

技術論文

DOI:10.5139/JKSAS.2010.38.10.1031

소형 정찰 UAV를 위한 고분자 전해질막 연료전지의 경량의 금속 분리판

김기인*, 이종광**, 장보선*, 권세진***

Lightweight Metallic Bipolar Plates of PEMFC for a Small Reconnaissance UAV

Ki-In Kim*, Jong-Kwang Lee**, Bo-Sun Jang* and Se-Jin Kwon***

ABSTRACT

This paper proposed lightweight aluminum bipolar plates as an alternative for conventional graphite bipolar plates in fuel cell systems used as a power source for small reconnaissance UAVs. Since bipolar plates occupy more than 80% of the total weight of the fuel cell system, lightweight aluminum bipolar plates can improve the overall payload and flight time of the fuel cell UAV. The aluminum and graphite bipolar plates were fabricated to compare the performance of each of them. A 15% higher performance per weight was obtained from aluminum bipolar plates than the graphite bipolar plates. Also, the performance of a single cell using aluminum bipolar plates was evaluated under various operating conditions.

초 록

이 논문에서는 소형 정찰 UAV의 동력원으로 연료전지 시스템을 적용하기 위해, 기존의 흑연 분리판을 대체할 수 있는 가벼운 알루미늄 분리판을 제시하였다. 분리판은 연료전지 시스템 전체 무게의 80% 이상을 점유하므로, 경량의 알루미늄 분리판은 연료전지 UAV의 유효 탑재량과 항속 시간을 증가시킬 수 있다. 일반적으로 사용되고 있는 흑연 재질의 분리판과 성능을 비교 및 평가하기 위해 알루미늄과 흑연 분리판을 제작하였으며, 알루미늄 분리판의 성능이 흑연 분리판에 비해 약 15% 이상 증가하였음을 확인하였다. 또한, 실제 소형 정찰 UAV에 적용하기 위한 기초 연구로써 알루미늄 분리판을 이용한 단전지의 성능을 다양한 운전조건에서 측정하였다.

Key Words : Unmanned Aerial Vehicle(무인기), Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell(고분자 전해질막 연료전지), Bipolar Plate(분리판)

1. 서 론

UAV(Unmanned Aerial Vehicle)의 활용 영역이 민간 및 군사 분야에서 점차적으로 확대되어

감에 따라 UAV에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 군사용 UAV는 작전지역 감시, 정찰 및 정보 수집 등의 임무를 주로 수행하는데, 기존의 동력원인 내연기관은 진동 및 소음이 심하고, 2차 전지/전기 모터의 조합 또한 낮은 에너지 밀도와 제한된 운용시간으로 임무를 수행하는데 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 UAV의 새로운 동력원으로 연료전지를 적용하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다[1-3].

† 2010년 3월 2일 접수 ~ 2010년 9월 28일 심사완료

* 정회원, KAIST 항공우주공학 전공 대학원

** 정회원, 삼성전자 LCD R&D 센터

*** 정회원, KAIST 항공우주공학 전공

교신저자, E-mail : trumpet@kaist.ac.kr

대전광역시 유성구 구성동 과학로 335

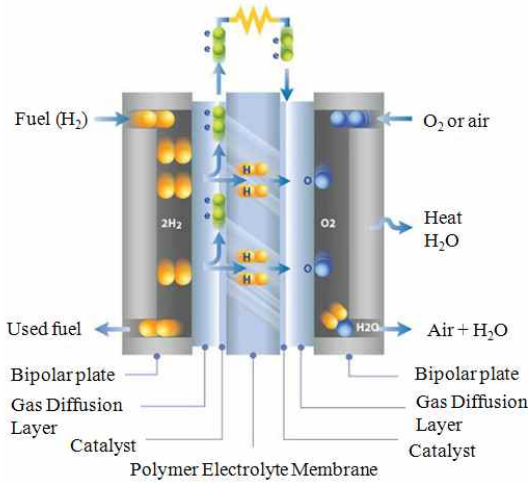


Fig. 1. Operating process of PEMFC[5]

