

## 직접 메탄올 연료전지를 이용한 휴머노이드 로봇의 전원시스템 개발

조한익<sup>1)</sup>, 하태정<sup>2)</sup>, 조재형<sup>2)</sup>, 김종호<sup>2)</sup>, 채승훈<sup>2)</sup>, 황상엽<sup>2)</sup>, 문상흡<sup>1)</sup>, 하흥용<sup>2)</sup>, 조백규<sup>3)</sup>,  
오준호<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>서울대학교 화학생물공학부, <sup>2)</sup>한국과학기술연구원 연료전지센터, <sup>3)</sup>KAIST 기계공학과

### Development of a DMFC-powered humanoid robot

<sup>1)</sup>Han-Ik Joh, <sup>2)</sup>Tae-Jung Ha, <sup>2)</sup>Jae-Hyung Cho, <sup>2)</sup>Jong-Ho Kim, <sup>2)</sup>Seung-Hoon Chae,  
<sup>2)</sup>Sang-Youp Whang, <sup>1)</sup>Sang-Heup Moon, <sup>2)</sup>Heung-Yong Ha, <sup>3)</sup>Baek-Kyu Cho, <sup>3)</sup>Jun-Ho Oh

**Key words** : DMFC, Stack, Humanoid robot, BOP, PMS, fuelcell/battery hybrid

**Abstract** : 전극 전해질 복합체가 하나로 구성된 단위전지는 전기출력이 낮아 원하는 전기출력을 얻기 위하여 단위전지를 여러 장 직렬로 쌓아 스택을 구성하여야 한다. 본 연구에서는 400 W급 직접메탄올 연료전지 스택을 제조하여, 운전 조건의 최적화를 위한 실험을 수행하였고, 한국형 휴머노이드 로봇인 Hubo에 적용하여 그 동특성을 평가하였다. 0.8 M 메탄올 용액은 260 ml/min의 유량을, 공기는 42LPM을 스택에 주입하여 400 W의 성능을 나타내었다. 연료전지 스택의 온도와 전압의 편차는 작았으며, 정상 운전시 스택의 온도는 약 70°C를 유지하였다. 로봇의 필요 전력이 높을 경우, 배터리와 연료전지가 동시에 부하 변동에 대응하였다. 방전된 배터리는 로봇의 필요 전력이 낮아질 경우, 충전되어 이후의 방전 상황에 대비하였다. 연료전지 시스템 적용 결과 로봇의 성공적인 운전을 확인할 수 있었다.

#### subscrip

DMFC : direct methanol fuel cell  
PEMFC : polymer electrolyte membrane fuel cell  
BOP : balance of plant  
PMS : power management system

#### 1. 서론

연료전지는 대체에너지로 각광받고 있는 전력 발생 시스템으로써 저온형 연료전지인 PEMFC(polymer electrolyte membrane fuel cell)와 DMFC(direct methanol fuel cell)는 휴대용, 가정용, 자동차용 전원 등으로 널리 연구가 진행되고 있다. 이 중 직접메탄올연료전지(DMFC)는 액체형태의 메탄올수용액을 연료로 사용하여 에너지 저장 밀도가 매우 높고 연료의 운송 및 저장이 용이하다. 또한 연료 자체가 냉각제의 역할을 하므로 냉각시스템(coolant manifold)이 간단해진다. 또한 DMFC는 고분자연료전지(PEMFC)에 비하여 습윤한 상태로 전해질 막이 유지되어 별도의 가습기가 필요 없다. 이러한

특징으로 인해 DMFC는 BOP(Balance of Plant) 자체가 매우 단순하고 크기가 작아서 휴대용 전원으로써 가장 적합한 형태이다. 이러한 DMFC에 대한 연구는 스택, BOP, PMS 등 각 구성요소로 연구 범위가 넓어지고 있다.

