

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.2.157

고체 산화물 연료전지를 위한 물성치 및 전기화학반응의 수치해석 모델링[§]

박준근* · 김선영* · 배중면**

* KAIST 기계공학과

Numerical Modeling of Physical Property and Electrochemical Reaction for Solid Oxide Fuel Cells

Joonguen Park*, Sunyoung Kim* and Joongmyeon Bae**

* Dept. of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology

(Received September 16, 2009 ; Revised October 8, 2009 ; Accepted October 13, 2009)

Key Words: Solid Oxide Fuel Cell(고체산화물연료전지), Physical Property(물성치), Electrochemical Reaction(전기화학반응), Numerical Analysis(수치해석)

초록: 고체산화물연료전지는 세라믹 물질로 이루어지며, 세라믹 물질의 물성치는 작동조건에 따라 달라진다. 따라서, 높은 신뢰성을 가지는 시뮬레이션 모델을 개발하기 위해서는 세라믹 물질의 물성치를 정확하게 예측할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 고체산화물연료전지의 성능에 영향을 미치는 여러가지 물성치를 선택하고 그 물성치를 위한 시뮬레이션 모델이 개발되었다. 개회로전압을 위한 깁스에너지, 활성화손실을 위한 교환전류밀도, 저항손실을 위한 전기전도도가 계산되었다. 또한, 다공성 전극 내부의 물질전달 해석을 위해서 분자 확산과 누셀확산을 함께 고려하는 유효확산계수가 계산되었다. 이러한 계산과정 후에 물성치 모델과 전기화학반응 모델이 동시에 시뮬레이션 되었다. 해석코드의 검증을 위해서 전산해석 결과는 실험결과 및 Chan 등에 의해서 수행된 이전 연구결과와 비교되었다.

Abstract: Solid oxide fuel cells (SOFCs) are commonly composed of ceramic compartments, and it is known that the physical properties of the ceramic materials can be changed according to the operating temperature. Thus, the physical properties of the ceramic materials have to be properly predicted to develop a highly reliable simulation model. In this study, several physical properties that can affect the performance of SOFCs were selected, and simulation models for those physical properties were developed using our own code. The Gibbs free energy for the open circuit voltage, exchange current densities for the activation polarization, and electrical conductivity for the electrolyte were calculated. In addition, the diffusion coefficient—including the binary and Knudsen diffusion mechanisms—was calculated for mass transport analysis at the porous electrode. The physical property and electrochemical reaction models were then simulated simultaneously. The numerical results were compared with the experimental results and previous works studied by Chan et al. for code validation.

- 기호설명 -

c_p : 비열(J/g/K)

$D_{A,eff}$: 유효 확산계수(m²/s)

D_{AB} : 분자 확산계수(m²/s)

$D_{k,A}$: 누셀 확산계수(m²/s)

E_a : 활성화에너지(J/mol)

F : 패러데이 상수

h : 엔탈피(J/kg)

j : 전류밀도(A/m²)

j_0 : 교환전류밀도(A/m²)

M_A : 분자량(g/mol)

n_e : 이온개수

P_0 : 전체압력(bar)

P_i : 분압(bar)

R : 가스상수(8.3145, J/mol/K)

R_p : 저항(Ω/cm²)

§ 이 논문은 2009년도 열공학부문 춘계학술대회(2009. 5. 20-22, BEXCO) 발표논문임

† Corresponding Author, jmbae@kaist.ac.kr

- r_0 : 교환전류밀도 상수(A/m²)
- f : 평균공극지름(m)
- t : 전극 및 전해질 두께(m)
- T : 절대온도(K)
- V : 전압(V)

그리스문자

- β : 전하전도계수
- γ : 교환전류밀도 상수
- Δg : 깁스 에너지(J/mol)
- Δh : 엔탈피(J/mol)
- Δs : 엔트로피(J/mol/K)
- ϵ : 다공도
- ξ : 비틀림도
- η_{act} : 활성화에너지 손실
- η_{ohmic} : 저항 손실
- η_{conc} : 농도 손실
- σ : 전기전도도(W/m/K)
- σ_0 : 전기전도도 계수(W/m/K)

