

## 알루미늄 알칼리용해에 의한 PEMFC용 수소 생성

심우종\*, 리일채\*\*\*\*, 송명현\*\*, 정희범\*\*\*, 김정호\*\*\*\*, 김태희\*, 박권필†

\*순천대 화공과, \*\*순천대 전기제어과, \*\*\*순천대 기계과, \*\*\*\*조선대 기계과, \*\*\*\*\* (주)CNL Energy

## Hydrogen Production by the Reaction of Al and Alkaline Solution for PEMFC Application

WOOJONG SIM\*, ILCHAI NA\*\*\*\*, MYUNGHYUN SONG\*\*, HOIBUM CHUNG\*\*\*,  
JEONGHO KIM\*\*\*\*, TAEHEE KIM\*, KWONPIL PARK\*†

\*Department of Chemical Engineering, Suncheon National Univ., 315  
Maegok-dong Suncheon-si Jeonnam 540-742, Korea

\*\*Department of Electrical Engineering, Suncheon National Univ.,

\*\*\*Department of Mechanical Engineering, Suncheon National Univ.

\*\*\*\*Department of Mechanical Engineering, Chosun Univ.,  
Seosuk-dong, Dong-gu, Gwangju 501-759, Korea

\*\*\*\*\*CNL Energy, 1149-15 Jegi-Dong Dongdaemun-gu Seoul-Si 130-865, Korea

### ABSTRACT

Hydrogen production by the reaction of aluminum alloys and NaOH solution was studied for an automotive proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) application. In our experiment conditions (30~75°C, NaOH 0.5~5M), passivation of aluminum was not occurred. Higher rate of hydrogen production was observed at the reaction with Al alloys that contain impurities. With an increase in reaction temperature, hydrogen production rate by an increase in NaOH concentration increased much. When hydrogen was fed into the anode without filtering, PEMFC cell performance decreased 35% by ionic contamination such as Na<sup>+</sup> on the membrane and electrode. Thus, filtering of produced hydrogen is necessary for PEMFC operation.

**KEY WORDS** : Hydrogen production(수소발생), Aluminum alloys(알루미늄합금), Sodium hydroxide(수산화나트륨), PEMFC(고분자전해질연료전지)

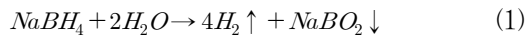
### 1. 서 론

수소연료전지는 수소의 화학에너지를 전기에너지로 변환시키는 장치로 에너지원이 탄화수소에서

수소로 바뀔 때(수소경제시대) 전기를 발생시키는 주요 에너지변환장치가 될 것이라 전망하고 있다. 수소와 연료전지는 상호 연관되므로 연료전지의 용도와 용량에 맞춰 수소의 제법 및 저장 방법이 결정되어야 한다. 수W~수kW 범위의 이동형 및

†Corresponding author : parkkp@sunchon.ac.kr

수송용 PEMFC 수소저장은 고압가스 봄베나 액체 수소로 하기에는 용기가 차지하는 무게 및 부피가 너무 커 적합하지 않다<sup>1)</sup>. 고압이나 액화에 의한 수소저장 방법외의 다른 수소저장방법으로서 수소저장물질에 의한 방법으로는 흡착 수소저장, MgH<sub>2</sub>, NaAlH<sub>4</sub> 등의 금속수소화물을 이용한 가역적 수소화물에 의한 저장, NaBH<sub>4</sub> 등을 이용한 비가역적 수소화물에 의한 저장방법이 있다. 흡착 수소저장의 경우 금속 나노입자를 비롯한 탄소나노튜브는 상온에서 1wt% 이하의 수소가 저장된다는 것이 밝혀졌고, 저장 용량의 재현성이 없어서 많은 연구가 필요한 상태이다<sup>2)</sup>. 가역적 금속수소화물에 의한 수소저장 중에서 일반적인 금속수소화물의 경우 현재 기술 수준에서 저장 탱크가 포함된 시스템을 기준으로 약 20kg/m<sup>3</sup> 및 1~3wt% 수소저장용량을 나타내어 실제 수송용, 휴대용보다 정치형에 적합하다<sup>3)</sup>. 비가역적 수소화물에 의한 수소저장 중에서 NaBH<sub>4</sub>는 높은 이론적 수소수율(10.8wt%)을 지니기 때문에 이동형 연료전지 장치의 수소저장방법으로 많은 연구가 진행되어 왔다. NaBH<sub>4</sub>의 가수분해 반응 (1)은 촉매가 없이는 매우 느린 반응이다<sup>4)</sup>.



