

유동 해석을 이용한 평판형 고체 산화물 연료전지의 성능 특성 분석 (II) - 비등온 모델 -

현희철* · 손정락† · 이준식** · 노승탁**

(2003년 2월 24일 접수, 2003년 5월 9일 심사완료)

Performance Predictions of the Planar-type Solid Oxide Fuel Cell with Computational Flow Analysis (II) - Non-isothermal Model -

Hee-Chul Hyun, Jeong L. Sohn, Joon Sik Lee and Sung Tack Ro

Key Words : Solid Oxide Fuel Cell(고체 산화물 연료전지), Performance Analysis(성능해석), Flow Analysis(유동해석), Mass Transfer(물질전달), Open Circuit Voltage(개방회로전압), Fuel Utilization(연료 이용률), Current Density(전류밀도), Power Density(출력밀도)

Abstract

Performance characteristics of the planar-type solid oxide fuel cell (SOFC) are investigated by the analysis of flow fields coupled with heat and mass transfer phenomena in anode and cathode channels. For these purposes, performance analysis of the SOFC is conducted based on electrochemical reaction phenomena in electrodes and electrolyte coupled with flow fields in anode and cathode channels. In the present study, the isothermal model adopted in the previous paper prepared by the same authors is extended to the non-isothermal model by solving energy equation additionally with momentum and mass transfer equations using CFD technique. It is found that the difference between isothermal and non-isothermal models come from non-uniform temperature distribution along anode and cathode electrodes by solving energy equation in non-isothermal model. Non-uniform temperature distribution in non-isothermal model contributes to the increase of average temperature of the fuel cell and influences its performance characteristics.

기호설명

<p>A : 면적 [m^2] C_p : 정압비열 [$J/kg \cdot K$] D : 확산계수 [m^2/s] F : Faraday 상수 ($=96485 C/mol$) H : 유로 높이 [cm] i : 전류밀도 [mA/cm^2] k : 열전도도 [$W/m \cdot K$] L : 유로 길이 [cm] M : 분자량 [$kg/kmol$] n : 몰 유량 [$kmol/s$] P : 압력 [bar], [Pa] R : 기체 상수 ($=8.31441 J/mol \cdot K$) s : 엔트로피 [J/mol]</p>	<p>T : 온도 [K] V : 전압 [V] \dot{w} : 출력밀도 [W/cm^2] x : 길이 방향 y : 높이 방향 γ : 질량 분율 δ : 두께 [mm] ρ : 밀도 [kg/m^3], 전기 비저항 [m] μ : 동 점성계수 [$kg/m \cdot s$]</p>
--	---

하첨자

a	: 공기극, 공기
c	: 연료극, 셀 전압
e	: 전해질
f	: 연료
in	: 입구
oc	: 개방 회로 전압
out	: 출구

* 회원, 서울대학교 대학원 기계항공공학부

† 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부
E-mail: jlsohn@snu.ac.kr

TEL: (02) 880-7434, FAX: (02) 889-6205

** 회원, 서울대학교 기계항공공학부

상첨자
0 : 기준 상태

1. 서론

800~1000°C의 고온 환경에서 작동하는 고체 산화물 연료전지는 저온형 연료전지에 비하여 열효율이 상대적으로 높을 뿐만 아니라, 고온의 배기가스를 이용한 열병합 발전 시스템의 구현, 혹은 가스터빈과의 복합 사이클 구성에 의한 성능 향상의 가능성 때문에 세계적으로 이와 관련된 관심이 증대되고 있다⁽¹⁾. 그 중에서도 특히 미국의 경우에는 DOE(Department of Energy)를 중심으로 고체 산화물 연료전지를 기반으로 하는 가스터빈-연료전지 하이브리드 동력시스템 개발을 주도해 나가고 있을 뿐만 아니라, 최근 들어서는 SECA(Solid State Energy Conversion Alliance) 프로그램을 통해서 자동차 보조동력원 등의 고체 산화물 연료전지의 응용분야를 확장해 나가고 있다⁽²⁾.

연료전지의 성능에 있어서 작동온도는 매우 중요한 변수 중의 하나이다. 연료전지에서의 전기화학적 반응에 의한 가역(reversible) 생성 일에 해당하는 Gibbs 에너지의 차의 함수로 표시되는 개방 회로 전압(open-circuit voltage)은 작동 온도가 낮을수록 상승하지만 연료전지 작동 시의 전류의 흐름에 따라 발생하는 각종 손실들에 따른 비가역성(irreversibility)의 크기는 작동 온도가 높을수록 작아지기 때문에 결과적으로 연료전지의 성능은 작동온도가 높을수록 향상된다. 고체 산화물 연료전지는 현재 세계적으로 존재 하는 모든 연료전지 중 가장 높은 온도에서 작동하므로 다른 연료전지에 비하여 성능이 가장 우수한 것으로 알려지고 있다⁽³⁾.

연료전지의 작동온도가 높을수록 성능이 향상되는 반면에 그에 따른 여러 가지의 문제가 있을 수

있다. 그 중에서도 특히 시동 시 고온에 이르기까지의 시동 시간이 상대적으로 길어 자동차 등과 같이 짧은 시동시간이 요구되는 용도로는 적용이 부적절하다. 또한 고온 작동으로 인한 연료전지 구성부의 열피로 현상이나 전극과 전해질간의 열팽창계수의 차이로 인한 해당 소재의 열적 거동 특성으로 인하여 저온형 연료전지에 비하여 수명이 현저히 짧은 단점도 있다. 뿐만 아니라, 연료전지에서의 전기화학 반응과 관련된 각종 화학 성분들의 조성비가 작동 온도에 따라 변하기 때문에 연료전지의 성능특성에도 영향을 미치게 된다. 따라서, 고체 산화물 연료전지의 성능 특성과 구성 부품의 수명예측을 위해서는 작동온도의 영향에 대한 면밀한 검토가 필수적으로 요구된다.

