

알루미늄 기판에 스크린 인쇄한 AlN 후막의 두께 방향으로 열전도도 평가

김종구¹ · 박홍석¹ · 김 현¹ · 한병동² · 조영래^{1,†}

¹부산대학교 재료공학부, ²재료연구소

Evaluation of Thermal Conductivity for Screen-Printed AlN Layer on Al Substrate in Thickness Direction

Jong-Gu Kim¹, Hong-Seok Park, Hyun Kim¹, Byung-Dong Hahn² and Young-Rae Cho^{1,†}

¹Division of Materials Science and Engineering, Pusan National University, Busandaehak-ro 63, Geumjeong-gu, Busan 609-735, Korea

²Korea Institute of Materials Science, 797 Changwondaero, Seongsangu, Changwon, Gyeongnam, 642-831, Korea

(Received December 7, 2015; Corrected December 22, 2015; Accepted December 28, 2015)

초 록: 히트 싱크용 소재에 응용할 목적으로 단층금속과 2층 단면구조 복합재료에 대해 열전도 특성을 연구하였다. 단층금속으로는 알루미늄합금(Al6061)을 사용했으며, 2층 단면구조 복합재료로는 Al6061기판에 질화알루미늄(AIN)을 스크린 인쇄한 층상구조 복합재료를 선택하였다. 섬광법으로 측정된 열확산계수와 비열 및 밀도를 사용해서 열전도도를 측정하였다. 실험을 통해 얻은 열전도 특성 값을 참고문헌에 보고된 자료를 사용해 계산한 값과 비교하였다. Al6061 기판에 스크린인쇄법으로 AIN 후막을 형성시킨 2층 단면구조 복합재료 시편의 열전도도는 AIN 후막의 두께가 증가할수록 선형적으로 감소하였다. 측정된 복합재료의 열전도도는 두께가 53 μm 과 163 μm 일 때, 각각 114.1 W/m \cdot K와 72.3 W/m \cdot K로 나타났다. 또한, 스크린 인쇄한 AIN 후막의 열전도도를 열전도비저항에 대한 혼합법칙을 적용해서 평가하였다. AIN 후막의 두께가 53 μm 와 163 μm 인 경우, 스크린 인쇄한 AIN 후막의 열전도도는 각각 9.35 W/m \cdot K와 12.40 W/m \cdot K로 나타났다.

Abstract: A study on thermal properties for a single-layer metal and two-layer composites was investigated for the heat-sink application. For the single-layer metal, an aluminum alloy (Al6061) was selected. A screen printed aluminum nitride (AlN) layer on the Al6061 substrate was chosen for the two-layer composites. The thermal conductivity of the sample was determined from the thermal diffusivity measured by the light flash analysis (LFA), specific heat and density. Measured thermal property values were compared to calculated values using the data from the references. The thermal conductivity of composites with screen printed AlN layer on the Al6061 substrate decreased linearly with increasing the thickness of AlN layer. Measured values of the thermal conductivity for composites with 53 μm and 163 μm thick AlN layers were 114.1 W/m \cdot K and 72.3 W/m \cdot K, respectively. In particular, the thermal conductivity of the screen-printed AlN layer was demonstrated by applying the rule of mixture in view point of thermal resistivity. Measured values of the thermal conductivity for AlN layers with the thickness of 53 μm and 163 μm showed 9.35 W/m \cdot K and 12.40 W/m \cdot K, respectively.

Keywords: thick film, thermal conductivity, aluminum nitride, composites, screen print

1. 서 론

전자소자의 고출력화와 고집적화 추세가 빠르게 진행됨에 따라 단위면적당 발생하는 발열량의 증가는 심각한 문제가 된다.¹⁻³⁾ 발광다이오드(LED)의 경우, 반도체소자의 접합부에서 발생하는 높은 발열로 인해 LED소자의 발광효율이 급격하게 감소한다. 컴퓨터의 중앙처리장치와 전력반도체 소자에서도 소형화와 고성능화 추세로 열

을 효과적으로 방출시키는 기술 개발이 필수적이다. 전자소자에서 생기는 발열의 원인은 작은 반도체 칩에 많은 양의 전류가 흐르기 때문이다. 칩에서 발생한 열을 효과적으로 방출시키는 방법의 하나로 리드프레임을 사용하기도 하지만, 발열문제가 심각한 경우 히트 싱크(heat sink)나 히트 파이프(heat pipe)를 추가로 사용한다.^{1,2)}

