

# PEM 연료전지 스택의 과도상태 출력특성에 관한 실험적 연구

김현일<sup>†</sup>, 황재순\*, 정태용\*\*, 신동훈\*\*, 남진현\*\*, 김영규\*\*\*

## An Experimental Study on Transient Characteristics of PEM Fuel Cell Stack

Hyun-il Kim, Jae Soon Hwang, Tae-Yong Chung, Donghoon Shin,  
Jin Hyun Nam and Young-Gyu Kim

Key Words: PEMFC(고분자전해질 연료전지), Steady state(정상상태), Transient(과도상태)

### Abstract

The transient power characteristics of a PEM fuel cell stack was experimentally studied using a commercial 1.2kW PEM fuel cell (Nexa<sup>TM</sup> Power Module, Ballard Power System Inc.). The conditions in PEM fuel cell stack such as temperature and water content change rather slowly because of their large heat capacity and long channel length, which results in long transient time to converge to a steady state. The steady characteristics of the PEM fuel cell module was determined first, followed by the measurement of its transient characteristics upon stepwise and continuous load current changes. During the stepwise current change from 5A to 25A, the output voltage initially decreased below the steady voltage and then increased gradually. Similar behavior was also observed for the stepwise current change from 25A to 5A. This transient behavior is explained with reference to the evolution of the temperature and water content of the PEM fuel cell stack.

기호설명	
$A$	: Tafel 기울기 (V)
$E_0$	: 가역전압 (V)
$H_t$	: 열전달계수 (W/°C)
$I$	: 스택전류 (A)
$I_{ex}$	: 교환전류 (A)
$(mC_p)_s$	: 스택의 열용량 (J/°C)
$\dot{Q}$	: 발열량 (W)
$R$	: ohmic 저항 ( $\Omega$ )
$R_{tot}$	: 총합저항 ( $\Omega$ )

$T_s$	: 스택온도 (°C)
$T_\infty$	: 외기온도 (°C)
$V_c$	: 스택전압 (V)

### 1. 서론

화석연료 자원의 한계와 동력발전 시 부산물로 생성되는 온실가스로 인한 기후변화 그리고, 환경오염의 심화로 인해 화석연료를 대체할 수 있는 에너지원에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 특히 수소는 친환경적이고 재생 가능한 특성으로 인해 가장 유력한 미래의 연료로 각광 받고 있다. 연료전지는 수소를 기반으로 하는 경제체제에서 가장 효율적이고 친환경적인 동력발전장치이다. 연료전지는 수소와 산소의 직접 전기화학반응을 통해 전기를 생산하며, 부산물로 열과 물이 발생된다. 특히, PEM 연료전지는 현재 가장 진보된 형태의 연료전지로서 자동차용 동력원과 가정용 열병합(CHP) 발전시스템에 적용하는 연구

† 국민대학교 대학원 기계공학과

E-mail : resume79@kookmin.ac.kr

TEL : (02)910-5036 FAX : (02)910-4839

\* 국민대학교 대학원 기계공학과

\*\* 국민대학교 기계자동차공학부

\*\*\* 한국가스안전공사

가 진행 중이다.

PEM 연료전지 스택은 긴 유로와 큰 열용량을 가지고 있기 때문에 부하의 변동과 같은 운전 조건의 변화 시에 스택온도와 수분함량이 매우 느리게 변화한다. 따라서 PEM 연료전지 스택의 출력특성도 스택온도와 수분함량의 함수인 저항의 변화에 따라 긴 시간에 걸쳐 정상상태에 도달하게 된다.<sup>(1-3)</sup>

본 논문에서는 Ballard 사의 1.2kW급 PEM 연료전지인 Nexa™ Power Module을 가지고 부하 변화에 따른 비교적 긴 시간동안의 과도 출력특성을 연구하였다. 이러한 연구를 통해 이전의 연구자들이 수행하였던 1초 이내의 과도 출력특성에 대한 연구를 보완하여 PEM 연료전지 스택의 출력특성을 더 잘 파악하고 예측할 수 있을 것이다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

