

상온 작동 환경하에서의 고분자 전해질막 연료전지의 성능에 대한 실험적 연구

차도원* · 김보성* · 김용찬*†

* 고려대학교 기계공학부

Experimental Study of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Performance Under Low Operating Temperatures

Dowon Cha*, Bosung Kim* and Yongchan Kim*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Korea Univ.

(Received March 12, 2014 ; Revised May 22, 2014 ; Accepted May 28, 2014)

Key Words: Dynamic Characteristics(동적 특성), Lower Operating Temperature(상온 작동 온도), PEMFC(고분자 전해질막 연료전지), Performance(성능)

초록: 본 연구에서는 휴대용 기기에 고분자 전해질막 연료전지(PEMFC)를 적용하기 위하여 상온에서 작동 시의 성능특성을 정상상태와 동적상태에서 관찰하였다. 상대습도 및 공기 화학양론비에 따른 PEMFC 성능 변화를 실험적으로 분석하였다. 또한, EIS(Electrochemical Impedance Spectroscopy)를 이용하여 내부 오믹 저항의 변화를 고찰하였다. 35°C 조건에서 물질 전달률이 감소하여 45°C 조건에 비해 전압 변동이 10 배 정도 크게 관찰되었으며 안정적인 작동을 위해 공기의 화학양론비를 2.5 보다 크게 유지하여야 한다. 또한 낮은 상대습도는 오믹 저항을 크게 증가시키며, 이를 감소시키기 위해 상대습도 60% 이상으로 작동하여야 한다.

Abstract: In this study, the performance characteristics of a polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) were investigated at low operating temperatures under steady-state and dynamic conditions. The performance of the PEMFC was analyzed according to the external humidifying rate and air stoichiometry. The ohmic resistance was also investigated using EIS tests. At the operating temperature of 35 °C, voltage fluctuation occurred to a greater degree compared to that at 45 °C. Therefore, it was found that the air stoichiometry should be higher than 2.5 for the stable operation of the fuel cell. In addition, the relative humidity of the reactant gases should be higher than 60 to reduce the ohmic resistance.

- 기호설명 -

ss : 정상상태 (steady-state)

t : 시간 (s)
V : 전압 (V)
 ΔV : 전압 차이 (V)

하첨자

st : 안정화 (stabilization)
min : 최소값 (minimum value)
under : 언더슈트 (undershoot)

1. 서론

연료전지는 에너지변환 효율이 높고 작동 중 오염물질을 배출하지 않아 차세대 에너지 변환장치로 각광받고 있다. 특히, 고분자 전해질막 연료전지(PEMFC)는 작동온도가 낮고 부피가 작다는 장점 덕분에 활발히 연구되고 있다. 최근 PEMFC 를 휴대폰, 노트북 등 휴대용 기기에 적용하기 위한 연구가 진행 중이다. PEMFC 는 일반적으로 60~80°C 에서 작동 시 최고의 성능과 신뢰성을 보인다. 하지만 PEMFC 를 휴대용 기기에 적용하기 위

† Corresponding Author: yongckim@korea.ac.kr
© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

Table 1 Test conditions

	Polarization & Dynamic		EIS
Operating temperature (°C)	25, 35, 45, 55, 65		35, 45, 65
Stoichiometry	Air	1.5, 2.5, 3.5, 4.5	2.5
	H ₂	1.5	1.5
Relative humidity of reactant gases (%)	40, 60, 100		40, 60, 80, 100

해서는 상온에 가까운 온도에서의 작동이 요구되며, 상온에서 작동 시에는 PEMFC 내부의 이온전도도와 물질 전달률이 낮아져 성능이 감소한다. 반면에 활성화 저항(activation resistance)이 높은 상태에서는 전류밀도가 증가하기도 한다. 이와 같이 상온 작동조건에서 PEMFC의 성능은 여러 가지 요소에 의해 결정되며, 그 내부반응 또한 복잡한 메커니즘으로 인하여 명확하게 규명하기 어렵다.⁽¹⁾

