

염료 감응형 태양전지 효율에 미치는 백금 상대 전극 제조공정의 영향

서현우 · 백현덕 · 김동민[†]

홍익대학교 재료공학부

Effects of Deposition Method of Thermally Decomposed Platinum Counter Electrodes on the Performance of Dye-Sensitized Solar Cells

HYUN WOO SEO, HYUN DUK BAEK, DONG MIN KIM[†]

Department of Materials science Engineering, Hongik University, 2639 Sejong-ro, Jochiwon, Sejong 339-701, Korea

[†]Corresponding author :
dmkim@hongik.ac.kr

Received 4 January, 2017
Revised 22 February, 2017
Accepted 28 February, 2017

Abstract >> In this work, two different platinum (Pt) counter electrodes have been prepared by spin coating a Pt solution and screen printing a Pt paste on fluorine doped tin oxide (FTO) glass substrate followed by sintering at 380 °C for 30 min. Linear sweep voltammetry (LSV) and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) analyses of the Pt electrodes showed that the spin coated electrode was catalytically more active than the screen printed electrode. The above result agrees well with the surface morphology of the electrodes studied by atomic force microscopy (AFM) and the photovoltaic performance of the dye-sensitized solar cells (DSSCs) fabricated with the Pt electrodes. Moreover, calculation of current density-voltage (*j*-*V*) curves according to diode model with the parameters obtained from the experimental *j*-*V* curves and the EIS data of the DSSCs provided a quantitative insight about how the catalytic activity of the counter electrodes affected the photovoltaic performance of the cells. Even though the experimental situations involved in this work are trivial, the method of analyses outlined here gives a strong insight about how the catalytic activity of a counter electrode affects the photovoltaic performance of a DSSC. This work, also, demonstrates how the photovoltaic performance of DSSCs can be improved by tuning the performance of counter electrode materials.

Key words : dye-sensitized solar cells(염료 감응형 태양전지), counter electrode(상대 전극), charge transfer resistance(전하 이동 저항), surface morphology (표면 형태) electrochemical impedance spectroscopy(임피던스)

1. 서론

염료 감응형 태양전지(Dye-sensitized solar cells,

DSSCs)는 1991년 Michael Gratzel에 의해 의 현재 형태로 개발되었으며, 이후 광기전력(photovoltaics) 분야에서 촉망받는 기술로 부각되고 있다¹⁻³⁾. 일반

적으로 염료 감응형 태양전지는 Fluorine doped tin oxide (FTO) 유리 기판 위에 다양한 색상의 염료가 흡착된 나노구조의 반도체 산화물이 코팅된 광전극(photoelectrode), I/I_3^- redox couple을 포함하는 전해질 용액(electrolyte), 그리고 Pt가 코팅된 FTO 유리 기판인 상대 전극(counter electrode)으로 구성된다. 염료 감응형 태양전지에서 상대 전극의 성능은 촉매 활성과 FTO 유리 기판 위에 증착된 전기화학적 촉매의 내부 표면적에 의존한다. 상대 전극 소재를 연구하는 연구자들은 효과적이고 저렴한 염료 감응형 태양전지에 관한 연구 결과를 많이 보고하고 있다. 고효율 염료 감응형 태양전지의 상대 전극으로 이용되는 일반적인 전기화학적 촉매는 Pt이다^{4,5)}. 염료 감응형 태양전지의 Pt 상대 전극은 보편적으로 열분해(thermal decomposition)⁶⁾, 전기화학 증착(electrochemical deposition)⁷⁾, 스퍼터링⁸⁾ 등의 방법으로 제조한다. 하지만 Pt 상대 전극의 특징은 증착 방법에 따라 Pt의 표면 구조 형태가 각기 달라지며 일반적으로 같지 않다.

Pt 상대 전극의 특성의 전기화학적 이해는 값비싼 Pt의 대체물로서 저비용 상대 전극을 개발하는데 도움이 된다. 염료 감응형 태양전지에서 광전류(photocurrent)의 손실은 셀의 total series resistance ($R_{s, total}$)로 인해 광전압이 감소되는 back reaction을 통해 발생한다^{9,11)}. $R_{s, total}$ 에 큰 영향을 미치는 요소인 상대 전극/전해질 계면의 전자 이동 저항(R_{CE})은 특정 전해질에 대해 전극 소재의 형태에 따라 매우 다양한 결과 값을 보인다. 그리하여 상대 전극에서 생기는 다양한 변화는 염료 감응형 태양전지의 광기전력 성능에 관여하는 R_{CE} 값에 직접적으로 영향을 미친다.

