

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2010.34.1.19

가정용 연료전지 시스템의 열관리 해석을 위한 시스템 운전 모델 개발

유상석* · 이영덕** · 안국영**†

* 충남대학교 기계공학과, ** 한국기계연구원

A System Simulation Model of Proton Exchange Membrane Fuel Cell for Residential Power Generation for Thermal Management Study

Sangseok Yu*, Youngduk Lee** and Kookyoung Ahn**†

* Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University

** Korea Institute of Machinery and Materials

(Received August 31, 2009 ; Revised November 22, 2009 ; Accepted November 23, 2009)

Key Words: PEMFC(이온교환막 연료전지), Thermal Management of PEMFC(열관리), Cooling Circuit(냉각 회로), Residential Power Generation FC(가정용 연료전지 발전시스템)

초록: 이온교환막 연료전지는 전세계적인 에너지 고갈 문제와 온실효과에 대한 대응책의 하나이다. 특히, 이온교환막 연료전지는 전기화학반응에 의해 전기를 생산함과 동시에 열을 발생하기 때문에 가정용으로 적용하기에 적합하다. 가정용 연료전지의 열관리 목적은 연료전지가 최적조건에서 운전할 수 있도록 적절히 온도를 제어해 주는 것으로, 본 연구에서는 부하 변화 시 가정용 연료전지 시스템의 응답 특성과 열관리 특성을 알아보기 위한 해석 모델을 개발하였다. 열관리 해석 모델은 연료전지의 온도를 조절하기 위한 펌프와 열교환기로 구성된 1차측, 주택에 온수를 공급하기 위한 탱크와 펌프 계통의 2차측으로 구성되었다. 부하를 순차적으로 증가시킬 때와 감소시킬 때를 구분하여 열관리 계통의 응답특성을 확인하였다. 결과적으로 탱크의 초기 승온에 많은 시간이 소요되기 때문에 부하를 다단으로 오랜 시간 동안 서서히 증가시키면서 시스템 응답 특성을 확인하였다. 또한, 본 연구에서는 가정용 연료전지의 부하 변화시의 열관리 특성을 고려한 운전 전략에 대해서도 조사하였다.

Abstract: A PEMFC(proton exchange membrane fuel cell) is a good candidate for residential power generation to be coped 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. 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, thermal management system of PEMFC stack is modeled to understand the dynamic response during load change. The thermal management system of PEMFC for RPGFC is composed of two cooling circuits, one for controlling the fuel cell temperature and the other for heating up the water for home usage. The different operating strategy is applied for each cooling circuit considering the duty of those two circuits. Even though the capacity of PEMFC system (1kW) is enough to supply hot domestic water for residence, heat-up of reservoir takes some hours. Therefore, in this study, time schedule of the simulation reflects the heat-up process. Dynamic responses and operating strategies of the PEMFC system are investigated during load changes.

- 기호설명 -

a : 균집체 비표면적

A : 면적 (cm²)

c : 농도 (mole/cm³)

D : 확산계수 (cm²/s)

F : Faraday 상수 (C/mole)

Δg_f^0 : 표준상태 Gibb's 자유 에너지 (J/ mole)

h : 대류 열전달 계수 (W/m²s)

J : 전류밀도 (A/cm²)

\dot{m} : 질량 유량(kg/s)

N_i : 가스 몰 유속 (mole/cm²s)

p : 둘레길이 (m) 또는 전압 (atm)

P : 출력 (W)

Δp : 압력차 (kPa)

R : 일반기체 상수 (J/molK)

† Corresponding Author. kyahn@kimm.re.kr

t : 두께 (m)
 T : 온도 (K)
 V : 전압 (V)
 x_i : 물분율

그리스문자

δ : 균집체에서의 Nafion[®] 두께 (cm)
 η : 공기극 손실 (V)
 κ : 전기전도도 (mho/cm)
 λ : 수분 함유도
 v : 양론계수

첨자

act : 활성면적
 A : 연료극
 c : 냉각수
 C : 공기극
 cond : 응축기
 eff : 유효 물성치
 FC : 연료전지
 g : 가스
 grill : 방열판 그릴
 H₂ : 수소
 in : 채널 입구
 mem : 막
 N₂ : 질소
 o : 채널 출구
 ON : 공기중 산소 함유량
 O₂ : 산소
 rad : 방열판
 w : 습증기

