

전류집전 방법에 따른 원통형 고체산화물 연료전지의 성능 변화 수치해석

유 건*, 박석주*[†], 이종원*, 이승복**, 임탁형*, 송락현*, 신동열*, 김호영**

*한국에너지기술연구원, **고려대학교 기계공학과

Numerical Analysis on Performance Changes of the Tubular SOFCs according to Current Collecting Method

GEON YU*, SEOKJOO PARK*[†], JONGWON LEE*, SEUNGBOK LEE*, TAKHYOUNG LIM*,
RAKHYUN SONG*, DONGRYUL SHIN*, HOYOUNG KIM**

*Fuel Cell Research Center, Korea Institute of Energy Research, Jang-dong 71-2,
Yuseong-gu, Daejeon, 305-343, Korea

**Department of Mechanical Engineering, Korea Univ., Anam-dong 5-ga,
Seongbuk-gu, Seoul, 136-713, Korea

ABSTRACT

Performance changes of an anode-supported tubular SOFC including current collectors are analyzed at different current collecting methods using numerical simulation. From the two dimensional numerical model of the solid oxide fuel cell with nickel felts as anodic current collectors and silver wires as cathodic ones, the performance curves and the distributions of temperature, concentration, current density are obtained. Also, the voltage loss of the cell is divided into three parts: activation loss, concentration loss and ohmic loss. The results show that the performance change of the cell is dominantly influenced by the ohmic loss. Although the temperature and concentration distributions are different, the total activation loss and concentration loss are nearly same. And the ohmic loss is divided into each parts of the cell components. The ohmic loss of the anodic current collector reaches about 60~80% of the cell's total ohmic loss. Therefore, the reduction of the ohmic loss of the anodic current collector is very important for stack power enhancement. It is also recommended that the load should be connected to the both ends of the anodic current collector.

KEY WORDS : Numerical analysis(수치해석), SOFC(고체산화물 연료전지), Current collector(집전체), Activation loss(활성화 손실), Concentration loss(농도 손실), Ohmic loss(저항손실)

Nomenclature

[†]Corresponding author : sjpark@kier.re.kr

[접수일 : 2011.2.11 수정일 : 2011.4.11 게재확정일 : 2011.4.22]

c_i : molar concentration, mol/m³

C_p : heat capacity, J/(mol·K)

- D : diffusion coefficient, m^2/s
- E : activation energy, $kJ/(mol \cdot K)$
- F : Faraday's constant, $96485 C/mol$
- i : local current density, A/cm^2
- i_o : exchange current density, A/cm^2
- n : number of participating electrons in the reaction (anode: $n=2$ cathode: $n=4$)
- P : total pressure, Pa
- R : universal gas constant, $8.314 J/(mol \cdot K)$
- s : molar specific entropy, $J/(mol \cdot K)$
- q : heat flux, W/m^2
- T : temperature, K
- u : velocity vector, m/s
- x_i : molar fraction of species i
- α : transfer coefficient, 0.5
- γ : pre-exponential factor, A/m^2
- μ : viscosity, Pa·s
- ρ : density, kg/m^3
- λ : heat conductivity, $W/(m \cdot K)$
- η : activation loss, V
- σ : electric or ionic conductivity, S/cm
- ϕ : electric or ionic potential, V

Subscripts

- a : anode
- c : cathode
- cc : current collector
- ct : contact resistance
- e : electrolyte
- $elec$: electron
- ion : anion
- rev : reversible
- rad : radiational
- irr : irreversible

1. 서 론

고체산화물 연료전지는 전기화학적 반응을 통해 연료로부터 직접 전력을 생산하는 발전장치로서 다른 연료전지에 비해 효율이 높고 연료 종류에 대한 제약이 적다. 또한 600~800°C의 고온작동 조건으로 인하여 열병합 발전이 가능하기 때문에 최근 많은 연구가 이루어지고 있다^{1,2)}. 그러나 고체산화물

연료전지는 고온 작동 조건 및 가스 밀봉의 어려움으로 인하여 내부 상태의 변화를 직접 측정하기가 어렵다. 이러한 실험적인 어려움을 극복하기 위하여 최근 수치적 방법이 고체산화물 연료전지의 설계에 많이 이용되고 있다.

고체산화물 연료전지뿐만 아니라 모든 연료전지의 내부에서는 물질전달 현상과 함께 전자와 이온의 전하전달 현상이 존재한다. 이 두 현상은 전기화학 반응을 매개로 하여 서로 영향을 주고받는다. 기존의 많은 연구들이 전지 내의 열 및 물질전달 현상에 주된 관심을 가졌으나 스택 제작을 위해서는 전하 전달 현상과 관련하여 전기적 저항 손실이 중요한 문제로 대두된다. 이러한 전기적 저항 손실과 관련하여 대표적인 수치해석 연구를 소개하면 다음과 같다.

