

## 고분자 전해질 막 연료전지에서의 아이오딘이 코팅된 분리판의 성능 효과

김태언<sup>1,2</sup> · 전소미<sup>2</sup> · 조광연<sup>1†</sup> · 설용건<sup>2†</sup>

<sup>1</sup>한국세라믹기술원 나노융합지능소재팀, <sup>2</sup>연세대학교 화공생명공학과, 신에너지전지융합기술 협동과정

### Effect of Iodine-coated Bipolar Plates on the Performance of a Polymer Exchange Membrane (PEM) Fuel Cell

TAE EON KIM<sup>1,2</sup>, SOME JUON<sup>2</sup>, KWANGYEON CHO<sup>1†</sup>, YONGGUN SHUL<sup>2†</sup>

<sup>1</sup>Intelligence Nano Convergence Material Team, The Korea Institute of Ceramic Eng. and Tech.,  
233-5, Gasan-dong, Geumcheon-gu, Seoul, 153-801, Korea

<sup>2</sup>Dep. of Chemical and biomolecular Eng. and Grad. Program of New energy and battery Eng., Yonsei Univ.,  
134 Sinchon-dong, Seodaemun-gu, Seoul, 120-749, Korea

**Abstract** >> Polymer exchange membrane (PEM) fuel cells have multifunctional properties, and bipolar plates are one of the key components in these fuel cells. Generally, a bipolar plate has a gas flow path for hydrogen and oxygen liberated at the anode and cathode, respectively. In this study, the influence of iodine applied to a bipolar plate was investigated. Accordingly, we compared bipolar plates with and without iodine coating, and the performances of these plates were evaluated under operating conditions of 75°C and 100% relative humidity. The membrane and platinum-carbon layer were affected by the iodine-coated bipolar plate. Bipolar plates coated with iodine and a membrane-electrode assembly (MEA) were investigated by electron probe microanalyzer (EPMA) and energy-dispersive x-ray spectroscopy (EDS) analysis. Polarization curves showed that the performance of a coated bipolar plate is approximately 19% higher than that of a plate without coating. Moreover, electrochemical impedance spectroscopy (EIS) analysis revealed that charge transfer resistance and membrane resistance decreased with the influence of the iodine charge transfer complex for fuel cells on the performance.

**Key words** : PEMFC(고분자 전해질 막 연료전지), Bipolar plate(분리판), Iodine(아이오딘), Electrochemical impedance spectroscopy analysis(전기화학적 임피던스 분석), Nafion(나피온)

## 1. 서 론

20세기 후반에 들어서면서 내연기관에 의한 대기 중의 이산화탄소의 영향으로 온실 효과 및 지구 온난

화에 따른 해수면의 상승으로 인한 문제가 확산되기 시작하였다. 이에 따른 석유 에너지의 사용이 규제되고 있지만 최근 급격한 인구증가와 빠른 기술발전으로 따른 에너지의 수요가 가파르게 증가하여 에너지 부족에 관한 문제를 해결하기 위한 방안으로 친환경적인 에너지의 중요성이 강조되고 있다. 이 중 수소연료를 사용하는 연료전지는 화학에너지를 전기에너지로 직접 전환하는 방식이 기존 열기관에 비해 에너

<sup>†</sup>Corresponding author : kycho@kicet.re.kr,  
shulyg@yonsei.ac.kr

[ 접수일 : 2013.1.3 수정일 : 2013.2.22 게재확정일 : 2013.2.28 ]

Copyright © 2013 KHNES

지 변환 방식에 차이가 있어 높은 효율을 가지며, 이산화탄소의 배출이 적어 친환경 에너지 시스템으로 전 세계적으로 연구가 활발히 이루어지고 있다<sup>1,2)</sup>. 특히 고분자 전해질 막 연료전지는 수소 이온 전도성 고분자 막을 전해질로 사용해서 다른 종류의 연료전지와 비교하여 저온에서 운전되기 때문에 이론 발전 효율/전류 밀도/출력 밀도가 크다. 또한 스택의 디자인의 간편성, 큰 압력차에 대한 내구성, 긴 수명 등의 장점으로 가정용과 자동차의 이동식 전원에 가장 적합한 형태로 초점이 맞추어졌다<sup>3)</sup>.

연료전지는 전해질 막과 전극, 기체 확산 막, 분리판, 집전체 등으로 구성되어 있다. 전해질 막의 경우에는 Dupont의 Nafion이나 Solvay의 Aquivion, Asahk glass의 Flemion 등 불소계 고분자 전해질 막이 널리 이용되고 있다. 하지만 비싼 제조공정과 100°C가 넘는 온도에서 수소 이온 전도도가 저하되고, 연료 기체의 투과 등의 이유로 최근 탄화수소계 고분자 및 세라믹 재료를 추가한 복합 막 형태의 전해질 막의 많은 연구가 진행되고 있다<sup>4,5)</sup>.

