

고분자 전해질 연료전지 특성 해석을 위한 열관리 계통 모델 기반 HILS 기초 연구

윤진원¹ · 한재영¹ · 김경택¹ · 유상석^{2†}

¹충남대학교 대학원, ²충남대학교 기계공학과

Model Based Hardware In the Loop Simulation of Thermal Management System for Performance Analysis of Proton Exchange Membrane Fuel Cell

JINWON YUN¹, JAEYOUNG HAN¹, KYUNGTAEK KIM¹, SANGSEOK YU^{2†}

¹Grad. School of Chungnam National Univ.

²School of Mechanical Engineering, Chungnam National Univ. 79, Daehangno, Yuseong-gu, Daejeon, 30-764, Korea

Abstract >> A thermal management system of a proton exchange membrane fuel cell is taken charge of controlling the temperature of fuel cell stack by rejection of electrochemically reacted heat. Two major components of thermal management system are heat exchanger and pump which determines required amount of heat. Since the performance and durability of PEMFC system is sensitive to the operating temperature and temperature distribution inside the stack, it is necessary to control the thermal management system properly under guidance of operating strategy. The control study of the thermal management system is able to be boosted up with hardware in the loop simulation which directly connects the plant simulation with real hardware components. In this study, the plant simulation of fuel cell stack has been developed and the simulation model is connected with virtual data acquisition system. And HIL simulator has been developed to control the coolant supply system for the study of PEMFC thermal management system. The virtual data acquisition system and the HIL simulator are developed under LabVIEWTM Platform and the Simulation interface toolkit integrates the fuel cell plant simulator with the virtual DAQ display and HIL simulator.

Key words : Thermal management system(열관리 계통), Proton exchange membrane fuel cell(고분자 전해질 연료 전지), Data acquisition system(데이터 수집 시스템), Hardware-in-the-loop simulation(HILS, 하드웨어 기반 모사)

Nomenclature

D : diffusivity, cm²/s

F : faraday's constant, C/mole

J : current density, A/cm²

T : temperature, K

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

h : heat transfer coefficient, W/m²s

λ : water content

[†]Corresponding author : sangseok@cnu.ac.kr

[접수일 : 2011.11.30 수정일 : 2012.8.2 게재확정일 : 2012.8.24]

Copyright © 2012 KHNES

Subscripts

FC : fuel cell

H₂ : hydrogen
 O₂ : oxygen
 act : active area
 A : anode side
 C : cathode side

1. 서 론

고분자전해질 연료전지(proton exchange membrane fuel cell, 이하 PEMFC)는 무공해, 청정, 무소음, 고효율 등의 장점과 우수한 시동성, 제작의 용이성 등의 장점으로 인해 노트북에서부터 가정용 초소형 열병합 발전, 그리고 수송용에 이르기까지 다양한 분야에의 적용을 위한 연구가 진행 중 이다.

PEMFC의 운전 특성 상 막 전해질로의 적절한 수분 공급이 선행되면서, 동시에 공기극에서 발생한 수분의 적절한 배출이 이루어져야 원하는 성능을 낼 수 있다. 고향량 전지의 경우 고분자전해질로의 적절한 수분을 공급하기 위해 외부 가습기를 장착하게 되며, 시스템에 필요한 가습량은 스택 운전 온도에 따라 변화하게 되므로 적절한 물관리가 필수적이며 연동되는 열관리도 중요하다¹⁾. 특히, 열관리는 외부로 효과적으로 방출하는 것도 중요하지만, 단위 전지 내부의 온도분포를 균일하게 하여 국부 가열을 방지함으로써, 전해질 막의 국부 손상을 방지하는 것이 중요하다. 그러므로, 연료전지의 열관리는 연료전지 스택을 최적 운전 온도로 유지시키는 것 뿐 아니라 셀 및 스택에서의 온도분포를 최소화하여 국부적 가열의 가능성을 최소화 하는 방향으로 연구가 진행되고 있다^{2,3)}.

