

<학술논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2017.41.10.667>

ISSN 1226-4881(Print)

2288-5324(Online)

고체산화물 연료전지의 유동방향에 따른 온도 균일성 영향

전동협^{*}, 신동열^{**}, 유광현^{**}, 송락현^{***}

* 동국대학교 기계시스템공학과, ** 엘티씨 기술개발연구소,

*** 에너지기술연구원 연료전지연구센터

Effect of Flow Direction on Temperature Uniformity in Solid Oxide Fuel Cell

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 April 21, 2017 ; Revised August 7, 2017 ; Accepted August 10, 2017)

Key Words: SOFC, (고체산화물 연료전지), CFD(전산유체역학), Temperature Uniformity(온도 균일성), Planar-type(평판형), Flow Direction(유동방향)

초록: 공개소스 전산유체 해석 라이브러리인 OpenFOAM을 이용하여 음극 지지체형 고체산화물 연료전지의 온도균일성에 관한 연구를 수행하였다. 3가지 유형의 유동흐름(병행류, 대향류, 직교류)에 대하여 수치해석이 이루어졌다. 다공성 물질내에서의 기체의 흐름은 유효확산계수를 이용하여 계산하였고 분리판의 리브 영향도 고려하였다. 전기화학반응의 계산을 위하여 실험식으로부터 얻은 집중내부저항 모델이 사용되었다. 수치해석 결과 대향류가 가장 균일한 온도분포를 나타내었다.

Abstract: We investigated the temperature uniformity in an anode-supported solid oxide fuel cell, using the open source computational fluid dynamics (CFD) toolbox, OpenFOAM. Numerical simulation was performed in three different flow paths, i.e., co-flow, counter-flow, and cross-flow paths. Gas flow in a porous electrode was calculated using effective diffusivity while considering the effect of interconnect rib. A lumped internal resistance model derived from a semi-empirical correlation was implemented for the calculation of electrochemical reaction. The result showed that the counter-flow path displayed the most uniform temperature distribution.

- 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/cm^2]
 P : 압력 [Pa]
 R_g : 기체상수, 8.314 J/K mol
 T : 온도 [K]
 u : 속도 [m/s]
 V : 전압 [V]
 ϵ : 공극율(porosity)
 κ : 열전도율 [W/m K]
 ρ : 밀도 [kg/m^3]

σ : 표준편차
 τ : 굴곡률(tortuosity)

하첨자
 avg : 평균
 H_2 : 수소
 H_2O : 물
 O_2 : 산소

1. 서론

음극 지지체형 고체산화물 연료전지(Anode-supported Solid Oxide Fuel Cells)는 비교적 낮은 온도에서 작동할 수 있으며 높은 전류밀도를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있어 중/저온형 고체산화물 연료전지(Intermediate temperature Solid Oxide Fuel Cells, IT-SOFCs)분야에서 많은 연구가 진행되고 있

† Corresponding Author, jeondh@dongguk.ac.kr

다.⁽¹⁾ 음극 지지체형 고체산화물 연료전지는 셀 형상에 따라 평판형(planar type), 원통형(tubular type), 그리고 평판형(flat-tubular type)으로 구분된다. 평판형 음극 지지체형 고체산화물 연료전지는 높은 출력을 낼 수 있고 비교적 저렴하게 제조할 수 있어 많은 관심을 받고 있으나, 소재간 열팽창률 차이 또는 온도구배에 의한 열응력과 밀봉재의 취약성, 반복된 열사이클에 의한 크랙(crack) 등은 아직도 해결해야 할 문제로 남아있다.^(2,3) 작동조건이나 물성 등과 같은 설계변수의 최적화를 통하여 열응력을 최소화 하려는 노력이 이루어지고 있다., 그 중 PEN(positive electrode/electrolyte/negative electrode)구조에서의 열응력 최소화는 전지수명의 향상과 밀접한 관계가 있기 때문에 열균일성을 일정하게 유지하려는 연구가 활발히 진행중이다.

