

<학술논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2017.41.2.109>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

고체산화물 연료전지에서 가스채널/리브 폭의 영향에 관한 연구

전동협^{*†} · 신동열^{**} · 유광현^{**} · 송락현^{***}

* 동국대학교 기계부품시스템공학과, ** 엘티씨 기술개발연구소,
*** 에너지기술연구원 연료전지연구센터

Effect of Gas Channel/Rib Width in Solid Oxide Fuel Cells

Dong Hyup Jeon^{*†}, Dong-Ryul Shin^{**}, Kwang-Hyun Ryu^{**} and Rak-Hyun Song^{***}

* Dept. of Mechanical System Engineering, Dongguk Univ., ** R&D Center, LTC
*** Fuel Cell Research Center, Korea Institute of Energy Research

(Received September 26, 2016 ; Revised October 24, 2016 ; Accepted December 21, 2016)

Key Words: SOFC(고체산화물 연료전지), OpenFOAM(오픈폼), Planar Type(평판형), Interconnect(분리판), Channel/Rib Width(채널/리브폭)

초록: 전산유체해석(CFD) 기법을 이용하여 음극 지지체형 고체산화물 연료전지(SOFC)에 대한 수치해석을 수행하였다. 평판형 구조의 SOFC 에서 가스채널과 리브폭 변화에 따른 성능과 온도균일성에 관한 연구가 이루어졌다. 전산해석 툴로서는 공개소스 전산유체해석 툴박스인 OpenFOAM 을 이용하였다. 수치해석결과, 산소고갈이 일어나지 않는 범위 내에서 가스채널과 리브폭의 증가는 성능과 온도 균일성에 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 하지만 넓은 리브폭의 사용과 고전류밀도에서의 작동은 산소 고갈로 인한 성능저하의 가능성이 있음을 확인하였다.

Abstract: Using the computational fluid dynamics (CFD) technique, we performed a numerical simulation in anode-supported solid oxide fuel cell (SOFC). The effect of gas channel/rib width on the cell performance and temperature uniformity was investigated in planar type SOFC. The open source CFD toolbox, OpenFOAM, was used as a numerical analysis tool. As a result, the effect of gas channel/rib width on the cell performance and temperature uniformity was not significant if the oxygen depletion is not occurring. On the other hand, the usage of a wide rib and operation at high current density may lead to performance degradation due to oxygen depletion.

- 기호설명 -

D : 확산계수 [m^2/s]
 d_p : 입자의 지름 [μm]
 F : Faraday 상수, 96,485 C/mol
 G_f : Gibbs 에너지 [J/mol]
 i : 전류밀도 [A/m^2]
 P : 압력 [Pa]
 R_g : 기체상수, 8.314 J/K mol
 T : 온도 [K]
 u : 속도 [m/s]
 V : 전압 [V]

w_{ch} : 채널폭 [mm]
 w_{rib} : 리브폭 [mm]
 ε : 공극률(porosity)
 κ : 열전도율 [W/m K]
 τ : 굴곡률(tortuosity)

1. 서 론

고체산화물 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)는 화석연료나 재생 가능한 연료의 화학적 에너지를 전기에너지로 변환하는 전기화학적 장치로서, 높은 효율의 에너지 변환이 가능하며 열병합발전이 가능한 시스템이며 유해한 물질을 배출하지 않는 장점으로 인하여 미래 에너지원으로 주목을 받

† Corresponding Author, jeondh@dongguk.ac.kr
 © 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

아오고 있다.^(1,2) SOFC는 양극과 음극으로 이루어진 두 개의 전극과 전극 사이에 위치한 고체 전해질, 반응기체가 흐르는 가스채널(Gas Channel), 그리고 집전체 역할과 셀간 반응기체의 분리 및 전기적 연결을 하는 분리판(Interconnect)로 구성되어 있다. 공기가 주입되는 양극에서는 산화반응에 의하여 산소이온과 전자가 생성되고, 생성된 산소이온은 전해질을 통하여 음극으로 이동한다. 연료가 주입되는 음극에서는 수소이온의 환원반응이 일어나며 물이 생성된다.⁽³⁾

