

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 23, No. 2, 2003

다공성 알루미늄 방열핀의 성능특성 연구

The Performance Characteristics of the Open Celled Aluminum Foam Applied for Heat Dissipation

김종수*, 이호진**

Kim, Jong-Soo*, Lee, Hyo-Jin**

Key words : 개기공 개질(Open celled media), 다공성 알루미늄(Porous aluminum), 방열(Heat dissipation)

Abstract

Experimental study for a porous aluminum heat dissipator/or heat sink made by casting method is conducted to evaluate the performance of the porous aluminum heat sinks. The parameters applied for the present study are the manufacturing method, various bonding materials for the bottom plate of heat sink, and their different material, pore size, etc.. The casting method for porous aluminum heat sink is suggested for the best performance of heat dissipation in this experiment. The bottom plate applied by melting aluminum is introduced and proved their excellent characteristics compared with brazing, soldering, and bonding methods. In the present experiment, aluminum with different conductivities, such as AC8A and pure aluminum, are tested and the pure aluminums with the higher conductivity than AC8A shows their improvement of the performance. And the proper dimensions related to the pore size and the height of porous aluminum heat sinks are proposed in the present study.

■ 기호설명 ■

A : 단면적 (m^2)

d_{avg} : 기공의 평균 입도 (mm)

h : 시편의 높이 (mm)

i : 히터의 공급전류 (A)

* 한국선급

** 한밭대학교 건축설비공학과

* Korean Registor of Shipping

** Dept. of Building Service Engineering, Hanbat National University

- k_s : 알루미늄 열전도도 (W/mK)
- k_{ins} : 단열재 열전도도 (W/mK)
- k_∞ : 공기의 열전도도 (W/mK)
- Q : 히트싱크 공급열량 (W)
- q'' : 열유속 (W/m²)
- q''_{in} : 히터의 공급 열유속 (W/m²)
- q''_{loss} : 손실 열유속 (W/m²)
- d_{avg} : 기공의 평균 입도 (mm)
- R : 열 저항 (°C/W)
- S/V : 방열기의 단위부피당 표면적 (m⁻¹)
- T_2, T_3 : 단열재내 열전대 온도 (°C)
- T_{base} : 히트싱크 받침면 온도 (°C)
- T_∞ : 주위 공기온도 (°C)
- V : 히터 공급전압 (V)
- X : 특성길이 (m)
- x : 열전대 간격 (m)
- ε : 기공도 (%)
- θ : 무차원 표면온도
- ρ_f : 다공성 알루미늄 밀도 (kg/m³)
- ρ_s : 알루미늄 밀도 (kg/m³)
- ϕ : 직경 (mm)

1. 서론

방열핀(또는 히트싱크)는 열원에서 발생한 열을 방열시키는 냉각작용을 하는 것을 목적으로 하고 있다. 현재 이용되고 있는 다양한 소재 및 형태의 히트싱크¹⁾ 가운데 최근에 새롭게 소개되고 있는 재료로서 다공성알루미늄을 들 수 있다.²⁾

이 소재의 특징은 기존의 히트싱크에 비하여 부피가 작으면서도 전열표면적이 매우 크다는 장점이 있다. 반면에 유로가 좁아 압력강하가 기존의 장치에 비하여 상승하는 단점이 있으며, 기존의 압출식 히트싱크에 비하여 제조공정이 다소 복잡하여 비용이 상승하는 문제점을 갖고 있다. 그러나 비용의 상승은 기존 제조공법의 단순화작업에 의하여 감소시킬 수 있을 것으로 여겨진다. 이러

한 노력의 일환으로 본 연구에서 활용된 암염입자를 활용한 용융 주조된 다공성알루미늄 히트싱크는 가격에서도 기존의 제품에 가깝도록 제조방법을 개선하였다. 다공성알루미늄 히트싱크에 대한 연구가 국내외에서 진행되고 있으며,³⁾⁻⁶⁾ 이들 성능 면에서 기존의 제품과 경쟁할 수 있는 수준으로 발전할 수 있음을 보여주고 있다.

다공성 알루미늄을 활용하기 위해서는 하부에 받침판을 부착하여 가열부에 접촉하도록 해야한다. 이때 이용되는 방법으로서 브레이징(Brazing)이 가장 효과가 좋은 것으로 알려져 있으며, 그 외에도 화학적 접착제를 이용하거나 납땜(Soldering)을 하여 접촉판과의 접촉저항을 줄이기 위한 방법이 적용되고 있다. 그러나 급속히 발전하는 전자장비의 성능을 따르기 위해서는 보다 발전된 제조방법이 요구되고 있다.

본 연구에서는 암염입자를 이용한 다공성 알루미늄제조법⁷⁾을 이용하였다. 또한 소재가 가지고 있는 열전도도의 영향을 평가하였다. 즉, 알루미늄계열 중 열전도도가 나쁜 AC8A ($k_s = 125$ W/mK)와 순수알루미늄($k_s = 230$ W/mK)으로 제조한 다공성 알루미늄 핀의 성능을 비교하였다. 또한 받침판이 두께에 따른 성능의 영향을 평가하였으며, 또한 접착제, 납땜, 및 용융주조에 의해 제조된 각각의 받침판을 부착한 히트싱크의 성능 특성을 실험적으로 비교하였다.