Yakabe³⁾는 평판형 연료전지에 대한 3차원 해석을 한 결과 전해질과 분리판 내부에서 대각선 방향의 전류 백터가 발생하며 이로 인한 영향을 연구하였다. Daan Cui⁴⁾ 등은 micro-tubular 전지에 대해 전류 집전 모드에 따른 집전 효율 변화를 연구하였으며 집전 모드에 따라 전류밀도와 물질농도 분포 및 전기적 효율이 변하는 결과를 얻었다. Suzuki⁵⁾는 micro-tubular 전지의 길이와 전극의 두께, 집전 모드가 집전 효율에 미치는 영향을 연구하였다. Zhu⁶⁾ 등은 원통형 전지에서 전극과 집전체 사이의 접촉점 수가 전지의 성능 특성에 미치는 영향을 연구하였다.

이와 같이 집전 관련 연구가 몇몇 있으나 원통형 전지의 집전방식에 따른 성능 차이와 그 성능곡선으로부터 각 손실을 분리하여 해석하는 시도가 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 원통형 전지를 대상으로 하여 전류 집전 방법에 따라 전지의 성능 변화를 예측하고 전기적 특성과 온도 및 물질 분포가 어떻게 차이가 나는지를 해석하고자 한다.

2. 수치해석 모델

2.1 해석 영역 및 격자 설정

Fig. 1은 2차원 축대칭 형상의 계산 영역과 각 영

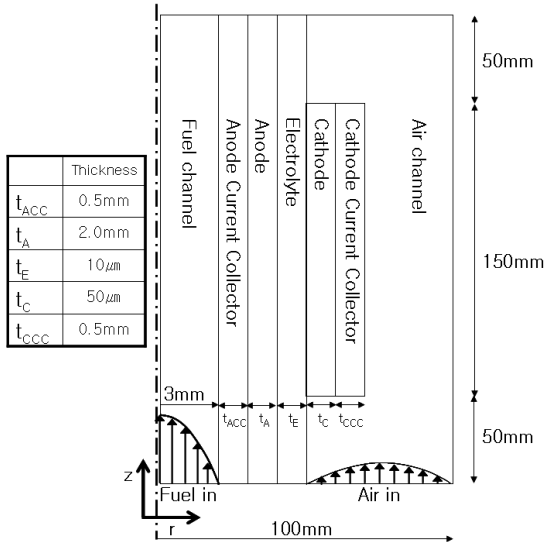


Fig. 1 Computational domains and their dimension

역의 치수를 나타낸다. 원통형의 단위 전지는 등온 상태로 유지되는 가열로 벽에 둘러 싸여 있으며 연료와 공기는 서로 같은 방향으로 평행하게 주입된다. 그리고 각 전극의 인접부에 집전체의 영역이 설정되어 집전 방법에 따른 영향을 살펴보게 된다. 형성된 전체 격자수는 31640개이며 반응이 일어나서 농도 구배가 크게 일어나는 전해질 주변을 중심으로 격자를 조밀하게 구성하였다. 수치해석에는 유한요소법을 기반으로 하는 전산 해석 프로그램인 FEMLAB을 이용하였다.

2.2 물리적 가정

- (1) 정상상태이며 유로 내의 유속이 작으므로 비압축성 층류 유동을 가정하였다⁷⁾.
- (2) 전기화학 반응은 전극과 전해질의 경계에서만 발생하는 것을 가정하여 물질, 열, 전하의 생성과 소멸을 경계에서의 유출입 조건으로 하였다.
- (3) 집전체는 다공성(기공율 90%이상)이며 0.5mm의 두께를 가지는 층으로 가정하였다.
- (4) 전극과 집전체를 통한 물질전달은 확산이 지배적이며, 열전달은 전도가 지배적인 것으로 가정하였다.

2.3 지배방정식

앞에서의 가정들을 바탕으로 각 영역에 대해 지배방정식을 정리하면 다음과 같다.

2.3.1 운동량 방정식과 연속방정식

$$\rho(u \cdot \nabla)u = -\nabla P + \mu \nabla^2 u \quad (1)$$

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (2)$$

여기서 밀도(ρ)는 이상기체 상태방정식으로부터 구해진다.

2.3.2 물질 전달 방정식

연료와 공기의 유로에서는 대류에 의한 반응물의 이송과 농도구배에 의한 확산현상이 공존한다. 또한 전극 내에서는 확산현상이 주가 되어 물질전달이 이루어지는데, 다음과 같이 Fick의 확산법칙을 이용한 물질전달 방정식을 적용하였다.

$$\nabla \cdot (-D \nabla c_i) + u \cdot \nabla c_i = 0 \quad (3)$$

$$(i = H_2, H_2O, O_2, N_2)$$

2.3.3 열 전달 방정식

전기화학 반응에 의해 발생하는 열은 전지의 내부에서 온도구배를 일으키며 생성된 열의 일부는 유로 내에서 대류 현상에 의해 전달되고 고체상을 통해서도 전도에 의해 전달된다. 이를 고려하기 위해 다음과 같은 열전달 방정식이 적용되었다.

$$\nabla \cdot (-\lambda \nabla T) + \rho C_p u \cdot \nabla T = 0 \quad (4)$$

유로 내에서 기체의 확산계수와 열전도율 및 비열, 전극 내에서의 유효확산계수는 관련 문헌을^{8,9)} 참고하였다.

