

가정용 연료전지 운전 모드 해석을 위한 동특성 모델 개발

유상석[†], 이영덕*, 홍동진*, 안국영*

*한국기계연구원

A Dynamic Simulation Model for the Operating Strategy Study of 1 kW PEMFC

SANGSEOK YU[†], YOUNGDUK LEE*, DONGJIN HONG*, KOOKYOUNG AHN*

*Korea Institute of Machinery & Materials,
171, Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-343, Korea

ABSTRACT

Dynamics of the proton exchange membrane fuel cell is specially important when the system is frequently working on transient conditions. Even though the dynamics of proton exchange membrane fuel cell for residential power generation is less critical than that of PEMFC for transportation application, the system dynamics of PEMFC for RPG can be very important for daily start-up and stop. In particular, thermal management of the PEMFC for RPG is very important because the heat generation from electrochemical reaction is delivered to the home for hot water usages. Additionally, the thermal management is also very important for heat balance of the system and temperature control of the fuel cell.

The objective of this study is to develop a dynamic system model for the study of PEMFC performance over various BOP options. Basic simulation results will be presented.

KEY WORDS : proton exchange membrane fuel cell (고분자 막 전해질 연료전지), residential power generator (가정용 발전기), BOP(주변장치), dynamic model(동적 모델)

Nomenclature

a : specific surface area of the agglomerates
c : concentration (mole/cm³)
E : effectiveness of reaction
F : faraday's constant (C/mole)

Δg_f^0 : gibb's free energy at STP (J/mole)

h : heat transfer coefficient (W/m²s)

J : current density (A/cm²)

\dot{m} : mass flow rate(kg/s)

p : total pressure (atm)

Q : heat transfer rate (W)

R : universal gas constant (J/molK)

t : thickness (m)

T : temperature (K)

[†]Corresponding author : sangseok@kimm.re.kr

- V : electric potential (V)
- W : electric work (W)
- z : thickness direction (cm)
- x_i : mole fraction
- δ : Nafion[®] thickness on agglomerate (cm)
- κ : electric conductivity (mho/cm)
- λ : water content
- ν : stoichiometry flow coefficient

Subscripts

- AN : anode side
- act : active area
- c : coolant
- CA : cathode side
- cv : control volume
- eff : effective properties
- FC : fuel cell
- g : gas
- H₂ : hydrogen
- in : inlet
- mem : membrane
- Nern : nernst potential
- out : outlet
- O₂ : oxygen
- react : reaction
- sat : saturation pressure (kPa)
- w : water vapor
- ∞ : O₂ concentration in GDL

1. 서 론

현재 국제 유가의 급등은 신흥 개발도상국이라 할 수 있는 중국과 인도의 급격한 에너지 및 원자재 소비에서 비롯되었다고 볼 수 있다. 여기에 국제 정세의 불안이 더해져 제 1, 2차 오일 쇼크에 견줄만한 파괴력으로 국내의 에너지 시장의 재편을 요구하고 있다. 특히 우리나라는 에너지의 대부분을 해외에서 수입해서 사용하고 있으므로, 자원 무기화에 종속적일 수밖에 없는 상황에 놓여 있으며, 이를 타개하기 위한 대책이 시급하다고 할 수 있다. 1kW급 가정용 연료전지는 이러한 의미에서

상당한 설득력을 지니고 있다. 특히, 저렴한 가스를 이용해 가정에 필요한 전력 및 온수를 공급함으로써 향후 석유자원 고갈에서 비롯되는 문제로부터 어느 정도 자유로울 수 있으며, 에너지 효율 증대를 통한 에너지 수입 대체 효과 또한 기대할 수 있다. 가정용 연료전지에 적용되는 고분자 막 전해질 연료전지(proton exchange membrane fuel cell, 이하 PEMFC)는 시동특성 및 효율이 우수하고, 제작 및 운전이 용이하여 가정용으로 적용하기 적합한 것으로 인식되어 왔으며 현재 광범위하게 연구가 진행되고 있다.

가정용 PEMFC는 상용화를 위해 아직은 다수의 기술적 도약이 필요하며 특히, 온수를 공급하고, 동시에 시스템 작동온도를 최적으로 유지하기 위한 열관리가 중요하다. 그리고 PEMFC는 막 전해질에 적절한 수분을 유지시켜야 최적 운전을 할 수 있기 때문에 효과적인 물관리도 매우 중요하다.

