

## 저온영역에서 단열용기를 이용한 연료전지 모의 실험

조인수\*, 권오정\*\*\*, 김유\*, 현덕수\*, 박창권\*\*\*\*, 오병수\*\*<sup>†</sup>

\*전남대학교 대학원, \*\*전남대학교 기계시스템공학부,  
\*\*\*삼성전자 생활가전사업부, \*\*\*\*경동나비엔

## Simulation Experiment of PEMFC Using Insulation Vessel at Low Temperature Region

INSU JO\*, OHJUNG KWON\*\*\*, YU KIM\*, DEOKSU HYUN\*, CHANGKWON PARK\*\*\*, BYEONGSOO OH\*\*<sup>†</sup>

\* Graduate School, Chonnam National Univ.

\*\* School of Mechanical Systems Engineering, Chonnam National Univ.  
300 YongBong-dong Buk-gu, GwangJu, 500-757, Korea

\*\*\*Refrigerator R&D Team, Digital Appliance Network, SAMSUNG ELECTRONICS CO.LTD  
No.272, Oseon-Dong, Gwangsan-Gu, GwanJu, 506-723, Korea

\*\*\*\*KD Navien co.,ltd. 459-2, Gasan-Dong, Geumcheon-Gu, 153-803, Seoul, Korea

### ABSTRACT

Polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) is very interesting power source due to high power density, simple construction and operation at low temperature. But it has problems such as high cost, improvement of performance, effect of temperature and initial start at low temperature. These problems can be approached to be solved by using experiment and mathematical method which are general principles for analysis and optimization of control system for heat and hydrogen detecting management. In this paper, insulation vessel and control system for stable operation of fuel cell at low temperature were developed for experiment. The constant temperature capability and the heating time at sub-zero temperatures with insulation control system were studied by using a heating bar of 60W class. PEMFC stack which was made by 4 cells with 50 cm<sup>2</sup> active area in each cell is a thermal source. Times which take to reach constant temperature by the state of insulation vacuum were measured at variable environment temperatures. The test was performed at two conditions: heating mode and cooling mode. Constant temperature capability was better at lower environment temperature and vacuum pressure. The results of this experiment could be used as basis data about stable operation of fuel cell stack in low temperature zone.

**KEY WORDS** : PEMFC(고분자전해질막 연료전지), Insulation vessel(단열용기), Cold-start(냉시동)

<sup>†</sup>Corresponding author : [bysoh@chonnama.ac.kr](mailto:bysoh@chonnama.ac.kr)

**Nomenclature**

- E : modulus of elasticity
- I : inertia moment
- L : length, m
- Q : heat transfer, W
- T : temperature, °C
- A : area, m<sup>2</sup>
- q<sub>o</sub> : force per unit area, N/m<sup>2</sup>
- v : deflection, m
- h : convection heat transfer coeff. ,W/m<sup>2</sup>·°C
- k : thermal conductivity, W/m·°C
- σ : Stefan-Boltzmann const. W/m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>
- ε : emissivity

Table 1 Design specification of insulation vessel

구 조	일체화된 이중용기
용 량	30 ℓ (250*250*500mm)
재 질	내통(STS316) 외통(STS304)
공극부	진공상태유지(진공도 133.3*10 <sup>-3</sup> Pa 이하)
고 려 사 항	- 공극부 : 대류열전달을 최소를 위한 진공처리 복사열전달을 최소를 위한 알루미늄포일막 이용 - 상.하층 접합부분의 전도에 의한 열전달 최소화 - 수소,산소 및 냉각수 유입 튜브에 의한 열전달 최소화

**1. 서 론**

근래에 세계의 자동차 생산 회사들이 연료전지를 적용한 자동차 개발과 생산에 많은 투자를 하고 있다. 현재 고체고분자연료전지(polymer electronic membrane fuel cell; PEMFC)를 적용한 자동차의 상용화가 이루어지고 있다<sup>1,2)</sup>. 앞으로 자동차용 PEMFC stack이 나왔을 경우, 0°C 이하의 겨울운전 조건을 고려하지 않을 수 없다. 연료전지 운전특성 중 영하의 저온영역 운전특성 연구가 이번 실험의 중점 목표이다<sup>3,4)</sup>.