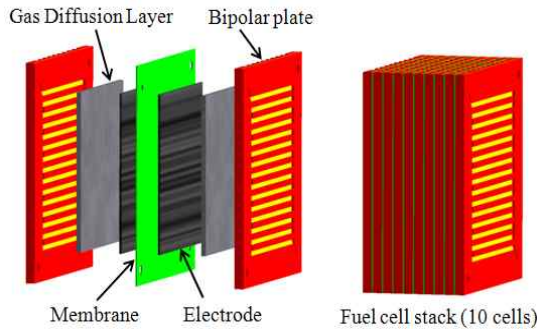
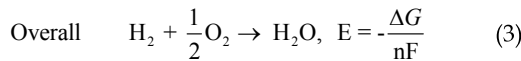
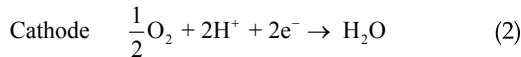
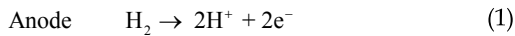


Fig. 2. Components of a single cell and stack



연료전지는 소음 및 진동이 적고, 에너지 밀도와 효율이 높다. 특히, 다양한 종류의 연료전지 중에서 작동온도가 낮고, 전류 밀도 및 출력 밀도가 크며, 상대적으로 시동시간이 짧은 고분자 전해질막 연료전지(PEMFC, Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell)가 소형 UAV의 동력원으로 적합하다[4]. 고분자 전해질막 연료전지는 수소와 산소의 전기화학 반응을 통해 전기 에너지를 생성하는 장치로 작동 원리는 Fig. 1과 같다[5].

고분자 전해질막 연료전지는 Fig. 2와 같이 전해질막, 전극, 기체 확산층, 분리판으로 구성되어 있으며, 단위 전지가 생성하는 전기에너지는 식

Table 1. Properties of bipolar plate materials

구분	장점	단점
흑연	<ul style="list-style-type: none"> • 화학적 안정성 • 높은 전기전도성 • 낮은 밀도, 내식성 	<ul style="list-style-type: none"> • 낮은 강도 • 가공 제한 • 다공성 물질 • 두께 증가
복합재	<ul style="list-style-type: none"> • 낮은 접촉저항 • 내식성 	<ul style="list-style-type: none"> • 낮은 전기전도성
금속	<ul style="list-style-type: none"> • 높은 전기전도성 • 높은 강도 • 가공 용이 	<ul style="list-style-type: none"> • 높은 밀도 • 부식성

(1)~(3)과 같이 전체 반응식의 ΔG 와 같다. 여기서 G , n , F 는 각각 깁스 자유 에너지(Gibbs free energy), 반응 기체의 몰수, 그리고 패러데이 상수(Faraday's constant)를 나타낸다. 소형 UAV를 운용할 수 있는 수준의 동력을 생성하기 위해서는 각각의 단위 전지들을 직렬로 연결하여 하나의 스택(stack)을 형성해야만 한다.

이러한 단위 전지의 구성 요소들 중에서 분리판(bipolar plate)은 연료전지 스택의 전체 질량의 80% 이상을 점유하고 있다[6-7]. 분리판은 단위 전지에서 발생하는 전하를 인접하는 전지에 전달해 주고, 반응 기체를 공급하는 채널을 형성해 주며, 구성 요소들을 구조적으로 지지하는 역할 등을 수행한다. Table 1에 제시한 바와 같이 여러 물질을 분리판으로 사용할 수 있으며, 일반적으로 전기 전도성이 높고, 연료전지 작동 환경에서 화학적으로 안정한 흑연이 사용되고 있다[6, 8].

그러나, 흑연은 다공성 물질이므로 반응 기체들 간의 혼합을 막고 적절한 강도를 유지하기 위해서는 전체 분리판의 두께가 두꺼워지며 무게가 증가하게 되므로, 소형 정찰 UAV의 동력원으로 사용할 경우 임무수행을 위한 감시 장비 및 항법 장치 등 다양한 장비의 탑재에 제약을 받게 된다.

이러한 흑연의 단점들을 보완하기 위해 많은 연구 그룹들에서는 금속을 이용한 분리판의 제작을 수행하고 있다. 금속 분리판으로 쓰이는 금속에는 알루미늄, 스테인리스 강, 티타늄 등이 있으며, 이들은 전기 전도성과 기계적 물성이 우수하고 가격이 저렴하다는 점에서 분리판 물질로서 많은 주목을 받고 있다. 금속 분리판의 단점으로는 흑연과 달리 부식에 취약하다는 점이지만 부식 방지 코팅 혹은 합금 처리를 통해 내식성이 우수한 금속 분리판을 제작할 수 있다 [11, 12].