PEMFC의 상용화를 위해서는 열관리와 물관리에 관한 시스템 수준 연구가 필요하다. 즉, 스택이 적절한 조건에서 운전될 수 있도록 공기 공급계, 연료 공급계, 열관리 계통의 운전이 필요하며, 열 및 물관리에 발생할 수 있는 문제를 최소화 하는 것이 필요하다. Jay등⁴⁾은 시스템 동특성 모델을 개발하고 공기공급계통 최적 운전제어 로직을 개발하였으며, 이후 다양한 형태의 시스템 연구가 진행 중에 있다. 가정용 PEMFC 시스템의 경우 작동온도가 60~70°C로 회수

되는 폐열을 적절히 활용하기 위한 시스템 운전 로직이 필요하다.

선진국에서는 초기의 모델기반 시스템 연구와 더불어 하드웨어 개발단계에서 로직 검증에 위한 hardware-in-the-Loop simulation(HILS) 기술을 적용해 개발에 필요한 시간적, 경제적 노력을 줄여 나가고 있다. HILS는 제어 시스템을 개발하는 단계에서 개발된 부 시스템을 하드웨어적으로 인터페이스하고 운용환경 및 제어 알고리즘 등을 실시간으로 모의하여 전체 시스템의 성능을 시험 및 평가하는 기술이다. HILS를 적용한 연료전지 연구는 2006년부터 주로 차량용 연료전지 시스템의 운전 로직을 하드웨어 없이 검증하고 결과를 실제 컨트롤러 설계에 반영하기 위한 연구에서 찾을 수 있다⁵⁻⁸⁾.

본 연구에서는 고분자전해질 연료전지 시스템의 부하 응답에 따른 성능을 모사할 수 있는 하드웨어 연동 성능 해석 시뮬레이터를 개발하고자 한다. 모델이 제어기 개발에 적용될 수 있도록 동특성을 가지는 스택 모델을 적용하며, 가상적으로 개발된 연료전지 플랜트 모델의 결과치를 산업용 제어기에서 계측 및 제어할 수 있도록 프로그램을 개발하며, 가상 시뮬레이터와의 통합 및 연계운전을 구현 한다. 개발된 계측/제어 프로그램을 이용하여 연료전지 열관리 계통의 실제 하드웨어인 솔레노이드 비례제어 밸브와 냉각수 펌프를 실제 운전하고 데이터를 취득하여 운전로직의 작동여부도 확인하고자 한다.

2. 가정용 PEMFC HIL 시뮬레이션

2.1 연료전지 스택 동특성 모델

실제 스택 출력 전압은 공기극에서의 반응 및 황산화 에너지 손실, 막의 저항 손실 등을 고려한 Han등⁹⁾의 모델을 이용 하였다. 또, 전기화학반응 열 및 방열을 모사하기 위해서는 스택 온도 변화를 모사할 수 있어야 하며, PEMFC 스택의 온도는 전기화학반응열과 가스 및 냉각수로의 방열의 균형을 통해 결정 하였다.

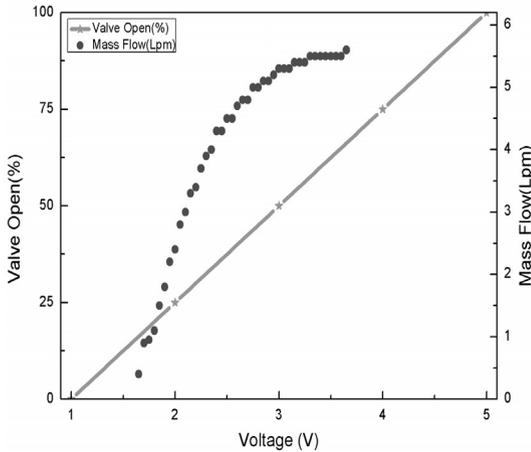


Fig. 1 Experimental results of valve opening ratio and mass flow rate in terms of input voltage

