

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2011.35.6.593

ISSN 1226-4881

PEMFC의 열관리가 시스템의 성능에 미치는 영향[§]

이정호* · 명노성* · 김동섭**

* 인하대학교 기계공학부

The Effect of Thermal Management on the Performance of a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell System

Jeong Ho Lee*, No Sung Myung* and Tong Seop Kim**

* Dept. of Mechanical Engineering, Inha Univ.

(Received December 10, 2010 ; Revised January 18, 2011 ; Accepted February 22, 2011)

Key Words: PEMFC(고분자 전해질형 연료전지), Heat Management Unit(열관리계), Off-Design(탈설계), System Performance(시스템 성능)

초록: 다양한 작동 조건에서 고분자 전해질형 연료전지의 성능 변화를 예측하기 위한 해석 프로그램을 구성하여 열관리가 시스템의 성능에 미치는 영향을 해석하였다. 전체 시스템은 연료전지 스택, 공기공급계, 연료공급계, 열 관리계로 구성 되었으며 각 구성부의 설계점을 고려하여 열역학적 모델링을 적용하였다. 외기온 변화와 냉각 시스템의 성능 변화에 따라 연료전지 스택의 온도 및 출력 변화가 예상되므로 탈설계 해석을 하여 전체 시스템의 성능 변화를 예측하였다.

Abstract: An analysis program to simulate the operation of a polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) system was set up, and system operation with variations in the working conditions of various components (especially the thermal management system) was simulated. The entire system included a PEMFC stack and balance-of-plant components such as an air-supply unit, a fuel-supply unit, and a heat-management unit (cooling system). Thermodynamic models of all components were made to evaluate the design performance of the entire system, and then off-design models were set up to simulate the operation of the entire system under arbitrary working conditions. A parametric study was carried out to examine the effects of varying the operating conditions (especially the ambient conditions and the operating conditions of the cooling system) on the operation and performance of the entire system.

- 기호설명 -

- A : 면적 [m²]
- C_p : 정압비열 [kJ/kg·K]
- F : 패러데이 상수 [96485 J/V·mol]
- h : 비엔탈피 [kJ/kg]
- i : 전류밀도[A/cm²]
- LHV : 저위발열량 [kJ/kg·K]
- P : 압력 [bar]
- T : 온도 [K]
- R : 기체상수[kJ/kmol·K]
- U : 열전달계수 [kW/m²·K]

- V : 전압 [V]
- \dot{m} : 질량유량 [kg/s]
- \dot{Q} : 열전달 [kJ/s]
- \dot{W} : 출력 [kW]
- ΔT_{lm} : 대수평균온도차 [K]
- α : 물질전달계수
- γ : 비열비
- η : 효율

하첨자

- AC : 교류
- Conv : 변환
- d : 설계점
- fc : 연료전지
- rad : 방열판
- w : 물

§ 이 논문은 대한기계학회 2010년도 추계학술대회 (2010. 11. 3.-5., ICC제주) 발표논문임

† Corresponding Author, kts@inha.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서 론

환경오염과 화석에너지 자원 고갈 등과 같은 문제점들이 세계적 관심사로 떠오르면서 최근 이에 대한 대안으로 연료전지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 연료전지는 전기화학 반응을 통해서 연료의 화학에너지를 전기에너지로 직접 변환하는 에너지 변환장치 이어서 효율이 높을 뿐 아니라 기타 환경오염 물질이 발생되지 않는다는 장점을 가진다. 이로 인하여 발전, 수송 등 여러 분야에서 주목을 받고 있고 실용화를 위한 많은 연구가 이루어지고 있다.⁽¹⁾ 그 중에서도 고분자 전해질형 연료전지(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell)는 100°C 미만의 낮은 작동온도와 빠른 시동성 및 응답성, 높은 출력 밀도를 갖고 있어 자동차를 포함한 발전시스템 분야 등에 사용하기 위해 활발한 연구가 진행중에 있다.⁽²⁻⁵⁾ PEMFC 시스템은 화학반응을 통해 전기를 발생시키는 연료전지 스택과 반응에 필요한 산소를 공급하고 가습하는 공기공급계, 연료인 수소를 공급하는 수소공급계 그리고 연료전지의 안정적 작동 온도를 유지하기 위한 열 및 물 관리계 등으로 구성된다. 연료전지의 안정적인 작동을 위해서는 연료전지 스택 설계도 중요하지만 공기공급계, 수소공급계, 열 및 물 관리계 등의 BOP(Balance of Plant) 구성 역시 중요한 요소라고 할 수 있으며, 이에 따라 연료전지 스택과 함께 시스템의 BOP에 대한 연구들도 진행되고 있다.⁽⁶⁻⁸⁾

연료전지 시스템에서 열 및 물 관리계는 냉각수 펌프, 방열판, 냉각팬 등으로 구성되고 냉각수는 스택 내부의 냉각 유로를 따라 흐르며, 냉각수는 펌프에 의하여 순환된다. 방열판에서는 냉각 팬에 의하여 냉각수가 다시 냉각되면서 최종적으로 스택에서 발생한 열을 외기로 방출한다. 결국 연료전지 시스템의 성능은 외기 조건과 열 관리 시스템의 구성부 작동 변화에 의하여 크게 영향을 받는다. 따라서 본 연구는 냉각 시스템의 실제적인 구성을 포함한 연료전지 시스템을 프로그램으로 구성하여 외기조건의 변화와 냉각 성능의 변화가 PEMFC 시스템의 성능에 미치는 영향을 모사하여 분석하는 것을 그 목적으로 하였다.

