

3차원 수치모사를 통한 연료극 지지식 관형 고체산화물 연료전지의 전지 성능에 대한 연결재 구조 효과

황지원, 이정용, 조동현, 정현욱*, 김성현

고려대학교 화공생명공학과
136-713 서울특별시 성북구 안암동 5가 1번지

(2010년 11월 2일 접수; 2010년 12월 7일 수정본 접수; 2010년 12월 7일 채택)

Effect of Interconnect Structure on the Cell Performance in Anode-supported Tubular SOFC Using Three-dimensional Simulation

Ji Won Hwang, Jeong Yong Lee, Dong Hyun Jo, Hyun Wook Jung,* and Sung Hyun Kim

Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University
5-1 Anam-dong, Seongbuk-gu, Seoul 136-713, Korea

(Received for review November 2, 2010; Revision received December 7, 2010; Accepted December 7, 2010)

요 약

본 연구에서는 유체유동해석프로그램인 Fluent를 이용하여 연료극 지지체식 관형 고체산화물 연료전지(SOFC)에서의 연결재 구조에 따른 성능 변화를 고찰하였다. 실험적 사실과 부합되는 이론적 결과를 확보하기 위해서는 전기적으로 전극과 하나로 되어있는 연결재의 구조가 전지 성능에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보는 것이 중요하다. 두께가 작은 연결재가 단전지 성능을 우수하게 하는 것으로 보아 옴(ohmic) 저항에 직결되는 연결재의 두께가 전지 성능에 있어 주요 변수임을 확인하였다. 일정 두께로 고정된 조건 하에 연결재 폭을 변화시킨 경우, 전지 성능은 상대적으로 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 본 연구에서 고려한 SOFC의 관형 구조 특성상 연결재의 폭으로는 원주 방향으로 흘러가는 전류 경로를 효과적으로 단축시킬 수 없기 때문으로 사료된다.

주제어: 연결재, 관형 SOFC, 옴 저항, 전지성능

Abstract : Effect of interconnect structure on the cell performance in anode-supported tubular solid oxide fuel cell (SOFC) has been investigated in this study, employing the Fluent CFD solver. For the robust and reliable theoretical analysis corroborating experimental results, it is of great importance to elucidate the role of interconnect which is electrically connected with electrodes on the cell characteristics. From the fact that the thin interconnect provides the enhanced cell performance, it is revealed that the interconnect thickness is a key parameter that is able to effectively control the ohmic resistance. Under the constant thickness condition, the cell performance does not considerably change with the variation of interconnect width. This is because the current passage along with circumferential direction is not effectively altered by the change of interconnect width in tubular SOFC system.

Keywords : Interconnect, Tubular SOFC, Ohmic resistance, Cell performance

* To whom correspondence should be addressed.
E-mail: hwjung@grtrkr.korea.ac.kr

1. 서 론

연료전지는 세계적으로 대두되고 있는 에너지 문제를 해결하기 위한 신재생에너지 자원의 하나로 선진국 주도로 활발히 연구, 개발되어 오고 있다. 과거 화석연료의 패러다임과는 달리 미래의 에너지는 환경 친화적이면서도 에너지 효율 면에서도 우수한 이상적인 형태의 에너지를 추구하고 있다. 그 중에서도 연료전지는 현재 사용하고 있는 석유와 매우 유사한 구동 형태를 지니고 있어 수송용, 발전용, 가정용 에너지를 공급하는 매개로 학계 및 산업계에서 주 연구대상이 되고 있다. 연료전지의 종류 중 하나인 고체산화물 연료전지(SOFC)는 재료의 특성상 고온에서 작동하는 특징을 갖고 있다. 이로 인해 활성화 에너지를 낮추기 위해 저온형 연료전지에서 사용하는 귀금속 촉매가 이 전지에서는 요구되지 않고, 촉매 반응 사이트에서의 기체 탈착 가능성이 높기 때문에 화석연료의 개질을 통한 수소의 일산화탄소 피독에 대한 허용량이 상대적으로 높은 편이다[1]. 따라서 가격 대비 전지 성능이 탁월하여 고분자 전해질 연료전지(PEMFC) 및 용융 탄산염 연료전지(MCFC)와 더불어 활발히 연구되고 있는 추세이다.

