Nafion 함량이 데칼전사기법을 통해 제작된 고분자 전해질 연료전지의 MEA 성능에 미치는 영향

김경희^{1,2} · 조은애^{1†} · 한종희¹ · 김성현³ · 엄광섭¹

¹한국과학기술연구원 연료전지연구센터, ²고려대학교 에너지환경정책기술학과, ³고려대학교 화공생명공학과

Effects of Nafion Contents on the Performance of MEAs Prepared by Decal-Transfer Method

GYEONGHEE KIM^{1,2}, EUNAE CHO^{1†}, JONGHEE HAN¹, SUNGHYUN KIM³, KWANGSUP EOM¹

¹Fuel Cell Research Center, Korea Institute of Science and Technology, 39-1 Hawolgok-dong,
Sungbuk-gu, Seoul 136-791, South Korea

²Dept. of Energy Environment Policy & Technology, Korea University, 1-5 Anam-dong, Sungbuk-gu,
Seoul 136-701, South Korea

³Dept. of Chemical & Biological Engineering, Korea University, 1-5 Anam-dong, Sungbuk-gu,
Seoul 136-701, South Korea

Abstract >> Nafion ionomer located in electrode helps to increase the platinum utilization and proton conductivity. To achieve higher performance in PEMFCs, it is important an optimum Nafion content in the electrode. As the platinum loading and fabricated method depend on the optimum Nafion content. In this study, we have examined the interrelationship between platinum loading and Nafion content fabricated by decal transfer method. For electrodes with 0.25 and 0.4 mg/cm² Pt loading, best performance was obtained at 25 wt.% Nafion ionomer loading. It is also found that MEA with 0.25 mg/cm² Pt, the optimum Nafion content appears differently at low and high current density.

Key words : PEMFC(고분자전해질연료전지), Nafion contents(나피온 함량), MEA(막-전극접합체), Pt loading(백금 사용량), Decal-transfer method(데칼전사기법)

1. 서 론

연료전지는 수소를 연료로 전기를 생산하며 그 부산물로 물과 열만을 발생하는 친환경 전기 에너지 변환장치이다. 특히 고분자 전해질 연료전지는 저온(상온-80℃)에서 운전되고 출력밀도가 높아 자동차 및 휴대용 전원으로 활발히 연구가 진행되고 있다.¹⁾

고분자 전해질 연료전지의 막-전극접합체(membrane electrode assembly, MEA)는 연료극과 공기극, 전해질막으로 구성된다. MEA는 수소의 전기화학적 반응을 통해 전기에너지를 생산하는 역할을 한다. 따라서, 효율적인 MEA의 제조는 고분자 전해질 연료전지의 성능 향상을 위해 매우 중요하다.^{2,3)}

고분자 전해질 연료전지의 전극층(연료극, 공기극)에는 백금 촉매가 사용된다. 백금 촉매는 반응 면적을 늘리기 위해 비정질의 카본 위에 나노사이즈의

[†]Corresponding author : eacho@kist.re.kr

[접수일 : 2012.4.10 수정일 : 2012.4.23 게재확정일 : 2012.4.27]

입자 형태로 담지되어 있고, 바인더와 균일하게 혼합되어 10-20 μm 두께로 전해질막의 양쪽에 위치한다. 연료극에서 생성된 수소이온은 전해질막을 통해 공기극으로 이동하여 산소와 전기화학적으로 반응한다. 따라서 전극층에는 촉매 뿐만 아니라 수소이온의 이동을 담당하는 나피온이 존재해야 하며, 백금/카본 입자는 전기화학 반응에 대한 촉매 역할과 동시에 전자의 이동을 담당한다. 또한 반응 가스는 촉매 표면까지 원활하게 전달되어야 한다. 전극내의 촉매, 전해질, 기체상이 만나는 삼상계면이 넓을수록 더 우수한 성능을 나타낸다.^{4,5)} 또한 생성물인 물이 원활하게 배출되어야 높은 성능을 유지하기 때문에 물이 잘 배출되는 기공구조를 형성하는 것이 중요하다.