본 연구에서는 스퍼터링과 스크린 프린팅 각각의 코팅 공정과 Pt 전구체의 열분해를 통해 제조한 두 가지의 다른 Pt 상대 전극을 이용하여 염료 감응형 태양전지를 제작하고, 다이오드 모델 측면에서 광기전력 성능을 비교 분석하였다⁹⁾. 제작된 Pt 상대 전극은 전기화학적으로 분석되었으며, 얻어진 주요 요소인 R_{CE} 는 상대 전극의 표면 형태뿐만 아니라 염료 감응형 태양전지의 current density-voltage (j - V)

곡선과 밀접한 관계가 있음을 확인할 수 있었다.

2. 실험 방법

별도의 언급이 없다면 실험에 사용된 모든 시약과 용매는 Sigma Aldrich에서 구입하여 사용하였다. 나노 결정 TiO_2 의 다공성 층은 TiO_2 페이스트(TTP-20N, ENB Korea)를 doctor blading 방법으로 FTO 유리(Pilkington TEC8, $8 \Omega/square$) 기판 위에 코팅하여 제조하였으며, $500^\circ C$ 에서 30분 동안 열처리 하였다. 광전극 TiO_2 필름의 코팅 면적은 $0.25 cm^2$ 이고 평균 두께는 약 $3 \mu m$ 이었다. 염료 흡착을 위해 열처리가 끝난 TiO_2 전극을 0.3 mM ruthenium 염료(N719, Solaronix SA, Switzerland) ethanol 용액에 넣고 약 16시간 동안 상온 보관하였다.

Pt 상대 전극은 동일한 FTO 유리 기판 위에 50 mM 농도의 chloroplatinic acid hexahydrate ($H_2PtCl_6 \cdot 6H_2O$) ethanol 용액과 Pt 페이스트(PT-1, Dyesol, Australia)를 이용하여 각각 스퍼터링과 스크린 프린팅 공정을 통해 제조하였다. 각각의 공정을 통해 Pt 전구체가 코팅된 FTO 유리 기판은 $380^\circ C$ 에서 20분 유지하는 조건하에 열처리하였다. 염료가 흡착된 광전극과 Pt 상대 전극은 surlyn 필름(Meltonix 1170-60, Solaronix SA, Switzerland)을 이용하여 샌드위치 형태로 조립하였다. 셀의 접합은 hot-press (QM900M, Qmesys, Korea)를 이용하여 $80^\circ C$ 에서 열과 일정 압력을 가하며 접합하였다.

액체 전해질은 acetonitrile과 valeronitrile (부피비 85:15)에 0.6 M 1-butyl-3-methylimidazolium iodide (BMII), 0.1 M I_2 , 0.1 M guanidinium thiocyanate와 0.5 M 4-tert-butylpyridine (TBP)을 해당 농도로 용해하여 제조하였다. 액체 전해질은 상대 전극에 뚫려 있는 구멍을 통해 셀에 직접 주입되었으며, 투명 테이프 조각을 이용하여 밀봉하였다. Pt/전해질/Pt 전극 배열로 구성된 대칭형 더미 셀 또한 각각의 Pt 상대 전극을 이용하여 염료 감응형 태양전지와 유사한 방법으로 접합 및 제작하였다.

제조된 Pt 상대 전극의 표면 형태는 atomic force

microscope (AFM, MultiMode 8, Bruker, USA)으로 분석하였다. 광기전력 측정은 AM 1.5 스펙트럼 조건 하에서 3A solar simulator (XES-40S1, San-Ei Electric Co. Ltd., Japan)를 이용하였으며 빛의 세기는 실리콘 광전다이오드를 기준으로 1 sun 강도 ($100\text{mW}/\text{cm}^2$)로 보정되었다. j - V 곡선은 potentiostat (Model 273A, EG&G, USA)을 이용하여 셀의 short circuit부터 open circuit 범위까지의 전압을 인가하며 측정하였다. 셀의 electrochemical impedance spectroscopy (EIS) 스펙트럼은 진동수 측정기(frequency response analyzer, SI 1255, Solartron, USA)가 장착된 동일한 potentiostat으로 측정하였다. 측정된 EIS 데이터는 Zview software (version 3.1, Scribner Associates Inc., USA)에서 염료 감응형 태양전지의 적절한 등가 회로로 피팅하였다. 모든 EIS 측정은 100 kHz에서 100 mHz까지의 진동수 영역에서 주파수를 변화시키며 수행되었으며, j - V 곡선과 동일한 1 sun 강도의 조건을 유지하며 셀의 open circuit voltage (V_{oc})부터 P_{max} 에 해당하는 전압 값까지 50 mV의 간격으로 측정하였다. 조정 전압의 진폭은 10 mV로 설정하였다. 대칭형 더미 셀의 EIS 스펙트럼은 셀의 V_{oc} 에서 측정하였으며, linear sweep voltammogram (LSV)는 10 mVs^{-1} 의 스캔속도로 -1.0 에서 $+1.0\text{ V}$ 까지의 인가 전압 범위에서 측정하였다.