SOFC에 관한 연구는 미시적, 거시적인 관점에서 다방면으로 이루어지고 있다. 전극 미세 구조의 최적화[2], 최적 성능과 내구성을 위한 전극 재료 및 전극 제조공정의 개발[3], 단전지 분석기술[4,5], 고출력을 위한 스택(stack)화[6] 등의 연구가 국

내외적으로 활발히 수행되어지고 있다. 그 중에서도 고출력을 위한 스택 구성시 야기될 수 있는 전류 손실을 감소시키는 것이 최근 관심의 대상이 되고 있다. 스택을 구성하기 위해 여러 개의 단전지를 적층하게 되는 경우, 전류 흐름에 따라 받게 되는 옴 저항이 점차 증가하게 되어 전체 출력이 감소하게 된다. 따라서 전류가 흘러가면서 받는 저항을 줄이기 위한 최적의 집전 구조 설계가 필요하다. 또한, 전기적으로 전극과 하나로 되어있는 연결재(interconnect)의 구조에 따라 단전지의 성능이 판이하게 달라지므로 전지 성능에 대한 연결재의 구조 영향을 규명하기 위한 다차원 전산모사를 통해 실험적 사실과 부합되는 이론치를 확보하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 Figure 1에서와 같은 SOFC 단전지에서 사용되는 연결재 형태의 전류집전체 구조에 따른 전지 성능 변화를 3차원 전산모사를 이용하여 고찰하고자 하였다. 연결재는 관형 SOFC에 직육면체 막대 형태로 길이방향으로 양극과 음극에 부착되어 있다. 연결재의 두께와 폭을 구조 변수로 하여 성능을 평가하고 물리적 의미를 해석하였다. 현재 사용되고 있는 SOFC의 형태는 관형, 평판형, 모듈식, 평판형 등이 있는데, 특히 이 중에서 관형은 전류의 경로가 원주 방향으로 되어 옴 저항을 많이 받게 된다. 따라서 본 연구는 관형의 SOFC를 대상으로 집전체 최적구조 제어를 위한 기초연구 목적으로 수행되었다. 연결재에 연결된 SOFC 단전지의 형태는 연료극 지지체 형태를 채택하였다. 그 이유는 연료극은 공기극보다 전기전도

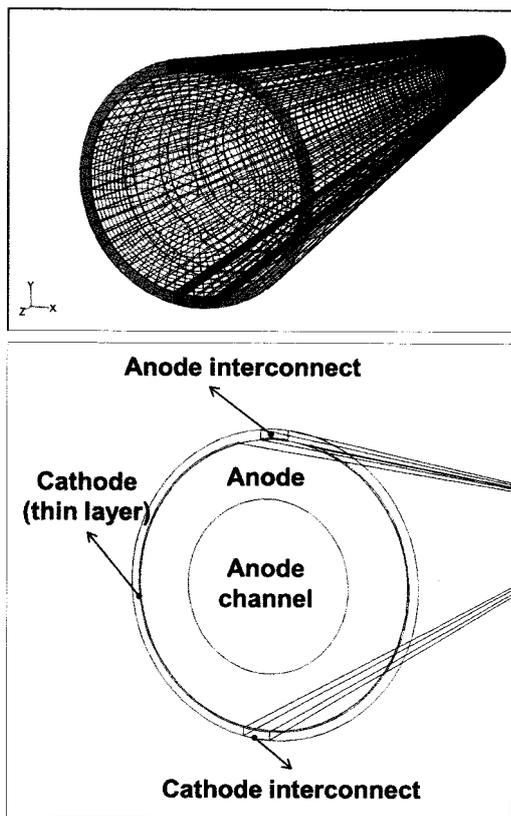


Figure 1. 3-D structure of the anode-supported tubular SOFC with interconnects.

