

## CFD를 통한 용융탄산염 연료전지 단위전지용 셀 프레임 구조 설계

이성주 · 임치영 · 이창환<sup>†</sup>

서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

### Design of Cell Frame Structure of Unit Cell for Molten Carbonate Fuel Cell Using CFD Analysis

SUNG-JOO LEE, CHI-YOUNG LIM, CHANG-WHAN LEE<sup>†</sup>

Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author :  
clwee@seoultech.ac.kr

Received 22 December, 2017  
Revised 12 February, 2018  
Accepted 28 February, 2018

**Abstract >>** In this study, a 100 cm<sup>2</sup> cell frame for a molten carbonate fuel cell was designed using CFD analysis. Electrochemical reactions, gas flow, and the heat transfer in 100 cm<sup>2</sup> cell frame were modeled using COMSOL Multiphysics. Two design variables such as the height of the cell frame and the length of the gas input area were determined to obtain minimized temperature distribution and uniform gas distribution. With two design parameter such as height of the cell frame and the length of the gas flow channel, the temperature difference in the cell fame was decreased to 5 °C and the gas uniformity in the flow channel were achieved.

**Key words :** MCFC(용융탄산염 연료전지), CFD(전산 유체 역학), Cell frame(셀 프레임), Heat transfer(열전달)

## 1. 서론

최근 환경오염 문제, 화석연료 발전소의 위험성 등에 따른 대체 에너지 개발의 중요성이 대두되면서 연료전지에 대한 연구, 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 그중 용융탄산염 연료전지는 650 °C의 고온에서 운전하기 때문에 귀금속 촉매가 필요하지 않고, 폐열의 재사용이 가능하다는 장점이 있다. 또한 연료로 수소 외에도 천연가스, 바이오가스, 석탄가스 등 메탄이 주성분인 연료를 사용할 수 있다는 장점이

있다<sup>1)</sup>.

현재 용융탄산염 연료전지의 운전 온도를 낮추어, 연료전지의 수명을 증가시키기 위해 연료극, 공기극, 전해질과 관련된 많은 연구가 진행되고 있다<sup>2)</sup>. 연료극, 공기극, 전해질과 같은 구성요소 개발 및 평가 과정에서 온도, 가스 사용률, 가스 분율 등을 변경하며 실험할 수 있어, 보통 100 cm<sup>2</sup> 단위 전지를 사용한다. 연료전지 반응은 발열 반응이기 때문에, 단위 전지의 셀 프레임을 적절히 설계하지 않으면 단위전지 내 큰 온도차가 발생하거나, 위치별로 투입되는 가스

량이 다를 수 있다. 따라서 셀 프레임의 온도차를 줄이고, 채널에 가스가 균일하게 투입될 수 있도록 하는 단위 전지 설계가 필요하다.

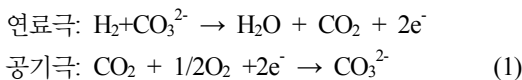
또한 작동시 내부에서의 전기 화학반응으로 인한 발열 문제는 스택의 수명에 직접적인 연관이 있다. 전기 부하에 따른 스택 내부의 생성열에 의해 고온 부가 한계온도를 초과하면 전지구성요소, 전해질의 미세구조 변화나 열화속도 등을 가속시켜<sup>3)</sup> 구성요소 평가를 어렵게 만든다. 따라서 전지의 발열을 낮출 수 있는 셀 프레임 설계가 필요하다.

본 연구에서는 스택의 성능과 수명 향상을 위해 100 cm<sup>2</sup> 단위 전지에 대해서 셀 프레임 높이 별 전지 내부의 온도 차를 알아보고 온도 차가 5°C 이하인 높이를 설계하고자 한다. 그리고 가스 분배영역 길이 별 온도 분포, 연료 유속을 비교하여, 이를 통해 반응 가스가 균일한 분포를 보이는 가스 분배영역 길이 설계에 대한 내용을 분석하고자 한다. 이를 이용하여 온도 편차를 줄이고, 가스 투입을 균일하게 만들 수 있는 100 cm<sup>2</sup> 셀 프레임 구조를 설계하고자 한다.

## 2. 해석 조건

### 2.1 지배방정식

용융탄산염 연료전지는 용융탄산염을 전해질로 사용한다. 이에 따른 연료극과 공기극에서의 반응식은 다음과 같다.



