

전자부품의 방열방향에 따른 접촉열전도 특성

Characterization of a Thermal Interface Material with Heat Spreader

김정균¹, Wataru Nakayama², 이선규^{1,✉}
 Jung-Kyun Kim¹, Wataru Nakayama² and Sun-Kyu Lee^{1,✉}

1 광주과학기술원 기전공학과 (Department of Mechatronics, Gwangju Institute of Science and Technology.)

2 Therm Tech International

✉ Corresponding author: skyee@gist.ac.kr, Tel: 062-970-2388

Manuscript received: 2009.3.3 / Accepted: 2009.9.18

The increasing of power and processing speed and miniaturization of central processor unit (CPU) used in electronics equipment requires better performing thermal management systems. A typical thermal management package consists of thermal interfaces, heat dissipaters, and external cooling systems. There have been a number of experimental techniques and procedures for estimating thermal conductivity of thin, compressible thermal interface material (TIM). The TIM performance is affected by many factors and thus TIM should be evaluated under specified application conditions. In compact packaging of electronic equipment the chip is interfaced with a thin heat spreader. As the package is made thinner, the coupling between heat flow through TIM and that in the heat spreader becomes stronger. Thus, a TIM characterization system for considering the heat spreader effect is proposed and demonstrated in detail in this paper. The TIM test apparatus developed based on ASTM D-5470 standard for thermal interface resistance measurement of high performance TIM, including the precise measurement of changes in in-situ materials thickness. Thermal impedances are measured and compared for different directions of heat dissipation. The measurement of the TIM under the practical conditions can thus be used as the thermal criteria for the TIM selection.

Key Words: Heat Spreader (방열판), Lateral Heat Flow (횡방향 열류), Longitudinal Heat Flow (종방향 열류), Thermal Contact Resistance (접촉 열저항) Thermal Management (열관리), Thermal Interface Material (접촉 열전도재)

기호설명

A = area of heat flow meter bar
 Bi = Biot number
 k = thermal conductivity
 Q = heat flow
 R = thermal resistance
 θ = thermal impedance
 T = temperature
 ΔT = temperature difference

Subscripts

b = bottom surface of TIM
 c = contact surface
 lat = lateral heat flow meter bar
 $long$ = longitudinal heat flow meter bar
 Max = maximum
 Sp = Heat spreader
 t = top surface of TIM
 TIM = thermal interface material

total = overall thermal resistance

1. 서론

전자 장비의 소형화와 집적화에 따른 시스템의 발열 문제를 해결하기 위한 열관리(thermal management) 기술은 중요한 문제이다.¹ 이러한 열 관리 기술은 노트북 컴퓨터, 고성능 CPU 칩셋, 휴대용 전자기기, 디스플레이 장비의 핵심부품 및 우주항공 전자장비에서 핵심적인 기술로 주목받고 있다. 대표적인 열 관리 기술로는 접촉경계면 연구, 방열설계기술, 쿨링 기술 등이 있다. 접촉경계면에 관한 연구는 주로 두 강체의 접촉면에서의 접촉 열저항을 줄이기 위한 연구로 진행되어 왔다. 실제 강체의 표면에는 표면 거칠기(surface roughness), 파상도(waviness) 등의 불규칙한 패턴을 가지며 이러한 불규칙한 표면 접촉은 열전도 현상을 방해하는 접촉 열 저항의 주요한 원인이 된다. 이 때 실제 접촉면적을 증가시키기 위해서는 압력을 가하여 표면을 평평하게 하는 방법과 접촉면 사이에 고열전도재료를 채워 넣어 접촉 열저항을 줄이는 방법이 있다. 이러한 접촉 열저항을 줄이기 위한 접촉열전도재 물질로 페이스트(paste), 패드(pad), 젤(gels), 접착 테이프(adhesive) 타입의 다양한 재료의 물질이 개발되어 왔다.²⁻⁵ 하지만 실제 전자장비에 적용시의 성능과 이상적인 환경에서의 표준화된 측정 성능간에 차이가 있다는 것이 지적되어 왔다.⁶⁻⁸

소형화, 집적화된 많은 전자장비의 경우 Fig. 1 과 같이 고성능의 전자칩은 얇은 방열판과 함께 패키지 된 경우가 자주 있다. 이 때, 패키지 시스템이 얇아질수록 접촉열전도재를 통해 흐르는 열류와 방열판과의 연관성은 강해진다.⁹ 따라서 접촉 열전도재의 성능 평가에 있어서 방열판과의 관계를 고려하는 것은 중요한 요소이다. 본 연구에서는 방열판에 의해 발생하는 횡방향 열류를 고려한