아래첨자

- a : anode
- c : cathode

1. 서 론

현재 친환경 동력원의 필요성이 증가함으로 인해 연료전지에 대한 관심이 높아지고 있다. 연료전지는 수소를 활용하여 전기를 생산하는 에너지변환장치로서 효율이 높고 소음이 발생하지 않으며 오염물질을 생산하지 않는다는 장점이 있다.⁽¹⁾ 다양한 연료전지 중 800℃ 이상에서 동작하는 고체산화물연료전지(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)는 저온형 연료전지에 비해 귀금속 촉매를 사용하지 않으므로 제조비용이 저렴하고 수소 이외에도 탄화수소를 연료로 사용할 수 있으며, 에너지 손실이 적고 폐열을 활용할 수 있다.⁽²⁾ 그러나 SOFC는 밀폐형 구조이고 표면에 전류가 흐르기 때문에 내부의 온도변화 및 가스조성변화를 측정하는 것이 어렵다. 이러한 정보는 SOFC를 설계할 때 중요한 역할을 담당하므로 수치해석 기법을 활용해서 결과를 예측해야한다.⁽³⁾

SOFC 성능 예측을 위한 다양한 수치해석 기법들이 개발되어 왔다. Iwata 등⁽⁴⁾은 평판형 SOFC를 위

한 전기화학모델을 개발하였고, Calise 등⁽⁵⁾은 원통형 SOFC를 위한 수치해석 모델을 개발하였다. Zhu 등⁽⁶⁾은 활성화손실 모델을 연구하고, Kim 등⁽⁷⁾은 농도손실 모델을 개발하였다. 이상의 연구와 함께 세라믹 재료의 물성치 변화를 예측할 수 있어야한다. 세라믹 재료는 온도에 따라 물성치가 달라지며 이러한 물성치 변화는 SOFC 성능에 중요한 영향을 미치기 때문이다. 그러나 기존의 연구에서는 세라믹 재료의 물성치를 예측하기 위한 연구가 심도있게 이루어지지 않았으며 중요한 물성치를 상수로 처리하는 경우가 많았다. 그러므로 본 연구에서는 SOFC의 전기화학반응 모델에 중요한 영향을 미치는 물성치를 선택하고 각 물성치의 예측모델을 개발한다. 그리고 다양한 온도에 따른 물성치의 계산결과와 실험결과를 비교함으로써 신뢰성을 검증한다. 최종적으로 물성치 모델과 전기화학반응 모델을 함께 계산하여 SOFC 단전지 성능을 예측할 수 있는 모델을 개발한다.

2. 전산해석 모델

SOFC의 전압에 영향을 주는 다양한 변수들이 존재하지만 일반적인 가정을 통해서 전압계산 모델을 단순화할 수 있다. 본 논문에서는 단전지의 전압을 계산하기 위해 식 (1)을 사용한다.⁽⁸⁾

$$\text{Voltage} = \text{OCV} - \eta_{act} - \eta_{ohmic} - \eta_{conc} \tag{1}$$

2.1 개회로전압(Open Circuit Voltage)

개회로전압(OCV)은 이론적인 최대 전압이며 식 (2)와 같이 Nernst 식을 통해서 계산할 수 있다.⁽⁹⁾

$$\text{OCV} = \frac{-\Delta \bar{g}}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{p_{H_2} p_{O_2}^{1/2}}{p_{H_2O}} \right) \tag{2}$$

OCV 계산에서 가장 중요한 변수는 깁스에너지(Gibbs energy, Δg)이다. 깁스에너지의 계산식은 열역학 분야에서 오랫동안 연구되어왔으며, 엔탈피(Enthalpy, Δh)와 엔트로피(Entropy, Δs)를 통해서 계산할 수 있다. 엔탈피와 엔트로피는 비열의 적분으로 구할 수 있으며 상세한 계산식은 Table 1에 나타낸다.⁽¹⁰⁾ 각 화학종에 따른 상수는 Table

