

촉매 활성층 두께 제어를 통한 연료전지 성능 해석

김홍건*

(논문접수일 2006. 4. 12, 심사완료일 2007. 5. 22)

Performance Analysis of Fuel Cell by Controlling Active Layer Thickness of Catalyst

H. G. Kim*

Abstract

A 2-D model of fluid flow, mass transport and electrochemistry is analysed to examine the effect of current density at the current collector depending on active layer thickness of catalyst in polymer electrolyte fuel cells. The finite element method is used to solve the continuity, potential and Maxwell-Stefan equations in the flow channel and gas diffusion electrode regions. For the material behavior of electrode reactions in the active catalyst layers, the agglomerate model is implemented to solve the diffusion-reaction problem. The calculated model results are described and compared with the different thickness of active catalyst layers. The significance of the results is discussed in the viewpoint of the current collecting capabilities as well as mass transportation phenomena, which is inferred that the mass transport of reactants dictates the efficiency of the electrode in the present analysis.

Key Words : Catalyst(촉매), Porous(다공성의), Membrane(막), Anode(양극), Current Collector(전류집전자), Cathode(음극), Fuel Cell(연료전지)

1. 서론

연료전지는 전기화학 반응에 의해 화학에너지를 전기에너지로 직접 변환하는 장치로 이동전원용, 수송용 뿐만 아니라 공작기계 전원용으로도 향후 가능성이 매우 높다. 특히 고분자 전해질형 연료전지는 짧은 시동시간에 고출력을 낼 수 있고

전류 밀도가 높으며, 환경 친화적인 고효율 발전시스템이다⁽¹⁻³⁾.

또 현재 널리 쓰이고 있는 디젤기관 발전, 증기가스 발전 등과는 달리 연소과정이나 기계적 일이 필요 없는 직접적인 에너지 변환방식이다. 즉 연료전지는 연료가 가지고 있는 자유에너지를 직접 이용하기 때문에 에너지 손실이 적어 총발전효율이 40-60% 정도로 매우 높다^(4,5). 그리고 터빈과 같

* 전주대학교 기계자동차공학과 (hkim@jj.ac.kr)
주소: 560-759 전북 전주시 완산구 효자동 3가 1200번지

은 로터가 없기 때문에 소음이 매우 적다. 따라서 이러한 여러 가지 이유로 인해 화석연료의 대체에너지로 우리나라를 비롯해 여러 선진국에서 각종 연료전지의 개발이 활발히 진행되고 있다^(1,6,7).

이러한 고분자 전해질형 연료전지는 에너지 효율이 높으면서 고분자막을 전해질로 사용하기 때문에 부식이나 크랙 발생의 염려가 없고 전해질이 누출될 염려도 없으며 제작이 간편하여 차량용 이외에도 공작기계 전원용, 현지 설치형 발전용 및 군사용 전원으로써도 응용이 되고 있다. 또한 소형 및 초소형 개질기의 개발로 직접 메탄을 연료전지의 분야에 까지 응용분야가 확대될 것으로 예측 된다. 그러나 직접메탄을 연료전지는 연료의 취급이 용이하다는 장점이 있으나 메탄을 크로스오버 등의 문제로 인한 효율의 감소, 일산화탄소의 백금촉매에 대한 피독성 문제를 내포하고 있다. 특히 촉매 사용량의 증가 등으로 단위전력 발생량당 가격이 높은 편이어서 현재로서는 소형전력공급원 이외에는 적합하지 못하다.

한편 조만간 시장진입이 예상되는 고분자 전해질형 연료전지는 아직 각 구성부품의 단가가 현실적으로 높은 상태다. 이의 주요 부품은 이온전도성 전해질막, 백금촉매 및 담체와 바인더, 가스확산 및 전기전도층, 밀봉용 개스킷, 유로판, 기타 전류 집전기 및 스택 조립을 위한 부속품으로 구성되어 있다. 또한 시스템화를 위하여 수소와 산소의 공급 및 조절을 위한 부분, 습도 조절부분, 냉각 및 온도 조절부분 등이 있고, 그 외에도 발전된 전기에너지의 제어장치와, 수소를 연료로 사용하지 않았을 때의 필요한 수소 발생장치 등을 주요 부분으로 분류한다. 고분자 전해질형 연료전지의 전기화학적 반응의 핵심부품으로 볼 수 있는 막-전극 접합체(MEA)와 유로판(Flow Field Plate)은 가격구성 비율이 높은 이온전도성 전해질막과 백금촉매 등이 주로 사용된다. 또한 이 부분은 전력 생산효율과 직결된 부분이기 때문에 연료전지의 성능향상과 가격경쟁력을 높이는데 매우 중요한 부분으로 간주되고 있으며 막-전극 접합체의 전극부분은 특히 그 중요성을 더해가고 있다⁽⁸⁻¹²⁾. 일반적으로 제작되는 고분자 전해질형 연료전지는 전해질(Electrolyte)과 두개의 전극(Electrode)이 샌드위치처럼 포개어져 있는 형태로 산소와 수소가 각각의 전극으로 흘러갈 때, 생성물로서 전기와 열 그리고 물이 만들어진다^(12,13). 이와 같은 연료전지의 핵심부품인 전극에 관한 연구개발도 최근 활발히 진행되고 있는 실정이다^(14,15).