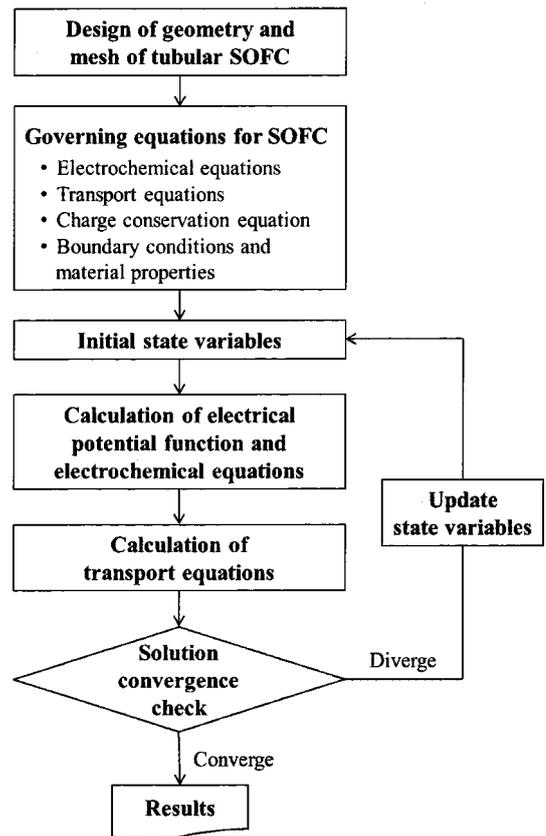


Figure 2. Flowchart for the numerical simulation of SOFC.

Table 1. Process conditions for the numerical simulation of SOFC

Properties	Value
Geometry	
Length of the cell(m)	0.16
Thickness of anode(m)	0.002
Thickness of cathode(m)	5×10^{-5}
Thickness of electrolyte(m)	5×10^{-6}
Anode	
Porosity	0.33
Tortuosity	4.5
Electrical conductivity($A^2 s^3 / kg \cdot m^3$)	150000
Density(kg/m^3)	3030
Heat conductivity($kg \cdot m/s^3 \cdot K$)	11
Cathode	
Porosity	0.4
Tortuosity	4.5
Electrical conductivity($A^2 s^3 / kg \cdot m^3$)	22000
Density(kg/m^3)	4375
Heat conductivity($kg \cdot m/s^3 \cdot K$)	6.0
Electrolyte	
Density(kg/m^3)	5371
Heat conductivity($kg \cdot m/s^3 \cdot K$)	6.0
Interconnect	
Density(kg/m^3)	8900
Heat conductivity($kg \cdot m/s^3 \cdot K$)	72
Anode channel	
Inlet volume flow rate(m^3/s)	4.17×10^{-5}
Cathode channel	
Inlet volume flow rate(m^3/s)	1.17×10^{-4}

도가 우수하여 두께에 따른 음 저항이 상대적으로 크지 않기 때문에 지지체로 많이 사용되고 있기 때문이다[7].

2. 이 론

SOFC 단전지 성능의 평가를 위해 3차원 전산모사가 가능한 Fluent CFD solver를 이용하였다[8]. Gambit을 통해 3차원 구조와 격자를 형성하는데, 이 과정에서 모사하고자 하는 단전지 및 연결체의 형태와 경계조건 등이 설정된다. 기본적인 구조는 Figure 1과 같다. Fluent solver에서는 2.1~2.4에 나와 있는 모델들을 설정하고 각 모델에 반영되는 수치 값 즉, 물질변수, 유량, 공정온도, 전도도 등을 상수 또는 함수로 고려한다. 그리고, 지배방정식의 해를 구하기 위한 수치해석 기법들과 수렴조건 등을 설정한다. 전반적인 수치모사 과정과 공정조건을 Figure 2와 Table 1에 각각 정리하였다.

2.1. 운동식과 연속식

각 전달식은 Bird et al.[9]에 자세히 설명되어 있다. 정상상

태에서 Navier-Stokes 운동식은 다음과 같다.

$$\rho(\underline{v} \cdot \nabla \underline{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot [\mu(\nabla \underline{v} + (\nabla \underline{v})^T)] + \underline{f} \quad (1)$$

여기서 ρ 는 혼합 기체의 밀도, \underline{v} 는 기체의 속도 벡터, P 는 압력, μ 는 혼합 기체의 점도, 그리고 \underline{f} 는 외력벡터이다. 위 식으로부터 기체가 흘러가는 채널에서의 속도 분포 및 압력변화를 계산할 수 있다. 혼합기체는 고온(700~900°C) 및 저압(1기압)에서 존재하므로 이상기체 혼합물로 간주할 수 있다[10].

$$\mu_{mix}^{ig} = \sum_i x_i \mu_{pure,i}^{ig} \quad (2)$$

여기서 x_i 는 순수성분 i 의 몰분율이다. 식 (1)에서 외력 \underline{f} 는 고려하지 않았다.

