

## 다공성매질을 삽입한 수평채널의 열전달 및 압력강하 특성

손영석† · 신지영\* · 조영일\*\*

(원고접수일 : 2008년 12월 5일, 원고수정일 : 2009년 3월 18일, 심사완료일 : 2009년 3월 23일)

### Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of a Horizontal Channel Filled with Porous Media

Young-Seok Son† · Jee-Young Shin\* and Young-Il Cho\*\*

**Abstract :** Porous media have especially large surface area per volume, which contain complex fluid passage. If porous media can be applied to cool a CPU or an electronic device with large heat dissipation, it could result in heat transfer enhancement due to the enlargement of the heat transfer area and the flow disturbance. This study is aimed to identify the heat transfer and pressure drop characteristics of high-porosity metal foams in a horizontal channel. Experiment is performed with the various heat flux, velocity and pore density conditions. Permeabilities, which is deduced from Non-Darcy flow model, become lower with increasing pore density. Nusselt number also decreases with higher pore density. High pore density with same porosity case shows higher pressure loss due to the increase of surface area per unit volume. The fiction factor decreases rapidly with increase of Reynolds number in Darcy flow region. However, it converges to a constant value of the Ergun coefficient in Non-Darcy flow region.

**Key words :** Metal foam(발포금속), Cooling performance(냉각성능), Porosity(다공도), Permeability(투과율), Pore density(기공밀도), Friction factor(마찰인자)

#### 기호설명

Bi	: Biot 수, $\frac{hH}{k_{s,eff}}$	$K$	: 투과율 [ $m^2$ ]
$C_E$	: Ergun 계수	$k$	: 열전도율 [ $W/mK$ ]
$f$	: 마찰인자	$k_{s,eff}$	: 고체의 유효열전도율 [ $W/mK$ ]
$H$	: 채널 높이 [ $m$ ]	Nu	: Nusselt 수, $\frac{hH}{k_f}$
$h$	: 채널 열전달계수 [ $W/m^2K$ ]	$P$	: 압력 [ $Pa$ ]
		PPI	: 기공밀도 (pores per inch)
		$Q$	: 전열판의 전체 열전달량 [ $W$ ]

† 교신저자(동의대학교 기계공학과, E-mail:ysson@deu.ac.kr, Tel: 051)890-1648)

\* 동의대학교 기계공학과

\*\* 동의대학교 대학원 기계공학과

- $q_w$  : 벽면으로부터의 열유속 [W/m<sup>2</sup>]
- $Re_k$  : 투과율 기준 Reynolds 수,  $\frac{\rho u \sqrt{K}}{\mu}$
- $T$  : 온도 [K]
- $u$  :  $x$  방향의 속도 [m/s]
- $W$  : 채널의 폭 [m]
- $x$  : 수평방향 좌표 [m]

그리스 문자

- $\epsilon$  : 다공도
- $\mu$  : 점성계수, [Pa · s]
- $\rho$  : 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]

하첨자

- $f$  : 유체
- $i$  : 채널 입구
- $o$  : 채널 출구
- $s$  : 고체
- $w$  : 벽면

## 1. 서 론

컴퓨터와 IT 관련기기 및 소형 전자제품 등 현대 생활에 필수적인 모든 요소는 전자장비를 필요로 하며, 최근 정보통신 산업의 발달과 더불어 소형화 및 자동화가 요구되면서 전자장비는 점차 영역을 넓혀가고 있다. 소형화 및 고집적화는 고성능화, 고출력화 되고 있으며 제품의 단위면적당 발열량이 증가하고 있다. 이는 전자장비 내부에 탑재된 열을 적절하게 방출하지 못하는 경우 제품의 성능을 저하시키거나 고장의 원인이 되어 제품의 내구성 및 신뢰성에 큰 영향을 준다. 이러한 이유로 전자통신 기기 및 부품의 냉각문제는 급격히 중요하게 되었으며 동시에 새로운 냉각기술의 개발이 필요하게 되었다<sup>[1],[2]</sup>. 다공성매질은 부피에 대한 표면적의 비가 매우 크고 불규칙한 유로를 형성하므로 열전달 면적이 증가하고 유동교란이 증대되는 효과를 가져와 상당한 열전달 증가를 가져올 것으로 판단할 수 있다.

