한국정밀공학회지 JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING VOL. 43, NO. 10, PP. 1015-1144 October 2026

Crossref Similarity Check
Powered by iThenticate

한국정밀공학회지

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 43, NUMBER 10
OCTOBER 2026

ISSN 1225-9071 (Print)
ISSN 2287-8769 (Online)

KSPE
The Korean Society for Precision Engineering

INDEXED IN
SCOPUS, DOAJ, and Korea Citation Index (KCI)

Editor-in-Chief

Bo Hyun Kim
Soongsil University
bhkim@ssu.ac.kr

Editors

Jihwan An
POSTECH

Doo-Man Chun
University of Ulsan

Jonghan Jin
Meter-Lab. Inc.

Hyun-Wook Kang
UNIST

Namkeun Kim
Sogang University

Seung Hwan Ko
Seoul National University

Changwoo Lee
Konkuk University

Jungjae Park
Meter-Lab. Inc.

Younghak Cho
Seoul National University of Science & Technology

Koo Hyun Chung
University of Ulsan

Maolin Jin
Korea Institute of Robotics & Technology Convergence

Yang Jin Kim
Pusan National University

Woo Kyun Kim
University of Cincinnati

Moonkyu Kwak
Kyungpook National University

Chang-Whan Lee
Seoul National University of Science & Technology

Hyung Wook Park
UNIST

Baeksuk Chu
Kumoh National Institute of Technology

Jihong Hwang
Seoul National University of Science & Technology

Bongchul Kang
Kookmin University

Hyo-Young Kim
Korea Polytechnic University

Chang-Ju Kim
Korea Institute of Machinery & Materials

Hyunseop Lee
Dong-A University

Kwang-Il Lee
Kyungil University

MinSoo Park
Seoul National University of Science & Technology

Won-Shik Chu
Gyeongsang National University

Yongho Jeon
Ajou University

Sung-Mook Kang
Daegu Catholic University

Sanha Kim
KAIST

Dong Sung Kim
POSTECH

HyunWook Lee
Korea Railroad Research Institute

Duhwan Mun
Korea University

Jung Woo Sohn
Kumoh National Institute of Technology

Members of Editorial Board

Sanghoon Ahn
Korea Institute of Machinery & Materials

Jungwook Choi
Chung-Ang University

Jinah Jang
POSTECH

Patrick Kwon
San Diego State University

Hyun-Taek Lee
Inha University

Suk-Hee Park
Pusan National University

Dahoon Ahn
Seoul National University of Science & Technology

Jin-Seung Choi
Konkuk University

Ki Nam Joo
Chosun University

Wonkyun Lee
Chungnam National University

Sangjin Maeng
Hongik University

Heonjun Yoon
Soongsil University

Dongwhi Choi
Kyung Hee University

Min-Woo Han
Dongguk University

Gap-Yong Kim
Iowa State University

Howon Lee
Seoul National University

Sangkee Min
University of Wisconsin-Madison

Hae-Sung Yoon
Korea Aerospace University

Young-Man Choi
Ajou University

Segon Heo
Korea Institute of Machinery & Materials

Beomjoon Kim
University of Tokyo

Bong-Kee Lee
Chonnam National University

Simon Park
VinUniversity

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 43, NUMBER 10 / October 2026

ISSN 1225-9071 (Print) / 2287-8769 (Online)

Aims and Scope The Journal of the Korean Society for Precision Engineering is devoted to publishing original research articles on all aspects of precision engineering and manufacturing. Specifically, the journal focuses on various fields including: Precision Manufacturing Processes, Precision Measurements, Robotics, Control and Automation, Smart Manufacturing System, Design and Materials, Machine Tools, Nano/Micro Technology, Bio Health, Additive Manufacturing, Green Manufacturing Technology.

Year of Launching Journal of Korea Society for Precision Engineering was launched by the Korea Society for Precision Engineering in June of 1984. The name was changed to the Journal of the Korean Society for Precision Engineering in December of 1985.

Abbreviation of Title J. Korean Soc. Precis. Eng.

Full Text Available at https://jkspe.or.kr

Indexed in SCOPUS, DOAJ, and Korea Citation Index (KCI)

Subscription Fee Free to KSPE Members (Membership Fee: 50,000 KRW per Year)

Published on October 1, 2026 (Monthly)

Published by The Korean Society for Precision Engineering

Publisher Sang Won Lee (President, KSPE)

Manuscript Editor So Jin Kim

Journal Office 12F, SKY 1004 Bldg., 50-1 Jungnim-ro, Jung-gu, Seoul, 04508, Republic of Korea / TEL +82-2-518-2928 / FAX +82-2-518-2937 / paper@kspe.or.kr / http://www.kspe.or.kr

Printed by Hanrimwon Co., Ltd.

Copyright © The Korean Society for Precision Engineering

This work was supported by the Korean Federation of Science and Technology Societies (KOFST) Grant funded by the Korean Government.

한국정밀공학회지

제43권 제10호 / 2026년 10월

ISSN 1225-9071 (Print)
ISSN 2287-8769 (Online)

목차

일 반

1017 기계학습 기반 밀링 절삭력 예측을 위한 연속 가변 데이터 수집
맹상진, 김병민

1027 기계적 폴리싱을 이용한 조형토 도자기 표면 특성 개선
허웅, 무함마드 아부 후레이라, 박지민, 김대용, 황지홍

1037 음향 공진가진 및 압전패치를 활용한 청동 주물의 감쇠비 정밀 측정
원천수, 오충석

1045 우주용 대형 광학 거울 가공을 위한 중력 보상 장치 개발
김상문, 김학용, 이상헌

1053 RLS 기반 구동기 추력상수 추정을 이용한 전방위 김발 시스템의 적응형 추력 분배
박천규, 김정호, 최대규

1063 조업 전문가와 LLM 대화를 이용한 도메인 지식그래프 기반 대화형 조업 어시스턴트 개발
서준영, 이재필, 문영민

1079 쿼드러플 아크 치형을 가지는 스트레인 웨이브 기어의 설계와 검증
김태원, 크리스토퍼 얀센, 정세철, 최동현, 정연석, 심희찬, 이달호

1087 레이저 미세 패턴 가공과 플라즈마 표면처리를 이용한 금속-플라스틱 하이브리드 구조물의 접합강도 향상
이호상

1097 군용 전자장비 보호를 위한 AlN/PDMS 복합 포팅재의 기계적 및 열적 특성 평가
이제석, 이진규, 정대윤, 조경한

1105 발 진행각 변경에 따른 무릎내전모멘트 변화의 생체역학적 메커니즘
곽호규, 김나연, 이승민, 엄광문

1113 맞춤형 인솔 착용이 아치 지표와 착화감에 미치는 영향
백예지, 유광열, 유진실, 이인환

1121 PBF 적층 기반 엔드밀 공구 바디의 내부 격자구조 설계에 따른 정적 해석 및 시작품 제작
손호민, 김동규, 사민우

1129 순간접착제 침지 코팅이 재료 압출 방식으로 제작된 PLA 구조물의 기계적 특성에 미치는 영향
김성준, 배승리, 박성제

1137 직접 에너지 증착 적층 제조에서 반복 재사용에 따른 체질 탈락 분말의 특성 평가
이정원, 김정민, 신석진, 박기덕, 박성제

본 사업은 기획재정부의 복권기금 및 과학기술정보통신부의 과학기술진흥기금으로 추진되어 사회적 가치 실현과 국가 과학기술 발전에 기여합니다.
This work is supported by the ‘Lottery Fund’ of the ‘Ministry of Strategy and Finance’ and the ‘Science and Technology Promotion Fund’ of the ‘Ministry of Science and ICT’, contributing to the realization of social value and the development of national science and technology.

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 43, NUMBER 10 / October 2026

ISSN 1225-9071 (Print)
ISSN 2287-8769 (Online)

CONTENTS

REGULAR

1017 Continuously Varying Data Collection for Machine Learning-based Milling Cutting Force Prediction
Sangjin Maeng and Byung-Min Kim

1027 Enhancement of Surface Characteristics of Sculpting Clay Ceramics Using Mechanical Polishing
Woong Hur, Muhammad Abu Hurairah, Jimin Park, Dayong Kim, and Jihong Hwang

1037 Precise Damping Ratio Measurement of Bronze Castings via Acoustic Resonance Excitation and Piezoelectric Patches
Chun-Soo Won and Chung-Seog Oh

1045 Development of a Gravity Compensation Device for Machining Large Space Optical Mirrors
SangMun Kim, Hagyong Kihm, and SangHeon Lee

1053 Adaptive Thrust Allocation for an Omnidirectional Gimbal System Using RLS-based Actuator Force Constant Estimation
Cheonkyu Park, Jungho Kim, and Dae Gyu Choi

1063 A Domain Knowledge Graph-based Conversational Operation Assistant Using Expert-LLM Dialogue
Junyoung Seo, Jaepil Lee, and Youngmin Moon

1079 Design and Validation of Quadruple Circular-arc Tooth Profiles for a Strain Wave Gear Using FE Analysis and Experiments
Tae Won Kim, Christopher Janssen, Se Chul Jeong, Dong Hyun Choi, Yeon Seok Jeong, Hee Chan Shim, and Dal Ho Lee

1087 Enhancement of Bonding Strength in Metal-plastic Hybrid Structures by Laser Micro-patterning and Plasma Surface Treatment
Ho-Sang Lee

1097 Mechanical and Thermal Properties of AlN/PDMS Composite Potting Materials for Protecting Defense Electronics
Jae Seok Lee, Jin Kue Lee, Dae Yun Jeong, and Kyung Han Jo

1105 Biomechanical Mechanisms Underlying Changes in Knee Adduction Moment induced by Modifications of the Foot Progression Angle
Ho-Kyou Kwak, Na-Yeon Kim, Sean-Min Lee, and Gwang-Moon Eom

1113 Effects of Customized Insoles on Arch Index and Subjective Comfort
Ye Ji Baek, Kwang Yeol Yu, Jin Sil Yoo, and In Hwan Lee

1121 Static Analysis and Fabrication of Sample according to the Internal Lattice Structure Design of Endmill Tool Body based on Powder Bed Fusion Technology
Ho Min Son, Dong Gyu Kim, and Min-Woo Sa

1129 Influence of Cyanoacrylate Adhesive Dip Coating on the Mechanical Properties of Material Extrusion-fabricated PLA Structures
Seongjun Kim, Seungli Bae, and Seong Je Park

1137 Characterization of Sieve-rejected Powder during Repeated Reuse in Directed Energy Deposition
Jungwon Lee, Jeongmin Kim, Seokjin Shin, Gideok Park, and Seong Je Park

본 사업은 기획재정부의 복권기금 및 과학기술정보통신부의 과학기술진흥기금으로 추진되어 사회적 가치 실현과 국가 과학기술 발전에 기여합니다.
This work is supported by the 'Lottery Fund' of the 'Ministry of Strategy and Finance' and the 'Science and Technology Promotion Fund' of the 'Ministry of Science and ICT', contributing to the realization of social value and the development of national science and technology.

한국정밀공학회지 제 43 권 제 10 호 pp. 1017-1026
J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 43, No. 10, pp. 1017-1026

http://doi.org/10.7736/JKSPE.026.00036
ISSN 1225-9071 (Print) / 2287-8769 (Online)

기계학습 기반 밀링 절삭력 예측을 위한 연속 가변 데이터 수집

Continuously Varying Data Collection for Machine Learning-based Milling Cutting Force Prediction

맹상진[1,#], 김병민[1]
Sangjin Maeng[1,#] and Byung-Min Kim[1]

1 홍익대학교 기계시스템디자인공학과 (Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University)
Corresponding Author / E-mail: sjmaeng@hongik.ac.kr, TEL: +82-2-320-3058
ORCID: 0000-0001-9166-7297

KEYWORDS: Cutting force prediction (절삭력 예측), Milling process (밀링 공정), Machine learning (기계학습), Continuously variable data collection (연속 가변 데이터 수집)

Accurate prediction of cutting forces in milling is crucial for intelligent machining. However, traditional methods of collecting discrete data are often time-consuming and can lead to overfitting due to data sparsity. This study introduces a continuously variable data collection strategy designed to efficiently gather training data for machine learning models. By linearly varying the feed rate and radial depth of cut along a single tool path, we obtained continuous data that reflect the variations in machining conditions. Additionally, we applied trigonometric feature transformation to the tool rotation angle to maintain its periodic characteristics. The collected data were used to train Artificial Neural Network (ANN), Support Vector Regression (SVR), and Gaussian Process Regression (GPR) models. The results demonstrate that models trained with continuous data exhibit improved generalization performance under unseen conditions compared to those trained with discrete data. Furthermore, comparable predictive accuracy was achieved using a subset of the continuous dataset. These findings suggest that the proposed approach enhances data efficiency in model training and has the potential to reduce the experimental effort required in developing machining monitoring systems.

Manuscript received: April 20, 2026 / Revised: August 4, 2026 / Accepted: August 5, 2026

1. 서론

밀링 공정의 절삭력을 정확하게 예측하는 것은 가공 품질, 공구 상태 및 에너지 소비를 관리하기 위한 지능형 가공의 핵심 기반이다. 절삭력은 가공 표면의 품질과 공구 마모 등에 직접적인 영향을 미치므로, 이를 사전에 예측하면 공정 상태를 평가하고 가공 조건을 효과적으로 제어할 수 있다[1]. 이에 단일점 절삭 이론과 밀링 기구학을 결합한 모델[2], 여러 절삭 공정에 적용할 수 있는 통합 모델[3], 원형 엔드밀과 헬리컬 밀링의 기하학적 특성을 반영한 모델[4], 절삭력 계수의 역학적 의미를 규명한 연구[5] 등 다양한 물리 기반 접근이 제안되어 왔다. 이러한 모델은 절삭 메커니즘을 해석하는 데 유용하지만, 복잡한 공구 형상과 가공 조건을 반영하기 위해서는 상세한 수식화와 절삭력 계수의 식별이 요구된다.

기계학습 기반 접근은 가공 조건과 절삭력 사이의 복잡한 비선형 관계를 데이터로부터 직접 학습할 수 있다는 장점이 있다. Tandon과 El-Mounayri [6]는 가공 조건을 입력으로 사용하는 ANN 기반 엔드밀 절삭력 모델을 개발하였으며, Yeganefar 등[7]은 ANN, SVR 및 회귀분석을 이용하여 절삭력과 표면 거칠기를 예측하였다. 또한 Charalampous [8]는 기계학습과 유한요소해석을 결합하였고, Zhu 등[9]은 물리적 지식과 주파수 영역 자기주의 기법을 적용한 신경망을 제안하였다. 이러한 방법은 복잡한 절삭 현상을 효과적으로 표현할 수 있지만, 예측 신뢰성은 훈련 데이터가 가공 조건 공간을 얼마나 충분히 포함하는지에 크게 좌우된다.

그러나 기계학습 기반 절삭력 예측의 실용성을 제한하는 주요

Copyright © The Korean Society for Precision Engineering
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

요인 중 하나는 가공 조건 공간을 대표하는 실험 데이터를 효율적으로 확보하기 어렵다는 점이다. 기존의 완전 요인 배치법에서는 각 가공 조건을 고정한 별도의 절삭시험을 반복하므로, 인자와 수준이 증가할수록 실험 횟수가 각 수준 수의 곱에 따라 급격히 증가한다[10]. 실험점이 제한되면 측정 조건 사이에 데이터가 희소한 영역이 발생하여 미학습 조건에서 예측 성능이 저하될 수 있다. 시뮬레이션 데이터와 전이학습을 이용하여 실제 실험에 대한 의존도를 낮추려는 연구[11]도 수행되었으나, 실제 가공 데이터를 효율적으로 확보해야 할 필요성은 여전히 존재한다. 특히 단일 공구 경로에서 가공 조건을 연속적으로 변화시키며 절삭력 데이터를 수집하고, 해당 데이터와 고정 조건 데이터의 일관성 및 기계학습 모델의 미학습 조건 예측 성능을 함께 검증한 연구는 제한적이다.

이에 본 연구에서는 고정된 Spindle Speed와 ADOC 조건에서 Feed Rate와 RDOC를 연속적으로 변화시키는 데이터 수집법을 제안하고, 기계학습 기반 절삭력 예측에 대한 적용 가능성을 평가하였다. 첫째, Feed Rate와 RDOC를 단독 또는 동시에 선형적으로 변화시키는 공구 경로를 설계하여 가공 조건 공간을 연속적으로 표본화하였다. 둘째, 연속 가변 데이터와 완전 요인 배치법으로 수집한 고정 조건 데이터의 절삭력 파형 및 합력을 비교하여 데이터의 일관성을 확인하였다. 셋째, 공구 회전각의 주기성을 반영한 삼각함수 변환을 적용하고 ANN, SVR 및 GPR 모델을 학습하여, 미학습 조건의 예측 성능과 훈련 데이터 크기에 따른 데이터 효율성을 평가하였다.

Table 1 Experimental conditions

Cutting condition	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4
Feedrate [mm/min]	300, 375, 450, 525, 600	300–600	300, 375, 450, 525, 600	300–600
RDOC [mm]	2, 3.5, 5, 6.5, 8		2-8	
Spindle speed [RPM]	6,000			
ADOC [mm]	1			
Tool	Diameter 8 mm, end mill, 2 flutes, WC			
Workpiece	Al6061			

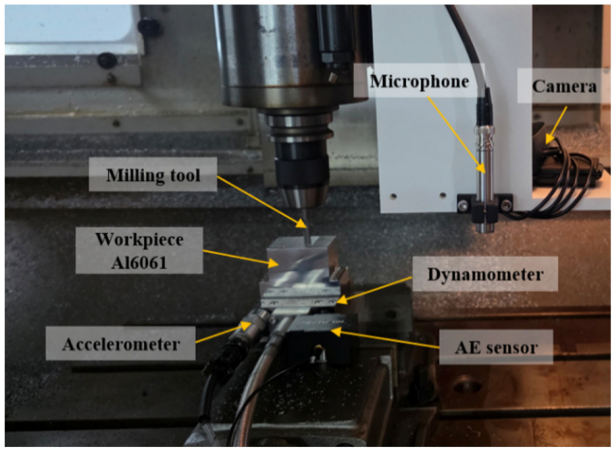


Fig. 1 Image of experiment setup

2. 훈련 데이터 수집

본 연구에서는 기계학습을 활용하여 절삭력을 예측하기 위한 모델을 구축하고자, 절삭력 훈련 데이터를 수집하였다. 이를 위해 완전 요인 배치법과 연속 가변 데이터 수집법을 병행하였으며, 두 실험 모두 최소·최대 가공 조건을 동일하게 설정하여 주어진 가공 조건 범위를 탐색하도록 구성하였다. 완전 요인 배치법은 전통적으로 많이 사용되는 방식으로 가공 조건 조합을 실험하여 데이터를 확보할 수 있지만, 수준이 많아질수록 실험 횟수가 기하급수적으로 증가한다. 반면, 일부 가공 조건을 점진적으로 변화시키는 연속 가변 데이터 수집법을 활용하면 특정 궤적 상의 다수 데이터를 단시간 내에 확보할 수 있어 효율성이 높다.

2.1 완전 요인 배치법

기계학습 기반 절삭력 모델을 훈련하기 위해서는 가공 조건의 범위를 적절히 반영하는 훈련 데이터가 필요하다. 예측 모델을 적용할 실제 가공 범위보다 좁은 범위에서만 데이터를 수집하면, 범위를 벗어나는 영역에서 과적합이 발생할 가능성이 높다. 반면, 수준을 세분화하면 데이터 수집에 상당한 시간과 비용이 소요될 수 있다.

예를 들어, Feed Rate를 100–600 mm/min 범위에서 2수준으로, ADOC를 0.5–1.0 mm의 2수준, RDOC를 20–100%의 2수준, Spindle Speed를 6,000–12,000 rpm의 2수준으로 설정하면 총 16건의 실험이 필요하다. 반면, 이를 3수준 이상으로 늘리면 실험 횟수가 81회로 급증하여 완전 요인 배치법의 필요한 실험 횟수가 16회에서 81회로 증가한다.

본 연구에서 제안하는 연속 가변 데이터 수집법과 비교하기 위해 Table 1의 Exp. 1에 정리된 것처럼 Feed Rate와 RDOC를 5수준으로 설정하는 완전 요인 배치법으로 실험 조건을 선정하였다. Feed Rate는 300–600 mm/min 범위에서 75 mm/min 간격으로, RDOC는 2–8 mm 범위에서 1.5 mm 간격으로 설정하였다. Spindle Speed는 6,000 rpm으로, ADOC는 1 mm로 고정하였다. 총 실험 조건은 25가지이며 각 조건별로 3회씩 실험을 하여 총 75회 실험을 수행하였다.

스핀들에는 직경 8 mm의 2날 텅스텐 카바이드 엔드밀을 장착하였다. Fig. 1은 연속 가변 절삭력 데이터 수집을 위한 실험 장치의 구성을 보여준다. Al6061 공작물을 공구동력계(9129AA, Kistler, Swiss)에 고정하고 3축 공작기계에서 밀링하였으며, 본 연구에서는 25 kHz로 측정한 3축 절삭력 신호를 분석에 사용하였다.

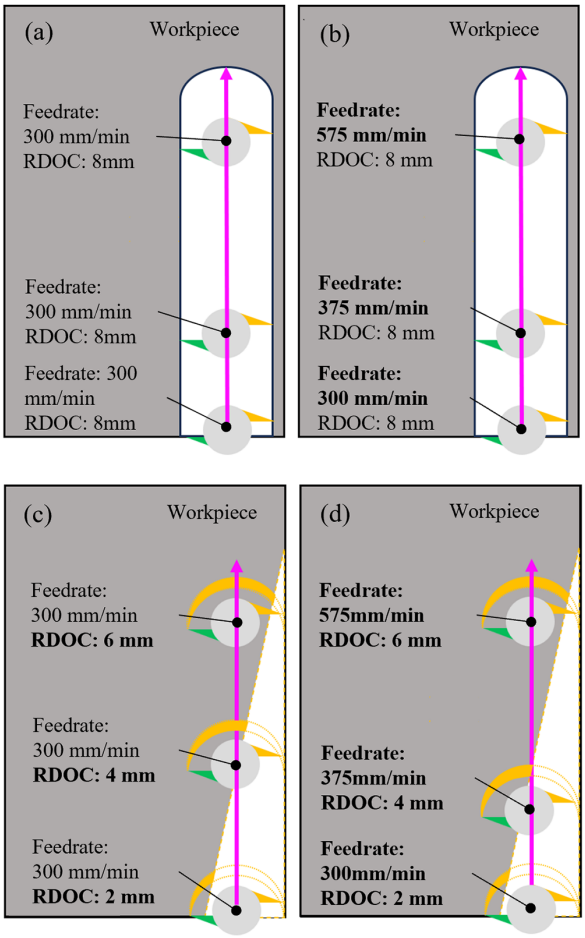


Fig. 2 Schematics of the milling experiment: (a) Exp. 1, (b) Exp. 2, (c) Exp. 3, (d) Exp. 4

2.2 연속 가변 데이터 수집법

연속 가변 데이터 수집법은 가공경로를 따라 조건을 변화시키면서 연속적인 절삭력 데이터를 획득하는 방식이다. Spindle Speed가 6,000 rpm이고 절삭날 수가 2개인 경우 날 통과 주파수는 200 Hz이다. 따라서 20개 가공조건에서 조건별로 10회의 절삭날 개입 데이터를 확보하는 데 필요한 이론적 순수 신호 취득시간은 약 1.0 s이다. 이 값은 신호 취득에 필요한 시간만을 의미하며, 공구 접근, 가감속, 위치결정, 공작물 교체 및 실험 준비시간은 포함하지 않는다. 이러한 계산은 제안한 방법이 기존의 개별 조건별 실험과 비교하여 순수 데이터 취득시간을 단축할 가능성이 있음을 보여준다.

앞서 2.1절에서 설명한 완전 요인 배치법을 이용한 전통적인 수집 방식은 Fig. 2(a)와 같이 한 번의 공구 경로에서 가공 조건이 변하지 않고 일정하게 유지된다. 반면, 본 연구에서 제안하는 연속 가변 데이터 수집법은 Table 1의 Exp. 2, 3, 4와 같이 특정 가공 조건을 점진적으로 변화시키며 데이터를 연속적으로 확보한다. 구체적으로 Fig. 2(b)와 같이 Exp. 2에서는 60 mm의 절삭경로를 0.1 mm 간격의 600개 직선 Block으로 분할하고,

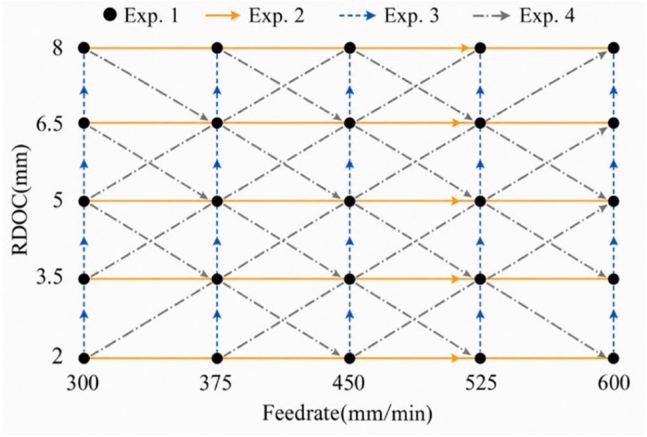


Fig. 3 Data collected from milling experiment 1 to 4

각 Block의 명령 Feed Rate를 300 mm/min에서 600 mm/min까지 위치에 대해 선형적으로 증가시켰다. 이에 따라 명령 Feed Rate는 Block당 0.5 mm/min씩 증가하였다. CNC 제어기의 Look-ahead와 가감속 제한으로 인해 실제 축 속도는 Block 경계에서 연속적으로 변화하였으며, X축 실제 속도 피드백을 통해 설정된 속도 변화가 근사적으로 구현되었음을 확인하였다. Fig. 2(c)처럼 Exp. 3에서는 직선 공구 경로를 따라 가공하는 동안 RDOC가 2에서 8 mm까지 선형적으로 증가하도록 공작물 형상을 사전 가공하였다. 더 나아가 Fig. 2(d)와 같이 Exp. 4에서는 직선 공구경로를 따라 RDOC도 2에서 8 mm까지 위치에 대해 선형적으로 증가하도록 공작물 형상을 가공하였다. 따라서 명목 Feed Rate와 RDOC가 동일한 경로 위치에 대해 선형적으로 변화하며, Feed Rate-RDOC 조건 공간에서 직선 궤적을 형성한다. Exp. 2–4의 연속 궤적 가공을 각 조건별로 3회 반복하여 데이터를 습득하였다.

각 시점의 가공조건은 절삭력 데이터와 공구 경로를 시간 기준으로 대응시켜 결정하였다. Exp. 2와 Exp. 4의 Feed Rate는 설정된 가속 프로파일과 절삭 경과시간으로부터 산정하였으며, CNC X축의 실제 속도 피드백을 통해 속도 변화를 확인하였다. Exp. 3과 Exp. 4의 RDOC는 사전 가공된 공작물의 경계 형상과 공구 중심 위치로부터 산정하였다. 따라서 RDOC는 가공 중 직접 측정한 값이 아니라 공작물 형상과 공구 위치에 기반한 국부 명목 값이다.

Fig. 3은 각 실험에서 수집한 데이터를 Feed Rate-RDOC 조건 공간에 나타낸 것이다. Exp. 1은 검은색 원형 마커, Exp. 2는 주황색 실선, Exp. 3은 파란색 파선, Exp. 4는 회색 일점쇄선으로 구분하였으며, 화살표는 각 연속 궤적의 가공 진행 방향을 나타낸다. 하나의 점은 완전 요인 배치법으로 가공하는 고정 가공조건을 의미하며, 하나의 선 전체는 조건이 연속적으로 변화하는 한 번의 절삭 궤적을 의미한다. 각 조건과 궤적에서 수행한 반복 실험은 동일한 점 또는 선에 중첩하여 표시하였다. 따라서 선의 교차점이나 일점쇄선의 개별 선분은 별도의 가공조건

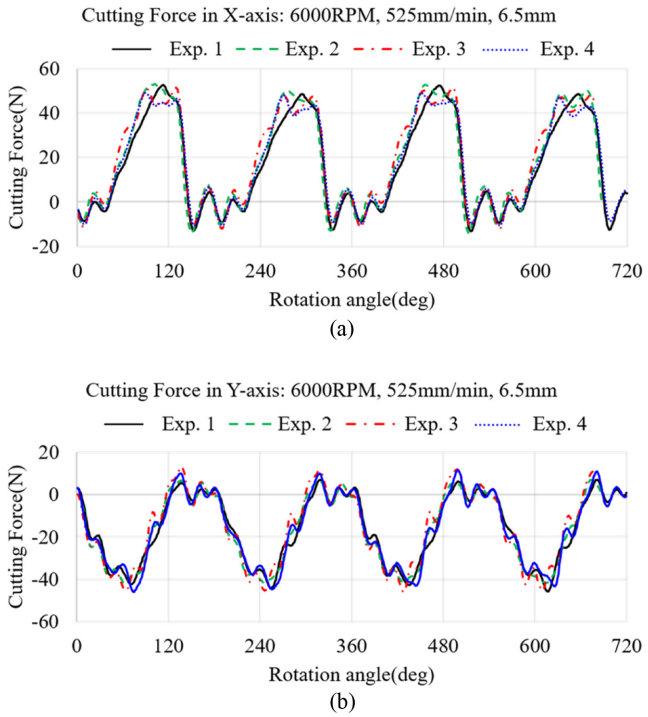


Fig. 4 Comparison of cutting force in milling experiment 1, 2, 3, and 4: (a) Cutting force in x-axis and (b) Cutting force in y-axis at 525 mm/min in feed rate, 6.5 mm in RDOC, and 6,000 rpm in spindle speed

또는 추가 절삭을 의미하지 않는다. 결과적으로 이 방식을 활용하면, 기존의 이산적인 데이터 수집 방식에 비해 적은 실험 횟수로도 주어진 Feed Rate-RDOC 범위 내의 다양한 조건 데이터를 효율적으로 수집할 수 있다.

2.3 실험 결과

연속 가변 데이터 수집법으로 확보한 데이터의 신뢰도를 확인하기 위해, 전통적인 완전 요인 배치법을 적용한 Exp. 1과 가공 조건에 점진적 변화를 준 Exp. 2–4의 데이터를 Spindle Speed 6,000 rpm, Feed Rate 525 mm/min, RDOC 6.5 mm에서 추출하여 비교 분석하였다. Fig. 4에 제시된 바와 같이, 네 가지 실험에서 측정된 절삭력 파형은 회전 각도에 따른 진폭과 주기가 전반적으로 일치하는 경향을 보였다.

나아가 주어진 실험 조건 범위에 걸친 거시적인 데이터의 일관성을 검토하기 위해 Fig. 5와 같이 평균 합력 절삭력을 비교하였다. Figs. 5(a)-5(c)는 각각 Exp. 2, 3, 4에서 연속적으로 수집된 궤적 데이터와 정적 방식인 Exp. 1에서 수집된 이산적 데이터를 대조한 결과이다. 그래프에서 확인할 수 있듯이, Feed Rate나 RDOC를 단일 혹은 동시에 점진적으로 변화시킨 경우 연속 가변 수집된 데이터의 추세선이 정적 조건에서 획득한 지점 데이터와 비교적 높은 일치도를 보였다.

물론 가공 조건이 실시간으로 변하는 가감속 구간에서는

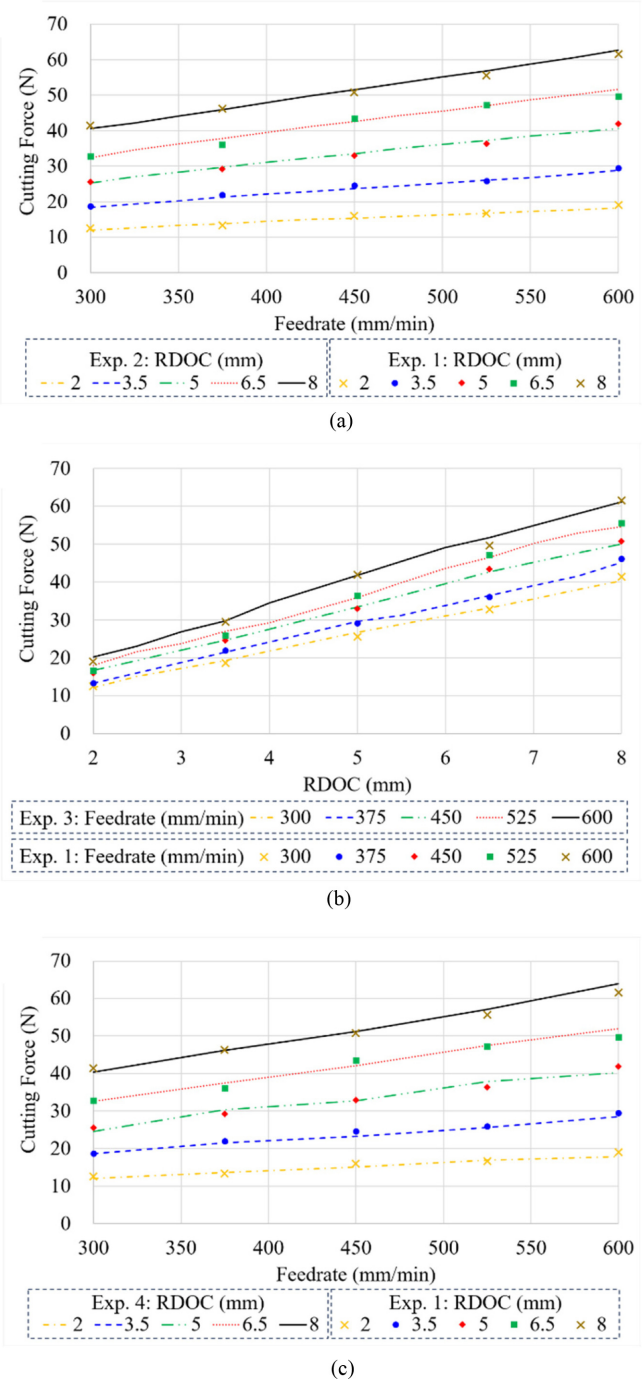


Fig. 5 Comparison of averaged resultant cutting force in milling experiment (a) 1 and 2, (b) 1 and 3, and (c) 1 and 4

공작기계의 동적 특성에 의한 미세한 오차가 개입될 수 있다. 그러나 본 실험의 변화율 범위에서 정적 데이터와 유사한 경향을 나타냈다. 이는 개별 조건별 반복실험 수를 줄이면서 하나의 연속 경로에서 주어진 궤적 내의 절삭력 데이터를 신뢰성 있게 확보할 수 있음을 보여준다. 또한, 가공 실험 횟수가 많지 않기 때문에 공구 마모에 따른 데이터 변화에 덜 민감하게 된다.

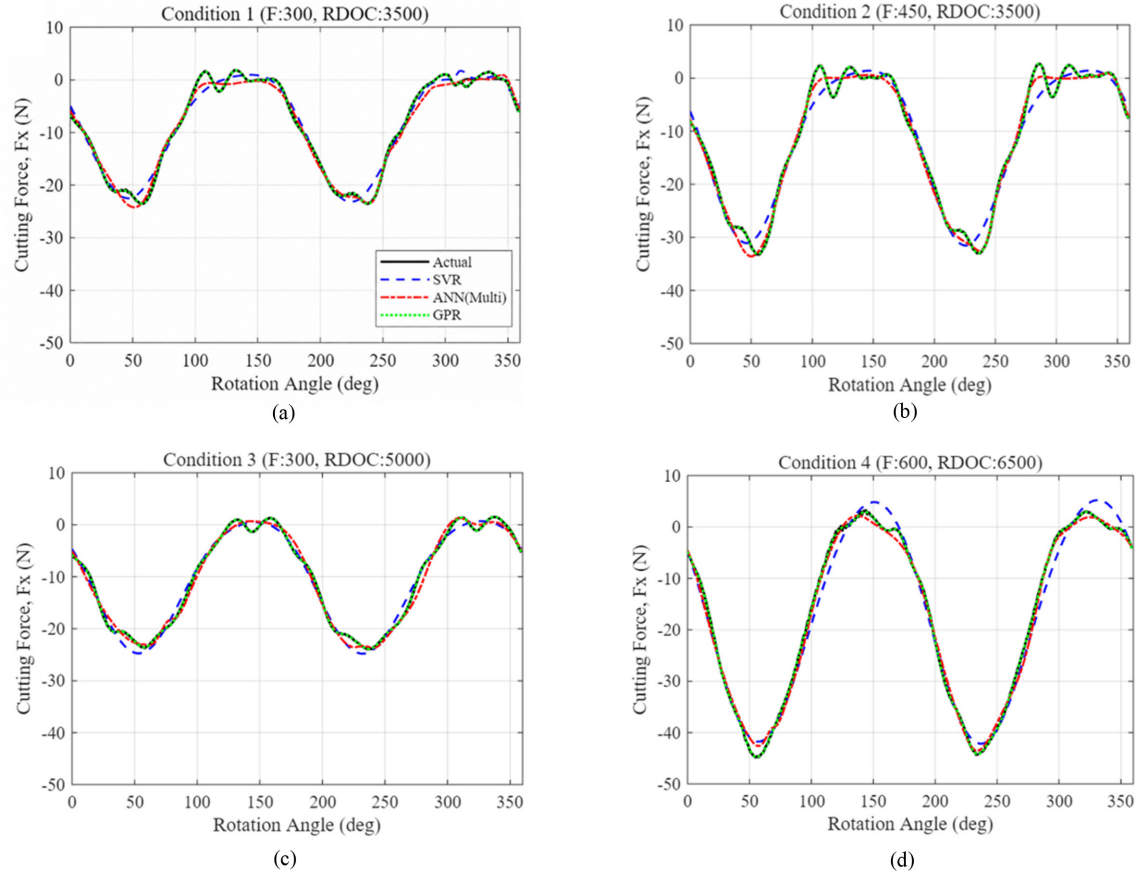


Fig. 6 Cutting force prediction in x-axis at (a) Feed rate: 300 mm/min and RDOC: 3.5 mm, (b) Feed rate: 450 mm/min and RDOC: 3.5 mm, (c) Feed rate: 300 mm/min and RDOC: 5.0 mm, and (d) Feed rate: 600 mm/min and RDOC: 6.5 mm

3. 기계학습 기반 절삭력 예측 모델

3.1 입력 데이터 전처리 및 주기성 변환

확보된 연속형 데이터를 활용하여 예측 모델을 구축하기 위해 데이터 전처리를 수행하였다. 기계학습의 물리적 입력변수는 Feed Rate, RDOC 및 공구 회전각으로 구성하였다. 각 5-sample Window에는 중앙 시점에 대응하는 가공조건과 공구 회전각을 부여하였으며, 출력값으로는 Window 내에서 각각 평균한 Fx와 Fy를 사용하였다. 공구 회전각, θ는 주기성을 반영하기 위해 삼각함수로 변환하였으므로, 실제 모델의 입력 벡터는 [feedrate, RDOC, sinθ, cosθ]이다. 이전 시점이나 이전 Window의 절삭력은 입력변수에 포함하지 않았다. 밀링 가공 특성상 회전 각도는 0도와 360도가 동일한 물리적 상태를 나타내므로, 수치적 단절 오류를 완화하기 위해 원본 회전 각도 데이터에 삼각함수 특징 공학을 적용하여 사인 및 코사인 변수로 변환하였다. 예비 실험 결과, 선형 각도를 그대로 사용했을 때보다 삼각함수 변환을 적용했을 때 경계 부근의 예측 오차가 크게 감소하며 회전 특유의 주기적 특성이 모델에 안정적으로 보존됨을 확인하였다.

절삭력은 공구동력계를 통해 X, Y, Z축 방향으로 측정하였다. 절삭력 데이터의 국부적인 변동을 완화하기 위해 연속된 5개의 샘플로 구성된 Time Window를 적용하였다. 25 kHz의 샘플링 속도에서 해당 Window의 공칭 시간 길이는 0.2 ms이며, Spindle Speed 6,000 rpm에서 약 7.2°의 공구 회전각에 해당한다. 각 Window에서 Fx와 Fy를 각각 산술평균하였으며, 해당 Window에 대응하는 가공조건과 공구 회전각을 입력 변수로, 평균 Fx와 Fy를 모델의 출력값으로 사용하였다. 이러한 국부 평균은 측정 신호의 미세한 변동을 완화하면서 공구 회전에 따른 절삭력 변화를 보존하기 위해 적용하였다. 본 연구에서는 ADOC가 1 mm로 비교적 작아 Z축 방향 절삭력의 크기가 상대적으로 미미하며, 해당 성분은 공구 형상에 민감하게 의존하는 특성을 보인다. 이에 따라 Z축 절삭력은 본 연구의 학습 데이터 구성에서 제외하였다.

3.2 예측 모델 설계 및 학습 구조

본 연구에서 예측 모델 학습 및 성능 평가는 연속 가변 데이터 수집법(Exp. 2, 3, 4)으로 확보한 연속형 데이터 세트만을 기준으로 수행되었다. 제안하는 수집 전략이 기계학습에 유효하게 작용하는지 평가하기 위해 SVR, ANN, GPR 모델을 구축하였다.

ANN의 경우 예비 실험을 통해 15개의 노드와 10개의 노드를

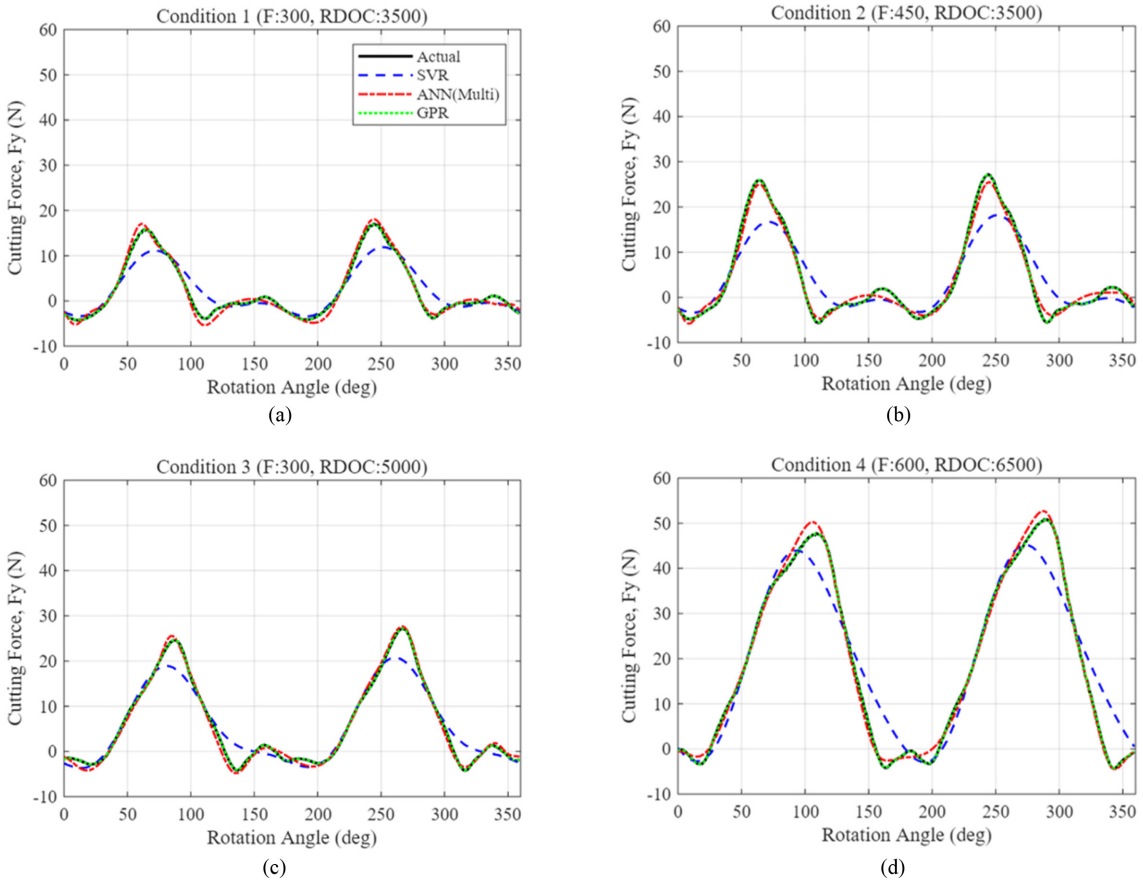


Fig. 7 Cutting force prediction in y-axis at (a) Feed rate: 300 mm/min and RDOC: 3.5mm, (b) Feed rate: 450 mm/min and RDOC: 3.5 mm, (c) Feed rate: 300 mm/min and RDOC: 5.0 mm, and (d) Feed rate: 600 mm/min and RDOC: 6.5 mm

갖는 2개의 은닉층으로 구성된 심층 구조를 채택하였으며, 과적합 방지를 위해 베이지안 정규화 알고리즘을 적용하였다. 또한, 하나의 모델이 Fx과 Fy 절삭력을 동시에 산출하도록 다중 출력 모델로 통합 설계하였다. 단일 출력에 최적화된 SVR과 GPR 모델은 Fx와 Fy에 대해 각각 독립적으로 훈련하였다. SVR은 가우시안 커널을, GPR은 비선형 파형 모델링에 우수한 Matern 5/2 커널을 적용하였다. 전체 데이터 세트의 80%는 훈련 데이터로, 나머지 20%는 테스트 데이터로 분할하여 성능 검증에 활용하였다.

일반적인 모델 성능 평가에 사용한 80:20 분할과 별도로, Fig. 8에서는 특정 가공조건 전체를 훈련에서 제외하는 조건 단위 홀드아웃 평가를 수행하였다. 시험조건은 Feed Rate 300 mm/min 및 RDOC 2 mm로 설정하였으며, 5-sample Window를 생성하기 전에 해당 조건과 관련된 원시 데이터를 먼저 분리하였다. Exp. 1 기반 모델은 해당 조건의 3회 반복 전체를 시험 데이터로 분리하고, 나머지 24개 고정조건으로 학습하였다. Exp. 2–4 기반 모델은 해당 조건을 포함하는 연속 가공궤적 전체를 훈련 데이터에서 제외하였다. 따라서 동일한 가공궤적 또는 서로 중첩되는 Time Window가 훈련 데이터와 시험 데이터에 동시에 포함되지 않도록 하였다.

3.3 절삭력 파형 분석

Figs. 6 및 7은 네 가지 가공 조건에서 실제 측정된 절삭력과 각 모델의 예측값을 비교한 파형 그래프이다. 360도 전체 회전 구간에 대해 모든 예측 모델이 2날 엔드밀의 역학적 특성에 따른 두 번의 절삭력 파동을 비교적 잘 추종하였다. Fx와 Fy 모두 Feed Rate와 RDOC가 증가함에 따라 절삭력 진폭의 증가 경향을 재현하였다.

세부 성능을 비교하면, GPR 모델은 모든 조건에서 실제 측정 데이터와 가장 유사한 파형을 보여주어 상대적으로 우수한 추종 성능을 나타냈다. 특히 미세한 비선형적 굴곡과 국부적인 피크를 정밀하게 모델링하였다. ANN 모델 또한 GPR과 매우 유사하게 실제 데이터에 근접한 결과를 보여주었으며, 이는 다중 출력 구조가 두 축 간의 상호 역학적 연관성을 효과적으로 학습했음을 시사한다. 반면, SVR 모델은 전반적인 추세는 따르고 있으나 피크나 밸리와 같은 극단적인 값들을 다른 모델에 비해 과도하게 평활화하여 예측하는 경향이 관찰되었다.

3.4 조건 단위 일반화 성능 평가

본 절에서는 조건 단위 홀드아웃을 통해 미학습 가공조건에 대한 모델의 예측 성능을 평가하였다. Fig. 8의 시험조건은

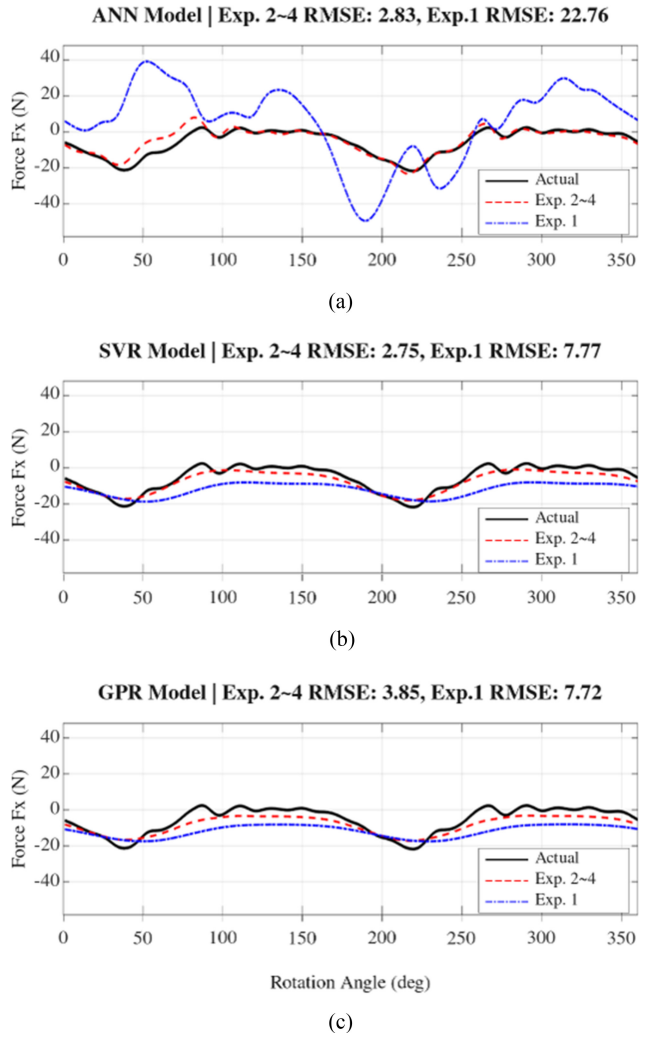


Fig. 8 Comparison of cutting force prediction of (a) ANN, (b) SVR, (c) GPR at unseen machining condition: Feed Rate 300 mm/min and RDOC 2 mm

Feed Rate 300 mm/min 및 RDOC 2 mm이며, 이 조건과 관련된 데이터는 모델 훈련에 사용하지 않았다. Exp. 1 기반 모델은 해당 조건의 3회 반복을 제외한 24개 고정조건으로 학습하였으며, Exp. 2–4 기반 모델은 해당 조건을 포함하는 가공궤적 전체를 제외한 데이터로 학습하였다. 따라서 Fig. 8은 동일한 가공조건이나 가공궤적의 데이터가 훈련과 시험에 중복되지 않은 상태에서 수행한 조건 단위 일반화 성능 평가 결과이다.

Fig. 8과 같이 완전 요인 실험법으로 훈련된 모델들은 알고리즘 종류와 무관하게 미학습 조건에서 상대적으로 큰 예측오차를 나타냈다. 특히 ANN 모델은 실제 절삭력의 스케일과 위상이 크게 왜곡되며 가장 높은 오차인 RMSE 22.76 N를 기록했고, SVR과 GPR 역시 새로운 가공 환경에 따른 스케일 변화를 제대로 추종하지 못했다.

반면, 연속 가변 데이터 수집 방법으로 훈련된 모델들은 실제 파형의 거시적 추세를 성공적으로 예측하며 높은 일반화 능력을 보였다. 이러한 일반화 성능의 차이가 단순히 훈련 데이터의 양적 차이에서 기인한 것이 아님을 확인하기 위해, 본 비교 실험에서는 연속 가변 수집 데이터의 샘플 수를 무작위 다운샘플링하여 완전 요인 실험법의 데이터 크기와 동일한 수준으로 통제한 뒤 학습시켰다. 데이터의 양을 엄격하게 제한했음에도 불구하고, 연속 가변 데이터로 훈련된 모델이 동일한 데이터 수에서 더 낮은 RMSE를 나타냈다.

Table 2 RMSE comparison of x-axis force prediction at the condition-level holdout point

Model	Exp. 1 RMSE [N]	Exp. 2–4 RMSE [N]	Reduction [%]
ANN	22.76	2.83	87.6
SVR	7.77	2.75	64.6
GPR	7.72	3.85	50.1

이는 모델의 강건성 확보에 있어 핵심적인 원인이 데이터의 절대적인 양이 아니라, 데이터가 내포한 정보의 연속성에 있음을 시사한다. 궤적을 따라 가공 조건이 변하는 연속 가변 데이터는 변수 변화에 따른 절삭력의 변화율 정보를 촘촘하게 포함하여 모델이 비선형적 상관관계를 온전히 학습하게 돕는다. 반면, 이산적 데이터는 조건 사이의 관계를 충분히 학습하지 못해 일반화 오차가 증가할 수 있다. 따라서 실가공 현장에서 신뢰할 수 있는 예측 모델을 구축하기 위해서는 연속 가변 데이터 수집을 통한 양질의 연속형 데이터 확보가 필수적이다.

다만 Fig. 8의 시험조건은 설정된 Feed Rate 300–600 mm/min 및 RDOC 2–8 mm 범위의 하한 경계조건이므로, 본 결과는 설정 범위 내 미학습 조건에 대한 일반화 성능을 나타내며 훈련 범위 밖의 외삽 성능을 검증한 것은 아니다. 따라서 모델이 훈련 범위를 어느 정도까지 벗어나 적용될 수 있는지는 본 결과만으로 판단할 수 없다. 제안한 방법은 동일한 공구, 피삭재, Spindle Speed 및 ADOC에서 feed rate와 RDOC에 따른 절삭력 변화가 연속적인 경우에 적용할 수 있다. 설정 범위를 벗어난 조건이나 가공환경 및 절삭 거동이 달라지는 조건에서는 추가 실험을 통한 검증과 모델 재학습이 필요하다.

Table 2는 Fig. 8에 제시한 홀드아웃 조건에서 Fx 파형의 예측 RMSE를 정량적으로 비교한 결과이다. 동일한 수의 훈련 데이터를 사용한 경우, Exp. 2–4 기반 모델의 RMSE는 모든 알고리즘에서 Exp. 1 기반 모델보다 낮게 나타났다. Exp. 2–4 기반 모델 중 SVR이 2.75 N로 가장 낮은 RMSE를 보였으며, ANN과 GPR은 각각 2.83 및 3.85 N를 나타냈다. Exp. 1 기반 모델과 비교한 RMSE 감소율은 ANN, SVR 및 GPR에서 각각 87.6, 64.6 및 50.1%였다. 이러한 결과는 선정된 범위 내 홀드아웃 조건에서 연속 가변 데이터가 모델의 조건 단위 일반화 성능을 향상시킬 수 있음을 보여준다.

3.5 훈련 데이터 크기에 따른 모델 학습

앞선 3.4절의 분석을 통해 연속 가변 데이터 수집법으로 획득한

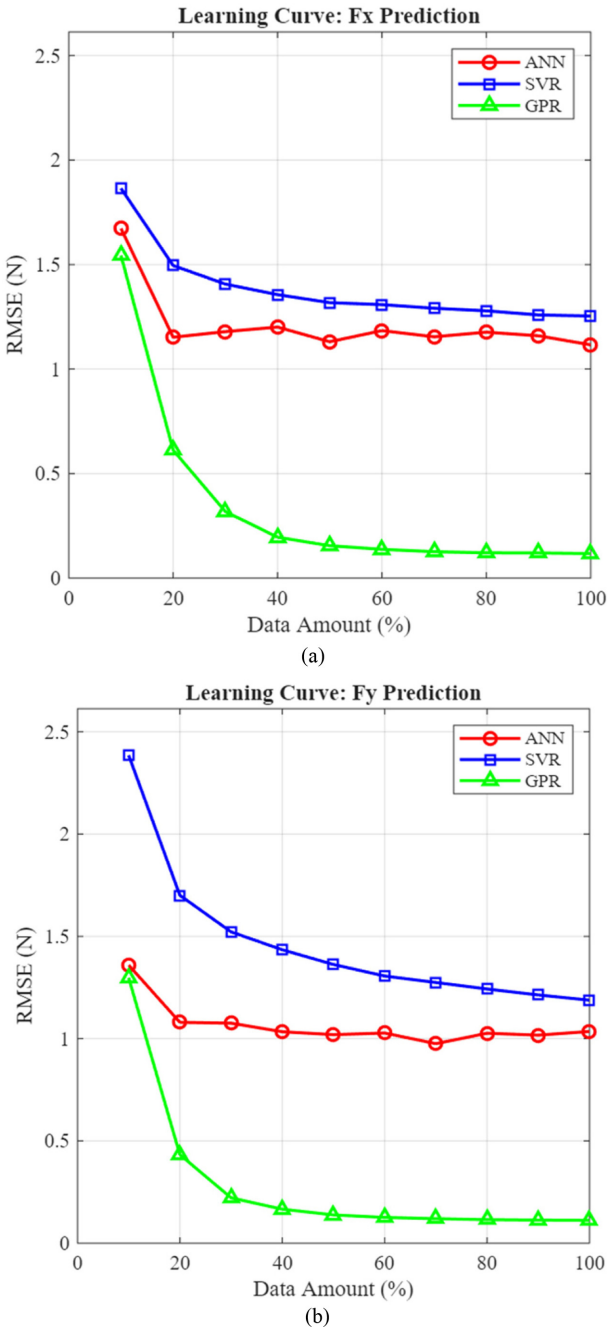


Fig. 9 Learning curve of force prediction from ANN, SVR, and GPR for data amount in (a) x-axis and (b) y-axis

연속형 데이터가 모델의 일반화 성능 향상에 핵심적인 역할을 함을 확인하였다. 본 절에서는 더 나아가, 유효한 연속 데이터를 얼마나 수집하고 학습시켜야 충분한 성능을 낼 수 있는지를 검증하고자 하였다. Fig. 9는 전체 훈련 후보 가공조건 중 무작위로 선택한 조건의 비율을 10%에서 100%까지 증가시켰을 때 ANN, SVR 및 GPR 모델의 시험 RMSE 변화를 보여준다. Figs. 9(a)와 9(b)는 각각 Fx와 Fy의 학습곡선이며, 낮은 RMSE는 높은 절삭력 예측 정확도를 의미한다.

분석 결과, 세 모델 모두 데이터가 증가함에 따라 오차가 감소하며 수렴하는 안정적인 추세를 보였다. 특히 ANN 모델은 훈련 데이터 20%까지 오차가 크게 감소한 후 수렴하는 경향을 보였다. GPR 모델은 전체 데이터의 40–50% 수준에서 오차가 거의 0에 가깝게 수렴하며 가장 우수한 최종 성능을 달성하였다. 반면, SVR 모델은 수렴 속도가 가장 느리고 전 구간에서 오차 수준이 높게 유지되어 복잡한 연속 패턴 학습에 한계를 보였다.

결론적으로, 연속 가변 수집 방식으로 획득한 데이터는 정보 밀도가 높아 부분적인 데이터만으로도 주요 모델이 최적 성능에 도달할 수 있다. 이는 데이터 수집에 소요되는 시간과 비용뿐만 아니라, 지능형 가공 시스템 구축 시 모델 훈련에 필요한 컴퓨팅 자원까지 획기적으로 절감할 수 있는 실무적 이점을 제공한다.

3.6 연구의 적용 범위 및 한계

본 연구는 연속 가변 데이터 수집 전략의 유효성을 검증하기 위해 Feed Rate와 RDOC로 구성된 2차원 가공조건 공간을 대상으로 하였으며, ADOC와 Spindle Speed는 각각 1 mm와 6,000 rpm으로 고정하였다. ADOC의 변화는 축방향 절삭날 개입 길이와 절삭력의 위상 중첩에 영향을 주며, Spindle Speed의 변화는 Cutting Speed, 날 통과 주파수 및 날당 이송량을 동시에 변화시킨다. 따라서 본 연구의 결과는 고정된 ADOC와 Spindle Speed 조건에 한정되며, 향후 여러 수준에서 연속 궤적을 반복 수집하여 적용 범위를 확장할 필요가 있다.

또한 실험은 Al6061과 직경 8 mm의 2날 WC 엔드밀을 이용한 건식가공 조건에서 수행하였다. 절삭유는 마찰, 응착, 절삭온도 및 칩 배출 상태를 변화시킬 수 있으므로, 현재 모델을 습식 또는 MQL 가공에 직접 적용하기 위해서는 추가적인 데이터 수집과 검증이 필요하다. 평엔드, 코너반경 및 볼엔드 공구 역시 절삭날 개입기하와 축방향 절삭력 특성이 다르므로, 다른 공구 형상으로 확장할 때는 형상 변수를 포함하고 Fz를 고려한 3축 절삭력 모델이 요구된다.

공구 장착 후 다이얼게이지로 측정한 공구 런아웃은 약 5 μm였다. 이에 따라 Fig. 4에서도 첫 번째와 두 번째 절삭날에 대응하는 절삭력 피크 사이에 반복적인 차이가 나타났으며, 이는 런아웃에 따른 날별 칩 부하 불균형과 부합한다. 현재 모델에는 해당 장착 상태의 런아웃 영향이 포함되어 있지만, 이를 구조진동이나 공구 처짐의 영향과 독립적으로 분리하지는 못하였다. 또한 높은 Feed Rate에서는 절삭력 증가에 따른 공구 처짐이 커질 수 있으나, 본 연구에서는 공구 끝단 변위와 동적 안정성을 별도로 평가하지 않았다.

Figs. 2(c)와 2(d)의 부분침지 구간에서는 공구의 한쪽 측면이 피삭재와 접촉하지만, 두 절삭날은 회전에 따라 순차적으로 개입한다. Up/Down-milling은 공구 회전방향, 이송방향 및 피삭재 접촉 측면에 의해 결정되며, RDOC 변화는 절삭날의 개입각을 변화시키지만 밀링 방향을 자동으로 전환하지는 않는다. RDOC가 공구 직경과 같은 8 mm에서는 전폭 슬롯가공 조건이 된다.

따라서 본 연구의 결과는 현재의 공구, 장착 상태, 밀링 방향 및 가공환경에서 연속 가변 데이터 수집 전략의 유효성을 보여주는 것으로 해석해야 하며, 다른 조건에 대한 범용적 적용을 위해서는 추가적인 검증이 필요하다.

4. 결론

본 연구에서는 밀링 공정의 절삭력 예측을 위해 '연속 가변 데이터 수집 전략'을 제안하고, 기계학습 모델을 통해 그 실효성을 검증하였다. 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

첫째, 이송 속도와 반경 방향 절입 깊이를 점진적으로 변화시키는 연속 가변 수집법을 통해 기존 완전 요인 배치법의 이산적 한계를 보완하고, 데이터 희소성 완화 및 실험 비용 단축 효과를 확인하였다. 특히 선형적 변화율을 적용함으로써 정적 조건 대비 단시간 내에 신뢰성 있는 연속적 데이터를 확보하였다.

둘째, 공구 회전 각도에 삼각함수 특징 공학을 적용하여 경계 영역의 수치적 단절을 방지하고 모델의 주기적 예측 안정성을 확보하였다.

셋째, 예측 모델 성능 평가 결과, 연속 가변 데이터가 내포한 변화율 정보 덕분에 이산적 데이터와 양이 동일하더라도 미학습 조건에서 상대적으로 낮은 미학습 조건 예측오차를 나타냈다. 또한 전체 수집 데이터의 일부분만으로도 모델이 최적 성능에 도달하여 데이터 수집 및 모델 학습 부담을 줄일 가능성을 확인하였다.

본 연구는 한정된 실험 환경에서도 경제적인 가공 모니터링 시스템을 구축할 수 있는 실용적 방법론을 제시한다. 향후 다양한 피삭재에 대한 범용성 검증 및 실시간 제어 시스템 통합 연구를 추진할 계획이다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 한국산업기술기획평가원(No. RS-2024-00416035)과 한국연구재단(No. RS-2024-00357760)의 지원을 받아 수행된 연구임.

REFERENCES

1. Maher, I., Eltaib, M., Sarhan, A. A., El-Zahry, R., (2015), Cutting force-based adaptive neuro-fuzzy approach for accurate surface roughness prediction in end milling operation for intelligent machining, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 76(5), 1459-1467.
2. Li, X., Nee, A., Wong, Y., Zheng, H., (1999), Theoretical modelling and simulation of milling forces, Journal of Materials Processing Technology, 89, 266-272.
3. Kaymakci, M., Kilic, Z., Altintas, Y., (2012), Unified cutting force model for turning, boring, drilling and milling operations, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 54, 34-45.
4. Wu, B., Yan, X., Luo, M., Gao, G., (2013), Cutting force prediction for circular end milling process, Chinese Journal of Aeronautics, 26(4), 1057-1063.
5. Wang, M., Gao, L., Zheng, Y., (2014), An examination of the fundamental mechanics of cutting force coefficients, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 78, 1-7.
6. Tandon, V., El-Mounayri, H., (2001), A novel artificial neural networks force model for end milling, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 18(10), 693-700.
7. Yeganefar, A., Niknam, S. A., Asadi, R., (2019), The use of support vector machine, neural network, and regression analysis to predict and optimize surface roughness and cutting forces in milling, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 105(1), 951-965.
8. Charalampous, P., (2021), Prediction of cutting forces in milling using machine learning algorithms and finite element analysis, Journal of Materials Engineering and Performance, 30(3), 2002-2013.
9. Zhu, J., Liu, H., Zhu, Q., Qiu, Y., Zhu, J., Mao, X., He, S., Peng, F., Niu, J., (2026), Adaptive milling force estimation via a physics-informed TCN model with frequency-domain self-attention, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 142(9), 5317-5337.
10. Vaishnav, S., Agarwal, A., Desai, K., (2020), Machine learning-based instantaneous cutting force model for end milling operation, Journal of Intelligent Manufacturing, 31(6), 1353-1366.
11. Wang, J., Zou, B., Liu, M., Li, Y., Ding, H., Xue, K., (2021), Milling force prediction model based on transfer learning and neural network, Journal of Intelligent Manufacturing, 32(4), 947-956.



Sangjin Maeng
Assistant professor in the Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University. His research interests are precision manufacturing, machine tool, and precision measurement.
E-mail: sjmaeng@hongik.ac.kr



Byung-Min Kim
M.S. candidate in the Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University. His research interest is precision machining and machine tools.

한국정밀공학회지 제 43 권 제 10 호 pp. 1027-1036 October 2026 / 1027
J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 43, No. 10, pp. 1027-1036 http://doi.org/10.7736/JKSPE.026.00056
ISSN 1225-9071 (Print) / 2287-8769 (Online)

기계적 폴리싱을 이용한 조형토 도자기 표면 특성 개선

Enhancement of Surface Characteristics of Sculpting Clay Ceramics Using Mechanical Polishing

허웅[1], 무함마드 아부 후레이라[1], 박지민[2], 김대용[2], 황지홍[1,#]
Woong Hur[1], Muhammad Abu Hurairah[1], Jimin Park[2], Dayong Kim[2], and Jihong Hwang[1,#]

1 서울과학기술대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Science and Technology)
2 서울과학기술대학교 도예학과 (Department of Ceramics, Seoul National University of Science and Technology)
Corresponding Author / E-mail: hwangjh@seoultech.ac.kr
ORCID: 0000-0002-0758-3590

KEYWORDS: Sculpting clay (조형토), Ceramics (세라믹), Surface characteristics (표면 특성), Mechanical polishing (기계적 폴리싱), Glaze coating (유약)

This study investigates the ability of mechanical polishing to enhance the surface properties of sculpting clay ceramics without the use of glaze. To accomplish this, a ceramic tile machining system capable of efficient grinding and polishing was developed and utilized. Through experiments conducted under various conditions, key processing parameters—including tool rotational speed, applied pressure, and feed rate—were determined experimentally, resulting in significantly improved surface quality of the ceramic specimens. Analyses of glossiness, surface roughness, and contact angle confirmed notable enhancements in surface characteristics after polishing. These results demonstrate that a mechanically polished surface can achieve quality comparable to, or even surpassing, that obtained through traditional glazing processes, suggesting the potential to replace conventional glaze coatings with a mechanical polishing approach.

Manuscript received: June 8, 2026 / Revised: August 21, 2026 / Accepted: September 1, 2026

1. 서론

도자기(Ceramic)는 점토를 빚어 높은 온도에서 구워낸 용기인데, 도자기의 미세 구조는 무기질 기반 결정질 상과 비정질 상의 특징을 모두 갖는 혼합 상을 가진다[1]. 이러한 도자기는 음식을 담는 용기로서의 역할뿐만 아니라 현대 도자, 환경 도자, 건축 도자 등 여러 분야에서 다양하게 활용되고 있다. 도자기 제작에 사용되는 점토로는 백자토, 청자토, 분청토, 조형토 등이 있는데, 이 중 조형토(Sculpting Caly)는 건조 및 냉각 수축이 작고 점력이 좋아 예술 조형물 등 복잡한 형태를 갖는 제품의 제작에 널리 이용되고 있다[2-5].

조형토 도자기는 규소(Si)나 알루미늄(Al)을 주 원소로 갖는 석영(Quartz), 크리스토발라이트(Cristobalite), 뮬라이트(Mullite)와 같은 결정질 산화물로 구성되어 있으며, 소성 단계에서 수분이 기화되면서 형성되는 다공성 구조와 거친 표면으로 인해 친수성(Hydrophilic)의 표면 특성을 갖는다[6]. 친수성을 갖는 도자기의 표면은 수분에 포함되어 있는 오염 물질이 쉽게 흡착될 수 있으며, 그 결과 박테리아 또는 세균이 증식될 수 있는 환경이 조성된다[7]. 나아가 조형토 도자기의 거친 표면 질감은 광택과 같은 미적 특성을 저하시킴과 동시에 사용자의 안전 문제를 발생시킨다[7]. 따라서 이러한 단점을 보완하기 위해 전통적으로는 도자기 표면에 유약을 도포한 후 열소성을 반복하여 표면을 코팅하는 방식이 사용되고 있다. 열소성된 유약은 도자기 표면의 기공을 완전히 폐쇄하여 방수 성능을 향상시키며[8], 오염 물질의 도자기 표면으로의 물리적 접근을 차단시킨다[9]. 또한 표면을 매끄럽게 만드는 효과가 있으며, 비정질 상에 의한 광택 등의 미적 효과를 유발해 내기도 한다. 열소성된 유약은 높은 친수성을 가지지만 뛰어난 방수성으로 인해 오염 물질의 세척이 용이하여 도자기의 유지 및 관리를 편하게 하는 장점을 가지고 있다.

Copyright © The Korean Society for Precision Engineering
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

그러나 유약 도포를 위한 반복적인 열소성 과정에는 많은 시간과 에너지가 소요된다. 또한 조형토 도자기와 도포된 유약의 열팽창계수 차이로 인해 발생하는 잔류 응력은 유리결정질 구조를 갖는 유약의 균열 또는 파괴를 유발할 수 있다[10]. 더불어 유약이 도포되는 두께와 소성 과정은 잔류 응력 형성과 직접적인 관계가 있고, 이로부터 표면 특성이 결정되기 때문에 유약 도포 및 온도 제어 기술에 따라 도자기의 표면 품질이 크게 달라질 수 있다[11]. 또한 유약 제조에 사용되는 납(Pb) 성분은 인체에 유해하여 사용에 제약이 있으며[12], 유약의 열소성 과정에서 발생하는 많은 양의 이산화탄소는 환경 문제를 유발한다[13]. 예로서 Turkmen 등[14]은 자기 타일의 생명 주기(Life Cycle)에서 생산 단계의 소성 과정이 환경에 가장 큰 영향을 미치며, 환경으로 배출된 화학 물질이 인간의 건강에 미칠 수 있는 잠재적 해로움을 정량화한 지표인 인체 독성 잠재력이 45.9%에 이르는 것으로 보고하였다. 소성 공정을 한 번만 수행하는 도자기 제작 방법(Single-firing)의 환경 영향도를 평가한 또 다른 연구에서는 유약 공정을 유해 폐기물의 가장 큰 원인 중 하나로 지목하기도 하였다[15]. 따라서 도자기의 기능적 측면과 표면 거칠기를 개선하면서 유약을 대체할 수 있는 표면 처리 방법의 개발이 요구되었다.

유약을 대체할 수 있는 표면 처리 방법으로는 기계적 폴리싱(Mechanical Polishing) 공정이 치과용으로 제안되었다. 치과용 유약은 보통 표면을 매끄럽게 하여 이물질 부착을 방지하고 교합면에서 치아의 마멸을 줄이기 위한 목적으로 사용된다. 하지만 치과용 유약은 마모가 빨라 이를 대체하기 위한 방안으로 기계적 폴리싱이 연구되었다. 예를 들어 Brito 등[16]은 기계적 폴리싱이 수행된 치과용 세라믹이 유약이 도포된 시편보다 향상된 표면 거칠기를 가지면서도 미세 경도는 유사한 값을 가진다고 보고하였다. 동일한 재료에 대해 수행된 또 다른 연구[17]에서는 기계적 폴리싱이 수행된 치과용 세라믹이 유약이 도포된 시편보다 향상된 표면 광택과 표면 거칠기를 가진다는 결과를 발표하였다. Jamaila 등[18]은 치과용 지르코니아 세라믹 표면의 기계적 폴리싱이 세라믹 시편의 기계적, 광학적 특성에 미치는 영향에 대해 조사하였다. 이를 위해 기계적 폴리싱이 수행된 시편의 미세 경도, 굴곡 강도, 표면 거칠기 측정 및 X선 회절 분석 등이 수행되었다. 그 결과 기계적 폴리싱은 유약에 비해 샘플의 기계적 특성에 미치는 영향을 최소화하면서도 매끄러운 표면을 생성하는 것으로 나타났다. 이러한 연구 결과는 기계적 폴리싱이 세라믹 재료의 기계적 또는 조성적 특성을 손상시키지 않으면서도 유약을 대체하는 지속가능하고 경쟁력 있는 수단이 될 수 있음을 의미한다.

기계적 폴리싱은 다양한 도자기 재료에 적용 가능하지만 앞서 언급한 선행연구들은 대부분 치과용 재료에 국한되어 있어 도자기 재료에 대한 기계적 폴리싱의 효과를 구체적으로 파악하는 데는 한계가 있다[19,20]. 따라서 본 연구는 유약에 견줄 수 있는 표면 특성을 얻는 것을 목표로 기존 유약 공정을 대체할 수 있는 효율적인 방법으로서 기계적 폴리싱의 적용 가능성을 살펴보았다. 이를 위해 조형토 도자기 시편의 그라인딩 및 폴리싱을 수행할 수 있는 가공기를 직접 제작한 후 다양한 조건에서 가공 시험을 수행하였다. 이렇게 가공된 시편 표면에 대해 접촉각, 표면 거칠기, 광택도를 측정하고 추가적으로 SEM, EDS, XRD 분석을 수행하여 유약의 표면 특성과 비교하였다. 그 결과를 토대로 유약 공정을 대체할 수 있는 기계적 폴리싱의 유효성을 평가하였다.

2. 실험 방법

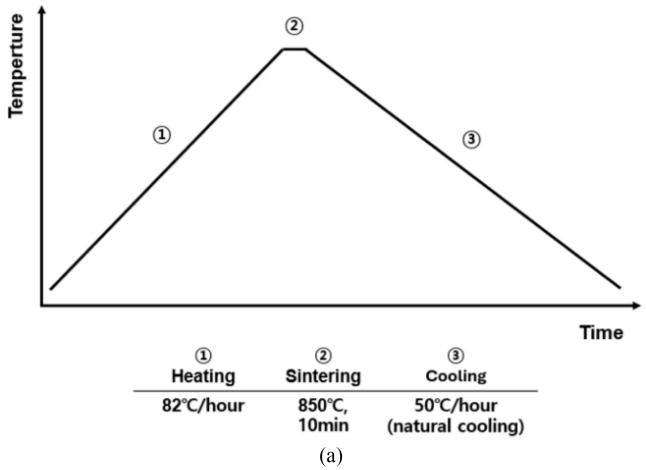
조형토 도자기의 가공 실험에는 연구실 내에서 직접 제작한 가공 기기와 조형토 시편이 사용되었다. 도자기 시편은 도자기 제작 전문가에 의해 제작되었으며, 유약 공정을 거친 형태와 유약 공정을 거치지 않은 형태로 제작되었다. 제작된 도자기 시편에서는 성형 과정에서 생긴 흠집이나 소성 과정에서 가열과 냉각을 거치면서 발생하는 굽힘 변형 등을 찾아볼 수 있었다. 도자기 시편의 가공은 평탄화 공정으로 그라인딩을 수행한 후 이어서 폴리싱을 수행하는 방식으로 진행되었다. 표면 특성에 대한 측정 및 분석은 성형 후 초벌 구이만이 이루어진 초기 상태 시편, 초기 상태에서 그라인딩 공정만이 수행된 시편, 초기 상태에서 그라인딩과 폴리싱 공정이 모두 수행된 시편, 초벌 구이와 유약을 발라 다시 굽는 재벌 구이가 모두 수행된 시편에 대해 각각 이루어졌다.

2.1 시편 준비

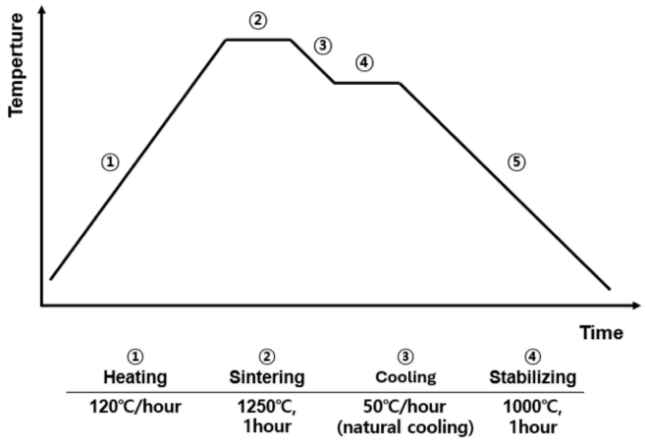
시편은 시중에 판매되고 있는 조형 점토(동영세라믹스)를 구매하여 제작되었다. 조형토는 점력이 좋고 모래 함유량이 높아 형태 유지력이 강하며 건조 시 변형(수축)이 적어 대형 작품이나 구조적 안정성이 요구되는 조소 작업에 적합하다. 조형토 도자기는 유약 도포 시 보통 1,200–1,270ºC 이상의 고온에서 소성되며, 갈색 계열의 투박한 질감을 내는 것이 특징이다.

본 연구에 사용된 시편은 75 mm(가로) × 75 mm(세로) × 10 mm(두께)의 크기로 타일 형태로 제작되었다. 시편 제작은 먼저 수축 여유를 두고 성형한 후 초벌 구이와 유약을 발라 다시 굽는 재벌 구이 과정을 거쳐 수행되었다. 초벌 구이는 10시간에 걸쳐 시편 온도를 850ºC까지 일정하게 상승시키고 일정 시간 이 온도를 유지하면서 시편을 소결시킨 후 자연 냉각하는 방식으로 진행되었다. 재벌 구이 과정에서는 10시간에 걸쳐 시편 온도를 1,250ºC까지 일정하게 상승시킨 후, 2단계의 온도 유지-자연 냉각 과정을 거쳐 소결 및 안정화를 가져오는 방식으로 진행되었다. Fig. 1은 초벌과 재벌 구이 과정에서의 온도 조건을 보여준다.

Fig. 2는 초벌 구이만이 진행된 초기 상태 시편, 초벌 구이 시편에 유약을 바른 후 재벌 구이를 수행한 시편, 초벌 구이 시편에 그라인딩과 폴리싱을 수행한 시편의 사진을 보여준다. 초벌 구이만이 진행된 초기 상태 시편(Fig. 2(a))은 거칠면서 편평하지 않은

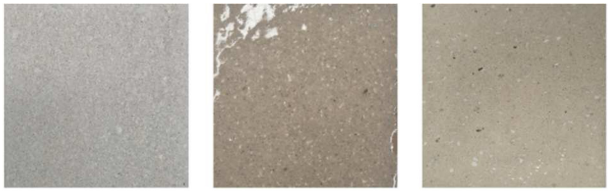


(a)



(b)

Fig. 1 Temperature conditions for (a) Bisque (first) firing process and (b) Glaze (second) firing process



(a) (b) (c)

Fig. 2 Pictures of surfaces of (a) A bisque-fired sample, (b) A glaze-fired sample and (c) A sample after grinding and polishing was carried out

면을 가지는 것을 알 수 있으며, 유약을 바른 후 재벌 구이를 수행한 시편(Fig. 2(b))은 높은 광택도와 낮은 표면 거칠기를 가진 표면을 갖는 것을 알 수 있다. 한편 그라인딩과 폴리싱을 거친 시편(Fig. 2(c))의 표면은 다른 시편들에 비해 편평한 면을 가지며, 초벌 구이만이 진행된 초기 상태 시편(Fig. 2(a)) 표면에 비해서는 낮은 표면 조도, 유약을 바른 후 재벌 구이를 수행한 시편(Fig. 2(b)) 표면에 비해서는 낮은 광택도를 갖는 것을 알 수 있다.

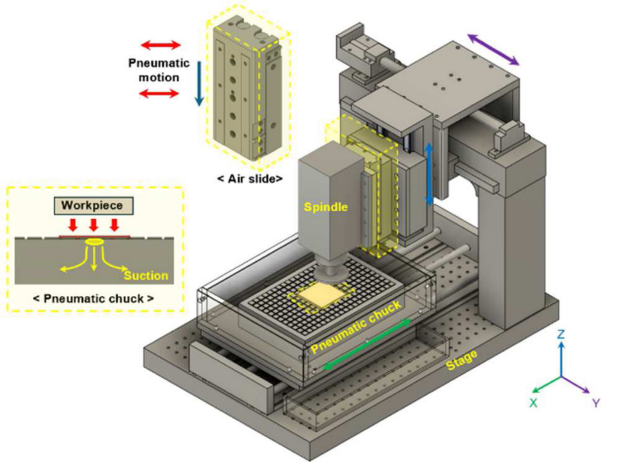


Fig. 3 3-axis CNC machine built for grinding and polishing of ceramic specimens

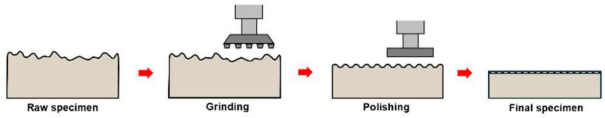


Fig. 4 Sample processing sequence (left to right): As-received sample is first grinded and then polished to the final polished sample

2.2 가공 장비

본 연구에서는 도자기 시편의 그라인딩과 폴리싱을 위해 Fig. 3과 같이 자체 제작된 3축 CNC 장비가 사용되었다. 이 장비의 특징 중 하나는 폴리싱 가공 중 시편에 가하는 압력을 일정하게 제어할 수 있도록 Z-축 이송부에 추가로 공압 슬라이드를 부착하였다는 점이다. 스핀들은 이 공압 슬라이드에 부착되는데 폴리싱 가공 중 발생하는 수직력이 공압에 의해 설정된 값과 다를 경우 슬라이드의 상하 움직임에 의해 자동으로 보정이 되도록 하였다. 그라인딩 시에는 가공 중 스핀들이 위로 밀리지 않도록 단단히 고정하여 시편의 평탄화가 이루어질 수 있도록 하였다. 시편의 고정을 위해 X-축 이송부에 공압척을 부착하였으며, 가공 시 발생하는 열이 시편과 공구를 손상시키지 않도록 냉각수 공급장치를 설치하였다. 또한 G-code 기반 소프트웨어 Mach3를 사용하여 공구의 회전 속도, 이송 속도, 이동 경로 등을 제어할 수 있도록 하였다.

2.3 가공 조건

Fig. 4는 초벌 구이만이 수행된 초기 상태 시편에 그라인딩과 폴리싱을 수행하는 과정을 보여준다. 그라인딩 휠로는 컵 형태의 레진 본드 다이아몬드 휠 (직경: 75 mm, 집중도: 75)이 사용되었는데, 이는 그라인딩 중에 주어지는 충격 하중과 시편의 취성으로 인해 발생하는 시편의 칩핑(Chipping) 또는 파괴를 방지하는데 레진 본드 다이아몬드 휠이 금속 본드 다이아몬드 휠보다 유리하기 때문이었다. 그 밖의 그라인딩 조건은 시편의 표면

Table 1 Grinding conditions

Parameters	Values
Rotational speed [rpm]	8,000
Feed rate [mm/min]	80
Depth of cut [mm/cycle]	0.1
Tool diameter [mm]	75

Table 2 Polishing conditions

Parameters	Values
Rotational speed [rpm]	5,000
Feed rate [mm/min]	50
Polishing pressure [kPa]	80 Grit : 6.5 180 Grit : 6.5 320 Grit : 6.5 600 Grit : 6.5 800 Grit : 5 1,500 Grit : 4.3 2,000 Grit : 3.5
Tool diameter [mm]	50

품질을 저해하지 않으면서 전면을 균일하게 평탄화 할 수 있는 조건으로 Table 1과 같이 실험적으로 결정하였다.

폴리싱은 입도 80부터 2,000까지의 SiC소재 폴리싱 패드(DEERFOS 사 ACM66 및 AC768)를 이용하여 순차적으로 진행하였다. 폴리싱 가공 시 패드의 회전 속도 및 면압이 높을수록 보다 고운 표면을 얻을 수 있었다. 하지만 다이아몬드 입자가 고운 경우에는 패드의 회전 속도 또는 면압이 높을수록 입자들이 패드에서 쉽게 이탈하여 가공이 균일하지 않게 되는 현상이 발생하였다. 따라서 Table 2에서와 같이 입자 크기가 작아짐에 따라 면압을 줄여가며 가공을 진행하였다. 또한 폴리싱 패드에 쿠션층을 두어 표면 굴곡이 가공에 미치는 영향을 최소화하였고, 가공 시 발생하는 열에 의한 공구 마모를 최소화하기 위해 증류수를 냉각수로 사용하여 습식으로 가공을 진행하였다.

2.4 표면 분석

도자기 표면의 성능을 결정짓는 주요 특성으로 표면 거칠기, 광택도, 접촉각 세가지를 선정하고 이에 대한 측정을 Fig. 5에 도시된 것과 같이 수행하였다. 이를 통해 서로 다른 공정 조건에서의 표면 특성을 분석하고 그 차이점을 고찰하였다. 또한 표면의 형상학적 변화, 화학적 변화, 결정학적 변화가 접촉각에 영향을 주었는지 여부를 확인하기 위해 SEM (Scanning Electron Microscope), EDS (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy), XRD (X-ray Diffraction) 분석을 추가적으로 수행하였다.

2.4.1 표면 거칠기 측정

표면 요철이 다량 존재하는 초기 상태 시편과 비교하여 그라인딩과 폴리싱을 거친 시편은 얼마나 균일한 표면을 갖는지 알아보기 위해 산술평균 거칠기(Ra), 제곱평균 거칠기(Rq), 10점

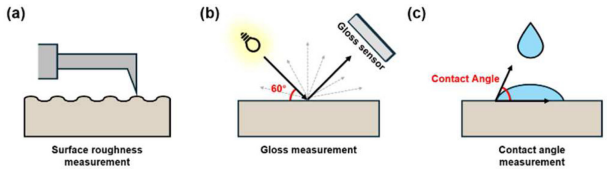


Fig. 5 (a) Surface roughness measurement, (b) Gloss measurement and (c) Contact angle measurement

평균 거칠기(Rz) 값을 측정하였다. 표면 거칠기 측정을 위해서는 접촉 방식의 기기(Mitutoyo사의 SJ-310)를 사용하였고, 측정 시 Cut-off 길이, 측정 길이 등은 ISO-4288의 표면 거칠기 측정 방법을 참고하여 설정하였다.

2.4.2 광택도 측정

시편 표면에서 얼마나 많은 광택이 나는지를 측정하기 위해 광택계(3NH사의 YG60S)를 이용해 광택도를 측정하였다. 광택도는 일정한 각도에서 표면에 빛을 쏜 후, 그 표면에서 반사되는 빛의 양을 측정하여 수치화(GU)된다. 측정에 사용된 빛은 가시광선 영역의 파장(380–780 nm)을 지니며, 빛이 표면에 쏘여지는 각도는 60°이다. 측정은 ISO-2813을 준수하여 수행되었다.

2.4.3 접촉각 측정

접촉각은 표면의 발수성과 직접적인 상관관계가 있기 때문에 도자가 표면의 가장 중요한 특성 중의 하나라고 할 수 있다. 따라서 도가지 표면에서의 접촉각을 접촉각 측정기(SEO사의 Phoenix-MT)를 사용하여 측정하였다. 접촉각 측정 시 액적은 표면에 떨어진 직후부터 증발 및 시편 표면으로의 흡수가 시작되어 부피가 감소하기 때문에 시간에 따른 접촉각의 차이를 일정하게 기록하는 것이 중요하다. 따라서 시편마다 증류수 3 μL를 떨어뜨리고 떨어뜨린 직후, 30초 후, 60초 후 액적의 접촉각 및 부피를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

본 장에서는 서로 다른 도자기 시편들에 대한 표면 분석 결과를 제시하고, 이를 토대로 그라인딩과 폴리싱이 조형토 도자기 표면에 어떤 영향을 주는지를 확인한다. 더불어 그라인딩과 폴리싱이 수행된 도자기 표면과 유약을 도포하여 재소성한 도자기 표면의 특성을 비교하여 유약의 대체 가능성을 살펴본다. 실험은 5개 독립 시편을 각각 8회 반복 측정하였다.

3.1 표면 거칠기 분석

Fig. 6은 네 가지 서로 다른 시편(초벌 구이만이 수행된 초기 상태 시편(Raw), 초기 상태 시편에 그라인딩이 수행된 시편(Grinding), 초기 상태 시편에 그라인딩 및 폴리싱이 수행된 시편(Polishing), 유약 공정이 수행된 시편(Glazing)에 대해 수행

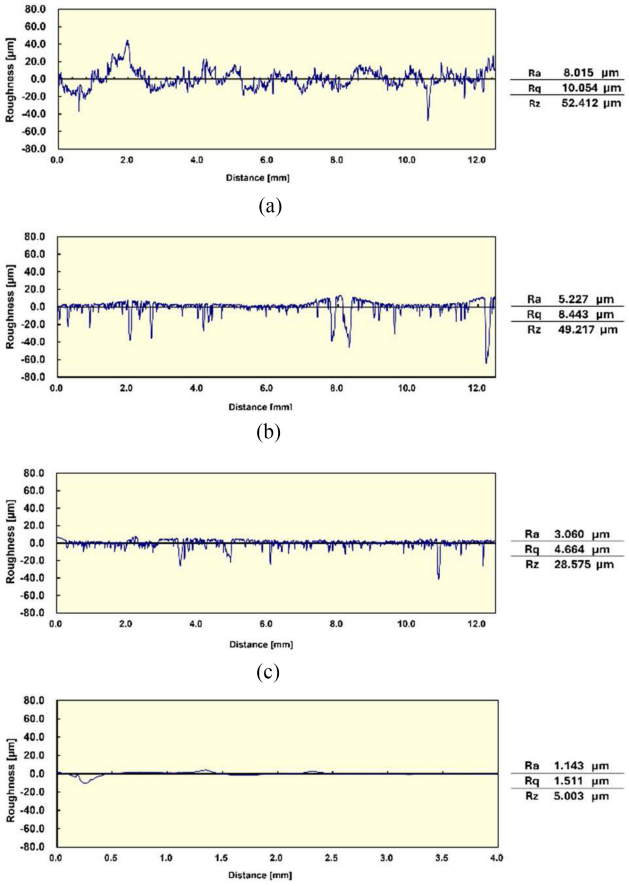
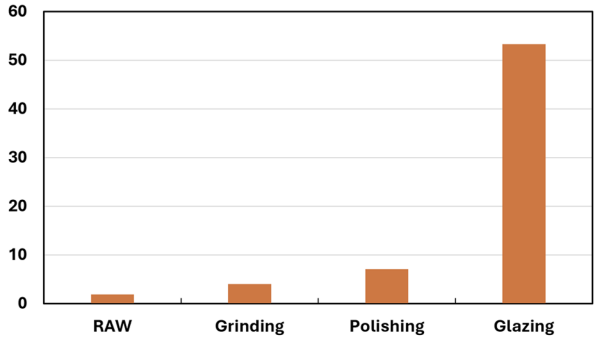


Fig. 6 Surface roughness profiles of (a) Raw, (b) Grinded, (c) Polished and (d) Glazed specimens

Polishing RPM		5000
Polishing Pressure		3.5-6.5kPa
RAW	Average	1.91
	Standard Deviation	0.07
Grinding	Average	4.03
	Standard Deviation	1.21
Polishing	Average	7.11
	Standard Deviation	0.99
Glazing	Average	53.31
	Standard Deviation	14.58

Units : [GU]

(a)



(b)

Fig. 7 (a) Gloss table according to each process and (b) Graph

된 표면 거칠기(Ra, Rq, Rz) 측정 결과를 보여준다. 그림에서 유약 공정을 거치지 않은 도자기 시편의 표면 거칠기는 그라인딩과 폴리싱 공정을 거치면서 점차 작아지는 것을 알 수 있다 (Ra: 8.015 μm > 5.327 μm > 3.060 μm). 한편, 유약 공정을 거친 시편의 표면 거칠기는 폴리싱 공정을 거친 시편의 1/3 수준 (Ra: 1.143 μm)으로, 거칠기 프로파일에서 보듯이 시편은 요철이 없는 매우 매끈한 표면을 가짐을 알 수 있다.

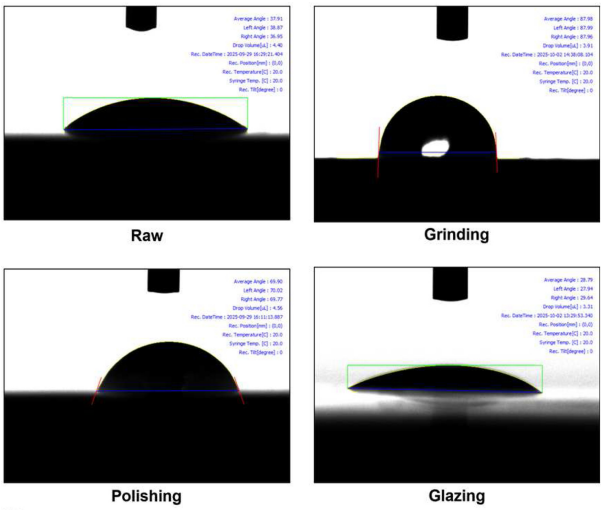
3.2 광택도 분석

Fig. 7은 네 가지 서로 다른 시편에 대해 수행된 광택도 측정 결과를 보여준다. 그림에서 유약 공정을 거치지 않은 도자기 시편의 광택도는 그라인딩과 폴리싱 공정을 거치면서 점차 향상되는 것을 알 수 있다. 앞의 표면 거칠기 분석 결과에서 알 수 있듯이 도자기 시편의 표면 거칠기는 그라인딩과 폴리싱 공정을 거치면서 감소한다. 따라서 이러한 광택도 측정 결과는 광택도가 표면 거칠기와 직접적인 상관관계를 갖는다는 사실을 뒷받침한다고 할 수 있다.

한편, 유약 공정을 거친 시편의 높은 광택도(평균값 53 GU)와 비교하면 폴리싱을 거친 시편의 광택도는 평균값이 7.11 GU로 그 값이 훨씬 낮음을 알 수 있다. 폴리싱을 거친 시편의 거칠기 값이 유약 공정을 거친 시편의 거칠기 값의 세 배 수준인 것을 감안하면 이는 특정 거칠기 이하에서 광택도가 급격히 증가하는 현상[22,23]과 관련이 있다고 판단된다. 따라서 일반적인 폴리싱 공정만으로는 유약 공정만큼 도자기 표면의 광택도를 향상시키는 데에는 한계가 있는 것으로 판단된다. 하지만 보다 효과적인 폴리싱 공정의 개발을 통해 표면 거칠기를 더욱 감소시킨다면 높은 광택도를 얻을 수 있으며, 나아가 가공 조건의 조절을 통해 광택도를 수요자의 요구에 맞게 제어할 수 있을 것으로 기대된다.

