

소형 모듈 스택을 이용한 가정용 연료전지 성능의 실험적 고찰

최 원석¹⁾, 김 용모¹⁾, 유 상석²⁾, 이 영덕²⁾, 홍 동진²⁾, 안 국영²⁾

An Experimental Study of Short Stack on the Performance of the Proton Exchange Membrane Fuel Cell for the Residential Power generation

Wonseok Choi, Yongmo Kim, Sangseok Yu, Youngduk Lee, Dongjin Hong, Kookyong Ahn

Key words : Proton Exchange Membrane Fuel Cell(고분자 막 전해질 연료전지), Short Module Stack(모듈 스택), Residential Power Generator(가정용 발전기)

Abstract : Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) is an attractive candidate for residential power generator due to fast start-up and stop, high efficiency, low emission, and high power density. In this study, we employ short module stack to understand the performance of the unit cell of the stack in terms of operating temperatures. To simulate the practical fuel cell stack of residential power generator, the structure and active area of the short module stack is kept the same as that of the practical fuel cell. The results shows that the electric potential of short module stack is different from the number of cells times the potential of unit cell because of cell-to-cell variation.

1. 서 론

연료전지는 화학반응에 의해 전기에너지를 직접 생산하는 전기화학 장치로 배터리와는 달리 연료를 제공하는 한 지속적으로 전기를 생산할 수 있다. 고분자 막 전해질 연료전지(Proton Exchange Membrane Fuel Cell(이하 PEMFC))는 이온을 교환하는 전해질로 고분자 막을 채용한 연료전지로 작동온도가 낮고 시동 특성과 효율이 우수하며, 다른 연료전지에 비해 부피를 줄일 수 있다는 장점 때문에 현재 많은 연구가 이루어지고 있다.⁽¹⁾⁻⁽³⁾ 국내에서는, PEMFC를 수송용과 가정용으로 적용하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있으며 상당한 기술 진보가 이루어졌다. 초기의 연료전지 연구는 스택개발에 치우쳐 왔으나 현 단계에서는 실증 시스템 운용 등과 같은 완성품 위주의 연구가 요구됨에 따라 연료전지 시스템에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 특히, 최근에는 시스템 최적화를 위한 시스템 통합 및 제어 기술을 비롯하여 가격경쟁력과 고효율을 달성할 수 있는 연료전지 전용 BOP(Balance of Plants) 개발에 대한 필요성이 크게 대두되고 있다.⁽⁴⁾⁻⁽⁵⁾

연료전지 시스템의 성능을 최적화하기 위해서는 운전조건에 따른 연료전지 스택의 성능을 이해해야 한다. 통상, 연료전지 스택의 성능은 공기와 연료의 공급방법, 열관리 방법, 가습 방법 등 다양한 인자에 의한 영향을 받기 때문에 개별 단위전지의 성능과는 차이를 보인다. 특히 스택을 구성하는 단위 전지 간에도 작동조건에 따라서 성능이 큰 차이를 보이게 되는데 이러한 스택을 구성하는 단위 전지 간의 구조 또는 운전 방법에 따른 성능 차이를 이해하는 것이 필요하다. 그러나 통상 단위 연료전지의 성능에 대해서는 문헌에서 다양한 정보를 찾을 수 있는 반면, 연료전지 스택의 성능에 대해서는 정보 공유가 많이 되어 있지 않다.

본 연구에서는 1kW급 가정용 연료전지 시스템에 적용할 수 있는 연료전지 스택의 성능을 파악하고 스택을 구성하는 각각의 단위전지의 성능 차이를 이해하고자 한다. 연료전지의 성능평가는 평가 장치(fuel cell station)를 통해서 이루어지지만,

-
- 1) 한양대학교 대학원 기계공학과
E-mail : wonseok@hanyang.ac.kr
Tel : (02)2297-7690 Fax : (02)2297-0339
 - 2) 한국기계연구원
E-mail : kyahn@kimm.re.kr
Tel : (042)868-7324 Fax : (042)868-7284

이러한 평가장치는 보통 스택의 전 운전조건에 따른 성능을 보는데 한계가 있다. 그러므로 본 연구에서는 1kW급 PEMFC 스택의 성능 평가를 위하여 실제 60 Cell 가정용 연료전지 스택과 동일한 구조를 갖는 10 Cell 모듈스택을 구성하여, 스택의 성능 및 스택을 구성하는 단전지의 성능을 평가하였다.