Table 1 Thermodynamics parameters⁽¹⁰⁾

$\Delta\bar{g}=\Delta\bar{h}-T\Delta\bar{s}$	(3)
$\Delta\bar{h}=\bar{h}_{\text{H}_2\text{O}}-\bar{h}_{\text{H}_2}-0.5\bar{h}_{\text{O}_2}$	(4)
$\Delta\bar{s}=\bar{s}_{\text{H}_2\text{O}}-\bar{s}_{\text{H}_2}-0.5\bar{s}_{\text{O}_2}$	(5)
$\bar{h}_T=\bar{h}_{298.15}+\int_{298.15}^T \bar{c}_p dT$	(6)
$\bar{s}_T=\bar{s}_{298.15}+\int_{298.15}^T \bar{c}_p \frac{dT}{T}$	(7)
$\bar{c}_p=A+B\cdot T^C+D\cdot T^E+F\cdot T^G$	(8)

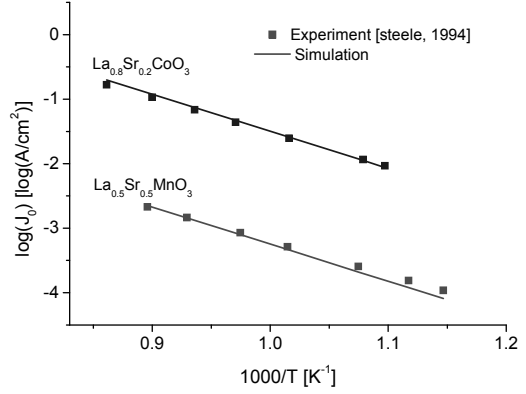


Fig. 1 Exchange current density of cathode

Table 2 Coefficients of specific heat⁽¹⁰⁾

	A	B	C	D	E	F	G
H ₂ O	143.05	-58.040	0.25	8.2751	0.5	-0.036989	1.0
H ₂	56.505	-22222.6	-0.75	116500	-1	-560700	-1.5
O ₂	37.432	2.0102e-5	1.5	-178570	-1.5	2368800	-2.0

2에 정리되어 있다.

2.2 활성화손실(Activation polarization, η_{act})

전기화학반응이 일어나기 위해서는 활성화에너지(Activation energy)를 활용하여 에너지 장벽을 넘어서야 한다. 이 과정에서 발생하는 에너지 손실이 활성화손실(Activation polarization)이며 Butler-Volmer 식을 통해 계산할 수 있다.

$$j=j_0 \left\{ \exp\left(\beta \frac{n_e F \eta_{act}}{RT}\right) - \exp\left(- (1-\beta) \frac{n_e F \eta_{act}}{RT}\right) \right\} \quad (9)$$

Butler-Volmer 식은 복잡한 계산을 필요로 하기 때문에 가정을 통해서 Tafel 식과 선형전류전위관계(Linear current-potential relation)로 나타낼 수 있다.⁽¹¹⁾ 활성화손실이 높은 영역(0.28V)에서는 Butler-Volmer 식의 두 번째 항이 첫 번째 항보다 아주 작기 때문에 두 번째 항을 무시할 수 있다. 그러므로 높은 활성화손실 영역에서는 식 (10)과 같이 Tafel 식을 사용할 수 있다.

$$\eta_{act} = -\left(\frac{RT}{\beta n_e F}\right) \ln(j_0) + \left(\frac{RT}{\beta n_e F}\right) \ln(j) \quad (10)$$

활성화 손실이 낮은 영역(0.1V 이하)에서는 Butler-Volmer 식이 일차함수와 같은 형태를 가지기 때문에 식 (11)과 같이 선형전류전위관계를 적용할 수 있다.

$$\eta_{act} = \frac{RT}{n_e F j_0} j \quad (11)$$

그러나 전기화학반응의 정반응 및 역반응이 동일한 반응성을 가진다고 가정할 경우 β 는 0.5가 되며, Butler-Volmer 식을 식 (12)와 같은 형태로 변화시킬 수 있다. 본 논문에서는 활성화손실을 계산하기 위하여 식 (12)를 사용한다.

$$\eta_{act} = \frac{2RT}{n_e F} \ln \left(\frac{j}{2j_0} + \sqrt{\left(\frac{j}{2j_0}\right)^2 + 1} \right) \quad (12)$$

활성화손실 계산 시 가장 중요한 영향을 미치는 물성치는 교환전류밀도(Exchange current density)이다. 공기극의 종류는 아주 다양하고, 조성에 따른 성능차이도 크기 때문에 실험에 사용되는 재료의 교환전류밀도를 측정해야 한다. Fig. 1은 공기극으로 사용되는 LSM, LSC의 측정결과와 해석결과를 비교한 것이다. Steel 등⁽¹²⁾의 측정결과를 이용하고 식