이 논문에서는 위에 기술한 바와 같이 연료전지의 성능에 큰 영향을 미치는 촉매 활성층의 두께가 전기적 성능에 미치

는 영향을 조사하였으며 전극에서의 질량전달 및 전기화학 반응을 2차원 유한요소해석을 통해 분석함으로써 효율적인 연료전지 설계에 전기화학적 기초자료로 활용하도록 제시하고자 한다.

2. 연료전지 유한요소해석 모델

다공성 재료로 구성된 연료전지의 전극, 즉 양극 및 음극은 손가락교차형 가스공급기(Interdigitated Gas Distributor)와 접촉하고 있으며, 입·출구 채널 및 전류집전자(Current Collector)와 접해 있다. Fig. 1에서 보이는 좌와 같이 연료인 수소는 양극으로 공급이 되며, 동시에 산소(공기)는 음극으로 각각 가습되어 공급된다. 고분자전해질형 연료전지의 원리로는 양극에서 수소는 촉매층과 반응하여 수소이온(H^+)과 전자(e^-)로 분해되고 수소이온은 다공성인 고분자전해질막을 통하여 음극으로 이동한다.

한편 음극으로 공급된 산소는 수소이온과 결합하여 물이 생성되고 전자는 폐회로를 구성함으로써 전기를 발생시킨다. 이와 같은 메커니즘에 의해 음극에서는 항상 물이 생성되므로 해석 및 설계시 이를 고려해야 한다. 연료전지 단위셀에서의 전기적 성능은 기본적으로 촉매에 의존하고 있으며 현재 고분자 전해질 연료전지의 촉매로는 Table 1에 나열된 바와 같이 백금(Pt)을 중심으로 한 합금 혹은 합성체가 가장 보편적으로 사용되고 있다. 표에서 보이는 바와 같이 촉매 재료의 결정격자구조는 주로 면심입방(FCC) 격자구조로서 밀도는 $21.45g/cm^3$, 전기전도도는 $10.6mWcm$ 이고 내화학적 성질을 가지고 있다.

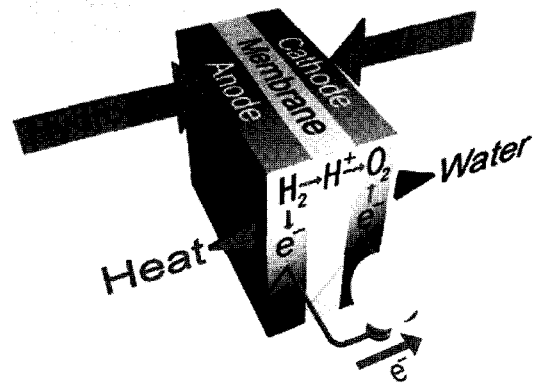


Fig. 1 Schematic diagram of a principle of fuel cell

Table 1 Catalyst materials and structures

Catalysts	Crystal structure	Lattice Parameter (Å)	Particle Size (Å)
Pt	Cubic	3.923	25
Pt-Fe-Cr	Cubic	3.866	49
Pt-Fe-Mn	Cubic	3.876	49
Pt-Fe-Co	Cubic	3.827	46
Pt-Fe-Ni	Cubic	3.812	46
Pt-Fe-Cu	Cubic	3.850	45