본 연구에서는 기존의 흑연 분리판을 대체할 수 있는 금속 분리판을 제시하여 소형 정찰 UAV에 적용하기 위한 기초 연구를 수행하였다. 선정된 금속은 알루미늄-망간-규소의 합금으로, 내식성과 용접성이 좋고 급랭 공법으로 강화되어 매우 가볍다는 장점을 지닌다. 이는 경량화가 핵심인 소형 UAV에 매우 적합한 특성이라고 볼 수 있다. 실제로 본 금속 분리판을 이용하면 흑연을 썼을 때에 비해 동일한 성능 및 전체 UAV 무게 대비 15% 이상의 무게 절감을 이룰 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구의 목적은 금속 분리판을 제작하여 기존의 흑연 분리판과의 비교 평가를 통해 무게 대비 에너지 증가를 제시하고, 다양한 운전조건에서 금속 분리판의 성능을 평가하여 향후 실제 개발을 위한 기반을 구축하는데 그 목적이 있다.

II. 알루미늄 분리판

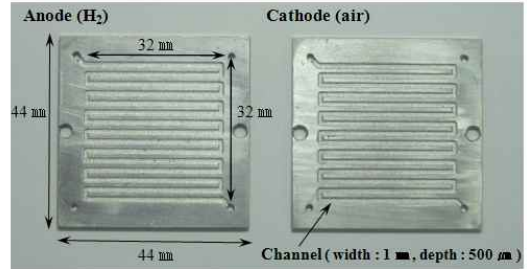
2.1 실험 장치

분리판의 기계적 요구조건을 기준으로 여러 금속의 특성을 Table 2에 제시하였다. 이번 연구에서는 요구조건을 충족시키면서 가장 가벼운 금속인 알루미늄을 이용하여 금속 분리판을 제작하였으며, 동일한 크기의 흑연 분리판을 제작하여 알루미늄 분리판의 성능을 검증하였다.

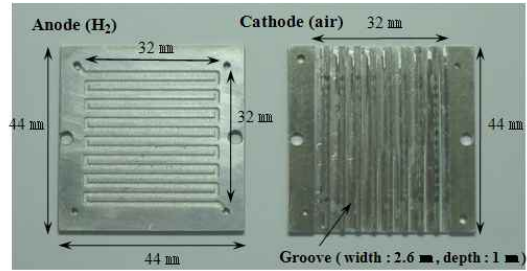
분리판은 한 면이 4.4 cm인 정사각형 형태로 가공하여 제작하였으며, 두께는 알루미늄이 2 mm, 흑연이 2.5 mm이다. 반응면적(active area)은 동일하게 3.2 cm × 3.2 cm이다. 알루미늄과 흑연분리판은 Fig. 3과 같이 공기 채널형 방식 (airflow-channel type)과 공기 호흡형 방식 (ambient air-breathing type) 2 종류로 제작하였다.

Table 2. Characteristics of metallic materials

구분	밀도 (g/cm ³)	저항 (Ω cm)	열전도 (W/mK)	압축강도 (MPa)
기준	< 5	< 10	> 20	> 25
SUS 316	8.0	74×10 ⁻⁶	16.2	515
Al	2.7	3.7×10 ⁻⁶	180	124
Au	19.3	2.35×10 ⁻⁶	315	130
Pt	21.5	10.6×10 ⁻⁶	71	125~165
Ni	8.9	9.5×10 ⁻⁶	70	462
Cu	8.9	1.72×10 ⁻⁶	388	220



(a) airflow-channel type



(b) ambient air-breathing type

Fig. 3. Fabricated aluminum bipolar plates

공기 채널형 방식은 연료극과 공기극에 수소와 공기의 원활한 공급을 위해 사형(serpentine) 채널을 가공하였으며, 연료전지 작동 중 발생하는 물방울이 통로에 부착되지 않도록 하기 위해 유로의 폭은 1 mm, 깊이는 500 μm로 가공하였다[4].

공기 호흡형 방식은 연료극에는 수소의 공급을 위해 사형 채널을, 공기극에는 자연 대류를 통해 공기를 공급하기 위해 폭 2.6 mm, 깊이 1 mm의 평행한 홈을 9개 만들었다. Table 3에는 공기 호흡형 방식의 상용 흑연 분리판과 이번 연구에서 제작한 알루미늄 및 흑연 분리판의 형상 변수를 비교하여 제시하였다.