1. 서 론

최근 다양한 산업체 분야에서 발생하는 매연 및 이산화탄소 배출에 의한 환경 문제, 미래에 있을 화석 에너지 자원의 고갈 등은 문제의 심각성에 있어서 전 세계가 공감대를 형성하고 있으며 이에 능동적으로 대처하기 위해 선진국을 중심으로 새로운 동력원 발굴 및 개발을 서두르고 있다. 연료전지는 작동원리상 오염물 배출이 기존 발전기관에 비해 매우 작고 연료의 다양화가 가능하며 고효율 발전에 의해 이산화탄소 배출이 최소화되기 때문에 특히 주목을 받고 있다. 연료전지는 그 작동온도 및 전해질 등 재료에 따라서

다양하게 분류되며, 그 중 이온교환막 연료전지(Proton Exchanger Membrane Fuel Cell, 이하 PEMFC)는 저온 작동이 가능하며, 제작이 간편하고, 시동 시간이 짧으며, 효율이 우수하여, 현재 차량용으로 적용하기 위해 활발한 연구가 진행 중이다. 전기화학반응기인 PEMFC에서 발생하는 전력과 열을 동시에 사용할 경우, 열효율을 극대화시킬 수 있기 때문에, 이러한 PEMFC는 가정용 및 건물용 복합 발전에 적용하기 위한 연구도 활발히 진행 중이다.⁽¹⁾

PEMFC를 상용화하기 위해서는 다수의 기술적 도약이 필요하며, 건물용의 경우 효과적인 열관리를 통해 건물에 필요한 온수를 공급함과 동시에, 시스템 작동온도를 최적으로 유지할 수 있다. 그리고 PEMFC는 전해질 막에 적절한 수분을 유지시킴과 동시에 양쪽 채널에서는 수분 배출을 효과적으로 수행해야 우수한 성능을 낼 수 있기 때문에, 물관리가 매우 중요하며, 물 및 열관리는 서로 연동되고 이러한 물/열관리를 효과적으로 수행하기 위해서는 BOP의 최적 설계 및 운전제어가 필요하기 때문에 시스템적 관점에서의 접근이 필요하다.⁽²⁾

최근에 가정용 연료전지의 실증 연구가 진행되고 있기는 하지만, 아직 시장에 제품이 출시되지 않은 상황이기 때문에, 제작사들이 자사의 제품에 대한 권익을 보호하고 시장 조성 시 선점을 위해 정보를 공유하지 않고 있기 때문에 각 업체에서 개발한 시스템에 대한 정보를 문헌상에서 찾기가 어렵다. 그럼에도 불구하고 시스템에 대한 연구는 주로 해석 분야에서 많이 수행되고 있는데, 가정용 연료전지 시스템에 대한 시스템 연구로는, König 등은 연료전지 연계 열 병합 시스템을 구축 및 운전하고 모델을 구성하여 시스템 효율에 대한 연구를 수행하였으며,⁽³⁾ Selamoğullari 등은 미국 동부에 가정용 PEMFC를 설치하고 운전한 결과에 대해 보고한 바 있다.⁽⁴⁾ 또, Sharkh 등과 Uzunoglu 등의 경우도 가정용/ 건물용으로 적용 가능한 시스템에 대한 동특성을 모사할 수 있는 시스템 모델을 개발하고 시스템 응답에 대해 보고하였다.^(5,6)

가정용 연료전지 시스템의 경우 차량용에 비해 동적 거동에 대한 응답 속도가 느리고, 기동과 정지 횟수가 차량용에 비해 적지만, 운전모드가 꼭 단순히 시동, 정격 운전, 정지 등으로 나눌 수 있는 것이 아니기 때문에 하나의 운전모드에서 다른 운전모드로 변화 시 운전 특성을 이해하기 위해서는 동적 모델을 작성하는 것이 유리하다. 기 개발된 실제 시스템에 대해 이러한 운전 모드를 해석하기에는 경험식을 활용해서 작성하는 것이

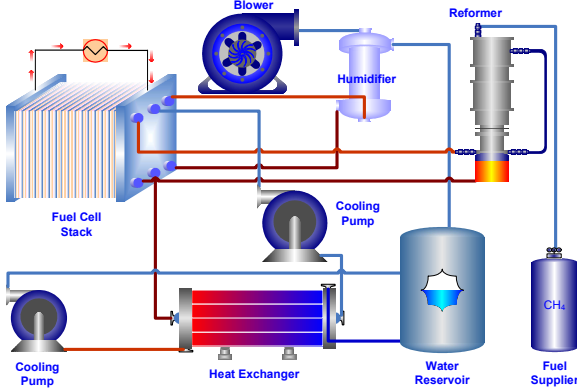


Fig. 1 Schematic diagram of residential PEMFC system

유리하지만, 경험식에 기초한 모델은 탈설계점이나 구조 및 재료의 변화에 대해서는 예측성이 현저하게 떨어지기 때문에 자유도를 크게 가져가는 포괄적인 연구에 있어서는 불리하다. 그러므로 본 연구에서는 단위 부품의 모델 작성 시 경험식에 의존하기보다 1차원 해석 모델을 적용해 단동 모델을 개발하고자 한다. 작성된 개별 단동 모델을 그래픽 프로그래밍 플랫폼인 SIMULINK[®]를 이용하여 통합하고, 연료전지 시스템의 열관리를 위한 설계 및 운전 인자를 도출하고자 한다.