3.3 접촉각 분석

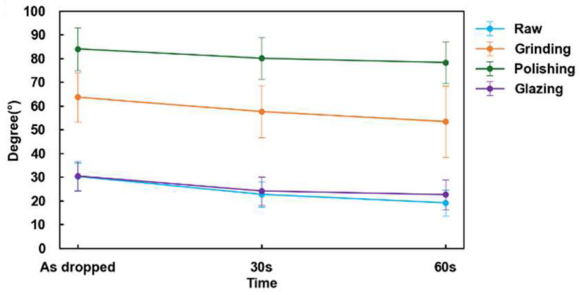
Fig. 8은 네 가지 서로 다른 과정의 시편에 대해 수행된 접촉각 측정 결과를 보여준다. 그래프(Fig. 8(c))는 시간에 따른 접촉각의 변화를 나타낸 것이며, 표준편차를 오차막대로 나타내었다. 액적을 떨어뜨린 직후 초벌 구이만이 수행된 초기 상태 시편의 접촉각과 유약 공정을 거친 시편의 접촉각 모두 30° 정도로 친수성을 보이는 것을 알 수 있다. 초기 상태 시편의 접촉각은 그라인딩과 폴리싱 공정을 거치면서 증가하는 것을 알 수 있다. 한편 액적의 부피 변화율은 액적 이미지를 이용하여 계산할 수 있는데, 그 값의 평균은 초벌 구이만이 수행된 초기 상태 시편의 경우 28.3%, 그라인딩이 수행된 시편의 경우 14.8%, 그라인



(a)

Process	As dropped (°)	30s (°)	60s (°)
Raw	30.24	22.70	19.10
Grinding	63.67	57.61	53.4
Polishing	84.05	80.10	78.32
Glazing	30.43	24.13	22.57

(b)



(c)

Fig. 8 (a) Pictures of droplets taken for contact angle analysis, (b) Table of the results and (c) Graph with standard deviations

딩 및 폴리싱이 수행된 시편의 경우 5.83%였고, 표준 편차는 각각 12, 7, 4%로 각 공정 간의 표본 T검정 결과(0.05 유의수준), p-value가 각각 0.015, 0.007로 유의미한 차이를 보였다.

유약은 도자기 표면 기공을 완전히 폐쇄함으로써 도자기 표면에 방수성을 부여한다. 따라서 유약 자체의 친수성(낮은 접촉각)에 상관없이 기능적 측면에서 우수함을 가진다. 하지만 유약을 사용하지 않고 표면의 기계적 가공만을 통해 방수성을 구현하는 것에는 한계가 존재한다. 때문에 방수성보다는 오염물질의 부착 정도와 관련된 발수성에 초점을 맞추는 것이 현실적이라고 할 수 있다. 발수성은 표면에 대한 액체의 젖음성(Wettability)을 통해 판별이 가능한데, 이때 액체의 젖음성은 액적(Droplet)의 표면에서 형성되는 접촉각(Contact Angle)에 의해 정량화될 수 있다. 그라인딩 및 폴리싱이 수행된 시편의

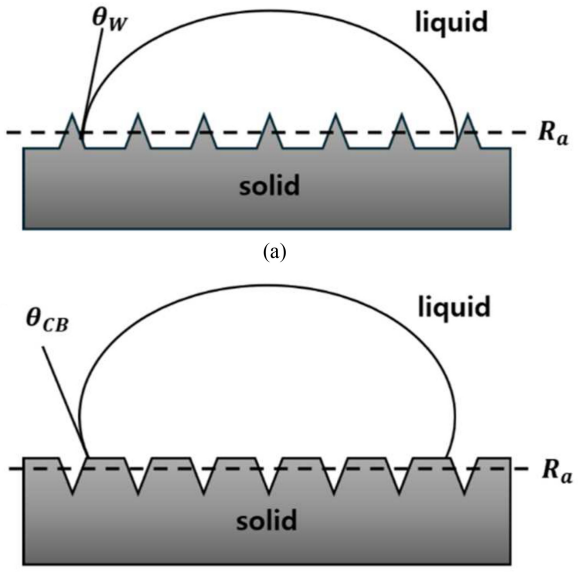


Fig. 9 Water repellency of wettability in (a) Wenzel state and (b) Cassie-Baxter state

접촉각은 70 이상으로 높고 평균 부피 감소율(5.83%)은 유약 공정을 거친 시편의 평균 부피 감소율(9.90%)보다 유의미하게 작아 (0.05 유의수준 표본 T검정 결과 p-value 0.031) 오염물질 부착 예방을 위한 발수성 향상 측면에서 폴리싱 공정의 유효성을 확인할 수 있었다.

조형토 도자기 표면의 거칠기 변화에 따른 접촉각 변화는 액체가 표면의 홈을 완전히 채우는 상황(Fig. 9(a))을 가정한 Wenzel 모델에 의해 설명될 수 있는데 Wenzel 모델은 식(1)에 의해 정의될 수 있다.

$$\cos\theta^* = r\cos\theta \ (0^o \le \theta \le 180^o) \quad (1)$$

식(1)에서 θ^*는 거친 표면에서의 겉보기 접촉각, θ는 매끄러운 이상적 표면에서의 접촉각이다. r은 투영 면적 대비 실제 표면적의 비율로 항상 1보다 크며 표면이 거칠수록 큰 값을 갖는다. 조형토 도자기 표면 같은 친수성 표면의 경우 θ 값은 90보다 작으므로, 거칠기값이 작아질수록(r 값이 작아질수록) θ^*값은 커지게 된다. 이는 그라인딩과 폴리싱을 거치면서 조형토 도자기 표면에서의 접촉각이 커지는 현상과 일치한다.

한편, 조형토 도자기 표면의 거칠기 변화에 따른 접촉각 변화는 액체가 돌출부와 그 사이 홈에 갇힌 공기층(Air Pocket) 위에 놓여 있는 상황(Fig. 9(b))을 가정한 Cassie-Baxter 모델에 의해서도 설명이 가능한데, Cassie-Baxter 모델은 식(2)에 의해 정의될 수 있다.

$$\cos\theta_{cb} = f_{sl}\cos\theta - (1 - f_{sl}) \ (0^o \le \theta \le 180^o) \quad (2)$$

식(2)에서 θ_{cb}는 거친 표면에서의 겉보기 접촉각, θ는 공기층이 없는 이상적 표면에서의 접촉각이다. f_{sl}은 겉으로 보이는 전체 접촉 면적 대비 액체가 실제로 고체 표면과 접촉하는 면적의

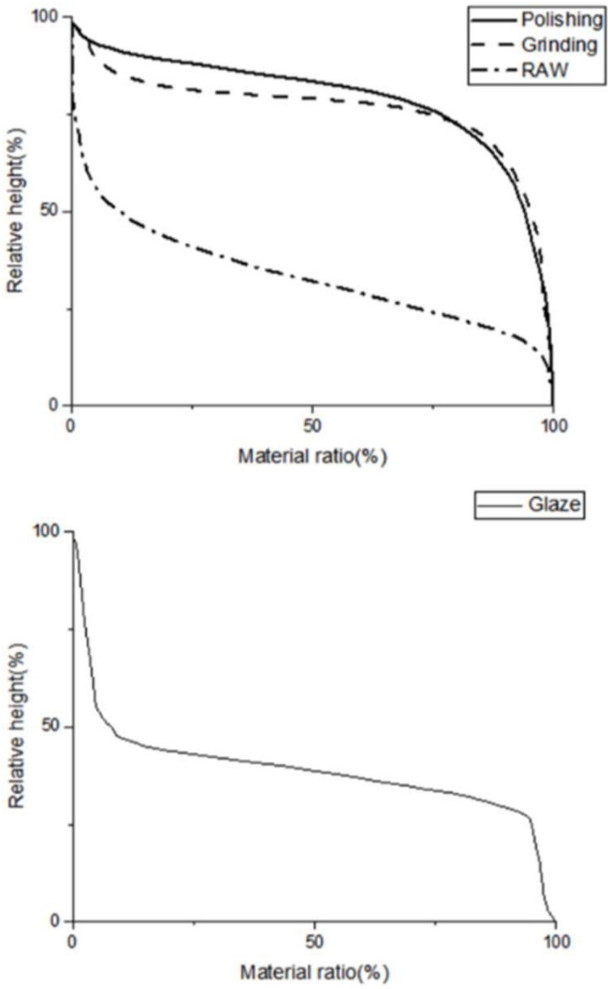


Fig. 10 The graph of relative height for material ratio according to each process

비율로 항상 1보다 작은 값을 갖는다. 친수성 표면의 경우 θ 값은 90보다 작으므로 f_{sl}이 작아지게 되면 θ_{cb}는 커지게 된다. Fig. 11은 네 가지 시편 표면에서의 실체비(Material Ratio of Profile), 즉 측정 표면의 일정 깊이에서 수평으로 잘랐을 때 재료의 단면 길이를 전체 평가 길이로 나눈 백분율(%)을 보여주는데, 초벌 구이만 거친 초기 상태 시편에 비해 그라인딩과 폴리싱을 거친 시편은 단면 높이가 큰 경우에도 실체비가 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 그라인딩 및 폴리싱 공정을 거치면서 돌출부가 줄어들고 홈이 많아져서 생긴 결과라고 판단된다. 이 작은 홈들은 공기층을 형성하여 액체가 고체 표면과 접촉하는 비율을 줄이게 되므로 Cassie-Baxter 모델의 설명대로 접촉각이 증가하게 된다고 판단된다.

3.4 형태학적 변화 분석

Fig. 11은 SEM을 이용해 서로 다른 네 가지 시편의 표면 형상을 관찰한 결과를 보여준다. 분석 결과 초기 상태 시편의 표면(Fig. 11(a))에서는 돌출부와 깊은 홈, 갈라진 틈, 그리고 도자기 부스러기들이 보였다. 반면 그라인딩까지 진행한 시편

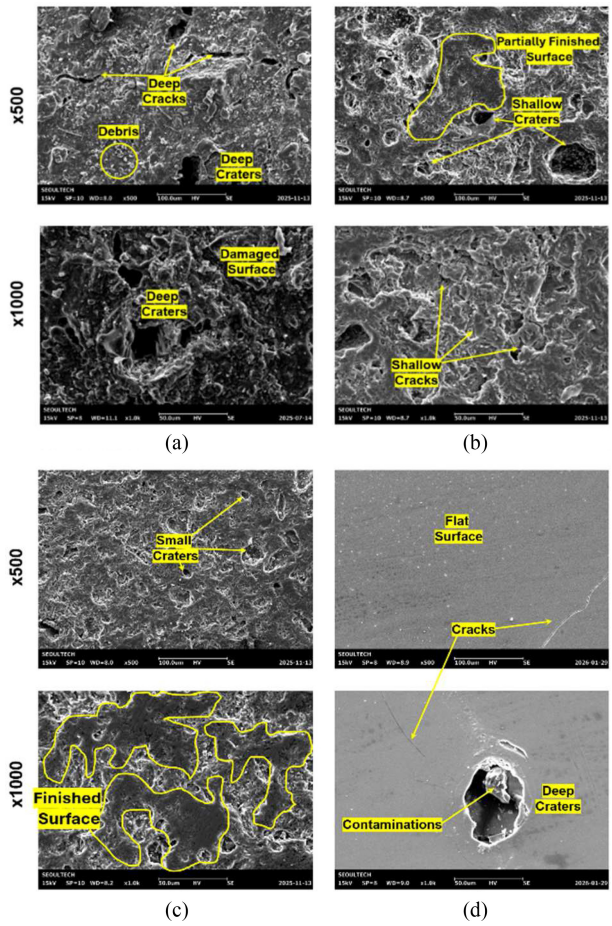


Fig. 11 SEM images of (a) Raw, (b) Grinded, (c) Polished and (d) Glazed specimens.

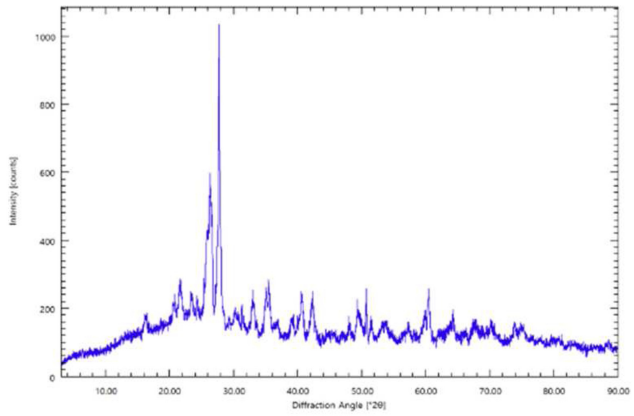
(Fig. 11(b))에서는 초기 상태 시편에서 보였던 큰 돌출부들은 사라지고 가공단계에서 생긴 수십 μm 크기의 홈들을 다수 볼 수 있었다. 폴리싱이 수행된 시편(Fig. 11(c))에서는 편평하게 가공되어 표면 거칠기가 낮아진 것을 확인할 수 있었다. 작은 홈은 여전히 존재하지만 큰 홈들은 대부분 사라진 것을 확인할 수 있었다. 이 작은 홈들은 앞 절에서 언급한 내용과 같이 접촉각을 높이는데 긍정적인 역할을 했을 것이라 추측된다. 유약 처리가 된 시편(Fig. 11(d))은 보통 매우 매끄러운 표면을 가지지만 표면에는 소성 과정에서 수분이 빠지면서 발생한 홈들과 열팽창계수 차이로 인한 균열을 다수 볼 수 있었다. 이러한 균열과 홈은 유약에 의존하는 도자기의 내구성을 감소시킴과 동시에, 발수성이 좋지 않은 유약 표면의 홈에 오염 물질들이 잔류하게 됨으로써 유약 표면의 위생 유지를 어렵게 만들 수 있다고 판단된다.

3.5 화학 및 결정학적 변화 분석

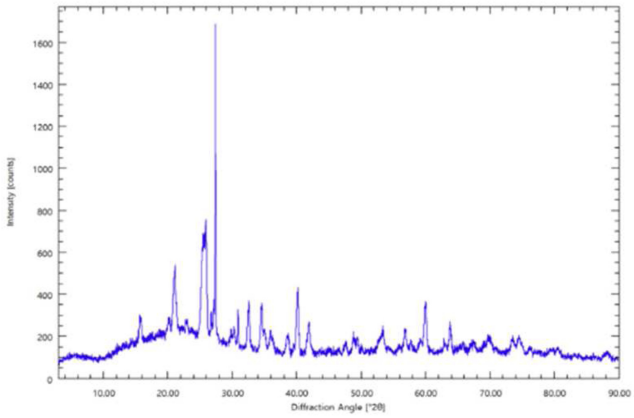
그라인딩과 폴리싱 공정에 의해 시편 표면에 화학적, 결정학적 변화가 있었는지를 살펴보기 위해 EDS와 XRD 분석을 수행하였다. 도자기는 소성 과정 중 가해지는 열에 의해 성분의 구조가 변하거나 심하면 결정질 성분이 비정질로 변하기도 한다. 이는 그라인딩 또는 폴리싱 공정 중 도자기 표면 온도가

Table 3 Chemical composition of specimens

Elements	Raw	Grinded	Polished
C	23.51	28.44	24.38
O	28.66	20.18	24.48
Si	23.63	30.18	28.08
Al	18.39	16.69	16.52
K	1.36	1.54	1.22
Ca	2.55	1.47	3.80
Fe	1.89	1.51	1.52



(a)



(b)

Fig. 12 XRD graph of (a) Raw and (b) Polished specimens

크게 상승하는 경우 마찬가지로 화학적, 결정학적 변화가 나타날 수 있음을 의미한다. 이를 확인하기 위해 EDS를 통해 시편의 구성 원소비를 측정한 결과 Table 3과 같은 결과를 얻었다. 초벌 구이만이 수행된 초기 상태 시편(Raw)과 그라인딩이 수행된 시편(Grinded), 폴리싱이 수행된 시편의 원소비는 약간의 차이가 있으나 유의미한 차이를 보이지는 않는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 약간의 차이는 도자기 표면의 조성 차이가 아닌 측정 깊이와 산화 또는 오염 등의 표면 상태 차이에 따른 결과로 볼 수 있다. 따라서, 그라인딩과 폴리싱에 의해 발행하는 도자기 표면의 유의미한 화학적 변화는 없다고 판단된다.

Fig. 12는 초기 상태 시편(Fig. 12(a))과 폴리싱이 수행된 시편(Fig. 12(b))의 XRD 분석 결과를 보여주는데, 두 개의 그래프 형태가 크게 다르지 않은 것을 확인할 수 있다. 이는 가공 중 발생하는 시편 표면의 온도 상승에 의해 Quartz와 같이 표면을 구성하는 성분의 구조에 큰 변화가 없었다는 것을 의미한다. 참고로 비정질 상의 XRD 그래프는 10°미만의 회절 각도 범위에서 그 값이 작아질수록 세기가 증가하는 경향을 띤다. 하지만 Fig. 12(b)의 그래프에서 볼 수 있듯이 폴리싱 공정을 거친 시편에서는 이러한 경향성이 보이지 않으므로 폴리싱 공정에 의한 결정학적 구조 변화는 발생하지 않았다고 판단된다.

4. 결론

도자기의 표면 처리는 지금까지는 일반적으로 유약에 의한 개선 효과에 의존하여 왔다. 하지만 유약의 사용은 제품의 표면 품질, 에너지적, 환경적인 부분 등에서 여러가지 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구의 목표는 도자기의 유약을 통한 표면 특성 개선 효과를 기계적인 폴리싱 공정으로 대체할 수 있는지 여부를 살펴보는 것이었다. 이를 위해 본 연구에서는 그라인딩 및 폴리싱을 효과적으로 수행할 수 있는 가공 장비를 개발하였으며, 다양한 조건에서 조형토 도자기 시편의 가공을 진행하였다.

초벌 구이 공정만이 수행된 초기 상태 시편, 그라인딩이 수행된 시편, 폴리싱이 수행된 시편, 유약 처리된 시편, 이렇게 네 가지 시편 표면에 대하여 표면 거칠기, 광택도, 접촉각을 측정하고 분석을 수행하였다. 그 결과 유약에 준하는 광택을 만들어 내기에는 한계가 있지만, 그라인딩을 거쳐 폴리싱을 완료한 도자기 시편의 경우 발수 표면에 준하는 접촉각 증가와 부피 감소율의 감소를 확인할 수 있었다. 이러한 접촉각 향상의 원인은 화학적, 결정학적 원인이 아닌 표면 거칠기와 표면 형상의 기계적 변화에 따른 것임을 표면거칠기, SEM, EDS, XRD 분석을 통해 확인하였다.

본 연구는 발수 기능적 측면에서 유약을 기계적 폴리싱으로 대체할 수 있는 가능성을 확인시켜 주었다. 추후 연구에서 가공 조건의 최적화를 통해 폴리싱 된 표면의 거칠기를 감소시키고, 그 결과로서 접촉각을 소수성 영역인 90° 이상으로 증가시킨다면 발수성을 크게 강화할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 도자기 제조 공정에서 다량의 이산화 탄소 발생, 높은 인체 독성 잠재력, 유해 폐기물의 원인인 유약 공정을 생략함으로써 환경적인 장점에 대한 가능성이 높다고 할 수 있다. 그 결과로 도자기의 심미적, 기능적 다양성을 높이고 동시에 지속 가능한 도자기 제조 및 가공 공정 개발에 기여할 수 있으리라 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 일반과제 연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Carbajal, L., Rubio-Marcos, F., Bengochea, M., Fernandez, J., (2007), Properties related phase evolution in porcelain ceramics, Journal of the European Ceramic Society, 27(13-15), 4065-4069.
2. Francis, L. F., (2024), Materials processing: A unified approach to processing of metals, ceramics, and polymers, Elsevier Science.
3. Zawrah, M. F., Taha, M. A., Youness, R. A., (2023), Advanced ceramics: Stages of development, in: Advanced Ceramics, Springer, Cham.
4. Luo, K., Ye, W., Li, Z., (2025), Controlling shrinkage and enhancing drying kinetics in ceramic clay bodies through chamotte particle size and content optimization, Journal of Ceramic Processing Research, 26(6), 1081.
5. Sudha, P., Sangeetha, K., Jisha Kumari, A., Vanisri, N., Rani, K., (2018), Corrosion of ceramic materials, in: Fundamental biomaterials: Ceramics, Woodhead Publishing.
6. Martínez-Martínez, S., Pérez-Villarejo, L., Garzón, E., Sánchez-Soto, P. J., (2023), Influence of firing temperature on the ceramic properties of illite-chlorite-calcitic clays, Ceramics International, 49(14), 24541-24557.
7. Watanabe, T., (2009), Wettability of ceramic surfaces-A wide range control of surface wettability from super hydrophilicity to super hydrophobicity, from static wettability to dynamic wettability, Journal of the Ceramic Society of Japan, 117(1372), 1285-1292.
8. Lu, Y., Dal Piva, A. O., Nedeljkovic, I., Tribst, J. M., Feilzer, A., Kleverlaan, C., (2023), Effect of glazing technique and firing on surface roughness and flexural strength of an advanced lithium disilicate, Clinical Oral Investigations, 27(7), 3917-3926.
9. Dal Piva, A. d. O., Contreras, L., Ribeiro, F., Anami, L., Camargo, S., Jorge, A., Bottino, M., (2018), Monolithic ceramics: effect of finishing techniques on surface properties, bacterial adhesion and cell viability, Operative Dentistry, 43(3), 315-325.
10. Mária, K., Alexandra, K., Jaroslav, K., (2017), Characterization of the interaction between glazes and ceramic bodies, Journal Ceramics-Silikáty, 61(3), 267-275.
11. Fabris, R., Masi, G., Mazzini, D., Sanseverino, L., Bignozzi, M. C., (2024), Tribomechanical Properties of Glazes for Ceramic Tiles: A Novel Protocol for Their Characterization, Materials, 18(1), 60.
12. Fralick, M., Thomspson, A., Mourad, O., (2016), Lead toxicity from glazed ceramic cookware, Canadian Medical Association Journal, 188(17-18), E521-E524.
13. Huseien, G. F., Joudah, Z. H., Baghban, M. H., A. Khalid, N. H., Faridmehr, I., Dong, K., Li, Y., Gu, X., (2025), Sustainability of recycling waste ceramic tiles in the green concrete industry: A comprehensive review, Buildings, 15(14), 2406.
14. Atılgan Türkmen, B., Budak Duhbacı, T., Karahan Özbilen, Ş., (2021), Environmental impact assessment of ceramic tile manufacturing: a case study in Turkey, Clean Technologies and Environmental Policy, 23(4), 1295-1310.
15. Ibáñez-Forés, V., Bovea, M., Simó, A., (2011), Life cycle assessment of ceramic tiles. Environmental and statistical analysis, The International Journal of Life Cycle Assessment, 16(9), 916-928.
16. Brito, M. G., Amaral, F. L., Turssi, C. P., Hofling, R. T., França, F. M., (2023), Effect of chemical or mechanical finishing/ polishing and immersion in staining solutions on the roughness, microhardness, and color stability of CAD-CAM monolithic ceramics, Acta Odontológica Latinoamericana, 36(2), 86-95.
17. Cebi Tuysuz, C., Demir, N., Yuzbasioglu, E., (2025), Does repolishing affect the gloss and roughness of lithium disilicate and monolithic zirconia ceramics?, Applied Sciences, 15(9), 4622.
18. Jamali, M., Ezoji, F., Esmaeili, B., Khafri, S., (2024), Comparative effects of glazing versus polishing on mechanical, optical, and surface properties of zirconia ceramics with different translucencies, Clinical and Experimental Dental Research, 10(3), e884.
19. Stuart, B., Thomas, P., Barrett, M., Head, K., (2019), Modelling clay materials used in artworks: An infrared spectroscopic investigation, Heritage Science, 7(1), 86.
20. Marinescu, I. D., Doi, T. K., Uhlmann, E.,, (2015), Handbook of ceramics grinding and polishing, William Andrew.
21. Yonehara, M., Matsui, T., Kihara, K., Isono, H., Kijima, A., Sugibayashi, T., (2004), Experimental relationships between surface roughness, glossiness and color of chromatic colored metals, Materials Transactions, 45(4), 1027-1032.
22. Aldosari, L. I., Alshadidi, A. A., Porwal, A., Al Ahmari, N. M., Al Moaleem, M. M., Suhluli, A. M., Shariff, M., Shami, A. O., (2021), Surface roughness and color measurements of glazed or polished hybrid, feldspathic, and zirconia cad/cam restorative materials after hot and cold coffee immersion, BMC Oral Health, 21(1), 422.



Woong Hur
M.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interest is precision engineering.
E-mail: woong4573@seoultech.ac.kr



Muhammad Abu Hurairah
M.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interest is precision engineering.
E-mail: hurairah7438@gmail.com



Jimin Park
M.A. candidate in the Department of Ceramics, Seoul National University of Science and Technology. Her research interest is ceramic arts and manufacturing technology.
E-mail: jii_mn@naver.com



Daeyong Kim
Professor in the Department of Ceramics, Seoul National University of Science and Technology. His research interest is fusion of ceramic arts and manufacturing technology.
E-mail: dyk@seoultech.ac.kr



Jihong Hwang
Professor in the Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interest is machining, grinding and polishing processes.
E-mail: hwangjh@seoultech.ac.kr

한국정밀공학회지 제 43 권 제 10 호 pp. 1037-1044 October 2026 / 1037
J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 43, No. 10, pp. 1037-1044 http://doi.org/10.7736/JKSPE.026.00060
ISSN 1225-9071 (Print) / 2287-8769 (Online)

음향 공진가진 및 압전패치를 활용한 청동 주물의 감쇠비 정밀 측정

Precise Damping Ratio Measurement of Bronze Castings via Acoustic Resonance Excitation and Piezoelectric Patches

원천수[1], 오충석[2,#]
Chun-Soo Won[1] and Chung-Seog Oh[2,#]

1 성종사 기업부설연구소 (Corporate Research Institute, Sungjongsa)
2 국립금오공과대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology)
Corresponding Author / E-mail: ocs@kumoh.ac.kr, TEL: +82-54-478-7323
ORCID: 0000-0002-0340-345X

KEYWORDS: Acoustic resonance excitation (음향 공진가진), Bronze cast (청동 주물), Damping ratio (감쇠비), Korean bell (한국종), Piezoelectric patch (압전패치)

The damping ratio is a crucial modal property that influences the sound duration and acoustic quality of traditional Korean bells. This study presents a high-precision measurement methodology utilizing non-contact acoustic resonance excitation and lightweight piezoelectric patches, specifically designed to address the limitations of conventional contact-based methods. Traditional accelerometers introduce significant errors due to mass loading and cable stiffness; in contrast, the proposed method employs a lightweight piezoelectric patch combined with selective acoustic resonance to minimize parasitic damping. Specimens with varying tin and silicon content were fabricated and tested. Verification results indicate that the coefficient of variation for the measured damping ratio decreased from 24% (observed with the conventional method) to less than 10%, demonstrating improved repeatability and precision. Notably, the damping ratio reaches a minimum at approximately 13 wt% tin, providing scientific validation for the potential optimized chemical composition of the Divine Bell of King Seongdeok. Furthermore, the damping ratio was observed to decrease as the resonance frequency increased from 110 to 245 Hz. This research establishes a technical foundation for accurate acoustic simulation and the modern restoration of traditional metallic musical instruments.

Manuscript received: June 15, 2026 / Revised: August 20, 2026 / Accepted: September 4, 2026

NOMENCLATURE

T	=	Period [s]
δ	=	Logarithmic Decrement
f_n	=	Natural Frequency [Hz]
ζ	=	Damping Ratio

1. 서론

한국의 전통 청동 종은 독자적인 조형미와 음향 특성으로 인해 국제적으로도 한국종(Korean Bell)이라는 고유 명칭으로 분류될 만큼 높은 학술적·문화적 가치를 지닌다. 특히 통일신라 시대에 조성된 대형 종은 구조적 비례, 합금 조성, 타격 위치 등이 정교하게 설계되어 있으며, 맥놀이(Beat Phenomenon)에 기반한 복합 배음 구조(Complex Harmonic Structure)와 장시간 지속되는 잔향(Reverberation)으로 높은 음향적 가치를 인정받아 왔다. 이러한 특성은 적절한 종의 크기 선택과 더불어, 낮은 감쇠 특성에서 기인하는 장주기 진동과 배음 간 미세한 주파수 차이에 의해 발생하는 맥놀이 효과로 설명된다[1,2].

Rossing은 종의 음향 특성을 결정하는 주요 인자로 고유주파수(Natural Frequency), 모드 형상(Mode Shape) 및 감쇠(Damping) 특성을 제시하였다[2]. Park 등은 실제 종의 감쇠 특성이 맥놀이 지속시간과 음향 품질에 큰 영향을 미친다고 보고하였다[3]. 이처럼 한국 종소리의 성능을 평가하는 핵심 지표 중 하나는 소리의 지속시간(Sound Duration)이며, 이는 타격 시 인가된 에너지가

Copyright © The Korean Society for Precision Engineering
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

종 내부 재료에서 얼마나 느리게 소산되는지를 나타내는 감쇠비(Damping Ratio)와 밀접한 관련이 있다. 감쇠비가 낮을수록 진동으로 인한 에너지 손실이 적어 공명과 잔향이 길게 유지되며, 이는 한국종의 독보적 음향 특성을 규정하는 중요한 물리적 요인이다. 따라서 감쇠 특성의 정량적 분석은 한국 전통 종의 음향적 우수성을 규명하고 새로운 종을 설계하는 데 필수적이다.

그러나 지금까지의 연구는 주로 고유주파수와 음색 변화에 집중되어 있으며[4], 합금 조성이 감쇠 특성에 미치는 영향에 대한 정량적 연구는 상대적으로 부족하다. 따라서 합금 조성과 감쇠비의 상관관계를 규명하는 것은 전통 종의 재료 설계 원리를 이해하는 데 중요한 의미를 가진다.

최근에는 유한요소해석(Finite Element Analysis)을 활용하여 대형 종의 고유주파수, 모드 형상 및 음향 특성을 예측하고 이를 실제 제작 과정에 반영하는 디지털 설계 기술이 발전하고 있다[5]. 정밀한 종소리 시뮬레이션에 기반한 현대적 종 제작을 위해서는 고유주파수와 맥놀이 주파수뿐 아니라 정확한 감쇠비 데이터 확보가 필수적이다. 이를 위해 소형 시편을 대상으로 설계 인자 변화에 따른 감쇠비를 정밀 측정해 데이터베이스를 구축하고, 이를 FEA 수행 시 감쇠 특성 입력값으로 적용해 대형 종의 음향 특성을 예측한다. 최종적으로 시편의 감쇠비와 실제 대형 종의 음향 특성을 비교함으로써 시편과 실제 종 사이의 상관성을 규명하고, 이를 통해 대형 종 설계의 신뢰성과 예측 정확도를 확보할 수 있다.

금속 시편의 감쇠비는 일반적으로 충격망치(Impact Hammer)나 쉐이커(Electromagnetic Shaker)로 가진한 뒤 가속도계(Accelerometer) 또는 레이저 센서를 이용해 진동 응답을 측정하여 평가한다[6,7]. 그러나 충격가진법은 가진 조건과 시편 고정 상태에 따른 오차가 발생할 수 있고, 쉐이커를 이용한 공진가진법은 안정적이지만 고가의 장비가 필요하다는 한계가 있다. 또한 최소 수 g 수준의 질량을 갖는 가속도계를 경량 시편에 부착할 경우 시편의 동특성이 변화하는 질량 부하 효과(Mass-loading Effect)와 케이블 강성(Cable Stiffness)으로 인해 시편의 동특성을 변화시켜 부가감쇠가 더해져 실제보다 큰 감쇠비를 유발할 수 있으며[8], 비접촉식 레이저 측정은 이러한 문제를 줄일 수 있으나 비용 부담이 크다.

특히 충격망치를 이용한 접촉식 가진 방식은 타격 위치, 타격 방향, 충격 강도, 시편의 흔들림 및 실험자 숙련도에 따라 측정 결과의 반복성(Repeatability)이 달라질 수 있으므로 일관된 데이터를 확보하기 어렵다. 이러한 요인으로 충격 지속시간(Impact Duration)이 변하면 가진되는 주파수 성분 역시 달라지는 한계가 있다. 특히 특정 고유주파수에서의 감쇠 특성을 정밀하게 측정하고자 할 경우 원하지 않는 다수의 진동 모드가 동시에 가진되어 결과 해석이 복잡해지는 문제점도 존재한다[9]. 이러한 제약으로 인해 외부 영향이 적고, 경량 시편에서도 반복성있게 감쇠비를 측정할 수 있는 실용적 계측 기법이 요구된다.

이러한 기존 측정 기술의 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 음향 공진가진(Acoustic Resonance Excitation)과 경량 압전패치(Lightweight Piezoelectric Patch)를 결합한 새로운 감쇠비 정밀 측정 기법을 제안한다. 제안된 방법은 스피커를 이용하여 시편의 특정 고유주파수에서 선택적으로 공진을 유도함으로써 기존 충격시험에서 발생하는 가진 조건의 불확실성을 최소화할 수 있다. 또한 질량이 약 0.3 g 수준인 압전패치를 적용하여 질량 부하 효과를 줄이고 0.15 mm 직경의 연결선을 채용해 부가감쇠 요인을 감소시킴으로써 저감쇠 청동 시편의 모달 감쇠비를 우수한 반복성과 정밀도(Precision)로 측정할 수 있는 계측 기법을 개발하였다.

본 연구에서는 먼저 제안된 측정 시스템의 구성과 측정 원리를 설명하고, 기존 충격가진시험과 비교하여 측정 반복성과 정밀도를 평가한다. 이어서 제안된 정밀 측정 시스템의 실무적 활용성을 검증하기 위해, 주석(Sn) 함량이 상이한 청동 시편의 모달 감쇠비를 측정한다. 특히 기존 충격망치법의 높은 측정 산포로 인해 식별이 불가능했던 합금 조성별 미세 감쇠 거동을 제안된 방법을 통해 측정한다. 아울러 대형 종의 음향 시뮬레이션에 필수적인 기초 데이터 확보를 위해 주파수 대역 변화에 따른 감쇠 특성의 의존성도 함께 측정한다.

2. 대수감쇠율법

외부에서 가진된 후 자유감쇠진동(Free Damped Vibration)을 하는 재료는 진폭이 Fig. 1과 같이 시간에 따라 지수적으로 감소하며, 이때 진폭은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다. 또한 한 주기(T) 간격의 진폭비인 식(2)에 자연대수를 취한 값을 대수감쇠율(Logarithmic Decrement, δ)이라 하며, 이는 식(3)과 같이 감쇠비(ζ)만의 함수가 된다. 따라서 실험적으로 대수감쇠율을 측정하면 식(4)를 이용하여 모달 감쇠 특성값인 모달 감쇠비를 산출할 수 있다[10].

$$x(t) = X_0 e^{-\zeta\omega_n t}\sin(\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t + \phi_0) \tag{1}$$

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{x(t_1)}{x(t_1+T)} = \frac{X_0 e^{-\zeta\omega_n t_1}}{X_0 e^{-\zeta\omega_n (t_1+T)}} = e^{\zeta\omega_n T} \tag{2}$$

$$\delta = \ln\frac{x_1}{x_2} = \zeta\omega_n T = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \tag{3}$$

$$\zeta = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2+\delta^2}} \tag{4}$$

3. 실험 방법

3.1 시편 제작

시편 제작용 모재는 한국 전통 종 제작 방법인 주조 공정을 통해 제작되었다. 순수 구리(Cu)를 모재로 하여 실험 목적에 따라

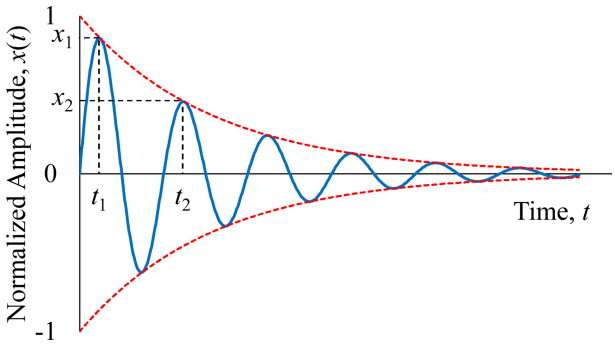


Fig. 1 Schematic diagram of decaying vibration signal

Table 1 Specimen specifications: dimensions (length × width × thickness), alloy composition, tests (I: Impact test, R: Resonance test), and usage

No	Dimension [mm]	Alloy [wt%]	Test	Usage
1	180 × 14 × 3.1	Si2, 4, 6	I	Sn → Si
2	180 × 14 × 3.6	Sn16	I+R	Comparison (I *vs*. R)
3	250 × 10 × 2.0	Sn 11–14	R	Sn composition (f_{n1})
4	166 × 10 × 2.0		R	Frequency (f_{n2})
5	83 × 10 × 2.0		R	Frequency (f_{n3})

주석(Sn, 11–16 wt%) 또는 규소(Si, 2–6 wt%)를 정밀하게 계량하여 첨가한 후 가스 토치를 이용해 용융시켰다. 용탕 온도는 주조 시 유동성을 확보하고 합금의 균질성을 높이기 위해 1,080°C로 일정하게 유지하며 미리 준비된 주형에 주입하였다.

주조된 모재는 밀링 등 정밀 기계가공을 거쳐 사각 단면 막대 형태로 제작하였다. 시편의 공칭 치수(길이 × 폭 × 두께)는 180 × 14 × 3.6 mm, 180 × 14 × 3.1 mm 및 250 × 10 × 2 mm이다. 시편 끝단에는 유연한 실(Hanging Thread)을 이용해 시편을 매달아 양단 자유(Free-free) 경계조건을 구현하기 위해 지름 2 mm의 구멍을 대칭으로 가공하였다. 실험의 반복성 및 데이터의 신뢰성을 확보하기 위해 동일 조성당 3개의 시편을 제작하였으며, 각 시편당 5회씩 반복 측정을 실시하였다.

마지막으로 감쇠비의 주파수 의존성을 평가하기 위해, 초기 길이 250 mm 시편을 측정한 후, 이를 각각 166과 83 mm로 추가 절단하여 1차 고유주파수를 높여가며 감쇠비의 변화 추이를 측정하였다. 시편 종류와 사용 목적을 Table 1에 정리하였다.

3.2 충격망치를 이용한 모달 시험

시편 위쪽 끝에서 25 mm 떨어진 지점에 순간접착제(454, Loctite)를 사용해 ±50 *g* 용량의 단축 압전 가속도계(333B30, PCB Piezotronics)를 부착한 뒤, 실을 이용해 Fig. 2와 같이 매단다. 가속도계를 전하증폭기(Charge Amplifier, 5134, Kistler)에 연결한 뒤, 아래쪽 끝에서 25 mm 떨어진 지점을 여러 가지 충격망치로 타격하였다. 타격 순간부터 30 kHz 샘플링 주파수로 2초간 데이터를 수집하였다.

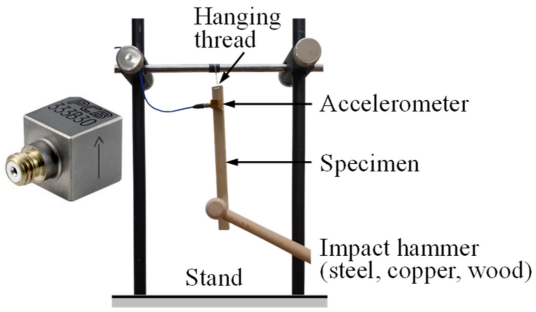


Fig. 2 Standard modal testing setup

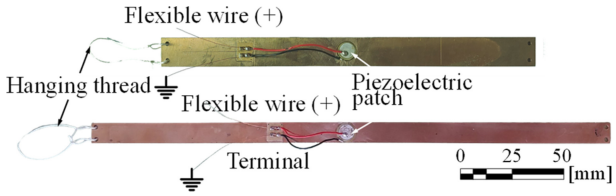


Fig. 3 Two specimen's configuration and piezoelectric patch

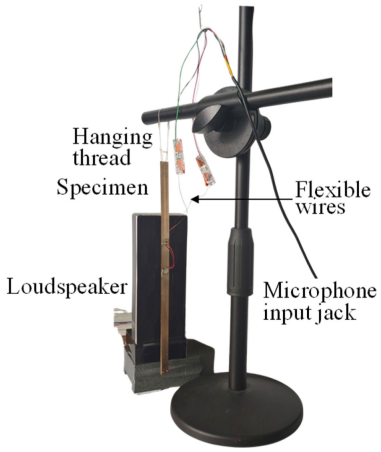


Fig. 4 Acoustic resonance excitation testing setup

3.3 압전패치와 음향 공진가진을 이용한 모달 시험

시편의 진동을 정밀하게 측정하기 위해 Fig. 3과 같이 시편 중앙에 지름 10 mm인 압전패치를 부착하였다. 진동 시 연결 케이블에 의한 에너지 손실을 최소화하기 위해 센서를 먼저 중간 터미널에 부착한 뒤, 지름 0.15 mm인 유연한 구리 선을 이용해 스탠드에 고정해 놓은 음향 측정용 케이블에 연결하였다.

시편은 Fig. 4와 같이 스탠드에 매달아 자유진동 조건을 확보하였으며, 압전패치는 컴퓨터의 마이크 입력단자에 직접 연결하였다. 이후 충격망치로 시편을 타격하여 고유주파수 산정을 위한 진동 신호를 획득하였다. 수집된 신호는 FFT 분석을 통해 1차 고유주파수를 식별하였으며, 모든 압전패치 신호는 16-bit 해상도와 48 kHz 샘플링 속도로 기록하였다. 신호 모니터링과 데이터 수집에는 오픈 소스 오디오 편집기인 Audacity 소프트웨어[11]를 사용하였다.

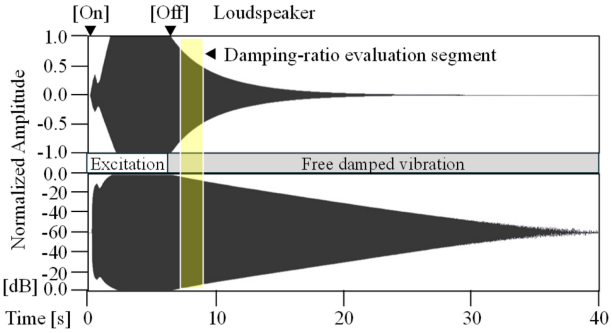


Fig. 5 Data extraction example for damping ratio evaluation (Top: Linear scale, Bottom: dB scale)

공진 가진 실험에서는 막대형 일반 음향 스피커(Loudspeaker, 5 W)를 Fig. 4와 같이 시편에 최대한 근접하도록 배치하였다. 압전패치 신호를 실시간으로 모니터링하면서 시편의 1차 고유주파수에 해당하는 정현파(Sine Wave)를 스피커로 출력하여 시편을 공진 상태로 유도하였다. 공진이 발생해 압전패치 출력이 포화 수준에 도달하면 스피커 출력을 중단하고, 이후 자연 감쇠되는 신호를 연속적으로 기록하였다.

3.4 진동 신호 처리

모달 시험을 통해 얻은 진동 진폭 신호에 섞여 있는 불필요한 주파수 성분이나 잡음을 제거하기 위해 가진 고유주파수(f_n)를 기준으로 (f_n ± 15) Hz의 디지털 대역 필터링(Digital Band Pass Filtering, BPF)을 수행해 신호대잡음비(Signal to Noise Ratio, SNR)를 높였다. 필터링한 진폭 데이터를 로그 스케일로 관찰하면서 선형적인 진폭 감소가 관찰되는 부분에서 100–200 사이클의 진폭 데이터를 추출하였다. 이 과정의 한 예를 Fig. 5에 나타내었다. 공진 가진의 경우 스피커를 켜는 순간 수초 이내에 공진이 발생해 신호가 포화됨을 알 수 있다. 스피커를 끄는 순간부터 자유 감쇠 진동하며, 이 부분의 초기 진동 영역에서 데이터를 추출해 감쇠비 계산에 사용하였다.

선택된 신호에서 각 싸이클당 정점(Peaks)만을 추출한 뒤 자연대수를 취해 나온 데이터를 가지고 선형 회귀분석(Linear Regression Analysis)을 수행해 평균 기울기를 구해 대수 감쇠율을 산정하였다. 회귀분석 결과 결정계수(Coefficient of Determination, r^2)가 0.9998 미만인 경우는 다른 구간 데이터를 사용해 재산정하였다.

4. 실험 결과 및 토론

4.1 가속도계와 충격망치를 이용한 감쇠비 측정 결과

현재 국내에서 대형 종 제작에 사용되는 주요 구리 합금은 주석 청동이며, 주석 함량은 13–16% 범위에 속한다. 그러나 주석 청동은 높은 밀도로 인해 무겁고 재료 단가 또한 높아, 최근에는 주석을 규소로 대체한 합금의 사용이 시도되고 있다. 이에 두

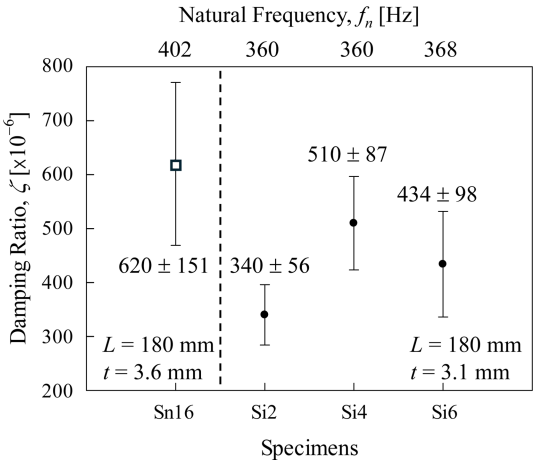


Fig. 6 Damping ratio comparison of Si (Spc. 1) and Sn (Spc. 2) bronzes (Impact hammer test)

재료의 감쇠 특성을 비교하기 위해 기존 주석 청동(Sn 16%)과 규소 청동(Si 2, 4, 6%)의 감쇠비를 측정하였다. 각 시편에 대해 총 5회의 반복 실험을 통해 얻어진 감쇠비의 평균값을 분석에 사용하였다.

두 재료의 모달 감쇠비 평균값과 표준편차를 Fig. 6에 제시하였다. 규소 청동은 전반적으로 주석 청동보다 감쇠비가 낮은 경향을 보인다. 다만 Si 2% 합금은 기계적 강도가 낮은 것으로 알려져 있어, 대형 종 제작용 규소 청동으로는 Si 6% 조성이 보다 적합할 것으로 판단된다. 또한 규소 청동 시편은 밀도와 두께 차이로 인해 1차 고유주파수가 주석 청동보다 약 10% 낮았으며, 이러한 주파수 차이가 감쇠비 감소에 일부 영향을 미쳤을 가능성이 있다.

충격망치를 이용한 모달 시험을 통해 Fig. 6과 같이 다양한 조건에서 감쇠비를 비교할 수 있었다. 그러나 그래프에서 확인되듯이 표준편차를 평균값으로 나눈 변동계수(Coefficient of Variation)가 16–24%에 달하여 산포가 매우 큰 것으로 나타났다. 이러한 큰 산포는 다음과 같은 요인들에서 기인한 것으로 판단된다.

첫째, 가속도계를 전하 증폭기에 연결하는 케이블의 강성이 높아 케이블 자체가 진동계에 영향을 미쳤을 가능성이 크다. 실제로 케이블의 연결 및 설치 방법에 따라 진동 응답이 크게 달라졌다.

둘째, 시편의 한쪽 끝만을 매단 상태에서 충격망치로 타격하였기 때문에 타격 순간 시편이 크게 흔들렸고, 이로 인해 입력 에너지의 일부가 시편의 위치에너지 변화나 케이블 변형 에너지로 소모되었을 가능성이 있다.

셋째, 동일한 실험자가 반복 실험을 수행하더라도 타격 강도와 망치-시편 간 접촉 시간을 일정하게 유지하기 어려웠으며, 이로 인해 측정된 감쇠비가 실험마다 달라졌다.

따라서 감쇠비가 매우 낮은 금속 재료의 모달 감쇠비를 보다 정밀하게 측정하기 위한 개선이 필요함을 확인할 수 있었다. 특히 충격망치를 이용한 접촉 가진 방식과 높은 강성을 가진 연결 케이블로 인한 문제를 해결하는 것이 중요함을 알 수 있었다.

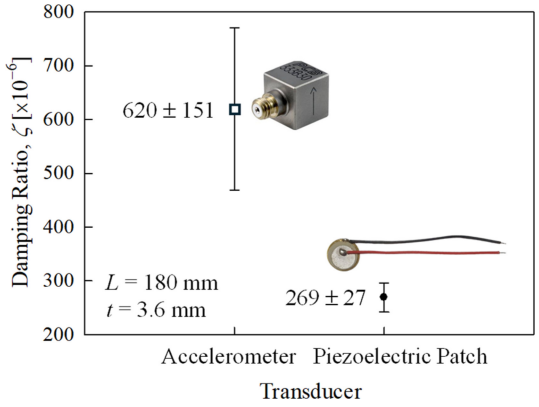


Fig. 7 Damping ratio comparison for two measurement methods of impact hammer test and acoustic resonance test (Spc. 2)

4.2 충격망치법과 음향 공진가진법 비교

기존 충격망치법의 한계성을 극복하기 위해 비접촉식 음향 공진가진법을 사용해 감쇠비를 측정하였다. 두 방법에 의해 산출된 감쇠비를 비교하기 위해 Fig. 6에 나타낸 Sn 16% 시편에 압전패치를 부착해 감쇠비를 측정하였다. 압전패치를 시편 중앙에 부착한 이유는 1차 고유주파수인 굽힘 모드를 검출하기 위함이다.

두 측정법으로 산출된 감쇠비의 비교 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 두 방법의 평균값이 서로 다른 점을 고려하여 정밀도를 비교하기 위해 변동계수를 산출한 결과, 음향 공진가진법은 약 10%로 나타나 기존 충격망치법의 24%에 비해 현저히 낮음을 확인하였다. 이는 제안된 기법이 저감쇠 재료의 감쇠비 측정 산포를 줄여 측정의 반복성과 정밀도를 향상시켰음을 입증한다.

이러한 개선은 가진 방식에 따른 물리적 응답 특성의 차이에서 기인한다. 충격망치법은 광대역 가진 특성상 목표 모드 외에도 강체 진동이나 고차 진동 모드를 동시에 유발하여 입력 에너지를 여러 경로로 분산시키는 한계가 있다. 반면, 음향 공진가진법은 특정 고유주파수 성분만을 지배적으로 유도함으로써 모드 간 간섭(Modal Coupling)을 최소화하고, 해당 모드의 순수한 감쇠 특성만을 정밀하게 고립시켜 측정할 수 있었기 때문으로 판단된다.

시편 중앙에 부착한 압전패치는 지름 10 mm, 두께 0.1 mm의 황동판 위에 압전 재료를 적층한 구조이다. 이러한 패치를 시편에 부착할 경우 시편의 변형 거동에 영향을 줄 가능성이 있다. 실제로 압전패치를 부착한 Sn 16% 시편의 1차 고유주파수는 부착 전 402에서 410 Hz로 소폭 상승하였다. 압전패치 부착에 의한 고유주파수 변화가 2% 내외로 매우 작다는 사실은 센서가 시편의 동특성을 크게 변화시키지 않았음을 의미한다. 따라서 기존 충격가진시험 대비 감쇠비가 43% 수준으로 대폭 낮게 측정된 것은 센서 부착에 의한 영향이 아니라, 가속도계 케이블 등에서 발생하던 외부 에너지 소산 경로가 차단되었기 때문으로 판단된다.

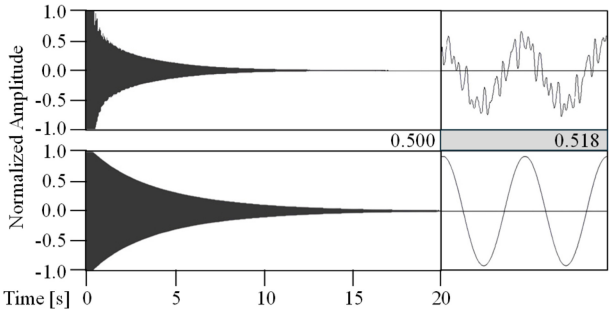


Fig. 8 Comparison of piezoelectric patch outputs: impact hammer excitation (top) and resonance excitation (bottom)

4.3 압전패치를 이용한 저주파수 감쇠비 측정

10 tonf가 넘는 대형 종의 경우 1차 고유주파수가 대체로 100 Hz 내외이므로, 시편의 1차 고유주파수를 이 범위에 맞추는 동시에 표준 시험 규격[12]을 충족하기 위해 본 실험에서는 길이 250 mm의 시편을 사용하였다. 감쇠비 측정에 영향을 미치는 인자를 확인하기 위해, 시편, 경계조건, 압전패치 부착 및 연결 등 모든 조건을 동일하게 유지한 상태에서 충격망치 가진과 공진가진에 대한 압전패치 출력 신호를 Fig. 8에 나타내었다.

그래프에서 확인되듯이, 충격망치 가진 시 진폭이 더 빠르게 감소하며, 신호 내에 다양한 주파수 성분이 포함되어 있음을 알 수 있다. 이를 보다 명확히 관찰하기 위해 초기 신호 중 2주기에 해당하는 0.500–0.518 s 구간을 확대하여 그림의 우측에 나타내었다. 확대된 그래프에서 충격망치 가진 신호는 고유주파수 이외의 성분이 다수 포함되어 있어, SNR이 낮음을 확인할 수 있다. SNR이 낮을 경우 BPF를 적용하는 과정에서 신호가 왜곡될 확률이 높고, 이로 인해 감쇠비 계산이 부정확한 경우가 발생한다.

Fig. 8에 제시한 두 가지 진동 신호에 대해 스펙트럼 분석을 수행한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 충격가진의 경우 시편의 1차 고유주파수인 112 Hz 이외에도 다양한 주파수 성분이 혼재되어 있는 반면, 공진 가진에서는 1차 고유주파수 성분만이 지배적으로 나타났다. 이는 충격가진 시 입력 에너지가 여러 주파수로 분산되어 진동하고, 그 결과 진폭이 빠르게 감소함을 시사한다. 충격가진 신호는 다양한 주파수 성분이 혼재되어 있어 BPF 과정에서 신호 왜곡이 발생할 가능성이 높으며, 이는 감쇠비 산출의 불확실성을 가중시킨다. 따라서 높은 정밀도가 요구되는 저감쇠 금속의 감쇠비 평가에 있어 기존의 충격가진 방식은 반복성 확보 측면에서 제약이 따르는 것으로 판단된다.

4.4 압전패치를 이용한 주석 청동의 감쇠비 측정

현재까지 주석 함량에 따른 감쇠비 변화에 대한 정량적 보고는 거의 이루어진 바 없다. 이에 본 연구에서는 감쇠비 관점에서 최적의 주석 함량을 탐색하기 위해, 개발한 공진가진법을 적용하여 주석 함량 변화(11–14%)에 따른 감쇠비를 평가하였다.

주석 함량이 서로 다른 네 종류의 합금으로 제작한 길이 250 mm 시편(Spc. 3)을 대상으로, 각 조건당 3개 시편, 각 시편당

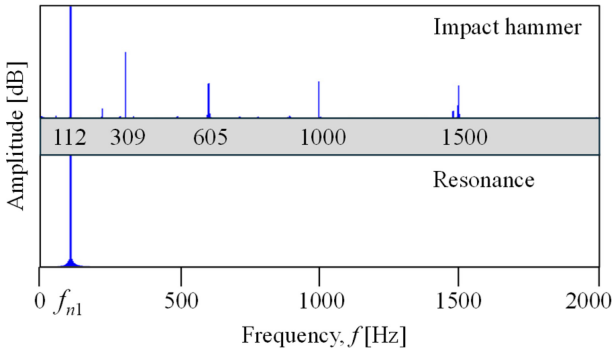


Fig. 9 Comparison of piezoelectric patch outputs' frequency spectrum: impact hammer excitation (upper) and resonance excitation (lower)

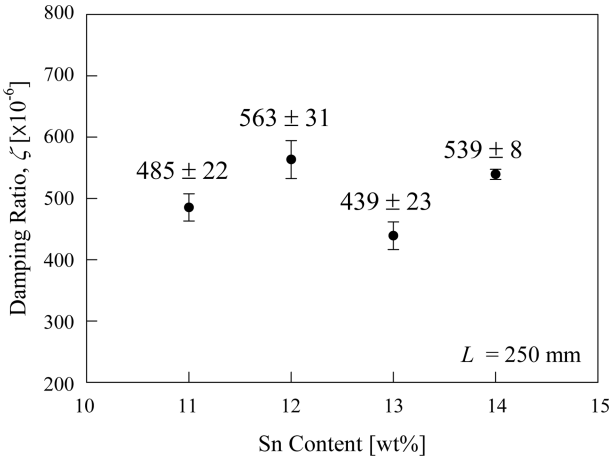


Fig. 10 Damping ratio comparison of tin bronzes (acoustic resonance test) (Spc. 3)

5회 반복 측정을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 10에 정리하였다. 그래프에서 확인되듯이 감쇠비의 변동계수는 2–6% 수준으로, Fig. 6에 제시한 충격망치법에 비해 산포가 현저히 작은 것으로 나타났다. 이는 공진가진법이 저감쇠 금속의 감쇠비 측정에서 더 높은 반복성과 정밀도를 제공함을 의미한다.

주석 함량 변화에 따른 감쇠비 측정 결과, Sn 13 wt%에서 감쇠비가 최솟값을 보이는 비단조적 거동이 관찰되었다. 일반적으로는 주석 농도가 증가하면 공석 조직(α+δ) 분율이 상승하여 감쇠비가 감소하는 경향을 보인다[13]. 본 연구에서는 조성별 미세조직이나 상분율에 대한 직접적인 분석을 수행하지 않았으나, 본 실험에서 나타난 이러한 비단조적 거동은 Cu-Sn 상태도에서 13.5 wt% Sn이 하이포포석(hypoperitectic) 영역의 시작점이자 α 고용체가 주석으로 포화되는 야금학적 전이 지점이라는 사실[14]과 관련이 있을 것으로 추정된다. 또한 Sn 14 wt%에서 감쇠비가 소폭 증가한 것은 주조 과정에서 불가피하게 형성되는 미세기공(Porosity) 및 불균질성이 추가적인 감쇠 요인으로 작용한 결과로 보인다. 본 실험을 통해 도출된 Sn 13 wt% 조건은 실제 성덕대왕신종의 합금 조성 분석 결과[15]와 유사한데, 이는 당시 장인들이 재료의 취성을 억제하면서 내부 마찰을 최소화하여 잔향을 극대화할 수 있는 최적 조성을 경험적으로 확보해 적용했음을 과학적으로 뒷받침한다.

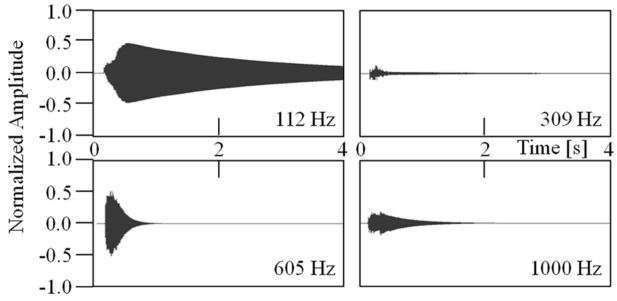


Fig. 11 Band-pass filtered vibration signals at different modes extracted from the upper graph of Fig. 8

4.5 주파수 변화에 따른 감쇠비 변화

대형 전통 종의 음향 특성에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 1차 고유주파수이지만, 종소리를 정밀하게 예측하거나 시뮬레이션하기 위해서는 주파수에 따른 감쇠비의 변화 특성이 필수적이다. 이러한 경향성을 파악하기 위해 우선 시편을 충격망치로 가진하여 Fig. 8 상단에 나타낸 바와 같이 다양한 주파수 성분을 확보하였다. 이후 각 주파수 성분을 중심으로 BPF를 적용하여 해당 모드의 진동 신호를 추출하고, 그중 초기 4 s 구간을 Fig. 11에 제시하였다. 그래프의 진폭은 Fig. 8의 원 신호에서 최대값을 1.0으로 정규화한 값이다.

그러나 Fig. 11에서 확인되듯이, 시편의 1차 고유주파수(112 Hz)를 제외한 고차 모드(309, 605, 1000 Hz)의 진폭은 매우 작고, 감쇠 또한 일정한 지수적 감소 형태를 보이지 않아, 감쇠비 계산에 필요한 신뢰도 높은 데이터를 확보할 수 없었다. 이는 1차 진동 모드 검출을 위해 압전패치를 시편 중앙에 부착한 구조적 특성에 기인한 것으로 판단된다. 시편 중앙은 1차 모드의 변형이 최대가 되는 위치이지만, 고차 모드에서는 변형이 작거나 마디(Node)에 가까워지기 때문에 SNR이 급격히 저하되고, 결과적으로 고차 모드의 감쇠 특성을 정량화하기 어려운 것으로 해석된다.

충격망치를 이용한 모달 시험만으로는 다양한 주파수에서의 감쇠비를 확보하는 데 한계가 있었다. 이를 보완하기 위해, 감쇠비 측정을 완료한 초기 길이 250 mm 시편을 절단하여 길이 166 mm (Spc. 4)와 83 mm (Spc. 5)의 시편으로 사용하였다. 일반적으로 고유주파수는 시편의 강성(k_b)과 질량(m)에 의해 결정되며, 특히 1차 고유주파수는 굽힘 모드에 해당하므로 대략적인 차원해석을 수행하면 식(5)와 같이 길이의 제곱에 반비례한다. 식에서 α, β, γ는 임의로 선택한 상수이고. E와 I는 각각 Young 계수 및 면적에 관한 2차 단면모멘트값으로 길이에 무관한 값이다. 따라서 원 시편을 각각 2/3 및 1/3 길이로 절단한 경우, 1차 고유주파수는 112 Hz의 $(3/2)^2$ 및 $(3/1)^2$ 배가 되어 이론적으로 각각 252와 1,008 Hz가 된다. 이러한 시편 구성은 서로 다른 주파수 영역에서 감쇠비를 정밀하게 비교 및 평가하기 위한 기반을 제공한다.

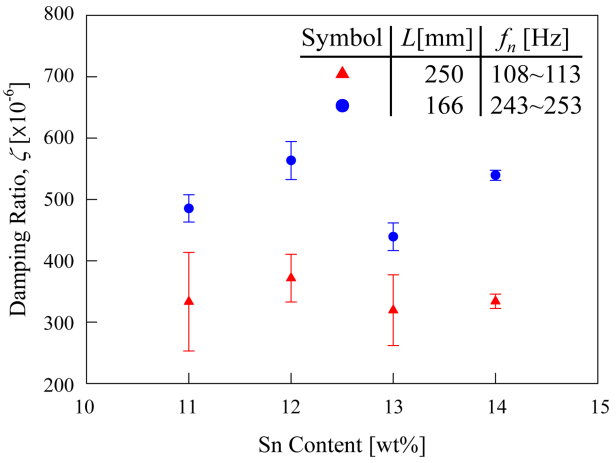


Fig. 12 Damping ratio of tin bronze for different specimen lengths (frequencies) (Spc. 3 & 4)

$$f_{n1} \propto \sqrt{\frac{k_b}{m}} \propto \left(\frac{\alpha EI}{l^3}\right)^{\frac{1}{2}} \propto \frac{\gamma}{l^2} \tag{5}$$

실험 결과, 길이 83 mm 시편(E = 100 GPa)은 강성이 매우 커($k_b \approx 56$ N/mm) 본 실험에서 사용한 스피커로는 충분한 공진 가진을 구현하기 어려웠다. 이로 인해 감쇠비 산정에 필요한 수준의 SNR을 확보하지 못하였으며, 해당 시편에 대해서는 감쇠비를 계산할 수 없었다. 83 mm 시편의 측정 실패는 시편 길이 단축에 따른 굽힘 강성의 급격한 증가($k_b \propto 1/l^3$)와 하드웨어적 가진 출력의 한계에 기인한다. 5 W 출력의 일반 스피커로는 굽힘강성이 7 N/mm를 초과하는 시편에 유의미한 SNR을 확보할 만큼의 음향 에너지를 전달하기 부족했기 때문이다. 이러한 한계를 극복하기 위해서는 고출력 스피커를 적용할 수 있다. 반면, 166 mm 시편의 경우에는 가진 에너지가 충분히 전달되어 신호가 포화될 정도의 높은 SNR을 확보할 수 있었고, 이를 이용해 감쇠비를 산정하여 Fig. 12에 제시하였다.

주파수 252 Hz 조건에서도 112 Hz에서와 마찬가지로 주석 함량 변화에 따른 감쇠비가 뚜렷한 단조 경향을 보이지는 않았으나 전체적인 변화 양상은 유사하였다. 비록 시편 길이 변경으로 인해 질량과 강성 등의 물리적 조건이 동시에 변화하여 나타난 결과이지만, 주파수 증가에 따라 감쇠비가 감소하는 경향이 관찰되었다. 해당 데이터는 대형 종의 디지털 트윈 설계 및 FEA를 통해 주요 배음의 잔향을 정량적으로 예측하는 데 필수적인 기초 물성치로 활용될 수 있다. 또한 제안된 공진가진법은 특정 주파수를 선택적으로 가진함으로써 미세한 감쇠 변화 트렌드를 식별할 수 있는 계측 분해능을 가졌음을 실증한다. 다만, 이러한 경향을 모든 대역에 대해 일반화하기 위해서는 향후 더 넓은 주파수 범위에서의 추가적인 실험적 검증이 필요할 것으로 판단된다.

추가적으로, 동일한 주석 함량 시편의 경우 감쇠비 편차가 112 Hz보다 252 Hz에서 더 크게 나타났다. 이는 길이 250 mm 시편은 표준 규격에 따라 충분한 길이를 확보하고 있어 1차 고유주파수가 뚜렷하게 검출되는 반면, 166 mm 시편은 상대적으로 길이가 짧아 SNR이 감소한 데 기인한 것으로 판단된다. 이러한 점을 고려하면, 특정 주파수에서 감쇠비를 정확하게 측정하기 위해서는 표준 규격에 부합하는 충분한 길이의 시편을 사용하되, 시편 길이를 줄이는 대신 폭이나 두께를 조정하여 목표 주파수를 갖도록 설계 및 제작한 뒤 감쇠비를 측정하는 것이 바람직하다.

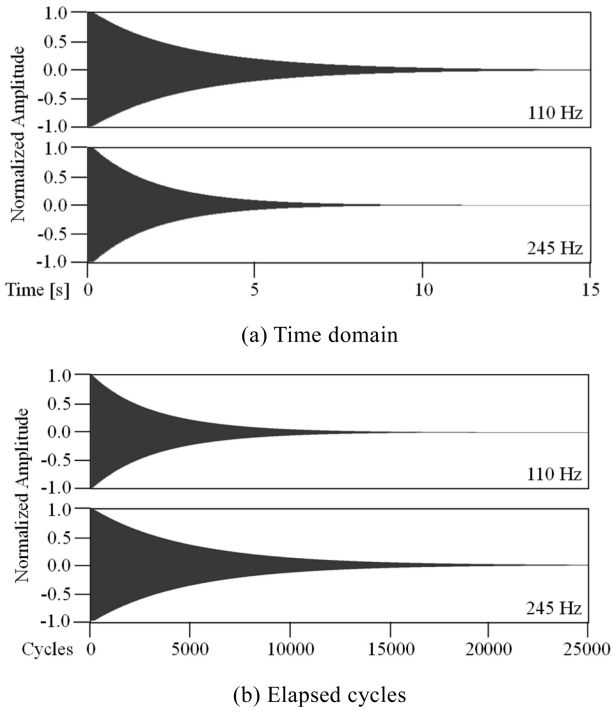


Fig. 13 Comparison of free-vibration damping at low and high frequencies in the time and cycle domains

타악기의 일종인 종의 경우 타격 시 저주파수 성분이 상대적으로 오래 지속되기 때문에, 저주파수에서 감쇠비가 더 낮다고 인식되는 경우가 있다. 이를 검증하기 위해 Fig. 13에서 두 주파수 조건을 비교하였다. 시간 영역에서 자유진동 신호를 관찰하면 Fig. 13(a)와 같이 저주파수 신호가 더 오래 지속되어 감쇠비가 낮아 보일 수 있다. 그러나 실제 진동 횟수(소요 사이클 수)를 기준으로 비교하면 Fig. 13(b)에서 확인되듯이 오히려 고주파수 신호의 감쇠비가 더 낮게 나타난다.

5. 결론

본 연구에서는 대형 전통 종의 음향 특성을 결정하는 핵심 물리량인 모달 감쇠비를 정밀하게 측정하기 위해, 비접촉식 음향 공진가진과 경량 압전패치를 결합한 새로운 계측 기법을 제안하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

제안된 공진가진법을 통해 측정한 모달 감쇠비 변동계수는

10%로 충격망치법의 24%에 비해 현저히 감소하였다. 이는 기존 방식의 한계였던 가속도계의 질량 부하 효과와 케이블 강성에 의한 에너지 소산 문제를 효과적으로 해결하고, 특정 고유주파수만을 선택적으로 가진하여 높은 신호대잡음비를 확보하였기 때문이다.

주석 함량이 약 13 wt%일 때 최소 감쇠비가 측정된 결과는 성덕대왕신종의 실제 합금 조성 범위와 유사하여 음향적 설계 관점에서의 연관 가능성을 시사한다. 다만, 실제 대형 종의 감쇠 특성은 구조물 고유의 기하학적 형상, 진동 모드 및 구속 경계 조건에 의존하므로 최적 조성 설계를 위해서는 향후 추가적인 검증이 요구된다.

주파수 특성 분석을 통해 제안된 정밀 측정 시스템이 저감쇠 합금의 주파수 의존적 감쇠 거동을 정량적으로 식별하는 도구로 활용될 수 있음을 확인하였다. 한국종의 주요 주파수 대역(100–300 Hz)에서 관찰된 감쇠비는 향후 디지털 기반의 정밀한 종 설계 시 각 배음의 잔향 시간을 보다 정확하게 예측하기 위한 기초 파라미터로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 저감쇠 재료의 정밀한 측정을 위해서는 표준 규격에 부합하는 충분한 길이의 시편을 사용하여 신호대잡음비를 확보하는 것이 필수적임을 확인하였다.

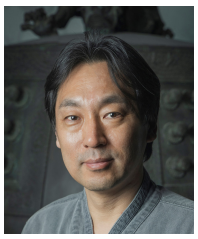
본 연구는 향후 한국 전통 종의 음향학적 우수성 규명은 물론, 디지털 기반의 정밀한 종 설계 및 현대적 복원을 위한 물성 데이터베이스 구축에 기여할 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 국립금오공과대학교 대학 연구과제비로 지원되었음(2024-2026).

REFERENCES

1. Kim, S., Lee, J. H., (2021), Beat control method of Korean bells using artificial dumshoi, The Journal of the Acoustical Society of Korea, 40(3), 192-200.
2. Rossing, T. D., (2000), Science of percussion instruments, Series in popular science – Volume 3, World Scientific Publishing.
3. Park, S. Y., Kang, Y. J., Kim, S. H., (2009), Identification of beat characteristics and damping ratios of bell type structures using wavelet transform, Journal of Sound and Vibration, 326(1-2), 367-382.
4. Kim, S., Lee, J. H., Byeon, J. H., (2017), Vibration and sound of Silla Great Bell, The Journal of the Acoustical Society of Korea, 36(3), 186-193.
5. Kaselouris, E., Dimitriou, V., (2026), Vibration and sound radiation of percussion instruments: A finite element-based review, Acoustics, 8(2), 34.
6. Bert, C. W., (1973), Material damping: An introductory review of mathematic measures and experimental technique, Journal of Sound and Vibration, 29(2), 129-153.
7. Lee, E.-T., Hong, Y.-S., Eun, H.-C. (2022), Prediction of the physical properties of a structural member by the impact hammer test, Sensors, 22(18), 6762.
8. Sabahi, I., Gallas, S., Kirchner, M., Naets, F., (2023), Experimental investigation on the influence of accelerometer cables on modal parameters identified by impact testing, Proceedings of 20th International Conference on Experimental Mechanics, 81-92.
9. Mali, K. D., Singru, P. M., (2018), Study on the effect of the impact location and the type of hammer tip on the frequency response function (FRF) in experimental modal analysis of rectangular plates, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 330(1), 012102.
10. Byeon, J. H., Kim, S. H., (2022), Extraction of the damping ratio of a beat wave using envelope logarithmic decrement, Journal of Mechanical Science and Technology, 36(6), 2729-2737.
11. Audacity, Older versions - 3.7.7. https://www.audacityteam.org/download/older-versions/
12. ASTM E756-05, (2017), Standard test method for measuring vibration-damping properties of materials.
13. Cekus, D., Nadolski, M., (2021), Assessment of the change in the tin concentration in bronzes to the basic components of the sound of bells, Archives of Metallurgy and Materials, 66(2), 531-535.
14. Slamet, S., Suyitno, Kusumaningtyas, I., (2019), Effect of composition and pouring temperature of Cu-Sn alloys on the fluidity and microstructure by investment casting, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 547(1), 012010.
15. Gyeongju National Museum, (1999), Comprehensive research reports on the Divine Bell of King Sŏngdŏk.



Chun-Soo Won
Director of the Corporate Research Institute, Sungjongsa. His research interest is the preservation, inheritance, and advancement of traditional Korean bell casting techniques.
E-mail: won6141@hanmail.net



Chung-Seog Oh
Professor in the School of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology. His research interests include mechanical behavior of materials, micro-LED transfer, microstructure fabrication, and finite element analysis.
E-mail: ocs@kumoh.ac.kr

한국정밀공학회지 제 43 권 제 10 호 pp. 1045-1052 October 2026 / 1045
J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 43, No. 10, pp. 1045-1052 http://doi.org/10.7736/JKSPE.026.00059
ISSN 1225-9071 (Print) / 2287-8769 (Online)

우주용 대형 광학 거울 가공을 위한 중력 보상 장치 개발

Development of a Gravity Compensation Device for Machining Large Space Optical Mirrors

김상문[1], 김학용[2], 이상헌[3,#]
SangMun Kim[1], Hagyong Kihm[2], and SangHeon Lee[3,#]

1 국립경국대학교 대학원 기계설계공학과 (Department of Mechanical Design Engineering, Graduate School, Gyeongkuk National University)
2 한국표준과학연구원 우주극한측정그룹 (Space Metrology Group, Korea Research Institute of Standards and Science)
3 국립경국대학교 로봇공학과 (Department of Robotics Engineering, Gyeongkuk National University)
Corresponding Author / E-mail: shlee@gknu.ac.kr, TEL: +82-54-820-5908
ORCID: 0000-0002-8910-2112

KEYWORDS: Air cylinder (에어 실린더), Load cell (하중 센서), Feedback (피드백), Gravity compensator (중력 보상기), Ziegler-Nichols method (지글러-니콜스 방법), Electro-pneumatic regulator (전공 레귤레이터)

Large optical mirrors for space applications require accurate surface evaluation between successive corrective machining steps. Without proper compensation for self-weight, gravitational deformation can affect the measured surface figure and thereby reduce the reliability of the machining process. In this study, an air-cylinder-based gravity compensation device was developed to maintain the target support loads for large optical mirrors. A proportional–integral–derivative (PID) controller with load-cell feedback was implemented, and the initial gains obtained using the Ziegler–Nichols method were retuned on the basis of the measured system response. Single-axis experiments showed that the retuned controller met the specified performance requirements for overshoot, settling time, and steady-state error, even when applied to air cylinders with different spring reaction forces. The validated control method was then applied, via a sequential multi-channel control scheme, to a five-axis gravity compensation system to assess its applicability to multi-point gravity compensation. The experimental results confirmed stable convergence to the target support loads and effective load regulation at steady state, demonstrating that the proposed system is suitable for the multi-point gravity compensation of large optical mirrors.

Manuscript received: June 15, 2026 / Revised: July 26, 2026 / Accepted: September 18, 2026

NOMENCLATURE

L, T	=	Time Delay (s), Time Constant (s)
F_g	=	Required Gravity-compensation Force at the Support Point (N)
F_{act}	=	Actuator Output Force (N)
S_{offset}	=	Offset Input Signal for Compensation of Spring Reaction Force and Weight of Coupler and Load Cell (V)
S_F	=	Final Input Signal for Gravity Compensation (V)
S_{step}	=	Step Input Signal to Electro-pneumatic Regulator (V)
D(s)	=	Transfer Function of PID Controller
s	=	Laplace Variable
r(t), K_c	=	Target Support Load (N), Proportional Gain
T_i, T_d	=	Integral Time (s), Derivative Time (s)
A, R	=	Steady-state Value (N), Reaction Rate (N/s)
G(s)	=	Transfer Function of Plant
N	=	Number of Control Channels
T_c	=	Overall Control Period of Multi-channel System (s)
F, V	=	Measured Support Load (N), Control Voltage (V)
P	=	Output Pressure of Electro-Pneumatic Regulator (MPa)

Copyright © The Korean Society for Precision Engineering
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

우주용 대형 광학 거울은 고해상도 광학 시스템의 핵심 요소로 사용되며, 요구되는 형상 정밀도를 확보하기 위해 가공 과정에서 형상 측정 결과를 기반으로 한 보정 가공이 반복적으로 수행된다[1-3]. 그러나 거울의 크기가 증가함에 따라 자중에 의한 변형이 발생할 수 있으며, 이를 적절히 보상하지 않을 경우 측정된 형상에는 실제 가공 오차와 자중 변형에 의한 오차가 함께 포함될 수 있다. 이러한 오차는 거울의 실제 형상에 대한 평가 신뢰도를 저하시키고 부정확한 보정 가공으로 이어질 수 있으므로, 정밀 가공을 위한 형상 측정 단계에서는 자중 변형을 보상하기 위한 중력 보상 장치가 필요하다[4-6]. 본 연구에서 제안하는 중력 보상 장치는 각 가공 단계 이후 수행되는 형상 측정 과정에서 거울의 자중 변형을 보상하기 위한 장치이다. 각 가공 단계가 완료되면 중력 보상 장치를 적용하여 자중 변형이 보상된 상태에서 거울의 형상을 측정하고, 그 결과를 바탕으로 중력 보상 장치를 적용하지 않은 상태에서 보정 가공을 수행한다. 이러한 형상 측정과 보정 가공 과정을 반복함으로써 가공 중 거울의 형상 오차를 평가하고 목표 형상에 도달하도록 보정 가공을 수행한다. 이를 위해서는 안정적이고 정밀한 하중 제어가 가능한 구동 시스템의 설계가 중요하다. 중력 보상 시스템은 다양한 방식으로 연구되어 왔으며, 공압 기반 구동 방식은 비교적 간단한 구조로 큰 하중을 지지할 수 있다는 장점이 있어 대형 광학 거울의 중력 보상에 적합하다[1,7]. 그러나 에어 실린더 기반 시스템은 공압 동특성, 마찰 및 외란의 영향을 받을 수 있으며[7,8], 제어 주기 변화와 에어 실린더별 특성 차이에 따라 제어 성능이 달라질 수 있다. 따라서 동일한 제어기가 다양한 운용 조건에서도 안정적인 제어 성능을 유지할 수 있는지 검증할 필요가 있다.

따라서, 본 연구에서는 우주용 대형 광학 거울의 가공 후 형상 측정 과정에서 자중 변형을 보상하기 위한 1축 중력 보상 구동기를 설계하고, 목표 지지 하중 유지를 위한 제어기를 개발한다. 2장에서는 중력 보상 구동기의 기본 설계에 대해 기술하고, 3장에서는 1축 중력 보상 구동기를 위한 제어기 설계와 성능 검증에 대해 다룬다. 4장에서는 3장의 결과를 바탕으로 다축 중력 보상 장치로의 확장 가능성을 검토한다.

2. 중력 보상 구동기 설계

본 연구에서 중력 보상은 거울의 구조해석을 통해 산정된 각 보상점에서의 목표 지지 하중에 해당하는 지지력을 구동기로 인가함으로써, 자중의 영향을 상쇄하여 거울의 변형을 최소화하는 것으로, 대형 광학 거울에서는 설계된 지지 하중 분포를 구현하기 위해 여러 보상점에서 지지 하중을 분산하고 각 보상점의 하중을 제어할 필요가 있다[1,3,6]. 따라서 본 연구에서는 다수의 1축 중력 보상 구동기를 이용하여 거울의 각 보상점에서 목표 지지 하중을 안정적으로 유지하는 방식으로 중력 보상 장치를 구성하였다. 보상점에서의 이상적인 하중 평형 조건은

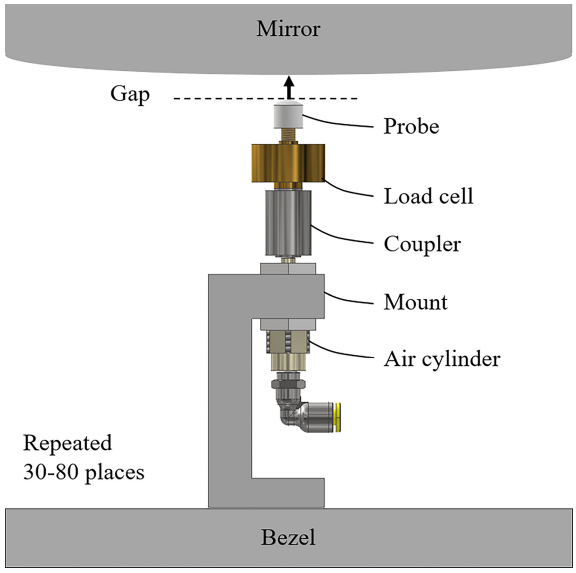


Fig. 1 Schematic of the single-axis gravity compensation actuator

구동기의 출력 힘과 해당 보상점의 목표 지지 하중이 평형을 이루는 상태로, 식(1)과 같이 간단히 정의할 수 있다.

$$F_{act} = F_g \tag{1}$$

그러나 실제 시스템에서는 공압 동특성, 마찰 및 외란 등의 영향으로 식(1)의 이상적인 하중 평형 상태를 지속적으로 유지하기 어렵다[7,8]. 따라서 목표 지지 하중을 안정적으로 유지하기 위해서는 피드백 제어가 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 중력 보상 시스템의 기본 요소인 1축 중력 보상 구동기를 설계하고, 하중 피드백 제어를 위해 로드셀을 적용하였다. Fig. 1은 1축 중력 보상 구동기의 구조 및 구성을 나타낸다. 실제 적용 시 거울은 별도의 지지기구에 의해 지지되며, 각 보상점에 배치된 구동기의 프로브는 초기 상태에서는 거울과 일정한 간격을 둔 채로 떨어져 있으며, 중력 보상 수행 시 에어 실린더가 전진함에 따라 프로브가 해당 보상점에 접촉하여 지지 하중을 인가하는 방식으로 동작한다. 로드셀은 보상점에 전달되는 지지 하중을 측정하고, 측정값을 바탕으로 에어 실린더의 공급 압력을 조절함으로써 목표 지지 하중을 유지한다.

중력 보상을 위한 지지 하중은 거울의 크기에 따라 달라질 수 있는데, 본 연구에서는 가상의 거울을 대상으로 보상점에서의 지지 하중을 50 N 이하로 설정하였다. 이에 따라 에어 실린더는 설계 여유를 고려하여 최대 60 N의 출력 힘을 발생시킬 수 있도록 설계하였으며, 이에 필요한 압력을 공급할 수 있는 전공 레귤레이터를 선정하였다. 또한 공압 장치의 구성을 단순화하기 위해, 단동식 에어 실린더를 채택하였다. 피스톤의 전진은 공급 압력에 의해 능동적으로 제어되며, 원위치로의 복귀는 에어 실린더 내의 스프링 반력에 의해 이루어진다. 에어 실린더의 순 출력 힘은 입력 압력에 의해 발생하는 추력과 복원 스프링의 반력, 가동부의 자중 및 마찰력 등의 영향을 받아 결정된다. 복원 스프링의 반력은 압력에 의해 발생하는 추력의 일부를 상쇄

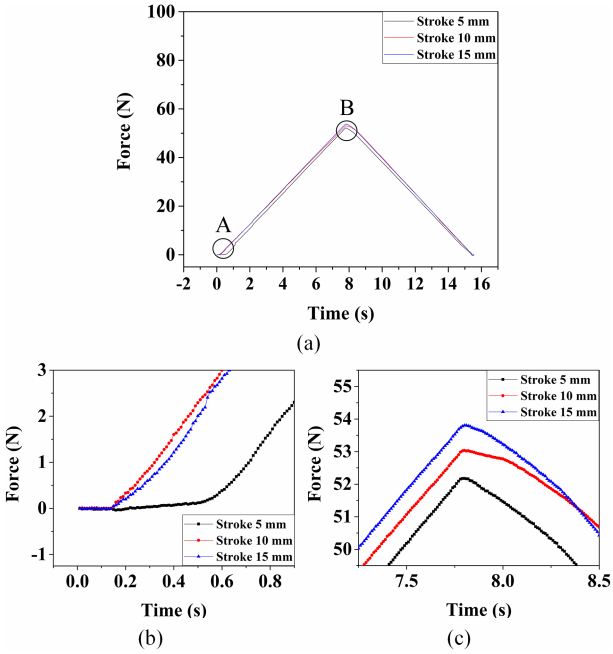


Fig. 2 Output force responses of air cylinders with different stroke lengths (5, 10, 15 mm). (a) Responses to increasing and decreasing supply pressure, (b) Enlarged view of region A, (c) Enlarged view of region B

시키므로, 동일한 입력 압력에서 에어 실린더가 발생시키는 순출력 힘을 감소시킨다. 또한 에어 실린더별 스프링 반력과 강성의 차이는 접촉 이전의 피스톤 전진 특성과 접촉 후의 압력-출력 힘 응답에 영향을 미칠 수 있으며, 이는 지연 시간과 시정수 등의 동특성 차이로 나타날 가능성이 있다. 특히 스트로크가 다른 에어 실린더는 복원 스프링의 특성과 내부 공기 체적 등이 다를 수 있으므로, 본 연구에서는 스트로크 길이에 따른 응답 특성을 비교하였다. 평가는 입력 압력을 변화시키면서 출력 힘을 측정하는 방식으로 수행되었으며, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2(b)에서 공급 압력을 증가시킨 경우, 스트로크가 10, 15 mm인 에어 실린더는 시간 지연 없이 빠른 힘의 증가를 보이나, 스트로크가 5 mm인 에어 실린더는 상대적으로 느린 반응을 나타내었다. 반면, Fig. 2(c)에서 공급 압력을 감소시킨 경우, 스트로크가 10 mm인 에어 실린더는 5, 15 mm인 에어 실린더에 비해 느린 반응을 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 스트로크가 15 mm인 에어 실린더를 선정하였다. 또한 본 장치는 지지기구에 거치된 대형 거울의 설계 보상점에 필요한 지지력을 인가하는 방식으로 작동하므로, 초기 비접촉 상태에서 보상점에 접근하기 위해 중력 보상 장치와 거울 사이에는 Fig. 1과 같은 간격이 필요하며, 거울의 지지면이 곡면의 형태로도 나타나기 때문에 에어 실린더의 스트로크가 클수록 시스템 설계 측면에서도 유리한 점이 있다.

2.1 1축 중력 보상 구동기의 구조해석

거울의 형상 측정 시, 거울은 별도의 지지기구에 의해 고정 지지되며, 각 보상점에는 중력 보상 구동기의 지지력을 거울에

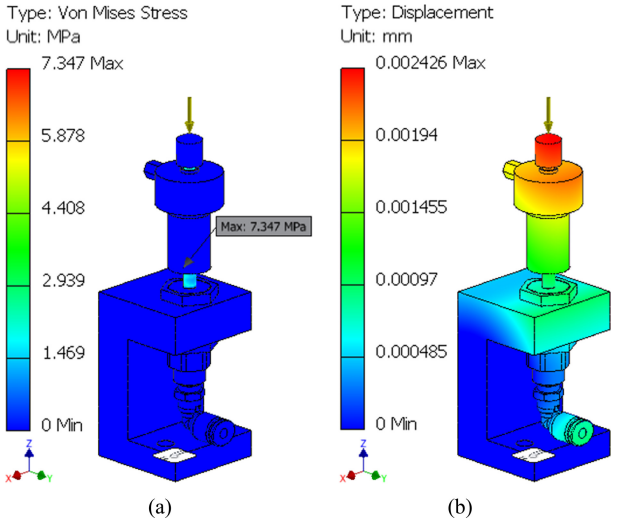


Fig. 3 Structural analysis results of the single-axis gravity compensation actuator with a 5 mm piston extension under a 50 N probe load. (a) Von mises stress, (b) Total displacement

전달하기 위한 하중 전달 기구가 설치된다. 중력 보상 구동기의 프로브는 중력 보상 수행 시 하중 전달 기구와 접촉하여 각 보상점에 설정된 목표 지지 하중을 인가한다. 따라서, 본 중력 보상 장치는 지지 하중을 제어 변수로 하여 각 보상점의 목표값을 유지하는 힘 제어 방식으로 동작하며, 중력 보상 성능은 목표 지지 하중의 구현 정확도를 기준으로 평가한다. 이와 같은 하중 전달 조건에서 최대 지지 하중이 작용할 때 구동기 구조부의 응력과 변위를 확인하기 위해 정적 구조해석을 수행하였다.

해석 모델의 구조 부품은 스테인리스강인 SUS303으로 설정하였으며, 에어 실린더의 피스톤이 5 mm 전진한 상태에서 프로브에 축 방향으로 50 N의 하중을 적용하였다. Fig. 3(a)의 등가응력 해석 결과, 응력은 에어 실린더의 피스톤 부위에 집중되었으며, 해당 부위의 최대 von Mises 응력은 7.35 MPa로 나타났다. 이는 SUS303의 항복강도 415 MPa보다 충분히 낮은 값으로, 약 56.5의 안전율에 해당한다. Fig. 3(b)의 변위 해석 결과, 최대 지지 하중 조건에서 구동기 구조부의 최대 변위는 2.42 μm로 나타났으며, 이는 인가된 지지력과 구조적 특성에 따라 발생한 결과이다. 이상의 응력 및 변위 해석 결과를 통해 구동기 구조부가 최대 지지 하중 조건에서 충분히 구조적으로 안전함을 확인하였다.

3. 제어 시스템 설계

중력 보상 시스템에서 제어기의 목적은 각 보상점의 지지 하중을 목표값으로 유지하여 안정적인 중력 보상을 수행하는 것이다. 대형 광학 거울은 외부 하중 변화에 민감하므로, 거울의 형상 측정 및 평가 시 각 보상점에서 하중 변화나 진동이 발생할 경우 거울의 형상 오차가 증가하거나, 최악의 경우 거울의 손상까지도 발생할 수 있다. 또한, 각 보상점에서의 하중이 불안

Table 1 Desired performance of the control system

Overshoot [%]	Settling time [s]	Steady-state error [mN]
< 1	≤ 2	≤ 50

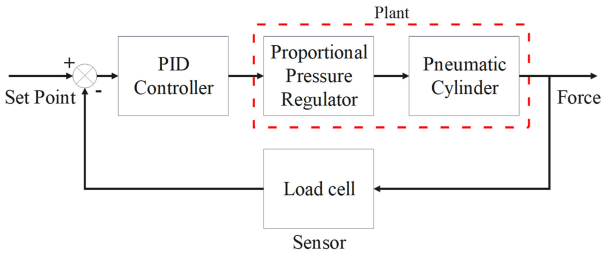


Fig. 4 Block diagram of the gravity compensation control system

정해지면 전체 중력 보상 상태가 나빠질 수 있으므로, 안정적인 제어 시스템의 구현이 중요하다. 이를 위해 1축 중력 보상 장치의 목표 제어 성능을 Table 1과 같이 설정하였으며, 특히 중력 보상 시스템은 정적인 특성이 중요하기 때문에 목표 정상상태 오차의 절대값을 선정된 로드셀의 성능을 고려하여 50 mN 이하로 설정하였다. 중력 보상점의 개수는 거울의 크기에 비례해서 증가하게 되는데, 보상점의 개수가 늘어날수록 제어 연산과 입출력 처리에 필요한 전체 제어 시스템 부하도 증가한다. 따라서, 다축 중력 보상 시스템에서는 필요한 경우 제어 주기를 증가시켜 시스템 부하를 줄일 필요가 있다. 그러나 디지털 제어 시스템에서는 동일한 PID 게인을 적용하더라도 제어 주기에 따라 이산화 특성이 달라지므로 폐루프 시스템의 응답과 안정성이 변화할 수 있다. 이에 본 연구에서는 실제 운용 조건과 보상점 증가에 따른 시스템 부하를 고려하여 제어 주기를 1, 10, 100 및 200 ms로 설정하고, 제어 주기 변화에 따른 성능과 안정성을 평가하였다. Fig. 4는 1축 중력 보상 제어 시스템의 블록 다이어그램을 나타내는데, 본 연구에서는 적절한 과도응답과 정상상태 응답을 얻기 위해 PID 제어기를 적용하였다. 에어 실린더와 공압 시스템은 공기의 압축성, 마찰 및 내부 스프링 반력 등의 영향으로 정형화된 수학적 모델을 얻기 힘들기 때문에, PID 제어기 설계에 있어 실험을 기반으로 하는 계단응답법의 지글러-니콜스 방법(Ziegler-Nichols Method)을 사용하였다[9].

한편, 중력 보상 구동기는 앞서 설명한 바와 같이, 에어 실린더의 피스톤이 전진하여 프로브가 거울면에 접촉한 후 보상점에 지지력을 인가하고, 접촉 후에는 로드셀에서 측정된 힘을 피드백하여 에어 실린더의 공급 압력을 제어한다. 정상상태에서는 스프링 반력을 정확히 알지 못하더라도 PID 제어를 통해 목표 지지 하중을 유지할 수 있다. 다만, 피드백 제어가 이루어지더라도 에어 실린더별 특성의 차이에 의한 스프링 반력의 차이는 동일한 입력 압력에 대한 순 출력 힘과 피스톤의 전진 특성에 영향을 미친다. 이로 인해, 에어 실린더별 지연 시간과 시정수가 달라지고, 이러한 특성 차이는 동일한 PID 게인을 적용할 때 과도응답과 안정성의 차이로 이어질 수 있어서 에어 실린더별로 서로 다른 제어 게인이 요구될 수

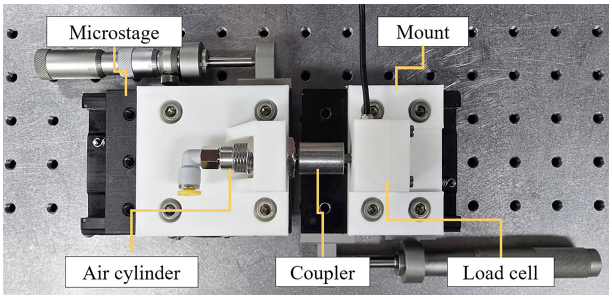


Fig. 5 Experimental setup for measuring the spring reaction force of an air cylinder

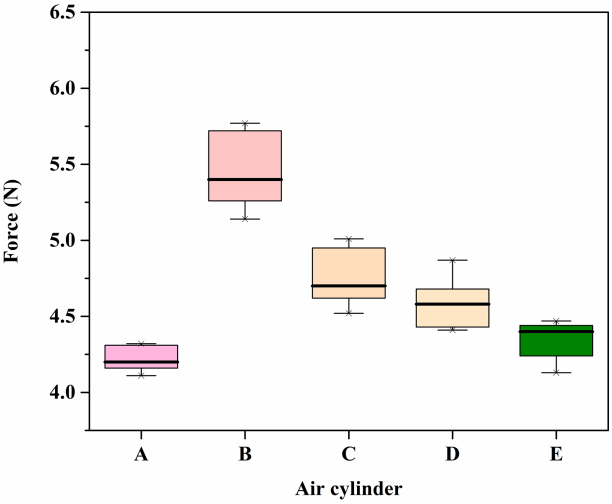


Fig. 6 Comparison of measured spring reaction forces among air cylinders of the same model

있다. 따라서 제어기 설계 시 에어 실린더별 스프링 반력 차이를 고려할 필요가 있었으며, 본 연구에서는 에어 실린더별 스프링 반력 차이를 확인하기 위해 Fig. 5와 같은 반력 측정 장치를 제작하여, 동일한 스트로크를 갖는 여러 에어 실린더를 대상으로 프로브가 거울면에 접촉하는 위치에서의 반력을 측정하였다. Fig. 6에서와 같이, 동일한 모델의 에어 실린더에서도 스프링 반력에 차이가 나타나는 것으로 확인되었다. 이 결과를 바탕으로 각 에어 실린더에 개별적인 PID 게인을 적용할 수 있으나, 다수의 구동기로 구성되는 중력 보상 시스템에서는 이런 방식의 접근법은 제어기 설계와 운용이 복잡해질 수 있다. 따라서, 이러한 문제를 해결하는 방법으로는 각 에어 실린더별로 접촉 위치에서의 반력을 다르게 적용하거나, 모델의 불확실성을 극복할 수 있는 여유(Margin)를 가지는 제어기를 적용하는 방법이 있는데, 본 연구에서는 다수의 에어 실린더를 제어해야 하므로, 후자와 같이 폐루프 제어기를 적용한 후, 모델의 불확실성 극복 여부를 확인하는 형태로 연구를 진행하였다. 제어기 게인 도출을 위한 계단응답 실험은 선택된 대표 에어 실린더를 대상으로, 식(2)와 같이 힘을 전공 레귤레이터의 입력 전압으로 변환하였으며, 앞서 구한 스프링의 반력과 커플러 및 로드셀의 무게를 모두 합친 오프셋 값에 계단입력 신호를 추가한 최종 신호를 전공 레귤레이터에 인가하는 방식으로 진행되었다.

