

## 고분자 전해질 연료전지의 전해질 막내의 함수율과 성능 예측

양 장 식<sup>1)</sup> · 최 경 민<sup>\*2)</sup> · 김 덕 줄<sup>2)</sup>

부산대학교 기계기술연구소<sup>1)</sup> · 부산대학교 기계공학부 기계기술연구소<sup>2)</sup>

### Prediction of Fuel Cell Performance and Water Content in the Membrane of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell

Jang Sik Yang<sup>1)</sup> · Gyung Min Choi<sup>\*2)</sup> · Duck Jool Kim<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>RIMT, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

<sup>2)</sup>School of Mechanical Engineering and RIMT, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

(Received 19 April 2006 / Accepted 26 May 2006)

**Abstract** : A one-dimensional numerical analysis is carried out to investigate the effects of inlet gas humidities, inlet gas pressures, and thicknesses of membrane on the performance of a proton exchange membrane fuel cell. It is found that the relative humidity of inlet gases at anode and cathode sides has a significant effect on the fuel cell performance. Especially, the desirable fuel cell performance occurs at low relative humidity of the cathode side and at high humidity of the anode side. In addition, an increase in the pressure ranging from 1 atm to 4 atm at the cathode side results in a significant improvement in the fuel cell performance due to the convection effect by a pressure gradient toward the anode side, and with decreasing the thickness of membrane, the fuel cell performance is enhanced reasonably.

**Key words** : Proton exchange membrane fuel cell(고분자전해질 연료전지), Electro-osmotic drag(전기적 삼투압), Back diffusion(역확산), Pressure gradient(압력구배)

#### Nomenclature

$c$  : concentration of water in the membrane (mol/cm<sup>3</sup>)

$D$  : diffusion of water in the membrane (cm<sup>2</sup>/s)

$EW$  : equivalent weight of the membrane (g/mol)

$E$  : open-circuit voltage (V)

$F$  : Faraday constant, 96487 (C/mol)

$h$  : mass transfer coefficient or Henry constant (cm/s)

$I$  : current density (A/cm<sup>2</sup>)

$k_p$  : water permeability (cm<sup>2</sup>)

$L$  : thickness of the membrane (cm)

$p$  : pressure (atm)

$T$  : temperature (K)

$V$  : voltage (V)

$\lambda$  : number of water molecules per sulfonate acid groups

$\mu$  : water viscosity (g/cm · s)

#### Subscripts

act : activation overvoltage

cell : fuel cell voltage

con : concentration overvoltage

ohm : ohmic overvoltage

m : average value

\*Corresponding author, E-mail: choigm@pusan.ac.kr

## 1. 서론

고분자전해질 연료전지(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)는 수소이온교환 특성을 갖는 고분자막을 전해질로 사용하는 연료전지로서, 다른 형태의 연료전지와 달리 고 효율, 고 전류 및 고 출력 밀도를 가질 뿐만 아니라 저 작동온도, 짧은 시동시간 및 부하변화에 대한 응답특성이 빠르다. 또한 다양한 범위의 출력을 낼 수 있기 때문에 이동용 전원, 군사용 전원, 무공해 차량의 동력원, 잠수함용 전원, 우주선용 전원 등 다양한 분야에 적용될 수 있다.<sup>1)</sup> 특히 고분자전해질 연료전지는 환경친화적 특성을 갖고 있기 때문에 차세대 자동차의 에너지원으로서 다양한 연구가 진행되고 있다.

연료전지의 연구는 크게 실험적 방법과 수치적 방법으로 이루어지고 있으며, 두 방법 모두 연료극(anode)과 공기극(cathode)에 공급되는 물의 상대습도, 수소와 산소의 공급 온도, 공급 유량 및 공급 압력 그리고 수소와 산소가 공급되는 유동채널의 형상 등을 주요 변수로 선택하여 연구를 하고 있다. 이 중 수치해석적 방법을 살펴보면, Jung 등<sup>2)</sup>은 기존의 3차원 해석과 달리 연료전지의 전 유동영역을 상용 프로그램인 star-cd를 이용해 가스 유동채널(gas flow channel), 가스 확산층(gas diffusion layer), 촉매층(catalyst layer), 전해질(membrane) 영역에 대해 수치해석을 수행하였다. Um 등<sup>3)</sup>은 유동채널, 가스 확산층, 촉매층 그리고 전해질 영역으로 구성되어 2차원 수치해석을 하였다. 이들의 경우 계산영역은 다중 영역으로 구성되어 있지만 다중 영역을 싱글 영역 기법으로 처리하여 전해질 내의 탈수현상, 유동채널 내의 공급가스의 속도분포 등을 예측하였다. Nguyen과 White<sup>4)</sup> 그리고 Yi와 Nguyen<sup>5)</sup>는 계산영역을 유동채널과 전해질 영역으로 구성하고 2차원 정상상태의 열 및 물질전달 방정식을 유도하여 연료전지의 분극특성 등을 연구하였다. 그리고 Okada 등<sup>6,7)</sup>은 연료전지의 전해질 층 영역에서 1차원 확산 방정식을 적용하여 수소 이온의 공기극 이동에 따른 전해질 내의 함수율과 전해질 막이 나타냄으로써 오염되었을 경우에 대한 연구를 수행하였다. Springer 등<sup>8)</sup>은 유동채널, 가스확산층, 전해질 영역에 대해 1차원적인 해석을 수행하였다. 이들의

경우 전해질 막 내부가 완전히 수화되어 있고, 연료극과 공기극에 완전 포화된 가습의 경우만 해석을 수행하였다.

