

무인항공기용 경량화 직접메탄올연료전지 스택 개발을 위한 복합소재 분리판 제작 및 성능 평가 (I)

강경문¹ · 박성현¹ · 김진수² · 지현진³ · 주현철^{1†}

¹인하대학교 기계공학과, ²(주) 일도에프엔씨 기술연구소, ³국방과학기술연구소

Evaluation and Fabrication of Composite Bipolar Plate to Develop a Light Weight Direct Methanol Fuel Cell Stack for Small-scale UAV Application (I)

KYUNGMIN KANG¹, SUNGHYUN PARK¹, JINSOO KIM², HYUNJIN JI³, HYUNCHUL JU^{1†}

¹School of Mechanical Engineering, Inha Univ., Yonghyun-dong, Nam-gu, Incheon 402-751, Korea

²ILDO F&C institute of technology, 120B-4L, 689-3, Gojan-dong, Namdong-gu, Incheon, 405-820, Korea

³Department of Defense Advanced R&D Center, Agency for Defense Development,

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

Abstract >> A bipolar plate is a major component of a fuel cell stack, which occupies 50~60% of the total weight and over 50% of the total cost of a typical fuel cell stack. In this study, a composite bipolar plate is designed and fabricated to develop a compact and light-weight direct methanol fuel cell (DMFC) stack for a small-scale Unmanned Aerial Vehicle (UAV) application. The composite bipolar plates for DMFCs are prepared by a compression molding method using resole type phenol resin as a binder and natural graphite and carbon black as a conductor filler and tested in terms of electrical conductivity, mechanical strength and hydrogen permeability. The flexural strength of 63 MPa and the in-plane electrical conductivities of 191 S cm⁻¹ are achieved under the optimum bipolar plate composition of phenol : 18%; natural graphite : 82%; carbon black : 3%, indicating that the composite bipolar plates exhibit sufficient mechanical strength, electrical conductivity and hydrogen permeability to be applied in a DMFC stack. A DMFC with the composite bipolar plate is tested and shows a similar cell performance with a conventional DMFC with graphite-based bipolar plate.

Key words : Composite bipolar plate(복합소재 분리판), Light-weight(경량화), Unmanned Aerial Vehicle, UAV(무인비행기), Direct methanol fuel cell, DMFC(직접메탄올연료전지)

1. 서 론

과거에 주로 군사용 항공표적 및 정찰임무 용도로만 개발되어 왔던 무인항공기(Unmanned Aerial Vehicle,

UAV)는 최근 들어 기술적 진화로 인해 군사 정찰임무 외에 유인기가 수행하고 있는 여러 임무를 대신하고 있다¹⁾.

무인항공기는 개발 초기 내연엔진이나 배터리(battery)를 동력원으로 사용하는 연구가 진행되었다. 하지만, 내연엔진은 낮은 효율, 진동 및 소음으로 인해 무인

[†]Corresponding author : hcju@inha.ac.kr

[접수일 : 2012.4.2 수정일 : 2012.4.20 게재확정일 : 2012.4.27]

항공기의 감시정찰 임무수행에 제약이 따르며, 배터리는 낮은 에너지밀도로 인해 임무범위에 큰 걸림돌이 된다. 최근, 이러한 동력원을 대체하기 위한 한 방안으로 연료전지를 무인항공기의 동력원으로 이용하는 연구가 활발히 진행되고 있다^{2,6)}. 한편, 연료전지 시스템은 단위 연료전지로부터 발생하는 출력이 그리 크지 않기 때문에 연료전지 시스템이 UAV의 동력원으로 사용되기 위해서는 수 십장의 단위전지를 직렬로 연결한 연료전지 스택(stack)으로 제작되어야 한다. 이러한 연료전지 스택을 구성하는 단위 품목 중 분리판을 제작하는 데 소요되는 가격은 전체 시스템의 가격 중 50% 이상이 소요되고 그 무게 또한 전체 무게 중 50% 이상을 차지한다^{7,8)}. 따라서, 제한적인 공간에 탑재될 연료전지 시스템을 개발하기 위해서는 분리판의 경량화 및 부피의 최소화가 우선적으로 수행되어야 한다. 기본적으로 분리판은 다음과 같은 기능을 지니고 있어야 한다. 1) 전류가 흘러가는 통로 역할, 2) 반응가스(수소, 산소 또는 공기)의 공급과 물의 배출 통로, 3) 연료극 및 공기극에서 공급되는 각 가스의 혼합방지/셀 분리 역할, 4) 냉각유로에 의한 열관리 등 다양한 기능을 담당하고 있다⁹⁾.

이렇듯 분리판 제작 시 요구되는 다양한 기능을 충족시키기 위해 다양한 소재를 이용하여 분리판을 제작하려는 연구가 진행되고 있다.