전극층에 포함된 나피온의 양이 너무 적을 경우 수소이온의 이동이 어렵다. 반면에 너무 많은 양의 나피온은 백금촉매의 표면을 덮어 기체의 전달을 방해하여 반응면적을 줄이거나 전자의 이동을 방해하여 성능을 감소시킨다.⁶⁻⁸⁾ 최적의 나피온 함량은 촉매량이나 제조방법 등에 따라 다르게 보고되고 있다.⁴⁻¹³⁾ G. Sasikumar 등은 CCG(catalyst coated GDL) 기법을 통해 제작된 MEA의 최적의 나피온 함량은 백금촉매의 함량에 따라 달라지며 0.5, 0.25 and 0.1mg/cm² 백금촉매 함량 기준 각각 20, 40 and 50wt.%가 최적의 성능을 보인다고 보고했다.⁴⁻⁷⁾ E. Passalacqua 등은 데칼전사기법으로 제작한 MEA의 경우 33wt.% 나피온 함량에서 가장 우수한 성능을 보인다고 보고했다.⁸⁾

본 연구에서는 데칼전사기법으로 제조한 MEA의 성능을 향상시키기 위해 공기극 백금 촉매 사용량이 0.4mg/cm² 인 경우와 0.25mg/cm² 인 경우, 촉매층 내의 나피온 함량에 따른 성능을 분석하여 MEA 제조 조건을 최적화하였다.

2. 실험방법

2.1 막-전극접합체 제작

데칼전사기법을 통한 MEA의 제작 과정은 Fig. 1

Fig. 1 Schematic procedure of MEA fabrication method; (1. steel plate, 2. teflon sheet, 3. gasket, 4. electrode on substrate, 5. Nafion membrane)

과 같다. 촉매잉크는 Pt/C (Tanaka K.K., Pt 45.8wt.%), 이차중류수 (resistivity of 18.2M Ω cm, Milipore), 20wt.% Nafion solution, IPA (J.T. Baker, HPLC grade) 을 sonicated bath 와 homogenizer (IKA-ULTRA-TURRAX ® T25) 를 이용, 항온(23 $^{\circ}\text{C}$) 조건에서 분산하여 제조하였다.

촉매잉크를 전사필름 위에 doctor blade로 코팅한 후 50 $^{\circ}\text{C}$ 진공 오븐(Jeio tech Co., Ltd, Temp. Range +5 $^{\circ}\text{C}$ -250 $^{\circ}\text{C}$)에서 24시간 동안 건조하였다. 건조된 전극층을 25cm² 로 자른 후 나피온 111 전해질막에 고온 고압으로(140 $^{\circ}\text{C}$, 15.7 Mpa pressure) 압착하여 전해질막으로 전사시켜 MEA를 제작하였다.

데칼기법으로 만든 MEA의 나피온 함량을 최적화하기 위해 공기극 나피온 함량을 20, 25, 30, 35wt.%로 제조하였다. 백금 촉매 사용량은 0.4mg/cm²와 0.25mg/cm²으로 하였다. 연료극의 나피온 함량은 25wt.%로 일정하게 유지하였으며 백금촉매량은 0.25mg/cm²로 하였다. 기체 확산층(gas diffusion layer, GDL)은 10BC GDL(SIGRACET® 10BC)을 사용하였다.

2.2 성능평가

2.2.1 운전조건

MEA의 성능평가는 CNL사에서 제작한 운전평가 장치를 이용하였다. 수소와 공기를 상대습도 100%

로 가습 후 화학양론비(stoichiometry ratio) 1.5 : 2.0 으로 공급하였고 운전온도는 65°C이다. 단위전지 조립 후 0.45 V에서 24시간 활성화 시킨 후 전기화학적 성능평가를 진행하였다.

2.2.2 전기화학 분석

전기화학 분석을 위해 i-V 특성곡선, 순환 전압전류(Cyclic Voltammetry, CV), 임피던스 측정(Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS)을 수행하였다. 임피던스 측정은 전압 0.85V, 진폭 5mV로 10 mHz에서 10 kHz의 주파수 범위에서 진행하였다. 순환전압전류는 연료극에 H₂, 120sccm, 공기극에 N₂, 340sccm 유량으로 50mV에서 1.2V 범위를 50mV/s의 주사속도로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 촉매 사용량 0.4mg/cm² 인 경우