SOFC를 셀 형상에 따라 분류하면 평판형(planar type), 관형(tubular type), 평판형(flat-tubular)로 구분된다. 이 중 평판형 SOFC는 구조가 간단하여 비교적 저렴하게 제조할 수 있고 높은 출력을 낼 수 있다.⁽⁴⁾ 특히 고온(700 ~ 900 °C)에서 작동하여 열병합발전(combined heat and power)이 가능하고 효율을 최고 90%까지 낼 수 있다고 알려져 있어 많은 관심을 받고 있다. 하지만 상용화를 위해서는 스택킹(stackings), 발전시스템 중합, 내구성, 장수명 등 해결해야 할 과제가 남아 있다. 이러한 문제들은 실험을 통하여 해결하기에는 비용과 접근과정의 난해함, 시간 등의 제약이 있어 모델링과 같은 수치해석적 기법이 많이 이용되고 있다. 수치해석적 연구는 전기화학 반응, 반응물/생성물의 이동, 열생성/전달 등의 내부반응 과정의 계산을 통하여 전류 밀도, 작동전압, 농도분포, 열분포 등을 예측할 수 있어 최근 SOFC 설계에 많이 이용되고 있다.

수치해석을 이용한 SOFC 연구는 그간 수많은 연구자들에 의하여 발표된 바 있다. SOFC 모델링 연구 방법을 분류하면 해석도구를 직접 개발(in-house code)하거나 상용소프트웨어(commercial software)를 이용하여 수치해석을 수행하는 것으로 나눌 수 있다. 상용 소프트웨어의 경우 SOFC 해석을 위한 툴박스(tool box)가 제공되어 있어 비교적 쉽게 전산 수치해석의 접근이 가능하나 소스 코드가 공개되지 않고 라이선스 비용이 고가인 단점이 있다. 최근 공개소스 전산 유체해석 라이브러리인 OpenFOAM(Open Field Operation and Manipulation)⁽⁵⁾을 이용하여 SOFC를 해석할 수 있는 프로그램이 개발되었고 일반에게 공개되어 별도의 라이선스 비용을 지불하지 않고도 공개 코드를 이용한 모델링이 가능해졌다.⁽⁶⁾ 또한 소스 코드가 공개되어 사용자가 직접 수치모델을 수정 또는 추가할 수 있어 사용자의 직접적인 참여로 프로그램의 검증과 개선이 가능해졌다.

본 연구에서는 OpenFOAM을 이용하여 SOFC의

전기화학 및 열유동 해석이 이루어졌다. 평판형태의 음극 지지체형(Anode-supported) SOFC를 대상으로 가스채널(gas channel) 및 리브(rib)의 최적화를 위한 연구가 진행되었다. 일반적으로 채널폭이 넓은 경우 기체확산 공간이 증가하나 집전체의 단면적이 적어지고, 리브가 넓은 경우 집전체의 단면적이 커지나 접촉저항이 증가하는 경향이 있어 이에 대한 최적화 연구가 요구되어 왔다. 따라서 본 연구에서는 채널폭과 리브폭을 일정 비율로 증가/감소시켜 폭 변화에 따른 성능변화를 관찰하였다. SOFC는 고온에서의 소재간 열팽창 계수 차이로 인한 크랙(crack) 및 박리(delamination)의 문제가 있어 온도 균일성이 중요하므로 온도분포의 비교를 통한 온도균일성 평가도 이루어졌다.

2. 수치 해석

2.1 지배방정식

SOFC의 수치해석을 위하여 다음과 같은 식들이 사용되었다.

질량 보존식(conservation of mass) :

$$\text{div}(\rho \vec{u}) = S_m \quad (1)$$

$$S_m = \sum_{i=1}^n S_i \quad (2)$$

운동량 보존식(conservation of momentum) :

$$\text{div}(\rho \vec{u} \cdot \vec{u}) = -\text{grad } P + \text{div}(\mu \text{grad } \vec{u}) + S_p \quad (3)$$

$$S_p = -\frac{\mu \vec{u}}{K} \quad (4)$$

기체 종 보존식(conservation of gas species) :

$$\text{div}(\rho \vec{u} y_i) = \text{div}(D_i^{\text{eff}} \text{grad } y_i) + S_i \quad (5)$$

$$S_{H_2} = -\frac{i}{2F} M_{H_2}, \quad S_{H_2O} = \frac{i}{2F} M_{H_2O},$$

$$S_{O_2} = -\frac{i}{4F} M_{O_2} \quad (6)$$

에너지 보존식(conservation of energy) :

$$\text{div}(\rho C_p \vec{u} T) - \text{div}(k \text{grad } T) = S_h^e + S_h^j \quad (7)$$

$$S_h^e = \frac{i}{2F} \Delta H(T) - iV^{\text{cell}}, \quad S_h^j = i^2 R \quad (8)$$

여기서 ρ 는 밀도, μ 는 동점성계수, K 는 투과도(permeability), y_i 는 질량분율(mass fraction), M_{H_2} 는 수소의 질량, M_{H_2O} 는 물의 질량, M_{O_2} 는 산소의 질량, C_p 는 열용량, H 는 엔탈피(enthalpy)를 의미

한다.

