

패시브 타입 공랭식 연료전지 성능향상을 위한 캐소드 채널 폭 비율에 대한 수치해석적 연구

이재승* · 이남민* · 임기성* · 최재유* · 주현철*†

Numerical Study on the Cathode Channel Width Ratio for Improving Performance of a Passive Air Cooled PEMFC

Jaeseung Lee*, Nammin Lee*, Kisung Lim*, Jaeyoo Choi*, Hyunchul Ju*†

Key Words : PEMFC(고분자 전해질 연료전지), Air-cooling(공랭식), Relative humidity(습도), Water management(물 관리), Water concentration(물 농도), Oxygen concentration(산소 농도)

ABSTRACT

In general, a passive air cooled proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) operates under an excessive amount of air flow and low humidification conditions, indicating effective control of stack temperature and membrane hydration is of paramount importance for achieving high and stable performance. In this study, we numerically investigate the effects of cathode bipolar plate flowfield design on temperature and water distributions inside a passive air cooled PEMFC. The three-dimensional (3D) non-isothermal PEMFC model is applied to various PEMFC geometries where three different flowfield designs with different ratio and dimensions of air supply channel and cooling channels are taken into account. Simulation results show that the flowfield design with narrow air supply channel and/or wide cooling channel exhibits superior water management performance whereas the effect of oxygen depletion is minimal due to sufficiently a large amount of air supply conditions. This study clearly demonstrates that the membrane dehydration issue in a passive type air cooled PEMFC can be mitigated by proper design of cathode flowfield.

1. 서 론

연료전지는 전기화학반응으로 화학에너지를 전기에너지로 전환시켜주는 장치이다. 높은 에너지 효율과 오염물질을 거의 발생시키지 않는다는 장점이 있으며 전해질의 종류 및 작동온도에 따라 고분자 전해질 연료전지(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC), 인산형 연료전지(Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC), 용융탄산염 연료전지(Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC), 고체산화물 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) 등으로 구분된다. 그 중에서 얇은 고분자 막을 사용하는 고분자전해질연료전지는 높은 전력밀도, 낮은 작동온도를 가지며 빠른 운전 및 정지 능력의 장점들을 가진다. 이러한 특징들은 고분자전해질연료전지가 수송용 및 소형 발전용 장비의 에너지원으로서 적합하게 한다.

연료전지의 많은 장점에도 불구하고 상용화를 위해서는 아직 해결해야 할 많은 문제점들이 존재한다. 촉매로 사용되는 백금으로 인한 비싼 가격을 하락시켜야 하며 내구성 및 신뢰성을 향상시켜야 한다^(1,2). 또한 다양한 보조 설비(Balance of plants, BOPs)를 축소하거나 없애 제작비용 및 시스템 복잡성을 절감하는 노력이 필요하다.

지금까지 여러 종류의 연료전지들이 다양한 분야로 상용화되기 위해 성능 및 내구성 향상과 가격 저감을 목표로 많은 연구들이 진행되어 오고 있다. 연료의 다양성을 지니고 고온에서 작동하는 고체 산화물 연료 전지(SOFC)⁽³⁻¹⁰⁾와 일산화탄소와 이산화탄소 및 수소에 내성이 있는 용융 탄산염 연료전지(MCFC)⁽¹¹⁻¹⁷⁾는 발전용에 적합한 것으로 인식되고 있으며, 직접연료를 사용하기 때문에 소형화가 가능한 직접 메탄올 형 연료전지(Direct Methanol Fuel Cell, DMFC)⁽¹⁸⁻²⁰⁾, 낮은 작동온도에서 작동 가능하며 높은 전력밀도를 보이는

* 인하대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Inha University)

† 교신저자, E-mail : hcju@inha.ac.kr

고분자 전해질 연료전지(PEMFC)⁽²¹⁻⁴⁰⁾는 주로 수송용 분야에 초점이 맞춰져 있다.

100°C 이하에서 작동하는 수송용 고분자 전해질 연료전지 냉각방식은 주로 수냉식(water-cooled)이 대부분이지만, 공랭식, 오픈 캐소드 타입 연료전지는 개방된 캐소드 유로에 Fan을 사용하여 외부 공기를 공급함과 동시에 냉각시키는 구조이며 무게의 제약성 때문에 수냉식 연료전지 시스템을 적용할 수 없는 소형 무인 항공기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)나 드론(drone)용에 적합한 연료전지 구조이다. 반응을 통해 생성된 물을 이용한 자가 가습방식이기 때문에 시스템을 단순화시킬 수 있다. 하지만 상온의 공기를 흡입하여 연료와 냉각가스로 동시에 사용해야 하고, 연료전지 스택에서 발생하는 열을 배출하여 스택 온도를 적절하게 유지해야 하므로 과도한 공기를 공급해야 한다. 상온의 공기가 과도하고 건조한 상태로 유입되기 때문에, 전해질 막의 탈수현상이 심화되고 셀 내부의 수분분포, 온도분포, 전류밀도 분포 등이 매우 불균일해지는 문제가 발생하여 안정적인 성능확보가 어려워진다⁽⁴¹⁾. 현재 고분자 막의 이온전도도를 향상시키기 위한 연구가 다각도로 진행 중이며⁽⁴²⁻⁴⁵⁾, 고분자막의 물함량 의존성을 보완하기 위해 고온형 고분자 전해질 연료전지(HT-PEMFC)가 개발되어 현재 많은 연구가 진행되고 있다⁽⁴⁶⁻⁴⁹⁾.

