

## cBN 입자상 강화재 첨가에 따른 중성자 흡수용 B<sub>4</sub>C/Al 복합재의 열전도도 변화 연구

강민우\*\*\* · 이동현\* · 이태규\* · 김정환\* · 이상복\* · 권한상\*\* · 조승찬\*†

### Improving Thermal Conductivity of Neutron Absorbing B<sub>4</sub>C/Al Composites by Introducing cBN Reinforcement

Minwoo Kang\*\*\*, Donghyun Lee\*, Tae Gyu Lee\*, Junghwan Kim\*, Sang-Bok Lee\*,  
Hansang Kwon\*\*, Seungchan Cho\*†

**ABSTRACT:** This study aimed to enhance the thermal conductivity of B<sub>4</sub>C/Al composite materials, commonly used in transport/storage containers for spent nuclear fuel, by incorporating both boron carbide (B<sub>4</sub>C) and cubic boron nitride(cBN) as reinforcing agents in an aluminum (Al) matrix. The composite materials were successfully manufactured through a stir casting process and practical neutron-absorbing materials were obtained by rolling the fabricated composite ingot. The evaluation of the thermal conductivity of the fabricated composites was carried out because thermal conductivity is critical for neutron absorbing materials. The thermal conductivity measurement results indicated an approximately 3% increase in thermal conductivity under the same volume fraction when compared to composite materials using only B<sub>4</sub>C particles. Through neutron absorption cross-sectional area calculations, it was confirmed that the neutron absorption capability decreased to a negligible level. Based on the findings of this study, new design approaches for neutron absorption materials are proposed, contributing to the development of high-performance transport/storage containers.

**초 록:** 본 연구에서는 기존 사용후핵연료(Spent nuclear fuel) 운반/저장 용기에 사용되는 중성자 흡수용 B<sub>4</sub>C/Al 복합소재의 열전도도를 개선하기 위해 탄화붕소(B<sub>4</sub>C)와 입방정 질화붕소(cBN)를 동시에 강화재로 사용한 알루미늄(Al) 기지 복합소재를 제조하고 평가를 진행하였다. 이를 위해서 교반주조 공정을 통해 복합재 잉곳을 제조하고 이를 압연하여 중성자 흡수용 소재를 성공적으로 제조하였다. 제조된 소재의 평가를 위해 cBN 첨가에 따른 열전도도와 중성자 흡수능 변화를 관찰하였다. 열전도도 측정 결과, B<sub>4</sub>C 단일 입자만을 사용한 복합소재 대비 B<sub>4</sub>C, cBN을 함께 사용한 복합소재가 동일 체적률 조건 하에서 약 3%의 열전도도 증가가 발생하는 것을 확인하였으며 중성자 흡수 단면적 계산을 통해 중성자 흡수능이 무시할 수 있는 수준으로 저하가 발생하는 것을 확인하였다. 본 연구의 결과를 바탕으로, 중성자 흡수 소재의 새로운 설계 방안을 제시하고 고성능 운반/저장 용기의 개발에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

**Key Words:** 교반주조(Stir casting), 금속복합재료(Metal matrix composite), 열전도도(Thermal conductivity), 중성자 감쇠(Neutron attenuation)

Received 15 November 2023, received in revised form 27 November 2023, accepted 29 November 2023

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

\*\*Major of Materials System Engineering, Pukyong National University, Busan, Republic of Korea

†Corresponding author (E-mail: [sccho@kims.re.kr](mailto:sccho@kims.re.kr))

## 1. 서 론

사용후핵연료는 원자력 발전 과정에서 핵분열 연쇄반응을 통해 에너지를 생산하고 난 뒤 인출된 핵연료이며 방사성 및 높은 수준의 열을 방출하기 때문에 저장 및 관리가 중요하다[1-4]. 현재 사용후핵연료의 저장 및 관리의 원자력 발전소 내의 임시저장공간에서 습식 또는 건식저장을 통해 이뤄지고 있으며 매년 발생하는 사용후핵연료에 의해 저장공간의 포화가 가까워지고 있다. 기존의 임시저장 공간을 증축하는 것도 하나의 방법으로 여겨지지만 일시적으로 포화를 지연시킬 수 있을 뿐 한계점이 존재한다. 따라서 새로운 저장 및 관리 방안에 대한 필요성이 증가하고 있다[3,5].

