



가스용탕반응법에 의한 Al-AlN 복합재 제조시 교반기 내의 유동장 해석

윤주일^a

A Velocity Field Analysis of Al-AlN Composite Fabrication in an Agitator by Gas Melt Reactions

Juil Yoon^{a*}^a Department of Mechanical System Engineering, Hansung University

ARTICLE INFO

Article history:

Received	8	January	2020
Revised	28	January	2020
Accepted	31	January	2020

Keywords:

Al-AlN composite
Velocity field
Agitator
Gas reaction control

ABSTRACT

The fabrication of Al-AlN composites by gas melt reactions has great potential since it involves a simple manufacturing process and has the ability to achieve a superior composite interface. This paper describes a velocity field analysis of an agitator system for the fabrication of Al-AlN composites. Based on the analysis, while sufficient particle velocities were achieved in the lower end of the stirrer when the AlN fraction of the composites was < 10%, the average velocity of AlN particles decreased rapidly with agitation time. However, the velocity field was not sufficiently developed with higher AlN fractions. Therefore, it is necessary to modify the stirring conditions for high fraction Al-AlN composite materials.

1. 서론

AlN은 낮은 열팽창계수, 높은 열전도율, 우수한 기계적 성질 등으로 복합재료의 강화상으로 매우 적합한 소재이다. 이러한 특성으로 인하여 기계분야에서의 구조소재로 사용될 뿐만 아니라 전자분야에서 방열소재로서 사용이 시도되고 있다. 대표적인 분야로서 LED에서는 방열소재로 열전도도가 높은 재료인 알루미늄, 구리, 은과 같은 금속이 주로 사용되고 있다. 그 중 알루미늄은 경량설계가 가능하고 낮은 온도에 의한 가공공정의 우수성 때문에 더욱 널리 사용되고 있다. 하지만 알루미늄 방열판(heat sink)은 InP, GaN와 같은 LED 소자에 비해 열팽창계수가 5배 이상 크기 때문에 작동온도가 상승함에 따라 LED 소자와의 접착면에서 발생한 열응력에 의한 부품 수명 단축되는 단점이 있다. 이러한 이유로 최근 들어 이와 같은 단점을 보완하고자 알루미늄 기지에 SiC, TiN 등과 같은 세라믹 입자를 섞어 재료의 열팽창계수를 줄인 금

속기지 복합재를 이용해 방열소재를 만들기 위한 연구가 활발히 진행되었다^{[1,2]}}.

일반적으로 AlN의 취성성질을 보상하기 위하여 Al을 모재로 한 AlN/Al 복합재료는 우수한 열특성과 기계적특성 때문에 구조소재나 방열소재로 적합하기에 제조 방법에 대한 연구가 매우 활발하다. 예를 들어 AlN/Al 복합재를 제조하기 위한 방법으로는 교반주조법^{[3]}}, 분말야금법^{[4]}} 등이 있다. 하지만 이러한 제조공법은 성형체 제조의 필요성 등의 복잡한 제조 공정, 강화재와 기지재의 결합면의 불균일성 등의 문제를 가지고 있다. 반면에 가스용탕 반응(gas-melt in-situ reaction)에 의한 복합재료는 액상이나 고상내부에서 화학반응이 일어나 직접 강화상이 생성되는 공정으로서 공정의 단순성 때문에 경제적으로 우수하고 강화재와 기지금속과의 계면 성질이 우수하며, 열적 안정성이 뛰어나다는 장점이 있다고 알려져 있다^{[5-8]}}. 이러한 장점에도 가스용탕 반응에 의한 복합재료 생성시에는 교반조건의 유무에 따라 강화재인 AlN이 분산이 전혀

* Corresponding author. Tel.: +82-2-760-8008

E-mail address: juilyoon@hansung.ac.kr (Juil Yoon).

이루어지지 않을 수도 있는 등의 문제점이 보고되고 있다^{5]}.

이러한 선행 연구에 기초하여 본 연구는 새로운 복합재 제조 기술인 가스반응 제어 복합소재 제조 기술을 적용하여 Al-AIN 복합재를 제조할 시 교반기 강화상인 AIN이 용탕기에서의 유동장을 얼마나 이루고 있는지를 예측하여 제조공정변수 기초자료를 구축하는 것으로 AIN 강화상의 분율에 따른 교반기 내의 평균 속도장에 대한 연구를 수행하였다. 현재 해석상으로 제안된 교반조건으로는 고분율의 교반시 분산이 충분하지 않을 것을 예측하였다.