2. 연료전지 성능평가 실험 장치 구성

본 연구에 사용된 모듈스택의 사양은 Table 1과 같다.

Table 1 Specification of PEMFC Stack

Parameters	Value
Active Area	124 (cm ²)
NO. of Cells	10
Gas Diffusion Layer	SGL carbon 35BC
Membrane	Nafion 50 μ m (N112)
Catalyst Layer thickness	5. \times 10 ⁻⁵ (m)
Stoichiometry	1.33(A), 2.00(C)
Total pressure (P _A , P _C)	1.15 (atm)
Equivalent weight	1100 (kg/kmol)
Dry density of membrane	2.0 (kg/m ³)

Fig. 1은 연료전지 성능평가를 위한 실험장치의 개략도를 나타낸 것으로, 연료전지 평가장치(Fuel Cell Test Station, FCTS)에서 연료 및 공기를 가습시켜 공급하고, 연료전지스택에서 반응시킨 후 배기 가스는 배출용 덕트를 통해 강제로 외부로 배출되도록 구성되어 있다. 평가장치의 연료공급부로는 99.999%의 초고순도 수소를 공급하였고 공기 공급부에서는 유분제거기와 제습기, 필터를 통과한 압축 공기를 평가장치로 공급하였다. 공급된 가스는 연료전지 평가장치(ETS-3000) 내의 MFC에 의해 유량이 조절되며, Bubbler type의 가습기를 통과한다. 연료전지로 들어가는 가스의 가습조건을 확보하기 위해 가습기 출구 온도와 연료전지 입구단의 온도를 연속적으로 모니터링 하면서 충분한 가습을 확보하도록 온도를 조절하였다. 또한, 연료인 수소가스의 열용량이 작은 저부하 운전조건에서 주위로의 열전달에 의해 가스가 원하는 가습조건을 확보하지 못할 수 있으므로, 연료 공급Line에 별도의 Line heater를 설치하였다. 또, 가습기로부터 연료전지까지의 연결부를 충분히 단열하여 열전달에 의한 손실을 최소화 하였다.

연료전지의 작동 온도를 조절하기 위해 두개의 열교환 회로를 구성하였다. 즉, 연료전지 스택으로부터 열을 회수하는 열교환 회로와 회수한 열을 외부로 방출하기 위한 열교환 회로로 구성하였으며, 연료전지로부터 열을 회수하는 쪽에는 DI water를 냉각수로 사용하고 펌프를 통해 순환시켰다. 이때 부하에 따라 연료전지로 흘러들어가는 유량을 조절하여 연료전지의 온도를 조절하

였다. 또한, 회수된 열을 방출하기 위해서 연료전지 측 냉각수와 2차 측 냉각수 사이에 열교환을 할 수 있는 열교환기를 설치하고 2차 열교환 회로를 구성하였다. 2차 측 냉각수의 유량은 부하변화에 관계없이 일정하게 유지하였다. Fig. 1에서 두개의 열전달 회로 상에 존재하는 Reservoir는 펌프를 보호하기 위해 설치하였으며, 연료전지 측 열교환망의 유량 조절은 고부하와 저부하에서 각각 다른 유량 밸브를 이용해 조절하였다.

가정용 연료전지 스택에서 발전한 전력은 통상 가정으로 송전되거나 또는 한전으로 역송전할 수 있는데 이 외부 부하 조건을 모사하기 위하여 Maximum Voltage 60V, Maximum Current 200A까지 방전 시킬 수 있으며 1V 이하에서도 200A 까지 방전 시킬 수 있는 DC Electronic Loader를 사용하였다.