오픈 캐소드(Open-cathode) 연료전지의 성능은 작동조건과 외부환경의 영향을 크게 받기 때문에 이와 관련된 다양한 연구가 필수적이다. Yuan⁽⁵⁰⁾ 등은 오픈 캐소드 타입 연료전지에서 온도와 습도를 동시에 제어할 경우 출력이 향상됨을 보였다. Pei⁽⁵¹⁾ 등은 가스확산층(Gas Diffusion Layer, GDL) 두께와 PTFE 함량이 성능에 주요한 변수가 된다는 것을 보였다. Santa Rosa⁽⁵²⁾ 등은 스택 성능에 대한 다양한 작동 파라미터의 영향을 연구했다. 그들은 자연대류 대신 강제대류로 운전하면 성능이 크게 증가하며 수소분압은 성능에 크게 영향을 주지 않는다는 결론을 내렸다. Ous⁽⁵³⁾ 등은 오픈 캐소드 연료전지에서의 물 관리에 대해 연구했다. 그들은 공기와 수소의 stoichiometry는 채널에서 물 제거에 거의 영향을 미치지 않았다는 것을 보였다. Wu⁽⁵⁴⁾ 등은 공랭식 단일 PEMFC를 설계하여 임계 작동 조건이 출력 성능에 미치는 영향을 조사했다. 셀(cell)의 온도와 수소의 습도는 ohmic 저항을 감소시키는 데 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다. 또한 캐소드 유동 채널의 친수성 처리가 물 관리를 향상시킬 수 있음을 보였다.

본 논문에서는 과도한 공기유량과 건조한 공기를 사용할 수밖에 없는 공랭식, 오픈 캐소드 연료전지의 분리판 유로 채널 설계변수가 온도제어 및 물 관리에 미치는 영향성을 연구할 목적으로 진행되었다. 3차원 연료전지 모델을 공랭식 오픈 캐소드 연료전지 형상에 적용하여, 캐소드 분리판의 공기공급 채널 폭과 냉각채널 폭의 비율변화가 막전극접

합체(Membrane Electrode Assembly, MEA)의 수분분포와 산소농도에 미치는 영향성을 이론적으로 분석하였다. 본 연구 결과는 소형 무인기 및 드론용 공랭식 연료전지 스택을 설계하는데 핵심지표로 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 공랭식 PEMFC 열유동 해석 모델

2.1 모델 시뮬레이션

본 연구에서는 공랭식(Air-cooled) PEMFC 스택의 열유동 특성을 연구하기 위해 ANSYS-FLUENT 16.1 전산유체(Computational Fluid Dynamics, CFD) 패키지를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 본 모델의 수렴조건은 해에 대한 정확도 향상을 위해 Residual이 10^{-9} 이하가 되도록 반복 계산을 하였다. 또한, 열 유동의 특성에 대한 시뮬레이션을 수행하기 위해 60만개의 육면체(hexahedral)형상의 격자가 스택형상에 적용되었다.

2.2 모델 가정

모델에 적용된 가정은 다음과 같다.

- (1) 압력 구배가 작기 때문에 비압축성 층류 유동으로 가정한다.
- (2) 전기화학반응은 공기극에서 느린 속도를 가지므로 전기화학반응으로 발생하는 열은 공기극 촉매층에서 지배적으로 발생한다.
- (3) 가스확산층은 등방성 및 균질한 다공성 층으로 고려되며, 유효 공극율과 투과성으로 특징지어질 수 있다.
- (4) 공기극 촉매층에서 발생한 열은 공기극과 연료극 방향으로 동일하게 나뉘어져 전도된다.
- (5) 분리판의 형상 및 MEA내부 수분분포와 상관없이 전해질 막에서는 동일한 전류밀도가 균일하게 분포한다.

2.3 지배방정식

본 연구에서 열유동해석을 위해 사용된 모델은 질량(mass), 모멘텀(momentum), 열 에너지(thermal energy) 보존법칙에 대한 지배방정식에 의해 표현된다.

질량 보존식:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

모멘텀 보존식:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau \quad (2)$$

에너지 보존식:

$$\nabla \cdot (\vec{u}\rho h) = \nabla \cdot (k\nabla T) \quad (3)$$

2.4 모델 기하학 형상 및 경계조건

본 연구의 모델에 대한 스택 기하학 형상과 정의한 Case 들은 Fig. 1과 같다. 여기서 Case 1은 Case 4와, Case 2는 Case 5와, Case 3은 Case 6과 서로 형상은 같지만 작동전류는 Case 1, 2, 3은 0.5 A/cm²@0.62V, Case 4,5,6은 0.7 A/cm²@ 0.57V로 다르다. 전해질막은 고려하지 않고 공기극의 촉매층과 가스확산층 그리고 분리판이 적층되어있는 구조이다. 사용된 채널의 형상은 단순화된 직선채널이다. 분리판 내 여러 개의 채널이 포함된 스택형상을 구현하기 위해 형상의 둘레에는 대칭조건을 주었다. Table 1에는 모델의 물성치를 표시하였으며 Table 2에는 형상의 치수와 작동조건을 표기하였다.

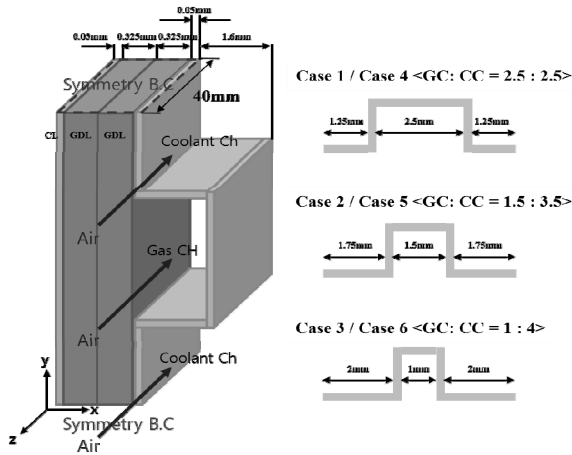


Fig. 1 Geometry and cell dimensions for simulation cases.