2.3.4 전하 전달 방정식

전극과 집전체에서는 전자에 의한 전하 전달이 있으며 전해질에서는 산소이온에 의한 전하 전달이

Table 1 Electric conductivity of each layers of the cell

	Conductivity (S/cm)
Anode	1000
Cathode	150
Electrolyte	식 (6)
Anode current collector	2.03e4
Cathode current collector	1.43e5

존재하므로 다음 식을 통해 전류밀도와 포텐셜 분포를 얻을 수 있다.

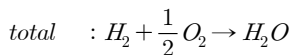
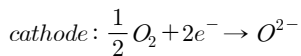
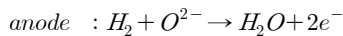
$$\nabla \cdot (-\sigma_i \nabla \phi_i) = 0 \quad (5)$$

여기서 전극과 전해질 및 집전체의 전도도는 모두 온도에 따라 변한다. 그러나 전극과 집전체의 전도도가 전해질에 비해 매우 높기 때문에 온도에 따른 변화는 전체 성능 변화에는 큰 영향을 미치지 않는다. 따라서 전해질에 대해서만 다음과 같은 온도에 따라 변하는 식을 사용하였으며 전극과 집전체에서의 전도도는 상수로서 Table 1에 나타내었다.

$$\sigma_e = 651.2 \times \exp(-10171/T) [S/cm] \quad (6)$$

2.3.5 전기화학 반응

전지에서 일어나는 화학 반응은 다음과 같다. 연료극에서는 연료가 산화되고 공기극에서는 산소가 산소이온으로 환원된다. 산소이온은 전해질을 통해 연료극 쪽으로 넘어와 수소와 반응하고 물을 형성한다. 이 과정에서 전자가 다시 생성되고 이 전자는 다시 외부 회로를 통해 공기극으로 이동하는 순환을 계속한다.



연료전지에서의 개방회로 전압(OCV, open circuit voltage)은 Nernst 식에 의해 다음과 같이 나타내어

Table 2 Parameters of exchange current density

Exchange current density parameter	Activation energy, E [kJ/(mol·K)]	Pre-exponential factor, γ [A/m ²]
Anode	100	1.4e8
Cathode	120	4.1e9

진다.

$$V_{OCV} = V_{rev} + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{x_{H_2} (x_{O_2})^{1/2}}{x_{H_2O}} \right) \quad (7)$$

$$V_{rev} = 1.27483 - 2.81535 \times 10^{-4} T \quad (8)$$

활성화 손실과 전류밀도의 관계는 다음과 같은 Butler-Volmer의 식을 사용하였다.

$$i_a = i_{0,a} \left[e^{\left(\frac{n\alpha F}{RT} \eta_{act,a} \right)} - e^{\left(\frac{n(1-\alpha)F}{RT} \eta_{act,a} \right)} \right] \quad (9)$$

$$i_c = i_{0,c} \left[e^{\left(\frac{n\alpha F}{RT} \eta_{act,c} \right)} - e^{\left(\frac{n(1-\alpha)F}{RT} \eta_{act,c} \right)} \right] \quad (10)$$

$$\eta_{act,a} = \phi_{elec} - \phi_{ion} \quad (11)$$

$$\eta_{act,c} = \phi_{elec} - \phi_{ion} - V_{OCV} \quad (12)$$

여기서 교환전류밀도 i_0 는 문헌^{10,11)}에서 제시한 식을 이용하였으며, 식의 주요 계수를 Table 2에 나타내었다.

$$i_{0,a} = \gamma_a (x_{H_2}) (x_{H_2O})^{-0.5} e^{\left(-\frac{E_a}{RT} \right)} \quad (13)$$

$$i_{0,c} = \gamma_c (x_{O_2})^{0.25} e^{\left(-\frac{E_c}{RT} \right)} \quad (14)$$

2.4 주요 경계조건

전극과 전해질의 계면에서는 식 (15)와 같이 반응

에 의해 수소와 산소가 소모되고 수증기가 생성된다.

$$\dot{m}_{H_2} = -\frac{|i_a|}{2F} \quad \dot{m}_{H_2O} = \frac{|i_a|}{2F} \quad \dot{m}_{O_2} = -\frac{|i_c|}{4F} \quad (15)$$

그리고 전자와 이온의 전류 생성 및 소멸이 발생하는데 이를 연료극쪽과 공기극쪽으로 구분하면 다음과 같다.

