

최적 TiO₂ 전극 두께 및 광산란 증가에 의한 염료감응형 태양광전지의 효율 개선

우중연 · 권현규[†] · 박창용

[†]금오공과대학교 기전공학과

Improving the Performances of Dye-Sensitized Solar Cell by the Optimal TiO₂ Photoelectrode Thickness and Light-Scattering Enhancement

Zeng Yuan Niu, Hyun Kyu Kweon[†] and Chang Yong Park

[†]Department of Mechatronics, Kumoh National Institute of Technology

Abstract

In this study, the performance of dye-sensitized solar cells with different thickness of the photoelectrode film was simulated by using the electron-diffusion differential model. Through this simulation, the relationships between the thickness of the photoelectrode film and the performances (open-circuit voltage, short-circuit current density, and overall photoelectric-conversion efficiency) of cells were understood and the performances with different thickness of the photoelectrode film were also examined. For considering the refractive index in the liquid electrolyte and exploring the scattering effect of titanium dioxide particles with different sizes using the Mie light-scattering theory, the highest scattering effect of each particles was found out and the optimal size of the titanium dioxide particle was determined for light scattering in the photoelectrode film of dye-sensitized solar cell. Through experiment, the mixed titanium dioxide cell was better than the single titanium dioxide cell and generated a higher overall conversion efficiency because the optimal titanium dioxide particles in the photoelectrode film as light scattering.

Key Words : Electron-Diffusion Differential Model, Incident photo-to-electron conversion efficiency, Electron-diffusion length, Mie light-scattering theory.

1. 서 론

염료감응형 태양광전지(DSSC)는 식물의 광합성원리를 모방해 만든 차세대 태양전지로 유기염료와 나노기술을 이용하여 고도의 에너지효율을 갖도록 개발된 태양광전지다. 염료감응 태양광전지는 공정이 복잡하고 생산단가가 높은 기존 실리콘 태양전지를 대체할 수 있는 친환경적 대체 에너지 기술의 기반기술 확립과 다가오는 에너지 문제를 해결할 것으로 예상되며, 화석염료사용 감소에 따른 온실 가스 방출 저감 등 환경오염 저감효과가 있다[1-4].

DSSC는 가시광선을 흡수하여 전자를 생성하는 염

료분자(Dye)와 생성된 전자를 전달하는 나노입자 이산화 티탄(TiO₂)으로 이루어지는 산화물 반도체 전극을 이용한 광전기 화학적 태양광전지로서 비정질 실리콘 태양광전지에 버금가는 에너지 변화 효율을 가지고 있다. 염료감응형 태양광전지의 일반적인 구조는 투명한 유리판위의 코팅된 전극(FTO)에 나노입자로 구성된 다공성 TiO₂ 입자를 접착시킨 후 그 표면에 단분자층으로 코팅된 염료화합물과 두개의 FTO 유리판 사이에 채우고 있는 산화환원용 전해질 용액으로 이루어진다. DSSC이 전지에 입사되면 광양자는 염료화합물에 의하여 흡수된다. 염료화합물은 광흡수에 의해 여기상태가 되고 전자를 TiO₂의 전도대로 보낸다. 반도체 산화물(TiO₂) 전극으로 주입된 전자는 입자간 계면을 통해 전도성 막으로 전달되어 전류를 발생시키게 된다[5]. 염

[†]E-mail : hkkweon@kumoh.ac.kr

료분자에 생성된 홀을 $I-I_3^-$ 쌍으로 이루어진 산화-환원 전해질에 의해 전자를 다시 받아 환원되어 DSSC가 작동된다[6].

최근에는 많은 연구들이 염료감응형 태양광전지의 효율을 향상시키기 위해 광전극의 구조 개선, 새로운 염료 개발, 전하 재결합 개선, 염료와 입사광의 상호작용의 증가와 전해질 성분의 수정 등에 노력하고 있다. 또한, 광전극으로의 TiO_2 박막의 구조와 같은 매개 변수 수정함으로써 염료감응형 태양광전지의 성능 개선을 시도하고 있다[7-10].

본 연구는 전자 확산 미분 모델(EDDM: Electron-Diffusion Differential Model)을 사용하여 TiO_2 으로 구성된 전극 두께의 변화에 따라 DSSC의 개방 전압(V_{oc}), 단락 전류 밀도(J_{sc})와 광전 전환 효율과의 영향에 대해 해석하여, 최적의 광전 전환 효율을 생산할 수 있는 광전극 두께에 대해 검토하였다. 또한, 광산란 효과를 이용하여 DSSC의 효율을 개선할 수 있고 입자의 크기에 따라 광산란 효과가 달라진다는 것이 많은 연구에서 입증되었지만, 입사광은 전해질 내의 굴절률을 고려하지 않고 있지만 본 연구에서는 입사광의 전해질 내의 굴절률을 고려하여 TiO_2 의 크기와 입사광의 파장에 따른 광산란 효과를 계산하고 염료감응형 태양광전지의 효율을 높이기 위해 높은 광산란 효과를 일으킬 수 있는 최적 크기의 TiO_2 의 크기를 결정하여, DSSC의 제작을 통해 효율 개선 효과에 대해 검증하였다.