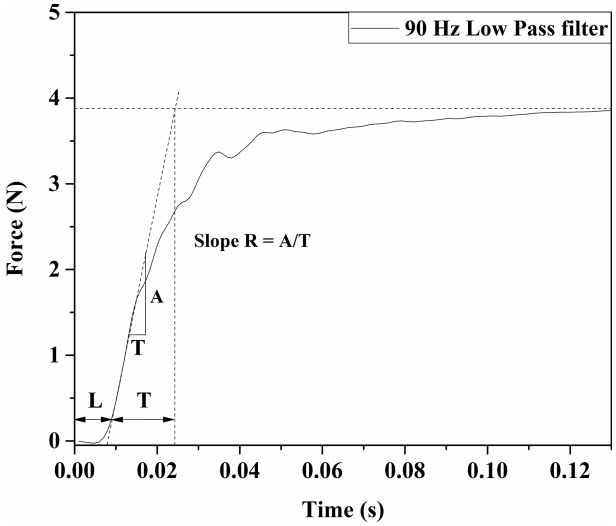


Fig. 7 Step response and parameters used in the Ziegler-Nichols tuning method

$$S_F = S_{offset} + S_{step} \tag{2}$$

Fig. 7은 지글러-니콜스 방법에 사용된 계단응답곡선을 나타내는데, 최초 계단응답에는 고주파 노이즈가 포함되어 지연 시간 및 상승률을 도출하는 데 어려움이 있었으므로, 노이즈 제거를 위해 90 Hz 저역 통과 필터를 적용하였다. 데이터 획득 실험 장치는 샘플링 주기의 안정성을 확보하기 위해 NI사의 PXI 시스템의 Real-time DAQ 시스템으로 구현되었으며, 제어 프로그램은 LabVIEW Real-Time 모듈을 이용하여 제작하였다. Fig. 7로부터 시간 지연과 시정수는 각각 L = 8.29 ms, T = 15.1 ms로 측정되었으며, 이를 지글러-니콜스 튜닝 식에 적용하여[10], 식(3)과 같은 PID 제어기의 전달함수를 구하였다.

$$D(s) = K_C\left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) \tag{3}$$

식(3)에서 K_c, T_i, T_d는 각각 비례 게인, 적분 시간 및 미분 시간을 나타내고, 지글러-니콜스 방법으로 산정된 초기값은 K_c = 0.5635, T_i = 16.6 ms, T_d = 4.15 ms이다. 산정된 초기 게인을 적용한 시스템의 계단응답을 Fig. 8에 나타내었다. 이때 제어 주기는 1 ms로 설정하고, 초기 PID 게인의 응답 특성을 평가하였다. 실험 결과, 정착 시간은 충분히 짧았으나 큰 오버슈트와 진동이 발생하여 Table 1의 설계 목표를 만족하지 못하였다. 그러나, 지글러-니콜스 방법은 실험 응답을 기반으로 PID 게인의 초기값을 산정하는 경험적 튜닝 방법으로 이를 통해 초기 도출된 게인은 실제 시스템에서 다소 공격적인 응답을 유발할 수 있으므로, Fig. 8의 응답을 바탕으로 식(3)의 게인을 추가로 조정하였다. 식(3)의 적분 시간 T_i와 미분 시간 T_d는 유지하고, 제어기 게인 K_c를 단계적으로 감소시키면서 계단응답을 얻어, 각 K_c 후보값에 대해 Table 1에 제시된 제어 사양의 만족 여부를 평가하였다. 그 결과, 모든 설계 목표를 만족하면서 불필요한 응답 속도

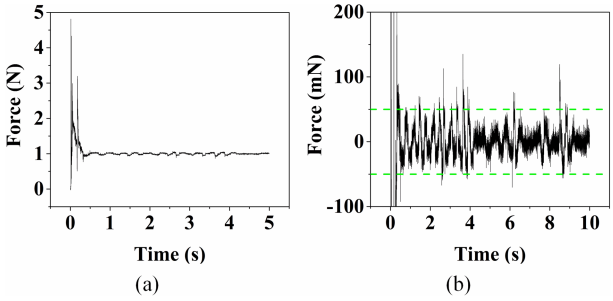


Fig. 8 Step response with PID gains tuned using the Ziegler-Nichols method. (a) Response, (b) Steady-state error

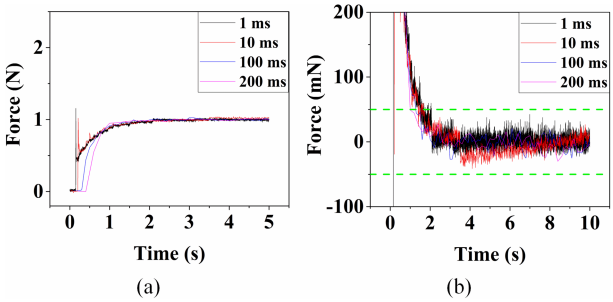


Fig. 9 Step responses with retuned PID gains at different control periods. (a) Response, (b) Steady-state error

저하를 최소화할 수 있는 K_c = 0.01을 최종 게인으로 선정하였다.

최종 재조정된 PID 제어기의 전달함수는 식(4)와 같다.

$$D(s) = 0.01\left(1 + \frac{1}{0.0166s} + 0.00415s\right) \tag{4}$$

식(4)의 PID 게인은 제어 주기 1 ms에서 도출되었으나, 실제 다축 중력 보상 시스템에서는 보상점 증가에 따른 연산 및 입출력 부하를 줄이기 위해 제어 주기를 증가시킬 필요성이 있다. 디지털 제어 시스템에서는 제어 주기의 변화에 따라 PID 게인을 조정해야 한다. 따라서, 이러한 제어 주기 변화가 최종 얻어진 PID 제어기의 폐루프 응답 특성과 안정성에 미치는 영향을 확인하기 위해, 식(4)의 동일한 PID 게인을 다양한 제어 주기(1, 10, 100, 200 ms)에 적용하여 계단응답을 측정하였다. Fig. 9에 제어 주기별 중력 보상 결과를 나타내었는데, 제어 주기가 증가함에 따라 폐루프 응답이 느려지는 경향이 나타났으며, 제어 주기 100과 200 ms에서 측정된 시정수는 각각 약 230과 350 ms로 나타났다. 이는 제어 주기의 증가로 제어 입력의 갱신 간격이 길어짐에 따라 폐루프 시스템의 응답 특성이 변화한 결과로 판단된다. 그러나 모든 제어 주기에 대해 목표 성능을 만족하였기 때문에 식(4)의 최종 제어기가 여러 제어 주기 범위(1–200 ms)에서 만족스러운 성능을 나타냄을 확인하였다.

그리고, 에어 실린더별 스프링 반력과 동특성 차이에 대한 제어기의 강건성을 확인하기 위해, Fig. 6에서 스프링 반력을 측정한 에어 실린더(A-E)에 동일한 PID 게인을 적용하여 중력 보상을 실시하였다. 그 결과를 Fig. 10에 나타내었는데, 모든 에어

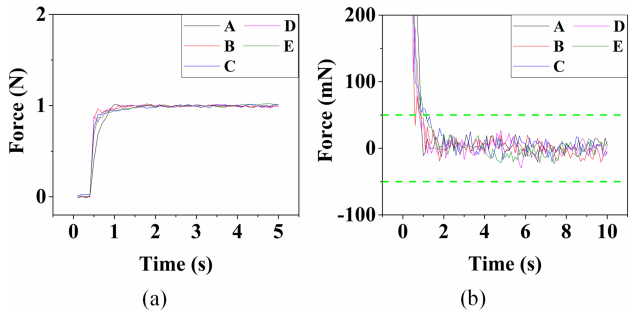


Fig. 10 Step responses of air cylinders with different spring reaction forces. (a) Response, (b) Steady-state error

실린더에서 앞서 설정한 성능 기준을 만족함을 확인하였다. 이를 통해 설계된 PID 제어기가 에어 실린더별 스프링 반력과 동특성 차이에 대해 충분한 강건성을 가지며, 개별적인 게인 조정 없이 동일한 PID 게인으로 목표 지지 하중을 안정적으로 제어할 수 있었다. 한편, 제어 시작 시 출력이 0 N으로 나타나는 구간은 중력 보상 구동기의 프로브가 접촉 대상면에 닿기 전으로, 로드셀에 부하가 작용하지 않는 상태를 나타낸다.

일반적인 모델 기반 제어기 설계에서는 시스템 동정(System Identification)을 통해 플랜트 모델을 먼저 도출하고, 시뮬레이션으로 제어기 게인을 조정하는 방식으로 이루어지나, 본 연구에서의 에어 실린더와 공압 시스템은 공기의 압축성, 마찰, 내부 스프링 반력 및 작동 조건에 따라 특성이 변하기 때문에 플랜트의 수학적 모델 없이 지글러-니콜스 튜닝 방법을 기반으로 PID 제어기를 설계하였다. 또한 향후 다양한 제어 주기에 적합한 제어기의 설계 및 적용을 위한 기초 작업으로 시스템 동정을 통해 플랜트의 수학적 모델을 추가로 도출하였다. 시스템 동정에는 Fig. 7의 계단응답 데이터를 사용하였으며, MATLAB의 시스템 동정 도구를 이용하여 식(5)와 같은 플랜트 모델을 구하였다.

$$G(s) = \frac{83340}{s^2 + 390.1s + 21500} \tag{5}$$

도출된 플랜트 모델의 타당성을 검증하기 위해 식(5)의 플랜트 모델과 실제 시스템에 동일한 식(4)의 제어기를 적용하고, 각각의 폐루프 계단응답을 Fig. 11에서 비교하였다. 프로브 접촉 이후의 실험 응답과 시뮬레이션 응답이 유사한 경향을 나타냈으며, 특히 본 연구에서 중요하게 고려하는 정상상태 영역에서 두 응답이 잘 일치하였다. 이를 통해 식(5)의 플랜트 모델이 실제 시스템의 거동을 적절히 묘사함을 확인하였으며, 향후 다른 용량의 에어 실린더 적용 시 이와 같은 방식으로 제어기 설계가 가능할 것으로 기대된다.

4. 다축 중력 보상 시스템

실제 대형 광학 거울의 중력 보상 시스템에서는 거울의 크기와

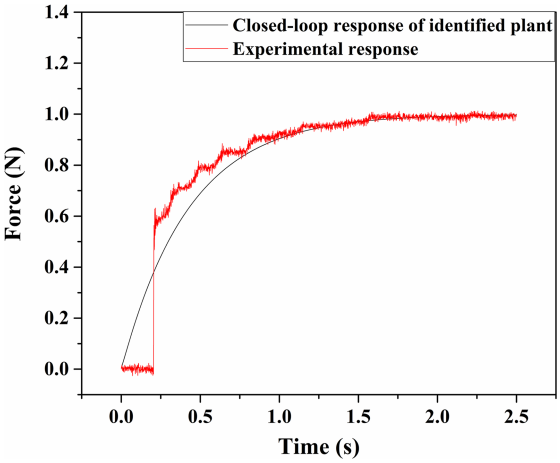


Fig. 11 Comparison of experimental and simulated closed-loop step responses

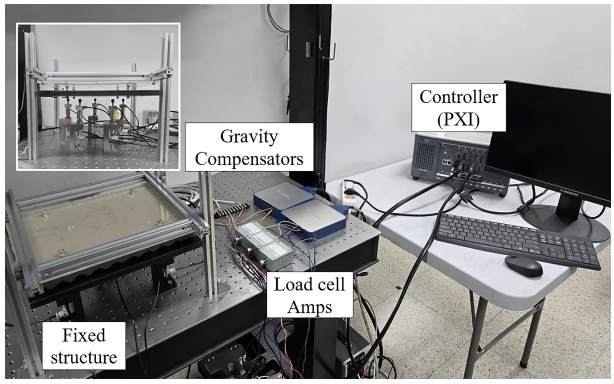


Fig. 12 Experimental setup for the 5-axis gravity compensation test

형상 조건에 따라 수십 개 이상의 보상점에 대한 다축 제어가 요구된다. 특히 거울의 직경이 커질수록 요구되는 보상점 수가 증가하므로, 향후 실제 거울에 적용하기 위해서는 다축 중력 보상 제어 시스템으로의 확장이 필수적이다. 본 연구에서는 1축 실험에서 검증된 제어 방법의 다축 적용 가능성을 확인하기 위해 5축 중력 보상 시스템을 구성하고, 각 축의 하중 제어 성능과 다축 시스템의 안정성을 평가하였다. 이때 5축은 제안한 제어 방법의 다축 확장 가능성을 검증하기 위해 실험적으로 설정한 제어 채널 수이며, 실제 거울에 필요한 보상점 수와 배치는 거울의 크기, 형상, 강성 및 지지 조건에 따라 별도로 결정된다. Fig. 12는 5축 중력 보상 실험 장치를 나타내며, 본 실험에서는 실제 거울 대신 고정된 구조물을 대상으로 하중 제어 실험을 수행하였다. 이는 거울의 변형이나 외부 진동에 의한 영향을 배제한 상태에서 다축 제어 방법의 적용 가능성과 각 축의 하중 제어 안정성을 우선적으로 평가하기 위한 것이다. 5축 중력 보상 시스템은 Figs. 6 및 10에서 평가한 에어 실린더(A-E)로 구성하였다. 각 축에는 앞선 1축 실험에서 얻은 PID 게인을 동일하게 적용하였으며, 다축 적용을 위한 추가적인 게인 조정은 수행하지 않았다. Fig. 13(a)는 다축 중력 보상 시스템의 구성을 나타내는데,

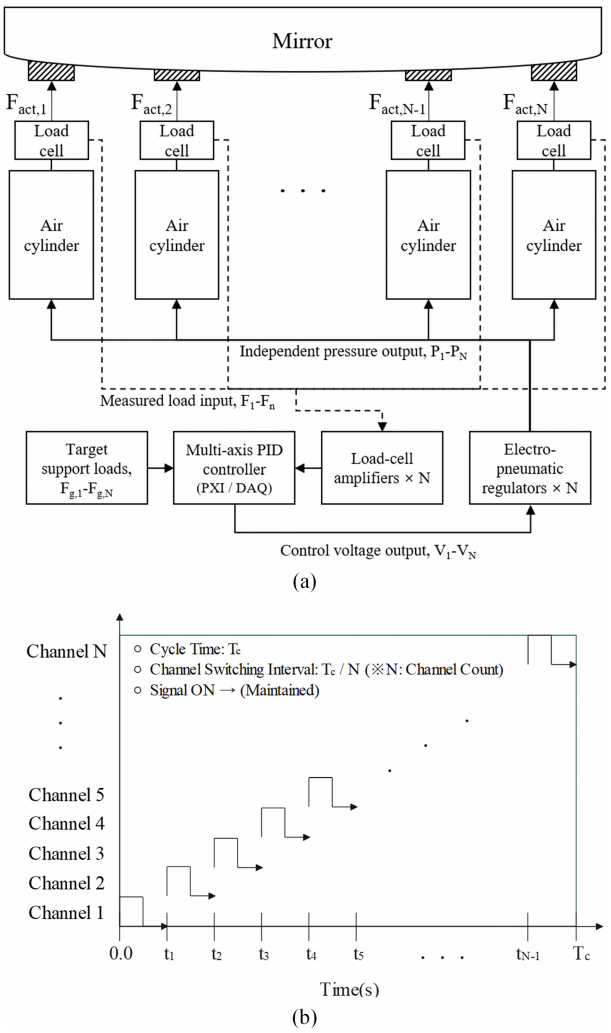


Fig. 13 Conceptual diagram of the multi-axis gravity compensation system. (a) System configuration, (b) Channel activation timing diagram

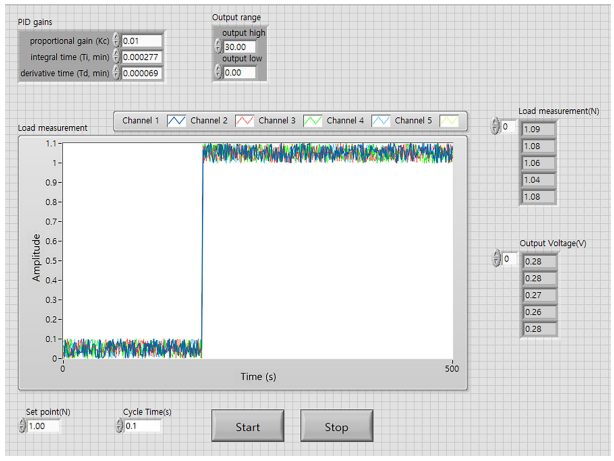


Fig. 14 Control program for the 5-axis gravity compensation system

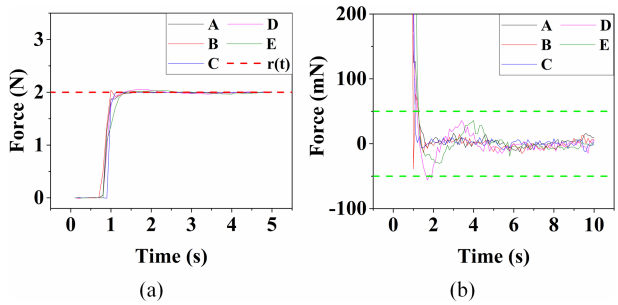


Fig. 15 Experimental results for the 5-axis gravity compensation system. (a) Responses, (b) Steady-state error

각 보상점의 구동기는 로드셀에서 측정된 하중을 기반으로 목표 지지 하중을 독립적으로 제어하며, 동일한 구동기와 제어 채널을 추가하는 방식으로 다축 확장이 가능하다. 다축 중력 보상 시스템을 구현 시, 이상적으로는 모든 축의 하중 신호를 동시에 샘플링하고, 각 구동기에 대한 제어 출력을 동시에 갱신하는 방식이 바람직하나, 더 많은 보상점을 갖는 다축 중력 보상 시스템으로 확장할 경우, 모든 채널에 대해 동시 샘플링이 가능한 DAQ 시스템을 구성하는 것은 높은 비용을 요구한다. 따라서 본 연구에서는 향후 다수의 보상점으로 확장 가능한 구조를 고려하여, 멀티플렉서 기반의 DAQ 및 ADC 구성을 전제로 한 순차적 다채널 제어 방식을 적용하였다. Fig. 13(b)는 본 연구에서 적용한 다축 제어 타이밍 개념을 나타내는데, 전체 다채널 제어에서 모든 채널이 한 번씩 선택되어 제어기가 갱신되는 시간을 하나의 제어 주기 T_c로 정의하였다. 즉, N개의 중력 보상기(채널)를 제어하는 경우 각 채널은 T_c/N 간격으로 순차적으로 선택되며, 선택된 채널에 대해서만 센서 신호 획득, 오차 계산, 제어 출력 연산이 수행된다. 이후 해당 채널의 출력 신호는 다음 제어 갱신 시점까지 유지된다. 이러한 방식에서는 각 채널의 제어기가 서로 다른 시간에 순차적으로 갱신되지만, 모든 채널은 동일한 전체 제어 주기 T_c를 기준으로 반복 동작하게 된다. 따라서 채널 수가 증가하더라도 제어 구조를 비교적 단순하게 유지할 수 있다. Fig. 14는 본 연구를 통해 개발된 제어 프로그램을 나타내는데, LabVIEW를 이용하여 개발하였다.

Fig. 15는 5축 중력 보상 시스템의 제어 결과를 나타내며, 각 축의 목표 지지 하중을 동일하게 설정하였고, 제안한 순차적 다축 제어 방식에 따라 각 구동기의 하중을 제어하였다. 실험 결과, 일부 축 사이에서 응답 특성의 미세한 차이는 나타났으나, 이는 각 에어 실린더의 스프링 반력 차이, 로드셀 장착 조건, 공압 경로 차이 등에 기인한 것으로 판단된다. 모든 축에서 지지 하중은 목표값으로 안정적으로 수렴하였으며, 정상상태에서의 하중 오차는 목표 제어 성능 범위 내에서 유지되었다.

이상의 결과를 통해, 설계된 1축 중력 보상 제어 시스템이 다축 중력 보상 시스템에도 안정적으로 적용 가능함을 확인하였고, 특히 본 연구에서 적용한 순차적 다채널 제어 방식이 향후 다축 중력 보상 시스템으로의 확장에도 유효하게 적용될 수 있을 것으로 기대된다. 한편, 본 실험은 고정 구조물을 대상으로 수행되었으므로 실제 거울의 유연성과 형상 측정 환경에서 발생할 수

있는 진동 및 외란이 다축 제어 성능에 미치는 영향은 포함하지 못했기 때문에, 향후에는 거울의 유연성을 모사한 시험체를 대상으로 형상 측정 환경에서 발생 가능한 진동 및 외란에 대한 다축 중력 보상 시스템의 제어 성능을 추가로 평가할 필요가 있다.

5. 결론

본 연구에서는 우주용 대형 광학 거울의 가공 후 형상 측정 과정에서 자중 변형을 보상하기 위한 에어 실린더 기반 중력 보상 장치를 개발하고, 목표 지지 하중을 안정적으로 유지하기 위한 피드백 제어 시스템을 구현하였다. 구조해석을 통해 최대 지지 하중 조건에서 중력 보상 구동기의 구조부가 구조적 안전성을 확보함을 확인하였다. 실험 기반의 지글러-니콜스 방법을 이용하여 초기 PID 제어기를 유도하고, 게인 조정을 통해 최종 제어기 모델을 설계하였다. 설계된 PID 제어기를 적용한 결과, 다양한 제어 주기에서 목표 제어 성능을 만족하는 것으로 확인되었고, 특성이 다른 에어 실린더에 대해서도 안정적인 제어가 이루어짐을 확인하였다. 개발된 1축 중력 보상기를 순차적 다채널 방식의 제어를 이용하여 다축 제어 시스템으로 확장이 안정적으로 이루어짐도 확인하여, 대형 광학 거울의 다점 중력 보상을 위한 기반 시스템으로 활용 가능함을 확인하였다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 국방기술진흥연구소의 지원으로 진행된 핵심기술연구개발(No. 22-107-100-003)의 결과임.

REFERENCES

1. Yu, Z., Wu, X., Wang, F., (2023), Active support system for the correction of a 4m SiC primary mirror based on the bending mode, Applied Sciences, 13(17), 9966.
2. Hu, H., Luo, X., Liu, Z., Zhang, X., Xue, D., Zhao, H., (2019), Designing a hydraulic support system for large monolithic mirror's precise in-situ testing-polishing iteration, Optics Express, 27(3), 3746-3760.
3. Fischer, B. M., Ranka, T., Aguayo, F., Ashby, D., Bugueno, E., Everman, A., Ford, J., Kechichian, Z., Kenagy, K., Krasuski, T., Muller, G., Rosenthal, W., Schwartz, D., Soto, J., Swett, H., Thanasekaran, D., Wadhavkar, A., (2020), The purpose, plan, and progress of the giant magellan telescope primary mirror off-axis segment test cell, Proceedings of the SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation, 11445.
4. Jin, Z., Cheng, G., Xu, S., Gu, W., (2021), Dynamic disturbance and error analysis of flexible support system for large optical mirror processing, Applied Sciences, 11(6), 2715.
5. Jin, Z., Cheng, G., Pang, Y., Xu, S., Yuan, D., (2021), Multi-objective parameter optimization of flexible support system of optical mirror, Applied Sciences, 11(17), 8071.
6. Lan, B., Wu, X., Li, J., Ming, M., Liu, X., Yang, H., (2017), Influence of axial-force errors on the deformation of the 4 m lightweight mirror and its correction, Applied Optics, 56(3), 611-619.
7. Ali, H. I., Mohd Noor, S. B. B., Bashi, S. M., Marhaban, M. H., (2009), A review of pneumatic actuators (modeling and control), Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 3(2), 440-454.
8. Seki, K., Shinohara, Y., Iwasaki, M., Chinda, H., Takahashi, M., (2011), High precision force control of pneumatic cylinders considering disturbance suppression with specific frequency, Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics, 937-942.
9. Ziegler, J. G., Nichols, N. B., (1942), Optimum settings for automatic controllers, Transactions of the ASME, 64(8), 759-765.
10. Lee, S. H., (2023), Design and implementation of control system using open-source and free software, Transactions Korean Society of Mechanical Engineers C, 11(2), 137-145.



SangMun Kim
Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Design Engineering, Gyeongkuk National University. His research interest is mechanical design engineering.
E-mail: rlatkdans456@naver.com



Hagyong Kihm
Principal Researcher in Space Metrology Group at Korea Research Institute of Standards and Science. His research interest is optical metrology and optomechanics for space optics.
E-mail: hkihm@kriss.re.kr



SangHeon Lee
Professor in the major of Robotics Engineering, Gyeongkuk National University. His research interest is the design and control of mechatronics systems.
E-mail: shlee@gknu.ac.kr

한국정밀공학회지 제 43 권 제 10 호 pp. 1053-1061 October 2026 / 1053
J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 43, No. 10, pp. 1053-1061 http://doi.org/10.7736/JKSPE.026.00072
ISSN 1225-9071 (Print) / 2287-8769 (Online)

RLS 기반 구동기 추력상수 추정을 이용한 전방위 김발 시스템의 적응형 추력 분배

Adaptive Thrust Allocation for an Omnidirectional Gimbal System Using RLS-based Actuator Force Constant Estimation

박천규[1,#], 김정호[1], 최대규[1]
Cheonkyu Park[1,#], Jungho Kim[1], and Dae Gyu Choi[1]

1 한화시스템 기반기술연구소 (Hanwha Systems Infra Technology R&D Center)
Corresponding Author / E-mail: dothkyu@hanwha.com
ORCID: 0009-0008-4707-9779

KEYWORDS: Omnidirectional gimbal (전방위 김발), Adaptive thrust allocation (적응형 추력 분배), Recursive least squares (재귀적 최소자승법), Line-of-sight tracking (시선 추종)

Omnidirectional gimbal systems use multiple actuators to achieve the desired line-of-sight (LOS) motion through thrust allocation. However, actuator degradation caused by thermal effects or aging alters the force constants, leading to model mismatch and diminished torque realization performance. Conventional pseudoinverse-based thrust allocation assumes constant actuator characteristics and, therefore, cannot effectively compensate for these variations. This paper proposes an adaptive thrust allocation algorithm based on Recursive Least Squares (RLS) for omnidirectional gimbal systems. The proposed method estimates the force constant of each actuator in real-time using measured torque and actuator current data. These estimated force constants are incorporated into the thrust allocation process to address actuator degradation. Additionally, a weighted thrust allocation strategy redistributes current demand to alleviate the burden on degraded actuators while maintaining the required torque. The proposed algorithm was validated through MATLAB/Simulink simulations under conditions of asymmetric actuator degradation. Compared to the conventional pseudoinverse-based method, the proposed algorithm reduced the torque realization RMSE by 99% and the LOS tracking RMSE by 24.5%. Furthermore, the weighted thrust allocation decreased the RMS current of the most degraded actuator by 35.8%, all while preserving torque realization and LOS tracking performance, demonstrating the effectiveness of the proposed method.

Manuscript received: July 10, 2026 / Revised: August 20, 2026 / Accepted: September 4, 2026

NOMENCLATURE

l_d	=	Desired LOS Vector
l	=	Current LOS Vector
x	=	Attitude Angle Vector
τ_{cmd}	=	Command Torque Vector
τ_{real}	=	Actual Generated Torque Vector
I	=	Actuator Current Vector
K_t	=	Force Constant
$\hat{\Theta}$	=	Estimated Force Constant Vector
W	=	Weighting Matrix
P	=	Covariance Matrix
λ	=	Forgetting Factor
H	=	Regression Matrix
J	=	Inertia Matrix
ω	=	Angular Velocity
B	=	Nominal Thrust Allocation Matrix
$B\dagger_W$	=	Weighted Pseudoinverse Allocation Matrix

Copyright © The Korean Society for Precision Engineering
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

최근 유도무기 탐색기 및 무인 항공기(UAV) 기반 정찰 시스템에서는 플랫폼의 기동 및 외란 환경에서도 광학 탑재체의 안정적인 시선(Line-of-sight, LOS)을 유지하기 위한 김발(Gimbal) 시스템이 필수적으로 적용된다[1-4]. 김발 시스템은 EO/IR (Electro-optical/infrared) 센서의 자세를 안정화하여 장거리 표적 탐지 및 고해상도 영상 획득 성능을 확보하는 핵심 장치이다[5-7]. 고해상도 영상 획득과 장거리 탐지 성능을 만족하기 위해서는 대구경 광학계와 고성능 이미지 센서가 요구되며 이에 따라 광학 탑재체의 크기와 중량이 증가하게 된다. 따라서 제한된 탑재 공간 내에서 대형 광학 장비를 효율적으로 수용할 수 있는 김발 기구 설계 기술이 중요하다.

기존의 축 기반 김발 시스템은 일반적으로 안쪽 프레임과 바깥쪽 프레임을 직렬 회전축 구조로 연결하고 각 회전축 중심에 모터를 배치하여 독립적인 축 제어를 수행하는 방식을 사용한다[8-11]. 이러한 구조는 제어 관점에서 직관적이라는 장점이 있으나 프레임과 회전축 구동부가 탑재체 주변 및 중심 공간을 차지하므로 동일한 외경 조건에서 내부 광학 장비의 수용 공간이 제한된다. 또한 일반적인 2축 김발 구조는 시선 축을 중심으로 발생하는 영상 회전 성분을 직접 보상하기 어렵다. 이를 해결하기 위해 롤 축을 추가하거나 디롤(Deroll) 광학계를 적용할 수 있으나 이 경우 시스템의 부피, 중량, 조립 복잡도가 증가하게 된다[12].

이러한 한계를 극복하기 위한 대안으로 내부 회전축과 중앙 프레임을 제거하고 구동기를 김발 외곽에 분산 배치하는 전방위 김발 시스템이 고려될 수 있다[13]. 전방위 김발 시스템은 외곽에 배치된 복수의 구동기를 동시에 사용하여 내부 탑재체의 3축 자세를 제어하는 구조이다. 이 방식은 내부 공간 활용성을 높이고 대형 탑재체 수용에 유리하지만 물리적으로 독립된 개별 회전축이 존재하지 않는다. 따라서 탑재체의 요구 토크를 각 구동기의 입력으로 변환하는 추력 분배 알고리즘이 필수적이며 일반적으로 의사역행렬(Pseudo-inverse)을 이용한 최소 노름 해 방식이 사용된다[14]. 이 방식은 요구 토크를 만족하는 여러 입력 조합 중 입력 노름이 최소가 되는 해를 계산하지만 추력 분배에 사용되는 값들이 실제 구동기 특성과 일치한다는 이상적인 가정을 기반으로 한다.

최근에는 구동기의 불확실성, 포화 및 고장 조건을 고려하기 위해 적응형 제어 할당 기법이 제안되고 있으며 이러한 최적 제어 할당 문제의 목적함수 구성과 계산 효율성에 대한 비교 연구도 이루어지고 있다[15-17]. 그러나 이러한 연구들은 항공기 및 수중 운동체를 대상으로 특정 시점에 발생하는 이산적이고 급격한 구동기 고장에 대해 검증되었으며 시간에 따라 서서히 진행되는 문제에 대한 검증은 제한적이다.

실제 시스템의 제작 및 운용환경에서는 조립 공차, 기구적 마찰, 온도 변화 및 전자기적 특성 변화로 인해 구동기 별 추력상수가 서로 달라지거나 시간에 따라 변화할 수 있다. 특정 구동기의 추력상수가 저하되면 사용되는 추력 행렬의 모델 불일치가 발생하여 명령 토크와 실제 구현 토크 사이에 오차가 발생한다. 특히 전방위 김발 시스템에서는 각 구동기가 특정 단일 축만 담당하는 것이 아니라 여러 구동기의 합성 작용으로 3축 토크를 생성하므로 구동기 간 추력상수 불균형은 단순한 축 별 이득 저하가 아니라 전체 토크의 왜곡된 형태로 나타난다. 그러나 전방위 김발 시스템은 복수의 구동기와 탑재체가 동역학적으로 결합되어 움직이므로 개별 구동기의 상태를 직접 측정하기 어렵다는 문제가 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 구동기 별 추력상수 상태를 추정하고 이를 추력 분배기에 반영할 수 있는 적응형 분배 구조가 필요하다. 이에 본 논문에서는 구동기 추력상수 저하를 등가 추력상수 계수로 모델링하고 재귀적 최소자승법(Recursive Least Squares, RLS)을 이용하여 개별 구동기의 추력상수 변화를 실시간으로 추정하는 방법을 제안한다. 추정된 추력상수를 유효 추력행렬에 반영하여 구동기 성능 변화에 따른 모델 불일치를 보상하고 가중치 기반 추력 분배를 적용하여 열화된 구동기의 입력 부담을 상대적으로 성능이 유지된 구동기로 재분배한다. 이를 바탕으로 구동기 상태 변화에 적응하면서 명령 토크를 효과적으로 구현할 수 있는 전방위 김발의 적응형 추력 분배 알고리즘을 구성하였다. 제안 기법의 유효성은 MATLAB/Simulink 기반 시뮬레이션을 통해 추력상수 추정 정확도, 명령 토크 구현 성능, LOS 추종 성능 및 열화 구동기의 입력 부담 완화 측면에서 종합적으로 검증하였다.

2. 전방위 김발 시스템 모델

2.1 시스템 구성

본 연구의 전방위 김발은 구형 탑재체 외곽에 90° 간격으로 배치된 4개의 구동기에 의해 Roll(ϕ), Pitch(θ), Yaw(ψ)의 3자유도 회전 운동을 생성하는 구조이다. Fig. 1과 같이 각 구동기의 고정부는 외부 프레임에, 가동부는 탑재체에 연결되며 가동부가 탑재체 접선 방향으로 힘을 인가한다. 구형 탑재체 외곽에 구동기를 분산 배치한다는 개념적 유사성은 구형 이동 플랫폼의 분산 구동 구조에서도 확인할 수 있다[18]. 탑재체의 자세 벡터를 $x = [\phi, \theta, \psi]^T$ 라 하고 4개의 구동기의 개별 추력 벡터를 $F = [f_1, f_2, f_3, f_4]^T$ 라 정의한다. 탑재체 몸체에 고정된 구동기들이 출력하는 개별 힘이 3축 가상 토크로 결합되는 관계는 기하학적 구조 배치 행렬 $B \in \mathbb{R}^{3\times4}$를 통해 식(1)와 같이 정의된다.

$$\tau = B \cdot F \tag{1}$$

행렬 B는 구동기의 부착 반경(R)과 설치 위치 및 추력 작용 방향에 의해 결정되는 기구학적 배치 행렬로 식(2)와 같이 정의된다. 본 시스템에서는 구동기의 고정부가 외부 고정 구조물에 고정되어 있어 탑재체의 자세 변화와 관계없이 추력 작용 위치와

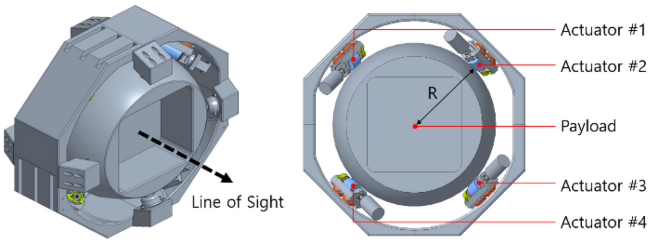


Fig. 1 Configuration of the omnidirectional gimbal system: (a) Overall system configuration and (b) Arrangement of the four actuators and payload

방향이 일정하게 유지된다. 따라서 구동 과정에서 각 구동기의 추력 크기만 변화하며 행렬 B는 일정하게 유지된다.

$$B = R\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

식(2)의 대칭 배치 특성에 따라 4개의 구동기에 동일한 추력이 인가되면 Pitch축과 Yaw축 토크는 상쇄되고 Roll축 토크만 생성된다. 반대로 각 구동기의 부호 조합을 달리하면 개별 축 토크를 독립적으로 생성할 수 있다. 탑재체 전체의 3자유도 회전 동역학 방정식은 3축 회전 관성 행렬 $J \in \mathbb{R}^{3\times3}$과 각가속도 $\ddot{x}$를 이용하여 식(3)와 같이 표현된다.

$$J\ddot{x} = B \cdot F \tag{3}$$

2.2 추력상수 저하 모델

각 구동기가 발생시키는 물리적 추력 $f_i(k)$는 인입 전류 $i_i(k)$와 실시간 구동기 추력 상수 $K_{ti}(k)$의 곱으로 나타난다. 실제 시스템에서는 열화, 온도변화, 마찰 조건 등에 의해 추력 상수가 변화할 수 있다. 이를 모델링하기 위해 본 논문에서는 각 구동기의 시변 특성을 반영한 실시간 추력 상수 변동 모델을 식(4)와 같이 정의한다.

$$F(k) = K_t(k) \cdot I(k)$$
$$= \begin{bmatrix} K_{t1}(k) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{t2}(k) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{t3}(k) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{t4}(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1(k) \\ i_2(k) \\ i_3(k) \\ i_4(k) \end{bmatrix} \tag{4}$$

여기서 초기 상태의 추력 상수를 K_{t0}이라고 할 때 실제 운용 중인 시스템의 개별 구동기 추력 상수는 이산 시간 인덱스 k에 대해 식(5)과 같이 모델링 된다.

$$K_{ti}(k) = \alpha_i(k) \cdot K_{t0},\ (i = 1,2,3,4) \tag{5}$$

이때 $\alpha_i(k)$는 각 구동기의 실시간 구동 효율을 나타내는 무차원의 불균형 계수이다. 시스템이 정상 상태일 때는 $a_i(k) = 1$의 값을 가지며 전자기적 열화나 기구적 손실이 심화될수록 $0 \le a_i(k) \le 1$ 범위를 가짐으로써 각 구동기의 실시간 추력 손실을 수학적으로 묘사한다.

3. RLS 기반 적응형 추력 분배

3.1 LOS 기반 자세 제어기

전방위 김발의 자세 제어 목표는 현재 시선 벡터 l이 명령 시선 벡터 l_d를 추종하도록 하는 것이다. 두 벡터를 정규화하면 식(6)과 같다.

$$\hat{l} = \frac{l}{\| l \|},\ \ \hat{l}_d = \frac{l_d}{\| l_d \|} \tag{6}$$

식(7)과 같이 현재 LOS에서 명령 LOS로 회전하기 위한 회전축은 두 벡터의 외적으로 정의되며 회전각은 내적으로 계산된다. 따라서 회전 오차 벡터는 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$n = \frac{\hat{l} \times \hat{l}_d}{\| \hat{l} \times \hat{l}_d \|}, \theta_e = \cos^{-1}(\hat{l}^T \cdot \hat{l}_d) \tag{7}$$

$$e_r = \theta_e n \tag{8}$$

본 연구에서는 회전 오차 벡터와 각속도 피드백을 이용하여 식(9)와 같은 PD자세 제어기를 구성하였다.

$$\tau_e = K_p e_r - K_d \omega \tag{9}$$

여기서 τ_e는 추력 분배기에 전달되는 3축 토크 명령이며 ω는 탑재체의 각속도이다.

3.2 기존 의사역행렬 기반 추력 분배

전방위 김발 시스템은 4개의 구동기가 동시에 작용하여 탑재체의 3축 회전 토크를 생성하는 과구동 구조이다. 따라서 자세 제어기에서 생성된 명령 토크를 개별 구동기의 입력으로 변환하기 위한 추력 분배 과정이 필요하다. 일반적으로 과구동 시스템에서는 요구 토크를 만족하는 입력 조합이 무수히 존재하므로 가장 널리 사용되는 방법은 식(10)과 같이 의사역행렬을 이용한 최소 노름 해를 계산하는 것이다.

$$I(k) = pinv(B \cdot K_t(k)) \cdot \tau_e \tag{10}$$

하지만 실제 전방위 김발 시스템에서는 구동기의 온도 상승, 기계적 마모 및 자기 특성 변화 등에 의해 각 구동기의 추력상수가 시간에 따라 변화할 수 있다. 이러한 경우 기존 의사역행렬 기반 추력 분배에서는 명령 토크와 실제 생성 토크 사이에 오차가 발생하게 되며 구동기 열화가 심할수록 모델 불일치가 증가하게 된다.

3.3 RLS 기반 추력 상수 추정

앞 절에서 설명한 바와 같이 구동기 특성이 변화하는 상황에서는 모델 불일치가 발생한다. 따라서 변화하는 구동기 특성을 실시간으로 추정하여 추력 분배기에 반영할 수 있는 적응형 파라미터 추정 과정이 필요하다. 본 연구에서는 구동기 전류 입력과 생성 토크 간의 관계를 기반으로 재귀적 최소자승법(Recursive Least Squares, RLS)을 적용하여 구동기 추력상수를 실시간으로 추정하였다. RLS는 이전 단계의 추정 결과를 이용하여 새로운 데이터가 입력될 때마다 파라미터를 갱신할 수 있어 시간에 따라 변화하는 구동기 특성을 추정하는 상황에 적합하다. 실제 생성 토크와 입력 전류 데이터를 기반으로 한 선형 회귀 모델은 식(11)과 같이 표현된다.

$$Y(k) = H(k) \cdot \theta(k) \tag{11}$$

$Y(k) \in \mathbb{R}^{3\times1}$ 는 탑재체에 인가되는 동적 토크 벡터이며 $H(k) \in \mathbb{R}^{3\times4}$ 는 추력 분배 행렬과 전류 입력으로 구성된 회귀 행렬이다. $\Theta(k) = [\hat{K}_{t1}(k), \hat{K}_{t2}(k), \hat{K}_{t3}(k), \hat{K}_{t4}(k)]^T$ 는 추정 대상인 개별 구동기의 추력 상수 벡터이다.

추력 상수 벡터는 매 샘플링 시간마다 획득되는 데이터에 대해 이전 시점의 추정 값과 현재 예측 오차를 이용하여 갱신된다. 식(12)과 같이 예측 오차를 $\varepsilon(k)$ 를 계산한 후 식(13)과 같이 칼만 이득 $L(k)$ 를 업데이트 한다.

$$\epsilon(k) = Y(k) - H(k)\hat{\Theta}(k-1) \tag{12}$$

$$L(k) = \frac{P(k-1)H^T(k)}{\lambda \cdot I_{3\times3} + H(k)P(k-1)H^T(k)} \tag{13}$$

여기서 $\lambda(0<\lambda<1)$ 는 과거 데이터의 가중치를 점진적으로 감소시켜 실시간 파라미터 변동에 대한 추종 성능을 높이는 망각인자(Forgetting Factor)이며 $I_{3\times3}$ 는 단위행렬이다. 계산된 이득을 토대로 식(14)와 같이 파라미터 추정 벡터를 갱신하고, 식(15)와 같이 오차 공분산 행렬 $P(k)$ 를 업데이트한다.

$$\hat{\Theta}(k) = \hat{\Theta}(k-1) + L(k)\epsilon(k) \tag{14}$$

$$P(k) = \frac{1}{\lambda}\left[P(k-1) - L(k)H(k)P(k-1)\right] \tag{15}$$

제안한 RLS 알고리즘은 각 구동기의 전류 입력이 동시에 작용하는 과구동 환경에서도 개별 구동기의 추력 상수를 독립적으로 추정할 수 있다. 따라서 특정 구동기의 추력상수가 변화하더라도 이를 실시간으로 식별할 수 있으며 추정 결과는 다음 절에서 설명하는 적응형 추력 분배기의 유효 추력행렬 구성에 사용된다.

3.4 추력상수 기반 적응형 추력 분배

앞 절에서 추정한 구동기 추력상수는 적응형 추력 분배기의 유효 추력행렬을 구성하는 데 사용된다. 하지만 적응형 추력 분배만 적용할 경우 추력상수가 저하된 구동기에도 요구 토크를 만족시키기 위해 상대적으로 큰 전류가 인가될 수 있다. 이러한 전류 증가는 구동기의 발열을 증가시키고 추가적인 성능 저하를 유발할 수 있다. 따라서 열화된 구동기의 입력 부담을 완화하기 위해 추정된 추력 상수를 기반으로 한 가중치 행렬 $W(k) \in \mathbb{R}^{4\times4}$ 를 도입하였다. 실시간 구동기 상태를 반영하는 가중치 행렬은 식(16)과 같이 정의된다.

$$W(k) = \begin{bmatrix} \hat{K}_{t1}(k) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \hat{K}_{t2}(k) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \hat{K}_{t3}(k) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \hat{K}_{t4}(k) \end{bmatrix} \tag{16}$$

제한된 전류 자원 내에서 요구 토크를 만족하며 열화된 구동기의 입력 부담을 최소화하기 위해 식(17)과 같은 목적함수를 정의하였다. 식(16)의 가중치 행렬은 추정된 구동기 추력상수로 구성되며 목적함수에서는 그 역행렬인 $W^{-1}(k)$ 가 각 구동기 전류에 대한 비용 행렬로 사용된다. 따라서 구동기의 추력상수가 감소할수록 $W^{-1}(k)$ 의 대응 대각원소는 증가하게 되며 동일한 전류에 대해서도 더 큰 비용이 부여된다. 이에 따라 최적화 과정에서는 요구 토크를 만족하는 범위 내에서 추력상수가 저하된 구동기 전류 사용이 자연스럽게 억제된다. 또한 추력 분배는 요구 토크를 만족해야 하므로 식(18)과 같은 제약조건을 적용하였다.

$$J_{\text{cost}} = I^T(k)W^{-1}(k)I(k) \tag{17}$$

$$\tau_{\text{cmd}} = BW(k)I(k) \tag{18}$$

식(17)의 목적함수를 최소화하면서 식(18)의 제약조건을 만족하는 최적화 문제를 라그랑주 승수법으로 풀면 식(19)와 같은 가중치 기반 의사역행렬 형태의 적응형 추력 분배식을 얻을 수 있다. 이를 이용하여 최종적으로 각 구동기에 인가되는 전류 명령은 식(20)과 같이 계산된다.

$$B_w^{\dagger}(k) = W^{-1}(k)B^T(BW^{-1}(k)B^T)^{-1} \tag{19}$$

$$I_{\text{cmd}}(k) = \begin{bmatrix} i_{\text{cmd1}}(k) \\ i_{\text{cmd2}}(k) \\ i_{\text{cmd3}}(k) \\ i_{\text{cmd4}}(k) \end{bmatrix} = B_w^{\dagger}(k) \cdot \tau_{\text{cmd}}(k) \tag{20}$$

제안한 가중치 기반 추력 분배에서는 추정된 추력상수가 감소할수록 해당 구동기의 전류 비용이 증가하도록 설계하였다. 따라서 추력상수가 저하된 구동기의 전류 기여도는 감소하고 부족한 토크는 상대적으로 추력상수가 높은 다른 구동기로 재분배된다. 이를 통해 요구 토크를 유지하면서도 열화된 구동기의 입력 부담을 효과적으로 완화할 수 있다.

Table 1 Simulation parameters

Category	Parameter	Value
Simulation	Sampling time	0.0001 s
	Simulation time	10 s
	LOS command	Cone trajectory
Controller	K_p	2
	K_d	4
RLS	Forgetting factor (λ)	0.99
	Initial parameter	[1 1 1 1]
	Initial covariance	$10I$
Actuator	Number of actuators	4
	Force constant	1.0 (Nominal)
Geometry	Moment arm (R)	145 mm

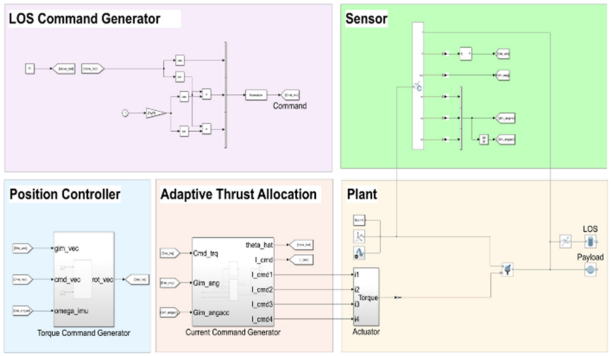


Fig. 2 Simulink-based simulation block diagram of the proposed omni-directional gimbal control system

4. 시뮬레이션 실험 및 결과

4.1 시뮬레이션 환경

제안한 RLS 기반 적응형 추력 분배 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 MATLAB/Simulink 환경에서 전방위 김발 시스템을 모델링하였다. 전체 시뮬레이션 모델은 LOS 명령 생성기, LOS 기반 자세 제어기, RLS 기반 적응형 추력 분배기 및 구동기-탑재체 동역학 모델로 구성하였다. 자세 제어기는 현재 LOS와 명령 LOS 사이의 오차를 이용하여 3축 명령 토크를 생성하고 추력 분배기는 이를 4개의 구동기 전류 명령으로 변환된다. 각 구동기의 추력상수는 시간에 따라 선형적으로 감소하도록 설정하여 구동기 열화에 따른 유효 추력상수 저하 상황을 모사하였다. 시뮬레이션에서는 기존 의사역행렬 기반 추력 분배 방식, RLS 기반 추력상수 보상 방식 그리고 가중치 기반 적응형 추력 분배 방식을 비교하였다. 모든 비교 조건에서 동일한 LOS 명령, 동일한 자세 제어기 이득 및 동일한 구동기 열화 조건을 적용하여 추력 분배 알고리즘에 따른 성능 차이를 평가하였다. 주요 시뮬레이션 파라미터는 Table 1과 같으며 전체 제어 및 식별 구조는 Fig. 2와 같다.

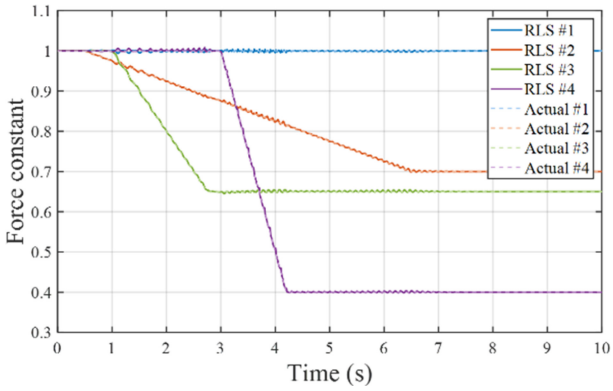


Fig. 3 Actual and estimated actuator force constants using RLS

Table 2 RMSE of estimated actuator force constants

Motor	RMSE
#1	0.0012
#2	0.0014
#3	0.0015
#4	0.0019
Average	0.0015

4.2 RLS기반 추력상수 추정 결과

RLS 알고리즘의 식별 성능을 검증하기 위해 구동기별 추력상수 저하 시나리오를 구성하였다. 일부 구동기는 정상 추력상수를 유지하도록 설정하였고 일부 구동기는 서로 다른 기울기로 추력상수가 감소하도록 설정하여 비대칭 열화조건을 모사하였다.

Fig. 3은 실제 추력상수와 RLS 기반 추정 추력상수를 비교한 결과이다. RLS 식별기는 시간에 따라 변화하는 추력상수를 안정적으로 추정하였으며 복수의 구동기가 서로 다른 비율로 열화되는 조건속에서도 각 구동기의 추력상수 변화를 분리하여 추정하였다. 이는 제안한 회귀모델이 전방위 김발의 과구동 구조에서 발생하는 합성토크와 구동기 전류 입력 사이의 관계를 이용하여 개별 구동기의 유효 추력상수를 식별할 수 있음을 의미한다.

추력상수 식별 성능은 추정된 추력상수와 실제 추력상수의 추정 오차에 대한 RMSE를 이용하여 평가하였다. Table 2는 각 구동기에 대한 추력상수 추정 RMSE를 나타낸다. 모든 구동기에서 추정 RMSE는 낮은 수준으로 유지되었으며 이를 통해 제안한 RLS 기반 식별기가 추력상수 변화 조건에서 적응형 추력 분배에 필요한 파라미터 정보를 안정적으로 제공할 수 있음을 확인하였다. RLS 설계 파라미터 변화에 따른 추정 성능의 민감도를 추가로 분석하였다. 망각인자 λ는 시간에 따라 변화하는 추력상수에 대한 추종 특성을 결정하는 주요 파라미터이며, 초기 추정값은 실제 시스템에서 발생할 수 있는 구동기 추력상수의 초기 불확실성을 고려하기 위해 선정하였다. 이에 따라 기존의 구동기 열화 조건을 동일하게 유지한 상태에서 망각인자와 초기 추정값의 조합을 변화시키며 추정상수 추정 RMSE를

Table 3 RMSE of estimated force constants according to the forgetting factor and initial parameter

No.	Forgetting Factor (λ)	Initial parameter	RMSE ($\times 10^{-3}$)
1	0.98	0.8	1.81
2	0.98	1.0	1.78
3	0.98	1.2	1.84
4	0.99	0.8	1.56
5	0.99	1.0	1.51
6	0.99	1.2	1.57
7	0.995	0.8	1.69
8	0.995	1.0	1.65
9	0.995	1.2	1.71

비교하였으며 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 분석결과 모든 파라미터 조합에서 추력상수 추정 RMSE가 1.81 × 10^{-3} 이하로 나타났으며, 이는 파라미터 변화에 따른 성능 차이가 제한적인 수준임을 확인할 수 있다. 이를 통해 검토한 망각인자 및 초기 추정값 범위에서 제안한 RLS기반 추력상수 추정이 일관된 추정 성능을 유지함을 확인하였다.

4.3 토크 구현 성능 비교

구동기의 추력상수 저하 조건에서 기존 의사역행렬 기반 추력 분배 방식과 제안한 RLS 기반 적응형 추력 분배 방식의 토크 구현 성능을 비교하였다. 기존 의사역행렬 방식은 모든 구동기의 추력상수가 동일하다는 명목 모델을 기준으로 전류 명령을 계산하므로 실제 추력 상수가 변화하는 경우 명령 토크와 생성 토크 사이에 불일치가 발생한다. 반면 제안한 RLS 기반 보상 방식은 추정된 추력상수를 유효 추력 행렬에 반영하여 전류 명령을 계산하므로 실제 생성 토크가 명령 토크를 보다 정확하게 구현할 수 있다. 토크 구현 오차는 식(21)과 같이 정의하였다.

$$e_\tau(k) = \tau_{\text{cmd}}(k) - \tau_{\text{real}}(k),\ \text{RMSE}_\tau = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} \| e_\tau(k) \|^2} \quad (21)$$

τ_{cmd} 는 자세 제어기에서 생성된 명령 토크이며 τ_{real} 은 구동기 추력상수 저하가 반영된 실제 생성 토크이다. Fig. 4는 기존 의사역행렬 방식과 제안한 RLS 기반 보상 방식의 3축 토크 추종 결과이며 전체 시뮬레이션 중 3–4 s구간을 확대하여 나타낸 것이다. 이 구간은 2번과 3번 구동기의 열화가 누적된 상태에서 4번 구동기의 급격한 추력상수 감소가 시작되므로 모델 불일치 영향이 뚜렷한 구간이다. 기존 방식에서는 실제 토크가 명령을 추종하지 못하지만 RLS 방식은 추정된 추력상수를 유효 추력 행렬에 반영하여 실제 생성 토크가 명령 토크와 거의 일치하는 결과를 보였다. 정량적인 성능 비교를 위해 전 구간에 대해 Table 4과 같이 각 축의 토크 구현 RMSE를 계산하였다. 제안한 RLS 기반 보상 방식은 기존 의사역행렬 방식 대비 토크 오차를

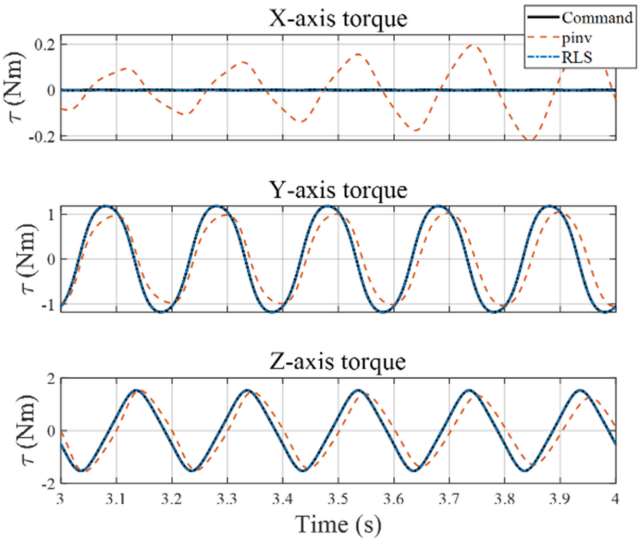


Fig. 4 Comparison of commanded and generated torques during 3–4 s

Table 4 Comparison of torque tracking RMSE

Method	X-axis	Y-axis	Z-axis	Average
Pinv	0.2387	0.2975	0.2857	0.2740
RLS	0.0001	0.0010	0.0012	0.0008

99% 이상 감소시켰다. 이는 RLS를 통해 추정된 구동기 추력상수가 유효 추력 행렬을 효과적으로 보정함으로써 추력상수 변화에 의해 발생하는 모델 불일치를 감소시켰기 때문이다.

4.4 LOS 추종 성능 비교

LOS 추종 성능은 명령 LOS와 실제 LOS 사이의 각도 오차를 이용하여 평가하였다. 명령 LOS 벡터는 x축을 기준으로 원뿔 궤적을 형성하도록 식(22)와 같이 설정하였다.

$$l_d(t) = \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta\cos\phi(t) \\ \sin\theta\sin\phi(t) \end{bmatrix}, \phi(t) = 2\pi ft \quad (22)$$

이러한 명령은 연속적으로 변화하는 시선 이동을 모사하며 전방위 김발의 연속 추종 성능을 평가하기 위해 사용하였다. LOS 오차는 식(23)과 같이 명령 LOS와 실제 LOS의 사이각으로 정의하였다.

$$e_{\text{LOS}}(k) = \cos^{-1}(l_d^T l(k)),\ \text{RMSE}_{\text{LOS}} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} e_{\text{LOS}}^2(k)} \quad (23)$$

Fig. 5은 기존 의사역행렬 방식과 제안한 RLS 기반 보상 방식의 LOS 오차 결과를 나타낸다. 두 방식 모두 상위 PD자세 제어기에 의해 명령 LOS를 안정적으로 추종하였으나 제안된 방식은 토크 구현 정확도가 향상됨에 따라 전체 시뮬레이션 구간에서LOS 오차가 감소하였다. 특히 Fig. 4의 토크 구현 오차가 증가하는 3–4 s 구간에서는 Fig. 5에서도 기존 의사역행렬 방식의

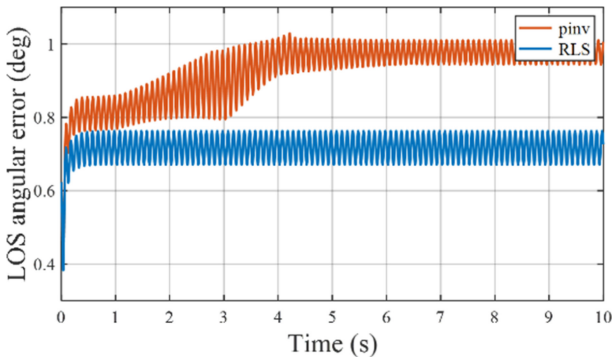


Fig. 5 LOS tracking response and LOS error comparison

Table 5 Comparison of LOS tracking RMSE

Method	RMSE (deg)
Pinv	0.9297
RLS	0.7021

LOS 오차가 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 이는 구동기 추력상수 저하로 인해 명령 토크와 실제 생성 토크 사이의 차이가 발생하고 해당 토크 오차가 탑재체의 회전 동역학을 통해 LOS 응답에 영향을 미치기 때문이다. 반면 제안한 적응형 추력 분배 방식은 추정된 추력 상수를 추력 분배 행렬에 반영하므로 열화된 구동기의 실제 출력 특성을 고려하여 명령 토크를 보다 정확하게 구현하며 이에 따라 동일 구간에서의 LOS 추종오차 증가도 완화된다.

정량적인 성능 비교를 위해 전체 시뮬레이션 구간에 대해서 명령 LOS와 실제 LOS 사이의 추종 오차에 대한 RMSE를 계산하였으며 그 결과를 Table 5에 나타내었다. 제안한 RLS 기반 적응형 추력 분배 방식은 기존 의사역행렬 방식 대비 LOS RMSE를 약 24.5% 감소시켰다. 이러한 결과는 토크 구현 성능의 향상이 LOS 추종성능 개선으로 이어진다는 두 성능지표 간의 연관성을 보여준다. 그러나 토크 구현 RMSE는 99% 이상 감소한 반면 LOS RMSE는 24.5% 감소하여 상대적으로 작은 개선율을 보였으며 이는 서로 선형적으로 비례하지 않는다는 것을 확인할 수 있다.

이는 토크 RMSE가 추력 분배 단계에서 명령 토크와 실제 생성 토크 사이의 오차를 직접 평가하는 지표이지만 LOS RMSE는 해당 토크가 상위 PD 자세제어기의 폐루프 보상까지 반영된 최종 시스템 응답이기 때문이다. 기존 방식에서 토크 구현 오차가 발생하더라도 상위 PD 제어기는 증가한 LOS오차에 따라 추가적인 보상 토크를 생성하여 자세 오차를 지속적으로 감소시킨다. 따라서 하위 추력 분배 단계의 토크 오차가 크게 감소하더라도 최종 LOS 오차의 개선율은 동일한 비율로 나타나지 않는다. 본 결과에서 제안 방법의 직접적인 효과는 구동기 열화로 인한 토크 구현 오차를 감소시키는 것이며 LOS 성능 개선은 이와 같은 토크 구현 정확도 향상이 상위 폐루프 시스템에 반영된 결과이다.

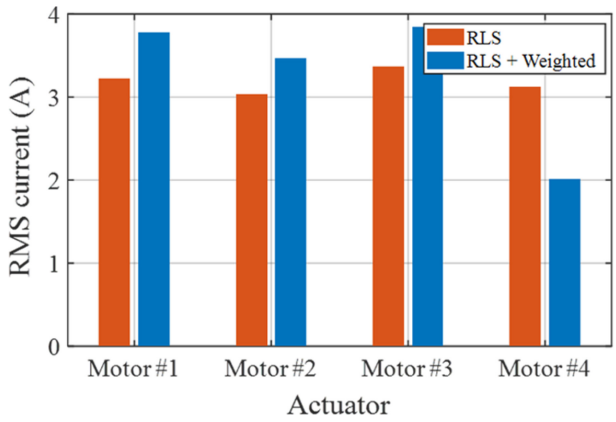


Fig. 6 Comparison of RMS currents for each actuator

Table 6 Comparison of RLS and weighted RLS allocation

Method	RLS	RLS+ Weighted	Change
Torque RMSE	7.667×10^{-4}	7.752×10^{-4}	+1.1%
LOS RMSE	7.0215×10^{-1}	7.0216×10^{-1}	< 0.01%
Total RMS current	12.7444	13.0990	+2.8%
RMS current (Motor#4)	3.1244	2.0073	-35.8%

4.5 가중치 기반 추력 분배 검증

추정된 추력상수를 이용한 가중치 기반 추력 분배의 효과를 검증하였다. 기본 RLS기반 적응형 추력 분배 방식은 명령 토크를 정확하게 구현하기 위해 추력상수가 저하된 구동기에도 상대적으로 큰 전류를 인가할 수 있다. 이에 본 연구에서는 추력상수가 크게 저하된 구동기의 입력 부담을 완화하기 위해 가중치 기반 추력 분배를 적용하였으며 기본 RLS 기반 방식과 가중치 기반 적응형 추력 분배 방식을 비교하였다. Fig. 6은 각 구동기의 RMS 전류를 비교한 결과를 나타낸다. 가중치 기반 추력 분배를 적용한 경우, 추력상수가 가장 크게 저하된 4번째 구동기의 RMS 전류는 기본 RLS 기반 방식 대비 35.8% 감소하였다. 이는 제안한 가중치 행렬이 추력상수가 저하된 구동기의 입력 사용을 억제하고 부족한 토크 생성 성분을 상대적으로 정상 상태에 가까운 다른 구동기로 재분배했기 때문이다. 반면 동일한 명령 토크를 유지하기 위해 다른 구동기의 전류 사용량이 증가하면서 전체 RMS 전류는 기본 RLS 기반 방식 대비 약 2.8% 증가하였다.

추가적으로 두 방식의 토크 구현 성능과 LOS 추종 성능을 정량적으로 비교한 결과를 Table 6에서 확인할 수 있다. 가중치 기반 추력 분배를 적용한 경우 토크 구현 RMSE와 LOS RMSE는 기본 RLS 기반 방식과 거의 동일한 수준을 유지하였다. 이는 가중치 기반 추력 분배가 요구 토크를 만족하는 제약조건을 유지하면서 추력상수가 저하된 구동기의 입력 부담을 완화할 수 있음을 의미한다.

따라서 제안한 가중치 기반 추력 분배는 전체 전류 사용량을 최소화하는 방법이 아니라 구동기 상태를 고려하여 토크 생성 부담을 재분배함으로써 열화된 구동기의 입력 부담을 효과적으로 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 구동기 추력상수 변화가 발생하는 전방위 김발 시스템을 대상으로 RLS 기반의 구동기 추력상수 식별 알고리즘과 이를 이용한 적응형 추력 분배 기법을 제안하였다. 기존 의사역행렬 기반 추력 분배 방식은 모든 구동기의 추력상수가 동일하다는 명목 모델을 기반으로 전류 명령을 계산하므로 실제 시스템에서 발생하는 구동기 열화 및 추력상수 변화에 의해 명령 토크와 실제 생성 토크 사이의 오차가 발생하는 한계가 있다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 구동기별 추력상수를 실시간으로 추정하는 RLS 기반 식별기를 설계하고 추정된 추력상수를 유효 추력행렬에 반영하는 적응형 추력 분배 알고리즘을 제안하였다.

제안한 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 MATLAB/Simulink 기반의 전방위 김발 시스템을 구축하고 구동기별 추력상수가 서로 다른 비율로 감소하는 비대칭 열화 조건을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과, 제안한 RLS 알고리즘은 시간에 따라 변화하는 구동기 추력상수를 안정적으로 추정하였으며 추정된 추력상수를 추력 분배기에 반영함으로써 기존 의사역행렬 기반 방식 대비 명령 토크 구현 RMSE를 99% 이상 감소시켰다. 또한 토크 구현 정확도 향상은 최종 LOS 추종 성능 개선으로 이어져 LOS RMSE를 약 24.5% 감소시켰다. 이는 RLS 기반 추력상수 식별을 통해 유효 추력행렬의 모델 불일치를 효과적으로 보정함으로써 전방위 김발 시스템의 토크 생성 정확도와 LOS 추종 성능을 동시에 향상시킬 수 있음을 확인한 결과이다.

추가적으로 추정된 추력상수를 기반으로 가중치 기반 적응형 추력 분배를 적용하여 열화된 구동기의 입력 부담 완화 효과를 검증하였다. 그 결과, 추력상수가 가장 크게 저하된 4번 구동기의 RMS 전류는 기본 RLS 기반 적응형 추력 분배 방식 대비 약 35.8% 감소하였으며 동일한 명령 토크를 유지하기 위해 전체 RMS 전류는 약 2.8% 증가하였다. 이는 제안한 가중치 기반 추력 분배가 전체 전류 사용량을 최소화하는 것이 아니라 열화된 구동기의 입력 부담을 완화하면서 구동기 간 토크 생성 부담을 효과적으로 재분배하는 방법임을 보여준다.

본 연구는 RLS 기반 추력상수 식별 및 적응형 추력 분배 기법을 통해 토크 구현 정확도와 LOS 추종 성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였으나 시뮬레이션 기반 검증이라는 한계를 갖는다. 실제 하드웨어 적용 시에는 RLS 식별에 필요한 동적 토크를 직접 측정하기 어렵기 때문에 IMU 기반의 각속도 및 각가속도 정보와 탑재체 관성 모델을 이용한 토크 재구성 또는 외란 관측기 기반의 토크 추정 과정이 필요하다. 또한 실제 구동기의 전류 및 전압 포화와 열적 제한을 고려하여 추력 분배 과정에 구동기별 입력 제한을 반영해야 한다. 향후에는 실제 전방위 김발 하드웨어에 제안한 알고리즘을 적용하여 다양한 외란 조건에서의 실험을 수행하고 실시간 제어 성능 및 실제 적용 가능성을 검증할 예정이다.

REFERENCES

1. Ekstrand, B., (2001), Equations of motion for a two-axes gimbal system, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 37(3), 1083-1091.
2. Seo, H., Park, J., Ahn, J.-H., (2018), Los moving algorithm design of electro-optical targeting pod for joystick command, The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, 67(10), 1395-1400.
3. Ahn, J., Baek, W., Park, J., (2011), A design of 3-axis gimbaled LOS stabilization system for an avionic EO/IR system, Proceedings of the Information and Control Symposium, 199-200.
4. Kandemir, K. D., Akmese, A., Yazicioglu, Y., (2014), Line-of-sight stabilization of a gimbaled mechanism under passive base isolation, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 228(1), 35-43.
5. Hwang, S. P., Park, J. H., Hong, S. K., (2012), Control system design for a UAV-mounted camera gimbal subject to coulomb friction, Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, 18(7), 680-687.
6. Kennedy, P. J., Kennedy, R. L., (2003), Direct versus indirect line of sight (LOS) stabilization, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 11(1), 3-15.
7. Hilkert, J., (2008), Inertially stabilized platform technology concepts and principles, IEEE Control Systems Magazine, 28(1), 26-46.
8. Skoglar, P., Swedish Defence Research Agency, (2002), Modelling and control of IR/EO-gimbal for UAV surveillance applications. https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/PB2004102201.xhtml
9. Cong Danh, N., (2021), The Stability of a Two-Axis Gimbal System for the Camera, The Scientific World Journal, 2021(1), 9958848.
10. Choi, D. G., Park, J. Y., Ahn, J. H., (2020), Design of line of sight stabilization controller gimbaled system on aircraft, Proceedings of the Conference on Information and Control Systems, 444-445.
11. Shin, S. C., Moon, H. C., Park, J. Y., Lee, S., (2019), LQG optimal controller design of 2-axis gimbal servo system for line of sight stabilization, Proceedings of the Conference on Information and Control Systems, 164-165.

12. Hilkert, J. M., Jonas, M., (2008), A unique three-axis gimbal mechanism, Proceedings of the SPIE Defense + Security, 6971.

13. Qi, Y., Wang, H. L., Xu, Q. Q., Du, Y. L., Shao, X. Z., Yang, H., (2021), A new flexible gimbal for electro-optical sighting system (EOSS), Optik, 242, 167016.

14. Johansen, T. A., Fossen, T. I., (2013), Control allocation—A survey, Automatica, 49(5), 1087-1103.

15. Tohidi, S. S., Yildiz, Y., Kolmanovsky, I., (2020), Adaptive control allocation for constrained systems, Automatica, 121, 109161.

16. Akram, W., Casavola, A., Miškovic, N., (2022), Robust adaptive control allocation schemes for overactuated underwater vehicles under actuator faults, IFAC-PapersOnLine, 55(6), 67-72.

17. Blaha, T. M., Smeur, E. J. J., Remes, B. D. W., (2023), A survey of optimal control allocation for aerial vehicle control, Actuators, 12(7), 282.

18. Kumagai, M., (2010), Development of a ball drive unit using partially sliding rollers—An alternative mechanism for semi-omnidirectional motion—, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 3352-3357.



Cheonkyu Park
Researcher of Hanwha Systems Infra Technology R&D Center. His research interest is Robotics engineering.
E-mail: dothkyu@hanwha.com



Jungho Kim
Senior Researcher of Hanwha Systems Infra Technology R&D Center. His research interest is Robotics engineering.
E-mail: gogo2436@hanwha.com



Dae Gyu Choi
Principal Researcher of Hanwha Systems Infra Technology R&D Center. His research interest is LOS stabilization control.
E-mail: daegyu.choi@hanwha.com

한국정밀공학회지 제 43 권 제 10 호 pp. 1063-1078 October 2026 / 1063
J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 43, No. 10, pp. 1063-1078 http://doi.org/10.7736/JKSPE.026.00081
ISSN 1225-9071 (Print) / 2287-8769 (Online)

조업 전문가와 LLM 대화를 이용한 도메인 지식그래프 기반 대화형 조업 어시스턴트 개발

A Domain Knowledge Graph-based Conversational Operation Assistant Using Expert-LLM Dialogue

서준영[1], 이재필[1], 문영민[1,#]
Junyoung Seo[1], Jaepil Lee[1], and Youngmin Moon[1,#]

1 포항산업과학연구원 AX연구그룹 (AX Research Group, K-Steel Innovation Institute, Research Institute of Industrial Science & Technology)
Corresponding Author / E-mail: ymmoon1850@gmail.com, TEL: +82-54-217-6176
ORCID: 0009-0000-7723-5826

KEYWORDS: Domain ontology (도메인 온톨로지), Knowledge graph (지식그래프), Large language model (거대언어모델), Continuous casting (연속주조), Conversational assistant (대화형 어시스턴트), Active expert query (전문가 능동 질의)

The growing complexity of steel manufacturing, loss of veteran operators, and demand for carbon-neutral operation make tacit operational knowledge increasingly difficult to sustain. Standalone large language models (LLMs) cannot adequately address terminology mismatch, schema fragmentation, undocumented tacit knowledge, and non-traceable hallucinations in on-site data. This study proposes a domain knowledge graph-based conversational operation assistant integrating a steel-process ontology with expert–LLM dialogue. An eight-class ontology is introduced, featuring the UnfilledSlot class to explicitly represent missing knowledge. A five-phase methodology constructs an initial graph, automatically fills available slots, prioritizes remaining deficiencies, and generates targeted multiple-choice questions for experts. The completed graph supports NL2SQL, analysis, explainable AI, and response generation, while operational logs reveal new knowledge gaps. Applied to a steel continuous casting process with 8,441 slots, automatic filling achieved 62% (5,233 slots), while 600 bundled expert questions resolved 2,702 additional slots, reducing the unfilled ratio from 38% to 6%. Comparisons with a standalone LLM, retrieval-augmented generation, and an ablation without UnfilledSlot, together with expert evaluations across three graph-completeness levels, confirm that explicit deficiency handling improves response reproducibility and traceability.

Manuscript received: July 31, 2026 / Revised: August 30, 2026 / Accepted: September 1, 2026
This paper was presented at KSPE Spring Conference in 2026

NOMENCLATURE

s	=	Slot in an Intent/Question Pattern
τ	=	Acceptance Threshold for Automatic Slot Filling
1[·]	=	Indicator Function
α, β, γ, δ	=	Expert-tuned Priority Weights
C1–C8	=	Eight top-level Ontology Classes
λ	=	Weights for the Slot-filling Score

1. Introduction

The steel industry is undergoing a rapid explosion of process complexity while simultaneously facing the discontinuity of skilled manpower. In a modern integrated steelworks, hundreds of interdependent variables interact across melting, casting, and rolling, and the number of operating conditions that must be jointly reasoned about has grown well beyond what any single operator can hold in mind. At the same time, the judgement rules that

Copyright © The Korean Society for Precision Engineering
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

determine whether an operation is normal, and the sensory interpretation of casting phenomena, largely reside in the minds of veteran operators as undocumented tacit knowledge [1]. As experienced operators retire and pressures from ESG and carbon-neutrality intensify, this tacit judgement structure (rather than the availability of data itself) has become the true bottleneck of steel operation. The problem is therefore not a shortage of data, but the discontinuity of the skilled interpretive structure that turns data into decisions.

Extreme thermal processes such as continuous casting further aggravate the problem. The core physical state of the process (internal temperature fields, flow fields, and phase transformation) cannot be measured directly, so it must be inferred indirectly from surrounding sensors [2,3]. On-site data are distributed across heterogeneous systems such as PLC, MES, SCADA, and LIMS, with inconsistent tags, units, and time references, and the coupling between process and quality is rarely recorded in an explicit form. In addition, abnormal, defective, and extreme-condition data are scarce, and core process data are often restricted from leaving the plant for security reasons, which limits the amount and diversity of learnable examples. As a result, the mapping from process conditions to quality outcomes remains implicit and difficult to reuse.

Large language models (LLMs) have recently shown strong natural-language reasoning and question-answering ability [4-6], which motivates their use as a conversational operation assistant that lets engineers query plant data in natural language. However, a standalone LLM cannot by itself resolve four structural barriers that are intrinsic to industrial operation. First, terminology mismatch: the same phenomenon is called differently across departments, lines, and shifts (e.g., “meniscus hunting” ≡ “MdLv oscillation” ≡ “level instability”), so without a standard vocabulary even intent classification becomes unstable. Second, schema fragmentation: five or more systems use different column names, keys, and units, and their schemas drift frequently. Third, tacit knowledge: judgement rules such as “when is a state normal” are rarely documented and cannot be fully elicited in advance. Fourth, hallucination and non-traceability: a standalone LLM tends to assume the existence of non-existent tables or columns and fabricate SQL, making verification, reproduction, and auditing difficult.

To address these barriers, this study proposes a domain knowledge graph-based conversational operation assistant that couples a steel-process ontology with expert–LLM dialogue. Rather than attempting to elicit the entire domain in advance or to audit every generated answer after the fact, the framework explicitly represents what it does not yet know and lets the LLM ask experts only the questions that matter. The main contributions of this paper are threefold: (i) an eight-class ontology whose distinctive element, the UnfilledSlot class, represents the deficiency of the graph as an explicit, first-class object; (ii) a five-phase construction–operation methodology in which the LLM actively generates prioritized, targeted questions to experts so that only essential gaps are answered; and (iii) a case study on a steel continuous casting process demonstrating reproducible and traceable, field-grounded responses. The remainder of this paper reviews the background in Section 2, analyzes the structural limitations of a standalone LLM with a motivating example in Section 3, details the proposed methodology in Section 4, presents the continuous casting case study in Section 5, discusses advantages and limitations in Section 6, and concludes in Section 7.

2. Background and Related Work

2.1 Industrial AI and Tacit Knowledge

Industrial AI has largely focused on predictive modelling for specific tasks such as defect prediction or anomaly detection [2]. These models achieve high accuracy on their target task but are difficult to reuse across processes, and they seldom expose the interpretive rules that connect process variables to quality outcomes. The interpretive layer, the tacit reasoning of experts, remains outside the model, which limits generalization and trust.

2.2 Knowledge Graphs and LLM Grounding

Knowledge graphs provide a structured representation of concepts and their relations and have been widely used to ground language systems [7,8]. When an LLM is combined with a domain knowledge graph, terminology can be normalized, database schemas can be linked explicitly, and generated queries can be validated against known structures, mitigating hallucination. Retrieval-augmented generation similarly grounds an LLM in external knowledge [3]. However, existing industrial knowledge graphs assume that the required knowledge is already available, and they provide no mechanism to represent, prioritize, or resolve the knowledge that is still missing. This study fills that gap by making deficiency an explicit, actionable class.

2.3 Text-to-SQL and Tool Orchestration

Translating a natural-language question into a database query (known as Text-to-SQL) has advanced considerably with sequence-to-sequence and, more recently, LLM-based methods [9]. Yet in an industrial setting the accuracy of Text-to-SQL is limited less by the language model than by the ambiguity of the

schema and the vocabulary: a model cannot generate a correct join if it does not know which physical column corresponds to a field term, or which threshold defines a defect. Tool-orchestration approaches, in which an LLM plans a sequence of calls to external tools, face the same dependency. The framework proposed here therefore treats the knowledge graph not as an optional add-on but as the substrate on which query generation, validation, and tool orchestration are all grounded, and it treats the resolution of schema and vocabulary ambiguity as an explicit construction step.

2.4 Positioning of the Proposed Approach

The proposed approach can be positioned at the intersection of the three research lines above. From industrial AI it inherits the goal of grounding decisions in plant data, but it externalizes the interpretive layer that industrial AI usually leaves implicit. From knowledge-graph research it inherits the structured representation, but it extends the representation to include the graph's own deficiencies. From Text-to-SQL and tool orchestration it inherits the execution machinery, but it removes the schema and vocabulary ambiguity that limits those methods in practice. The novelty is therefore not any single component but the closed loop that connects them: an ontology that describes both what is known and what is missing, and an active-query mechanism that uses the LLM to fill the missing part economically. To the best of the authors' knowledge, representing deficiency as a first-class, prioritizable class and driving expert elicitation from it has not been reported in prior industrial knowledge-graph systems.

3. Structural Limitations and Motivating Example

This section analyzes why the four barriers introduced in Section 1 cannot be overcome by scaling the language model alone, and illustrates the consequence with a motivating example.

3.1 The Four Barriers in Detail

Terminology mismatch is not a spelling problem but a semantic one: field expressions, case-based judgements, and unwritten rules coexist, and a single standard dictionary does not exist. Because the same slot may be referred to by several field terms, the intent classifier and the slot resolver both become unstable when the mapping is missing. Schema fragmentation compounds this: the SCADA, MES, LIMS, quality, and prediction-result databases each use different column names, keys, and units, and their schemas change often, so a query written against one snapshot may silently break later. Tacit knowledge is the hardest barrier, because the rules that define normality are case-based and reside in operators' heads; they cannot all be mined in advance, and attempting to do so would impose an unrealistic burden on experts. Finally, hallucination and non-traceability arise directly from the first three: lacking a grounded schema, a standalone LLM assumes that a plausible table or column exists and fabricates SQL accordingly, so the result cannot be reproduced, traced, or audited.

3.2 Motivating Example

Consider the operator question, “Why was meniscus hunting severe in this cast?” Without a domain ontology, an LLM produces a fluent but ungrounded answer that merely lists possible factors and advises checking casting speed, temperature, and pressure. The question is superficially understood, but the answer is not connected to any field definition, does not know which database columns to inspect, and remains at the level of generic explanation.

With a domain ontology, the same question is first interpreted through the field term (meniscus hunting is recognized as equivalent to MdLv oscillation), and the relevant variables and events are automatically linked. The assistant then reports that in the late stage of this cast the MdLv variability was 1.8 times higher than in normal casts, that UpperArPress surges and a temporary CastSpd drop occurred in the same interval, and that the variation was concentrated right after the ladle change; it concludes that pressure instability and casting-speed change are the primary causes and recommends inspecting the Ar-pressure control history and the nozzle state. The response thus proceeds from interpretation, to data linkage, to analysis, to an actionable recommendation. The contrast makes clear that the missing ingredient is not linguistic fluency but a structured, field-grounded knowledge layer: precisely what the proposed methodology constructs.

4. Proposed Methodology

4.1 Overview and Ontology Design

The proposed framework organizes domain knowledge into an ontology of eight top-level classes, summarized in Table 1. Classes C1-C7 capture the concepts, data schema, executable tools, constraints, intents, response templates, and evidence needed for grounded question answering. The distinctive addition is C8, UnfilledSlot, which represents the slots that could not be filled automatically. By expressing "what the graph does not know" as an object (with an identifier, a parent intent, a deficiency type, a priority, and a generated query), the framework can prioritize deficiencies and turn them into targeted questions for experts. This single design decision is what allows the same graph to serve both as a grounding substrate for question answering and as a self-

Table 1 Eight top-level ontology classes

#	Class	Role
C1	Domain / Concept	Semantic units: process, equipment, product, section, quality, defect, event
C2	DataSchema	Tables, columns, keys, join paths, units, sampling period, data source
C3	Execution	SQL templates, Python analysis, visualization, XAI, tool candidates
C4	Constraint / Policy	Required/forbidden/range/format, sandbox, permission, model routing
C5	Intent / QuestionPattern	Query intent types with required/optional slot structure
C6	ResponseSchema	Fact-Interpretation-Recommendation three-layer response template
C7	Evidence / EventLog	Execution results, errors, latency, drift, user feedback
C8	UnfilledSlot	Missing slot: identifier, parent intent, deficiency type, priority, generated query

description of its own limitations.

The classes are connected by typed relations that carry the domain semantics needed for reasoning. Concept-to-Attribute relations bind a phenomenon to its measurable variables; Attribute-to-DataSchema relations bind a variable to its physical column, key, and unit; Intent-to-Concept relations declare which concepts an intent operates on; and Event relations such as influence, co-movement, and increase express how one quantity affects another over an interval. These relations are what allow the assistant to move from a field term to the correct columns and then to a causal interpretation, rather than merely retrieving isolated values. When a required relation is missing (for instance, when the variable set that defines a phenomenon is ambiguous), the gap surfaces as an UnfilledSlot just as a missing value does, so structural and definitional deficiencies are handled by the same mechanism.

The construction and operation of the graph proceed in five phases, illustrated in Fig. 1. Phases 1–3 complete the graph, and Phases 4–5 operate on it; any deficiency discovered during operation is fed back to Phase 3.

4.2 Phase 1: Semantic Extraction and Initial Graph

In Phase 1, domain materials are parsed by the LLM to extract instances of the eight classes and to build an initial graph. The input materials include standard operating procedures (mapped mainly to Concept and Attribute instances such as slab, charge, mold, tundish, CastSpd, TdTemp, and MdLv), variable and abbreviation dictionaries, expected operator question–answer sheets (mapped to Event and Intent instances such as ladle change, pressure surge, trend-over-last-N, and normal-versus-current),

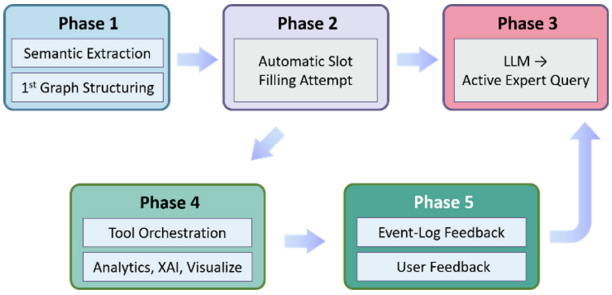


Fig. 1 Five-phase framework: Phases 1–3 build the graph and Phases 4–5 operate on it, with deficiency feedback

defect case reports (mapped to Relation instances such as influence, co-movement, and increase), and technical reports, papers, and manuals (mapped to ResponseSchema instances following the Fact-Interpretation–Recommendation template).

The resulting initial graph is structurally complete in that every intent is associated with its required slots, but the value of each slot may still be empty. This deliberate separation of structure from value is what allows the framework to reason explicitly about missing information in the subsequent phases, instead of silently returning an incomplete or fabricated answer.

4.3 Phase 2: Automatic Slot Filling

Phase 2 attempts to fill each slot automatically through a three-stage procedure. First, the slot is matched against the database schema using a combined score of lexical similarity, embedding similarity, and unit compatibility, as defined in Eq. (1). Second, candidates are searched in the dictionary and refined Q&A data prepared in Phase 1. Third, a slot is accepted if its score reaches the threshold; otherwise, it is registered as an UnfilledSlot (C8) node.

$$Score(s) = \lambda_{lex} S_{lex} + \lambda_{emb} S_{emb} + \lambda_{unit} S_{unit} \quad (1)$$

Here S_lex, S_emb, and S_unit denote lexical, embedding, and unit-compatibility scores, and λ are their weights. A slot with score(s) ≥ τ is filled; a slot with score(s) < τ is left unfilled and explicitly materialized as a C8 node, so that the graph records not only what it knows but also what it lacks. For example, the mold-level slot maps cleanly to the MdLv column because the field term, its embedding, and its unit all agree, yielding a high combined score and an automatic fill. In contrast, a slot such as the comparison-group definition has no lexical or schema counterpart at all, so its score falls below τ and it becomes a C8 node. The threshold τ acts as a deliberate conservatism control: raising it sends more borderline slots to expert review, trading automation for reliability. The operating point is therefore selected by an explicit criterion rather than by convenience. On a manually verified subset of slots we measured the incorrect-fill rate as a

function of τ and adopted the smallest value at which that rate falls below 5%. We place the operating point on the conservative side because an incorrect fill is more damaging than an unfilled slot in this framework: an unfilled slot is materialized as a C8 node and resolved through a defined procedure, whereas an incorrectly filled slot remains unmarked in the graph and propagates into every response that reads it. The sensitivity of the framework to this choice is reported in Section 5.8.

4.4 Phase 3: Deficiency Prioritization and Active Expert Query

Because experts have limited time, the unfilled slots must be prioritized before they are turned into questions. The priority of a slot is computed by Eq. (2), which favors slots that are essential, frequently invoked, reusable, and blocking.

$$Pri(s) = \alpha 1[Req(s)] + \beta \hat{F}(s) + \gamma Re(s) + \delta Blk(s) \qquad (2)$$

Here Pri(s), Req(s), $\hat{F}$(s), Re(s) and Blk(s) denote priority, Required, Frequency, Reuse, and Block scores. The indicator term rewards required slots, distinguishing a required slot (value 1) from an optional one (value 0); $\hat{F}$(s) estimates how frequently the parent intent is invoked, inferred from dictionary Q&A and report frequencies; Reuse(s) measures how many intents share the same slot, such as a shared "comparison-group definition"; and Block(s) measures the degree to which the missing slot blocks execution of the whole intent, taking 1 when it blocks the entire intent and 0.5 when it blocks only part.

The four weights are not tuned independently. Their relative ordering follows from a single criterion, namely that executability takes precedence over utilization and utilization over efficiency, which yields $\alpha > \delta > \beta > \gamma$. The indicator term for Required slots carries the largest weight because a missing required slot renders its parent intent inexecutable; this is a categorical rather than a graded consequence, and no degree of frequency or reuse compensates for an intent that cannot run at all. The Blocking term is placed immediately below it because it expresses the same concern while admitting a partial value of 0.5. Were δ set at or above α, a partially blocking optional slot could outrank a fully blocking required one, contradicting the criterion. The Frequency term follows because a frequently invoked intent realizes the benefit of a resolution more often, though frequency governs how often the benefit accrues rather than whether it can accrue at all. The Reuse term is smallest because reuse amplifies the efficiency of an expert answer without affecting executability. What the framework asserts is therefore the ordering rather than the magnitudes: any assignment satisfying $\alpha > \delta > \beta > \gamma$ implements the same criterion, and the magnitudes allow a plant to adjust the relative emphasis within that constraint. The configuration (1.0, 0.5, 0.3, 0.7) is the operating point adopted in the case study of Section 5, and its sensitivity is examined in Section 5.8.

The prioritized slots are then converted by the LLM into targeted questions that follow five generation principles, designed so that an expert can answer in a short time. The principles are: (i) clarify units, so that a question about a threshold specifies whether it is expressed in degrees Celsius or in another unit; (ii) prefer a multiple-choice format over an open-ended one; (iii) cite the supporting evidence, so the expert can confirm or correct the assumption; (iv) bundle slots that share the same intent or variable into a single question; and (v) enforce a strict response format such as JSON, checkboxes, or short sentences. Each principle is encoded as an explicit constraint in the generation prompt, so that the principles are enforced rather than merely stated. A representative generated question for the FlowBias intent asked the expert to select, from a checklist, which variables should be used to judge an increase in flow bias—the left–right difference of UpperArPress, the per-nozzle deviation of PlateArFlow, or the asymmetry of the In 01–11 and Out 01–11 temperature distributions—together with an "other" field. This design lets experts answer only the essential gaps, minimizing their burden while maximizing the value of each answer.

Table 2 Eight-step tool orchestration pipeline in Phase 4

Step	Stage	Role
1	Intent classify	Identify what the user is asking
2	Slot resolve	Extract the key entities in the question
3	Schema lookup	Link entities to real tables and columns
4	SQL Gen + validate	Generate the query and check its validity
5	Sandbox execute	Run safely without affecting the live DB
6	Analysis + XAI	Analyze data and explain influential variables
7	Visualize + response	Present results and compose the answer
8	Event log	Record success, failure, latency, and feedback

4.5 Phase 4: Tool Orchestration

Once the graph is completed, Phase 4 answers a natural-language query through the eight-step pipeline summarized in Table 2. The steps proceed from understanding the question to delivering a grounded answer and recording the outcome. Because every step is grounded in the graph, generated SQL references only tables and columns that provably exist, execution occurs first in a sandbox so that the live database is never affected, and each answer is produced as a Fact–Interpretation–Recommendation three-layer response.

Table 3 Feedback triggers and graph updates in Phase 5

Trigger	Target	Mechanism
Query frequency exceeds threshold	C5 Intent	Promote to a new intent template
Repeated missing-column / wrong join	C4 Constraint	Strengthen required/ forbidden conditions
Repeated variable redefinition	C1 C6	Correct definition and response template
Schema change detected	C2 DataSchema	Auto-remap columns and join paths
Negative user feedback	C6 C3	Re-rank template candidates
Repeated failure / new intent	C8 UnfilledSlot	Register new slot → Phase 3 feedback

4.6 Phase 5: Event-log Feedback

During operation, Phase 5 monitors success, failure, latency, drift, and user feedback, and updates the graph when specific triggers fire, as summarized in Table 3. Crucially, repeated failures and newly emerging intents register new UnfilledSlot nodes, which are fed back into the Phase 3 queue. The graph therefore evolves continuously, and its limitations remain transparently visible rather than hidden: every new deficiency discovered in operation becomes a C8 node and re-enters the construction loop.

4.7 Response Generation with a Three-layer Schema

Every answer produced in Phase 4 follows the ResponseSchema class (C6), which enforces a three-layer structure: Fact, Interpretation, and Recommendation. The Fact layer states only what the validated query returned, for example the measured variability of the mold level in a given interval relative to a normal-cast baseline. The Interpretation layer relates those facts to one another and to the field concepts, for example noting that the elevated variability co-occurs with a pressure surge and a casting-speed drop. The Recommendation layer proposes a concrete, bounded next action, for example inspecting a specific control history. Separating the three layers keeps the factual content auditable and prevents the interpretive or advisory content from being mistaken for measured data: a common failure mode of an unconstrained LLM. The schema also makes the response format predictable, which in turn allows the event-log in Phase 5 to attribute any user dissatisfaction to a specific layer and to re-rank the response templates accordingly.

Because the response is assembled from graph-grounded slots rather than free-form generation, two properties follow directly. First, the same question resolved to the same slots always produces the same SQL and therefore the same Fact layer, giving reproducibility. Second, the provenance of each layer (Ex. the slot, the SQL template, and the expert answer that filled any ambiguous slot) is recorded, giving traceability. These two properties are precisely the ones a standalone LLM cannot guarantee.

4.8 The UnfilledSlot Lifecycle

The UnfilledSlot class ties the five phases together into a single loop, and understanding its lifecycle clarifies how the framework behaves over time. A C8 node is created whenever Phase 2 fails to fill a slot with sufficient confidence, or whenever Phase 5 detects a repeated failure or a newly emerging intent. Once created, the node carries the metadata needed to act on it: an identifier, the parent intent it belongs to, the type of deficiency, a priority computed by Eq. (2), and, after Phase 3, the generated query. The node is then queued for the active-query procedure; when an expert answers, the corresponding slot value is written into the graph, the provenance of the answer is stored, and the C8 node is retired. If the same deficiency recurs later (because the schema drifted or a new intent reused the slot), a fresh C8 node is created and the cycle repeats.

4.9 Deployment Considerations

Deploying the framework in a real plant requires several engineering conditions to be met. In terms of data requirements, the target databases must expose read access to the process, quality, and event tables referenced by the DataSchema class, and their sampling periods must be recorded so that time alignment is well defined. In terms of preprocessing, unit normalization and window-based aggregation are applied before slot filling, because raw tags differ in unit and cadence across systems. In terms of hyperparameters, the acceptance threshold τ of Phase 2 and the weights (α, β, γ, δ) of Phase 3 are the principal tuning knobs, and the criteria by which they are set are given in Sections 4.3 and 4.4. In terms of system constraints, SQL execution is confined to a sandbox with read-only permissions, and model routing and access are governed by the Constraint class. Operational policies specify who may answer which expert questions and how conflicting answers are escalated.

A further operational question is when the active-query loop of Phase 3 should terminate. Because the priority function places the most consequential slots first, the marginal benefit of an additional answering round declines monotonically, and continuing to query experts past that point spends their time on slots with the least operational impact. We therefore define a stopping criterion in terms of the marginal reduction of the unfilled ratio: the loop is terminated at the first round in which that reduction falls below a specified threshold, after which the system transitions to the operation phase. The residual deficiencies are not abandoned but

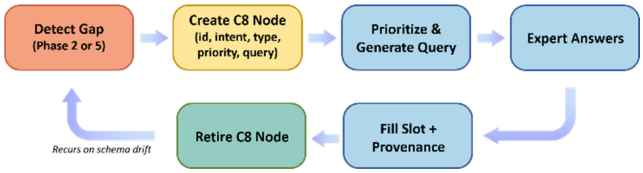


Fig. 2 Lifecycle of an UnfilledSlot (C8) node, from detection through expert answering to retirement and possible recurrence

deferred to the Phase 5 feedback loop, which re-registers a slot as a C8 node when operation actually encounters it. This routes expert effort only to deficiencies whose demand has been demonstrated, rather than pre-emptively to low-frequency slots. Section 5.3 reports the saturation round observed in the case study and the composition of the slots that remain at that point.

