

# 마이크로프로세서를 이용한 소형 PEM 연료전지 스택의 제어

金兌勳<sup>\*</sup>, 崔宇鎭<sup>†</sup>

## Control of Small PEM Fuel Cell Stack by a Microprocessor

Tae-Hoon Kim and Woo-Jin Choi

### 요 약

본 논문에서는 소형 PEM(Proton Exchange Membrane) 연료전지 스택의 마이크로프로세서를 이용한 제어에 관하여 소개한다. 연료전지 제어의 핵심 기술인 스택 내부의 수분 관리는 부하에 의해 요구되는 연료와 온도에 따른 냉각용 공기의 유량을 적절하게 조절하고, 잉여수분을 스택으로부터 배출시킴으로써 성취된다. 이러한 주변장치(BOS: Balance of Stack)의 제어는 시스템의 안정적인 운전을 좌우하는 중요한 요소이기 때문에 이를 정확하게 제어하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 최적 운전조건에서 공기유량과 퍼지주기를 측정하고 이를 바탕으로 BOS를 제어함으로써 BOS의 소비전력을 최소화하여 연료 효율을 향상시킬 수 있었으며, 이를 실험을 통해 검증하였다. 마이크로프로세서를 이용하여 개발된 제어기는 시스템의 운전 안정성을 향상시켜 소형 연료전지 스택의 제어에 널리 사용될 것으로 기대된다.

### ABSTRACT

In this paper, control of small PEM(Proton Exchange Membrane) fuel cell stack by a microprocessor is introduced. The water management of fuel cell stack inside, a key technique in fuel cell control, can be achieved by adjusting the required air flow for fuel and cooling, and by purging the excessive water from the stack. It is very important to precisely control the BOS(Balance of Stack) since the stable operation of the fuel cell system mainly depends on it. In this study the fuel efficiency of the system is improved by the control of the system based on the measured air flow and purge cycle during the optimal operation and its effectiveness is proved by the experiments. The operating stability of the system is improved by the developed controller using a microprocessor and it is expected to be widely used for the control of small PEM fuel cell stack.

**Key Words** : PEM fuel cell, Microprocessor, BOS control, Water management, Purge

### 1. 서 론

PEM(Proton Exchange Membrane) 연료전지는 저온에서 동작하기 때문에 빠르게 시동할 수 있고

MEA(Membrane Electrode Assembly)가 얇아서 콤팩트하게 만들 수 있으며 스택을 어느 방향으로 놓아도 동작한다는 장점 등으로 인해 자동차용이나 휴대용으로 사용하기에 적합하다. 특히, 소형 연료전지 시스템은 에너지 밀도와 효율이 높고 유해 물질의 배출이 없으며, 가습 장치와 같은 복잡한 BOS(Balance of Stack)를 필요로 하지 않는다는 장점 때문에 가까운 장래에 배터리가 담당하던 소형 가전기기용 전원공급 장치 영역을 흡수해 나갈 것으로 기대된다.

