

유동 해석을 이용한 평판형 고체 산화물 연료전지의 성능 특성 분석 (I) - 등은 모델 -

현희철* · 손정락† · 이준식** · 노승탁**

(2002년 12월 14일 접수, 2003년 3월 25일 심사완료)

Performance Predictions of the Planar-type Solid Oxide Fuel Cell with Computational Flow Analysis (I) - 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), Cell Voltage (셀전압), Current Density (전류밀도), Power Density (출력밀도)

Abstract

Parametric study for the analysis of performance characteristics of a planar-type solid oxide fuel cell (SOFC) using computational flow analysis is conducted. A planar-type SOFC, which is composed by two gas channels (fuel and air) and one set of anode-electrolyte-cathode assembly, is modeled as a two-dimensional isothermal case. Results of computational analysis of flow field including distributions of mass fractions in gas channels are used to the performance analysis of the fuel cell. Flow analysis makes it possible to consider current density distributions along the length of the cell in the process of performance analysis of the SOFC. As results of parametric study, it is found that the mole fraction of fuel at the inlet of fuel channel, operating pressure and temperature are closely related to the performance characteristics of SOFC.

기호설명

A : 면적 [m^2]
 D : 확산 계수 [m^2/s]
 F : Faraday 상수 (=96485 C/mole)
 ΔG : Gibbs 에너지 차 [$J/mole$]
 H : 유로 높이 [mm]
 i : 전류밀도 [A/m^2]
 L : 유로 길이 [mm]
 M : 분자량 [$kg/kmole$]
 n : 몰 유량 [$kmol/s$]
 P : 압력 [bar]
 r : 면적 비저항 [Ωm^2]

R : 기체 상수 (=8.31441 J/mole K)
 T : 온도 [K]
 V : 전압 [V]
 w : 출력밀도 [W/m^2]
 x : 길이 방향
 y : 높이 방향
 Y : 질량 분율
 δ : 두께 [mm]
 ρ : 밀도 [kg/m^3], 비저항 [Ωm]

하첨자

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

* 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

1. 서론

연료전지는 연료와 산소의 전기화학적 반응을 통하여 연료의 화학적 에너지를 전기 에너지로 직접 변환시키는 고효율, 환경 친화적 동력 장치이다. 특히 고체 산화물 연료전지의 경우 작동온도가 800~1000°C 로써 배기열의 효율적인 이용이 가능하여 열병합 발전, 하이브리드 시스템 구성 등이 용이하다. 뿐만 아니라 고온 작동 특성으로 인하여 연료 전지 내부에서의 내부 개질이 가능하므로 별도의 개질기(reformer) 없이도 메탄 등 수소 이외의 연료 사용이 가능하며, 추가의 개질기를 장착하더라도 그 크기를 최소화 시킬 수 있는 장점이 있다.

일반적으로 연료전지는 산소가 공급되는 공기극(cathode), 연료가 공급되는 연료극(anode), 그리고 두 전극 사이에서 이온의 이송에 필요한 전해질(electrolyte)로 구성된다. 고체 산화물 연료전지는 지르코니아(zirconia)가 특정 온도(약 800°C) 이상이면 산소 이온 전도체가 되는 특성을 이용하여 고형 물질인 지르코니아를 산소 이온을 통과시키는 전해질로 사용하는 것이다. 그리고, 연료극의 경우 니켈과 지르코니아의 분말 소결체가 사용되고, 공기극의 경우에는 전기 전도 산화물질이 주로 사용된다. 따라서, 고형 전해질을 사용하는 고체 산화물 연료전지는 액체 전해질을 사용하는 다른 연료전지에 비하여 취급이 용이한 장점이 있다.

고체 산화물 연료전지는 최근 들어 발전 동력원,⁽¹⁾ 마이크로 가스터빈과의 결합을 통한 하이브리드 동력원,⁽²⁾ 그리고 자동차의 보조 동력원⁽³⁾에 이르기까지 다양한 용도로 적용되고 있다. 이에 따라 고체 산화물 연료전지의 정확한 성능 해석 기법에 관한 연구도 활발하게 진행되고 있다. 그러나, 지금까지 이 분야에 대한 연구는 Pangalis 등⁽⁴⁾의 경우와 같이 열 및 물질의 포괄적(lumped)인 보존관계를 이용한 열역학적 성능해석이 대부분이다. 그러나 보다 정확한 성능을 예측하기 위해서는 두 전극 층, 그리고 전해질 내부에서의 유동, 열 및 물질전달 등이 고려되어야 한다.

