

입방정 질화붕소 입자 크기에 따른 마그네슘 복합재료의 기계적·열적 특성에 관한 연구

이태호*** · 정다운*** · 박현재*** · 조승찬* · 이상복* · 이상관* · 김양도** · 김정환*

Effect of Cubic Boron Nitride Particle Size on the Mechanical and Thermal Properties of Magnesium Matrix Composites

Taeho Lee***, Dawoon Jung***, Hyeonjae Park***, Seungchan Cho*, Sang-Bok Lee*,
Sang-Kwan Lee*, Yangdo Kim**, Junghwan Kim*†

ABSTRACT: In this study, cubic boron nitride (cBN) reinforced pure magnesium (Mg) matrix composites with a target reinforcement content of 60 vol.% were fabricated by a liquid pressing process using cBN particles with average size of 5, 15, 40, 100, and 300 μm , and the effects of reinforcement particle size on the microstructure, mechanical properties, and thermal properties were investigated. Scanning electron microscopy revealed that cBN particles were relatively uniformly distributed in the Mg matrix for all specimens, and no coarse pores or distinct interfacial reaction phases were observed. The measured densities ranged from 2.704–2.787 g/cm^3 , and the back-calculated cBN volume fractions were 56–61 vol.%, indicating that dense composites close to the target composition were successfully fabricated. Tensile testing showed that the tensile strength increased with decreasing cBN particle size, reaching a maximum value of 247 MPa for the 5 μm specimen, while the 300 μm specimen exhibited the lowest value of 86.2 MPa. In contrast, the thermal conductivity increased with increasing particle size, showing values of 164, 209, 224, 288, and 298 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ for the 5, 15, 40, 100, and 300 μm specimens, respectively. Thermomechanical analysis further showed that the linear coefficients of thermal expansion of the 40 and 100 μm specimens, calculated from the average slope in the range of 0°C – 80°C , were $6.70 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ and $8.02 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, respectively. These results indicate that fine cBN particles are advantageous for improving tensile strength and inhibiting thermal expansion because of the increased interfacial area and enhanced constraint effect on the Mg matrix, whereas coarse cBN particles are beneficial for thermal conduction due to reduced cumulative interfacial thermal resistance. Therefore, the cBN particle size is a key factor governing the trade-off between mechanical and thermal properties in high-volume-fraction cBN/Mg composites.

초 록: 본 연구에서는 액상가압공정을 이용하여 순수 마그네슘(Pure Mg) 기지에 평균 입자 크기 5, 15, 40, 100 및 300 μm 의 입방정 질화붕소(cBN)을 목표 체적률 60 vol.%로 첨가한 복합소재를 제조하고, 강화재 입자 크기가 미세조직, 기계적 특성 및 열적 특성에 미치는 영향을 평가하였다. 주사전자현미경 관찰 결과, 모든 시편에서 cBN 입자가 기지 내에 비교적 균일하게 분산되어 있었으며, 조대한 기공이나 뚜렷한 계면 반응상은 관찰되지 않았다. 복합소재의 밀도는 2.704–2.787 g/cm^3 범위로 측정되었고, 역산된 cBN 체적률은 56–61 vol.%로 나타나 목표 조성에 근접한 치밀한 복합소재가 제조되었음을 확인하였다. 인장시험 결과, 인장강도는 입자 크기가 감소할수록 증가하는 경향을 나타내었으며, 5 μm 시편에서 247 MPa의 최대값을, 300 μm 시편에서 86.2 MPa의 최소값을 나타내었다. 반면 열전도도는 입자 크기가 증가할수록 향상되어 5, 15, 40, 100 및 300 μm 시편에서 각각 164, 209, 224, 288

Received 14 June 2026, received in revised form 22 June 2026, accepted 21 July 2026

*Composites Research Division, Korea Institute of Materials Science, Changwon, Korea

**School of Materials Science and Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

†Corresponding author (E-mail: jhwankim@kims.re.kr)

및 $298 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 를 나타내었다. 또한 열기계분석 결과, 0°C – 80°C 구간에서 산출된 선형 열팽창계수는 $40 \mu\text{m}$ 및 $100 \mu\text{m}$ 시편에서 각각 $6.70 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 및 $8.02 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 로 나타났다. 이러한 결과는 미세한 cBN 입자가 증가된 계면 면적을 통해 하중 전달과 기지 변형 구속에는 유리하게 작용하는 반면, 조대한 cBN 입자는 계면 열저항을 감소시켜 열전달에는 유리하게 작용함을 의미한다. 따라서 고체적률 cBN/Mg 복합소재에서 강화재 입자 크기는 인장강도와 열전도도 사이의 상충관계를 결정하는 핵심 인자이다.