나피온 함량을 최적화하여 데칼 전사 기법으로 제조한 MEA의 성능을 향상시키기 위해 공기극 백금 사용량이 0.4mg/cm² 일 때 나피온 함량이 20, 25, 30, 35wt.% 인 단위전지의 성능을 측정하여 Fig. 2(a)에 도시하였다. 모든 단위전지에서 열림회로 전위(OCV, open circuit voltage)는 1.0V로 유사하였다. 전류밀도가 150mA/cm² 이하의 저전류 밀도에서는 나피온 함량에 무관하게 성능이 거의 유사했으나, 전류밀도가 증가함에 따라 나피온 함량이 20, 25wt.% 인 단위전지에 비해 30, 35wt.% 인 단위전지의 전압이 빠르게 감소하였다. Fig. 2(a)의 결과로부터 나피온 함량에 따른 0.6V에서의 전류밀도와 최대출력밀도를 Fig. 2(b)에 도시하였다. 나피온 함량이 20에서 25wt.%로 증가함에 따라 0.6V에서의 전류밀도는 838에서 950mA/cm²로 증가한 후 나피온 함량이 30, 35wt.%로 증가했을 경우 650, 680mA/cm²으로 감소하였다. 최대출력밀도도 나피온 함량이 25wt.%일 때 585mW/cm²로 가장 높았으며, 나피온 함량이 25wt.%보다 낮아지거나 높아지는 경우 최대출력밀도는 감소하였다. 이

(a)

(b)

Fig. 2 Effects of Nafion content on (a) i-V curves for the MEAs with cathode Pt loading of 0.4 mg/cm² and (b) current density at 0.6 V and maximum power density

는 데칼전사기법으로 제조한 MEA의 경우 Pt 사용량이 0.4mg/cm²일 때 최적의 나피온 함량은 25wt.%임을 보여준다. 나피온 함량이 25wt.%보다 낮을 때는 전극 내에 이온의 전달 경로가 충분히 형성되지 못하고, 나피온 함량이 25wt.%보다 많을 때는 과량의 나피온이 촉매층을 덮어 반응기체의 물질전달을 어렵게 하고, 친수성의 나피온에 의한 물가둠 현상으로 물배출이 원활하지 못하기 때문이라고 판단된다.

나피온 함량에 따른 성능 변화의 원인을 분석하기 위해 Fig. 2로부터 전류밀도에 따른 전압손실을 식

(a)

(b)

(c)

Fig. 3 (a) Activation, (b) ohmic, and (c) mass transfer loss calculated from data in Fig. 2 and Eq. (2)

(1)에 따라 활성화손실(η_{act}), ohmic 손실(iR_{ohm}), 물질 전달손실(η_{conc})로 나누어 Fig. 3에 도시하였다.¹⁴⁾

$$\begin{aligned} E(i) &= E^{ocv} - \eta_{act}(i) - iR_{ohm} - \eta_{conc}(i) \\ &= E^{ocv} - A \log\left(\frac{i+i_0}{i_0}\right) - iR_{ohm} - \eta_{conc}(i) \end{aligned} \quad (1)$$

Fig. 3(a)에 도시한 활성화 손실은 나피온 함량이 20 과 25wt.% 일 때 낮고 30, 35wt.% 인 경우 다소 증가하였다. Fig. 3(b)의 ohmic 손실은 나피온 함량

(a)

(b)

Fig. 4 Effects of Nafion content on (a) cyclic voltammograms for the MEAs with cathode Pt loading of 0.4 mg/cm² and (b) electrochemical active surface area (EAS) and Pt utilization

Fig. 5 Effects of Nafion content on (a) Nyquist plot for the MEAs with cathode Pt loading of 0.4 mg/cm^2 and (b) ohmic and charge transfer resistance

에 상관없이 거의 유사하였다. 따라서 Fig. 2의 전류밀도 영역에서는 성능이 거의 유사하게 나타났던 것으로 판단된다. 반면, Fig. 3(c)에 나타난 물질전달 손실은 전류밀도가 높아짐에 따라 급격하게 증가하였으며, 특히 나피온 함량이 30wt.% 이상일 때 높은 값을 나타냈다. 이는 나피온 함량이 30wt.% 이상일 때는 과량의 나피온이 반응기체의 물질전달 저항을 증가시키고 물배출을 어렵게 하기 때문이라고 사료된다.

