

<학술논문>

단일채널 및 다채널을 포함한 평판형 고체산화물연료전지의 열유동 해석 및 성능평가

안 효 정* · 차 석 원*

(2007년 9월 5일 접수, 2007년 10월 10일 심사완료)

Performance and Thermal-Flow Characteristics in a Planar Type Solid Oxide Fuel Cell with Single Channel and Multi-Channel

Hyo-Jung Ahn and Suk-Won Cha

Key Words: SOFC(고체산화물연료전지), CFD(전산유체), Interconnector(연결자), Single Channel (단일채널), Multi-Channel(다채널)

Abstract

This paper studied the characteristics of performance and temperature in a unit cell of a planar type SOFC under various conditions by employing computational fluid dynamics (CFD). In order to derive thermal stress distribution and performance characteristics, the 3-D model simulation for a single channel was performed in various conditions which include interconnect materials (LaCrO₃/AISI430), gas flow direction (co-flow/counter-flow) and inlet temperature (923 K/1173 K). From these results of a single channel, the most effective conditions were applied to the unit stack with multi-channel and the temperature distribution is displayed. Considering both thermal stress and performance, the best combination is 923 K inlet temperature, counter-flow and interconnector of stainless steel. As the end results, flow, thermal and current density distributions were found in the model with multi-channel applied to the best combination and were concentrated in the middle of channels than in the edge.

기호설명

a : 화학양론계수
 D : 물질확산계수 [m²/s]
 F : 패러데이 상수 [96,485 C/mol]
 I, j_r : 전류밀도[A/m²], [A/m³]
 j_o : 교환전류밀도 [A/m³]
 M : 혼합 물질량 [kg]
 p : 압력 [Pa]
 q : 열유량 [W/m²]
 R : 이상기체상수 [8.314 J/mol·K]
 t : 시간 [s]

S_h : 엔트로피 [W/m²]
 T : 온도 [K]
 U : 속도 [m/s]
 Y : 몰분율
 α : 전달계수
 β : 농도지수
 ε : 다공도
 η : 과전압 [V]
 κ : 투과성 [m²]
 k_{eff} : 유효열전도도 [W/m·k]
 μ : 점성도 [kg/m·s]
 ρ : 밀도 [kg/m³]
 σ : 전도도 [S/m]
 τ : 굴곡비
 ϕ : 전위 [V]
 h : 엔탈피 [J/kg]

* 책임저자, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : swcha@snu.ac.kr

TEL : (02)880-1700, FAX : (02)880-1696

* 회원, 서울대학교 기계항공공학부 대학원

상첨차 : 전기화학반응상태

하첨차
 a : 연료극
 c : 공기극
 i : 화학종
 I : 이온상태
 f : 액체상
 S : 고체상

1. 서 론

연료전지는 연료(수소, 메탄올 등) 및 공기의 화학에너지를 전기화학적 반응에 의해 전기 및 열로 직접 변환시키는 장치로 기존의 발전기술과는 달리 연소과정이나 구동장치가 없으므로 효율이 높을 뿐만 아니라 환경문제를 유발하지 않는 새로운 개념의 에너지 변환 기술이다. 특히 수백 ℃ 이상의 고온에서 작동하는 고체산화물 연료전지는 다른 저온형 연료전지에 비해서 효율이 높고, 내부 개질 반응이 가능하여 수소 이외의 탄화수소 등 다양한 연료를 사용할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 800 ℃ 이상의 고온 작동 특성으로 인하여 초기 시동시간이 길고, 기체의 밀봉이 어려우며, 구성소재가 고온에서 기계적으로 취약하여 내구성 확보가 어렵다는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 고체산화물 연료전지의 작동 온도를 500 ℃ 이하로 낮추기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다⁽¹⁾. 고체산화물 연료전지의 작동온도가 낮아짐에 따라 고온에서 사용되었던 고가의 세라믹 계열의 연결자(interconnect) 대신, 저가의 스테인리스 계열의 연결자가 적용될 수 있게 되었으며, 기계적 가공을 통해 다양한 형태의 채널 설계가 용이하게 되었다. 따라서 이

러한 연결자 소재의 변화에 따른 단위전지의 열유동 및 전기적인 성능의 변화를 분석할 필요가 있다.

Yakabe et al.⁽²⁾과 Iwata et al.⁽³⁾은 3차원 단일채널(single channel)을 가진 단위전지 모델을 바탕으로 전극/전해질 경계면에서 생성된 열 및 물질의 생성 및 소멸항을 경계조건으로 고려하여 고체산화물 연료전지의 열유동 해석을 수행하였다. 하지만 실제 고체산화물 연료전지의 전기화학반응은 전극과 전해질 경계면 보다는 전극 전체에 형성된 삼상계면에서 일어나기 때문에 열생성 및 물질 생성을 전극 내의 단위 부피당 생성량으로 생각하는 것이 더 타당하다. Cyou et al.⁽⁴⁾과 Lin et al.⁽⁵⁾은 밀봉재(sealant)를 고려한 평판형 고체산화물 연료전지에서 열응력 연구를 위해 열유동 및 전기화학 모델이 통합된 모델을 이용하였다. 이를 통해 시동 및 정상상태 단계에서의 스택의 온도 프로파일 및 열응력 분포의 해석 결과를 제시하였으나, 전류, 전압과 같은 전기적인 성능을 고려하지 않았다.