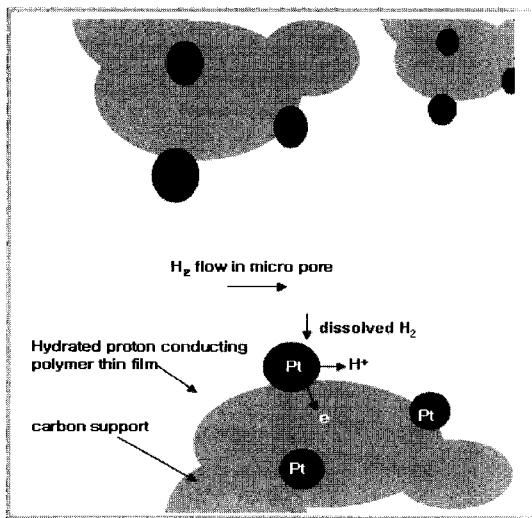


Fig. 2 Reaction process in the electrode

전극에서의 전기화학적 반응 절차는 Fig. 2에서와 같이 가스가 다공성물질의 전극으로 확산과정이 이루어진 후 전극내에서 용해되며 이 용존가스가 다시 전극내에서 확산되어 촉매 내로 흡착되고 가스 분자가 전자와 양성자로 이온화된다⁽¹⁶⁾. 여기서 기존의 배터리와는 달리 연료전지의 최대이론효율은 화학적 에너지가 바로 전기에너지로 변환될 때 카르노 사이클에 제한되지 않기 때문에 50% 이상의 효율을 얻을 수 있다. 하지만 연료전지의 출력은 단위면적당 발생하는 전위차에 의해 제한되며 출력 또한 일정치 않아 DC-DC Converter와 같은 적절한 변환장치가 필요하다. 이의 해석 모델은 다음의 Fig. 3에 도시되어 있다.

Fig. 3에서 수소 가스와 공기에 포함된 산소 가스가 Counter-Flow 상태로 공급되고 있는 것을 알 수 있으며 이때 고분자 전해질 막과 전극 경계면에 촉매 활성층이 도시되

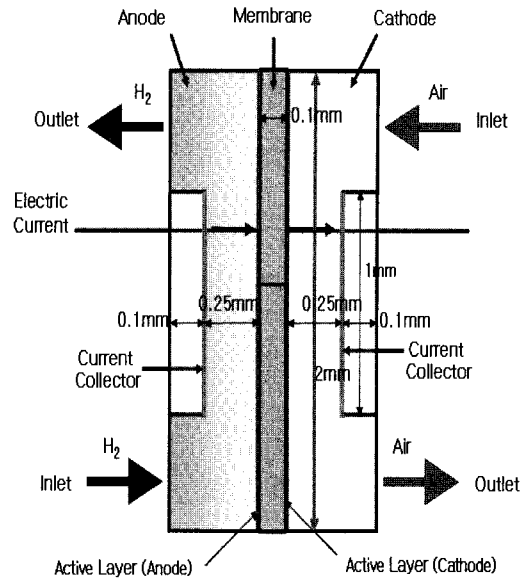


Fig. 3 The interdigitated fuel cell model

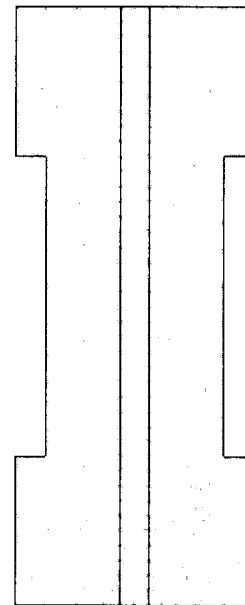


Fig. 4 Finite element mesh for 2-D interdigitated fuel cell model

어 있다. 이러한 유한요소 모델을 메시로 구성하면 다음의 Fig. 4와 같다.

3. 유한요소해석 정식화

2차원 유한요소해석을 통한 연료전지의 성능해석을 위하여 막-전극 접합체(MEA) 및 전류집전자(Current Collector)의 단위모델을 구성하여 해석하였으며(Fig. 3 참조) 지배방정식으로는 전류 평형식, 모멘텀 평형식, 질량 평형식의 3가지 평형식을 설정하여 연료전지 내부의 거동 해석을 수행하였다⁽¹⁷⁾.

3.1 전류 평형식

전위차 분포는 양극(양극)과 음극(음극)은 전도성 직류 매체로, 그리고 전해질막(Membrane)은 단순히 양성자 흐름의 통로로 모델링하였다. 각 영역별 지배방정식은 다음의 식 (1)~(3)과 같다.

$$\nabla \cdot (-\kappa^{s,eff} \nabla \Phi_s) = 0 \quad \text{at } \Omega_a \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (-\kappa^{m,eff} \nabla \Phi_m) = 0 \quad \text{at } \Omega_m \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (-\kappa^{c,eff} \nabla \Phi_c) = 0 \quad \text{at } \Omega_c \quad (3)$$

여기서 Ω 는 각 영역을 의미하며 하첨자 a 는 양극, m 은 전해질막, c 는 음극, s 는 전극(Electrode)을 의미하며 κ^{eff} 는 유효전도도(S/m), 전극의 전위차는 Φ 로 정의하였다. 이 때 유효전도도 S 는 Simense 단위를 말하며 다르게 표현하면 Ampere/Volt(A/V)이 된다. 이 때 양극과 음극 사이에서의 전위차는 전체 셀 전압에 비례한다.

