

발포 금속을 사용하는 채널의 열전달 특성 실험 및 해석

손 영 석, 신 지 영[†], 조 영 일^{*}

동의대학교 기계공학과, ^{*}한국원자력연구원

Experiment and Analysis on the Heat Transfer Characteristics of a Channel Filled with Metal Foam

Young-Seok Son, Jee-Young Shin[†], Young-Il Cho^{*}

Department of Mechanical Engineering, Dong-Eui University, Busan 614-714, Korea

^{*}KAERI, Daejeon 305-353, Korea

(Received January 8, 2010; revision received April 20, 2010)

ABSTRACT: Porous media containing complex fluid passage have especially large surface area per unit volume. This study is aimed to identify the heat transfer characteristics of high-porosity metal foams in a horizontal channel. Experiment is performed under various heat flux, velocity and pore density. Nusselt number decreases with higher pore density. Metal foams shows higher heat transfer coefficients than pin-fin structure with the same porosity. This is due to the more complex flow passage and larger heat transfer area based on the structure of the metal foams. The analysis on the pin-fin structure may not be suitable to the metal foam structure but should be identified extensively through further study.

Key words: Heat transfer characteristics(열전달 특성), Metal foam(발포 금속), Porosity(다공도), Pore density(기공 밀도)

기 호 설 명

a	: 단위체적당 표면적 비 [1/m]	k	: 열전도율 [W/mK]
C_E	: Ergun 계수	$k_{f, eff}$: 유체의 유효열전도율 [W/mK]
C_p	: 정압비열 [J/kgK]	$k_{s, eff}$: 고체의 유효열전도율 [W/mK]
D_h	: 채널 수력직경 [m], $\frac{4A}{P}$	Nu	: Nusselt 수, $\frac{hH}{k_f}$
H	: 채널 높이 [m]	P	: 압력 [Pa]
h	: 채널 열전달 계수 [W/m ² K]	PPI	: 기공 밀도 (pores per inch)
h_i	: 튜브 열전달 계수 [W/m ² K]	Q	: 전열판의 가열량 [W]
K	: 투과율 [m ²]	q_w	: 벽면으로부터의 열유속 [W/m ²]
		Re_{D_h}	: 수력직경 기준 Reynolds 수, $\frac{\rho u D_h}{\mu}$
		Re_K	: 투과율 기준 Reynolds 수, $\frac{\rho u \sqrt{K}}{\mu}$
		T	: 온도 [K]
		u	: x 방향의 속도 [m/s]

[†] Corresponding author

Tel.: +82-51-890-1650; fax: +82-51-890-2232

E-mail address: jyshin@deu.ac.kr

- x : 수평방향 좌표 [m]
- y : 수직방향 좌표 [m]

그리스 문자

- ϵ : 다공도
- μ : 점성계수 [Pa · s]
- ρ : 밀도 [kg/m^3]

하첨자

- f : 유체
- i : 채널 입구
- o : 채널 출구
- s : 고체

1. 서 론

최근 들어 열교환기 분야에서도 갈수록 심화되는 사용 공간의 제약성으로 인해 단위체적당 전열 면적을 극대화시킨 고밀도, 고효율 열교환기가 관심을 끌고 있다. 또한 설계 기술이 발달함에 따라 최적 설계로 압력 손실을 낮추고 열전달을 극대화시킨 경제적이고 효율적인 최적의 열교환기 시스템 설계에 노력을 기울이고 있는 실정이다.

다공성 매질을 열교환기 내에 삽입할 경우 열전달 면적 확대와 유동 교란에 의한 열전달계수 증가 효과를 동시에 얻을 수 있을 것으로 판단할 수 있다. 다공성 매질은 부피 대 표면적의 비가 매우 크고 불규칙한 유로 구성이 특징이며, 다공성 매질 내 유체 유동은 미세한 다공 구조를 지나면서 복잡한 3차원 형태를 띄게 된다.⁽¹⁾ 그러나 다공성 매질은 극히 이상적인 경우를 제외하고는 그 구조가 매우 복잡하기 때문에, 컴퓨터의 계산능력이 아무리 발전하여도 다공성 매질과 같은 미세구조에 대한 3차원 유동 및 열전달 해석은 현실적으로 불가능하다. 따라서, 주로 단순화된 Darcy 방정식을 이용하여 다공성 매질에서의 유동 및 열전달 특성을 해석하고 있다.⁽²⁾