2. 두께의 변화에 따른 DSSC의 성능 변화

DSSC의 TiO_2 광전극의 두께는 전지의 성능에 큰 영향을 미친다. TiO_2 광전극의 두께가 얇아지면 입사광을 충분히 흡수 할 수가 없기 때문에 낮은 단락 전류 밀도와 광전 전환 효율을 야기할 것이다. 또한 TiO_2 광전극의 두께가 두꺼워지면 입사광을 충분하게 흡수하여 더 많은 전자를 생성하게 되고 단락 전류 밀도를 향상시킬 수 있지만 직렬 저항이 커져서 개방 전압을 낮추는 원인으로 광전 전환 효율도 낮춘다. 따라서 최고의 광전 전환 효율을 얻을 수 있는 최적 TiO_2 광전극의 두께를 찾기 위해 많은 연구들이 진행되어 왔으며, 그 결과, 실험적으로 두께와 효율과의 관계를 도출해 왔다[11-14]. 본 연구에서는 전자 확산 미분 모델을 사용하여 두께와 효율과의 관계를 시뮬레이션을 통해 검증하여 최적의 두께를 설계하였다.

2.1. 전자 확산 미분 모델

전자 확산 미분 모델에 의하면, DSSC는 정상 조사

조건 하에서 광전극 안에 염료 여기상태가 되어 전자를 TiO_2 에 보내며, 염료분자에 생성된 홀이 전해질에 의해 환원된다. 식 (1)은 전자 확산 미분 모델을 나타낸 것이다.

$$D \frac{\partial^2 n(x)}{\partial x^2} - \frac{n(x) - n_0}{\tau} + \Phi \alpha e^{-\alpha x} = 0 \quad (1)$$

D 는 TiO_2 광전극 내의 전자 확산 상수($D = 5.0 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$), $n(x)$ 는 과잉 전자 밀도, n_0 는 전자 밀도이다($n_0 = 10^{-16} \text{ cm}^{-3}$)[15, 16]. τ 는 전도 밴드 자유 전자의 수명($\tau = 2 \times 10^{-2} \text{ s}$), Φ 는 조도($\Phi = 1.0 \times 10^{17} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$), α 는 광전극의 광흡수 계수($\alpha = 5000 \text{ cm}^{-1}$)이다. 단락 상태에서 전자들이 광전류로써 추출하게 되고 전자들이 직접 전극으로 이동할 수 없다. 그래서 두 입계 조건을 식 (2)와 (3)으로 표현할 수 있다.

$$n(0) = n_0 \quad (2)$$

$$\lim_{x=d} \frac{dn}{dx} = 0 \quad (3)$$

d 는 전극 두께이다. 따라서 단락 전류 밀도는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$J_{sc} = \frac{q \Phi L \alpha}{1 - L^2 \alpha^2} \left[-L \alpha + \tanh\left(\frac{d}{L}\right) + \frac{L \alpha e^{-\alpha d}}{\text{soth}\left(\frac{d}{L}\right)} \right] \quad (4)$$

L 는 전자 확산 길이이고 q 는 전자의 전하량이다($q = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ C}$). DSSC는 TiO_2 의 페르미 레벨(Fermi level)과 전해질의 산화 환원 전위 사이에서 작동하면 TiO_2/TCO 계면($x=0$)에서 전자의 밀도는 n 까지 증가한다. 이로 인해 새로운 입계조건은 식 (5)와 같다.

$$n_0 = n \quad (5)$$

두번째의 입계 조건은 $x=d$ 에서 식 (3)과 같이 변하지 않는다. 따라서 이 조건 하에서 식 (1)은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = \frac{KTm}{q} \ln \left[\frac{L(J_{sc} - J)}{q D n_0 \tanh\left(\frac{d}{L}\right)} + 1 \right] \quad (6)$$

K 는 볼츠만 상수(Boltzman constant)에 $K = 1.380 6505 \times 10^{-23} \text{ J/k}$ 이고, m 는 Ideality Factor($m=4.5$)이다. T 는 전지의 작동 온도($T=300 \text{ K}$)이다. 식 (6)는 Soder-

gren et al.(1994)들에 의해 이미 입증되었고, 단락 전류는 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$J = J_{sc} - \frac{qDn_o}{L} \tanh\left(\frac{d}{L}\right) e^{\left(\frac{qV}{KTm}\right)^{-1}} \quad (7)$$