알루미늄 분리판을 사용한 연료전지의 성능 평가를 위해 전극은 ETEK사의 ELAT® 0.5 mg

Table 3. Shape comparison between graphite and aluminum bipolar plates

구분	가로 (mm)	세로 (mm)	두께 (mm)	무게 (g)	반응면적 (cm ²)
흑연(상용)	57	60	4.6	24	
흑연(제작)	44	44	2.5	9	10.2
알루미늄	44	44	2	7	

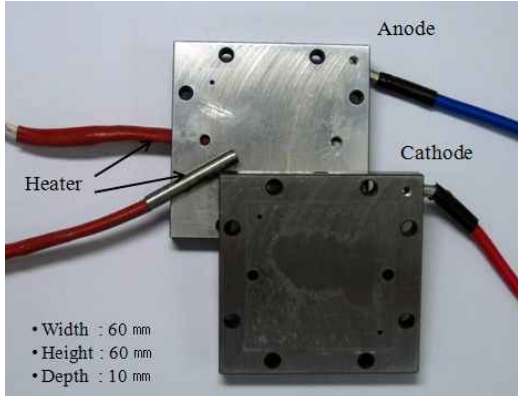


Fig. 4. Aluminum end plates

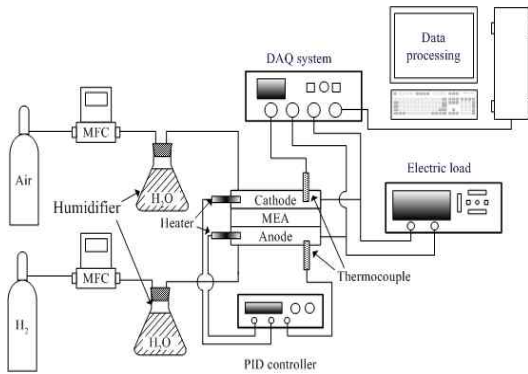


Fig. 5. Schematic of experimental setup

Pt/cm²인 탄소섬유 종이를 사용하였으며, 전해질 막은 Dupont사의 Nafion® 112를 사용하였다. 연료전지의 구성요소들을 결합하고, 단위 전지를 직렬로 연결하기 위한 끝 판(end plate)은 Fig. 4와 같이 알루미늄을 이용하여 제작하였으며, 끝 판 내에는 히터를 삽입하고 P.I.D 제어 방식을 통해 전지의 작동 온도를 조절하였다.

Figure 5는 연료전지의 성능을 측정하기 위한 실험장치의 개략도이다. 연료전지의 성능은 Electronic load(3311D, VizzKorea Inc.)와 데이터 기록장치(Personal DAQ Module, KMI(주))를 이용하여 10 mA/cm²씩 전류밀도를 증가시키면서 10분간 1 Hz로 전류와 전압을 측정하여 평가하였다.

2.2 실험 조건 및 방법

연료전지는 25 °C의 상압 조건에서 운전되었으며, 연료극과 공기극의 상대습도는 25 °C에서 100%로 하였다. 반응물의 유량은 식 (4)~(5)로 결정하였다[9].

$$\dot{m}_{H_2} = \lambda \frac{\rho A}{2F} M_{H_2} \text{ (g/s)} \tag{4}$$

$$\dot{m}_{air} = \lambda \frac{\rho A}{0.21 \times 4F} M_{air} \text{ (g/s)} \tag{5}$$

위 식에서 λ는 화학 양론비(stoichiometric ratio), ρ는 전류밀도, A는 반응면적, F는 패러데이 상수(Faraday's constant)를 나타낸다. 수소와 공기의 공급 유량은 채널 내에 생성된 물이 응집되는 것을 막기 위해 λ=3을 적용하여, 300 mA/cm²의 전류 밀도를 기준으로 공급하였다.

실험은 알루미늄과 흑연 분리판의 무게 대비 성능을 비교하기 위해 제작한 알루미늄과 흑연 분리판을 이용하여 공기 채널형 방식의 단전지의 성능을 측정하였다. 또한, 시스템의 단순화를 위해 알루미늄 단전지를 이용하여 작동 온도와 공기 공급 방식에 따른 성능을 평가하였다.

