

다공성 분리판을 적용한 고분자 전해질 연료전지의 유동 분포에 관한 전산해석 연구

송명호¹ · 김경연^{2†}

¹한밭대학교 대학원, ²한밭대학교 기계공학과

Numerical Study on Flow Distribution in PEMFC with Metal foam Bipolar Plate

MYEONGHO SONG¹, KYOUNGYOUN KIM^{2†}

¹Graduate School of Hanbat National University

²Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Daejeon 34158, South Korea

Abstract >> It is important to uniformly supply the fuel gas into the reaction activity area in polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC). Recent studies have shown that the cell performance can be significantly improved by employing metal foam gas distributor as compared with the conventional bipolar plate types. The metal foam gas distributor has been reported to be more efficient to fuel transport. In this study, three-dimensional computational fluid dynamics (CFD) simulations have been performed to examine the effects of metal foam flow field design on the fuel supply to the reaction site. Darcy's law is used for the flow in the porous media. By solving additional advection equation for fluid particle trajectory, the gas transport has been visualized and examined for various geometrical configuration of metal foam gas distributor.

Key words : Computational fluid dynamics(전산유체역학), PEMFC(고분자 전해질 연료전지), Metal foam(메탈 폼), Flow field(유동 필드), Permeability(투과도), Bipolar plate(분리판)

Nomenclature

P : pressure, Pa
g : gravitational acceleration, m/s^2
K : permeability, m^2
S_i : momentum source
ε : porosity
μ : dynamic viscosity, kg/m·s

Subscripts

MEM : membrane
MEA : membrane electrode assembly
PEM : polymer electrolyte membrane; proton exchange
membrane
GC : gas channel
GDL : gas diffusion layer
CL : catalyst layer

[†]Corresponding author : kkim@hanbat.ac.kr

Received: 2016.1.29 in revised form: 2016.2.22 Accepted: 2016.2.28

Copyright © 2016 KHNES

1. 서 론

최근에는 환경보호에 대한 관심이 높아지면서 저공해 에너지 개발의 필요성이 높아짐에 따라 연료전지의 개발 필요성이 증가하고 있다¹⁻³⁾. 그 중에서도 고분자 전해질 연료전지(PEMFC)는 수명이 길고 저온에서도 높은 전류밀도를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다³⁻⁵⁾. PEMFC가 작동을 하기 위해서는 채널(GC; gas channel)을 통해 확산되고, 촉매층(CL; catalyst layer)에 도달하여 전기화학반응이 일어난다. 수소 이온은 전기화학반응으로 인하여 전해질막(MEM; membrane)을 통해 양극으로 이동하게 되고 양극에 공급된 산소와 반응함으로써 물을 생성하게된다. 이 때 들어가는 수소는 유동장을 통하여 MEA의 표면에 고르게 분포된다. 이때 반응의 효율은 유동이 잘 분포 되었는지에 따라 비례한다. 이와 같은 이유로 분리판 내부에서의 유동은 균일성을 확보해야 한다.

최근에 가장 많이 사용되고 있는 분리판의 재질은 그래파이트이다. 그러나 그래파이트는 기계적 강도가 매우 약하고 비용이 비싸다⁶⁾. Kumar and Reddy^{7,8)}는 분리판 유동 필드에 그래파이트 대신에 메탈 폼을 사용하여, 기존의 분리판보다 좋은 작동을 보여, 메탈 폼이 분리판 재료로서의 가능성을 확인하였다. 앞선 연구들은 기존 그래파이트 분리판의 형상에 따른 유동분포에 관한 연구들이 주를 이루며, 최근 떠오르는 메탈 폼을 적용한 분리판에 관한 연구는 미미한 실정이다.

본 연구에서는 유동지역의 다공성 분리판의 설계에 따른 연료공급 효과를 알아보기 위해 상용 소프트웨어 FLUENT를 사용하여 3차원 전산해석을 수행하였으며, Tsai et al.⁹⁾의 실험 결과를 비교대상으로 하여 기존 그래파이트 사행유로의 형상과 메탈 폼을 적용한 기본적인 구조의 유동 필드 형상을 재연하여 전산해석결과를 검증하였으며, 이를 토대로 각 유형의 유동장을 가시화하여 살펴보았다. 다공성 매질에서의 유동을 해석하기 위해 Darcy's law를 사용하였

고, Tsai et al.⁹⁾의 실험과 동일한 작동조건으로 수행되었다. 해석결과를 통해 새로운 형상을 도출하였다.

