

## CFD를 통한 용융탄산염 연료전지의 유동 및 크기에 따른 운전 특성 분석

김동우 · 김하영 · 최정환 · 이창환<sup>†</sup>

서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

### Study on the Effects of the Flow Characteristics and Size on the Performance of Molten Carbonate Fuel Cells Using CFD

DONG-WOO KIM, HA-YOUNG KIM, JEONG-HWAN CHOI, 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 :  
cwlee@seoultech.ac.kr

Received 19 February, 2019

Revised 10 April, 2019

Accepted 30 April, 2019

**Abstract >>** In this study, effects of flow types and size of molten carbonate fuel cells (MCFCs) were investigated using CFD simulation. In the simulation, the current collector of MCFCs were assumed to be a porous media. With the area of 0.09 m<sup>2</sup>, the effect of flow types such as Co-flow, Counter-flow, Cross-flow were studied. After that the effect of the size and flow direction was studied. Among three-flow types, MCFCs with co-flow type shows more uniform distribution and current density distribution.

**Key words :** Molten carbonate fuel cell(용융탄산염 연료전지), Flow direction(유동 방향), Computational fluid dynamics(전산 유체 역학)

## 1. 서론

최근 화석에너지에 의한 환경오염, 원자력 발전소의 사고 위험성 등의 문제에 따라 친환경적이며 안정적인 대체에너지 개발의 중요성이 대두되고 있다. 연료전지는 현존 대체에너지 발전 기술 중 발전 효율이 가장 높으며 이에 따른 연구, 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 다른 발전소와 달리 설치 면적이 작고 도시가스 공급망을 통하여 연료 공급을 받을 수 있어 도심, 도서지역 등 다양한 지역에 설치 및 운전이 가능하다<sup>1)</sup>. 용융탄산염 연료전지는 600°C 이상

의 고온에서 운전되는 연료전지로, 저렴한 촉매를 사용한다는 점과 고온 가동으로 인한 내부개질이 가능하다는 장점이 있다<sup>2)</sup>.

그러나 MCFC는 작동시 내부에서의 전기화학적 반응으로 인한 발열이 스택 전체의 수명을 감소시킨다는 단점을 갖고 있다. 전기 부하에 따른 스택 내부의 과도 발열에 의하여 내부의 국부적 온도차가 과도화된다면 전지구성요소, 전해질의 미세구조 변화나 열응력 등을 가속시켜 장기운전에 큰 장애요인이 된다<sup>3)</sup>. 연료전지 내 전기화학 반응이 균일하지 못하게 발생하는 경우, 큰 온도편차가 발생한다. 이와 같

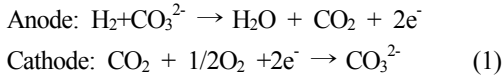
은 온도차는 연료전지의 장기운전에 큰 문제가 되고 있다<sup>4)</sup>.

따라서 본 연구에서는 용융탄산염 연료전지의 핵심 부품인 셀의 유동, 물질전달, 전기화학 해석을 통해 연료전지의 크기 및 유동 특성에 따른 전류밀도 분포, 온도분포를 분석하고자 한다.

## 2. MCFC 스택 해석 모델

### 2.1 반응 모델

용융탄산염 연료 전지는 연료극과 공기극, 전해질(CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)로 구성되어 있다. 연료극에 연료가스(H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>)가 공급되면 수소와 탄산염의 산화 반응이 발생하고 전기가 생성된다. 그렇게 발생한 전자는 다시 공기극에서 연료가스와의 환원 반응을 통하여 탄산염의 형태로 돌아간다. 이 과정을 반복하여 전기를 생산하는 것이 용융탄산염 연료전지의 작동 원리이다. 연료극(Anode)과 공기극(Cathode) 반응식은 식 (1)과 같다.



