

기체확산층의 기공률이 고분자 전해질 연료전지 성능에 미치는 영향에 관한 전산해석 연구

김경연* · 손영준† · 김민진** · 이원용**

(2009년 7월 10일 접수, 2009년 9월 14일 수정, 2009년 9월 15일 심사완료)

Numerical Study on the Effects of GDL Porosity on the PEMFC Performance

Kyoungyoun Kim, Young-Jun Sohn, Minjin Kim and Won-Yong Lee

Key Words : GDL(기체확산층), PEMFC(고분자 전해질 연료전지), Performance(성능), CFD(전산 유체역학), Porosity(기공률), Thermal Conductivity(열전도도)

Abstract

Numerical analysis was carried out to investigate the effect of GDL (Gas diffusion layer) porosity on the performance of PEMFC (proton exchange membrane fuel cell). A complete three-dimensional model was chosen for single straight channel geometry including cooling channel. Main emphasis is placed on the heat and mass transfer through the GDL with different porosity. The present numerical results show that at high current densities, the cell voltage is influenced by the GDL porosity while the cell performance is nearly the same at low current densities. At high current densities, low value of GDL porosity results in decrease of the fuel cell performance since the diffusion of reactant gas through GDL becomes slow with decreasing porosity. On the other hand, for high GDL porosity, the effective thermal conductivity becomes low and the heat generated in the cell is not removed rapidly. This causes the temperature of fuel cell to increase and gives rise to dehydration of the membrane, and ultimately increase of the ohmic loss.

기호설명

<p>ϕ : 기공률</p> <p>K : 기체투과도 [m²]</p> <p>j : 전류밀도 [A/m²]</p> <p>V_{oc} : 개방회로 전압 [V]</p> <p>V_{cell} : 전지 전압 [V]</p> <p>t_m : 전해질 두께 [m]</p>	<p>A_{cv} : 계산체적의 비표면적 [m⁻¹]</p> <p>F : 패러데이 상수, 96487 [C/mol]</p> <p>R : 기체상수, 8.314 [J/mol K]</p> <p>M : 분자량 [kg/mol]</p> <p>k^{eff} : 유효열전도도 [W/mK]</p> <p>D^{eff} : 유효확산계수 [m²/s]</p>
--	---

하첨자

wv	: 기체상태 물
lw	: 액체상태 물
e	: 전기화학 반응
p	: 상변화
sat	: 포화상태

† 책임저자, 회원, 서울대학교 기계공학과, 한국에너지기술연구원

E-mail : yjsohn@kier.re.kr

TEL : (042)860-3087 FAX : (042)860-3104

* 한밭대학교 기계공학과

** 한국에너지기술연구원

1. 서 론

고분자 전해질 연료전지는 낮은 작동 온도, 고출력, 빠른 시동 등의 장점으로 인해 다양한 응용분야에서 주목 받는 기술이다. 고분자 전해질 연료전지는 막전극접합체(Membrane electrode assembly; MEA), 기체확산층(Gas diffusion layer; GDL), 연료채널, 분리판, 냉각채널 등으로 구성된다. 음극 및 양극 쪽의 연료채널을 통해 공급되는 가습된 수소 및 공기가 기체확산층을 통해 막전극접합체로 이동하게 되고, 촉매층(Catalyst layer; CL)에서의 전기화학반응을 통해 전기가 발생하며, 이 때 부가적으로 열과 물이 생성된다.

가스확산층은 채널을 통해 공급되는 연료를 효율적으로 반응면적에 공급하여야 하며, 동시에 화학반응으로 인해 생성된 열 및 응축수를 잘 배출하도록 선정되어야 한다. 반응 기체가 GDL 을 통해 MEA 쪽으로 충분히 빠르게 확산 되지 못하면 큰 농도손실을 발생하게 되어 셀전압의 저하를 초래한다. 또한, 화학반응으로 인해 발생된 열이 효과적으로 배출되지 못하면 전해질 막이 건조되어 이온전도도가 감소하고 이는 저항 손실(ohmic loss) 을 증가시켜 셀전압이 낮아지게 된다.⁽¹⁾ 따라서, GDL 내부의 확산 물질 전달 및 열 전달의 특성이 연료전지 성능에 직접적인 영향을 미친다.

일반적으로 GDL 의 대표적인 물성치는 투과도(permeability) 및 기공률(porosity)으로 알려져 있다. 투과도는 GDL 내부의 압력차이에 의한 전달 현상과 관련이 있다. 사행유로와 같은 꺾어진 채널 구성에서 인접한 유로 간의 큰 압력 구배는 GDL 내부에서의 우회유동(bypass flow)을 유도하여 공급 연료의 분포에 영향을 주고, 최종적으로 전류밀도 분포에 영향을 미친다고 보고되었다.^(2,3) 반면, 기공률은 GDL 내부에서 반응 기체의 유효 확산계수와 밀접한 관계가 있으므로 확산 물질 전달에 직접적인 영향을 주게 된다. 아울러, 다공성 물질인 GDL 내부에서의 평균 열전도도에도 큰 영향을 끼친다. 따라서, GDL 기공률은 물질 전달 및 열 배출과 직접적인 영향이 있는 중요한 인자이다.

