

균일한 열유속을 갖는 가열된 평판에 부착된 발포알루미늄에 대한 원형 충돌제트의 열유동 특성

한영희 · 이계복[†] · 이충구

충북대학교 기계공학부

(2009년 2월 17일 접수, 2009년 6월 16일 수정, 2009년 6월 16일 채택)

Heat Flow of Round Jet Impinging Aluminum Foam Mounted on the Heated Plate with Constant Heat Flux

Young Hee Han, Kye Bock Lee[†], Chung Gu Lee

School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University

(Received 17 February 2009, Revised 16 June 2009, Accepted 16 June 2009)

요 약

균일한 열유속을 갖는 가열된 평판에 부착된 발포 알루미늄에 대한 충돌제트의 열유동 특성에 대한 실험적 연구가 수행되었다. 열전달 특성에 대한 기공도, 다공성 물질의 두께, Reynolds 수의 영향이 고찰되었다. 실험결과 가열평판에 부착된 발포 알루미늄에 의해 열전달의 증가를 얻을 수 있었고 다공성 물질의 삽입에 의한 열전달 증가는 열전달 표면적의 증가와 압력 손실에 의한 운동량 감소에 의해 영향을 받는 것을 확인하였다.

주요어 : 기공도, 충돌제트, 열전달 면적, 압력구배

Abstract— An experimental study of jet impingement on aluminum foam mounted on the surface with constant heat flux is conducted with the presentation of the heat transfer rate measured when jet impinges normally to a flat plate. Effects of pore density, foam thickness and Reynolds number on the heat transfer are analyzed. Experimental results show that the significant enhancement in Nu is obtained when the aluminum foam is mounted on the heated plate and that the increase in the heat transfer due to the porous material insertion is dominated by both the increase in the heat transfer area and the decrease in the momentum flux resulted from the pressure drop.

Key words : Pore density, Impinging jet, Heat transfer area, Pressure gradient

1. 서 론

근래 들어 화석연료의 고갈로 인한 에너지난이 예견되어 왔고, 급기야 지난해부터 시작된 고유가 행진은 연일 최고가를 기록하면서 그 영향은 생필품 가격에까지 막대한 영향을 끼치고 있어 날로 위기감이 고조되고 있으며,

가속되어 온 기술개발로 인한 컴퓨터의 고집적화로(Very Large Scale Integrated chip)와 미소기전 집적계통(Micro-Electro-Mechanical Systems)의 발전에 따른 초소형 기계에 대한 냉각 기술의 필요성은 기존에 개발된 열전달 방법의 개선 방안과 새로운 열전달 촉진기술에 대한 연구를 필요로 하고 있다. 최첨단 전자 장비들의 고집적화와 고성능화에 기인한 기기 내 발열은 장비의 운용이나 안정성 면에서 뿐만이 아니라, 효율적인 면에서 커다란 문제를 일으킬 수 있어 여러 각도에서 냉각을 위한 방안이 도입 되고 있다. 현재 범용 되는 일반적인 대류 열전

[†]To whom correspondence should be addressed
410 Sungbongro, Heungdukgu, Cheongju,
Chungbuk, South Korea, 361-763
E-mail : kblee@chungbuk.ac.kr

