

로봇용 자연급기형 연료전지의 최적구조에 관한 연구

박상균† · 최재혁*

(원고접수일 : 2006년 1월 27일, 심사완료일 : 2006년 2월 7일)

Study on optimum structure of free-breathing Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) for robotic application

Sang-Kyun Park† · Jae-Hyuk Choi*

Abstract : The performance of free-breathing polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) was studied experimentally and the effect of cathode separator structure on the cell performance was investigated. Cathode separators were used for the cell with 18cm² active area. In channel type, the contact resistance is low, and the nature convection, which is strongly affected by the cross-sectional shape of cathode separator channel, is dominant in a cell performance. The maximum power density with 18cm² active area is 105mW/cm² using the 10mm depth and 2mm width channel. A computational analysis was optimum structure of free-breathing channel type PEMFC for robotic application.

Key words : PEMFC(고체고분자형 연료전지), Free-breathing(자연급기), Flooding(플러딩), Channel type(채널형), Separator(세퍼레이터, 분리판)

1. 서 론

고체고분자형 연료전지(PEMFC)는 기존의 2차 전지와 비교해서 장시간 운전이 가능하며, 연료를 교환함으로써 충전이 불필요함 등의 특징이 있어 휴대전화, 노트북, 소형 로봇 등의 휴대용 전원으로서 최근 주목 받고 있다^{[1][2]}. 그러나, 실용화를 위해서는 장치의 소형화 및 경량화가 요구 되어 있고, 보조적 기기를 가능한 줄일 수 있는 구조가 필요하다. 이것의 한 방법으로서 자연급기형 연료전지를 생각 할 수 있다. 자연급기형 연료전지는 주

위 공기 중의 산소가 자연대류 물질전달에 의해서 직접 공급되기 때문에 산소를 공급하기 위한 보조적인 기기가 필요 없게 된다.

자연급기형 연료전지는 캐소드(Cathode) 세퍼레이터(Separator)의 구조에 따라 오픈형과 채널형으로 분류 할 수 있다. 오픈형의 캐소드 세퍼레이터는 관통 슬릿(Slit)구조로 되어있고, 이것을 통해서 주위 공기가 직접 공급되어진다. 채널형의 캐소드 세퍼레이터는 채널의 양쪽 끝부분이 대기에 개방된 직선형 수직 채널의 구조로 되어있고, 주위공기가 부력에 의해서 채널 하류부에서 위쪽 방향으

* 책임저자(한국해양대학교), E-mail : jasija@hanmail.net, Tel : 051)410-4268

* 한국원자력연구소 원자력수소사업추진반

로 공급되어진다.

오픈형 전지에 관해서는 전지의 설계^{[3][4]}, 세퍼레이터의 슬릿 구조가 전지성능에 미치는 영향^[5], 주위공기의 온도·습도의 영향 및 전류밀도 측정^[6] 등에 관한 연구가 보고 되고 있다. 채널형 전지에 관해서는 온도·습도 등의 주위공기의 상태가 전지 성능에 미치는 영향^[7], 전류밀도측정^[8]에 관한 연구가 보고 되고 있다. 지금까지의 대부분의 연구는 특정의 전지구조에서의 성능을 각각 검토한 것으로, 채널형 자연급기형 연료전지의 캐소드 세퍼레이터의 최적 채널구조에 관한 연구는 보고 되고 있지 않다.

본 연구에서는 차세대 로봇용 연료전지의 전원으로서 공기 공급용기 및 가습기를 갖지 않는 자연급기형 연료전지를 대상으로, 캐소드 세퍼레이터 구조가 전지성능에 미치는 영향의 파악 및 로봇용 전원으로서의 최적 구조와 유용성에 관하여 고찰하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

