

금속분리판을 이용한 무인기항공기(UAV)용 경량화 DMFC 스택 개발

이수원^{1,2} · 김도환³ · 노정호¹ · 조영래¹ · 김도연¹ · 주현철^{3,†}

¹LIG 넥스원 주식회사, ²인하대학교 대학원 에너지공학전공, ³인하대학교 기계공학과

Development of Lightweight Direct Methanol Fuel Cell (DMFC) Stack Using Metallic Bipolar Plates for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)

SUWON LEE^{1,2}, DOHWAN KIM³, JUNGHO RO¹, YOUNGRAE CHO¹, DOYOUN KIM¹, HYUNCHUL JU^{3,†}

¹LIGNex1 Co., Ltd., 333 Pangyo-ro, Bundang-gu, Seongnam 13488, Korea

²Department of Energy Engineering, Inha University, 100 Inha-ro, Nam-gu, Incheon 22212, Korea

³Department of Mechanical Engineering, Inha University, 100 Inha-ro, Nam-gu, Incheon 22212, Korea

†Corresponding author :
hcju@inha.ac.kr

Received 27 September, 2017

Revised 25 October, 2017

Accepted 30 October, 2017

Abstract >> A 900 W scale direct methanol fuel cell (DMFC) stack is designed and fabricated for unmanned aerial vehicle (UAV) applications. To meet the volume and weight requirements, metallic bipolar plates are applied to the DMFC stack for the first time wherein POS470FC was chosen as bipolar plate material. To ensure good robustness of the metallic bipolar plate based DMFC stack, finite element method based simulations are conducted using a commercial ANSYS Fluent software. The stress buildup and deformation characteristics on bipolar plates and end plates are analyzed in details. The present DMFC stack exhibits the performance of 1,130 W at 32 V and 35.3 A, clearly demonstrating that it could successfully operate for UAVs requiring around 1,000 W of power.

Key words : Direct methanol fuel cells(직접 메탄올 연료전지), Unmanned aerial vehicle(무인항공기), Lightweight stack(경량화 스택), Metal bipolar plate(금속분리판), Stress analysis(응력해석)

1. 서론

직접메탄올 연료전지(direct methanol fuel cell, DMFC)는 수소 대신 메탄올을 직접 연료극에 공급하여 작동시키는 연료전지로서, 연료공급체계가 간단하여 시스템의 소형화 및 경량화가 가능한 장점이 있다. 또한 DMFC는 이러한 장점으로 인하여 고압가스 형태의 수소의 사용, 공급, 저장

등의 인프라 구축이 어려운 독립형 전원분야에 활용도가 매우 뛰어난 연료전지로 주목받고 있다. 현재 독립형 전원으로 이용되고 있는 배터리는 오랜 충전시간에도 불구하고 사용시간이 제한적이고, 장시간 사용에 대비할 경우 중량에 대한 부담이 매우 큰 단점이 있다. 따라서 독립형 전원시스템의 시장성 규모 및 접근성의 향상을 위해서는 제품의 사용시간 및 거리의 대폭 연장, 이동성

을 고려한 경량화 그리고 친환경화가 이루어져야 한다. 연료사용을 위한 인프라와 용이성, 사용 출력 범위 등을 고려할 때, 상온에서 액체 상태의 연료를 이용하는 DMFC가 적합하며, DMFC는 액체인 메탄올을 연료로 직접 사용하기 때문에 기체 상태의 수소를 연료로 사용하는 연료전지에 비하여 주변 장치(base of plants, BOP)가 줄어들어 시스템이 간단하여 경량화와 소형화가 가능하고 연료 교체가 편리하다는 장점이 있다. 특히 DMFC는 무인항공기(unmanned aerial vehicle, UAV)와 같이 지속적인 배터리 충전이 필요하거나 전력망 접근이 용이하지 않고 장비의 야외 이용시간이 긴 제품의 전원팩으로서 적용이 용이하다. 2003년 미국의 AeroVironment사에서 첫 번째 연료전지 항공기를 제작하여 시험에 성공한 이후 현재까지 여러 종류의 소형 무인기가 개발되었다. 2008년에는 미국 AeroVironment사가 Puma 연료전지 무인항공기를 이용하여 9시간 이상의 장기 체공 비행에 성공하였다¹⁾. Fig. 1에는 첫 번째 연료전지 무인항공기 이래로 개발된 주요 무인항공기를 크기별로 비교해서 나타내었다²⁾.

무인항공기의 개발을 시작으로 항공기용 연료전지의 기술 진보 및 전력 밀도 향상이 지속적으로 연구되었다. 특히 전력밀도의 향상은 현재의 가스터빈 항공기 엔진을 대체할 수 있는 대형 항공기의 연료전지 개발을 가능하게 한다. 이는 더 낮은 소음과 배출가스 감소 목표를 달성할 수 있는 대형 항공기 동력원의 개발을 촉진시킨다³⁾.