본 연구의 선행연구에 해당하는 현희철 등⁽⁴⁾에서는 평판형 고체 산화물 연료전지를 온도가 일정한 등온모델로 가정하여 유동해석 기법을 적용하여 성능 특성을 분석하였다. 그러나, 실제 연료전지의 작동환경에서는 연료전지 내에서의 연료 및 공기극 유로 내에서의 온도는 유동 방향에 따라 변하게 된다. 본 연구에서는 이러한 온도의 변화를 고려하기 위하여 선행 연구의 내용을 확장하여 에너지 방정식을 포함한 유동해석 과정을 통하여 평판형 고체 산화물 연료전지의 성능 특성을 분석하였다.

2. 고체 산화물 연료전지 해석 모델

2.1 유동해석 모델

고체 산화물 연료전지 내부 유동현상이 연료전지 성능에 미치는 영향을 고찰하기 위해서 Fig.1과 같은 평판형 연료전지를 기본형상으로 설정하였으며, 형상 및 기준 사양 및 유동 조건들은 Table 1과 같다.

고체 산화물 연료전지에 공급되는 연료로는 메탄 등의 화석연료를 주로 사용하지만 본 연구에서는 연료가 연료전지에 공급되기 이전에 완전히 개질되어 수소와 수증기의 혼합물로 연료 유로로 공급된다고 가정하였다. 또한, 공기 유로로는 산소와 질소의 혼합물인 공기가 공급된다고 가정하였다. 연료극 표면에서의 물질전달에 의해 연료극으로 전달된 수소는 역시 공기극으로부터 전달된 산소 중 전해질을 통과한 산소 음이온과 결합하여 연료극으로 수증기를 방출하며, 동시에 전자를 발생시킴으로써 두 전극을 연결한 외부 회로를 통하여 전류를 생성시킨다. 따라서, 연료전지 내부에서의 물리적 현상을 정확하게 파악하기 위해서는 연료

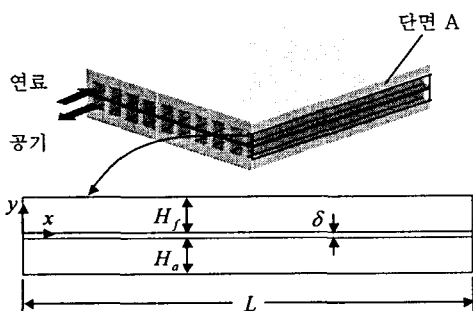


Fig. 1 The geometry of unit cell and computational domain

Table 1 Geometric dimensions and operating conditions of the reference fuel cell

Geometric Dimensions	Length	5 cm	
	Channel height	Fuel	0.2 cm
		Air	0.2 cm
	Thickness	Anode	0.035 mm
		Electrolyte	0.1 mm
		Cathode	0.035 mm
Pressure	1 bar		
Flow type	Counter flow		
Cell voltage	0.7 V		
Inlet Conditions	Velocity	Fuel	1 m/s
		Air	3 m/s
	Temperature	Fuel	1273K
		Air	1123K
Mole fraction	Fuel	H ₂ :H ₂ O=0.7:0.3	
	Air	O ₂ :N ₂ =0.21:0.79	
Fluid Properties	Density	Fuel	H ₂ : 0.0223 kg/m ³ H ₂ O: 0.1979 kg/m ³
		Air	O ₂ : 0.3545 kg/m ³ N ₂ : 0.3104 kg/m ³
	Thermal Conductivity	Fuel	0.3058 W/mK
		Air	0.0853 W/mK
	Specific Heat	Fuel	5169.50 J/KgK
		Air	1165.71 J/KgK
	Viscosity	Fuel	4.4321×10 ⁻⁵ kg/m-s
Air		5.1032×10 ⁻⁵ kg/m-s	
Mass Diffusion Coefficient	Fuel	6.6740×10 ⁻⁴ m ² /s	
	Air	4.5635×10 ⁻⁴ m ² /s	

및 공기 유로 내에서의 운동량, 열 및 물질전달 현상을 고찰하여야 할 뿐만 아니라 연료극, 전해질 및 공기극 내부에서의 전기화학 반응 현상도 함께 고려하여야 한다. 그러나, 이 경우 해석 과정이 매우 복잡해지므로 본 연구에서는 선행연구의 경우⁽⁴⁾와 마찬가지로 해당 유로 상의 전극 표면에서의 적절한 경계조건을 유도하여 이를 이용하여 연료 및 공기 유로 내에서의 운동량, 열 및 물질전달 지배 방정식을 해석함으로써 해석과정을 단순화 시켰다.

2.2 지배 방정식

Fig. 1 과 같은 평판형 고체 산화물 연료전지의 내부 유동장을 2 차원 단면(단면 A)에서의 정상상태로 가정할 경우 지배 방정식들은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

질량 보존 방정식:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

길이(x)방향 운동량 보존 방정식:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial x}(\rho u u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v u) + \frac{\partial P}{\partial x} - 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ &- \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right) = 0 \end{aligned} \tag{2}$$

높이(y)방향 운동량 보존 방정식:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial x}(\rho u v) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v v) + \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \\ &- 2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right) = 0 \end{aligned} \tag{3}$$

물질 전달 방정식:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial x}(\rho u Y_i) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v Y_i) \\ &- \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho D \frac{\partial Y_i}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho D \frac{\partial Y_i}{\partial y} \right) = 0 \end{aligned} \tag{4}$$

여기서, 첨자 *i* 는 유로 내부에서의 구성 물질의 종류를 나타낸다.

에너지 보존 방정식:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial x}(\rho c_p u T) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho c_p v T) \\ &- \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0 \end{aligned} \tag{5}$$

상태 방정식:

$$P = \rho R T \sum_{i=1}^N \frac{Y_i}{M_i} \tag{6}$$

2.3 경계 조건

위의 지배방정식의 해를 구하기 위해서는 물리적으로 타당한 적절한 경계 조건들이 필요하다. 질량 및 운동량 보존 방정식과 관련된 경계 조건들은 다음과 같다.

