

# 무인항공기용 200W 급 직접메탄올연료전지 경량화 스택 제작 및 작동 특성 연구 (II)

강경문<sup>1</sup> · 박성현<sup>1</sup> · 곽건희<sup>1</sup> · 지현진<sup>2</sup> · 주현철<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>인하대학교 기계공학과, <sup>2</sup>국방과학기술연구소

## Development of a Lightweight 200W Direct Methanol Fuel Cell Stack for UAV Applications and Study of its Operating Characteristics (II)

KYUNGMIN KANG<sup>1</sup>, SUNGHYUN PARK<sup>1</sup>, GEONHUI GWAK<sup>1</sup>, HYUNJIN JI<sup>2</sup>, HYUNCHUL JU<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Inha Univ., Yonghyun-dong, Nam-gu, Incheon 402-751, Republic of Korea

<sup>2</sup>Department of Defense Advanced R&D Center, Agency for Defense Development,

111, Sunamn-dong, Yoseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

**Abstract** >> A lightweight 200W direct methanol fuel cell (DMFC) stack is designed and fabricated to power a small scale Unmanned Aerial Vehicle (UAV). The DMFC stack consists of 33-cells in which membrane-electrode assemblies (MEAs) having an active area of 88 cm<sup>2</sup> are sandwiched with lightweight composite bipolar plates. The total stack weight is around 3.485 kg and stack performance is tested under various methanol feed concentrations. The DMFC stack delivers a maximum power of 248 W at 13.2 V and 71.3°C under methanol feed concentration of 1.2 M. In addition, the voltage of individual cell in the 33-cell stack is measured at various current levels to ensure the stability of DMFC stack operations. The cell voltage distribution data exhibit the maximum cell voltage deviation of 28 mV at 15 A and hence the uniformity of cell voltages is acceptable. These results clearly demonstrate that DMFC technology becomes a potential candidate for small-scale UAV applications.

**Key words** : Direct methanol fuel cell, DMFC(직접메탄올연료전지), Unmanned aerial vehicle, UAV(무인비행기), Fuel cell stack(연료전지 스택), Methanol crossover(메탄올 크로스오버)

### 1. 서 론

본 연구에서는 무인항공기(unmanned aerial vehicle, UAV)용 동력원으로 적용할 200W 급 직접메탄올 연료전지(direct methanol fuel cell) 스택 경량화 연구와 스택 작동특성 분석결과를 소개한다.

기존에 무인항공기의 동력원으로 적용되었던 내

연엔진이나 배터리(battery)는 낮은 효율, 진동 및 소음으로 인해 무인항공기의 감시 정찰에 큰 걸림돌이 된다. 따라서, 이러한 동력원을 대체하기 위하여 연료전지를 무인항공기의 동력원으로 이용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중 저온에서도 작동이 가능한 수소를 연료로 이용하는 고분자전해질형 연료전지(polymer electrolyte membrane fuel cell, PEMFC)가 새로운 동력원으로 각광받고 있다<sup>1-5)</sup>. 하지만 UAV의 동력원으로서 PEMFC의 가장 큰 기술적 난제는 수소연료의 저장과 공급 방식이다. 에너지 밀도가 낮은

<sup>†</sup>Corresponding author : 208185@inha.ac.kr

[ 접수일 : 2012.4.2 수정일 : 2012.4.20 게재확정일 : 2012.6.22 ]

기체상태의 수소는 수백 기압의 압력을 가하여 압축 용기에 저장되어야 한다. 그러나 이 방법은 고압으로 수소를 압축해야 하기 때문에 안정성에 문제가 있으며, 비용이 많이 든다는 단점이 있다. 또한, PEMFC는 전해질 막 수화(hydration)를 위한 가습기와 같은 주변장치(balance of plant)가 필요로 하기 때문에 시스템의 부피가 커지고 무게가 증가한다는 단점이 있다<sup>6)</sup>. 이러한 문제의 대안으로 화학 수소화물을 가수분해하여 수소를 생산하는 방식이 최근 들어 많은 주목을 받고 있으나, 이 또한 수소를 생산하기 위한 시스템이 추가적으로 구성되어야 한다는 단점이 있다<sup>7)</sup>. 따라서, 수소를 이용한 고분자전해질형 연료전지 시스템은 임무 범위가 넓고 장시간 운용이 가능한 kW급 이상의 중대형 무인기용 연료전지 시스템에 적합하다고 할 수 있다.

