

충돌공기제트에서의 다공성 방열기의 열전달 특성

백진욱[†], 김서영, 강병하
한국과학기술연구원 열유동제어연구센터

Heat Transfer from a Porous Heat Sink by Air Jet Impingement

Jin Wook Paek[†], Seo Young Kim, Byung Ha Kang
Thermal/Flow Control Research Center, KIST, Seoul 130-650, Korea

(Received July 18, 2000; revision received november 6, 2000)

ABSTRACT: Experiments were carried out to investigate the heat transfer characteristics of an aluminum foam block as a porous heat sink on a heat source by a vertical air jet impingement that can be applied for electronics cooling. The performance of the aluminum foam heat sink was evaluated by the convective heat transfer coefficient on the heat source. At a fixed porosity, pore density (β) of the foam and Reynolds number Re were varied in the range of $\beta=10, 20, 40$ PPI (Pore Per Inch) and $850 \leq Re \leq 25000$. A nozzle diameter and the nozzle-to-plate spacing were also varied. It was found that the convective heat transfer was enhanced by the aluminum foam heat sink with lower pore density due to relatively intensified flow through the foam block. The aluminum foam block with much reduced weight shows slightly better performance with larger Nusselt number, compared with the conventional heat sink.

Key words: Porous media(다공성 물질), Air jet impingement(충돌공기제트), Heat sink(방열기), Heat transfer(열전달), Aluminum foam(발포알루미늄)

기 호 설 명

D : 노즐 직경 [m]
 H : 노즐 출구와 열원사이의 거리 [m]
 h_f : 핀 높이 [m]
 h_r : 대류열전달 계수 [W/m^2K]
 k : 열전도도 [$W/(m K)$]
 k_e : 유효열전도도 [$W/(m K)$]
 Nu_r : 국소 Nusselt 수
 \overline{Nu} : 평균 Nusselt 수

Pr : Prandtl 수, ν/α
 q'' : 열유속 [W/m^2]
 Re : Reynolds 수, $\frac{U_o D}{\nu}$
 r : 반경방향 [m]
 S/V : 단위부피당 표면적 [m^{-1}]
 T_o : 노즐 출구 공기 온도 [$^{\circ}C$]
 T_w : 열원 표면 온도 [$^{\circ}C$]
 U_o : 노즐 출구 공기 속도 [m/s]

그리스 문자

β : 기공밀도
 ϵ : 다공도

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-958-5679; fax: +82-2-958-5689

E-mail address: jwpaek@kist.re.kr

ν : 동점성 계수
 θ_w : 무차원 벽면온도

1. 서 론

충돌제트는 고체표면의 가열 또는 냉각에 사용되는 방법으로 일반적으로 다른 대류 열전달 방법보다 뛰어난 열전달 특성을 얻을 수 있다. 따라서 제지와 섬유유의 건조, 유리의 템퍼링(tempering), 금속의 아닐링(annealing), 가스터빈 블레이드의 냉각 등 열전달 성능에 대한 요구가 기존의 가열 또는 냉각 방법의 한계를 넘어서는 영역에서 사용 예가 증가하고 있다. 특히, 지난 수십 년간 전자장비의 고성능화, 소형화가 진행된 결과, 최근 개발된 전자장비 요소는 기존 대류 열전달 방법에 의한 냉각 특성을 넘어서는 국부적으로 매우 높은 열밀도를 가지게 되었다. 이에 따라 효율적인 방열을 위해 충돌제트를 사용하려는 시도가 진행되고 있다.⁽¹⁾

높은 열전달 특성으로 인해 충돌제트는 오랜 기간 관심의 대상이었으며 이에 따라 많은 연구가 이루어져 왔다.^(2,3) 평판에서의 충돌제트에 의한 열전달 특성에 관한 연구가 대부분이었으나, 최근 들어 다양한 연구를 통해 평판대신 천공판, 동심형 돌출물, 매쉬 스크린, 환 형상 등 확장된 표면에 대한 연구가 수행되었으며, 보다 높은 열전달 성능을 얻을 수 있음이 확인되고 있다.⁽⁴⁾ 이와 같이 확장된 표면에 의한 대류 열전달 성능의 향상에 있어서는 단위부피당 높은 표면적 비와 유동의 효율적인 혼합이 중요한 요소임이 알려져 있다.⁽⁵⁾

