

## 건물용 고분자 전해질 연료전지 금속분리판 유동장 형상 변화에 따른 산소 확산 특성에 대한 연구

박동환<sup>1,2</sup> · 손영준<sup>2,3</sup> · 최윤영<sup>2</sup> · 김민진<sup>2,3†</sup> · 홍중섭<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>연세대학교 대학원 기계공학부, <sup>2</sup>한국에너지기술연구원 연료전지연구소, <sup>3</sup>과학기술연합대학원대학교 신에너지 및 시스템공학

### A Study on Oxygen Diffusion Characteristics According to Changes in Flow Field Shape of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Metallic Bipolar Plate for Building

DONGHWAN PARK<sup>1,2</sup>, YOUNG-JUN SOHN<sup>2,3</sup>, YOON-YOUNG CHOI<sup>2</sup>, MINJIN KIM<sup>2,3†</sup>, JONGSUP HONG<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Yonsei University Graduate School, 50 Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 03722, Korea

<sup>2</sup>Fuel Cell Research Center, Korea Institute of Energy Research, 152 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34129, Korea

<sup>3</sup>Advanced Energy and System Technology, University of Science and Technology, 217 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author :  
Minjin@kier.re.kr

Received 27 July, 2021  
Revised 23 August, 2021  
Accepted 25 August, 2021

**Abstract >>** Various studies about metallic bipolar plates have been conducted to improve fuel cell performance through flow field design optimization. These research works have been mainly focused on fuel cells for vehicle, but not fuel cells for building. In order to reduce the price and volume of fuel cell stacks for building, it is necessary to apply a metallic flow field. In this study, for a metallic flow field applied to a fuel cell for building, the effect of a change in the flow field shape on the performance of a polymer electrolyte membrane fuel cell was confirmed using a model and experiments with a down-sizing single cell. As a result, the flow field using a metal foam outperforms the channel type flow field because it has higher internal differential pressure and higher reactants velocity in gas diffusion layer, resulting in higher water removal and higher oxygen concentration in the catalyst layer than the channel type flow field. This study is expected to contribute to providing basic data for selecting the optimal flow field for the full stack of polymer electrolyte membrane fuel cells for buildings.

**Key words :** Polymer electrolyte membrane fuel cell(고분자 전해질 연료전지), Metallic bipolar plate(금속분리판), Flow field design(유동장설계), Computational fluid dynamics(전산 유체 역학), Experiment(실험)

## 1. 서론

최근 전 세계 곳곳에서 폭염과 홍수 등의 기후변화가 발생하면서 인명 및 재산에 큰 피해를 입히고 있으며, 이러한 기후변화의 주범으로 온실가스로 인한 지구 온난화가 거론되고 있다. 온실가스는 인류가 에너지원으로 사용하고 있는 석탄, 석유, 가스 등을 무분별하게 사용함으로써 많이 배출되고 있다. 그렇기 때문에 온실가스 배출을 최소화하고 친환경적인 에너지를 생산하기 위해 전 세계적으로 많은 노력이 이루어지고 있으며, 온실가스의 주범인 탄소를 사용하지 않고 수소를 통해 에너지를 생산할 수 있는 연료전지에 대한 관심이 확대되고 있다.

연료전지는 다양한 종류가 있지만, 고분자 전해질 연료전지(polymer electrolyte membrane fuel cell, PEMFC)는 100°C 이하의 낮은 작동 온도, 짧은 시동 시간, 부하 변동에 빠른 응답 등의 장점을 지니고 있기 때문에 자동차와 가정 그리고 건물용에 적용되어 사용되고 있다. 자동차용과 가정/건물용 연료전지의 가장 큰 차이는 운전환경으로써 자동차용의 경우, 상대적으로 고전류밀도 영역에서 운전하기 때문에 물 생성이 많아 물관리에 어려움이 있고, 그렇기 때문에 물 제거에 특화된 유동장(flow field) 및 확산층을 사용하게 된다. 또한 물 제거 후 저기습 조건에서도 성능이 확보되어야 하기 때문에 주로 저기습용 membrane electrode assembly (MEA)를 사용하는 추세이다. 하지만 가정/건물용 연료전지는 이와 반대로 저전류밀도 영역에서 운전하기 때문에 물관리에 대한 어려움은 자동차용에 비해 적으며, 고기습조건에서 성능이 확보될 수 있는 MEA를 주로 사용하게 된다.

PEMFC의 성능은 반응물과 생성물의 물질 전달에 큰 영향을 받으며, 연료전지의 성능을 향상시키기 위해서는 반응물이 유동장과 가스 확산층(gas diffusion layer)을 통해 촉매 층까지 높은 농도를 유지하며 고르게 확산하여야 하고, 반응에 의해 생성된 생성물 즉, 물이 촉매 반응을 방해하지 않도록 빠르게 제거되어야 한다. PEMFC의 물질 전달은 크게 유동장과 가스 확산층에 의해 이루어지기 때문에 PEMFC 물질

전달 최적화 전략은 유동장을 최적화 시켜 효율적으로 반응물을 공급하고 생성물을 제거하는 것이다<sup>1)</sup>.

연료전지 물질 전달 최적화를 이루기 위해 다양한 유동장 연구가 사전에 진행되었으며, 대표적으로 Nan 등<sup>2)</sup>은 사다리꼴 유로를 이용한 유로의 기하학적 형상 변화에 따른 연료전지 성능의 변화를 관찰하였으며, Kim 등<sup>3)</sup>은 유동장 자체의 타입을 메탈폼으로 변경하여 연료전지 유동장으로서 적용시키는 연구를 진행하였다. Roshandel 등<sup>4)</sup>은 생체영감 패턴(bio inspired pattern) 유동장을 적용한 연료전지의 성능 변화를 연구하였고, Shen 등<sup>5)</sup>은 경사지고 엇갈리게 배열된 3D 유동장을 적용한 연료전지의 성능 향상 연구를 진행하였다.