2. 가스용탕반응 제어 복합재 제조기술

복합소재란 두 종류 이상의 소재를 이용하여 소재의 원래의 상을 유지하면서 서로의 특성을 상호 보완하여 원래의 소재보다 우수한 성능을 갖도록 한 재료를 말한다. 이러한 복합소재 제조기술은 일반적으로 모재와 강화상(또는 제 2상)을 각각 독립적으로 제조하여 공정 중에 물리적으로 혼합하는 방식으로 이루어진다. 이러한 방식은 불완전한 계면(interface), 복잡한 공정, 경제적 문제 등이 단점이 될 수 있다.

이러한 복합소재 제조 기술의 본질적인 문제를 해결하기 위하여 본 연구단에서는 가스 반응 중에 모재(Al)에서 강화상(AIN)이 자발 반응을 통하여 생성되도록 함으로써 공정의 단순화와 계면의 불균질성 등을 극복하고자 하였다. 구체적으로 가스반응 제어 복합소재 제조 기술이란 Mg 촉매를 포함하는 Al 용탕에 N₂ gas를 주입하는 직접 질화법에 의해 Al-AIN 복합재를 제조하는 방식을 말한다.

AIN ($a_{AIN}: 5 \sim 6 \times 10^{-6} / K$)은 SiC ($a_{SiC}: 3 \sim 5 \times 10^{-6} / K$)와 유사한 열팽창계수를 가지면서도 고온에서 알루미늄과의 반응성이 거의 없는 고열전도($K_{AIN}: 180 \text{ W/mK}$) 세라믹 물질이다. 특히나 고온에서 Al 용탕과 질소 가스반응을 통한 AIN의 형성이 열역학적으로 안정한 자발반응으로 알려져 있다. 용탕 Al에서 AIN을 합성하기 위한 공정조건으로, 온도는 800 ~ 1200°C, N₂ 가스압력은 2 기압을 사용한다. 이와 같은 실험조건을 제공하기 위해 가압 하에서 압력을 제어할 수 있는 Fig. 1의 주조반응기를 사용하였다.

이 주조반응기는 공급가스와 배출가스의 차이를 조절하여 N₂ 압력을 제어한다. 또한 챔버 내부에 코일을 이용한 전자기유도에 의한 온도 구배를 형성시켜 Al 기지 내의 AIN의 농도 구배가 용이할 수 있도록 하였다. 이 주조반응기의 최고 온도는 1500°C이며, 최대 N₂ 가스 압력은 3 기압까지 적용 할 수 있다. 특히나 AIN 반응을 결정하는 핵심적인 공정 변수들은 온도, 촉매의 조성, 반응시간, 그리고 질소의 분압이다. 이러한 공정 변수에 의하여 Al-AIN 복합재내의 강화상인 AIN복합재의 분율이 결정된다.

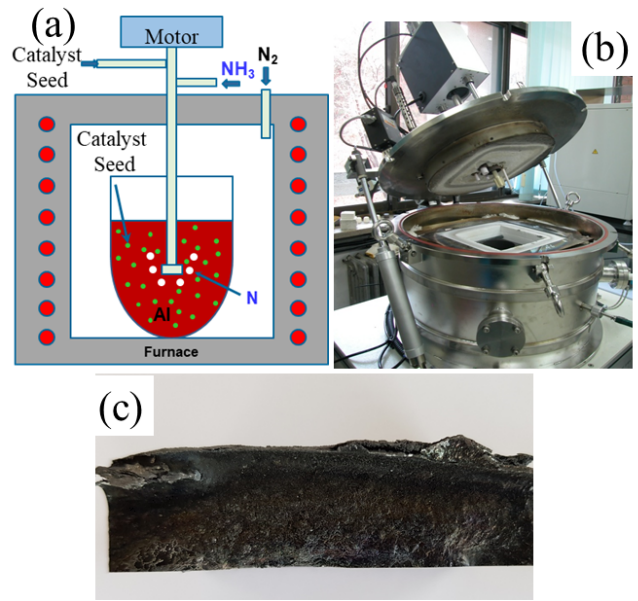


Fig. 1 Gas-Melt reactor system, (a) The schematic drawing of mechanism of melting machine, (b) Melting machine for high temperature and pressure casting (c) Photos of as-cast samples of Al-AIN composites