또한 전극 활성 물질로 사용되는 값 비싼 백금 촉매의 양을 줄이고 전극 성능을 향상 시키기 위하여 전극 내에서의 반응 활성점들을 증가시키는 연구도 이루어지고 있다. 전극 촉매층과 전해질 막 사이의 계면은 전해질 막이 고체로 되어 있어 한계가 있다. 따라서 이러한 전해질 막과 촉매층 계면의 면적을 증가하기 위하여 촉매층에 이오노머(ionomer)를 첨가하여 촉매와 이오노머의 접촉을 높여주어야 한다. 이때 촉매층과 이오노머 전해질 막 사이의 삼상계면(three-phase boundary)이 생겨나고 따라서 백금 촉매의 활용이 높아진다<sup>6)</sup>.

한편 최근에는 장기운전 및 내구성 향상을 위하여 고분자 전해질 막 연료전지의 연구가 진행되고 있다. 특히 장기 성능 또는 내구성 평가 운전 시 촉매층 또는 전해질 막, 분리판의 열 배출이 연료전지에 미치는 영향에 대해서도 연구가 진행되고 있다<sup>7)</sup>. W. M. Yan 등은 할로겐 원소인 염소(chlorine)가 연료전지에 미치는 영향에 대하여도 연구하였다<sup>8,9)</sup>. 이 보고에 따라

면 고분자 막 연료전지에 사용할 수소를 Chlor-alkali 과정으로 생산하게 되고, 이 과정에서 염소가 불순물로 포함된 수소를 연료로 사용하게 된 연료전지는 성능 감소를 가져온다고 말하고 있다.

하지만 수소를 생산하는 방식을 생각해보면, 매우 다양하게 존재하지만 대량으로 제조할 수 있는데 적합한 공정으로는 S-I 공정<sup>10)</sup>(sulfur-iodine process) 및 HyS 공정<sup>11)</sup>(hybrid Sulfur process) 등을 들 수 있으며, 이처럼 수소생산에 있어서 황(sulfur)과 아이오딘(iodine)의 수소와의 반응성 등에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.

따라서 본 연구에서 또 다른 할로겐 원소인 아이오딘이 연료전지에 미치는 효과를 확인하고자 하였다. 아이오딘에 대한 성능 효과를 확인 하기 위해 분리판을 이용하여 실험을 진행 하였다. 흑연 분리판을 이용해 아이오딘 용액에 흑연 분리판을 침지(dipping)시켰다가 꺼내어서 140°C의 온도에서 건조를 시킨 후 분리판 코팅 전 후의 단위전지 성능을 확인 하고자 하였다. Nafion 전해질 막을 이용해 막-전극 집합체(membrane-electrode assembly)를 만들고 코팅 전후의 분리판과 결합하여 단위전지를 제작하고 단위 전지 측정 시 기본조건으로 맞추어 75°C(상대습도 100%)에서 각각의 성능 비교 및 전기화학적 분석을 통하여 아이오딘의 영향을 확인 하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 분리판의 코팅 및 막-전극 집합체 제조

#### 2.1.1 분리판의 코팅

분리판(Il do F&C Co., LTD, Korea)은 흑연 분리판을 제작하여 사용하였으며 아이오딘 코팅은 용액에 넣었다가 건조하여 코팅하였다. 아이오딘(iodine, 대정화금)을 에탄올(Ethanol 99.9%, 대정화금)에 10wt%로 하여 용액을 만들어 12시간 동안 침지(dipping)시키고 140°C 오븐에서 12시간 건조시켰다.

2.1.2 막-전극 집합체 제조

고분자 전해질 막으로는 Dupont에서 개발한 Nafion NR212(thickness 50.0 $\mu$ m, equivalent weight 2100g/mol)을 사용하였다. 촉매 슬러리 제조를 위해서는 40wt% Pt/C(HISPEC 4000, Johnson Matthey)와 Iso-propyl alcohol(IPA, 대정화금), 5wt% Nafion 용액(Dupont)을 사용하여 전극을 제조하였다. Pt/C와 증류수, IPA, 5wt% Nafion 용액을 1 : 4 : 0.4 : 12의 질량비로 혼합하였다. 기체 확산층(gas diffusion layer, GDL)으로는 카본 페이퍼(SIGRACET, GDL-10BC)를 사용하였다. 전극의 활성면적은 25 cm<sup>2</sup>으로 전해질 막에 직접 스프레이 코팅(catalyst-coated membrane, CCM)하는 방법으로 균일하게 양극(anode, 연료극)과 음극(cathode, 공기극)에 각각 0.4mg/cm<sup>2</sup>으로 도포하여 제조하였으며, 도포 후 잔여 용매를 제거하기 위해 60°C에서 1시간동안 건조 시켰다.

