

소형 로봇용 연료 전지 스택 설계 사양 최적화

황순욱*, 최경호*, 박용현**, R. Michael Ench**, Alex M. Bates**
이상철***, 권오성***, 이동하***

*대구경북과학기술원, 에너지 시스템 공학부, **루이빌 대학교, 기계공학과,
*** 대구경북과학기술원, 로봇 시스템 연구부

Optimization of a Fuel Cell Stack for Small Robot Systems

S. W. Hwang*, G. H. Choi*, Sam. Park**, R. Michael Ench**, Alex M. Bates**
S. C. Lee***, O. S. Kwon***, and D. H. Lee***

*Department of Energy System Engineering, Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology,

**Department of Mechanical Engineering, University of Louisville,

***Division of Robot System Research, Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology.

Abstract

Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFC) are the most appropriate for energy source of small robot applications. PEMFC has superior in power density and thermodynamic efficiency as compared with the Direct Methanol Fuel Cell (DMFC). Furthermore, PEMFC has lighter weight and smaller size than DMFC which are very important factors as small robot power system. The most significant factor of mobile robots is weight which relates closely with energy consumption and robot operation. This research tried to find optimum specifications in terms of type, number of cell, active area, cooling method, weight, and size. In order to find optimum 500W PEMFC, six options are designed in this paper and studied to reduce total stack weight by applying new materials and design innovations. However, still remaining problems are thermal management, robot space for energy sources, and so on. For a thermal management, design options need to analysis of Computational Fluid Dynamics (CFD) for determining which option has the improved performance and durability.

Keywords : 고분자 전해질 막 연료전지(PEMFC), 로봇 전원 공급(Robot Energy Source), 에너지시스템 최적화(Energy System Optimization)

1. 서 론

연료전지는 수소의 화학적 에너지를 직접적

으로 전기 에너지로 바꾸어 주는 변환 장치이다. 그리고 순수한 물과 잠재적으로 사용이 가능한 열에너지만을 부산물로 배출한다. 연

료전지는 넓은 범위의 확장성과 많은 응용분야들 때문에 오랜 시간 많은 곳에서 연구되고 있다. 특히, 휴대용 응용분야에서는 배터리보다 동작시간이 길고 간단한 연료 재공급을 통한 재충전이 용이하기 때문에 이미 많은 휴대용 응용분야에서 연료전지가 적용 범위를 넓혀가고 있다 [1]. 배터리가 최근 파워 밀도 측면에서 상당한 진보를 이루어 냈으나, 여전히 배터리 고유의 약점과 충전 시간이 걸림돌이 되고 있다. 이러한 배터리의 약점을 극복하고, 원하는 파워를 얻기 위해서는 연료 전지가 전원으로 매우 적합하다 [2].

소형 휴대용 전원으로 사용할 수 있는 연료전지는 크게 고분자 전해질 막 연료전지와 직접 메탄올 연료전지 두 가지로 나눌 수 있다. 고분자 전해질 막 연료전지는 직접 메탄올 연료전지보다 파워 밀도와 열역학적 효율이 비교적 우위이다. 고분자 전해질 막 연료전지의 파워 밀도는 30-1000 mW/cm² 이고 반면에 직접 메탄올 연료전지는 30-100 mW/cm² 이다 [3]. 그리고 직접 메탄올 연료전지는 크로스 오버 문제를 가지고 있다 [4].

본 논문에서는 개발 중인 소형 로봇의 전원으로 사용할 연료 전지 스택의 종류, 단위 셀 수, 무게, 유효 면적, 냉각 방식, 사이즈 등을 검토하여 소형 로봇에 최적화 할 수 있는 설계 사양을 찾고자 한다.

2. 스택 설계 시 고려 요소

연료전지 스택 설계 시 고려해야 할 설계 사양은 매우 다양하다. 그 중에서 본 논문에서 다룰 내용은 현재 개발 중인 무게 감량, 냉각 방식, 유효면적과 단위 셀 수에 따른 스택 부피 설계 사양 결정에 대한 내용이다.

앞서 언급된 두 연료전지 방식 모두 친환경적이고 비교적 낮은 온도(<100℃)에서 동작한다. 또한, 디젤 엔진(27-45%)이나 가스터빈(22-36%)보다 좋은 효율(40-60%)을 가진다. 수명이 길고, 빠른 시동이 가능하며, 셀

디자인이 다른 연료전지에 비해 간단하다.