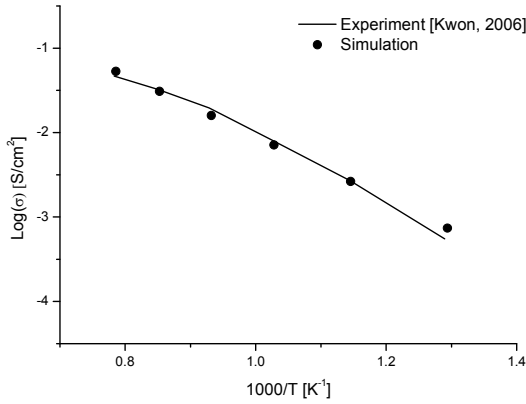


Fig. 2 Ionic conductivity of electrolyte

(13)과 같이 Costamagna 등⁽¹³⁾의 모델을 수정하였다. $\gamma_{0,c}$ 는 $1.49 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$, E_a 는 $1 \times 10^5 \text{ J/mol}$ 을 사용한다.

$$j_{0,c} = \gamma_{0,c} \left[\frac{P_{O_2}}{P_0} \right]^{0.25} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (13)$$

연료극의 교환전류밀도 역시 SOFC 성능에 중요한 영향을 미친다. 본 연구에서는 SOFC의 연료극으로 많이 이용되는 Ni/YSZ를 이용한다. 실험결과와 해석결과를 비교함으로써 모델링의 신뢰성을 검증한 Koide 등⁽¹⁴⁾의 결과(식 (14))을 이용한다. R_p 는 0.235를 사용한다.

$$j_{0,a} = \frac{RT}{nFR_p} \quad (14)$$

2.3 저항손실(Ohmic polarization, η_{ohmic})

저항손실은 전자가 전극을 통과하거나 이온이 전해질을 통과할 때 발생하는 전기적 저항에 의한 손실이다. 저항손실은 전극 및 전해질에서 모두 발생할 수 있지만 전해질을 통과하는 이온으로 인한 저항이 전극을 통과하는 전자로 인한 저항보다 더 크기 때문에 본 논문에서는 이온전도에 의한 전기저항만을 고려한다.⁽¹⁵⁾ 전기저항손실은 식 (15)를 통해서 계산할 수 있다.⁽¹⁶⁾

$$\eta_{ohmic} = j \frac{t}{\sigma} \quad (15)$$

저항손실 계산을 위해서 산소의 이온전도도가 정확하게 계산되어야 한다. 이온전도도는 식 (16)

과 같이 Kilner 등⁽¹⁷⁾의 식을 통해서 계산할 수 있다. Fig. 2는 계산결과와 Kwon 등⁽¹⁸⁾이 측정한 결과를 비교한 그래프이다.

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{T} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (16)$$

2.4 농도손실(Concentration polarization, η_{conc})

SOFC의 전기화학반응이 일어나기 위해서 유로에서 공급되는 수소와 산소가 다공성 매질인 전극을 통과한 후 전극과 전해질의 경계면에 도달해야 한다. 그러나 유로에 비해 다공성 매질 내부의 확산속도는 아주 낮기 때문에 필요한 반응물이 경계면에 도달하지 못하는 물질전달한계(Mass transfer limitation)이 발생할 수 있다. 이러한 물질전달저항으로 인한 손실이 농도손실(η_{conc})이며 식 (17)-(18)로 나타낼 수 있다.