SOFC의 온도균일화에 관한 연구는 수치해석 또는 실험의 형태로 진행되어 왔다. Huang 등⁽⁴⁾은 수치해석과 실험을 통하여 셀 내 유동을 균일화하는 연구를 진행하였다. Yakabe 등,⁽²⁾ Nakajo 등,⁽⁵⁾ Cui 등,⁽⁶⁾ Selimovic 등,⁽⁷⁾ Lin 등⁽⁸⁾은 유한요소해석(finite element method, FEM) 기법을 이용하여 SOFC내 열응력 해석을 수행하였다. Yuan 등⁽⁹⁾은 불균일 유동에 따른 SOFC 스택(stack) 성능에 관한 연구하였으며, 입구에서의 유동이 전류밀도분포에 영향을 주는 것을 확인하였다. Achenbach⁽¹⁰⁾는 내부개질을 고려한 유동의 영향을 연구하였으며, 직교류(cross-flow) 유형이 온도구배가 가장 크다고 주장하였다. Recknagle 등⁽¹¹⁾은 수치해석기법을 이용하여 평판형 SOFC의 온도와 전류밀도를 예측하였다. 그들은 co-flow가 온도분포가 가장 균일하며 평균온도도 가장 낮게 나타남을 확인하였다. 하지만 이들의 모델은 다공성 전극과 interconnect 리브(rib)의 영향을 고려하지 않았다. 비슷한 연구가 Xia 등⁽¹²⁾에 의해 시행되었으며, 불균일한 유동이 온도와 성능에 미치는 영향을 연구하였다. 그 결과 대향류(counter-flow) 유형이 병행류(co-flow) 유형보다 균일한 온도분포와 전류밀도 분포를 나타낸다고 발표하였다. 상기와 같이 연구결과에 차이가 나는 이유는, SOFC 내 복잡한 전달현상에 대한 해석모델 설정시 단순화 정도의 차이와 작동조건, 경계조건의 차이에 의하여 상이한 결과가 발표되었다.

수치해석을 이용한 SOFC 연구는 해석도구를 직접 개발하거나 상용 S/W를 도입함으로써 수치해석기반을 구축하는 시도가 이루어져 왔다. 최근 공개소스 전산유체해석 라이브러리인 OpenFOAM(Open Field Operation and Manipulation)을 이용하여

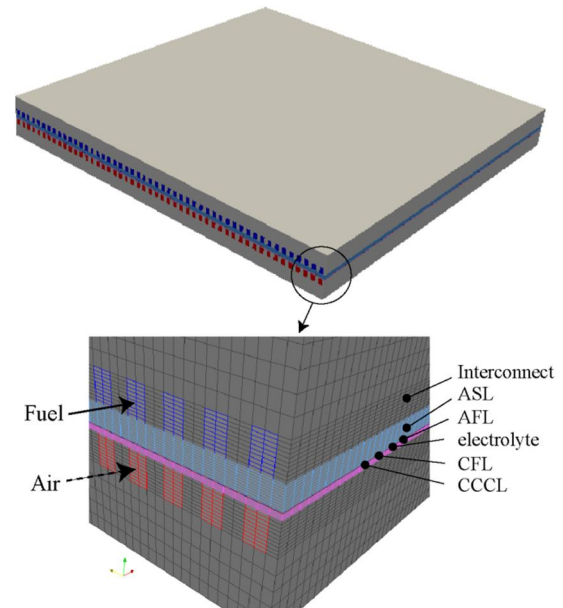


Fig. 1 Geometry and meshes of planar-type anode-supported SOFC

SOFC를 해석할 수 있는 프로그램이 공개되어 이를 통한 해석이 가능해졌다.^(13,14) 공개소스 프로그램은 GNU GPL(General Public Licenses)와 같은 공개 라이선스 정책이나 개발자의 결정에 따라 소스 코드가 공개되는 프로그램을 통칭한다. 이 같이 공개된 프로그램을 이용하여 사용자가 수치 모델을 수정, 추가함에 있어 소스 코드 접근에 제한이 없고, 라이선스 비용 또한 발생하지 않아 사용자의 직접적인 참여로 프로그램의 검증/개선이 가능해졌다.

본 연구는 음극지지체형 고체산화물 연료전지의 유동방향에 따른 온도 균일성을 알아보는 데 목적이 있다. 병행류, 대향류, 직교류(co-flow, counter-flow, cross-flow)의 세가지 유동 방향을 대상으로 수치해석이 이루어졌다. 각각의 구조는 Fig. 3에 설명이 되어 있다. 수치해석은 공개소스 전산유체해석(Computational fluid dynamics, CFD) 라이브러리인 OpenFOAM(Open Field Operation and Manipulation)에서 이루어졌으며 열-유체-전기화학을 고려한 물질전달 해석이 포함되었다. 온도분포가 비교되었고 온도의 균일성을 판단하기 위하여 통계적 기법이 사용되었다.

