

Aspen Custom Modeler를 이용한 고분자 전해질 연료전지 다중 물리 모델 개발

손혜영¹ · 한재수¹ · 유상석^{2,†}

¹충남대학교 대학원 기계공학과, ²충남대학교 기계공학부

Development of a Multi-Physics Model of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Using Aspen Custom Modeler

HYEYOUNG SON¹, JAESU HAN¹, SANGSEOK YU^{2,†}

¹Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University Graduate School, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Korea

²Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Korea

[†]Corresponding author :
sangseok@cnu.ac.kr

Received 8 October, 2021
Revised 19 November, 2021
Accepted 16 December, 2021

Abstract >> The performance of polymer electrolyte membrane fuel cell depends on the effective management of heat and product water by the electrochemical reaction. This study is designed to investigate the parametric change of heat management along the channel of polymer electrolyte membrane. The model was developed by an aspen custom modeler that it can solve differential equation with discretization model. The model can simulate water transport through the membrane electrolyte that is coupled with heat generation. In order to verify the model, it is compared with the experimental data. The water transport behavior is then evaluated with the simulation model.

Key words : Proton exchange membrane fuel cell(고분자 전해질 연료전지), Water transport(수분 전달), Discretization model(차분 모델), Aspen custom modeler(아스펜 커스텀 모델러)

Nomenclature

A	: 열 교환 면적 (cm ²)	D _h	: 수력직경 (cm)
a _{i0}	: 교환전류 밀도 (A/cm ²)	h	: 열전달률 (W/m ² /K)
a _w	: 수분활성도	I	: 수소 반응량 (mol/s)
c _{O₂} ^{eff}	: 산소 농도 (mol/cm ³)	J	: 전류 밀도 (A/cm ²)
D _{O₂} ^{eff}	: 산소 확산계수 (cm ² /s)	k	: 열전도도 (W/m/K)
		L	: 반응기체의 이동방향 채널 길이 (cm)
		M _m	: 전해질막 질량 (g/mol)

N	: 각 기체의 반응량 (mol/s)
n	: 각 구간에서의 각 기체의 반응량 (mol/s)
R_{total}	: 이온저항 ($\Omega\text{-cm}^2$)
Q	: 열량 (W)
t_{mem}	: 전해질막 두께 (cm)
W	: 생성된 전력 (W)
x	: 물 분율

Greek

α	: 정미 수분전달 계수
λ	: 수분 함유량
ρ	: 전해질막 밀도 (g/cm^3)
σ	: 이온전도도 ($[\Omega\text{-cm}]^{-1}$)
η	: 힌 효율
φ	: 상대습도

Subscripts

a	: 연료극
c	: 공기극
cool	: 냉각수
f, fin	: 힌

1. 서 론

탄소 중립에 대한 관심이 높아지면서, 기존의 화력 발전을 대체할 수 있는 에너지원에 대한 관심이 증가하고 있다^{1,2)}. 연료전지는 전기를 생성하는 과정에서 순수한 물만을 배출하여 차세대 친환경 에너지원으로 주목받고 있다³⁾. 그중 고분자 전해질 연료전지(polymer electrolyte membrane fuel cell, PEMFC)는 다른 종류의 연료전지보다 작동온도가 낮고, 수명이 길며 에너지 효율이 좋다는 장점을 가지고 있다.

고분자 전해질 연료전지의 성능은 스택 내의 수분을 얼마나 효과적으로 관리하는지에 따라 크게 좌우되기 때문에 수분 이동 현상에 기여하는 변수가 무엇인지 그리고 어떠한 인과관계로 수분 균형에 영향

을 미치는지 파악하는 것이 중요하다. 수소 이온의 전도도는 전해질막 내의 수분과 비례하지만 수분 양이 과도하게 많을 경우 수분에 의해 채널 및 가스 확산층의 기공을 막아 연료 공급을 방해한다⁴⁾. 연료전지 시스템은 또한 열병합 발전 방식으로 스택뿐만 아니라 상호작용하는 주변 구성품들의 물리적/열적 특성 또한 성능에 큰 영향을 주기 때문에 통합적인 해석이 필요하다. 이러한 이유들로 인해 내부 수분 이동 현상을 보다 정확하게 예측하고자 다음과 같은 선행 연구들이 있었다.

