

차량용 PEMFC 동적 모델을 이용한 시스템 부하 응답 특성

한재영¹⁾ · 김성수²⁾ · 유상석^{*3)}

충남대학교 대학원 기계공학과¹⁾ · 충남대학교 메카트로닉스공학과²⁾ · 충남대학교 기계공학과³⁾

System Response of Automotive PEMFC with Dynamic Modeling under Load Change

Jaeyoung Han¹⁾ · Sungsoo Kim²⁾ · Sangseok Yu^{*3)}

¹⁾Mechanical Engineering, Graduate School, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

²⁾Mechatronics Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

³⁾Mechanical Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

(Received 19 November 2011 / Revised 9 July 2012 / Accepted 1 August 2012)

Abstract : The stringent emission regulation and future shortage of fossil fuel motivate the research of alternative powertrain. In this study, a system of proton exchange membrane fuel cell has been modeled to analyze the performance of the fuel cell system for automotive application. The model is composed of the fuel cell stack, air compressor, humidifier, and intercooler, and hydrogen supply which are implemented by using the Matlab/Simulink®. Fuel cell stack model is empirical model but the water transport model is included so that the system performance can be predicted over various humidity conditions. On the other hand, the model of air compressor is composed of motor, static air compressor, and some manifolds so that the motor dynamics and manifold dynamics can be investigated. Since the model is concentrated on the strategic operation of compressor to reduce the power consumption, other balance of components (BOP) are modeled to be static components. Since the air compressor model is empirical model which is based on curve fitting of experiments, the stack model is validated with the commercial software and the experiments. The dynamics of air compressor is investigated over unit change of system load. The results shows that the power consumption of air compressor is about 12% to 25% of stack gross power and dynamic response should be reduced to optimize the system operation.

Key words : PEMFC system(Proton Exchange Membrane Fuel Cell system, 고분자 막전해질 연료전지 시스템), Air supply(공기 공급계), Hydrogen supply(수소 공급계), Compressor(압축기), Water transport model(습증기 수송 모델)

Nomenclature

A	: area (cm ²)	p	: power (W)
D	: diffusivity (cm ² /s)	t	: thickness (m)
F	: faraday's constant (C/mole)	T	: temperature (K)
J	: current density (A/cm ²)	V	: electric potential (V)
h	: heat transfer coefficient (W/m ² s)	λ	: water content
m	: mass flow rate (kg/s)	R	: universal gas constant (J/molK)

Subscripts

FC : fuel cell

*Corresponding author, E-mail: sangseok@cnu.ac.kr

- g : gas
- in : inlet
- N₂ : nitrogen
- H₂ : hydrogen
- O₂ : oxygen
- W : water vapor
- act : active area
- o : outlet
- mem : membrane

1. 서론

화석연료의 연소를 통해 동력을 발생시키는 기존 차량용 엔진은 유해 배기가스 배출로 인해 대기 오염의 주요 원인으로 지적되고 있다. 또한, 최근 화석연료의 부족량이 위협받으면서 동 연료를 사용하는 동력기관에 대한 대체기관의 필요성이 지적되고 있다. 연료전지 차량은 신 연료와 초저공해라는 전 세계적 요구 조건을 만족하며 현재 활발한 연구 개발이 진행 중이다.¹⁾

이에 따라 차량용에 연료전지를 적용하기 위해서는 빠른 시동 특성, 고효율, 저공해, 양산성 등을 갖출 수 있어야 하는데, 이온 교환막 연료전지는 이러한 특성을 가지고 있는 전지로 인식되고 있다. 이러한 이온교환막 연료전지 시스템을 차량에 적용하기 위해서는 스택 등 다양한 부품에 대한 연구와 더불어, 시스템 부하 응답에 따른 운전 특성에 대한 이해가 필요하다.

Jay 등은 이러한 시스템의 동특성을 이해하기 위해 모델을 개발하여 다양한 동적 거동에 따른 시스템 응답 특성을 조사하였다. 또, 공기 압축기의 제어를 최적화하기 위한 제어기법에 대하여도 언급하였다.²⁾ 또한 Asl³⁾ 등도 동특성 모델을 개발 하였으며 온도 변화에 따른 전압 변화와 가스의 습도 변화에 따른 전류와 전압의 변화도 조사 하였다. 또한 시간에 따른 공기극과 연료극 채널의 압력 변화도 조사 하였다. 연료전지는 기존 동력 기관 보다 온도 제어가 상대적으로 중요하며, Amphlett⁴⁾ 등은 연료전지에 열 모델을 추가하여 온도에 따른 전압 특성 변화를 관찰하였다.