위에서 언급한 3차원과 2차원의 경우, 전 과정을 해석하기 위해서는 시간과 비용이 많이 소요될 뿐만 아니라 이들의 해석 모델은 전해질 내의 함수율 변화를 예측하지 못하는 단점이 있다. 이에 반해 1차원의 경우, 유동채널, 가스 확산층, 촉매층 내부에서의 연료전지의 특성에 대한 정보를 얻을 수 없지만, 전해질 내의 함수율 변화에 대한 영향을 예측할 수 있기 때문에 짧은 시간에 효율적으로 연료전지의 성능예측을 할 수 있는 장점이 있다.

따라서 본 연구에서는 Okada 등<sup>6,7)</sup>의 연구에서 미진했던 부분을 보완하고, Springer 등<sup>7)</sup>의 연구와 달리 완전 포화되지 않은 가습 조건 즉, 실제 연료전지 실험에서 사용되는 실험변수들로서 연료극과 공기극에 공급되는 물의 습도변화, 수소와 산소의 압력변화 그리고 전해질 막의 두께 변화가 연료전지의 성능에 어떤 영향을 미치는지를 1차원적인 해석을 통해 연구하고자 한다.

## 2. 이론

### 2.1 지배방정식

Fig. 1은 고분자전해질 연료전지 내의 물의 이동 메커니즘을 설명하기 위해 나타낸 것이다. 연료전지는 연료극, 전해질 막 그리고 공기극으로 구성되어 있다. 연료전지에 공급되는 물은 가습된 상태로 연료극과 공기극에 공급되고, 수소가스는 촉매층과의 산화반응에 의해 수소이온과 음이온으로 분해된다(식 (1) 참조). 수소이온은 전기적 삼투압작용으로 인해 연료극에서 공기극으로 이동한 후, 공기극에서 산소와의 환원반응(식 (2) 참조)으로 물이 생성된다. 이와 더불어 전기적 삼투압작용에 의해 공기극으로 물이 수송되고, 이로 인해 공기극의 물의 농도가 연료극의 물의 농도보다 증대된다. 이와 같은 물의 농도 구배 때문에 공기극에서 연료극으로 역확산이 발생하게 된다. 또한 연료극과 공기극의 압력차에 의한 대류의 영향으로 연료극에서 공기극 또는 공기극에서 연료극으로 물의 이동이 발생한다.

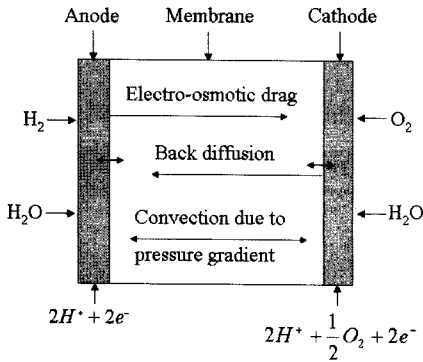
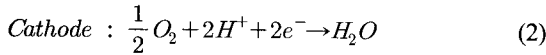


Fig. 1 Schematic of the water transport process in PEMFC



위의 메커니즘을 통해 주어진 위치에서 물의 이동 플럭스는 역확산에 의한 플럭스, 전기적 삼투압에 의한 플럭스, 압력에 의한 대류 플럭스의 합으로 식 (3)과 같이 주어진다.

$$J_x = -D \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{n_{drg} I}{F} + \frac{k_p}{\mu} c \frac{\partial p}{\partial x}$$
 (3)

주어진 위치에서 전해질 막 내의 물의 시간변화에 따른 농도변화는 식 (4)로 주어진다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial c}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{n_{drg} I}{F} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{k_p}{\mu} c \frac{\partial p}{\partial x} \right)$$
 (4)

그리고 Okada 등<sup>6,7)</sup>과 Springer 등<sup>8)</sup>, Um 등<sup>9)</sup>에 의하면 물분자의 전기적 삼투압계수  $n_{drg}$ 와 물의 농도는 식 (5)와 (6)으로 주어진다고 하였다.

$$c = \frac{\rho \lambda}{EW}$$
 (5)

$$n_{drg}(\lambda) = \frac{2.6}{22} \lambda$$
 (6)

식 (4), 식 (5) 그리고 식 (6)로부터 전해질 막 내의 함수율  $\lambda$ 는 식 (7)로 주어진다.

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial \lambda}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{2.6}{22} \frac{EW}{\rho} \frac{I \cdot \lambda}{F} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{k_p}{\mu} \lambda \frac{\partial p}{\partial x} \right)$$
 (7)

압력에 의한 대류플럭스( $Pf$ )와 역확산에 의한 플럭스( $Bf$ )의 크기를 비교하면,  $\frac{O(Ef)}{O(Bf)} \approx \frac{k_p/\mu \cdot P}{D}$ 로 연료극과 공기극의 압력차에 따라 0.2 ~ 0.8 정도의 크기이기 때문에 압력에 의한 대류플럭스를 고려하여야 한다.