흑연(graphite) 소재를 이용한 분리판은 전기전도성과 내식성이 탁월하여 저온형 연료전지에서의 분리판 소재로서 많이 사용되고 있다. 하지만, 그라파이트계 분리판은 몰딩(molding)이나 기계가공 등의 방법으로 만들어지는데 제조비용이 높고 대량생산이 어렵다. 또한 기계적 물성이 낮고 기체투과율이 높기 때문에 그러한 단점을 보완하기 위해서는 분리판의 두께가 두꺼워져야 한다. 따라서, 이것은 스택의 부피와 중량을 증가시키는 요인이 된다. 또한, 분리판의 두께를 줄이기 위해 흑연 분리판 표면에 열처리 및 표면 코팅을 하여 흑연 분리판의 단점을 보완하려는 노력을 하고 있다. 하지만, 이러한 분리판 제조 방법은 공정이 복잡해지고 분리판 가격 상승의 요인

이 된다는 단점이 있다.

금속 소재 분리판은 전기 및 열적 전도성이 우수하고 충분한 기계적 강도를 유지할 수 있으므로 분리판의 두께를 0.1mm까지 줄일 수 있어 무게나 가격적인 측면에서 유리한 측면이 있다. 하지만, 금속 분리판은 연료전지 작동 조건에서 산성의 환경에 노출되어 내식성에 큰 문제점을 가지고 있다^{10,11)}.

이처럼 흑연 및 금속소재를 이용한 분리판의 단점을 보완하기 위해 흑연 원료에 고분자 수지를 혼합한 형태의 복합소재 분리판에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

복합소재 분리판을 제작하기 위해 첨가되는 고분자 수지는 전기적으로 부도체이다. 따라서, 수지의 함량이 높아질수록 분리판의 전기전도성이 낮아지는 단점이 있다. 하지만, 흑연입자 간 네트워크 형성을 향상시켜 분리판의 기계적 강도 및 전기전도도를 높이는 연구가 지금까지 활발히 진행되어 왔다¹²⁻¹⁶⁾. Lee¹²⁾ 등은 수지의 첨가로 인해 낮아진 전기전도도를 향상시키기 위해 카본 블랙(carbon black), 탄소나노튜브(carbon nano tube), 카본섬유(carbon fiber) 등의 전도성 충전제(filler)를 소량 첨가하여 전기전도도를 향상시키는 연구를 진행하였다. 그들의 결과는 적정량의 첨가제가 전기전도도를 향상시키는데 크게 도움을 준다고 보고하였다. Priyanka¹³⁾ 등은 천연 흑연의 입자 크기에 따라 분리판의 전기전도도 및 기계적 특징이 크게 달라진다고 설명하였다. 그들은 흑연 간 공극을 채워줄 수 있을 정도의 흑연 입자가 추가로 첨가되었을 때 흑연 간 네트워크를 더 잘 형성시키고 그로 인하여 전기전도도가 향상된다고 보고하였다. Mathur¹⁴⁾ 등도 충전제로서 첨가되는 카본 블랙이 흑연 간 공극을 채울 수 있을 정도의 작은 크기가 첨가되었을 때 전기전도도뿐만 아니라 분리판의 기계적 강도 또한 증가한다는 사실을 실험을 통해 입증하였다. 하지만, 전도성 충전제의 과다한 투입은 분리판의 기계적 안정성을 감소시키며, 이에 따라 반응가스 투과도를 증가시키기 때문에 최적 혼합 비율을 바탕으로 하여 충전제의 함량을 결정해야 한다^{15,16)}.

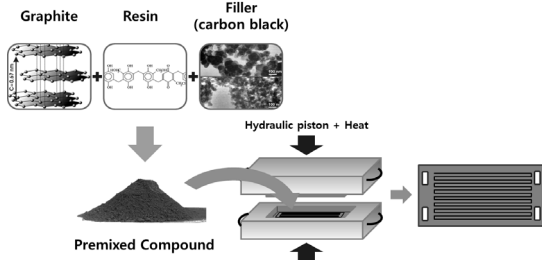


Fig. 1 Schematic drawing of fabrication process on the composite bipolar plate

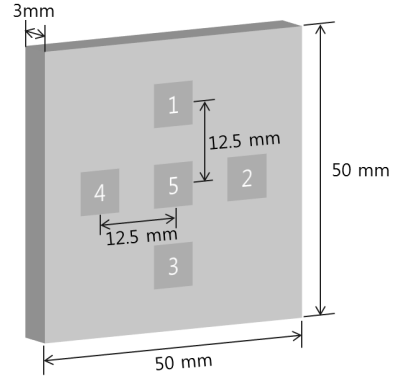
상기의 여러 가지 문헌으로부터 흑연 분말 원료를 기초로 한 복합소재 분리판은 70% 이상의 흑연과 수지 및 각종 첨가제가 혼합된 컴파운드(compound) 형태로 제작된다. 첨가된 흑연의 종류, 입자 크기, 수지의 종류 및 함량에 따라 기계적, 전기적 물성은 크게 변화된다.