이 반응에서 생성된 전류(i)를 구하는 식은 식 (2)와 같다. 반응 도중 전극에서의 전압(V<sub>cell</sub>)은 셀 전체에서 일정하다고 가정하였다. 여기서 네른스트 전위(E<sub>Nernst</sub>)는 식 (3)과 같다.

$$i^{x,y} = \frac{E_{Nernst}^{x,y} - V_{cell}}{R_a^{x,y} + R_c^{x,y} + R_{ohm}^{x,y}} \quad (2)$$

$$E_{Nernst} = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{P_{H_2, Anode} \sqrt{P_{O_2, cathode}} P_{CO_2}}{P_{H_2O, Anode} P_{CO_2, cathode}}\right) \quad (3)$$

내부 저항인 R<sub>ohm</sub>과 분극에 의한 저항성분인 R<sub>a</sub>, R<sub>c</sub>를 구하는 식은 식 (4)와 같으며 실험문헌의 결과를 사용하였다<sup>5)</sup>.

$$\begin{aligned} R_{ohm} &= 0.5 \times 10^{-4} \exp\left[3016\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{923}\right)\right] \\ R_a &= 2.27 \times 10^{-9} \exp\left(\frac{6435}{T}\right) P_{H_2}^{-0.42} P_{CO_2}^{-0.1742} P_{H_2O}^{-1.0} \\ R_c &= 7.51 \times 10^{-10} \exp\left(\frac{9289}{T}\right) P_{O_2}^{-0.43} P_{CO_2}^{-0.09} \end{aligned} \quad (4)$$

MCFC의 연료극으로 투입된 H<sub>2</sub>와 CO<sub>2</sub>는 수성가스 전이 반응(water-gas-shift)이 발생한다. 수성가스 전이 반응은 반응속도가 매우 빨라, 빠르게 평형상태에 도달한다. 수성가스 전이 반응은 평형상수를 사용하여 계산하였다<sup>6)</sup>.

### 2.2 열전달 모델

전극 반응에 의한 발열량 q<sub>e</sub>는 다음과 같다. 식 (5)에서 ΔH<sub>e</sub>는 셀 내부의 반응에서의 엔탈피 변화이다.

$$q_e = -\Delta H_e (i/2F) - \dot{V}_i \quad (5)$$

수성가스 전이반응에 의한 발열량은 셀 내부 반응의 엔탈피 변화(ΔHs)와 셀 면적에 대한 CO의 몰 비 변화(Δnco)의 곱으로 구할 수 있다.

열 발생과 열 소비 또한 셀 내부에서 발생한다고 가정하였다. 용융탄산염 연료전지는 다수의 단위전지가 적층되어 스택을 구성한다. 이때, 스택 윗면과 아랫면으로는 다음의 인접 전지가 부착된다. 여기서 한 셀의 발열량이 인접 전지가 발열량과 동일하다고 가정하여 전지의 윗면과 아랫면으로는 단열 조건으로 가정하여 스택을 모사하였다<sup>7)</sup>. 열전달에 의하여 셀과 분리판은 각 두께에서 균일한 온도를 가진다.

또한 가스 투입구의 온도 조건은 초기 가스온도와 동일한 온도로 일정 온도 조건을 부가하였다. 그리고 전지의 나머지 면은 챔버와의 자연대류 조건(h=5 W/m<sup>2</sup>K)으로 가정하여 계산하였다. 또한 구성요소의 열 물성은 Table 1과 같고 가스는 혼합가스 법칙을 사용하여 물성을 계산하였다<sup>6)</sup>.

### 2.3 해석 조건

본 연구에서 사용한 기본 MCFC 단위 전지는 전극 면적  $0.09 \text{ m}^2$ 의 정사각형 형상이다. MCFC는 유동 방식에 따라 양극과 음극의 기체 투입구 방향이 같은 Co-flow 타입, 양극과 음극의 기체 투입구가 반대 방향에 있는 Counter-flow 타입, 양극과 음극의 기체 투입구가 수직으로 교차하여 있는 Cross-flow 타입으로 나눌 수 있다<sup>8)</sup>.