달 방법은 방열 기능에 한계를 보임에 따라 대안으로 층돌공기제트의 도입이 적극 연구되고 있다^(1,2,3). 층돌공기제트는 층돌면에서 국소적으로 높은 열 및 물질 전달 효과를 가져 올 뿐 아니라, 설치의 간편성과 더불어 냉각 또는 가열 하고자 하는 위치의 조절이 용이하므로 산업 전반에 걸쳐 많은 이용과 연구가 진행 되고 있으며 최근 들어 다양한 형태의 핀(fin)을 이용한 전열 면적 증가에 따른 열전달 효과들이 연구 되고 있는 바, 이와 같이 확장되어진 전열 표면에 의한 대류 열전달 성능의 향상을 위해 다공성 매체를 통한 열전달 촉진 기술이 연구되고 있다. 개포형 발포금속(open cell metal foam)은 금속 재료 내부에 수많은 기포를 가진 다공질(Porous) 금속으로, 기체나 유체의 통과가 용이하며, 구조학적으로 완전 등방성(isotropic)이므로 안정한 구조를 가진다. 뿐만 아니라, 기계적으로는 구현할 수 없는 표면적 (surface area) 을 가지고 있어 단위 체적 당 표면적비(S/V)가 $790 \sim 2740 (m^2/m^3)$ 에 달해 극도로 크다. 이러한 이유로, 개포형 발포금속을 열교환기에 응용한다면 열전달 면적을 확대시키고 동시에 복잡한 유로 형성에 따른 유동 교란으로 열전달계수를 크게 증가 시킬 수 있을 것으로 기대를 모아 많은 연구가 진행되고 있다. 또한, 높은 다공도로 ($\epsilon=90 \sim 95\%$) 초경량을 보이므로 기존의 fin 가공에 의한 것 보다 향상된 열전달 매체로 활용 할 수 있다.

다공질 금속 내의 유체 흐름은 변칙적이고 혼란스러운 구불구불한 통로를 통해 움직인다. 이와 같은 유동은 경계층의 결여, 재순환 그리고 난기류와 같은 복잡한 효과를 포함하게 된다. Hwang 등⁽⁴⁾과 Lage 등⁽⁵⁾의 연구자들은 발포 금속(metal foam) 구조의 기하학적 복잡함이 다공질 내부의 전달방정식(transport equation)의 정확한 해석을 방해한다고 지적 하였다. 다공질 금속(porous metal)을 통한 열전달 효율의 증가를 위해서는 유체와 다공질 금속 사이에 열전달이 이루어지기 위해 온도차는 필연적이며, 기존의 거시적 관점에서 열적평형(local thermal equilibrium)으로는 해석에 어려움이 있으므로 새로운 해석 방법으로서의 접근이 불가피하다^(6,7).

층돌제트와 다공질 물질의 전열촉진 특성을 활용하여 보다 높은 방열 성능을 얻기 위한 연구도 활발히 진행되고 있는 바, 본 연구에서는 관성력의 영향을 고려한 non-Darcy flow를 주 대상으로 등열유속(constant heat flux)을 내는 열원(heater) 위에 다공도(porosity) $90 \sim 94\%$ 의 알루미늄 발포금속(Al-porous metal) 방열기를 부착하고 층돌공기제트를 수직으로 작용할 경우의 다공질 금속 방열기의 대류 열전달 특성을 실험적으로 연구하였다. Heat sink가 부착되지 않은 상태에서의 열전달 특성과 비교하고, 다공질 금속의 두께(t) 변화와 기공밀도(β)의 변화에

따른 열전달 특성을 특성길이 (L ; S/V 의 역수)로 표현된 Re_L 수와 반경방향의 위치에 따라 관찰하였다.

II. 실험 장치 및 방법

본 연구를 위해 Fig. 1과 같이 실험 장치를 구성하였다. 방열기에 수직으로 작용하는 층돌제트는 실내공기를 풍동(wind tunnel)으로 송풍시켜 노즐에서 원하는 속도의 제트를 만들 수 있도록 하였다. 본 연구에 사용된 송풍기는 2.2 kW의 속도 제어용 모터에 연결된 단상 축류 송풍기로 풍압은 35 mmH₂O, 풍량은 94m³/min의 성능을 갖으며 0~15000 rpm의 범위에서 정확도 1% 이내로 회전한다. 덕트의 내부에는 곧고 균일한 제트를 만들어 주는 honey comb을 설치하였고 부식 방지를 위해 알루미늄으로 만들어져 있다. 유체유동을 균일하게 하고 박리를 방지하기 위해서 축소 노즐을 설치하였다. 유동의 손실과 동하중을 줄여주면서 유동을 가속화 시켜주는 기능도 갖는다. 노즐의 형태는 Tomas Morel의 설계이론에 따라 제작되었으며 입구 지름이 300 mm 인 것을 출구지름을 50 mm로 축소 시켰다. 노즐 출구 속도는 마이크로 마노미터(Bexhill, FCO12)를 사용하여 보정하였다. 열원과 다공질 금속 방열기가 설치되어 있는 시험부는 40×40×10(mm)의 발포금속을 재질이 같은 1mm의 알루미늄판(Aluminum alloy 6101) 위에 열전도성 접착제를 균일하게 도포하여 접합하였다. 등열유속 조건을 위해 약 0.02 mm의 스테인리스박판 히터를 단열성과 내열성을 고려