각 성분의 연속방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\text{Anode: } \nabla \cdot (\rho \underline{v}) = S_{H_2} + S_{O^{2-}} + S_{H_2O} \quad (3)$$

$$\text{Cathode: } \nabla \cdot (\rho \underline{v}) = S_{O_2} + S_{O^{2-}} \quad (4)$$

우항의 S 는 반응에서 생성 혹은 소멸되는 절대적인 양을 나타내며 양론계수와 전류밀도를 통해 계산된다.

2.2. 에너지식

여기에 적용되는 에너지수지식은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\nabla \cdot (\underline{v}(\rho E + P)) = \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \underline{J}_j + \left(\underline{\tau}_{eff} \cdot \underline{v} \right) \right) + Q_h \quad (5)$$

여기서 k_{eff} 는 유효 열전도계수이며, T 는 온도, h_j 는 순수성분 j 의 엔탈피, \underline{J}_j 는 순수성분 j 의 질량플럭스 벡터, $\underline{\tau}_{eff}$ 는 유효 응력 텐서, Q_h 는 전기저항에 의한 열이다. 좌항의 E 는 내부 에너지 및 운동에너지, 위치에너지를 포함한다. 에너지식은 전지 내에서의 전도, 대류에 의한 열전달과 반응, 점성소산 및 전기저항에 의해 발생하는 열의 균형에 의해 유도되었다.

2.3. 기체성분의 확산

채널 및 전극에서의 물질 확산은 Fick의 법칙에 의해 나타낼 수 있다.

$$\underline{J}_i = -\rho D_{ij} \nabla w_i \quad (6)$$

여기서 D_{ij} 는 성분 i 와 j 간의 확산도이며 w_i 는 질량 분율이다. 다공성 전극의 경우 전극의 공극률(porosity)과 비틀림(tortuosity)을 고려하여 다음과 같은 유효 확산도를 적용한다.

$$D_{ij,eff} = \frac{\epsilon}{\xi} D_{ij} \quad (7)$$

여기서 ϵ 는 공극률, ξ 는 비틀림을 나타낸다.

2.4. 전하량 보존식과 전기화학식

질량 보존식과 마찬가지로 전하를 띠는 부분에 대한 전하보존 관계식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot \underline{i} = 0 \quad (8)$$

전류밀도 벡터인 \underline{i} 는 전기퍼텐셜 ϕ 와 전하를 띠는 부분의 전도도인 σ 로 표현된다.

$$\underline{i} = -\sigma \nabla \phi \quad (9)$$

식(9)를 식(8)에 대입하면 식(10)과 같다.

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \phi) = 0 \quad (10)$$

전지의 성능 계산을 위해 전류가 통하지 않는 전해질을 기준으로 양 전극의 퍼텐셜 도약의 개념을 도입한다. 전지의 이론적인 최대 성능은 열역학적 관계로부터 유도된 Nernst 식(11)에 의해 구해진다.

$$\phi_{ideal} = \phi^0 + \frac{RT}{nF} \ln \prod_i p_i^{\nu_i} \quad (11)$$

여기서 ϕ^0 는 표준 상태에서의 퍼텐셜, p_i 는 성분 i 의 분압, ν_i 는 각 반응 성분들의 양론계수를 의미한다. F 는 패러데이 상수(96,485C)이며, n 은 전기화학 반응에서 이동하는 전자의 몰계수이다. 퍼텐셜 도약은 Nernst 식으로부터 구해진 이상 퍼텐셜(η_{ideal})에서 각 전극의 활성화전압($\eta_{act,a}$, $\eta_{act,c}$)과 전해질에서의 이온전도저항에 의한 손실(η_{ele})을 감하여 얻어진다.

$$\phi_{jump} = \phi_{ideal} - \eta_{ele} - \eta_{act,a} - \eta_{act,c} \quad (12)$$

전지의 전체 전압은 식(12)의 퍼텐셜 도약에서 각 전극의 움직임에서 발생하는 손실(η_s)을 추가로 반영함으로써 계산된다.