최근에 가정용 연료전지의 실증 연구가 진행되고 있기는 하지만, 아직 상업화 전단계이기 때문에, 시스템에 대한 정보를 문헌상에서 찾기가 어려운 상황이다. 시스템에 대한 연구는 주로 해석 분야에서 많이 수행되고 있는데, 스택을 단전지의 단순한 확장으로 가정할 때 적용 가능한 모델로는 amphlett 등이 제안한 경험식과 집중 용량법에 기초한 열해석 모델이 있다. 이 모델에서는 막 전해질의 습증기 수송과 전기화학반응에 대해 실험식을 사용하였다¹⁾. Francesco 등은 집중 용량법을 이용한 동특성 모델을 적용하면서 전기화학반응에 대해서는 실험식을, 막 전해질에서의 습증기 수송은 해석적 모델을 적용한 스택 모델을 제안하였다²⁾. 최근에는 가정용 연료전지 시스템에 대한 연구가 활발하게 수행되어 지고 있다. König등은 연료전지 연계 열병합 시스템을 구축 및 운전하고 모델을 구성하여 시스템 효율에 대한 연구를 수행하였다³⁾. Selamoğullari등은 미국 동부에 가정용 PEMFC를 설치하고 운전한 결과에 대해 보고한 바 있다⁴⁾.

본 연구에서는 가정용 연료전지 시스템을 정성적으로 모사할 수 있는 모델을 개발하는 것을 목

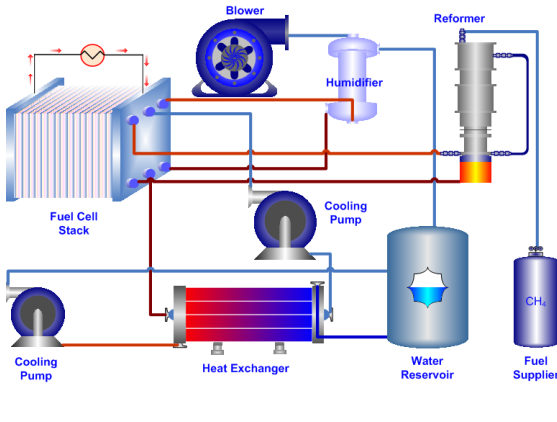


Fig. 1 Schematics of PEMFC system for residential power generator

표로 한다. 이를 위해 연료전지 스택 및 구동에 필요한 구성요소에 대한 모델링을 수행하며, 통합 모델의 작동에 대해 살펴보고자 한다.

2. 동특성 모델

2.1 개요

Fig. 1은 본 연구에서 고려한 연료전지 시스템 장치도로 고려 대상 연료전지 시스템은 연료전지 스택, 가스 공급을 위한 터보블로워, 가습기, 개질기 등과 열관리를 위한 펌프, 물탱크, 열교환기 등으로 구성되어 있다.

본 연구에서는 온도 응답 등 과도운전에 대한 동특성을 검토하기 위해 비정상 연료전지 스택 모델과 비정상 냉각계통 모델을 적용하였다. 공기 공급용 터보블로워의 동특성은 모터 동특성이 지배한다고 가정하였으며, 정상상태 가습기 모델을 적용하였다. 연료전지 스택 모델은 다시 촉매층을 균집체로 가정한 균집체 전기화학 반응 모델(agglomerate structured electrochemical reaction model)을 적용하였으며, 막 전해질에서의 습증기 수송이 성능에 중요한 영향을 미치므로, 이를 모사하기 위한 비정상 습증기 수송 모델(water transport model), 그리고 비정상 온도 응답을 모사하는 열전달 모델로 구성하였다. 냉각계통은 열

Table 1 Specification of FC stack

Parameters	Value
Active area (A_{act})	124 (cm^2)
Catalyst layer thickness(z_{act})	1.2910-5 (m)
Membrane thickness(t_{mem})	1.0810-4 (m)
Characteristic length(L)	1 (μm)
Ratio of specific area to char. thickness of electrolyte (δ/a)	6.5×10-10 (cm^2)
Fuel cell temperature(T_{FC})	80 ($^{\circ}C$)
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_d)	2.0 (kg/m ³)

교환기, 스택안에서의 열 교환을 담당하는 1차측 열 교환 회로 및 외부 냉각수 저장고와의 열 교환을 담당하는 2차측 냉각 회로를 위한 냉각 펌프 등으로 구성 하였다. 본 연구에 사용된 연료전지의 사양은 Table 1에 나타내었다.