Bering & Djilali⁽⁴⁾은 작동 압력, 온도, 이용률, GDL 기공률, GDL 두께 등의 다양한 인자에 대한 연료전지의 성능 변화에 대한 전산해석 연구를 수행하였다. 높은 기공률을 갖는 GDL 에서는 확산에 의한 물질 전달이 활성화되지만, 동시에 접촉면적의 감소로 인해 접촉저항도 증가하게 됨을 관찰하였다. 따라서 그들의 계산 조건하에서는 0.4 의 기공률이 가장 적

절하다고 보고하였다. 연료전지를 체결하게 되면 렌드에 접하는 GDL 의 기공률은 감소하게 된다. 이러한 효과를 고려하기 위해 Roshandel 등⁽⁵⁾은 GDL 기공률의 공간적인 변화에 따른 연료전지 성능 변화를 수치적으로 연구하였다. 기공률의 변화를 통한 GDL 내부에서 확산계수의 변화는 활성과전압에 영향을 주어 연료전지 성능에 큰 영향을 끼침을 보고하였다. Jang 등⁽⁶⁾은 다양한 GDL 의 물성치가 PEM 연료전지 성능에 미치는 영향에 대한 수치적 연구를 수행하였다. 그들의 전산해석 결과는 0.3-0.6 범위의 기공률에서는 기공도가 증가할 수록 촉매층으로의 확산이 증가하여 연료전지의 성능이 증가한다고 보고하였다. 그러나, iso-thermal model 에 기반한 전산해석 모델을 사용하였으므로 높은 기공률의 경우 열 배출의 감소로 유발되는 막의 건조에 의한 연료전지의 성능감소는 고려되지 않았다. 한편, Ju 등⁽⁷⁾은 전산해석을 통해 GDL 의 열전도도가 막의 온도상승에 큰 영향을 주며, 특히 공급 연료의 가습 정도가 낮은 경우 연료전지 내부의 온도상승이 고분자 전해질 막의 건조를 초래하여 큰 손실을 야기함을 보고하였다.

그러나, 기존의 열 전달을 포함한 연료전지 전산해석 연구들의 대부분은 GDL 의 열전도도 및 확산계수를 독립적으로 부과하고 있다.⁽⁸⁾ 문헌조사에 의하면 다공성 매질을 통과하는 유동의 유효열전도도 및 유효확산계수는 기공률에 따라 변화한다⁽⁹⁾. 또한, 유효확산계수는 온도의 함수이므로, 실제 연료전지의 운전 시 GDL 선정을 통해 독립적으로 열 배출 및 확산을 제어하기에는 어려움이 있다. 기공률이 너무 작으면 반응기체의 공급이 원활하지 못해 연료전지의 성능 저하를 야기하게 된다. 반면, 기공률이 너무 크면, GDL 의 열전도도가 낮아지게 되므로 열 배출 성능이 저하되고 MEA 가 건조되어 연료전지 성능이 저하된다. 따라서, 열 및 물질 전달 관리의 측면에서 적절한 기공률을 갖는 GDL 을 선정하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 GDL 기공률에 따른 GDL 내부에서의 반응 기체 전달 및 열 배출의 변화 및 그로 인한 연료전지의 성능 변화를 조사하고자 3 차원 전산모사를 수행하였다. 앞서 언급한 GDL 의 물성치 중 투과도의 효과를 배제하기 위해 우회유동이 존재하지 않는 직선관 형태의 유로를 선정하였다. 0.3, 0.5, 0.7 의 기공률에 대하여 다양한 전류밀도의 조건에서 총 18 경우의 계산을 수행하여, GDL 내부에서의 반응 기체 전달 및 생성된 열전달의 측면에서 기공률이 연료전지 성능에 미치는 효과를 파악하였다.

2. 전산해석 모델

Fig. 1 은 전체적인 계산영역 및 PEMFC 의 각 구성요소를 나타낸다. 양극 및 음극의 반응가스 공급 유로 사이에 MEA 가 위치하게 된다. 가습된

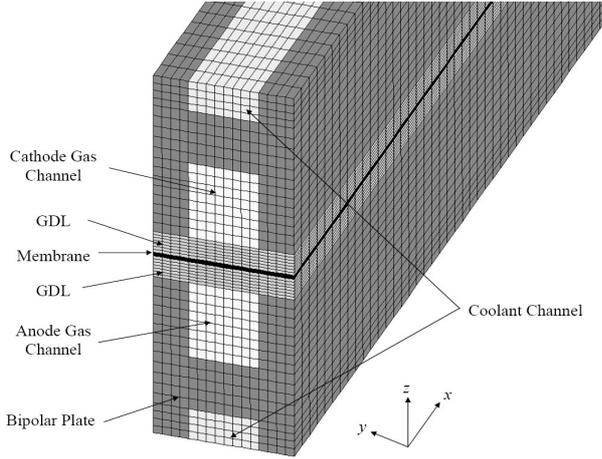


Fig. 1 A schematic diagram of the computational domain

수소 및 공기가 각 유로로 공급되며 그 유입 속도는 아래와 같이 평균 전류밀도 (j_{avg}) 및 가스 이용률 ($1/\zeta$) 에 의해 결정된다.

$$V_{in} = \frac{\zeta j_{avg} RT}{nFPX_i} \frac{A_{rxn}}{A_{cross}} \quad (1)$$

또한, 반응가스 및 냉각수의 출구 경계조건으로 는 질량유량조건을 사용하였다. y 방향의 측면에서는 단열조건을 사용하였으며, z 방향으로는 주기적 경계조건을 사용하였다. 연료전지내부의 유동을 이상기체로 이루어진 혼합 기체의 층류 유동으로 가정하면 지배방정식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = s^c \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + s_i^m \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho Y_n}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j Y_n) = -\frac{\partial}{\partial x_j} F_{n,j} + s_n^y \quad (4)$$