연료 유로:

$$x = 0: \quad u = u_{f,in}, v = 0 \tag{7a}$$

$$x = L: \quad P = P_{out} \tag{7b}$$

$$y = H_f: \quad u = 0, v = 0 \tag{7c}$$

$$y = 0: \quad u = 0, v = \frac{1}{\rho} \frac{i}{2F} (M_{H_2O} - M_{H_2}) \tag{7d}$$

공기 유로:

$$x = 0: \quad P = P_{out} \tag{8a}$$

$$x=L: \quad u=-u_{a,in}, v=0 \quad (8b)$$

$$y=-(H_a+\delta): \quad u=0, v=0 \quad (8c)$$

$$y=-\delta: \quad u=0, v=\frac{1}{\rho} \frac{i}{2F} M_{O_2} \quad (8d)$$

고체 산화물 연료전지는 연료가 공급되는 연료극으로 수증기가 생성되며, 이를 고려한 물질 전달 방정식을 해석하기 위한 경계 조건들은 아래와 같다.

연료 유로:

$$x=0: \quad Y_{H_2O}=Y_{H_2O,in}, Y_{H_2}=Y_{H_2,in} \quad (9a)$$

$$x=L: \quad \frac{\partial Y_{H_2O}}{\partial x} = \frac{\partial Y_{H_2}}{\partial x} = 0 \quad (9b)$$

$$y=H_f: \quad \frac{\partial Y_{H_2O}}{\partial y} = \frac{\partial Y_{H_2}}{\partial y} = 0 \quad (9c)$$

$$y=0: \quad -\rho D \frac{\partial Y_{H_2O}}{\partial y} + \rho v Y_{H_2O} = \frac{i}{2F} M_{H_2O} \quad (9d)$$

$$-\rho D \frac{\partial Y_{H_2}}{\partial y} + \rho v Y_{H_2} = -\frac{i}{2F} M_{H_2}$$

공기 유로:

$$x=0: \quad \frac{\partial Y_{O_2}}{\partial x} = \frac{\partial Y_{N_2}}{\partial x} = 0 \quad (10a)$$

$$x=L: \quad Y_{O_2}=Y_{O_2,in}, Y_{N_2}=Y_{N_2,in} \quad (10b)$$

$$y=-(H_a+\delta): \quad \frac{\partial Y_{O_2}}{\partial y} = \frac{\partial Y_{N_2}}{\partial y} = 0 \quad (10c)$$

$$y=-\delta: \quad -\rho D \frac{\partial Y_{O_2}}{\partial y} + \rho v Y_{O_2} = \frac{i}{4F} M_{O_2} \quad (10d)$$

$$-\rho D \frac{\partial Y_{N_2}}{\partial y} + \rho v Y_{N_2} = 0$$

앞서 기술한 바와 같이 연료전지는 연료극에서의 수소와 공기극에서의 산소의 전달을 통하여 전기화학 반응을 일으키며 그 과정 중에 전류를 생성한다. 위의 경계조건에서는 각 전극 표면에서의 물질 전달량을 전류밀도의 함수로 표현하고 이를 연료전지의 반응 및 생성물질의 전극 표면에서의 경계조건으로 설정하였다. 따라서, 연료 및 공기 유로에서의 물질전달 특성은 연료전지 성능과 경계조건을 통해서 연계되어 있음을 알 수 있다.

전극과 전해질 내부에서의 전기 화학 반응은 발열 반응이므로 반응과정 중 엔트로피 생성과 관련된 열이 발생하게 된다. 또한, 전기 화학적 반응을 통하여 생성된 전류는 전극과 전해질에서의 전기적 저항으로 인하여 또 다른 형태의 열을 발생하게 되는데 이를 일반적으로 Joule 열이라고 부른다.

이렇게 발생된 열은 연료 및 공기 유로로 방출되어 유로를 통과하는 물질들의 온도를 상승시키는 원인이 된다. 전극과 전해질 내부에서 발생한 열이 연료 및 공기 유로 방향으로 동일하게 방출된다고 가정하면 에너지 보존 방정식 해석에 필요한 경계조건은 다음과 같이 표현할 수 있다.

연료 유로:

$$x=0: \quad T=T_{f,in} \quad (11a)$$

$$x=L: \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (11b)$$

$$y=H_f: \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (11c)$$

$$y=0: \quad -k \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{1}{2} \left(-\frac{iT\Delta s}{2F} + i^2 r \right) \quad (11d)$$

공기 유로:

$$x=0: \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (12a)$$

$$x=L: \quad T=T_{a,in} \quad (12b)$$

$$y=-(H_a+\delta): \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (12c)$$

$$y=-\delta: \quad -k \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{1}{2} \left(-\frac{iT\Delta s}{2F} + i^2 r \right) \quad (12d)$$

위의 지배 방정식과 경계조건으로부터 각 유로에서의 유동장과 구성 물질들의 질량 분율을 구해야 하므로 유동해석을 위한 전산유체역학적 기법의 도입이 필요하다. 본 연구에서는 이를 위해서 유한 체적법을 기반으로 하는 유동해석 전용 상용 프로그램인 CFC-ACE(U)를 사용하였다.

2.4 성능해석 모델

유동해석을 통하여 구하여진 연료전지 유동장 내에서의 속도, 압력, 온도 및 구성 물질의 분포를 이용하여 연료전지의 성능을 구할 수 있다. 연료전지의 성능은 주로 셀 전압과 전류 밀도로 나타내며 이들로부터 다음과 같이 출력 밀도를 구할 수 있다.

$$\dot{w}_{FC} = iV_c \quad (13)$$

여기서, 셀 전압은 개방 회로 전압과 연료전지 내부에서의 각종 손실의 차이로부터 구할 수 있으며 개방 회로 전압은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$V_{oc} = -\frac{\Delta G^0}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \left[\frac{P_{H_2}/P^0 (P_{O_2}/P^0)^{1/2}}{P_{H_2O}/P^0} \right] \quad (14)$$

위의 관계식에서와 같이 개방 회로 전압은 유동장에서 온도와 전기 화학 반응에 관련된 물질들의 분압의 함수로 표현되는데, 여기서 분압은 유동장의 압력과 해당 물질들의 몰 분율로부터 구할 수 있으므로 결과적으로 유동장 해석 결과로부터 개방 회로 전압을 구할 수 있다.