또한, 연료전지의 원활한 상용화를 위해 스택의 가격 및 부피를 줄이기 위해선 금속 분리판을 적용하는 것이 효과적이기 때문에 금속 분리판 유동장 연구 또한 활발하게 수행되어왔으며, Kim과 Wang<sup>6)</sup>과 Zhang 등<sup>7)</sup>은 주로 연료전지 자동차(fuel cell electric vehicle, FCEV)에 사용되는 3D fine mesh flow field 유동 모델링 연구를 수행하였다. Konno 등<sup>8)</sup>은 FCEV인 Toyota Mirai에 3D fine mesh flow field를 적용하는 연구를 진행하였고, Nonobe<sup>9)</sup>와 Yoshida와 Kojima<sup>10)</sup>는 금속 분리판을 적용한 PEMFC 자동차인 Toyota Mirai 개발에 관한 연구를 진행하였다. 지금까지 PEMFC 금속 분리판 유동장 연구는 주로 자동차용 연료전지에 국한되어 수행되어왔으며, 건물용 연료전지 운전 환경을 고려한 금속 분리판 유동장 연구는 현재까지 미미한 수준이다. 즉, 건물용 PEMFC 운전환경을 고려한 금속 분리판 유동장 연구가 필요하다.

본 연구의 목적은 건물용 PEMFC 금속 분리판 유동장 형상 변화에 따른 물질 전달 최적화 및 유동장 최적 설계를 도출하는 것이며, 이를 위해 우선, 2가지 타입(채널과 메탈폼)의 유동장에 대한 기초 실험을 실시하여 유동장의 기본 데이터를 획득하고, 전산 유체 해석 프로그램인 COMSOL Multiphysics (Comsol, Burlington, MA, USA)를 이용하여 각 유동장에 대한 수치 모델(numerical model)을 개발하고 실험 데이터

를 기반으로 모델 검증을 진행한 후, 완성된 수치 모델을 이용하여 실험 결과를 수치 해석적으로 분석을 진행하였다.

## 2. 실험

본 연구에서는 채널 타입(사다리꼴 유로)과 두께가 다른 두 종류의 메탈폼을 대상으로 단위 전지 테스트를 진행하였고, 각 유동장별 성능을 비교 분석하였다.

### 2.1 실험장치 및 환경

Fig. 1은 실험을 위한 단위 전지 test station 및 시스템의 개략도를 나타낸 것이다.

단위 전지는 활성 면적  $40\text{ cm}^2$  크기의 국내 Donjin® (Seoul, Korea) MEA와, 기체확산층(GDL)으로 국내 JNTG® (Hwaseong, Korea) JNT30 -A6를 사용하여 실험을 수행하였고, 연료로 수소와 공기를 사용하였으며, mass flow controller를 통해 유량을 조절하였고, 수소의 경우 520 sccm, 공기는 2,000 sccm으로 설정하였다. 단위 전지의 온도는  $60^\circ\text{C}$ 로 제어하였으며, 상대습도는 RH=100%, 80%, 50%로 조절하였다. 연료의 가습기 통과 후 온도 변화로 인한 가스 응축을 방지하기 위해 가습기 출구 라인 온도는 단위 전지 온도보다  $5^\circ\text{C}$  이상으로 유지하였으며, 운전 온도를 균일하게 유지하기 위하여, cooling fan과 heater를 사용하였다. Table 1은 실험에 적용된 실험 환경을 나타낸 것이다.

### 2.2 유동장 및 가스확산층

유동장의 경우, 두께 0.6 mm인 사다리꼴 유로를 갖는 채널형과 두께 0.46 mm, 0.4 mm인 메탈폼을 사용하였고, 채널형 분리판은 금속 분리판 형상의 적절성 검증을 위해 상대적으로 가공이 용이한 탄소 소재를 사용했으며, 메탈폼의 경우 금 도금을 한 니켈폼을 사용하였다. 채널과 메탈폼 모두 anode는 동

일 형상의 channel형으로 고정이며, cathode의 경우만 유동장을 바꾸가며 실험을 진행하였으며, 메탈폼의 경우, 0.46 mm, 0.4 mm 깊이로 분리판 내부를 파

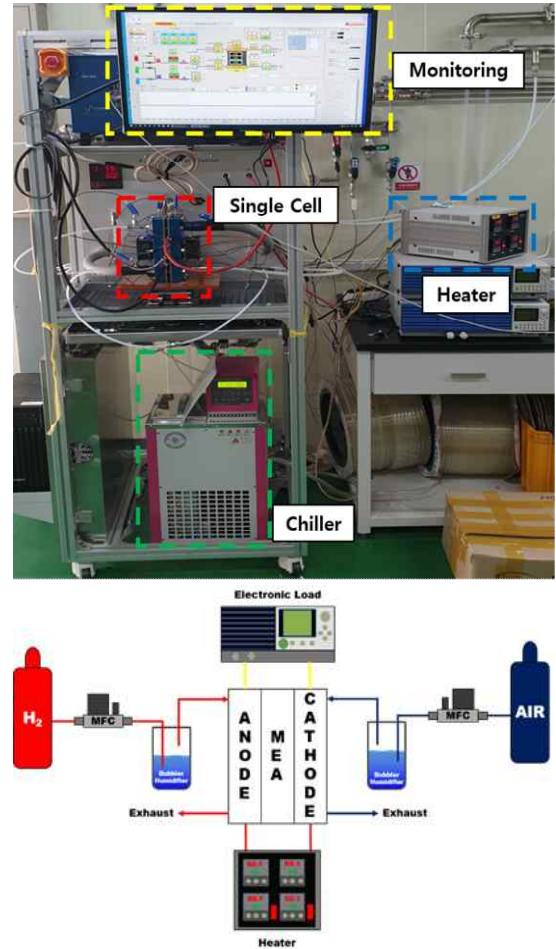


Fig. 1. Single cell test station and Schematic diagram of an experimental setup

Table 1. Experimental conditions

Parameter	Value	Unit
Flow field (cathode)	Channel/metal foam	-
Cell temperature	60	$^\circ\text{C}$
Operating pressure	1	atm
Stoichiometry ratio	1.5/2.4	-
Flow rate	520/2,000	sccm
Relative humidity	100/80/50	%

내어 메탈폼이 들어갈 공간을 확보하였다. Fig. 2는 단위 전지의 구성 및 단면 구조를 나타낸 것이다. Table 2는 채널과 메탈폼 그리고 GDL의 설계 변수를 나타낸 것이다.

