

충돌제트 열전달에 발포알루미늄 방열기의 높이와 노즐의 크기가 미치는 영향

백진욱* · 김서영† · 강병하**

(2001년 4월 6일 접수, 2001년 7월 10일 심사완료)

Effects of Nozzle Size and Height of Aluminum Foam Heat Sink on Jet Impingement Heat Transfer

Jin Wook Paek, Seo Young Kim and Byung Ha Kang

Key Words: Air Jet Impingement(충돌공기제트), Heat Transfer Enhancement(열전달촉진), Aluminum Foam Heat Sink(발포알루미늄 방열기)

Abstract

An experimental study is carried out for an aluminum foam heat sink attached to an isolated heat source to evaluate high potential of aluminum foam as a heat sink with impinging jets. The effects of the pore density and the height of the aluminum foam heat sink, the jet Reynolds number, and the nozzle diameter are delineated in comparison with a conventional pin type heat sink. It is found that the aluminum foam with small pores is inefficient for the heat transfer enhancement due to the large flow friction at the given porosity. In the parameter ranges of the present study, the change in the nozzle diameter shows no significant effects on the surface temperature of the aluminum foam heat sink at a given Reynolds number. The heat transfer enhancement is strongly dependent on the jet Reynolds number and shows a maximum value at a moderate Reynolds number.

기호설명

$E(h^*)$: 무차원 열전달촉진비율, 식 (4)
 D : 노즐 직경 [m]
 H : 노즐 출구와 열원면 사이의 거리 [m]
 h : 방열기 높이 [m]
 h^* : 무차원 방열기 높이
 h_r : 대류 열전달 계수 [W/m^2K]
 k : 열전도도 [$W/(m K)$]
 k_e : 유효열전도도 [$W/(m K)$]
 Nu_r : 국소 Nusselt 수, 식 (3)
 \overline{Nu} : 평균 Nusselt 수

$\overline{Nu_s}$: 평판의 평균 Nusselt 수
 q'' : 열유속 [W/m^2], 식 (1)
 r : 반경방향 거리 [m]
 Re : Reynolds 수, $U_o D / \nu$
 S/V : 단위부피당 표면적 [m^{-1}]
 T_o : 노즐 출구 공기 온도 [$^{\circ}C$]
 t_b : 방열기 베이스판의 두께 [m]
 t_a : 발포알루미늄 금속지주의 두께 [m]
 T_w : 열원 표면 온도 [$^{\circ}C$]
 U_o : 노즐 출구 공기 속도 [m/s]

그리스문자

β : 기공밀도 [PPI]
 ϵ : 다공도
 ν : 동점성 계수 [m^2/s]
 θ_w : 무차원 벽면온도, 식 (2)

* 회원, KIST 열유동제어 연구센터
 † 책임저자, 회원, KIST 열유동제어 연구센터
 Email: seoykim@kist.re.kr
 TEL : (02)958-5683 FAX : (02)958-5689
 ** 회원, 국민대학교 기계자동차공학부

1. 서 론

국부적으로 매우 높은 열밀도를 가지는 최신 전자장비의 냉각을 위해 보다 우수한 열전달 특성을 가지는 충돌제트를 사용한 방열기술이 개발되고 있다.⁽¹⁾ 충돌제트는 높은 열전달 특성으로 인해 그 동안 많은 연구^(2,3)가 수행되어 왔으며 최근 연구를 통해 핀과 같은 확장된 표면을 이용하여 보다 높은 열전달 성능을 얻을 수 있음이 확인되고 있다.⁽⁴⁾ 이와 같이 확장된 표면을 이용한 대류 열전달 촉진에 있어서는 일반적으로 확장된 표면의 단위부피당 높은 표면적 비와 유동의 효율적인 혼합이 중요한 요소임이 알려져 있다.⁽⁵⁾

발포알루미늄은 단위부피당 매우 높은 표면적 비와 함께 0.9이상의 높은 다공도로 인해 유동의 압력손실이 기존의 일반적인 다공성 물질에 비해 매우 낮은 특성이 있다. 또한 금속지주가 직접 연결된 구조로 인해 높은 유도열전도도를 가지고 있어 대류 열전달 촉진을 위한 매우 효과적인 다공성 물질이라고 할 수 있다.^(6,7) 더구나 발포 알루미늄은 간단한 제작과정과 함께 기계적인 강도가 충분하고 가공이 자유로운 장점이 있다.⁽⁸⁾

최근 들어 이와 같은 발포알루미늄의 장점을 전자장비내의 국부 열원의 냉각에 활용하기 위한 연구가 활발히 전개되고 있다. 특히, 전자장비내의 유동과 유사한 채널유동에서의 열전달 촉진에 관한 많은 연구가 진행되었으며 다양한 형상의 다공성 블록에 의한 열전달 촉진의 가능성도 고찰되었다.⁽⁹⁾ Paek et al.⁽¹⁰⁾은 실험을 통해 채널내의 열원으로부터의 열전달량이 발포알루미늄 블록에 의해 크게 증가하며 기존 방열기와의 비교를 통해 전자장비의 냉각에 발포알루미늄을 적용할 수 있음을 밝혔다.