또한, 전류밀도는

$$i = \frac{2\dot{n}_{H_2} F}{A} \quad (15)$$

와 같이 표현되는데, 여기서 \dot{n}_{H_2} 란 연료극 표면에서 전기화학 반응을 위하여 연료극으로 전달되는 수소의 몰량을 의미하므로 유동장 해석 과정에서의 연료극 표면에서의 경계 조건과 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다. 뿐만 아니라, 각종 전압 손실들은 전류밀도의 함수로 나타나므로 유동장 해석 과정과 식 (13)-(15)로부터 연료전지의 성능을 해석할 수 있다. 이와 관련된 구체적인 내용은 본 연구의 선행 연구인 현희철 등⁽⁴⁾에 자세하게 기술되어 있다. 단, 선행 연구에서 사용된 전압 손실

중 내부 저항에 의한 손실은 Ferguson 등⁽⁵⁾이 제시한 실험식으로 대치하였다. 이에 대한 내용은 현희철⁽⁶⁾에 자세하게 기술되어 있다. 또한 각 전극 및 전해질의 두께도 Iwata 등⁽⁷⁾이 적용한 전해질 지지형(electrolyte-supported) 연료전지 사양을 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

성능해석 과정 중의 유로 내에서의 유한 체적법에 의한 유동해석을 위해서는 유로 단면에서의 적절한 격자의 형성이 필요하다. 본 연구에서는 유로 단면에서 각 유로 당 길이 방향과 높이 방향으로 각각 50 개, 20 개의 격자를 사용하였는데 이러한 격자는 여러 가지 격자를 적용해 본 결과 격자의 수에 따른 결과의 변화가 없는 최적값으로 선정된 것이다.

3.1 유동장 해석 결과 분석

Fig. 2 는 연료 및 공기 유로 내에서의 전압(출구 압력에 대한 상대적인 값)과 온도의 분포를 나타내고 있다. 전압력은 식 (14)에서와 같이 분압항을 통하여 연료전지의 개방 회로 전압의 크기에 영향을 미친다. 연료 및 공기 유로 내에서의 온도는 하류로 갈수록 상승하고 전극 표면에서의 온도가 유동장 온도보다 높음을 알 수 있다. 이는 전극 및 전해질 내부에서의 전기화학 반응에 의한

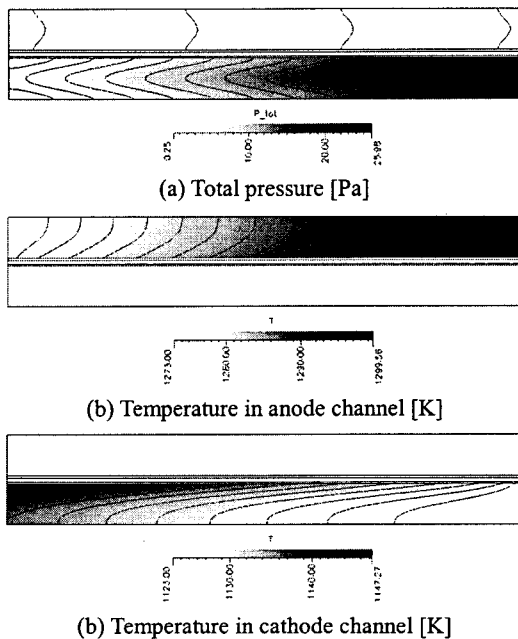


Fig. 2 Total pressure and Temperature distributions in anode and cathode channels

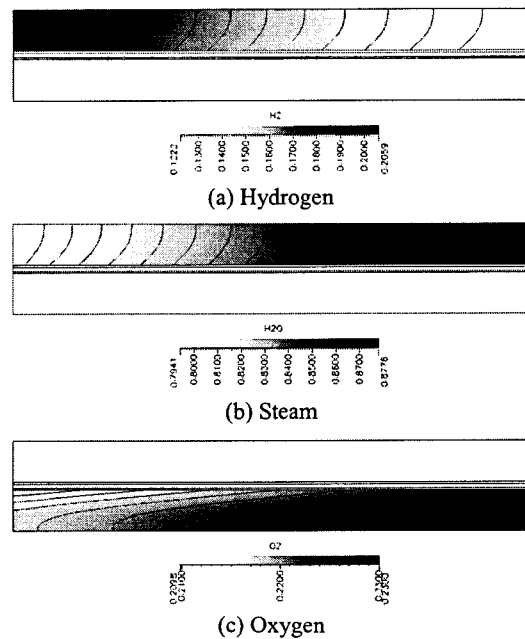
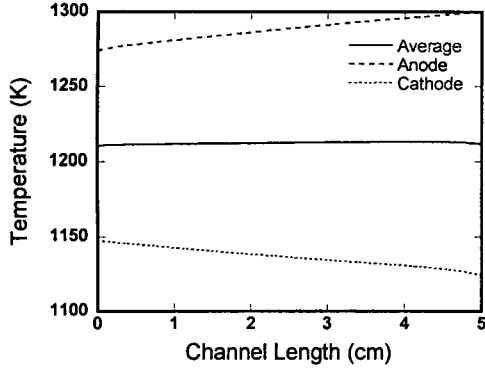
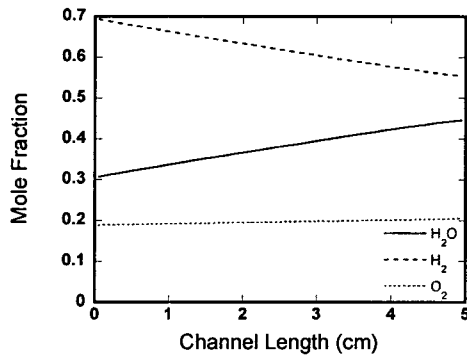