본 연구에서는 이러한 문헌을 통해 알려진 사실을 기반으로 무인항공기용 연료전지 시스템에 적용될 수 있는 분리판의 경량화 및 성능향상에 초점을 두고 있다. 이를 위해 본 연구에서는 흑연 분말 원료를 기초로 하여 첨가되는 수지 및 첨가제로 사용된 카본블랙과의 최적 혼합비 조건을 산출하고 도출된 결과를 통해 분리판을 제작하여 기계적인 물성 및 전기전도도를 측정하였다. 또한, 제작된 분리판이 연료전지 시스템에 적용 가능 여부를 판단하기 위하여 막-전극접합체(membrane electrode-assembly, MEA)를 제작하여 단위전지 측정 실험을 수행하였다.

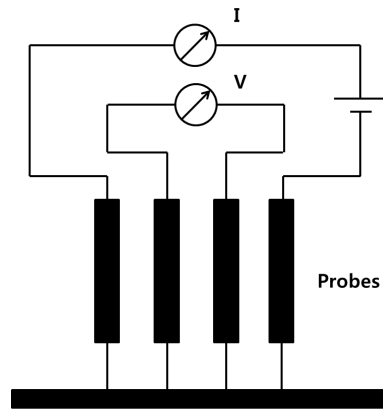
2. 실험 방법

2.1 소재 선정

본 연구에서 분리판 제작을 위해 적용된 흑연 소재는 25 μm (NG 25), 40 μm (NG 40)의 천연흑연(Btr Energy Materials Co., Ltd)이며, 이를 1:1의 함량비로 사용하였다. 그리고, 천연 흑연 소재와 페놀 수지의 함량을 각각 85/15, 82/18, 79/21, 76/24wt%로 적용하여 기계적, 전기적 특성을 실험하였다. 또한 첨가제로 사용



(a)



(b)

Fig. 2 Schematic of measuring points of specimen and four-point test method for measuring the specific area resistance of materials

된 카본 블랙(Vulcan[®] XC 72R carbon black, Cabot, USA)의 함량은 흑연 함량의 3wt%로 고정하였다. 본 연구에서는 1차적으로 천연흑연, 페놀 수지와 카본블랙을 혼합하고 컴파운드 형태로 제작하여 몰드 성형판을 이용한 분말 압축 성형을 진행하였다. 원료혼합 및 제작공정을 Fig. 1에 나타내었다. 제작된 분리판의 특성은 다음과 같은 물리·전기화학적 방법을 통하여 분석하였다.

2.2 복합소재 특성 분석

본 연구에서 제작된 분리판의 굴곡강도 시험은 ASTM

D790 규정에 따라 3점 굽힘 방식을 통해 측정되었다. 전기전도도는 KS C IEC 60093의 규정에 따라 4-포인트 프로브(FPP-5000, 4-Point Probe) 기법을 통해 측정되었다. 4-포인트 프로브 기법은 시편의 양단에 전류를 흘려준 후 그 사이의 전압 값을 측정하여 시편의 저항 값을 전기 전도도 값으로 환산한 방법이다. 시편은 50 x 50 x 3.0t의 크기로 제작되었고, 측정 포인트는 Fig. 2(a)와 같이 4 지점에 위치하였고 각 위치에서의 전기전도도 값을 측정하여 평균하였다. Fig. 2(b)는 분리판의 전기전도도를 측정하는 장비의 개략도이다. 가스투과도 시험은 50 x 50 x 3.0t의 크기의 시편을 제작하여, 80℃에서 수소압력 3 bar의 실험기준에 따라 가스투과도 장비(BT-1, Toyoseki, Japan)를 이용하여 가스투과도를 측정하였다.