3. 결과 및 토의

Fig. 1은 FTO 유리 기판 위에 열적으로 분해된 Pt

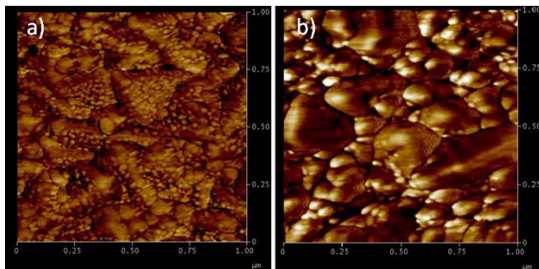


Fig. 1. Atomic force microscopy (AFM) image of Pt deposited on FTO through a) spin coating a Pt solution (SC) and b) screen printing a Pt paste (SP) followed by sintering at 500°C

상대 전극의 표면 AFM 이미지를 보여준다. AFM 이미지로부터 스핀 코팅으로 제조된 전극(spin coating, SC)에 분포된 Pt 나노입자가 스크린 프린팅으로 제조된 전극(screen printing, SP)의 Pt 나노입자보다 입자의 사이즈가 비교적 미세하고 균일함을 명확하게 관찰할 수 있다. Fig. 2는 두 종류의 Pt 전극으로 각각 제작된 대칭형 더미 셀의 Bode imaginary와 복소 평면(complex plane) 플롯에서의 EIS 스펙트럼을 나타낸다. 높은 진동수와 낮은 진동수 피크는 각각 전극 표면에서의 전하 이동과 triiodide/iodide 산화환원 종의 확산 결과에 기인한다¹²⁾. 두 종류의 대칭형 더미 셀의 Bode imaginary 플롯(Fig. 2a) 데이터는 SC에서의 전하 이동에 상응하는 시간 상수가 SP의 해당 상수보다 더 낮은 값을 나타낸다. 스펙트럼의 R_s 는 옴 직렬 저항(ohmic series resistance), R_{ct} 는 전하 이동 저항, C_{dl} 은 double layer capacitance 그리고 Z_w 는 확산 임피던스(diffusion impedance)를 나타내며, Randle's circuit (Fig. 2a)으로 피팅하였다. R_{ct} 는 상대 전극 소재의 촉매 성능을 평가하는데 매우 중요한 변수이다. 또한 Tafel polarization plot 뿐만 아니라 LSV는 상대 전극의 촉매 성질을 평가하는 유용한 수단 중 하나이다¹³⁾. 대칭형 더미 셀의 LSV는 Fig. 3a, Tafel polarization plot은 Fig. 3b에 각각 나타내었다. SC, SP의 두 가지 대

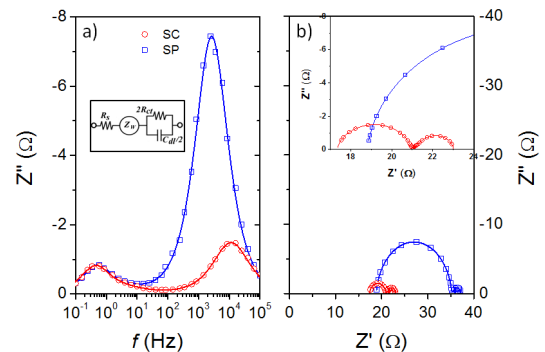


Fig. 2. EIS spectra of the symmetric dummy cells fabricated with two different thermally decomposed Pt electrodes SC and SP in a) Bode imaginary plot with the equivalent circuit in the inset and b) complex plane plot showing magnified view of the high frequency region in the inset. The spectra were obtained at V_{oc} of the cells

