

전자소자의 평면 접촉계면에 대한 열전도성 향상에 관한 연구

홍성은 · 이수영* · 김철주**

유한대학 건축설비과, *성균관대 대학원, **성균관대학교 기계공학부

A Study on the Thermal Enhancement for a Plane Contact Interfaces of Electronic Systems

Sung Eun Hong, Soo Young Lee* and Chul Ju Kim**

Yuhan College, Dept of Architectural Equipment, *SKKU, Graduate School

**SKKU, School of Mechanical Engineering

요 약

본 연구에서는 지름 30 mm, 길이 45 mm인 brass와 aluminium 원통 실린더의 접촉면이 i) 진공 상태에 있을때, ii) silicone grease를 충전하였을때, iii) silicone grease와 aluminium 분말 (#325) 혼합물을 충전하였을 때의 열접촉저항을 측정하였고, 그 결과를 Fouche의 해석 모델과 비교하였다. 진공상태에서 비 접촉면의 열접촉저항은 표면의 가공 상태에 따라 $(2\sim 100)\times 10^{-5}(m^2\text{ }^\circ\text{C/W})$ 의 분포를 나타내었고 접촉 표면을 연마하였을 때에는 거친 표면에 비하여 약 30~50%의 열접촉저항저감을 나타내었다. 그러나, silicone grease를 충전했을 때에는 열접촉저항 값이 약 5~10배 정도 감소하는 경향을 나타내었다. Fouche 모델을 이용한 해석 결과는 silicone grease로 충전한 접촉면에 대해서 각 10~30% 범위에서 아주 잘 일치하였다.

Abstract — In the present study, measurements of thermal contact resistance (TCR) were conducted for joints of brass and aluminium cylinders of 30 mm in diameter, 45 mm in length, when their interfaces were; i) under vacuum, ii) charged with a pure silicone grease and iii) charged with a mixture of silicone grease and powder of aluminium (#325). Also the data were compared with analytical calculations using Fouche's model. The data of TCR for joints under vacuum state varied in the range of $(2\sim 100)\times 10^{-5}(m^2\text{ }^\circ\text{C/W})$ depending on their surface roughness. When the contact surfaces were carefully ground, a reduction of 30~50% in TCR was obtained. But the surface treatment with silicone grease gave rise to a reduction of about 5~10 times more than that of vacuum state. The analytical prediction by Fouche's model showed a good agreement within 10~30%, for the case of contact surface charged with silicone grease.

1. 서 론

오늘날 전자 제어 기술의 발달로 인하여 전자 통신설비, 컴퓨터, 냉난방 기기, 전기철도차량, 등 산업 설비 전반에 다양한 종류의 전자 반도체들이 사용되고 있다. 반도체 소자들의 전기특성은 온도에 따라 매우 민감하게 변화한다. 따라서 반도체를 사용할 때에는 항상 허용 온도 범위를 넘어 가지 않도록 반도체에서 발생하는 열을 제거해야 한다^{[1][8]}. 이러한 냉각방법으로는 알루미늄 재질의 열침(heat sink)을 반도체에 부착하고 열침을 통하여 자연대류 또는 강제대류 방식으로 열을 제거하는 방법이 많이 사용되고 있다. 전자 반도체에서 발생하는 열

의 크기는 컴퓨터 기억소자에서 $1\sim 10\text{ W/cm}^2$, 철도차량용 전력반도체에서 $50\sim 100\text{ W/cm}^2$ 까지 다양하며, 반도체 기술의 발달에 따라 점차 발열밀도가 증가하는 추세에 있다. 또한 열침의 크기도 점차 축소 지향적으로 이전하고 있으며, 이 결과 반도체 냉각장치의 설계에 보다 엄밀한 열회로 해석을 필요로 하고 있다. 이러한 냉각 시스템의 열회로 해석에서 열침과 반도체의 접촉면 열저항은 저항값이 가장 크고 예측이 어려운 요소이다. 열접촉저항은 접합물체 표면의 가공상태, 체결하중, 물체의 하중변형 관계등 관련인자들이 복잡하여 크기와 변화를 예측하기가 어렵다^{[9][10]}.