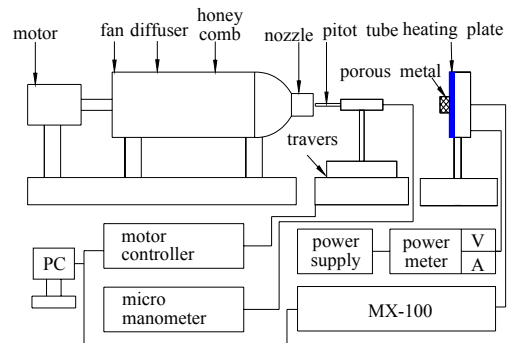


Fig. 1. Experimental apparatus

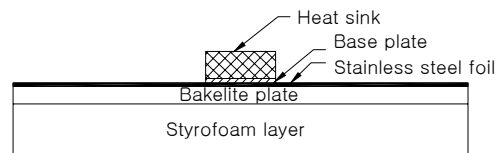


Fig. 2. Heat sink

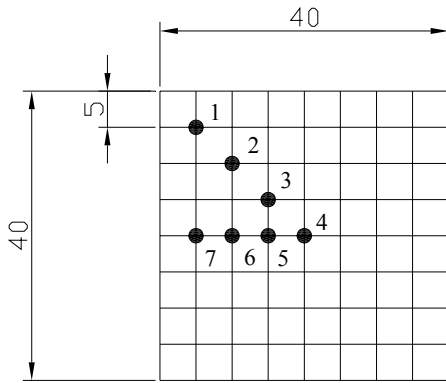


Fig. 3. Thermocouple position

Table 1. Particulars of the aluminum foam

	ϵ	$\beta(\text{ppi})$	$s/v(m^{-1})$	Heat sink height (t: mm)
Foam 1	0.94	10	500	10
Foam 2	0.94	10	1700	20
Foam 3	0.94	20	500	10
Foam 4	0.94	20	1700	20

한 MC나일론(bakelite) 위에 고온에서 내열성이 강한 양면접착테이프를 이용하여 부착하였고 MC나일론 뒷면은 30mm의 스티로폼으로 단열하였다. 히터의 표면온도는 T-type 열전대를 MC나일론 판에 직경 1mm의 드릴 구멍을 내어 심었으며, 이 열전대는 채널온도기록장치(MX-100)에 연결하여 여러 위치의 온도가 동시에 기록될 수 있도록 하였다. 필름 히터 양 끝단은 전원 공급 장치(Slidac Voltage Regulator 2KW)에 연결하여 저 전압 고 전류를 공급하도록 하고, 공급 전원의 전류와 히터의 전압강하를 측정하기 위해 디지털 전류계와 디지털 전압계를 연결하였다.

Fig. 3은 필름 히터 뒷면에 심은 T-type 열전대의 위치를 나타낸다. 처음 15개의 열전대를 심어 시험적으로 온도를 측정한 결과 대칭적인 온도분포를 나타냄에 따라 7개의 열전대로도 충분한 것으로 증명되어 그림과 같이 구성하였다. 본 실험에서 사용된 다공질 금속의 자세한 내용은 Table 1과 같다.

III. 실험 결과 및 고찰

전원 공급 장치의 디지털 전류계와 전압계를 통해 단위 면적 당 열유속(q)을 계산하였다.