Beavers and Sparrow⁽³⁾는 Non-Darcy 유동에서 다공성 매질의 상관식을 유도했고, Hunt and Tien⁽⁴⁾은 다공성 매질이 채워진 채널 내에서의 열전달 및 유체 유동에 대한 투과율의 영향을 해석적 및 실험적 방법으로 고찰하였다. 그리고 Paek et al.⁽⁵⁾은 알

루미늄 발포 금속의 다공도와 투과율 등 형상변화가 유효 열전도도와 압력 손실 특성에 미치는 영향을 실험을 통해 규명하였다. Kim et al.⁽⁶⁾은 발포 알루미늄이 채워져 있는 채널 내를 공기가 흐를 때 투과율이 작을수록 Nusselt 수가 크게 증가함을 실험을 통해 연구했다. Noh et al.⁽⁷⁾은 환형관내에 다공도 0.9이상에서 기공 밀도가 다른 두 가지의 발포 알루미늄을 삽입하여 마찰 계수와 Nusselt 수를 실험을 통해 측정하였다. Kuwahara⁽⁸⁾는 소결된 다공성 매질에 대해 Navier-Stokes 방정식을 풀어 직접적인 수치해석을 수행하였다. Shin et al.⁽⁹⁾은 핀-핀 구조물을 다공성 매질로 모사하여 냉각 특성을 해석하고, 핀-핀의 배열 변화가 열전달에 미치는 영향을 고찰하였다.

다공성 매질에 대한 기존의 연구를 살펴보면 적층구를 사용한 실험이 대부분이고 유속이 느린 유동에 집중되어 왔다. 그러나 적층구 충전층과 달리 발포 금속은 형상이 복잡하고 불규칙하며 해석적 접근이 매우 어렵다.

본 연구에서는 높은 다공도를 가진 구리와 니켈 발포 금속을 다공성 매질로 선정하여 이를 사각 수평 채널에 채우고 작동유체를 공기로 하여 유속, 가열량, 기공 밀도를 변화시키면서 발포 금속의 열전달 특성을 고찰하고 핀-핀 구조물로 모사한 해석결과와 비교하여, 발포 금속과 같은 다공성 매질을 전자시스템 냉각에 적용했을 때의 열전달 특성을 연구하고 냉각성능의 개선 방법을 검토하고자 한다.

2. 실험 및 해석

2.1 실험

실험장치의 구성을 Fig. 1에 나타내었다. 시험부 단면적은 2000 mm^2 ($200 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$), 길이는 300 mm 이며, 덕트 전체 길이는 $1,000 \text{ mm}$ 이다. 인버터로 팬의 속도를 조절하여 공기유속을 실험조건에 맞는 속도로 일정하게 유지시키고, 교류전원공급기를 사용하여 채널 벽면을 가열하는 가열판에 일정한 열유속을 공급한다. 열전대, 열선유속계를 데이터 획득장치에 연결하여 시험부의 입·출구 온도 및 채널 벽면온도, 유속 데이터를 획득하고, GPIB 카드를 이용하여 컴퓨터로 데이터를 전송하였다.

발포 금속과 접촉하는 벽면의 온도 분포를 측정하기 위해 평판 각 열에 T-형 열전대를 사용하여 횡

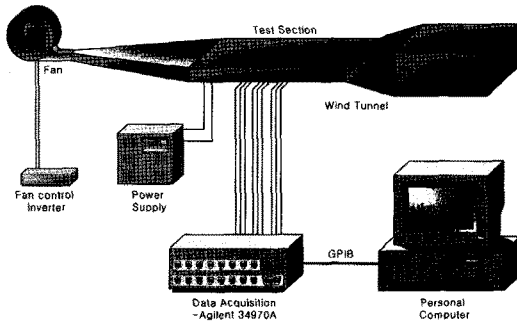
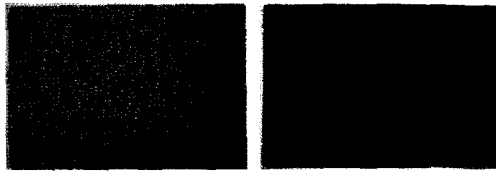


Fig. 1 Schematic representation of the experimental apparatus.