2.2 분리판과 촉매층의 미세구조 관찰 및 성분 분석

2.2.1 분리판과 촉매층의 미세구조 관찰

아이오딘 코팅을 처리 하기 전 후의 분리판과 아이오딘 코팅된 분리판에서 운전을 마친 막-전극 집합체는 15kV와 20 $\mu$ A에서 FE-SEM(field-emission scanning electron microscope, JSM-6700F, Japan)을 통하여 코팅 전후의 분리판 표면 구조와 막-전극 집합체에서의 촉매층의 미세구조를 관찰 하였다.

2.2.2 분리판과 촉매층의 성분 분석

아이오딘이 코팅된 것을 확인하기 위하여 코팅 후 분리판을 20kV 4 $\mu$ A에서 운전해 EPMA(electron probe micro analyzer, JXA-8001, Japan)을 통하여 코팅 후 분리판에서의 아이오딘의 함량을 확인하였다. 동시에 단위전지 운전 후의 촉매층 및 전해질 막의 성분 변화 분석은 EDS(energy dispersive x-ray spectrometer, Genesis 2000 XMS, USA)를 이용하여 전해질 막의 변화를 관찰 하였다.

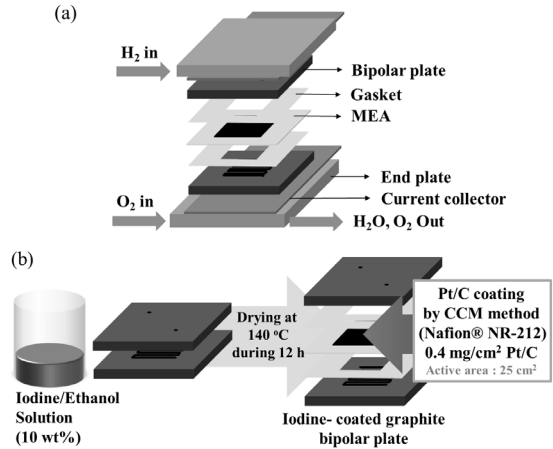


Fig. 1 Schematic diagram of (a) the configuration of a single cell and (b) the coating process for iodine-coated bipolar plate

2.3 단위전지의 성능 및 전기화학적 분석

Fig. 1에는 (a) 단위전지의 구성과 (b) Nafion 전해질 막에 Pt/C 촉매층이 코팅되어 제조된 막-전극 집합체를 아이오딘 코팅한 분리판을 그림으로 나타내었다. 그리고 그 각각 결합된 단위전지를 연료전지 평가시스템(Bekk Tech, USA)으로 전압과 전류를 측정하여 출력 특성을 비교하였다. 연료전지 운전 시 반응기체의 유량은 양극과 음극에 수소 기체는 100 ml/min로 산소 기체는 150ml/min으로 각각 흐르도록 고정하였으며 외부 압력은 상압을 유지 하였다. 성능 평가 조건은 75°C(상대습도 100%)인 기본조건에서 측정하였다. 연료전지의 전기화학적 분석을 위하여 전기화학적 분석 측정기(bio-logic, France)로 분리판 코팅 전후의 교류 임피던스(alternating current (AC) impedance), 순환 전압 전류법(cyclic voltametry, CV)과 동전위 주사 방법(linear sweep voltametry, LSV)를 측정하여 전기화학적으로 아이오딘이 미치는 성능 효과를 확인하였다. AC impedance는 0.6V에서 측정하였고, CV는 음극의 산소기체를 질소 기체로 바꾸어 약 15분간 공급한 후에 50mV/sec의 속도로 0.0~1.0V의 영역을 확인하였다. 또한 LSV는 5mV/sec의 속도로 0.0~0.5V의 영역을 측정하였다.

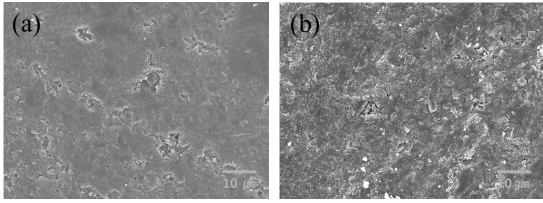


Fig. 2 FE-SEM image of (a) a normal graphite bipolar plate and (b) an iodine-coated bipolar plate

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 분리판과 촉매층의 미세구조 관찰 및 성분분석

Fig. 2는 아이오딘 코팅 전후로 분리판의 미세구조를 관찰한 사진이다. 아이오딘의 코팅 전에는 매끈한 분리판의 표면을 볼 수 있지만 코팅 후에는 코팅 전 보다 거칠어 보이는 표면을 볼 수 있다. 이는 흑연 분리판에 아이오딘 용액이 입혀져 건조되면서 표면이 거칠어진 것으로 판단된다. Table 1은 아이오딘으로 코팅한 분리판의 EPMA 분석이다. 흑연 분리판 제조시 불순물로 들어간 실리콘(silicon) 그리고 철(iron)과 같은 성분은 극 소량으로 존재하지만 탄소(carbon)의 비율이 크게 존재한다. 또한 아이오딘이 분리판 표면에 원자 비율 0.04% 소량 존재하고 있음을 관찰 할 수 있다. 에탄올에 녹인 아이오딘은 아이오딘화 알킬(Alkyl iodide)을 생성한다. 할로젠 원소 중 전기음성도가 가장 큰 플루오린(Fluorine)이 카본과 강한 공유결합을 이루어 일반적으로 화학적 열역학적으로 꽤 안정하다<sup>12,13</sup>. 하지만 상대적으로 전기음성도가 낮은 아이오딘은 결합 및 비결합이 쉽게