MCFC의 집전판은 사다리꼴 형상이 반복 성형되어 있다. 실제 3차원 계산을 수행할 때 사다리꼴 형상의 집전판 단면적을 모두 계산하는 것은 실질적으로 계산량이 너무 많아 불가능하므로 등가의 압력강하와 등가의 열전도도를 갖는 다공성 매질로 가정하여 채널을 해석하였다. 집전판을 등가의 압력강하와 열전달 계수를 가지는 다공성 매질로 가정하기 위하여 단위 셀 해석을 통하여 열전달 계수와 침투성계수를 결정하였다.

스택에서, 공기극과 연료극 채널 내에서 각 가스의 Reynolds Number가 낮은 값을 보여로 채널 내에서의 가스 유동은 완전 발달 층류 유동으로 가정하였다<sup>9)</sup>. 가스 이용률은 40%를 사용하였다. 가스 조성은 연료극은  $\text{H}_2:\text{CO}_2:\text{H}_2\text{O}:\text{CO}=0.617:0.077:0.203:0.103$ , 공기극은  $\text{O}_2:\text{CO}_2=0.33:0.67$  (Air: $\text{CO}_2=0.7:0.3$ )의 조건을 사용하였다.

### 2.4 해석 모델 구성

스유동, 열전달, 전기화학 해석은 COMSOL multi-physics v5.3을 이용하였다. 스택 해석모델은 위 가스 채널 결정을 토대로 기준이 될 수 있는 기본 해석 모

델을 구성하였다. 면적  $0.9 \text{ m}^2$  ( $W=0.3 \text{ m}$ ,  $L=0.3 \text{ m}$ )를 기준으로 하여 모델링을 진행하였고, 집전판 형상은 모델링하지 않고 다공성 매질을 가지는 직육면체로 재구성하였다. 집전판의 두께는  $2.4 \text{ mm}$ , 전극의 두께는 각  $0.7 \text{ mm}$ 이다. 두께 방향으로 7개의 요소를 사용하였고, 전체 요소는 80,640개의 직육면체 요소를 사용하였다. 요소는 개수를 30%씩 증가시켜 해석하여 다음 단계와의 해석 오차가 1% 안으로 감소하는 요소 개수로 결정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 집전판 등가 물성 계산

집전판으로 사용되는 사다리꼴 형상은 높이  $2.4 \text{ mm}$ , 폭  $6.2 \text{ mm}$ 이다. 여기에 가로 2개, 세로 3개의 단위형상을 정하여 등가 열물성을 계산하였고, 해석 모델은 Fig. 1과 같다. 위 면적에 X, Y방향, Z방향의 상향, 하향으로 각 네 가지 방향에서  $1 \text{ W}$ 의 열을 가하였다. 정상 상태에서 외부로부터 단열이고 온도차를 만들기 위하여 열을 주는 반대방향에는  $893 \text{ K}$ 의 온도로 고정하였다. 집전판은 STS 316이며, 밀도는  $7,800 \text{ kg/m}^3$ , 열전도율은  $20 \text{ W/mK}$ 이다. 이때 열전달은 전도로 이루어지므로 선형 열전도 식( $Q=K^{\text{eff}} \cdot \Delta T/\Delta L$ )을 이용하였다. 해석 결과로 나온 온도차를 이용하여 방향에 따른  $K_{\text{eff}}$ 를 구하여 등가물성으로 사용하였다. 열전도계수는 면적과 비례하므로 아래 값으로 계산한 방향 별 열전달계수는  $K_x^{\text{eff}}=3.11 \text{ W/mK}$ ,  $K_y^{\text{eff}}=1.42 \text{ W/mK}$ ,  $K_z^{\text{eff}}=1.19 \text{ W/mK}$ 이다. 이를 스택

Table 1. Thermal properties of the anode and the cathode

	Anode (Ni-Cr)	Cathode (NiO)
Density ( $\text{kg/m}^3$ )	8220	6794
Heat capacity ( $\text{J/molK}$ )	444	44352
Thermal conductivity ( $\text{W/mK}$ )	78	5.5

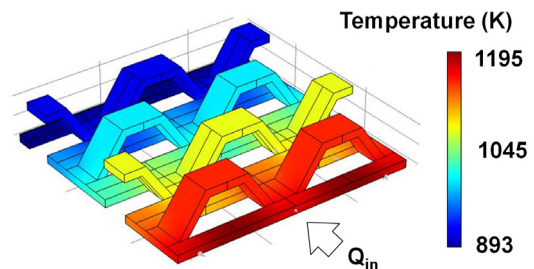


Fig. 1. Simulation result for the effective thermal conductivity

해석에 적용하였다.