## 2.2 경계조건

### 2.2.1 연료극의 경계조건

본 연구에서는 연료극에 물이 가습되기 때문에 Henry 정수에 기초한 흡수(증발)항을 첨가하여 식 (8)로 나타내었다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\lambda dx}{2} \right) = h_a (\lambda_a - \lambda) + D \frac{\partial \lambda}{\partial x} - \frac{EW}{\rho} \frac{n_{drg} \cdot I}{F} - \frac{EW}{\rho} \frac{k_p}{\mu} \lambda \frac{\partial p}{\partial x} \text{ at } x=0$$
 (8)

### 2.2.2 공기극의 경계조건

공기극에도 역시 물이 가습될 뿐만 아니라 산소의 환원반응으로 인해 공기극에서는 물이 생성된다. 따라서 Henry 정수에 기초한 흡수(증발)항 뿐만 아니라 산소환원반응으로 인한 물의 생성항을 경계조건에 추가하여 식 (9)로 나타내었다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\lambda dx}{2} \right) = h_c (\lambda_c - \lambda) - D \frac{\partial \lambda}{\partial x} + \frac{EW}{\rho} \frac{n_{drg} \cdot I}{F} + \frac{EW}{\rho} \frac{k_p}{\mu} \lambda \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{EW}{\rho} \frac{I}{2F} \text{ at } x=L$$
 (9)

여기서 연료극과 공기극의 경계조건에서 하첨자  $a$ 와  $c$ 는 연료극과 공기극을 의미한다. 수식에 사용된 변수들의 값들은 Table 1에 나타내었고, 물의 확산계수와 물의 가습에 의한 함수율은 식 (10)과 식 (11)로 주어진다.<sup>9)</sup>

$$\lambda_a = \lambda_c = \begin{cases} 0.043 + 17.81a - 39.85a^2 \\ + 36.0a^3 & \text{for } 0 < a \leq 1 \\ 14.0 + 1.4(a-1) & \text{for } 1 < a \leq 3 \end{cases}$$
 (10)

$$D = \begin{cases} 3.1 \times 10^{-3} \lambda (e^{0.282\lambda} - 1) \cdot e^{(-2346/T)} \\ \text{for } 0 < \lambda \leq 3 \\ 4.17 \times 10^{-4} \lambda (1 + 161e^{-\lambda}) \cdot e^{(-2346/T)} \\ \text{otherwise} \end{cases}$$
 (11)

Table 1 Values of parameters for simulation

Parameters	Symbol	Value	Reference
Density	$\rho$	2.02 g/cm <sup>3</sup>	6
Equivalent weight	$EW$	1100 g/mol	6
Water permeability	$k_p$	1.58 × 10 <sup>-14</sup> cm <sup>2</sup>	5
Water viscosity	$\mu$	8.99 × 10 <sup>-3</sup> g/cm.s	
Faraday constant	$F$	96487 C/mol	
Henry constant	$h$	0.001 cm/s	

여기서  $a$ 는 물의 상대습도를 의미한다.

### 2.3 전류전압곡선

실제 연료전지에 전류를 흐르게 하면 연료전지의 출력 전압은 개회로 출력전압( $E$ )에 활성화 전압( $V_{act}$ ), 농도 과전압( $V_{con}$ ) 그리고 전해질 막 움저항 전압( $V_{ohm}$ )을 뺀 값으로 나타내며, 식 (12)로 주어진다.

$$V_{cell} = E - V_{act} - V_{con} - V_{ohm} \quad (12)$$

활성화 전압, 농도 과전압은 Mann 등<sup>10)</sup>, Serra 등<sup>11)</sup>이 제안한 경험식을 사용하였고, 전해질 막 움저항 전압은 Chan 등<sup>12)</sup>이 제안한 경험식을 이용하였다. Table 2에 이들의 식을 나타내었고, 각 식들은 연료극과 공기극의 공급압력, 작동온도, 전류밀도, 평균 함수율, 전해질 두께의 함수로 주어진다.

### 2.4 계산방법

전해질 막내의 함수율을 나타내는 지배방정식 (7)의 해를 구하기 위해 시간에 대해서는 1차 정도를 갖는 전진차분을 적용하였고, 공간에 대해서는 2차 정도의 중앙차분을 적용하였다. 전해질막의 두께가 얇기 때문에 압력항은 선형적으로 변한다고 가정하였다.

