

# 상용차용 고분자 전해질 연료전지 냉각시스템 배열에 따른 성능 특성

우중빈<sup>1</sup> · 김영현<sup>1</sup> · 유상석<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>충남대학교 대학원 기계공학과, <sup>2</sup>충남대학교 공과대학 기계공학부

## Performance of Fuel Cell System for Medium Duty Truck by Cooling System Configuration

JONGBIN WOO<sup>1</sup>, YOUNGHYEON KIM<sup>1</sup>, SANGSEOK YU<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Korea

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author :  
sangseok@cnu.ac.kr

Received 7 May, 2021  
Revised 26 July, 2021  
Accepted 2 August, 2021

**Abstract >>** Fuel cell systems for medium duty truck require high power demands under driving. Since high power demands results in significant heat generation, thermal management is crucial for the performance and durability of medium duty truck. Therefore, various configurations of dual stacks with cooling systems are investigated to understand appropriate thermal management conditions. The simulation model consists of a dynamic fuel cell stack model, a cooling system model equipped with a controller, and the mounted controller applies a feedback controller to control the operating temperature. Also, In order to minimize parasitic power, the comparison of the cooling systems involved in the arrangement was divided into three case. As a result, this study compares the reaction of fuel cells to the placement of the cooling system under a variety of load conditions to find the best placement method.

**Key words :** Proton exchange membrane fuel cell(고분자 전해질 연료전지), Thermal management(열 관리), Parasitic energy(기생 전력), Cooling system(냉각 시스템), Hydrogen heavy duty truck(수소 중형 트럭)

### Nomenclature

$T_{FC}$  : 연료전지 온도 [°C]  
 $T_{RV}$  : 레저버 온도 [°C]  
 $T_{amb}$  : 대기 온도 [°C]

$J_{FC}$  : 전류 밀도 [ $A/cm^2$ ]  
 $V_{FC}$  : 연료전지 전압 [V]  
 $A_{FC}$  : 활동 면적 [ $cm^2$ ]  
 $Q$  : 방열량[W]  
 $\dot{m}$  : 질량 유량 [ $kg/s$ ]

$C_p$	: 비열 [ $kJ/kg \cdot K$ ]
$N_{channel}$	: 채널 개수
$h$	: 대류 열전달 계수 [ $W/m^2 \cdot K$ ]
$U$	: 총합 열전달 계수 [ $W/m^2 \cdot K$ ]
$A_t$	: 전열 면적 [ $cm^2$ ]
$f$	: 밸브 개도율
$P_{fan}$	: 냉각팬 소비 전력 [ $kW$ ]
$P_{pump}$	: 냉각수 펌프 소비 전력 [ $kW$ ]

## 1. 서론

수송 부문의 기후변화에 대한 대응 방안으로 고분자 이온 교환막 연료전지(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)를 탑재한 승용차가 시장을 형성하고 있다. 수송용 PEMFC는 운전 부하 변동이 크고, 전기화학 반응에 의한 발열이 부하에 비례하므로, 적절한 열관리가 필수적이다.

최근 수소 상용 트럭과 수소 택시 기술 개발이 가속화되면서 내구성에 대한 요구가 더 커지고 있다. 수소 상용 트럭은 기존 승용차 대비, 상시 부하 요구량이 크고 저속 주행 패턴을 가지고 있어서 고성능 냉각계통이 요구되고 있으나 아직 문헌상 관련 연구나 보고는 미흡하다.

PEMFC 시스템의 체계적 물 관리와 열관리 연구에 관한 다수의 모델링 논문들이 보고되고 있다. Wang 등<sup>1)</sup>은 다수의 온도 조건에서의 연료전지 성능 실험과 모델링 결과를 비교하여 평가하는 연구를 수행하였다. Chavan과 Talange<sup>2)</sup>는 기존의 PEMFC 모델을 MATLAB/SIMULINK<sup>®</sup> (MathWorks, Natick, MA, USA)를 이용하고 스택 거동을 모사하는 모델을 제안하였다. Pukrushpan<sup>3)</sup>은 열 모델을 제외한 차량용 연료전지 스택과 압축기 모델링을 통해, 압축기 제어 알고리즘을 도출하였다. Vasu와 Tangirala<sup>4)</sup>는 Jay 모델을 기반으로 열관리 모델을 적용하였다. Amphlett 등<sup>5)</sup>은 집중 용량법으로 과도 열 모델을 개발하였다.