전극에서의 전압( $V_{\text{cell}}$ )은 식 (2)와 같이 Nernst 전위( $E_{\text{Nernst}}$ )에서 내부 셀 저항 및 분극 저항으로 인한 비가역 손실값을 뺀 값이다. 여기서 Nernst 전위( $E_{\text{Nernst}}$ )는 식 (3)과 같다.

$$V_{\text{cell}} = E_{\text{Nernst}}^{x,y} - i^{x,y} R_{\text{irr}}^{x,y} \quad (2)$$

$$E_{\text{Nernst}} = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \left( \frac{P_{\text{H}_2, \text{Anode}} \sqrt{P_{\text{O}_2, \text{cathode}}}}{P_{\text{H}_2\text{O}, \text{Anode}} P_{\text{CO}_2, \text{cathode}}} \right) \quad (3)$$

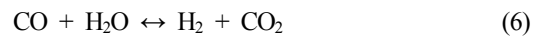
전기화학반응이 보통 삼상계면에서 발생하지만, 해석에서는 모든 반응이 전해질에서 발생한다고 가정하였다. 여기서, 셀에 발생한 전압( $V_{\text{cell}}$ )은 일정하며, 다음 식으로 전류밀도 분포를 계산할 수 있으며, 구하는 식은 식 (4)와 같다<sup>4)</sup>. 본 식에서 사용된 내부 저항( $R_{\text{ohm}}$ ), 연료극 저항( $R_a$ ), 공기극 저항( $R_c$ )은 기존 연구 결과를 사용하였다<sup>5,6)</sup>.

$$i^{x,y} = \frac{E_{\text{Nernst}}^{x,y} - V_{\text{cell}}}{R_a^{x,y} + R_c^{x,y} + R_{\text{ohm}}^{x,y}} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} R_{\text{ohm}} &= 0.5 \times 10^{-4} \exp[3016 \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{923} \right)] \\ R_a &= 2.27 \times 10^{-9} \exp \left( \frac{6435}{T} \right) P_{\text{H}_2}^{-0.42} P_{\text{CO}_2}^{-0.1742} P_{\text{H}_2\text{O}}^{-1.0} \\ R_c &= 7.51 \times 10^{-10} \exp \left( \frac{9289}{T} \right) P_{\text{O}_2}^{-0.43} P_{\text{CO}_2}^{-0.09} \end{aligned} \quad (5)$$

### 2.2 수성가스전이반응

용융탄산염 연료전지 연료극에서는 식 (6)과 같은 수성가스 전이반응(water-gas shift reaction), 역수성가스 전이반응이 일어나게 된다. 수성가스 전이반응은 CO와 H<sub>2</sub>O가 반응하여 H<sub>2</sub>와 CO<sub>2</sub>가 되는 과정이다. 연료극 내에서는 수성가스 전이반응, 역수성가스 전이반응이 발생하여 연료극 내에 CO, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>의 농도가 결정된다. 본 연구에서는 평형 상태에서 일어나는 수성가스 전이반응을 고려하여 해석을 진행하였다. 가스가 투입되는 시점에서 평형조건을 이룬다고 가정하였다. 수성가스 전이반응의 평형상수는 식 (7)과 같이 온도에 대한 함수로 표현하였다<sup>7)</sup>.



$$K_{\text{eq}} = \frac{[P_{\text{H}_2}][P_{\text{CO}_2}]}{[P_{\text{CO}}][P_{\text{H}_2\text{O}}]} = \frac{[X_{\text{H}_2}][X_{\text{CO}_2}]}{[X_{\text{CO}}][X_{\text{H}_2\text{O}}]}$$

$$K_{\text{eq}} = 157.02 - 0.4447 T + 4.2777 \times 10^{-4} T^2 - 1.3871 \times 10^{-7} T^3 \quad (7)$$

### 2.3 열물성

셀 프레임 소재인 AISI316과 연료극 공기극의 열물성은 Table 1과 같다.

