

고분자 전해질형 연료전지용 Au-PTFE/Al 금속분리판 연구

유승을*, 김명환, 구영모

Study of Au-PTFE/Al metallic bipolar plate for PEMFC

Seung-Eul Yoo, Myong-Hwan Kim, Youngmo Goo

Abstract Aluminum was used as metallic bipolar plate material to reduce a stack weight. The functional materials such as conductive material, Au and nonconductive material, PTFE (polytetrafluoroethylene) were coated on the bipolar plate to enhance electrical contact and corrosion prevention in PEMFC.

The active area of bipolar plate is divided into the top layer part that electric current mainly passes, and the bottom layer part that gas and water pass. The bottom layer part in the flow channel needs not to have electrical conductivity because it doesn't pass electric current directly. In this reason, Au on the top layer and PTFE on the bottom layer were coated to apply high electrical conductivity and/or good corrosion resistance. Although the single cell performance using Au-PTFE/Al bipolar plate was shown 78% in comparison with that of graphite, specific power of Au-PTFE/Al bipolar plate(0.4 W/g) was twice as much as graphite bipolar plate.

Key words PEMFC(고분자 전해질형 연료전지), Metallic bipolar plate(금속분리판), ICR(접촉저항), Corrosion(부식)

* 자동차부품연구원 환경소재연구센터
 ■E-mail : seyoo@katech.re.kr ■Tel : (041)559-3154 ■Fax : (041)559-3158

Nomenclature

R1, R2, R3 : resistance, Ω

subscrip

PEMFC : proton exchange membrane fuel cell

PTFE : polytetrafluoroethylene

GDL : gas diffusion layer

ECA : electrical conductive area

ENCA : electrical non-conductive area

SCE : saturated calomel electrode

SR : stoichiometric ratio

ICR : interfacial contact resistance

1. 서론

산화·환원 반응이 급격히 일어나는 고분자 전해질형 연료전지(PEMFC)에 사용되는 분리판(bipolar plate)은 여러 가지의 특성이 요구된다. 보통 단위면적당 1A 이상 발생하는 전기를 원활히 이동시킬 수 있는 전기전도성과 산화·환원 반응에 강한 내부식성 및 부반응으로 발생하는 열을 외부로 전달시키기 위한 우수한 열전도성을 지녀야 한다. 또한, 발화성이 큰 수소의 누설을 방지할 수 있는 낮은 기체투과도와 이동용 및 수송용에 적합한 기계적 강도, 특히 수송용 연료전지에 적용시

에너지 효율을 증가시킬 수 있는 낮은 중량, 스택의 부피를 최소화 할 수 있는 강도와 아울러 분리판 단가를 저감시킬 수 있는 단순한 제조공정 등 매우 다양한 사양이 고려되어야 한다. 종래에 분리판으로 사용해 온 고가의 graphite 소재는 현재까지도 계속 이용되고 있으며 가장 큰 이유는 연료전지 사용범위에 적합한 전기전도도($> 100S/cm$)의 특성을 보이면서 산화·환원 반응에서 내식성($< 1\mu A/cm^2$)이 우수한 특성을 갖는 소재이기 때문이다. 그러나 graphite는 세라믹 소재의 특성상 박판 제조 및 취급과정에서 파손의 우려가 크고 제조단가가 높아 이 동용 및 수송용으로 사용하기에는 단점이 있다.

본 연구에서는 graphite 소재의 분리판을 대체하기 위하여 알루미늄(Al) 소재를 선정하여 분리판에 적용하기 위한 연구를 수행하였다. 알루미늄 소재를 분리판으로 사용할 경우 금속분리판에 적용하기 위해 304 SS 등과 같은 금속소재를 박판화하여 성형하거나 carbon composite와 같이 mixing 후 압축 또는 사출 성형하는 공정을 사용하지 않고도 단순한 press 공정을 이용하여 유로 성형이 가능하다. 그리고 유로형성 후 남아 있는 두께가 0.1mm 이하라고 할지라도 수소투과도가 DOE goal인 $< 2 \times 10^{-6} cm^3/cm^2 \cdot sec \cdot (80^\circ C, 3atm)$ 이므로 수소 crossover에 의한 연료전지 파손의 우려가 적다. 대부분의 특성이 graphite에 비하여 우수하지만 산화·환원 반응에 의해 Al이 용해되거나 Al_2O_3 와 같은 산화피막이 형성되어 연료전지 성능을 감소시키는 단점이 있다. 내식성이 취약한 단점은 순수 귀금속계를 사용하는 금속분리판을 제외하고 거의 모든 금속 분리판이 해당된다.^{1~3)}

현재 연구되고 있는 대부분의 금속분리판의 경우 내식성 소재를 분리판 전 표면에 처리하여 개발 중에 있다. 이중 내식성과 내구성을 동시에 확보한 소재로는 Au 등의 귀금속계가 유일하다. 그러나 고가의 Au를 전 면적에 표면처리할 경우 분리

판의 제조단가가 상승하여 CNC로 가공한 graphite 소재와 거의 동일한 가격 수준이다. 대량생산시 graphite 분리판은 어느 정도 가격저감이 예상되나 Au를 전 면적에 표면처리하는 형태는 단가저감 효과가 미미할 것으로 예상된다. 본 연구에서는 가격저감 효과와 내부식성 및 경량화를 동시에 확보하기 위하여 금속분리판에 표면처리하는 Au 사용량을 감소시키고 내식성을 향상시키는 형태로 연구를 수행하였다.

