

이동 전원용 공랭식 고분자 연료전지의 제작 및 운전 특성 연구

손영준*, 박구곤, 양태현, 윤영기, 이원용, 임성대, 김창수

Operating characteristics of an air cooling PEMFC for portable application

Young-Jun Sohn*, Gu-Gon Park, Tae-Hyun Yang, Young-Gi Yoon,
Won-Yong Lee, Sung-Dae Yim, and Chang-Soo Kim

Abstract Optimal design and proper operation are important to get aimed output power of a polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) stack. An air cooling fuel cell stack is widely used in sub kW PEMFC systems. The purpose of this study is to analyze operating conditions affecting the performance of the air cooling PEMFC which is designed for portable application. In portable applications, air cooling stack is difficult to maintain well balanced operating conditions. The important parameters are the relative humidity, the temperature of the stack, the utilization of reactant gas and so on. In this study, a 500W air cooling PEMFC was fabricated and tested to evaluate the design performance and to determine optimal operating conditions. Moreover, basic modeling also is carried out. These results can be used as design criteria and optimal operating conditions for portable PEMFCs

Key words air cooling(공랭식), portable(이동용), design parameter(설계 변수), PEMFC(고분자연료전지)

* 한국에너지기술연구원

■ 71-2, Jang-Dong, Yuseong-Gu, Daejeon, 305-343, Korea

■ E-mail : yjsohn@kier.re.kr ■ Tel : (042)860-3781 ■ Fax : (042)860-3309

1. 서론

연료전지 스택의 설계는 고려할 점이 대단히 많다. 시스템의 성능에 영향을 미치는 변수가 많고 각 설계 변수들은 서로 긴밀한 관계들을 가지고 있는 경우가 대부분이다. 단위 전지의 경우와는 달리 연료전지 스택은 각 단위 전지로 공급되는 반응 기체의 양을 균일하게 하기 위하여 매니폴드 설계를 엄밀하게 고려해야 하며, 반응 공기를 공기압축기 또는 송풍기로 공급해

야하는 경우에는 스택 내부에서의 압력강하 또한 중요하게 고려해야할 사항이다.

연료전지 시스템의 종류에 따른 연료전지 스택의 운전 측면에 있어서 이동 전원용 분야는 시스템의 이동이 가능하기 때문에, 운전환경의 변화가 가장 다양한 시스템 중의 하나이다. 시스템의 성능은 주변 공기의 습도와 온도에 따라 변화할 수 있기 때문에 이동 전원용 시스템은 주변 환경에 따라 물 및 열 관리를 통해서 성능을 안정적으로 유지할 수 있도록 주의하여야

한다.

스택의 설계 및 운전 변수 중에서도 연료전지 내부의 반응 공기의 상대 습도는 연료전지의 성능과 밀접한 관계를 가지고 있다. 상대 습도는 연료전지 스택과 반응 공기의 온도에 의해 결정된다. 2kW 내외의 고분자 연료전지 시스템의 경우 간단한 냉각 계통의 설계를 위하여 공랭식 시스템을 많이 채택하고 있는데, 이 경우 주변 공기의 상태에 따라 냉각 및 스택 내부의 상대 습도가 영향을 직접적으로 받을 가능성이 대단히 높다. 따라서 공랭식 연료전지 시스템을 설계할 경우, 안정적인고 높은 전력 밀도를 갖추게 하기 위해서는 실질적인 실험을 통해 반응 공기의 상대 습도가 시스템의 성능에 미치는 영향을 규명할 필요가 있다.

기존에 고분자 연료전지 및 직접 메탄올 연료전지에서의 물 및 열관리에 대한 연구가 많이 있어왔다^(1,2). 그러나, 수백 W급 공랭식 고분자 연료전지 스택을 실제로 운전하면서 관련된 실험 결과를 고찰해 본 경우는 찾아보기 힘든 실정이었다.

