

Hardware-In-the-Loop Simulation을 이용한 고분자 전해질 연료전지 냉각시스템 최적 제어기법 연구

최은영* · 지현진*[†]

*국방과학연구소, [†]한국과학기술원

(2015년 7월 27일 접수, 2016년 1월 8일 수정, 2015년 1월 12일 채택)

Optimal Control Strategy of Cooling System for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell using Hardware-In-the-Loop Simulation

Eunyeong Choi*, Hyunjin Ji*[†]

*Agency for Defense Development, [†]Korea Advanced Institute of Science and Technology

(Received 27 July 2015, Revised 8 January 2016, Accepted 12 January 2015)

요 약

고분자 전해질 연료전지는 운전온도에 따라 효율과 출력이 변화하기 때문에 65°C~75°C 정도의 적정 운전온도를 유지하기 위한 냉각시스템을 필요로 한다. 따라서 PEMFC 운전온도를 유지하기 위한 냉각시스템 및 이를 위한 제어로직을 적용할 필요가 있다. HILS는 이러한 냉각시스템 제어로직을 검증하고 연구하기 위한 방법 중 하나이다. 본 논문에서는 냉각수 제어 알고리즘 연구를 위해 HILS 시스템을 구성하였다. HILS 시스템 모델은 PEMFC, 열교환기 및 온도와 관련한 외부환경 모델로 구성되며, HILS 시스템의 하드웨어는 삼방밸브, 펌프, 열교환기로 이루어진다. 이러한 HILS를 활용하여 냉각시스템 제어 효율 향상을 위한 제어우선순위 및 제어 대상온도 설정에 대한 연구를 수행하였다. 1차 냉각회로의 삼방밸브를 우선제어대상으로 설정하고, 2차 냉각회로의 온도제어성능 보정을 위해 2차 냉각회로 삼방밸브의 개도를 하한값을 PEMFC 출력과 2차 냉각회로 냉각수 온도의 함수로 작성하여 온도제어성능을 보상할 수 있도록 하였다. 그 결과 안정적인 PEMFC 온도 제어성능을 확인하였다.

주요어 : 고분자 전해질 연료전지, 냉각수 제어, Hardware-In-the-Loop simulation

Abstract - Polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) requires cooling system to maintain the proper operating temperature (about 65°C ~ 75°C) because the efficiency and power are affected by operating temperature. In order to retain the operating temperature of PEMFC, cooling system and coolant control logic are needed. Hardware-in-the-loop simulation (HILS) is one of effective methods to study and evaluate control algorithm. In this paper, the HILS system was designed to study the coolant control algorithm. The models of HILS system consisted of PEMFC, heat exchanger, and external environment associated with temperature. The hardwares in HILS system are 3-way valves, pumps, and a heat exchanger. The priority control and the control target temperature were investigated to improve the control performance using HILS. The 3-way valve in 1st cooling circuit was selected as priority control target. The under limit value of 2nd 3-way valve set as a function of PEMFC power and 2nd circuit coolant temperature to correct temperature control performance. As a result, the temperature of PEMFC is stably controlled.

Key words : Polymer electrolyte membrane fuel cell, coolant control, Hardware-In-the-Loop simulation

[†]To whom corresponding should be addressed.
Korea Advanced Institute of Science and Technology,
Guseong-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-701
Tel : +82-42-821-3020 E-mail : grgmachine@kaist.ac.kr

1. 서론

고분자 전해질 연료전지(PEMFC, Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell)는 다른 연료전지에 비해 높은 전력밀도를 갖는다. 또한 일반적으로 80℃정도로 운전온도가 비교적 낮기 때문에 주택이나 건물 등의 고정형 보조전원, 연료전지 자동차, 무인기, 분산발전용 전원, 휴대용 전원 등의 다양한 용도로의 사용이 가능하며, 이를 위한 연구가 지속되고 있다. PEMFC는 주로 PTFE(persulfonated polytetrafluoroethylene) 등의 양성자 전도성 고분자를 전해질로 이용하며, 이 고분자 전해질과 촉매를 포함한 전극으로 이루어진 MEA(Membrane Electrode Assembly)가 양성자 전도체 역할을 수행하며, 전기화학반응을 통해 전류를 생산한다. 이 MEA의 고분자 전해질은 물 함량과 온도에 전도성이 큰 영향을 받으므로, PEMFC는 능동적인 물관리와 적절한 온도관리가 필수적이다[1].

PEMFC를 부하변동, 환경조건 변화에 관계없이 적정 온도를 유지하기 위해서는 냉각시스템 및 냉각수 제어가 반드시 필요하다. 따라서 PEMFC를 이용한 시스템 구성 시, 냉각을 위한 적절한 제어로직을 적용할 필요가 있으며, 이러한 제어로직에 대한 연구 및 검증이 선행될 필요가 있다. 그러나 고가인 PEMFC를 직접 사용하여 제어로직을 검증하고 연구하는 것은 큰 위험부담을 가진다. 이러한 이유로, 주로 시뮬레이션을 통해 PEMFC와 냉각시스템 제어에 대한 연구를 수행하며 이를 위한 다양한 모델들을 개발하고 있다 [2]. 모델링을 활용한 시뮬레이션을 통한 연구는 위험

부담을 낮출 수 있으나, 정확한 시뮬레이션을 위한 실험대상을 완벽하게 모사하는 모델의 작성은 사실상 불가능하다. 따라서 시뮬레이션을 활용한 제어로직 연구는 상대적으로 정확도가 낮다는 단점이 있다.