2. 연료전지 시스템 모델

Fig. 1에는 본 연구에서 해석을 위해 개발한 시스템 모델의 개략도를 보여주고 있다. 본 연구에서 개발하는 가정용 연료전지 시스템의 경우는 Fig. 1과 같이 연료전지 스택, 공기 공급계의 블로워 및 가습기, 연료 공급계의 개질기, 그리고 냉각 계통을 구성하는 펌프, 열교환기, 물탱크 등이 있는 것으로 가정하고 이를 모사할 수 있는 구성품들의 단위 모델을 개발하였으며, 이를 통합해 시스템 해석을 수행하였다.

2.1 연료전지 스택 성능해석 모델

연료전지 스택 모델은 단위전지 모델을 개발한 후 단위 전지간의 성능 변화는 무시할 만하다는 가정을 적용하였으며 전체 스택의 출력은 단순히 단위전지의 장수에 의해 결정된다고 가정하였다. 본 연구에서 유도한 스택 모델은 단위전지 내부의 열 발생 및 열전달, 전기 화학 반응에 의한 전압 변화, 그리고 고분자 전해질 막의 습증기 수송 특성에 의한 전기 저항 변화 등을 모사할 수 있는 모델을 통합하여 개발하였다.

Nafion[®]계열 이온교환 막 전해질은 전기전도도가 막내부의 습증기 농도에 매우 민감하므로, 이온교환 막 전해질에서의 습증기의 농도를 적절히 관리하는

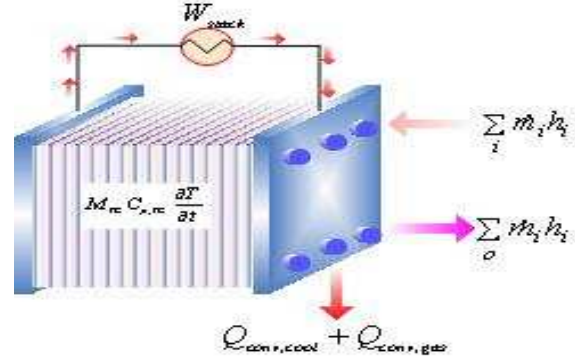


Fig. 2 Control volume analysis of fuel cell stack

것이 연료전지의 성능에 매우 중요하다. 이러한 이온교환 막 전해질의 습증기 수송 특성과 전기 전도도의 상관관계를 나타내기 위해 Springer⁽⁷⁾ 등은 습증기 함유도(Water content, λ)라는 개념을 적용하였으며 이온교환막의 전기 전도도는 습증기 함유도에 따라 선형적으로 변한다고 제안하였다. 이온교환 막 전해질 내부의 습증기 함유도를 결정하는 습증기 구동력은 역확산력(back diffusion)과 전기삼투력(electroosmotic force)이다. 통상 공기극에서 전기화학 반응이 완료되기 때문에 공기극과 연료극의 습증기 농도는 달라지게 되며, 이 농도차가 습증기를 연료극으로 수송하게 하는 확산력이다. 이와는 반대로, 전기화학반응시 양이온이 연료극로부터 이동되면서 물분자를 끌고 가게 되는데 양이온에 의한 물분자 이송력을 전기삼투력(electroosmotic force)이라 부른다. 그리고 양 전극에 압력차가 존재하면 이에 의한 습증기 유동도 존재하지만, 본 연구에서는 두 전극의 압력차는 동일한 것으로 가정하였다. 그러므로, 습증기 수송 모델은 비정상상태에 대해 두 구동력을 중 보존 방정식에 적용하여 유도하였다.⁽⁷⁾

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

식 (1)을 통해 구해진 이온교환막에서의 습증기 농도를 이용해 막의 전기 전도도를 구하기 위해 다음과 같은 상관식을 적용하였다.⁽⁷⁾

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

그리고, 이온교환막의 전기저항(R)은 다음과 같이 구할 수 있다.