최근 건식 사용후핵연료의 저장/운반이 가능한 용기에 대한 개발이 진행되고 있으며 용기 개발을 위해 고성능 중성자 흡수소재의 개발이 필수적이다[4,6]. 기존 흡수소재의 경우 보론 함유 스테인리스강과 알루미늄 복합소재 등이 존재하는데 스테인리스강의 경우 최대 보론 함량에 제한이 있으며 함량 증가에 따라 물성감소가 발생하는 특징이 있다. 알루미늄 복합소재의 경우 Boral, Metamic, MAXUS 등  $B_4C$ 를 강화재로 하는 소재들이 실제 사용되고 있다. 기존 소재들의 경우  $B_4C$ 의 함유량이 증가할수록 중성자 흡수능은 증가하지만 열전도도는 감소하는 특징이 있다[7,8]. 해당 특성으로 인해 저장 용기의 냉각 성능이 저하하게 된다. 따라서 중성자 흡수능 및 열전도도 특성이 모두 우수한 소재의 개발이 필요하다[9].

복합소재의 열전도도를 향상시키기 위해서는 열전도도를 감소시키는  $B_4C$  강화재 함량을 줄이는 것이 필수적이지만 중성자 흡수용 소재에서는 최소한의 중성자 흡수능을 확보하기 위해서 20 vol.%  $B_4C$  이상의 함량을 유지하는 것이 필요하다[10]. 따라서, 본 연구에서는 중성자 흡수용 복합재의 중성자 흡수능을 크게 저해하지 않으면서 열전도도를 향상시키기 위해 940 W/mK의 우수한 열전도도 및 중성자 흡수능을 지니는 cBN[11,12]을 첨가하여 기존  $B_4C$ /Al 복합재의  $B_4C$  강화재를 부분적으로 대체한 hybrid 복합소재를 제조하여 열전도도 특성 및 중성자 흡수 단면적 계수를 비교하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 알루미늄 복합소재 준비 및 제조

금속복합재료의 기지재료는 Al1100(99.99%, Komajawa metal, Japan)를 사용하였고 강화재로는  $B_4C$ (Dunhua Zhengxing Abrasive Co., Ltd., Dunhua, China) 분말과 cBN 분말(ILJIN Diamond, Korea)을 사용하였다. cBN 입자가 중성자 흡수 복합재의 특성에 미치는 영향을 조사하기 위해서 Table 1와 같이 다양한 강화재를 지닌 복합재를 설계하였다. 사용 분말들의 SEM image를 Fig. 1에 나타내었으며 Fig. 1(a), (b)에 나타나 있듯이  $B_4C$ 의 경우 100  $\mu m$ 의 평균 입자크기를 가지고 cBN의 경우 50  $\mu m$ 의 평균 입자크기를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 1(c)는  $B_4C$ , cBN을 혼합한 경우이다.

교반주조 및 열간 압연 공정을 이용하여  $B_4C$ , cBN 단일 Al 복합재와  $B_4C$  + cBN 분말이 혼합된 Al 복합소재를 제조하였다. 공정 조건으로는 흑연 도가니를 저항가열을 통해 700°C까지 가열하여 Al1100을 용융시켰다. 이후 해당 강화재들을 투입하며 500 rpm의 속도로 10분 간 교반하여 중간재를 제조한 뒤, 제조된 중간재를 약 400°C의 온도에서 preheating 후 1 pass 당 약 10%의 압하율로 압연하여 판재 형태로 가공하였다. 본 연구의 전체적인 과정을 Fig. 2에 도식화하였다.

### 2.2 미세조직 및 복합재 물성 평가

$B_4C$  및 cBN을 강화재로 하여 교반주조와 압연 공정을 통해 제조된 알루미늄 복합소재의 강화재 체적률 및 분산정도를 평가하기 위해 주사전자현미경(JSM-6610LV, JEOL, Japan)으로 미세조직을 관찰하였고 강화재 체적률 및 강화재 분산도 계산 프로그램[13]을 통해 복합소재 표면부 미

Table 1. Reinforcement volume ratio for each composite

Sample	$B_4C$ content	cBN content
Matrix alloy	0 vol.%	0 vol.%
4cBN	0 vol.%	4 vol.%
22 $B_4C$	22 vol.%	0 vol.%
18 $B_4C$ + 4cBN	18 vol.%	4 vol.%

