

발포 알루미늄이 삽입된 환형관에서의 열전달 및 유동특성

노주석* · 한영희 · 이계복[†] · 이충구

경기공업대학 실내환경시스템과, *충북대학교 기계공학부
(2006년 1월 16일 접수, 2006년 2월 24일 채택)

Heat Transfer and Flow Characteristics in an Annulus Filled with Aluminum Foam

Joo-Suk Noh*, Young Hee, Han, Kye Bock Lee[†] and Chung Gu Lee

School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 361-763 Korea

*Department of Indoor Environment System, Kyonggi Institute of Technology, Shihung 429-792, Korea

(Received 16 January 2006, Accepted 24 February 2006)

요 약

발포 알루미늄이 삽입된 환형관에서의 유동과 대류 열전달 특성을 실험적 연구를 수행하여 분석하고 heat sink로서의 실현 가능성을 검토하였다. 다른 기공밀도를 갖는 두 종류의 발포 알루미늄을 사용하여 유동과 열전달 특성을 파악하고 마찰계수와 열전달 관련 Nusselt 수를 Darcy 수, Reynolds 수, Prandtl 수의 함수로 상관식을 구하였다. 발포 알루미늄이 없는 경우에 비해 마찰계수는 증가하지만 Nusselt 수에서도 6에서 10배의 증가를 나타낸다. 따라서 열교환기의 크기가 제한되는 경우 열교환기에 발포알루미늄을 삽입하면 전열면적을 감소시킬 수 있으므로 열교환기를 소형화할 수 있다.

주요어 : 환형관, 누셀수, 마찰계수, 투과율, 발포알루미늄, 열유속, 기공밀도

Abstract — An experimental investigation on the flow and convective heat transfer characteristics has been carried out for aluminum foam heat sink inserted into the annulus to examine the feasibility as a heat sink. Two aluminum foams of different permeability were selected to provide the friction factor and heat transfer correlations as function of Darcy, Reynolds and Prandtl number. Experimental results show that the friction factor is higher than clear annulus without aluminum foam, while 6~10 times augmentation in Nusselt number is obtained. This technique can be used for the compactness of the heat exchanger.

Key words : Annulus, Nusselt number, Friction factor, Permeability, Aluminum foam, Heat flux, Pore density

1. 서 론

컴퓨터의 고집적화 및 미소기전 집적계통(MEMS)의 발전에 따라 국부적으로 매우 높은 열밀도를 갖는 초소형 부품에 대한 냉각을 위해 새로운 열전달 촉진기술에 대한 연구가 요구되고 있다. 다공성 매질은 부피에 대

한 표면적의 비가 매우 크고 불규칙한 유로를 형성하므로 열 및 물질 전달 면적이 증가하고 유동공간에 의해 섞임 현상(mixing)이 증가하여 열전달이 증대되는 효과를 나타낸다. 그러나 다공성물질을 전열촉진에 이용하기 위해서는 다공성물질로 인해 발생하는 압력손실을 고려할 때 다공성이 커야 바람직하다. 지금까지 연구되어 온 다공성 물질은 구조가 일정하여 해석이 비교적 용이한 적층구(packed sphere beds)를 이용한 경우에 집중되어 왔다. 이를 열교환기에 이용할 경우 공극률(porosity)이 0.3~0.6 정도로 낮아 유동저항이 커지므로 유동에 따른 압력손실 때문에 실제 응용하기에는 많은 문제점이 있

[†]To whom correspondence should be addressed.
School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 361-763 Korea
Tel: 043-261-3232
E-mail: kblee@chungbuk.ac.kr

다. 최근에 개발된 발포 알루미늄은 다공성 물질의 일종으로 0.9 이상의 높은 다공도로 인한 낮은 유동저항으로 대류 열전달 촉진에 효과적인 물질로 부각되고 있다.