2. 수치 해석

2.1 모델방정식

다중스케일(multi-scale)과 복잡한 전달현상을 내

포하는 고체산화물 연료전지의 수치해석을 위하여 질량 보존식(conservation of mass), 운동량 보존식(conservation of momentum), 기체수송 보존식(conservation of species transport), 에너지보존식(conservation of energy)이 사용되었으며 각각의 식은 다음과 같다.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

여기서 S_i 는 반응 혹은 생성기체, μ 는 동점성계수, K 는 투과도(permeability), y_i 는 질량분율, M_{H_2} 는 수소의 질량, M_{H_2O} 는 물의 질량, M_{O_2} 는 산소의 질량, C_p 는 열용량, κ 는 열전도율, H 는 엔탈피(enthalpy)를 의미한다. S_m 은 전기화학반응에 의하여 수소나 산소의 소비 또는 물의 생성의 형태로 계산되고, S_p 는 다공성 물질인 양극과 음극에서만 고려된다. 또한 S_h 는 주열에 의한 열생성(S_h^j)과 엔트로피 변화에 의한 열생성(S_h^e)을 고려하였다. 엔트로피 변화에 사용된 변수들은 Todd and Young⁽¹⁵⁾과 Hernandez-Pacheco and Mann⁽¹⁶⁾의 실험값들을 polynomial fit 하여 얻어진 값이다.

양극과 음극을 포함한 다공성물질 내에서의 기체는 확산에 의한 이동이 지배적이다. 유효확산계수(D_i^{eff})는 주로 Bosanquet formula로 나타내며 binary diffusion(D_{ij})과 Knudsen diffusion($D_{i, \text{kn}}$)을 결합한 형태로 표현된다.

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

$$D_{ij} = \frac{0.001437T^{1.75}}{p M_{ij}^{1/2} (V_i^{1/3} + V_j^{1/3})^2} \quad (10)$$

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

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

여기서 M_{ij} 는 평균분자량, V_i 는 확산체적, d_{pore} 는 공

극지름을 의미한다.

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.

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

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

여기서 r_i 는 집중내부저항(lumped internal resistance)을 나타내며 Global Thermoelectric Inc.에서 측정된 자료를 최소자승법(least-squares method)을 이용하여 4차항까지 polynomial fit 하였으며 다음과 같다.⁽¹⁷⁾

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

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

2.2 수치해석 방법

공개소스 전산유체해석 라이브러리인 OpenFOAM을 이용하여 다중스케일에서의 해석을 시행하였다. 지배방정식들은 C++ 프로그래밍 언어로 구성된 유한체적구조(finite volume scheme)를 이용하여 계산되었다. 해석 알고리즘은 순차적이고 반복적으로 구성되어 있다. Sparse matrices를 풀기 위하여 conjugate-gradient(CG) 법(method)이 사용되었고, symmetric matrices의 계산을 위하여 Incomplete Cholesky preconditioning method가 사용되었으며 asymmetric matrices의 계산을 위하여 BI-CGSTAB method가 사용되었다.

3. 해석 모델

3.1 구조 및 작동조건

본 연구에 사용된 음극 지지체형 고체산화물 연료전지는 Fig. 1과 같다. 기본 구조는 분리판(Interconnect), Channel, PEN으로 구성되어 있다.

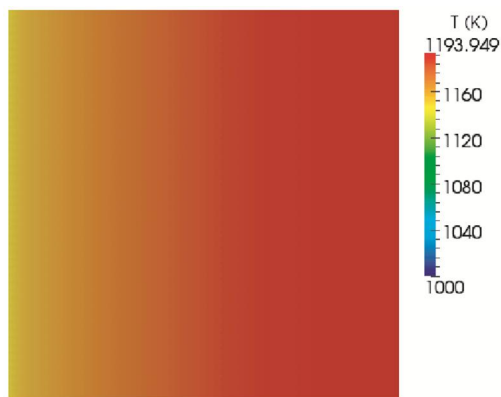
Table 1 Physical properties of materials

	Thickness (mm)	porosity	d_p (μm)
Interconnect	3.5	-	-
ASL	1.0	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