한편 경계조건으로는 양극에서의 전위는 식 (4)에서와 같이 0으로 놓을 수 있고 반면, 전체 전위는 식 (5)와 같이 음극 측의 경계조건으로서 사용될 수 있다. 이 때 $\partial\Omega_i$ 는 각 하첨자에서의 경계영역을 나타낸다.

$$\Phi_s = 0 \quad \text{at } \partial\Omega_a \quad (4)$$

$$\Phi_s = V_{cell} \quad \text{at } \partial\Omega_c \quad (5)$$

나머지 경계조건에 대해서는 절연상태이거나 혹은 대칭조건을 부여하면 된다. 양극과 막의 경계면에서 수직방향으로 작용하는 전류밀도 산출을 위한 경계조건은 다음의 식 (6)~(9)와 같이 정리할 수 있다⁽¹⁷⁾.

$$(-\kappa^{m,eff} \nabla \Phi_m) \cdot n = -i_a \quad \text{at } \partial\Omega_a \quad (6)$$

$$(-\kappa^{m,eff} \nabla \Phi_m) \cdot n = -i_c \quad \text{at } \partial\Omega_c \quad (7)$$

$$(-\kappa^{s,eff} \nabla \Phi_s) \cdot n = -i_a \quad \text{at } \partial\Omega_a \quad (8)$$

$$(-\kappa^{s,eff} \nabla \Phi_s) \cdot n = -i_c \quad \text{at } \partial\Omega_c \quad (9)$$

여기서, i_a 는 식 (10)과 같으며 이에 따른 비례상수는 식 (11)~(14)와 같다.

$$i_a = -K_1 (c_H^{agg} - c_H^{eff} \exp(-K_2(\Phi_s - \Phi_m - \Delta\Phi_{eq,a}))) (1 - K_3 \coth K_3) \quad (10)$$

$$K_1 = \frac{6L_a(1-\epsilon)FD_H^{agg}}{(R^{agg})^2} \quad (11)$$

$$K_2 = \frac{2F}{RT} \quad (12)$$

$$K_3 = \sqrt{\frac{i_{0,a}S}{2F c_H^{eff} D_H^{agg}}} R^{agg} \quad (13)$$

$$c_H^{agg} = \frac{P_{H_2} y_H}{H_H} \quad (14)$$

위의 경계조건 식에서 c^{agg} 는 전체 표면에서 용해된 기체 농도[mol/m³], c^{eff} 는 임의 상태에서의 용해된 기체 농도[mol/m³], $\Delta\Phi_{eq}$ 는 평형조건에서 전극과 고분자 막사이의 전위차를 나타낸다. 또한 L_a 는 전극의 촉매 활성층 두께, ϵ 은 전극의 공극, F 는 패러데이 상수[As/mole], D^{agg} 는 전체 반응에서 용해된 기체의 확산 계수[m²/s], R^{agg} 는 전체 반경, i_0 은 교환전류 밀도[A/m²], S 는 전극의 활성면 면적[m²/m³]을 나타낸다.

한편 고분자 전해질 막과 음극측에서의 음극에 수직방향으로 작용하는 경계면에 대한 경계조건은 식 (15)와 같이 쓸 수 있고 식 (16)~(19)는 이에 따른 비례상수이다.

$$i_c = K_4 c_O^{agg} (1 - \sqrt{K_5 \exp(-K_6(\Phi_s - \Phi_m - \Phi_{eq}^c))}) \coth \sqrt{K_5 \exp(-K_6(\Phi_s - \Phi_m - \Phi_{eq}^c))} \quad (15)$$

$$K_4 = \frac{12L_a(1-\epsilon)FD_O^{agg}}{(R^{agg})^2} \quad (16)$$

$$K_5 = \frac{i_{0,c}S(R^{agg})^2}{4Fc_O^{eff} D_O^{agg}} \quad (17)$$

$$K_6 = \frac{0.5F}{RT} \quad (18)$$

$$c_O^{agg} = \frac{p_{O_2}}{H_O} \quad (19)$$

3.2 모멘텀 평형식

기체상태의 유동은 *Darcy's Law*를 사용하여 모델링하였고 기체의 속도는 연속방정식으로서 식 (20)과 같이 주어진다. 여기서 c^g 는 기체상태의 총 몰농도[mole/m³], u 는 기체의 속도[m/s]를 나타낸다. 투과성이 있는 물질에 *Darcy's Law*는 압력구배, 유체의 점도, 투과성 물질은 속도 벡터를 결정하는 것으로 아래의 식 (7-29)과 같이 사용된다. 여기서 κ_p 는 전극의 투과도[m²], η 는 기체의 점도[kg/ms], p 는 압력[Pa]을 나타내며, 식 (7-30)는 기체상태의 전체 몰농도를 의미하는 이상기체 상태방정식이다. 여기서 R 은 기체상수[J/mole·K], T 는 온도[K], p 는 입출구측의 압력을 의미한다.