다공성 매체(porous media) 내에서의 기체 이동은 주로 확산(diffusion)에 의해 이루어진다. 유효 확산계수(effective diffusion coefficient)는 binary diffusion(D_{ij})과 Knudsen diffusion($D_{i,Kn}$)이 결합한 Bosanquet formula 형태로 다음과 같이 표현된다.

$$D_i^{eff} = \frac{\varepsilon}{\tau} \left(\frac{1}{D_{ij}} + \frac{1}{D_{i,Kn}} \right)^{-1} \quad (9)$$

$$D_{ij} = \frac{0.00143T^{1.75}}{P M_{ij}^{1/2} (v_i^{1/3} + v_j^{1/3})^2} \quad (10)$$

$$D_{i,Kn} = \frac{97}{2} d_{pore} \sqrt{\frac{T}{M_i}} \quad (11)$$

$$d_{pore} = \frac{2}{3} \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} d_p \quad (12)$$

여기서 P 는 압력(bar), M_{ij} 는 평균몰질량(kg/kmol)이며 ($M_{ij} = 2(1/M_i + 1/M_j)^{-1}$), 식 (10)에 의하여 계산된 D_{ij} 의 단위는 cm^2/s 이다.

2.2 전기화학방정식

셀전압(V^{cell})은 개방회로전압(open circuit voltage, V^{OCV}), 양극 과전압(cathode overpotential, η_A), 음극 과전압(anode overpotential, η_C) 및 내부저항(ohmic resistance, iR)의 결합으로 표현된다.

$$V^{cell} = V^{OCV} - \eta_A - \eta_C - iR = V^{OCV} - ir_i \quad (13)$$

$$V^{OCV} = -\frac{\Delta G_f}{2F} + \frac{R_g T}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2}}{P_{H_2O}} \left(\frac{P_{O_2}}{100000} \right)^{1/2} \right) \quad (14)$$

본 연구에서는 양극 과전압, 음극 과전압 및 내부저항을 집중내부저항(lumped internal resistance)을 이용하여 간략화 하였으며, 집중내부저항은 Global ThermoElectric Inc에서 측정된 자료를 이용하였다.⁽⁷⁾ 온도범위 550~1200 °C에서 측정되었으며 수식화된 식은 다음과 같다.

$$r_i = 0.3044 + 0.408\gamma + 0.8687\gamma^2 + 2.7861\gamma^3 + 2.9825\gamma^4 \quad (15)$$

$$\gamma = \frac{1000}{T} - 1.1463 \quad (16)$$

또한 ASL(또는 CCCL)과 Interconnect간 존재하는 접촉저항(contact resistance)의 영향은 고려하지 않았다.

2.3 수치해석 방법

공개소스 라이브러리인 OpenFOAM을 이용하여 다중스케일에서의 전산유동해석(computational fluid dynamics, CFD)을 시행하였다. 지배방정식들은 C++ 프로그래밍 언어로 구성된 유한체적구조

(finite volume scheme)를 이용하여 계산되었다. 해석 알고리즘은 순차적이고 반복적으로 구성되어 있다. SIMPLE 알고리즘(algorithm)과 가우스 선형 구조(Gauss linear scheme)을 이용하여 지배방정식이 계산되었다. 또한 OpenFOAM내의 라이브러리(library)를 이용하여 복잡한 수학적 표현들이 계산되었다. 즉, Sparse matrices를 풀기 위하여 conjugate-gradient(CG) method가 사용되었고, symmetric matrices의 계산을 위하여 Incomplete Cholensky preconditioning method가 사용되었으며 asymmetric matrices의 계산을 위하여 BI-CGSTAB method가 사용되었다. 수치해석의 효율성을 위하여 질량 보존식, 운동량 보존식, 기체 종 보존식은 각각의 부분영역(sub-region)에서, 에너지 보존식은 전체영역(whole-region)에서 계산하였으며 mapping을 통하여 상호 데이터 교류가 이루어졌다.