2.3 막-전극 접합체 제작

본 연구에서는 분리판의 특성을 확인한 후 연료전지 성능과의 관계를 확인하기 위해 직접메탄올 연료전지(direct methanol fuel cell, DMFC)용 MEA를 제작하여 단위전지 측정 실험을 진행하였다. 제작된 MEA의 면적은 88cm²(10cm x 8.8cm)이며 전해질 막은 나피온(Nafion 115, DuPont[®])이 사용되었다. 한편 PtRu/C(Hispec 12100, Johnson Matthey[®]), Pt/C(Hispec 13100 Johnson Matthey[®]) 촉매가 나피온 이오노머(Nafion ionomer, 10wt% DE1021, DuPont[®])와 함께 분산된 상태로 각각 연료극, 공기극 촉매층 제작을 위해 사용되었다. 분산된 촉매 슬러리는 탄소지지체(carbon paper, TGPH-060, Toray[®]) 위에 바 코팅(automatic film coater EQ-AFA-III-220, MTI)방법을 이용하여 Pt 기준 2mg/cm²으로 균일하게 도포되었다. MEA 제작 과정에 대한 사항들은 기존 Kang¹⁷⁾ 등의 연구에서 자세히 언급하였으므로 본 논문에서 이들에 대한 자세한 언급은 생략한다.

분리판의 유로 형태는 사형 유로(serpentine flow field) 구조의 형태로 가공되었다.

Fig. 3은 DMFC 단위전지 성능 측정을 위해 제작된 MEA와 분리판의 개략도이다. MEA와 분리판을

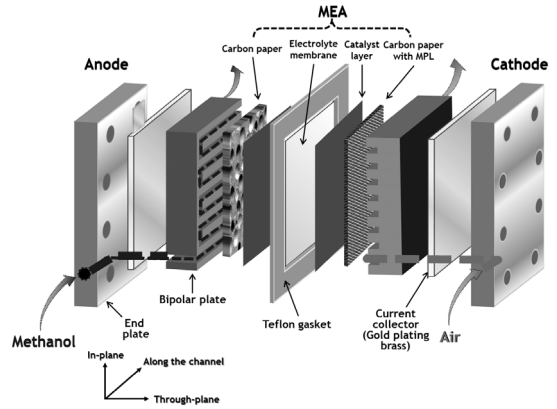


Fig. 3 Schematic diagram of single cell DMFC hardware

제결한 후 단위전지 성능 측정장비(Scitech Korea Inc.)와 연결하여 성능 측정을 진행하였다.

3. 결과 및 분석

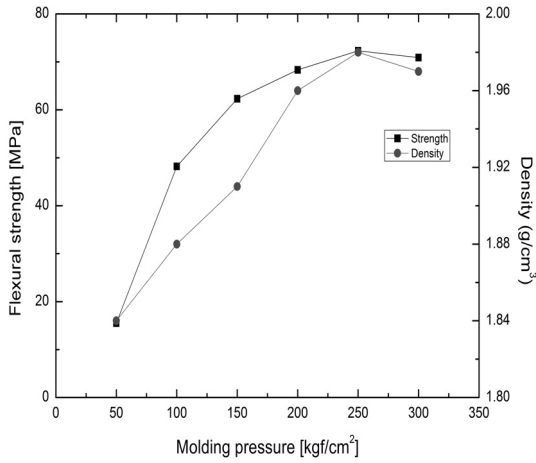
본 연구에서는 전도성 충전제인 흑연, 열경화성 수지 및 카본블랙을 이용하여 제조된 복합소재를 이용하여 UAV에 적합한 분리판을 제작하였으며 그에 따른 기계적, 전기적 성능 평가를 수행하였다. 본 연구에서는 전도성 향상을 위한 카본 블랙의 함량은 흑연 함량의 3wt%로 고정하여 추가적으로 혼합하였고, 수지의 함량은 각각 15, 18, 21, 24wt%로 변화를 주며 성능을 측정하였다. 표 1은 전도성 충전제인 흑연과 수지의 함량에 따른 분리판의 밀도를 비교한 결과이다.

Fig. 4는 성형 압력에 따른 분리판의 밀도 및 전기적, 기계적 특성을 평가한 결과이다. 흑연과 수지의 함량을 75, 25wt%로 각각 고정하고 성형압력을 50~300kgf/cm²로 증가시키며 전기전도도 및 굽힘강도를 측정하였다. 성형 압력이 증가할수록 전기전도도 및 굽힘강도는 증가한다. 그리고, 성형압력이 150kgf/cm² 이상에서는 굽힘강도 및 전기전도도의 증가폭이 점점 줄어들어, 성형 압력이 250kgf/cm² 이상에서는 더 이상 성능 변화가 없는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4에서 보듯이 성형압력이 증가할수록 복합소재 내의 공극이 줄어들어 밀도가 증가하고 그로 인하여 흑연