저온에서 연료전지의 안정적인 운전특성을 확보하기 위해서는 영하의 냉시동시 스택의 외부 온도와 같은 조건들을 만족시켜야 한다<sup>4)</sup>. 단열용기는 영하의 조건에서 연료전지를 보호하고, 스택의 수소누출과 같은 위험성으로부터 안전성을 만족시켜야 한다.

또한 연료전지 시스템의 효율을 증대시키기 위해 연료전지에서 발생하는 폐열을 활용하여야 한다<sup>5)</sup>.

**2. 단열용기 개발 및 시스템 구축**

**2.1 단열용기 개발**

**2.1.1 단열용기 설계시 필요 사항**

Table 1은 단열용기 설계 고려 사항이다.

저온환경에서 연료전지를 보호하기 위한 단열용기는 몇 가지 요구조건을 충족시켜야 한다.

연료전지 실험 시 내부 쇼트를 방지시켜야 하며, 연료전지에 공급되고 연료전지에서 나오는 출력과 센서 출력 값들을 전달할 수 있는 통로인 전기선 및 냉각, 개스 파이프 등의 위치 및 부품 선정이 필요하다. 이외에 시스템의 요구조건에 따른 내부에 스택의 지지판이나 바닥부분에 외부와 지지체 연결과 같은 추가 설계사항도 고려하여야 한다.

**2.1.2 재료역학적 고려사항**

내통과 외통 사이의 공기를 뽑아내어 진공상태를 만들었을 때 외통과 내통의 골격은 대기압의 차로 인해 압력차가 발생하여 굽힘 응력이 발생한다.

$$\begin{aligned}
 EIV'' &= \frac{q_o L}{2} x - \frac{q_o x^2}{2} \\
 EIV' &= \frac{q_o L}{4} x^2 - \frac{q_o x^3}{6} + c_1 \quad (1) \\
 EIV &= \frac{q_o L}{12} x^3 - \frac{q_o x^4}{24} + c_1 x + c_2
 \end{aligned}$$

외통과 내통사이의 가로, 세로, 높이의 길이를 L

이라 놓고, 단순보라 가정하여 위의 처짐 공식 (1) 을 이용하였다.

$$v = -\frac{q_0}{24EI}(2Lx^3 - x^4 - L^3x)$$

$$= -\frac{q_0L^4}{24EI}\left[\left(\frac{x}{L}\right)^4 - 2\left(\frac{x}{L}\right)^3 + \frac{x}{L}\right] \quad (2)$$

$$v_{\max} = v\Big|_{x=\frac{L}{2}} = -\frac{q_0L^4}{24EI}\left[\left(\frac{1}{2}\right)^4 - 2\left(\frac{1}{2}\right)^3 + \frac{1}{2}\right] = -\frac{5}{384}\frac{q_0L^4}{EI}$$

용기의 두께는 무게와 힘의 적정성을 고려하여 2mm로 하였다. t= 2mm이고 압력차 1기압 일 때, 식 (1)과 (2)를 이용하여 구한 처짐량은 δ= 17.1849 mm 가 되었다.