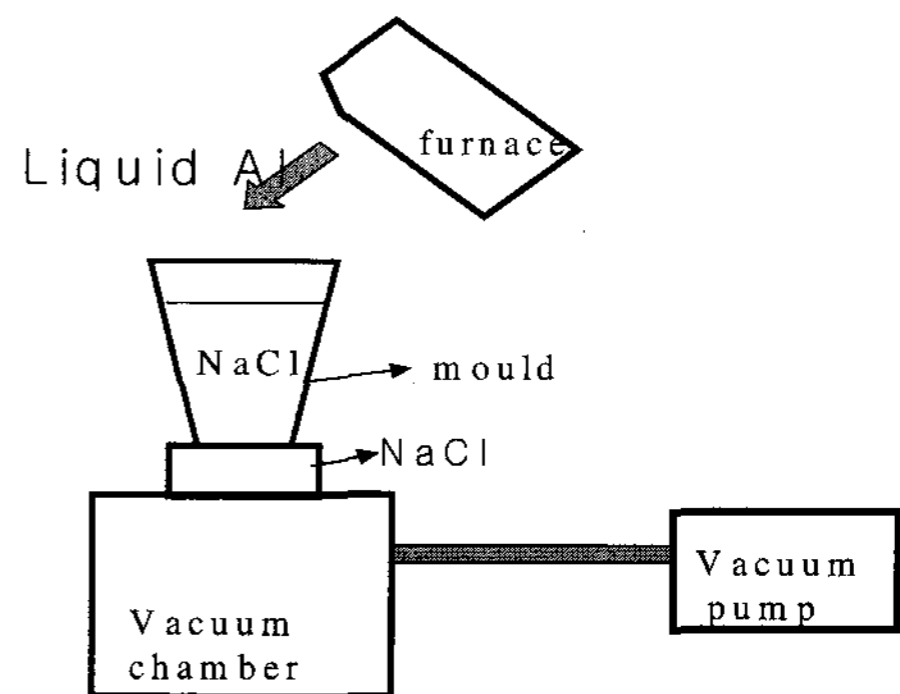


그림 1. 암염입자를 이용한 다공성 알루미늄의 제조공정도

2. 다공성 알루미늄 제조 및 샘플제작

2.1 압염입자를 이용한 다공성 알루미늄제조

다공성 알루미늄을 제조하기 위하여 압염입자의 크기를 이용한 제조방법을 채택하였다. 이는 다른 방법에 비하여 제조원가가 매우 저렴하여 기존의 압출식 히트싱크와도 가격에서 경쟁이 가능한 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 3, 5, 8 mm 크기의 평균 입도를 가진 압염을 각 각 몰드에 채워 넣은 다음, 약 650°C로 예열을 한 후, 용융 알루미늄을 몰드에 부어 넣었다. 이때 미세한 압염입자간의 공간을 알루미늄이 투입되도록 하기 위하여 그림 1에서 보는 바와 같이 진공 펌프를 이용하여 흡입하도록 하였다. 이후 용융알루미늄을 이용한 받침판을 만들기 위해 제조된 다공성 알루미늄 위에 용융상태의 알루미늄을 부어 일정크기의 받침판이 형성되도록 하였다. 제조된 다공성 알루미늄은 물을 이용하여 세척한 후 초음파 세척기를 이용하여 잔존하는 소금기를 완전히 제거하였다. 그림 2는 새로운 공정에 의하여 제작된 다공성 알루미늄의 샘플을 보여주고 있다. 제품의 특징은 받침판의 두께가 기존의 두께(3~5 mm)보다 두꺼운 5~7 mm를 형성하고 있다.

2.2 히트싱크제작

그림 1의 방법에 의하여 제작된 다공성 알루미늄판을 실험에 필요한 크기로 절단하였다. 이때 활용한 시편의 크기 및 형상은 표 1에 나타나 있다.

표 1. 다공성 알루미늄의 물성

	$d_{avg}=3 \text{ mm}$	5 mm	8 mm
$S/V(m^{-1})$	1068	628	392
ϵ	0.76	0.74	0.63
ρ	0.64	0.69	0.98

본 연구를 위하여 절단된 각 각의 시편은 그림 2에 보여주는 바와 같이 압염입자의 평균직경이

3 mm, 5 mm, 8 mm 기공크기를 가진 시편을 제작 비교하였다.

3. 실험장치 및 방법

히트싱크의 성능검사를 위한 실험기준은 표준화된 방법이 아직 없으나, 일반적으로 덕트내에서 압력강하 및 열저항을 구하는 방법⁸⁾과 컴퓨터내부에 직접장착하여 성능검사를 하는 방법⁹⁾이 있다. 본 연구에서는 그림 3과 같이 설치한 대기중에서 실험을 수행하였고, 대기온도를 헨의 유입온도로 계산하였다.