한편, 상온에서 취급이 용이한 액체인 메탄올을 연료로 직접 사용하는 DMFC 시스템은 PEMFC 시스템에 비해 가습기와 같은 BOP가 요구되지 않기 때문에 시스템이 간단하며 경량화와 소형화가 가능하고 연료의 공급, 운반, 교체가 편리한 장점이 있어 수백 W급 소형 UAV의 동력원으로써 적절한 대안이 될 수 있다.

실제 UAV 시스템의 동력원으로써, 고성능의 DMFC 스택을 제작하기 위해서는 연료전지 내부의 물질 전달 매커니즘을 정확히 이해하여 막-전극접합체(membrane electrode-assembly, MEA)의 구성요소를 최적화하고 최적의 DMFC 작동 조건을 구축해야 한다. Ko등<sup>8)</sup>은 1차원, 2상, 정상상태(a one-dimensional, two-phase, steady state)의 DMFC 모델을 개발하여 작동온도, 공급 메탄올 농도에 따른 DMFC 성능변화를 수치시뮬레이션을 통해 이론적으로 설명하였다. Ko등<sup>8)</sup>이 개발한 모델의 정확성을 검증하기 위해 활성면적  $25\text{cm}^2$ 의 단위전지를 직접 제작하여 다양한 작동조건 하에서 실험적으로 측정된 전류밀도 및 메탄올 크로스오버 데이터와 비교 하여 본 모델의 정확성을 검증하였다.

Purushothama<sup>9)</sup>등은 DMFC 1차원 이상, 비등온 천이해석(one-dimensional two-phase, non-isothermal transient)

모델을 개발하여 다양한 작동조건 하에서 시간에 따른 DMFC 열적 변화 특성에 대하여 수치시뮬레이션을 통해 이론적으로 설명하였다. 시뮬레이션 결과는 공급되는 메탄올 농도가 증가할수록 메탄올 크로스오버(methanol crossover) 현상이 더욱 더 심해지고 이는 DMFC의 과열현상을 초래하여 DMFC 스택(stack) 내부의 열관리가 반드시 필요하다는 것을 입증하였다. 이것은 스택온도를 제어할 수 있는 추가적인 냉각시스템이 필요하다는 것을 암시한다.

DMFC 스택의 성능을 최적화하기 위해서는 DMFC를 구성하는 MEA 뿐만 아니라 분리판(bipolar plate, BP)의 최적 설계 또한 병행되어야 한다. Park<sup>10)</sup>등은 분리판 유로 형상의 최적화를 위해 채널(channel)과 랜드(land)의 폭이 다른 4가지 형태의 사형 유로(serpentine flow field)를 제안하였고 다양한 조건에서 단위전지 실험을 통해 측정된 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하여 최적의 분리판 형상을 도출하였다. 그 결과는 채널 폭(channel width) 1mm, 랜드 폭(land width) 0.5mm인 유로 형상이 가장 높은 성능을 보여준다는 사실이 입증되었다.

