

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 40(12), 1063-1069(2012)

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2012.40.12.1063>

PEM 연료전지 경량화를 위한 마그네슘 분리판의 성능평가

박토순*, 이동우**, 김경환***, 권세진***

Performance assessment of Magnesium Bipolar Plates for Light Weight PEM Fuel Cell

To-Soon Park*, Dong-Woo Lee**, Kyung-Hwan Kim*** and Se-Jin Kwon***

Agency for Defense Development*, Hyundai Engineering**,

Department of Aerospace Engineering of KAIST***

ABSTRACT

In present paper, we used magnesium alloy having a lower density and higher electrical conductivity for bipolar plate to reduce the weight of PEM fuel cell. The silver was coated to prevent corrosion and form passivation film on the metal surface with sputtering. In acid proof evaluation for setting optimal coating conditions, the homogeneity of coating thickness was improved by coating with the thickness of 3 μm which not indicated any micro cracks and the temperature 180 $^{\circ}\text{C}$. The performance test and evaluation based on the clamping pressure and channel depth to determine the configuration of bipolar plate for assembling single cell was implemented. And then we assembled single cell with this bipolar plate and implemented the performance test to ensure and compare the current-voltage performance followed as several factors such as coating or non-coating, the change of clamping pressure, the change of channel depth, etc. As these results, the maximum power density of single cell with the coated bipolar plate was 192 mW/cm^2 and it was confirmed that the power density per unit mass was better than existing metal bipolar plate.

초 록

본 연구에서는 PEM 연료전지의 경량화를 위한 방안으로 밀도가 낮고 전기전도성이 높은 마그네슘 합금을 분리판에 적용하였다. 금속 분리판 표면의 부식 및 산화 방지막 형성을 위해서 스퍼터링을 이용하여 은(silver)을 증착하였다. 최적의 증착 조건 확립을 위한 내산성 평가에 있어서 미세균열이 발생하지 않는 3 μm 를 최적 증착 두께로 선정하고, 180 $^{\circ}\text{C}$ 에서 코팅을 수행함으로써 증착 두께의 균일성을 향상시켰다. 단일전지 구성을 위한 분리판 형상결정을 위해서 체결압, 채널 깊이에 따른 성능을 비교평가 하였다. 제작된 분리판을 이용하여 단일전지를 구성하고, 코팅 유무 및 체결압과 채널 깊이별 전류-전압 성능을 비교평가 하였다. 코팅된 마그네슘 분리판은 최대 전력밀도 192 mW/cm^2 로, 단위 중량당 전력 밀도가 기존 금속 분리판 대비 우수함을 확인하였다.

Key Words : PEM Fuel Cell(PEM 연료전지), Magnesium Alloy(마그네슘 합금), Bipolar Plate(분리판), Corrosion(부식), Silver sputtering(은 물리증착)

† Received: June 13 2012, Accepted: November 22 2012

<http://journal.ksas.or.kr/>

*** Corresponding author, E-mail : pts127@add.re.kr

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

I. 서 론

전 세계적으로 화석연료의 제한된 매장량과 국제 기후 협약에 따른 온실가스 배출 감소 의무에 따른 환경보호에 대한 인식이 재고되면서 대체 에너지 및 신·재생에너지에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히, 에너지원으로의 변환이 용이하고 효율이 높은 수소에너지가 가장 부각되고 있으며, 연료전지는 수소에너지를 가장 효율적으로 활용할 수 있는 대표적인 동력장치이다[1,2]. 연료전지는 기존의 2차 전지나 내연기관에 비하여 에너지 밀도가 높고 친환경적이며 구조가 비교적 간단하다는 장점을 가진다. 따라서 최근에는 높은 에너지 밀도를 가지는 연료전지를 소형 전자장비에서부터 무인항공기, 자동차 등의 대체 동력원으로 사용하기 위한 연구개발 사례가 많이 보고되고 있다[2-5].