Beavers와 Sparrow<sup>[3]</sup>는 Non-Darcy 유동에서 다공성매질의 일반 상관식을 유도했고 다공성매질의 종류에 따라 관성항의 계수가 다르다는 것을 보였다. 또한 Hunt와 Tien<sup>[4]</sup>은 물을 이용한 다공성매질 내에서의 강제대류를 연구함으로써, 다공성매질이 채워진 채널 내에서의 열전달 및 유체유동에 대한 투과율의 영향을 해석적 및 실험적 방법으로 고찰하였다. Paek et al.<sup>[5]</sup>은 알루미늄 발포금속의 다공도와 투과율 등 형상변화가 유효열전도도와 압력손실 특성에 미치는 영향을 실험을 통해 규명하고 최대의 열전달 특성과 최소의 압력손실 특성을 가지는 발포금속의 형상을 고찰하고 이에 대한 상관식을 제시하였다. Kim et al.<sup>[6]</sup>은 발포 알루미늄이 채워져 있는 채널 내를 공기가 흐를 때 투과율이 작을수록 Nusselt 수가 크게 증가함을 실험을 통해 연구했다. Noh et al.<sup>[7]</sup>은 환형관내에 기공밀도가 다른 두 가지의 발포 알루미늄을 삽입하여 다공성매질을 형성하고, 작동유체로 물을 사용하여 마찰계수와 Nusselt 수를 실험을 통해 측정하여 발포 알루미늄이 없는 경우에 비해 마찰계수는 증가하지만 Nusselt 수에서도 6에서 10배의 증가를 나타냄을 연구했다.

최근 들어 열시스템 유로 내에 다공성매질을 삽입한 몇몇 연구결과가 발표되었다. 그러나 다공성매질 내 유체유동은 복잡한 3차원 형태를 가지므로 극히 이상적인 경우를 제외하고는 해석이 어렵다. 그리고 유동의 압력손실도 고려하여야 하며, 투과율이 매우 작을 경우 압력강하에 의한 손실이 과도하기 때문에 비교적 투과율이 큰 다공성매질에 대한 연구가 주로 이루어지고 있다<sup>[8]</sup>. 또한 몇몇 연구결과에서 발포금속의 재질과 제조방법에 따라 압력강하 및 열전달 특성이 달라지며 셀의 크기와 형태도 불균일하기 때문에 다양한 재료에 대한 연구가 요구되어지고 있다<sup>[9]</sup>. 따라서 발포금속의 다공도와 투과율 등의 형상변화가 열전달 및 압력손실에 미치는 영향에 대한 분석과 실제 냉각시스템에의 적용에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 관성력의 영향을 고려한 Non-Darcy 유동을 주 대상으로 하였으며 다공도( $\epsilon = 0.97$ )가 높은 발포금속(니켈과 구리)을 사용하

여 사각채널 내에 삽입하였고, 작동매체를 공기를 사용하여 유속 및 기공밀도와 열유속을 변화시켰을 때 압력손실과 열전달 특성을 분석하여 냉각성능의 개선방법을 검토하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 주위 공기(25~28℃)는 토출형 팬을 통해 덕트로 유입하게 된다. 시험부 전후의 압력손실을 측정하기 위해 시험부 입·출구에 압력탭을 설치하였고, 덕트를 통과한 유동은 열선유속계를 통과하여 실험장치 밖으로 유출된다. 시험부의 외부 벽면은 두께 25 mm인 단열재를 덮어 주위로의 열손실을 최소화하였다. 유동에 수직한 시험부 단면적은 200×10 mm(수력직경 19.05 mm)로 폭과 높이의 비(W/H)는 20이다. 시험부의 길이는 300 mm 이고, 덕트 전체 길이는 1000 mm이다. 본 실험의 작동조건은 전면유속이 1~5 m/s이며,  $Re_{Dh} = 1032 \sim 5588$ 에 해당한다. 투과율 기준 Reynolds 수( $Re_K$ )는 10.32~101.19의 범위가 된다. 다공성매질의 유동에서 Darcy law를 벗어나는 기준이  $Re_K = 0.2$  부근이므로 Non-Darcy 유동 영역에 해당된다<sup>(10)</sup>. 또한 얇은 기판(base plate)은 열전도율이 우수한 알루미늄( $k = 237$  W/mK)을 사용

하였다. 기판의 두께는 0.1 mm이며, 그 밑면에 박막 가열판(foil heater)을 설치하여 가열하였다. 기판과 박막 가열판 사이의 접촉저항을 최소화하기 위하여 은(silver)성분인 Fujikura Kasei사의 Dotite(silver paste) 접착제를 사용하였다. Fig. 2는 실험에 사용된 발포금속을 나타낸 것이다. 사용한 발포금속은 구리와 니켈로 만든 발포금속으로 단면적은 200×10 mm이고 길이는 300 mm 이다. 높은 다공도( $\epsilon=0.97$ )에 대해 5 PPI, 10 PPI, 20 PPI, 30 PPI, 40 PPI의 기공밀도(pore density)를 가지고 있다.