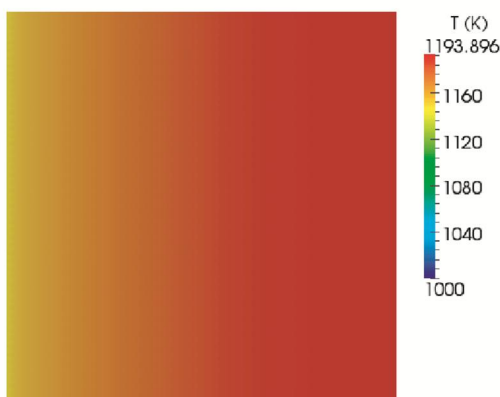
PEN은 5층 구조로 구성되어 있으며 다음과 같다. 1) anode substrate layer(ASL), 2) anode functional layer(AFL), 3) electrolyte, 4) cathode functional layer(CFL), 5) cathode current collect layer(CCCL). SOFC의 구조상 연료와 공기는 매니폴드(manifold)를 통하여 채널(channel)로 들어오므로 유동의 균일성에 중요한 역할을 하나 본 연구는 유동방향에 따른 온도 균일성을 알아보기 위한 연구이므로 manifold의 영향은 무시하기로 한다. 반응면적이 100 cm^2 ($10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$)이며 channel의 단면이 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 인 단위전지가 모델링 되었다. 작동온도는 1000 K , 그리고 작동압력은 1 atm 으로 설정하였으며 단열조건에서 작동시켰다. 모델의 상세한 치수는 Table 1에 표시하였으며 작동조건은

Table 2 Results of grid independency test

Case	Grid size	V^{cell} (V)	T_{avg} (K)	ΔT (K)
1	2,080,000	0.834	1179.3	193.896
2	16,640,000	0.834	1179.3	193.949



(a)



(b)

Fig. 2 Temperature distribution at $i_{avg.} = 0.5 \text{ A/cm}^2$ for grid independency test. (a) case 1, (b) case 2

Jeon 등⁽¹⁴⁾의 연구에 사용된 조건과 동일하게 적용하였다. 본 해석 프로그램은 일반에게 공개되어 (<http://openfuelcell.sourceforge.net>) 여러 사용자에게 의하여 프로그램의 검증이 이루어지고 있으며 (<http://www.ieafuelcell.com>), 최근 검증결과가 발표되고⁽¹⁸⁾ 있어 본 연구에서는 생략하기로 한다. 다만 격자수에 따라 해석결과에 차이가 발생할 수 있으므로 격자수를 달리하여 차이점을 고찰하였다.

3.2 격자 의존성(Grid Independency)

격자가 조밀할수록 해석의 정확도는 높아지나 해석비용이 높아지므로, 계산격자의 독립성과 적절한 격자의 선택을 위하여 격자 의존성 테스트가 이루어졌다. 해석은 두 case로 나누어 수행하였다. case 1은 반응면적 방향으로 40,000 (200×200)개 그리고 두께방향으로는 52개의 격자를 만들어 총 2,080,000 개의 격자를 적용하였고, case 2는 각 방향별로 두 배씩 증가시켜 총 16,640,000 개의 격자를 적용하였다. Fig. 2는 AFL 표면에서의 온도분포로 각 case에 대해 계산한 결과를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 두 case간 온도분포의 차이는 구분하기가 어려우며 최고온도에서도 미미한 차이를 보인다. Table 2는 격자 의존성 테스트 결과로, 전압과 평균온도의 차이는 없으며 최고온도와 최저온도간 온도차에서 미미한 차이를 보인다. 하지만 계산에 소요된 시간은 case 1의 경우 28919 s이며 case 2의 경우 173528 s으로 상당한 차이를 보인다. 따라서 본 연구에서는 2,080,000개의 격자로 구성된 case 1을 적용하여 수치해석에 이용하였다.

4. 결 과

Fig. 3은 $i_{avg.} = 0.5 \text{ A/cm}^2$ 일 때 SOFC의 3차원 온도분포를 나타내며, 3가지 유형의 유동흐름(co-flow, counter-flow, cross-flow)이 각각 도시되었다.