또한, 개방 전압은 식 (6)으로부터 얻을 수 있다.

$$V_{oc} = \frac{KTm}{q} \ln \left[\frac{LJ_{sc}}{qDn_o \tanh\left(\frac{d}{L}\right)} + 1 \right] \quad (8)$$

전지의 출력은 $P=JV$ 로 표현할 수 있고 식 (6)와 (7)를 대입하면 출력은 식 (9)와 같다.

$$P = JV = \frac{JKTm}{q} \ln \left[\frac{L(J_{sc} - J)}{qDn_o \tanh\left(\frac{d}{L}\right)} + 1 \right] \quad (9)$$

2.2. 단락 전류 및 개방 전압

Fig. 1(a)에서 광전극의 두께에 따라 개방 전압과 단락 전류 밀도의 변화를 나타내고 있다. 단락 전류 밀도는 광전극이 두꺼워짐에 따라 처음에 급하게 증가하다가 광전극의 두께가 10 μm가 될 때 단락 전류 밀도의 최대 값을 얻었는데 그 후에 광전극 두께가 증가함에 따라 단락 전류 밀도가 상대적으로 일정한 값을 계속 유지했다.

이런 현상은 염료에서 발생한 전자가 TiO₂ 광전극 내의 전자 확산 길이(Electron-Diffusion Length: L)이 기인한 것으로 판단되며, 확산 길이는 다음과 같다.

$$L = \sqrt{D\tau} \quad (10)$$

D 는 전자가 TiO₂ 입자 안의 전자 확산 계수($5.0 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$)이고 τ 는 TiO₂ 광전극 안에 전자의 수명($2 \times 10^{-2} \text{ s}$)이며[17, 18], 식 (10)에 대입하면 전자가 TiO₂ 광전극 안에 이동할 수 있는 길이는 10 μm임을 확인할 수 있다. Fig. 2와 같이 광전극의 두께가 증가하여 더 많은 전자를 만들어도 일부의 전자가 TiO₂ 입자 안에 이동하는 길이가 전자 확산 길이를 넘으면 전해질과 환원되어, 전류가 증가하여도 전극까지 도달할 수 없게 된다. 그림과 같이 전자 확산 길이(10 μm)를 초과하면 아무리 광전극의 두께가 증가해도 전류가 증가하지 않고 상대적으로 일정한 값을 유지한다.

또한 Fig. 1(a)처럼 개방 전압은 광전극이 증가함에 따라 계속 감소하고 있다. 이는 전자 희석 효과(Electron Dilution Effect)와 광전극의 증가에 따라 직렬 저항

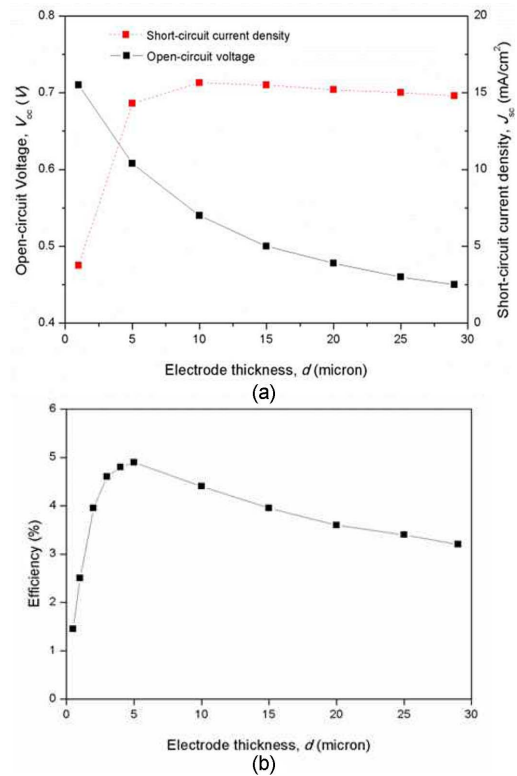


Fig. 1. (a) J - V characteristics and (b) energy conversion efficiency of photoelectrode films with different thicknesses.

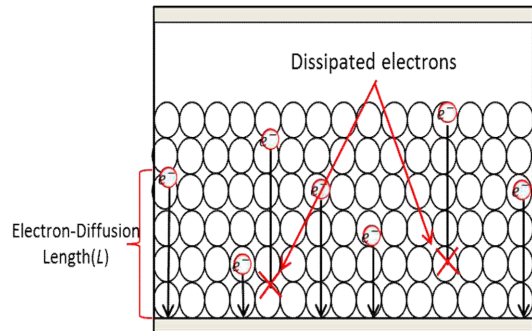


Fig. 2. Electrons reach the electrode and dissipate in TiO₂ film.