HILS(Hardware-In-the-Loop Simulation)는 이러한 제어로직을 연구 및 검증할 수 있는 방법 중 하나로, 일반적으로 제어기 설계 시 실제 제어기를 활용하고 제어대상 및 외부환경을 모델링하여 다양한 환경 및 조건에서 제어기 성능 및 특성을 확인하는 방식으로 사용된다. 이와 같이 실제 대상과 모델링을 통한 시뮬레이션을 병합하여 활용하는 HILS는 실험 제어대상, 시스템 및 환경을 적용하여 제어로직을 연구하는 방법보다 연구기간 및 비용을 단축할 수 있으며, 제어대상 및 환경 모두를 모델링하여 시뮬레이션으로 제어로직을 연구하는 방법보다 높은 신뢰성을 가진다는 장점이 있다.

HILS는 주로 자동차나 항공기와 같이 개발기간 및 비용이 높은 분야에서 사용되어온 기술로, 이러한 HILS를 연료전지 분야에 적용하기 위한 연구가 다양하게 시도되고 있으며, 점차 증가하는 추세이다[3-5]. 따라서 본 연구에서는 HILS를 활용하여 PEMFC 냉각시스템을 보다 안정적이고 효율적으로 제어할 수 있는 제어기법에 대해 연구하였다.

Fig. 1은 본 연구에서 구성하고자 하는 PEMFC 냉각시스템의 개략도이다. 냉각시스템은 1차, 2차 냉각회로로 구성되어 있으며, 주요 구성품은 PEMFC 스택, 열교환기(Heat Exchanger), 금속수소화물(MH, Metal Hydride), 삼방밸브 및 펌프이다.

HILS시스템 구성을 위해 냉각시스템 열관리 계통에 관련된 PEMFC, 열교환기, 외부환경 중 온도와 관련된 부분을 실시간 모델로 작성하고, 그 외의 부분은 하드웨어로 적용한 HILS 시스템을 구성하여 PEMFC 냉각시스템 제어성능 향상을 위한 연구를 수행하였다.

2. 실험 구성 및 방법

2-1 HILS 시스템 구성

Fig. 2는 HILS 시스템 구성을 나타낸 개략도이다. 그림에 나타난 바와 같이 HILS 시스템은 HILS 하드웨어, PLC, Monitoring/Control PC, HOST PC 및 열관리 계통과 관련된 PEMFC, 열교환기, 금속수소화물 등의 구성품 모델로 이루어진 HILS 냉각시스템 모델이 포함된 RT-Computer로 구성된다. 또한 제어와 계

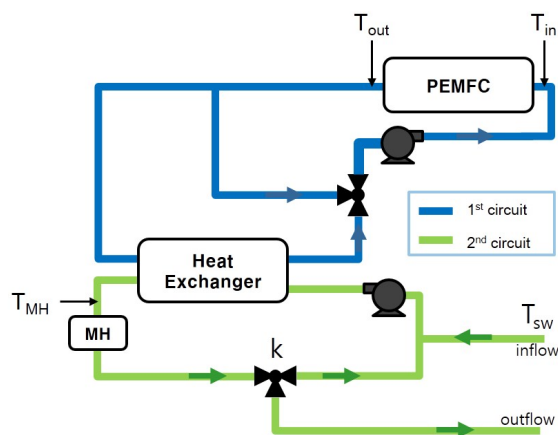


Fig. 1. Schematic diagram of PEMFC cooling system

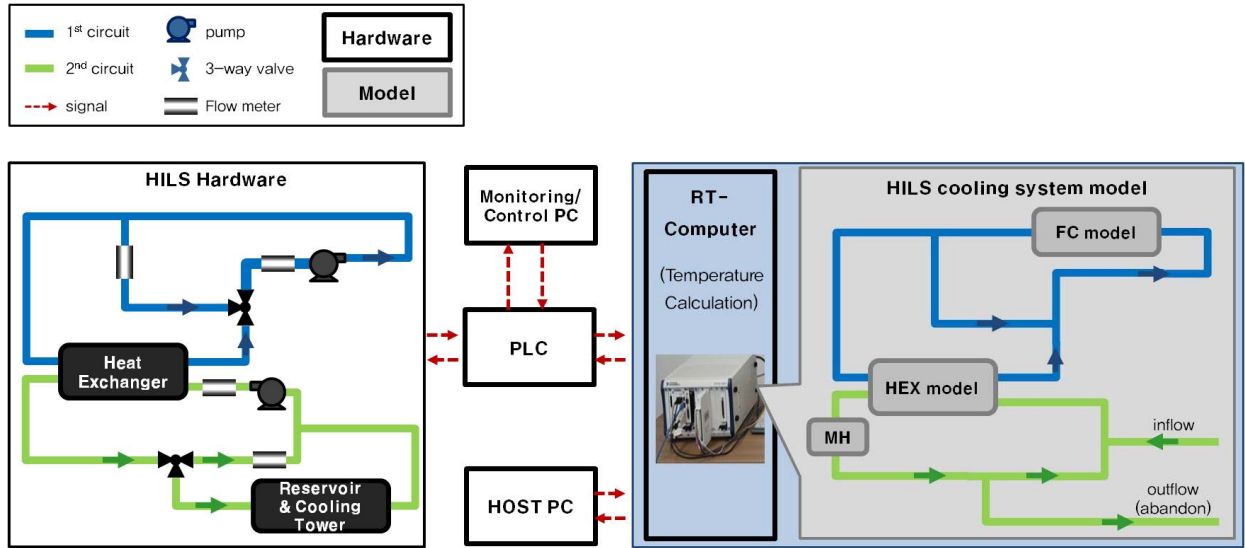


Fig. 2. Configuration of HILS system

측 등을 위해 HILS 시스템은 그림과 같이 각 구성품을 연결하여 신호를 교환할 수 있도록 하였다.