2. 실험방법

2.1 금속분리판 제조

본 연구에서 사용된 알루미늄(Al5052) 소재는 Al과 Mg이 많이 함유된 합금으로 내식성과 가공성이 우수하고, 피로강도 및 내해수성이 우수하여 선박, 차량, 건축 등에 널리 사용되고 있으며 열전도도가 우수하고, 비중이 구리의 약 1/3 정도인 경량 금속이다.

2.1.1 Au-PTFE/Al 분리판 설계

Au의 표면처리 양을 감소시키기 위하여 분리판 표면은 전기적인 접촉기준으로 표면처리 영역을 전기접촉면과 비전기 접촉면으로 구분하여 설계하였다. Fig. 1의 (a)에 반응면적 24.01mm, 유로 깊이 1.0mm, 유로 폭 1.0mm, 유로 수 5 channel인 Al 분리판의 모식도를 나타내었다. 부식현상은 금속분리판에 형성된 유로 골(flow channel), 산(rib) 부분과 GDL($5.3 \times 5.3 cm^2$) 및 분리판이 맞닿는 부위에서 대부분 발생된다. Fig 1의 (b)는 GDL이 닿는 곳과 유로 부분을 나타낸 것이며 금속소재의 부식발생을 방지하기 위하여 내식성 소재로

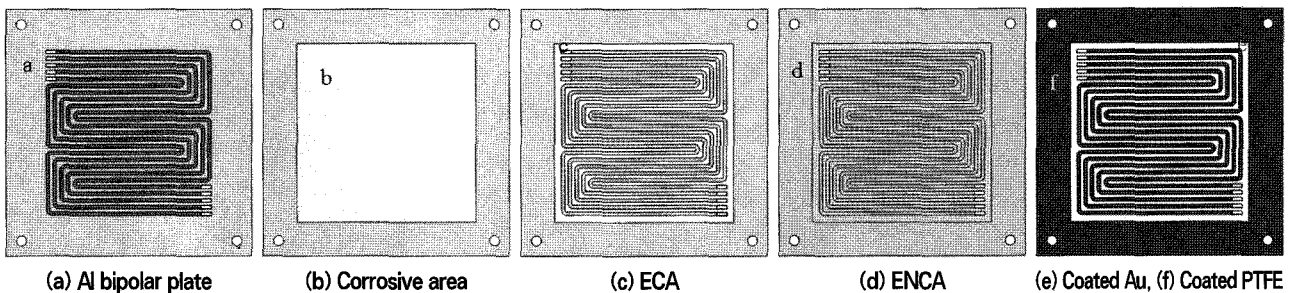


Fig. 1 Design of Au-PTFE/Al bipolar plate

표면처리가 필요한 영역이다.

부식발생이 주로 일어나는 영역(b)는 전기적인 면으로 기준하여 볼 때 MEA에서 발생된 전자가 GDL을 통하여 분리판에 이동되는 면, 즉 GDL과 분리판이 맞닿아 있는 영역(ECA)과 전기적으로는 불필요하지만 연료기체(수소, 공기)의 흐름과 물 배출의 통로로만 이용되는 유로 끝부분의 영역(ENCA)으로 나눌 수 있다. Fig. 1의 (c)는 부식발생 영역에서 ECA 부위를 나타낸 것이며 (d)는 분리판 전체에서 ENCA 부위를 나타낸 것이다. 직접적으로 전기를 통하는 ECA 부위에는 내식성과 전기전도성이 우수한 Au(e)를 표면처리하였으며 그 외 부위인 ENCA에는 내식성 특성이 우수한 PTFE(f)를 처리하였다.

