

알루미늄 발포금속의 유효열전도도와 침투율의 측정

Measurement of effective thermal conductivity and permeability on aluminum foam metal

백진욱*, 강병하*, 김서영*, 현재민**
 J. W. Paek, B. H. Kang, S. Y. Kim, J. M. Hyun

Key words: Foam metal(발포금속), Effective thermal conductivity(유효열전도도), Pressure loss (압력손실), Permeability(침투율), Friction factor(마찰계수)

ABSTRACT

Effective thermal conductivities and pressure-drop-related properties of aluminum foam metals have been measured. The effects of porosity and cell size in the aluminum foam metal are investigated in detail. The porosity of the foam metal, considered in the present study, varies from 0.89 to 0.96 and the cell size from 0.65mm to 2.5mm. The effective thermal conductivity is evaluated by comparing the temperature gradient of the foam metal with that of the thermal conductivity-known material. The pressure drop in the foam metal is measured by a highly precise electric manometer while air is flowing through the aluminum foam metal in the channel. The results obtained indicate that the effective thermal conductivities are found to be increased with a decrease in the porosity while the effective thermal conductivities are little affected by the cell size at a fixed porosity. However, the pressure drop is strongly affected by the cell size as well as the porosity. It is seen that the pressure drop is increased as the cell size becomes smaller, as expected. The minimum pressure drop is obtained in the porosity 0.94 at a fixed cell size. A new correlation of the pressure drop is proposed based on the permeability and Ergun's coefficient for the aluminum foam metal.

기호설명

C_E : Ergun계수

d : 셀(cell)의 크기 [m]

f : 마찰계수, $\frac{(-dP/dx)\sqrt{K}}{\rho \cdot V^2}$

H : 발포금속 또는 스펀레스강판의 두께,

식(1)과 (2) [m]

K : 침투율 [m²]

k : 열전도도 [W/m · °C]

k_e : 유효열전도도 [W/m · °C]

L : 발포금속의 길이 [m]

P : 공기의 정압 [Pa]

Re_K : 레이놀즈수, $\frac{\rho V \sqrt{K}}{\mu}$

T : 온도 [°C]

t : 금속지주의 무차원 두께

V : 상류에서의 공기의 유입 속도(Frontal

* 정회원, 한국과학기술연구원 열·유동제어연구센터

** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

air velocity) [m/s]
 x : 발포금속의 길이 방향 좌표 [m]

그리스문자

Δ : 차이
 ε : 다공도(Porosity)
 ρ : 밀도 [kg/m^3]
 μ : 점성계수 [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]

하첨자

p : 발포금속
 sus: 스텐레스강

1. 서론

다공물질은 그 구조상 단위 부피당 표면적이 매우 큰 특징을 가지고 있다. 에너지변환이나 열전달현상이 수반되는 분야에서는 장치의 소형화와 고효율화를 위해 다공물질의 이런 특성을 이용하여 열전달을 촉진시키기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다^(1,2). 이러한 연구는 주로 촉매반응로나 열저장장치 등에 적용되는 충전층(Packed bed)에 의한 열전달현상에 관한 것이 대부분이었다. 그러나, 충전층은 상당히 밀집된(다공도의 범위가 0.3~0.6) 형태로 단위 부피당 표면적은 크지만 유동이 존재할 경우 매우 큰 압력손실이 발생하며, 충전층을 이루는 입자들이 점접촉상태이므로 충전층의 유효열전도도는 상당히 작게 된다^(3,4).

발포성 다공물질은 고체매질내의 공기가 차지하는 공간이 매우 크고(다공도가 0.9이상) 단위 부피당 표면적이 큰 반면 압력손실이 충전층에 비해 매우 적으며 고체매질이 서로 직접 연결되어 있으므로 유효열전도도가 충전층에 비해 매우 큰 특성을 가지고 있다. 특히, 고체매질이 알루미늄과 같은 열전도도가 높은 금속일 경우 가공성이 좋고 가볍기 때문에 최근에는 열전달현상이 수반되는 분야에서 장치의 소형화와 고효율화를 위해 발포금속에 관한 관심이 증가하고 있다^(5,6). 이와 같이 열전달을 촉진시키기 위해 발포금속을 사용할 경우에는 기초적인 요소로 발포금속의 유효열전도도 특성과 압력손실 특성이 매우 중요하

며 최적의 발포금속을 선택하기 위해서는 이 두 가지 요소를 동시에 고려해야 한다.