Bernardi와 Verbrugge⁵⁾는 가스 확산층에서 기체와 수분의 이동이 연료전지 성능에 미치는 영향에 대해 연구하였으며, Springer 등⁶⁾은 채널 내 각 기체 및 수분의 분포는 일정하다고 가정하고 전해질막 내부를 수분 이동 방향으로 차분화하여 수분 농도 구배를 1차원 비선형 모델을 제시하였으며, 반대로 Nguyen과 White⁷⁾는 반응 기체의 흐름 방향으로 또한 차분화하여 2차원 열 및 질량전달 모델을 제시하였다. Dutta 등⁸⁾은 navier stokes의 3차원 질량 전달 방정식을 통한 모델을 제시하여 반응 기체 및 수분의 거동을 분석하였다.

Aspen plus는 화학공정 해석에 주로 사용되는 상용 프로그램으로 실제로 공장을 가동하지 않고도 이를 모사하여 다양한 설계변수의 영향을 분석하기 적합하다. 하지만 현재 공용 라이브러리에는 연료전지 스택 모델이 제공되지 않고 있다.

따라서 본 연구는 사용자 모델 개발 도구인 aspen custom modeler (ACM)를 통해 이온 교환막 연료전지 스택 모델을 개발하고자 한다. 개발된 모델은 채널 내의 수분 함유량과 전해질막을 통과하는 수분 투과량에 대한 모델, 이온 전도도 모사 모델 그리고 스택 내부 열 평형 방정식을 도입하여, 냉각수 유량 및 온도에 따른 스택의 작동온도를 예측할 수 있는 모델을 포함하고 있다. 상기 모델을 통해 전류 밀도에 따른 전기 및 열에너지 생산량을 예측하면서, 동시에 공기극과 연료극 출구단 가스 조성을 보다 구체적으로 모사할 수 있는 모델을 개발하고 신뢰성을 검증하고자 한다.

2. 모델 개발

2.1 스택 모델(ACM)

본 연구에서 개발한 고분자전해질 연료전지는 Fig. 1과 같이 평형 채널을 반응 기체의 흐름 방향으로 차분화하여 수분 농도를 보다 정확하게 예측하여 해석의 정밀도를 향상시키고자 하였다. 이때, 각 구간(반응 면적)에서의 전류가 일정하다고 가정한 후 출력전압을 계산하였으며, 그 외 적용된 가정은 다음과 같다.

- ① 모든 반응 기체는 이상기체이다.
- ② 스택의 온도는 모든 구간에서 동일하다.
- ③ 압력차에 의한 농도 구배는 무시한다.
- ④ 가스 확산층 및 촉매층의 두께는 무시한다.
- ⑤ 전해질막 내 수분 함유량은 선형적으로 변한다.
- ⑥ 모든 셀은 동일하게 반응한다.

전기화학 반응 및 수분 이동 현상 모델링은 대부분 Springer 등⁶⁾의 식을 참조하였다.

2.1.1 전기화학 반응 및 수분 이동 현상 모델링

연료전지에 일정한 전류 J 가 흐를 경우, 활성면적 전체에 걸쳐 반응에 참여하는 각 기체의 몰 유량은 식 (1)과 같은 관계를 갖는다⁶⁾.

$$I = J/2F = N_{H_2} = 2N_{O_2} = \frac{N_{wA}}{\alpha} = \frac{N_{wC}}{1 + \alpha} \quad (1)$$

연료극 및 공기극 입구 수분량은 실험 조건에 따른 각 입구의 상대습도(ϕ)에 의해 식 (2)와 같이 물

분율을 계산하여 공급한다.

$$x_{wA,in} = \phi_{A,in} \times \frac{P_A^{sat}}{P_A}, x_{wC,in} = \phi_{C,in} \times \frac{P_C^{sat}}{P_C} \quad (2)$$

모든 구간에서의 전류 밀도가 동일하다고 가정했기 때문에 i 구간에서의 각 성분의 반응량은 다음과 같다. 이때, x 는 반응 기체의 흐름 방향 길이이며, 질소는 반응에 참여하지 않는다.