본 연구에서는 이러한 선행 연구를 통해 밝혀진 현상들을 바탕으로, 소형 무인기의 동력원으로 적용 가능한 200W급 DMFC 경량화 스택을 제작하여 성능평가를 실시하였다. 먼저, DMFC 스택의 경량화를 위해서 복합소재를 이용한 분리판을 연구/개발하여, 분리판에 요구되는 전기전도도, 기계적강도, 가스투과도와 같은 주요특성들을 평가하였다. 또한, 200W급 DMFC 스택용 MEA 및 복합소재 분리판 사양을 결정하기 위하여 단순화 스택(short-stack)을 제작, 성능평가 후 그 결과를 바탕으로 MEA 및 분리판을 설계하였다. 이를 통해 200W 급 DMFC 스택에 적용될 최적의 MEA 디자인 및 분리판 설계 인자를 도출하였다. 이러한 결과를 바탕으로 200W급 DMFC 스택을 제작한 후에 무인항공기용 DMFC 스택의 운전조건을 결정하기 위해 공급 메탄올 농도 조건에 따른 성능을 측정하였다. 또한, 안정적인 스택 성능을 구현하기 위해 셀 간 성능 분포 및 안정성 테스트를 수행하였다.

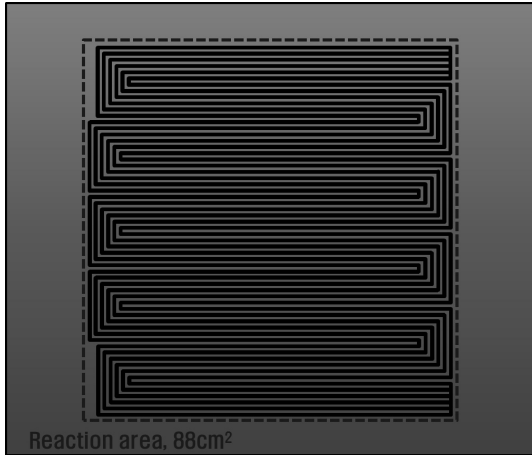


Fig. 1 A schematic diagram of a 6-serpentine flow design for the 88 cm<sup>2</sup> MEA (channel width=1 mm, land width=0.5 mm)

## 2. 실험 방법

본 연구에서 제작된 스택은 전극면적이 88cm<sup>2</sup>(10cm × 8.8cm)인 33개의 셀로 구성되었다. 전해질 막은 나피온(Nafion 115, DuPont<sup>®</sup>)이 사용되었으며, PtRu/C(Hispec 12100, Johnson Matthey<sup>®</sup>), Pt/C(Hispec 13100 Johnson Matthey<sup>®</sup>) 촉매가 나피온 이오노머(Nafion ionomer, 10wt.% DE1021, DuPont<sup>®</sup>)와 함께 분산된 상태로 각각 연료극, 공기극 촉매층으로 사용되었다. 분산된 촉매 슬러리는 탄소지지체(carbon paper, TGPH-060, Toray<sup>®</sup>) 위에 바 코팅(automatic film coater EQ-AFA-III-220, MTT)방법을 이용하여 Pt 기준 2mg/cm<sup>2</sup> 으로 균일하게 도포되었다. MEA 제작 과정에 대한 사항들은 기존 Kang<sup>11)</sup> 등의 연구에서 자세히 언급하였으므로 본 논문에서 이들에 대한 언급은 생략한다.

스택에 적용되는 분리판의 채널 및 랜드의 폭은 Park<sup>10)</sup>의 결과를 토대로 각각 1mm, 0.5mm, 깊이가 0.7mm로서 Fig. 1과 같이 6개의 사형(6-serpentine)구조의 유로 형태로 제작되었다. 또한, 본 연구에서 적용된 분리판은 흑연(graphite)을 주원료로 하고, 페놀 수지를 첨가하여 전기전도도와 굽힘강도를 향상시킨 복합소재 분리판으로서 분리판 두께를 2.2mm까지 줄일 수 있었다<sup>12)</sup>. DMFC 스택이 UAV에 탑재 될 때