HILS 하드웨어는 열관리 계통과 관련된 구성품을 제외한 PEMFC 냉각시스템과 동일한 구성을 갖도록 1차, 2차로 이루어진 냉각회로와 펌프, 삼방밸브, 유량계 및 열교환기 등으로 이루어져 있다. HILS 하드웨어에 설치된 유량계로 측정한 각 냉각회로의 전체유량과 바이패스 유량 및 삼방밸브 개도율은 PLC를 통해 RT-Computer로 전송되어 RT-Computer에 임베디드된 HILS 냉각시스템 모델에서 각 위치별 냉각수 온도를 계산하는데 사용된다.

PLC는 자동제어 등이 필요한 산업 전반에 걸친 다양한 분야에서 사용되고 있는 제어기로, 본 연구에서는 Siemens사의 Simatic S7 PLC를 이용하여 HILS 시스템을 구성하였다. PLC는 모니터링/제어 PC에서 제어신호를 받아 HILS 하드웨어의 펌프와 삼방밸브를 입력된 제어로직에 따라 제어하고, 모니터링/제어 PC를 포함한 HILS 시스템 각 구성품간 신호를 전송하는 역할을 수행한다. 이를 통해 실시간으로 입출력되는 측정값을 통해 PEMFC 냉각시스템의 각 위치별 온도가 계산되고, 계산된 온도값을 이용해 PEMFC 냉각시스템 제어를 수행하며 제어성능 향상을 위한 방법을 적용하고 검증하였다.

2-2 PEMFC 모델

PEMFC 냉각시스템의 주요 구성품 중 하나이며, 주 제어대상인 PEMFC는 수소와 산소의 전기화학반

Table 1. Equations for PEMFC model

$E = \frac{-\Delta g_f^0}{2F} + \frac{RT_{fc}}{2F} \ln \left[\frac{p_{H_2} p_{O_2}^{1/2}}{p_{H_2O}} \right]$	(1)
$E = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} (T_{fc} - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} T_{fc} \left[\ln(p_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(p_{O_2}) \right]$	(2)
$v_{fc} = E - v_{act} - v_{ohmic} - v_{conc}$	(3)
$\frac{dm_{O_2,ca}}{dt} = W_{O_2,ca,in} - W_{O_2,ca,out} - W_{O_2,reacted}$	(4)
$\frac{dm_{N_2,ca}}{dt} = W_{N_2,ca,in} - W_{N_2,ca,out}$	(5)
$\frac{dm_{m_w,ca}}{dt} = W_{v,ca,in} - W_{v,ca,out} + W_{v,ca,gen} - W_{l,ca,out}$	(6)
$\frac{dm_{H_2,an}}{dt} = W_{H_2,an,in} - W_{H_2,an,out} - W_{H_2,reacted}$	(7)
$\frac{dm_{w,an}}{dt} = W_{v,an,in} - W_{v,an,out} - W_{v,membr} - W_{l,an,out}$	(8)
$D_w = D_\lambda \exp \left(2416 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{fc}} \right) \right)$	(9)
$D_\lambda = \begin{cases} 10^{-6} & , \lambda_m < 2 \\ 10^{-6} (1 + 2(\lambda_m - 2)) & , 2 \leq \lambda_m \leq 3 \\ 10^{-6(3-1.67(\lambda_m-3))} & , 3 < \lambda_m < 4.5 \\ 1.25 \times 10^{-6} & , \lambda_m > 4.5 \end{cases}$	

응으로 전력과 열을 생산하는 장치로, 이러한 PEMFC에 대한 연구를 수행하기 위한 다양한 시뮬레이션 모델에 대한 연구들이 진행되어왔다[6-8].

본 연구에서는 Matlab/Simulink를 이용하여 실시간 연산에 적합한 연산속도를 가질 수 있도록 PEMFC 모델을 작성하였다. PEMFC 모델 작성에 사용된 주요 수식은 Table 1과 같다. 일반적으로 잘 알려진 에너지 보존법칙, 손실과 관련된 수식, 연료전지 채널 내 물의 유량에 관계된 수식과 종 보존 방정식 등을 적용하여 모델을 작성하였다[9].

연료전지의 이론적 가역전압(E)은 에너지 보존 법칙에 의해 Table 1의 식 (1)로 표현되며, 표준 상태를 적용해서 정리하면 Table 1의 식 (2)와 같다.

그러나 연료전지의 실제 전압(v_{fc})은 전기화학반응의 반응속도에 따른 활성화 손실(v_{act}), 이온과 전자 저항으로 인한 저항 손실(v_{ohmic}), 물질 수송에 따른 농도 손실(v_{conc})이 존재하기 때문에 이론적 최대값 보다는 작은 값을 가지며 Table 1의 식 (3)과 같이 표현된다.

연료전지 내 물의 유량은 연료극과 공기극에 별도의 수식을 적용해 계산하며, 전기화학 반응에 의해 생성되는 물의 양을 고려하여 Table 1의 식 (4-9)와 같이 계산한다. PEMFC모델은 부하전류 및 PEMFC로 유입되는 냉각수의 온도와 유량을 입력받아 연료전지의 출력 전압 및 전류, 출구단의 냉각수 온도를 계산하도록 작성되었다.

2-3 열교환기 모델

본 연구의 냉각시스템 구성에 사용된 열교환기는 원통 다관형 열교환기(Shell and Tube type Heat exchanger)로, 원통 다관형 열교환기는 적용범위가 넓고, 효율 및 신뢰성이 높기 때문에 다양한 산업분야에서 폭넓게 이용되고 있다. 또한 설계 방식과 형상별 설계 기법이 및 제작기법이 표준화되어 관리되고 있어, 열교환기 성능 및 특성을 이론적으로 계산할 수 있는 식들과 간단한 모델부터 3차원의 복잡한 모델까지 다양한 수식들이 알려져 있다[10, 11].