<sup>†</sup>교신저자 : 정희원, 송실대 전기공학부 조교수

E-mail : cwj777@ssu.ac.kr

<sup>\*</sup>학생회원, 송실대 전기공학부 재학

접수일자 : 2008. 8. 18

1차 심사 : 2008. 10. 8

2차 심사 : 2008. 10. 20

심사완료 : 2008. 10. 24

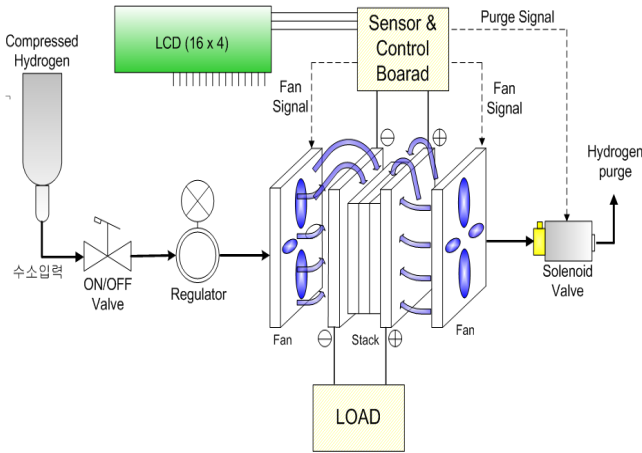


그림 1 소형 150W PEM 연료전지 전원 시스템  
Fig. 1 Small 150W PEM fuel cell power system

소형 연료전지 스택을 이용한 전원장치에 관한 다수의 연구가 보고되고 있다<sup>[1-6]</sup>. 그러나 대부분은 시스템에 관한 자세한 기술이 생략되어 있고, 스택의 제어에 관한 상세한 언급도 없다<sup>[1-4]</sup>. 참고문헌 [3-4]는 마이크로프로세서를 이용하여 스택을 제어한 것으로 보이나 BOS(Balance of Stack)의 제어방법에 관한 설명이 없으며 시스템에 관하여만 비교적 자세히 기술하여 기술적 진보성을 논하기 어렵다. 참고문헌 [7]은 소형 무가습 연료전지 스택의 제어가 연료 및 냉각용 공기의 유량만을 제어함으로써 가능함을 제시한 논문이며, 이후 참고논문 [8-12]까지 소형 무가습 연료전지의 물관리(Water Management)방법에 관한 연구가 다수 진행되었다.

PEM 연료전지 스택의 제어에 있어서 전해질의 수분관리와 스택의 온도관리는 안정된 출력을 얻는데 매우 중요한 문제이다. 수분의 양이 너무 많으면 Flooding이 되며, 또한 너무 적으면 Dehydration 되어 MEA의 성능을 저하시키게 된다. 이는 곧 연료전지의 성능 저하를 뜻하므로 시스템의 안정된 출력을 위해서는 냉각팬의 제어와 잉여 수분의 방출을 위한 퍼지 주기(Purge Cycle)의 제어는 매우 중요하다. 무가습의 소형 연료전지 시스템의 경우 연료는 압력에 의해 자동으로 공급되며 냉각팬은 연료전지 스택의 온도가 상승하였을 경우 자연 냉각에 의해 방출하지 못하는 열을 방출시키는 역할을 하는 동시에 MEA의 습도를 적절하게 유지하는 역할을 한다. 잉여 수분의 퍼지를 위해 사용되는 솔레노이드 밸브도 시스템의 상태에 따라 그 주기가 변경되어야 하며, 이들을 최적으로 제어

하여 최소한의 전력을 사용하도록 하여야 운전 효율을 극대화 할 수 있다.

본 논문에서는 전해질의 수분관리와 스택의 온도관리를 위해서, 마이크로프로세서를 통해 냉각팬과 퍼지용 솔레노이드 밸브를 최적으로 제어하는 방법에 관해 기술하고, 그림 1과 같은 시스템을 꾸미고 부하 실험을 통해 시스템의 안정성과 연료 효율의 향상을 검증하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 PEM 연료전지 스택의 물 관리 방법

소형 무가습 PEM 연료전지 스택의 물 관리는 특정 온도에서 캐소드 출구의 상대습도를 100%로 유지하는데 필요한 공기 유량의 화학량론(Stoichiometry)을 계산하여 공급함으로써 이루어진다<sup>[7-8]</sup>. 냉각팬을 이용하여 연료용 공기를 냉각용 공기와 함께 공급할 경우 팬이 공급해야 할 총 공기 유량은 식(1)과 같이 표현 할 수 있다.

$$\dot{m}_{fan,air} = \dot{m}_{reac,air} + \dot{m}_{cool,air} \quad (1)$$

연료전지의 화학 반응에 필요한 공기의 유량은 대기 중 산소의 비율을 감안하여 식 (2)와 같이 계산된다.

$$\dot{m}_{reac,air} = \frac{P_e}{4 \times V_{cell} \times F} \times \frac{1}{0.21} \quad (2)$$

그러나 식 (2)의 값을 그대로 사용할 경우 반응에 의해 산소가 모두 소진된 후 산소의 분압 저하에 의한 전압 손실이 매우 커지게 되므로 실제로는 식 (2)의 값보다 더 큰 값으로 화학량론을 설정해 주어야 한다.