본 연구에서는 Matlab/SIMULINK[®]를 이용하여

차량용 고분자전해질 연료전지 시스템의 동특성을 모사할 수 있는 모델을 개발하고자 한다. 이온 교환막 연료전지는 막의 습증기 함유도에 따라 성능에 크게 영향을 받기 때문에 이를 모사하는 것이 중요하여 함유도에 따른 막의 거동을 모사할 수 있는 습증기 수송 모델을 포함 하였으며 부하 변화의 온도 제어에 따른 압축기 응답 특성과 시스템 출력 변화를 확인하고자 한다. 모델의 동특성은 다양한 부분에서 중요하지만, 특히, 공기 압축기의 동특성에 따라 시스템 응답 특성이 크게 달라질 수 있기 때문에, 이에 대한 동적 거동 모사 모델을 개발하고자 하며, 기타 구성품 모델들은 정적 거동 모델을 적용하고자 한다. 그리고 이 모델의 신뢰성을 검증하기 위하여 동적 시뮬레이션 결과들을 실험 데이터와 비교한 후 개발된 모델의 동특성에 대한 기초 연구를 수행하고자 한다.

2. 이온교환막 연료전지 시스템 모델

일반적인 연료전지 시스템은 스택을 포함하는 다양한 구성품으로 구성되며, 크게는 공기공급계, 수소공급계, 열관리계, 스택으로 나누어진다. 연료전지는 구성 방법에 따라서 시스템의 효율, 주기기 및 BOP의 사양 및 운전전략이 상이 하게 된다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 1의 개발 절차에 따라 시스템 모델을 개발 하였다. 즉, 에너지 보존 방정식과 종보존 방정식 등을 이용하여서 각각의 모듈들을 개발 하였으며 개발한 모듈들을 SIMULINK[®]에서 통합하여 최종적으로 시스템의 동적 거동 응답을 모사할 수 있는 연료전지 시스템 모델을 개발 하였다.

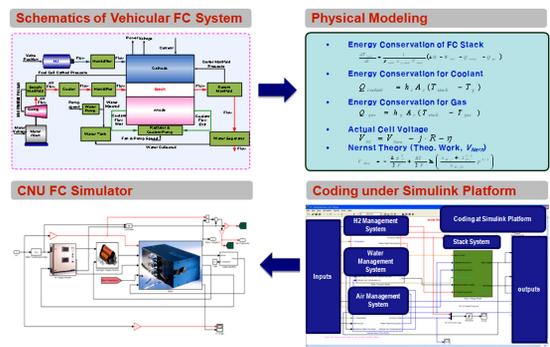


Fig. 1 Modeling process with system block diagram

Table 1 Specification of fuel cell system

Parameter	Value
Fuel cell length (l)	0.196 (m)
Fuel cell width (w)	0.196 (m)
Number of cells in FC stack	381
Membrane thickness (t_{mem})	0.0001257 (m)
Fuel cell temperature (T_{FC})	348.15 (K)
Fuel cell active area	280 (cm ²)
Compressor diameter	0.2286 (m)
Motor electric constant	0.0153 V/(rad/s)
Compressor motor efficiency	98%

연료전지 스택 모델은 전기 화학 반응을 모사하기 위한 균집체에서의 전기화학 반응 모델(Agglomerate structured electrochemical reaction model)과, 막 전해질에서의 습증기 수송을 모사하기 위한 습증기 수송 모델(Water transport model), 그리고 비정상 온도 응답을 모사하는 열전달 모델로 구성되어 있으며, 비정상 상태에서의 압축기의 응답 특성에 초점을 맞추기 때문에 가습량은 필요량을 공급해 줄 수 있다고 가정 하였으며 공기극과 연료극의 유량 및 압력은 압축기에 의해서 결정 되어 진다. Table 1에서는 연료전지 스택 사양을 찾을 수 있다.