Key Words: 마그네슘 복합재료(Magnesium matrix composites), 입방정 질화붕소(Cubic-boron nitride), 인장강도(Tensile strength), 열전도도(Thermal conductivity), 열팽창계수(Coefficient of thermal expansion)

1. 서 론

최근 우주항공, 자동차, 전자통신 산업 등에서 부품의 고성능화 및 경량화 요구가 급증함에 따라, 밀도가 1.74 g/cm^3 로 실용 금속 중 가장 가벼운 마그네슘(Mg)이 핵심 구조 재료로 주목받고 있다[1,2]. 마그네슘은 우수한 비강도와 방열 특성을 지니고 있으나, 순수 마그네슘(Pure Mg)의 경우 절대적인 기계적 강도가 낮고 구리나 알루미늄에 비해 상대적으로 열전도도가 부족하여 고부하 및 고방열이 동시에 요구되는 극한 환경에서의 적용에는 한계가 따른다.

이러한 순수 마그네슘의 단점을 극복하고 다기능성을 확보하기 위해 세라믹 입자를 강화재로 첨가하는 금속 기지 복합재료(Metal Matrix Composites, MMCs)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[3-6]. 다양한 세라믹 강화재 중 입방정 질화붕소(cubic Boron Nitride, cBN)는 다이아몬드에 필적하는 매우 높은 경도를 지닐 뿐만 아니라, 우수한 화학적 안정성과 약 $940 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 이상의 뛰어난 열전도도를 동시에 갖고 있다. 따라서 cBN은 마그네슘 기지재의 기계적 물성과 열적 특성을 동시에 비약적으로 향상시킬 수 있는 이상적인 강화재로 평가받는다[7]. 일반적으로 미세한 입자는 전위의 이동을 효과적으로 억제하여 기계적 강도를 향상시키는 데 유리하지만, 급격히 증가한 계면이 열저항(interfacial thermal resistance)으로 작용하여 열전달 효율을 저하시킬 수 있다. 반대로 조대한 입자는 기지재와의 전체 계면 면적을 감소시켜 계면 열저항을 낮추는데 유리하므로 열전도도를 향상시킬 수 있지만 인장 변형 시 단일 입자가 받는 응력이 커져 조기 파단이 발생하기 쉬우며 강화재의 입자 크기가 클수록 기지재의 결정립이 커져 결정립 미세화(Grain refinement)에 의한 강화 효과가 감소하여 기계적 물성 저하를 유발하게 된다[8-10].

이처럼 기계적 특성과 열적 특성 간에는 상충 관계(Trade-off)가 존재하므로, 고체적률 cBN 강화 마그네슘 복합재료를 설계함에 있어 입자 크기의 영향을 체계적으로 규명하는 것은 필수적이다. 이에 본 연구에서는 순수 마그네슘 기지재에 60 vol.%의 cBN을 첨가한 복합소재를 제조하되, cBN 입자 크기를 $5 \mu\text{m}$ 에서 $300 \mu\text{m}$ 까지 5단계($5 \mu\text{m}$, $15 \mu\text{m}$, $40 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$, $300 \mu\text{m}$)로 세분화하여 제어하였다. 제조된

복합소재의 미세조직 관찰을 비롯하여 인장강도 및 열전도도를 통합적으로 분석함으로써, 입자 크기 변화가 복합재료의 기계적·열적 거동에 미치는 메커니즘을 밝히고 다기능성 마그네슘 복합재료의 최적 설계에 활용하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 마그네슘 복합소재 준비 및 제조

본 연구에서 마그네슘 기지 금속복합소재의 기지재는 순수한 마그네슘(Pure Mg)을 사용하였으며 강화재는 평균 입도가 5, 15, 40, 100, 300 μm 인 cBN 분말(Zhengzhou Wode Superhard Material Co., Ltd, China)을 사용하였다. Fig. 1에는 입도별 cBN 분말의 형상 및 크기를 주사전자현미경(SEM)으로 관찰한 결과를 나타내었으며, 각형의 균일한 입도를 가진 5, 15, 40, 100, 300 μm 크기의 cBN 입자를 확인하였다.

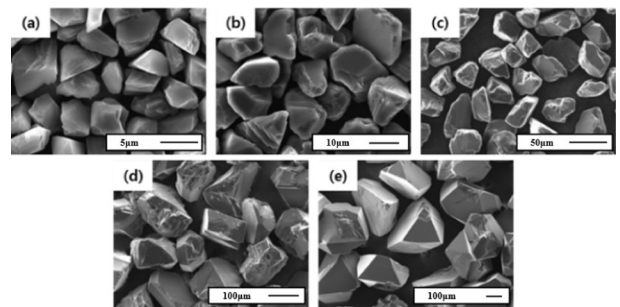


Fig. 1. SEM image of cubic boron nitride powders with different particle size: (a) $5 \mu\text{m}$, (b) $15 \mu\text{m}$, (c) $40 \mu\text{m}$, (d) $100 \mu\text{m}$, (e) $300 \mu\text{m}$