현재 로봇은 다양한 기능을 담당하는 형태로 개발되고 있으며, 이 중에서 인간형 로봇은 가장 첨단 기술을 요하는 분야로 평가된다. 인간형 로봇에 있어서 가장 큰 문제점은 로봇구동에 필요한 에너지를 공급하는 것이다. 기존에는 배터리를 사용하고 있으나, 사용시간이 짧고, 재충전 시간이 길어 사용하는데 많은 어려움이 있다. 따라서, 궁극적으로 이러한 전원 문제가 효과적으로 해결되지 않으면 인간형로봇의 실용화에 걸림돌로 작용할 것으로 예상되

- 
- 1) 한국과학기술연구원  
E-mail : hyha@kist.re.kr  
Tel : (02)958-5275 Fax : (02)958-5199
  - 2) 서울대학교 화학생물공학부  
E-mail : energy@surf.snu.ac.kr  
Tel : (02)958-6678 Fax : (02)958-5199
  - 3) 서울대학교 화학생물공학부  
E-mail : shmoon@surf.snu.ac.kr  
Tel : (02)880-7409 Fax : (02)880-8067

고 있다. 이러한 관점에서 연료전지 특히, 직접메탄올연료전지(DMFC)는 로봇의 에너지공급 문제를 해결할 수 있는 대체전원으로 기대를 모으고 있다.

KIST 연료전지센터에서는 KAIST에서 개발한 인간형 로봇(humanoid robot)인 휴보(HUBO)를 구동할 수 있는 연료전지/배터리 하이브리드 시스템을 개발하고, 이것을 휴보에 장착하여 운전하였다. 본 연구에서는 이러한 로봇용 연료전지 시스템의 특성 및 로봇 구동시의 운전 특성 등에 대하여 고찰하고자 한다.

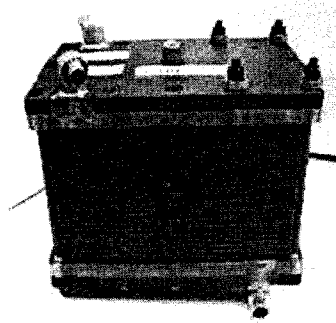
## 2. 실험

### 2.1 절 400 W 급 스택의 개발.

직접메탄올 연료전지 스택의 운전조건은 단위전지와 5-셀 스택 실험을 통해 최적화를 시켰고, 최적화된 운전조건은 스택에 적용하여 성능을 확인하였다. 400 W급 스택에 사용한 전극 크기는 132cm<sup>2</sup>, MEA는 42장을 적층하였다. 단위전지는 메탄올 농도, 반응물의 양론값, 그리고 셀의 온도를 변화시키면서 실험을 수행하였다. 메탄올 농도는 0.5 M과 1 M 두 종류로 실험을 수행하였으며, 반응물의 양론값은 음극과 양극 모두 2.8과 3.6으로 변화시켰다. 셀의 온도는 연료전지 성능에 영향을 주는 중요한 요소 중 하나이다. 따라서 셀이 구동하였을 때 최적의 온도를 찾기 위해, 셀 온도를 60°C, 70°C, 80°C까지 변화시키면서 성능 실험을 수행하였다. 5-셀 스택은 단위전지와 동일한 조건에서 실험을 수행하였다. 하지만, 5-셀 스택 실험은 단위전지 실험과 달리 상온에서 전류를 인가하며 셀 온도의 변화를 측정하는 실험을 추가하였다. 또한, 메탄올 농도와 양론값에 따라 유량을 변화하여 단위전지 성능을 확인하였다. 메탄올 농도는 0.5 M과 1 M 두 종류로 실험을 수행하였다.