고출력 LED와 고발열 전자소자에 사용되는 방열모듈은 대부분 다층 층상구조를 갖는다. 일반적으로 전자소

[†]Corresponding author
E-mail: yescho@pusan.ac.kr

© 2015, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

자는 절연기판(insulating substrate)에 탑재되며, 절연기판은 열계면소재를 사용해 금속재료 방열판에 부착시킨다. 절연기판은 열전도도가 높을수록 바람직하며, 탄소화합물 혹은 질소화합물이 첨가된 후막(thick film)의 복합재료(composites)에 대한 연구가 많다.⁴⁻⁶⁾ 열계면소재는 절연기판과 방열판을 본딩시키는 역할을 하며, 열전도 특성이 우수한 무기질 입자와 본딩특성을 갖는 고분자 소재가 혼합된 복합소재가 사용된다. 방열판의 소재는 열전도도가 높으면서 기계가공이 용이한 알루미늄(Al) 합금이 주로 사용된다. 방열은 대부분 방열모듈의 두께 방향으로 일어나기 때문에 두께 방향에 대한 열전도 특성을 연구하는 것이 필요하다. 우수한 방열특성을 갖는 방열모듈을 개발하기 위해서는 다층구조를 갖는 방열모듈의 두께 방향으로 열전도 특성을 알아야 한다.^{7,8)} 현재까지 수행된 대부분의 연구는 단층구조를 갖는 소재에 대한 것이었으며, 다층구조를 갖는 방열모듈에 대한 두께 방향으로 열전도에 대한 연구는 많지 않다.^{9,10)} 특히, 판상의 기판에 형성시킨 유전체(dielectric materials) 후막의 열전도 특성을 이해하는 것은 중요하지만, 두께가 100 μm 이하로 얇은 후막에 대해 두께방향으로 열전도도 측정에 관한 연구는 많지 않다.¹¹⁾

본 연구는 LED용 다층구조 방열모듈에서 두께 방향으로 열전도 특성을 이해하기 위한 기초 연구로, 중간에 계면을 갖는 층상 복합재료를 시편으로 선택하였다. 시편은 금속기판에 유전체 후막을 코팅시킨 2층 단면구조의 형상을 갖는다. 단층금속으로는 열전도 특성이 우수한 알루미늄이 선택되었으며, 유전체 후막으로는 전기적 부도체로 열전도 특성이 뛰어난 질화알루미늄(AIN)을 사용하였다. 단층시편과 복합재료 시편에 대해 각각 섬광법(LFA)으로 두께 방향으로 열확산계수를 측정 후 열전도도를 계산하였다. 유전체 후막의 두께를 실험변수로 선택해서 제조한 복합재료의 열전도 특성을 연구함으로써, 유전체 후막 자체의 열전도 특성을 도출하고 고찰하였다.

2. 실험 방법

섬광법은 다층구조의 방열모듈에서 두께 방향으로 열전도 특성을 연구하기에 적합하다. Fig. 1은 본 연구에서 섬광법으로 AIN 후막의 열전도도를 도출하기 위해 수행한 실험의 주요공정을 도식적으로 나타낸 것이다. Al6061 기판에 스크린 인쇄법으로 AIN 후막(AIN layer)을 형성시킨 복합재료 시편과 Al6061 시편에 대해 각각 섬광법으로 열확산계수를 측정하였다. 복합재료 시편과 Al6061 기판에 대한 열확산계수와 밀도 및 비열을 사용해서 AIN 후막의 열전도도를 도출하였다.

Fig. 2는 본 연구에 사용된 시편의 형상과 열확산계수의 측정원리를 간략하게 나타낸 개념도이다. Fig. 2(a)에서 보듯이, 복합재료 시편의 단면구조는 Al6061 기판에 유전체인 AIN 후막을 스크린 인쇄해서 형성시킨 2층 단

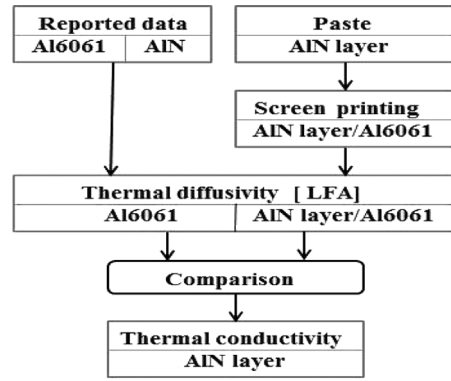


Fig. 1. Schematic diagram of experimental procedure.