실험장치의 구성은 다공성 알루미늄의 크기를 $50 \times 60 \times x^h \text{ mm}^3$ 크기로 절단한 후 하부에 접착제, 납땀, 및 주조에 의해 받침을 부착하였다. 받침의 크기는 $50 \times 60 \text{ mm}^2$ 로 하였으며, 두께가 1, 3, 5 mm인 구리판 및 알루미늄판을 사용하였다. 열원으로는 막대형($\phi 5, L20$)이고 저항이 각각 80.3 Ω 인 두 개의 열선을 $25 \times 25 \times 10^h \text{ mm}^3$ 인 구리판에 삽입하여 슬라이더스에 연결하고, 디지털전류계(Model : FINEST135)를 이용하여 공급 전압과 전류를 읽어 식(1)과 같이 총 공급전력을 계산하였다.

$$Q_{in} = V \times i \quad (1)$$

열원은 석고판재로 제작된 $150 \times 150 \times 50^h \text{ mm}^3$ 단열판($k_{ins}=0.06 \text{ W/mK}$)을 그림 3과 같이 장착하고 하부에 T-type의 열전대 T/C2와 T/C3를 삽입하여 하부로의 손실열량을 계산하였다. 히트 싱크의 표면온도는 받침판 중심부에 T-type 열전대를 삽입하여 온도를 측정하였다.

히터의 표면과 방열기와의 접촉열저항을 최소화하기 위해 각각의 접촉면에 열그리스(OMEGA: OT-201)를 도포하였고, 발포알루미늄 방열기는 스프링 크램프를 사용하여 히터표면에 밀착되도록 하였다. 열전대를 통하여 측정된

온도를 조사하여 열적으로 정상상태에 도달한 것을 확인한 후, 데이터로거를 이용하여 각각의 온도를 측정하였다.