Table 2. Particulars of the heat sinks

β (ppi)	$s/v (m^{-1})$	$L(1/s/v)$ (m)	Re_L			
			5m/s	10m/s	15m/s	20m/s
10	500	1/500	667	1333	2000	2667
20	1700	1/1700	196	392	588	784

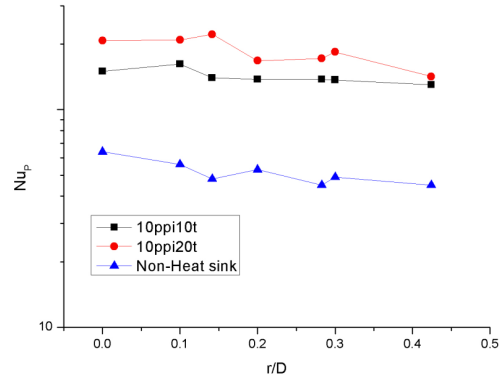


Fig. 4. Nusselt number at different radial location ($Re=16,700$)

$$q = \frac{1}{A} \times E \times I = \frac{1}{A} \times I^2 \times R [W/m^2] \quad (1)$$

여기서 E는 필름 히터 전체의 전압강하이고 I는 전류, R은 저항을 나타내며, 필름 히터 표면의 대류열전달계수는 다음 식에 의해 정의 되었다.

$$h = \frac{q}{(T_w - T_\infty)} [W/m^2K] \quad (2)$$

여기서 q 는 단위면적당 열유속, h 는 대류열전달계수, T_w 는 열원표면 온도 T_∞ 는 공기의 온도를 나타낸다.

발포알루미늄의 대류열전달 특성을 고찰하기 위해 Nusselt 수를 다음 식에 의해 산정 하였다.

$$Nu = \frac{hD}{\lambda} \quad (3)$$

여기서 λ 는 공기의 열전도율($W/m/K$) 이고, D는 노즐 지름이다.

본 연구에서는 특성길이에 따른 열전달 특성을 살펴본 바, 제트의 노즐 출구 속도와 표면적비에 따른 기공밀도(β)별 특성길이(L)와 Reynolds수는 Table 2와 같다

Fig. 4는 자연대류 열전달에 의한 열전달 특성과 발포알루미늄을 부착한 경우의 열전달 특성을 비교한 결과이

다. 발포알루미늄을 부착한 경우 Nusselt 수가 모든 영역에서 높게 나타나며 최대 약 300 % 정도까지 증가하는 것으로 측정되었다.

발포알루미늄은 구조상 높은 유동저항에 의해 압력손실이 크기 때문에 유체의 운동량이 감소하게 된다. 따라서 발포알루미늄을 장착하게 되면 열전달 특성은 표면적의 증가에 의한 효과와 운동량의 감소차이에 의해 영향을 받는다. 이 두 가지 효과는 서로 상쇄되는 방향으로 작용하므로 상대적 효과 차이에 의해 열전달 특성이 결정되게 된다.

원형노즐로부터 다공성 물질이 부착된 가열판에 분사되는 축대칭 층돌제트 non-Darcy 유동의 압력강하는 다음 식으로 표현된다⁽⁸⁾.

$$-\frac{dp}{dx} = \frac{\mu_f}{K}u + \frac{C_E}{\sqrt{K}}\rho_f u^2 \quad (4)$$

여기서 K 와 C_E 는 투과율과 Ergun 상수이다.

이 식을 사용하여 Hamaguchi 등⁽⁹⁾은 다음과 같은 압력손실에 대한 상관식을 제안하였다.

$$-\frac{dp}{dx} = A\frac{\mu_f u_D}{d_p^2} + B\frac{\rho_f u_D^2}{d_p} \quad (5)$$

여기서 A와 B는 상수이고, u_D 와 d_p 는 기공에서의 속도, 기공의 특성길이를 나타낸다.