본 연구에서는 열유동 및 전기화학 통합 모델을 이용하여 단일채널을 가진 단위전지에 대해 분리판 소재 (LaCrO₃/AIS1430), 반응가스의 유입 방향 (평행류/대향류) 및 입구온도 (923 K/1173 K)에 따른 열분포 및 전기적인 성능의 변화를 해석하였다. 또한 이러한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 열응력 및 전기적인 성능 측면에서 가장 효율적인 조건을 확인한 후, 다채널(multi-channel)로 이루어진 단위스택(unit stack)에 적용하여 반응물의 채널내의 유동현상과 단위스택내의 열 및 전류밀도 분포 등을 확인할 수 있었다.

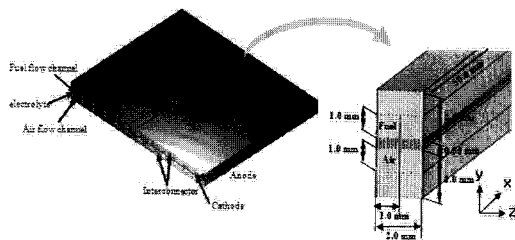


Fig. 1 Anode-supported SOFC with a single channel

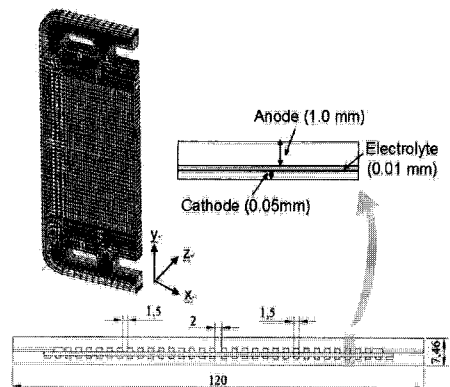


Fig. 2 Anode-supported SOFC with multi-channels

Table 1 Properties of materials

| Solid | | Density (kg/m ³) | Specific heat (J/kg·K) | Thermal Conductivity (W/m·K) | Electrical Resistivity (ohm·m) |
|----------------|-----------------------|------------------------------|--------------------------------|---|--|
| Interconnector | (LaCrO ₃) | 5200 | 542.11 | $-1.091e^{-8} \cdot T^3 + 2.66e^{-5} \cdot T^2 - 0.022372 \cdot T + 8.8595$ | $4.77e^{-16} \cdot T^5 - 2.52e^{-12} \cdot T^4 + 4.96e^{-9} \cdot T^3 - 4.40e^{-6} \cdot T^2 + 0.0016 \cdot T - 0.1009$ |
| | (AISI430) | 7780 | 653.30 | $0.14271 \cdot T + 16.703$ | $1.23e^{-22} \cdot T^5 - 4.18e^{-19} \cdot T^4 + 6.19e^{-16} \cdot T^3 - 8.46e^{-13} \cdot T^2 + 1.38e^{-9} \cdot T + 2.56e^{-7}$ |
| Porous Media | | Porosity | Permeability (m ²) | Thermal Conductivity (W/m·K) | Electrical Resistivity (ohm·m) |
| Anode | (Ni/YSZ) | 0.4 | 1.52×10^{-12} | 11.0 | $-5.078e^{-20} \cdot T^5 + 2.255e^{-16} \cdot T^4 - 3.835e^{-13} \cdot T^3 + 2.994e^{-10} \cdot T^2 - 9.223e^{-8} \cdot T + 1.119e^{-5}$ |
| Cathode | (LSM/YSZ) | 0.4 | 2.67×10^{-12} | 6.0 | $-1.29e^{-17} \cdot T^5 + 6.013e^{-14} \cdot T^4 - 1.11e^{-10} \cdot T^3 + 1.024e^{-7} \cdot T^2 - 4.79e^{-5} \cdot T + 0.009737$ |
| Electrolyte | (YSZ) | 0.001 | 1.00×10^{-18} | 2.7 | $-4.686e^{-13} \cdot T^5 + 2.796e^{-9} \cdot T^4 - 6.668e^{-6} \cdot T^3 + 0.00795 \cdot T^2 - 4.742 \cdot T + 1133.3$ |

Table 2 Mole fractions for fuel and air

| Gas Type | H ₂ | H ₂ O | CO | CO ₂ | N ₂ | O ₂ |
|----------|----------------|------------------|------|-----------------|----------------|----------------|
| Fuel | 0.49 | 0.39 | 0.04 | 0.08 | • | • |
| Air | • | • | • | • | 0.767 | 0.233 |

2. 본 론

2.1 모델 형상

Fig. 1에서 볼 수 있듯이 평판형 고체산화물 연료전지의 단일유로 모델은 연료극, 공기극, 전해질, 전기화학반응을 통해서 생성된 전자들이 이동하는 연결자로 구성되어 있다. 연결자를 포함한 단위전지의 형상은 채널을 중심으로 주기적으로 반복되므로, 단위전지 전 영역을 해석하는 것은 계산소요 시간 측면에서 비효율적이다. 따라서 각 채널 입구의 경계조건이 동일하고, 채널리브(channel rib)의 중앙부분에서 Y축에 대하여 대칭적인 경계조건을 가졌다고 가정하여, 유동채널 및 채널리브의 절반을 경계로 하여 해석영역을 설정하였다. 이때 단일유로 모델은 연료극 지지체형 타입이며, 총 17,760개의 격자로 이루어졌다.