2. 해석방법

본 연구에서는 채널 내의 유동은 정상 상태, 등온, 층류의 3차원 유동으로 가정하였으며, 흐르는 유체에서 변화의 방정식은 유체 내의 미소체적 성분내 대한 질량과 운동량 보존을 나타내는 연속 방정식과 Navier-Stokes 방정식으로 다음과 같다.

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

$$\frac{\partial \rho \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \mathbf{g} + S_i \quad (2)$$

P는 압력이고 ρ 는 밀도를 나타내며, ϵ 는 기공율, $\bar{\tau}$ 는 점성 응력 텐서, V는 유체의 속도, g는 중력가속도이다. S_i 는 Darcy's law로 표현된 운동량 Source 항이 운동량 방정식에 추가된 것이다. 여기서 Darcy's law란 다공성 매질을 통과하는 유체의 단위 시간당 유량과 유체의 점성, 유체가 흐르는 거리와 그에 따는

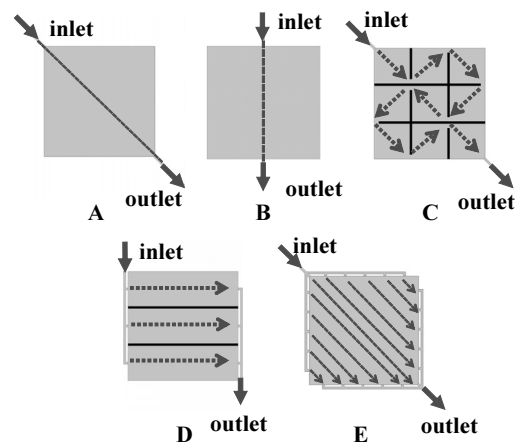


Fig. 1 Flow field designs

압력 차이 사이의 비례 관계를 의미한다. 다공질 흐름 장에서는 Darcy's law로 압력강하를 구할 수 있다.

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{K}V + C\frac{1}{2}\rho|V|V\right) \quad (3)$$

이 Source 항은 점성 손실항과 관성 손실항으로 이루어져 있으나, 낮은 유속에서는 압력강하는 주로 점성 손실에 의해서만 영향을 받으며, 다공성 매체에서는 유체의 속도에 비례하여 압력강하를 일으킨다. μ 는 점성계수, K 는 투과도(Permeability)를 나타낸다. 투과도란 유체가 다공성체를 얼마나 쉽게 통과하는지를 나타내는 척도이다. Tsai et al.⁹⁾에서 투과도와 공극률 값이 명시 되어있지 않다. 본 연구에서는 시행착오법과 최소사승법을 활용하여 투과도($K=1.29E-8 \text{ m}^2$)를 선정하였다. 이 투과도 값은 대표적인 메탈폼 투과도 값 범위 안에 속한다. 공극률은 메탈폼의 일반적인 공극률 0.9를 적용하였다.

연료전지로 공급되는 기체는 Tsai et al.⁹⁾의 실험과 동일하게 100% 가습된 공기이며, 기체의 밀도는 다음과 같다.

$$\rho = \frac{P}{RT/M} \quad (4)$$

P 는 압력, R 은 이상기체 상수이고, M 은 각 기체들의 몰 질량을 나타낸다. 이에 따른 공기의 밀도는 1.039 kg/m^3 이다. 혼합 기체의 점성 계수는 아래 식으로 계산된다.

$$\mu = \sum_{i=1}^N \frac{x_i \mu_i}{\sum_{j=1}^N x_j \phi_{ij}} \quad (5)$$

$$\phi_{ij} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{M_i}{M_j}\right)^{-1/2} \left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j}\right)^{1/2} \left(\frac{M_i}{M_j}\right)^{1/4}\right]^2 \quad (6)$$

여기서 Φ 는 무차원 상수이다. N 은 혼합물에 들어 있는 화학종들의 총수이고, x_i, x_j 은 i 와 j 종의 몰분율이며, M_i, M_j 은 i, j 종의 분자량이다. 위 식에 의한 점성 계수는 $1.96E-5 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ 이다.

채널 입구에서는 유량에 의해 산출된 일정한 속도가 부과되며, 채널 출구에서는 유출 조건이 적용되었다. 입구와 출구를 제외한 경계 조건은 점착조건으로 설정하였다.