그러나, 충전층과 달리 발포금속은 형상이 복잡하고 불규칙하여 해석적인 접근이 매우 어렵기 때문에 기존의 연구는 제한되어 있다. 발포금속의 유효열전도도에 영향을 미치는 변수는 고체와 유체매질의 열전도도와 다공도 그리고, 형상에 관련된 계수 등 다양하기 때문에 지금까지 제시된 상관식도 그 범위가 매우 제한되어 있으며⁽⁶⁻⁸⁾ 알루미늄이나 니켈 발포금속에 관한 연구도 다공도가 0.94이상으로 제한되어 있다⁽⁸⁾. 또한, 유동의 압력손실에 관한 연구결과는 충전층의 경우와 달리 발포금속의 종류에 따라 서로 일치하지 않은 경향을 보이고 있다^(5,12-14). 따라서, 발포금속의 압력손실 특성과 유효열전도도 특성을 동시에 고려한 연구가 발포금속을 이용한 열교환기의 해석에 필수적이지만 이에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 알루미늄 발포금속의 다공도와 기공의 크기 등 형상변화가 유효열전도도와 압력손실 특성에 미치는 영향을 실험을 통해 규명하여, 최대의 열전달촉진 특성과 최소의 압력손실 특성을 가지는 알루미늄 발포금속의 형상을 고찰하고 이에 대한 상관식을 제시하고자 한다.

2. 실험장치와 방법

정체된 공기로 채워진 발포금속의 유효열전도도는 Fig. 1과 같은 실험장치로 측정할 수 있다. 본 실험장치에서는 고온부와 저온부사이의 열흐름이 1차원적이며 정상상태라고 가정할 수 있다. 따라서, 발포금속을 지나는 열유속은 이미 열전도도가 알려진 물질(SUS 304)을 지나는 열유속과 같으며 이 스텐레스강관의 온도구배를 측정함으로써 발포금속을 지나는 열유속을 알 수 있다.

따라서, 발포금속의 온도구배를 측정하면 유효열전도도를 얻을 수 있다. 이 방법은 기존의 연구에서 다공물질의 유효열전도도를 측정하는데 많이 이용되어 왔다^(3,4,8).

이 장치내의 수직방향 열흐름을 1차원 정상상태로 유지하기 위해 두 개의 다른 온도를 가지는 항온조에서 공급되는 물을 사용하여 발포금속의 윗면과 스텐레스강관의 밑면과 밀착된 구리판(두께 10mm)의 온도를 일정하게 유지하였다. 고온

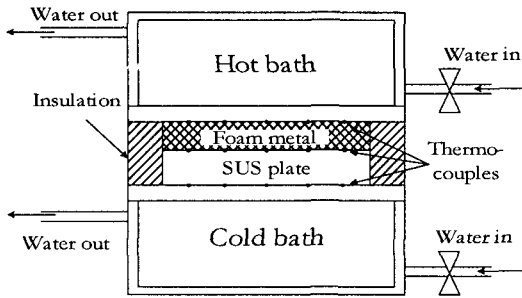


Fig. 1 A schematic diagram of an experimental apparatus for the measurement of an effective thermal conductivity.

측 구리판으로 유입되는 물의 온도는 항온조내의 열선과 조절기를 이용하여 약 50℃로 일정하게 유지하였으며, 저온측 구리판의 경우에는 발포금속내에 결로현상이 발생하지 않는 낮은 온도로 일정하게 유지되는 냉수를 사용하였다. 본 실험에서는 발포금속의 종류에 관계없이 고온용기와 저온용기의 물의 온도는 각각 50±0.2℃와 8.4±0.1℃로 일정하게 유지하였다.