### 2.1.3 열전달적 고려사항

내통과 외통사이의 열 이동을 알아보기 위하여 외통과 내통의 접합부를 고려한 열전달 방정식으로 전도 열전달식(3)을 사용하고,

$$Q_1 = \frac{2\pi kL(T_2 - T_1)}{\ln(r_2 - r_1)} \quad (3)$$

외통과 내통사이에는 대류 열전달을 고려하여 식 (4)를 사용하며,

$$Q_2 = \frac{T_2 - T_1}{\frac{1}{h_2A_2} + \frac{1}{h_1A_1}} \quad (4)$$

외통과 내통사이에 복사 열전달을 고려하여 식 (5)를 사용한다.

$$Q_3 = \frac{\sigma(T_2^4 - T_1^4)}{(1-\epsilon_2)/\epsilon_2A_2 + 1/A_2F_{12} + (1-\epsilon_1)/\epsilon_1A_1} \quad (5)$$

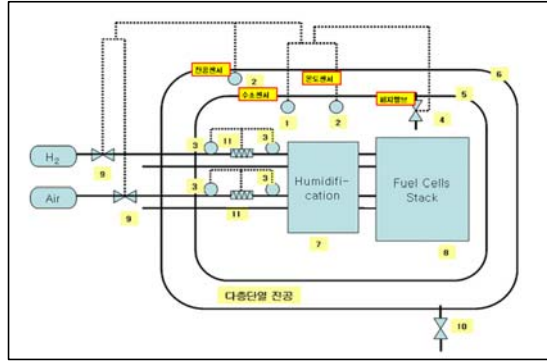


Fig. 1 Insulation system diagram

## 2.2 제어시스템 개발

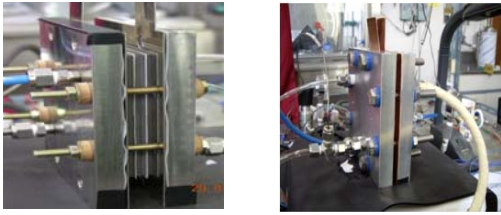
Fig. 1은 Table 2의 설계사항에 따라 제작한 단열 컨트롤 시스템의 개략도이다.

시스템 설계에 있어 아래와 같은 사항들이 고려되었다.

- 1) 연료전지 작동 시 내부 온도 측정 및 외부온도에 따른 내부 온도 변화를 감지해야 한다.
- 2) 연료전지 시동 시 영하의 외부온도로부터 저온 피해를 방지하기 위한 내부 항온 유지능력이 있어야 한다.
- 3) 수소 누출 시 안전을 위한 수소 감지 및 내부 순환장치 필요하다.
- 4) 좁은 내부 장치에 부피가 큰 수소 감지 센서를 직접 장치를 대체할 수 있는 설비가 필요하다.
- 5) 단열용기 격판내의 진공유무 측정을 할 수 있어야 한다.

Table 2 Design specification of control system

구조	다단형식의 박스형 타입
용량	130 l (500*350*750 mm)
재질	알루미늄 프로파일 (20*20 mm) 2 mm 아크릴 판넬
전면부 판넬구조	▷ 수소포집용 흡입펌프 ▷ 내부순환 팬 컨트롤러 ▷ 수소 디텍터 ▷ 내부 항온 컨트롤러



(a) graphite PEMFC stack (b) metal PEMFC stack  
Fig. 2 Pictures of graphite and metal PEMFC stacks

### 3. 실험

#### 3.1 PEMFC 개발 및 발생 열량

Fig. 2는 graphite 경우 단위전지 3 세트, 금속 분리판의 경우 단위전지 4 세트를 적층하여 제작한 연료전지 스택 사진이다. 유체 흐름의 방향으로 수소는 스택의 왼쪽 위에서 유입되어 각각의 cell에 공급되어 왼쪽 아래로 배출되고 공기는 오른쪽 위에서 유입되어 각각의 cell에 공급되어 오른쪽 아래로 배출된다. 그리고 전지의 양쪽에 냉각유로를 설치하여 냉각할 수 있게 하였다. 전지 집전체인 니켈 도금 구리판을 사용하여 스택의 양쪽 끝에 설치하였다. 제작비를 줄이기 위하여 금속 분리판의 경우 연료 공급부(anode)와 산소 공급부(cathode)의 유로는 같은 형상을 사용하였고 냉각