연료전지 열관리 및 온도제어와 관련하여 Pourrahmani 등<sup>6)</sup>은 인공신경망을 이용해 열관리와 최적설계를 수행하였고, PEMFC의 열관리와 관련하여 가스유동 체

널 내 다공성 매체의 영향에 관한 연구도 수행하였다. Lim 등<sup>8)</sup>은 PEMFC의 다양한 전류밀도에 관한 열관리의 효율적인 고장진단 연구를 진행하였다. Hu 등<sup>9)</sup>은 냉각 시스템용 펌프전압과 바이패스 밸브 개도율 조정을 위한 퍼지 컨트롤러를 포함하여 냉각회로를 설계하였다. Rabbani와 Rokni<sup>10)</sup>는 냉각 시스템에 여러 개의 PI 제어를 적용하였다. 하지만, 기존 연구들은 연료전지의 기생 전력을 고려하여 진행하지 않았으며, Han 등<sup>11)</sup>은 연료전지 시스템을 평가하기 위해서 다중 입력 다중 출력(multi-input multi-output) 시스템을 적용하고, 다양한 제어전략에 따른 기생전력 비교 연구를 수행하였다. 기존 연구는 승용차 관점에서 진행되었으며, 수소 상용차는 패키징 공간이 더 좁고 주행 속도가 느리기 때문에, 더 가혹한 환경에서 작동되어야 하지만, 아직 관련 연구는 보고된 바 없다.

본 연구에서는 상용차용 연료전지 PEMFC의 고부하 운전 시 냉각 목표를 달성하기 위해, 냉각 시스템 배열 조건을 탐색하고, 피드백 제어를 통해 연료전지 시스템의 온도 응답 특성을 분석하고자 한다. 연료전지 시스템 모델은 동특성 모델을 적용하고, 다수의 바이패스 밸브를 적용하여 적절한 열관리 기법을 도입하고자 한다.

## 2. 상용차용 PEMFC 시스템 모델

5 ton 급 상용 트럭의 통상적인 동력이 300 마력 급인 점을 고려하여, 본 연구에서는 기존 승용 연료전지 시스템 2기를 적용하여 출력을 얻고자 하였다. 2기의 연료전지 시스템 장치도는 Fig. 1과 같다.

이 시스템은 PEMFC 스택 2개, 공기 공급계, 연료 공급계, 냉각팬, 워터 펌프, 라디에이터, 레저버, 2조의 냉각회로용 삼방밸브로 구성되었다. 본 연구는 열관리 계통 구성에만 관심을 두고 있기 때문에, 수소 공급계와 공기 공급계는 요구량을 필요 시 적정량을 공급해 줄 수 있다고 가정하였다. 제어기 작동 시 스택 계측 온도를 이용해 워터펌프 유량을 제어하며, 스택 입구단의 냉각수 온도는 라디에이터 냉각팬을 이용해 제어된다.

2.1 스택 모델

이론 전압은 Nernst 전압을 이용하였다.

$$E_{nernst} = 1.229 - (8.5 \times 10^{-3})(T_{FC} - 298.15) + 4.308510^{-5} \times T_{FC} \times \ln(P_{H_2} + 0.5P_{O_2}) \quad (1)$$

실제 연료전지 전압은 활성화 손실, 저항 손실, 농도 손실이 결합되어 있다. 실제 작동 전압은 손실을 고려하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{FC} = E_{nernst} - V_{act} - V_{\Omega} - V_{conc} \quad (2)$$

연료 전지 스택 내의 채널에서의 가스 유동은 중보존식으로부터 유도된다.

$$\frac{dm_{O_2,ca}}{dt} = W_{O_2,ca,in} - W_{O_2,ca,out} - W_{O_2,react} \quad (3)$$

$$\frac{dm_{N_2,ca}}{dt} = W_{N_2,ca,in} - W_{N_2,ca,out} \quad (4)$$

$$\frac{dm_{V,ca}}{dt} = W_{V,ca,in} + W_{V,ca,gen} + W_{V,memb} - W_{V,ca,out} \quad (5)$$

$$\frac{dm_{H_2,an}}{dt} = W_{H_2,an,in} - W_{H_2,an,out} - W_{H_2,react} \quad (6)$$

$$\frac{dm_{V,an}}{dt} = W_{V,an,in} - W_{V,an,gen} - W_{V,memb} - W_{V,an,out} \quad (7)$$

연료전지 스택은 집중 용량법을 적용해 모델링하였다. 스택 동적 응답 온도는 냉각수에 의한 열대류, 가스에 의한 열대류, 주변 외기에 의한 열대류에 의해 설명된다.