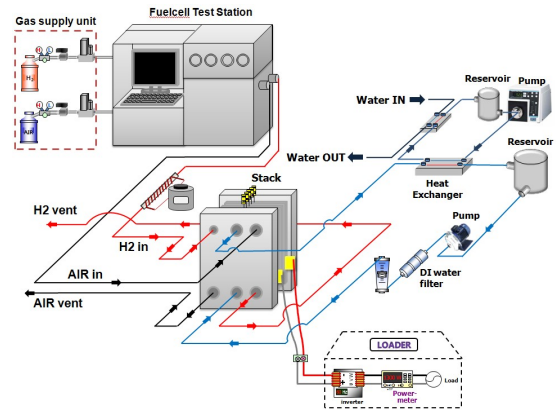


Fig. 1 실험장치 구성도

3. 결과 및 고찰

3.1 기초 실험: 정상상태 스택 전압 측정

본 연구에서는 연료전지 스택의 성능을 평가하기 위해 스택 온도를 50 $^{\circ}$ C, 60 $^{\circ}$ C, 70 $^{\circ}$ C로 유지했을 때의 연료전지 스택의 성능을 평가하고자 한다. 이때, 연료전지 스택으로 유입되는 가스도 스택 온도와 가능한 동일한 값을 유지할 수 있도록 충분한 시간을 두고 가스 온도를 제어하였다. 스택의 온도는 Fig. 2의 TC1, TC2, TC3위치에서 측정하였으며, 본 연구에서는 온도의 평균값(TC1, TC2, TC3의 온도편차 \pm 2.1 $^{\circ}$ C 이내)을 스택의 작동온도로 정의하였다. 부하조건은 저부하부터 고부하까지 전 부하 조건에 대한 스택 내 단위전지의 거동을 볼 수 있도록 설정하였다.

Fig. 2는 모듈 스택에서 온도 및 전압의 측정 위치를 나타내고 있는데, 전압은 8개 위치에서 측정하고 온도는 양쪽 끝단과 중앙에서 측정하였다. 이외에도 Electric loader에서는 스택 전압을 측정하며, Fig. 2의 공기극과 연료극에 lead 선을 연결하여 Electric Loader에서 측정한 값과 비교하였다. 비교 결과, Loader로 흐르는 전류에 의한 전기저항 손실은 미미한 것으로 평가되었다.

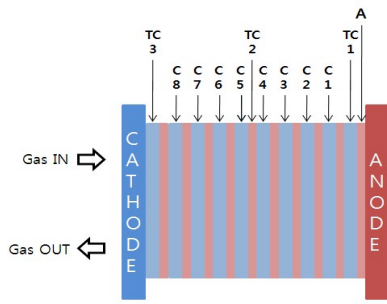


Fig. 2 모듈 스택의 측정 위치

Fig. 3은 스택의 평균온도 70℃ 조건으로 유지하면서 스택의 전압을 측정하는 실험 수행 중 연속적으로 획득한 스택 전압의 측정 데이터를 나타낸 것이다. 본 실험에서는 스택의 평균온도는 70.4℃로 Coolant의 유량을 제어하여 실험을 수행하는 동안 $\pm 1.1^\circ\text{C}$ 이내로 균일하게 유지하였다. Fig. 3에서 실험 부하조건 중 저전류 밀도 ($J < 0.05\text{A}/\text{cm}^2$)에서는 수소 측 MFC의 최소 유량 제한 조건 때문에 Table 1에 제시된 당량비 조건을 유지할 수 없었다.