본 실험에서 사용된 1.2kW급 PEM 연료전지 스택의 스펙과 실험장치가 Table 1과 Fig. 1에 제시되어 있다. 연료전지 스택에는 활성화 면적이 100 cm<sup>2</sup>인 전극전해막을 가진 단위 셀 47개가 적층되어 있으며 연료 공급 장치, 공기 공급 장치, 가습 장치, 공랭식 냉각장치 등의 BOP시스템이 포함되어 있다. 과도 출력특성 실험은 1kW급 DC Electric Load(EL-1000P, 대길전자)를 사용하여 전류 부하를 변화시키는 방식으로 수행되었다.

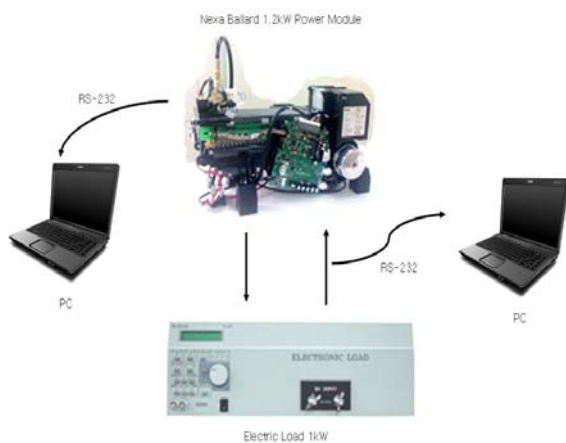


Fig. 1 Experimental setup for PEM fuel cell study

Table 1 Specification of Nexa™ Power Module

Dimension	56 × 25 × 33 cm
Output voltage	22 V to 50 V
Output current	<60 A
Inlet fuel pressure	70-720 kPa
Inlet air pressure	Atmospheric
Stack temperature	<70°C

실험 데이터는 RS-232통신을 이용하여 Nexa™ Power Module 및 Electric Load를 컴퓨터와 직접 연결하여 수집하였다. 과도 출력특성의 파악을 위하여 스택의 전류, 전압을 1초 단위로 수집하였으며, 스택의 온도와 공기의 유량도 측정되었다.

### 2.2 실험방법

정상상태에서의 PEM 연료전지의 출력특성을 파악하기 위하여 전류 부하를 3 A에서 30 A까지 3 A의 간격으로 변화시키며 전압을 측정하였다. 본 실험에서는 스택이 정상상태까지 도달하도록 충분한 시간동안 운전한 후에 측정을 수행하였다. 수소극의 압력을 5 bar로 고정하여 실험하였으며 주위 온도는 약 15°C로 측정되었다.

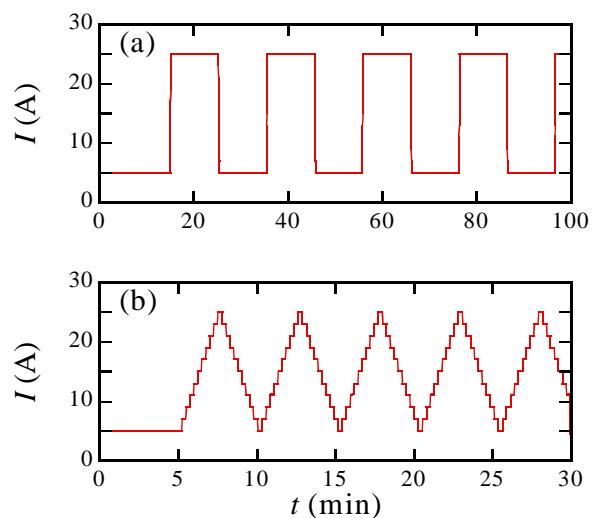


Fig. 2 Experimental load conditions for transient characteristics of PEM fuel cell: (a) step load change, (b) continuous load change