3. 해석 모델

Fig. 1은 평판형태의 음극 지지체형 SOFC로 대향류(counter-flow)를 대상으로 하였으며, 구조는 분리판(Interconnect), 가스 채널, PEN(positive electrode-Electrolyte-Negative electrode)로 구성되어 있다. PEN은 다음과 같은 5개의 층으로 구성되어

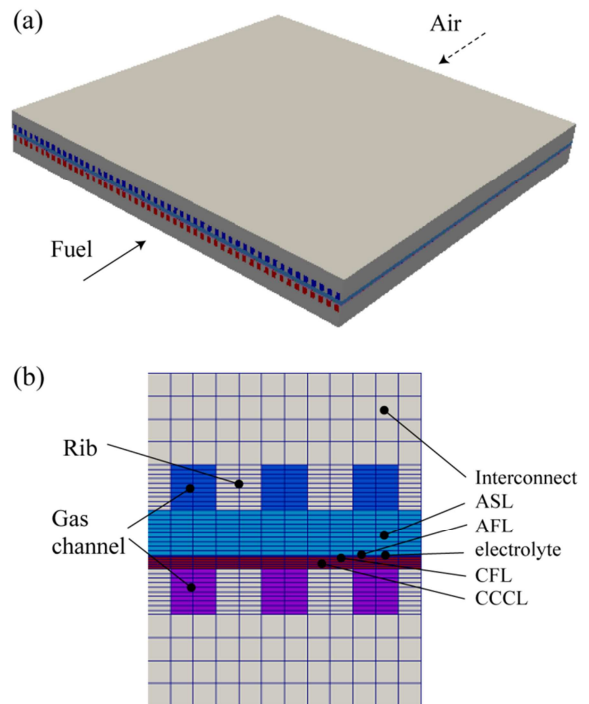


Fig. 1 (a) Geometry of planar-type anode-supported SOFC (counter-flow), and (b) the detailed schematic of computational domain

Table 1 Physical properties of materials

	Thickness (mm)	ϵ	d_p (μm)
Interconnect	3.5	-	-
ASL	1	0.5	2
AFL	0.007	0.25	1.3
Electrolyte	0.008	-	-
CFL	0.018	0.25	0.5
CCCL	0.267	0.5	12

Table 2 Operating conditions

	Fuel	Air
Mass fraction of H ₂ (or O ₂) (%)	0.782	0.233
Mass fraction of H ₂ O(or N ₂) (%)	0.218	0.767
Inlet velocity (m/s)	2	5
Operating temperature (K)	1000	
Operating pressure (atm)	1	

있다. 1) anode substrate layer(ASL), 2) anode functional layer(AFL), 3) electrolyte, 4) cathode functional layer (CFL), 5) cathode current collect layer(CCCL). 본 연구에서는 반응면적이 100 cm²(10 cm×10 cm)이며 가스채널의 단면이 1 mm×1 mm인 단위전지가 모델링 되었다. 작동온도는 1000 K, 그리고 작동압력은 1 atm으로 설정하였으며, 입구와 출구를 제외한 벽면에서는 단열조건을 적용하였다. 모델링에 사용된 SOFC의 상세한 치수와 작동조건은 각각 Table 1과 Table 2에 표시하였다. 본 연구에 사용된 해석 프로그램은 최근 일반에게 공개되어 (<http://openfuelcell.sourceforge.net>) 여러 사용자에게 의하여 프로그램의 검증이 활발히 이루어지고 있으며, 최근 검증결과가 발표되고^(8,9) 있어 본 연구에서의 모델검증은 생략한다.

4. 결 과

가스채널의 최적화를 위하여 가스채널과 리브의 폭을 동일하게 두고 일정비율로 변화시켰을 때의 성능 및 온도 균일성을 관찰하였다. Fig. 2는 폭 변화에 따른 SOFC의 성능곡선을 나타낸다. 가스채널과 리브의 폭은 0.5, 1.0, 1.5 mm를 대상으로 하였다. 그림에서 보는 바와 같이 가스채널과 리브의 폭이 작을 때 높은 성능을 나타내며 폭이 커짐에 따라 성능이 하락하는 경향을 나타내나 그 차이는 미미하다. 이는 리브폭이 작을 경우 반응