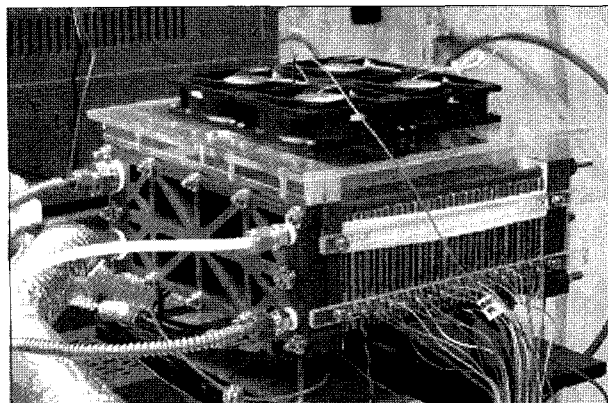
스택의 온도와 반응 공기의 습도는 연료전지의 유로 내부에서 생성된 물의 양에 영향을 미치게 되고 물의 생성과 연료전지의 온도는 운전 상태에 따라 밀접한 관련을 가지고 변한다. 따라서 관련 변수들의 상호 연관에 대해서 시스템의 운전을 통해 고찰해 볼 필요가 있다. 공랭식 연료전지 시스템의 성능 및 안정성에 대해서 단위전지들 간의 유량 분포 및 반응 공기의 상대 습도 변화의 영향을 실험적으로 살펴보고 이들 설계 변수들의 상호 영향에 대해 살펴본다.

2. 실험 장치와 방법

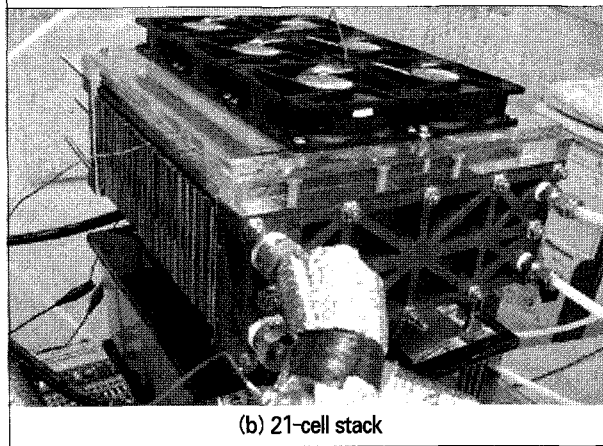
스택(fig. 1)은 냉각 공기의 소통을 위해 골가공이 된 금속판을 삽입하여 16장과 21장으로 적층하여 제작하였다. 각 셀의 활성면적은 100cm²이다. 21장으로 적층된 연료전지 스택의 크기는 23(폭) × 7.2(높이) × 22(길이)cm³로서 체적은 약 3.64리터이다.

MEA는 Nafion[®]112 막을 사용하였으며 촉매 제조 및 각 층의 적층은 본 센터에서 새롭게 개발하여 제작하였다. 스택의 크기에 따라 4개에서 6개의 냉각팬을 설치하고 온도를 제어하였으며, 스택의 주요 지점에 K타입 열전대를 사용하여 온도를 측정하였다.

Fig. 2는 실험 장치의 개략도이다. 반응 공기는 온도가 제어



(a) 16-cell stack



(b) 21-cell stack

Fig. 1 The experimented stacks.

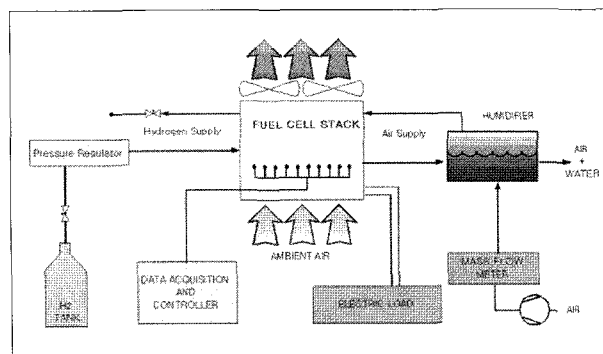


Fig. 2 The schematic diagram of the PEMFC experimental system

되고 있는 수조를 통과하여 가습된 상태로 스택에 주입된다. 수조의 온도는 실제 시스템에 사용될 가습기와 유사한 조건을 구현하도록 30, 40 및 50℃를 선택하여 운전하였다. 스택의 온도는 냉각팬의 회전 속도를 제어하여 설정한 값을 유지하도록 하였다. 스택에서의 반응 공기의 상대 습도는 다음 식에 의해 계산된다⁽³⁾.

$$\phi = \frac{P_w}{P_{sat}} \quad (1)$$

P_w 와 P_{sat} 는 각각 반응 공기의 주입 온도와 스택 온도에서의 포화 수증기압이다. 수조로부터 스택까지의 배관에는 단열 처리를 하였고 온도차는 2~3°C 이하였기 때문에 P_w 를 반응 공기의 입구 온도로 간주하도록 한다.