Table 1 EPMA analysis of an iodine-coated graphite bipolar plate

Element	Mass(%)	Atom(%)
C	91.549	93.8896
O	7.796	6.0016
Si	0.089	0.0389
Fe	0.122	0.0268
I	0.444	0.0431

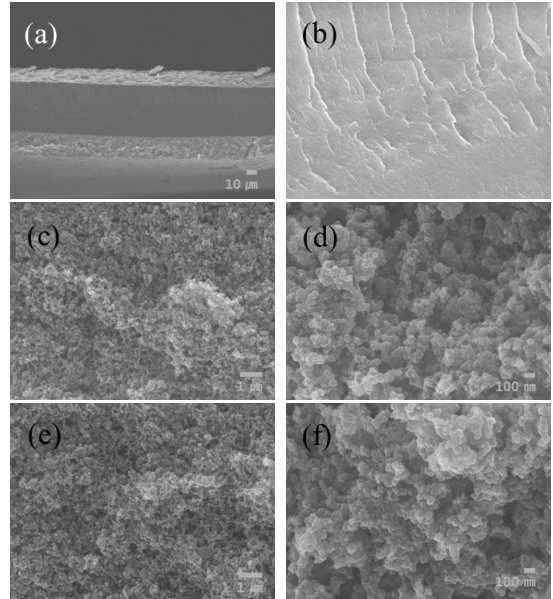


Fig. 3 FE-SEM image of (a) a catalyst-coated membrane, (b) a magnification of the membrane, (c, d) a magnification image of the catalyst layer at the anode, and (e, f) a magnification image of the catalyst layer at the cathode after cell performance

이루어진다는 것을 나타내므로 에탄올에서의 흑연 코팅이 쉽게 이루어진 것으로 판단된다.

Fig. 3은 아이오딘으로 코팅된 분리판으로 단위전지 운전을 마친 후 촉매층과 전해질 막에 대한 미세

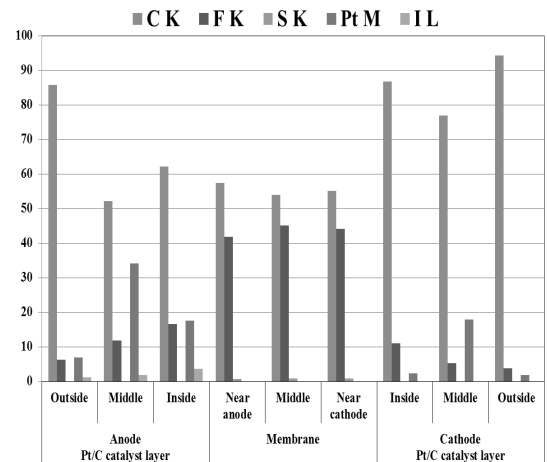


Fig. 4 EDS analysis of the anode Pt/C catalyst layer to the cathode Pt/C catalyst layer (atomic %)

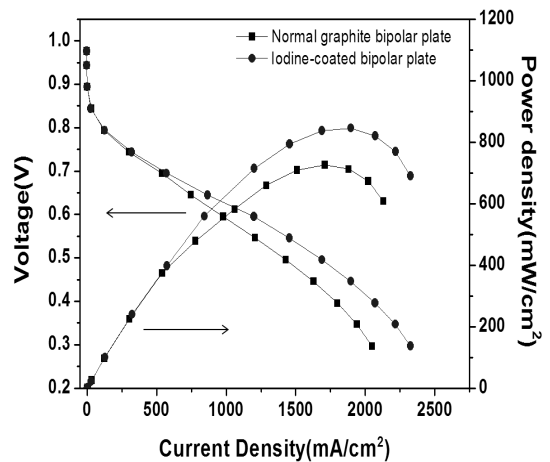
**Table 2** EDS analysis of numerical data in the scan range of anode and cathode catalyst layers (atomic %)

	Anode Pt/C catalyst layer			Membrane			Cathode Pt/C catalyst layer		
	Outside	Middle	Inside	Near anode	Middle	Near cathode	Inside	Middle	Outside
C K	85.73	52.18	62.22	57.4	53.99	55.17	86.7	76.86	94.3
F K	6.3	11.89	16.5	41.88	45.15	44.04	10.98	5.31	3.87
S K	-	-	-	0.72	0.86	0.79	-	-	-
Pt M	6.86	34.07	17.62	-	-	-	2.32	17.83	1.83
I L	1.11	1.86	3.66	-	-	-	-	-	-

