가정용 연료전지 시스템의 열관리 해석

유상석†·이영덕*·안국영**

Thermal Management Study of PEMFC for Residential Power Generation

Sangseok Yu, Youngduk Lee and Kookyoung Ahn

Key Words: thermal management(열관리), cooling circuit(냉각 회로), PEMFC(고분자 막전해질 연료전지), residential power generation(가정용 발전)

Abstract

A PEMFC(proton exchange membrane fuel cell) is a good candidate for residential power generation to be cope with the shortage of fossil fuel and green house gas emission. The attractive benefit of the PEMFC is to produce electric power as well as hot water for home usage. Typically, thermal management of vehicular PEMFC is to reject the heat from the PEMFC to the ambient air. Different from that, the thermal management of PEMFC for RPG is to utilize the heat of PEMFC so that the PEMFC can be operated at its optimal efficiency.

In this study, dynamic thermal management system is modeled to understand the response of the thermal management system during dynamic operation. The thermal management system of PEMFC for RPGFC is composed of two cooling circuits, one for controling the fuel cell temperature and the other for heating up the water for home usage. Dynamic responses and operating strategies of the PEMFC system are investigated during load changes.

기호설명

h : enthalpy (kJ/kg)
J : current density (A/cm2)
$\dot{m}$: mass flow rate(kg/s)
p : total pressure (atm)
P : power (W)
T : temperature (K)
V : electric potential (V)
d : Nafion® thickness on agglomerate (cm)
l : water content
n : stoichiometry flow coefficient

Subscripts

A : anode side
c : coolant
CA : cathode side
FC : fuel cell
in : inlet
mem : membrane
o : outlet

1. 서 론

연료전지는 다양한 산업체 분야에서 발생하는 매연 및 이산화탄소 배출문제, 에너지 자원의 고갈 등 전세계적으로 공감대를 형성하고 있는 자원고갈과 공해에 능동적으로 대처할 수 있는 차세대 동력 추진원으로 서서히 인식을 확장하고 있다. 연료전지는 그 작동온도 및 전해질 등 재료에 따라서 다양하게 분류되며, 그 중 고분자 막 전해질 연료전지(Proton Exchanger Membrane Fuel Cell, 이하 PEMFC)는 저온작동이 가능하며, 제작이 간편하고, 시동 시간이 짧으며, 효율이 우수하여, 현재 차량용으로 적용하기 위해 활발한 연구가 진행 중 이다. PEMFC는 또 대형 트럭들의 장기 정차 시 발생하는 기생전력(hotel power)

을 제공하기 위한 보조동력용으로 적용시에도 효율 향상에 큰 기여를 하기 때문에, 보조 동력용으로도 연구가 진행중이다. 그리고, PEMFC에서 발생하는 전력과 열을 동시에 사용하여, 열효율을 극대화 시킬 수 있기 때문에, 가정용 복합 발전(1kW급)에 적용하기 위한 연구도 진행 중이다.

PEMFC를 상용화하기 위해서는 다수의 기술적 도약이 필요하며, 가정용의 경우 효과적인 열관리를 통해 가정에 필요한 온수를 공급함과 동시에, 시스템 작동온도를 최적으로 유지할 수 있다. 그리고, PEMFC는 전해막에 적절한 수분을 유지시킴과 동시에 양쪽 채널에서는 수분 배출을 효과적으로 수행해야 우수한 성능을 낼 수 있기 때문에, 물관리가 매우 중요하며, 물 및 열관리는 서로 연동되기 때문에 시스템적 관점에서의 접근이 필요하다.

최근에 가정용 연료전지의 실증 연구가 진행되고 있기는 하지만, 아직 시장에 제품이 출시되지 않은 상황이기 때문에, 제작사들이 자사의 제품에 대한 권익을 보호하고 시장 조성시 선점을 위해 정보를 공유하지 않고 있기 때문에 시스템에 대한 정보를 문헌상에서 찾기가 어렵다. 시스템에 대한 연구는 주로 해석 분야에서 많이 수행되고 있는데, 가정용 연료전지 시스템에 대한 시스템 연구로는, König등은 연료전지 연계 열병합 시스템을 구축 및 운전하고 모델을 구성하여 시스템 효율에 대한 연구를 수행 하였으며[1], Selamoğullari등은 미국 동부에 가정용 PEMFC를 설치하고 운전한 결과에 대해 보고한 바 있다[2].