충돌제트와 다공성 물질의 전열촉진 특성을 활용하여 보다 높은 방열 성능을 얻기 위한 연구도 활발해지고 있다. Fu와 Huang⁽¹¹⁾은 충돌제트에서 보다 많은 유동이 흐를 수 있는 다공성 블록의 형상이 열전달 성능 향상에 적합함을 수치 계산을 통해 고찰하였다. 또한, 백 등⁽¹²⁾에 의해 한정된 크기의 열원에 놓여진 발포알루미늄 방열기와 충돌공기제트의 열전달 특성이 연구되었다. 다공도가 일정한 경우 발포알루미늄의 열전달 특성은 기공밀도의 영향을 받으며 표면적의 확대보다는

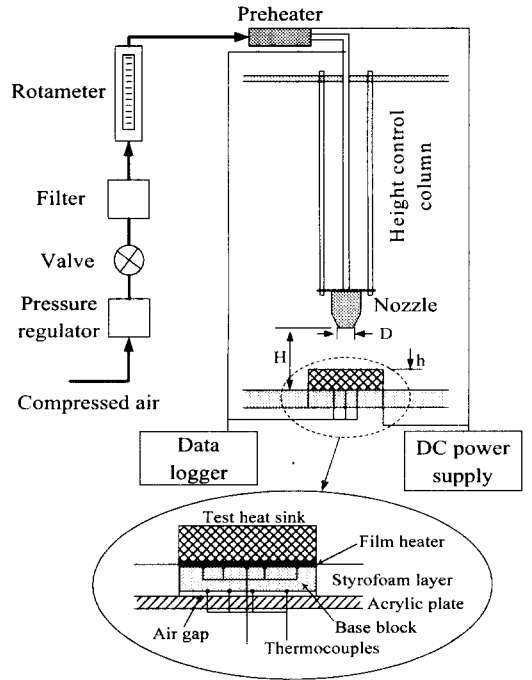


Fig. 1 Experimental setup

침투유량의 증가가 열전달 촉진에 보다 중요함을 밝혔다. 동일한 크기의 기존 핀형상 방열기와 비교를 통해 발포알루미늄 방열기의 가능성을 고찰하였다.

최신 밀집형 전자장비의 경우 내부에는 많은 수의 기판이 배열되어 있고 외형의 소형화로 전자부품의 냉각을 위한 방열기의 설치공간에 많은 제한요인이 발생하고 있다. 이에 따라 발포알루미늄 방열기를 실제로 적용하기 위해서는 설치공간의 제약과 밀접한 관계가 있는 발포알루미늄 방열기의 높이변화가 방열성능에 미치는 영향에 대한 연구가 필수적이다.

이를 위해 본 연구에서는 충돌공기제트에 의한 발포알루미늄의 열전달 특성에 관한 기존의 연구를 바탕으로 발포알루미늄 방열기의 높이와 충돌공기제트의 노즐크기가 방열성능에 미치는 영향을 고찰하였다. Fig. 1과 같이 등열유속을 내는 열원 위에 발포알루미늄 방열기를 부착하고 충돌공기제트가 수직으로 가해지는 경우 발포알루미늄 방열기의 대류열전달 특성을 실험적으로 연구하였다. 다양한 기공밀도(β)를 가지는 발포알루미늄에 대해 발포알루미늄 방열기의 높이(h)와 충

돌제트의 노즐직경(D)이 방열성능에 미치는 영향을 충돌공기제트의 유속(U₀)을 변화시키면서 고찰하였고 그 결과를 기존 편형 방열기와 비교하였다.

2. 실험 장치 및 방법

실험장치는 충돌제트부와 시험부로 구성되어 있다. 충돌공기제트를 만들기 위한 공기는 외부의 압축기로부터 공급되며 노즐부의 유로에는 미세한 메쉬층을 설치하여 충돌공기제트의 유속이 노즐출구에서 균일하게 되도록 하였다. 본 실험에서는 직경 D=10, 20 mm의 노즐을 사용하였다. 노즐로 공급되는 공기 유로에 소형 히터를 설치하여 실험장치 외부의 공기온도와 노즐출구의 공기 온도를 일치시켰다. 노즐과 열원사이의 간격(H)은 노즐부에 설치된 칼럼의 높이 이송장치로 조절하였다. 공기의 유량은 버블유량계로 보정된 유량계를 통해 조절하였으며 노즐의 직경을 기준으로 한 Reynolds수는 850~25000이었다.

열원과 발포알루미늄 방열기가 설치된 시험부는 크기 40 mm x 40 mm x 10 mm의 블록형상으로 단열성과 내열성을 위해 MC나일론으로 제작되었다. 등열유속 조건을 제공하기 위해 두께 약 0.18 mm의 골드 필름히터를 시험부인 MC나일론 블록 윗면에 부착하였고, 본 실험에서의 열유속은 약 3200 W/m²로 고정하였다. MC나일론 블록 외부로의 열손실량을 최소화하기 위해 주위에 단열재를 부착하였으며 밑면에는 1 mm의 공기단열층을 설치하였다. 또한 MC나일론 블록 밑면과 측면 단열재내부에 열전대를 설치하여 전도에 의한 열손실량을 측정하였다.

본 연구의 발포알루미늄 방열기는 Fig. 2(a)에 나타나 있듯이, 두께(t_b) 1.0 mm의 알루미늄(aluminum alloy 6101) 판이 밑면에 브레이징(brazing)되어 있으며 기존의 실제 CPU 방열기와 유사한 크기인 한 변의 길이(L)가 40 mm인 정방형이다. 본 연구에서 발포알루미늄 방열기의 높이(h)의 영향은 h=0.5 mm에서 9.0 mm 범위에서 고찰되었다.