Fig. 1은 본 연구에서 설계·제작한 자연급기형 채널형 연료전지의 개략도를 나타내고 있다. 전지는 애노드(Anode) 단판, 애노드 세퍼레이터, 카본 페이퍼(Carbon paper), 막전극접합체(MEA), 카본 페이퍼, 캐소드 세퍼레이터, 캐소드 단판의 순으로, 조립압력 28kg/cm²로 조립하였다. 전지의 유효 반응면적은 18cm²이다. 애노드 세퍼레이터는 스테인레스 금속에 금도금을 하였고, 수소의 유로와 전극으로 사용하였다. MEA 및 카본 페이퍼는 PRIMEA Series 5510(Japan GORE-TEX Inc.), TGP-H(Toray Industries, Inc.)를 사용하였다. 애노드 및 캐소드 확산층의 두께는 0.54mm로 일정하게 하였다. 캐소드 세퍼레이터는 알루미늄 판으로, 유로 폭이 2mm의 경우는 유로 깊이가 2, 4, 6, 8, 10mm의 5종류, 유로 폭이 1mm의 경우는 유로 깊이가 2, 5, 10mm의 3종류이며, 반응면의 유로 길이는 45mm, 유로 간격은 1mm로 구성되어 있다.

실험에서는 가습기, 히터를 사용하지 않은 경우를 가정하여, 연료는 실온·무가습의 순 수소 가스를

사용하였다. 또한 애노드 측에서의 확산 과전압에 의한 영향을 막기 위해서 수소는 900mA/cm²에서 가스 이용률 40%에 상당하는 0.3ℓ/min의 유량으로 충분히 공급하였다. 전 실험에서의 실내온도는 18~22°C, 상대습도는 21~33%의 범위를 유지하였다. 전지성능 측정은 수소 가스를 실온, 가습조건에서 26mA/cm²의 부하로 5분간 운전함으로 전지를 충분히 안정화시켜, 성능의 재현성을 확인한 후 본 실험을 하였다. 또한, 각 전류밀도에서의 전지전압은 장시간 운전에 의한 플러딩(Flooding)과 드라이 아웃(Dry out)의 가능성을 배제하기 위하여, 측정 시점으로부터 3분간 측정치의 평균값을 사용하였다.

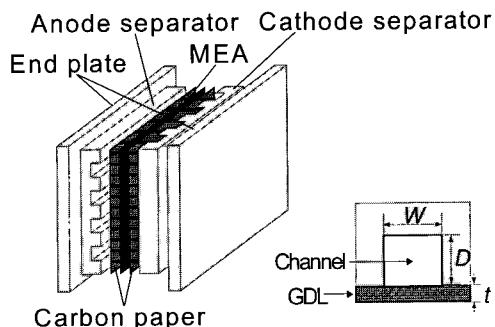


Fig. 1 Structure of free-breathing PEMFC

3. 실험결과 및 고찰

3.1 캐소드측에서의 대류의 영향

채널형 연료전지는 구조특성상 조립 면압분포를 균일하게 할 수 있고, 접촉저항을 작게 할 수 있는 특징을 가지고 있다. 한편, 산소 공급에 영향을 주는 자연대류는 채널구조에 의해서 제한되기 때문에 채널 구조의 최적화를 함으로써 보다 높은 성능개선을 기대 할 수가 있다. 본 절에서는 캐소드 세퍼레이터의 유로 깊이와 유로 폭이 전지 성능에 미치는 영향에 관해서 평가 하였다.

Fig. 2는 여러 가지 종류의 캐소드 유로 폭 및 유로 깊이에 따른 채널형 전지성능을 나타내고 있다. 유로 폭이 1mm, 2mm 경우 모두 유로가 깊어질수록 전지성능이 향상됨을 알 수 있다. 유로 폭이 2mm인 경우는 유로 깊이를 10mm까지 깊게 하면 전지 전압

이 급격히 저하하는 전류밀도가 현저하게 개선되지 만, 유로 폭이 1mm인 경우는 그 영향이 작음을 알 수 있다. 이것으로부터 유로가 자연대류를 제한하는 효과가 전지성능에 큰 영향을 미침을 확인 할 수가 있다.