PEM 연료전지의 과도 출력특성 실험은 우선 Electric Load 프로그래밍을 이용하여 부하를 5 A에서 25 A로 계단식으로 변화시키면서 수행되었으며, 전류 부하는 Fig. 2(a)처럼 사각파 형태로 나타난다. 초기에 PEM 연료전지가 안정화 상태에 이를 때까지 충분한 시간동안 운전한 후에 각각의 부하조건에 대해 10분씩 유지하는 방식으로 실험하였다. 연속적인 부하 변화에 따른 PEM 연료전지의 출력특성을 파악하기 위하여 Fig. 2(b)의 삼각파 형태의 전류 부하를 주었다. 전류 부하는 5분의 주기로 각각 5 A에서 25 A로 증가와 감소를 반복하여 실험하였다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 정상상태 출력특성

일반적으로 연료전지의 정상상태 출력전압은 가역전압에서 저항손실, 활성화손실, 농도손실을 뺀 형태로 결정된다. 그러나 실험에서 사용된 Nexa 모듈의 경우 공기극 쪽으로 충분한 산소 공급이 이루어지므로 농도 손실은 무시 될 수 있다. 따라서 본 실험결과로 얻어진 정상상태의 출력특성은 다음의 식 (1)과 같이 모델링한다.

$$V_c = E_0 - IR - A \ln\left(\frac{I}{I_{ex}}\right) \quad (1)$$

위에서  $E_0$ 는 가역전압으로 다음과 같다.<sup>(4)</sup>

$$E_0 = 47 \times [1.482 - 0.000845 T_k + 0.0000431 T_k \ln(P_{H_2} P_{O_2}^{0.5})] \quad (2)$$

정상상태에서의 측정결과와 식 (1)을 이용하여 fitting 한 결과를 Fig. 3에서 나타내었다. 그림에서 전류가 증가하면 전압은 초기에 급격히 감소하다가 중기에는 선형적으로 감소하며 끝에 가서는 약간의 변화를 보인다. 이는 저전류에서는 활성화 손실이 지배적이고, 중전류에서는 저항 손실이 지배적이며, 고전류에서는 농도 손실이 지배적이기 때문이다. Fig. 3에서 농도 손실의 영향은 매우 작음을 알 수 있다.

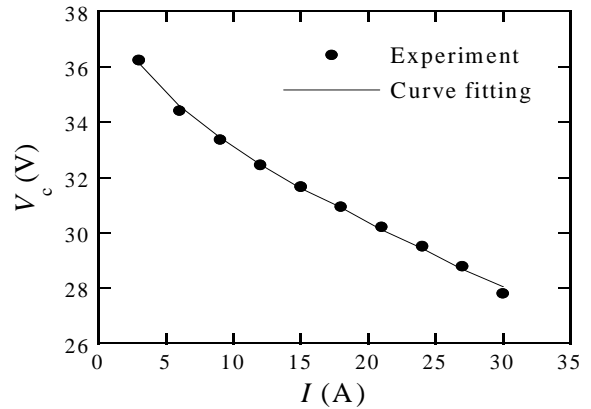


Fig. 3 Steady characteristics of PEM fuel cell stack

식 (1)의 fitting 모델의 인수들은 비선형 회귀분석을 통하여 얻어졌으며,  $R$ 은 0.125065  $\Omega$ ,  $A$ 은 1.49612 V,  $I_{ex}$ 는  $1.6849 \times 10^{-6}$  A로 결정되었다. Fig. 3에서 보이듯이 fitting 모델은 정상상태 PEM 연료전지의 출력특성을 적절하게 모델링하고 있음을 확인할 수 있다.<sup>(5)</sup>