발포금속과 스텐레스강판의 크기는 각각 90mm x 190mm x 9.1mm, 90mm x 190mm x 14mm이며 각 판의 온도구배를 측정하기 위해 3개의 접촉면에 각각 5개의 T형 열전대(AWG36)를 부착하였고 열전대의 정선(Junction)크기는 지름 0.3mm이었다. 특히, 열전대로 인한 접촉불량을 방지하기 위해 스텐레스강판의 상하면과 고온측 구리판 밑면에는 열전대의 설치를 위한 0.5mm 깊이의 홈을 만들었다. 열전대로부터의 온도는 데이터로거(DR232)를 사용하여 0.1℃의 정밀도로 측정하였다. 발포금속과 스텐레스강판으로부터 외부로의 열손실을 방지하기 위해 주위에 단열재를 채웠고, 발포금속과 등은 구리판사이의 접촉저항을 줄이기 위해 각각의 접촉면에 열그리스를 칠하였다.

발포금속을 통과하는 공기의 압력손실을 측정하기 위한 실험장치는 Fig. 2에 개략적으로 나타내었다. 유효열전도도를 측정하는데 사용한 동일한 발포금속을 사용하였으며 시험부 유로의 단면은 9.1mm x 90mm이다. 공기압축용기로부터 압력조절장치를 통과하여 공기가 공급되며 유량계

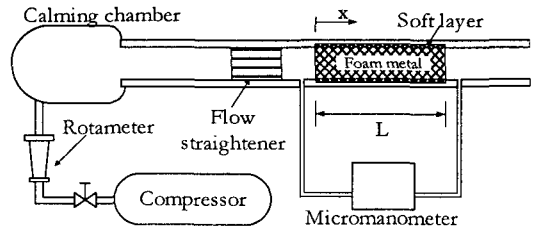


Fig. 2 An experimental apparatus for the measurement of pressure drops.

(Rotameter)를 이용하여 발포금속으로 유입되는 속도를 조절하였다. 발포금속입구의 속도분포를 균일하게 하기 위해 매우 조밀한 금속망과 가는 튜브변들을 시험부 전방에 배치하였다. 공기의 압력손실은 발포금속전후에서 액주압력계를 이용하여 측정하였으며 액주압력계의 지시유체의 높이차가 작은 경우에는 0.01mm의 측정 정밀도를 가지는 미소액주압력계(Dwyer's Microtector)를, 지시유체의 높이차가 충분히 큰 경우에는 일반적인 경사액주압력계를 이용하였다. 발포금속의 단면형상은 매우 불규칙하기 때문에 시험부의 벽면 안쪽에 폴리우레탄계열의 얇고 부드러운 층을 부착하여 발포금속과의 밀착성을 좋게 하여 벽면과 발포금속사이로 공기가 흐르는 것을 방지하였다.

3. 실험결과 및 고찰

본 연구에 사용된 스텐레스강(SUS 304)과 알루미늄합금 6101의 물성치를 Table 1에 표시하였다.^(9,10)

발포금속의 다공도(ϵ)는 발포금속을 이루는 알루미늄합금 6101의 질량과 발포금속과 같은 부피를 가지는 알루미늄합금 6101의 질량을 비교함으로써 다음과 같이 직접 구할 수 있다.

$$\epsilon = 1 - \frac{\text{발포금속내의 고체질량}}{\text{같은 부피의 고체질량}}$$

발포금속내의 유체가 공기인 경우 고체인 알루미늄에 비해 밀도가 무시할 만큼 작으므로 발포금속내의 고체질량은 발포금속전체의 질량과 거의 같다. 따라서, 다공도는 다음과 같다.

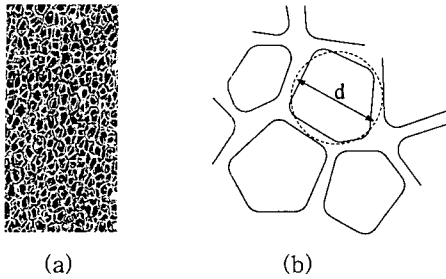


Fig. 3 The structure of the aluminum foam metal in the present study:
 (a) Aluminum foam metal; (b) A schematic diagram of cell structure.

$$\epsilon = 1 - \frac{\text{발포금속의 밀도}}{\text{고체의 밀도}}$$

본 연구에 사용된 발포금속의 다공도는 각각 0.89, 0.92, 0.94, 0.96로 측정되었다. 알루미늄 발포금속의 전형적인 형상과 발포금속을 이루는 셀(cell)형상은 Fig. 3에 나타나 있다. Fig. 3(b)에 나타난 것처럼 셀의 크기는 직경 d로 표시하였으며 본 연구에 사용된 발포금속의 셀크기(d)는 각각 0.65mm, 1.25mm, 2.50mm였다.

