

가정용 연료전지 시스템 동특성 해석 모델

유 상석¹⁾, 김 한석²⁾, 이 상민³⁾, 이 영덕⁴⁾, 안 국영⁵⁾

A Dynamic Model of PEMFC for Residential Power Generator

Sangseok Yu, Hanseok Kim, Sangmin Lee, Youngduk Lee, Kookyong Ahn

Key words : Proton Exchange Membrane Fuel Cell (고분자 막 전해질 연료전지), Residential Power Generator (가정용 발전기), BOP(주변장치), Dynamic Model(동특성 모델)

Abstract : A dynamic model of proton exchange membrane fuel cell(PEMFC) system is designed to understand the performance of the PEMFC in residential power generator(RPG) over various balance of plant(BOP) options. In particular, since the performance of PEMFC system should be optimized for given operating ranges, it is necessary to design suitable BOP components which can support the operating ranges. The objective of this study is to develop a dynamic system model for the study of PEMFC performance over various BOP options. Therefore, a dynamic model is composed of a PEMFC stack model, a water management system model, a thermal management system model and a fuel/air supply model and the model is integrated under SIMULINK®environment. Basic simulation results will be presented.

Nomenclature

c	: concentration (mole/cm ³)	g	: gas
F	: Faraday's constant (C/mole)	in	: inlet
Δg_f^o	: Gibb's free energy at STP (J/ mole)	mem	: membrane
J	: current density (A/cm ²)	o	: outlet
\dot{m}	: mass flow rate(kg/s)	w	: water vapor
Δp	: pressure difference (kPa)		
R	: universal gas constant (J/molK)		
t	: thickness (m)		
V	: electric potential (V) or Volume (m ³)		
x_i	: mole fraction		
κ	: electric conductivity (mho/cm)		
v	: stoichiometry flow coefficient		

Subscripts and Superscripts

act	: active area
A	: anode side
c	: coolant
C	: cathode side
eff	: effective properties
FC	: fuel cell

1. 서론

고분자 막전해질 연료전지(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)는 효율이 우수하고 제작 및 운전이 용이하여 가정용 발전기(Residential Power Generator, RPG)로 적용하기에 적합한 것으로 알려져 있다. 이 연료전지가 최적 성능을 내기 위해서는 적절한 온도 및 압력조건에서 운전되어야 하며, 연료전지 내부에 필요한 물을 적절히 유지 및 배수 시키는 것이 중요하다. 시스템의 열 관리는 냉각계통의 운전과 연결되어 있고, 냉각에 사용된 고온수는 가정에 온수를 공급할 수 있기 때문에, 이의 적절한 제어가 필수적이다. 외부 가

1-5) 한국기계연구원
E-mail : sangseok@kimm.re.kr
Tel : (042)868-7992 Fax : (042)868-7284

습을 해야 하는 연료전지 시스템의 경우 물관리는 가습계통의 성능이 매우 중요하다.

PEMFC의 경우 시스템의 연구는 특히 주로 자동차 분야에 치우쳐져 있어서, 가정용 RPG에 대한 시스템 해석은 아직 미흡하다. 단위 연료전지에 대한 전기 화학 반응 연구는 Bernardi등⁽¹⁻²⁾과 Springer등⁽³⁻⁴⁾에 의해 시작되다가 현재 다양한 연구가 진행되고 있고, 또 공냉식 소형 단전지에 대한 열 거동에 대한 해석⁽⁵⁻⁶⁾도 진행되어 왔다. 단전지의 비정상 열 응답 특성 해석 분야에서는 Amphlett등⁽⁷⁾이 경험식과 집중용량법에 기초한 열 해석 모델을 제안하였다. Francesco등⁽⁸⁾은 시동 특성을 해석하기 위해 집중용량법을 이용한 동특성 모델을 적용하였다. 이러한 동특성 해석 모델들은 아직 실험식의 의존도가 크기 때문에 개발될 시스템에 대한 성능 등을 예측하는 데는 어려움이 있다.