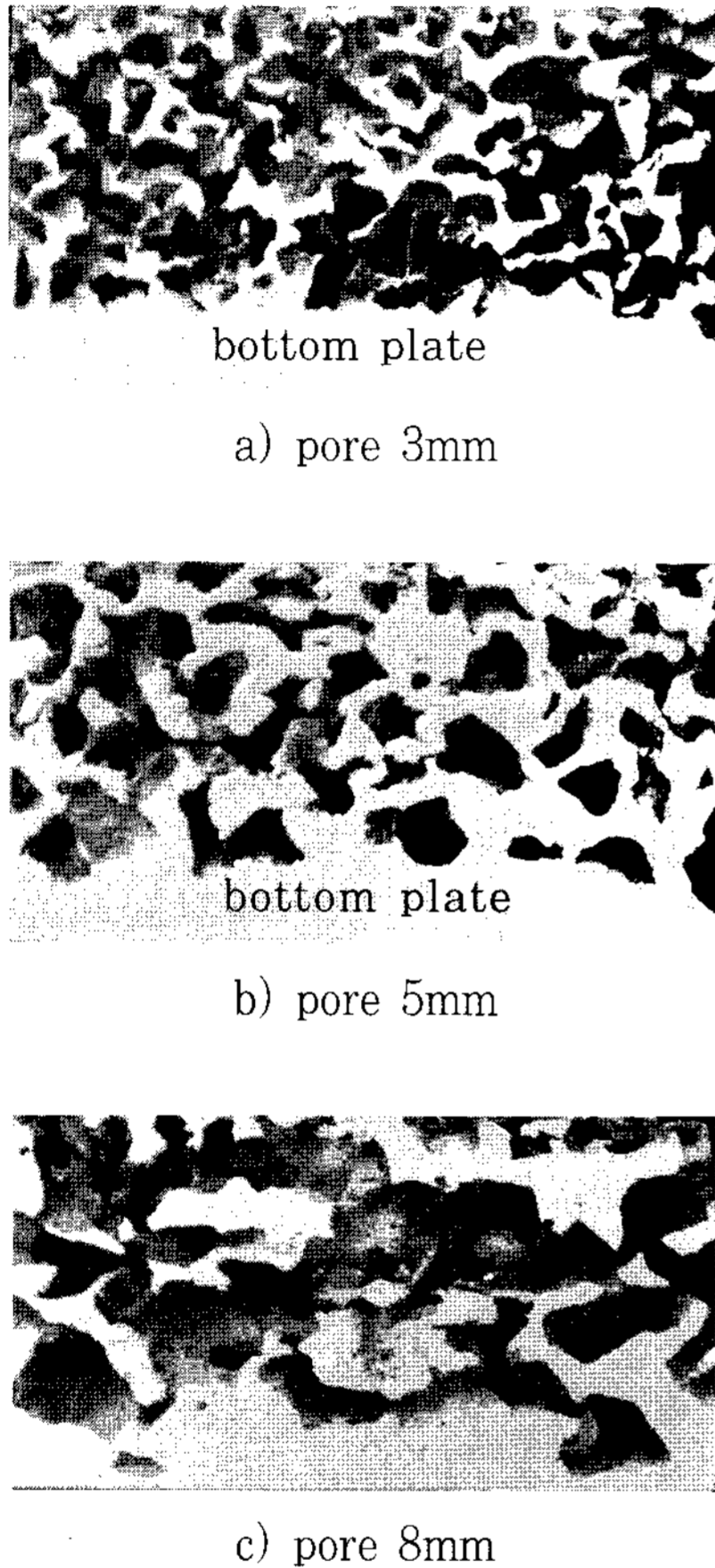


그림 2. 용융주조에 의해 받침판이 제작된 다공성 알루미늄의 기공크기에 따른 샘플

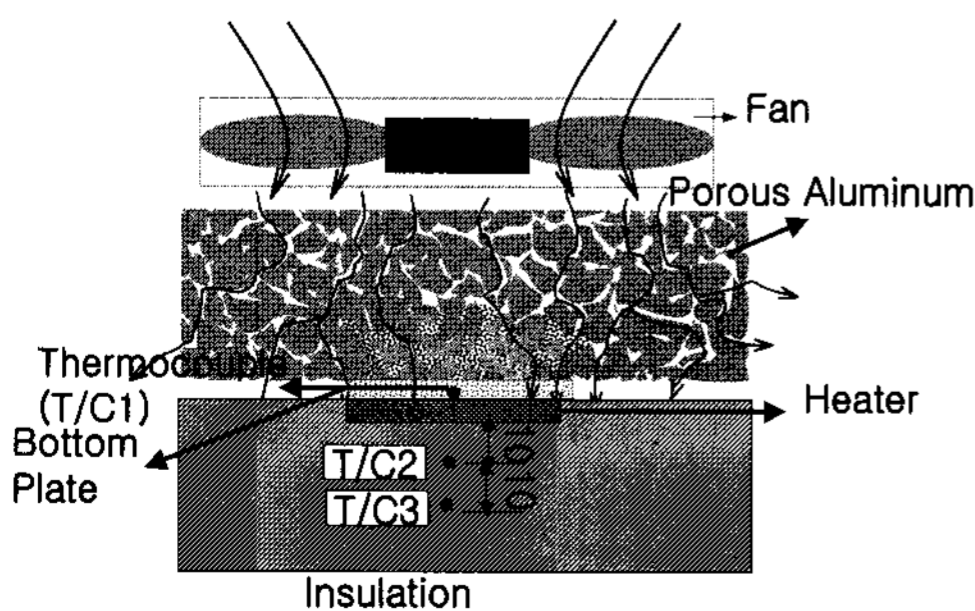


그림 3. 다공성 알루미늄을 이용한 성능실험용 개략도

본 연구에서 수행한 성능 실험결과 오차의 범위는 $\pm 3 \sim \pm 5\%$ 로 주로 사용된 압연 입자의 입도 분포에 따른 영향을 받는 것으로 확인 되었다. 제작에 사용된 압연은 천연재료로서 세밀한 입도 분포를 얻기가 쉽지 않기 때문이다.

4. 실험결과 및 고찰

본 연구에 사용된 발포알루미늄의 제원 및 물리적인 특성을 표 1에 나타내었다. 여기서 기공도는 발포알루미늄내의 단위부피당 공기로 채워진 부분의 부피비를 의미하며 식(1)에 의하여 계산된다.

$$\epsilon = 1 - \frac{\rho_f}{\rho_s} \quad (1)$$

히트싱크로 전달된 열량은 다음 식(2)에 의하여 계산 할 수 있다.

$$q''_{loss} = k_{ins} \frac{T_2 - T_3}{\Delta x} \quad (2)$$

식(2)에 의하여 계산된 손실 열량은 히트싱크에 가해진 열량인 10 ~ 50 W에 따라 0.8 ~ 3%의 손실량을 갖는 것으로 측정되었다. 이를 이용하여 실제 히트싱크에 공급된 열량은 다음 식(3)에 의하여 계산할 수 있다.

$$q'' = Q/A = q''_{in} - q''_{loss} \quad (3)$$

일반적으로 히트싱크의 성능분석을 하기 위해서는 다음 식(4)에 의한 온도저항을 이용하거나 또는 식(5)의 무차원 표면온도¹⁰⁾를 사용한다. 본 연구에서는 식(3)에 의하여 얻어진 공급열량을 이용하여 식(4)의 온도저항을 계산하였다.

$$R = \frac{T_{base} - T_{\infty}}{Q} \quad (4)$$

$$\theta = \frac{T_{base} - T_{\infty}}{q \cdot X / k_{\infty}} \quad (5)$$

그림 4는 받침판의 두께에 따른 성능에 미치는 영향을 평가 하였다. 성능평가를 위하여 사용된 다공질 알루미늄의 기공크기는 8 mm를 이용하였으며, 높이가 20 mm인 히트싱크를 채택하였다. 사용된 받침판의 부착방법은 납용접을 이용하였으며, 받침판의 재질은 구리판으로 하였고, 각각의 두께는 1, 3, 5 mm인 것을 활용하였다. 받침판은 열원으로부터 열을 빼앗아 히트싱크로 전도에 의하여 전달하기 때문에 받침판의 재질 및 두께가 주요 변수이다. 그림 4에 나타난 두께의 영향을 살펴보면 실험한 3가지 변화에 큰 영향을 받지 않은 것으로 판명되었다. 이는 구리의 열전도도가 320 W/mK으로 매우 높기 때문인 것으로 여겨지며, 본 용융 알루미늄 히트싱크에 사용될 순수 알루미늄(230 W/mK) 받침판도 적용 두께에 따라 성능에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