발포금속의 유효열전도도를 측정하는 실험에서는 실험장치내의 발포금속과 스텐레스강관을 통과하는 열유속은 서로 같다고 가정하였으므로 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$k_{sus} \frac{\Delta T_{sus}}{H_{sus}} = k_e \frac{\Delta T_p}{H_p} \quad (1)$$

따라서, 발포금속의 유효열전도도는 다음과 같이 계산된다.

$$k_e = k_{sus} \frac{\Delta T_{sus}}{\Delta T_p} \cdot \frac{H_p}{H_{sus}} \quad (2)$$

여기서 H_{sus} , H_p , ΔT_{sus} 와 ΔT_p 는 각각 스텐레스강관과 발포금속의 두께와 상하면의 온도차이를 의미한다. 각 면에서 측정된 온도는 발포금속과 스텐레스강관에 가해지는 압력의 변화에는 거의 영향을 받지 않았다. 식(2)의 ΔT_{sus} 와 ΔT_p 는 각 면에서 측정된 온도의 평균값의 차로 계산하였으며 유효열전도도의 불확실성은 주로 알루미늄

Table 1 Material properties of stainless steel 304 and Aluminum alloy 6101

	Density (kg/m ³)	Specific heat (kJ/kg K)	Thermal conductivity (W/m K)
Stainless steel 304	7900	0.477	14.9
Aluminum alloy 6101	2690	0.895	218

미늄 발포금속의 금속지주의 위치와 열전대의 위치에 따라 측정된 온도의 불균일함에서 유발되며 셀크기가 증가할수록 불확실성도 증가하였다. d=1.25mm의 발포금속의 경우 유효열전도도의 불확실성은 약 12%였다.

일반적으로 발포금속을 구성하는 단위 셀의 형태는 각 모서리를 이루는 금속지주에 의해 형태가 유지되는 정오각형의 면을 가지는 정12면체로 가정하기도 하지만 실제의 발포금속의 셀형상은 발포금속의 재질과 제조방법에 따라 달라지며⁽⁸⁾ Fig. 3에서 볼 수 있듯이 셀의 크기와 형태도 불균일하다. 이런 복잡한 형태의 단위 셀구조를 정육면체로 가정하고(Fig. 4(a)) 전도에 의한 열의 흐름을 1차원으로 가정한 Dul'nev 모델⁽¹¹⁾을 Fig. 4에 보이고 있다. Fig. 4(b)로부터 금속지주의 무차원 두께(t)는 발포금속의 다공도(ϵ)를 이용하여 식(3)과 같이 구할 수 있다.

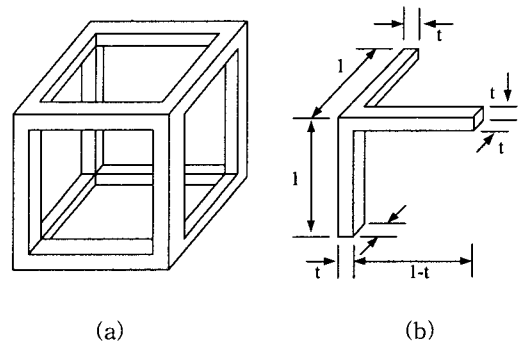


Fig. 4 Dul'nev's model for the effective thermal conductivity of the foam metal:

- (a) Dul'nev's cubic cell model;
- (b) Dul'nev's model rearranged for calculating the effective thermal conductivity.

$$t = \frac{1}{2} + \cos\left(\frac{1}{3} \cos^{-1}(2\varepsilon - 1) + \frac{4\pi}{3}\right) \quad (3)$$

이 경우 단위 셀내의 대류열전달과 복사열전달현상이 무시할 만큼 작다고 가정하고, 전도에 의한 열흐름이 금속지주와 평행하고 1차원적이라면 단위 정육면체셀로 이루어진 발포금속의 유효열전도도는 식(4)와 같이 나타난다.

