

고체적률 TiB_2 -Al1050 금속복합재료의 미세조직 및 기계적 특성 연구

고성민* · 박현재* · 이영환* · 신상민* · 이동현* · 조일국* · 이상복* · 이상관* · 조승찬*[†]

Study on the Microstructure and Mechanical Properties of High Volume Fraction TiB_2 -Al1050 Metal Matrix Composites

Seongmin Ko*, Hyeonjae Park*, Yeong-Hwan Lee*, Sangmin Shin*, Donghyun Lee*,
Ilguk Jo*, Sang-Bok Lee*, Sang-Kwan Lee*, Seungchan Cho*[†]

ABSTRACT: In this study, Al1050 composites reinforced with uniformly dispersed, high volume fraction TiB_2 particles were fabricated by liquid pressing process and analyzed to microstructure, mechanical properties. Hardness, ultimate tensile strength and compressive yield strength of the 56 vol.% TiB_2 -Al1050 composite increased to 10, 4.5 and 9.8 times, respectively, compared with those of the Al1050 due to dispersion hardening effect of uniformly dispersed TiB_2 in the Al matrix.

초 록: 본 연구에서는 액상가압성형공정을 이용하여 고체적률 TiB_2 입자가 균일하게 분산된 알루미늄 복합재료를 제조하고 미세조직과 기계적 물성을 분석하였다. 제조된 알루미늄 복합재료 내에 TiB_2 는 약 56 Vol.% 존재하였으며 Al1050 기지재 내부에 TiB_2 세라믹 강화재의 균일한 분산에 의한 분산강화 효과로 경도는 230.5 Hv로써 기지재(Al1050) 대비 약 10배, 인장강도는 306.4 MPa로 약 4.5배, 압축항복강도는 581.7 MPa로 약 9.8배 증가하였다.

Key Words: 금속복합재료(Metal matrix composite), 붕화 티타늄(Titanium diboride), 알루미늄(Aluminum), 액상가압성형(Liquid pressing process)

1. 서 론

최근 우주항공, 수송, 국방 등 여러 분야에서 비용절감 및 환경 개선, 성능 강화를 위해 고성능 경량재료에 관한 관심이 증가하고 있다[1]. 경량재료를 제조하기 위해 일반적으로 낮은 밀도를 가지는 알루미늄을 많이 사용한다. 알루미늄은 경량(2.71 g/cm³)이면서 높은 연성과 좋은 비강도를 가지고 있지만, 철강재료 등과 비교하여 절대적인 강도는 낮은 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 SiC, B₄C, TiB_2 , TiC, Al₂O₃ 등의 세라믹 강화재를 첨가한 알루미늄계 금속복합재료(Aluminum Metal Matrix Composites, AMMCs)

를 제조하는 연구가 진행되고 있다[2-5]. 알루미늄계 금속복합재료는 가벼우면서도 고강도, 고경도, 고강성, 내마모성 등 우수한 기계적 성질을 가진다. 특히, 실험에 사용된 Titanium diboride(TiB_2) 세라믹 강화재는 세라믹 중에서도 고용점(2790°C), 고경도(960 Hv), 높은 탄성계수(530×10^3 GPa), 내마모성, 내식성, 열안정성 및 중성자 차폐능 등 여러 분야에서 우수한 특성을 가지고 있으며 고온 유지 시 용융 알루미늄과 젖음성이 우수하기 때문에 TiB_2 세라믹 입자는 알루미늄 복합재료의 강화재로 적합하다[6,7].