연료전지 내부의 열 및 물질전달 현상과 관련해서는 Um 등⁽⁵⁾의 경우와 같이 자동차 주 동력원으로 사용되는 고분자(polymer) 연료전지 내부에서의 전달현상의 해석적 고찰을 위한 모델 개발을 목적으로 활발히 진행되어 오고 있다. 고체 산화물 연료전지의 경우에도 Ferguson 등⁽⁶⁾과 같이 평판 및 원통형 연료전지 내부의 열 및 물질전달 현

상이 연료전지 성능에 미치는 영향을 해석적으로 고찰하는 등 유사한 연구가 진행 중에 있다. 그러나 이러한 연구들은 연료전지에서의 전기화학적 반응을 포함하고 있는데, 이를 정확히 묘사할 수 있는 전기화학적 반응 모델은 아직도 충분히 개발되어 있지 않은 상태이다.

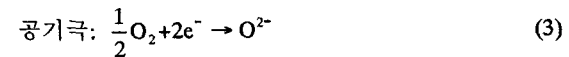
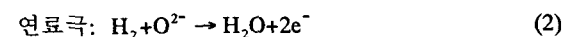
본 연구에서는 기존의 포괄적인 열 및 물질의 보존관계를 이용한 고체 산화물 연료전지의 성능 해석 방법을 보완하기 위하여 연료전지 내부에서의 유동현상을 성능해석 과정에 접목시켰다. 이를 위해서 고분자 연료전지에 적용한 Dutta 등⁽⁷⁾의 아이디어를 기반으로 고체 산화물 연료전지의 연료 및 공기 유로 내부에서의 유동과 물질 전달 현상을 해석하고, 그 결과를 연료전지의 성능 해석 과정에 연결시킴으로써 유동현상이 고려된 연료전지의 성능해석을 수행하였다.

2. 고체 산화물 연료전지 성능 모델

수소가 연료로 공급되는 연료전지의 화학 반응식은 다음과 같다.



고체 산화물 연료전지의 경우 전해질을 통하여 산소 음이온이 공기극으로부터 연료극으로 전달되며, 이 과정을 아래와 같이 전기 화학적 반응식으로 나타낼 수 있다.⁽¹⁾



위의 화학적 반응으로부터 생성되는 가역 출력(reversible power)은 생성물(H₂O)과 반응물(H₂, O₂) 간의 Gibbs 에너지 차이로 표현할 수 있으며, 이로부터 Nernst 포텐셜에 해당하는 개방 회로 전압(open-circuit voltage)은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$V_{oc} = -\frac{\Delta G^0}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \left[\frac{P_{\text{H}_2} / P^0 (P_{\text{O}_2} / P^0)^{1/2}}{P_{\text{H}_2\text{O}} / P^0} \right] \quad (4)$$

여기서, 개방 회로 전압이란 연료전지 내부에서 비가역성이 없다는 가정 하에서 생성 가능한 이론적 최대 전압으로써 위의 식에서와 같이 연료전지의 온도와 구성 물질의 분압에 의해서 결정됨을

알 수 있다.

그러나, 실제의 경우 화학 반응 과정 중의 여러 가지 비가역적인 요소로 인한 전압 손실 때문에 연료전지의 실제 셀 전압(cell voltage)은 개방 회로 전압보다 낮다. 연료전지 내부에서의 전압 손실의 종류로는 (1) 전극 면에서의 화학 반응 속도와 관련된 활성화 손실(activation loss), (2) 전자가 전극을 통과하는 과정과 이온이 전해질을 통과하는 과정 중 발생하는 손실로서 전극과 전해질의 소재 특성과 관련된 내부 저항에 의한 손실(ohmic loss), (3) 일부 전자가 외부 회로가 아닌 전해질을 통과 하면서 발생하는 내부 전류(internal current)에 의한 손실, 그리고 (4) 전극에서의 반응물질의 농도 변화에 따른 손실(concentration loss) 등이 있으나 본 연구에서는 고체 산화물 연료전지에서 가장 지배적인 손실로 알려져 있는 활성화 손실과 내부 저항에 의한 손실만을 고려하기로 한다.