연료극과 공기극의 혼합 가스의 열전도율, 점도는 혼합 가스의 물성 계산 방법(gas mixture rule)을 사용하여 계산하였다. 밀도와 비율은 이상기체 가정을 통해 계산하였다. 또한 분산계수(diffusivity)는 Multi-component diffusivity 계산방법을 사용하였다. 공기극의 입구에서 분산계수는  $1.183 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 이고, 연료극 입구에서 분산계수는  $4.615 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 이다.

### 2.4 열전달 조건

용융탄산염 연료전지의 전기화학 반응에 의한 발열량 ( $q_c$ )는 식 (8)과 같다. 그리고 수성가스 전이 반응에 의한 흡열량은 식 (9)와 같다.

$$q_c = -\Delta H_c (i/2F) - \dot{V}_i \tag{8}$$

$$q_s = \Delta H_s \Delta n_{CO} \tag{9}$$

여기서  $\Delta H_c$ 는 전극반응의 엔탈피 변화이다. 본 연구에서는 전해질과 매트릭스를 등가 물성을 갖는 얇은 막으로 가정하였고, 이를 반응 표면(reaction surface)으로 정의하였다. 그리고 전기 화학반응이 반응 표면에서 발생한다고 가정하였다. 수성가스 전이반응은 연료극 채널 내부와 연료극에서 발생하며, 이 반응에 의한 발열량( $q_s$ )은 전이반응의 엔탈피 변화( $\Delta H_s$ )와 단위 면적에 대한 CO의 몰 비 변화( $\Delta n_{CO}$ )로부터 유도할 수 있다.

**Table 1.** Thermal properties of AISI 316L, the anode and the cathode

	AISI 316	Anode (Ni-Cr)	Cathode (NiO)
Density (kg/m <sup>3</sup> )	7800	8220	6794
Heat capacity (J/molK)	500	444	44,352
Thermal conductivity (W/mK)	25	78	5.5

가스 채널에서 반응가스와 금속 셀 프레임에서 발생하는 열전달은 COMSOL의 연성 열전달 해석 모델(conjugate heat transfer)을 사용하여 모델링하였다. 그리고 셀 프레임의 외부는 작동 온도의 챔버 내부에 있는 자연대류(natural convection) 조건으로 모델링하였다.

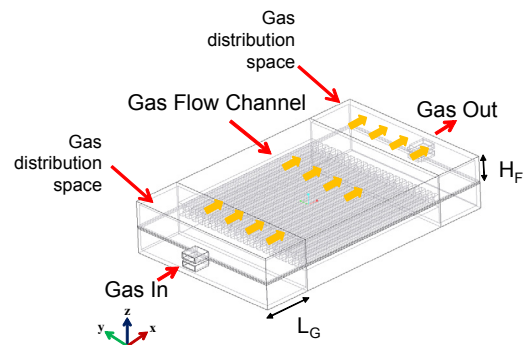
### 2.5 해석 조건

본 연구에서 사용한 용융탄산염 연료전지의 단위 전지는 전극 면적  $100 \text{ cm}^2$ 이다. 여기서 채널당 가스 유로는 일반적인 단전지 실험에서의 설계 값인 가로 세로 각각 3 mm로 설정하였으며, 채널 간 2 mm의 간격을 두었다. 유동 채널은 총 20개로 구성하여  $100 \text{ cm}^2$ 의 전극 면적을 설계하였다. 채널의 형상은 연료전지 반응에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 본 연구에서는 설계 변수에 포함하지 않았다<sup>8)</sup>.

용융탄산염 연료전지에서 기체의 흐름 방식은 양

**Table 2.** MCFC Standard operation condition

Variable	Specification
Fuel gas composition	H <sub>2</sub> :CO <sub>2</sub> :H <sub>2</sub> O:CO =0.617:0.077:0.203:0.103
Oxidant gas composition	O <sub>2</sub> :CO <sub>2</sub> =0.33:0.67 (Air:CO <sub>2</sub> =0.7:0.3)
Inlet gas temperature	893 K
Gas utilization	0.4
Operating pressure	1 atm



**Fig. 1.** Schematic figure of the  $100 \text{ cm}^2$  unit cell for MCFCs

극과 음극의 입구가 반대 방향에 있을 경우 counter-flow, 양 극의 기체가 같은 방향일 경우 co-flow라고 하는데<sup>9)</sup>, 본 연구에서 기체의 흐름 방식은 일반적인 단위 전지 운전 조건과 같은 co-flow를 적용하였다. Table 2에 용융탄산염 연료전지의 표준 조건을 나타내었고, Fig. 1에 단위 전지 모사 형상을 보였다. 본 연구에서의 설계 변수는 셀 프레임 높이( $H_F$ )와 가스 분배영역의 길이( $L_F$ )이다.