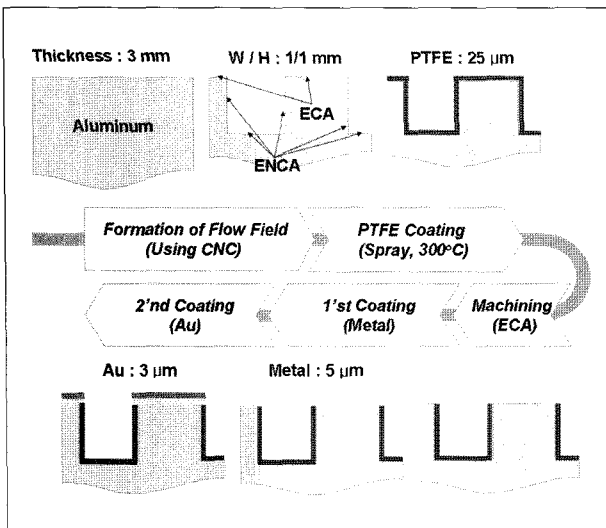


Fig. 2 Manufacturing process for Au-PTFE/Al bipolar plate

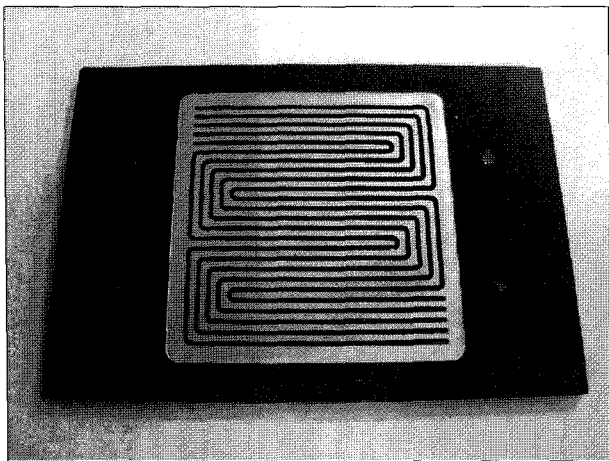


Fig. 3 Au-PTFE/Al bipolar plate

2.1.2 Au-PTFE/Al 분리판 제작

Au-PTFE/Al 분리판의 제조공정 모식도를 Fig. 2에 나타내었다. 두께가 3mm인 Al5052 판재를 이용하여 CNC 가공을 통하여 분리판 외형과 유로를 형성시켰으며 제조된 Al 분리판의 외형치수는 가로, 세로가 각각 7.3cm이다. Al 분리판과 PTFE의 접착을 강화시키기 위하여 활성면을 형성시키고 PTFE powder를 spray법으로 도포하였다. PTFE가 도포된 Al 분리판을 300°C로 유지된 건조기에 넣어 25μm의 PTFE 표면층을 형성시켰다. Au 표면처리를 위해 PTFE/Al 분리판의 ECA 부위를 CNC로 절삭하고 PTFE/Al 분리판에 metal 5μm를 전처리한 후 KAu(CN)₂ 용액을 이용하여 습식방법으로 도막 두께 3μm가 되도록 Au를 표면처리하였다. Fig. 2의 공정 순으로 제조된 Au-PTFE/Al 분리판을 Fig. 3에 나타내었다.

2.2 부식실험

금속분리판의 부식을 측정을 위하여 Fig. 4와 같이 지름이 15mm이고 유로 깊이와 폭이 1mm로 형성된 시편을 제조하였다. 시편의 위쪽에 가지가 형성된 이유는 유로를 형성시키기 위한 예칭공법 적용시와 Au, PTFE 표면처리시 제작의 편리성을 위한 것이다. ECA, ENCA에 대한 특성을 보기 위하여 표면처리가 되지 않은 Al시편과 표면과 유로끝 부분에 각각 Au, PTFE를 처리한 시편의 부식률을 측정하였다.

Potentiodynamic법을 이용하여 시편의 표면상태를 안정화시킨 후 tafel plot으로 부식률을 분석하였다. 증류수와 H₂SO₄ 및 2ppm의 HF를 이용하여 pH 3의 부식용액을 제조하였다. 시험온도 조건은 80°C이며 SCE를 reference

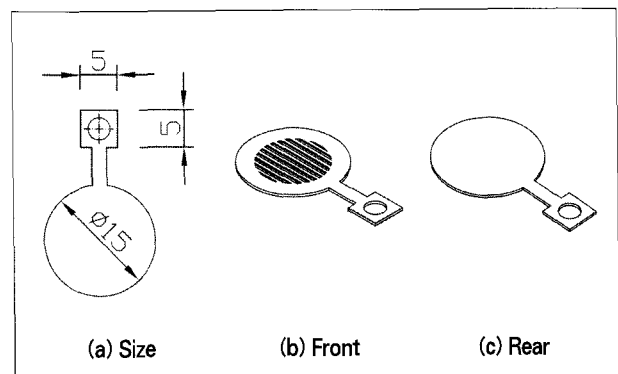


Fig. 4. Design of corrosion test sample

electrode로 이용하였다. SCE는 40℃ 이상에서는 사용할 수 없는 단점이 있기 때문에 염다리를 설치하여 부식률을 측정하였다.

