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.

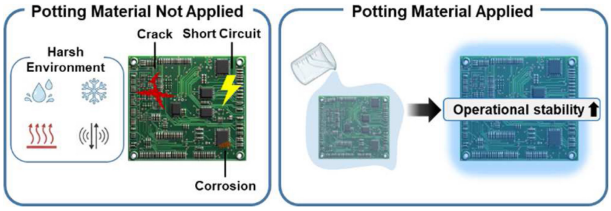



Fig. 1 Schematic diagram comparing unpotted and potted electronic equipment exposed to harsh operational environments: failure modes such as cracking, short circuits, and corrosion due to external stressors (left), and enhanced operational stability achieved through the application of the protective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

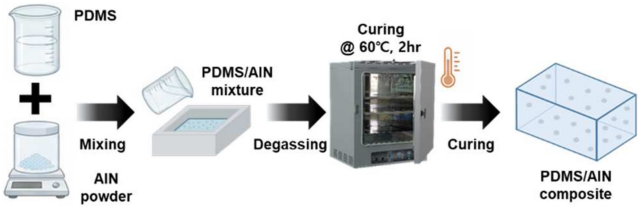



Fig. 2 Fabrication process of AlN/PDMS composites

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.

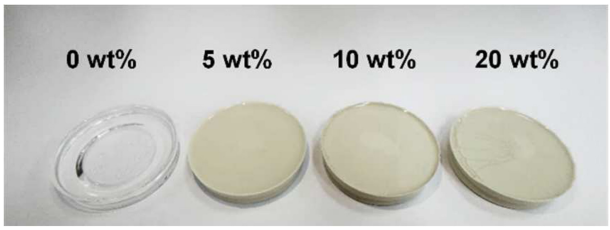



Fig. 3 Optical photographs of AlN/PDMS composites with various AlN filler contents, demonstrating the transition from transparency to opacity

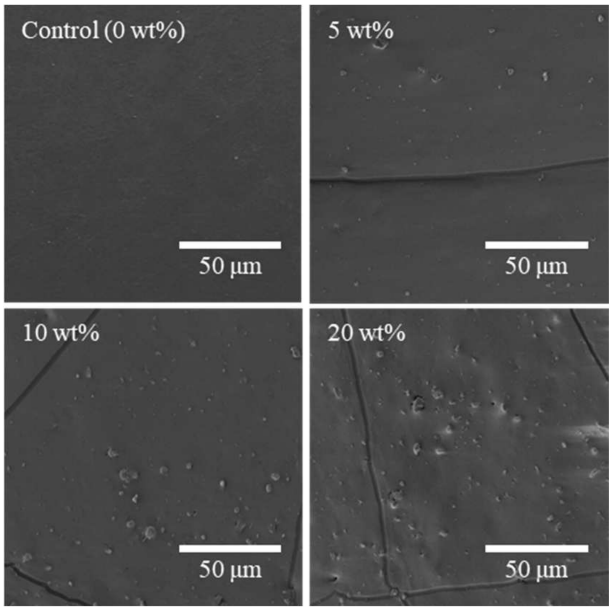



Fig. 4 SEM images of neat PDMS and AlN/PDMS composites with 5, 10, and 20 wt% AlN filler contents

## 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.

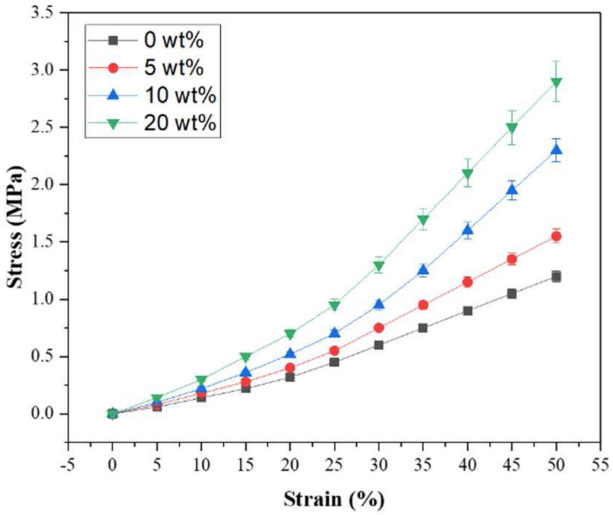



Fig. 5 Compressive stress-strain curves of AlN/PDMS composites with various AlN contents