100 cm<sup>2</sup> 단위 전지의 공기극과 연료극 채널 내에서 각 가스의 Reynolds number가 0.4, 0.0125로 매우 작다. 따라서 채널 내에서의 가스 유동을 완전 발달 층류 유동으로 가정하였다. 반응 면적 100 cm<sup>2</sup>, 가스 이용률 0.4, 상온 기준으로 연료극 채널에 주입되는 가스 유량은  $2.16 \times 10^{-5}$  m<sup>3</sup>/s이고, 공기극 채널에 주입되는 가스 유량은  $5.14 \times 10^{-5}$  m<sup>3</sup>/s이다. 앞의 가스 유량을 각각 연료극과 공기극 가스 투입구에 층류 입구 조건으로 가스 입구 경계 조건을 부가하였다. 출구 조건으로는 가스 출구에 대기압 조건으로 가스 출구 경계 조건을 부가하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 셀 프레임 높이별 온도 분포

연료전지 내부에서 전기 화학반응에 의해 발열반응이 일어나 입구와 출구 부분에 온도 차가 발생한다. 해석의 단순함을 위해 단위 채널 형상을 사용하여 해석을 진행하였다. 해석에서 y방향으로 대칭 조건을 사용하여 연구를 진행하였다. 그리고 온도 조건으로, 가스 투입구의 온도를 작동온도 620°C와 같도록 경계 조건을 부가하였고, 셀 프레임 위, 아래쪽으로 챔버 내부에서의 자연대류가 발생하는 것으로 계산하였다. Figs. 2 and 3의 최대 온도( $T_{max}$ ), 최저 온도( $T_{min}$ )는 각각 가스 출구와 입구에서의 전극 온도이다.

Fig. 2는 한 개의 가스 유동 채널에 대한 셀 프레임 높이별 전극에서의 전류밀도와 최대 온도( $T_{max}$ )의 관계를 나타낸 곡선이다. 전류밀도가 증가함에 따라,

연료전지 반응이 더 많이 발생하게 되고 발열량도 많아진다. 따라서 셀 프레임의 온도가 크게 상승한다. 그래프를 보면 전류밀도 1,500 A/m<sup>2</sup>일 때, 셀 프레임 높이가 높아질수록 전극에서 발생하는 온도값이 작아지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 3는 셀의 전압( $V_{cell}$ )이 0.8 V일 때, 셀 프레임 높이에 따른 최고 온도와 최저 온도의 차이( $\Delta T$ )를 나타낸 그래프이다. 여기서 셀 프레임 높이가 60 mm일 때, 온도 차가 4.93°C로 5°C 이하인 것을 알 수 있다. Fig. 4는 셀 프레임 높이 10 mm, 60 mm일 때의  $\Delta T$ 를 비교한 내용이다. 각 셀 프레임 높이에 따른 온도차는 각각  $\Delta T=14^\circ\text{C}$ 와  $\Delta T=4.93^\circ\text{C}$ 이다.

이와 같은 결과는 셀 프레임의 높이가 높아질수록 셀 프레임에 의한 열전달이 크게 발생하여 온도가 낮아지는 것을 의미한다. 셀 프레임의 높이가 높을수

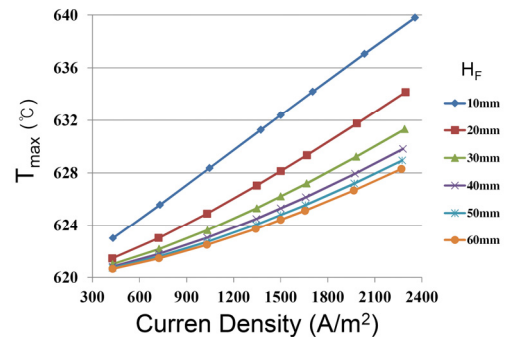


Fig. 2. Maximum temperature of the one channel with respect to the cell frame height ( $H_F$ )