Fig. 3 Distributions of mass concentrations in anode and cathode channels



(a) Temperature

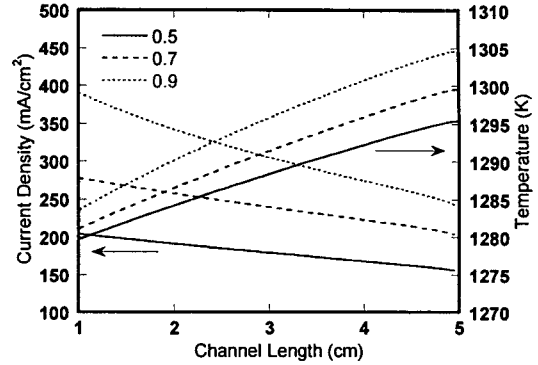


(b) Mole fractions

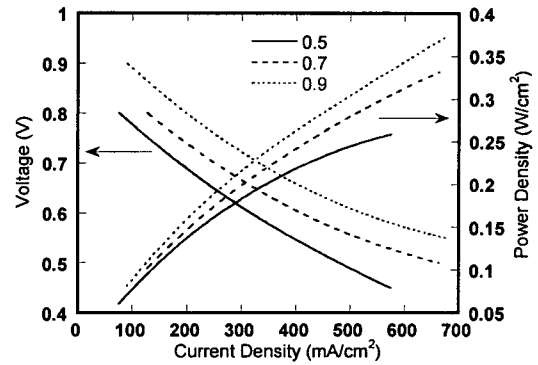
Fig. 4 Distributions of temperature and mole fractions along channel length

발열 및 Joule 열의 영향 때문이다. 전기화학 반응에 참여하는 물질들의 연료 및 공기 유로 내에서의 농도 분포는 Fig. 3 과 같다. 수소와 산소는 연료전지의 전극 및 전해질 내부에서의 전기화학 반응 과정에서 소모되므로 각각 연료극 및 공기극 표면에서 최소의 값을 가지며 유로 진행 방향으로 점차적으로 줄어들고 있다. 반면에 수증기의 경우에는 연료극 표면에서 최대의 값을 가지며 유로 진행 방향으로 증가하고 있다. 연료극 및 공기극 표면에서의 각 물질의 농도는 개방 회로 전압을 구할 때의 전압력과 함께 분압을 계산하는 과정에서 활용된다.

연료전지 성능계산 과정에 반영되는 유동장과 관련된 정보들은 각 전극 표면에서의 값들이므로 전극 표면에서의 연료전지 길이 방향으로의 온도 및 물질들의 몰 분율 분포를 Fig. 4 에 나타내었다. 온도는 연료전지에서의 발열로 인하여 연료극과 공기극 표면에서 각각 유동의 진행방향으로 상승하며 두 값의 평균값도 길이 방향으로 상승하지만 온도 상승폭이 약 3°C 로써 그다지 크지 않음을



(a) Current density and temperature distributions of anode along channel length



(b) Cell voltage and power density

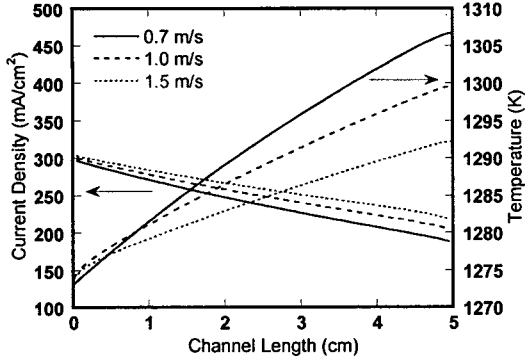
Fig. 5 Characteristics of fuel cell performance with various mole fractions of the hydrogen at the fuel inlet

알 수 있다. 이와 같은 연료전지 길이방향의 온도 구배는 전극 표면에서의 구성 물질의 몰 분율 분포와 밀접한 관련이 있으므로 결과적으로 연료전지의 성능에 영향을 미치게 된다. 전극 표면에서의 구성 물질의 농도 분포를 보면 연료전지 길이 방향으로 수소와 물 몰 분율의 변화 구배에 비하여 산소 농도의 변화 구배가 매우 작음을 알 수 있는데 이는 전기화학 반응 시 수소와 산소의 반응 비율이 2:1 로서 산소의 소모량이 수소에 비하여 상대적으로 작고, 수소의 분자량이 수증기에 비해 9 배나 작기 때문이다.

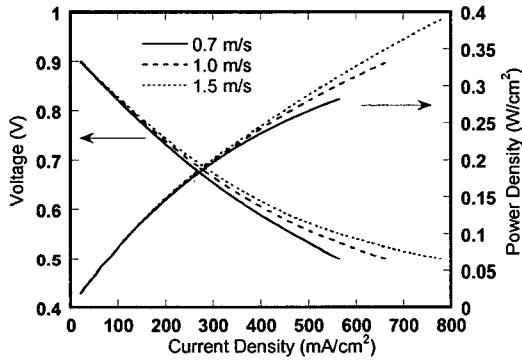
3.2 입구조건의 영향

3.2.1 유입 연료의 몰 분율의 영향

다른 조건은 동일한 조건에서 유입되는 수소의 몰 분율을 변화할 때의 연료전지 성능 특성은 Fig. 5 로부터 고찰할 수 있다. 동일한 수소 몰 분율의 조건에서 전류밀도는 연료전지의 길이방향으로 감소하는데 이는 Fig. 3 에서와 같이 연료 유로의 하류방향으로 수소 몰 분율이 감소하므로 전기화학