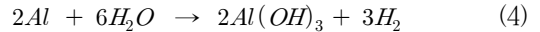
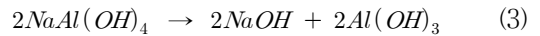
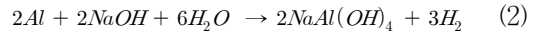
그래서 Pt 또는 Ru 등의 촉매 상에서 NaBH<sub>4</sub>를 물과 반응시켜야 하므로 혼합물에 촉매를 주입하는 장치가 필요하고, 반응으로부터 생성된 NaBO<sub>2</sub>는 ball milling 공정과 열화학적 방법으로 재순환될 수 있지만 높은 에너지를 필요로 하는 것과 연료공급이 쉽지만 반응조절이 어려운 것이 문제점이 되고 있다. 그리고 NaBH<sub>4</sub>는 고가이고 불안정하며 공기 중에서 수분에 매우 민감한 단점이 있다. 그에 반해 Al은 NaBH<sub>4</sub>에 1/20~1/10의 가격밖에 안 되고 안정하며 밀도가 2.7인 가벼운 금속으로 일반인들도 흔히 사용해 쉽게 접근할 수 있는 장점이 있어 최근에 연구가 활발하다.

NaOH와 같은 알칼리 용액에 Al을 넣으면 (2)(3)반응에 의해 수소가 발생하고 (4)는 전체반

Table 1 Theoretical yield of hydrogen produced by aluminum and sodium borohydride

M	M base H <sub>2</sub> mass%	M+H <sub>2</sub> O base H <sub>2</sub> mass%	H <sub>2</sub> kg./Mm <sup>3</sup>	H <sub>2</sub> kg/(M+H <sub>2</sub> O)m <sup>3</sup>
Al	11.1	3.7	300	52.8
NaBH <sub>4</sub>	21.2	10.8	296	121.0

응(overall reaction)으로 Al과 물이 소모되고 NaOH는 소모되지 않고 촉매역할을 할 뿐이다.



위의 반응에 의해 Al이 용해해서 발생하는 이론 수소수율과 NaBH<sub>4</sub>의 가수분해반응에 의한 이론 수소 수율을 비교하면 Table 1과 같다.

소모된 물을 고려하지 않을 경우, 수소생성량을 중량 %로 계산하면 Al이 NaBH<sub>4</sub>의 1/2 수준이지만 부피%로 계산하면 Al이 오히려 약간 더 높은 300 H<sub>2</sub>kg/Alm<sup>3</sup>을 갖고 있다. Al을 알칼리 수용액에 용해시켜 수소를 발생시키는 방법의 문제점은 Al 표면에 산화물이 형성되어 부동태화(passivation)로 인한 느린 반응속도, 강알칼리로 부식성이 강해 취급하기 어려운 점, 발열반응으로 반응조절이 어려운 점등을 들 수 있다<sup>4-7)</sup>.

본 연구에서는 상용 Al 합금을 알칼리에 용해하여 수소를 발생시키는 실험을 수행하여 Al 용해방법으로 생성된 수소를 수송용 PEMFC의 연료로 사용할 수 있는지 검토하였다.

## 2. 실험

관형태의 상용 Al 합금 1050, 3104, 5052를 사용하였다. 500ml NaOH(98%, DAE JUNG)용액이 들어있는 반응기에 2cm×2cm의 Al 합금을 넣어 상온에서 용해시켰다. 이때 발생하는 수소는 가는 튜브를 통해 물이 가득 채워진 채 거꾸로 세워진 메

스실린더에 포집해 그 양을 측정하였다.