한국에서는 지난 2007년 카이스트에서 연료전지를 적용한 소형 UAV를 처음 개발한 이래로 연

료전지 UAV에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 해당 고분자전해질 연료전지(PEMFC) UAV는 50 W급의 PEMFC를 탑재하여 시험비행에 성공하였다⁴⁾. 이후 해당 UAV의 출력을 100 W로 향상시킨 무인항공기를 개발하여 육군 교육사와의 2시간 시험비행에 성공하였다⁵⁾. 2013년에는 인하대학교에서 세계 최초로 DMFC를 동력원을 하는 200 W급 UAV를 자체 제작하여 30분간 시험비행에 성공하였다⁶⁾. 2015년에는 재료연구소에서 PEMFC를 탑재한 600 W급 UAV를 제작하여 고도 120 m 상공에서의 80분간 시험비행에 성공하였다⁷⁾.

위와 같이 연료전지를 UAV에 적용하기 위해서는 스택의 내구성 저하를 최소화시킨 경량화 연료전지 스택과 스택 분리판의 설계 및 제작이 필수적으로 이루어져야 한다. 본 논문에서는 세계 최초로 DMFC에 금속분리판을 적용하여 스택 경량화에 성공한 사례를 소개하고자 한다. 메탄올 전달을 용이하게 하고, 금속분리판 기반 스택의 기밀성을 유지하기 위해 ANSYS Fluent 프로그램을 이용한 FEM 시뮬레이션도 병행하여 금속분리판의 소재 및 형상을 최적화하였다. 메탄올은 기존의 수소연료에 비해 연료의 운송 및 저장에 용이하기 때문에 본 연구 결과물은 군용 UAV 개발에 적극적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 실험

2.1 핵사로터 UAV 성능 시험

본 연구에서는 DMFC 파워팩을 핵사로터 무인기(UAV)에 적용하기 위한 일련의 성능 실험을 실시하였다. 핵사로터의 요구 비행 성능은 이차전지로 성능 테스트를 실시하였으며, Table 1에 이차전지로 측정된 핵사로터의 요구 비행 성능을 나타내었다. Fig. 2에는 실제 요구 비행 성능을 측정하기 위해 제작한 UAV 프로토타입 형상을 나타내었다. 핵사로터는 접이식 구조로 설계하여 인력 1명이 이동하는데 무리가 없도록 설계하였다. 배터리 장

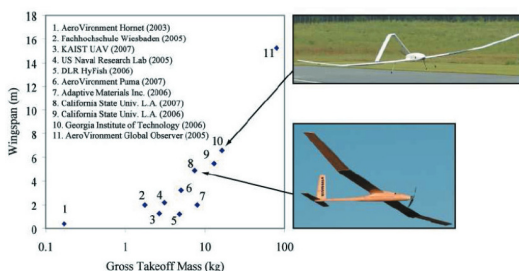
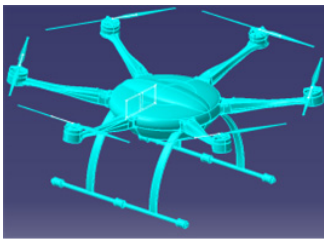


Fig. 1. Comparison of fuel cell unmanned aircraft size

Table 1. Required flight performance conditions of hexarotor UAV

| Item | Requirements |
|---------------------|---|
| Wind condition | ~ 8 m/s |
| Vertical velocity | ≤ 21.6 km/h |
| Horizontal velocity | ≤ 35 km/h |
| Operating altitude | ≤ 1 km |
| Operating distance | ≤ 1 km |
| Operating time | ≤ 25 minutes (Except fuel cell stack & bottom frame) |
| Airframe weight | ≤ 7kg (Except secondary battery) |
| Acceptable payload | ≤ 9 kg (Could be varied according to the Payload) |
| Airframe dimension | 1.6×1.6×h 0.55 m |
| ETC | Application of video transceiver |



(a)



(b)

(c)

Fig. 2. (a) concept figure of DMFC hexarotor (b, c) photo of 900-W hexarotor prototype model

착부는 탈부착이 용이한 구조로 설계되었으며, 헬사로터의 재질은 Carbon 소재(CFRP)를 활용하여 경량화 설계하였다. 제어기는 DJI사, GPS-Compass 안테나 모듈 및 IMU 모듈은 전용 홀더가 장착되어 위치가 고정 및 조절이 가능하도록 설계하였다. 헬사로터의 전기적인 성능 요구 조건은 이차전지 배터리 전원과 12 VDC (3 A 이하) 그리고 5VDC (3 A)로 구성하였다.