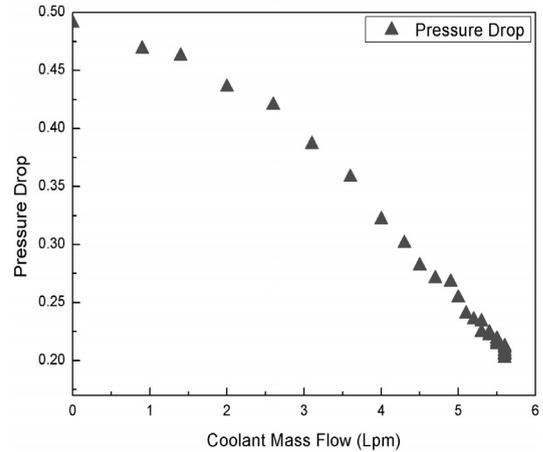


Fig. 2 Experimental result of pump performance curve

$$\rho c_p V \frac{dT}{dt} = \sum_i \dot{m} h_i - W_{cv} - Q_c - Q_{gA} - Q_{gC} \quad (1)$$

여기서 Q_c , Q_{gA} , Q_{gC} 는 각각 냉각수, 연료극 가스, 공기극 가스에 배출되는 열량이다. 스택 발열은 각 단위 전지를 통과하는 냉각수로 방출되므로, 냉각수 온도는 전지와외의 열교환에 의해 결정된다. 연료극과 공기극은 층류영역에서의 계산식을 적용하고, 냉각수는 층류영역에서는 동일하고 난류영역에서는 Gnielinski 상관식을 적용하였다¹⁰⁻¹²⁾.

고분자 전해질 연료전지의 Nafion[®] 계열 막 전해질은 전기전도도가 막 내부의 습증기 농도에 매우 민감하므로, 습증기 농도를 적절히 관리하는 것이 성능에 매우 중요하다. 본 연구에서는 고분자 전해질 전해질의 습증기 수송특성과 전기 전도도의 상관관계를 나타내기 위해 Springer 등이 제안한 습증기 함유도 (Water content, λ)를 적용하여 역확산력(back diffusion)과 전기삼투력(electroosmotic force)의 종 보존 방정식을 유도하였다^{10,11,12)}.

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

2.2 밸브 및 펌프 성능 실험

본 연구에서는 PEMFC 열관리 계통의 운전 로직을 연구하기 위해 실제 냉각 펌프와 비례제어 솔레노이드 밸브를 조합하여, 열관리 계통 능동 제어에 따른 특성을 확인하고자 하였다.

이를 위해 비례제어 솔레노이드 밸브의 입력 전압에 따른 개도 정보가 필요하며, 입력 전압과 개도를 밸브의 질량 유량을 실 계측하였다. 연구에 사용된 펌프는 일로펌프사의 PM-030PM 제품으로 유량과 Δp 등의 정보를 실측할 필요가 있었다. 또, 비례 제어 밸브는 효신전기사 HVM 03SC-P 제품으로 1~5V의 입력 신호를 받아서 개도가 0~100%로 변하는 특징을 가지고 있다.

Fig. 1에는 실 계측을 통해 얻은 솔레노이드 밸브 개도와 입력 전압, 유량 사이 상관관계를 보여주며, Fig. 2에는 펌프의 성능 곡선을 보여주고 있다.

펌프 및 밸브 실험 결과는 제어로직을 수립하기 위한 구성요소의 기본 정보의 형태로 Simulink의 Lookup table로 제공되어 지게 되며, 제어 로직의 소프트웨어적 검증에 활용된다.

실제 비례 제어를 제어하는 경우에는 플랜트 모델에서 확인 가능한 정보가 입력 전압 정보이며, 플랜

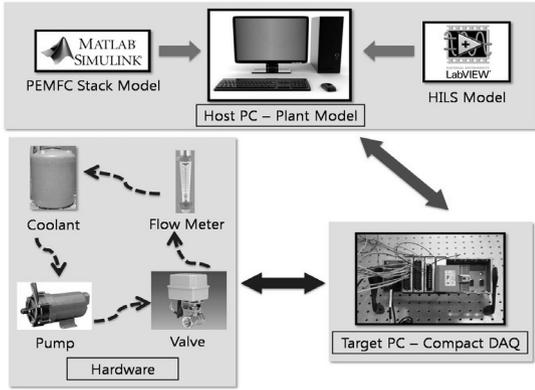


Fig. 3 PEMFC HILS configuration

트 모델은 입력 전압을 개도 정보로 환산하여, 플랜트 모델에 개도 입력을 주게 되고, 출력 유량을 정보로 받게 구성하였다.