$$\eta_{conc,a} = -\frac{RT}{2F} \ln \left[\frac{(1-(RT/2F)(t_a/D_{H_2,eff}P_{H_2})j)}{(1+(RT/2F)(t_a/D_{H_2O,eff}P_{H_2O})j)} \right] \quad (17)$$

$$\eta_{conc,c} = -\frac{RT}{4F} \ln \left[(p_0/\delta_{O_2}) - ((p_0/\delta_{O_2}) - p_{O_2}) \right] - \frac{RT}{4F} \ln \left[\frac{p_0/\exp((RT/4F)(\delta_{O_2}t_c/D_{c,eff}P_0)j)}{p_{O_2}} \right] \quad (18)$$

$$\delta_{O_2} = \frac{D_{O_2,eff}}{D_{O_2,eff} - D_{N_2,eff}} \quad (19)$$

농도손실 계산 시 가장 중요한 변수는 확산계수이다. 확산 매커니즘은 분자확산(Molecular diffusion)과 누센확산(Knudsen diffusion)으로 나눌 수 있다.⁽¹⁹⁾ 분자확산은 유로에서 주로 발생하며 식 (20)과 같이 Chapman-Enskog 이론을 통해 계산할 수 있다.⁽²⁰⁾ σ_{AB} 및 Ω_{AB} 는 Lennard-Jones 계수를 통해 구할 수 있다.

$$D_{AB} = 1.853 \times 10^{-3} \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{1/2} \frac{T^{3/2}}{p \sigma_{AB}^2 \Omega_{DAB}} \quad (20)$$

누센확산은 분자가 다공성 매질을 통과할 때 적용할 수 있으며 식 (21)을 통해 계산할 수 있다.

$$D_{Ak} = 97.0 \bar{\Gamma} \sqrt{\frac{T}{M_A}} \quad (21)$$

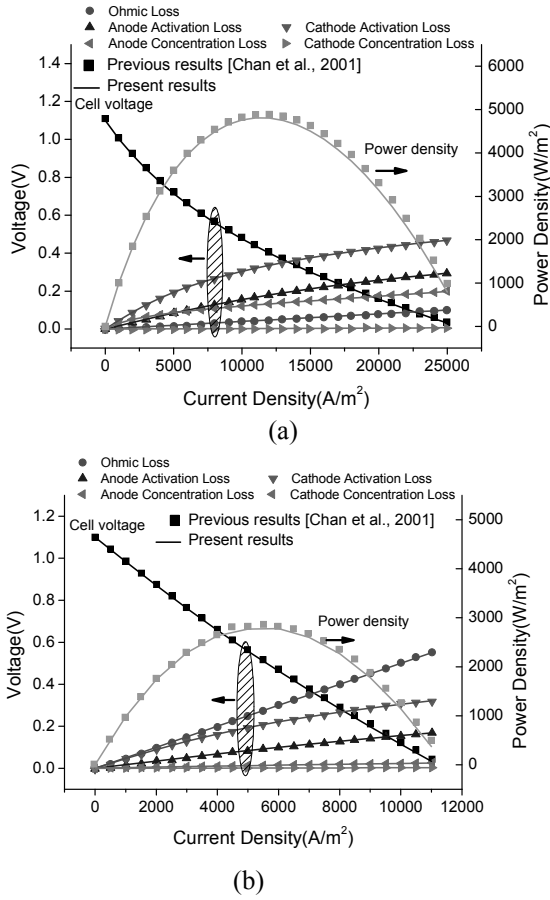


Fig. 3 IV curve (a) anode supported SOFC (b) electrolyte supported SOFC

최종적인 확산계수는 분자확산계수와 누선헌산계수의 조화평균으로 구할 수 있다. 그리고 다공도(porosity)와 비틀림도(tortuosity)의 영향을 고려하여 식 (22)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{1}{D_{A,eff}} = \left(\frac{\xi}{\varepsilon} \right) \left(\frac{1}{D_{AB}} + \frac{1}{D_{Ak}} \right) \quad (22)$$

3. 검증

2장에서 제시된 세라믹 물성치 모델을 이용하여 주어진 온도 및 압력에 대한 물성치를 계산한다. 계산된 물성치를 이용하여 전기화학반응 해석을 위한 OCV, 활성화손실, 저항손실, 농도손실을 계산한다. 전류밀도 변화에 따른 전압을 계산함으로써 전압-전류밀도 그래프를 그릴 수 있다.