본 연구에서는 가정용 연료전지 시스템의 열 관리 특성에 따른 성능을 해석할 수 있는 시스템 모델을 개발하고자 한다. 이를 위해, 연료전지 스택의 전기화학 반응, 습증기 수송 모델, 열 거동에 대한 해석적 모델을 적용하고, BOP 모델들도 개발하며, SIMULINK[®]를 이용, 시스템 모델로 통합한다. 또, 구성된 모델의 응답 특성을 보기 위해, 전류밀도 변화에 따른 시스템 응답을 조사한다.

Table 1 Specification of FC Stack

Parameters	Value
Active area (A_{act})	124 (cm ²)
Catalyst layer thickness(z_{act})	1.29 × 10 ⁻⁵ (m)
Membrane thickness(t_{mem})	5 × 10 ⁻⁵ (m)
Ratio of specific area to char. thickness of electrolyte (δ/a)	6.5 × 10 ⁻¹⁰ (cm ²)
Fuel cell temperature(T_{FC})	80 (°C)
Total pressure (P_C, P_A)	1.15 (atm)
Number of cells in FC stack	60
v_{H_2}, v_{O_2}	1.42, 2.0
Equivalent weight(M_m)	1100 (kg/kmol)
Dry density of membrane(ρ_{dry})	2.0 (kg/m ³)

2. 동특성 모델

본 연구에서는 그림 1과 같은 연료전지 시스템을 모사하기 위해, 스택 모델, 공기 공급계, 냉각계통으로 나누어 모델링 하였다. 표 1은 해석에 사용된 연료전지 스택의 사양이다.

2.1 연료전지 스택 모델

일반적으로 Nafion[®]계열 막전해질은 전기전도도가 막내에서의 습증기 농도에 매우 민감하므로, 막 전해질에서의 습증기의 농도를 적절히 관리해야 원하는 성능을 얻을 수 있다. Springer 등은 막

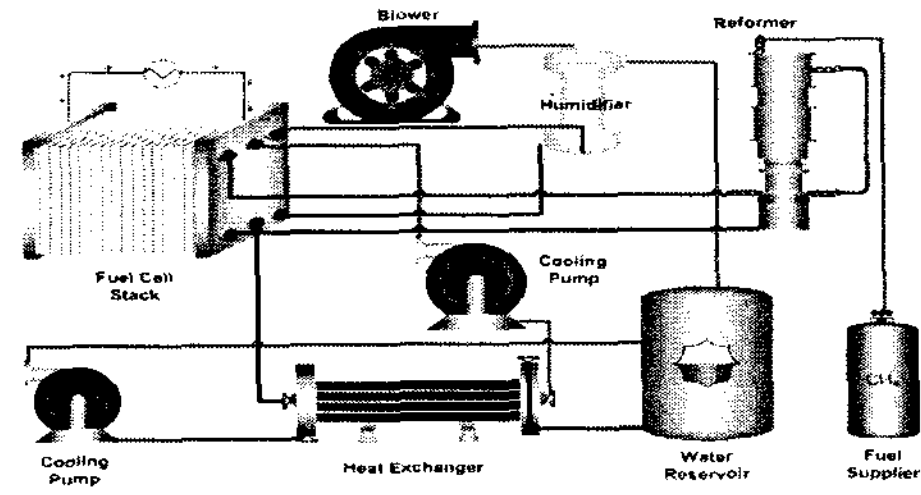


Fig. 1 Schematic of Fuel Cell System for RPG

전해질의 전기 전도도와 내부의 습증기 농도에 대해 실험식을 제안하였으며, 막 전해질의 습증기 함유도(Water content, λ)는 양쪽 전극에서의 습증기 농도 및 습증기 수송 현상에 의해 결정된다고 제안하였다⁽³⁾. 즉, 양단의 습증기 농도는 질량 보존에 의해 결정하고, 습증기 수송 현상은 전압차에 의한 전기 삼투현상(electroosmotic force)에 의한 순방향 이동력(공기극 방향)과 농도차에 의한 역방향 확산력의 균형에 의해 막내부의 습증기 함유도를 결정할 수 있다. 이를 막 전해질 내에 반응이 없고 정상상태를 가정하여 공식화하면:

$$\frac{\rho_a}{M_m} \frac{\partial \lambda}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho_a}{M_m} D_\lambda \frac{\partial \lambda}{\partial z} - \frac{5}{22} \frac{J}{2F} \lambda \right) \quad (1)$$