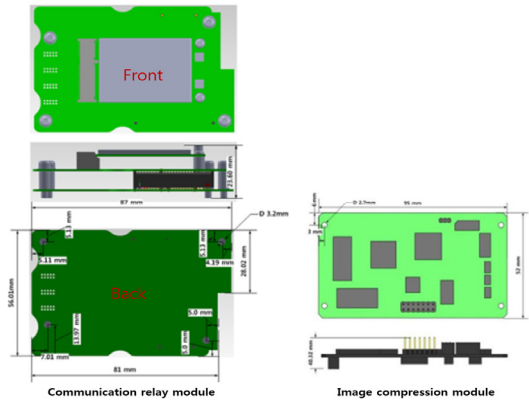


Fig. 3. Communication relay and image compression module of lightweight DMFC stack

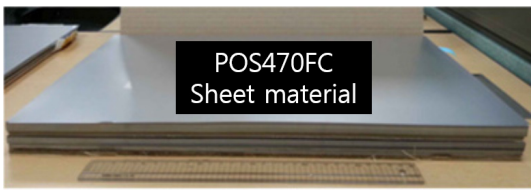
운용 환경을 고려하여 DMFC용 헬사로터와 조작용 장치/기록장치 간의 무선통신 방식(DJI사 Datalink)을 선정하였으며, Fig. 3은 통신중계 모듈과 영상압축 모듈 형상을 나타낸 것이다. 헬사로터 무인기를 설계하여 이차전지만 장착하여 테스트 한 결과 38분 이상을 운행할 수 있는 것으로 확인하였다.

하지만 실제로 단면형 금속 분리판을 적용하여 무게 4.5 kg의 연료전지 스택과 이차전지 그리고 기타 BOP를 장착하여 운행시험을 수행한 결과 8분간 운영할 수 있었다. 이는 연료전지 시스템의 무게가 10 kg 이상으로 요구사항인 7 kg보다 무거워서 결과적으로 순행시간을 만족할 수 없었다.

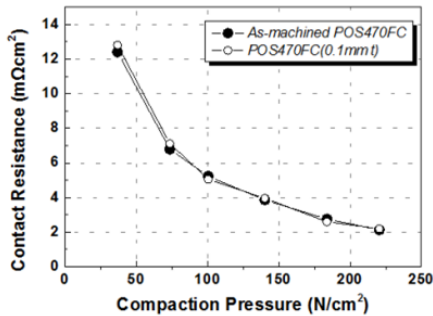
2.2 900 W급 경량화 DMFC 단전지 스택 설계 및 제작

2.2.1 무인기용 경량화 DMFC 스택용 금속분리판 및 가스켓 설계 및 제작

본 연구에서는 경량화 DMFC 스택 설계 및 제작을 위해 우선적으로 경량화 스택용 금속분리판을 제조하였다. Fig. 4와 같이 경량화 스택용 금속분리판을 제조하기 위하여 POS470FC 강재를 재료로 선정하고, 해당 강재에 대한 0.1 mm, 0.075 mm 소재 두께의 강재를 제조 완료하였다. 또한 경량화



(a)

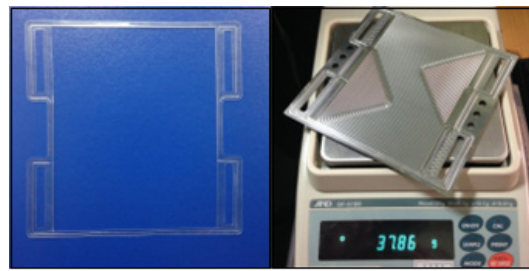


(b)

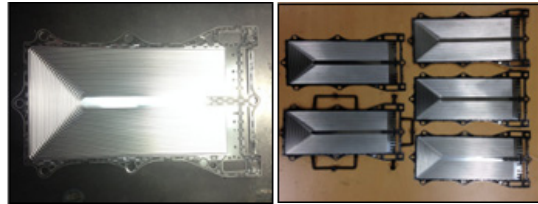
Fig. 4. A material POS470FC applied to lightweight metal bipolar plate (a) a material sheet of POS470FC, (b) contact resistance diagram of POS470FC

금속분리판을 제조하기 위하여 사전 모델금형 평가를 토대로 설계 기본 data로 활용하였다. Anode 분리판은 0.075 mm, Cathode 분리판은 0.1 mm 두께의 소재를 사용하여, 채널깊이 및 채널폭, Die R 등의 변수설계를 실시하였다. 금속분리판용 POS-470 FC 모재와 성형분리판의 접촉저항을 평가한 결과, 100 N/cm²의 접촉압력에서 5.2 mΩ/cm²의 양호한 접촉저항을 얻을 수 있었다. 따라서 원활한 분리판 성형이 가능한 POS470FC 모재를 경량화 DMFC 스택 금속분리판의 재질로 선정하였다. Fig. 5와 같이 해당 소재를 바탕으로 경량화 DMFC 금속분리판 및 금속분리판 가스켓을 제작하였다. 금속분리판의 경우 제작 결과 전체적으로 스프링백 및 성형치수 정밀도가 기준에 만족하는 결과를 나타내었다.

경량화 DMFC 스택 분리판용 가스켓의 경우 초기 제작 시에는 점착방식으로 제작하였으며 자체 사출 성형 금형 개발을 개발하여 제작하였다. 분리판 양면 성형용 인젝션 금형 제작하여 금속 분리판을 양면에 동시에 가스켓 사출 성형을 할 수



(a)



(b)

Fig. 5. A photo of lightweight bipolar plate gasket (a) adhesive type gasket, (b) Gasket molded on both sides of mold and separator

있게 설계하였다. 이후의 제작에서는 스택의 경량화를 위해 1장의 금속분리판 양쪽으로 가스켓을 성형하는 기술을 개발하여 적용하였다.

