

TiO₂ 두께에 따른 염료감응형 태양전지의 전기화학적 임피던스 분석

논문
58-12-20

Electrochemical Impedance Spectroscopy Analysis on the Dye-sensitized Solar Cell with Different TiO₂ thicknesses

김희제* · 이정기** · 서현웅** · 손민규*** · 김진경*** · 프라바카르[§] · 신인영[†]
(Hee-Je Kim · Jeong-Gee Lee · Hyunwoong Seo · Min-Kyu Son · Jin-Kyoung Kim · K. Prabakar · Inyoung Shin)

Abstract - Dye-sensitized solar cell(DSC) is composed of a dye-adsorbed nanoporous TiO₂ layer on fluorine-doped tin oxide(FTO) glass substrate, electrolyte, and platinum doped counter electrode. Among these, a dye-adsorbed nanoporous TiO₂ layer plays an important role in the performance of the DSC because the injected electrons from excited dye molecules move through this layer. And the condition of TiO₂ layer such as the morphology and thickness affects on the electron movement. Therefore, the performances and the efficiency of DSC change as the thickness of TiO₂ layer is different. Electrochemical Impedance Spectroscopy(EIS) is the powerful analysis method to study the kinetics of electrochemical and photoelectrochemical processes occurring in the DSC especially the injected electron movements. So we analyzed the DSCs with different TiO₂ thicknesses by using EIS to understand the influence of the TiO₂ thickness to the performance of the DSC clearly. Finally, we got the EIS analysis on the DSC with different TiO₂ thickness from the internal resistance of the DSC, the electron life time and the amount of dye molecules.

Key Words : DSC(Dye-sensitized Solar Cell), TiO₂ thickness, EIS(Electrochemical Impedance Spectroscopy) analysis, Electron life time.

1. 서론

최근 지구 온난화, 사막화와 같은 급격한 기후 변동문제 및 화석 연료 고갈 문제가 심화되면서 전 세계적으로 친환경 신재생 에너지에 대한 관심이 고조되고 있다. 이러한 석유, 석탄, 천연가스 등의 화석 연료를 대체할 수 있는 친환경 신재생 에너지로는 태양광, 지열, 풍력, 조력, 수력에너지 등이 있는데 그 중 태양광 에너지는 청정하고 무한하다는 특성을 바탕으로 일찍부터 많은 연구가 진행되었다. 태양광 시장은 매년 지속적인 정부의 지원을 바탕으로 기초 및 상용화에 대한 연구가 활발히 진행되어 급속히 성장해왔고, 이미 그 수요가 폭발적이므로 상용화 및 저변 확대를 위해서는 앞으로 원료 확보와 가격 경쟁의 문제가 중요해질 것으로 보인다.

현재 태양광 시장의 대부분을 차지하고 있는 결정질 실리콘 태양전지는 실리콘 잉곳의 공급이 수요를 따라가지 못해 원료 값이 폭등하고 복잡한 제조공정과 비싼 제조단가로 인해 경쟁력이 약화되어 어려움을 겪고 있는 실정이다. 따라서

결정질 실리콘 태양전지의 한계를 뛰어넘을 수 있는 낮은 제조단가의 적정한 효율을 갖춘 태양전지의 연구와 상용화가 절실한 시점이다.

결정질 실리콘 태양전지의 대안으로서 여러 가지의 차세대 태양전지가 거론되는 가운데 염료감응형 태양전지(DSC: Dye-sensitized Solar Cell)는 1991년 스위스 EPFL의 Michael Grätzel팀에 의해 개발된 이래로 세계 각국에서 많은 연구가 진행 중에 있으며 현재 Michael Grätzel팀이 단위 셀 효율 11.6%를 달성하여 세계 최고 수준의 기술을 가지고 있다.[1,2] 특히 DSC는 제조단가가 기존 실리콘 태양전지의 5분의 1수준에 불과하여 그 경제성이 입증되었으며, 친환경적인 제조환경과 다양한 응용가능성으로 상용화에 유리한 장점을 지니고 있기 때문에 많은 관심과 주목을 받고 있어 기초 및 응용 연구가 활발히 진행되고 있다.[3-6]

DSC는 투명 전도막(TCO: Transparent Conductive Oxide)의 전극, 나노사이즈의 입자로 구성된 다공질 TiO₂ 그리고 전자를 생성하는 염료 분자 층으로 구성된 광전극(photo-electrode)과 TCO의 전극, 전자의 산화·환원을 용이하게 하는 촉매인 백금(Pt)막으로 구성된 상대전극(counter-electrode)으로 이루어지고 그 사이는 전자 이동의 매개체인 전해질로 채워져 있는 구조이다. 광전극에 태양광이 입사하면 염료가 여기하여 전자를 발생하게 되며 생성된 전자는 TiO₂ 전도대로 주입된다. 주입된 전자는 광전극-상대전극의 경로로 흘러 외부 부하에 기전력을 전달한다. 한편 전자를 잃은 염료 분자는 전해질 내의 산화·환원 반응에 의해 다시 환원되어 DSC 동작 과정이 완성된다.[7]

