

## WO<sub>3</sub>가 첨가된 TiO<sub>2</sub> 염료감응형 태양전지의 에너지 전환 효율

이성규 · 이영석<sup>†</sup>

충남대학교 정밀응용화학과  
(2010년 7월 27일 접수, 2010년 9월 27일 채택)

### Energy Conversion Efficiency of TiO<sub>2</sub> Dye-sensitized Solar Cells with WO<sub>3</sub> Additive

Sung Kyu Lee and Young-Seak Lee<sup>†</sup>

Department of Fine Chemical Engineering and Applied Chemistry, BK21-E2M, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea  
(Received July 27, 2010; Accepted September 27, 2010)

염료 감응형 태양전지의 에너지 전환 효율을 향상시키고자 TiO<sub>2</sub>에 WO<sub>3</sub>를 첨가하여 광전극을 제조하고 그 전기화학적 특성 평가를 하였다. 또한 WO<sub>3</sub>가 첨가된 TiO<sub>2</sub>를 회쇄함으로써 회쇄 효과가 전지효율에 미치는 영향을 고찰하였다. I-V 곡선을 통하여 측정된 염료 감응형 태양전지의 효율은 WO<sub>3</sub> 첨가 및 회쇄 효과에 의하여 2.8에서 6.0%로 크게 증가하였다. 이와 같은 결과는 TiO<sub>2</sub>의 전도대에서 전달되는 전자가 염료 및 전해질과 재결합되기 전에 TiO<sub>2</sub>의 전도대보다 낮은 WO<sub>3</sub>의 전도대를 통해 전달되기 때문에 전체 전류의 양이 증가되어 효율이 증가한 것으로 여겨진다. 또한, 임피던스 결과로부터 TiO<sub>2</sub>/염료/전해질 계면의 저항 값이 감소하는 것을 확인하였다.

In order to improve the energy conversion efficiency of dye-sensitized solar cell (DSSC), the photoelectrode was manufactured by using TiO<sub>2</sub> and WO<sub>3</sub> on combination effects of two conduction bands. The smash procedure of TiO<sub>2</sub> and WO<sub>3</sub> was carried out by using a paint shaker to enlarge the contact area of semiconductor with dye and electrolyte. The energy conversion efficiency of prepared DSSC was improved about two times from current-voltage curve based on effects of WO<sub>3</sub> and smash. The mechanism was suggested that the conduction band of WO<sub>3</sub> worked for prohibiting the trapping effects of electrons in conduction band of TiO<sub>2</sub>. This result is attributed to the prevention of electron recombination between electron in conduction band of TiO<sub>2</sub> with dye and electrolyte. Impedance results indicate the improved electron transport at interface of TiO<sub>2</sub>/dye/electrolyte.

**Keywords:** dye-sensitized solar cell, TiO<sub>2</sub>, WO<sub>3</sub>, recombination, energy conversion efficiency

## 1. 서 론

최근 환경오염 및 화석연료의 고갈을 대비하여 대체에너지 연구에 많은 관심이 집중되고 있다. 이런 대체에너지 연구 중 태양전지는 무한한 태양에너지를 이용하는 것으로 청정성, 안정성, 무한성으로 인하여 가장 확실한 대체에너지원으로 인식되어 왔으며 태양전지를 통하여 빛을 전기로 전환하려는 노력이 시도되어 왔다. 태양전지의 종류 중 염료 감응형 태양전지(dye-sensitized solar cell, DSSC)는 1991년 스위스의 그라첼(Gratzel) 등에 의해 소개된 것으로 기존 실리콘 태양전지에 비해 제조비용보다 저렴하고 제조가 용이하다는 점과 긴 재생 수명, 친환경적 에너지, 다양한 응용이 가능하다는 장점을 가지고 있다 [1-6].

DSSC는 광전극(photoelectrode), 상대전극(counter electrode), 염료(sensitizer), 전해질(electrolyte)로 구성되어 있다. 광전극의 재료로는 TiO<sub>2</sub>가 널리 이용이 되고 있으나 그 밖에 ZnO, SnO<sub>2</sub>와 같은 넓은 밴드 갭을 갖는 n형 전이금속 산화물들로 구성될 수 있다. 이런 광전극

표면에 흡착이 되어 있는 염료가 태양광을 받으면 염료 속의 전자가 태양 에너지를 흡수하여 채워지지 않은 상위 준위로 여기(excited state)되며, 이때 전자가 빠져나간 하위 준위(ground state)의 빈자리는 전해질 속의 산화된 요오드 이온이 전자를 주면서 다시 채워진다. 염료에 전자를 제공한 이온은 산화되어 광전극으로 이동하여 전자를 제공받게 된다. 또한 상대전극은 전해질 속에 있는 이온의 환원 반응의 촉매로 작용하여 전해질 속의 이온에 전자를 제공하는 역할을 한다 [7-9].