3. Al-AIN 교반기 유동해석

가스용탕반응을 통하여 Al 기지 AIN 복합재 생성이, 교반기 (agitator) 내의 도가니 크기 및 팬 형상, 분당 회전수 등의 교반조건에 의한 Mixing 효과를 검토하는 것은 양질의 복합재 결과물을 얻기 위하여 매우 중요하다. 특히나 실험결과만으로 가스용탕반응을 위한 최적의 조건을 도출하기란 매우 힘들다^{5]}. 또한 Jae Deuk Kim이 언급하였듯이 교반기 없이 가스반응을 일으키는 경우 AIN이 전체 복합재에 고루 분산되는 것이 아니라 층상으로 반응하는 것으로 보고 되고 있다. 따라서 교반기를 적용한 전산모사를 통한 유동현상을 분석하는 것은 필수적이다. 본 연구에서는 교반기시간에 따라서 AIN 속도장을 검토하였다. 이를 바탕으로 실제 실험 및 제조 시 필요한 기본 데이터 확보하였다.

3.1 해석 교반기 형상 및 물성

해석 도가니 형상은 실제 제작한 기본형 도가니 모델(Fig. 1)에 근거하여 해석모델을 정립하였으며, Fig. 2와 같다. 교반기는 도가니의 정중앙에 지름 10 mm의 축에 부착되어 있으며, 교반기 하단부는 도가니 바닥면으로부터 25.5 mm 위에 있다. 교반기의 형상은 사다리꼴 형태를 취하고 있으며, 효율을 높이기 위하여 용융된 Al, AIN를 도가니 바닥면에서 상부로 쳐올려주는 기능을 할 수 있게 경사 블레이드 팬(pitched blade fan) 형태를 취하도록 하였다. 교반기의 회전속도는 200 rpm이며 N₂ 가스의 주입압력은 2

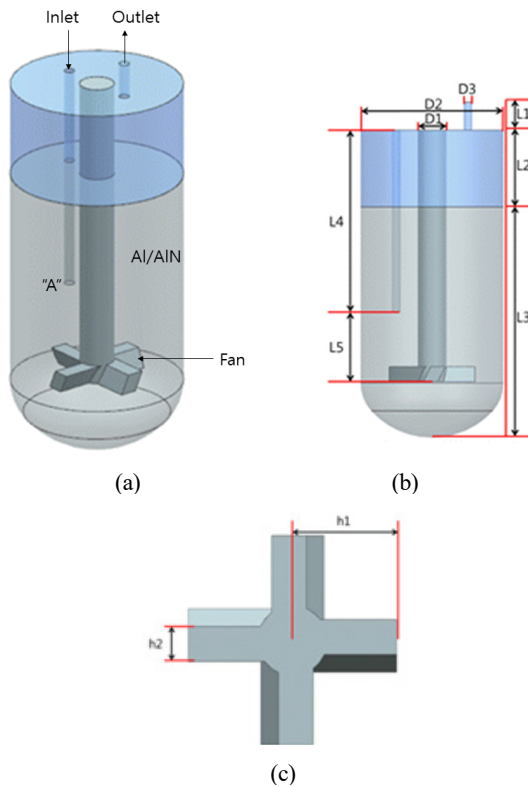


Fig. 2 Agitator system for Al/AIN composite, (a) Isometric 3D view of agitator system, (b) Front view of agitator system (c) Top veiw of pitched blade fan

bar로 설정하였다. 그 외의 물성치와 교반기의 중요 형상 정보는 Table 1에 정리되어 있다.

3.2 용탕 해석 모델

Al 기지 AIN 복합재 생성에 관련된 해석은 열역학적 반응식을 고려한 매우 복잡한 생성모델을 적용하여 수행할 수 있으나, 이는 해석시간이 상당히 소요되며, 정확도를 보장하기 위해서는 실험과 해석의 지속적인 반복 작업이 요구된다. 본 연구의 1차적인 목적인 기본적인 주조반응 조건을 검증하고 제2상의 분산정도를 검토하기 위함이다. 따라서 N₂ 가스 및 촉매 등에 의한 반응은 제외하고, 제2상인 AIN이 자발 반응에 의하여 생성된 후부터를 해석대상으로 고려하였다. 보다 자세히 설명하자면, Fig. 2에서 L4로 명시된 원형관의 본래 기능은 Al이 들어있는 도가니 내부로 촉매를 주입시키기 위해 만들었으나, 촉매 주입 시 원형관 근처에서부터 AIN가 가스 자발 반응에 의해 일정시간동안 일정비율로 생성된다는 가정 하에 Mg₃N₂ 가스 대신 AIN를 초당 질량 유동 비율(mass flow rate)로 바꾸어 해석을 수행하였다. 이러한 AIN 생성은 600 초 경에 완료된다고 가정하였다^[5]. 팬의 RPM, 형상, 부피 분율에 따라 시간별로 AIN가 퍼지는 현상을 파악하기 위해 천이(transient) 해석을 1초 간격으로 수행하여 Al/AIN 유동장, 부피 분율 분포도