현재 개발되고 있는 연료전지는 무거운 무게와 큰 체적으로 인해 에너지 밀도의 한계를 가진다. 따라서 동력장치의 중요한 성능지표인 에너지 밀도를 향상시키기 위해서는 연료전지의 경량화가 필수적이다. 연료전지의 B.O.P(balance of plant) 중 가장 높은 무게 점유율을 가지는 스택(stack)의 경량화가 선행되어야 한다. 스택은 크게 분리판(bipolar plate), 막-전극 결합체(MEA), 끝판(end plate)로 구성되며, 스택의 경량화에는 분리판의 경량화가 가장 크게 기여한다[Fig. 1]. 분리판은 연료전지로 유입되는 연료의 공급 채널을 형성하고, 전지 내의 물과 열관리 역할 뿐만 아니라 전류를 전도시키는 역할을 수행한다. 따라서 밀도가 낮으며, 높은 전기 전도성, 높은 강성, 높은 열전도도를 가지는 재료로 제작되는 것이 가장 이상적이다. 현재 연료전지 분리판 재료로는 흑연이 널리 사용되고 있으며, 화학적으로 안정되어 있지만 강성이 낮아 가공이 어렵고,

Table 1. Material properties chart for bipolar plates

Contents	Ref.	C	SS 316	Ti	Al	Mg
Density (g/cm ³)		2.3	8.0	4.5	2.7	1.7
Resistance (Ω cm)	<0.1	138 × 10 ⁻⁶	70.4 × 10 ⁻⁶	48.0 × 10 ⁻⁶	2.7 × 10 ⁻⁶	4.4 × 10 ⁻⁶
Thermal conductivity (W/mK)	>20	23.8	16.2	22	221	156
Tensile stress (MPa)	<25	20	515	951	206	228

다공성 재질(porous material)이기 때문에 기계 투과율을 낮추기 위하여 두껍게 제작해야 하는 단점이 있다. 최근에는 스테인리스 스틸, 티타늄, 알루미늄 등 금속을 이용하여 매우 얇고 가볍게 제작하기 위한 다양한 연구가 시도되고 있다[8-10]. 그러나 순수 금속류는 부식에 취약하며, 표면 보호막 형성에 따른 접촉저항 증가로 인해서 내구성이 낮다[6]. 따라서 금속 분리판을 적용하기 위해서 부식방지를 위한 표면의 코팅 및 코팅 물질에 대한 연구도 동시에 이루어지고 있다.

본 연구에서는 PEM 연료전지의 경량화를 위해서, 실용 금속 중 가장 가벼운 마그네슘의 분리판 적용 가능성을 검토하였다. 마그네슘은 우수한 밀도 외에도 전기 및 열전도도, 높은 강도, 높은 기계 가공성을 가진다[Table 1]. 하지만 기전력 계열에서 가장 큰 활성전위를 가지므로 산성 환경에서 부식에 취약하다[12-13]. 따라서 고순도 마그네슘보다 내부식성이 향상된 마그네슘-알루미늄-아연 합금인 AZ31B를 사용하고, 부식 방지막 코팅을 통한 내부식 성능을 확인 하였다. 또한 분리판 유로 두께, 전극과의 체결압 등의 영향성 평가를 통한 단전지 실험조건을 확립하고, 부식 방지막 코팅 전·후의 성능을 비교하였다.

II. 본 론

2.1 부식 방지 물질 선정

일반적으로 PEM 연료전지의 막-전극 결합체에 사용되는 나피온(Nafion)은 SO₄²⁻, Cl⁻, F로 구성되는 고분자 물질로, 연료전지 활성화 과정에서 생성된 물에 의해 몰 농도 0.5 이하의 pH 2~4에 달하는 산성 환경이 형성된다[11]. 이같은 산성

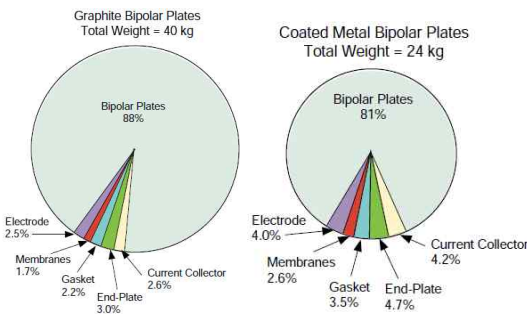


Fig. 1. Weight portion of PEM fuel cell system[6]