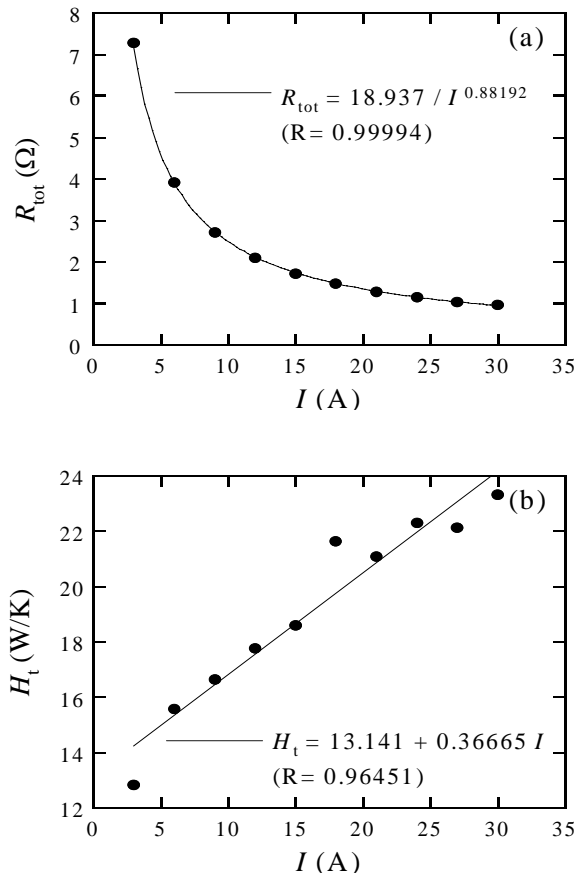


Fig. 4 Fitting of (a) total resistance  $R_{tot}$  and (b) heat transfer coefficient  $H_t$

추가적으로 정상상태 전압 손실에 대하여 보다 간단한 형태의 식 (3)에 의한 모델링을 수행하였다. 즉, 전체 전압 손실을 다음과 같이 하나의 총합 저항  $R_{tot}$ 로 정의하며, 이때  $R_{tot}$ 은 전류의 함수가 된다.

$$V_c = E_0 - IR_{tot} \quad (3)$$

식 (3)을 변형한  $R_{tot} = (E_0 - V_c)/I$  을 이용하여  $R_{tot}$ 을 계산하였으며, 이를 Fig. 4(a)에 전류의 함수로서 나타내었다. 그림에서  $R_{tot}$ 은 전류가 증가함에 따라 급격히 감소하는 경향을 보이며, 상관식과 매우 잘 들어맞음을 알 수 있다. 따라서 이후의 해석에서 식 (1)보다는 식 (3)을 이용하여 간단하게 모델링을 수행할 수 있다.

PEM 연료전지의 온도 변화는 다음의 식 (4)과 같이 간단한 집중열용량 모델을 이용하여 모델링할 수 있다.

$$(mC_p)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = H_t(T_\infty - T_s) + \dot{Q} \quad (4)$$

여기서,  $\dot{Q}$ 는 발열량으로  $\dot{Q} = (E_0 - V_c)I$  로 계산된다. 정상상태에서는 시간에 따른 온도 변화가 0이 되므로 식 (4)를 변형하여 열전달계수  $H_t$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.<sup>(6)</sup>

$$H_t = \frac{(E_0 - V_c)I}{T_s - T_\infty} \quad (5)$$

Fig. 4(b)는 전류에 따른  $H_t$ 의 값을 보여주고 있는데 열전달계수는 전류가 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보인다. 이것은 Nexa 모듈에서 전류가 증가함에 따라 냉각 공기의 유량을 증가시키기 때문이라 여겨진다. Fig. 4(b)에서 결정된 열전달계수를 이용하면 PEM 연료전지의 정상상태 온도 특성을 적절히 모델링할 수 있다.