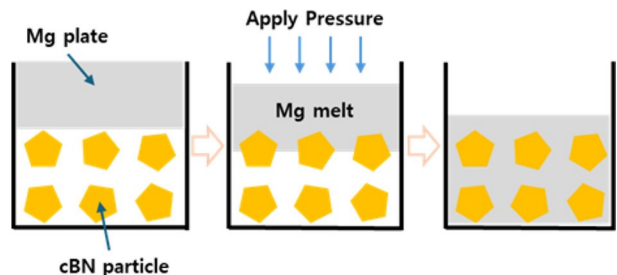


Fig. 2. Schematic of liquid pressing process

cBN/Mg 복합소재를 $50 \times 50 \times 12 \text{ mm}^3$ 크기로 제조하기 위해 금형 내부에 cBN 함량을 60 vol.%로 계산하여 입도별 (5, 15, 40, 100, 300 μm) cBN 분말과 마그네슘 판재를 장입하였다. 이후 금형 내부를 진공상태로 조성한 뒤, 액상가압 공정을 이용하여 700°C까지 승온하고 10분간 유지하여 마그네슘 판재를 용융시킨 후 가압함으로써, 입도별 60 vol.% cBN을 함유한 cBN/Mg 복합소재를 제조하였다. 본 연구에서 사용한 액상가압공정의 모식도는 Fig. 2에 나타내었다.

2.2 금속복합소재 특성 평가

액상가압공정으로 제조된 cBN/Mg 복합소재는 연마용 다이나몬드 디스크로 40 μm 에서 9 μm 단계까지 순차적으로 연마 후 diamond slurry로 3 μm , 1 μm 및 0.25 μm 순서로 연마하였다. 남은 연마제를 제거하기 위해 에탄올을 이용하여 초음파 세척 과정을 30분간 진행 후 건조하였다. 제조된 시편의 건전성을 평가하기 위해 주사전자현미경(JSM-6610LV, JEOL, Japan)을 사용하여 미세조직을 관찰하였다. 제조된 복합소재의 인장강도는 만능재료시험기(5882, INSTRON, USA)를 사용하여 측정하였다. 인장시험은 dog-bone 형상의 판상 시편을 사용하였으며, 시편의 게이지 길이, 폭 및 두께는 각각 5 mm, 6.5 mm 및 1.5 mm이며, 변형률(strain rate)속도는 $10^{-3}/\text{s}$ 로 수행하였다. 인장시험은 2회 측정 후 더 높은 측정값을 사용하였다. 열팽창계수는 열기계분석기(TMA Q400, TA Instrument, USA)를 이용하여 5°C/min의 승온 속도 조건에서 -20°C~100°C 범위에서 측정 한 후, 0°C~80°C 구간의 데이터를 기반으로 계산하였다. 또한 열전도도는 열확산계수, 밀도, 비열값을 이용하여 산출하였다. 열확산계수는 레이저 플래시 분석기(LFA467, NETZSCH, German)를 사용하여 측정하였으며, 밀도는 아르키메데스 법칙을 적용하여 평가하였다. 비열은 참고문헌에서 보고된 마그네슘의 비열(1.02 J/(g·K))과 cBN의 비열(0.791 J/(g·K)) 값을 바탕으로 혼합물 법칙(rule of mixture)을 적용하여 계산한 cBN/Mg 복합소재 비열 값(0.848 J/(g·K))을 사용하였다[11,12]. 최종 열전도도는 다음 식을 이용하여 계산하였다.

$$k = \alpha \cdot \rho \cdot C_p \quad (1)$$

k =열전도도

α =열확산계수

ρ =밀도

C_p =비열

3. 결과 및 고찰

3.1 복합소재 미세조직 분석

Fig. 3은 액상가압공정을 통해 제조된 cBN/Mg 복합소재

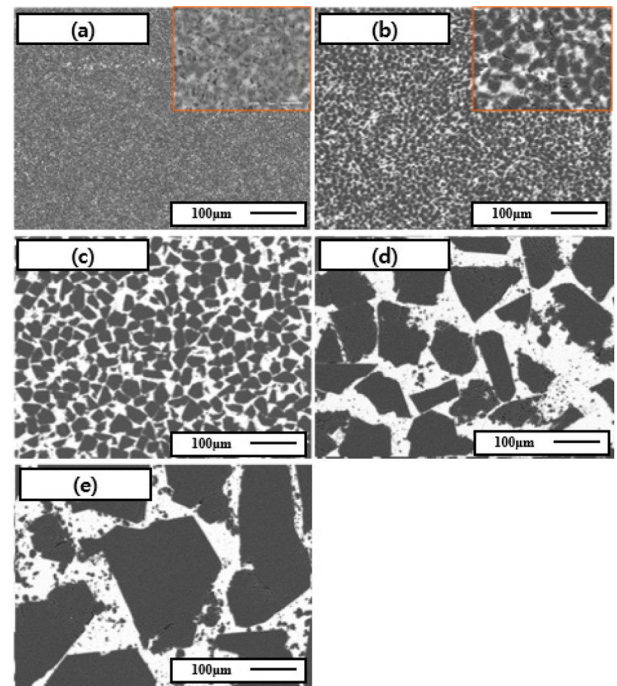


Fig. 3. SEM Microstructure of cBN/Mg composites with different cBN particle size: (a) 5 μm , (b) 15 μm , (c) 40 μm , (d) 100 μm , (e) 300 μm