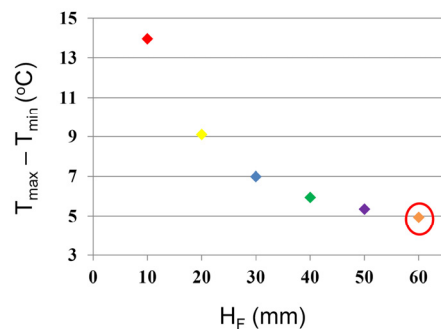


Fig. 3. Difference between the maximum temperature and the minimum temperature in one channel with respect to the cell frame height at 0.8 V

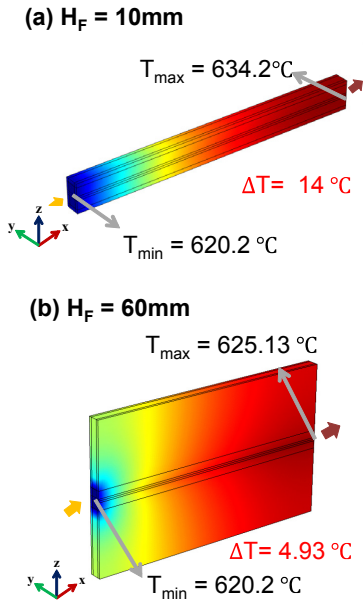


Fig. 4. Comparison of temperature distribution in the one channel at  $H_F$  of 10 mm and 60 mm ( $V_{cell}=0.8$  V)

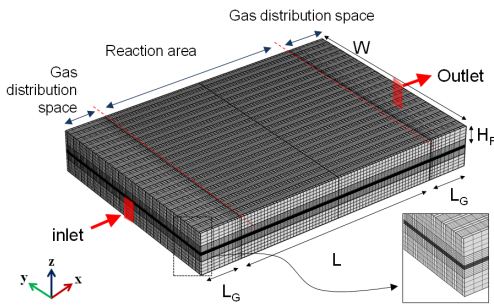


Fig. 5. Mesh structure of 100 cm<sup>2</sup> unit cell

록 두께 방향으로의 유효 열전달 계수가 작아지고, 열이 분산되어 전달되기 때문에, 온도 증가가 낮아지며, 따라서 전지의 최고, 최소 온도 차이가 감소한다.

### 3.2 가스 분배영역에 따른 설계

Fig. 5는 셀 크기 10 cm (L) × 10 cm (W), 가스 분배영역 길이 20 mm, 셀 프레임 높이 30 mm, 조건의 100 cm<sup>2</sup> 단위 전지의 요소 구성을 나타낸 그림이다. 셀 프레임의 해석에는 총 1,024,000개의 요소를

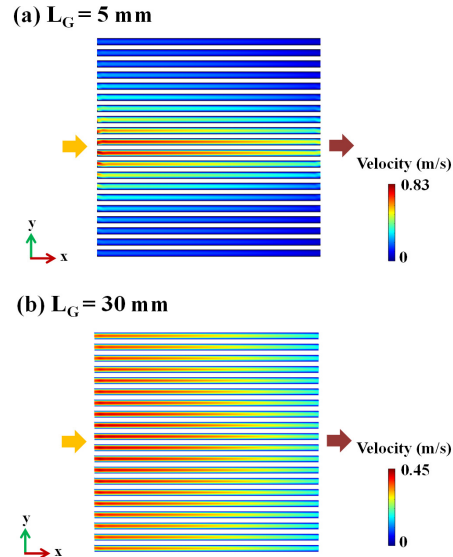


Fig. 6. Comparison of the cathode side velocity at the channel center when  $L_G$  is 5 mm and 30 mm ( $V_{cell}=0.8$  V,  $L=0.1$  m,  $H_F=60$  mm)

사용하였다. 이 해석 모델을 사용하여 반응가스의 균일한 분포를 위해 가스 투입구 설계를 진행하였다. 설계변수는 셀 프레임 높이( $H_F$ )와 가스 분배영역의 길이( $L_G$ )이다. 그리고  $V_{cell}$ 은 0.8 V,  $H_F$ 는 60 mm의 조건으로 해석을 진행하였다.