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

이온교환막 연료전지의 전기화학반응에서는 연료극 촉매층에서는 수소 분자(H_2)가 수소 이온($2H^+$)과 전자($2e^-$)로 분해되고 공기극 촉매층에서는 수소 이온($2H^+$)와 전자($2e^-$) 및 산소($0.5O_2$)가 반응하여 최종적으로

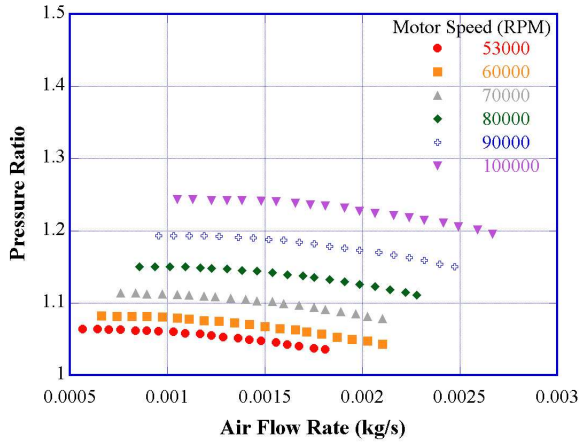


Fig. 3 P-Q curve of turbo-blower

전기에너지와 열을 발생시키면서 수증기를 생산하게 된다. 이러한 촉매층에서의 전기화학반응을 모델링하기 위해 연료극 촉매층에서의 반응 속도는 공기극에 비해 매우 빠르므로 무시하였다. 공기극 촉매층에서의 반응은 Broka 등이 제안한 촉매층의 균집체에서의 전기화학 반응 모델을 적용하였다.⁽⁸⁾

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

식 (4)의 전압강하식에서는 공기극의 가스확산층으로부터 촉매층으로의 농도 확산에 의한 물질 전달저항 및 반응유효도 감소로 인해 발생하는 반응저항을 포함하고 있으므로, 이를 통해 전기화학반응 시 발생하는 전압강하를 예측할 수 있다. 여기에 식 (1)~(3)을 통해 구해진 이온교환 전해질 막에서의 저항 손실을 고려하면, 연료전지 스택으로부터 생산되는 순 전압을 구할 수 있다.

$$V_{Nern} = -\frac{\Delta g_f^\circ}{2F} + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{a_{H_2} a_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{a_{H_2O}} \right) \quad (5)$$

$$V_{FC} = V_{Nern} - \eta_{z=0} - JR_{mem} \quad (6)$$

셀 간의 전압 변동을 무시하면 전력 생산량은,

$$W_{cv} = n_{FC} V_{FC} J \quad (7)$$

연료전지는 전기화학반응을 통해 전기를 생산함과 동시에 열을 발생시키기 때문에, 발생한 열을 효과적으로 제거시켜 주어야 원하는 성능을 낼 수 있다. 본 연구는 연료전지 시스템의 동적 부하변화에 대한 열관리를 위한 것으로 발생하는 열에 대한 동적 거동을 모사하기 위해 Fig. 2의

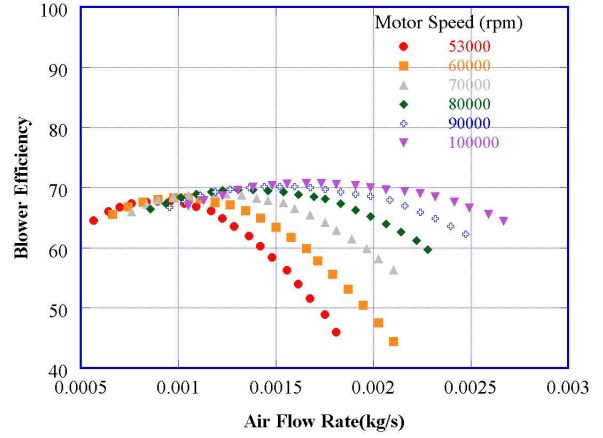


Fig. 4 Efficiency curve of turbo-blower

제어체적을 적용하였으며 연료전지 스택의 온도는 전기 화학반응에 의한 발열과 가스 및 냉각수로의 방열의 균형을 통해 결정했다.

$$\rho_c V \frac{dT}{dt} = \sum_{in} \dot{m} h_i - \sum_{out} \dot{m} h_i - W_{cv} - Q_c - Q_g \quad (8)$$