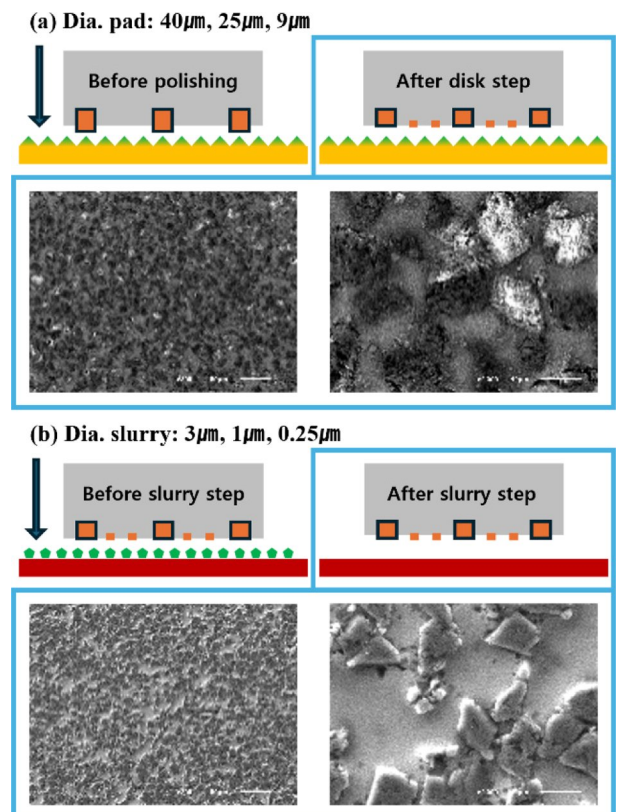


Fig. 4. Microstructural evolution during sequential polishing: (a) Diamond disk step, (b) Diamond slurry step

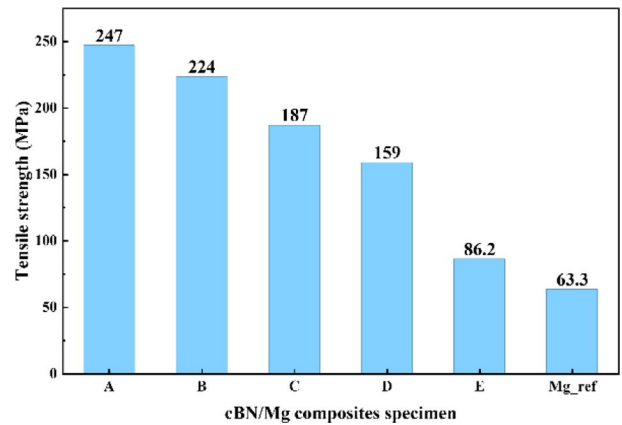
Table 1. Densities of cBN/Mg composites

Specimen	cBN size (μm)	Density(g/cm^3)
A	5	2.704
B	15	2.713
C	40	2.748
D	100	2.787
E	300	2.775

의 미세조직을 주사전자현미경으로 관찰한 결과이다. 미세조직 관찰 결과 모든 시편의 미세조직에서 cBN 입자가 고르게 분산되어 있으며 조대한 기공이나 계면 반응상과 같은 결함이 관찰되지 않아 복합소재가 건전하게 제조되었음을 확인할 수 있다. 관찰된 미세조직에서는 cBN 입자와 주변 마그네슘 기지의 표면 높이 차이와 다량의 cBN 입자 파편이 관찰되었으며, 이는 연마 과정에서 cBN과 마그네슘 간의 큰 경도 차이로 인해 상대적으로 연질인 마그네슘 기지가 우선적으로 과연마되고, 이후 돌출된 cBN 입자에 국부적으로 높은 응력이 집중되어 파괴가 발생한 결과로 판단된다. 이러한 연마단계에 따른 미세조직 차이를 Fig. 4에 나타내었으며 Fig. 4(a)의 diamond disk 단계에서 형성된 cBN 입자 부스러기(debris)는 연질의 마그네슘 기지에 박히게 되고 이후 Fig. 4(b)의 diamond slurry 단계에서 제거되지 못한 입자들이 관찰되는 것을 확인할 수 있다. 또한 미세연마(fine polishing) 과정에서 사용되는 slurry 연마는 고정된 입자를 가진 다이아몬드 디스크와 달리 시편의 표면에서 연마제들이 연질 마그네슘 영역을 더 많이 연마하여 cBN 입자와 마그네슘 간 연마량의 차이가 발생하게 되어 cBN 입자와 주변 Mg의 표면 높이 차이가 발생하였다. 복합소재의 건전성 평가를 위해 아르키메데스법을 이용하여 측정된 각 시편의 밀도를 Table 1에 나타내었으며, 측정된 밀도는 각각 2.704, 2.713, 2.748, 2.787 및 2.775 g/cm^3 로 측정되었다. cBN 입자 크기가 증가함에 따라 밀도는 전반적으로 소폭 증가하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 조대한 입자의 경우 분말 충전 과정에서 입자 간 공극이 상대적으로 감소하여 충전율이 증가하고, 이에 따라 겉보기 밀도가 커졌기 때문으로 해석된다. 그러나 시편 간 밀도 차이에 의한 cBN의 체적률 차이는 약 4% 이내이며, 본 연구에서는 이러한 강화상 체적률 차이의 영향은 cBN 입자 크기 변화가 복합소재의 물성에 미치는 영향보다 작을 것으로 가정하고 입자 크기에 따른 물성 변화를 고찰하였다.