Table 1 Source terms for governing equations

Governing equation Location	Non-zero volumetric source terms	
Conservation of mass	$s^c = s_{H_2}^y + (s_{wv}^y)_e + (s_{wv}^y)_p + (s_{lw}^y)_p$ $s^c = s_{O_2}^y + (s_{wv}^y)_e + (s_{wv}^y)_p + (s_{lw}^y)_p$	Anode CL Cathode CL
Hydrogen transport CL	$s_{H_2}^y = -\frac{j}{2F} M_{H_2} A_{cv}$	Anode
Water vapor transport	$(s_{wv}^y)_e = -\alpha \frac{j}{F} M_{H_2O} A_{cv}$ $(s_{wv}^y)_e = \left(\frac{j}{2F} + \alpha \frac{j}{F} \right) M_{H_2O} A_{cv}$ $(s_{wv}^y)_p = \frac{M_{H_2O} \sum_{n \text{ of } v} \text{mass}_{n \text{ of } v}}{\left(1 - \frac{P_{wv}^{sat}}{P_v} \right)} \left[\frac{P_{wv}^{sat} - P_{wv}}{P_v} \right] \cdot r$	Anode CL Cathode CL Entire domain
Liquid water transport	$(s_{lw}^y)_p = -(s_{wv}^y)_e$	Entire domain
Oxygen transport	$s_{O_2}^y = -\frac{j}{4F} M_{O_2} A_{cv}$	Cathode CL
Energy equation	$s_e^h = h_{form} \left[\frac{1}{2F} j \cdot A_{cv} \right] - j \cdot V_{cell} A_{cv}$ $s_p^h = (s_{lw}^y)_p \cdot h_{fg}$	Cathode CL Entire domain

Table 2 Computational parameters

Gas channel length (mm)	100
Gas channel width (mm)	0.8
Gas channel height (mm)	1.0
Membrane thickness (mm)	0.05
GDL thickness (mm)	0.28
Electrode width (mm)	1.6
Coolant channel width (mm)	0.8
Coolant channel height (mm)	0.8
GDL permeability (m ²)	1e ⁻¹²
Anode pressure (atm)	1
Cathode pressure (atm)	1
Stoichiometric rate at anode	1.5
Stoichiometric rate at cathode	2.0
Anode inlet temperature (°C)	65
Cathode inlet temperature (°C)	65
Coolant inlet temperature (°C)	62
Relative humidity at anode (%)	80
Relative humidity at cathode (%)	80
Exchange current density for HOR (Am ⁻²)	2000

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho h u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + s_e^h + s_p^h \quad (5)$$

여기서, ρ , μ , h , u_j 는 혼합 기체의 밀도, 점성계수, 엔탈피, 속도 성분을 나타내며 Y_n 는 물질 n 의 질량분율을 나타낸다. 연료전지 내부에서의 전기화학 반응으로 인하여 혼합 기체의 조성이 변화하게 되며 또한 열도 발생하게 된다.⁽¹⁰⁾ 따라서 이를 고려하기 위하여 각 지배방정식에 Table 1 과 같은 생성항을 추가하여 계산한다.

위의 지배방정식에서 화학종방정식(식 (4))은 물질 n 의 j 방향으로의 질량확산 $F_{n,j}$ 를 포함하고 있으며 아래와 같이 정의된다.

$$F_{n,j} = -D_n \frac{\partial \rho Y_n}{\partial x_j} \quad (6)$$

여기서 D_n 은 혼합 기체 내의 물질 n 의 확산계수이며 다공성 매질인 GDL 내부의 유동에 대해서는 Bruggemann 관계식에 의해 다음과 같은 유효 확산계수를 사용한다.⁽¹⁾

$$D_n^{eff} = \phi^{1.5} D_n \quad (7)$$

에너지방정식 (식 5) 에 표시된 열전도도 또한 GDL 내부의 유동에 대해서는 아래와 같은 유효 열전도도를 사용한다.⁽¹¹⁾

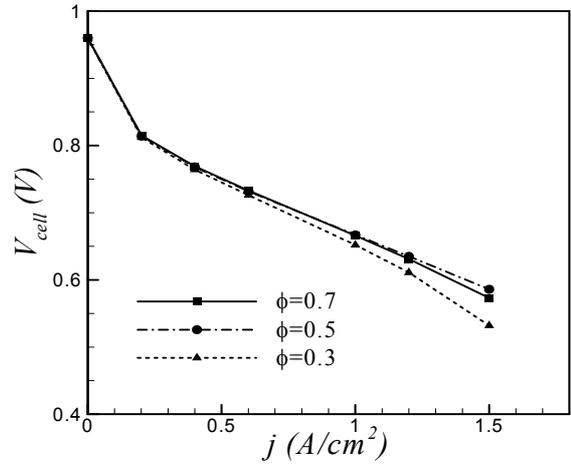


Fig. 2 Polarization curve for different GDL porosity (ϕ)

$$k^{eff} = k_f \left(k_f / k_s \right)^{-n} \quad (8)$$

여기서 $n = 0.280 - 0.757 \log_{10} \phi + 0.057 \log_{10} (k_f / k_s)$ 이며, k_s 는 다공성 매질의 고체 부분의 열전도도이고 k_f 는 다공성 매질을 통과하는 혼합 기체의 열전도도이다.⁽¹²⁾

앞서 언급한 바와 같이, 위의 식 (7)과 (8)에서 GDL 내부의 유동에 대한 확산계수 및 열전도도는 기공률 (ϕ) 의 함수임을 확인할 수 있다.