3. 결과 및 토의

3.1 유량 분포

스택의 각 단위 전지로 들어가는 반응 기체의 유량은 단위 전지의 전압과 성능에 직접적으로 영향을 미친다. 특히 반응 공기의 양이 불균일하게 되면 특정 단위 전지에 공기량이 부족하게 되고 유량이 충분치 않아 채널 내부의 물이 원활하게 배출되지 못할 수 있게 됨에 따라 전압이 주변에 비해 떨어지게 된다. 심각한 경우에는 단위 전지의 전압이 -1.5V 이하로 떨어지는 경우가 생기며 물의 전기 분해가 일어나는 수가 있다. 전기 분해가 일어날 경우, 수전해를 고려하지 않은 막과 채널의 구조로 인해 막표면에서 발생하는 기포가 막에 심각한 물리적 손상을 줄 수 있다. 특히 채널의 경계면에서 물리적인 스트레스를 많이 받게 되며 결과적으로 막이 파손될 수 있다. 아주 미세하게 파손된 부분을 통해 수소와 산소가 섞이게 되고 국부적인 촉매 연소가 일어날 수도 있으며 파손 부위는 점점 확대된다. Fig. 3은 이러한 파손의 예이다.

이러한 상황을 방지할 경우 스택에 심각한 손상을 줄 가능성도 있기 때문에 각 단위 전지에서의 유량 분포에 대해 공기측 채널의 3차원 수치 해석을 통해 엄밀하게 검토를 하였다. GAMBIT®2.0을 이용하여 fig. 4에 나타낸 것과 같이 격자를 형성시켰으며 FLUENT®6.0을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 공기는 단상 유동으로 간주하였으며 전기화학 반응은 고려하지 않았다.

매니폴드 설계는 유량의 고른 분배를 위해 중요한 요소이다. 유동의 양상은 매니폴드 입구의 형상에 따라 민감하게 변화한다. 또한 입출구의 구성(fig. 5)도 유량 분배에 영향을 준다. Fig. 6은 이러한 결과를 보여주었고 있다. 해석 결과로 볼 때 U형태의 입출구 구조가 Z형태보다 더 고른 분배를 보여준다는 것

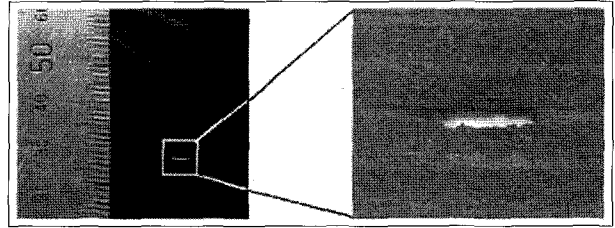


Fig. 3 The example photograph of membrane failure.

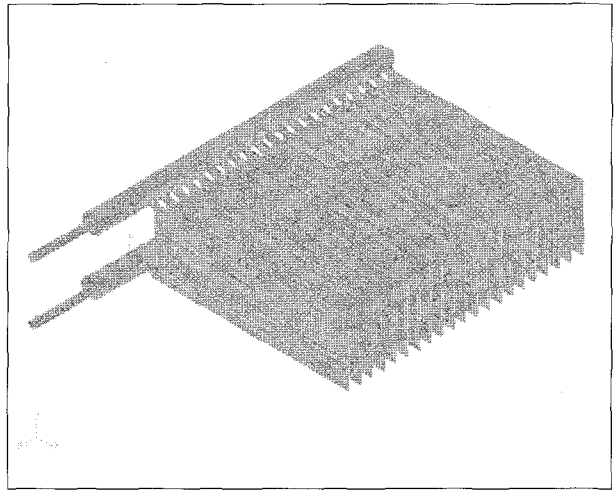


Fig. 4 Three-dimensional mesh for numerical analysis.

