

# 발포 금속 내 공기 유동 및 압력강하에 관한 시뮬레이션

김 필 환<sup>†</sup>, 김 미 화, 장 석 준, 정 한 식, 정 효 민

경상대학교 기계항공공학부, 정밀기계공학과, BK21 친환경냉열에너지 기계연구사업팀

## The Simulation about the Air Flow and Pressure Drop inside the Metal Foam

Pilhwan Kim<sup>†</sup>, Jin meihua<sup>\*</sup>, Seokjun Jang, Hanshik Chung<sup>\*\*</sup>, Hyomin Jeong<sup>\*\*</sup>

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

**ABSTRACT:** Porous medium was considered in the present study for the heat transfer enhancement. This was attributed to its high surface area to volume ratio as well as intensive flow mixing by tortuous flow passages. But when the air or water flow through in the porous medium, it is occurred the pressure drop between inlet and outlet. So in the present study investigated simulation result about the pressure drop in the porous medium before apply to heat exchanger. In this simulation, the thickness of the solid inside the porous medium region was varied 0.2 mm to 0.4 mm. And then the simulation result were compared the pressure drop in the same unit cell (0.5 mm x 0.5 mm x 0.5 mm). To make the analysis model, it was assumed the 14-sided tetrakaidecahedron cell which has long been considered the optimal packing cell first proposed by the Lord Kelvin in 1887. And then the simulation is carried out using by STAR-CCM+ which is commercial software. The simulation result can be showed quantified pressure drop by solid effect in the porous medium.

**Key words:** Porous medium(다공성), Metallic Foam(발포금속), Pressure Drop(압력강하)

### 기 호 설 명

$\Delta P$  : 압력강하  
 $L$  : 유동방향 길이 [m]  
 $\mu$  : 공기의 점성계수  
 $\nu$  : 동점성 계수

$k$  : 난류 운동에너지  
 $I$  : 난류강도  
 $\varepsilon$  : 난류 운동에너지 소멸율  
 $K$  : 투과율  
 $U$  : 유체의 속도  
 $\rho$  : 유체의 밀도  
 $C_F$  : 유체의 비열  
 $d_p$  : 기공의 직경

<sup>†</sup> 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 부피비는 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.

따라서 본 연구에서는 우선 발포 금속내의 유동 패턴과 입 출구 사이의 압력강하의 특성에 대하여 상용 시뮬레이션 프로그램인 STAR-CCM+ 를 사용하여 시뮬레이션 한 결과를 분석하였다.

## 2. 압력강하

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

최초로 제시된 방정식은 식 (1) 과 같이 실험적 결과를 근거로 한 다공성 금속내의 유동에서 길이와 투과율의 압력강하의 수학적 모델로 제시

된 Darcy 법이다.

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{K} U \quad (1)$$

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

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

이들의 모델은 Kaviany[1], Boomsma 그리고 Poulikakos[2]에 의하여 제시된 유동의 레이놀드 수(Re)에 의존한다.

다공성 금속에서 레이놀드 수를 계산하는데 다음 두 가지의 방법이 제시된다. 그 첫 번째로 식 (3)과 같이 투과율 K 를 식에 적용된다. 투과율은 실험을 통하여 가장 쉽게 구할 수 있으므로 가장 많이 적용된다.

$$Re_K = \frac{\rho U K^{1/2}}{\mu} \quad (3)$$

하지만, 높은 다공도와 잘 정의된 고체 구조 때문에 개방 셀 다공성 금속은 특별한 경우에 해당된다. 이에 대하여 Boomsma, Poulikakos [2] 그리고 Antohe et al.[3] 등은 레이놀드 수를 계산하는데 투과율 대신 셀의 직경을 대체하여 다음과 같은 식을 제시하였다.

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

## 3. 수치해석을 위한 모델링

Fig. 1 (a) 과 같이 발포금속의 미소구조는 매우 복잡하고 각각의 셀 크기와 형태도 불균일하다. 이런 복잡한 셀 구조를 가진 발포 금속 내부의 유동 해석을 하기 위하여 Fig. 1 (b) 와 같이 단위 셀의 구조를 정육면체로 가정한 Dul 'nev 모델을 적용하기도 하였다.[4]