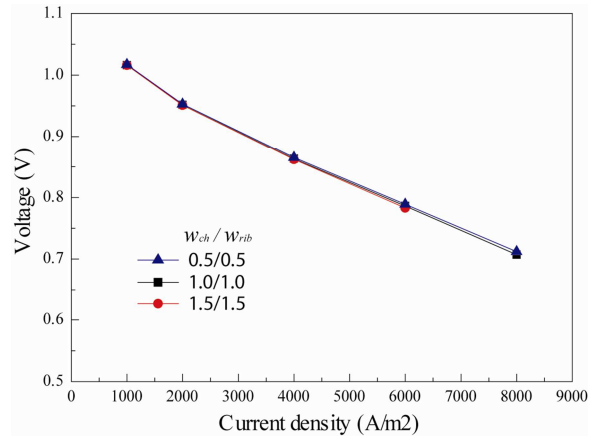


Fig. 2 I-V characteristics at 1000 K

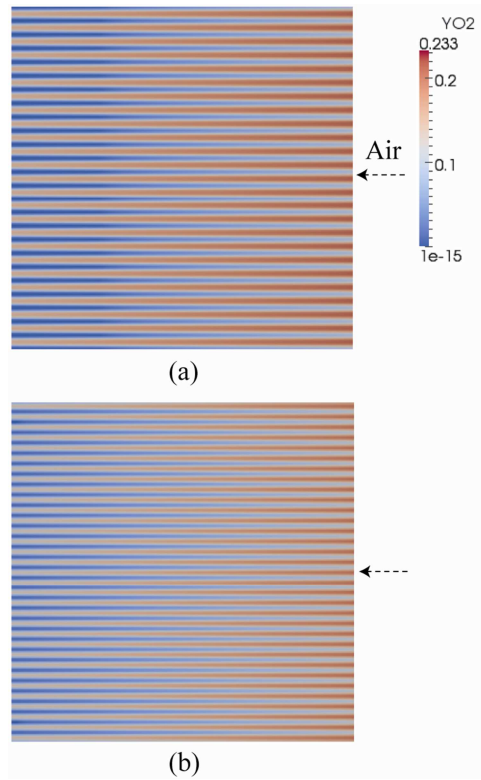


Fig. 3 Mass fraction distribution of Oxygen (a) at $i = 6000 \text{ A/m}^2$ for $w_{ch}/w_{rib} = 2.0/2.0 \text{ mm}$ and (b) at $i = 8000 \text{ A/m}^2$ for $w_{ch}/w_{rib} = 1.5/1.5 \text{ mm}$

기체의 확산 거리가 짧아짐으로 인하여 반응면적으로 기체의 공급이 원활하기 때문이다. 또한 리브폭이 차지하는 비율의 증가는 접촉저항의 증가를 야기하여 성능하락을 유발하나 본 연구에서는 접촉저항의 영향을 고려하지 않아 리브폭 변화에 따른 성능차이가 미미한 것으로 판단된다. 하지만 폭이 2.0 mm인 경우 출구부분에서의 극심한 전류밀도 분균일로 인하여 성능곡선을 얻을 수가 없었

다. 이는 Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 리브 아래에서 산소고갈(Oxygen depletion)이 발생하였기 때문이다. 이러한 결과는 넓은 리브폭과 얇은 CCCL 두께의 복합적인 원인에 기인하며 음극 지지체형 SOFC의 경우 리브폭을 가능한 적게 설계해야 할 것으로 판단된다. 하지만 가스채널 폭이 작을 경우 제작이 어려워지며 정밀제작의 경우 제작단가가 높아지는 단점이 있다. 또한 폭 1.5 mm의 $i_{avg} = 8000 \text{ A/m}^2$ 에서도 Fig. 3(b)에서 보는 바와 같이 동일한 문제가 발생하여 수렴이 이루어지지 않았다. 이는 전류밀도의 증가로 반응기체의 소모가 증가하여 출구쪽에서의 산소고갈이 발생한 것으로 판단된다. 따라서 높은 전류밀도에서 작동시 반응기

체의 공급량을 증가시켜야 할 것으로 사료된다. SOFC 시뮬레이션 중 산소고갈이 발생할 경우 복잡한 형태의 코드의 로직이 구성되어야 하며 수렴도 천천히 이루어져야 하므로 계산시간이 상당량 증가하는 문제점이 있다. 본 코드에는 아직 적용되어 있지 못하여 추후 반드시 보완되어야 할 문제이다.

Fig. 4는 AFL 표면에서의 전류밀도분포를 나타낸다. 가스채널과 리브의 폭이 0.5, 1.0, 1.5 mm인 SOFC에 대하여 각각 비교하였다. 연료입구에서 높은 전류밀도를 나타내며 연료입구로부터 멀어질수록 낮은 전류밀도를 나타낸다. 따라서 전류밀도 분포는 연료분포와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 또한 가스채널에서 전류밀도가 높으며 리브

