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

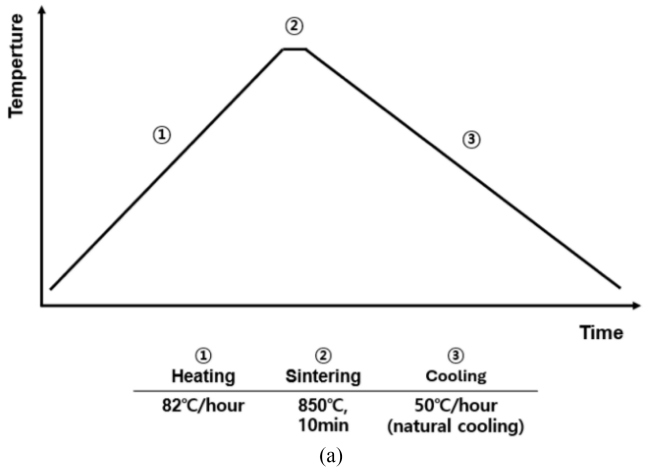
조형토 도자기의 가공 실험에는 연구실 내에서 직접 제작한 가공 기기와 조형토 시편이 사용되었다. 도자기 시편은 도자기 제작 전문가에 의해 제작되었으며, 유약 공정을 거친 형태와 유약 공정을 거치지 않은 형태로 제작되었다. 제작된 도자기 시편에서는 성형 과정에서 생긴 흠집이나 소성 과정에서 가열과 냉각을 거치면서 발생하는 굽힘 변형 등을 찾아볼 수 있었다. 도자기 시편의 가공은 평탄화 공정으로 그라인딩을 수행한 후 이어서 폴리싱을 수행하는 방식으로 진행되었다. 표면 특성에 대한 측정 및 분석은 성형 후 초벌 구이만이 이루어진 초기 상태 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

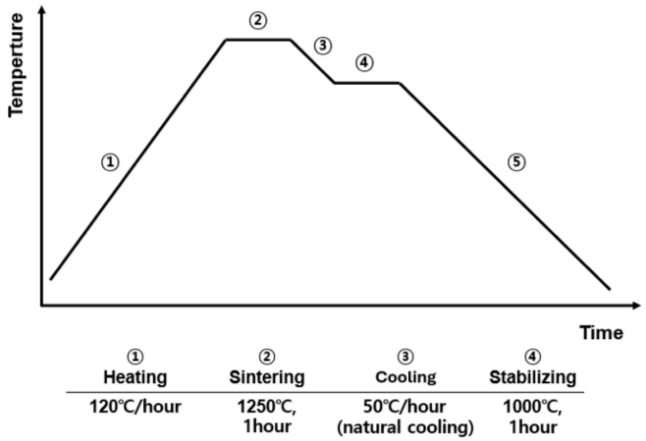
시편은 시중에 판매되고 있는 조형 점토(동영세라믹스)를 구매하여 제작되었다. 조형토는 점력이 좋고 모래 함유량이 높아 형태 유지력이 강하며 건조 시 변형(수축)이 적어 대형 작품이나 구조적 안정성이 요구되는 조소 작업에 적합하다. 조형토 도자기는 유약 도포 시 보통 1,200–1,270ºC 이상의 고온에서 소성되며, 갈색 계열의 투박한 질감을 내는 것이 특징이다.

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

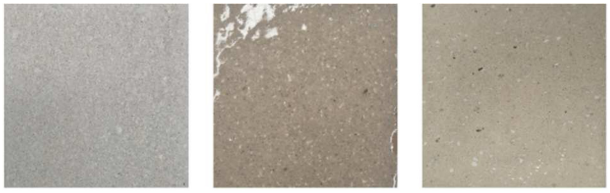


(a)



(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.

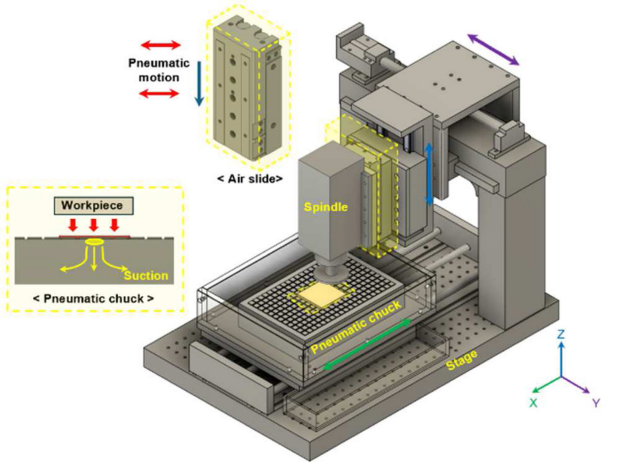


Fig. 3 3-axis CNC machine built for grinding and polishing of ceramic specimens

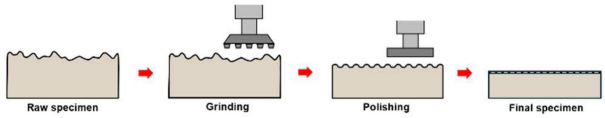


Fig. 4 Sample processing sequence (left to right): As-received sample is first grinded and then polished to the final polished sample