Koh and Stevens^[1]이 냉각유체에 작은 강철 입자(steel particles)를 삽입하여 관 벽의 온도와 냉각유체의 온도차를 현저히 감소시켜 냉각효과가 증가함을 밝힌 이후 다공성 물질을 이용한 전열촉진 연구와 다공성 물질에서의 유동 마찰손실에 대한 연구가 많이 수행되어 오고 있다. Hwang and Chao^[2]는 채널 내에 청동입자(bronze beads)를 채운 후 공기를 유동시킬 때 공기의 강제대류 열전달계수(forced convective heat transfer coefficient)가 현저하게 증가하는 것을 확인하였다. Paek *et al.*^[3]은 발포 알루미늄의 열물성치와 기공도의 관계를 실험을 통해 밝혔고 마찰계수에 대한 상관식을 제안하였다. 또한 Kim *et al.*^[4]은 발포알루미늄이 채워져 있는 채널 내를 공기가 흐를 때 투과율(permeability)이 작을수록 Nusselt 수가 크게 증가함을 실험을 통해 연구하였다.

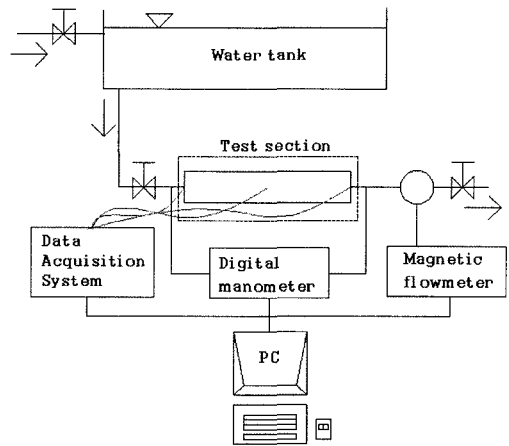
그러나 지금까지 수행된 연구의 대부분은 다공성 물질이 채워져 있는 평행 평판이나 원형관의 열전달에 집중되어 있으며 현재 열교환기로 많이 사용하고 있는 2중관의 환형 형상에 관한 연구는 극히 미약한 실정이다. 또한 적층구를 사용한 실험의 대부분이 유속이 대단히 느린 유동 즉 관성력의 영향을 받지 않는 Darcy flow에 가까운 흐름에 집중되어 있으며 작동 유체로 공기를 사용하고 있다.

본 연구에서는 실제 열교환기에서 발생하는 유동 즉 관성력의 영향을 고려한 non-Darcy flow를 주 대상으로 하였다. 2중관 열교환기에 많이 사용되는 환형관(annulus) 내에 0.9 이상의 높은 공극률을 갖지만 기공밀도(pore density)가 다른 두 가지의 발포 알루미늄을 삽입하여 다공성 매체를 형성하고 작동유체로서 물을 사용하여 마찰계수(friction factor)와 Nusselt 수를 실험을 통해 측정하여 발포 알루미늄의 물성치에 따른 압력손실과 열전달 특성을 분석하여 방열성능의 개선 방법을 검토하였다.

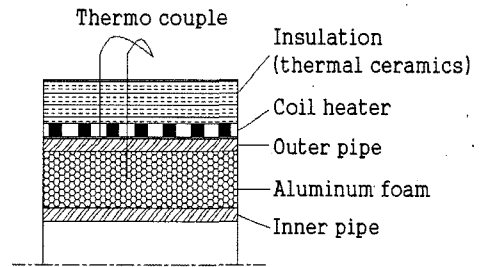
2. 실험장치 및 방법

2-1. 실험장치

Fig. 1과 같이 실험장치는 상부의 물탱크를 통하여 공급된 물이 발포 알루미늄이 채워진 환형의 동관으로 된 시험부를 통과한 후 외부로 배출되도록 설치하였다. 물탱크 수면을 일정하도록 유지시키기 위해 일정 수면 이상이 되면 아래쪽의 물탱크로 오버플로우(overflow)되도록 설계하였다. 일정 열유속을 공급하기 위해 열원이 설치된 가열부의 외부관은 외경 $D_o=41.28$ mm, 내경 $D_i=38.24$ mm의 동관, 내부관은 2가지로 외경 $D_o=15.88$



(a) Experimental setup



(b) Detail of test section part

Fig. 1. Schematic of experimental apparatus.