Table 2 Equations used in calculation of cell voltage

Equations	Expression	Reference
$E$	$1.229 - 0.85 \times 10^{-3}(T - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} T (\ln(p_{H_2}^*) + 0.5 \ln(p_{O_2}^*))$	11
$V_{act}$	$V_{act} = \xi_1 + \xi_2 T + \xi_3 T [\ln(c_{O_2})] + \xi_4 T [\ln(I)]$ , $\xi_1 = -0.944$ , $\xi_2 = -0.00354$ , $\xi_3 = 7.80 \times 10^{-5}$ , $\xi_4 = -0.000196$ , $c_{O_2} = \frac{p_{O_2}}{5.08 \times 10^6 \exp(-\frac{498}{T})}$	10
$V_{con}$	$V_{con} = I(c_1 \frac{I}{2.2})^2$ , $c_1 = \begin{cases} \text{if } \frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat} < 2 \\ (7.16 \times 10^{-4} T - 0.622) (\frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat}) - 1.45 \times 10^{-3} T + 1.68 & \text{else} \\ (8.66 \times 10^{-5} T - 0.068) (\frac{p_{O_2}}{0.1173} + p_{sat}) - 1.6 \times 10^{-4} T + 0.54 \end{cases}$	11
$V_{ohm}$	$V_{ohm} = I \frac{L}{\sigma_m}$ , $\sigma_m = (\frac{\lambda_m}{29.81 + \lambda_m} - 0.06)^{1.5} (\frac{\lambda_1^0}{1 + 5.5}) \frac{1}{18 \lambda_m} \alpha$ , $\lambda_1^0 = 349.8 \exp(-\frac{14000}{8.3143} (\frac{1}{T} - \frac{1}{298}))$ , $\alpha = \frac{\lambda_m + 1 - \sqrt{(\lambda_m + 1)^2 - 4 \lambda_m (1 - 1/K_{AC})}}{2(1 - 1/K_{AC})}$ , $K_{AC} = 6.2 \exp(\frac{52300}{8.3143} (\frac{1}{T} - \frac{1}{298}))$	12

다른 언급이 없을 경우, 초기의 전해질 막내의 함수율은 일정한 값( $\lambda_0 = 10$ )으로 가정하였으며, 작동 온도는 상온의 상태인 25°C로 하였다. 또한 전해질 막의 허용함수량을 초과할 경우 배출되도록 경계조건을 설정하였다. 그리고 Nafion 112/117의 재원을 모델로 하여 계산을 수행하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 전류밀도  $I=0.5 A/cm^2$  그리고 Henry 정수  $0.001 cm/s$  일 때 시간변화에 따른 전해질 막 내부의 함수율을 나타낸 그림이다. 0.1s 일 때는 연료극에서의 가습효과는 거의 없지만, 공기극에서는 전기적 삼투압작용으로 인해 함수율이 증가하고 있다. 시간이 경과함에 따라 공기극에서의 함수율 증대로 인해 공기극에서 연료극으로의 농도구배로 인한 역확산이 발생하고 있음을 알 수 있으며, 100s 이후에 정상상태에 도달하였다.

Fig. 3은 전류밀도  $I=0.5 A/cm^2$  일 때 Henry 정수 값이 전해질 막 내부의 함수율에 미치는 영향을 나타낸 그림이다. Henry 정수 값이 증가할수록 함수율은 증가하였고, Henry 정수 값이  $0.00001 cm/s$  보다 작은 경우는 전해질 막 내부 함수율 변화에 거의 영향을 미치지 못하였다. 따라서 전해질 막 내의 함수율 예측에 있어서 Henry 정수값은 중요한 인자 중의 하나로 판단된다.

Fig. 4는 전류밀도가  $I=0.222 A/cm^2$  일 때, Aciplex S-1112(전해질 막 두께  $0.034 cm$ ,  $EW=1025 g/mol$ )인

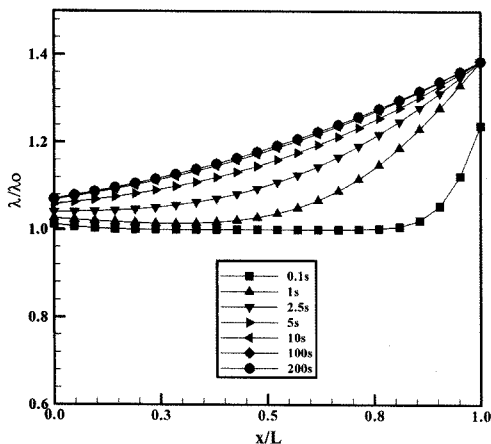


Fig. 2 Profiles of water content for time variation

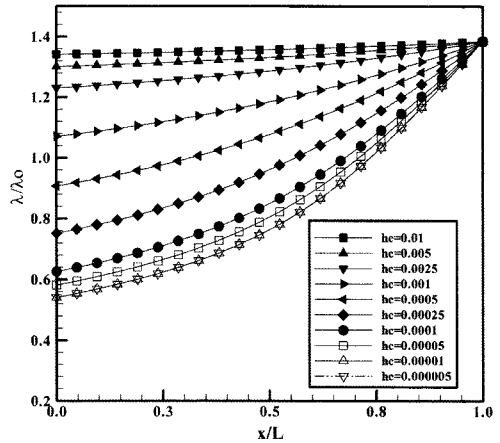


Fig. 3 Effects of Henry constant on water content

고분자 전해질 내의 함수율을 MRI로 측정된 실험 데이터<sup>13)</sup>와 현재의 결과를 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 Henry 정수가  $0.001 cm/s$  인 경우만이 전해질 막의 두께  $0.022 cm$  이전까지는 실험데이터와 상대적으로 일치하였고, 그 이외의 Henry 정수는 실험데이터와 잘 일치하지는 않았다. 이러한 이유로 본 수치해석에서는 Henry 정수를  $0.001 cm/s$  값으로 선정하였다. 이 이후의 수치계산에서는 Nafion 112/117의 재원을 모델로 하여 계산을 수행하였다.