해석결과를 검증하기 위해서 기존에 발표된 연구결과를 이용한다. Fig. 3은 Chan 등⁽¹¹⁾의 해석결과와

Table 3 Calculation based parameters

Temperature(K)	1073
Pressure(bar)	1.0
Exchange current density, anode(A/m ²)	5300
Exchange current density, cathode(A/m ²)	2000
Porosity(%)	30
Tortuosity	6

Table 4 SOFC single cell

Temperature(K)	1073
Pressure(bar)	1
Porosity(%)	30
Tortuosity	6
Material	Anode Ni/YSZ
	Electrolyte 8YSZ
	Cathode LSM
Thickness	Anode 750μm
	Electrolyte 20μm
	Cathode 30μm

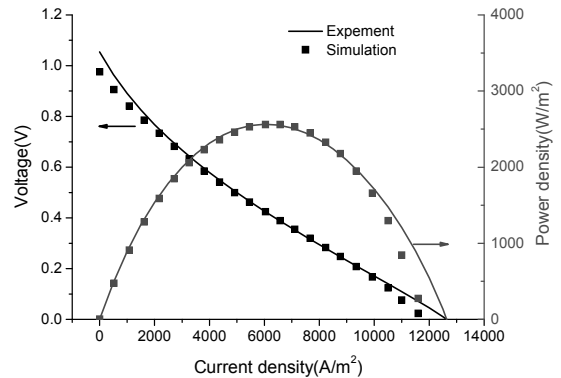


Fig. 4 Comparison between experimental results and numerical results

본 논문의 연구결과를 비교한 것이다. Fig. 3(a)는 연료극지지체 SOFC의 결과이며, Fig. 3(b)는 전해질 지지체 SOFC의 결과이다. 전류밀도-전압 곡선 및 각각의 전극손실이 일치함을 보여주고 있다. 이 계산의 경우 기존 연구와 계산환경을 일치시키기 위해 교환전류밀도를 상수로 가정한다. 계산을 위한 상수값은 Table 3에 나타낸다.

Fig. 4는 SOFC 단전지의 실험결과와 해석결과를 비교한 것이다. 실험에 사용된 전극 및 전해질 물질, 두께, 작동조건은 Table 4에 나타낸다.

그리고 세라믹 재료의 물성치 계산을 위한 상수는 2장에서 제시된 상수값을 사용한다. 활성화손실이 결정적인 영향을 미치는 저전류밀도 영역에서는 약간의 오차가 발생한다. 이것은 실험 시 정확한 온도유지가 어렵고 실제 실험에 사용된 재료와 교환전류밀도가 같은 조성을 가지더라도 제조과정 및 열처리 과정의 차이가 존재하기 때문이다. 그러나 최대 오차 5% 이내로 상당히 높은 정확도를 가진다.

4. 결 론

SOFC는 세라믹 재료로 만들어지며 세라믹 재료의 물성치는 온도에 따라 달라진다. 그러므로 신뢰성 높은 시뮬레이션 코드를 개발하기 위해 세라믹 물성치 모델을 이용한다. 열역학적 관계식을 통해서 Gibbs 에너지를 계산하고 이를 바탕으로 OCV를 계산한다. 활성화손실을 계산하기 위해서 Butler-Volmer 식을 사용하고, 활성화손실에 가장 중요한 영향을 미치는 변수로서 교환전류밀도를 계산한다. 본 논문에서는 대표적인 SOFC 재료로서 LSC, LSM, Ni/YSZ를 사용하고 이들 재료의 교환전류밀도를 측정된 연구결과와 해석결과를 비교한다. 저항손실 계산 시 가장 중요한 변수는 전해질의 이온전도도이기 때문에 이온전도도의 계산결과와 측정결과를 비교한다. 농도손실은 반응 가스의 다공성 매질 통과로 인해 발생한다. 농도손실 계산을 위해 분자확산과 누설확산을 함께 고려하여 확산계수를 계산하고 농도손실 모델에 적용한다. 기존 연구결과와 본 실험실에서 측정된 실험결과를 이용하여 개발된 시뮬레이션 코드를 검증한다. 비교 결과, 최대 오차 5% 이내의 높은 정확성을 보여준다.