2.1 연료전지 스택 모델

2.1.1 공기극 채널

공기극 채널은 유동중에 전기 화학 반응에 생성된 증기가 포함되며, 질량 보존 법칙과 공기의 열역학적, 물리적인 물성치들을 사용하여 개발하였다. 또, 모든 가스는 이상기체이며, 공기극 출입구의 온도는 스택의 온도와 동일하고 공기극을 빠져 나가는 온도, 압력, 습도 등은 공기극 채널 안쪽과 같다고 가정하였다. 또한, 상대습도가 100% 이상일때는 수증기는 액체 형태로 응축되며, 100% 이하 일때는 증발한다고 가정하였다.

공기극 채널에 대한 산소와 질소 및 수증기의 유량은 다음과 같이 표현된다.⁵⁾

$$\frac{dm_{N_2,ca}}{dt} = W_{N_2,ca,in} - W_{N_2,ca,out} \quad (1)$$

$$\frac{dm_{O_2,ca}}{dt} = W_{O_2,ca,in} - W_{O_2,ca,out} - W_{O_2,reacted} \quad (2)$$

$$\frac{dm_{w,ca}}{dt} = W_{v,ca,in} - W_{v,ca,out} + W_{v,ca,gen} + W_{v,membr} \quad (3)$$

2.1.2 연료극 채널

연료극 채널 모델도 공기극과 상당히 유사하며, 연료극 채널에서는 입구를 통해서 수소가스와 수증기가 함께 공급이 되고, 멤브레인을 통해서 전기를 발생시키는 수소와 물이 공기극 채널 쪽으로 이동한다. 나머지 수소와 수증기는 출구를 통해 나가게 된다.

연료극 채널에 대한 수소와 수증기 유량은 다음 식과 같이 표현된다.⁵⁾

$$\frac{dm_{H_2,an}}{dt} = W_{H_2,an,in} - W_{H_2,an,out} - W_{H_2,reacted} \quad (4)$$

$$\frac{dm_{w,an}}{dt} = W_{v,an,in} - W_{v,an,out} - W_{v,membr} - W_{l,an,out} \quad (5)$$

여기서, $W_{v,membr}$ 은 멤브레인을 통해 이동하는 물의 양이며 유효전송률, α 에 의해서 표현이 되고 2.1.4에서 더 자세히 설명되어질 것이다.

2.1.3 스택의 동특성 모델링

연료전지가 가지는 최대전압을 기전력(EMF)이라 부른다. 또한 화학 평형을 이루게 되면서 발생하는 손실을 고려하면 이를 이론적으로 발생할 수 있는 최대 전압이라고 하며 스택의 실제 전압은 이러한 기전력과 각각의 손실들을 고려하여 정의 할 수 있다.

$$E = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} (T_{fc} - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} T_{fc} \left[\ln(p_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(p_{O_2}) \right] \quad (6)$$

실제 측정되는 전압은 이론적 최대값에서 각각의 손실들을 고려하여 정의 할 수 있으며 스택 모델은 본 연구실에서 기 개발된 스택 모델을 이용하였다.⁶⁾

$$V_{FC} = E - \eta_{act} - \eta_{ohmic} - \eta_{con} \quad (7)$$

2.1.4 습증기 수송 모델

Nafion[®] 계열 막 전해질은 이온전도도가 막내에서의 습증기 농도에 매우 민감하다. 막에서의 습증

기 농도는 전기삼투현상(Electroosmotic force)과 역확산력(Back diffusion)의 농도 평형에 의해 결정된다. 이온교환 막 전해질의 습증기 수송 특성과 전기전도도의 상관관계를 나타내기 위해서 Springer 등⁷⁾이 제안한 습증기 함유도(Water content, λ)를 이용하여 모델링을 하였다.

$$\frac{\rho_d}{M_m} D_\lambda \frac{\partial \lambda}{\partial z} - 2n_d \frac{J}{2F} \lambda = \alpha \frac{J}{2F} \quad (8)$$

식 (8)에서는 막에서의 수분의 농도변화를 선형으로 가정하였으며, 따라서 이온교환막에서의 수분의 확산계수, 유효전송률(Net water flux), 막의 전기 저항은 Springer 등이 제안한 식으로부터 구할 수 있다.⁵⁾

습증기 수송 모델의 경우 연료극과 공기극 채널에 유입되는 수증기 농도가 중요하다. 따라서 가스에 포함된 수증기의 분압은 주어진 온도에서의 증기의 포화압력을 알면 계산 할 수 있다.