3.2 복합소재 기계적 특성 평가

Fig. 5는 cBN 입자 크기에 따른 복합소재의 인장강도 변화를 나타낸다. 인장시험 결과, 복합소재의 인장강도는 cBN 입자 크기가 감소할수록 증가하고, 반대로 입자 크기가 증가할수록 감소하는 뚜렷한 경향을 나타내었다. 가장 미세

**Fig. 5.** Tensile strength of cBN/Mg composites fabricated with different cBN particle sizes

한 5 μm 입자를 적용한 A시편은 247 MPa의 가장 높은 인장강도를 나타낸 반면, 가장 조대한 300 μm 입자를 적용한 E시편은 86.2 MPa로 가장 낮은 값을 보였다. A-E의 모든 복합소재 시편은 Liu의 연구에서 보고된 Mg의 인장강도 (63.3 MPa)[12] 보다 우수한 특성을 나타내었으며 A시편 기준 인장특성이 Mg 대비 약 290% 향상된 것을 확인하였다. 즉, 본 연구의 cBN/Mg 복합소재에서는 약 60 vol.%의 강화재 체적률 조건에서도 강화재의 입자크기에 따라 인장특성이 크게 달라질 수 있음을 확인하였다.

이러한 경향은 동일 체적률에서 입자 크기 감소에 따라 증가하는 총 계면 면적과 감소하는 결정립 크기 및 입자 간 거리로 설명할 수 있다. 입자가 미세할수록 단위 부피당 형성되는 cBN/Mg 계면 면적이 증가하고, 이에 따라 인장하중이 보다 많은 계면을 통해 분산 전달될 수 있으며 미세한 마이크로 입자가 고온에서 Mg의 동적 재결정 핵 생성을 촉진하여 결정립 크기를 미세화하는 효과를 나타낸다[6]. 또한 Mg 기지의 국부 변형은 주변의 조밀한 강화재에 의해 더 강하게 구속되므로, 변형의 국부화와 균열 개시가 지연될 가능성이 크다. 반대로, 조대한 입자를 포함한 시편에서는 총 계면 면적이 감소하고 입자 간 간격이 증가함에 따라, 상대적으로 적은 수의 하중 지지 경로에 응력이 집중되기 쉽다. 이러한 경우 조대한 세라믹 입자 주변에서 균열이 보다 쉽게 형성되기 쉬우며, 결과적으로 인장강도 저하로 이어질 수 있다. 이러한 결과는 최근 보고된 국내 cBN/Al 복합소재 연구에서 미세한 cBN 입자가 더 높은 굽힘강도를 나타낸 경향과 유사하며, Mg 기지 복합소재에서 계면 특성이 하중 전달 및 파손거동을 지배하는 핵심 요소임을 보고한 최근 연구 결과와도 잘 부합한다[14-16].

3.3 복합소재 열적 특성 평가

복합소재의 열적 특성을 평가하기 위해 레이저 플래시 분석기(LFA)로 열확산계수(Thermal diffusivity)를 측정된 후

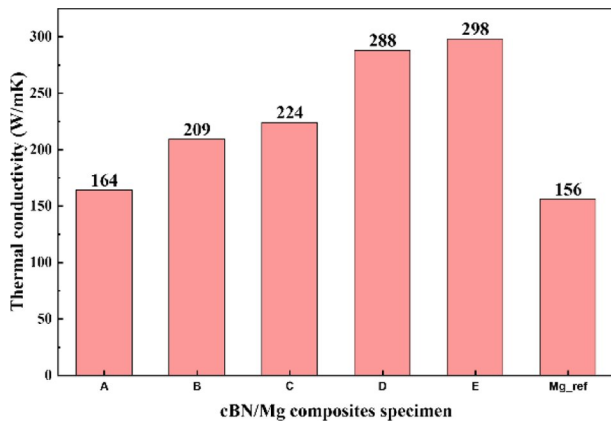


Fig. 6. Calculated thermal conductivity of cBN/Mg composites fabricated with different cBN particle sizes