등가 압력 전달 계수를 구하기 위한 해석 모델에서는 Fig. 2와 같은 길이 0.088 m, 폭 0.0248 m, 높이 0.0024 m의 해석 모델을 사용하였다. 대부분의 유동이 Fig. 2와 같은 방향이므로 등가 압력 계수는 집전판을 통과하는 방향으로만 계산하였다.

유동의 수직방향으로는 반복 조건을 경계 조건으로 부가하였다. 입구와 출구쪽은 사각형 채널을 사용하여 가스를 균일하게 분배하도록 하였다. 가스 분배구의 압력 강하는 무시하였다. 다공성 매질에서 압력 강하를 구하는 식 (7)과 같은 Darcy's law [7]를 이용하여 압력강하계수 ( $\alpha$ )를 구하였다.

$$\Delta P = -\frac{\mu L}{\alpha} v \quad (7)$$

여기서  $\Delta P$ 는 입구와 출구의 압력차, L은 다공성 매질의 길이,  $\alpha$ 는 가스 압력 강하 계수,  $v$ 는 출구쪽 평균 속도이다. 단위면적의 가스 채널 입구에 일정 가스 유속을 가하고, 출구 조건으로는 압력을 대기압으로 가정하였다. 유동은 정상 층류 유동으로 가정하였고 작동온도는 893 K으로 가정하였고 외부 벽면 조건은 단열 조건을 주어 해석했다. 여기서 동적 점성은  $22.6 \times 10^{-5}$  kg/m/s이다. 해석 결과는 Fig. 3과 같다.

해석 결과와 입구쪽 평균 입력 가스 속도와 가스 입구와 출구 압력차 값의 관계를 알 수 있었고 이를 그래프로 나타냈다. 계산 결과 집전판의 압력 강하계

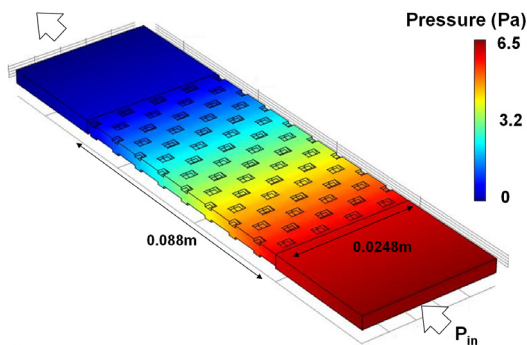


Fig. 2. Simulation model for the equivalent properties of the current collector

수( $\alpha$ )는  $1.75 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>이다.

### 3.2 유동 특성에 따른 셀 해석 결과 비교

#### 3.2.1 Counter-flow

면적 0.9 m<sup>2</sup>의 Counter-flow의 0.9 V에서 온도분포 및 전류밀도 분포 해석 결과는 Fig. 4와 같다. Counter-flow는 연료극과 공기극의 가스 진행방향이 서로 반대방향이다. 연료극 및 공기극의 차압은 입구 쪽에서 발생하고 다공성 매질을 통과하면서 점차 약해진다.