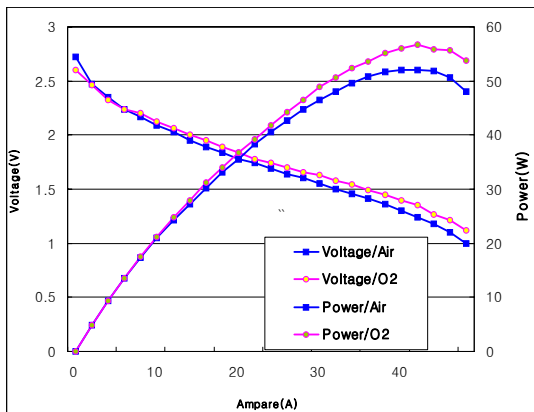


Fig. 3 Performance of PEMFC stack with graphite separator; no humidity and environment temperature 18°C

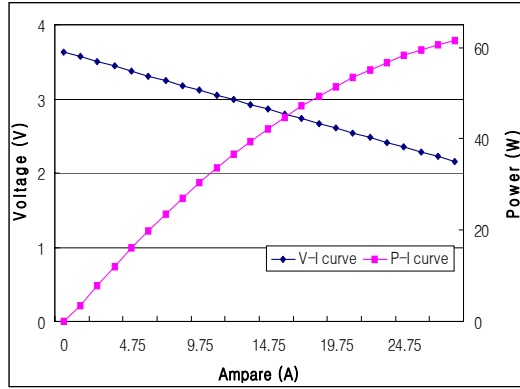


Fig. 4 Performance of PEMFC stack with metal separator; no humidity and environment temperature 18°C

은 수냉을 위하여 뒷면에 수냉 유로를 설계하였다.

Fig. 3은 graphite를 이용한 PEMFC 스택을 작동 시켰을 때 출력을 측정하였다. 산소와 공기에 따른 스택의 성능곡선을 보여준다. 성능은 산소를 사용하는 것이 공기에 비하여 성능이 10% 높게 나타난다. 이것은 스택의 작동온도와 관련이 있다. 산소를 사용하는 것이 공기에 비하여 스택의 온도가 14°C정도 높아서 백금 촉매의 활성도를 높이는 역할을 한다. 성능의 차이는 고전류밀도로 갈수록 성능의 차이가 높게 나타나고 이것은 고전류밀도 부분으로 갈수록 요구되는 산소량이 많아지게 되므로 공기에 비하여 산소를 사용하는 것이 좋은 성능을 나타내게 된다. 성능측정은 스택이 일정전류로 작동시켜 정상상태에 도달했을 때 측정하였다. 출력은 산소 사용시 1.40V, 40A에서 56W 이고, 공기 사용시 1.30V, 40A에서 52W 이다<sup>6)</sup>.

Fig. 4는 금속분리판을 이용한 PEMFC 스택을 작동 시켰을 때 출력을 측정하였다. 기습온도는 스택외부 공기 온도와 동일하게 하였다. 성능은 2.14V, 28.2A에서 61W가 측정되었다<sup>6)</sup>.

이러한 2개의 PEMFC stack에서 나오는 출력을 기준으로 방출되는 열량을 60W로 계산하였다. 계산된 방출열량에 따라 본 실험에서는 60W 용량의 가열장치를 사용하였다.



Fig. 5 Cylinder type insulation vessel

### 3.2 단열용기 내의 모의 실험

Fig. 5는 Table 1의 설계사항에 따라 제작된 단열용기이다.

Fig. 5와 같이 제작된 단열용기를 이용하여 저온영역에서 연료전지 모의실험을 하였다. 외부온도와 진공 유무를 변수 인자로 하여 변수 인자별 내부 항온 유지 시간을 측정 하였다. 내부 발생 열량은 연료전지 스택 실험을 통하여 얻은 데이터를 바탕으로 60W를 기준으로 하였다.