항의 증가로 인해 개방 전압이 계속 감소한다. 입사광에 의해 광전극이 증가하면 증가할수록 전극 안에 입사광의 강도가 감소하여 높은 영역에서는 낮은 영역보다 전자의 양이 줄어들다. 즉 높은 영역의 과잉 전자 밀도(Excessive electron density)의 감소로 인해 개방 전압이 감소하게 되는 것으로 판단된다.

2.3. 에너지 전환 효율

두께에 따라 에너지 전환 효율은 Fig. 1(b)와 같이 나타나고, 개방 전압(V_{oc})과 단락 전류 밀도(J_{sc}), 입자 충전계수(FF)의 관계는 식 (11)와 같이 나타난다. P_{input} 는 입사광의 에너지이고 일정한 값이다. P_{output} 는 전지의 출력 에너지이고 V_{oc} , J_{sc} , FF 와 정비례 관계를 갖고 있다. Fig. 1(a)에서 광전극 두께는 5 μm 가 될 때 최고의 광전 전환 효율이 나타났으며, 약 5%의 효율을 확인할 수 있다.

$$\eta = \frac{P_{output}}{P_{input}} = \frac{V_{oc} \times J_{sc} \times FF}{P_{input}} \times 100\% \quad (11)$$

염료감응형 태양광전지의 성능은 전자 확산 미분 모델에서 두께, 전자 확산 계수, 전자 수명과 같은 계수들에 의존하지만, 광전극 안에 TiO_2 입자 크기에 대한 영향은 고려되지 않았다. 다음 절에서 입자의 크기에 따라 염료감응형 태양광전지의 효율에 미치는 영향을 검토하였다.

3. 미에광산란 모델에 의한 최적입자의 크기와 효과

많은 이전의 연구들은 DSSC의 광전극 안에 큰 입자를 사용하여 광산란 효과를 일으키는 것이 전지의 광전 효율을 향상시킬 수 있는 것을 입증했다[17,18]. 절에서는 입사광의 굴절률 등을 고려한 미에 광산란 원리(Mie Light-Scattering Theory)를 사용하여 최적 크기의 TiO_2 입자에 대해 검토하였다. 미에 광산란을 통해 산란 효율(Q_{sca})은 식 (12)으로 나타낼 수 있다.

$$Q_{sca} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (12)$$

여기서, x 는 크기 계수이고 계수 a_n 과 b_n 은 미에 계수이고 식 (13)와 (14)처럼 나타난다.

$$a_n = \frac{\Psi_n'(mx) \Psi_n(x) - m \Psi_n(mx) \Psi_n'(x)}{\Psi_n'(mx) \xi_n(x) - m \Psi_n(mx) \xi_n'(x)} \quad (13)$$

$$b_n = \frac{m \Psi_n'(mx) \Psi_n(x) - m \Psi_n(mx) \Psi_n'(x)}{m \Psi_n'(mx) \xi_n(x) - m \Psi_n(mx) \xi_n'(x)} \quad (14)$$

ψ 와 ξ 는 Riccati-Bessel 함수이다[19, 20]. m 는 광전극 내 광의 굴절률이다.

Fig. 3은 식 (12)로 부터 직경 200, 300, 400 nm의 TiO_2 입자를 파장의 변화에 따른 광산란 효율을 나타낸 것이다. 200 nm의 TiO_2 입자는 400 - 450 nm, 300 nm의 TiO_2 입자는 550 - 650 nm, 400 nm의 TiO_2 입자는

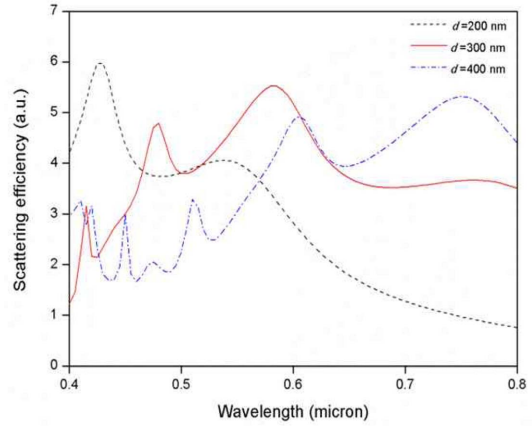


Fig. 3. Light-scattering efficiency Q_{sca} as a function of the wavelength.

700 - 800 nm의 파장 범위 내에 광산란 효율이 가장 높다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 파장이 입자의 직경보다 약 2 배정도 클 때 입자의 광산란 효과가 가장 높다는 것을 알 수 있었다.