이러한 문제의 해결을 위하여 접촉계면에 열전도성이

큰 윤활유, 또는 납, 알루미늄과 같은 금속박막을 도입하는 연구가 Fried and Costello(1962)^[11], Cuhnington (1964)^[12] 등에 의해 제시되었다. 이와 같이 열전도성이 큰 고체박막 또는 윤활유를 접촉면에 도입하면 접촉면의 열저항의 크기는 공기중에서의 측정치에 비해 50% 이상, 진공에서의 측정치에 비해 8~20배 정도 감소시킬 수 있다^[13]. 전자반도체와 열침 사이의 비교적 낮은 체결 하중을 갖는 접촉계면에는 윤활유 계통의 물질을 많이 사용한다. 이러한 목적으로 silicone grease, DC-340 grease, 흑연 grease 등이 사용되고 있다^[14].

본 연구에서는 aluminum과 brass 재질의 원통 시편 접촉표면에 silicone grease를 도포시키고 열접촉저항 저감에 미치는 영향을 정량적 실험으로 구하였다. 아울러 열접촉 저항의 예측에 관한 여러 가지 해석적 이론들 중 띠형상의 단순한 접촉구조의 접촉계면에 대한 Fouche의 이론을 적용하여 실험결과와 비교하였다. 또한 silicone grease에 aluminum 분말(#325)을 첨가했을 때의 영향을 실험적으로 검토하였으며, 접촉표면의 온도는 각 금속시편을 연마시킨 것과 선반가공을 통하여 거칠기가 서로 다른 두 경우로 제한하였다. 표면 가공상태에 대한 자세한 자료는 제 3절에서 설명하였다.

2. 열접촉 저항 이론

Weills and Ryder(1949)^[15]는 Fig. 1과 같이 서로 다른 2개의 금속체 원통 사이의 평면 접촉면에 열흐름을 가하는 실험을 통하여 아래와 같이 열접촉 저항을 정의하였다. 실제 모든 고체의 표면거칠기는 불규칙하며 이 결과 두 물체 사이의 직접접촉은 점의 형태로 이루어지

고, 이 점들은 불규칙하게 분포되어 있다. 또한 이 접촉 점들의 면적 합은 접촉압력과 표면 가공상태에 따라 전체 겉보기 면적의 1/1000~1/10000로 매우 작다. 이 결과 Fig. 1에서 보는 것과 같이 두 원통체의 접촉면에는 온도차, $\Delta T_c = T_{c1} - T_{c2}$ 가 발생한다. 이때 원통 결합체가 1차원 정상상태 열전도를 받고 있다고 가정하면, 식(1)의 관계로 쓸 수 있다. 즉

$$\frac{Q}{A} = \frac{\Delta T_c}{R} \tag{1}$$

여기서 A는 원통의 겉보기면적(m²), Q는 열전달율(W)이며, R을 열접촉저항(m² °C/W)이라 정의한다. 그 동안 많은 연구자들에 의해 수행된 열접촉저항에 관한 연구는 대부분 접촉 열저항의 크기를 저감시키는데 목적이 있다. 응용분야는 원자로(Dean, 1902)^[16], 전자반도체 냉각^{[17][18]}(Kraus & Bay-Cohen, 1983, Childres & Peterson, 1989) 등 다양하다. 그러나 극저온 유체의 냉각 및 수송 용기, 우주선내부 요소들에 관한 열접촉 저항 연구에서는 오히려 단열성을 높이기 위하여 열저항 증가를 목적으로 하고 있다.

물리적으로 열접촉 저항의 크기는 미시적 크기를 갖는 실제접촉점의 크기와 분포, 이들 접촉구조의 역학적 변형에 관련되어 있다. 따라서 어떠한 주어진 물체표면의 접촉에 대하여 열접촉 저항값을 예측하는 데에는 많은 불확실성이 존재한다. 그러나 많은 연구자들이 접촉구조를 단순화시킴으로써 수학적 해를 구하는 방법들을 제시하였다. 대부분의 연구자들은 주어진 접촉계면의 구조를 원판(disk)형, 또는 띠(band)형으로 이상화하였고, 실제 접촉부위와 그 주위 좁은 틈새에서의 열전달 문제에 대한 해석적 해를 구하였다^{[19][21]}.