외부온도가 0℃, -10℃ 또는 -20℃ 일 때, 내부온도가 상온 20℃에서 0℃ 및 외부온도와 열평형이 되기까지 냉각시간을 측정하였고, 60W의 열량

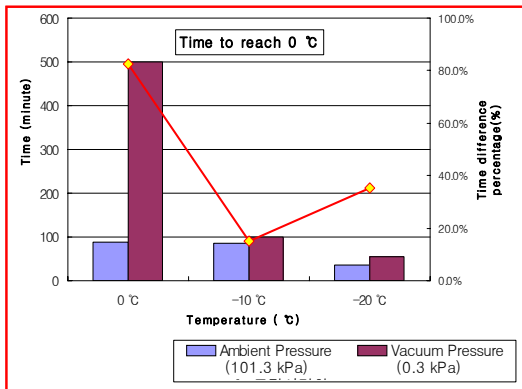


Fig. 6 Cooling mode : comparison of time to reach 0℃ without vacuum and with vacuum at various environment temperatures

Table 3 Cooling mode (Initial temp. 20℃)

[unit : minute]

Comparison		Environment Temp.		
Inside Pressure	Inner condition	0℃	-10℃	-20℃
Ambient Pressure (101.3kPa)	0℃	87	85	35
	Thermal Equilibrium	87	389	295
Vacuum Pressure (0.3kPa)	0℃	499	100	54
	Thermal Equilibrium	499	434	590

으로 내부를 가열했을 때 내부온도가 외부온도로부터 0℃ 및 20℃까지 도달되는 시간을 측정하였다. 진공은 대기압 상태인 무진공(101.3 kPa), 진공 펌프 가동상태인 진공(0.3 kPa이하)의 두 조건으로 실험을 하였다.

위의 두 조건을 통하여 냉각 시 0℃까지 도달시간, 가열 시 20℃까지 도달시간을 측정하였고, 이를 토대로 항온유지 능력을 계산하였다.

### 4. 결과 및 고찰

냉각모드에서는 단열용기 내의 초기 온도를 상온 20℃로 하였을 때 외부환경의 낮은 온도로 인한 내부온도가 저하되는 시간을 측정하였다. Table 3은 이러한 냉각 조건으로 측정된 데이터이다. Fig. 6에서는 진공 시 측정된 시간과 대기압 시 측정된 시간의 차를 나타낸 것이다. 시간차 백분율(time difference percentage)은 단열용기를 진공 단열할 때의 도달시간과 진공을 하지 않을 때의 도달시간의 차이를 그 중 값이 큰 도달시간으로 나눈 값을 백분율로 나타낸 것이다. 그림에서 시간차 백분율을 꺾은선 그래프로 표시하였다.

외부온도가 영하일 때 진공을 하였을 경우 온도 강하의 시간차 백분율이 진공을 하지 않을 경우에 비해 상승하였다. 외부 온도가 -10℃의 경우 0℃ 도달시간의 차가 15분, -20℃의 경우 도달시간의 차는 19분이다. 이를 시간차 백분율로 전환한 값은

Table 4 Heating mode (60W heater)

[unit : minute]

Comparison		Environment Temp		
Inside Pressure	Inner condition	0℃	-10℃	-20℃
Ambient Pressure (101.3kPa)	0℃	0	12	55
	20℃	50	89	298
Vacuum Pressure (0.3kPa)	0℃	0	11	34
	20℃	41	76	185

15.0%와 35.2%이다. 진공의 유무가 외부온도가 낮을수록 중요함을 알 수 있다.

가열모드에서는 단열용기 내부온도가 외부온도와 같은 초기 온도 상태로 시작하였을 때, 60W heater 작동 시 단열용기 내의 내부온도 상승 시간을 측정하였다. Table 4는 위의 가열 조건에 따라 측정된 데이터이다. 60W heater는 연료전지 스택 작동 시 방출되는 열량을 모사한 것이다.