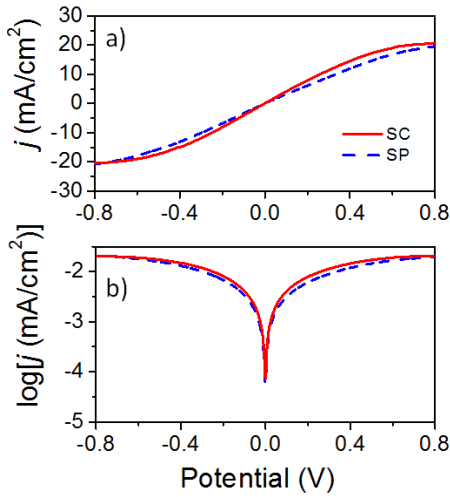


Fig. 3. Linear sweep voltammogram (LSV) at a scan rate of 20 mV/s and b) Tafel plot for the LSV of the symmetric dummy cells fabricated with two different thermally decomposed Pt electrodes SC and SP

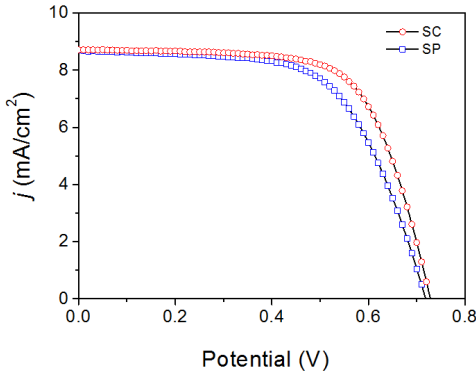


Fig. 4. *j*-*V* curves of the DSSCs composed of two different thermally decomposed Pt counter electrodes SC and SP measured under 1 sun (AM 1.5G) condition

칭형 터미 셀의 complex plane 플롯(Fig. 2a)과 LSV (Fig. 3a)는 두 셀에 대한 확산 저항(R_d) 값이 같음에도 불구하고(Fig. 2b), SC 터미 셀의 R_s 및 R_{ct} 값이 SP 터미 셀보다 더 낮은 값을 나타내었다^{12,13}. SC 터미 셀에서 R_s 와 R_{ct} 두 값의 감소는 Pt 나노입자가 넓은 비표면적을 가지며 균일하게 분포되어 표면에 뒤덮인 결과로 여겨진다. 게다가 이러한 넓은 비표면적의 Pt 나노입자는 SC 터미 셀의 전하 이동 시간 상수를 감소시켜(증가한 진동수의 최대값) 결과적으로 SC 터미 셀은 SP 터미 셀보다 더 높은 촉매효과

Table 1. Photovoltaic parameters open-circuit voltage (V_{oc}), short-circuit current density (j_{sc}), fill-factor (ff) and efficiency (η) of the DSSCs composed two different thermally decomposed Pt counter electrodes (Pt-CE) SC and SP

Pt-CE	V_{oc} (V)	j_{sc} (mA/cm ²)	ff	η (%)
SC	0.73	8.71	0.67	4.36
SP	0.72	8.69	0.62	3.87

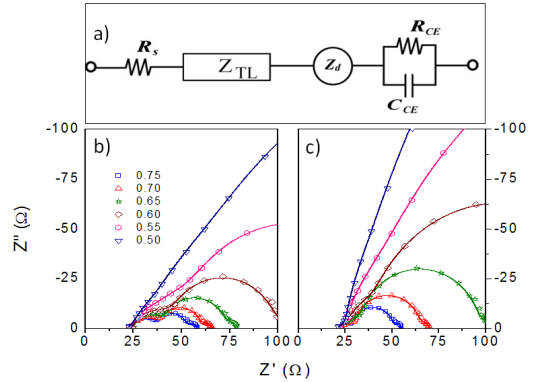


Fig. 5. a) Equivalent circuit to the fit the EIS spectra of the DSSCs composed of b) SC and c) SP measured at different potential under 1 sun (AM 1.5G) condition. Inset shows magnified view of the spectra. Z_{TL} is the DX-extended element (11: Bisquert # 2) in Zview

를 보인다.