경계조건은 전해질/전극 계면에서의 습증기 함유도(water content, λ)를 이용해 구할 수 있는데, Springer등⁽³⁾은 계면에서의 습증기 함유도를 습증기 활성(water activity, $a = x_w p / p_{sat}$)을 이용한 경험식으로 제안하였다.

$$\lambda(0) = \lambda_A \quad (2)$$

$$\lambda(t_{mem}) = \lambda_C \quad (3)$$

막 전해질의 전기 전도도와 전기저항은⁽³⁾:

$$\sigma = \exp \left(1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right) (0.005139\lambda - 0.00326) \quad (4)$$

$$R_{mem} = \int_0^{t_{mem}} \frac{dz}{\sigma(\lambda)} \quad (5)$$

전기화학반응은 Broka등이 제안한 균집체에서의 전기화학반응 (agglomerate structured electrochemical reaction model) 모델을 적용하였다⁽¹²⁾. 촉매층에서의 전기화학 반응은 공기와 수소 이온이 확산에 의해 수송된 후 균집체에서 반응을 하는 것으로 모사할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial z^2} = \frac{4F}{\kappa_{eff}} \frac{1}{\frac{\delta}{a \cdot c_{O_2}^\infty D_{eff}} + \frac{1}{k_{react} E}} \quad (6)$$

가스확산층 계면($z=0$)의 전압은:

$$z=0: \quad \eta(0) = V_{CA} - V_{Nern} \quad (7)$$

막전해질 계면($z=z_{act}$)은 전기 절연을 이용하여:

$$z=z_{act}: \quad \left. \frac{\partial \eta}{\partial z} \right|_{z=z_{act}} = 0 \quad (8)$$

여기서 $V_{CA}=V_{FC}+J \cdot R_{mem}$ 이고, $J \cdot R_{mem}$ 은 공기극 전압 보정항이다.

Nernst 전압은 주어진 온도, 압력조건에서 연료전지가 생산할 수 있는 최대 전압이며, 실제 연료전지가 생산하는 전압은 막 전해질의 저항과 반응시의 비가역적 손실을 고려하여 계산한다. 본 연구에서는 스택전압 계산을 위해 단위 셀 간의 전압은 일정하다고 가정하였다.

$$V_{Nern} = -\frac{\Delta g_f^0}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{a_{H_2} a_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{a_{H_2O}} \right) \quad (9)$$

$$V_{FC} = V_{Nern} - J R_{mem} - \eta_z = 0 \quad (10)$$

$$W_{cv} = n_{FC} V_{FC} J A_{act} \quad (11)$$

연료전지의 열관리는 시스템 성능뿐 아니라 물관리 및 내구성과도 직접 연결되기 때문에 매우 중요하다. 연료전지 스택에 대한 에너지 보존을 적용하면:

$$\rho_c V \frac{dT}{dt} = \sum_{in} \dot{m} h_i - \sum_{out} \dot{m} h_o - W_{cv} - Q_c - Q_g \quad (12)$$

식 (12)의 PEMFC에서 가스와 냉각수로 전달되는 열량은 가스와 냉각수에 대한 에너지 보존으로부터 구하였다.

2.2 공기공급장치

공기 공급장치는 송풍기(Blower)와 가습기로 구성되어 있는데 가정용 연료전지의 송풍기(Air Blower)는 연료전지에 필요한 공기를 공급해주는 역할을 한다. 송풍기 모델은 성능곡선과 시스템에 의해 결정되는 차압을 이용하여 구성하였으며, 동특성은 모터 동특성만 고려하였다.