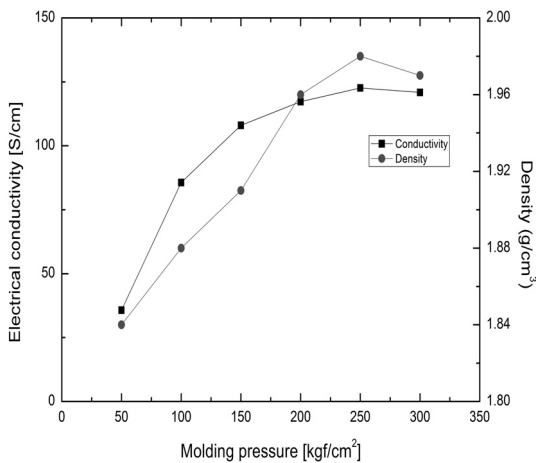
Table 1 Density with varying contents of graphite and resin of composite bipolar plate

Graphite/resin contents (wt.%)	Density (g/cm ³)
85/15	1.88
82/18	1.94
79/21	1.97
76/24	1.98

간의 접촉 저항이 줄어들게 되어 전기전도도가 향상하게 된다. 이와 유사한 원인에 의해 굽힘 강도 또한 성형압력이 증가할수록 향상되는 결과를 확인할 수

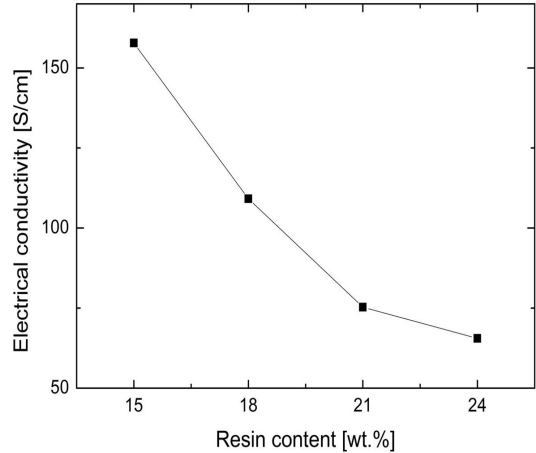


(a)

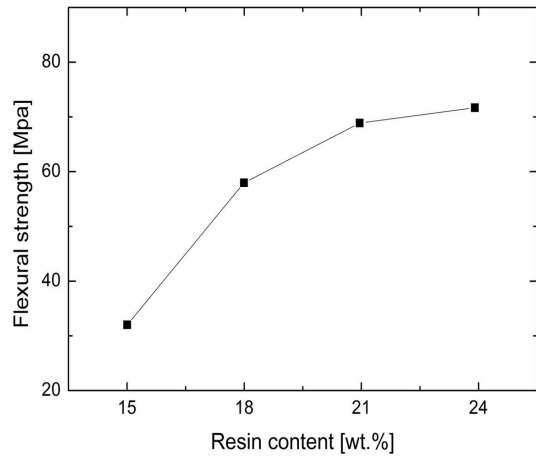


(b)

Fig. 4 Effects on flexural strength (a) and electrical conductivity (b) with variation of molding pressure



(a)

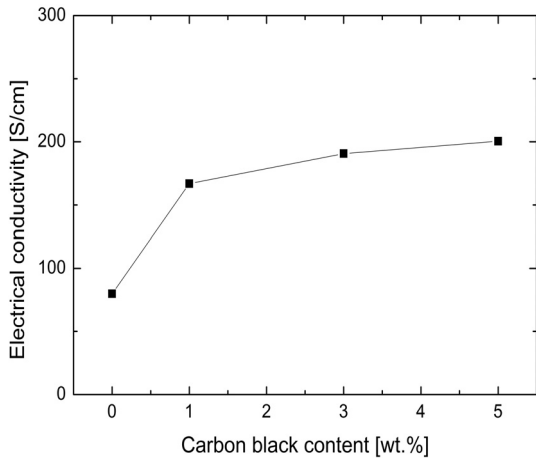


(b)

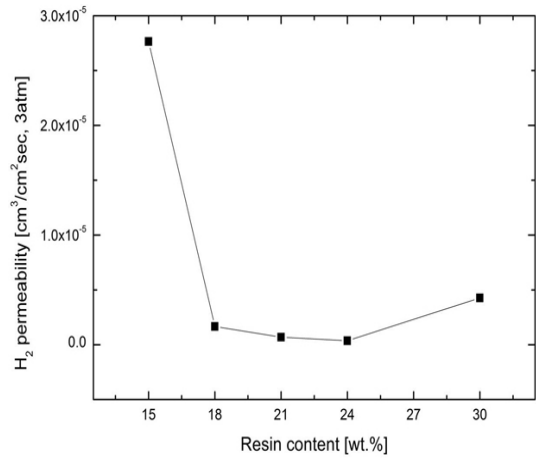
Fig. 5 Effects on electrical conductivity (a) and flexural strength (b) with variation of resin content

있다. 하지만, 250kgf/cm² 이상에서는 복합소재의 밀도가 다소 하락하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 성형압력이 증가할수록 흑연의 스프링백(spring-back) 현상이 증가하게 되어 흑연 간에 자리잡고 있는 수지가 성형 시 외부로 도출되어 밀도가 하락하게 된다. 그로 인하여 강도 및 전기전도도가 다소 하락하는 결과를 보여준다. 이러한 결과를 통해, 폐놀 수지를 적용하여 분리판 제작 시 최적의 성형압력은 250 kgf/cm² 이 적정하다는 결론을 얻을 수 있다.