최근에 개발된 발포 알루미늄은 다공성 물질의 일종으로 단위부피당 매우 높은 표면적 비와 함께 0.9 이상의 높은 다공도에 의해 유동의 압력 손실이 기존의 일반적인 다공성 물질에 비해 매우 낮은 특성이 있다. 또한 금속지주가 직접 연결된 구조로 인해 높은 유효열전도도를 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⁾

이와 같은 다공성 물질의 장점을 이용하여 전자장비의 냉각과 같은 국부 열원의 효율적인 방열에 관한 연구가 활발히 전개되어 왔다. 특히,

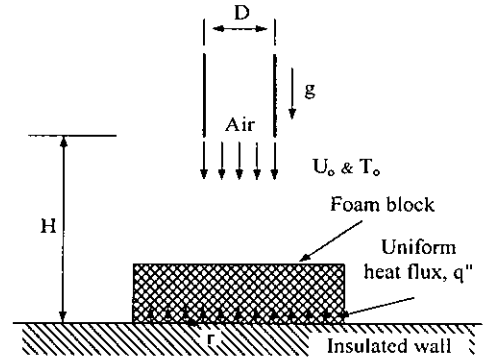


Fig. 1 Physical model of the present study.

전자장비내의 유동과 유사한 채널유동에 의한 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.

이와 같이 대류 열전달 촉진에 있어 다공성 물질이 매우 유망함에도 불구하고 다공성 물질의 충돌제트 열전달 특성에 관한 연구는 많지 않다. Fu et al.⁽¹¹⁾은 충돌제트에서 보다 많은 유동이 흐를 수 있는 다공성 블록의 형상이 열전달 성능 향상에 적합함을 수치 계산을 통해 고찰하였다. 그러나, 열전달 촉진에 발포알루미늄이 매우 유망한 물질임에도 불구하고 복잡한 구조와 관련 연구의 부족으로 충돌제트에 의한 발포알루미늄의 열전달 현상에 관한 연구는 거의 없다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 등열유속을 내는 열원 위에 다공성 물질의 일종인 발포알루미늄 블록을 부착하고 충돌공기제트가 수직으로 가해지는 경우 발포 알루미늄 방열기의 대류 열전달 특성을 실험적으로 연구하였다. 공기의 유속 (U_0)과 노즐과 열원 사이의 거리 (H), 노즐의 크기 (D) 그리고 발포알루미늄의 기공 밀도 (β)의 변화에 따른 발포알루미늄 방열기의 열전달 특성을 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

충돌공기제트에 의한 발포알루미늄의 열전달

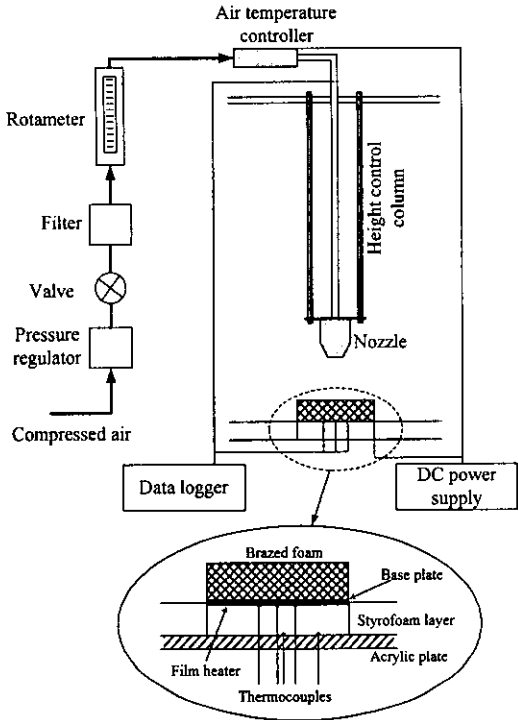
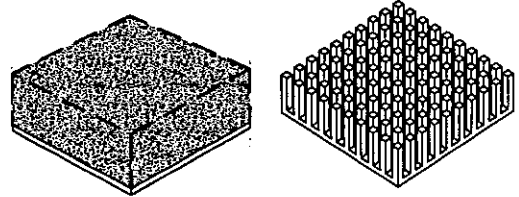


Fig. 2 Experimental setup.