본 연구에서 PEMFC 냉각시스템 구성에 사용한 열교환기는 다양한 형상의 원통 다관형 열교환기 중 U-타입 열교환기로, 열교환기 고온측과 저온측의 토출온도 계산을 위해 Effective-NTU 방법을 적용해 온도를 계산하였다[11, 12].

Effective-NTU 방법은 수식이 비교적 간단하기 때문에 연산시간이 상대적으로 짧아 실시간 연산에 적

Table 2. Equations for heat exchanger model

$$C_h = (\dot{m}c_p)_h, C_c = (\dot{m}c_p)_c \quad (1)$$

$$LMTD = \frac{(T_{h_{in}} - T_{c_{out}}) - (T_{h_{out}} - T_{c_{in}})}{\ln\left(\frac{T_{h_{in}} - T_{c_{out}}}{T_{h_{out}} - T_{c_{in}}}\right)} \quad (2)$$

$$NTU = \frac{UC}{C_{min}}, U = \frac{Q}{A(LMTD)} \quad (3)$$

$$\epsilon = \frac{1 - \exp\left[-\left(1 + \frac{C_{min}}{C_{max}}\right)NTU\right]}{1 + \frac{C_{min}}{C_{max}}} \quad (4)$$

$$Q = \epsilon C_{min} (T_{h_{in}} - T_{c_{in}}) \quad (5)$$

$$T_{h_{out}} = T_{h_{in}} - \frac{Q}{C_h}, T_{c_{out}} = T_{c_{in}} + \frac{Q}{C_c} \quad (6)$$

합하며, 연산시간에 비해 비교적 신뢰성 높은 계산결과를 얻을 수 있어, 실시간성이 중요한 HILS 시스템에 적합하다고 판단되었다. Table 2는 Effective-NTU 방법으로 열교환기를 모델링 하기 위해 사용된 수식을 정리하였다.

Effective-NTU방법으로 열교환기 출구단 온도를 계산하기 위해서는 Table 2의 식 (1) 고온측과 저온측의 열용량과, Table 2의 식(2) LMTD(Logarithmic Mean Temperature Difference), Table 2의 식 (3) NTU(Number of Transfer Units) 및 총 열전달계수(U)를 계산하여 Table 2의 식 (4)와 같이 열교환기의 유효성을 계산한다. 열교환기의 유효성을 고려한 열교환량은 Table 2의 식(5)와 같으며, Table 2의 식 (6)에 의해 열교환기 고온측과 저온측 출구온도를 계산할 수 있다.

2-4 HILS 시스템 모델

HILS 시스템 모델은 검증이 완료된 PEMFC 모델, 열교환기 모델 등 각 구성품 모델을 포함하여 실제 냉각시스템과 동일한 구조를 갖도록 Matlab/Simulink를 이용해 작성하였다. HILS 시스템 모델은 실시간 연산을 위해 RT-Computer에 탑재하여야 하므로, 컴파일하여 Veristand에서 사용할 수 있도록 작성하였다. HILS 시스템 모델에서는 외부에서 입력받은 부하전류와 유량, 삼방밸브 개도율 등에 따라 PEMFC 냉각시스템 각 위치별 냉각수 온도를 실시간으로 계산하고, 이를 RT-Computer를 통해 실제 제어기로 출력해

Table 3. Input-output variables for HILS system

항목(변수)	From	To	비고
PEMFC 부하 전류	HOST PC	PLC	입력값
PEMFC 출력, (P)	RT-Computer	PLC	모델 계산값
PEMFC 전압 (v_{fc})	RT-Computer	PLC	모델 계산값
각 위치별 온도 (T)	RT-Computer	PLC	모델 계산값
Reservoir 냉각수 온도 (T_{sw}) (2차 냉각회로 외부 유입수 온도)	HOST PC	PLC	입력값
위치별 유량 (\dot{m})	HILS Hardware	RT-Computer	계측값
각 삼방밸브의 개도율 (k)	HILS Hardware	RT-Computer	계측값

제어기가 계산된 온도를 따라 제어를 수행할 수 있도록 한다.

실제 하드웨어와 모델을 연동하여 시뮬레이션을 수행하는 HILS의 경우, 이를 위해 각 구성품 간 입출력 변수를 설정하여야 할 필요가 있으며, 이는 Table 3에 정리하였다. 표에서 확인할 수 있는 바와 같이 주요 입출력 변수는 냉각시스템 각 위치별 온도 계산에 필요한 PEMFC 출력, 유량 및 삼방밸브 개도율 등이다.

2-5 냉각시스템 제어방법

본 연구에서는 1차 및 2차 냉각회로로 구성된 PEMFC 냉각시스템의 제어성능을 최적화하여 부하 변동에 관계없이 PEMFC의 온도를 안정적으로 유지할 수 있는 제어방법을 구현하기 위해 크게 두 가지 측면에서 제어방법을 구성하여 실험을 진행하였다. 첫째, 제어대상품목 간 제어 우선순위 설정과 제어 안정성과의 관계와, 상대적으로 제어 우선순위가 낮아진 2차 냉각회로 삼방밸브의 제어성능 보안을 위한 하한값 설정방법 및 이에 따른 제어 안정성을 확인하였다. 둘째, 제어 대상온도 위치 설정이 달라짐에 따른 제어 안정성을 확인하기 위해 1차 냉각회로의 PEMFC 입구온도와 출구온도로 제어 대상온도 설정을 달리하며 이에 따른 제어 안정성을 확인하였다.