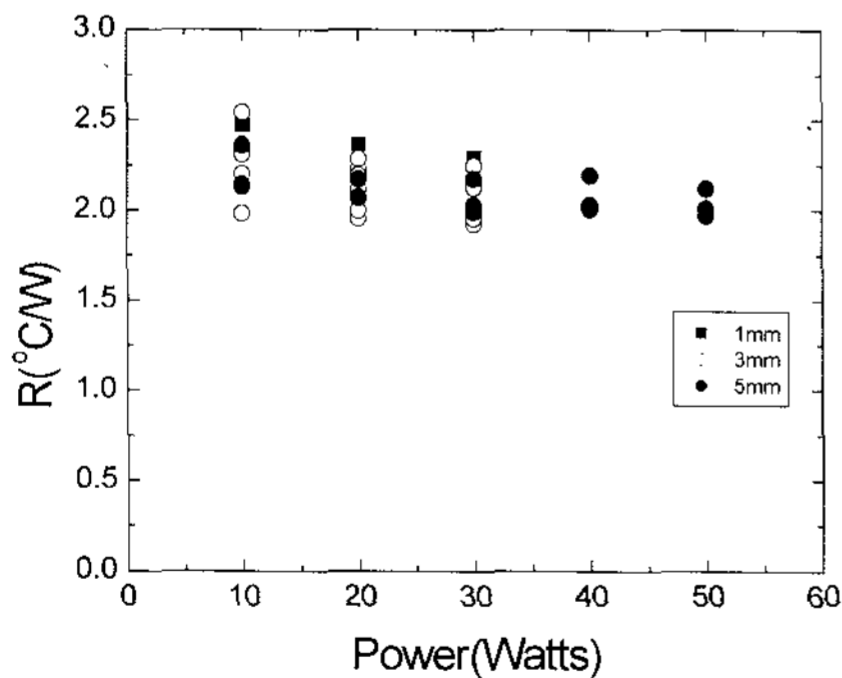


그림 4. 받침판 두께에 따른 성능비교

받침판이 히트싱크에 미치는 영향으로 부착 방법을 들 수 있다. 현재 보편적으로 사용되고 있는 압출식 알루미늄 히트싱크는 접촉저항에 대한 문제는 없지만 다공질이나 일반 접합이 요구되는 히트싱크에서는 접합방법이 매우 중요한 성능에 영

향을 미치는 것으로 알려져 있다.¹¹⁾ 본 연구에서는 그림 5에 나타난 바와 같이 본드와 납땜, 브레이징 및 제작단계에서 용융 알루미늄을 이용한 방법을 비교분석 하였다. 일반적으로 브레이징 방법이 가장 접촉저항이 작으며, 납땜, 그리고 본드의 순인 것으로 알려져 있다.¹¹⁾ 본 연구에서는 압출 히트싱크와 같은 효과가 있도록 하기 위하여 용융 접합법을 개발하여 기존의 방법과 비교 하였다. 그림 5는 10 Watts 전력을 가한 실험결과를 보여주고 있다. 용융 접합법이 다른 접합법에 비하여 월등한 성능을 나타내고 있으며, 그 다음으로 납땜, 브레이징, 접착제 순으로 나타내고 있다. 본 결과에 나타난 바와 같이 납땜이 브레이징보다 우수하게 나타난 것은 다공질 히트싱크에 납땜을 하기전에 미리 용융된 납을 히트 싱크의 접합표면에 있는 기공을 메운 후 받침판을 접합하여 열 전도의 표면적을 극대화한 결과로 여겨진다. 또한 용융 접합은 받침판과 히트싱크사이에 접촉저항을 제거하는 효과가 있기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 제조법으로 형성된 받침판의 두께는 평균 6 mm의 두께를 나타내고 있으며, 이는 일반적인 받침판의 두께에 비하여 약 1.3배 가량 두껍다. 그러나 그림 4에 나타난 결과와 같이 열전도도가 높은 받침판은 히트싱크의 성능에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 히트싱크의 성능에 미치는 영향은 그리 크지 않은 것으로 판단된다. 본 비

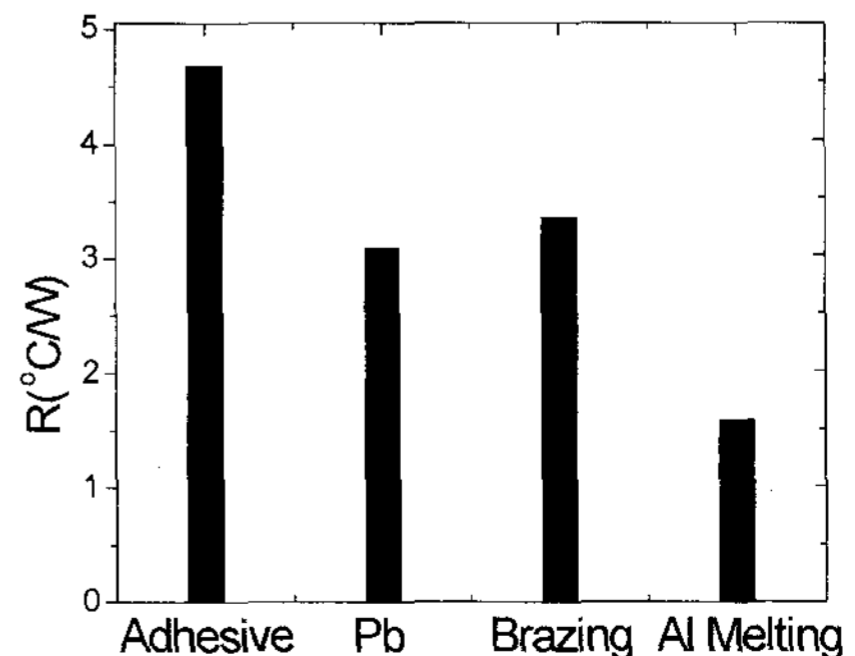


그림 5. 다공성 알루미늄의 받침판 접합방법에 따른 열저항 비교

교 실험에 사용된 다공질 알루미늄은 기공의 크기가 3 mm이고 50x60x10^h mm³을 사용하였다.