본 연구에 사용된 세 가지 Al 합금에 함유된 금속의 함량은 ICP(PerkinElmer, D-Time 3000DC)로 분석하였고, Al 합금 3104를 2M NaOH 용액에서 용해시킨 후 나온 침전물은 여과·건조 하여 high power X-ray diffractometer(PANalytical B. V., D/Max-2500V/PC)로 분석했다.

본 실험에서 사용한 Al 합금에 함유된 금속의 함량을 Table 2에 나타냈다.

Al 용해반응에 의해 생성된 수소를 이용해 단위 전지 실험을 하였다. 5cm<sup>2</sup>의 상용 MEA, GDL, teflon gasket, bipolar plates와 end plates로 구성된 단위 전지는 100 토크로 체결 후 70℃로 운전했다.

2M NaOH 400ml가 채워진 반응기에 5cm×5cm Al 5052 3개를 용해시켜 발생한 수소를 튜브를 통해 anode에 가습 없이(반응열에 의해 자체 가습되었다고 볼 수 있음) 공급하였다. 이러한 수소 발생 반응기는 지속적인 수소 공급을 위해 단위전지를 구동하는 10시간 동안 20회 교체되었다.

생성된 수소를 Cell에 직접주입, 증류수층(scrubber)을 통과하고 주입하여 Cell에 미치는 이온의 영향을 확인하였다.

단위전지 실험동안 막 저항 및 부하전달저항(charge transfer resistance)의 변화를 impedance analyzer(Solatron, SI1260)로 측정하였고, 산화, 환원 peak에 의한 촉매활성을 비교하기 위해 cyclic voltammetry(Solatron, SI1287)를 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 합금 종류에 따른 수소 발생 속도

Table 2 Composition of aluminum alloys used in this study

	Cu	Fe	Cr	Mn	Mg	Si	Zn	Ti	Al
Al 1050	0.03	0.306	0.001	0.000	0.060	0.044	0.011	0.005	99.54
Al 3104	0.237	0.380	0.016	0.847	1.225	0.081	0.042	0.005	97.17
Al 5052	0.039	0.282	0.172	0.068	2.347	0.014	0.002	0.004	97.07

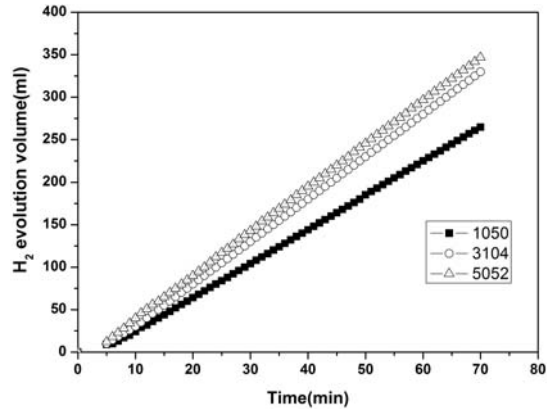


Fig. 1 Comparison of hydrogen volumes produced by the reaction of different alloys and 2M NaOH solution

각 Al 합금의 2M NaOH 수용액에서 수소 발생 속도를 Fig. 1에 나타냈다.

수소발생속도 순서는 1050 < 3104 < 5052 이다. Al 합금의 용해는 일종의 부식(corrosion)현상으로 해석할 수 있다. 즉 서로 다른 금속이 양극(anode)과 음극(cathode)을 형성해 만든 Galvanic cell에 의한 부식 메카니즘으로 설명할 수 있다. 금속의 표준 기전력(standard electric motive force of metal, EMF)에서 음의 위치에 있는 금속이 양극이 되어 이온화(즉, 용해)되는 것이다.

본 실험에서 사용한 Al 합금에 함유된 금속의 EMF를 Table 3에 나타냈다.

Cu, Fe, Cr, Mn은 Al과 같이 있을 때 음극이 되어 Al이 용해되게 하지만 Mg은 Al과 함께 있을 때 Mg이 양극이 되어 자신이 용해되므로 Al 용해 속도 증가에 도움을 주지 않는다.