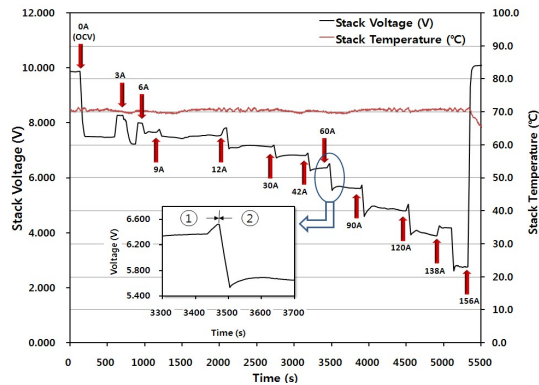


Fig. 3 부하별 스택 전압의 변화

통상 스택의 전압 측정 실험을 하기 위해서는 먼저 요구 유량을 증가시킨 상태에서 전류를 증가시켜야 산소결핍(Oxygen Starvation)문제를 없앨 수 있기 때문에 Fig. 3에서는 부하변동 구간마다 전압이 상승 후 하락하는 것을 볼 수 있다. 즉, 초기 전압 상승은 연료와 산화제를 증가시키는데 따른 당량비 증가 효과이고, 그 후 전압강하는 측정을 위해 전류를 증가시켰기 때문이다. Fig. 3에 있는 확대한 그림을 보면 부하변동 시 전압이 순간적으로 감소했다가 증가하는 것을 볼 수 있는데 이 현상은 스택의 온도를 일정하게 유지하고 있음에도 나타났다. 이러한, 전류를 증가시켰을 때의 비정상 상태는 반응사이트로의 확산 지연과 화학반응의 지연에 의한 것으로 생각된다.

3.2 스택온도에 따른 특성

스택의 평균 온도를 각각 50℃, 60℃, 70℃로 유지하면서 얻어진 모듈스택의 성능곡선(I-V,

I-P Curve)을 Fig. 4에 나타내었다. Fig.4에 보여지듯이 전류 밀도가 낮은 영역에서는 스택의 작동 온도에 의한 영향은 매우 작지만, 전류 밀도를 증가시켜 감에 따라 스택 전압은 온도에 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다. 스택의 전압과 전력은 작동 온도를 50℃로 할 때와 60℃, 70℃으로 할 때는 확연히 구분을 보인다. 하지만, 스택 온도가 60℃일 때와 70℃일 때는 고 전류 밀도에서만 성능에 차이가 있는 것으로 관측되었다.

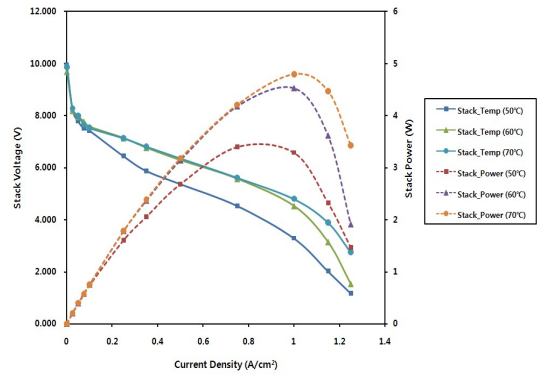


Fig. 4 스택온도에 따른 성능곡선

3.2 전류 밀도 변화에 대한 단위 전지 전압 변화

Fig. 5는 PEMFC 스택의 작동온도를 60℃로 유지하고 전류밀도를 변화시켰을 때 단위 전지들의 성능을 보여주고 있다.

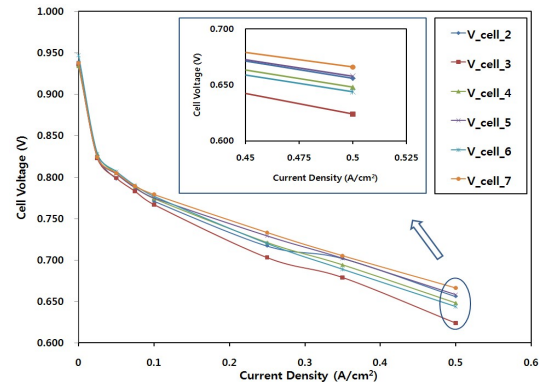


Fig. 5 단전지의 I-V Curve 특성

단전지 중 1번과 8번은 공기극과 연료극의 전압을 나타내므로 제외시키고, 2번에서 7번까지를 표시하였다. 관찰된 단전지 중 공기극에 가까운 7번 단전지가 가장 좋은 성능을 보였는데, 이것은 모듈 스택이 Cathode측에서 가스가 공급되고 배출되는 구조로 되어서 상대적 당량비가 크고, 공급가스의 온도가 높고 가습량이 충분하기 때문인 것으로 판단된다.