PEM 연료전지 스택의 제어에 있어서 전해질 막의 수분관리에 대한 신뢰성을 유지하는 것이 핵심이다. 연료전지의 MEA가 적절한 수분을 갖게 하기 위해서는 출구공기의 상대습도는 80%~100%가 되어야 하며<sup>[7-8]</sup>, 동작 조건이 변화할 경우에도 이를 유지해야 한다.

연료전지의 캐소드 출구에서의 수증기압은 스택의 캐소드 입구 공기(대기)의 수분을 고려하여 식 (3) 및 (4)를 이용하여 계산할 수 있다<sup>[8]</sup>.

$$P_w = \frac{(0.420 + \Psi \lambda_{air}) P_{exit}}{(1 + \Psi) \lambda_{air} + 0.210} \quad (3)$$

$$\Psi = \frac{P_{win}}{P_{in} - P_{win}} \quad (4)$$

따라서 식(4)를 고려하여 계산된 식(3)의 수증기압의 값을 캐소드 출구 배출가스의 온도에서의 포화수증기압과 같게 만드는 공기의 화학량론을 도출 할 수 있고, 최종적으로 스택의 운전에 필요한 공기 유량은 식(5)와 같이 계산되어 진다.

$$\dot{m}_{react,air} = \frac{P_e}{4 \times V_{cell} \times F} \times \frac{1}{0.21} \times \lambda_{air} \quad (5)$$

## 2.2 냉각에 필요한 공기유량의 계산

연료전지 스택의 운전으로 발생한 열량 중 냉각시켜야 할 열량은 연료전지 스택 전체 생성열량에 자연대류 및 복사에 의해 소산되는 자연 발열량과 전기 화학 반응에 참여하는 유량에 의해 냉각되는 열량의 차로 식(6)과 같이 구할 수 있다.

$$Q_{cool} = Q_{stack} - Q_{dis} - Q_{react} \quad (6)$$

연료전지의 반응엔탈피 모두가 전기적 출력으로 변환된다면 연료전지 셀의 출력전압은 1.25V(LHV 기준)가 되며, 스택의 생성열량은 식(7)과 같이 계산된다<sup>[8]</sup>.

$$Q_{stack} = P_e \left( \frac{1.25}{V_{cell}} - 1 \right) \quad (7)$$

전체 발열 중 자연 발열은 자연대류 및 복사로 구분되어 진다.

$$Q_{dis} = Q_{conv} + Q_{rad} \quad (8)$$

자연 대류의 발열량인  $Q_{conv}$ 는 다음 수식과 같다<sup>[13]</sup>.

$$Q_{conv} = hA_s(T_s - T_o) \quad (9)$$

여기서  $h$ 는 대류 열전달 계수로써,  $Nu_L$  (Nusselt Number)의 함수이다.

$$h = \frac{k}{L} Nu_L \quad (10)$$

Nusselt Number는 발열체의 형상에 따라 달라지는데<sup>[14]</sup>,

연료전지 스택의 수직 평판의 경우 식(11)과 같고,

$$Nu_L = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{\left[ 1 + \left( \frac{0.5}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (11)$$

$$\text{여기서, } Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_o)L^3}{\nu\alpha}, \quad Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$

연료전지 스택의 수평 평판의 윗면일 경우 식(12)와 같으며,

$$Nu_L = 0.54 Ra_L^{1/4} \quad (10^4 \leq Ra_L \leq 10^7) \quad (12)$$

여기서,  $L = A_s/Pm$

연료전지 스택의 수평 평판의 아랫면일 경우 식(13)과 같다.

$$Nu_L = 0.27 Ra_L^{1/4} \quad (10^5 \leq Ra_L \leq 10^{10}) \quad (13)$$

여기서,  $L = A_s/Pm$

스택의 자연 복사 발열량  $Q_{rad}$ 은 식(14)와 같으며,

$$Q_{rad} = h_r A_s (T_s - T_o) \quad (14)$$

여기서  $h_r$ 는 복사 열전달 계수로써, 식(15)와 같이 계산되어 진다.