충돌공기제트의 온도와 히터의 표면온도는 T-type의 열전대를 사용하여 측정하였다. 히터의 표면온도는 반경 18 mm의 중심부 영역에 설치된 5개의 열전대로 측정하였다. 히터표면과 실험

시편인 발포알루미늄 방열기와의 접촉열저항을 최소화하기 위해 각각의 접촉면에 열그리스를 도포하였고, 발포알루미늄 방열기는 소형볼트를 사용하여 MC나일론 블록에 고정시켰다. 열전대를 통해 측정된 온도를 조사하여 열적으로 정상상태에 도달한 것을 확인한 후, 데이터 획득장치(Yokogawa DR230)로 공기의 온도와 히터의 표면온도를 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

발포알루미늄 방열기의 열전달 특성을 고찰하기 위해 히터표면에서의 대류 열전달계수를 다음과 같이 정의하였다.

$$q'' = h_r(T_w - T_o) \quad (1)$$

여기서 q''는 단위 면적당 열전달량, h_r는 국부 대류 열전달계수, T_w와 T_o는 각각 열원표면의 온도와 노즐 출구에서의 공기 온도이다.

또한, 균일한 열유속을 갖는 열원표면에서 무차원 표면 온도는 다음과 같이 정의된다.⁽³⁾

$$\theta_w = \frac{T_w - T_o}{q''D/k} \quad (2)$$

여기서 k는 공기의 열전도도이다. 따라서 국부 Nusselt 수는 다음과 같이 표현된다.

$$Nu_r = \frac{h_r D}{k} = \frac{1}{\theta_w} \quad (3)$$

본 연구에서 한정된 크기를 가지는 다공성 방열기의 방열 성능은 열원의 평균 온도로 표현될 수 있다. 일반적으로 충돌제트의 국부 대류 열전달계수는 유동특성에 의해 정체점을 중심으로 반경방향으로 변화하지만 본 실험에서는 방열기의 베이스 알루미늄 판의 높은 열전도성에 의해 열원 표면온도 변화는 미약하게 된다. 또한 실제 실험에서는 MC 나일론 블록 주위로의 전도 열손실 때문에 열전대의 위치에 따른 반경방향의 온도변화를 정확히 측정하기는 매우 어렵다. 열원 표면의 측정온도의 불균일도는 평균온도와 공기의 온도차에 대해 약 ±3% 정도로 매우 작게 나

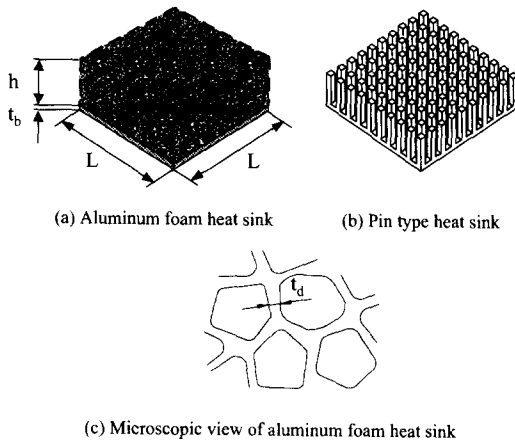


Fig. 2 Test specimens

Table 1 Geometrical particulars of aluminum foam heat sink.^(6,14)

	ϵ	β (PPI)	S/V (m^{-1})	k_e ($W/(m \cdot K)$)	t_d (mm)
Foam 1	0.92	40	2740	6.01	0.102
Foam 2	0.92	20	1720	5.56	0.203
Foam 3	0.92	10	790	5.33	0.406

타났다. 따라서 열원표면에서의 평균 Nusselt수 \overline{Nu} 값은 5개의 열전대에서 측정된 온도의 산술 평균으로부터 구할 수 있다.

히터 표면에 설치된 5개의 열전대에서 측정된 평균온도와 히터로 공급되는 전기에너지, 시험부의 밑면과 주위를 통해 손실되는 전도 열손실량을 측정하여 식 (2)와 식 (3)으로부터 등열유속의 열원 표면에서의 평균 Nusselt수 \overline{Nu} 값을 측정할 수 있다. 본 실험의 불확실도는 Kline과 McClintock의 방법을 이용하여 산정하였다.⁽¹³⁾ 노즐 출구에서의 유속의 불확실도는 95% 신뢰구간에서 약 2%로 나타났으며,⁽⁷⁾ 열원표면온도, 열유속의 불확실도는 각각 3%와 2%로 나타났다. 따라서, 레이놀즈수 Re 와 \overline{Nu} 값에 대한 불확실성은 각각 약 2%와 5% 미만이었다.