3. 결과 및 분석

3-1 PEMFC 냉각시스템 제어

본 연구에서 구성한 1차 및 2차 냉각회로로 구성된 PEMFC 냉각시스템의 제어 대상온도는 주 제어대상

인 1차 냉각회로의 PEMFC 입구온도와 출구온도, PEMFC 스택에 수소를 공급하기 위해 적정 온도가 요구되는 2차 냉각회로의 급속수소화물 입구온도이다. 이러한 제어 대상온도를 적정값으로 유지하기 위해 1차 및 2차 냉각회로의 삼방밸브와 펌프를 이용해 온도를 제어한다. 그러나 일반적으로 제어대상이 증가할수록 제어의 복잡성 및 난이도가 비례하여 증가하므로, 본 연구에서는 두 개의 펌프는 단순 제어를 수행하고 반응속도가 빠른 두 삼방밸브를 중심으로 제어를 수행하는 제어방식을 적용하였다.

각 냉각회로의 삼방밸브와 펌프 중 1차 냉각회로의 삼방밸브와 펌프는 1차 냉각회로에 위치한 PEMFC의 입구 및 출구온도를 제어한다. PEMFC의 발열량은 PEMFC의 출력에 비례한다. 그러므로 각 냉각회로의 펌프는 제어의 복잡성을 감소하기 위해 PEMFC 출력 증가에 비례하여 펌프 회전수 역시 증가하여 냉각능력을 높일 수 있도록 비례제어를 적용하였다. 이러한 펌프 제어 방법은 PEMFC 출력이 증가하여 발열량이 증가하는 경우, PEMFC 출구단 온도가 상승하기에 앞서 펌프 회전수를 증가시켜 PEMFC 출구단 온도가 제어 설정값을 초과하여 상승하는 오버슈트(overshoot)를 감소시킬 수 있다. 이를 통해 PEMFC 온도가 적정 운전온도를 초과하여 상승하는 경우를 방지하여 안정적인 운전을 가능하게 한다.

이러한 펌프 제어와 동시에 삼방밸브를 이용하여 PEMFC가 적정 온도에서 운전되도록 냉각시스템 온도제어를 수행한다. 그러나 앞선 HILS 시스템 구성에서 나타난 바와 같이 1차 냉각회로와 2차 냉각회로는 열교환기를 중심으로 각 냉각회로 간 열교환을 수행하

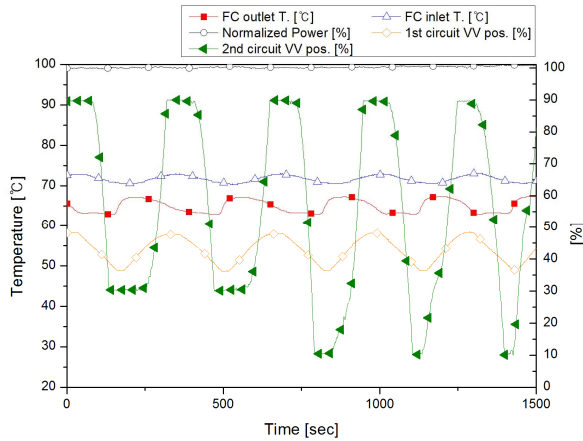
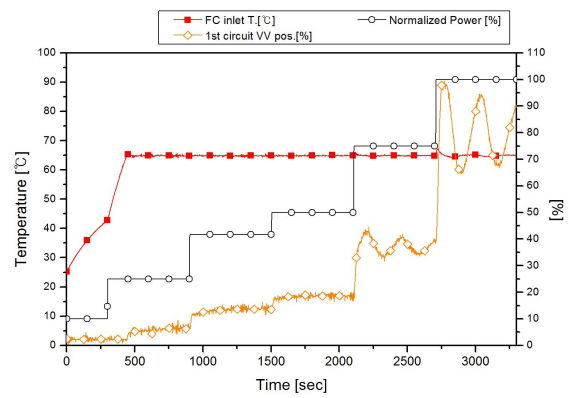


Fig. 3. Response to high speed control of 1st and 2nd circuit 3-way valves.

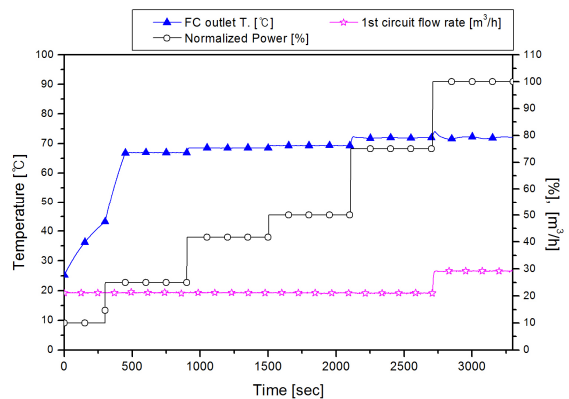
며 영향을 주고받는다. 따라서 이러한 구성의 냉각시스템에서 1차 냉각회로의 삼방밸브와 2차 냉각회로의 삼방밸브를 모두 빠르게 제어하면 각 삼방밸브의 빠른 반응에 각 냉각회로의 온도가 빠르게 변화하고, 이러한 빠른 온도변화가 열교환기를 통해 서로 영향을 주어 전체 냉각시스템이 불안정해진다. 이러한 조건에서 냉각시스템 제어를 수행한 결과가 Fig. 3에 나타나 있다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같은 이러한 영향을 최소화하기 위해 두 삼방밸브 중 하나의 삼방밸브를 상대적으로 느리게 제어하도록 한다. 이 때, PEMFC는 온도에 의해 효율, 내구성 등이 급속수소화물에 비해 큰 영향을 받으므로 1차 냉각회로의 삼방밸브를 2차 냉각회로의 삼방밸브보다 빠르게 제어하도록 설정하였다.