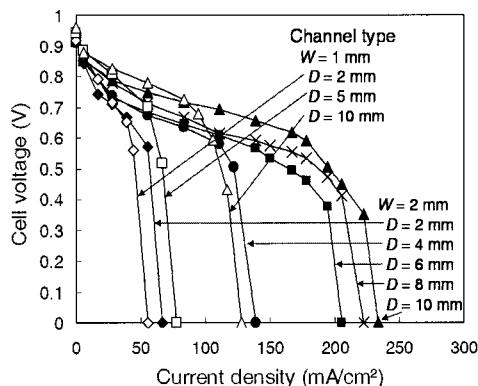


Fig. 2 Polarization curves of channel type with various depths and widths of the channel

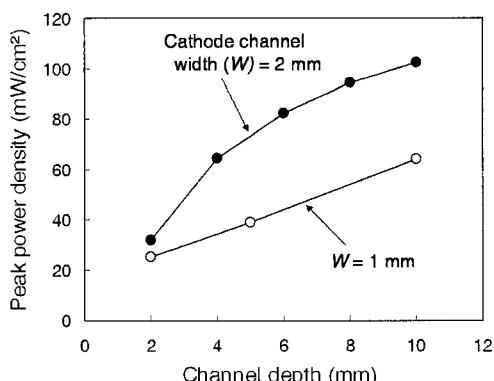


Fig. 3 Peak power densities derived from the polarization curves in Fig. 2

Fig. 3은 Fig. 2의 전압-전류밀도곡선으로부터 산출한 피크 전력밀도를 나타내고 있다. 횡축은 유로 폭을 나타내고 있다. 피크 전력밀도는 유로 깊이가 깊을수록, 유로 폭이 넓을수록 향상됨을 알 수 있다. 유로 폭이 2mm의 경우는 유로 깊이가 깊어짐에 따라 피크 전력밀도의 개선효과가 점차적으로 작아지고, 깊이가 10mm보다 깊어지면 더욱더 그 영향이 작아지리라고 예측되지만, 유로 폭이 1mm인

경우는 깊이가 10mm에서도 피크 전력밀도가 선형적으로 상승하고 있음을 알 수 있다. 유로 폭이 1mm의 경우는 유로를 더욱 깊이 하는 것은 가공상 곤란한 점이 있고, 유로 폭을 2mm보다 넓게 하는 것은 전기 저항에 나쁜 영향을 미칠 것으로 예측되어진다. 이것으로부터 본 실험 장치에서는 유로 폭이 2mm, 깊이가 10mm정도를 최적의 채널구조로 설정하였다. 이때의 전지 출력밀도는 105mW/cm^2 이다.

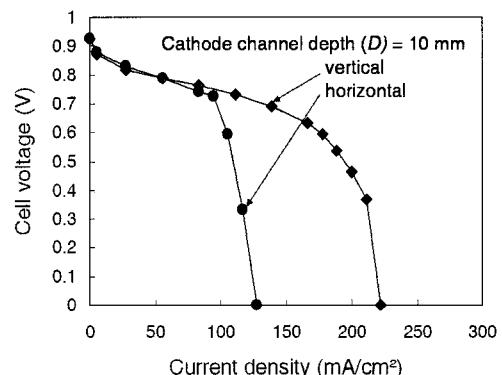


Fig. 4 Polarization curves of channel type in horizontal and vertical orientations

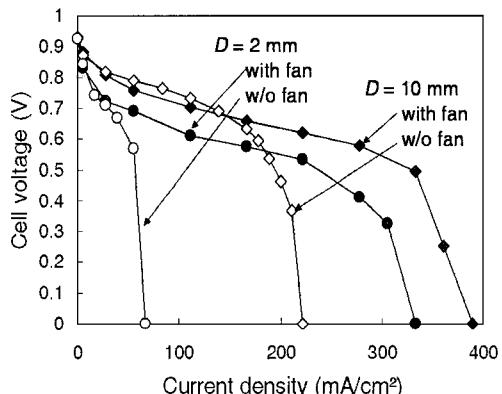


Fig. 5 Polarization curves of channel type with supplying air to cathode side by fan

