J. Microelectron. Packag. Soc., 22(3), 67-72 (2015)
Print ISSN 1226-9360 Online ISSN 2287-7525
http://dx.doi.org/10.6117/kmeps.2015.22.3.067

히트 싱크용 클래드메탈에서 두께 방향의 열전도 특성에 미치는 계면의 영향

김종구[1] · 김동용[1] · 김 현[1] · 한병동[2] · 조영래[1,†]
[1]부산대학교 재료공학부, [2]재료연구소

Effect of Interface on Thermal Conductivity of Clad Metal through Thickness Direction for Heat Sink

Jong-Gu Kim[1], Dong-Yong Kim[1], Hyun Kim[1], Byung-Dong Hahn[2] and Young-Rae Cho[1,†]
[1]Division of Materials Science and Engineering, Pusan National University, Busandaehak-ro 63, Geumjeong-gu, Busan 609-735, Korea
[2]Korea Institute of Materials Science, 797 Changwondaero, Seongsangu, Changwon, Gyeongnam 642-831, Korea

(Received September 14, 2015: Corrected September 23, 2015: Accepted September 24, 2015)

초 록: 히트 싱크용 소재에 응용할 목적으로 단층금속과 2층금속 클래드메탈에 대해 열전도 특성에 대한 연구를 하였다. 단층시편으로는 스테인리스강과 알루미늄을 선택하였으며, 2층 금속으로는 스테인리스강과 알루미늄을 압연해서 제조한 클래드메탈을 사용하였다. 열전도도는 섬광법으로 측정한 열확산계수와 비열 및 밀도를 사용해 얻었다. 실험을 통해 얻은 측정값을 참고문헌에 보고된 자료를 사용해 얻은 계산값과 비교하였다. 단층시편의 경우, 실험을 통해 얻는 열확산계수와 열전도도는 계산값보다 작았다. 스테인리스강의 경우, 측정한 열전도도는 계산값에 비해 6% 정도 작았으며, 알루미늄의 경우 18% 정도 작았다. 반면, 2층 금속인 스테인리스강과 알루미늄의 클래드메탈은 측정한 열전도도가 계산값에 비해 55% 정도 낮게 나타났다. 섬광법으로 측정한 열전도도가 계산값보다 55% 정도 낮게 나타난 이유는 스테인리스강과 알루미늄의 사이에 존재하는 계면의 영향 때문이다. 스테인리스강과 알루미늄의 사이에 존재하는 계면은 열전도 특성을 지배하는 전자와 탄성파의 이동을 어렵게 하기 때문이다. 우수한 방열특성을 갖는 다층구조 방열모듈을 개발하기 위해서는 열전도 특성에 결정적으로 영향을 주는 계면 특성의 조절이 중요하다.

Abstract: A study on thermal properties for a single-layer metal and a 2-ply metal (clad metals) was investigated for the application of heat sink. For the single-layer metal, a stainless steel (STS) and an aluminum (Al) were selected. Also, a roll bonded clad metal with STS and Al was chosen for the 2-ply metal. The thermal conductivity of the sample was obtained from the thermal diffusivity measured by the light flash analysis (LFA), specific heat and density. Measured thermal property values were compared with the calculated values using the data from the references. For the single–layer metal, measured values for the thermal diffusivity and thermal conductivity were smaller than calculated values. Differences between measured and calculated values were about 6% and 18% for the STS and Al samples, respectively. For the clad metals, however, a large difference (55%) was observed. Here, a relatively small thermal conductivity measured by LFA was due to the existence of a interface between STS and Al in the clad metal. Such a interface reduces the moving velocity of free electrons and phonons in the clad metal. For the development of a high performance heat-dissipation module with the multi-layer structure, the control of interface properties which determine thermal properties was confirmed to be important.