$$k_e = k_s t^2 + k_f(1-t)^2 + \frac{2t(1-t)k_f \cdot k_s}{k_s(1-t) + k_f t} \quad (4)$$

먼저 발포금속의 다공도가 유효열전도도에 미치는 영향을 고찰하기 위해 발포금속의 셀크기를 고정하고($d=1.25\text{mm}$) 다공도를 0.89, 0.92, 0.94, 0.96으로 변화시켰다. Fig. 5는 다공도와 유효열전도도의 관계를 보이고 있다. Takegoshi 등⁽⁸⁾의 연구는 다공도가 0.94이상이고 셀크기가 2.5mm 이상인 알루미늄 발포금속에 관한 것이며 Fig. 5에 함께 나타내었다. Fig. 4의 Dul'nev 모델⁽¹¹⁾을 사용하여, 복잡한 발포금속의 셀형상을 정육면체로 가정하고 식(3)과 식(4)를 이용한 해석적 결과와 실험결과를 비교하였다. 동일한 셀크기에서 발포금속 다공도의 감소는 단위 셀내의 빈 공간의 감소와 금속지주 두께의 증가를 의미한다. 이것은 단위 셀의 금속지주를 통한 열전도량의 증가가 공기를 통한 열전도량의 감소보다 크게 되므로 단위 셀 전체의 열흐름이 증가하게 된다. 그 결과 발포금속전체의 유효열전도도가 증가하는 것이다.

한편, 발포금속의 다공도가 일정한 상태에서 셀크기의 변화에 따른 유효열전도도의 변화를 Fig. 6에 표시하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 다공도 약 0.92의 발포금속의 경우에는 셀크기의 변화에 관계없이 거의 일정한 유효열전도도가 나타나고 있다. 이런 경향은 Takegoshi 등⁽⁸⁾의 실험결과(다공도 약0.97)에서도 관찰된다. 이 현상을 Dul'nev 모델에 기초하여 살펴보면 단위 셀의 크기가 변하더라도 단위 셀내의 금속지주의 상대적인 두께는 거의 변하지 않기 때문에 전체의 유효열전도도에 미치는 영향이 거의 나타나지 않게 된다.

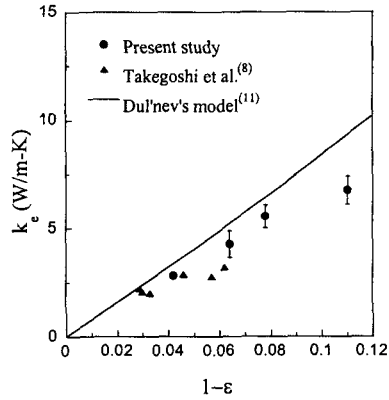


Fig. 5 Effect of porosity on the effective thermal conductivity at a fixed cell size, $d=1.25 \text{ mm}$.

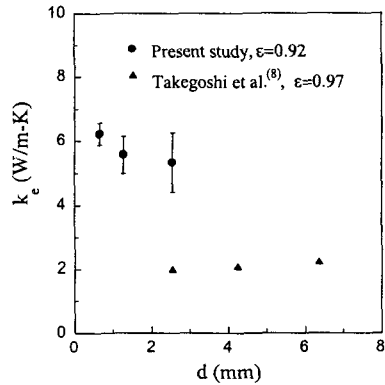


Fig. 6 Effect of cell size on the effective thermal conductivity at a fixed porosity.

발포금속을 열교환기의 핀으로 사용하기 위해서는 발포금속의 압력손실에 관한 고찰이 필수적이다. 발포금속의 압력손실 특성은 Fig. 2의 실험장치에서 측정하였다. Fig. 7은 다공도를 0.92로 고정하였을 때 셀크기가 발포금속의 단위 길이당 압력손실량에 미치는 영향을 나타내고 있다. 다공도가 같기 때문에 발포금속 전체의 유로면적은 같지만 셀의 크기가 작아질수록 발포금속 단위 부피당 표면적이 증가하기 때문에 압력손실이 증가함을 볼 수 있다. 압력손실 측정시, 불확실성은 약 3%미만이었다.