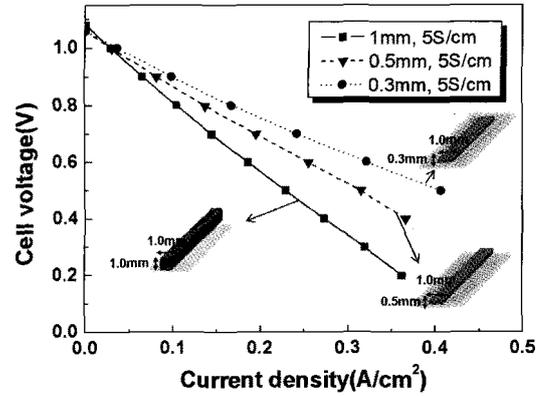
$$\phi_{cell} = \phi_{jump} - \eta_s = \phi_{ideal} - (\eta_{ele} + \eta_{act,a} + \eta_{act,c} + \eta_s) \quad (13)$$

각 전극의 활성화전압 관계식은 일반적으로 Butler-Volmer 식(14)으로부터 구할 수 있다.

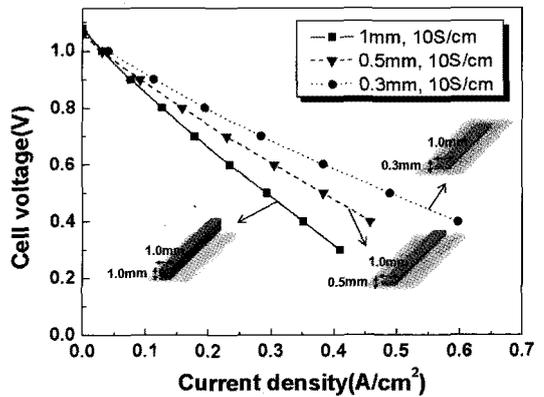
$$\text{Anode: } i = i_{0,a} \left[e^{\frac{\alpha n F \eta_{act,a}}{RT}} - e^{-\frac{\alpha n F \eta_{act,a}}{RT}} \right] \quad (14)$$

$$\text{Cathode: } i = i_{0,c} \left[e^{\frac{\alpha n F \eta_{act,c}}{RT}} - e^{-\frac{\alpha n F \eta_{act,c}}{RT}} \right] \quad (15)$$

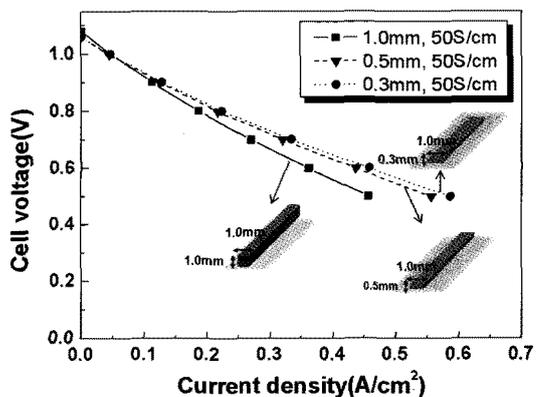
여기서 i_0 는 각 전극의 교환전류밀도이며, α 는 전달계수, n 은 전기화학반응에서 발생하는 전자의 몰 계수이다. 교환전류밀도는 전극에 사용되는 촉매의 종류와 미세구조에 큰 영향을 받는 수치이다[11]. Butler-Volmer 식에 들어있는 활성화전압의 계산은 비선형 방정식을 풀어야 하므로 Newton 방법을 이용하였다.



(a)



(b)



(c)

Figure 3. Effect of interconnect thickness and conductivity ((a) 5 S/cm, (b) 10 S/cm, and (c) 50 S/cm) on cell performance.

3. 결과 및 고찰

연결재의 구조적 영향을 살펴보기 위해 두께와 폭을 변수로 지정하였다. 연결재는 음극 연결재와 양극 연결재로 구분되며, 두 연결재의 형태를 동시에 변경하며 전지 성능을 비교하였다. 연결재의 두께는 전류가 흘러가면서 받는 음 저항과 밀접하게