현재까지 작동온도 조건에 따른 PEMFC의 성능 변화에 대한 연구가 많이 진행되어왔다. Song 등⁽²⁾은 상온에서 120°C 까지 작동온도를 변화시켜가며 PEMFC 내부의 반응 속도에 대한 실험을 진행하였고, 고온 작동 시 작동온도와 성능이 비례관계가 있음을 제시하였다. Williamson 등⁽³⁾은 공기 호흡형 소형 PEMFC에 대한 작동온도의 영향을 실험적으로 분석하였고, 고 전류밀도 영역에서 온도증가가 공기 호흡형 PEMFC의 성능을 향상시키는 것을 확인하였다. Cheddie와 Munroe⁽⁴⁾는 고온형 PEMFC에 대한 삼차원 모델링을 통하여 온도 분포에 따른 성능 변화에 대해 고찰하였다. 또한 Mert 등⁽⁵⁾은 수학적 모델링을 통해 50°C에서 80°C에 이르는 온도 범위에서 PEMFC 성능을 연구하고 문헌의 실험데이터와 비교 하였다. 연구한 작동온도 내에서 온도 상승이 PEMFC의 성능에 긍정적 영향을 미치는 것을 확인하였다.

PEMFC를 휴대용 기기에 적용하기 위해서는 시동(start-up)과 셧다운(shut-down), 부하 변동과 같은 동적 조건에서 안정적인 성능 및 내구성이 요구된다. 특히, 부하 변동에 따른 전압 변화의 경향성에 대한 고찰과 빠른 응답 성능을 위한 작동조건에 대한 연구가 필요하다. Lee 등⁽⁶⁾은 PEMFC의 자체가습에 따른 성능 변화를 정상상태와 동적상태에 대해 관찰하였다. Tang 등⁽⁷⁾은 kW급의 PEMFC 스택에 대해서 시동, 셧다운, 부하 변동 시 동적 특성을 고찰하였다.

대부분의 기존 연구들은 일반적 작동온도 조건에서 진행되어 상온 작동조건에서의 성능 특성에 관한 연구는 상당히 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 상온 작동조건에서 반응물의 상대습도와 공기 화학양론비(air stoichiometry)에 따른 PEMFC의 성능을 실험적으로 고찰하였다. 이를 위하여 분극화 곡선을 관찰하였고, EIS를 통하여 내부 저항의 변화를 측정하였다. 또한, 갑작스런 전류밀도 변화 시 PEMFC의 동적 성능을 분석하여 최적 운전조건을 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험조건

2.1 실험장치

본 연구에서는 유효면적 25 cm²의 단위 PEMFC를 사용하여 실험을 수행하였다. 가스 채널은 변형 서펜타인(modified-serpentine)형태로 구성하였다. 가스 채널의 너비와 높이는 모두 1.2 mm였고, 채널과 리브의 비율은 1:1로 설정하였다. Gore사의 M815 MEA와 SIGRACET사의 GDL 35BC를 사용하였다. Fig. 1은 실험장치의 구성도를 나타내고 있다. 수소와 공기 저장용기로부터 나온 반응물은 각각의 유량제어기(mass flow controller)를 거쳐 외부가습기를 통과한다. 가습기에서 배출된 가스는 라인히터로 가열되는 연결배관을 통하여 연결되며 가스의 온도를 가습기 내부의 물의 온도보다 높게 유지하여 배관의 내부에서 물이 응축되지 않게 하였다. 반응하고 남은 기체와 반응에서 생성된 물은 액체 분리기로 들어가 기체와 액체가 분리된 후에 배출된다. 반응물의 상대습도는 외부가습기의 온도를 통해 제어하였다. 또한, PEMFC의 성능 특성을 관찰하기 위해 분극화 곡선과 EIS를 사용하였다. EIS 측정장비는 TDI loader와 Gamry FC350을 사용하였다.

2.2 실험조건

상온 작동조건에서의 성능을 일반적 작동조건과 비교하기 위하여 PEMFC의 작동온도를 25°C에서 65°C로 변화시켜가며 실험을 수행하였다. PEMFC의 작동온도는 열전대를 통해 측정된 값을 바탕으로 히터와 팬을 통해 제어하였다. 공기의 화학양론비를 1.5에서 4.5로 바꾸며 성능 변화를 측정하였고, 모든 실험조건에 대하여 수소의 화학양론비는 1.5로 고정하였다. 각 실험에서 반응물의 상대습도는 40~100%로 외부가습기의 온도를 통해 제어하였고, 양극의 상대습도는 서로 동일하게 설정하였다. Table 1은 본 연구에서 적용한 실험조건