Fig. 5는 여러 작동조건에서 정상상태에 도달했을 때의 전해질 막 내부의 함수율을 나타낸 그림이다.(그림 (a), (b) 그리고 (c)는 연료극과 공기극의 공급 압력을 모두 1 atm으로 하였다.) 그림 (a)는 연료

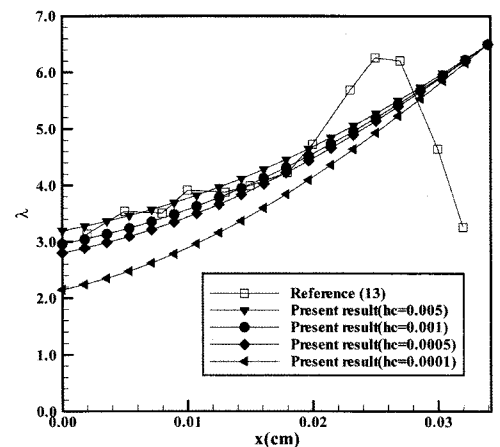


Fig. 4 Comparison of the present result with the experimental result

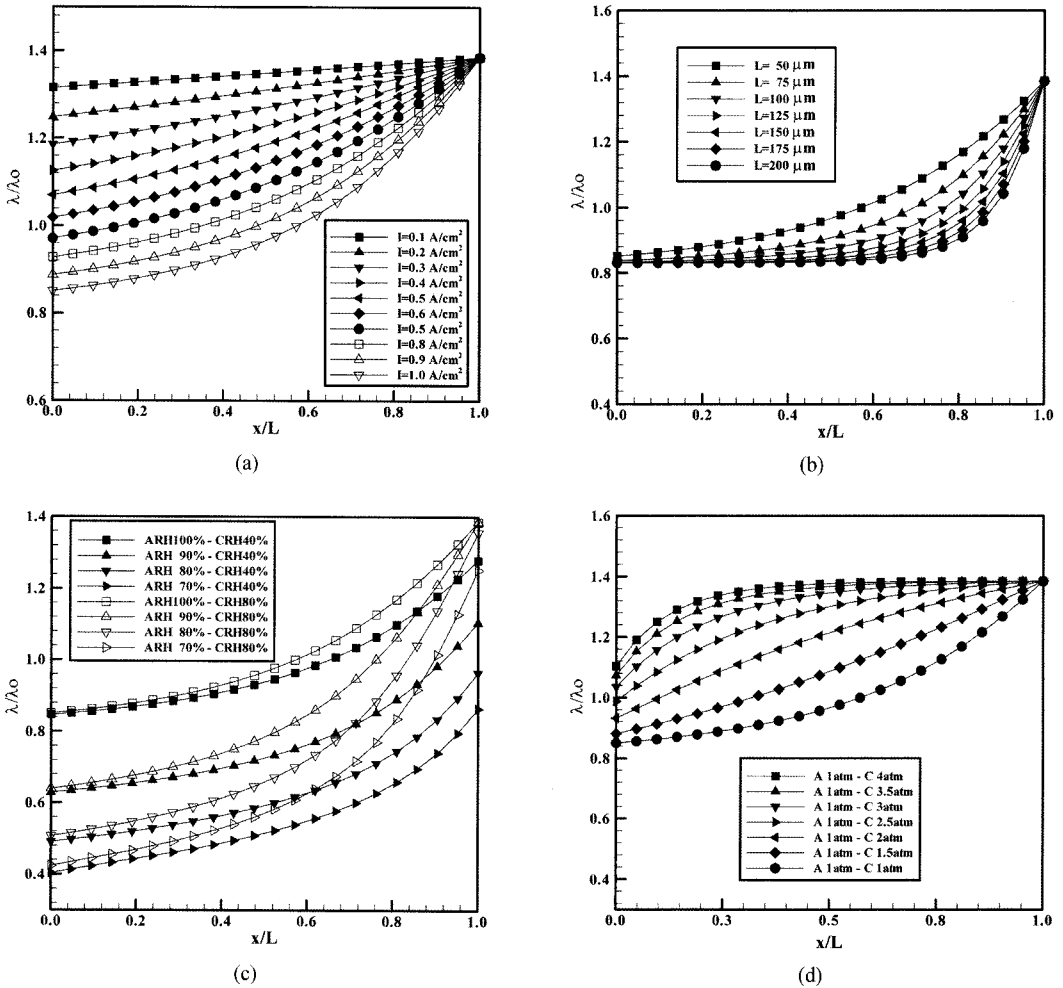


Fig. 5 Profiles of water content across membrane at different operating conditions

극의 탈수현상과 공기극의 역산화 현상의 메커니즘을 설명하기 위해 나타내었다. 연료극과 공기극에 공급되는 물의 상대습도는 각각  $ARH=CRH=100\%$ 이다. 그림에서 알 수 있듯이 연료극에서는 탈수가 진행되고 이에 반해 공기극에서는 수화가 진행되고 있다.