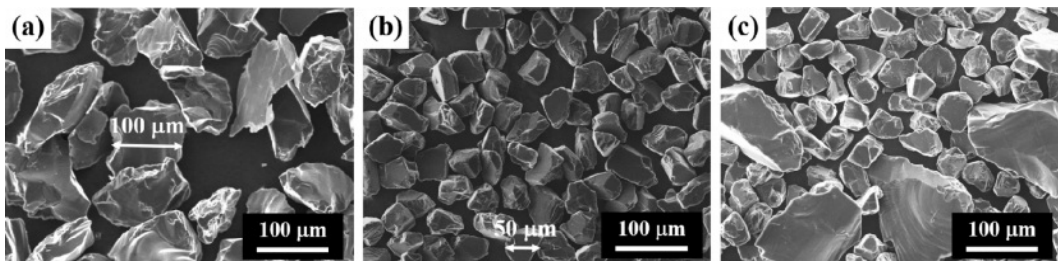


Fig. 1. SEM images of the starting powder (a)  $B_4C$ , (b) cBN, (c) mixed powder of  $B_4C$  and cBN

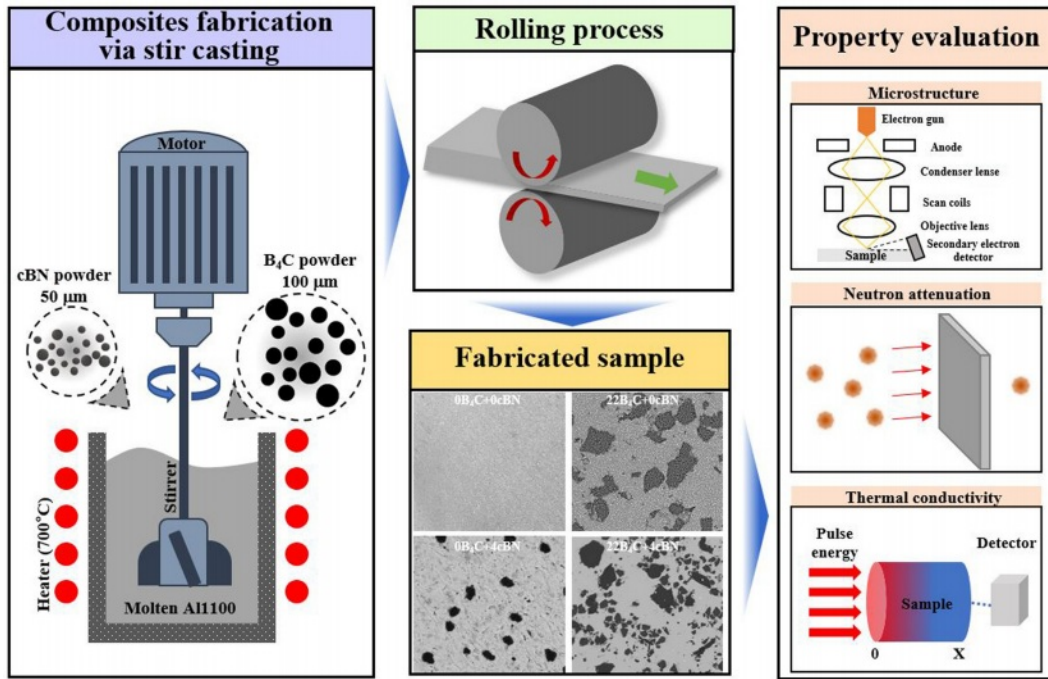


Fig. 2. A schematic representation of the experimental procedure of the present study

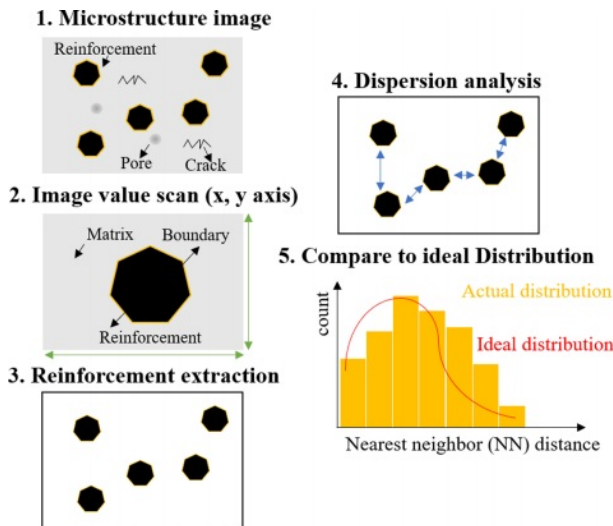


Fig. 3. Schematic diagram of the dispersion quantification technique

제조적 특성을 분석하였다. 이때 분산도란 강화재 입자가 기지재 내에 얼마나 균일하게 분포되어 있는지를 정량적으로 계산한 값이다. 해당 분석 방법에 대한 이해를 돕기 위하여 Fig. 3에 분석 방법에 대한 개요도를 나타내었다. 미세조직 이미지에서 강화재 입자, 금속 기지재, 계면의 Image value를 통해 미세구조에서 강화재 입자를 추출해낸다. 이후 추출된 입자들 사이 간 거리와 이상적 분포와의 정량적인 비교를 통해 강화재의 분산도를 계산하며 이러한 방법

을 통해 복합소재의 분산도를 측정하였다. 추가로 기지재-강화재 간 반응 관계를 파악하기 위해 전계방사형 전자현미분석기(JXA-8530F, JEOL, Japan)를 이용하여 원소 매핑을 통해 분석을 진행하였다.