(a) Cu(5 PPI) (b) Ni(40 PPI)

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

방향 50 mm 간격으로 3개씩, 유동의 진행 방향으로 60 mm 간격으로 4개씩 총 12개의 열전대를 가열판과 벽면 사이에 삽입하여 채널 벽면온도를 측정하였다. 채널을 흐르는 유동의 온도를 측정하기 위해서 채널의 입구 측에 3개, 출구 측에 5개, 총 8개의 열전대를 채널의 입구와 출구에 각각 횡방향으로 삽입해서 유체의 입·출구온도를 계속하였으며, 이 온도로부터 유체의 혼합평균온도를 결정하였다.

본 실험의 작동유체는 공기이며, 전면 유속은 1~5 m/s이다. 이는 $Re_{D_n} = 1032 \sim 5588$ 에 해당하며, 투과율 기준 레이놀즈 수(Re_K)는 10.32~101.19의 범위가 된다. 다공성 매질의 유동에서 Darcy law를 벗어나는 기준이 $Re_K = 0.2$ 부근이므로 Non-Darcy 유동 영역에 해당된다.⁽⁷⁾ 또한 가열판의 가열량을 50, 100, 150 W로 변화시켰으며, 발포 금속(Fig. 2)은 구리와 니켈로 만든 발포 금속으로 단면적은 2000 mm²(200 mm × 10 mm)이고 길이는 300 mm이다. 높은 다공도($\epsilon = 0.97$)에 대해 5 PPI, 10 PPI, 20 PPI, 30 PPI, 40 PPI의 기공 밀도(pore density)를 가지고 있다.

발포 금속이 채널 내의 대류 열전달에 미치는 영향을 평가하기 위해 Nusselt 수를 식(1)과 같이 구하였다.

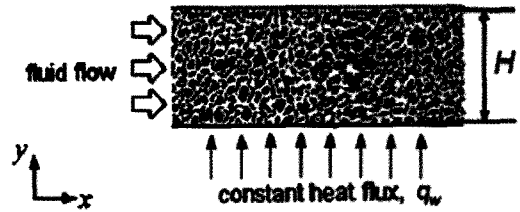


Fig. 3 A channel filled with porous media.

$$Nu = \frac{hH}{k_f} \quad (1)$$

$$h = q_w / (\overline{T}_w - \overline{T}_f) \quad (2)$$

$$\overline{T}_f = \frac{\overline{T}_{f,i} + \overline{T}_{f,o}}{2} \quad (3)$$

여기서, q_w 는 벽면에 공급되는 단위면적당 열전달량, \overline{T}_w 는 벽면 평균온도, \overline{T}_f 는 입구 및 출구 유체의 평균온도를 나타낸다.

본 실험에 사용한 전력계, 열전대, 데이터획득장치의 오차를 고려하여 열전달계수의 실험오차를 구하였으며, 벽면 온도와 유체 온도의 차이가 15°C일 경우 7.0%이고, 60°C일 경우 2.6%로 판단할 수 있다.

2.2 해석

두 평판 사이에 발포 금속을 삽입한 채널을 Fig. 3에 나타냈다. 벽면에서 균일한 열유속이 공급되고 평판 사이에 발포 금속이 채워져 있는 경우, 입구영역의 길이는 매우 짧다고 보고되고 있으므로⁽¹⁰⁾, 완전발달된 유동과 물성치는 온도에 관계없이 일정하다고 가정하면, 운동량방정식과 에너지방정식은 다음과 같다.⁽¹¹⁾

$$\frac{\mu}{K}u + \rho \frac{C_E}{\sqrt{K}}u^2 - \frac{\mu}{\epsilon} \frac{d^2u}{dy^2} + \frac{dP}{dx} = 0 \quad (4)$$

$$k_{f,eff} \frac{\partial^2 T_f}{\partial y^2} + h_s a (T_s - T_f) = \rho c_{p,f} u \frac{\partial T_f}{\partial x} \quad (5-a)$$

$$k_{s,eff} \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2} - h_s a (T_s - T_f) = 0 \quad (5-b)$$