이전의 미에 광산란에 대한 연구들[18, 21]은 TiO_2 입자의 크기가 약 350 - 400 nm일 때 파장이 550 - 600 nm의 입사광에 대해 광산란 효율이 가장 높다는 결과와 달리 본 연구는 Fig. 3에서와 같이 300 nm의 TiO_2 입자는 파장이 550 - 650 nm의 입사광에 대해 광산란 효율이 가장 높다는 결과가 나타났다. 그 이유는 광전극 내에 광의 굴절률을 전해질에 의한 TiO_2 입자의 상태 굴절률로 계산했기 때문이다. TiO_2 입자의 전체 굴절률(m)은 식 (15)과 같다.

$$m = \frac{m_{sphere}}{m_{medium}} \quad (15)$$

m_{sphere} 는 TiO_2 입자에 의해 광의 굴절률이고 m_{medium} 은 전해질 안에 입사광의 굴절률이다. 보통 DSSC 내에 사용하는 전해질은 주로 아세 니트릴(Acetonitrile, $\text{C}_2\text{H}_3\text{N}$)로 구성되어 있으며, 전해질 안에 파장에 따라 굴절률은 식 (16)에 의해 얻을 수 있고, TiO_2 입자에 대해 파장에 따라 굴절률은 식 (17)로 얻을 수 있다.

$$m_{sphere}^2 = 5.913 + \frac{0.241}{\lambda^2 + 0.0803} \quad (16)$$

$$m_{medium}^2 = C_1 - C_2 \lambda^2 + C_3 \lambda^{-2} + C_4 \lambda^{-4} + C_5 \lambda^{-6} \quad (17)$$

Fig. 4에서 파장에 따라 전해질의 굴절률(m_{medium}), TiO_2 입자의 굴절률(m_{sphere})과 TiO_2 입자의 전체 굴절

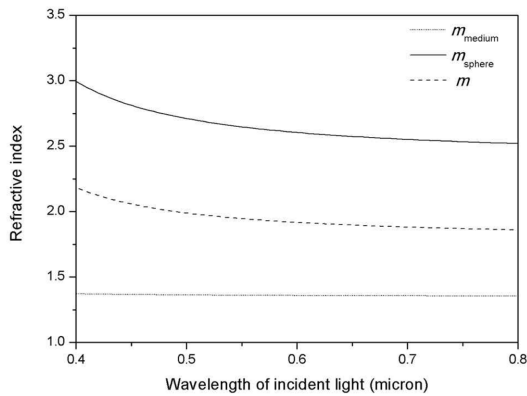


Fig. 4. Refractive index with the different wavelength of the incident light.

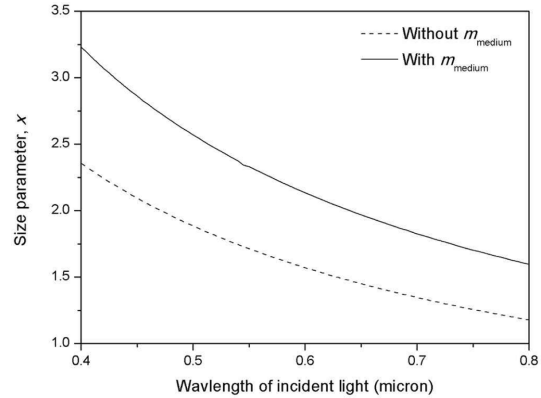


Fig. 5. Size parameter of 300-nm TiO₂ particle with different wavelength of incident light.

Table 1. Parameters of the refractive index in electrolyte

C ₁	1.78207648
C ₂	0.001147808
C ₃	0.003252916
C ₄	0.000655275
C ₅	0.000001251

*Referred to Refractive Index database

률(m)은 식 (15)~(17)을 통해 얻었다. 파장에 따라 m_{medium} 은 약 1.5 정도의 값에 유지하고 있으므로 m 의 값이 m_{sphere} 보다 더 낮은 값을 얻었다는 것을 결과에서 확인할 수 있다. 따라서 m_{medium} 의 영향으로 파장에 따라 m 의 값은 작아지고, m 는 미에 계수 a_n 과 b_n 에 영향을 미치게 된다.

또한 크기 계수(x)도 전해질의 굴절률에 의해 영향을 받는다. 크기 계수의 계산은 식 (18)과 같다.

$$x = \frac{2\pi r}{\lambda} m_{\text{medium}} \quad (18)$$

여기서, r 는 TiO₂ 입자의 반경, λ 는 입사광의 파장, m_{medium} 은 전해질 안에 입사광의 굴절률이다. Fig. 5는 300 nm의 TiO₂ 입자의 전해질 안에 입사광의 굴절률의 영향으로 크기 계수와 파장에 따른 결과를 나타낸다.