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

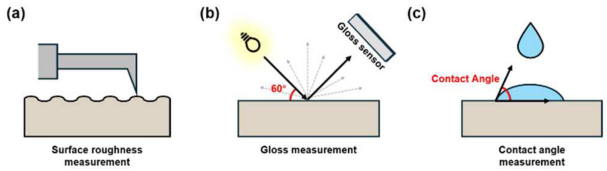


Fig. 5 (a) Surface roughness measurement, (b) Gloss measurement and (c) Contact angle measurement

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

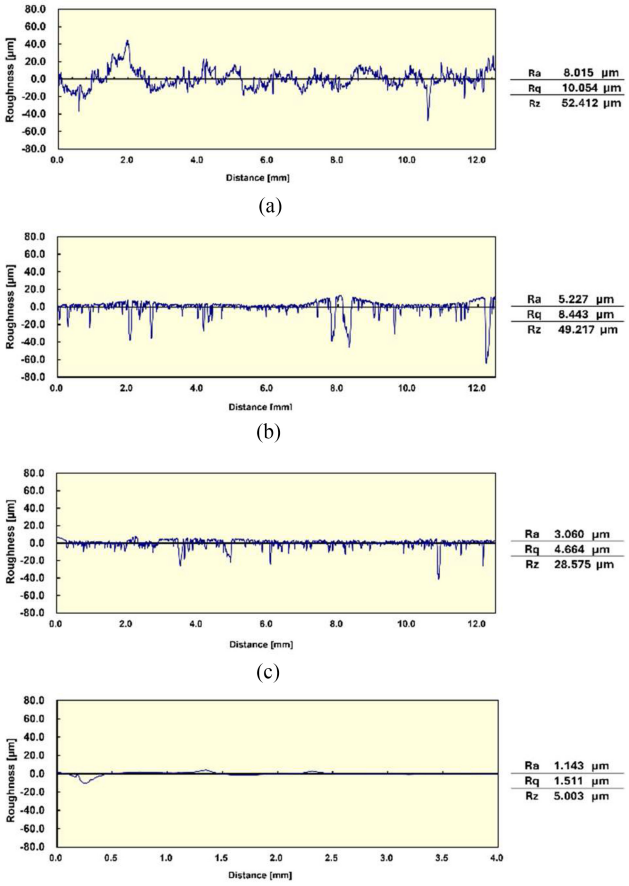
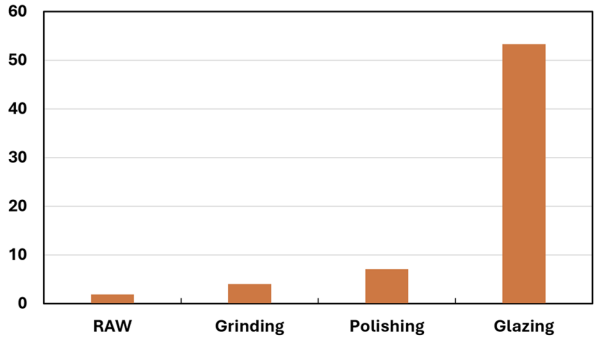


Fig. 6 Surface roughness profiles of (a) Raw, (b) Grinded, (c) Polished and (d) Glazed specimens

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.