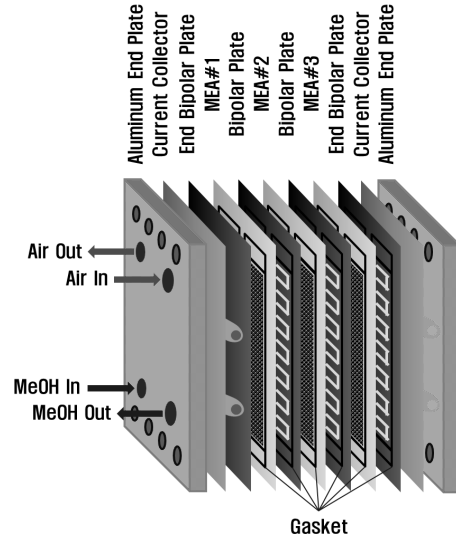
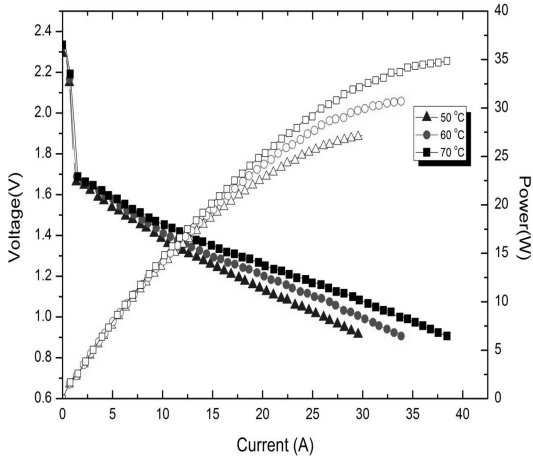


Fig. 2 A schematic diagram of a DMFC short stack

동체 내부의 부피를 고려하여 메탄올과 공기는 평행류(co-flow type) 방식으로 공급하고 이를 위해 U자형의 매니폴드(manifold) 방식을 택하였다. 상기와 같은 방법으로 제작된 MEA와 분리판은 Fig. 2와 같이 엔드판(end plate)과 전류집전판(current collector)위에 직렬로 순서대로 적층한 후 단순화한 스택(3-cells stack)을 제작하여 작동 온도에 따른 성능 평가를 수행하였다. 더불어 스택 체결 요소인 볼트와 너트는 기존의 스테인리스 강 소재 대신에 흑연에 수지를 함침시킨 방법으로 제조하여 스택을 경량화 하는데 주력하였다. DMFC 스택의 각 요소의 무게는 Table 1에 정리하였다.

Table 1 Weight of DMFC stack components

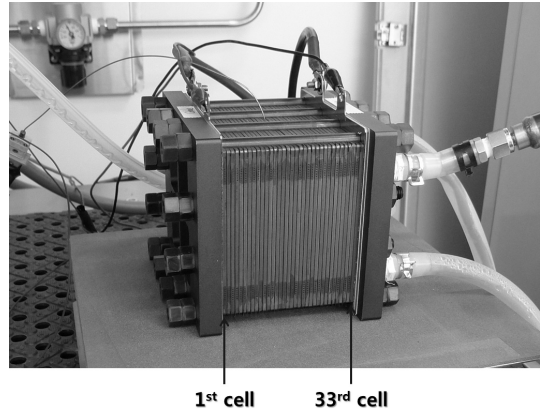
Components	Value
End plates	0.81 kg
Bipolar plates	1.58 kg
Current collectors	0.745 kg
MEAs	0.15 kg
Bolts/Nuts	0.2 kg
Total	3.485 kg



**Fig. 3** Polarization and power density curves of a short stack at different operating temperatures (2 M MeOH, 50°C, 60°C and 70°C). Stoichiometries were fixed at 2 and 3 for methanol and air, respectively