활성화 손실은 각 전극에서 반응 물질로부터 전자나 이온을 발생시키는데 필요한 화학적 반응에 소모되는 전압손실에 해당된다. 따라서, 대부분의 연료전지는 활성화 손실을 줄이기 위하여 전극에서의 화학적 반응을 촉진시키기 위한 각종 촉매(catalyst)들을 전극 물질에 혼합하여 사용한다. 고분자 연료전지와 같은 저온형 연료전지의 경우에는 백금(platinum)과 같은 고가의 촉매를 사용해야 하지만 고온에서 작동하는 고체 산화물 연료전지의 경우 높은 작동온도로 인하여 상대적으로 활발한 화학적 반응이 가능하므로 니켈계열의 촉매를 사용하는 것이 일반적이다. 고체 산화물 연료전지에서의 활성화 손실과 관련된 모델은 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 그 중에서도 가장 보편적으로 적용되고 있는 Achenbach⁽⁸⁾가 사용한 모델을 채택하기로 한다.

$$\frac{1}{r_c} = \frac{4F}{RT} k_c \left(\frac{p_{O_2}}{p^0} \right)^m \exp\left(-\frac{E_c}{RT}\right) \quad (5a)$$

$$\frac{1}{r_a} = \frac{2F}{RT} k_a \left(\frac{p_{H_2}}{p^0} \right)^m \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (5b)$$

위 식에 사용되는 상수들의 값은 $m=0.25$, $E_c=160$ kJ/mole, $E_a=110$ kJ/mole, $k_c=1.49 \times 10^{10}$ A/m², $k_a=2.13 \times 10^8$ A/m² 이다. 이를 이용하면 활성화 손실에 의한 전압 손실량은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta V_{act} = i(r_c + r_a) \quad (6)$$

연료전지 내부 저항은 전극과 전해질을 구성하

고 있는 물질의 특성에 따라 변하는 값으로써 본 연구에서는 Kim 과 Suzuki,⁽⁹⁾ Massardo 와 Lubelli⁽¹⁰⁾ 등에 의해서 광범위하게 사용되고 있는 다음과 같은 내부 저항 모델을 사용하였다.

$$r_{ohm} = \rho_c \delta_c + \rho_a \delta_a + \rho_e \delta_e \quad (7)$$

여기서, 전해질, 연료극 및 공기극에서의 비저항 값은 Bessette 등⁽¹¹⁾이 적용한 아래의 모델을 사용하였다.

$$\rho_c = 0.0000294 \exp(10350/T) \quad (8a)$$

$$\rho_a = 0.0000298 \exp(-1392/T) \quad (8b)$$

$$\rho_e = 0.00008114 \exp(600/T) \quad (8c)$$

이로부터 연료전지 내부 저항에 의한 전압 손실량은 다음으로부터 구할 수 있다.

$$\Delta V_{ohm} = i r_{ohm} \quad (9)$$

위의 결과들을 종합하면 연료전지에서의 셀 전압은 아래와 같이 개방 회로 전압과 전압 손실의 차이에 해당된다고 볼 수 있다.

$$V_c = V_{oc} - (\Delta V_{act} + \Delta V_{ohm}) \quad (10)$$

셀 전압과 함께 연료전지의 성능과 직접적인 관련이 있는 전류밀도(current density)는 아래와 같이 연료(수소)의 몰(mole) 유량의 함수로 나타낼 수 있다.

$$i = \frac{2\dot{n}_{H_2} F}{A} \quad (11)$$

위의 두 식으로부터 연료전지의 출력밀도(power density)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{w}_{FC} = i V_c \quad (12)$$

따라서, 연료전지의 성능(출력)은 연료전지의 기하학적인 형상에 해당되는 반응면적 및 구성품 두께뿐만 아니라, 전류밀도와 셀 전압과 관련이 있는 압력, 온도, 반응 물질의 농도에 따라 변함을 알 수 있다. 이러한 변수들을 정확하게 예측하기 위해서는 연료전지 내부에서의 유동 현상에 대한 보다 구체적인 고찰이 필요하다.

3. 고체 산화물 연료전지 유동 모델

3.1 지배 방정식

고체 산화물 연료전지 내부 유동현상이 연료전지 성능에 미치는 영향을 고찰하기 위해서 Fig. 1 과 같이 평판형 연료전지모형을 기본으로 2 차원 단면(단면 A) 중에서 연료극, 전해질, 공기극 등 고체영역을 제외한 연료와 공기 유로를 유동해석 대상영역으로 설정하였다.

연료전지 내부 유동은 열 및 물질전달이 포함된 복합적인 물리적 현상을 나타내지만 본 연구에서는 열전달 문제를 배제시킴으로써 문제를 단순화시키기 위하여 연료전지 내부 온도를 일정하다고 가정하였다. 이 경우 연료전지 내부 유동을 지배하는 방정식은 2 차원 정상상태로 가정할 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다.