### 2.2 실험방법

실험을 수행하기 전에 박막 가열판에 일정한 전원을 공급하였을 때 기판에 균일한 열유속이 공급되는가를 확인하기 위한 예비실험을 수행한 결과, 기판 각 부분에서 측정된 최대 온도차는 0.5℃ 이내의 범위로 나타났다. 덕트 내를 통과하는 공기의 유속을 측정하기 위해 열선유속계를 설치하였으며, 전면 평균유속이 1~5 m/s인 경우를 고려하였고 압력을 측정하기 위해 차압기를 설치하였다. 또한 기판의 온도분포를 측정하기 위해 평판 각 열에 횡방향 50 mm 간격으로 3개씩, 유동의 진행방향으로 60 mm 간격으로 4개씩 총 12개의 열전대를 가열판과 기판 사이에 삽입하여 채널 벽면온도를 측정하였다. 또 채널내의 온도를 측정하기 위해서 채

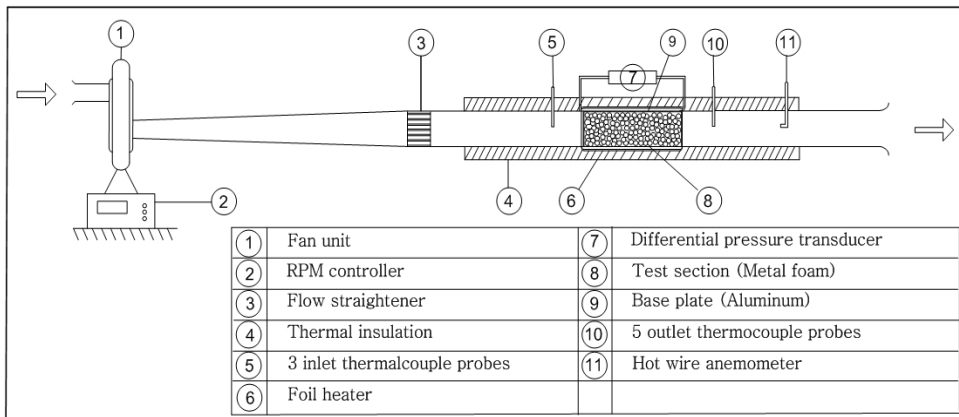


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

널의 입구 측에 3개, 출구 측에 5개, 총 8개의 열전대를 채널의 입구와 출구에 각각 횡방향으로 삽입해서 유체의 입·출구온도를 계측하였으며, 이 온도로부터 유체의 혼합평균온도(bulk temperature)를 결정하였다. 온도계측에 사용한 열전대는 36-게이지(직경 0.127 mm)인 T-형(구리-콘스탄탄) 열전대이다. 실험의 진행과정은 다음과 같다. 모든 실험장치의 전원을 연결하고, 시험부의 가열판에 실험조건에 맞는 전압을 공급한다. 온도가 정상상태에 도달하는 과정을 확인하기 위해 시간변화에 따른 온도변화를 관찰한다. 본 실험에서는 온도변화가 0.15°C/300초 이내일 때를 정상상태에 도달하는 기준으로 정하였다. 실험과정 중 측정변수로는 입구온도, 출구온도, 평판온도, 유속, 압력강하 등이 있다. 본 실험에서의 실험오차를 확인해 보면, 전력계의 오차, 열전대의 오차, 데이터획득장치의 오차를 고려하여 열전달계수의 실험오차를 구하면 벽면온도와 유체온도의 차이가 15°C일 경우 7.0%이고, 60°C일 경우 2.6%로 판단할 수 있다. 속도의 실험오차는 1 m/s일 때 8.0%이고 5 m/s일 때 4.0%이며, 압력의 실험오차는 71.59 Pa일 때 7.6%이고 980.66 Pa일 때 3.1%이다.