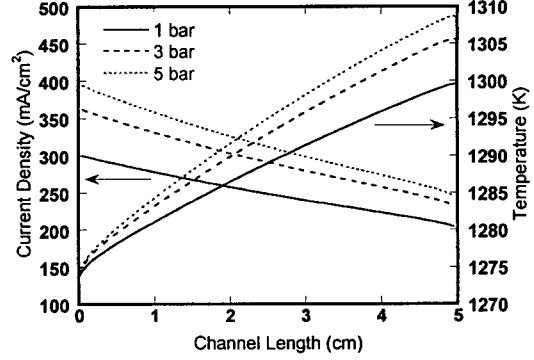


(a) Current density and temperature distributions of anode along channel length

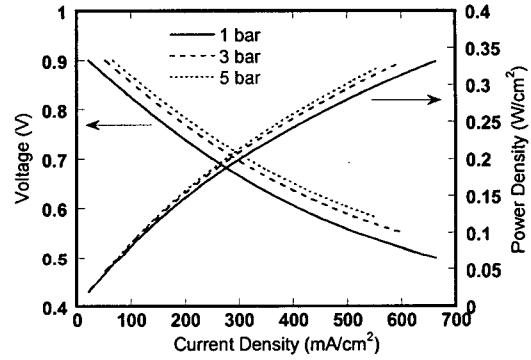


(b) Cell voltage and power density

Fig. 6 Characteristics of fuel cell performance with various inlet velocities in fuel channel



(a) Current density and temperature distributions of anode along channel length



(b) Cell voltage and power density

Fig. 7 Characteristics of fuel cell performance with various operating pressure

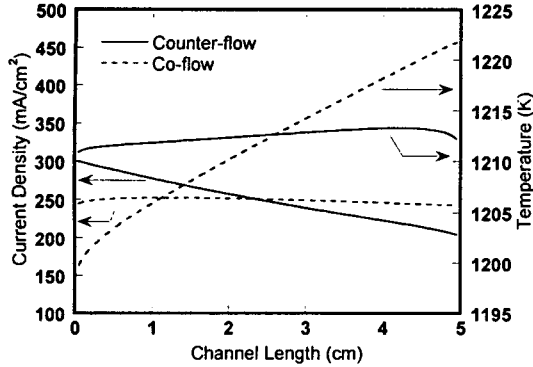
반응에 참여하는 수소의 유량이 감소하기 때문이다. 그리고, 수소의 물 분율이 높을수록 전류밀도가 증가하는 이유는 수소의 물 분율이 높을수록 전기화학 반응에 참여하는 수소의 유량이 증가하기 때문이다. 뿐만 아니라, 수소의 물 분율 증가에 따라 연료전지 길이방향으로 전류밀도의 감소 구배가 줄어들는데 이 역시 동일한 이유 때문이라고 할 수 있다. 연료전지의 온도도 수소 물분율이 증가함에 따라 상승하고 있다. 셀 전압과 출력밀도도 역시 수소의 물 분율 증가에 따라 향상됨을 확인할 수 있다. Table 1의 기본사양을 기준으로 연료의 수소 물분율을 0.5에서 0.9로 높이는 경우 출력밀도는 78.4%나 향상되었다. 여기서 두 가지 수소 물 분율에서의 출력밀도의 증가 폭은 0.7V의 셀 전압 조건에서 Fig. 5(b)로부터 각각 수소 물 분율에서의 전류밀도에 해당하는 출력밀도의 차이를 의미한다.

동일한 조건에서 연료전지의 온도를 등온으로 가정 한 경우의 계산 결과(참고문헌 4의 Fig. 4에서 유입 수소의 물 분율이 0.5인 경우)와 비교해 보

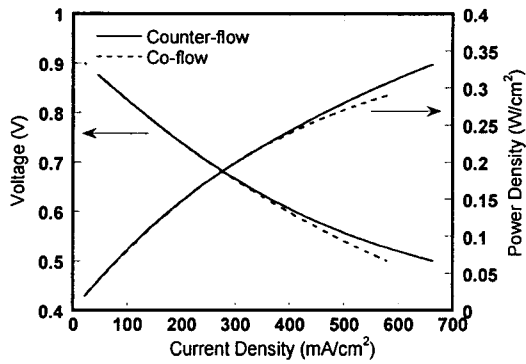
면 등은 가정의 경우 출력 밀도는 특정 전류 밀도에서 최대값이 존재하는 반면에 본 연구의 비등온 모델의 경우에는 전류밀도가 증가할수록 상승함을 알 수 있다. 이는 비등온 모델의 경우 전류밀도가 증가할수록 연료전지의 온도가 길이방향으로 상승하여 연료전지의 평균온도를 상승시킴으로써 전압 손실을 감소시키기 때문으로 이해된다. 또한 등온 모델의 경우와 비교하여 모든 전류밀도의 범위에서 비등온 모델의 셀 전압이 높을 뿐만 아니라 그 차이는 높은 전류밀도 영역에서 더 큰데 이는 비등온 모델의 경우 모든 전류밀도 영역에서 연료전지 평균 온도가 높을 뿐만 아니라 전류밀도가 클수록 온도 상승 폭이 더 크기 때문이다.

3.2.2 연료 유로 입구속도의 영향

연료극 유로의 입구 속도는 유로 내부에서의 각 물질들의 농도 분포에 영향을 미치게 되어 연료전지의 성능을 변화시킨다. Fig. 6(a)에서와 같이 연료 유로 입구속도가 증가하게 되면 유입 수소량도 증가하게 되어 전류밀도가 상승하게 되지만 유입 수소의 물 분율 증가의 경우에 비하면 전류 밀도의



(a) Current density and temperature distributions of electrolyte along channel length

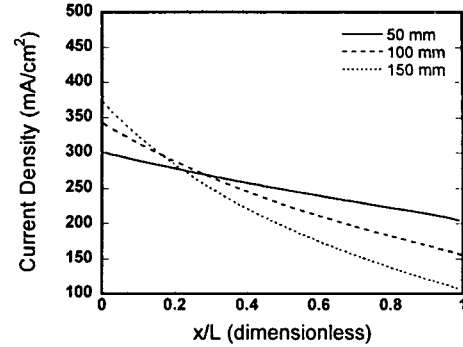


(b) Cell voltage and current density

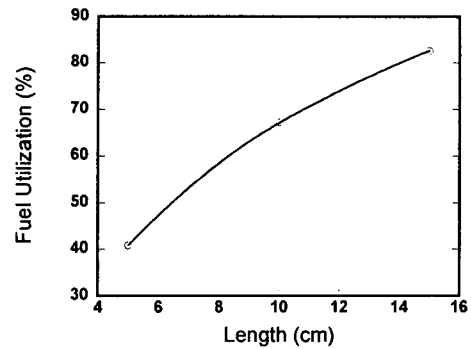
Fig. 8 Characteristics of fuel cell performance with different flow directions

상승폭은 상대적으로 작은 편이다. 반면에 연료전지 하류 영역에서의 온도는 연료 유로의 유입 입구속도가 증가할수록 오히려 감소하는 경향을 보여주고 있는데 이는 연료 유로 내에서의 속도가 빨라질수록 길이방향으로의 대류효과가 커져 연료전지에서 발생한 발열량을 연료전지 하류로 이송시키는 효과가 커지기 때문으로 판단된다.