Table 1. Physical, transport and thermal properties

Description	Value
Cell dimensions	
Gas channel height	1.6 mm
Coolant channel height	1.6 mm
Thickness of cathode GDL	0.65 mm (0.325 mm + 0.325 mm)
Thickness of cathode CL	30 μm
Cell length	40 mm
Active area	2.04 cm ² (0.51 cm × 4 cm)
Coolant channel number	2 EA
Gas channel number	1 EA
Operating conditions	
Inlet temperature	25 °C
Outlet temperature	50 °C
Rh	35%
Pressure	1 atm

Table 2. Cell dimensions and operating conditions

Description	Value
Specific heat capacities of GDL, CL, and BP	568, 3300, 7703 J/kg · K
Specific heat capacities of H ₂ O, N ₂ and O ₂	1863.63, 917.778, 1040 J/kg · K
Thermal conductivities of GDL, CL, and BP	1.5, 1.2, 13.4 W/m · K
Thermal conductivities of H ₂ O, N ₂ , and O ₂	0.0237, 0.0293, 0.0296 W/m · K
Porosity of cathode GDL and CL	0.5, 0.4
Diffusivity of O ₂ and H ₂ O in	3.5131×10 ⁻⁵ , 3.421×10 ⁻⁵ kg/m · s
Diffusivity of O ₂ and H ₂ O in GDL	1.2421×10 ⁻⁵ , 1.2095×10 ⁻⁵ kg/m · s
Diffusivity of O ₂ and H ₂ O in CL	8.8875×10 ⁻⁶ , 8.6545×10 ⁻⁶ kg/m · s
Viscosity	2.0498×10 ⁻⁵ kg/m · s

공기극 촉매층에서 발생하는 열은 연료전지의 열역학적 포텐셜, U₀을 기준으로 가역 및 비가역적 손실을 고려하여 계산될 수 있다.

$$U_0 = 1.23 - 0.0009(T - 298.15) \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{rev} = (-T \frac{\partial U_0}{\partial T}) \cdot I \cdot A_{active} \quad (5)$$

$$\dot{Q}_{irrev} = (U_0 - V_{cell}) \cdot I \cdot A_{active} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_T &= \dot{Q}_{rev} + \dot{Q}_{irrev} \\ &= (-T \frac{\partial U_0}{\partial T} + U_0 - V_{cell}) \cdot I \cdot A_{active} \end{aligned} \quad (7)$$

팬을 통해 공랭식 스택내로 공기가 유입될 때, 공기극 가스채널과 냉각채널에서 공기속도는 동일하게 되며, 공기극 가스채널과 냉각채널 입구에서의 공기 유입속도는 다음과 같이 계산된다.

$$V_c = \frac{\dot{Q}_T}{\rho_c \cdot A_{channel} \cdot C_{p,c} \cdot \Delta T} \quad (8)$$

또한 공기극 촉매층에서 물이 생성되고 산소가 소멸하는데 이는 작동전류밀도, j_c에 비례하며 다음 식을 통해 계산된다.

물 생성 항 :

$$S_{H_2O} = \frac{j_c}{2F} \quad (9)$$

산소 소멸 항 :

$$S_{O_2} = -\frac{j_c}{4F} \quad (10)$$

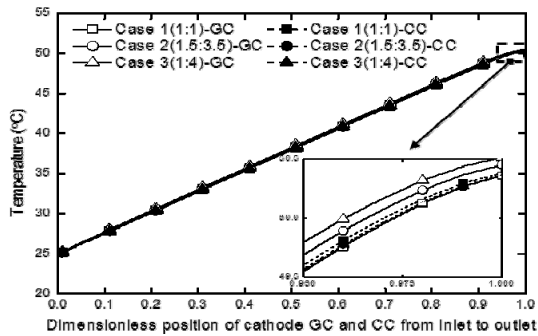
3. 결과 및 고찰

Fig. 1에서 설명된 것처럼, 본 연구에서는 공기극 가스채널 입구의 너비가 2.5 mm, 1.5 mm, 1 mm로 좁아지며, 공기공급 채널(GC)과 냉각채널(CC)의 비율이 1:1, 1.5:3.5, 1:4로 증가할 때 따른 PEMFC 성능예측을 연구하였다. 공기공급채널을 폭을 냉각채널의 폭에 비해 과도하게 감소시킨 이유는 공랭식 연료전지 특성상 과도한 공기가 유입되기 때문에 산소전달 능력 향상보다는 캐소드 촉매층에서 생성된 물의 배출을 억제하는 것이 셀 성능에 더 도움이 되기 때문이다. 시뮬레이션 모델의 경계조건인 입구채널의 속도는 식 (9)를 이용하여 계산하였으며 발생하는 열은 식 (8)을 이용하여 계산하였다. 또한 촉매층에서 발생하는 산소와 물은 식 (10)과 (11)로 계산하였다. Case 1, 2, 3과 Case 4, 5, 6은 형상은 서로 같지만 전류밀도가 다른 경우를 비교하기 위해 정의되었다.

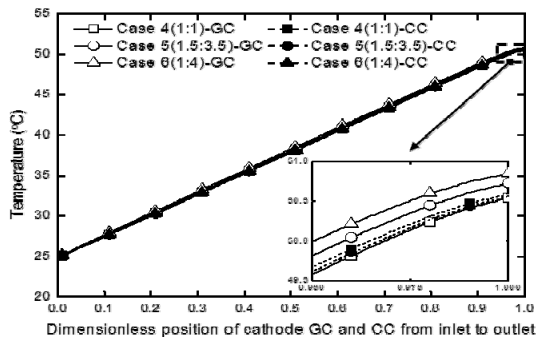
Fig. 3은 입구부터 출구까지 가스채널과 냉각채널에서의

온도분포를 나타내는 그래프이다. x축은 입구에서부터의 거리를 총 거리를 나눈 값을 의미하며 x 값이 1에 가까워질수록 출구와 가깝다는 것을 의미한다. 유입되는 공기에 의해 셀 내부에 생성되는 열이 제거되기 때문에 입구에서 출구까지의 온도가 점차 증가함을 확인할 수 있다. 또한 출구온도가 50°C로 유지될 수 있도록, 유입되는 공기유량은 발열량에 비례하여 제어되기 때문에 작동 전류밀도와 관계없이 (0.5 A/cm² 또는 0.7 A/cm²) 온도상승분포는 유사하게 나타남을 알 수 있다. 또한 공기공급채널과 냉각채널의 비율 및 치수와는 상관없이 온도분포는 거의 유사하게 예측되었지만, 공기공급 채널의 너비가 좁아질수록 직접적으로 셀 내부로 유입되는 공기의 유량이 적어지고 그만큼 열을 흡수하여 빠져나가는 공기유량 또한 적기 때문에 온도가 미세하게 증가하는 경향을 보였다.