을 알 수 있다. U형태의 입출구 구조를 통해 각 단위 전지로 들어가는 유량의 차이를 1% 이하로 유지하도록 하였다.

3.2 전압 분포와 상대 습도

일반적인 경우를 생각해 볼 때, 상대 습도가 증가 할수록 막의 이온 전도도가 향상되어 연료 전지의 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 하지만, 경우에 따라서는 상대 습도가 높아짐에 따라 채널 내부에 물이 지나치게 많게 되어 촉매의 반응 영역을 차단할 수 있으며 연료 전지의 성능이 떨어질 수도 있게 된다. 결과적으로 상대 습도는 지나치게 낮거나 높게 되면 각 단위 전지의 전압 불균일 또는 스택 성능의 불안정을 초래할 수 있다. 또한, MEA는 기체 확산층에 PTFE를 처리하여 기체와 물의 유동에 대해 최적화된 운전 조건이 있기 때문에 적절한 운전 전압과 성능을 얻기 위해 적절한 운전 조건을 찾고 유지할 필요가 있다⁽⁴⁾. 공기 공급 계통에 있는 가습기 역시 이동 전원을 위한 시스템 구성에서는 크기 및 성능에 많은 제약이 있다. 이러한 상황을 종합해 볼 때, 채널에서의 압력강하, MEA의 특성, 가습기 및 냉각팬의 성능과 같은 설계 변수

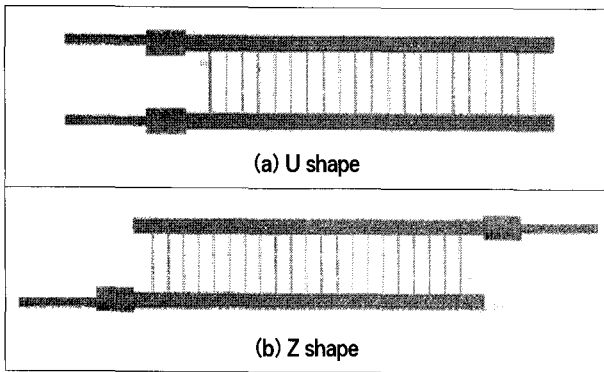


Fig. 5 Manifold configuration.

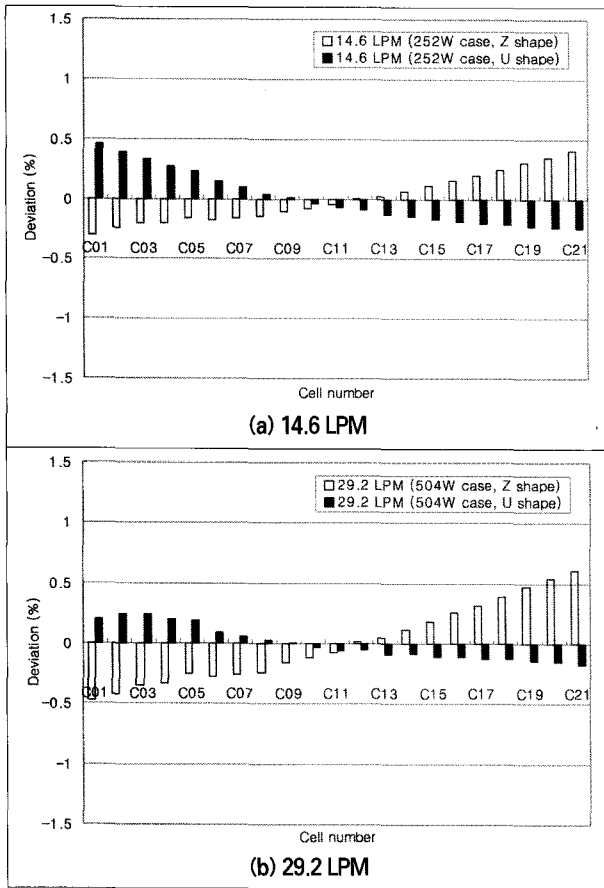


Fig. 6 The deviation of the volume flow rate of each cell.