실제의 평판형 고체 산화물 연료전지는 원통형 고체 산화물 연료전지와 달리 대면적으로 제작된 단위전지가 다채널을 가진 구조로서, 연료전지의 성능을 향상시키는 위해서는 반응물이 각 채널에 균일하게 공급되어야 한다. 그러나 단일유로 모델에서는 각 채널에서의 열유동 특성이 동일하다고 가정하였으므로, 다채널로 설계된 단위스택의 열유동 및 전기화학적 특성을 예측하기에는 한계가 있다. 그러므로 Fig. 2와 같이 한국과학기술연구원(KIST)에서 설계한 연료와 공기 공급구 및 배출구 전체를 포함한 다채널 연료전지 단위 스택의 수치 해석을 통하여, 유동의 불균일성과 이

에 따른 온도 분포, 단위 전지 전체에 형성되는 차압 등을 분석할 필요가 있다. 다채널 단위 스택 모델은 총 92,768개 격자로 구성되었으며, Y축에 대해 대칭인 경계조건을 가진다.

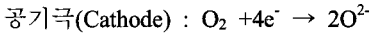
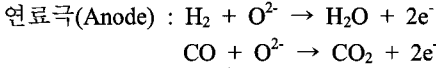
2.2 물성치 (Properties)

Table 1은 모델에 적용한 재료들의 물성치를 보여주고 있다.⁽⁶⁾ 전기화학반응과 관계가 있는 전극 및 전해질은 다공성 매질로 가정하였으며, 전해질의 기공률을 0.001로 두어 연료극/공기극에 비해 상대적으로 치밀한 구조를 가진다고 생각하였다. 또한 전극, 전해질의 열전도도는 연결자에 비해 상대적으로 두께가 얇기 때문에 일정하다고 가정하였으며, 예상되는 온도 해석 결과 범위인 873~1273 K에서의 내부저항은 온도에 대한 5차 식으로 근사할 수 있었다. 이에 반해 연결자는 기공이 없는 고체로 가정하여 매질 내에 기체의 이동이 존재하지 않는다고 생각하였으며, 열전도도 및 전기 저항은 873~1273 K의 범위에서 온도에 대한 함수로 표현할 수 있었다.

연료 채널의 입력조건은 고체산화물 연료전지와 연료개질기의 연동운전을 고려하여 메탄(CH₄)을 수증기 개질(SR, steam reforming)로 개질한 후 생성된 물질의 물분율을 사용하였으며,⁽⁷⁾ 공기 채널의 입력조건은 대기중 공기의 물분율을 고려하여 이용하였다.

2.3 화학 반응식

화학 반응은 다공성 전극 내부의 삼상계면에서 일어나며, 그 화학식은 아래에 나타내었다.



이 때, 각 반응에서의 기준 전류값 및 Tafel 상수는 다음과 같다.

연료극 : $j_{0,a} = 1E + 14, \alpha_a = 0.7, \alpha_c = 0.7$

공기극 : $j_{0,c} = 1E + 10, \alpha_a = 0.7, \alpha_c = 0.7$

2.4 해석방법 (Numerical procedures)

고체산화물 연료전지 모델은 전기화학 반응과 전달현상 등을 고려하여 다양한 지배방정식을 사용하였다. 이때 해석을 단순화하고 불필요한 요소에 대한 해석을 배제하기 위하여 아래와 같은 가정을 적용하였다.⁽⁸⁾

- ① 연료전지 내의 혼합기체는 이상기체
- ② 채널 내 유동은 층류
- ③ 물은 증기상태로 존재(100℃ 이상에서 동작)
- ④ 측면은 단열 경계 조건

단일채널 모델 및 다채널 단위스택 모델은 CFD-ACE solver를 이용하여 해석하였으며 아래와 같은 지배방정식이 적용되었다.⁽⁹⁾

질량보존식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon\rho) + \nabla \cdot (\epsilon\rho\mathbf{U}) = 0 \tag{1}$$

운동량보존식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon\rho\mathbf{U}) + \nabla \cdot (\epsilon\rho\mathbf{U}\mathbf{U}) = -\epsilon\nabla p + \nabla \cdot (\epsilon\boldsymbol{\tau}) + \frac{\epsilon^2\mu\mathbf{U}}{\kappa} \tag{2}$$

에너지보존식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon\rho h) + \nabla \cdot (\epsilon\rho\mathbf{U}h) = \nabla \cdot \mathbf{q} + \epsilon\boldsymbol{\tau} : \nabla\mathbf{U} + \epsilon \frac{dp}{dt} - j_r\eta + \frac{\mathbf{i} \cdot \mathbf{i}}{\sigma} + \dot{S}_h$$

$$\mathbf{q} = k_{eff}\nabla T + \sum_{k=gas} \mathbf{J}_k h_k \tag{3}$$

화학종 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon\rho Y_i) + \nabla \cdot (\epsilon\rho\mathbf{U}Y_i) = \nabla \cdot (\rho D_{eff,i}\nabla Y_i) + M_i a_i \frac{j_r}{F} \tag{4}$$