$$\frac{\partial \dot{n}_{H_2,i}}{\partial x} dx = -\frac{J}{2F}(L \times dx) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \dot{n}_{O_2,i}}{\partial x} dx = -\frac{J}{4F}(L \times dx) \quad (4)$$

$$\frac{\partial \dot{n}_{wA,i}}{\partial x} dx = -\alpha_i \times \frac{J}{2F}(L \times dx) \quad (5)$$

$$\frac{\partial \dot{n}_{wC,i}}{\partial x} dx = (\alpha_i + 1) \times \frac{J}{2F}(L \times dx) \quad (6)$$

α_i 는 정미 수분 전달계수(net water transport coefficient)로 식 (7)과 같이 양극의 전압차에 의해 수분이 공기극으로 당겨지는 전기삼투(electro-osmotic force, 식 [8])와 반대로 농도차에 의한 확산력에 의해 수분이 연료극으로 당겨지는 역확산(back diffusion, 식 [9])의 두 힘에 의해 결정된다^{5,9)}. 연료극에서 공기극으로 이동하는 수분은 +, 반대로 공기극에서 연료극으로 이동하는 수분은 -로 계산된다.

$$N_{w,i} = \alpha_i I = N_{drag,i} - N_{diff,i} \quad (7)$$

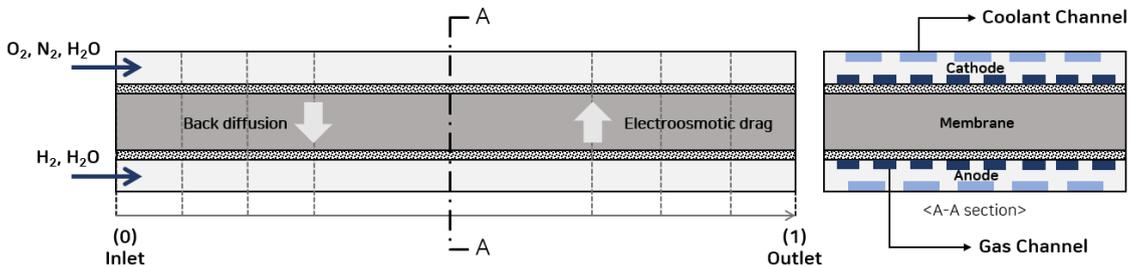


Fig. 1. Schematic diagram of distributed PEM fuel cell

$$N_{drag,i} = \frac{5}{22} \lambda_i \frac{J}{2F} \quad (8)$$

$$N_{diff,i} = -\frac{\rho_{dry}}{M_m} D_{\lambda,i} \frac{d\lambda_i}{dz} \quad (9)$$

확산계수 $D_{\lambda,i}$ 는 식 (10)과 같다.

$$D_{\lambda,i} = 10^{-6} \exp \left[2416 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{273 + T_{cell}} \right) \right] \times (2.563 - 0.33\lambda_i + 0.0264\lambda_i^2 - 0.000671\lambda_i^3) \quad (10)$$

채널 내 수분 함유량(λ , 식 [11])은 해당 구간의 물 분율로 계산되는 수분 활성화도(a_w , 식 [12])의 함수로 나타내었다. 포화 상태일 때 값 14를 기준으로 하여, 만약 λ 가 14를 넘었다면 이는 액체 상태의 물이 생성될 수 있음을 의미한다.

$$0 \leq a_{w,i} < 1 : \lambda_i = 0.043 + 17.81 a_{w,i} - 39.85 a_{w,i}^2 + 36 a_{w,i}^3 \quad (11)$$

$$1 \leq a_{w,i} \leq 3 : \lambda_i = 14 + 1.4 (a_{w,i} - 1)$$

$$a_{w,i} = \frac{x_{w,i} P}{P_{sat}} \quad (12)$$

이온전도도는 구해진 각 구간에서의 수분 함유량을 이용해 다음 식 (13)과 같이 구하였다.

$$\sigma_i = \exp \left(1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{cell}} \right) \right) \times (0.005139\lambda_i - 0.00326) \quad (13)$$

구간을 기체의 흐름방향으로 차분화하였기 때문에 셀을 병렬로 연결한 것과 같이 가정할 수 있으며, 그로 인해 이온저항 R_{total} 은 식 (14)의 식을 적용하였다.