mm, 내경 $D_i=13.84$ mm(반경비 $r_i/r_o=0.415$), 외경 $D_o=9.52$ mm, 내경 $D_i=8$ mm(반경비 $r_i/r_o=0.249$)의 동관으로 구성되고 동관의 길이는 400 mm로 하였다. 외부 동관의 표면에 최대용량 2kW의 가열코일 2개를 설치하였다. 1개의 가열코일로 동관길이 200 mm를 가열하게 하였다. 가열코일의 단면은 사각형으로 동관 외벽과 접촉면이 크도록 설계하였다. 가열코일 외측은 가열코일의 열량이 외부로 손실되는 것을 방지하기 위하여 고온에서도 견딜 수 있는 두께 2 mm 롤 타입의 thermal ceramic으로 외경 120 mm 정도까지 단열하였다. 가열장치의 공급전원은 3상이며 트랜스포머(3상, 3 kVA, 220 V)를 통하여 공급하였다.

또한 상부의 물탱크를 나온 물이 발포 알루미늄이 삽입된 환형관의 입구에 들어가기 전에 안정된 유동상태를 유지하기 위해서 직관 구간을 확보하였고 각 경우의 물의 입구온도는 $8\sim 10^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지시켰다.

외경 38.24 mm, 내경 15.88 mm, 길이 20~30 mm의

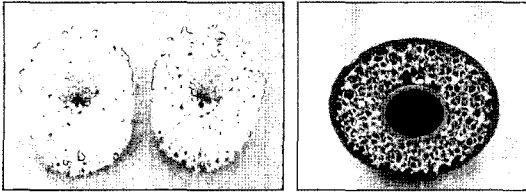


Fig. 2. Aluminum foam and annulus filled with aluminum foam.

원통 형상(Fig. 2)의 발포 알루미늄을 여러 개 사용하여 외부 동관과 내부 동관사이에 길이가 400 mm가 되도록 삽입하였다. 가열부 전후의 배관은 가열부의 열량이 다른 배관으로 전도되는 것을 방지하기 위해 PVC관으로 설치하였다.

발포 알루미늄 내를 통과하는 물의 유량을 측정하기 위하여 발포 알루미늄을 통과한 후 가열부 후방 측에 미소 유량계(low flow magnetic flowmeter, RCM, BadgerMeter, Inc.)를 설치하였다. 또한 발포 알루미늄 속을 통과하는 물의 온도를 측정하기 위해 가열코일과 접촉되어 있는 외부 동관의 표면에 구멍을 뚫고 입구지점에서부터 길이방향으로 0, 25, 50, 100, 200, 300, 400 mm 지점에 열전대(T type thermocouple)를 설치하였다. 열전대의 깊이는 각 지점에서 1~3곳(두께의 1/4, 1/2, 3/4 되는 위치)을 측정할 수 있도록 달리 하였으며 외부 동관의 표면온도를 측정하기 위해 길이방향으로 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 mm 지점에 열전대를 부착하였다. 온도측정은 열전대에서 읽은 신호를 Data Acquisition Unit(YOKOGAWA, DA100)를 사용하여 측정하였으며 데이터 취득 프로그램(DAQ 32)을 사용하여 데이터를 처리하였다. 또한 발포 알루미늄을 통과할 때의 물의 압력강하를 측정하기 위하여 디지털액주계(Wet/Wet Digital manometer, Series 490, Dwyer)를 설치하여 발포 알루미늄을 통과하기 전후의 압력변화를 측정하였다.

2-2. 실험방법

환형관(annulus) 내부의 유량을 0.5~18 l/s의 범위에서 변화시키면서 발포 알루미늄이 삽입된 시험부 전후의 압력차를 측정하였다. 따라서 환형관의 수력직경 D_h 를 기준으로 한 레이놀즈수(Re_d)는 120~9700의 범위, 투과율(permeability) 기준 레이놀즈수(Re_p)는 2~95의 범위가 된다. 다공성 물질의 유동에서 Darcy law를 벗어나는 기준이 $Re_p=0.2$ 부근이므로 non-Darcy flow 영역에 해당된다^[5].