본 연구에서는 2차 냉각회로에 비해 상대적으로 1차 냉각회로에 제어의 우선순위가 부여되는 제어를 기본으로, 2차 냉각회로의 온도제어성능 향상을 위해 2차 냉각회로의 삼방밸브가 제어 대상온도를 적정온도로 유지할 수 있도록 하는 삼방밸브 개도율을 PEMFC 출력과 2차 냉각회로에 유입되는 온도(T_{sw})와 관계된 수식으로 작성하여, 계산된 해당 개도율이 2차 냉각회로 삼방밸브의 하한값으로 부여되어 삼방밸브의 느린 반응속도를 보상할 수 있도록 하는 제어 방식을 적용하였다.

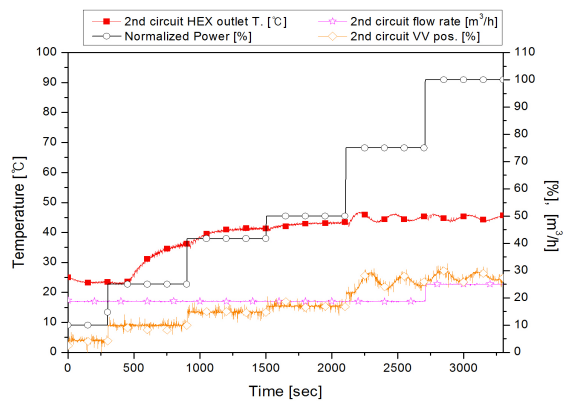
2차 냉각회로의 삼방밸브에서 열교환기 유입 측으로 바이패스되는 냉각수 온도(αT_{MH})가 외부에서 유입되는 냉각수(T_{sw})와 합쳐지며 잃은 열량과 외부에서 유입되는 냉각수(T_{sw})가 바이패스되는 냉각수와 합쳐지며 얻은 열량이 동일하기 때문에 이를 다음 식 (1)



(a) Response of 1st cooling circuit to PEMFC inlet temperature



(b) Response of 1st cooling circuit to PEMFC outlet temperature



(c) Response of 2nd cooling circuit to MH inlet temperature

Fig. 4. Temperature control results.

과 같이 나타낼 수 있다.

$$(1 - k)\dot{m}c_p(\alpha T_{MH} - T_m) = k\dot{m}c_p(T_m - T_{sw}) \quad (1)$$

여기에서,

- k = 삼방밸브 개도율 (1/100%)
- \dot{m} = 2차 냉각회로 총 유량
- c_p = 냉각수의 비열
- αT_{MH} = 금속수소화물 후단 온도
- T_{sw} = 외부 유입 냉각수 온도
- T_m = 열교환기 유입 온도

상기 식 (1)에서 금속수소화물 후단 온도(αT_{MH})는 금속수소화물이 수소 방출 시 흡열반응을 하기 때문에, 금속수소화물 전단 온도보다 낮은 온도값을 가지므로 금속 수소화물 전후단 온도 비율을 나타내는 α 값은 1보다 작은 값을 갖는다. 또한 물의 비열이 일정하다고 가정하고 식 (1)을 삼방밸브 개도율 k 에 대해 정리하면 다음 식 (2)와 같다.

$$k = \frac{\alpha T_{MH} - T_m}{\alpha T_{MH} - T_{sw}} \quad (2)$$

이 때, 열교환기 2차 냉각회로측 유출 냉각수 온도가 1차 냉각회로와의 열교환을 통해 T_{MH} 가 되는 유입 온도 T_m 은 1차 냉각회로에서 생성된 열량과 관계되므로, 1차 냉각회로의 PEMFC 발열량과의 관계로 나타낼 수 있다. 일반적으로 고출력 상태에서 PEMFC의 발열량은 출력 P 와 유사한 값을 가지므로, 출력과 발열량이 같다고 가정한다.

열교환기로 유입되고 유출되는 2차 냉각회로의 각 온도는 T_m 과 T_{MH} 이고, 이러한 온도차를 가지기 위해 열교환기에서 각 냉각회로에서 교환하여야 하는 열량

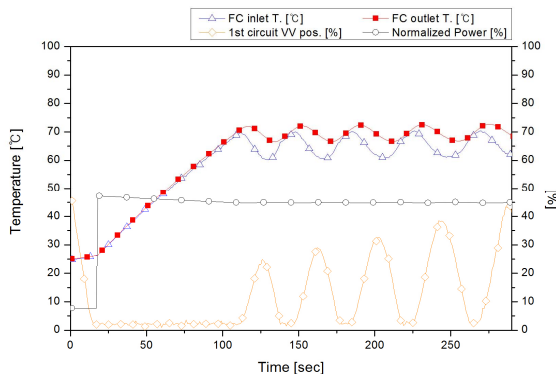
은 두 온도의 온도차와 유량, 비열에 의해 간단한 수식으로 정리된다. 이렇게 계산된 열량이 1차 냉각회로에서 2차 냉각회로로 공급되어야 하는 열량과 동일하며, 1차 냉각회로의 열량 공급은 PEMFC 출력과 관계하므로 이들의 관계를 정리하면 다음 식 (3)과 같다.