아래 Fig. 2는 선반가공표면에서 얻게되는 띠 형상의 접촉구조를 단순화시킨 것이다. Fouche(1966)는 이 띠상의 접촉구조에서 복사 및 대류효과를 무시하고 식(2)와 같은 수학적 해를 제시하였다^[22].

$$R = \frac{2\delta \left[1 + \frac{a}{\delta} \frac{1 + (k/k_2)}{\pi} (-0.15 - \log s^*) s^* \right]}{k_1 s^* + k_2 \left[1 + \frac{a}{\delta} \frac{1 + (k/k_2)}{\pi} (-0.15 - \log s^*) s^* \right]} \tag{2}$$

여기서 k₁, k₂, k는 각각 고체 1, 2와 틈새유체의 열전도율이고 s^{*}=c/a는 겉보기 면적에 대한 실제 접촉면적의 비이다.

식(2)는 많은 단순화과정을 통하여 얻은 해이며, 접촉상태에 따라 보다 단순한 형태로 표시할 수 있다. 즉 식(2)에서 분자의 괄호 내 두 번째 항은 $\frac{a}{\delta} \gg 10$ 경우에만 의미를 갖는다. 따라서 두번째 항이 상대적으로 무시할

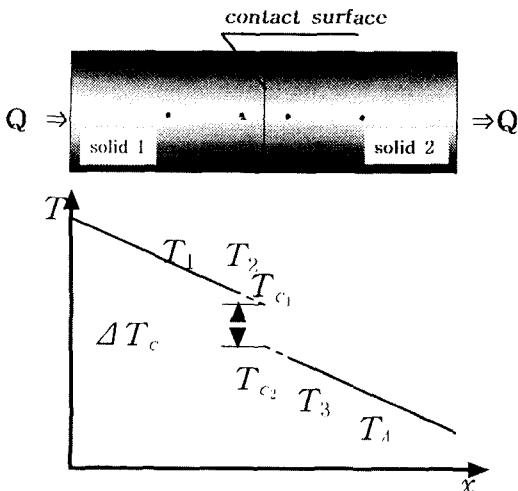


Fig. 1. Temperature drop at an interface.

만큼 작은 경우에는 아래의 식(3)과 같이 표시할 수 있다.

$$R = \frac{2\delta}{k_1 s^* + k_f} \quad (3)$$

한편 식(2)에서 또한 s^* 가 0에 접근하는 경우에 식(3)은 다음식과 같이 더욱 단순해진다.

$$R = \frac{2\delta}{k_f} \quad (4)$$

Fouche에 의하면 식(4)는 체결압력이 매우 낮은 경우에 적용할 수 있다. 이 경우 실제접촉점들을 통한 열전달은 무시되며, 따라서 열은 틈새 유체층을 통한 전도에 의해서 전달된다.

실제표면에 대한 변수 a 와 c 는 표면조도 측정 결과로부터 구한다. 그러나 실제 접촉면의 크기 c 는 가공상태와 접촉하중의 크기에 따라 변화하기 때문에 탄성 또는 소성변형 이론을 적용하여 해석적으로 구하기 위한 여러 방법들이 발표되었다. 여기서는 소성변형 이론을 적용하는 아래의 방법을 적용하였다. 즉, 주어진 접촉하중 상태에서 표면의 돌기들이 소성변형을 일으킨다고 가정하고 힘의 평형을 적용하면 아래 식(5)를 얻는다.

$$P_c A = H A_r \quad (5)$$

여기서 P_c 는 접촉압력, H 는 물체의 표면경도(Vickers)로써 두 물체 중 작은 값을 사용하며, A_r 는 실제 접촉면적이다.