고분자 전해질 막 연료전지는 수소를 연료로 사용하여 전기를 발생시키고 순수한 물과 열만 방출하고, 높은 파워 밀도를 가진다. 고분자 전해질 막 연료전지에서 가장 중요한 부분이라고 할 수 있는 부분은 막 전극 집합체(Membrane Electrode Assembly)이다. 막 전극 집합체는 촉매(electrocatalyst)와 전해질 막(membrane)으로 구성되어 있다 [5]. 고분자 전해질 막 연료전지가 가지는 단점으로는 값비싼 백금(Platinum)을 촉매로 사용한다는 것과 복잡한 주변 장치(Balance of Plant), 그리고 수소 가스의 위험성을 들 수 있다.

직접 메탄올 연료전지는 메탄올을 연료로 공급하고 이산화탄소(CO₂)와 물이 방출되는 전기 변환 장치이다. 직접 메탄올 연료전지는 높은 에너지 밀도를 가지며, 메탄올은 수소에 비해 비교적 안전하게 보관, 운반할 수 있다. 그리고 현재 많이 사용되고 있는 부품들을 대부분 그대로 사용할 수 있는 장점이 있다. 직접 메탄올 연료전지는 메탄올의 농도를 일정하게 유지시켜주는 것이 관건이다. 음극에 메탄올을 공급할 때에도 물에 희석하여 공급하며, 반응 후 생성되는 물을 재사용하여 메탄올의 농도를 조절한다. 직접메탄올 연료전지 역시 촉매로 백금을 사용하기 때문에 비용이 문제가 되며, 고분자 전해질 막 연료전지보다 약 5-10배정도 많은 양이 들어가므로 더 비싸다. 그리고 메탄올이 독성을 가진다는 것이 문제점으로 꼽힌다. 그리고, 이산화탄소가 부산물로 생성되며, 고분자 전해질 막 연료전지보다 상대적으로 낮은 효율 또한 단점으로 꼽을 수 있다.

2.1 스택 무게 감량

현재 진행 중인 소형 로봇의 전원 공급 과제에서 로봇은 이동에 용이하고 내구성과 작동시간이 보장되어야 하므로 전원 시스템의 무게가 로봇에 매우 중요한 사양 중에 하나라 판단된다. 이에 연료전지 스택의 무게 감량을

위한 접근법이 검토 되었다.

2.1.1 천연고무-탄소 합성섬유의 분리판 사용

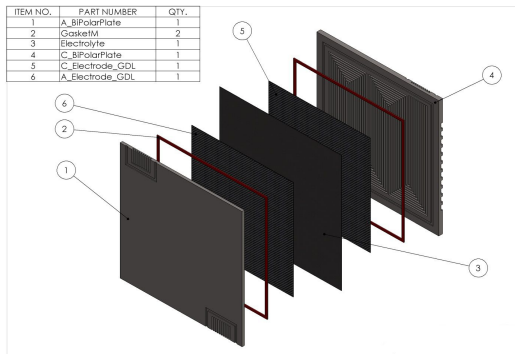


그림 1. 연료전지의 구조 및 분리층

천연고무-탄소 합성섬유를 스택의 분리판으로 사용하면서 높은 전기 전도도와 내구성, 매우 낮은 전기 도자성을 가지는 동시에 무게 감량을 달성 할 수 있다. 게다가, 기존의 흑연이나 강철판을 사용할 때 보다 더 값이 저렴하고 가벼운 판을 만들 수 있다. 그림1. 은 연료전지의 구조 및 분리층의 구성을 보여준다. 높은 전도도의 천연고무와 다단식의 주조 기술의 사용으로 높은 탄소 섬유 함량을 가지는 분리 판의 제조가 가능하다. 그리고 이 합성 분리 판은 높은 기계적 내구성, 안정성과 직결되는 열적, 화학적 안정성으로 각광을 받고 있다.