Fig. 4는 입구부터 출구까지 가스채널과 냉각채널중심에서의 상대습도 분포를 나타내는 그래프이다. 냉각채널에서는 채널 폭 비율과 상관없이 입구에서부터 출구까지 일정하게 35%에서 9.7%까지 약 72.29% 감소하는 결과를 보였다. 이는 출구로 갈수록 온도가 촉매층에서 발생하는 열로 인해 높아져 포화수증기압이 증가하기 때문이다. 공기공급 채널 또한 입구에서 출구로 갈수록 상대습도가 감소하는 경향을 보이는데, 이는 캐소드 촉매층에서 물이 생성되는 영향성보

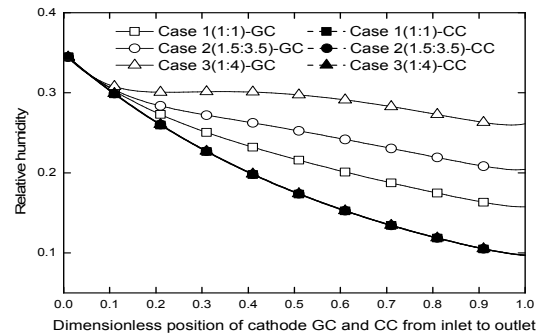


(a)

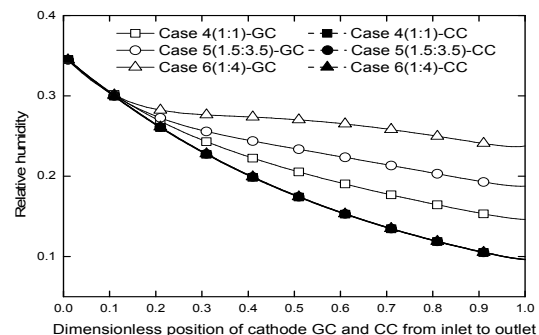


(b)

Fig. 3 Temperature distributions along the cathode gas channels and coolant channels at (a) 0.5 A/cm² and (b) 0.7 A/cm².



(a)



(b)

Fig. 4 Relative humidity distributions along the cathode gas channels and coolant channels at (a) 0.5 A/cm² and (b) 0.7 A/cm².

다 발열에 의한 온도상승 영향성이 상대습도에 더 크게 작용한다는 사실을 의미한다. 또한 공기공급채널 폭이 감소하고 냉각채널폭이 증가할수록, 캐소드 촉매층에서 생성되는 물이 공기를 통해 배출되는 영향성을 줄여주어 상대습도의 감소 폭은 줄어들게 된다. 예를 들어 0.5 A/cm² 전류밀도 조건에서 Case 1 (1:1)의 상대습도 감소폭은 55%(35%에서 15.75%)인 반면 냉각채널폭이 상대적으로 크게 설계된 Case 3(1:4)에서는 상대습도 감소폭이 25.31%(35%에서 26.14%)로 상당히 줄어들게 된다.

Fig. 5는 촉매층 중간에서 상대습도 분포를 나타낸 그림이다. 촉매층에서의 상대습도는 촉매층 water uptake에 의한 전해질 내 물함량과 이온전도도에 직접적으로 영향을 주므로, 촉매층 내 상대습도가 높을수록 전해질막 움저항이 감소되는 효과가 나타난다. 공기공급 채널의 폭이 줄어들고 냉각채널 폭이 증가할수록 공기에 의한 물 제거 영향성이 줄어들어 높은 상대습도가 예측됨을 확인할 수 있다. 캐소드채널과 촉매층에서의 상대습도 분포의 결과를 통해 공기공급 채널 입구가 좁아지고 냉각채널 폭이 넓어질수록 배출되는 물의 양을 줄일 수 있고 효과적인 물관리(water management)를 통해 막 탈수현상을 억제하고 움저항을 최소화하여, 과도한 공기유량 공랭식 조건에서 연료전지 성능 및 작동안정성이 유지될 수 있음을 알 수 있다.

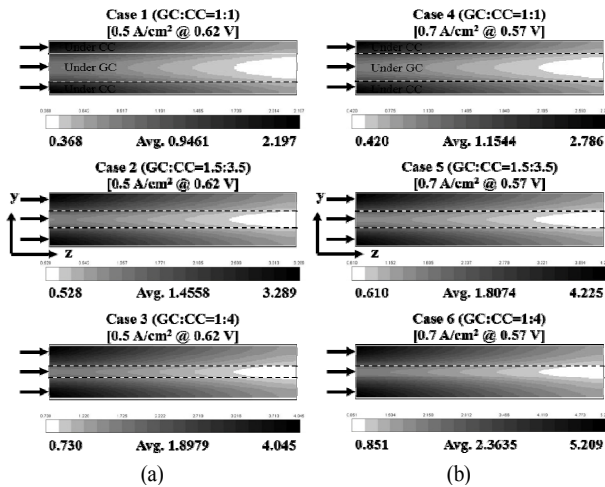


Fig. 5 Relative humidity contours over the middle of cathode catalyst layer at (a) 0.5 A/cm² and (b) 0.7 A/cm².

Fig. 4와 Fig. 5의 결과를 통해 공기공급 채널의 폭이 줄어들고 냉각채널 폭이 증가할수록 물 관리 측면에서는 유리하지만 산소환원반응(oxygen reduction reaction, ORR)을 위한 공기공급능력은 약화되어 물질수송손실(mass transport loss)는 증가될 수 있는 위험성이 있다.