제조된 복합소재의 열전도도를 계산하기 위해  $10 \times 10 \times 2 \text{ mm}^3$  크기의 시편을 준비하여 열확산도 측정기(LFA467, NETZSCH, Germany)를 이용하여 열확산계수를 측정 및 비열 값을 계산하였다. 밀도의 경우 아르키메데스 방법을 이용하여 sample 당 5회 측정을 통해 평균 밀도 값을 측정하였다.

중성자 투과율(I)은 아래 Eq. 1과 같이 구해지며 각 항은 I (중성자 투과량),  $I_0$  (입사 중성자량),  $\Sigma$  (흡수소재의 중성자 흡수 단면적 계수[ $\text{cm}^{-1}$ ], t (흡수소재 두께)이다.

$$I = I_0 \times \exp(-\Sigma \times t) \quad (1)$$

중성자 흡수 단면적 계수는 흡수소재에 존재하는 각 원소의 고유 중성자 흡수 단면적 및 강화재 분율, 강화재 입자 크기 등 다양한 요인에 의해 계산된다. 본 연구에서는 YAMAMOTO의 model[14]을 통해 이론적으로 계산하였다. 해당 흡수 단면적 계수가 증가함에 따라 투과되는 중성자의 양은 지수적으로 감소하기 때문에 중성자 흡수 소재에서는 향상시켜야 할 중요한 인자이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 제조된 복합소재의 강화재 체적률 및 분산도

복합소재 제조 시 투입되는 강화재의 형상 및 크기는 소



재의 물성에 큰 영향을 미치므로[15,16] SEM 분석을 통하여 강화재의 분포를 확인하였다. 단일 및 혼합 분말의 SEM image 관찰 결과 입자의 형상 및 크기가 균일한 것을 확인하였으며 혼합 분말의 경우 혼합과정에서 공정 제어를 통해 입자의 파괴 없이 균일하게 혼합된 것을 확인하였다.

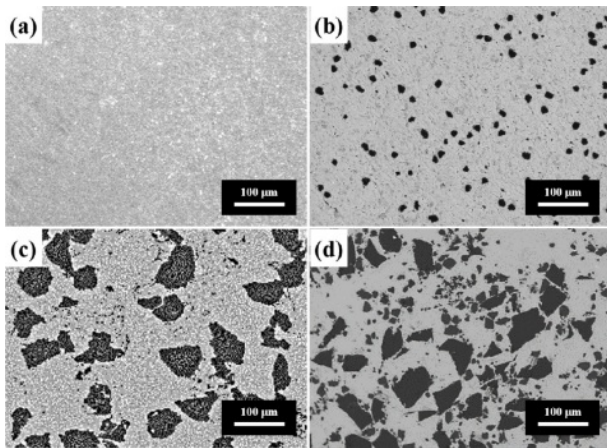
제조된 기지재 및 복합재의 밀도(상대밀도(%))는 각각 Matrix alloy, 4cBN, 22B<sub>4</sub>C, 18B<sub>4</sub>C + 4cBN의 순서로  $2.674 \pm 0.005 \text{ g/cm}^3$  ( $99.0 \pm 0.002$ ),  $2.703 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$  ( $99.3 \pm 0.003$ ),  $2.603 \pm 0.004 \text{ g/cm}^3$  ( $97.8 \pm 0.001$ ) 그리고  $2.674 \pm 0.007 \text{ g/cm}^3$  ( $99.2 \pm 0.003$ )로서 상대밀도로 보아 낮은 기공도를 가지며 건전하게 제조된 것으로 확인하였다. 추가적으로 복합소재의 미세구조를 분석하기 위해서 압연까지 수행된 복합재의 단면을 연마하여 SEM을 이용하여 미세조직을 관찰하였고 이는 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)는 기지금속의 미세조직을 나타내며, 내부 결함이 없는 것으로 관찰되었다. Fig. 4(b)-(d)를 통해 제조된 금속복합소재의 미세조직 관찰 결과를 통해 강화재의 분산이 균일하고 결함 및 기공이 없는 조직을 가지는 것을 확인하였다. 복합소재별 강화재의 분산도 및 함량을 측정하였고 Table 2에 정리하였다.