히트 싱크의 성능에 미치는 또 다른 요소로는 히트 싱크에 사용된 소재이다. 그러나 현재 사용되고 있는 압출에 의한 히트싱크는 압출성이 좋은 60계열의 알루미늄으로 한정 되어 사용되고 있으나 주조에 의하여 제조되는 다공성 알루미늄은 다양한 합금 소재의 알루미늄이 적용 가능하다. 본 연구에서는 그림 6에서와 같이 열전도도가 매우 낮은 주조용 알루미늄 합금인 AC8A(125 W/mK)와 순 알루미늄 (230 W/mK)의 성능을 비교하여 히트싱크의 소재가 성능에 미치는 효과를 실험하였다.

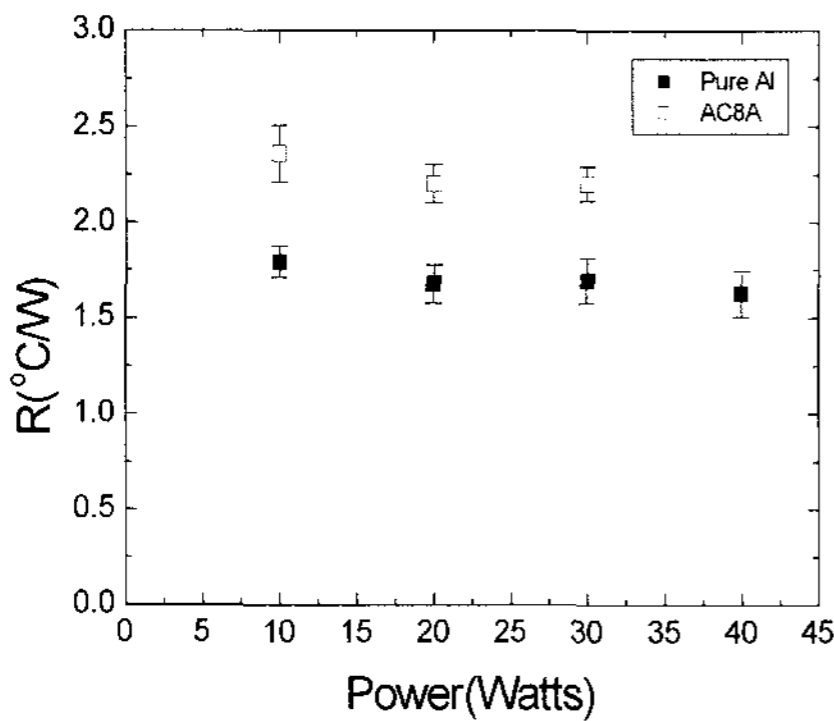
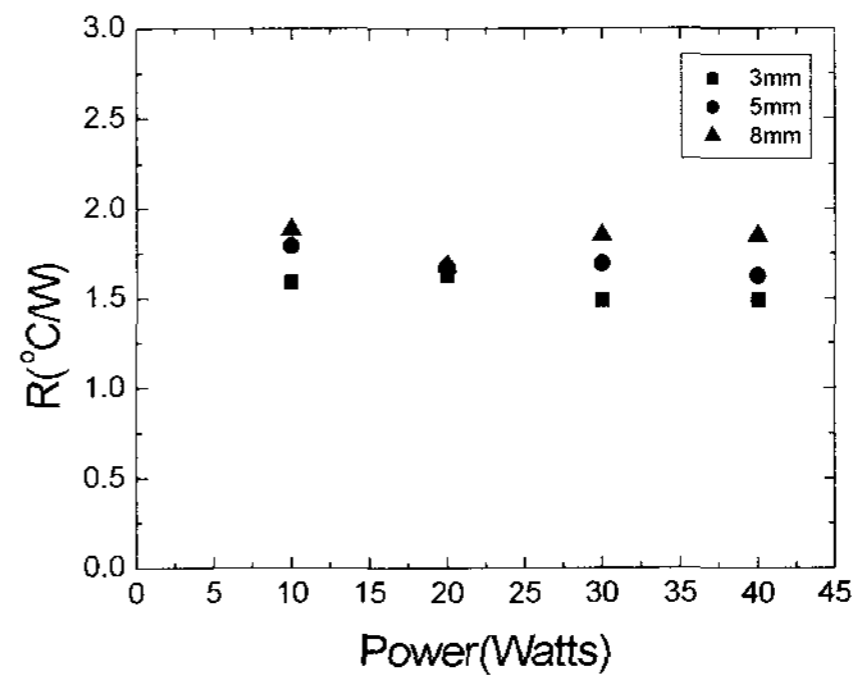