본 실험에서 수소 발생 속도는 불순물이 많을수록 높아졌는데, 비슷한 예로 Al이 HCl 용액에서 99.998% Al에 비해 99.97, 99.2% Al은 각각 1,000

Table 3 Comparison of EMF on the metal-metal ion

Metal-metal ion	Cu-Cu <sup>2+</sup>	Fe-Fe <sup>2+</sup>	Cr-Cr <sup>3+</sup>	Al-Al <sup>3+</sup>	Mg-Mg <sup>2+</sup>
EMF (V vs. NHE)	0.337	-0.440	-0.774	-1.662	-2.363

배와 30,000배로 부식 속도가 증가함을 보였다<sup>8)</sup>.

### 3.2 NaOH 농도 및 온도에 따른 수소 발생 속도

Fig. 2는 Al 합금 3104를 30°C에서 0.5M에서 5M까지 NaOH 농도를 변화에 따른 수소발생 속도를 측정된 것이다.

0.5M에서 3.0M까지는 농도 증가에 의해 수소발생속도가 증가했으나 2.5M 이상부터는 농도 증가에 의해 속도증가가 거의 없음을 보이고 있다. 끝부분에 기울기가 꺾어진 것은 모든 부분이 균일하게 용해되지 않고 일부분이 용해속도가 빨라 먼저 없어진 부분이 있어 표면적이 작아지기 시작했기 때문이다. 이와 같이 균일하게 용해되지 않은 것은 Al 표면에서 농도와 온도가 균일하지 않은 영향도 있겠지만 Al 합금이 각 부분에서 균일하게 혼합되지 않은 영향도 있다고 본다.

본 실험은 교반하지 않은 상태이기 때문에 물질전달이 전체 반응속도에 중요한 역할을 한다. 물질전달은 농도차이에 의한 구동력에 의한 것이므로 NaOH 농도가 높은 bulk로부터 Al금속표면까지 NaOH가 확산해 가는데, 표면반응속도가 매우 빨라 표면에서 NaOH농도는 일정하다고 하면 구동력(즉, 농도 구배)은 결국 bulk 농도에 의해 결정된다. 그러나 농도가 높아지면 물질전달 속도가 표면 반응 속도와 비교해 빨라져 이때(=2.5M)부터는

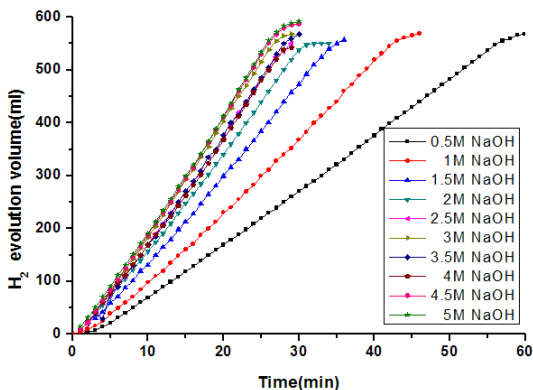


Fig. 2 Comparison of hydrogen volumes produced by the reaction of aluminum alloy 3104 and different NaOH concentrations at 30°C

전체 반응속도는 물질전달이 좌우하는 것이 아니라 표면 반응속도에 의해 좌우된다고 할 수 있다. 표면 반응속도는 온도에 영향을 제일 많이 받으므로 온도를 변화시키면 확인할 수 있다. 그리고 Al이 용해되어 수소가 발생하고 Al(OH)<sub>3</sub>가 침전하면서 물중의 산소도 소모되므로 물이 계속 추가되지 않으면 물이 소모돼 NaOH 농도는 증가한다. 농도가 증가해 2.5M 이상이 되더라도 농도 증가에 의한 그 이상의 수소 발생속도 증가는 없을 것으로 예상된다.

각 온도와 NaOH농도에서 수소 발생 속도를 측정한 결과를 Fig. 3에 나타냈다.

온도가 상승할수록 농도 증가에 따른 수소 발생속도가 증가했다. 온도 상승에 따라 표면 반응속도가 빨라져 물질전달이 잘되는 높은 농도에서 수소 발생속도가 더욱 높아졌다.