또한, 시뮬레이션을 위한 모델로서 Fig. 2 (a) 와 같은 14면체로 구성된 Lord Kelvin 의 모델을

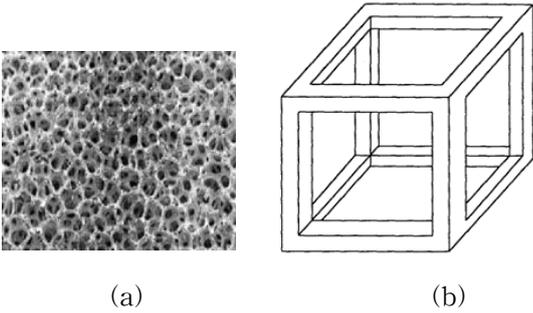


Fig. 1 Structure of metallic foam

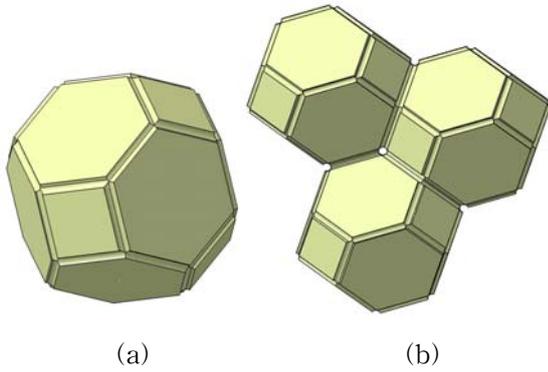


Fig. 2 Geometry of a single tetrakaidecahedron and an array of three tetrakaidecahedra[5]

(b) 와 같이 조합하여 Fig. 3 과 같이 모델링하였다.

#### 4. 지배 방정식 및 경계조건

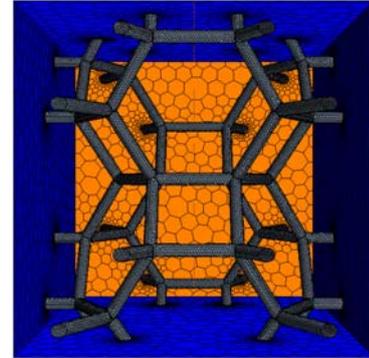
유체의 유동을 해석하기 위한 연속방정식을 식 (1) 과 같이 나타내며, 이를 직각 좌표계에서 나타내면, 식 (2) 와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

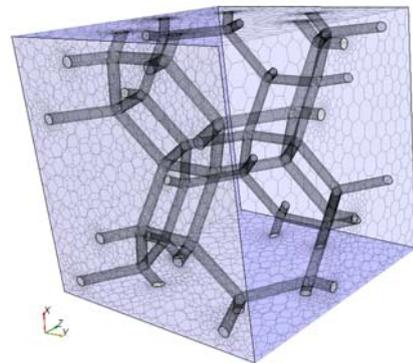
$$\frac{\partial \rho}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial \rho}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial \rho}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (2)$$

또한, 유체 유동의 운동량 방정식을 고려한 지배방정식을 나타내면 식 (3) 과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = \rho g - \nabla p + \nabla \cdot \tau_{ij} \quad (3)$$



(a)



(b)

Fig. 3 The structure of modeling in the metallic foam

본 시뮬레이션에서 사용된 난류 모델은  $k-\epsilon$  을 사용하였으며, 상용 소프트웨어인 STAR-CCM+에서 적용되는 난류 운동에너지  $k$  와 난류 운동에너지 소멸율  $\epsilon$  에 관한 방정식은 식 (4), (5) 와 같다.

$$k = 1.5 \times I^2 \times U^2 \quad (4)$$

$$\epsilon = \frac{(\rho \times 0.09 \times k^2)}{\nu \times \mu} \quad (5)$$

발포금속 내부의 유동 해석 조건으로 각각의 모델에 적용되는 입구 속도는 1 m/s, 293 K 로 동일하게 하였으며, 출구의 조건을 대기압 조건으로 하여 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, 본 논문에서 수행한 시뮬레이션은 전체 발포금속에서 0.005 m 내의 미세한 일부의 모델을 형성하여 계산한 점을 고려하여 입출구 경계를 제외한 외

부에는 대칭 조건을 주어 시뮬레이션을 수행하였다.