Keywords: thermal diffusivity, thermal conductivity, heat sink, clad metal

1. 서 론

전자소자의 고출력화와 고집적화 추세가 빠르게 진행됨에 따라 단위면적당 소비되는 전력의 증가와 함께 발열량의 증가는 심각한 문제가 되고 있다.[1-3] 발광다이오드(LED)의 경우, 반도체소자의 접합부에서 발생하는 과도한 발열로 인해 LED소자가 가열되면 발광효율이 급격하게 저하한다. 컴퓨터의 중앙처리장치(CPU)와 전력반도체 등의 소자에서도 소형화와 고성능화 추세와 함께 전자소자에서 발생하는 열을 효과적으로 방출시키는 기술

†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.

의 개발이 필요하다. 전자소자에서 생기는 발열의 원인은 작은 반도체 칩(chip)에 많은 전류가 흐르기 때문이며, 칩에서 발생한 열을 방출시키는 방법은 몇 가지가 있다. 산업적 관점에서 가장 널리 사용되는 열방출 기술은 반도체소자의 뒷면에 방열모듈을 추가로 붙이는 것이다. 반도체소자의 경우 리드프레임을 사용해 방열 기능을 갖도록 하지만, 발열문제가 심각한 경우 히트 싱크(heat sink)나 히트 파이프(heat pipe)를 추가로 장착해야 한다.

고출력 LED를 비롯한 고발열 전자소자에 사용되는 방열모듈은 대부분 다층구조를 갖는다. 전자소자는 일반적으로 절연기판에 탑재되며, 열계면소재를 사용해 방열판에 결합시킨다. 절연기판은 열전도도가 높을수록 바람직하며, 탄소화합물 혹은 질소화합물이 첨가된 후막형태의 복합소재의 개발에 대한 연구가 주로 보고되고 있다.[4-6] 열계면소재는 절연기판과 방열판을 본딩시키는 역할을 하며, 열전도 특성이 우수한 미세한 무기질 입자와 본딩 특성을 갖는 고분자 소재가 혼합된 복합소재가 주로 사용된다. 방열판의 소재는 열전도도가 높으면서 기계가공이 용이한 알루미늄 합금이 주로 사용된다. 대부분의 방열은 방열모듈의 두께 방향으로 진행되기 때문에, 두께 방향으로 열전도 특성을 파악하는 것은 중요하다. 즉, 우수한 방열특성을 갖는 방열모듈을 개발하기 위해서는 다층구조를 갖는 방열모듈의 두께 방향으로 열전도 특성을 이해해야 한다.[7,8] 현재까지 수행된 대부분의 연구는 단층구조를 갖는 소재에 대한 것이며, 다층구조를 갖는 방열모듈의 두께 방향으로 열전도 특성에 대한 연구는 찾아보기 어렵다.[9]

본 연구는 LED용 다층구조 방열모듈에서 두께 방향으로 열전도 특성을 알아보기 위해 수행되었다. 연구의 단순화를 위해 시편의 선택은 단층금속과 2층 금속(2-ply metal)의 2가지 그룹으로 제한하였다. 단층금속으로는 알루미늄(Al)과 스테인리스강(STS)을 선택하였고, 2층 금속으로는 Al과 STS 판재를 압연(rolling)해서 제조한 2층 시편인 클래드메탈을 사용하였다. 단층시편과 2층 시편에 대해 섬광법(LFA)으로 두께 방향으로 열확산도를 측정한 후 열전도도를 계산하였다. 각 시편의 열전도 특성을 비교함으로써 계면이 클래드메탈의 두께 방향으로 열전도 특성에 미치는 영향에 대해 고찰하였다.

2. 실험 방법

Fig. 1과 Table 1은 본 연구에 사용된 단층금속과 2층 금속인 클래드메탈의 종류별 시편(sample)의 구분을 나타낸다. 단층금속으로는 2가지 종류의 스테인리스강(STS304, STS439)과 2가지 종류의 알루미늄합금(Al3003, Al1050)이 사용되었다. 클래드메탈은 한국클래드텍(주)에서 압연법으로 제조한 것으로, 클래드메탈의 단면부분 관찰시, 전체 두께에서 Al이 차지하는 두께의 비율을 70~80%까지 변화시켜 제조한 시편을 사용하였다.