Table 3은 본 연구에서 사용된 다공성 물질에 대한 각 유동조건에서의 압력 손실을 식 (5)를 이용하여 구한 결과이다. 다공성 물질에 대한 지금까지의 연구결과에 의하면 열교환기의 최적 조건을 위해서 공기 측 압력손실은 10^4 Pa/m 이하로 제한하고 있다⁽¹⁰⁾. Table 3으로부터 20ppi의 경우 압력손실이 제한값을 초과하는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 $Re=16,700$ (노즐출구속도, $V=5$ m/s) 조건에서 10 ppi와 20 ppi의 발포알루미늄을 장착하였을 때의 열전달 특성을 나타낸다. r 은 가열판의 중심인 정체점으로부터 반경방향을 나타내고 D 는 노즐 출구의 직경이다. 발포 알루미늄의 두께가 10 mm(10t)인 경우 속도가 큰 중심부에서는 전열면적이 증가한 20 ppi가 큰 열전달을 나타내고 속도가 작은 영역에서는 전열면적이 작은 10 ppi가 더 큰 열전달을 나타내고 있다. 이것은 속도가 큰 영역에서는 운동량의 증가량보다는 전열면적의 증가가 더 중요한 것을 보여준다. 반면에 속도가 작은 영역에서는 전열면적의 증가보다는 운동량의 증가가 더 중요한 상반되는 경향을 보여준다. 또한 Table 3에 나타난 바와 같이 두께가 20 mm인 경우, 압력손실이 10^4 Pa/m을 초

Table 3. Nusselt number and pressure gradient for different pore density

β (ppi)	s/v (m^{-1})	$d_p(1/s/v)$ (m)	Nu		$\Delta p/\Delta x$	
			10t	20t	10t	20t
10	500	0.002	150	208	4168	4168
20	1700	0.00058	187	129	16285	16285

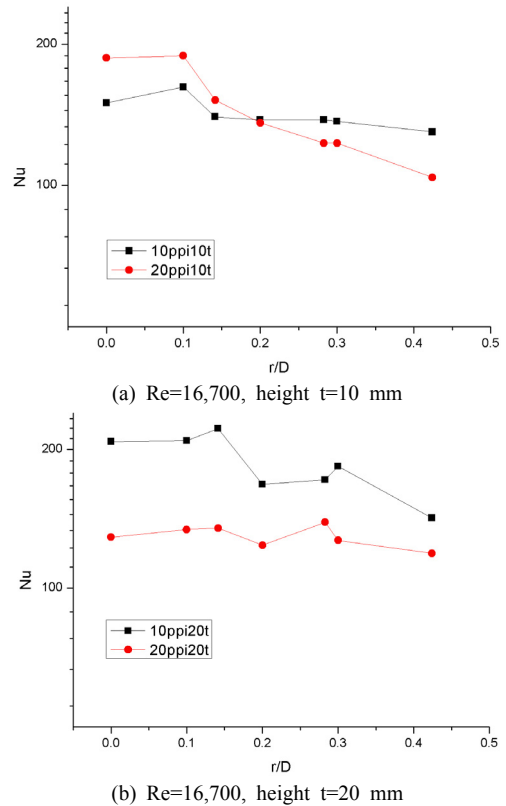


Fig. 5. Nusselt number at different radial location with the effect of pore density ratio

과하므로 운동량의 감소가 전열면적의 증가보다 더 큰 영향을 미치는 것을 Fig. 5(b)에서 알 수 있다.

발포알루미늄의 두께의 감소는 압력부하의 감소를 의미하므로 통과운동량의 증가를 의미한다.

두께가 감소하면 발포알루미늄의 전열면적은 선형적으로 감소하지만 발포알루미늄에 의한 유동저항이 감소하므로 오히려 열전달이 증가할 수 있다. Fig. 6은 같은 기공도에서 발포알루미늄의 두께에 따른 열전달 특성을 나타낸다. 10 ppi의 경우 두께가 10 mm에서 20 mm로 증가한 경우 모든 영역에서 열전달이 증가하는 것을 보여준다. Table 3에서 10 ppi의 경우 압력손실이 10^4 Pa/m