Fig. 2 Photographs of the metal foam used in the experiment

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 압력강하 특성

##### 3.1.1 압력강하

채널 내에 발포금속을 설치할 경우 열전달은 증가시킬 수 있지만, 발포금속의 설치에 유동을 방해함으로써 마찰항력과 형상항력이 증가하여 압력강하가 커진다. Fig. 3은 다공도를 0.97로 고정하였을 때 기공밀도의 차이가 발포금속의 압력손실에 미치는 영향을 나타내고 있다. 유속이 증가할수록 압력강하량은 증가하며, 전체 체적에 대한 빈 공간의 체적비인 다공도가 같기 때문에 발포금속 전체의 유효면적은 같지만 기공밀도가 커질수록 압력손실이 증가함을 볼 수 있다. 이는, 발포금속의 단위 부피당 표면적이 증가하기 때문으로 판단되며 Paek et al.<sup>[5]</sup>의 결과와도 일치한다. 이로부터 공기의 유속과 기공밀도가 압력강하에 큰 영향을 주는 주요 인자라고 판단할 수 있다.

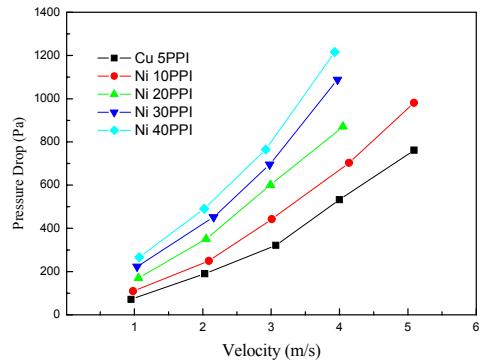


Fig. 3 Effect of pore density on pressure drop at fixed porosity, ε = 0.97

Table 1 Parameters for metal foams

Specimen	1	2	3	4	5
Material	Cu	Ni	Ni	Ni	Ni
Porosity, ε	0.9776	0.9777	0.9706	0.9739	0.9773
PPI (pore density)	5	10	20	30	40
1/Permeability, $1/K \times 10^{-7} m^{-2}$	0.840	1.266	2.087	2.755	3.428
Permeability, $K \times 10^7 m^2$	1.19	0.79	0.48	0.36	0.29
Ergun coefficient, $C_E$	0.0195	0.0193	0.0139	0.0129	0.0107

한편, 다공성매질 내의 유동에서 관성력의 영향을 고려한 Non-Darcy 유동에서 압력강하는 다음 식으로 표현된다<sup>[3]</sup>.

$$-\frac{dP}{dx} = \frac{\mu}{K}u + \frac{C_E}{\sqrt{K}}\rho u^2 \quad (1)$$

이 식은 다음과 같이 변화시킬 수 있다.

$$\frac{1}{\mu u}(-\frac{dP}{dx}) = \frac{1}{K} + \frac{C_E}{\sqrt{K}} \frac{\rho u}{\mu} \quad (2)$$

위 식에서  $(-dP/dx)/\mu u$ 와  $\rho u/\mu$ 는 선형적인 관계를 보인다고 알려져 있다<sup>[7]</sup>. 본 실험 결과도 역시 선형적인 관계를 보이는 것을 확인할 수 있었으며, 최소자승법(least-square method)을 이용하여 투과율과 Ergun 계수의 값을 구하였다. 즉, 직선이 y축과 만나는 점의 값은  $1/K$ 이고 직선의 기울기는  $C_E/\sqrt{K}$ 임을 이용하여 투과율  $K$ 와 Ergun 계수  $C_E$ 를 계산하였으며, 실험에 사용한 5가지 발포금속에 대해 계산된 값을 Table 1에 나타내었다.