Table 1 에 나타난 생성항들에 포함된 α 는 전해질 막을 통과하는 양이온 하나당 함께 이동하는 물 분자의 수 (net water transfer coefficient) 이며 아래와 같이 정의된다.

$$\alpha = n_{drag} - \frac{F}{j} D_\lambda \frac{\rho_{dry}}{M_m} \frac{d\lambda}{dz} \quad (9)$$

여기서, n_{drag} 은 전기삼투현상에 의해 이동되는 물의 양을 나타내고, D_λ 는 전해질 막 내부의 물의 농도 차이에 의한 확산계수이며 이들 값들은 전해질 막 내부의 함수율 (λ) 에 영향을 받는다.

전류밀도의 분포는 개방회로전압과 전압손실의 관계식으로부터 구해진다.

$$j = \frac{\sigma_m}{t_m} (V_{oc} - V_{cell} - \eta) \quad (10)$$

여기서, 전해질 막의 이온전도도 σ_m 은 아래와 같이 정의된다.

$$\sigma_m = (0.5139 \lambda_a - 0.326) \exp \left[1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (11)$$

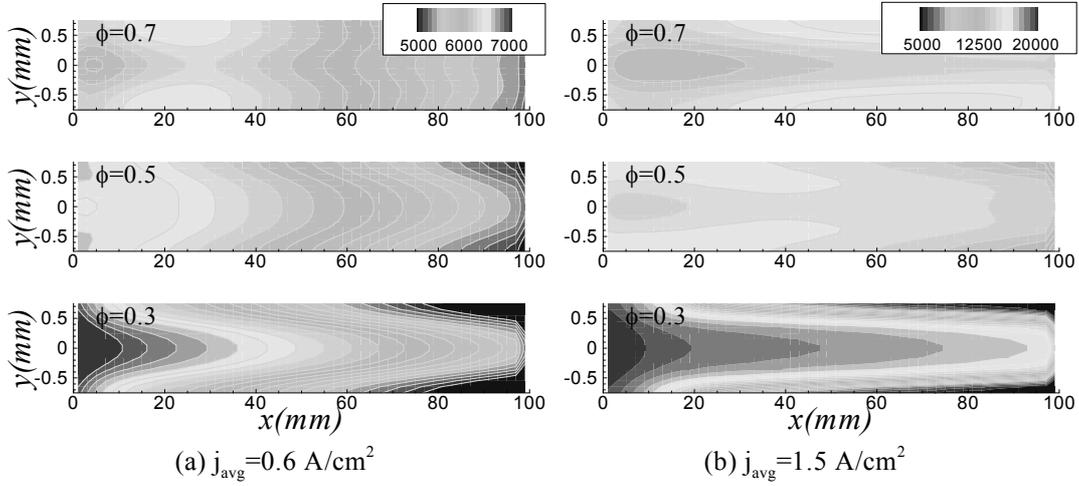


Fig. 3 Distributions of local current density (A/m^2) on the MEA surface

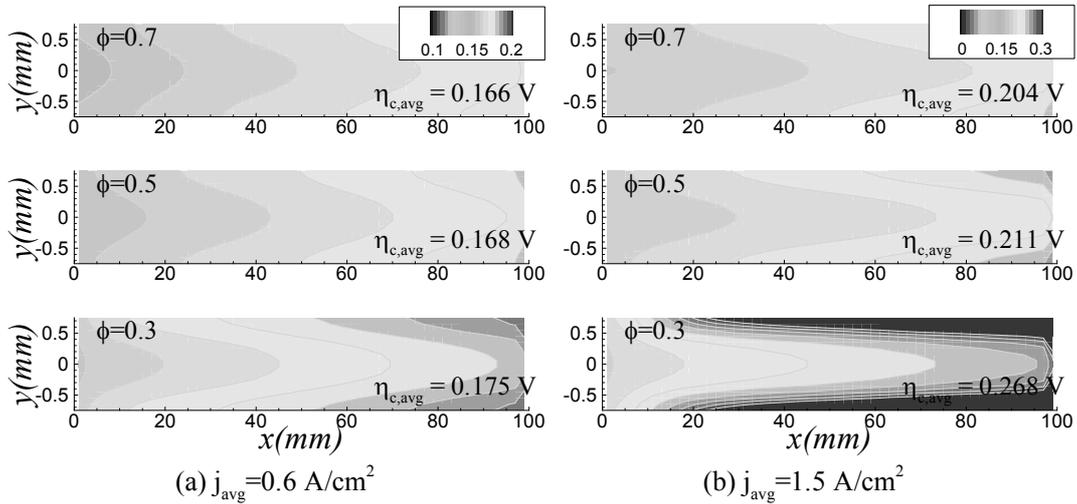


Fig. 4 Distributions of cathode over-potential (V) on the MEA surface

λ_a 는 전해질 막의 함수율로 아래와 같이 물의 활성도 (a_w) 의 함수로 표현된다.

$$\lambda = \frac{0.043 + 17.8a_w - 39.85a_w^2 + 36.0a_w^3}{14 + 1.4(a_w - 1)} \quad (0 < a_w \leq 1) \quad (12)$$

$$\lambda = \frac{0.043 + 17.8a_w - 39.85a_w^2 + 36.0a_w^3}{14 + 1.4(a_w - 1)} \quad (1 < a_w \leq 3)$$