Table 2. Corrosion rates of Materials in sulfuric acids [14]

Acid	Platinum	Gold	Silver
	[mm/yr]		
Sulfuric, %			
10	< 0.05	< 0.05	< 0.003
	@ Boiling	@ 250°C	@ Boiling
50	< 0.05	< 0.05	< 0.034
	@ Boiling	@ 250°C	@ Boiling
60	< 0.05	< 0.05	< 0.88
	@ Boiling	@ 250°C	@ Boiling
95	< 0.05	< 0.05	< 0.14
	@ ~100°C	@ 250°C	@ Room
Sulfurous	< 0.05	< 0.05	< 0.05
	@ 100°C	@ 100°C	@ 90 °C

환경으로부터 마그네슘 분리판의 산화 및 부식 방지를 위하여 부동화 피막(passivation film) 코팅을 수행하였다. 여기서 부동화 피막은 스스로 안정하여 부동화를 이루어야하므로 표준수소 환원전위가 높은 백금(Pt), 금(Au), 은(Ag)과 같은 귀금속 계열이어야 하며, 전극의 역할을 하는 분리판의 특성으로 인해서 전기 전도도가 우수해야 한다. 귀금속 물질에 따른 황산 용액에서의 부식률을 아래 Table 2에 정리하였다.

이 중에서 은(silver)은 50%이하의 높은 농도의 황산 용액에서도 우수한 내식성을 보여주며, 귀금속 중 가격이 저렴하다. 뿐만 아니라 전기 전도성이 뛰어나 분리판의 코팅 물질로 적합하여, 본 연구에서 마그네슘의 부식방지를 위한 재료 물질로 사용하였다. 은 물질을 마그네슘에 증착시키기 위해서 Yamamoto 등[15]이 제안하는 물리 증착 방법 중 하나인 스퍼터링(sputtering)을 수행하였다. 스퍼터링은 고(高)진공상태의 챔버 내에서, 플라즈마에 의해 튕겨져 나온 시료물질의 원자들을 시료 표면에 증착하여 박막을 형성시키는 물리 증착방법으로, 마그네슘과 같이 내화화성이 약한 물질에 코팅물질을 증착시키는 데 용이하다.

2.2 부식 방지막 조건 확립

부식 방지막 코팅에 앞서 마그네슘 합금의 표면에 존재하는 먼지, 가공 시 발생된 기름, 유기물 등의 불순물을 제거하기 위한 전처리 과정을 수행하였다. 일반적으로 수행되는 전처리 과정은 아세톤 → 메탄올 → IPA(iso-propyl alcohol) → 증류수 → 질소 건조 순으로 수행된다. 여기서 아세톤은 기름 제거에 유용하며, 메탄올과 IPA는

잔존하는 아세톤의 제거에 사용된다. 하지만 마그네슘의 경우 메탄올 및 증류수 세척시 부식이 발생 하였다. 따라서 메탄올 세척과정을 제외하고, 초음파 세척기를 이용하여 완전 세척을 수행하였으며, 마지막으로 질소를 이용하여 마그네슘 표면에 남아있는 IPA를 제거하였다. 전처리 후 마그네슘 합금 시편은 접착력(adhesion)을 높이기 위해 시드레이어로서(seed layer) 크롬(Cr) 0.2 μm 증착하였다.

은 코팅 조건 및 증착 두께를 확립하기 위해 시편을 이용하여 내산성 테스트를 실시하였다. 시편은 2 cm x 2 cm으로 제작하였고 실제 연료 전지 운전환경과 유사하도록 하기위하여 황산을 pH 1로 조절 후 15 cc를 시편 중앙에 투여 후 2 시간 관찰하였다.