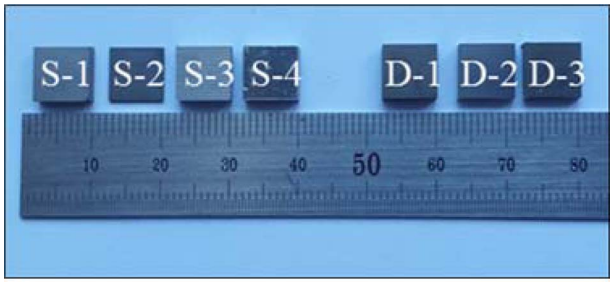

Fig. 1. Photo of samples used in measurement of thermal properties. The area of each sample is 8×8 mm^2.

Table 1. Designation of samples with thickness of each component

Sample	Total thickness [mm]	Thickness of component [mm]
S-1	2.5	STS304[2.5]
S-2	0.53	STS439[0.53]
S-3	2.55	Al3003[2.55]
S-4	2.45	Al1050[2.45]
D-1	2.0	STS439[0.6]/Al1050[1.4]
D-2	2.0	STS439[0.5]/Al1050[1.5]
D-3	2.5	STS439[0.5]/Al1050[2.0]

열전도도(thermal conductivity, λ)의 산출은 2가지 방법으로 수행하였다. 첫 번째는, 기존에 발표된 여러 참고문헌들에 나타난 자료들을 사용해서 계산한 열전도도이다.[10-13] 두 번째는, 각 시편에 대해 비열(specific heat, C_p)과 밀도(ρ) 및 열확산계수(thermal diffusivity, α)를 측정해서 얻는 열전도도이다. 비열은 시차주사열량계(differential scanning calorimetry, DSC)를 사용해 측정하였으며, 밀도는 아르키메데스의 수중부유법을 사용해서 측정하였다. Fig. 1에서 보듯이, 열확산계수의 측정을 위해 시편을 8×8 mm^2의 크기로 방전가공 하였으며, 표면레이저 펄스의 균일한 흡수를 위해 콜로이드 상태의 흑연입자를 시편의 양쪽면에 분사 코팅하였다. 시편의 열확산계수는 Netzsch사의 light flash analysis(모델명: LFA 447 NanoFlash)를 사용해 상온에서 측정하였다. 열확산계수의 측정시, 시편의 아랫면에 파장이 0.4 ms이고 pulse당 3 Joule의 열량을 갖는 Xenon-flash lamp를 조사하였다. 시편의 윗면에서는 비접촉식 적외선 온도센서를 사용하여 시간에 따른 온도 증가 모드의 그래프를 통해 열확산계수를 구했다. 시편의 열전도도는 아래의 식을 사용해서 계산하였다.[14,15]

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

식 (1)에서 λ(W/m·K)는 열전도도, α(mm^2/s)는 열확산계수, ρ(g/cm^3)는 밀도, C_p(J/kg·K)는 비열을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 단층금속에서 두께 방향으로 열전도 특성

Table 2. Data of specific heat, bulk density, thermal diffusivity and thermal conductivity from references

Sample	*α[mm²/s]	Cp[J/kg·K]	ρ[g/cm³]	λ[W/m·K]
S-1	4.0	500	7.90	16.2
S-2	7.0	460	7.70	24.2
S-3	72.0	893	2.73	193.0
S-4	95.0	900	2.71	231.0

*α is calculated value from equation (1) using Cp, ρ and λ.