2.2.2 경량화용 금속분리판 유동 해석

경량화 DMFC 금속분리판의 채널 내부에서의 압력강하 분포를 도출하기 위한 금속분리판 유동 해석을 수행하였다. 금속분리판의 압력강하는 그 크기가 과도하게 클 경우 분리판 채널에서의 균일한 연료 및 공기의 흐름을 억제하기 때문에 cell 간의 균일한 전류밀도분포를 출력할 수 없다. Fig. 6에 본 연구에서 수행한 금속분리판 유동 해석 결과를 정리하였다.

시뮬레이션 결과를 분석하면 깊이가 0.45 mm 인 형상보다 깊이가 0.5 mm인 형상의 압력강하가 약 500 Pa 작게 나타남을 알 수 있다. 이는 채널 깊이가 깊을수록 입구면적이 크고 동일한 채널 유량으로 공기가 공급되므로 단위 면적당 입구속도가 작아지기 때문에 나타나는 결과로 판단되었다. 채널 수가 25개인 형상이 채널 수가 19개인 형상에 비해 압력강하가 약 950 Pa 낮게 나타나며, 두 형상의 입구 면적과 채널 공급 유량이 동일하

여 채널 수가 증가할수록 단위 채널당 입구 속도가 낮고 채널 길이 또한 짧기 때문에 압력강하가 작게 나타나는 것으로 판단되었다.

분리판 유동해석 결과를 요약하면 채널 내에서의 압력강하는 채널 입구에서의 속도, 채널 수가 낮을수록 감소하는 경향이 나타나고 채널 길이가 길수록 증가하는 경향이 나타나며, 채널 입구면적에 의한 채널 내에서의 압력강하 증가 영향이 채널 길이에 의한 채널 내에서의 압력강하 증가 영향보다 크게 나타났다. 더불어 유동해석을 수행한 형상 중 가장 낮은 압력강하 값인 1265.75 Pa 이 나타나는 25채널이 금속 분리판 형상에 적용하기에

용이할 것으로 판단된다.

2.2.3 경량화용 스택 매니폴드 유동 해석

경량화 DMFC 스택의 매니폴드가 금속분리판 채널의 압력강하 및 유량분배에 미치는 영향을 분석하기 위해 금속분리판 스택 매니폴드 유동 해석을 수행하였다. 스택 매니폴드 유동해석은 최적화된 금속 분리판 형상을 기반으로 채널형상을 단순화하여 수행하였다. 매니폴드 유동 해석에 적용한 물성치와 작동조건은 Table 2에 나타내었고, 시뮬레이션에 적용한 연료극과 공기극의 매니폴드 형상 및 매니폴드의 형상에 따른 압력강하와 매니폴드 내부의 속도분포 및 유량분배 결과는 Fig. 7에 정리하였다.

연료극과 공기극의 매니폴드 양 끝에 위치한 A 채널과 Y채널의 유량분배가 용이하지 못한 현상을 발견하여 확인 분석 결과 이는 매니폴드 양 끝에서 separation이 발생하기 때문임을 확인하였다. 유량편차 분석 결과를 통해서도 연료극의 각 채널 유량편차는 0.5% 이내, 공기극의 각 채널 유량편차는 3% 이내인 것을 알 수 있었다.

2.2.4 경량화용 금속분리판 적용 스택 응력해석

DMFC 경량화 스택의 내구성의 평가 및 향상을 위해 금속분리판의 체결압과 응력집중현상의 분석을 위한 금속 분리판 응력해석을 수행하였다. 900 W UAV용 스택에 적용되는 실제 분리판의 치

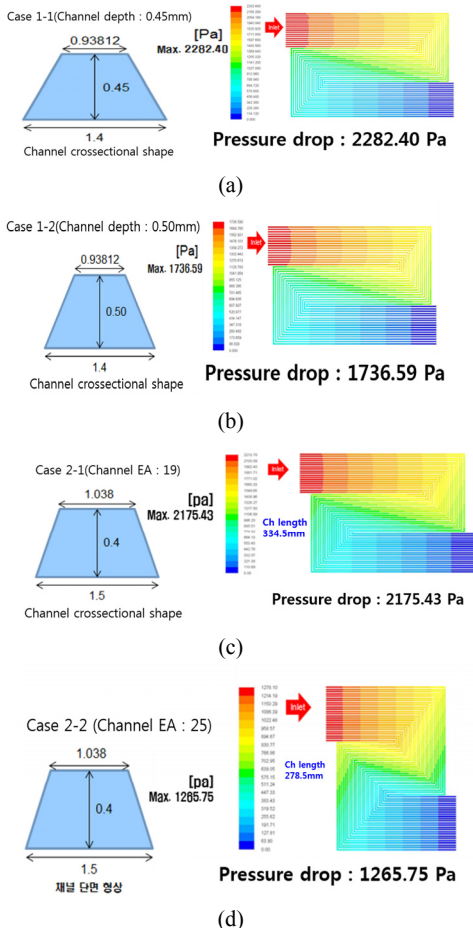


Fig. 6. Simulation results of bipolar plate channel pressure drop (a, b) Pressure drop distribution according to channel thickness (c, d) Pressure drop distribution according to the number of channels