전류밀도가 증가할수록 전기적 삼투압작용으로 인해 연료극의 탈수는 더욱 증가되고 공기극에서는 산소의 환원반응으로 생성된 물과 전기적 삼투압작용으로 인해 일정한 값으로 유지되고 있다. 전류밀도가 증가할수록 연료극과 공기극에서 물의 농도구배 차이가 더 심해져 공기극에서 연료극으로 역확산이 발생하게 된다. 그림 (b)는 전류밀도가  $I=1.0 A/cm^2$

일 때 전해질 막 두께의 변화에 따른 막 내의 함수율 변화를 나타낸 것이다. 막의 두께가 증가할수록 막 내의 함수율이 감소하고, 전해질 막 내의 함수율 감소는 수소 이온의 연료극에서 공기극으로의 전도에 영향을 미친다. 따라서 이러한 영향으로 인해 옴저항 전압( $V_{ohm}$ )이 증대되므로 전해질 막의 두께는 연료전지의 성능에 지대한 영향을 미친다. 그림 (c)는 전류밀도가  $I=1.0 A/cm^2$ 일 때, 연료극과 공기극의 상대습도 변화에 대한 전해질 막의 함수율 변화를 나타낸 것이다. 연료전지의 전해질 막의 가습은 공기극의 상대습도가 40%와 80%일 때, 연료극의 상대습도가 70, 80, 90, 100%로 증가함에 따라 공기극의 상대습도 차이에 따른 함수율 차이는 점점 더 감

소하고, 전해질 막의 함수율은 점점 증가한다. 이로 인해 옴저항 전압이 감소하기 때문에 연료전지의 전압 이용효율이 증가하게 된다. 연료극과 공기극에 100%-40%와 100%-80%의 가습이 가장 이용효율이 높고, 공기극에 80%를 가습한 경우가 40%보다 연료전지의 전압 이용효율이 더 높지만, 공기극에 습도가 높은 수분을 공급할 경우 공기극에 flooding 현상이 발생할 수 있다. 따라서 연료전지에 가습을 할 경우, 공기극에 공급되는 물의 상대습도를 낮게 하고 연료극에 공급되는 물의 상대습도를 높게 공급하는 것이 효과적인 연료전지의 운전 방법으로 판단된다. 그림 (d)는 연료극과 공기극에 100% 가습을 하고, 공기극의 공급압력을 1 atm에서 4 atm으로

변화시켰을 때의 전해질 막내의 함수율을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 공기극의 공급압력이 높을수록 연료극과 공기극의 압력차에 의한 역압력 구배로 공기극에서 연료극으로 대류현상이 발생하고 이로 인해 막내의 함수율이 증가하는 현상을 확인할 수 있다.

고분자 전해질 막은 어느 정도 이상 수화되어야 수소 이온 전도성을 나타낸다. 전해질 막에 가습을 하지 않고 연료극과 공기극에 수소와 산소(공기)를 공급할 경우, 전해질 막이 수분을 잃고 건조해지며 수소 이온 전도도가 떨어지고 막의 수축을 유발하여 막과 전극 사이의 접촉저항을 증가시킨다. 반면, 수분이 너무 많이 공급되면 공기극에 flooding 현상