연료전지용 가습기는 PermaPure 사의 가습기 성능을 해석 하기 위해 모델링하였으며, 모델링 시 Shell & Tube 형 열 및 물질 교환기로 가정하였다. 그림 2에는 가정용 연료전지에서 사용하는 운전조건에 대한 모델링 결과로, 건조공기는 공기공급계에서 공급되는 공기이고, 습공기는 연료전지의 공기극을 지나 나오는 공기로 가습기에서 둘 사이의 습증기 확산에 의해 습도가 전달되는 것을 보여주고 있다. 그림에서 보면 건조공기 온도가 올라갈수록 습증기에서 전달되는 공기량이 줄어들며, 습증기의 량이 증가 할수록 전달량은 많아진다.

2.3 냉각계통 모델링

냉각을 위한 열교환기는 판형 열교환기를 채택하였고, Cross-Flow 형 열교환기로 모델링 하였다. 냉각수 펌프의 성능곡선은 냉각수 유량에 대

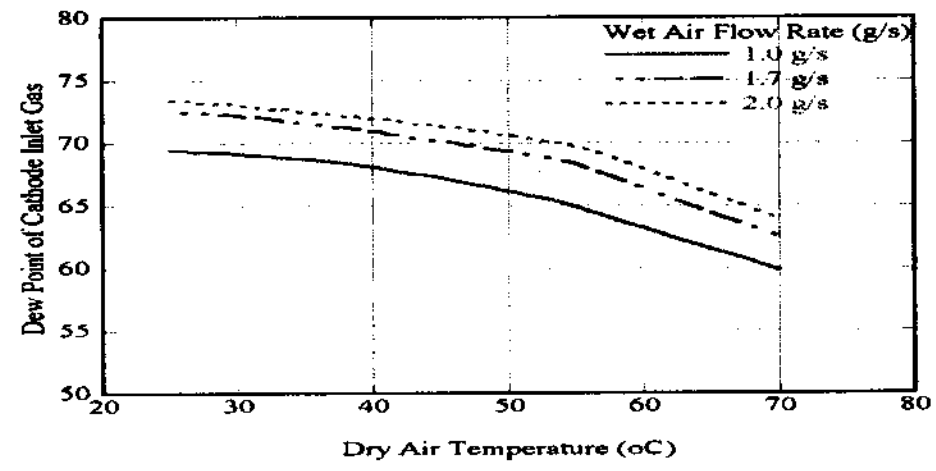


Fig. 2 Dew Point of Dry Gas at Humidifier Outlet

한 압력손실 곡선인 P-Q곡선의 실험 결과를 획득한 후 이 실험결과를 이용해 다음과 같은 실험식을 적용하였다.

$$\Delta p_{pump} = 99.74 \left(\frac{N_{new}}{3500} \right)^2 - 0.0002983 Q^2 \quad (\text{kpa}) \quad (13)$$

연료전지의 온도를 제어하기 위해서는 기준값을 정해야 한다. 연료전지 스택의 경우, 온도 분포가 단위 연료전지의 채널 방향으로 존재하고, 스택내부의 각 단위전지 사이에도 온도분포가 존재한다. 연료전지의 작동온도가 353.15 K를 넘게 되면 Nafion® 막의 내구성이 떨어지게 되어 성능이 저하되므로, 스택 내부의 최고온도가 353.15K를 넘지 않도록 제어하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 연료전지 스택의 최고 온도는 냉각수 출구단 부분일 것으로 생각되므로, 이 온도를 353.15 K (80°C)로 유지하도록 냉각수 유량을 제어하도록 하였다. 여기에 냉각수 입·출구단의 온도차가 커지면, 채널방향 온도가 불균일 해지므로, 냉각수 입출구단의 온도차가 적정수준을 유지할 수 있도록 하였다. 이상의 제어로직과 함께 스택 및 BOP시스템을 SIMULINK®환경에서 통합하면 그림 3과 같은 연료전지 시스템 성능 해석 툴을 구성하였다.