Table 3. Results of specific heat, bulk density, thermal diffusivity and thermal conductivity from measurement

Sample	*α[mm²/s]	Cp[J/kg·K]	*ρ[g/cm³]	λ[W/m·K]
S-1	3.73	500	7.90	14.7
S-2	6.52	460	7.62	22.9
S-3	58.97	893	2.75	144.6
S-4	79.72	900	2.64	189.2

*α and ρ are measured values by instruments

섬광법(LFA)으로는 소재의 열전도도를 직접 측정할 수 없으며, 열확산계수를 측정한 후 식 (1)을 사용해 열전도도를 구할 수 있다. 섬광법으로 클래드메탈의 열전도도 산출시 생기는 문제점을 예측하기 위해, 단층금속의 열전도도를 섬광법을 이용해서 산출하였다. Table 2는 참고문헌에 보고된 단층금속의 비열, 밀도 및 열전도도 자료를 나타내며,[10-13] 식 (1)을 사용해서 계산한(calculated) 열확산계수도 나타냈다. 반면, Table 3은 본 연구에서 선택한 4개의 단층시편에 대해, 섬광법으로 열확산계수와 밀도를 직접 측정하고 산출함으로써 측정한(measured) 열전도도를 나타낸다. 이때, 단층금속의 비열은 압연법에 의해 크게 영향을 받지 않기 때문에 Table 2의 값을 그대로 사용하였다. Table 2와 Table 3를 비교하면, 단층금속의 밀도는 예측한 바와 같이, 참고문헌에 보고된 값과 측정한 값이 3% 이내로 잘 일치하였다. 그런데, 열확산계수와 열전도도는 시편의 종류에 따라 다른 값을 나타냈다.

Fig. 2는 Table 2와 Table 3에서 산출한 열확산계수와 열전도도를 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 2(a)는 각 시편의 열확산계수를 나타내고, Fig. 2(b)는 열전도도를 나타낸다. STS시편(S-1)의 경우, Table 3에서 보듯이 측정한 열확산계수와 열전도도는 각각 3.73 mm²/s와 14.7 W/mK로, Table 2의 계산값인 4.0 mm²/s와 16.2 W/mK에 비해 각각 6.75%와 9.25% 작게 나타났다. 또한, Al시편(S-3)의 경우, 섬광법으로 측정해서 산출한 열확산계수와 열전도도는 각각 58.97 mm²/s와 144.6 W/mK로, Table 2의 계산으로 산출한 열확산계수와 열전도도인 72 mm²/s와 193 W/mK에 비해 더욱 낮게 나타났다. 즉, 섬광법으로 측정해서 산출한 측정값은 참고문헌을 사용해서 산출한 계산값에 비해, 열확산계수는 STS시편의 경우 대략 6%, 알루미늄시편의 경우 18% 정도 낮게 나타났다.

이상의 결과에서, 단층금속의 두께 방향으로 열전도 특성 평가에서 열확산계수와 열전도도의 변화는 비슷한 경향을 나타냄을 알았다. 예측한 바와 같이, 단층금속의 경우 밀도와 비열은 금속재료의 미세조직에 크게 영향을 받지 않음을 확인하였다. 반면, 열확산계수와 열전도도는 섬광법으로 측정한 값이 대략 18~20% 정도 낮게 나타남을 보았다. 이런 차이가 생기는 이유는, 시편의 제조공정 시 발생한 서로 다른 압하율 등으로 생긴 미세구조의 변화가 열확산계수와 열전도도에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 계산값에 비해 측정값이 낮게 나타난 이유는 금속에서 열확산계수와 열전도도는 자유전자(free electron)와 탄성파(phonon)의 이동과 밀접한 관련이 있는데, 냉간가공된 미세조직은 전자의 이동과 탄성파의 이동을 방해하기 때문이다.[16]

3.2. 다층 클래드메탈의 두께 방향 열전도 특성

Fig. 3은 2층 금속인 클래드메탈에 대한 열확산계수와 열전도도를 나타낸다. 각 시편의 구분은 Table 1에 표시한 바와 같으며, Al의 부피분율은 클래드메탈을 구성하는 STS와 Al의 두께 비율에 의해 계산했다. 시편부호 D-1의 경우, 클래드메탈의 전체 두께는 2.0 mm인데 Al이