Fig. 4는 앞에서 기술한 최적구조로 설정한 유로 폭 2mm, 유로 깊이 10mm의 채널형 전지의 전지 자세에 따른 전지성능을 나타내고 있다. 전지의 자세는 앞의 실험과 동일하게 수직으로 설치한 경우와 수평으로 설치한 경우를 비교하였다. 수평으로 설치

한 경우 전류밀도가 100mA/cm^2 에서 전지성능이 급격히 떨어져, 전지 자세의 영향을 강하게 받고 있음을 알 수 있다. 이것으로부터도 산소공급에 영향을 미치는 자연대류가 채널형에서는 아주 중요함을 확인 할 수 있다.

지금까지는 자연대류에 의한 산소확산의 영향을 검토하였지만, 소규모 팬의 설치가 가능한 경우를 가정해서 소규모 팬이 전지성능에 미치는 영향에 관하여 검토하였다. Fig. 5는 캐소드측에 소형팬을 사용한 경우의 전지성능을 나타내고 있다. 캐소드 세퍼레이터의 유로 폭은 2mm이다. 소형 팬을 사용하여 캐소드 세퍼레이터의 아랫부분에서 위쪽 방향으로 강제대류를 형성하였다. 이때 열선풍속계를 사용하여 캐소드 세퍼레이터 출구 중앙부분에서 10mm떨어진 지점에서의 유속을 계측한 결과, 유로 깊이가 10mm의 경우 약 4.5m/s, 2mm의 경우 약 1.7m/s였다. 전지성능은 팬에 의해서 현저하게 개선되어지고, 특히 유로 깊이가 2mm의 경우는 10mm와 동일한 정도 까지 전지성능이 개선됨을 알 수 있다.

3.2 로봇용 연료전지의 구조

본 절에서는 실험결과를 기초로 한 차세대 로봇용 전원으로서 자연급기형 연료전지의 최적구조에 관해서 고찰 하였다. Fig. 6은 현재 가장 유명한 차세대 로봇의 하나로 Honda의 ASIMO의 개략도를 나타내고 있다. ASIMO는 중량 43kg, 높이 1.2m이며, 전원으로서 니켈수소(NiMH) 이차전지를 사용하여 38.4V, 10Ah로 약 1시간 가동이 가능하다⁽⁹⁾. 이 ASIMO의 배면부에 설치 가능한 자연급기형 연료전의 구조에 관하여 검토를 하였다. Table 1은 해석조건을 나타내고 있다. 전지출력으로서는 400W로 5시간 연속 가동을 목표로 하였으며, 배면부의 최대 사이즈를 $300\text{mm(W)} \times 220\text{mm(D)} \times 300\text{mm(H)}$ 로 가정하였다. 본 해석에서는 셀을 적층하여도 단 셀의 실험결과와 동일한 전지성능이라고 가정하였다. 단, 자연급기형 전지에서는 셀의 높이가 전지성능에 중요한 영향을 미치는 인자이기 때문에, 본 해석에서는 실험과 동일한 높이인 45mm로 하였다. 또한, 반응면의 폭을 변경함으로써 반응면적을 변화하였고, 단 셀의 두께는 애노드 세퍼레이터

및 화산층 두께를 고려하여 캐소드 유로 깊이 +3mm로 가정하였다.