Fig. 1은 전산해석 영역이며, 이때 해석에 사용된 격자 수는 약 280만개이다. 격자 해상도를 테스트하기 위해 격자 수를 50% 증가시켜 전산해석을 수행하였다. 그 결과 압력강하의 변화가 3%로 사용된 격자가 충분히 조밀함을 확인하였다. 모든 유형의 활성면적은 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$, 다공질 분리판의 두께는 1 mm , 공급유로의 단면적은 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 이다. 회색으로 표현된 부분이 다공성 매질로 이루어진 메탈 폼을 나타낸다. 유형 A는 하나의 영역으로 구성되어 있으며, 유동이 대각선으로 흐른다. 유형 B는 유형 A와 마찬가지로 하나의 영역이지만 유동이 위에서 아래로 흐른다. 유형 C와 D에서 표시된 검은색 부분은 유동의 고른 분배를 목적으로 설치된 격벽을 나타낸다. 유형 C는 유형 A에서 9가지 영역으로 나뉘어진 형태이다. 유형 D는 세 군데로 영역이 나뉘어져 있고 연료의 입출구가 3개씩인 병렬 형태이다. 유형 A, B, C, D는 Tsai et al.⁹⁾의 실험과 동일한 형태의 유동 필드이고, 유형 E는 본 연구에서 새롭게 제시한 형상으로, 낮은 압력강하와 고른 유동 분포를 목적으로 고안되었다.

3. 해석결과

메탈폼의 입출구에서 측정한 압력강하 그래프를 Fig. 2에 나타내었다. 공급 유량이 증가할수록 압력강하는 증가한다. 유형 C의 압력강하가 높게 나타났는데, 이는 C가 다른 유형들에 비해 긴 유동 경로를

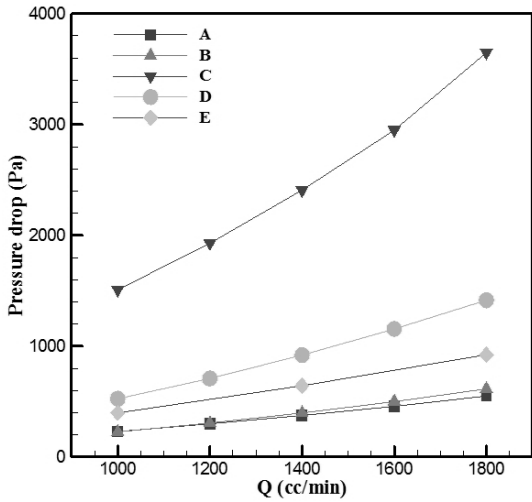


Fig. 2 Pressure drop in the porous media of metal foam flow field

가지고 있기 때문이다. 다음으로 유형 D가 높은 압력강하를 나타냈다. 유형 A, B는 거의 같은 수치를 보였다. 유형 E는 유형 D와 유형 A, B 사이의 압력강하 수치를 나타냈다. 유형 E는 유형 D보다 연료분배가 많은 형상이지만, 연료의 입구와 출구의 방향이 일치하여 유형 D보다 낮은 압력강하가 발생했다.

Fig. 3은 유량 1800 cc/min일때, 유형별 압력 분포를 중심 평면에 나타내었다. 모든 유형에서 입출구

유로에서의 압력강하가 크게 일어나며, 유형 C에서는 유동 경로가 다른 유형들에 비해 상당히 길기 때문에 아주 큰 차이를 보인다. 유형 A와 B의 압력강하가 가장 낮은 수치를 나타냈다.

유선을 통해 유동분포를 가시화하여 알아보았다. Fig. 4는 유량이 1800 cc/min 일 때, 각 유형의 유선을 중심 평면에 나타낸 그림이다. 유형 E가 다른 유형들에 비해 정성적으로 고른 분포임을 알 수 있다.

연료분배에 대한 정량적 비교를 위해, 입구에서 공급되는 염료(dye)가 메탈 폼 내부로 전달되는 과정을 아래의 대류방정식으로 해석하였다.

$$\frac{DC}{Dt} = \alpha \nabla^2 C \tag{7}$$

C는 염료의 질량분율, α 는 확산계수로 대류현상만을 고려하므로 확산계수의 값은 0 이어야한다. 수치적 안전성을 위해 임의로 매우 작은 값(1E-30)을 이용하였다. 초기조건은 $C(x, t=0)=0$ 으로 부과하고, 입구 경계조건은 $C=1$ 을 부과하였다. 이때 해석에 사용된 시간간격은 1E-4초이다. Fig. 5는 시간에 따른 염료의 질량분율 분포를 나타내었다. 검은색부분이 연