$$\nabla \cdot (c^g u) = 0 \quad \text{at } \Omega_a \text{ and } \Omega_c \quad (20)$$

$$u = -\frac{\kappa_p}{\eta} \nabla p \quad (21)$$

$$c^g = \frac{p}{RT} \quad (22)$$

경계조건으로서 기체의 입구측과 출구측의 압력은 아래의 식 (23)~(27)과 같이 하며, 입·출구측의 압력차는 각각 0.01atm으로 설정하였다. 전극과 고분자막 경계에서는 *Darcy's Law*의 기체속도 경계조건이 총 질량 플럭스 n 로부터 계산하였고 여기서 n 는 반응기체와 배출되는 물의 몰질량과 전류밀도로 주어진다.

$$p = p_{a,inlet} \quad \text{at } \partial\Omega_{a,inlet} \quad (23)$$

$$p = p_{ref} \quad \text{at } \partial\Omega_{a,outlet} \quad (24)$$

$$p = p_{c,inlet} \quad \text{at } \partial\Omega_{c,inlet} \quad (25)$$

$$p = p_{ref} \quad \text{at } \partial\Omega_{c,outlet} \quad (26)$$

$$u = n \quad (27)$$

여기서 하첨자 *inlet*, *outlet* 및 *ref*는 각각 입구, 출구 및 기준값을 의미한다.

3.3 질량 평형식

질량 평형식에서는 양극측의 가스는 H₂와 H₂O, 그리고 음극측의 가스는 O₂, H₂O, N₂가 고려되었다. Maxwell-Stefan Diffusion과 대류모드가 각 전극에 사용되었고 Maxwell-Stefan Diffusion은 다음의 식 (28)과 같다. 질량분율, ω 항의 플럭스를 계산하고 음극 측에서는 3가지 종 (산소=1, 물=2, 질소

=3)에 대한 다음의 결과를 얻는다. 여기서 M 은 혼합물의 몰 질량을 M_j 는 j 에 대한 몰 질량을 ω_j 는 j 에 대한 질량분율, x_j 는 j 에 대한 몰분율을 나타낸다. 또한 D_{ij} 는 Maxwell-Stefan 확산도[m²/s]로서 종 i 가 j 로 얼마만큼 확산되는지를 나타낸다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \omega_i + [-\rho \omega_i \sum_j D_{ij} (\frac{M}{M_j} \nabla \omega_j + \omega_j \frac{\nabla M}{M} + (x_j - \omega_j) \frac{\nabla p}{p}) + \omega_i \rho u + D_i^T \frac{\nabla T}{T}] = R_i \quad \text{at } \Omega_a \text{ and } \Omega_c \quad (28)$$

$$\nabla \cdot [-\rho \omega_1 \sum_k (D_{1k} \nabla x_k (x_k - \omega_k \frac{\nabla p}{p}) + D^T \frac{\nabla T}{T})] = R - (\rho u \cdot \nabla \omega_1) \quad (29)$$

$$\nabla \cdot [-\rho \omega_2 \sum_k (D_{2k} \nabla x_k (x_k - \omega_k \frac{\nabla p}{p}) + D^T \frac{\nabla T}{T})] = R - (\rho u \cdot \nabla \omega_2) \quad (30)$$

$$\omega_3 = 1 - \omega_1 - \omega_2 \quad (31)$$

$$\rho = \sum_i x_i M_i \quad (32)$$

경계조건으로서 수소는 일반적으로 양극측의 촉매 활성층에서 소비되는 반면 산소는 음극측의 촉매 활성층에서 소비된다는 것을 감안하면 양극과 음극의 촉매 활성층을 가로지르는 질량 이동은 아래의 식 (33)~(35)와 같이 전류밀도와 관련된다. 여기서 d_{H_2O} 는 물의 Drag factor이고 나머지 경계조건은 절연 및 대칭조건이라 가정한다. 순환하는 기체의 질량분율은 입구측과 출구측에는 대류 플럭스 경계조건을 적용한다. 전극과 고분자 전해질 막 경계에서 양극과 음극측의 수소, 산소 및 물의 플럭스는 각각 다음의 식 (36) 및 (37)과 같이 표현할 수 있다.