Fig. 4(a)는 나피온 함량에 따른 CV 결과이다. 100

mV 정도에서 나타나는 전류 피크의 면적으로부터 전기화학적 활성면적(electrochemical active surface area, EAS)을 계산하여¹⁵⁾ Fig. 4(b)에 정리하였다. 이때 Pt의 surface charge는 0.21 mC/cm^2 , Pt surface area는 $140 \text{ m}^2/\text{g}$ 으로 하였다. 나피온 함량이 20, 25wt.%인 경우 EAS는 $83, 78 \text{ m}^2/\text{g} \cdot \text{Pt}$ 로 유사하거나 약간 감소하였으나 나피온 함량이 30, 35wt.%로 증가함에 따라 $63, 48 \text{ m}^2/\text{g} \cdot \text{Pt}$ 로 확연히 감소하였다. 이는 나피온 함량이 30wt.% 이상일 때 Fig. 2과 3에서 보여준 물질전달 저항의 증가 뿐만 아니라 반응활성면적의 형성도 감소함을 보여준다. 또한 이는 Fig. 3(a)에서 나타난 나피온 30, 35wt.%에 비해 20, 25wt.%에서 활성화 손실이 낮은 것과도 일치하는 결과를 보여준다.

Fig. 5(a)는 나피온 함량에 따른 Nyquist plot이다. 이로부터 ohmic 저항(x-축과의 왼쪽 교점)과 전하전달저항(반원의 지름)을 구하여¹⁶⁾ Fig. 5(b)에 도시하였다. Ohmic 저항은 나피온 함량에 무관하게 $0.14 \text{ } \Omega \text{ cm}^2$ 로 동일하였다. 반면, 반응에 대한 저항인 전하전달저항은 나피온 함량이 20, 25wt.%인 경우 0.85, $0.84 \text{ } \Omega \text{ cm}^2$ 이었으나, 나피온 함량이 30, 35wt.%로 증가함에 따라 0.92, $1.03 \text{ } \Omega \text{ cm}^2$ 로 증가하였다. 즉, 나피온 함량이 30wt.% 이상인 경우 산소환원반응에 대한 저항이 높아지며, 이는 Fig. 4(a)의 EAS 감소와 함께 Fig. 3(a)의 활성화 저항의 증가에 기여하는 것으로 사료된다.

3.2 촉매 사용량 0.25 mg/cm^2 인 경우

백금 사용량에 따른 나피온 함량이 미치는 영향을 확인하기 위해 공기극의 백금 사용량이 0.25 mg/cm^2 일 때 나피온 함량이 20, 25, 30, 35wt.%인 단위전지의 성능을 측정하여 Fig. 6(a)에 도시하였다. 150 mA/cm^2 이하의 낮은 전류밀도에서는 나피온 함량에 따라 성능이 거의 유사하였다. Fig. 6(a)의 결과로부터 나피온 함량에 따른 0.6V에서의 전류밀도와 최대출력밀도를 Fig. 6(b)에 도시하였다. 나피온 함량이 20에서 25, 30wt.%로 증가함에 따라 0.6V에서의 전류밀도

(a)

(a)

(b)

(b)

Fig. 6 Effects of Nafion content on (a) i-V curves for the MEAs with cathode Pt loading of 0.25 mg/cm^2 and (b) current density at 0.6 V and maximum power density

는 855 에서 930 mA/cm^2 로 증가하였다. 그러나 나피온 함량이 $35 \text{ wt.}\%$ 에서는 780 mA/cm^2 으로 감소하였다. 최대출력밀도는 나피온 함량이 $25 \text{ wt.}\%$ 일 때 601 mW/cm^2 로 가장 높았으며 나피온 함량이 $20 \text{ wt.}\%$ 일 때는 563 mW/cm^2 , $30 \text{ wt.}\%$ 일 때 589 mW/cm^2 , $35 \text{ wt.}\%$ 인 단위전지의 경우 524 mW/cm^2 으로 가장 낮은 값을 보였다. 이를 통해 데칼전사기법으로 제조한 MEA의 경우 Pt 사용량이 0.25 mg/cm^2 일 때 최적의 나피온 함량은 $25 \text{ wt.}\%$ 임을 확인하였다.

Fig. 6로부터 전류밀도에 따른 전압손실을 계산

(c)

Fig. 7 (a) Activation, (b) ohmic, and (c) mass transfer loss calculated from data in Fig. 6 and Eq. (2)

(a)

(a)

(b)

(b)

Fig. 8 Effects of Nafion content on (a) cyclic voltammograms for the MEAs with cathode Pt loading of 0.25 mg/cm² and (b) electrochemical active surface area (EAS) and Pt utilization

Fig. 9 Effects of Nafion content on (a) Nyquist plot for the MEAs with cathode Pt loading of 0.25 mg/cm² and (b) ohmic and charge transfer resistance