일반적으로 금속복합재료는 분말야금공정 또는 용탕교반공정(stir casting)을 거쳐 제조한다. 분말야금공정은 강화

Received 17 October 2018, received in revised form 5 January 2019, accepted 23 January 2019

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

[†]Composites Research Division, Korea Institute of Materials Science, Changwon, Korea, Corresponding author (E-mail: sccho@kims.re.kr)

재가 균일하게 분포된 고체적률 복합재료 제조에 유리하나, 공정이 복잡하고 대형화가 어려우며 제조된 금속복합재료의 난삭성에 의해 형상구현이 제한적이다. 반대로 용탕교반공정은 가격이 저렴하고 생산성이 우수한 장점이 있으나 고체적률 복합재료 제조가 어려우며 강화재가 균일하게 분포하지 않아 재연성이 떨어지는 단점이 있기 때문에 강화재가 균일하게 분포된 고체적률 금속복합재료의 대형화 및 상업화가 쉽지 않다. 하지만 이번 연구에서 금속복합재료 제조에 사용된 액상가압공정은 정수압의 원리를 이용해서 용융 금속이 가압되어 세라믹 강화재 내부로 함침되는 기술로 공정이 단순하며 강화재가 균일하게 분포된 고체적률 금속복합재료를 제조할 수 있으며 대형화가 가능하고 분말야금 공정보다 형상이 자유롭다는 장점이 있다[8,9].

따라서 본 연구에서는 고체적률 TiB_2 -Al1050 복합재료를 액상가압공정을 통해 제조하고 미세조직 및 기계적 물성을 분석하여 우주항공, 수송, 국방 등 다양한 분야에 TiB_2 -Al1050 고체적률 금속복합재료의 적용 가능성을 확인하였다.

2. 실험 방법

2.1 알루미늄 복합재료 준비

강화재로는 순도 99.84%, 평균입도 2-3 μm 인 TiB_2 (KOJUNDO CHEMICAL LABORATORY Co., Ltd.) 세라믹 분말을 사용하였다. 주사전자현미경(SEM-EDS; JSM-6610LV, JEOL) 분석결과 Ti와 B 이외 다른 원소는 확인되지 않았고 평균입도는 오차 범위 내에서 약 2-3 μm 이었으나 일부 크고 작은 입자들이 확인되었다(Fig. 1). 또한 기지재료는 Al1050을 사용하였다.

2.2 알루미늄 복합재료 제조공정

액상가압 성형공정을 이용하여 TiB_2 -Al1050 복합재료를 제조하기 위해 내부 크기가 $50 \times 50 \times 20 \text{ mm}^3$ 인 steel 금형에 세라믹 강화재 비율이 50 Vol.%가 되도록 TiB_2 분말과

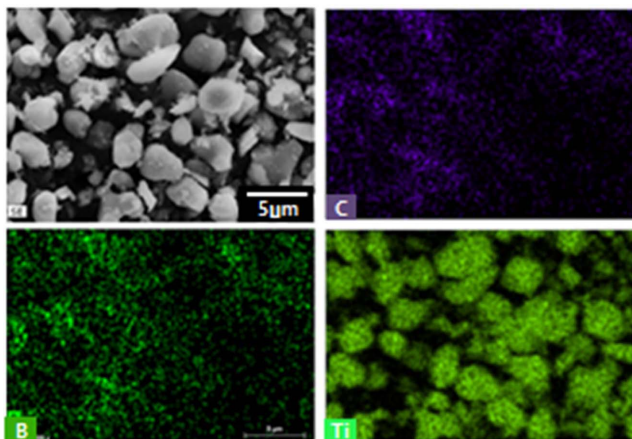


Fig. 1. SEM-EDS images of TiB_2 powder

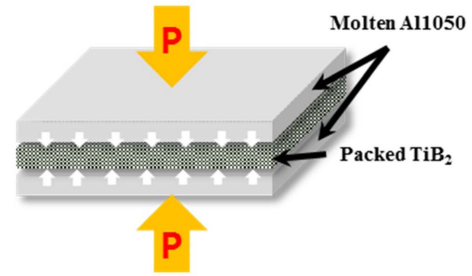


Fig. 2. Schematic of liquid pressing process

Al1050을 적층시킨 뒤 액상가압성형 장비에 장입하여 진공분위기 하에서 승온속도 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 으로 720 $^{\circ}\text{C}$ 까지 승온, 20 min 유지 후 가압하였고 그에 대한 모식도를 Fig. 2에 나타내었다.