### 2.3 실험 방법

유동장 실험의 경우, electronic load를 사용하여, 전압을 0.35 V에서 1 V까지 변화시키는 방식으로 출력 전류 값을 측정하였고, 그 값들로 전압/전류 출력 특정 곡선(IV curve)을 구하였다. 상대습도의 경우, bubbler humidifier의 온도를 제어하여 조절하였으며, 각각 RH 100%일 때, 가습기 온도는 60°C이며 RH 80%일 때, 가습기 온도는 55.3°C이며 RH 50%일 때, 가습기 온도는 45.8°C로 유지하였다.

## 3. 유동해석모델 개발

각 유동장별, cathode 3차원 모델링을 COMSOL Multiphysics (Comsol)를 사용하여 수행하였다.

### 3.1 모델 설정 및 가정

#### 3.1.1 모델 설정

Model 기하구조는 총 세 가지 부분으로 나뉘지며, 유동장, GDL, 촉매층으로 나뉜다. 촉매층의 경우는 GDL 최하단 레이어로 설정하였다. 모델의 경우, 전산 유체 해석 프로그램인 COMSOL Multiphysics (Comsol) 프로그램을 사용하였다. Fig. 3는 수치 모델에 사용된 기하구조를 나타낸 것이다.

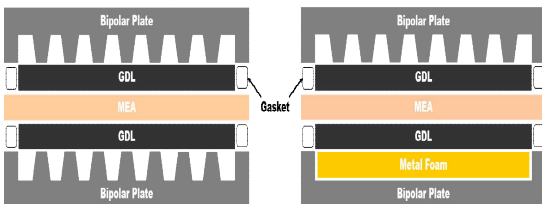


Fig. 2. Structure of single cell using channel and metal foam

Table 2. Design parameters

Channel		
Parameter	Value	Unit
Top width	0.94	mm
Bottom width	1.26	mm
Height	0.6	mm
Active area	40	cm <sup>2</sup>
Number of channels	18	-
Metal foam		
Parameter	Value	Unit
Height	0.46 / 0.4	mm
Porosity	0.85	mm
Permeability	4.9E-7	mm
Pore size	50~300	cm <sup>2</sup>
Active area	40	-
GDL		
Parameter	Value	Unit
Thickness before compression	0.32±0.025	mm
Thickness after compression	0.27±0.025	mm
Pore size	0.00010314	mm
Porosity	0.8242	-
Permeability	7.9E-12	m <sup>2</sup>
Basis weight	110±10	g/m <sup>2</sup>

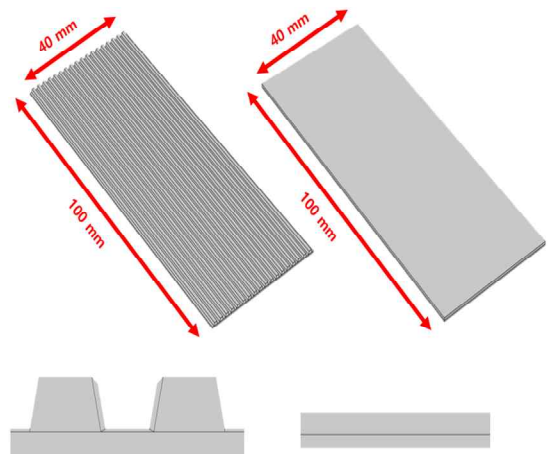


Fig. 3. Geometry numerical model

### 3.1.2 모델 가정

다음은 모델에 사용된 주요 가정들이다.

- 1) 모든 영역에서 층류흐름이다.
- 2) 반응물과 생성물은 이상 기체 혼합물로 취급한다.
- 3) 모든 다공성 매체는 균일한 다공성 재료로 구성된다.
- 4) 셀 온도 분포는 균일하고 일정하다.
- 5) 고분자 전해질막은 반응 가스에 불 침투성이다.
- 6) 중력의 영향은 무시한다.

## 3.2 지배방정식

수치 모델에 사용된 지배방정식은 다공체에서의 유체 운동량 및 유동장부터 촉매층까지의 종의 이동 그리고 촉매층에서의 반응 및 생성 전류에 관한 물리 현상을 정의하기 위하여 다음과 같은 식을 사용하였다.

### 3.2.1 브링크만 방정식

연료전지는 유동장과 가스 확산층을 통해 물질 전달이 이루어지고, 메탈폼과 가스 확산층은 미세한 다공성 구조로 이루어져 있기 때문에, 연료전지 수치 모델을 개발하기 위해서는 이러한 다공성 매체에서의 유체 운동량을 정의하는 것이 필요하다. 연료전지 다공성 매체에서의 유체 운동량을 정의하는 방법은 크게 3가지가 있다. 첫 번째는 다공성 매체를 고려한 Navier-stokes equation이며, 두 번째는 Darcy's law이며, 세 번째는 brinkman equation이다. 위 식들은 모두 연료전지 다공성 매체에서의 유체 운동량 정의에 사용할 수 있으나 Navier-stokes equation의 경우, 비선형 대류 항으로 인한 잠재적 수렴 문제를 갖게 되고, Darcy's law의 경우, 매우 낮은 투과성과 다공성 매체의 자유 흐름에만 적합하기 때문에 연료전지 다공성 매체에서의 유체 운동량을 설명하는 데 brinkman equation이 적합하다<sup>11)</sup>.

$$\frac{1}{\varepsilon_p} \rho(u \cdot \nabla) u \frac{1}{\varepsilon_p} = \nabla \cdot [-pI + K] - \left( \mu \kappa^{-1} + \beta \varepsilon_p |u| + \frac{Q_m}{\varepsilon_p^2} \right) u + F \quad (1)$$

여기서  $\varepsilon$ 는 다공성 매체의 다공률이며,  $p$ 는 압력이고,  $I$ 는 단위 행렬이며,  $K$ 는 분배 계수이고,  $\mu$ 는 동점성 계수이며,  $\kappa$ 는 다공성 매체의 투과도이며,  $\beta$ 는 forchheimer 항력 계수이며,  $Q$ 는 질량 소스항을 의미한다.