$$\text{Anode} \quad -i_a(\text{electron}), \quad i_a(\text{ion}) \quad (16)$$

$$\text{Cathode} \quad i_c(\text{electron}), \quad -i_c(\text{ion}) \quad (17)$$

집전체와 전극이 접하는 경계에서 접촉저항을 고려하기 위해 식 (18)을 이용하여 전류의 유출입 조건을 부여하였다. 이는 접촉저항에 의해 집전체와 전극 사이에 포텐셜 차이가 발생함을 의미한다.

$$i = \frac{|\phi_{ct} - \phi_{elec}|}{ASR_{ct}} \quad (18)$$

전해질과 전극의 계면에서는 반응에 의한 열발생이 존재한다. 열발생은 가역적 열발생(식 (19))과, 활성화 과전압에 의한 비가역적 열발생(식 (20))으로 구분할 수 있으며 다음과 같다.

$$q_{rev} = -\frac{i}{2F} T \left[s_{H_2O} - \left(s_{H_2} + \frac{1}{2} s_{O_2} \right) \right] \quad (19)$$

$$q_{irr,a} = i_a \eta_{act,a} \quad q_{irr,c} = i_c \eta_{act,c} \quad (20)$$

그리고 셀 표면으로부터 등온으로 유지되는 가열로 벽면으로의 간단한 복사 열손실을 고려하였으며 다음과 같다.

$$q_{rad} = \sigma_{sb} (T_s^4 - T_f^4) \quad (21)$$

(s: cell surface, f: furnace wall)

2.5 전류집전 방법

원통형 전지에서 집전 방법에 따른 성능 변화를

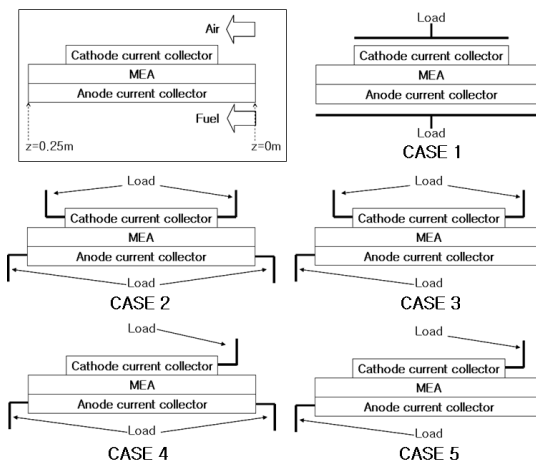


Fig. 2 Schematics of current collecting method (MEA : anode/electrolyte/cathode)

해석하기 위해서 Fig. 2에서와 같이 부하(load)를 연결하는 위치에 변화를 주었다. 그리고 부하가 연결되는 위치에는 전기적 경계조건으로서 포텐셜 값을 부여해야 하는데 연료극쪽에는 0V, 공기극쪽에는 셀 전압을 부여하였다. CASE-1는 평판형 연료전지의 해석에서 이용되는 균일 경계조건으로서 집전체에 의한 영향이 무시된다는 가정을 바탕으로 한다. CASE 2~5는 집전체의 영향이 포함되도록 전지의 전기적 경계 조건이 부여된다. 이 중에서 CASE-2와 CASE-3을 통해 연료극쪽 부하 연결 방법에 따른 변화를 비교할 수 있으며 CASE-2와 CASE-4는 공기극쪽 집전 방법에 따른 변화를 비교할 수 있다. 그리고 CASE-5는 실제 단위 전지의 실험 조건을 나타내며 CASE 1~4의 결과와 비교하여 개선 방법을 생각해 보는 기준이 된다. 집전 방법을 제외한 전

Table 3 Operating conditions of the cell

Conditions	Value
Operating temperature/pressure	1073K / 1bar
Fuel inlet condition	0.5 L/min, 1073K, X _{H2} : 0.97 X _{H2O} : 0.03
Air inlet condition	0.5 L/min, 1073K, X _{O2} : 0.21 X _{O2} : 0.79
Contact resistance	10 (mΩ · cm ²)