2.2 연료전지 스택 모델

2.2.1 습증기 수송 모델

일반적으로 Nafion[®] 계열 막 전해질은 전기전도도가 막내에서의 습증기 농도에 매우 민감하므로, 막 전해질에서의 습증기의 농도를 적절히 관리하는 것이 연료전지의 성능에 매우 중요하다. Springer 등은 막 전해질의 전기삼투력(electro-osmotic force)이 습증기 함유도(water content, λ)에 선형적으로 변한다고 제안하였다. 또한, 막 전해질 내부의 습증기 함유도는 습증기 농도 차에 의한 확산력과 전압 차에 의한 습증기 전송력 사이의 균형에 의해 결정되고, 이때 확산계수(DI)를 습증기 함유도의 함수로 제안하였다⁵⁾. 그 외의 습증기 구동력으로는 양 전극에 압력차가 존재할 때 생기는 대류현상이 있지만, 본 연구에서는 두 전극의 압력이 동일한 것으로 가정하였다. 따라서 습증기 수송 모델을 구하기 위해 전기 삼투력과 확산력을 종 보존 방정식에 적용하여 유도하였다. 즉, 막 전해질 내에 반응이 없고 비정상상태를 가정하면 습증기 수송은 다음과 같이 표현된다.

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

경계조건은 막 전해질과 전극 계면에서의 습증기 함유도(water content, λ)를 이용해 구할 수 있는데, Springer 등⁵⁾은 전극과 촉매층 사이 계면의 습증기 함유도를 습증기 활성도(water activity, $a = x_{wp}/p_{sat}$)를 이용한 경험식으로 제안하였다.

$$\lambda(0) = \lambda_{AN}, \quad \lambda(t_{mem}) = \lambda_{CA} \quad (2)$$

고분자막의 전기 전도도(σ) 및 저항(R_{mem})은⁵⁾,

$$\sigma = \exp\left(1268\left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T}\right)\right)(0.005139\lambda - 0.00326) \quad (3)$$

$$R_{mem} = \int_0^{t_{mem}} \frac{dz}{\sigma(\lambda)} \quad (4)$$

2.2.2 촉매층의 전기화학반응

전기화학반응은 Broka 등이 제안한 촉매층 내부 균집체에서의 전기화학반응 모델(agglomerate structured electro-chemical reaction model)을 적용하였다⁶⁾. 즉, 반응은 공기와 수소 이온이 확산에 의해 촉매층으로 수송된 후 균집체에서 반응을 하는 것으로 모사할 수 있다. 즉, 전기 화학반응에 대한 과전위(over-potential, η)는,

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial z^2} = \frac{4F}{\kappa_{eff}} \frac{1}{\frac{\delta}{a \cdot c_{O_2}^\infty D_{eff}} + \frac{1}{\kappa_{react} E}} \quad (5)$$

촉매와 가스 확산층 계면($z=0$)에서의 과전위를 구할 수 있으므로 :

$$z=0: \quad \eta(0) = V_{CA} - V_{nern} \quad (6)$$

촉매와 막 전해질 사이 계면($z=z_{act}$)은 전기적으로 절연되어 있으므로 :

$$z=z_{act}: \quad \left. \frac{\partial \eta}{\partial z} \right|_{z=z_{act}} = 0 \quad (7)$$

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

2.2.3 전력과 열 생산

Nernst 전압은 주어진 온도, 압력조건에서 연료 전지가 생산할 수 있는 최대 전압으로, 실제 연료 전지가 생산하는 전압은 막 전해질의 저항과 반응시의 비가역적 손실을 고려하여야 한다. 본 연구에서는 단위 셀 간의 전압은 일정하다고 가정하였다. 따라서 스택 전압은 단전지의 성능곡선과 스택을 구성하는 단전지 개수를 알면 계산할 수 있다.