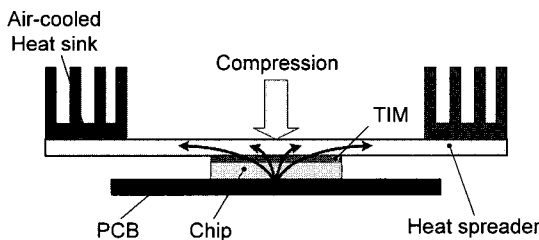


Fig. 1 Compact electronic package with heat spreader

접촉열전도재의 열전도율 및 접촉 열저항 측정방법을 제시하였고, 소형화, 집적화 된 전자장비 패키지에서 실제 방열장비와의 연관성을 고려하였다.

2. 접촉열전도재 특성 측정장치의 개요

2.1 측정장치 구성

방열판과 접촉열전도재의 특성 관계를 파악하기 위해서는 기존의 종방향 열류만을 고려한 접촉 열전도재 측정장치¹⁰가 아닌 횡방향 열류를 고려한 측정장치가 필요하다. Fig. 2 는 횡방향 열류를 고려해서 설계한 접촉열전도재 특성 측정장치를 보여주고 있다.

열 전도율이 높은 구리를 이용하여 종방향 열류가 발생하는 크기 50x50x137mm 의 두 개의 열류막대를 구성하였고 각 열류막대에는 발열을 위한 직경 10mm 의 80W 의 발열용량을 갖는 다섯 개의 카트리지 히터가 내장되어 있다. 열류막대는 주위 공기에 의한 열손실을 막고 종방향 열류만을 발생키 위해 열전도율이 낮은 두께 25mm 의 테프론 재질로 단열 처리하였다. 측정 시 접촉열전도

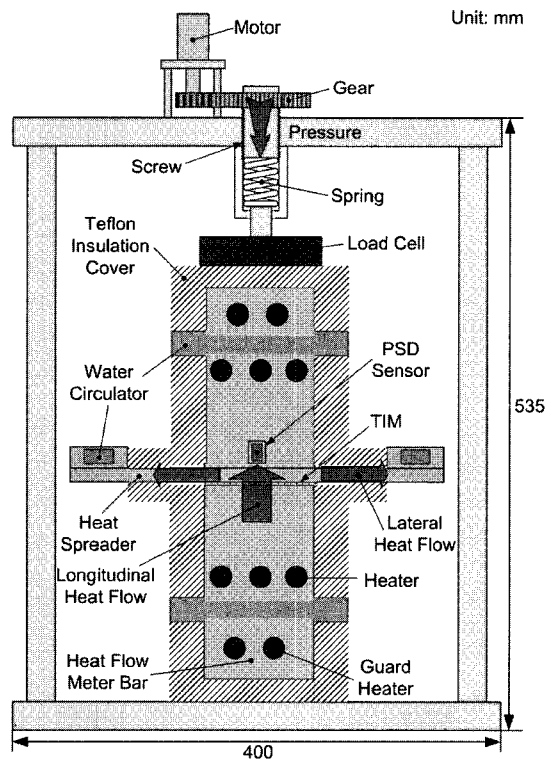


Fig. 2 Experimental setup for lateral TIM tester

재에 압력을 가하는 장치는 기어박스 와 모터, 나사 스프링을 이용하여 구성하였으며 자동으로 압력조절이 가능하며, 로드셀을 이용하여 실시간으로 가하는 외부압력을 측정하였다. 다음으로 횡방향 열류를 발생시키기 위해서 구리를 이용하여 두께 10 mm 의 방열판을 제작하였고, 두께 20 mm 의 테프론 재질로 단열 처리하였다. 각 열류막대와 방열판에는 냉각을 위한 유동 채널을 가공하여, 각 유동 채널은 액체순환기에 연결되어 있어 냉각수의 온도를 10℃로 일정하게 유지시키게 하였다. 압력 변화에 따른 접촉열전도재의 두께 변화를 실시간으로 측정하기 위해 10μm 분해능의 PSD(Position Sensitive Detector) 센서를 사용하였다. 열류막대의 온도는 RTD(Resistance Temperature Detector) 센서를 이용하여 측정하였고, 방열판의 온도는 T 타입 열전대를 이용하여 측정하였다. 압력신호와 온도신호는 데이터 수집장치를 이용하여 데이터를 수집하였다. 접촉열전도재로는 Bergquist 사의 갭 패드(Gap pad) 타입과 접착 테이프(Adhesive) 타입을 이용하여 측정하였다. Table 1 은 측정장치의 명세사항과 각 측정 센서와 장치의 오차(uncertainties)를 나타내고 있다.