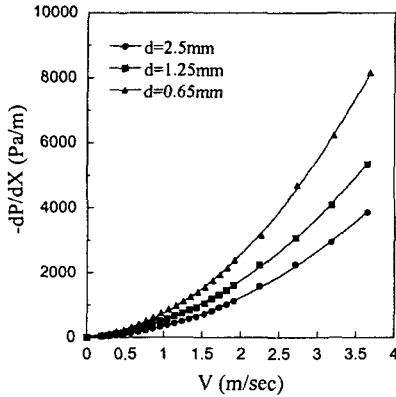


Fig. 7 Effect of cell size on the pressure drop at a fixed porosity, $\epsilon=0.92$.

한편 알루미늄 발포금속의 셀크기가 같은 경우 ($d=1.25\text{mm}$)에 대하여 다공도의 변화에 따른 압력손실 특성은 Fig. 8에 나타나 있다. 다공도가 약 0.94인 발포금속의 압력손실량은 다공도가 0.96, 0.92, 0.89인 발포금속보다 모든 유속영역에서 작게 나타나고 있다. 다공도 약 0.94인 발포금속의 압력손실량에 대하여 다공도의 변화에 따른 발포금속의 압력손실량의 변화를 살펴보면 시험부 입구의 공기유속에 따라 다공도 0.96에서 약 20-30%, 다공도 0.89에서 약 30-40%정도 압력손실이 증가함을 알 수 있다. 이 현상은 발포금속의 셀구조가 다공도에 따라 변화하기 때문이며, 다공도가 0.94보다 작은 경우에는 셀을 이루는 기공(pore)이 원형에 가까운 형태를 가지고 있지만 다공도가 0.96인 경우에는 구조가 삼각형 형태로 변형되어 단위 셀당 유동의 압력손실이 증가하는 것이다. 발포금속의 단위 부피당 전열면적은 주로 셀크기에 의해 결정되지만 같은 셀크기에서도 다공도의 변화에 따른 압력손실량이 변화하며, 발포금속의 유효열전도도는 셀의 크기보다는 주로 다공도의 영향을 받기 때문에(Fig. 5와 Fig. 6) 전열촉진을 위한 최적의 발포금속을 선정하기 위해서는 다공도의 영향을 반드시 고려해야 한다.

다공물질의 압력손실구배는 유속이 큰 경우에는 다음과 같이 2차 다항식(5)으로 표시되며 침투율 K 와 Ergun계수 C_E 에 의해 결정된다.

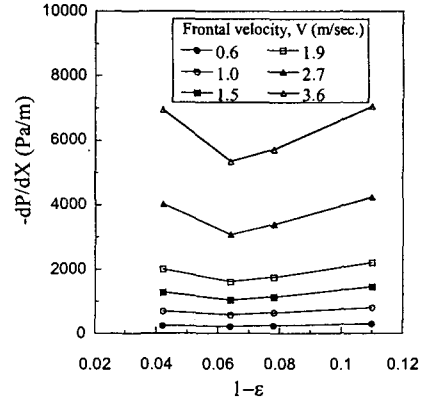


Fig. 8 Effect of porosity on the pressure drop for several frontal velocities at a fixed cell size, $d=1.25\text{ mm}$.

$$\left(-\frac{dP}{dx}\right) = \frac{\mu}{K} V + \frac{\rho \cdot C_E}{\sqrt{K}} V^2 \quad (5)$$

$$\left(-\frac{dP}{dx}\right) \frac{1}{\mu \cdot V} = \frac{1}{K} + \frac{\rho \cdot C_E}{\sqrt{K \cdot \mu}} V \quad (6)$$

발포금속 단위 길이당 압력손실량(Fig. 7와 Fig. 8)을 식(6) 같이 정리한 뒤 최소자승법(Least Squares fitting)을 통해 침투율 K 와 Ergun계수 C_E 를 결정할 수 있다.