* 정희원 : 부산대학 전자전기공학과 교수
** 정희원 : 부산대학 전자전기공학과 박사과정
*** 준희원 : 부산대학 전자전기공학과 석사과정
§ 비희원 : 부산대학 전자전기공학과 조교수
† 교신저자, 준희원 : 부산대학 전자전기공학과 석사과정
E-mail : iokyoungh@hanmail.net
접수일자 : 2009년 8월 13일
최종완료 : 2009년 10월 14일

DSC 성능의 지표인 광전변환효율을 결정짓는 파라미터인 개방전압(V_{oc}), 단락전류밀도(J_{sc}), 충전률(Fill Factor, FF)에 영향을 주는 인자는 상대전극의 백금 층의 성능, 광전극의 TiO_2 의 입자크기와 두께 및 구조, 염료의 성능과 DSC 전극 판저항 및 구조 등 여러 가지가 있다. 이 중 특히 반도체 산화물 필름인 TiO_2 의 두께는 전자의 확산 및 이동과 관계가 있고 이는 전류의 발생과도 밀접한 연관이 있으므로 DSC의 전반적인 성능에 막대한 영향을 주는 인자이다. 그러므로 DSC 성능을 개선하기 위해서는 TiO_2 두께의 변화에 따른 전자의 이동 및 메커니즘을 분석하는 것이 필수적이며 이를 위해서는 주파수의 변화에 따라 임피던스를 분석함으로써 DSC의 내부에서 일어나는 전기화학적 과정에 대한 확실한 이해를 가져다 줄 수 있는 분석 기법인 전기화학적 임피던스 분석(EIS : Electrochemical Impedance Spectroscopy)법이 필요하다.[8] 하지만 지금까지 TiO_2 의 두께에 대한 연구는 두께 변화에 따른 J_{sc} 와 V_{oc} 그리고 FF의 변화 추이, 입사광자의 전류 변환효율(Incident Photon-to-current Conversion Efficiency, IPCE) 분석을 통한 연구[9-12]가 대부분이어서 TiO_2 두께의 변화에 따른 전자의 이동 및 메커니즘 분석 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 EIS를 활용하여 TiO_2 막의 두께 변화에 따른 각 파라미터의 변화와 추이를 분석하여 TiO_2 두께의 변화에 따른 전자의 이동 및 메커니즘을 이해하고자 하였다. 특히 TiO_2 두께 변화에 따른 내부 저항의 변화를 DSC의 내부 등가회로 이론을 바탕으로 상세히 분석하고 EIS 측정 결과로부터 피크 주파수와 전자 수명 시간을 분석함으로써 TiO_2 두께의 변화가 전자 이동 및 메커니즘에 어떠한 영향을 미치는지를 면밀히 분석하였다.

2. 실험방법

2.1 상대전극 제작

본 연구는 광전극의 TiO_2 두께가 변수이므로 상대전극은 동일하게 제조되었다. FTO(Fluorine-doped tin oxide) 기판 위에 샌드블라스트 공정으로 전해질 주입을 위한 작은 구멍을 형성하고 아세톤, 에탄올, 증류수의 순서로 각 10분씩 초음파 세척 후 질소로 건조하여 준비한다. 백금 층은 RF 스퍼터링 방식으로 형성되는데 2.8mTorr, 100°C, 150W 조건하에서 진공 챔버 내에 아르곤 가스를 주입하여 60초간 증착되었다.

2.2 광전극 제작

광전극 제조의 경우 세척과 건조방식은 상대전극과 같으며, TiO_2 는 Solaronix사의 TiO_2 Paste (Ti-Nanoxide HT/SP, Solaronix)를 스크린 프린트(Screen print) 방법과 닥터 블레이드(doctor-blade) 방법으로 한 층 또는 두 층으로 코팅(유효면적 0.25cm²)하여 TiO_2 두께를 조절하였다. 한 층으로 코팅된 것은 450°C에서 30분간 소성하고 두 층으로 코팅된 것은 첫번째 층을 120°C에서 30분 동안 건조시키고 그 위에 코팅한 두 번째 층을 450°C에서 30분간 소성하여 다공질 TiO_2 구조를 형성하였다. 소성된 광전극은 염료 분자의 흡착을 위해 0.3mM 염료 용액((N719, cis-bis(isothiocyanato)bis(2,2'-bipyridyl)-4,4'-dicarboxylato)-ruthenium(II)

bis-tetrabutyl-lammonium)에 상온 24시간 침지하였다. 이후 99.9% 에틸 알콜(C_2H_5OH)에 10여분 침지하여 염료의 단분자층을 형성하였다.