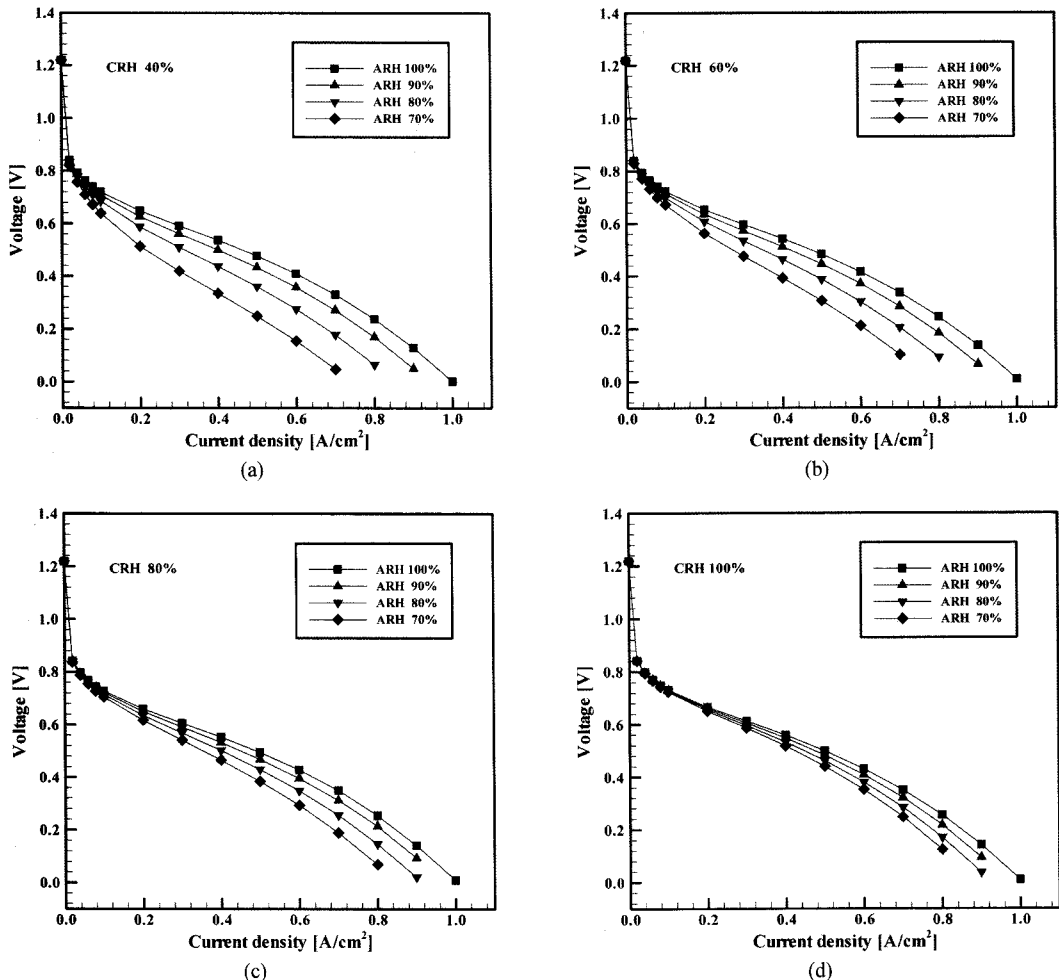


Fig. 6 Polarization curves for the fuel cell at different humidifies of anode side

이 일어나 전극 반응속도가 저하된다. 따라서 전해질 막 내에 적절한 수분을 유지하도록 물관리가 매우 중요하다.

이와 같이 전해질 막 내의 물관리가 매우 중요하기 때문에 공기극의 상대습도를 40%, 60%, 80%, 100%로 변화시키고, 이에 대응해 연료극의 상대습도를 70%, 80%, 90%, 100%로 변화시킬 경우의 전압 특성곡선을 Fig. 6에 나타내었다. 이 경우 전해질 막의 두께는 50 $\mu\text{m}$ 로 하였다. 공기극의 상대습도가 100%인 경우(그림 (d)), 연료극의 상대습도 증가에 대한 전압곡선의 향상이 다른 조건에 비해 미미한 것으로 나타났다. 이에 반해 공기극의 상대습도가 80%(그림 (c)), 60%(그림 (b)), 40%(그림 (a))로 감소할 경우, 연료극의 상대습도가 증가할수록 전압곡선의 성능이 두드러진다. 따라서 효과적으로 연료 전지를 운전하기 하기 위해서는 연료극에는 높은 상대습도를 유지하고 공기극에는 낮은 상대습도를 유지하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

Fig. 7은 전해질 막의 두께 변화에 대한 전압특성곡선을 나타낸 것이다. Fig. 5의 (b) 그림에서 알 수 있었듯이 전해질 막 두께가 증가할수록 막 내의 함수율이 감소하고, 막 내의 함수율 감소는 수소 양자의 연료극에서 공기극으로의 원활한 수송에 악영향을 미쳐 옴저항 전압을 증가시킨다. 이로 인해 전해질 막의 두께가 증가할수록 연료전지의 성능은 떨어지게 된다. 따라서 연료전지의 설계 시 전해질 막의 두께를 고려하여야 한다.

Fig. 8은 전해질 막의 두께를 50 $\mu\text{m}$ , 연료극과 공기극에 상대습도 100%인 물을 가습하였을 때, 공기극에 공급되는 가스의 압력변화에 대한 연료전지의 성능곡선을 나타낸 것이다. Fig. 5(d)에서 알 수 있었듯이, 공급가스 압력의 증가로 인해 연료극과 공기극의 압력차가 증대하고 이로 인해 전해질 막 내에 역압력 구배가 발생하여 공기극에서 연료극으로 대류현상이 발생한다. 이러한 대류현상의 발생으로 인해 전해질 막 내의 함수율이 증가하므로 연료극에서 공기극으로 수소 이온의 수송을 원활하게 하여 연료전지의 성능이 증대하게 된다. 특히 이러한 현상은 높은 전류밀도에서 두드러진다. 따라서 연료전지 설계 시 공기극에서의 가압조건도 고려하는 것이 바람직한 것으로 판단되며, Yan 등<sup>14)</sup>의 실험

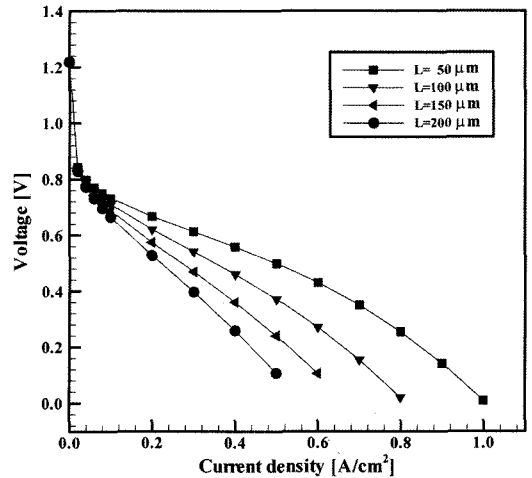


Fig. 7 Effect of different thicknesses of membrane on fuel cell performance

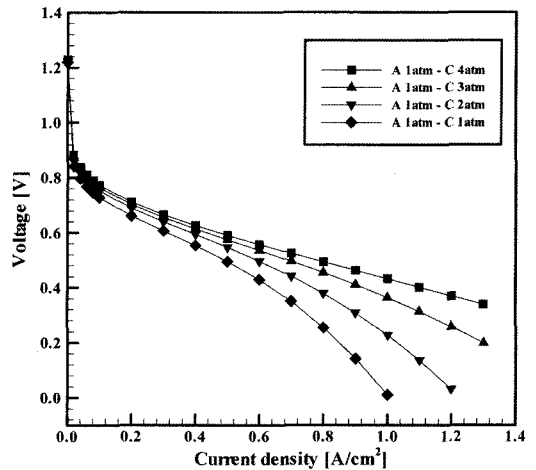


Fig. 8 Effect of different pressures at cathode side on fuel cell performance

결과에서도 본 연구와 동일한 경향을 보였다.