2.3 LabVIEW기반 HIL 시뮬레이터

시뮬레이터 모델은 Simulink® 기반 PEMFC 플랜트 모델, National Instruments™사의 LabVIEW™ 플랫폼을 사용한 가상 계측/제어 모델, National Instruments™사의 CompactDAQ 그리고 실제 하드웨어인 비레제어 솔레노이드 밸브로 구성되며 Fig. 3에는 전체 시스템 구성도를 보여주고 있다. 가상 계측/제어 모델 및 플랜트 모델간의 통신을 위해서는 NI사의 Simulation Interface Toolkit (SIT)을 적용하였다.

제 하드웨어인 비레제어 솔레노이드 밸브의 제어는 Simulink® 기반의 플랜트 모델에서 미리 기준 온도 값을 정하고 실행하면 필요한 냉각수 유량이 LabVIEW™상의 HIL 시뮬레이터에 입력으로 전송되고 HIL 시뮬레이터는 그 유량에 맞는 전압을 비레제어 솔레노이드 밸브에 출력한다.

비레제어 솔레노이드 밸브는 입력 전압에 따라 밸브의 개도를 변경하여 플랜트 모델에서 필요한 냉각수의 유량을 흘려보내게 된다. 밸브를 지나는 유량은 유량계를 이용하여 확인하고 그 값을 플랜트 모델에서 요구하는 유량과 비교하였다.

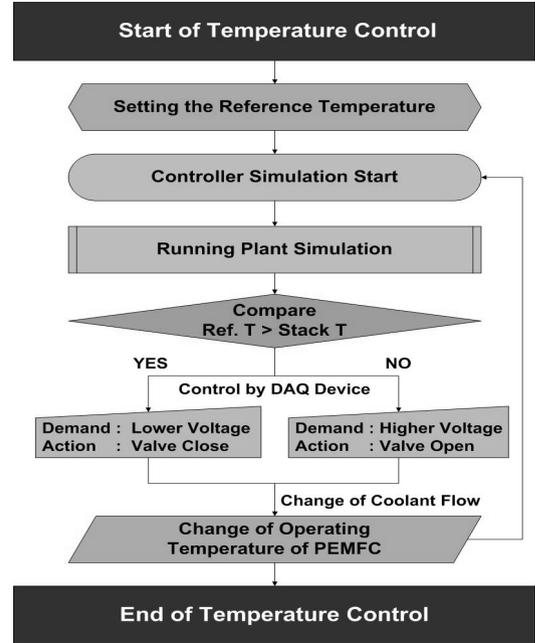


Fig. 4 PEMFC HIL simulator control logic

Fig. 4는 PEMFC HIL 시뮬레이터의 제어 로직을 보여준다. 연료전지 스택 모델의 운전온도가 미리 정한 기준 온도보다 높으면 더 높은 전압을 밸브에 출력하여 유량을 늘리고 연료전지 스택의 운전온도가 기준 온도보다 낮으면 더 낮은 전압을 밸브에 출력하여 유량을 조절하는 방식으로 제어되게 된다. 이러한 과정을 통하여 연료전지에 흐르는 냉각수 유량을 제어하는 액추에이터인 비레제어 솔레노이드 밸브를 제어하여 연료전지의 작동온도를 제어 할 수 있게 하였다.

3. 결 과

3.1 통합 모델 계측/제어 결과

Fig. 5는 연료전지 스택의 가상 계측/제어 통합 모델의 디스플레이 패널을 보여 준다. 가상 계측/제어 통합 모델을 이용해 입력 값인 스택의 부하 변화에 따라 주요 변수인 스택의 셀 전압, 냉각수 입·출구