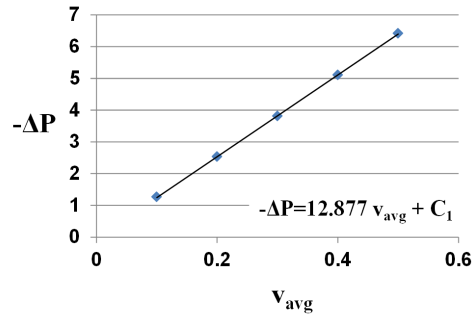


Fig. 3. Relationship of the pressure difference with respect to the input average velocity

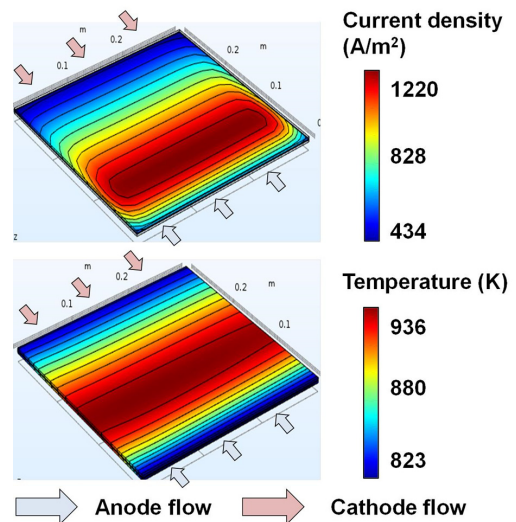


Fig. 4. Current density and temperature distribution of current density distribution of the counter-flow type MCFC

전류밀도의 경우 연료극 입구쪽에서 최대값을 보인다. 그리고 공기극 입구쪽에서 최소값을 보인다. 연료극의 가스 투입구 쪽에서 반응이 더 활발하게 발생하고 이 부분에서 최대 온도를 보인다. 전기화학 반응이 연료극 쪽에서 더욱 활발하여 높은 온도를 보인다.

온도분포의 경우 전류밀도 분포와 밀접한 연관을 가진다. 가스 투입구 부분은 앞선 해석 조건에서 가스 투입온도(823 K)로 고정하였기 때문에 낮은 온도를 보인다. 가스가 투입되면서 진행 방향에 따라 반응이 이뤄지고, 이에 따라 온도가 점차 높아짐을 확인할 수 있다.

### 3.2.2 Co-flow

공기극 가스와 연료극 가스의 방향이 서로 같은 방향으로 가스가 주입되는 Co-flow의 0.9 V에서 온도분포 및 전류밀도 분포 해석 결과는 Fig. 5와 같다. Co-flow의 경우 최대 전류밀도가 중심부에서 발생한 것을 확인할 수 있다. 그리고 0.09 m<sup>2</sup>에서는 전류밀도 분포가 Counter-flow에 비하여 더 균일하게 발생한다.

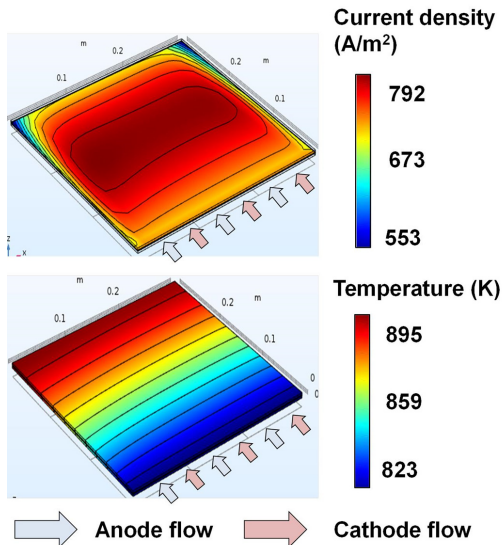


Fig. 5. Current density and temperature distribution of 0.3 m x 0.3 m co-flow type MCFC

온도분포는 연료극과 공기극 가스 출구쪽에서 최대값이 발생한다. Co-flow는 연료극과 공기극의 유동 진행방향이 동일하다. 전기화학 반응에서 발생한 열이 중심부에서 집중하여 발생하지 않고, 유동방향으로 이동한다. 이에 따라 출구 부분에서 최대 온도가 발생한다.

### 3.2.3 Cross-flow

면적 0.09 m<sup>2</sup>에서 공기극 가스와 연료극 가스의 방향이 서로 엇갈려 들어오는 Cross-flow의 온도분포 및 전류밀도 분포 해석 결과는 Fig. 6과 같다. Cross-flow의 경우 Co-flow와 마찬가지로 가스가 진행하는 방향으로 열이 이동한다. 따라서 연료극 가스 출구와 공기극 가스 출구가 만나는 모서리 부분에서 최고 온도가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 전류밀도의 경우 연료극의 입구쪽, 공기극의 출구쪽으로 최대 전류밀도가 발생한다.