Fig. 6은 입구부터 출구까지 가스채널 중심에서의 산소농도를 나타낸 그래프이다. 가스채널 입구에서 출구로 갈수록 산소농도는 낮아지는데 이는 입구에 유입된 산소가 캐소드 GDL을 통해 촉매층으로 확산되어 ORR에 의해 소모되기 때문이다. 또한 공기공급 채널의 입구 폭이 좁아질수록 산소농도는 더 낮아지는 것을 확인 할 수 있지만 그 감소의 폭은 심각하지 않다는 것을 알 수 있다. 캐소드 촉매층에서의 산소농도가 ORR 및 물질수송손실에 직접적으로 영향을 주기 때문에 캐소드 촉매층 내부에서 산소농도 분포를 분석할 필요성이 있다. Fig. 7은 촉매층 중간에서 산소농도 분포를 두 전류밀도(0.5 A/cm² 또는 0.7 A/cm²)에서 도식한 그림이다. 일반적으로 촉매층 산소농도분포는 냉각채널과 접해 있고 하류방향으로 갈수록 고갈되는 정도가 커지는 경향성을 보인다. 하지만 0.5 A/cm² 작동조건에서 산소농도 분포(Fig. 7(a))는 냉각채널 폭이 극대화된 Case 3 경우에도 최소 산소농도가 2.312 mol/m³ 정도로 산소고갈정도가 심각하지 않음을 알 수 있다. 이는 공랭식 연료전지의 과도한 공기공급조건에서는, 공기공급 채널들 사이의 간격이 넓다 하더라도 산소가 층분이 확산에 의해 전달될 수 있다는 사실을 입증한다. 반면 전류밀도가 증가한 0.7 A/cm² 작동조건(Fig. 7(b))에서는 Case 3의 최소 산소농도는 0.279 mol/m³로 산소고갈정도가 심해진다는 것을 알 수 있다. 이를 통해 캐소드 분리판 유로채널 디자인은 공랭식 스택 작동전류에 맞춰 최적화 되어야 한다는 사실이 본 해석결과를 통해 입증되었다.

Fig. 7은 촉매층 중간에서 산소농도 분포를 두 전류밀도(0.5 A/cm² 또는 0.7 A/cm²)에서 도식한 그림이다. 일반적으로 촉매층 산소농도분포는 냉각채널과 접해 있고 하류방향으로 갈수록 고갈되는 정도가 커지는 경향성을 보인다. 하지만 0.5 A/cm² 작동조건에서 산소농도 분포(Fig. 7(a))는 냉각채널 폭이 극대화된 Case 3 경우에도 최소 산소농도가 2.312 mol/m³ 정도로 산소고갈정도가 심각하지 않음을 알 수 있다. 이는 공랭식 연료전지의 과도한 공기공급조건에서는, 공기공급 채널들 사이의 간격이 넓다 하더라도 산소가 층분이 확산에 의해 전달될 수 있다는 사실을 입증한다. 반면 전류밀도가 증가한 0.7 A/cm² 작동조건(Fig. 7(b))에서는 Case 3의 최소 산소농도는 0.279 mol/m³로 산소고갈정도가 심해진다는 것을 알 수 있다. 이를 통해 캐소드 분리판 유로채널 디자인은 공랭식 스택 작동전류에 맞춰 최적화 되어야 한다는 사실이 본 해석결과를 통해 입증되었다.

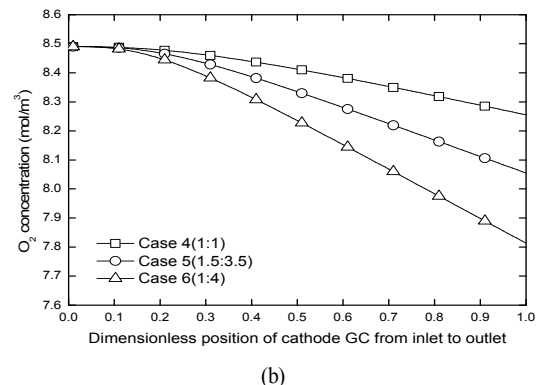
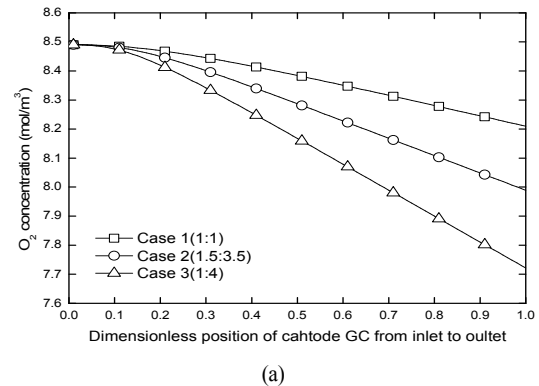


Fig. 6 Oxygen concentration distributions along the cathode gas channels at (a) 0.5 A/cm² and (b) 0.7 A/cm².

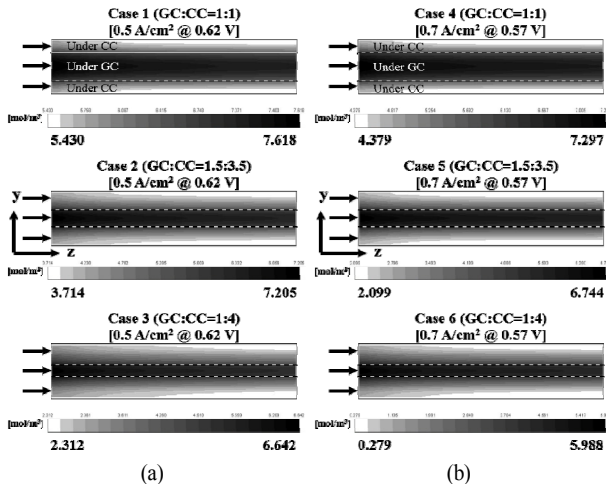


Fig. 7 Oxygen concentration contours over the middle of cathode catalyst layer at (a) 0.5 A/cm² and (b) 0.7 A/cm².

Fig. 8은 입구부터 출구까지 가스채널 중심에서의 물의 농도를 나타낸 그래프이다. 가스채널 입구에서 출구로 갈수록 물 농도는 계속 높아지는데 이는 촉매층에서 ORR 반응에 의해 생성된 물이 공기공급 채널을 통해 제거되기 때문이다. 이러한 원인으로 공기공급 채널의 폭이 좁고, 냉각채널의 폭이 넓어질수록 물의 농도는 더 높아지는 것을 볼 수 있다. Fig. 9는 캐소드 촉매층 중간에서 물 농도 분포를 나