Table 1 Typical Material Properties and Dimension of Agitator system

Material	Density (g/cc)	Viscosity (Poise)			
Al6012	2.8	80			
AIN	3.2	100			
Dimension	D ₁	D ₂	L ₃	L ₄	h ₁
Length (mm)	10	52	83	66	16

를 검토하였다.

유동 해석의 정확도 향상을 위해 격자를 약 60만 요소로 분할하였으며, 특히 가스 유입 관로 주변과 팬 유동 주위를 집중적으로 생성 하였다. 외부에 노출된 요소의 크기와 내부 요소 크기 차를 최소화 시켜 수치 오류를 최소화하였다. 용탕 내의 자유수면 및 상 분포 해석을 수행하기 위해 앞서 기술한 바와 같이 용융 알루미늄과 AIN, 공기의 물성을 적용한 유동해석을 실시하였으며 ANSYS Fluent 내의 다상 유동 모델 해석을 위한 VOF (volume of fluid), mixture, eulerian 방법 중 고압, 폐쇄식(non-open channel) 등의 해석 조건에 적합한 mixture 방법을 선택하였다. 또한 MRF (motion reference frame)을 이용하여 각각의 계산 스텝마다 재격자 생성을 통해 해석의 정확도를 높였다.

4. 결과 및 고찰

교반기의 성능을 파악하기 위하여, 교반기 내부에서의 입자들의 유동장에 대한 정보는 매우 중요하다. 기본형 팬을 이용한 교반기에서 200 rpm으로 팬이 회전하고 있을 때의 교반기 내부의 AIN 입자의 평균 유동장을 Fig. 3 (AIN volume fraction 10%), Fig. 4 (AIN volume fraction 20%) Fig. 5 (AIN volume fraction 30%)에 정리하였다. AIN의 부피 분율에 의한 속도, 부피 분율의 분포정도를 정량적으로 비교 검토하기 위하여 교반기 바닥면에서 15 mm (하층면, bottom bplane), 30 mm (중층면, middle plane), 50 mm (상층면, top plane) 위치한 곳에서 해석 결과를 추출하였다. 또한 노즐부위의 영향을 배제하기 위하여 노즐이 없는 쪽의 데이터를 추출하였으며, 부피 분율의 경우 마찬가지로 원형 평면의 한쪽 부분에서 추출한 데이터를 사용하였다.

AIN 최종 분율이 10%인 경우(Fig. 3), 주조반응 초기에는 하층면에서의 평균 속도는 대략 0.14 mm/s로 유동장이 비교적 잘 발달되어 있다. 이는 하층면이 상대적으로 중층면, 상층면에 비하여 팬의 직접적인 영향을 받고 있기 때문이다. 또한 AIN의 비율이 적은 비중이기 때문에 판단된다. 이에 반하여 유동장은 중층면에서 상층면으로 올라갈수록 감소함을 확인 할 수 있다. 시간의 경과에 따라 AIN의 양이 증가하게 되며, Al에 비하여 밀도와 점도가 상대

