

유한요소해석을 이용한 방열용 Al-AIN 복합재의 제2상 분율에 따른 열-기계적 특성에측

윤주일*.#

*한성대학교 기계시스템공학과

Predicting Thermo-mechanical Characteristics from the 2nd Phase Fraction of Al-AIN Composites for LED Heat Sinks with FEM

Juil Yoon*.#

*Department of Mechanical System Engineering, Hansung UNIV.

(Received 31 May 2018; received in revised form 4 July 2018; accepted 10 August 2018)

ABSTRACT

With the development of the electronic-materials industry, multi-functional metal-composite materials with high thermal conductivity and low thermal expansion must be developed for high reliability and high life expectancy. This paper is a preliminary study on the manufacturing technology of gas reaction control composite material, focusing on the prediction of the equivalent thermal properties of Al-AIN composite materials. Numerical equivalent property values are obtained by using finite element analysis and compared with theoretical formulas. Al-AIN composite materials should become the optimal composite material when the proportion of the reinforcing phase is less than 0.5.

Key Words : Al-AIN Composite(Al-AIN복합재), Thermal Conductivity(열전도계수), LED(LED), Finite Element Method(유한요소법), Gas Reaction Control(가스제어반응)

1. 서 론

LED는 에너지 대비 우수한 광특성 때문에 친환경 소자로 인식되고 있으며 다양한 분야에서 사용되고 있다.^[1-2] 하지만 첫째로 출력 증가와 함께 방열문제로 인하여 LED 투입전력의 50-90% 수준이 열에너지로 소비되며 효율이 급속히 떨어지는 단점

을 가지고 있다.

두 번째로 발생된 열은 LED 소자의 자체 효율을 저하시키며 결과적으로 수명 감소의 문제점이 있다. 이는 LED 산업의 더 큰 발전을 위해 반드시 극복되어야 하는 과제이다. 이러한 LED방열 문제 해결 방안으로 우수한 열전도성의 TIM개발, 히트파이프 또는 강제대류방식 설계 또는 열전도성이 우수한 방열소재 개발 등이 국내외에서 연구되고 있다.^[3-7] 하지만 LED 방열과 관련된 연구는 우수한 열전도성을 지닌 방열소재를 사용하여 히트싱크 형상과 배열을 효율적으로 설계하여 방열특성을 높이

Corresponding Author : juilyoon@hansung.ac.kr

Tel: +82-02-760-8008, Fax: +82-02-760-4329

는 연구에 한정되고 있다.

일반적으로 LED 방열소재는 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 heat sink는 InP, GaN와 같은 LED 소자에 비해 열팽창계수가 5배 이상 크기 때문에 작동온도가 상승함에 따라 LED 소자와의 접촉면에서 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 금속기지 복합재를 이용해 방열소재를 만들기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.^[7-9]

본 연구는 새로운 복합재 제조기술인 가스반응 제어 복합소재 제조 기술을 적용하여 Al-AlN 복합재를 제조할 시 제2상인 AlN의 분율에 따른 열전도계수를 예측하여 제조공정변수 설정자료를 만들기 위함이다. 2장에서는 가스반응 제어 복합소재 제조 기술에 대한 간략한 소개를 하였고 3장에서는 금속 복합 소재의 유효 열전달 계수의 이론식과 유한요소해석에 대하여 소개하였다. 4장에서 분율에 따른 Al-AlN복합재의 분율에 따른 열전달계수에 대한 연구를 수행하였고 특히나 강화상(AlN)의 분포에 의한 효과가 어느 정도인지에 대하여 연구를 수행하였다. 특히나 강화재의 2차원 배열은 강화재의 분율이 높은 경우 무시될 수 없는 요소라는 사실을 확인하였다. 최종적으로 등가 물성치 예측을 통하여 최적 분율의 값을 도출하였으며 이를 통하여 복합소재 개발의 공정설계 변수로 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 가스반응 제어 복합소재 제조 기술

일반적인 복합소재 제조는 모재와 강화상(또는 제2상)을 각각 독립적으로 제조하여 최종공정에서 물리적으로 혼합하는 방식으로 이루어진다.