셀 전압과 출력 밀도는 전류 밀도가 작은 경우에는 유입속도의 영향을 크게 받지 않지만 전류 밀도가 클수록 유입속도의 증가에 따라 각각 상승한다(Fig. 6(b)). 그러나, 그 상승폭이 유입 수소의 물 분율 변화의 경우와 비교해서 매우 작으므로 연료전지의 성능을 향상시키기 위해서는 연료극으로 유입되는 전체 유량을 증가시키는 경우보다는 동일한 유량 조건에서 수소의 물 분율을 증가시키는 것이 훨씬 유리하다고 볼 수 있다. 이러한 결과는 고체 산화물 연료전지의 경우 연료전지 전방에 설치될 개질기(reformer)의 성능이 연료전지의 성능에 매우 중요한 요인이 될 수 있음을 설명하고 있다.



(a) Current density distributions along channel length



(b) Fuel utilization

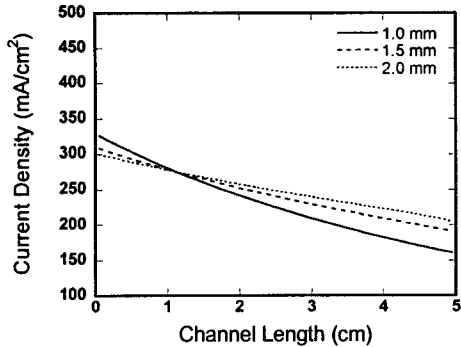
Fig. 9 Influence of channel length on the fuel cell performance

3.3 작동 압력의 영향

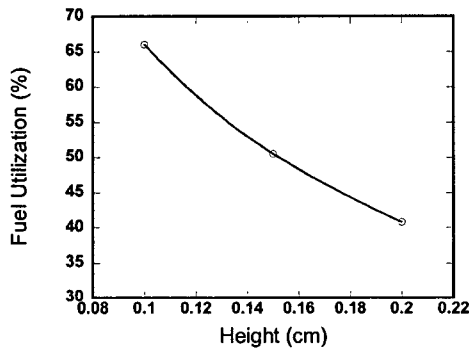
연료전지의 작동압력을 상승시키면 전기화학 반응에 관련된 물질들의 분압이 높아져 식 (14)에서와 같이 개방 회로 전압이 상승하게 되어 연료전지의 성능이 향상된다. 작동 압력이 연료전지의 성능에 미치는 효과를 분석하기 위하여 본 연구에서는 유동 해석 과정 중 연료 및 공기 유로 출구에서의 압력 경계 조건(식 (7b), 식 (8a))을 변화시켰다. 작동 압력이 상승하면 연료전지의 온도가 상승하게 되고 그 결과 전류 밀도도 증가하게 된다. 또한 그 결과 모든 전류 밀도 영역에서 셀 전압과 출력 밀도도 작동압력의 증가에 따라 함께 향상된다(Fig. 7). Fig. 7(b)로부터 Table 1에서와 같이 셀 전압이 0.7V 인 기본 사양을 기준으로 작동 압력이 1 bar 에서 5 bar 로 상승하면 출력은 26% 향상됨을 알 수 있다.

3.4 유동 방향의 영향

연료전지의 설계 시 고려할 수 있는 연료 및 공기 유로로 유입되는 유동의 방향은 대향류(counter-flow)와 병행류(co-flow) 등 두 가지가 있을 수 있다. 본 연구에서는 기본적으로 Table 1에



(a) Current density distributions along channel length



(b) Variation of the fuel utilization with channel height

Fig. 10 Characteristics of fuel cell performance with various channel heights

서와 같이 대향류(counter-flow)를 선택하였지만 유동 방향의 영향을 분석해 보기 위하여 연료와 공기의 유동 방향이 동일한 병행류인 경우도 함께 고찰하였다. Fig. 8(a)에서와 같이 전류밀도의 연료 전지 길이방향 구배는 대향류의 경우에는 길이방향으로 감소하는 반면 병행류의 경우에는 거의 일정하다. 반면에 온도의 경우 대향류의 경우는 길이방향으로 균일하고, 병행류의 경우에는 길이방향으로 증가하고 있는데 대향류의 경우와 비교하여 입구부의 온도는 낮고 출구부의 온도는 높다. 유로의 입구부에서는 대향류의 전류밀도가 높고 출구부에서는 병행류의 전류밀도가 높은 이유는 입구부에서 대향류가 병행류인 경우보다 전해질의 온도가 높기 때문에 손실이 줄어들어 전류밀도가 높지만, 출구부에서는 오히려 대향류의 경우가 병행류보다 온도가 낮기 때문에 손실이 커져서 전류밀도도 병행류에 비해서 작아짐을 알 수 있다. 또한 Fig. 8(b)에서와 같이 유동 방향에 따른 연료전지 성능은 전류밀도가 작은 경우에는 크게 영향을 받지 않지만 전류밀도가 300mA/cm² 정도보다 커지면 대향류의 경우가 상대적으로 성능이 우수함을 알 수 있다.