Dynamic Heat Production and Rejection Model

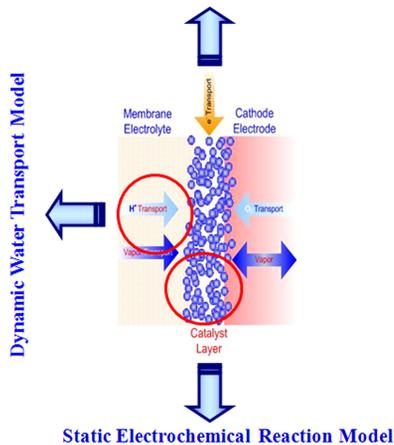


Fig. 2 Water Transport phenomenon inside the Fuel Cell MEA

$$\log_{10} p_{sat} = -2.1794 + 0.02953 T - 9.1837 \times 10^{-5} T^2 + 1.4454 \times 10^{-7} T^3 \quad (9)$$

2.2 압축기 모델

공기 공급 계통은 압축기를 사용하였으며 블로워

대비 소모 동력은 많지만, 필요 요구 유량을 충족시킬 뿐 아니라 공급 압력이 블로워 보다 높아 막에서의 반응 비율을 높이는 장점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 외부 온도의 변화와 다양한 운전 상태 변화 해석에 용이한 Jensen & Kristensen 방법⁸⁾을 사용하여 압축기를 구성 하였다. 또한, 압축기로부터 나오는 공기의 유량은 다음과 같은 상관식을 사용하여 결정하였다.

$$W_{cr} = \Phi \rho_a \frac{\pi}{4} d_c^2 U_c \quad (10)$$

2.3 가슴기 모델

공기는 스택으로 들어가기 전에 막의 탈수를 막기 위해서 요구되는 상대습도로 가슴시켜 줄 가슴기 모델이 필요하게 되며 이러한 가슴기 모델은 분사되어진 물에 의한 유량과 압력변화를 결정한다. 이러한 가슴기 모델은 분사식 가슴기 모델을 적용하였으며 분사되어진 물은 수증기의 형태를 가진다고 가정하였다. 따라서 다음과 같이 분사되어진 수증기의 유량은 쿨러에서 나오는 유량과 요구되어지는 상대습도까지 필요한 수증기 유량의 관계에 의해서 계산된다.

$$\omega_{v,inj} = \frac{M_v}{M_a} \frac{\phi_{des} p_{sat}(T_d)}{p_{a,d}} \omega_{a,d} - \omega_{v,d} \quad (11)$$

2.4 냉각계통 단순 모델

연료전지는 전기 화학반응을 통해 전기를 생산함과 동시에 열을 발생시키기 때문에 발생된 열을 효과적으로 제거해 주는 것이 연료전지의 성능과 내구성 확보에 중요하다. 연료전지 스택의 온도는 전기 화학반응에 의한 발열과 가스 및 냉각수로의 방열의 균형을 통해 결정하였으며, Table 2에서 냉각수 유로의 사양을 표시하였다.⁹⁾

$$\rho C_p V \frac{dT}{dt} = \sum_i \dot{m} h_i - \sum_{out} \dot{m} h_i - W_{cv} - Q_c - Q_{g,A} - Q_{g,C} \quad (12)$$

여기서 Q_c , Q_{ga} , Q_{gc} 는 각각 냉각수, 연료극 가스, 공기극 가스에 배출되는 열량이며 다음과 같이 각각 나타낼 수 있다.