구조를 관찰한 사진이다. Fig. 3(a)에서는 성능 평가 후 Nafion 전해질 막에 양극과 음극에 촉매층이 도포 되어 있는 것과 Fig. 3(b)은 전해질 막의 확대 사진, 그리고 Fig. 3(c), (d), (e), (f) 각각 양극과 음극의 촉매층을 볼 수 있다. 단위 전지 운전 후의 전해질 막과 촉매층은 미세구조 관찰에서는 큰 변화가 없는 것으로 판단된다. Fig. 4과 Table 2는 아이오딘으로 코팅된 분리판으로 단위전지 운전을 마친 후의 촉매층과 전해질막에 대한 EDS 분석이다. 양극과 음극의 백금 촉매층에서는 가스 확산층(GDL)과 만나는 바깥쪽으로부터 탄소의 원자 비율 %가 높고 다시 전해질 막으로 갈수록 증가한다. 백금 촉매층은 중간 범위에서 원자 비율 %이 높아져 양극에서의 수소 이온의 분리 및 음극에서의 산소와의 수소의 결합을 도와주고 있다. 하지만 아이오딘은 양극에서만 관찰되며, 가스 확산층과 만나는 바깥쪽보다 전해질 막으로 들어가면서 원자 비율 %가 증가하고 있다. 아이오딘이 수소와 결합하여 백금 촉매에 영향을 주었다고 판단할 수 있다. 반대로 음극에서는 물의 생성으로 아이오딘의 워싱(washing)이 생겨 존재하지 않는 것으로 판단된다. 전해질 막으로 사용한 Nafion NR212는 과불소화된 술폰산(perfluorinated sulfonic acid, PFSA)계 통으로 좋은 화학적 안정성과 높은 수소이온 전도도를 가지고 있다<sup>14)</sup>. 공중합체(copolymer)의 구조는 소수성의 테플론(Teflon)을 지지체로 가지며 친수성의 술폰산기(HSO<sub>3</sub>)로 이루어져 있다<sup>15,16)</sup>. 따라서 탄소와 플루오린, 술폰이 각각의 원자 비율 %로 측정되었다.

### 3.2 단위전지의 출력 특성 및 전기화학적 분석

Fig. 5는 아이오딘 코팅 전후의 분극곡선 및 출력 곡선이다. 단위 전지 성능은 아이오딘을 코팅 하지 않은 흑연 분리판을 사용하여 성능평가를 했을 때 보다 아이오딘을 코팅한 흑연 분리판을 사용했을 때 0.6V에서 약 19%정도의 높은 전류밀도가 측정되었다. 연료전지는 열역학 법칙에 따라서 이론 기전력이 1.23V이지만, 실제 발전에서는 활성화 손실, 저항 손실, 농도 손실이 존재하여 성능 감소를 가져온다.<sup>17)</sup> 아이오딘이 코팅된 흑연 분리판을 사용했을 때 저항 손실 부분에서 향상된 성능이 측정되었다. 이는 아이오딘에 의하여 음극에서의 접촉 저항 및 전해질 내의 이온전도도가 향상된 것으로 보인다.



**Fig. 5** Polarization curve and power density curve of the normal graphite bipolar plate unit cell and the iodine-coated bipolar plate unit cell at 75°C and 100% relative humidity

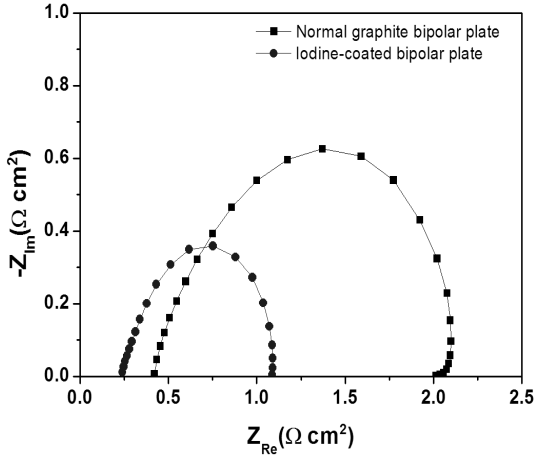


Fig. 6 AC impedance curve for a normal graphite bipolar plate unit cell and the iodine-coated bipolar plate unit cell at 75°C and 100% relative humidity