22 vol.% 복합재의 강화재 체적률은 21.8%로 투입된 강화재 체적률과 흡사하게 분석되었다. 분산도의 경우 0에 가까울수록 균일한 분산을 의미하며 18B<sub>4</sub>C + 4cBN, 4cBN, 22B<sub>4</sub>C의 순서로 균일한 분산이 되었다. 복합재에서 강화재

의 응집이 발생하는 이유는 교반 시 입자에 가해지는 에너지가 부족하거나 Matrix의 결정립 성장으로 인해 강화재가 이동하여 발생하게 된다[17]. 분산도 측정 결과 높은 강화재 체적률의 22B<sub>4</sub>C는 4cBN에 비해 교반에 의해 가해지는 입자 당 에너지가 낮아지기 때문에 입자의 응집이 발생하기 쉬우며 따라서 분산도 값이 높은  $0.2009 \pm 0.085$ 를 나타냈다. 같은 22 vol.% 강화재 체적률에서 혼합 강화재(18B<sub>4</sub>C + 4cBN)인 경우 높은 분산도를 보이는데 이는 큰 입자 사이로 작은 입자들이 침투하여 최인접 거리가 줄어든 것이 주효한 것으로 판단된다[13].

### 3.2 강화재-기지재 간 반응 분석

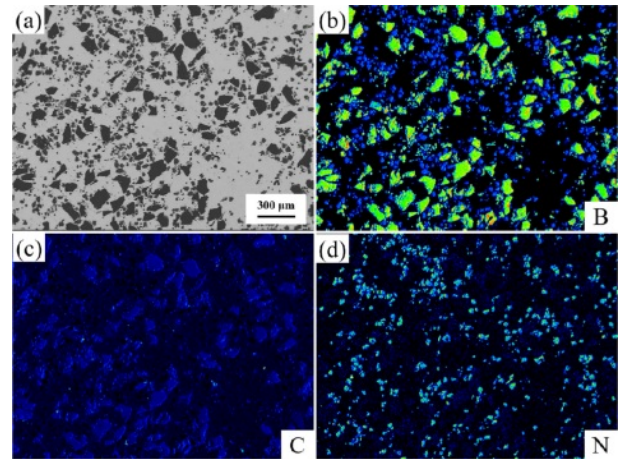
18B<sub>4</sub>C + 4cBN 복합재의 제조 중, 주조와 압연 과정에 있어서 강화재는 높은 온도에 노출되므로 기지금속과의 화학 반응이 발생하며 이는 복합재 물성에 상당한 영향을 미친다[18,19]. 따라서 해당 복합소재 내에서의 화학반응을 추적하기 위해서 EPMA 분석을 진행하였고 원소 별 매핑



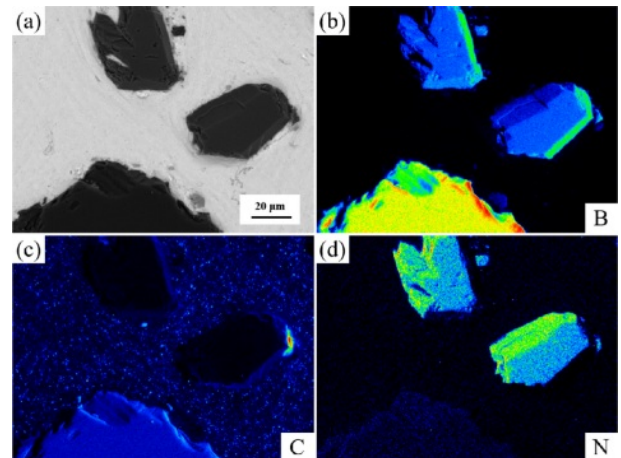
**Fig. 4.** SEM images of (a) Al1100, (b) 4 vol.% cBN/Al1100, (c) 22 vol.% B<sub>4</sub>C/Al1100, (d) (18+4) vol.% B<sub>4</sub>C + cBN/Al1100 composites

**Table 2.** Reinforcement volume ratio and dispersion index for fabricated composites

Sample	Reinforcement Vol.%	Dispersion Index
Matrix alloy	0	0
4cBN	$3.3 \pm 0.8\%$	$0.1908 \pm 0.043$
22B <sub>4</sub> C	$21.8 \pm 0.3\%$	$0.2009 \pm 0.085$
18B <sub>4</sub> C + 4cBN	$22.0 \pm 0.2\%$	$0.1518 \pm 0.027$