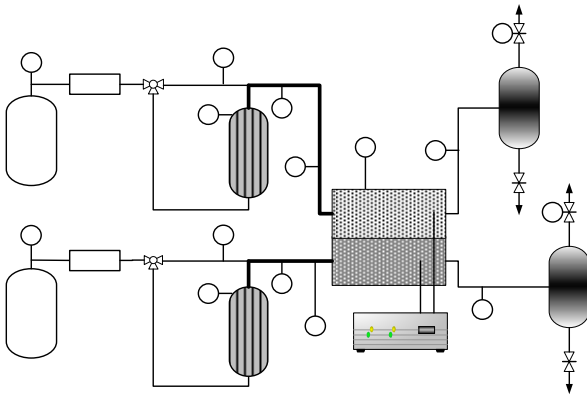


Fig. 1 Schematic diagram of the test station

을 나타내고 있다.

본 연구에서는 PEMFC의 성능 변화를 분극화 곡선과 단위면적당 동력곡선을 통해 나타내었다. 실험은 galvanostatic 모드로 진행하였으며, PEMFC의 전압이 OCV로부터 0.35 V 이하로 떨어질 때까지 전류밀도를 0.08 A/cm² 씩 증가시키며 측정하였다. 각 실험조건에서 모든 전류밀도 영역의 전압이 정상상태에 도달할 수 있도록 하였으며, 대표 전압은 그 구간의 평균 전압으로 선정하였다. PEMFC의 동적 성능을 분석하기 위해 부하 변동시에 PEMFC의 전압 변화를 1 초 간격으로 측정하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 정상상태 성능 분석

Fig. 2는 작동온도의 변화에 따른 분극화 곡선을 나타내고 있다. 공기측과 수소측의 화학양론비는 각각 2.5와 1.5로 유지하였고, 반응물의 상대습도는 모두 60%로 설정하였다. 전류밀도 1.2 A/cm²를 기준으로 상온 조건인 25°C, 35°C 및 45°C일 때의 전압은 일반적 작동온도인 65°C와 비교하여 각각 26%, 19% 및 12% 감소하였다. 이는 고 전류밀도영역에서 작동온도 감소로 인하여 채널 내부의 반응물 확산속도가 감소하여 농도 구배에 의한 내부 저항이 증가하였기 때문이다. 또한 중간 전류 밀도영역(0.4 A/cm² ~ 0.96 A/cm²)에서는 낮은 작동 온도로 인하여 PEMFC 내부 이온전도도가 감소함으로써 오믹 저항(ohmic resistance)이 증가하여⁽⁸⁾ 성능이 감소하였다.

Fig. 3은 Fig. 2와 동일한 실험 조건하에서 작동 온도 변화에 따른 단위면적당 동력 곡선을 나타내고 있다. 상온 조건인 25°C, 35°C 및 45°C일 때 일반 작동 온도 조건인 65°C에 비하여 최대동력이 각각 35%, 30% 및 25% 감소하였다. 또한, 최대동