2. 시스템 구성 및 모델링

2.1 시스템 구성

PEMFC 시스템의 구성도를 Fig. 1에 나타내었

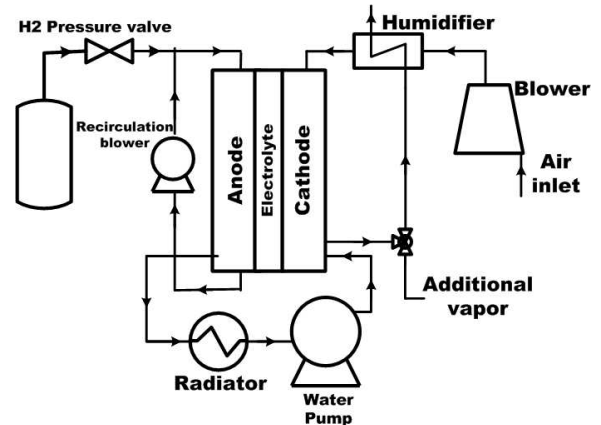


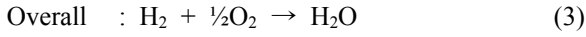
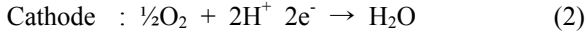
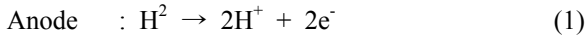
Fig. 1 Configuration of the PEMFC system

다. 블로워를 통해 공급된 공기는 막가습기에서 공기극 출구에서 나오는 상대적으로 습하고 온도가 높은 유동으로부터 열 및 습기를 전달받아서 가습된 상태로 연료전지 스택의 공기극으로 공급된다. 블로워는 연료전지의 화학반응에 사용하는 이론 공기량(stoichiometric ratio, SR)의 2배에 해당하는 공기를 공급한다. 연료/공기비는 모든 작동 조건에서 유지시켰다. 스택 내에서 연료이용률은 90%로 가정하여 유지시켰으며 이 때 연료극에서 남은 연료는 재순환되어 연료극으로 재공급되는 방식을 사용하였다.⁽⁹⁾ 제한된 연료전지 스택의 크기 내에서 보다 높은 출력을 얻기 위해서 연료이용률을 높게 설정하였다. 이렇게 공급된 공기와 수소의 전기화학 반응을 통하여 전기와 열을 발생시키며, 발생한 반응열은 열 및 물 관리계에 의해 제거되어 연료전지 스택이 일정한 온도를 유지하며 작동되도록 하였다. 모델링 및 해석을 위하여 MATLAB/SIMULINK를 사용하였다.

2.2 시스템 모델링

2.2.1 연료전지 스택 모델링

PEMFC 스택은 전해질막을 기준으로 하여 연료극(Anode)과 공기극(Cathode)으로 나누어진다. 연료극으로 연료인 수소 가스가 공급되며 막가습기를 통과하면서 온도와 상대습도가 높아진 공기가 공기극으로 공급된다. 연료극으로 공급된 수소는 수소이온과 전자로 분해되고, 공기극에서는 수소이온과 산소가 반응하여 물과 열이 발생하게 된다.



스택 내에서 전기화학반응에 의해 발생하는 연료전지의 전압은 Nernst 전압에서 활성화 분극(activation loss), 오hm 분극(ohmic loss), 농도 분극(concentration loss)을 감하여 계산하였는데, 각 손실들은 전류 밀도와 기타 작동변수들의 함수로 주어진 다음과 같은 상관식들⁽¹⁰⁾을 사용하였다.

$$V_{act} = \frac{RT}{2F\alpha} \ln\left(\frac{i+i_{in}}{i_0}\right) \quad (4)$$

$$V_{ohm} = iR_{ohm} \quad (5)$$

$$V_{conc} = \frac{RT}{2F} \ln\left(\frac{i_L}{i_L-i}\right) \quad (6)$$

여기서 i_0 는 교환전류밀도(exchange current density), i_L 은 한계전류밀도(limit current density)이다.