### 2.2 절 연료전지 하이브리드 시스템

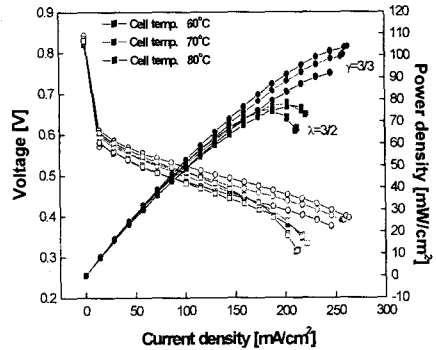
연료전지/배터리 하이브리드 전력 계통에서는 배터리가 방전되면서 연료전지의 부족한 출력을 보충한다. 반대로 연료전지의 출력이 로봇 구동 전력보다 높을 경우에는 배터리를 충전한다. 이러한 배터리의 역할로 운전 초기에 연료전지의 성능이 정상 출력보다 낮아도 로봇의 운전에 영향을 주지 않는다. 또한 로봇이 최대출력을 필요로 하는 경우에는 로봇과 배터리가 동시에 전력을 공급하므로 연료전지의 용량이 로봇의 최대출력보다 낮아도 문제가 발생하지 않는다. 본 연구에서는 로봇 구동시 발생하는 연료전지와 배터리의 전류 분포를 측정하여 하이브리드 시스템의 정상운전을 확인하였다.



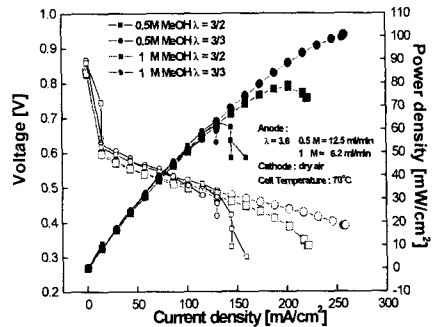
< 42-cell stack >

## 3. 결과 및 고찰

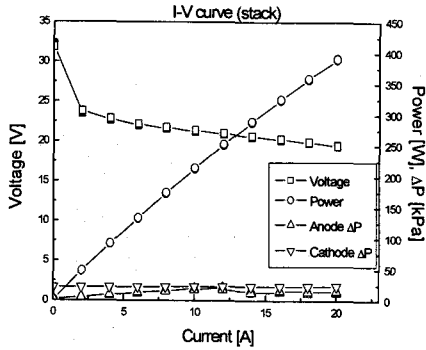
### 3.1 절 연료전지 스택의 운전 특성



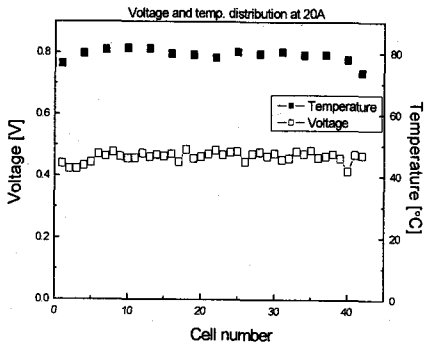
<셀 온도와 공기 유량에 따른 단위전지 성능>



<메탄올 농도에 따른 단위전지 성능>



<42-셀 스택의 I-V 성능 곡선>



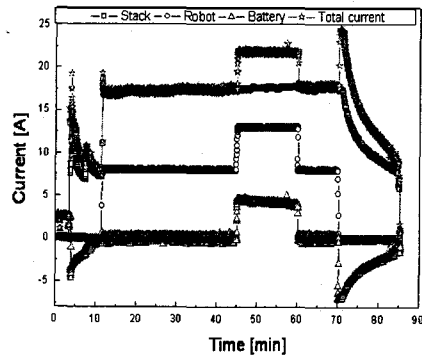
<20A 인가시 스택의 전압 및 온도 분포>

제작한 단위전지를 셀 온도, 공기의 유량, 메탄올 농도에 따라 성능실험을 수행하였다. 셀 온도가 높을수록, 반응물의 물질전달이 좋아져 높은 성능을 나타내었다. 또한 공기의 유량과 메탄올 농도가 높을수록, 높은 성능을 나타내는 것을 알 수 있다. 하지만, 연료전지의 전체 반응은 발열반응으로, 스택을 구성하였을 때 중간에 위치한 단위전지는 온도가 높아 질 수 있어 메탄올 농도를 0.5 M과 1M 사이 값으로 정하였다. 스택은 0.8 M 메탄올을 이용하여 I-V 성능을 측정하였다. 스택은 20 A에서 목표치인 400 W를 나타내었으며, 전압 및 온도 분포 또한 균일한 것을 알 수 있다.