### 3.1.2 마찰인자

압력강하를 무차원화한 마찰인자(fiction factor)를 Reynolds 수의 함수로 표시하는데, Beavers와 Sparrow<sup>[3]</sup>는 다음과 같이 투과율을 기준으로 표현하였다.

$$f_K = \frac{1}{Re_K} + C_E \quad (3)$$

식(3)에 따라 Fig. 4에 실험한 5가지 발포금속에 대한 투과율 기준 마찰인자를 투과율 기준 Reynolds 수의 함수로 나타내었다. 타 연구자의 결과와 비교하기 위해서 Beavers와 Sparrow<sup>[3]</sup>, Kim et al.<sup>[6]</sup>와 Noh et al.<sup>[7]</sup>의 결과를 함께 표기하였다. 그리고 저속 유동에서 적용 가능한 Darcy 유동( $C_E=0$ )에 대한 마찰인자도 참고로 함께 표기하였다. 마찰인자는 Reynolds 수가 아주 작은 Darcy 유동에서는 Reynolds 수가 증가함에 따라 급격하게 감소하지만, Non-Darcy 유동 영역에서는 Reynolds 수가 증가함에 따라 일정한

값(Ergun 계수,  $C_E$ )으로 수렴하는 것을 보여준다. 이러한 경향은 발포금속을 실험한 타 실험자의 실험결과와 동일하다. 다만 본 논문의  $f_K-Re_K$ 의 관계는 타 실험자에 비해 마찰인자에 관한 상관식과는 약간의 차이를 보이고 있다. 이것은 타 실험의 Kim et al.과 Noh et al.의 다공도가 각각 0.92와 0.90인데 비해 본 실험에서 사용한 발포금속의 다공도는 0.97로서 높은 다공도를 가지므로, 유체가 유동할 수 있는 영역이 증가하여 마찰인자가 낮게 나오는 것으로 판단된다.

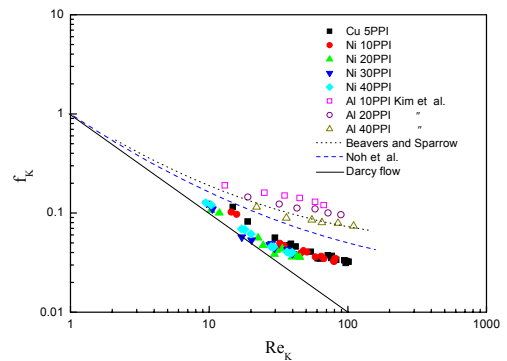


Fig. 4 Relation between friction factor and Reynolds number based on permeability

## 3.2 열전달 특성

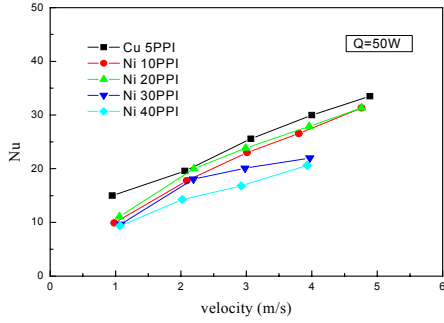
### 3.2.1 Nusselt 수

발포금속이 채널 내의 대류 열전달에 미치는 영향을 평가하기 위해 평균 열전달계수를 살펴보았다. 여기서,  $q_w$ 는 벽면에 공급되는 단위면적당 열전달량,  $\overline{T}_w$ 는 벽면 평균온도,  $\overline{T}_f$ 는 입구 및 출구 유체의 평균온도를 나타내고, 평균 열전달계수로부터 Nusselt 수를 구하였다.

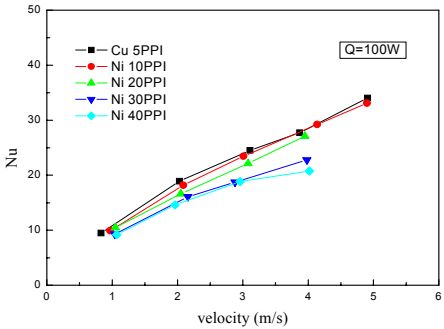
$$h = \frac{q_w}{\overline{T}_w - \overline{T}_f} \quad (4)$$