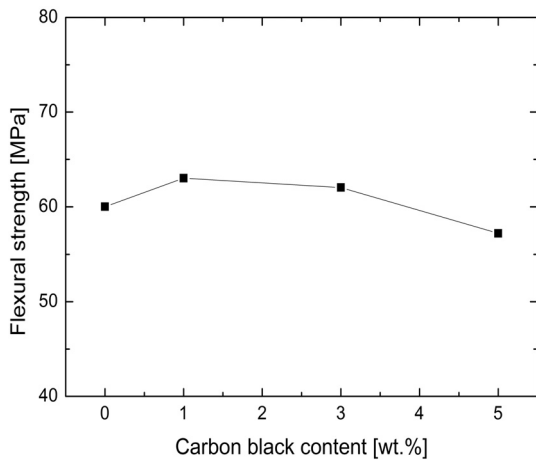
Fig. 5는 폐놀 수지의 함량에 따른 전기적, 기계적 특성을 보여주는 그래프이다. Fig. 5(a)를 통해 수지



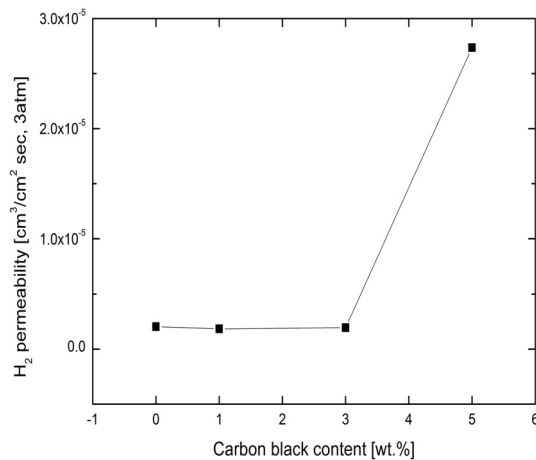
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 6 Effects on electrical conductivity (a) and flexural strength (b) with variation of carbon black content

Fig. 7 Effects on the H₂ permeation rate with variation of resin content (a) and carbon black content (b)

함량이 감소할수록 In-plane 방향의 전기전도도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 수지의 함량이 18wt% 일 때 전기전도도가 121S/cm 로 측정되었고, 이 값은 미 에너지성(Department of Energy, DOE)에서 제시한 목표치를 초과하는 것을 확인할 수 있다. 한편, 수지의 함량이 18wt% 이상에서는 전기전도성이 급격하게 저하되고 있음을 확인할 수 있다. 이것은 수지의 함량이 증가할수록 흑연 간 지지 역할을 하는 수지층이 전기 전도적 흐름을 방해하고 흑연과 흑연 사이의 층간 간격이 넓어지게 되어 전기전도도가 하

락하는 것으로 볼 수 있다. 반면에 수지의 함량이 증가할수록 굽힘강도는 증가한다. 하지만, 수지의 함량이 21wt% 이상일 때 수지함량의 증가에 따라 굽힘강도가 더 이상 크게 증가하지 않는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 통해 페놀릭계 열경화성 수지를 사용하였을 경우 최적의 수지 함량은 18wt% 임을 알 수 있다.

Fig. 6은 카본 블랙 함량에 따른 기계적, 전기적 특성을 평가한 결과이다. 흑연의 함량과 수지의 함량은 82, 18wt%로 고정을 하고 카본 블랙의 함량을 추가

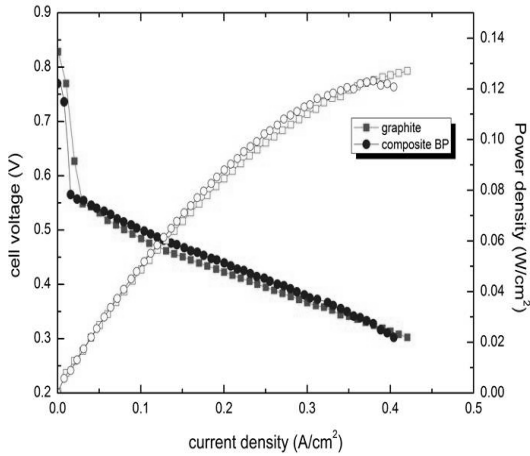


Fig. 8 Polarization curves of composite bipolar plate compared to pure graphite bipolar plate. The cell was operated 60°C and an anode/cathode stoichiometry of 3/3