2.2 측정방법

2.2.1 종방향 열류만을 고려한 측정 방법

ASTM D-5470 측정 방식은 정상상태에서의 접촉열전도재의 열전도율을 측정하는 방식이며 측정 장치의 종방향 열류만을 고려한 측정방법이다. 이 때 정상상태는 5 분간 0.1 도 이내의 온도 변화가 유지되는 경우로 정의한다.¹⁰ 측정 방법은 먼저 측정 샘플을 고온 열류막대와 저온 열류막대 사이에 위치시켜 히터를 작동하여 열류막대가 정상온도상태를 이루도록 한 다음, 온도를 측정한다. 이 때의 열류막대 경계면의 열저항 및 열임피던스는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R_{total} = \frac{\Delta T}{Q} \tag{1}$$

$$\theta_{total} = \frac{\Delta T \cdot A}{Q} \tag{2}$$

경계면의 전체 열저항을 구하기 위해서는 양 열류막대 끝단의 온도 값과 접촉열전도재를 흐르

는 열류 값이 필요하다. 이 때 RTD 센서를 이용하여 열류막대의 각 부분에 따른 온도를 측정할 수 있고, 측정 값을 선형 보간한 선을 통하여 열류막대의 양 끝단의 온도를 추출할 수 있다. 접촉열전도재를 흐르는 열류 값은 열류막대 온도의 선형 보간한 선의 기울기 값과 구리 열류막대의 열전도율 값을 이용하여 추출할 수 있다. 이 때, 열임피던스(thermal impedance)는 구한 열저항 값에 열류막대의 단면적을 곱하면 구할 수 있다.

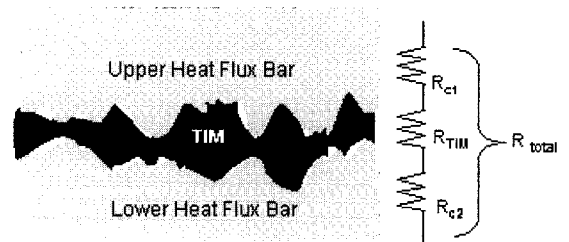


Fig. 3 Thermal interface material between upper and lower heat flux bar

Fig. 3 에서 보듯 경계면에서 전체 열저항은 세 개의 직렬 저항으로 연결되어 있다고 간주하고, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R_{total} = R_{TIM} + R_{C1} + R_{C2} \tag{3}$$

이 때 접촉열전도재 자체의 열저항은 식(4)와 같이 표현할 수 있고, 고체 경계면의 접촉 열 저항 R_C1 과 R_C2 을 합쳐서 R_C 로 표현할 경우 전체 접촉열저항은 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$R_{TIM} = \frac{t}{k_{TIM} A} \tag{4}$$

$$R_{total} = \frac{t}{k_{TIM} A} + R_C \tag{5}$$

식 (5)를 통해서 알 수 있듯이 접촉열전도재의 자체 열 전도율은 접촉열저항과 접촉열전도재 두께와 무관하기 때문에 접촉열전도재의 두께를 달리하면서 경계면의 전체 열저항을 측정하면 Fig 4 과 같이 측정 값을 선형보간한 선의 기울기 값의 역수를 통해 접촉열전도재의 자체 열 전도율 (k_TIM)을 구할 수가 있고, Y 축 절편 값을 이용하

여 경계면에서의 접촉열저항(R_C)을 얻을 수 있다. 이 때 접촉면 주위를 열저항으로 구성된 열 네트워크(Thermal network)로 표현하면 Fig. 5 와 같이 나타낼 수 있다.