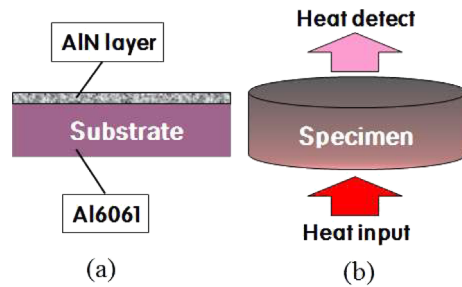


Fig. 2. Schematic diagram of specimen and heat flow: (a) AIN layer on Al6061 composites and (b) arrangement of specimen in light flash analysis (LFA).

면구조 층상구조를 갖는다. 기판의 형상은 두께가 2.02 mm이고, 면적이 8 × 8 mm²인 판상이다. Al6061을 기판으로 사용한 이유는 고강도 알루미늄 합금으로, 가공성과 열전도 특성이 우수해서 히트 싱크 소재로 적합하기 때문이다.

유전체 후막은 (주) IMD의 제품코드 AN-2501인 AIN 페이스트(paste)를 사용해 스크린 인쇄한 후 150 °C에서 30 분 동안 경화시켜 제조하였다. AIN 페이스트는 BPF (bisphenol f epoxy resin) 계통이며, 주요 성분은 무게비로 AIN filler가 65%, 에폭시 수지가 28% 및 경화제가 7%인 것을 사용하였다. AIN은 열전도 특성은 우수하지만, 전기적 부도체이기 때문에 전자소자용 부품에서 절연 및 열방출 소재로 적합하다. AIN 후막의 두께는 163 μm까지 변화시켰는데, 스크린인쇄의 횡수를 변화시켜 AIN 후막의 두께를 조절하였다.

Fig. 2(b)는 열확산계수를 측정하는 원리를 도식적으로 나타낸다. 시편의 열확산계수는 Netzsch사의 light flash analysis(모델명: LFA 447 NanoFlash)를 사용해 상온에서 측정하였다. 열확산계수의 측정시 표면레이저 펄스의 흡수도를 높이기 위해, 콜로이드 상태의 흑연입자를 시편의 양쪽면에 분사 코팅했다. 열주입은 시편의 아랫면에 파장이 0.4 ms이고 pulse당 3 Joule의 열량을 갖는 Xenon-flash lamp를 조사해 수행했으며, 시편의 윗면에 비접촉식 적외선 온도센서를 사용해 시간에 따른 온도증가 모

드의 그래프를 통해 열확산계수를 구했다. 시편의 열전도도는 아래의 식을 사용해서 계산하였다.^{12,13)}

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

식 (1)에서 k(W/m·K)는 열전도도, $\alpha(\text{mm}^2/\text{s})$ 는 열확산계수, $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$ 는 밀도, $C_p(\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K})$ 는 비열을 나타낸다. 비열은 시차주사열량계(differential scanning calorimetry, DSC)를 사용해 측정했으며, 밀도는 아르키메데스의 수중부유법을 사용해서 측정하였다.

식 (1)을 사용해서 측정된 열전도도의 타당성 검증을 위해 열전도비저항(thermal resistivity, R)에 대한 혼합법칙(rule of mixture)을 적용해서 Al 기판에 AlN 후막을 형성시킨 2층 단면구조 복합재료에 대해 아래의 식을 사용해 열전도도를 계산하였다.¹⁴⁾

$$R_c = 1/k_c = f_m \times R_m + f_L \times R_L \quad (2)$$

식 (2)에서 R_c 는 복합재료의 열전도비저항으로 복합재료의 전기전도도와 역수인 $1/k_c$ 를 나타낸다. f_m 과 R_m 은 복합재료에서 모재(matrix)인 기판의 비율과 열전도비저항을 나타내며, f_L 와 R_L 은 코팅층의 비율과 열전도비저항을 나타낸다.

또한, 광학현미경(optical microscopy, OM)과 주사전자현미경(scanning electron microscopy, SEM)을 사용해서 AlN 후막과 Al6061 기판으로 이루어진 복합재료의 경계

면과 미세조직을 관찰하였다.

3. 실험 결과

3.1. Al6061 기판과 AlN 후막의 열적 특성

Al6061 기판에 AlN 후막이 형성된 2층 단면구조를 갖는 복합재료를 구성하는 Al6061 기판과 AlN 후막 각각에 대해 우선적으로 특성 평가하였다. Table 1은 2층 단면구조를 갖는 복합재료 시편의 열전도 특성 평가에 필요한 Al6061 기판과 AlN 후막에 대한 밀도, 비열 및 열확산계수를 요약한 것인데, 참고문헌에 발표된(reported) 값과 실험으로 측정된(measured) 값을 함께 나타냈다.^{15,16)} 기판으로 사용된 두께가 2.02 mm인 Al6061의 경우, 측정된 밀도와 비열은 참고문헌에 보고된 값과 비슷하게 나타났다. 반면, LFA로 측정된 열확산계수는 65.44 mm²/s로 참고문헌에 보고된 74.40 mm²/s에 비해 약 12% 낮게 나타났다.