Table 2. Manifold flow analysis properties and operating conditions

| Property | Anode (MeOH) | Cathode (air) |
|------------------------------|------------------|-----------------|
| Density (kg/m ³) | 998.2 | 1.225 |
| Viscosity (kg/m·s) | 1.003e-3 | 1.972e-5 |
| Diameter (m) | 0.0254 | 0.0254 |
| Reynolds number | 1,049.06 | 6,615.88 |
| Temperature (°C) | 65 | 65 |
| MeOH(0.6M) flow rate (m/s) | 0.0415 (80 cell) | |
| Air flow rate (m/s) | | 4.193 (80 cell) |

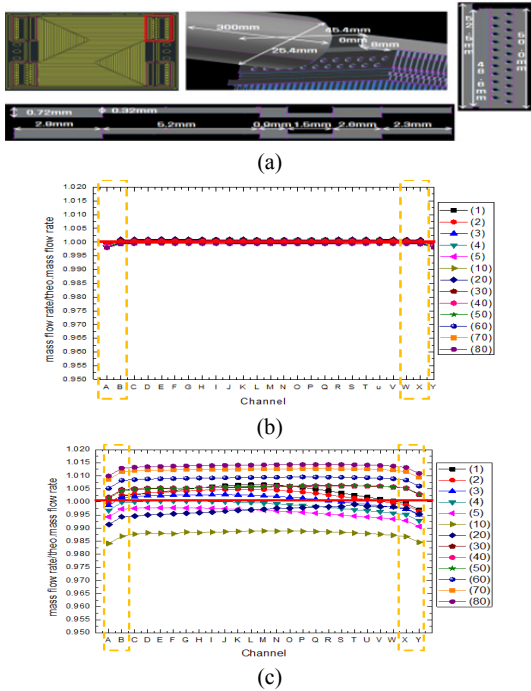


Fig. 7. Manifold shape of DMFC stack anode/cathode and flow analysis simulation results (a) manifold shape of anode/cathode (b) flow distribution of anode expander (c) flow distribution of cathode expander

수를 측정하여 분리판의 형상을 구현하였다. 구성요소들 간의 접촉조건은 bonded로 가정하였고 체결압은 1, 2, 3 MPa로 가정하여 체결압에 따른 각 구성요소에 나타나는 응력분포를 알아보았다. 응력해석을 위한 제원은 Table 3과 같이 구성하였으며, Fig. 8에는 체결압에 따른 구성요소들의 등가응력을 나타내었다.

금속분리판은 다른 구성요소들에 비해 영률값이 크고 체결압에 직접적으로 영향을 받기 때문에 등가응력 값이 크게 나타났다. 막-전극접합체의 경우에는 랜드 하단영역과 접한 부분에서 높은 등가응력 값이 나타나며, 특히, 랜드와 채널의 경계부분에서 응력집중현상이 발생하는 것을 볼 수 있다. 또한 등가응력은 체결압이 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 한편, 구성요소들의 두께가 두꺼울수록 등가응력 값이 크게 나타나는 경향을 확인할 수 있으며, 이는 후의 법칙(Hooke's law)이 반영된 결과임을 알 수

있다. 또한 체결압이 증가할수록 확산층의 변형이 증가하여 확산층이 채널로 침투하는 현상이 나타나는 것을 볼 수 있으며, 이는 연료전지 작동 시 연료공급에 악영향을 미칠 것으로 판단된다.

추가적으로, 금속분리판이 적용된 DMFC 스택을 지지하는 스택 엔드판에 대한 체결압에 따른 응력해석을 수행하였다. 각 구성요소들 간의 접촉 조건은 bonded로 가정하였으며, 막-전극접합체의 물성치는 확산층, 촉매층, 전해질막의 평균값을

Table 3. Material Properties of 900W UAV Fuel Cell Components

| Property | Reference | Value |
|---|---|---------|
| Bipolar plate (BP) Young's modulus (MPa) | POSCO | 220,000 |
| Bipolar plate (BP) Poisson's ratio | POSCO | 0.3 |
| Backing layer (BL) Young's modulus (MPa) | Dong'an Liu, et. al, 2009, IJHE | 6.1 |
| Backing layer (BL) Poisson's ratio | Dong'an Liu, et. al, 2009, IJHE | 0.1 |
| Membrane (MEM) Young's modulus (MPa) | Laam Angela Tse, 2006, Degree of Doctor of Philosophy Georgia Institute of Technology | |

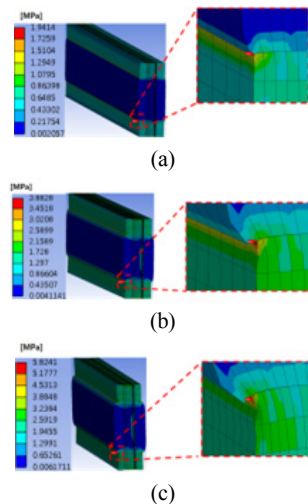


Fig. 8. DMFC stack stress distribution according to clamping pressure (equivalent stress) (a) 1 MPa clamping pressure (b) 2 MPa clamping pressure (c) 3 MPa clamping pressure

이용하였다. 그리고 체결압은 1, 2, 3 MPa로 가정하여 체결 후, 체결압이 엔드판에 미치는 영향을 알아보았다.