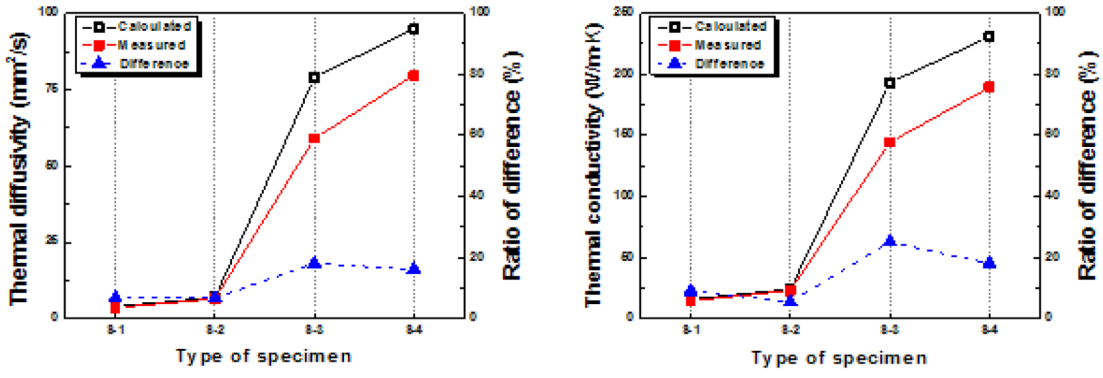

Fig. 2. Results of thermal properties for each sample of single metal: (a) thermal diffusivity and (b) thermal conductivity. Ratio of difference is came from the difference between calculated value minus measured value.

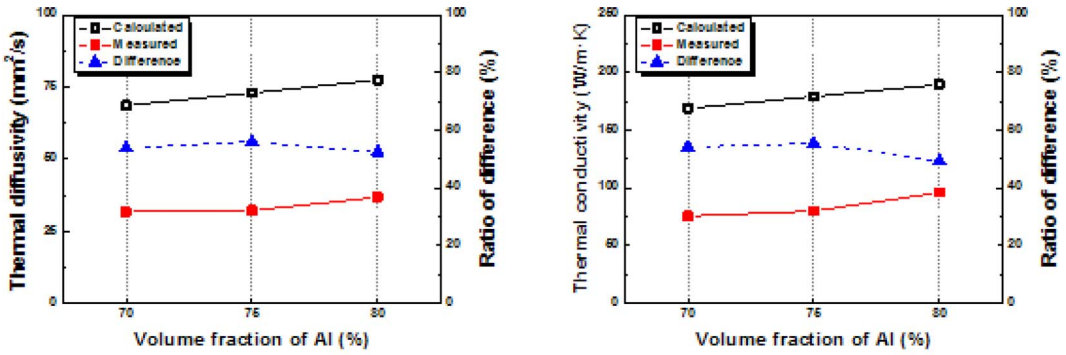

Fig. 3. Results of thermal properties for each clad metal of 2 ply: (a) thermal diffusivity and (b) thermal conductivity. Ratio of difference is came from the difference between calculated value minus measured value.

차지하는 두께가 1.4 mm이기 때문에 Al의 부피분율은 70%가 된다. Fig. 3(a)는 부피분율의 변화에 따른 클래드메탈의 열확산계수를 나타내고, Fig. 3(b)는 열전도도를 나타낸다. 클래드메탈에서 Al의 부피분율이 증가할수록 열확산계수와 열전도도는 증가하였다. 이유는 Table 2에서 보듯이, 클래드메탈을 구성하는 STS439 시편(S-2)에 비해 Al1050 시편(S-4)의 열확산계수와 열전도도가 훨씬 높기 때문이다. 즉, 클래드메탈의 제조시 열확산계수와 열전도도가 높은 소재의 부피분율을 증가시키면 다층구조 클래드메탈의 열전도 특성은 우수하게 된다.