$$V_{Nern} = - \frac{\Delta g_f^0}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{a_{H_2} a_{O_2}^{1/2}}{a_{H_2O}} \right) \quad (8)$$

$$V_{FC} = V_{Nern} - J \times R_{mem} - \eta_z = 0 \quad (9)$$

$$W_{ov} = n_{FC} V_{FC} J \quad (10)$$

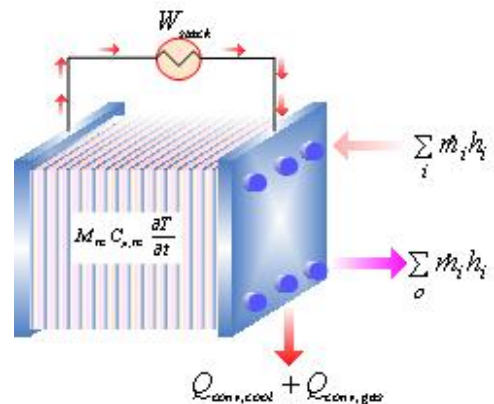


Fig. 2 Control volume analysis of fuel cell stack

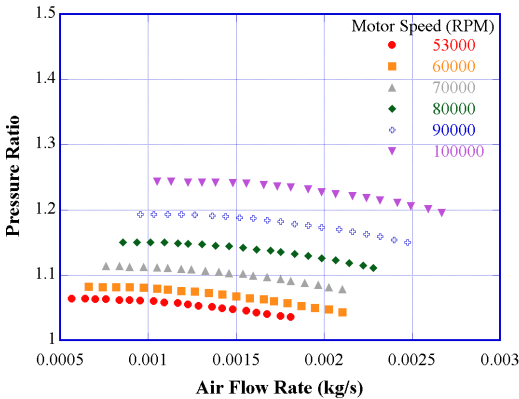


Fig. 3 P-Q curve of turbo-blower

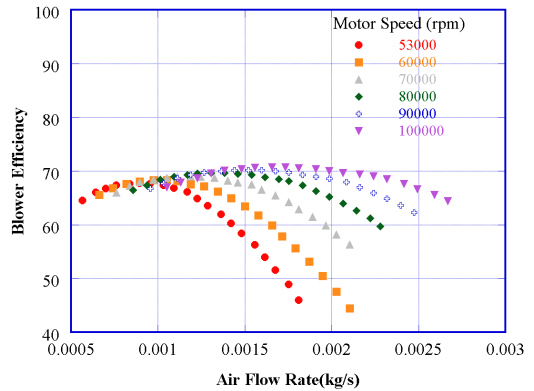


Fig. 4 Efficiency curve of turbo-blower

2.2.4 연료전지 스택의 에너지 보존

가정용 연료전지는 연료전지에서 방출되는 폐열을 활용하여 가정에 필요한 온수를 공급하는 복합발전(combined heat and power, CHP) 방식으로 수송용에 비해 열관리가 매우 중요하다. 연료전지 스택의 에너지 보존은 Fig. 2에 나타난 제어체적해석을 통해 구할 수 있으며 에너지 보존으로부터, 연료전지 스택온도는 반응에 의해 발생한 열이 냉각계통으로 방출되는 양과 가스로 방출되는 열의 평형에 의해 결정된다⁷⁾. 즉,

$$\rho c_p V \frac{dT}{dt} = \sum_{in} \dot{m} h_i - \sum_{out} \dot{m} h_i - W_{cv} - Q_c - Q_g \quad (11)$$

여기서, $\rho(kg/m^3)$ 은 스택의 밀도, c_p (1000J/kgK)는 비열, $V(m^3)$ 는 스택 부피, h (1000J/kg)는 엔탈피를 나타내고, $Q(W)$ 는 각각 냉각수와 가스를 통해 방열되는 열량, $W_{cv}(W)$ 는 스택의 생산 전력을 나타낸다.