그러므로 면적비는,

$$\frac{c}{a} = \frac{A_r}{A} = \frac{P_c}{H} \quad (6)$$

이다. 식(6)으로부터 접촉압력 P_c 의 크기에 따라 c/a

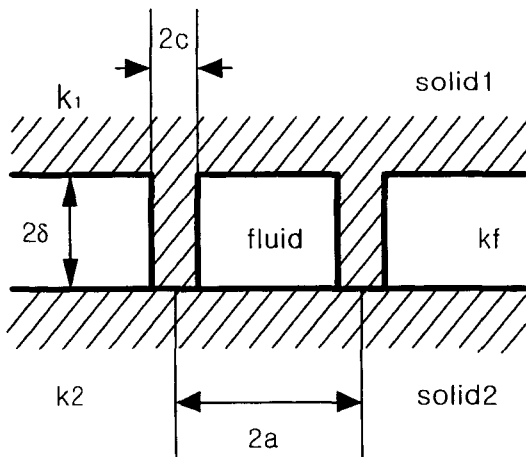


Fig. 2. Idealized contact structure of band type.

항을 결정할 수 있다.

3. 실험장치

실험장치는 Fig. 1에서 보는 것과 같이 2개의 원통 금속시편과 이 시편에 1차원 정상상태 전도 열전달을 가하는 가열장치와 냉각장치로 구성되어 있다.

접촉원통의 표면으로부터 대류에 의한 냉각작용을 억제하기 위하여 Fig. 3과 같이 열전도장치를 용기(bell jar) 내부에 설치하고 진공을 유지하였다. 시편에 공압으로 축방향 접촉하중을 가할 수 있으며, 접촉압력의 크기는 소형전자 반도체냉각의 경우를 가정하여 약 100~500 kPa로 결정하였다. 이 접촉하중은 금속체간의 체결에 사용하는 10~100 MPa에 비하여 매우 낮은 값이다.

Fig. 4는 시편의 크기와 측정점의 위치를 자세하게 나타내고 있다. 시편의 온도는 벽면에서 측정하였으며, 측정오차를 줄이기 위하여 동일 평면 위의 있는 3점의 온도를 thermopile로 측정하였다. Table 1은 6개의 시편에

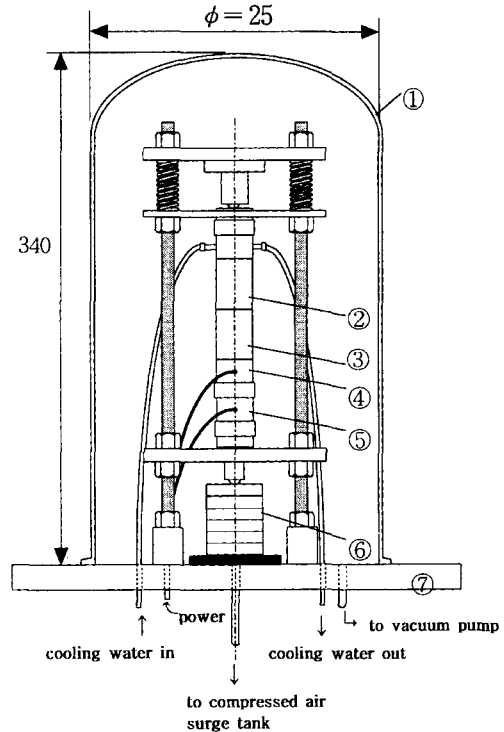


Fig. 3. Experimental apparatus to measure thermal contact resistances.

- ① bell jar
- ② test piece 1
- ③ test piece 2
- ④ main heater
- ⑤ auxiliary heater
- ⑥ bellows
- ⑦ base plate

대하여 재질과 가공방법, 그리고 접촉면 조도를 측정된 결과로부터 구한 변수 a , δ 를 나타내고 있다. Fig. 5는 참고로 선반가공을 한 al 시편의 표면을 조도기를 이용하여 측정된 결과이다. 열접촉 저항은 Fig. 1과 같은 측정결과로부터 다음과 같이 구한다.