특성을 고찰하기 위해 Fig. 2와 같은 실험장치를 구성하였다. 본 연구에서는 국부적으로 높은 열 유속이 발생하는 CPU와 같은 전자장비내의 냉각 장치를 모사하기 위해 등열유속의 열원 위에 놓여진 발포알루미늄 방열기에 수직으로 충돌제트가 가해지는 조건을 설정하였다.

실험장치는 충돌제트부와 시험부로 구성되어 있다. 충돌공기제트를 만들기 위한 공기는 외부의 압축기로부터 공급되며 노즐부의 유로에는 미세한 메쉬층을 설치하여 충돌공기제트의 유속이 노즐출구에서 균일하게 되도록 하였다. 또한 노즐로 공급되는 공기 유로에 작은 히터를 설치하여 실험장치 외부의 온도와 노즐출구의 공기온도를 일치시켰다. 이 노즐과 열원 사이의 간격(H)은 노즐부에 설치된 칼럼의 높이 이동으로 조절하였다. 공기의 유량은 잘 보정된 유량계를 통해 조절하였으며 노즐의 직경을 기준으로 한 Reynolds 수는 850~25000이었다.

열원과 발포알루미늄 방열기가 설치된 시험부는 크기 40 mm×40 mm×10 mm의 블록형상으로 단열성과 내열성을 위해 MC 나일론으로 제작되



(a) Aluminum foam block (b) Pin type heat sink

Fig. 3 Test specimens.

었다. 등열유속 조건을 제공하기 위해 두께 약 0.18 mm의 골드 필름히터를 시험부인 MC 나일론 블록 윗면에 부착하였고, 본 실험에서의 열유속은 약 3200 W/m²로 고정하였다. MC 나일론 블록 외부로의 열손실량을 최소화하기 위해 주위에 단열재를 부착하였다. 또한 MC 나일론 블록 밑면에 열전대를 설치하여 전도에 의한 열손실량을 측정하였다.

본 연구의 발포알루미늄 방열기는 Fig. 3(a)에 나타나 있듯이, 두께 1.0 mm의 알루미늄(Aluminum alloy 6101) 판이 밑면에 브레이징(Brazing)되어 있는 상태로 블록의 크기는 한 변의 길이가 40 mm인 정방형이며 발포알루미늄 핀 높이(h_f)는 9.0 mm이고 베이스 판을 포함한 높이는 10 mm이다.

충돌공기제트의 온도와 히터의 표면온도는 T-type의 열전대를 사용하여 측정하였다. 히터의 표면온도는 반경 10 mm의 중심부 영역에 설치된 4개의 열전대로 측정하였다. 히터표면과 실험시편인 발포알루미늄 방열기와의 접촉열저항을 최소화하기 위해 각각의 접촉면에 열그리스를 도포하였고, 발포알루미늄 방열기는 소형볼트를 사용하여 MC 나일론 블록에 고정시켰다. 열전대를 통해 측정된 온도를 조사하여 열적으로 정상상태에 도달한 것을 확인한 후, 데이터 취득장치(Yokogawa DR230)로 공기의 온도와 히터의 표면온도를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

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 시

Table 1 Geometrical dimensions of aluminum foam

	ϵ	β (PPI)	S/V (m^{-1})	k_e ($W/(m \cdot K)$)	h_f (mm)
Foam 1	0.92	40	2740	6.01	9.0
Foam 2	0.92	20	1720	5.56	9.0
Foam 3	0.92	10	790	5.33	9.0

편의 다공도는 0.92로 일정하였다. 이것은 동일한 부피의 알루미늄에 비해 발포알루미늄의 질량이 약 8%에 불과함을 의미한다. 발포알루미늄의 기공의 크기는 기공밀도(β)로 표현된다. 기공밀도가 증가할수록 기공의 크기가 작아지며, 다공도가 일정할 경우 기공밀도의 증가는 금속지주의 두께가 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.⁽¹²⁾

유효열전도도는 고체와 유체로 이루어진 다공성 물질의 열전도도를 의미하며 다공성 물질의 대류 열전달 특성에 영향을 미치는 주요한 변수이다. 본 연구에 사용된 발포알루미늄의 경우 유체가 공기이기 때문에 발포알루미늄을 통한 전도 열전달은 대부분 금속지주를 통해 이루어진다. 따라서 발포알루미늄의 유효열전도도는 다공도가 일정한 경우 기공밀도에 영향을 받지 않고 거의 일정한 값을 보이고 있다.⁽⁶⁾

발포알루미늄의 열전달 특성을 고찰하기 위해 히터표면에서의 대류열전달계수를 다음과 같이 정의하였다.