연료전지 단위셀의 유효 반응면적은 320cm², 전체 스택의 수는 440이다. 연료전지 스택의 출력은 전력변환에 관한 문헌⁽¹¹⁾을 참고하여 직-교류 변환 효율을 95%로 가정하여 계산하였으며, 전체 시스템의 출력은 연료전지 출력과 블로워의 소모동력, 재순환 블로워의 소모동력, 냉각수 펌프의 소모동력 그리고 냉각팬의 소모동력을 고려하여 다음과 같이 계산되었다.

$$\dot{W}_{fc,AC} = (V \cdot I) \cdot \eta_{conv} \quad (7)$$

$$\dot{W}_{system} = \dot{W}_{fc,AC} - \dot{W}_{blower} - \dot{W}_{pump} - \dot{W}_{fan} \quad (8)$$

연료전지 스택과 전체 시스템의 효율은 외부에서 공급된 수소의 발열량을 기준으로 다음과 같이 계산된다.

$$\eta_{stack} = \frac{\dot{W}_{fc,AC}}{(\dot{m} \cdot LHV)_{H_2}} \quad (9)$$

$$\eta_{system} = \frac{\dot{W}_{system}}{(\dot{m} \cdot LHV)_{H_2}} \quad (10)$$

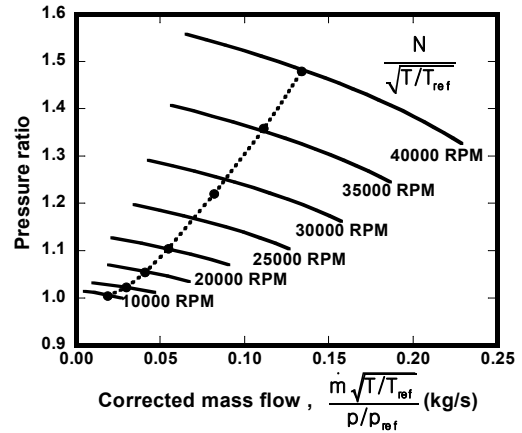


Fig. 2 Blower performance map

2.2.2 블로워 모델링

공기 공급에 이용된 블로워의 성능 곡선을 Fig. 2에 나타내었다. 이 성능곡선은 Jensen & Kristensen 방법⁽¹²⁾을 사용하여 구한 것인데, 변수들이 수정회전수 및 유량으로 표현되어 있으므로 외기온도 변화 등 다양한 운전상태 변화 해석에 이용 가능하다. 블로워의 출력은 등엔트로피 효율을 고려한 다음 식을 이용하여 계산된다.

$$\dot{W}_{blower} = \dot{m}c_p \left[\frac{T_{in}}{\eta_{blower}} \left(\frac{p_{out}}{p_{in}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (11)$$

운전 회전수가 주어졌을 때 블로워의 작동점은 블로워의 작동 선상에서 스택과 막가습기에서의 압력 손실과 블로워 상승 압력이 매칭되는 점이다. 본 연구에서는 아직 스택 내의 공기극 유로 형상과 막가습기 내에서의 압력 손실에 대한 실측 자료가 주어진 상황이 아니므로 일반적인 블로워 작동선과 배관에서의 압력손실 상관식⁽¹³⁾을 바탕으로 압력손실을 아래 식으로 모사하였다.

$$\frac{\Delta p}{\Delta p_d} = \left(\frac{\dot{m}}{\dot{m}_d} \right)^{1.82} \left(\frac{p}{p_d} \right)^{-1} \quad (12)$$

이 식을 이용하여 기준 외기 상태인 20°C, 1atm 상태에서 주어진 회전수별 작동점들을 이은 작동선이 Fig. 2에 예시되어 있다.

2.2.3 막가습기 모델링

막가습기는 대향류 원통형 형상으로서 셀-튜브

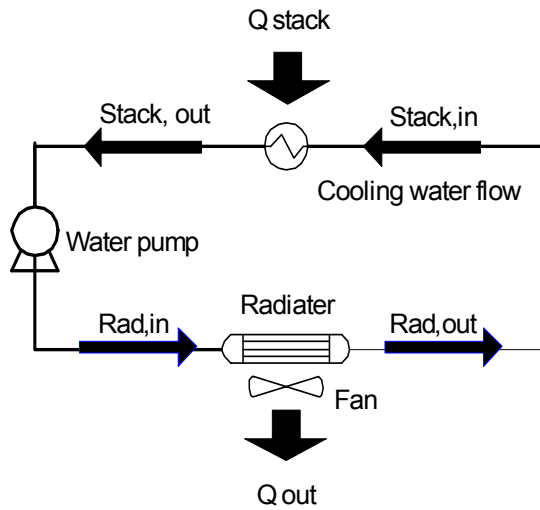


Fig. 3 Configuration of cooling system

(Shell & tube) 형태를 지닌다. 막가습기의 셸 측으로는 연료전지 출구 가스인 습공기가 유입되고, 튜브 측으로는 블로워를 통해 공급된 건공기가 유입되어 막가습기에서 열 및 물질 전달이 이루어진 뒤 상대습도가 증가한 후 연료전지의 공기극으로 공급된다. 열 및 물질 전달을 포함한 막가습기의 모델링에 대한 내용은 선행 연구⁽¹⁴⁾에 자세히 설명되어 있으므로 생략한다.