Fig. 3의 클래드메탈과 Fig. 2의 단층금속의 결과를 비교해 보면, 다층 클래드메탈에서 계산값과 측정값에서 큰 차이가 발생함을 볼 수 있다. Fig. 3(a)에서 보면, 열확산계수의 경우 시편번호 D-1에서 53.8%, D-2에서 55.9%, 그리고 D-3에서 49.1%의 차이를 나타낸다. 열전도도는 Fig. 3(b)에서 보듯이, 시편번호 D-1에서 54.2%, D-2에서 55.4%, 그리고 D-3에서 49.3%의 차이가 나타났다. 즉, 측정한 열전도도가 계산된 열전도도에 비해 약 55% 낮게 나타났다. 또한, 클래드메탈에서 생기는 열전도도 변화의 크기는 섬광법으로 측정한 열확산계수에 대부분 의존함을 볼 수 있다. 금속소재의 경우, 밀도와 비열은 금속을 구성하는 합금원소의 첨가와 관련된 시편의 조성에는 민감하지만, 냉간가공으로 인한 미세구조 등에는 덜 민감하기 때문이다.[16] 따라서, 2층금속 클래드메탈의 열전도 특성을 체계적으로 파악하기 위해서는, 미세구조와 계면(interface)이 열확산계수와 열전도도에 어떻게 영향을 주는지에 대한 연구가 필요하다.

3.3. 클래드메탈에서 계면과 미세구조가 열전도 특성에 미치는 영향

Fig. 4는 2층 금속인 클래드메탈을 구성하는 STS와 Al의 계면을 광학현미경(optical microscopy, OM)으로 관찰한 사진이다. Fig. 4(a)는 시편번호 D-1의 계면을 100배로 관찰한 것으로, 위쪽은 STS 부분이고 아래쪽은 Al 부분이다. Fig. 4(b)와 Fig. 4(c)는 동일한 배율로 관찰한 시편번호 D-2와 D-3의 단면사진이다. Fig. 4에서 보듯이, 압연법으로 클래드메탈을 제조하면 계면이 치밀하게 본딩

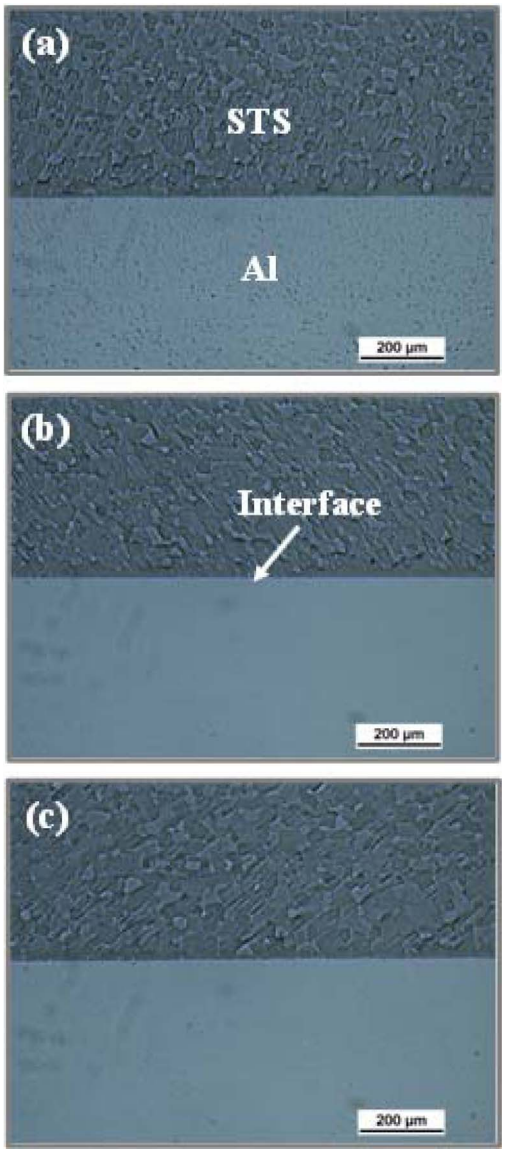

Fig. 4. Cross-sectional OM images of clad metals around interface: (s) sample D-1, (b) sample D-2, and (c) sample D-3.