를 고려하여 적절한 상대 가습량을 정하는 것이 중요하다.

Fig. 7은 각각의 상대 습도에 따른 평균 전압과 최대, 최소값의 차이에 대해 보여주고 있다. 상대 습도 37%의 경우, 전류 밀도가 $550\text{mA}/\text{cm}^2$ 이상의 영역에서 최소 전압값이 급격하게 감소한다. 이와는 대조적으로 나머지 2가지 경우에는 최대, 최소값의 차이 및 I-V 성능이 적절한 것으로 나타났다. 이 결과를

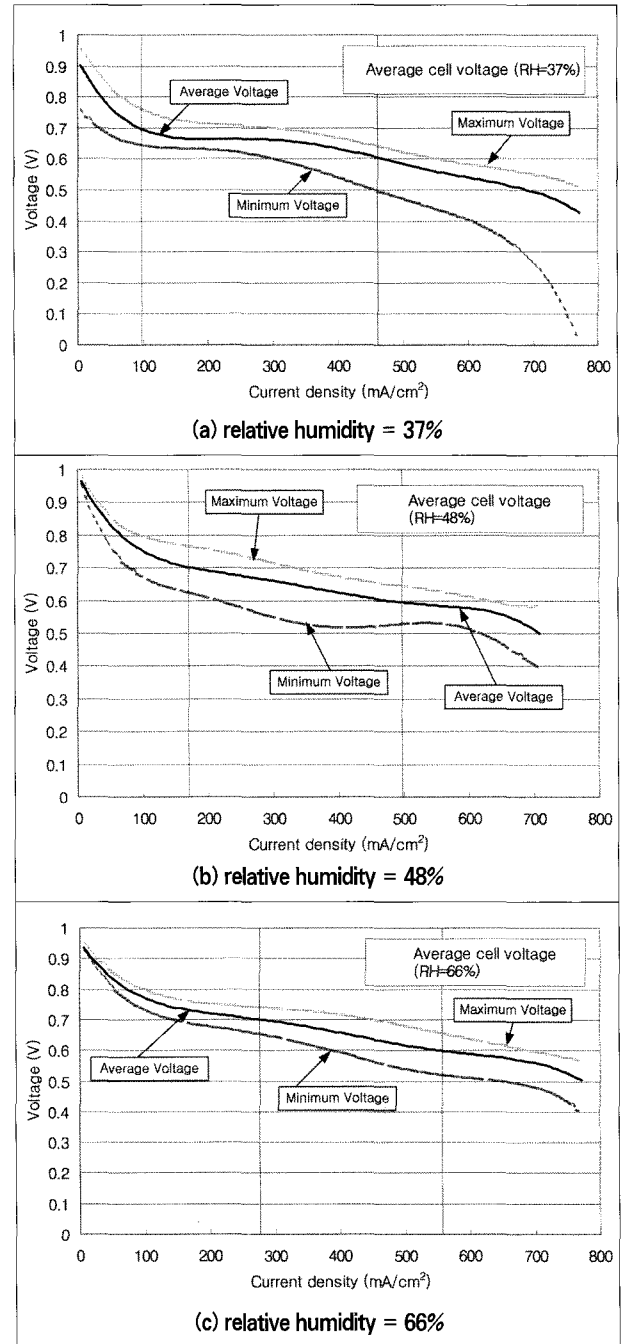


Fig. 7 The average and the distribution of cell voltage with respect to the relative humidity.

통해 설계된 압력값이 상대 습도 50~70%의 경우에도 채널 내부의 물을 제거하기에 충분하다는 사실을 알 수 있다. 한편, 낮은 상대 습도에서는 막의 이온 전도도의 감소가 스택의 전압 분포를 불균일하게 만든 주요 요인일 수 있다. 결과적으로 가습기와 냉각팬의 성능이 적절할 경우라면, 상대 습도 65% 정도

의 운전 조건이 유효할 수 있음을 알 수 있다.