2.2.4 냉각 계통 모델링

냉각 계통의 구성을 Fig. 3에 나타내었다. 계산은 설계점과 탈설계점으로 구분되는데, 먼저 설계점 계산을 살펴보면 다음과 같다. 식 (13)과 같이 스택 내에서의 에너지 균형 식을 통하여 설계점에서 스택의 발열량을 계산한다. 냉각수와 냉각공기의 설계 입출구 온도를 주고 스택에서 발생된 열이 냉각수에 의해 제거되어 스택이 설계 온도인 70℃를 유지한다고 가정하여 냉각수의 유량을 결정하였다. 대수평균온도차와 열량으로부터 스택의 열전달용량 (UA)가 구해진다.

$$\sum_j \dot{m}_{in,j} h_{in,j} - \sum_j \dot{m}_{out,j} h_{out,j} = \dot{W}_{elec} + \dot{Q}_{stack} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{stack} &= \dot{m}_w (h_{stack,out} - h_{stack,in}) \\ &= (UA)_{stack} \Delta T_{lm,stack} \end{aligned} \quad (14)$$

방열판에서는 역시 냉각 공기의 설계 입출구 온도를 주면 냉각공기 유량과 열용량이 구해진다.

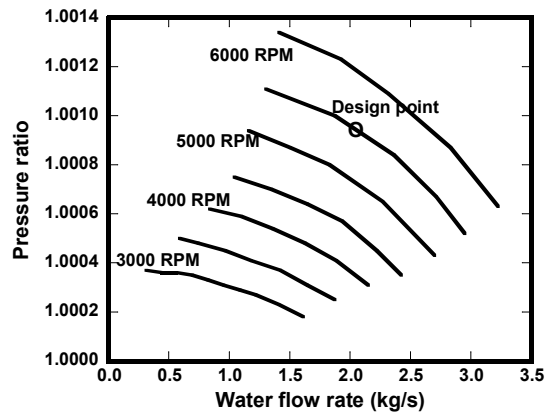


Fig. 4 Water pump performance map

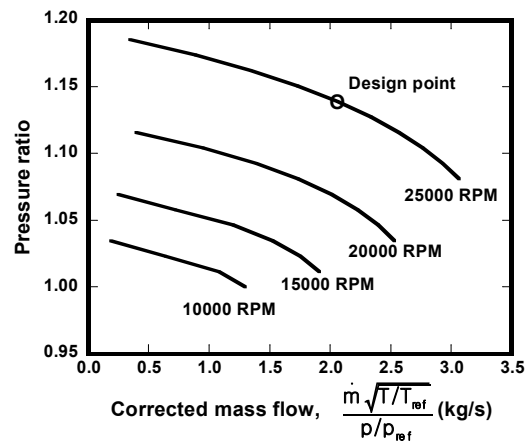


Fig. 5 Cooling fan performance map

$$\begin{aligned} \dot{m}_w (h_{w,rad,out} - h_{w,rad,in}) \\ &= \dot{m}_{air} (h_{air,rad,out} - h_{air,rad,in}) \\ &= (UA)_{rad} \Delta T_{lm,rad} \end{aligned} \quad (15)$$

탈설계점에서는 임의의 한 변수가 변하게 되면 다른 변수들을 역시 위 식들을 이용하여 구하게 된다. 예를 들어 냉각 공기의 입구온도가 변하게 되면 식 (15)를 만족하는 냉각공기 출구 온도가 구해지면서 열전달율이 구해지고 이로부터 냉각수의 운전 조건들(유량과 입구온도가 정해져 있으면 출구온도)이 구해진다. 스택에서도 유사한 방법으로 식 (14)를 이용하여 열전달 계산이 수행되면서 스택의 새로운 작동온도가 정해지고 이에 따라서 식 (13)로부터 출력이 계산된다.

방열판에서의 열전달을 계산할 때, 열전달 계수는 냉각수와 냉각 공기의 유량에 의한 영향이 지배적이므로 문헌^(15,16)을 참고하여 아래 식을 사

용하여 설계값으로 부터 변화를 고려하였다.

$$\left(\frac{U}{U_d}\right) = \left(\frac{\dot{m}}{\dot{m}_d}\right)^{0.64} \quad (16)$$

스택 내에서의 열전달은 스택 내부의 냉각 유로 형상을 고려하지 않았기 때문에 열전달 계수가 일정하다고 가정하여 계산하였으나 형상이 충분히 주어진다면 변화를 고려할 수 있다.

또한 냉각수 펌프와 냉각팬은 일반적인 자동차 방열 시스템에서 사용하는 것들과 유사하므로 탈 설계 해석을 위한 성능 곡선은 문헌 자료⁽¹⁷⁾를 바탕으로 하여 공기 공급 블로워와 같은 방법으로 모델링 하였고, 각 성능 곡선을 Fig. 4, 5에 나타내었다. 냉각수 펌프의 성능 곡선은 문헌의 자료를 그대로 참고하였고, 냉각팬의 성능 곡선은 블로워의 성능 곡선을 축소하여 사용하였다.