산출된 열전도도 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 열전도도는 인장강도와 반대되는 거동을 나타내었으며, 5 μm cBN을 사용한 A시편의 열전도도는 164 W/m·K로 가장 낮았으며, 입자 크기가 증가함에 따라 점진적으로 증가하여 300 μm cBN을 사용한 E시편에서는 298 W/m·K의 가장 높은 값을 보였다. 일반적으로 알려진 Mg의 열전도도는 156 W/(m·K)이며 [13], 제조된 A-E의 모든 복합소재 시편은 기지재(Mg)보다 높은 열전도도를 나타내었다.

이와 같은 결과는 고체적률 금속/세라믹 복합소재에서 일반적으로 고려되는 계면 열저항(interfacial thermal resistance) 관점에서 이해할 수 있다. 복합소재의 유효 열전달 특성은 구성상들의 고유 열물성뿐만 아니라, 금속/세라믹 계면에서 발생하는 열저항의 영향을 크게 받는다. 실제로 cBN/Al 복합소재에서도 입자 크기가 가장 큰 300 μm 조건에서 가장 높은 열전도도가 보고되었으며, 이는 계면 면적 감소에 따른 계면 열저항 감소로 설명할 수 있다[15-18]. 또한 입자 강화 복합소재의 유효 열전도 모델은 계면 열저항이 존재할 경우, 유효 열전달 특성이 입자 크기에 의존하게 됨을 보여준다. 본 연구에서도 동일한 체적률 조건에서 미세한 cBN 입자를 사용한 복합소재 시편은 더 많은 수의 cBN/Mg 계면을 형성하게 되므로 누적 계면 열저항이 증가하여 열확산계수가 낮아진 것으로 해석할 수 있다. 반면, 조대한 입자를 사용한 시편은 총 계면 면적이 감소하여 열전달을 방해하는 계면의 영향이 줄어들고, 그 결과 상대적으로 높은 열확산 특성을 나타낸 것으로 판단된다. 특히 본 연구에서는 밀도 값이 전 시편에서 거의 유사하였으므로, 열확산계수의 차이는 치밀화 정도의 차이보다는 입자 크기에 따른 계면 구조 및 계면 열저항 변화에 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 7은 40 μm 와 100 μm cBN 입자를 사용한 cBN/Mg 복합소재의 선형 열팽창 거동을 TMA로 측정한 결과이다. 열

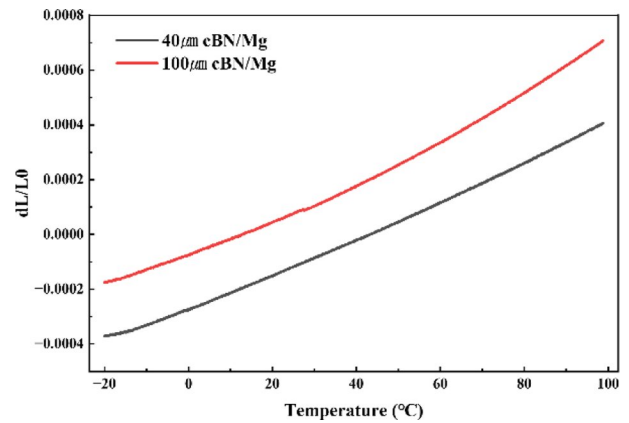


Fig. 7. TMA curves of 60 vol.% cBN/Mg composites reinforced with 40 and 100 μm cBN particles