먼저 1차원 정상상태 열전도에서 시편의 온도 측정값 T_1 , T_2 , T_3 , 그리고 T_4 를 이용해서 접촉표면의 온도 T_{c1} 과 T_{c2} 를 외삽법으로 구한다. 즉,

$$T_{c1} = T_2 + \frac{1}{4}(T_2 - T_1) \quad (7-a)$$

$$T_{c2} = T_3 - \frac{1}{4}(T_4 - T_3) \quad (7-b)$$

이 결과를 이용하여 열접촉저항 R 을 구하면,

$$R = \frac{T_{c1} - T_{c2}}{Q/A} \quad (8)$$

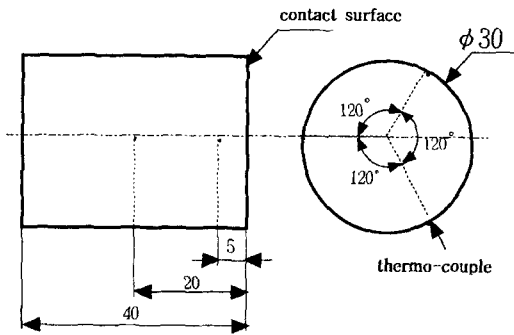


Fig. 4. Details of a specimen and measuring positions of termocouples on the wall.

Table 1. Test pieces.

material	specimen	2a (mm)	2δ (mm)	machining
Brass k=129.0 H=152	br1	0.005	0.005	grinding
	br2	0.1	0.05	lathe
	br3	0.25	0.085	lathe
Aluminum k=152.5 H=150	al1	0.005	0.005	grinding
	al2	0.1	0.04	lathe
	al3	0.25	0.1	lathe

*H: Vickers microhardness, kg/mm²; k: thermal conductivity, W/m °C.

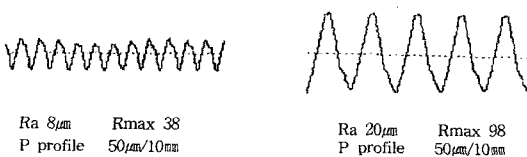


Fig. 5. Surface roughness of aluminum specimens.

실험에서 사용한 시편의 결합은 aluminum-brass와 brass-brass이었고, 고온측 시편으로는 표면을 연마한 시편 br1을 사용하였다. 실험은 시편을 1) 직접 결합시킨 경우, 2) 경계면에 silicone grease를 도포한 경우와 3) 경계면에 silicone grease와 al 분말 혼합제를 도포한 경우로 나누어 수행하였다.

silicone grease의 열전도율을 증가시키기 위하여 첨가한 al 분말은 #325이며, 입자의 상당평균직경은 약 0.07~0.08 mm이다.

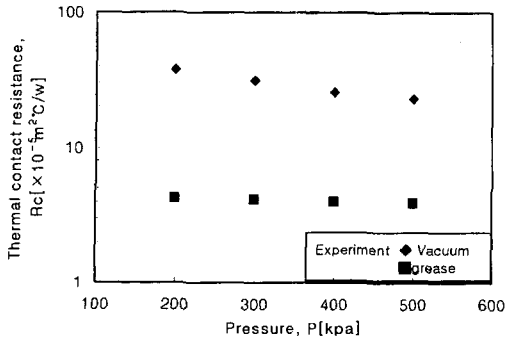
4. 결과 및 고찰

이미 알려진 바와 같이 접촉계면에 공기, 윤활유 등 제 3의 물질이 있으면 열접촉 저항은 감소하며, 또한 거칠기가 작을수록 열접촉 저항은 감소한다.

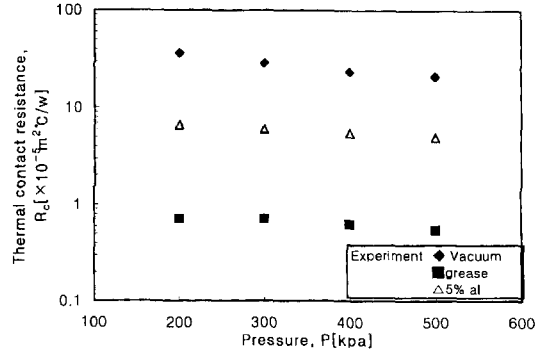
Figs. 6, 7은 각각 brass-brass, aluminum-brass 사이의 접촉표면에 대하여 접촉표면의 조건에 따라 열접촉저항 측정치와 해석값을 비교한 것이다.