Fig. 9은 다공도가 일정할 때($\epsilon=0.92$) 발포금속의 셀크기에 따른 침투율 K 와 Ergun계수 C_E 값의 변화를 보이고 있다. 셀크기가 작아질수록 K 값이 작아지는데 이것은 K 값이 발포금속내의 유로면적의 의미를 가지므로 충분히 예상할 수 있는 결과이다. 또한, C_E 값은 유동의 관성효과(Inertial effect)를 의미하며 셀크기에 관계없이 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 그러나, 셀크기가 일정한 상태($d=1.25\text{mm}$)에서 다공도가 증가할 때 단위 셀의 금속지주의 두께가 감소하므로 유로의 면적은 증가하게 된다. 따라서, Fig. 10에서 볼 수 있듯이 다공도가 증가할수록 K 값은 증가하지만 셀구조의 특성상 다공도 0.94에서 최대값을 가지며 0.96에서는 오히려 감소하고 있다. 셀크기의 영향과 마찬가지로 다공도가 C_E 값에 미치는 영향은 미약하다.

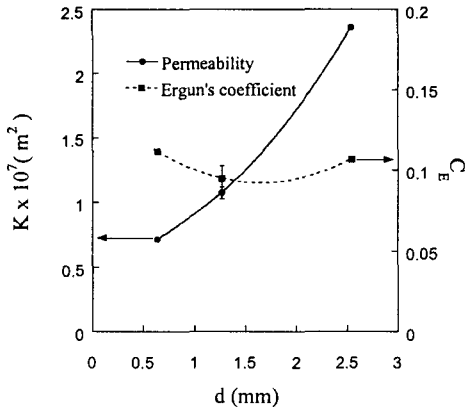


Fig. 9 Effect of cell size on permeability and Ergun's coefficient at a fixed porosity, $\epsilon=0.92$.

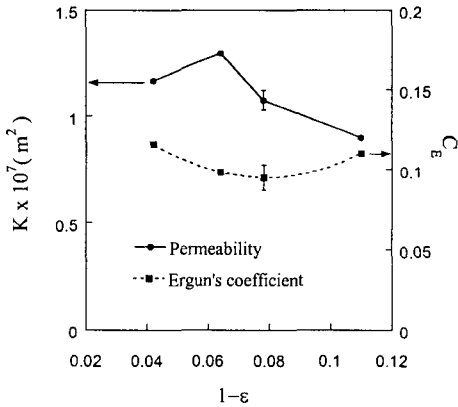


Fig. 10 Effect of the porosity on permeability and Ergun's coefficient at a fixed cell size, $d=1.25$ mm.

위에서 얻어진 침투율 K 값을 바탕으로 발포금속의 레이놀즈수 Re_K 와 마찰계수 f 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$Re_K = \frac{\rho V \cdot \sqrt{K}}{\mu} \quad (7)$$

$$f = \frac{\left(-\frac{dP}{dx}\right) \sqrt{K}}{\rho \cdot V^2} \quad (8)$$

Fig. 11은 발포금속의 압력손실 특성을 레이놀즈

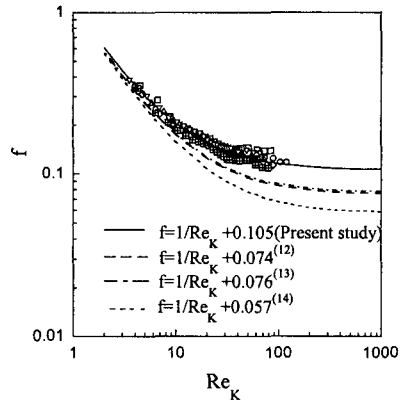


Fig. 11 Friction factor correlations.

수 Re_K 와 마찰계수 f 로 표시한 것으로, 실험을 통해 얻어진 알루미늄 발포금속의 마찰계수 f 와 레이놀즈수 Re_K 의 상관식은 다음과 같다.

$$f = \frac{1}{Re_K} + 0.105 \quad (9)$$

식(5), (7), (8)의 관계에서 알 수 있듯이 식(9)의 상수항은 발포금속의 C_E 값을 나타낸다. 본 연구의 $f-Re_K$ 의 상관식(9)은 니켈 발포금속의 압력손실 특성을 조사한 Beavers와 Sparrow⁽¹²⁾와 Hamaguchi 등⁽¹³⁾의 마찰계수(f)에 관한 상관식과는 약간의 차이를 보이고 있다. 이것은 발포금속의 C_E 값의 차이로 니켈 발포금속의 C_E 값은 0.075 정도이지만^(12,13) 본 연구의 알루미늄 발포금속은 약 0.105의 값을 나타내고 있다. C_E 값은 발포금속 내의 유동의 관성효과를 의미하며 발포금속의 제조방법에 따라 변화하는 셀구조와 금속지주의 형상에 영향을 받게 된다. Takegoshi 등⁽⁸⁾이 언급한 것처럼 발포금속 제조과정은 니켈은 전기도금 후 소각제거법, 알루미늄은 주조법으로 각각 서로 다르고, 그 결과 니켈 발포금속의 기공(pore) 형상이 좀 더 원형에 가까우며 이에 따라 셀을 이루는 금속지주의 형상이 달라지기 때문이다.