2.3 공기공급장치

2.3.1 터보 블로워

연료전지의 공기극으로의 공기 공급은 터보 블로워(turbo-blower)를 적용하였다. 터보 블로워 모델은 크게, 성능곡선 및 효율곡선 테이블, 동특성

모터 모델, 열역학적 효율 및 출구 조건 계산부 등으로 구성되는데, 이 중 터보 블로워의 성능 곡선과 효율은 Fig. 3과 4에 제시한 곡선을 사용하였으며, 모델은 Simulink의 lookup table을 이용하여 구성하였다⁷⁾. 터보 블로워의 동특성은 모터 동특성만을 고려하였으며, 모터 속도는 PI 제어기에 의해 조절된다. Jay등에 따르면 블로워 모터 속도는⁸⁾,

$$K = \frac{k_t}{bR_a + k_t k_e}, \quad \tau = \frac{R_a J_m}{bR_a + k_t k_e} \quad (12)$$

$$\frac{\Omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (13)$$

여기서, K , k_t , k_e 는 보정상수, J_m 은 회전관성모멘트, R_a 는 아마추어 전기저항, τ 는 시정수이며 Ω 는 회전수, V_a 는 아마추어 입력 전압이다. 터보 블로워 모델의 입구조건은 대기 조건을 적용하였으며, 아마추어 전압을 이용해 모터 회전수를 PI제어하도록 모델링 하였다. 모터 회전수와 압축비가 정해지면, 유량이 결정되고 시스템으로 공급된 유량을 다시 피드백 받아서 블로워 컨트롤러가 유량을 증가시키거나 감소시키게 된다. 블로워 유량 제어의 경우, 반응량의 2배를 기준유량으로 정하고 이를 모터 PI제어기에서 제어하도록 모델링 하였다.

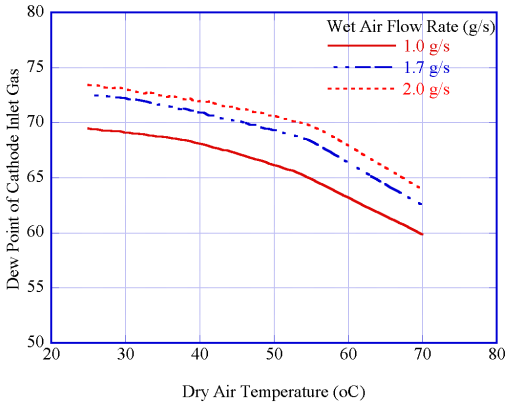


Fig. 5 Dew point of dry gas at humidifier outlet

2.3.2 가습기

가습기는 연료전지 스택으로 들어가는 공기와 연료에 적절한 습분을 제공하여, 전기 화학반응을 활성화 시키는데 기여한다. 본 연구에서는 Perma Pure 사의 가습기를 Shell & Tube형 열 및 물질 교환기로 가정하여 본 연구소에서 개발한 모델을 사용하였다⁹⁾. 모델은 정상상태 모델이며, 튜브 안과 밖의 열교환은 LMTD법을 이용하여 구하였다.

튜브를 통과하는 습증기량은 튜브 안과 밖의 습증기 농도차에 의한 확산력이 지배하는 것으로 모델링하였다. Fig. 5는 가정용 연료전지에서 사용하는 운전조건에 대한 가습기 모델링 결과이다. 건조공기는 터보 블로워에서 공급되는 공기이고, 습공기는 연료전지의 공기극 출구의 반응공기로 반응공기는 매우 습하고 블로워에서 들어오는 공기는 매우 건조하기 때문에, 가습기에서 둘 사이의 습증기 확산에 의해 습도가 전달되는 것을 보여주고 있다.

2.4 냉각계통 모델링

2.4.1 열교환기, 냉각 펌프

냉각 계통은 가정용 급탕으로 연료전지 폐열을 회수하기 위한 열교환기, 냉각계통의 유체를 기동하기 위한 냉각 펌프 등으로 구성된다. 냉각수 펌프의 성능곡선은 보유중인 냉각펌프의 성능곡선을

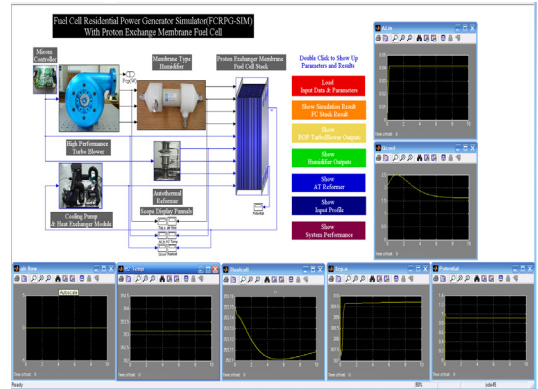


Fig. 6 Integration of the lumped transient fuel cell stack model with the thermal management system

실험적으로 결정한 후 이를 적용하였다. 열교환기 모델은 판형 열교환기를 가정하여 모델링하였으며, 냉각계통의 동특성은 냉각수 구동 펌프의 모터 동특성만을 고려하였다.