4.10 Implementation Environment

This section reports the configuration under which the case study of Section 5 was conducted, so that the results can be reproduced. Table 4 summarizes the environment. Semantic extraction (Phase 1) and question generation (Phase 3) were performed with OpenAI GPT-4o at a temperature of 0.2 and a top-p of 0.9, with a maximum output length of 8,192 tokens. The low temperature reflects that both stages require schema-conforming structured output rather than diverse generation. The model was accessed through an internal enterprise API gateway inside the corporate network. Because the case study uses proprietary plant data, we state explicitly which categories of data were transmitted: schema metadata, canonical terminology, and document text approved for external processing, with no raw process measurements leaving the corporate environment. Requests pass through an OpenAI-compatible abstraction layer so that the model can be replaced without modifying the pipeline, which also allows the same experiment to be repeated with a different model.

The embedding similarity term of Eq. (1) is computed with text-embedding-3-large, which produces 3,072-dimensional vectors. Korean field terminology is canonicalized through the Phase 1 terminology and abbreviation dictionary before embedding, so that variants such as “?? ??” and "MdLv oscillation" are embedded as the same canonical term; this is the mechanism by which the terminology-mismatch barrier of Section 3.1 is addressed at the representation level. The ontology and its instances are stored in Neo4j 5.26 LTS, and the completed graph comprises 60,430 nodes and approximately 88,445 relationships, consistent with the per-class instance counts of Table 7. Slot resolution in Phase 4 uses a hybrid index combining the Neo4j full-text and graph indexes with a PostgreSQL B-tree index and a vector similarity index. The slot

Table 4Implementation environment of the case study

Component	Specification
Language model	OpenAI GPT-4o
Decoding parameters	temperature = 0.2, top-p = 0.9, max tokens = 8,192
Hosting	Internal enterprise API gateway; no raw process measurements transmitted
Interface	OpenAI-compatible REST API abstraction layer
Embedding model	text-embedding-3-large, 3,072-dimensional
Korean term handling	Canonicalization via Phase 1 dictionary prior to embedding
Graph database	Neo4j 5.26 LTS
Graph scale	60,430 nodes, approx. 88,445 relationships
Slot-resolution index	Neo4j full-text/graph + PostgreSQL B-tree + vector similarity
Relational store	PostgreSQL 16 (slot registry, C8 queue, provenance, event log)
Vector store	pgvector 0.8
Operating system	Ubuntu 22.04 LTS (64-bit)
Containerization	Docker Compose v2, 5 containers

registry, the C8 queue, the provenance records, the version history, and the Phase 5 event log are held in PostgreSQL 16, with embeddings indexed in pgvector 0.8. The separation is deliberate: the graph holds the semantics and their provenance links, whereas the relational store holds the operational records appended at high frequency during operation. The system is deployed as five containers orchestrated with Docker Compose v2 on Ubuntu 22.04 LTS.

5. Case Study: Steel Continuous Casting

5.1 Process and Variables

The framework was applied to a steel continuous casting process, in which liquid steel flows from the ladle through the tundish and mold and solidifies into a slab across the segments, as shown in Fig. 3. The relevant variables were grouped into process variables (e.g., CastSpd, TdTemp, MdLv, LdWgt), gas and pressure variables (e.g., UpperArPress, PlateArPress, PlateArFlow), quality indicators (e.g., defect_grade, FlowGrade, mold temperatures In/Out 01–11), and operational events (e.g., LadleChange, TundishRefill, NozzleClogging).

5.2 Dataset and Preprocessing

The knowledge graph was grounded in a real continuous casting dataset collected over 24 months, from January 2023 to December

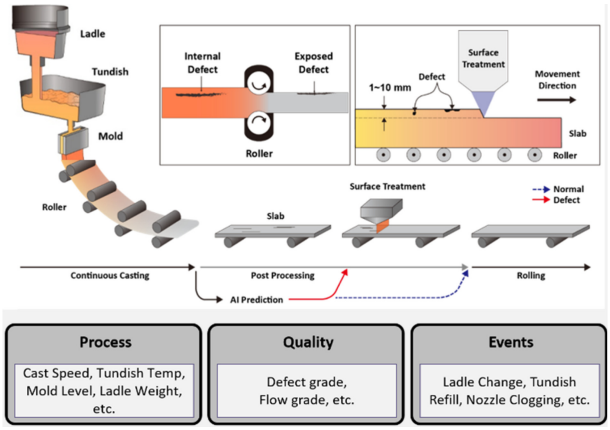


Fig. 3 Continuous casting process and representative variable groups used to instantiate the ontology

Table 5 Dataset, domain materials, and expert panel

Item	Value
Collection period	2023.01 – 2024.12 (24 months)
Time-series records	Approx. 7.2 million
Slabs	25,620 (19,153 normal / 6,467 defective, defect_grade ≥ 3)
Operational variables	Approx. 50 (process, gas·pressure, quality, mold temperature)
Sampling cadence	Process/SCADA: 1 s; quality/event: event-based
Domain documents	84 documents, approx. 1,250 pages
Expert panel	6 experts, 8–26 years of field experience
Panel composition	Casting operation, quality, and equipment

2024. The dataset comprises approximately 7.2 million time-series records covering 25,620 slabs, of which 19,153 were classified as normal and 6,467 as defective under the defect-grade threshold of ≥ 3. We state this threshold here because it is itself one of the slots resolved by the active-query procedure of Section 5.4: the labelling of the dataset rests on a value the framework obtained from an expert rather than assumed a priori. To capture the molten-steel flow pattern that is otherwise unobservable, multiple thermocouples were installed at equal intervals inside the mold copper plates, providing the In 01–11 and Out 01–11 temperature channels; this arrangement allowed the flow pattern and the associated defect patterns to be visualized and analyzed. The final dataset comprised approximately fifty operational variables (operating plans, operating conditions, and mold temperatures), structured as time series and organized under the Attribute class of the ontology. Process and SCADA variables were recorded at a one-second cadence, whereas quality and event data are event-based rather than periodic. Section 4.9 requires sampling periods to be recorded so that time alignment is well defined, and the same requirement applies here: the window-based preprocessing described below aggregates variables over intervals, and an interval length is interpretable only relative to the underlying cadence.

A key preprocessing step reconciled the spatial reference between quality and process data. Surface-defect locations obtained from post-rolling images were converted back to the corresponding slab lengths before rolling, so that each defect could be aligned with the process variables that produced it. To minimize the error introduced by this length conversion, a window-based preprocessing was applied, aggregating variables over intervals rather than at single instants. These steps ensured that the DataSchema (C2) and Concept (C1) instances referenced by the graph corresponded to physically meaningful, correctly aligned quantities, which is a precondition for the grounded question answering demonstrated in this section.

The materials supplied to Phase 1 comprise 84 documents amounting to approximately 1,250 pages, consisting of standard operating procedures, variable and abbreviation dictionaries, expected operator question-answer sheets, and defect case reports. We report the document base explicitly because the quality of the initial graph depends directly on the primary materials, as noted in Section 6.2, and a reader should be able to judge whether the automatic filling ratio reported below was obtained from a rich or a sparse base. Table 5 summarizes the dataset, the materials, and the expert panel that participated in Phase 3.

5.3 Graph Instances and Slot-filling Result

Parsing the domain materials produced a large initial graph. Representative instance counts per class are listed in Table 7; the completed graph contained about 60,000 class instances, dominated by the Attribute and Concept classes that carry the process variables and their physical meanings. A class instance and a slot are distinct quantities, and we distinguish them explicitly because conflating them would make the ratios reported below difficult to interpret. A slot, as defined in Section 4.2, is a value position attached to an intent; the 4,496 Intent instances give rise to 8,441 instantiated slots, an average of 1.9 per intent, which is consistent with the required-slot structures listed in Table 8. The filling ratio is defined as the number of slots whose value is non-empty divided by the total number of instantiated slots, and every percentage reported in this paper is computed on that denominator. Of the 8,441 slots, 6,331 are required and 2,110 optional. Phase 2 filled 5,233 slots automatically, corresponding to 62%, and registered the remaining 3,208 as C8 nodes, corresponding to 38%.

Table 6 Slot accounting for the continuous casting case study

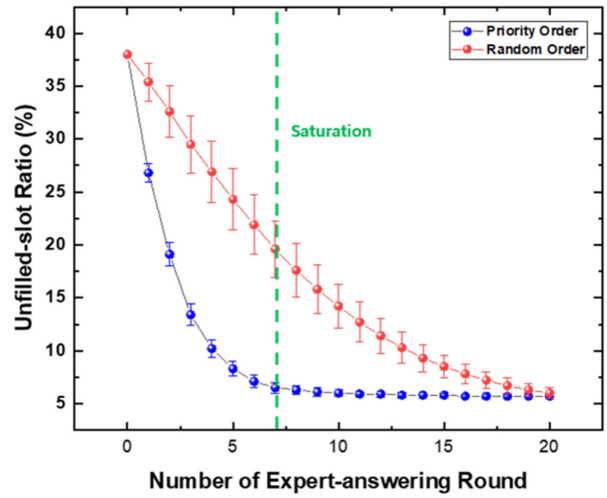
Stage	Slots	Ratio [%]
Total instantiated slots	8,441	100.0
Required	6,331	75.0
Optional	2,110	25.0
Phase 2 automatically filled	5,233	62.0
Phase 2 unfilled (registered as C8)	3,208	38.0
Phase 3 resolved by expert answers	2,702	32.0
Residual unfilled at saturation	506	6.0
Bundled questions put to experts	600	—
Slots resolved per question	4.5	—

Table 7 Representative graph instance counts by class

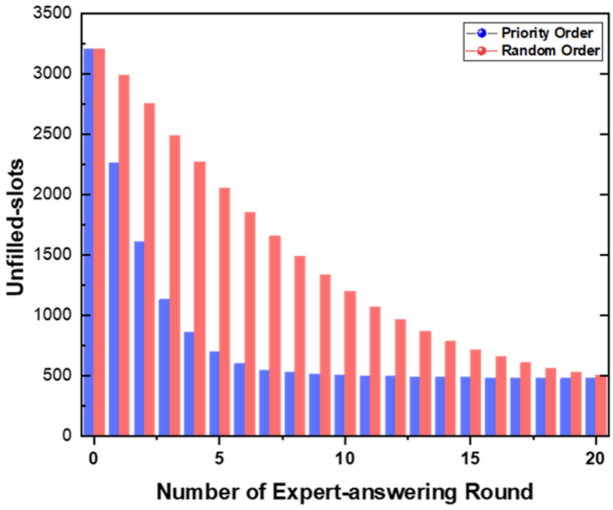
Class	Count	Representative instances
Concept	14,309	Heat, Cast, Strand, Slab, Mold, Tundish
Attribute	38,491	CastSpd, TdTemp, MdLv, LdWgt, In/Out 01-11
Event	2,593	LadleChange, TundishRefill, PressureSurge
Intent	4,496	StateCheck, TrendQuery, FeatureAttribution
ResponseSchema	541	NumericSummary, TrendInterp, CauseCandidate

Table 8 Representative intents and their required slots

Intent	Required slots
StateCheck	target section, variable, normal range
TrendQuery	target cast, variable, time window
NormalVsDefectCompare	comparison-group definition, variable
PredictionExplain	target cast, defect-grade threshold
FlowBias	bias-decision indicator, threshold



(a)



(b)

Fig. 4 Reduction of the unfilled-slot ratio as prioritized slots are answered, compared with a random answering order. The random-order curve is the mean over 50 permutations; error bars denote one standard deviation. (a) Unfilled-slot ratio, (b) Absolute number of unfilled slots

Phase 3 resolved 2,702 of those through expert answers, leaving 506 unfilled, corresponding to 6%. Table 6 reports the accounting in full.

The trajectory of the slot-filling process is shown in Fig. 4, which plots the unfilled-slot ratio against the number of expert-answering rounds. Each round comprised approximately 60 bundled questions distributed across the six experts, roughly ten questions per expert per round, so that the 600 questions in total correspond to the rounds shown. Under the priority order of Eq. (2) the ratio drops sharply in the first rounds and then flattens, falling from 38% (3,208 slots) to 6% (506 slots). Applying the stopping criterion of Section 4.9, saturation is reached at round 7, where the marginal reduction first falls below one percentage point; the marginal reduction was 11.2 percentage points at round 1 and 0.6 at round 7, and beyond that round the residual remains close to 506 slots. For comparison, the random-order condition was evaluated over 50 independent permutations of the same 600 questions, preserving the resolution dependencies recorded during the case study, so that both curves in Fig. 4 derive from measured expert answers rather than from simulation. The random order reduces the ratio far more slowly, requires almost all questions to be answered before reaching the same level, and exhibits no saturation over the interval examined; the difference between the two conditions at the saturation round is statistically significant. This contrast is the central quantitative evidence that a small number of high-priority slots accounts for most of the improvement, and that prioritization, not merely the volume of expert answers, is what makes the active-

query loop economical.

The 600 questions resolved 2,702 slots, an average of 4.5 slots per question. Two mechanisms account for this ratio, and both are intended rather than incidental. First, questions are bundled: by the fourth generation principle of Section 4.4, slots sharing an intent or a variable are combined into a single question, so one interaction addresses several slots at once. Second, a resolved slot propagates: a single answer to a shared slot resolves it wherever it is referenced, as with the defect-grade threshold discussed in Section 5.4. This is the effect that the Reuse term of Eq. (2) is designed to reward, and it is why the reduction from 38% to 6% is achieved within the small number of rounds shown in Fig. 4.

The composition of the 506 slots that remain at saturation explains why the curve flattens rather than reaching zero. The residual set is dominated by optional slots, by slots belonging to intents whose estimated invocation frequency falls in the lowest quartile, and by slots for which no standard definition exists in the field and on which the expert panel did not converge. Required slots belonging to frequently invoked intents are almost entirely resolved by the saturation round. A fourth group is distinct in kind from the other three: these slots remain not because they are unimportant but because they lie outside the reach of a single question. Question generation presupposes a form an expert can answer briefly, whereas some slots cannot be reduced to a value or a choice and require supplementary domain materials (equipment drawings, the revision history of an operating standard, or case data spanning several processes) to be settled. Demanding an immediate answer for such a slot degrades rather than improves the reliability of the response, and in the case study questions of this type tended to be deferred, mirroring the observation in Section 5.7 that open-ended questions were deferred. These slots are therefore properly handled by a separate material-collection procedure rather than by repeated querying. Saturation is accordingly not a loss of effectiveness but the intended consequence of the priority function: what remains is, by construction, either of least operational impact or beyond the reach of the elicitation mechanism.

The Intent class instantiated for this domain covers the question types that operators most frequently ask. Table 8 lists representative intents together with their required slots; the required slots are precisely the ones whose absence triggers an UnfilledSlot, which is why several of them recur as the unfilled slots discussed in Section 5.4.

5.4 Representative Unfilled Slots and Expert Query

The active-query phase involved six domain experts whose field experience ranges from 8 to 26 years and who cover continuous-casting operation, quality, and equipment. The case study surfaced several representative unfilled slots, each arising from a genuine ambiguity in the field rather than from missing data. Examples include the absence of a standard definition of the comparison group, the temporal definition of the late-cast segment (variously taken as the last 20%, the last 30%, or a fixed number of minutes), and the defect-grade threshold that mixed ≥ 2 and ≥ 3. These are exactly the required slots whose absence blocks an intent, as noted in Section 5.3. Following the priority computed by Eq. (2), the highest-priority slot for the PredictionExplain intent, the defect-grade threshold, was converted by the LLM into a bundled multiple-choice question. The question asked the expert to choose the default threshold at which a slab is regarded as defective, offering the options defect_grade ≥ 2, ≥ 3, and ≥ 4 together with an “other” field, and citing the mixed usage as evidence.

The expert selected defect_grade ≥ 3, and this default was fixed in the graph. Because the same threshold is reused by several intents, a single answer resolved multiple downstream ambiguities at once. Repeating this targeted procedure over the prioritized slots reduced the unfilled ratio from 38% to 6%, and every filled value carries a record of which expert answer set it, satisfying the traceability requirement.

The FlowBias intent illustrates the same mechanism for a structural rather than a threshold ambiguity. Its bias-decision indicator slot could not be filled automatically because several variable combinations were plausible: the left–right difference of UpperArPress, the per-nozzle deviation of PlateArFlow, and the asymmetry of the In/Out 01–11 temperature distributions. The generated question presented these as a checklist so that the expert could select the intended combination in a single interaction. Once answered, the FlowBias intent became executable, and the same indicator definition was reused wherever flow asymmetry was queried, again amplifying the value of one expert answer across the graph.

5.5 Worked Example of the Operation Pipeline

To make the operation phase concrete, consider the query "why did the recent cast have many defects?" resolved to the PredictionExplain intent. In the Intent Classify step the question is mapped to PredictionExplain; in Slot Resolve the target cast is bound from the session context and the defect-grade threshold is read from the graph value (≥ 3) fixed earlier by the expert. Schema Lookup links the abstract slots to concrete columns: the defect table keyed by slab length, and the process tables for MdLv, UpperArPress, and CastSpd. SQL Gen + Validate then produces a query that joins these tables over the aligned time window, and the validator confirms that every referenced column exists in the schema.

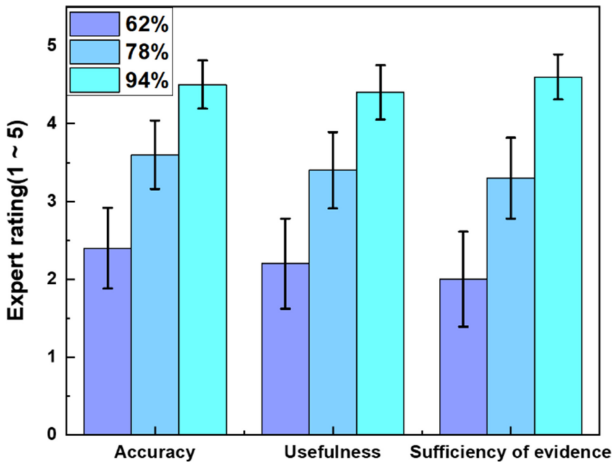


Fig. 5 Expert ratings at three levels of graph completeness (62, 78, and 94%). Six domain experts rated responses to a common set of 120 queries on a five-point scale, blind to condition and in randomized order. Error bars denote one standard deviation across raters

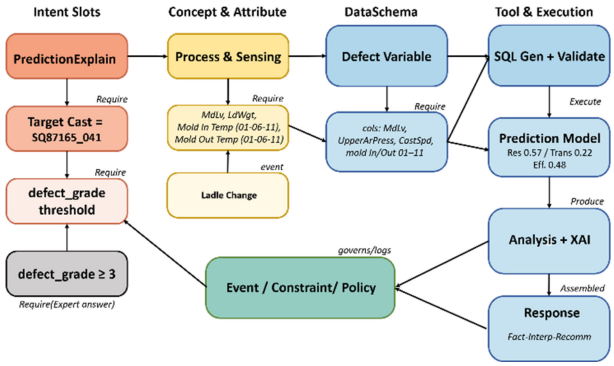


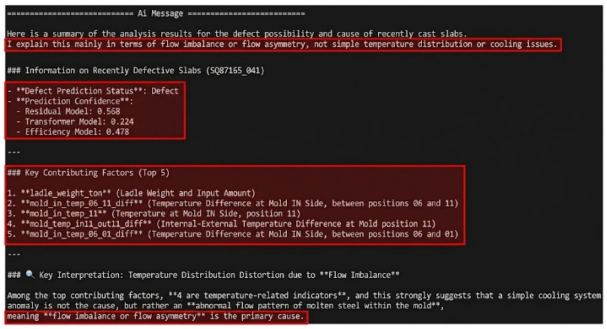
Fig. 6 Four-layer use-case subgraph for the PredictionExplain query: intent and slots, grounded concepts and attributes, the physical DataSchema mapping, and the tool-execution pipeline from SQL validation through prediction, XAI attribution, and response generation.

In Sandbox Execute the query runs against a read-only replica, returning the per-interval statistics without touching the live database. Analysis + XAI computes the relative variability against the normal-cast baseline and attributes the elevated defect rate to the late-cast interval following the ladle change. Visualize + Response renders the interval chart and composes the Fact-Interpretation-Recommendation answer. Finally, Event Log records the latency, the success status, and any user feedback. Every intermediate artifact (the resolved slots, the validated SQL, and the attribution) is retained, so the same query can be reproduced and audited later. This end-to-end trace (Fig. 7) illustrates why grounding the pipeline in the graph, rather than relying on free-form generation, is what delivers reproducibility and traceability in practice.

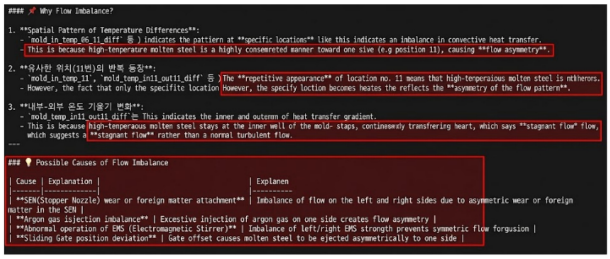
5.6 Effect of the Domain Ontology

The value of the completed graph is best seen by comparing responses with and without the ontology, as introduced in Section 3.2. Without it, the question “why was meniscus hunting severe in this cast?” receives only a generic answer that lists possible factors, because the field definition of the term is missing, the relevant database columns are unknown, and the answer is not linked to real data. With the completed ontology, the same question is interpreted through the field term (meniscus hunting ≡ MdLv oscillation), the relevant variables and events are automatically linked, and the answer reports that late-cast MdLv variability was 1.8 times higher than in normal casts, coinciding with UpperArPress surges and CastSpd drops after a ladle change, together with a concrete recommendation to inspect the Ar-pressure control history and nozzle state. The response thus proceeds from interpretation to data linkage to actionable recommendation, and because it is generated from fixed slots and validated SQL, the identical question yields the identical, auditable answer on repetition.

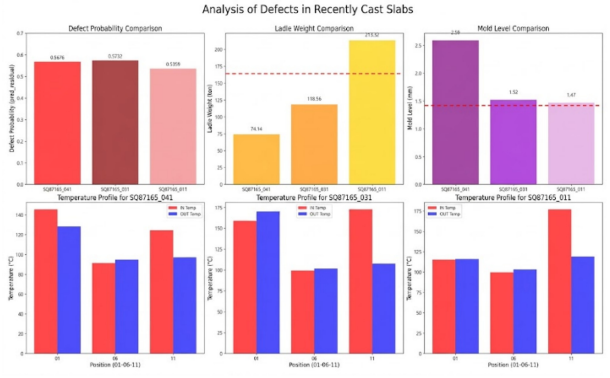
Beyond the single comparison above, we examined whether answer quality improves systematically as the graph becomes more complete. Beyond the single comparison above, we examined whether answer quality improves systematically as the graph becomes more complete. Three graph states were compared: the Phase 2 output at 62% completeness, the graph after the third prioritized answering round of Fig. 4 at 78%, and the completed graph at 94%. Defining the intermediate condition by a specific round makes it reproducible. The assistant was run on the same common query set of 120 queries used for the controlled comparison of Section 6.3, giving 3 × 120 responses. The six domain experts of Section 5.4 rated each response independently on a five-point scale along three axes (factual accuracy, usefulness, and sufficiency of evidence) with responses presented in randomized order and raters blind to the condition. Averaged over the three axes, the mean rating rises from 2.20 ± 0.57 at 62% completeness, through 3.43 ± 0.48 at 78%, to 4.50 ± 0.32 at 94%, and the difference between the extreme conditions is statistically significant. Fig. 5 reports the ratings. The largest gain falls in the interval over which the high-priority definitional slots are answered, which is the same interval in which the unfilled ratio drops most steeply in Fig. 4 and is consistent with the observation in Section 5.7 that the deficiencies most degrading answer quality were definitional rather than model-related. One limitation of this evaluation should be stated alongside its result: the raters are the same experts who answered the active queries, since they are the



(a)



(b)



(b)

Fig. 7 End-to-end operation example for the PredictionExplain intent on slab. Given the query "Assess the defect likelihood of the recently cast slab and, if defective, explain the contributing causes", the assistant (a) returns a grounded answer reporting the defect prediction with per-model confidences and the top-five contributing features, (b) generates a traceable interpretation attributing the temperature-distribution distortion to flow imbalance rather than a cooling fault, and (c) supports the interpretation with the underlying process data: defect likelihood, ladle weight, and mold level across three casts, with the IN/OUT mold-temperature profiles at positions 01–06–11.

personnel with the required field experience at this site. We therefore restrict the claim to the relative ordering of the three conditions rather than to the absolute values, and Section 6.2 identifies evaluation by raters independent of the construction process as the appropriate next step.

The end-to-end operation of the framework on a single query is summarized in Fig. 6, which traces the PredictionExplain intent from its required slots, through the grounded concepts, attributes, and physical DataSchema, to the tool-execution pipeline that produces the final three-layer response. The diagram makes explicit how a field term is resolved to a physical column and how the expert-set defect-grade threshold is consumed by the prediction and response tools, so that every step of the answer remains grounded and traceable.

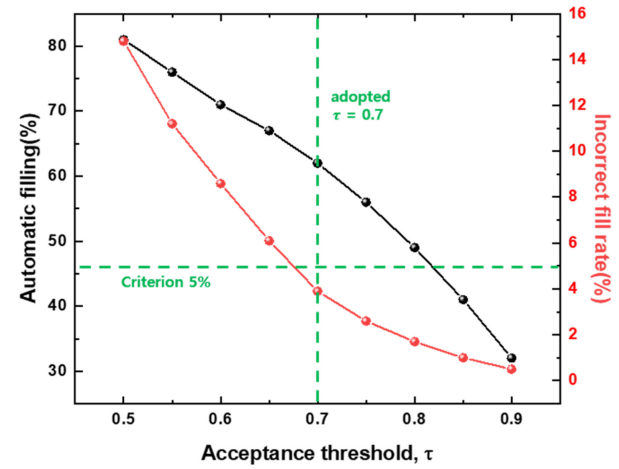
5.7 Operational Observations

Two observations from the case study support the design choices of the framework. First, the reuse of slots across intents amplified the value of each expert answer: because the defect-grade threshold is shared by the PredictionExplain, NormalVsDefectCompare, and AnomalyDetect intents, a single expert decision resolved ambiguity for all three, which is exactly the effect the Reuse term in Eq. (2) is meant to reward. Second, the deficiencies that most degraded answer quality were definitional rather than model-related: what counts as the comparison group, the late stage, or a defect. This confirms the premise of Section 3 that the limiting factor in an industrial conversational assistant is the field-grounded knowledge layer rather than the fluency of the language model, and it explains why targeting a small number of high-priority definitional slots produced a disproportionate reduction in the unfilled ratio. A third observation concerns the questions the LLM generated: bundling slots that shared an intent or a variable, and offering multiple-choice options with cited evidence, kept each expert interaction short, which was essential for securing expert participation in a busy operating environment. Poorly phrased or open-ended questions, by contrast, tended to be deferred, underscoring that the phrasing of the active query is as important as the prioritization that selects it.

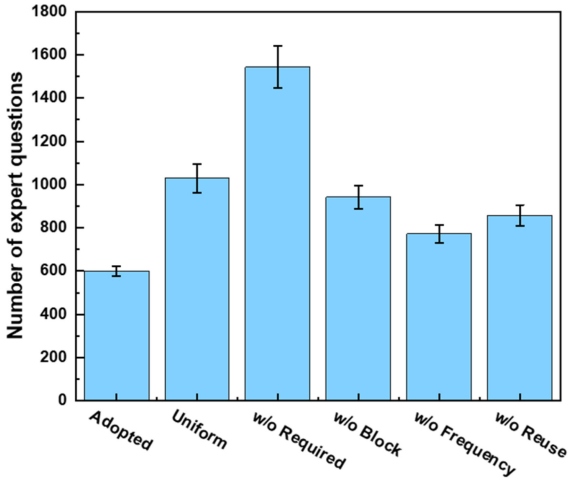
5.8 Sensitivity Analysis

The acceptance threshold τ of Phase 2 and the priority weights of Phase 3 are the principal tuning knobs of the framework, and Sections 4.3 and 4.4 state the criteria by which each was set. This section quantifies how far the reported results depend on those choices. Fig. 8(a) reports the automatic filling ratio, the proportion of slots routed to expert review, and the incorrect-fill rate across the range of τ. The trade-off that Section 4.3 describes qualitatively is visible directly: raising τ lowers the incorrect-fill rate but transfers more slots to the expert queue. The adopted operating point is marked together with the 5% incorrect-fill criterion that determined it, so that a reader applying a different criterion can identify the operating point it would select.

Fig. 8(b) compares the adopted weight configuration against



(a)



(b)

Fig. 8 Sensitivity analysis of the two principal tuning parameters. (a) Trade-off between the automatic filling ratio and the incorrect-fill rate as the acceptance threshold τ of Eq. (1) is varied; the adopted operating point (τ = 0.70) and the 5% incorrect-fill criterion that determined it are marked. (b) Number of bundled expert questions required to reach the target unfilled ratio under the adopted weight configuration, under uniform weighting, and under ablated variants in which each term of Eq. (2) is removed in turn. Error bars denote one standard deviation

uniform weighting and against ablated variants in which each term of Eq. (2) is removed in turn, reporting for each the number of bundled questions required to reach a target unfilled ratio. Removing the Required term degrades the outcome most severely, followed by removal of the Blocking term, which is the pattern that the ordering principle $\alpha > \delta > \beta > \gamma$ predicts; uniform weighting, in which the criterion is not expressed at all, requires substantially more questions than the adopted configuration. We read this as evidence that the ordering encodes a property observable in the data rather than a preference supplied after the fact. The analysis is intended to establish that the ordering materially affects the outcome, not to claim optimality for a particular numerical configuration.

6. Discussion

6.1 Advantages

The proposed framework offers five main advantages. First, it directs expert effort rather than consuming it indiscriminately: instead of defining the entire domain in advance or auditing every generated result afterwards, it asks experts only the targeted questions that resolve prioritized deficiencies, and the case study shows that 600 bundled questions were sufficient to resolve 2,702 slots. Second, it ensures reproducibility, because a given slot yields the same SQL and therefore the same response every time, a property measured rather than asserted in Section 6.3. Third, it provides traceability, recording which slot was filled by which expert's answer, which is essential for auditing in a regulated industrial setting. Fourth, it is extensible: the plugin structure organized around C8 allows a new process to be added without modifying the core graph. Fifth, it makes tacit knowledge visible, because C8 nodes expose the limitations of the system transparently instead of hiding them behind fluent but ungrounded answers.

6.2 Limitations

Several limitations define the boundary conditions under which performance may degrade. The quality of the initial graph depends heavily on the primary materials; if they are sparse, the initial graph is sparse and Phase 3 questions may proliferate. Two experts may give conflicting answers to the same slot, and fully automatic conflict resolution remains limited; with six experts spanning three areas, as in the present case study, disagreement on shared definitional slots is a realistic rather than a hypothetical concern. The expert rating study of Section 5.6 carries a related limitation: the raters were the same experts who answered the active queries, because they are the personnel with the required field experience at this site, so the result supports the relative ordering of the three completeness conditions rather than the absolute rating values, and evaluation by raters independent of the construction process remains necessary. A further limitation concerns the reach of the elicitation mechanism itself: as Section 5.3 reports, part of the residual set consists of slots that cannot be settled by a single question and require supplementary domain materials, which places them outside the active-query loop and calls for a separate

collection procedure. Continual self-evolution can accumulate node conflicts and duplicates, so periodic compaction of the graph is required to maintain consistency. Finally, although permission and security policies are represented as C4 constraints, aligning them with an external identity-and-access-management system is a separate engineering task that lies outside the graph itself. Recognizing these conditions is important for setting realistic expectations in deployment.

6.3 Controlled Comparison with Baselines

A claim about the mechanism through which the four barriers of Section 3 are resolved requires evidence rather than argument. Four conditions were evaluated on a common query set of 120 queries derived from the representative intents of Table 8, each with a reference answer and a reference SQL statement validated by the expert panel of Section 5.4. The conditions are: (B1) a standalone LLM with no domain grounding; (B2) retrieval-augmented generation over the same 84 domain documents supplied to Phase 1; (B3) the proposed knowledge graph without the UnfilledSlot class and without the active-query loop, so that the 3,208 slots Phase 2 could not fill remain unresolved; and (P) the full proposed framework. Condition B3 is included specifically because it isolates the contribution claimed in this paper. B1 and B2 differ from the proposal both in graph grounding and in deficiency handling, so a difference between them and P would not attribute the improvement to either mechanism; B3 differs only in the latter and therefore constitutes an ablation of the UnfilledSlot mechanism, sharing an identical graph, schema mapping, and orchestration pipeline.

Fig. 9 reports the outcome. Fig. 9(a) gives the accuracy metrics—SQL execution accuracy, intent-classification accuracy, slot-resolution accuracy, and answer correctness against the reference set—reported separately so that failures can be localized to the pipeline stage at which they occur. Fig. 9(b) gives the schema hallucination rate, defined as the proportion of generated queries referencing tables or columns that do not exist in the schema, together with a reproducibility rate obtained by issuing each query repeatedly and recording the proportion of runs producing an identical validated SQL statement and an identical Fact layer, and the mean end-to-end latency per query. We measure reproducibility rather than assert it because Section 4.7 claims it as a defining property of the framework, and a property claimed as defining should be tested. Reporting latency alongside these two rates is deliberate: the framework performs work the ungrounded baselines do not, namely schema lookup, validation, and sandbox execution, so the three quantities in Fig. 9(b) together express the cost at which the reliability properties are obtained.

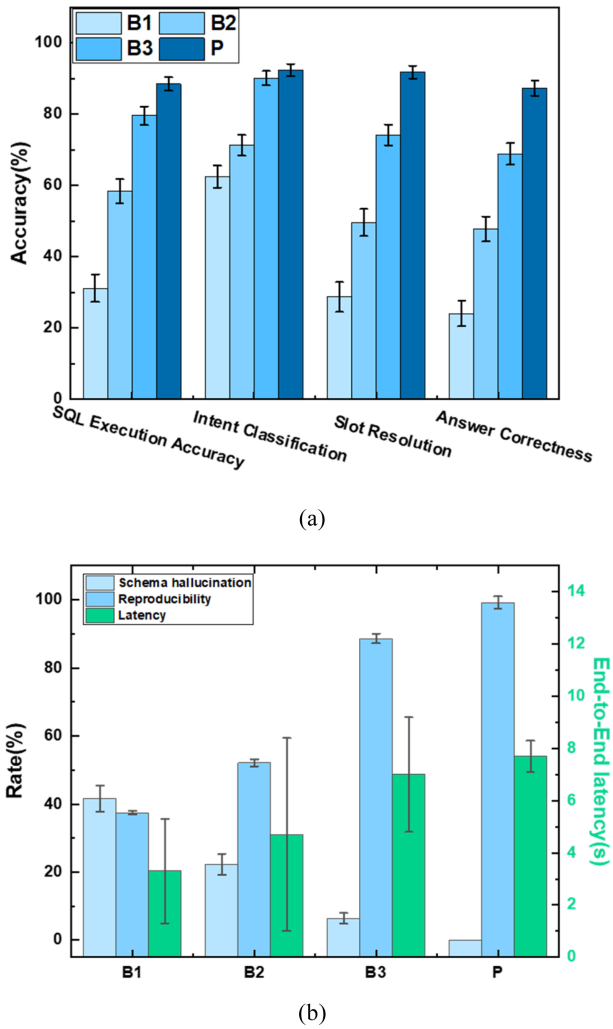


Fig. 9 Controlled comparison of the proposed framework against three baselines on a common query set of 120 queries derived from the representative intents of Table 5. The conditions are B1, a standalone LLM without domain grounding; B2, retrieval-augmented generation over the same 84 domain documents supplied to Phase 1; B3, the same knowledge graph without the UnfilledSlot class and without the active-query loop; and P, the full proposed framework. (a) Accuracy metrics, localizing failures to the pipeline stage at which they occur, (b) Schema hallucination rate and reproducibility rate. End-to-end latency decomposed by pipeline stage. Error bars denote one standard deviation. Condition B3 is the ablation of the UnfilledSlot mechanism

The ordering B1 < B2 < B3 < P holds across every accuracy metric. The largest single increment occurs between B2 and B3, indicating that graph grounding rather than document retrieval accounts for most of the improvement; the remaining increment between B3 and P isolates the contribution of explicit deficiency handling, and is most pronounced in slot resolution and answer correctness, the stages at which an unresolved definitional slot

manifests. The failure modes observed under B3 are instructive. A query depending on an unresolved definitional slot either failed outright or proceeded on a silently assumed value, and the latter case is the more consequential: the answer is fluent and superficially grounded, yet the definitional premise on which it rests was never established. This is precisely the outcome that representing deficiency explicitly is intended to prevent, and observing it under an ablation provides direct evidence for the design decision. Fig. 9(b) shows the trade-off these properties entail: the framework eliminates schema hallucination and achieves near-complete reproducibility, at the price of an end-to-end latency roughly twice that of the standalone baseline, which reflects the validation and analysis steps the baselines omit.

Interpreted against the four barriers of Section 3, the measurements support the mechanism the paper proposes. Against terminology mismatch, the Concept class normalizes field terms to canonical slots, which is reflected in the intent-classification accuracy of the grounded conditions. Against schema fragmentation, the DataSchema class provides an explicit mapping from field terms to physical columns, which is reflected in the SQL execution accuracy and in the elimination of schema hallucination. Against tacit knowledge, the UnfilledSlot class captures the definitional rules that are missing and obtains them through prioritized questions, which is what separates P from B3. Against hallucination and non-traceability, generation is constrained to validated slots and executed in a sandbox, and every layer of the response carries provenance.

6.4 Generalization and Scalability

Although the case study concerns continuous casting, the framework is deliberately process-agnostic. The eight classes describe any process in which operators ask grounded questions over plant data, and the plugin structure organized around C8 lets a new process be added by supplying its concepts, schema, intents, and response templates without modifying the core loop. A rolling process, a reduction furnace, or a battery-cell process could be onboarded by the same Phase 1–3 construction procedure, after which they would share the same Phase 4–5 operation machinery. This suggests a path toward a shared knowledge infrastructure in which process-specific profiles are exchanged across plants and, eventually, across companies.

Scalability, however, is bounded by the same self-evolution that gives the framework its adaptivity. As the graph accumulates nodes over long operation, conflicts and duplicates arise and must be compacted periodically; without compaction, the graph would grow monotonically and slow down slot resolution. The framework therefore treats graph maintenance (compaction, conflict detection, and versioning) as a first-class operational concern rather than an afterthought, and future work will formalize the compaction policy so that the graph remains consistent as it scales across processes and sites.

7. Conclusion

This study proposed a domain knowledge graph-based conversational operation assistant that couples a steel-process ontology with expert–LLM dialogue. By introducing the UnfilledSlot class and a five-phase construction–operation loop, the framework represents deficiencies explicitly, prioritizes them, and resolves them through LLM-generated targeted questions to experts, thereby turning the four structural barriers of industrial operation into an actionable construction procedure. In a steel continuous casting case study instantiating 8,441 slots, automatic slot filling reached 62% (5,233 slots), and 600 bundled expert questions resolved 2,702 slots, reducing the unfilled ratio from 38% to 6% and reaching saturation at the seventh answering round. A controlled comparison against a standalone LLM, retrieval-augmented generation, and an ablation without the UnfilledSlot class shows that the reproducibility and traceability of the responses derive from explicit deficiency handling rather than from model scale, and an expert rating study at three levels of graph completeness shows that answer quality rises as the definitional slots are resolved.

Three directions are planned for future work. First, the precision of automatic slot filling will be improved by combining a domain-specific LLM with multiple signals, raising the Phase 2 filling rate and thereby reducing the Phase 3 burden. Second, the consistency of expert answers will be maintained through decision models that weight answers and account for time and expert role, ensuring coherence in a multi-expert environment. Third, the plugin structure organized around C8 will be leveraged to share process-specific profiles and, ultimately, to develop a marketplace of process ontologies, extending the approach from a single plant into an industry-wide knowledge infrastructure.

More broadly, the approach reframes the role of an LLM in industrial operation. Rather than treating the model as an oracle expected to know the plant, it treats the model as an interviewer that helps a plant articulate and preserve its own tacit knowledge, one prioritized question at a time. In an era of workforce discontinuity, this reframing offers a practical route to capturing veteran judgement before it is lost, while keeping every resulting answer reproducible, traceable, and auditable, properties that are indispensable for the safe adoption of AI in heavy industry.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported through the Industrial Technology Alchemist Project (20025702, “Development of smart manufacturing multiverse platform based on multisensory fusion avatar and interactive AI”) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea).

REFERENCES

1. Polanyi, M., (1966), The tacit dimension, University of Chicago Press.
2. Wuest, T., Weimer, D., Irgens, C., Thoben, K. D., (2016), Machine learning in manufacturing: Advantages, challenges, and applications, Production & Manufacturing Research, 4(1), 23-45.
3. Thomas, B. G., (2018), Review on modeling and simulation of continuous casting, Steel Research International, 89(1), 1700312.
4. Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., Kaiser, L., Polosukhin, I., (2017), Attention is all you need, Advances in Neural Information Processing Systems, 30, 5998-6008.
5. Lewis, P., Perez, E., Piktus, A., Petroni, F., Karpukhin, V., Goyal, N., Rocktäschel, T., Riedel, S., Kiela, D., (2020), Retrieval-augmented generation for knowledge-intensive NLP tasks, Advances in Neural Information Processing Systems, 33, 9459-9474.
6. Brown, T., Mann, B., Ryder, N., Subbiah, M., Kaplan, J. D., Dhariwal, P., Neelakantan, A., Shyam, P., Sastry, G., Askell, A., (2020), Language models are few-shot learners, Advances in Neural Information Processing Systems, 33, 1877-1901.
7. Hogan, A., Blomqvist, E., Cochez, M., d’Amato, C., Melo, G. D., Gutierrez, C., Kirrane, S., Gayo, J. E. L., Navigli, R., Neumaier, S., (2021), Knowledge graphs, ACM Computing Surveys, 54(4), 1-37.
8. Ji, S., Pan, S., Cambria, E., Marttinen, P., Yu, P. S., (2021), A survey on knowledge graphs: Representation, acquisition, and applications, IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 33(2), 494-514.
9. Zhong, V., Xiong, C., Socher, R., (2017), Seq2SQL: Generating structured queries from natural language using reinforcement learning, arXiv preprint arXiv:1709.00103.



Junyoung Seo
Researcher in the AX Research Group, K-Steel innovation Institute, RIST. His research interests are industrial AI and knowledge graphs.
E-mail: jyseo91@rist.re.kr



Jaepil Lee
Researcher in the AX Research Group, K-Steel innovation Institute, RIST. His research interests are factory automation and AI.
E-mail: ultimategd1234@rist.re.kr



Youngmin Moon
Researcher in the AX Research Group, K-Steel innovation Institute, RIST. His research interests are Sensor and Digital-twin.
E-mail: ymmoon1850@gmail.com

한국정밀공학회지 제 43 권 제 10 호 pp. 1079-1085 October 2026 / 1079
J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 43, No. 10, pp. 1079-1085 http://doi.org/10.7736/JKSPE.026.00014
ISSN 1225-9071 (Print) / 2287-8769 (Online)

쿼드러플 아크 치형을 가지는 스트레인 웨이브 기어의 설계와 검증

Design and Validation of Quadruple Circular-arc Tooth Profiles for a Strain Wave Gear Using FE Analysis and Experiments

김태원[1,#], 크리스토퍼 얀센[1], 정세철[1], 최동현[1], 정연석[1], 심희찬[1], 이달호[1]
Tae Won Kim[1,#], Christopher Janssen[1], Se Chul Jeong[1], Dong Hyun Choi[1], Yeon Seok Jeong[1], Hee Chan Shim[1], and Dal Ho Lee[1]

1 현대위아 차량부품연구센터 (Research Center of Automotive Parts, Hyundai-Wia Corporation)
Corresponding Author / E-mail: twkim@Hyundai-wia.com
ORCID:0009-0002-1034-8767

KEYWORDS: Strain wave gear (스트레인 웨이브 기어), Quadruple-arc profiles (쿼드러플 아크 치형), Tooth engagement analysis (치합분석), Performance and load capacity tests (성능 및 하중 용량 평가)

Strain wave gears are widely used in applications that require high reduction ratios, compact designs, and high positioning accuracy. However, increasing torque capacity remains a key challenge, particularly due to the high stresses at the flex spline tooth root. This study presents the development and investigation of a new strain wave gear variant. The tooth profile is defined using a quadruple-arc geometry with tangential transitions. A two-dimensional tooth engagement analysis evaluates the meshing behavior under flex spline deflection and identifies potential collisions during the design phase. Consequently, an FE simulation was conducted to investigate stress distribution. In the final step, the developed strain wave gear was assessed for overall performance and load capacity. Performance evaluations, including hysteresis loss, showed that the developed strain wave gear performed equally well or better than a leading strain wave gear manufacturer across seven key performance metrics. In terms of load capacity, the maximum torque at 50% failure probability (T50%) reached 106.7 Nm, which is 30% higher than the development target of 82 Nm, thereby confirming the validity of the tooth-profile design.

Manuscript received: February 27, 2026 / Revised: August 14, 2026 / Accepted: August 24, 2026
This paper was presented at KSPE Autumn Conference in 2025

NOMENCLATURE

FS	=	Flex Spline
CS	=	Circular Spline
WG	=	Wave Generator
dt	=	Pitch Circle Diameter
$z_{1,2}$	=	Number of Teeth
m	=	Module
ω_0	=	Deflection
h_a	=	Head Height Factor
h_f	=	Foot Height Factor
l_f	=	Foot Radius x Coordinate
b_f	=	Foot Radius y Coordinate
φ_f	=	Root Radius Factor
l_a	=	Head Radius x Coordinate
b_a	=	Head Radius y Coordinate
φ_a	=	Head Radius Factor
h_l	=	Head Radius Length Factor
$\varphi_{f'}$	=	Root Radius Factor 2
φ_{a2}	=	Head Radius Runout Factor

Copyright © The Korean Society for Precision Engineering
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

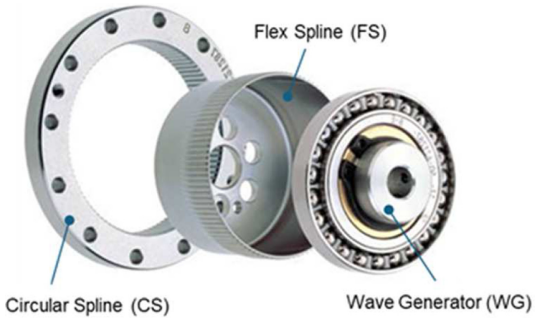


Fig. 1 Components of the strain wave gear

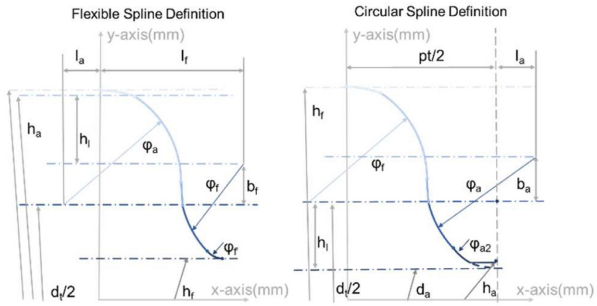


Fig. 2 Geometric parameters of the CS and FS

1. Introduction

Strain wave gears, also known as harmonic drives, are widely used in high-precision applications such as aerospace and industrial robotics because of their compact size, high reduction ratios, and excellent positioning accuracy. These gears consist of three key components: the flex spline (FS), circular spline (CS), and wave generator (WG), as shown in Fig. 1. To improve the tooth engagement area of strain wave gears, considerable research has been devoted to tooth-profile design. Ivanov [1] and Zhang et al. [2] investigated strain wave gear tooth profiles and their meshing process. Several studies have investigated double-arc and quadruple-arc tooth profiles [3-5]. In particular, Eloy Yague-Spaude [5] investigated quadruple-arc tooth profiles, which provide greater geometric flexibility through independent control of the tooth-root and tooth-tip regions, thereby enabling more refined optimization of stress distribution, meshing quality, and load-carrying capacity. In addition, Zhiyuan Yu et al. [6,7] examined validation methods for strain wave gears using analytical approaches. Building on these previous studies, this paper presents the design, development, and validation of a strain wave gear for standard-torque applications. The developed gear was designed for a repeated peak torque of 82 Nm, with a reduction ratio of 100 : 1 and 20-inch size.

2. Tooth Profile Design

This section presents the geometric design and profile definition of the strain wave gear. The objective is to develop feasible and collision-free tooth geometries that serve as the basis for subsequent numerical and experimental investigations. The design of the flex spline and circular spline is described below.

2.1 General Gear Data

The strain wave gear set considered in this study has a module of m = 0.254, with z_1 = 200 teeth for the flex spline and z_2 = 202 teeth for the circular spline. The profiles of the circular spline and flex spline are defined using a quadruple-circular-arc geometry. Compared with the involute tooth profile, this profile type provides advantages such as a higher number of meshing tooth pairs and a more uniform stress distribution. Furthermore, compared with the double-arc profile, it includes a larger number of design variables, which increases the degree of freedom in tooth-profile design and enables more flexible optimization of tooth contact characteristics. For both the circular spline and the flex spline, the profile definition begins with the selection of two major radii, φ_a and φ_f, which are key design parameters governing the initial tooth contact. Additional arcs are then introduced at the tooth root of the flex spline and at the tooth tip of the circular spline to ensure smooth profile transitions. Tangential continuity is imposed between adjacent arcs. Further parameters are used to define the positions of the arc centers, and some of these parameters are therefore interdependent. The parameters used for the profile definition are shown in Fig. 2.

2.2 Profile Design

Based on the profile definitions introduced in Section 2.1, the profile parameters for the circular spline and flex spline were determined. The resulting quadruple-circular-arc tooth profiles are shown in Fig. 3, while the corresponding geometric parameters are summarized in Table 1. In addition, the wave generator deflection was selected as ω_0 = 0.27 mm based on the results of finite element and tooth engagement analyses. To evaluate the meshing condition between the two gears, the flex spline profile was considered in its deflected state. This placed the flex spline tooth at its maximum radial extension and enabled a preliminary analysis of the meshing between the two gears.

2.3 Wave Generator Design

The wave generator shape considered in this study resembles that of a ring deformed by two opposing forces. The variation in

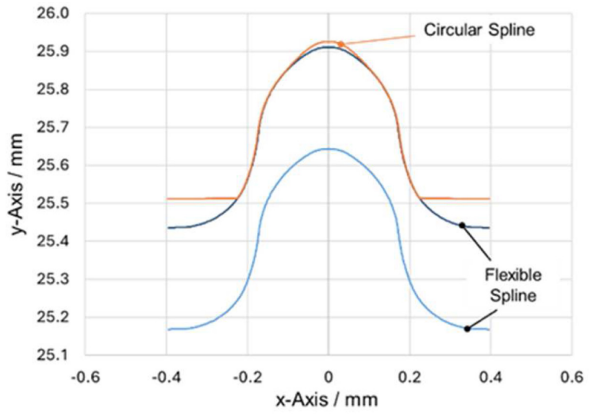


Fig. 3 Quadruple-circular-arc profiles of the CS and FS

Table 1 Main parameters of the designed tooth profiles

Parameters	Values [mm]	Parameters	Values [mm]
h_a	0.9	φ_f	0.21
h_f	0.9	l_a	0.4
l_f	2.72	b_a	0
b_f	0.26	φ_a	1.08
h_l	0.76	$\varphi_{f'}$	0.55

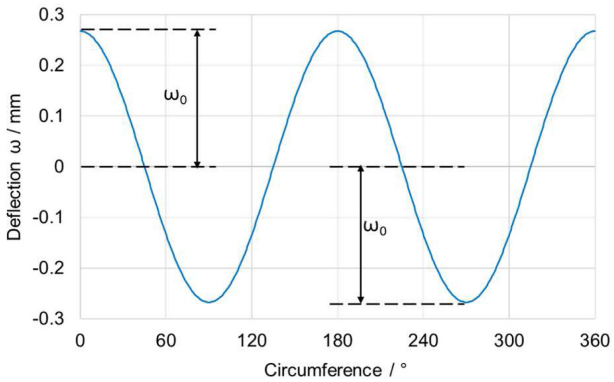


Fig. 4 Circumferential variation of the deflection ω in the two force model

the deflection along the circumference of the wave generator can be described mathematically by Eq. (1).

$$\omega = \omega_0 \cos(2\varphi) \quad (1)$$

The circumferential variation of the deflection ω for the two-force model is shown in Fig. 4. The deflection follows a cosine function. The maximum positive deflection, ω_0 = 0.27 mm, occurs at 0° and 180°. Similarly, the maximum negative deflection of -0.27 mm occurs at 90° and 270°. Overall, the deflection distribution is symmetric, and the transition between positive and negative deflection is smooth.

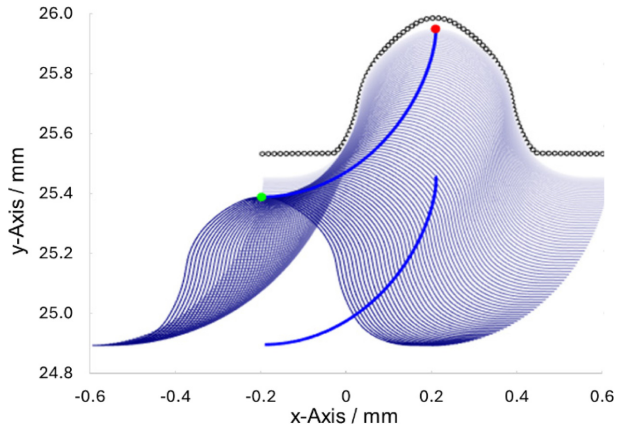


Fig. 5 Tooth engagement analysis results

2.4 Tooth Engagement Analysis

To analyze potential collisions between the flex spline and the circular spline during the design phase, a tooth engagement analysis was developed and implemented in MATLAB. This analysis serves as a purely geometric preliminary assessment. It enables the identification of potential collisions or penetrations during meshing, but it does not provide information on stress distribution or load capacity. For this purpose, the wave generator is rotated through 90°. Owing to symmetry, no further rotation is required. The resulting motion of the flex spline tooth relative to a fixed circular spline gap is visualized in Fig. 5. In addition, the trajectories of the tooth tip and tooth root are shown as two blue curves. If a collision or penetration with the circular spline occurs at any point during the motion of the flex spline profile, the analysis generates a warning. This makes it possible to evaluate the meshing condition and adjust the profile parameters accordingly. Since no warning is generated for the selected parameters, they are considered suitable for subsequent FE simulations.

3. Finite Element Analysis and Validation

The designed tooth profiles of the flex spline and the circular spline are investigated using finite element (FE) simulation. In this analysis, the wave generator geometry is considered, and the stress distribution at the tooth root, the contact pressure distribution along the flank of the flex spline, the number of teeth in contact, and the continuity of tooth contact are evaluated.

3.1 Structural Analysis of the Tooth Profile

To investigate the tooth profile of the strain wave gear, a two-dimensional finite element model of the flex spline, circular spline, and wave generator in the standard configuration was

Table 2 Material properties

Materials	Young's modulus	Poisson's ratio
42CrMo4 QT (CS)	160 GPa	0.3
34CrNiMo6 QT (FS)	200 GPa	0.3
Steel (WG)	210 GPa	0.3

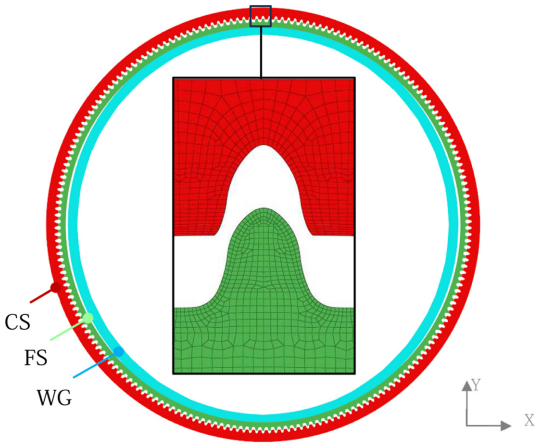


Fig. 6 2D FE model of the tooth profile

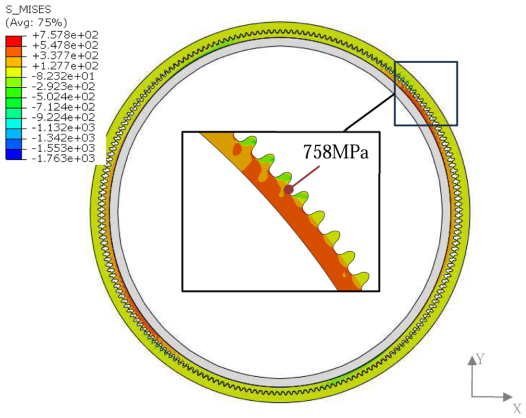


Fig. 7 Max. bending (signed von-mises) stress of FS (Step 2)

developed (Fig. 6). This model represents a 2.4 mm-wide central section of the tooth profile and was analyzed under plane-strain conditions. The material properties used in the analysis are summarized in Table 2. To minimize the influence of auxiliary components such as bearings, the wave generator was assumed to be a rigid body. Based on this model, the contact pressure in the tooth contact region and the bending stress at the tooth root were evaluated. The analysis procedure consisted of two steps. In Step 1, the wave generator was inserted into the flex spline. In Step 2, a reference torque of 82 Nm was applied to evaluate the tooth strength under torque loading. Due to the elliptical shape of the wave generator, the maximum stress in the flex spline during Step 1

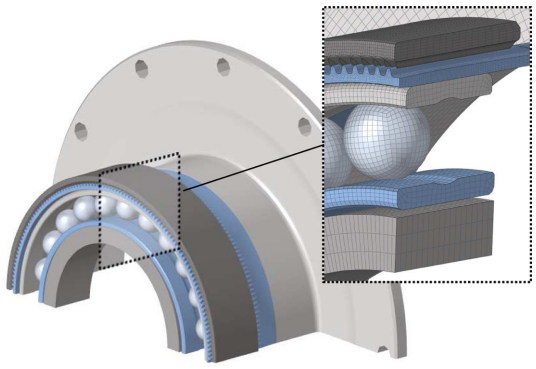


Fig. 8 FE model of 3D strain wave gear

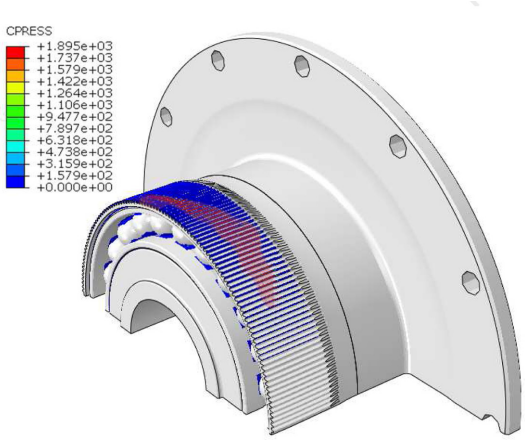


Fig. 9 Tooth contact pressure distribution on the flex spline

occurred along the major axis (Y), and the maximum bending stress was 234 MPa. In Step 2, the location of the maximum stress shifted to 45°, and a total of 82 teeth were in continuous contact, with 41 teeth in each of the upper and lower regions relative to the major axis. The maximum bending stress at the tooth root was 758 MPa (Fig. 7), corresponding to approximately 62% of the material yield strength (1,230 MPa). The maximum tooth contact pressure was 2,277 MPa, indicating a relatively high local contact stress level.

3.2 Three-dimensional Contact Analysis

Due to the structural characteristics of the strain wave gear, a coning effect that induces a tilt angle occurs when the bearing is assembled into the flex spline. Since this effect also influences tooth meshing, the tooth contact behavior should be examined with the coning effect considered. In addition, separate contact conditions were defined for the ball-inner race interface and the ball-outer race interface. To reduce the computational cost while taking advantage of model symmetry, a half model of the strain wave gear was developed, as shown in Fig. 8, and a cyclic

Table 3 Summary of FE analysis results

Analysis result	2-D	3-D
Contacted tooth number	82	80
Maximum bending stress [MPa]	758	669
Maximum contact stress [MPa]	2,277	1,895

symmetry boundary condition was applied to the symmetry plane. As in the two-dimensional analysis, the simulation consists of two steps. In Step 1, the coning effect induced by the assembly of the wave generator (WG) is considered. In Step 2, tooth stresses and contact behavior are calculated under an applied torque of 82 Nm. As shown in Fig. 9, the tooth contact region remained continuous; however, owing to the coning effect, the contact pattern was nonuniform compared with that observed in the 2D analysis. The total number of teeth in contact was 80. The maximum contact pressure and bending stress were 1,895 and 669 MPa, respectively, which are slightly lower than the corresponding 2D analysis results of 2,277 and 758 MPa. These reductions are attributed to the increased contact area and the more distributed load transfer caused by the coning effect.

4. Performance and Load Capacity Tests

The designed strain wave gear was subsequently evaluated in terms of performance and load capacity. In the first step, the gear performance was investigated. In the second step, the load capacity was determined.

4.1 Test Specimen

To validate the proposed design, a strain wave gear sample was manufactured. Considering cycle time and suitability for mass production, power skiving was adopted as the manufacturing process. After manual pairing, the final sample is shown in Fig. 10. For the load-capacity tests, 18 test samples were manufactured. Tempered 34CrNiMo6 QT steel was used.

However, nine of the samples were manufactured using steel with a lower impurity content, which is expected to result in a higher load capacity.

4.2 Performance Test

For the performance evaluation of the developed strain wave gear, the specimens were prepared in a semi-unit configuration with test jigs attached to relevant components, such as the output bearing, as shown in Fig. 11. Performance tests were conducted in accordance with KS B 7300 and KOROS 1166 [8], including



Fig. 10 Prototype strain wave gear used for testing

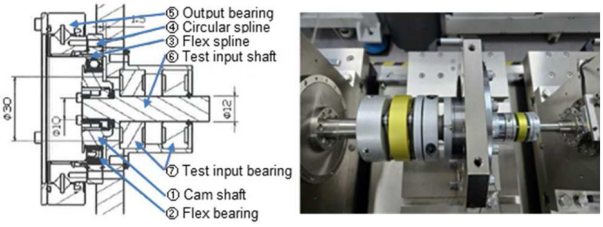


Fig. 11 Performance testing set-up

Table 4 Performance test results

Test items	Unit	Goal [10]	Result
Hysteresis loss	arc-min	1.00↓	0.62 (Pass)
Lost motion	arc-min	1.00↓	0.45 (Pass)
Torsional stiffness	Nm/arc-min	8.34↑	9.42 (Pass)
Angular transmission error	arc-min	1.00↓	0.46 (Pass)
Transmission efficiency	%	55.0↑	68.32 (Pass)
No-load running torque	Nm	0.40↓	0.12(Pass)
No-load starting torque	Nm	0.32↓	0.05(Pass)

assessments of hysteresis, angular transmission error, transmission efficiency, no-load running torque, and starting torque. A total of nine specimens were tested, and the average values are summarized in Table 4. The results were compared with the reference specifications [9], thereby confirming the performance validity of the proposed design.

4.3 Load Capacity Tests

Load capacity tests were conducted on flex splines made of two variants of 34CrNiMo6 QT steel. Variant A is a conventional grade of 34CrNiMo6 QT steel, whereas Variant B is the same steel grade with a lower impurity content. The aim of the tests was to

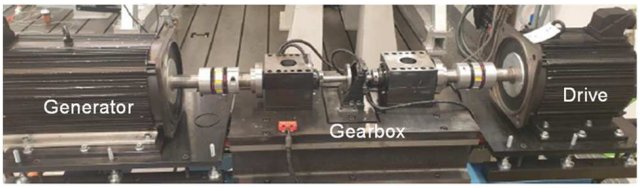


Fig. 12 Test setup for load capacity investigation

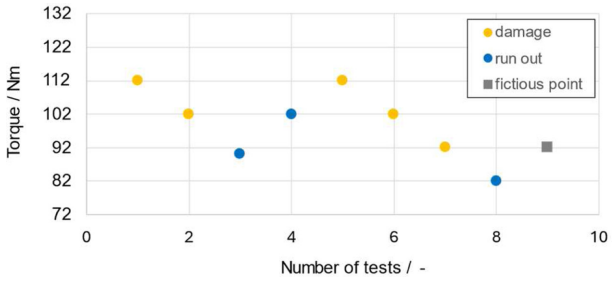


Fig. 13 Load-capacity test results for Variant A

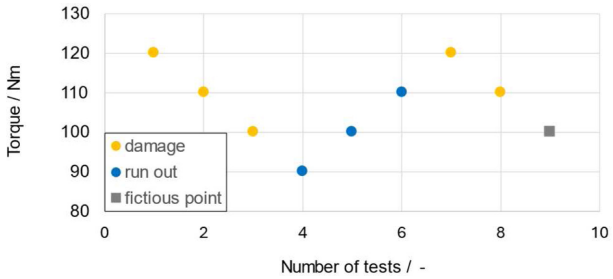


Fig. 14 Load-capacity test results for Variant B

determine the load capacity of the flex spline tooth root. The load capacity tests were evaluated using the endurance method [10], with the torque level for each subsequent test adjusted according to whether the previous specimen fractured or resulted in a run-out. The test setup is shown in Fig. 12. Grease (Harmonic Grease SK-1A) was applied to the meshing area. The test was stopped when the temperature reached 80°C, abnormal vibrations occurred, or 10^7 cycles were achieved. The stopping criteria were defined as either reaching the limit of 10^7 load cycles or the occurrence of fracture or tooth failure, which was identified through vibration monitoring. The results of the load-capacity tests for Variant A are shown in Fig. 13. The torque corresponding to a 50% failure probability was determined to be $T_{50\%}$ = 98.7 Nm. Subsequently, the tests for Variant B were also conducted under the same conditions. The results for Variant B(lower impurity content) are shown in Fig. 14. The torque for a 50% failure probability was determined at $T_{50\%}$ = 106.7 Nm. This indicates that Variant B, with its lower impurity content, has an 8.1% higher load capacity than Variant A.

5. Conclusion

This study developed and validated the tooth geometry of a strain wave gear through finite element (FE) analyses and experiments.

The results can be summarized as follows:

1) For a strain wave gear with a module of m = 0.254 mm, a 1 : 100 gear ratio, and a 20-inch size, quadruple-circular-arc tooth profiles were designed. The wave-generator deflection was defined as $\omega = \omega_0 \cos(2\varphi)$ with ω_0 = 0.27 mm, and a MATLAB-based 90° meshing analysis verified interference-free engagement.
2) FE analyses were performed to evaluate tooth-root stress and contact pressure. Under a torque of 82 Nm, the 2D model showed 82 teeth in continuous contact, with maximum values of 758 MPa for root bending stress and 2,277 MPa for contact pressure. The maximum root bending stress corresponds to approximately 62% of the material yield strength (1,230 MPa), indicating a sufficient safety margin in terms of tooth-root strength. The 3D model, which accounted for the coning effect, yielded 80 teeth in contact and a reduced peak contact pressure of 1,895 MPa due to the larger contact area.
3) Finally, nine specimens were used for the performance tests, and 18 specimens were used for the load-capacity tests. The performance metrics satisfied the reference specifications. In the load-capacity tests, the torque corresponding to a 50% failure probability was 98.7 Nm for Variant A and 106.7 Nm for the low-impurity Variant B, corresponding to an 8.1% improvement in load capacity for Variant B. Therefore, the results confirm that the prototype of the developed standard-torque version has sufficient gear strength at the target repeated peak torque of 82 Nm.

REFERENCES

1. Ivanov M. N., (1981), Wave gear transmission, Vysshaya Shkola.
2. Zhang, T., Liu, Z., Yang, C., Hu, Q., (2020), Study on the envelope process of the flexspline of harmonic reducer based on the angle of wave generator, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 012030.
3. Cheng, Y.-H., Chen, Y.-C., (2023), A general mathematical modeling and finite element analysis of a strain wave gear possessing a double-circular-arc-with-a-common-tangent profile, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 237(1), 223-236.
4. Song, C., Zhu, F., Li, X., Du, X., (2023), Three-dimensional

conjugate tooth surface design and contact analysis of harmonic drive with double-circular-arc tooth profile, Chinese Journal of Mechanical Engineering, 36(1), 83.

5. Yague-Spaude, E., (2021), Computational design, simulation of meshing, and stress analysis of strain wave gear drives, Ph.D. Dissertation, Rochester Institute of Technology.
6. Yu, Z., Ting, K.-L., (2019), Application of finite element analysis for the strain wave gear tooth surfaces design and modification, American Gear Manufacturers Association.
7. Yague-Spaude, E., Gonzalez-Perez, I., Fuentes-Aznar, A., (2020), Stress analysis of strain wave gear drives with four different geometries of wave generator, Meccanica, 55(11), 2285-2304.
8. KS B 7300:2016, (2016), Test method of high precision reducer for robot.
9. Harmonic Drive SE, Kataloge - Harmonic Drive® Getriebe. https://harmonicdrive.de/de
10. Hück, M., (1983), Ein verbessertes verfahren für die auswertung von treppenstufenversuchen, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 14(12), 406-417.



Tae Won Kim
Senior Research Engineer, Hyundai-Wia Corporation. His research interests are F. E. Analysis and Development of Precision Mechanical System.
E-mail: twkim@hyundai-wia.com



Christopher Janssen
Senior Research Engineer, Hyundai-Wia Corporation. His research interests are Gear Design and Simulation and Gear Manufacturing.
E-mail: Christopher.janssen@hyundai-wia.com



Se Chul Jeong
Senior Research Engineer,
Hyundai-Wia Corporation.
His research interest is Computer Aided Engineering.
E-mail: scjeong@hyundai-wia.com



Dong Hyun Choi
Senior Research Engineer, Hyundai-Wia Corporation. His research interest is Precision Manufacturing Engineering.
E-mail: choi.donghyun@hyundai-wia.com



Yeon Seok Jeong
Senior Research Engineer, Hyundai-Wia Corporation. His research interests are Driveline System Design and Development.
E-mail: ysjeong@hyundai-wia.com



Hee Chan Shim
Senior Research Engineer, Hyundai-Wia Corporation. His research interest is Materials Engineering.
E-mail: shimhc@hyundai-wia.com



Dal Ho Lee
Senior Research Engineer, Hyundai-Wia Corporation. His research interest is Precision Gear Technology.
E-mail: dalholee@hyundai-wia.com

한국정밀공학회지 제 43 권 제 10 호 pp. 1087-1095
J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 43, No. 10, pp. 1087-1095

http://doi.org/10.7736/JKSPE.026.00045
ISSN 1225-9071 (Print) / 2287-8769 (Online)

레이저 미세 패턴 가공과 플라즈마 표면처리를 이용한 금속-플라스틱 하이브리드 구조물의 접합강도 향상

Enhancement of Bonding Strength in Metal-plastic Hybrid Structures by Laser Micro-patterning and Plasma Surface Treatment

이호상[1,#]
Ho-Sang Lee[1,#]

1 한국교통대학교 항공기계설계학과 (Department of Aeronautical & Mechanical Design Engineering, Korea National Univ. of Transportation)
Corresponding Author / E-mail: lhs@ut.ac.kr, TEL: +82-43-841-5371
ORCID: 0000-0003-3392-1087

KEYWORDS: Bonding strength (접합강도), Metal-plastic hybrid structure (금속-플라스틱 하이브리드 구조), Laser processing (레이저 가공), Plasma treatment (플라즈마 처리), Insert injection molding (인서트 사출성형)

Integrating metals and plastics is essential for lightweight structures and efficient assembly in industries such as automotive and IT device manufacturing. This study investigated how laser micro-patterning enhances the interfacial bonding strength between these dissimilar materials in metal insert injection molding. Galvanized high-strength steel and polyphenylene sulfide (PPS) reinforced with 40% glass fiber were used as the metal and plastic materials, respectively. Four micro-patterns—circular, square, diamond, and hexagonal—were machined by laser on the bonding area at the end of the steel sheet. The effect of pattern spacing on bonding strength was evaluated by tensile shear tests on injection-molded specimens. The combined effect of laser processing and plasma surface treatment was also examined. For the square pattern, wider pattern spacing increased the bonding strength 2.2-fold, and for the hexagonal pattern the increase was 1.4-fold. Combining laser micro-patterning with plasma treatment enhanced the bonding strength by factors of 1.4 to 2.3. The effect of plasma treatment was greater for the square and diamond patterns than for the circular geometry.

Manuscript received: May 19, 2026 / Revised: July 23, 2026 / Accepted: July 26, 2026
This paper was presented at KSPE Spring Conference in 2026

1. 서론

금속과 고분자의 접합기술은 자동차, IT 기기 등 전반적인 산업에서 경량화, 조립공정 단순화 등을 위해 대단히 중요하다. 기존에는 나사를 사용하여 기계적으로 접합하거나, 접착제를 사용하여 금속과 고분자를 접합하였다. 그러나 기계적 접합은 구멍을 뚫어야 하고, 접착제 접합은 경화 공정이 필요하기 때문에 이러한 방법은 시간이 많이 소요되며 대량 생산에 적합하지 않은 단점이 있다. 다른 방법으로 레이저[1-3], 마찰[4-6], 초음파[7-9] 등을 이용한 국부 가열 방식에 의한 금속-고분자 겹침 접합방식이 현장에서 사용되고 있다. 최근에는 공정 단순화 및 생산성 향상을 고려하여, 금속 인서트를 활용한 사출성형 직접 접합에 대한 관심이 높아지고 있다. 표면처리를 통해 금속 표면에 미세 구조를 형성하고 금형에 인서트하며, 용융된 고분자를 사출성형하여 금속과 고분자의 하이브리드 접합부가 기계적 맞물림에 의해 접합되는 방식이다. 이 방법은 복잡한 형상의 고분자 부품을 금속과 용이하게 접합할 수 있으며, 자동차, IT 기기 등 다양한 분야에 응용할 수 있다. 금속 표면에 미세 구조를 형성하는 방법에 따라 마이크로 스케일 가공[10-12], 프라이머 도포[13], 화학적 변형[14] 등 크게 3가지로 구분할 수 있다.

Kimura 등은 화학공정을 사용하여 금속 표면에 20 nm 크기의 다수 기공을 형성시키고, 인서트 사출성형에서 공정조건이

Copyright © The Korean Society for Precision Engineering
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

접합강도에 미치는 영향을 고찰하였다[15]. 사출성형 시편을 130°C에서 4시간 동안 어닐링하여 잔류응력을 제거하고, 인장 전단시험을 수행하였으며, 그 결과 보압이 증가하면 접합강도가 커지고, 사출속도가 증가하면 전단강도가 크게 감소하였으며, 약 16 MPa 수준의 접합강도를 구현하였다. Kajihara [16]는 높은 보압이 고분자의 침투성을 향상시켜 접합강도를 높인다고 발표하였으며, Taki [17]는 사출온도가 높을수록 접합강도가 높아진다고 보고하였다.

Zhao 등[18] 은 펄스 레이저 가공기를 이용하여 Al합금 평판의 접합부에 깊이 75 μm, 직경 50 μm, 간격 60 μm인 딤플을 가공하였으며, 유리섬유 30% 함유된 PBT를 사용하여 금속 인서트 사출성형 실험을 통해 보압크기와 사출온도가 고분자의 침투 깊이를 깊게 하고, 금속표면과의 접촉을 강화하여 20 MPa 수준의 접합강도를 구현하였다.

Kim 등[19] 은 레이저 가공을 이용하여 합금화용융아연도금 시편의 표면에 다양한 형태의 미세 그루브를 형성한 뒤 유리섬유 50% 함유된 PA6를 이용한 인서트 사출성형을 수행하였다. 깊이 100 μm, 간격 140 μm인 다이아몬드 형상의 그루브에서 접합강도가 가장 높게 나타났으며, 금형온도가 증가할수록 접합강도가 높아짐을 발표하였다.

지금까지 수행된 대부분의 연구는 금속 접합부 영역에 대한 다양한 독립적인 표면처리 방법이 접합강도에 미치는 영향에 대해 고찰하였다. 본 연구에서는 레이저 가공 정밀도를 고려한 패턴 사이의 간격이 접합강도에 미치는 영향을 분석하고, 레이저 가공과 플라즈마 표면처리를 동시에 수행할 경우 접합강도의 변화를 고찰하였다. 또한 SEM과 EDS 분석을 통해 인장시험에 의한 접합부 파단면에 잔류하고 있는 소재의 형태와 성분을 파악하고, 접합부 파단 메커니즘을 분석하였다.

2. 실험

2.1 소재

금속 플라스틱 접합강도 실험을 위해 사용한 금속은 용융아연도금고장력 강판(SGAFC 590, Hyundai steel)이고, 플라스틱은 40%의 유리섬유가 포함된 PPS (1140A6, Polyplastics USA)이며. 강판과 플라스틱의 인장강도는 각각 652, 210 MPa이다. ISO 19095규격을 적용하여 강판과 플라스틱의 시편 크기는 Fig. 1과 같이 각각 18 mm × 45 mm × 1.2 mm, 10 mm × 45 mm × 3 mm이며, 접합부 영역은 10 mm × 5 mm이다.

2.2 미세 패턴 레이저 가공 및 플라즈마 처리

강판의 끝 부분에 위치한 접합부 영역(10 mm × 5 mm)에 피코초 레이저 가공기(μ-Lab-S1, Kortherm)를 이용하여 원형, 사각형, 다이아몬드형, 육각형 등 4가지 종류의 미세 패턴을 1차 가공하였으며, 레이저 가공기 주요 사양은 레이저 파워 500 W, 파장 355 nm, 펄스 폭 12 ps, 반복 주파수 300 kHz, 빔 크기

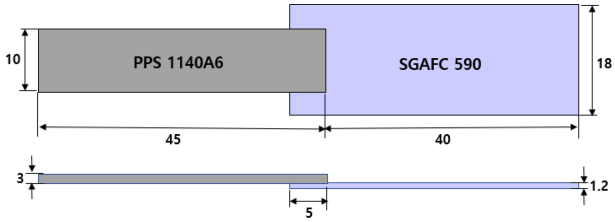


Fig. 1 The geometry of the joint part of SGAFC 590 and PPS 1140A6

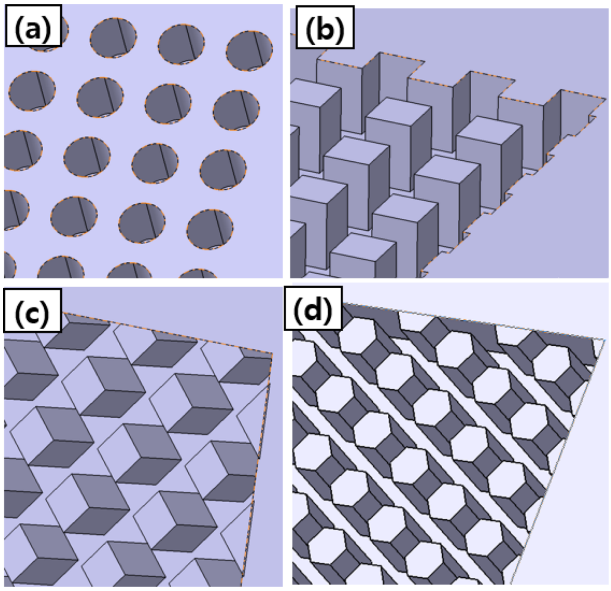


Fig. 2 1st Patterns of laser surface texturing: (a) Circle, (b) Rectangular, (c) Diamond, (d) Hexagon

20 μm이며, 스캔속도는 100 mm/s이다. 레이저 가공한 시편은 초음파세척기를 사용하여 클리닝하였다.

Fig. 2는 1차 가공 패턴을 나타낸 것으로 원형 패턴은 직경 100 μm, 깊이 150 μm, 원 사이의 간격 50 μm로서 음각 가공하였고, 사각형 및 다이아몬드형 패턴은 변의 길이 75 μm, 깊이 110 μm, 간격 75 μm로 양각 가공하였다. 또한 육각형 패턴은 변의 길이 69 μm, 깊이 200 μm, 간격 80 μm로 양각 가공하였다.

레이저 패턴 가공과 함께 플라즈마 표면처리가 접합강도에 미치는 효과를 확인하기 위하여 원형, 사각형, 다이아몬드형, 육각형 등 4가지 종류의 1차 레이저 가공 패턴 시편과 에칭 시편에 각각 플라즈마 표면처리를 수행하였다. 이때 진공 플라즈마 장비(AVP -125G-2-T, AETP)를 사용하였으며, 진공도 0.4 torr, 출력 1,000 W, 노즐 높이 420 mm, CDA (Clean Dry Air) Gas 유량 100 sccm, 표면처리 시간 10분을 적용하였다.

2.3 사출금형 설계

금속 인서트 사출성형 실험을 수행하기 위하여 Fig. 3과 같이 스프루(길이 72 mm, 지름 3.5–7.275 mm), 러너(길이 14.4 mm, 지름 5 mm), 게이트(길이 3.07 mm, 깊이 1.5 mm, 폭 3.9–5 mm)로 구성된 사출금형을 설계하였다. 또한 사출성형 공정에서

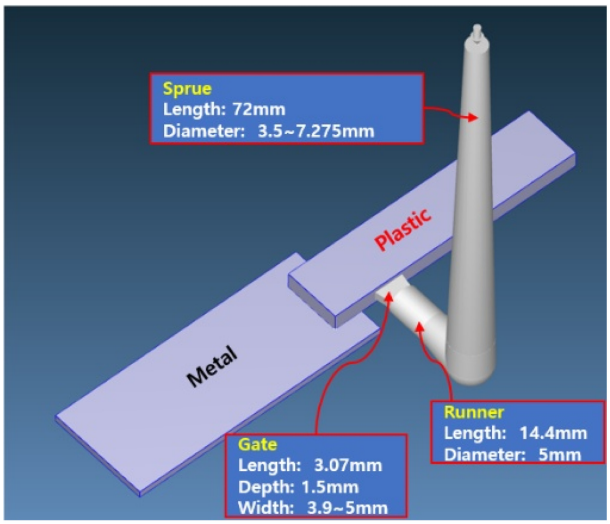


Fig. 3 Schematics of sprue, runner and gate

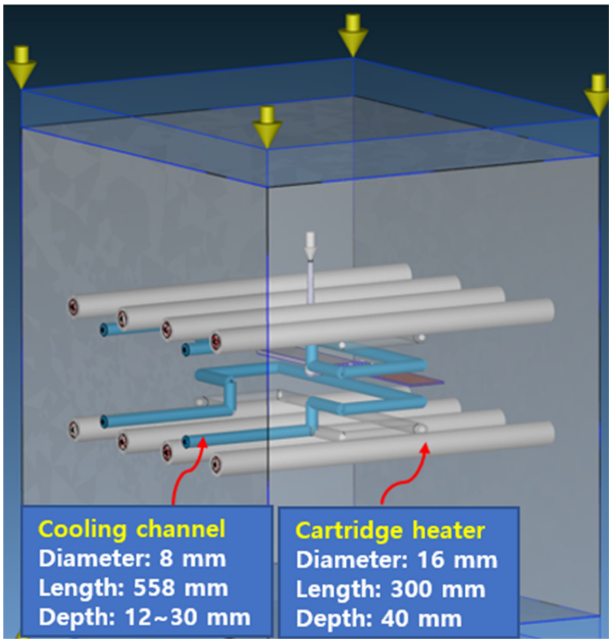


Fig. 4 Layout of cartridge heaters and cooling channels

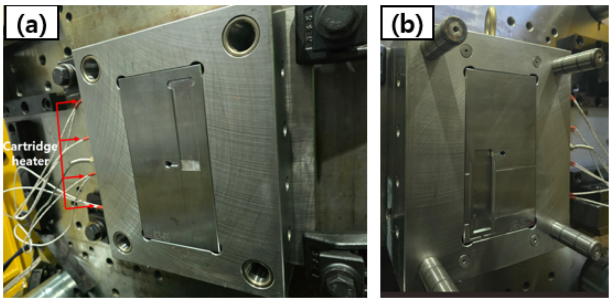


Fig. 5 Photograph of (a) Stationary mold and (b) Movable mold

수지가 미세 패턴 안으로 침투할 수 있도록 금형을 가열하기 위하여 Fig. 4와 같이 상측과 하측에 각각 4개의 카트리지 히터를 설치하고, 또한 냉각채널을 상측과 하측에 각각 1개씩 설치하였다. Fig. 5는 금속 인서트 사출성형 실험을 위해 제작한 고정측 금형과 가동측 금형을 나타낸다.

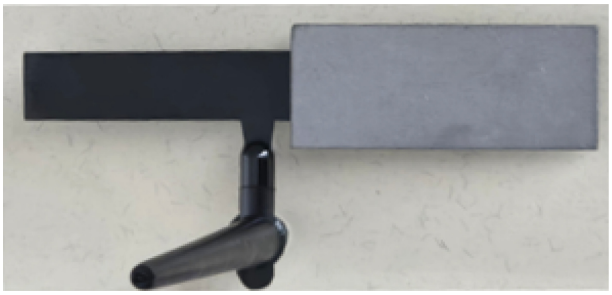


Fig. 6 Photograph of metal insert molded specimen

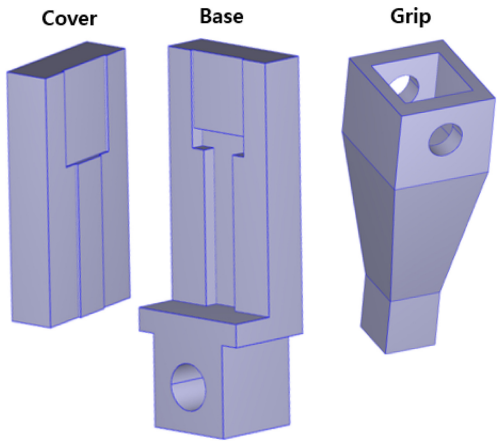


Fig. 7 Schematics of jig for bonding strength test

2.4 금속 인서트 사출성형

핫 플레이트(PC-6200, Corning)를 이용하여 120°C로 가열한 고장력강판을 금형의 고정측에 인서트하고, 전동식 사출성형기(Roboshot α-S250iA, FANUC)를 사용하여 PPS 수지를 사출성형하였다. 성형조건은 수지온도 307°C, 금형온도 150°C, 사출속도 20 mm/s, 보압크기 25 MPa, 보압시간 2초이며, Fig. 6은 금속 인서트 사출성형 시편을 나타낸다.

2.5 접합강도 측정

금속과 플라스틱의 두께가 각각 1.2, 3 mm로 서로 다르기 때문에 인장 전단시험 과정에서 발생하는 굽힘모멘트를 방지하기 위하여 Fig. 7과 같이 커버, 베이스, 그립으로 구성된 지그를 설계하였다. 시편의 플라스틱 파트를 지그의 베이스에 삽입하고 커버를 이용하여 고정시킨 후 베이스 하단부에 그립을 핀으로 연결하여 인장시험기에 장착하였다.

Fig. 8과 같이 인장시험기(AUTOGRAPH AGX-1kNVD, Shimadzu)를 사용하였으며, ISO 19095 시험 규격에 따라 10 mm/min의 일정한 크로스헤드 속도로 시편이 파단될 때까지 인장하여 최대 접합력을 측정하고, 접합강도(접합력/접합부 면적)를 계산하였다.

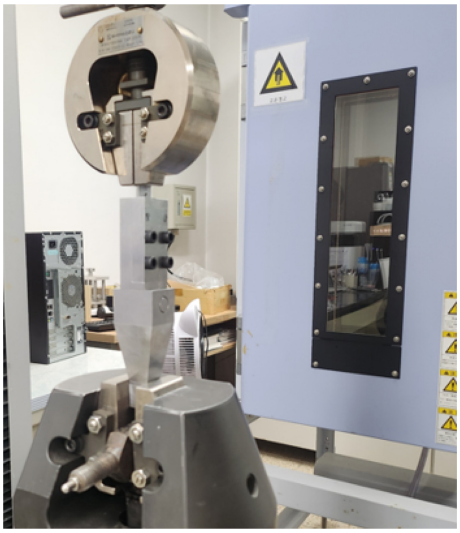


Fig. 8 Tensile test for bonding strength

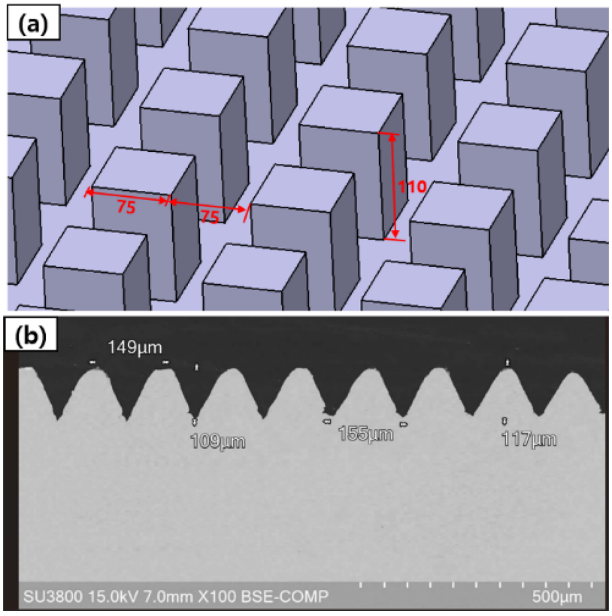


Fig. 9 1st rectangular pattern: (a) Design, (b) Measurement (×100)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 레이저 가공 패턴 형상

1차 레이저 가공 패턴 형상을 확인하기 위하여 시편제작기(TechCut5x, Allied High Tech Products)를 사용하여 단면을 절단하고, 3D 금속현미경(MM-400 Stand, Nikon)으로 패턴 형상을 측정하였다. Figs. 9와 10은 각각 1차 가공한 사각형과 육각형 패턴에 대한 설계와 측정 결과를 비교한 것이다. 레이저 가공 치수는 설계와 유사하지만 패턴 형상이 설계와 같이 직각으로 가공되지 못함을 알 수 있다. 특히 사각형 패턴의 경우 골부분이 V 홈 형태로 가공되어 있음을 볼 수 있다. 사각 및 육각 패턴의 깊이인 110, 200 μm에 비해 패턴 사이의 간격이 각각

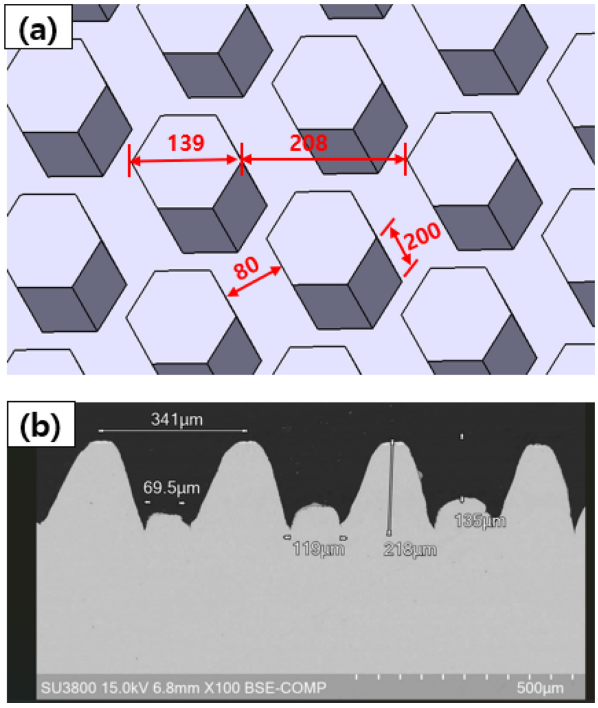


Fig. 10 1st hexagon pattern: (a) Design, (b) Measurement (×100)

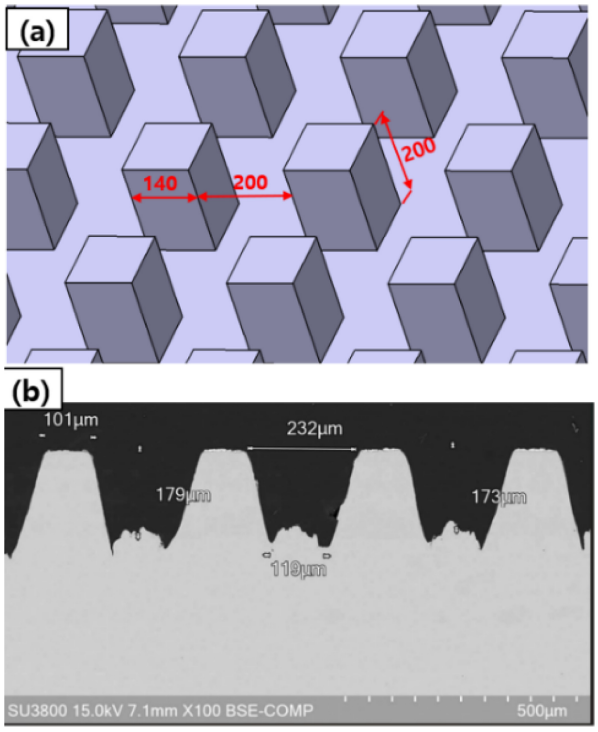


Fig. 11 2nd rectangular pattern: (a) Design, (b) Measurement (×100)

75, 80 μm로서 매우 작기 때문에 가우시안 빔의 불균일한 에너지 분포[20]에 의해 발생한 테이퍼링 현상에 기인한 것으로 판단된다.

사용한 레이저 가공기의 빔 특성을 고려하여 패턴 사이의 간격을 깊이의 2/3이상 크게 설계하는 것이 필요한 것으로 판단하고,

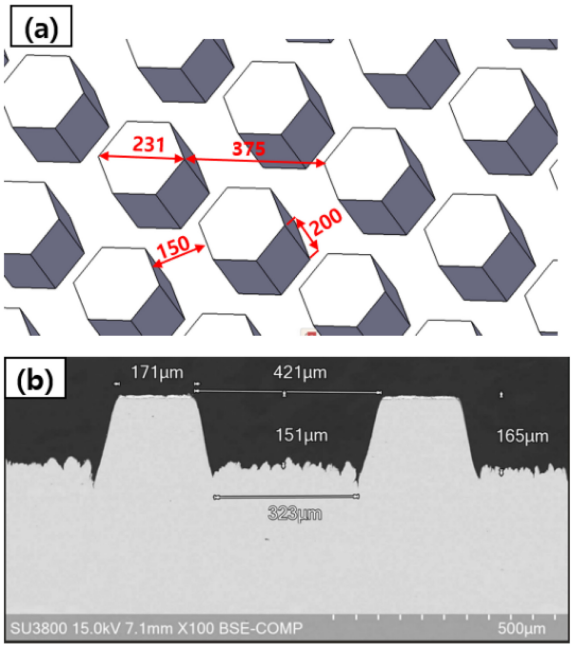


Fig. 12 2nd hexagon pattern: (a) Design, (b) Measurement (×100)

사각형과 육각형 패턴의 크기를 수정하여 2차 가공을 수행하였다. 2차 가공을 위한 사각형 패턴은 변의 길이 140 μm, 깊이 200 μm, 간격 200 μm, 그리고 육각형 패턴은 변의 길이 115 μm, 깊이 200 μm, 간격 150 μm로 각각 양각 가공하였다. Fig. 11은 2차 가공한 사각형 패턴에 대한 설계와 측정결과를 비교한 것으로 설계에서 패턴 사이의 간격을 깊이와 동일한 200 μm로 증가시킨 결과 Fig. 9와 다르게 골 부분에서 119 μm의 공간이 형성되고, 수지 침투 면적이 약 3.8배 증가하였다. 또한 2차 가공한 육각형 패턴에서는 간격을 깊이의 2/3수준인 150 μm로 증가시킨 결과 Fig. 12에서 나타난 바와 같이 설계와 유사한 가공 치수를 얻을 수 있으며, 매우 평탄한 골 부분이 형성되어, 수지 침투 면적이 약 1.5배 증가하였다.