가정용 연료전지 시스템의 경우 차량용에 비해 동적 거동에 대한 응답 속도가 느리고, 기동과 정지 횟수가 차량용에 비해 적지만, 동적 모델을 작성해야 운전 특성을 이해 할 수 있으며, 필요한 운전 전략을 분석 할 수 있다. 연료전지 해석 모델을 정해진 운전조건에 대해 경험식으로 작성하는 것이 해석에는 유리하지만, 스택 내부의 거동을 보는데는 불리하다. 그러므로 본 연구에서 작성된 단위 부품의 모델들은 경험식에 의존하기 보다는 1-D 해석 모델을 이용해 작성하고자 한다. 이렇게 작성된 모델을 프로그래밍 플렛폼(SIMULINK®)에서 통합하여, 가정용 연료전지 시스템의 열관리를 위한 설계 및 운전 인자를 도출하고자 한다.

† 정회원, 기계연
E-mail : sangseok@kimm.re.kr
TEL : (042)86-7992 FAX : (042)868-7284
*,** 기계연

2. 해석 모델 소개

2.1 연료전지 스택 성능해석 모델

일반적으로 Nafion®계열 막 전해질은 전기전도도가 막내부의 습증기 농도에 매우 민감하므로, 막 전해질에서의 습증기의 농도를 적절히 관리하는 것이 연료전지의 성능에 매우 중요하다. Springer[3] 등은 막 전해질의 이온 전도도가 습증기 함유도(Water content, λ)에 선형적으로 변한다고 제안하였다. 여기서, 막 전해질 내부의 습증기 함유도는 양쪽 전극에서의 습증기 농도차에 의한 확산력과 전압차에 의한 전기삼투력(electroosmotic force)사이의 균형에 의해 결정된다[3]. 그리고 양 전극에 압력차가 존재하면 이에 의한 유동도 존재하지만, 본 연구에서는 두 전극의 압력차는 동일한 것으로 가정하였다. 습증기 수송 모델은 비정상상태에 대해 두 구동력을 종 보존 방정식에 적용하여 유도하였다[4]:

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

식(1)을 이용해, 전해질에서의 습증기 농도를 구했으면, 다음과 같이 막 전해질의 전기 전도도(σ)와 전기저항(R)을 구할 수 있다[3].

$$\sigma=\exp\left(1268\left(\frac{1}{303}-\frac{1}{T}\right)\right)(0.005139\lambda-0.00326) \quad (2)$$

$$R_{mem}=\int_0^{t_{mem}}\frac{dz}{\sigma(\lambda)} \quad (3)$$

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)
Fuel cell temperature(T_{FC})	80 (°C)
Total pressure (P_C, P_A)	1.15 (atm)
Number of cells in FC stack	60
ν_{H2}, ν_{O2}	1.42, 2.0
Equivalent weight(M_m)	1100 ($kg/kmol$)
Dry density of membrane(ρ_{dry})	2.0 (kg/m^3)

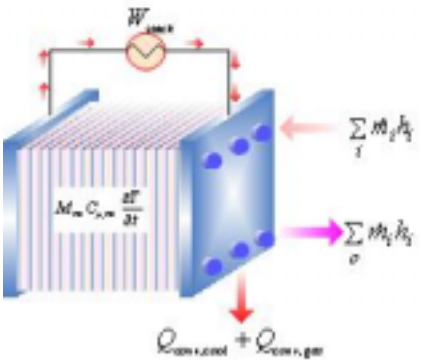

Fig. 2 Control Volume Analysis of Fuel Cell Stack

연료극 촉매층에서의 반응 속도는 공기극에 비해 매우 빠르므로 무시하였고 공기극 촉매층에서의 반응은 Broka 등이 제안한 촉매층의 군집체에서의 전기화학 반응 모델을 적용하였다[5]:

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial z^2} = \frac{4F}{\kappa_{eff}} \frac{1}{\frac{\delta}{a.c_{O_2}^{\infty} D_{eff}} + \frac{1}{k_{react} E}} \tag{4}$$