### 3. 결과 및 분석

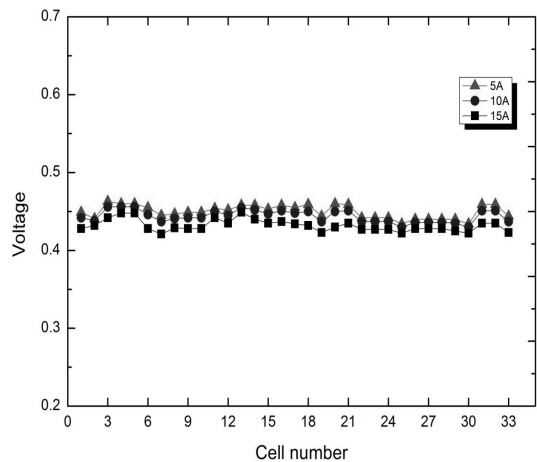
본 연구에서는 200W급 스택의 작동특성을 파악하기 전에 활성면적이 88cm<sup>2</sup>인 3개의 셀로 구성된 단순화 스택을 제작하여 성능을 평가하였다. Fig. 3은 공급하는 메탄올 농도 2 M 조건에서 예상되는 스택내부의 작동온도(50, 60, 70°C)에 따른 DMFC 단순화 스택의 성능을 보여주는 그래프이다. 공급유량은 해당 전류에 대하여 각각 양론계수(stoichiometry) 2와 3인 조건으로 공급하였다. 또한, 스택 내부에 공급되는 메탄올 및 공기는 상압의 외기 온도(room temperature) 하에서 공급되었다. 작동온도가 증가함에 따라 전체 셀 성능이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 기준 전압 1.2V에서 작동온도의 변화(50, 60, 70°C)에 따른 단순화 스택 성능은 각각 20.7, 24.1, 27.6W로 측정되었으며 50°C보다 70°C에서의 작동 온도 조건에서 대략 15% 정도의 성능 향상이 되는 것을 확인할 수 있다. 셀 온도의 상승은 메탄올 크로스오버로 인한 손실과 전기화학반응(메탄올산화반응 및 산소 환원반응) 속도 및 물질전달효율 (메탄올 및 산소 확산율) 증가로 인한 성능 향상이 동시에 발생한다. 즉, 셀 온도의 증가로 인한 스택 성능향상은 메탄올 공



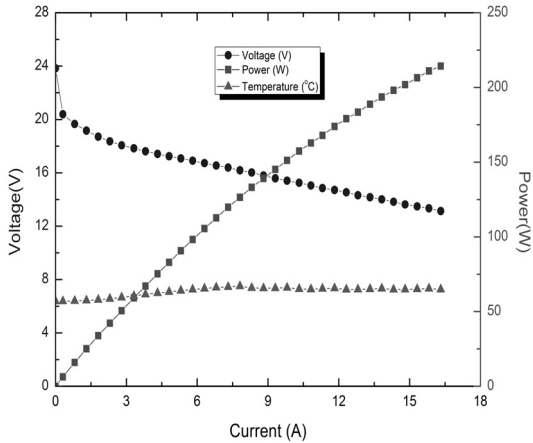
**Fig. 4** Photograph of a 200 W DMFC stack consisting of 33 cells

급 농도 2M 조건에서는, 메탄올 크로스오버 영향성이 적다는 사실을 암시한다<sup>8)</sup>. 단순화 스택의 결과를 토대로 본 연구에서는 200W 급 DMFC 스택을 제작하기 위해 셀의 개수를 33개로 결정하였다. Fig. 4는 33개의 셀로 구성된 DMFC 스택을 나타낸 그림이다.

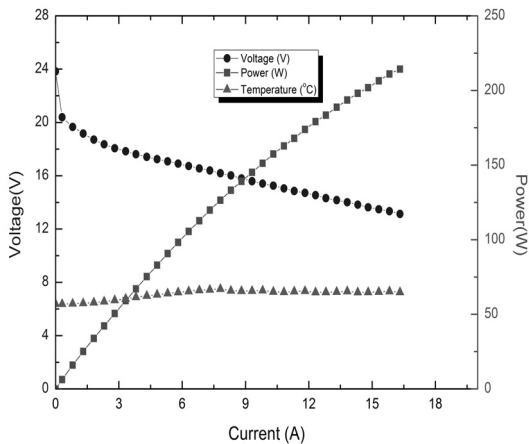
Fig. 5는 1M 농도의 메탄올 수용액과 공기를 스택에 공급하였을 때 셀 간 전압 측정 결과이다. 스택에 공급되는 메탄올과 공기의 유량은 해당 전류에 대하여 각각 양론계수(stoichiometry) 2와 3인 조건으로 공급되었다. 각 농도 조건 하에서 개회로 전압(open