Fig. 6에서는 연료극과 공기극 가스 채널 중심에서의 가스의 유속을 비교하여 나타냈다. 가스 분배영역 길이 5 mm인 경우, 가스가 중앙에 편중되어 최대 속도가 길이 30 mm일 때보다 약 2배 가량 높은 것을 알 수 있다. 가스 분배영역 길이 5 mm인 경우와 30 mm인 경우, 중심부와 최 외곽측 채널의 속도 차가 각각 0.64 m/s, 0.02 m/s이다. 이는 공기극으로 투입된 가스가 가스 분배영역에서 골고루 분포되지 못하고 중심영역으로만 유입되는 것을 의미한다.

Fig. 7은 전기화학 반응이 발생한 가스 분배영역 길이( $L_G$ )에 따른 공기극 CO<sub>2</sub> 몰 분율을 나타낸 그림이다. 여기서, 공기극의 CO<sub>2</sub> 몰 분율을 비교하면 30 mm일 때는 반응가스가 각 채널에 비교적 고르게 분포되는 것을 알 수 있다. 하지만, 5 mm에서는 연료 투입 부분의 양쪽 끝에 불완전한 가스의 유동이 있

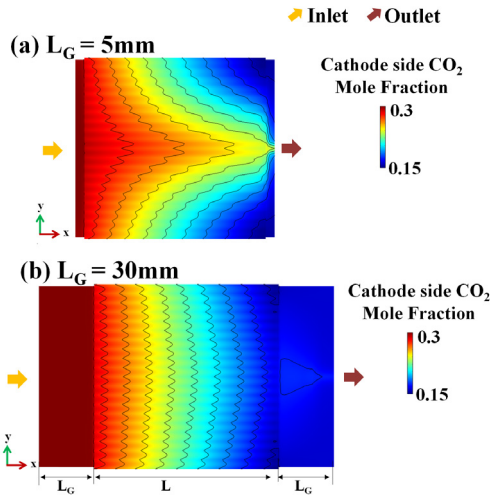


Fig. 7. Maximum temperature of the one channel with respect to the cell frame height ( $H_f$ )

음을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 가스 분배영역 길이( $L_G$ )에 따른 반응 표면에서의 전류밀도 분포를 나타낸 그림이다. 여기서 가스 투입구의 길이가 길어질수록 유량이 고르게 분포되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상으로 인해, 전류밀도도 점차 높아지게 된다.  $L_G$ 가 5 mm, 10 mm, 30 mm인 경우 모두, 가스 투입구에서 발생하는 최대 전류밀도는 유사하다. 그러나 Fig. 8(a)와 같이, 반응 가스가 중심으로 집중되면서, 출구 쪽 모서리에서의 전류밀도가  $786.81 \text{ A/m}^2$ 로 다른 경우에 비해 낮다. 이와 같은 결과는 전기 화학반응이 가스 진행 방향의 수직 방향으로 균일하게 발생하지 못하고, 중심으로 집중되어 발생한다는 것을 의미한다<sup>10)</sup>.

따라서 가스 분배영역 길이가 짧을수록 중앙에서 먼 채널에는 원활한 반응가스의 공급이 이루어지지 않기 때문에, 반응가스가 충분히 확산될 수 있는 가스 분배영역 길이 설계의 필요함을 알 수 있다.

### 3.3 셀 프레임 설계

앞서 연구하였던 한 개의 유동 채널에서 셀 전압이 0.8 V일 때, 온도 차가  $5^\circ\text{C}$  이하인 셀 프레임 높이는 60 mm였다. 이를  $100 \text{ cm}^2$  단위 전지에 적용하