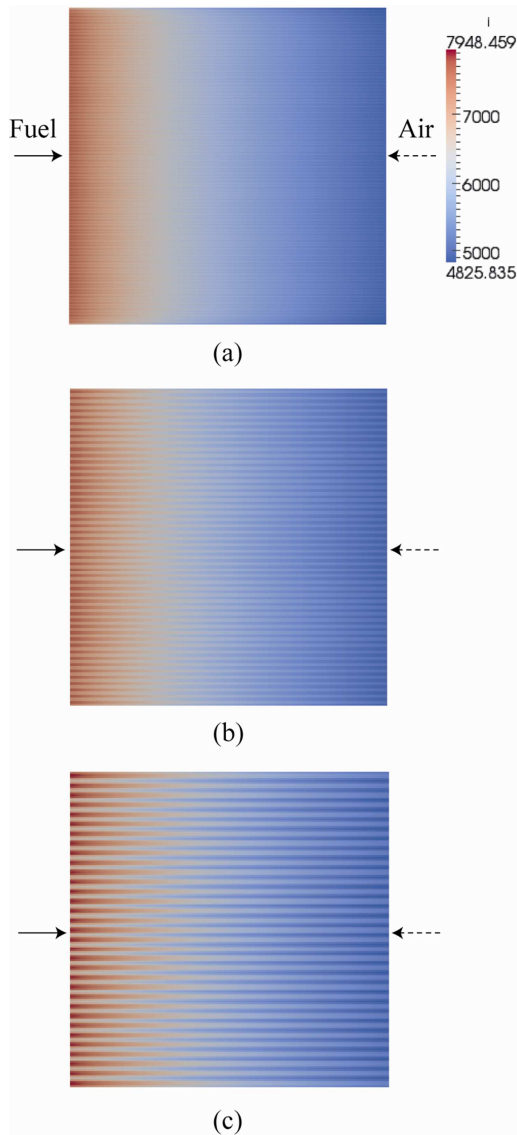


Fig. 4 Current density distribution on AFL surface at $i = 6000 \text{ A/m}^2$. $w_{ch}/w_{rib} =$ (a) 0.5/0.5 mm, (b) 1.0/ 1.0 mm, (c) 1.5/1.5 mm

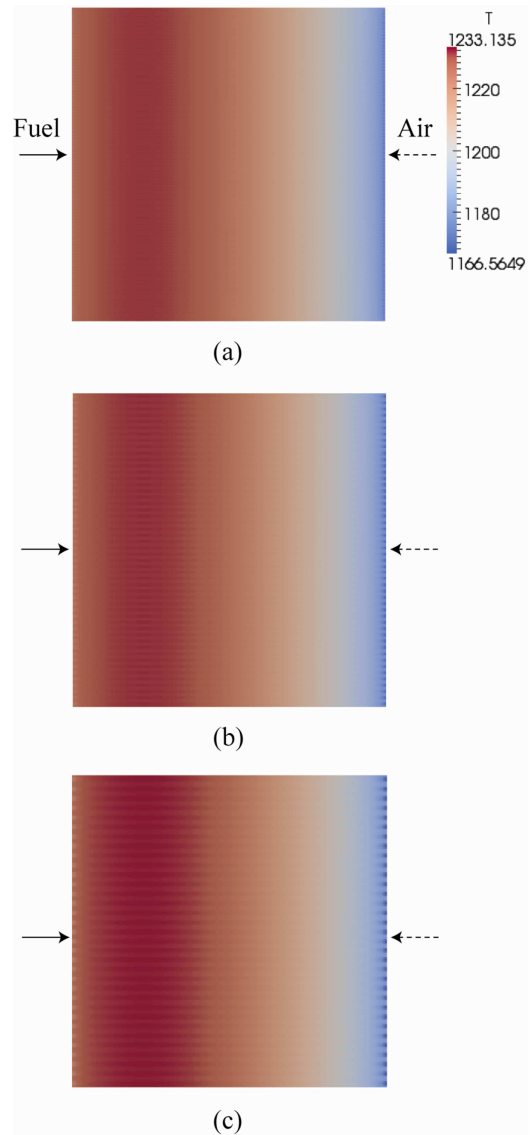


Fig. 5 Temperature distribution on AFL surface at $i = 6000 \text{ A/m}^2$. $w_{ch}/w_{rib} =$ (a) 0.5/0.5 mm, (b) 1.0/ 1.0 mm, (c) 1.5/1.5 mm