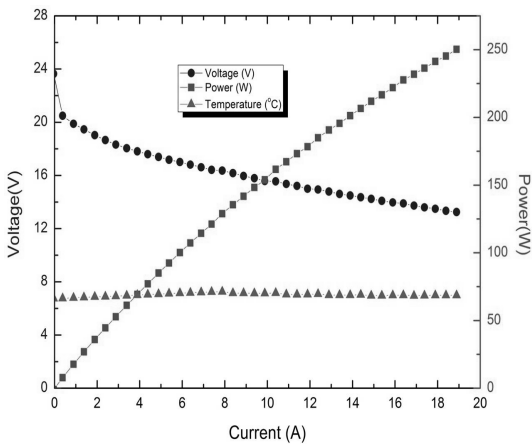
**Fig. 5** Voltage distributions of the stack at various operating current densities (5A, 10A and 15A)



(a)



(b)



(c)

**Fig. 6** Performance curves of DMFC stack under different methanol feed concentrations of (a) 1 M, (b) 1.1 M and (c) 1.2 M

circuit voltage, OCV)은 1M 공급 시 23.83V, 1.1M 공급 시 23.80V, 1.2M 공급 시 23.64V로 측정되었다. 공급하는 몰농도가 증가함에 따라 전기삼투항력 (electro osmotic drag, EOD) 효과로 인하여 OCV가 다소 감소하는 것을 확인할 수 있다. 한편, 일정 전류에서 셀 간 전압을 보면, 5A(74W), 10A(145W), 15A(211W)일 때 셀 간의 차이는 최대 각각 29mV, 26mV, 28mV로서 비교적 큰 차이가 나타나지 않음을 확인할 수 있다. 또한, 200W 이상에서도 스택을 구성하는 모든 셀이 기준전압 0.4V이상에서 작동하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 본 연구에서 적용된 분리판이 스택의 매니폴드에서 각 셀의 채널로 반응물이 고르게 잘 분배될 수 있도록 설계가 되었으며 스택 제작에 사용된 MEA간에 성능 차이 또한 거의 없음을 입증해준다.

Fig. 6은 1 M, 1.1 M, 1.2 M 메탄올 공급조건 하에서 전체 33개의 셀로 구성된 200W 급 DMFC 스택의 성능 그래프이다. 본 연구에서 적용한 DMFC 시스템의 운전 방법은 외부에서 스택으로의 열 공급 시스템이 없는 자가 발열(self-heating)로 작동하는 방법을 택하였다. 즉, 스택의 작동 온도는 전압 손실에 의한 스택의 발열과 메탄올 크로스오버에 의한 발열에 의해 스택 온도가 상승하게 된다. 스택에 공급되는 메탄올과 공기의 유량은 해당 전류에 대하여 각각 양론계수(stoichiometry) 2와 3인 조건으로 공급되었다. 메탄올 1M, 1.1M, 1.2M 공급 시 스택의 최고 성능은 각 셀 당 전압 0.4V에 해당하는 13.2V에서 각각 220, 241, 248W를 기록하여 공급되는 메탄올의 몰농도가 증가할수록 더 높은 셀 성능을 나타남을 알 수 있다. 이러한 사실은 고 전류 영역으로 DMFC 작동이 진행됨에 따라 메탄올 크로스오버의 영향성보다 메탄올 농도 분극에 의한 영향성이 더 큼을 암시한다.