여기서 Q_c 와 Q_g 는 각각 냉각수와 가스에 의해 배출되는 열량을 나타내며 온도 T 는 연료전지 스택의 온도이다. 식 (7)의 PEMFC에서 가스로 전달되는 열량은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_{g,o} = T_{FC} + (T_{g,in} - T_{FC}) \exp \left(- \frac{h A_g}{\sum \dot{m}_{g,i} c_{p,g}} \right) \quad (9)$$

$$Q_g = \sum \dot{m}_i \bar{c}_{p,g} (T_{g,o} - T_{g,in}) \quad (10)$$

연료전지에서 발생된 열은 각 단위전지를 통과하는 냉각수로 방출되므로, 냉각수 온도는 전지와 열교환에 의해 결정되고 방출 열 및 열전달량도 계산해 구할 수 있다.

$$T_{c,o} = T_{FC} + (T_{c,in} - T_{FC}) \exp \left(- \frac{h A_c}{\sum \dot{m}_c c_{p,c}} \right) \quad (11)$$

$$Q_c = \dot{m}_c \bar{c}_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,in}) \quad (12)$$

식 (19)와 식 (21)의 열전달 계수 h 는 열전달 교제에서 찾을 수 있다.⁽¹¹⁾ 공기나 연료의 경우 반응과 연결되어 있기 때문에 대부분 층류 유동 영역에서 운전되는데 비해, 냉각수는 난류일 수 있으므로, 난류 운전시는 Gnielinski 상관식을 사용하여 열전달 계수를 결정하였다.⁽¹¹⁾

2.3 공기공급장치

본 연구에서는 공기극으로 공기를 공급하기 위해 한국기계연구원에서 가정용 연료전지 시스템용으로 개발한 터보 블로워(Turbo Blower)를 사용하였다. 터보 블로워의 성능 곡선과 효율은 Fig.

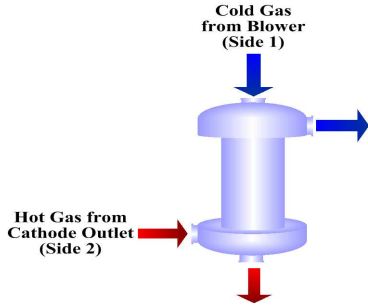


Fig. 5 Simplified diagram of membrane humidifier

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.⁽⁹⁾ 터보 블로워는 연료전지 스택에 공기를 공급해 주지만, 또한 구동 동력을 공급 받는다.

통상, 스택으로 유입되는 공기량을 반응량 이상으로 증가시킬수록 발전되는 전압이 상승되지만, 블로워가 사용하는 기생 전력도 증가하기 때문에, 운전 조건을 효율적으로 제어 시킬 필요가 있다. 본 연구에서는 이론공기량의 2배를 블로워 운전을 위한 기준조건으로 정의하고 운전영역에서 블로워가 이론공기량(stoichiometry flowrate)의 2배에 해당하는 공기량을 공급할 수 있도록 제어하였다.⁽¹⁰⁾ 한편, 전력부하가 매우 작아서 요구 공기 유량이 매우 작은 경우에는 요구유량의 2배 조건을 무시하고 블로워의 안정성을 확보하기 위한 최소 속도로 운전할 수 있도록 제어하였다.

가습기는 연료전지 스택으로 들어가는 공기와 연료에 적절한 습분을 제공하여, 전기 화학반응을 활성화 시키는데 기여한다. 본 연구에서는 Fig. 5와 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, 상용 막가습기의 경우, 형상은 Shell and tube형 이지만, 내부의 Baffle등이 없으므로, 대향류형 열교환기로 모델링 하였다.⁽¹²⁾

Fig. 6은 모델결과를 실험과 비교한 것으로 오차 값은 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 이며, 블로워로부터 공급되는 건공기의 온도는 통상 313.15K (40°C)이하로 이 범위