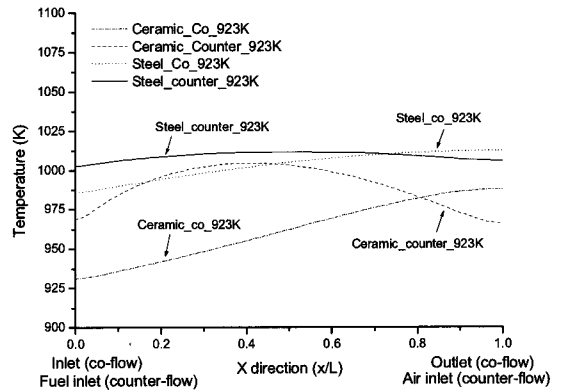
전하량보존식 $\nabla \cdot \mathbf{i} = 0 \tag{5}$

$$\nabla \cdot \mathbf{i}_s = -\nabla \cdot \mathbf{i}_e = \nabla \cdot (-\sigma_s \nabla \phi_s) = -\nabla \cdot (-\sigma_e \nabla \phi_e) = \mathbf{j}_r \tag{6}$$

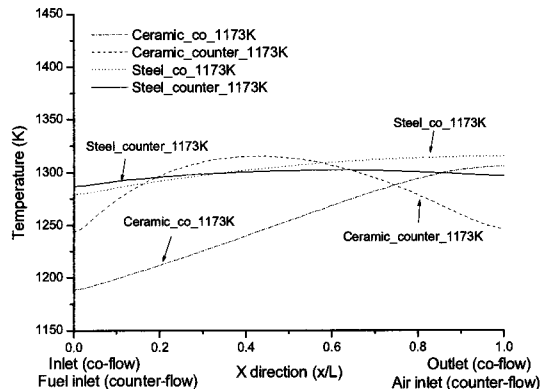
전기화학반응식

$$j_r = j_0 \left[\exp\left\{ \frac{\alpha F}{RT} (\phi_s - \phi_r) \right\} - \exp\left\{ \frac{-(1-\alpha)F}{RT} (\phi_s - \phi_r) \right\} \right] \prod_{i=1}^N Y_i^{\beta_i} \tag{7}$$

연료 및 공기 채널 입구역역에서 각각의 유입 속도는 1 m/s와 3 m/s이며, 출구역역에서의 압력은 대기압으로 고정하였다. 또한 전류집전판 외부표면에서 전압은 일정하며, 연료극/공기극의 연결자 사이에는 일정한 전압차가 유지된다고 가정하였다.



(a) Inlet temperature : 923 K



(b) Inlet temperature : 1173 K

Fig. 3 Temperature distribution at the anode side of interconnector along x-direction

3. 해석 결과

3.1 단일유로 모델

3.1.1 입구온도의 영향

Fig. 3은 전지전압이 0.7 V이고, 입구온도가 923 K와 1173 K일 때 연료극 연결자 상부에서의 온도분포를 보여준다. 재료가 세라믹일 경우, 입구온도가 923 K 일 때는 연료극 연결자 상부에서 온도 차이의 최저/최고값이 38~56 K인데 비해 1173 K 일 때는 71~116 K로서, 입구온도가 증가할수록 온도의 최고/최저 차이가 커지는 것을 볼 수 있다. 연결자의 재료가 스테인리스일 경우에도 입구온도가 증가할수록 온도 차이의 최대 및 최저값 차이가 커지지만 세라믹 연결자의 경우와 비교하면 그 차이가 현저하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 위와 같이 입구 온도 상승에 따라 최대/최저 온도 차이가 증가하는 이유는 단위전지의 전기저항이 온도에 대해 5차항으로 감소하기 때문이다(Table 1). 즉, 입구온도가 상승하게 되면 전기 전도도 증가에 따른 줄가열(joule heating)효과와 유입되는 반응물에 의한 상대적인 냉각효과가 동시에 커져 단위전지 내에서 온도차가 크게 나타나게 된다.

입구온도 상승에 따른 전기 전도도 증가는 길이방향에 따른 물분율 변화와 전기적인 성능 변화를 통해서도 확인할 수 있다. 즉, Fig. 4에서 볼 수 있듯이 입구온도가 상승할수록 길이방향에 따라 반응물인 수소와 산소의 물분율이 감소하고, 생성물인 수증기의 물분율은 증가한다. 이를 통

해 입구 온도 증가에 따라 단위전지 내부에서 화학반응이 더욱 활발하게 일어나는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 입구온도가 상승할수록 전기저항이 감소하여 평균전류밀도 및 평균전력밀도가 상승하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 온도와 전류밀도의 상관관계는 Fig. 6과 같이 길이방향에 따른 전해질과 공기극 경계면에서의 온도와 전류밀도를 통해 확인할 수 있다. 전반적인 영역에서 온도와 전류밀도의 경향이 유사하였으나, 공기채널 입구 영역에 근접할수록 산소 물분율의 영향을 받아 전류밀도가 온도 변화 경향에서 다소 벗어나는 것을 볼 수 있다.