### 3.2 과도상태 출력특성

5 A의 저전류와 25 A의 고전류 사이에서 부하를 변동시키면서 과도상태에서의 출력특성을 파

악하였다. 전류 부하를 계단식으로 변화시킨 결과를 Fig. 5에, 연속적으로 변화시킨 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 5의 그래프를 보면 5 A에서 25 A로 전류 부하를 변화시킨 경우 전압은 초기에 급격히 감소한 후에 점차 증가하면서 정상상태에 도달하였다. 반대로 25 A에서 5 A로 전류가 감소하면 전압은 초기에 급속히 증가한 후에 점차 감소하면서 정상상태에 도달하는 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 경향은 스택의 온도와 밀접한 관계를 가지기 때문으로 생각되며 또한, 스택 온도는 정상상태에 도달하는 데 걸리는 시간과도 연관된다. Fig. 5에서 고전류에서 안정화 상태까지 이르는 데 걸리는 시간이 저전류일 경우보다 짧음을 확인할 수 있다. Fig. 6에서 보여진 연속적으로 전류 부하를 변화시킨 경우 온도는 실험 시 운전시간이 짧아서 정상상태에 도달하지 못한 것으로 여겨진다.

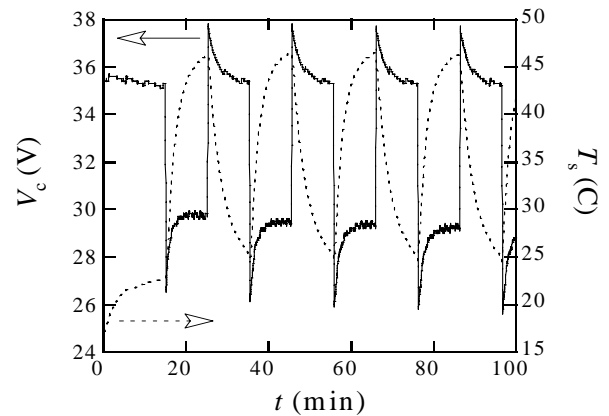


Fig. 5 Transient behaviors of stack voltage and temperature according to step load change

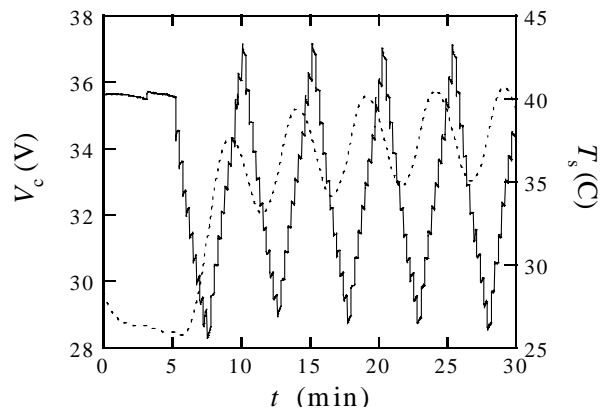


Fig. 6 Transient behaviors of stack voltage and temperature according to continuous load change