2.3 복합재 미세조직 및 기계적 물성 분석

액상가압성형공정으로 제조된 TiB_2 -Al1050복합재료의 건전성을 평가하기 위해 주사전자현미경(SEM-EDS; JSM-6610LV, JEOL)으로 미세조직 분석을 실시하였고, 아르키메데스 방법으로 밀도를 측정하고 상대밀도를 계산하였다. 또한 TiB_2 /Al1050 복합재료의 성분분석을 위해 X선회절분석(D/Max-2500, Rigaku)을 실시하였다. 압축강도와 인장강도 평가를 위하여 TiB_2 -Al1050복합재료와 Al1050을 가공하여 변형속도 $5 \times 10^{-3}/\text{s}$ 조건 하에서 만능재료시험기(5882 model, Instron)로 측정하였고, 경도는 비커스경도기(FM-700, FUTURE-TECH)를 이용하여 5회 측정 후 평균값을 계산하였다. 또한 파단면 분석을 위해 인장시험이 완료된 시편을 주사전자현미경으로 미세조직을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 액상가압공정으로 제조된 TiB_2 -Al1050 복합재료의 미세조직을 주사전자현미경으로 분석한 결과이다. 2k의 저배율로 관찰한 결과, 조대한 기공 등의 결함은 관찰되지 않았으며 TiB_2 강화재는 공정 중 입성장 하지 않고 평균입도가 약 2-3 μm 이었던 초기 강화재 크기와 동일하게 기지

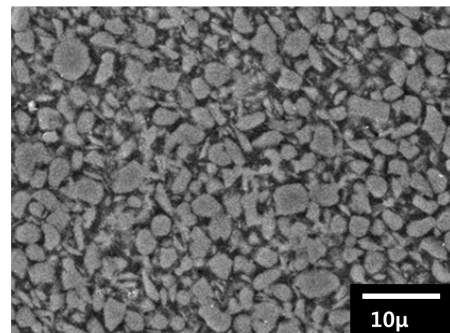


Fig. 3. SEM image of the TiB_2 -Al1050 composite

재인 Al1050에 균일하게 분산된 것을 확인하였다. SEM 조직사진을 이미지 프로그램으로 체적률 분석을 한 결과 TiB₂ 강화재의 체적률은 약 56%임을 확인하였다. 아르키메데스 법으로 5회 측정된 TiB₂-Al1050 복합재료의 평균밀도는 3.645 g/cm³이고, 체적률이 56%인 TiB₂/Al1050 복합재료의 이론밀도는 3.724 g/cm³이므로 액상가압성형 공정으로 제조된 금속복합재료의 상대밀도는 약 97.9%임을 확인하였다. 따라서, 액상가압성형 공정을 이용하여 고체적률 TiB₂-Al1050 복합재료의 경우 약 2.1%의 기공이 존재하지만 전체적으로 TiB₂가 균일 분산되어 있는 치밀화된 알루미늄 금속복합재료가 제조되었음을 확인하였다.

Fig. 4는 TiB₂-Al1050 복합재료의 SEM-EDS 맵핑 이미지이다. 맵핑 이미지 확인 결과 강화재와 기지재의 각각 영역에서 Ti와 Al의 농도가 높은 것을 확인하였으며 Ti, B, Al 이외에 Fe, O, C가 소량 검출되었다. Fe원소는 Al1050 합금 내에 0.35% 함유되어 있으며, 또한 고온에서 실시하는 복합재료 제조 공정 중 Fe와 C, O가 steel 금형에서 미량 혼입된 것으로 판단된다.