이러한 결과를 통해 연료전지의 입구 온도가 고온일수록 연료전지의 화학반응이 활발해지고

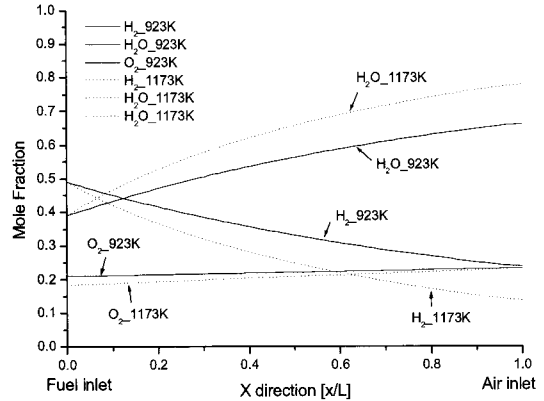
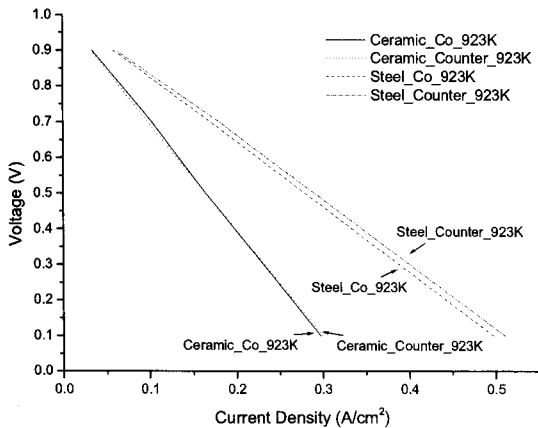
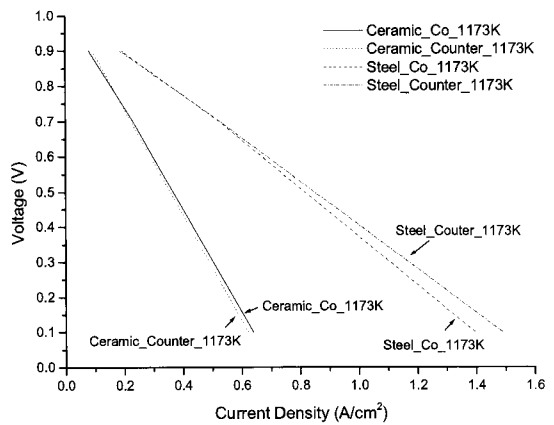


Fig. 4 Mole fraction distribution along x-direction distance (stainless steel interconnector, counter-flow, 923 K and 1173 K)



(a) I-V curve at 923 K



(b) I-V curve at 1173 K

Fig. 5 I-V curve in the model of unit cell with single channel

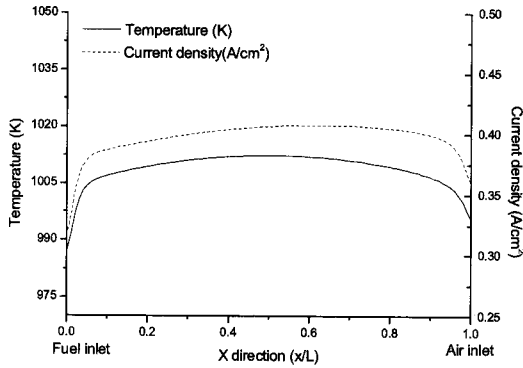


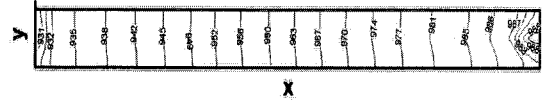
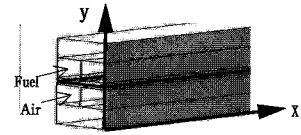
Fig. 6 Temperature and current density distribution at electrolyte (steel interconnector, counter-flow, 923 K)

전기 저항이 감소하여 단위전지의 전기적인 성능이 증가하는 것을 알 수 있다.

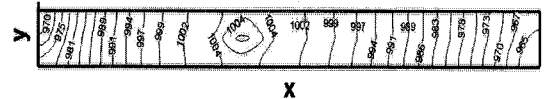
3.1.2 유동방향 및 분리판 소재의 영향

Fig. 7은 입구온도가 923 K일 때 유동방향에 따른 채널리브의 중앙부분에 위치한 x-y단면의 등온선을 보여주고 있다. 평행류일 경우에는 한쪽방향으로 유입되는 반응물의 상대적인 냉각효과로 인해 입구쪽 온도가 출구쪽 온도보다 상대적으로 낮았으며, 대향류일 경우에는 양쪽방향으로 반응물이 유입되기 때문에 단위전지의 양끝보다 중심부분이 상대적으로 온도가 높았다. 또한 대향류일 경우 단위전지 내부의 최대/최소 온도차가 평행류 경우보다 작게 나타났다. 그러나 Fig. 3과 Fig. 7을 통해 알 수 있듯이 연결자의 재질에 상관없이 입구온도에 대한 단위전지의 온도 분포 경향은 동일하였으나, 스테인리스의 경우 열전도도가 세라믹보다 높기 때문에 단위전지 내에서의 최대/최소 온도차가 작다는 것을 확인할 수 있다. 특히 세라믹 연결자인 경우는 유동방향에 상관없이 단위전지 내에서의 온도차가 상대적으로 심하였으며, 이러한 결과는 전지 내부의 열응력을 발생시켜 연료전지의 열사이클 운전 시 단위전지의 갈라짐 혹은 휘어짐을 유발할 수 있다고 사료된다.