$$h_r = \epsilon\sigma(T_s + T_o)(T_s^2 + T_o^2) \quad (15)$$

연료로 사용되는 공기 유량에 의하여 냉각되는 열량은 다음과 같이 계산 된다.

$$Q_{react} = \dot{m}_{react,air} c_p (T_{react,out} - T_{react,in}) \quad (16)$$

따라서, 냉각팬에 의해 유입된 냉각용 공기에 의해 냉각되어야 하는 열량은 식(17)과 같이 나타나며,  $\dot{m}_{cool,air}$ 에 관하여 수식을 정리하면 연료전지 스택의 강제 냉각에 필요한 공기 유량을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \dot{m}_{cool,air} c_p \Delta T_{cool} \\ &= P_e \left( \frac{1.25}{V_{cell}} - 1 \right) - (Q_{conv} + Q_{rad}) - \dot{m}_{react,air} c_p \Delta T_{react} \end{aligned} \quad (17)$$

### 2.3 마이크로프로세서를 이용한 BOS의 제어

앞 절에서 설명된 공식을 이용하면 각 동작점에서 팬에 의해 스택에 공급되어야 하는 총 공기 유량은 식 (5) 및 (17)에서 구한 유량의 합이 된다. 그러나 이러한 결과는 수동제어기를 이용한 실험을 통해 최적의 운전조건에서 측정한 총 공기 유량과 많은 차이를 나타내었다(그림 2). 이는 실험에 사용된 BCS Fuel Cell사의 연료전지 스택이 측면에 냉각팬을 부착하여 냉각용 공기와 연료용 공기를 동시에 공급하는 구조를 채택하고 있어(그림 1), 팬에서 캐소드로의 공기 수급이 원활히 조절되지 못함과 팬이 연료전지 스택의 측면에 밀착되어 있음으로 인해 발생하는 냉각의 비효율성이 주요 원인으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 실험으로 얻은 전류와 공급 공기 유량과의 관계에 대한 데이터를 바탕으로 식 (18)과 같이 커브 피팅한 실험식을 이용하여 총 공기 유량을 계산하고 팬을 제어하였다. 식 (18)은 Matlab을 통해 커브 피팅 하여 구한 전류와 요구되는 공기 유량과의 관계식이다.

$$\dot{m}_{exp,air} = -0.001972I^3 + 0.005715I^2 + 0.4568I + 1.37 \quad (18)$$

마이크로프로세서는 연료전지 스택의 출력전류를 검출하고, 식(18)을 이용하여 계산된 공기의 유량을 공급하기 위하여, 팬의 속도제어를 위한 PWM(Pulse Width Modulation)방식의 전압 제어 신호를 마이크로프로세서를 통해 팬에 인가하며, 이때 부하에 따른 최적의 퍼지주기는 실험을 통해 측정된 값으로 만들어진 Look-up Table에서 찾아 밸브의 온/오프를 PFM(Pulse Frequency Modulation) 방식으로 출력하여 솔레노이드 밸브를 제어한다.

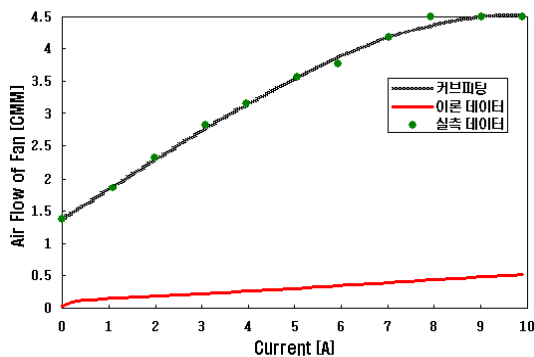


그림 2 계산 및 측정된 공기 유량의 커브 피팅 곡선  
Fig. 2 Calculated and measured air flow and its fitted curve

그림 2에서 점선 그래프는 식 (18)의 커브 피팅 곡선이며, 표 1은 부하에 따른 최적 퍼지 주기의 Look-up Table 이다. 그림 3은 연료전지 시스템의 제어 흐름도이다. 센서를 통해 얻어진 연료전지 스택의 전류, 전압, 온도를 이용하여 설정되는 최적의 팬 속도와 퍼지 주기를 이용하여 시스템을 제어한다.