2.3 접촉저항실험

제조된 Au-PTFE/Al 분리판의 접촉저항(ICR)을 Fig. 5와 같은 형태로 측정하였다. 금 도금된 집전체를 위/아래로 설치하고 분리판과 GDL을 삽입하여 접촉저항을 측정하였다. 시험 조건은 상온의 상태에서 power supply를 이용하여 1A의 전류를 인가하였으며 전류가 인가된 상태에서 유압 press의 압력을 50N/cm²부터 220N/cm²까지 상승시키면서 변화되는 전체전압(V)을 측정하였다. 측정된 전압과 전류를 통하여 Fig. 5의 R1, R2, R3의 저항값을 환산하였다.

Fig. 5의 R1, R2, R3 형태로 측정된 저항값은 식 (1)~식 (3)과 같이 표현할 수 있다. 식 (1)~식 (3)에서 $R_{cc}(Q)$ 는 집전체의 저항, $R_{cc-gdl}(Q)$ 은 집전체와 GDL간의 접촉저항, $R_{gdl}(Q)$ 은 GDL의 저항, $R_{gdl-bp}(Q)$ 은 GDL과 분리판과의 접촉저항, $R_{bp}(Q)$ 은 분리판의 저항, $R_{gdl-gdl}(Q)$ 은 GDL과 GDL간의 접촉저항을 각각 나타낸다.

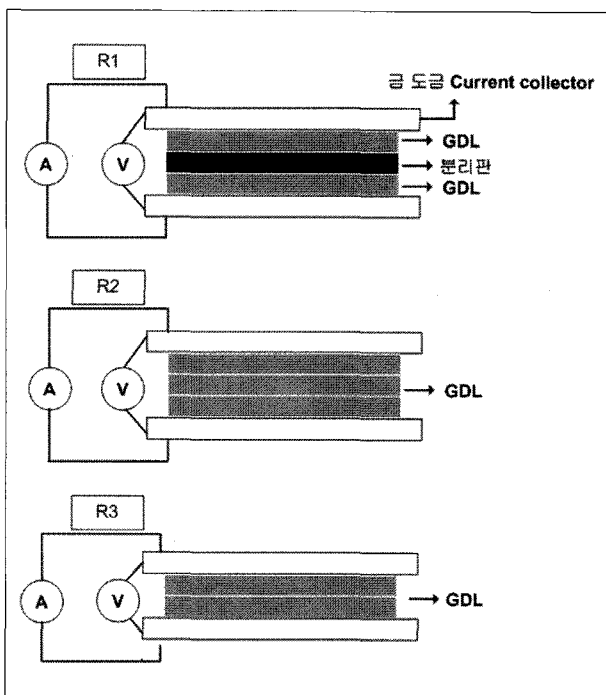


Fig. 5 ICR test

$$R1=2R_{cc}+2R_{cc-gdl}+2R_{gdl}+2R_{gdl-bp}+R_{bp} \quad (1)$$

$$R2=2R_{cc}+2R_{cc-gdl}+3R_{gdl}+2R_{gdl-gdl} \quad (2)$$

$$R3=2R_{cc}+2R_{cc-gdl}+2R_{gdl}+R_{gdl-gdl} \quad (3)$$

GDL과 분리판 사이의 접촉저항인 R_{gdl-bp} 을 계산하기 위하여 식 (1)~식 (3)을 식 (4)에 적용하면 GDL 저항, 분리판 저항 및 GDL과 분리판간의 접촉저항의 인자로 표현될 수 있다.

$$R1+R2-2R3=2R_{gdl}+2R_{gdl-bp}+R_{bp} \quad (4)$$

R_{gdl} , R_{bp} 의 저항값이 R_{gdl-bp} 의 저항값 보다 큰 경우에 식 (5)을 이용하여 R_{gdl-bp} 의 저항값을 계산할 수 있다. 제조된 Au-PTFE/Al 및 graphite 분리판의 접촉저항값은 식 (5)를 이용하여 계산하였다.

$$R_{gdl-bp} = \frac{R1+R2-2R3}{2} \quad (5)$$

($R_{gdl}+R_{gdl} \ll 2R_{gdl-bp}$ 경우)

2.4 성능평가

제조된 Fig. 3의 Au-PTFE/Al 분리판을 anode, cathode에 적용하여 단위전지를 제작하고 전류-전압 곡선을 측정하였다. Anode, cathode 기체로 수소와 공기를 이용하였으며 cell 온도 70℃, 상압 조건에서 측정하였다. 전류변화는 Agilent사 HP6050a electronic load를 이용하여 constant current mode로 변경하였다. 전류량별 anode 및 cathode의 SR은 각각 1.5와 2.0으로 설정하였으며 semi-counter flow 형태로 공급하였다. Bubbler type의 가습기를 이용한 anode, cathode의 가습량은 전 전류량 범위에서 RH95~98% 정도로 측정되었다. Anode, cathode의 촉매함침량이 0.4 mg Pt/cm² 인 MEA를 사용하였다.