0.5M 농도에서는 30°C보다 75°C에서 수소 발생속도가 7.6배 높았으나 5.0M에서는 16.6배로 급상승하였다. 알루미늄의 알칼리 용해과정에서 부동태(passivation)가 발생한다고 하였는데 본 실험범위(30~75°C, 0.5~5.0M)에서는 발생하지 않았다.

부동태화는 침전물 농도의 영향도 있을듯한데 이에 대한 더 많은 연구가 필요하다. Al용해는 발

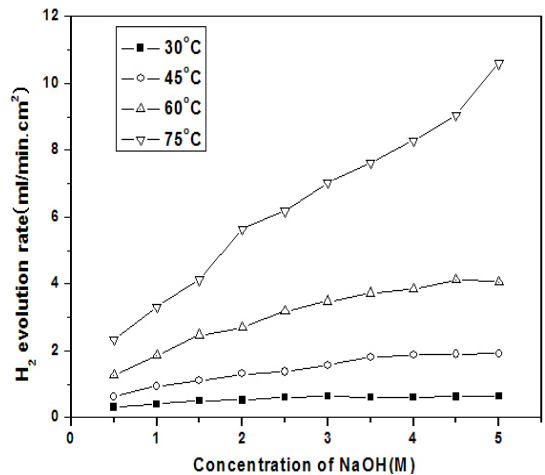


Fig. 3 Hydrogen production rates by the reaction of aluminum alloy 3104 and sodium hydroxide in different temperatures and concentrations

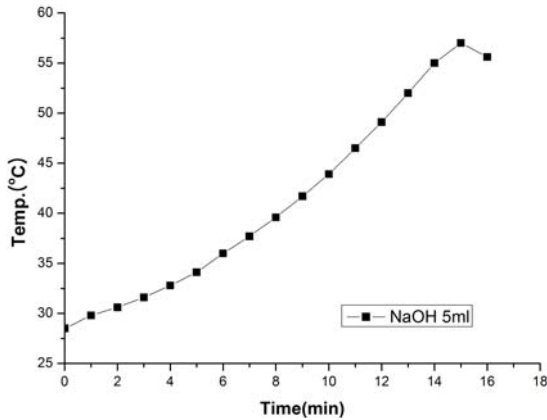


Fig. 4 Temperature variation during hydrogen production by the reaction of Al 5052 and 2M NaOH

열 반응(-831.2 kJ/mol)<sup>9)</sup>이므로 온도 제어를 하지 않으면 Al용해과정에서 온도상승에 따라 수소발생속도는 기하급수적으로 증가할 수 있고 100°C 이상에서는 물의 증발에 의해 수소발생원이 손실되므로 냉각과정이 필요하다.

Fig. 4에 25 ml 비커에 2M NaOH 5ml용액과 Al 5052 2cm×2cm 판을 넣고 상온(24°C)에서 용해시켰을 때 용액의 온도변화를 측정한 것이다.

단열재에 의해 열전달을 최소화시킨 상태에서 실험하였다. 15분 만에 온도가 57°C로 급상승하였고 이 과정에서 온도가 52°C 이상이 될 때 많은 기포와 거품에 의해 용액이 용해조 밖으로 넘치는 현상이 있었다. 수소기포를 따라 침전하지 않은 미세 Al(OH)<sub>3</sub>와 Al 합금 속의 Mg과 같은 다른 성분이 거품이 되는 것으로 보인다.

거품 발생을 방지하기 위해 침전물 제거와 온도 제어가 필요함을 보였다.

### 3.3 침전물 분석 및 PEMFC 단위전지 실험

Fig. 5는 Al 합금 3104를 2M NaOH 상온에서 용해시킨 후 나온 침전물을 여과해 건조한 후 XRD 분석한 것으로, Al(OH)<sub>3</sub>, Al<sub>12</sub>(Cr,Mn), Al<sub>7</sub>Cu<sub>2</sub>Fe, Mg 결정들이 형성됨을 보였다.

ICP 분석한 결과 용액속의 Na가 일부 포함되어 있을 뿐 3104 합금조성과 비슷한 조성을 보였다.