질량 보존 방정식:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (13)$$

길이(x)방향 운동량 보존 방정식:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\rho u u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v u) + \frac{\partial P}{\partial x} - 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ - \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right) = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

높이(y)방향 운동량 보존 방정식:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\rho u v) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v v) + \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \\ - 2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right) = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

물질 전달 방정식:

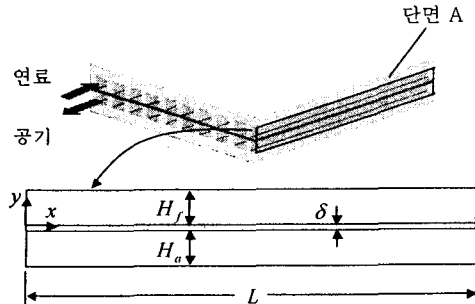


Fig. 1 The geometry of unit cell and computational domain

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\rho u Y_i) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v Y_i) \\ - \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho D \frac{\partial Y_i}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho D \frac{\partial Y_i}{\partial y} \right) = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

여기서, 첨자 i 는 유로 내부에서의 구성 물질의 종류를 나타낸다.

3.2 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:

$$x=0: \quad u = u_{f,m}, v = 0 \quad (17a)$$

$$x=L: \quad P = P_{out} \quad (17b)$$

$$y=H_f: \quad u = 0, v = 0 \quad (17c)$$

$$y=0: \quad u = 0, v = \frac{1}{\rho} \frac{i}{2F} (M_{H_2O} - M_{H_2}) \quad (17d)$$

공기 유로:

$$x=0: \quad P = P_{out} \quad (18a)$$

$$x=L: \quad u = -u_{a,in}, v = 0 \quad (18b)$$

$$y=-(H_a + \delta): \quad u = 0, v = 0 \quad (18c)$$

$$y=-\delta: \quad u = 0, v = \frac{1}{\rho} \frac{i}{2F} M_{O_2} \quad (18d)$$

고체 산화물 연료전지는 연료가 공급되는 연료극으로 물이 생성되므로 연료 유로는 연료에 해당하는 수소(H_2)와 수증기(H_2O)의 혼합물로 구성되어 있다. 공기 공급 유로는 산소(O_2)와 질소(N_2)가 혼합되어 공급된다고 가정하였다. 이러한 조건에서의 물질 전달 방정식을 해석하기 위한 경계 조건들은 다음과 같다.

연료 유로:

$$x=0: \quad Y_{H_2O} = Y_{H_2O,m}, Y_{H_2} = Y_{H_2,m} \quad (19a)$$

$$x=L: \quad \frac{\partial Y_{H_2O}}{\partial x} = \frac{\partial Y_{H_2}}{\partial x} = 0 \quad (19b)$$

$$y=H_f: \quad \frac{\partial Y_{H_2O}}{\partial y} = \frac{\partial Y_{H_2}}{\partial y} = 0 \quad (19c)$$

$$\begin{aligned} y=0: \quad -\rho D \frac{\partial Y_{H_2O}}{\partial y} + \rho v Y_{H_2O} = \frac{i}{2F} M_{H_2O} \\ -\rho D \frac{\partial Y_{H_2}}{\partial y} + \rho v Y_{H_2} = -\frac{i}{2F} M_{H_2} \end{aligned} \quad (19d)$$

공기 유로:

$$x = 0: \quad \frac{\partial Y_{O_2}}{\partial x} = \frac{\partial Y_{N_2}}{\partial x} = 0 \quad (20a)$$

$$x = L: \quad Y_{O_2} = Y_{O_2,in}, Y_{N_2} = Y_{N_2,in} \quad (20b)$$

$$y = -(H_i + \delta): \quad \frac{\partial Y_{O_2}}{\partial y} = \frac{\partial Y_{N_2}}{\partial y} = 0 \quad (20c)$$

$$y = -\delta: \quad \begin{aligned} -\rho D \frac{\partial Y_{O_2}}{\partial y} + \rho v Y_{O_2} &= \frac{i}{4F} M_{O_2} \\ -\rho D \frac{\partial Y_{N_2}}{\partial y} + \rho v Y_{N_2} &= 0 \end{aligned} \quad (20d)$$

연료전지는 연료극에서의 수소와 공기극에서의 산소의 흡입을 통하여 전기화학적 반응을 일으키며 그 과정 중에 전류를 생성한다. 위의 경계조건에서는 각 전극 표면에서의 물질 전달량을 식 (11)의 관계를 이용하여 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. 이와 유사한 모델을 Dutta 등⁽⁷⁾이 제안하여 고분자 연료전지에 적용한 사례가 있는데 Dutta 등⁽⁷⁾의 경우에는 전극 표면에서의 물질 전달량과 전류밀도와의 관계를 본 연구에서와 같이 경계조건으로 처리하지 않고 대신 지배 방정식의 생성항 (source term)의 형식으로 반영하였다. 이 경우 생성항은 유동장 경계가 아닌 경계와 인접한 유동장

내부에 존재하게 하였는데 이는 물리적으로 적합하지 않다고 판단된다.