그림 6. 소재에 따른 열성능 특성비교

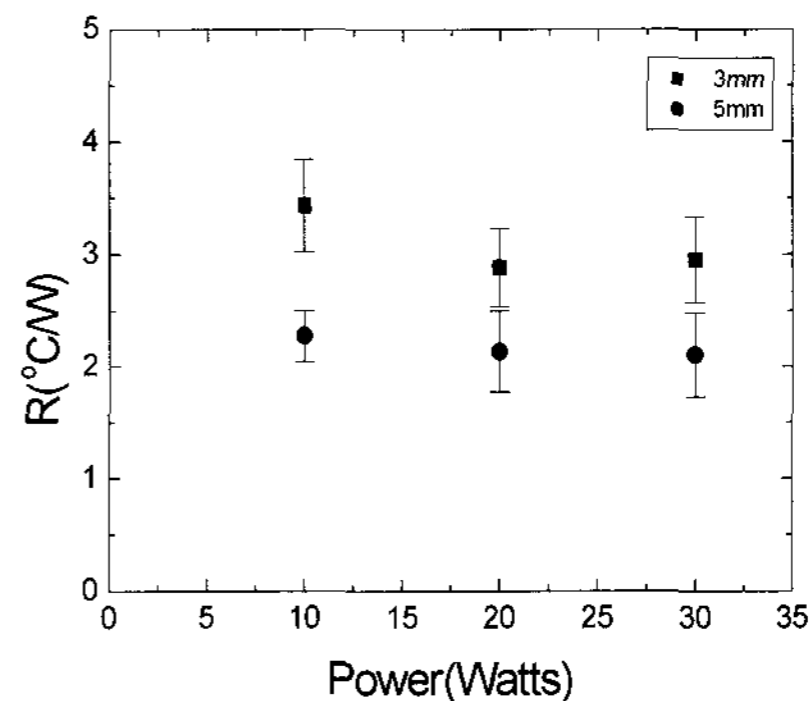
실험 결과에 의하면 순 알루미늄으로 제작된 히트싱크가 약 10 % 정도의 성능이 우수하게 나타났다. 즉 대류에 의하여 외부로 열이 방출되기 전에 신속한 열의 전도가 무엇보다도 중요한 요소를 입증하는 것으로, 히트싱크의 성능 향상을 위하여 소재의 재료선정에 보다 신중해야 할 것으로 여겨진다. 본 재료에 대한 비교실험에는 평균 기공 크기가 5 mm이고 50x60x10^h mm³의 크기를 갖는 다공성 알루미늄 히트싱크를 사용하였다.

다공성 알루미늄 히트싱크의 장점은 넓은 표면

적을 가지고 있는 것을 들 수 있다. 이러한 표면적을 확대시키기 위해서는 기공의 크기를 작게 하면 할수록 확대될 수 있지만, 공기 유동에 대한 저항의 증대로 기공의 크기 축소에 한계가 있다. 본 연구에서는 그림 7에 나타난 바와 같이 기공의 크기에 따른 히트싱크의 성능을 평가 하였다. 결과에 의하면 열 전도도가 낮은 AC8A의 결과는 기공의 크기가 5 mm일때가 3 mm 일때보다 좋은 성능을 나타내고 있으나, 순 알루미늄의 경우에는 3 mm의 기공을 갖는 히트싱크가 5 mm나 8 mm일때보다 열저항이 낮게 나타났다. 이는 열 전도도가 낮은 소재에서는 기공크기가 작은 3 mm에서의 유동저항이 5mm에서의 유동저항 보



(a) Pure Al



(b) AC8A

그림 7. 순 알루미늄과 AC8A 재료에 대한 기공크기에 따른 열적 성능비교

다 크기 때문에 대류 열전달을 저해하는 요인으로 작용하는 것으로 판단된다. 그러나 순 알루미늄은 높은 열전도도에 의한 많은 열 확산으로 인하여 유동저항에 의한 대류 열전달의 감소가 상쇄될 수 있음을 보여주는 것으로 판단된다. 본 비교실험에 활용된 다공성 알루미늄의 크기는 50 x 60 x 20^h mm³을 이용하였다.

발포알루미늄의 성능은 표면적과 발포 알루미늄의 기공을 통과하는 통과유량의 강도차이에 의하여 좌우된다.⁴⁾⁵⁾ 즉 표면적 증대를 위하여 발포 알루미늄의 높이를 증대시키면, 냉각 현의 통과유량의 저항이 상승하는 효과를 가져와 방열량의 감소를 초래하게 된다. 그림 8은 기공의 크기가 8mm인 발포알루미늄의 높이를 변화시키면서 성능의 변화를 실험한 결과이다. 본 연구에서는 35 mm 높이의 발포 알루미늄이 가장 우수한 성능을 나타내고 있으며, 이러한 결과는 3, 5 mm에서도 나타나고 있다. 즉, 그림 8에서 보는 바와 같이 높이가 증가함에 따라 열저항이 점차 감소하다가 35 mm에서 최소가 된 후 40 mm에서 다시 상승하는 현상을 보여주고 있다.