$$\frac{dT_{FC}}{dt} = \frac{Q_{FC} - Q_g - Q_{cool} - Q_{conv}}{C_{p,FC} \cdot m_{FC} \cdot V_{FC,vol}} \quad (8)$$

$$Q_{FC} = V_{FC} \cdot J_{FC} \cdot A_{FC} \left( \frac{U_{FC}}{V_{FC}} - 1 \right) \quad (9)$$

$$Q_{gas} = [C_p \cdot \dot{m} \cdot (T_{out} - T_{in})] \quad (10)$$

$$Q_{cool} = \dot{m}_c \cdot N_{channel} \cdot C_{p,cool}(T_{out} - T_{in}) \quad (11)$$

$$Q_{amb} = h_{FC} \cdot A_{FC} \cdot (T_{FC} - T_{amb}) \quad (12)$$

2.2 냉각 시스템 모델

라디에이터는 스택의 전기화학반응에 의해 발생

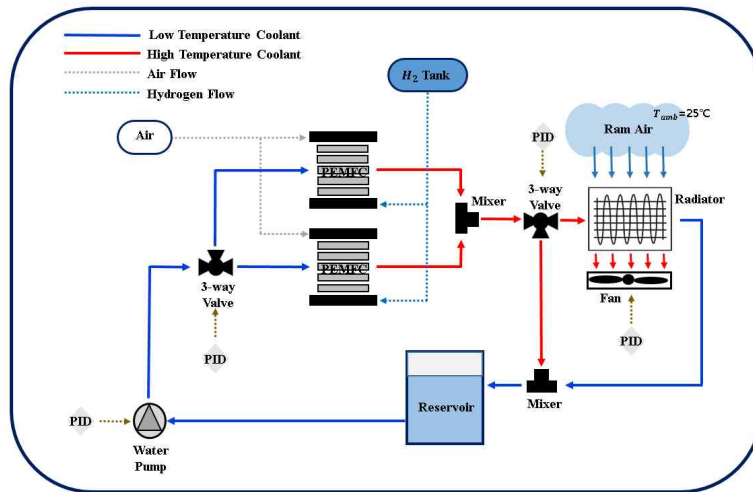


Fig. 1. Schematics of a fuel cell system with auxiliary component

된 열을 제거하기 위해 사용된다. 라디에이터 모델은 튜브, 루버 휠 그리고 그 외 부속 장치들로 구성된다. 스택에서 생성된 고온 냉각수는 튜브를 통해 흐르면서 냉각팬에 의해 냉각된다. 라디에이터의 열전달량은 다음과 같다.

$$q = UA_t(T_e - T_a) \tag{13}$$

$$U = \left( \frac{1}{h_c} + \frac{t_c}{k_t} + \frac{A_t}{\eta_o h_o A_o} \right)^{-1} \tag{14}$$

레저버는 냉각수 저장고로, 스택 전단에 위치하는 것으로 가정하였으며, 냉각수의 총 중량은 7 kg으로 설정하였으며, 다음으로부터 계산된다.

$$\frac{dT_{RV}}{dt} = \frac{C_{p,cool} \times \dot{m}_{cool}}{C_{p,RV} \times m_{RV}} (T_{mix} - T_{RV}) \tag{15}$$

냉각수의 열용량이 주행풍의 열용량보다 크기 때문에, 스택 온도 제어는 주요 제어는 전동식 워터펌프를 이용하고, 미세 제어는 팬 제어를 통해 달성하고자 한다. 제어 방법은 PI 제어를 적용하였다. 냉각 팬의 성능곡선은 AP 등의 실험에서 제공된 실험 데이터를 적용하였다<sup>2)</sup>. 제어 전략은 기존에 본 연구실에서 개발된 냉각 계통 제어 전략을 채택하였다<sup>13,14)</sup>. 또한, 워터펌프와 냉각 팬 소비 전력은 다음과 같이 구할 수 있다:

$$P_{fan} = \frac{\dot{m}_{air} \times C_{p,air} \times T_{amb} \left( \left( \frac{P_{fan}}{P_{amb}} \right)^{\frac{r-1}{r}} - 1 \right)}{\eta_{fan}} \tag{16}$$

$$P_{pump} = \frac{\Delta P \times Q_{cool}}{\eta_{pump}} \tag{17}$$

삼방밸브는 열용량이 큰 냉각수를 이용해 연료전지 스택 온도를 보다 효과적으로 미세 제어하기 위해 적용하였다. 이중 스택을 사용하면서 냉각 계통을 단일 냉각 계통으로 하는 경우, 스택 온도 제어가 매

우 복잡해진다. 이를 위해 두 조 이상의 삼방밸브를 사용하여 냉각수를 분할 공급해주면, 두 스택의 정밀한 온도 제어가 가능하다. 삼방밸브의 개방 계수는 단순 선형 유량 가변으로 가정하였다. 스택 입구단 냉각수 온도는 삼방밸브 개방 계수를 이용해 제어하며, 삼방밸브 출구단의 엔탈피 분지는 에너지 보존 방정식으로 구하였다.