2.2.1 두께에 따른 성능

부동화 피막 두께는 두꺼울수록 부동화 성능은 향상되지만, 3 μm 이상의 박막층에 있어서 증착 후 잔류응력으로 인한 미세균열(micro cracking)이 발생하여, 내부식성은 급격히 나빠진다. 따라서 최대 증착두께를 3 μm로 제한하고, 증착 두께를 각각 1 μm, 2 μm, 3 μm로 선정하여 스퍼터링을 수행하였다. (Fig. 2) 그결과 3 μm 두께로 증착하였을 경우가 미세 균열이 발생하지 않고 안정화 되는 것을 확인하여 최적의 코팅 두께로 선정하였다.

2.2.2 온도에 따른 성능

Hones 등[16]은 스퍼터링을 통한 증착에 있어서, 박막의 강도(hardness) 향상 및 잔류응력 완

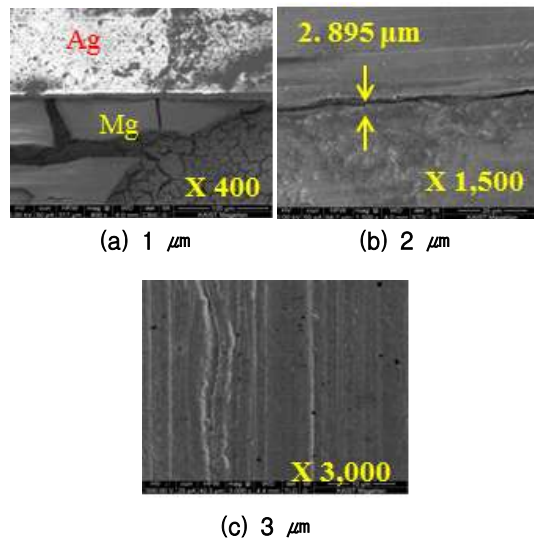


Fig. 2. Corrosion tests to coating thickness

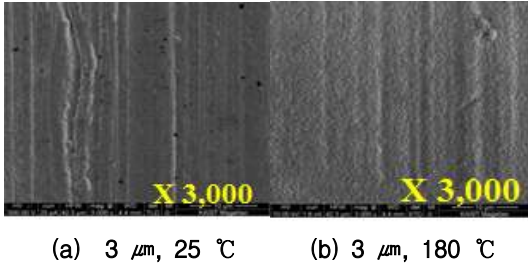


Fig. 3. Corrosion tests to sputtering temperature

화를 위한 온도의 영향성을 확인 하였으며, Georg 등[11]은 마그네슘의 소결을 억제하기 위하여 스퍼터링 온도를 180 °C 이하로 제한하고 있다. 이에 따른 마그네슘 합금의 스퍼터링 25 °C의 상온에서 두께 3 μm로 코팅한 경우와 180 °C에서 두께 3 μm로 코팅한 경우를 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 그 결과 180 °C 온도에서 3 μm 두께로 증착한 시료가 훨씬 우수한 특성을 보였고, 표면이 균일함을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 마그네슘 분리판의 부식방지를 위해 180 °C에서 은(Ag) 3 μm 두께로 증착하는 경우를 최적의 증착 조건으로 결정하였다.

2.3 단일전지 성능측정 및 결과

2.3.1 실험 방법 및 절차

실험에 사용된 막-전극 결합체(MEA)는 Paxitech사의 제품을 사용하였고, 전해질막은 Dupont사의 Nafion[®] 112를 사용하였고 두께는 50 μm이다. 양 쪽 전극의 촉매 로딩 양은 0.5 mgPt/cm²이다. 가스켓은 테플론이 코팅 된 섬유 유리 테잎을 사용하였다.