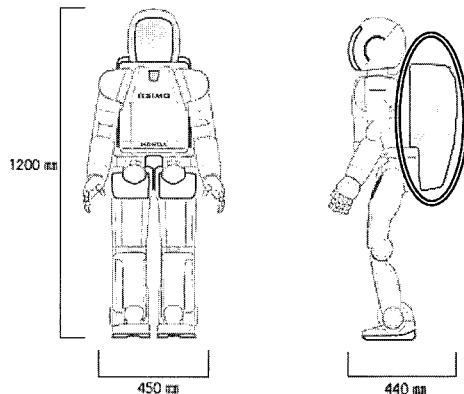


Fig. 6 Specifications of ASIMO

Table 1 Target of free-breathing PEMFC

정격출력	400W
연속가동시간	5시간
최대 사이즈	$300\text{mm(W)} \times 200\text{mm(D)} \times 300\text{mm(H)}$
총 중량	10kg이하

3.2.1 전지구조

연료전지에 있어서 전지출력, 전지전압, 전류밀도, 반응면적은 다음과 같은 관계를 가지고 있다.

$$Pe = Vc \times I \times A \quad (1)$$

여기서, Pe는 전기출력(W), Vc는 단 셀 전압(V), I는 전류밀도(A/cm^2), A는 총 반응면적(cm^2)이다.

Table 2는 최적 채널구조로 설정한 유로 폭이 2mm, 유로 깊이가 10mm의 경우, Fig 2의 실험결과에서 얻어진 최대 출력밀도에서의 값을 사용하여 식(1)에서부터 산출한 400W의 출력을 얻기 위해서 필요한 스택 사이즈에 관해서 계산한 것이다. 여기서, 음영으로 표시된 부분이 배면부 최대사이즈에 설치 가능한 구조이다. 이처럼 전지를 스택화 함으로써 다양한 전지 구조가 가능함을 알 수 있다. 본 연구에서는 반응면 폭이 300mm, 스택이 2개, 1스

택의 셀 수가 14개, 1 스택의 두께(D)가 182mm를 자연대류만으로 운전 가능한 최적의 전지 구조의 하나로 선택하였다.

Table 2 Stack size of free-breathing PEMFC

Type	Channel			
유로 깊이	10mm			
최대출력밀도	105 mW/cm ²			
전압 전류밀도	0.592V, 0.177A/cm ²			
총 반응면적	3817 cm ²			
스택 수	2	3		
반응면 폭(W)	단셀 반응 면적	1스택 셀 수	1스택 두께(D)	1스택 셀 수
40	180	106	1378	71
150	680	28	365	19
200	900	21	273	14
250	1130	17	221	11
300	1350	14	182	9
단위:mm				

3.2.2 냉각계

연료전지에서 수소연료를 전력으로 변환할 경우에는 그 효율을 통상 50%정도이다. 이것은 출력 400W의 연료전지의 경우, 스택의 각 셀에서의 평균전압을 0.6V로 가정하면 433W의 열이 발생함을 의미한다. 100W이하의 연료전지에서는 자연대류

만으로 전지의 냉각이 가능하며, 전지를 냉각하기 위한 냉각용 팬이 없어도 안정적인 전지운전이 가능하다. 하지만, 무가습 운전에서는 전지온도가 40°C이상이 되면 전지성능이 급격히 저하하기 때문에, 전지온도를 40°C이하로 유지하는 것이 바람직하다. 이러한 이유로 출력 400W의 전지에서는 전지의 냉각이 필요하게 된다. 433W의 열을 냉각하기 위한 공기량은 다음의 식으로 계산할 수가 있다.

$$Pe = \{(1.25 / Vc) - 1\} = m \cdot Cp \cdot \Delta T \quad (2)$$

여기서, m은 유속(kg/s), Cp는 비열, ΔT는 온도차이다. 냉각용 공기가 25°C로 들어가서 40°C로 배출되고, 발생하는 열의 100%가 냉각공기에 의해 제거된다고 가정하였을 경우, 필요한 냉각용 공기유량은 0.03187kg/s가 된다. 또한, 유로 내부의 압력손실을 고려하여 0.03187kg/s의 유량을 얻기 위한 소형 팬의 동력을 계산하면 약 8W정도로 충분함을 알 수 있었다^[10]. 이것은 400W 전지출력의 약 2%이하의 아주 작은 전력손실이다. 이처럼 반응열의 문제는 소형 팬을 사용함으로서 해결이 가능함을 알 수 있다.