질량 소스(mass source)는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\nabla \cdot (\rho u) = Q_m \quad (2)$$

### 3.2.2 종의 질량 보존 방정식(equation for the conservation of mass of a species)

유입부로부터 cell 내부로 들어온 반응물들의 유동장에서 촉매층까지의 이동은 종의 질량 보존 방정식을 이용하여 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega_i) + \nabla \cdot (\rho \omega_i u) = -\nabla \cdot j_L + R_i \quad (3)$$

여기서  $\rho$ 는 유체의 밀도이고,  $\omega$ 는 질량 분율이며,  $u$ 는 유체의 속도이며,  $j$ 는 질량 플럭스이고,  $R$ 은 반응에 의해 소비되거나 생산되는 소스항을 의미한다.

부분 압력과 온도의 변화가 다 성분 확산에 영향을 미치지 않는다고 가정할 수 있기 때문에, 혼합 평균 확산 모델을 사용하여 간소화할 수 있다<sup>12)</sup>.

$$\nabla \cdot j_L + \rho(u \cdot \nabla) \omega_i = R_i \quad (4)$$

종  $i$ 의 확산 플럭스(diffusive flux)는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$j_L = - \left( \begin{array}{l} \rho D_i^m \nabla \omega_i + \rho \omega_i D_i^m \frac{\nabla M_n}{M_n} \\ - \rho \omega_i \sum_k \frac{M_i}{M_n} D_k^M \nabla x_k + D_i^T \frac{\nabla T}{T} \end{array} \right) \quad (5)$$

여기서  $D$ 는 확산 계수이고,  $M$ 는 몰 질량이며,  $x$ 는 몰 분율이고,  $T$ 는 단위 전지의 온도를 의미한다.

열확산 계수(thermal diffusion coefficient)는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$D_i^T = \frac{1 - \omega_i}{\sum_{k \neq i} \frac{x_k}{D_{ik}}} \quad (6)$$

평균 몰 질량(molar mass)은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$M_n = \left( \sum_i \left( \frac{\omega_i}{M_i} \right) \right)^{-1} \quad (7)$$

### 3.2.3 수정된 버틀러-볼머 방정식

연료전지 촉매층에서의 반응과 이로 인해 생성되는 전류를 표현하기 위하여 버틀러-볼머 식을 사용한다. 본 연구의 수치 모델에서는 Cathode 영역만을 특정하여 모델링하였기 때문에 기존 버틀러-볼머 식을 수정하여 사용하였다.

$$i = i_0 \left( \frac{c_R^*}{c_R^{0*}} e^{\frac{\alpha n F \eta_c}{RT}} - \frac{c_P^*}{c_P^{0*}} e^{-\frac{(1-\alpha)n F \eta_c}{RT}} \right) \quad (8)$$

여기서  $i_0$ 는 교환전류밀도이며,  $\alpha$ 는 전달 계수이고,  $R$ 은 기체 상수이며,  $n$ 은 전기화학 반응을 통해 이동한 전자 수이며,  $c_R^*$ 과  $c_P^*$ 는 반응속도를 제한하는 화학 종의 실제 표면 농도이며,  $c_R^{0*}$ 과  $c_P^{0*}$ 는 기준 반응물 농도이며,  $\eta_c$ 는 산소극에서의 과전압을 의미한다.

산소극 과전압(cathode overpotential)은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\eta_c = E_{cell} - (E_{OCV} - R \times i_{loc}) = E_{cell} - E_T \quad (9)$$

여기서  $E_{cell}$ 는 단위 전지의 전압이며,  $E_{OCV}$ 는 단위 전지의 개방 회로 전압이고,  $i$ 는 전류이며,  $E_T$ 는 연료 전지의 이론 전압을 의미한다. 연료전지의 이론 전압은 연료전지에서 발생하는 전기 에너지 최대량을 의미하는 Gibbs 자유 에너지를 기반으로 도출된 연료 전지 전압을 의미하며, 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$E_T = \frac{-\Delta G}{n \cdot F} = 1.23 V \quad (10)$$

여기서  $\Delta G$ 는 Gibbs 자유 에너지이며,  $n$ 은 반응에 의해 이동하는 전자수이고,  $F$ 는 faraday 상수이다.

교환전류밀도(exchange current density)는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$i_0 = n F C_{O_2} f_1 e^{-\frac{\Delta G_1^\ddagger}{RT}} \quad (11)$$

여기서  $n$ 은 전기화학 반응을 통해 이동한 전자 수 ( $n=2$ )이고,  $F$ 는 패러데이 상수이며,  $f$ 는 생성물로의 붕괴율이며,  $\Delta G_1^\ddagger$ 는 정반응 활성화 장벽의 크기를 의미한다.