### 3.2 절 연료전지/배터리 하이브리드 시스템 운전 특성

처음 약 3 분동안 배터리를 이용하여 BOP를 운전하였다. 3분이 지난 후, 운전 모드로 전환하여 BOP에서 소모되는 전력과 배터리가 방전된 만큼의 전력을 스택에서 공급하였다. 시간이 지남에 따라, 배터리가 충전되어 스택에서 나오는 전류의 양은 줄어들게 된다. 약 12분이 지나면, 배터리가 완충되고, 이 시점에서 로봇을 작동시켰다. 로봇이 수화, 손가락 움직이기, 악수 등을 수행할 때, 390 W (BOP에 약 100 W를 일정하게 공급)이하의 필요 전력은 스택에서 공급된다. 하

지만, 로봇이 390 W이상의 전력을 요구할 경우, 390 W를 제외한 나머지 필요 전력은 충전된 배터리에서 공급된다. 약 45~60분 동안 390 W 이상의 전력을 소비하고 난 후, 로봇이 390 W 이하의 전력을 요구하게 되면 배터리는 자동적으로 차단된다. 로봇 움직임이 끝난 후 연료전지는 방전된 배터리를 충전하게 된다. 배터리 충전이 시작되면서, 스택의 전류는 서서히 감소하고, 배터리가 완충이 되면 스택은 BOP에서 소모되는 전력만 공급하게 된다. 이 실험을 통해, 연료전지-배터리 하이브리드 시스템이 로봇에 최대 725 W의 전력을 안정적으로 공급할 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한 PMS를 통한 전류의 흐름과 전압의 변환이 잘 이루어짐을 확인할 수 있었다.



<연료전지/배터리 하이브리드 시스템의 전류변화>

## 4. 결론

400와트급의 연료전지/배터리 하이브리드 시스템을 제작하고 휴먼로봇에 장착하여, 성공적으로 로봇을 운전하였다. 로봇이 요구하는 다양한 출력에 적절히 대응하여 전력이 공급되었으며, 배터리의 충전전도 완충이 이루어졌다. 스택의 경우 최대 방전전력을 제한하므로써 과부하로 인한 스택의 전압강하를 방지할 수 있었으며, 스택의 최대출력을 상회하는 경우에는 배터리에서 보충전력이 방전되어 로봇시스템이 안정적으로 운전되었고, 낮은 부하 시에는 연료전지가 배터리를 충전함으로써, 연료가 공급되는 한에 있어서는 연속적으로 로봇운전이 가능함을 확인할 수 있었다.

하지만 부대 장비를 제외한 연료전지/배터리 하이브리드 시스템 자체와 배터리만을 비교할 경우 크기나 무게 면에서 연료전지/배터리 하이브리드 시스템은 아직 경쟁력이 약하다. 또한 BOP 작동시 발생하는 진동과 소음, 연료전지에서 발생하는 열이 주변기기에 야기할 수 있는 문제점들은 앞으로 해결되어야 할 것이다.

본 연구를 통해 연료전지 하이브리드 시스템을 사용한 휴먼로봇의 작동가능성을 확인하였으며, 향후 추가적인 연구를 통해 휴먼로봇에 사용할 수 있는 보다 효율적인 연료전지시스템을 개발할 수 있을 것으로 판단된다.

## References

- [1] Andreas Jossen, Ludwig Joerissen, Hybrid systems with lead-acid battery and proton-exchange membrane fuel cell, Journal of Power Sources 144 (2005) 395-401
- [2] H. Dohle, D. Stolten, Heat and power management of a direct-methanol fuel cell (DMFC) system, Journal of Power Sources 111 (2002) 268-282