2.1.2 전도판(Conduction plate)과 막음판(End plate)

앞선 연구결과를 검토하였을 때 전체 무게의 60% 정도를 전도판과 막음판의 무게가 차지하고 있는 것으로 파악되었다 [7]. 이에 새로운 물질을 사용하여 전도판과 막음판의 무게를 줄일 수 있는 방법이 검토 되었다. 먼저 막음판은 새로운 물질인 렉산 9034 (Lexan 9034)를 사용하여 스택 무게를 40% 가량 줄일 수 있는 것으로 평가 되었다. 그리고 전도판은 구리 합금을 이용하여 스택 전체 무게를

30% 가량 줄일 수 있다.

2.2 스택의 냉각 방식

앞서 언급한 고분자 전해질 막 연료전지 와 직접 메탄올 연료전지는 동작 온도를 70-75 °C로 유지해야 한다. 동작 온도를 유지하기 위해서는 별도의 냉각 장치가 필요하다.

냉각 방식은 크게 공기에 의한 냉각인 공랭식과 냉각수, 냉각액으로 온도를 낮추는 수랭식 두 가지로 나눌 수 있다. 간단하게 설명하여 공랭식은 스택에 팬(Fan)이나 에어 블로 우(Air Blower)를 설치하여 공기를 임의로 불어 넣어서 연료전지 스택의 온도를 유지 시키는 방식이고, 수랭식은 연료전지에 냉각수나 냉각액으로 순환하게 하여 스택 내부 온도를 일정하게 유지시키는 방법이다. 이는 별도로 각 설계안 마다 두 가지의 냉각 방식을 모두 설계하여 전산 유체 역학(Computational Fluid Dynamics)적 해석을 통해 어떤 방식으로 설계할 지를 계속 검토를 진행 할 예정이다.

2.3 설계안에 따른 스택 면적과 무게

2.3.1 스택 설계 1안

스택 설계 1안은 고분자 전해질 막 연료전지로 무게는 5.33 kg, 가로 166 mm (전극연결부위 제외), 세로 166 mm, 높이 133 mm이다 (그림2 참조). 유효면적은 100 cm², 500 W 기준으로 16개의 셀을 설계하였다. 고안된 설계 1안의 특징은 공급되는 수소와 산소가 분리판 밖에서 공급됨으로써 분리판의 사용효율을 높이는 방식으로 설계되었다.

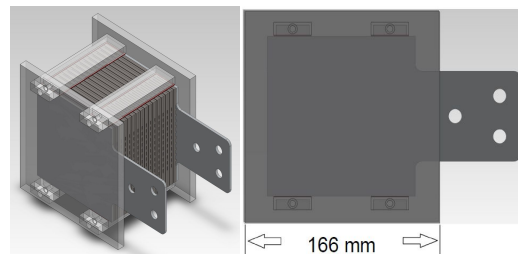


그림2. 스택 외형과 전도판(Conduction Plate)

2.3.2 스택 설계 2안

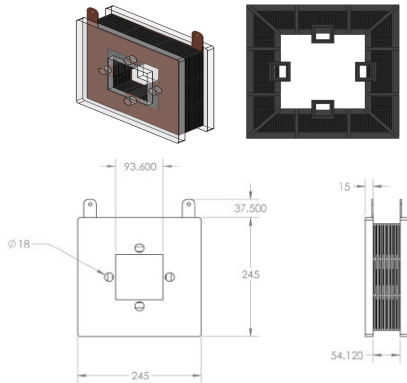


그림3. 스택 설계 2안 외형과 분리판(Bipolar Plate)

이 설계안은 기존 연료 전지 스택에서 성능 저하 문제가 되었던 연료전지 중심부의 열점(Hot Spot)을 해소하기 위해서 스택 중간을 관통하여 공기가 드나들 수 있는 구멍을 설계하였다. 고분자 전해질 막 연료전지로 무게는 5.2 kg 으로 무거워 졌고, 유효면적이 200 cm², 8개의 셀을 사용한다. 크기는 가로 245 mm, 세로 245 mm, 높이는 54 mm이다 (그림 3 참조). 분리판의 무게는 136.07 g 이다.