본 연구의 실험장치와 실험방법의 타당성을 검증하기 위해 Fig. 3에서 충돌공기체트에 의한 평판열원에서의 대류 열전달에 대한 기존의 Martin⁽²⁾의 실험 결과를 본 연구에서 측정된 두께 1.0 mm 의 알루미늄 평판에서의 실험결과와

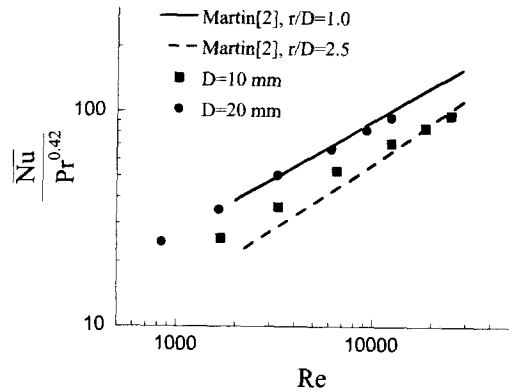


Fig. 3 Variation of the averaged Nusselt number on the smooth wall. $H/D=7.5$

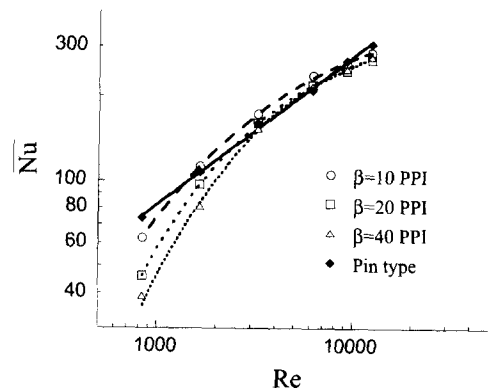


Fig. 4 Effect of pore density β on the averaged Nusselt numbers. $D=20$ mm, $H/D=1.5$ and $h=9.0$ mm

비교하였다. 이 경우 열원과 노즐과의 간격 $H/D=7.5$ 이었다. 비교를 위해 본 연구에서 사용된 사각형 열원을 Womac et al.⁽¹⁵⁾의 환산식을 사용하여 원형열원으로 변환한 결과 열원의 크기는 $D=10$ mm 와 20 mm인 경우 각각 $r/D=2.4$ 와 1.2 이다. 본 연구의 결과는 Martin⁽²⁾의 결과 중 가장 근접한 $r/D=1.0$ 과 2.5 에서의 결과와 전반적으로 잘 일치하여 실험장치와 실험방법이 타당함을 확인하였다.

본 연구에 사용된 발포알루미늄의 기하학적 특성과 유효열전도도(k_e)를 Table 1에 나타내었다. 다공도(ϵ)는 발포알루미늄 내의 단위부피당 공기로 채워진 부분의 부피비를 의미하며 실험 시편

의 다공도는 0.92로 일정하였다. 이것은 전체 부피에서 발포알루미늄의 부피가 약 8%에 불과함을 의미한다. 발포알루미늄의 기공의 크기는 기공밀도(β)로 표현된다. 기공밀도가 증가할수록 기공의 크기가 작아지며, 다공도가 일정할 경우 기공밀도의 증가는 금속지주의 두께(t_d)가 얇아짐을 의미한다. 또한, 기공밀도가 증가할수록 발포알루미늄의 단위부피당 표면적비(S/V)도 증가하게 된다.⁽⁶⁾ 실험시편의 β 는 각각 10, 20, 40 PPI (Pore Per Inch)이며 S/V 는 각각 790, 1720, 2740 m^{-1} 이다.⁽¹⁴⁾

또한 발포알루미늄의 열전달 특성을 실제 전자장비의 냉각에 사용되는 일반 방열기와 비교하기 위해 Fig. 2(b)와 같이 현용 고성능 PC의 CPU 냉각에 사용되는 핀형 방열기의 열전달 특성을 조사하였다. 정확한 특성비교를 위해 베이스 판의 두께와 전체높이를 발포알루미늄 방열기와 같게 가공하였다. 단위부피당 표면적 비는 약 $570m^{-1}$, 핀의 단면적은 1.8 mm x 1.5 mm이며 다공도는 약 0.77이다.

Fig. 4는 기공밀도의 변화가 발포알루미늄의 열전달 특성에 미치는 영향을 보여주고 있다. 발포알루미늄의 대류 열전달 특성은 기공밀도(β)와 다공도(ϵ)의 변화에 큰 영향을 받는다.⁽⁷⁾ Table 1에 나타나 있듯이, 시편의 다공도는 $\epsilon=0.92$ 로 고정되어 있기 때문에 기공밀도의 변화는 주로 단위부피당 표면적의 비(S/V)의 변화로 나타나고 있다. 본 실험영역에서는 레이놀즈수 Re 가 증가함에 따라 모든 시편의 평균 Nusselt수 \overline{Nu} 가 증가함을 볼 수 있다. 그러나 동일한 Re 에서는 기공밀도가 감소함에 따라 \overline{Nu} 값이 증가하는데, 이는 단위부피당 표면적이 감소하였음에도 불구하고 열전달이 촉진됨을 의미한다. 이것은 기공밀도가 감소하여 전열 면적이 감소했음에도 불구하고 발포알루미늄의 유동저항의 감소에 따른 통과유량의 운동량 증가로 열전달량이 증가하기 때문이며 채널 유동에 놓인 다공성 블록에서도 발견되는 현상이다.⁽⁹⁾ 또한, 기공밀도의 영향은 저속영역에서는 크게 나타나지만 레이놀즈수가 증가함에 따라 그 영향이 감소하여 \overline{Nu} 값의 차이는 작아짐을 보이고 있다.