$$\frac{1}{R_{total}} = \int \frac{1}{R_{ohm,i}}, R_{ohm,i} = \frac{t_{mem}}{\sigma_i} \quad (14)$$

2.1.2 셀 출력 전압

셀의 실제 출력 전압(v_{cell} , 식 [15])은 가역적인 네

른스트 전압에서 손실들을 고려해야한다.

$$V_{cell} = E - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (15)$$

식 (16)부터 (19)는 각각 nernst 전압, 활성화 손실 전압, 전기저항 손실 전압, 물질전달 손실 전압에 대한 식이다.

$$E = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} (T_{cell} - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} T_{cell} (\ln(P_{H_2}) + 0.5 \ln(P_{O_2})) \quad (16)$$

활성화 손실 전압은 전극의 표면에서 반응이 늦게 일어나기 때문에 발생하는 손실로, 본 연구는 연료극 보다 더욱 반응이 느린 공기극만을 고려하여 유사 균질 모델(Pdo-homogeneous model)의 식을 적용하였다. 촉매층 내 산소의 확산 및 반응의 관계를 기반으로 한 활성화 손실 전압은 다음 식 (17)과 같다^{5,10}.

$$V_{act} = \frac{RT_{cell}}{2F} \ln \left[\frac{1}{a_{i_0} D_{O_2}^{eff} c_{O_2}^{eff}} \left(\frac{J}{4F} \right)^2 \right] \quad (17)$$

전기저항 손실은 수소 이온 전달에 대한 전해질막의 저항과 전극의 전기저항에 의해 발생하며, 단순히 전류에 비례한다.

$$V_{ohm} = J \times R_{total} \times N_{cell} \quad (18)$$

물질전달 손실은 반응물의 농도의 변화로 인해 발생하여 고전류 밀도에서 빠른 전압 강하의 원인이 된다¹¹.

$$V_{conc} = J \left(c_1 \frac{J}{i_{max}} \right)^{c_2} \quad (19)$$

$$c_1 = \begin{cases} (7.16 \times 10^{-4} T_{cell} - 0.622) \left(\frac{P_{O_2}}{0.1173} + P_{sat} \right) \\ + (-1.45 \times 10^{-3} T_{cell} + 1.68) \\ \text{for} \left(\frac{P_{O_2}}{0.1173} + P_{sat} \right) < 2atm \end{cases}$$

$$i_{max} = 2.2, c_2 = 2$$

2.1.3 열 전달 및 에너지 보존

본 연구의 스택은 정상 상태의 연료전지 모델이기 때문에 스택이 만족해야하는 에너지 법칙은 다음과 같다.

$$\sum_{in} \dot{m}h_i - \sum_{out} \dot{m}h_i - \dot{Q}_g - \dot{Q}_{cool} - \dot{Q}_A - \dot{Q}_C = 0 \quad (20)$$

여기서 \dot{Q}_g 는 연료전지가 전기화학 반응으로 통해 전력 W_{stack} 을 생산해냄과 동시에 방출된 열로 식 (22)와 같이 계산된다.

$$W_{stack} = \dot{N}_{cell} V_{cell} J \quad (21)$$

$$\dot{Q}_g = W_{stack} \times \left(\frac{1.25}{V_{cell}} - 1 \right) \quad (22)$$

또한, \dot{Q}_{cool} , \dot{Q}_A , \dot{Q}_C 는 각각 스택에서 냉각수, 연료극 가스, 공기극 가스로 배출되는 열량으로 식 (23) 과 식 (24)와 같이 계산된다^{12,13}.

$$\dot{Q} = \dot{m}_{out} c_{p,out} \overline{T}_{out} - \dot{m}_{in} c_{p,in} \overline{T}_{in} \quad (23)$$

$$T_o = T_{cell} + (T_{in} - T_{cell}) \exp\left(-\frac{1}{m_{in} c_p R_{fin}}\right) \quad (24)$$

열접촉저항($R_{fin,i}$, 식 [25])은 평형 채널의 전극판에 환이 부착된 것과 같은 형상으로 환 면적(A_f , 식 [26])과 환 효율(η_{fin} , 식 [27])을 계산하여 구하였다.