연료극과 공기극에 각각 순도(Purity) 99.99% 수소와 공기가 유입되고 이 때 압력조절기를 통해 원하는 압력으로 조절 가능하도록 하였다. 단일 전지의 연료전지의 경우 전류값이 낮기 때문에 전류 보충을 위하여 전원공급장치(Power supply)와 직렬로 연결하여 데이터를 측정하였다. 데이터 측정은 전기부하장치(Electronic load, VizzKorea Inc.)와 데이터 기록장치(Personal DAQ, KMI(주))를 이용하여 정전류(constant current) 모드로 O.C.V(Open Circuit Voltage)에서부터 0.1 A씩 증가시키면서 10초씩 전압을 측정하였다(Fig. 4).

분리판 재질은 내부식성이 향상된 마그네슘 합금 AZ31B를 사용하고, 크기 4.4 × 4.4 × 0.2 cm, 활성화 면적(active area)은 10.2 cm²인 공기 채널 형으로 제작하였다(Fig. 5).

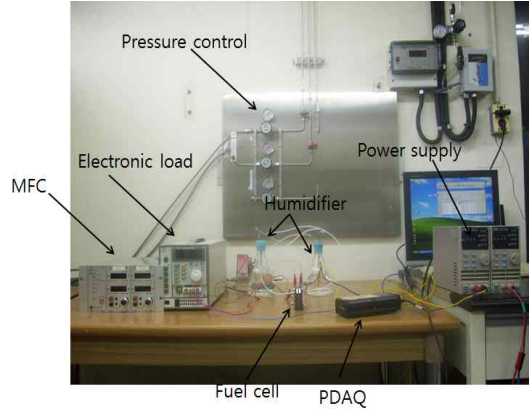


Fig. 4. Test setup for fuel cell performance tests

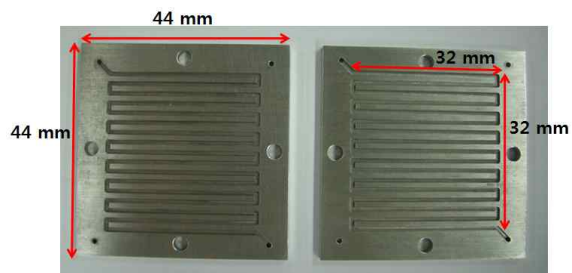


Fig. 5. Bipolar plate fabricated for fuel cell performance tests

제작된 분리판의 무게는 6.2 g 으로 같은 크기의 흑연 분리판 대비 25 % 경량화 되었다. 단일 전지 분리판 실험은 위의 2.2 절에서 확립한 조건을 이용하여 은(Ag)으로 표면 스퍼터링을 하였다. 실험은 상온, 상압 조건에서 수행되었으며 연료극과 공기극은 25 °C, 1 atm 조건에서 상대습도 100 %로 하였다. 또한 수소와 산소의 공급식 (1)에 따라 계산하였다.

$$\dot{m}_{H_2} = \lambda \frac{\rho A}{2F} M_{H_2} \text{ (g/s)} \quad (1)$$

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

여기서 유량 결정에 중요한 요소인 λ는 화학양론비(Stoichiometric ratio)로서, 일반적으로 수소는 1.2 ~ 1.5, 산소는 2 ~ 2.5 로 설정한다. 하지만 본 연구에서는 수소, 산소 모두 일반적인 경우보다 많은 양의 유량이 공급되도록 하기 위해 140 mA/cm²를 기준으로 양론계수 3을 적용하였다. 분리판에 가해지는 압력은 토크 렌치를

이용하여 전 면에 걸쳐 균일하게 10 kgf-cm을 가하였다. 실험은 활성화(Activation) 과정을 포함하여 30분간 진행되었고 정전류 방법으로 0.1 A 간격으로 데이터를 측정하였다.