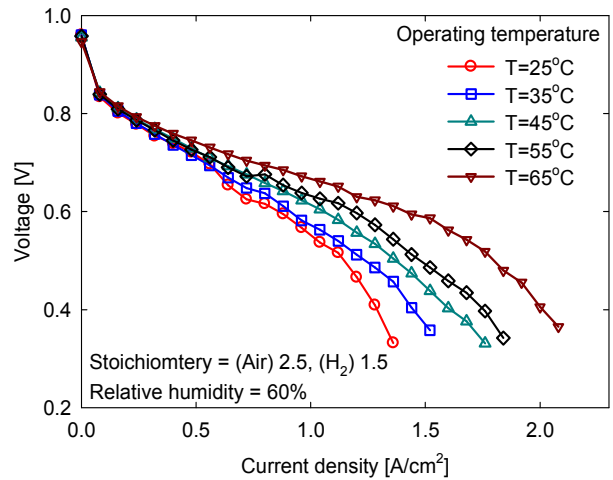


Fig. 2 Polarization curves with operating temperature

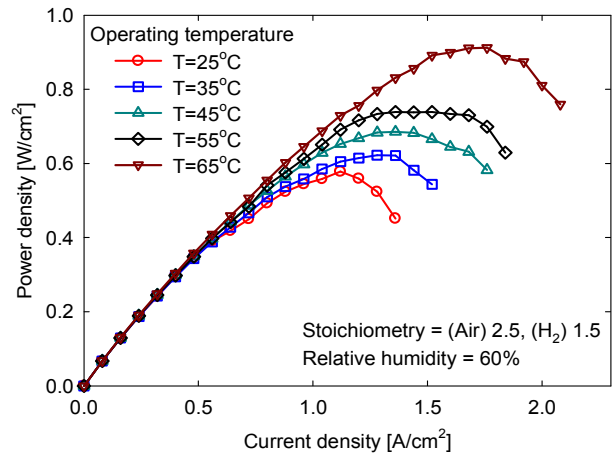


Fig. 3 Power density with operating temperature

력을 나타낸 전류밀도도 작동온도가 감소함에 따라 감소하였다. 작동온도가 65°C일 때, 최대동력이 전류밀도 1.76 A/cm²에서 나타난 것에 비해서, 작동온도가 35°C와 25°C일 때에는 최대동력이 발생하는 전류밀도는 각각 1.28 A/cm² 및 1.12 A/cm²로 낮게 나타났다. 이는 앞서 설명한 것과 같이 작동온도가 상온으로 낮아졌을 때, 이온전도도 감소로 인한 오믹 저항의 증가 때문이다. 따라서 PEMFC를 상온조건에서 운전할 때는 연료의 효율적인 사용을 위해서 최적의 전류밀도는 일반적 작동 조건에 비해 상대적으로 낮아야 한다.

Fig. 4 (a)와 (b)는 작동온도가 각각 35°C와 45°C일 때, 공기측 화학양론비에 따른 분극화 곡선을 나타낸다. 반응물의 상대습도는 양측 모두 100%로 유지하였다. 공기측의 화학양론비는 일반적인 작동조건인 2.5를 기준으로⁽⁸⁾ 1.5, 3.5 및 4.5로 변화시키면서 PEMFC 성능특성을 고찰하였다. PEMFC의 작동온도가 45°C일 때, 고 전류밀도 영

역인 1 A/cm^2 이상에서 공기측 화학양론비가 기준 조건인 2.5 에서 증가함에 따라 성능이 크게 증가하였다. 0.4 V 영역에서 화학양론비 3.5 와 4.5 인 경우, 기준 조건인 2.5 보다 성능이 각각 38%와 40% 향상되었다. 이는 공급되는 공기 질량유량의 증가로 인하여 PEMFC 내부의 산소량이 증가하여 촉매층의 산소 농도가 증가하였기 때문이다. 작동 온도가 35°C 인 경우에도 화학양론비가 2.5 에서 3.5 및 4.5 로 증가하였을 때 성능이 크게 향상되었지만, 증가 폭은 각각 28%와 31%로 45°C 일 때 보다 낮게 나타났다. 이는 PEMFC 가 낮은 온도에서 작동함에 따라 내부의 물질 전달률 및 이온전도도가 감소하여 PEMFC 내부 반응속도가 느려졌기 때문이다.

PEMFC 는 시간에 따라 작동 전압의 변동 (fluctuation)이 발생할 수 있으며, 전압 변동이 크면 동력이 일정하지 않아 시스템에 문제를 일으킬 수 있다. Fig. 5 는 작동온도와 공기측 화학양론비에 따른 PEMFC 전압의 변동에 대한 표준편차를 나타내고 있다. 공기측 화학양론비를 1.5 에서 4.5 까지 증가시켜 가며 실험을 수행하였다. 공기와 수소의 상대습도는 모두 100%로 유지하였고, PEMFC 는 전류밀도 0.6 A/cm^2 에서 작동하였다. 표준편차는 PEMFC 의 성능이 충분히 안정된 후의 평균 전압을 기준으로 계산하였다. 35°C 조건에서는 일반적 공기 화학양론비인 2.5 에서도 PEMFC 의 전압 변동이 크게 관찰되며 45°C 의 결과에 비해 10 배 정도 큰 값을 나타냈다. 이는 작동온도가 낮아짐에 따라 물질 전달률이 감소하여 PEMFC 내부 촉매층의 반응물 농도가 감소하였기 때문이다. 따라서 작동 온도 35°C 에서 PEMFC 를 안정적으로 작동하기 위해서는 공기측 화학양론비를 2.5 보다 높게 설정하여야 한다.