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.

4. 결과 및 고찰

고체 산화물 연료전지의 형상으로는 원통형 및 평판형이 있으나 본 연구에서는 해석의 편의성을 위하여 Fig. 1 과 같은 평판형으로 선정하였다. 성능해석 대상 연료전지의 기본 형상 및 유동 조건들은 Table 1 과 같다.

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.

4.1 유로 내에서의 물질의 질량 분포

Fig. 2 는 연료 유로 내에서의 수소와 수증기, 공기 유로 내에서의 산소의 질량분율 분포를 보여주고 있다. 연료 유로와 공기 유로에서의 유동의 방향은 서로 반대 방향인 대향류이다. 연료 유로의 하단인 연료전지의 연료극 부근에서는 연료 유동의 방향에 따라 수소의 질량 분포는 작아지고, 반면에 수증기의 질량 분포는 커진다. 공기 유로의

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

Geometric Dimensions	Length	50 mm	
	Channel height	Fuel	2 mm
		Air	2 mm
	Thickness	Anode	0.02 mm
Electrolyte		0.01 mm	
Cathode		0.02 mm	
Operating Conditions	Temperature	1150 K	
	Pressure	1 bar	
	Flow type	Counter flow	
	Cell voltage	0.7 V	
Inlet Conditions	Velocity	Fuel	1 m/s
	Air	3 m/s	
Mole fraction	Fuel	H ₂ :H ₂ O=0.3:0.7	
	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
	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	

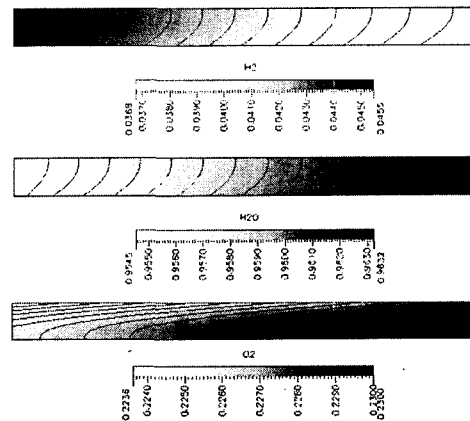


Fig.2 Contours of mass fractions of each species in each channel

상단인 연료전지의 공기극 부근에서는 산소의 이온화로 인하여 공기 유동 방향에 따라 산소의 질량 분포는 작아진다.

4.2 연료 유로 입구조건에의 영향

4.2.1 유입 연료의 물 분율의 영향

본 연구에서는 연료 유로 입구에서는 전처리 과정을 통하여 완전히 개질된 상태에서의 수소와 고체 산화물 연료전지 시스템에서 주로 사용하는 수증기 재순환 개념에 의하여 유입된 수증기가 혼합되어 유입된다고 가정하였다. Fig. 3 은 다른 작동 조건은 Table 1 과 동일하고 연료 입구에서의 수소와 수증기의 물 분율만 변화시킬 경우 전류밀도의 연료전지 길이 방향으로의 변화를 보여주고 있다. 길이 방향으로 전류밀도의 변화 구배는 유사하나 수소의 물 분율이 높을수록 전류밀도가 높다.

Fig. 4 는 수소의 물 분율 변화에 따른 연료전지의 성능을 나타낸 것이다. 이 결과는 Table 1 의 데이터를 기준으로 셀 전압을 변화시키면서 각각의

셀 전압의 상태에서 유입 연료의 물 분율의 변화에 따른 전류밀도와 출력밀도를 구한 것이다. 여기서 전류 밀도란 연료전지의 길이방향 전류밀도의 평균값을 의미한다. Fig. 3 의 경우와 마찬가지로 수소의 물 분율 상승이 연료전지의 성능향상에 도움을 줄 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 고체 산화물 연료전지 시스템에서 내부 개질 등의 목적으로 채택하는 수증기 재순환 방식은 연료전지 자체의 성능에는 좋은 영향을 미치지 않는다고 볼 수 있다. 그러나, 이 경우 개질 과정에서의 열 공급이 고려된 연료전지의 전체적인 시스템 성능을 기준으로 판단이 되어야 할 것이다.