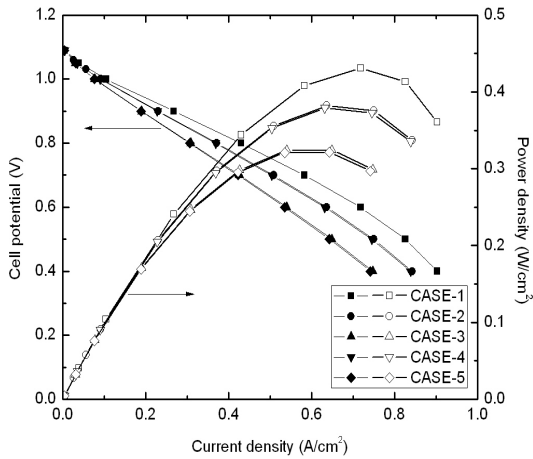


Fig. 3 Current-Voltage curves of each cases

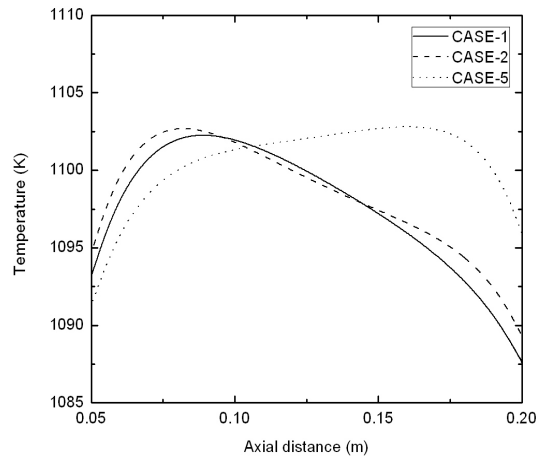


Fig. 4 Temperature distributions on the cathode surface (average current density : 0.53 A/cm²)

지의 작동 조건은 모든 경우에 대해 동일하며 이를 Table 3에 나타내었다.

4. 결과 및 해석

먼저 각 CASE별로 셀 전압을 0.4~1.09V 까지 변화시켜 성능 곡선을 구하였으며 이를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에 나타난 성능 곡선 중에 CASE-1이 가장 높은 성능을 나타내었으며 CASE-2,4 그리고 CASE-3,5 순으로 높은 성능을 나타내는 것을 알 수 있다. 각 경우를 비교해 보면 연료극쪽 부하연결 지점이 1곳인지 2곳인지에 따라 성능 차이가 크게 나며 공기극쪽의 경우에는 부하연결지점이 1곳이거나 2곳이거나 거의 차이가 나지 않는 것을 알 수 있다.

성능곡선에서 활성화 손실과 농도 손실, 그리고 저항 손실을 분리해 보기에 앞서 성능 변화가 크게 나타난 CASE-1,2,5에 대해 내부상태가 어떻게 다른지 조사해 보았다. 먼저 Fig. 4는 평균전류밀도가 0.53A/cm²로 동일한 조건에서 공기극 표면의 온도 분포를 나타낸다. CASE-1의 경우 평판형에서의 균일 경계조건으로서 전류 유입이 x=0.05~0.20m 전체에 걸쳐 일어나며 CASE-2의 경우는 x=0.05m와 x=0.20m지점에서 전류가 유입된다. 그리고 CASE-5

의 경우는 x=0.20m 지점에서만 전류가 유입된다. 여기서 최고 온도는 1102.2K(CASE-1), 1102.7K(CASE-2), 1102.8K(CASE-5)로서 모두 비슷하나 온도 분포가 다르다는 것을 알 수 있다. 이러한 온도분포의 차이는 연료가 유입되는 곳에서 가까운 위치에 전류 유입 지점의 유무에 따라 달라진다. 연료가 유입되는 위치는 반응물의 농도가 높기 때문에 반응이 활발해질 수 있다. 그러나 반응에는 전자도 관여하기 때문에 전류의 유입위치가 연료의 유입 위치와 가까우면 반응의 활성도가 높아질 수 있다. 이런 이유로 인해 CASE-5의 경우에는 연료가 x=0.20m 부근에서 반응율이 높고 그로 인해 최고 온점이 발생한다. 비록 온도 분포는 다소 다르지만 동일한 평균 전류 밀도 조건하에서 총 반응율은 동일하다. 결국 반응에 의해 발생하는 발열량도 같기 때문에 전극 전체에 걸쳐 온도를 평균하면 비슷한 값을 가지게 되며 이로부터 평균적인 활성화 손실 역시 Fig. 5에서처럼 거의 차이가 없게 됨을 알 수 있다. 다만 Fig. 5의 고전류밀도 영역에서는 CASE-3,5가 약간 더 낮은 활성화 손실을 보여주는데 이것은 연료극 집전체에서의 줄 가열(Joule heating)이 다른 경우에 비해 크고 활성화 손실은 온도가 높을수록 낮아지기 때문으로 해석된다.