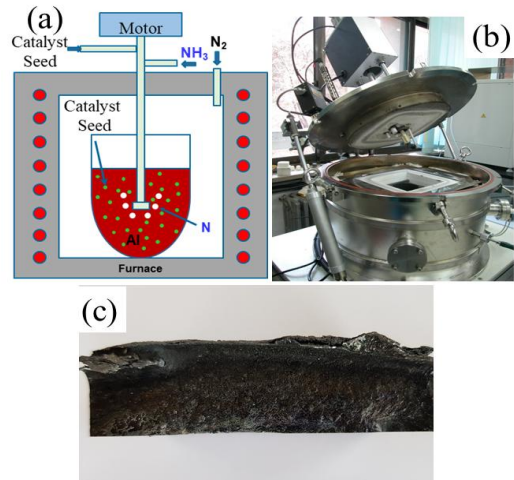
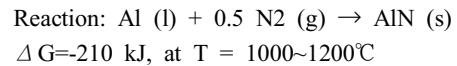


Fig. 1 (a) The schematic drawing of mechanism of melting machine, (b) Melting machine for high temperature and pressure casting (c) Photos of as-cast samples of Al-AlN composites

이러한 방식은 불완전한 계면(Interface), 복잡한 공정, 경제적 문제 등이 단점이 될 수 있다. 본 연구단에서 연구를 수행하고 있는 가스반응 제어 복합소재 제조 기술이란 Mg 촉매를 포함하는 Al 용탕에 N₂ gas를 주입하는 직접 질화법에 의해 AlN 분말을 제조하여 Al-AlN복합재를 제조하는 방식을 말한다. 이 방식은 다음 식에서 알 수 있는 바와 같이 고온에서 Al 용탕과 질소 가스반응을 통한 AlN의 형성이 열역학적으로 안정한 자발반응이다.



용탕 Al에서 AlN을 합성하기 위한 공정조건으로, 온도는 800 ~ 1200°C, N₂ 가스압력은 2 기압을 사용한다. 이와 같은 실험조건을 제공하기 위해 가압하에서 압력을 제어할 수 있는 주조반응기를 사용하였다(Figure 1).

이 주조반응기는 공급가스와 배출가스의 차이를 조절하여 N₂ 압력을 제어한다. 또한, 챔버 내부에 코일을 이용한 전자기유도에 의한 온도 구배를 형

성시켜 Al 기지 내의 AIN의 농도 구배가 용이할 수 있도록 하였다. 이 주조반응기의 최고 온도는 1500°C이며, 최대 N2 가스 압력은 3 기압까지 적용할 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 분율(fraction)이 결정된다. 현재까지 반응온도는 열역학적으로 AIN 형성이 가능한 800, 900 그리고 1000°C로 결정되었으며 온도에 따라 AIN 생성물 양과 생성거동이 관찰되었다(Figure 1).

3. 이론 모델 및 수치해석 모델

3.1 이론모델 - 유효열전달 계수

복합재의 유효 열전달 계수 예측에 대한 다양한 연구 중 대표적으로 단순 모델인 혼합물 모델(Series Model), 탄성론에 기반한 Eshelby의 등가개재물 모델(Equivalent inclusion method)^[10]와 Mori-Tanaka의 평균장 이론 모델(Mean field theory)^[11]을 들 수 있다. 또한 Hashin과 Shtrikman은 변수접근법(H-S Model)을 사용하여 복합재의 열팽창계수 및 열전도계수 등을 예측하였다^[12]. Kirkpatrick은 평균장 이론으로부터 강화재의 불규칙적인 배치도 고려한 유효매질이론(EMT: Effective medium theory)을 제안하였다^[13].