3.2.3 캐소드 공기 공급계

자연대류에 의한 전지운전만으로도 셀을 적층함으로써 목표 전지성능을 충분히 얻을 수 있지만, Fig. 4의 전지 자세의 영향을 강하게 받는 것과

Table 3 Specifications of free-breathing PEMFC system

전지구조	Type	Channel	
	캐소드 유로 깊이	10mm	2mm
	스택 사이즈	300mm(W) × 182mm(D) × 45mm(H)	200mm(W) × 185mm(D) × 45mm(H)
	스택 수	2	1
	총 셀 수	28	37
	총 중량	3.87kg	1.69kg
	총 체적	3817cm ³	1655cm ³
운전조건	출력	400W	
	단 셀 전압	0.592(V)	0.535(V)
	전류밀도	0.177(A/cm ²)	0.222(A/cm ²)
냉각, 공기공급계	소형 팬 사용	.	DC12V-8W, 중량 약 300g

Fig. 5의 소형 팬에 의해서 전지성능이 향상되는 결과로부터, 공기의 공급에 관해서도 소형 팬을 사용하는 것을 고려 할 수 있다. Fig. 7은 Fig. 2와 Fig. 5의 실험 결과로부터 얻은 유로 깊이가 10mm인 경우의 자연대류와 유로 깊이가 2mm이고 팬을 사용한 경우, 전지의 출력밀도와 효율의 관계를 나타내고 있다. 자연대류의 경우가 팬을 사용한 경우보다 효율적으로 유리함을 알 수 있다. 한편, 팬을 사용한 경우는 최대 출력밀도가 향상되고, 유로 깊이도 2mm로 작게 할 수 있기 때문에 소형화의 측면에서 더욱 유리하게 됨을 알 수 있다.

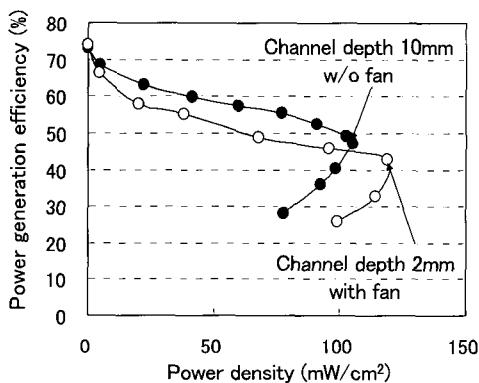


Fig. 7 Comparison of power generation efficiency

Table 3은 Fig. 7의 결과로부터 산출한 400W급 연료전지의 설계사양을 나타내고 있다. 여기서, 총 중량의 계산은 현재 세퍼레이터로 가장 일반적 으로 사용되어지는 밀도 2000kg/m³의 카본재^[11]

를 사용하여 스택을 구성하고, 전지의 외형 사이즈에서 애노드 및 캐소드 세퍼레이터 유로부분의 체적을 50%로 가정하여 계산하였다.

3.3 연료전지 시스템과 이차전지의 비교

본 절에서는 다양한 수소 공급시스템을 장착한 연료전지의 총 중량 및 총 체적을 기준의 2차전지와 비교 검토하였다. 현재 로봇용으로 탑재가 가능한 소형 수소 공급시스템으로서는 소형 압축탱크와 수소 흡착금속의 값을 사용하였다. 또한, 장래형 수소 공급시스템으로서는 현재의 대형 수소 저장 시스템과 2010년 DOE의 수소 저장 밀도의 목표치가 달성된 경우의 값을 사용하였다. 연료전지의 구조로서는 소형화에 유리한 소형 팬을 사용한 경우, 캐소드 유로 폭이 2mm, 깊이가 2mm의 경우의 스택 중량 및 체적으로 하였다.