식 (10) 에 의해 계산된 전류밀도를 통해 아래의 식을 사용하여 활성과전압을 계산한다.

$$\eta = \underbrace{\frac{RT}{\alpha_a F} \ln \left(\frac{j}{j_{H_2}^0} \frac{p}{P_{H_2}} \right)}_{\eta_a} + \underbrace{\frac{RT}{\alpha_c F} \ln \left(\frac{j}{j_{O_2}^0} \frac{p}{P_{O_2}} \right)}_{\eta_c} \quad (13)$$

이상의 지배방정식은 유한체적법에 기반한 상용프로그램인 STAR-CD 를 사용해 해석되었으며 전기화학반응으로 인해 요구되는 각 지배방정식의

생성항들 및 혼합기체의 물성치들은 사용자지정 서브루틴 (user defined subroutine) 을 통해 적용되었다.

3. 전산해석 결과 및 토의

본 연구에서는 일정한 평균 전류밀도 조건 하에서 전압손실을 조사하여 연료전지의 성능을 파악하고자 하였으므로, 전지전압을 조절하여 주어진 평균전류밀도를 얻도록 반복적인 계산을 수행하였다. $(N_x, N_y, N_z) = (50, 16, 49)$ 의 격자로 계산을 수행하였으며, 격자민감도 분석을 위해 두 배의 격자를 사용하여 계산한 결과, 셀전압의 차이가 0.3% 이내였으며 전류밀도분포 또한 거의 동일하게 나타났으므로 충분히 조밀한 격자가 사용되었