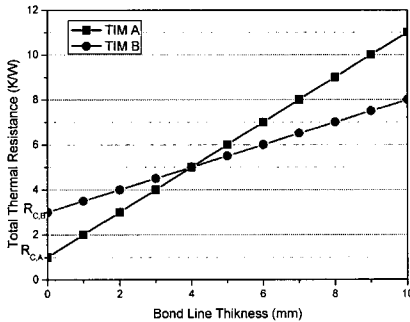


Fig. 4 Example of plot of total thermal resistance for two thermal interface materials

- Measurement value
- Extrapolated value

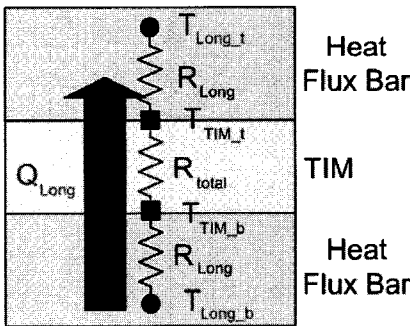


Fig. 5 Thermal network model for calculating longitudinal thermal conductivity

2.2.2 횡방향 열류까지 고려한 측정 방법

횡방향 열류를 고려한 측정 방법의 경우 경계면에서의 전체 열저항을 구하기 위해 접촉열전도재의 양 표면의 온도와 접촉열전도재를 흐르는 열류 값이 필요하다. 이 때 방열판과 결합된 측정장치를 열저항으로 구성된 열 네트워크(Thermal network)로 표현하면 Fig. 6 과 같이 나타낼 수 있다.

접촉열전도재를 흐르는 열류 값은 종방향 측정 방식과 동일하게 열류막대에서의 온도 측정 값을 통하여 선형 보간함으로써 열류막대의 열전도율을 이용하여 추출할 수 있고, 열류 값과 측정된 온도

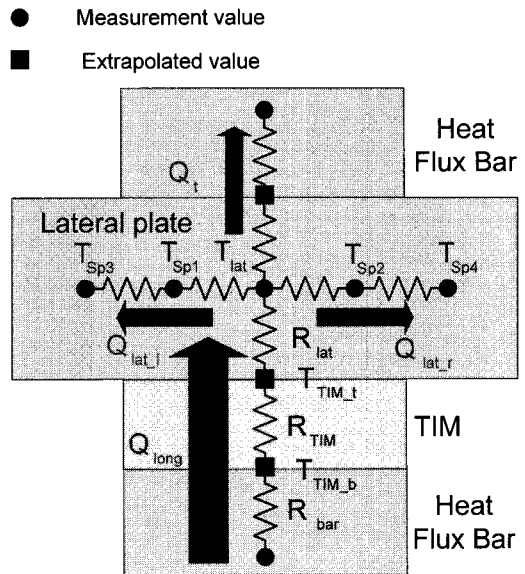


Fig. 6 Thermal network model for calculating combined lateral /longitudinal thermal conductivity

값들을 이용하여 식 (6), (7)과 같이 접촉열전도재의 상하 표면의 온도 값을 추출할 수 있다. 접촉열전도재 표면 온도와 열류 값을 이용하여 식 (8)와 같이 접촉열전도재의 경계면에서의 전체 열저항을 구할 수 있다.

$$T_{TIM_b} = T_{Long} - Q_{Long} \cdot R_{Long} \quad (6)$$

$$T_{TIM_t} = Q_{Long} \cdot R_{Lat} + T_{lat} \quad (7)$$

$$R_{total} = \frac{(T_{TIM_b} - T_{TIM_t})}{Q_{Long}} \quad (8)$$

3. 측정 결과 및 고찰

측정은 종방향 열류만 고려한 상황에서 접촉열전도재가 없이 두 열류막대가 접촉되어 있는 상태와 갭 패드 타입과 접착테이프 타입의 접촉열전도재가 삽입된 상태를 측정하였고, 접촉열전도재의 두께를 달리하여 각 접촉열전도재의 자체 열전도율을 측정하여 제작사의 측정 값과 비교하였다. 또한 방열판에 의한 횡방향 열류를 동시에 고려한 경우에 접촉열전도재의 경계면에서의 전체 열저항

값의 변화를 측정하였다. 측정 시 열류막대에 가하는 압력은 실제 상용 전자패키지의 가압범위 (0.07~0.1 Mpa)를 고려하여 0.1 Mpa로 하였다. 열류막대에 가하는 열류량은 실제 접촉열전도재의 사용환경온도(50~70℃)를 유지하기 위해 80W의 입력력을 가하였다. Table 1은 측정조건을 나타내고 있다. 각 측정조건에 따른 열저항, 열임피던스, 열전도율 값은 Table 2에 정리되어 있다. Fig. 7과 8은 각각 접촉열전도재의 열전도율을 측정하기 위한 접촉열전도재의 두께의 변화에 따른 열임피던스를 측정한 결과와 선형 보간한 선을 보여주고 있다. Fig. 6과 7을 통하여 접촉열전도재의 두께를 변화 시킴에 따라 경계면에서의 전체 열저항이 선형적으로 변하는 것을 확인할 수 있고, 선형 보간한 선의 기울기 값을 이용하여 접촉열전도재의 자체 열전도율 값을 구할 수 있다.