핀형 방열기의 평균 Nusselt 수 \overline{Nu} 는 Re 의 증가에 따라 선형적으로 변하지만 발포알루미늄

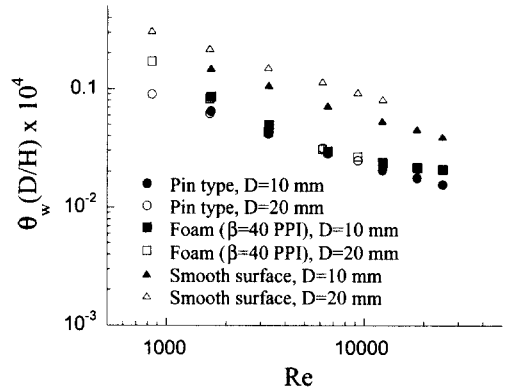


Fig. 5 Effect of nozzle diameter D on the surface temperature of the heater. $h=9.0$ mm and $H=30$ mm

방열기는 Re 가 증가함에 따라 \overline{Nu} 의 기울기가 감소함을 볼 수 있다. 즉, $Re \leq 2000$ 에서 발포알루미늄 방열기의 높은 유동저항 형상에 기인하여 기존 핀형 방열기보다 열전달률이 낮게 나타나고 있다. 그러나 $2000 < Re < 9000$ 인 경우 10 PPI의 발포알루미늄 방열기가 핀형 방열기보다 조금 더 큰 \overline{Nu} 값을 보이고 있어 열전달 측면에서 우수함을 알 수 있다. 경제적인 측면에서도 각각의 다공도가 0.92와 0.77로 발포알루미늄의 무게가 일반 방열기의 1/3수준으로 재료비의 절감과 함께 상당한 경량화가 가능함을 알 수 있다.

실제의 전자장비 냉각의 목적은 전자부품소자의 효율적인 작동을 보장하는 온도이하로 열원의 온도를 낮추는 것이므로 열원표면의 온도는 방열기 설계의 주요한 요소이다. Fig. 5는 충돌제트 노즐의 직경(D)의 변화에 의한 열원표면의 온도 변화를 보이고 있다. 노즐 직경의 변화에 따른 열원의 실제 표면온도의 변화를 고찰하기 위해 실험여건에 따라 발생하는 외부공기의 온도와 열유속의 차이를 고려한 무차원 온도 θ_w 와 노즐 직경의 곱인 $\theta_w \cdot (D/H)$ 로 수직축을 표시하였다.

방열기가 부착된 열원의 표면 온도는 방열기가 없는 평판에 비해 크게 낮아졌음을 볼 수 있다. 또한, 발포알루미늄 방열기($\beta=40$ PPI)나 핀형 방열기가 부착된 경우, 노즐직경이 $D=10$ mm와 20 mm인 경우의 열원표면의 온도는 동일 Re 에서는 거의 차이가 나지 않고 있다. 기공밀도가 다른 $\beta=10, 20$ PPI의 발포알루미늄 방열기에서도 동일

한 Re에서는 표면온도가 거의 같아 노즐직경의 영향은 매우 미약하였다. 이것은 방열기의 밑면적이 총돌체트의 노즐면적에 비해 크게 차이가 나지 않는 경우 열원의 표면온도는 노즐의 직경 변화에 큰 영향을 받지 않음을 의미한다.

그러나, 방열기가 없는 평판에서는 동일한 레이놀즈수에서 노즐직경이 D=10 mm인 경우의 표면온도가 D=20 mm보다 약 50% 정도 낮게 나타나고 있다. 따라서, 방열기가 없는 평판에 비해 발포알루미늄 방열기를 통해 얻을 수 있는 열원 표면의 온도 강하의 폭은 D=20 mm인 노즐의 경우가 D=10 mm 보다 크게 나타난다. 이것은 방열기 전체의 열전달에 있어 확장된 표면의 영향이 방열기 바닥면의 영향보다 훨씬 크고 따라서 직경이 큰 노즐이 발포알루미늄의 확장된 전열면을 보다 효율적으로 이용하고 있음을 의미한다.

Fig. 6은 40 PPI 발포알루미늄 방열기에서 발포알루미늄의 높이 h의 변화에 따른 평균 Nusselt수 \overline{Nu} 의 변화를 나타내고 있다. 방열기의 높이 h가 감소함에 따라 모든 Re의 영역에서 Re에 관계없이 열전달 성능이 저하됨을 알 수 있다. h=3.0 mm인 경우 실험영역에서 평균 Nusselt수 \overline{Nu} 가 Re의 증가에 따라 거의 선형적으로 증가하는 반면, h=6.0 mm와 9.0 mm인 경우에는 Re가 증가함에 따라 \overline{Nu} 의 증가율이 감소하고 있다. 이에 따라 Re가 커질수록 방열기의 높이h의 차이에 따른 \overline{Nu} 의 차이도 점차 감소하고 있다.

이와 같이 레이놀즈수의 변화가 방열기의 높이 h와 열전달 특성의 관계에 미치는 영향은 다음과 같이 정의된 무차원 열전달촉진비율에 의해 표현될 수 있다.

$$E(h^*) = \frac{\overline{Nu}(h^*) - \overline{Nu}_s}{\overline{Nu}(h^*=1.0) - \overline{Nu}_s} \quad (4)$$

여기서, h^* 는 방열기 초기의 높이 h=9.0 mm로 무차원화된 방열기의 높이이며 $\overline{Nu}(h^*)$ 는 높이 h^* 에서의 평균 Nusselt수, \overline{Nu}_s 는 방열기가 없는 평판($h^*=0$)에서의 평균 Nusselt수이다. 따라서, $E(h^*=0.0)=0.0$ 이며 $E(h^*=1.0)=1.0$ 이 된다. 40 PPI의 발포알루미늄 방열기에 대해 대표적인 레이놀즈수 Re=1650, 6200과 12400에서 $h^*=0.05$ 에서 1.0