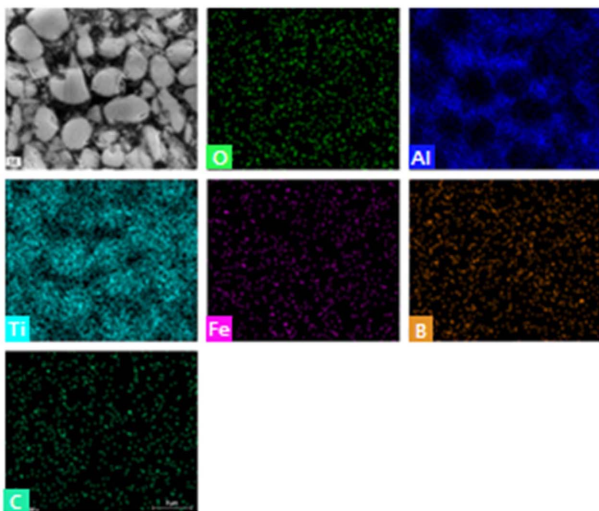
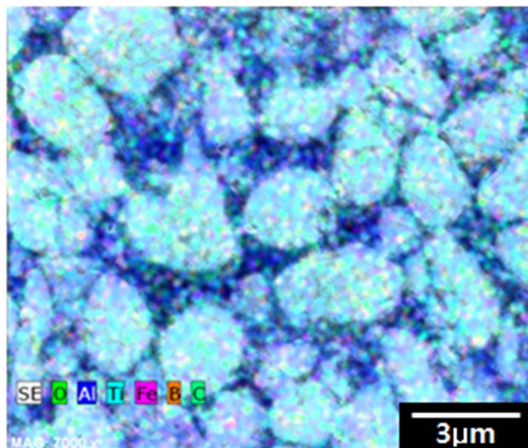


Fig. 4. SEM/EDS mapping images of TiB₂-Al1050 composite

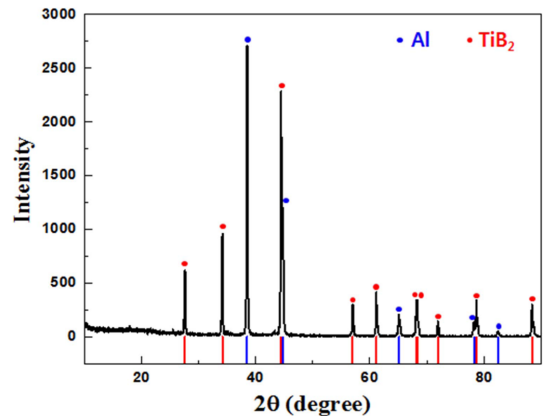


Fig. 5. XRD pattern of TiB₂-Al1050 composite

TiB₂-Al1050 복합재료의 XRD분석 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 앞서 맵핑에서 발견된 미량 혼입된 Fe, O, C의 peak는 관찰되지 않았다. 또한 TiB₂-Al1050의 peak는 크게 TiB₂와 Al 두 종류로 나뉘었으며, Ti_xAl_y 금속간 화합물이나 Al_xB_y 화합물 peak는 관찰되지 않았다.

TiB₂와 Al의 젓음성에 관련된 문헌에 의하면 1400°C 이하의 온도에서는 TiB₂-Al 복합재료 제조공정 중 TiB₂와 Al는 화학반응을 하지 않는다고 보고되고 있다[10,11]. 이는 화합물 peak가 형성되지 않은 Fig. 5의 XRD data와 Al와 Ti의 경계가 정성적으로 나뉘었던 Fig. 4의 맵핑 이미지 결과와 동일하며 TiB₂와 Al1050은 액상 가압 성형 공정 중 반응하여 새로운 상을 형성하지 않음을 확인하였다.