추가적으로 시뮬레이션 결과를 살펴보면 엔드판 내에서 나타나는 등가응력분포와 수직(X, Y, Z) 응력분포를 나타내며, 등가응력분포에서 최대 등가응력은 볼트가 5개 위치한 엔드판 끝부분에서 약 2.2 MPa의 값이 나타나고, 엔드판과 분리판이 접한 부분에서는 균일한 응력분포를 보이며, 약 0.215 MPa의 값이 나타났다. 이론적으로 계산한 등가응력 값과 시뮬레이션 값을 비교해보면 오차는 약 0.08%로 매우 작은 값을 나타냈다. 한편, Y-방향 수직응력이 나머지 수직응력이 비해 지배적임을 알 수 있었다.

체결압(1MPa)이 가해졌을 때, 엔드판 내에서 나타나는 등가변형률분포와 신장(X, Y, Z) 변형률 분포를 나타내며, 변형률분포는 응력분포와 동일한 경향을 보이며, 이론값과 시뮬레이션 값의 오차도 0.08%로 동일하게 나타났다. 한편, 신장변형률분포의 경우는 볼트가 위치한 부분의 엔드판 영역이 분리판이 위치한 부분의 엔드판 영역보다 크게 나타나는 경향을 보인다.

아래 그림은 체결압이 2, 3 MPa이 가해졌을 때, 엔드판 내에서 나타나는 등가응력, 등가변형률, 변형분포를 나타냈다. 등가응력 및 등가변형률 분포는 체결압이 1 MPa가 가해졌을 때의 경향과 일치하며, 체결압이 증가할수록 응력 및 변형률 값도 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한, 변형은 볼트가 위치한 영역에서 가장 크게 나타나며, 분리판과 접한 엔드판 영역에서 가장 낮게 나타나는 것을 알 수 있다.

2.2.5 실제 토크를 고려한 스택 응력 해석

금속 분리판이 적용된 DMFC 스택 응력해석 결과는 임의의 체결압을 가정하여 수행하였다. 따라서 실제 체결토크를 고려한 DMFC 3-D 모델을 개발하고 이를 실험을 통해 검증함으로써 모델의 신뢰성을 높이고자 하였다. 체결압 측정 실험은 단위

cell 내 감압지를 분리판과 막 전극접합체 사이에 삽입하여 측정하였다. 감압지는 LLW (0.6-2.5 MPa) 타입, 체결토크는 35 kgf·cm로 하여 체결을 수행하였으며 실험 결과를 Fig. 9에 정리하였다. 단위 cell은 가스켓, 막-전극접합체가 없는 경우이고 단위 cell 내 활성 면적에서 나타나는 체결압은 약 0.6-1.5 MPa로 측정된다. 단위 cell은 가스켓, 막-전극접합체가 있는 경우로 체결토크로 체결하였을 때, 단위 cell 내 활성 면적에서 나타나는 체결압은 약 0.6-1.0 MPa의 값으로 도출된다.

엔드판, 분리판, 집전체로 단위 cell을 구성한 시뮬레이션 값과 실험값을 비교해보면, 시뮬레이션 값(약 0.3-1.2 MPa)이 실험 값(약 0.6-1.5 MPa)에 비해 좀 더 낮게 나타나는 경향을 보이지만 대체로 비슷한 체결압 범위가 나타났다.

해당 단위 cell에 가스켓과 막-전극접합체를 추가한 시뮬레이션 결과 또한 살펴보면 앞선 결과와 동일하게 상단영역이 하단영역에 비해 높은 체결압이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 하지만 추가된 가스켓의 영향으로 좀 더 균일한 체결압 분포를 나타냈다. 시뮬레이션 값과 실험값을 비교해보면, 시뮬레이션 값(약 0.3-1.1 MPa)이 실험 값

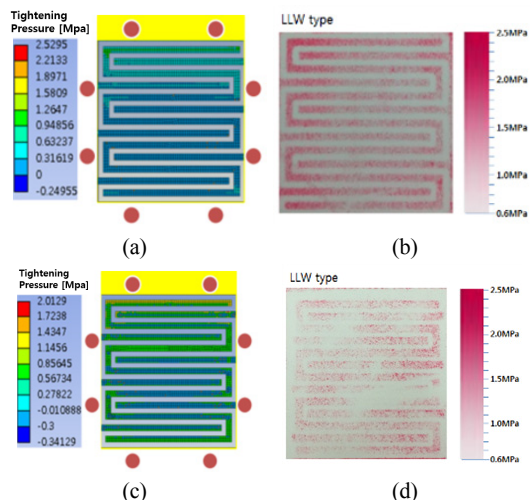


Fig. 9. Simulation and Measuring result of tightening pressure considering actual torque (a, b) components : end plate, bipolar plate, current collector (c, d) end plate, bipolar plate, current collector, gasket, MEA

(약 0.6-1.0 MPa)과 비슷한 범위의 체결압 값을 갖는 것을 알 수 있다.