3. 해석 결과

기준 외기상태 (20°C, 1atm)에서 시스템의 주요 설계 값들을 Table 1에 보였다. 이를 바탕으로 몇 가지 운전변수들의 변화에 따른 전체 시스템의 운전점과 성능의 변화를 해석하였다. 외기온도 변화에 의한 영향을 살폈고, 이어서 냉각 공기 유량 변화와 냉각수의 유량 변화가 미치는 영향을 고찰하였다.

먼저, 기준 외기상태에서 공기공급계의 블로워 회전수를 변화시켜 공기 공급량에 따른 연료전지 스택과 전체 시스템의 성능 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 이때 스택의 운전 온도를 설계 온도로 정한 70°C로 유지하기 위해서 냉각팬과 냉각수 펌프의 회전수를 조절하여 냉각 유량을 변화시켰다. 각 구성부의 소모동력을 Fig. 7에 보였다. 수소 공급계의 재순환 블로워 소모동력은 매우 작아서 그림에 나타내지는 않았다.

공기 블로워의 회전수가 증가함에 따라 공급되는 공기 유량이 증가하고, 설정된 공연비에 맞추어 수소 공급량도 증가하여 스택의 출력이 증가하게 된다. 하지만 높은 출력을 내기 위하여 수소-산소의 반응량이 증가하면서 발생하는 열량도 증가하기 때문에 냉각 시스템을 적절히 제어하지 않으면 스택의 온도가 증가하게 된다. 따라서 스택온도를 설계 온도인 70°C로 유지하려면 냉각

Table 1 Design parameters and performance of the PEMFC system

Design parameters	Value
T _{stack} (K)	343.27
P _{stack} (bar)	1.358
T _{ambient} (K)	293.15
RH _{ambient} (%)	60
Air supply (kg/s)	0.114
Fuel supply (kg/s)	0.0016
(UA) _{stack} (kW/K)	19.69
(UA) _{rad} (kW/K)	3.71
Cooling air flow (kg/s)	2.0
Cooling water flow(kg/s)	2.0
Performance	
Current density (A/cm ²)	1.0
Voltage (V)	0.693
Stack power (kW)	92.75
Blower power (kW)	6.49
Pump power (kW)	0.67
Fan power (kW)	1.58
System efficiency (%)	47.5

공기와 냉각수의 유량이 증가해야 하기 때문에 Fig. 7과 같이 냉각 시스템의 소모동력이 증가하게 된다. 반대로 공기 공급이 작아지면 출력은 감소한다. 효율은 출력이 감소할수록 증가하게 되는데, 출력이 낮을수록 연료전지 스택의 전류 밀도가 감소하고 셀 전압이 증가하기 때문이다. 또한 공기 공급 블로워와 냉각팬, 냉각수 펌프의 소모동력이 감소하기 때문에 시스템 효율은 증가한다. 공기 공급 유량이 증가할 때, 스택 효율과 전체 시스템의 효율을 Fig. 6에서 비교하여 보면 스택의 효율 감소 보다 시스템의 효율 감소 비율이 더 크다. 스택에서 높은 출력을 내기 위해서는 공기 공급 블로워의 소모동력이 크게 증가하기 때문이다. 또한 출력이 높아질수록 스택에서 발생하는 열이 증가하므로 스택의 온도를 70°C로 제어하기 위한 냉각팬, 냉각수 펌프의 소모동력이 증가하기 때문이다. 이러한 BOP들의 소모동력 증가는 전체 시스템의 효율 감소에 더 큰 영향을 준다. 연료전지 스택의 효율은 순출력 40~90kW 사이에서 52~58%를 보이지만 전체 시스템의 효율은 45~56%이다.

다음은 외기 온도 변화에 대한 영향을 해석하

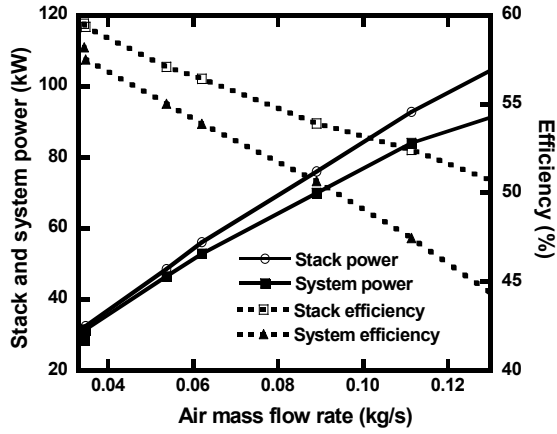


Fig. 6 Influence of the variation in the PEMFC stack air flow rate by blower speed change on PEMFC stack and system performance (20°C ambient temperature)