Fig. 8은 연속 운전시간이 1시간의 경우와 5시간인 경우의 총 중량을 나타내고 있다. 대표적으로 Li-ion전지와 소형 고압탱크를 탑재한 연료전지의 총 중량을 비교하면, 1시간 연속운전의 경우는 연료전지의 총 중량이 약간 무겁게 됨을 알 수 있다. 그렇지만, 5시간 연속운전을 할 경우에는 중량을 약 70%까지 경감할 수가 있다. 더욱이, DOE의 목표치가 달성될 경우에는 5시간 연속운전의 경우 중량을 2차전지의 1/5까지 대폭 소형화가 가능함을 알 수 있다.

Fig. 9는 총 체적의 비교를 나타내고 있다.

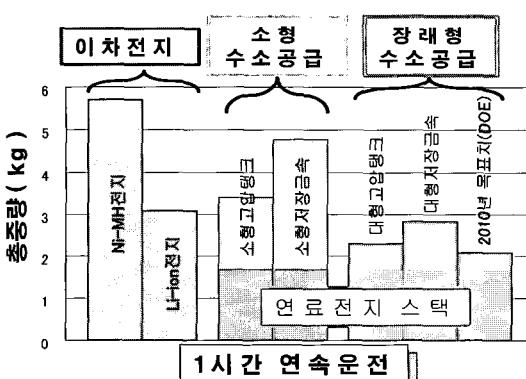
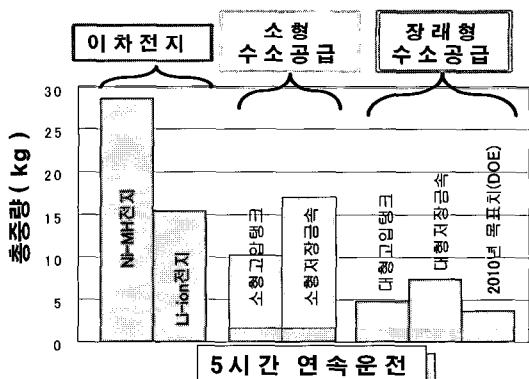


Fig. 8 Comparison of the total weight of fuel cell system and rechargeable battery for operation time



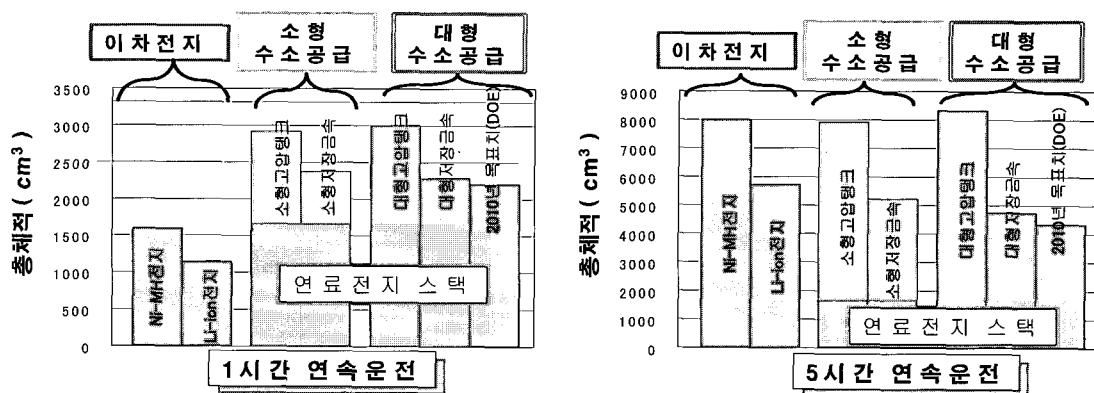


Fig. 9 Comparison of the total volume of fuel cell system and rechargeable battery for operation time

Li-ion전지와 소형 고압탱크를 탑재한 연료전지의 총 체적을 비교하면, 1시간 연속운전의 경우는 연료전지의 총 체적은 약 2.5배가 됨을 알 수 있다. 하지만, 5시간 연속운전을 할 경우는 총 체적을 약 1.3배까지 경감할 수가 있다. 더욱이, DOE의 목표치가 달성될 경우에는 5시간 연속운전의 경우 체적을 2차전지의 3/4까지 대폭 소형화가 가능함을 알 수 있다.