$$T_{mix} = T_{bypass}(1-f) + fT_{rad,out} \tag{18}$$

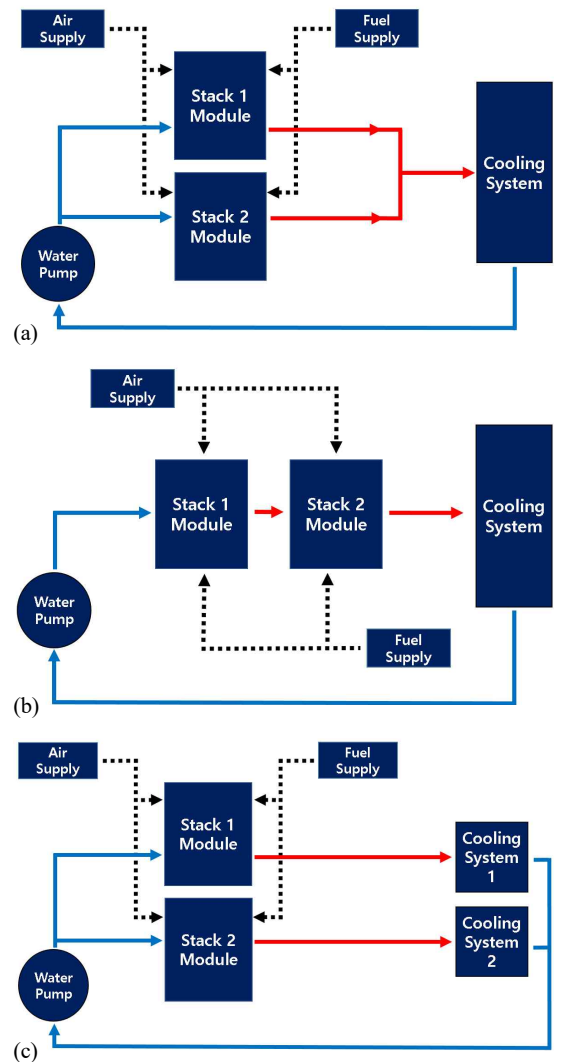


Fig. 2. Case of arrangement of the cooling system. (a) Parallel arrangement system. (b) Series arrangement system. (c) Individual cooling system.

### 2.3 열관리 계통 배열 구성 방법

스택의 적절한 온도를 유지하면서, 냉각 시스템의 기생 소비전력을 최소화하기 위해서는 냉각 계통 배열이 중요하다. 스택 온도 제어 지령을 통해, 냉각 시스템의 배열에 따라 직렬 배열, 병렬 배열, 개별 냉각으로 나뉘어 연료전지시스템의 응답특성을 비교분석하였으며, 냉각 시스템의 배열의 종류는 Fig. 2에 나타난다.

Fig. 2(a)는 스택 병렬 배열로 냉각수가 병렬로 연결된 스택을 통과 후 냉각 시스템으로 들어가는 방식이고, 냉각수는 삼방밸브에 의해 각각의 스택으로 균등하게 분배되어 공급된다. Fig. 2(b)는 스택 직렬 배열로 냉각수가 직렬로 연결된 스택을 통과 후 냉각 시스템으로 들어가는 방식이며, 병렬배열과 달리 냉각수의 대부분이 스택 1차 모듈을 통과 후 스택 2차 모듈로 공급되고, 워터펌프의 제어점은 스택 2차 모듈로 지정하였다. Fig. 2(c)는 개별 냉각으로 냉각수가 병렬로 연결된 스택을 지나 각각의 냉각 시스템으로 들어가 개별 냉각되는 방식이고, 중요한 점은 냉각 장치가 각각 스택에 독립적으로 구축이 되어 있어 냉각팬의 제어점을 각각 가지고 있기 때문에 각각의 스택 모듈에서 나온 냉각수의 온도는 각각 구축되어 있는 냉각팬에 의해 제어된다. 이 세 개의 케이스 모두 삼방밸브를 적용하여 스택 간의 냉각수

를 분할공급 해주었으며, 냉각 시스템에 피드백 제어를 적용하여 시뮬레이션을 진행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 스택 모델 검증

PEMFC 동특성 모델을 검증하기 위하여 문헌상의 결과와 비교하였고 시스템 구성품의 동특성은 이론적 계산을 통하여 구하였다<sup>1)</sup>. 스택의 평균온도를 70°C로 유지하였으며, 운전 압력은 3 atm이다. 모델링 결과와 문헌상 결과를 비교하여 보면 약 3%의 오