3.2 접합강도

3.2.1 1차 가공 패턴

원형, 사각형, 다이아몬드형, 육각형 등 4가지 종류의 1차 패턴을 각각 3개씩 레이저 가공하고, 가공된 시편을 금형에 인서트하여 사출성형하였다. Fig. 13은 인장시험을 통해 측정한 접합강도를 나타낸다. 육각형 패턴의 경우 접합강도 편차는 13%로 가장 낮고, 평균값은 34.8 MPa로 가장 높았으며, 나머지 패턴의 경우 접합강도 편차는 24–36%이고, 평균값은 15.3–20.3 MPa로 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 사각형과 다이아몬드형 패턴이 원형 패턴에 비해 접합강도가 다소 낮은 원인은 Fig. 9에서 고찰한 바와 같이 1차 가공한 패턴 형상이 직각이 아닌 테이퍼진 삼각형 형상으로서 골 부분이 V자형 홈 모양으로 가공되어 사출성형 공정에서 수지가 제대로 침투하지 못한데 기인한 것으로 판단된다. 반면에 육각형 패턴의 경우에는 골 부분의 간격이 넓어 수지의 침투가 상대적으로 원활하고 안정적이기 때문에,

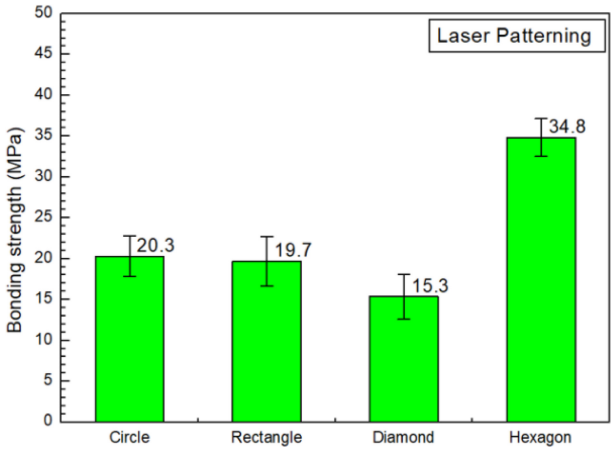


Fig. 13 Bonding strength under 1st laser texturing patterns

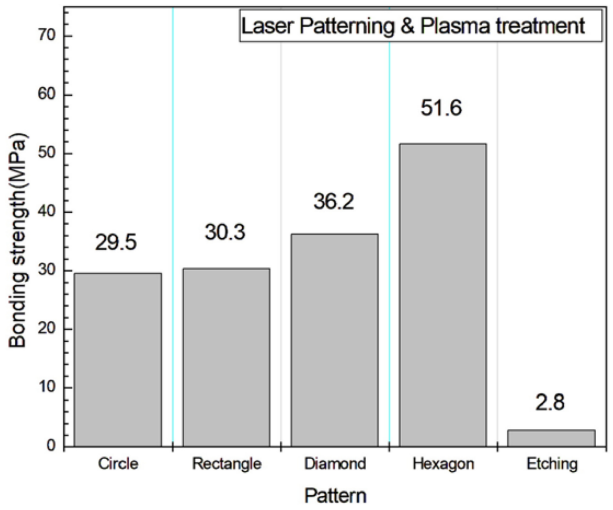


Fig. 14 Bonding strength for 1st laser patterns with plasma treatment

시편간 접합강도 편차가 상대적으로 작으며, 높은 접합강도를 나타낸 것으로 판단된다.

레이저를 사용한 1차 미세패턴 가공 이후 진공 플라즈마 표면처리를 수행한 강판을 인서트 사출성형한 시편에 대해 접합강도를 측정하였다. Fig. 14에서 나타난 바와 같이 플라즈마 표면처리를 통해 접합강도가 1.4–2.3배 높아졌다. 특히, 원형 패턴에 비해 사각형과 다이아몬드형 패턴에서 플라즈마 처리의 효과가 각각 1.2배, 3.0배 크게 나타났다. 그 이유는 표면 에너지 활성화를 통해 앞에서 기술한 V자형 홈 형상을 갖는 골 부분으로 수지의 침투가 더욱 원활하게 이뤄진데 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 15는 플라즈마 표면처리가 이뤄진 사각형과 육각형 패턴에 대해 파단된 금속 접합면을 나타낸 것이다. 사각형과 육각형 패턴의 금속 접합면에서 접합부 면적 대비 PPS 잔류 비율은 각각 12.6%, 60.6%로 나타났다. 따라서 사각형에 비해 육각형 패턴의 그루브 안에 더 많은 PPS가 침투하고 접합강도가 더욱 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

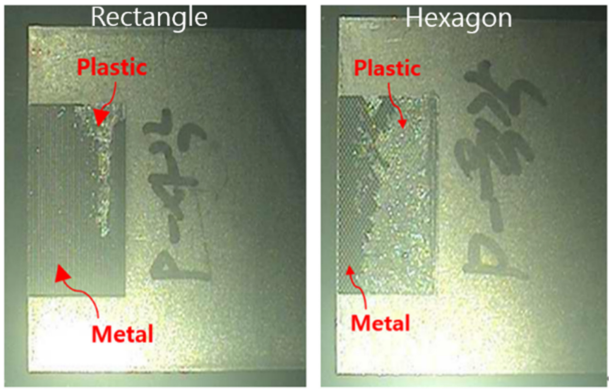


Fig. 15 Top view of the metal fracture surface in the joint area (×20)

본 실험을 통해 육각형 패턴의 레이저 가공과 플라즈마 표면처리를 병행할 경우 접합강도를 51.6 MPa까지 높일 수 있음을 알 수 있다. 다만 플라즈마 표면처리의 효과는 레이저 가공 패턴의 형상과 크기에 따라 크게 달라질 수 있는 있을 것으로 판단된다.

3.2.2 2차 가공 패턴

패턴 사이의 간격을 증가시켜 2차 가공한 사각형과 육각형 패턴을 적용한 강판을 인서트 사출성형하고, 인장시험을 통해 접합강도를 측정하였다. Fig. 16은 1차와 2차 가공 패턴의 접합강도를 비교한 것이다. 사각형 패턴은 2.2배 증가한 43.4 MPa, 육각형 패턴은 1.4배 증가한 47.4 MPa로 접합강도가 크게 증가하였다. 특히, 2차 가공한 사각형 패턴의 경우 접합강도 편차는 1차 가공의 30%에서 6%로 크게 감소하였으며, 또한 1차 가공한 육각형 패턴보다 오히려 더 높은 접합강도를 나타냈다. 그 원인은 Fig. 11에서 고찰한 바와 같이 2차 가공한 사각형 패턴의 골 부분에서 119 μm의 공간이 균일하게 확보되어 사출성형 공정에서 PPS 수지가 골 안쪽 부분까지 원활하게 침투하였기 때문으로 판단된다. 실험을 통해 1차 및 2차 가공 모두 육각형이 사각형 패턴에 비해 접합강도 향상에 더욱 유리한 것으로 나타났다.

3.3 파단면 분석(1차 가공 패턴)

1차 가공 패턴에서의 접합부 영역 파단 메커니즘을 파악하기 위하여 인장시험 이후 파단된 접합면에 대해 주사전자현미경(SU3800, Hitachi)을 사용하여 SEM (Scanning Electron Microscope) 분석과 에너지 분산 X선 분광(EDS, Energy Dispersive X-ray Spectroscope) 분석을 실시하였다. Fig. 17은 사각형 패턴에 대해 파단된 접합면을 나타낸 것으로 금속부 패턴 사이에 소량의 PPS가 붙어 있음을 볼 수 있다. 인장시험 과정에서 하중이 접합부 결합력을 초과하면 그루브에 채워진 PPS가 그루브 사이를 관통하며 파단이 일어남을 알 수 있으며, Fig. 18에서 금속 표면에 아주 미세한 탄소 신호가 검출됨을 볼 수 있다.

한편, 육각형 패턴의 경우 그루브 안으로 깊이 침투해 있는 PPS가 인장응력을 받게 되어 금속 안에서 부러지는 현상이 발생하게 된다. 이로 인해 Fig. 19에서 보는 바와 같이 금속 강판의

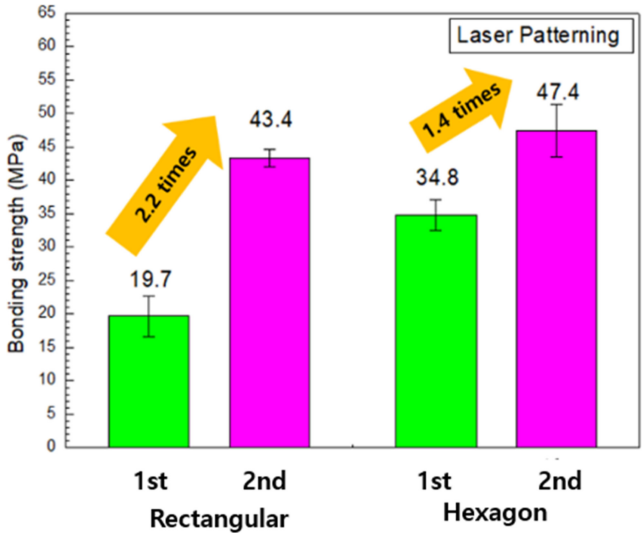


Fig. 16 Comparison of bonding strengths between 1st and 2nd patterns

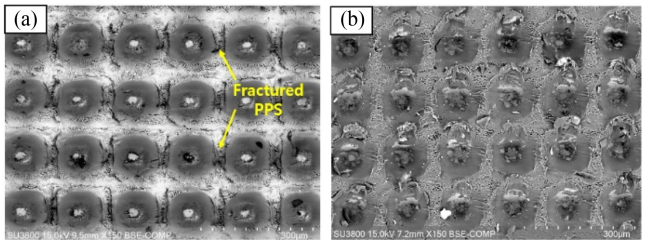


Fig. 17 Top-sectional SEM images for rectangular pattern (×150): (a) Metal, (b) Plastic

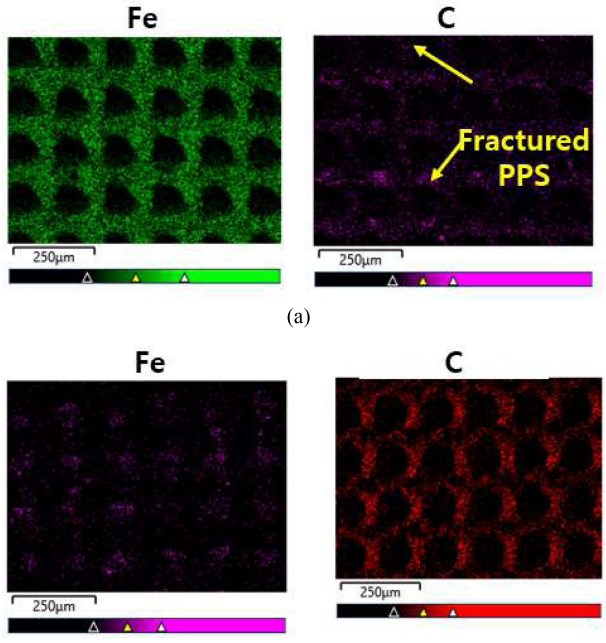


Fig. 18 EDS elemental distribution maps for rectangular pattern (Scale bar: 250 μm): (a) Metal, (b) Plastic

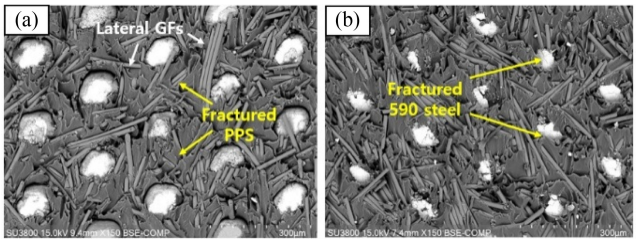
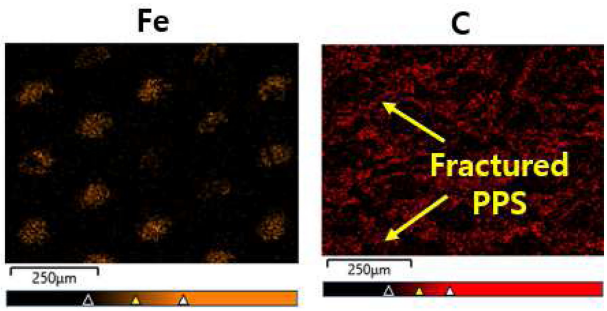
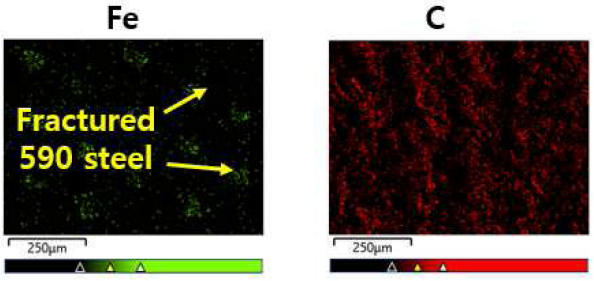


Fig. 19 Top-sectional SEM images for hexagon pattern (×150): (a) Metal, (b) Plastic



(a)



(b)

Fig. 20 EDS elemental distribution maps for hexagon pattern (Scale bar: 250 μm): (a) Metal, (b) Plastic

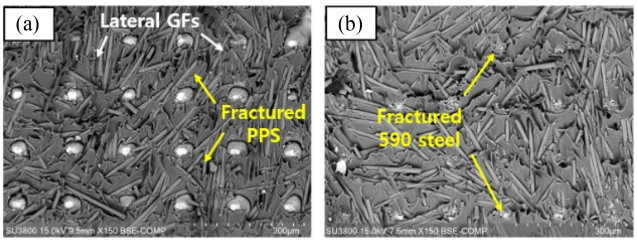
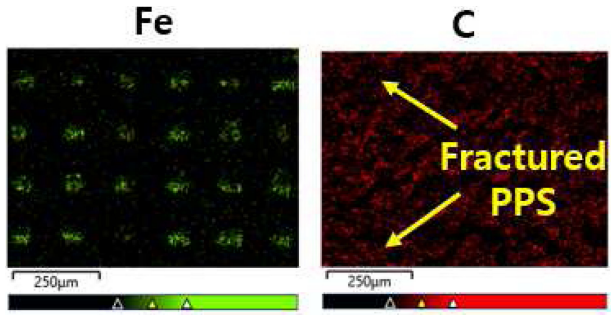


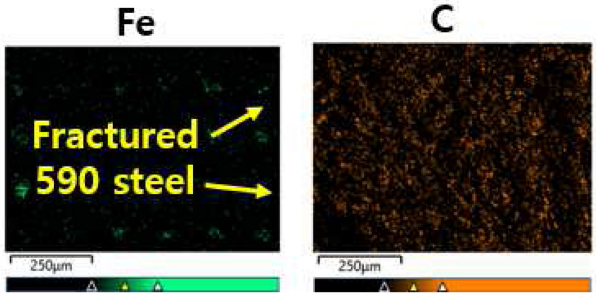
Fig. 21 Top-sectional SEM images for rectangular pattern with plasma treatment (x150): (a) Metal, (b) Plastic

그루브 안에 유리섬유와 함께 PPS가 다수 부러진 상태로 남아 있음을 알 수 있으며, Fig. 20을 통해 금속 표면에서 상당량의 탄소 신호가 검출됨을 볼 수 있다.

Fig. 21은 사각형 패턴에 플라즈마 표면처리를 한 경우에 대한 파단면 SEM분석 결과이다. 플라즈마 처리로 인해 사출성형 공정에서 PPS가 그루브 골 부분까지 침투하고 금속 강판의



(a)



(b)

Fig. 22 EDS elemental distribution maps for rectangular pattern with plasma treatment (Scale bar: 250 μm): (a) Metal, (b) Plastic

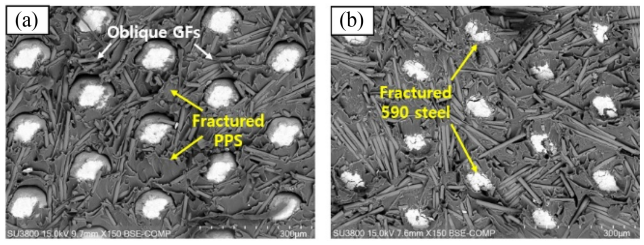


Fig. 23 Top-sectional SEM images for hexagon pattern with plasma treatment (×150): (a) Metal, (b) Plastic

그루브 안에 유리섬유와 함께 PPS가 다수 부러진 상태로 남아 있으며, 금속 표면에서 많은 탄소 신호가 검출되고 있음을 Fig. 22에서 확인할 수 있다. 결국 앞에서 고찰한 바와 같이 플라즈마 표면처리를 할 경우 사각패턴의 접합강도는 19.7에서 30.3 MPa로 증가하는 것으로 나타났다.

육각형 패턴에 플라즈마 표면처리를 한 경우 Fig. 23에서 보는 바와 같이 강판의 파단면에서 다량의 부러진 유리섬유가 파단면과 수직방향으로 경사지게 배향하고 있으며, Fig. 24의 강판 표면에서 다량의 탄소 신호가 검출되고 있다. 이러한 경향은 플라즈마 처리를 하지 않은 육각형 패턴에 대한 결과인 Fig. 19에서 부러진 많은 유리섬유들의 배향이 파단면과 평행한 전단방향으로 분포되어 있는 것과 대비되는 결과이다. 결과적으로 플라즈마 처리를 통해 전단방향으로의 강도가 높아지고, 접합강도가 34.8에서 51.6 MPa로 증가한 것으로 판단된다.

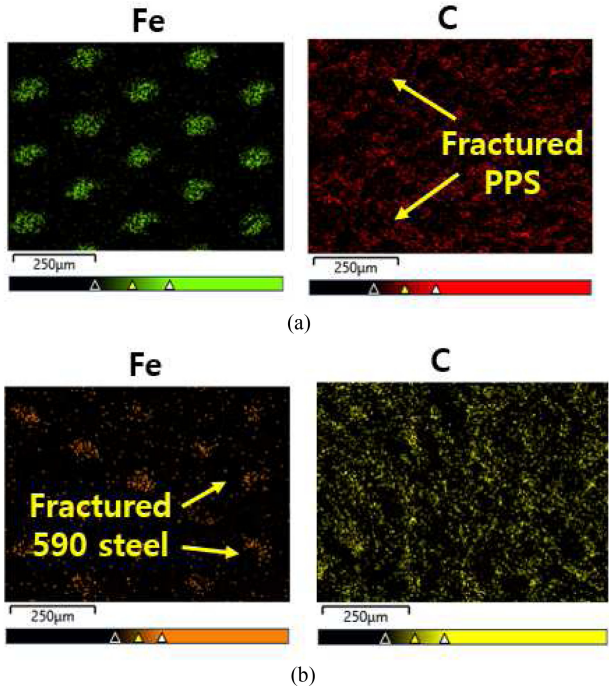


Fig. 24 EDS elemental distribution maps for hexagon pattern with plasma treatment (Scale bar: 250 μm): (a) Metal, (b) Plastic

4. 결론

강판 표면에 미세 패턴을 레이저 가공하고, 인서트 사출성형과 인장 전단시험을 통해 금속과 플라스틱 사이의 접합강도에 대해 실험적으로 고찰하였으며, 이로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

레이저 가공기의 빔 특성을 고려하여 패턴 설계에서 패턴 사이의 간격을 깊이의 2/3이상 크기로 설계하여 가공된 패턴의 골 부분에서 충분한 공간을 확보하고, 사출성형 공정에서 수지가 골 안쪽 부분까지 원활하게 충전되도록 하는 것이 접합강도를 높이기 위해 중요함을 알 수 있었다.

사각형 패턴의 경우 패턴 사이의 간격을 75에서 200 μm로 증가시켰을 때 접합강도는 19.7에서 43.4 MPa로 2.2배 증가하였다.

육각형 패턴의 경우 패턴 사이의 간격을 80에서 150 μm로 증가시켰을 때 접합강도는 34.8에서 47.4 MPa로 1.4배 증가하였다.

미세 패턴을 레이저 가공하고, 동시에 플라즈마 표면처리를 실시한 경우 접합강도가 1.4–2.3배 증가했으며, 원형 패턴에 비해 사각형과 다이아몬드형 패턴에서 플라즈마 처리효과가 각각 1.2배, 3.0배 크게 나타났다.

SEM분석 및 EDS분석을 통해 육각형 패턴에 플라즈마 표면처리를 한 경우 강판의 파단면에서 다량의 부러진 유리섬유가 파단면과 수직방향으로 경사지게 배향하고 있었으며, 강판 표면에서 다량의 탄소 신호가 검출됨을 확인할 수 있었다.

육각형이 사각형 패턴에 비해 접합강도 향상에 더욱 유리한 것으로 나타났으며, 육각형 패턴의 크기, 간격, 깊이를 최적화할 경우 접합강도를 더욱 높일 수 있을 것이다.

뿐만 아니라 향후 플라즈마 표면처리 조건 최적화, 가우시안 빔을 보완하기 위한 Top-hat 빔 기술개발 등 추가적인 연구를 통해 접합강도를 더욱 높일 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 산업통상부 신산업 대응 차세대 공통·핵심 뿌리기술 개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다(No. RS-2025-23323686).

REFERENCES

1. Katayama, S., Kawahito, Y., (2008), Laser direct joining of metal and plastic, Scripta Materialia, 59(12), 1247-1250.
2. Rodríguez-Vidal, E., Lambarri, J., Soriano, C., Sanz, C., Verhaeghe, G., (2014), A combined experimental and numerical approach to the laser joining of hybrid Polymer–Metal parts, Physics Procedia, 56, 835-844.
3. Jung K.-W., Kawahito Y., Takahashi M., Katayama S., (2013), Laser direct joining of carbon fiber reinforced plastic to aluminum alloy, Journal of Laser Applications, 25(3), 032003.
4. Nagatsuka, K., Yoshida, S., Tsuchiya, A., Nakata, K., (2015), Direct joining of carbon-fiber–reinforced plastic to an aluminum alloy using friction lap joining, Composites Part B: Engineering, 73, 82-88.
5. Shahmiri, H., Movahedi, M., Kokabi, A., (2017), Friction stir lap joining of aluminium alloy to polypropylene sheets, Science and Technology of Welding and Joining, 22(2), 120-126.
6. Amancio-Filho S. T., Bueno C., Dos Santos J. F., Huber N., Hage Jr E., (2011), On the feasibility of friction spot joining in magnesium/fiber-reinforced polymer composite hybrid structures, Materials Science and Engineering: A, 528(10-11), 3841-3848.
7. Wagner G., Balle F., Eifler D., (2013), Ultrasonic welding of aluminum alloys to fiber reinforced polymers, Advanced Engineering Materials, 15(9), 792-803.
8. Balle F., Wagner G., Eifler D., (2009), Ultrasonic metal welding of aluminium sheets to carbon fibre reinforced thermoplastic composites, Advanced Engineering Materials, 11(1-2), 35-39.
9. Yeh R.-Y., Hsu R.-Q., (2016), Development of ultrasonic direct joining of thermoplastic to laser structured metal, International Journal of Adhesion and Adhesives, 65, 28-32.
10. Ramani, K., Moriarty, B., (1998), Thermoplastic bonding to metals via injection molding for macro-composite manufacture, Polymer Engineering & Science, 38(5), 870-877.
11. Ramani, K., Zhao, W., (1997), The evolution of residual stresses in thermoplastic bonding to metals, International Journal of Adhesion and Adhesives, 17(4), 353-357.

12. Ramani, K., Tagle, J., (1996), Process-induced effects in thin-film bonding of PEKEKK in metal-polymer joints, Polymer Composites, 17(6), 879-886.

13. Sasaki, H., Kobayashi, I., Sai, S., Omoto, T., Mori, K., (1998), Direct adhesion of nylon resin to stainless steel plates coated with triazine thiol polymer by electropolymerization during injection-molding, Japanese Journal of Polymer Science and Technology, 55(8), 470-476.

14. Berry, D. H., Namkanisorn, A., (2005), Fracture toughness of a silane coupled polymer-metal interface: Silane concentration effects, The Journal of Adhesion, 81(3-4), 347-370.

15. Kimura, F., Kadoya, S., Kajihara, Y., (2016), Effects of molding conditions on injection molded direct joining using a metal with nano-structured surface, Precision Engineering, 45, 203-208

16. Kajihara, Y., Tamura, Y., Kimura, F., Suzuki, G., Nakura, N., Yamaguchi, E., (2018), Joining strength dependence on molding conditions and surface textures in blast-assisted metal-polymer direct joining, CIRP Annals, 67(1), 591-594.

17. Taki, K., Nakamura, S., Takayama, T., Nemoto, A., Ito, H., (2016), Direct joining of a laser-ablated metal surface and polymers by precise injection molding, Microsystem Technologies, 22(1), 31-38.

18. Zhao, S., Kimura, F., Kadoya, S., Kajihara, Y., (2020), Experimental analysis on mechanical interlocking of metal–polymer direct joining, Precision Engineering, 61, 120-125.

19. Kim, Y., Park, C., (2025), Effects of laser surface texturing and injection molding parameters on the direct joining of AHSS and PA 6, Journal of Welding and Joining, 43(1), 92-102.

20. Le, H., Penchev, P., Henrottin, A., Bruneel, D., Nasrollahi, V., Ramos-de-Campos, J. A., Dimov, S., (2020), Effects of top-hat laser beam processing and scanning strategies in laser micro-structuring, Micromachines, 11(2), 221.



Ho-Sang Lee
Emeritus Professor in the Department of Aeronautical & Mechanical Design Engineering, Korea National University of Transportation. His research interest is mold engineering.
E-mail: lhs@ut.ac.kr

한국정밀공학회지 제 43 권 제 10 호 pp. 1097-1104 October 2026 / 1097
J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 43, No. 10, pp. 1097-1104 http://doi.org/10.7736/JKSPE.026.00071
ISSN 1225-9071 (Print) / 2287-8769 (Online)

군용 전자장비 보호를 위한 AlN/PDMS 복합 포팅재의 기계적 및 열적 특성 평가

Mechanical and Thermal Properties of AlN/PDMS Composite Potting Materials for Protecting Defense Electronics

이제석[1], 이진규[1], 정대윤[1], 조경한[1,#]
Jae Seok Lee[1], Jin Kue Lee[1], Dae Yun Jeong[1], and Kyung Han Jo[1,#]

1 LIG 디펜스&에어로스페이스 CW 기술연구소 (CW Technology R&D Lab, LIG Defense&Aerospace)
Corresponding Author / E-mail: kyunghan.jo@ligdna.com, TEL: +82-54-469-8817
ORCID: 0009-0001-0075-7877

KEYWORDS: Potting material (포팅재), AlN/PDMS composite (AlN/PDMS 복합재), Thermal conductivity (열전도율), Mechanical property (기계적 특성), Environmental stability (환경 안정성), Defense electronics (방산 전자장비)

Military electronic equipment is often subjected to harsh operational environments characterized by mechanical shocks, vibrations, and rapid temperature fluctuations. Therefore, reliably protecting internal components is crucial. To ensure system reliability, potting materials must provide both mechanical cushioning and environmental stability. While polydimethylsiloxane (PDMS) is a promising option due to its excellent flexibility, chemical stability, and environmental resistance, its low thermal conductivity limits its effectiveness in thermal management. In this study, we aimed to address these limitations by fabricating aluminum nitride (AlN)/PDMS composite potting materials. We evaluated their thermal and mechanical properties based on varying filler loadings. PDMS specimens with different AlN contents (0, 5, 10, and 20 wt%) were prepared, followed by systematic compressive tests and thermal conductivity measurements. The results indicated that both compressive strength and thermal conductivity improved consistently with increased AlN filler loading, achieving up to a 46.7% enhancement in thermal conductivity while reasonably maintaining the inherent elasticity of the elastomer. These findings suggest that AlN/PDMS composites can effectively serve as protective materials that meet the thermal management and mechanical cushioning requirements of defense electronics, providing a foundational guideline for designing military-grade potting materials.

Manuscript received: July 8, 2026 / Revised: August 10, 2026 / Accepted: September 7, 2026
This paper was presented at KSPE Spring Conference in 2026

1. 서론

군용 전자장비는 육상, 해상 및 항공 플랫폼 등 다양한 환경에서 장기간 사용되며, 민수용 전자장비보다 더욱 가혹한 충격, 진동 및 온도 변화에 반복적으로 노출된다[1]. 이러한 환경은 장비 내부에 기계적 응력과 열적 부하를 유발하여 전자부품의 균열, 접합부 손상, 절연 성능 저하 및 국부적 온도 상승과 같은 문제로 이어질 수 있다.

따라서 군용 전자장비의 안정적인 운용을 위해서는 외부 환경 조건으로부터 내부 부품을 보호하는 동시에 전자부품에서 발생하는 열을 효과적으로 분산시킬 수 있는 포팅 소재의 개발이 중요하다. Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 포팅재는 전자부품 주변을 충진하여 외부 충격과 진동을 완화하고, 수분 및 이물질의 침투를 억제하며, 전기적 절연성을 제공하는 부품 보호용 소재이다[2]. 최근 전자 부품의 고집적화가 이루어지며 출력이 증가함에 따라 포팅재에는 외부 하중에 대한 구조적 변형 저항성뿐 아니라 우수한 방열 성능을 동시에 충족하는 다기능성이 요구되고 있다[3,4].

Copyright © The Korean Society for Precision Engineering
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

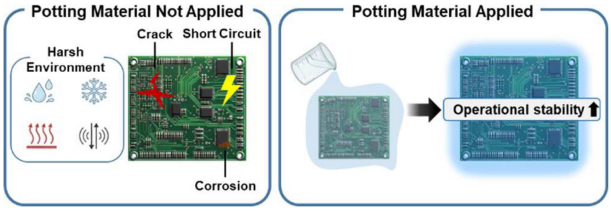


Fig. 1 Schematic diagram comparing unpotted and potted electronic equipment exposed to harsh operational environments: failure modes such as cracking, short circuits, and corrosion due to external stressors (left), and enhanced operational stability achieved through the application of the protective potting material (right)

전자장비의 포팅에 사용되는 다양한 재료들의 특성을 Table1에 요약하였다. 에폭시 수지는 인장 강도에 비해 높은 압축 강도를 나타내며[5] 우수한 접착력[6]을 바탕으로 우수한 구조적 지지력을 제공하지만, 낮은 파단 연신율과 높은 취성을 갖는다[7]. 이로 인해 열충격 상황이나 지속적인 진동 환경 노출 시 내부 응력 집중으로 인한 크랙 발생 및 신뢰성 저하의 위험이 크다. 폴리우레탄의 경우 비교적 낮은 탄성계수와 우수한 변형 회복력을 바탕으로 뛰어난 탄성을 나타내지만[8], 에스테르/우레탄 구조를 갖는 폴리머는 고온 환경에서의 열분해와 수분에 의한 가수분해 반응이 일어날 수 있으므로 습열 조건에서의 신뢰성에 대한 세심한 고려가 필요하다[9,10].

반면 본 연구에서 사용된 실리콘계 고분자인 Polydimethylsiloxane (PDMS)은 실록산 결합 고유의 높은 결합 에너지를 바탕으로, 고온 환경에서도 우수한 열적 안정성을 유지한다[11]. 특히 낮은 탄성계수에 기반한 높은 연신율로 인해 탄성 변형 구간이 넓어 응력이 제거될 경우 변형 회복률이 매우 우수하다[12]. 이러한 역학적 특성은 외부 정적 하중이나 전자 부품 간 열팽창계수 불일치로 발생하는 열응력을 효과적으로 분산할 수 있는 장점이 있다. 이에 따라 PDMS는 가혹한 환경에 사용되는 군용 전자장비 포팅재로 활용하기에 적용하기에 우수한 조건을 갖추고 있다.

또한 PDMS는 다양한 무기질 재료와의 혼합이 쉽기때문에 기계적 특성과 열전도 특성을 조절할 수 있어 방열 소재 분야에서 활발히 연구되고 있다. 그러나 PDMS는 자체 열전도율이 약 0.15–0.2 W/(m·K) 수준으로 매우 낮아[13], 단독 사용 시 높은 발열량을 가진 장비에 적용이 힘들다. 이에 따라 Boron Nitride (BN) [14,15], Aluminum Oxide (Al_2O_3) [16], Aluminum Nitride (AlN) [17]와 같은 재료를 보강재로 첨가하여 열전도 특성을 향상시키는 연구들이 진행되었으며, 보강재 함량 증가에 따라 열전도율이 향상되는 경향[18]이 보고되었다. 특히 AlN은 높은 열전도율과 우수한 전기 절연성을 동시에 제공하여 방열기판 및 반도체 절연층 등으로 사용된다[19,20].

그러나 포팅재는 단순한 방열 소재와 달리 외부 충격과 진동으로부터 전자부품을 보호하는 기능을 동시에 수행해야 한다. 따라서 열전도율 향상뿐 아니라 보강재 첨가에 따른 기계적 특성

Table 1 Mechanical and thermal properties of Epoxy, Polyurethane, and PDMS

	Epoxy	Polyurethane	PDMS
Young's modulus [MPa]	1–4 × 10^3	10–100	0.5–3
Elongation [@break, %]	< 10	300–800	100–500
Thermal stability [T_d^*, ºC]	300–380	200–280	350–430
Ref.	[5-7]	[9,10,21]	[11,12,22]

*Thermal decomposition temperature

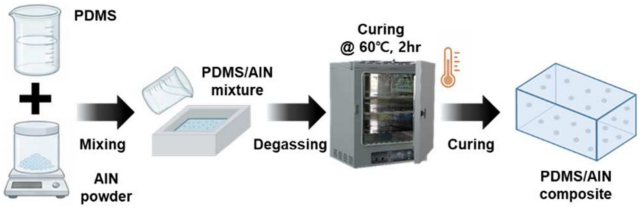


Fig. 2 Fabrication process of AlN/PDMS composites

변화까지 함께 고려하는 것이 중요하다. 그럼에도 불구하고 기존 AlN/PDMS 복합재 연구는 열전도 특성 향상에 집중되어 있으며, AlN 함량 변화에 따른 압축 변형 거동과 열전달 특성을 함께 평가하여 포팅재 설계 관점에서 두 특성 간의 균형을 분석한 연구는 상대적으로 부족하다. 특히 군용 전자장비용 포팅재는 우수한 방열 성능과 함께 정적 압축 변형 저항성을 동시에 확보해야 하므로, 두 특성의 상관관계를 분석하는 것이 중요하다.

이에 본 연구에서는 PDMS의 기계적 성능과 AlN의 열전도 특성을 결합한 AlN/PDMS 복합 포팅재를 제안한다. 이를 위해 포팅재 고유의 기계적 특성을 유지할 수 있는 임계 범위를 고려하여 0, 5, 10 및 20 wt%의 AlN을 포함하는 PDMS 복합재를 제조하였다. 제조된 복합재는 AlN 함량에 따른 압축 응력-변형률 거동, 50% 변형률에서의 압축 응력을 평가하였으며, 열적 특성 평가를 위해 열확산도 및 열전도율을 측정하였다. 이를 통해 AlN 함량에 따른 기계적 특성과 방열 특성의 상관관계를 분석하고, 군용 전자장비 포팅재 설계 시 요구되는 기계적 보호 성능과 방열 성능의 균형을 확보하기 위한 기초 자료를 제시하고자 한다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 AlN/PDMS 복합재의 제조

AlN/PDMS 복합재는 Fig. 2에 제시된 공정에 따라 제조하였다. PDMS (Sylgard 184)는 Dow Corning Korea Ltd. (Korea)에서 구입하였으며, 입자 크기가 10 μm인 AlN 파우더(241903-50 g)는 Sigma-Aldrich (USA)에서 구입하였다. 본 연구에서 고려한

AlN 충진율은 0, 5, 10 및 20 wt%이며, AlN을 첨가하지 않은 PDMS를 대조군으로 사용하였다.

복합재 제조를 위해 먼저 PDMS 주제와 경화제 혼합물(10 : 1)을 준비한 후, 목표 충진율에 맞추어 AlN 분말을 계량하였다. 계량된 AlN 분말을 PDMS 주제와 경화제의 혼합물에 첨가한 후 충분한 시간 동안 교반하여 PDMS 용액 내에 균일하게 분산시켰다. 혼합 후에는 용액 내에 잔류한 기포를 제거하기 위해 진공 데시케이터 내에서 1시간 동안 진공 탈포 공정을 수행하였다. 탈포된 혼합액은 몰드에 주입한 후 60ºC에서 2시간동안 경화하여 AlN/PDMS 복합재를 제조하였다. 제작된 복합재는 주사전자현미경(SEM, GeminiSEM 560, Carl Zeiss AG, Germany)을 사용해 표면을 고배율(1,000×)로 관찰하였다.

2.2 기계적 특성 평가

AlN 충진율에 따른 기계적 성능을 평가하기 위해 압축 시험을 수행하였다. 기계적 특성 평가 시 인장 시험이 광범위하게 활용되나, 본 연구에서는 군용전자장비의 실제 운용 환경을 고려하여 압축 시험을 주요 기계적 평가 지표로 선정하였다. 밀폐된 금속 하우징 내부에 충진되는 포팅재는 외부로 인장력이 작용하는 환경에 노출되기보다는 하우징 체결 시 발생하는 물리적 압착 하중, 내부 발열 부품의 열팽창에 의해 유발되는 구속 압축 응력 등을 주로 받게 된다. 따라서 실제 운용 조건인 구속된 환경을 고려하여 압축 시험만을 진행했다.

압축 시험용 시편은 길이 10 mm, 폭 10 mm, 높이 10 mm의 정육면체 형태로 제작하였으며, 압축 시험은 만능재료시험기(Instron 8801, Instron Corp., USA)를 사용하여 수행하였다. 압축 시험을 통해 변형률 증가에 따른 응력 변화를 측정하여 응력-변형률(Stress-Strain) 곡선을 확인하였다. 통계적 신뢰성 확보를 위해 각 충진율마다 5개 이상의 시편에 대해 동일한 과정을 반복 수행하여 평균값과 표준편차를 산출하였다.

또한 AlN 함량에 따른 변형 저항성의 변화를 비교하기 위해 50% 압축 변형률에서의 응력을 별도로 산출하였다. 압축 응력-변형률 거동과 50% 변형률에서의 압축 응력을 비교하여 AlN 충진율이 복합재의 기계적 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

2.3 열적 특성 평가

복합재의 열적 안정성은 열중량분석(Thermogravimetric Analysis, TGA) 및 미분열중량분석(Differential Thermogravimetry, DTG)을 통해 평가하였다. TGA는 열분석기(SDT 650, TA Instruments, USA)를 사용하여 수행하였으며, 질소 분위기 하에서 상온부터 800ºC까지 10ºC/min의 일정한 승온 속도로 하중변화를 측정하였다. TGA 및 DTG 결과를 비교하여 AlN 함량이 PDMS 복합재의 열분해 거동에 미치는 영향을 분석하였다.

열전달 특성은 열확산도(Thermal Diffusivity) 및 열전도율(Thermal Conductivity) 측정을 통해 평가하였다. 시편은 길이 10 mm, 폭 10 mm, 높이 10 mm의 정육면체 형태로 제작하였으며, Laser Flash Analysis 장비(LFA 457 MicroFlash, NETZSCH, Germany)를 사용하여 측정하였다. 각 조성에 대해 5회 이상 반복 측정을 수행하여 평균값과 표준편차를 산출하였으며, AlN 충진율에 따른 열전달 특성의 변화를 비교하였다. 본 연구에서 수집된 모든 데이터는 Origin Pro 2023 소프트웨어(v10.0.0.154, OriginLab Corporation, USA)를 사용해 그래프로 표현되었다.

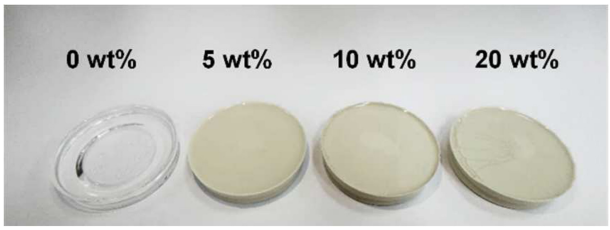


Fig. 3 Optical photographs of AlN/PDMS composites with various AlN filler contents, demonstrating the transition from transparency to opacity

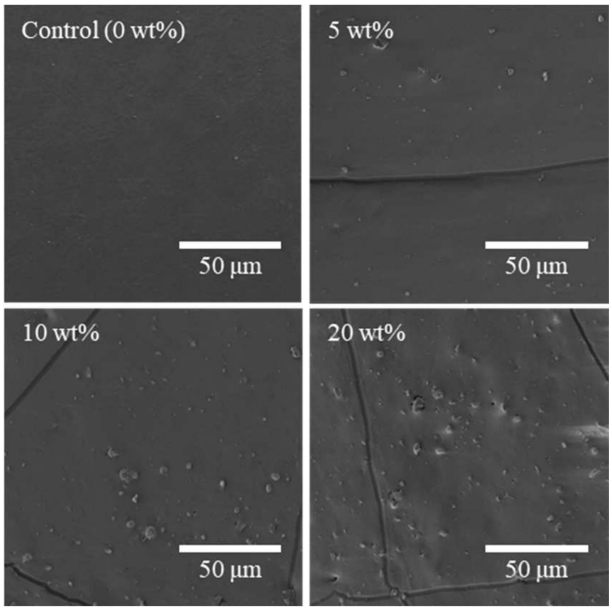


Fig. 4 SEM images of neat PDMS and AlN/PDMS composites with 5, 10, and 20 wt% AlN filler contents

3. 결과 및 고찰

3.1 AlN/PDMS 복합재의 외관 및 미세조직

Fig. 3은 AlN 충진율에 따른 PDMS 복합재의 외관 변화를 보여준다. 보강재가 첨가되지 않은 PDMS는 투명한 외관을 나타내지만, AlN 보강재가 첨가됨에 따라 세라믹 입자에 의한 빛의 산란 효과로 인해 시편이 불투명하다[23]. 이러한 투명도의 변화는 연회색의 AlN 입자보강재가 PDMS 내에 고르게 혼입됨에 따라 빛의 굴절률 차이 및 산란현상으로 발생하였으며[24], 보강재의 구체적인 분산 형태와 미세구조적 특징은 SEM 분석을 통해 상세히 확인하였다.

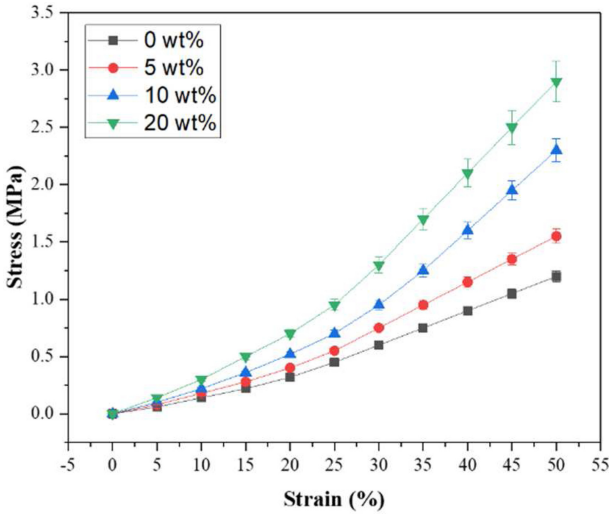


Fig. 5 Compressive stress-strain curves of AlN/PDMS composites with various AlN contents

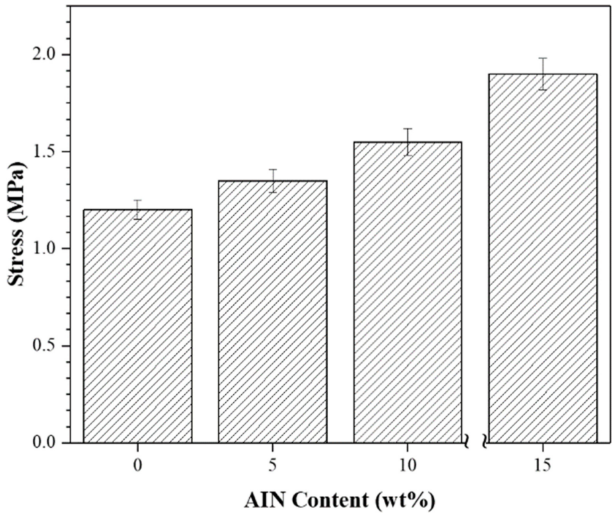


Fig. 6 Compressive stress-strain curves of AlN/PDMS composites with various AlN contents

Fig. 4는 AlN 함량에 따른 PDMS 복합재 단면의 SEM 이미지를 나타낸다. AlN이 첨가되지 않은 대조군에서는 균일하고 매끄러운 단면이 관찰된다. 반면 5 wt% AlN/PDMS 복합재의 경우, AlN 입자가 단면 전반에 무작위로 분산되어 있음을 확인하였다. 다만 해당 충진율에서는 AlN 입자들이 서로 고립된 형태로 존재하여 입자 간 간격이 비교적 넓기 때문에 열전도율이 비교적 제한적일 것으로 보인다.

AlN 함량이 10 wt%로 증가함에 따라 단면 내 입자의 밀도가 높아지며, 일부 입자들이 상호 접촉하여 부분적인 네트워크 구조를 형성하기 시작한다. 이러한 밀도 변화는 AlN/PDMS 복합재 내에서 열전도 경로가 점차 구축되고 있음을 나타내며[25], 이는 향후 설명할 열확산도 및 열전도율의 증가 경향을 뒷받침하는 주요 근거이다.

20 wt% AlN/PDMS 복합재에서는 AlN 입자가 복합재 전반에 걸쳐 분포하며, 입자 간 접촉 및 응집 현상이 뚜렷하게 관찰된다. 이처럼 높은 밀도로 배열된 구조는 연속적인 열전도 경로 형성에 유리하여 복합재의 열전도율 향상에 크게 기여한다.

3.2 기계적 특성

Fig. 5는 AlN 충진율에 따른 AlN/PDMS 복합재의 압축 응력-변형률 곡선을 나타낸다. 모든 조건에서 변형률이 증가함에 따라 압축 응력이 비선형적으로 상승하는 전형적인 탄성체의 압축 거동이 관찰된다. 대조군의 경우 50% 변형률에서의 압축 응력이 1.21 MPa로 나타났으나, AlN 함량이 5, 10, 20 wt%로 증가함에 따라 각각 1.55, 2.32, 2.93 MPa로 유의미하게 상승하였다. 특히 20 wt% 조건에서는 대조군 대비 약 141%의 높은 응력 증가율을 보였으며, 이를 직관적으로 비교하기 위해 50% 압축 변형률에서의 응력 변화 추이를 Fig. 6에 별도로 나타내었다.

AlN의 함량이 증가함에 따라 압축 변형 저항성이 증가하는 것은, 상대적으로 강성과 경도가 높은 세라믹 보강재가 유연한 PDMS 내에서 효과적인 하중 지지 역할을 수행하여 복합재의 변형 저항성을 향상시키기 때문이다[26]. 특히 AlN 함량이 10 wt% 이상인 영역에서 응력의 증가 폭이 더욱 두드러지는데, 이는 앞서 SEM 분석에서 확인한 바와 같이 입자 간의 네트워크 형성에 기인한 것으로 볼 수 있다.

그러나 포팅재는 단순히 외부 하중을 버티는 높은 강성을 요구하는 소재가 아니라, 운용 중 발생하는 외부 하중에 대한 구조적 변형 저항성 역시 확보해야 한다. 보강재 함량 증가에 따른 지나친 강성 증가와 탄성 계수의 상승은 소재를 경화시켜 충격 에너지 흡수율을 떨어뜨리고, 진동 감쇄 성능을 저하시키는 원인이 될 수 있다[27]. 본 실험 결과에서는 AlN 충진율이 20 wt%까지 증가함에 따라 압축 응력이 점진적으로 상승하는 안정적인 경향을 보였으나, 실제 장비 적용을 위해서는 방열 성능의 극대화와 안정적인 기계적 성능 사이의 상충 관계를 적절히 고려하여 설계를 최적화하는 것이 필수적이다.

3.3 열적 안정성

Fig. 7은 AlN/PDMS 복합재의 TGA 및 DTG 결과를 나타낸다. TGA 곡선 분석 결과, 모든 시편은 약 350–600 ℃ 구간에서 주된 질량 감소를 보였으며, AlN 충진율이 증가할수록 초기 분해 온도와 급격한 열분해 거동이 고온 영역으로 점진적으로 이동하는 내열성 향상 효과가 관찰된다. 본 연구에서는 질량 감소가 5% 발생한 시점을 초기 열분해 온도($T_{5\%}$)로 정의하였으며, 대조군의 경우 $T_{5\%}$인 약 360℃ 이후 급격한 질량 감소가 시작된다. 반면 20 wt% AlN/PDMS 복합재는 $T_{5\%}$인 약 410℃ 부근까지 안정적인 질량을 유지하다 본격적인 열분해가 진행되어 가장 우수한 열분해 지연 효과를 나타내었다.

고온 영역에서의 잔류 질량 역시 AlN 함량 증가에 따라 정량적으로 증가하는 경향을 보였다. 800°C에서의 최종 잔류량은 AlN 함량(0, 5, 10, 20 wt%)에 따라 각각 1.5, 7.5, 13.5, 24.5%로

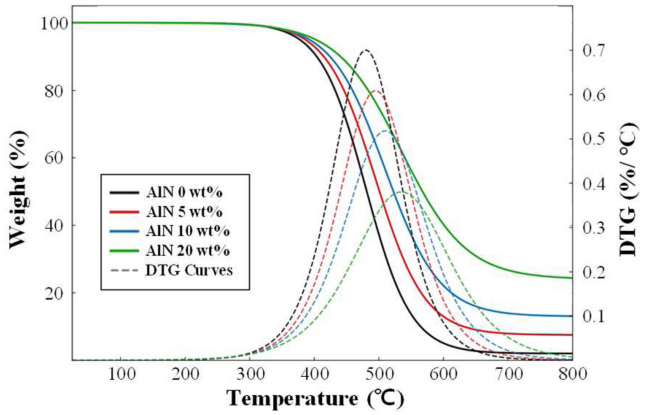


Fig. 7 TGA and DTG curves of AlN/PDMS composites with various AlN contents

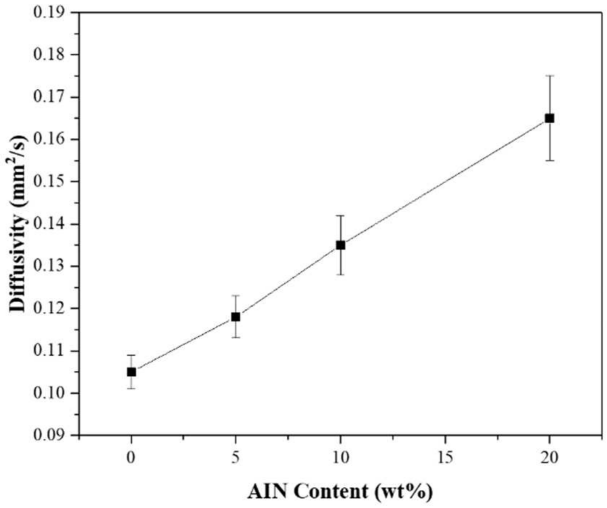


Fig. 8 Thermal diffusivity of AlN/PDMS composites with various AlN contents

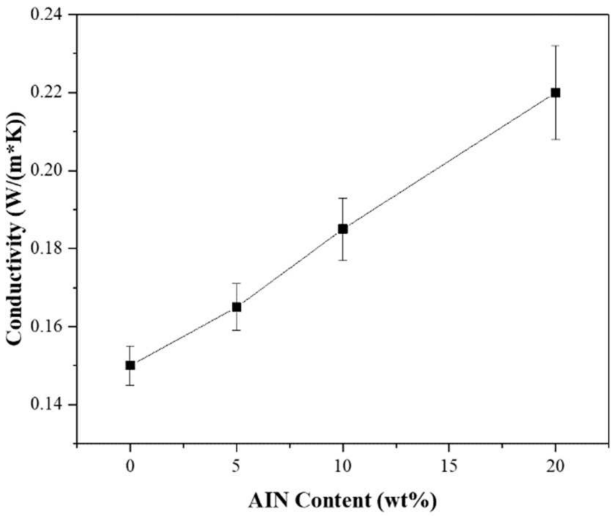


Fig. 9 Thermal conductivity of AlN/PDMS composites with various AlN contents

증가하였다. 이러한 고온 잔류량의 증가는 세라믹 소재인 AlN 보강재가 고온 환경에서도 열적으로 안정하게 잔존함에 따라 질량 백분율이 반영된 결과이다. 다만, 보강재 함량을 차감한 순수 PDMS 기준 잔류량(각 1.5, 2.63, 3.89, 5.63%)을 고려하더라도, AlN 보강재가 PDMS의 휘발을 충분히 억제하였음을 나타내며 열적 장벽 역할을 수행함으로써[28] $T_{5\%}$를 고온 영역으로 지연시키는 실질적인 열적 안정화 효과를 유발함을 확인하였다.

DTG 곡선에서도 AlN 충진에 따른 열적 안정성 향상이 명확히 확인된다. 질량 감소 속도가 최대가 되는 지점인 최대 분해 속도 온도(T_{max})는 대조군의 경우 약 475°C에서 나타났으나, AlN의 함량이 증가함에 따라 고온 영역으로 점진적으로 이동하여 20 wt% 조성에서는 약 535°C까지 상승(약 60°C 증가)하였다. 이와 동시에 AlN 함량이 증가할수록 DTG 피크의 절대적인 높이(분해 속도)가 확연히 감소하는 거동이 관찰되었다. 이는 PDMS 내에 균일하게 분산된 AlN 입자들이 열 전달을 지연하는 물리적인 열적 장벽으로 작용하여 열분해 진행 속도를 효과적으로 억제했기 때문이다[29]. 결과적으로 AlN 보강재의 혼합이 PDMS 포팅재의 고온 열분해 저항성과 잔류 안정성을 크게 향상시킴을 입증하며, 이는 국부적으로 고온에 노출될 가능성이 있는 군용 전자장비의 보호용 소재로서의 높은 적용 가능성을 뒷받침한다.

3.4 열확산율 및 열전도도

Fig. 8은 AlN 충진율에 따른 PDMS 복합재의 열확산도 변화를 보여준다. 대조군의 열확산도는 0.105 mm^2/s로 측정되었으며, AlN 함량이 5, 10, 20 wt%로 증가함에 따라 각각 0.118, 0.135, 0.165 mm^2/s로 점진적으로 증가하였다. 이러한 추세는 AlN/PDMS 복합재에 포함된 AlN 입자가 PDMS 내부에서 열에너지의 확산 및 전달을 유의미하게 촉진하고 있음을 의미한다.

Fig. 9는 AlN 충진율에 따른 열전도율 변화를 나타낸다. 대조군의 열전도율은 0.150 W/(m·K)이었으며, AlN 함량이 5, 10, 20 wt%로 증가함에 따라 각각 0.165, 0.185, 0.220 W/(m·K)로 향상되었다. 특히 20 wt% AlN/PDMS 복합재는 대조군 대비 약 46.7% 향상된 열전도율을 나타내었으며, 이는 AlN 보강재의 혼합이 PDMS 기반 포팅재의 방열 성능을 개선하는 데 효과가 있음을 나타낸다.

이처럼 열확산도와 열전도율이 AlN 함량 증가에 따라 동시에 향상되는 현상은, 앞서 SEM 미세구조에서 언급한 바와 같이 열전도도가 높은 AlN 입자가 PDMS 내에서 효율적인 열 전달 경로를 형성하기 때문으로 해석된다. 특히 열확산도와 열전도율 모두 AlN 함량이 20 wt%에 도달할 때까지 일정한 기울기로 우상향하는 경향을 보인다. 그러나 이런 추세에도 불구하고, 세라믹 보강재 고유의 높은 열전도율(약 320 W/(m·K))을 고려할 때, 복합재 전체의 열전도율 상승 폭이 보강재 자체의 물성치보다는 다소 낮게 나타난다[30,31]. 이러한 현상은 PDMS 내 보강재의 무작위 분산, PDMS와 보강재 계면에서 발생하는 계면 열저항[32], 그리고

충진율 상승에 따른 효율성 변화 등에 의해 복합적으로 제한되는 것으로 보인다. 따라서 향후 AlN 입자의 표면 개질 및 PDMS 내 분포 최적화 등을 통해 계면 열저항을 최소화한다면, 방열 성능의 향상 효율을 극대화할 수 있을 것으로 기대된다[33,34].

4. 결론

본 연구에서는 군용 전자장비 보호용 포팅재로 활용하기 위해 열전도성이 띄어난 AlN 보강재가 충진된 PDMS 복합재를 제조하고, 보강재의 충진율에 따른 기계적 및 열적 특성 변화를 다각도로 평가하였다. 압축 시험 결과, AlN 함량이 증가함에 따라 50% 변형률에서의 압축 응력이 1.21에서 2.93 MPa로 유의미하게 상승하여 복합재의 강성이 향상됨을 확인하였다. 이는 PDMS 내에 분산된 AlN 입자가 효과적인 하중 지지 역할을 수행한 결과로 해석된다.

열적 특성 평가에서는 TGA 및 DTG를 통해 AlN/PDMS 복합재의 초기 열분해 온도와 최대 분해 속도 온도가 고온 영역으로 크게 지연됨을 확인하였다. 이는 매트릭스 내에 충진된 AlN 보강재가 열적 장벽 효과를 유발함으로써 복합재의 전반적인 안정성을 향상시킨 결과로 해석된다.

또한, AlN 충진율이 증가함에 따라 복합재의 열확산도와 열전도율이 모두 점진적으로 향상되는 경향을 보였다. 특히 20 wt% AlN/PDMS 복합재의 열전도율은 0.220 W/(m·K)를 나타내 대조군 대비 약 46.7% 향상된 방열 성능을 나타내었다. 이러한 결과는 AlN/PDMS 복합재가 기존 PDMS 기반 포팅재 고유의 낮은 열전도율 한계를 극복할 수 있음을 보여준다.

본 연구는 열전도도 향상에 국한되었던 기존 연구에서 벗어나, AlN/PDMS 복합재의 방열 특성과 기계적 특성을 동시에 체계적으로 분석하여 차별화된 결과를 도출하였다. 이를 통해 가혹한 환경에서 운용되는 군용 전자장비용 포팅재 설계를 위한 기초 물성 데이터를 정량적으로 제시하였다. 특히 AlN 함량 증가에 따라 방열 성능은 향상되는 동시에 기계적 강성 또한 증가하는 경향을 확인하였으며, 포팅재 설계 시 방열 성능과 기계적 성능 간의 균형을 고려한 보강재 함량 선정이 중요함을 확인하였다.

다만 본 연구가 단위 시편 수준의 기초 재료 특성 평가에 집중된 만큼, 실제 방산 제품 적용을 위해서는 확장된 신뢰성 검증이 요구된다. 따라서 향후 연구에서는 MIL-STD 규격에 기반한 충격, 진동 및 열충격 시험을 수행하고, 실제 전자장비를 이용한 장기 신뢰성 평가를 수행하여 AlN/PDMS 복합 포팅재의 군용 전자장비 적용 가능성을 종합적으로 입증할 계획이다.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by LIG Defense&Aerospace Co., Ltd., Korea.

REFERENCES

1. Brown, T. G., (2003), Harsh military environments and microelectromechanical (MEMS) devices, Sensors, IEEE, 2, 753-760.
2. Chao, N. H., Cordes, J. A., Carlucci, D., DeAngelis, M. E., Lee, J., (2011), The use of potting materials for electronic-packaging survivability in smart munitions, Journal of Electronic Packaging, 133(4), 041003.
3. Yan, X., Martin-Gonzalez, M., (2026), Strategies for enhancing thermal conductivity of PDMS in electronic applications, Advanced Materials Technologies, 11(4), e01210.
4. Meguid, S., Zhuo, C., Yang, F., (2014), Effective mitigation of shock loads in embedded electronic packaging using bilayered potting materials, Journal of Electronic Packaging, 136(4), 041010.
5. Littell, J. D., Ruggeri, C. R., Goldberg, R. K., Roberts, G. D., Arnold, W. A., Binienda, W. K., (2008), Measurement of epoxy resin tension, compression, and shear stress–strain curves over a wide range of strain rates using small test specimens, Journal of Aerospace Engineering, 21(3), 162-173.
6. Prolongo, S. G., del Rosario, G., Ureña, A., (2006), Comparative study on the adhesive properties of different epoxy resins, International Journal of Adhesion and Adhesives, 26(3), 125-132.
7. Pham, H. Q., Marks, M. J., (2000), Epoxy resins, in: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH.
8. Hepburn, C, (2012), Polyurethane elastomers, Springer Netherlands.
9. Plota, A., Masek, A., (2020), Lifetime prediction methods for degradable polymeric materials—A short review, Materials, 13(20), 4507.
10. Petrović, Z. S., Zavargo, Z., Flyn, J. H., Macknight, W. J., (1994), Thermal degradation of segmented polyurethanes, Journal of Applied Polymer Science, 51(6), 1087-1095.
11. Mark, J. E., (2004), Some interesting things about polysiloxanes, Accounts of Chemical Research, 37(12), 946-953.
12. Victor, A., Ribeiro, J. E., Araújo, F. F., (2019), Study of PDMS characterization and its applications in biomedicine: A review, Journal of Biomechanical Engineering, 4(1), 1-9.
13. Goel, P., Dutta Choudhury, M., Aqeel, A. B., Li, X., Shao, L.-H., Duan, H., (2019), Effect of thermal conductivity on enhanced evaporation of water droplets from heated graphene–PDMS composite surfaces, Langmuir, 35(21), 6916-6921.
14. Fang, H., Zhang, X., Zhao, Y., Bai, S., (2017), Dense graphene foam and hexagonal boron nitride filled PDMS composites with high thermal conductivity and breakdown strength, Composites Science and Technology, 152, 243-253.
15. Pezzana, L., Riccucci, G., Spriano, S., Battegazzore, D., Sangermano, M., Chiappone, A., (2021), 3D printing of PDMS-like polymer nanocomposites with enhanced thermal conductivity: Boron nitride based photocuring system, Nanomaterials, 11(2), 373.

16. Si, W., He, X., Huang, Y., Gao, X., Zheng, X., Zheng, X., Leng, C., Su, F., Wu, D., (2018), Polydimethylsiloxane/aluminum oxide composites prepared by spatial confining forced network assembly for heat conduction and dissipation, RSC Advances, 8(63), 36007-36014.

17. Yang, C.-R., Chen, C.-D., Cheng, C., Shi, W.-H., Chen, P.-H., Teng, T.-P., (2020), Thermal conductivity enhancement of ALN/PDMS composites using atmospheric plasma modification techniques, International Journal of Thermal Sciences, 155, 106431.

18. Ngo, I.-L., Jeon, S., Byon, C., (2016), Thermal conductivity of transparent and flexible polymers containing fillers: A literature review, International Journal of Heat and Mass Transfer, 98, 219-226.

19. Hahn, B.-D., Kim, Y., Ahn, C.-W., Choi, J.-J., Ryu, J., Kim, J.-W., Yoon, W.-H., Park, D.-S., Yoon, S.-Y., Ma, B., (2016), Fabrication and characterization of aluminum nitride thick film coated on aluminum substrate for heat dissipation, Ceramics International, 42(16), 18141-18147.

20. Haider, S. T., Shah, M. A., Lee, D.-G., Hur, S., (2023), A review of the recent applications of aluminum nitride-based piezoelectric devices, IEEE Access, 11, 58779-58795.

21. Szycher, M., (2012), Szycher's handbook of polyurethanes, 2nd Edition, Taylor & Francis.

22. Ellis, B., Smith, R., (2008), Polymers: A property database, 2nd Edition, CRC press.

23. He, X., Ou, D., Ma, Y., Wu, S., Chen, Y., Luo, Y., Wu, D., (2021), Enhancing the thermal conductivities of aluminum nitride-polydimethylsiloxane composites via tailoring of thermal losses in filler networks, Polymer Composites, 42(3), 1338-1346.

24. Sales, F., Souza, A., Ariati, R., Noronha, V., Giovanetti, E., Lima, R., Ribeiro, J., (2021), Composite material of PDMS with interchangeable transmittance: Study of optical, mechanical properties and wettability, Journal of Composites Science, 5(4), 110.

25. Bohren, C. F., Huffman, D. R., (2008), Absorption and scattering of light by small particles, John Wiley & Sons.

26. Ke, X., Liu, L., Guo, L., You, F., Jiang, X., Li, C., Zhu, W., (2026), Enhanced thermal conductivity and mechanical properties of polydimethylsiloxane composites using polydopamine functionalized boron nitride, Polymer Bulletin, 83(3), 101.

27. Tian, L., Wang, Y., Jin, E., Li, Y., Wang, R., Shang, Y., (2017), Aluminum nitride–filled elastic silicone rubber composites for drag reduction, Advances in Mechanical Engineering, 9(4).

28. Zheng, J., He, S., Wang, J., Fang, W., Xue, Y., Xie, L., Lin, J., (2020), Performance of silicone rubber composites filled with aluminum nitride and alumina tri-hydrate, Materials, 13(11), 2489.

29. Ou, Z., Gao, F., Zhao, H., Dang, S., Zhu, L., (2019), Research on the thermal conductivity and dielectric properties of AlN and BN co-filled addition-cure liquid silicone rubber composites, RSC Advances, 9(49), 28851-28856.

30. Xu, Y., Chung, D., Mroz, C., (2001), Thermally conducting aluminum nitride polymer-matrix composites, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 32(12), 1749-1757.

31. Zhou, H., Deng, H., Zhang, L., Fu, Q., (2017), Significant enhancement of thermal conductivity in polymer composite via constructing macroscopic segregated filler networks, ACS Applied Materials & Interfaces, 9(34), 29071-29081.

32. He, M., Zhang, L., Ruan, K., Zhang, J., Zhang, H., Lv, P., Guo, Y., Shi, X., Guo, H., Kong, J., (2025), Functionalized aluminum nitride for improving hydrolysis resistances of highly thermally conductive polysiloxane composites, Nano-Micro Letters, 17(1), 134.

33. Niu, H., Guo, H., Ren, Y., Ren, L., Lv, R., Kang, L., Bashir, A., Bai, S., (2022), Spherical aggregated BN/AlN filled silicone composites with enhanced through-plane thermal conductivity assisted by vortex flow, Chemical Engineering Journal, 430, 133155.

34. Chiu, H. T., Sukachonmakul, T., Kuo, M. T., Wang, Y. H., Wattanakul, K., (2014), Surface modification of aluminum nitride by polysilazane and its polymer-derived amorphous silicon oxycarbide ceramic for the enhancement of thermal conductivity in silicone rubber composite, Applied Surface Science, 292, 928-936.



Jae Seok Lee
Research engineer in CW Technology R&D Lab, LIG Defense&Aerospace. His research interest is mechanical design for defense systems.
E-mail: jaeseok.lee@ligdna.com



Jin Kue Lee
Chief Research engineer in CW Technology R&D Lab, LIG Defense&Aerospace. His research interest is mechanical design for defense systems.
E-mail: jinkue.lee2@ligdna.com



Dae Yun Jeong
Research engineer in CW Technology R&D Lab, LIG Defense&Aerospace. His research interest is mechanical design for defense systems.
E-mail: daeyun.jeong@ligdna.com



Kyung Han Jo
Chief Research engineer in CW Technology R&D Lab, LIG Defense&Aerospace. His research interest is mechanical design for defense systems.
E-mail: kyunghan.jo@ligdna.com

한국정밀공학회지 제 43 권 제 10 호 pp. 1105-1112 October 2026 / 1105
J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 43, No. 10, pp. 1105-1112 http://doi.org/10.7736/JKSPE.026.00040
ISSN 1225-9071 (Print) / 2287-8769 (Online)

발 진행각 변경에 따른 무릎내전모멘트 변화의 생체역학적 메커니즘

Biomechanical Mechanisms Underlying Changes in Knee Adduction Moment induced by Modifications of the Foot Progression Angle

곽호규[1], 김나연[1], 이승민[1], 엄광문[1,#]
Ho-Kyou Kwak[1], Na-Yeon Kim[1], Sean-Min Lee[1], and Gwang-Moon Eom[1,#]

1 건국대학교 대학원 의학공학과 (Department of Biomedical Engineering, Graduate School of Konkuk University)
Corresponding Author / E-mail: gmeom@kku.ac.kr
ORCID: 0000-0002-7934-3772

KEYWORDS: Knee adduction moment (무릎 내전 모멘트), Foot progression angle (발 진행각), Center of pressure (압력중심), Moment arm (모멘트암), Gait modification (보행변경), Ground reaction force direction (지면반력 방향)

The knee adduction moment (KAM) is widely used as a surrogate measure of medial knee loading and is a primary target of gait modification. Toe-in and toe-out modifications of the foot progression angle are commonly assumed to reduce KAM peaks by displacing the center of pressure (COP), but this mechanism has not been firmly established. This study therefore aimed to clarify the mechanism underlying KAM reduction during these modifications. Healthy adults walked under normal, toe-out, and toe-in conditions. KAM, the moment arm of the ground reaction force (GRF), GRF magnitude, GRF angle, and COP were analyzed at the first and second KAM peaks. Toe-in and toe-out walking predominantly reduced the first and second KAM peaks, respectively. The moment arm was the primary determinant of both peaks (R^2 > 0.90). Contrary to conventional assumptions, the reduction in moment arm depended largely on changes in GRF angle, whereas the contribution of COP was minimal or even opposed the change in moment arm. These findings provide a mechanistic basis for foot progression modification strategies and should help improve their clinical effectiveness.

Manuscript received: April 27, 2026 / Revised: July 6, 2026 / Accepted: August 2, 2026

NOMENCLATURE

KOA	=	Knee Osteoarthritis
KAM	=	Knee Adduction Moment
FPA	=	Foot Progression Angle
GRF	=	Ground Reaction Force
MA	=	Moment Arm
COP	=	Center of Pressure
KJC	=	Knee Joint Center

1. 서론

무릎 골관절염(Knee Osteoarthritis, KOA)은 대표적인 퇴행성 근골격계 질환이며, 특히 내측구획(Medial Compartment)에서 높은 발생 빈도를 보인다. 내측구획에 작용하는 과도한 부하는 내측 골관절염의 발생 및 진행과 관련된 주요 생체역학적 요인으로 알려져 있으며, 이에 따라 보행 중 무릎 내측부하를 평가하기 위한 연구가 활발히 수행되고 있다[1]. 보행 중 무릎내전모멘트(Knee Adduction Moment, KAM)는 내측 구획 부하의 대표적 대리지표로 사용되며, 기저(Baseline) 무릎내전모멘트 크기가 방사선학적 무릎 골관절염 진행과 연관됨이 보고되었다[1].

Copyright © The Korean Society for Precision Engineering
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이러한 배경에서, 보행 중 무릎내전모멘트를 낮추는 보행수정(Gait Modification) 전략과 같은 비수술적 관리전략이 지속적으로 제안되었다[2].

보행수정은 추가적인 장비나 침습적 처치 없이도 관절 내외측의 하중분포를 변화시킬 수 있는 방법이다. 그 중, 수평면에서의 발진행각도(Foot Progression Angle, FPA)를 조절하는 내반(Toe-in) 및 외반(Toe-out)전략은 임상적용이 가장 용이하다[2,3]. 발진행각도 변경은 무릎내전모멘트의 피크를 감소시킬 수 있으며, 건강한 대조군과 무릎 골관절염 환자 모두에서 발진행각도 변경의 효과가 유사하게 나타났고, 따라서 발진행각도 수정이 무릎 골관절염 관리의 유망한 보존적 치료임이 메타분석을 통해 보고되었다[3].

발진행각도 수정의 효과는 입각기의 두 개의 무릎내전모멘트 피크 중 어느 피크를 주로 조절하는가와 연결되어 논의되어 왔다. 선행연구에서 내반보행은 1st Peak 무릎내전모멘트를 감소시키는 전략으로서[3,4], 외반보행은 2nd Peak 무릎내전모멘트를 낮출 수 있는 전략으로 보고되어 왔다[3,5]. 최근에는 개인별로 무릎내전모멘트의 어느 피크가 더 큰지에 따라 내반 또는 외반을 선택하는 방식이 일괄적용방식보다 더 큰 무릎내전모멘트 감소를 유도할 수 있으며[6], 수정의 개인화가 발진행각도 수정의 효율을 높일 수 있다는 결과도 제시되었다[7]. 일괄적용방식의 경우, 무릎 골관절염 환자대상 실험에서 Baseline 대비 10°의 내반수정은 1st Peak 무릎내전모멘트를 평균 7.6% 감소시키고, 10°의 외반수정은 2nd Peak 무릎내전모멘트를 평균 11.0% 감소시킨다는 보고가 있다[8].

무릎내전모멘트는 관상면(Coronal Plane)에서의 지면반력(Ground Reaction Force, GRF)의 크기와 모멘트암(Moment Arm, MA)의 곱으로 근사된다[9,10]. 또한, 모멘트암은 압력중심(Center of Pressure, COP)과 지면반력 벡터의 방향(각도)에 의존한다. 문헌에서는 발진행각도 변경으로 인한 모멘트암과 무릎내전모멘트 감소의 원인으로서, 압력중심 이동과 지면반력 벡터의 작용선 변화가 제시되지만[3-5], 모두 일부의 사실을 근거로 한 추정에만 그칠 뿐 각 성분이 무릎내전모멘트에 얼마만큼의 영향을 미치는지에 대한 체계적인 근거가 제시되지 않았다. 특히, 전역좌표계에서의 압력중심, 지면반력 벡터의 변화가 모멘트암 계산의 기반이 되는 무릎 국소좌표계에서는 어떻게 작용되는지에 대한 해석이 없었다. 이러한 메커니즘에 대한 정확한 이해는 보행변경의 방향성을 제시하고, 임상적용에서의 효율 제고를 위해 필수적인 것이다.

따라서 본 연구의 목적은 내반변경과 외반변경을 포괄하는 분석을 통해, 발진행각도 수정에 따른 무릎내전모멘트 변화가 모멘트암으로 얼마나 설명되는지, 또한 모멘트암을 결정하는 요인으로서 압력중심과 지면반력 각도의 영향을 무릎 국소좌표계에서 체계적으로 규명하는 것이다. 이를 통해 발진행각도 수정이 무릎내전모멘트에 영향을 미치는 생체역학적 메커니즘을 제시하고자 한다.

Table 1 Subject characteristics

Characteristic	Mean ± SD (n = 14)
Gender	Male = 7, Female = 7
Age [yrs]	22 ± 1.8
Height [m]	1.68 ± 0.09
Body mass [kg]	67.8 ± 14.3



Fig. 1 Gait-path and experimental setup

2. 방법

2.1 피실험자

본 연구에는 하지에 근골격계 질환이나 수술 병력이 없는 건강한 성인 14명이 참여하였다(Table 1). 본 연구는 윤리위원회(IRB No. 7001355-202011-HR-409)의 승인을 받아 수행되었으며, 모든 피험자는 실험 절차에 대한 충분한 설명을 듣고 동의한 후 실험에 참여하였다.

2.2 실험장비 및 방법

실험에서는 보행 계측을 위해 모션캡쳐 카메라 9대(Eagle, Motion Analysis, CA)와 힘판 2대(OR6-7, AMTI, MA)를 사용하였다. 피험자는 모션캡처 전용 수트와 캡(3×3 Designs Ltd., Canada)을 착용한 후, Helen-Hayes 풀 마커 세트를 부착하였다.

피험자는 정상보행(Normal Gait), 외반보행, 내반보행의 3가지 조건을 수행하였다. 정상보행에서는 자연스러운 평상시의 보행패턴을 수행하였다. 외반 보행은 정상보행 대비 발진행각도를 약 10° 외측으로 증가시키도록, 내반 보행은 정상보행 대비 발진행각도를 약 10° 내측으로 감소시키도록 지시하였다.

Fig. 1과 같이 6.5 m 보행로 중앙에 힘판을 배치하였다. 각 조건별로 약 7분간 연습 후 10회 보행을 측정하였다. 분석대상은 왼발의 입각기로 하였다. 10회의 데이터 중 마커 데이터 유실이 적은 7회를 선별하여 분석하였다.

운동학(Kinematic) 데이터에 대해 Cortex (Ver. 8.1, Motion

Analysis, CA)에서 4차 Butterworth 저역통과필터(차단주파수 6 Hz)를 적용하였다. 역동역학(Inverse Dynamics) 분석을 수행하여 외부(External) 무릎내전모멘트를 산출하고, 이로부터 1st Peak와 2nd Peak를 각각 추출하였다.

무릎내전모멘트의 감소를 유도하는 요인을 파악하기 위해서 무릎 관상면에서의 모멘트암과 지면반력 크기를 산출하고, 무릎내전모멘트의 두개의 피크시점에서의 값을 추출했다. 또한, 모멘트암의 감소를 결정하는 요인을 파악하기 위해 무릎 국소 좌표계에서의 압력중심 및 지면반력 각도를 산출하였다. 그 상세한 과정은 다음과 같다. 우선, 전역(Global) 좌표계로 표현된 압력중심 좌표와 지면반력 벡터를 무릎 국소(Local) 좌표계로 변환하였다. 압력중심의 경우, 원점을 무릎관절중심(Knee Joint Center, KJC)으로 변환한 후 무릎좌표계의 오일러 축회전을 수행하였고, 지면반력 벡터 방향과 크기만을 나타내므로 축회전만을 수행했다. 이후, 압력중심과 지면반력 벡터를 무릎좌표계의 관상면으로 투영(Projection)하여, 점(KJC)과 직선(지면반력 벡터)과의 거리인 모멘트암을 벡터외적을 이용하여 산출하였다[9]. 관상면에 투영된 지면반력 벡터의 길이를 지면반력 크기로 정의하였고, 투영된 압력중심의 내외측 성분(내측이 +)을 COPml로 정의하였다. 지면반력 각도는 무릎 관상면에서 무릎축의 수직선으로부터 지면반력이 내측으로 기울어진 각도로 정의했다.

산출된 변수들 (무릎내전모멘트, 모멘트암, 압력중심, 지면반력 크기, 지면반력 각도)의 보행전략 간 비교를 위해 RM-ANOVA를 수행하였다. 또한, 무릎내전모멘트와 모멘트암을 결정하는 요인들의 영향력 분석을 위해 단계적(stepwise) 다중회귀분석을 수행하였다. 이때, 무릎내전모멘트의 결정요인으로서 모멘트암과 지면반력 크기를, 모멘트암의 결정요인으로서 압력중심과 지면반력 각도를 설정하였다. 모든 통계 분석에는 SPSS 29 (IBM, NY)를 사용하였고 유의수준은 0.05로 설정하였다.

정규성 검정 결과, 무릎내전모멘트, 모멘트암, 지면반력 크기, 지면반력 각도, COPml 모두에서 정규성 위반이 관찰되지 않았다. 따라서 보행조건 간 비교 및 회귀 분석은 모수 통계 방법으로 수행하였다.

3. 결과

3.1 발진행각도 수정의 검증

실험에서 제시한 발진행각도 수정이 의도한 대로 수행되었는지를 확인하기 위해 발진행각도를 분석하였다. Table 2와 같이 정상보행 대비 내반보행에서는 발진행각도가 유의하게 감소하였고, 외반보행에서는 유의하게 증가하였다($p < 0.001$). 정상보행의 평균 발진행각도는 1st Peak에서 $9.5 \pm 6°$, 2nd Peak에서 $11.9 \pm 7°$였으며, 내반보행에서는 각각 $-2.5 \pm 7°$, $-0.4 \pm 9°$로 감소하였고, 외반보행에서는 각각 $22.2 \pm 7°$, $23.9 \pm 7°$로 증가하였다. 이를 통해 단순한 언어적 지시만으로도 목표한 발진행각도 수정이 효과적으로 수행되었음을 확인하였다.

Table 2 Foot progression angle (FPA) across the three gait conditions

Gait type	1st peak [deg]	2nd peak [deg]
Normal	9.5 ± 6	11.9 ± 7
Toe-in	-2.5 ± 7***	-0.4 ± 9***
Toe-out	22.2 ± 7***	23.9 ± 7***

Significant differences compared with the normal gait condition determined by repeated-measures ANOVA followed by Bonferroni-corrected post hoc tests (*p < 0.05, ** p < 0.01, *** p < 0.001)

3.2 무릎내전모멘트와 그 결정요인

Fig. 2에서 무릎내전모멘트와 그 결정요소로서의 모멘트암, 지면반력 크기에 대해, 그 시간궤적과 Figs. 2(a)-2(c) 무릎내전모멘트 피크시점에서의 값(Figs. 2(d)-2(f))을 나타낸다. 피크시점에서의 무릎내전모멘트와 모멘트암의 감소패턴은 매우 유사했다(Figs. 2(d)-2(e)). 구체적으로, 외반변경에서는 두 피크시점 모두 정상보행보다 작았고 내반변경의 경우에는 첫번째 피크시점에서만 작았다($p < 0.001$). 지면반력 크기는 두 피크시점 모두에서 발진행각도 변경과 정상보행의 차이가 없었다(Fig. 2(f)).

모멘트암과 지면반력 크기를 요인으로 하는 무릎내전모멘트에 대한 단계적 다중회귀분석의 결과(Table 3), 두 피크 모두에서 모멘트암 단독모델의 설명력(R^2)가 90% 이상이었고, 지면반력 크기의 추가에 의한 설명력의 증가는 4–7%에 불과했다.

3.3 모멘트암 결정요인들의 변화양상

Fig. 3은 모멘트암의 결정요인으로서의 COPml과 지면반력 각도에 대해, 그 시간궤적(Figs. 3(a)-3(b))과 무릎내전모멘트 피크시점의 값(Figs. 3(c)-3(d))을 나타낸다. 지면반력 각도(Fig. 3(d))는 모멘트암의 변화(Fig. 2(e))와 매우 유사해서, 외반에서는 두 피크 모두 감소, 내반에서는 첫 피크시점만 감소했다. 그러나, COPml은 (Fig. 3(c)) 외반에서는 첫 피크시점만 증가, 내반에서는 두번째 피크시점만 감소하여 모멘트암의 변화양상과 전혀 달랐다.

Fig. 4는 입각기 동안의 압력중심의 이동궤적을 나타낸 것으로서, Fig. 4a는 전역좌표계에서의 궤적을 Fig. 4b는 무릎국소좌표계에서의 궤적을 보여준다. 전역좌표계에서는, 내반보행에서는 압력중심 궤적이 내측편이하였고, 외반보행에서는 외측편이하였다. 이와는 반대로, 무릎국소좌표계에서의 궤적은 내반보행의 COPml이 오히려 외측편이하고 외반보행의 COPml은 내측편이하였다. 이것은 무릎좌표계의 기준이 되는 하퇴(Shank)의 회전량이 발의 발진행각도 수정량보다 더 크다는 것을 나타낸다.

3.4 모멘트암에 대한 다중회귀분석

지면반력 각도와 COPml를 요인으로 하는 모멘트암에 대한 다중회귀분석 결과(Table 4), 두 요인을 모두 포함한 모델에서 높은 설명력을 보였다($R^2 = 0.84$–0.93). 지면반력 각도와 COPml 모두 모멘트암을 증가하도록 하는 양의 영향력을 미치는 것으로 (Positive Beta) 나타났으며, 지면반력 각도가 압력중심보다 더 큰 부분회귀계수를 보였다.

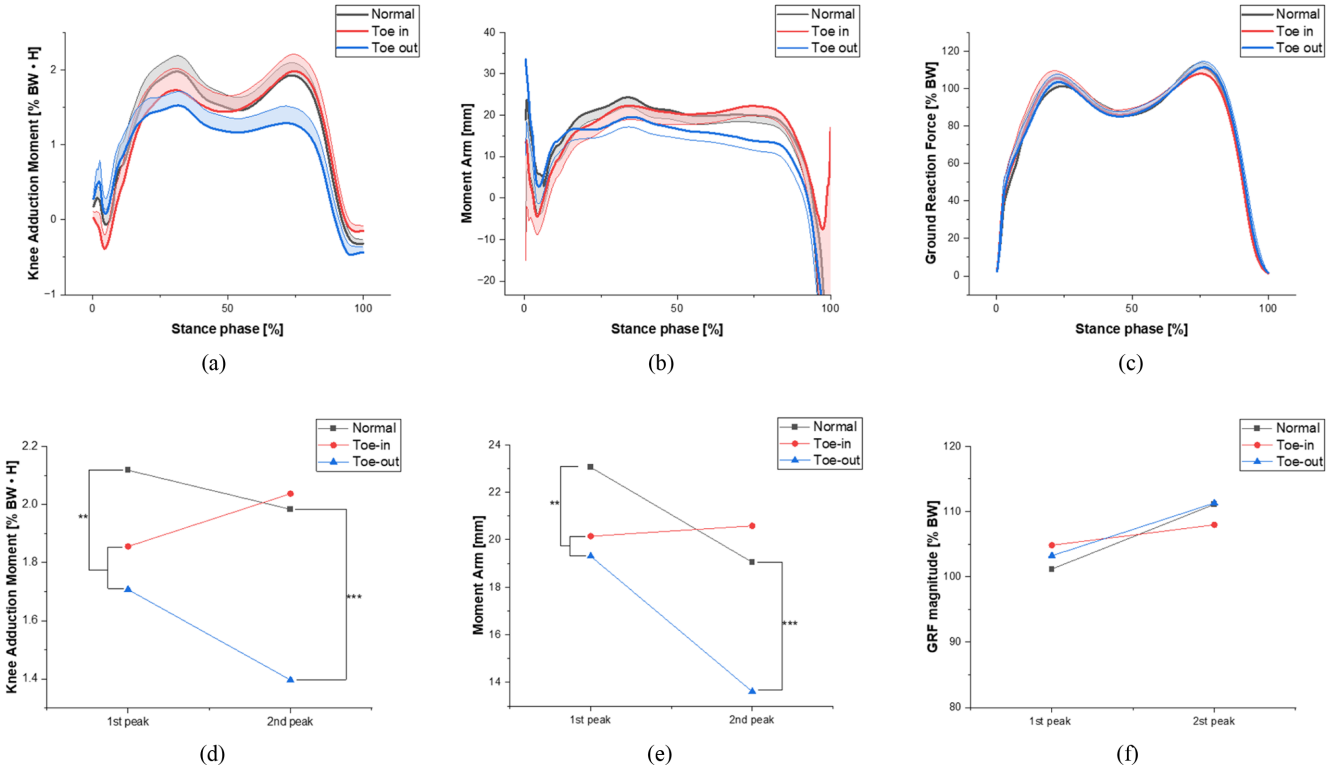


Fig. 2 Time trajectories of (a) KAM, (b) MA, and (c) GRF magnitude, with their corresponding values at the two peaks of KAM (d)-(f) across three gait types (normal, toe-in, and toe-out). In panels (d)-(f), the lines connecting the first and second KAM peaks are intended solely to facilitate visual comparison of the two peak values within each gait condition and do not represent temporal changes or causal relationships between the peaks. Significant differences from the normal gait condition determined by repeated-measures ANOVA followed by Bonferroni-corrected post hoc tests (*p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001)

Table 3 Stepwise regression analysis for the peak knee adduction moment (KAM)

Dependent variable	Factors	Final adjusted R^2	Δ Adjusted R^2	VIF	β (95% CI)
KAM 1st peak	MA [mm]	0.967***	0.90	1	0.92***(0.86–0.97)
	GRF magnitude [N]		0.07		0.27***(0.21–0.32)
KAM 2nd peak	MA [mm]	0.991***	0.95	1	0.90***(0.87–0.94)
	GRF magnitude [N]		0.04		0.22***(0.18–0.25)

*p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001

4. 고찰

4.1 주요 결과와 시사점

이 연구의 주요한 결과는 다음과 같다. 발진행각도 변경 보행에서 무릎내전모멘트의 변화는 대부분 모멘트암변화로 설명되었으며(R^2 > 0.90, Table 3), 모멘트암은 지면반력 각도와 압력중심의 변화에 의해 설명되었다(R^2 > 0.84, Table 4). 이 중 지면반력 각도의 영향이 COPml보다 크게 나타났다. 종합하면, COPml과 지면반력 각도의 상호작용이 모멘트암을 경유하여 최종적으로 무릎내전모멘트에 영향을 미치게 되는데, 이 상세한 과정을 개념적 도식으로 Fig. 5에 나타내고 다음에서 고찰한다.

무릎내전모멘트를 모멘트암과 지면반력 크기의 곱으로 근사하는 모델에서, COPml의 증가(내측편이)와 지면반력 각도의 증가(내측 기울어짐)는 둘 모두 모멘트암의 증가를 통해 무릎내전모멘트의 증가를 유발하게 된다. 따라서 모멘트암의 가장 효과적인 감소는 COPml과 지면반력 각도 모두 감소할 경우가 된다. Fig. 5에서, 이러한 경우는 외반보행의 2nd Peak, 내반보행의 1st Peak에서 발생했고, 두 경우 모두 각 보행변경전략에서의 주된(Primary) 변화를 유발했다. 특히, 두 경우 모두 COPml의 감소는 유의하지 않았는데도 모멘트암과 무릎내전모멘트가 크게 감소한 것은, 지면반력 각도의 감소가 주된 원인이었음을 보여준다.

한편, COPml과 지면반력 각도의 변화가 반대방향일 경우

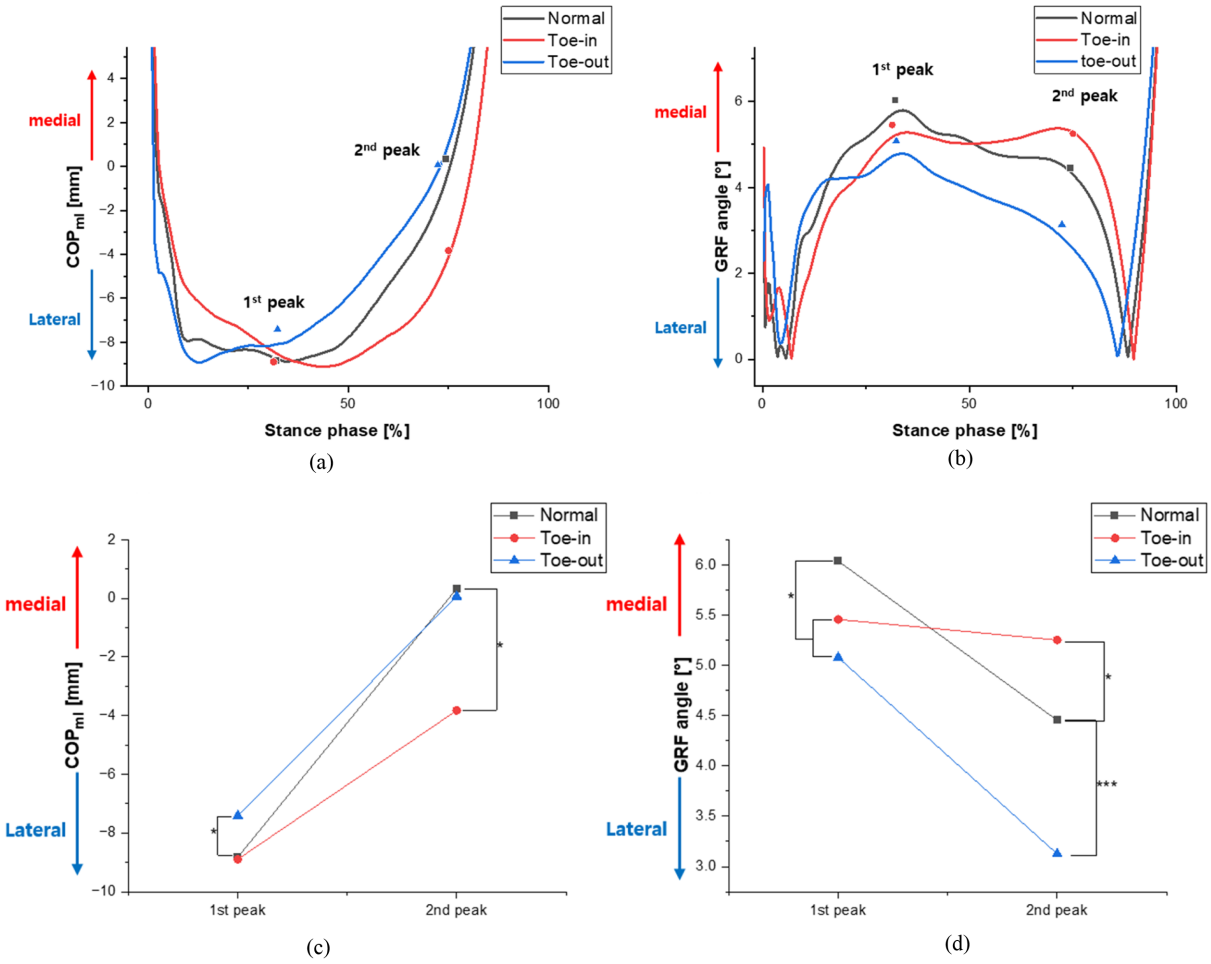


Fig. 3 Time trajectories of (a) COPml and (b) GRF angle, with (c)-(d) their corresponding values at the first and second KAM peaks across the three gait types. In panels (c)-(d), the lines connecting the first and second KAM peaks are intended solely to facilitate visual comparison of the two peak values within each gait condition and do not represent temporal changes or causal relationships between the peaks. Significant differences from the normal gait condition determined by repeated-measures ANOVA followed by Bonferroni-corrected post hoc tests (*p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001)

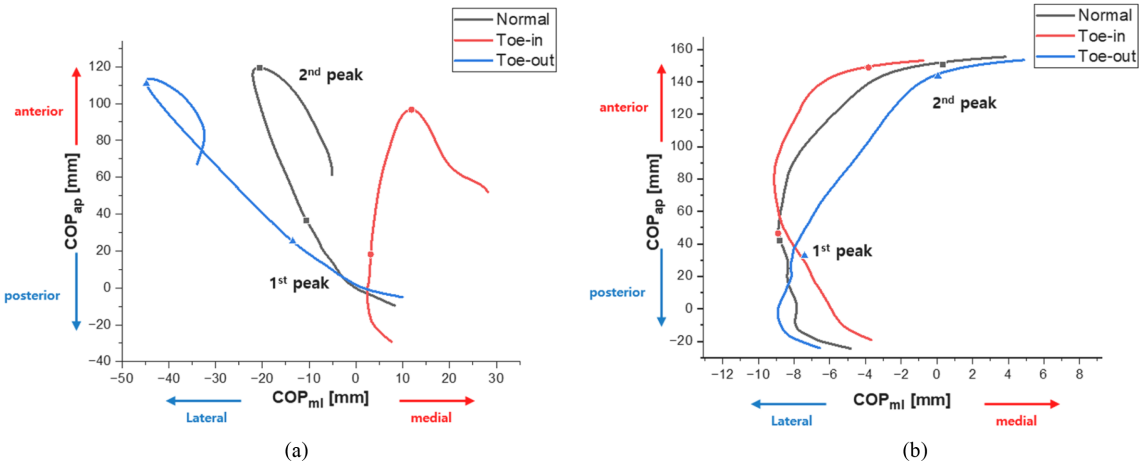


Fig. 4 COP trajectories (ensemble averaged) across three gait conditions on the horizontal plane, presented in (a) the global reference frame with the ankle joint center at the origin and (b) the local knee reference frame with the knee joint center at the origin

Table 4 Stepwise regression analysis for the moment arm at peaks of KAM

Dependent variable	Factors	Final adjusted R^2	Δ Adjusted R^2	VIF	β (95% CI)
MA 1st peak	GRF angle [deg]	0.84***	0.63	2.2	1.3***(1.11–1.49)
	COPml [mm]		0.21		0.7***(0.50–0.87)
MA 2nd peak	GRF angle [deg]	0.93***	0.15	3.0	1.7***(1.50–1.80)
	COPml [mm]		0.78		1.5***(1.37–1.66)

*p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001

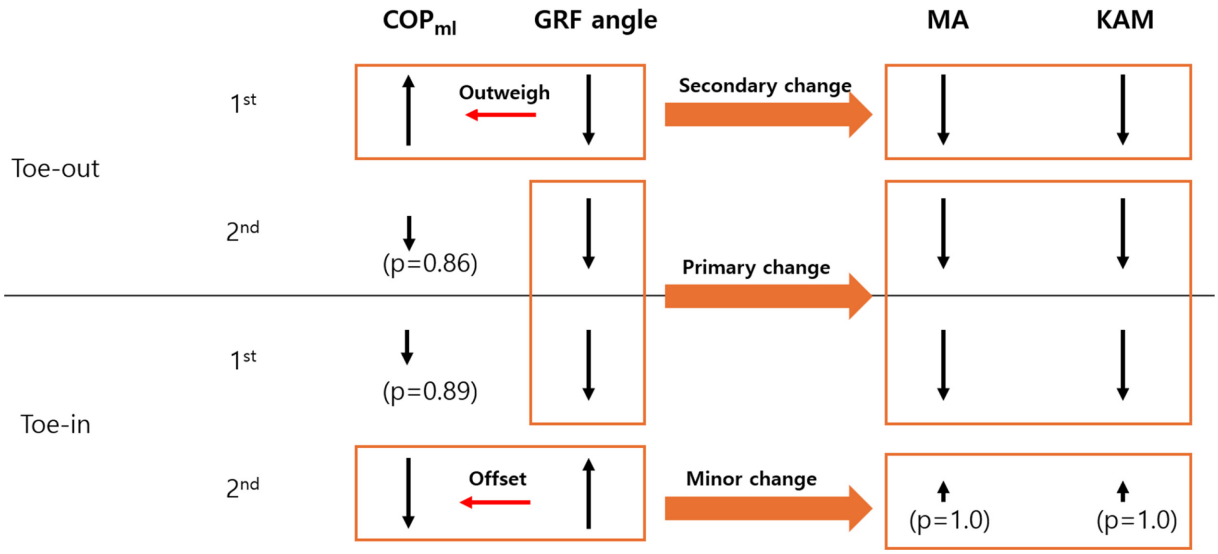


Fig. 5 Interactions between COPml and GRF angle, and their resultant effects on changes in MA and KAM

모멘트암 감소의 효과는 작아지게 되는데, 이것은 외반보행의 1st peak, 내반보행의 2nd Peak에서 발생했고, 이것은 각 전략에서의 부차적(Secondary)이거나 미미한(Minor) 모멘트암의 변화를 유발했다. 즉, 외반보행의 1st Peak에서는 지면반력 각도의 감소가 COPml 증가를 압도하여 결과적으로 모멘트암, 무릎내전모멘트의 감소를 유발했으나, 감소폭은 2nd peak에서보다 작아서 부차적 감소로 판단된다. 한편, 내반보행의 2nd Peak에서는 지면반력 각도 증가가 COPml 감소를 상쇄하는데 거의 다 사용되어, 모멘트암은 미미한 변화(소폭 상승)에 그친 것으로 판단된다.