4.2.2 연료 유로 유입 속도의 영향

연료 유로의 유입 속도는 유로 내에서의 구성 물질의 물질 전달 특성에 영향을 미치게 된다. 그 중에서도 전극 표면에서의 물질의 분포 특성은 전류밀도의 크기와 직접적인 관련이 있다. 연료의 유입 속도의 영향을 고찰하기 위하여 Table 1 의 기준 연료전지 데이터에서 연료의 유입 속도만을

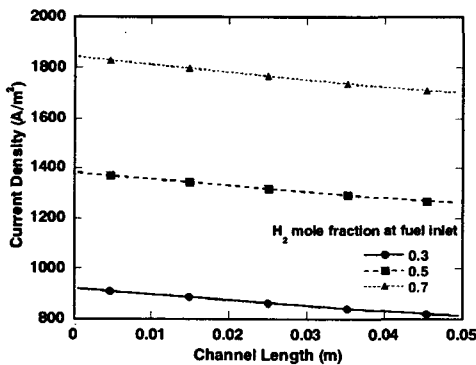


Fig. 3 Distributions of current density along axial direction of the fuel cell with various hydrogen mole fractions at fuel inlet

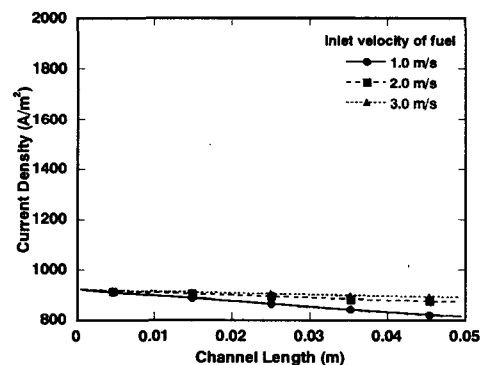


Fig. 5 Distributions of current density along axial direction of the fuel cell with various inlet velocities in fuel channel

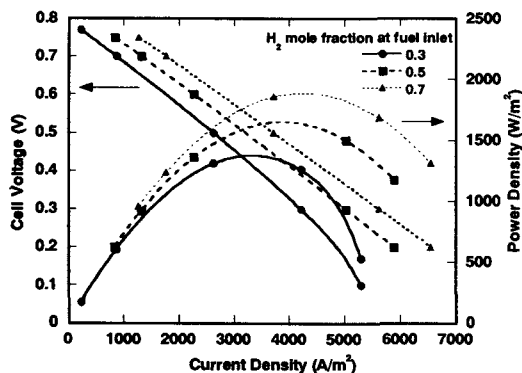


Fig. 4 Characteristics of fuel cell performance with various hydrogen mole fractions at fuel inlet

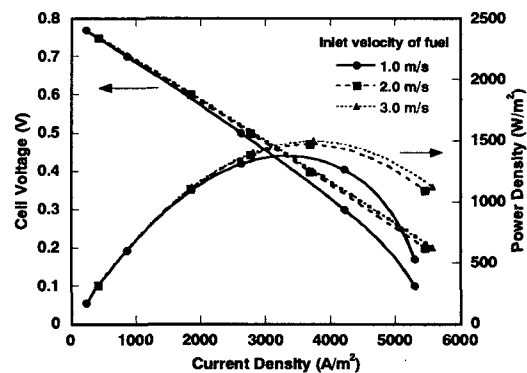


Fig. 6 Characteristics of fuel cell performance with various inlet velocities in fuel channel

변화시켜서 유동해석 및 연료전지 성능해석을 수행하여 그 결과를 Fig. 5 와 6 에 나타내었다. 연료 유로의 유입 속도가 빠르면 연료극 표면에서 유동 방향으로의 연료(수소)가 상대적으로 균일하게 분포되기 때문에 전류밀도 역시 균일한 형태로 나타나게 된다. 연료전지 길이 방향으로 전류밀도가 균일하다는 것은 평균 전류밀도가 높아지는 것을 의미하기 때문에 연료전지의 성능 향상과 관련된 긍정적인 요인이 될 수 있다. 그러나, Fig. 3 및 4 와 비교해 보면 연료의 유입 속도는 유입 연료의 물 분율에 비하여 전류밀도의 변화에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있다.

4.3 작동온도의 영향

연료전지의 작동온도가 상승하면 반응물과 생성물의 Gibbs 에너지 차이가 줄어들게 되므로 Nernst 포텐셜이 낮아져서 결과적으로 개방 회로 전압이 낮아지게 된다. 그러나, 온도가 상승하면 각종 전압손실이 작아지므로 셀 전압은 커지게 되

는데 이 점이 고체 산화물 연료전지와 같은 고온형 연료전지의 장점이다.

