

발포금속의 열전달 특성에 관한 실험적 연구

김 필 환*, 김 미 화*, 김 영 진*, 정 효 민**, 정 한 식**†

경상대학교 기계항공공학부, 정밀기계공학과, BK21 친환경냉열에너지 기계연구사업팀

Study on the Heat Transfer Characteristic of Metallic Foam

Pilhwan Kim[†], Jin meihua^{*}, Youngjin Kim^{*}, Hanshik Chung^{**}, Hyomin Jeong^{**}

*Department of Mechanical and Precision Engineering, school of mechanical and aerospace engineer
Eco-Friendly Heat & Cold Energy Mechanical Research Team, BK21

ABSTRACT: To enhancement heat transfer performance, the metallic foam as heat exchanger was studied rapidly. This was attributed to its high surface area to volume ratio as well as intensive flow mixing by tortuous flow passages. So the experimental study about the heat transfer characteristic of metallic foam is presented in this paper. The material in this experiment was used as FeCrAl which has density of 10 ppi, 20 ppi and 30 ppi respectively. And the results show the heat transfer is rise with permeability Reynolds number increase and the pressure drop metallic foam was increased with the ppi increase.

Key words: Metallic Foam(발포 금속), Porous Medium(다공성 금속) Heat Transfer(열교환), Pressure Drop(압력강하), Nusselt Number(누셀 수)

기 호 설 명

ε : 다공도 [%]
 μ : 공기의 점성계수 [$N \cdot s/m^2$]
 ρ : 공기의 밀도 [kg/m^3]
 ΔP : 공기의 밀도 [Pa]
 L : 공기 유동방향 길이 [m]
 K : 투과 계수 [m^2]
 U : 공기의 속도 [m/s]
 Re_K : 레이놀드 수
 d_p : 기공의 직경

θ : 무차원 온도
 X, Y : x 또는 y 방향의 무차원 길이
 H : y 방향의 최대 길이 [m]
 T_∞ : 대기 온도 [$^\circ C$]
 T_w : 벽면 온도 [$^\circ C$]
 T_f : 유체 온도 [$^\circ C$]
 \ddot{q} : 열유속 [W/m^2]
 $k_{s,eff}$: 발포금속 재료의 유효 열전도율 [W/mK]
 $k_{f,eff}$: 공기의 유효 열전도율 [W/mK]
 h_w : 열전달 계수 [W/m^2K]
 Nu : 누셀 수

† Corresponding author

Tel.: +82-55-646-4766; fax: +82-55-640-3188

E-mail address: pilani@naver.com

1. 서론

최근 기계 장치의 소형화 및 고성능화가 가속됨에 따라 제한된 공간 내에서의 전열 촉진 기술 향상에 대한 기술개발이 중요한 문제가 되고 있다. 이에 다공성 금속은 최근 제조 기술에서 구조, 열, 음향 및 다른 기술 적용에서 독창적이고, 가벼운 재료의 영역에서 개발되어 오면서 작은 체적에 비하여 큰 열전달량을 필요로 하는 곳에 적합한 요소로서 많은 연구가 진행되어 왔다.

다공성 금속은 내부 구조상 단위 부피당 표면적이 매우 크고 고체매질 사이의 복잡한 유로와 유동의 교란으로 인한 유체의 혼합효과가 크기 때문에 전열촉진을 위한 유리한 특성을 가지고 있다.

하지만, 이와 같이 기존의 핀을 사용한 열교환기에 핀을 대체하여 발포금속을 적용할 경우 발포금속의 높은 표면적대 부피 비는 결국 많은 압력손실을 유발하며 이것은 열교환기의 운용경비의 증가를 유발한다. 이와 같이 열전달을 촉진시키기 위해 발포금속을 사용할 경우에는 일반적으로 기초적인 요소로서 발포금속의 유효열전도도 특성과 압력손실 특성이 매우 중요하며 최적의 발포금속을 선택하기 위해서는 이 두 가지 요소를 동시에 고려하여야 한다.⁽¹⁾

따라서 본 연구에서는 이와 같은 요소에 대하여 열교환기에 발포금속을 적용하였을 경우의 발생하는 압력강하 및 열전달 특성에 대한 실험적 연구를 실시하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 실험에 사용된 실험장치의 개략도를 나타낸다. 그림에서 공기의 유동을 변수로 두기 위하여 0.5 hp의 시로코 타입의 팬을 사용하였으며, 이에 컨트롤러를 설치하여 0.4 m/s에서 2.4 m/s의 영역 내에서 유량 컨트롤이 가능하도록 하였다. 공기 유동을 위한 관을 내부길이 140×70×180 mm의 아크릴 챔버로 구성하였으며 재료의 열적 특성을 파악하기 위한 3 mm 두께의 전열판을 테스트부 아래에 장착하여 슬라이더스를 이용하여 전압조절을 함으로서 열유속을 계산할 수 있도록 하였다. 또한 10 mm 두께의 발포금속을 x 방향으로 190 mm 까지 나열하였다.