$$T_m = T_{MH} - \frac{P}{\dot{m}c_p} \quad (3)$$

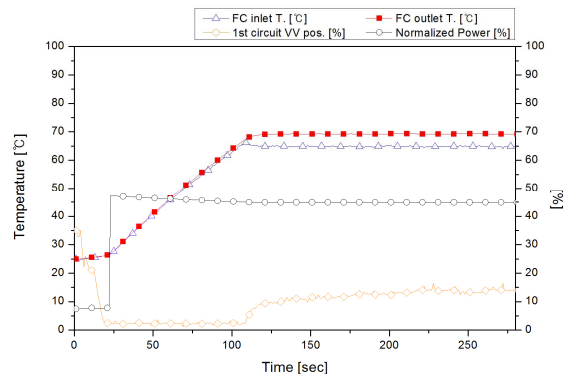
식 (3)을 식 (2)에 대입하여 정리하면 2차 냉각회로 삼방밸브 개도율 k 에 대한 수식을 다음 식 (4)와 같이 정리할 수 있다.

$$k = \frac{(\alpha - 1)T_{MH} + \frac{P}{\dot{m}c_p}}{\alpha T_{MH} - T_{sw}} \quad (4)$$

여기에서 α 는 금속수소화물에서 수소 방출 시 흡열반응에 의해 감소하는 냉각수 온도의 비율로, 금속수소화물 후단 온도(αT_{MH}) 계측을 통해 직접 계측이 가능한 온도이며, 직접계측 또는 이론적 계산을 통해 온도의 함수로 표현이 가능하다. 또한 냉각수 유량 (\dot{m})과 비열(c_p) 역시 계측, 수식 또는 상수값을 가지고, T_{MH} 는 제어 대상온도로 설정값이기 때문에 상기 식 (4)를 통해 2차 냉각회로 삼방밸브가 제어 대상온도인 T_{MH} 를 적정온도로 유지하기 위한 개도율을 계산하여 삼방밸브 하한값으로 적용하여 PEMFC 냉각시스템 제어를 수행하였다. 그 결과 PEMFC 출력의 스텝 상승 시 PEMFC 입구온도의 경우 Fig. 4 (a)에 나



(a) control target : PEMFC outlet temperature



(b) control target : PEMFC inlet temperature

Fig. 5. Effect of control target temperature.

타난 바와 같이 설정 기준온도인 65℃에 대해 최대 +2℃ 가량의 오버슈트를 가지며 이후 안정적으로 제어됨을 확인하였으며, Fig. 4 (b)에 나타난 바와 같이 출구온도 역시 제어 설정온도인 75℃에 대해 최대 +2℃ 가량의 오버슈트를 보이며 안정적으로 제어를 수행하였다. 또한 2차 냉각회로의 삼방밸브 하한값 적용에 의해 Fig. 4 (c)에서 확인할 수 있는 바와 같이 2차 냉각회로의 제어 대상온도인 금속수소화물 전단온도를 제어 설정온도인 45℃에 대해 $\pm 1^\circ\text{C}$ 이내에서 안정적으로 제어함을 확인하였다.

3-2 제어 대상온도

1차 냉각회로에 위치한 삼방밸브의 제어 대상온도는 PEMFC 입구온도 또는 출구온도로 설정될 수 있다. Fig. 5는 삼방밸브의 제어 대상온도 설정 외의 다른 조건은 모두 동일한 상태에서, 삼방밸브의 제어 대상온도를 PEMFC 입구온도와 출구온도로 설정하여 제어를 수행한 경우 PEMFC 입구 및 출구온도를 나타낸 그래프이다. Fig. 5 (a)는 삼방밸브의 제어 대상온도를 PEMFC 출구온도로 설정하고 PEMFC 출력을 증가시킨 경우 냉각시스템의 반응을 나타낸 그래프이다. 그래프에 나타난 바와 같이 제어 설정온도인 75℃에 도달한 이후 추가적인 온도 상승을 방지하기 위해 삼방밸브 개도율이 감소하여 냉각량을 감소시키도록 동작한다. 그러나 본 연구에서 구성한 PEMFC 냉각시스템 개략도에서 확인할 수 있는 바와 같이 삼방밸브와 출구온도 사이에 외란으로 여겨질 수 있는 PEMFC가 존재하기 때문에 설정온도 도달 후 삼방밸브 개도율이 감소하여 냉각량을 감소시킨 영향이 PEMFC 입구온도에 영향을 주어 입구온도 역시 출구온도와 함께 감소한다. 이에 따라 감소한 입구온도와 일정한 PEMFC 발열량에 의해 출구온도가 과도하게 감소하게 되며, 이러한 현상이 반복적으로 일어나 PEMFC 입구온도와 출구온도 모두 진동하며 불안정한 경향을 보이게 된다. 반면에 삼방밸브의 제어 대상온도를 PEMFC 입구온도로 설정하고 PEMFC 출력상승에 따른 냉각시스템 반응을 나타낸 Fig.5 (b)에서 확인할 수 있는 바와 같이, 출구온도를 제어 대상온도로 설정한 경우에 비해 안정적으로 입구온도와 출구온도가 모두 제어되는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞선 제어 대상온도가 출구온도인 경우와는 달리 삼방밸브와 제어 대상온도인 입구온도 사이에 특별한 외란이 없기 때문에 제어가 안정적으로 수행되는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 HILS를 적용하여 1차, 2차 냉각회로로 구성된 PEMFC 냉각시스템의 최적 제어 기법에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위해 열관리 계통과 관련된 PEMFC, 열교환기 및 온도와 관련된 외부환경을 실시간 연산을 위한 모델로 작성하였으며, 그 외 부분은 하드웨어인 PEMFC 냉각시스템용 HILS 시스템을 구성하였다. 또한 HILS 시스템의 실시간성을 구현하기 위해 Matlab/Simulink와 NI Veristand의 인터페이스로 RT-Computer를 이용한 실시간 연산을 구현하였으며, NI Labview를 이용해 HILS 시스템을 컨트롤 및 모니터링 할 수 있는 프로그램을 작성하여 HILS 시스템을 제어할 수 있게 하였다.