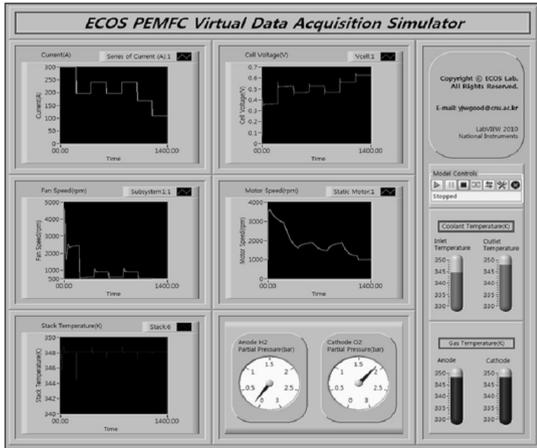


Fig. 5 The display panel of data acquisition model

온도, 연료전지 온도, 반응가스의 온도·압력뿐만 아니라 다양한 시뮬레이션 결과를 획득할 수 있으며, 이렇게 획득된 결과는 HIL 시뮬레이터를 이용한 제어 학습에 활용하였다.

3.2 통합 HIL 시뮬레이터 결과

Fig. 6은 연료전지 스택의 열관리 계통 HIL 시뮬레이터의 결과를 보여준다. 개발된 고분자전해질 연료전지 열관리 계통 HIL 시뮬레이터로 NI사의 CompactDAQ를 이용해 비례제어 솔레노이드 밸브를 제어 하였다. HIL 시뮬레이터를 이용하여 기준 온도와 플랜트 모델의 운전 온도를 비교하여 고분자