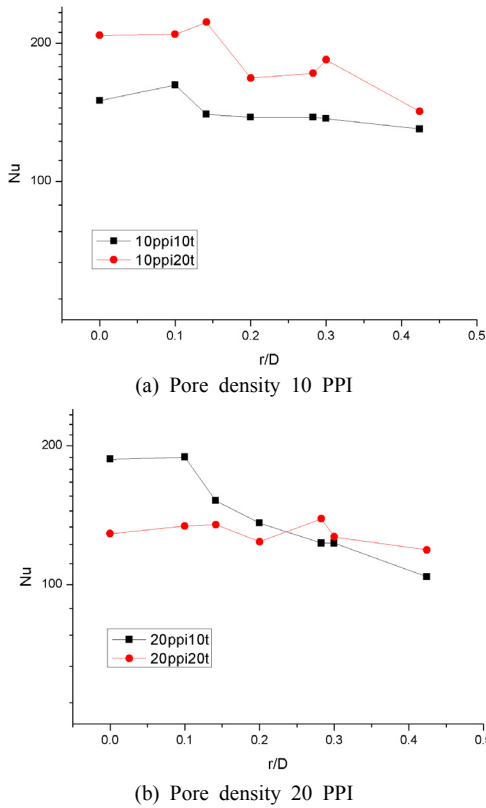


Fig. 6. Nusselt number at different radial location with the effect of the thickness

보다 작기 때문에 운동량의 변화가 전열면적의 변화보다 영향이 작은 것을 보여준다. 그러나 20 ppi의 경우는 두께가 증가하여도 열전달이 감소하는 영역(압력손실이 10^4 Pa/m을 초과하는 영역)이 존재한다. 즉 두께가 증가하여 전열면적이 증가한 효과가 유동저항의 증가로 인한 운동량의 감소 효과에 의한 열전달 감소 효과보다 작기 때문에 열전달이 오히려 감소한 것으로 판단된다.

Fig. 7은 점 1과 4에서 국부 Nusselt 수의 Reynolds 수에 따른 변화를 나타낸다. 모든 조건에서 Reynolds 수가 증가하면 Nusselt 수가 증가하는 것을 보여준다. 전열면적이 동일한 경우에는 속도의 증가에 따른 운동량 증가가 열전달을 촉진시킨다. 그러나 Reynolds수가 동일한 경우 즉, 속도가 같은 경우 기공도가 커지거나 발포알루미늄의 두께가 증가하면 전열면적은 증가하지만 압력부하의 증가로 운동량의 감소를 일으킬 수 있으므로 열전달이 오히려 감소할 수 있음을 보여준다.