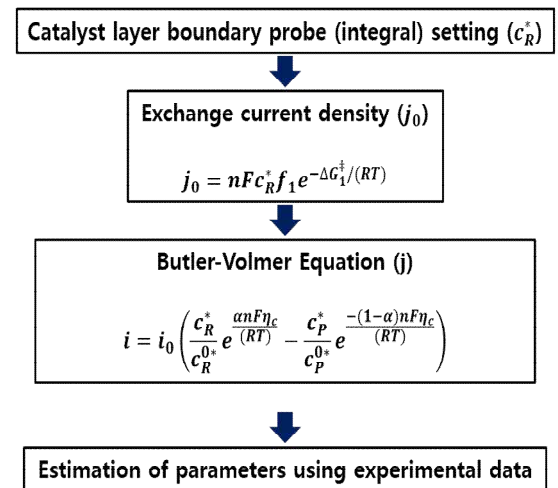
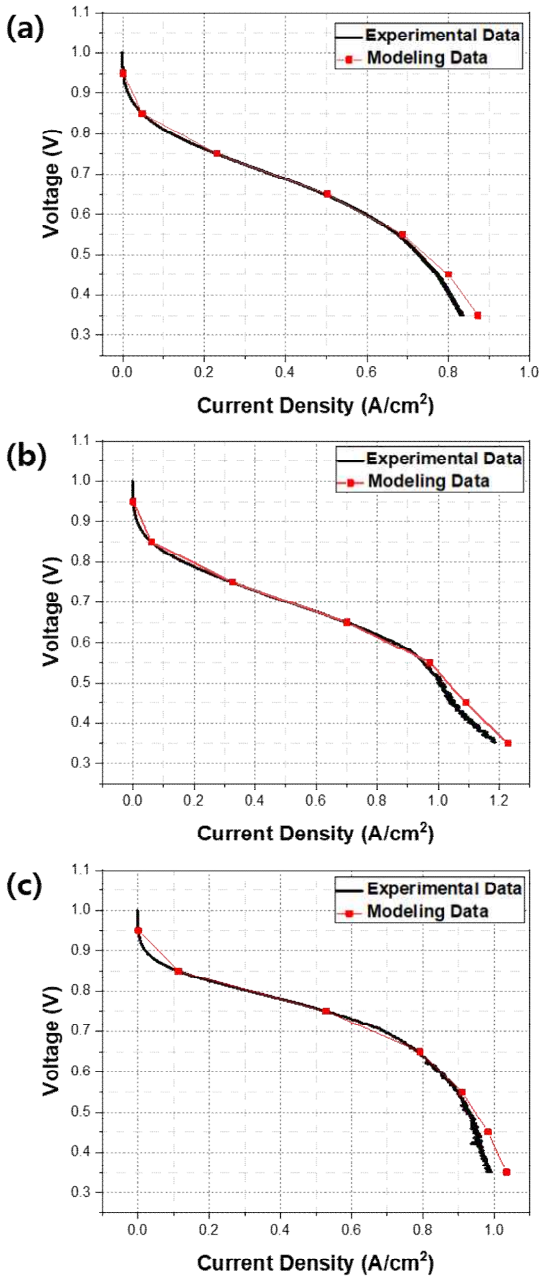


Fig. 4. Parameter estimation method

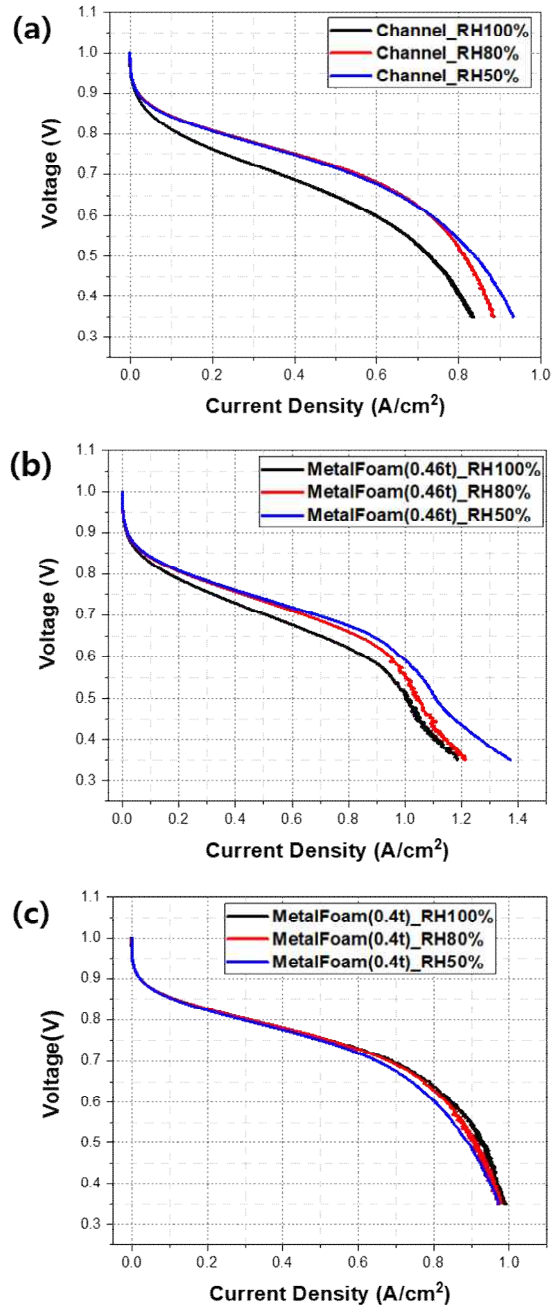
### 3.3 모델 검증

수치 모델의 정확도를 검증하기 위하여, 실험 데

이터를 이용하여 수치 모델 검증을 수행하였다. 우선, MEA에 대한 세부 정보가 없기 때문에, 수치 모델에 필요한 매개변수를 얻기 위해 매개변수 추정을



**Fig. 5.** Validation result of experimental data and modeling data for each flow field at 100% relative humidity (a) channel, (b) metal foam\_0.46t, (c) metal foam\_0.4t



**Fig. 6.** IV performance according to the flow field (a) channel, (b) metal foam\_0.46t, (c) metal foam\_0.4t

실시하였다. 매개변수 추정의 경우, 촉매층에 경계 프로프를 설정하여 촉매층 평균 농도를 추정한 후, 이를 통해 교환전류밀도를 설정하고, 버틀러-볼머 식을 통해 작동 전류를 구한 후, 구해진 작동 전류와 실험 데이터 간의 매개 변수 추정을 진행하였다.