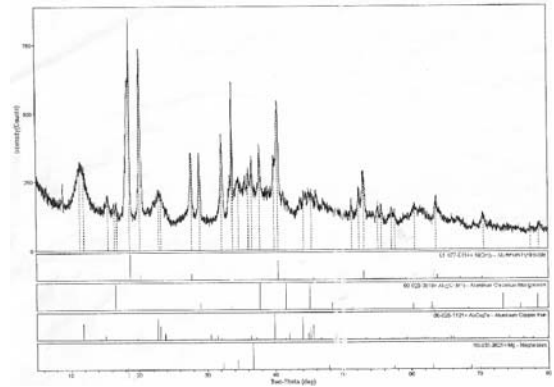


Fig. 5 X-ray diffraction of the precipitate formed by the reaction of Al 3104 and 2M NaOH

이 침전물을 순수한 Al으로 회수하기 위해서는 복잡한 과정과 많은 비용이 소요되겠지만, 수소발생용 Al 합금으로 회수하는 것은 이 침전물을 그대로 용융환원과정을 거치면 효과적으로 이용할 수 있을 것이라 본다.

Fig. 1에서도 보았지만 Al 합금이 순도가 높으면 오히려 수소발생속도가 작기 때문에 합금상태 그대로 리사이클링 하는 것이 효과적인 방법이다.

공기 중의 CO<sub>2</sub>와 KOH가 반응해 KHCO<sub>3</sub>(Kali-cinite)피크가 잡힐 것을 기대해<sup>10)</sup> 2M KOH 수용액에서 Al 합금 3104를 상온에서 용해시킨 후 침전물을 XRD 분석한 결과 KHCO<sub>3</sub>피크가 전혀 나타나지 않았다.

공기 중의 CO<sub>2</sub> 농도가 너무 낮아서라고 생각되어 용해조에 CO<sub>2</sub>를 2~3분 흘려 넣어준 후 알루미늄을 용해해 침전물을 XRD 분석한 결과 Fig. 6에 나타난 것처럼 KHCO<sub>3</sub>는 아니지만 카보네이트 화합물 K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O, KAl(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>2</sub>의 결정들이 형성됨을 보였다.

공기 중에 CO<sub>2</sub>가 많을 경우 KOH가 침전물로 소모되어 계속 보충해줘야 하는 문제점이 있어 NaOH를 알칼리로 이용하는 경우보다 효과적이지 않은 측면이 있다. 그리고 2M 농도 30°C에서 수소발생속도는 KOH가 0.88ml/min·cm<sup>2</sup>으로 NaOH의 1.36ml/min·cm<sup>2</sup>보다 약 35% 낮아 수소생성속도 측면에서도 NaOH가 유리하였다. 상업용 PEMFC

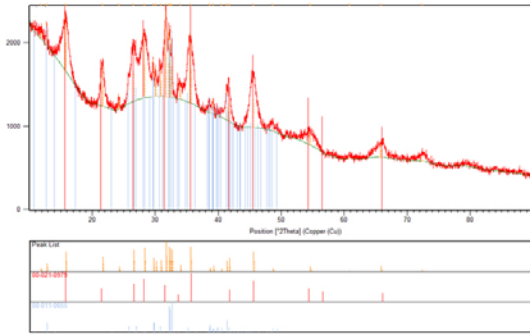


Fig. 6 X-ray diffraction of the precipitate formed by the reaction of Al 3104 and 2M KOH

5cm<sup>2</sup> MEA에 Al 용해에 의해 발생한 수소를 공급 하면서 성능을 측정한 I-V 곡선이 Fig. 7에 있다.

Al 5052를 45℃, 2M NaOH 용액에서 용해시켜 발생한 수소를 직접 anode에 유입한 경우와 증류수층(scrubber)을 통과한 후 유입되게 한 두 경우를 비교하였다. 증류수층을 통과해 수소 중에 있을 Na 이온 등을 제거한 경우에는 99.99% 상업용 수소를 공급했을 때와 같은 성능을 보였다. 그러나 증류수 층을 통과하지 않은 수소를 10시간 유입한 후 성능을 측정한 결과 Fig. 7에 있는 것처럼 0.6 V에서 약 35% 전류감소가 있음을 보였다. OCV