파장에 따라 300 nm의 TiO₂ 입자의 전해질 내 광의 굴절률(m_{medium})을 고려할 때의 크기 계수와 전해질 내 광의 굴절률(m_{medium})을 고려하지 않을 때의 크기 계수 그래프가 나타나 있다. 이 결과로부터, 전해질 내 광의 굴절률은 파장에 따라 TiO₂ 입자의 크기 계수를 높인 결과를 확인하였다. 그래서 m_{medium} 의 영향으로 크기

계수의 값이 커지고 크기 계수는 미에 계수 a_n 과 b_n 에 영향을 미친다. 이상으로 전해질 내의 광이 굴절률은 파장에 따라 광전극 내의 상태 굴절률과 크기 계수에 영향을 주고, Fig. 3과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

앞서 말했듯이 DSSC는 가시광선을 흡수하여 전자를 생성한다. 가시광의 범위는 약 380 - 700 nm의 범위 내에 있다. 보통 DSSC 광전극의 비표면적을 높이기 위해 광전극 안에서 10 - 25 nm의 TiO₂ 입자와 약 1 nm의 염료 분자를 사용하므로 이런 작은 크기의 입자와 분자의 파장은 380 - 700 nm의 가시광에서 일컫는 광산란 효과는 거의 무시한다. 많은 실험을 통해 얻은 결과로써 10 - 25 nm의 TiO₂ 입자와 약 1 nm의 염료 분자로 구성되는 광전극은 380-550nm의 파장에서 입사광 흡수 효율(IPCE: Incident Photo-to-electron Conversion Efficiency)이 가장 높고, 그 후에는 계속 떨어진다라는 것이 알려져 있다[18,22,23]. 그래서 파장 550 - 700 nm의 입사광 흡수 효율을 향상시키기 위해 미에의 광산란에 의해 전해질 내의 굴절률을 고려하여 300 nm의 TiO₂ 입자가 550 - 700 nm의 입사광에서 가장 높은 광산란 효과를 만들 수 있음을 확인하였다.

4. DSSC의 제작 및 실험결과

광산란 효과를 이용한 DSSC의 효율을 시뮬레이션 할 수 있는 모델이 없으므로 이 절에서, 앞절에서 확인한 결과들을 바탕으로 DSSC를 제작하여 효율을 검토하였다.

본 실험에서 수열합성으로 제조된 10 ~ 20 nm급과 250 ~ 300 nm급의 TiO₂ 나노입자, 분산제 아크릴실란, 용매로 에탄올, TiO₂ 나노입자 분말 5 ~ 30중량부, 분

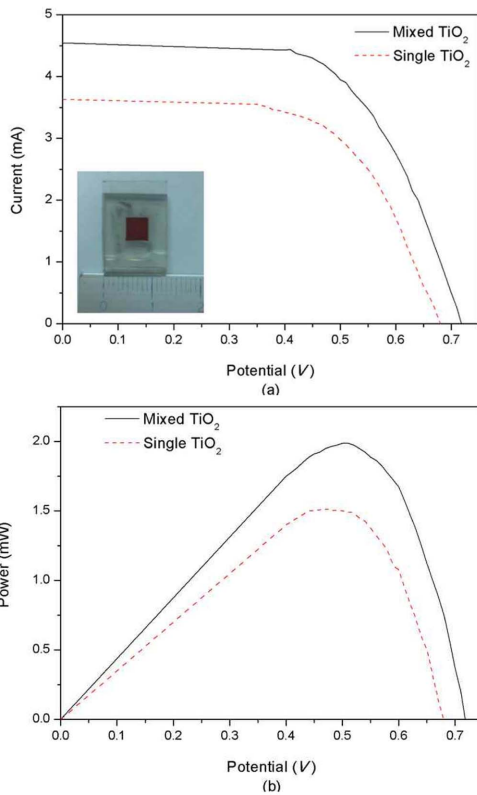


Fig. 6. (a) J - V and (b) P - V characteristics of two types of cells.

산재 0.5~10중량부 및 용매 60~95중량부로 제작하였다. 이러한 재료를 혼합교반기에 투입하며 교반속도 100~200 rpm 수준으로 5시간동안 교반한 후 분산시켜 1차 혼합물을 준비하고, 그 혼합물을 다시 초음파 분산기에서 30분간 분산시켜 2차 초음파 혼합한다. 초음파 혼합된 10~20 nm급 혼합물을 다시 비드밀을 통해 120분간 분산시켜 이산화 티탄의 입경은 20 nm수준이 되었고 초음파 혼합된 250~300 nm혼합물을 비드밀을 통해 30분간 분산시켜 이산화 티탄의 입경은 300 nm수준이 되었다. 여기서 제조된 분산용액의 분산 입도를 입자분석기(Model: Microtrac S3500)에 의해 측정하였다. 이 때, 고형분의 함량은 분산용액 총량에 대해 10중량% 수준이었다.