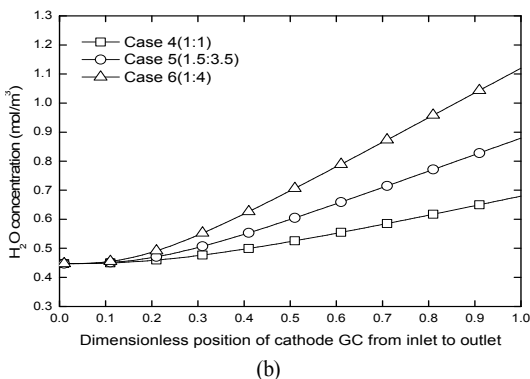
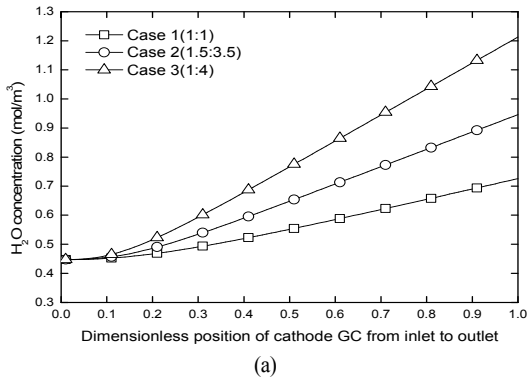


Fig. 8 Water concentration distributions along the cathode gas channels at (a) 0.5 A/cm² and (b) 0.7 A/cm².

타낸 그림이며 공기공급 채널 입구 폭이 좁아질수록 촉매층 내부 물 농도가 높아지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8과 Fig. 9의 결과를 종합해보면, 캐소드 공기공급 채널폭이 좁아질수록 출구를 통해 빠져나가는 물의 양을 줄일 수 있고 이를 통해 공랭식 스택의 효과적인 물관리가 가능하다는 결론에 도달할 수 있다.

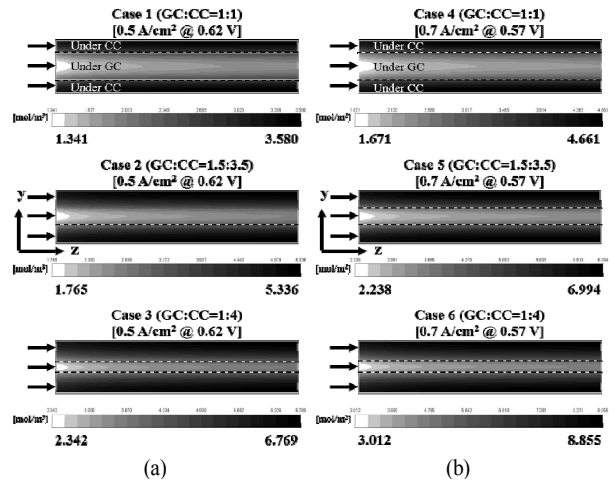


Fig. 9 Water concentration contours over the middle of cathode catalyst layer at (a) 0.5 A/cm² and (b) 0.7 A/cm².

4. 결론

건조하고 과도한 공기유량으로 인해 물 관리가 어려운 공랭식 연료전지에서는 물 관리가 상당히 중요하다. 본 연구에서는 연료전지 열유동 해석 모델을 이용하여, 동일한 반응 면적을 갖지만 캐소드 공기공급 채널폭과 냉각채널폭의 비율이 서로 다른 세 가지 형상의 캐소드 분리판 유로디자인을 공랭식 연료전지에 적용하여, 시뮬레이션을 수행, 물 관리 성능을 비교분석 하였다. 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 패시브 타입 공랭식 연료전지는 과도한 공기공급유량에 의해 출구방향으로 갈수록 상대습도가 계속 낮아지는 경향성을 띠며, 이는 ORR 반응에 의해 생성되는 물의 영향성 보다, 온도 상승에 의한 포화수증기압 증가 영향성이 더 크다는 사실을 암시한다. 즉 전해질막 탈수현상과 그에 따른 옴저항 또한 출구방향으로 계속 증가하기 때문에 패시브 타입 공랭식 연료전지 성능은 불안정하고 낮아지게 된다.
- 2) 캐소드 공기공급 채널 폭이 좁아지거나 냉각채널 폭이 넓어질수록 캐소드 채널과 촉매층에서 상대습도 하락 폭이 감소하고 물 농도 증가폭이 커짐을 알 수 있었다. 이러한 결과로부터 공기공급 채널 폭을 좁게 디자인하는 것이 물이 외부로 배출되는 양을 줄일 수 있고 이를

통해 건조한 상태에서 운전하는 공랭식 연료전지의 막 탈수현상을 억제할 수 있다는 사실이 입증되었다.

- 3) 좁은 공기공급 채널 또는 넓은 냉각채널 디자인은 ORR 반응에 의한 산소고갈문제를 심화시킬 것으로 예상했지만, 과도한 공기공급으로 인해 그 영향성은 크지 않은 것으로 예측되었다. 다만 작동전류조건이 커질수록 산소고갈 영향성이 커지기 때문에 공랭식 연료전지 작동전류가 캐소드 유로채널의 설계요소로 중요하게 고려되어야 한다는 사실이 본연구의 수치결과들을 통해 알 수 있었다.

이 모델은 전류 밀도가 일정하다는 가정 하에 해석을 진행하였기 때문에 전류밀도가 보다 더 불균일한 패시브 공랭식 연료전지에서는 해석결과에 있어서 본 논문의 결과와 약간의 차이가 있을 수 있다. 따라서 이후 연구에서는 전기화학 반응과 2-phase 모델을 적용하여 유로 설계가 패시브 공랭식 연료전지 성능 변화에 끼치는 영향을 분석할 계획이다.

후 기

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임.(No.2018R1D1A1B07048131).