#### 4. 결론

고분자전해질 연료전지의 전해질 막 내부의 함수율 및 성능 예측을 위한 1차원 지배방정식을 유도하고, 연료전지의 운전 변수로 연료극과 공기극에 공급되는 상대습도의 변화, 전해질 막 두께의 변화 그리고 공급 가스의 압력변화를 고려하여 전해질 막 내부의 함수율 그리고 연료전지의 성능을 계산한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.



- 1) 전해질 막의 두께가 증가할수록 전해질 막 내부의 함수율이 감소하여 연료전지의 성능이 저하된다.
- 2) 전해질 막 내의 수소 이온 전도도를 높이기 위해서는 물관리가 매우 중요하며, 연료극과 공기극에 가습된 물을 공급할 경우 연료극에는 높은 상대습도의 물을 공급하고 공기극에는 낮은 상대습도의 물을 공급하는 것이 효과적이다.
- 3) 공기극에 공급되는 가스의 공급압력을 연료극에 공급되는 가스 압력보다 높게 하면 역압력 구배로 인해 전해질 막 내의 함수율이 증대되어 연료전지의 성능이 향상되고, 특히 고전류밀도에서 두드러진다.
- 4) 본 모델은 연료전지 설계 전 단계의 모사 실험에 적용 가능할 것으로 기대되며, 추가적으로 채널 형상 변화에 따른 연료 이용율, 가스 확산층 등의 변수를 고려한 연료극과 공기극에서의 경계조건에 관한 모델연구가 병행될 필요가 있다.

## 후 기

본 연구는 2004년도 부산대학교 교내 학술연구비(신임교수연구정착금) 지원으로 이루어졌음.

## References

- 1) S. Ge, X. Li and I. M. Hsing, "Internally Humidified Polymer Electrolyte Fuel Cells Using Water Absorbing Sponge," *Electrochimica Acta*, Vol.50, No.9, pp.1909-1916, 2005.
- 2) H. M. Jung, W. Y. Lee, J. S. Park and C. S. Kim, "Numerical Analysis of a Polymer Electrolyte Fuel Cell," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.29, No.9, pp.945-954, 2004.
- 3) S. Um, C. Y. Wang and K. S. Chen, "Computational Fluid Dynamics Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cells," *Journal of The Electrochemical Society*, Vol.147, No.12, pp.4485-4493, 2000.
- 4) T. V. Nguyen and R. E. White, "A Water and Heat Management Model for Proton Exchange Membrane Fuel Cells," *Journal of The Electrochemical Society*, Vol.140, No.8, pp.2178-2186, 1993.
- 5) J. S. Yi and T. V. Nguyen, "An Along-the-Channel Model for Proton Exchange Membrane Fuel Cells," *Journal of The Electrochemical Society*, Vol.145, No.41, pp. 1149-1159, 1998.
- 6) T. Okada, G. Xie and M. Meeg, "Simulation for Water Management in Membranes for Polymer Electrolyte Fuel Cells," *Electrochimica Acta*, Vol.43, Nos.14-15, pp.2141-2155, 1998.
- 7) T. Okada, G. Xie and Y. Tanabe, "Theory of Water Management at the Anode Side of Polymer Electrolyte Fuel Cell Membranes," *Journal of Electroanalytical Chemistry*, Vol. 413, Nos.1-2, pp.49-65, 1996.
- 8) T. E. Springer, T. A. Zawodzinski and S. Gottesfeld, "Polymer Electrolyte Fuel Cell Model," *Journal of Electrochemical Society*, Vol.413, No.8, pp.2334-2342, 1991.
- 9) S. Um and C. Y. Wang, "Computational Study of Water Transport in Proton Exchange Membrane Fuel Cells," *Journal of Power Sources*, Vol.156, pp.211-223, 2006.
- 10) R. F. Mann, J. C. Amphlett, M. A. I. Hooper, H. M. Jensen, B. A. Peppley and P. R. Roberge, "Development and Application of a Generalised Steady-State Electrochemical Model for a PEM Fuel Cell," *Journal of Power Sources*, Vol.86, pp.173-180, 2000.
- 11) M. Serra, J. Aguado, X. Ansele and J. Riera, "Controllability Analysis of Decentralized Linear Controllers for Polymeric Fuel Cells," *Journal of Power Sources*, Vol.151, pp.93-102, 2005.
- 12) H. Chan, Z. T. Xia and Z. D. Wei, "Matching of Critical Parameters in a Small Non-Pressurized Non-Humidified PEMFC Stack," *Journal of Power Sources*, Vol.158, pp.385-391, 2006.
- 13) K. Teranishi, "Phenomena of Mass and Heat Transport in PEMFC by MRI," *Tokyo Institute of Technology, M. S. Thesis*, 2004.
- 14) Q. Yan, H. Toghiani and J. Wu, "Investigation of Water Transport through Membrane in a PEM Fuel Cell by Water Balance Experiments," *Journal of Power Sources*, Vol.158, pp.316-325, 2006.