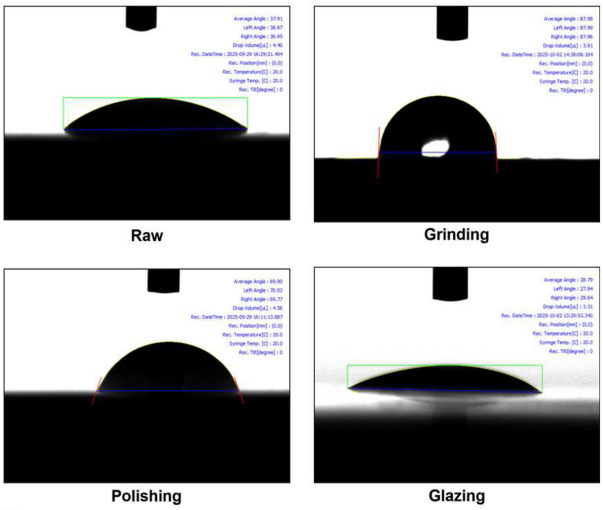
3.2 광택도 분석

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

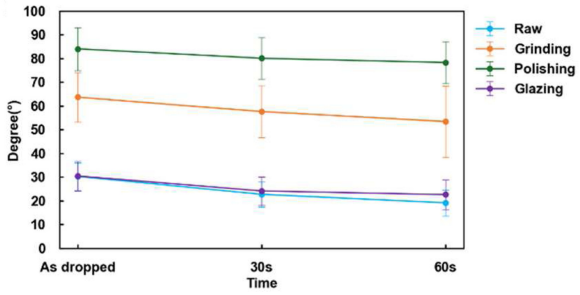
Fig. 8은 네 가지 서로 다른 과정의 시편에 대해 수행된 접촉각 측정 결과를 보여준다. 그래프(Fig. 8(c))는 시간에 따른 접촉각의 변화를 나타낸 것이며, 표준편차를 오차막대로 나타내었다. 액적을 떨어뜨린 직후 초벌 구이만이 수행된 초기 상태 시편의 접촉각과 유약 공정을 거친 시편의 접촉각 모두 30° 정도로 친수성을 보이는 것을 알 수 있다. 초기 상태 시편의 접촉각은 그라인딩과 폴리싱 공정을 거치면서 증가하는 것을 알 수 있다. 한편 액적의 부피 변화율은 액적 이미지를 이용하여 계산할 수 있는데, 그 값의 평균은 초벌 구이만이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

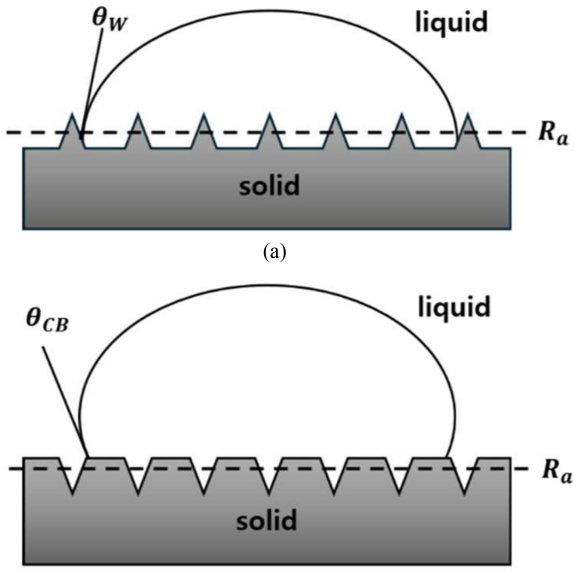


Fig. 9 Water repellency of wettability in (a) Wenzel state and (b) Cassie-Baxter state

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

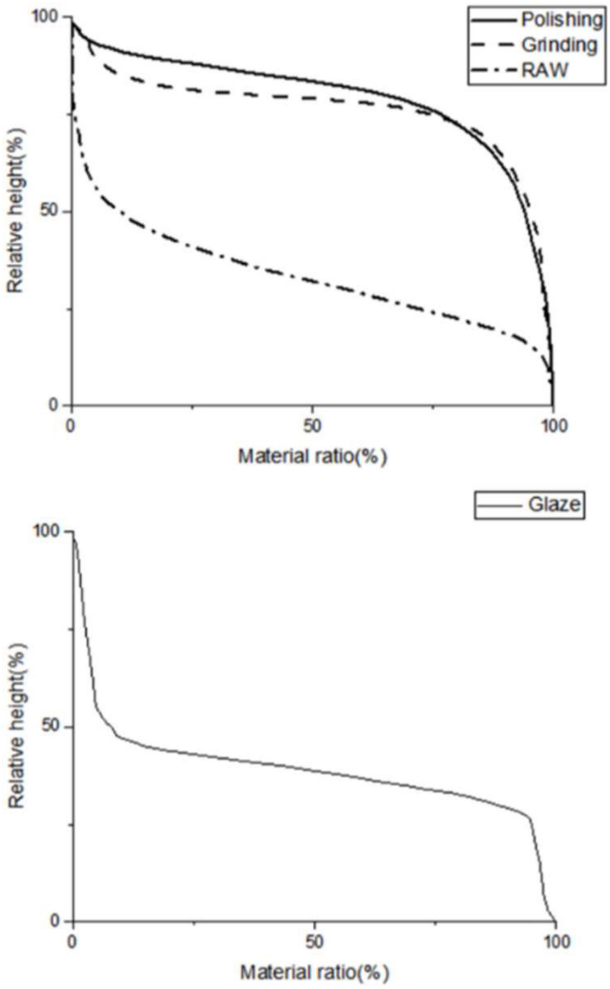


Fig. 10 The graph of relative height for material ratio according to each process