Fig. 4는 매개변수 추정 방법을 나타낸 것이다.

매개 변수 추정 후, 실험 데이터와 모델링 데이터를 비교 분석하였다.

Fig. 5는 RH 100%일 때 각 유동장 별 실험 데이터와 모델링 데이터의 검증 결과를 나타낸 것이며 이를 통해, 수치 모델 결과와 실험 결과가 유사하게 일치하는 것을 확인할 수 있었고, 수치 모델이 실제 실험을 잘 모사한다는 것을 확인할 수 있었다.

## 4. 결과 및 토의

### 4.1 실험 결과 분석

각 유동장의 성능평가를 위하여, 유동장별 IV curve를 구하였다. 또한, 실험 시 상대습도의 영향을 관찰하기 위해, 유동장별 상대습도를 조절하여 실험을 진행하였다. 성능의 비교는 정격운전 목표 전압인 0.75 V에서의 전류밀도를 기준으로 한다.

채널의 경우, RH 100%일 때 전류밀도는 0.230 A/cm<sup>2</sup>이고, RH 80%일 때 전류밀도는 0.404 A/cm<sup>2</sup>이고, RH 50%일 때 전류밀도는 0.394 A/cm<sup>2</sup>의 성능을 보였다.

메탈폼 두께 0.46 mm의 경우, RH 100%일 때 전류밀도는 0.323 A/cm<sup>2</sup>이고, RH 80%일 때 전류밀도는 0.430 A/cm<sup>2</sup>이고, RH 50%일 때 전류밀도는 0.451 A/cm<sup>2</sup>의 성능을 보였다.

메탈폼 두께 0.4 mm의 경우, RH 100%일 때 전류밀도는 0.528 A/cm<sup>2</sup>이고, RH 80%일 때 전류밀도는 0.528 A/cm<sup>2</sup>이고, RH 50%일 때 전류밀도는 0.502 A/cm<sup>2</sup>의 성능을 보였다.

실험을 통해 메탈폼의 성능이 채널보다 더 뛰어나다는 것을 확인할 수 있었고 이를 통해, 메탈폼이 연료전지 산소극 물질 전달에 있어 채널보다 유리함을 알 수 있었다. 또한, 동일 메탈폼이더라도 두께가 얇

을수록 성능이 더 뛰어남을 확인하였다. Fig. 6은 유동장별 상대습도 변화에 따른 IV성능을 나타낸 것이다. Table 3은 0.75 V에서의 각 유동장별 성능 비교를 나타낸 것이다.

위 결과를 통해, 상대습도 80%일 때 메탈폼 0.4 t의 성능이 가장 뛰어나다는 것을 확인할 수 있었다. Jung 등<sup>13)</sup>에서도 알 수 있듯이, 상대습도가 높으면 water flooding이 발생하여 성능이 저하될 수 있고, 반대로 상대습도가 낮으면 water flooding의 영향은 줄어들지만, 막을 통한 이온 전달 손실이 증가하여 성능이 줄어들 수 있다.

### 4.2 유동해석모델 결과 분석

검증된 수치 모델을 이용하여, 실험 데이터 분석

Table 3. Performance comparison for each flow field at 0.75V

	Channel	Metal foam 0.46 t	Metal foam 0.4 t
RH 100%	0.2305 A/cm <sup>2</sup>	0.3231 A/cm <sup>2</sup>	0.5276 A/cm <sup>2</sup>
RH 80%	0.4037 A/cm <sup>2</sup>	0.4298 A/cm <sup>2</sup>	0.5280 A/cm <sup>2</sup>
RH 50%	0.3941 A/cm <sup>2</sup>	0.4512 A/cm <sup>2</sup>	0.5028 A/cm <sup>2</sup>

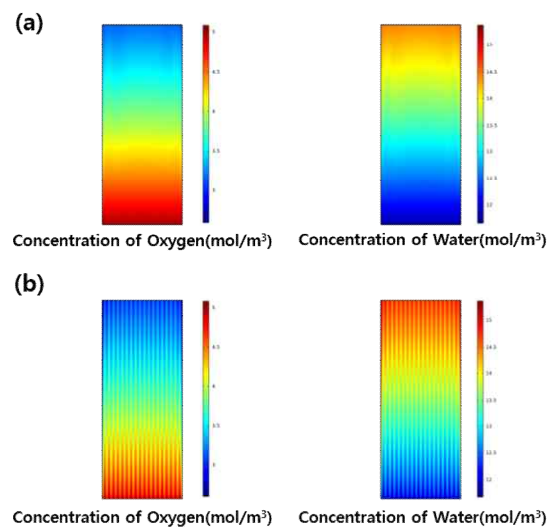


Fig. 7. Comparison of modeling results in the (a) channel and (b) metal foam\_0.4t



을 실시한다. 이를 통해 실험으로 알 수 없는 반응 기체(산소)의 단위 전지 내부에서의 확산 및 촉매층에서의 산소 농도 등을 확인하고, 각 유동장별 성능 차이의 원인을 추정한다.

Fig. 7은 상대습도 100%일 때 동일 전류밀도에서의 채널 및 메탈폼(0.4t)의 촉매층에서의 산소 및 물 농도 분포 모델링 결과를 나타낸 것이다. 수치 모델을 통해, 메탈폼이 채널보다 산소극과 촉매층에서의 산소 농도가 고르게 높은 것을 확인할 수 있으며 이와 더불어 촉매층에서 발생한 물 역시 메탈폼 유로에서 더욱 잘 제거되었음을 알 수 있다.