적으로 흑연 함량의 0, 1, 3, 5wt%로 첨가하여 성능을 측정하였다. 카본 블랙을 첨가하지 않았을 경우 (0wt%) 전기전도도가 $93\text{S}/\text{cm}$ 로 측정되었다. 카본 블랙의 함량이 증가할수록 전기전도도가 상승하지만 3 wt% 이상일 때는 전기전도도의 상승폭이 현저히 둔화됨을 알 수 있다. 또한, 굽힘강도는 카본 함량이 3 wt%일 때까지 60MPa 이상을 유지하고 있으나 카본 함량이 5wt%일 때 굽힘 강도가 저하되고 있음을 Fig. 6(b)를 통해 확인할 수 있다. 이것은 카본 블랙의 함량이 증가할수록 수지의 함량이 상대적으로 작아짐에 따라 수지가 흑연과 흑연 간 지지 역할을 충분히 수행하고 있지 못하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 7(a)는 첨가되는 수지 함량에 따른 가스투과도를 측정된 결과이다. 수지 함량이 증가할수록 가스투과도는 감소하는 것을 확인할 수 있다. 수지 함량이 15wt%일 때 상대적으로 수지 함량이 부족하여 수지, 흑연 및 충전제 사이에 공극이 증가하게 되어 이 공극 사이로 수소기체가 투과되어 가스투과도가 높다. 반면 수지의 양이 30wt%로 과다하게 투입되었을 때도 가스투과도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 수지 경화 시 수지 자체에서 발생하는 과량의 가스가 빠져나오면서 분리판 내에 공극을 형성시키게 되어 가스투과도가 높게 나타나는 것으로 예

측된다. Fig. 7(b)는 카본 함량에 따른 가스투과도를 측정한 결과이다. 카본 함량이 0~3wt%일 때 가스투과도가 $1.78 \times 10^{-6} \text{cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 로 측정되었으나 카본 블랙의 함량이 5wt%일 때 가스투과도가 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 카본 블랙의 함량이 증가할수록 상대적으로 수지의 함량이 감소하여 수지가 흑연 간 공극을 채우지 못하기 때문이다.

Fig. 8은 본 연구에서 개발된 복합소재 분리판과 기존의 그래파이트 소재의 분리판과 이용한 단위전지 성능 결과를 비교한 그래프이다. 두 분리판은 모두 88cm^2 MEA를 기준으로 제작되었으며 기존의 그래파이트 소재 분리판의 무게는 장당 132g 인 반면, 경량화된 복합소재 분리판은 장당 48g 으로 측정되었다. 두 단위전지는 다음과 같은 동일 조건에서 측정되었다; 셀 온도는 60°C 로 유지하였고 공급 메탄올 농도는 2M 이다; 공급하는 메탄올과 유량은 연료극(anode)과 공기극(cathode)에 각각 당량계수(stoichiometry) 3/3으로 조절하여 공급하였다. Fig. 8의 성능곡선을 비교할 때 복합소재 분리판의 성능은 기준전위 0.4V 에서 전력밀도가 $110\text{mW}/\text{cm}^2$ 로 측정이 되었고, 그래파이트 소재의 성능은 $96\text{mW}/\text{cm}^2$ 로 측정되어 경량화된 복합소재 분리판이 적용된 DMFC의 성능이 오히려 약 15% 정도 향상됨을 알 수 있다. 또한, 순수 그래파이트 소재로 제작된 분리판의 두께가 2.2mm 로 매우 얇게 제작되어, 단위전지 체결 시 균일한 하중으로 지지되기 어렵기 때문에 복합소재 분리판보다 성능이 하락된 것으로 판단된다. 이러한 결과는 본 연구에서 제작된 복합소재 분리판이 스택의 무게와 부피를 줄이는데 기여할 뿐만 아니라, 전기전도도, 가스투과도, 기계적 강도를 확보하여 연료전지 스택 성능 향상에도 크게 이바지함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 무인항공기용 연료전지 시스템 개발을 위해 분리판 경량화 및 성능향상에 초점을 두고 있다. 이를 위해 본 연구에서는 흑연 분말 원료를 기초로 하여 페놀 수지 및 첨가제로 사용된 카본블