References

- (1) Lei, X., Yan W., Prodip K. Das, Scott, K., Weidong, S., 2018, "Homogenization of current density of PEM fuel cells by in-plane graded distributions of platinum loading and GDL porosity", *Chemical Engineering Science*, Vol. 192, pp. 699~713
- (2) Andrea, B., Matteo, B., Haoran, Y., Laure, G., Radenka, M., Andrea, C., 2018 "Modelling analysis of low platinum polymer fuel cell degradation under voltage cycling: Gradient catalyst layers with improved durability", *Journal of Power Sources*, Vol. 405, pp. 89~100.
- (3) Kwak, M. J., Choi, H. J., Kim, T. W., Seo, D. W., Woo, S. K., Kim, S. D., 2018, "Redox stability and electrochemical performances of $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Fe}_{1-x}\text{Sc}_x\text{O}_{3-\delta}$ for solid oxide cells interconnector", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 29, No. 3, pp. 274~279.
- (4) Yi, Y., Shin, S. J., Park, S. J., Kim, M. S., Kim, H. J., Kim, J. H., Kim, I. H., Kim, Y. S., 2017, "Long term operation and improvement reliability for SOFC system", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 28, No. 5, pp. 502~511.
- (5) Bin, C., Haoran, X., Peng, T., Yuan, Z., Xiaoming, X., Weizi, C., Meina, C., Meng, N., 2019, "Thermal modelling of ethanol-fuelled Solid Oxide Fuel Cells", *Applied Energy*, Vol. 237, pp. 476~486
- (6) Choi, Y. J., Ahn, J. S., 2017, "Study on reversible electrolysis characteristic of a planar type SOFC", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 28, No. 6, pp. 657~662.
- (7) Choi, B. H., Hong, S. K., Ji, M. J., 2017, "Performance of SOFC according to thickness of shell with Ni-YSZ core-shell", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 28, No. 6, pp. 663~668.
- (8) Choi, Y. J., Ahn, J. S., Lee, I. S., Bae, C. Y., Moon, J. W., Lee, J. G., 2017, "Study on internal reforming characteristic of 1kW solid oxide fuel cell stack", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 28, No. 4, pp. 377~383.
- (9) Julio, M.B., Francisco, E.B., Jose, M.R., Juan, M. B., Armando, G.B., 2019 "On the effect of gas channels-electrode interface area on SOFCs performance", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, pp. 446~456
- (10) Lee, Y. H., Yang, C. U., Yang, C. M., 2017, "Optimization of operating conditions for a 10 kW SOFC system", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 27, No. 1, pp. 49~62.
- (11) Lee, S. J., Lim, C. Y., Lee, C. W., 2018, "Design of cell frame structure of unit cell for molten carbonate fuel cell using CFD analysis", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 29, No. 1, pp. 56~63.
- (12) Liquiang, D., Hao, L., Mingye, Y., Zhipeng, L., 2018 "Optimization and part-load performance analysis of MCFC/ST hybrid power system", *Energy*, Vol. 152, pp. 682~693
- (13) Lee, C. W., Jung, J. Y., 2018, "Modeling of the resistance model for anode and cathode for molten carbonate fuel cells", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 29, No. 3, pp. 267~273.
- (14) Ahn, J. H., Yoon, S. Y., Kim, T. S., 2017, "Performance comparison of molten carbonate fuel cell hybrid systems minimizing carbon dioxide emissions", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 28, No. 1, pp. 30~39.
- (15) Kim, M. S., Kim, H. K., Jang, S. C., Kim, Y. C., Choi, S. H., Yoon, S. P., Han, J. H., Nam, S. W., Choi, D. K., 2015, "Hydrodesulfurization of diesel for molten carbonate fuel cell applications", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 26, No. 1, pp. 21~27.
- (16) Im, S. Y., Sung, Y. W., Han, J. Y., Yu, S. S., 2015, "Operating characteristics of MCFC system on the diversification of fuel", *Trans. of the Korean Hydrogen*

- and New Energy Society, Vol. 26, No. 2, pp. 156~163.
- (17) Lee, C. W., Lee, M. H., Yoon, S. P., Ham, H. C., Choi, S. H., Han, J. H., Nam, S. W., Yang, D. Y., 2017, "Study on the effect of current collector structures on the performance of MCFCs using three-dimensional fluid dynamics analysis", Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 51, pp. 153~161
- (18) Lee, S. W., Kim, D. H., Ro, J. H., Cho, Y. R., Kim, D. Y., Ju, H. C., 2017, "Development of lightweight direct methanol fuel cell (DMFC) stack using metallic bipolar plates for unmanned aerial vehicles (UAVs)", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 28, No. 5, pp. 492~501.
- (19) Ting, G., Jing, S., Junfeng, Z., Hao, D., Xu, X., Kui, J., Xuri, H., 2017, "Transient analysis of passive vapor-feed DMFC fed with neat methanol", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 42, pp. 3222~3239.
- (20) Lee, S. W., Gwak, G. H., Ro, J. H., Cho, Y. R., Kim, D. Y., Ju, H. C., 2017, "Development of lightweight DMFC system for charging secondary battery in military operational environment", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 28, No. 5, pp. 481~491.
- (21) Kim, H. S., Hong, S. J., Hur, T., 2018, "Environmental life cycle assessment (LCA) of polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) system", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 29, No. 1, pp. 111~116.
- (22) Kim, I. J., Lee, J. J., Kim, H. S., 2018, "Study on the characteristics of low-pressure automotive polymer electrolyte membrane fuel cell system efficiency with blower configuration", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 29, No. 1, pp. 111~116.
- (23) Jo, A.R., Ju, H.C., "Numerical study on applicability of metal foam as flow distributor in polymer electrolyte fuel cells (PEFCs)", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 43, pp. 14012~14026
- (24) Baek, J. H., Lee, E. K., Lee, J.W., Lee, S. K., Moon, J. S., Kim, K. H., Park, H. W., Kim, D. C., Lee, J. H., 2017, "A study on safety performance evaluation of NG blower for 5 kW class stationary fuel cell systems", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 28, No. 6, pp. 675~682.
- (25) Palaniswamy, K., Marappan, M., Rajendran jothi, V., 2016, "Influence of porous carbon inserts on scaling up studied for performance enhancement on PEMFC", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 41 pp. 2867~2874.
- (26) Song, M. H., Kim, K. Y., 2017, "Numerical study on heat transfer of air-cooling PEMFC in HALE UAV", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 28, No. 2, pp. 150~155.
- (27) Joung, G. B., 2017, "Bidirectional power transmission fuel cell system for notebook battery", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 28, No. 3, pp. 273~278.
- (28) Lee, W. Y., 2017, "Fault detection and diagnosis methods for polymer electrolyte fuel cell system", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 28, No. 3, pp. 252~272.
- (29) Song, M. H., Kim, K. Y., 2016, "Numerical study on flow distribution in PEMFC with Metal foam Bipolar Plate", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 27, No. 1, pp. 29~35.
- (30) Bowen, W., Kangcheng, W., Fuqiang, X., Jing, X., Xu, X., Xiaoyang, W., Kui, J., 2019, "Numerical analysis of operating conditions effects on PEMFC with anode recirculation", Energy, Vol. 173, pp. 844~856.
- (31) Lee, J. S., Kim, S. G., Sohn, Y. J., 2016, "An experimental study on the natural convection heat transfer of air-cooling PEMFC in a enclosure", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 27, No. 1, pp. 42~48.
- (32) Ahn, D. K., Lee, H. J., Shim, H. S., Kim, D. J., 2016, "Optimization of condensate water drain logic depending on the characteristics of drain valve in FPS of fuel cell vehicle and development of anode water management strategy to achieve high fuel efficiency and operational stability", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 27, No. 2, pp. 155~162.
- (33) Lee, E. K., Baek, J. H., Lee, J. W., Lee, S. K., Lee, Y. J., 2016, "A study on hydrogen impurity effect in anode of proton exchange membrane fuel cell on various concentration of CO and H₂S", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 27, No. 6, pp. 670~676.
- (34) Lee, B. G., Sohn, Y. J., 2015, "Experimental analysis for optimization of PEM fuel cell dead-end operation", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 26, No. 2, pp. 136~147.
- (35) Mahdavi, A., Ranjbar, A. A., Rahimi-Esbo, M, G, M., 2018, "Numerical simulation based design for an innovative PEMFC cooling flow field with metallic bipolar plates", Applied Energy, Vol. 228, pp. 656~666
- (36) Lee, M. H., Choi, J. S., Roh, B. W., 2015, "Synthesis and durability of carbon-supported catalysts for PEMFC", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 26, No. 4, pp. 318~323.
- (37) Lee, Y. H., Oh, D. J., Jeon, U. S., Lee, J. H., 2015, "Development of an accelerated durability test mode for fuel cell", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 26, No. 5, pp. 493~498.