스크린 인쇄한 AlN 후막의 경우, 측정된 밀도와 비열은 각각 2.21 g/cm³과 754 J/kg·K로 나타났다. Table 1에서 보고된 AlN(분말형태의 입자)의 밀도와 비열이 각각 3.26 g/cm³과 765 J/kg·K인 것을 고려하면, 스크린 인쇄한 AlN 후막의 밀도와 비열은 각각 32%와 1.4% 작게 나타났다. 이유는 AlN 페이스트의 주요 조성에서 알 수 있듯이, 스크린 인쇄 후 150 °C에서 30분 동안 경화시킨 후에

Table 1. Thermal properties of related data for Al6061 and AlN materials

	Al6061 [t=2.02 mm]		AlN	
	Reported	Measured	AlN* [Reported]	AlN layer [Measured]
Density [g/cm ³]	2.7	2.7	3.26 ¹⁵⁾	2.21
Specific heat [J/kg·K]	896	896	765 ¹⁵⁾	754
Thermal diffusivity [mm ² /s]	74.40	65.44	74.00	-
Thermal conductivity [W/m·K]	180.0	158.3	185.0 ¹⁶⁾	-

*The reported values are for the AlN particles.

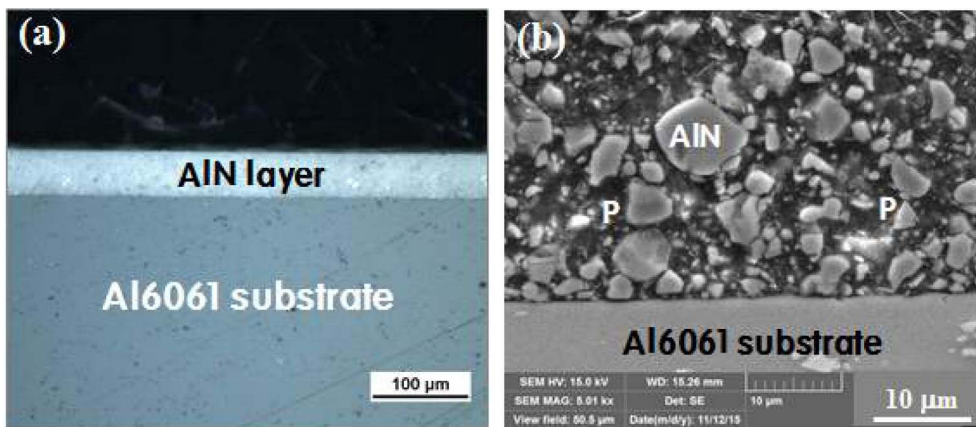


Fig. 3. Cross-sectional photos of AlN layer on Al6061 composites when the thickness of AlN layer is 53 μm: (a) OM image and (b) SEM image.

도 AlN 후막에는 밀도가 낮은 에폭시수지와 경화제가 무게비로 35% 정도 존재하기 때문이다.

3.2. Al 기판에 AlN 후막을 스크린 인쇄한 복합재료의 특성

Al6061 기판에 AlN 후막이 형성된 2층 단면구조를 갖는 복합재료를 AlN 후막의 두께를 변수로 해서 스크린 인쇄법으로 제조하였다. Fig. 3은 AlN 후막의 두께가 53 μm 인 복합재료의 단면을 나타낸다. Fig. 3(a)는 광학현미경으로 관찰한 단면을 나타내는데, Al6061 기판에 AlN 후막이 대략 53 μm 의 두께로 치밀하게 형성되어 있음을 확인할 수 있다. Fig. 3(b)는 Al6061 기판에 AlN 후막이 형성된 복합재료에서 AlN 후막 부분을 5,000배로 확대한 주사전자현미경 사진이다. Al6061 기판과 AlN 후막의 경계 부분이 치밀하게 분당되어 있으며 계면 크랙 등은 관찰되지 않았다. AlN 후막의 미세조직은 P로 표시된 에폭시수지 계통의 폴리머 연속상에, AlN으로 표시된 AlN 입자가 분산되어 존재함을 Fig. 3(b)에서 알 수 있다.