## 3.3 셀 크기에 따른 해석 결과

앞의 구성한 기본 해석모델을 바탕으로 면적 100 cm<sup>2</sup>

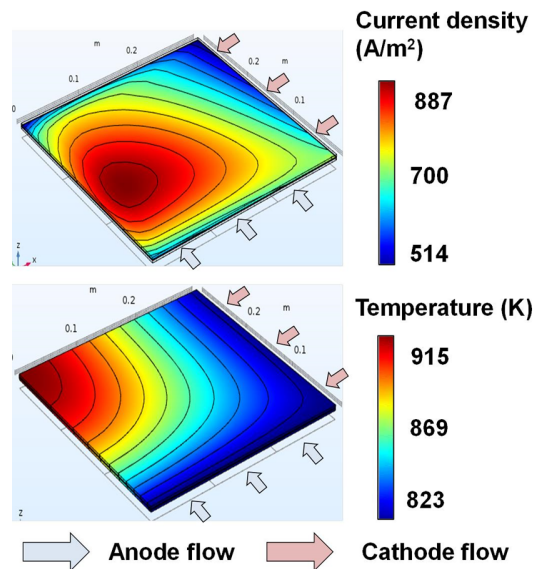


Fig. 6. Current density and temperature distribution of 0.3 m x 0.3 m cross-flow type MCFC

단위 전지 모델, 400 cm<sup>2</sup>, 900 cm<sup>2</sup>, 1,600 cm<sup>2</sup>, 2,500 cm<sup>2</sup>의 총 다섯 가지 스택 모델 해석을 진행하였다. 전지의 종횡비는 모두 1:1로, 가로 세로 같은 길이며 높이는 동일하다. 면적이 증가함에 따라 투입되는 가스량도 비례하여 증가한다. 나머지 조건의 경우 모두 동일하다고 가정하였다. 연료전지에 발생한 전압은 0.9 V로 일정하다고 가정하고 최고 전류밀도, 최고 온도를 비교하였다. Fig. 7은 면적 0.25 m<sup>2</sup>, 셀 전압 0.9 V에서 유동 방향에 따른 전류밀도 및 온도분포 해석 결과이다.

0.25 m<sup>2</sup>에서 각 유동방향에 따른 전류밀도 분포 및 온도분포는 0.09 m<sup>2</sup>의 분포와 유사하다. Co-flow의 경우 연료극 입구쪽에서 최대 전류밀도를 보이고, 가스 출구 쪽으로 최대 온도를 보인다. Counter-flow는 연료극 입구쪽에서 최대 전류밀도가 발생하고, 그 근처에서 최대 온도가 발생한다. Co-flow에서 최고 온도는 901 K, Cross-flow에서 최고 온도는 940 K이다. Counter-flow는 최고 온도 1,080 K이며, 다른 두 유동에 비하여 매우 높다. 전류밀도 역시 큰 차이를 보인다. Counter-flow가 Co-flow에 비하여 최대 전류밀도가 약 2.49배 높다. Cross-flow는 연료극 입구, 공기극 출구쪽에서 최대 전류밀도가 발생하고, 출구 모서리가 만나는 부분에서 최대 온도분포를 보인다.