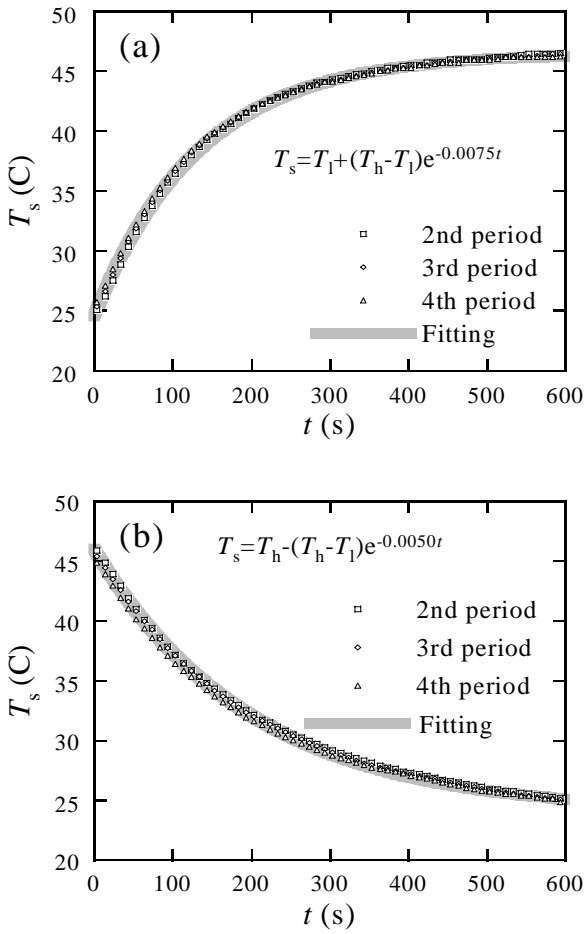


Fig. 7 Transient behavior of stack temperature: (a) 25 A, (b) 5 A

### 3.3 과도상태 출력특성 모델링

Fig. 5의 스택 온도의 과도상태 거동을 각 전류별로 모아 Fig. 7에 제시하였다. 비교를 위해서 부하 전류를 변화시킨 시점을 일치시켰다. 과도상태에서의 스택 온도는 식 (4)의 지배방정식에 의해 모델링할 수 있다. 만약 스택 온도가  $T_1$ 에서  $T_2$ 까지 변한다면 다음 형태의 연속적인 온도 변화를 나타내게 된다.

$$T_s = T_1 + (T_2 - T_1)e^{-\frac{H_t}{(mC_p)_s}t} \quad (6)$$

따라서, Fig. 4의 열전달계수  $H_t$ 의 결과와 Fig. 7의  $T_s$ 의 거동을 결합하면, 스택의 열용량

$(mC_p)_s$ 을 구할 수 있다. 5 A와 25 A의 결과에서 계산된 스택의 열용량은 2984 J/°C로 약 1% 이내의 편차를 보였다. Fig. 7의 그래프에서는 첫 구간의 결과는 안정화 상태에 도달하지 않았기 때문에 제외하였다.

일반적으로 과도상태에서의 총합저항은 전류뿐만 아니라 온도, 수분함량의 함수이다. 본 실험에서 사용된 Nexa 모듈은 충분한 가습을 유지하고 있으므로 수분함량의 영향을 제외할 수 있다. Fig. 8은 5 A 및 25A에서의 총합저항을 온도에 대하여 제시하고 있으며, 온도가 증가하면 총합저항은 감소하는 경향을 보였다. 그림에서 총합저항은 온도의 선형적인 함수로서 적절히 모델링될 수 있음을 확인할 수 있다.

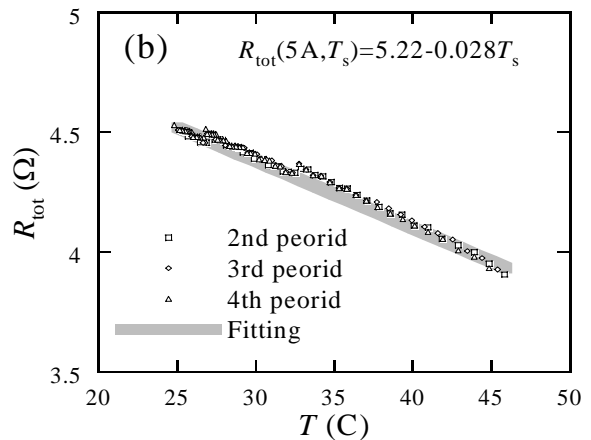
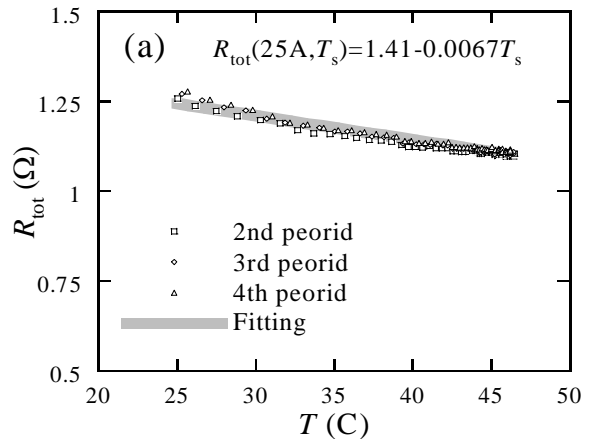