Fig. 6(a)와 (b)는 작동온도와 반응물의 상대습도에 따른 PEMFC 내부의 옴 저항과 질량 전달 저항(mass transport resistance)의 변화를 나타내며 EIS 실험을 통하여 측정하였다. 공기측 화학양론비와 수소측 화학양론비를 각각 2.5 와 1.5 로 유지하여 실험을 수행하였으며, PEMFC 의 작동전류는 0.6 A/cm^2 로 고정하였다. 작동온도가 35°C , 45°C 및 65°C 일 때, 반응물의 상대습도를 40%에서 100% 까지 변화시키면서 실험을 수행하였다. 모든 작동 온도에서 반응물의 상대습도가 증가할수록 옴 저항이 감소하였다. 이는 반응물의 상대습도가 증가할수록 PEMFC 내부 멤브레인이 가습되어 이온전도도가 증가하기 때문이다. 상대습도 변화에 따

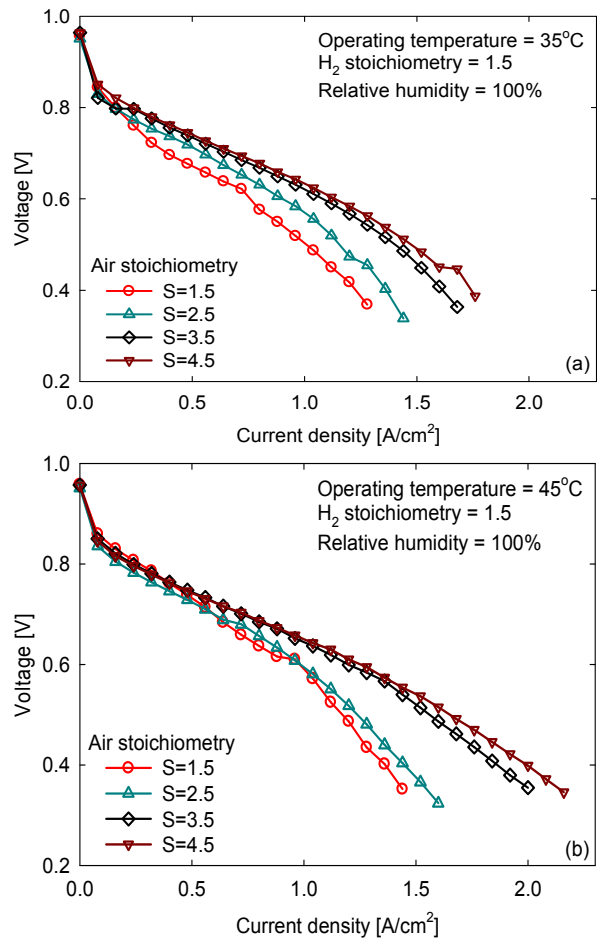


Fig. 4 Polarization curves with stoichiometry at operating temperatures of (a) 35°C and (b) 45°C

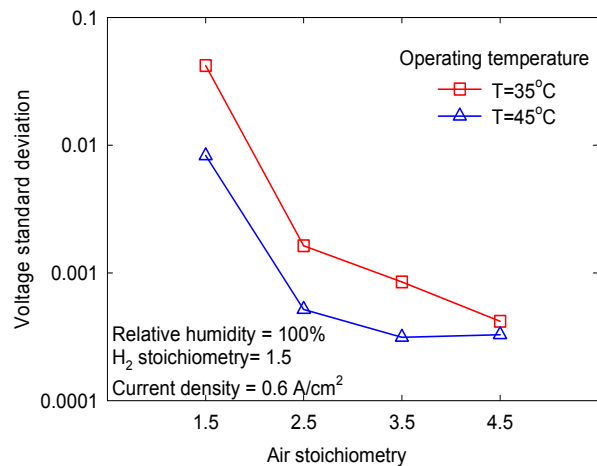


Fig. 5 Standard deviation of voltage with stoichiometry

른 옴 저항의 변화는 작동 온도 65°C 에서 크게 나타났다. 작동 온도 35°C 조건에서는 낮은 온도로 인해 이온전도가 활발하지 않아 옴 저항이 크게 나타났으며, 상대습도가 증가함에 따라 옴 저항