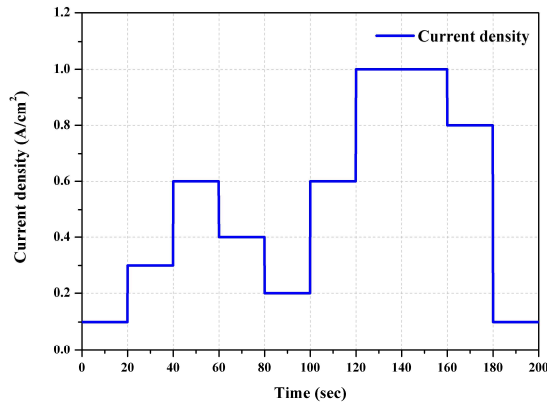


Fig. 4. Input current density supplied to the proton exchange membrane fuel cell system

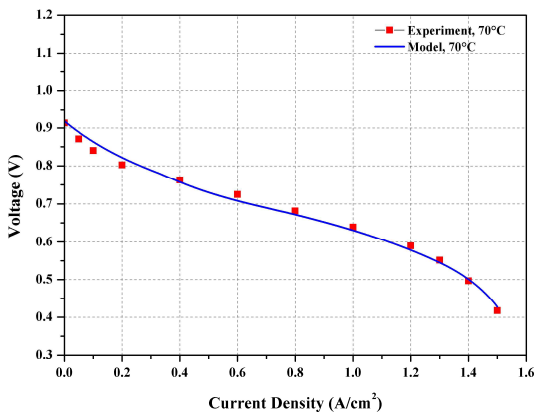


Fig. 3. Polarization curve for dynamis proton exchange membrane fuel cell model validation

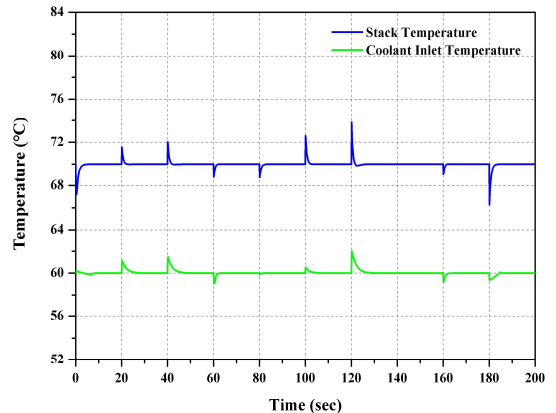


Fig. 5. Dynamic temperature responses of the stack and reservoir

차가 있었으며, Fig. 3에는 이러한 비교 결과를 보여 주고 있다.

상기 모델을 바탕으로 연료전지의 안정적 작동 범위를 0.65 V (1.0 A/cm<sup>2</sup>) 이상으로 설정하였으며, 다양한 부하에 따른 연료전지 시스템의 응답을 분석하기 위해 시스템에 공급되는 입력전류는 Fig. 4에 나타내었다.

또한 연료전지 스택의 온도는 피드백 제어를 이용해 작동 온도가 70°C로 유지되도록 제어하고, 냉각수 입구 온도는 냉각팬과 삼방밸브에 의해 작동 온도를 60°C로 유지하였으며, 결과는 Fig. 5에 나타내었다.

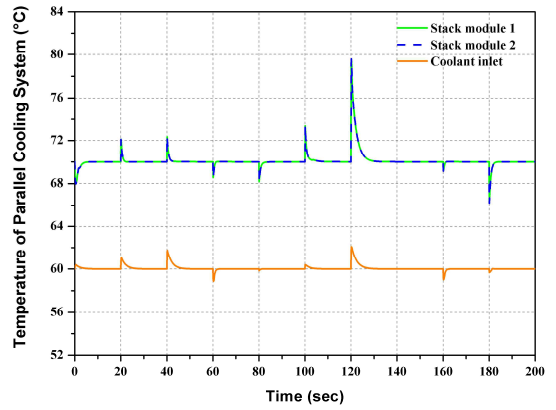
### 3.2 배열 별 스택과 냉각수 입구 운전 온도 응답

Fig. 6은 배열에 따른 스택의 운전 온도 응답을 나타내었다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이, 각 그림 모두 스택과 냉각수 입구 온도가 각각의 목표 운전 온도인 70°C와 60°C로 제어되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6(a), (c)는 병렬 냉각 시스템과 개별 냉각 시스템이며 두 시스템은 냉각수가 동일한 양으로 각각의 스택에 공급되고 그로 인해 스택 모듈 1과 2의 온도가 동일하게 나타난다. Fig. 6(b)는 직렬 냉각 시스템이며 냉각수가 스택 모듈 1에 먼저 공급된 후 스택 모듈 2로 공급되므로 스택 모듈 1이 오버슈트가 적고 매우 안정적인 형태가 나타난다. 또한, 직렬 냉각 시스템은 스택 당 공급되는 냉각수의 양이 다른 배열보다 많기 때문에 다른 배열보다 상대적으로 오버슈트가 작고 안정적인 온도 그래프가 나타난다.