Table 1 Specification of apparatus and uncertainties on measurement

Thermometer	RTD sensor type: Pt 100Ω Temp. variation: ±0.04℃
	Thermocouple type: T-type Temp. variation: ±0.04℃
Heater	Cartridge Heater Heat capacity: 80W Heat flow variation: ±1.2W
Pressure loading Module	Loadcell capacity: 200kg Indicator resolution: 0.02kgf (78Pa) Pressure accuracy: Under 390Pa Pressure range: 0~98kPa
Cooling unit	Temp. range: -20℃ ~ +80℃ Temp. accuracy: ±0.01℃
Heat loss	Under 3%
Thermal interface material	Gap pad type Filler: None Thermal Conductivity: *1.5W/m·K
	Adhesive tape type Filler: Fiberglass Thermal Conductivity: *0.8W/m·K

* : manufacturer' data

Table 2 Measurement results

Longitudinal heat flow	Without TIM	R: 0.235 K/W θ: 5.871 Kcm ² /W
	Gap pad TIM	R: 0.228 K/W θ: 5.696 Kcm ² /W
	Adhesive TIM	R: 0.163 K/W θ: 4.070 Kcm ² /W
Longitudinal lateral heat flow	Gap pad TIM	R: 0.269 K/W θ: 6.742 Kcm ² /W
	Adhesive TIM	R: 0.202 K/W θ: 5.047 Kcm ² /W
Thermal conductivity measurement	Gap pad TIM	k: 1.57 W/mK *(k: 1.50 W/mK)
	Adhesive TIM	k: 0.73 W/mK *(k: 0.80 W/mK)

* : manufacturer' data

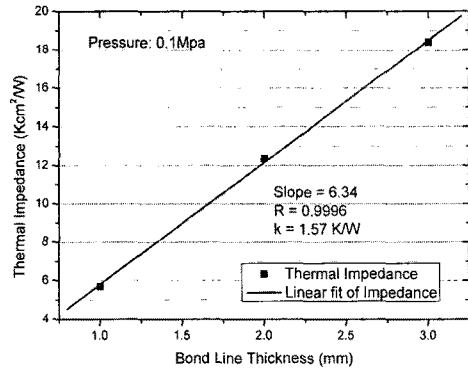


Fig. 7 Linear relation between BLT and total thermal impedance for Gap Pad TIM

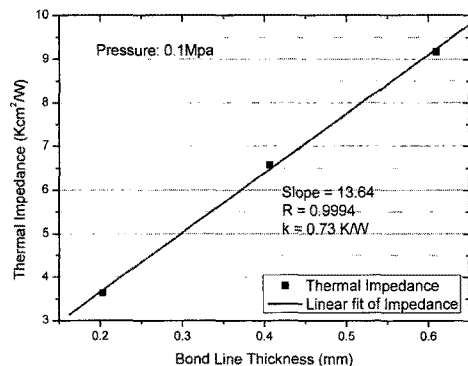


Fig. 8 Linear relation between BLT and total thermal impedance for Adhesive TIM

측정 결과 접촉열전도재가 있는 경우 두 접촉 열전도재 모두 전체 열저항과 열임피던스가 감소하는 것을 볼 수 있었다. 이 때 갭 패드 타입 접촉열전도재의 경우 약 3%의 열저항 감소 효과를 보였고, 접착테이프 타입 접촉열전도재의 경우 약 21%의 열저항 감소 효과를 보였다. 따라서 접착테이프 타입의 접촉열전도재가 열 저항 감소효과가 우수한 것을 확인할 수 있다. 또한, 각 접촉열전도재의 열 전도율을 측정할 결과 제조사의 측정 값과 갭 패드 타입의 경우 5%, 접착테이프 타입의 경우 9%의 오차를 보였다. 한편, Fig. 9에서는 횡방향 열류가 존재하는 경우 접촉열전도재는 종방향 열류만 있는 경우보다 갭 패드 타입은 18%, 접착테이프 타입은 24% 정도 열저항과 열임피던스가 증가하는 것을 보여주고 있다. 따라서 횡방향 열류가 발생하는 경우 이상적인 상황에서보다 접촉 열전도재의 열전도 성능이 저하되는 것을 확인했다.