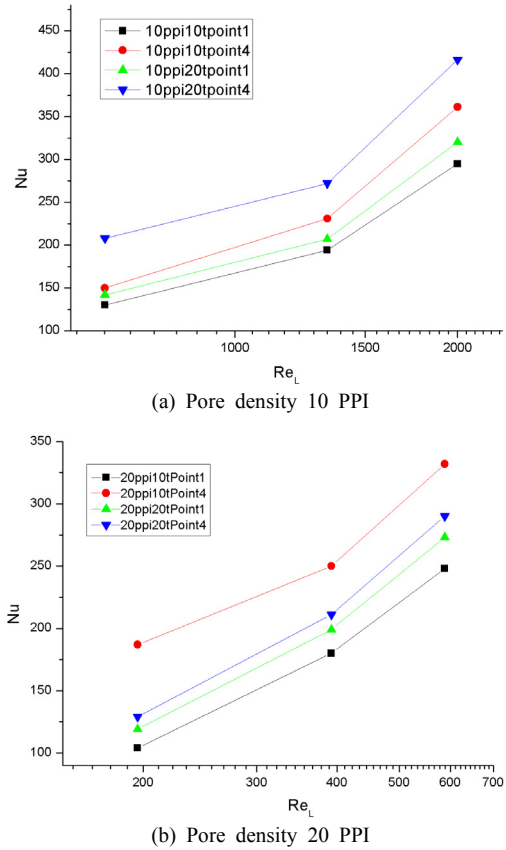


Fig. 7. Nusselt number with the effect of Reynolds number

IV. 결 론

발포알루미늄이 부착된 평판에 대한 충돌제트에서 실험적 연구를 수행하여 기공도와 두께에 따른 열전달 특성을 분석하였다. 발포알루미늄을 부착한 경우 Nusselt 수가 최대 약 300% 정도까지 증가하는 것으로 나타났다. 발포알루미늄은 구조상 높은 유동저항에 의해 압력손실이 크기 때문에 통과하는 유체의 운동량이 감소하게 된다. 따라서 발포알루미늄을 장착하게 되면 열전달 특성은 표면적의 증가에 의한 효과와 통과 운동량의 감소차이에 의해 영향을 받는다. 이 두 가지 효과는 서로 상쇄되는 방향으로 작용하므로 상대적 효과 차이에 의해 열전달 특성이 결정되게 된다. 실험 결과 유동장에서 압력구배의 크기가 10,000이상인 경우, 열전달 면적의 증가에 의한 영향보다는 압력손실에 의한 운동량 감소의 영향이 더 큰 것으로 나타났다. 즉, 기공밀도 20 ppi의 경우, 두께를 증가시키면 압력손실에 의한 운동량 감소로 인해 오히려 열전달이 떨어지는 것을 보여준다. 그러나

10 ppi의 경우는, 두께의 증가가 전열면적의 증가 효과로 열전달을 향상시킨다. 따라서 발포알루미늄을 사용하는 경우, 압력부하에 의한 운동량 감소 효과와 전열면적의 크기 증가에 따른 효과의 상대적 크기에 따라 열전달 특성이 결정된다.

후 기

이 논문은 2007학년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

기호설명

A	Film Heat area [m^2]
D	노즐 지름 [m]
E	전압강하(Voltage drop)
h	대류 열전달 계수(Heat transfer coefficient) [W/m^2K]
I	전류(Current of circuit)
L	$1/(S/V)$ [m]
Nu	Nusselt 수, 식(3)
q	열유속 [W/m^2]
Re_L	Reynolds 수, UL/ν
Re	Reynolds 수, UD/ν
S/V	단위부피당 표면적비 [m^{-1}]
t	방열기 높이 [m]
T_w	열원표면온도 [K]
T_∞	공기온도 [K]
U	속도 [m/s^2]
β	기공밀도(Pore Per Inch) [PPI]
ϵ	다공도(porosity)
λ	공기의 열전도도(Thermal conductivity of air) [$W/m K$]

참고문헌

1. Khan Ali, M. N., Hirata, M., Kasagi, N., Nishiwaki, N., "Heat Transfer Augmentation in an Axisymmetric Impinging Jet", Seventh Int. Heat Transfer Conf., 363-368, (1982).
2. Ichimiya, K., "Heat Transfer and Flow Characteristics of an Oblique Turbulent Impinging Jet Within Confined Walls", ASME J. Heat Transfer, 117, 316-322. (1995).
3. Lee, D. H., Chung, Y. S., Kim, M. G., "Technical Note Turbulent Heat Transfer from a Convex Hemispherical Surface to a Round Impinging Jet", Int. J. of Heat and Mass Transfer, 42, 1147-1156, (1999).
4. Hwang, J. J., Hwang, G. J., Yeh, R. H., Chao C. H., "Measurement of Interstitial Convective Heat Transfer and Frictional Drag for Flow Across Metal Foams", Journal of Heat Transfer, 124, 120-129, (2002).
5. Lage, J. L., Antohe, B. V., Nield, J. A., "Two Types of Nonlinear Pressure-drop versus Flow-rate Relation Observed for Saturated Porous Media", Journal of Fluids Engineering, 119, 700-706, (1997).
6. Vafai, K. and Sozen, M., "Analysis of Energy and Momentum Transport for Fluid Flow Through a Porous Bed", ASME Journal of Heat Transfer, 112, 690-699, (1990).
7. Amiri, A., Vafai, K., Kuzay, T., "Effects of Boundary Conditions on Non-Darcian Heat Transfer through Porous Media and Experimental Comparisons", Numerical Heat Transfer Part A, 27, 651-664, (1995).
8. Kaviany, M. Principles of heat transfer in porous media, Springer, 48-60, 1995.
9. Hamaguchi, K., Takahashi, S., Miyabe, H., "Pressure drop and thermal performance of regenerator matrix", Trans. JSME(B), 49, 1991-1999, (1983).
10. 이대영, 진재식, 강병하 "발포금속을 삼입한 밀집형 열교환기의 최적설계", 설비공학 논문집, 제13권 제7호, 612-620, (2001).