$$\overline{T}_f = \frac{\overline{T}_{f,i} + \overline{T}_{f,o}}{2} \quad (5)$$

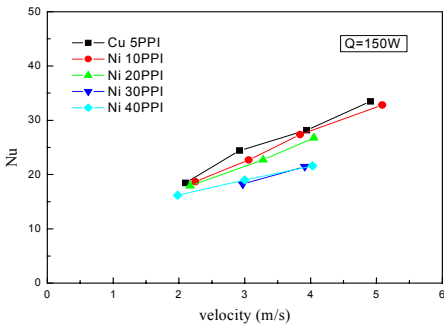
$$Nu = \frac{hH}{k_f} \quad (6)$$



(a)  $Q = 50W$



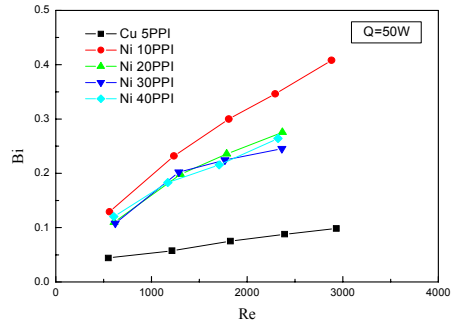
(b)  $Q = 100W$



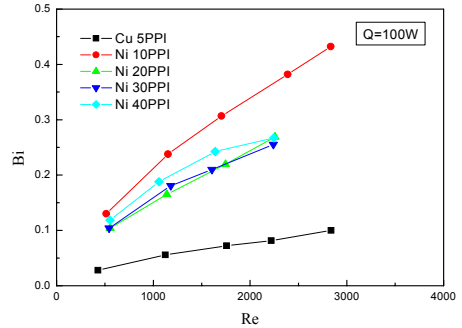
(c)  $Q = 150W$

**Fig. 5** Variation of Nusselt number of metal foams

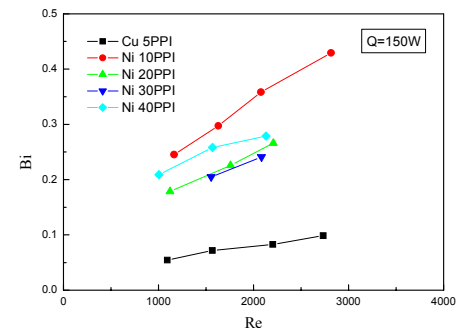
Fig. 5는 공기의 전면유속을 1 ~ 5 m/s로 하고, 가열량과 기공밀도를 변화시켰을 때 대류 열전달 특성을 나타내는 Nusselt 수를 보여준다. 다공도가 동일할 경우 전면 유속이 증가하면 대류 열전달이 증가한다. 또한 기공밀도가 작아질수록 대류 열전달이 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉, 다공도가 큰 영역( $\epsilon = 0.97$ )에서는 기공밀도가 작아지면 투과율이 커지고 이로 인해 유체 내의 확산에 의한 열전달이 활발해지는 것으로 판단된다.



(a)  $Q = 50W$



(b)  $Q = 100W$



(c)  $Q = 150W$

**Fig. 6** Variation of Biot number of metal foams

### 3.2.2 Biot 수

Biot 수는 고체의 전도 열전달율에 대한 유체의 대류열전달율의 비로 생각할 수 있으며, 실험의 결과를 나타내기 위해 무차원수 Biot 수를 다음식과 같이 정의한다.

$$Bi = \frac{hH}{k_{s,eff}} \quad (7)$$

여기서  $k_{s,eff} = (1-\epsilon)k_s$  이다.

Fig. 6은 공기의 전면유속을 1~5 m/s로 하고, 가열량과 기공밀도를 변화시켰을 때 발포금속의 Biot 수를 나타낸 것이다. 공기의 유속이 증가 할 수록 Biot 수는 증가하며, 이것은 유속이 증가함에 따라 다공성매질 내부 유체에서의 열전달이 증가함을 나타낸다. 유속이 증가하면 대류에 의한 확산이 증가하여 이것이 열전달을 향상시키는 역할을 하기 때문이다. 다공도가 동일한 경우 기공밀도가 작아 지면 Biot 수는 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 다공도가 같더라도 기공밀도가 작아지면 투과율이 커져서 전도에 의한 열전달보다 확산에 의한 열전달이 커지기 때문이다. 구리 재질은 고체의 유효열전도율이 니켈보다 상당히 크기 때문에 Biot 수는 니켈 발포금속보다 감소하였다. 즉, 투과율이 클 경우 유체에서의 열전달도 활발하게 일어나지만, 고체의 유효열전도율도 매우 크기 때문에 Biot 수는 니켈 발포금속 보다 작고, 열전도를 통한 열전달이 지배적임을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 높은 다공도를 가진 구리와 니켈 발포금속을 다공성매질로 선정하여 이를 사각 수평 채널에 채우고 작동유체를 공기로 유속, 가열량, 기공밀도를 변화시키면서 발포금속의 열전달 및 압력강하를 고찰하여, 발포금속과 같은 다공성매질의 전자시스템 냉각에의 적용 가능성을 연구하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 다공도가 동일한 경우 기공밀도가 증가할수록 발포금속 단위 부피당 표면적이 증가하여 투과율이 감소하기 때문에 압력손실이 증가함을 볼 수 있다. 또한 채널에서 마찰인자는 Reynolds 수가 아주 작은 Darcy 유동에서는 Reynolds 수가 증가함에 따라 급격하게 감소하지만, Non-Darcy 유동에서는 Reynolds 수가 증가함에 따라 일정한 값으로 수렴한다.