2.3 DSC의 제작 및 결과 측정

위 방식을 통하여 제작된 상대전극과 광전극을 60 μ m 두께의 thermoplast hot-melt sealing sheet(SX 1170-60) 실링지를 사용하여 100°C에서 5초 동안 열과 압력을 가해 샌드위치 구조로 접합한다. 그 후 상대전극에 미리 뚫어 놓은 작은 구멍을 통해 산화·환원 반응을 위한 전해질 (0.5M LiI, 0.05M I₂, 0.5M 4-tertbutylpyridine in acetonitrile)을 주입하고 커버 글라스와 실링지로 구멍을 막아 DSC 제작을 완료하였다.

완성된 태양전지의 I-V 특성 곡선을 측정하기 위하여 Air Mass(AM) 1.5(100mW/cm²)조건의 Xenon lamp 하에서 디지털 소스 미터(Keithley Instruments Inc, Model 2400)를 사용하여 그 특성을 분석하였다. EIS는 전기화학분석기(Biologic science instrument, SP-150)를 이용하여 측정하였다. EIS는 100mHz의 저주파 영역에서부터 1MHz의 고주파 영역까지 주파수를 변화시켜 가며 측정하였다. 또한 UV/VIS(Ultraviolet-Visible Spectroscopy) spectrophotometer(Varian USA, Carry 300)을 이용하여 TiO_2 두께 변화에 따른 염료의 흡착량을 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 DSC의 내부 전기적 등가회로

태양광이 입사하여 생성된 전자는 TiO_2 전도대로 이동하여 나노입자간 계면을 통하여 전극인 FTO를 지나 외부 부하에 전달되게 되는데, 이 과정에서 전자의 이동 및 확산에 영향을 미치는 것은 DSC 내부의 저항 성분들이다. 이러한 내부 저항 성분들이 커지게 되면 전자의 이동 및 확산을 방해하게 되어 DSC 성능이 떨어지게 된다. DSC 내부 임피던스 성분은 백금 상대전극에서의 산화·환원반응과 관계된 임피던스 성분(Z_1), TiO_2 /염료/전해질 사이의 전하이동과 관계된 임피던스 성분(Z_2), 전해질 내의 이온이동과 관련된 임피던스 성분(Z_3), 그리고 투명전도성 기판의 판 저항을 나타내는 성분(R_h)의 네 가지 임피던스로 나누어진다.[13,14]

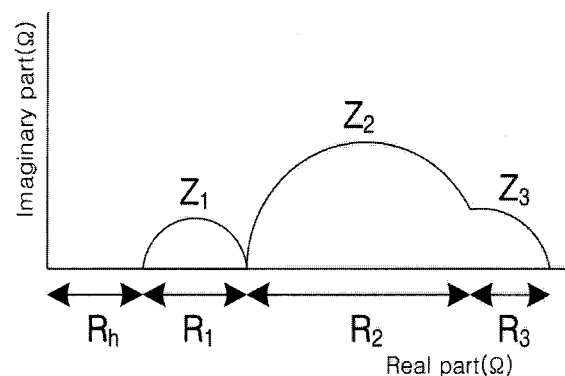


그림 1 EIS 분석 - 나이퀴스트 선도

Fig. 1 EIS Analysis - Nyquist Diagram

이러한 내부 임피던스 성분을 EIS를 이용해 표현을 할 경우 그림 1과 같이 나이키스트 선도로 표현이 된다. 그림에서 보듯이 R_h 를 제외한 나머지 3가지 임피던스 성분은 반원으로 표현이 된다. Z_1 은 1MHz~100Hz의 고주파수대에서 측정되는 반면 Z_2 는 1~100Hz의 중간 주파수대에서 측정되며 Z_3 는 100mHz~1Hz의 저주파에서 측정이 된다. 또한 X축은 실수부로 저항 성분을 나타내며 Y축은 허수부로 커패시터 성분의 임피던스 성분을 나타낸다.