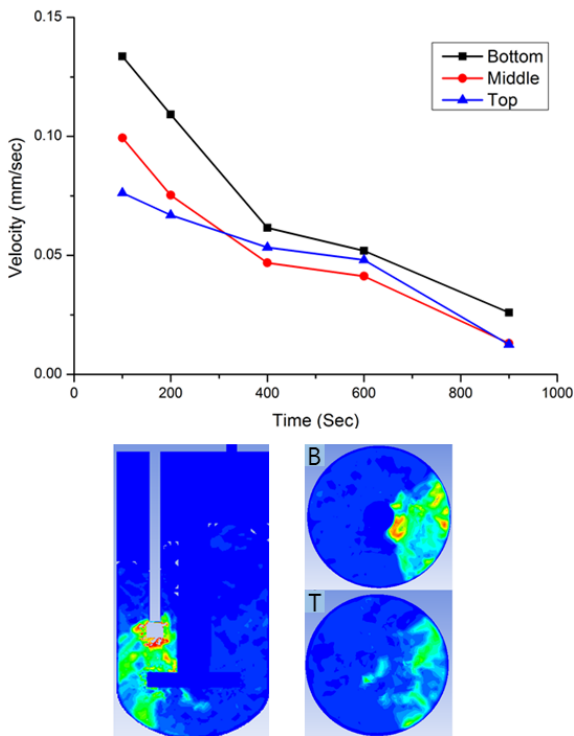


Fig. 3 (Top) Velocity distribution of AIN Particle over agitating time in the agitator system with AIN volume fraction 10%, (Bottom) Velocity field in the agitator when agitating time = 10 min

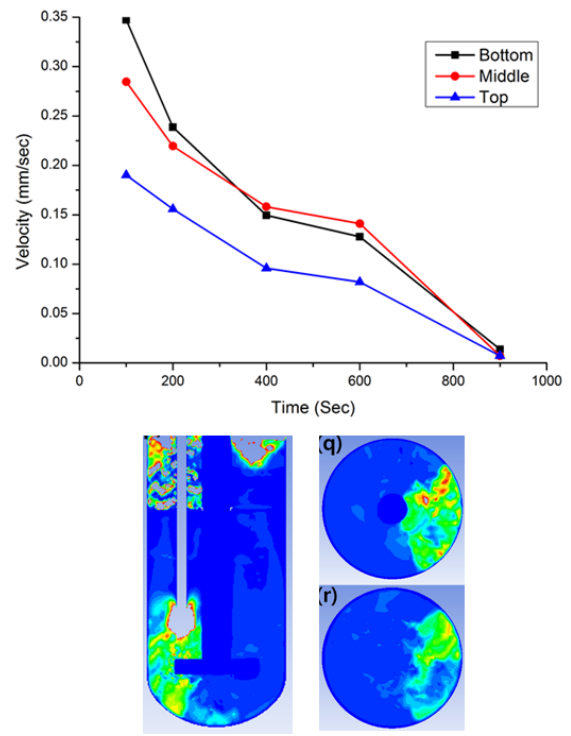


Fig. 5 (Top) Velocity distribution of AIN Particle over agitating time in the agitator system with AIN volume fraction 30%, (Bottom) Velocity field in the agitator when agitating time = 10 min

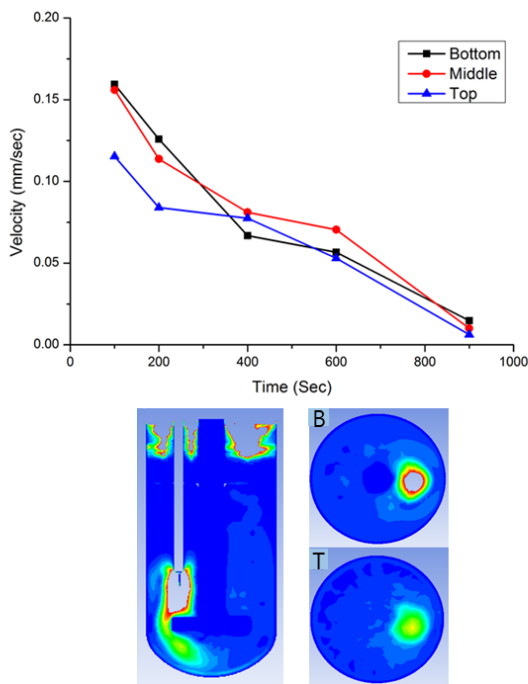


Fig. 4 (Top) Velocity distribution of AIN Particle over agitating time in the agitator system with AIN volume fraction 20%, (Bottom) Velocity field in the agitator when agitating time = 10 min

적으로 높은 AIN의 증가는 결과적으로 전체 평균 속도를 감소시키게 된다.

이는 유동해석결과에도 잘 나타나있으며, 600 초경에는 하층면, 중층면, 상층면 모두 속도장이 현저히 감소하였으며, 평균적으로 0.5 mm/s 내외였다. 흥미로운 사실은 상층면에서의 속도의 감소에 비하여 하층면에서의 속도의 감소가 매우 급격하다는 사실이다. 이는 AIN이 충분히 상층면으로 이동하지 못하고, 대부분 하단부에 적층되고 있는 결과로 판단된다. 이러한 결과 직접적인 팬의 영향권에 있는 하단부에서도 초기에 비하여 속도장이 급격히 감소하고 있다.