Table 2는 Al6061 기판에 AlN 후막을 서로 다른 두께로 형성시킨 2층 단면구조 복합재료의 열확산계수와 열전도도를 나타낸다. AlN 후막의 두께가 0 μm 인 시편은 기판에 AlN 후막을 형성시키지 않은 Al6061 기판을 의미한다. 따라서, AlN 후막의 두께가 0 μm 인 경우 시편의 열확산계수와 열전도도 값은 Table 1에서 두께가 2.02 mm인 Al6061의 열확산계수와 열전도도의 값을 사용했다. Table 2에서 2층 단면구조 복합재료에 대한 열확산계수는 섬광법으로 직접 측정하였다.

Table 2에 표시된, 계산된 열전도도와 측정된 열전도도에 대한 도출과정은 쉽게 이해되기 않기 때문에 자세하게 설명하면 다음과 같다. 본 연구의 2층 단면구조 복합재료에서 열전도도의 계산은 열저항에 대한 혼합법칙을 사용해서 계산하였다. 즉, 두께가 2.02 mm인 Al6061 기판에 53 μm 두께의 AlN 후막을 형성시켜 제조한, 전체두께가 2,073 μm 인 복합재료에서 열전도도 k_c 는 Table 1의 보고된 값을 사용해 계산할 수 있다. 즉, 복합재료의 계산된 열전도도는 Al6061과 AlN의 보고된 열전도도가 각각 180 W/m·K와 185 W/m·K였고, AlN에 0.5 W/m·K를 갖는 에폭시가 무게비로 35%기 때문에 이를 적용하여 식 (2)을 사용해서 178.4 W/m·K로 계산된다.¹⁷⁾ 178.4 W/m·K로 계산된 복합재료의 열전도도는 에폭시가 무게비로 35% 첨가되어 AlN로 후막이 형성된 시편에 대한 것이다.

반면, 측정된 열전도도의 도출을 위해서는, 2층 단면구조를 갖는 복합재료의 밀도와 비열을 혼합법칙에 의해 먼저 구해야 한다. 혼합법칙에 입력되는 밀도와 비열은 Table 1에서, 측정된 밀도와 비열의 값을 사용한다. AlN 후막의 두께가 53 μm 인 복합재료의 밀도는 2.69 g/cm³가 되고, 비열은 892 J/kg·K로 계산된다.

AlN 후막의 두께가 53 μm 인 복합재료의 열전도도 k_c 는 식 (1)에서 보듯이, $k = \alpha \times \rho \times C_p$ 로 표시되며, 복합재료의 측정된 열확산계수 α , 복합재료의 측정된 밀도 ρ

Table 2. Thermal properties for composites with AlN layer on Al6061 substrate

Thickness of AlN layer [μm]	Thermal diffusivity [mm^2/s]	Thermal conductivity [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$]	
	Measured	Calculated	Measured
0	65.44	180.0	158.3
53	47.55	178.4	114.1
119	40.36	176.7	95.7
163	30.71	174.1	72.3

및 측정된 비열 C_p 을 대입해서 구할 수 있다. 즉, 측정된 열전도도는 $47.55 \text{ mm}^2/\text{s} \times 2.69 \text{ g}/\text{cm}^3 \times 892 \text{ J}/\text{kg}\cdot\text{K} = 114.1 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$ 로 나타난다. 동일한 방법으로 Table 2에 나타낸 서로 다른 AlN 후막 두께를 갖는 복합재료의 값들도 구할 수 있다. 이상의 결과로, Al6061 기판에 AlN 후막을 형성시킨 2층 단면구조 복합재료에서 열전도도는 AlN 후막의 두께가 증가할수록 감소함을 알았다.

3.3. 스크린 인쇄한 AlN 후막의 열전도도

다층구조 방열모듈에서 관상의 기판에 형성시킨 유전체 후막 자체의 열전도도를 이해하는 것은 방열모듈의 설계에서 중요하다. 특히, 두께가 5 μm 에서 100 μm 범위를 갖는 후막의 열전도도를 이해하는 것은 중요하지만, 아직까지 후막의 열전도도를 측정하는 일반화된 방법은 없다. 3오메가(3 ω)법은 박막의 두께가 1 μm 이내로 얇은 시편의 열전도도 측정에 주로 사용된다.^{18,19)} 반면, 섬광법은 시편의 두께가 충분히 두꺼워 기판의 도움 없이 스스로 형상을 유지할 수 있는 벌크재료와 관상의 시편에 적용이 용이하다.¹⁸⁾