일반적으로 각각의 임피던스에 포함된 C_1 과 C_3 는 각각 10 μ F/cm², 1F/cm²의 단위로 DC 회로의 해석에서는 생략이 가능하므로 실질적인 DSC 내부 저항 성분은 실수부로 표현이 되며 다음과 같은 식으로 표현된다.[13]

$$\text{내부 저항 성분} = R_h + R_1 + R_2 + R_3 \quad (1)$$

이들 중 TiO₂/염료/전해질의 상호간의 저항성분을 나타내는 R_2 는 TiO₂의 상태에 따라 직접적인 연관을 가진다. 본 연구에서 TiO₂의 단면 두께를 조절하며 R_2 에 대해 중점적으로 분석해 본 결과, 다른 저항 성분보다도 확연한 경향성을 띠고 있는 것을 발견하였다.

3.2 TiO₂의 두께와 R₂ 및 DSC 성능

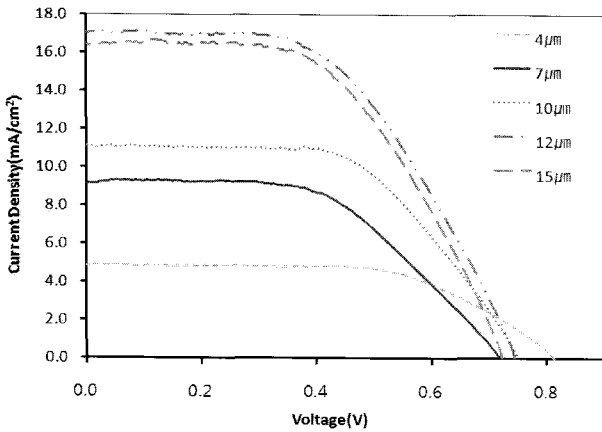


그림 2 TiO₂ 두께 변화에 따른 DSC I-V 특성 곡선
Fig. 2 DSC I-V characteristics curves with different thicknesses of TiO₂

그림 2는 TiO₂의 두께 변화에 따른 DSC의 성능을 나타내는 I-V 특성 곡선이며 표 1은 그에 따른 각각의 V_{oc} , J_{sc} , FF 및 효율(η)이다. 전반적으로 TiO₂ 두께가 두꺼워질수록 전류가 증가하여 효율이 증가하는 경향성을 보인다. 이런 경향성은 표에서 보듯이 TiO₂와 관련된 내부 저항 성분 R_2 의 감소로 인한 것임을 알 수 있다. 이를 통하여 저항이 감소함에 따라 전자 수집의 효과가 상승한다는 결과를 도출할 수 있다.

그림 3은 TiO₂의 두께를 변화시킬 때, Z_2 의 실수값인 R_2 와 허수값인 C_2 의 추이를 나타내는 EIS 나이키스트 선도이다. 그림에서 보듯이 TiO₂의 두께의 증가에 따라서 Z_2 와 관련된 반원의 크기가 급격히 변화함을 확인할 수 있다. 이는 Z_2 가 TiO₂와 염료, 전해질과의 사이에서 전자의 이동에

관여되는 임피던스인 것으로 미루어 TiO₂의 두께가 전자의 이동에 밀접한 영향을 끼치는 변수라는 것을 알 수 있다. TiO₂의 두께의 증가 시 반원 X축의 저항 즉, R_2 저항 성분이 감소하고 이것으로 인해 TiO₂ 전도대로의 전자기동이 쉽게 되어 전류(J_{sc})의 증가를 가져오게 됨으로써 결과적으로 효율이 증가하게 된다.

표 1 TiO₂ 두께 변화에 따른 DSC 특성

Table 1 DSC performances with different thicknesses of TiO₂

Thickness	R_2 (Ω)	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	P_{max} (mW)	FF	Eff (%)
4 μ m	148.5	0.81	4.92	0.30	0.61	2.44
7 μ m	110	0.72	9.46	0.45	0.53	3.60
10 μ m	88.65	0.75	11.46	0.60	0.56	4.83
12 μ m	37.43	0.74	17.18	0.84	0.53	6.73
15 μ m	35.22	0.72	16.84	0.80	0.53	6.44

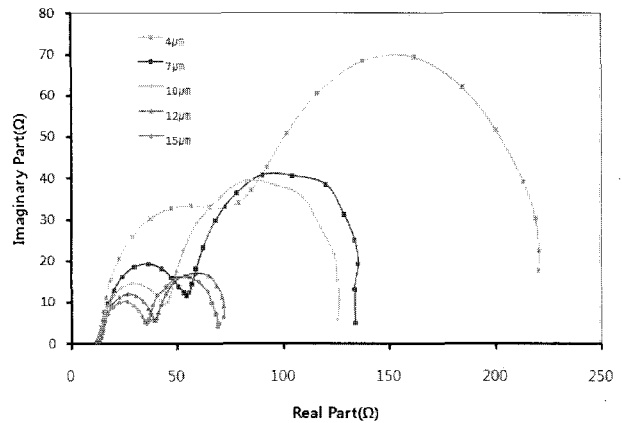


그림 3 TiO₂ 두께 변화에 따른 EIS 나이키스트 선도
Fig. 3 EIS Nyquist Diagrams with different thicknesses of TiO₂