Fig. 6은 아이오딘 코팅 전후 단위전지의 교류 임피던스(AC impedance)곡선이다. 전기화학적 임피던스 분석(electrochemical impedance spectroscopy analysis, EIS)은 나이퀴스트 플랏(nyquist plot)으로 나타나는데, 원점에서부터 플랏이 시작되는 점까지의 x축 저항 값이 계면 이중층에서의 전하 전달 저항(charge transfer resistance)이다. 또한 플랏이 시작되는 점에서 끝나는 점까지의 x축 저항의 거리 값이 전해질 막 저항(membrane resistance)을 나타낸다<sup>18)</sup>. 아이오딘을 코팅한 흑연분리판을 사용하여 성능을 측정한 단위전지가 전하 전달 저항과 전해질 막 저항이 작게 측정되었다. 이는 아이오딘이 가지고 있는 전하 전달 복합체(charge transfer complex)가 작용하여 음극의 저항을 감소시킨 것으로 보인다. 1954년 벨 연구소와 다른 발표에 따르면 아이오딘과 브롬(Bromine)이 포함된 페릴렌(Perylene) 복합체가 전하 전달 복합체의 역할을 하여 전기적 저항의 감소를 가져온 것을 보고하였다<sup>19,20)</sup>. 따라서 아이오딘이 전하 전달 복합체로서 전하 전달 저항을 줄이고, 전해질 막 저항 또한 동시에 줄여줌으로서 Fig. 5의 성능 곡선에서도 저항 손실이 감소하여 성능 향상을 볼 수 있었다.

Fig. 7은 아이오딘 코팅 전후 단위전지의 순환 전압 전류법(cyclic voltammetry, CV)곡선이다. 백금 촉

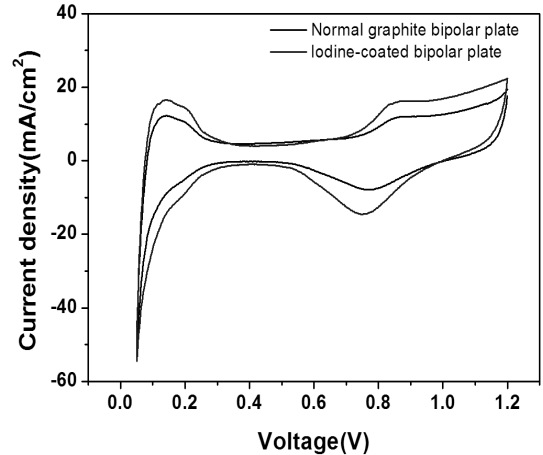


Fig. 7 Cyclic voltammetry for a normally graphite bipolar plate unit cell and an iodine-coated bipolar plate unit cell at 50 mV/s scan rate, 75°C, and 100% relative humidity

매의 수소 흡/탈착에 관한 전기화학적 활성 비표면적(electrochemical surface area, ECSA) 분석은 식 (1)을 이용하여 계산하였다<sup>21)</sup>.

$$ECSA(m^2g^{-1}) = \frac{\text{area charge}[mC cm^{-2}]}{(10 \times 210)[\mu C cm^{-2}] \times \text{loading catalyst}[mg cm^{-2}]} \quad (1)$$

여기서 전기화학적 활성 비표면적(ECSA)은 수소의 흡착/탈착 곡선의 전하 면적과 관계가 있다. 백금 촉매 표면에 단층의 수소이온이 흡착/탈착되는데 필요한 전하 밀도는  $210 \mu C/cm^2$ 이다. 따라서 흑연 분리판을 아이오딘으로 코팅 한 것은  $36.88 m^2/g$ 의 전기화학적 활성 비표면적을 가지며 코팅하지 않은 것은  $18.86 m^2/g$ 의 전기화학적 활성 비표면적이 계산된다. 전기화학적 활성 비표면적을 비교해 볼 때, 아이오딘으로 코팅한 분리판이 백금 촉매의 흡/탈착 활성 비표면적을 높인 것으로 측정되었다. 이는 아이오딘이 백금 전극 표면에서 확산이 되어 탈착의 가속화를 가져온다는 A.E. Thomas 등의 연구에 보고되어 있다<sup>22)</sup>. 따라서 아이오딘이 순간적으로 백금 촉매에 확산에 의하여 활성 비표면적을 높인 것으로 판단된다. 하지만 앞으로 연료전지에서의 아이오딘과 백금과의 반

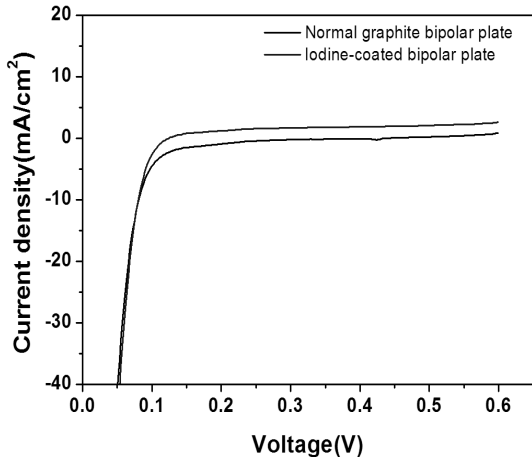


Fig. 8 Linear sweep voltammetry for a normally graphite bipolar plate unit cell and an iodine-coated bipolar plate unit cell, at 5 mV/s scan rate, 75°C and 100% relative humidity

응에 관한 연구가 이루어져야 한다.