Fig. 8은 채널과 메탈폼의 산소극에서 압력 분포

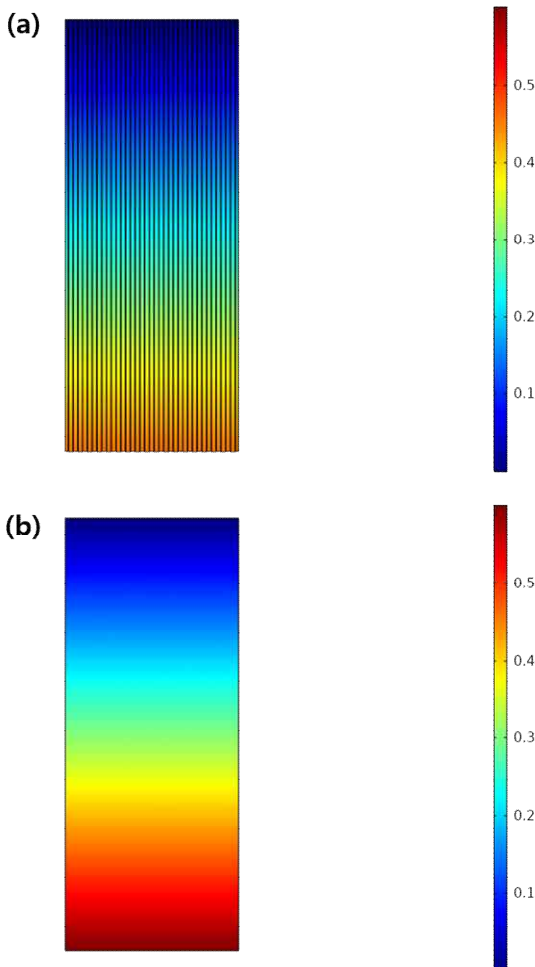


Fig. 8. Pressure distribution of (a) channels and (b) metal foam

를 나타낸 것이다.

0.75 V 기준 반응 기체의 차압(유로 inlet과 outlet

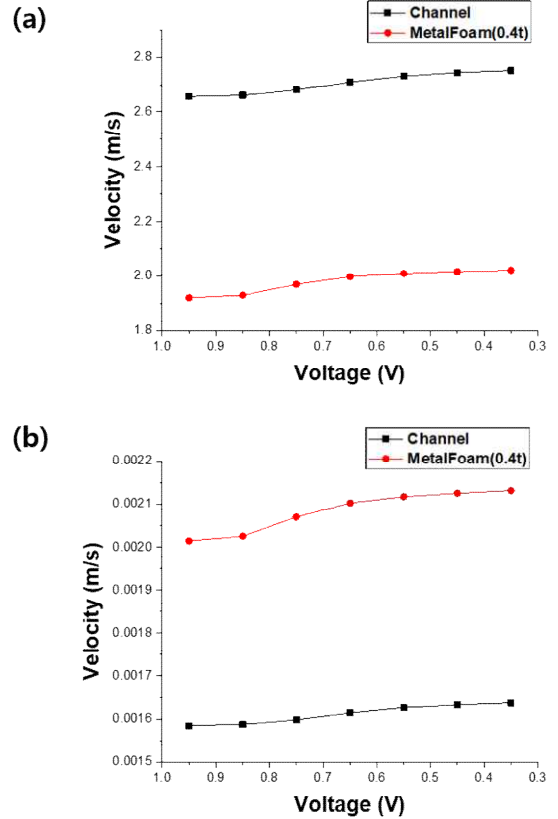


Fig. 9. Velocity of reactants in (a) flow field and (b) GDL according to voltage change

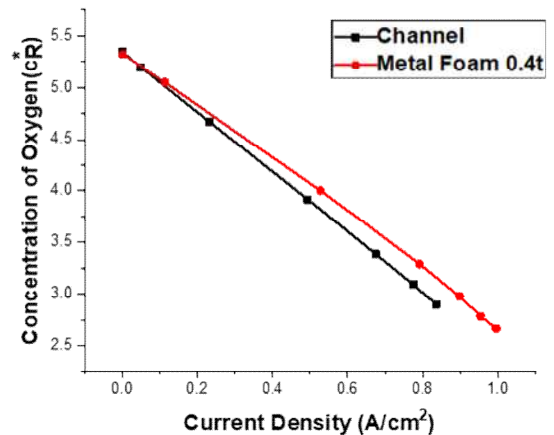


Fig. 10. Comparison of oxygen concentration in channel and metal foam (0.4t) catalyst layer at 100% relative humidity

의 압력 차이)은 채널일 때 0.457 kPa이고, 메탈폼일 때 0.597 kPa이다. 즉, 메탈폼의 차압이 채널에 비해 약 1.3배 높다. 0.75 V 기준 cell 평균 압력은 채널일 때 0.231 kPa이고, 메탈폼일 때 0.303 kPa이다. 채널에 비해 메탈폼 유동장에서 유로의 차압이 더욱 크게 발생함으로 인해, 메탈폼 유로에서 촉매층까지 전달되는 산소의 확산이 채널보다 원활하고 전극에서 생산되는 물 배출도 보다 효과적임을 추론할 수 있다.

Fig. 9는 채널과 메탈폼의 전압 변화에 따른 유동장 및 GDL에서 반응기체의 평균 속도를 나타낸 것이며, 이를 통해 유동장 내부의 반응 기체의 속도는 채널이 메탈폼에 비해 빠르지만, GDL 내부에서의 반응 기체의 속도는 메탈폼이 채널에 비해 더 빠르다는 것을 확인할 수 있다. 즉, cell 내부의 압력 및 속도의 차이가 채널과 메탈폼의 물 제거 효과의 차이를 만들어 내고, 이러한 물 제거 효과의 차이가 메탈폼과 채널의 성능 차이로 이어진다는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 상대습도 100%일 때 채널 및 메탈폼(0.4 t) 촉매층에서 산소 농도를 비교한 그래프를 나타낸 것이다.