3.3 τ (electron life time)와 전자 이동과의 관계

$$L_n = \sqrt{D_e \tau_r} \quad (2)$$

식 (2)는 전자의 확산거리를 나타낸다. 전자의 확산거리 (L_n : electron diffusion length)는 전자 확산 계수(D_e : Diffusion coefficient)와 전자의 수명(τ_r : electron life time)으로 나타낸다. 즉 전자의 수명이 증가할수록 전자가 확산하는 거리가 증가한다는 의미로 전자의 수명이 길수록 전자가 확산하여 갈 수 있는 거리가 늘어나게 된다는 것이다.[2]

전자의 수명은 EIS 나이키스트 선도의 두 번째 반원에서 측정되는 피크 주파수(f_p : peak frequency)의 역수를 취함으로써 다음과 같이 계산할 수 있다.[15]

$$\tau_r = \frac{1}{f_p} \quad (3)$$

표 2는 EIS에서 두 번째 반원의 f_p 를 측정하고 이에 따른 τ_r 을 식 (3)을 이용하여 계산해 본 결과이다. TiO_2 의 두께가 두꺼워질수록 τ_r 또한 증가하는 변화를 보이는데 이는 두께가 증가할수록 전자가 머무를 수 있는 시간이 증가한다는 것을 의미한다. 또한 앞선 수식을 통하여 전자의 확산거리인 L_n 또한 증가함을 알 수 있고, 이는 TiO_2 두께가 두꺼워질수록 전자의 확산거리가 증가하여 전자의 이동이 한층 용이하다는 결론에 이른다. 이는 DSC의 성능에 궁극적인 연관이 있으며 위에서 언급한 TiO_2 내 전자 이동과 관련된 내부 저항 성분 R_2 가 TiO_2 두께가 증가할수록 감소하는 것과 일치하는 결과이다.

표 2 TiO_2 두께 변화에 따른 피크 주파수(f_p) 및 전자의 수명(τ_r)

Table 2 The peak frequency(f_p) and the electron lifetime(τ_r) with different thicknesses of TiO_2

Thickness	f_p (Hz)	τ_r (s)
4 μm	7.45	0.134
7 μm	5.04	0.198
10 μm	5.04	0.198
12 μm	3.417	0.293
15 μm	3.417	0.293

3.4 TiO_2 두께와 염료 흡착량과의 관계

염료는 태양광이 입사될 때 전자를 생성하는 DSC의 핵심 인자이다. 전자의 발생과 이동이 전류와 효율에 직접적으로 영향을 미치는 만큼 TiO_2 에 흡착된 염료의 양은 매우 중요하다. 따라서 DSC 제작과정 중 소성으로 인해 형성된 다공질의 TiO_2 표면과 TiO_2 유효면적, 그리고 TiO_2 의 두께 등은 보다 더 많은 염료의 흡착을 위해 중요한 인자라고 할 수 있다. 따라서 TiO_2 두께에 따른 DSC의 에너지 변환 효율의 변화를 분석하기 위해서는 EIS를 통한 내부 저항 및 전자 수명 시간뿐만 아니라 TiO_2 두께와 염료 흡착량의 관계에 대해서도 정확한 분석이 이루어져야 한다.

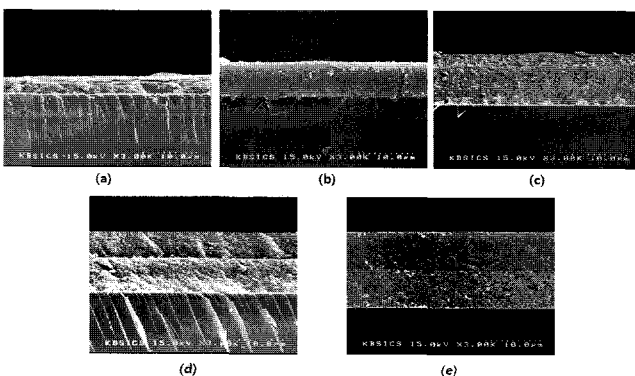


그림 4 TiO_2 두께 SEM 이미지
Fig. 4 The SEM images for each cases of the different TiO_2 thicknesses