에서 전류밀도가 낮게 분포되어 있다. 폭이 넓어질수록 이 현상이 뚜렷이 나타나며 이는 폭이 넓어질수록 리브 아래로 산소공급의 불충분해져서 전류밀도가 낮아짐을 의미한다. 하지만 폭 변화별 최고 전류밀도와 최저 전류밀도의 차이가 크지 않아 각각의 전류밀도 분포 차이는 크지 않은 것으로 판단된다. 이는 식 (15)와 (16)의 집중내부저항을 이용하여 저항 식을 단순화 시킨 영향에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 5는 가스채널과 리브의 폭이 0.5, 1.0, 1.5 mm 인 AFL 표면에서의 온도분포를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이, 연료입구 부근에서 온도가 높으며 연료입구에서 멀어질수록 온도가 낮아지며 공기 입구에서 낮은 온도가 분포되어 있음을 확인할 수 있다. 이는 연료의 주입속도가 공기의 주입속도 보다 낮아 연료입구 부근에서 전기화학 반응이 높게 일어나고 있으며 단열조건을 경계조건으로 설정하였기 때문에 낮은 공기 입구 온도가 일종의 냉각제 역할을 하고 있는 것으로 보인다. 가스채널과 리브의 폭이 좁을수록 균일한 온도분포를 보이며 폭이 넓을수록 리브의 영향에 의한 불균일한 온도분포를 나타낸다. 특히 폭이 1.5 mm인 경우 리브 아래에서 낮은 온도를 나타내는데 이는 리브폭 증가에 따른 반응기체의 불충분한 공급과 이로 인한 불균일한 전기화학반응에 기인한다. 또한 리브폭이 좁을수록 반응가스의 균일한 공급과 전기화학반응에 의하여 균일한 온도분포를 나타냄을 의미한다.

Table 3은 $i_{avg} = 6000 \text{ A/m}^2$ 일 때 가스채널과 리브의 폭 변화에 따른 각각의 해석결과를 나타낸다. 가스채널과 리브의 폭이 0.5 mm일 때 가장 높은 전압과 평균온도가 나타났으며 1.5 mm에서 가장 낮은 전압과 평균온도가 나타났으나 그 차이는 매우 작다. 따라서 산소고갈이 일어나지 않는 범위 내에서 가스채널과 리브의 폭 변화는 성능과 온도에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

온도분포의 균일성에 관한 정량적인 고찰을 위하여 AFL 표면에서의 온도분포를 통계적인 기법을 이용하여 나타내었다. Fig. 6은 3가지 폭 변화($w_{ch}/w_{rib} = 0.5/0.5 \text{ mm}$, $1.0/1.0 \text{ mm}$, $1.5/1.5 \text{ mm}$)에 대하여 AFL 표면에서의 온도별 도수분포를 나타낸 히스토그램이다. Fig. 5에 나타난 AFL 표면에서의 온도분포를 각 노드에서의 온도데이터를 추출하여 온도별로 분포를 배열하여 온도 균일성을 수치화하였다. 그림에서 보는 바와 같이 온도가 높아짐에 따라 빈도수가 높아짐을 알 수 있다. 세 경우 모두 1170~1235 K에 분포되어 있고 1230 K

Table 3 Predicted results of SOFC at $i_{avg} = 6000 \text{ A/m}^2$

w_{ch}/w_{rib}	$V^{cell}(\text{V})$	$T_{avg}(\text{K})$	$\sigma^1(\text{K})$
0.5/0.5	0.789	1217.7	14.52
1.0/1.0	0.786	1218.1	14.58
1.5/1.5	0.783	1219.2	14.71

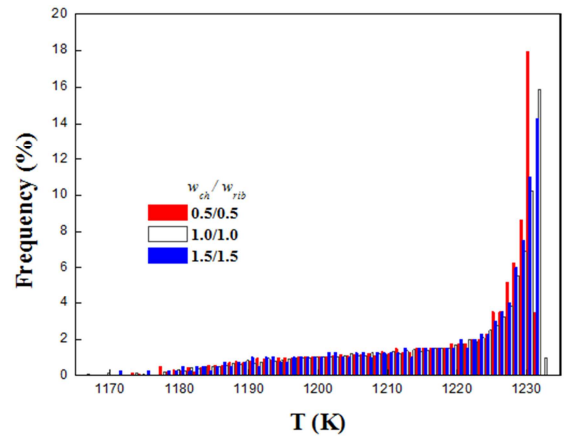


Fig. 6 Observed frequency distribution of AFL surface temperature at $i = 6000 \text{ A/m}^2$

부근에 분포비율이 높다. 즉 $w_{ch}/w_{rib} = 0.5/0.5 \text{ mm}$ 의 경우 1228~1231 K에서, $w_{ch}/w_{rib} = 1.0/1.0 \text{ mm}$ 의 경우 1229~1232 K에서, $w_{ch}/w_{rib} = 1.5/1.5 \text{ mm}$ 의 경우 1230~1233 K에서 분포비율이 높다. 또한 Table 3에서 보는 바와 같이 표준편차(standard deviation)는 $w_{ch}/w_{rib} = 0.5/0.5 \text{ mm}$ 의 경우 가장 작았고 $w_{ch}/w_{rib} = 1.5/1.5 \text{ mm}$ 의 경우 가장 큰 값을 나타냈다. 세 경우의 온도별 빈도수가 유사하게 나왔으며 표준편차의 차이도 미미하여 온도 균일성이 유사하다고 판단된다. 따라서 산소고갈이 일어나지 않는 범위 내에서 가스채널과 리브의 폭 변화는 온도 균일성에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