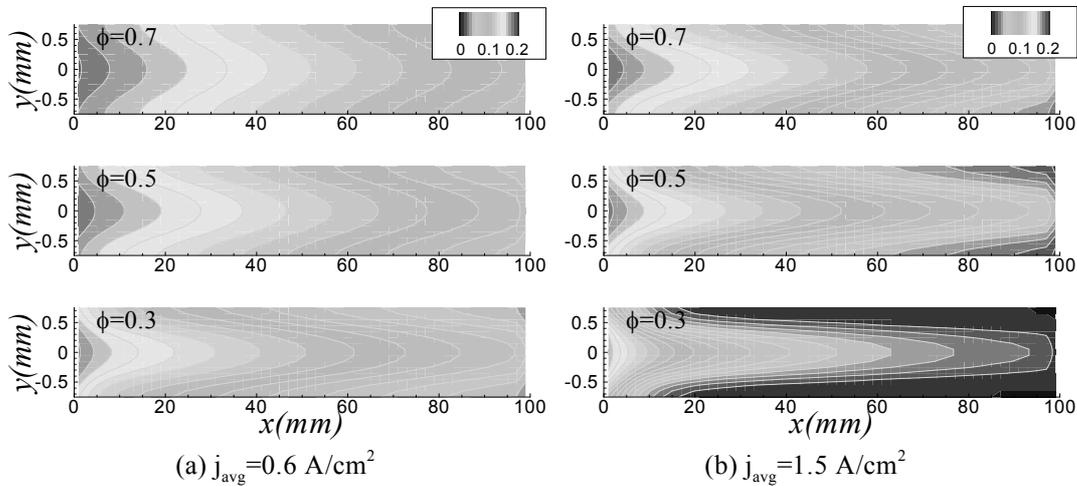


Fig. 5 Distributions of oxygen mass fraction on the MEA surface

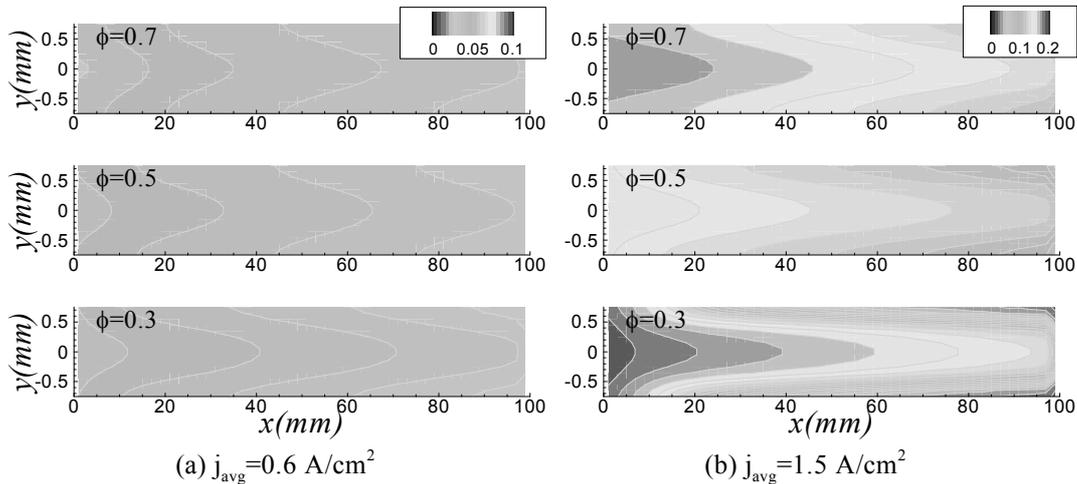


Fig. 6 Distributions of ohmic loss (V) on the MEA surface

음을 확인할 수 있었다. 전기화학 및 형상에 대한 인자들은 Table 2 에서 나타내었다. Fig. 2 는 GDL 기공률에 따른 연료전지의 성능을 나타내는 I-V 곡선이다. 전류밀도가 낮은 영역 ($j_{avg} < 0.5 \text{ A/cm}^2$)에서는 기공률의 변화에 영향 없이 거의 동일한 성능을 보여준다. 반면, 전류밀도가 큰 영역 ($j_{avg} > 1 \text{ A/cm}^2$)에서는 기공률에 따른 연료전지 성능의 변화를 뚜렷이 확인할 수 있다. 가장 낮은 기공률 $\phi = 0.3$ 에서의 성능이 가장 낮게 나타났으며, 이는 기공률이 낮을수록 반응 기체의 축매층으로의 확산이 느려지기 때문이다. 그러나, $\phi = 0.5$ 의 경우가 $\phi = 0.7$ 보다 오히려 약간의 성능이 증가한 것으로 나타났다. 이러한 경향은 전류밀도가 큰 영역 ($j_{avg} > 1.2 \text{ A/cm}^2$)에서 관찰되며, 이는 전기화학 반응을 통해 발생하는 열의 양이 많은 상황에서 기공률이 너무 높을 경우 GDL을 통한 열전달

이 효율적으로 이루어 지지 않아 막이 건조하게 되고, 그로 인해 저항 손실이 증가하였기 때문으로 추정할 수 있다. 기공률에 의한 GDL 열전도도의 변화를 고려하지 않은 기존의 전산해석의 연구 결과는 기공률이 높을수록 연료전지 성능이 증가한다고 보고하였다.⁽⁶⁾ 그러나, 본 전산해석 결과는 기공률에 의해 변화하는 GDL의 열전도도 또한 연료전지 성능에 영향을 끼치므로 이에 대한 고려가 이루어져야 함을 제안한다.

Fig. 3은 기공률에 따른 전류밀도의 분포를 나타낸다. 동일한 평균 전류밀도에 대해서 기공률에 따라 전류밀도의 분포는 큰 차이를 보인다. 평균 전류밀도가 0.6 A/cm^2 인 경우에는 기공률이 감소함에 따라 전류밀도의 공간상의 균일도가 감소함을 확인할 수 있다. 그러나, 평균 전류밀도가 1.5 A/cm^2 로 높은 경우에는, $\phi = 0.5$ 의 기공률이 $\phi =$

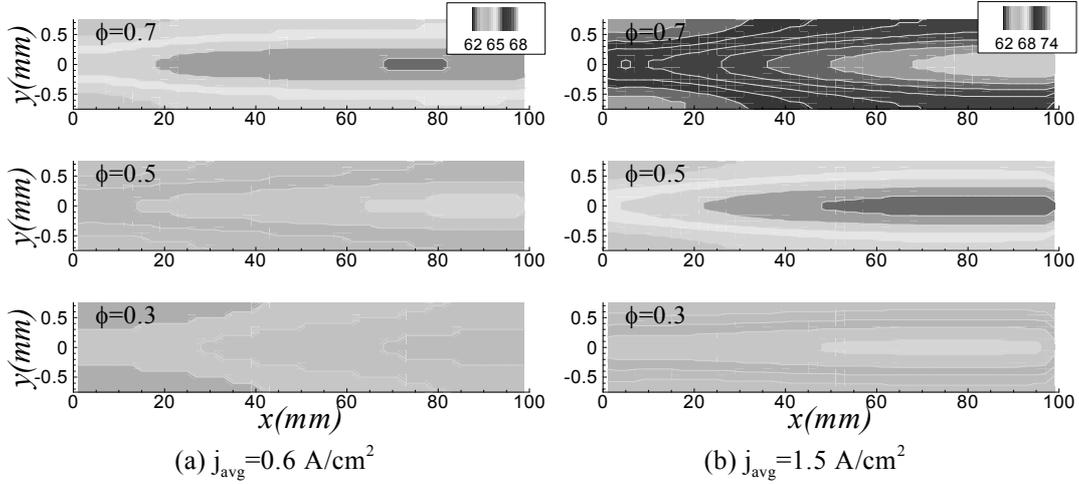


Fig. 7 Temperature (°C) distributions on the MEA surface of cathode side

0.3 및 $\phi = 0.7$ 에 비해 더 균일한 전류밀도의 분포를 나타낸다. 전류밀도의 불균일성으로 인해, 국소적으로 높은 전류밀도가 발생하는 부분에서는 많은 양의 열이 발생하게 된다. 본 전산해석 결과는 기공률에 의해 전류밀도가 영향을 받고, 높은 전류밀도 영역에서는 적절한 GDL 기공률을 선택함으로써 전류밀도의 균일성을 증가시킬 수 있음을 보여준다.

Fig. 4 는 기공률에 따른 cathode 촉매층에서의 활성화전압에 의한 손실을 나타낸다. 기공률이 감소함에 따라 활성화전압이 증가하며, 전류밀도가 높은 영역에서 더 뚜렷하게 관찰할 수 있다. 기공률이 $\phi = 0.7$ 에서 $\phi = 0.3$ 으로 감소함에 따라 $j_{avg} = 0.6 \text{ A/cm}^2$ 인 경우는 평균 활성화전압이 0.166 V 에서 0.175 V 로 다소 (5%) 증가하였으나, $j_{avg} = 1.5 \text{ A/cm}^2$ 인 경우에는 0.204 V 에서 0.268 V 로 크게 (30%) 증가하였다. Fig. 5 에서 확인할 수 있듯이, 일반적으로 채널 부분에 비해 랜드 부분에서 산소의 질량 분율이 낮으며, $\phi = 0.3$ 으로 낮은 기공도의 경우 그 차이가 더 증가됨을 확인할 수 있다. 이는 낮은 기공률의 경우, GDL 내부를 통해 촉매층으로 반응 기체의 확산이 충분이 이루어 지지 않기 때문으로 해석할 수 있다.