Table 1 Explicit expressions of thermal conductivity for the composite with spherical fillers

| Theoretical Model | |
|------------------------|---|
| Series Model | $k_{eff} = \frac{1}{\frac{(1-f)}{k_m} + \frac{f}{k_f}}$ |
| Hashin-Shtrikman Model | $k_{eff} = k_m \frac{2(1-f)k_m + (1+2f)k_f}{(2+f)k_m + (1-f)k_f}$ |
| EMT Model | $k_{eff} = \frac{1}{4}((3-f)k_f + (2-3f)k_m) + \sqrt{[(3-f)k_f + (2-3f)k_m]^2 + 8k_mk_f}$ |

본 연구에서는 혼합물 모델, H-S 모델, EMT 모델을 수치해석 모델의 비교모델(Table 1)로 사용하여 수치해석 모델과 이론 모델의 비교 검토를 수행하였다.

3.2 수치해석 모델

본 연구에서는 원형 강화상이 포함된 복합재의 유닛셀(unit cell)에 대한 열해석을 수행하였다. 제2상(AIN)의 열전도계수는 k_f 이며, 모재(Al)의 열전도계수는 k_m 이다. 사용된 열하중 조건은 해석모델의 양쪽 끝단에 단위 온도구배를 발생시키는 방식이다(Figure 2). 경계조건으로는 열해석의 방향에 수직인 면은 단열조건을 부여 하였다. 이러한 해석을 통하여 구하여진 열플럭스(heat flux)로부터 훅스의 열확산 법칙(Fick's law)를 이용하여 복합재의 유효열전달계수를 계산할 수 있다. 가스반응제어에 의하여 제조될 Al과 AIN의 물성치는 기본 물성값은 Table 2에 정리하였다. 또한 유한요소 해석은 원형 강화상 가정과 그리고 강화상과 모재사이의 접촉이 완벽하다는 가정, 보이드(void)가 없다는 가정 하에 수행되었다.

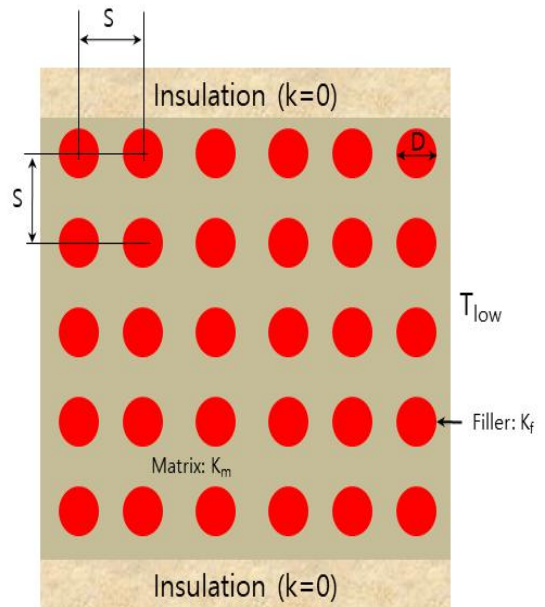


Fig. 2 FEM Modeling of Al-AIN Composites

Table 2 Material Property for FEM Analysis

| | Property | Value |
|-----|------------------------------------|-------|
| Al | Young's Modulus: E_m (GPa) | 69 |
| | Poisson's Ratio: ν_m | 0.33 |
| | Thermal Conductivity: K_m (W/mk) | 230 |
| | CTE (ppm/K): α_m | 24 |
| ALN | Young's Modulus: E_f (GPa) | 320 |
| | Poisson's Ratio: ν_f | 0.25 |
| | Thermal Conductivity: K_f (W/mk) | 180 |
| | CTE (ppm/K): α_f | 5 |

4. 해석결과 및 고찰

4.1 FEM해석모델과 이론해의 비교

우선적으로 FEM해석모델과 이론모델의 비교를 통하여 해석모델의 유효성을 검증하였다. 모재와 강화상의 열전도비(K_f/K_m)가 0.5, 0.6, 0.78, 1, 3, 10, 50인 경우에 대하여 복합재의 유효열전달 계수를 유한요소해석을 통하여 구하였다. 해석모델의 경우 모재와 강화상의 열전도비가 0.1~100사이에서 대부분 H-S 모델의 결과와 매우 가깝게 나왔다. 참고로 단순 모델인 Series model의 경우 모재와 강화상의 열전도비 차이가 매우 큰 경우 ($K_f/K_m < 0.1$ 또는 $K_f/K_m > 10$)의 경우 다른 이론모델과 해석모델과 비교적 큰 차이를 보였다.