Fig. 10을 통해, 메탈폼이 채널보다 촉매층에서 산소 농도가 더 높게 유지되는 것을 확인할 수 있고, Eq.8을 통해 산소 농도가 높을수록 연료전지에서 발생하는 전류가 더 높아진다는 것을 알 수 있다. 즉, 촉매층에서 산소 농도 차이가 연료전지 성능 차이를 유발함을 확인할 수 있다.

지금까지의 수치 모델 결과를 종합해보면, 메탈폼이 물 제거 효과 및 촉매층에서의 산소 농도가 채널에 비해 높기 때문에 채널보다 성능이 더 뛰어나다는 것을 확인할 수 있었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 총 세 가지 유동장 타입(channel형, metalfoam\_0.4 t, metalfoam\_0.4 t)에 대한 성능평가 실험을 상대습도 조건을 바꿔가며(100%, 80%, 50%) 실시하였다. 또한, cathode 반쪽 전지 수치 모델을 개

발하여, 실험 데이터와 비교 검증을 통해 수치 모델의 정확도를 검증하였다. 이후, 개발된 모델을 통해, 유동장 및 확산층에서의 산소 확산 분포 및 촉매층에서의 산소 농도 변화 그리고 물의 분포를 분석하였다.

1) 실험을 통해, 메탈폼이 채널보다 성능이 더 뛰어나고, 건물용 연료전지 운전 환경에 더 적합함을 확인하였다. 또한, 동일 메탈폼일 때 두께가 얇아지면 성능이 증가하는 것을 확인할 수 있었고, 상대습도가 줄어들수록 flooding이 적게 일어나며 대부분 성능이 증가하는 결과를 보여준다.

2) 모델링을 통해, 메탈폼이 채널보다 촉매층에서의 산소 농도가 높게 유지되고, 물 제거 효과가 더 뛰어나다는 것을 확인할 수 있었고 이는, 메탈폼이 채널에 비해 차압 및 GDL에서의 반응 기체의 속도가 더 빠르기 때문인 것으로 그 원인을 추론할 수 있었다.

본 연구는, 건물용 고분자 전해질막 연료전지 최적 유동장 선택 및 스택 설계 시 필요한 물질 전달 기초 데이터 제공에 기여할 것이며 향후, 개발된 모델을 이용하여 본 연구에서 선택된 유동장에 맞는 최적의 확산층 물성치를 도출하고 검증 실험을 통해 이를 확인할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 2021년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제이다(No. 20203040030090).

## Reference

1. O. Ryan, S. W. Cha, W. Colella, and F. B. Prinz, "Fuel cell fundamentals", J. Wiley & Sons, USA, 2017.
2. M. Nan, X. Xu, H. Hu, and C. Li, "Trapezoidal channel proton-exchange membrane fuel cell performance study", *Energy Fuels*, Vol. 34, No. 12, 2020, pp. 16729-16735, doi: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c02805>.
3. M. E. Kim, C. S. Kim, and S. Y. Jun, "Application of metal foam as a flow field for PEM fuel cell stack", *Fuel Cells*, Vol. 18, No. 2, 2018, pp. 123-128, doi: <https://doi.org/10.1002/>

- fuce.201700180.
4. R. Roshandel, F. Arbabi, and G. K Moghaddam, "Simulation of an innovative flow-field design based on a bio inspired pattern for PEM fuel cells", *Renewable Energy*, Vol. 41, 2012, pp. 86–95, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.10.008>.
  5. J. Shen, Z. Tu, and S. H. Chan, "Performance enhancement in a proton exchange membrane fuel cell with a novel 3D flow field", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 164, 2020, pp. 114464, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114464>.
  6. J. Y. Kim and C. Y. Wang, "Modeling two-phase flow in three-dimensional complex flow-fields of proton exchange membrane fuel cells", *Journal of Power Sources*, Vol. 365, 2017, pp. 419–429, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.09.003>.
  7. G. Zhang, B. Xie, Z. Bao, Z. Niu, and K. Jiao, "Multi-phase simulation of proton exchange membrane fuel cell with 3D fine mesh flow field", *International Journal of Energy Research*, Vol. 42, No. 15, 2018, pp. 4697–4709, doi: <https://doi.org/10.1002/er.4215>.
  8. N. Konno, S. Mizuno, H. Nakaji, and Y. Ishikawa, "Development of compact and high-performance fuel cell stack", *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, Vol. 4, No. 1, 2015, pp. 123–129. Retrieved from <https://www.jstor.org/stable/26169071>.
  9. Y. Nonobe, "Development of the fuel cell vehicle mirai", *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 12, No. 1, 2017, pp. 5–9, doi: <https://doi.org/10.1002/tee.22328>.
  10. T. Yoshida and K. Kojima, "Toyota MIRAI fuel cell vehicle and progress toward a future hydrogen society", *The Electrochemical Society Interface*, Vol. 24, No. 2, 2015, pp. 45. Retrieved from <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/2.F03152if/meta>.
  11. Z. Shi and X. Wang, "Comparison of Darcy's law, the brinkman equation, the modified N-S equation and the pure diffusion equation in PEM fuel cell modeling", Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference, 2007. Retrieved from <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.473.6071&rep=rep1&type=pdf>.
  12. Comsol Multiphysics, "Fuel cell & electrolyzer module user's guide ver.5.6", Comsol Multiphysics, USA, 2020. Retrieved from <https://doc.comsol.com/5.6/doc/com.comsol.help.fce/FuelCellAndElectrolyzerModuleUsersGuide.pdf>.
  13. S. P. Jung, C. I. Lee, C. C. Chen, W. S. Chang, and C. C. Yang, "Development of novel proton exchange membrane fuel cells using stamped metallic bipolar plates", *Journal of Power Sources*, Vol. 283, 2015, pp. 429–442, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.02.145>.