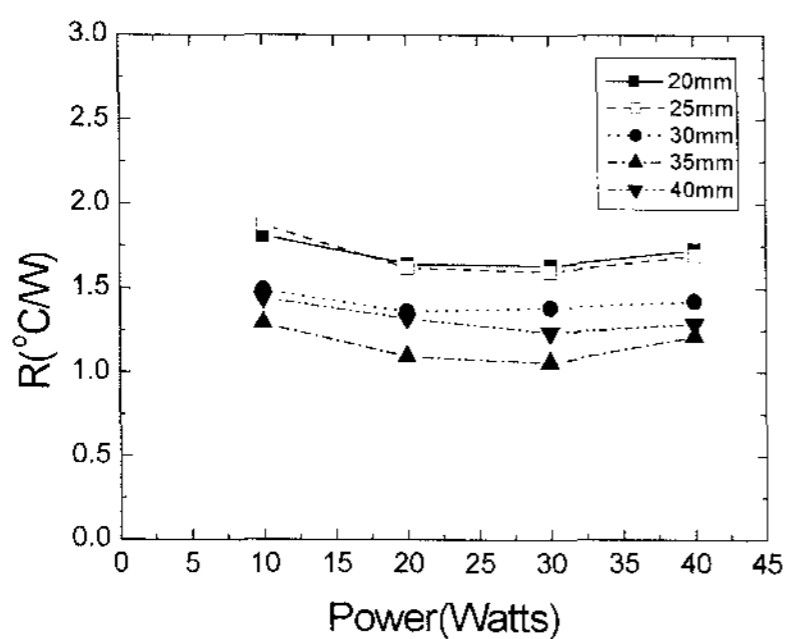


그림 8. 8mm 크기의 기공도를 갖는 발포알루미늄의 높이에 따른 열 성능비교

4. 결론

본 연구에서는 다공성 알루미늄을 이용한 히트싱크의 성능을 제조방법 및 히트싱크의 다양한

변수에 대한 실험적 고찰 통하여 다음의 결과를 얻었다.

- (1) 히트싱크의 구리 받침판에 대한 두께가 성능에 미치는 영향은 매우 미미한 것으로 나타났다. 이는 높은 열전도도에 비하여 두께가 얇기 때문인 것으로 판단된다.
- (2) 히트싱크의 받침판 부착방법에 따른 성능은 용융 알루미늄 부착법이 가장 우수하고, 납땀, 브레이징 및 접착제 순으로 나타났다.
- (3) 히트싱크의 모재에 대한 성능평가는 전도도가 높은 순수 알루미늄이 약 10% 가량 열저항이 낮게 관찰되었다.
- (4) 다공성 알루미늄의 기공크기에 대한 성능에 미치는 영향은 열 전도도가 높은 순수 알루미늄인 경우 평균 입도가 3 mm인 기공을 갖는 히트싱크가 가장 우수한 성능을 나타내고 있으나 열 전도도가 상대적으로 낮은 AC8A 재질의 히트싱크는 5 mm가 열저항 값이 낮게 관찰되었다.
- (6) 발포알루미늄의 최적의 높이는 35 mm에서 최고의 성능을 나타내고 있다. 즉 높이의 증가에 따라 열 저항이 감소하다가 35 mm를 기점으로 다시 상승하고 있다.

후 기

본 논문은 2002년도 교내 학술연구비 지원사업에 의해 수행되었으며, 본 연구를 위해 협조해주신 (주)에이티 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Shaukatullah, H., Bibliography of Air Heat Sinks for Thermal Enhancement of Electronic Packages, Fourteenth IEEE EMI-

- THERM Symposium, 1998, pp.177~221.
2. Lu, T.J., Stone, H.A., and Ashby, M.F., Heat Transfer in Open-Cell Metal Foams, *Acta Materials*, 1998, Vol. 46, No. 10, pp. 3619~3635.
 3. Boomsma, K., and Poulikakos, D., On the Effective Thermal Conductivity of a Three-dimensionally Structured Fluid-saturated Metal Foam, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2001, Vol. 44, pp. 827~836, 2001.
 4. 이명호 외, CPU 냉각을 위한 환-발포알루미늄 방열기 조합의 열 전달 특성, 2001년도 열공학 부문 춘계 학술대회 논문집, pp. 101~106.
 5. 백진욱 외, 발포 알루미늄 표면이 충돌제트 열 전달에 미치는 영향, 2001년도 열공학 부문 춘계 학술대회 논문집, pp.89~94.
 6. 민경수 외, Darcy 유동과 Two-equation 모델을 이용한 다공성 방열기 이론해석, 2001년도 열공학 부문 춘계 학술대회 논문집, pp. 95~100.
 7. 조성석, 김상동, 수용성 용융염 입자를 이용한 다공질 금속의 제조방법, 출원 10-2000-0025470, 2000.
 8. Patel, C. and Belady, C., Modeling and Metrology in High Performance Heat Sink Design, *Proceedings of the 47th Electronic Components and Technology Conference*, IEEE, 1997, pp. 296~304.
 9. Intel Pentium4 Processor Thermal Design Guidelines, November, 2000, pp. 17~21.
 10. Martin, H., Heat and Mass Transfer between Impinging Gas Jet and Solid Surface, *Advances in Heat Transfer*, 1977, Vol. 13, pp. 1~60.
 11. Loh, C.K., Chou, B., Nelson, D., and Chou, D.J., Study of Thermal Characteristics on Solder and Adhesive Bonded Folded Fin Heat Sink, 2000 Inter Society Conference on Thermal Phenomena, IEEE, 2000, pp. 1~7.