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

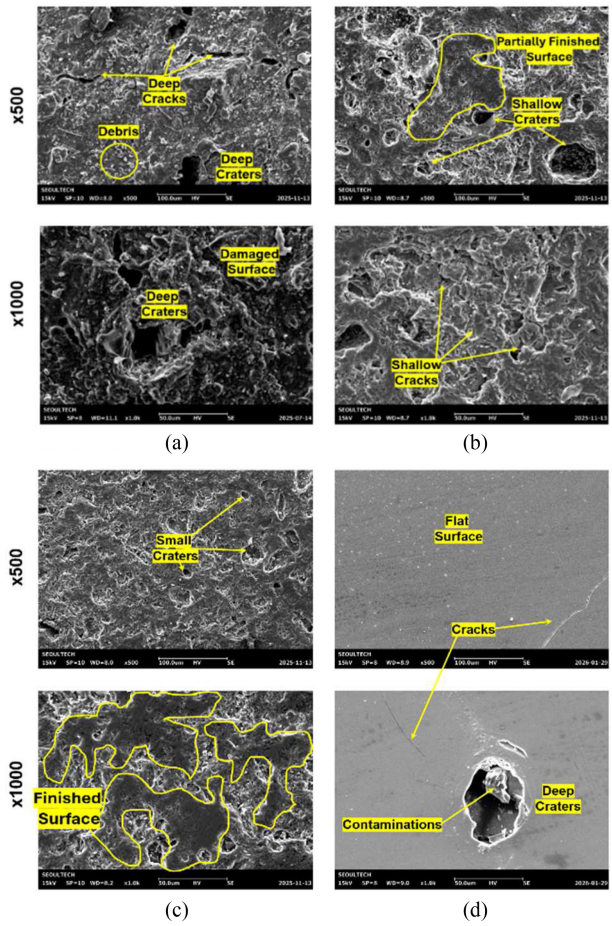


Fig. 11 SEM images of (a) Raw, (b) Grinded, (c) Polished and (d) Glazed specimens.

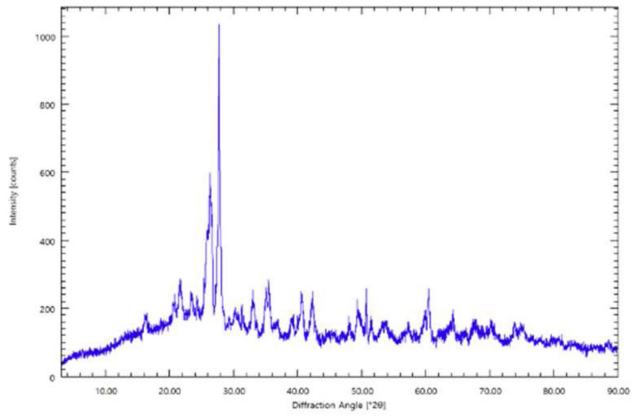
(Fig. 11(b))에서는 초기 상태 시편에서 보였던 큰 돌출부들은 사라지고 가공단계에서 생긴 수십 μm 크기의 홈들을 다수 볼 수 있었다. 폴리싱이 수행된 시편(Fig. 11(c))에서는 편평하게 가공되어 표면 거칠기가 낮아진 것을 확인할 수 있었다. 작은 홈은 여전히 존재하지만 큰 홈들은 대부분 사라진 것을 확인할 수 있었다. 이 작은 홈들은 앞 절에서 언급한 내용과 같이 접촉각을 높이는데 긍정적인 역할을 했을 것이라 추측된다. 유약 처리가 된 시편(Fig. 11(d))은 보통 매우 매끄러운 표면을 가지지만 표면에는 소성 과정에서 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

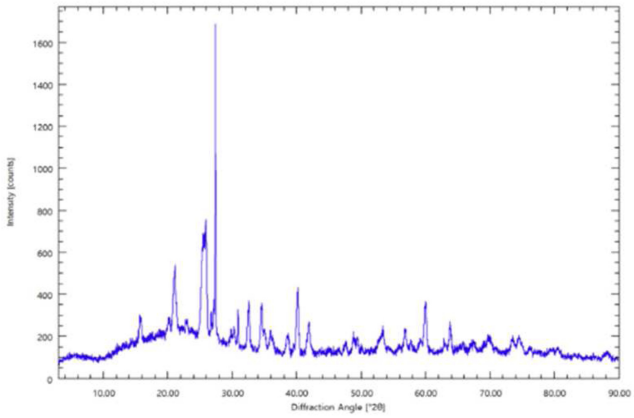
그라인딩과 폴리싱 공정에 의해 시편 표면에 화학적, 결정학적 변화가 있었는지를 살펴보기 위해 EDS와 XRD 분석을 수행하였다. 도자기는 소성 과정 중 가해지는 열에 의해 성분의 구조가 변하거나 심하면 결정질 성분이 비정질로 변하기도 한다. 이는 그라인딩 또는 폴리싱 공정 중 도자기 표면 온도가

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