Fig. 6으로부터 진공상태의 열접촉 저항은 모든 조합의 경우에서 표면의 조도에 따라 $(2\sim 100) \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ 으로 넓은 분포를 나타내었다. 연마한 표면은 거친 표면에 비하여 열접촉저항이 약 5~10배의 매우 큰 감소를 나타내었다. 접촉압력 크기 200~500 kPa 범위에서 압력 증가는 열접촉 저항을 약 20~70% 감소시켰고 평면도가 나쁠수록 감소폭이 크게 나타났다. silicone grease를 거친 표면에 도포한 결과 진공상태에 비하여 열접촉저항이 $(0.5\sim 7) \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ 로 약 10~20배 정도의 현격한 감소를 나타내었다. 이러한 결과는 기존의 연구결과와 접근된 내용이다.^[13]

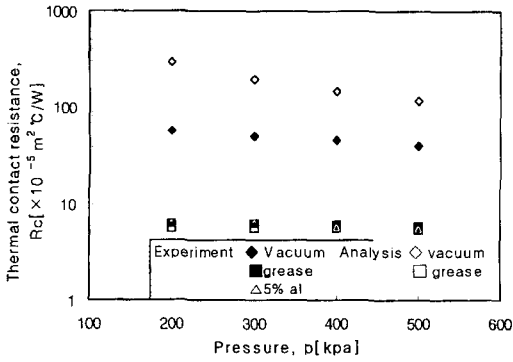
한편 체적비 약 5%의 분말 silicone grease에 첨가시킨 혼합제는 오히려 순수 grease 보다 열접촉 저항을 증가시키는 효과를 나타내었다. 특히 매끈한 표면의 접촉에서는 이러한 경향이 더욱 심화되어 약 6~7배 이상 크게 열저항이 증가되었다. 그러나 거칠기가 큰 경우에는 순수 grease의 경우와 비슷하거나 증가가 약하게 나타났다. 이러한 현상은 첨가입자들의 접촉표면의 돌기보다 클 때 고체-고체사이의 직접접촉상태를 오히려 나쁘게 하기 때문으로 생각된다. 이러한 결과를 고려하여 거칠기가 비교적 큰 br2, br3 시편에 대하여 silicone grease에 분말의 체적 혼합율을 5~25%까지 변화시킨 것을 사용하였을 때의 측정결과를 Fig. 8에 도시하였다. 가장 거친 거칠기를 갖는 시편 br2의 접촉면에서는 약 15% 혼합율에서 peak을 나타내었고, 이후 열저항이 감소하여 25% 혼합율에서는 100% grease의 경우와 비슷한 크기의 열저항을 나타내었다. 그러나 다소 작은 거칠기를 갖는 시편 br3에서는 분말의 혼합율을 증가시킬수록 지