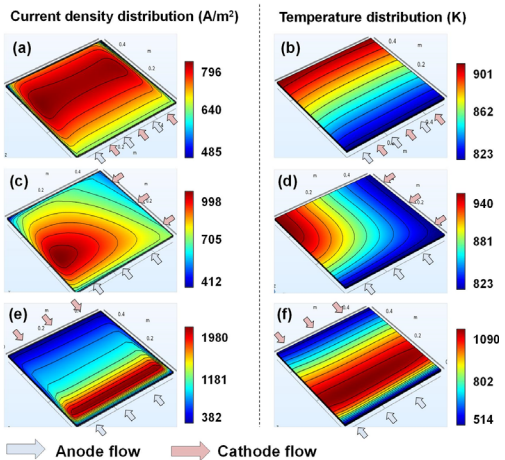


Fig. 7. Current density and temperature distribution of the 0.25 m<sup>2</sup> cell and at the cell voltage of 0.9 V: (a) and (b) are co-flow; (b) and (c) are cross-flow; (e) and (f) are counter-flow

Fig. 8에서는 면적별 유동타입의 셀 전압 0.9 V에서 최고 전류밀도 값을 나타냈다. 면적이 증가함에 따라 모든 유동 타입에서 최고 전류밀도 값이 증가하는 경향을 보였다. 유동 특성에 따라 최대 전류밀도를 비교하면, Counter-flow는 0.25 m<sup>2</sup>에서 0.01 m<sup>2</sup>에 비하여 191.2% 증가하였고, Co-flow는 11.3%, Cross-flow는 37.6% 증가하였다. 면적 증가에 따라 Co-flow에서 전류밀도 증가가 제일 작았다. 또한 세 가지 유동 타입 중 Co-flow 조건이 가장 균일한 전류밀도 분포를 보였음을 알 수 있다.

Fig. 9에서는 면적별 유동 타입의 최고 온도값을 나타냈다. 면적이 증가함에 따라 모든 유동 타입에서의 최고 온도가 증가하는 경향을 보였다. 최고 온도의 경우, Counter-flow는 0.25 m<sup>2</sup>에서 0.01 m<sup>2</sup>에 비하여 31.3%, Co-flow는 6.3%, Cross-flow는 12.0% 증가하였다. 최대 전류밀도, 최대 온도 증가폭이 Counter-flow가 가장 크다.

면적이 증가함에 따라 Counter-flow는 온도가 증

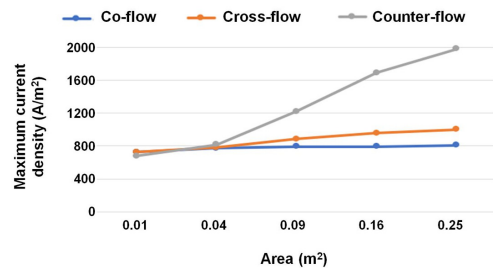


Fig. 8. Maximum current density value with respect to the cell area and flow type at 0.9 V

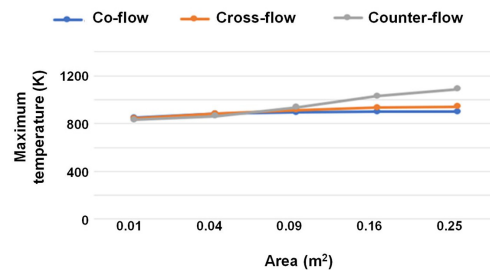


Fig. 9. Maximum temperature value with respect to the cell area and flow type at the cell voltage of 0.9 V

가하면서 동시에 최고 전류밀도 역시 크게 상승한다. 온도가 상승함에 따라 식 (4)의 분극저항이 감소하기 때문에 전류밀도가 증가한다. Counter-flow의 경우 온도 경계조건은 서로 반대편에 위치한 연료극 입구, 공기극 입구로 투입가스와 같은 온도이다. 셀 면적이 작은 경우, 양 쪽에서 동일한 온도가 유지되므로 전체 온도가 낮게 발생한다. 하지만 면적이 증가함에 따라 양 쪽의 거리차가 증가하고 연료전지 반응에서 발생한 열이 쉽게 빠져나가지 못하여 중심부에서 높은 온도가 발생한다.

Co-flow와 Cross-flow는 면적이 증가할 때 Fig. 7의 Counter-flow와 같이 온도가 급증하는 현상이 발생하지 않는다. Co-flow와 Counter-flow는 가스 출구 쪽으로 최대 온도가 발생한다. Co-flow와 Counter-flow는 연료전지 반응으로 발생한 열이 유동을 따라 가스 출구로 배출되어 급격한 온도 상승은 발생하지 않는다.