Table 2 Specification of coolant channel

Parameter	Value
Depth of coolant channel (m)	0.001 (m)
Width of coolant channel (m)	0.001 (m)
Number of channel	10

$$\text{Anode} : Q_{g,A} = \sum \dot{m}_i C_{p,gA} (T_{gA,out} - T_{gA,in}) \quad (13)$$

$$\text{Cathode} : Q_{g,C} = \sum \dot{m}_i C_{p,gC} (T_{gC,out} - T_{gC,in}) \quad (14)$$

$$\text{Coolant} : Q_C = \sum \dot{m}_i C_{p,g} (T_{g,o} - T_{g,i,n}) \quad (15)$$

연료전지에서 발생된 열은 각 단위전지를 통과하는 냉각수로 방출 되므로, 냉각수 온도는 전지와 열 교환에 의해 결정된다. 공기극과 연료극은 층류 영역에서의 계산식을 사용하였으며 냉각수는 층류 계산은 양극 계산과 동일식을, 그리고 난류운전시는 Gnielinski¹⁰⁾ 상관 식을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 부하 운전에 따른 압축기 유량 변화

연료전지의 공기 공급을 위해 원심형 공기 압축기를 이용 하였으며, 본 연구에서는 부하 변화에 따른 압축기 응답 특성을 확인하였다. Fig. 3에는 연료전지 운전 시 부하 변화에 따른 압축기 토출 압력과 토출 유량을 보여주고 있다. 압축기 유량은 반응 요구 유량의 2배를 공급해야 한다는 지령과, 고효율 구간에서 운전이 진행되어야 한다는 지령을 압축기 모터에 부과하고, 모터가 각 부하에 따라 응답으로

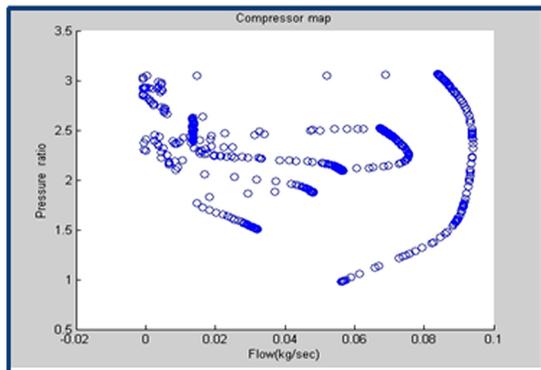


Fig. 3 Mass flow rate versus pressure rise of compressor under load changes

보이는 것으로 모델링 하였다. 압축기 응답의 동적 거동은 모터의 동적 모델만을 고려하였으며, 부하 변화에 따른 Fig. 3의 궤적을 이용해 모터 운전 전략을 수립할 수 있다. 즉, Fig. 3에서는 압축기 운전 영역이 일부는 Surge 영역과 Choking 영역에 걸쳐 있는 것을 볼 수 있으며, 이를 개선하기 위해서는 노즐 통과 유량 계수를 변경해야 한다는 것을 보여주고 있다.

3.2 부하 운전에 따른 시스템 응답

차량용 연료전지 시스템은 차량 주행 중에 잦은 부하 변동에 대한 스택의 운전 온도를 적절히 유지해 주도록, 냉각 계통의 적절한 제어가 필요하며, 이러한 제어 전략에 따른 시스템 응답 특성을 이해할 필요가 있다. 즉 냉각 계통 구성 성분이 운전 전략에서 지시하는 지령을 적절히 수행하게 될 때, 스택이 적절한 성능을 낼 수 있다. 본 연구에서는 이러한 냉각 계통의 운전 전략에 따른 시스템 구성품의 동적 거동 및 응답 특성을 확인하였다. 시스템 시뮬레이션에서는 각각 부하(10%~100%) 변화에 따른 동적 거동의 핵심 응답 변수를 전압 변화 및 스택 출력, 냉각팬, 펌프 모터 응답, 그리고 라디에이터 입 출구 단의 온도 등으로 선정하였다.

3.2.1 부하 증가 시 주요 구성품 응답 특성

이온 교환막 연료전지는 충분한 가습이 보장되는 범위에서는 온도가 높을수록 출력이 증대되는 것이 사실이나, 이온 교환막은 통상 353.15K 이하로 운전되어야 내구성이 보장된다. 여기에 부하 응답시 냉각계통의 응답 지연을 고려하여, 연료전지 스택의 작동온도를 348.15K로 유지하도록 각 구성요소에 지령을 내렸다. 스택 운전 온도는 출력 변화에 따른 방열량과 냉각계통의 방열량에 의해 결정되며, 냉각 계통의 냉각 팬은 스택 출구단에서의 냉각수 온도를 감지하여, 설정온도 인 348.15K 이하로 유지되도록 제어하였다. 또한 냉각수 펌프는 냉각수의 스택 입구 온도를 감지하여, 방열량을 유지하도록 펌프 모터의 PI 제어를 제어하였다.