2층 단면구조를 갖는 복합재료의 열전도도는 복합재료를 구성하는 각각 재료의 열전도도와 두께 비율에 의해 결정된다고 가정하면, 스크린 인쇄한 AlN 후막의 열전도도를 얻을 수 있다. 즉, 후막과 기판으로 이루어진 복합재료에서 기판과 복합재료의 열전도도와 두께 비율을 알면 후막의 열전도도를 도출할 수 있다. 두께가 53 μm 인 AlN 후막의 열전도도는 다음과 같이 도출할 수 있다. Table 2에서 보듯이, Al6061 기판은 두께가 2020 μm 이며 측정된 열전도도는 158.3 W/m·K이다. 반면, Al6061 기판에 AlN 후막을 53 μm 두께로 스크린인쇄해서 두께가 2,073 μm 인 복합재료의 열전도도는 114.1 W/m·K이다. 스크린 인쇄한 AlN 후막의 열전도도를 k_L 라 두고, AlN 후막의 두께가 53 μm 인 복합재료에 대해 열전도도와 두께 비율을 식 (2)에 적용하면 다음과 같이 표시된다.

$$1/k_c = 1/114.1 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K} = (2,020/2,073) \times 1/158 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K} + (53/2,073) \times 1/k_L \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K} \quad (3)$$

식 (3)을 계산하면, Al6061 기판에 53 μm 의 두께로 스크린 인쇄한 AlN 후막의 열전도도 k_L 는 9.80 W/m·K로 구해진다. 동일한 방법으로 119 μm 과 163 μm 의 두께로 스

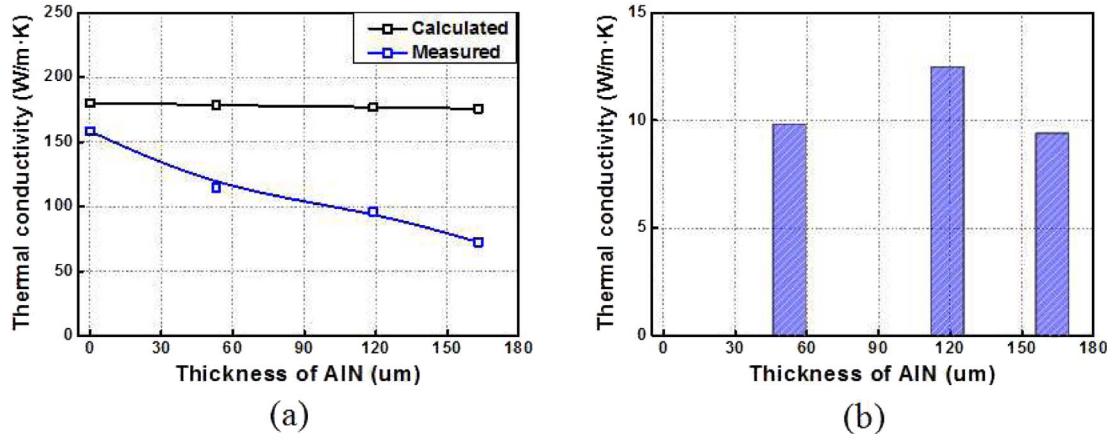


Fig. 4. Thermal conductivity of specimen as a function of AlN-layer thickness: (a) for AlN layer on Al6061 composites and (b) for AlN layer.

스크린 인쇄한 AlN 후막의 열전도도를 구할 수 있으며, 각각 12.40 W/m·K와 9.35 W/m·K로 구해진다. 본 연구의 결과, AlN 후막의 두께가 53 μm에서 163 μm의 범위로 스크린 인쇄한 AlN 후막의 열전도도는 9.35 W/m·K에서 12.40 W/m·K로 평균 10.53 W/m·K의 값으로 얻어졌다.

4. 고 찰

실험결과에서 스크린 인쇄한 AlN 후막의 열전도도는 9.35 W/m·K에서 12.40 W/m·K로 나타났다. Table 2에서 Al6061 기판에 AlN 후막을 두께를 변수로 형성시킨 2층 단면구조 복합재료의 열전도도는 AlN 후막의 두께가 증가할수록 감소하였다. 시편의 열전도도에 영향을 미치는 인자들이 열확산계수, 밀도 및 비열 등이 있음을 고려하면, AlN 후막의 미세구조 변화는 시편의 열전도 특성에 영향을 주게 된다.¹²⁾ 2층 단면구조 복합재료의 경우, 서로 다른 2가지 재료가 적층되는 구조를 갖기 때문에 경계면이 존재해서 열전도 특성의 해석이 어렵다. 스크린 인쇄한 AlN 후막은 AlN 분말과 에폭시수지 계통의 본딩 재료로 구성되기 때문에 열전도 특성의 예측은 더욱 복잡하고 어렵다. 따라서, 복합재료와 AlN 후막의 열전도도 변화를 AlN 후막의 미세구조와 관련시켜 고찰하고자 한다.