Au-PTFE/Al 분리판을 이용한 단위전지의 전류-전압 곡선과 비교하기 위하여 SGL사의 graphite 소재를 금속분리판과 같은 형태로 제조하고 동일한 운전조건에서 전류-전압 곡선을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

제조된 Au-PTFE/Al 분리판을 이용하여 부식률, 접촉저항 및 단위전지 성능에 대한 시험을 실시하였다.

3.1 부식률

Fig. 4의 형태로 Al 시편을 준비하여 하나는 표면처리를 하지 않고 다른 하나는 골부분에 PTFE 피막을 형성시키고 그 외 부분은 Au 표면처리하여 tafel법으로 시험하였다. Al 및 Au-PTFE/Al 분리판의 부식실험 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6의 실험결과에 의하면 Al, Au-PTFE/Al 시편의 부식률은 각각 $122\mu\text{A}/\text{cm}^2$, $1.38\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 으로 나타났다. Au-PTFE/Al 시편의 부식률은 2015년 DOE goal인 $1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 와 거의 동등한 수준에 해당하는 것으로 귀금속 Au를 전 면적에 표면처리한 형태에 비하여 Au 사용량을 감소시키면서 동일한 내식성을 유지시킬 수 있을 것으로 여겨진다.

3.2 접촉저항

ECA, ENCA로 구분되어 표면처리된 Fig. 3의 Au-PTFE/Al 분리판을 이용하여 체결압에 따른 접촉저항을 측정하여 Fig. 7에 나타내었다. 초기 $50\text{N}/\text{cm}^2$ 에서 graphite 분리판의 접촉저항값은 $22.0\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 으로 측정되었고 Au-

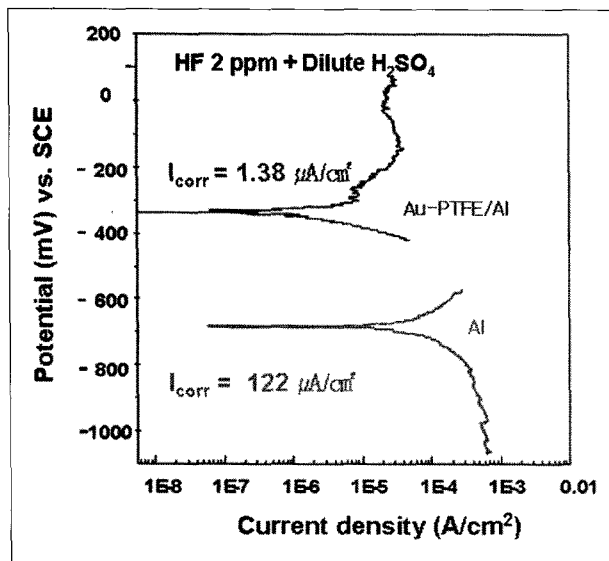


Fig. 6 Corrosion test

PTFE/Al 분리판의 경우 graphite 분리판에 비하여 약 32배 정도인 $717.0\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 으로 나타났다. 체결압을 $50\text{N}/\text{cm}^2$ 에서 $220\text{N}/\text{cm}^2$ 으로 상승시켰을 경우 graphite와 Au-PTFE/Al 분리판의 접촉저항은 $12.4\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$, $27.8\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 로 각각 44%와 33%의 감소율로 나타났다.

3.3 단위전지 성능

Anode 및 cathode에 Au-PTFE/Al 분리판을 이용한 단위전지를 제작하여 전류-전압 곡선을 측정하였다. Au-PTFE/Al 분리판을 이용한 단위전지의 성능과 비교하기 위하여 graphite 분리판을 이용한 단위전지를 제작하여 동일한 조건으로 시험을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8의 그래프에 나타난 것과 같이 Fig. 2의 형태로 제조된 Au-PTFE/Al 분리판의 경우 graphite 분리판에 비하여 낮은 성능을 보였다. 전압 0.6V 기준으로 graphite, Au-PTFE/Al의 전류량은 각각 $900\text{mA}/\text{cm}^2$, $450\text{mA}/\text{cm}^2$ 으로 나타났으며 전력량은 $0.54\text{W}/\text{cm}^2$, $0.27\text{W}/\text{cm}^2$ 으로 측정되었다.