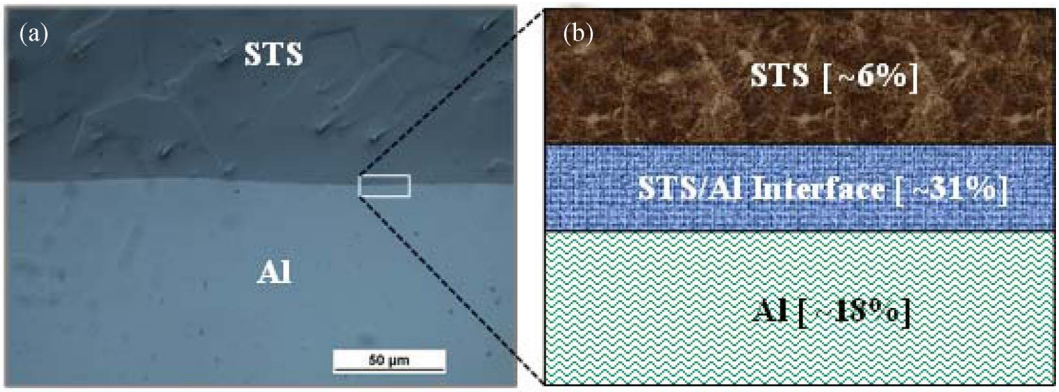

Fig. 5. Cross-sectional views of clad metals around interface: (a) OM of 500x for sample D-2, and (b) schematic diagram of STS/Al interface according to thermal conductivity.

된다.[17] STS와 Al의 계면(STS/Al interface) 부분을 100배의 배율로 관찰하면 본딩이 완벽한 것처럼 관찰된다. Fig. 4의 계면상태 결과는 Fig. 3에서 나타난 결과인, 열전도 특성에서 계산값과 측정값의 차이가 50~55% 정도로 크게 발생한 이유를 설명하지 못한다. 따라서, 클래드메탈의 계면에 대한 좀 더 깊이 있는 고찰이 필요하다.

클래드메탈에서 계면은 원자의 배열과 결함의 밀도 측면에서 모재인 벌크 부분과 큰 차이를 나타낼 수 있다. Fig. 5(a)는 시편번호 D-2의 클래드메탈에 대해 계면부분을 500배로 관찰한 광학현미경 사진이다. STS와 Al의 계면에서 금속간화합물과 같은 새로운 상은 관찰되지 않는다. 스테인리스(STS304)와 알루미늄(Al1050)을 압연법으로 제조한 클래드메탈의 계면을 연구한 경우, 금속간화합물은 후 열처리의 조건에 따라 생성되기도 한다. 후 열처리 온도가 450ºC 이하인 경우 금속간화합물이 발견되지 않지만,[17] 후열처리 온도가 550ºC 이상이 되면 10 μm 이상의 두께를 갖는 금속간화합물이 생성된다.[18] 이때 계면에서 생성된 금속간화합물의 조성은 클래드메탈을 구성하는 모재인 STS와 Al와는 다른 $Al_{13}Fe_4$ 혹은 FeC 등으로 나타나기도 한다. Fig. 5(b)는 클래드메탈의 계면에 금속간화합물의 생성 혹은 확산층(diffusion layer)의 생성을 가정해서 도시한 계면부의 개념도이다. Fig. 3(b)에서 클래드메탈의 경우, 열전도도는 계산값에 비해 측정값이 50% 정도 낮았다. Table 2와 Table 3를 그림으로 표시한 Fig. 2(b)와 Fig. 3(b)의 결과를 종합하면, 클래드메탈에서 측정값의 열전도도가 낮게 나타난 55% 중에서, STS와 Al이 기여하는 부분은 6%와 18%로 작았고, 대부분을 차지하는 31%는 계면의 영향으로 계산되었다.

클래드메탈에서 계면은 모재인 STS와 Al와 경계를 이루는 부분으로, 미세한 크기의 기공(void)과 불순물(impurity) 등으로 이루어진 결함(defect)의 농도가 높은 영역이다. 계면에 존재하는 결함들은 전자의 이동과 포논의 이동을 감소시키기 때문에 열전도 특성을 저하시킨다. 클래드메탈의 두께 방향으로 열전도도를 좀 더 정확하게 예측하기 위해서는 열흐름 방향으로 배치된 각 층들의 열저항(thermal resistance) 특성을 고려해야 하는 어려움이 있다.[19] 따라서, 우수한 열전도 특성을 갖는 다층구조 방열모듈을 개발하기 위해서는 열저항의 개념을 적용한 계면특성의 제어에 대한 폭 넓은 연구가 필요하다.