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

여기서 q'' 는 단위 면적당 열전달량, h_r 는 국부 대류열전달계수, T_w 와 T_o 는 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 k 는 공기의 열전도도이다. 따라서 국부 Nusselt 수는 다음과 같이 표현된다.

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

본 연구에서 제한된 크기를 가지는 다공성 방열기의 방열 성능은 열원의 평균 온도로 표현될 수 있다. 일반적으로 충돌제트의 국부 대류열전달계수는 유동특성에 의해 정체점을 중심으로 반경방향으로 변화하지만 본 실험에서는 방열기의 베이스 알루미늄 판의 높은 열전도 특성에 의해 열원 표면온도 변화는 미약하게 된다. 따라서 충돌제트에서 국부 대류열전달계수의 반경방향의 변화를 알루미늄 베이스 판 밑면에 설치된 열전대로 정확히 측정하기는 매우 어렵고 실제 실험 결과 열전대의 위치에 따른 반경방향의 온도변화는 평균온도와 공기의 온도차에 대해 약 $\pm 2\%$ 정도로 매우 작으며 거의 균일한 온도분포가 나타났다. 따라서 열원표면에서의 평균 Nusselt 수 \overline{Nu} 값은 4개의 열전대에서 측정된 온도의 산술 평균으로부터 구할 수 있다.

히터 표면에 설치된 4개의 열전대에서 측정된 평균온도와 히터로 공급되는 전기에너지, 시험부의 밑면을 통해 손실되는 전도 열손실량을 측정하여 식(2)와 식(3)으로부터 등열유속의 열원 표면에서의 평균 Nusselt 수 \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 충돌공기제트에 의한 평판열원에서의 대류 열전달에 대한 기존의 실험 결과⁽²⁾와 본 연구에서 측정된 두께 1.0 mm의 알루미늄 평판에서의 실험결과를 Fig. 4에서 비교하였다. 이 경우 노즐의 직경 D 는 10 mm이었으며 열원과 노즐과의 간격 H/D 는 2.0으로 고정하였다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 기존 결과와 본 연구의 실험 결과가 잘 일치하므로 본 연구의 실험장치와 실

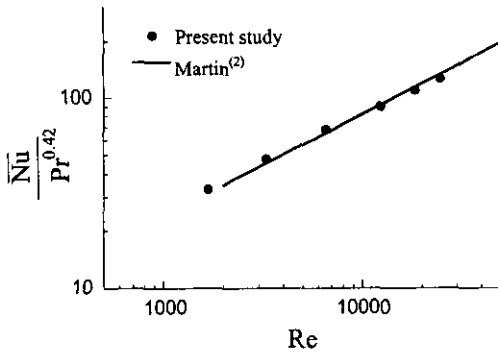


Fig. 4 Variation of the Nusselt number on the smooth surface, $H/D=2.0$ and $r/D=1.0$.

험방법이 타당함을 확인하였다.

충돌공기제트에 의한 평판에서의 열전달 특성은 평판에 도달하는 공기의 유속분포에 큰 영향을 받는다.⁽³⁾ 따라서 유속분포를 결정하는 노즐과 평판사이의 거리(H)는 충돌제트에 의한 열전달 특성의 연구에 있어 중요한 요소이다. Fig. 5는 레이놀즈수 Re 가 일정한 경우, 노즐과 열원 사이의 거리(H)가 발포알루미늄의 열전달 특성에 미치는 영향을 보여주고 있다. 평판열원의 경우, 노즐출구에서 일정거리($H/D \sim 7$)까지는 노즐출구의 유속이 유지되는 포텐셜 코어 영역(potential core region)이 존재하기 때문에 정체점(stagnation point)에서의 국부 Nusselt 수도 거의 일정하게 유지됨이 알려져 있다.⁽³⁾ 그러나 제한된 열원 면적을 가지는 발포알루미늄이 부착된 경우에는 전열면적의 증가로 인해 열전달 특성에 변화가 나타난다. 노즐의 직경이 $D=10\text{ mm}$ 인 경우, $H/D < 10$ 인 범위에서 \overline{Nu} 값은 전체적으로 노즐과 열원 사이의 거리의 영향을 받지 않고 거의 일정한 값을 보이며 $H/D > 10$ 인 범위에서는 노즐과 열원 사이의 거리가 증가할수록 충돌제트의 확산으로 인한 발포알루미늄에 도달하는 유량의 감소와 유속의 저하로 \overline{Nu} 값도 서서히 감소하게 된다. 노즐의 직경이 $D=20\text{ mm}$ 인 경우, $H/D=0.5$ 에서는 충돌제트의 출구면적의 감소로 인한 유동 가속으로 \overline{Nu} 값이 증가하지만, $H/D < 5$ 인 범위에서 \overline{Nu} 값은 전체적으로 거의 일정한 값을 보이고 있다. 그러나, 충돌제트의 면적에 대한 열원의 면적이 $D=10\text{ mm}$ 인 경우의 1/4에 불과하기