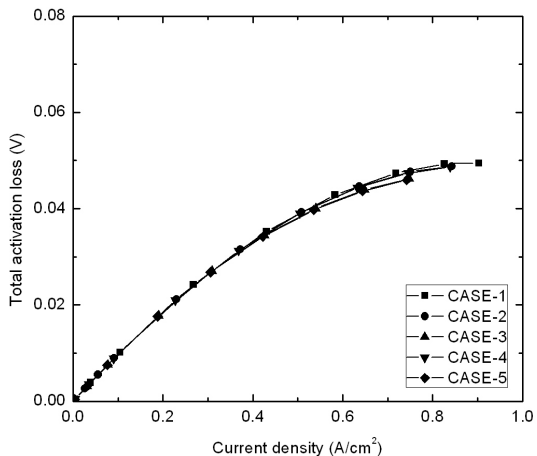


Fig. 5 Total activation losses with average current density

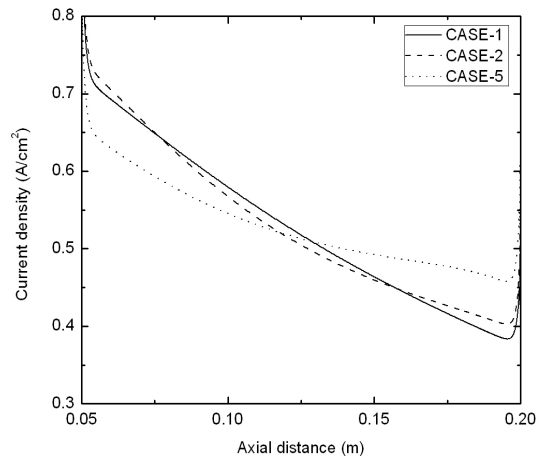


Fig. 7 Current density distributions on anode/electrolyte interface (average current density : 0.53 A/cm²)

Fig. 6은 0.53A/cm²의 부하조건에서 연료 유로의 중심선과 연료극/전해질 계면에서 수소의 물분율 분포를 나타내고 Fig. 7은 계면에서 반응에 의해 발생하는 전류밀도를 나타낸다.

농도분포를 보면 연료 유로에서는 연료가 x=0.0m로부터 유입되어 반응 영역(x=0.05~0.20m)을 지나면서 반응에 의해 점차 소모되는 것을 알 수 있다. 그러나 동일한 평균전류밀도 조건에서는 총 반응율이 같고 유로 내에서는 수소의 확산이 빠르게 이루어지

기 때문에 수소의 물분율 분포에 큰 차이가 없다. 반면에 계면에서는 다공성 전극에 의한 확산저항 때문에 수소의 물분율 분포에 차이가 보이는 것을 알 수 있다. 수소의 물분율 분포를 Fig. 7의 계면전류밀도 분포와 비교해 보면 전류밀도가 높으면 연료의 물분율은 낮게 유지되는 반대의 경향을 보인다.

계면에서의 농도와 전류밀도 분포가 다음에 따라 총 농도 손실도 달라질 것으로 예상했지만, Fig. 3의 성능곡선으로부터 평균 농도 손실을 분리하여 보면

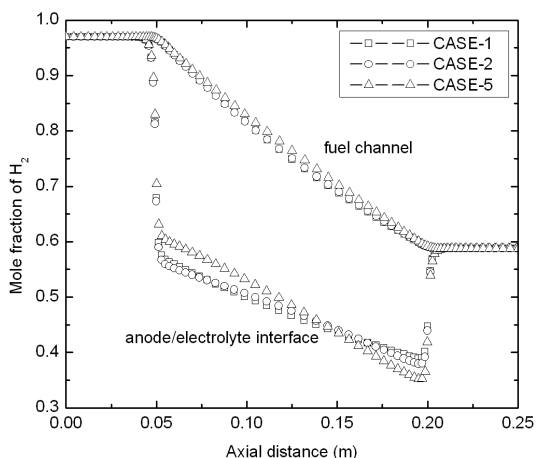


Fig. 6 Mole fractions of H₂ on fuel channel and anode/electrolyte interface (average current density : 0.53 A/cm²)