본 연구에서 구성한 HILS 시스템은 PLC를 포함하며, 이를 이용한 PID 제어를 기본으로 하는 PEMFC 냉각시스템 제어기법 연구를 수행하였다. PEMFC 냉각시스템을 안정적으로 제어하기 위해 본 연구에서는 다음과 같은 제어방법을 적용하여 PEMFC 냉각시스템의 안정성과 냉각성능을 향상할 수 있는 제어전략을 확인하였다.

- (1) 1차 및 2차 냉각회로의 삼방밸브와 펌프 중 응답특성이 빠른 삼방밸브를 주 제어 대상으로 설정하였다. 이를 위해 펌프는 PEMFC 출력에 비례하여 회전수가 증감하는 비례제어를 적용하였다. 펌프 회전수가 PEMFC 출력에 비례하도록 제어하는 경우, 출력 증가에 의해 PEMFC 온도가 상승하기 전, 미리 냉각수 유량을 증가시켜 PEMFC 출구단 온도의 과도한 상승을 감소시켜 PEMFC 운전온도를 적절히 유지할 수 있음을 확인하였다.
- (2) 1차 및 2차 냉각회로의 삼방밸브 중 냉각시스템의 안정성을 확보하기 위해 주 제어대상인 PEMFC가 포함된 1차 냉각회로의 삼방밸브에 제어 우선순위를 두고, 2차 냉각회로의 삼방밸브는 1차 냉각회로의 삼방밸브에 비해 상대적으로 느리게 제어하여 각 냉각회로가 열교환기를 통해 주고받는 영향을 최소화하여 제어 대상온도의 안정성을 확보하였다.
- (3) 상대적으로 느리게 제어되는 2차 냉각회로의 온도제어성능 보안을 위해 2차 냉각회로 삼방밸브의 제어 대상온도를 적정온도로 유지하기 위

한 삼방밸브 개도율(k)을 PEMFC 출력과 2차 냉각회로에 유입되는 2차 냉각수 온도(T_{sw})의 함수로 작성하여, 계산된 해당 개도율 값이 2차 냉각회로 삼방밸브의 하한값으로 설정되도록 적용하였다. 이러한 제어방식의 적용을 통해 상대적으로 느린 2차 냉각회로 삼방밸브의 반응 속도를 보상하여, 주 제어 대상인 PEMFC 입구 및 출구온도의 안정적 제어와 함께, 향상된 2차 냉각회로 제어 대상온도의 제어성능을 확인하였다.

- (4) 동일한 조건하에서 1차 냉각회로의 삼방밸브를 통해 제어하는 제어 대상온도를 PEMFC 입구온도와 출구온도로 달리하여 냉각시스템 제어를 수행한 결과, 출구온도를 제어대상으로 하는 경우에 비해 입구온도를 제어대상으로 하는 경우가 보다 안정적으로 냉각시스템이 제어됨을 확인하였다. 이는 본 연구의 시스템 구성 상, 1차 냉각회로의 삼방밸브와 PEMFC 출구온도 사이에 외란으로 다뤄질 수 있는 PEMFC가 존재하기 때문에 상대적으로 제어가 불안정해 지며, 이러한 이유로 제어 대상온도가 PEMFC 입구온도인 경우 상대적으로 안정적인 제어가 가능한 것으로 판단된다.

References

1. Ryan O'Hayre, Suk-Won Cha, Whitney Colella, Fritz B. Prinz, "Fuel Cell Fundamentals", WILEY
2. J-W. Ahn, S-Y. Choe, "Coolant controls of a PEM fuel cell system", *Journal of Power Sources*, Vol. 179, 252-264, (2008)
3. R.M. Moor, K.H. Hauer, G. Randolph, M. Virji, "Fuel cell hardware-in-loop" *Journal of Power Sources*, Vol. 162, 302-308, (2006)
4. Thomas H. Bradley, Blake A. Moffitt, Dimitri N. Mavris, Thomas F. Fuller, David E. Parekh, "Hardware-in-the-Loop Testing of a Fuel Cell Aircraft Powerplant", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 25, No. 6, Nov.-Dec., 1336-1344, (2009)
5. Lucia Gauchia, Javier Sanz, "A Per-Unit Hardware-in-the-Loop Simulation of a Fuel Cell/Battery Hybrid Energy System", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57, No. 4, Apr,

1186-1194, (2010)

6. Sampath Yerramalla, Asad Davari, Ali Feliachi, Tamal Biswas, "Modeling and simulation of the dynamic behavior of a polymer electrolyte membrane fuel cell", *Journal of Power Sources*, Vol. 124, 104-113, (2003)
7. Zijad Lemeš, Andreas Vath, Th. Hartkopf, H. Mä ncher, "Dynamic fuel cell models and their application in hardware in the loop simulation", *Journal of Power Sources*, Vol. 154, 386-393, (2006)
8. Fei Gao, Benjamin Blunier, Marcelo Godoy Simoes, Abdellatif Miraoui, "PEM Fuel Cell Stack Modeling for Real-Time Emulation in Hardware-in-the-Loop Applications", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 26, No. 1, Mar, 184-194, (2011)
9. Jay T. Pukrushpan, Anna G. Stefanopoulou, Huei Peng, "Control of Fuel Cell Power Systems", Springer
10. M. Prithiviraj, M. J. Andrews, "Three Dimensional Numerical Simulation of Shell-and-Tube Heat exchangers. Part I: Foundation and Fluid Mechanics", *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications : An International Journal of Computation and Methodology*, Vol. 33, No. 8, 799-816, (1998)
11. T. Kuppan, "Heat Exchanger Design Handbook", Marcel Dekker, Inc.
12. John H. Lienhard IV, John H. Lienhard V, "A Heat Transfer Textbook", Phlogiston Press