TiB₂-Al1050 복합재료와 Al1050의 인장 및 압축시험 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 어닐링 열처리 된 기지재(Al1050)의 기계적 물성은 인장강도의 경우 약 66 MPa, 연신율은 약 45%로 매우 연질이며 압축강도의 경우 항복강도가 평균 59.4 MPa로 문헌에 보고되는 값과 유사한 수치를 나타내었다[12]. 반면 복합재는 인장강도가 약 300 MPa, 연신율은 3% 내외로, 압축항복강도는 약 581.7 MPa, 연신율은 12%로 측정되었다.

또한, TiB₂-Al1050 복합재료와 Al1050의 밀도, 경도 및 강도를 Table 1에 나타내었다. 밀도가 4.52 g/cm³으로 높은 TiB₂에 의해 TiB₂-Al1050 복합재료는 3.645 g/cm³로 기지재인 Al1050 대비 약 35% 증가하였으나, 경도는 기지재(Al1050) Hv23.2에서 복합재료(TiB₂-Al1050) Hv230.5로 약 10배 증가하였다. 또한 복합재료의 인장강도는 306 MPa로써 기지재 대비 약 4.5배의 증가를 확인하였으며 압축항복강도는 581.7 MPa로 기지재 대비 9.8배 증가하였다. 위와 같이 복합재료의 강도 및 경도가 증가하는 이유는 복합재료 내부의 강화재가 주된 요인으로 강화재는 기지재 내부에 균일 분산되어 있으며 기지금속과 우수한 계면을 가짐으로 인해 TiB₂-Al1050 복합재료가 외부의 물리적인 힘을 받았을 때 기지금속에서 강화재로 하중이 잘 전달되었고, 또한 기

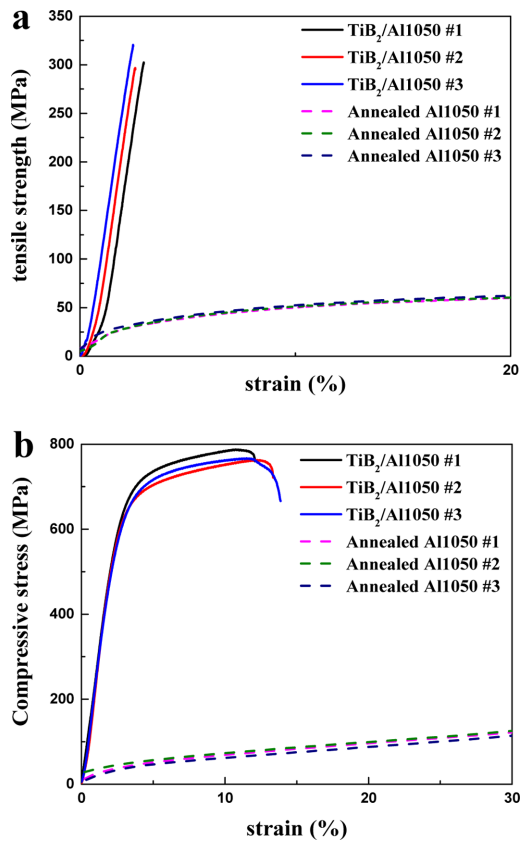


Fig. 6. (a) Tensile stress-strain curves, (b) compressive stress-strain curves of the TiB_2 -Al1050 composite and Al1050

Table 1. Average density and mechanical properties of TiB_2 -Al1050 composite and Al1050

Properties	TiB_2 -Al1050	Al1050
Density (g/cm^3)	3.645	2.710
Hardness (Hv)	230.5	23.2
Ultimate tensile strength (MPa)	306.4	67.1
Compressive yield strength (MPa)	581.7	59.4

지금속에 발생하는 전위의 이동 및 축적을 방해하여 재료의 강도와 경도가 증가하게 된 것으로 판단된다. 따라서 Table 1의 측정된 복합재료 및 기지재의 물성을 바탕으로 액상가압성형공정을 이용하여 밀도 증가 대비 우수한 기계적 물성을 가진 고체적률 TiB_2 입자강화 알루미늄 금속복합재료 제조에 성공하였음을 확인하였다.