2.4.2 냉각 펌프 운전 전략

Fig. 6은 Matlab/Simulink[®]을 이용해 구성한 시스템 모델을 보여준다. 냉각계통은 연료전지 스택의 온도를 유지시켜 주는 역할을 하는데, 온도 유지를 위해서는 기준온도가 필요하다. Nafion[®] 막의 경우 충분한 습증기가 공급된다고 하더라도 353.15K (80°C)이하에서 작동해야 내구성을 보장받는다. 그러므로 냉각펌프는 연료전지 출구 온도를 검출하여 그 온도가 353.15K를 유지하기 위한 냉각수 유량을 제어하도록 설계하였다.

Yu⁷⁾에 따르면, 연료전지 내부의 온도차가 커지면, 국부적으로 과열되는 지역과 건조해지는 지역이 존재하며, 운전 시에 성능의 저하 및 내구성 문제가 있을 수 있음을 지적하고 있다. 그러므로 스택의 입출구에서의 온도차가 작을수록 스택 성능 및 내구성은 유리함을 알 수 있다. 즉, 스택의 냉각계통 입출구 온도차가 작아지면, 이를 통해 각 단위전지간의 성능 편차도 줄일 수 있을 것으로 기대 된다. 하지만, 스택의 냉각계통 입출구의 온

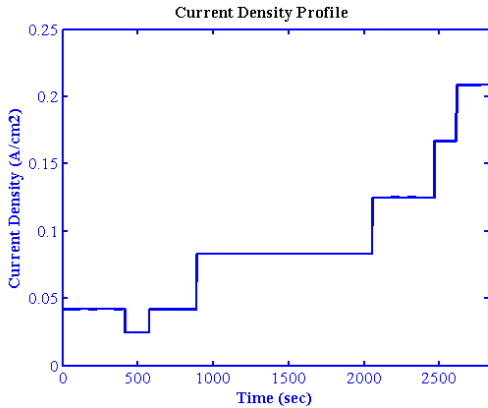


Fig. 7 Input current density for load follow-up

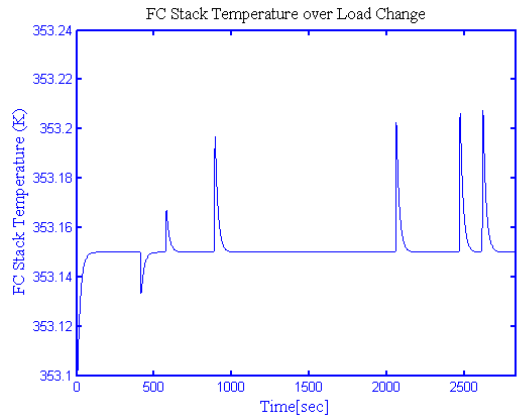


Fig. 8 Dynamic response of stack temperature

도를 과도하게 줄이게 되면, 이를 만족시키기 위한 냉각수 유량이 과도해지기 때문에, 결과적으로 단위전지 간의 성능편차를 줄여서 얻는 성능 이득보다, 냉각 펌프를 구동하기 위한 동력손실이 커지게 된다. 그러므로 냉각 계통의 운전 제어는 스택온도를 유지시키면서, 냉각계통 입출구에서의 온도차는 적어야하고, 기생전력의 손실 또한 최소화가 되도록 펌프가 운전되어야 한다는 것이 펌프 운전 제어조건이다.

냉각 시스템의 제어는 펌프의 모터 제어를 통해 달성되므로, 모터의 PI 제어기에서는 냉각수 입출구의 온도와 연료전지 스택의 온도를 검출하여, 이를 기준값과 비교하여 모터 속도를 제어함으로써 요구되는 기준치를 맞추도록 모델링하였다. 현재 설정된 냉각수 입출구 온도차는 3°C이며, 연료전지 스택의 제어 온도는 80°C로 냉각수 출구단의 스택 온도를 검출온도로 정의 하였다.