Fig. 4는 AlN 후막의 두께가 53 μm에서 163 μm의 범위로 변할 때, 복합재료와 AlN 후막의 측정된 열전도도 변화를 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 4(a)는 Table 2에서 구한 값들로, Al6061 기판에 AlN 후막이 형성된 복합재료에 대한 열전도도 변화를 나타낸 것이다. Fig. 4(a)에서 보면, 계산된 복합재료의 열전도도는 AlN 후막의 두께 변화에 따라 180 W/m·K에서 174.1 W/m·K로 나타난다. 반면, 측정된 열전도도는 두께가 53 μm, 119 μm, 163 μm으로 증가할 때, 114.1 W/m·K, 95.7 W/m·K, 72.3 W/m·K로 감소하였다. AlN 후막의 경우 Fig. 3에서 보듯이, AlN 분말의 비율이 무게비로 65 %이고, 35%는 열전도도가 0.5

W/m·K 이하로 낮은 폴리머가 사용된 것을 고려하면 측정된 열전도도가 더 시편의 실제값에 가깝다고 판단된다.¹⁷⁾

Fig. 4(b)는 Fig. 4(a)에서 복합재료의 측정된 열전도도를 기준으로, 3.3절에서 도출한 AlN 후막의 열전도도 변화를 나타낸다. AlN 후막의 두께가 53~163 μm 범위 내에서, 열전도도는 대략 9.35 W/m·K~12.40 W/m·K의 값으로 평균 10.53 W/m·K의 값을 갖는다. Lee 등의 논문에서 Nielson 공식에 의하면 복합재료의 열전도도는 높은 열전도도를 갖는 필러(filler)의 무게 비율에 의존하며, 복합재료의 열전도도는 모재인 폴리머 대비 최대 50배까지 증가될 수 있다.²⁰⁾ 한편, Lee 등은 AlN 필러의 무게 비율이 60% 이내로 작은 범위에서, 복합재료의 열전도도를 TC probe 장치를 사용해 측정된 결과 2.0 W/m·K로 낮았다. Xu 등은 에폭시 폴리머에 AlN 입자를 부피 비율로 60% 첨가한 경우, 복합재료의 열전도도가 최대 11 W/m·K까지 증가함을 보고하였다.²¹⁾ 스크린인쇄 공정으로 제조한 본 연구의 AlN 후막에서 AlN 분말의 무게비가 65%인 점을 고려하면, 스크린 인쇄한 AlN 후막의 열전도도가 9.35 W/m·K에서 12.40 W/m·K로 평균 10.53 W/m·K의 값으로 나타난 것은 Nielson 공식의 예측과 일치한다. 따라서, 본 연구에서 측정된 AlN 후막의 열전도도 측정법은 타당성이 있다고 판단된다.

5. 결 론

다층구조 방열모듈에서 두께 방향으로 열전도 특성을 이해하기 위해 단층기판에 유전체 후막을 형성시킨 복합재료의 열전도 특성을 연구하였다. Al6061 기판에 AlN 후막을 스크린 인쇄법으로 형성시킨 2층 단면구조 복합재료의 열전도도를 섬광법을 사용해 구할 수 있었다. Al6061 기판에 AlN 후막이 형성된 복합재료에서, AlN 후막의 두께가 53 μm에서 163 μm로 증가할 때 측정된 열전도도는 114.1 W/m·K에서 72.3 W/m·K로 감소하였다.

스크린 인쇄법으로 형성한 AlN 후막의 열전도도를 구할 수 있는 방법을 열전도비저항 개념을 사용해서 제시하고 검증하였다. 본 연구에서는 두께가 53 μm 와 163 μm 인 AlN 후막에서 열전도도가 9.35 W/m·K와 12.40 W/m·K로 나타났다. 100 μm 이하의 두께로 얇게 스크린 인쇄한 후막의 열전도도를 구하는 일반적인 방법은 찾기 어려우나, 본 연구에서 수행한 후막의 열전도도 측정 방법은 향후 고발열 방열모듈의 설계에 필요한 자료를 얻는데 사용될 수 있다.