면적이 작은 경우, 가장 낮은 온도를 보인 것은 Counter-flow지만 면적이 증가함에 따라 가장 균일한 값을 보인 것은 Co-flow였다. 이 결과를 토대로 세 가지 유동 타입 중, 대면적 스택으로 Co-flow가 가장 적은 온도차가 발생하고, 이에 따라 안정적으로 운전이 가능하다는 결론을 얻을 수 있었다.

## 4. 결론

COMSOL Multiphysics를 이용하여 MCFC단위 전지를 모델링하고 셀 내부의 전기 화학 반응, 기체 유동, 열전달 모델을 모사하였다. 해석 모델을 결정하는 과정에서 사다리꼴 형상의 집전판을 등가의 압력 강하 계수와 열전도 계수를 가지는 다공성 매질로 가정하여 해석을 진행하였다.

이렇게 결정된 기본 해석 조건을 토대로 각 유동 타입에 따라 면적을 100 cm<sup>2</sup>, 900 cm<sup>2</sup>, 2,500 cm<sup>2</sup>로 달리하여 압력, 온도, 전류밀도의 분포를 확인하였다. 해석 결과 최고 온도는 Counter-flow의 경우 0.25 m<sup>2</sup>에서 0.01 m<sup>2</sup>에 비하여 31.3% 증가하였다. Co-flow는 6.3%, Cross-flow는 12.0% 증가하였다. 최대 전류

밀도는 Counter-flow의 경우 0.25 m<sup>2</sup>에서 0.01 m<sup>2</sup>에 비하여 191.2% 증가하였다. Co-flow는 11.3%, Cross-flow는 37.6% 증가하였다. 면적 증가에 따라 Co-flow에서 전류밀도 증가가 제일 작았다. 이를 통하여 세 가지 유동 중 Co-flow 유동 타입에서 가장 적은 열응력이 발생하고 반응이 안정되어, 장수명 운전이 가능할 것으로 예측된다.

## 후 기

본 연구는 2018년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20163030031860)이다.

## References

1. X. Li, "Principles of fuel cells", Taylor & Francis Group, USA, 2005. Retrieved from <https://www.crcpress.com/Principles-of-Fuel-Cells/Li/p/book/9781591690221>.
2. H. K. Park, Y. R. Lee, M. H. Kim, G. Y. Chung, S. W. Nam, S. A. Hong, T. H. Lim, and H. C. Lim, "Studies of the effects of the reformer in an internal-reforming molten carbonate fuel cell by mathematical modeling", *Journal of Power Sources*, Vol. 104, No. 1, 2002, pp. 140-147, doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00912-0](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00912-0).
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, doi: <https://doi.org/10.1361/105994906X117305>.
4. 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. Retrieved from <http://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200430360539720.page>.
5. G. Wilemski, "Simple porous electrode models for molten carbonate fuel cells", *J. Electrochem. Soc.* Vol. 130, 1983, pp. 117-121.
6. S. J. Lee, C. Y. Lim, and C. W. Lee, "Design of Cell Frame Structure of Unit Cell for Molten Carbonate Fuel Cell Using CFD Analysis", *Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 29, No. 1, pp. 56-63, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.28.1.56>.
7. Y. J. Kim, I. G. Chang, T. W. Lee, and M. K. Chung, "Effects of relative gas flow direction in the anode and cathode on

- the performance characteristics of a Molten Carbonate Fuel Cell”, *Fuel*, Vol. 89, No. 5, 2010, pp. 1019-1028, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.027>.
8. F. Yoshida, N. Ono, Y. Izaki, T. Watanabe, and T. Abe, “Numerical analyses of the internal conditions of a molten carbonate fuel cell stack: comparison of stack performances for various gas flow types”, *Journal of Power Sources*, Vol. 71, No. 1-2, 1998, pp. 328-336, doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(97\)02727-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(97)02727-4).
9. C. W. Lee, M. Lee, M. J. 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, No. 41, 2016, pp. 18747-18760, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.188>.