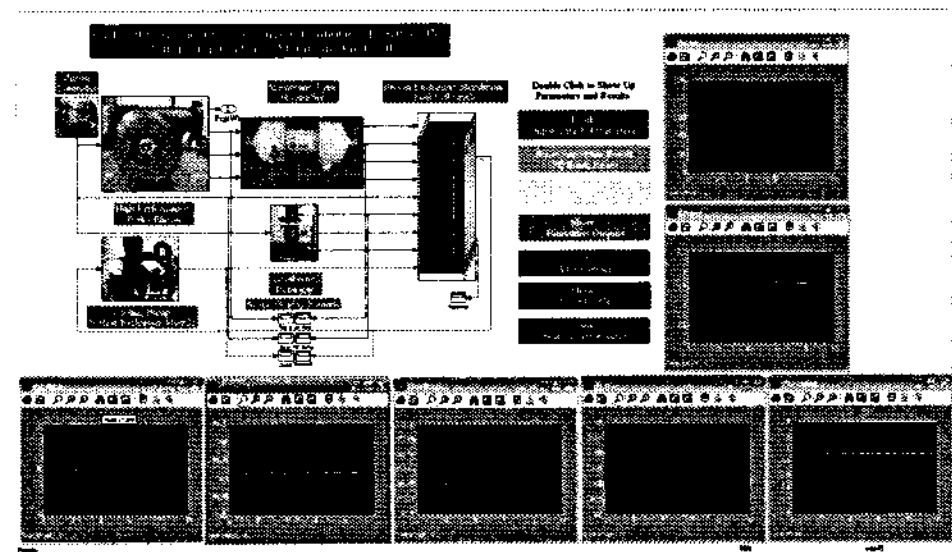


Fig. 3 Integration of the lumped transient fuel cell stack model with the thermal management system

3. 결과 및 토의

통합된 연료전지 시스템 해석 모델을 이용하여, 부하 변동에 대한 개별 모델들의 응답특성을 확인하였다. 사용된 부하 변동은 그림 4와 같다.