최종 분율을 10%에서 20%, 또는 30%로 향상시킬시 최종 분율 10%와 비슷한 경향성을 보여주었다(Fig. 4, 5). 구체적으로 최종 분율이 증가함에 따라 일반적으로 전체 유동장의 속도가 감소하였으며, 15분정도의 교반시간이 지난 후 평균속도의 감소는 상당하였다. 예를 들어, 최종 분율 10%의 하층면에서의 평균속도는 0.026 mm/s에서 최종 분율 30%로 변경시, 동일한 하층면에서의 평균속도는 0.0126 mm/s로 감소하였다. 이러한 결과는 하층면에서의 유동장이 거의 발달하지 못하고 있음을 의미하며, AIN이 하단면에 지속적으로 적층이 되고 있다는 사실이다. 따라서 고분율의 AI 기지 AIN 복합재를 주조반응으로 제조시 이러한 현상을 피

하기 위해서는 팬설계 등의 교반기 조건을 변경할 필요가 있다고 판단된다.

5. 결론

질화반응에 기반을 둔 가스반응제어 복합재 제조 기술에 의하여 제조시 교반기 내의 Al-AlN복합재의 유동장 특성에 대한 연구를 수행하였고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

AlN 분율이 10%인 경우 AlN 입자의 평균 속도는 교반기의 하단부에서는 충분하였으나 시간이 경과함에 따라 급격히 감소하는 경향을 보였다. 반면 교반기의 상층부에서는 AlN 입자의 속도도 충분하지 않았고 교반이 충분히 이루어지지 않고 있음을 확인하였다. 이러한 경향은 AlN 분율이 증가함에 따라 심화되었고, 속도장이 충분히 발달하지 않았다. 따라서 고분율의 AlN/Al 복합재를 교반하기 위해서는 교반조건의 변경이 필요할 것으로 판단된다. 예를 들어 팬설계의 변경 또는 교반 온도조건의 변경 등이 필요할 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 한성대학교 연구비 지원과제로 연구되었음.

References

- [1] Zweben, C., 1998, Advances in Composite Materials for Thermal Management in Electronic Packaging, Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, 50 47-51, <https://doi.org/10.1007/s11837-998-0128-6>.
- [2] Hou, Q., 1995, Feasibility of Aluminium Nitride Formation in Aluminum Alloys, Materials Science and Engineering A, 195 121-129, [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(94\)06511-X](https://doi.org/10.1016/0921-5093(94)06511-X).
- [3] Taheri-Nassaj, E., Kobashi, M., Choh, T., 1995, Fabrication of an AlN Particulate Aluminium Matrix Composite by a Melt Stirring Method, Scripta Mater., 32:12 1923-1929, [https://doi.org/10.1016/0956-716X\(95\)00083-8](https://doi.org/10.1016/0956-716X(95)00083-8).

- [4] Tajika, M., Matsubara, H., Rafaniello, W., 1999, Microstructural Development in AlN Composite Ceramics, Nanostructured Mater., 12:1-4 131-134, [https://doi.org/10.1016/S0965-9773\(99\)00081-1](https://doi.org/10.1016/S0965-9773(99)00081-1).
- [5] Kim, J. D., Euh, K. J., Lee, J. M., Kang, S. B., 2003, Fabrication of AlN/Al Composites by Gas-Melt in-situ Reactions, J. Kor. Inst. Met. & Mater., 41:5 313-320.
- [6] Kumari, S. S. S., Pillai, U. T. S., Pai, B. C., 2011, Synthesis and Characterization of in situ Al-AlN Composite by Nitrogen Gas Bubbling Method, J. Alloys. Compounds, 509:5 2503-2509, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.11.065>.
- [7] Yoon, J., 2018, Prediction Thermo-mechanical Characteristics due to 2nd Phase Fraction of Al-AlN Composite for LED Heat Sink using FEM, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 17:5 137-142, <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2018.17.5.137>.
- [8] Yoon, J., 2019, Prediction of Thermal Expansion Coefficients using the Second Phase Fraction and Void of Al-AlN Composites Manufactured by Gas Reaction Method, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 18:4 41-47, <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2019.18.4.041>.



Juil Yoon

Professor in the Department of Mechanical System Engineering, Hansung University. His research interest is Thermo-mechanical reliability of microelectronic devices and micro-systems, Mechanics of the micro/nano structures in flexible macroelectronics, 3D Printing systems.
E-mail: juilyoon@hansung.ac.kr