$$R_{fin,i} = \frac{1}{h_i [A - A_f (1 - \eta_f)]} \quad (25)$$

$$h_i = \frac{\overline{Nu}_D \times k}{D_h} \quad (26)$$

$$\eta_f = \frac{\tanh(mL_f)}{mL_f}, m = \sqrt{\frac{2h}{k_{fin}t_{fin}}} \quad (27)$$

또한, 식 (25)의 열전달 계수 h_i 는 유속에 따라 변

하는 값이다. 반응 기체의 경우 유체의 흐름을 층류로 가정하였으며, 냉각수는 난류일 수 있기 때문에 reynold 수를 계산하여 그 수가 3,000 미만일 경우엔 nusselt 수를 3.66으로 가정하였고 이상일 경우엔 다음 식 (28)과 같이 Dittus-boelter 방정식¹⁴)으로부터 값을 구하였다³).

$$\overline{Nu}_D = 0.023 Re_D^{4/5} Pr^n \quad (28)$$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k}, Re_D = \frac{4\dot{m}_{in}}{\pi D \mu} \quad (29)$$

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \quad (30)$$

이렇게 스택의 에너지 보존 법칙에 적용된 미지수는 연료극, 공기극 그리고 냉각수로부터 배출되는 열량 (\dot{Q}_{cool} , \dot{Q}_c , \dot{Q}_A)과 이들의 출구 온도($T_{o,cool}$, $T_{o,A}$, $T_{o,C}$) 그리고 전기화학반응에 의해 생성되는 열(\dot{Q}_g) 및 스택 작동 온도(T_{cell})이며, 식 (20)부터 식 (24)에 의해 계산된다.

3. 결과 및 고찰

3.1 모델 검증

Fig. 2는 개발한 스택 모델의 신뢰성을 검증하기

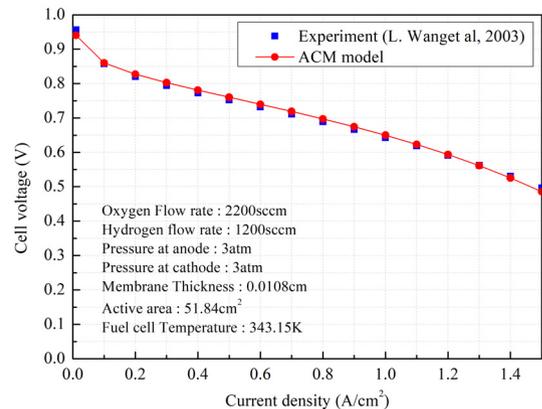


Fig. 2. Polarization curves of experimental and model

위해 실제 실험을 통해 얻어진 결과¹⁵⁾와 동일한 조건에서의 계산 값을 비교한 그래프이며, 상관계수가 약 0.998156으로 오차가 거의 없는 것을 확인할 수 있었다. 오차는 출력전압을 계산할 때 고려하지 않은 그 밖의 손실들 또는 압력차에 의한 농도구배를 무시하는 등의 앞선 가정들로 인해 발생된 것으로 판단된다.

3.2 해석 결과

본 연구는 사용자가 지정한 작동조건에서 각 구간에서 전기화학 반응이 순차적으로 진행됨에 따라 채널 내 수분 농도 변화 및 성능을 예측하도록 개발되었으며, Table 1은 시뮬레이션에 사용된 파라미터들을 보여주고 있다.

전해질막 두께가 얇은 경우, 스택 내부에서 전기화학반응에 의해 발생하는 수분에 의한 공기극과 연료극 출구단 습도 변화를 알아보기 위해, 연료극의 경우 입구 습도를 0%로 하고, 공기극의 경우는 80% 조건을 유지하였다. 본 연구는 가스 확산층의 두께를 무시하였고, 유로 구간은 총 20개로 차분화 하였으며, x축은 평형 채널의 길이로 표준화한 위치를 나타낸 값으로, 0은 입구이고 1은 출구이다.

Fig. 3은 냉각수 유량에 따른 스택의 작동온도 변화를 나타낸 그래프이다. 냉각수량이 많을수록 연료전지의 전기화학 반응에 의해 생성된 열은 많이 제

거되는 것을 볼 수 있으며, 본 연구는 Table 1의 작동 조건과 같이 스택 작동 온도를 70°C로 유지하기 위해 각 전류 밀도에 따른 적절한 냉각수량을 결정하여 적용하였다.