### 2.4 150W 소형 PEM 연료전지 시스템 구성

본 논문에서 사용된 연료전지는 150W급 PEM 연료전지 스택으로 24개의 단전지와 냉각을 위한 3개의 냉각셀로 이루어져 있으며, 전극의 면적은 50cm<sup>2</sup>으로 BCS Fuel Cell사에서 제작되었다(그림 4). 네 개의 냉각 팬이 스택의 양쪽에 부착 되어 있는 공랭식이며, 퍼지를 위한 솔레노이드 밸브가 있다. 또한 무가습 방식이어서 가습을 위한 별도의 장치 없이 구동되기 때문에 시스템이 단순해져 소형 전원으로 이용하기에 적합하다. 그러나 스택과 함께 제조사에서 제공되는 제어기는 시스템의 상태에 따라 사용자가 팬과 퍼지밸브의 동작 주기를 가변제어를 이용하여 직접 조절하는 방식을 사용하고 있어 상용화하기에는 적합하지 않으므로 2.3절에서 설명한 방식대로 마이크로프로세서를 이용하여 연료전지 스택을 자동 제어하였다.

표 1 부하별 최적 퍼지의 주기  
Table 1 Optimum purge cycle at each load

부하전류[A]	Purge Cycle [sec]
0 ~ 3.0	30
3.0 ~ 6.0	20
6.0 ~ 9.0	10
9.0 이상	4

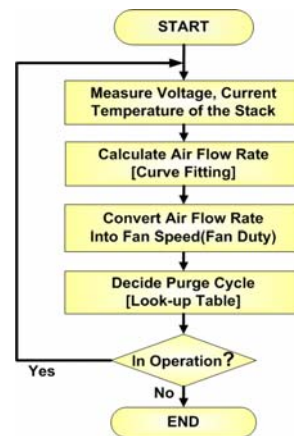


그림 3 연료전지 시스템의 제어 흐름도  
Fig. 3 Flowchart of the control of the fuel cell system

BCS사의 연료전지 스택에는 순도 99.99% 수소의 사용이 요구된다. 따라서 실험에서는 고압 실린더에 100기압으로 저장된 고순도 수소를 압력 조절기에 의해 0.2 기압으로 감압된 뒤 스택에 공급 하였다. 공기극(Cathode)에 필요한 산소는 네 개의 냉각팬이 공급한 주변 공기를 통해 공급되며, 그 외에 시스템의 On/Off 제어를 위한 밸브, 시스템을 자동제어하기 위한 마이크로프로세서를 포함한 센서 및 인터페이스 회로로 구성되어 있다. 또한 연료전지 스택의 상태를 나타내는 여러 가지 제량들은 실시간으로 LCD 모듈에 디스플레이 된다. 제어용 마이크로프로세서는 Atmel사의 8-Bit 마이크로컨트롤러인 ATmega128을 이용하였고, 센서를 통해 측정된 연료전지 스택의 전압, 전류 및 온도를 바탕으로 최적 운전조건에서 측정된 최적의 팬 속도와 퍼지 주기로 시스템은 자동제어 된다.

2.5 실험 및 고찰

실험을 통해 제안된 방식의 적절함을 평가하기 위해 그림 4와 같이 소형 150W PEM Fuel Cell 시스템 및 제어회로를 제작하였다. 제어기의 성능 및 효율을 검증하기 위해 동일한 형태의 가변부하에 대해 수동제어 방식과 개발된 자동제어 방식으로 각각 운전하면서 운전의 안정성과 사용 연료의 양을 비교하여 보았다.

그림 5는 본 논문에서 제안한 제어방식을 이용하여 PEM 연료전지 스택을 제어 하였을 때 연료 효율이 향상되는 것을 검증하기 위하여, 마이크로프로세서를 이용하여 제어한 경우와 제조사에서 제공한 수동제어기를 이용하여 매뉴얼에 따라 시스템을 제어 하였을 경우에 스택에 유입되는 수소의 유량을 각각의 경우 측정된 스택의 전력을 이용하여 유량을 역계산하는 방식으로 그린 그래프이다.