Fig. 6에 나타나 있는 스택의 온도곡선을 비교하면 1M, 1.1M, 1.2M 메탄올 공급조건 하에서 스택의 최고 온도는 각각 66.1, 67, 71.3°C로 기록 되어, 메탄올 수용액의 농도증가에 따라 스택의 온도는 증가하

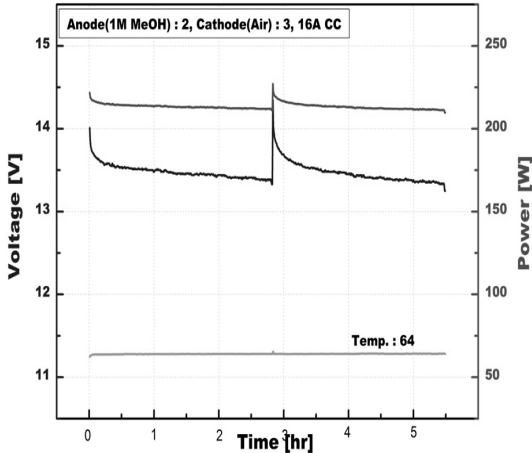


Fig. 7 Operating characteristics of the DMFC stack at constant current of 16A

는 경향성을 나타냄을 알 수 있다. 이는 공급되는 메탄올 수용액의 농도가 클수록 크로스오버 된 메탄올의 양은 증가하고 공기극 촉매층에서 메탄올의 산화반응(MOR)이 부가적으로 더 발생하여 전체 스택 온도를 상승시키는 효과를 야기하기 때문이다. 앞에서 언급된 것처럼 이러한 셀 온도상승은 DMFC 내부 전기화학반응 속도와 물질전달을 향상시킨다. Fig. 6의 결과를 토대로, 저 농도 메탄올 공급조건 하에 DMFC 스택 성능은 메탄올 크로스오버로 인한 부정적인 효과보다 긍정적인 효과가 더 지배적임을 알 수 있다.

Fig. 7은 UAV 순항 시 DMFC 스택에서의 안정적인 출력을 제공하기 위해 실제 비행시간 및 외기 온도(13°C)와 비슷한 조건 하에서 지상 테스트를 진행한 결과이다. 본 연구에서는 스택을 상온에서 작동시킨 후, 내부온도가 자가 발열에 의해 64°C까지 상승된 상태에서 실험을 진행하였다. 연속 운전은 메탄올 1M 농도에서 진행되었으며 16A 정전류(constant current)를 인가하여 5시간 동안의 전압, 출력, 온도를 측정하였다. 스택 작동 후 약 2시간 40분이 경과된 후에 스택 부하 응답성을 확인하기 위해 연료 공급을 순간적으로 중단시킨 후 다시 연료를 공급하여 스택의 성능의 변화를 확인하였다. 연료가 재공급이 되면 스택의 성능이 다시 회복되는 것을 확인할 수 있다. DMFC

스택은 5시간동안 13.3V의 전압에서 215W의 일정한 성능을 유지하였고, 스택 내부의 온도 또한 64°C로 유지되는 것을 확인할 수 있다.

이로써, 본 연구팀이 제작한 DMFC 스택은 UAV의 5시간 이상 순항을 위한 안정적인 출력을 제공할 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

## 4. 결론

본 연구에서는 UAV용 200W급 DMFC 스택을 제작하기 위해 단순화한 DMFC 스택을 선 제작하여 스택의 성능을 예측하고 스택의 무게 및 부피를 고려하여 적합한 셀의 갯수를 결정하였다. 단순화 스택의 성능 측정 결과를 바탕으로 200W급 DMFC 스택을 제작하여 공급하는 메탄올의 몰농도에 따른 스택 성능을 측정하였다. 본 연구에서 도출된 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 경량화 된 200W급 DMFC 스택은 88cm<sup>2</sup> MEA 면적의 33개의 단위전지로 구성되어 있으며 총 스택 무게는 3.485kg 로 측정되었다. 1.2M 메탄올 공급농도와 70°C 온도조건에서 248W의 파워를 달성하여 DMFC 스택 중량당 파워밀도 70W/kg 이상을 달성하였다. 스택의 셀 간 전압 차이는 실제 UAV 운용 전류 조건과 유사한 15 A의 정전류 조건 하에서 최대 28mV의 차이를 나타내었고 스택을 구성하는 모든 셀이 기준 전압 0.4V 이상에서 안정적으로 운전되고 있는 것을 확인할 수 있다.
- 2) 1M, 1.1M, 1.2M 메탄올 공급조건 하에서 자가 발열로 인한 DMFC스택 온도 상승은 1.2M 공급 시에 가장 높았고 스택의 성능 또한 1.2M에서 최대 로 측정되었다. 이는 저 농도 메탄올 공급 조건에서는 메탄올의 크로스오버로 인한 전압손실 보다 스택의 온도 증가로 인한 성능 향상 효과가 더 지배적임을 알 수 있다.
- 3) UAV 순항 시의 조건과 유사한 환경에서 경량화된 DMFC 스택을 운전한 결과 UAV의 5시간 이상 순항을 위한 안정적인 출력을 제공하였다. 이