Fig. 4는 연료극과 공기극의 채널 방향 정미 수분 전달 계수(α)를 보여주고 있다. 입구로 유입된 후 수분 전달계수는 전류 밀도에 관계없이 큰 폭의 음의 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 연료극의 입구 습도가 0이기 때문에, 공기극으로부터 수분 투과량이 매우 크게 되고, 이로 인해, 입구 주변에서 수분 투과 계수가 음의 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 하지만 이러한 수분 투과 계수는 연료극으로 이동하는 수분과 공기극에서 생성된 수분에 의해 양극의 수분 농도 차이가 점차 줄어들어 약 1/3 지점부터 0에 가까운 양의 값을 가지게 되고 수소 이온에 의해 물이 공기극으

Table 1. Specification of the fuel cell stack

Parameters	Value
Active surface area	225.6 cm ²
Membrane thickness (t_{mem})	50 mm
Number of cell (N_{cell})	50
Stoichiometric coefficient	H ₂ : 1.1 O ₂ : 2
Stack target temperature (T_{cell})	70°C
Coolant inlet temperature	65°C
Pressure (P_A/P_C)	1.1 bar
Humidity of inlet gas	Anode: 0% Cathode: 80%

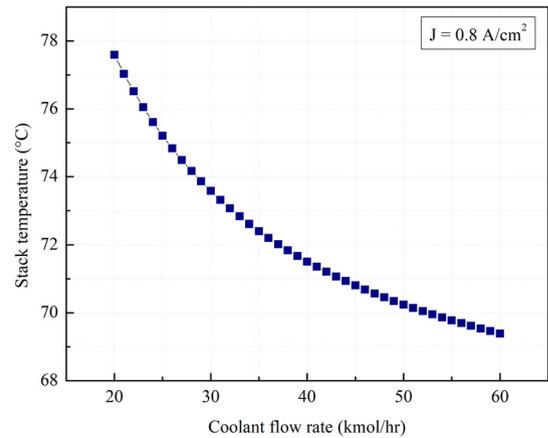


Fig. 3. Profile of the stack temperature according to the coolant flow rate

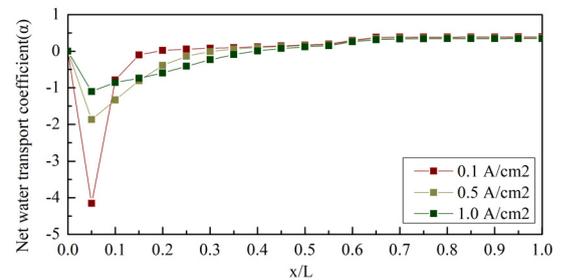


Fig. 4. Profiles of net water transport coefficient at different current density

로 이동하기 시작한다.

Fig. 4는 또한 수분 투과 계수의 전류 밀도에 의한 영향을 나타내고 있다. 저전류 밀도에서는 비교적 빠르게 높아지지만, 전류 밀도가 높아짐에 따라 그 회복량이 다소 완만한 것을 볼 수 있다. 즉, 고전류 밀도에서는 전기 삼투력(electro-osmotic drag)이 크기 때문에 연료극으로부터 끌고 가는 물 분자수가 많아서 채널 방향으로 진행되는 수분 투과 계수가 천천히 회복된다는 것을 알 수 있다.

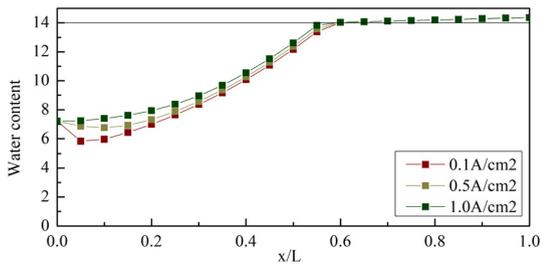
Fig. 5에는 이러한 수분 투과 계수의 변화에 의한 양극 표면에서의 함유율을 비교하였다. 양극 채널 입구에서는 입구 가습 효과에 의해 수분 함유량이 결정되지만, 이후 공기극은 전기화학 반응에 의해 생성된 수분과 전해질막으로의 수분 투과 특성에 의해 수분 함유량이 변화하게 된다. 이에 비해 연료극은 순수하게 수분 투과 특성에 의해서 수분 함유량이 변화하는 것을 볼 수 있다. 수분 투과 계수가 보여주듯이, 연료극 입구에서는 수분 함유량이 초기에 급속하게 올라가게 되고, 그 이후에도 채널 진행 방향으