그림에서 보는 바와 같이, 입구부근에서 온도가 낮으며 입구에서 멀어질수록 온도가 높아짐을 확인할 수 있다. 이는 단열조건을 경계조건으로 설정하였기 때문이며 주입기체가 냉각제 역할을 하는 것으로 보인다. Co-flow와 cross-flow의 경우 출구부근에서 가장 높은 온도를 보이나 counter-flow의 경우 가운데에서 가장 높은 온도를 보인다. 이는 공기극과 연료극의 입구 위치가 상반되게 배치되어 있어 출구에서의 높은 온도가 입구에서의 낮은 온도로 인하여 낮아졌음을 의미한다.

Table 3 Predicted results of SOFC

	$V^{cell}(V)$	$T_{avg}(K)$	$\sigma^T(K)$
co-flow	0.834	1179.3	13.20
counter-flow	0.837	1198.5	4.84
cross-flow	0.836	1184.8	10.68

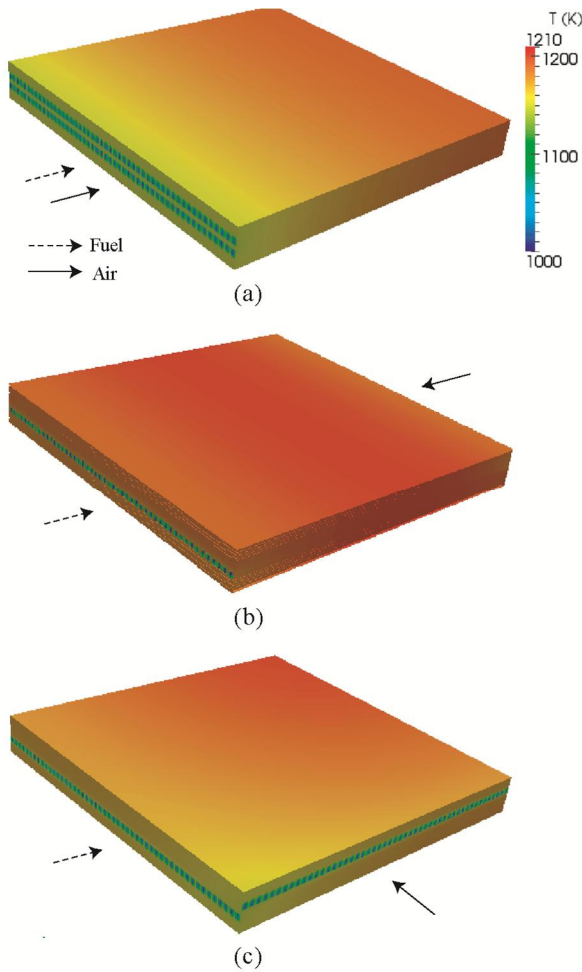


Fig. 3 Temperature distribution of SOFC at $i_{avg} = 0.5 \text{ A/cm}^2$. (a) co-flow path, (b) counter-flow path, (c) cross-flow path

Fig. 4는 AFL 표면에서의 2차원 온도분포를 나타내며 3가지 유형의 유동흐름(co-flow, counter-flow, cross-flow)에 대하여 각각 비교하였다. 앞서 설명하였듯이 입구부근에서 온도가 낮게 분포되어 있다. 하지만 가장 높은 온도는 co-flow의 경우 출구부근에, counter-flow의 경우 가운데에, 그리고 cross-flow의 경우 공기극 출구와 연료극 출구의 모서리에 분포되어 있다. 따라서 온도분포는 유동흐름 방향에 크게 영향을 받을 수 있다. Table 3은 $i_{avg}=0.5 \text{ A/cm}^2$ 일 때 각 유동흐름에서의 해석결과를 나타낸다. counter-flow에서 가장 높은