3. 결과 및 토론

해석에 사용된 부하 변동 입력값은 동 실험실에서 실험한 결과와의 비교를 위해 Fig. 7의 부하 변동을 사용하였다. 본 연구에서 개발된 연료전지 시스템의 성능 모사 시뮬레이터의 응답특성이 물리적 현상을 적절히 설명하고 있는지에 대해, 스택 온도 응답 특성, 공기공급계 응답특성 등에 대해

검토하였다.

3.1 스택 응답 특성

시뮬레이터의 스택 응답의 경우 부하 변동 시 현저한 동특성을 나타내는 결과들은 전압 변화와 온도 변화이다. 스택 온도 응답 특성의 경우, Fig. 8에 나타난 바와 같이 온도 응답 특성이 매우 우수한 것으로 보여진다. 본 연구에 사용된 냉각계통의 펌프는 시스템 성능에 비해 성능이 과다한 것을 사용했기 때문에 실제 스택의 온도 변화가 미미한 것으로 나타났다.

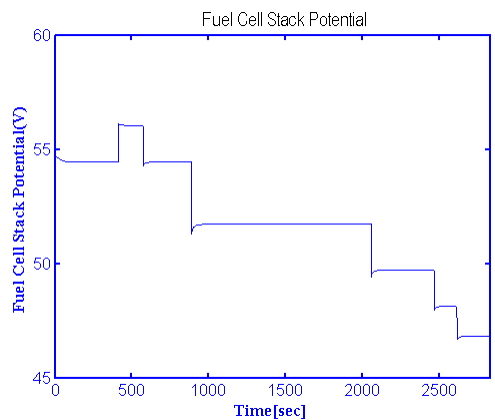


Fig. 9 Dynamic response of fuel cell potentials

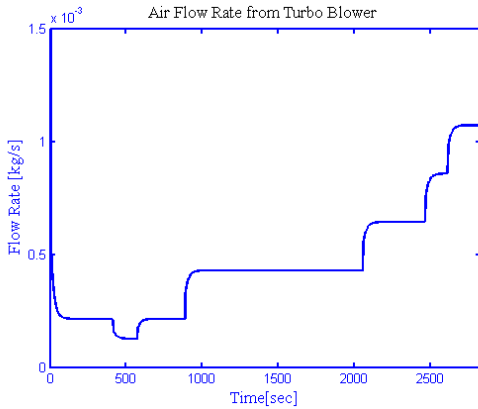


Fig. 10 Mass flow rate to maintain $n_{air}=2$ under given load conditions

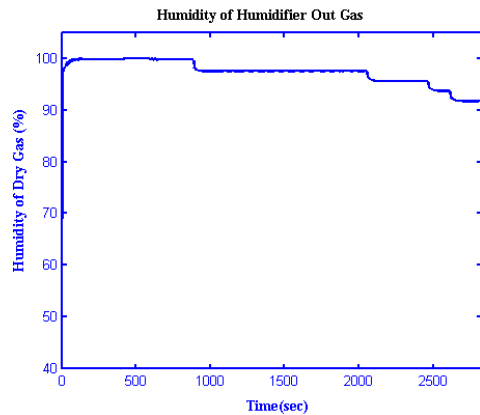


Fig. 11 Dry air humidity at the humidifier outlet

Fig. 9의 스택 전압 변화를 보면, 개발된 시뮬레이터가 전기화학반응에 관련된 동적 거동시의 응답특성을 적절히 묘사하고 있음을 알 수 있다. 다만, 실제 응답 특성에 있어서는 동적 거동 시 전압 변화폭이 큰데 비해 상대적으로 동적 거동에 대한 응답의 변화는 작게 나왔다.

현재 해석 모델에서는 전압의 비정상 거동이 온도 동특성 및 막 전해질에서의 습증기 수송에 관련된 부분만 적용되었다. 향후, 전압의 비정상 응답특성을 보정하기 위해서는, 가스 확산층에서의 비정상 가스 확산을 포함시켜야 보다 현실적인 결과를 낼 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 공기 공급계 응답 특성

본 연료전지 시스템 성능 예측 프로그램에서는 공기 공급계의 제어가 공기 이용율에 의해 결정되도록 되어 있다. 즉, 연료전지 스택의 부하가 변할 때 공기 블로워는 항상 전체 공기 이용율을 50%로 맞출 수 있도록 모터의 속도를 제어한다. 부하 입력에 대한 동특성은 Fig. 10에 표시하였으며, 모터 회전을 제어한 유량의 동특성이 나타나 있다.