### 5. 결과 및 고찰

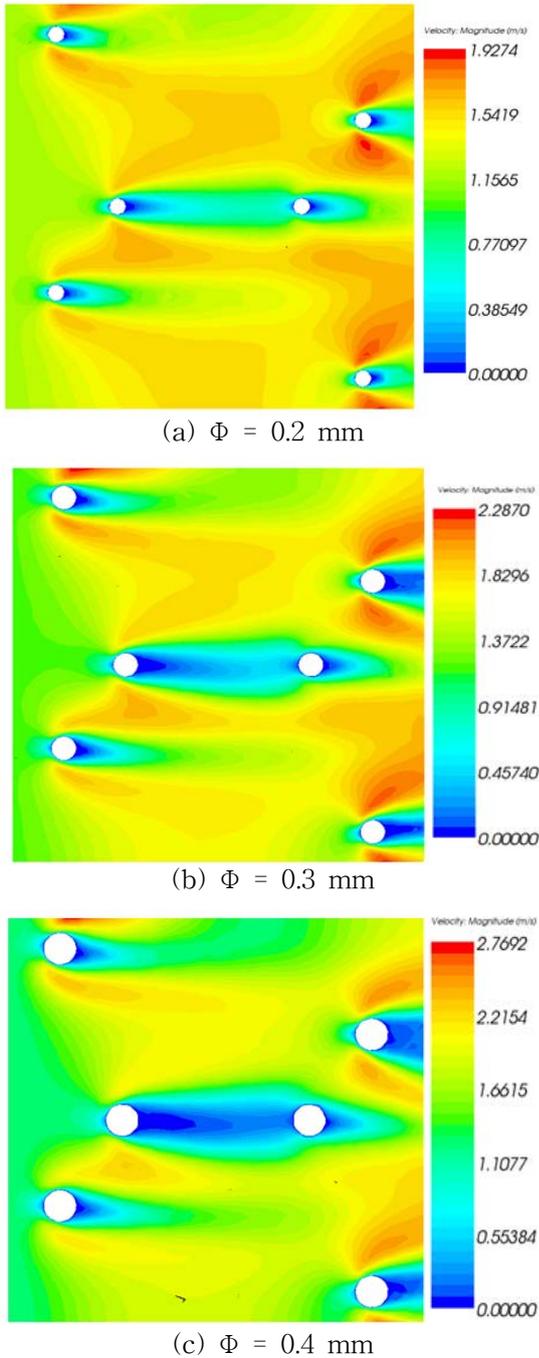


Fig. 4 Velocity distribution of metallic foam

시뮬레이션을 위하여 Fig. 3의 (b)에서 z 축 방향으로 공기가 통과할 경우 공기의 유동에서 내부에 복잡하게 얽혀있는 고체 셀 구조와 충돌하면

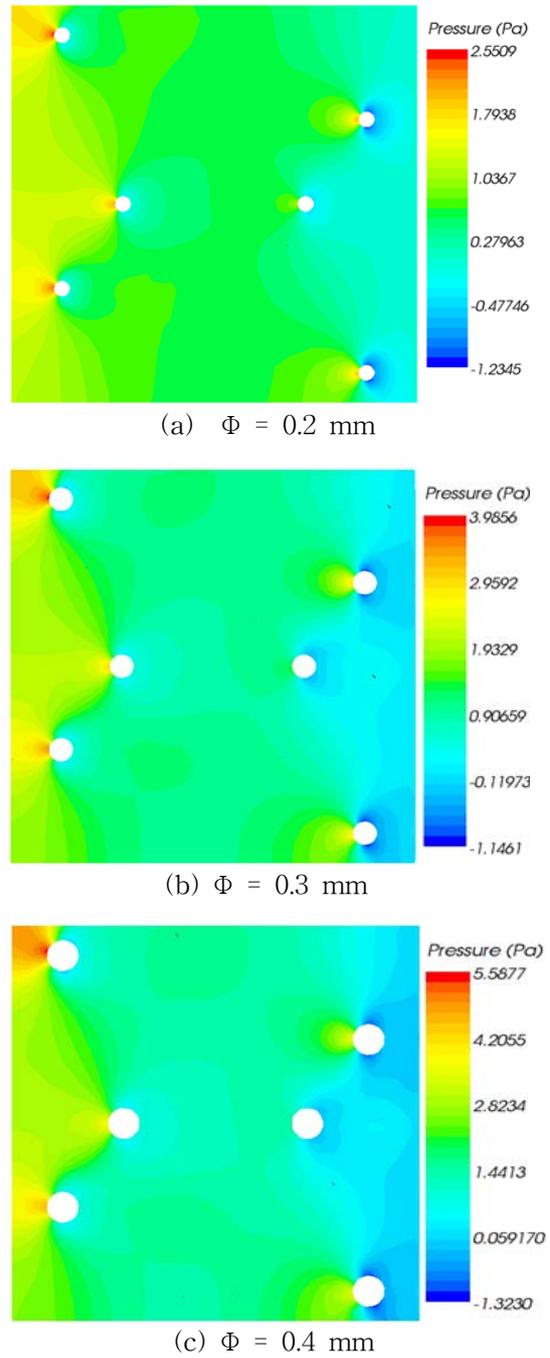


Fig. 5 Pressure distribution of metallic foam

서 입구와 출구 사이에 압력강하가 발생하고 유동의 교란이 일어나게 된다.

Fig. 4 (a)는 모델의 가운데 영역에 평면을 생성하여 시뮬레이션 결과에 대한 속도 분포로서 입구에서 유입된 공기는 첫째 열에 있는 고체 셀과 충돌하면서 고체 셀 주변에 와류를 형성하고 고체 셀을 따라 돌며 압력구배에 의해 가속이 되고 셀의 중앙을 지난 유동은 역압력 구배의 영향

으로 속도가 늦추어지며 셀의 두께가 두꺼워질수록 셀의 중앙에서 발생하는 역압력 구배의 영향이 두 번째 열의 고체 셀에 영향을 미치게 됨으로서 셀의 두께가 두꺼워짐에 따라 출구의 속도가 증가하는 경향이 나타남을 알 수 있다.