4. 결론

알루미늄 발포금속의 다공도와 셀크기의 변화에 따른 유효열전도도 특성과 압력손실 특성을

실험을 통해 연구하였다. 본 연구영역에서 알루미늄 발포금속의 유효열전도도는 3~7 W/(m K) 영역이었으며 다공도에 반비례하고 셀크기의 변화에는 거의 영향을 받지 않았다. 이것은 다공도가 증가할수록 단위 셀을 이루는 고체의 비율이 감소하여 공기를 통한 열전도의 증가량보다 금속 지주를 통한 열전도의 감소량이 더 크기 때문에 전체적인 열흐름이 줄어들며 다공도가 일정한 경우에는 단위 셀을 이루는 고체의 비율이 일정하므로 셀크기의 영향이 미약하게 되는 것이다.

압력손실 특성은 셀크기가 작아질수록 단위 부피당 표면적의 증가로 압력손실이 증가하며 발포금속의 침투율 K 와 마찰계수 f 는 $f=Re_K^{-1}+0.105$ 의 상관관계를 나타냈다. 그러나, 같은 셀크기에서도 다공도의 변화에 따라 발포금속의 셀구조가 달라지며 다공도 약 0.94에서 압력손실이 최소가 되는 독특한 특성이 나타났다. 따라서, 열시스템의 열전달 촉진을 위한 최적의 발포금속을 선정하기 위해서는 단위 부피당 전열면적(셀크기)의 결정과 함께 다공도의 변화에 따른 압력손실 특성과 유효열전도도 특성을 동시에 고려해야 한다.

참고문헌

- Sozen, M., Vafai, K. and Kennedy, L. A., 1991, Thermal charging and discharging of sensible and latent heat storage packed bed, *J. Thermophysics*, Vol. 5, pp. 623-625.
- Schmidt, F. W. and Willmott, A. J., 1981, *Thermal Energy Storage and Regeneration*, McGraw-Hill.
- Ofuchi, K. and Kunii, D., 1965 Heat-transfer characteristics of packed beds with stagnant fluids, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 8, pp. 749-757.
- Hadley, G. R., 1986, Thermal conductivity of packed metal powders, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 29, pp. 909-920.
- 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.
- Mantle, W. J. and Chang, W. S., 1991, Effective thermal conductivity of sintered metal fibers, *J. Thermophys.*, Vol. 5, pp. 545-549.
- Bauer, T. H., 1993, A general analytical approach toward the thermal conductivity of porous media, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 4181-4191.
- Takegoshi, E., Hirasawa, Y., Matsuo, J. and Okui, K., 1992, A study on effective thermal conductivity of porous metals, *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, (in Japanese) Vol. 58, No.547, B, pp. 879-884.
- Bejan, A., 1995, *Convection Heat Transfer*, 2nd edn, Wiley, New York.
- Metals Handbook*, 9th edn, Volume 2: Properties and Selection; Nonferrous Alloys and Pure Metals, American Society for Metals.
- Dul'nev, G. N., 1965, Heat transfer through solid dispersed systems, *J. Eng. Phys*, Vol. 9, pp. 275-279.
- Beavers, G. S. and Sparrow, E. M., 1969, Non-Darcy flow through fibrous porous media, *J. Appl. Mech.* Vol. 36, pp. 711-714.
- Hamaguchi, K., Takahashi, S. and Miyabe, H., 1983, Pressure drop and thermal performance of regenerator matrix (Case of foam metal), *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, (in Japanese) Vol. 49, No.445, B, pp. 1991-2000.
- Vafai, K. and Tien, C. L., 1982, Boundary and inertia effects on convective mass transfer in porous media, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 25, pp. 1183-1190.