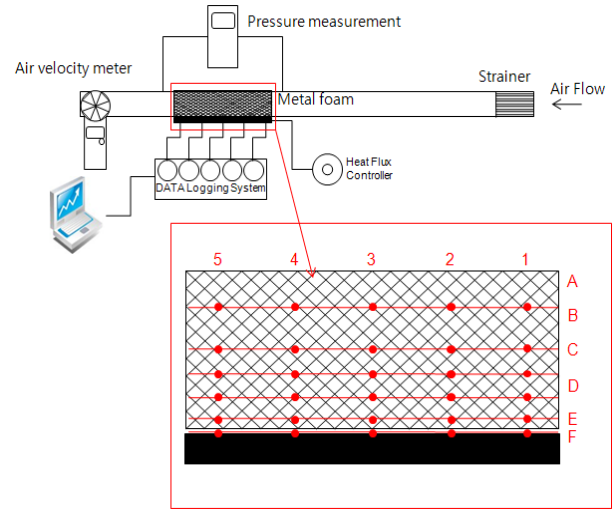


Fig. 1 Schematic diagram of experiment device

y 방향으로 70 mm의 높이로 구성하여 테스트부에 설치하였으며, 확대된 그림과 같이 y 방향으로 전열판 표면의 온도를 포함하여 A~F 그리고 x 방향으로 좌측의 1~5 까지 총 30 개의 열전대를 설치하였으며 외부로부터 공기의 열출입을 최소화하기 위하여 10 mm 이상 두께의 단열재로 재료가 채워져 있는 아크릴 챔버를 단열하였다. 또한 재료를 통과하는 유체의 압력강하의 특성을 파악하여 투과계수 K를 구하기 위하여 마이크로 마노미터를 설치하였다. 챔버내의 유속을 측정하기 위하여 속도계를 시스템의 출구부에 설치하였으며, 최종적으로 온도 데이터는 DS600 모델의 데이터 로그를 통하여 PC에 저장된다.

Table 1 Metallic foam properties and experimental parameters

material	ppi	ϵ	ρ (g/cm ³)	$k_{s,eff}$ (W/mK)
FeCrAl	10	0.88	7.1	2.53
	20	0.89		2.17
	30	0.91		1.58

여기서, 발포금속의 다공도 ε 은 발포금속을 이루는 FeCrAl 재료의 질량과 동일 금속의 같은 부피를 가지는 재료의 질량을 비교함으로써 식 (1)과 같이 구할 수 있었다.⁽²⁾

$$\varepsilon = 1 - \frac{\text{발포금속내의 고체질량}}{\text{같은부피의 고체질량}} \quad (1)$$

3. 실험결과

3.1 압력강하

다공성 금속을 통과하는 공기 유동 내에 발생하는 압력강하에 대한 상관식은 많은 문헌들을 통하여 제시되어 왔다.

최초로 제시된 방정식은 식 (2)와 같이 실험적 결과를 근거로 한 다공성 금속내의 유동에서 길이와 투과율의 압력강하의 수학적 모델로 제시된 Darcy 법이다.⁽³⁾

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{K} U \quad (2)$$

이에 대하여 Dupuit 법은 좀 더 높은 속도 영역에서 중요하게 적용되는 2차 항을 포함하여 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{K} U + \frac{\rho c_F}{\sqrt{K}} U^2 \quad (3)$$

이들의 모델은 Kaviany⁽⁴⁾, Boomsma 그리고 Poulikakos⁽⁵⁾에 의하여 제시된 유동의 레이놀드 수(Re)에 의존한다.