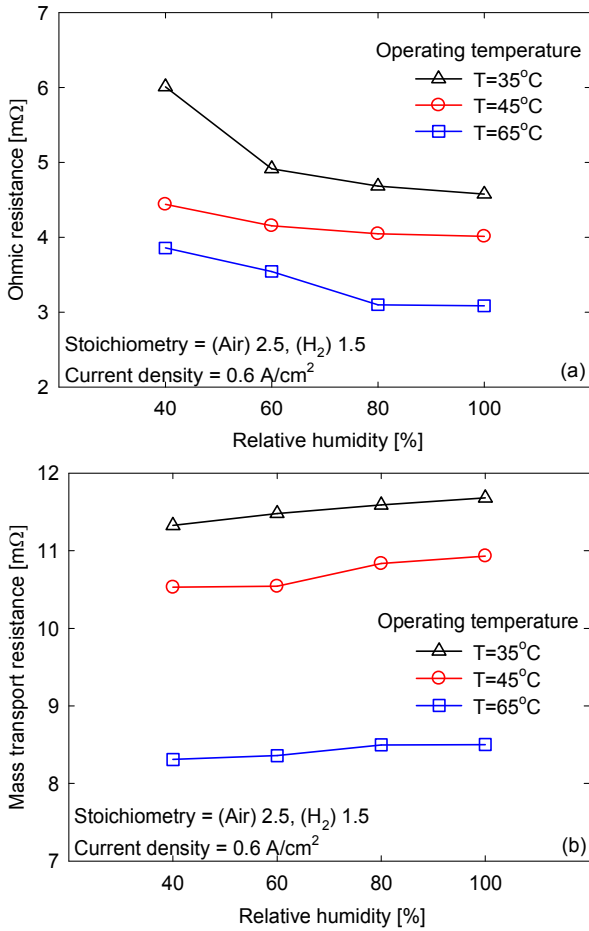


Fig. 6 Resistance variation with operating temperature and relative humidity: (a) ohmic resistance (b) mass transport resistance

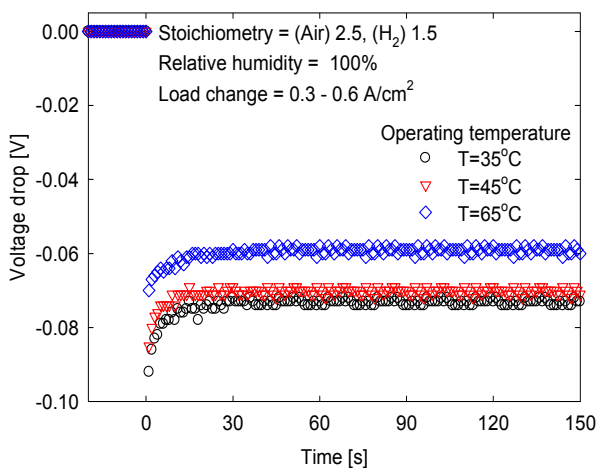


Fig. 7 Transient response of a PEMFC with operating temperatures

이 감소하였다. 작동 온도 65°C 경우에는 이온전도가 활발하지만 높은 온도로 인하여 내부 증발이 증가하였다. 따라서 저 상대습도 조건인 40%와

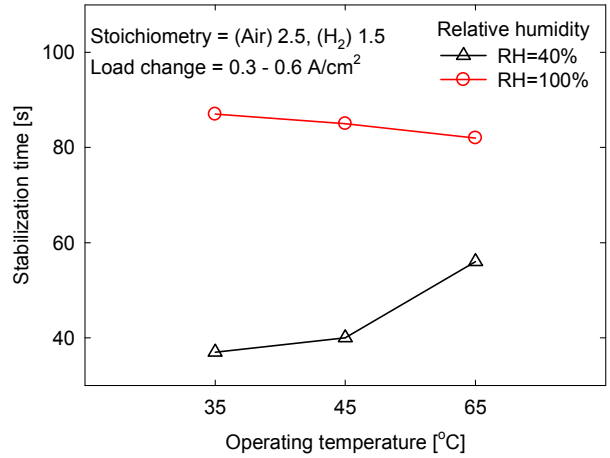


Fig. 8 Stabilization time with operating temperature and relative humidity

60%에서 옴 저항이 조금 크게 나타났다. 질량 전달 저항은 온도가 증가함에 따라 감소하였는데 이것은 작동 온도가 상승함에 따라 물질 전달이 증가하였기 때문이다. 동일한 온도 조건하에서 상대 습도가 증가함에 따라 질량 전달 저항이 조금씩 증가하였으나 변화량은 미미하였다. 이는 연료전지가 중간전류 밀도 영역인 0.6 A/cm²에서 작동함에 따라 연료전지 내부의 물 생성량이 크지 않아 플러딩이 발생하지 않았기 때문이다.