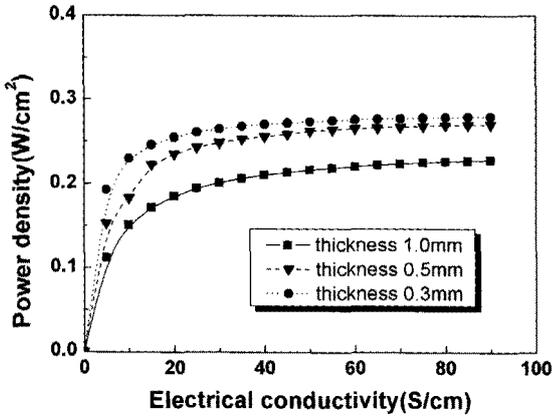
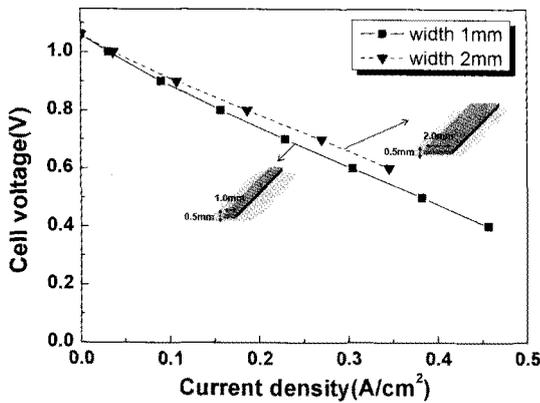
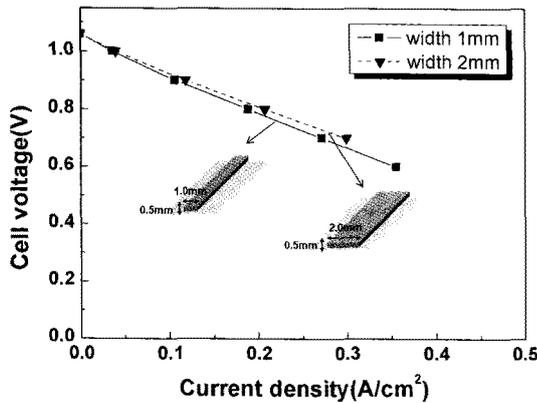


Figure 4. Power density profiles with the variation of electrical conductivity and interconnect thickness.



(a)



(b)

Figure 5. Effect of interconnect width and conductivity ((a) 10 S/cm and (b) 50 S/cm) on the cell performance

관련된다. 두꺼운 연결재일수록 비저항이 커지면서 음저항에 의한 손실이 증가하여 전반적으로 성능이 떨어졌으며 그 결과를 Figure 3에 제시하였다. 또한, 5 S/cm 및 10 S/cm의 전도도를 가진 연결재의 경우 두께에 따른 성능 차이가 나타나는 반면 50 S/cm의 높은 전도도를 가진 연결재의 경우에는 두께 영향이 크지 않다는 점을 확인할 수 있다. 이는 각 연결재의 두께마다 전지가 갖는 최고 성능을 발휘할 수 있는 전도도 상한치가 존재함을 의미한다. 즉, Figure 4에 따르면 각 연결재 두께에 대하여 전도도가 증가할수록 단전지 내부의 전류밀도가 증가하다가 대응하는 최대치로 수렴함을 볼 수 있다. 각 두께별로 최대 전류밀도를 갖게 하기 위한 최소 전도도(전도도에 대한 전류밀도의 변화율이 1% 미만인 것으로 정함)는 두께가 1.0 mm의 경우 55 S/cm, 0.5 mm의 경우 50 S/cm, 0.3 mm의 경우 35 S/cm이며, 두께가 얇을수록 낮은 전도도 수치에서 최대 성능이 발휘됨을 알 수 있다. 이 결과를 통해 연결재의 전도 성능을 높이는 것 이외에도 구조 조절에 따라 전지 성능의 최적화를 구현할 수 있다는 사실을 도출하였다.

다음으로 연결재의 두께는 0.5 mm, 전기전도도는 각각 10 S/cm와 50 S/cm로 고정시킨 상태에서 폭을 각각 1.0 mm, 2.0 mm로 조절하였을 때의 성능 차이를 고찰하였다 (Figure 5). 번들(bundle)이나 스택(stack) 제조시, 연결재 구조상 접촉 폭을 크게 늘리기 어려운 한계가 있으므로 더 큰 폭에 대한 변화 특성은 본 연구에서 고려하지 않았다. Figure 3의 연결재 두께 변화와 비교하면, 연결재의 폭 변화가 전도도 크기에 관계없이