위의 논의를 종합하면, 발진행각도 변경에 의한 모멘트암의 변화에 있어서 지면반력 각도의 변화가 주도적인 역할을 했고, COPml의 변화는 지면반력 각도와 반대적 역할을 하거나 미미한 역할을 수행한 것이다.

이러한 결과는 내반보행전략에서 초기입각기에서의 압력중심의 외측이동이 모멘트암의 감소를 유발하는 주된 것이라는 Shull et al.의 주장[4]과 대비되는 것이다. Shull의 연구에서는 압력중심을 전역좌표계에서만 분석하여, 이러한 압력중심의 외측편이가 실제로 무릎의 국소좌표계에서 어떻게 반영되는지는 파악하지 못했으므로 그들의 주장은 설득력이 낮다. 실제로 본 연구에서 내반보행 초기입각기에서의 압력중심의 외측이동(전역좌표계)은 무릎국소좌표계에서는 사라졌다는 것(Fig. 4)은 Shull의 연구의 문제점을 간접적으로 보여준다.

한편, Jenkyn et al.은 외반보행의 초기입각기에서 압력중심이 내측편이하지만 하퇴의 회전으로 인해 무릎내전모멘트 감소가 무릎굴곡모멘트의 증가로 전환되었다고 주장한다[5]. 그러나, Jenkyn et al.은 외반보행과 실제의 정상보행과의 차이를 조사한 것이 아니라, 시뮬레이션 된 정상보행에서의 압력중심을 전역좌표계에서 조사했고 지면반력 벡터의 크기와 방향은 두 보행에서 동일하다고 가정했으므로, 실제적인 차이점을 보지는 못했으며, 압력중심과 지면반력이 국소좌표계에서 무릎내전모멘트에 미치는 영향을 분석하지는 못했다는 한계가 있다. 본 연구에서는 국소좌표계의 압력중심이 내측편이하여 유발하는 모멘트암 증가의 효과를 지면반력 각도의 외측 기울어짐이 압도하여 모멘트암의 감소를 유발했다는 것을 구체적으로 밝힌 것에 큰 차별성이 있다.

또한, 본 연구는 발진행각도의 내반, 외반변경 모두를 조사하여, 두가지 모두 공통적인 모멘트암 감소의 메커니즘으로서 지면반력 각도의 변화가 주된 것이라는 점을 밝혔다. 즉, 발진행각도의 변경에 의한 모멘트암의 감소의 주된 원인은 변경에 의해 나타나는 즉각적인 전역 압력중심의 변화가 아니라, 안정성을 확보하기 위해 체중심(Center of Mass) 근방을 지나가야 하는 지면반력 벡터의 방향이 압력중심의 변동으로 인해 달라지는

것이 보다 직접적이고 근원적인 원인이라는 점이다.

한편, 무릎내전모멘트 감소 효과가 최대가 되는 발진행각도 변경의 방향(내반, 외반)과 변경각도의 크기가 개인별로 크게 다르다는 결과는[6,7], 발 진행각에 의존하는 전역 압력중심의 이동보다 개인별로 체중심을 다르게 배치하여 발생하는 지면반력 각도의 개인차가 발생하는 것이 원인일 가능성을 시사한다.

이러한 메커니즘에 대한 이해는 보행변경전략의 무릎내전모멘트 감소 효율을 높이기 위하여 매우 중요한 것이다. 즉, 발진행각도 변경전략의 평가와 훈련에서 관심을 가져야 할 것은 전역 압력중심의 내외측 이동보다는 지면반력 각도변화와 이로 인한 모멘트암 감소가 되는 것이 바람직하다고 판단된다.

4.2 한계점과 향후 연구방향

본 연구에는 몇 가지 제한점이 있다. 골관절염 환자는 통증, 관절 정렬 이상, 근력 저하 및 보상적 보행전략 등으로 인해 건강인과 다른 운동역학적 특성을 보일 수 있다. 따라서 본 연구의 결과를 임상 현장에 직접 일반화하기에는 주의가 필요하며, 향후 연구에서는 골관절염 환자를 대상으로 동일한 분석을 수행하여 본 연구에서 제시된 생체역학적 메커니즘의 임상적 타당성을 검증할 필요가 있다.

피험자 수는 통계 분석에는 충분하였으나, 연구결과를 일반화하기에는 제한적인 규모였다. 또한 실험 전 제공된 적응시간이 짧았기 때문에, 즉각적인 효과만을 관찰할 수 있었고 장기간 훈련의 효과와 지속효과는 파악하지 못했다. 향후 연구에서는 표본 수를 확대하고, 충분한 훈련과 피드백 이후에도 동일한 피크 반응과 모멘트암 변화가 재현되는지를 확인할 필요가 있다. 또한 이러한 변화가 시간 경과 이후에도 유지되는지를 추적 관찰할 필요가 있다.

본 연구에서는 발진행각도 변경에 따른 모멘트암과 무릎내전모멘트의 변화가 압력중심의 이동보다 무릎 국소좌표계에서의 지면반력 각도의 변화와 더 밀접하게 연관됨을 확인하였다. 그러나 전역좌표계에서의 지면반력 벡터가 국소좌표계로 어떻게 변화하여 이러한 결과를 유발했는지를 직접적으로 밝혀내지 못했다. 향후 연구에서는 발진행각도 변화에 따른 발과 하지 분절의 운동학적 변화, 무릎 국소좌표계의 회전, 체중심의 이동 및 지면반력 벡터의 변화를 통합적으로 분석하여, 발진행각도 변화가 지면반력 방향 변화로 이어지는 생체역학적 메커니즘을 규명할 필요가 있다.

5. 결론

본 연구에서 내반보행은 압력중심의 변화보다 지면반력 각도의 감소에 의해 모멘트암이 감소하였고, 그 결과 1st Peak 무릎내전모멘트가 감소하였다. 반면 2nd Peak에서는 압력중심의 외측 이동과 지면반력 각도의 증가가 서로 상쇄되어 모멘트암과 무릎내전모멘트의 변화가 제한적으로 나타났다.

외반보행은 지면반력 각도의 감소에 의해 2nd Peak에서 모멘트암과 무릎내전모멘트가 감소하였으며, 1st Peak에서는 압력중심의 내측 이동에도 불구하고 지면반력 각도의 감소 효과가 우세하여 모멘트암과 무릎내전모멘트가 감소하였다.

따라서 발진행각도 수정에 따른 무릎내전모멘트 감소는 압력중심의 이동보다 지면반력 벡터 방향의 변화에 의해 유도되는 모멘트암의 변화로 더 잘 설명된다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(RS-2026-25597227).

REFERENCES

1. Miyazaki, T., Wada, M., Kawahara, H., Sato, M., Baba, H., Shimada, S., (2002), Dynamic load at baseline can predict radiographic disease progression in medial compartment knee osteoarthritis, Annals of the Rheumatic Diseases, 61(7), 617-622.
2. Simic, M., Hinman, R. S., Wrigley, T. V., Bennell, K. L., Hunt, M. A., (2011), Gait modification strategies for altering medial knee joint load: a systematic review, Arthritis Care & Research, 63(3), 405-426.
3. Wang, S., Mo, S., Chung, R. C., Shull, P. B., Ribeiro, D. C., Cheung, R. T., (2021), How foot progression angle affects knee adduction moment and angular impulse in patients with and without medial knee osteoarthritis: a meta-analysis, Arthritis Care & Research, 73(12), 1763-1776.
4. Shull, P. B., Shultz, R., Silder, A., Dragoo, J. L., Besier, T. F., Cutkosky, M. R., Delp, S. L., (2013), Toe-in gait reduces the first peak knee adduction moment in patients with medial compartment knee osteoarthritis, Journal of Biomechanics, 46(1), 122-128.
5. Jenkyn, T. R., Hunt, M. A., Jones, I. C., Giffin, J. R., Birmingham, T. B., (2008), Toe-out gait in patients with knee osteoarthritis partially transforms external knee adduction moment into flexion moment during early stance phase of gait: a tri-planar kinetic mechanism, Journal of Biomechanics, 41(2), 276-283.
6. Uhlrich, S. D., Silder, A., Beaupre, G. S., Shull, P. B., Delp, S. L., (2018), Subject-specific toe-in or toe-out gait modifications reduce the larger knee adduction moment peak more than a non-personalized approach, Journal of Biomechanics, 66, 103-110.
7. Uhlrich, S. D., Kolesar, J. A., Kidziński, Ł., Boswell, M. A., Silder, A., Gold, G. E., Delp, S. L., Beaupre, G. S., (2022), Personalization improves the biomechanical efficacy of foot progression angle modifications in individuals with medial knee osteoarthritis, Journal of Biomechanics, 144, 111312.

8. Seagers, K., Uhlrich, S. D., Kolesar, J. A., Berkson, M., Kaneda, J. M., Beaupre, G. S., Delp, S. L., (2022), Changes in foot progression angle during gait reduce the knee adduction moment and do not increase hip moments in individuals with knee osteoarthritis, Journal of Biomechanics, 141, 111204.

9. Kim, J., Lee, S., Shin, H., Kim, N., Jung, J., Ryu, H., Eom, G., (2025), Biomechanical mechanisms behind the reduction of knee adduction moment in medial knee thrust gait, Scientific Reports, 15(1), 37317.

10. Baniasad, M., Martin, R., Crevoisier, X., Pichonnaz, C., Becce, F., Aminian, K., (2022), Knee adduction moment decomposition: toward better clinical decision-making, Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 10, 1017711.



Ho-Kyou Kwak
M.Sc. in the Department of Biomedical Engineering, Konkuk University. His research interest is sports rehabilitation.
E-mail: ghrb0524@naver.com



Na-Yeon Kim
M.Sc. in the Department of Biomedical Engineering, Konkuk University. Her research interest is Gait analysis and rehabilitation engineering research.
E-mail: gimnayeon791@gmail.com



Sean-Min Lee
M.Sc. candidate in the Department of Biomedical Engineering, Konkuk University. His research interest is biomechanics in osteoarthritis.
E-mail: finalsm@naver.com



Gwang-Moon Eom
Professor in the Department of Biomedical Engineering, Konkuk University. His research interests include biomechanics of locomotion and rehabilitation of the elderly.
E-mail: gmeom@kku.ac.kr

한국정밀공학회지 제 43 권 제 10 호 pp. 1113-1119 October 2026 / 1113
J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 43, No. 10, pp. 1113-1119 http://doi.org/10.7736/JKSPE.026.00051
ISSN 1225-9071 (Print) / 2287-8769 (Online)

맞춤형 인솔 착용이 아치 지표와 착화감에 미치는 영향

Effects of Customized Insoles on Arch Index and Subjective Comfort

백예지[1], 유광열[2], 유진실[3], 이인환[2,#]
Ye Ji Baek[1], Kwang Yeol Yu[2], Jin Sil Yoo[3], and In Hwan Lee[2,#]

1 충북대학교 생산공학과 (Department of Production Engineering, Chungbuk National University)
2 충북대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Chungbuk National University)
3 ㈜엑슬릭스 (Excelix Co., Ltd.)
Corresponding Author / E-mail: anxanx@chungbuk.ac.kr, TEL: +82-43-261-3161
ORCID: 0000-0001-9381-4908

KEYWORDS: Customized insole (맞춤형 인솔), Additive manufacturing (적층제조), Plantar pressure analysis (족저압 분석), Arch index (아치 지표), Biomechanics (생체역학)

As interest in personalized biomechanical interventions grows, customized insoles have garnered attention for their ability to improve plantar pressure distribution and foot comfort. While previous studies primarily focused on pressure redistribution, systematic quantitative evaluations across different foot types remain limited. Notably, objective assessment methods that link plantar pressure-based structural metrics with subjective comfort are still insufficient. In this study, customized insoles were fabricated for 32 adults using plantar pressure-based foot shape acquisition and additive manufacturing, and their biomechanical effects were evaluated. The arch index (AI) and subjective comfort were measured before and after one month of use. AI was calculated from static plantar pressure data, and comfort was assessed across multiple foot regions using a visual analogue scale. Statistical analysis revealed significant improvements in comfort at the arch, ankle, and rearfoot regions ($p < 0.05$). The mean AI deviation from the normal reference value decreased by approximately 30.6%, indicating a shift toward a more normalized arch pattern. Overall, this study demonstrates that customized insoles can enhance plantar contact characteristics and perceived comfort across different foot types. These findings provide quantitative evidence for engineering evaluation and establish a foundation for the objective assessment of personalized insole performance.

Manuscript received: May 28, 2026 / Revised: August 27, 2026 / Accepted: August 30, 2026

1. 서론

인체의 발은 신체 하중을 지지하고 지면과의 상호작용을 통해 자세 안정성을 유지하는 기능을 수행한다[1]. 특히 내측 종아치(Medial Longitudinal Arch)는 뒤꿈치뼈(Calcaneus)부터 첫째 중족골(Head of First Metatarsal)까지 이어지는 구조로, 체중 부하 시 발생하는 충격을 흡수하고 족저압(Plantar Pressure)을 분산시키는 역할을 한다[2]. 여기서 족저압은 발바닥과 지면 사이에서 발생하는 압력을 의미하며, 발바닥의 하중 분포 특성을 정량적으로 파악하는 데 활용된다.

한편, 발의 아치 구조는 형태에 따라 정상족, 평족, 요족으로 구분되며, 이러한 구조적 차이는 족저압 분포를 기반으로한 정량적 지표인 아치 지표(Arch Index, AI)를 통해 평가된다. 아치 지표는 발바닥과 지면의 접촉 영역을 발 길이 방향을 기준으로 전족부, 중족부, 후족부의 세 구역으로 나눈 뒤, 중족부 면적이 전체 접촉 면적에서 차지하는 비율로 정의된다[3]. 일반적으로 평족에서는 중족부 영역에서 압력이 증가하는 경향을 보이는 반면, 요족에서는 전족부와 후족부에 상대적으로 높은 압력이 분포하는 특성이 보고되어 있다[4,5]. 이러한 족형별 하중 전달 특성의 차이는 장시간 기립이나 반복 보행 시 족저 피로 누적 및 통증 발생과 관련된다[5-7].

이러한 문제를 완화하기 위한 보조기기로서 인솔(Insole)은 족저압을 재분배하고 발의 지지 기능을 보완하는 수단으로 널리 활용되고 있다[7,8]. 그러나 기존 연구들은 인솔 착용에 따른

Copyright © The Korean Society for Precision Engineering
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

족저압 분포의 전반적인 변화에 주로 초점을 맞추었으며[8,9], 아치 구조 변화를 정량적으로 비교한 연구는 상대적으로 제한적으로 보고되어 있다[3,5].

본 연구에서는 적층제조 공정을 통해 제작된 맞춤형 인솔을 1개월간 착용시킨 후, 아치 지표(Arch Index, AI)의 변화와 주관적 착화감을 평가하였다. 아치 지표는 족저압 분포를 기반으로 발의 아치 구조를 정량적으로 평가하기 위해 사용되는 지표이다. 평가 기간은 인솔 착용 후 변화가 나타나는 시점에 관한 선행 연구[10]를 참고하여 1개월로 설정하였다. 이를 통해 맞춤형 인솔이 발 구조와 주관적 착용 만족도에 미치는 영향을 종합적으로 분석하였다.

2. 연구방법 및 내용

2.1 맞춤형 인솔의 제작공정

본 연구에서는 체중부하 조건에서 취득한 발바닥 형상 데이터를 기반으로 맞춤형 인솔의 설계 및 제작 공정을 수행하였다. Fig. 1은 맞춤형 인솔 제작의 전체 공정을 단계적으로 제시한다. 피험자는 체중이 가해지면서 형상이 변화하는 점토 위에 양발을 올려 놓은 상태에서 체중을 부하하여 발바닥의 음각 형상을 형성하였다. 만들어진 음각 형상은 발바닥과 지면 사이의 접촉 상태를 반영하는 기준 데이터로 활용하였다(Fig. 1(a)). 형성된 음각 형상은 스캐너(EXScanner, SHINING 3D)로 스캔하여 STL 형식으로 저장하였다(Fig. 1(b)). 이후 CAD 소프트웨어(Fusion 360, Autodesk)에서 스캔 데이터를 불러와 베이스 인솔 모델에 정렬하고, 인솔 상면의 곡률을 조정하여 맞춤형 인솔 모델을 생성하였다(Figs. 1(c) 및 1(d)). 인솔 모델은 FFF (Fused Filament Fabrication) 방식의 적층제조장치(Bambu P1S)를 사용하여 적층 조건을 설정한 후, TPU (Thermoplastic Polyurethane) 필라멘트로 성형하였으며(Fig. 1(e)), 상부에 EVA (Ethylene-Vinyl Acetate) 폼을 부착하여 최종 맞춤형 인솔을 제작하였다(Fig. 1(f)).

2.2 연구 설계

성인 남녀를 대상으로 본 연구에서 제작된 맞춤형 인솔 착용 전·후의 변화를 비교·분석하였다. 연구 수행에 앞서 충북대학교 기관생명윤리위원회(Institutional Review Board, IRB)의 승인(승인번호: CBNU-2025-A-0116)을 받았으며, 모든 참여자에게 연구의 목적과 절차를 충분히 설명한 후 자발적 참여 동의서를 확보하였다.

2.3 연구대상자

연구대상자는 최근 6개월 이내 발 또는 하지 부위의 통증이나 부상 경험이 없으며, 보행에 영향을 미칠 수 있는 근골격계 또는 신경계 질환이 없는 성인 남녀로 선정하였다. 참여자 모집은 연구자가 접근 가능한 성인을 중심으로 하는 편의표집

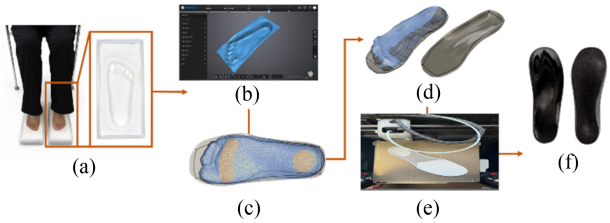


Fig. 1 Workflow of customized insole fabrication (a) Foot impression acquisition, (b) 3D foot scanning, (c) Alignment and pressure region identification, (d) Curvature-based insole design, (e) Additive manufacturing process, and (f) Finish

Table 1 General characteristics of the subjects

Characteristics	Total participants (N = 32) (M ± SD)
Sex [M : F]	18 : 14
Age [years]	26.03 ± 3.61
Height [cm]	167.73 ± 9.44
Weight [kg]	66.08 ± 17.89
Foot size [mm]	254.38 ± 20.94

M ± SD: Mean ± Standard Deviation

(Convenience Sampling) 방식으로 이루어졌다.

본 연구에는 총 32명이 참여하였으며, 연구대상자의 일반적 특성은 Table 1과 같다. 모든 참여자의 개인정보는 일련번호로 코드화하여 익명성을 유지하였으며, 연구 과정에서 개인을 식별할 수 있는 정보는 수집하거나 기록하지 않았다.

3. 측정내용 및 방법

3.1 주관적 착화감 설문조사

맞춤형 인솔 착용에 따른 주관적 착화감 변화를 정량적으로 비교하기 위해 설문조사를 실시하였다. 착화감 평가는 인솔 및 신발의 기능적 효과를 평가하는 데 널리 활용되는 방법으로, 기존 연구에서도 주로 설문조사를 통해 수행되어 왔다[11,12]. 설문조사는 총 32명의 피험자를 대상으로 인솔 착용 전과 착용 후에 각각 1회씩 실시하였다. 발바닥은 Fig. 2와 같이 뒤꿈치에서 발가락까지의 길이를 기준으로 전족부, 중족부, 후족부로 구분되며 부위에 따라 족저압 분포가 다르게 나타난다. 설문 평가는 전족부, 중족부, 후족부를 기본 영역으로 설정하고 인솔 착용 시 발의 지지 구조 변화가 발목의 정렬 및 안정성에 영향을 미칠 수 있음을 고려하여 발목부를 추가하였다. 또한, 전체적인 착용 편안함을 평가하기 위해 발 전체 영역을 포함하였다. 각 영역에 대해 적합성(Fit), 쿠셔닝(Cushioning), 안정성(Stability) 그리고 전반적인 착용 편안함(Comfort)을 지표로 평가하였다. 적합성은 인솔이 발에 밀착되어 지지되는 정도를 의미하며, 쿠셔닝은 보행 시 발생하는 충격을 완화하는 특성을 나타낸다. 편안함은 착용자가 느끼는 전반적인 만족도를 의미하고, 안정성은 보행 중 발

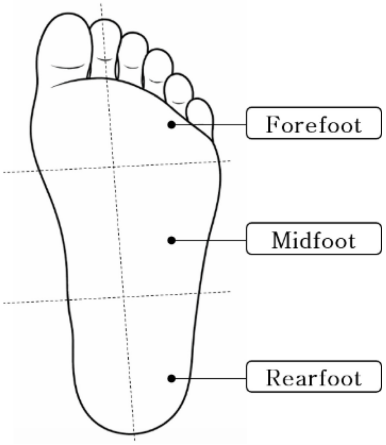


Fig. 2 Plantar regions of the foot: Forefoot, midfoot, and rearfoot

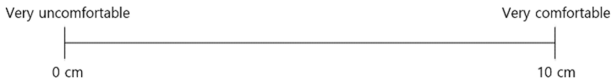


Fig. 3. Visual Analogue Scale (VAS)

의 움직임이 안정적으로 유지되는 정도를 반영한다[13].

착화감 평가는 시각적 아날로그 척도(Visual Analogue Scale, VAS)를 사용하여 수행하였다. VAS는 주관적 감각을 연속적인 수치로 측정할 수 있는 도구로, 착화감 평가에서 높은 신뢰를 가진 것으로 보고되어왔다[13,14]. 본 연구에서는 길이 10 cm의 연속 척도를 사용하였으며, 0 cm는 '매우 불편함', 10 cm는 '매우 편안함'을 의미하도록 설정하였다. 피험자가 표시한 지점은 기준점으로부터의 거리를 측정하여 점수화하였고, 인솔 착용 전·후 변화량을 통계 분석에 활용하였다.

3.2 족저압 측정 및 아치 지표 계산

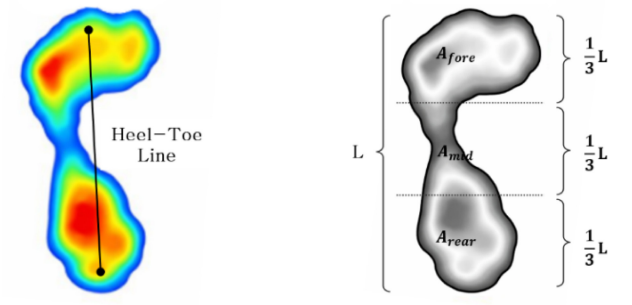
아치 지표는 족부 아치 형태를 정량적으로 분류하기 위한 지표이다. 족부 아치 지표의 계산 방법은 아치 높이 기반, 아치 압력 면적 기반, 그리고 아치 폭 기반의 세 가지가 있다[15]. 본 연구에서는 족저압 측정 장비를 통해 접촉 면적을 정량적으로 산출할 수 있으므로, 아치 압력 면적 기반 계산 방법을 적용하여 발가락을 제외한 전체 족저 접촉 면적 대비 중족부 압력 면적의 비율을 아치 지표로 정의하였다.

3.2.1 족저압 측정

족저압 측정은 족저압 분석 장치인 Exbody GA (Exbody Inc., Korea)를 사용하여 정적 체중부하 조건에서 수행하였다. 피험자는 Exbody GA 장치 위 선 자세를 유지한 상태로 10초간 3회 반복 측정하였다.

3.2.2 아치 지표 계산

아치 지표는 중족부 접촉 면적(A_{mid})을 전족부(A_{fore}), 중족부(A_{mid}), 후족부(A_{rear}) 접촉 면적의 합으로 나눈 값으로 정의되며,



(a) (b)

Fig. 4 (a) Plantar pressure image, and (b) Division of plantar regions into forefoot, midfoot, and rearfoot for Arch Index (AI) calculation

식(1)과 같이 계산된다.

$$AI = \frac{A_{mid}}{A_{fore} + A_{mid} + A_{rear}} \quad (1)$$

각 영역의 접촉 면적을 산출하기 위해 Python 기반 알고리즘을 적용하여 족저압 데이터를 처리하였으며, 전체 과정은 Fig. 4와 같다. 즉, 족저압 이미지를 흑백으로 변환하여 발이 닿은 부분과 닿지 않은 부분을 구분한 뒤, 후족부 중심점과 전족부 중심점을 연결한 보행선(Heel-toe Line)을 기준으로 발 길이를 동일한 비율로 삼등분하였다. 이때 발을 후족부(A_{rear}), 중족부(A_{mid}), 전족부(A_{fore}) 영역으로 구분하고, 각 영역의 접촉 면적을 산출하였다. 발 전체 접촉 면적(A_{total})은 세 영역의 접촉 면적의 합($A_{fore} + A_{mid} + A_{rear}$)으로 정의하였다.

산출된 아치 지표 값은 3회 반복 측정의 평균값을 기준으로 발 유형을 분류하였으며, 아치 지표가 0.21 미만인 경우 요족, 0.21–0.26 범위는 정상족, 0.26 초과인 경우 평족으로 설정하였다[3].

좌·우 발 아치 지표 간의 관계를 평가하기 위해 Pearson 상관분석을 실시하였다. Pearson 상관계수(r)는 두 변수 간 선형 관계의 방향과 강도를 나타내며, 값이 1에 가까울수록 강한 양의 상관관계를 의미한다. 또한, p값은 해당 상관관계의 통계적 유의성을 검증하는 지표로, 일반적으로 $p < 0.05$일 때 통계적으로 유의한 것으로 판단한다. 분석 결과, 착용 전 좌·우 발 지표($r = 0.888$, $p < 0.001$)와 변화량($r = 0.751$, $p < 0.001$) 모두에서 강한 양의 상관관계가 확인되었다. 이는 동일인의 내 좌·우 발의 변화가 서로 유사한 경향을 보임을 의미한다. 따라서 개인 단위의 변화를 평가하기 위해 좌·우 아치 지표 측정값의 평균을 대표 값으로 설정하고 분석에 활용하였다.

4. 결과

제작된 맞춤형 인솔 착용 전후의 주관적 착화감을 평가하기

Table 2 Subjective comfort scores before and after insole use

Region	Mean difference	Standard deviation	t	p-value
Forefoot	-0.59	3.74	-0.893	0.379
Rearfoot	-1.02	2.21	-2.601	0.014*
Midfoot	-2.29	3.07	-4.212	< 0.001***
Ankle	-1.42	2.57	-3.121	0.004 **
Overall	-1.06	3.11	-1.921	0.064

*p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001 versus the pre-insole condition

위한 설문조사 결과와 계산된 아치 지표 변화를 정량적으로 평가하기 위해 통계 분석을 수행하였다. 통계적 검정은 SPSS Statistics (IBM Corp.)를 이용하여 수행하였다. 모든 통계 분석의 유의수준은 α = 0.05로 설정하였다.

4.1 주관적 착화감 결과

맞춤형 인솔 착용 전·후의 부위별 주관적 착화감 변화를 비교하기 위해 부위별 대응표본 t-검정을 수행하였다(Table 2). 본 분석에서는 평균차(Mean Difference)를 '착용 전 - 착용 후'로 정의하였으며, 음의 값은 인솔 착용 후 착화감 개선을 의미한다. Table 2의 부위별 착화감 점수는 해당 부위에 대한 설문 항목의 평균값으로 산출하였다. 전족부, 중족부 및 후족부는 적합성, 쿠셔닝, 안정성 및 편안함 점수의 평균값을, 발목부는 안정성과 편안함 점수의 평균값을, 전체 착화감은 쿠셔닝, 안정성 및 편안함 점수의 평균값으로 산출하였다.

분석 결과, 중족부, 발목부, 후족부에서 통계적으로 유의한 착화감 개선이 확인되었다. 특히 중족부는 인솔 착용 후 가장 큰 변화 폭을 보였으며(t = -4.212, p < 0.001), 발목부(t = -3.121, p = 0.004)와 후족부(t = -2.601, p = 0.014)에서도 유의한 향상이 나타났다. 반면, 전족부에서는 통계적으로 유의한 차이가 관찰되지 않았다(p = 0.379). 전체 착화감 점수는 인솔 착용 후 증가하는 경향을 보였으나, 통계적 유의수준에는 도달하지 않았다(p = 0.064). 이는 전족부가 보행 시 주로 밀어내는 역할을 하는 부위로, 인솔의 지지 효과가 크게 작용하지 않기 때문으로 해석된다. 또한, 본 연구에서 사용한 인솔은 아치와 후족부 중심으로 설계되어 전족부 영역에는 영향이 제한적으로 나타난 것으로 판단된다.

4.2 아치 지표 변화 결과

인솔 착용 효과를 정량적으로 평가하기 위해, 정상 아치 지표의 기준값을 Cavanagh & Rodgers가 제시한 정상 범위(0.21 < AI < 0.26)의 중앙값인 0.235로 설정하였다[3]. 이는 정상 범위의 중심을 나타내는 대푯값으로, 측정된 아치 지표가 정상 상태에서 얼마나 벗어났는지를 하나의 기준으로 비교하기 위해 사용하였다. 이를 바탕으로 정상 기준으로부터의 절대 편차(D)를 식(2)와 같이 변위 지표로 정의하였다.

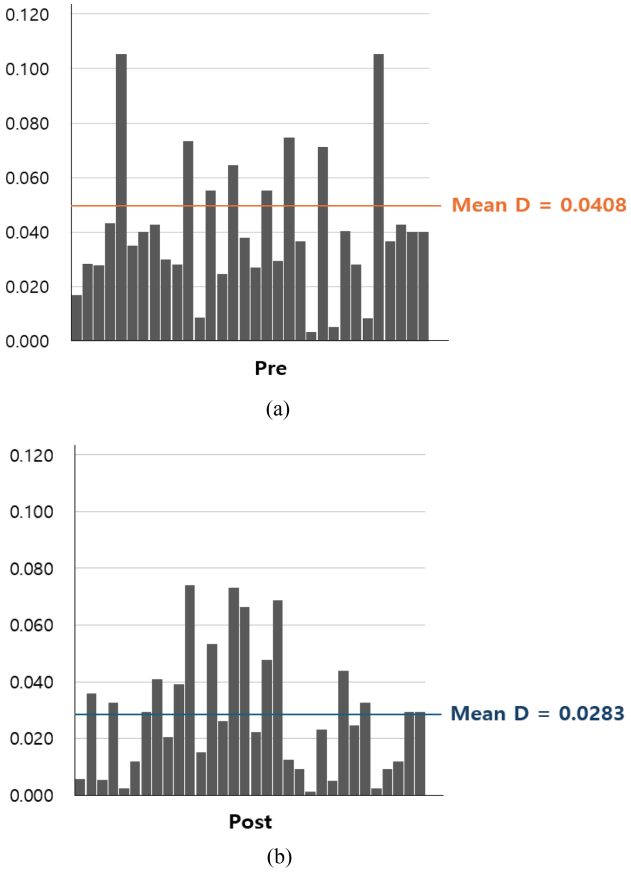


Fig. 5 Distribution of deviation (D) from the reference arch index (0.235) in 32 subjects: (a) Before customized insole use and (b) After customized insole use. Horizontal lines indicate the mean values for each condition

$$D = |AI - 0.235| \tag{2}$$

여기서 D값이 작을수록 측정된 아치 지표가 정상 범위의 중앙값에 더 가까운 상태를 의미한다. 또한, 인솔 착용 전·후 아치 지표가 정상 기준 값에 얼마나 가까워졌는지를 비교하기 위해, 개별 피험자에 대해 정상 기준 값으로부터의 편차 변화량(Dd)을 식(3)과 같이 정의하였다.

$$Dd = |AI_{pre} - 0.235| - |AI_{post} - 0.235| \tag{3}$$

여기서 AI_{pre}는 맞춤형 인솔 착용 전 측정된 아치 지표 값을 의미하며, AI_{post}는 맞춤형 인솔 착용 후 측정된 아치 지표 값을 의미한다. 이때 Dd > 0은 정상 기준에 더 근접했음을, Dd < 0은 정상 기준에서 더 멀어졌음을 의미한다.

4.2.1 인솔 착용 전·후 평균 변위(D)의 비교

Fig. 5는 인솔 착용 전과 착용 후의 정상 기준으로부터의 절대 편차(D) 분포를 나타낸다. 착용 전 D의 평균은 0.0408이었고 착용 후는 0.0283로서 감소하여, 정상 기준으로부터의 평균 편차가 약 30.6% 감소한 것으로 나타났다. 이는 인솔 착용 후 아치 지표가 정상 기준값에 보다 근접하는 방향으로 변화하였음을 의미한다.

Table 3 Paired t-test results for D values before and after insole use

Condition	Mean D (M ± SD)		T	p-value
	Pre	Post		
D	0.0408 ± 0.0248	0.0283 ± 0.0214	2.281	0.030*

* $p < 0.05$

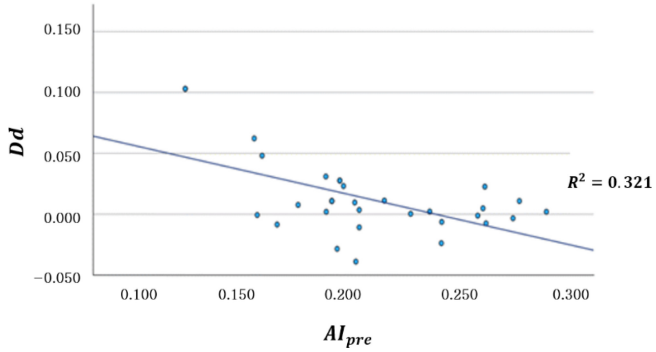


Fig. 6 Scatter plot and linear regression analysis of pre-intervention Arch Index and displacement change (Dd)

인솔 착용 전·후 측정값은 동일한 피험자를 대상으로 반복 측정된 자료이므로, 착용 조건에 따른 평균 변화의 통계적 유의성을 검정하기 위해 대응표본 t-검정을 적용하였다(Table 3). 대응표본 t-검정 결과, 인솔 착용 전 평균 변위(D = 0.0408)와 착용 후 평균 변위(D = 0.0283) 사이에는 통계적으로 유의한 차이가 확인되었다 (ΔD = 0.0125, t = 2.281, p = 0.030).

4.2.2 초기 아치 지표(AI_{pre})와 정상 기준 편차 변화량(Dd)의 관계

Fig. 6은 인솔 착용 전 아치 지표(AI_{pre})와 정상 기준 편차 변화량(Dd) 간의 관계를 산점도와 선형 회귀선으로 나타낸 것이다. 아치 지표 값이 낮을수록 요족 경향, 높을수록 평족 경향을 의미하며, 본 연구에서는 정상 아치 범위를 기준으로 0.235를 기준값으로 설정하였다.

정상 기준 편차 변화량(Dd)은 기준값으로부터의 절대 편차 변화를 이용하여 $Dd = |AI_{pre} - 0.235| - |AI_{post} - 0.235|$로 정의하였다. 따라서 Dd > 0은 인솔 착용 후 아치 지표가 정상 기준에 더 근접했음을, Dd = 0은 변화가 없음을, Dd < 0은 정상 기준에서 더 멀어졌음을 의미한다.

산점도 분석 결과, AI_{pre}와 Dd 사이에는 음의 선형 관계가 관찰되었다. 이는 초기 아치 지표가 낮은 피험자에서 정상 기준으로의 변화량이 상대적으로 크게 나타나는 경향을 보여준다. 이러한 경향은 요족에서 상대적으로 작은 중족부 접촉 면적이 인솔 착용 후 증가하면서 아치 지표가 정상 범위에 가까워진 결과로 해석된다. 반면 초기 아치 지표가 정상 범위에 근접한 경우에는 변화량이 상대적으로 작거나 개인별 편차가 크게 나타났다.

본 연구에서 선형 회귀 분석의 결정계수는 $R^2 = 0.321$로 나타났으며, 이는 초기 아치 지표가 정상화 변화량의 변동을 상당 부분 설명함을 의미한다. 또한, 전체 피험자 32명 중 정상 기준에 더 근접한 방향으로 변화한 경우(Dd > 0)는 18명(56.3%), 변화가 없는 경우(Dd = 0)는 3명(9.4%), 정상 기준에서 더 멀어진 경우(Dd < 0)는 11명(34.4%)으로 나타났다.

다만, 본 연구는 제한된 표본 수를 기반으로 수행되었기 때문에 결과 해석에 있어 신중한 접근이 필요하다. 향후 더 많은 피험자를 포함한 연구를 통해 초기 아치 지표와 정상 기준 편차 변화량 간의 관계를 보다 명확하게 규명할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 토의

맞춤형 인솔 착용에 따른 정적 기립 상태에서의 아치 지표 변화를 분석한 결과, 맞춤형 인솔은 개인의 발 형태에 적합한 지지 구조를 제공함으로써 아치 지표를 정상 범위에 보다 근접하게 하는 데 기여한 것으로 판단된다.

발의 아치는 보행 시 체중을 지지하고 충격을 흡수하는 중요한 생체역학적 구조이며[2], 선행 연구에서는 맞춤형 인솔이 족저압을 재분배하여 특정 부위에 집중되는 압력을 감소시키고[7], 보행 및 스포츠 활동에서 발에 가해지는 충격을 완화하며[8], 하지의 운동학 및 운동역학적 특성에도 영향을 미치는 것으로 보고되었다[9]. 이러한 선행 연구를 고려할 때, 본 연구에서 확인된 정적 아치 구조의 개선은 보행 시 아치의 체중 지지와 충격 흡수 기능을 보다 효과적으로 수행할 수 있는 기반을 제공하며, 이에 따라 족저압 분포와 하지의 생체역학적 특성에도 긍정적인 영향을 미칠 가능성을 시사한다. 다만, 본 연구는 정적 기립 상태에서의 변화를 평가한 결과이므로, 이러한 효과를 직접 입증한 것은 아니다.

또한, 본 연구는 편의표집을 통해 모집한 성인 32명을 대상으로 수행되었으며, 정적 기립 상태에서의 아치 지표와 주관적 착화감을 중심으로 분석하였다는 제한점이 있다. 따라서 향후 연구에서는 다양한 발 유형과 더 많은 피험자를 대상으로 동적 족저압 분석과 보행 분석을 함께 수행하여, 정적 아치 구조의 변화가 실제 보행이나 달리기와 같은 동적 환경에서 어떠한 생체역학적 변화로 이어지는지 규명할 필요가 있다.

6. 결론

본 연구에서는 개인 맞춤형 인솔 착용이 주관적 착화감과 아치 지표에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 1개월 착용 후 중족부와 후족부에서 주관적 착화감이 통계적으로 유의하게 향상되었으며, 아치 지표 또한 정상 범위에 더 근접하는 변화를 보였다. 특히 정상 기준 대비 평균 편차가 약 30.6% 감소하여, 맞춤형 인솔이 족저 접촉 양상과 발의 기능적 지지 상태에 실질적인 변화를 유도할 수 있음을 확인하였다.

초기 아치 지표와 정상화 변화량의 관계 분석에서는 인솔 착용 전 아치지표가 인솔 효과와 밀접하게 관련됨을 확인하였다.

초기 아치 지표가 낮은 경우 정상 기준으로의 변화가 상대적으로 크게 나타났으며, 이는 맞춤형 인솔의 효과가 개인의 발 구조 특성에 따라 다르게 나타날 수 있음을 시사한다.

한편, 본 연구는 맞춤형 인솔이 아치 지표와 주관적 착화감을 동시에 개선할 수 있음을 실험적으로 확인하였으며, 개인 맞춤형 인솔의 기능적 평가를 위한 정량적 근거를 제시한다. 이러한 결과는 향후 맞춤형 인솔 설계 및 평가 연구를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

본 연구는 제한된 표본 수의 성인을 대상으로 단기간 착용 효과를 평가하였고, 정적 기립에서의 측정을 중심으로 분석되었다는 한계를 가진다. 향후 연구에서는 장기간 착용에 따른 적응 효과와 동적 보행 환경에서의 족저압 변화를 포함한 종합적인 평가가 필요하다. 또한, 관찰된 변화를 기계적으로 규명하기 위해 유한요소 기반 해석을 적용한다면, 발-인솔-지면 상호작용을 정량적으로 분석할 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

1. Park, S., Park, D., (2019), Comparison of foot structure, function, plantar pressure and balance ability according to the body mass index of young adults, Osong Public Health and Research Perspectives, 10(2), 102.
2. Ker, R., Bennett, M., Bibby, S., Kester, R., Alexander, R. M., (1987), The spring in the arch of the human foot, Nature, 325(6100), 147-149.
3. Cavanagh, P. R., Rodgers, M. M., (1987), The arch index: a useful measure from footprints, Journal of Biomechanics, 20(5), 547-551.
4. Buldt, A. K., Forghany, S., Landorf, K. B., Levinger, P., Murley, G. S., Menz, H. B., (2018), Foot posture is associated with plantar pressure during gait: A comparison of normal, planus and cavus feet, Gait & Posture, 62, 235-240.
5. Burns, J., Crosbie, J., Hunt, A., Ouvrier, R., (2005), The effect of pes cavus on foot pain and plantar pressure, Clinical Biomechanics, 20(9), 877-882.
6. Williams Iii, D. S., McClay, I. S., Hamill, J., (2001), Arch structure and injury patterns in runners, Clinical Biomechanics, 16(4), 341-347.
7. Chen, W., Lee, S., Lee, P. V. S., (2015), Plantar pressure relief under the metatarsal heads–Therapeutic insole design using three-dimensional finite element model of the foot, Journal of Biomechanics, 48(4), 659-665.
8. Nigg, B. M., Nurse, M. A., Stefanyshyn, D. J., (1999), Shoe inserts and orthotics for sport and physical activities, Medicine & Science in Sports & Exercise, 31(7), S421-S428.
9. Mündermann, A., Nigg, B. M., Humble, R. N., Stefanyshyn, D. J., (2003), Foot orthotics affect lower extremity kinematics and kinetics during running, Clinical Biomechanics, 18(3), 254-262.
10. Landorf, K. B., Keenan, A.-M., Herbert, R. D., (2006), Effectiveness of foot orthoses to treat plantar fasciitis: A randomized trial, Archives of Internal Medicine, 166(12), 1305-1310.
11. Buldt, A. K., Menz, H. B., (2018), Incorrectly fitted footwear, foot pain and foot disorders: a systematic search and narrative review of the literature, Journal of Foot and Ankle Research, 11(1), 43.
12. Menz, H. B., Morris, M. E., (2005), Footwear characteristics and foot problems in older people, Gerontology, 51(5), 346-351.
13. Mills, K., Blanch, P., Vicenzino, B., (2010), Identifying clinically meaningful tools for measuring comfort perception of footwear, Medicine & Science in Sports & Exercise, 42(10), 1966-1971.
14. Menz, H. B., Bonanno, D. R., (2021), Footwear comfort: a systematic search and narrative synthesis of the literature, Journal of Foot and Ankle Research, 14(1), 63.
15. Zheng, T., Yu, Z., Wang, J., Lu, G., (2020), A new automatic foot arch index measurement method based on a flexible membrane pressure sensor, Sensors, 20(10), 2892.



Ye Ji Baek
M.S. candidate in the Department of Production Engineering, Chungbuk National University. Her research interest is biomechanics.
E-mail: qordpwl56@naver.com



Kwang Yeol Yu
Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Chungbuk National University. His research interest lies in additive manufacturing-based biomechanical and structural design.
E-mail: simon1887@chungbuk.ac.kr



Jin Sil Yoo
Team leader in Excelix Co., Ltd. Her research interest is customized insole manufacturing.
E-mail: sincere@excelix.co.kr



In Hwan Lee
Professor in the Department of Mechanical Engineering, Chungbuk National University. His research interest is Additive Manufacturing and biomechanics.
E-mail: anxanx@chungbuk.ac.kr

한국정밀공학회지 제 43 권 제 10 호 pp. 1121-1128 October 2026 / 1121
J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 43, No. 10, pp. 1121-1128 http://doi.org/10.7736/JKSPE.026.00021
ISSN 1225-9071 (Print) / 2287-8769 (Online)

PBF 적층 기반 엔드밀 공구 바디의 내부 격자구조 설계에 따른 정적 해석 및 시작품 제작

Static Analysis and Fabrication of Sample according to the Internal Lattice Structure Design of Endmill Tool Body based on Powder Bed Fusion Technology

손호민[1], 김동규[2], 사민우[1,#]
Ho Min Son[1], Dong Gyu Kim[2], and Min-Woo Sa[1,#]

1 에스제이앤텍 기업부설연구소 (R&D Center, SJNTEC)
2 (재)대구기계부품연구원 정밀가공종합기술지원센터 (Center for Advanced Cutting Tool and Machining, Daegu Mechatronics & Materials Institute)
Corresponding Author / E-mail: 79smw42@gmail.com, TEL: +82-53-586-6210
ORCID: 0000-0003-0979-8736

KEYWORDS: Metal 3D printing (금속 3D 프린팅), Powder bed fusion (분말 적층 용융), Cutting tool (절삭공구), Lattice structure (격자구조), End mill (엔드밀)

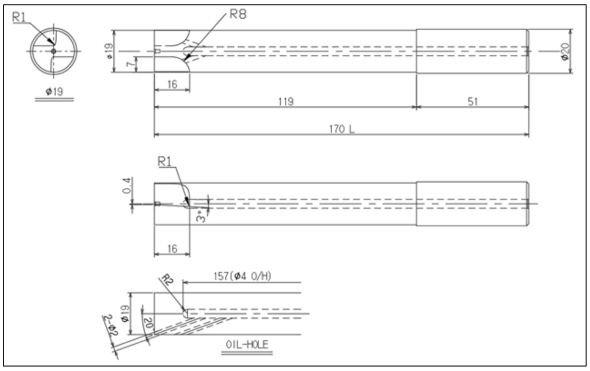
Product development based on metal 3D printing has been expanding steadily in the manufacturing industry. Powder bed fusion (PBF) is currently the most widely used metal 3D printing method, as it produces parts of complex shape with high precision. Applying PBF to the cutting tool industry could shorten process time relative to conventional sintering routes and reduce the material waste generated during machining. It also allows internal lattice structures and fluid channels to be designed within the tool, facilitating light-weighting and improved cutting performance. In this study, nTop software was first used to design the internal lattice structure of an end mill tool for additive manufacturing and to perform the corresponding simulation analysis. Three configurations were compared, in which the tool lattice was defined either by thickness dimension or by thickness range, and the reinforced results confirmed that none of the designs posed problems for actual additive manufacturing within the software. On this basis, tool bodies were fabricated on PBF metal 3D printing equipment, and their feasibility for tool applications was evaluated.

Manuscript received: Manuscript received: March 4, 2026 / Revised: June 18, 2026 / Accepted: August 4, 2026
This paper was presented at KSPE Autumn Conference in 2025

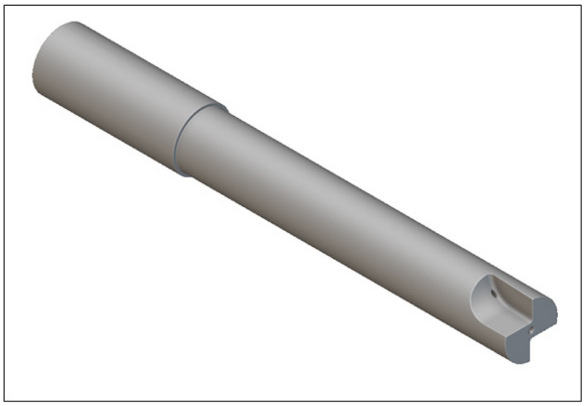
1. 서론

여러 산업 분야에서 금속 3D 프린팅 기술의 활용성이 점차 증가되고 있어 이를 활용한 혁신적인 제품 개발이 활발히 진행되고 있다[1-4]. 금속 3D 프린팅 방식 중 분말 적층 용융(Powder Bed Fusion) 방식은 금속 분말 소재를 얇은 층으로 도포한 후 레이저나 전자빔을 선택적으로 조사하여 용융시켜 적층하는 기술을 말한다[3-6]. 이 방식은 복잡한 형상을 가진 모델이나 가공이 어려운 난삭재 가공에 유리한 특징이 있다. 절삭공구 제작에서 PBF 방식을 이용한다면 기존 제작 방식인 연삭 가공 공정과 비교해 여러 이점들이 나타난다. 대표적으로 기존 연삭 가공의 공정수를 단축시킬 수 있으며, 설계 데이터를 3D 프린팅 장비에 입력만 하면 원하는 형상으로 제작되는 방식으로 인해 복잡하고 정밀한 형상의 공구 제작이 쉽게 가능하다. 이를 통해 공구 내부의 다양한 내부 격자구조 및 절삭 유로에 대한 제작이 가능하여 공구의 경량화 및 절삭 성능을 향상시킬 수 있다[5-7]. 또한, 공구 제작에 3D 프린팅 기술을 활용한다면 기존 연삭 가공의 고숙련 작업자들이 없어도 제작이 가능하여 인건비를

Copyright © The Korean Society for Precision Engineering
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

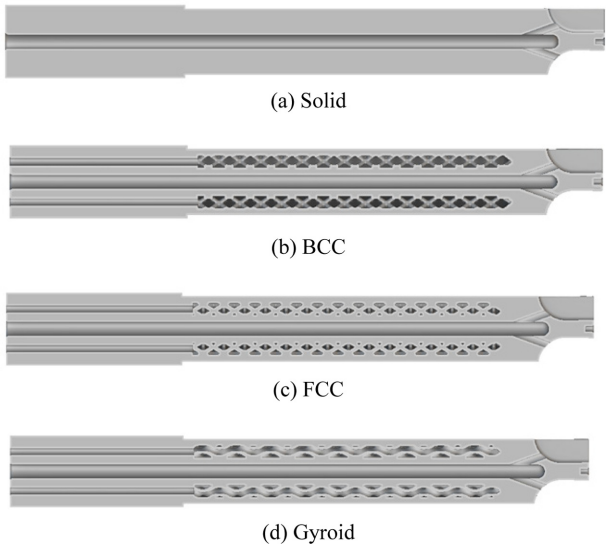


(a) 2D CAD



(b) 3D modeling

Fig. 1 2D and 3D design of endmill tool body



(a) Solid

(b) BCC

(c) FCC

(d) Gyroid

Fig. 2 Designing lattice structures within tools using nTop software

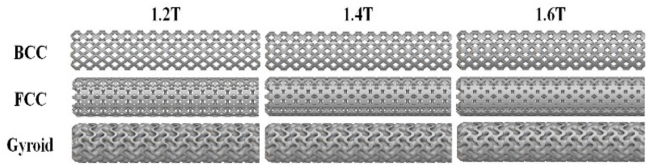


Fig. 3 Shape according to lattice structure thickness dimensions

줄일 수 있음과 동시에 제작 공정에서 가공 칩 배출이 없어 환경 친화적인 제조를 실현시킬 수 있다[8,9].

따라서, 절삭공구 제작에서도 PBF 적층 방식을 이용할 필요가 있다. 적층 기술을 이용해 공구 내부 구조를 다양한 형태로 설계하여 경량화와 진동 감쇠성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단되어 공구의 특성을 비교하기 위해 다음과 같이 연구를 실시하였다[10].

본 연구에서는 설계한 엔드밀 공구 바디 형상을 nTop (nTop Software, nTopology, USA) 프로그램을 이용해 공구 내부에 격자구조를 삽입하였고, 격자 선 두께에 대해 치수별로 공구 바디를 각각 설계하였다. 이후, 공구 바디의 경량률 및 정적 시뮬레이션 해석을 분석하여 최적의 결과를 토대로 PBF 적층 방식의 금속 3D 프린팅 장비를 통해 엔드밀 공구 바디를 적층 제조하여 실제 강성 실험을 실시하여 비교 분석하였다. 또한, 공구 바디에 절삭날을 체결하여 엔드밀 공구로 제작한 후 비교 가공 실험을 통해 가공성도 분석하였다.

2. 공구 바디 설계

2.1 엔드밀 공구 바디 형상 설계

엔드밀 공구 바디 제작에 앞서, 공구 바디의 형상 설계를 다음과 같이 실시하였다. Fig. 1은 직경 19 mm의 엔드밀 공구 바디를 2D 및 3D로 설계한 사진이다. 엔드밀 공구 바디의 플루트 수는 2개로 하였으며, 가공 시 각 플루트 면에 절삭유가 나올 수 있도록 2개의 가지형으로 오일 홀을 형성하였다. 플루트 측면의 길이는 16 mm, 폭 길이는 7 mm, 각도는 3°를 주었다. 또한, 공구 바디의 전장 길이는 170 mm, 생크 측면 길이는 51 mm, 생크 직경은 20 mm로 설정하였다.

2.2 공구 바디의 내부 구조 설계

엔드밀 공구 바디 형상 설계 후 nTop 프로그램을 통해 공구 내부에 여러 형태의 격자구조들을 삽입시켰다. 삽입한 격자구조는 BCC (Body Centered Cubic), FCC (Face Centered Cubic), Gyroid로 3가지 형태의 구조이다. 또한, 격자구조의 Unit Cell은 모두 3.5 × 3.5 × 6 mm로 동일하게 설계하였다.

Fig. 2는 nTop프로그램에서 공구 내부에 각 격자구조별로 삽입한 단면 모습을 보여준다. Fig. 2(a)는 격자구조를 형성하지 않은 일반Solid 형태, Fig. 2(b)는 BCC 격자구조, Fig. 2(c)는 FCC 격자구조 그리고 Fig. 2(d)는 Gyroid 격자구조를 삽입한 공구 바디의 단면을 보여준다. 각 격자구조별로 삽입된 공구 바디의 심층적인 비교 분석을 위해 격자 선 두께 치수별로 다음과 같이 설계하였다. Fig. 3은 3가지 격자 선 두께에 따른 각 격자구조 형상을 보여준다. 설계한 해당 격자 선 두께의 치수는 1.2, 1.4, 1.6 mm이다. 격자 선 두께가 증가할수록 격자 사이의 빈 공간이 점차 줄어드는 것을 볼 수 있다.

Table 1 Mass of Solid structure tool

Type	Tool body mass [g]
Solid	383.31

Table 2 Weight of tools by 3 Lattice structures and lightweight ratio compared to solid tool

Type	Tool body mass [g]			Solid to lightweight ratio [%]		
	1.2T	1.4T	1.6T	1.2T	1.4T	1.6T
BCC	319.08	327.87	337.09	16.76	14.47	12.06
FCC	326.58	335.72	344.75	14.80	12.42	10.06
Gyroid	325.90	332.29	338.57	14.98	13.31	11.67

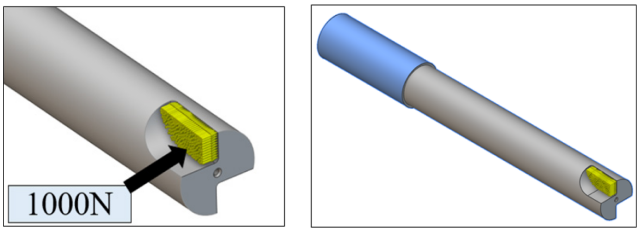
3. 시뮬레이션 해석

3.1 공구 바디의 경량률 분석

격자구조별로 설계한 엔드밀 공구 바디의 기본 형상인 Solid 구조 대비 경량률을 파악하기 위해 다음과 같이 분석하였다. Table 1은 기본 형상 Solid 구조의 공구 바디의 중량을 nTop 소프트웨어를 통해 측정하여 나타낸 것이며, 383.31 g으로 나타났다. Table 2는 3가지 격자 선 두께에 따른 각 격자구조별 삽입된 엔드밀 공구 바디의 중량 및 Solid 구조 대비 경량률을 나타낸 값이다. 격자구조 모두 격자 선 두께가 증가할수록 경량률이 작게 나타나며, 격자 선 두께가 1.2 mm일 때 BCC 격자구조의 공구 홀더의 경량률이 가장 크게 나타난 것을 볼 수 있다.

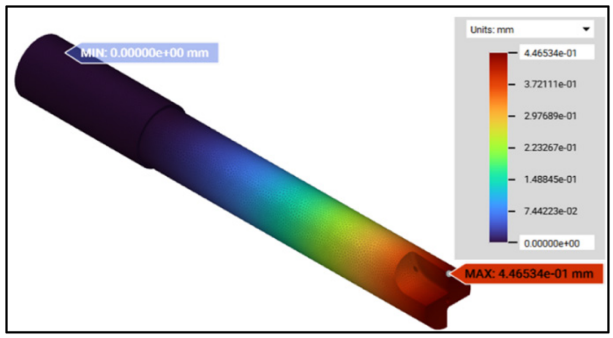
3.2 공구 바디의 격자 선 두께에 따른 응력 변형 해석

격자 선 두께에 따른 각 격자구조별로 삽입된 엔드밀 공구 바디의 휘어지는 량과 응력 값을 파악하기 위해 nTop 프로그램을 통해 시뮬레이션 해석을 실시하였다. 시뮬레이션 해석에 앞서, 구속 조건은 Fig. 4와 같이 설정하였다. Fig. 4(a)는 힘의 방향을 지정한 모습으로 절삭날 면으로 힘이 들어가게 설정하였으며, 1,000 N의 힘을 주었다. Fig. 4(b)는 공구에 힘이 들어가는 것을 지지하기 위해 고정면을 생크면으로 설정한 모습이다. Fig. 5는 nTop 프로그램을 통해 정적 시뮬레이션 해석을 실시한 모습이며, 각 격자구조 및 격자 선 두께별에 따른 공구의 최대 변위 및 최대 응력에 대해 나타내었다. Table 3은 기본 형상인 Solid 구조 공구의 최대 변위 및 최대 응력 값을 나타낸 것이다. Solid 구조 공구 바디의 최대 변위 값은 0.45 mm, 최대 응력 값은 244.32 MPa로 측정되었다. Table 4는 3가지 격자 선 두께에 따른 격자구조별로 삽입된 공구 바디의 최대 변위 값에 대한 표이며, Table 5는 각 공구별 최대 응력 값을 나타낸 표이다. 최대 변위 값에서3가지 격자구조의 공구 바디 모두 격자 선 두께가 증가할수록 변위 값이 낮아지는 것으로 나타난다. 최대 응력 값에서는 BCC 및 FCC 구조의 공구 바디는 격자 선 두께가 증가할수록 응력 값이 높아지지만 Gyroid 구조의 공구 바디는 격자 선 두께 1.4 mm에서는 높아졌지만 1.6 mm에서는 낮아지는

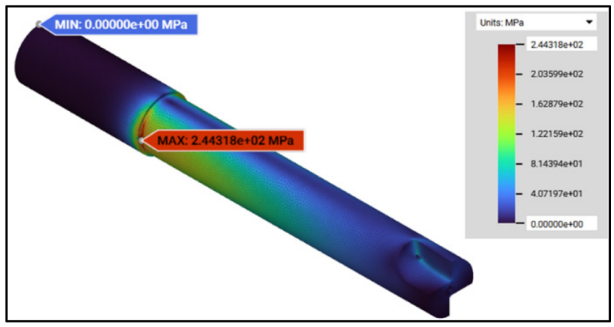


(a) Force direction (b) Fix face

Fig. 4 Setting conditions for simulation analysis



(a) Displacement



(b) Stress

Fig. 5 Simulation analysis of the nTop program

Table 3 Static characteristics of Solid structure tool

Type	Maximum displacement [mm]	Maximum stress [MPa]
Solid	0.45	244.32

Table 4 Maximum displacement of tools by 3 lattice structures

Type	Maximum displacement [mm]		
	1.2T	1.4T	1.6T
BCC	0.62	0.60	0.57
FCC	0.58	0.56	0.53
Gyroid	0.57	0.55	0.53

Table 5 Maximum stress of tools by 3 lattice structures

Type	Maximum stress [MPa]		
	1.2T	1.4T	1.6T
BCC	369.82	369.68	380.27
FCC	386.52	390.97	440.01
Gyroid	301.64	330.05	325.78

Table 6 Static stiffness analysis results for tool bodies of each Lattice structure with a 1.2 mm grid line thickness

Type	Displacement [mm]	Static stiffness [N/mm]
Solid	0.45	2,240
BCC	0.62	1,613
FCC	0.58	1,719
Gyroid	0.57	1,768

것을 볼 수 있다. 이를 통해 격자 선 두께 1.6 mm의 공구 바디가 다른 두께 치수에 비해 높은 변위 값을 가지지만 0.05 mm 미만으로 차이가 거의 나타나지 않았다. 하지만 최대 응력 값에서는 1.2 mm 격자 선 두께의 공구 바디가 다른 두께 치수에 비해 10.45 MPa 이상으로 차이가 나타나 기계적 부하가 적어 가공 시 채터 진동이 줄어들 것으로 보여진다. 따라서, 1.2 mm 격자 선 두께의 공구 바디가 다른 격자 선 두께에 비해 경량률이 높으면서도 적은 최대 응력 값으로 인해 외부 힘의 분산이 균일하게 잘 발생되어 가공에 대한 효율성이 높을 것으로 판단된다[11].

3.3 공구 바디의 강성 해석

공구 바디 제작에 앞서, 엔드밀 공구의 가공 정밀도 향상에 대한 요인인 강성 특성을 비교하고자 다음과 같이 분석하였다[12]. 바디의 선정한 격자 선 두께 1.2 mm에 대해 각 구조별 공구 바디의 정강성 특성을 비교하기 위해 식(1)을 통해 나타내었다.

$$k_{Static} = \frac{F}{\delta} \tag{1}$$

여기서 정적 등가 강성 값인 k_{static}는 공구 바디의 절삭날 면으로 들어가는 힘인 F를 공구 바디의 변위 값인 δ를 나눈 값으로 구해진다. 힘은 1,000 N이며, 변위 값은 nTop 프로그램을 통해 얻어진 최대 변위 값으로 위 수식에 대입한 결과를 Table 6에 나타내었다. 정강성 결과에서 격자구조가 생성되지 않은 기본 형상인 Solid 공구 바디가 2,240 N/mm로 가장 높게 나타났으며, 격자구조가 생성된 공구 바디에서는 Gyroid 구조가 1,768 N/mm로 가장 높게 나타났다.

또한, 각 격자구조별 공구 바디의 고유 진동수를 통한 모달 강성을 나타내었다. Fig. 6은 nTop 프로그램을 통해 각 격자구조별 공구 바디에 대한 고유진동수를 나타낸 것이다. 모달 강성은 nTop 프로그램을 통해 나타난 1차 고유 진동수를 다음 수식을 통해 대입하여 나타내었다. 모달 강성 값인 k_{Modal}은 각 격자구조별 공구 바디에 발생되는 1차 고유진동수 f를 2π와 곱한 값에 제곱하여 공구 바디의 질량 m을 곱한 값으로 나타낼 수 있다. 각 격자구조별 공구 바디의 1차 고유 진동수 및 수식을 통해 구해진 모달 강성 값들을 Table 7에 나타내었다. 모달 강성도 정강성과 동일하게 Solid 구조의 공구 바디가 가장 높게 나타났으며, 격자구조가 생성된 바디에서는 Gyroid 구조가 높게 나타났다. 모달 강성이 높을수록 로봇 밀링 시스템의 안정성이 증가된다는

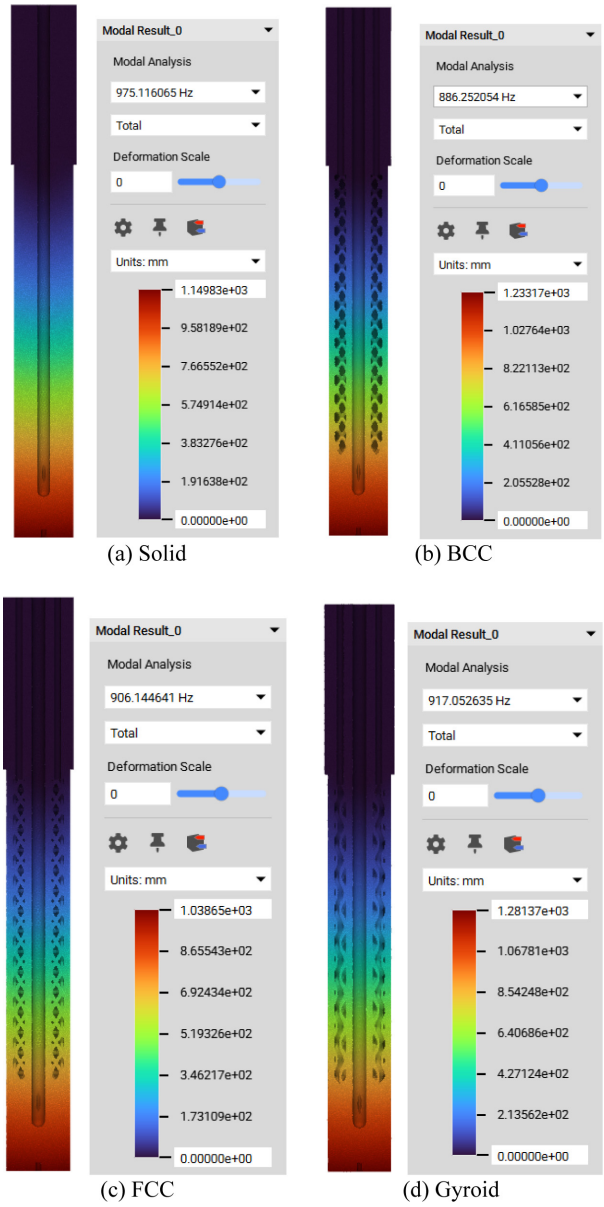


Fig. 6 Natural frequencies of tool bodies by lattice structure

Table 7 Results of modal stiffness analysis for tool bodies of each Lattice structure with a 1.2 mm grid line thickness

Type	Natural frequency [Hz]	Modal stiffness [N/m]
Solid	975.12	1.44E+07
BCC	886.25	0.99E+07
FCC	906.14	1.06E+07
Gyroid	917.05	1.08E+07

문헌을 통해 공구 바디로 제작된 엔드밀의 절삭 가공 중 발생하는 진동에 저항하는 힘이 커질 것으로 사료된다[13].

$$k_{Modal} = (2\pi f)^2 \times m \tag{2}$$



Fig. 7 3D printing equipment

Table 8 Specification of 3D printing equipment

Build volume	250 × 250 × 325 mm
Laser type	Yb fiber laser: 1 × 400 W
Precision optics	F theta lens: High speed scanner
Scan speed	Up to 7.0 m/s
Focus diameter	100 µm
Power supply	1 × 32 A
Power consumption	Max 8.5 kW / Typical 2.4 kW
Compressed air supply	7 Bar: 20 m³/h

Table 9 Properties of Maraging steel powder material

Part density	8.0–8.1 g/cm³
Part Accuracy (Small)	Approx. ±50 µm
Part Accuracy (Large)	Approx. ±0.1%
Layer thickness	40 µm
Hardness rockwell C	50–57 HRC

4. 공구 바디 제작 및 분석

4.1 공구 바디 제작

설계를 토대로 각 공구 내부 구조별에 따른 1.2 mm의 격자 선 두께로 엔드밀 공구 바디를 적층 제조하였다. Fig. 7은 본 엔드밀 공구 바디 제작에 사용된 PBF 방식의 3D 프린팅 장비(M290, EOS GmbH, Germany)이며, 제작에 사용된 적층 분말 소재는 Maraging steel이다. Table 8은 제작에 사용된 3D 프린팅 장비의 제원을 나타내고 있고, Table 9은 사용된 적층 분말 소재인 Maraging Steel의 특성을 보여준다. Fig. 7은 1.2 mm의 격자 선 두께에 대한 격자구조별로 적층 제작된 엔드밀 공구 바디이고, Fig. 9는 최종 생크 직경으로 생크를 연마 가공하여 완성시킨 공구 바디의 모습을 나타내었다. Fig. 10은 적층 제작된 각 구조별 엔드밀 공구 바디를 전자저울(WK-4C, CAS, Korea)을 통해 무게를 측정한 모습이다. 측정 결과, FCC 및 Gyroid 격자구조의 공구 바디가 서로 동일하게 나타났고, BCC 격자구조의 공구 바디가 가장 작게 나타난 것을 볼 수 있다.

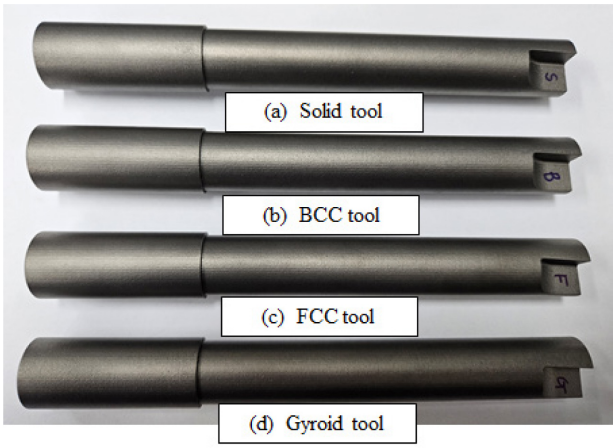


Fig. 8 Endmill tool body manufactured using PBF additive manufacturing

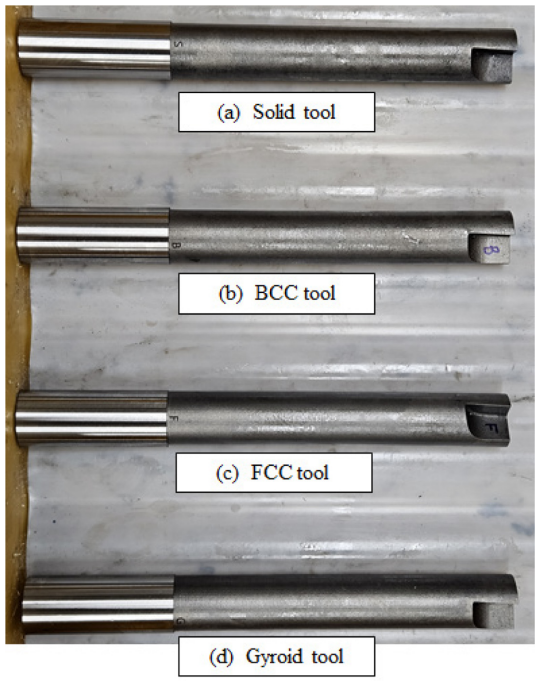


Fig. 9 Endmill tool body with polished shank

Fig. 11은 공구 측정 장비(Genius3, Zoller, Germany)를 통해 제작된 엔드밀 공구 바디의 런아웃 및 절삭 날부의 플루트 직경을 측정한 모습이며, 측정 값은 Table 10에 나타내었다. 측정 결과, 4가지 엔드밀 공구 바디에 대한 런아웃은 0.07 mm 이내로 들어오게 되었으며, 플루트 직경 값은 설계 값에 대해 차이가 거의 나타나지 않아 추후 엔드밀 공구 제작에 문제가 없음을 확인할 수 있었다.



(a) Solid tool body: 384 g



(b) BCC tool body: 314 g



(c) FCC tool body: 326 g



(d) Gyroid tool body: 326 g

Fig. 10 Weight measurement of the manufactured Endmill tool bodies

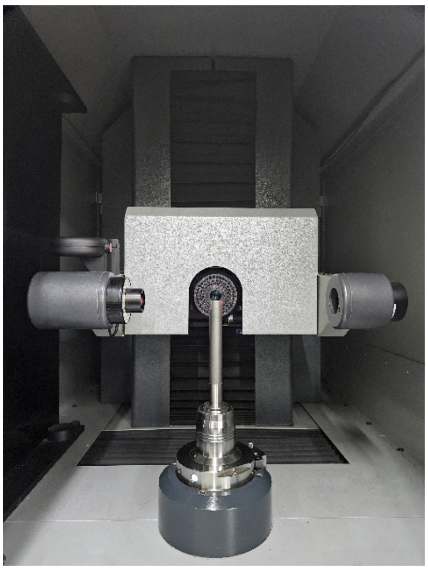


Fig. 11 Dimension measurement set up

Table 10 Dimension information for endmill tool bodies

Type	Run-out [mm]	Diameter [mm]
Solid	0.067	19.042
BCC	0.042	19.049
FCC	0.038	19.012
Gyroid	0.009	19.038

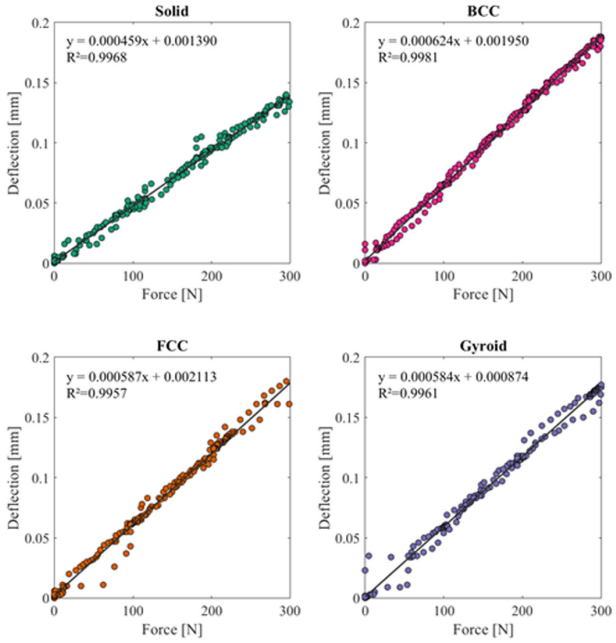


Fig. 12 Static stiffness graph for each tool bodies

4.2 제작된 공구 바디의 강성 특성 분석

공구 바디를 공작기계에 장착 후 인서트가 장착되는 부분인 공구 바디 끝 부분을 로드셀로 힘을 가하여 밀었다. 이때 공구 바디 상단과 하단에 각각 변위센서를 부착하여 변위를 측정하였다. 힘에 따른 상단과 하단 변위 차이를 처짐이라 정의하였으며, 처짐 시험 결과는 Fig. 12에 제시하였다. 기존 Solid 구조는 100 N 힘에서 약 50 μm, 300 N 힘에서 140 μm의 처짐을 보였다. BCC 구조는 100 N 힘에서 약 66 μm, 300 N 힘에서 188 μm, FCC 구조는 100 N 힘에서 약 60 μm, 300 N 힘에서 180 μm, Gyroid 구조는 100 N 힘에서 약 60 μm, 300 N 힘에서 177 μm의 처짐을 보였다.

격자구조를 적용하지 않은 Solid와 대비해 격자구조를 적용한 바디는 300 N 하중 조건에서 약 29–48% 큰 처짐을 보였다.

조금 더 직관적으로 비교하기 위해 로드셀로 미는 힘에 대한 바디 처짐 기울기를 강성으로 가정하고 그 값을 Fig. 13과 같이 비교하였다. 기존 Solid 구조는 2,177.84 N/mm, BCC 구조는 1,603.2, FCC 구조는 1,702.57 N/mm, N/mm, Gyroid구조는 1,711.99 N/mm 강성을 보였다.

격자구조를 적용하지 않은 Solid와 대비해 격자구조를 적용한 바디는 최대 약 78% 이상 강성을 유지하였다. 격자 구조 별 강성 비교는 해석 비교결과와 동일한 경향을 보였다.

4.3 엔드밀 공구 제작 및 가공 실험

격자별 공구 바디를 엔드밀 공구로 제작하기 위해 절삭날인 인서트 팁을 바디에 체결하였다. Fig. 14는 인서트 팁이 체결되어 완성된 엔드밀 공구의 모습이다. 이후, 제작된 엔드밀 공구의 가공성을 분석하기 위해 머시닝 센터(DST-36D, Daesung HITEC, Korea)

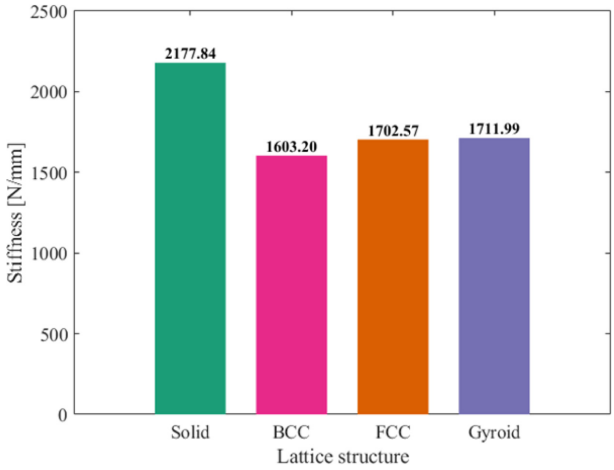


Fig. 13 Comparison of static stiffness data



Fig. 14 Photos of the fabricated endmill tool



(a) Ti-6Al-4V workpiece (b) Endmill set up

Fig. 15 Machining experiment set up

Table 11 Machining conditions

Parameter	Value
Cutting velocity [m/min]	50
Feed rate [mm/tooth]	0.05
Axis depth [mm]	2
Radius depth [mm]	4

장비를 통해 절삭 가공 실험을 실시하였다. Fig. 15는 가공 실험에 사용된 피삭재 및 가공 세팅 사진이다. 피삭재는 티타늄 합금(Ti-6Al-4V)을 사용하였으며, 공구 내부의 오일 홀을 통해 내부 급유 가공을 실시하였다. Table 11은 가공 조건을 나타낸 표로 1가지 가공 조건을 통해 가공된 표면 거칠기 값을 Table 12에 나타내었다. 그 결과, Solid 공구의 가공 표면 거칠기 값이 가장 낮게 나타났으며, 격자구조가 삽입된 공구 중에서는 Gyroid 공구의 가공 표면 거칠기 값이 가장 낮게 나타났다. 이에 대한 결과는 앞서 측정된 공구 바디의 정강성 값이 영향을 끼친 것으로 판단되었다.

Table 12 Surface roughness of endmill

Type	Surface roughness [μm, Ra]
Solid	0.337
BCC	0.651
FCC	0.483
Gyroid	0.482

5. 결론

본 연구에서는 엔드밀 공구 바디 내부에 3가지 격자구조(BCC, FCC, Gyroid)를 삽입하여 격자 선 두께별로 설계한 후 시뮬레이션 해석을 실시하였다. 이후, 특성을 비교 분석하여 최적의 결과를 바탕으로 PBF 방식의 금속 3D 프린팅을 통해 엔드밀 공구 바디를 제작하여 공구의 주요 가공 치수 및 강성을 측정하여 분석하였다.

3가지 격자구조인 BCC, FCC, Gyroid 구조에 대해 격자 선 두께별(1.2, 1.4, 1.6mm)로 공구 바디 내부에 삽입하여 nTop 프로그램 상에서 무게를 측정하였다. 그 결과, 두께가 커질수록 공구의 중량이 크게 나타나 Solid 구조 공구 대비 경량률이 점점 작아지는 것을 볼 수 있다. 그리고 3가지 격자구조 중 BCC 구조의 공구 바디가 Solid 구조 대비 경량률이 가장 크게 나타났으며, 그 다음 Gyroid 구조의 공구 바디가 경량률이 크게 나타났다.

또한, nTop 프로그램을 통해 각 격자 선 두께별 공구 바디에 대한 정적 시뮬레이션을 실시한 결과, 격자 선 두께 1.2 mm가 다른 두께에 비해 경량률이 높으면서도 최대 응력값이 작게 나타나 외부 힘의 분산이 잘 발생되어 실제 공구 가공에서 효율성이 가장 좋을 것으로 판단되었다.

격자구조별 공구 바디에 절삭날을 체결하여 제작된 엔드밀 공구 비교 가공 실험을 실시하여 가공된 표면 거칠기를 측정한 결과, 설계된 바디의 시뮬레이션 해석 및 제작된 바디의 해석 결과가 기인됨을 확인할 수 있었다.

정적 시뮬레이션 결과를 바탕으로 격자 선 두께 1.2 mm를 선정하여 격자구조별로 공구 바디를 제작하였으며, 제작된 공구 바디에 대해 정강성 실험을 실시하였다. 그 결과, nTop 프로그램에서 실시한 정강성 실험 결과와 거의 동일하게 나타난 것을 볼 수 있다.

본 연구에서 적층 기술을 이용해 공구 바디 내부에 다양한 격자구조 및 격자 선 두께를 형성시킬 수 있어 가공 성능 향상에 영향을 끼칠 것으로 보여진다. 추후, 엔드밀 공구의 반경방향 절삭력과 더 최적화된 격자구조 탐색에 대한 연구도 수행할 계획이다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 중소벤처기업부와 중소기업기술정보진흥원의 “지역혁신선도기업육성(R&D), (S3451625)”사업의 지원을 받아 수행된 연구결과임.

REFERENCES

1. Son, Y., (2020), Design for additive manufacturing processes for metal 3D printing using the PBF method, Journal of the KSME, 60(2), 34-37.
2. Choi, B. J., Yang, J. Y., Lee, M. G., Jeon, Y. H., (2021), Defect analysis of metal 3d printing process, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 30(1), 92-98.
3. Oh, D. J., Kang, Y. J., Kim, G. D., Park, S. Y., Song, S. W., (2020), Effect of HIP process on fatigue performance for SS 316L manufactured by PBF, Journal of Welding and Joining, 38(1), 41-46.
4. Lee, B., Kim, D. K., Kim, Y. I., Kim, D. H., Son, Y., Park, K. T., Kim, T. S., (2020), Review on characterization method and recent research trend about metal powder for powder bed fusion (PBF) process, Journal of Powder Materials, 27(6), 508-519.
5. Yoon, J. C., Lee, M. G., Choi, C. Y., Kim, D. H., Jeong, M. S., Choi, Y. J., Kim, D. H., (2018), Evaluation of microstructure and mechanical properties in 17-4PH stainless steels fabricated by PBF and DED processes, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 17(2), 83-88.
6. Yeo, U. S., (2021), A study on the manufacture of bite holder using 3D additive manufacturing technology, M.Sc. Thesis, Ulsan University.
7. Jeong, M. H., Kong, J. R., Kim, D. H., Kim, H. J., Kim, H. J., (2023), Metal additive manufacturing of canoe paddle grip using lattice structure, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 22(6), 47-54.
8. Song, J. K., Park, K. S., Kim, M. S., Kwon, T. Y., Hong, M. H., (2018), Accuracy comparison between subtractive and additive methods in fabricating working model, Korean Journal of Dental Materials, 45(1), 89-96.
9. Chang, Y., (2007), Evaluation of the productivity and environmental effects of laser aided direct metal deposition process for remanufacturing, Clean Technology, 13(3), 228-234.
10. Lee, H. B., Lee, H. J., Kim, K. H., Kim, K. M., Ryu, S. S., Han, Y. S., (2019), A Study on the mechanical properties of Al_2O_3 cutting tools by DLP-based 3D printing, Journal of Powder Materials, 26(6), 508-514.
11. Lee, J., Yoo, G. D., Oh, S. Y., Kwon, T. K., (2026), A Comparative analysis of structural performance and life cycle cost by stadium seat installation method: focusing on domestic sports stadiums, Journal of Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 27(2), 125-135.
12. Choi, J. G., Kim, H. S., Kim, S. C., (2004), A study on the optimum finish allowance for machining accuracy improvement in the end milling processes, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 13(3), 8-15.
13. Tian, H., Pang, B., Liu, J., Meng, D., Dang, X., (2024), Influence of different position modal parameters on milling chatter stability of orthopedic surgery robots, Scientific Reports, 14, 10581.



Ho Min Son
Received his bachelor's degree in 2021 from the Department of Mechanical Engineering, Keimyung University, Daegu, Korea. He is currently an assistant researcher in R&D Center, SJNTEC company, Daegu, Korea. His research interest is cutting tool.
E-mail: shm0091@naver.com



Dong Gyu Kim
Principal Researcher, Daegu Mechatronics & Materials Institute (DMI), Daegu, Korea. His research interest is advanced manufacturing technology.
E-mail: kdg0830@dmi.re.kr



Min-Woo Sa
Received his Ph.D. degree in 2018 from the Department of Mechanical Engineering, Andong National University, Andong, Korea. He is currently a director in R&D Center, SJNTEC company, Daegu, Korea. His current research interests are special cutting tools and additive manufacturing technology.
E-mail: 79smw42@gmail.com

한국정밀공학회지 제 43 권 제 10 호 pp. 1129-1136 October 2026 / 1129
J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 43, No. 10, pp. 1129-1136 http://doi.org/10.7736/JKSPE.026.00058
ISSN 1225-9071 (Print) / 2287-8769 (Online)

순간접착제 침지 코팅이 재료 압출 방식으로 제작된 PLA 구조물의 기계적 특성에 미치는 영향

Influence of Cyanoacrylate Adhesive Dip Coating on the Mechanical Properties of Material Extrusion-fabricated PLA Structures

김성준[1], 배승리[1], 박성제[1,#]
Seongjun Kim[1], Seungli Bae[1], and Seong Je Park[1,#]

1 경상국립대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Gyeongsang National University)
Corresponding Author / E-mail: seongje.park@gnu.ac.kr, TEL: +82-55-772-1622
ORCID: 0009-0003-5446-5292

KEYWORDS: Additive manufacturing (적층 제조), Material extrusion (재료 압출), Mechanical properties (기계적 물성), Dip coating (침지 코팅)

Material extrusion (MEX) is widely used in additive manufacturing due to its simplicity and compatibility with various thermoplastics. While adhesive coating is commonly applied to enhance the watertightness of MEX-fabricated (MEXed) structures, its impact on mechanical properties remains unclear. This study investigated the effect of cyanoacrylate adhesive dip coating on the mechanical behavior of MEXed polylactic acid (PLA) specimens. Tensile specimens were fabricated in both longitudinal and transverse orientations and coated with two commercial cyanoacrylate adhesives, Loctite 401 and Alaska 4001. The coating process was repeated 2, 4, and 6 times, followed by cross-sectional observations and tensile testing. The results indicated that the cross-sectional area increased with an increasing number of coating repetitions, regardless of adhesive type or infill pattern. Tensile strength generally decreased after coating, with reductions of 10.6–14.7% after six coating cycles. In contrast, the elongation at break increased after coating treatment. For Loctite 401, the maximum increases were approximately 35.1% and 124.1% for the longitudinal and transverse specimens, respectively, while Alaska 4001 resulted in maximum increases of approximately 29.7% and 48.3%, respectively. These findings suggest that adhesive dip coating significantly alters the mechanical behavior of MEXed PLA structures and requires optimization to balance strength and ductility.

Manuscript received: June 15, 2026 / Revised: August 11, 2026 / Accepted: September 1, 2026

1. Introduction

Additive Manufacturing (AM) has been widely adopted in various industrial fields owing to its capability to fabricate complex geometries without molds or dedicated tooling [1,2]. Among various AM technologies, Material Extrusion (MEX) is one of the most widely utilized processes due to its high accessibility, cost-effectiveness, and compatibility with a wide range of thermoplastic materials [3,4]. In particular, MEX has been actively employed not only for rapid prototyping but also for the fabrication of functional and structural components [5]. Owing to these advantages, MEX-fabricated (MEXed) structures have been increasingly utilized in applications involving fluid or gas flow, including fluid containers, microfluidic channels, housings, ducts, and storage components requiring liquid sealing performance [6-8].

However, the layer-by-layer deposition nature of the MEX process and the circular geometry of the extrusion nozzle inherently generate microscopic gaps between adjacent deposited beads and layers. These voids can form interconnected leakage pathways within the MEXed structure, resulting in insufficient

Copyright © The Korean Society for Precision Engineering
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

watertightness [9]. In addition to degrading mechanical performance, such defects can significantly affect the fluid sealing capability of MEXed parts. Leakage-related defects commonly observed in MEXed structures include localized delamination (partial separation between adjacent deposited layers), stringing defects (unintended deposition of residual molten filament during nozzle travel movement), and normal porosity (microscopic internal or surface-connected voids generated during deposition, which may not be visually distinguishable on the outer surface), as illustrated in Fig. 1. Among these defects, localized delamination can induce severe leakage due to the formation of relatively large interconnected openings, whereas stringing defects and normal porosity typically result in localized liquid permeation or droplet-level leakage. Furthermore, in large-scale MEXed structures such as fluid storage tanks, leakage may become more severe due to the increased hydrostatic pressure exerted by the stored liquid.

To reduce these defects, various process optimization strategies, such as increasing nozzle temperature to improve interlayer bonding, increasing extrusion flow rate, and decreasing layer thickness to achieve denser deposition, have been employed in previous studies [10-12]. In addition to process optimization, several post-processing approaches, including surface coating, infiltration, and sealing treatments, have been explored to improve the watertightness of MEXed parts [13-15]. These approaches aim to block surface-connected defects and prevent the formation of continuous leakage pathways. Previous studies have demonstrated that coating and sealing treatments can effectively reduce liquid permeation and enhance leakage resistance. However, most existing studies have primarily focused on evaluating leakage prevention performance, while the influence of coating treatments on the mechanical properties of MEXed parts has received relatively little attention. Since coating materials can penetrate surface defects and inter-bead gaps, they may alter stress transfer mechanisms between deposited filaments and consequently affect the mechanical behavior of MEXed structures. Depending on the coating material and treatment condition, the infiltration of coating agents into surface-connected defects may either improve structural integrity by reinforcing weak regions or adversely affect mechanical performance due to localized stress concentration and material embrittlement. Despite the practical importance of this issue, studies systematically investigating both leakage-prevention performance and mechanical property variation induced by coating treatments remain limited.

In this study, commercially available cyanoacrylate adhesives were employed as dip coating materials for MEXed structures to investigate their influence on mechanical performance. Tensile specimens were fabricated in both longitudinal and transverse directions and subsequently subjected to repeated dip coating treatments. Cross-sectional analyses were conducted to examine the distribution and penetration behavior of the adhesive according to the number of coating cycles. Furthermore, tensile testing was performed to evaluate the variations in tensile strength and elongation at break as a function of coating repetition. The findings are expected to provide practical guidelines for the application of adhesive-based post-processing treatments in MEXed structures.

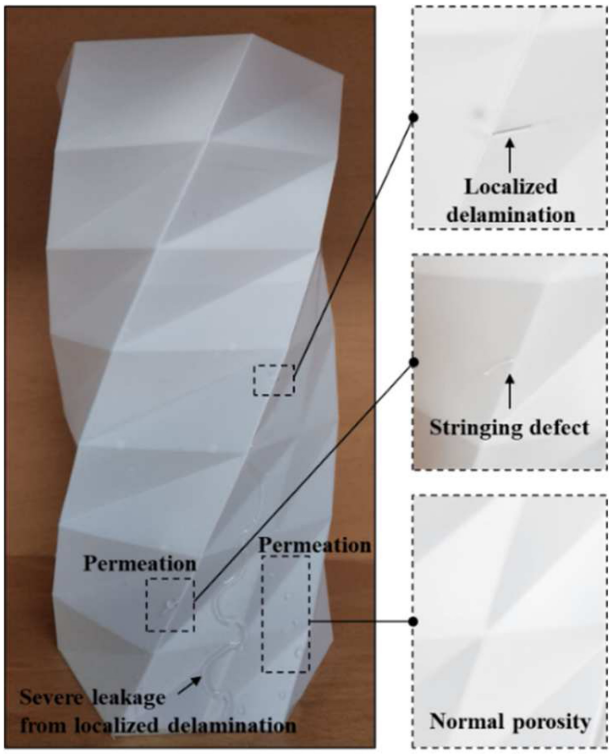


Fig. 1 Representative leakage-related defects observed in MEXed parts and their associated liquid leakage behavior

2. Methodology

2.1 Specimen Fabrication

Tensile specimens were fabricated using a MEX system (A1, Bambu Lab, China). A commercially available white polylactic acid (PLA) filament with a diameter of 1.75 mm (HS PLA, Hanil Industry Co., Ltd., Namyangju-si, Republic of Korea) was used as the MEX material. The specimens were designed according to ASTM D638 Type I geometry and fabricated in both longitudinal and transverse infill patterns with 100% infill density to investigate the influence of deposition direction on the effectiveness of adhesive coating treatments [16]. The MEX parameters were maintained constant throughout the fabrication process. The layer

thickness, nozzle diameter, nozzle temperature, bed temperature, and nozzle speed were set to 0.2 mm, 0.4 mm, 220°C, 55°C, and 250 mm/s, respectively.

2.2 Dip Coating Treatment

Two commercially available cyanoacrylate adhesives, Loctite 401 (Henkel AG & Co. KGaA, Germany) and Alaska 4001 (Alaska Co., Republic of Korea), were employed as dip coating materials. According to the manufacturer's technical data sheet, Loctite 401 exhibits a viscosity of 70–110 mPa·s by the cone-and-plate method and 100–120 mPa·s by the Brookfield method at 25°C. In addition, it exhibits a cure time of less than 5 seconds and a lap shear strength of less than 10 MPa on a thermoplastic polymer substrate. According to the manufacturer's website, Alaska 4001 exhibits a viscosity of approximately 100 mPa·s and a tensile-shear strength of 120–160 kgf/cm² (approximately 11.8–15.7 MPa). The coating treatment was conducted using a simple immersion process, as illustrated in Fig. 2. Each tensile specimen was completely immersed in a container filled with cyanoacrylate adhesive and held in the adhesive for 10 seconds, a duration used in previous dip coating studies [17], to allow sufficient contact between the adhesive and the specimen surface. After immersion, the specimen was removed from the adhesive and dried under ambient laboratory conditions for 12 hours. A small hole was introduced at the grip section of each specimen, and the specimen was suspended vertically during drying, as shown in Fig. 2. This configuration enabled the specimen to maintain a uniform vertical position under gravity and prevented directional inclination during the curing process, thereby minimizing variations in coating conditions between specimens. This procedure was defined as one coating cycle. To investigate the influence of coating repetition, the coating process was repeated 2, 4, and 6 times, resulting in three coating conditions for each adhesive. Three specimens were used for each coating condition, and the cross-sectional area was compared according to the number of coating cycles.

2.3 Tensile Testing

Tensile tests were performed to evaluate the influence of adhesive coating on the mechanical behavior of MEXed specimens. The tests were conducted using a universal testing machine (AGX-10kNVD, Shimadzu Corporation, Japan) equipped with a 10 kN load cell. All tests were performed at a crosshead speed of 1 mm/min. For each experimental condition, three specimens were tested. The tensile strength and elongation at break were reported as the mean value ± standard deviation obtained from the three specimens.

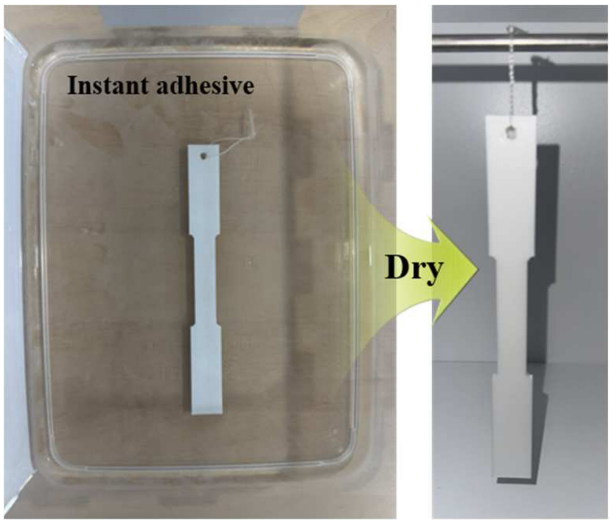


Fig. 2 Dip coating and drying procedures for MEXed tensile specimens using cyanoacrylate adhesive

2.4 Cross-sectional Observations

Cross-sectional observations were performed to evaluate the effect of repeated dip coating and the penetration behavior of the cyanoacrylate adhesives. For macroscopic observation, the cross-sections of uncoated and coated specimens were photographed using a smartphone camera. In addition, the cross-sections were observed using scanning electron microscopy (SEM; Apreo 2S, Thermo Fisher Scientific, USA) to examine whether the cyanoacrylate adhesives penetrated into the surface-connected defects and inter-bead gaps of the MEXed specimens.