발포 알루미늄을 통과하는 물의 유량은 유량계 후방에 부착되어 있는 수동밸브를 사용하여 조절하고 일정

유량이 유지될 때 디지털 마노미터로 차압을 측정하였다. 가열코일에 공급되는 전원은 220 V, 3상을 사용하였으며 설치된 트랜스포머를 이용하여 전압, 전류를 조절함으로써 가열량을 조절하였다. Nusselt 수 계산을 위해 필요한 동관 표면의 온도와 물의 온도 측정은 가열조건을 480 W, 656.25 W, 860 W, 1056 W 4단계로 변화시키면서 측정하였다.

본 실험의 불확실도는 Kline and McClintock^[6]의 방법을 사용하여 계산하였다. 압력값의 불확실도는 95%의 신뢰구간에서 약 1%이고 온도, 열유속의 불확실도는 각각 1%와 8.1%이다. 따라서 Reynolds 수와 Nusselt 수의 불확실도는 각각 약 7.6%와 8.8% 미만이다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 투과율과 마찰계수(friction factor)

실험에 사용한 발포 알루미늄의 특성값은 Table 1에 나타냈다.

다공성 물질속의 유동에서 관성력의 영향을 고려한 non-Darcy flow에서의 압력강하는 다음 식으로 표현된다^[5].

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

이 식은 다음과 같이 변화시킬 수 있다.

$$\frac{1}{\mu V} \left(-\frac{dp}{dx} \right) = \frac{1}{K} + \frac{C_E \rho V}{\sqrt{K} \mu} \quad (2)$$

위 식에서 투과율 K와 Ergun 계수 C_E 가 상수이므로 $(-dp/dx)/\mu V$ 와 $\rho V/\mu$ 는 선형적인 관계를 갖는다. Fig. 3에 실험에서 측정 한 $(-dp/dx)/\mu V$ 와 $\rho V/\mu$ 의 관계를 나타냈다. 실험값 역시 선형적인 관계를 보여주고 있다. 채널 형상에 대해 실험한 Beavers and Sparrow^[7]의 결과도 같은 경향을 보여준다. 발포 알루미늄이 삽입되지 않은 환형관에서는 $(-dp/dx)/\mu V$ 의 값이 속도가 증가하여도 일정한 값을 갖는다^[8]. Fig. 3에 실험값을 사용하여 최소자승법(least-squares method)으로 구한 직선을 나타냈다. 이 직선과 $(-dp/dx)/\mu V$ 와 $\rho V/\mu$ 의 관계식인 식(1)

Table 1. Flow parameters for aluminum foams.

Aluminum foam	A	B
Porosity ϵ	0.90	0.90
Pore density (PPI)	10	20
Permeability, K (cm ²)	7.31×10^{-4}	5.5×10^{-4}
Ergun coefficient, C_E	0.0449	0.0582
Darcy number, K/D_h^2	8.86×10^{-6}	6.67×10^{-6}
Radius ratio r_i/r_o	0.249	0.249

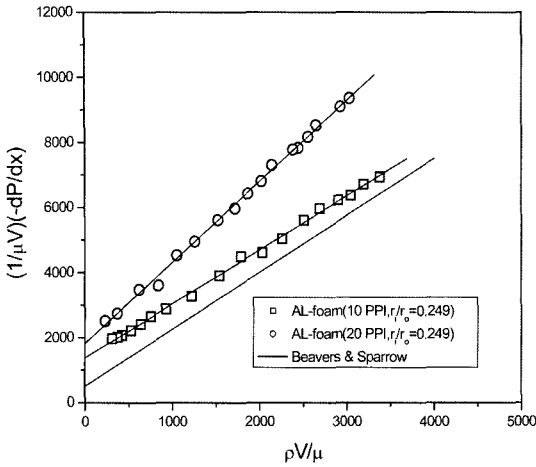


Fig. 3. Relation between axial pressure gradient and velocity.

을 사용하면 Permeability와 Ergun coefficient의 값을 계산할 수 있다. 계산된 값은 Table 1에 나타냈다.

Kim *et al.*^[4]은 마찰계수가 포함된 무차원 수들을 조합하여 다음과 같은 상관 관계식을 구하였다.

$$f = \frac{1}{(ReDa)} + \frac{C_E}{Da^{1/2}} \quad (4)$$

여기서 사용한 마찰계수 f 는 다음과 같이 정의된다.

$$f = \left(\frac{\Delta p}{L}\right) H / \rho V^2 \quad (5)$$

본 연구에서는 채널의 높이(H) 대신에 수력직경(D_h)을 사용하여 마찰계수를 다음과 같이 정의하였다.