4. 결 론

자연급기형 연료전지의 캐소드 세퍼레이터 구조에 따른 성능의 실험적 검토 및 출력 400W급의 차세대 로봇용 자연급기형 연료전지의 기본 구조에 관하여 검토하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 채널형 자연급기형 전지는, 채널내부의 자연 대류에 의한 산소공급이 전지성능에 지배적이며, 산소공급은 채널 형상의 영향을 강하게 받는다. 본 실험의 범위 내에서는 유로 폭이 2mm, 유로 깊이가 10mm에서 최대출력밀도 105mW/cm²을 얻었다.

(2) 400W 출력의 자연급기형 연료전지로서는, 셀의 냉각 및 공기 공급용으로서 전지 출력의 약 2%정도의 소형 팬을 사용하는 채널형 구조가 최적이다. 캐소드 세퍼레이터의 구조로서는 유로 폭이 2mm, 유로 깊이가 2mm가 전지의 소형화 면에서 유리하다.

(3) 400W급의 연료전지 스택 및 수소 공급용 탱크의 총 중량 및 체적은 1시간 연속운전의 경우에는

이차전지와 비교해서 대형화 되지만, DOE의 목표치의 수소 저장밀도가 달성될 경우에는 5시간 연속운전할 경우, 총 중량은 1/5이하, 총 체적은 3/4정도로 소형화가 가능하다.

참고문헌

- [1] Dyer, C. K., "Fuel cells for portable applications", Journal of Power Sources, 106, pp. 31-34, 2002.
- [2] Heinzel, A., Hebling, C., Muller, M., Zedda, M. and Muller, C., "Fuel cells for low power applications", Journal of Power Sources, 105, pp. 250-255, 2002.
- [3] Schmitz, A., Tranitz, M., Wagner, S., Hahn, R. and Hebling, C., "Planar self-breathing fuel cells", Journal of Power Sources, 118, pp. 162-171, 2003.
- [4] Hottinen, T., Mikkola, M. and Lund, P., "Evaluation of planar free-breathing polymer electrolyte membrane fuel cell design", Journal of Power Sources, 129, pp. 68-72, 2004.
- [5] Hottinen, T., Himanen, O. and Lund, P., "Effect of cathode structure on planar free-breathing PEMFC", Journal of Power Sources, 138, pp. 205-210, 2004.
- [6] Hottinen, T., Noponen, M., Mennola,

- T. Himanen, O. Mikkola, M. and Lund, P., "Effect of ambient conditions on performance and current distribution of a polymer electrolyte membrane fuel cell", *Journal of Applied Electrochemistry*, 33, pp. 265-271, 2003.
- [7] Morner, S. and Klein, A. "Experimental evaluation of the dynamic of air-breathing fuel cell stack", *Journal of Solar Energy Engineering*, 123, pp. 225-231, 2001.
- [8] Noponen, M., Mennola, T., Mikkola, M., Hottinen, T. and Lund, P. "Measurement of current distribution in a free-breathing PEMFC", *Journal of Power Sources*, 106, pp. 304-312, 2002.
- [9] <http://www.honda.co.jp/ASIMO/>
- [10] <http://www.wonjin-e.co.kr/>
- [11] <http://www.tokaicarbon.co.jp/>

저자 소개



박상균 (朴相均)

1974년 10월생, 1996년 한국해양대학교 기관공학과 졸업(공학사), 2001년 한국 해양대학교 대학원 졸업(석사), 2005년 일본 북해도대학교 대학원 졸업(박사)



최재혁 (崔宰赫)

1974년 3월생, 1996년 한국해양대학교 기관공학과 졸업(학사), 2000년 동대학 교, 대학원 졸업(석사), 2005년 일본북 해도대학, 대학원 졸업(박사), 2005년- 현재 한국원자력, 연구소 연구원