(2) 다공도가 동일한 경우 채널 내 열전달은 유속이 증가할수록 커진다. 또한 기공밀도가 작아질수록 대류 열전달이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 다공도가 동일한 경우 기공밀도가 작아지면 투

과율이 커지게 되고, 고체를 통한 전도의 영향보다 유체 내의 확산의 영향으로 인하여 열전달이 증가한다는 것을 알 수 있다.

(3) 채널 내의 Biot 수는 고체영역과 유체영역에서의 상대적인 열전달 비를 나타내며, Nusselt 수와 같은 경향을 가진다. 그러나 구리의 경우 고체의 유효열전도율이 니켈에 비해 상당히 크기 때문에 Biot 수는 작은 경향을 보인다. 즉, 투과율이 클 경우 유체에서의 열전달도 활발하게 일어나지만, 고체의 유효열전도율의 증가가 더 크기 때문에 Biot 수는 작고, 열전도를 통한 열전달이 지배적임을 알 수 있다.

#### 후 기

이 논문은 2008학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음(과제번호:2008AA155).

#### 참고문헌

- [1] A. D. Kraus and A. Bar-Cohen, *Thermal Analysis and Control of Electronic Equipment*, McGraw Hill, New York, 1983.
- [2] Y. S. Son, J. Y. Shin and S. R. Lee, "Heat transfer characteristics depending on the length of a channel with pin-fin array," *Transactions of the Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea*, Vol. 19, No. 5, pp. 355-363, 2007.
- [3] G. S. Beavers and E. M. Sparrow, "Non-darcy flow through fibrous porous media," *ASME J. Applied Mechanics*, *Transactions of the ASME*, Vol. 36, pp. 711-714, 1969.
- [4] M. L. Hunt and C. L. Tien, "Effects of thermal dispersion on forced convection in fibrous media," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 31, pp. 301-309, 1988.
- [5] J. W. Paek, B. H. Kang, S. Y. Kim

and J. M. Hyun, "Measurement of effective thermal conductivity and permeability on aluminum foam metal," Proceedings of the SAREK '98 Summer Annual Conference, pp. 1464-1469, 1998.

- [6] S. Y. Kim, B. H. Kang and J. H. Kim, "Forced convection from aluminum foam materials in an asymmetrically heated channel," Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 44, pp. 1451-1454, 2001.
- [7] J. S. Noh, Y. H. Han, K. B. Lee, C. G. Lee, "Heat transfer and flow characteristics in an annulus filled with aluminum foam," J. Energy Engineering, Vol. 15, No. 1, pp. 60-66, 2006.
- [8] K. Vafai and S. J. Kim, "Forced convection in a channel filled with a porous medium: An exact solution," ASME J. of Heat Transfer, Vol. 111, pp. 1103-1106, 1989.
- [9] E. Takegoshi, Y. Hirasawa, J. Matsuo and K. Okui, "A study on effective thermal conductivity of porous metals," Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 58, No. 547, pp. 879-884, 1992.
- [10] M. Kaviany, Principles of Heat Transfer in Porous Media, Second edition, Springer-Verlag, New York, 1995.

## 저 자 소 개



### 손영석 (孫永沓)

1960년 5월생. 1983년 부산대학교 기계공학과 졸업(공학사). 1986년 연세대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사). 1994년 미국 The University of Texas at Austin 대학원 기계공학과 졸업(공학박사). 현재 동의대학교 기계공학과 교수.



### 신지영 (申智榮)

1967년 7월생. 1990년 서울대학교 기계공학과 졸업(공학사). 1992년 동대학원 졸업(공학석사). 1996년 동대학원 졸업(공학박사). 현재 동의대학교 기계공학과 부교수.



### 조영일 (曹泳一)

1980년 12월생. 2007년 동의대학교 기계공학과 졸업(공학사). 2009년 동대학원 졸업(공학석사).