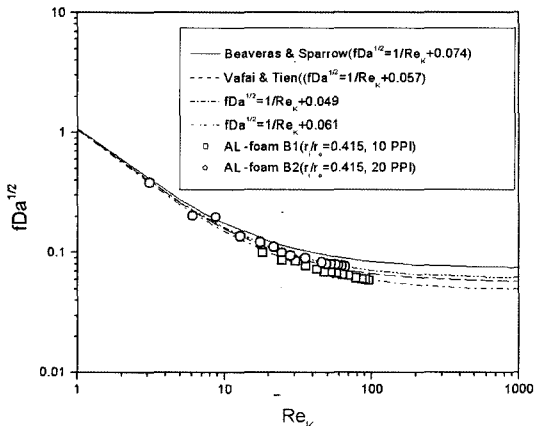


Fig. 4. Modified friction factors of aluminium foams.

$$f = \left(\frac{\Delta p}{L}\right) D_h / \rho V^2, \quad Da = K/D_h^2 \quad (6)$$

식(2)로부터 위에서 정의한 마찰계수가 포함된 무차원 수들의 관계식을 얻을 수 있고 Fig. 4에 도시하였다. 채널과 비슷한 경향을 보여주는 것을 알 수 있다.

$$f = \left(\frac{\mu V}{K} + \frac{C_E}{\sqrt{K}} \rho V^2\right) \frac{D_h}{\rho V^2} = \frac{\mu}{\sqrt{K}} \frac{D_h}{\rho V \sqrt{K}} + C_E \frac{D_h}{\sqrt{K}} = \frac{1}{Re_k Da^{1/2}} + \frac{C_E}{Da^{1/2}} \quad (7)$$

$$Re_k = \frac{\rho V \sqrt{K}}{\mu}, \quad Da = \frac{K}{D_h^2} \quad (8)$$

$Re_k < 20$ 인 구간에서는 $fDa^{1/2}$ 의 값이 크게 변하는 구간으로 투과율 K의 영향이 큰 것을 알 수 있다. 그러나 $Re_k > 20$ 인 구간에서는 $fDa^{1/2}$ 의 값이 거의 일정해진다.

3-2. Nusselt Number

Fig. 5에 동관의 표면온도를 물의 유동방향에 따라 나타냈다. 동관의 표면온도는 유동방향의 무차원수 x/D_h 에 따라 증가하며 레이놀즈 수가 증가함에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 동관 입구에서 레이놀즈 수에 따른 표면 온도변화는 작지만 동관 출구 쪽으로 갈수록 레이놀즈 수에 따른 동관 표면온도 변화가 커지는 것을 알 수 있다.

발포 알루미늄이 환형관 내의 대류 열전달에 미치는 영향을 평가하기 위해 Nusselt 수를 구하였다. 사용된 국부 Nusselt 수(local Nusselt number)와 국부 대류열전달 계수(local convective heat transfer coefficient)의 관계는 다음과 같다.

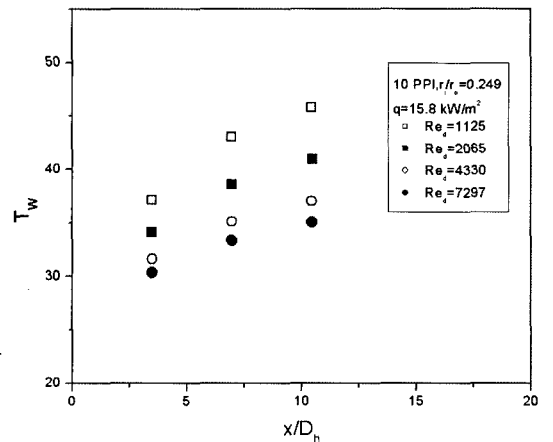


Fig. 5. Wall temperature distribution at different axial location with the effect of Reynolds number.