2.2.6 900 W급 UAV DMFC 시스템용 스택 제작

응력해석 및 최적 형상 제시 결과를 적용하여 실제 900 W급 금속 분리판 및 금속 분리판 적용 DMFC 스택을 제작하였다. 900 W급 DMFC 스택은 32 A의 일정 부하에서 안정적인 전압을 유지할 수 있도록 막-전극접합체의 전극은 165 cm² (11×15 cm)의 면적으로 총 80 cell을 적층하여 제작하였다. 그 외에 MEA, 분리판, 집전판, 체결판 등은 단전지와 동일한 것을 사용하였다.

금속 분리판 스택에 사용된 금속 분리판의 두께는 0.1 mm이다. 스택의 전체 크기는 167×188×137 mm (4.3L)이고, 무게는 5 kg이다. 900 W급 금속 분리판 80 cell 스택의 전류-전압 특성 곡선(I-V 성능 곡선)을 도출한 결과, 금속 분리판 스택의 정격 출력은 1,130 W (32 V, 35.3 A)로 스택 설계에서 예측한 1 kW 이상의 정격 출력을 나타내었다. 추가적으로 카본 분리판을 대신하여 극박 분리판을 금속스택에 적용한 결과, 카본 분리판을 탑재한 국외기업에서 개발된 DMFC 전원과 비교했을 때 스택의 무게(40%) 및 부피(50%) 감량의 성과를 달성하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 900 W급 UAV DMFC 시스템용 스택 최적 형상 제시

앞서 실험을 통해 검증된 응력해석 모델을 이용하여 실제 체결토크 50 kgf·in를 고려한 스택 응력해석 시뮬레이션을 수행하여 분리판 최적 조건을 제시하였다. 실제 체결토크를 고려한 응력해석 모델은 금속 분리판 설계 도면을 바탕으로 형상을 제작하였다. 금속 분리판의 경우 채널 및 엠보싱, 가스켓 홈을 고려하게 되면 격자수가 증가하여 계산시간이 비효율적으로 늘어나기 때문에 계

산 효율을 증가시키기 위하여 오차가 최소화된 범위 내에서 형상을 단순화한 결과를 그림에 나타내었다. 해당 단순화 형상에 스택의 물성치 및 경계조건을 앞서 수행한 실험과 동일하게 설정하여 응력해석을 수행한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10(b)에 나타난 엔드판에 대한 해석 결과로 변형량분포를 보면, 볼트가 위치한 영역에서 엔드판 내부영역으로 변형이 발생한다. 특히, 최대의 변형은 약 0.056 mm로 중앙의 가장자리에 위치한 볼트영역에 나타나며, 등가응력 및 등가변형률 분포는 볼트영역을 제외한 영역에서 고르게 나타났다. 또한, 등가응력은 약 4.74 MPa, 등가변형률은 약 9.455e⁻⁶의 크기를 나타내었다. Fig. 10(c)와 10(d)는 DMFC 스택(80 cell)의 1번째 cell과 40번째 cell 금속 분리판의 변형량, 등가응력, 등가변형률 분포를 각각 나타내며 금속 분리판에서 나타나는 변형량은 분리판 중앙의 가장자리에 위치한 볼트로부터의 영향이 크게 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 특히, 1번째 cell의 경우 볼트의 안쪽에서 약 0.058 mm의 변형이 발생하는 반면에 40번째 cell의 경우 볼트의 바깥쪽에서 약 0.102 mm의 변형이 발생하는 것을 볼 수 있다. 한편, 등가응력 및 등가변형률은 활성영역에서 고르게 나타나는 경향을 보인다.

결과적으로, 체결토크에 의해 나타나는 금속 분리판의 등가응력은 볼트영역을 제외한 부분에서 고르게 나타나지만, 가장자리에 위치한 분리판이 중앙에 위치한 분리판보다 약 7배 정도 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 중앙에 위치한 금속 분리판의 경우 분리판 중앙의 가장자리에 위치한 볼트영역에서 가스켓 없이 분리판과 분리판 사이의 간격이 존재하기 때문에 변형이 크게 발생한다. 따라서 스택 체결시 각 분리판 간에 단락이 발생하지 않도록 분리판 중앙의 가장자리에 위치한 볼트영역의 체결압을 최적화하여야 하며, 분리판 제작시 엔드판과 인접한 위치의 분리판이 더 큰 강도를 요구하는 것 또한 함께 고려되어야 한다. 따라서 해당 분석 결과를 통해 분리판 및 스택 제작시