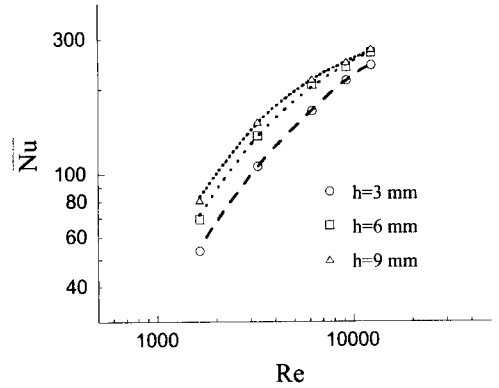


Fig. 6 Variation of the averaged Nusselt numbers at different heights h. $\beta=40$ PPI, D=20 mm, and H/D=1.5

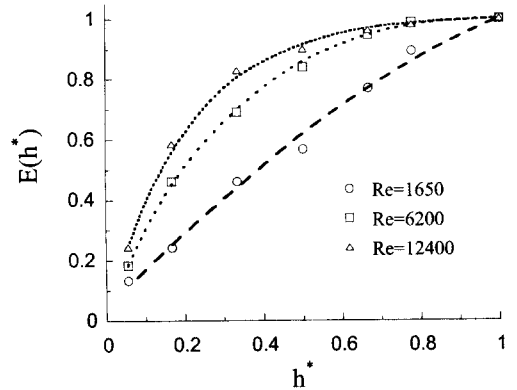


Fig. 7 Effect of Al. foam height h^* on the $E(h^*)$. $\beta=40$ PPI, D=20 mm and H/D=1.5

까지의 범위에서 $E(h^*)$ 의 변화를 Fig. 7에서 고찰하였다. 우선, Re의 크기에 관계없이 발포알루미늄 방열기의 높이 h^* 가 증가할수록 열전달 성능도 증가함을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 다공성 물질과 총돌체트 열전달에 관한 기존의 연구인 Fu와 Huang⁽¹¹⁾의 결과와 상반되는 것이다. Fu와 Huang⁽¹¹⁾의 연구에서 적용된 다공성 물질은 다공도가 0.5정도로 작고 유동저항이 매우 크기 때문에 다공성 블록 높이가 감소하더라도 통과유동의 강화로 열전달이 향상되었지만 발포알루미늄의 경우 다공도가 매우 크고 유동저항이 상대적으로 매우 작기 때문에 높이의 감소는 통

과유동의 강화보다는 열전달 면적의 감소로 인한 열전달 성능의 저하를 유발하고 있다.

대류 열전달의 영향이 상대적으로 미약한 낮은 레이놀즈수 $Re=1650$ 에서는 발포알루미늄으로부터의 열전달량이 h^* 의 증가에 따라 거의 모든 구간에서 선형적으로 증가하고 있으며 이것은 열전달량이 발포알루미늄의 표면적과 선형적으로 비례함을 의미한다. 즉, 열원에서 발생한 열이 발포알루미늄 방열기의 베이스와 금속지주를 통해 금속지주 끝단까지 전도에 의해 완전히 전달되며 금속지주의 편 효율이 거의 1.0에 가까움을 의미한다. 그러나 Re 가 증가하면 대류 열전달의 강화로 이와 같은 선형성이 나타나는 h^* 의 구간이 점점 축소됨을 알 수 있다.

대류 열전달의 영향이 강한 $Re=12400$ 의 경우, $h^*=0.33$ 에서의 열전달량은 $h^*=1.0$ 의 거의 80%에 이르고 있으며, $h^*>0.67$ 의 영역에서의 높이의 증가는 열전달량의 증가에 크게 영향을 미치지 못하고 있다. 이 경우 발포알루미늄 방열기의 금속지주 윗부분은 열전달촉진의 관점에서 밑부분 만큼 효율적이지 못하고 열전달 촉진보다는 추가적인 무게와 부피, 재료비의 증가로 인한 소요비용의 상승만을 유발할 뿐이다. Fig. 4와 6에서 나타난 것처럼 레이놀즈수가 증가함에 따라 발포알루미늄 방열기의 평균 Nusselt수의 증가율이 감소하는 이유는 이와 같은 금속지주의 편 효율의 감소 때문이다.

발포알루미늄의 다공도가 일정한 상태에서 기공밀도가 감소하면 열전달 표면적이 감소하지만 발포알루미늄의 금속지주의 두께는 증가하게 된다. 따라서, 발포알루미늄의 $E(h^*)$ 도 기공밀도의 영향을 받게 된다. Fig. 8은 대류 열전달의 영향이 강하게 나타나는 레이놀즈수 $Re=12400$ 에서 10 PPI, 40 PPI의 발포알루미늄 방열기와 핀형 방열기의 $E(h^*)$ 의 변화를 보이고 있다. 금속지주의 두께가 증가할수록 전도를 통한 금속지주의 열저항이 감소하게 되어 금속지주의 편 효율은 향상되게 된다. 따라서 10PPI의 발포알루미늄의 $E(h^*)$ 의 변화는 보다 선형적으로 나타나고 있다. 또한 금속지주의 두께가 더 두꺼운 핀형 방열기는 보다 선형적인 변화를 보이고 있다. $h^*=1.0$ 근처에서의 $E(h^*)$ 의 변화를 보면 40 PPI의 발포알루미늄과 달리 10 PPI의 발포알루미늄과 핀형 방열기의 경우, 높이가 $h>9.0$ mm 이상으로 추가적