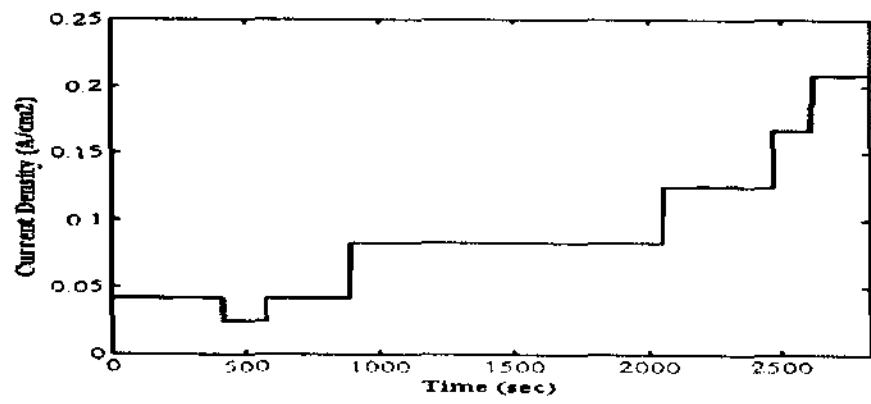


Fig. 4 Input Current Density For Load Follow-up

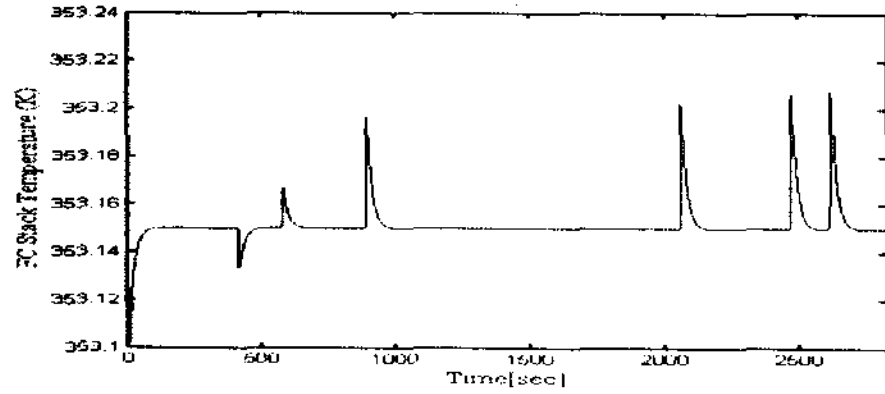


Fig. 5 Dynamic Response of Stack Temperature

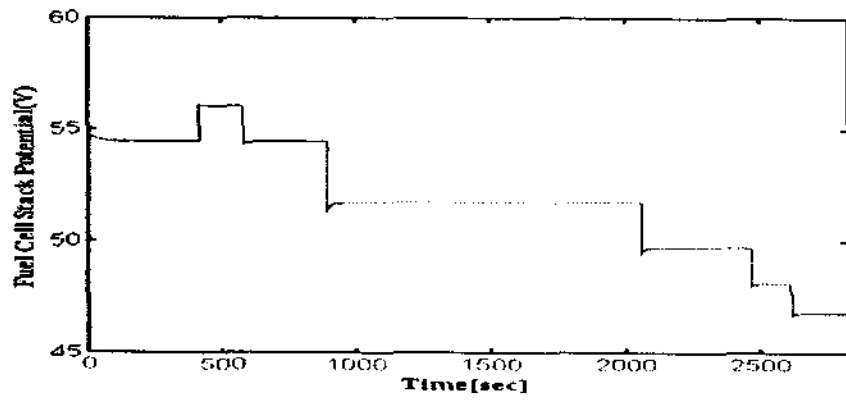


Fig. 6 Dynamic Response of Fuel Cell Potentials

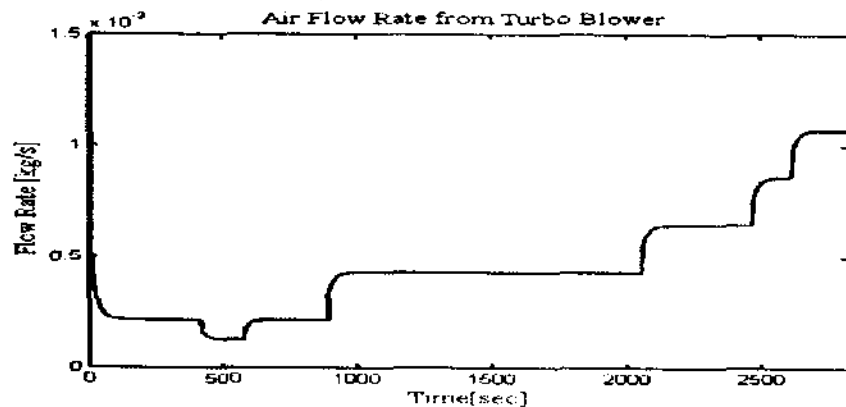


Fig. 7 Mass Flow Rate to Maintain $v_{air}=2$ under given load conditions

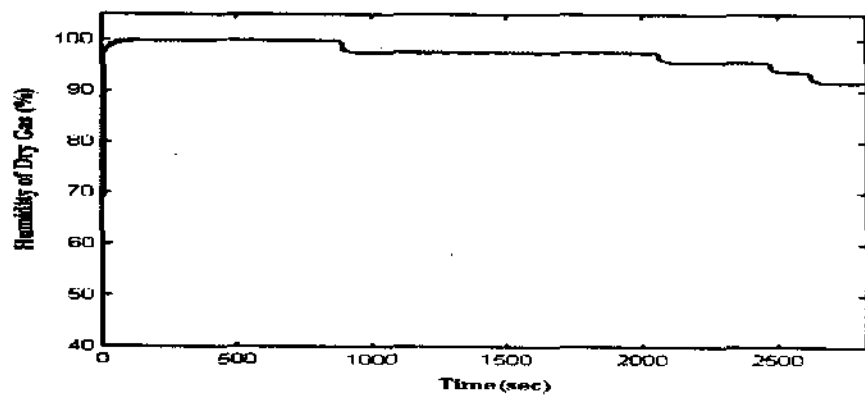


Fig. 8 Dry Air Humidity at the Humidifier Out

3.1 스택

스택의 경우 부하 변동에 의해 동특성을 보여주는 부분은 전압 변화와 온도 변화이다. 그림5의 경우 온도 변화를 보여주고 있는데, BOP로 사용한 펌프가 시스템에 비해 큰 것을 사용했기 때문에 온도 변화가 상당히 작은 것을 볼 수 있다.