Fig. 7 은 연료전지의 작동온도의 변화에 따른 연료전지의 성능특성을 나타내고 있다. 넓은 영역의 전류밀도의 범위에서는 예상대로 동일한 전류밀도 조건에서 작동온도가 높을수록 셀 전압이 커지고 출력밀도도 증가함을 알 수 있다. 그러나 전류밀도가 4000A/m² 이상의 영역에서는 오히려 작동온도가 높을수록 셀 전압이 떨어지는 경향을 보이고 있는데 이는 본 연구에서 적용한 등은 모델의 한계와 관련이 있다고 판단된다. 실제의 경우에는 연료전지 내부에서 전기화학적 반응으로 인하여 연료전지의 온도가 연료전지의 길이방향으로 증가할 것이므로 평균 작동온도를 상승시켜 전압 손실이 감소할 것이므로 셀 전압이 커질 것으로 예상된다. 길이방향의 온도분포를 고려하기 위해서는 연료전지 내에서의 물질전달 특성과 함께 열전달 특성이 함께 고려되어야 하며 이 분야에 대해서는 후속 논문에서 그 결과를 고찰하고자 한다

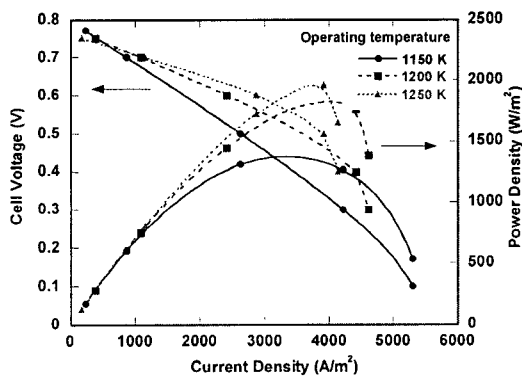


Fig. 7 Characteristics of fuel cell performance with operating temperature

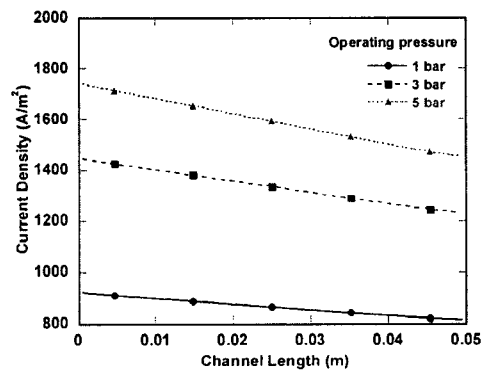


Fig. 9 Distributions of current density along axial direction of the fuel cell with various operating pressure

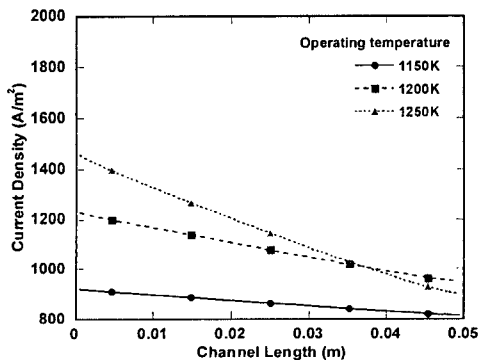


Fig. 8 Distributions of current density along axial direction of the fuel cell with various operating temperature

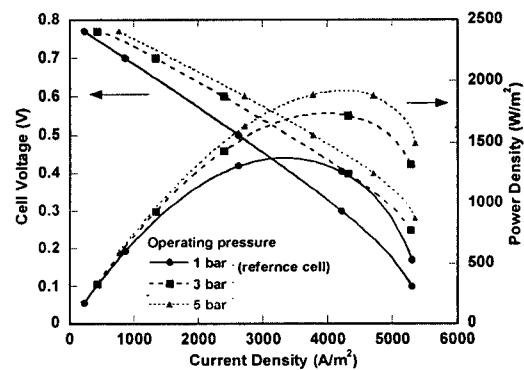


Fig. 10 Characteristics of fuel cell performance with various operating pressure

Fig. 8 은 작동온도의 변화에 따른 전류밀도의 유로 방향의 분포특성을 나타내고 있다. 작동온도가 높을수록 전류밀도의 크기는 전반적으로 증가하지만 유로 방향으로 감소하는 구배가 커지는데 이 역시 앞에서 기술한 등온모델의 한계로 인한 유로 방향으로의 균일한 온도에 따른 결과라고 판단된다.

4.4 작동압력의 영향

본 연구에서 연료전지의 작동압력이란 연료전지 출구의 압력으로 설정하였다. Fig. 9 와 10 에서와 같이 작동압력이 높을수록 전류밀도가 커지며, 그 결과 셀 전압과 출력밀도가 상승하여 성능이 향상됨을 알 수 있다. 작동압력이 1bar 에서 5bar 로 상승할 경우 최대 출력밀도는 1380W/m² 에서 1890W/m² 로 약 37% 정도 향상되었다. 그러나, 연료전지 시스템의 성능을 고찰할 경우에는 작동압력을 상승시키기 위하여 필요한 가압장치에 소모되는 출력을 함께 고려하여야 한다.