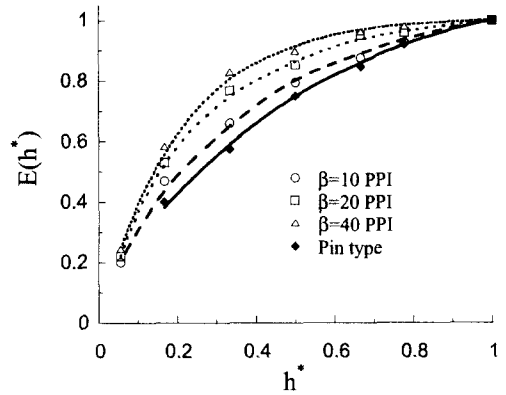


Fig. 8 Effect of pore density on the $E(h^*)$ at $Re=12400$, $D=20$ mm and $H/D=1.5$

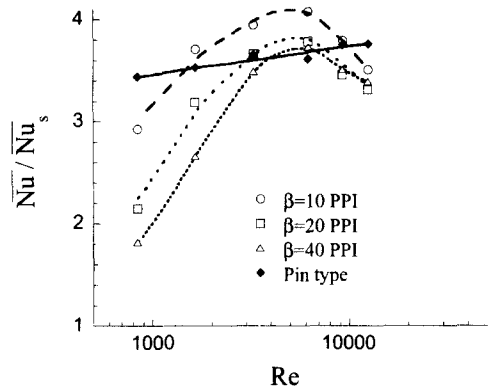


Fig. 9 Heat transfer enhancement for the Al foam heat sinks with $h=9.0$ mm, $D=20$ mm and $H/D=1.5$

으로 높아지더라도 열전달량이 증가할 것으로 예상된다. 그러나 $0.3 < h^* < 0.7$ 영역에서 기공밀도가 다른 발포알루미늄 사이의 $E(h^*)$ 값은 서로 큰 차이가 있으며, 이는 발포알루미늄 방열기의 높이가 낮아지는 경우에 기공밀도의 차이에 의한 방열성능의 우열이 변할 수 있음을 의미한다.

전자장비의 냉각을 위해 한정된 크기의 열원에 부착된 방열기를 통해 얻을 수 있는 방열효과는 방열기의 평균 Nusselt 수 \overline{Nu} 와 평판열원의 평균 Nusselt 수 \overline{Nu}_s 의 비로써 표현될 수 있다. Fig. 9는 편 높이 $h=9.0$ mm인 경우에 대해 레이놀즈수 Re 의 변화가 발포알루미늄 방열기와 핀형 방열기의 방열효과에 미치는 영향을 보이고

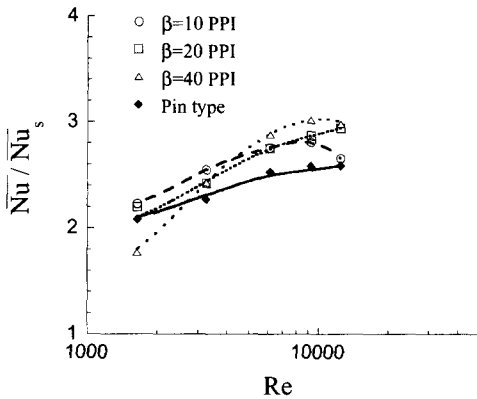


Fig. 10 Heat transfer enhancement for Al. foam heat sinks with lower height $h=3.0$ mm. $D=20$ mm and $H/D=1.5$

있다. 핀형 방열기의 경우 Re 의 변화에 큰 영향을 받지 않고 있으며 이러한 경향은 기존의 연구 결과⁽⁴⁾와도 일치하는 것이다. 그러나 발포알루미늄의 경우 Re 의 변화에 크게 영향을 받고 있음을 볼 수 있다. Re 가 증가함에 따라 방열효과가 증가하지만 일정한 Re 를 지나면 감소하고 있다. 방열효과가 최대가 되는 Re 는 기공밀도의 영향을 받지만 약 5000~7000 영역에서 나타나고 있다. 발포알루미늄 방열기는 방열효과의 관점에서 보면, Re 가 낮은 영역에서는 발포알루미늄의 유동저항이 유동의 운동량보다 우세하여 통과유동이 약화되므로 핀형 방열기에 비해 비효율적이며, Re 가 높은 영역에서는 금속지주의 낮은 핀 효율로 인해 핀형 방열기에 비해 비효율적으로 나타나고 있다.

발포알루미늄 방열기의 높이가 $h=3.0$ mm로 낮아지는 경우 Fig. 10에 나타난 것처럼 기공밀도에 따른 발포알루미늄 방열기의 방열성능상의 우열이 변함을 볼 수 있다. 즉, 높이가 낮은 경우, 저속영역에서는 역시 기공밀도가 낮은 10 PPI의 발포알루미늄이 40 PPI 보다 높게 나타나지만 레이놀즈수가 증가함에 따라 40 PPI의 발포알루미늄이 더 높은 열전달 성능을 보이고 있다. 또한, 방열효과가 최대가 되는 Re 는 높이 $h=9.0$ mm의 경우에 비해 약간 높은 영역에서 형성되고 있음을 볼 수 있다. 이것은 높이가 낮아지는 경우, 기공밀도의 차이에 의한 통과유동의 강도차이보다는 열전달 면적의 차이가 방열기의 열전달 특성

에 보다 큰 영향을 미치게 됨을 의미한다.