기계적 물성 증가 원인을 확인하기 위하여 TiB_2 -Al1050 복합재료 인장 파단면 이미지를 분석한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 금속복합재료의 파괴거동에서 기계적 물성이 향상되기 위해서는 강화재와 기지재의 상호간 결합력을 증가시켜야 한다. 재료가 외력을 받아 변형될 때 전위의 증식 및 축적이 일어나고 이 때 강화재와 기지재 간 결합력이 약할 경우 입계 파단이 발생하고, 결합력이 우수할 경우 강화재

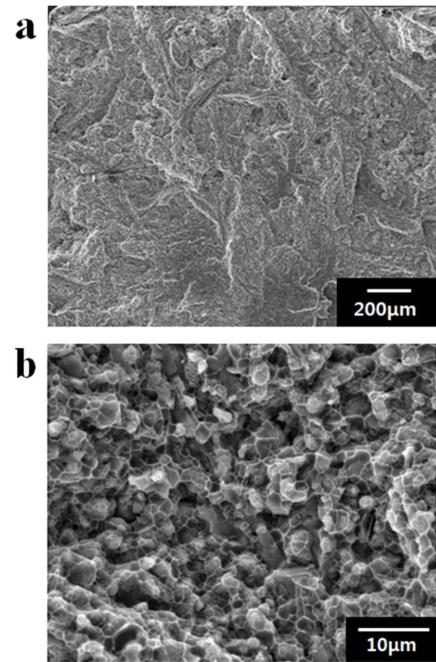


Fig. 7. SEM images of fracture surface of TiB_2 -Al1050 composite

가 외부의 변형 에너지를 흡수한 후 입내 파단이 일어나게 된다. 우선, 인장시험 후 얻은 시편의 파단면을 저배율로 관찰하였을 때 TiB_2 -Al1050복합재료는 거시적으로 취성 파단이 일어난 것을 확인할 수 있었다(Fig. 7a).

배율을 높인 후 동일 시편을 관찰한 결과 외부 인장응력을 받고 시편의 파단이 일어날 경우 복합재료 내의 미세한 TiB_2 세라믹 강화재는 Al 기지재와 우수하게 결합되어 강화재의 입내파단이 일어났으며, 일부 강화재와 기지재의 결합이 파괴되어 강화재가 이탈하는 입계파단이 발생하여 부분적 미함침 영역이 존재하는 것으로 생각된다. 한편 Al 기지의 경우 미세 덩이를 형성하여 복합재료 전체적으로는 혼합파단이 발생함을 확인하였다(Fig. 7b).

본 실험에서는 고체적률 TiB_2 -Al1050 금속복합재료를 액상가압성형공정으로 제조하고 미세조직과 기계적 물성을 분석하였다. 향후 첨가원소가 계면 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 고합금계 Al 기지재를 사용하여 동일 공정으로 실험을 진행할 예정이며, 합금 첨가원소로 인해 강화재와 기지재의 계면 결합력이 상승할 경우 TiB_2 -Al 복합재료의 기계적 물성이 더 향상될 수 있을 것이라 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 고체적률 TiB_2 -Al1050 금속복합재료를 액상가압성형공정으로 제조하였다. 제조된 복합재료의 상대 밀도는 97.9%로 약 2.1% 결함이 존재하였으나 강화재는 공정 중 입성장 없이 기지재 내부에 균일하게 분포되었으며 치밀화된 미세조직을 나타내었다. 제조된 복합재료의 SEM-

EDS mapping 및 XRD 분석결과 TiB₂-Al 복합재료 제조 공정 중 TiB₂와 Al1050은 다른 화합물을 형성하지 않으며 복합재료의 밀도는 3.645 g/cm³로 기지재 대비 35% 증가하였지만 기계적 물성의 경우 경도는 230.5 Hv로써 약 10배, 최대인장강도는 306.4 MPa로 약 4.5배, 압축항복강도는 581.7 MPa로 약 9.8배 증가하여 우주항공, 수송기기, 방탄 등 여러 분야에 적용 가능성을 확인하였다.