- (38) Lim, Y. D., Lee, S. H., Jang, H. H., Yoo, J. H., Ha, J. S., Ju, H. C., Hong, T. W., Kim, W. G., 2015, "New Multi-phenylene polymer electrolyte containing hexa-benzocoronene interior for PEMFC", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40 pp. 1316~1323
- (39) Park, S. J., Lee, J. S., Lee, K. S., Roh, B. W., 2015, "Manufacturing process improvement of electrode for PEMFC", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 26, No. 6, pp. 547~553.
- (40) Kim, M. E., Kim, C. S., Sohn, Y. J., 2015, "A study on performance of polymer electrolyte membrane fuel cell using metal foam", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 26, No. 6, pp. 554~559.
- (41) Strahl, S., Husar, A., Puleston, P. and Riera, J., 2014, "Performance improvement by temperature control of an open-cathode PEM fuel cell system", *Fuel Cells*, Vol. 1, No. 3, pp. 466~478.
- (42) Kim, A. R., 2017, "Synthesis and characterization of fluorinated polybenzimidazole proton exchange membranes for fuel cell", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 28, No. 1, pp. 24~29.
- (43) Kim, A. R., 2017, "Preparation and characterization of block copolymer containing bisphenyl propane unit and nanosilica composite membrane for fuel cell electrolyte application", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 28, No. 2, pp. 144~149.
- (44) Kim, A. R., 2017, "Preparation and characterization of hybrid membrane for block copolymer containing diphenyl unit increasing cationic conductivity for fuel cells", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 28, No. 5, pp. 465~470.
- (45) Olesia, D., Clement, G., Cristina, L., Laure, C., Amadou, T., Sandrine, L., Jean-Yves, S., 2016, "Polyaromatic ionomers with a highly hydrophobic backbone and perfluorosulfonic acid for PEMFC", *Electrochimica Acta*, Vol. 214, pp. 182~191
- (46) Ahn, S. H., Oh, K. M., Ju, H. C., 2018, "Numerical study on comparison of serpentine and parallel flow channel in high-temperature proton exchange membrane fuel cells", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 29, No. 1, pp. 41~55.
- (47) Jo, A. R., Oh, K. M., Lee, J. H., Han D. H., Kim, D. W., Kim, J. W., Kim, B. G., Kim, J. D., Park, D. R., Kim, M. J., Sogn, Y. J., Kim, D. H., Kim, H. S., Ju, H. C., 2017, "Modeling and analysis of a 5 kW HT-PEMFC system for residential heat and power generation", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42, pp. 1698~1714
- (48) Kim, J. H., Kim, M. J., Sohn, Y. J., Yu, S. S., 2016, "Operating method to maximize life time of 5 kW high temperature polymer exchange membrane fuel cell stack", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 27, No. 2, pp. 144~154.
- (49) Choi, B. W., Ju, H. C., 2015, "Analysis of thermal effect by coolant plate number in high-temperature polymer electrolyte membrane fuel cell stack", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 26, No. 2, pp. 127~135.
- (50) Yuan, W., Choi, M. H., Yang, S. R., Kim, Y. B., 2017, "Performance increase for a 2kW open cathode type fuel cell using temperature/humidity control", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 28, No. 4, pp. 369~376.
- (51) Pei, H., Shen, J., Cai, Y., Tu, Z., Wan, Z., Liu, Z., Liu, W., 2014, "Operation characteristics of air-cooled proton exchange membrane fuel cell stacks under ambient pressure", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 63, pp. 227~233.
- (52) Santa Rosa, D. T., Pinto, D. G., Silva, V. S., Silva, R. A., Rangel, C. M., 2007, "High performance PEMFC stack with open-cathode at ambient pressure and temperature conditions", *Int. J. Hydrogen energy*, Vol. 32, pp. 4350~4357.
- (53) Ous, T., Arcoumanis, C., 2009, "The formation of water droplets in an air-breathing PEMFC", *Int. J. Hydrogen energy*, Vol. 34, pp. 3476~3487.
- (54) Wu, J. F., Galli, S., Lagana, I., Pozio, A., Monteleone, G., Yuan, X. Z., Martin, J., Wang, H., 2009, "An air-cooled proton exchange membrane fuel cell with combined oxidant and coolant flow", *J. Power Sources* Vol. 188, pp. 199~204.