4. 결 론

전자소자에서 발생하는 열을 효과적으로 방출시키는 기술의 개발이 필요하기 때문에, 히트 싱크용 단층금속과 클래드메탈의 열전도 특성에 미치는 인자에 대한 연구를 수행하였다. 단층금속의 경우, 문헌에 보고된 물리적 값들을 사용해서 계산한(calculated) 열전도 특성값은 실험으로 측정한(measured) 열전도 특성값과 18% 이내의 범위에서 일치하였다. 스테인리스강의 경우 6% 이내로 일치하였으며, 알루미늄의 경우 18% 이내에서 일치하였다. 반면, 스테인리스강과 알루미늄을 압연해서 제조한 2층금속 클래드메탈의 경우, 계산값과 측정값은 55% 정도 큰 차이를 보였는데, 측정값이 낮게 나타났다. 클래드메탈의 두께 방향으로 열전도 특성의 평가시, 계산값에 비해 측정값이 55% 정도 낮게 나타난 이유는 스테인리스강과 알루미늄 사이에 생긴 계면이 전자의 이동과 탄성파(phonon)의 이동을 방해하기 때문이다. 우수한 방열 특성을 갖는 다층구조 방열모듈을 개발하기 위해서는 두께는 작지만 전자와 탄성파의 이동에 큰 영향을 주는 계면의 특성을 조절하는 기술이 중요하다.

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. S. Kim, “Thermal Management on 3D Stacked IC”, J. Microelectron. Packag. Soc., 22(2), 5 (2015).
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_2 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. ASM International Handbook Committee, “Properties and Selection: Nanoferrous Alloys and Special-Purpose Materials”, Metals Handbook 10th Ed., Vol. 2, ASM International, Ohio (1990) from http://matweb.com.
11. J. M. Holt, “Structure Alloys Handbook”, Handbook, CINDAS/Purdue University, Indiana (1996) from http://matweb.com.
12. D. Peckner and I. M. Bernstein, “Handbook of Stainless Steels”, in Handbook, McGraw-Hill Book Company, New York (1997) from http://matweb.com.
13. F. Cardarelli, “Materials Handbook”, in Handbook 2nd Ed., Springer-Verlag, London (2008) from http://matweb.com.
14. C. J. H. Helmereich, R. Corbin and S. M. McDeavitt, “Measurement of Thermal Diffusivity of Depleted Uranium Metal Microspheres”, J. Nucl. Mater., 446, 100 (2014).
15. 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).
16. D. R. Askeland and P. P. Phule, “The Science and Engineering of Materials 5th Ed.” (in Korean), C. G. Kang, S. M. Koo, J. H. Kim, Y. W. Seo, K. Y. Son, K. S. Lee, J. H. Lee and H. C. Lee, Eds, pp. 791-806, Scitech Media, Seoul (2008).
17. J. E. Lee, D. H. Bae, W. S. Chung, K. H. Kim, J. H. Lee and Y. R. Cho, “Effect of Annealing on the Mechanical and Interface Properties of Stainless Steel/Aluminum/Copper Clad-Metal Sheets”, J. Mater. Process. Technol., 187-188, 546 (2007).
18. H. R. Akramifard, H. Mirzadeh and M. H. Parsa, “Cladding of Aluminum on AISI 304L Stainless Steel by Cold Roll Bonding: Mechanism, Microstructure and Mechanical Properties”, Mater. Sci. Eng., A613, 232 (2014).
19. H. Samadi and E. Gracia, “Thermal Conductivity of Plasma Sprayed Forsterite/Mullite Coatings”, Ceram. Inter., 40, 13995 (2014).