그림 6의 스택 전압 변화를 보면, 동특성 모델에서 고려하는 부분이 막 전해질의 습증기 수송 및 온도 동특성을 고려하므로, 이 부분이 반영되었다고 볼 수 있다.

3.2 공기 공급계

공기 공급계의 경우, 연료전지 스택의 부하가 변할 때 그 이용율을 50%로 맞추는 역할을 하기 때문에, 제어는 항상 50%를 맞추는지를 센서에서 확인하도록 되어 있다. Blower의 동특성은 모터의 동특성만을 고려하기 때문에 그림 7에서는 모터 회전에 의한 동특성을 보여주고 있다.

가습기 모델은 정상상태 모델이므로 그림 8의 동특성은 Blower의 동특성에 따른 가습기 출구에서의 습도 변화를 보여준다.

4. 결론

가정용 연료전지 시스템의 성능을 다양한 운전 조건에 따라 모사할 수 있는 해석 모델을 개발하였다. 스택 모델은 온도 응답에 대한 동특성을 가질 뿐 아니라, 전해질의 비정상 습도 변화도 예측이 가능하며, 공기 공급계의 송풍기, 냉각계통의 펌프 등도 모터 동특성을 결합하여, 연료전지의 부하 변화 시 각 BOP들의 운전이 어떤 영향이 있는지를 예측할 수 있었다.

개발된 모델은 향후 스택의 최적 운전을 위한 BOP 설계 및 운전 최적화를 위해 사용할 계획이다.

References

- [1] Bernardi, D.M., and Verbrugge, M.W., 1991, "Mathematical Model of a Gas Diffusion Electrode Bonded to a Polymer Electrolyte," *AICHE Journal*, 37(8), pp. 1151-1163.
- [2] Bernardi, D.M., and Verbrugge, M.W., 1992, "A Mathematical Model of the Solid-Polymer-Electrolyte Fuel Cell," *J. of Electrochemical Society*, 139(9), pp. 2477-2491.
- [3] Springer, T.E., Zawodzinski, T.A., and Gottesfeld, S., 1991, "Polymer Electrolyte Fuel Cell Model," *J. of Electrochemical Society*, 138(8), pp. 2334-2342.
- [4] Springer, T.E., Wilson, M.S., and Gottesfeld, S., 1993, "Modeling of Experimental Diagnostics in Polymer Electrolyte Fuel Cells," *J. of Electrochemical Society*, 140(12), pp. 3513-3526.
- [5] Fuller T.F., and Newman, J., 1993, "Water and Thermal Management in Solid-Polymer-Electrolyte Fuel Cells," *J. of Electrochemical Society*, 140(5), pp. 1218-1225.
- [6] Nguyen, T.V., and White, R.E., 1993, "A Water and Heat Management Model for Proton-Exchange Membrane Fuel Cells," *J. of Electrochemical Society*, 140(8), pp. 2178-2186.

- [7] Amphlett, J.C., Mann, R.F., Peppley, B.A., Roberge, P.R., Rodrigues, A., "A model predicting transient responses of proton exchange membrane fuel cells", *Journal of Power sources* 61, 1996, pp.183-188.
- [8] Francesco, M.D., Arato, E., "Start-up analysis for automotive PEM fuel cell systems", *Journal of Power Sources*, 108, 2002, pp.41-52.
- [9] Broka, K., and Ekdunge, P., 1997, "Modeling the PEM Fuel Cell Cathode," *J. of Applied Electrochemistry*, 27, pp. 281-289.