다공성 매질의 고체 부분과 유체 부분의 유효열전도율($k_{s,eff}$, $k_{f,eff}$)에 대한 실험식은 거의 알려진 바 없으며, 일반적으로 식(6)과 식(7)을 사용하고 있다.⁽¹¹⁾ 횡방향의 열적분산(thermal dispersion) 효과($k_{f,dia}$)를 고려할 경우 유체의 유효열전도율은 식(8)을 사용한다.⁽¹²⁾

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

$$k_{f,eff} = \epsilon k_f \tag{6}$$

$$k_{s,eff} = (1 - \epsilon)k_s \tag{7}$$

$$k_{j,eff} = \epsilon k_j + k_{j,dis} \tag{8}$$

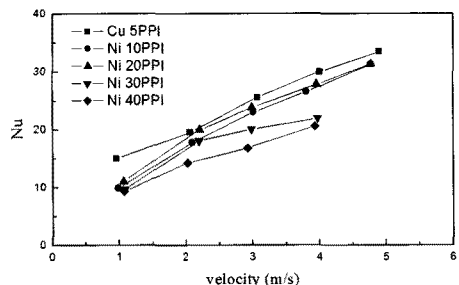
운동량방정식과 에너지방정식, 실험 또는 수치해석에서 주어지는 각종 상관식으로 부터 다공성 매질에서의 속도장과 온도장에 대한 해를 구할 수 있다. 해석 알고리즘에 대한 자세한 내용은 Shin et al.⁽²⁾의 논문에 기술되어 있다.

3. 결과 및 고찰

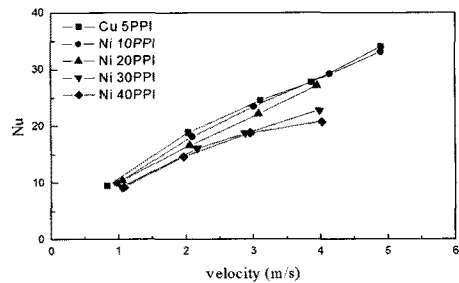
실험은 5개의 서로 다른 발포 금속을 사용하였고 발포 금속의 특성은 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 보듯이 다공도가 큰 영역($\epsilon = 0.97$)에서는 기공 밀도가 작아지면 투과율이 커진다.

Fig. 4는 공기의 전면 유속을 1~5 m/s로 하고, 가열량과 기공 밀도를 변화시켰을 때 대류 열전달 특성을 나타내는 Nusselt 수를 보여준다. 다공도가 동일할 경우 전면 유속이 증가하면 대류 열전달이 증가한다. 또한, 전면 유속이 동일할 경우 기공 밀도가 작아질수록 대류 열전달이 증가하는 경향을 관찰할 수 있다. 즉, 다공도는 0.97정도로 큰 차이가 없지만 기공 밀도가 작아지면 투과율이 커지고 이로 인해 전도의 영향보다 확산에 의한 열전달이 활발해진다. Ni의 경우 기공밀도가 높은 영역일 때, 과도한 압력강화로 인해 유량이 작아서 유속을 5 m/s로 유지할 수 없었다. 유속이 1 m/s인 경우 열전달이 활발하지 않아서 벽면의 온도가 100도를 초과할 경우 가열판 밑에 알루미늄 기판과 발포금속을 밀착시킬 때 변형 및 파손을 방지하기 위한 실리콘이 녹는 현상이 발생하는 경우에는 실험을 제한하였다.

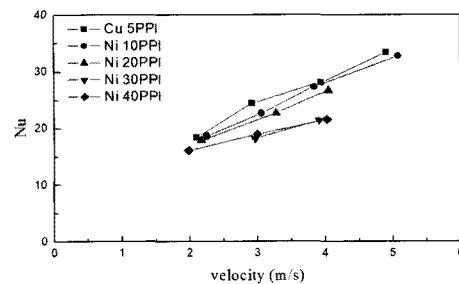
Fig. 5는 본 실험에서 사용한 5가지 발포 금속 중 대표적으로 구리 5 PPI의 평균 Nusselt 수를 Rey-



(a) Q = 50 W



(b) Q = 100 W



(c) Q = 150 W

Fig. 4 Variation of average Nusselt numbers of metal foams.