로 완만하게 수분 함유량이 증가하게 된다. 이후 양극의 수분 함유량 차이가 줄어들면서 채널 진행 방향 약 2/3 구간부터 공기극 채널이 포화 상태에 도달하게 되면 두 힘이 평형을 이루어 수분 농도가 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다.

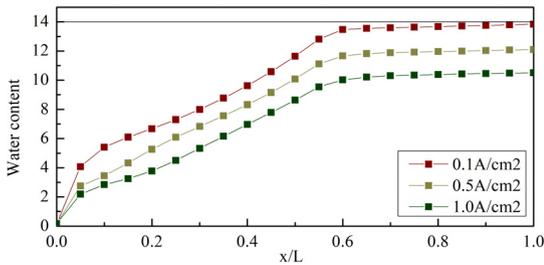
공기극의 경우에도 채널 초입에서는 전기화학 반응이 진행됨에도 불구하고 연료극으로 수분 투과로 인해 수분 함유량이 낮아지지만, 그 후 반응수가 증가하면서 증가하게 되고, 수분 함유량이 포화 상태에 도달하게 되면서부터, 연료극으로 투과되는 수분 이송을 위한 구동력도 제한받게 되고 이로 인해 공기극 수분 함유량도 포화상태를 유지하게 된다.

전류 밀도가 증가함에 따라 연료극에서는 전기 삼투에 의해 수소 이온이 물분자를 끄는 양이 증가하게 되면서, 수분 함유량은 전류 밀도에 따라 전체적으로 감소하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6은 채널 내 수분 함유량 변화에 의한 이온저항을 비교한 그래프이다. 전기화학 반응이 진행되면서 연료극 및 공기극의 함유율이 증가하는 것에 반비례하여 이온 저항은 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 채널 내 수분 농도가 높을수록 수소 이온이 전해질막을 보다 수월하게 투과할 수 있음을 보여주며, 공기극 채널이 포화상태에 도달하자 이온저항도 일정한 값을 유지하였다. 공기극 수분 함유량은 전류 밀도에 따라 큰 차이가 없지만 연료극은 전류 밀도가 낮을수록 채널 내 수분 농도가 높아 이온저항 또한 전반적으로 낮은 것을 볼 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 5. Profiles of water content at different current density ((a) anode/(b) cathode)

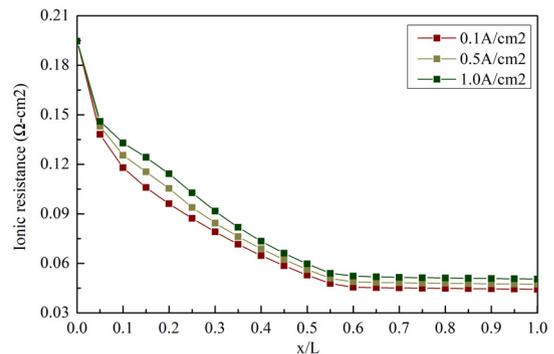


Fig. 6. Profiles of ionic resistance at different current density

4. 결론

본 연구는 고분자 전해질 연료전지 스택의 특성을 모사할 수 있는 모델을 개발하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 전류밀도가 높을수록 전기 삼투력이 강해 연료극 채널 내 평균 수분 함유량은 낮아지고 이온저항은 증가하기 때문에 보다 많은 가슴을 필요로 한다.

(2) 본 연구에 적용된 해석 조건의 경우, 공기극의 채널 출구단 근처에서 수분 함유량(λ)이 최댓값을 넘어 액체상태의 물이 생성되어 flooding 현상이 발생할 가능성이 있음을 확인하였다.