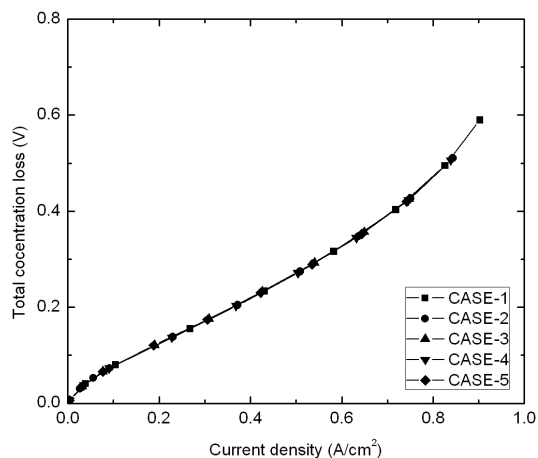


Fig. 8 Total concentration losses with average current density

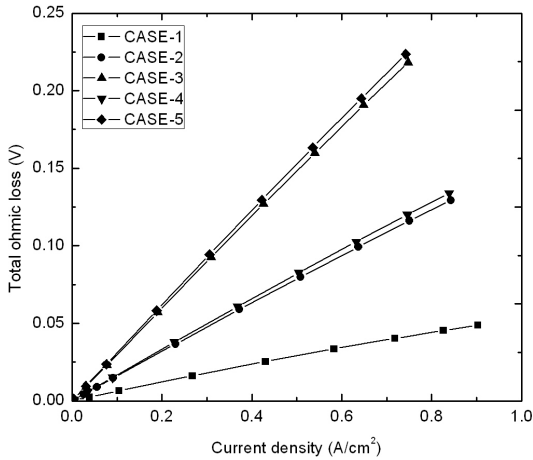


Fig. 9 Total ohmic losses with average current density

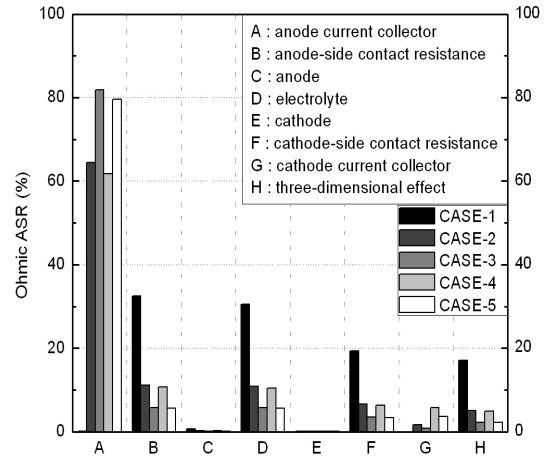


Fig. 10 Ohmic ASR portion of each cell components

Fig. 8에서와 같이 모두 동일하다는 것을 알 수 있다. 농도 손실은 확산속도와 반응속도 차이에 의해 발생하는데, 전극 내에서의 확산속도를 결정하는 것은 전극의 기공도(porosity)와 기공비틀림도(tortuosity) 그리고 유로로 유입되는 연료의 농도와 유량이다. 이것은 집전방법과는 상관없이 일정하게 유지되는 조건들이다. 그리고 전체 반응속도 역시 평균전류 밀도가 동일하기 때문에 일정하게 유지된다. 따라서 집전방법과는 상관없이 평균 농도 손실이 일정한 것으로 해석된다.

Fig. 9는 Fig. 3의 성능 곡선에서 활성화 손실과 농도 손실을 제외하고 남은 저항 손실을 나타낸다. 활성화 손실 및 농도 손실과 달리 저항 손실은 평균 전류밀도 변화에 대해 선형적인 관계로 나타나며 직선의 기울기는 비면적저항($\Omega \cdot \text{cm}^2$)의 단위를 가진다. 각각의 직선의 기울기는 Table 4에 정리하였다.

다른 손실과 달리 저항 손실은 부하연결 방법에 따라 크게 차이가 나며 전지의 성능 변화에 직접적으로 영향을 미치는 손실로서 작용함을 알 수 있다.

Table 4 Ohmic ASR of each cases (slopes of graph in Fig. 9)

	CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4	CASE-5
ASR ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	0.0544	0.1542	0.2925	0.1603	0.3023

CASE-1은 전류가 전극에 대해 수직인 방향으로 흐르기 때문에 전극 및 집전체에서의 저항이 최소화되어 직선의 기울기가 가장 작다. Fig. 9에서의 큰 기울기 변화는 연료극 집전체의 집전 방법에 따라 달라진다. 그리고 CASE-3과 CASE-5 및 CASE-2와 CASE-4에서의 미세한 기울기 변화는 공기극의 부하연결 방법의 차이로 인한 저항 변화가 나타난 것으로 판단된다.

전지를 구성하는 전극과 전해질, 집전체 등에서 발생하는 저항 손실의 크기를 비교해 보기 위해 먼저 각 요소에서의 저항을 구해야 한다. 전지의 각 요소마다 전류가 들어오고 나가는 경계가 있는데, 이 경계들에서의 평균 포텐셜을 식 (22)에서와 같이 구한다.

그리고 유입경계와 유출경계 사이의 평균포텐셜의 차이와 평균전류밀도로부터 비면적저항(ASR, $\Omega \cdot \text{cm}^2$) 이 식 (23)의 관계로부터 얻어질 수 있다. 이렇게 구한 ASR값을 Table 4에 나타낸 총 ASR값에 대한 비율로 바꾸어 Fig. 10에 나타내었다.

$$\phi_{avg} = \frac{1}{L_c} \int_{0.05}^{0.20} \phi dz \quad (22)$$

$$ASR = \frac{|\phi_{avg,1} - \phi_{avg,2}|}{i_{avg}} \quad (23)$$

Table 5 Comparison with literature values of Ohmic ASR for planar type SOFC

	electrolyte	contact resistance
(CASE-1)	0.0157	0.0266
Jung et al. ¹¹⁾	0.0170	0.0280