3.4 표면처리 두께단차 최소화

Fig. 8의 전류-전압 곡선의 결과에 의하면 Au-PTFE/Al 분리판을 이용한 단위전지에서 낮은 성능이 나타났다. 이러한 이유는 체결압이 $200\text{N}/\text{cm}^2$ 인 조건에서 Au-PTFE/Al 분리판의

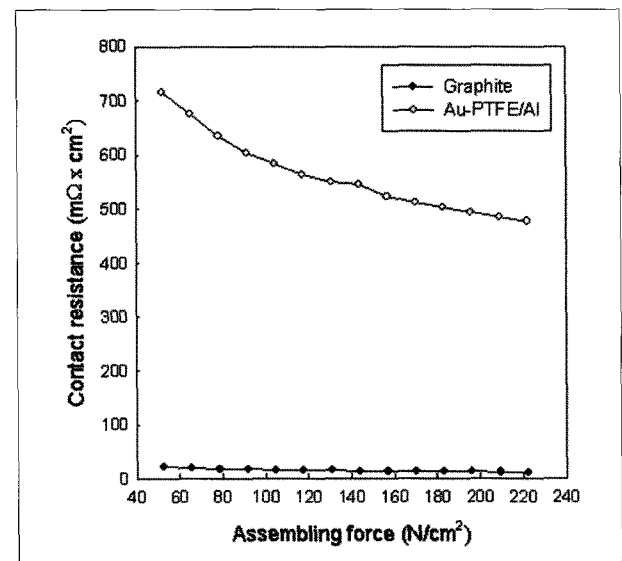


Fig. 7 Au-PTFE/Al ICR test

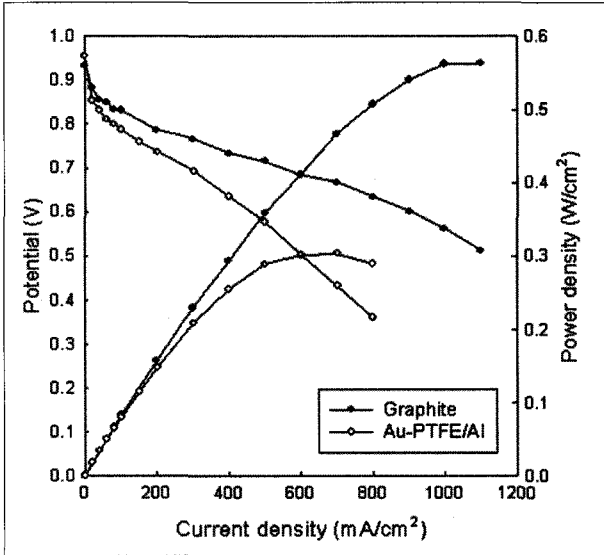


Fig. 8 Au-PTFE/Al I-V curve

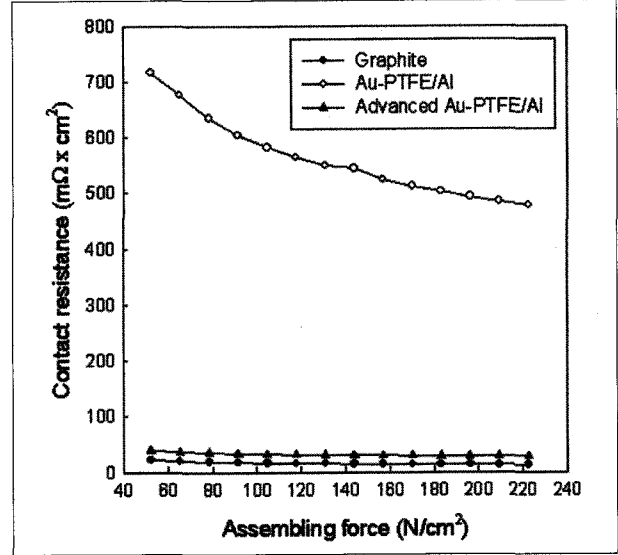


Fig. 9 Advanced Au-PTFE/Al ICR test

접촉저항이 graphite 분리판에 38배 정도 높게 나타났기 때문으로 분석되었다. 체결압이 높은 이유는 Fig. 2의 표면처리 두께단차에 의해 발생된 것으로 여겨진다. Fig. 2의 형태로 제조된 Au-PTFE/Al 분리판의 경우 ECA 부분은 gasket이 맞닿는 유로 외각 부분의 ENCA와 비교해서 두께가 22 μ m 정도 낮기 때문에 이로 인하여 두께단차가 없는 graphite 분리판에 비하여 체결저항이 높게 측정된 것으로 분석되었다.

Au-PTFE/Al 분리판의 ECA와 gasket이 맞닿은 ENCA와의 두께단차를 줄이기 위하여 Fig. 2의 제조공정을 수정하였다. Al 분리판에서 gasket이 맞닿은 ENCA 부분을 CNC로 22 μ m 절삭하여 Fig. 2의 방법으로 제조하였다. 그 결과 ECA와 gasket이 맞닿은 ENCA와의 두께단차가 1~2 μ m인 Au-PTFE/Al 분리판을 제조할 수 있었다.