그림 4는 각각의 두께를 주사 전자 현미경(SEM : Scanning Electron Microscope)으로 촬영한 이미지이다. a(4 μm), b(7 μm), c(10 μm)는 10 μm 이하의 두께로 TiO_2 를 한층 올려 소성한 광전극의 단면들이고 10 μm 이상의 d(12 μm), e(15 μm)는 TiO_2 를 두 층으로 겹쳐 올려 소성한 광전극의 단면이다. 그림 4에서 TiO_2 두께가 두꺼워질수록 다공성의 TiO_2 입자의 양이 많아짐을 확인할 수 있다. 이는 염료 분자가 TiO_2 입자에 흡착된다는 사실을 바탕으로 할 때 TiO_2 두께가 두꺼워질수록 흡착될 염료의 양이 증가함을 의미한다. 따라서 TiO_2 의 두께가 증가할수록 흡착된 염료 양이 증가하여 많은 전자가 생성되어 전류의 양이 증가한다는 것을 확인할 수 있다. 또한 이러한 사실은 UV-VIS를 통하여 염료의 태양광 흡광도를 분석함으로써 조금 더 확실하게 알 수 있다.

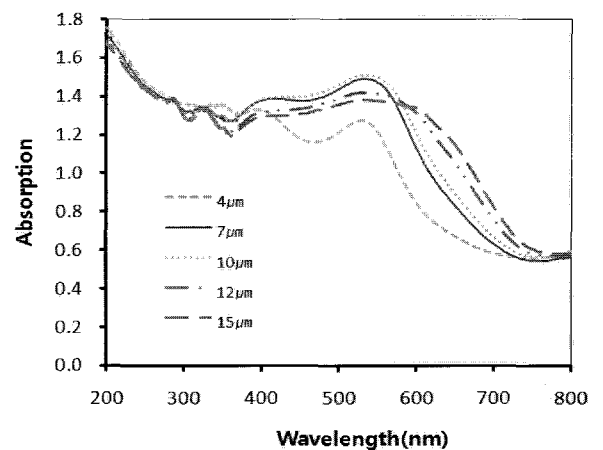


그림 5 TiO_2 두께별 염료의 흡광도
Fig. 5 The light absorption of dye molecules with different thicknesses of TiO_2

그림 5는 TiO_2 두께 변화에 따른 파장별 태양광 흡광도를 분석한 것으로 흡광도가 높을수록 TiO_2 표면에 염료가 많이 흡착되었음을 알 수 있는 지표이다. 그림에서 살펴보면 두께 4~10 μm 의 범위에서는 두께가 증가할수록 400~600nm의 파장에서의 흡광도가 높아지는 것을 알 수 있으며 이는 두께가 증가할수록 염료 흡착량이 증가함을 의미한다. 따라서 두께가 증가할수록 400~600nm의 파장의 빛의 이용률이 증가하게 된다. 하지만 두께 12 μm , 15 μm 의 경우 두께가 두꺼워졌음에도 불구하고 400~600nm의 파장에서의 흡광도가 떨어졌음을 알 수 있는데 이는 TiO_2 두께가 증가하여 400~600nm 파장의 빛의 이용률이 약간 줄어들었기 때문이다. 그럼에도 불구하고 12 μm , 15 μm 의 경우 4~10 μm 의 범위의 두께보다 생성 전류 양이 증가한 것은 600~700nm 파장의 빛의 흡수도의 증가 및 전자의 수명 시간 증가에 기인한다. 그림 5에서 보듯이 600~700nm의 범위의 빛의 흡수도가 두께가 증가할수록 증가하였음을 알 수 있는데 이는 TiO_2 두께가 증가되어 긴 파장의 빛을 흡수할 수 있어 빛의 흡수 파장영역이 넓어지기 때문이다. 이것은 TiO_2 두께가 두꺼워질수록 그만큼 넓은 파장의 빛을 전자로 변환시킬 수 있으므로 빛의 이용률이 높아지는 것을 의미한다. 따라서 TiO_2 두께가 두꺼워질수록 많은 염료를 흡착하여 빛의 이용률이 증가하

기 때문에 보다 많은 전자가 생성된다는 것을 의미하므로 전류가 증가하게 된다.