Fig. 5는 내부의 압력강하에 대한 분포를 나타내며, Fig. 4의 속도분포와 비교하여 반비례하는 경향을 보임으로서 입구와 출구 사이에 압력강하가 발생함을 알 수 있다. 또한 고체 셀의 두께가 증가할수록 압력강하가 더 크게 나타남을 보여준다.

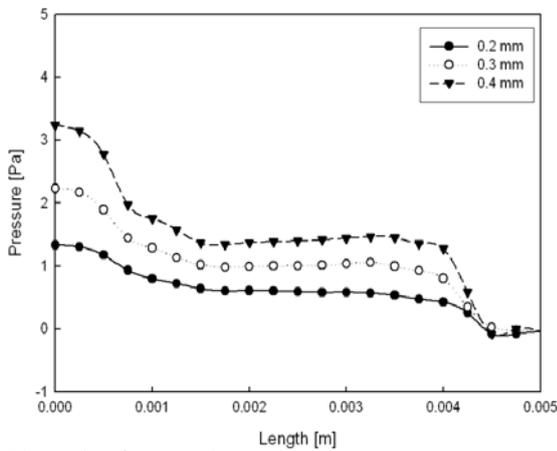


Fig. 6 Comparison of average pressure distribution with the length for metallic foam

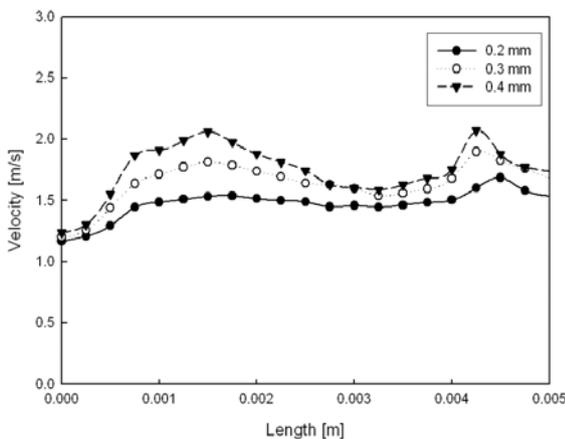


Fig. 7 Comparison of average velocity distribution with the length for metallic foam

Fig. 6과 7은 시뮬레이션 결과를 z 축의 길이 방향으로의 평균 압력과 속도 값을 나타낸다. 여

기서 압력의 분포는 길이 방향으로 갈수록 감소하여 나타남으로서 두께가 클수록 압력강하가 더 크게 나타남을 알 수 있다. 그리고 약 0.001 m에서 0.004 m 사이에서는 거의 균일한 분포를 보이는데 이는 고체 셀 사이에 기공을 형성하는 부분이므로 유동에 저항하는 요소가 없기 때문이다. 또한 속도 분포에서는 압력분포와 반비례하여 증가하여 나타나면서 특히 셀의 두께가 두꺼운 영역으로 갈수록 속도의 증감이 크게 나타나는데 이는 고체의 두께가 두꺼워질수록 전반부의 고체 셀의 뒷부분에서 발생하는 재순환 영역의 영향이 크게 미치기 때문이다.

#### 4. 요약

본 논문에서는 발포금속의 내부를 형성하는 고체 셀이 공기의 유동에 미치는 영향에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 0.005 m 내의 단위 부피 내부에서 발생하는 압력강하는 0.4 mm의 두께에서 약 3 Pa로 가장 큰 압력강하로 나타내면서 고체 셀의 두께가 발포금속 내부를 통과하는 유체의 유동에 큰 영향을 미침을 확인할 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 지식경제부 산업기술재단의 지역혁신 인력양성 사업과 ITEP 중점기술개발 사업의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Kaviany, M., 1995. Principles of Heat Transfer in Porous Media. Springer-Verlag, New York.
2. 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.
3. Antohe, B.V., Lage, J.L., Price, D.C., et al., 1997. Experimental determination of permeability and inertia coefficients of mechanically compressed aluminum porous

matrices. Journal of Fluids Engineering-Transactions of the ASME 119, 404-412.

4. D. Y. Lee, J. S. Jin, B. H. Kang, 2000 Optimum Design of a Compact Heat Exchanger with Foam Metal Insertion, Architecture & Urban Research Information Center, AURIC.
5. J. G. Fourie, J. P. Du Plessis, 2002, Pressure drop modelling in cellular metallic foams, Chemical Engineering Science 57, 2781-2789.