식(4)을 통해 촉매층에서 농도 확산 및 반응에 의한 전압 손실을 구 할 수 있고, 전해질 막에서의 저항에 의한 손실을 고려하면, 연료전지 스택으로부터 생산되는 순 전압을 구할 수 있다. 즉, $V_{FC}=V_{CA}+J \cdot R_{mem}$이고, $J \cdot R_{mem}$은 막 전해질을 거칠 때의 전압 손실이다. 셀 간의 전압 변동을 무시하면, 스택 전압은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_{FC} = V_{Nrn} - \eta_{z=0} - JR_{mem} \tag{5}$$

$$W_{cv} = n_{FC} V_{FC} J \tag{6}$$

가정용 연료전지의 동적 거동 및 열관리를 모사하기 위해 Fig. 2의 제어체적을 적용하였으며 연료전지 스택의 온도는 전기 발열과 가스 및 냉각수로의 방열의 균형을 통해 결정했다.

$$\rho c_p V \frac{dT}{dt} = \sum_{in} \dot{m} h_i - \sum_{out} \dot{m} h_i - W_{cv} - Q_c - Q_g \tag{7}$$

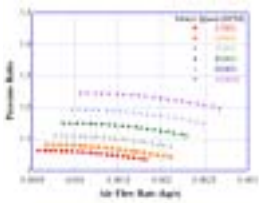

Fig. 3 P-Q Curve of Turbo-Blower

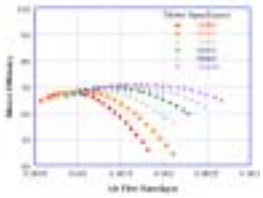

Fig. 4 Efficiency Curve of Turbo-Blower

2.3 공기공급장치

본 연구에서는 공기극으로 공기를 공급하기 위해 터보 블로워(Turbo Blower)를 사용하였다. 터보 블로워의 성능 곡선과 효율은 Fig. 3과 4에서 찾을 수 있고, 모델은 Simulink®환경에서 작성하였다. 블로워 모듈은 터보 블로워 본체와 모터로 구성되어진다. 터보 블로워의 동특성은 모터 동특성에 의해 지배된다고 가정하였으며, 모터 동특성 모델을 적용하였다[6]. 터보 블로워는 연료전지 스택에 공기를 공급해 주지만, 또한 구동 동력을 공급 받는다.

통상, 스택으로 들어가는 공기량을 증가 시킬수 록 스택의 성능은 개선 될 수 있지만, 블로워가 사용하는 기생 전력도 증가하기 때문에, 운전조건을 효율적으로 제어 시킬 필요가 있다. 본 연구에서는 이론공기량의 2배를 최적조건이라고 정의하여, 대부분의 운전영역에서 터보블로워가 반응량(stoichiometry flowrate)의 2배에 해당하는 공기량을 공급할 수 있도록 제어하였다. 요구 유량이 매우 작은 경우에는 블로워의 안전성을 확보하기 위해 최소 속도로 운전할 수 있도록 제어하였다.

가습기는 연료전지 스택으로 들어가는 공기와 연료에 적절한 습분을 제공하여, 전기 화학반응을 활성화 시키는데 기여한다. 본 연구에서는 Fig. 4와 같은 막가습기를 대향류형 열 및 물질 교환기를 모델링 하였으며, 건공기(side 1)측은 터보-블로워에서 유입되는 공기이며, 습공기측(side 2)은 연료전지 출구에서 나오는 공기이다. 모델은 채널 방향으로의 질량 보존과 막 두께 방향으로의 습증기 수송을 고려하였으며, Gas-to-Gas형 물질교환기를 적용하였다. 또한, 현재 상용으로 나온 막가습기의 경우, 형상은 Shell and tube 형 이지만, 내부의 Baffle등이 없으므로, 대향류형 열교환기로 모델링 하였다.