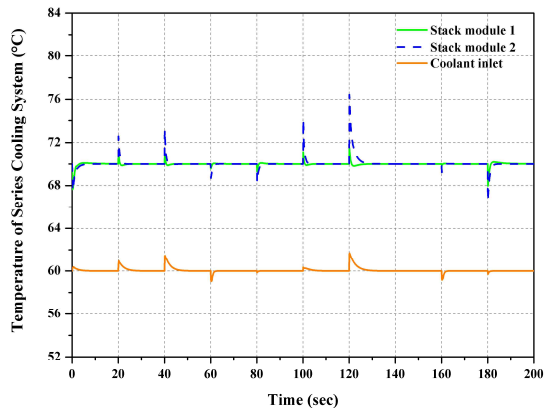
### 3.3 배열 별 시간 가중 제어 누적 오차량(integral of time weighted absolute error, ITAE)

제어시스템에 따른 시스템 특성을 보다 명확히 구분하기 위해 ITAE를 확인하였다. ITAE를 확인하면 제어 시스템의 성능에 따른 냉각 계통의 운전 특성을 정량적으로 평가할 수가 있으며, 제어 지령에 따른 응답 만족도 평가를 효과적으로 수행할 수 있다<sup>15)</sup>.

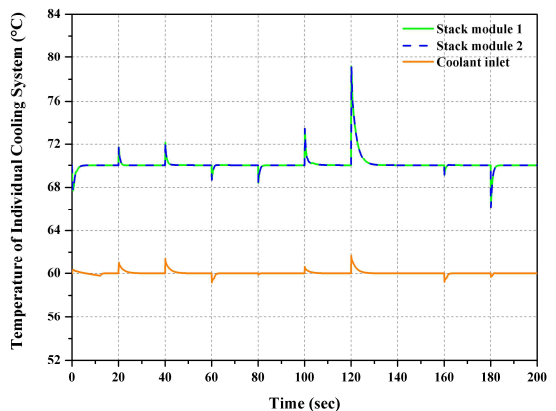
Figs. 7, 8은 스택 온도와 냉각수 입구 온도의 ITAE를 각각 보여준다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 6. Dynamic temperature responses of the stack and reservoir according to arrangement. (a) Parallel cooling system (°C), (b) Series cooling system (°C), (c) Individual cooling system (°C).



Fig. 7에서는 직렬 냉각 시스템의 ITAE가 가장 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 연료전지 동특성 시스템에서 스택의 온도는 워터펌프에 의해 제어되며, 냉각수 입구 온도는 냉각팬에 의해 제어된다. 또한 스택 온도와 레저버 온도는 냉각수 유량의 영향을 받는다.

따라서, 직렬 냉각 시스템은 워터펌프에서 나오는 냉각수가 나누어지지 않고 스택으로 공급되기 때문에 병렬 냉각 시스템이나 개별 냉각 시스템보다 스택 당 공급되는 냉각수의 양이 많고 스택 작동 온도가 다른 배열보다 안정적으로 제어되므로 스택 온도의 ITAE가 가장 낮게 나타난다.

또한, 개별 냉각은 냉각팬이 2개로 구성되어 있어

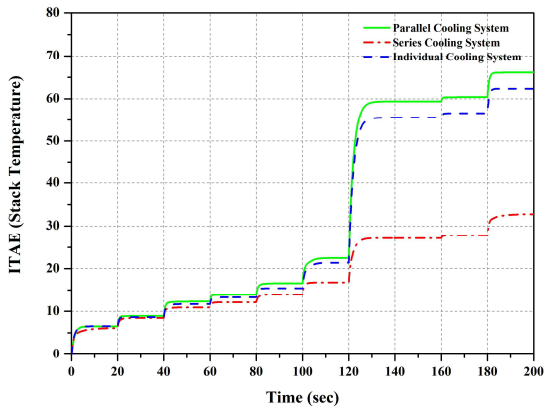


Fig. 7. ITAE of stack temperature for three different arrangement. ITAE, integral of time weighted absolute error.

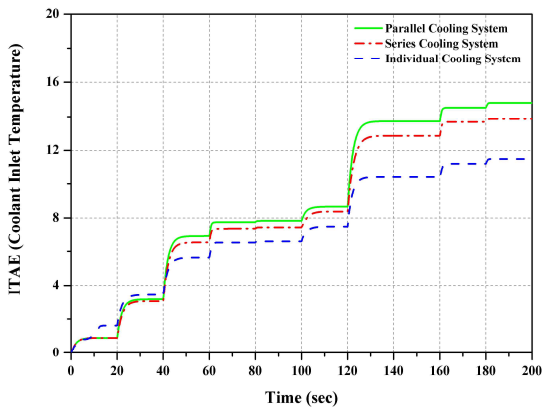


Fig. 8. ITAE of coolant inlet temperature for three different arrangement. ITAE, integral of time weighted absolute error.