**Fig. 5.** Low-magnification electron probe microanalyzer image of 18% B<sub>4</sub>C + 4% cBN/Al1100 composite



**Fig. 6.** High-magnification electron probe microanalyzer image of 18% B<sub>4</sub>C + 4% cBN/Al1100 composite

을 통하여 계면 반응상을 확인하였다. Fig. 5는 저배율로 수행한 EPMA 이미지이다. Fig. 5(a)는 SEM 이미지이며 큰 입자는 B<sub>4</sub>C 작은 입자는 cBN로 추정된다. Fig. 5(b)는 Boron의 함량에 따른 EPMA mapping이며 이를 통해서 B<sub>4</sub>C와 cBN을 구분할 수 있으며 더 나아가서 C level (Fig. 5(c))와 N level (Fig. 5(d))을 통해서 더 명확히 구분이 가능하다. 저배율 EPMA에서 cBN과 B<sub>4</sub>C 모두 B, C, N의 확산이 이루어지지 않은 것으로 보이나, 정밀한 분석을 위해서 고배율의 EPMA 분석을 진행하였다(Fig. 6). Fig. 6(b)-(d)의 고배율 EPMA 이미지에서도 마이크로 크기의 계면 화합물이 발견되지 않았다.

알루미늄 기지 복합소재에서 계면간 화합물은 B<sub>4</sub>C와 cBN 모두 발생한다고 알려져 있으나 본 연구에서 EPMA로는 발견되지 않았다[20-22]. 하지만 Al-C간 반응은 600°C의 낮은 온도에서도 Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> 등의 계면 화합물이 발생한다고 알려져 있는데 이는 대부분 수십 nm 크기이기 때문에 TEM으로만 관찰된다[22]. 본 연구에서는 EPMA를 통해서 거시적인 화학 반응을 분석하였는데, 수μm급의 거시적인 반응은 일어나지 않은 것으로 보인다.

### 3.3 중성자 흡수용 복합소재의 열전도도 및 중성자 감쇠능 분석

cBN과 B<sub>4</sub>C가 강화재로 투입된 복합재의 응용처는 중성자 흡수용 소재이기 때문에 열전도도와 중성자 흡수능의 분석이 필수적이다. 제조된 복합재의 열전도도와 중성자 흡수능이 Fig. 7에 나타나 있다. Fig. 7(a)에 나타나 있듯이 4 vol.%의 cBN 투입을 통해 AlH100 기지재 대비  $13 \pm 5$  W/mK의 열전도도가 감소하였으며 22 vol.% B<sub>4</sub>C 투입 4 vol.%와 18 vol.%를 동시에 넣은 복합재는  $95 \pm 8$  W/mK 정도의 열전도도 감소를 보이며 22 vol.% B<sub>4</sub>C 대비 낮은 열전도도 감소를 보였다.

cBN을 4% 투입한 복합재의 rule of mixture 하한값을 계산해본 결과 약 252.5 W/mK의 값을 가지는데 이에도 미치지 못하고 오히려 열전도도가 감소한 것을 확인할 수 있다. 이는 기지와 강화재의 계면이 발생함에 따라 계면 저항에 의한 감소로 생각된다[23]. 하지만 계면의 증가가 발생하였음에도 4 vol.%의 B<sub>4</sub>C를 대체한 경우 열전도도가 감소되는 경향이 줄어들었기 때문에 추후 계면 제어를 이용하면 cBN 강화 복합재의 열물성을 유의미하게 개선시킬 수 있을 것으로 기대된다.

Fig. 7(b)에 각 복합재의 중성자 흡수 단면적 계수의 이론 계산 결과를 나타냈다. 이때 22B<sub>4</sub>C 대비 18B<sub>4</sub>C + 4cBN의 거시적 중성자 단면적이 약  $0.5 \text{ cm}^{-1}$  감소하지만 이는 판재의 두께가 2 mm 기준, 0.5%의 흡수율 손실이다. 0.5%의 흡수율 손실은 계면 개선을 통하여 열전도도를 증가시킨다면 충분히 상쇄될 수 있는 값으로 B<sub>4</sub>C의 cBN 대체에 대한 가능성을 볼 수 있다.