특히나 강화재와 모재의 열전달 비율(K_f/K_m)이 0.8~2 경우는 유한요소해석모델에 의하여 구하여진 정규화된 유효열전달 계수(K_{eff}/K_m)값은 0.8~1.1 값을 나타내며 세가지 이론식 모두와 매우 잘 일치하였다. 실제로 본연구의 타겟이 되는 Al-AIN의 경우 열전도비는 0.78내외가 되며, 이 경우 해석의 결과는 매우 정확함을 확인 할 수 있다.

가스반응 복합소재 제조에서 공정변수의 변화에 따라 강화상의 분율, 분산정도 등이 조절된다. 강화상의 분율 비율에 따른 유효열전달계수의 효과를 분석하기 위하여 Al-AIN 복합재의 경우($K_{Al}=180$ W/mk, $K_{AIN}=230$ W/mk)에 대하여 분율별 해석을 수행하였고 이를 이론모델과 비교하여 그림 4에 도시하였다.

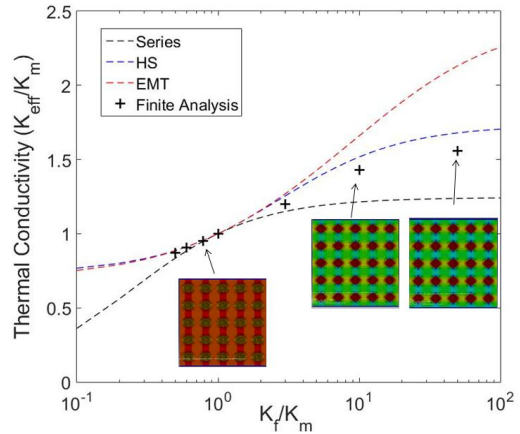


Fig. 3 Comparison between Effective thermal conductivity calculated by FEM Modeling and those by various theoretical modeling (volume fraction 0.196)

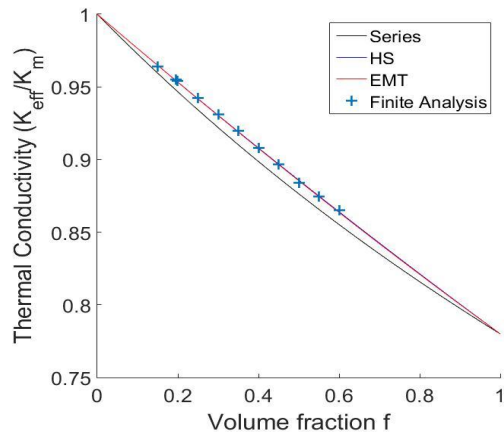


Fig. 4 Comparison between Effective thermal conductivity calculated by FEM Modeling and those by various theoretical modeling ($K_f/K_m=0.78$)

Table 3 Effective thermal conductivity and C.T.E v.s. fraction ratio of AIN in Al/AIN Composite

| | 0.3 | 0.35 | 0.4 | 0.45 | 0.5 |
|-----|------|------|------|------|------|
| K | 214 | 211 | 209 | 206 | 203 |
| CTE | 18.3 | 17.4 | 16.4 | 15.5 | 14.5 |

강화상인 AIN의 분율이 증가함에 따라 가스 반응 복합재의 열전도율이 비교적 선형적으로 감소하고 있다. 이는 AIN의 열전도율이 AI에 비하여 작고, AI과 AIN의 열전도계수의 차이가 적기 때문이다. 실제로 AIN을 강화상으로 본 과제에서 선택한 이유는 AIN의 작은 팽창계수(Coefficient of Thermal Expansion: C.T.E) 때문이다. 복합재의 유효 열팽창계수를 계산하기 위하여 R.O.M(rule of Mixture)를 이용하여 그 결과를 표 3에 정리하였다.