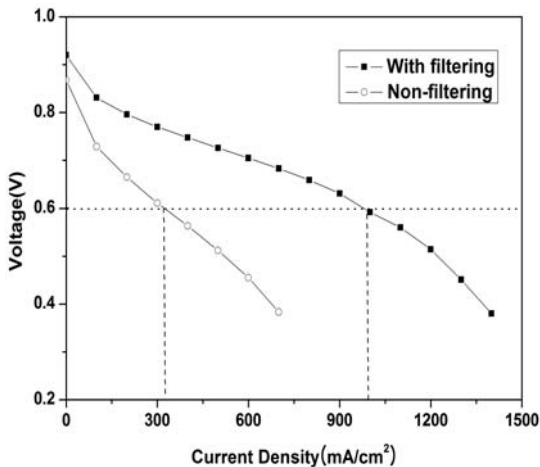


Fig. 7 Effect of hydrogen supplied with and without filtering on polarization curves(Hydrogen was produced by the reaction of Al 5052 and 2M NaOH at 45℃)

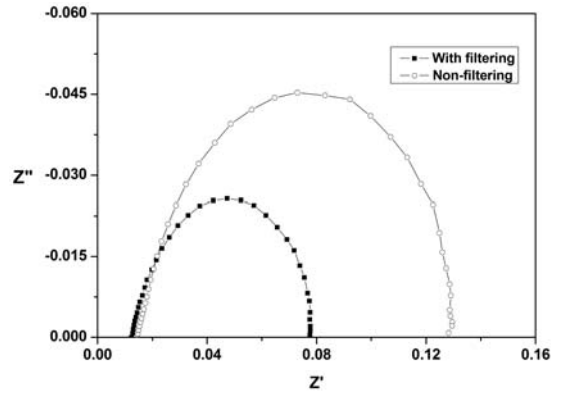


Fig. 8 Effect of hydrogen supplied with and without filtering on Nyquist plots(Hydrogen was produced by the reaction of Al 5052 and 2M NaOH at 45℃)

감소도 있고 이온이나 전자 전달 저항에 의해 전압강하가 나타나는 중간 영역에서 기울기가 증가해 막 이온 전달 저항이 증가했음을 보였다. 임피던스 측정된 결과 Fig. 8처럼 막 저항이 증가했음을 확인하였다.

Charge transfer 저항도 많이 증가했음을 보이고 있고, 불순물에 의해 촉매도 피독되어 촉매 활성 면적이 감소되었음을 Fig. 9의 CV 그래프에서 보이고 있다.

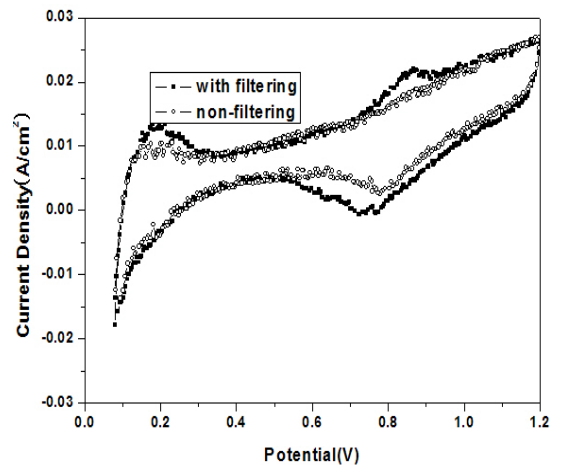


Fig. 9 Effect of hydrogen supplied with and without filtering on CVs(Hydrogen was produced by the reaction of Al 5052 and 2M NaOH at 45℃)

사용 후 MEA에서 전극을 분리하고 남은 막에서  $\text{Na}^+$  성분을 ICP로 분석한 결과 증류수층을 통과하지 않은 수소유입 막에서  $\text{Na}^+$ 이온이 0.19ppm/ $\text{cm}^2$  로 검출되었다. 수소이온보다 Nafion에 친화력이 좋은  $\text{Na}^+$ 이온이 NaOH 용액 중에서 수소와 같이 미스트(mist)형태로 떨어져 나와 Nafion막에 이온교환된 것이다. 알칼리에 Al을 용해 시켜 얻은 수소를 PEMFC 연료로 사용할 때는 수소 가스 중에 함유된 이온 등을 제거하면 됨을 보였다.