블로워의 크기가 커질수록 응답 속도가 저하되는 경향이 있지만, 물리적으로는 터보 블로워의 사이즈가 작아질수록 모터 회전속도가 커져야 동일 유량을 제공할 수 있게 된다. 결국, 기생전력을 줄

이면서, 응답속도를 원하는 수준으로 달성하기 위해서는 PI제어기보다는 feedforward와 PI를 동시에 적용한 제어기를 적용하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

공기 가습기의 경우, 정상상태 모델을 채택하였으며, 부하 입력에 대해 가습기를 독립적으로 운전 시에는 동특성을 확인할 수 없다. 하지만, 가습기는 블로워에서 들어오는 공기의 가습에 사용되기 때문에, 통합 모델에 있어서는, 블로워의 동특성에 의한 변화를 가습기에서도 확인할 수 있다. 즉, Fig. 11에서 보이듯이 블로워의 모터 회전에 의한 유량의 동특성은 가습기에서도 확인할 수 있다.

4. 결 론

가정용 연료전지 시스템의 성능을 묘사할 수 있는 해석 모델을 개발하였다.

- 1) 개별 모듈 중, 블로워는 모터 동특성을 보여주며, 연료전지 스택의 동특성은 온도 동특성과 전압 동특성을 보여준다.
- 2) 가습기 출구단에서 확인되는 응답 특성의 경우, 정상상태를 가정한 모델을 적용하였지만, 블로워 출구단에서 나오는 공기를 가습기에서 가습시켜 주기 때문에, 동특성을 보여주고 있다.
- 3) 본 연구를 통해 개발된 모델은 실험적 검증을

거쳐 향후 시스템의 최적 운전을 위한 BOP 설계 및 운전 최적화를 위해 사용할 계획이다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원 기본사업의 지원으로 이루어진 결과임.

참 고 문 헌

- 1) J. C. Amphlett, R. F. Mann, B. A. Peppley, P. R. Roberge and A. Rodrigues, "A Model Predicting Transient Responses of Proton Exchange Membrane Fuel Cells", *Journal of Power sources*, Vol. 61, 1996, pp. 183-188.
- 2) M. D. Francesco and E. Arato, "Start-up Analysis for Automotive PEM Fuel Cell Systems", *Journal of Power Sources*, Vol. 108, 2002, pp. 41-52.
- 3) P. König, A. Weber, L. Lewald, T. Aicher, L. Jörissen, E. Ivers-Tiffée, R. Szolak, M. Brendel and J. Kaczerowski, "Testing and model-aided analysis of a 2 kWel PEMFC CHP-system", *Journal of Power Sources*, Vol. 145, 2005, pp. 327-335.
- 4) U. S. Selamoğullari, T. R. Willemain and D. A. Torrey, "A System Approach for Sizing a Stand-alone Residential PEMFC Power System", *Journal of Power Sources*, Vol. 171, 2007, pp. 802-810.
- 5) T. E. Springer, T. A. Zawodzinski and S. Gottesfeld, "Polymer Electrolyte Fuel Cell Model", *Journal of Electrochemical Society*, Vol. 138, No. 8, 1991, pp. 2334-2342.
- 6) K. Broka and P. Ekdunge, "Modeling the PEM Fuel Cell Cathode", *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol. 27, 1997, pp. 281-289.
- 7) S. Yu, "Thermal Modeling of the Proton Exchange Membrane Fuel Cell", Ph.D. Dissertation, University of Michigan, 2006.
- 8) J. T. Pukrushpan, A. G. Stefanopoulou, and H. Peng, *Control of Fuel Cell Power Systems*, First Edition, Springer, London, 2004, pp. 15-20.
- 9) 유상석, 김한석, 이상민, 이영덕, 최원석, 안국영, "가정용 연료전지 막가습기 해석 모델 개발", *대한기계학회 열공학/유체공학부문 춘계학술대회 논문집*, 2008, pp. 93-96.