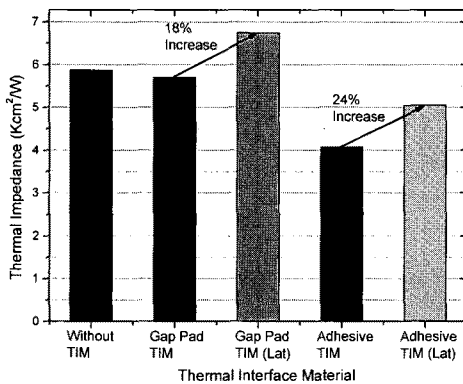


Fig. 9 Comparison of thermal impedance

이러한 횡방향 열류가 존재하는 경우의 접촉열저항의 증가 원인을 규명하기 위해 발열 면적과 방열 면적이 다른 경우에 존재하는 압축/팽창 (Constriction/Spreading) 열저항을 부록 A1 와 같이 계산하였다. Fig. 10 은 실제 측정장치에서 발생하는 압축/팽창 열저항을 계산하기 위한 직사각형 타입의 방열 기하구조이다.

무차원 압축/팽창 열저항을 통하여 계산된 실제 실험장치에서 방열판에 의해 발생하는 압축/팽창 열저항 값은 0.046 K/W 이다. 한편, 방열판이 결합된 상태에서 갭 패드 타입과 접착 테이프 타입의 접촉열전도재의 증가한 열저항 값은 각각

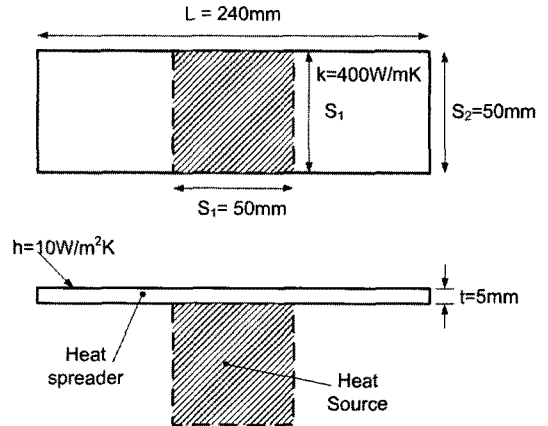


Fig. 10 Non-square thermal spreader plate geometry

0.041 K/W 과 0.039 K/W 이다. 이는 계산된 접촉/팽창 열저항 값과 매우 유사함을 알 수 있다. 따라서 횡방향 방열판에 의한 열류가 존재하는 경우의 접촉열전도재의 접촉 열저항의 증가 원인은 방열판에 의한 압축/팽창 열저항에 기인한다고 생각되며 향후 보다 자세한 검토가 필요할 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 방열판의 방향에 따른 접촉열전도재의 열전도율과 접촉 열저항 측정을 위한 실험장치와 측정 방법을 제시하였다. 실험 결과, 횡방향의 열류를 고려한 경우 접촉열전도재는 종방향 열류만을 고려한 경우보다 열저항과 열임피던스가 갭 패드 타입은 18%, 접착테이프 타입은 24% 증가하였고, 횡방향 열류가 존재하는 경우의 접촉 열저항의 증가원인이 열전도 면적의 압축/팽창 효과에 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단 국가지정연구실사업의 지원((No. R0A-2008-000-10065-0)과 광주과학기술원 생체적용 나노기초기술연구센터의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Kim, J. W., Gao, S., Hong, J. P., Chung, C. Y., Choi,

S. M. and Yi, S., "Thermal Via Design for Heat Dissipation in PCB," Proc. of Korean Society Precision Engineering Spring Conference, pp. 195-196, 2008.

2. Liu, B. M. and Mui, Y. C., "TIM Characterization for High Performance Microprocessors," Proc. of Electronics Packaging Technology Conference, Vol. 2, pp. 532-536, 2005.