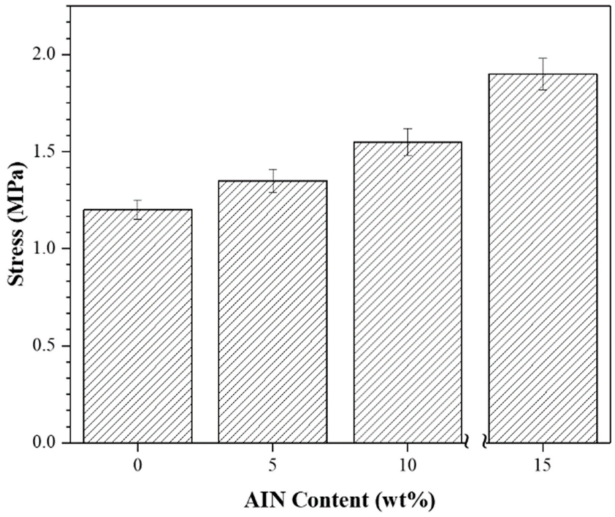



Fig. 6 Compressive stress-strain curves of AlN/PDMS composites with various AlN contents

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

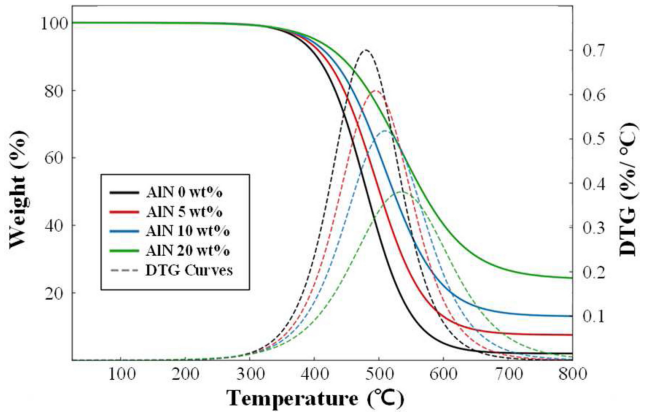



Fig. 7 TGA and DTG curves of AlN/PDMS composites with various AlN contents

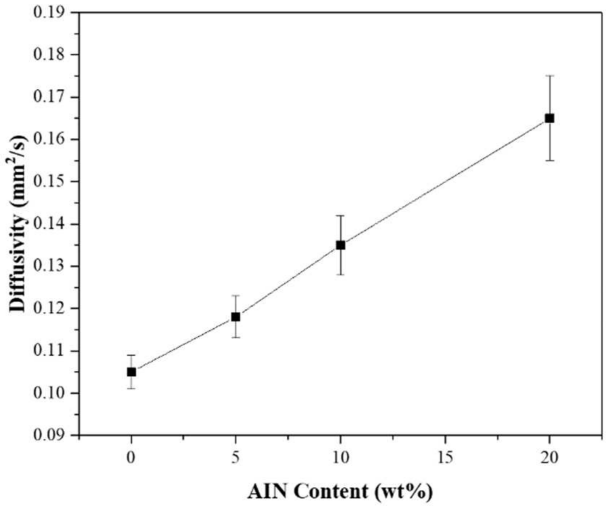



Fig. 8 Thermal diffusivity of AlN/PDMS composites with various AlN contents

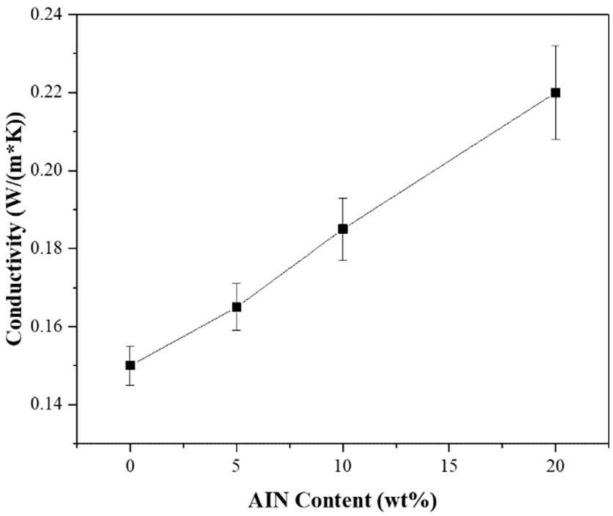



Fig. 9 Thermal conductivity of AlN/PDMS composites with various AlN contents

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 $mm^2/s$로 측정되었으며, AlN 함량이 5, 10, 20 wt%로 증가함에 따라 각각 0.118, 0.135, 0.165 $mm^2/s$로 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