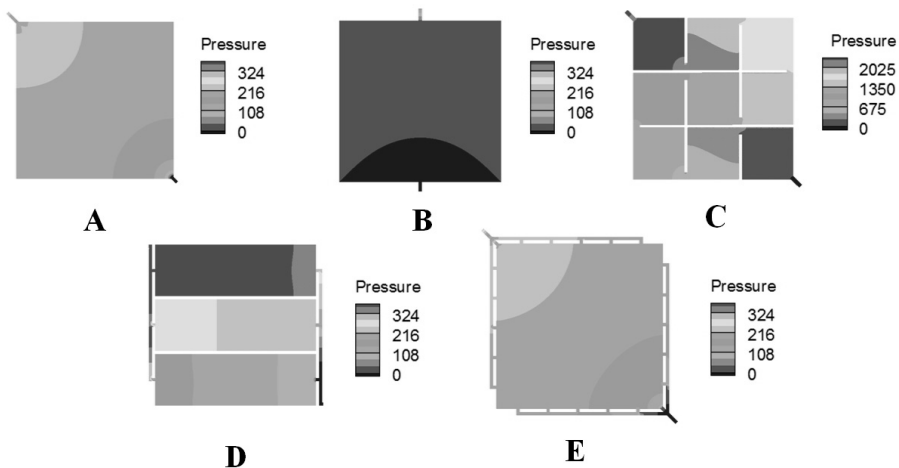


Fig. 3 Pressure contours in metal foam flow field designs

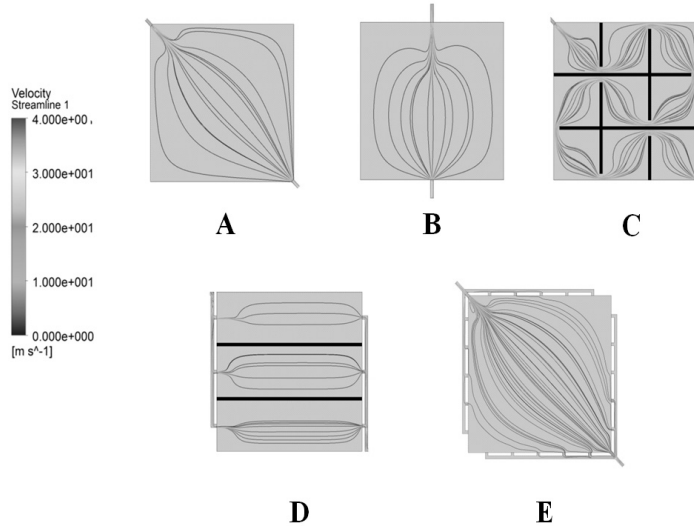


Fig. 4 Streamline in metal foam flow field designs

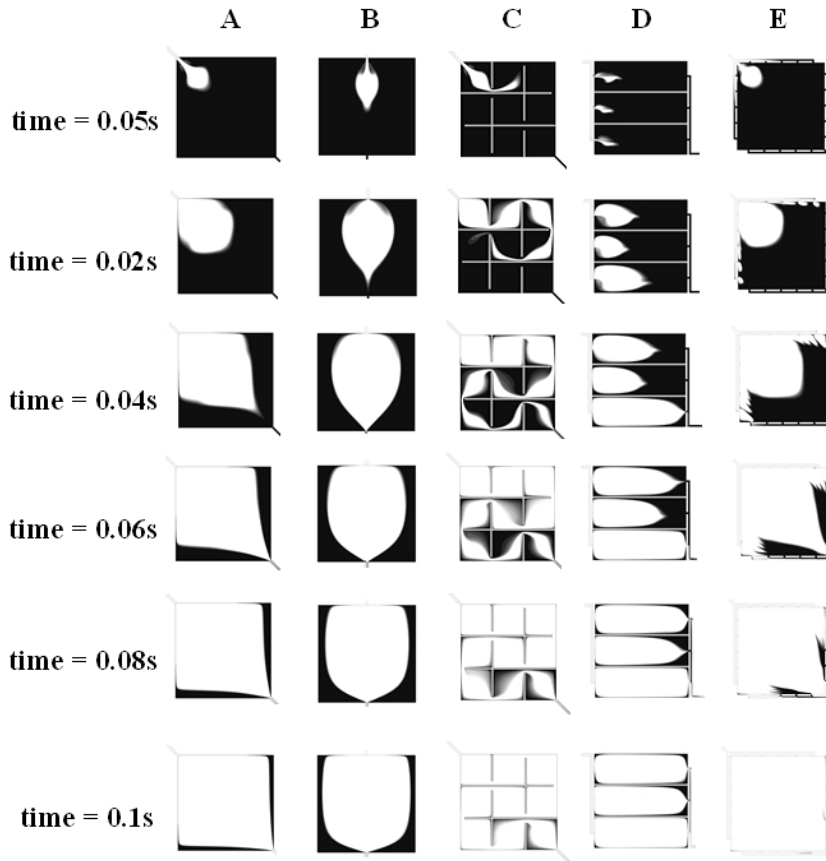


Fig. 5 Visualization of dye injected from the inlet for Q=1800cc/min

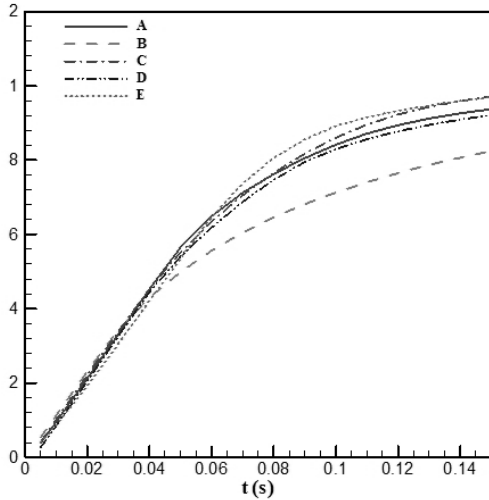


Fig. 6 Volume averaged mass fraction of injected dye in the metal foam

료가 공급되지 않은 부분이다. 유선으로 살펴본 유동 분포와 같은 패턴으로 입자가 퍼지는 것을 확인할 수 있다. E 형상에서 염료가 가장 고르게 분포되었다. 시간에 따른 염료의 분배를 정량적으로 분석하기 위해, 메탈폼 내부에서 평균된 염료의 질량 분율을 시간에 따라 Fig. 6에 나타내었다. 유형 E가 가장 빠른 질량 분율의 상승을 보이며, 이는 유동이 입구에서 공급되는 염료가 빠른 시간 내에 메탈폼 내부로 고르게 분배됨을 의미한다.

4. 결 론

본 연구는 고분자 전해질 연료전지의 성능향상을 위해 연료공급 측면에서 전산해석을 수행하였다. 다공성 매질에서의 유동을 해석하기 위하여 Darcy's law를 사용하였으며, 다공성 매질의 투과도를 예측하여 실험결과와 비교하였다. 또한, 편미분 방정식을 이용해 연료분포를 시각화, 정량화하여 비교하였다. 전산해석 결과는 다음과 같다.

- 1) 5가지 유형에 따른 압력강하와 유동 패턴, 압력 분포를 비교하였다. 메탈 폼 내부에서의 압력강하를 살펴보면, 유형 C가 가장 높은 압력강하를 보였으며, 유형 A와 B가 가장 낮은 압력강하를 나타냈다. 실험결과를 통하여 도출한 새로운 유형 E는 유형 D와 유형 A, B 사이의 압력강하를 나타내었다.
- 2) 정량화한 유동분포 비교에서는 유형 E가 가장 고른 분포를 보였고, 다음으로 유형 C, A, D는 비슷한 연료 분포를 보였으며, 실험결과를 통해 도출한 유형 E는 유형 D처럼 연료를 병렬 공급하여 연료의 고른 분포가 이루어졌으며, 유형 A, B처럼 연료 유동의 방향을 일치하게 하여 압력강하도 낮게 발생하였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행되었음(No. 20148520120160).

References

1. Hayre RO CS, Collela W, Prinz FB, "Fuel Cell Fundamentals", New york, John Wiley and sons, 2005.