그림 4 개발된 소형 PEM 연료전지 전원 시스템  
Fig. 4 Developed small PEM fuel cell power system

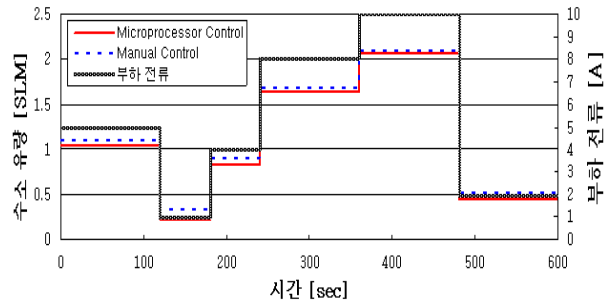


그림 5 동일 부하에서 각 제어방식 별 수소 유량의 비교  
Fig. 5 Comparison of the Hydrogen flow rate with each control method under the same load condition

먼저 연료전지 스택에 각각의 제어방식을 적용하여 그림 5와 같은 형태의 부하를 1시간 동안 구동할 경우 절감되는 연료량을 측정 전력을 이용하여 계산하여 보았다. 우선 부하전류에 따라 단일 셀에서 소모되는 수소의 유량은 식 (19)와 같이 계산된다.

$$Q_{U_{H_2}} = \frac{I}{ZF_n} \tag{19}$$

$$= \frac{1Cs^{-1} \times 60smin^{-1} \times 22.4SLmol^{-1}}{2 \times 96485Cmol^{-1} \times 1cell}$$

$$= 0.007 SLM / (A \cdot cell)$$

또한, 연료전지 스택 구동에 필요한 수소의 유량은 식 (20)과 같이 계산되어 진다.

$$Q_{T_{H_2}} = Q_{U_{H_2}} \times \frac{P_e}{V_{stack}} \times n \times \lambda_{H_2} \tag{20}$$

각각의 경우 측정된 전력의 값과 식(19) 및 (20)을 이용하여 소모된 수소량을 계산한 결과 마이크로프로세서를 이용한 시스템의 구동방식을 이용한 경우 68.64[Liter]이었고, 제조사에서 제공한 수동제어기를 이용한 경우 72.20[Liter] 이었다. 따라서 그림 5와 같은 형태로 변하는 부하를 한 시간 구동하는데 소모되는 수소의 양은 수동제어기를 적용하였을 경우에 비해 시간당 3.56[Liter]의 수소가 적게 사용되어 평균 5% 정도의 연료가 절감됨을 알 수 있다.

경부하시와 중부하시의 연료 절감률은 큰 차이를 보였는데, 수동 제어기보다 마이크로프로세서에 의해 자동 제어되는 경우 경부하에서 약 31%의 연료 효율 향상을 보였으나 정격부하에서는 약 3%로 낮아졌다. 이

는 증부하로 갈수록 발열량이 많아져 자동제어 방식과 수동제어 방식 모두 냉각 팬을 최대출력으로 운전하므로 팬에 의해 소모되는 전력량이 두 경우 모두 같아지고, 퍼지주기가 짧아져 퍼지밸브의 시간당 구동회수도 거의 같아지기 때문이다. 따라서 자동제어 방식을 이용할 경우 전 부하구간에서 효율적인 시스템 운전이 가능하여 연료를 절감할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 수동제어기를 이용하면 부하가 급변할 때 냉각팬의 속도나 퍼지 주기를 제대로 조정하지 못하는 경우 스택의 전압이 불안정해지거나, shut-down되는 현상이 발생하는 것에 반해 마이크로프로세서를 이용하는 자동제어기의 경우 부하 급변 시에도 BOS의 순시적인 제어를 통해 안정된 운전이 가능하므로 시스템의 안정성 역시 매우 높아졌다고 볼 수 있다.