특히 UV/VIS의 결과를 이용하면 TiO_2 두께가 다르지만 전자 수명 시간이 같은 경우의 DSC의 전체적인 성능의 변화에 대해 설명할 수 있다. $7\mu\text{m}$ 와 $10\mu\text{m}$ 가 전자 수명이 0.198로 같음에도 그리고 $12\mu\text{m}$ 와 $15\mu\text{m}$ 가 전자 수명이 0.293로 같음에도 DSC의 성능이 차이가 나는 것은 그림 5에서 확인할 수 있듯이 빛의 이용률이 다르기 때문이다. 즉 전자수명 시간이 같아도 더라도 염료의 흡착량에 따라 빛의 이용률이 다르고 전자의 발생정도가 다르기 때문에 DSC 성능에 차이가 나는 것이며 두께가 두꺼워져 전자가 많이 생성될 경우, 그 많은 전자들이 같은 수명 시간 동안 TiO_2 전도대를 지나 외부로 전달되므로 전체적인 효율이 상승하게 되는 것이다.

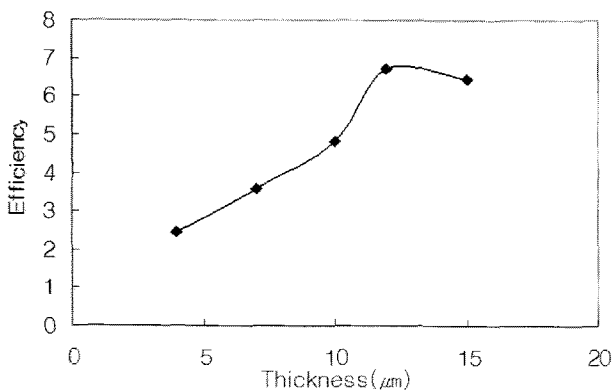


그림 6 TiO_2 두께와 효율과의 상관관계

Fig. 6 The relationship between the TiO_2 thickness and the efficiency of DSC

그림 6은 TiO_2 두께와 효율과의 상관관계를 나타낸 그래프이다. $12\mu\text{m}$ 까지는 전체적으로 두께가 증가할수록 효율이 상승하며 이는 R_2 감소 및 전자수명시간의 증가, 그리고 많은 염료의 흡착으로 인한 많은 전자 생성에 따른 전류 상승에 기인한다. 하지만 $15\mu\text{m}$ 에서는 약간의 효율 감소가 일어남을 알 수 있는데 이는 두께가 너무 두꺼워져 $12\mu\text{m}$ 경우보다 빛의 이용률이 떨어지기 때문이다.

4. 결 론

본 연구에서는 EIS 분석 결과를 이용하여 TiO_2 의 두께 ($4\sim 15\mu\text{m}$)를 증가시킬 때 DSC의 내부저항(R_2) 및 피크 주파수(f_p)의 변화, 나아가서 전자 수명 시간(τ_r)과 전자 확산 거리(L_n)와의 상관관계를 중점적으로 분석하여 TiO_2 두께의 변화가 전자 이동 및 메커니즘에 미치는 영향에 대해서 확인하였다. 그 결과 TiO_2 의 두께가 증가할수록 TiO_2 내 전자 이동과 관련된 내부 저항 R_2 가 감소하는 것을 확인 하였으며 이로 인해 TiO_2 의 전자 수집의 효과가 상승하여 전류밀도와 효율이 증가한다는 것을 알 수 있다. 또한 EIS 나이키스트 선도의 두 번째 반원에서 측정되는 피크 주파수를 이용하여 얻어진 전자 수명 시간은 TiO_2 두께가 증가할수록 증가하는 추세를 보이는데 이는 태양광의 입사 시에 생성된

전자들이 더욱 먼 거리로 확산할 수 있다는 의미이므로 TiO_2 두께가 두꺼워 질수록 더 많은 양의 전류를 얻을 수 있어 전체적인 DSC 효율이 증가하게 된다. 또한 염료의 흡광도 역시 DSC 성능에 중요한 영향을 끼치는 요인 중 하나로 TiO_2 두께가 증가할수록 염료가 많이 흡착되므로 빛의 이용률이 증가하게 되어 많은 전자가 발생될 수 있다. 하지만 TiO_2 두께가 너무 두꺼워질 경우 빛의 이용률이 떨어져 오히려 약간의 효율 감소가 발생하였다. 따라서 궁극적으로 어느 정도의 TiO_2 의 두께의 증가는 내부저항의 감소와 전자의 수명증가, 그리고 빛의 이용률을 증가시킴으로써 DSC의 전류밀도를 더욱 증가시켜 더 높은 DSC의 광전변환효율을 기대할 수 있다는 결론을 얻었다.