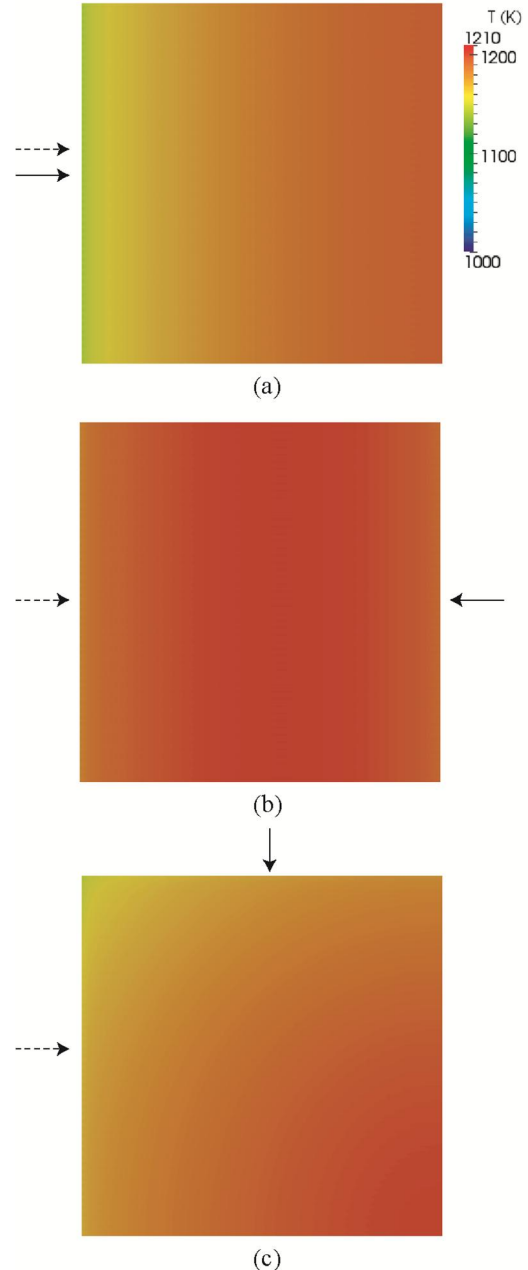


Fig. 4 Temperature distribution on AFL surface at $i = 0.5 \text{ A/cm}^2$. (a) co-flow path, (b) counter-flow path, (c) cross-flow path

전압과 평균온도가 나타났으며 co-flow에서 가장 낮은 전압과 평균온도가 나타났다. 이는 counter-flow에서 전기화학반응에 의한 열생성이 가장 많으며 이로 인하여 높은 전압이 형성되었음을 알려준다.

Fig. 5는 AFL 표면에서의 온도를 길이방향에 따라 나타낸 그래프이다. AFL 표면의 중앙에서 x 혹은 y 방향에 따라 각 노드에서의 온도를 그래프로 표시하여 앞선 그림에 비해 더 구체적인 온도분포의 정보를 제공한다. Fig 5(a)에서 보는 바와 같이,

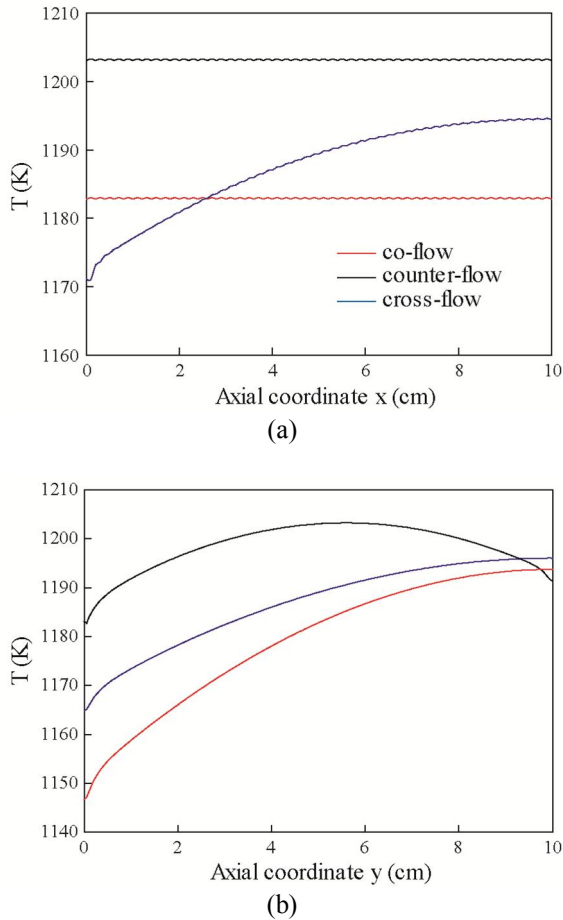


Fig. 5 Local temperature profiles of AFL surface along the (a) axial coordinate x and (b) axial coordinate y at $i = 0.5 \text{ A/cm}^2$