Fig. 4는 SC와 SP로 구성된 염료 감응형 태양전지의 *j*-*V* 곡선을 나타낸다. *j*-*V* 곡선으로부터 계산된 셀의 광기전력 변수는 Table 1에 요약하였다. SC, SP 두 셀의 short-circuit current density (j_{sc})와 V_{oc} 값은 거의 동일하고, SC 셀은 SP 셀보다 높은 fill-factor (ff) 값을 보인다. 결과적으로 SC 셀의 효율(efficiency, η)은 SP 셀의 효율보다 높은 값을 보인다.

염료 감응형 태양전지의 광기전력 성능의 체계적인 분석을 위해, 각기 다른 SC, SP 상대 전극으로 구성된 염료 감응형 태양전지의 EIS 스펙트럼을 1 SUN 조건 하에서 다양한 전압에서 측정하였다. (Fig. 5b, 5c) 또한 염료 감응형 태양전지의 EIS 스펙트럼의 분석은 Fig. 5a의 등가 회로를 이용하여 각 구성 요소들로 표현 및 분석하였다¹¹). 염료 감응형 태양전지의 R_s , 상대 전극에서 전하 이동 저항(R_{CE}), 그리고 TiO_2 /전해질 계면에서의 재결합(recombination)

Table 2. Parameters obtained from the analysis of j - V and EIS data of the DSSCs composed of two different thermally decomposed Pt electrodes SC and SP

Pt-CE	j_{sc} (mA/cm ²)	j_0 (mA/cm ²)	β	$R_{s,total}$ (Ω cm ²)	R_{CE} (Ω cm ²)	${}^aR_{ct}$ (Ω cm ²)
SC	8.71	1.00×10^{-7}	0.65	9.7	1.2	1.3
SP	8.69	1.56×10^{-7}	0.64	12.9	3.8	5.9

^a R_{ct} measured from EIS of symmetric blank cell with SC and SP

저항(R_r)과 같은 변수들은 다른 문헌에서 언급한 방법을 따라 계산하였다^{11,13}.

Table 2는 염료 감응형 태양전지의 $R_{s,total}$ 과 R_{CE} 값을 요약하였다. SC 셀의 $R_{s,total}$ 값(12.9 Ω cm²)은 SP 셀의 $R_{s,total}$ 값보다 약 3.2 Ω cm² 정도 더 작다. 이러한 $R_{s,total}$ 값의 차이는 주로 R_{CE} 값의 차이로부터 발생된다. 해당 결과는 대칭형 터미 셀의 EIS 데이터로부터 얻어진 R_{ct} 값과도 일치하며, 타당한 결과로 판단할 수 있다.

염료 감응형 태양전지의 외부 셀 current density (j_{cell})은 β -recombination 모델에 따라 Bisquet et al. 에 의해 유도된 다이오드 모델 형태의 방정식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$j_{cell} = j_{sc} - j_0 \left[\exp\left(\frac{q\beta V_F}{k_B T}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

j_0 은 dark saturation current, β 는 전하 이동 변수, k_B 는 볼츠만 상수, T 는 절대 온도, 그리고 q 는 전하량이다. 해당 모델은 광전극에서 전자의 Fermi 에너지 레벨(E_F), 전해질의 산화환원 전압(E_{redox}), 두 에너지 레벨 사이의 차이인 전압 V_F ($qV_F = E_F - E_{redox}$)와 같은 염료 감응형 태양전지 광전극의 j - V 곡선을 설명하는데 명확하고 유효한 방법이다. 식 (1)은 외부 셀 전압(V_{cell})과 V_F 를 대체하는 아래 식을 이용하여 완전한 염료 감응형 태양전지의 j - V 곡선을 계산하기 위해 확장될 수 있다.

$$V_F = V_{cell} + j_{cell} R_{s,total} \quad (2)$$

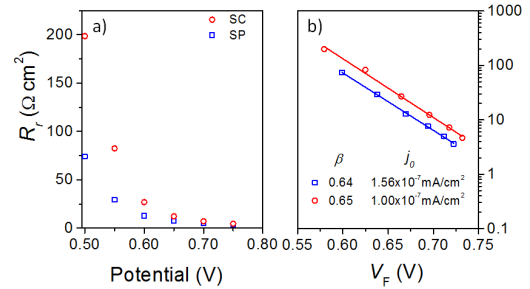


Fig. 6. Back reaction resistance (R_r) plotted against a) applied potential and b) corrected potential (V_F) obtained from the fitting of the EIS spectra of the DSSCs composed of two different thermally decomposed Pt electrodes SC and SP