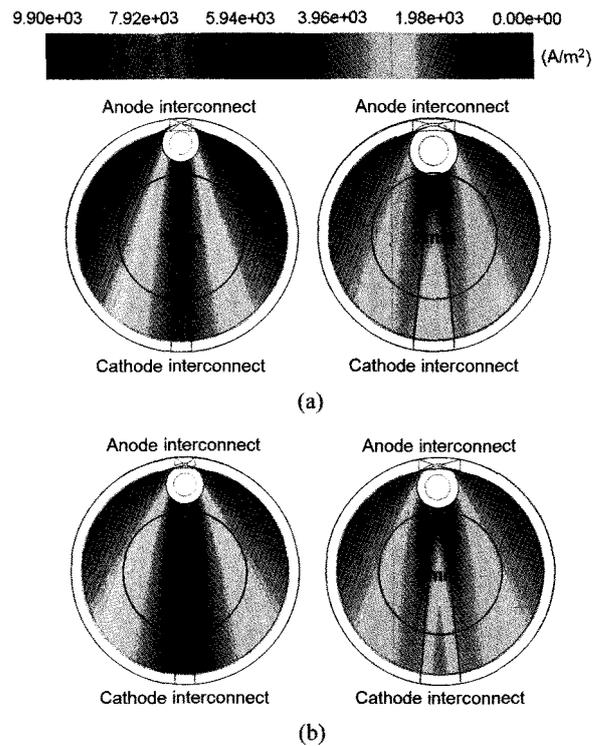


Figure 6. Current density contours on the triple phase boundary with different interconnect widths at 0.7V: (a) 10 S/cm and (b) 50 S/cm.

전지 성능을 크게 변화시키지 못함을 밝혔다. 그 이유는 관형 구조의 특성상 연결재의 폭을 늘린다 하더라도 전지 내부에서 흘러가는 원주 방향의 전류 경로를 효과적으로 줄이지 못하기 때문이다. Figure 6의 3차원 전류밀도 contours를 살펴보면, 양극 연결재와 멀리 떨어진 부분에서는 양극 자체의 낮은 전도도와 전류 경로에 의한 저항으로 인해 전류밀도 분포가 감소해 짐을 볼 수 있다. 또한, 1.0 mm 폭의 연결재와 2.0 mm 폭의 연결재를 연결한 단전지 특성 비교를 통해 내부 전류밀도 분포는 비슷하지만, 양극 연결재가 접촉된 면의 경계부근에서 약간의 전류밀도 분포 차이를 확인하였다. 향후 이러한 결과를 반영하여 양극과의 접촉 면적을 넓히면서 저항을 동시에 줄일 수 있는 새로운 전류 집전 방식을 설계할 수 있으리라 기대한다.

이와 같은 연구는 단전지 내에서 전지 성능을 이론적으로 미리 예측하고 음 저항을 효율적으로 최소화할 수 있는 방법론을 실제적으로 구축해볼 수 있다는데 의의가 있다. 비단 음 저항과 관련하여 연결재의 구조 조절 영향뿐만 아니라 전극의 구조 제어에 따른 영향도 분석함으로써 새로운 유형의 단전지 구성이 가능할 것이다. 유념할 점은 앞서 기술한 전류 집전과 관련된 사항과 더불어, 전지 성능을 최적화시키기 위한 전극의 새로운 구조를 모색할 때에는 열적 팽창률 차이에 따라 발생할 수 있는 결함을 최소화할 수 있는 기술 개발도 병행해야 한다. 본 연구에서 수행한 방법으로는 구조의 열적 응력 분포를 해석하기 어렵고 단지 전류의 경로만을 고려하였으므로 최적의 연료전지 시스템 설계를 위해서는 구조제 응력 변화에 대한 추가적인 연구도 수반되어야 할 것으로 사료된다.

4. 결 론

3차원 전산모사를 이용하여 관형 SOFC에서의 연결재 구조에 따른 전지 성능의 차이를 규명하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 전극에 부착되는 연결재의 두께가 얇을수록 음 저항의 크기가 작아져 집전 효율을 향상시킬 수 있었다.
- 2) 연결재와 단전지 사이의 접촉면을 넓이기 위해 연결재의 폭을 넓힌 경우 집전 효율에 큰 차이가 없었는데, 이는 단전지의 관형 구조 특성상 연결재의 연결형태가 전류 경로를 효과적으로 줄일 수 없기 때문으로 판단된다.
- 3) 최적 집전구조 연구를 통해 전지의 스택 형성시 발생하는 음 저항을 최소화할 수 있는 기본적인 방법론을 구축하였다.

감 사

본 연구는 에너지관리공단과 한국에너지기술평가원의 지원으로 수행되었습니다.