2.3.2 분리판 체결압의 영향

가스의 유출을 막고, 접촉 저항을 줄이기 위해서 MEA와 분리판 사이의 적절한 체결압 선정이 중요하다. 체결압 선정을 위하여 토크렌치(60 QLK, NAKAURA Co., Ltd)를 사용하여 10, 13, 15, 20 kgf-cm으로 조절해가며 단일전지 성능을 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 저 전류 밀도 영역에서는 성능의 큰 차이가 없었지만, 고 전류 밀도 영역으로 갈수록 큰 차이를 보였다. 실험 결과 체결압이 높을수록 향상된 성능을 보였다. 이는 고 전류 영역으로 갈수록 기체의 누출로 인해 반응 할 수 있는 기체의 농도가 줄어들기 때문에 급격한 성능저하가 나타난 것으로 판단된다. 15 kgf-cm을 적용한 경우에는 20 kgf-cm을 적용했을 때와 비슷한 성능을 보이나 300 mA/cm² 이후 급격한 감소를 보였다. 이는 유입된 가스가 활발하게 작용, 결합하지만 높아지는 작동온도로 인해 작용하는 기체의 증발이 일어났고, 미세하게 유출되는 가스로 인해 농도 손실(concentration losses)이 발생했기 때문으로 사료된다.

2.3.3 유로 깊이의 영향

다양한 유로 형태 중 사형 유로로 제작된 분리판을 이용하여 채널의 깊이에 따른 분리판의 성능을 측정하였으며 그 결과를 Fig. 7에 나타냈다. 유로의 폭을 1.0 mm로 하고 깊이가 각각 0.3, 0.4, 0.5 mm인 분리판을 제작하여 성능을 비교한 경우 채널이 깊어짐에 따라 향상된 성능을 보였다. 0.5 mm의 경우에는 0.3 mm와 비교하였을 경우, 206%, 0.4 mm와 비교했을 경우에는 160% 높은 전류 밀도를 나타냈다. 저 전류밀도 영역에서는 세 경우 큰 차이를 보이지 않았지만 90 mA/cm² 이상의 영역에서 차이를 보이기 시작했고 채널 깊이 0.3 mm의 경우에는 뚜렷하게 전압이 강하하는 경향을 보였다. 그 이상의 깊이에서는 큰 차이를 보이지 않았지만 0.4 mm의 경우에는 최대 전력밀도 이후에는 급격한 성능 저하를 보였다. 이는 채널 폭을 모두 동일하게 제작하고 깊이를 변화시켰기 때문에 유로의 단면적이 증가할수록 유입되는 기체의 반응률이 증가하기 때문이며 기체가 유입되는 채널 단면적의 변화에 따른 결과로 판단된다.