결과적으로 본 연구과제의 목표인 복합재의 열전달계수가 200W/mk 이상을 유지하면서 최소의 CTE 값을 얻기 위해서는 AIN 강화상의 volume fraction은 0.5를 넘지 않는 선으로 제조되어 제조변수를 제공해주고 있다. 보다 정확한 CTE예측을 위한 연구는 FEM모델을 이용한 보다 정확한 연구가 필요하며 이는 다음 연구주제가 될 것이다.

4.2 강화상의 정렬에 의한 효과

대부분의 이론모델과 해석모델의 경우 제 2상이 그림 2와 같이 강화상이 바둑판 모양으로 동일한 위치에 정렬되어 있는 경우를 가정하고 유효열전달 계수를 예측한다. 하지만 실제 제조시 공정조건에 따라 AIN의 발생은 정렬이 완벽하지 않으며 약간씩 틀어져있는 상태이다. 강화상의 정렬에 의한 효과에 의하여 실제 제조될 Al-AIN 복합재의 유효열전달 계수에 이러한 정렬에 의한 효과가 미치는 영향을 분석하기 위하여 정렬된 정도인 d/S 값에 따른 유효 열전달 계수 값의 변화를 분석하였다. S 는 강화상간의 거리이며, d 는 강화상과 다음 강화상이 비틀어져 있는 정도이다. $d/S=0$ 인 경우는 그림 2와 같은 바둑판 모양이며, $d/S=0.5$ 가 정렬이 가장 어긋난 경우이다.

AI의 분율이 0.1인 경우 Al/AIN 복합재의 유효열전달 계수에 있어서 정렬에 의한 효과는 미비하였다(그림 5(a)). 구체적으로 $d/S=0$ 인 경우를 1로 정의하면 $d/S=0.5$ 인 경우 0.995 정도로 0.5%정도의 차이를 나타낸다. 분율이 적은 경우 유효장 모델의 이론식이 FEM결과와 유사하다는 결론과 같다. 하지만 복합재의 강화상 분율이 0.3인 경우 이 차이는 2.5% 정도이다. 따라서 본 연구에서 수행하고 있는 Al-AIN의 경우 유효열전달 계수를 구하기 위해서

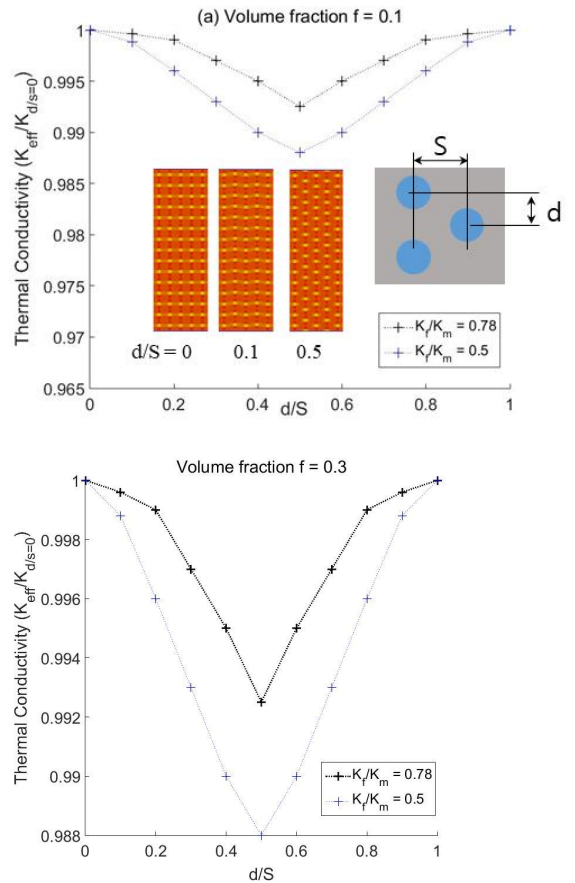


Fig. 5 Thermal Conductivity vs skewness of 2nd phase: (a) volume fraction $f=0.1$, (b) volume fraction $f=0.3$

일반적인 바둑판 모양의 정렬모델을 사용하여도 큰 문제는 없을 것으로 판단된다.