러한 결과는 DMFC 시스템이 소형 UAV의 동력 원인으로 충분히 적용될 수 있다는 사실을 입증해 준다.

## 후 기

본 논문은 국방과학연구소 국제공동연구사업분야 (계약번호 UD090080GD)를 통해 지원받아 수행된 연구입니다. 기술적인 부분은 일도에프엔씨와 프로파워를 통해 지원 받았습니다.

## 참 고 문 헌

1. "Hydrogen fuel cells power Georgia Tech UAV", Fuel Cells Bulletin, Vol. 2006, Issue 10, 2006, pp. 9-10.
2. "Blue Bird, Horizon unveil first commercial fuel cell UAV", Fuel Cells Bulletin, Vol. 2009, Issue 10, 2009, p. 6.
3. "Energy Or fuel cell powered UAV reaches 10 h flight endurance", Fuel Cells Bulletin, Vol. 2011, Issue 9, 2011, pp. 4-5.
4. T. Kim and S. Kwon : "Design and development of a fuel cell-powered small unmanned aircraft", Int J. Hydrogen Energy, Vol. 37, Issue 1, 2012, pp. 615-622.
5. T. H. Bradley, B. A. Moffitt, D. N. Mavris and D. E. Parekh : "Development and experimental characterization of a fuel cell powered aircraft", J. Power Sources, Vol. 171, Issue 2, 2007, pp. 793-801.
6. S. Kang, B. Kim, H. Kim : "Experimental study on the characteristics of heat exchanger of 1 kW PEMFC system for UAV", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 22, No. 6, 2011, pp. 819-826.
7. K. Kim, T. Kim, K. Lee and S. Kwon : "Fuel cell system with sodium borohydride as hydrogen source for unmanned aerial vehicles", J. Power Sources, Vol. 196, Issue 21, 2011, pp. 9069-9075.
8. J. Ko, G. Lee, Y. Choi, P. Chippar, K. Kang and H. Ju : "Comparison of numerical simulation results with experimental current density and methanol-crossover data for direct methanol fuel cells", J. Power Sources Vol. 196, 2011, pp. 935-945.
9. P. Chippar, J. Ko and H. Ju : "A global transient, one-dimensional, two-phase model for direct methanol fuel cells (DMFCs) - Part II : Analysis of the time-dependent thermal behavior of DMFCs", Energy Vol. 35, 2010, pp. 2301-2308.
10. Y. C. Park, P. Chippar, S. K. Kim, S. Lim, D. H. Jung, H. Ju and D. H. Peck : "Effects of serpentine flow-field designs with different channel and rib widths on the performance of a direct methanol fuel cell", J. Power Source, Vol. 205, 2012, pp. 32-47.
11. K. Kang, G. Lee, G. Gwak, Y. Choi and H. Ju : "Development of an advanced MEA to use high-concentration methanol fuel in a direct methanol fuel cell system", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 37, Issue 7, 2012, pp. 6285-6291.
12. K. Kang, S. Park, J. Kim, H. Ju : "Evaluation and fabrication of composite bipolar plate to develop a light weight direct methanol fuel cell stack for small-scaled UAV application ( I )", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 23, No. 2, 2012, pp. 134-142.