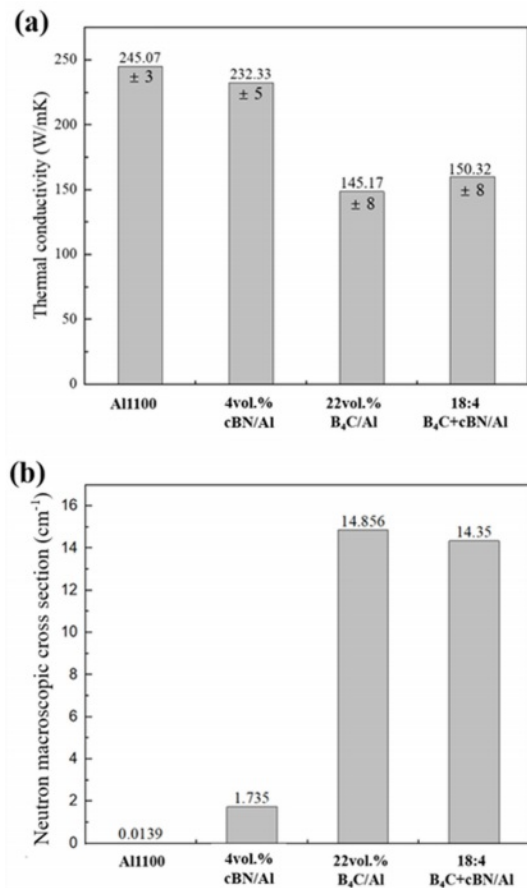


Fig. 7. The graphs of (a) experimental thermal conductivity and (b) Theoretically calculated cross-section of manufactured materials

## 4. 결 론

본 연구에서는 기존 중성자 흡수용 B<sub>4</sub>C/Al 복합소재의 열전도도를 증가시키기 위해 cBN을 추가 강화재로서 도입하여 교반주조 및 압연 공정을 통해 제조하였다. 입자 응집 및 복합소재의 물성을 저해하는 거시적인 계면 반응상이 발생되지 않았음에도 불구하고 cBN의 첨가는 Rule of mixture의 하한값에 비해 더 낮은 값을 보였는데 이는 본 연구의 기지/강화재 계면 증가에 의한 계면 저항에 의해 크게 향상되지 않은 값을 나타낸 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 B<sub>4</sub>C를 cBN으로 대체한 경우 단일 B<sub>4</sub>C 입자 강화 복합재보다 높은 열전도도를 보이기 때문에 cBN 입자 강화재의 도입은 계면 제어를 통해 보다 향상된 열전도도를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 B<sub>4</sub>C + cBN 혼합 강화재를 이용한 중성자 흡수재의 개발에 있어서 cBN + Al 간 계면 반응의 연구와 제어에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

본 연구의 결과는 사용후핵연료를 보다 효율적으로 저장할 수 있는 고열전도도 중성자 흡수 소재의 개발에 대해 cBN 강화재 도입을 통한 새로운 방안을 제시한다.

## 후 기

본 연구는 한국에너지기술평가원-에너지기술개발사업(2022B10100040) 및 한국연구재단-나노 및 소재기술개발사업(2022M3H4A3046292)의 지원을 받아 수행된 연구이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