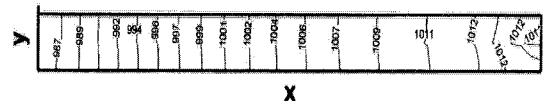
유동방향에 따른 단위전지 내부온도의 영향은 전기적인 성능을 통해서도 확인할 수 있다(Fig. 5). 비록 연결자의 재료가 세라믹인 경우에는 유동방향에 따라 전기적인 성능이 거의 변화가 없었으나, 스테인리스 연결자를 사용한 단위전지의



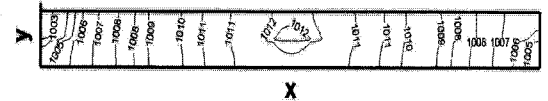
(a) Ceramic interconnector, co-flow, 923 K



(b) Ceramic interconnector, counter-flow, 923 K



(c) Stainless steel, co-flow, 923 K



(d) Stainless steel, counter-flow, 923 K

Fig. 7 Temperature distribution on the surface of interconnectors and PEN assembly

전기적인 성능은 입구온도에 상관없이 유동방향이 대향류일 때가 평행류일 때보다 약간 향상되었다는 것을 볼 수 있다.

이러한 스테인리스와 세라믹 연결자에 대한 시뮬레이션 결과로 볼 때, 높은 온도의 반응물이 대향류 방식으로 열전도도가 높은 스테인리스 연결자 채널을 통해 단위전지로 공급되는 것이 단위전지의 성능 및 열사이클 특성을 높일 수 있다고 판단할 수 있다.

3.2 다채널 유로 모델

다채널 모델의 조건은 단일채널 모델의 해석결과를 바탕으로 하여 열응력 및 전기적인 성능을 고려하여 적용하였다. 즉 반응물은 대향류 방식으로 스테인리스 연결자 채널을 통해 단위전지로 공급되며, 전기적인 성능은 다소 감소하나 열응력 및 스테인리스 산화에 의한 영향을 줄이기 위해 반응물의 입구온도를 923 K로 설정하였다. 이외의 초기조건 및 경계조건은 단일채널 모델과 동일하게 적용하였다.

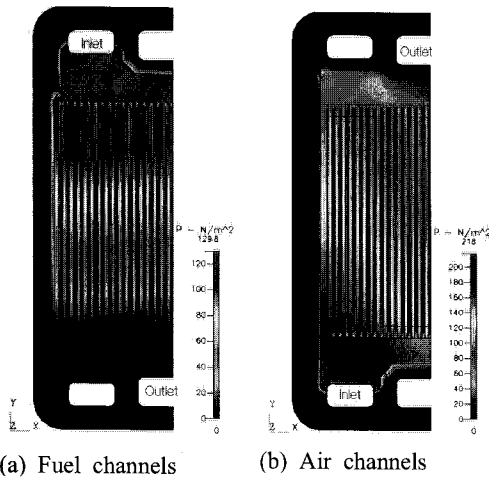


Fig. 8 Pressure distribution in the fuel and air channels

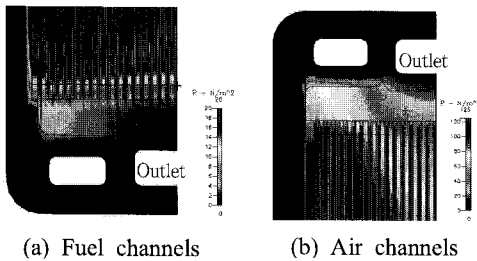
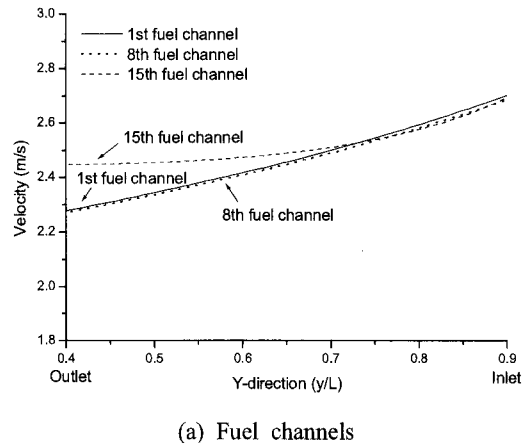