nolds 수의 함수로 나타낸 것이며, 비교를 위하여 Hunt and Tien⁽⁴⁾과 Kim et al.⁽⁶⁾의 결과도 함께 나타

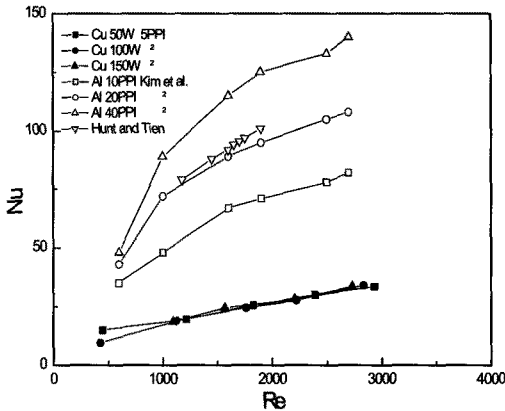


Fig. 5 Average Nusselt numbers of metal foams as a function of Reynolds number.

내었다. 타 연구와 마찬가지로 Reynolds 수가 증가하면 Nusselt 수도 증가하지만, 타 실험결과와 비교할 때 Nusselt 수가 낮게 나왔다. 이러한 차이에 대한 원인을 분석하기 위하여 타 연구자의 결과를 살펴보면, Hunt and Tien⁽⁴⁾의 실험에서는 다공도가 0.94인 구리, 니켈, 알루미늄 발포 금속을 사용하였고, 작동유체는 물이며 등온조건으로 실험하였다. Kim et al.⁽⁶⁾의 실험에서는 다공도가 0.92인 발포 알루미늄을 사용하였고, 작동유체는 공기이며 등온조건으로 실험하였다. 본 연구에 사용한 발포 금속의 다공도가 더 크고 체적 당 표면적비가 낮아서 이로 인해 Nusselt 수가 낮게 나타나고 있다.

Fig. 6은 공기의 전면 유속을 3 m/s, 가열량을 100 W로 하였을 때 같은 채널면적에서 발포 금속의 실험결과와 Son et al.⁽¹⁾에서 수행한 핀-핀 구조물의 실험결과, 그리고 Shin et al.⁽⁹⁾의 해석 방법을 본 연구에 적용하여, 핀-핀 구조물로 모사한 해석 결과를 함께 나타내었다. 발포 금속의 결과와 핀-핀 구조물을 비교하였을 때 Nusselt 수는 발포 금속의 경우가 다소 높게 나왔다. 이는 동일 다공도이지만 발포 금속과 같은 다공성 매질이 구조가 복잡하기 때문에 핀-핀 구조물보다 유체의 유동이 더 복잡하다. 또한, 접촉 면적이 증가하므로 열전달이 더 잘 일어나 Nusselt 수가 증가하였다고 볼 수 있다. 한편 해석결과는 실험결과와 비교할 때 전반적으로 낮게 나타났다. 그러나, 핀-핀 모델로 연구한

Shin et al.⁽⁹⁾의 연구는 다공도가 낮은 영역($0.5 < \epsilon < 0.75$)에 대한 결과이고, 본 연구는 0.97의 높은 다공도에 대한 결과이기 때문에 단순 비교는 어렵

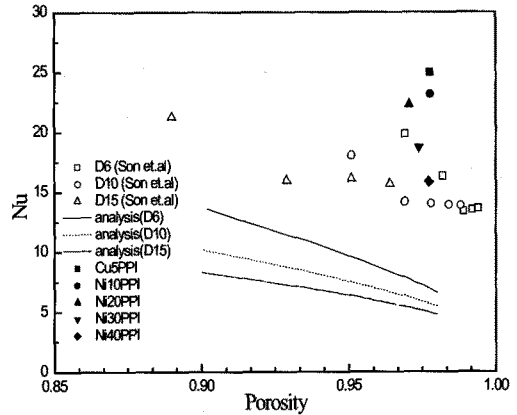


Fig. 6 Comparison of Nusselt numbers with pin-fin structures at $u = 3$ m/s, $Q = 100$ W.