$$-n \cdot n_{H_2} = -\frac{i_a}{2F} \quad \text{at } \partial\Omega_a \quad (33)$$

$$-n \cdot n_{O_2} = -\frac{i_c}{4F} \quad \text{at } \partial\Omega_c \quad (34)$$

$$-n \cdot n_{H_2O} = d_{H_2O} \frac{i_c}{F} \quad \text{at } \partial\Omega_c \quad (35)$$

$$n \cdot \left[-\rho \omega_i \sum_{j=1}^N D_{ij} \left\{ \frac{M}{M_j} (\nabla \omega_j + \omega_j \frac{\nabla M}{M}) + (x_j - \omega_j) \frac{\nabla p}{p} \right\} + D_i^T \frac{\nabla T}{T} \right] = i_a \quad (36)$$

$$n \cdot \left[-\rho \omega_i \sum_{j=1}^N D_{ij} \left\{ \frac{M}{M_j} (\nabla \omega_j + \omega_j \frac{\nabla M}{M}) + (x_j - \omega_j) \frac{\nabla p}{p} \right\} + D_i^T \frac{\nabla T}{T} \right] = i_c \quad (37)$$

4. 해석 결과 및 고찰

위의 Fig. 3 및 4에서와 같은 2차원 성능 시뮬레이션을 위하여 적합한 변수들을 설정하고 효율적인 작동에 필요한 상수들을 확보한 후, 촉매 활성층 두께의 변화에 따른 전기