III. 실험 결과

3.1 알루미늄과 흑연 단전지 성능

제작한 공기 채널형의 알루미늄과 흑연 분리판을 이용한 단전지의 성능 측정 결과를 Fig. 6에 제시하였다. 알루미늄과 흑연 분리판을 이용한 단전지의 개회로 전압은 0.95 V로 동일하게 나타났으나, 알루미늄과 흑연 단전지의 최대 전력밀도는 각각 180 mW/cm², 152 mW/cm²로 알루미늄 분리판을 이용한 경우 흑연 분리판을 이용했을 때에 비해 약 15%의 성능이 증가한 것을 알 수 있다. 이러한 성능 차이가 발생한 원인은 알루미늄과 흑연의 서로 다른 물적 특성 때문이며, 낮은 전류밀도와 높은 전류밀도 영역에서 각기 다른 방식으로 성능에 영향을 받게 된다.

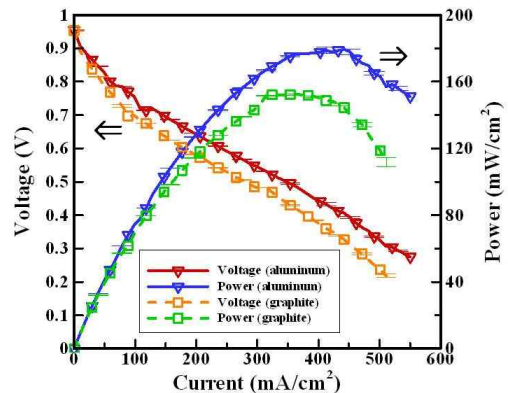


Fig. 6. I - V - P curves of aluminum and graphite single PEMFC

낮은 전류밀도 영역에서는 전기화학 반응이 전극에서의 활성화 손실(activation losses)에 의해 가장 큰 영향을 받게 되는데, 알루미늄과 흑연 분리판을 이용한 단전지에서는 동일한 막-전극 결합체를 사용하였으며, 작동 온도, 반응물질의 농도, 압력이 동일하게 적용되었으므로 낮은 전류밀도 영역에서는 성능에 큰 차이가 발생하지 않았다[4, 10].

전류밀도가 증가하면 저항 손실(ohmic losses)이나 농도 손실(concentration losses)에 의해 영향을 받게 되는데, 저항 손실의 경우 주로 전해질막에서 발생되나 분리판 자체의 저항도 큰 영향을 미치게 되므로, 알루미늄에 비해 상대적으로 전도도가 낮은 흑연의 경우 저항 손실이 더 커지게 된다. 또한, 농도 손실의 경우 흑연 분리판은 물질 자체와 분리판의 주변에서 반응 기체의 누출이 발생되면서, 흑연 분리판과 알루미늄 분리판의 단전지 상의 성능 차이는 전류밀도가 증가할수록 뚜렷해지게 되며 결과적으로 알루미늄 분리판을 사용한 단전지가 더 높은 전력밀도를 내었다.

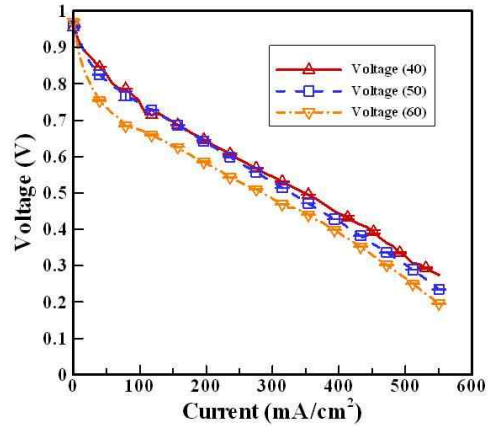
그럼으로, 알루미늄 분리판을 이용할 경우, 흑연 분리판에 비해 무게 대비 에너지 밀도가 향상된 것을 확인할 수 있었다.

3.2 작동 온도에 따른 성능

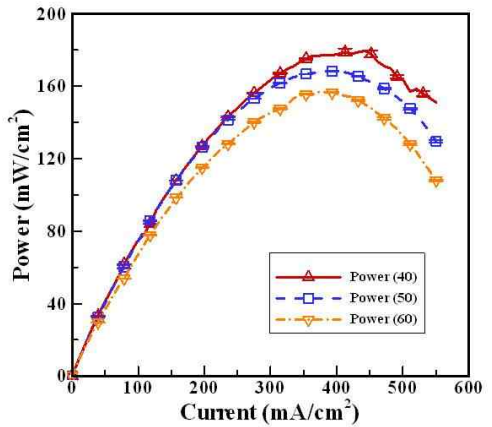
공기 채널형 타입의 알루미늄 단전지의 성능을 작동 온도에 따라 평가하였으며, 그 결과를 Fig. 7에 제시하였다.(40 / 50 / 60 °C) 실험에서는 작동 온도에 따라 성능의 큰 차이는 보이지 않았으며, 전체적으로 낮은 온도에서 더 높은 성능을 보였다.