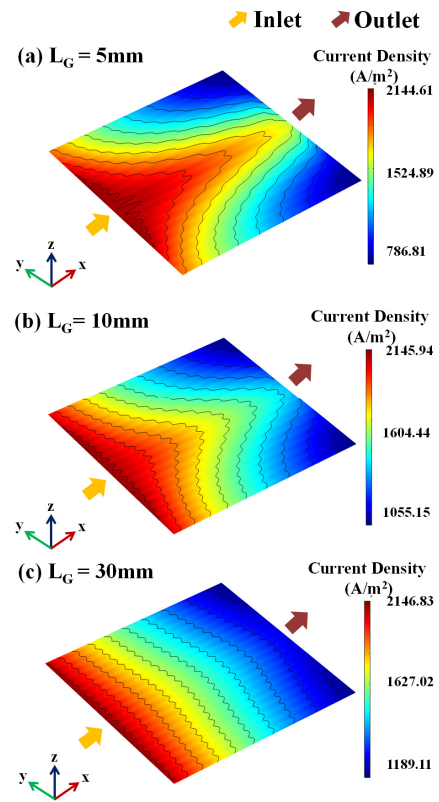


Fig. 8. Current density distribution when the length of the gas distribution space ( $L_G$ ) is 5 mm, 10 mm, and 30 mm ( $V_{\text{cell}}=0.8 \text{ V}$ ,  $L=0.1 \text{ m}$ ,  $H_f=60 \text{ mm}$ )

였다. 그 결과, Fig. 9와 같이 셀 프레임 높이 60 mm 일 때  $100 \text{ cm}^2$  단위 전지에서는 더 낮은 온도 차이인  $2.35^\circ\text{C}$ 인 것을 알 수 있다. 여기서, Fig. 9는 셀 프레임 높이( $H_f$ )에 따른 반응 표면에서의 온도 분포를 나타낸 그림이다. 한 개의 유동 채널의 해석(Fig. 4)에서는 윗면과 아랫면을 제외한 측면과 가스 투입구 부분의 열전달을 고려하지 않았다. 하지만  $100 \text{ cm}^2$  대면적 해석에서는 가스 투입구와 단위 전지 측면의 열전달까지 모두 고려하여 해석을 진행하였다. 따라서 채널 입구와 출구 사이의 온도 차이를 더 줄일 수 있게 되었음을 알 수 있다.

$100 \text{ cm}^2$  단위 전지에 대해 셀 프레임 높이에 대한 해석을 진행하였다. Fig. 9와 같이 셀 프레임 높이가 30 mm일 때 온도 차가  $3.78^\circ\text{C}$  발생하였다. 하지만, 셀 프레임 높이가 30 mm일 때의 최고 온도가  $633.04^\circ\text{C}$

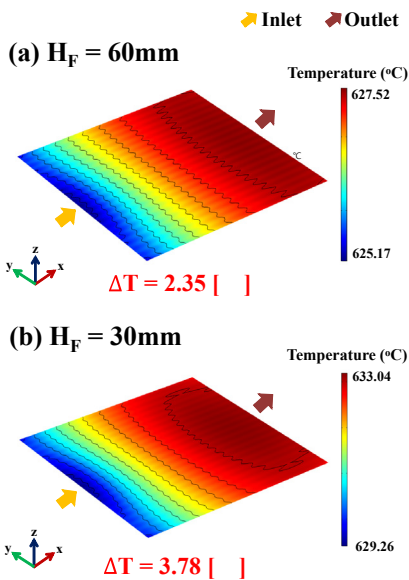


Fig. 9. Comparison of temperature difference when  $H_F$  is 60 mm and 30 mm ( $V_{\text{cell}}=0.8\text{ V}$ ,  $L_G=0.03\text{ m}$ )

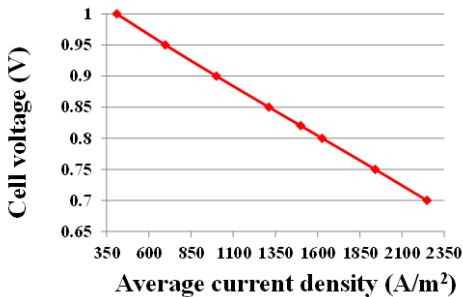


Fig. 10. I-V Curve in  $100\text{ cm}^2$  unit cell ( $V_{\text{cell}}=0.8\text{ V}$ ,  $H_F=60\text{ mm}$ ,  $L_G=30\text{ mm}$ )

로 작동 초기 온도인  $620^{\circ}\text{C}$ 와 약  $10^{\circ}\text{C}$ 가량 차이가 나기 때문에 옳지 못한 설계로 판단하였다. 따라서 셀 프레임 높이를 60 mm로 설계하였다.