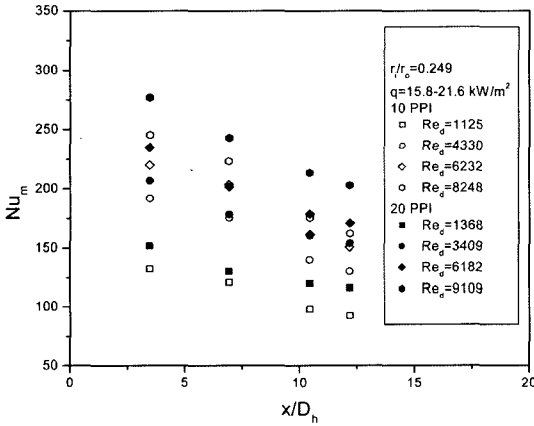
$$Nu_x = \frac{h_x D_h}{k_f} \quad (9)$$

$$h_x = q / (T_w - T_{xf}) \quad (10)$$

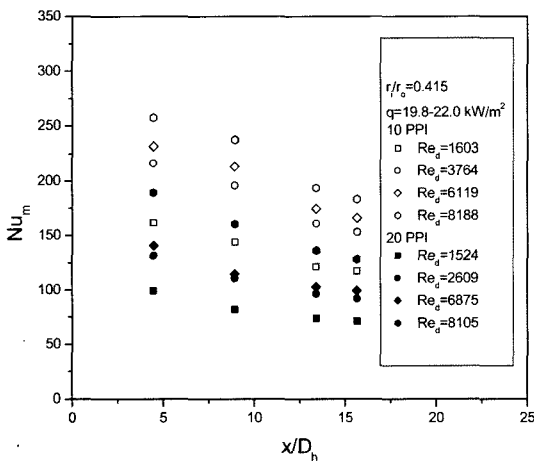
여기서 q 는 동관 표면을 통해 단위면적당 가열되는 열 유속(heat flux)으로 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$q = \frac{\rho C_p V A_f (T_o - T_i)}{A_w} \quad (11)$$

평균 Nusselt 수(Average Nusselt Number)는 입구에서 50 mm, 200 mm, 300 mm, 400 mm까지의 구간에 대해 각각 다음 식을 사용하여 구하였다.



(a) $r_i/r_o = 0.249$



(b) $r_i/r_o = 0.415$

Fig. 6. Average Nusselt number of Annulus filled with AL-foam of different pore size as a function of entry length.

$$Nu_m = \frac{h_m D_h}{k_f} \quad (12)$$

$$h_m = q / \Delta T_m \quad (13)$$

여기서 ΔT_m 은 각 구간에서 측정된 각 지점에서의 관 벽 온도와 환형관 내의 물과의 온도차들의 평균값을 사용하여 구하였으며 다음 식으로 표현된다.

$$\Delta T_m = \frac{1}{n} ((T_{w1} - T_{xf1}) + (T_{w2} - T_{xf2}) + \dots + (T_{wn} - T_{xfn})) \quad (14)$$

Fig. 6은 기공밀도의 변화가 발포 알루미늄의 열전달 특성에 미치는 영향을 보여준다. 시편의 다공도는 고정되어 있기 때문에 기공밀도의 변화는 단위 부피당 표면적의 비로 나타난다. 동일한 레이놀즈 수에서 기공밀도가 10 PPI에서 20 PPI로 증가하는(기공 직경은 감소) 경우 반경비 $r_i/r_o = 0.249$ 에서는 Nusselt 수가 증가한다. 이것은 기공밀도가 감소하여 단위 부피당 표면적이 줄어들었음에도 불구하고 발포 알루미늄의 유동 저항 감소에 따른 통과 유량의 운동량 증가로 열전달량이 증가하기 때문이다. 반면에 $r_i/r_o = 0.415$ 에서는 기공밀도의 증가(10 PPI→20 PPI)가 Nusselt 값을 감소시킨다. 즉 이 경우는 유동저항의 감소에 의한 운동량 증가 효과가 전열면적의 감소 효과보다 적어서 열전달량이 줄어드는 것으로 판단된다. 따라서 열전달 특성은 전열 면적의 증감과 유량에 의한 운동량 효과의 상대적 크기에 의해 좌우되는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 임의의 지점에서 국부 Nusselt 수의 레이놀즈 수에 따른 변화를 나타낸다. 또한 발포 알루미늄이 삽입되지 않은 경우에 대한 환형관에서의 국부 Nusselt