3.2 동적 성능 분석

Fig. 7은 작동 온도에 따른 PEMFC의 동적 특성을 나타내고 있다. 그래프의 y 축은 시간에 따른 전압 변화를 나타내며, 전압 변화는 이전 단계의 전류 밀도에서 전압을 기준(voltage drop=0)으로 음의 값으로 나타내었다. 작동 온도는 35°C, 45°C 및 65°C로 설정하였다. 반응물의 상대 습도는 100%로 고정하였으며, 공기측과 수소측 화학양론비는 각각 2.5와 1.5로 유지하였다. 전류 밀도를 0.3 A/cm²에서 0.6 A/cm²로 변화시켜 실험을 수행하였다. 전류 밀도를 증가시켰을 때(t=0), 작동 전압은 최저 전압이 되며 이중전하층 현상(double-charge layer)에 의해 시간이 지남에 따라 전압이 서서히 증가하다가 일정해진다. 이때 전류 밀도 변화 직후의 최저 전압과 정상상태에서 전압의 차이를 언더슈트(undershoot)으로 정의하였다. 작동 온도가 35°C 일 때 언더슈트가 0.019 V 이었던 것에 반해 45°C와 65°C 일 때에는 각각 0.015 V와 0.011 V로 감소하였다. 이것은 작동 온도가 감소함에 따라 PEMFC 내부의 이온전도도 및 물질 전달률이 낮아졌기 때문이다.⁽⁸⁾ 작동 온도가 감소할수록 PEMFC 내부의 반응속도가 감소하여 갑작스런 부하 변동 시

언더 슈트 증가하였다.

Fig. 8 은 반응물 상대습도와 작동온도 변화에 따른 안정화 시간(stabilization time)을 나타낸다. 작동온도는 35°C, 45°C 및 65°C 로 설정하였고 반응물의 상대습도는 40%와 100%로 실험을 수행하였다. 공기 및 수소의 화학양론비와 전류밀도 변화는 Fig. 7 에서의 조건과 동일하다. 안정화 시간은 전류밀도 변동 후 PEMFC 전압과 최하 전압의 차이가 언더슈트의 98.2% 보다 커지는데 걸리는 시간을 안정화 시간으로 정의하였으며, 식 (1)과 같이 표현된다.

$$t = t_{st} \text{ at } \frac{V(t_{st}) - V_{\min}}{\Delta V_{\text{under}}} > 0.982 \quad (1)$$

여기서, 언더슈트의 크기는 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta V_{\text{under}} = V_{ss} - V_{\min} \quad (2)$$

하지만, 실험 데이터를 그대로 사용할 경우 시간에 따른 전압의 변동(fluctuation)으로 인하여 정확한 안정화 시간을 구하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 IBM 사의 SPSS Statistics 21 프로그램을 사용하여 3 차원 비선형 회귀곡선을 구하여 안정화 시간을 계산하였다.

반응물의 상대습도가 40%인 경우, 작동온도가 65°C 에서 35°C 로 감소함에 따라 안정화 시간이 56 초에 37 초로 34% 감소하였다. PEMFC 의 전류밀도가 갑자기 증가시키는 경우에 순간적으로 많은 양의 산소가 반응하게 되어 촉매층에서 생성되는 물의 양이 증가하게 된다. 이때, 동일한 상대습도에서 작동온도가 35°C 경우 PEMFC 내부의 수분 증발량이 적기 때문에 때문에 멤브레인 가습이 정상상태에 도달하는데 걸리는 시간이 짧다. 하지만 작동온도가 45°C 와 65°C 로 높아짐에 따라 내부 수분 증발량이 커져 안정화 시간이 길어졌다. 하지만 상대습도가 100%인 경우에는 작동온도와 상관없이 많은 양의 수분이 PEMFC 내부에 존재하여 온도 상승으로 인한 물질 전달률 증가로, 65°C 작동시에는 35°C 와 45°C 에 비교하여 안정화 시간이 다소 감소하였다.

4. 결론

본 연구에서는 상온작동 시 정상상태와 동적상태에서 고분자 전해질막 연료전지의 성능 특성을 반응물의 상대습도와 공기측 화학양론비의 변화에 따라 고찰하였다. 본 연구결과를 다음과 같이 요약

할 수 있다.

(1) 전류밀도 1.2 A/cm²를 기준으로 상온 작동온도인 25°C 에서 PEMFC 의 전압은 일반 조건인 65°C 에 비해 34% 감소하였으며, 이는 작동온도가 감소함에 따라 PEMFC 내부의 물질 전달이 느려지고 이온전도도가 감소하였기 때문이다.