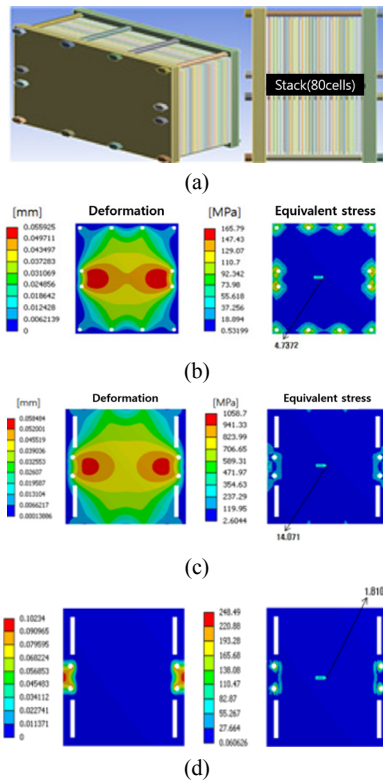


Fig. 10. Modeling and simulation of stress analysis model considering clamping torque (a) stress analysis model shape considering actual tightening torque (b) deformation / equivalent stress of end plate considering actual clamping torque (c) stress distribution of 1st cell (d) stress distribution of 40th cell

엔드판 인접 가장자리 금속분리판의 강도와 중앙의 분리판의 변형을 최소화할 수 있는 설계안 도출이 필요할 것으로 판단된다.

추가적으로 본 연구에서는 스택 및 분리판의 응력해석 결과를 적용하여 Fig. 11과 같이 실제 900 W급 금속 분리판 및 금속 분리판 적용 DMFC 스택을 제작하였다. 먼저 900 W급 금속 분리판 80 cell 스택을 제작하였고, 제작한 스택의 성능평가를 위해 I-V 성능 곡선을 나타내었다. UAV 탑재를 위한 경량화 금속 분리판 스택의 정격 출력은 1,130 W (32 V, 35.3 A)로 스택 설계에서 예측한 1 kW 이상의 정격 출력을 나타내었다.

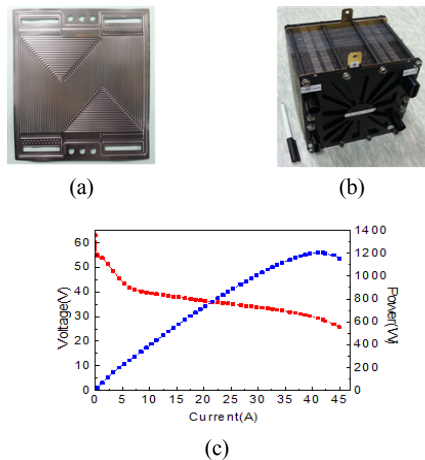


Fig. 11. Metal bipolar plate and 900 W 80 cell DMFC stack (a, b) Photo of Metal bipolar plate and 900 W 80 cell DMFC stack (c) I-V curves of a 900 W 80 cell stack

4. 결론

본 연구에서는 UAV에 탑재가 가능한 경량화 DMFC 연료전지 스택 및 경량화 DMFC 스택을 위한 금속분리판을 설계 및 제작하고 최적 형상을 제시하였다. 설계한 최적 DMFC 스택 형상을 적용한 결과 스택의 무게(40%) 및 부피(50%) 감량의 성과를 달성하였다.

설계한 최적 스택 형상의 내구성을 평가하기 위해 실제 토크를 고려하여 응력해석 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과 가장자리에 위치한 분리판이 중앙에 위치한 분리판보다 약 7배 더 큰 등가응력을 받음을 알 수 있었다. 이를 통해 경량화 스택 설계 시에는 더욱 물성치가 큰 물성을 가진 분리판을 적용해야 한다는 결론을 도출하였다. 엔드 분리판의 기계적 물성은 중앙에 위치한 분리판보다 높게 제작해야한다는 결론 또한 도출하였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 산하 대경지역사업 평가원의 대경광역시경제권 선도산업육성사업(과제 번호 R0001192)의 지원으로 수행되었다.

References

1. G. Kim, "Technical Trends for Fuel Cell Aircraft", Current industrial and technological trends in aerospace, Vol. 12, 2004, pp. 95-105.
2. T. H. Bradley, "Modeling, Design and Energy Management of Fuel Cell Systems for Aircraft", Ph. D. Thesis, Georgia Institute of Technology, 2008.
3. A. K. Sehra and W. Whitlow Jr, "Propulsion and power for 21st century aviation", Progress in Aerospace Sciences, 2004, pp. 199-235.
4. T. Kim, H. Shim, and Sejin Kwon, "Design and Performance Tests of a Fuel Cell System for a Power Source of UAV", Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, 2007, pp. 282.
5. T. Kim, H. Shim, and Sejin Kwon, "Development of Fuel Cell Power System for Unmanned Aerial Vehicle", Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, 2007, pp. 87-90
6. K. Kim, S. Park, S. O. Cho, K. Choi, and H. Ju, "Development of Lightweight 200-W Direct Methanol Fuel Cell System for Unmanned Aerial Vehicle Applications and Flight Demonstration", Fuel cells, Vol. 14, No. 5, 2014, pp. 694-700.
7. N. Yang and Y. Kim "Development and Demonstration of 150W Fuel Cell Propulsion System for Unmanned Aerial Vehicle(UAV)", The Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 23, No. 4, 2012, pp. 300-309.