스택을 통과한 고온의 냉각수를 좀 더 효율적으로 냉각시킬 수 있기 때문에 Fig. 8에서 냉각수 입구 온도는 다른 배열보다 안정적으로 제어되며 냉각수 입구 온도의 ITAE는 가장 낮게 나타난다.

### 3.4 배열 별 기생전력 및 에너지 비교

냉각 시스템의 기생 소비 전력을 최소화 하기 위해 배열에 따라 기생전력과 기생에너지를 비교하였으며, Figs. 9, 10은 각각 냉각 시스템의 기생 소비 전력과 소비 에너지를 보여준다.

Fig. 9에서 직렬 냉각 시스템은 저-중부하 구간에서는 전력 소비가 가장 낮지만, 고부하 구간에서는 개별 냉각 시스템보다 전력 소비가 크게 나타난다.

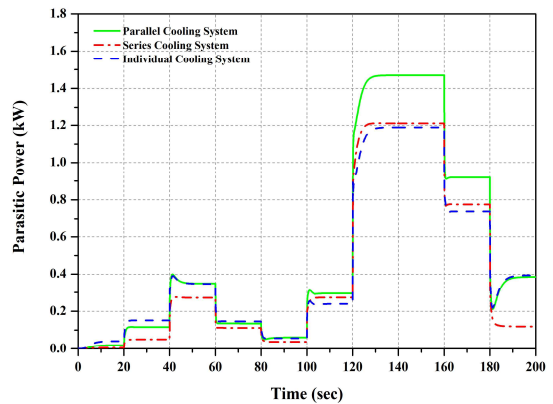


Fig. 9. Parasitic power according to arrangement (kW)

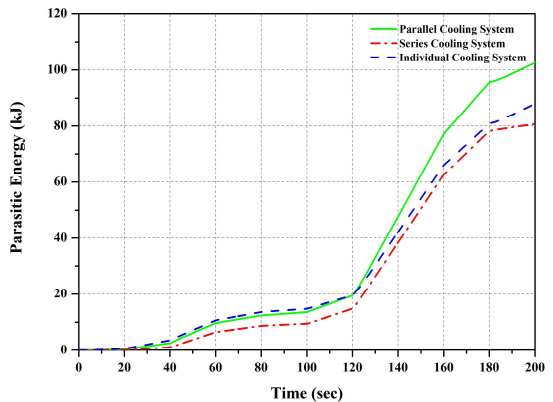


Fig. 10. Parasitic energy according to arrangement (kW)

하지만, Fig. 10을 보면 전체적인 소비 에너지량을 비교해 봤을 때 직렬 냉각 시스템의 소비 에너지량이 가장 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

병렬 냉각 시스템과 개별 냉각 시스템은 직렬 냉각 시스템과 달리 냉각수가 분할되어 양단의 스택으로 공급되며, 펌프의 소비전력은 높게 나오게 된다. 또한, 고부하 구간에서 2개의 냉각 시스템을 갖춘 개별 냉각은 분할된 냉각수를 좀 더 쉽게 냉각하기 때문에 기생 전력 소모량이 가장 낮고 냉각 시스템이 1개인 병렬 냉각 시스템은 분할된 고온의 냉각수가 합쳐지며 냉각팬과 워터펌프의 기생 소비전력이 상당히 높아진다. 직렬 냉각 시스템은 냉각수가 분할되지 않아 병렬 냉각 시스템에 비해 펌프의 소비 전력이 낮지만 고부하 구간으로 갈수록 후단 스택을 통과한 고온의 냉각수에 의해 냉각팬의 전력 소비량이 증가한다.

전체적으로 비교 분석을 하였을 때, 직렬 냉각 시스템이 전력 소모량은 가장 낮으면서 온도 제어 성능도 양호하기 때문에 가장 적절한 제어 전략으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 상용차용 연료전지인 PEMFC 스택 모듈 2개와 냉각 시스템을 병합하여 연료전지의 고부하 운전 시 냉각 목표를 달성하기 위해 해석을 진행하였다. 냉각 시스템을 제어하기 위해 사용된 제어기는 PI 제어기이며, 다양한 부하 조건에서 냉각 시스템의 배열에 따라 발생하는 스택의 거동 특성을 비교 분석하였다. 또한 상용차용 연료전지 PEMFC의 기생전력 및 ITAE를 비교 분석하였으며 주요 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 스택의 온도 동특성 모델에서의 열관리를 위한 PI 제어기가 정상적으로 작동하는 것을 확인하였다. 그리고 3가지 배열 모두 목표 작동온도를 유지하며 작동되는 것을 확인하였다.