이온교환막의 이온전도도 및 국소전류밀도에 의해 발생하는 저항 손실 (ohmic loss) 의 분포를 기공률에 따라 Fig. 6 에서 나타내었다. 평균전류밀도가 $j_{avg} = 0.6 \text{ A/cm}^2$ 의 경우, 기공률에 따라 저항 손실은 크게 차이 나지 않는다. 그러나, $j_{avg} = 1.5 \text{ A/cm}^2$ 의 경우, 기공률의 변화에 따라 저항 손실은 크게 변화함을 확인할 수 있다. 세 가지의

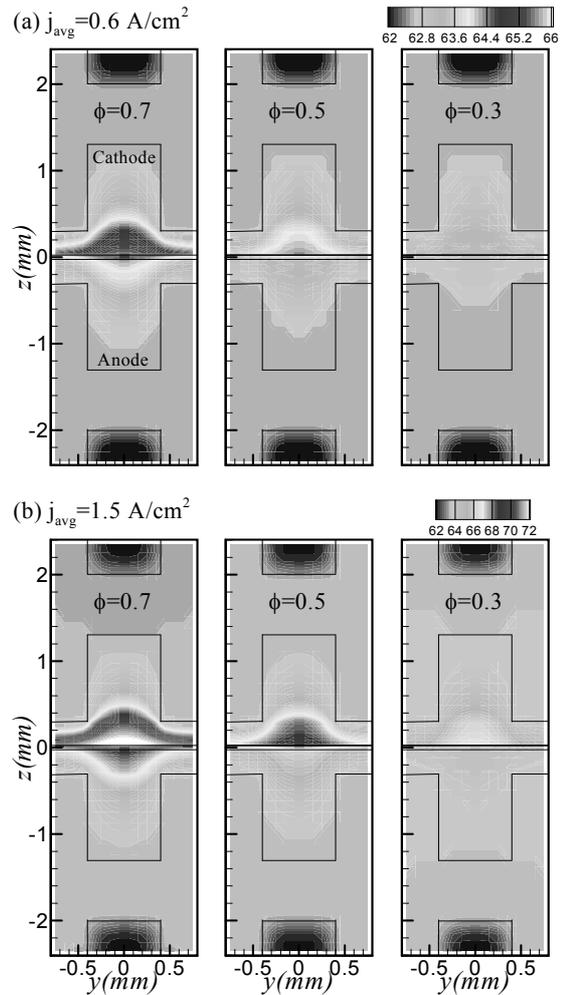


Fig. 8 Temperature (°C) distributions at $x=50 \text{ mm}$

기공률에 대해 계산을 수행한 결과, $\phi = 0.5$ 의 값이 본 계산 조건하에서 저항손실이 가장 작게 나타났다. $\phi = 0.7$ 의 경우와 비교하면, 기공률의 감

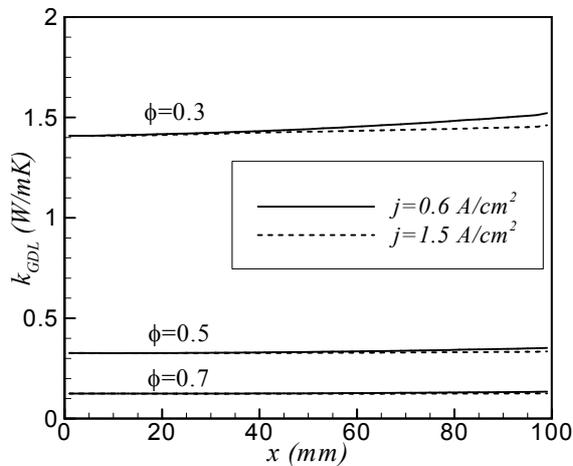


Fig. 9 Thermal conductivity along the centerline in the cathode GDL

소로 인해 활성화전압 손실이 증가하나 (Fig. 4), 이에 비해 저항 손실이 더 줄어들어, 전체적인 셀 전압은 기공률이 감소하였음에도 오히려 증가하였다 (Fig. 2).