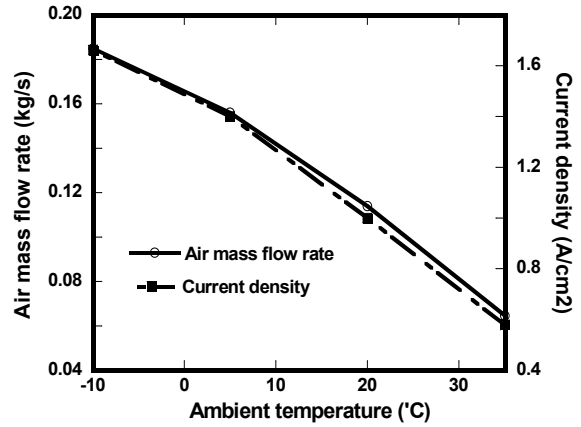


Fig. 8 Variations in stack air mass flow rate and current density with ambient temperature (stack air blower speed = 35,000 rpm)

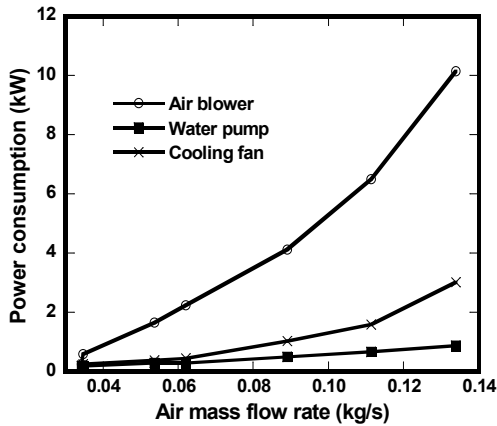


Fig. 7 Variations in auxiliary power consumptions with the PEMFC stack air flow rate (20°C ambient temperature)

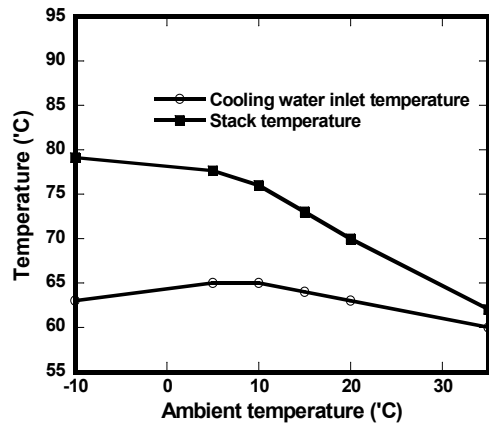


Fig. 9 Variations in cooling water and stack temperature with ambient temperature (stack air blower speed = 35,000 rpm)

였다. 외기온이 바뀌면 스택으로 공급되는 공기의 온도가 바뀌게 된다. 예를 들어 외기온이 올라가면 공기 공급 블로워의 회전수는 일정해도가습기로 공급되는 공기의 유량이 줄어들게 되고 (Fig. 2 참조), 이에 따라서 가습기를 거쳐서 스택으로 공급되는 공기의 온도와 습도는 증가하게 된다. 이에 더하여 냉각팬의 공기 유량도 감소한다. 공기공급 블로워의 회전수를 35000 rpm 으로 고정시키고 외기의 상대습도가 60%로 일정할 때, 외기 온도의 변화에 따른 공기공급 유량과 스택의 전류밀도 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 이 때 냉각수 펌프나 냉각팬의 인위적인 제어는 없다고 가정했다. 즉, 두 기기의 회전수를 설계 값으로 일정하게 유지하였다. 공기공급 블로워의 회

전수가 일정할 때 외기온이 낮을수록 유입되는 공기의 질량 유량은 증가하게 되고 설계 값과 동일하게 공연비를 맞춰 연료를 공급하므로 연료전지 스택 내에서의 반응량이 증가하게 되어 전류밀도, 스택 온도 및 스택 출력이 증가한다. 하지만 외기온이 낮을수록 방열판에서의 냉각수 온도가 낮아지고 냉각팬으로 공급되는 공기 유량도 증가하게 된다. 온도가 증가한 스택에서 열을 얻어온 냉각수가 이러한 낮은 외기 온도의 공기와 방열판에서 열교환을 하기 때문에 Fig. 9에 나타난 것처럼 스택 입구의 냉각수 온도는 과하게 높아지지 않고 62~65°C의 범위 안에 있으며, 이에 따라서 스택은 80°C 이내의 온도에서 작동하는 것을 확인할 수 있다. 외기 온도가 낮아질수록 스택의 전압 감소 차이 보다 연료 공급량의 증가