사용기호

$D_{ij,eff}$: Effective diffusivity (m^2/s)

E : Internal, potential and kinetic energies ($kg \cdot m^2/s^2$)

F : Faraday constant (A·s)

I : Current (A)

\underline{J} : Mass flux vector ($kg/m^2 \cdot s$)

P : Pressure ($kg/m \cdot s^2$)

Q_h : Heat source ($kg \cdot m^2/s^2$)

R : Gas constant ($kg \cdot m^2/s^2 \cdot mol \cdot K$)

S : Mass source ($kg/m^2 \cdot s$)

T : Temperature (K)

e : Exponential constant

\underline{f} : External force vector ($kg \cdot m/s^2$)

h : Enthalpy ($kg \cdot m^2/s^2$)

i : Current density (A/m^2)

i_0 : Exchange current density (A/m^2)

k_{eff} : Effective thermal conductivity ($kg \cdot m/s^3 \cdot K$)

n : Number of electrons

p : Partial pressure ($kg/m \cdot s^2$)

\underline{v} : Velocity of gas flow (m/s)

x : Mole fraction of pure species

α : Transfer coefficient

ϵ : Porosity

η_{act} : Activation overpotential ($kg \cdot m^2/A \cdot s^3$)

η_{ele} : Ohmic overpotential by ionic conductivity at the electrolyte ($kg \cdot m^2/A \cdot s^3$)

η_s : Ohmic overpotential at the electrically conductive region ($kg \cdot m^2/A \cdot s^3$)

μ : Gas viscosity ($kg/m \cdot s$)

ξ : Tortuosity

ρ : Density of gas mixture (kg/m^3)

σ : Electrical conductivity ($A^2 s^3/kg \cdot m^3$)

$\underline{\tau}_{eff}$: Effective shear stress tensor ($kg/m \cdot s^2$)

ϕ : Electrical potential ($kg \cdot m^2/A \cdot s^3$)

ϕ_{jump} : Potential jump between the electrodes ($kg \cdot m^2/A \cdot s^3$)

ϕ_{ideal} : Nernst potential ($kg \cdot m^2/A \cdot s^3$)

w : Mass fraction

Subscript

a : Anode

c : Cathode

i : Species i

j : Species j

Superscript

ν : Stoichiometric coefficient

0 : Standard state (273.15K, 101325 $kg/m \cdot s^2$)

참고문헌

1. Larminie, J., and Dicks, A., Fuel Cell System Explained, John Wiley & Sons, Chichester, 2003, pp. 207-228.
2. Zhu, B., "Solid Oxide Fuel Cell(SOFC) Technical Challenges and Solutions from Nano-aspects," *Int. J. Energ. Res.*, **33**, 1126-1137 (2009).
3. Vohs, J. M., and Gorte, R. J., "High-performance SOFC Cathodes Prepared by Infiltration," *Adv. Mater.*, **21**, 943-956 (2009).
4. Malzbender, J., Steinbrech, R. W., and Singheiser, L., "A Review of Advanced Techniques for Characterizing SOFC Behaviour," *Fuel Cells*, **9**, 785-793 (2009).
5. Hwang, J. W., Lee, J. Y., Jo, D. H., Jung, H. W., and Kim, S. H., "Polarization Characteristics and Fuel Utilization in Anode-supported Solid Oxide Fuel Cell Using Three-dimensional Simulation," *Korean J. Chem. Eng.*, **28**, 143-148 (2011).
6. Suzuki, T., Funahashi, Y., Yamaguchi, T., Fujishiro, Y., and Awano, M., "New Stack Design of Micro-tubular SOFCs for Portable Power Sources," *Fuel Cells*, **10**, 381-384 (2008).
7. Song, R.-H., Lee, G.-Y., and Shin, D.-R., "Redox Behaviors of NiO/YSZ Anode Tube in Anode-supported Flat Tubular Solid Oxide Fuel Cells," *Trans. Korean Hydrogen New Energ. Soc.*, **17**, 82-89 (2006).
8. Fuel Cell Modules Manual: ANSYS Group (<http://www.fluent.com>).
9. Bird, R. B., Stewart, W. E., and Lightfoot, E. N., Transport Phenomena, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 2002.
10. O'Connell, J. P., and Haile, J. M., Thermodynamics: Fundamentals for Applications, Cambridge University Press, New York, 2005, pp. 128-129.
11. Ni, M., Leung, M. K. H., and Leung, D. Y. C., "Parametric Study of Solid Oxide Fuel Cell Performance," *Energ. Conv. Manage.*, **48**, 1525-1535 (2007).