3.3 공랭식 PEMFC 스택의 운전 결과

Fig. 8은 본 센터에서 실험을 위하여 설계한 스택의 운전 결과를 보여주고 있다. 상대 습도는 64%를 일정하게 유지하고 있다. 공기와 수소 채널은 모두 상압으로 운전하였다. 평균 스택 온도는 약 60°C, 공기 주입시의 온도는 약 50°C로 하였다. 공기의 stoichiometry는 2.3이었다. 측정 결과, 본 스택의 성능은 주어진 상대 습도에서 상당히 안정적으로 운전할 수 있는 것을 보여주고 있다.

Fig. 9에 나타난 바와 같이 3가지 주요 지점에서 21셀 연료전지 스택의 전압 분포가 균일하게 유지되고 있는 점은 주목할 만하다. 주요 지점은 각각 OCV(open circuit voltage, point 1), 일반 운전 조건(point 2) 그리고 평균 전압 0.6V 운전 상태(point3)를 나타낸다.

3.4 냉각팬 운전에 따른 주변 기기 전력 소모량

Fig. 10은 운전 상황에 따른 냉각팬의 전력 소모에 따른 스택 운전시의 주변 전력 소모량에 대해 나타낸 것이다. 운전은 fig. 9에서의 동일한 조건으로 실험하였다. 주변 온도는 20°C

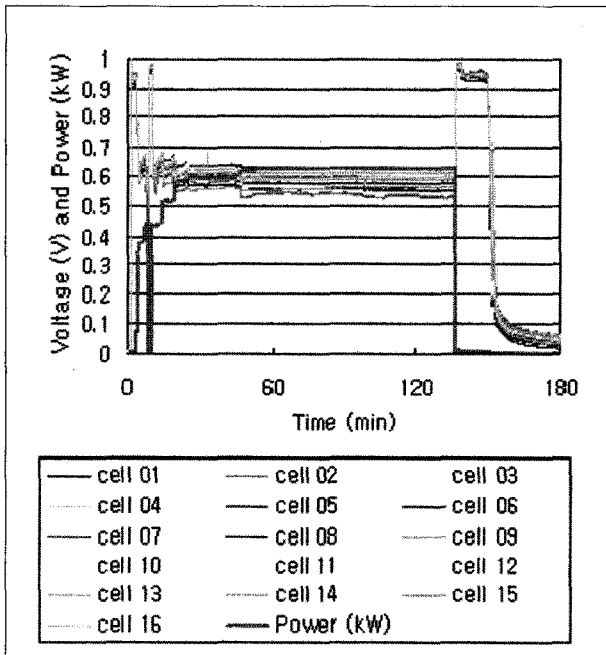


Fig. 8 The voltage of the cells and the stack power graph.