다공성 금속에서 레이놀드 수를 계산하는데 다음 두 가지의 방법이 제시된다. 그 첫 번째로 식 (4)과 같이 투과율 K가 식에 적용된다. 투과율은 실험을 통하여 가장 쉽게 구할 수 있으므로 가장 많이 적용된다.⁽⁶⁾

$$Re_K = \frac{\rho U K^{1/2}}{\mu} \quad (4)$$

하지만, 높은 다공도와 잘 정의된 고체 구조 때문에 개방 셀 다공성 금속은 특별한 경우에 해

당된다. 이에 대하여 Boomsma, Poulikakos⁽⁵⁾ 그리고 Antohe et al.[3] 등은 레이놀드 수를 계산하는데 투과율 대신 셀의 직경을 대체하여 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$Re_K = \frac{\rho U d_p}{\mu} \quad (4)$$

Fig. 2는 발포 금속 내부를 통과하는 공기 유동에서 발생하는 압력강하에 대한 그래프를 나타낸다. 압력강하는 속도의 증가에 따라 2차 함수 관계로 증가함을 보여주며, ppi의 증가에 따라서 압력강하가 크게 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이는 동일 공간 내에 고체 셀이 더 세밀하게 분포되어 공기 유동에 저항이 더 크게 발생하는 것으로 생각된다.

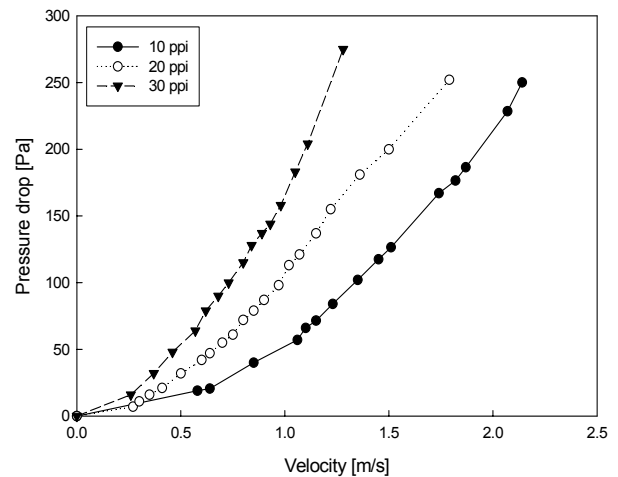


Fig. 2 Pressure drop with velocity

3.2 무차원 온도 분포

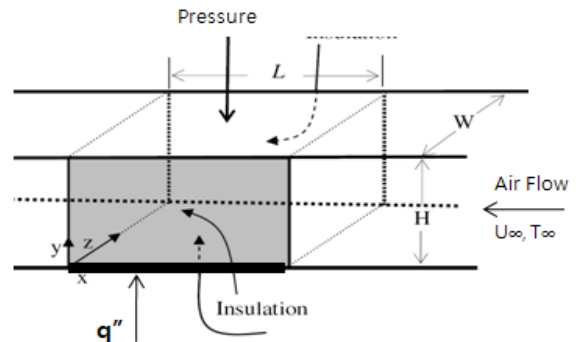


Fig. 3 Schematic of metallic test part

본 연구에서 측정된 테스트 부 내의 온도는 다공성 물질을 통과하는 공기의 온도라고 가정 할 수 있으며, 실험여건에 따라 발생하는 외부 공기의 온도변화와 히터의 열유속의 변화를 보정하기 위해 식 (5)와 같이 무차원 식을 정의하여 각각의 실험 결과를 비교하였다.⁽⁷⁻⁹⁾

$$\Theta(X, Y) = \frac{T - T_{\infty}}{qH/k_{s,eff}} \quad (5)$$

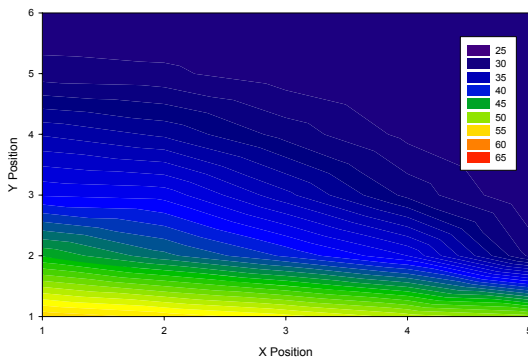
$$X = x/H, Y = y/H,$$

여기서, T_{∞} 는 공기의 입구 온도를 나타내며, 각 실험에서 측정된 입구온도는 Table 2와 같다.