5. 결론

본 연구에서는 연료전지 내부에서의 물질전달을 포함한 유동현상이 고려된 성능해석 절차를 통하여 고체 산화물 연료전지의 성능 특성을 분석하였다. 연료전지 내부에서의 유동 현상과 연료전지의 특성은 연료전지 전극 표면에서의 물질 전달량과 전류밀도와의 관계, 그리고 연료전지 유로 내부에서의 각 구성 물질의 분압과 개방 회로 전압과의 관계 등을 통하여 서로 연계되어 있다.

이러한 방법을 통하여 고체 산화물 연료전지의 성능 특성을 분석한 결과 다음과 같은 주요 결과들을 도출하였다.

(1) 연료 유로로 유입되는 수증기와 수소의 혼합물 중 수소의 몰 분율이 높을수록 연료전지의 성능은 향상된다.

(2) 연료 유로로 유입되는 혼합물의 유입 속도는 연료전지 길이방향으로 전류밀도의 분포를 균일하게 하여 평균 전류밀도의 값을 상승시켜 주기는 하지만 수소 몰 분율 만큼 연료전지의 성능에 크게 기여하지 못한다.

(3) 작동온도가 높을수록 연료전지의 성능이 향상되는 현상을 확인할 수 있었다. 그러나, 본 연구에서 적용한 등온모델의 한계로 인하여 연료전지 길이방향의 온도 변화가 고려되지 않아 전류밀도가 높은 경우 셀 전압이 떨어지는 현상이 발생하였다.

(4) 작동압력이 높을수록 연료전지의 성능이 향상됨을 알 수 있었다. 이는 가압형 연료전지가 저압형보다 성능이 우수함을 의미하지만 이와 관련된 최종 판단은 가압에 필요한 에너지 소모량을 고려한 연료전지 전체 시스템의 성능 분석을 통해서 이루어져야 한다.

후 기

본 연구는 2002 년도 마이크로 열시스템 연구센터 지원에 의하여 수행되었음.

참고문헌

- (1) Larminie, J. and Dicks, A., 2000, *Fuel Cell System Explained*, John Wiley & Sons, Inc.
- (2) Campanari, S., 2000, "Full Load and Part-Load Performance Prediction for Integrated SOFC and Microturbine," *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 122, pp. 239~246
- (3) Mukerjee, S., "Solid Oxide Fuel Cell Auxiliary Power Init," *Proceedings of an international workshop on fuel cell technology for advanced vehicles (Edited by Shah, R.K. and Kandlikar, S.G.)*, Rochester Institute of Technology, Rochester, NY, USA, April 23~25, 2002
- (4) Pangalis, M.G., Martinez, R.F. and Brandon, N.P., 2002, "Integration of Solid Oxide Fuel Cells into Gas Turbine Power Generation Cycles, Part 1: Fuel Cell Thermodynamic Modeling," *Proceeding of ImechE, Part A: Journal of Power and Energy*, Vol. 216, pp.129~144
- (5) Um, S., Wang, C.-Y. and Chen, K.S., 2000, "Computational Fluid Dynamics Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cells," *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 147, pp. 4485~4493
- (6) Furguson, 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
- (7) Dutta, S., Shimpalee, S. and Van Zee, J.W., 2001, "Numerical Prediction of Mass-Exchange Between Cathode and Anode Channels in a PEM Fuel Cell," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 2029~2042
- (8) Achenbach, E., 1994, "Three-Dimensional and Time-Dependent Simulation of a Planar Solid Oxide Fuel Cell Stack," *Journal of Power Sources*, Vol. 49, pp. 333~348
- (9) Kim, J. H. and Suzuki, K., 2001, "Performance Analysis of SOFC/MGT Hybrid System," *Proceedings of KSME 2001 Spring Annual Meeting D*, pp.703-707
- (10) Massardo, A. and Lubelli, F., 1998, "Internal

Reforming Solid Oxide Fuel Cell – Gas Turbine Combined Cycle (IRSOFC-GT): Part A – Cell Model and Cycle Thermodynamic Analysis,” ASME Paper 1988-GT-577

(11) Bessette, N.F., Wepfer, W.J. and Winnick, J., 1995. “A Mathematical Model of a Solid Oxide Fuel Cell,” *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 142, pp. 3792~3800