하여 활성화손실(η_{act}), ohmic 손실(iR_{ohm}), 물질전달 손실(η_{cons})로 나누어 Fig. 7에 도시하였다. Fig. 7(a)에 도시한 활성화 손실은 나피온 함량이 23, 30wt.%인 경우가 20, 35wt.%인 경우보다 낮았다. Fig. 7(b)에서의 ohmic 손실은 나피온 함량에 무관하게 거의 동일하였다. Fig. 7(c)에 나타난 물질전달손실은 전류밀도가 높아짐에 따라 증가하였다. 특히 나피온 함량이 35wt.%인 경우 고전류밀도에서 높은 물질전달 손실을 나타냈다. 즉, Fig. 6(a)의 600mA/cm²의 고전류밀도에서 나피온 함량이 35wt.%인 단위전지의

성능저하가 물질전달저항 때문이라고 사료된다.

Fig. 8은 나피온 함량에 따른 CV 결과이다. 백금 사용량이 0.4mg/cm²인 단위전지에서의 방법과 동일하게 EAS를 계산하여 Fig. 8(b)에 도시하였다. 나피온 함량이 20에서 25wt.%로 증가함에 따라 EAS는 78.6에서 82.7m²/g·Pt로 증가하다가 나피온 함량이 30wt.%에서는 72.6m²/g·Pt로 감소하였으며 35wt.%에서는 48.1m²/g·Pt로 크게 감소하였다. 이는 Fig. 7(a)에서 나피온 함량이 35wt.%인 경우 가장 높은 활성화 손실을 보이는 것과도 일치하는 결과를 보여

준다. 즉, 나피온 함량은 촉매활성면적의 형성에도 영향을 주며 데칼전사기법으로 제조된 단위전지의 경우 백금 촉매의 사용양과는 무관하게 나피온 함량이 35wt.% 인 경우 촉매활성면적이 크게 감소하는 것을 확인하였다.

Fig. 9(a) 는 나피온 함량에 따른 Nyquist plot 이다. 이로부터 ohmic 저항과 전하전달저항을 구하여 Fig. 9(b)에 나타내었다. Ohmic 저항은 나피온 함량과 무관하게 $0.08\Omega\text{cm}^2$ 로 동일하였다. 반면, 전하전달저항은 나피온 함량이 30wt.%인 경우 $0.552\Omega\text{cm}^2$ 으로 가장 낮은 값을 보였고 나피온 함량이 35wt.%인 경우 $0.833\Omega\text{cm}^2$ 으로 가장 높은 값을 보였다. 그러나 이는 공기극의 백금 사용량이 $0.4\text{mg}/\text{cm}^2$ 에서의 낮은 저항값인 나피온 함량 20, 25wt.%의 경우 ($0.85\Omega\text{cm}^2$)와 유사하였다. 즉, 백금 사용량이 $0.25\text{mg}/\text{cm}^2$ 로 적을 경우 전극층 두께가 줄어들고 그로인해 전하전달저항이 감소하기 때문이라고 사료된다. 또한 Fig. 6(a)에서 나타난 $400\text{mA}/\text{cm}^2$ 이하의 저전류밀도에서 나피온 함량이 20wt.% 인 단위전지의 낮은 전압이 높은 전하전달저항에 기인한 것이라고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 백금 사용량에 따른 최적의 나피온 함량을 확인하기 위해 공기극의 백금 사용량을 $0.4\text{mg}/\text{cm}^2$ 과 $0.25\text{mg}/\text{cm}^2$ 으로 제조하여 나피온 함량이 20, 25, 30, 35wt.% 인 단위전지의 성능을 측정하였다.

백금 사용량이 $0.25\text{mg}/\text{cm}^2$ 와 $0.4\text{mg}/\text{cm}^2$ 인 경우 모두 나피온 함량이 25wt.%인 경우 가장 좋은 성능을 나타냈다. 나피온 함량이 25wt.%보다 낮을 때는 전극 내의 이온전달경로가 충분히 형성되지 못하고 나피온 함량이 30wt.% 이상일 경우에는 백금 표면을 과량의 나피온이 백금 촉매 표면을 덮어 활성면적을 줄이고, 기체 및 물의 통로를 막으며, 전기전도도를 떨어뜨리기 때문으로 판단된다.