식 (1)과 (2)에 관련된 변수는 j - V 곡선과 EIS 데이터의 결합 분석으로부터 구할 수 있다^{11,14-17}. $R_{s,total}$ 값이 규명되면 TiO_2 의 Fermi 에너지 레벨에 해당하는 V_F 는 식 (2)를 이용하여 인가된 전압으로부터 쉽게 계산할 수 있다. β -recombination 모델에 따르면, R_r 은 V_F 에 지수적으로 비례한다.

$$R_r = \frac{k_B T}{qA\beta j_0} \exp\left(-\frac{q\beta V_F}{k_B T}\right) \quad (3)$$

식 (3)에 R_r vs. V_F 의 플롯을 피팅함으로써 j_0 과 β 값의 범위를 계산할 수 있다.

EIS 스펙트럼으로부터 얻어진 R_r 은 인가 전압에 대응하여 도포(Fig. 6a)로 나타내었다. 식 (3)에 따르면, j_0 과 β 변수 값의 범위는 Table 2에 요약된 것처럼 R_r 과 Fermi 에너지 레벨 전압인 V_F 의 피팅 데이터(Fig. 6b)에서 구해지며, 이로부터 SC, SP 두 셀의 j_0 과 β 값의 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 Pt 상대 전극의 촉매 활성도가 염료 감응형 태양전지의 j 의 차이에 확실히 주요한 요인의 역할을 한다는 것을 뚜렷하게 제안한다.

본 연구에서는 스핀 코팅, 스크린 프린팅 제조 공정에 따른 상대 전극의 보다 정확한 비교분석을 위해 비교적 얇은 두께의 TiO_2 광전극을 사용하여 발생할 수 있는 변수들을 최대한 제어하였으며, 이로 인해 제작된 셀들은 비교적 낮은 효율을 보인다. 결과적으로 SC 셀이 SP 셀보다 더 좋은 성능을 보일

지라도, SC 셀의 $R_{s, total}$ 값이 현재 범위보다 더 낮아질 수 있도록 Pt 상대 전극을 개선한다면(고 효율의 염료 감응형 태양전지에 대한 $R_{s, total}$ 값이 $5.0 \Omega cm^2$ 인 것을 고려한다면) 염료 감응형 태양전지의 광기 전력 성능 향상에 대한 효과를 기대할 수 있다. 만약 SC에 대한 $R_{s, total}$ 값의 범위가 더 낮아진다면 결과적으로 셀의 η 는 증가하며, 이로 인해 셀의 효율 또한 증가하게 된다.

4. 결론

본 연구에서는 스핀 코팅과 스크린 프린팅 공정과 Pt 전구체의 열분해를 통해 제조한 두 가지의 다른 Pt 상대 전극을 이용하여 염료 감응형 태양전지를 제작하고, 다이오드 모델 측면에서 광기 전력 성능을 분석 및 고찰하였다.

1) 열적으로 분해된 Pt 상대 전극은 Pt 전구체의 스핀 코팅과 스크린 프린팅 공정 방법에 기인하는 표면 형태로 인해 서로 다른 촉매 성질을 보인다.

2) 전기화학적 분석 결과, Pt 상대 전극의 촉매 효과와 염료 감응형 태양전지의 광기 전력 성능의 두 결과는 매우 밀접한 연관성을 보인다.

3) 상대 전극의 표면 특성 변화는 염료 감응형 태양전지의 R_s 및 R_{CE} 값에 영향을 주며, 이로 인해 셀의 η 값에 관련 있는 $R_{s, total}$ 값을 변화시켜 셀의 효율을 변화시킨다.

본 연구는 EIS 데이터와 함께 $j-V$ 데이터 분석의 체계적인 결합 분석은 염료 감응형 태양전지의 메카니즘과 관련된 주요 변수를 이해할 수 있게 하는 유용한 도구라는 사실을 보여주며, 어떻게 상대 전극 소재를 변경하고 특성 분석을 하면 염료 감응형 태양전지의 효율 개선에 관한 통찰력을 제공한다. 또한 저비용 및 고효율 염료 감응형 태양전지를 위해 Pt에 대한 상대 전극 소재 대안을 탐구하는데 도움이 될 것이다.

후 기

이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로

로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2015M1A7A1A01002237, NRF-2016R1D1A1B01014701).