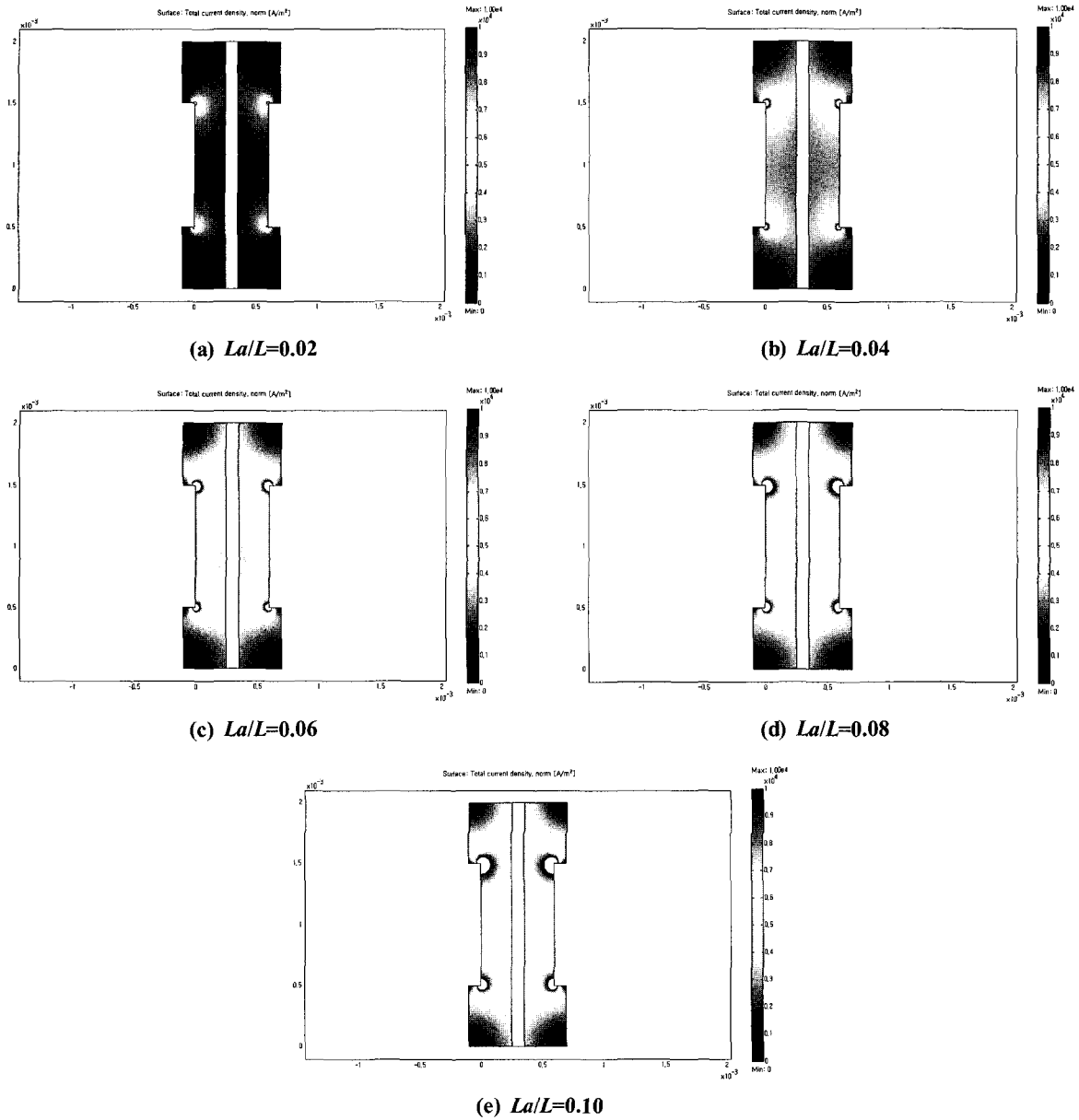


Fig. 5 Current density distributions at the anode and cathode as a function of active layer thickness of catalyst

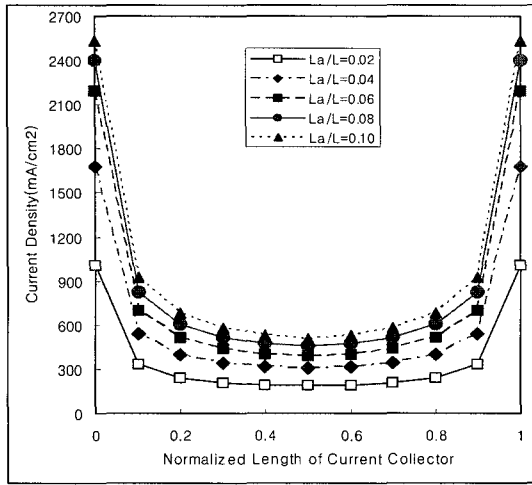


Fig. 6 Current density distribution at the current collector as a function of active layer thickness of catalyst

적 성능 특성을 관찰하기 위해 해석을 수행하였다. 촉매 활성층 두께(L_a)의 변화는 전극 및 가스확산층(GDL: Gas Diffusion Layer)의 두께(L)과 비교하여 L_a/L 로 무차원화하였으며 $L_a/L=0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10$ 의 5가지 경우에 대하여 해석을 수행하였다. Fig. 5에서 해석모델 영역의 전류밀도 분포를 보이고 있으며 Fig. 5 (a)~(e)에서 $L_a/L=0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10$ 의 경우에 관해 각각 도시되었다. 이 그림들에서 알 수 있는 바와 같이 촉매 활성층 두께가 증가함에 따라 발생하는 전류밀도의 크기도 비례적으로 증가함을 알 수 있다.

그러나 전류밀도의 증가율은 직선적으로 비례하지 않으며 두께가 커짐에 따라 그 증가율이 차츰 둔화되어 가는 것을 알 수 있다.

한편 전류를 전송하는 전류집전자에서의 전류밀도를 촉매 활성층 두께의 변화에 따라 측정하면 Fig. 6과 같으며 $L_a/L=0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10$ 의 경우에 관해 각각 도시되었다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 전류밀도의 크기는 어느 경우를 막론하고 가스 공급에 인접할수록 커짐을 알 수 있고, 동시에 전류밀도의 증가율은 직선적으로 비례하지 않으며 촉매 활성층 두께가 증가함에 따라 전류밀도의 증가율이 차츰 둔화되어 가는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 전류집전자 영역에서 전류밀도를 적분하면 더욱 자명하게 나타나며 Fig. 7에서 전류집전자 영역의 전류를 촉매 활성층 두께의 변화에 따라 보여주고 있다. 위에서 기술한 바와 같이 선형적 증가를 보이지 않고 대신 포물선적 비례

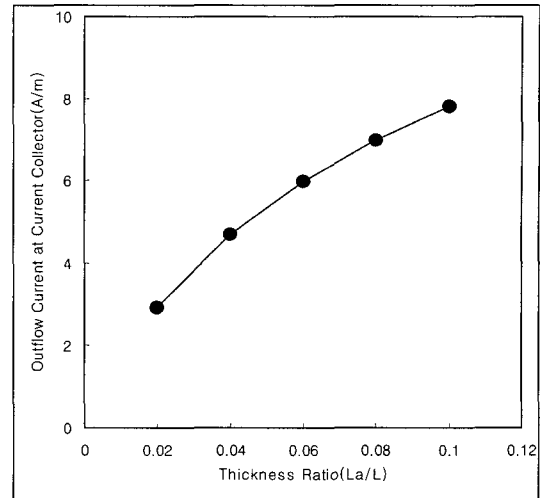


Fig. 7 Out-flow Current at the current collector as a function of active layer thickness of catalyst

관계가 있음을 알 수 있다. 이와 같은 해석 결과에 따라 촉매의 성능과 경제성을 동시에 고려하여 적절한 설계를 기할 수 있을 것이다.