Fig. 8 Fitting of total resistance with stack temperature: (a) 25 A, (b) 5 A

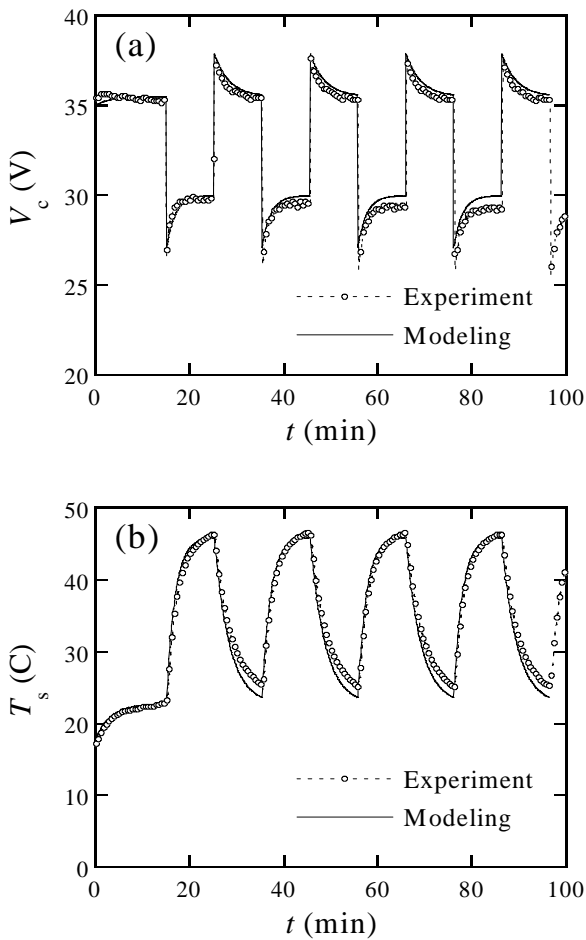


Fig. 9 Comparison of experiment and modeling results: (a) output voltage, (b) stack temperature

이상의 실험과 실험결과의 해석을 통해 PEM 연료전지의 과도상태 출력특성을 모델링하는 인자들을 도출하였으며, 이를 이용하여 간단한 해석을 수행하였다. 해석 결과를 Fig. 9에 제시하였으며 적은 수의 인자들을 이용하여 비교적 잘 예측하고 있다. Fig. 9(a)의 고전류 부분에서의 오차는 본 모델에서 고려하지 못한 수분함량의 변화나 비활성 기체의 연료극으로의 유입으로 인한 출력 손실이라 여겨진다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 Ballard 사의 1.2kW급 PEM 연료전지인 Nexa™ Power Module을 사용하여 PEM 연료전지 스택의 출력특성을 파악하는 실험적 방법 및 간단한 해석모델을 제시하였다. PEM 연료

전지 스택의 전류, 전압, 온도 및 저항을 측정하여 과도상태 출력특성을 모델링할 수 있는 인자들을 도출하였다. 모델링의 결과는 실험결과를 비교적 잘 설명할 수 있었으며, 향후 모델의 개선을 통해 보다 정확한 연료전지의 출력특성 성능 예측이 가능할 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 한국가스안전공사 “가정용 연료전지 시스템 성능 평가 연구”의 일부분으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Kordesch, K. and Simader, G., 1996, *Fuel Cells and Their Applications*, VCH.
- (2) Sammes, N., 2006, *Fuel Cell Technology Reaching Towards Commercialization*, Springer.
- (3) Busby, R. L., 2005, *Hydrogen and FUEL CELLS A Comprehensive Guide*, PennWell.
- (4) Larminie, J. and Dicks, A., 2003, *Fuel Cell Systems Explained*, 2nd ed., Wiley.
- (5) Barbir, F., 2005, *PEM Fuel Cells Theory and Practice*, Elsevier.
- (6) Li. X., 2006, *Principles of Fuel Cells*, T&F Informa.