Fig. 7 역시 진공 시 측정된 시간과 대기압 시 측정된 시간의 차이를 나타낸 것이다.

진공을 하고 외부온도가 낮을수록 시간차 백분율이 상승하였다. 즉 단열용기내의 진공 역할이 외부온도가 낮을수록 더 중요함을 알 수 있다. 외부

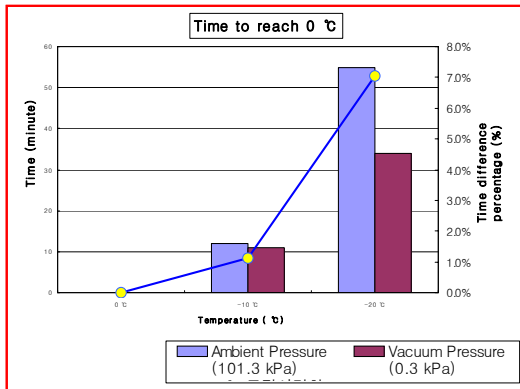


Fig. 7 Warming mode : comparison of time to reach 0℃ without vacuum and with vacuum at various environment temperatures

온도가 -10℃인 경우, 0℃ 도달시간의 차이가 1분의 차이가 있었지만, 20℃ 도달시간의 차이는 13분의 차이가 있었다. 외부온도가 -20℃인 경우, 0℃ 도달시간의 차이가 21분, 20℃ 도달시간의 차이는 113분이었다. 0℃ 도달시간의 차이를 시간차 백분율로 전환한 값은 7%와 61.1%이다.

### 5. 결 론

- 1) 냉각모드의 데이터 분석결과, 외부온도가 낮을수록 진공을 하였을 경우 온도강하의 시간은 진공을 하지 않을 경우에 비해 증가하였다.
- 2) 가열모드의 데이터 분석결과, 외부온도가 낮을수록 진공을 하였을 경우 온도상승의 시간은 진공을 하지 않을 경우에 비해 감소하였다.
- 3) 실험 데이터를 영하의 저온환경 냉시동 시 연료전지를 보호하기 위하여 내부 항온유지에 필요한 가열 에너지와 시스템 효율 향상의 기초자료로 이용할 수 있을 것이라 판단되었다.
- 4) 연료전지 모의 실험 결과 내부 온도를 유지시키는 소모 열량은 진공을 하지 않고, 외부온도가 낮을수록 증가 하였다. 단열용기 격벽 사이의 진공은 내부 열에너지가 외부로 유출되어 손실되는 것을 감소시키는 역할을 하였다.

### 참 고 문 헌

- 1) 김봉진, 김종욱, 최상진, “국내 수소 생산, 소비 및 유통 현황”, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 16, No. 4, 2005, pp. 391-399.
- 2) 이원용, 정귀성, 유상필, 엄석기, 김창수, “가정용 고분자연료전지 시스템의 운전 방법에 따른 성능 비교” 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 16, No. 4, 2005, pp. 364-371.
- 3) 박창권, “고분자 전해질형 연료전지내의 질

- 량유동이 성능에 미치는 영향 연구”, 전남대학교 대학원 학위 논문, 2007. 8.
- 4) Chang Kwon Park, In Su Jo, Seung Ho Cheon, Doek Su Hyun, Sang Gon Lee, Byeong Soo Oh, " Operation of PEMFC stack at low temperature region" The 10th international symposium on Technology for next generation vehicle and machine, Chonnam National Univ. 2007.10.26~27, pp. 52-55.
- 5) 차일남 외 9명 공저, “연료전지 자동차 이론과 실제”, 도서출판 아진, 2005.10, pp. 1-155.
- 6) 교육과학기술부, “저온영역에서 연료전지 스택의 안정적인 작동 연구에 관한 보고서”, 2008.5.