3. Results and Discussion

3.1 Effect of Dip Coating in Terms of Cross-section

Fig. 3 plots the variation in cross-sectional area according to the number of dip coating cycles for specimens coated with Loctite 401 (Fig. 3(a)) and Alaska 4001 (Fig. 3(b)). To provide representative cross-sectional observations after dip coating, photographs of the coated longitudinal specimens are shown in Fig. 4. For both adhesives, the cross-sectional area increased with increasing coating repetitions regardless of the infill pattern. This trend indicates that repeated coating treatment gradually accumulated adhesive on the specimen surface, resulting in an increase in the overall specimen dimensions. In addition, similar trends were observed for both longitudinally and transversely MEXed specimens, suggesting that the influence of coating repetition on cross-sectional area was not significantly affected by the infill pattern. The largest increase in cross-sectional area was observed after six coating cycles for all conditions.

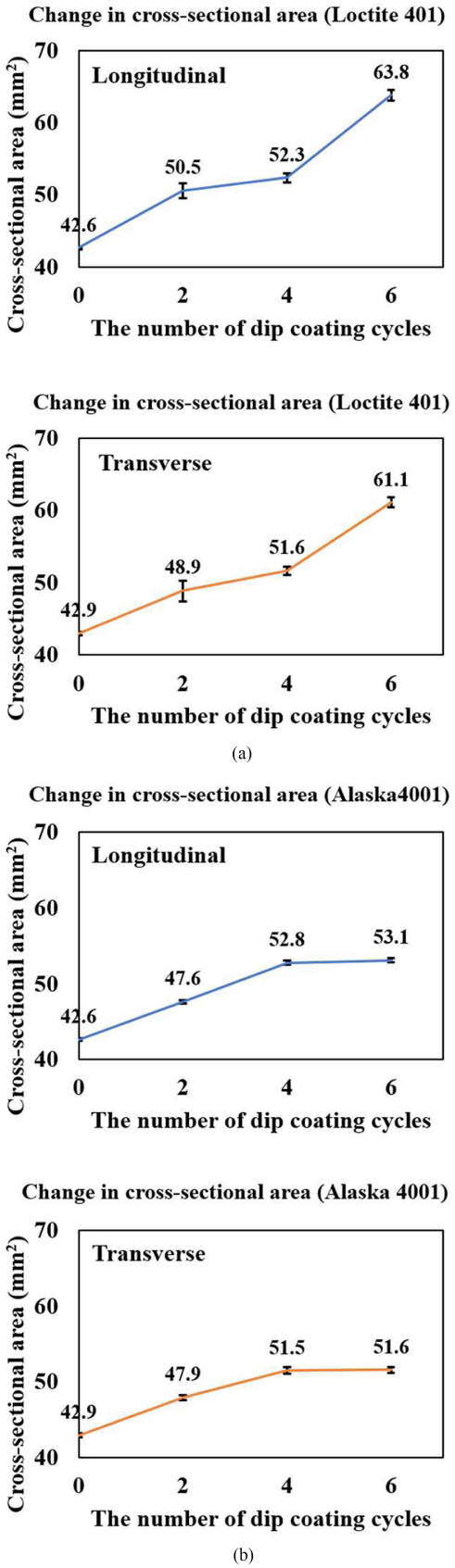


Fig. 3 Change in cross-sectional area according to the number of dip coating cycles for longitudinally and transversely MEXed specimens coated with (a) Loctite 401 and (b) Alaska 4001

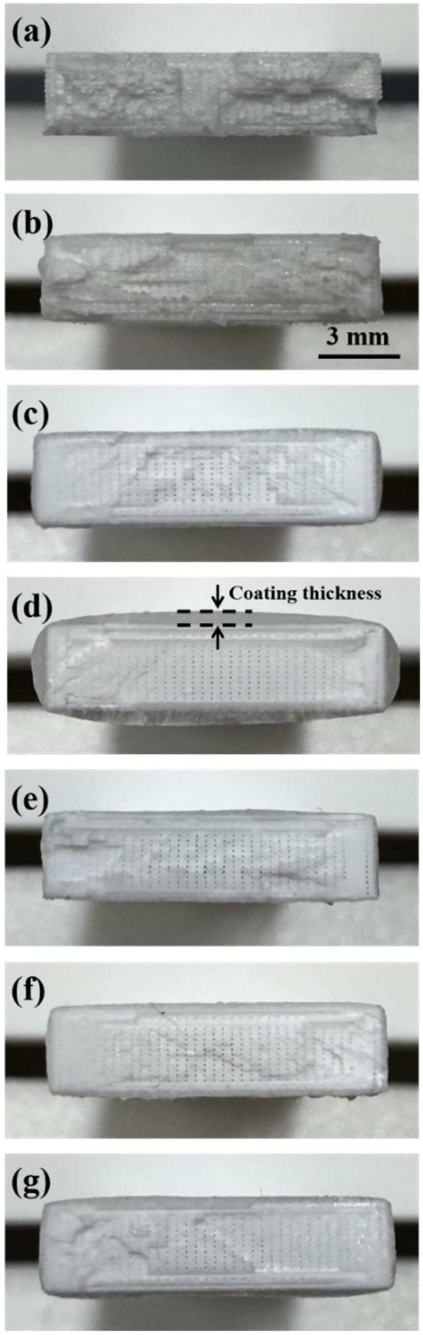


Fig. 4 Photographs for cross-section of the dip coated longitudinal specimens: (a) Uncoated, (b) Loctite 401 with 2 dip coatings, (c) Loctite 401 with 4 dip coatings, (d) Loctite 401 with 6 dip coatings, (e) Alaska 4001 with 2 dip coatings, (f) Alaska 4001 with 4 dip coatings, and (g) Alaska 4001 with 6 dip coatings

3.2 Effect of Dip Coating in Terms of Tensile Strength

Fig. 5 shows the tensile strength of the specimens coated with Loctite 401 and Alaska 4001 according to the number of coating cycles. For the Loctite 401-coated specimens, the tensile strength of the longitudinal specimens gradually decreased from 41.6 MPa for the uncoated condition to 38.8, 38.3, and 35.5 MPa after 2, 4,

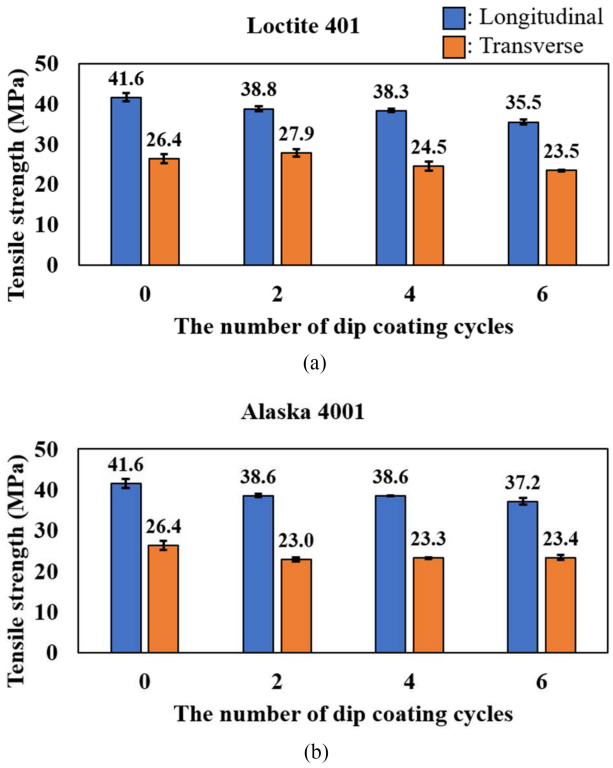


Fig. 5 Tensile strength of longitudinally and transversely MEXed specimens coated with (a) Loctite 401 and (b) Alaska 4001 according to the number of coating cycles

and 6 coating cycles, respectively. Compared with the uncoated specimen, the tensile strength after six coating cycles decreased by approximately 14.7%. The transverse specimens exhibited tensile strengths of 26.4, 27.9, 24.5, and 23.5 MPa for the uncoated, 2-cycle, 4-cycle, and 6-cycle conditions, respectively. Although a slight increase was observed after two coating cycles, the tensile strength ultimately decreased by approximately 11.0% after six coating cycles compared with the uncoated condition. For the Alaska 4001-coated specimens, the longitudinal tensile strength decreased from 41.6 to 38.6 MPa after two coating cycles and remained at the same level after four coating cycles. After six coating cycles, the tensile strength further decreased to 37.2 MPa, corresponding to a reduction of approximately 10.6% compared with the uncoated condition. Similarly, the transverse tensile strength decreased from 26.4 to 23.0 MPa after two coating cycles and remained relatively stable at 23.3 and 23.4 MPa after four and six coating cycles, respectively. Consequently, the tensile strength after six coating cycles was approximately 11.4% lower than that of the uncoated specimen. Overall, repeated adhesive coating generally reduced the tensile strength of the specimens regardless of the adhesive type and infill pattern. After six coating cycles, the tensile strength reductions ranged from 10.6% to 14.7% for the longitudinally MEXed specimens and from 11.0% to 11.4% for the transversely MEXed specimens. These results indicate that excessive adhesive coating may have a detrimental effect on the tensile strength of MEXed structures.

3.3 Effect of Dip Coating in Terms of Elongation at Break

Fig. 6 shows the elongation at break of the specimens coated with Loctite 401 and Alaska 4001 according to the number of coating cycles. For the Loctite 401-coated specimens, the elongation at break of the longitudinally MEXed specimens increased from 7.4% for the uncoated condition to a maximum value of 10.0% after two coating cycles. This corresponds to an increase of approximately 35.1% compared with the uncoated specimen. Similarly, the elongation at break of the transversely MEXed specimens increased from 2.9% for the uncoated condition to a maximum value of 6.5% after four coating cycles, representing an increase of approximately 124.1%. Therefore, for Loctite 401, the longitudinally MEXed specimens exhibited the highest elongation at break after two coating cycles, whereas the transversely MEXed specimens exhibited the highest value after four coating cycles. For the Alaska 4001-coated specimens, the elongation at break of the longitudinally MEXed specimens increased from 7.4% for the uncoated condition to a maximum value of 9.6% after two coating cycles, corresponding to an increase of approximately 29.7%. In the transversely MEXed specimens, the elongation at break increased from 2.9% for the uncoated condition to a maximum value of 4.3% after two coating cycles, corresponding to an increase of approximately 48.3%. Unlike the tensile strength results, which generally decreased after repeated adhesive coating, the elongation at break increased after coating treatment. Similar improvements in deformation behavior following surface coating have also been reported for MEXed PLA. Polyurethane coating was reported to improve the strength and ductility/toughness characteristics of MEXed PLA by up to 24% [14]. In another study, PCL dip coating increased the elongation at break of MEXed pure PLA from 7.8% to 13.0%, corresponding to an increase of approximately 66.7%, despite a decrease in tensile strength [18]. The enhanced elongation was associated with surface smoothing by the coating, which could retard crack initiation at stress concentration sites. Thus, the increase in elongation at break after adhesive coating can be attributed to the increase in effective cross-sectional area and the partial filling of surface defects by the adhesive. These effects can delay premature failure and allow larger deformation prior to fracture. However, the elongation did not continuously increase with coating repetition. After six coating cycles, a slight reduction in elongation was observed in several conditions. This behavior is

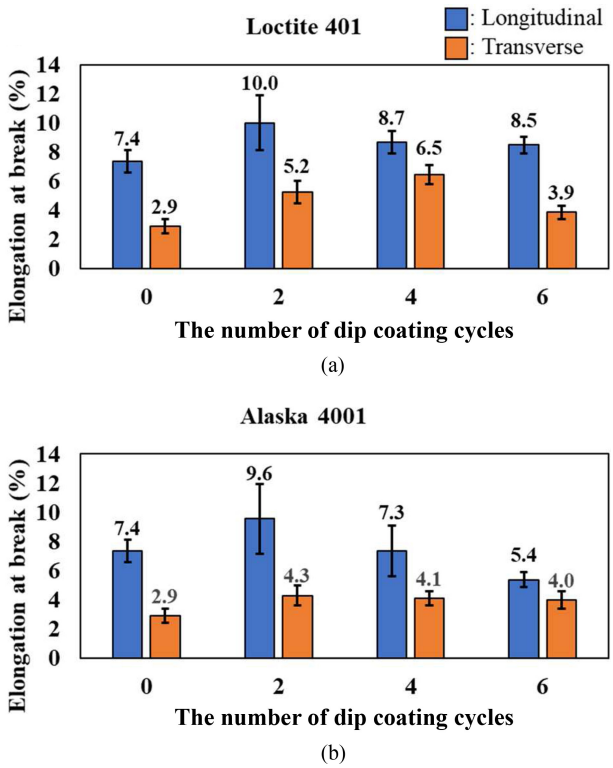


Fig. 6 Elongation at break of longitudinally and transversely MEXed specimens coated with (a) Loctite 401 and (b) Alaska 4001 according to the number of coating cycles

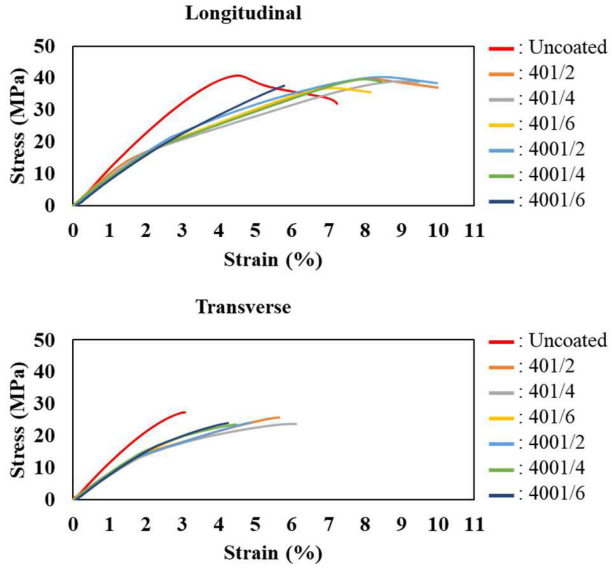


Fig. 7 Stress–strain curves of uncoated and cyanoacrylate adhesive-coated MEXed PLA specimens according to the number of coating cycles: (a) Longitudinal and (b) Transverse specimens

associated with the increased proportion of cured cyanoacrylate adhesives, which are inherently brittle. Excessive accumulation of the adhesive layer may therefore reduce the deformation capability of the coated specimens despite the increase in cross-sectional area.

3.4 Stress-strain Behavior and Cyanoacrylate Adhesive Penetration

Fig. 7 shows representative stress–strain curves of the uncoated and adhesive-coated specimens in the longitudinal (Fig. 7(a)) and transverse (Fig. 7(b)) directions. In the legend, 401 and 4001 represent Loctite 401 and Alaska 4001, respectively, while the numbers following the slash indicate the number of dip coating cycles. In both directions, the adhesive-coated specimens generally exhibited a lower initial slope than the uncoated specimens, suggesting a reduction in the apparent stiffness after the coating treatment. In addition, the coated specimens generally exhibited lower maximum stress while sustaining deformation over a larger strain range before fracture. These observations are consistent with the tensile test results presented in Sections 3.2 and 3.3, where adhesive coating generally decreased the tensile strength while increasing the elongation at break. The reduction in the initial slope may be partly associated with the increase in the measured cross-sectional area caused by the accumulation of the cured adhesive layer. As demonstrated in Fig. 3, the cross-sectional area progressively increased with repeated coating cycles due to adhesive accumulation on the specimen surface. Because the stress was calculated based on the overall cross-sectional area of the coated specimen, an increase in cross-sectional area without a proportional increase in load-bearing capacity could result in a lower calculated stress and, consequently, a lower apparent slope of the stress–strain curve. Therefore, the observed decrease in the initial slope does not necessarily indicate a reduction in the intrinsic elastic modulus of the PLA itself but rather reflects the mechanical response of the coated PLA-adhesive system. In particular, the longitudinal specimens exhibited a distinct change in their stress–strain behavior after adhesive coating. The uncoated specimen showed a relatively pronounced maximum stress followed by a stress drop, whereas the coated specimens exhibited lower maximum stress and extended deformation before fracture. This indicates that the adhesive coating altered the deformation and failure behavior of the MEXed PLA specimens. Rather than directly reinforcing the load-bearing PLA structure, the coating treatment appears to modify the overall deformation behavior of the specimens, resulting in a trade-off between tensile strength and elongation at break.

To further clarify the role of the cyanoacrylate adhesive, cross-sectional SEM observations were conducted, as shown in Fig. 8. No noticeable penetration of the cyanoacrylate adhesive into the internal inter-bead gaps or voids was observed. Therefore, the cyanoacrylate adhesive made only a limited contribution to

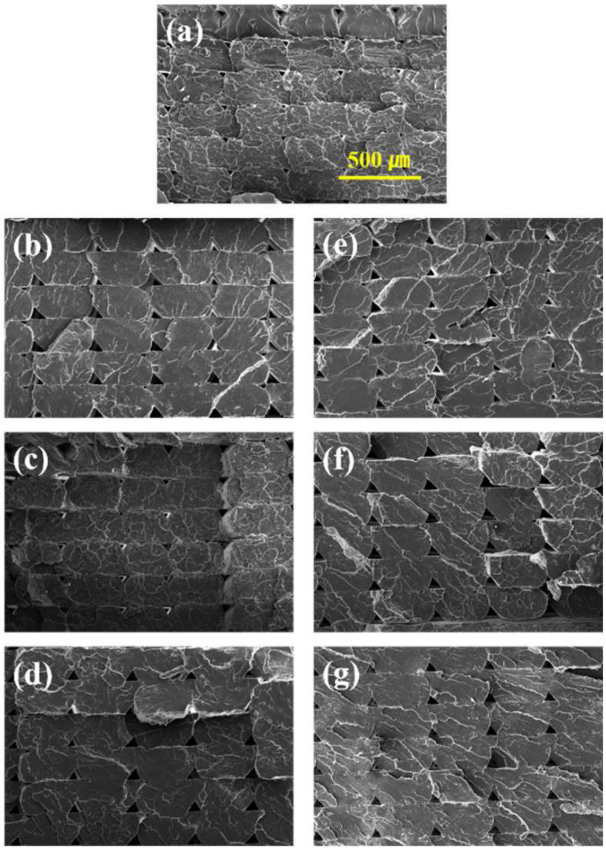


Fig. 8 SEM images of the cross-sections for verification of cyanoacrylate adhesive penetration: (a) Uncoated, (b) Loctite 401 with 2 dip coatings, (c) Loctite 401 with 4 dip coatings, (d) Loctite 401 with 6 dip coatings, (e) Alaska 4001 with 2 dip coatings, (f) Alaska 4001 with 4 dip coatings, and (g) Alaska 4001 with 6 dip coatings

reinforcing the internal bead interfaces. Combined with the increase in cross-sectional area shown in Figs. 3 and 4, these observations indicate that the adhesive treatment primarily formed and accumulated as a surface coating rather than penetrating deeply into the internal structure of the MEXed specimens. Consequently, the coating treatment influenced the overall stress-strain response mainly through the formation of an external adhesive layer, rather than through substantial reinforcement of the internal bead-to-bead interfaces.

4. Conclusion

In this study, the influence of cyanoacrylate adhesive dip coating on the mechanical properties of material extrusion-fabricated PLA structures was investigated using two commercially available adhesives, Loctite 401 and Alaska 4001. Based on the experimental results, the following conclusions can be drawn:

The cross-sectional area of the specimens increased with increasing dip coating repetitions regardless of the adhesive type and deposition orientation. The largest cross-sectional area was observed after six coating cycles due to the accumulation of cured adhesive on the specimen surface.

Repeated dip coating generally reduced the tensile strength of the specimens. After six coating cycles, the tensile strength decreased by 10.6–14.7% for the longitudinally fabricated specimens and by 11.0–11.4% for the transversely fabricated specimens compared with the uncoated condition.

In contrast to the tensile strength results, the elongation at break generally increased after the coating treatment. For the Loctite 401-coated specimens, the highest elongation at break was obtained after two coating cycles for the longitudinal specimens and after four coating cycles for the transverse specimens, corresponding to increases of approximately 35.1% and 124.1%, respectively. For the Alaska 4001-coated specimens, the highest elongation at break was obtained after two coating cycles for both the longitudinal and transverse specimens, corresponding to increases of approximately 29.7% and 48.3%, respectively.

The increase in elongation at break is attributed to the increase in effective cross-sectional area and the partial filling of surface defects by the adhesive. However, excessive coating did not continuously improve elongation because the increased proportion of brittle cured adhesive limited the deformation capability of the specimens.

Although improving inter-bead bonding is important for suppressing leakage in MEXed structures, cross-sectional SEM observations revealed no noticeable penetration of the cyanoacrylate adhesive into the internal inter-bead gaps. Therefore, the coating treatment did not substantially reinforce the internal bead-to-bead interfaces, which is consistent with the absence of improvement in tensile strength. Instead, the adhesive mainly accumulated on the specimen surface and partially filled surface-connected defects, thereby modifying the deformation behavior and increasing the elongation at break.

These findings demonstrate that cyanoacrylate adhesive dip coating significantly affects the mechanical behavior of MEXed PLA structures. While excessive coating may reduce tensile strength, an appropriate coating condition can effectively improve the deformation capability of the MEXed structures. Future work will investigate a vacuum-assisted coating process to enhance adhesive penetration into the internal structure. By removing trapped air from the inter-bead gaps and voids prior to adhesive infiltration, deeper penetration of the adhesive is expected, and its effects on internal defect filling and mechanical properties will be systematically evaluated.

REFERENCES

1. Srivastava, M., Rathee, S., (2022), Additive manufacturing: Recent trends, applications and future outlooks, Progress in Additive Manufacturing, 7(2), 261-287.
2. Bahnini, I., Rivette, M., Rechia, A., Siadat, A., Elmesbahi, A., (2018), Additive manufacturing technology: The status, applications, and prospects, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 97(1), 147-161.
3. Rajeshirke, M., Fidan, I., Naikwadi, V., Alkunte, S., Gupta, A., Mohammadizadeh, M., (2025), Material extrusion–based multi-material 3D printing: A holistic review of recent advances, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 139(1), 149-174.
4. Patel, A., Taufik, M., (2024), Extrusion-based technology in additive manufacturing: A comprehensive review, Arabian Journal for Science and Engineering, 49(2), 1309-1342.
5. Jasik, K., Śnieżek, L., Kluczyński, J., (2025), Additive manufacturing of metals using the MEX method: Process characteristics and performance properties—A review, Materials, 18(12), 2744.
6. Kotz, F., Mader, M., Dellen, N., Risch, P., Kick, A., Helmer, D., Rapp, B. E., (2020), Fused deposition modeling of microfluidic chips in polymethylmethacrylate, Micromachines, 11(9), 873.
7. Park, S. J., Lee, J. E., Son, Y., Park, S.-H., (2022), A study on material extrusion additive manufacturing of transparent thermoplastic polymer for microfluidic chip fabrication, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 21(10), 106-112.
8. Sundaram, J., Rajkumar, C., Salunkhe, S., Praveen, A., Muniamuthu, S., Ganesan, S., (2023), Fabrication and mechanical characterization of venturi duct using fused deposition modelling through finite element approach, Materials Today: Proceedings (In Press).
9. Park, S. J., Park, S. J., Son, Y., Ahn, I. H., (2022), Influence of warm isostatic press (WIP) process parameters on mechanical properties of additively manufactured acrylonitrile butadiene styrene (ABS) parts, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 122(7), 3311-3322.
10. Gordeev, E. G., Galushko, A. S., Ananikov, V. P., (2018), Improvement of quality of 3D printed objects by elimination of microscopic structural defects in fused deposition modeling, PloS One, 13(6), e0198370.
11. Leeder, R., Rankin, K. E., Nightingale, A. M., (2025), Microscale Computed Tomography (μCT) Imaging of Leak Pathways for Optimized Leak-Free 3D Printed Fluidics, ACS Applied Polymer Materials, 7(21), 14130-14137.
12. Szczęch, M., Sikora, W., (2024), The influence of printing parameters on leakage and strength of fused deposition modelling 3D printed parts, Advances in Science and Technology, Research Journal, 18(1), 195-201.
13. Park, S. J., Park, S. J., Son, Y., Ahn, I. H., (2022), Reducing anisotropy of a part fabricated by material extrusion via warm isostatic pressure (WIP) process, Additive Manufacturing, 55, 102841.
14. Vicente, C., Fernandes, J., Deus, A., Vaz, M., Leite, M., Reis, L., (2019), Effect of protective coatings on the water absorption and mechanical properties of 3D printed PLA, Fracture and Structural Integrity, 13(48), 748-756.
15. Zhu, J., Chen, J. L., Lade Jr, R. K., Suszynski, W. J., Francis, L. F., (2015), Water-based coatings for 3D printed parts, Journal of Coatings Technology and Research, 12(5), 889-897.
16. Ahn, S. H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S., Wright, P. K., (2002), Anisotropic material properties of fused deposition modeling abs, Rapid Prototyping Journal, 8(4), 248-257.
17. Chen, R., Hsu, S., Chang, H., Chen, M., (2021), Challenge tooth regeneration in adult dogs with dental pulp stem cells on 3D-printed hydroxyapatite/polylactic acid scaffolds, Cells, 10(12), 3277.
18. Kiani, P., Sedighi, M., Kasaeian-Naeini, M., Mostahsan, A. J., (2023), Effect of dip-coating on tensile and high cycle fatigue behavior of 3D printed bio-polymer blends, Proceedings of the 30th National and 8th International Iranian Conference on Biomedical Engineering, 232-236.



Seongjun Kim
Undergraduate student in the School of Mechanical Engineering at Gyeongsang National University. His research interests include additive manufacturing.
E-mail: horse2584@gnu.ac.kr



Seungli Bae
Undergraduate student in the School of Mechanical Engineering at Gyeongsang National University. His research interests include additive manufacturing.
E-mail: baeseungli12@gnu.ac.kr



Seong Je Park
Assistant professor in the School of Mechanical Engineering at Gyeongsang National University. His research interests include polymer and metal additive manufacturing.
E-mail: seongje.park@gnu.ac.kr

한국정밀공학회지 제 43 권 제 10 호 pp. 1137-1144 October 2026 / 1137
J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 43, No. 10, pp. 1137-1144 http://doi.org/10.7736/JKSPE.026.00096
ISSN 1225-9071 (Print) / 2287-8769 (Online)

직접 에너지 증착 적층 제조에서 반복 재사용에 따른 체질 탈락 분말의 특성 평가

Characterization of Sieve-rejected Powder during Repeated Reuse in Directed Energy Deposition

이정원[1,*], 김정민[1,*], 신석진[2], 박기덕[2], 박성제[1,#]
Jungwon Lee[1,*], Jeongmin Kim[1,*], Seokjin Shin[2], Gideok Park[2], and Seong Je Park[1,#]

1 경상국립대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Gyeongsang National University)
2 ㈜갓테크 (GODTECH)
Corresponding Author / E-mail: seongje.park@gnu.ac.kr, TEL: +82-55-772-1622
ORCID:0009-0003-5446-5292

KEYWORDS: Additive manufacturing (적층 제조), Directed energy deposition (직접 에너지 증착), Powder reuse (분말 재사용), Powder morphology (분말 형상)

Directed energy deposition (DED) enables the efficient fabrication and repair of large metal components. However, repeated reuse of the powder generates degraded particles, which must be removed by sieving. This study used scanning electron microscopy and laser diffraction particle size analysis to characterize the sieve-rejected Inconel Alloy 939 powder collected sequentially after each of four DED processing cycles (R1–R4). The rejected powder consistently contained elongated, irregular, and satellite-attached particles, and its particle size increased progressively with each reuse cycle. The mean particle size increased by 16.8%, from 51.1 μm for R1 to 59.7 μm for R4. The D_{10}, D_{50}, and D_{90} values also increased, with D90, for example, rising from 71.5 to 82.2 μm. These results suggest that sieving may serve as an important quality control step for maintaining powder quality when the powder is repeatedly reused in DED.

Manuscript received: August 14, 2026 / Revised: September 9, 2026 / Accepted: September 17, 2026
*These authors contributed equally to this work.

1. Introduction

Directed energy deposition (DED) is one of the most widely adopted metal additive manufacturing (AM) technologies owing to its capability to fabricate large-scale components, repair high-value parts, and produce near-net-shape structures with high material utilization [1-3]. Compared with powder bed fusion processes, DED offers greater flexibility in repairing or adding material to existing components, making it attractive for aerospace, energy, and defense applications [4,5]. Since metallic powders account for a significant portion of the manufacturing cost, repeated powder reuse has become an important strategy for improving the economic feasibility and sustainability of DED [6,7].

The performance and reliability of the DED process strongly depend on the quality of the feedstock powder. Powder characteristics such as particle size distribution, particle morphology, flowability, and chemical composition directly influence powder feeding behavior, deposition stability, and the quality of the fabricated components [8,9]. Consequently, maintaining consistent powder quality throughout repeated reuse cycles is essential for ensuring stable processing and reproducible mechanical properties [10].

During repeated DED processing, the remaining powder is commonly recovered and classified through a sieving process

Copyright © The Korean Society for Precision Engineering
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

before being reused [6]. Generally, only powders within a specified particle size range are reused for subsequent fabrication, whereas particles outside the allowable size range are discarded [11]. In addition to particle size, repeated thermal exposure and particle interaction during the DED process may alter particle morphology through oxidation, satellite formation, and particle coarsening, which can adversely affect powder flowability and feeding stability [12,13]. Consequently, sieving is considered an essential quality control step for maintaining stable powder delivery during repeated powder reuse.

Previous studies on DED powder reuse have primarily focused on the physical characteristics of reusable powder or the mechanical properties of components fabricated using repeatedly reused powder [14,15]. These studies have demonstrated that repeated powder reuse can lead to changes in particle size distribution, morphology, and chemical composition with increasing reuse cycles [13,16-18]. However, despite the practical importance of the sieving process, the powder fractions removed during sieving have received little attention. These rejected particles may contain valuable information regarding the degradation accumulated during repeated powder reuse because they represent the powder that no longer satisfies the requirements for continued processing. Thus, investigating the characteristics of sieve-rejected powder can provide a better understanding of powder degradation mechanisms and help evaluate the effectiveness of the sieving process in maintaining powder quality.

In particular, Ni-based superalloy powders are widely used in DED because of their excellent mechanical properties and resistance to oxidation and corrosion at elevated temperatures [19,20]. Previous studies on Ni-based alloys, including IN625 and IN718, have investigated the effects of powder reuse on particle morphology, particle size distribution, chemical composition, and the properties of deposited materials [21,22]. In other words, relatively little attention has been given to the characteristics of sieve-rejected powder generated during the repeated reuse of Ni-based superalloys.

Therefore, this study investigates the morphological and particle size characteristics of sieve-rejected Ni-based powder generated during repeated powder reuse in DED. The morphology, elemental distribution, and particle size distribution of the rejected powder collected after each reuse cycle were systematically characterized using scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS), and laser diffraction particle size analysis. The findings provide new insights into the characteristics of discarded powder during repeated DED powder reuse and demonstrate the importance of the sieving process as a quality control strategy for sustainable powder recycling.

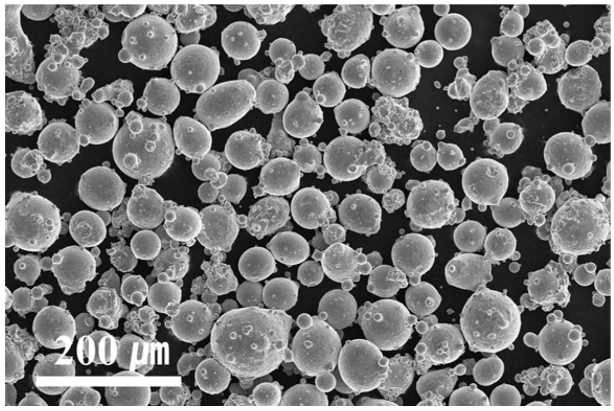


Fig. 1 SEM micrograph of the virgin IN939 powder

2. Methodology

2.1 Material and Equipment

Inconel Alloy 939 (IN939; GT939, GODTECH, Republic of Korea) was employed as the feedstock material for the DED process. The morphology of the virgin IN939 powder used in this study is shown in Fig. 1. The D_{10}, D_{50}, and D_{90} values of the virgin powder were 51.0, 85.1, and 134.2 μm, respectively, with a mean particle size of 89.4 μm. According to the manufacturer's datasheet, heat-treated IN939 exhibits an ultimate tensile strength of approximately 1,460–1,560 MPa and an elongation of 9.5–11%, whereas the as-built material shows a UTS of approximately 1,090–1,160 MPa and an elongation of 24–28%. The nominal chemical composition of the GT939 powder was Ni (balance), Cr (22.71 wt.%), Co (19.02 wt.%), Ti (3.77 wt.%), W (2.06 wt.%), Al (1.94 wt.%), Zr (1.94 wt.%), Ta (1.46 wt.%), Nb (1.01 wt.%), C (0.14 wt.%), Fe (0.050 wt.%), Cu (0.04 wt.%), Mn (0.003 wt.%), Si (0.002 wt.%), P (0.002 wt.%), S (0.002 wt.%), N (0.006 wt.%), O (0.011 wt.%), B (< 0.10 wt.%), and Mo (< 0.10 wt.%). The DED process was carried out using an MX-Fab1 equipped with a PCM Multi system (InssTek Inc., Republic of Korea). The system employs a Ytterbium fiber laser with a wavelength of 1,064 nm and a beam diameter of 1,200 μm. The laser power was automatically adjusted according to the DMT mode during the deposition process, ranging from 530 to 756 W (DMT modes 1–10). The scanning speed, layer height, hatch spacing, and nozzle stand-off distance were set to 850 mm/min, 0.45, 0.8, and 9.0 mm, respectively. The powder feed rate, powder carrier gas flow rate, and shielding gas flow rate were maintained at 5.0 g/min, 3 L/min, and 10 L/min, respectively.

2.2 Powder Reuse and Collection Procedure

A total of 6 kg of virgin IN939 powder was initially prepared for

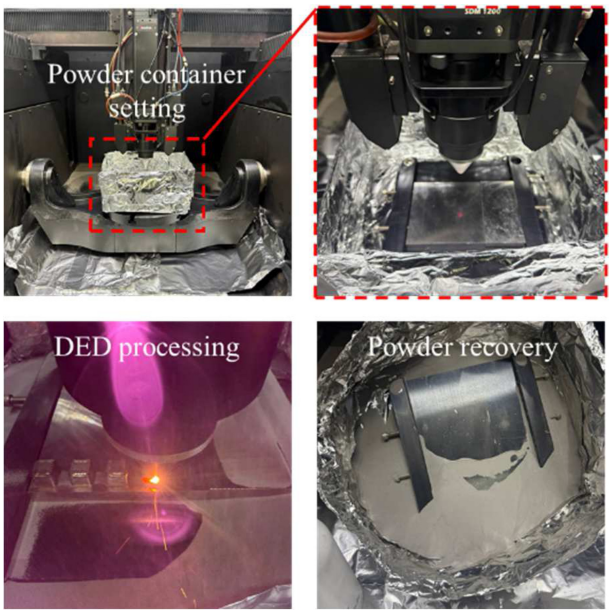


Fig. 2 Photographs of the powder reuse procedure in the DED process, including powder container setting, DED processing, and powder recovery

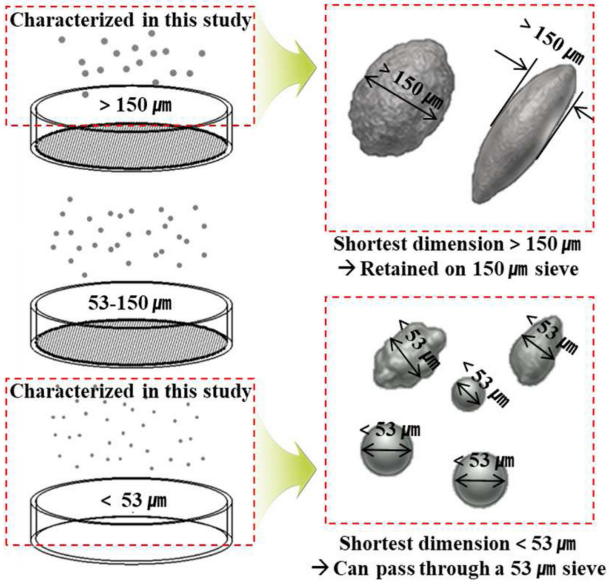


Fig. 3 Schematic illustration of the sieving process and powder classification into reusable (53–150 μm) and sieve-rejected (<53 and >150 μm) powder fractions. Red dashed boxes denote the powder fractions characterized in this study. (The particle representations shown in the right panels were AI-generated for schematic illustration purposes and do not represent experimental observations.)

the DED process. During each powder reuse cycle, 10 mm × 10 mm × 10 mm cubic specimens were continuously fabricated until the available powder was completely consumed. Following each deposition cycle, the used powder was recovered from the deposition chamber, as shown in Fig. 2, and classified by sieving using 53 and 150 μm meshes, thereby separating the recovered powder into three particle size fractions: < 53 μm, 53–150 μm, and > 150 μm, as illustrated in Fig. 3. The sieving process was performed manually for 10 min by hand-shaking the 53 and 150 μm sieves. According to previous studies, only the powder fraction within the particle size range of 53–150 μm was considered suitable for reuse and was employed in the subsequent DED process [23-25]. Accordingly, the fractions below 53 μm and above 150 μm, both of which were excluded from reuse, were collectively defined as the sieve-rejected powder and collected for physical characterization. It should be noted that, for non-spherical or elongated particles, passage through the sieve depends on the particle dimensions and orientation relative to the sieve aperture. As illustrated in Fig. 3, particles with a shortest dimension larger than 150 μm are retained on the 150 μm sieve, whereas particles with a shortest dimension smaller than 53 μm may pass through the 53 μm sieve depending on their orientation. Therefore, an elongated particle may pass through the 53 μm sieve even when its longer dimension exceeds 53 μm. The < 53 μm and > 150 μm fractions were not mixed in equal amounts or at a predetermined mass ratio. Instead, the powder naturally separated into these two fractions during each sieving cycle was collected and analyzed as the sieve-rejected powder without adjusting their relative proportions. The amount of the > 150 μm fraction may be relatively small compared with that of the < 53 μm fraction. This can be attributed to the fact that particles are retained on the 150 μm sieve only when their dimensions are sufficiently large to prevent passage through the sieve aperture, whereas elongated particles with a longer dimension exceeding the nominal sieve size may still pass through depending on their shorter dimension and orientation. Therefore, the particle-size characteristics of the sieve-rejected powder were primarily influenced by the naturally generated proportions of the two rejected fractions rather than by an artificially controlled mixing ratio. The mass proportions of the two fractions were not separately quantified in this study. The DED processing–recovery–sieving procedure was conducted for four consecutive cycles. The sieve-rejected powders collected sequentially after each DED cycle were designated as R1, R2, R3, and R4, respectively. R1 represents the first sieve-rejected powder collected after the initial DED processing of the virgin powder, while R2, R3, and R4 represent the second, third, and fourth sieve-rejected powders collected during the subsequent DED cycles, respectively. No fresh IN939 powder was added between the consecutive cycles.

2.3 Characterization

The morphology and elemental composition of the powder particles were characterized using a field-emission scanning electron microscope (FE-SEM; Apreo 2S, Thermo Fisher Scientific, USA) equipped with an energy-dispersive X-ray spectroscopy system. SEM observations were performed to investigate the morphological characteristics of the sieve-rejected powder during repeated powder reuse, while EDS elemental mapping was conducted to qualitatively examine the distribution of oxygen. The particle size was measured using a laser diffraction particle size analyzer (1090LD Shape Analyzer, CILAS, France) based on the Fraunhofer diffraction theory. Distilled water was used as the dispersion medium, and the powder suspension was ultrasonically dispersed for 60 s prior to each measurement to minimize particle agglomeration. For each powder sample, particle size measurements were repeated three times (n = 3) using the same prepared suspension, and the results are presented as the mean ± standard deviation.

3. Results and Discussion

3.1 Morphological Characteristics of Sieve-rejected Powder

Fig. 4 presents the SEM micrographs and corresponding oxygen elemental mapping images of the sieve-rejected powder collected after each powder reuse cycle (R1–R4). Regardless of the reuse cycle, the rejected powder exhibited a wide range of particle morphologies. In addition to predominantly spherical particles, elongated particles (yellow circles), irregularly shaped particles, and particles with attached satellite particles were consistently observed in all rejected powder samples. Compared with the ideal spherical morphology required for stable powder reuse, the sieve-rejected powder generally exhibited reduced sphericity and increased morphological irregularity. The elongated particles are considered to have originated from repeated thermal exposure and particle interaction during the DED process, while the attached satellite particles further increased surface roughness and geometric irregularity [17,26]. These morphological features are expected to adversely affect powder flowability and powder feeding stability. No distinct progressive change in morphology was observed with increasing powder reuse cycles. Nevertheless, the same characteristic defects, including elongated particles, reduced sphericity, and satellite-attached particles, were consistently identified in all sieve-rejected powder samples, indicating that these particles had already become unsuitable for reuse when removed during the sieving process [27,28]. Such morphologically degraded particles may interfere with stable

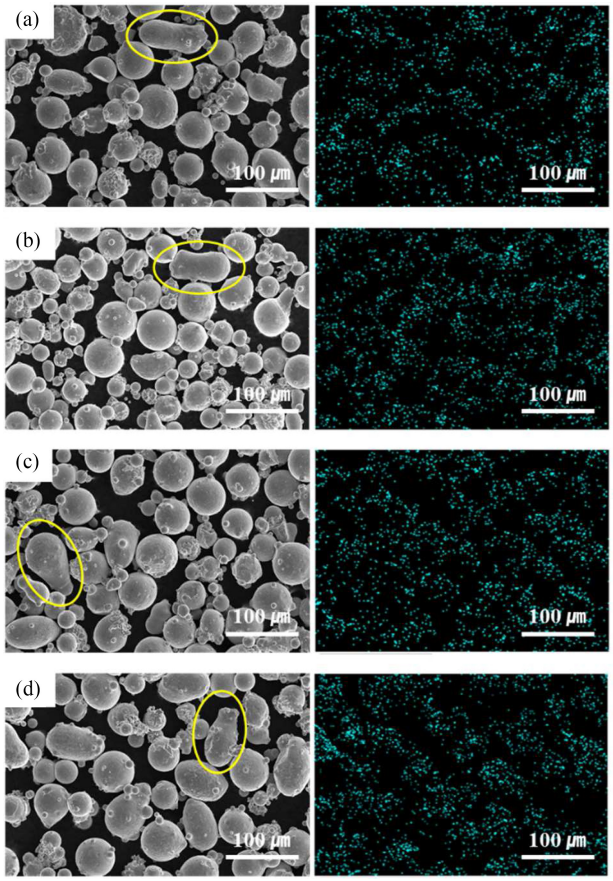


Fig. 4 SEM micrographs and corresponding oxygen elemental mapping images of the sieve-rejected powder collected after repeated powder reuse: (a) R1, (b) R2, (c) R3, and (d) R4. (Yellow circles indicate elongated particles)

powder transport and increase the likelihood of powder feeding instability or nozzle clogging during the DED process [29,30]. Therefore, the results suggest that the primary role of the sieving process extends beyond simple particle size classification. These results suggest that, by removing particles with degraded morphology, sieving may contribute to maintaining stable powder delivery during repeated powder reuse in DED systems. In addition to the morphological analysis, oxygen was detected in the rejected powder throughout all reuse cycles; however, no clear progressive change in oxygen distribution was observed from R1 to R4. The presence of oxygen suggests surface oxidation of the rejected powder, which is important because oxidation of reused metallic powders can affect powder characteristics and contribute to oxide inclusions in subsequently deposited materials [31].

3.2 Particle Size of Sieve-rejected Powder

Fig. 5 presents the changes in the particle size distribution of the sieve-rejected powder with increasing powder reuse cycles. It should be noted that the particle sizes measured by laser diffraction

do not necessarily correspond directly to the sieve aperture sizes. As observed in Fig. 4, the sieve-rejected powder contained non-spherical and elongated particles. For such particles, passage through a sieve depends on particle orientation and dimensions, and particles with a longer dimension exceeding the sieve aperture may pass through the mesh when their shorter dimension is appropriately oriented. In contrast, laser diffraction determines particle size from the diffraction pattern rather than directly measuring the dimension governing passage through the sieve. Consequently, particles classified into the < 53 μm fraction by sieving may exhibit particle sizes greater than 53 μm in the laser diffraction analysis [32-34]. This difference between the particle-size definitions of sieving and laser diffraction explains the presence of particle sizes exceeding the nominal sieve aperture in Fig. 5. The characteristic particle size parameters (D_{10}, D_{50}, and D_{90}) shown in Fig. 5(a) all exhibited a gradual increase as the number of powder reuse cycles increased. This trend indicates that the particle size distribution progressively shifted toward larger particle sizes during repeated powder reuse. Among the three parameters, D_{90} showed the largest absolute increase, suggesting that the coarse end of the particle size distribution shifted toward larger particle sizes with repeated powder use. A relatively greater increase was observed between R2 and R3, implying that particle coarsening became more pronounced after multiple reuse cycles. The mean particle size shown in Fig. 5(b) also exhibited a continuous increase throughout the powder reuse cycles, which is consistent with the trends observed for D_{10}, D_{50}, and D_{90}. Specifically, the mean particle size increased from 51.1 μm for R1 to 59.7 μm for R4, corresponding to an increase of approximately 16.8%. These results indicate that repeated powder reuse gradually promoted particle coarsening, thereby increasing the fraction of oversized particles [13,17,35]. Combined with the SEM observations presented in Fig. 4, where elongated particles, reduced sphericity, and satellite particles were identified, the increase in particle size suggests that the rejected powder became progressively less suitable for stable reuse [8,36]. The continuous increase in particle size, together with the non-spherical morphology observed in Fig. 4, may adversely affect powder feeding behavior during the DED process. Previous studies have shown that an increased fraction of larger particles can increase particle-particle and particle-gas flow resistance during mechanical metering and pneumatic transport, resulting in a reduced powder mass flow rate [9]. In addition, both particle size and shape play important roles in carrier-gas-driven powder transport in DED systems [29]. The progressive increase in particle size and morphological irregularity observed in the sieve-rejected powder may thus make these particles less suitable for stable powder

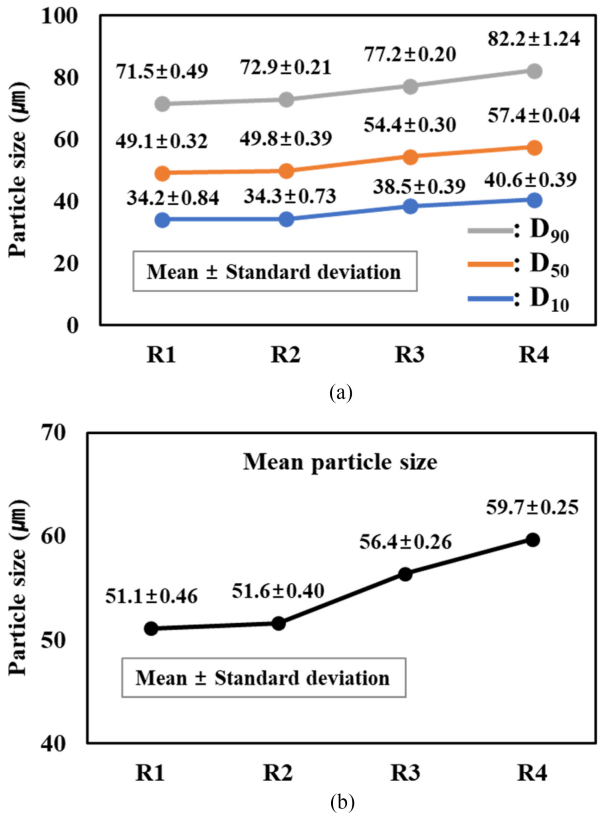


Fig. 5 Evolution of the particle size of the sieve-rejected powder with increasing powder reuse cycles: (a) Characteristic particle size parameters (D_{10}, D_{50}, and D_{90}), and (b) Mean particle size

feeding. Therefore, the present results suggest that the sieving process may contribute to maintaining an appropriate particle size range by continuously removing coarse particles generated during repeated powder use, which may be beneficial for stable powder feeding in DED.

4. Conclusion

This study investigated the morphological characteristics and particle size evolution of sieve-rejected powder generated during repeated powder reuse in the DED. Unlike previous studies that primarily focused on the properties of reusable powder, the present work tracked the powder fractions removed during sieving to clarify why these particles are unsuitable for further reuse. The main findings are summarized as follows:

The sieve-rejected powder consistently exhibited elongated particles, reduced sphericity, irregular particle morphology, and attached satellite particles, regardless of the powder reuse cycle. These morphological defects indicate that the rejected powder had

already lost the characteristics required for stable powder reuse.

The particle size distribution progressively shifted toward larger particle sizes with increasing powder reuse cycles. All characteristic particle size parameters (D_{10}, D_{50}, and D_{90}) increased continuously, while the mean particle size increased from 51.1 μm (R1) to 59.7 μm (R4), corresponding to an increase of approximately 17%. These results demonstrate the progressive coarsening of the sieve-rejected powder during repeated reuse.

Oxygen was detected in the sieve-rejected powder throughout all reuse cycles. However, no clear progressive change in oxygen distribution was observed from R1 to R4.

The present findings demonstrate that the role of the sieving process extends beyond simple particle size classification. By continuously removing oversized and morphologically degraded particles generated during repeated powder use, sieving may contribute to maintaining powder quality and stable powder feeding in DED. Overall, this study provides new insights into the characteristics of powder discarded during repeated DED powder reuse and highlights the importance of sieving as a quality control process for sustainable powder recycling. Although this study successfully characterized the sieve-rejected powder generated during repeated DED powder reuse, it was limited to the investigation of the discarded powder fraction. The evolution of the reusable powder fraction (53–150 μm) and its influence on the properties of DED-fabricated components were not addressed in the present work. Future research will focus on systematically tracking the physical evolution of the reusable powder with increasing reuse cycles. Furthermore, the microstructural characteristics and mechanical properties of DED-fabricated components produced using the repeatedly reused powder will be evaluated. These investigations will provide a comprehensive understanding of powder degradation throughout the reuse process and establish practical guidelines for determining the allowable reuse cycles of DED powder.

REFERENCES

1. Costello, S. C., Cunningham, C. R., Xu, F., Shokrani, A., Dhokia, V., Newman, S. T., (2023), The state-of-the-art of wire arc directed energy deposition (WA-DED) as an additive manufacturing process for large metallic component manufacture, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 36(3), 469-510.
2. Cunningham, C. R., Flynn, J. M., Shokrani, A., Dhokia, V., Newman, S. T., (2018), Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing, Additive Manufacturing, 22, 672-686.
3. Yi, H., Lang, T., Si, J., Chi, Y., Cao, H., Huang, Y., (2025), High-performance manufacturing of metal components via multi-field assisted wire-arc directed energy deposition, Journal of Manufacturing Processes, 143, 234-276.
4. Svetlizky, D., Das, M., Zheng, B., Vyatskikh, A. L., Bose, S., Bandyopadhyay, A., Schoenung, J. M., Lavernia, E. J., Eliaz, N., (2021), Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications, Materials Today, 49, 271-295.
5. Ahn, D., (2021), Directed energy deposition (DED) process: State of the art, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 8(2), 703-742.
6. Terrassa, K. L., Haley, J. C., MacDonald, B. E., Schoenung, J. M., (2018), Reuse of powder feedstock for directed energy deposition, Powder Technology, 338, 819-829.
7. Joju, J., Verdi, D., Han, W., Hang, L., Soh, N., Hampo, C., Liu, N., Yang, S., (2023), Sustainability assessment of feedstock powder reuse for directed laser deposition, Journal of Cleaner Production, 388, 136005.
8. Mahtabi, M., Yadollahi, A., Morgan-Barnes, C., Priddy, M. W., Rhee, H., (2024), Effects of powder reuse and particle size distribution on structural integrity of Ti-6Al-4V processed via laser beam directed energy deposition, Journal of Manufacturing and Materials Processing, 8(5), 209.
9. Iams, A., Gao, M., Shetty, A., Palmer, T., (2022), Influence of particle size on powder rheology and effects on mass flow during directed energy deposition additive manufacturing, Powder Technology, 396, 316-326.
10. Singh, A., Kapil, S., Das, M., (2020), A comprehensive review of the methods and mechanisms for powder feedstock handling in directed energy deposition, Additive Manufacturing, 35, 101388.
11. Pereira, J. C., Irastorza, U., Solana, A., Soriano, C., García, D., Ruiz, J. E., Lamikiz, A., (2024), Effect of powder reuse on powder characteristics and properties of DED laser beam metal additive manufacturing process with Stellite® 21 and UNS S32750, Metals, 14(9), 1031.
12. Lee, Y. E., Soni, S. K., Kim, I. S., Jo, S. J., Rizi, M. S., Ebrahimian, M., Lee, J. W., Moon, J., Kim, H. S., Hong, S. J., (2026), Microstructure characterization and recyclability assessment of heat-affected 316L stainless steel powders processed via directed energy deposition, Results in Engineering, 29, 108759.
13. Kiani, P., Dupuy, A. D., Ma, K., Schoenung, J. M., (2024), The reusability of AlSi10Mg powder in directed energy deposition, Powders, 3(1), 28-43.
14. Saboori, A., Aversa, A., Bosio, F., Bassini, E., Librera, E., De Chirico, M., Biamino, S., Ugues, D., Fino, P., Lombardi, M., (2019), An investigation on the effect of powder recycling on the microstructure and mechanical properties of AISI 316L produced by directed energy deposition, Materials Science and Engineering: A, 766, 138360.

15. Kim, I., Soni, S. K., Jo, S., Lee, Y., Kwon, J., Kim, D., Jeong, S. G., Lee, J., Moon, J., Kim, H. S., (2026), Influence of recycling-induced oxide inclusions on microstructure and mechanical properties of directed energy deposited 316L stainless steel, Materials Science and Engineering: A, 150046.

16. Kong, Y., Peng, K., Huang, H., (2026), Toward sustainable laser directed energy deposition of NiCoCr: Powder reusability, performance evolution, and purification strategies, Sustainable Materials and Technologies, 49, e02128.

17. Zhang, H., Li, J., Li, Y., (2023), Effect of powder recycling on the organization and mechanical properties of GH4169 alloy by laser metal deposition, Coatings, 13(3), 659.

18. Gorji, N. E., O'Connor, R., Mussatto, A., Snelgrove, M., González, P. G. M., Brabazon, D., (2019), Recyclability of stainless steel (316L) powder within the additive manufacturing process, Materialia, 8, 100489.

19. Zhang, W., Duan, M., Chang, F., Gao, P., Wang, Q., Chang, G., Cai, B., Kong, J., Wang, K., Peng, Y., (2026), Effects of additive heat source type and heat treatment on microstructural evolution and mechanical properties of Inconel 718 alloy fabricated by directed energy deposition, Materials Characterization, 116422.

20. Cavalcante, T. R. F., Mariani, F. E., Diaz, J. A. A., (2026), Additive manufacturing of Inconel 718: A review on microstructures and mechanical properties of DED-LB-processed samples, Journal of Materials Research, 41(1), 2-24.

21. Zhang, P., Jiang, M., Luan, B., (2024), Influence of Inconel 625 alloy powder reusing on feedstock characteristics and mechanical properties of deposited parts, Journal of Materials Research and Technology, 29, 3782-3794.

22. Renderos, M., Torregaray, A., Gutierrez-Orrantia, M. E., Lamikiz, A., Saintier, N., Girot, F., (2017), Microstructure characterization of recycled IN718 powder and resulting laser clad material, Materials Characterization, 134, 103-113.

23. Cruz, J. R., Sousa, J. M. S., Ferreira, H. S., Thiesen Junior, A., Marino, C. E. B., (2024), Impact of feedstock recycling on the corrosion resistance of Inconel 625 processed by L-DED, Materials Research, 27(Suppl. 1), e20230578.

24. Chen, Y., Qiu, J., Chang, W., Hwang, Y., Hwang, S., (2024), Process optimization and mechanical properties analysis of Inconel 718/stainless steel 316 L multi-material via direct energy deposition, Scientific Reports, 14(1), 28927.

25. Urbánek, M., Hodek, J., Melzer, D., Koukolíková, M., Prantl, A., Vavřík, J., Brázda, M., Martínek, P., Rzepa, S., Džugan, J., (2022), Prediction of behaviour of thin-walled DED-processed structure: experimental-numerical approach, Materials, 15(3), 806.

26. Kim, D., Madavali, B., Go, E., Jo, S., Baek, G., Kim, H., Kim, T., Hong, S., (2025), Assessing sustainability of Titanium powder recycling in additive manufacturing through the powder surface and microstructure analysis for porous implant coatings, Journal of Materials Research and Technology, 41, 913-924.

27. Shalnova, S. A., Kuzminova, Y. O., Evlashin, S. A., Klimova-Korsmik, O. G., Vildanov, A. M., Shibalova, A. A., Turichin, G. A., (2022), Effect of recycled powder content on the structure and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy produced by direct energy deposition, Journal of Alloys and Compounds, 893, 162264.

28. Rousseau, J. N., Bois-Brochu, A., Blais, C., (2018), Effect of oxygen content in new and reused powder on microstructural and mechanical properties of Ti6Al4V parts produced by directed energy deposition, Additive Manufacturing, 23, 197-205.

29. Garg, R., Dhami, H. S., Panda, P. R., Viswanathan, K., (2023), Evaluating gas-driven flow mechanics of non-spherical powders for directed energy deposition, Journal of Manufacturing Processes, 99, 260-271.

30. Lee, H., Heogh, W., Yang, J., Yoon, J., Park, J., Ji, S., Lee, H., (2022), Deep learning for in-situ powder stream fault detection in directed energy deposition process, Journal of Manufacturing Systems, 62, 575-587.

31. Jandaghi, M. R., Moverare, J., (2024), Exploring the efficiency of powder reusing as a sustainable approach for powder bed additive manufacturing of 316L stainless steel, Materials & Design, 244, 113222.

32. Schneider, C. L., Neumann, R., Souza, A. S., (2007), Determination of the distribution of size of irregularly shaped particles from laser diffractometer measurements, International Journal of Mineral Processing, 82(1), 30-40.

33. Garboczi, E., Riding, K., Mirzahosseini, M., (2017), Particle shape effects on particle size measurement for crushed waste glass, Advanced Powder Technology, 28(2), 648-657.

34. Bowen, P., Sheng, J., Jongen, N., (2002), Particle size distribution measurement of anisotropic—particles cylinders and platelets—practical examples, Powder Technology, 128(2-3), 256-261.

35. Sibisi, P. N., Popoola, A., Arthur, N., Pityana, S., Popoola, O., (2019), Morphological characterization of recycled powder and microstructures of Ti-6Al-4V components synthesized by LENS additive manufacturing, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 655(1), 012019.

36. Santoni, A., Santecchia, E., Schiavone, A. M., Latini, V., Lascu, B. D., Stoica, C. R., (2025), On the extent of feedstock–system interaction in determining the efficiency of laser powder directed energy deposition, Metals, 15(6), 599.



Jungwon Lee
Undergraduate student in the School of Mechanical Engineering at Gyeongsang National University. His research interest is additive manufacturing.
E-mail: 2jw_00@gnu.ac.kr



Jeongmin Kim
Undergraduate student in the School of Mechanical Engineering at Gyeongsang National University. His research interest is additive manufacturing.
E-mail: 2021011235@gnu.ac.kr



Seokjin Shin
Director at GODTECH Co., Ltd.. His research focuses on materials and laser-based metal additive manufacturing.
E-mail: sj.shin@godtechnology.co.kr



Gideok Park
CEO at GODTECH Co., Ltd.. His research focuses on materials and laser-based metal additive manufacturing.
E-mail: ceo@godtechnology.co.kr



Seong Je Park
Assistant professor in the School of Mechanical Engineering at Gyeongsang National University. His research interests include polymer and metal additive manufacturing.
E-mail: seongje.park@gnu.ac.kr

창간

(사)한국정밀공학회에서 발행한 한국정밀기계학회지는 1984년 6월에 창간되었다. 이후 1985년 12월, 학술지명을 한국정밀공학회지로 변경하였다.

목적 및 연구 범위

한국정밀공학회지는 정밀공학 및 제조와 관련된 독창적 연구 논문을 게재하는 것을 목표로 한다. 구체적으로는 모든 학문분야나 산업분야에서 독창적인 아이디어의 실험적인 구현과정 및 제조과정에서의 반복정도, 신뢰성, 운동정밀도 및 측정정밀도에 영향을 미칠 수 있는 각 종 현상에 대하여, 기계공학적 또는 다학제적 접근방식으로 창의적인 실험, 해석 및 모델링 예측 등 한층 심화된 연구로 궁극적으로는 기계 및 생산공정의 정밀도향상에 기여하는 데 초점을 맞춘다, 연구범위로는 정밀가공, 정밀측정, 로봇제어자동화, 스마트생산시스템, 설계 및 재료, 공작기계, 나노마이크로기술, 바이오헬스, 적층제조시스템, 녹색생산기술 분야 등 정밀공학 관련분야를 포함하며 다른 간행물에 발표되지 않은 논문이어야 한다.

금액

구독료

이 논문집은 우리학회 회원에 한하여 무료로 제공됩니다.

게재료

- 기본면수 8면: 200,000원, 8면 초과 시 1면 당 30,000원으로 가산
- 용역 또는 지원금(Acknowldegement)으로 작성된 논문은 게재료의 50% 가산
- 게재료는 게재 확정 된 논문으로서, 용역 또는 지원금(Acknowldegement)으로 작성된 논문에만 한하여 청구
- 청구 후 15일 이내에 납부

연락처

[04508] 서울 중구 중림로 50-1, SKY1004빌딩 12층
전화 02-518-2928 / 팩스 02-518-2937 / paper@kspe.or.kr / https://www.kspe.or.kr
한국정밀공학회지 논문투고 및 심사: https://www.editorialmanager.com/jkspe/
한국정밀공학회지 저널: https://jkspe.or.kr/

한국정밀공학회지 논문투고 및 게재규정 · 논문집필요령

논문투고 및 게재규정

제1조 (목적)

이 규정은 사단법인 한국정밀공학회(이하 '학회'라 한다)의 국문학술지(한국정밀공학회지, 이하 '학회지' 또는 'JKSPE'라 한다) 논문의 투고 및 게재에 대한 사항을 규정함을 목적으로 한다.

제2조 (투고자)

투고논문의 교신저자 및 제1저자는 학회 회원이어야 한다. 단, 편집장이 특별히 인정하는 자는 예외로 할 수 있다.

제3조 (책임 및 윤리규정 준수)

① 투고논문의 책임은 저자(들)에게 있다.

② 투고논문에 대하여 모든 저자들은 '(사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정'을 준수하여야 한다. 학술활동 윤리규정을 위반할 경우 편집장은 논문의 게재를 불허 또는 취소할 수 있으며, 규정에 따라 징계할 수 있다.

제4조 (연구범위)

논문의 연구범위는 정밀가공, 정밀측정, 로봇제어자동화, 스마트생산시스템, 설계 및 재료, 공작기계, 나노마이크로기술, 바이오헬스, 적층제조시스템, 녹색생산기술 등 정밀공학 관련분야로 하며 다른 간행물에 발표되지 않은 논문이어야 한다.

제5조 (투고 구분)

학회지에 투고되는 논문은 아래와 같이 구분하며, 기본면수는 8면 이내로 하되 내용에 따라 초과할 수 있다.

① 일반논문: 학술성 또는 실용성이나 응용성이 우수한 논문

② 특집논문: 별도로 규정된 특집논문 규정에 따라 작성된 논문

③ 기타투고: 전망, 해설, 강좌, 기타 원고 등

제6조 (접수)

① 논문은 수시로 접수하며 접수일은 학회에 접수절차가 완료된 일자로 한다.

② 논문은 학회에서 규정한 원고작성양식(Template)에 따라 작성한 후 등록 제출한다.

③ 이 규정과 '논문집필요령'에 위배되는 원고는 접수하지 않을 수 있다.

④ 접수된 원고는 반환하지 않는다.

제7조 (심사 및 게재 결정)

① 논문의 게재여부는 학회지 편집장이 결정한다.

② 논문의 심사는 학회지 편집장, 편집인, 또는 편집위원이 추천한 2인의 심사위원에 의해 진행되며 심사 및 게재여부 판정 절차는 논문심사규정에 따른다.

제8조 (저작권)

① 논문내용에 대한 책임은 저자(들)에게 있다.

② 저자(들)는 제출된 논문의 저작권을 학회에 양도하여야 하며, 이를 위해 교신저자는 '한국정밀공학회지 연구윤리 및 저작권 동의서(Research Ethics and Copyright Transfer Agreement)'를 제출하여야 한다.

③ 게재된 논문 및 기타 투고물의 저작권은 학회에 있으며, 학회의 승인 없이 무단으로 복제할 수 없다.

④ 저자(들)는 자신(들)의 다른 연구물에 학회지에 게재된 논문 및 기타투고물의 일부를 사용할 수 있으나, 그 내용의 출처로 게재 논문을 인용해야 한다.

제9조 (자료공개)

학회는 논문 및 기타 투고물을 인쇄물과 온라인 출판물 등의 형태로 공개할 수 있다.

제10조 (원고작성요령)

① 학회에 투고하는 원고의 작성방법 및 편집은 별도로 규정된 '논문집필요령'에 따른다.

② 편집위원회는 채택된 원고에 대하여 용어, 문자, 맞춤법 등을 '논문집필요령'에 부합되도록 수정할 수 있다.

제11조(게재료)

저자는 학회지에 게재된 논문에 대하여 소정의 게재료를 납부하여야 한다. 규정면수를 초과한 논문의 경우 초과 면에 대한 게재료를 납부하여야 한다. 게재료는 이사회에서 결정한다.

한국정밀공학회지 논문투고 및 게재규정 · 논문집필요령

논문집필요령

1. 논문원고를 투고할 때는 한국정밀공학회지 양식에 맞춰 https://www.editorialmanager.com/jkspe/로 온라인 투고한다.
2. 논문의 구성은 다음 순서로 함을 원칙으로 한다.
   (1) 제목, (2) 영문제목, (3) 저자명, (4) 영문저자명, (5) 소속(국·영문 병기) 및 교신저자 정보, (6) Keywords,
   (7) 초록, (8) 투고일자, (9) 서론, (10) 본론(이론해석, 실험방법, 결과, 토론, 고찰), (11) 결론, (12) 후기,
   (13) 참고문헌, (14) 부록 기타, (15) 모든 저자의 소속·직위 등의 정보
3. 논문 원고는 한글 또는 영문 전용 및 한글과 영문 혼용, 한글과 한자 혼용으로 작성하고 용어의 의미가 난해할 경우는 ( ) 안에 원어를 병기하도록 한다.
4. 논문의 제목은 10 단어 이내로 간결하게 표시해야 하고 Keywords는 영문(괄호 안에 국문)으로 6 단어 이내로 작성한다.
5. 논문이 한글 혹은 한자 혼용일 때는 한글로 제목을 표시한 다음 영문으로 제목을 작성한다. 이어서 저자명을 국·영문 병기로 작성한다. 다음에 초록과 Keywords를 삽입하여야 하며 초록은 영문 200 단어 이내로 작성한다. 초록에는 도표, 참고문헌 표시가 있어서는 안되며 한문단(Paragraph)으로 서술한다.
6. 표 및 그림은 영문(Table 1, Fig. 1...)으로 하고 번호순에 따라 본문중에 그 위치를 표시하고 설명을 병기해야 한다.
7. 숫자는 아라비아 숫자를 사용하며 수량단위는 SI 단위 사용을 원칙으로 한다.
8. 인용 및 참고문헌의 색인번호를 본문의 인용처에 반드시 기입하고, 인용순서대로 다음과 같이 표시 한다.
   (1) 본문 중 인용 시: 대표저자의 성씨 뒤에 대괄호를 사용하여 일련번호를 쓴다.
      예) Hong [1]은, Chandran [3]에 의하여
   (2) 참고문헌 표기 시 영문으로 작성한다.
      단행본일 경우: 저자, (년도), 제목, 출판사.
      정기간행물인 경우: 저자, (년도), 제목, 저널명, 권(호수), 페이지.
         예) Hong, K. D., (2022), A method to investigate mechanical properties, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 39(1), 1-18.
9. 부록은 본문 전체 서식과 동일

한국정밀공학회지 논문심사규정

제1조 (목적)
이 규정은 사단법인 한국정밀공학회(이하 '학회'라 한다) 국문학술지(한국정밀공학회지, 이하 '학회지' 또는 'JKSPE'라 한다) 투고된 논문의 심사와 관련된 사항을 규정함을 목적으로 한다.

제2조 (투고 및 접수)
① 학회지에 투고하고자 하는 자는 별도로 규정된 학회의 투고 규정에 따라 작성된 논문을 학회의 논문제출시스템을 이용하여 투고하며 학회는 이를 접수한다.
② ①항의 규정에도 불구하고, 학회지 편집장이 인정하는 경우에 한하여 기타의 방법으로 논문 투고 및 접수를 진행할 수 있다.
③ 학회의 연구 분야와 관련된 주제의 논문 접수를 원칙으로 한다. 투고된 논문이 학회의 연구 분야와 관련이 없거나 논문의 기본 요건이 갖추어져 있지 않은 경우 편집장은 논문의 접수를 거절할 수 있다. 연구 분야는 별도로 규정된 '논문투고 및 게재규정'과 '논문집필요령'에 따른다.

제3조 (심사위원 선정)
① 학회지 편집장은 접수된 논문의 분야를 고려하여 해당분야 학회지 편집인에게 심사 배정하며, 학회지 편집인은 부문별로 선정된 학회지 편집위원 중 1인을 심사주관 편집위원으로 위촉한다.
② 심사주관 편집위원은 접수된 논문의 심사에 적절하다고 판단되는 심사위원을 선정하여 편집장에게 추천한다.
③ 심사위원의 수는 논문 1편당 2인으로 하되 제3심사위원이 위촉될 수 있고, 이 경우를 포함하여 논문 1편당 최대 3인으로 한다. 심사위원으로는 논문저자와 소속이 다른 위원을 위촉함을 원칙으로 한다.
④ 편집장은 추천 받은 위원에게 논문심사 수락여부를 확인하기 위한 이메일을 송부한다. 추천 받은 위원 중 심사거부 의사를 표시한 위원이 있는 경우 편집위원에게 심사위원 재추천을 요청한다.

제4조 (심사 방법)
① 심사위원은 논문의 종합평가 후 객관적인 근거를 들어 심사결과를 기술해야 하며, 필요 시 수정요구를 명확하게 해야 한다.
② 심사결과는 '채택가(Accept)', '수정 후 채택(Accept Subject to Minor Revisions)', '수정 후 재심(Re-Review after Major Revisions)', '채택불가(Reject)' 중 선택한다.

제5조 (심사 기간)
① 학회지의 편집위원은 편집위원 위촉일로부터 7일 이내에 심사위원을 선정하고, 논문심사를 의뢰 받은 심사위원은 제1차 심사의 경우 심사수락일로부터 14일 이내, 제2차 심사인 경우 7일 이내에 심사를 완료하여야 한다.
② 편집인 및 편집위원의 판정은 심사결과 접수일로부터 7일 이내에 완료하여야 한다.
③ 심사위촉 후 14일이 지나도록 심사수락을 하지 않는 경우에는 다른 심사위원으로 변경할 수 있다.
④ 심사위원의 심사수락 후 1개월이 지나도록 심사가 완료되지 않은 경우에는 편집인 또는 편집위원이 심사위촉을 철회할 수 있다.
⑤ 상기의 규정에도 불구하고 논문접수일로부터 3개월이 소요된 시점까지 심사결과가 접수되지 않은 경우 다음과 같이 시행할 수 있다.
1. 심사위원 중 1인의 심사결과가 접수되지 않은 경우: 해당논문의 편집위원이 3개월 소요 시점으로부터 7일 이내에 심사한다.
2. 심사위원 2인의 심사결과가 모두 접수되지 않은 경우: 해당논문의 편집인 및 편집위원이 3개월 소요 시점으로부터 7일 이내에 심사한다. 단, 편집인이 편집위원을 겸한 경우 편집인 1인의 심사만으로 심사절차를 진행한다.

제6조 (저자수정기한)
① 저자는 학회지 편집장의 심사결과 판정에 따른 논문수정요구를 반영한 수정 논문을 접수일로부터 수정 후 재심일 경우 30일 이내, 수정 후 채택일 경우 14일 이내에 재제출하여야 한다.
② 수정논문 접수가 제출 마감일로부터 60일 이상 지체될 경우 편집위원회는 논문을 철회할 수 있으며, 저자가 그 이후 계속 심사를 받기 원할 경우 다시 투고 하여야 한다.

제7조 (게재 판정)
① 논문게재여부는 심사위원 2인의 심사결과를 검토하여 해당논문의 학회지 편집인 및 편집위원의 종합평가를 받아 학회지 편집장이 최종 결정한다.
② 심사위원 2인 이상이 '채택불가' 판정 한 논문은 학회지에 게재 할 수 없다.

제8조 (특집논문심사)
① 학회지 편집장은 특집논문을 주관할 책임편집인을 학회 임원의 추천을 받아 위촉한다.
② 책임편집인이 학회 이사 또는 부문회장인 경우, 책임편집인의 주관으로 접수된 논문에 대해 2인의 심사위원을 선정하여 심사하며 게재의 판정은 이 규정 제7조에 따른다. 책임편집인이 학회 이사 또는 부문회장이 아닌 경우, 편집위원회에서 논문심사를 담당할 편집인을 선정하여 논문 심사를 주관하도록 한다.

한국정밀공학회지 논문심사규정

제9조 (비밀유지)

① 심사위원은 누구에게도 밝히지 아니한다.

② 저자의 이름은 심사위원에게 밝힐 수 있다.

③ 심사내용은 저자 이외에는 밝히지 아니한다.

제10조 (이의제기)

① 저자가 심사 결과에 대하여 이의를 제기할 경우, 심사위원과 저자 간의 의견 교환은 편집인을 통해서 한다. 심사위원과 저자가 의견교환을 하고자 할 때, 편집인의 중계로 서로 의견을 교환할 수 있다.

② 저자의 재심요구는 원칙적으로 받아들이지 않는다.

제11조 (심사료)

필요 시 편집인, 편집위원에게는 소정의 편집비를, 심사위원에게는 소정의 심사료를 지급할 수 있다.

(사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정

- (사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정 전문: https://jkspe.or.kr/policy/ethics.php
- 규정에서 정의되지 않은 사안은 한국학술단체총연합회의 연구윤리지침을 따르되, 구체적인 판정은 (사)한국정밀공학회 편집위원회의 결정에 따른다.

제 1 장 총칙

제1조(목적)

이 규정은 사단법인 한국정밀공학회(이하 '학회'라 한다)와 관련된 학술활동이 인간의 존엄성과 가치를 침해하거나 사회 공동의 이익을 손상하지 않는 높은 윤리적 수준을 유지하기 위하여, 우리 학회 구성원들이 지켜야 할 윤리적 기준을 제시, 학문 및 사회 발전에 건강하게 기여함에 그 목적이 있다.

제2조(윤리규정 적용범위)

① 이 규정은 학회가 발간하는 모든 학술지 및 학술대회, 심포지엄, 워크샵, 포럼 등 학술활동 전반에 적용한다.
② 본 규정은 위 학술활동과 관련된 저자, 심사위원, 편집위원, 사무국 실무자에게 모두 적용한다.
③ 기타 위에 정하여 지지 않은 범위는 교육부 및 산하기관의 각급 규정을 준용할 수 있다.

제3조(부정행위의 범위)

당 규정에서 제시하는 부정행위는 학회와 관련된 학술활동과 논문 및 발표 등에서 행하여진 위조 · 변조 · 표절 · 부당한 논문저자 표시 행위·이중게재 등을 말하며 다음 각 호와 같다.
① '위조'는 존재하지 않는 데이터 또는 연구결과 등을 허위로 만들어 내는 행위를 말한다.
② '변조'는 연구 재료 · 장비 · 과정 등을 인위적으로 조작하거나 데이터를 임의로 변형 · 삭제함으로써 연구 내용 또는 결과를 왜곡하는 행위를 말한다.
③ '표절'이라 함은 타인의 아이디어, 연구내용 · 결과 등을 정당한 승인 또는 인용 없이 도용하는 행위를 말한다.
④ '부당한 논문저자 표시'는 연구내용 또는 결과에 대하여 과학적 · 기술적 공헌 또는 기여를 한 사람에게 정당한 이유 없이 논문저자 자격을 부여하지 않거나, 과학적 · 기술적 공헌 또는 기여를 하지 않은 자에게 감사의 표시 또는 예우 등을 이유로 논문저자 자격을 부여하는 행위를 말한다.
⑤ '이중게재'란 2개 이상의 학술지에 동일한 내용을 게재하는 행위를 말한다.
⑥ 본인 또는 타인의 부정행위의 의혹에 대한 조사를 고의로 방해하거나 제보자에게 위해를 가하는 행위
⑦ 과학기술계에서 통상적으로 용인되는 범위를 심각하게 벗어난 행위 등
⑧ 기타 위 규정된 부정행위 외에도 우리 학회 자체적으로 조사 또는 예방이 필요하다고 판단되는 행위

제 2 장 저자

제4조(저자의 정직성)

① 저자는 각자가 수행하는 연구에 있어서 정직하여야 한다. 여기서 정직은 아이디어의 도출, 실험에 대한 설계, 실험과 결과의 분석, 연구비 지원, 연구결과의 출판, 연구 참여자들에 대한 공정한 보상 등 연구과정의 전반에 관한 정직을 말한다.
② 연구자는 연구에 있어서의 표절, 사기, 조작, 위조 및 변조 등을 심각한 범죄행위로 간주하고, 이러한 부정이 발생하지 않도록 최선을 다하여야 한다.
③ 저자는 자신의 이익과 타인 또는 타 기관의 이익이 상충하거나, 상충할 가능성이 있을 경우 이를 공표하고 적절히 대응하여야 한다.

제5조(저자의 기준)

논문의 저자가 되기 위해서는 아래 4개의 기준을 모두 충족하여야 한다.
이 기준은 제1저자, 교신저자를 포함한 모든 종류의 저자를 대상으로 한다.
① 연구 논문의 구상, 설계, 데이터의 획득과 분석, 해석에 실제로 기여한 자.
② 논문의 초안을 작성하거나 논문의 중요한 내용을 학술적으로 개선한 자.
③ 출판될 최종 원고를 승인한 자.
④ 논문 내용의 정확성과 진실성에 대한 의문이 있을 경우 적절히 대응하는 것에 대한 책임이 있음을 동의한 자.

제6조(저자의 준수사항)

① 투고한 논문의 연구 수행과정에서 저자는 인권존중, 생명윤리 준수 및 환경보호 등의 보편성을 확보하여야 한다.
② 저자는 투고한 논문에서 연구내용과 그 중요성에 대하여 정확하게 기술하여야 하고, 연구결과를 왜곡하지 말아야 한다.
③ 투고논문은 학술적으로 충분한 가치가 있는 결과와 그것을 뒷받침할 수 있는 논거를 포괄적으로 포함하고 있어야 한다. 이미 발표한 논문과 유사한 결론을 주장하는 논문의 경우에는 새로운 논거에 충분한 학술적인 가치가 있어야만 한다.
④ 공개된 학술자료를 인용할 경우에는 그 출처를 명백하게 밝혀야 한다. 공개되지 않은 논문이나 연구계획서, 또는 개인적인 접촉을 통해서 얻은 자료의 경우에는 그 정보를 제공한 연구자의 동의를 받은 후에 인용하여야 한다.
⑤ 다른 연구자의 연구결과를 참고문헌의 인용 없이 논문의 전부 혹은 일부로 사용하는 것은 표절에 해당하므로 허용되지 않는다.
⑥ 저자가 다른 학술지에 투고 혹은 게재하였거나 투고할 예정인 논문을 학회 발행 학술지에 이중으로 투고하는 행위는 부정한 행위로서 허용되지 않는다. 학술대회나 세미나 등에서 이미 발표한 내용을 학술지 규정에 맞추어 논문으로 작성하여 투고하는 것은 일반적으로 허용되지만, 해당 발표내용에 중요한 연구결과가 추가되어야함을 원칙으로 한다.

⑦ 연구 수행과정에서 중요한 기여를 한 모든 연구자는 공저자가 되어야 하며, 논문의 대표저자는 저자명단에 대해 모든 공저자에게 동의를 얻어야 한다. 행정적, 재정적 지원과 같은 학술외적인 지원이나 연구자료 제공 혹은 단순한 학술적 조언 등에 대해서는 '후기'를 통해서 그 내용을 표기한다.
⑧ 연구에 학술적으로 기여하지 않았거나 기여도가 현저히 떨어지는 자를 학문 외적인 이유로 공저자로 기재하는 것은 학문의 권위를 실추시키는 부도덕한 행위이다.
⑨ 저작권 등과 관련하여 관계자의 승인이 필요한 경우 저자는 논문을 투고하기 이전에 승인을 얻어야 하며, 논문의 출판으로 말미암아 영향을 받을 수 있는 계약 및 소유권의 분쟁이 발생하지 않을 것임을 확인하여야 한다.

제 3 장 학회 구성원의 역할과 책임

제7조(편집위원 준수사항)

① 편집위원은 저자의 성별, 나이, 인종, 소속기관 또는 저자와의 개인적 친분 등에 따른 편견 없이 심사논문에 대한 판정업무를 정해진 규정에 따라 공정하고 객관적으로 수행하여야 한다.
② 편집위원은 투고된 논문에 대한 심사위원의 심사결과를 바탕으로 일관된 기준으로 논문의 재심 여부나 게재 여부를 결정하여야 한다.
③ 투고논문의 연구분야에 대한 편집위원의 지식이 부족하여 심사결과를 판정하는데 곤란함이 있다고 판단될 경우에는 해당 분야에 전문적인 지식을 가진 자로부터 자문을 받을 수 있다.
④ 편집위원은 심사과정에서 취득한 정보를 다른 사람에게 공개하거나 유용하지 않아야 한다. 학술지가 출판되기 전에는 저자의 동의 없이 해당 논문의 내용을 인용하는 행위도 허용되지 않는다.
⑤ 편집위원은 저자와 심사위원의 비윤리적인 행위를 감시할 의무를 가지며, 윤리적으로 부적절한 행위가 발견될 경우 이를 지체 없이 편집장에게 보고하여 조사와 함께 필요에 따라 적절한 징계가 이루어질 수 있도록 하여야 한다.
⑥ 편집위원은 투고된 논문이 자신과 직접적인 이해관계가 있는 논문일 경우, 편집인에게 보고하여 다른 편집위원이 해당 논문을 담당하게 하여야 한다.
⑦ 편집위원이 담당 업무를 신속하게 처리하지 못할 사유가 발생할 경우 학회 사무국 혹은 해당 편집인에게 보고하는 것이 바람직하다.
⑧ 투고논문이나 심사과정에서 비윤리적인 행위가 적발되거나 비윤리적 행위에 대한 탄원이 있을 경우 편집인은 그 사안의 비중을 판단하여 필요할 경우 관련분야 편집위원들로 조사위원회를 구성하여야 하며, 편집위원회는 조사위원회에서 작성된 보고서를 바탕으로 해당 행위자에 대한 징계를 결정하고, 기 게재된 논문이 관련되었을 경우 해당 논문의 게재를 소급하여 취소할 수 있다.

제8조(심사위원 준수사항)

① 심사위원은 저자의 성별, 나이, 인종, 소속기관 또는 저자와의 개인적 친분 등에 따른 편견 없이 심사논문을 일관된 기준으로 공정하고 객관적으로 심사하여야 한다. 완벽하게 검증되지 않은 개인의 학술적 신념이나 가정에 근거한 심사는 배제하여야 한다.
② 심사위원은 심사논문에 대한 비밀을 보장하기 위해 심사과정에서 취득한 정보를 다른 사람에게 공개하거나 유용하지 않아야 한다. 논문집이 출판되기 전에는 저자의 동의 없이 해당논문의 내용을 인용하는 행위도 허용되지 않는다.
③ 심사위원은 전문 지식인으로서의 저자의 인격을 존중하여야 한다. 개인적이고 주관적인 평가나 불쾌한 표현을 자제하고 학문적으로 겸손한 자세에서 객관적인 심사의견서를 작성하도록 노력하여야 한다. 심사논문에 대한 자신의 판단과 보완이 필요하다고 생각되는 내용을 그 이유와 함께 상세하게 명시하여야 한다.
④ 심사위원의 개인적인 목적을 위하여 저자에게 추가 자료나 해명을 요구하는 것을 금지한다.
⑤ 이미 다른 학술지에 공개된 논문의 내용과 유사한 내용이 심사논문에 인용 없이 포함되었을 경우에는 편집위원에게 그 사실을 상세하게 알려주어야 한다.
⑥ 심사 의뢰된 논문과 직접적인 이해관계가 있거나 자신의 전공분야가 투고된 논문을 심사하기에 적합하지 않다고 판단되면 담당 편집위원에게 지체 없이 그 사실을 통보하여 다른 심사위원을 선정할 수 있도록 하여야 한다. 아울러, 기한 내에 심사를 마치지 못할 사유가 있을 경우 편집위원에게 이를 통보한다.

제 4 장 검증 절차와 기준

제9조(윤리위원회)

① 우리 학회는 학술활동 윤리 위반 및 의심사례 발생 시 윤리위원회(이하 '위원회'라 한다)를 구성, 그 진위를 조사할 수 있다.
② 위원회 구성 및 직무
1. 위원회는 위원장 1명과 위원 5명으로 구성한다.
2. 위원장은 학술담당 부회장이 하며, 위원은 이사회에서 선출, 회장이 임명한다.
3. 위원장과 위원의 임기는 1년으로 1월 1일부터 12월 31일까지로 하며, 연임이 가능하다.
4. 위원장은 위원회를 대표하고 학회의 윤리에 관한 업무를 총괄한다.

제10조(윤리위원회 기능)

위원회는 다음의 내용으로 활동한다.
① 연구윤리 수립 및 추진
② 연구 부정행위의 예방과 방지
③ 연구 부정행위 심의 및 의결
④ 부정행위자에 대한 제재내용 결정 및 이사회에 결과보고
⑤ 기타 연구 윤리의 개선 및 증진에 관한 사항

(사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정

제11조(윤리위원회 소집 및 의결)

① 위원회는 위원장이 필요에 따라 소집하며, 위원 과반수의 출석으로 개최하고 출석위원 2/3의 찬성으로 의결한다.
② 의결된 내용은 부정행위 의심자(피제소자)에게 통보하고 15일 이내에 서면으로 소명 의견을 받아야 한다.
③ 위원회에서는 부정행위 의심자로부터 받은 소명자료를 검토하거나 필요 시 의견을 청취하여 최종 의결토록 한다.
④ 의결된 내용은 이사회에 보고하여 최종 결정한다.
⑤ 위원장이 필요하다고 판정할 경우, 외부 인사나 위원이 아닌 자의 의견을 청취할 수 있다.
⑥ 위원회에서 참가자 발표내용 및 회의내용은 비공개를 원칙으로 한다.

제12조(연구 부정행위의 제보)

① 연구 부정행위의 제보는 육하원칙에 따라 관련 자료를 첨부하여 서면으로 제출하여야 한다. 단, 익명제보라 하더라도 제보의 육하원칙이 명백한 제보의 경우, 위원회에서 조사개시에 대한 검토를 할 수 있다.
② 학회는 제보자가 부정행위 신고를 이유로 불이익, 차별, 부당한 압력 또는 위해 등을 받지 않도록 노력한다.
③ 제보자의 신원에 관한 사항은 정보공개의 대상이 되지 않으며, 신원이 노출되지 않도록 최선의 조치를 취한다.
④ 제보자가 부정행위의 신고 이후에 진행되는 조사 절차 및 일정 등에 대하여 알고자 할 경우 학회는 이에 성실히 응하여야 한다.
⑤ 제보 내용이 허위인 줄 알았거나 알 수 있었음에도 불구하고 이를 신고한 제보자는 보호 대상에 포함되지 않는다.

제13조(연구 부정행위에 대한 제재 및 사후조치)

① 연구 부정이 확인된 저자에게는 위원회 결정에 따라 부정행위의 경중을 고려하여 다음의 제재를 선택하여 가할 수 있다.
   1. 해당 발표연구물에 대한 학회 간행물에 게재취소
   2. 5년간 학회 발행 학술지에 투고금지
   3. 5년간 학회 학술대회 발표금지
   4. 해당 논문이 이미 출판된 경우에는 해당 학술지에 게재 취소를 공지하고, 부정행위자 소속기관에 부정행위 내용 통보
   5. 학회 회원자격 박탈
② 제보자가 고의로 허위제보를 하였을 경우 위원회의 결정에 따라 연구 부정행위자 수준과 동일한 제재를 가할 수 있다.

제14조(피조사자 권리 보호)

① 피조사자는 제보 또는 학회 및 관련기관의 인지에 의하여 부정행위의 조사 대상이 된 자 또는 조사 수행 과정에서 부정행위에 가담 한 것으로 추정되어 조사의 대상이 된 자를 말하며, 조사과정에서의 참고인이나 증인은 이에 포함되지 아니한다.
② 학회는 검증과정에서 피조사자의 명예나 권리가 부당하게 침해되지 않도록 주의하여야 한다. 또한 결과가 확정되기 이전까지는 이의 제기 및 변론의 기회가 동등하게 주어져야 하며, 관련절차를 사전에 알려주어야 한다.
③ 부정행위에 대한 의혹은 판정 결과가 확정되기 전까지 외부에 공개되어서는 아니 된다. 다만, 공공의 복리 등 사회 통념에 중대한 위험사항이 발생할 경우는 해당되지 아니한다.
④ 피조사자는 부정행위 조사·처리절차 및 처리일정 등에 대해 학회에 알려줄 것을 요구할 수 있으며, 학회는 이에 성실히 응하여야 한다.

제15조(조사의 기록과 정보의 공개)

① 위원회는 조사 과정의 모든 기록을 음성, 영상, 또는 문서의 형태로 작성한 조사결과 보고서를 반드시 5년 이상 보관하여야 한다.
② 조사결과 보고서 및 조사위원 명단은 판정이 끝난 이후에 공개할 수 있다.
③ 조사위원·증인·참고인·자문에 참여한 자의 명단 등에 대해서는 당사자에게 불이익을 줄 가능성이 있을 경우 공개하지 않을 수 있다.

제16조(조사결과의 보고)

① 위원회는 조사의 결과와 내용을 조사의 종료 및 판정 후, 접수일 기준 6개월 경과 이전에 심의 내용을 확정하여 이사회에 보고한다.
② 결과보고서에는 다음 각 호의 사항이 반드시 포함되어야 한다.
   1. 제보의 내용
   2. 조사의 대상이 된 부정행위
   3. 조사위원회의 조사위원 명단
   4. 해당 연구에서의 피조사자의 역할과 부정행위의 사실 여부
   5. 관련 증거 및 증인
   6. 제보자와 피조사자의 이의제기 또는 변론 내용과 그에 대한 처리결과
③ 연구 부정행위에 대한 최종결과가 확정되기 전에는 외부에 공개되어서는 안 된다.

한국정밀공학회지(JKSPE) 연구윤리 및 저작권 동의서

논문 제목(국문):

논문 제목(영문):

저자명(전체):

소속:

***책임저자 ORCID:**

저자(들)는 위 논문이 한국정밀공학회지에 게재되기를 희망하며 아래와 같은 사항들에 대하여 확인하고 동의합니다.

1. 저자(들)는 상기 제목의 논문이 한국정밀공학회지에 게재될 경우 저작권을 한국정밀공학회에 양도하며, 한국정밀공학회는 위 논문에 대한 포괄적이고 독점적인 권리를 가집니다.
2. 저자(들)는 위 논문이 다른 연구자들의 저작권 및 어떠한 권리들도 침해하지 않았으며, 이 논문에 포함된 다른 인쇄 및 전자출판 물의 내용/표/그림들에 대한 합법적인 저작권 소유주(자, 기관)로부터 사용허가를 받았습니다.
3. 저자(들)는 위 논문의 작성과 연구에 실질적인 기여를 하였으며, 위 논문의 작성과 내용에 대한 책임이 있습니다.
4. 저자(들)는 위 논문에 대한 인쇄 및 전자 출판물의 일부를 저자(들)의 연구결과 보고 및 논문게재/발표에 수정 후 재사용/출간하고자 할 때에는 무료로 사용할 수 있습니다. 이 경우 이 같은 사실과 타당한 이유를 한국정밀공학회에 알려야 하고, 위 논문을 해 당 연구결과 보고 및 논문/발표자료에 정확히 인용하며 적절한 저작권을 명시하여야 합니다.
5. 저자(들)는 위 논문이 과거에 어떠한 학술지에도 출판된 적이 없으며, 현재 다른 학술지에 게재를 목적으로 제출되었거나 제출할 계획이 없습니다.
6. 저자(들)는 한국정밀공학회의 윤리규정에 있는 한국정밀공학회의 학술활동 윤리규정을 준수합니다. 또한, 중복 출판이나 표절 예방을 위해 CrossRef 확인에 동의합니다.
7. 책임저자는 위 논문의 공동저자들이 1항-6항의 사실들을 인식하고 있으며, 위 6가지 사항들에 대하여 동의합니다.
8. 한국정밀공학회는 저자(들)가 위 7가지 사항에 동의하지 않았을 경우, 위 논문의 출판을 지연시키거나 중지시킬 수 있는 권리를 가집니다.
9. 전체 저자들은 위 논문의 저작권과 일체 권리 양도에 관한 권한을 책임저자에게 일임하며, 책임저자는 전체 저자들을 대표하여 저작권을 양도합니다.

*책임 저자: 논문심사과정에서 교신저자의 역할을 수행함과 아울러 논문의 학술지 게재 시 저자들을 대표하여 저작권에 대한 일체의 책임을 담당하는 저자

성명 _____ **서명** _____

날짜 _____

전자 문서에 디지털 서명을 하시면 자필 서명과 동일한 효력이 인정됩니다. 자필 또는 디지털 서명 중 원하시는 방식으로 서명해주시기 바랍니다.

한국정밀공학회지(Journal of the Korean Society for Precision Engineering) 사무국
서울특별시 중구 중림로 50-1, 12층(만리동, SKY1004빌딩); Fax: +82-2-518-2937; Phone: +82-2-518-2928; E-mail: paper@kspe.or.kr

(사)한국정밀공학회 소개 및 활동현황

설립목적

이 법인은 사회일반의 이익에 기여하기 위하여 공익법인의 설립운영에 관한 법률의 규정에 따라 정밀공학에 관한 학문 및 기술의 체계화를 도모하여 국가 산업 발전에 기여함을 목적으로 한다.