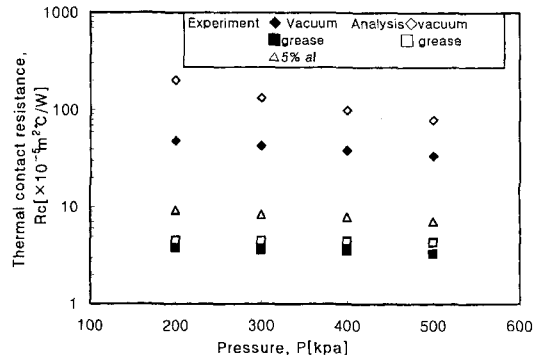
(a) br1-br1



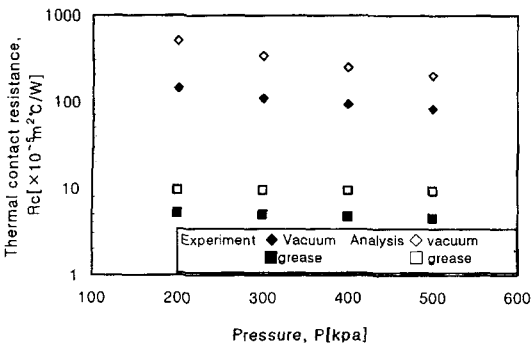
(a) al1-br1



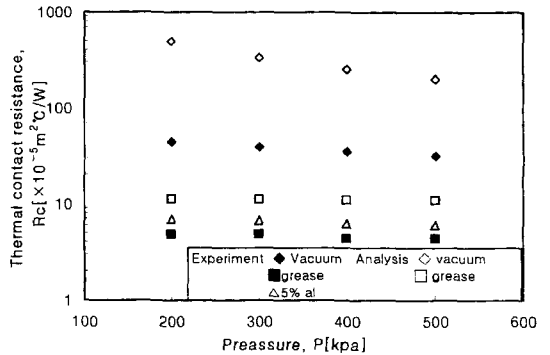
(b) br2-br1



(b) al2-br1



(c) br3-br1



(c) al3-br1

Fig. 6. Thermal contact resistance for brass-brass joints with different surface roughness.

Fig. 7. Thermal contact resistance for aluminum-brass joints with different surface roughness.

속적으로 열저항이 증가하였다. 이상 두 경우의 실험 결과만으로 grease에 분말 혼합제의 사용 효과를 규명하기는 어려우나 정성적 측면에서 거칠기가 매우 나쁘거나 또는 평면도가 나쁜 경우의 표면접촉에 대해서는 5% 미만의 소량의 분말을 첨가함으로써 열접촉 저항 효과를 증대시킬 수 있을 것으로 생각한다. 이것은 접촉면에 금속 망사를 첨가시킴으로써 20~30%의 열접촉 저항 저감을 얻었던 Fried and Castello(1962)의 연구 결과와 유사한 것으로 생각한다. 한편 Fouche의 이론을 적용한

해석 결과는 진공상태의 접촉에서는 실험치에 비해 약 2~3배 정도 큰 값을 예측하였다. 그러나 100% silicone grease를 도포한 접촉면에서는 약 10~20% 범위의 매우 접근된 결과를 예측할 수가 있었다.

5. 결 론

- 진공상태의 접촉에서 접촉 표면을 매끈하게 연마하면 거친 가공상태의 표면접촉에 비하여 약 5~10배 이

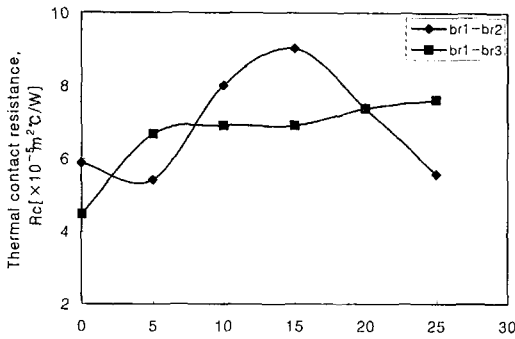


Fig. 8. Volumetric content of aluminum powder, Vol [%].

상의 열접촉저항 저감을 얻을 수 있었다. 또한 silicone grease로 표면처리 한 것은 진공상태에 비하여 약 10~20 배의 열저항 저감을 얻을 수 있었다.

- silicone grease에 미세한 al 분말을 5% 이내로 첨가한 혼합제는 표면 가공상태가 거친 표면에 대해서는 열접촉저항 저감을 얻을 수 있는 것으로 보인다. 그러나 매끈한 표면에서는 오히려 열저항을 크게 증가시켰다.

- 물체 표면의 조도 측정결과를 이용하여 열접촉저항을 예측한 Fouche의 해석적 이론의 결과는 진공상태의 측정값과는 약 2~3배 정도 큰 예측을 하였다. 그러나 silicone grease를 도포한 경우의 측정치와 약 10~30% 범위의 근사한 결과를 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 유한대학 학술연구비 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

사용기호

a	: distance between contact spots, m
A	: surface contact area, m^2
c	: width of contact spot, m
H	: Vickers microhardness, kg/mm^2
k	: thermal conductivity, $\text{W/m } ^\circ\text{C}$
P	: pressure, kPa
P profile	: surface roughness curve of test piece
Q	: heat flow rate, W
R	: thermal contact resistance, $\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$
R_a	: arithmetical average roughness height
R_{\max}	: maximum height
\dot{q}	: heat flux, W/m^2
s^*	: ratio of actual contact area to nominal

	contact area
T	: temperature, $^\circ\text{C}$
x	: distance, m
ΔT_c	: temperature drop at contact surface, $^\circ\text{C}$
δ	: interfacial gap thickness at contact surface