5. 결론

질화반응에 기반을 둔 가스반응제어 복합재 제조 기술에 의하여 제조된 Al-AIN복합재의 열전도 특성에 대한 연구를 수행하였고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) LED 방열소재로서 사용하기 위하여 일반적으로 제시되는 200W/mk이상의 열전도계수를 얻으면

서 최소의 열팽창계수를 얻기 위해서는 AlN 분율 0.5까지 복합재를 개발하여도 될 것으로 판단된다.

2) 분율이 낮은 경우 제2상의 정렬에 의한 효과는 매우 미비하며 분율이 증가함에 따라 그 효과는 증가한다.

3) 가스반응제어로 LED 방열소재를 개발시 반응시간을 제어하여 질화반응을 조절함으로써 AlN 강화상화상의 분율을 조절할 수 있으며 이를 통해서 복합재의 열전도계수를 조절할 수 있다.

최종적으로 등가 물성치 예측을 통하여 최적 분율의 값을 도출하였으며 이를 통하여 가스반응 복합재 제조시 공정설계 변수로 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

“이 논문은 한성대학교 연구비 지원과제로 연구되었음.”

REFERENCES

1. Krames, M. R., Shchekin, O. B., Mueller-Mach, R., Mueller, G. O., Zhou, L., Harbers, G., Craford, M. G., “Status and Future of High-Power Light-Emitting Diodes for Solid-State Lighting”. *J. Disp. Tech.*, Vol. 3, pp. 160-175, 2007.
2. “LED Lighting Technology Lessons from the USA,” Report of a global watch mission March 2006.
3. Kim, D. U., Chung, H. S., Jeong, H. M., Yi, C. S., “An Experimental Study on the Temperature Distribution according to the Heat Sink Height of 30W LED floodlight”, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 16, pp. 150-156, 2017.
4. Yoo, J. Y., Park, S. H., “Natural Cooling Characteristics of a Heat Sink for LED Headlight used in Passenger Cars”, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 16, pp. 142-148, 2017.
5. Cho, Y. T., Lee, C. H., “Performance Evaluation of Heat Radiant for 50W LED by the CNT Thermal Interface Material”, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 6, pp. 23-29, 2014.
6. Kulkarni, D., Das, D. K., “Analytical and numerical studies on microscale heat sinks for electronic applications”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 25, pp. 2432-2449, 2005.
7. Hu, J., Yang, L., Shin, M. W., “Mechanism and thermal effect of delamination in light-emitting diode package”, *Microelectronics Journal*, Vol. 38, pp. 157-163, 2007.
8. Lee, Y. J., Chou, C. Y., Huang, C. Y., Yao, Y. C., Haung, Y. K., Tsai, M. T., “Determination on the coefficient of thermal expansion in high power InGaN based Light emitting diodes by optical coherence tomography”, *Scientific Reports*, Vol. 7, pp. 1-9, 2017.
9. Zweben, C., “Advances in composite materials for thermal management in electronic packaging,” *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, Vol. 50, pp. 47-51, 1998.
10. Eshelby, J. D., “The Determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems”, *Proc. of the Royal Society of London*, Vol. 241, pp. 376-396, 1957.
11. Mori, T., Tanaka, K., “Average stress in the matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions”, *Acta Metallurgica*, Vol. 21, pp. 571-574, 1973.
12. Hashin, Z., Shtrikman, S., “A Variational approach to the theory of the effective magnetic permeability of multiphase materials”, *J. Appl. Phys.*, Vol. 33, pp. 3125-3131, 1962.
13. Kirkpatrick, S., “Percolation and conduction”, *Rev. Mod. Phys.*, Vol. 45, pp. 574-588, 1973.