Fig. 4는 부하 감소 시 상기 변수 특성을 나타낸 것으로서 부하는 100%에서 30% 까지 감소시켰을 경우 스택내의 열 발생량이 감소하여 팬과 펌프의 작동 속도가 부하 변화에 따라 감소하는 것을 확인할

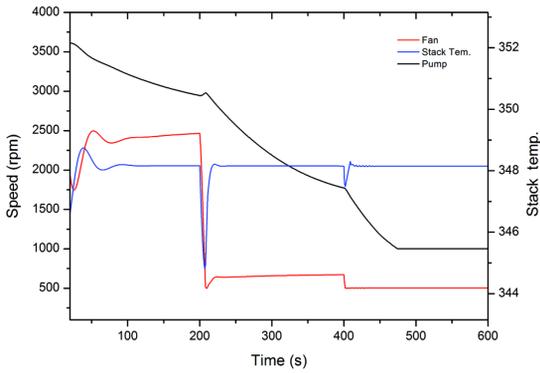


Fig. 4 Stack temperature, fan and pump speed

수 있으며, 스택의 온도는 설정온도인 348.15K으로 유지되는 것을 확인 할 수 있다. 펌프의 유량과 냉각수 온도에 의해 전기화학반응의 열을 배출하도록 하였으므로, 펌프 유량은 방열량을 조절하기 위해 제어되는 것으로 보여진다.

부하를 순간적으로 증가시키게 되는 경우를 통해 실제 스택 및 구성품의 운전 특성을 확인 할 수 있으며, 이러한 운전 조건에 대한 응답 특성을 Fig. 5에서 확인할 수 있다. 즉, 운전 초기 부하에서는 설정된 온도 이하에서 작동하기 때문에 운전특성이 다소 불안정한 모습을 보여 주고 있지만 50초 후 오버슈트 이후 바로 목표 온도에 도달하여 안정화 되어 설정된 운전 온도에서 운전이 이루어지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6은 압축기 또한 전류가 변화함에 따라 그에 따른 공기는 공기 공급 장치에 의해 매니폴드와 가슴기를 거쳐 연료전지 스택으로 들어가 반응을 일으킨다. 자동차의 부하가 증가하면서 그에 상응하는 높은 출력이 요구되고 공기량이 증가하게 된다. 공기량이 증가 하면 초기 반응하는 공기량의 급격한 증가로 인하여 언더슈트가 각각 부하 변화시에 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 7은 전류 증가에 따른 출력의 변화를 비교해 보았다. 전체 출력은 스택 생산 전력에 대한 압축기에 의한 소모 전력을 고려하여 계산하였다. 운전 영역이 100초에서 200초 사이 일 경우 가장 많은 출력이 생산되어 지며, 200초 이상일 경우 출력이 다소 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 이러한 출력의 증가를 위한 제어가 향후 더 필요하다. 또한 부하의 급격한 변화 시 모터의 구동에 의한 관성력 의해