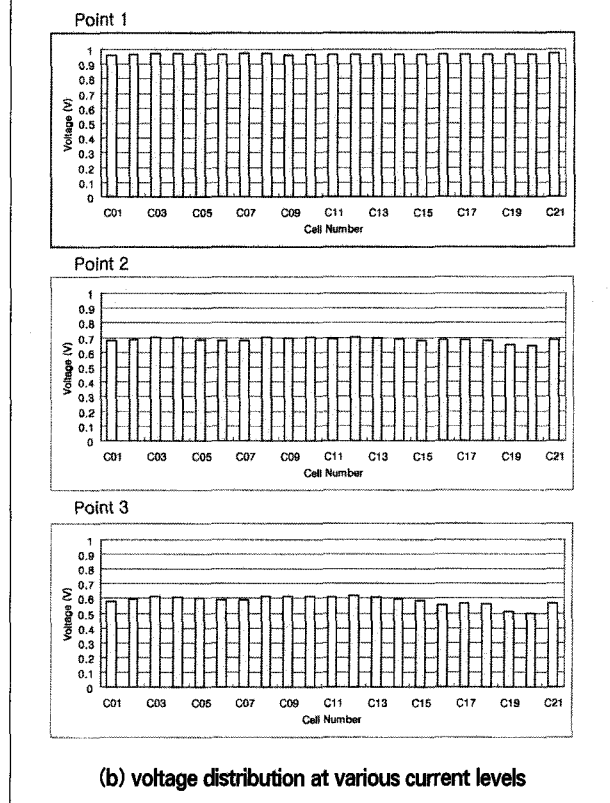
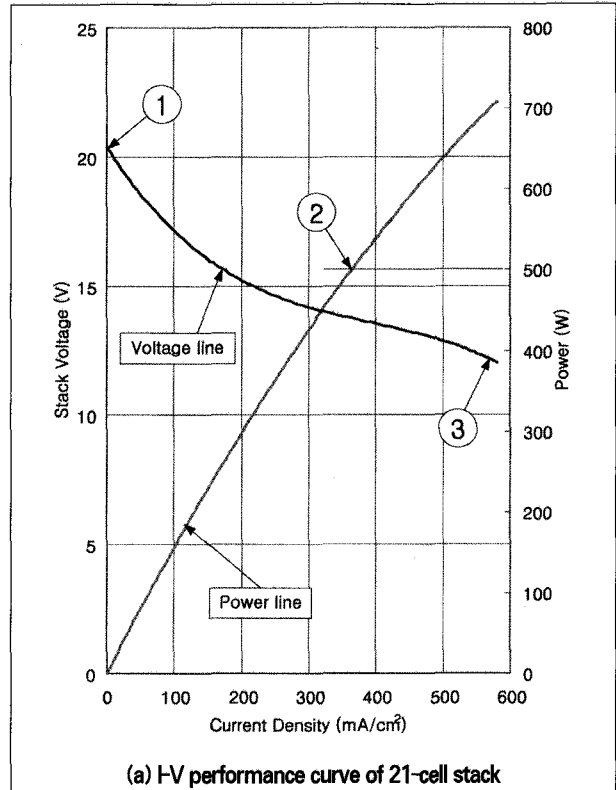


Fig. 9 Stack performance and Voltage Uniformity.

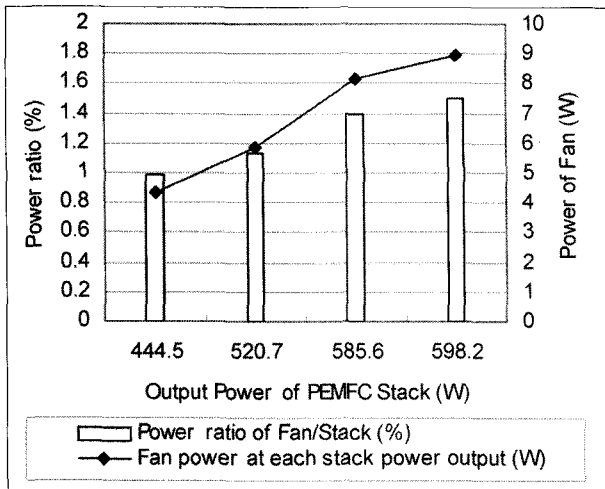


Fig. 10 The parasitic load associated with the forced cooling by axial fans.

로 일상적인 실내 온도값을 유지하였다. 연료 전지는 스택 총 출력 전압 대비 2% 이하의 전력을 사용하여 냉각팬을 통해 성공적으로 스택의 온도를 제어할 수 있음을 그래프를 통하여 알 수 있다.

4. 결론

활성면적 100cm^2 의 고분자 연료전지를 설계하고 16장과 21장을 적층한 스택을 각각 제작하여 실험하였다. 적절한 채널과 매니폴드 설계 및 공기 입출구 구성을 통하여 1% 이하의 유량 분포 차이를 수치 해석을 통해 구현하였다. 스택의 운전 온도와 반응 공기의 온도 조절을 통하여 상대 습도에 따른 성능 변화를 실험하였다. 냉각팬으로 공기를 강제 순환시켜 연료전지의 온도를 조절하였다. 66%의 상대 습도로 운전한 경우가 다른 상대 습도로 운전한 것에 비하여 성능이 더 좋았다. 이동 전원

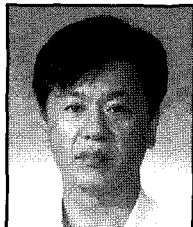
시스템의 경우, 운전시의 전류값과 공기 유량에 따라 스택의 온도가 변화한다. 주입되는 반응 공기를 스택의 출구에서 나오는 공기의 열과 수분의 교환을 통해 가습을 하도록 시스템을 구성하는 경우, 연료 전지 운전의 환경은 출구 공기의 상태에 따라 계속 변화하게 된다. 이런 운전 상황에서 상대 습도는 시스템 제어에 중요한 변수로 작용할 수 있을 것으로 본다.