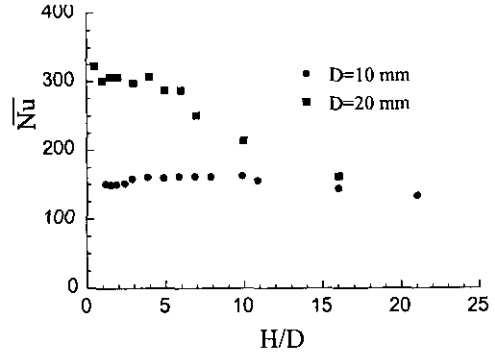


Fig. 5 Effect of the nozzle-to-plate spacing on the Nusselt number of the foam block ($\beta=40\text{ PPI}$) at a fixed $Re=12200$.

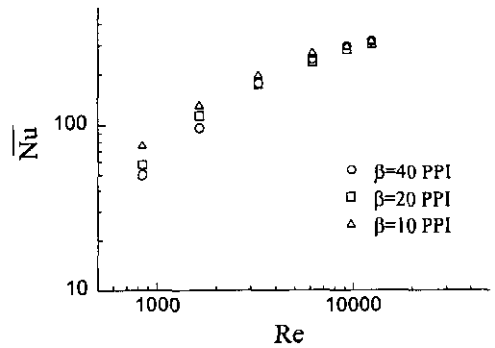


Fig. 6 Effect of the pore density of the foam block on the Nusselt number, $D=20\text{ mm}$ and $H/D=1.5$.

때문에 $H/D > 5$ 인 범위에서는 노즐과 열원 사이의 거리가 증가할수록 충돌제트의 확산으로 발포알루미늄에 도달하는 유량이 크게 감소하며 발포알루미늄에 도달하는 유속도 저하되므로 \overline{Nu} 값이 보다 급격하게 감소하게 된다.

Fig. 6은 기공밀도의 변화가 발포알루미늄의 열전달 특성에 미치는 영향을 보여주고 있다. 발포알루미늄의 대류열전달 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 Nusselt 수 \overline{Nu}

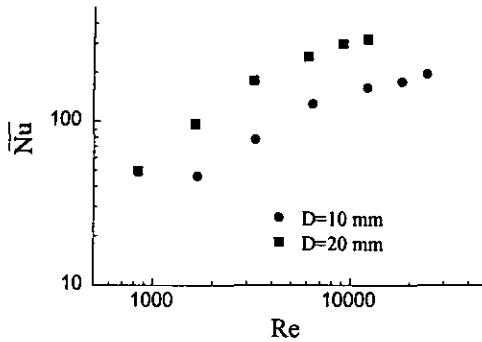


Fig. 7 Effect of the nozzle diameter on the Nusselt number of the foam block ($\beta=40$ PPI), $H=30$ mm.

가 증가함을 볼 수 있다. 그러나 동일한 Re수에서는 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 모멘텀 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.

Fig. 7은 충돌제트 노즐의 직경(D)의 변화에 따른 발포알루미늄 방열기의 열전달 특성의 변화를 보이고 있다. 노즐의 직경이 큰 경우의 \overline{Nu} 값이 작은 노즐보다 크게 나타나고 있다. 그러나, 열원의 표면온도의 관점에서 살펴보면, 동일한 유량이 공급되는 경우 작은 노즐에서의 열원 표면온도가 큰 노즐의 경우보다 더 낮게 나타난다. 이것은 동일한 유량이 공급되는 경우 제한된 크기의 열원의 냉각에 있어서는 유속이 빠른 작은 노즐이 보다 효과적임을 의미한다.