다. 다공도가 낮은 핀-핀 구조물이 다공도가 높은 핀-핀 구조물과 비교하여 높은 Nusselt 수를 가진다. 이러한 결과를 볼 때 다공도가 낮을수록 유체의 확산에 의한 열전달보다 구조물의 전도에 의한 열전달의 비중이 커진다. 핀-핀 구조물 모델로 발포 금속의 열전달을 예측하기에는 다소 문제점을 가지고 있을 수도 있으나, 추후 계속되는 연구를 통해 복잡한 다공성 매질의 열전달특성을 파악하기 위한 손쉬운 방법으로 사용할 수 있는지 밝힐 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 높은 다공도를 가진 구리와 니켈 발포 금속을 사각 수평 채널에 채우고 열전달 특성을 고찰하여 발포 금속과 같은 다공성 매질의 전자 시스템 냉각에의 적용 가능성을 연구하였으며, 매우 복잡한 다공성 매질에서의 유동 및 열전달 특성을 비교적 간단하게 예측할 수 있는 방법에 대한 계속되는 연구가 필요하다.

- (1) 다공도가 동일한 경우 채널 내 열전달은 유속이 증가할수록 커진다. 또한 기공 밀도가 작아질수록 대류 열전달이 증가한다.
- (2) 기존 연구자의 결과와 마찬가지로 Reynolds 수가 증가하면 Nusselt 수도 증가하는 경향은 일치하였으나, 타 실험결과와 비교할 때 Nusselt 수가 낮았다.
- (3) 핀-핀 구조물과 발포 금속의 실험결과를 비

교하였을 때 발포 금속의 Nusselt 수가 다소 크게 나왔다.

- (4) 핀-핀 구조물 해석모델은 다공도가 다소 낮은 영역에서만 적용 가능하기 때문에, 핀-핀 구조물로 모사한 해석결과가 실험결과보다 낮게 나타났다.

후 기

이 논문은 2009학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음(과제번호 : 2009AA156).

참고문헌

1. Son, Y. S., Shin, J. Y., and Lee, S. R., 2007, 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. 418-425.
2. Shin, J. Y., Son, Y. S., and Lee, D. Y., 2003, Analysis on the cooling characteristics of a channel with pin-fin structure, Transactions of the Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, Vol. 15, No. 8, pp. 667-673.
3. Beavers, G. S. and Sparrow, E. M., 1969, Non-Darcy flow through fibrous porous media, ASME J. Applied Mechanics, Transactions of the ASME, Vol. 36, pp. 711-714.
4. Hunt M. L. and Tien, C. L., 1988, Effects of thermal dispersion on forced convection in fibrous media, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 31, pp. 301-309.
5. Paek, J. W., Kang, B. H., Kim, S. Y., and Hyun, J. M., 1999, Measurement of effective thermal conductivity and permeability on aluminum foam metal, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 11, No. 2, pp. 185-192.
6. Kim, S. Y., Kang, B. H. and Kim, J. H., 2001, Forced convection from aluminum foam materials in an asymmetrically heated channel, Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 44, pp. 1451-1454.
7. Noh, J. S., Han, Y. H., Lee, K. B., and Lee, C. G., 2006, Heat transfer and flow characteristics in an annulus filled with aluminum foam, J. Energy Engineering, Vol. 15, No. 1, pp. 60-66.
8. Kuwahara, F. and Nakayama, A., 2001, Numerical modeling of heat and fluid flow in a porous medium, Proceeding of the 10th IHTC, pp. 612-620.
9. Shin, J. Y., Son, Y. S., and Lee, D. Y., 2006, Design of a pin-fin structure in a channel considering the heat transfer and pressure drop characteristics, Transactions of the Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, Vol. 18, No. 6, pp. 459-467.
10. Vafai, K. and Tien, C. L., 1981, Boundary and inertia effects on flow and heat transfer in porous media, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 24, pp. 195-203.
11. Lee, D. Y., Jin, J. S., and Kang, B. H., 2001, Optimum design of a compact heat exchanger with foam metal insertion, Transactions of the Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, Vol. 13, No. 7, pp. 612-620.
12. Kuwahara, F. and Nakayama, A., 1999, Numerical determination of thermal dispersion coefficients using a periodic porous structure, ASME J. of Heat Transfer, Vol. 121, pp. 160-163.