팽창계수는 ASTM E831을 참조하여 측정된 온도구간에 대한 dL/L_0 값을 온도 변화량으로 나누어 평균 기울기를 구하는 방법으로 계산되었다. 측정 결과, 두 시편 모두 온도 증가에 따라 길이 변화율(dL/L_0)이 점진적으로 증가하는 전형적인 열팽창 거동을 보였다. 본 연구에서는 안정적인 열팽창 거동이 확인되는 구간을 기준으로 열팽창계수를 산출하기 위해, 전체 측정 범위 중 0°C에서 80°C까지의 온도 구간을 계산 범위로 설정하였다. 그 결과, 40 μm cBN/Mg 복합소재의 열팽창계수는 $6.70 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, 100 μm cBN/Mg 복합소재의 열팽창계수는 $8.02 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 로 나타났다. 즉, 본 연구에서 측정한 범위 내에서는 cBN 입자 크기가 증가할수록 열팽창계수가 증가하는 경향을 보였으며, 40 μm cBN 입자를 사용한 시편은 100 μm cBN 입자를 사용한 시편 대비 약 16.5% 낮은 열팽창계수를 나타내었다. 이와 같은 결과는 동일한 강화재 체적률 조건에서 입자 크기가 작아질수록 총 계면 면적이 증가하고, 이에 따라 저열팽창 특성을 갖는 cBN(약 $4.7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) 강화재가 Mg 기지의 열팽창을 보다 효과적으로 구속하기 때문으로 해석할 수 있다[19,20]. 즉, 더 미세한 입자를 사용한 시편일수록 기지/강화재 계면을 통한 기계적 구속 효과가 커져 가열 과정에서 Mg 기지의 팽창 변형이 보다 억제된 것으로 판단된다. 이러한 해석은 고체적률 cBN/Al 복합소재에서도 작은 cBN 입자를 적용한 시편이 더 낮은 열팽창계수를 나타낸 Jung의 연구 결과와도 일치한다[14]. 또한 순수한 마그네슘의 열팽창계수(약 $26 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) 대비 두 복합소재 모두 열팽창계수가 현저하게 감소하였으며 상용 방열 소재인 Cu-W(약 $6.5-8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)나 AlSiC(약 $6-10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)와 유사한 수준의 우수한 치수 안정성을 확인하였다. 다만 본 연구에서의 열팽창계수 평가는 현재 40 μm 와 100 μm 시편에 한정되어 본 해석은 우선적으로 해당된 입자 크기 범위 내에서의 경향성으로 이해하는 것이 타당하다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 우주항공 및 전자통신 산업에서 요구되는 초경량·고방열 다기능성 소재를 개발하기 위해, 액상가압공정을 이용하여 순수 마그네슘 기지재에 5–300 μm 크기의 입방정 질화붕소(cBN)를 약 60 vol.% 첨가한 복합소재를 성공적으로 제조하고 그 특성을 통합적으로 평가하였다. 제조된 복합소재는 입자 크기에 관계없이 계면 반응상이나 기공 결합이 관찰되지 않았으며, 2.704–2.787 g/cm^3 의 치밀하고 건전한 미세조직을 나타내었다. 기계적 특성 분석 결과, 복합소재의 인장강도는 cBN 입자 크기가 작을수록 증가하는 경향을 나타내었으며 5 μm 시편에서 최대값인 247 MPa, 300 μm 시편에서 최소값인 86.2 MPa를 나타내었다. 열전도도는 입자 크기가 증가함에 따라 향상되었으며, 5 μm 시편에서 164 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 300 μm 시편에서 298 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 로 나타내었다. 복합소재의 열팽창계수는 0°C–80°C 구간에서 40 μm 및 100 μm 시편이 각각 $6.70 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ 및 $8.02 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ 로 나타났다. 측정된 범위 내에서는 상대적으로 작은 입자를 사용한 시편이 더 낮은 열팽창계수를 나타내었으며, 이는 증가된 계면 면적에 의해 Mg 기지의 열팽창이 보다 효과적으로 억제된 결과로 판단된다. 다만 열팽창계수 평가는 40 μm 와 100 μm 시편에 한정되므로, 입자 크기 전 범위에 대한 일반화에는 추가 검토가 필요할 것으로 판단된다.

위 결론을 종합하면, 고체적률 cBN/Mg 복합소재에서 강화재 입자 크기는 인장강도, 열전도도 및 열팽창 특성을 좌우하는 핵심 인자이며, 기계적 특성과 열적 특성 사이에는 뚜렷한 상관관계가 존재하였다. 즉 미세한 cBN 입자는 높은 인장강도와 낮은 열팽창계수에 유리한 반면, 조대한 cBN 입자는 높은 열전도도 확보에 유리하였다. 따라서 본 연구 결과는 요구 특성에 따라 강화재 입자 크기를 선택함으로써 경량·고방열 Mg 기반 복합소재를 설계하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있다.

후 기

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-나노 및 소재기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00281508, RS-2024-00444649).