References

1. B. O'Regan, and M. Gratzel, "A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films", Nature, Vol. 353, 1991, p. 737.
2. V. Sugathan, E. John, and K. Sudhakar, "Recent improvements in dye-sensitized solar cells: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 52, 2015, p. 54.
3. L. Peter, "The gratzel cell: where next?", Journal of Physical Chemistry Letters, Vol. 2, No. 15, 2011, p. 1861.
4. S. Thomas, T. G. Deepak, G. S. Anjusree, T. A. Arun, S. V. Nair, A. S. Nair, "A review on counter electrode materials in dye-sensitized solar cells", Journal of Materials Chemistry, Vol. 2, 2014, p. 4474.
5. S. Sarker, H. W. Seo, F. O. Bakare, Md. A. Aziz, and D. M. Kim, "Facile and rapid preparation of platinum counter electrodes for dye-sensitized solar cells", Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, Vol. 321, No. 1, 2016, p. 122.
6. A. Mosquera, D. Horwat, L. Vazquez, A. Gutiérrez, A. Erko, A. Anders, J. Andersson, and J.L. Endrino, "Thermal decomposition and fractal properties of sputter-deposited platinum oxide thin films", Journal of Materials Research, Vol. 27, No. 5, 2012, p. 829.
7. Y. H. Wei, M. C. Tsai, C. C. M. Ma, H. C. Wu, F. G. Tseng, C. H. Tsai, and C. K. Hsieh, "Enhanced Electrochemical Catalytic Efficiencies of Electrochemically Deposited Platinum Nanocubes as a Counter Electrode for Dye-Sensitized Solar Cells", Nanoscale Research Letters, Vol. 10, 2015, p. 467.
8. R. Zhou, W. Guo, R. Yu, C. Pan, "Highly flexible, conductive and catalytic Pt networks as transparent counter electrodes for wearable dye-sensitized solar cells", Journal of Materials Chemistry A, Vol. 3, 2015, p. 23028.
9. J. Halme, P. Vahermaa, K. Miettunen, and P. Lund, "Device Physics of Dye Solar Cells", Advanced Materials, Vol. 22, No. 35, 2010, p. E210.
10. F. Fabregat-Santiago, J. Bisquert, E. Palomares, L. Otero, D. Kuang, S. Zakeeruddin, and M. Gratzel, "Correlation between Photovoltaic Performance and Impedance Spectroscopy of Dye-Sensitized Solar Cells Based on Ionic Liquids", Journal of Physical Chemistry C, Vol. 111, No. 17, 2007, p. 6550.
11. S. Sarker, H.W. Seo, and D.M. Kim, "Calculating current density-voltage curves of dye-sensitized solar cells: A straight-forward approach", Journal of Power Sources, Vol. 248, No. 15, 2014, p. 739.

12. A. Hauch, and A. Georg, "Diffusion in the electrolyte and charge-transfer reaction at the platinum electrode in dye sensitized solar cells", *Electrochimica Acta*, Vol. 46, No. 22, 2001, p. 3457.
13. M.X. Wu, X.A. Lin, A. Hagfeldt, and T.L. Ma, "A novel catalyst of WO₂ nanorod for the counter electrode of dye-sensitized solar cells", *Chemical Communications*, Vol. 47, 2011, p. 4535.
14. E. Barea, C. Zafer, B. Gultekin, B. Aydin, S. Koyuncu, S. Icli, F. Santiago, and J. Bisquert, "Quantification of the Effects of Recombination and Injection in the Performance of Dye-Sensitized Solar Cells Based on N-Substituted Carbazole Dyes", *Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 114, No. 46, 2010, p. 19840.
15. J. Bisquert, and I. Mora-Sero, "Simulation of Steady-State Characteristics of Dye-Sensitized Solar Cells and the Interpretation of the Diffusion Length", *Journal of Physical Chemistry Letters*, Vol. 1, No. 1, 2010, p. 450.
16. S. Sarker, H. W. Seo, D. W. Seo, and D. M. Kim "Electrochemical impedance spectroscopy of dye-sensitized solar cells with different electrode geometry", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 45, No. 25, 2017, p. 56.
17. H. W. Seo, S. Sarker, and D. M. Kim, "Electrochemical impedance spectroscopy of dye-sensitized solar cells with post-treated TiO₂ photoelectrodes using hafnium (IV) chloride and titanium (IV) chloride", *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, Vol. 332, No. 1, 2017, p. 258.