x 방향에 따른 온도분포 곡선에서는 울퉁불퉁한 모양(peak and valley)이 관찰된다. 이는 분리판에 의한 불균일한 전기화학반응과 이에 따른 불균일한 열생성에 기인한다. 즉 반응기체가 공급되는 channel에서는 높은 온도가, 분리판에 의하여 막혀 있는 rib에서는 반응기체의 공급이 원활하지 못하여 낮은 온도가 나타남을 알 수 있다. Counter-flow가 co-flow나 cross-flow에 비해 높은 온도와 균일한 온도분포를 보인다. 이는 counter-flow에서 전기화학반응에 의한 열생성과 주입된 반응기체에 의한 냉각이 적절히 일어나고 있음을 알려준다. co-flow의 경우 x 방향에 따른 온도분포는 균일하나 y 방향에 따른 온도분포는 불균일함을 보여 출구부근에서의 추가적인 냉각이 필요해 보인다. Cross-flow의 경우 x 와 y 방향으로의 온도분포가 유사하게 나타나나 Fig. 4에서 보는 바와 같이 공기극과 연료극의 입구와 출구의 각각의 모서리에서의 온도차가 많이 발생하여 전체적인 온도 불균일성이 이보다 더 심할 것으로 판단된다. 온도분포의 균

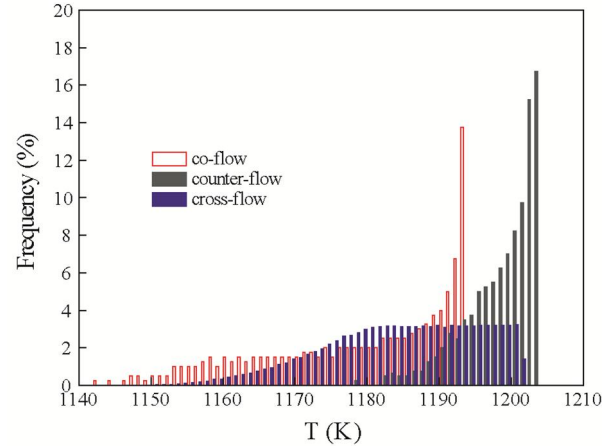


Fig. 6 Observed frequency distribution of AFL surface temperature

일성에 관한 정량적인 고찰을 위하여 AFL 표면에서의 온도분포를 통계적인 기법을 이용하여 Fig. 6와 같이 나타내었다. 이 그래프는 3가지 유형의 유동흐름(co-flow, counter-flow, cross-flow)에 대하여 온도별 도수분포를 나타낸 히스토그램이다. Fig. 4에 나타난 AFL 표면에서의 온도분포를 각 노드에서의 온도데이터를 추출하여 온도별로 분포를 배열하였다. 그림에서 보는 바와 같이 온도가 높아짐에 따라 빈도수도 같이 높아짐을 알 수 있다. Co-flow의 경우 1190~1193 K에, 그리고 counter-flow의 경우 1200~1202 K에 분포비율이 높은 반면 cross-flow는 전 영역에 걸쳐 분포되어 있다. 또한 co-flow와 cross-flow는 비교적 넓은 영역에 걸쳐 온도가 분포되어 있는 반면, counter-flow는 좁은 영역에 온도가 분포되어 있어 counter-flow의 온도분포가 균일함을 알 수 있다. Table 3에서 보는 바와 같이 표준편차(standard deviation)는 counter-flow의 경우 가장 작았고 co-flow의 경우 가장 큰 값을 나타냈다. 따라서 counter-flow의 경우 온도가 가장 균일하게 분포되어 있음을 나타낸다. 이는 Xia 등⁽¹²⁾의 결과와 일치한다.

5. 결론

공개 소스 전산유체 해석 도구인 OpenFOAM을 이용하여 평판형 SOFC의 유동방향에 따른 온도균일성에 관한 연구를 수행하였다. 3가지 유형의 유동흐름(co-flow, counter-flow, cross-flow)에 대한 온도분포를 알아보고 온도균일성에 대한 고찰이 이루어졌다. 본 연구결과 counter-flow가 가장 균일한 온도분포를 보였으며 평균온도도 가장 높은 것으로 나타났다. 이는 균일한 온도분포로 인하여