2.2.4 코팅 전.후의 분리판의 성능 비교

마그네슘 분리판을 대상으로 코팅여부에 따른 성능비교를 수행하였고 그 결과를 Fig. 8에 나타

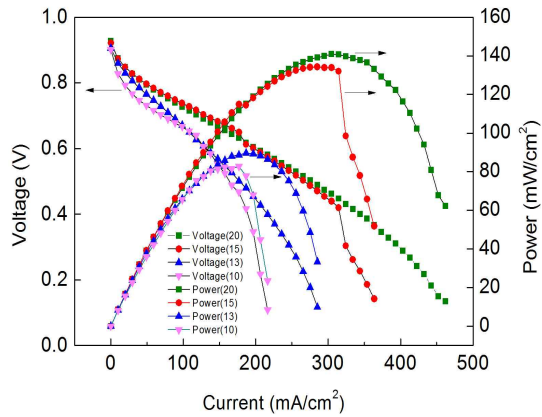


Fig. 6. Performance on clamping pressure

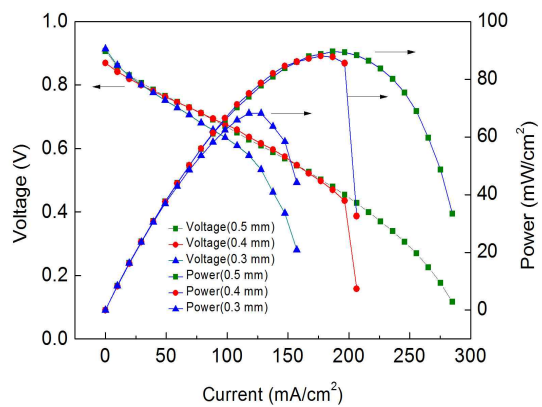


Fig. 7. Performance vs. depth of flow channel

냈다. 앞서 수행된 실험결과를 바탕으로 채널 깊이 0.5 mm 분리판을 사용하고 체결압은 20 kgf-cm의 토크로 인가하였다. 그 결과 코팅 처리한 분리판의 경우 최대 전력 밀도가 36% 향상된 모습을 보였다(Table 3). 저 전류밀도 영역에서는 비슷한 성능을 보이지만 150 mA/cm² 이상의 영역에서는 코팅하지 않은 분리판의 경우 전압의 그래프로 살펴보았을 때 저항 손실이 큼을 확인하였다. 이는 분리막 표면에 형성된 산화 피막의 영향 때문인 것으로 판단된다.

Table 3. Max. Power Density results by coating

	Open Circuit Voltage(V)	Max. Power Density (mW/cm ²)
Non-coating	0.92	140.9
Ag-coating	0.90	192.0

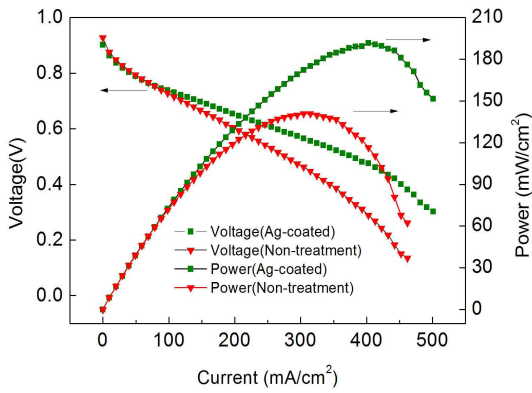


Fig. 8. Performance comparison between the coated bipolar plate and non-coated bipolar plate

2.2.5 경량화 비교

연료전지 분리판의 단위중량당 전력밀도를 기준으로 기존 연구결과와 비교해 본 결과 본 연구에서 제작한 마그네슘 합금 분리판의 성능은 선행연구의 티타늄-금 합금 분리판을 제외하고 가장 우수함을 보였고, 특히, 알루미늄 분리판 보다 훨씬 우수하였다(Fig. 9).

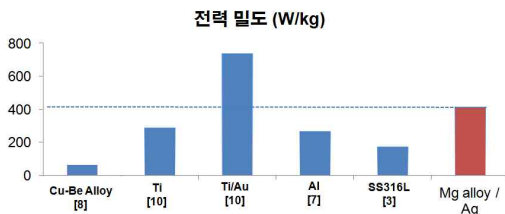


Fig. 9. Power density on bipolar plates

III. 결 론

본 연구에서는 PEM 연료전지의 구성품 중 가장 큰 부피와 무게 비율을 차지하고 있는 분리판의 경량화를 위하여 마그네슘 합금의 적용 가능성을 실험적으로 고찰하였다. 기존의 흑연을 대체 할 수 있는 재료로 밀도가 낮고 전기전도성, 가공성, 내산성이 우수하고 가격이 저렴한 마그네슘 합금(AZ31B)를 선택하였으며 산화와 부식 방지를 위해 마그네슘 합금을 은(Ag)으로 코팅하는 방법을 사용하였다. 분리판은 유로의 폭을 1 mm로 고정하고 깊이를 0.5 mm로 제작하였을 경우 최고의 성능을 보였고, 분리판의 체결압은 20 kgf-cm일 경우 가장 우수한 성능을 보였다. 또한, 코팅하지 않은 분리판과의 비교에서 최대

전력밀도가 192 mW/cm²로, 단위 중량당 전력 밀도가 기존 금속 분리판 대비 우수함을 확인하였으며, 180 °C에서 은을 3 μm로 증착한 결과 분리판 표면의 산화층의 생성과 막-전극 결합체(MEA)의 손상을 막을 수 있었다. 마그네슘을 분리판으로 사용하기 위해서는 고온도 상태 보다는 내부식성이 우수한 성분을 추가한 합금을 사용하고 성능 향상을 위하여 표면 처리가 필요함을 확인하였다.