2) ITAE 측면에서 직렬 냉각 시스템이 다른 배열보다 좀 더 안정적으로 제어되고, ITAE가 가장 높은

병렬 냉각 시스템보다 50.7% 낮은 결과 값이 나오는 것을 확인하였다.

3) 기생 전력 측면에서는 저부하 구간에서는 직렬 냉각 시스템, 고부하 구간에서는 개별 냉각 시스템의 기생 소비 전력이 낮게 나왔지만, 전체적인 에너지 소모량은 직렬 냉각 시스템이 가장 낮게 나오는 것을 확인하였다.

4) 전체적으로 비교분석을 하였을 때 직렬 냉각 시스템이 전력소모량은 가장 낮으면서 온도 제어 성능도 양호하기 때문에 시스템의 효율을 증가시킬 수 있는 가장 적절한 제어 전략으로 판단된다.

#### 후 기

이 연구는 2021년도 산업통상자원부 및 산업기술 평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구입니다 (10084611) (20011907).

#### References

1. L. Wang, A. Husar, T. Zhou, and H. Liu, "A parametric study of PEM fuel cell performances", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 28, No. 11, 2003, pp. 1263–1272, doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(02\)00284-7](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(02)00284-7).
2. S. L. Chavan and D. B. Talange, "Modeling and performance evaluation of PEM fuel cell by controlling its input parameters", *Energy*, Vol. 138, 2017, pp. 437–445, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.070>.
3. J. T. Pukrushpan, "Modeling and control of fuel cell systems and fuel processors [dissertation]", University of Michigan, 2003. Retrieved from [http://www-personal.umich.edu/~annastef/FuelCellPdf/pukrushpan\\_thesis.pdf](http://www-personal.umich.edu/~annastef/FuelCellPdf/pukrushpan_thesis.pdf).
4. G. Vasu and A. K. Tangirala, "Control-orientated thermal model for proton-exchange membrane fuel cell systems", *Journal of Power Sources*, Vol. 183, No. 1, 2008, pp. 98–108, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.03.087>.
5. J. C. Amphlett, R. F. Mann, B. A. Peppley, P. R. Roberge, and A. Rodrigues, "A model predicting transient responses of proton exchange membrane fuel cells", *Journal of Power sources*, Vol. 61, No. 1–2, 1996, pp. 183–188, doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(96\)02360-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(96)02360-9).
6. H. Pourrahmani, M. Siavashi, and M. Moghimi, "Design optimization and thermal management of the PEMFC us-



- ing artificial neural networks”, *Energy*, Vol. 182, 2019, pp. 443–459, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.06.019>.
7. H. Pourrahmani, M. Moghimia, and M. Siavashi, “Thermal management in PEMFCs: the respective effects of porous media in the gas flow channel”, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 44, No. 5, 2019, pp. 3121–3137, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.11.222>.
  8. I. S. Lim, J. Y. Park, E. J. Choi, and M. S. Kim, “Efficient fault diagnosis method of PEMFC thermal management system for various current densities”, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 46, No. 2, 2021, pp. 2543–2554, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.085>.
  9. P. Hu, G. Y. Cao, X. J. Zhu, and M. Hu, “Coolant circuit modeling and temperature fuzzy control of proton exchange membrane fuel cells”, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 35, No. 17, 2010, pp. 9110–9123, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.06.046>.
  10. A. Rabbani and M. Rokni, “Dynamic characteristics of an automotive fuel cell system for transitory load changes”, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 1, 2013, pp. 34–43, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2012.12.003>.
  11. J. Han, J. Park, and S. Yu, “Control strategy of cooling system for the optimization of parasitic power of automotive fuel cell system”, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 39, 2015, pp. 13549–13557, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.08.067>.
  12. N. S. Ap, P. Guerrero, and P. Jouanny, “Influence of fan system electric power on the heat performance of engine cooling module”, SAE International in United States, 2003, doi: <https://doi.org/10.4271/2003-01-0275>.
  13. 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, No. 11, 2010, pp. 2525–2532, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.03.023>.
  14. J. Han and S. Yu, “Ram air compensation analysis of fuel cell vehicle cooling system under driving modes”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 142, 2018, pp. 530–542, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.038>.
  15. Y. Saygili, I. Eroglu, and S. Kincal, “Model based temperature controller development for water cooled PEM fuel cell systems”, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 1, 2015, pp. 615–622, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.10.047>.