하첨자

c	: contact
f	: fluid

참고문헌

1. Kraus, A.D. and Bar-Cohen, A.: "Thermal Analysis and Control of Electronic Equipment", Hemisphere, Washinton D.C. (1983).
2. Knight, R.W., Hall, D.J., Goodling, J.S. and Jaeger, R.C.: "Heat Sink Optimization with Application to Microchannels", IEEE, Vol. 15, No. 5, 832-842 (1992).
3. Mertol, A.: "Optimization of Extruded Type External Heat Sink for Multichip Module", Journal of Electronic Packaging, Vol. 115, 440-444 (1993).
4. Wirtz, R.A., Chen, W. and Zhou, R.: "Effect of Flow Bypass on the Performance of Longitudinal Fin Heat Sink", Journal of Electronic Packaging, Vol. 116, 207-211 (1994).
5. Lee, S.: "Optimum Design and Selection of Heat Sinks", 11th IEEE SEMI-THERM, Symposium (1994).
6. Hannemann, R., Fox, L.R. and Mahalingham, M.: "Thermal Design for Microelectronic Components", Cooling Techniques for Computers, W. Aung ed., Hemisphere Pub., New York (1991).
7. 신동열, 서영배: "히트싱크 열설계 및 평가기법 개발", 대한기계학회 추계학술대회 논문집, 775-780 (1996).
8. 김원태: "ISDN 정보통신 시스템에서의 열관리 및 전자부품실장 냉각 기술", 대한기계학회 열 및 유체공학부문 학술강연집, 14-29 (1995).
9. Rogers, G.F.C.: "Heat Transfer at the Interface of Dissimilar Metals", Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 2, 150-154 (1961).
10. Shl kov, Y.U.P. and Ganin, Y.E.A.: "Thermal Resistance of Metallic Contacts", Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 7, 921-929 (1964).
11. Fried, E. and Castello, F. A.: "Interface Thermal Contact Resistance Problem in Space Vehicles", ARS J, 237-243 (1962).
12. Cuhnington, G. R., Jr.: "Thermal Conductance of Filled Aluminum and Magnesium Joints in a

- Vacuum Environment”, ASME paper 64-WA/HT-40 (1964).
13. Madhusudana, C.V.: “Thermal Contact Conductance”, Springer (1996).
 14. Marotta, E.E., Lambert, M.A. and Fletcher, L.S.: “Thermal Enhancement Coatings and Films for Microelectronic System”, Proc 10th Int Heat Transfer Conf, Paper 15-IC-15, Institution of Chemical Engineers, Rugby, UK.
 15. Weills, N.D. and Ryder, E.A.: “Thermal Resistance Measurement of Joints Formed between Stationary Metal Surfaces”, Journal of Heat Transfer, 159-267, Apr (1949).
 16. Dean, R.A.: “Thermal Contact Conductance Between O₂ and Zircaloy -2 Westinghouse Electric Packages”, IEEE Trans, Components, Hybrids, 717-723 (1991).
 17. Kraus, A.D. and Bay-Cohen, A., “Thermal Analy-
silicones and Control of Electronic Equipment”, McGraw-Hill, New York, 199-214 (1983).
 18. Childres, W.S. and Peterson, G.P.: “Quantification of Thermal Contact Conductance in Electronic Packages”, IEEE Trans, Components, Hybrids, 717-723 (1989).
 19. Mikic, B. and Rohsenow, W.M.: “Prediction of Thermal Conductance of Metallic Surfaces in Contact”, Journal of Heat Transfer, 15-22, Feb (1963).
 20. Greenwood, J.A.: “Constriction Resistance and the Real Area of Contact”, BRIT. J. APPL. PHYS., Vol. 17, 1621-1632 (1966).
 21. Cooper, M.G., Mikic, B.B. and Yovanovich, M.M.: “Thermal Contact Conductance”, Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 12, 279-300 (1969).
 22. Fouché, F.: “Etude Experimentale et Theorique de La Resistance Thermique D um Contact par Bandes Paralleles These”, Univ de Poitiers, Fr, (1966).