3. Jarrett, R. N., Merritt, C. K., Ross, J. P. and Hisert, J., "Comparison of Test Methods for High Performance Thermal Interface Materials," Proc. of 23rd IEEE SEMI-THERM Symposium, pp. 83-86, 2007.

4. Sarvar, F., Whalley, D. C. and Conway, P. P., "Thermal Interface Materials - A Review of the State of Art," Proc. of Electronics System Integration Technology Conference, Vol. 2, pp. 1292-1302, 2006.

5. Gwinn, J. P. and Webb, R. L., "Performance and testing of thermal interface materials," Microelectronics Journal, Vol. 34, No. 3, pp. 215-222, 2003.

6. Lasance, C. J. M., Murray, C. T., Saums, D. L. and Renez, M., "Challenges in Thermal Interface Material Testing," Proc. of 22nd IEEE SEMI-THERM Symposium, pp. 42-49, 2006.

7. Culham, J. R., Teertstra, P., Savija, I. and Yovanovich, M. M., "Design, Assembly and Commissioning of a Test Apparatus for Characterizing Thermal Interface Materials," Proc. of 2002 Inter Society Conference on Thermal Phenomena, pp. 128-135, 2002.

8. Kearns, D., "Improving Accuracy and Flexibility of ASTM D 5470 for High Performance Thermal Interface Materials," Proc. of 19th IEEE SEMI-THERM Symposium, pp. 129-133, 2003.

9. Samson, E. C., Machiroutu, S. V., Chang, J.-Y., Santos, I., Hermerding, J., Dani, A., Prasher, R. and Song, D. W., "Interface Material Selection and a Thermal Management technique in Second-Generation Platforms Built on Intel Centrino Mobile Technology," Intel Technology Journal, Vol. 9, No. 1, pp. 75-86, 2005.

10. EIA/JESD 51-1, "Integrated Circuits Thermal Measurement Method - Electrical Test Method (Single Semiconductor Device)," Electronic Industries Association, 1995.

부 록

A1. 압축/팽창 열저항

발열 면적과 방열 면적이 다른 경우에 존재하는 경우의 압축/팽창 열저항은 Lee^{A1} 에 의해 개발된 식을 이용하여 계산한다. 본 식은 발열 면적과 방열 면적이 원형인 경우를 기준으로 하기 때문에 측정장치에 적용하기 위해서는 직사각형 구조를 원형 구조로 변경하는 등가반경 식 (A1), (A2)가 필요하고, 등가반경 값과 기하구조 값들을 이용하여 무차원 접촉 반경(식(A3)), 무차원 방열판 두께(식(A4)), Biot 수(식(A5)), 코유치(식(A6)), 무차원 수(식(A7))를 계산할 수 있다.

$$r_1 = \sqrt{\frac{s_1^2}{\pi}} \tag{A1}$$

$$r_2 = \sqrt{\frac{s_2 L}{\pi}} \tag{A2}$$

$$\varepsilon = \frac{r_1}{r_2} \tag{A3}$$

$$\tau = \frac{t}{r_2} \tag{A4}$$

$$Bi = \frac{hr_2}{k} \tag{A5}$$

$$\lambda = \pi + \frac{1}{\varepsilon \sqrt{\pi}} \tag{A6}$$

$$\phi = \frac{\tanh(\lambda \times \tau) + \frac{\lambda}{Bi}}{1 + \frac{\lambda}{Bi} \tanh(\lambda \times \tau)} \tag{A7}$$

다음으로 계산된 무차원 값들을 이용하여 구한 무차원 압축/팽창 열저항은 식 (A8)과 같이 표현할 수 있다. 무차원 압축/팽창 열저항을 통하여 실제 실험장치에서 방열판에 의해 발생하는 압축/팽창 열저항은 식 (A9)와 같이 계산된다.

$$\psi_{\max} = \frac{\varepsilon \times \tau}{\sqrt{\pi}} + \frac{1}{\sqrt{\pi}} (1 - \varepsilon) \phi \quad (\text{A8})$$

$$R_{sp} = \frac{\psi_{\max}}{k \times r_1 \sqrt{\pi}} \quad (\text{A9})$$

부록참고문헌

- A1. Lee, S., Song, S., Au, V. and Moran, K., "Constriction/Spreading resistance model for electronics packaging," ASME/JSME Thermal Engineering Conference, Vol. 4, pp. 199-206, 1995.