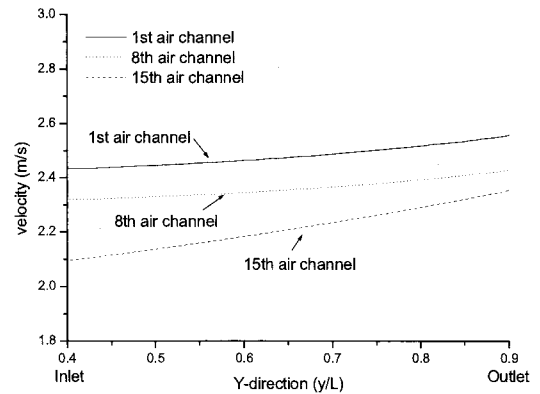
Fig. 9 Enlarged pressure distribution

3.2.1 압력 및 유동분포

Fig. 8은 연료채널과 공기채널에서의 상대압력 분포를 보여주고 있다. 연료채널의 경우 내부 압력차는 유동 방향에 따라 130 N/m²정도 이지만, 압력 분포 경향은 각 채널별로 동일하게 나타났다. 이에 반해 공기채널에서는 연료채널과 마찬가지로 유동방향에 따라 압력이 줄어들으나, 감소폭이 218 N/m²로 연료극에 비해 증가하였으며, 압력 분포 경향은 채널별로 상이하게 나타났다. 즉 단위스택 바깥쪽에 위치한 채널에서는 채널의 중앙부까지 높은 압력차를 유지한데 비해, 단위스택 중앙에 위치한 채널에서는 내부압력차가 상대적으로 작았다. 이러한 현상은 연료(1m/s)에 비해 상대적으로 빠르게 유입된 공기(3m/s)가 주위 채널까지 확산하여 이동하기보다는 입구 가까이 위치한 채널로 유입되었기 때문이다. 이러한 유체의 채널별 편중현상은 Fig. 9(a), (b)와 같은 연료극 및 공기극 출구쪽의 확대된 압력 분포를 통



(a) Fuel channels



(b) Air channels

Fig. 10 Flow velocity along y-direction in the fuel and air channels

해서 확인할 수 있었으며, 유입량이 많은 공기극에서 더욱 과도하게 나타났다.

연료극 채널에서의 압력분포에 의한 영향은 Fig. 10(a)와 같이 채널별 속도 경향에서도 확인할 수 있다. 연료극의 각 채널 속도는 유동 방향에 따라 2.8 m/s에서 2.27 m/s로 감소하였으며, 속도 감소 경향은 1, 8번 채널에서 유사하게 나타났다. 그러나 15번 채널에서는 속도 감소가 2.8 m/s에서 2.44 m/s로 1, 8번 채널에 비해 상대적으로 적었으며, 이러한 채널별 속도 차이는 Fig. 9(a)의 연료극 출구영역의 압력분포를 형성하였다고 판단되었다.

공기극에서는 채널별로 압력분포가 상이한 것과 동일하게 속도도 채널별로 큰 차이를 보였다. 또한 유동방향에 따른 반응물의 속도는 약 0.12 m/s 상승하는 것을 확인할 수 있었으며, 이러한 속도증가는 Fig. 11과 같이 공기 채널에서의 산소

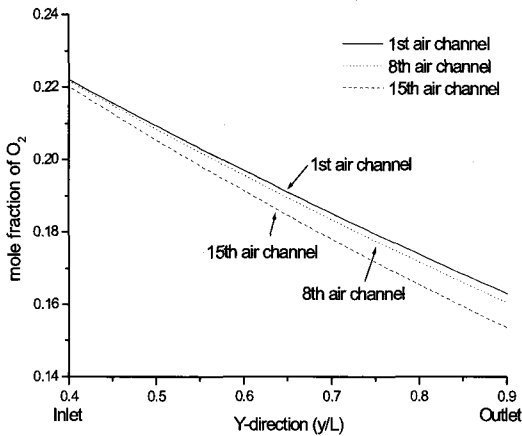


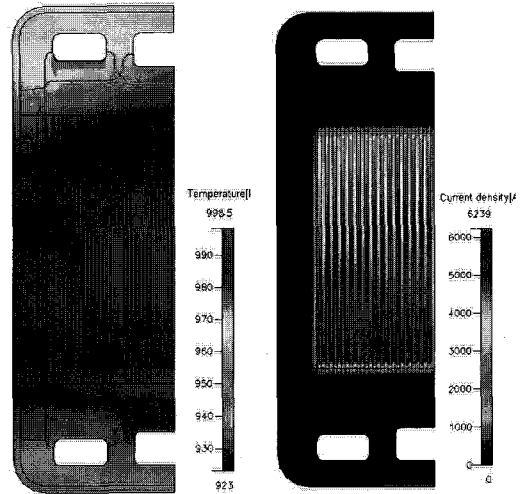
Fig. 11 O₂ mole fraction in the air channels

의 물분율 변화를 통해서도 확인할 수 있다. 연료극에서는 수소가 전류밀도에 비례하여 연료로 소모되지만, 동일한 몰수의 수증기가 생성된다. 따라서 Fig. 4에서도 확인할 수 있듯이 전체적으로는 동일한 몰수가 채널내에서 이동된다고 볼 수 있다. 그러나 공기극에서는 전기화학반응을 위해 유입되는 산소의 일부가 전해질을 통해 연료극으로 이동하기 때문에 유동방향에 따라 이동하는 유체의 몰수가 감소되어 길이방향에 따른 반응물의 속도가 증가하는 것으로 판단된다.

3.2.2 온도 및 전류밀도 분포

전해질과 전극의 경계면에서의 온도분포를 Fig. 12(a)에 나타내었다. 각 채널에서는 앞서 단일유로모델의 대향류 결과와 같이 채널의 중앙 부분에서 온도분포가 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한 단위스택은 상하부 모서리로부터 유입되는 반응물의 상대적인 냉각효과에 의해 중앙부분에 가까울수록 온도가 높아지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 12(b)는 전류밀도 분포로서, 전체적인 경향은 단일유로모델 해석결과와 일치함을 확인할 수 있었다. 즉, 전류밀도 분포는 온도 분포와 유사하나 반응물인 산소 물분율의 영향에 의해 최대 전류밀도지점이 최대온도지점에 비해 다소 공기유입구 쪽으로 이동해 있다는 것을 볼 수 있다. 또한 채널에서 유입되는 반응물이 다공성 매질인 전극내부에서 채널 리브 방향으로 확산되는 현상 때문에 채널에서의 전류밀도가 채널리브에 비해 상대적으로 높게 나타났다.