회원(사) 구성

1. 특별회원: 정밀공학 분야와 관련 있는 단체로서 본회의 목적에 찬조하는 자
2. 찬조회원: 개인 또는 단체로서 본회의 목적에 찬조하는 자
3. 정 회 원: 정밀공학에 관하여 학식과 경험이 있는자

관련정부기관과의 관계

1. 교육과학기술부 산하: 사단법인 설립 허가
2. 한국과학기술단체총연합회: 정회원
3. 특허청: 학술단체 지정 받음
4. 한국연구재단, 한국과학기술단체총연합회: 연구 활동 지원

주요활동현황

1. 논문 발표회(학술대회): 연 2회(춘·추계) - 1,600여 편 발표
2. 기술세미나(부문별) 개최: 생산현장과 학술적인 교류 촉진, 미래 산업의 방향 제시
3. 산학연 협동 체계 구축: 기술세미나 개최 및 학술대회
4. JSPE(일본정밀공학회) & TSPE(대만정밀공학회)와 협정
5. ASPE(미국정밀공학회)교류: 학술사업 공동 개최
6. PRESM, ASPEN, ISMTII, ICPT 등 국제학술대회 유치 및 개최
7. 싱가포르, 베트남 과학기술 교류

발간자료

1. 한국정밀공학회지(논문집 발간): JKSPE 연 12회
2. 국제학회지(논문집 발간): IJPEM 연 12회 / IJPEM-GT 연 6회
3. 기술세미나(부문별) Proceeding 발간: 연 5-7회
4. 국제학술대회 Proceeding 발간
5. 춘·추계 학술대회 논문집 발간: 연 2회
6. 국제표준도서번호(ISBN) 또는 국제표준연속간행물번호(ISSN) 부여

발행규정

1. 한국정밀공학회지(JKSPE)는 월간으로, 매월 1일 발행: SCOPUS, DOAJ, KCI 등재지
2. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing은 월간으로, 매월 1일 발행: SCIE, SCOPUS, KCI 등재지
3. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology는 격월간으로, 1월, 3월, 5월(특집호), 7월호, 9월호, 11월 1일 발행: SCIE, KCI 등재지
4. 발행목적: 정밀공학에 관한 학술논문 및 학회 소식 등의 제공, 정밀공학 기술의 체계화를 도모하여 국가 산업 발전에 기여

부문위원회 활동

부문은 정밀가공, 정밀측정, 로봇제어자동화, 스마트생산시스템, 설계 및 재료, 공작기계, 나노마이크로기술, 바이오헬스, 적층제조시스템, 녹색생산기술의 10개 부문이 있으며, 부문별 기술 세미나를 개최

특별회원사 가입

구 분	회비(연)	비고
다이아몬드	300만원 이상	
플래티늄	200만원	학회 발간물 증정
골드	100만원	국내 학술행사 무료등록 등
패밀리	100만원 이하	

(사)한국정밀공학회 소개 및 활동현황

한국정밀공학회상

정밀공학대상
- 학회 발전에 현저하게 공헌한 자

학술상
- 정밀공학 분야에서 창의성을 발휘하여 연구를 계속한 자로서 탁월한 업적을 이룩한 자 중에서 선정

생산기술상, 정밀기술상
- 정밀공학에 관련된 산업분야에서 독창적인 의의를 가지는 제품을 제작한 자 또는 기업체, 연구단체

공로상
- 학회 발전과 운영에 지대하게 기여한 자

Best Editor Award
- 학회 학술지의 발전에 공헌한 편집인(Editor), 편집위원(Member of Editorial Board)

JKSPE, IJPEM, IJPEM-GT, IJPEM-ST Contribution Award
- JKSPE, IJPEM, IJPEM-Green Technology, IJPEM-Smart Technology의 출판에 탁월한 공헌을 한 심사위원(Reviewer)

JKSPE, IJPEM, IJPEM-GT, IJPEM-ST Award
- JKSPE, IJPEM, IJPEM-Green Technology, IJPEM-Smart Technology에 발표된 논문 중 가장 탁월한 가치의 논문 저자

KSPE Young Researcher Award
- 각 부문 젊은 연구자의 활동을 격려의 목적으로 해당 분야의 연구 업적이 탁월하고 유망한 젊은 연구자

특별상

가헌학술상
- 가헌신도재단의 지원으로 가헌학술상을 설정
- 한국정밀공학회지 및 국내외 학술지에 게재된 정밀공학 분야의 탁월한 논문저자 또는 정밀공학 분야 발전에 기여가 현저한 자

현송공학상
- 현송교육문화재단의 지원으로 현송공학상을 설정
- 한국정밀공학회지 및 국내외 학술지에 게재된 정밀기계공학 분야의 탁월한 논문저자 또는 정밀기계공학 분야 발전에 기여가 현저한 자

유정백합학술상
- 학회 초대 2대 회장인 유정 이봉진 회원이 기증한 기금을 바탕으로 유정백합학술상을 제정 및 시행
- FA, CNC, 제어 등을 비롯한 정밀공학 분야에서 탁월한 업적으로 학문발전에 기여한 자

백암논문상
- 백암 함인영 회원이 기증한 기금을 바탕으로 백암논문상을 제정 및 시행
- 한국정밀공학회지 및 국내외 학술지에 게재된 생산공학 분야의 논문저자 중 최우수 논문저자로 하며 해당 논문발표 시 만 40세 이하인 자

Year of Launching

Journal of Korea Society for Precision Engineering was launched by the Korea Society for Precision Engineering in June of 1984. The name was changed to the Journal of the Korean Society for Precision Engineering in December of 1985.

Aims and Scope

Journal of the Korean Society for Precision Engineering (JKSPE) is devoted to publishing original research articles with high ethical standard on all aspects of precision engineering and manufacturing. Specifically, the journal focuses on articles related to improving the precision of machines and manufacturing processes through implementation of creative solutions that stem from advanced research using novel experimental methods, predictive modeling techniques, and rigorous analyses based on mechanical engineering or multidisciplinary approach. The expected outcomes of the knowledge disseminated from JKSPE are enhanced reliability, better motion precision, higher measurement accuracy, and sufficient reliability of precision systems. The various topics covered by JKSPE include: Precision Manufacturing Processes, Precision Measurements, Robotics, Control and Automation, Smart Manufacturing System, Design and Materials, Machine Tools, Nano/Micro Technology, Bio Health, Additive Manufacturing, Green Manufacturing Technology.

Fee

Subscription Fee:
This print copy of the journal is provided free of charge to the members of KSPE.

Publication Fee:
1. Basic fee (up to eight pages): 200,000 won; additional pages: 30,000 won per page.
2. Manuscripts contributed as a result of funded research will be charged an extra 50%.
3. Publication fee is charged only for the papers contain ‘Acknowledgement’ that represent supports of academic research project by th fund of government, institutes or university, etc.
4. Publication fee should be paid within 15 days of the receipt of the publication fee invoice.

Contact Us

[04508] 12F, SKY1004 Bldg., 50-1 Jungnim-ro, Jung-gu, Seoul, Republic of Korea
TEL +82-2-518-2928 / FAX +82-2-518-2937 / paper@kspe.or.kr / https://www.kspe.or.kr
Submission to Journal of Korean Society for Precision Engineering: https://www.editorialmanager.com/jkspe/
Search for Journal of Korean Society for Precision Engineering: https://jkspe.or.kr/

Rules for Submitting and Publishing Papers

Article 1 Purpose

The rules are designed to specify matters related to the submission and publication of papers in Journal of the Korean Society for Precision Engineering (hereinafter referred to as the "Journal") of the Korean Society for Precision Engineering (hereinafter referred to as the "Society").

Article 2 Submitter

The corresponding author and the first author of the submitted paper must be members of the Society. With special permission by the Editor-in-Chief, however, the person can be treated as the exceptional case.

Article 3 Responsibilities and Compliance with Code of Ethics

A. The Authors are responsible for the submitted paper.
B. With regard to their submitted paper, all its authors must comply with 'Code of Ethics for Academic Activities of the Korean Society for Precision Engineering'. When any of the authors violates Code of Ethics for Academic Activities, the Editor-in-Chief may disallow or cancel the publication of the paper and impose disciplinary actions as specified.

Article 4 Scope of Research

The scope of research for the paper shall cover areas of precision engineering such as Precision Manufacturing Processes, Precision Measurements, Robotics, Control and Automation, Smart Manufacturing System, Design and Materials, Machine Tools, Nano/Micro Technology, Bio Health, Additive Manufacturing, Green Manufacturing Technology, and the paper must not have been published in any other publication.

Article 5 Categorization of Submissions

The paper submitted to the Journal falls into one of the categories below, and should be within eight pages, which may be exceeded if need be.

A. Ordinary paper: The paper that shows excellent scholarship, practicality, and applicability.
B. Special paper: The paper that is written in accordance with a special provision for special papers.
C. Other submissions: Forecast, explications, lectures, and other writings.

Article 6 Submission

A. The Paper is accepted anytime and submission date is the day submission is completed at the Society.
B. The paper must be written in compliance of the template specified by the Society to be registered and submitted.
C. The paper that is found not to comply with 'Rules for Submitting and Publishing Papers in Journal of the Korean Society for Precision Engineering' and 'Guidelines for Manuscript Writing' may not be accepted.
D. The submitted paper shall not be returned.

Article 7 Review and Decision to Publish Paper

A. The Editor-in-Chief shall decide whether to publish the paper or not.
B. The review of the paper is conducted by two reviewers recommended by the Editor-in-Chief, and the review and the decision over its publication shall comply with 'Rules for Reviewing Papers for Journal of the Korean Society for Precision Engineering Paper Review Rules'.

Article 8 Copyright

A. The authors shall be responsible for the content of the paper.
B. The author(s) must transfer the copyright for the submitted paper to the Society, and for this purpose, the corresponding author(s) must submit 'Research Ethics and Copyright Transfer Agreement'.
C. The copyright for the submitted paper or other submissions shall lie with the Society and may not be reproduced without authorization from the Society.
D. The author(s) may use part of their paper or other submissions published in the Journal in their other research, provided the published paper is referenced as its source.

Article 9 Disclosure of Materials

The Society may disclose a paper or other submissions in print or as online publications.

Article 10 Manual of Style

A. Writing and editing the paper to be submitted to the Society must comply with 'Guidelines for Manuscript Writing' provided separately.
B. Editorial Board may edit the selected paper so that terms, characters, and orthography may comply with 'Guidelines for Manuscript Writing'.

Article 11 Publication Fees

The author must pay the specified fee for the paper published in the Journal. For the paper that exceeds the specified number of pages, the author must pay the fee for those extra pages. The fee for extra pages shall be decided by the board of directors.

Guidelines for Manuscript Writing

1. Manuscripts should be written according to the format of the Journal (https://www.kspe.or.kr) and should be submitted online (https://www.editorialmanager.com/jkspe/).
2. The manuscript should be organized in the following order: (1) The title in Korean, (2) The title in English, (3) Author names in Korean, (4) Author names in English, (5) Affiliations in Korean and English, and information of corresponding author, (6) Keywords, (7) Abstract, (8) Date of submission, (9) Introduction, (10) Main body (Theory, Experimental, Results, Discussion) (11) Conclusion, (12) Acknowledgements, (13) References, (14) Appendices, (15) Position format
3. A manuscript may be written in Korean or English. If necessary, the original terminology may be provided in parentheses to avoid confusion.
4. The manuscript title must be expressed concisely, preferably in ten words or less, and Keywords must be written in English, with Korean translations in parentheses, and numbering six words or less.
5. The abstract must be written in English and not exceed 200 words. Figures and tables shall not be included in the abstract.
6. Figures and tables shall be numbered in order in the main text, and captions should be written in English. Captions shall be labeled beginning “Fig. 1” for figures and “Table 1” for tables.
7. Arabic numbers and SI units shall be used in principle.
8. References shall be numbered in order of quotation.
   (1) Citation in the main text: First author’s last name with reference number in square brackets. e.g.) Hong [1]
   (2) References shall be written in English at the end of the main body with the following formats.
   - Books: Author names, (Year of publication), Book title, Publisher.
   - Periodic Articles: Author names, (Year of publication), Paper title, Journal name, Vol.(No.), Cited pages.

   e.g.) Hong, K. D., Kim, C. S., (2022), A method to investigate mechanical properties, John Wiley & Sons.
   Hong, K. D., (2022), A method to investigate mechanical properties, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 39(1), 1-18.
9. Appendices shall be formatted in the same way as main body text.

Author’s Check List

1. Are the affiliations of all authors indicated with the correct symbols?
2. Does the manuscript adhere to the style set forth in the template?
3. Are Korean and English titles written in ten words or less?
4. Are keywords written in English with Korean in parentheses, in six words or less?
5. Are all symbols listed with correct nomenclature and proper description?
6. Are all figures containing abscissas and ordinates labeled with the correct symbols and units?
7. Does the manuscript use Arabic numbers and SI units?
8. Is the English abstract within 200 words?
9. Are the captions of tables and figures in English, corresponding to the format?
10. Are appendices formatted in the same way as main body text?
11. Is the manuscript written according to the guidelines of the journal?

Rules for Reviewing Papers

Article 1 Purpose

The Rules are designed to specify matters related to the review of papers submitted to Journal of the Korean Society for Precision Engineering (hereinafter referred to as the "Journal") of the Korean Society for Precision Engineering (hereinafter referred to as the "Society").

Article 2 Submission and Reception

A. The person who wants to submit the paper to the Journal shall use the Society's paper submission system to submit the paper that has been written in compliance with the Society's rules for submitting papers, which the Society shall receive.
B. Notwithstanding the provision of A., the paper may be submitted and received in other ways so long as the Editor-in-Chief approves it.
C. The Society shall basically receive papers that are related to the Society's areas of research. The Editor-in-Chief may refuse to receive the submitted paper, if it is not related to the Society's areas of research or has not fulfilled the requirements. Areas of research are specified in 'Rules for Submitting and Publishing Papers in Journal of the Korean Society for Precision Engineering' and 'Guidelines for Manuscript Writing'.

Article 3 Selection of Reviewers

A. The Editor-in-Chief shall consider the areas for the submitted paper and assign its review to the Editor in the relevant area, and the Editor shall assign the Editorial Board Member in the given area as the review supervising Editorial Board Member.
B. The review supervising the Editorial Board Member shall select and recommend to the Editor-in-Chief who he or she deems fit for the review of the submitted paper.
C. The paper shall have two reviewers while the third reviewer may be appointed, in which case, the paper shall have the maximum of three reviewers. Reviewers shall basically belong to the different institution than the authors of the paper belong to.
D. The Editor-in-Chief shall send the email to the recommended reviewer to confirm the acceptance of the reviewing duty. In case any of the recommended reviewers refuses to serve as the reviewer, the Editor-in-Chief shall ask the relevant The Editorial Board Member to recommend some other candidate.

Article 4 Review Procedure

A. Following the comprehensive review of the paper, the reviewer shall record results of the review supported with objective grounds and make the clear request for revision, if necessary.
B. For the review, the reviewer must choose 'Accept', 'Accept Subject to Minor Revisions', 'Re-Review after Major Revisions', or 'Reject'.

Article 5 Review Period

A. The Editorial Board Member for the Journal must select reviewers within seven days from the appointment of the Editorial Board Member, and the reviewers who are asked to review a paper must complete the review within 14 days from their acceptance of the reviewer's duty for the primary review and within seven days for the secondary review.
B. The ruling by the Editor and the Editorial Board Member must be completed within seven days from the reception of review results.
C. In case the reviewer candidate fails to accept the reviewer's duty for more than fourteen days from the request, the candidate may be replaced with another reviewer.
D. If review results fail to arrive for more than three months from the reception of the paper in contravention of the above provision, the following may be put into action.
   ① If one of the reviewers has failed to deliver review results: The Editorial Board Member for the specific paper shall review it within seven days from the expiry of the three months.
   ② If all of the reviewers have failed to deliver review results: The Editor and the Editorial Board Member for the specific paper shall review it within seven days from the expiry of the three months. If the Editor is the same person as the Editorial Board Member, the Editor alone may perform the review procedures.

Article 6 Deadline for Author's Revision

A. The author must resubmit the revised paper that reflects requests for revisions in accordance with the Editor-in-Chief decision based on review results within thirty days for 'Re-Review after Major Revisions' or within fourteen days for 'Accept Subject to Minor Revisions'.
B. In case a revised paper fails to be submitted for more than thirty days from the submission deadline, the Editorial Board may cancel its publication, and if the author wants a review to continue, he or she must resubmit the paper.

Rules for Reviewing Papers

Article 7 Decision over Publication

A. The Editor-in-Chief shall make a final decision on whether to publish a paper or not by reviewing the results of the review by two reviewers and considering the comprehensive evaluation by the editing director and the Editor for the paper.

B. A paper that has been ruled as 'Reject' by two or more reviewers cannot be published in the Journal.

Article 8 Review of Special Papers

A. The Editor-in-Chief shall appoint a Special Editor for supervising the special paper, with recommendations from the officers of the Society.

B. In case a Special Editor is the Director or the Division Chairman of the Society, the Special Editor shall supervise the selection of two reviewers for the review of the submitted paper and decide whether to publish it solely based on the review results. In case the Special Editor is not the Director or the Division Chairman of the Society, the Board of Editing Directors shall select the Editor for supervising the review of paper.

Article 9 Confidentiality

A. The reviewer shall not disclose his or her assumed status to anyone else.

B. The name of the author may be disclosed to the reviewer.

C. Review results shall not be disclosed to anyone but the author.

Article 10 Objection

A. If the author raises an objection to the review results, the exchange of views between the reviewer and the author shall proceed through the Editor. When the reviewer and the author want to exchange their views, they can do so through the mediation of the Editor.

B. The author's request for the re-review shall not basically be accepted.

Article 11 Review Fee

If necessary, the specified editing fee may be paid to the Editor and the Editorial Board Member, while the specified review fee may be paid to the reviewer.

Code of Ethics for Academic Activities

- Full Text of Code of Ethics for Academic Activities of the Korean Society for Precision Engineering: https://jkspe.or.kr/policy/ethics.php
- For the policies on the research and publication ethics not stated in this instructions, International standards for editors and authors (http://publicationethics.org/international-standards-editors-and-authors) can be applied.

Chapter 1 Overall Rules

Article 1 Purpose

This regulation aims to establish the ethical standard for the members of this institute to comply with and to contribute to the healthy development of academics and society in order for our academic activities related with the Korean Society for Precision Engineering (hereinafter referred to as the "Society") to not infringe the dignity and value of human beings and maintain a high ethical standard that does not damage the benefits of public society.

Article 2 Application Area of Code of Ethics

A. The code applies to the overall academic activities including all academic journals, academic conferences, symposiums, workshops, forums, etc. published and held by the Society.
B. The code applies to all authors, reviewers, Editorial Board Members (hereinafter referred to as "EBM", and hands-on-workers in the service bureau related with the above academic activities.
C. Other items not set forth above may comply with this article, each level of regulations of Ministry of Education and its annex institutions.

Article 3 Scope of Misconduct

Misconduct suggested in this code include forging, falsification, plagiarism, and false indication of the author of the paper in academic activities, papers and presentations related with the society, and are as follows:

A. 'Forging' is the act of creating false data or non-existent research results.
B. 'Falsification' is the act of perverting research content or results by artificially modifying research ingredients, equipment or processes, or arbitrarily modifying and deleting data.
C. 'Plagiarism' is the act of appropriating others' ideas, research contents or results without proper approval or quotation.
D. 'False indication of the author of the paper' is the act of not granting the qualification as an author of the paper without a reasonable cause to a person who contributed scientifically or technically on a research content or result, or granting qualification of an author of the paper to a person who did not contribute scientifically or technically to express gratitude or show respect.
E. 'Duplicate publication' is the act of publishing the same content to two or more academic journals.
F. Activity of intentionally interfering investigation on the doubts of one's own or other's misconduct, or disturbing the informant.
G. Activity that seriously deviates from the scope commonly accepted in the science and technology sector.
H. Activity other than the misconduct set forth above that needs to be independently investigated or prevented by the Society.

Chapter 2 Author

Article 4 Honesty of Author

A. The author shall be honest in research carried out by an individual. Here, honesty refers to honesty in overall research processes including derivation of ideas, designing experiments, analyses of experiments and results, research funds, publishing research results, and fair compensation to research participants.
B. The researcher shall consider plagiarism, fraud, manipulation and falsification during research as serious criminal activities, and endeavor to prevent these misconducts.
C. The author shall announce and properly respond in case of contradiction or the possibility of contradiction of benefits of one's own and others or other institutions.

Article 5 Authorship

It is recommended for every author including the first and corresponding author that authorship be based on the following 4 criteria:

A. Substantial contributions to the conception or design of the work; or the acquisition, analysis, or interpretation of data for the work; AND
B. Drafting the work or revising it critically for important intellectual content; AND
C. Final approval of the version to be published; AND
D. Agreement to be accountable for all aspects of the work in ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Article 6 Compliance of Authors

A. During the research implementation process of the submitted paper, the author shall respect human rights, comply with life ethics, and obtain universality such as environment protection.
B. In the submitted paper, the author shall accurately illustrate the research content and its importance without perverting the research result.
C. The submitted paper shall comprehensively include an academically valuable result and its basis of argument. If the paper asserts for a conclusion similar to an already announced paper, it should be academically valuable for a new basis of argument.
D. If citing a public academic data, its source must be clearly stated. For data obtained from an undisclosed paper, research plan or personal contact, it should be cited after consent from the researcher who provided the information.
E. Using the whole or part of another researcher's research result without citing the reference corresponds to plagiarism and is not allowed.
F. The activity of duplicate publication by an author in the journal issued by the society where the paper is already published or planning to publish in other academic journal is considered misconduct and not allowed. Submitting content already presented in academic conferences or seminars by rewriting in a paper according to the academic journal standard is generally accepted, but it must additionally have an important research result for the relevant presentation.
G. All researchers who made important contributions to research implementation shall become co-authors, and the representative author of the paper must have consents from all co-authors. For outside academic support such as administrative and financial support, provision of research data or simple academic advice shall be indicated in the 'Acknowledgement' for its content.
H. Indicating a person who did not make academic contribution to research or falls short of contribution based on causes outside academics is unethical conduct that defames the dignity of academics.
I. In relation to copyrights, if approval of a person in charge is needed, the author must be granted approval before submission of the paper, and confirm that there will be no dispute of contract or ownership that may be affected by the publication of said paper.

Chapter 3 Roles and Responsibilities of Members of Society

Article 7 Compliance of Editorial Board Member (EBM)

A. The EBM shall fairly and objectively execute the revision process of the paper according to the set regulation without prejudice on the author's gender, age, race, affiliated institution or personal acquaintanceship with the author.
B. The EBM shall determine whether to reconsider or publish the paper based on the consistent standard of the review results for the submitted paper.
C. If it is determined that due to the lack of EBM's knowledge in the research area of the submitted paper, there may be difficulty in judging the result, the EBM may be advised by a person with professional knowledge in the relevant area.
D. The EBM shall not disclose or make use of the information acquired in the review process to others. Before the publication in the journal, it is not even allowed to cite the content of the relevant paper without the consent of the author.
E. The EBM has the responsibility to monitor any unethical activity of the author and reviewers, and when ethically inadequate behavior is discovered; the EBM shall investigate and give proper sanction as required by immediately reporting to the Editor-in-Chief.
F. If the submitted paper has direct interest with the EBM, it should be reported to the Editor so that the relevant paper can be examined by another EBM.
G. In case of reasons that prevent the EBM to promptly process the duty, it is advised to report to the editorial office of the society or the Editor.
H. In case of discovering any unethical activity from a submitted paper or reviewing process, or in case of deprecation on unethical activities, the Editor shall determine the importance of the case, and organize an Investigation Committee with EBM in the relevant area if needed. The Editorial Board determines the level of sanction to the relevant person based on the report by the Investigation Committee, and if the already published paper is related, the publication of the relevant paper may be retracted and cancelled.

Article 8 Compliance of Reviewers

A. The reviewer shall fairly and objectively perform reviewing duty for examining the paper according to the set regulation without the prejudice on the author's gender, age, race, affiliated institution or personal acquaintanceship with the author. Personal academic beliefs that have not been completed, verified or under judgment based on assumption must be eliminated.
B. The reviewer, in order to assure the secrecy of reviewing the paper, must not disclose or make use of information acquired in the process of reviewing to others. Before the publication of the paper, it is not allowed to even cite the content of the relevant paper without the consent of the author.

C. The reviewer must respect the personality of the author as a professional. The reviewer shall endeavor to write the objective reviewer's opinion in an academically modest way by eliminating personal and subjective evaluations and offensive expressions. The reviewer shall state in details the review comments and basis for the comments of the paper under review.

D. It is prohibited to request for additional information or explanation to the author for the reviewer's personal purpose.

E. If the similar content to the paper disclosed in other academic journal has been included in the paper without citation, the EBM should be notified in detail.

F. If the reviewer is in direct interest with the requested paper or it is determined that the reviewer's own professional area is not suitable for examining the submitted paper, the reviewer should immediately notify the EBM in charge so that other reviewers may be appointed. Also, in case of reason for not being able to finish the review within the deadline, it needs to be notified to the EBM.

Chapter 4 Verification Process and Standard

Article 9 Ethics Committee

A. In case of breach of ethics and suspected cases during academic activities, the society may organize an Ethics Committee (hereinafter referred to as "Committee") to investigate the truth.

B. Organization and Duties of Committee

① The Committee shall be composed of one chairman and five members.

② The Vice-President in charge of academic affairs shall be the chairman, and members shall be selected from the board of directors, and appointed by the chairman.

③ The chairman and members shall take office for 1 year from January 1 to December 31 and can be reelected.

④ The chairman shall represent the Committee and take charge of overall duties for ethics of society.

Article 10 Function of Ethics Committee

The Committee shall act in the following manners:

A. Establish and promote research ethics.

B. Prevent and discourage research misconduct.

C. Deliberate and vote on research misconduct.

D. Determine sanctions for wrongdoers and report the result to the board of directors.

E. Improve and enhance other research ethics.

Article 11 Convocation and Voting of Ethics Committee

A. The Committee shall be convened by the chairperson as needed, held in attendance of the majority of members, and resolved by over two-thirds of registered members' agreements.

B. The decision shall be notified to the suspected person (accused) of misconduct, and the explanatory opinion shall be received in writing within 15 days.

C. The Committee shall review an explanatory opinion from the suspected person of misconduct, and hear an opinion if needed before making the final decision.

D. The decision shall be reported to the board of directors for the final decision.

E. If the chairman deems it necessary, opinions by a person other than external personnel or members can be heard.

F. Presented content by participants and details of the Committee shall be undisclosed in principle.

Article 12 Reporting Research Misconduct

A. Research misconduct may be reported in writing with related documents attached according to the five W's and one H. However, even if anonymously reported, if it is clear based on the five W's and one H, the Committee may review the initiation of investigation.

B. The Society shall endeavor not to give any disadvantage, discrimination, unreasonable pressure or damage to the informant for reporting misconduct.

C. The identity of the informant shall not be subject to disclosure, and the best measures shall be taken to prevent identity disclosure.

D. In case the informant wishes to know the investigation schedule and procedure after reporting misconduct, the Society shall respond sincerely.

E. The informant who made the report although it was known or it could be known that the information given is false shall not be subject to protection.

Article 13 Sanctions on Research Misconduct and Follow-up Actions

A. The author whose research misconduct has been confirmed shall be imposed with sanction by selecting from the following considering the severity of the misconduct according to the decision made by the Committee:
   ① Cancel publication of relevant research subject to the Society publication
   ② Prohibit submission of paper to the journal issued by the Society for five years
   ③ Prohibit presentation in the Society academic conference for five years
   ④ If the relevant paper has already been published, notify cancellation of publication in the relevant academic journal, and notify the misconduct to the affiliated institution of the wrongdoer
   ⑤ Cancel membership to the Society

B. If the informant intentionally made a false report, the sanction equivalent to the research misconduct may be given according to the decision of the Committee.

Article 14 Protection of Rights of Examinee

A. The examinee refers to a person who has become the subject of investigation for misconduct due to the report or cognition by the Society or related institution, or a person who has become the subject of investigation by suspecting of taking part in misconduct during the investigation process. The examinee shall not include testifiers or witnesses.

B. The Society shall be careful not to violate the dignity or rights of an examinee during the verification process. Also, until the confirmation of the results, the examinee shall have an equal opportunity for objection or defense, and shall be notified in advance of the related procedure.

C. The suspicion on misconduct shall not be disclosed to the public until the judgment has been confirmed. However, this does not include cases where serious risk may be present to public welfare or social norms.

D. The examinee may request for investigation and processing procedure as well the processing schedule for misconduct to the Society, and said the Society shall respond sincerely.

Article 15 Disclosure of Record and Information of Investigation

A. The Committee shall store the investigation report of the entire investigation process obtained in the form of voice, video or written document for at least 5 years.

B. The report of investigation and list of investigators may be disclosed after judgment has been made.

C. If the list of investigators, witnesses, testifiers, or consultants has the possibility to cause disadvantage to the concerned personnel, it may not be disclosed.

Article 16 Report of Investigation Result

A. The Committee shall report the confirmation of the examined content to the board of directors within 6 months of the submission date after completion and judgment of the investigation.

B. The report of the result must include each of the following items:
   ① Content of information
   ② Misconduct subject to investigation
   ③ List of investigators of Investigation Committee
   ④ The role of the examinee in the relevant research and validity of misconduct
   ⑤ Related evidence and witnesses
   ⑥ Objection or defense by informant and examinee, and its processing result

C. Until the final judgment on the research misconduct, it must not be disclosed to the public.

JKSPE Copyright Transfer Agreement

Manuscript Title (KOR):

Manuscript Title (ENG):

Manuscript Authors (all):

Affiliation:

Corresponding author's ORCID:

Please read this form carefully before signing:

1. The submitting/corresponding authors (hereafter referred to as "authors") warrant that the copyright shall be transferred to the Korean Society for Precision Engineering (KSPE) when the manuscript is accepted, and the KSPE will own the exclusive rights.
2. Authors certify that they have not impinged upon the rights or copyrights of other researchers, and have attained legal copyright to display items from the original copyright owners.
3. Authors certify that they have indeed contributed to the outcomes and writing of their manuscript and are responsible for the contents therein.
4. Authors may use or reproduce part of the published work in an annual report, magazine or another journal. In this case, they should inform the KSPE of the reproduction and cite the work with proper citation information.
5. Authors have never published the same work in any other journal and are not planning to do so.
6. Authors certify that they will abide by the ethics regulations of the KSPE related to academic activities. Authors also agree to CrossRef verification of the manuscript for prevention of duplicate publication and plagiarism.
7. The corresponding author is aware of the items 1-6 and agrees to them.
8. The KSPE will have the right to delay or cancel the publication if authors do not adhere to the above statements.
9. Corresponding author has the full authority to sign the Statement of Copyright Transfer form on behalf of all the co-authors.

Name _____ **Signature** _____

Date _____

A digital signature affixed on an electronic document shall have the same effect as a handwritten signature by the Korean Digital Signature Act. Please select a preferred method to sign this agreement.

Journal of the Korean Society for Precision Engineering (JKSPE) Editorial Office
12F, SKY1004 bldg., 50-1, Jungnim-ro, Jung-gu, Seoul 04508, Republic of Korea
Fax: +82-2-518-2937; Phone: +82-2-518-2928; E-mail: paper@kspe.or.kr

International Journal of Precision Engineering and Manufacturing

Volume 27 · Number 10 · October 2026

REGULAR PAPERS

Cavitation Flexible Microforming Mechanism and Quality Analysis of Complex Micro-Box Components
Y. Sun · W. Meng · F. Li · P. He · J. Pu · Y. Wang **3893**

Rigid/Flexible Medium Combination Superplastic Forming of Industrial 5083 Aluminum Alloy Front Windshield Panel with Large-size and Complex-shape
Z. Du · X. Dai · Y. Zhang · X. Zhang · Z. Zhao · H. Li · G. Wang **3909**

Investigation of Green Nanofluid in Minimum Quantity Lubrication for Broaching
S. Wu · J. Wen · Y. Cui · J. Ni · J. Gu · Z. Rong **3923**

Disturbance Rejection and Robust Tracking Using a Compound Control Approach for RFC Linear Motor Motion Stage
K.H. Yang · H.-J. Ahn **3943**

Development of High-speed Railway Wheel Ultrasonic Inspection System using Pulse-echo and Pitch-catch Technique
Y.-W. Choi · M.-S. Kim · H.-J. Kim · S.J. Kwon · S.-J. Song **3951**

Analytical Optimization of Tetrahedral Mirror Corners as Geometrical Reference for High-Precision Nanopositioning Systems
S. Eisele · J. Belkner · I. Ortlepp · T. Fröhlich **3975**

Miniaturized Optical Measurement System for Five-Degree-of-Freedom Geometric Errors of Linear Axes and Compensating Thermal Deformation in Linear Positioning Axes
H.-H. Chiang · C.-S. Liu · W.-J. Chen · Z.-K. Chen · C.-C. Cheng **3987**

Compliant Positioning of Sphere Head Using Fuzzy Variable Damping Admittance Control for Large-Scale Aircraft Component Assembly
S. Liang · L. Wang · Q. Fang · Y. Wei **3999**

Anthropomorphic Dummy Robot for the Wearable Robot Performance Evaluation
C.-H. Lee · K.-W. Gwak **4015**

Digital Twin-based Sensor-Free Virtual Mapping for Autonomous Mobile Robot Localization
H.-C. Lee · H.-M. Woo · S. Shin **4029**

Advanced Wafer Hotspot Detection through Image Segmentation and Stacked Model
A. Raza · J.C.M. Espinosa · D.L.R. Vargas · M. Shafiq · I. Ashraf **4041**

A Modified GTN Model to Predict the Damage Mechanism of Al–Zn–Mg–Cu Alloy Conical Parts During Warm Spinning
J.-F. Wu · Z.-J. Chen · D. He · Y.C. Lin **4057**

Federated Learning for Privacy-Preserving Quality Prediction in the Globalized Plastic Injection Molding Industry
J.-Y. Kim · S. Lee · J. Yu · J. Lee · S. Ryu **4077**

Development of Tools for Dry Polishing and Wet Polishing of Hard and Brittle Stone Materials
Y. Shen · J. Lu · L. Yang · C. Cui · S. Huang **4095**

Mechanical Analysis of Plate Harmonic Reducer Considering Deformation of Thin-Plate Flex Spline
S. You · E. Sung · D. Kim · J. Kim · J. Park **4113**

Thermal Network Modeling for Battery Tab Laser Welding: Predicting and Mitigating Thermal Damage at Manufacturing Scale
Y. Lee · Y. Lee · C. Han · H. Kim · J. Cho **4135**

Experimentally Supported Nonlinear Finite Element and Topology Optimization Framework for Lightweight Design of a GH60 Cast Iron Steering Knuckle
İ. İnan · C. Yuce **4147**

Optimisation of the Injection Moulding Process for Thick-Walled Parts Using Conformal Cooling Channels and CuBe Alloy Inserts
J. de Carvalho Teixeira Baifus · F. Marin · D. Porto · P.P. de Andrade Jr. · A. Fagali de Souza **4167**

Analysis of Hexagonal Honeycomb-Based Piezoelectric Energy Harvesting Under Random Vibrations: Analytical and Numerical Solutions
Y. Jin · H. An · G. Park · W. Kim · H. Yoon **4191**

Position-Independent Geometric Error Identification and Compensation for Five-Axis Machine Tool Using Projection-Based Fitting Methods
T.-H. Zhang · Z.-W. Jian · M.-S. Tsai **4205**

Modeling and Compensation of Geometric Errors in Heavy CNC Machine Tools Based on Conformal Geometric Algebra
L. Yang · Y. Zhang · M. Li · M. Zheng · P. Zhao **4227**

Numerical Simulation and Mass Transfer Analysis of Ultrasound-Enhanced Metal-Assisted Chemical Etching for Silicon Nanopore Fabrication
X. Chen · X. Zhang · H. Wang · H. Zhang · J. Long · G. Lin · H. Liu · Y. Chen · X. Chen **4247**

Dual-Interface Stabilization Enables Mechanically Robust and Air-Stable Flexible PbS Quantum Dot Solar Cells
H.C. Shim **4263**

High-Resolution Tri-Modal Particle Separation Using a Horizontally Extended Cruciform Microchannel via Newtonian/Viscoelastic Co-Flow
S. Baek · J. Jang · S.J. Lee · Y. Cho **4271**

Gait Simulation Method Using the Damping Characteristics of a Linear Hydraulic Cylinder for Microprocessor-Controlled Knees
H. Shin · S. Park · S. Jung · H. Lee · Y. Chang · H. Choi · J. Park **4287**

Kinematic Analysis of Three Different Reconstruction Techniques for Scapholunate Dissociation: A Cadaveric Biomechanical Study
I.-J. Park · S.-H. Kang · J.-Y. Lee · J.-H. Im · Y.-T. Roh · D.-S. Kwak **4305**

Are Standard High Tibial Osteotomy Strategies Appropriate for Patients With a Discoid Lateral Meniscus?
T.S. Bae · B.W. Jung **4317**

Experimental Image-Based Framework for Quantifying Boundary-Condition Sensitivity in Compression Tests from in-Situ Videos Using SSIM
K.Y. Yu · J.W. Cho · J.S. Park · J.-W. Choi · I.H. Lee **4331**

Multiscale Numerical Simulation and Experimental Study of Laser Cladding of Titanium Alloy Material
Z. Guan · A. Yang · B. Tang · H. Zhou · F. Yu · S. Dong **4347**

Process Research on Laser Ablation Fabrication of Non-equidistant Depth 3D Flow Fields for PEMFC Metal Bipolar Plates
C. Gao · M. Wu · A. Chen · Q. Gu · Q. Sun · M. Gao · Z. Mao **4361**

REVIEW PAPERS

Advancing Strength and Durability of Dissimilar Al/Mg Friction Stir Butt Welds: A Review
R. Maurya · S. Ariharan · P.K. Katiyar **4375**

Research Landscape and Prospects of Bio-Inspired Soft Grippers
M. Gong · E. Lu · Z. Wei · M. Hou · L. Tan · T. Weng · L. Feng · J. Hou **4423**

CORRECTION

Correction: Mechanical Analysis of Plate Harmonic Reducer Considering Deformation of Thin-Plate Flex Spline
S. You · E. Sung · D. Kim · J. Kim · J. Park **4443**

Further articles can be found at link.springer.com

Abstracted/Indexed in *BFI List, Baidu, CLOCKSS, CNKI, CNPIEC, Dimensions, EBSCO Discovery Service, Google Scholar, INSPEC, Japanese Science and Technology Agency (JST), Journal Citation Reports/Science Edition, Korea Citation Index (KCI), Naver, Norwegian Register for Scientific Journals and Series, OCLC WorldCat Discovery Service, Portico, ProQuest-ExLibris Primo, ProQuest-ExLibris Summon, SCImago, SCOPUS, Science Citation Index Expanded (SCIE), TD Net Discovery Service, UGC-CARE List (India), WTI AG, Wanfang*

Instructions for authors for *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* are available at www.springer.com/12541

International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology

Volume 13 · Number 5 · September 2026

REGULAR PAPERS

Evaluation of Sustainability-Oriented Route to Produce CoCrFeNi High-Entropy Alloy Spherical Agglomerates Using Hydrogen Reduction
M. Kim · T. Im · G.M. Mongella · N.M. Bayi · C.S. Lee **2137**

Framework Guided by Environmental Analysis for Comparing Manufacturing Alternatives in Laser Cutting
M. Ramard · M. Miroir · R. Laniel · O. Kerbrat **2149**

Large-field-of-view, high-resolution imaging of microfeatures via geometry-optimized reattachable lens and deep learning-based super-resolution
Y.T. Kim · J.S. Lee · M. Kim · Y.-D. Park · H. Youn · J.G. Ok **2169**

Drilling Performance of Cemented Carbide Microdrill Cutting Edges Prepared by Shear Thickening Polishing
M. Ke · Y. Zhou · Y. Chen · F. Wang · D. Li · L. Shao · J. Wang · B. Lyu **2187**

Integrated Fabrication of Glass Microfluidic Devices Using PCD Microgrinding and Calcium-Assisted Bonding
M.C. Shin · H.J. Choi · S.Y. Kim · B.H. Kim · G.M. Kim **2211**

Thermally and Structurally Robust Design of Through Glass via Arrays Using Multi-objective Optimization and Machine Learning-Based Geometry Prediction
Y.T. Kim · J.S. Lee · J.G. Ok **2223**

Strategy of Cost Reduction in Copper Chemical Mechanical Polishing: Enhancing Removal Rate and Uniformity Via a Novel Slurry Sweep Mode
L. Zhang · H. Ci · X. Lu **2241**

Thermal Behavior in Micro-Grinding of Ti-6Al-4V Using an Environmentally Friendly Nanofluid-Based Air-Flow-Assisted Electrospray Lubrication (AF-ESL)
P.-H. Lee · M. Kim · S. Shin · S.W. Lee **2257**

Investigation of the Machinability Characteristics Using Dry Electrostatic Cooling (DEC) for the Turning Process of SCr420H
J.-H. Choe · S.M. Yang · J.-H. Ha · Y.S. Kang · H.W. Park · J. Kim **2273**

Energy-efficient Conformal Mold Cooling Using Additively Manufactured Microcellular Thermal Metamaterials
C.-K. Park · Y. Choi · S. Kim · C.Y. Park · K. Park **2289**

Impact of Powder Reuse, Laser Scanning Strategies and Heat Treatment on the Microstructure, Mechanical, and Electrochemical Properties of LPBF 316 L Stainless Steel
T. Huang · Y. Wei · S. Yi · J.Y.H. Fuh · H.P. Lee **2303**

The Three-Dimensional Characteristics and Formation Mechanism of Microscopic Pores in Steel-Aluminum Laser Welding
Q. Guan · C. Li · W. Huang **2323**

Study on Fretting Wear Mechanism and Optimization Technology of Aluminum Alloy Clinched Joints
Y. Shi · L. Lei · J. Sun · M. Yan · S. Guo **2339**

Ultra-High-Strength Cross-Tension Metal-Composite Joints via Wobble Angular-Laser-Structured, Injection-Molded Interlocking
S. Hong · J.Y. Choi · S.Y. Chey · J. Lee · D.H. Kim · Y. Wang · S.-H. Ahn **2353**

Non-Calcination Production of Calcium Hydroxide via Plasma-Activated Water for Sustainable Supplementary Cementitious Material
P. Jantra · S. Chaiwithee · K. Kochchapong · T. Keereemasthong · P. Phromyoi · P. Wattanachai **2371**

Early Fault Warning Framework for Offshore Wind Turbine Pitch Systems Using Relief Feature Selection and SSA-Optimized SABiLSTM
Y.-J. Chen · N.-X. Sun · J.-H. Liu **2399**

Low-Temperature O-ring Leak Testing for High Pressure Hydrogen Gas Applications
B.-L. Choi · S.M. Lee · J. Kim · B.R. Lee · U.B. Baek · B.-H. Choi **2421**

Numerical Investigations of Mass Transport Improvement Techniques of Flow Channels for PEMFCs
D.Y. Jung · D.K. Song · N. Kim · J. Son · G.Y. Cho **2435**

Synergistic Interplay Between a Hydrophilic TiO_2-Coated Microporous Layer and Flow Field Architecture for Enhanced Durability of Low-Humidity PEMFCs
B.G. Kang · Y.R. Kwon · K.W. Hong · D.K. Song · H.M. Lee · G.H. Kim · J.G. Park · H.J. Yoo · Y.H. Lee · G.Y. Cho **2453**

Design and Manufacturing of a High-Speed Motorized Spindle: Engineering Challenges and Insights
S.A. Afridi · E. Yuksel · G. Rivera · S.-W. Hong · E. Budak **2473**

Adaptive Energy Optimization Based on Fuel Cell Degradation Prediction for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles
Y. Wang · S. Hou · Z. Jia · J. Gao · D. Hao · H. Chen **2497**

Revealing the Structural Transformation of Biopolymer-Modified Clay Materials Through Microtomography and Hygroscopic Analysis
Y. Trambitski · O. Kizinievč · V. Kizinievič · L. Pavasaryte **2513**

Gold nanoparticles synthesized by laser ablation in saline medium: an assessment of colloidal stability
P.C. Ricardo · C.R. Vanoni · M.J. Piotrowski · D.C. Costa · J. Padrão · A. Zille · V. Satulu · G. Dinescu · Ó. Carvalho · C.L. Jost · F.S. Silva · M.C. Fredel **2527**

Real-Time Structural Health Monitoring with Bayesian Neural Networks: Distinguishing Aleatoric and Epistemic Uncertainty for Digital Twin Frameworks
H. Cho · J. Yu · H. Moon · J. Yoon · J. Lee · J. Park · S. Ryu **2555**

Lean Energy Analysis for Smart Manufacturing: An Interpretable and Scalable Framework for Industrial Energy Modeling
G. Mchale · S. Kapp · H. Beck · J.-K. Choi **2571**

Smart Operation Platform for Railway Rolling Stock Production Using Digital Twin and AI
H. Cho · H. Lee · S.M.M. Sajadieh · H. Yoon · C. Song · J.H. Woo · J.W. Choi · S.D. Noh **2593**

SHORT COMMUNICATION

A Representative Volume Element-Based Approach for Predicting Sintering Shrinkage in Metal Binder Jetting
S.J. Park · S. Cho · S. Jeon · S.K. Moon **2619**

REVIEW PAPERS

Next-Generation Catalysts from Spent Lithium-ion Battery Cathodes: A Sustainable Recycling Paradigm
T. Abedin · M. Mahmud · M.E.M. Soudagar · T.M.Y. Khan · M. Nur-E-Alam **2627**

Mass Customization Through Additive Manufacturing: Review of Technologies, Applications, and Scalability Challenges
Y. Ji · M. Kim · B.J. Lee **2653**

Material Selection and Performance Trends in Triboelectric Nanogenerators (TENG): A Comprehensive Analysis of Electrode and Voltage Outcome
V.D. Vo · N.H. Dao · Q.T. Nguyen · K.R. Kaja · S. Hajra · P.L. Nguyen · A. Hajjar **2681**

Challenges and Innovations in Chemical Mechanical Polishing in the More-than-Moore Era
H. Je · S. Kang · S. Kim **2717**

Towards Sustainable Machining: A Comprehensive Review of Energy-Reduction Strategies in Machine Tools
J. Lee · J.S. Oh · D.Y. Lee **2757**

Current Applications and Advancements in the Manufacturing of Discontinuous Fiber Composites
A. Zaveri · K. Ok · C. Lee · K.D. Humfeld · M. Nielsen · S.-H. Ahn · J. Lee · J.H. Jeon **2803**

Flow Channels-Integrated Porous Media and Foam-Based Gas Diffusion Layer-Less Flow Fields as Next-Generation Strategies for Proton Exchange Membrane Fuel Cells: A Review of Recent Advances
G. Park · S. Yang · J. Baek · D. Kim · J. Youn · Y. Cho · S. Jeong · J. Lim · J. Park · T. Park **2841**

Design Principles and Fabrication Methods for Polymeric Re-entrant Structures for Omniphobic Surfaces
S.M. Kang **2861**

Further articles can be found at link.springer.com

Abstracted/Indexed in *Baidu, CLOCKSS, CNKI, CNPIEC, Dimensions, EBSCO Discovery Service, EI Compendex, Google Scholar, INSPEC, Japanese Science and Technology Agency (JST), Journal Citation Reports/Science Edition, Korea Citation Index (KCI), Naver, Norwegian Register for Scientific Journals and Series, OCLC WorldCat Discovery Service, Portico, ProQuest-ExLibris Primo, ProQuest-ExLibris Summon, SCImago, SCOPUS, Science Citation Index Expanded (SCIE), TD Net Discovery Service, UGC-CARE List (India), WTI AG, Wanfang*

Instructions for authors for *Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech.* are available at www.springer.com/40684

International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Smart Technology

Volume 4 · Number 2 · July 2026

REGULAR PAPERS

Deep Learning-based Welding Quality Evaluation Using Arc Sound Classification in Gas Metal Arc Welding
Mu-Sung Kim · Tae-Hyun Lee · Hee-Seon Bang · Cheolhee Kim **45**

Vibration-based Feature Analysis and Intelligent Tool Wear Prediction for CNC Machines: An Industry 4.0 Approach
Deept Sharma · Sangkee Min **57**

Uncertainty-aware RBF-enhanced Sliding Mode Control for Magnetic Levitation System
Seseung Namgung · Hyeong-Joon Ahn **67**

A Fully Analog Intelligent Servo-valve Amplifier Enabling Wide-band Pressure Control of Pneumatic Actuators
Tae-Gyu Yoon · Jae-Min Shin · Hyeong-Joon Ahn **77**

Machine Learning-based Tool Wear Prediction Using Bolt Type Piezo Sensors
Odong Kwon · Jae-Eun Kim · Kyunghoon Lee · Wonkyun Lee **85**

Sensor-based Prediction of Thermally Induced Lateral Dynamics in Roll-to-roll Web Processing
Sangbin Lee · Junyoung Yun · Youngcheol Jeong · Changwoo Lee **95**

Deep Learning-based Vibration Signal Generation with Frequency-amplitude Variability
Hyungsik Park · Minhyung Lee · Jaejung Park · Hong-Kyun Noh · Seungchul Lee **109**

Magnetically Levitated Rotor Systems: Grey-box Modelling and Model-based Control
Brett Wallace · Matthew Nesbitt · Jihyun Lee **127**

Quasi-static, Rolling and Shear Behaviors of an Auxetic Non-pneumatic Tire with TPMS-based Spokes
Hong-Seok Kim · Do-Yeon Kim · Sang-Hu Park **145**

High-fidelity Virtual Modeling Framework for Outdoor UWB Localization via Real-world Measurements
Jeik Choi · Byeonghyun Lee · Seho Son · JungHun Choi · Ki-Yong Oh **155**

Variance-based Sensitivity Analysis for Efficient Volumetric Error Compensation in 5-axis Machine Tools
Hyeonseo Park · Hyeongjin Seo · Sungtae Kim · Chang Ho Lee · Yangjin Kim **177**

Recent Progress in Mechanical Energy Harvesters for Smart Mobility
Namgyue Ki · Jianming Hu · Kaifu Zheng · Kyungwho Choi **189**

Investigation of Crack Formation in Micro-groove Machining of Silicon Carbide
Ju Hyeon Lee · Gyu Man Kim · Bo Hyun Kim **199**

Reaction Wheel Based Control System to Stabilize Swing Motion of Ropeway Facility Inspection Robot
Hyunbin Park · Baeksuk Chu **209**

Temperature Monitoring Based Drilling Strategy for Defect Reduction in Consecutive CFRP Drilling
Kangwoo Shin · Dongmin Han · Tae-Gon Kim **219**

Data-driven Modeling of Cascading Failures via Bayesian Networks and PageRank Algorithm
Sungeu Chae · Sang Woo Ha · Suk Joo Bae **229**

REVIEW

Electrospun Nanofiber-based Strain Sensors for Wearable Electronics
Jinsol Kim · Seung Hwan Ko **241**

Vibration Sensing for Smart Monitoring of Ultra-precision Manufacturing Equipment: A Review
Hujeong Lee · Jaeyoon Kim · Guseon Kang · Young-Jin Kim **249**

SHORT COMMUNICATION

A Survey on Point Cloud-based 3D Mesh Reconstruction for Large Scale Facilities
Jeehoon Lee · Youlin Yang · Jongguk Park · Duhwan Mun **275**

2026년 제7차 이사회 회의록

◎ 일　자 : 2026년 9월 11일(금)
◎ 장　소 : 학회 회의실
◎ 참석자 : 이상원, 오정석, 김규만, 안형준, 곽문규, 김남근, 김보현, 문두환, 김양진, 김태곤, 이창우, 김영진, 김효영, 손정우, 안지환, 주백석, 신현정, 안상훈, 이원균, 이현욱, 이동윤, 허세곤, 김창주, 박형욱, 송지현, 조정대, 최영재, 김석민, 이광일, 이동훈, 이현택, 권지연, 김무림, 김충수, 박석희, 윤주성, 이현섭, 장진아, 조영삼, 한민우, 김동성, 남정수, 맹상진, 이동진, 장원석, 김호찬, 강현욱, 김산하, 김해진, 박　근, 윤희택, 김종백, 김현준, 박　준, 서진호, 주기남, 최정욱, 전용호, 권석진, 김종혁, 송시한, 조영환, 한국현, 현승민
재적 110명 중 64명(위임19명) 참석

I. 주요보고사항

1. 제2차 평의원회 개최
2. 전임회장 자문회의(워크숍) 개최 보고
3. [기총] 올해의 10대 기계기술 선정 온라인 투표 진행 (~9/23(수))
4. 회원현황(26.9.10 기준) 보고
5. 2026년 8월말 수입 지출(안) 현황 보고
6. IJPEM-ST Editor 위촉(안) 승인: Toru Kizaki (The University of Tokyo (Japan))
7. JKSPE Editor 위촉(안) 승인: 김우균(University of Cincinnati (USA))
8. JKSPE 특별호(Special Issue) 발간 제안 논의
9. 2026년 Journal Awards 후보자 논의
10. 영문지 3종 투고 및 게재규정 개정(안) 검토
11. 저널 4종 심사규정 개정(안) 검토
12. AI 윤리 규정(안) 신설
13. PRESM2026 Full paper 심사 현황 보고
14. JKSPE 외부기관 우수논문상 후보자 추천에 따른 수상자 보고
15. 2027년 OUP-OA 전환준비 회의 진행사항 보고
16. 2026 추계학술대회 제1차 조직위원회 (2026.12.2-12.5, 창원CECO)
17. PRESM 2027 제1차 Kick-off Meeting
18. 교육위원회 – 제11차 창의경진대회 개최
19. 정밀가공부문 산하 한국연마기술연구회 제10회 기술교류회 개최 결과 보고
20. 정밀측정 제9회 정밀측정 워크숍 개최 결과 보고
21. 스마트생산시스템 부문위원회 회의 결과 보고

II. 승인 및 의결사항

1. 신입회원 인준(안)
2. 바이오헬스부문 2026년 워크숍 개최(안)
3. 영문지(IJPEM, IJPEM-GT, IJPEM-ST) 3종 투고 및 게재 규정 개정(안)
4. KSPE 국내/국제 학술지 4종 심사규정 개정(안)
5. 학술활동 윤리 규정 중 AI 윤리 규정 제정(안)

신입회원인준명단

• 정회원 •

회 원 번 호	이 름	소 속	회 원 번 호	이 름	소 속
202611652	이 진 광	경 상 국 립 대 학 교	202611654	신 용 우	한 국 전 자 기 술 연 구 원

• 학생회원 •

회 원 번 호	이 름	소 속
202611653	나 승 채	서 울 과 학 기 술 대 학 교

2026년 사단법인 한국정밀공학회 임원

회장
이상원(성균관대학교)

수석부회장
오정석(한국기계연구원)

부회장
김규만(경북대학교) 안형준(숭실대학교) 김호찬(국립경국대학교) 류상문(㈜DN솔루션즈) 박상후(부산대학교)
성대운(현대자동차㈜) 이영수(삼성전자) 이인환(충북대학교) 최영재(한국생산기술연구원)

감사
이동원(전남대학교) 현승민(한국기계연구원)

총무이사
곽문규(경북대학교) 김남근(서강대학교) 김보현(숭실대학교) 문두환(고려대학교)

재무이사
고승환(서울대학교) 김양진(부산대학교) 김태곤(한국생산기술연구원) 이창우(건국대학교)

편집이사
강봉철(국민대학교) 강현욱(UNIST) 김동립(한양대학교) 김산하(KAIST) 김석민(중앙대학교)
김영진(KAIST) 김해진(연세대학교) 김효영(한국공학대학교) 박근(서울과학기술대학교) 박영빈(UNIST)
박인규(KAIST) 손정우(국립금오공과대학교) 안지환(POSTECH) 오기용(한양대학교) 윤준영(연세대학교)
윤헌준(숭실대학교) 윤희택(KAIST) 이광일(경일대학교 이동훈(숭실대학교) 이윤석(서울대학교)
이현택(인하대학교) 이호원(서울대학교) 정구현(울산대학교) 정훈의(UNIST) 주백석(국립금오공과대학교)
진종한(㈜미터랩) 천두만(울산대학교) 추원식(경상국립대학교)

사업이사
강윤정(제주대학교) 강태준(인하대학교) 권지연(동국대학교) 김무림(한국로봇융합연구원) 김종백(연세대학교)
김진호(영남대학교) 김충수(Eloi MateriaLs (EML)) 김현준(경북대학교) 박석희(부산대학교) 박용재(강원대학교)
박준(한국광기술원) 서진호(국립부경대학교) 송용남(고려대학교) 신현정(KAIST) 안상훈(한국기계연구원)
윤주성(경남대학교) 이문구(아주대학교) 이봉기(전남대학교) 이원균(충남대학교) 이지혜(한국기계연구원)
이현섭(동아대학교) 이현욱(한국철도기술연구원) 임지석(영남대학교) 장진아(POSTECH) 정영훈(경북대학교)
정재일(국민대학교) 조영삼(원광대학교) 주기남(조선대학교) 최정욱(중앙대학교) 한민우(동국대학교)

기획홍보이사
김동성(POSTECH) 류시형(전북대학교) 이동윤(한국생산기술연구원) 이주연(서울과학기술대학교) 허세곤(한국기계연구원)

국제이사
김미소(KAIST) 김영범(한양대학교) 김창주(한국기계연구원) 남정수(한국생산기술연구원) 노준석(POSTECH)
맹상진(홍익대학교) 박형욱(UNIST) 송지현(단국대학교) 이동진(건국대학교) 전용호(아주대학교)
조영태(국립창원대학교) 차석원(서울대학교) 홍성태(울산대학교)

대외협력이사
권석진(한국철도기술연구원) 김건희(국립한밭대학교) 김민찬(㈜DN솔루션즈) 김종혁(위아공작기계㈜) 송시한(㈜와이지-원)
심창섭(한국산업기술기획평가원) 이강재(㈜DN솔루션즈) 이재열(한국로봇융합연구원) 장원석(한국기계연구원) 조영환(LIG디펜스&에어로스페이스)
조정대(한국기계연구원) 최정오(LG전자) 한국현(㈜삼영기계)

특별회원사

다이아몬드
신도리코㈜ ㈜DN솔루션즈 LIG디펜스&에어로스페이스 ㈜스맥 위아공작기계㈜
㈜이수페타시스 ㈜케이씨텍 한국화낙㈜ 한화에어로스페이스㈜ 현대자동차㈜
화천기공㈜

골드
㈜마리알로 ㈜어드밴테크코리아 ㈜에이스나노켐 ㈜엔도로보틱스 지앤피테크놀로지㈜
㈜프로토텍

실버
㈜심팩 ㈜와이지-원 ㈜웨이퍼펩 ㈜하이쏠라 한국공작기계산업협회

패밀리
LPKF Korea QED Technologies ㈜넥스페이스 더싸인 디케이에스에이치코리아㈜
라온엑스솔루션즈㈜ 라이트런㈜ 리파인㈜ ㈜매이드 맥스트레이딩
㈜미디어스트리트 ㈜벡터바이오 브루커코리아㈜ 세움트로닉스 ㈜스팀솔루션
㈜아이엠에스코리아 ㈜앨리텍 에이비씨무역 ㈜에이엠코리아 ㈜에임즈
㈜위즈옵틱스 ㈜유니오텍 ㈜인사이드테크 ㈜제이엔텍 참테크
㈜큐빅테크 ㈜크렐로 ㈜테스트원 ㈜티앤알바이오팹 하비스탕스㈜
㈜하스피 ㈜한국데베소프트

Editor-in-Chief

김보현
숭실대학교
bhkim@ssu.ac.kr

Editors

강봉철 국민대학교
강성묵 대구가톨릭대학교
강현욱 UNIST
고승환 서울대학교
곽문규 경북대학교
김남근 서강대학교
김동성 POSTECH
김무림 한국로봇융합연구원
김산하 KAIST
김양진 부산대학교
김우균 University of Cincinnati
김창주 한국기계연구원
김효영 한국공학대학교
문두환 고려대학교
박민수 서울과학기술대학교
박정재 ㈜미터랩
박형욱 UNIST
손정우 국립금오공과대학교
안지환 POSTECH
이광일 경일대학교
이창우 건국대학교
이창환 서울과학기술대학교
이현섭 동아대학교
이현욱 한국철도기술연구원
전용호 아주대학교
정구현 울산대학교
조영학 서울과학기술대학교
주백석 국립금오공과대학교
진종한 ㈜미터랩
천두만 울산대학교
추원식 경상국립대학교
황지홍 서울과학기술대학교

Members of Editorial Board

맹상진 홍익대학교
박석희 부산대학교
안다훈 서울과학기술대학교
안상훈 한국기계연구원
윤해성 한국항공대학교
윤헌준 숭실대학교
이봉기 전남대학교
이원균 충남대학교
이현택 인하대학교
이호원 서울대학교
장진아 POSTECH
주기남 조선대학교
최동휘 경희대학교
최영만 아주대학교
최정욱 중앙대학교
최진승 건국대학교
한민우 동국대학교
허세곤 한국기계연구원
김갑용 Iowa State University
김범준 University of Tokyo
민상기 University of Wisconsin-Madison
Simon Park VinUniversity
Patrick Kwon San Diego State University

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 43, NUMBER 10/October 2026

ISSN 1225-9071 (Print) / 2287-8769 (Online)

월간 • 제43권 제10호 [통권 제427호] • 비매품

등록일자 1987년 4월 25일
등록번호 서울 라 07037
인 쇄 일 2026년 9월 25일
발 행 일 2026년 10월 1일
발 행 인 이상원
편 집 인 김보현
인 쇄 한림원
편 집 한림원
발 행 소 사단법인 한국정밀공학회
[04508] 서울 중구 중림로 50-1(만리동 1가 51-1 SKY1004빌딩) 12층 / FAX (02)518-2937 / http://www.kspe.or.kr
사무국장 김영심 / (02)518-0722 / kspe@kspe.or.kr
JKSPE(한국정밀공학회지), IJPEM-ST 김소진 / (02)518-2928 / paper@kspe.or.kr, ijpem.st@kspe.or.kr
IJPEM(GT) 정혜림 / (02)518-0723 / ijpem@kspe.or.kr
국내학술대회(춘 · 추계) / (02)393-0725 / conf@kspe.or.kr
국제학술대회(PRESM) 김영심 / (02)6925-0710 / presm@kspe.or.kr
회계 최나영 / (02)393-0724 / account@kspe.or.kr

한국정밀공학회지(JKSPE)

JOURNAL OFTHE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING



Indexed in SCOPUS, DOAJ, KCI

SCOPUS(2017~), DOAJ(2026~), KCI(2001~) 등재지
1984년 창간, 연간 12회, 매월 1일 발행
ISSN 1225-9071(Print) / 2287-8769(Online)

INTRODUCTION

1. 분기마다 특정 주제에 따른 특집논문 구성
2. 국내 · 국제 학술대회 발표 논문 중 우수 논문 선정 후 게재
3. 일반 투고 논문

PUBLICATION FEE

	국문 투고	영문 투고
기본 8페이지	200,000원	면제
1페이지 추가	30,000원	면제
후기(사사) 추가	총 금액의 50% 증가	면제

* 국내외 학술대회 발표 논문, 후기(사사)가 없을 경우 게재료 면제

ADVERTISEMENT

관련 기업 및 연구기관의 연구성 또는 제품 홍보, 각 공과대학 도서관 · 연구소 · 관련 산업체에 배포

학회지 광고 게재 비용		특별광고료(연 6회 이상)		광고 필름	비고사항
뒷표지	750,000원	6회	정가의 30%	A4(210x297 mm) 제작	* 앞쪽은 광고가 불가능합니다.
칼라광고	500,000원	12회	정가의 50%		* 특별회원사: 칼라광고 연간 무료제공 (최대 3회)
흑백광고	250,000원				
홈페이지 배너	월 100,000원				

TOPICAL ISSUE

TOPIC

2022: 재료성형 공정에서의 고효율 금형 기술
2023: 스마트/디지털 헬스케어 기술
2024: 가공된 기능성 재료 기술
2025: 레이저를 이용한 가공 기술
2026: AI 융합 제조로봇 조작 및 자동화 기술AI 융합 제조로봇 조작 및 자동화 기술

IJPEM-ST

INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING-SMARTTECHNOLOGY



2023 New Journal

2023년 창간, 연간 2회, 1월·7월 1일 발행
ISSN 2951-4614(Print) / 2951-6382(Online)

INTRODUCTION

1. Full Open Access
2. Research papers, Short communications, Technical briefs, Position papers, Industry case studies

AIMS AND SCOPE

- Big Data Analytics and Informatics
- Sensors, Instrumentation and Process Monitoring
- Prognostics and Health Management (PHM)
- Industrial Internet of Things (IIOT)
- Industrial Artificial Intelligence
- Digital Twin, Cyber-Physical Systems (CPS) and Metaverse
- Augmented, Virtual and Extended Reality
- Human-Robot Interaction, Augmentation and Collaboration
- Autonomous Things

WEBSITE

www.ijpem-st.org

IJPEM

INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING



2025 Impact Factor: 3.9

SCIE, SCOPUS, KCI 등재지
2000년 창간, 연간 12회, 매월 1일 발행
ISSN 2234-7593(Print) / 2005-4602(Online)

INTRODUCTION

1. Regular paper, Short communication, Review paper
2. 국제 학술대회 발표 논문 중 우수 논문 선정 후 게재
3. 인용, 다운로드 수 높은 논문 시상 및 홍보

AIMS AND SCOPE

- Precision Manufacturing Processes
- Measurements and Control
- Robotics and Automation
- Manufacturings System
- Design and Materials
- Machine Tools
- Nano/Micro Technology
- Bio Health
- Additive Manufacturing

SPECIAL ISSUE

TOPIC

2023: Robots for Manufacturing Processes and Systems
2024: Semi Conductor Manufacturing
2025: IJPEM 25th Anniversary Special Issue
2026: Humanoid Robots and Physical AI and for Manufacturing
2027: Human-Robot Collaboration for Precision Manufacturing: Perception, Interaction Control, and Safety

IJPEM-GT

INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING-GREEN TECHNOLOGY



2025 Impact Factor: 6.6

SCIE, SCOPUS, KCI 등재지
2014년 창간, 연간 6회, 홀수월 1일 발행
ISSN 2288-6206(Print) / 2198-0810(Online)

INTRODUCTION

1. Regular paper, Short communication, Review paper
2. 국제 학술대회 발표 논문 중 우수 논문 선정 후 게재
3. 인용, 다운로드 수 높은 논문 시상 및 홍보

AIMS AND SCOPE

- Energy Saving and Waste Reduction in Manufacturing Processes
- Manufacturing of New and Renewable Energy Devices
- Design and Manufacturing of Green Products
- Materials for Green Manufacturing
- Management and Policy for Sustainable Manufacturing

SPECIAL ISSUE

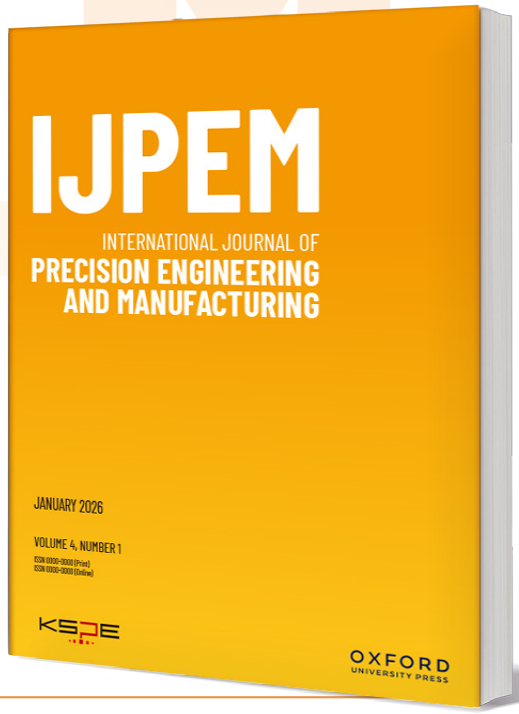
TOPIC

2016: Hybrid Manufacturing
2017: 4D Printing
2018: Sustainable Manufacturing in 4th Industrial Revolution
2019: Energy Harvesting
2020: Green Smart Manufacturing
2021: Soft and Green Manufacturing and Applications
2022: Green Manufacturing Coping with Climate Change and Pandemics
2023: NetZero, Achievable by Manufacturing?
2024: Advanced Manufacturing for ESG
2025: Autonomous Manufacturing with Green Technology
2026: Autonomous Manufacturing for Sustainable Industry
2027: AX-Driven Sustainable and Energy-Intelligent Manufacturing

Open Access

INTERNATIONAL JOURNAL OF

PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING



About IJPEM

IJPEM is published by the Korean Society for Precision Engineering with Oxford University Press as Open Access. The journal has a history of 27 years and aims to disseminate relevant fundamental and applied research works of high quality to the international precision and manufacturing engineering community. The journal is indexed in SCIE (Impact factor 3.9) and downloaded more than 148,000 times a year around the world.

Topics of the Special Issue cover novel research contributions of precision engineering and manufacturing - theories and applications in the field of

Human-Robot Collaboration for Precision Manufacturing: Perception, Interaction Control, and Safety

The potential focus areas to be covered in this Special Issue include, but are not limited to:

- Multimodal perception for industrial HRC: vision, force/torque, and tactile sensing
- Contact-rich manipulation and dexterous task execution in manufacturing environments
- Shared autonomy and human-in-the-loop interaction control
- Learning from demonstration and skill transfer for manufacturing tasks
- Co-adaptive learning, personalization, and lifelong robot skills
- Safety, verification, trust, and deployability in real factory environments
- Case studies in manufacturing cells and industrial environments
- Materials, device architectures, and functionality for Human-Robot interface
- Digital twin and simulation for HRC in manufacturing environments
- Sim-to-Real transfer learning for contact-rich collaborative tasks
- VTLA (vision-tactile-language-action) architectures for precision manufacturing

Guest editors

Jung Woo Sohn (Kumoh National Institute of Technology, Korea)
Youngsu Cha (Korea University, Korea)
Sungryul Yun (Electronics and Telecommunications Research Institute, Korea)
Kwang J. Kim (University of Nevada, USA)
Masashi Konyo (Tohoku University, Japan)

Submission Procedures

Deadline for Submission Date: February 28, 2027
Publication Date: September 1, 2027
Volume, Number: Vol. 28, No. 9

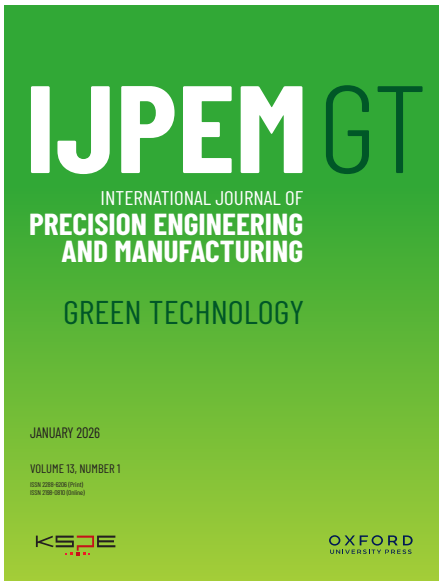
KSPE Korean Society for Precision Engineering

pISSN: 2288-6206 / eISSN: 2198-0810

INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING
GREEN TECHNOLOGY

Open Access

Impact Factor: 6.6 by JCR in 2025



About IJPEM-GT

IJPEM-GT is co-published by the Korean Society for Precision Engineering and Oxford University Press. The journal is published bimonthly as an Open Access journal and its JCR 2025 impact factor is 6.6, which ranks it top 9% (17/184) journal in the category of Engineering-Mechanical and top 20% (14/71) journal in the category of Engineering-Manufacturing.

Topics of the Special Issue cover novel research contributions of "Green" precision engineering and manufacturing - theories and applications in the field of

AX-Driven Sustainable and Energy-Intelligent Manufacturing

The potential focus areas to be covered in this Special Issue include, but are not limited to:

- AI Transformation (AX)
- Energy-intelligent manufacturing
- Sustainable manufacturing systems
- Digital twins for energy optimization
- Autonomous production systems

Guest editors:

Prof. **Beomjoon Kim**
(The University of Tokyo, Japan)

Prof. **Young Beom Kim**
(Hanyang University, Korea)

Prof. **Taehyun Park**
(Soongsil University, Korea)

Prof. **Soonwook Hong**
(Chonnam National University, Korea)

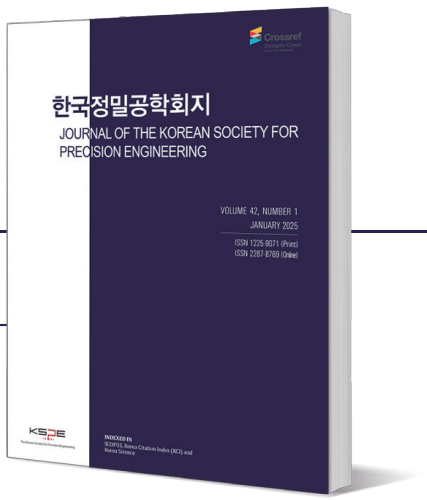
Submission Procedures

Deadline for Submission Date:
November 30, 2026

Publication Date:
May 1, 2027

Volume, Number:
Vol. 14, No. 3

Introducing the New JKSPE Submission System



Journal of the Korean Society for Precision Engineering

Indexed in SCOPUS, DOAJ, KCI

Editor-in-Chief: Bo Hyun Kim
Frequency: Monthly
ISSN: 1225-9071(Print) / 2287-8769(Online)
Submission to JKSPE: https://www.editorialmanager.com/jkspe/
Search for JKSPE articles: https://jkspe.or.kr/

Introduction of Journal

Journal of the Korean Society for Precision Engineering (JKSPE) is devoted to publishing original research articles with high ethical standard on all aspects of precision engineering and manufacturing. Specifically, the journal focuses on articles related to improving the precision of machines and manufacturing processes through implementation of creative solutions that stem from advanced research using novel experimental methods, predictive modeling techniques, and rigorous analyses based on mechanical engineering or multidisciplinary approach. The expected outcomes of the knowledge disseminated from JKSPE are enhanced reliability, better motion precision, higher measurement accuracy, and sufficient reliability of precision systems.

Aims and Scope

The Journal of the Korean Society for Precision Engineering is devoted to publishing original research articles on all aspects of precision engineering and manufacturing. Specifically, the journal focuses on various fields including:

Precision Manufacturing Processes
Precision Measurements
Robotics, Control and Automation
Smart Manufacturing System
Design and Materials
Machine Tools
Nano/Micro Technology
Bio Health
Additive Manufacturing
Green Manufacturing Technology

Award

JKSPE Award
Best Editor Award
Contribution Award

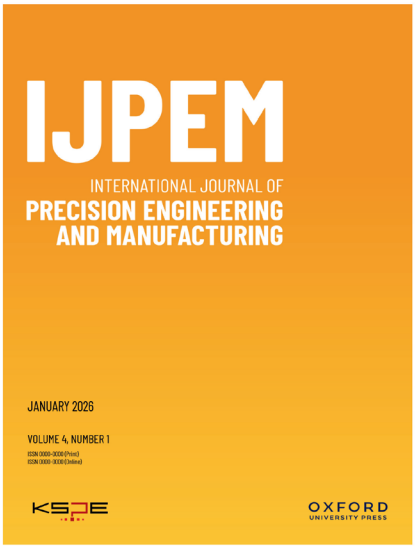
The article processing charge (APC) will be waived for full papers presented at the conference that are written in English and do not include acknowledgment statements.

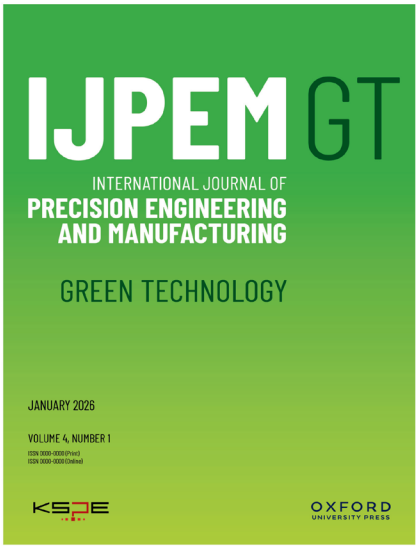
Email: paper@kspe.or.kr | **Tel:** +82-2-518-2928

OXFORD UNIVERSITY PRESS

KSPE
Korean Society for Precision Engineering

The journals of the
Korean Society for Precision Engineering







Discover the high impact journals dedicated to disseminating high-quality fundamental and applied research works in precision engineering and manufacturing. From 1st January 2027 all of the KSPE journals will be fully open access.

Find out more about publishing with the journals

OXFORD UNIVERSITY PRESS

KSPE
Korean Society for Precision Engineering

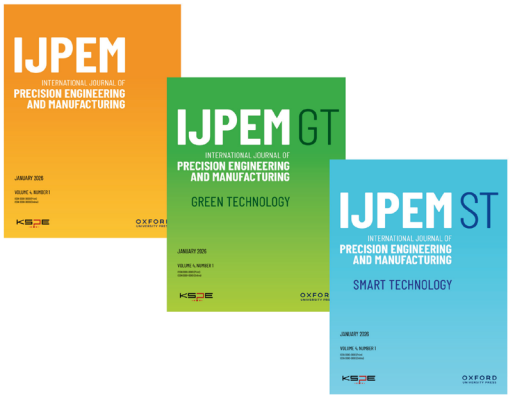
OPEN ACCESS, GLOBAL IMPACT

Advancing Precision Engineering Research Without Barriers

The Korean Society for Precision Engineering is pleased to announce that their three flagship journals will transition to fully open access beginning January 1, 2027.

Why open access?

- ✓ Global accessibility - no paywalls
- ✓ Higher visibility & citation potential
- ✓ Faster dissemination of results
- ✓ Aligned with global open science



Member-Exclusive APC Benefits

Journal	Journal Member APC	Non-member APC
IJPEM	USD 1,000	USD 1,667
IJPEM-GT	USD 1,760	USD 2,200
IJPEM-ST	USD 1,000	USD 1,667

Save up to 40% on APCs as a KSPE member

Member rates apply to Regular or Student Members with active membership at the time of submission.

Find out more about the journals' move to open access

(사)한국정밀공학회

상 훈 안 내

사단법인 한국정밀공학회에서는 매년 정밀공학분야에 탁월한 업적을 이루고
학문과 기술의 발전에 크게 공헌한 회원 및 관련 연구자, 기업 등을 대상으로
다음과 같이 한국정밀공학회상과 외부상을 시상하고 있습니다.

한국정밀공학회상

정밀공학대상, 학술상, 유정백합학술상, 백암논문상, 생산기술상, 정밀기술상, 공로상,
Journals' Awards (Best Paper Awards, Contribution Awards, Journal Awards),
KSPE Young Researcher Awards

외 부 상

가헌학술상, 현송공학상(기계부문), Springer Award (Most Cited Paper, Most Downloaded Paper)

후보자 추천. **매년 9월까지** 수상자 발표. **매년 10월 중순 전후** 시상. **정기총회**(추계학술대회 중 함께 시상)

관심있으신 분들의 많은 참여와 수상이 있기를 바랍니다. 감사합니다.

(사)한국정밀공학회 포상위원회

KSPE 사단법인 한국정밀공학회 Korean Society for Precision Engineering
서울시 중구 중림로 50-1(만리동 1가), SKY1004빌딩 12층 / T. 02-518-0722 / E. kspe@kspe.or.kr

산학프로젝트
참여기업 모집

본 사업은 **기계 산업 경쟁력 강화**를 위한 "**스마트 제조장비용 CNC 시스템**"과 "**첨단제조 정밀기계 부품장비**" 분야 **전문인력을 양성하는 사업**으로 **기업에서 제안한 주제로 대학원생과 공동으로 수행하는** 프로젝트 연구에 참여할 기업을 모집합니다.

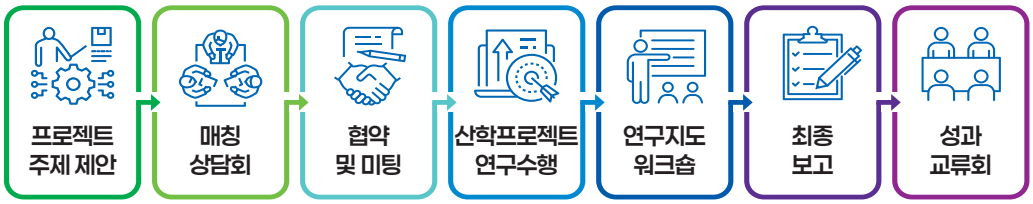
추진목적

기계부품 기업의 애로기술 및 신기술 등에 대한 연구 수요를 대학원(석·박사)의 R&D 인력과 협력하여 산학프로젝트 연구 수행

지원대상

국내 기계부품분야(스마트기계, 정밀기계, 부품장비) 우수기업으로 애로 기술 해결 및 신기술 개발을 위해 선행연구를 필요로 하는 기업

진행절차



지원방법

협회 홈페이지(komma.org) ▶ 주요활동 ▶ KOMMA 알리미 ▶ "전문인력양성" 검색 ▶ "산학프로젝트 전문인력양성 참여기업 신청(첨단제조정밀기계부품장비 & 스마트제조장비용CNC시스템)" ▶ "신청서" 작성 및 제출

참여기업 특전

1. 산학프로젝트 무상수행
2. 기술 컨설팅 무상수행
3. 산학프로젝트 수행 경비 소정지원
   (재료비, 시제품 제작비 등 최대 1,000만원 내)
4. 산학프로젝트 참여 대학원생 취업 연계 등

문의처 Komma 한국공작기계산업협회 산업진흥팀 임정철 차장 ☎ 02-3459-0022 ✉ yim@komma.org



플래그십 전동화 대형 SUV
'IONIQ 9' 판매 개시

HYUNDAI

Bluehands
고객 곁에는 항상 현대자동차 블루핸즈
정비/서비스, 홈투홈 서비스, 긴급출동, 블루멤버스

■ 구입 문의센터 및 고객센터, 긴급출시번 현물 서비스 080-600-6000 ■ 정부 공인 표준연비 ▶ 항속형 2WD (19") 개인승 : 복합 4.3km/kWh (도심 : 4.7km/kWh, 고속도로 : 3.9km/kWh) | CO2 배출량 0g/km | 측정지 정격전압(전류중량) : 610V (180.9Ah) | 공차중량 2,505kg ▶ 항속형 2WD (19") 6인승 : 복합 4.3km/kWh (도심 : 4.7km/kWh, 고속도로 : 3.9km/kWh) | CO2 배출량 0g/km | 측정지 정격전압(전류중량) : 610V (180.9Ah) | 공차중량 2,510kg ▶ 항속형 2WD (21") 개인승 : 복합 4.2km/kWh (도심 : 4.6km/kWh, 고속도로 : 3.8km/kWh) | CO2 배출량 0g/km | 측정지 정격전압(전류중량) : 610V (180.9Ah) | 공차중량 2,560kg ▶ 항속형 2WD (21") 6인승 : 복합 4.2km/kWh (도심 : 4.6km/kWh, 고속도로 : 3.8km/kWh) | CO2 배출량 0g/km | 측정지 정격전압(전류중량) : 610V (180.9Ah) | 공차중량 2,555kg ▶ 항속형 AWD (i-TRAC (19") 개인승 : 복합 4.1km/kWh (도심 : 4.5km/kWh, 고속도로 : 3.7km/kWh) | CO2 배출량 0g/km | 측정지 정격전압(전류중량) : 610V (180.9Ah) | 공차중량 2,605kg ▶ 항속형 AWD (i-TRAC (19") 6인승 : 복합 4.1km/kWh (도심 : 4.5km/kWh, 고속도로 : 3.7km/kWh) | CO2 배출량 0g/km | 측정지 정격전압(전류중량) : 610V (180.9Ah) | 공차중량 2,610kg ▶ 항속형 AWD (i-TRAC (21") 개인승 : 복합 4.1km/kWh (도심 : 4.5km/kWh, 고속도로 : 3.7km/kWh) | CO2 배출량 0g/km | 측정지 정격전압(전류중량) : 610V (180.9Ah) | 공차중량 2,660kg ▶ 항속형 AWD (i-TRAC (21") 6인승 : 복합 4.1km/kWh (도심 : 4.5km/kWh, 고속도로 : 3.7km/kWh) | CO2 배출량 0g/km | 측정지 정격전압(전류중량) : 610V (180.9Ah) | 공차중량 2,655kg ▶ 성능형 AWD (i-TRAC II) (19") 개인승 : 복합 4.1km/kWh (도심 : 4.4km/kWh, 고속도로 : 3.7km/kWh) | CO2 배출량 0g/km | 측정지 정격전압(전류중량) : 610V (180.9Ah) | 공차중량 2,625kg ▶ 성능형 AWD (i-TRAC II) (19") 6인승 : 복합 4.1km/kWh (도심 : 4.4km/kWh, 고속도로 : 3.7km/kWh) | CO2 배출량 0g/km | 측정지 정격전압(전류중량) : 610V (180.9Ah) | 공차중량 2,630kg ▶ 성능형 AWD (i-TRAC II) (21") 개인승 : 복합 4.1km/kWh (도심 : 4.4km/kWh, 고속도로 : 3.7km/kWh) | CO2 배출량 0g/km | 측정지 정격전압(전류중량) : 610V (180.9Ah) | 공차중량 2,680kg ▶ 성능형 AWD (i-TRAC II) (21") 6인승 : 복합 4.1km/kWh (도심 : 4.4km/kWh, 고속도로 : 3.7km/kWh) | CO2 배출량 0g/km | 측정지 정격전압(전류중량) : 610V (180.9Ah) | 공차중량 2,675kg ※ 위 공차중량은 국토부 신고값 기준입니다. ※ 위 엔비는 프로모드에 최한 엔비로서 도로상태, 운전방법, 차량상태 및 히터온오에 따라 실주행 연비의 차이가 있습니다. ※ 올림 사양 (구동축, 반승차이어 모델에 "빌트인 일체"으로 별도 표기되어 있지 않은 경우, 기본사양 빌트인형 일체 사양의 연비 올림 한습 사양입니다. ※ 감승형, 감가속 및 급제동을 하지 맙시다. ※ 정속주행을 합시다. ■ EV-구제 혜택 : 3가지 합계 올 해 ① 최대 80만 출신 크레도 부상 지원 (※ 출신 크레도 체제 관련 상세 내용은 전국 현대자동차 지점/대리점에 문의) ② 홈 충전기 설치공사 무상 지원 (960만 상당) ※ 현한 올림금 별도 고객 부담 ③ EV전용 손실케어에 2본 (2본 추가 구입시 35% DC) ■ 신차 교환 : 차량 출고 후 2년 이내 전손사고 발생 시 신차교환 비용 지원 (단, 현대 슬림/RV 신차 구매 시 택택 제공, 제네시스 제외) ※ 보조금 문제로 변심에 따른 차종 교환 불가 ※ 자세한 내용은 전국 현대자동차 지점/대리점에 문의 ■ 전준가치 보장 : 전기차 구매 후 3년 내 현대/제네시스 신차로 대차 시, 기존 차량 구입금액의 최대 55% 가격보장 ※ 대상 차종 : IONIQ 5, IONIQ 6, IONIQ 9, 코나 Electric (운전고슬종/장애인용/영업용 제외) ※ 자세한 내용은 현대자동차 서비스 소개 페이지 또는 전국 현대자동차 지점/대리점에 문의 ■ 현대자동차는 지점/대리점의 카마스터를 통해서만 판매하며, 전국 어느 곳에서나 같은 제품 같은 가격으로 바른 거래를 실천하고 있습니다.

SMEC
스맥공작기계

www.smecmachinetools.com

- 고정밀 가공을 보장하는 일체형 Frame 구조와 고강성 주축
- 응답성이 우수한 Roller Type LM Guide 적용
- 저진동, 저발열 직결 주축구조 적용으로 고정밀 가공실현
- 소재적재와 유지보수가 용이한 저중심 베드구조

MCV 4500D

자동차 부품 가공에 적합한 Dual Pallet Type 머시닝센터





NS 1600T2Y2

복잡한 공정을 한번의 세팅으로 수행하는 복합가공 선반

- 2개의 스핀들과 2개의 터렛이 독립적으로 동작하여 생산을 극대화
- 다양한 공정 집약형 복합가공 능력 보유
- 제 2스핀들에 배출장치인 파트 언로더를 채택하여 자체적 자동화 시스템 구현
- 경사형 베드채용으로 공작물의 접근성과 칩의 배출성이 용이
- 고강성, 고속 구조를 갖춘 롤러타입 LM 가이드 적용

SMEC 서비스 콜 센터 1899-8238

본사 및 공장 · 경남 김해시 주촌면 골든루트로 157-10 | Tel. 055-340-4800
영 남 지 사 · 경남 김해시 주촌면 골든루트로 157-10 | Tel. 055-340-4882
경 인 지 사 · 경기도 광명시 일직로12번길 13, 5층 | Tel. 02-898-7069
경 북 지 사 · 대구광역시 달서구 성서서로40길 12, 2층 | Tel. 053-524-5211
중 부 지 사 · 대전시 유성구 테크노10로 31, 2층 | Tel. 042-864-8104

주식회사 스맥 | YouTube | TALK

KSPE 2026 Autumn CONFERENCE

2026 한국정밀공학회 추계학술대회

2026.12.2.Wed. - 12.5.Sat.
창원컨벤션센터(CECO) (경남 창원시)

200단어 초록 마감
2026. 10.12. Mon

초록채택통지
2026. 10.21. Wed

사전등록 마감
2026. 10.26. Mon

논문모집분야

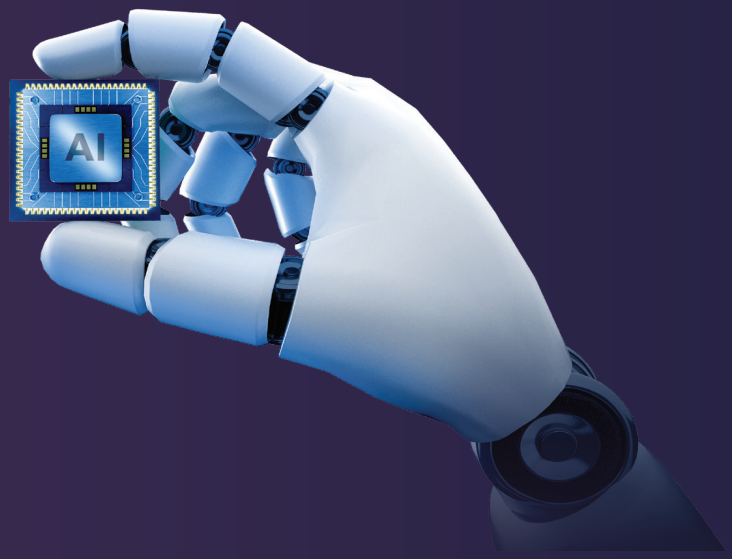
정밀가공 Precision Manufacturing Processes
정밀측정 Precision Measurements
로봇제어자동화 Robotics, Control and Automation
스마트생산시스템 Smart Manufacturing System
설계및재료 Design and Materials
공작기계 Machine Tools
나노마이크로기술 Nano/Micro Technology
바이오헬스 Bio Health
적층제조시스템 Additive Manufacturing
녹색생산기술 Green Manufacturing Technology



주최 : KSPE 사단법인 한국정밀공학회 GNTO 경남관광재단 GYEONGNAM TOURISM ORGANIZATION

문의 : 한국정밀공학회 사무국 Tel (02)518-0722, (02)393-0725 E-mail conf@kspe.or.kr Homepage http://www.kspe.or.kr/event/

제11회 정밀공학 창의경진대회



The 11th Precision Engineering Creativity Competition

공모주제

생성형 AI 시대의 창의적 Smart & Green 정밀공학

(첨단모빌리티(무인자동차, 드론, 친환경자동차), 자율시스템(빅데이터, 인공지능), 메타버스(로보틱스, 사물인터넷), 첨단제조(3D프린팅, 디지털트윈, 탄소저감), 첨단바이오(나노-바이오, 디지털헬스) 등 정밀공학 전 분야)

접수기간(기간연장)

2026. 7. 1.수 - 8. 7.금

최종 발표 및 시상

2026. 12. 4.금 / 창원 CECO

주요 일정 안내(기간연장)

- 아이디어 제안서 접수: 2026. 7. 1.(수)–8. 7.(금)
- 중간보고서 접수: 2026. 8. 10.(월)–9. 4.(금)
- 본선 진출팀 통보: 2026. 9. 18.(금)
- 최종보고서 접수: 2026. 9. 28.(월)–10. 23.(금)
- 최종발표 및 평가/시상: 2026. 12. 4.(금) 창원 CECO

※ 최종보고서 제출 및 발표는 본선 진출팀만 해당됩니다.
※ 위 일정은 사정에 따라 변경될 수 있습니다.
※ 각종 양식 및 세부 안내 사항은 학회 홈페이지(www.kspe.or.kr)를 참조해주시기 바랍니다.

참가자격

- 전국 대학(원)생(2–4년제 포함, 대학원생은 팀원으로 참여 가능하나 전체팀원의 1/3을 넘어서는 안됨)
- 2–6인 이하의 대학(원)생과 1인의 지도교수로 구성된 팀
- 단, 교외 경진대회에서 이미 입상한 주제에 대하여는 경연 자격이 부여되지 않음을 원칙으로 함(개량 · 보완된 것은 심사 후 결과에 따라 허용 가능함)
- 연구아이디어 제안서 접수 이후 타 경진대회 등에서 동일 주제로 수상을 할 경우 즉시 학회에 해당사실을 통보하여야 하며, 이를 위반할 경우 상훈이 취소될 수 있음

시상내역

상훈	수상팀	시상내용	훈격
대상	1팀	상장, 상금 300만원	한국정밀공학회장상
최우수상	3팀	상장, 상금 50만원	한국기계연구원장상 한국생산기술연구원장상 한국공작기계산업협회장상
우수상	4팀	상장, 상금 25만원	특별회원기업 대표이사장상
장려상	8팀	상장, 상금 10만원	한국정밀공학회장상

※ 위 상목 내역은 대회 준비 및 사정에 따라 변경될 수 있습니다.
※ 수상 이후라도 기존 연구와의 표절 및 중복의 사유가 발생할 경우 수상을 취소할 수 있습니다.

• 문의 **한국정밀공학회 사무국**
Tel. 02-518-2928
E-mail. contest@kspe.or.kr
Homepage. www.kspe.or.kr

• 주최 KSPE 한국정밀공학회 Korean Society for Precision Engineering

• 주관 **한국정밀공학회 교육위원회**

• 후원 KIMM 한국기계연구원 · KITECH 한국생산기술연구원 · Komma 한국공작기계산업협회 · DN SOLUTIONS · sindoh · LIG Defense&Aerospace · FANUC 한국화낙주식회사

한국정밀공학회

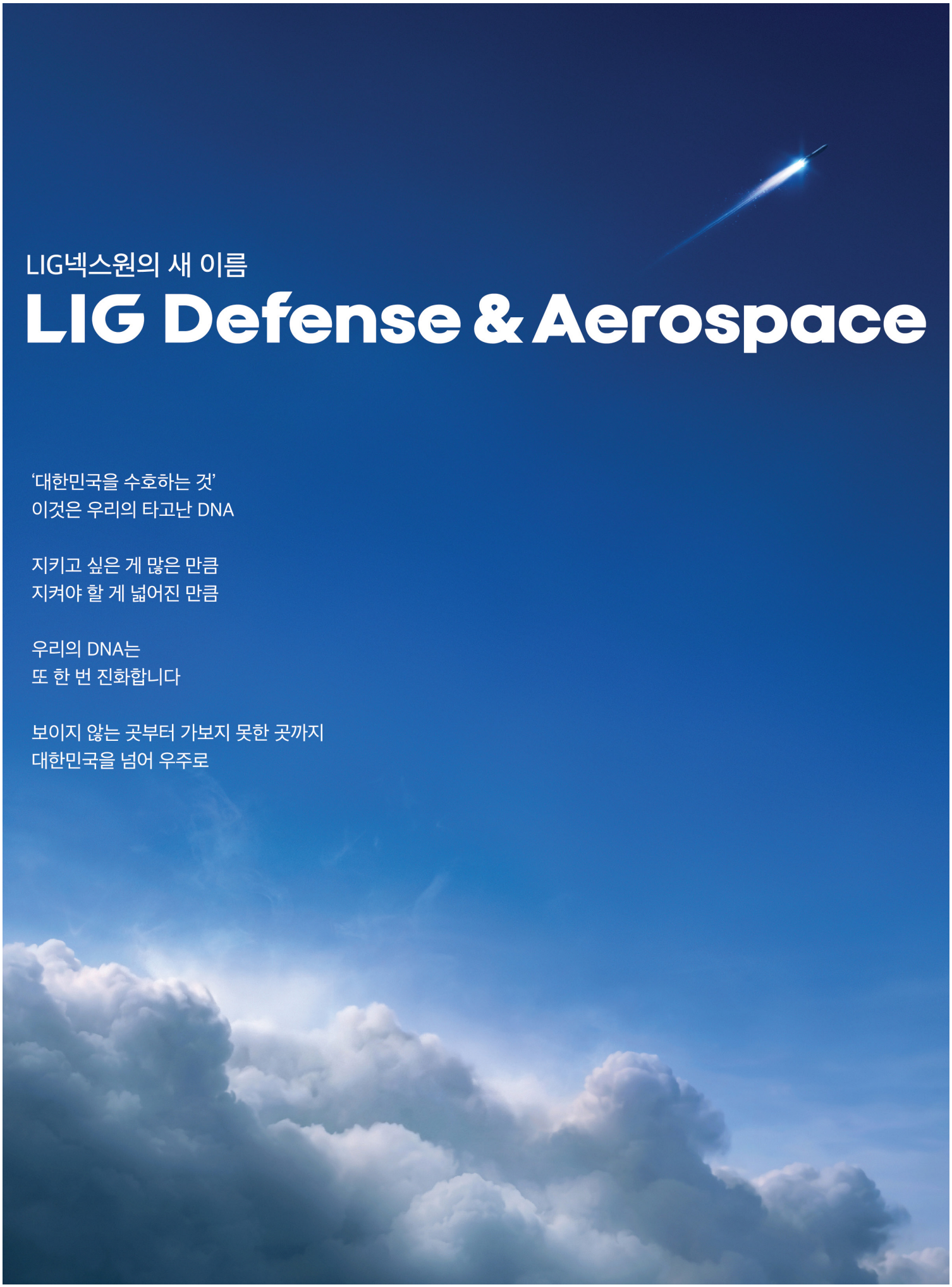
Korean Society for Precision Engineering

2027년 국내/국제학술대회 일정 안내








LIG넥스원의 새 이름
LIG Defense & Aerospace
'대한민국을 수호하는 것'
이것은 우리의 타고난 DNA
지키고 싶은 게 많은 만큼
지켜야 할 게 넓어진 만큼
우리의 DNA는
또 한 번 진화합니다
보이지 않는 곳부터 가보지 못한 곳까지
대한민국을 넘어 우주로