(3) 스택 작동온도는 냉각수 유량에 따라 지수적으로 감소하므로 추후 효율적인 시스템을 설계하기 위해선 적절한 냉각수량을 계산하여야 한다.

후 기

본 연구는 2021년도 산업통상자원부 및 산업기술 평가관리원(KEIT)의 지원(20015756)과 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(No. 20203010030010)을 받아 수행된 연구이다.

References

1. N. Z. Muradov and T. N. Veziroğlu, ““Green” path from fossil-based to hydrogen economy: an overview of carbonneutral technologies”, *Int. J. Hydrog. Energy*, Vol. 33, No.23, 2008, pp. 6804-6839, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.08.054>.
2. M. Steinberg, “Fossil fuel decarbonization technology for mitigating global warming”, *Int. J. Hydrog. Energy*, Vol. 24, No. 8, 1999, pp. 771-777, doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(98\)00128-1](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(98)00128-1).
3. L. Carrette, K. A. Friedrich, and U. Stimming, “Fuel cells: principles, types, fuels, and applications”, *ChemPhysChem*, Vol. 1, No. 4, 2000, pp. 162-193, doi: [https://doi.org/10.1002/1439-7641\(20001215\)1:4%3C162::aid-cphc162%3E3.0.co;2-z](https://doi.org/10.1002/1439-7641(20001215)1:4%3C162::aid-cphc162%3E3.0.co;2-z).
4. J. Larminie and A. dicks, “Fuel cell systems explained, second edition”, WILEY, 2003, doi: <https://doi.org/10.1002/9781118878330>.
5. D. M. Bernardi and M. W. Verbrugge, “Mathematical model of a gas diffusion electrode bonded to a polymer electrolyte”, *AICHE J*, Vol. 37, No. 8, 1991, pp. 1151-1163, doi: <https://doi.org/10.1002/aic.690370805>.
6. T. E. Springer, T. A. Zawodzinski, and S. Gottesfeld, “Polymer electrolyte fuelcell model”, *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 138, No. 8, 1991, pp. 2334-2342, doi: <https://doi.org/10.1149/1.2085971>.
7. 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, 1993, pp. 2178, doi: <https://doi.org/10.1149/1.2220792>.
8. S. Dutta, S. Shimpalee, and J. W. Van Zee, “Three dimensional numerical simulation of straight channel PEM fuel cells”, *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol. 30, No. 2, 2000, pp. 135-146, doi: <https://doi.org/10.1023/A:1003964201327>.
9. J. S. Yang, G. M. Choi, and D. J. Kim, “Prediction of fuel cell performance and water content in the membrane of a proton exchange membrane fuel cell”, *The Korean Society Of Automotive Engineers*, 2006, pp. 151-159. Retrieved from <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE00770118>.
10. P. C. Sui, L. D. Chen, J. P. Seaba, and Y. Wariishi, “Modeling and optimization of a PEMFC catalyst layer”, *SAE*, 1999, doi: <https://doi.org/10.4271/1999-01-0539>.
11. J. T. Pukrushpan, “Modeling and control of fuel cell systems and fuel processors”, Ph.D. dissertation, Univ. of Michigan, 2003. Retrieved from <https://www.semanticscholar.org/paper/Modeling-and-control-of-fuel-cell-systems-and-fuel-Pukrushpan/75f4c71d3ac70d3688270e761f6f07786fd84b49>.
12. S. Yu and D. Jung, “Thermal management strategy for a proton exchange membrane fuel cell system with a large active cell area”, *Renewable Energy*, Vol. 33, No. 12, 2008, pp. 2540-2548, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.02.015>.
13. J. Y. Han, K. H. Lee, and S. S. Yu, “Dynamic modeling of cooling system thermal management for automotive PEMFC application”, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, Vol. 36, No. 12, 2012, pp. 1185-1192, doi: <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2012.36.12.1185>.
14. F. P. Incropera, D.P. Dewitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, “Principles of heat and mass transfer”, WILEY, 2018.
15. L. Wang, A. Husar, T. Zhou, and H. Liu, “A parametric study of PEM fuel cell performances”, *Int. J. Hyd. Energy*, Vol. 28, No. 11, 2003, pp. 1263-1272, doi: <https://doi.org/10.1115/imece2002-33167>.