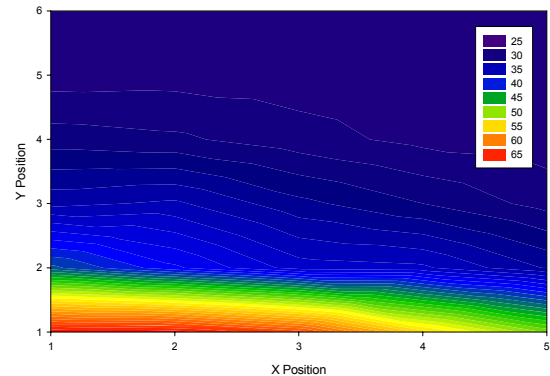
Table 2 Inlet temperature condition in every experiment

ppi	Inlet temperature
10	27.2 °C
20	29.1 °C
30	28.3 °C

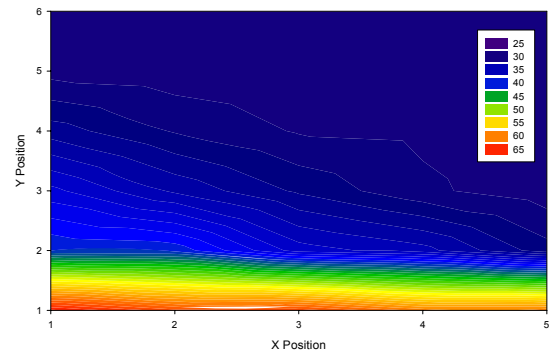
Fig. 4의 (a)에서 (c)는 실험으로부터 측정된 온도 분포를 나타낸 것이다. 그래프로부터 ppi의 증가에 따라 전열관 근처에서의 온도가 상승하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 전열관과 발포금속의 고체 부분과의 접촉면이 ppi의 증가에 따라 증가함으로 인해 전열관 근처에서의 전도 열전달의 영향과 동시에 더욱 복잡해지는 내부 구조에 의해 공기의 고체 셀 주변에서 공기의 정체 현상으로 인해 공기의 온도가 상승하는 것으로 보인다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 Temperature profiles in the FeCrAl metal foam for the 10 ppi(a), 20 ppi(b), 30 ppi(c), respectively at the velocity of 1.2 m/s.

또한, 각 실험마다 환경의 미세한 변화를 고려하여 각 실험의 온도 데이터를 무차원화하여 서로 비교한 결과 Fig. 5에서 Fig. 7과 같이 나타난다.

먼저, Fig. 5에서 입구에서 출구로 갈수록 온도가 급격히 변화하며, 전열관으로부터 Y 축 방향으로 증가할수록 온도가 급격히 변화하면서 Y 축이 최대가 되는 지점에서의 온도는 입구와 출구 사이에 온도변화가 거의 없음을 확인할 수 있다. Fig. 6과 Fig. 7에서도 동일한 경향을 보이며, 전체적으로 ppi의 증가에 따라서 출구의 온도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 하지만, Fig. 4의 전체 온도 분포에서는 (a)의 10 ppi의 경우의 온도가 대체로 낮은 분포결과를 보여주지만, 무차원 온도에서는 10 ppi의 경우 전열관 근처에서 가장 높은 온도 분포를 보여준다. 이는 Table 2에서 보여지는 것과 같이 각 실험에서의 공기 유동의 입구에서의 온도가 다른 실험에 비해 낮기 때문에 유입 온도에 비해 상대적으로 온도변화가 크게 일어났음을 의미한다. 또한, 10 ppi의 경우 중

간 지점까지 온도 변화가 일어나면서 다른 타입에 비해 고체면을 통한 전도 열전달이 더 잘 일어났음을 예측할 수 있다.

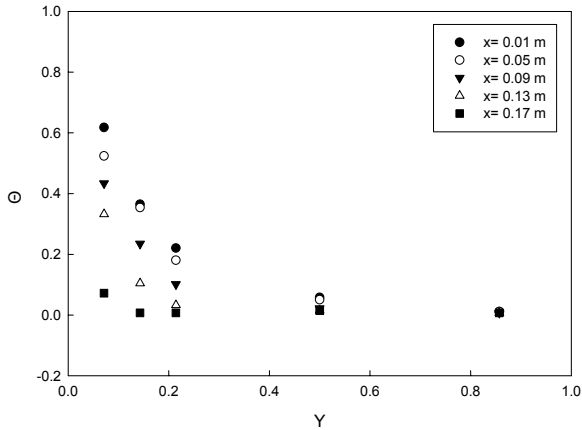


Fig. 5 None-dimensional Temperature distributions at the pore density is 10 ppi.