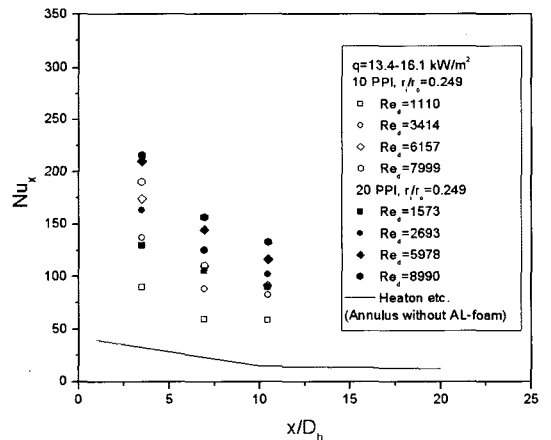


Fig. 7. Local Nusselt number at different Reynolds number with the effect of axial location.

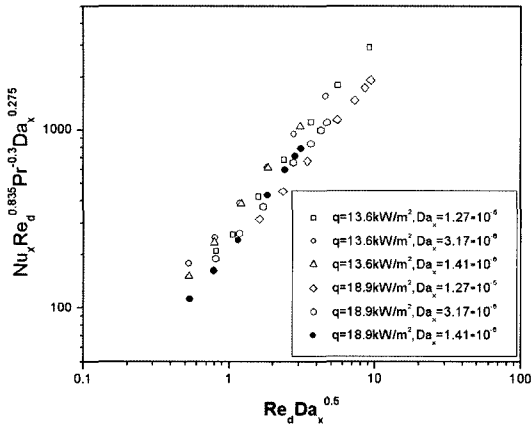


Fig. 8. Nusselt number as a function of non-dimensional parameters for flow through aluminum foams.

수도 나타냈다. 발포 알루미늄이 삽입된 경우가 삽입되지 않은 경우에 비해 Nusselt 수가 6배에서 10배 정도 증가하는 것을 보여준다. 반경비가 0.249에서 기공밀도가 20 PPI인 경우가 10 PPI인 경우보다 국부 Nusselt 수가 크게 나타나고 관의 길이가 증가함에 따라 레이놀즈 수에 따른 Nusselt 수의 변화가 작아지는 것을 알 수 있다.

Fig. 8에는 실험에서 측정된 각 지점에서의 국부 Nusselt 수의 상관관계식을 나타냈다. 시험관의 입구에서부터의 거리를 사용한 Darcy 수, Reynolds 수, Prandtl 수를 사용하여 상관관계식을 회귀 분석을 통해 구하였으며 적용할 수 있는 범위는 $450 < Re_d < 2500$ 이고 오차는 16.6% 이내이다.

$$Nu_x = 253.48 Re_d^{0.165} Pr^{0.3} Da_x^{0.225} \quad (15)$$

여기서

$$Da_x = \frac{K}{x^2} \quad (16)$$

K : permeability

x : 시험부 입구에서부터 거리

4. 결 론

열교환기로 많이 사용되는 환형관에 발포 알루미늄을 삽입하여 유동장과 대류 열전달 특성을 실험을 통해 연구하였다. 다른 기공밀도를 갖는 두 종류의 발포 알루미늄을 사용하여 마찰계수와 대류 열전달 계수에 대한 상관식을 구하였다. 발포 알루미늄이 삽입된 환형관에서 non-Darcy flow의 유동방정식이 성립하는 것을 확인할 수 있었으며 기공밀도가 작을수록 압력강하량이 증가하

고 열전달 특성은 전열 면적의 증감과 유량에 의한 운동량 효과의 상대적 크기에 의해 좌우되는 것을 알 수 있다.