광산란 효과를 측정하기 위해 본 연구에서 두가지의 태양광전지를 제작했다. 즉 광산란 효과가 있는 DSSC와 광산란 효과가 없는 DSSC다. 광산란 효과가 있는 DSSC는 평균 입경이 300 nm와 20 nm TiO_2 분산용액을 1:1의 중량비로 혼합하여 광전극을 형성하였다. 광

Table 2. Performances of cells

Types	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	η (%)
Mixed TiO_2	18.19	0.718	7.869
Single TiO_2	16.52	0.680	6.770

산란 효과가 없는 DSSC는 평균 입경이 20 nm TiO_2 분산용액만 사용하여 광전극을 형성하였다. Ru계의 N719 염료(Ruthenium sensitizer)와 전해질(0.5 M lithium iodide-0.05 M iodine-0.5 M TBP in CH_3CN)를 사용하여 DSSC를 구성하였다.

광전효율 측정방법은 효율 측정기 Keithley 236 Source Measurement와 Solar simulator(300W simulator models 81150, Spectra Physics.Co.)를 사용하여 표준조건(AM 1.5, 100mW/cm² 25°C)에서 측정하였다.

Fig. 6과 Table 2에서 광산란 효과가 있는 DSSC(Mixed TiO_2)와 광산란 효과가 없는 DSSC(Single TiO_2)의 단락 전류 밀도(J_{sc}), 개방 전압(V_{oc})과 광전 효율(η)이 나타나고 있다.

광산란 효과가 있는 DSSC 광전극 내의 큰 TiO_2 (300 nm)로 인해 광전극 내의 비표면적이 줄어들지만 광산란 효과 때문에 광산란 효과가 있는 DSSC의 단락 전류 밀도와 개방 전압이 광산란 효과가 없는 DSSC의 전류 밀도와 개방 전압보다 높고 그 결과로써 광전 효율이 증가했다는 것을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 광전극의 두께에 따라 DSSC 성능의 영향과 입자 크기에 따라 광산란 효과를 두 모델의 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 전자 확산 미분 모델에 의해서 광전극 두께의 변경에 따라 단락 전류 밀도는 광전극의 두께가 10 μm 될 때 가장 높고 개방 전압은 두께가 두꺼워지면 전압이 낮아지며, 광전 효율은 두께가 5 μm 될 때 가장 높다는 결과를 얻었다.

또한 미에 광산란 원리를 사용하여 여러 크기 TiO_2 입자의 광산란 현상을 분석했다. 200 nm의 TiO_2 입자는 400 - 450 nm, 300 nm의 TiO_2 입자는 550 - 650 nm, 400 nm의 TiO_2 입자는 700 - 800 nm의 파장 범위 내에 광산란 효율이 가장 높다는 결과를 얻었고 파장이 TiO_2 입자의 직경보다 약 2배정도 클 때 입자의 광산란 효과가 가장 높음을 알 수 있었다. 이 결과는 전해질 내의 광 굴절률을 고려하기 때문인 것으로 판단된다. 광전극 내에 있는 10 - 25 nm TiO_2 입자와 염료 분자의 입사광 흡수 효율 측면에는 300 nm의 TiO_2 입자

가 염료감응형 태양광전지 광전극 내의 광산란 입자로써 가장 적합하다는 결론을 얻었으며, 실험을 통해 광산란 효과가 있는 염료감응형 태양광전지의 단락 전류 밀도, 개방 전압과 광전 전환 효율을 검토하였다.

감사의 글

이 논문은 금오공과대학교 교수연구년제에 의하여 연구된 실적물 연구임.