전기화학반응이 활발히 이루어져 전체적으로 온도가 높아진 것으로 판단된다. Co-flow의 경우 온도가 가장 불균일하게 분포되어 작동시 냉각제를 이용한 국부적인 냉각이 필요한 것으로 판단된다. 하지만 Recknagle 등⁽¹¹⁾과 Xia 등⁽¹²⁾의 연구결과에서 알 수 있듯이, 온도 균일성은 해석모델의 단순화, 경계조건 및 작동조건의 차이, 그리고 셀형상에 따라 다소 차이가 있을 수 있으므로 설계시 주의를 기울여야 한다. 또한 본 해석에 사용된 OpenFOAM을 이용한 공개소스 SOFC 해석 프로그램은 다양한 사용자들에 의해 더 많은 검증과 개선이 되어야 할 과제가 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) Steel, B.C.H. and Heinzl, A., 2001, "Materials for Fuel-cell Technologies," *Nature*, Vol. 414, pp. 345~352.
- (2) Yakabe, H., Ogiwara, T., Hishinuma, H. and Yasuda, I., 2001, "3-D Model Calculation for Planar SOFC," *J. Power Sources*, Vol. 102, pp. 144~154.
- (3) Jiang, T.L. and Chen, M.-H., 2009, "Thermal-stress Analysis of an Operating Planar Solid Oxide Fuel Cell with the Bonded Compliant Seal Design," *Int. J. Hydrogen Energ.*, Vol. 34, pp. 8223~8234.
- (4) Huang, C.M., Shy, S.S. and Lee, C.H., 2008, "On Flow Uniformity in Various Interconnects and its Influence to Cell Performance of Planar SOFC," *J. Power Sources*, Vol. 183, pp. 205~213.
- (5) Nakajo, A., Stiller, C., Harkegard, G. and Bolland, O., 2006, "Modeling of Thermal Stresses and Probability of Survival of Tubular SOFC," *J. Power Sources*, Vol. 158, pp. 287~294.
- (6) Cui, D. and Cheng, M., 2009, "Thermal Stress Modeling of Anode Supported Micro-tubular Solid Oxide Fuel Cell," *J. Power Sources*, Vol. 192, pp. 400~407.
- (7) Selimovic, A., Kemm, M., Torisson, T. and Assadi, M., 2005, "Steady State and Transient Thermal Stress Analysis in Planar Solid Oxide Fuel Cells," *J. Power Sources*, Vol. 145, pp. 463~469.
- (8) Lin, C.-K., Chen, T.-T., Chyou, Y.-P. and Chiang, L.-K., 2007, "Thermal Stress Analysis of a Planar SOFC Stack," *J. Power Sources*, Vol. 164, pp. 238~251.
- (9) Yuan, P., 2008, "Effect of Inlet Flow Maldistribution in the Stacking Direction on the Performance of a Solid Oxide Fuel Cell Stack," *J. Power Sources*, Vol. 185, pp. 381~391.
- (10) Achenbach, E., 1964, "Three-dimensional and Time-dependent Simulation of a Planar Solid Oxide Fuel Cell Stack," *J. Power Sources*, Vol. 49, pp. 333~348.
- (11) Recknagle, K.P., Williford, R.E., Chick, L.A., Rector, D.R. and Khaleel, M.A., 2003, "Three-dimensional Thermo-fluid Electrochemical Modeling of Planar SOFC Stacks," *J. Power Sources*, Vol. 113, pp. 109~114.
- (12) Xia, W., Yang, Y. and Quisheng, W., 2009, "Effect of Operations and Structural Parameters on the One-cell Stack Performance of Planar Solid Oxide Fuel Cell," *J. Power Sources*, Vol. 194, pp. 886~898.
- (13) 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.
- (14) Jeon, D.H., Shin, D.-R., Ryu, K.-H. and Song, R.-H., 2017, "Effect of Gas Channel/Rib Width in Solid Oxide Fuel Cells," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 41, pp. 109~115.
- (15) Todd, B. and Young, J.B., 2002, "Thermodynamic and Transport Properties of Gases for Use in Solid Oxide Fuel Cell Modeling," *J. Power Sources*, Vol. 110, pp. 186~200.
- (16) Hernandez-Pacheco, E. and Mann, M.D., 2004, "The Rational Approximation Method in the Prediction of Thermodynamic Properties for SOFCs," *J. Power Sources*, Vol. 128, pp. 25~33.
- (17) 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.
- (18) 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.