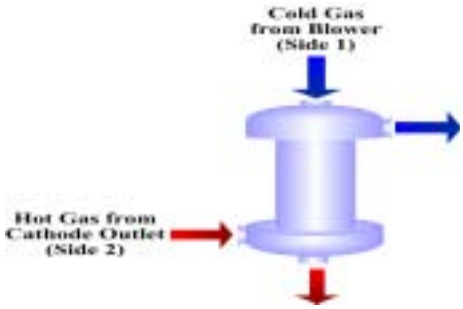

Fig. 4 Simplified Diagram of Membrane Humidifier

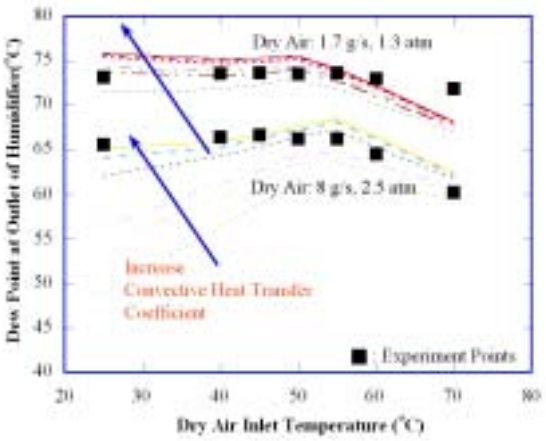

Fig. 5 Validation of Membrane Humidifier with Experimental Data

Fig. 5는 모델결과를 실험과 비교한 것으로 블로워로부터 유입되는 건공기의 공급유량을 고정시키고 연료전지로부터 유입되는 공기는 80°C에서 상대습도 100%를 적용하였다.

2.4 냉각계통 모델링

냉각 계통은 연료전지 내부의 열을 회수하는 1차측과 가정용 급탕조를 승온하는 2차측으로 나누어 지며, 에너지 전달은 열교환기에 의해 이루어진다. 1차 냉각회로에서는, 연료전지 출구단에서의 냉각수 온도를 센서를 이용하여 검출하여, 온도가 제어온도 이상으로 올라가면 냉각수 유량을 증가시키고, 이하로 내려가면 유량을 감소시키는 방식으로 제어하며, 연료전지 온도를 최적으로 제어하기 위해 펌프 유량을 PI 제어 하였다.

2차측 냉각회로는 열교환을 통해 연료전지 스택의 온도를 제어할 수 있어야 하기 때문에, 급탕조 온도를 높이는데 제한이 있다. 2차측의 경우 충분한 유량을 열교환기에 흘려 1차측에서 방열되는 열을 효과적으로 회수 시키기 위해 충분한 펌프 유량을 제공할 수 있도록 설계하였다. 그리고, 급탕조의 온도가 제한선 이상으로 올라가는 것을 막기 위해, 솔레노이드 밸브를 이용해 외부 급수를 받아들일 수 있도록 설계하였다. 이를 제어하기 위해서 급탕수 유량 및 온도 신호를 검출하였으며, 급탕수 온도는 65°C를 최고온도로 설정하고, 외부 냉각 유량을 이용해 온도를 조절하였다. 열교환기 모델은 판형 열교환기를 가정하여 모델링하였으며, 냉각계통의 동특성은 냉각수 구동 펌프의 모터 동특성만을 고려하였다.

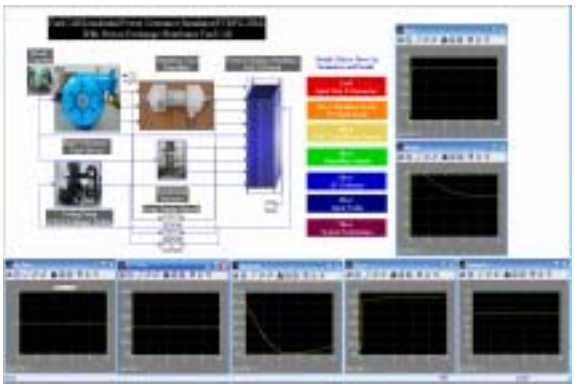

Fig. 6 Integration of the lumped transient fuel cell stack model with the thermal management system

2.5 시스템 통합 및 운전 전략

Fig. 6은 Matlab/Simulink®를 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 출구에서의 냉각수 온도를 검출하여 그 온도를 353.15K로 유지하기 위해 냉각수 유량을 제어하도록 설계하였다.

그리고 Yu[7]에 따르면, 연료전지 내부의 온도차가 커지면, 국부적으로 과열되는 부분과 건조해지는 부분이 전지 내부에 존재하며, 이러한 국부과열이 운전 시에 성능의 저하 및 내구성 문제가 있을 수 있음을 지적하고 있다. 그러므로 스택의 입출구에서의 온도차가 작을수록 스택 성능 및 내구성에는 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 온도를 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 목표는 스택온도를 유지시키면서, 냉각계통 입출구에서의 온도차는 적어야하고, 기생전력의 손실 또한 최소화가 되도록 펌프가 운전되어야 한다는 구속 조건을 설정하였다.