두께단차를 개선시킨 Au-PTFE/Al 분리판을 이용하여 접촉저항을 측정하였으며 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 두께단차를 개선한 경우 체결압 50N/cm²에서 접촉 저항값은 39.6m Ω ·cm²으로 측정되었다. 이는 개선전 717.0m Ω ·cm²에 비하여 약 18배 낮은 수치에 해당되며, graphite 분리판 22.0m Ω ·cm²에 비해서 Au-PTFE/Al 분리판의 접촉저항이 비슷한 수준으로 측정되었다. 체결압이 220N/cm²인 경우 개선된 Au-PTFE/Al 분리판의 접촉저항은 27.8m Ω ·cm²으로 개선전 477.0m Ω ·cm²에 비하여 17배 낮아졌으며 graphite 12.4m Ω ·cm²와 비교해서는 다소 높으나 저항값이 대폭 감소되었다.

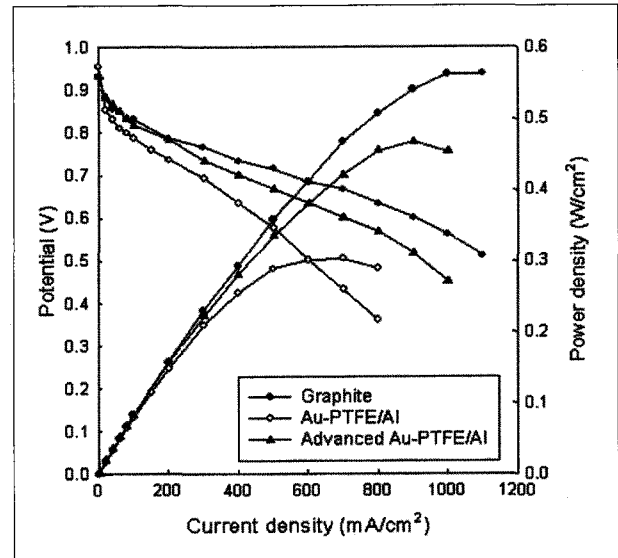


Fig. 10 Advanced Au-PTFE/Al I-V curve

개선된 Au-PTFE/Al 분리판을 이용하여 단위전지를 제작한 후 전류-전압 곡선을 측정하였으며 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 두께단차를 개선한 Au-PTFE/Al 분리판을 이용한 단위전지의 경우 개선전의 결과보다 우수한 성능을 보였다. 전압 0.6V를 기준으로 개선전과 개선후의 전류량은 450mA/cm²에서 700mA/cm²으로 상승하였으며 전력량 기준으로는 0.27W/cm²에서 0.42W/cm²으로 개선전에 비하여 약 36%의 성능이 향상되었다.

위 결과들을 종합하여 볼 때 graphite 분리판을 이용한 단위

전지에 비해서 29% 낮은 성능을 보이지만 표면처리 및 gasket 두께의 통해 체결압에 따른 접촉저항을 낮춤으로써 Au-PTFE/Al 분리판의 성능을 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

3.5 분리판 경량화

금속분리판의 장점 중 하나는 graphite 분리판보다 강도가 우수한 경량의 분리판을 제조할 수 있다는 것이다. 본 연구에서 개발된 Au-PTFE/Al 분리판은 성형공정으로 제조된 것이 아니기 때문에 다소 중량이 높은 편에 속한다.

본 연구에 사용된 graphite 분리판과 Au-PTFE/Al 분리판의 무게는 각각 48.16g, 20.83g으로 측정되었다. 전압 0.6V를 기준으로 분리판 중량 대비 성능을 Fig. 11에 나타내었다. 단위 전지의 경우 graphite 분리판을 이용한 형태에 비하여 Au-PTFE/Al 분리판을 사용한 경우에 단위전지의 성능이 낮게 측정되었다. 그러나 중량별 전력으로 환산하여 보면 graphite 분리판 0.27W/g보다 약 1.7배 높은 0.46W/g으로 계산되어 경량화면에서는 보다 우수한 것을 알 수 있다. 중량 대비 성능 계산에 사용된 분리판의 무게는 분리판 양면에 유로가 형성된 형태를 기준으로 하였기 때문에 1장의 분리판 무게로 환산하였다.