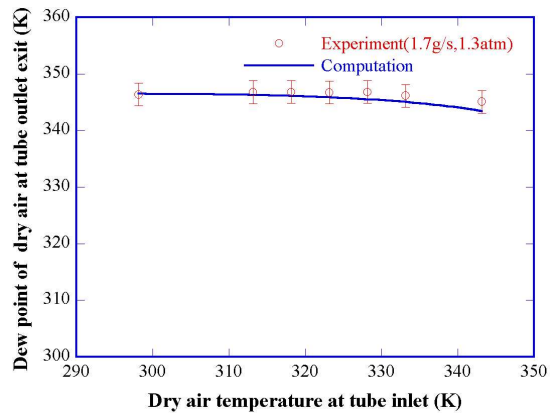


Fig. 6 Validation of humidifier model with experimental data⁽¹²⁾

에서는 실험결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

2.4 냉각계통 모델링

냉각 계통은 전기화학반응을 통해 연료전지에서 발생한 열을 회수하는 1차측 냉각회로와 가정용 급탕조를 승온하는 2차측 냉각회로로 나누어지며, 두 냉각회로 사이에 열교환기가 에너지 전달을 담당한다. 1차측 냉각회로는 연료전지의 운전온도를 제어해야 하므로, 연료전지 출구단에서의 냉각수 온도를 검출하여 연료전지 온도가 기준 값과 같은 값을 유지할 수 있도록 펌프 유량을 제어하며 PI제어로직을 적용하였다. 2차측 냉각회로의 경우 급탕조의 승온을 담당하지만 보다 중요한 것은 1차측에서 전달된 열을 효과적으로 방출시켜야 한다는 것이다. 그러므로 2차측 펌프는 충분한 유량이 정격으로 흐를 수 있도록 운전로직을 작성하였다. 여기서 2차측 냉각수 유량은 급탕조 온도와 직접적으로 연결되며, 급탕조 온도를 연료전지 온도에 근접시킬수록 2차측 냉각 펌프의 유량은 증가하게 된다. 그러므로 냉각 펌프 용량과 급탕조 온도를 동시에 고려해서 펌프 용량을 결정하였다.

급탕조 내의 냉각수 유량모델은 질량 보존의 법칙으로부터 유도하였으며, 급탕조는 연료전지와 가정용의 급수를 위해 입구 및 출구를 각 2조씩을 갖추고 있으며 1조는 연료전지와의 열교환을 위해 사용되고 1조는 가정용의 급수를 위해 사용된다. 또 온도 상한선을 정하여 급탕조의 온도가 제한선 이상으로 올라가는 경우, 별도의

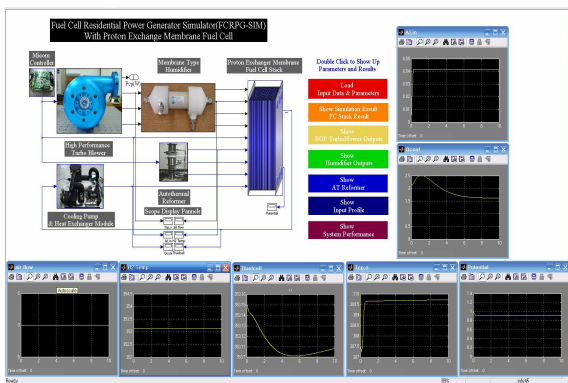


Fig. 7 Integration of the lumped transient fuel cell stack model with the thermal management system

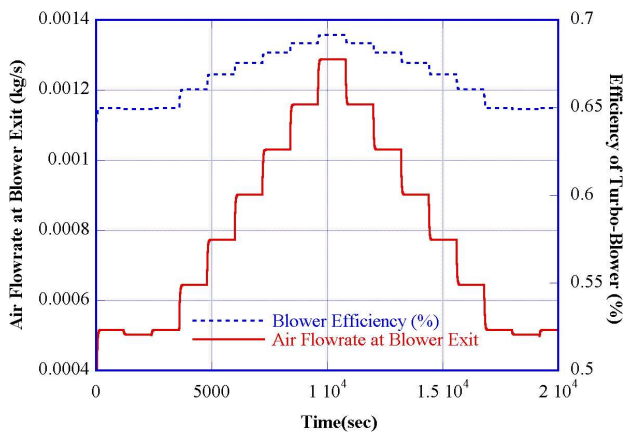


Fig. 8 Blow Supplied Air Flow Rate and Efficiency of Turbo-Blower Regarding Input Load Profile

솔레노이드 밸브를 이용해 외부 급수를 받아들임과 동시에 필요이상의 냉각수는 배수가 가능하도록 모델링하였다. 급탕수의 온도조절을 위해서는 급탕수 유량 및 온도 신호를 검출하도록 하였으며, 급탕수 온도는 65°C를 기준온도로 설정하고, 만일 온도가 기준 온도 이상으로 상승시 외부 냉각수가 유입되도록 제어하였다. 열교환기 모델은 판형 열교환기를 가정하여 모델링하였으며 주요 변수는 Incropera 등에서 제시한 값을 사용하였다.⁽⁸⁾ 그리고, 냉각계통의 동특성은 냉각수 구동 펌프의 모터 동특성만을 고려하였다.