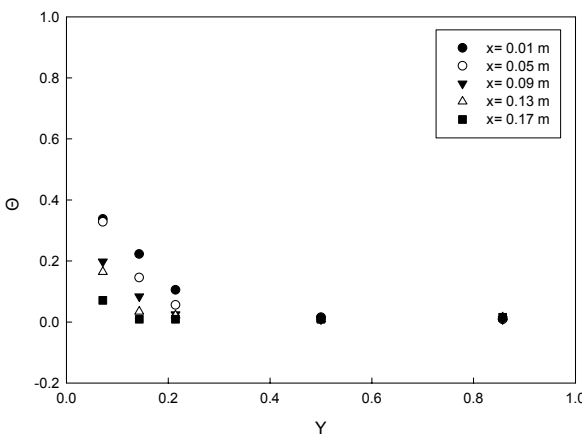


Fig. 6 None-dimensional Temperature distributions at the pore density is 20 ppi.

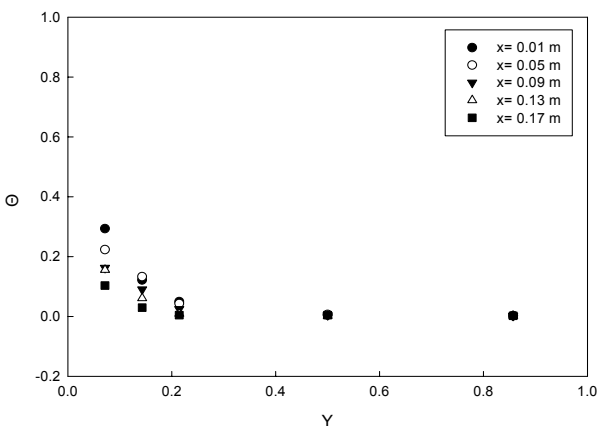


Fig. 7 None-dimensional Temperature distributions at the pore density is 30 ppi.

4. 결론

본 연구에서는 발포금속을 열교환기에 적용한 경우 발생하는 압력강하 및 온도 분포 특성을 발포금속 종류를 구명하는 ppi의 종류에 따른 실험적 결과를 비교하였다.

결과로부터 실험에 사용된 재료는 ppi의 증가에 따라 다공도가 각각 0.88, 0.89, 0.91로 측정되었다.

압력강하의 특성에서 속도의 증가에 따라 압력강하가 2차원의 함수 관계로 증가하였으며, ppi의 증가에 따라 압력강하가 크게 증가함을 보여주었다.

무차원 온도 분포 특성을 비교한 결과 10 ppi의 발포금속인 경우가 전열판 벽면 근처에서 비교적 높은 온도 분포를 보였으며, 전열판과의 법선 방향으로의 열전달이 다른 타입에 비해 더 잘 이루어진 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식경제부 산업기술재단의 지역혁신인력 양성사업과 ITEP 중점기술개발 사업의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국과학기술연구원, 1990, "다공성 물질을 이용한 전열촉진기술 개발", 과학기술부, pp. 03 ~06.
2. 백진욱 외 3인, 1999, "알루미늄 발포금속의 유효열전도도와 침투율의 측정", 공기조화 냉동공학 논문집 제 11권 제2호, pp. 185~192
3. K. Boomsma, D. Poulikakos, Y. Ventikos, 2003, "Simulations of flow through open cell metal foams using an idealized periodic cell structure", IJHFF 24, pp. 825~834
4. Kaviany, M., 1995. Principles of Heat Transfer in Porous Media. Springer-Verlag, New York.
5. Boomsma, K., Poulikakos, D., 2002. The effects of compression and pore size variations on the liquid flow characteristics of metal foams. Journal of Fluids Engineering-Transactions of the ASME 124,

263~272.

6. K. Boomsma, D. Poulikakos, F. Zwick, 2003, "Metal foams as compact high performance heat exchangers", *Mechmat*, 35, pp. 1161~1176.
7. Nihad Dukhan, Pablo D. Quinones-Ramos, Edmundo Crux-Ruiz, Miguel Velez-Reyes, Elaine P. Scott, 2005, " One-dimensional heat transfer analysis in open-cell 10-ppi metal foam", *IJHMT*, 48, pp. 5112~5120.
8. Nihad Dukhan, Kuan-Chih Chen, 2007, "Heat transfer measurements in metal foam subjected to constant heat flux", *ETFS*, 32, pp. 624~631.
9. W. Lu, C.Y. Zhao, S.A. Tassou, 2006, "Thermal analysis on metal-foam filled heat exchangers. Part I: Metal-foam filled pipes", *IJHMT*, 49, pp. 2751~2761.