REFERENCES

1. Kainer, K.U., *Magnesium - Alloys and Technologies*, Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2003.
2. Lloyd, D.J., "Particle Reinforced Aluminium and Magnesium Matrix Composites," *International Materials Reviews*, Vol. 39, No. 1, 1994, pp. 1-23.
3. Goh, C.S., Wei, J., Lee, L.C., and Gupta, M., "Properties and Deformation Behaviour of Mg-Y₂O₃ Nanocomposites," *Acta Materialia*, Vol. 55, No. 15, 2007, pp. 5115-5121.
4. Habibnejad-Korayem, M., Mahmudi, R., and Poole, W.J., "Enhanced Properties of Mg-Based Nano-Composites Reinforced with Al₂O₃ Nano-Particles," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 519, No. 1-2, 2009, pp. 198-203.
5. Lim, C.Y.H., Leo, D.K., Ang, J.J.S., and Gupta, M., "Wear of Magnesium Composites Reinforced with Nano-Sized Alumina Particulates," *Wear*, Vol. 259, No. 1-6, 2005, pp. 620-625.
6. Deng, K.K., Wang, X.J., Wu, Y.W., Hu, X.S., Wu, K., and Gan, W.M., "Effect of Particle Size on Microstructure and Mechanical Properties of SiCp/AZ91 Magnesium Matrix Composite," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 543, 2012, pp. 158-163.
7. Kang, M.W., Lee, D.H., Lee, T.G., Kim, J.H., Lee, S.B., Kwon, H.S., and Cho, S.C., "Improving Thermal Conductivity of Neutron Absorbing B4C/Al Composites by Introducing cBN Reinforcement," *Composites Research*, Vol. 36, No. 6, 2023, pp. 435-440.
8. Hasselman, D.P.H., and Johnson, L.F., "Effective Thermal Conductivity of Composites with Interfacial Thermal Barrier Resistance," *Journal of Composite Materials*, Vol. 21, No. 6, 1987, pp. 508-515.
9. Tan, Z., Chen, Z., Fan, G., Ji, G., Zhang, J., Xu, R., Shan, A., Li, Z., and Zhang, D., "Effect of Particle Size on the Thermal and Mechanical Properties of Aluminum Composites Reinforced with SiC and Diamond," *Materials & Design*, Vol. 90, 2016, pp. 845-851.
10. Abdullaev, R.N., Agazhanov, A.S., Khairulin, A.R., Samoshkin, D.A., and Stankus, S.V., "Thermophysical Properties of Magnesium in Solid and Liquid States," *Journal of Engineering Thermophysics*, Vol. 31, No. 3, 2022, pp. 384-401.
11. Yun, H., Zou, B., Wang, J., Huang, C., Xing, H., Shi, Z., and Xue, K., "Design and Fabrication of Graded cBN Tool Materials Through High Temperature High Pressure Method," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 832, 2020, 154937.
12. Liu, C., Fu, X., Pan, H., Wan, P., Wang, L., Tan, L., Wang, K., Zhao, Y., Yang, K., and Chu, P. K., "Biodegradable Mg-Cu Alloys with Enhanced Osteogenesis, Angiogenesis, and Long-lasting Antibacterial Effects," *Scientific Reports*, Vol. 6, No. 27374, 2016.
13. Li, S., Yang, X., Hou, J., and Du, W., "A Review on Thermal Conductivity of Magnesium and Its Alloys," *Journal of Magnesium and Alloys*, Vol. 8, No. 1, 2020, pp. 78-90.
14. Jung, D.W., Kim, M.S., Lee, T.H., Park, H.J., Kim, J.H., Lee, S.B., Lee, S.K., Kim, Y.D., and Cho, S.C., "Effect of Particle Size on the Thermal and Mechanical Properties of cBN-Reinforced Aluminum Matrix Composites," *Composites Research*, Vol. 38, No. 5, 2025, pp. 517-522.
15. Nan, C.W., Birringer, R., Clarke, D.R., and Gleiter, H., "Effective Thermal Conductivity of Particulate Composites with Interfacial Thermal Resistance," *Journal of Applied Physics*, Vol. 81, No. 10, 1997, pp. 6692-6699.
16. Every, A.G., Tzou, Y., Hasselman, D.P.H., and Raj, R., "The

- Effect of Particle Size on the Thermal Conductivity of ZnS/Diamond Composites,” *Acta Metallurgica et Materialia*, Vol. 40, No. 1, 1992, pp. 123-129.
17. Mizuuchi, K., Inoue, K., Agari, Y., Sugioka, M., Tanaka, M., Takeuchi, T., Tani, J., Kawahara, M., Makino, Y., and Ito, M., “Effect of Bimodal cBN Particle Size Distribution on Thermal Conductivity of Al/cBN Composite Fabricated by SPS,” *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*, Vol. 62, No. 5, 2015, pp. 263-270.
 18. Mizuuchi, K., Inoue, K., Agari, Y., Tanaka, M., Takeuchi, T., Tani, J., Kawahara, M., Makino, Y., and Ito, M., “Thermal Conductivity of Cubic Boron Nitride (cBN) Particle Dispersed Al Matrix Composites Fabricated by SPS,” *Materials Science Forum*, Vol. 879, 2017, pp. 2413-2418.
 19. Yan, Y.W., and Geng, L., “Effects of Particle Size on the Thermal Expansion Behavior of SiCp/Al Composites,” *Journal of Materials Science*, Vol. 42, No. 15, 2007, pp. 6433-6438.
 20. Park, C.S., Kim, C.H., Kim, M.H., and Lee, C.M., “The Effect of Particle Size and Volume Fraction of the Reinforced Phases on the Linear Thermal Expansion in the Al-Si-SiCp System,” *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 88, No. 1, 2004, pp. 46-52.