References

1. W. Suh, H. S. Jung, Y. H. Lee, Y. H. Kim and S. H. Choa, "Heat Dissipation Technology of IGBT Module Package", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 21(3), 7 (2014).
2. Y. J. Heo, H. T. Kim, K. J. Kim, S. Nahm, Y. J. Yoon and J. Kim, "Enhanced Heat Transfer by Room Temperature Deposition of AlN Film on Aluminum for a Light Emitting Diode Package", *Appl. Therm. Eng.*, 50, 799 (2013).
3. I. G. Kim, M. E. Son and Y. S. Kim, "Fabrication of the Cu-STS-Cu Clad Metal for High Strength Electric Device Lead Frame and Thermal Stability on Their Physical Properties", *Journal of KWJS*, 32(5), 80 (2014).
4. W. Feng, L. Zhang, Y. Liu, X. Li, L. Cheng and B. Chen, "Thermal Mechanical Properties of SiC/SiC-CNTs Composites Fabricated by CVI Combined with Electrophoretic Deposition", *Mater. Sci. Eng.*, A626, 500 (2015).
5. S. M. Na, S. I. Go and S. J. Lee, "Observation of Thermal Conductivity of Pressureless Sintered AlN Ceramics under Control of Y_2O_3 Content and Sintering Condition", *J. Kor. Ceram. Soc.*, 48(5), 368 (2011).
6. Y. W. Kim, H. C. Park and K. D. Oh, "Effect of AlN Addition on the Thermal Conductivity of Sintered Al_2O_3 ", *J. Kor. Ceram. Soc.*, 33(3), 285 (1996).
7. G. Kim, K. M. Jung, J. T. Moon and J. H. Lee, "Electrical Resistivity and Thermal Conductivity of Paste Containing Ag-Coated Cu Flake Filler", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 21(4), 51 (2014).
8. J. W. Roh, S. Y. Jang, J. Kang, S. Lee, J. S. Noh, J. Park and W. Lee, "Thermal Conductivity in Individual Single-Crystalline PbTe Nanowires", *Kor. J. Met. Mater.*, 48(2), 175 (2010).
9. M. Abdel-Rahman, S. Ilahi, M. F. Zia, M. Debbar, N. Yacoubi and B. Ilahi, "Temperature Coefficient of Resistance and Thermal Conductivity of Vanadium Oxide 'Big Mac' Sandwich Structure", *Infrared Phys. Technol.*, 71, 127 (2015).
10. J. G. Kim, D. Y. Kim, H. Kim, B. D. Hahn and Y. R. Cho, "Effect of Interface on Thermal Conductivity of Clad Metal through Thickness Direction for Heat Sink", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 22(3), 67 (2015).
11. H. J. Ratzler-Scheibe, U. Schulz and T. Krell, "The Effect of Coating Thickness in the Thermal Conductivity of EB-PVD PYSZ Thermal Barrier Coatings", *Surf. Coat. Technol.*, 200, 5636 (2006).
12. C. J. H. Helmreich, R. Corbin and S. M. McDevitt, "Measurement of Thermal Diffusivity of Depleted Uranium Metal Microspheres", *J. Nucl. Mater.*, 446, 100 (2014).
13. K. Kuniya, H. Arkawa, T. Kanai and A. Chiba, "Thermal Conductivity, Electrical Conductivity and Specific Heat of Copper-Carbon Fiber Composites", *Trans. Japan Inst. Metals*, 28(10), 819 (1987).
14. D. R. Askeland and P. P. Phule, *The Science and Engineering of Materials 4th Ed.*, pp.731-736, Thomson, California (2008).
15. S. Kume, I. Yamada and K. Watari, "High-Thermal-Conductivity AlN Filler for Polymer/Ceramics Composites", *J. Am. Ceram. Soc.*, 92(s1), S153 (2009).
16. K. A. Khor, K. H. Cheng and L. G. Yu, F. Boey, "Thermal conductivity and dielectric constant of spark plasma sintered aluminum nitride", *Mater. Sci. Eng.*, A347, 300 (2003).
17. Z. Gao and L. Zhao, "Effect of Nano-Fillers on the Thermal Conductivity of Epoxy Composites with Micro- Al_2O_3 Particles", *Mater. Des.*, 66, 176 (2015).
18. J. G. Kang, K. S. Hong and H. S. Yang, "Investigation of Film-Thickness Dependent Thermal Conductivity of $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ Thin Films", *Curr. Appl. Phys.*, 13, 1967 (2013).
19. S. Shin, H. N. Cho, B. S. Kim and H. H. Cho, "Influence of Upper Layer on Measuring Thermal Conductivity of Multilayer Thin Films using Differential 3- ω Method", *Thin Solid Films*, 517, 933 (2008).
20. G. W. Lee, M. Park, J. Kim, J. I. Lee and H. K. Yoon, "Enhanced Thermal Conductivity of Polymer Composites Filled with Hybrid Filler", *Composites*, A37, 727 (2006).
21. Y. Xu, D. D. L. Chung and C. Mroz, "Thermally Conducting Aluminum Nitride Polymer-Matrix Composites", *Composites*, A32, 1749 (2001).