본 연구에서 사용된 발포알루미늄의 열전달 특성을 실제 전자장비의 냉각에 사용되는 일반 방열기와 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 특성 비교에 사용한 방열기는 Fig. 3(b)에 나타난 핀 형태의 방열기로 현용 고성능 PC의 CPU에 장착되는 것이다. 정확한 특성비교를 위해 베이스 판의 두께와 전채높이를 발포알루미늄 블록과 같게 가공

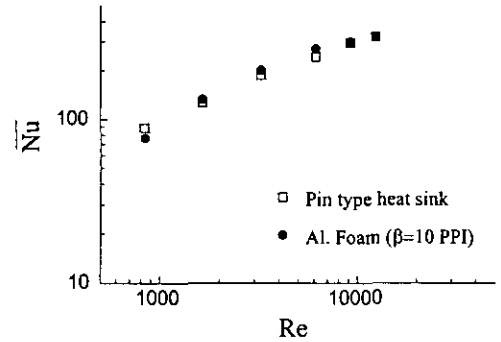


Fig. 8 Comparison of the Nusselt numbers of the foam block with those of the conventional heat sink, $D=20$ mm and $H/D=1.5$.

하였다. 단위부피당 표면적 비는 약 570 m^{-1} , 핀의 단면적은 $1.8 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ 이며 다공도는 약 0.77이다. 평균 Nusselt 수 \overline{Nu} 를 비교한 결과, $Re > 10000$ 인 경우 10 PPI의 발포알루미늄이 일반 방열기보다 조금 더 큰 \overline{Nu} 값을 보이고 있어 열전달 측면에서 우수함을 알 수 있다. 또한 경제적인 측면에서도 각각의 다공도가 0.92와 0.77로 발포알루미늄의 무게가 일반 방열기의 1/3 수준으로 상당한 경량화가 가능함을 알 수 있다.

4. 결 론

열원 위의 놓인 발포알루미늄 방열기에 충돌공기체가 수직으로 충돌하는 경우의 열전달 특성을 실험을 통해 고찰하였다.

다공도가 일정한 경우 표면적이 작은 10 PPI의 발포알루미늄이 표면적이 큰 40 PPI의 발포알루미늄보다 유동저항의 감소로 인한 유동의 모멘텀 강화로 열전달이 보다 촉진되었다. 또한 노즐과 열원사이의 거리가 변화하더라도 열원에 도달하는 충돌제트의 유량이 일정한 영역에서는 평균 Nusselt 수도 거의 일정하게 유지되었다. 동일한 유량이 공급될 경우 작은 직경의 노즐이 열원의 냉각에 보다 효과적이었다. 발포알루미늄 방열기는 기존의 방열기와 비교하여 냉각성능은 거의 동일한 반면 무게는 1/3 정도로 재료비 절감측면에서 훨씬 경제적이며 방열장치의 경량화가 가능할 것이다.

후 기

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

참고문헌

- Hollworth, B. R. and Durbin, M., 1989, Impingement cooling of electronics, *Natn. Heat Transfer Conf., HTD-Vol. 111*, pp. 89-96.
- Martin, H., 1977, Heat and mass transfer between impinging gas jet and solid surface, *Advances in Heat Transfer*, Vol. 13, pp. 1-60.
- Viskanta, R., 1993, Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets, *Exp. Thermal and Fluid Sci.*, Vol. 6, pp. 111-134.
- 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.
- Webb, R. L., 1994, *Principles of Enhanced Heat Transfer*, John Wiley & Sons, Inc.
- 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.
- 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, Accepted, *J. of Heat Transfer*.
- Gibson, L. J. and Ashby, M. F., 1997, *Cellular Solids*, Cambridge University Press, Cambridge.
- 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.
- Paek, J. W., Kim, S. Y. and Kang, B. H., 2000, Heat transfer from an aluminum foam heat sink for electronics cooling, *Proceedings of the 4th JSME-KSME Thermal engineering Conf.*, Kobe, Japan, pp. 635(2)-640(2).
- 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.
- ERG Duocel aluminum foam catalog, 1995, Energy Research and Generation Inc., Oakland, CA.
- Figliola, R. S. and Beasley, D. E., 1995, *Theory and Design for Mechanical Measurements*, John Wiley and Sons, New York.