2. J.O'M. Bockris SS. Fuel Cells, "Their Electrochemistry", McGraw-Hill, New York, 1969.
3. Parthasarathy A, Srinivasan S, Appleby AJ, Martin CR, "Electrode kinetics of oxygen reduction at carbon-supported and unsupported platinum microcrystallite / Nafion® interfaces", Journal of Electroanalytical Chemistry, 1992, 339, 101-21.
4. Patil PG, "US Department of Energy fuel cell program for transportation applications", Journal of power sources, 1992, 37, 171-9.
5. Prater KB, "Solid polymer fuel cell developments

- at Ballard”, *Journal of power sources*, 1992, 37, 181-8.
6. Chang H-P, Chou C-L, Chen Y-S, Hou T-I, Weng B-J, “The design and cost analysis of a portable PEMFC UPS system” *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32, 316-22.
 7. Kumar A, Reddy RG, “Materials and design development for bipolar/end plates in fuel cells” *Journal of power sources*, 2004, 129, 62-7.
 8. Kumar A, Reddy R, “Modeling of polymer electrolyte membrane fuel cell with metal foam in the flow-field of the bipolar/end plates” *Journal of power sources*, 2003, 114, 54-62.
 9. Tsai B-T, Tseng C-J, Liu Z-S, Wang C-H, Lee C-I, Yang C-C, et al, “Effects of flow field design on the performance of a PEM fuel cell with metal foam as the flow distributor” *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37, 13060-6.