2.3.3 스택 설계 3안

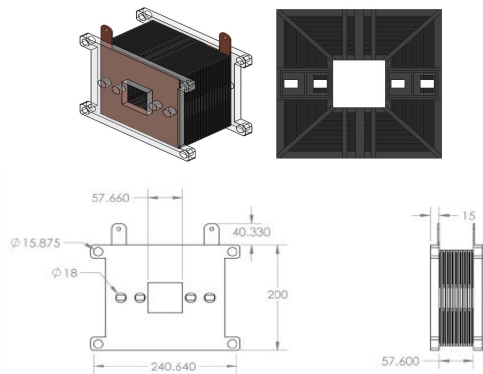


그림4. 스택 설계 3안 외형, 분리판(Bipolar Plate), 설계 치수

3안 역시 연료전지의 성능을 저하 시키는 열 점을 해소하기 위해 스택 중앙을 관통하는 구

멍을 설계하였다. 하지만 2안과는 다르게 막음 판의 나사 구멍을 스택 안쪽으로 넣어서 막음 판의 크기를 최소화 하므로 무게가 줄어들 수 있게 설계하였다. 무게는 3.96 kg이고 8개의 단위 셀을 사용하였다. 유효면적은 200 cm²이고 가로 250 mm, 세로 200 mm, 높이 57 mm 이다 (그림4 참조). 분리판의 무게 112.52 g 이다.

2.3.4 스택 설계 4안

설계 4안은 고분자 전해질 막 연료전지로 유효 면적이 200 cm²이고 8개의 단위 셀이 사용 되었다. 전체 스택의 무게는 5.7 kg이고 가로 350 mm, 세로 150 mm, 높이 56 mm으로 설계하였다 (그림 5참조). 연료전지 스택이 설치될 소형로봇의 내부 공간 형태가 직사각형의 공간이 예상되므로, 공간 효율을 높이는 방식으로 가로 길이가 세로 길이의 2배가 되는 설계 안을 고안하였다.

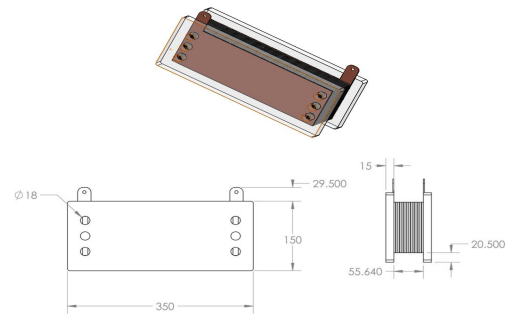


그림5. 스택 설계 4안 외형과 설계 치수

2.3.5 스택 설계 5안

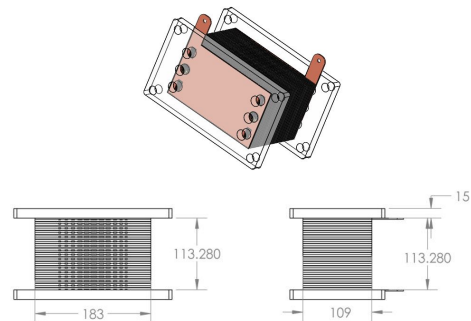


그림6. 스택 설계 5안 외형과 설계 치수

스택 설계 5안은 고분자 전해질 막 연료전지로 유효 면적은 100 cm² 이고 16개의 단위 셀을 사용한다. 전체 스택의 무게는 5.1 kg이고 크기는 가로 183 mm, 세로 109 mm, 높이 113 mm이다 (그림 6참조). 설계 4안과 5안은 로봇의 디자인이나 전원장치의 공간의 모양에 따라 스택 디자인이 달라질 수 있음을 보여주고 차후 수랭식 냉각 설계 테스트를 미리 염두한 구조이다.

2.3.6 스택 설계 6안

제 6안은 직접 메탄올 연료전지로 설계를 시도하였다. 최근 연구 논문에 따르면 100 mW/cm², 400 mA/cm² 로 파워 밀도와 전류 밀도가 상당히 상승했음에도 불구하고 여전히 고분자 전해질 막 연료전지에 비하면 부족하다 [8]. 500 W의 전력을 생산하기 위해서는 유효면적 100 cm²에서 단위 셀 60개 이상이 필요하다. 그리고 설계안에 따르면 스택의 무게는 무려 14 kg 정도가 된다. 가로 183 mm, 세로 109 mm, 높이 404 mm 로 설계하였다. 표 1에서 참조가 되는 연료전지 스택의 크기 및 사양은 이전 논문의 셀 설계 사양에서 참고하였다 [7]. 본 논문에서 제시하고 서술한 연료전지 설계안과 세부 사양들을 정리하면 아래 표1과 같다.