5. 결론

본 논문에서는 연료전지에서의 실험을 바탕으로 한 적절한 입력 데이터를 설정하여 2차원 유한요소해석 연료전지 모델을 생성한 후 성능 시뮬레이션을 실시하였고 이를 위한 지배방정식과 경계조건을 수립하였다. 성능에 중요한 영향을 미치는 촉매의 활성층 두께를 변화시킴으로써 전류밀도의 증가추이를 관찰한 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 전류밀도의 크기는 가스공급 채널에 인접할수록 증가된다.
- (2) 촉매 활성층 두께가 증가함에 따라 발생하는 전류밀도의 크기도 비례적으로 증가된다. 그러나 직선적으로 비례하지 않으며 두께가 커짐에 따라 그 증가율이 차츰 둔화된다.
- (3) 촉매 활성층 두께를 제어함으로써 경제성을 가진 MEA의 제작이 가능하고 또 시스템의 성능 향상이 가능하다.

참고 문헌

- (1) Kim, H. G. and Nah, S. C., 2006, *New and*

- Renewable Energy and Fuel Cell*, HakSulJeongBo.
- (2) Kim, H. G., Kang, Y. W. and Kim, Y. S., 2004, "Fundamental Study on Performance Analysis and Design of Fuel Cell Vehicle," *Proceedings of the KSMTE Spring Conference 2004*, pp. 178~183.
- (3) Scholta. J., Rohland. B. and Trapp. V., 1999, "Investigation on Novel Low-cost Graphite Composite Bipolar Plate, *Journal of Power Sources*," 84, pp. 231~234.
- (4) Patil, G. and Pandit, M., 1996, "Alternative Fuels in Future Vehicles," *Automotive Engineering*, pp. 39~43.
- (5) Barbir, F., 1998, "Technical Challenges in PEM Fuel Cell Development," *Proceedings of the 12th World Hydrogen Energy Conference Buenos Aires, Argentina*, 21-25, Vol. 2, pp. 1717~1726.
- (6) Oh, I. H., 2002, "PEMFC Technique of Vehicle Power," *HYUNDAI Fuel Cell Workshop*, pp. 97~114.
- (7) Kim, H. G., Nah, S. C., Kim, S. C., Kang, Y. W., Yang, G. E., Lee, H. K. and Choi, M. C., 2004, "A Study on the Dynamic Analysis in the Shaft of Turbo-Blower for Fuel Cell," *KSMTE*, Vol 13, pp. 81~87.
- (8) Kim, H. G., Kang, Y. W. and Yu, G. H., 2003, "A Study on the Vehicle Dynamics Design of Mini-BAJA Driven by Battery," *Journal of the Institute for Engineering and Technology*, Vol. 9, No. 1, pp. 41~48.
- (9) Kim, H. G., Kang Y. W. and Yu G. H., 2003, "A Study on the Motor Control System Driven by Battery," *Proceedings of the KSMTE Fall Conference 2003*, pp. 195~200.
- (10) Bernardi, D. M. and Verbrugge, M. W., 1991, "Mathematical Model of a Gas Diffusion Electrode Bonded to a Polymer Electrolyte," *AIChE Journal*, 37, pp. 1151~1163.
- (11) Fuller, T. F. and Newman, J., 1993, "Water and Thermal Management in Solid Polymer Electrolyte Fuel Cells," *J. Electrochem. Soc.* 140. 1218.
- (12) Laurencelle, F., Chahine, R., Hamelin, J., Agbossou, K., Fournier, M., Bose, T. K. and Laperriere, A., 2001, "Characterization of a Ballard MK5-E Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack," *Fuel Cells*, No. 1, pp. 66~71.
- (13) Jiang, R. and Chu, D., 2001, "Stack Design and Performance of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells," *Journal of Power Sources*, Vol. 93, No. pp. 1~2.
- (14) Blomen, L. and Mugerwa, M. N., 1993, *Fuel Cell Systems*, Plenum Press.
- (15) Kim, H. G., Kim, Y. S. and Kang, Y. W., 2005, "Electric Voltage and Current Characteristics of Fuel Cell for Machine Tool Power Supply," *KSMTE*, Vol. 14, pp. 1~7.
- (16) Shen, P. K. and Tian, Z., 2004, "Performance of highly dispersed Pt/C catalysts for low temperature fuel cells," *Electrochimica Acta* 49, pp. 3107~3111.
- (17) Comsol Inc., 2003, *Comsol Multiphysics*, Burlington, MA, USA.