5. 결론

공개 소스 전산유체 해석 도구인 OpenFOAM을 이용하여 음극 지지체형 SOFC의 가스채널과 리브의 최적화에 관한 연구를 수행하였다. 3가지 유형의 폭 변화($w_{ch}/w_{rib} = 0.5/0.5 \text{ mm}$, $1.0/1.0 \text{ mm}$, $1.5/1.5 \text{ mm}$)에 대하여 성능 및 전류밀도, 온도분포를 알아보고 온도균일성에 대한 고찰이 이루어졌다. 본 연구결과, 산소고갈이 발생하지 않는 범위 내에서 가스채널과 리브의 폭 변화가 성능 및 온도 균일성에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 하지만 리브폭이 너무 넓은 경우 리브 아래에서

산소고갈이 발생할 가능성이 있으며, 그리고 높은 전류밀도에서는 출구에서의 산소고갈의 가능성이 있다. 이러한 결과는 음극 지지체형 SOFC의 얇은 CCCL의 두께에 기인한 것이므로 CCCL 두께를 고려한 적절한 리브폭의 설계가 요구된다. 가스채널 및 리브폭의 감소는 산소고갈의 위험을 감소시키거나 분리판 제작을 어렵게 하여 제작비용의 상승을 야기시키며, CCCL 두께의 증가 또한 산소고갈의 위험을 감소시키거나 작동온도의 상승으로 이어지므로 분리판 설계시 이에 대한 최적화가 요구된다. 또한 본 해석에 사용된 OpenFOAM을 이용한 공개소스 SOFC 해석 프로그램은 반응기체 고갈시 수렴성 저하 문제점과 접촉저항을 고려한 해석 툴 개발은 추후 해결해야 할 과제로 남아 있다.

후 기

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(과제번호: 20143030031440)과 2016년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원(2016R1D1A1A09916637) 및 2016년 동국대학교 DG선진연구강화사업 지원으로 수행한 연구과제입니다.

참고문헌 (References)

- (1) Minh, N.Q., 1993, "Ceramic Fuel Cells," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 76, pp. 563~588.
- (2) Larminie, L. and Dicks, A., 2000, *Fuel Cell Systems Explained*, Wiley & Sons, Chichester.
- (3) Berteil, A., Nucci, B. and Nicolella, C., 2013, "Microstructural Modeling for Prediction of Transport Properties and Electrochemical Performance in SOFC Composite Electrode," *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 101, pp. 175~190.
- (4) Wei, S.-S., Wang, T.-H. and Wu, J.-S., 2014, "Numerical Modeling of Interconnect Flow Channel Design and Thermal Stress Analysis of a Planar Anode-supported Solid Oxide Fuel Cell Stack," *Energy*, Vol. 69, pp. 553~561.
- (5) OpenFOAM®, 2016, *User and Programmer's Guide*, OpenCFD Ltd., Available From <http://www.openfoam.com>
- (6) Beale, S.B., Choi, H.-W., Pharoah, J.G., Roth, H.K., Jasak, H. and Jeon, D.H., 2015, "Open-source Computational Model of a Solid Oxide Fuel Cell," *Comp. Phy. Comm.*, In press, doi:10.1016/j.cpc.2015.10.007.
- (7) Dong, W., Beale, S.B., and Boersma, R.J., 2001, "Computational Modeling of Solid Oxide Fuel Cells," *Proc. Conf. CFD Soc. Canada*, Waterloo, ON. pp. 382~387.
- (8) Jeon, D.H., Beale, S.B., Choi, H.-W., Pharoah, J.G., and Roth, H., 2010, "Computational Study of Heat And Mass Transfer Issues in Solid Oxide Fuel Cells," *In Proc. of 21st International Symposium on Transport Phenomena*, Taiwan, Nov.
- (9) Le, A.E., Beale, S.B. and Pharoah, J.G., 2015, "Validation of a Solid Oxide Fuel Cell Model on the International Energy Agency Benchmark Case with Hydrogen Fuel," *Fuel Cells*, Vol. 15, pp. 27~41.

(1) Minh, N.Q., 1993, "Ceramic Fuel Cells," *J. Am.*