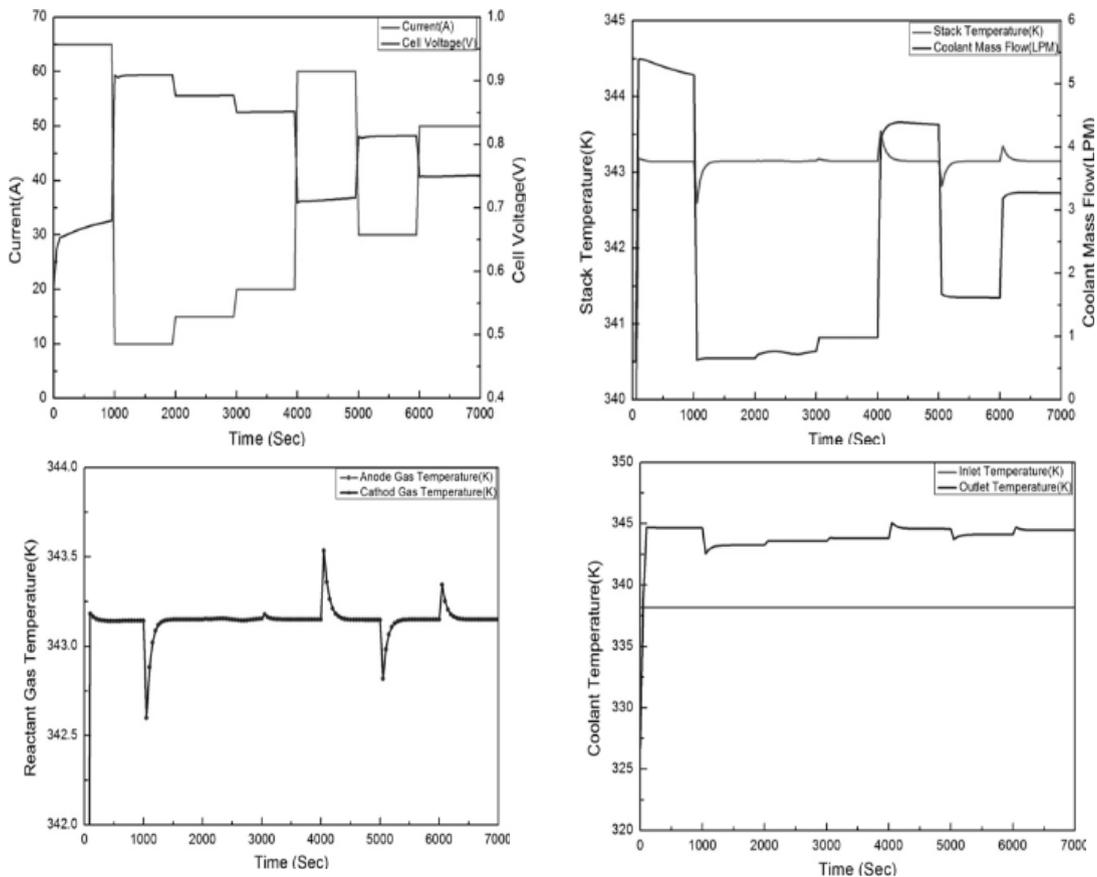


Fig. 6 The results of PEMFC HIL simulator

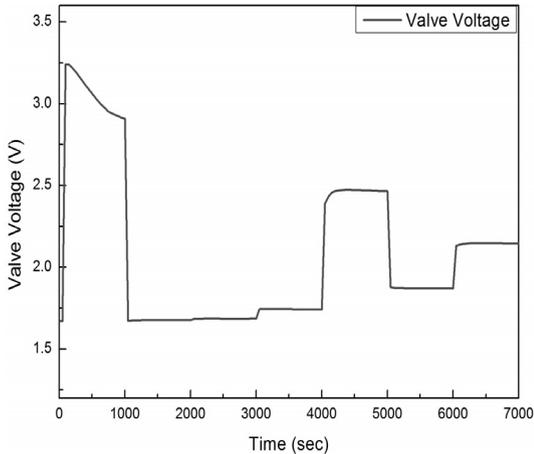


Fig. 7 Control of the Proportional Solenoid Valve

전해질 연료전지 스택의 운전 온도를 조절하는 냉각수의 유량을 제어하는 비례제어 솔레노이드 밸브를 제어 할 수 있다.

플랜트 모델의 입력 값인 다양한 부하 변화에 따라 연료전지 스택의 온도가 변하게 된다. 플랜트 모델에서 요구되는 유량이 HIL 시뮬레이터의 입력 값이 되고 이것이 전압으로 변환되어 CompactDAQ 장비를 통하여 비례제어 솔레노이드 밸브에 입력되고, 각 입력 전압에 따라 밸브의 개도가 변경되어 냉각수 유량이 변하게 된다. 이 결과로 실제 하드웨어의 제어를 통해서 플랜트 모델의 스택에서 요구되는 냉각수 유량이 흐르게 된다.

Fig. 7은 비례제어 솔레노이드 밸브의 제어 화면을 보여준다. 스택의 온도가 정해진 온도 보다 높으면 밸브에 입력되는 전압이 높아지고 개도가 더 열리고 더 많은 냉각수가 흐르도록 제어로직이 구성되었다. 그리고 스택의 온도가 정해진 온도 보다 낮으면 밸브에 입력되는 전압이 낮아지고 개도가 더 닫히고 더 적은 냉각수가 흐르도록 제어로직이 구성되었다.

Fig. 8은 스택 부하의 변화에 의해 실제 하드웨어인 밸브의 개도가 변해서 냉각수 유량이 변하는 것을 보여준다. 플랜트 모델에서 필요한 유량 대비 실제 측정값이 잘 맞는 것을 확인 할 수 있다. 작동 온