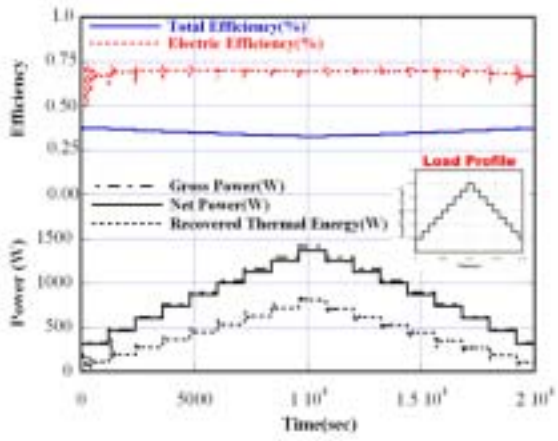

Fig. 7 Stack Response Regarding Increasing and Decreasing Current Densities

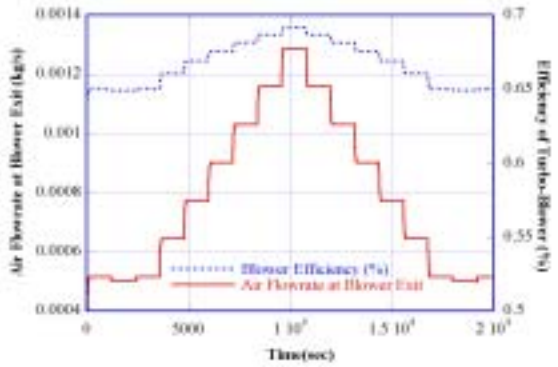

Fig. 8 Blow Supplied Air Flow Rate and Efficiency of Turbo-Blower Regarding Input Load Profile

Fig. 9 Air Humidity and Temperature at Cathode Inlet

3. 결과 및 토론

3.1 스택 응답 특성

스택 응답을 확인하기 위해, Fig. 7과 같이 부하를 점진적으로 증가시킨 후 다시 점진적으로 감소시켰다. 급탕조가 충분히 가열되는 시간을 확보하기 위해 시뮬레이션 시간은 6시간으로 설정하였다. Gross Power는 연료전지 시스템이 생산하는 전력을 의미하며, Net Power는 시스템이 사용하는 기생전력을 제외한 스택 생산 전력을 의미한다. 부하가 증가함에 따라 시스템의 BOP에 의해 소비되는 기생전력이 증가함을 확인 할 수 있다. Fig. 7에서는 보여지듯이 부하가 작은 경우, 스택의 방열량이 적기 때문에, 방열량 중 급탕조에서 회수 할 수 있는 열에너지가 작은 것을 알 수 있다. 부하가 증가함에 따라, 급탕조가 흡수할 수 있는 열에너지가 증가함을 알 수 있다. 전기효율(Electric Efficiency)의 경우, 부하가 증가하면 감소하게 되지만, 회수할 수 있는 열에너지가 증가하기 때문에, 시스템 효율(Total Efficiency)은 고부하로 갈수록 증가하고, 저부하에서 감소하는 것을 볼 수 있다.

3.2 공기 공급계 응답 특성

연료전지 시스템 성능 예측 프로그램에서는 스택에 필요한 공기량을 공급하기 위해, 블로어의 모터 속도를 제어한다. 모터 속도 제어 시, 모델을 단순화 시키기 위해, 모터 제어를 위한 검출 신호는 공기 공급계 출구에서의 유량으로 설정하였으며, 향후 경제성 등을 고려하여 검출 신호를 변경할 예정이다. 검출 신호의 제어 목표값 공기 이용율을 50%(ν_{air} =2)로 하였다(Jay). 본 연구에서 사용된 터보블로워의 경우, 당 연구소에서 개발한 모델로, 가정용 연료전지의 운전점을 설계점으로 설계하였기 때문에, Fig. 8에서 보여지듯이, 효율이 고유량으로 갈수록 증가됨을 볼 수 있다. 유량의 경우, 모터 속도를 PI제어하여 얻은 결과이다. 터보 블로워를 거쳐 공급된 공기는 다시 막가습기를 거쳐 습분을 공급받고 온도또한 승온되게 되는데, Fig. 9에서는 이러한 경향을 보여주고 있다. Fig. 9에서 보여지듯이, 공급 유량이 증가할수록 연료전지 스택으로 공급하는 유체의 습도와 온도가 낮아지는 것을 볼 수 있다. 이는 유속이 증가함에 따라, 막가습기의 습공기에서 건공기로의 물질전달량이 감소하고, 열전달량 또한 감소하면서 생기는 현상이다. Fig.9에 보여지는 공기유량의 동특성은 연료전지 스택으로부터 가습기로 공급되는 습공기의 동특성에 의한 것으로, 블로워에서 공급되는 건공기가 연료전지로부터 오는 습공기에 의해 가습되기 때문이다