초기 낮은 전류밀도 영역에서 60 °C의 단전지가 가장 큰 전압 강하를 보이고 있으며, 높은 전류밀도 영역으로 갈수록 그 차이가 줄어드는 것을 확인하였다. 그 이유는 작동 온도가 올라갈수록 반응은 활발해지나, 전지 내의 상대습도가 감소되면서 이온의 전도도가 저하되기 때문이다. 즉, 작동 온도가 올라갈수록 입구에서의 상대습도가 낮아지면서 전해질막의 수분 손실로 인해 이온 전달을 위한 충분한 통로가 확보되지 않았기 때문이다.

높은 전류밀도 영역으로 갈수록 작동 온도에 따른 전압 강하의 차이가 줄어들게 되는데, 이는 전지 내에서 반응 중에 발생하는 물에 의해 이온의 전도를 위한 충분한 통로가 확보되었기 때문이다. 오히려 높은 전류밀도 영역으로 갈수록 40 °C와 50 °C의 작동 온도에서는 반응 중에



(a) Voltage changes



(b) Power changes

Fig. 7. Performances as a function of Temp

발생되는 물에 의한 홍수현상(flooding)이 발생하여 반응면적에 균일하게 반응 기체를 공급하지 못하게 되는 것을 확인하였다.

3.3 공기 공급 방식에 따른 성능

공기 채널형과 호흡형 알루미늄 분리판을 이용한 단전지의 성능 측정 결과를 Fig. 8에 제시하였다. 공기 채널형 단전지의 개회로 전압은 0.95 V, 최대 전력밀도는 약 180 mW/cm²이었으며, 공기 호흡형 단전지는 0.94 V의 개회로 전압과 84 mW/cm²의 최대 전력밀도로, 공기 채널형 단전지의 성능이 약 2배 이상 향상된 것을 확인했다.

공기 호흡형 단전지의 경우 200 mA/cm²의 전류밀도에서 급격한 전압 강하를 확인하였다. 상온에서 상대습도 100%로 공급된 수소는 40 °C로 작동하는 전지의 입구로 들어서면서 급격히 건조하게 된다. 이온의 이동 통로가 충분히 확보될 수 있도록 전해질막이 수화되기 위해서는 공

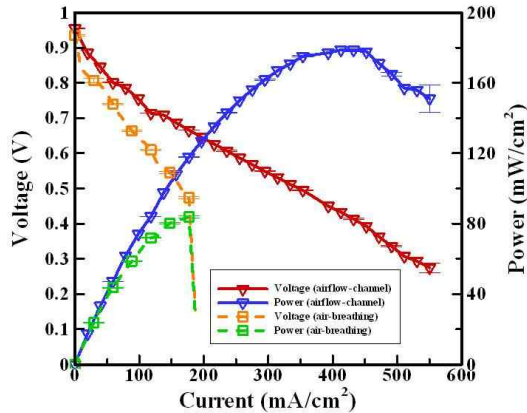


Fig. 8. Performance comparison according to air supply types

기극에서 화학반응에 의해 생성된 물이 역확산(back diffusion)을 통해 연료극으로 공급되어야만 한다. 그러나, 자연 대류 방식을 통해 공기를 공급하게 되면 공급되는 공기의 양에 의해 공기극에서는 홍수 현상보다는 오히려 급격한 건조 현상이 발생하면서 이온의 이동 통로가 충분히 확보되지 못하게 된다.