참고문헌

- O'regan, B. and Grätzel, M., "A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized." *Nature*, Vol. 353, pp. 737-740, 1991.
- Smestad, G., Bignozzi, C. and Argazzi, R., "Testing of dye sensitized TiO₂ solar cells I: Experimental photocurrent output and conversion efficiencies." *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 32, pp. 259-272, 1994.
- Kay, A. and Grätzel, M., "Low cost photovoltaic modules based on dye sensitized nanocrystalline titanium dioxide and carbon powder." *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 44, pp. 99-117, 1996.
- Grätzel, M., "Conversion of sunlight to electric power by nanocrystalline dye-sensitized solar cells." *J. of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, Vol. 164, pp. 3-14, 2004.
- Kalyanasundaram, K. and Grätzel, M., "Applications of functionalized transition metal complexes in photonic and optoelectronic devices." *Coordination Chemistry Reviews*, Vol. 177, pp. 347-414, 1998.
- Kambe, S., Murakoshi, K., Kitamura, T., Wada, Y., Yanagida, S., Kominami, H. and Kera, Y., "Mesoporous electrodes having tight agglomeration of single-phase anatase TiO₂ nanocrystallites: Application to dye-sensitized solar cells." *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 61, pp. 427-441, 2000.
- Lee, J. K., Jeong, B. H., Jang, S. I., Kim, Y. G., Jang, Y. W., Lee, S. B. and Kim, M. R., "Preparations of TiO₂ pastes and its application to light-scattering layer for dye-sensitized solar cells." *J. of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 15, pp. 724-729, 2009.
- Chou, C. S., Guo, M. G., Liu, K. H. and Chen, Y. S., "Preparation of TiO₂ particles and their applications in the light scattering layer of a dye-sensitized solar cell." *Applied Energy*, Vol. 92, pp. 224-233, 2012.
- Chou, T. P., Zhang, Q., Russo, B., Fryxell, G. E. and Cao, G., "Titania particle size effect on the overall performance of dye-sensitized solar cells." *J. of Physical Chemistry C*, Vol. 111, pp. 6296-6302, 2007.
- Guliani, R., Jain, A. and Kapoor, A., "Exact Analytical Analysis of Dye-Sensitized Solar Cell: Improved Method and Comparative Study." *Open Renewable Energy Journal*, pp. 5, 2012.
- Soedergren, S., Hagfeldt, A., Olsson, J. and Lindquist, S. E., "Theoretical models for the action spectrum and the current-voltage characteristics of microporous semiconductor films in photoelectrochemical cells." *J. of Physical Chemistry*, Vol. 98, pp. 5552-5556, 1994.
- Gómez, R. and Salvador, P., "Photovoltage dependence on film thickness and type of illumination in nanoporous thin film electrodes according to a simple diffusion model." *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 88, pp. 377-388, 2005.
- El Tayyan, A. A., "Dye sensitized solar cell: parameters calculation and model integration." *J. of Electron Devices*, Vol. 11, pp. 616-624, 2011.
- Ni, M., Leung, M. K. and Leung, D. Y., "Theoretical modelling of the electrode thickness effect on maximum power point of dye-sensitized solar cell." *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 86, pp. 35-42, 2008.
- Rothenberger, G., Fitzmaurice, D. and Grätzel, M., "Spectroscopy of conduction band electrons in transparent metal oxide semiconductor films: optical determination of the flatband potential of colloidal titanium dioxide films." *J. of Physical Chemistry*, Vol. 96, pp. 5983-5986, 1992.
- Ferber, J. and Luther, J., "Modeling of photovoltage and photocurrent in dye-sensitized titanium dioxide solar cells." *J. of Physical Chemistry B*, Vol. 105, pp. 4895-4903, 2001.
- Wang, Z. S., Kawauchi, H., Kashima, T. and Arakawa, H., "Significant influence of TiO₂ photoelectrode morphology on the energy conversion efficiency of N719 dye-sensitized solar cell." *Coordination chemistry reviews*, Vol. 248, pp. 1381-1389, 2004.
- Ferber, J. and Luther, J., "Computer simulations of light scattering and absorption in dye-sensitized solar cells." *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 54, pp. 265-275, 1998.
- Abramowitz, M. and Stegun, I. A. (Eds.), "Handbook of mathematical functions: with formulas, graphs, and mathematical tables." Courier Dover Publications, 2012.
- Du, H., "Mie-scattering calculation." *Applied optics*,

- Vol. 43, pp. 1951-1956, 2004.
21. Kim, A. Y., Kim, J., Kim, M. Y., Ha, S. W., Tien, N. T. T. and Kang, M., "Photovoltaic Efficiencies on Dye-Sensitized Solar Cells Assembled with Graphene-Linked TiO₂ Anode Films." *Bulletin of the Korean Chemical Society*, Vol. 33, pp. 3355-3360, 2012.
22. Wang, Z. S., Kawauchi, H., Kashima, T. and Arakawa, H., "Significant influence of TiO₂ photo-electrode morphology on the energy conversion efficiency of N719 dye-sensitized solar cell." *Coordination Chemistry Reviews*, Vol. 248, pp. 1381-1389, 2004.
23. Zhang, Q., Jeong, Y. H., Cao, G., Dandeneau, C. S., Park, K., Liu, D. and Zhou, X., "Light scattering with oxide nanocrystallite aggregates for dye-sensitized solar cell application." *J. of Nanophotonics*, Vol. 4, pp. 041540-041540, 2010.

접수일: 2014년 5월 28일, 심사일: 2014년 6월 10일,
게재확정일: 2014년 6월 20일