CASE-1의 경우에는 전체 저항에서 전해질의 저항이 약 30%를 차지하고 있으며 실제 전극 자체의 저항은 크지 않은 것을 알 수 있다. 이는 Table 5에서와 같이 Jung 등이¹²⁾ 실험을 통해 구한 평판형 전지에서 저항 값과 대략적으로 비슷하다. 그러나 일단 평판형 구조에서 원통형 구조로 바뀌게 되면 전류집전 경로가 원통의 길이방향으로 이루어지기 때문에 집전체에서의 저항 손실이 급격히 증가한다. 그 결과 집전체에서의 저항이 큰 비율을 차지하는데 그 중에서도 연료극 집전체에서의 저항이 60% 이상 많게는 80% 가까이 차지하는 것을 알 수 있다. 따라서 원통형 구조의 전지에서 집전체를 포함하여 외부 부하 연결 및 스택을 구성할 때에는 연료극 집전체에서의 저항손실을 줄이는 것이 가장 효과적인 방법이 될 수 있다. 평판형 구조에서와 같이 전류흐름을 전극 전체에 걸쳐 두께방향으로 일어나게 하는 것이 가장 이상적이지만 원통형 구조에서는 그렇게 할 수가 없으므로 가장 최선은 부하연결을 모두 2곳으로 연결하는 것이다.

5. 결 론

본 논문에서는 원통형 SOFC에서 길이방향으로의 전류집전 방법에 따라 나타나는 전지의 손실을 요소별로 분리하였으며 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 동일한 평균전류밀도 조건이라 하여도 집전 방법에 따라서 온도분포와 농도분포는 달라진다.
- 2) 활성화 손실과 농도 손실은 집전방법에 따라 거의 변하지 않으나 저항 손실은 크게 변화하여 전지의 성능 변화에 지배적인 영향을 미친다.
- 3) 저항 손실 중에서 연료극 집전체가 차지하는 비율이 매우 높아서 많게는 80% 가까이 된다.

현재 연료극쪽 집전체가 저항손실에서 차지하는 비율이 높은 이유는 집전 재료로서 Ni를 사용했기 때문이다. 연료극쪽에 고전도성 재료를 사용한다면 이러한 문제는 개선될 수 있으나 비용적 측면에서 유리하지 못할 수 있다. 따라서 현재의 방식을 유지한다면 연료극 쪽의 부하연결을 2곳으로 하는 것이 스택 제작에 있어서 저항손실을 줄이는데 가장 효과적일 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 1) W. Vielstich, H. A. Gasteiger and A. Lamm, "Handbook of Fuel Cells-Fundamentals, Technology and Applications", Vol. 1, John Wiley & Sons, Chichester, 2003.
- 2) Ryan P. O'Hayre, Suk-won Cha, Whitney Colella, Fritz B. Prinz, "Fuel Cell Fundamentals", Wiley & Sons, New York, 2006.
- 3) H. Yakabe, T. Ogiwara, M. Hishinuma, I. Yasuda, "3-D model calculation for planar SOFC", Journal of Power Sources, 102, 2004, pp. 144-154.
- 4) Daan Cui, Lin Liu, Yonglai Dong, Mojie Cheng, "Comparison of different current collecting modes of anode supported micro-tubular SOFC through mathematical modeling", Journal of Power Sources, 174, 2007, pp. 246-254.
- 5) Toshio Suzuki, Toshiaki Yamaguchi, Yoshinobu Fujishiro, Masanobu Awano, "Current collecting efficiency of micro tubular SOFCs", Journal of Power Sources, 163, 2007, pp. 737-742.
- 6) Huayang Zhu, Robert J. Kee, "The influence of current collection on the performance of tubular anode-supported SOFC cells", Journal of Power Sources, 169, 2007, pp. 315-326.
- 7) 이규호, 남기훈, 변재기, 최남현, 최영돈, "Wave 형상 채널을 통한 연료전지 Cathode에서의 물질전달 특성 향상에 관한 연구", 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 22, No. 2, P. 71.
- 8) B. Todd and J.B. Young, "Thermodynamic and

- transport properties of gases for use in solid oxide fuel cell modeling”, *Journal of Power Sources*, 110, 2002, pp. 186-200.
- 9) Feng Zhao and Anil V. Virkar, “Dependence of polarization in anode-supported solid oxide fuel cells on various cell parameters”, *Journal of Power Sources*, 141, 2005, pp. 79-95.
- 10) Paola Costamagna and Kaspar Honegger, “Modeling of Solid Oxide Heat Exchanger Integrated Stacks and Simulation at High Fuel Utilization”, *J. Electrochem. Soc.*, 145, 1998, pp. 3995-4007.
- 11) S. Campanari and P. Iora, “Definition and sensitivity analysis of a finite volume SOFC model for a tubular cell geometry”, *Journal of Power Sources*, 132, 2004, pp. 113-126.
- 12) H.Y. Jung, W.-S. Kim, S.-H. Choi, H.-C. Kim, J. Kim, H.-W. Lee, J.-H. Lee, “Effect of cathode current-collecting layer on unit-cell performance of anode-supported solid oxide fuel cells”, *Journal of Power Sources*, 155, 2006, pp. 145-151.