Fig. 10은 본 연구에 따른 설계 결과인 셀 프레임 높이( $H_F$ ) 60 mm, 가스 분배영역 길이( $L_G$ ) 30 mm, 반응 면적  $100\text{ cm}^2$ 에 대한 전류밀도-전압 (I-V) 곡선이다. 전류밀도 분포  $1500\text{ A}/\text{m}^2$ 에서 셀 전압 0.82 V로, 기존 실험 결과( $0.818\text{V}$ )<sup>4)</sup>와 큰 차이를 보이지 않는 것을 알 수 있었다.

## 4. 결론

COMSOL Multiphysics를 이용하여 단위 전지의 가스 유동 채널, 셀 프레임을 모델링하고 내부의 전기 화학반응, 가스 유동, 열전달 반응을 모사하였다. 이를 이용하여 온도 균일도, 가스 균일도를 향상시킬 수 있는 셀 프레임 구조를 설계하였다. 본 연구에서의 설계 변수는 셀 프레임 높이( $H_F$ )와 가스 분배영역의 길이( $L_F$ )이다.

1) 한 개의 가스 유동 채널에 대해 셀 프레임 높이를 변경하여 온도에 대한 영향을 분석하였다. 셀 프레임 높이가 높아질수록, 최고 온도가 감소하는 것을 확인하였다.

2) 가스 분배영역의 길이 30 mm에서 반응가스가 균일하게 투입될 수 있음을 확인하였다. 또한  $100\text{ cm}^2$  셀 프레임에서 셀 프레임의 높이가 낮은 경우, 작동 환경에서의 셀의 온도가 전체적으로 상승하는 것을 확인하였다.

3) 해석을 통해  $100\text{ cm}^2$ 의 단위 전지에 대해, 가스 분배영역의 길이 30 mm, 셀 프레임 높이 60 mm인 셀 프레임 구조를 설계할 수 있었다.

## 후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었다.

## References

1. K. S. Lee and H. H. Cho, "Numerical Analysis of Molten Carbonate Fuel Cell Stack Using Computational Fluid Dynamics", Journal of the Korean Electrochemical Society, Vol. 8, No. 4, 2005, pp. 155-161.
2. M. G. Kang, H. S. Park, H. C. Ham, S. C. Jang, C. W. Yoon, J. Han, S. W. Nam, S. H. Kim, and S. P. Yoon, "Effect of  $\text{Cs}_2\text{CO}_3$  in Li/K and Li/Na Carbonate on the Oxygen Reduction Reaction for MCFC", Journal of The Electrochemical Society, Vol. 163, No. 8, 2016, pp. F962-F967.
3. C. Yuh, J. Colpetzer, K. Dickson, M. Farooque, and G. Xu, "Carbonate fuel cell materials", Journal of Materials

- Engineering and Performance, Vol. 15, No. 4, 2006, pp. 457-462.
4. C. W. Lee, M. Lee, S. C. Chang, S. P. Yoon, H. C. Ham, and J. Han, "Effect of the flow directions on a 100 cm<sup>2</sup> MCFC single cell with internal flow channels", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 41, 2016, pp. 18747- 18760.
  5. G. Wilemski, "Simple porous electrode models for molten carbonate fuel cells", J. Electrochem. Soc. Vol. 130, 1983, pp. 117-121.
  6. C.Y. Yuh and J.R. Selman, "The polarization of molten carbonate fuel cell electrodes. 1. Analysis of steady-state polarization data", J. Electrochem. Soc., Vol. 138, 1991, pp. 3642-3648.
  7. J. H. Koh, B. S. Kang, and H. C. Lim, "Effect of various stack parameters on temperature rise in molten carbonate fuel cell stack operation", J. of Power Sources, Vol. 91, 2000, pp. 161-171.
  8. H. Hirata, T. Nakagaki, and M. Hori, "Effect of gas channel height on gas flow and gas diffusion in a molten carbonate fuel cell stack", J. of Power Sources, Vol. 83, 1999, pp. 41-49.
  9. C. G. Lee, K. S. Ahn, S. Y. Park, H. K. Seo, and H. C. Lim, "Temperature characteristics of the molten carbonate fuel cell stack", Trans. Of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 15, No. 1, 2004, pp. 54-61.
  10. H. Hirata and M. Hori, "Gas-flow uniformity and cell performance in a molten carbonate fuel cell stack", J. of Power Sources, Vol. 63, 1996, pp. 115-120.