후 기

본 연구는 민군기술협력사업(NRF-2014M3C1A9060717)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

REFERENCES

1. Agrawal, S., Chose, A.K., and Chakrabarty, I., "Effect of Rotary Electromagnetic Stirring during Solidification of In-situ Al-TiB₂ Composites", *Materials and Design*, Vol. 113, 2017, pp. 195-206.
2. Cho, S., Jo, I., Lee, S.-K., and Lee, S.-B., "Microstructure and Wear Characteristics of TiC-SKD11 Composite Fabricated by Liquid Pressing Infiltration Process", *Composites Research*, Vol. 30, No. 3, 2017, pp. 209-214.
3. Poria, S., Sutradhar, G., and Sahoo, P., "Design of Experiments Analysis of Friction Behavior of Al-TiB₂ Composite", *Materials Today*, Vol. 4, 2017, pp. 2956-2964.
4. Suresh, S., and Vinayaga Moorthi, N.S., "Aluminium- Titanium Diboride (Al-TiB₂) Metal Matrix Composites: Challenges and Opportunities", *Procedia Engineering*, Vol. 38, 2012, pp. 89-97.
5. Mazaheri, Y., Meratian, M., Emadi, R., and Najarian, A.R., "Comparison of Microstructural and Mechanical Properties of Al-TiC, Al-B₄C and Al-TiC-B₄C Composites Prepared by Casting Techniques", *Materials Science & Engineering A*, Vol. 560, 2013, pp. 278-287.
6. James, S.J., Venkatesn, K., Kuppan, P., and Ramanujam, R., "Comparative Study of Composites Reinforced With SiC and TiB₂", *Procedia Engineering*, Vol. 97, 2014, pp. 1012-1017.
7. Suresh, S., and Vinayaga Moorthi, N.S., "Process Development in stir Casting and Investigation on Microstructures and Wear Behavior of TiB₂ on Al6061 MMC", *Procedia Engineering*, Vol. 64, 2013, pp. 1183-1190.
8. Lee, D., Cho, S., Kim, Y., Lee, S.-K., Lee, S.-B., and Jo, I., "Mechanical Properties and Wear Performance of the Al7075 Composites Reinforced with Bimodal Sized SiC Particles", *Composites Research*, Vol. 30, No. 5, 2017, pp. 1-6.
9. Lee, S.-B., Lee, S.-K., Lee, S., and Kim, N.J., "Microstructure and Mechanical Properties of Two Continuous-Fiber-Reinforced Zr-Based Amorphous Alloy Composites Fabricated by Liquid Pressing Process", *Metallurgical and Materials Trans. A*, Vol. 39, 2008, pp. 763-771.
10. Kamyar, S., Khayyam, H., Abdzadeh, H., Karbalaee, M., Pakseresht, A.H., Abdi, F., Abbasi, A., and Naebe, M., "Effect of B₄C, TiB₂ and ZrSiO₄ Ceramic Particles on Mechanical Properties of Aluminium Matrix Composites: Experimental Investigation and Predictive Modelling", *Ceramics International*, Vol. 42, 2016, pp. 6206-6220.
11. Lixia, X., Kaban, I., Nowak, R., Korpala, B., Bruzda, G., Sobczak N., Mattern N., and Eckert J., "High-temperature Wetting and Interfacial Interaction between Liquid Al and TiB₂ Ceramic", *Journal of Materials Science*, Vol. 50, 2015, pp. 2682-2690.
12. Abdulstaar, M.A., El-Danaf, E.A., Waluyo, N.S., and Wagner, L., "Severe Plastic Deformation of Commercial Purity Aluminum by Rotary Swaging: Microstructure Evolution and Mechanical Properties", *Materials Science & Engineering A*, Vol. 565, 2013, pp. 351-358.