환형관의 마찰계수는 모든 조건에 대해 Darcy 수, 투과율을 사용한 Reynolds 수 Re_k 의 함수로 나타낼 수 있고 $Re_k < 20$ 인 구간에서는 투과율 K의 영향이 크므로 $f Da^{1/2}$ 의 값이 크게 변하는 것을 알 수 있다. 발포알루미늄이 삽입된 환형관 내의 유동에서 일정 열유속으로 관 벽을 가열할 때 관 벽에서의 국부 Nusselt 수는 삽입되지 않은 경우에 비해 증가하고 국부 Nusselt 수에 대한 상관식을 구하였다. 열교환기의 크기가 제한되는 경우 열교환기에 발포알루미늄을 삽입하여 설계하면 전열면적을 감소시킬 수 있으므로 열교환기를 소형화할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2005년도 충북대학교 학술연구 지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

기호설명

- A_f : 환형관 단면의 단면적 [m²]
- A_w : 가열부 동관의 표면적 [m²]
- C_E : Ergun 계수
- C_p : 유체의 비열
- D : 동관의 직경 [m]
- Da : Darcy 수, K/D_0^2
- Da_x : Darcy 수, K/x^2
- D_h : 환형관의 수력직경, $2(r_o - r_i)$ [m]
- f : 마찰계수
- h : 대류 열전달계수 [W/m²K]
- H : 채널의 높이 [m]
- k : 열전도도 [W/mK]
- K : 투과율(permeability) [m²]
- L : 가열부의 길이
- Nu : Nusselt 수, hD_w/k_f
- dp/dx : 압력구배
- p : 압력
- Pr : Prandtl 수, v/α
- q : 열유속(heat flux) [W/m²]
- r : 반경 [m]
- Re : 채널높이 기준 Reynolds 수, VH/ν
- Re_d : 수력직경 기준 Reynolds 수, VD_w/ν
- Re_k : 투과율 기준 Reynolds 수, $V\sqrt{K}/\nu$
- T : 온도 [K]
- V : 유체 속도 [m/s]

x : 유체 유동방향의 좌표

그리스 문자

v : 유체의 동점성계수 [m^2/s]
 μ : 유체의 점성계수 [kg/ms]
 ρ : 유체의 밀도 [kg/m^3]
 ε : 다공성 물질의 공극율

하첨자

h : 수력(hydraulic)
d : 수력직경
K : 투과율
f : 유체
i : 안쪽, 입구쪽
o : 바깥쪽, 출구쪽
x : 유체 유동방향의 좌표
w : 동관의 벽면
m : 평균

참고문헌

1. Koh, J.C.Y.; Stevens, R.L. "Enhancement of cooling effectiveness by porous materials in coolant passage", J. of Heat Transfer, Transactions of ASME, 1975, 97, 309-311.
2. Hwang, G.J.; Chao, C.H. "Heat transfer measurement and analysis for sintered porous channels", J. of Heat Transfer, Transactions of ASME, 1994, 116, 456-464.
3. Paek, J.W.; Kang, B.H.; Kim, S.Y.; Hyun, J.M. "Effective thermal conductivity and permeability of aluminum foam materials", Int. J. of Thermophysics, 2000, 21(2), 453-464.
4. Kim, S.Y.; Kang, B.H.; Kim, J.H. "Forced convection from aluminum foam materials in an asymmetrically heated channel", International J. of Heat and Mass Transfer, 2001, 44, 1451-1454.
5. Kaviany, M. *Principles of Heat Transfer in Porous Media*, Springer, 1995, 48-60.
6. Kline, S.J.; McClintock, F.A. "Describing uncertainties in single sample experiments", Mechanical Engineering, 1953, 3-8.
7. Beavers, G.S.; Sparrow, E.M. "Non-Darcy flow through fibrous porous media", J. Applied Mechanics, Transactions of the ASME, 1969, 36, 711-714.
8. Kays, W.M.; Crawford, M.E. *Convective Heat and Mass Transfer*, McGraw-Hill, Inc., 1993, 81.
9. Heaton, H.S.; Reynolds, W.C.; Kay, W.M. "Heat transfer in annular passages. Simultaneous development of velocity and temperature fields in laminar flow", International J. Heat and Mass Transfer, 1964, 7(7), 763-781.
10. White, *Viscous flow*, McGraw-Hill, 1991, 124 (Shah and London, *Laminar flow forced convection in ducts*, 1978, Academic Press).
11. Sparrow, E.M.; Loeffler, J.R. "Longitudinal laminar flow between cylinders arranged in regular array", AIChE, 1959, 5, 325-329.