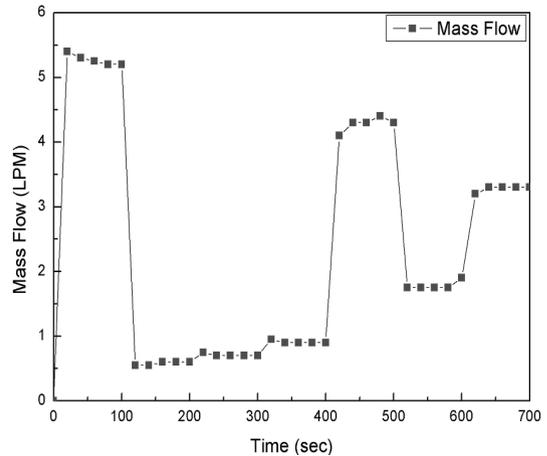


Fig. 8 Experimental Coolant Mass Flow by Strategic Control

도가 기준 온도 보다 높아지는 경우 더 높은 전압이 밸브에 전달되기 때문에 연료전지 운전에 의해 상승되었던 온도는 다시 떨어지게 되며, 이 온도가 기준 온도 보다 낮아지게 되면 낮은 전압이 밸브에 전달되도록 구성하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 Simulink[®]기반으로 개발된 고분자 전해질 연료전지 스택의 플랜트 모델을 NI사의 Simulation Interface Toolkit을 이용하여 통합하여 스택의 동특성을 분석 할 수 있는 통합 계측/제어 모델을 개발하였고, 열관리 계통 HIL 연구를 위한 PEMFC HIL 시뮬레이터를 개발하고 실제 열관리 계통 하드웨어인 비례제어 솔레노이드 밸브를 이용한 HIL 시뮬레이션을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 개발된 가상 계측/제어 모델은 고분자전해질 연료전지 스택의 부하의 변화에 따라 시뮬링크에서 제공하는 모든 출력변수에 대한 확인이 가능하며, 본 화면에서는 주요 설계 변수인 스택 온도, 공기극 및 연료극 온도·압력 변화, 출력 전압 등을 확인할 수 있도록 구성하였다.
- 2) 개발된 HIL 시뮬레이터는 고분자전해질 연료전

지 플랜트 모델의 스택 온도 변화에 따라 주어진 기준 온도와 비교하고 컨트롤러를 이용하여 연료 전지 열관리 계통의 실제 하드웨어인 비례제어 솔레노이드 밸브를 제어하여 고분자전해질 연료 전지 운전 온도를 제어 할 수 있다.

- 3) 향후 기 개발된 플랜트 모델과 HIL 시뮬레이터 및 열관리 계통의 실제 하드웨어를 이용하여, 고분자전해질 연료전지 시스템용 열관리 계통 운전 특성에 관한 연구를 수행할 계획이다.

후 기

“이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업과(2011-0026580) 지역혁신인력양성사업의(201206A0106312010100) 지원을 받아 수행된 것임.”

참 고 문 헌

1. James Larminie, Andrew Dicks, “Fuel Cell Systems Explained”, 2nd Ed. John Wiley & Sons Ltd., 2003, pp. 35-36.
2. Kandlikar, S. G., Lu, Z., “Thermal management issues in a PEMFC stack- a brief review of current status”, Applied Thermal Engineering 29, 2009, pp. 1276-1280.
3. S. Yu, “Thermal Modeling of the Proton Exchange Membrane Fuel Cell,” Ph.D. Dissertation, University of Michigan, 2006.
4. Jay T. Pukrushpan, Anna G. Stefanopoulou, and Hwei Peng, “Control of Fuel Cell Power Systems”, Springer, London, First Edition, 2004, pp. 15-20.
5. Z., Lemes, A., Vath, T., Hartkopf, and H. Mancher, “Dynamic fuel cell models and their application in hardware in the loop simulation”, Journal of Power Sources 154, 2006, pp. 386-393.
6. R. M., Moore, K. H., Hauer, G. Randolph, M. Virji, “Fuel cell hardware-in-loop”, Journal of Power Sources 162, 2006, pp. 302-308.
7. J., Bernard, S., Delprat, T. M., Guerra, and F. N., Buchi, “Fuel efficient power management strategy for fuel cell hybrid powertrains”, Control Engineering Practice 18, 2010, pp. 408-417.
8. J., Ryu, Y., Park, M., and Sunwoo, “Electric powertrain modeling of a fuel cell hybrid electric vehicle and development of a power distribution algorithm based on driving mode recognition”, Journal of power sources 195, 2010, pp. 5735-5748.
9. J. Han, J. Yun, S. Im, S. Kim, S. Yu, “Dynamic simulation model of PEMFC for automotive application” 2011 KSAE spring conference, 2011, pp. 2217-2223.
10. Incropera, DeWitt, Bergman, Lavine, “Fundamental of Heat Transfer”, 1996, pp. 420-450.
11. S. Yu, H. Kim, S. Lee, Y. Lee, K. Ahn, “Thermal Management of Proton Exchange Membrane Fuel Cell”, KHNES 18, 2007, pp. 292-300.
12. S. Yu, Y. Lee, D. Hong, K. Ahn, “A Dynamic Simulation Model for the Operating Strategy Study of 1 kW PEMFC”, KHNES 19, 2008, pp. 313-321.