표1. 스택 설계 안에 따른 주요 설계 사양

	참조 스택	설계 #1	설계 #2	설계 #3	설계 #4	설계 #5	설계 #6
종류		PEM					DM FC
셀수 (ea)	16	16	8	8	8	16	60
유효 면적 (cm ²)	100	100	200	200	200	100	100
전도판 (kg)	3.2	0.3	0.6	0.4	0.6	0.4	3.1
분리판 (kg)	1.3	1.1	0.1	0.1	0.2	0.1	1.4
총무게 (kg)	14.1	5.3	5.2	4.0	5.7	5.1	14
면적 (mm)	166 *166 *240	166 *166 *133	245 *245 *54	250 *200 *57	350 *150 *56	183 *109 *113	183 *109 *404

3. 결 론

지금까지 연료전지 전원 시스템 개발 사양을 정리해 보면 다음과 같이 정리할 수 있다.

- (1) 고분자 전해질 막 연료전지와 직접 메탄올 연료전지의 장, 단점과 스택 구성 시 사양을 비교해 본 결과 소형 로봇에 사용할 전원 시스템으로 고분자 전해질 막 연료전지가 매우 유리하다고 볼 수 있다. 직접 메탄올 연료전지(DMFC)의 경우 고분자 전해질 막 연료전지(PEMFC)에 필요한 가슴기나 주변장치를 줄이는 긍정적 효과가 있지만, 단위 셀 당 생산할 수 있는 파워가 고분자 전해질 막 연료전지에 비해 현저히 작기 때문에 스택의 무게가 3배 이상 차이가 나는 것으로 평가 되었다.
- (2) 무게 감량을 위해 천연고무-탄소 합성섬유를 분리판으로 바꾸고 Lexan 9034을 막 음판(End Plate)의 재료로 사용, 구리 합금을 전도판(Conduction Plate)으로 사용하므로 스택의 전체 무게를 기존 제작 스택 대비 60%-70% 가량 줄일 수 있다.
- (3) 소형 로봇용 연료전지에 적합한 냉각 시스템 설계를 위해서는 차후 CFD 해석을 통해 어떤 설계 방식으로 선택할지 검토가 필요하다.
- (4) 간추려진 6개의 설계안 가운데서 현재 진행 중인 소형 로봇용 연료전지 전원 시스템 개발 과제에 가장 적합한 설계안을 도출하거나 설계를 좀 더 적절하게 변경하여 최종적으로 가장 적합한 설계를 찾는 연구들이 앞으로 수행되어야 한다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부에서 지원하는 대구경북과학기술원 일반사업에 의해 수행되었습니다(12-BD-0102).

참 고 문 헌

1. Joh, H.-I., T. J. Ha, et al. (2010). "A direct methanol fuel cell system to power a humanoid robot." *Journal of Power Sources* 195(1): 293-298.
2. Sang-Yeop Lee, In-Gyu Min, et al.(2010). "Development of a 600 W Proton Exchange Membrane Fuel Cell Power system for the Hazardous Mission Robot." *Journal of Fuel Cell Science and Technology* JUNE 2010, Vol. 7 / 031006-1
3. O'Hayre, R., Cha, S. W., Colella, W., and Prinz, F. B., 2006, *Fuel Cell Fundamentals*, Wiley, New York, Chap. 8.
4. Argyropoulos, P., Scott, K., and Taama, W. M., 2000, "Dynamic Response of the Direct Methanol Fuel Cell Under Variable Load Conditions," *J. Power Sources*, 87, pp. 153-161. [Inspec]
5. Peighambardoust, S. J., S. Rowshanzamir, et al. (2010). "Review of the proton exchange membranes for fuel cell applications." *International Journal of Hydrogen Energy* 35(17): 9349-9384.
6. Zainoodin, A. M., S. K. Kamarudin, et al. (2010). "Electrode in direct methanol fuel cells." *International Journal of Hydrogen Energy* 35(10): 4606-4621.
7. Park, Y. H. and J. A. Caton (2008). "Development of a PEM stack and performance analysis including the effects of water content in the membrane and cooling method." *Journal of Power Sources* 179(2): 584-591.
8. Zhiani, M., H. Gharibi, et al. "Performing of novel nanostructure MEA based on polyaniline modified anode in direct methanol fuel cell." *Journal of Power Sources*(0).