제작된 소형 150W 연료전지 시스템의 정격 전압, 전류 및 출력은 각각 14.31[V], 10[A], 143.1[W] 이고, 이때 소모되는 수소의 유량은 2.06[SLM] 이므로, 시스템을 정격출력으로 1 시간 구동하는데 요구되는 수소의 유량은 123.6[L/hr]가 되어, 1000cc 고압 실린더에 350기압으로 저장된 수소를 이용할 경우 정격 출력으로 3시간 정도 연속 구동이 가능함을 알 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 150W 무가습 PEM 연료전지 스택을 이용하여 소형 연료전지 전원 시스템을 꾸미고, 마이크로프로세서를 통해 연료전지의 BOS(Balance of Stack)를 제어하는 시스템을 제안하고 실험을 실시하였다. 제안된 알고리즘은 수동으로 제어되던 스택의 제어를 자동화하여 소형 휴대용 전원시스템으로 상용화가 가능하게 하였고, BOS를 최적으로 제어하여 연료 절감의 효과도 거두었다. 제작된 시스템은 전 부하구간에서 실시된 운전시험에서 수동제어기에 비해 효율적이며 부하변동에 대해서도 안정한 성능을 나타내었다. 제안된 소형 연료전지 전원 시스템은 향후 배터리를 대체하여 각종 소형 이동용 전자기기에 전력을 공급하거나 배터리를 충전하는 용도로 널리 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 부 호

$A_s$  스택의 노출된 표면적 [ $m^2$ ]  
 $c_p$  공기의 정압 비열 [ $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$ ]  
 $F$  패러데이 상수 [Coulomb/mol]

$g$  중력 가속도 [ $m \cdot s^{-2}$ ]  
 $h$  대류 열전달 계수  
 $h_r$  복사 열전달 계수  
 $I$  연료전지 스택의 전류 [A]  
 $k$  공기의 열 전도율 [W/m]  
 $L$  스택의 높이(수직평판의 경우) [m]  
 $\dot{m}_{fan,air}$  팬에 의해 입력되는 공기의 몰 유량 [mol/s]  
 $\dot{m}_{exp,air}$  측정된 입력 공기의 몰 유량 [mol/s]  
 $\dot{m}_{react,air}$  반응을 위한 연료용 공기의 몰 유량 [mol/s]  
 $\dot{m}_{cool,air}$  냉각을 위한 공기의 몰 유량 [mol/s]  
 $Nu_L$  Nusselt Number  
 $n$  연료전지 스택의 셀의 수  
 $Pr$  Prandtl Number  
 $P_m$  스택의 노출된 표면적 주변길이 [m]  
 $P_e$  연료전지 스택의 전기적 출력[W]  
 $P_{win}$  입구에서의 수증기압 [kPa]  
 $P_{in}$  입구 공기의 전체압력 [kPa]  
 $P_{exit}$  출구 공기의 전체압력 [kPa]  
 $P_w$  출구 공기의 수증기압 [kPa]  
 $Q_{stack}$  연료전지 스택의 전체 열량 [W]  
 $Q_{dis}$  연료전지 스택의 자연 열량 [W]  
 $Q_{conv}$  자연대류에 의한 냉각 열량 [W]  
 $Q_{rad}$  복사에 의한 냉각 열량 [W]  
 $Q_{react}$  반응하는 공기 유량에 의한 냉각 열량 [W]  
 $Q_{cool}$  연료전지 스택의 강제 냉각 열량 [W]  
 $Q_{U,H_2}$  단셀에서 소모되는 수소 유량 [SLM/(A · cell)]  
 $Q_{T,H_2}$  스택에서 소모되는 수소 유량 [SLM]  
 $Ra_L$  Rayleigh Number  
 $\Delta T_{react}$  반응용 공기의 온도차 [K]  
 $\Delta T_{cool}$  냉각용 공기의 온도차 [K]  
 $T_{react,out}$  반응용 공기의 출구 온도 [K]  
 $T_{react,in}$  반응용 공기의 입구 온도 [K]  
 $T_s$  스택의 표면온도 [K]  
 $T_o$  스택 주변의 대기온도 [K]  
 $V_{cell}$  연료전지 셀의 전압 [V]  
 $V_{stack}$  연료전지 스택의 전압 [V]  
 $Z$  연료 1 몰당 발생하는 전자의 몰수  
 $\alpha$  열 확산율 [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]  
 $\beta$  열 팽창 계수 [ $K^{-1}$ ]  
 $\epsilon$  열 방사율, 표면의 재질과 상태에 따라 지배됨 ( $\approx 1$ )