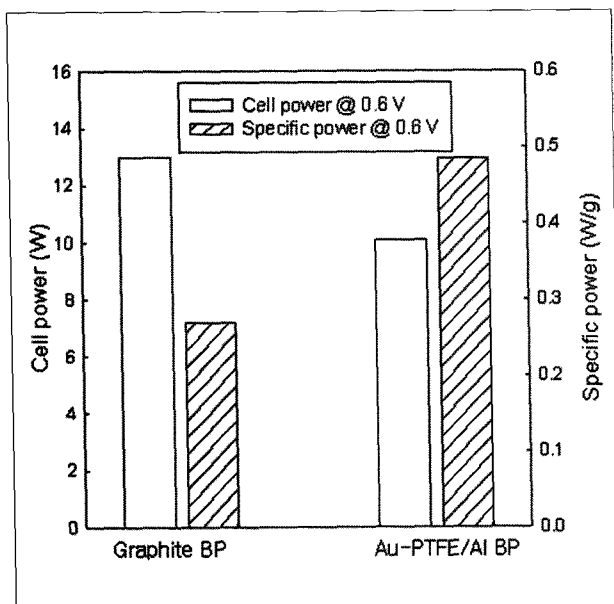


Fig. 11 Comparison of cell power and specific power

4. 결론

본 연구에서는 Al 금속소재에 전도성 Au와 비전도성 PTFE를 표면처리하여 성능 및 경량화정도에 대한 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. 분리판 표면을 전기적 접촉을 가지는 ECA와 전기적 접촉을 가지지 않는 ENCA로 구분하여 각각 Au, PTFE를 표면처리한 경우 전 면적에 Au를 처리한 형태보다 많은 양의 귀금속 소재를 감소시킬 수 있어 제조가격 저감효과를 가져올 수 있었다.
2. 비전도성 물질인 PTFE와 전도성 물질인 Au를 동시에 표면처리한 경우에 낮은 부식률인 $1.38\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 으로 나타났다.
3. ECA, ENCA 영역으로 설계된 Au-PTFE/Al 분리판의 경우 접촉저항을 향상시키기 위해서는 ECA와 gasket이 맞닿는 ENCA의 두께단차 최소화 설계가 중요하며 두께단차를 개선시킨 Au-PTFE/Al 분리판의 경우 $220\text{N}/\text{cm}^2$ 에서 접촉저항이 비교적 양호한 $27.8\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 으로 측정되었다.
4. 금속분리판에 Au 소재를 전체면적에 표면처리하지 않고 ECA에만 처리하여도 기존의 graphite 분리판을 이용한 단위전지의 78% 정도의 성능을 구현할 수 있었다. 아울러 향후 ECA와 gasket이 맞닿는 ENCA의 두께단차에 대한 지속적인 연구를 통해 성능을 보다 향상시킬 수 있는 가능성을 확인하였다.
5. Au-PTFE/Al 분리판을 이용한 단위전지의 성능이 0.6V에서 $0.42\text{W}/\text{cm}^2$ 으로 graphite에 비하여 다소 낮게 나타났지만, 무게당 전력에서는 $0.49\text{W}/\text{g}$ 으로 graphite 분리판에 비하여 약 2배가량 높게 측정되었다. 따라서 Au-PTFE/Al 분리판을 이용할 경우 연료전지 스택의 경량화에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.
6. 본 연구에 적용된 Au-PTFE/Metal 분리판은 Ti, Cr, Fe, Ni, Cu 등의 금속을 적용하여도 사용될 수 있는 형태이므로 이를 응용할 경우 고 내식성, 저 코스트 등과 같은 특수 목적에 필요한 연료전지용 분리판을 제작할 수 있을 것으로 사료된다.

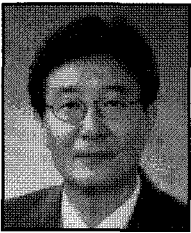
후기

본 연구는 자동차기반기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

References

- (1) D. P. Davies, 2000, "Stainless steel as a bipolar plate material for solid polymer fuel cells", J. of Power Sources, Vo. 86, No. 1-2, pp. 237-242.
- (2) E. Middelmann, W., 2003, "Bipolar plates for PEM fuel cells", J. of Power Sources, Vo 118, No. 1-2, pp. 44-46.
- (3) R. F. Silva, 2006, "Surface conductivity and stability of metallic bipolar plate materials for polymer electrolyte fuel cells", Electrochimica Acta, Vo. 51, No. 17, pp. 3592-3598.

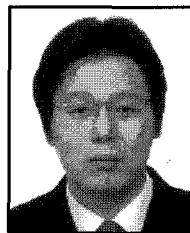
유승을



1984년 연세대학교 세라믹공학과 공학사
 1987년 Tokyo Institute of Technology 재료공학과 공학석사
 1990년 Tokyo Institute of Technology 재료공학과 공학박사
 1991년 자동차부품연구원

현재 자동차부품연구원 환경소재연구센터 센터장
 (E-mail : seyoo@katech.re.kr)

김명환



2001년 명지대학교 화학공학과 공학사
 2003년 한양대학교 화학공학과 공학석사
 2004년 자동차부품연구원

현재 자동차부품연구원 환경소재연구센터 연구원
 (E-mail ; kimmh@katech.re.kr)

구영모



2000년 울산대학교 화학공학과 공학사
 2002년 울산대학교 화학공학과 공학석사
 2002년 자동차부품연구원

현재 자동차부품연구원 환경소재연구센터 연구원
 (E-mail ; ymgoo@katech.re.kr)