Fig. 8은 아이오딘 코팅 전후 단위전지의 동전위 주사 방법(linear sweep voltammetry, LSV)곡선이다. 아이오딘을 코팅하지 않은 흑연 분리판은 수소기체 투과에 대한 안정성을 가지고 있으나 코팅된 분리판은 약  $0.3\text{mA}/\text{cm}^2$ 의 투과전류밀도를 나타내었다. 보통 전해질 막에 수소 기체의 투과가 생기면 이로 인해 혼성 전위(mixed potential)가 발생하게 되는데, 음극으로 넘어간 수소 기체가 산소 기체와 바로 반응하여 국소점(local point)에서 높은 열이 발생하게 되고 이는 전해질 막 표면의 핀홀(pinhole)을 더욱 크게 만들어 열린 회로전압(open circuit voltage, OCV)이 하락하게 된다<sup>23,24)</sup>. 여기서 아이오딘으로 코팅한 분리판을 사용한 단위전지는 순간적인 백금 촉매활성을 통하여 성능 향상과 높은 출력 특성을 보이지만, 많은 에너지가 갑자기 활성화되어 국소점의 핀홀을 더욱 크게 만들어 막의 열화를 촉진함으로 인한 것이라 판단된다. 따라서 앞으로 장기 성능평가를 하기에 다소 무리가 있지만 전해질 막 저항과 전하 전달 저항을 감소시켜 순간적인 출력 특성을 보이므로 아이오딘의 고정화로 촉매와 전해질 막에 영향을 주는 출력 특성을 이용하고 아이오딘이 가져오는 단점을 보완하여 연료전지에 이용할 수 있는 연구가 이루어

져야 할 것이다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 아이오딘을 코팅한 흑연 분리판과 일반 흑연 분리판을 사용하여 Nafion 전해질 막으로 단위 전지를 제작하고 성능 평가 및 전기화학적 분석으로 아이오딘의 영향을 확인 하였다.

- 1) 아이오딘을 코팅한 흑연 분리판과 코팅하지 않은 분리판을 사용하여 단위전지의 성능 평가에서 아이오딘이 코팅되지 않은 흑연 분리판은 0.6V에서  $978\text{mA}/\text{cm}^2$ 의 전류밀도를 얻었고, 아이오딘이 코팅된 흑연 분리판은 0.6V에서  $1200\text{mA}/\text{cm}^2$ 를 나타냈다.
- 2) 전기화학적 분석에서 아이오딘이 코팅된 분리판은 아이오딘의 전하 전달 복합체의 영향으로 전기적 저항의 감소를 가져와 아이오딘이 포함되지 않은 단위전지보다 교류 임피던스 측정에서 전하 전달 저항 및 전해질 막 저항을 줄여 성능이 증가한 것으로 판단된다.
- 3) 순환 전류 전압법 측정에서는 아이오딘이 코팅된 분리판은 아이오딘이 백금 촉매의 탈착의 가속화로 활성화에 영향을 미쳐 아이오딘이 없는 단위전지보다 백금 촉매의 활성화 표면적을 높게 얻었다.
- 4) 아이오딘이 포함되지 않은 단위전지에서의 동전위 주사 방법 측정에서는 수소기체의 투과가 이루어지지 않는 반면에 아이오딘으로 코팅된 흑연 분리판의 단위전지에서는 수소기체의 투과가 측정되었다. 앞으로 장기성능 평가에서 아이오딘이 고분자 막 연료전지에 미치는 영향이 연구되어야 할 것이다.

## 후 기

The authors are appreciated for the financial supports from Korean Ministry of Knowledge and Economy, under the program of Industrial Convergence Resources

Research Program and World Premier Material Research Program and the Fundamental R&D Program for Core Technology of Materials. This work was supported by the National Research Foundation of Korea Grant funded by the Korean Government (MEST) (NRF-2009-C1AAA001-2009-0092926).