2.5 시스템 통합 및 운전 전략

Fig. 7은 Matlab/Simulink[®]를 이용해 구성한 시스템 모델을 보여준다. 냉각계통은 연료전지 스택의 온도를 유지시켜 주는 역할을 하는데, 온도 유지를 위해서는 기준 온도가 필요하다. Nafion[®] 막의 경우 충분한 습증기가 공급된다고 하더라도 353.15K (80°C) 이하에서 작동해야 내구성을 보장받는다. 그러므로 냉각펌프는 연료전

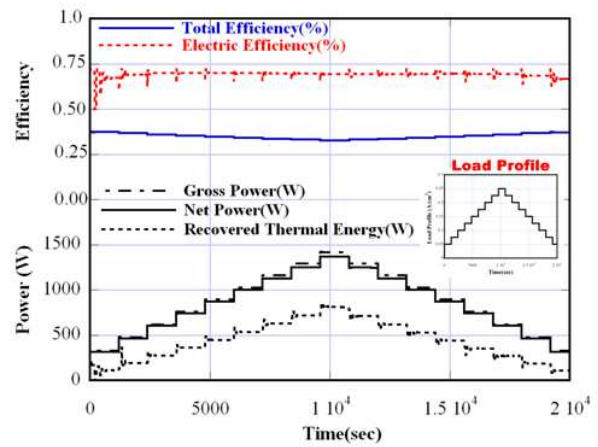


Fig. 9 Stack response regarding increasing and decreasing current densities

지출구에서의 냉각수 온도를 검출하여 그 온도를 353.15K로 유지하기 위해 냉각수 유량을 제어하도록 설계하였다.

그리고 Yu⁽¹³⁾에 따르면, 연료전지 내부의 온도차가 커지면, 국부적으로 과열되는 부분과 건조해지는 부분이 전지 내부에 존재하며, 이러한 국부과열이 운전시에 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 스택 온도를 유지시키면서, 냉각계통 입출구에서의 온도차는 적어야하고, 기생전력의 손실 또한 최소화 되도록 펌프가 운전되어야 한다는 구속 조건을 설정하였다.

3. 결과 및 토론

3.1 스택 응답 특성

스택 응답을 확인하기 위해, Fig. 8과 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 제외

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 ($^{\circ}C$)
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_{dry})	2.0 (kg/m^3)

한 스택 생산 전력을 의미한다. 부하가 증가함에 따라 시스템의 BOP(Balance of Plant)에 의해 소비되는 기생전력이 증가함을 확인 할 수 있다. Fig. 8에서는 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. 전기 효율(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 단순화시키기 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%($v_{air} = 2$)로 하였다⁽⁹⁾. 본 연구에서 사용된 터보블로워의 경우, 당 연구소에서 개발한 모델로, 가정용 연료전지의 운전점을 설계점으로 설계하였기 때문에, Fig. 9에서 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 온도 또한 승온되게 되는데, Fig. 10에서는 이러한 경향을 보여주고 있다. Fig. 10에서 보여지듯이, 공급 유량이 증가할수록 연료전지 스택으로 공급하는 유체의 습도와 온도가 낮아지는 것을 볼 수 있다. 이는 유속이 증가함에 따라, 막가습기의 습공기에서 건공기로의 물질전달량이 감

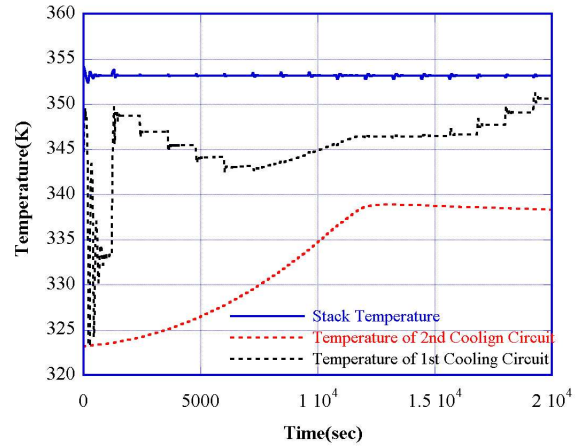


Fig. 10 Temperature response of cooling circuits

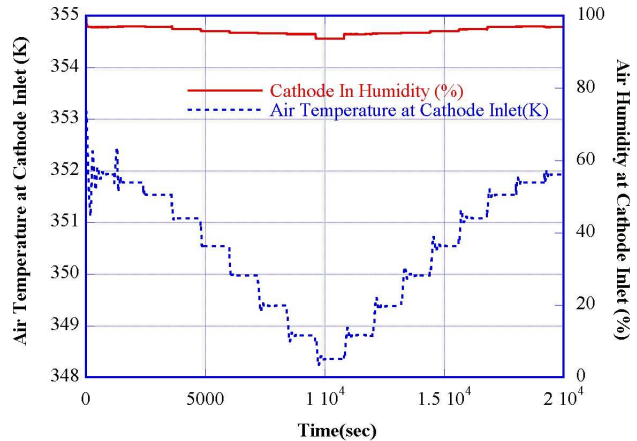


Fig. 11 Air humidity and temperature at cathode inlet

소하고, 열전달량 또한 감소하면서 생기는 현상이다. Fig.10에 보여지는 공기유량의 동특성은 연료전지 스택으로부터 가습기로 공급되는 습공기의 동특성에 의한 것으로, 블로워에서 공급되는 건공기가 연료전지로부터 오는 습공기에 의해 가습되기 때문이다.