랙의 함량에 따른 전기적, 기계적 특성 상관관계를 분석하였다. 최종적으로 도출된 최적 혼합비 조건으로 분리판을 제작하고 MEA를 제작하여 단위전지 측정 실험을 병행하였다. 본 연구에서 도출된 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 첨가되는 수지의 함량이 증가할수록 흑연 간 층간 거리가 증가하게 되어 전기전도도가 하락하지만 굽힘강도는 증가한다. 하지만, 수지가 최적의 조건 이상으로 혼합되었을 때 더 이상 굽힘강도는 증가하지 않는다. 따라서, 복합소재 분리판의 전기적, 기계적 특성을 동시에 증가시키기 위해서는 최적의 함량 조건으로 혼합하여 제작되어야 한다.
- 2) 전기전도도의 향상을 극대화하기 위해 첨가되는 카본 블랙은 흑연과 흑연 사이에 충전되어 전자가 이동할 수 있는 터널을 제공하는 역할을 한다. 이것은 복합소재 분리판의 전기적 특성을 향상시키지만 과도한 투입은 오히려 굽힘강도를 저감시켜 기계적 안정성에 영향을 줄 수 있음을 실험결과를 통해 알 수 있다.
- 3) 최적의 성형조건을 통해 개발된 분리판의 가스투과도는 $1.781 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 로 측정되었다. 이러한 가스 투과도 값은 기존에 흑연 블록에 적용되었던 열분해 코팅(pyrolytic coating) 열처리 및 표면 처리 없이도 우수한 특성을 보여주고 있음을 입증하며, 복합소재를 적용하였을 경우 분리판 공정 단계가 간단해지고 그로 인하여 생산 단가가 절감될 수 있음을 암시한다.

후 기

본 논문은 국방과학연구소 국제공동연구사업분야(계약번호 UD090080GD)를 통해 지원받아 수행된 연구입니다.

참 고 문 헌

1. 권세진, 김태규 : “연료전지 무인기”, KSAS 매거

진 제 3권 제 2호, 2009, pp. 65-72.

2. “Hydrogen fuel cells power Georgia Tech UAV”, Fuel Cells Bulletin, Vol. 2006, Issue 10, 2006, pp. 9-10.
3. “Blue Bird, Horizon unveil first commercial fuel cell UAV”, Fuel Cells Bulletin, Vol. 2009, Issue 10, 2009, p. 6.
4. “Energy Or fuel cell powered UAV reaches 10 h flight endurance”, Fuel Cells Bulletin, Vol. 2011, Issue 9, 2011, pp. 4-5.
5. 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.
6. 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.
7. B.O. I, R. Kirchain, R. Roth, “Technical cost analysis for PEM fuel cells”, J Power Sources, Vol. 109, 2002, pp. 71-75.
8. H. Tsuchiya, O. Kobayashi, “Mass production cost of PEM fuel cell by learning curve”, Int J Hydrogen Energy, Vol. 29, 2004, pp. 985-990.
9. 김정현, “고분자연료전지용 분리판 상용화 기술개발”, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, 제 22권 3호, 2011, pp. 409-414.
10. I. U. Hwang, H. N. Yu, S. S. Kim, D. G. Lee, J. D. Suh, S. H. Lee, B. K. Ahn, S. H. Kim, and T. W. Lim, “Bipolar plate made of carbon fiber epoxy composite for polymer electrolyte membrane fuel cells”, J. Power Sources, Vol. 184, 2008, pp. 90-94.
11. E. A. Cho, U. S. Jeon, S. A. Hong, I. H. Oh, and S. G. Kang, “Performance of a 1 kW-class PEMFC stack using TiN-coated 316 stainless steel bipolar plates”, J. Power Sources, Vol. 142, 2005, pp. 177-183.
12. J. Lee, Y. Jang, C. Hong, N. Kim, P. Li, H. Lee, “Effect of carbon fillers on properties of polymer

- composite bipolar plates of fuel cells”, J. Power Source, Vol. 193, 2009, pp. 523-529.
13. Priyanka H. Maheshwari, R.B. Mathur, T.L. Dhimi, “Fabrication of high strength and a low weight composite bipolar plate for fuel cell applications”, J. Power Source, Vol. 173, 2007, pp. 394-403.
 14. R.B. Mathur, S.R. Dhakate, D.K. Gupta, T.L. Dhimi, R.K. Aggarwal, “Effect of different carbon fillers on the properties of graphite composite bipolar plate”, J. materials processing technology, Vol. 203, 2008, pp. 184-192.
 15. H. Wolf, M. Willert-Porada, “Electrically conductive LCP-carbon composite with low carbon content for bipolar plate application in polymer electrolyte membrane fuel cell”, J. Power Sources, Vol. 153, 2006, pp. 41-46.
 16. Richard Blunk, Feng Zhong, John Owens, “Automotive composite fuel cell bipolar plates : Hydrogen permeation concerns”, J. Power Sources, Vol. 159, 2006, pp. 533-542.
 17. 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, 2012, pp. 6285-6291.