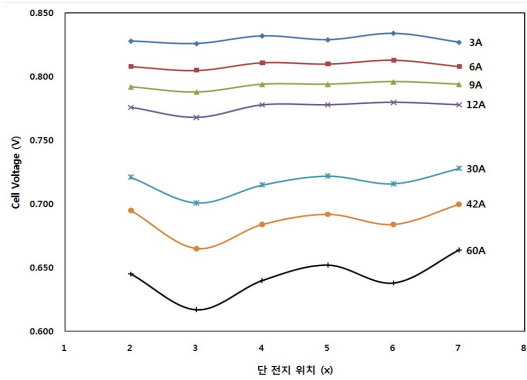


Fig. 6 전류에 따른 단전지의 전압분포

다음으로 단위전지의 위치에 따른 전압을 Fig. 6에 표시하였다. 그림에서 보여지듯이, 전류밀도가 낮을 때와 높을 때가 서로 반대의 전압 분포를 보이는 것을 확인하였다. 또, 예상과는 달리 단위 전지간의 전압 분포가 상승과 하락을 반복하는 것을 확인하였다. 이는 단위전지로 공급하는 가스, 냉각수 등 공급 방식 및 스택의 구조적인 부분에 원인이 있을 것으로 생각된다. 그리고 2번과 7번 단전지의 전압이 높은 이유는 모듈 스택의 구조적 특성상 채널 내부의 온도 및 물의 영향과 가스의 입출구가 같은 방향으로 위치하기 때문에 발생하는 압력차로 인한 것으로 보인다. 이러한 결과는 모듈스택의 온도가 50℃, 70℃로 유지되는 조건에서도 비슷한 경향으로 나타난다. 스택을 구성하는 단위 전지 간의 이러한 성능 변동에 대해서는 향후 추가적인 실험과 해석을 거쳐야 정확한 이해가 가능할 것으로 기대된다.

4. 결론

본 연구에서는 가정용 연료전지 시스템에 적용되는 스택의 성능을 예측하기 위해 10셀로 구성된 모듈 스택을 이용하여 스택 및 스택을 구성하는 단전지 성능 평가를 수행할 수 있는 장치를 구성하였다. 스택 및 단전지 성능 평가 시험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 단전지 실험 결과를 바탕으로 각각의 셀간에도 전압분포가 차이를 보이는 것을 확인하였으며, 셀간 전압차는 전류밀도가 커질수록 증가한다.
- 2) 스택을 구성하는 단전지 중 특성이 스택과 유사한 단전지를 선택하여 대표 단전지로 선정하려 하였으나, 주어진 10 cell 모듈스택을 주어진 유동대로 운전시 셀 간 변화가 심하여, 대표성을 부여할 수 없음을 확인하였다.
- 3) 향후 추가 실험을 진행할 예정이며, 유동 방향을 변경해 가면서 스택을 대표할 단전지를 선정할 수 있는지 확인 할 계획이다.

References

- [1] James Larminie, Andrew Dicks, 2007, "Fuel Cell Systems Explained 2nd edition," John Wiley & Sons Ltd., pp.65-119.
- [2] Wolf Vielstich, Hubert A. Gasterger, Arnold Lamm, 2003, "Handbook of the Fuel Cells - Fundamentals, Technology and Applications, Volume 1, John Wiley & Sons, Ltd., pp.145-218.
- [3] Victor C. Regep, Eden Mamut, 2004, "Stand for the experimental study of PEM Fuel Cells", Rom. Journ. Phys., Vol. 51, Nos. 1-2, pp. 41-48.
- [4] T. Susai et al., 2001. "Development of a 1 kW polymer electrolyte fuel Cell power source", Journal of Power Sources 92 (2001) 131-138
- [5] 안국영 외, 2006, "기본사업 연구계획서 : 연료전지 시스템 통합 및 BOP 기술 개발", 한국기계연구원