감사의 글

이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2008-313-D00399)

참 고 문 헌

- [1] Brian O'Regan, Michael Grätzel, "A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO_2 films", Nature, Vol. 353, pp.737-740, October 1991.
- [2] Michael Grätzel, "Solar energy conversion by dye-sensitized photovoltaic cells", Inorg. Chem. Vol. 44, No. 20, 2005.
- [3] 서현용, 손민규, 이경준, 김정훈, 홍지태, 김희제, "레이저 식각 및 그리드 전극을 적용한 염료감응형 태양전지의 효율 향상 연구" Trans. KIEE, Vol.57, No. 10, OCT, 2008.
- [4] 황경준, 유승준, 노성희, 김선일, 이재욱, " TiO_2 전극의 구조 특성이 염료감응형 태양전지의 효율에 미치는 영향", Applied Chemistry, Vol. 11, No. 2, November, 2007.
- [5] 황경준, 유승준, 노성희, 김선일, 이재욱, " TiO_2 전극의 구조 특성이 염료감응형 태양전지의 효율에 미치는 영향", Applied Chemistry, Vol. 11, No. 2, November, 2007.
- [6] M. Gratzel, "A photovoltaic device structure based on internal electron emission", Nature, Vol. 421, pp. 6923, 2003.
- [7] M. Gratzel, "A photovoltaic device structure based on internal electron emission", Nature, Vol. 421, pp. 6923, 2003.
- [8] Qing Wang, Jacques-E. Moser, and Michael Grätzel, "Electrochemical impedance spectroscopic analysis of dye-sensitized solar cells", J. Phys. Chem. B, Vol. 109, No. 31, 2005.
- [9] N.G.Park, J. van de Lagemaat, and A.J. Frank, "Comparison of Dye-Sensitized Rutile- and

- Anatase-Based TiO₂ Solar Cells”, J. Phys. Chem. B, Vol. 104, 2000.
- [10] Man Gu Kang, Kwang Sun Ryu, Soon Ho Chang, Nam Gyu Park, Jin Sup Hong, and Kang-Jin Kim, "Dependence of TiO₂ Film Thickness on Photocurrent-Voltage Characteristics of Dye-Sensitized Solar Cells”, Bull. Korean Chem. Soc. Vol. 25, No. 5, 2004.
- [11] M.C. Kao, H.Z. Chen, S.L. Young, C.Y. Kung, C.C. Lin, "The effects of the thickness of TiO₂ films on the performance of dye-sensitized solar cells”, Thin Solid Films, Vol. 517, 2009.
- [12] 김종태, 김참, 정선주, 한윤수, "FTO 기판 및 TiO₂ 층의 두께에 따른 염료감응형 태양전지의 효율 연구”, Applied Chemistry, Vol. 13, No. 1, April 2009.
- [13] Naoki Koide, Ashrafal Islam, Yasuo Chiba, Liyuan Han, "Improvement of efficiency of dye-sensitized solar cells based on analysis of equivalent circuit”, Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, Vol. 182, Issue 3, September 2006.
- [14] Liyuan Han, Naoki Koide, Yasuo Chiba, and Takehito Mitate, "Modeling of an equivalent circuit for dye-sensitized solar cells”, Appl. Phys. Lett., Vol. 84, No. 13, March 2004.
- [15] T.Hoshikawa, T. Ikebe, R. Kikuchi, K.Eguchi, "Effects of electrolyte in dye-sensitized solar cells and evaluation by impedance spectroscopy”, Electrochimica Acta, Vol. 51, Issue 25, July 2006.



서현웅 (徐鉉雄)

1980년 10월 25일생. 2006년 부산대학교 공과대학 전자전기통신공학부 졸업. 2008년 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전자전기공학과 박사과정 재학 중.



손민규 (孫珉圭)

1982년 6월 7일생. 2008년 부산대학교 공과대학 전자전기통신공학부 졸업. 현재 동 대학원 전자전기공학과 석사과정 재학 중.



김진경 (金珍暻)

1986년 11월 14일생. 2009년 부경대학교 자연과학대학 물리학과 졸업. 현재 부산대학교 대학원 전자전기공학과 석사과정 재학 중.



프라바카르 (K. Prabakar)

1973년 5월 20일생. 1996년 인도 Bharathiar University 물리학과 졸업(석사). 2002년 인도 Bharathiar University 물리학과 졸업(박사). 현재 부산대학교 전기공학과 조교수 재직 중

저자 소개



김희제 (金熙濟)

1955년 10월 23일생. 1980년 부산대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1982년 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 규슈대학교 대학원 에너지공학과 졸업(박사). 현재 부산대학교 전기공학과 교수 재직 중.



이정기 (李廷基)

1972년 1월 31일생. 2008년 부산대학교 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 현재 한국전기연구원 인증신뢰성평가실에 재직 중



신인영 (申仁英)

1985년 8월 16일생. 2009년 부산대학교 공과대학 전자전기공학부 졸업. 현재 동 대학원 전자전기공학과 석사과정 재학 중.