## 참 고 문 헌

1. M. L. Perry, and T. F. Fuller, "A Historical Perspective of Fuel Cell Technology in the 20th Century", *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 419, No. 7, 2002, pp. S59-S67.
2. B. C. H. Steele, and A. Heinzl, "Materials for fuel cell technologies", *Nature*, Vol. 414, 2001, pp. 345-352.
3. S. J. Lee, S. Mukergee, J. McBreen, Y. W. Rho, Y. T. Kho, and T. H. Lee, "Effects of Nafion impregnation on performances of PEMFC electrodes", *Electrochimica Acta*, Vol. 43, No. 24, 1998, pp. 3693-3701.
4. S. J. Peighambaroust, S. Rowshanzamir, and M. Amjadi, "Review of the proton exchange membranes for fuel cell applications", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 35, 2010, pp. 9349-9384.
5. L. Zhang, S. R. Chae, Z. Hendren, J. S. Park, and M. R. Wiesner, "Recent advances in proton exchange membranes for fuel cell application", *Chem. Eng. J.*, Vol. 204-206, 2012, pp. 87-97.
6. J. K. Lee, H. Y. Ha, S. A. Hong, H. S. Chun, T. W. Lim, and I. H. Oh, "Effects of Preparation Method of Catalytic Layer on the Performance of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells", *J. Kor. Inst. Chem. Eng.*, Vol. 39, No. 1, 2001, pp. 109-115.
7. F. A. de Bruijn, V.A.T. Dam, and G. J. M. Janssen, "Review: Durability and Degradation Issues of PEM Fuel Cell Components", *Fuel Cell*, Vol. 8, No. 1, 2008, pp. 3-22.
8. H. Li, H. Wang, W. Qian, S. Zhang, S. Wessel, T. T. H. Cheng, J. Shen, and S. Wu, "Chloride contamination effects on proton exchange membrane fuel cell performance and durability", *J. Power Sources*, Vol. 196, 2011, pp. 6249-6255.
9. W. M. Yan, H. S. Chu, Y. L. Liu, F. Chen, and J. H. Jang, "Effects of chlorides on the performance of proton exchange membrane fuel cells", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 36, No. 36, 2011, pp. 5435-5441.
10. C. W. Forsberg, "Hydrogen, nuclear energy, and the advanced high-temperature reactor", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 28, 2003, pp. 1073-1081.
11. J. E. Funk, "Thermochemical hydrogen production: past and present", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 26, 2001, pp. 185-190.
12. B. P. Dailey, "Halogen Bond Character in the Alkyl Halides", *J. Chem. Phys.*, Vol. 33, No. 6, 1960, pp. 1641-1643.
13. P. J. Kropp, "Photobehavior of Alkyl Halides in Solution: Radical, Carbocation, and Carbene Intermediates", *Acc. Chem. Res.*, Vol. 17, 1984, pp. 131-137.
14. J. Peron, A. Mani, X. Zhao, D. Edwards, M. Adachi, T. Soboleva, Z. Shi, Z. Xie, T. Navessin, and S. Holdcroft, "Properties of Nafion NR-211 membranes for PEMFCs", *J. Membr. Sci.*, Vol. 356, 2010, pp. 44-51.
15. W. Liu, Y. Xie, J. Liu, Xiao. Jie, J. Gu, and Z. Zou, "Experimental study of proton exchange membrane fuel cells using Nafion 212 and Nafion 211 for portable application at ambient pressure and temperature conditions", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 37, 2012, pp. 4673-4677.
16. A. C. Fernandes, and E. A. Ticianelli, "A performance and degradation study of Nafion 212 membrane for proton exchange membrane fuel cell", *J. Power Sources*, Vol. 193, 2009, pp. 547-554.
17. S. Bhatt, B. Gupta, V. K. Sethi, and M. Pandey, "Polymer Exchange Membrane (PEM) Fuel Cell: A Review", *Int. J. Curr. Eng. Tech.*, Vol. 2, No. 1, 2012, pp. 219-226.



18. T. E. Springer, T. A. Zawodzinski, M. S. Wilson, and S. Gottesfeld, "Characterization of Polymer Electrolyte Fuel Cell Using AC Impedance Spectroscopy", *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 143, No. 2, 1996, pp. 587-599.
19. Y. Okamoto, and W. Brenner, "Organic Semiconductor", Reinhold Publ. Corp., New York, 1964.
20. H. Akamatsu, H. Inokuchi, and Y. Matsunaga, "Electrical Conductivity of the Perylene-Bromine Complex", *Nature*, Vol. 173, No. 4395, 1954, pp. 168-169.
21. S. Sun, H. Yu, J. Hou, Z. Shao, B. Yi, P. Ming, and Z. Hou, "Catalytic hydrogen/oxygen reaction assisted the proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) startup at subzero temperature", *J. Power Sources*, Vol. 177, 2008, pp. 137-141.
22. A. E. Thomas and A. Wieckowski, "Surface diffusion limited desorption of iodine on a platinum electrode", *J. Electroanal. Chem.*, Vol. 399, 1995, pp. 207-212.
23. V. Ramani, H. R. Kunz, and J. M. Fenton, "Investigation of Nafion/HPA composite membranes for high temperature/low relative humidity PEMFC operation", *J. Membr. Sci.*, Vol. 232, 2004, pp. 31-34.
24. V. Ramani, H. R. Kunz, and J. M. Fenton, "Stabilized composite membranes and membrane electrode assemblies for elevated temperature/low relative humidity PEFC operation", *J. Power Sources*, Vol. 152, 2005, pp. 182-188.