(2) 공기측 화학양론비가 2.5 에서 4.5 로 증가함에 따라 PEMFC 성능은 작동온도 35°C 와 45°C 에서 모두 증가하였다 (0.4 V 조건). 또한 성능의 증가 폭은 작동온도가 낮은 35°C 인 경우에 작게 나타났다. 이는 낮은 작동온도에서 물질 전달률 및 이온전도도가 감소하여 PEMFC 내부 반응속도가 느려져서 화학양론비 증가에 따른 성능 증가가 크지 않았기 때문이다.

(3) 작동온도가 35°C 인 조건에서 일반적 공기 화학양론비 조건인 2.5 에서도 전압이 크게 변동하는 현상이 관찰되었다. 이는 작동온도가 감소함에 따라 물질 전달률이 감소하여 PEMFC 내부 촉매층의 반응물 농도가 감소하였기 때문이다. 본 실험 결과를 바탕으로 PEMFC 가 35°C 에서 작동하는 경우에는 공기측 화학양론비를 일반적 조건인 2.5 보다 크게 설정하여야 한다.

(4) PEMFC 이 35°C 에서 작동 시 반응물의 상대습도가 40%인 경우 100%에 비하여 옴 저항이 40% 증가하였고, 증가 폭은 45°C 와 65°C 에서 작동시보다 크게 나타났다. 이는 35°C 에서 작동 시 내부 반응이 활발하지 않아 자체가습으로 인한 옴 저항 감소 효과가 작기 때문이다. 따라서 반응물의 상대습도를 60% 이상으로 설정하여야 전압 손실이 급격하게 증가하는 것을 방지할 수 있다.

(5) EIS 실험에서 옴 저항에 비하여 질량 전달 저항이 크게 나타났다. 또한, 상대습도 변화에 의한 질량 전달 저항의 증가는 미미하였는데, 이는 중간 전류밀도인 0.6 A/cm² 에서 작동함에 따라 내부 물 생성량이 적어 플러딩이 발생하지 않았기 때문이다.

(6) 동적상태에서 반응물의 상대습도가 40%일 때, 35°C 에서 작동 시 65°C 에서 보다 안정화 시간이 감소하였다. 이는 PEMFC 내부의 절대 수분량이 낮아 공기 중의 산소가 촉매층에 전달될 때의 물질 전달 저항이 감소하였기 때문이다.

후 기

본 연구는 2012 년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(No. 20124010203250)과 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 중견연구자지원사업(No. 2013068888)의 지

원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

참고문헌
(References)

- (1) O'Hayre, R., Cha, S., Colella, W. and Prinz, F. B., "Fuel Cell Fundamentals," *Wiley*, p. 137.
- (2) Song, C., Tang, Y., Zhang, J. L., Zhang, J., Wang, H., Shen, J., McDermid, S., Li, J. and Kozak, P., 2007, "PEM Fuel Cell Reaction Kinetics in the Temperature Range of 23-120°C," *Electrochimica Acta*, Vol. 52, pp. 2552~2561.
- (3) Williamson, Z., Kim, D., Chun, D., Lee T. and Squibb. C., 2011, "Experimental Evaluation of Cell Temperature Effects on Miniature, Air-breating PEM Fuel Cells," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, pp. 3761~3767.
- (4) Cheddie, D. F. and Munroe, N. D. H., 2006, "Three Dimensional Modeling of High Temperature PEM Fuel Cells," *Journal of Power Sources*, Vol. 160, pp. 215~223.
- (5) Mert, S. O., Dincer, I. and Ozcelik, Z., 2012, "Performance Investigation of a Transportation PEM Fuel Cell System," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 72, pp. 623~633.
- (6) Lee, Y., Kim, B. and Kim, Y., 2009, "Effects of Self-humidification on the Dynamic Behavior of Polymer Electrolyte Fuel Cells," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, pp. 1999~2007.
- (7) Tang, Y., Yuan, W., Pan, M., Li, Z., Chen, G. and Li, Y., 2010, "Experimental Investigation of Dynamic Performance and Transient Responses of a kW-class PEM Fuel Cell Stack Under Various Load Changes," *Applied Energy*, Vol. 87, pp. 1410~1417.
- (8) Barbir, F., 2005, *PEM Fuel Cell : Theory and Practice*, Elsevier, pp. 58~121.