후 기

본 연구는 지식경제부 신재생에너지기술개발사업(2008-N-FC12-J-03-1-000)과 5kW SOFC 시스템 개발 사업의 일환이며 KAIST EEWs 및 BK21 프로그램의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Ji, H., Lim, S., Bae, J. and Yoo, Y., 2006, "A Study on Operation Characteristics of Planar-Type SOFC System Integrated with Fuel Processor," *KSME-B*, Vol. 30, No. 8, pp. 731~740.
- (2) Park, K. and Bae, J., 2008, "Performance Behavior by H₂ and CO as a Fuel in Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cell (IT-SOFC)," *KSME-B*, Vol. 32, No. 12, pp. 963~969.
- (3) Hyun, H.-C., Sohn, J.-L., Lee, J.-S. and Ro, S.-T., 2002, "Performance Predictions of the Planar-Type Solid Oxide Fuel Cell with Computational Flow Analysis (I)," *KSME-B*, Vol. 27, No. 5, pp. 635~643.
- (4) 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 States Ionics*, Vol. 132, No. 3, pp. 297~308.
- (5) Calise, F., Dentice d'Accadia, M., Palombo, A. and Vanoli, L., 2008, "One-Dimensional Model of a Tubular Solid Oxide Fuel Cell," *J. Fuel Cell Sci. Technol.*, Vol. 5, No. 2, pp. 1~15.
- (6) Zhu, H. and Kee, R.J., 2003, "A General Mathematical Model for Analyzing the Performance of Fuel-Cell Membrane-Electrode Assemblies," *J. Power Sources*, Vol. 117, No. 1-2, pp. 61~74.
- (7) Kim, J.-W., 1999, "Polarization Effects in Intermediate Temperature, Anode-Supported Solid Oxide Fuel Cells," *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 146, No. 1, pp. 69~78.
- (8) O'Hayre, R., Cha, S.-W., Colella, W. and Prinz, F.B., 2006, *Fuel Cell Fundamentals*, 1st ed., WILEY, New York.
- (9) Sundén, B. and Faghri, M., 2005, *Transport Phenomena in Fuel Cells*, 1st ed., WIT press, Boston.
- (10) Larminie, J. and Dicks, A., 2003, *Fuel Cell Systems Explained*, 2nd ed., WILEY, New York.
- (11) Chan, S.H., Khor, K.A. and Xia, Z.T., 2001, "Complete Polarization Model of a Solid Oxide Fuel Cell and Its Sensitivity to the Change of Cell Component Thickness," *J. Power Sources*, Vol. 93, No. 1-2, pp. 130~140.
- (12) Steele, B.C.H., 1994, "Oxygen Transport and Exchange in Oxide Ceramics," *J. Power Sources*, Vol. 49, No. 1, pp. 1~14.
- (13) Costamagna, P. and Honegger, K., 1998, "Modeling

- of Solid Oxide Heat Exchanger Integrated Stacks and Simulation at High Fuel Utilization," *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 145, No. 11, pp. 3995~4007.
- (14) Koide, H., Someya, Y., Yoshida, T. and Maruyama, T., 2000, "Properties of Ni/YSZ Cermet as Anode for SOFC," *Solid States Ionics*, Vol. 132, No. 3, pp. 253~260.
- (15) Ahmed, S., McPheeters, C. and Kumar, R., 1991, "Thermal-Hydraulic Model of a Monolithic Solid Oxide Fuel Cell," *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 138, No. 9, pp. 2712~2718.
- (16) Zhao, F. and Virkar, A.V., 2005, "Dependence of Polarization in Anode-Supported Solid Oxide Fuel Cells on Various Cell Parameters," *J. Power Sources*, Vol. 141, No. 1, pp. 79~95.
- (17) Kilner, J.A., 2000, "Fast Oxygen Transport in Acceptor Doped Oxides," *Solid States Ionics*, Vol. 129, No. 1, pp. 13~23.
- (18) Kwon, O.H. and Choi, G.M., 2006, "Electrical Conductivity of Thick Film YSZ," *Solid State Ionics*, Vol. 177, No. 35, pp. 2057~3063.
- (19) Suwanwarangkul, R., Croiset, E., Fowler, M.W., Douglas, P.L., Entchev, E. and Douglas, M.A., 2003, "Performance Comparison of Fick's, Dusty-Gas and Stefan-Maxwell Models to Predict the Concentration Overpotential of a SOFC Anode," *J. Power Sources*, Vol. 122, No. 1, pp. 9~18.
- (20) Bird, R.B., Stewart, W.E. and Lightfoot, E.N., 2002, *Transport Phenomena*, 2nd ed., WILEY, San Francisco.