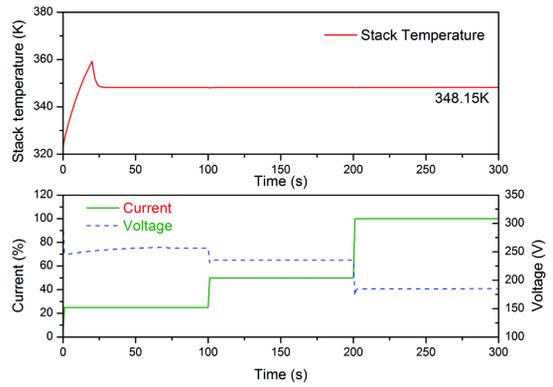


Fig. 5 Stack voltage change for load increase

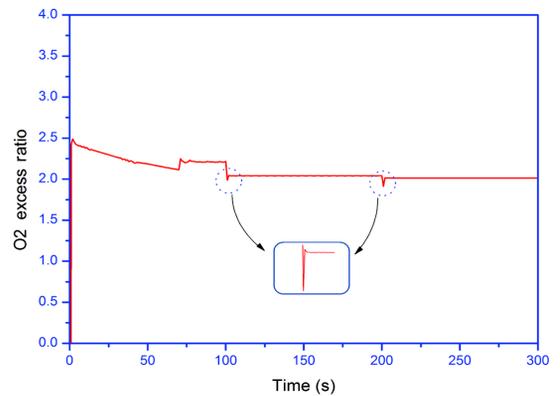


Fig. 6 Excess ratio change for load increase

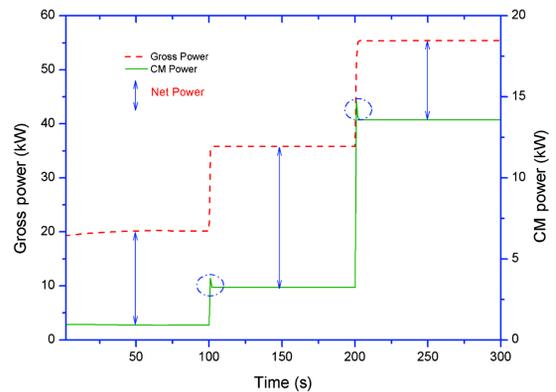


Fig. 7 Power change for load increase

서 오버 슈트가 나타나는 것을 확인 할 수 있었다.

3.2.2 부하 감소 시 구성품 응답 특성

Fig. 8은 전류를 100%, 50%, 30% 로 감소시킬 때 스택의 온도 변화 및 전압 변화를 보여주고 있다. 위

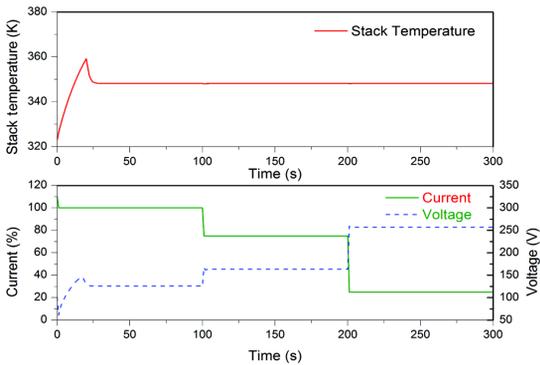


Fig. 8 Stack voltage change for load decrease

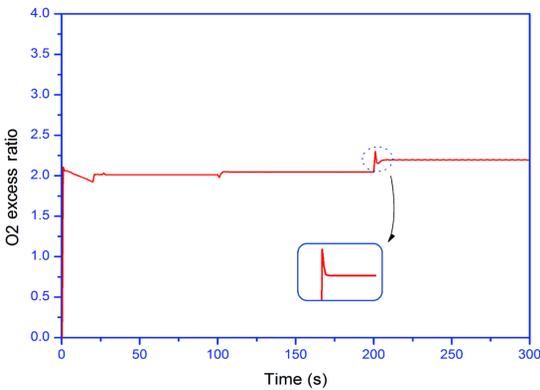


Fig. 9 Excess ratio change for load decrease

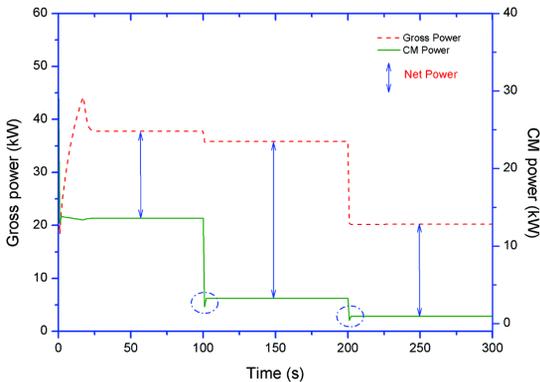


Fig. 10 Power change for load decrease

의 서술한 바와 같이 전류가 변화함에 따라 요구되는 출력의 값이 감소하면서 공급되는 공기의 양이 감소하게 되고 따라서 셀 내부와 전해질 막의 물 함유도가 낮아지게 된다. 전압 역시 운전 초기 설계 온도 이하에서 운전 되어 지기 때문에 불안정한 모습을 보이지만 곧 안정 상태로 운전되어 지는 것을 확

인 할 수 있다. 부하와 전압의 상태가 서로 상이하게 운전 되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 9는 전류 감소에 따른 과잉 공기량의 변화로써 부하 감소 시 반응하는 공기의 양이 급격히 적어 지기 때문에 과잉 공기량이 증가하며 점차 안정화 되어가는 것을 볼 수 있다.