(a) Temperature (b) Current density

Fig. 12 Temperature and current density distribution on the surface where the electrolyte and the cathode are in contact

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 단일채널을 가진 고체산화물 연료전지의 단위전지에 대해 연결자 소재, 반응가스의 유입방향, 입구온도와 관련한 조건을 적용하여 열분포 및 성능특성에 대한 해석을 수행하였다. 해석 결과 스테인리스 연결자를 사용하여 상대적으로 저온인 923 K의 반응물을 대향류 방식으로 유입하는 것이 단위전지의 열 및 성능 측면에서 유리한 것으로 판단되었다.

이러한 단일채널의 해석 결과를 다채널 구조인 단위스택에 적용하여 각 채널에서의 압력, 유동, 온도 그리고 전류밀도 분포를 살펴보았다. 그 결과 단위스택의 압력분포는 각각의 연료 및 공기 채널 유동분포에 영향을 주었으며, 입구의 유입속도가 증가할수록 채널별 압력 및 유동속도가 차이가 커졌다. 또한 단위스택은 상하부 모서리로부터 유입되는 반응물의 상대적인 냉각효과에 의해 중앙부분에서 상대적으로 높은 온도를 나타내었다. 전류밀도 분포도 온도 분포에 영향을 받아 중앙부분에서 가장 높은 값을 나타내었으나, 아래쪽에서 유입되는 산소의 물분율에 의해 최대 전류밀도 구역이 다소 공기유입쪽으로 이동하였다. 또한 연결자가 반응물을 이동시키는 채널과

전자를 이동시키는 채널리브 구조로 되어있기 때문에 온도분포와는 달리 전류밀도가 불연속적으로 나타났다.

결론적으로 초기조건에 따라 단일채널과 다채널 단위스택의 해석결과는 일치된 경향을 보여주었다. 그러나 다채널로 구성된 단위스택에서는 상대적으로 넓은 면적, 다수의 채널, 유입속도, 유입구의 위치 등이 온도 및 전류밀도 분포에 영향을 주었다. 따라서 추후 연구되는 고체 산화물 연료전지 단위스택에서는 열분포에 따른 응력을 고려하여 효과적인 유로채널, 채널 리브, 유입구 크기 및 위치에 대한 설계를 통해 최적화된 분리판의 디자인에 대해 연구할 필요가 있다. 또한 단위스택에서 뿐만 아니라 다수로 적층된 스택 모델을 개발하여, 스택 전체에서의 유동경향에 대한 연구가 필요하다.

5. 후기

이 논문은 2006년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었습니다(KRF-2006-331-D00074).

참고문헌

(1) Larminie, J. and Dicks, A., 2002, *Fuel Cell Systems Explained*, Wiley, Chichester, pp. 225~226.
 (2) Yakabe, H., Ogiwara, T., Hishinuma, M. and Yasuda, I. 2001, "3-D Model Calculation for Planar SOFC," *Journal of Power Sources*, Vol. 102, pp. 144~154.

(3) Iwata Mitsunori, Hikosaka Takeshi, Morita Makoto, Iwanari Toru, Ito Kohei, Ondaa Kazuo, Esakib Yoshimi, Sakakib Yoshinori and Nagata Susumu, 2000, "Performance Analysis of Planar-type Unit SOFC Considering Current and Temperature Distributions," *Solid State Ionics*, Vol. 132, pp. 297~308.
 (4) Chyou Yau-Pin, Chung Tsang-Dong, Chen Jong-Sheng and Shie Ri-Fong, 2005, "Integrated Thermal Engineering Analyses with Heat Transfer at Periphery of Planar Solid Oxide Fuel Cell," *Journal of Power Sources*, Vol. 139, pp. 126~140.
 (5) Lin Chih-Kuang, Chen Tsung-Ting, Chyou Yau-Pin and Chiang Lich-Kwang, 2007, "Thermal Stress Analysis of a Planar SOFC Stack," *Journal of Power Sources*, Vol. 164, pp. 238~251.
 (6) Singhal, S. C. and Kendall, K., 2003, *High Temperature Solid Oxide Fuel Cells: Fundamentals, Design and Applications*, Elsevier, Kidlington, pp. 83~190.
 (7) Lin Shi-Tin, Chena Yih-Hang, Yu Cheng-Ching, Liu Yen-Chun and Lee Chiou-Hwang, 2005, "Modelling an Experimental Methane Fuel Processor," *Journal of Power Sources*, Vol. 148, pp. 43~53.
 (8) Cha Suk-Won, O'Hayre Ryan, Lee Sang Joon, Saito Yuji and Prinz Fritz B., 2004, "Geometric Scale Effect of Flow Channels on Performance," *Journal of Electrochemical Society*, Vol. 151, pp. A1856~A1864.
 (9) CFD Research Corporation, 2006, *CFD-ACE+ V2006 Modules Manual*, ESI CFD Inc., Huntsville, pp. 1~298.