핀형 방열기와 비교해보면, 열전달 성능이 핀형 방열기보다 높게 나타나는 Re 의 영역이 보다 확장되었으며, 이것은 전자장비 내에서 공간상의 제약으로 방열기의 높이가 낮게 제한되는 경우 발포알루미늄 방열기가 기존의 핀형 방열기에 비해 훨씬 효과적임을 의미한다.

4. 결론

충돌공기제트에서 한정된 크기의 열원 위의 높은 발포알루미늄 방열기의 형상변화에 따른 열전달 특성을 실험을 통해 고찰하였다.

다공도가 일정한 경우 발포알루미늄 방열기의 열전달률은 기공밀도의 차이에 크게 영향을 받으며, 방열기의 높이가 변함에 따라 열전달률의 상대적인 차이도 크게 변화한다. 본 실험 영역에서 레이놀즈수가 동일한 경우 노즐 직경의 변화는 열원 표면의 온도에 미치는 영향이 미약하였다.

발포알루미늄 방열기의 높이가 높은 경우, 낮은 기공밀도의 발포알루미늄은 단위부피당 작은 표면적에도 불구하고 유동저항의 감소로 인한 유동의 운동량 강화로 기공밀도가 큰 발포알루미늄보다 열전달이 촉진되었다. 발포알루미늄 방열기의 높이가 낮아지는 경우 기공밀도의 차이에 의한 유동 강도의 차이보다는 표면적의 차이가 열전달 촉진에 보다 큰 영향을 미치게 되어 높은 레이놀즈수에서는 기공밀도가 높은 발포알루미늄이 열전달 촉진 면에서 보다 유리하게 나타났다. 레이놀즈수가 증가할수록 발포알루미늄의 핀 효율이 감소하여 평판 대비 열전달 촉진효과가 최대가 되는 레이놀즈수가 5000~10000영역에서 존재하며, 방열기의 높이가 낮아질수록 최대 방열효과가 나타나는 레이놀즈수도 높게 나타났다. 이것은 레이놀즈수가 낮은 영역에서는 발포알루미늄의 유동저항에 의한 통과유량의 감소가 지배적인 영향을 미치고, 레이놀즈수가 높은 영역에서는 핀 효율이 저하되기 때문이다.

후 기

본 연구는 과학기술부가 지원하는 특정연구개발사업 중 중점국가연구개발사업(기체설비요소기술개발)으로 지원되어 수행하였습니다.

참고문헌

- (1) Hollworth, B. R. and Durbin, M., 1989, "Impingement Cooling of Electronics," *Nat. Heat Transfer Conf.*, HTD-Vol. 111, pp. 89~96.
- (2) Martin, H., 1977, "Heat and Mass Transfer Between Impinging Gas Jet and Solid Surface," *Advances in Heat Transfer*, Vol. 13, pp. 1~60.
- (3) Viskanta, R., 1993, "Heat Transfer to Impinging Isothermal Gas and Flame Jets," *Exp. Thermal and Fluid Sci.*, Vol. 6, pp. 111~134.
- (4) Hansen, L. G and Webb, B. W, 1993, "Air Jet Impingement Heat Transfer from Modified Surface," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 989~997.
- (5) Webb, R. L., 1994, "*Principles of Enhanced Heat Transfer*," John Wiley & Sons. Inc.
- (6) Paek, J. W., Kang, B. H., Kim, S. Y. and Hyun, J. M, 2000, "Effective Thermal Conductivity and Permeability of Aluminum Foam Material," *Int. J. Thermophysics*, Vol. 21, pp. 453~464.
- (7) Kim, S. Y., Paek, J. W. and Kang, B. H., 2000, "Flow and Heat Transfer Correlations for Porous Fin in a Plate-Fin Heat Exchanger," *ASME J. of Heat Transfer*. Vol. 122, pp. 572~578.
- (8) Gibson, L. J. and Ashby, M. F., 1997, "*Cellular Solids*," Cambridge University Press. Cambridge.
- (9) Fu, W.-S., Huang, H.-C. and Liou, W.-Y. , 1996, "Thermal Enhancement in Laminar Channel Flow with a Porous Block," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 2165~2175.
- (10) Paek, J. W., Kim, S. Y. and Kang, B. H., 2000, "Heat Transfer from an Aluminum Foam Heat Sink for Electronics Cooling," *Proc. of the 4th JSME-KSME Thermal engineering Conf.*, Kobe, Japan, pp. 635(2)~640(2).
- (11) Fu, W.-S. and Huang, H.-C., 1997, "Thermal Performance of Different Shape Porous Blocks Under an Impinging Jet," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 40, pp. 2261~2272.
- (12) 백진욱, 김서영, 강병하, 2001, "충돌공기제트에서의 다공성 방열기의 열전달 특성," *설비공학 논문집*, Vol. 13, pp. 73~79.
- (13) Figliola, R. S. and Beasley, D. E., 1995, "*Theory and Design for Mechanical Measurements*," John Wiley and Sons, New York.
- (14) ERG Duocel Aluminum Foam Catalog, 1995, Energy Research and Generation Inc., Oakland, CA.
- (15) Womac, D. J., Ramadhyani, S. and Incropera, F. P., 1993, "Correlating Equations for Impingement Cooling of Small Heat Sources with Single Circular Liquid Jets," *ASME J. of Heat Transfer*. Vol. 115, pp. 106~115.