## REFERENCES

1. Alyokhina, S., and Kostikov, A., "Unsteady Heat Exchange at the Dry Spent Nuclear Fuel Storage," *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 49, No. 7, 2017, pp. 1457-1462.
2. Botsch, W., Smalian, S., Hinterding, P., Völzke, H., Wolff, D., and Kasperek, E.M., "Safety Aspects of Dry Spent Fuel Storage and Spent Fuel Management," Proceeding of the ASME 15<sup>th</sup> International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation on American Society of Mechanical Engineers, Brussels, Belgium, Sep. 2013.
3. Saegusa, T., Shirai, K., Arai, T., Tani, J., Takeda, H., Wataru, M., Sasahara, A., and Winston, P.L., "Review and Future Issues on Spent Nuclear Fuel Storage," *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 42, No. 3, 2010, pp. 237-248.
4. Konarski, P., Cozzo, C., Khvostov, G., and H. Ferroukhi, "Spent Nuclear Fuel in Dry Storage Conditions-current Trends in Fuel Performance Modeling," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 555, 2021, 153138.
5. Braun, C., and Forrest, R., "Considerations Regarding Rok Spent Nuclear Fuel Management Options," *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 35, No. 4, 2013, pp. 427-438.
6. Palacio, A., "Design Process for Dual-purpose Nuclear Spent Fuel Casks," *Energy Procedia*, Vol. 127, 2017, pp. 398-406.
7. Patidar, D., and Rana, R.S., "Effect of B<sub>4</sub>C Particle Reinforcement on the Various Properties of Aluminium Matrix Composites: A Survey Paper," Proceeding of the 5<sup>th</sup> International Conference of Materials Proceeding and Characterization on Materialstoday, Apr. 2017, pp. 2981-2988.
8. Pehlivanlı, Z.O., and Pul, M., "Investigation of the Effect of B<sub>4</sub>C Amount and Sintering Temperature on the Thermal Properties of the Material in Al1070-B<sub>4</sub>C Composites," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Aug. 2021, pp. 2746-2761.
9. Bonnet, G., Rohr, V., Chen, X.G., Bernier, J.L., Chiocca, R., and Issard, H., "Use of Alcan's Al-B<sub>4</sub>C Metal Matrix Composites as Neutron Absorber Material in TN International's Transportation and Storage Casks," *Packaging, Transport, Storage & Security of Radioactive Material*, Vol. 20, No. 3, 2009, pp. 98-102.
10. Zhang, P., Li, Y., Wang, W., Gao, Z., and Wang, B., "The Design, Fabrication and Properties of B<sub>4</sub>C/Al Neutron Absorbers," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 437, No. 1-3, 2013, pp. 350-358.
11. Li, S., Zheng, Q., Lv, Y., Liu, X., Wang, X., Huang, P.Y., Cahill, D.G., and Lv, B., "High Thermal Conductivity in Cubic Boron Arsenide Crystals," *Science*, Vol. 361, No. 6402, 2018, pp. 579-581.
12. Shang, Y., Yang, G., Su, F., Feng, Y., Ji, Y., Liu, D., Yin, R., Liu, C., and Shen, C., "Multilayer Polyethylene/hexagonal Boron Nitride Composites Showing High Neutron Shielding Efficiency and Thermal Conductivity," *Composites Communications*, Vol. 19, 2020, pp. 147-153.
13. Park, B., Lee, D., Jo, I., Lee, S.B., Lee, S.K., and Cho, S., "Automated Quantification of Reinforcement Dispersion in B<sub>4</sub>C/Al Metal Matrix Composites," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 181, 2020, 107584.
14. Yamamoto, T., Miyoshi, Y., and Takeda, T., "Extension of Effective Cross Section Calculation Method for Neutron Transport Calculations in Particle-dispersed Media," *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 43, No. 1, 2006, pp. 77-87.
15. Paknia, A., Pramanik, A., Dixit, A.R., and Chattopadhyaya, S., "Effect of Size, Content and Shape of Reinforcements on the Behavior of Metal Matrix Composites (MMCs) Under Tension," *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 25, 2016, pp. 4444-4459.
16. Behm, N., Yang, H., Shen, J., Ma, K., Kecskes, L.J., Lavernia, E.J., Schoenung, J.M., and Wei, Q., "Quasi-static and High-rate Mechanical Behavior of Aluminum-based MMC Reinforced with Boron Carbide of Various Length Scales," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 650, 2016, pp. 305-316.
17. Lee, D., Kim, J., Park, B., Jo, I., Lee, S.K., Kim, Y., Lee, S.B., and Cho, S., "Mechanical and Thermal Neutron Absorbing Properties of B<sub>4</sub>C/Aluminum Alloy Composites Fabricated by Stir Casting and Hot Rolling Process," *Metals*, Vol. 11, No. 3, 2021, 413.
18. Akinwamide, S.O., Abe, B.T., Akinribide, O.J., Obadele, B.A., and Olubambi, P.A., "Characterization of Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Response of Aluminium-based Composites Fabricated via Casting—a Review," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 109, No. 3-4, 2020, pp. 975-991.
19. Previtali, B., Pocci, D., and Taccardo, C., "Application of Traditional Investment Casting Process to Aluminium Matrix Composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 39, No. 10, 2008, pp. 1606-1617.
20. Guo, H., Zhang, Z., Zhang, Y., Cui, Y., Sun, L., and Chen, D., "Improving the Mechanical Properties of B<sub>4</sub>C/Al Composites by Solid-state Interfacial Reaction," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 829, 2020, 154521.
21. McKie, A., Winzer, J., Sigalas, I., Herrmann, M., Weiler, L., Rödel, J., and Can, N., "Mechanical Properties of cBN-Al Composite Materials," *Ceramics International*, Vol. 37, No. 1, 2011, pp. 1-8.
22. Rong, X.-Z., and Yano, T., "TEM Investigation of High-pressure Reaction-sintered cBN-Al Composites," *Journal of Materials Science*, Vol. 39, No. 14, 2004, pp. 4705-4710.
23. Marcos-Gómez, D., Ching-Lloyd, J., Elizalde, M.R., Clegg, W.J., and Molina-Aldareguia, J.M., "Predicting the Thermal Conductivity of Composite Materials with Imperfect Interfaces," *Composites Science and Technology*, Vol. 70, No. 16, 2010, pp. 2276-2283.