500W에서 운전을 목표로 설계 제작된 공랭식 고분자 연료 전지 스택을 60% 상대 습도 조건으로 제어하며 성공적으로 운전을 하였다. 상대 습도를 유지하기 위하여 스택 온도를 조절하도록 설치된 냉각팬의 소비 동력은 전체 스택 출력의 2% 이하로 유지할 수 있었다. 보다 더 현실적인 상황을 고려하기 위해서는 향후에 본 연료 전지 스택을 포함한 공기 공급 압축기, 제어 보드 등을 갖춘 전체 시스템의 운전 실험을 통해 분석을 할 필요가 있겠다.

References

1. Ahmed, S., Kopasz, J., Kumar, R. and Krumpelt, M., 2002, "Water balance in a polymer electrolyte fuel cell system", *Journal of Power Sources*, 112, 519-530.
2. Michael, G. Izenson and Roger, W. Hill, 2003, "Water and thermal balance in PEM fuel cells", the first international conference on fuel cell science, engineering and technology, 1, 477-486.
3. James Larminie and Andrew Dicks, 2000, "Fuel Cell Systems Explained", Second ed., John Wiley & Sons Ltd, England.
4. Gu-Gon Park, Young-Jun Sohn, Tae-Hyun Yang, Young-Gi Yoon, Won-Yong Lee, Chang-Soo Kim, 2004, "Effect of PTFE contents in the gas diffusion media on the performance of PEMFC", *Journal of Power Sources*, 131, 182-187.

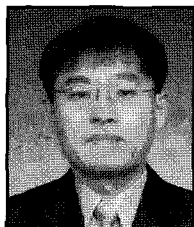
김창수



1977 연세대학교 공학사
1980 연세대학교 공학석사
1993 KAIST 공학박사

현재 한국에너지기술연구원 수소/연료전지연구부 부장
(E-mail : cskim@kier.re.kr)

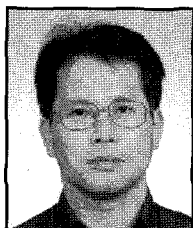
이원용



1983 항공대학교 공학사
1985 KAIST 공학석사
1991 KAIST 공학박사

현재 한국에너지기술연구원 연료전지연구센터 센터장
(E-mail : wy82lee@kier.re.kr)

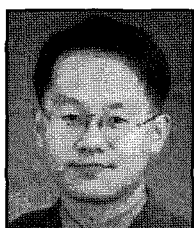
윤영기



1989 연세대학교 공학사
1991 KAIST 공학석사
1995 KAIST 공학박사

현재 한국에너지기술연구원 연료전지연구센터 선임연구원
(E-mail : yoonyg@kier.re.kr)

양태현



1990 KAIST 공학사
1992 KAIST 공학석사
1996 KAIST 공학박사

현재 한국에너지기술연구원 연료전지연구센터 선임연구원
(E-mail : thyang@kier.re.kr)

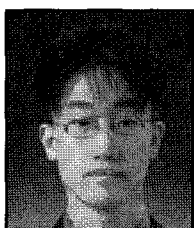
임성대



1996 연세대학교 공학사
1998 POSTECH 공학석사
2001 POSTECH 공학박사

현재 한국에너지기술연구원 연료전지연구센터 선임연구원
(E-mail : jimmyim@kier.re.kr)

박구곤



1997 경희대학교 공학사
1999 POSTECH 공학석사

현재 한국에너지기술연구원 연료전지연구센터 연구원
(E-mail : gugon@kier.re.kr)

손영준



1997 POSTECH 공학사
1999 POSTECH 공학석사

현재 한국에너지기술연구원 연료전지연구센터 연구원
(E-mail : yjsohn@kier.re.kr)