#### 4. 결 론

알칼리 용액에서 Al 합금을 용해시켜 연료전지용 수소를 발생시키는 실험을 한 결과를 다음과 같이 정리할 수 있다.

Al 합금의 수소 발생 속도는 EMF가 높은 성분이 많이 함유된 합금 5052와 3104가 순도가 높은 1050보다 높았다. 온도가 상승할수록 농도 증가에 따른 수소 발생 속도가 증가했다. 온도 상승에 따라 표면 반응 속도가 빨라져 물질전달이 잘 되는 높은 농도에서 수소 발생 속도가 더욱 높아졌다. 70°C 이상에서도 Al의 부동태화는 일어나지 않아 Al 부동태화는 온도의 영향뿐 만 아니라 알칼리 농도 침전물 농도 등 다른 조건의 영향도 받는 것으로 보인다. Al 용해는 높은 발열량으로 인해 냉각하지 않으면 온도가 계속 상승해 거품 발생 및 증발에 의해 용액이 손실되므로 온도제어가 중요하였다. Al 합금의 침전물에는  $\text{Al}(\text{OH})_3$  등이 있었고 KOH 알칼리를 사용했을 때는 공기 중의  $\text{CO}_2$ 와 반응해 카보네이트 화합물이 형성되었다. Al 용해에 의해 발생한 수소를 여과나 세척하지 않고 PEMFC 양극에 그대로 공급하면 가스 중에  $\text{Na}^+$  이온이 고분자막에 교환돼 성능을 감소시키고 촉매를 피독시키므로 여과나 세척 후에 연료전지에 공급해야 함을 보였다.

#### 후 기

본 연구는 2008년 순천대학교 산학협력실지원

사업에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- 1) D. K. Ross, "Hydrogen storage : The major technological barrier to the development of hydrogen fuel cell cars", Vacuum, Vol. 80, No. 10, 2006, pp. 1084-1089.
- 2) X. B. Wu, P. Chen, J. Lin and K. L. Tan, "Hydrogen Uptake by carbon nanotubes", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 25, No. 3, 2000, pp. 261-265.
- 3) B. Sakintuna, F. Lamari-Darkrim, M. Hirscher, "Metal hydride materials for solid hydrogen storage : a review", Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 32, No. 9, 2007, pp. 1121-1140.
- 4) L. Soler, J. Macanas, M. Munoz and J. Casado, "Synergistic hydrogen generation from aluminium, aluminium alloys and sodium borohydride in aqueous solutions", International J. of Hydrogen Energy, Vol. 32, No. 18, 2007, pp. 4702-4710.
- 5) C. R. Jung, Arunabha Kundu, B. Ku, J. H. Gil, H. R. Lee and J. H. Jang, "Hydrogen from aluminum in a flow reactor for fuel cell applications", J. of Power Sources, Vol. 175, No. 1, 2008, pp. 490-494.
- 6) A. V. Parmuzina and O. V. Kravchenko, "Activation of aluminium metal to evolve hydrogen from water", International J. of Hydrogen Energy, Vol. 33, No. 12, 2008, pp. 3073-3076.
- 7) E. D. Wang, P. F. Shi, C. Y. Du and X. R. Wang, "A mini-type hydrogen generator from for proton exchange membrane fuel cells", J. of Power Sources, Vol. 181, No. 1, 2008, pp. 144-148.
- 8) Mars G. Fontana, "Corrosion Engineering", 3rd edition, McGraw-Hill, New York, 1987, p. 31.

- 9) T. Hiraki, S. Yamauchi, M. Iida, H. Uesugi and Tomohiro Akiyama, "Process for Recycling waste aluminum with generation of High-Pressure Hydrogen", *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 41, No. 12, 2007, pp. 4454-4457.
- 10) L. Soler, J. Macanas, M. Munoz and Juan Casado, "Aluminum and aluminum alloys as sources of hydrogen for fuel cell applications", *J. of Power Sources*, Vol. 169, No. 1, 2007, pp. 144-149.