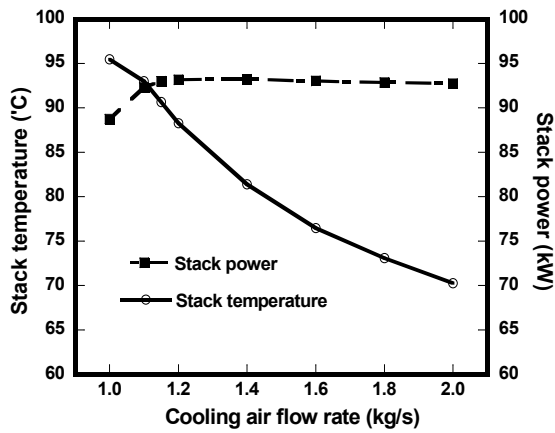


Fig. 10 Variations in stack temperature and power with cooling air flow (stack air blower speed = 35,000 rpm)

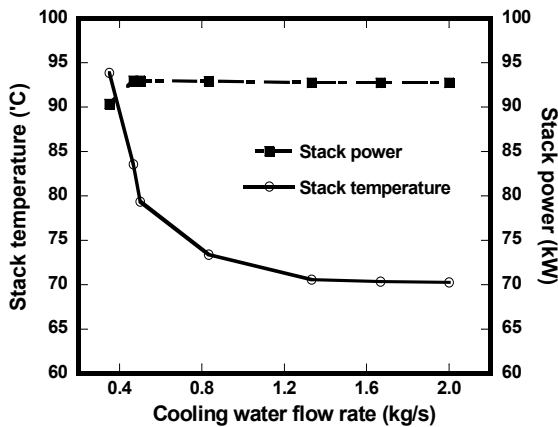


Fig. 11 Variations in stack temperature and power with cooling water flow (stack air blower speed = 35,000 rpm)

에 따른 전류밀도의 증가 폭이 크기 때문에 전체 시스템의 출력은 증가한다.

다음으로 냉각시스템의 작동 변화 (냉각팬이나 냉각수 펌프의 회전수 변화에 의한 유량 변화) 따른 시스템의 성능을 해석하였다. 공기 공급 블로워의 회전수가 35000 rpm, 외기 조건은 기준 외기상태(20°C, 1atm) 일 때 냉각 공기와 냉각수 유량 변화 (각각 독립적으로 변화함)에 따른 스택의 온도, 출력 변화를 Fig. 10, 11에 나타내었다. 냉각 공기의 유량이 설계 값(2kg/s) 이하로 감소함에 따라 방열판에서의 냉각 성능이 저하되어 냉각수의 온도가 증가하게 되어 스택의 작동 온도가 90°C 이상까지 증가함을 확인할 수 있다.

또한 작동 온도가 70~80°C의 범위 안에 있을 때에는 스택의 출력 변화에 큰 차이가 없음을 확인하였다. 스택의 작동 온도가 85°C 이상으로 증가하면 스택 출력이 감소하게 되는데 이는 스택 모델링에 고려된 활성화 분극, 오음 분극, 농도 분극 관계식에서 온도가 증가함에 따라 각 분극이 증가하고, 특히 농도 분극에 고려된 한계전류밀도가 온도에 의한 영향을 크게 받게 되어 온도가 증가함에 따라 농도 분극이 급격하게 증가하기 때문이다. 본 연구에서 고려된 온도 범위가 상관계의 유효한 온도 범위 내에 있으므로 예측된 결과가 합리적일 것으로 기대 되지만 추후 실제 시스템의 결과와 비교하여 확인이 필요하다고 판단된다. 냉각공기의 유량 감소에 따라 냉각팬의 소모 동력도 감소하지만 스택의 출력 감소에 비해 냉각팬의 소모동력 감소는 전체 시스템으로 볼 때 영향을 미치지 못하기 때문에 시스템의 효율은 감소하게 된다. 냉각수 유량의 감소도 냉각 공기 유량 감소와 유사한 결과를 가져온다. 냉각수 유량 감소에 따라 스택의 온도가 70°C에서 93°C 까지 증가하고 스택의 출력은 85°C 이상의 스택의 작동 온도에서부터 감소함을 확인하였다. 이런 결과를 통해서 스택의 작동 온도가 출력이 감소하기 시작하는 온도 이상이 되지 않도록 냉각 시스템의 제어가 요구됨을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 냉각 계통을 고려한 전체 PEMFC 시스템을 프로그램으로 구성하고 모델링된 시스템을 통하여 외기 온도 조건 변화에 따른 스택의 성능 해석이 수행되었으며, 냉각 공기와 냉각수 유량 변화에 따른 연료전지 스택의 온도 및 출력 변화가 해석되었다.

전체 시스템에서 공기 공급량이 증가함에 따라 시스템 출력은 증가하고, 높은 출력을 내기 위한 공기 공급 블로워의 소모동력과 스택의 온도를 설계 온도인 70°C로 유지하기 위한 냉각 시스템의 소모동력은 증가한다. 연료전지 스택의 효율 감소와 비교하였을 때 BOP들의 소모동력은 시스템 효율 감소에 더 큰 영향을 주기 때문에 BOP의 관리가 중요하다.