3.3 냉각계통 응답 특성

가정용 연료전지 시스템에서 냉각시스템 운영의 목적은 연료전지 스택의 온도를 일정하게 유지하면서, 급탕조의 온도를 승온시키는데 있다. Fig. 11에는 연료전지 스택 온도와 1차측 및 2차측에서의 냉각수 온도를 보여주고 있다. 1차측의 온도는 운전 초기 저부하에서는 운전 특성이 다소 불안정한 모습을 보여주고 있지만, 운전이 안정화 되면, 후기의 저부하에서는 안정된 제어가 이루어짐을 알 수 있다. 2차측 냉각수 온도의 경우, 본 연구에서는 65 $^{\circ}C$ 를 제어온도로 설정하였기 때문에, 초기에는 설정온도를 달성하기 위해서 지속적으로 승온을 하게 되며, 승온 이후

에는 외부 급수를 통해 온도를 제어하도록 되어 있다. Fig. 11에서 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 증가함에 따라 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 주요사업의 재정 지원으로 이루어진 결과로 후원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Won, J., Hwang, K., Lewald, L., Aicher, T., Jörissen, L. and Kim, K., 2009, "Mid- and Long Term Strategic Road-Map For Development Of Green Energy Industry," pp. 9-34
- (2) Yu, S., Kim, H.S., Lee, Y.D. and Ahn, K. Y., 2008, "A Dynamic model of PEMFC System For The Simulation Of Residential Power Generation," Proceedings of FuelCell2008.
- (3) König, P., Weber, A., Lewald, L., Aicher, T., Jörissen, L., Ivers-Tiffée, E., Szolak, R., Brendel, M. and Kaczerowski, J., 2005, "Testing and Model-Aided Analysis of a 2 kWel PEMFC CHP-System," *Journal of Power Sources*, Vol. 145, pp. 327-335.
- (4) Selamoğullari, U. S., Willemain, T. R. and Torrey, D. A., 2007, "A System Approach for Sizing a Stand-alone Residential PEMFC Power System," *Journal of Power Sources*, Vol. 171, pp. 802-810.
- (5) Sharkh, M., Rahman, A., Alam, M., Byrne, P., Sakla, A. and Thomas, T., "A Dynamic Model For A Stand-Alone PEM Fuel Cell Power Plant For Residential Applications," *Journal Power Sources*, Vol. 138, pp. 199-204
- (6) Uzunoglu, M., Onar, O. and Alam, M., "Dynamic Behavior of PEM FCPPs Under Various Load Conditions And Voltage Stability Analysis For Stand-Alone Residential Applications," *Journal of Power Sources*, Vol. 168, pp. 240-250.
- (7) Springer, T. E., Zawodzinski, T. A. and Gottesfeld, S., "Polymer Electrolyte Fuel Cell Model," *Journal of Electrochemical Society*, Vol. 138, No. 8, 1991, pp. 2334-2342.
- (8) Broka, K. and Ekdunge, P., "Modeling the PEM Fuel Cell Cathode," *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol. 27, 1997, pp. 281-289.
- (9) Jay T. Pukrushpan, Anna G. Stefanopoulou, and Huei Peng, 2004, Control of Fuel Cell Power Systems, Springer, London, First Edition, pp. 15-20
- (10) Yu, S., 2006, "Thermal Modeling of the Proton Exchange Membrane Fuel Cell," Ph.D. Dissertation, University of Michigan.
- (11) Incropera, F.P. and DeWitt, D.P., 1996, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, JOHN WILEY & SONS, New York, Fourth Edition, pp. 420-450.
- (12) Ahluwalia, R., K., Wang, X., Doss, E., D. and Kumar, R., 2005, "Fuel Cell System Analysis," USDOE Progress Report, VII.H.7, pp. 1014-1018
- (13) Yu, S., Lee, Y.D., Bae, H., Hwang, J. and Ahn, K. Y., 2009, "Mass and Heat Transfer Analysis Of Membrane Humidifier With A Simple Lumped Mass Model," *Trans. of the KSME*, Section B, Vol. 33, No. 8, pp. 596-603.