Fig. 7 은 MEA 표면 (cathode 측) 에서의 온도분포를 나타낸다. 평균 전류밀도 $j_{avg} = 0.6$ 과 1.5 A/cm^2 두 경우 모두, 기공률이 클 수록 MEA 표면 온도가 증가한다. MEA 표면 온도의 증가는 water activity 의 감소로 이어지며, 막의 건조로 인해 이온전도도가 감소하게 된다. 이러한 이온전도도의 감소는 저항손실로 인한 연료전지의 성능저하에 영향을 미치며, 전류밀도가 높은 영역에서 그 효과가 크게 나타난다. 즉, 막의 건조를 방지하기 위해서는, GDL 을 통한 효과적인 열 배출이 요구된다. 기공률에 따른 GDL 내부에서의 온도분포를 보다 자세히 관찰하기 위해, 직선채널 중심 ($x = 50$ mm) 의 y - z 단면에서 온도 분포를 살펴보았다 (Fig. 8). 전기화학반응으로 인해 발생한 열이 GDL 및 연료 공급 채널과 분리판을 통해 전달되어 냉각채널을 통해 흐르는 냉각수에 의해 배출된다. Cathode 측 MEA 표면에서 가장 높은 온도가 관찰되며, 같은 기공률을 갖는 경우 $j_{avg} = 0.6$ A/cm^2 에 비해 $j_{avg} = 1.5$ A/cm^2 에서 MEA 의 온도가 더 높게 나타났다. 또한, 동일한 전류밀도에 대해서는 기공률이 감소할 수록 MEA 의 온도가 감소함을 확인할 수 있다. Fig. 9 는 cathode GDL 중심부분에서의 유효열전도도를 유동방향을 따라 나타낸다. 열전도도는 전류밀도에 의해 큰 영향을 받지 않으나, 기공률이 감소할수록 열전도도가 증가함을 확인할 수 있다. 결론적으로, GDL 의 기공률이 감소하면 상대적으로 GDL 에서 차지하는 탄소섬유의 부피

가 증가하여 다공성 매질을 통과하는 유동의 유효 열전도도는 증가하게 되고, 생성된 열 배출이 더 원활히 이루어 지게 되어 MEA 의 건조를 방지할 수 있음을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 GDL 기공률에 따른 GDL 내부에서의 반응 기체 전달 및 열 배출의 변화 및 그로 인한 연료전지의 성능 변화를 조사하고자 직선관 형태의 PEMFC 에 대한 3 차원 전산모사를 수행하였다. 전류밀도가 낮은 영역에서는 기공률의 변화에 영향 없이 거의 동일한 성능을 나타내는 반면 전류밀도가 높은 영역에서는 기공률에 따라 연료전지의 셀 전압이 변화하였다. 전류밀도가 높은 운전 조건에서, 기공률이 매우 작을 경우, 연료전지의 성능이 급격히 저하되었으며 이는 기공률이 낮을수록 반응 기체의 촉매층으로의 확산이 느려지기 때문임을 활성화전압과 산소의 질량 분율의 분포를 통해 확인하였다. 한편, 기공률이 높을 경우에는 GDL 을 통한 열 배출이 효율적으로 이루어 지지 않아 막이 건조하게 되고, 그로 인해 저항 손실이 증가함을 확인하였다. 본 연구를 통해, GDL 의 기공률이 PEMFC 내부의 확산 물질 전달에 미치는 영향뿐만 아니라, 기공률에 의해 변화하는 GDL 의 열전도도 또한 연료전지 성능에 영향을 끼치므로 이에 대한 고려가 이루어져야 함을 제안하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 지원을 받는 신재생에너지 기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다. (2005-N-FC12-P-01-30202007)

참고문헌

- (1) O'Hayre, R., Cha, S.-W., Colella, W., and Prinz, F.B., *Fuel Cell Fundamentals* 2005: Wiley.
- (2) Cho, C.-W., Ahn, E.-J., Lee, S., Yoon, Y.-G., and Lee, W.-Y., 2009, "A Study on the Bypass Flow Penetrating Through a Gas Diffusion Layer in a PEM Fuel Cell with Serpentine Flow Channels," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 33, No. 4, pp. 288~297.
- (3) Shimpalee, S., Dutta, S., Lee, W.K., and Van Zee, J.W., 1999, "Effect of Humidity on PEM Fuel Cell Performance Part II - Numerical Simulation," in *ASME IMECE*. Nashville, TN.

- (4) Berning, T. and Djilali, N., 2003, "Three-Dimensional Computational Analysis of Transport Phenomena in a PEM Fuel Cell - a Parametric Study," *Journal of Power Sources*, Vol. 124, No. 2, pp. 440~452.
- (5) Roshandel, R., Farhanieh, B., and Saievar-Iranizad, E., 2005, "The Effects of Porosity Distribution Variation on PEM Fuel Cell Performance," *Renewable Energy*, Vol. 30, No. 10, pp. 1557~1572.
- (6) Jang, J.H., Yan, W.M., and Shih, C.C., 2006, "Effects of the Gas Diffusion-Layer Parameters on Cell Performance of PEM Fuel Cells," *Journal of Power Sources*, Vol. 161, No. 1, pp. 323~332.
- (7) Ju, H., Meng, H., and Wang, C.Y., 2005, "A Single-Phase, Non-Isothermal Model for PEM Fuel Cells," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 48, No. 7, pp. 1303~1315.
- (8) Wang, C.Y., 2004, "Fundamental Models for Fuel Cell Engineering," *Chemical Reviews*, Vol. 104, No. 10, pp. 4727~4765.
- (9) Nield, D.A. and Bejan, A., *Convection in Porous Media*. 1999: Springer.
- (10) Shimpalee, S. and Dutta, S., 2000, "Numerical Prediction of Temperature Distribution in PEM Fuel Cells," *Numerical Heat Transfer Part a-Applications*, Vol. 38, No. 2, pp. 111~128.
- (11) Nield, D.A., 1991, "Estimation of the Stagnant Thermal Conductivity of Saturated Porous Media," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 34, No. 6, pp. 1575~1576.
- (12) Marthur, S., Tondon, P.K., and Saxena, S.C., 1967, "Thermal Conductivity of Binary, Ternary and Quaternary Mixtures of Real Gases," *Molecular Physics*, Vol. 12, No. pp. 569~579.