특히, 백금 사용량이 $0.25\text{mg}/\text{cm}^2$ 인 경우, 0.6V 에서의 전류밀도는 나피온 함량이 25, 30wt.% 인 단위

전지에서 유사하였다. 그러나 나피온 함량이 30wt.%인 경우 매우 낮은 전하전달저항으로 인해 저전류밀도에서 나피온 함량이 25wt.%인 경우보다 우수한 성능을 보였다. 반면에 고전류밀도에서는 친수성의 나피온에 의한 물질전달손실의 증가에 의해 성능이 감소하였다. 백금 사용량이 $0.4\text{mg}/\text{cm}^2$ 인 경우, 나피온 함량이 25에서 30wt.%으로 증가할수록 물질전달손실의 증가, EAS의 감소, 전하전달저항의 증가가 나타났다.

후 기

본 연구는 한국과학기술연구원 기관고유사업의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Ryan O'hayer, Wiley Suk-Won Cha, Whitney Colella, Fitz B.Prinz, editors. "Fuel Cell fundamentals", New York: Wiley, 2008.
2. S. Litster, G. McLean, "PEM fuel cell electrodes", J. Power Sources, Vol. 130, 2004, pp. 61-76.
3. Arvind Parthasarathy, Supramaniam Srinivasan, A. John Appleby, "Electrode kinetics of oxygen reduction at carbon-supported and unsupported platinum microcrystallite/Nafion interfaces", J. Electroanal. Chem., Vol. 339, 1992, pp. 101-121.
4. M. W. Wilson, S. Gottersfeld, "Thin-film catalyst layers for polymer electrolyte fuel cell electrodes", J. Appl. Electrochem., Vol. 22, 1992, pp. 1-7.
5. Haolin Tang, Shenlong Wang, San Ping Jiang, Mu Pan, "A comparative study of CCM and hot-pressed MEAs for PEM fuel cells", J. Power Sources, Vol. 170, 2007, pp. 140-144.
6. G. Sasikumar, J.W.Ihm, H.Ryu, "Dependence of optimum Nafion content in catalyst layer on platinum loading", J. Power Sources, Vol. 132, 2004, pp. 11-17.
7. G. Sasikumar, J.W. Ihm, H.Ryu, "Optimum Nafion content in PEM fuel cell electrodes", Electrochim.

- Acta, Vol. 50, 2004, pp. 601-605.
8. E. Passalacqua, F. Lufrano, G. Squadrito, A. Patti, L. Giorgi. "Nafion content in the catalyst layer of polymer electrolyte fuel cells ; effects on structure and performance", *Electrochim. Acta*, Vol. 46, 2001, pp. 799-805.
 9. K.H Kim, K.Y Lee, H.J Kim, E.A Cho, S.Y Lee, T.H Lim, S.P Yoon, I.C Hang, J.H Jang, "The effects of Nafion ionomer content in PEMFC MEAs prepared by a catalyst-coated membrane (CCM) spraying method", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 35, 2010, pp. 2119-2126.
 10. D.Y Lee, S.W Hwang, "Effect of loading and distributions of Nafion ionomer in the catalyst layer for PEMFCs", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 33, 2008, pp. 2790-2794.
 11. Zhigang Qi, Arthur Kaufman, "Low Pt loading high performance cathodes for PEM fuel cells", *J. Power Sources*, Vol. 113, 2003, pp. 37-43.
 12. Takahiro Suzuki, Shohji Tsushima, Shuichiro Hirai, "Effects of Nafion ionomer and carbon particles on structure formation in a proton-exchange membrane fuel cell catalyst layer fabricated by the decal-transfer method", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 36, 2011, pp. 12361-12369.
 13. Peter Gode, Frederic Jaouen, Goran Lindbergh, Anders Lundblad, Goran Sundholm, "Influence of the composition on the structure and electrochemical characteristics of the PEFC cathode", *Electrochim. Acta*, Vol. 48, 2003, pp. 4175-4187.
 14. S.Y. Jeon, J.S. Lee, G.M. Rios, H.J. Kim, S.Y. Lee, E.A. Cho, T.H. Lim, J.H. Jang, "Effect of ionomer content and relative humidity on polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) performance of membrane-electrode assemblies (MEAs) prepared by decal transfer method", *Int. J Hydrogen Energy*, Vol. 35, 2010, pp. 9678-9686.
 15. A. Pozio, M. D. Francesco, A. Cenni, F. Cardellini, L. Giorgi, "Comparison of high surface Pt/C catalysts by cyclic voltammetry", *J Power Sources*, Vol. 105, 2002, pp. 13-19.
 16. X. Yuan, H.J. Wang, J.C. Sun, J.J. Jang. "AC impedance technique in PEM fuel cell diagnosis", *Int. J Hydrogen Energy*, Vol. 32, 2007, pp. 4365-4380.