향후 마그네슘 분리판을 무인기 혹은 자동차에 적용하기 위해서는 연료전지의 작동 온도를 적정 수준에서 제어하고 스택의 물 넘침(flooding) 현상 등을 효과적으로 제거할 수 있는 방안이 모색되어야 한다. 또한, 분리판의 경량화 뿐만아니라 수소 공급방법 개선, 가스 공급장치 및 가습장치를 동시에 경량화 할 필요가 있다.

후 기

이 논문은 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R0A-2007-000-20065-0)

References

- 1) Moon Young Seok, Cho Keong Yeop, 2003, "The development of alternative Energy technology and Agreements for Climate Change under Unstable Contractive Markets", EERI, Preliminary Research Report 03-11(문영석, 조경엽, 2003, "불완전 경쟁시장하의 대체에너지 기술개발과 기후변화협약", 에너지경제연구원, 기본연구보고서 03-11)
- 2) Kim Tae Kyu, Sim Hyen Chul, Kwon Se Jin, 2007, "Blended Wing-body UAV with a Fuel Cell based Power Plant", KSAS '07 Spring Academic Conference
- 3) Lee Seok Hyen, 2010, "The effects of Surface Treatment on electrical conductivity and corrosion resistance of Stainless Steel for Bipolar Plates of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells", PhD Thesis, KAIST, Korea
- 4) Thomas H. Bradley, Blake A. Moffitt, 2007, Dimitrii N.Mavris, David E. Parekh, "Development and experimental characterization of a fuel cell powered aircraft", Journal of Power sources, Vol.171, pp.793~801

- 5) Mark D. Guynn, Joshua E. Freeh, Erik D. Olson, 2004, "Evaluation of a Hydrogen Fuel cell Powered Blended-Wing-Body Aircraft Concept for Reduced Noise and Emissions", NASA/TM-2004-212989
- 6) A.S. Woodman, E.B. Anderson, K.D. Jayne, and M.C. Kimble, 1999, "Development of Corrosion-Resistant Coatings for Fuel Cell Bipolar Plates", American Electroplaters and Surface Finishers Society(AESF)
- 7) Kim Ki In, 2010, "Fabrication and Performance Evaluation of Metallic Bipolar Plates of PEM Fuel Cell for UAV Application", Master Thesis, KAIST, Korea
- 8) J. Wind, R. Späh, W. Kaiser, G. Böhm, 2002, "Metallic bipolar plates for PEM fuel cells", J. Power Sources 105, pp. 256-260
- 9) D.R. Hodgson, B. May, P.L. Adcock, D.P. Davies, 2001, "New lightweight bipolar plate system for polymer electrolyte membrane fuel cells", J. Power Sources 96, pp. 233~235
- 10) Wang S-H, Peng J, Lui W-B, Zhang J-S, 2006, "Performance of the gold-plated titanium bipolar plates for the light weight PEM fuel cells", J. Power Sources. 162 pp. 486~491
- 11) Tawfika H., Hung Y., Mahajan D., 2007, "Metal bipolar plates for PEM fuel cell - A review", Journal of Power Sources, Vol. 163, pp.755~767
- 12) Reiners G, Griepentrog M., 1995, "Hard coatings on magnesium alloys by sputter deposition using a pulsed d.c. bias voltage", Surface and Coatings Technology, 77, pp. 809~814.
- 13) Lee Hak Reol, "Metal Corrosion Engineering", Yeonkeong Pub. Cor., 2004 (이학렬, "금속부식공학", 연경문화사, 2004)
- 14) Bruce D. C., David S. A., 1997, "Handbook of Corrosion Data", 2nd, pp.74~79
- 15) Yamamoto A., Wantanabe A., Sugahara K., Tsubakino H., Fukumoto S., 2001, "Improvement of corrosion resistance of magnesium alloys by vapor deposition", Scripta mater, pp.1039~1042
- 16) Hones P., Diserens M., Levy F., 1999, "Characterization of sputter-deposited chromium oxide thin films", Surface and Coating Technology, pp.277~283