Fig. 10은 전류 감소에 따른 출력 변화로써 역시 100초에서 200초 사이의 영역에서 출력이 최대가 나오는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 부하의 급격한 변화 시 모터의 구동에 의한 관성력에 의해서 언더 슈트가 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 차량용 연료전지 시스템의 특성을 모사할 수 있는 단위 구성품을 선정하고, 각 모델의 동특성을 고려하여 모델을 개발하였으며, 구성품 모델을 통합하여 기초 응답 특성을 확인하였다.

- 1) 차량용 PEMFC 시스템의 과도 응답특성을 파악하기 위하여 스택, 압축기, 냉각 펌프, 냉각 팬 등에 대한 동적 거동을 모사할 수 있는 모델을 개발하였으며, 압축기는 공기 과잉률에 대한 동적 거동, 스택 및 냉각 계통은 온도 동적 거동을 모사할 수 있는 모델이다.
- 2) 압축기는 공기 당량비를 반응량의 두배로 유지하도록 제어되었으며, 냉각 계통은 스택 온도를 348.15K로 유지하도록 팬과 펌프의 운전을 제어하였다.
- 3) 펌프와 팬의 제어 알고리즘을 개발하고 피드백 제어를 적용한 결과, 스택 온도를 부하 변동시에도 일정하게 유지할 수 있음을 확인하였으며 오버슈트와 언더슈트가 발생함에도 온도가 빠른 시간에 온도 지령으로 수렴하도록 하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 산업원천개발기술사업(기반구축사업, 과제번호: 10035226)으로 수행된 결과입니다.

References

- 1) <http://www.doe.gov/>

- 2) J. Pukrushpan, A. G. Stefanopoulou and H. Peng, *Control of Fuel Cell Power Systems*, Springer, London, 1st Edn., pp.15-21, 2004.
- 3) S. M. SharifiAsl, S. Rowshanzamir and M. H. Eikani, "Modelling and Simulation of the Steady-state and Dynamic Behaviour of a PEM Fuel Cell," *Energy*, Vol.35, Issue 4, pp.1633-1646, 2010.
- 4) J. Amphlett, R. Baumert, R. Mann, B. Peppley and P. Roberge, "Performance Modeling of the Ballard Mark IV Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell," *Journal of Electrochemical Society*, Vol.142, No.1, pp.9-15, 1995.
- 5) J. T. Pukrushpan, H. Peng and A. G. Stefanopoulou, "Control-oriented Modeling and Analysis for Automotive Fuel Cell Systems," *Transactions of ASME*, Vol.126, pp.14-25, 2004.
- 6) S. Yu, Y. Lee and K. Ahn, "A System Simulation Model of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Residential Power Generation for Thermal Management Study," *Transactions of ASME*, Vol.34, No.1, pp.19-26, 2010.
- 7) T. Springer, T. Zawodinski and S. Gottesfeld, "Polymer Electrolyte Fuel Cell Model," *Journal of Electrochemical Society*, Vol.138, No.8, pp.2334-2342, 1991.
- 8) J. P. Jensen, A. F. Kristensen, S. C. Sorenson, N. Houbak and E. Hendricks, "Mean Value Modeling of a Small Turbocharged Diesel Engine," SAE 910070, 1991.
- 9) S. Yu and D. Jung, "A Study of Operation Strategy of Cooling Module with Dynamic Fuel Cell System Model for Transportation Application," *Renewable Energy*, Vol.35, pp.2525-2532, 2010.
- 10) F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman and A. S. Lavine, *Fundamental of Heat Transfer*, John Wiley & Sons, New York, 4th Edn., pp.420-450, 1996.