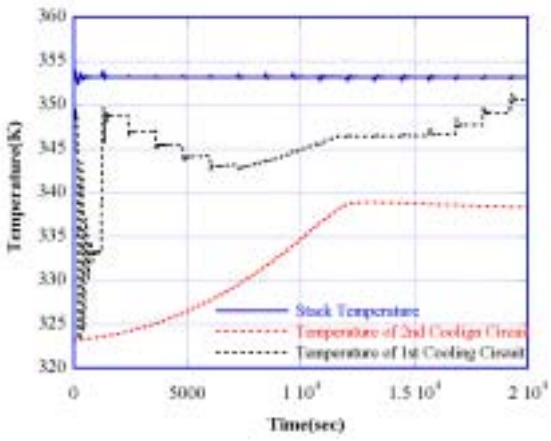

Fig. 10 Temperature Response of Cooling Circuits

3.3 냉각계통 응답 특성

가정용 연료전지 시스템에서 냉각시스템 운영의 목적은 연료전지 스택의 온도를 일정하게 유지하면서, 급탕조의 온도를 승온시키는데 있다. Fig. 10에는 연료전지 스택 온도와 1차측 및 2차측에서의 냉각수 온도를 보여주고 있다. 1차측의 온도는 운전 초기 저부하에서는 운전 특성이 다소 불안전한 보습을 보여주고 있지만, 운전이 안정화 되면, 후기의 저부하에서는 안정된 제어가 이루어 짐을 알 수 있다. 2차측 냉각수 온도의 경우, 본 연구에서는 65°C를 제어온도로 설정하였기 때문에, 초기에는 설정온도를 달성하기 위해서 지속적으로 승온을 하게 되며, 승온 이후에는 외부 급수를 통해 온도를 제어하도록 되어 있다. Fig. 10에서 보여지듯이, 급탕수 초기 온도를 높게 설정하였음에도 불구하고 대략 3시간정도 승온 시간이 필요함을 알 수 있다.

4. 결 론

가정용 연료전지 시스템의 성능을 모사할 수 있는 해석 모델을 개발하였다.

1. 시스템 동특성을 모사하기 위해, 연료전지 스택의 동특성 모델, 블로워 동특성 모델, 냉각 시스템 동특성 모델을 적용하였다.

2. 스택의 전기효율은 부하가 증가하면 감소하지만, 부하증가에 따라 열부하가 증가하기 때문에 시스템 효율은 고부하로 갈수록 증가한다.

3. 부하가 증가함에따라 시스템에서 요구되는 공기량이 증가하게 되는데 가습기 내부에서의 습증기 수송력이 감소하기 때문에 부하가 증가함에 따라 가습 성능은 감소하게 된다.

4. 냉각 시스템은 스택의 온도를 제어함과 동시에 급탕조를 승온하는 두가지 기능을 수행하며 스택의 온도를 제어하는 1차측과 급탕조를 승온하는 2차측으로 나누어 온도를 제어해야 한다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원 기본사업의 지원으로 이루어진 결과임.

참고문헌

(1) 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.

(2) 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.

(3) 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.

(4) S. Yu, H.S. Kim, Y.D. Lee, and K. Y. Ahn, 2008, "A Dynamic model of PEMFC system for the simulation of residential power generation," Proceedings of FuelCell2008.

(5) K. Broka and P. Ekdunge, "Modeling the PEM Fuel Cell Cathode," Journal of Applied Electrochemistry, Vol. 27, 1997, pp. 281-289.

(6) Jay T. Pukrushpan, Anna G. Stefanopoulou, and Huei Peng, 2004, Control of Fuel Cell Power Systems, Springer, London, First Edition, pp. 15-20

(7) S. Yu, "Thermal Modeling of the Proton Exchange Membrane Fuel Cell," Ph.D. Dissertation, University of Michigan, 2006.