IV. 결 론

이 연구에서는 소형 UAV의 새로운 동력원으로 적용하고자 하는 고분자 전해질막 연료전지의 경량화를 통해 UAV의 항속시간과 유효 탑재량을 증가시키기 위해, 기존의 흑연 분리판을 대체할 수 있는 알루미늄 분리판에 관한 실험을 수행하였다. 제작된 알루미늄과 흑연 분리판을 이용한 단전지의 성능 평가를 통해 알루미늄 분리판이 흑연 분리판에 비해 약 15% 이상 성능이 향상된 것을 확인하였다. 연료전지의 성능은 분리판으로 사용된 물질의 특성에 많은 영향을 받으므로 이러한 성능 차이는 흑연에 비해 더 가볍고 높은 전기 전도성과 낮은 기체 투과율을 지니는 알루미늄 분리판의 특성에 기인한다고 볼 수 있다. 또한, 실제 알루미늄 분리판을 소형 정찰 UAV에 적용하기 위한 기초 연구로써 알루미늄 분리판을 이용한 단전지의 성능을 작동 온도와 공기 공급 방식에 따라 평가하였다.

작동온도에 따른 성능평가 결과, 온도가 높아질수록 반응 기체들의 상대습도가 감소하여 전해질 막의 이온 전도도가 떨어져 결과적으로 성능이 저하됨을 확인하였다. 일반적으로 PEM 연료전지는 온도가 높아질수록 성능은 좋아지나,

온도가 일정 온도 이상 올라가면 반응 기체들의 상대습도가 감소하여 성능 저하를 유발하기 때문에, 공기 공급 방식과 습도등과 같은 작동 환경에 따른 적절한 동작 온도를 결정할 필요가 있다.

공기 공급 방식에 따른 성능 평가 결과, 공기 호흡형 방식에서는 급격한 막 건조 현상이 발생하여 공기 채널형 방식에 비해 성능이 2배 이상 저하된 것을 확인하였다. 궁극적으로 소형 UAV에 적합한 공기 공급 방식은 따로 공기를 공급할 필요 없이 외부 공기를 사용하는 공기 호흡형으로 공기 채널형의 경우 공기를 따로 공급해 줄 공급원이 필요하므로 소형 UAV에 적용할 경우 UAV 적재하중의 감소를 유발할 수 있다. 그러나 공기 호흡형은 보는 결과에서와 같이 상대습도와 온도의 조절이 용이하지 않으므로 성능이 공기 채널형에 비해 저하되었다.

향후, 실제 소형 정찰 UAV의 동력원으로 적용하기 위해 알루미늄 분리판을 이용한 연료전지 스택의 성능을 측정하고, UAV 운용환경을 활용할 수 있는 시스템적인 보완이 필요하다고 볼 수 있다.

후 기

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 전합니다(No. R0A-2007-000-20065-0).

참고문헌

- 1) 김태규, 심현철, 권세진, "무인기 동력원을 위한 연료전지 시스템의 설계 및 성능 시험," '07 군사과학기술학회 종합학술대회, 2007, p. 282.
- 2) NEWS article, "Hydrogen fuel cells powered Georgia Tech UAV", Fuel Cell Bulletin, Vol. 2006, No. 10, pp. 9-10.
- 3) NEWS article, "Horizon's hydrogen powered UAV breaks distance record", Fuel Cell Bulletin, Vol. 2008, No. 1, pp. 4-5.
- 4) James Larminie, Andrew Dicks, "Fuel Cell System Explained", John Wiley & Sons. Ltd, Chichester, 2003.
- 5) <http://www.ballard.com/> accessed on February 23, 2010.

6) A. Hermann, T. Chaudhuri, P. Spagnol, "Bipolar plates for PEM fuel cells : A review", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 30, 2005, pp. 1297-1302.

7) A. S. Woodman, E. B. Anderson, K. D. Jayne, M. C. Kimble, "Development of Corrosion - Resistant Coating for Fuel Cell Bipolar Plates", *AESF SUR/FIN '99 Proceedings*, 1999.

8) Viral Mehta, Joyce Smith Cooper, "Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing", *Journal of Power Sources*, Vol. 114, 2003, pp. 32~53.

9) 조영일, 남기석, "고분자 연료전지 공학 :

이론과 실제", (주)북스힐, 2007, pp. 75~111.

10) Zhigang Qi, Arthur Kaufman, "PEM fuel cell stacks operated under dry-reactant conditions", *Journal of Power Sources*, Vol. 1093, 2002, pp. 469~476.

11) A. Hermann, T. Chaudhuri, P. Spagnol, 2005, "Bipolar plates for PEM fuel cells : A review", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 30, pp. 1297~1302.

12) T. Mennola, M. Mikkola, M. Noponen, T. Hottinen, P. Lund, 2002, "Measurement of ohmic voltage losses in individual cells of a PEMFC stack", *Journal of Power Sources*, Vol. 112, pp. 261~272.