3.5 유로 형상의 영향

3.5.1 유로 길이의 영향

Fig. 9(a)는 유로의 길이가 다른 경우의 길이방향 전류밀도의 변화를 나타내고 있다. 앞에서 기술된 다른 경우에서의 결과들과 마찬가지로 전류밀도는 길이방향으로 갈수록 감소하는데 이는 동일한 입구 유동 조건에서 하류로 갈수록 전기화학 반응에 이용되기 위하여 전극 표면을 통하여 전해질 방향으로 전달되는 연료량이 상대적으로 작아지기 때문이다. 또한 유로의 길이가 길수록 길이방향으로 전류밀도의 변화 구배가 커지는 현상도 역시 하류에서의 전극 표면에서의 연료 전달량의 감소와 관련이 있다고 판단된다. 이로 인하여 연료전지 입구에서 유입되는 연료유량 중에서 전기화학 반응에 이용되는 연료의 유량비로 정의 되는 연료 이용율(fuel utilization factor)은 Fig. 10(b)에서와 같이 길이가 길수록 증가함을 알 수 있다. 그러나 연료전지의 길이가 증가할수록 연료 이용율은 향상되지만 하류에서의 낮은 전류밀도로 인한 평균 전류밀도의 감소로 인하여 출력밀도는 오히려 감소할 수도 있다. 실제로 본 연구에서 길이가 50mm 에서 150mm 로 증가시켰을 때 출력밀도가 16.1% 감소함을 확인 할 수 있었다. 그러나 출력밀도가 아닌 출력을 비교하면 유로 길이가 길어질수록 연료전지의 반응 면적이 넓어지므로 출력이 커지게 된다.

3.5.2 유로 높이의 영향

Table 1 에서의 기준 사양에서 유로의 높이를 변화시킬 경우 유로의 높이가 커질수록 유로로 유입되는 연료와 공기의 유량이 증가하게 된다. Fig. 10(a)로부터 유로의 높이가 커지면 연료전지 길이방향으로의 전류밀도 감소 구배가 작아짐을 알 수 있으며 이로 인하여 평균 전류밀도는 상승하게 된다. 따라서, 유로의 높이가 커질수록 전기화학 반응에 참여하는 연료의 양이 증가한다고 볼 수 있다. 반면에 Fig. 10(b)와 같이 연료 이용율은 연료의 높이가 커질수록 작아지는데 이는 연료의 전기화학 반응에 참여하는 연료의 양이 증가함에도 불구하고 유로 높이 증가에 따른 유입 연료량의 증가에 비해서는 상대적으로 작아짐을 의미하고 있다.

4. 결론

연료전지 내부에서의 열 및 물질전달을 포함한 유동현상이 고려된 성능해석 과정을 통하여 고체 산화물 연료전지의 성능 특성을 분석하였다. 본

연구에서는 연료전지 내부 유동장을 등온모델로 가정한 선행 연구내용을 확장하여 연료전지 내부 온도장의 거동을 고려한 비등온 모델을 적용하여 고체 산화물 연료전지의 성능 특성을 분석한 결과 다음과 같은 주요 결과들을 도출하였다.

(1) 비등온 모델에서의 연료전지 내부에서의 온도장의 변화를 고려하기 위하여 기존의 운동량 및 물질 전달 방정식과 함께 에너지 보존방정식을 함께 해석하였으며, 이를 위하여 연료전지 내부에서의 발열량을 고려한 전극 표면에서의 온도 경계조건을 설정하였다.

(2) 모든 유동 조건에서 연료전지 내부 유동장에서의 온도는 길이방향으로 상승함을 확인하였으며, 이는 연료전지 내부의 평균 온도를 상승시키는 효과를 가져오게 됨을 알 수 있었다.

(3) 연료전지 입구조건의 영향은 전반적으로 등온모델의 결과와 유사한 경향을 보여주고 있으나, 연료전지 내부에서의 온도 변화로 인하여 등온모델의 결과와는 다소 차이가 있음을 알 수 있었다. 그 중에서도 특히 전류밀도의 변화에 따른 출력밀도 변화의 특성은 등온 모델의 결과와는 많은 차이가 남을 알 수 있었는데 이는 비등온 모델 해석 결과로 인한 연료전지의 평균온도 상승때문이라고 판단된다.

(4) 연료전지의 연료극 및 공기극에서의 유동방향의 영향을 고찰해 본 결과 고 전류밀도 영역에서는 병행류(co-flow)보다는 대향류(counter flow)가 연료전지의 성능을 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다. 또한 유로 형상의 영향을 고찰한 결과 동일한 작동 조건에서는 유로의 길이가 길수록, 유로의 높이가 낮을수록 연료전지에서의 연료 이용율이 증가함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 2002 년도 마이크로 열시스템 연구센터 지원에 의하여 수행되었음.

참고문헌

- (1) George, R.A., 2000, "Status of Tubular SOFC Field Unit Demonstrations," *Journal of Power Sources*, Vol.86, pp. 134~139.
- (2) Solid State Energy Conversion Alliance (SECA), www.netl.doe.gov.
- (3) Larminie, J. and Dicks, A., 2000, *Fuel Cell Systems Explained*, John Wiley & Sons, Inc.
- (4) Hyun, H.C., Sohn, J.L., Lee, J.S. and Ro, S.T., 2003, "Performance Predictions of the Planar-type Solid Oxide Fuel Cell with Computational Flow Analysis (I) isothermal model," *Transactions of the KSME(B)*, Vol. 27, pp. 635~643
- (5) Ferguson, J.R., Fiard, J.M. and Herbin, R., 1996, "Three-Dimensional Numerical Simulation for Various Geometries of Solid Oxide Fuel Cells," *Journal of Power Sources*, Vol. 58, pp. 109~122.
- (6) Hyun, H.C., 2003, "Performance Analysis of Planar-type SOFC," *M.S. Thesis*, Seoul National University
- (7) Iwata, M., Hikosaka, T., Morita, M., Iwanari, T., Ito, K., Onda, K., Esaki, Y., Sakaki, Y. and Nagata, S., 2000, "Performance Analysis of Planar-type Unit SOFC Considering Current and Temperature Distributions," *Solid State Ionics*, Vol. 132, pp. 297~308.