PEMFC 시스템에서 연료전지 공기공급 블로워의 회전수가 일정한 경우에 외기 온도가 낮을수

록 공기 공급량이 증가하고 그에 따라 소모되는 연료량이 증가하게 되어 연료전지 스택의 출력은 증가한다. 이러한 경우 낮아진 냉각 공기의 영향으로 방열판에서 냉각수가 더 많은 열을 방출하기 때문에 외기온 $-10\sim 35^{\circ}\text{C}$ 에서 스택은 $70\sim 80^{\circ}\text{C}$ 온도 범위 안에서 작동하게 되고 외기온이 감소할수록 스택의 출력은 증가한다.

냉각 시스템에서는 냉각수 유량과 냉각공기의 유량 감소에 따라 스택의 작동 온도가 증가하게 된다. 스택 작동 온도가 85°C 이내의 작동 운전 범위에서는 출력에 큰 영향을 미치지 않지만, 냉각 유량의 감소에 따른 85°C 이상의 운전 조건에서는 스택 전압이 감소하게 되고 그에 따라 스택의 출력이 감소한다. 따라서 스택의 운전 온도 유지를 위한 냉각 시스템의 제어가 요구된다.

후 기

본 연구는 2008년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 신재생에너지기술개발사업 연구 과제입니다. (2008-N-FC12-J-02-2-100)

참고문헌

- (1) Williams, M. C., Strakey, J. and Sudoval, W., 2006, "U.S. DOE Fossil Energy Fuel Cell Program," *Journal of Power Sources*, Vol. 159, pp. 1241~1247.
- (2) Perry, M. L., Fuller, T. F., 2002, "A Historical Perspective of Fuel Cell Technology," *Journal of Electrochemical Society*, Vol. 149, pp.59~67.
- (3) Bernay, C., Marchand, M. and Cassir, M., 2002, "Prospects of Different Fuel Cell Technologies for Vehicle Applications," *Journal of Power Sources*, Vol. 108, pp. 139~152.
- (4) Boettner, D. D., Paganelli, G., Guezennec, Y. G., Rizzoni, G, Moran, M. J., 2002, "Proton Exchange Membrane Fuel Cell System Model of Automotive Vehicle Simulation and Control," *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 124, pp. 20~27.
- (5) Zhao, H., Burke, A. F., 2009, "Optimization of Fuel Cell System Operation Conditions for Fuel Cell Vehicles," *Journal of Power Sources*, Vol.

- 186, pp. 408~416.
- (6) Bao, C., Ouyang, M., Yi. B., 2006, "Modeling and Optimization of the Air System in Polymer Exchange Membrane Fuel Cell System," *Journal of Power Sources*, Vol. 156, pp. 232~243.
- (7) Park, S. K., Choe, S. Y. and Choi, S. H., 2008, "Dynamic Modeling and Analysis of a Shell-and-Tube Type Gas-to-Gas Membrane Humidifier for PEM Fuel Cell Applications," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 33, pp. 2273~2282.
- (8) Kadylak, D., Cave, P., Merida, W., 2009, "Effectiveness Correlations for Heat and Mass Transfer in Membrane Humidifiers," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 1504~1509.
- (9) Badami, M., Mura, M., 2010, "Theoretical Model with Experimental Validation of a Regenerative Blower for Hydrogen Recirculation in a PEM Fuel Cell System," *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, pp. 553~560.
- (10) Frano, B., 2005, PEM Fuel Cell, *Elsevier*, pp. 40~50.
- (11) Lee, J. M., Choi, J. Y., Yi, J. H., Suh, I. Y., 2009, "A State of Authentication & Development of Small PCS for Fuel Cell," *KIPE Summer Annual Meeting*, pp. 211~213.
- (12) Jay, T. P., Anna, G. S. and Huei Peng, 2005, Control of Fuel Cell Power Systems, *Springer*, pp. 17~21.
- (13) Erbes, M. R., Gay, R. R., 1989, "GATE/CYCLE Predictions of the Off-Design Performance of Combined-Cycle Power Plant," *Simulation of Thermal Energy Systems*, ASME AES-Vol. 6/HTD, Vol. 124, pp. 43~51.
- (14) Ji, S. W., Kim, T. S., 2009, "Performance Analysis of a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Coupled with Air Supply Unit," *KSME Fall Annual Meeting*, pp. 2523~2528.
- (15) Jung, J. S., Lee, C. S., 1989, "Design of the Heat Dissipation Rate of Automotive Radiation," *Trans. KSAE*, Vol. 11, No. 5, pp. 65~75.
- (16) Kays, W. M., London, A. L., 1984, Compact Heat Exchangers (3rd edition), *Krieger Publishing*

Company, p. 270.

(17) Shin, C. H., Lee, S. H., Park, W. G. and Jang, G. L., 2006, "The Study About the

Performance-Analysis of a Automotive Engine Cooling System," *Trans. KSAE*, Vol. 14, No. 2, pp. 39~48.