- $\lambda_{air}$  공기의 화학량론
- $\lambda_{H_2}$  수소의 화학량론
- $\nu$  동점성 계수 [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]
- $\sigma$  스테판-볼츠만 상수 [ $w \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ ]
- $\psi$  입구 공기의 수분 계수

본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌음

### 참 고 문 헌

[1] G. Squadrito, O. Barbera et. al., "Polymer Electrolyte Fuel Cell Mini Power Unit for Portable Application", *Journal of Power Sources* 169, pp. 334-337, 2007, March.

[2] Alfredo P. Vega-Leal, F. Rogelio Palomo et. al., "Design of control systems for portable PEM fuel cells", *Journal of Power Sources* 169, pp. 194-197, 2007, January.

[3] Giovanni Bucci, Edoardo Fiorucci, et. al., "A Microcontroller-Based System for the Monitoring of a Fuel Cell Stack", *Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Ottawa, Canada, 2005, May.

[4] 김대현, 최우진, "PEM 연료전지를 이용하는 휴대용 전원의 개발", 전력전자학회 학술대회 논문집, pp. 61-63, 2007, 7.

[5] C. Hebling, B. Burger, A. Hakenjos, J. Hesselmann, D. Poczka, J.O. Schumacher, M. Zedda, M. Zobel, "PEM fuel cells for the power supply of electronic appliances", *Proceedings of the European Fuel Cell Forum 2004*, pp 143-152, 2004.

[6] K. S. Lee, N. H. Chang, Jianli Zhuo, et. al., "A Fuel-Cell-Battery Hybrid for Portable Embedded Systems", ACM, Vol. 13, Issue 1, Article No. 19, 2008, January.

[7] Felix N. Buchii, Supramaniam Srinivasan, "Operating Proton Exchange Membrane Fuel Cells Without External Humidification of the Reactant Gases", *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 144, No. 8, pp. 2767-2772, 1997, August.

[8] James Larminie, Andrew Dicks, *Fuel Cell Systems Explained : Second Edition*, Wiley, 2003.

[9] G.J.M. Janssen, M.L.J. Overvelde, "Water transport in the proton-exchange-membrane fuel cell : measurements of the effective drag coefficient", *Journal of Power Sources* 101, pp. 117-125, 2001,

January.

[10] R. Eckl, W. Zehntner, C. Leu, U. Wagner, "Experimental analysis of water management in a self-humidifying polymer electrolyte fuel cell stack", *Journal of Power sources* 138, pp. 137-144, 2004, August.

[11] S. U. Jeong, E. A. Cho, H. J. Kim, et. al., "A study on cathode structure and water transport in air-breathing PEM fuel cells", *Journal of Power Sources* 159, pp. 1089-1094, 2006, February.

[12] Minkmas V. Williams, H. Russell Kunz, James M. Fenton, "Operation of Nafion<sup>®</sup>-based PEM fuel cells with no external humidification : influence of operating conditions and gas diffusion layers", *Journal of Power Sources* 135, pp. 122-134, 2004, July.

[13] Frano Barbir, *PEM Fuel Cells : Theory and Practice*, Academic Pr, pp. 147-203, 2005.

[14] Frank P. Incropera, David P. DeWitt, et. al., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer : Fifth Edition*, Wiley, pp. 598-662, 2003.

### 저 자 소 개



**김태훈(金兌勳)**  
1983년 9월 18일생. 2003년~현재 숭실대 전기공학부 재학.



**최우진(崔宇鎭)**  
1967년 1월 7일생. 1990년 숭실대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 Texas A&M University 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1995년~1998년 (주) 대우중공업 중앙연구소 전자기술실. 2005년~현재 숭실대 전기공학부 조교수. 현재 당 학회 학술위원.