이런 원리로 작동이 되는 DSSC는 많은 장점에도 불구하고 낮은 에너지 전환 효율(energy conversion efficiency)로 인하여 상용화하기에는 어려움이 있다[10-14]. 에너지 전환 효율이 낮은 이유에는 받는 태양광의 손실 및 전극 내로 전자 공급의 어려움 등 여러 가지가 있으나 가장 큰 문제는 전달되는 전자와 염료 및 전해질과의 재결합(recombination) 문제이다. 전자의 재결합 문제는 태양광을 흡수한 염료가 전자를 여기 하여 반도체 층으로 주입되는 속도는 나노 초로 상당히 빠른 반면에 여기 된 전자가 반도체 층을 통과하는 속도는 밀리 초로 상대적으로 느리기 때문에 여기 된 전자가 전부 반도체 층을 통과하지 못하고 일부는 다시 전해액 속의 산화된 I<sub>3</sub><sup>-</sup> 이온과 재결합 하

<sup>†</sup> 교신저자(e-mail: youngslee@cnu.ac.kr)

Table 1. Photovoltaic Parameters of DSSC

	Voc (V)	Isc (mA/cm <sup>2</sup> )	Vmax (V)	Imax (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	$\eta$ (%)
NT	0.871	5.482	0.615	4.617	59.467	2.839
WT	0.905	7.985	0.636	7.122	62.681	4.531
SWT	0.914	9.686	0.654	9.211	68.045	6.024

거나 염료의 광전자를 여기 시킨 정공의 홀로 재결합하여 DSSC의 전체적인 전류 생산량을 감소시켜 효율을 저하시키게 된다[15-17]. 이러한 재결합 문제는 전지의 장기간 안정성 문제에도 영향을 주기 때문에 이를 해결하려는 연구가 진행 중이다.

따라서 본 연구는 서로 다른 에너지 준위를 갖는 반도체 산화물을 이용하여 재결합 현상을 감소시키고자 TiO<sub>2</sub>에 WO<sub>3</sub>를 첨가하여 광전극을 제조하고 전기화학적 특성 평가를 하였다. 또한 WO<sub>3</sub>가 첨가된 TiO<sub>2</sub>를 회쇄 후 제조함으로써 첨가된 WO<sub>3</sub> 및 회쇄 효과가 에너지 전환 효율에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

## 2. 실험

### 2.1. WO<sub>3</sub> 첨가 TiO<sub>2</sub> 광전극 재료 제조

증류수 25 mL에 TiO<sub>2</sub> (5 g, 아나타자제, 99.7%, Aldrich co.)와 WO<sub>3</sub> (2.3 g, formula weight (Fw) : 231.85, ~20 micron, 99+%, Aldrich co.)를 넣고 상온에서 48 h 동안 교반하였다. 그 후 TiO<sub>2</sub> 및 첨가된 WO<sub>3</sub>의 결합을 위하여 질소분위기에서 1 h 동안 600 °C로 열처리하였다. 미처리 TiO<sub>2</sub>와 WO<sub>3</sub>가 첨가된 TiO<sub>2</sub>를 NT, WT로 각각 명명하였다. 또한, 제조된 WT는 페인트 셰이커를 이용하여 20 min 동안 회쇄하였고, 이를 SWT (회쇄된 WO<sub>3</sub> 첨가 TiO<sub>2</sub>)로 명명하였다.

### 2.2. 광전극 및 상대전극 제조

제조된 NT, WT 그리고 SWT 시료 각각 2 g을 증류수 7 mL에 0.5 g이 용해된 PEG (poly ethylene glycol, molecular weight (Mw) : 30000) 수용액, Ethanol (Fw : 46.07) 5 mL, Terpienol (Fw : 154.25) 15 mL와 함께 80 °C에서 6 h 교반시켜 NT, WT 그리고 SWT 페이스트를 제조하였다. 2-propanol, ethanol, 증류수 순으로 세척하여 표면 불순물을 제거하고 상온에서 건조한 FTO glass (fluorine doped tin oxide, Solaronix) 위에 각각의 페이스트를 스크린 프린팅법으로 15  $\mu$ m의 두께, 1 cm  $\times$  1 cm의 면적으로 코팅하였다. 코팅 된 FTO glass는 70 °C 오븐에서 1 h 동안 건조 후 공기분위기에서 30 min 동안 450 °C로 열처리하였다. 열처리 과정을 거친 후 염료 흡착은 70 mg의 염료 (Ruthenium 535-bis TBA, Solaronix)와 acetonitrile 25 mL, r-butylolactone 25 mL의 혼합으로 제조된 염료액에 코팅 된 FTO를 담지시키고 40 °C로 유지하면서 24 h 동안 진행하였고, 이후 상온에서 건조하였다. 상대전극은 Pt 페이스트(Pt-1, DYESOL)를 구입하여 광전극과 동일한 방법으로 제조하였다. 셀 조립 후에 원활히 전해액을 넣어 주기 위하여 작은 구멍을 Pt가 코팅 된 전극의 양 끝에 뚫어주었다.

### 2.3. DSSC 셀 조립

상기 제조된 광전극과 상대전극은 접합용 필름인 surlyn (SX1170-25PF, Solaronix)을 이용하여 접착하였다. Surlyn 필름을 광전극과 상대전극 사이에 넣고 100 °C 오븐에서 4 min 정도 열처리하여 두 전극을 접착하였다. 전해액(AN-50, Solaronix)은 상기 상대전극에 뚫었던 작은 구멍을 통하여 넣어주고 박막유리와 surlyn 필름으로 작은 구멍

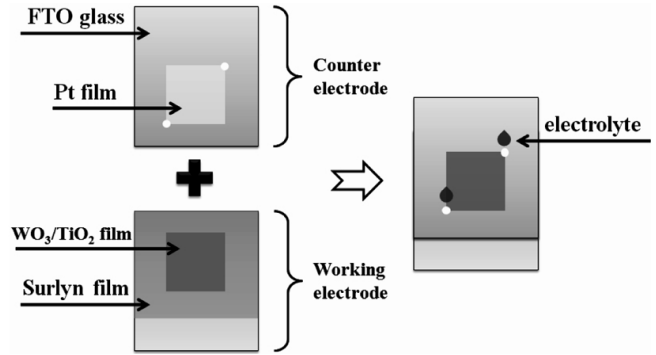


Figure 1. Schematic diagram for the assembly of the DSSC in this study.

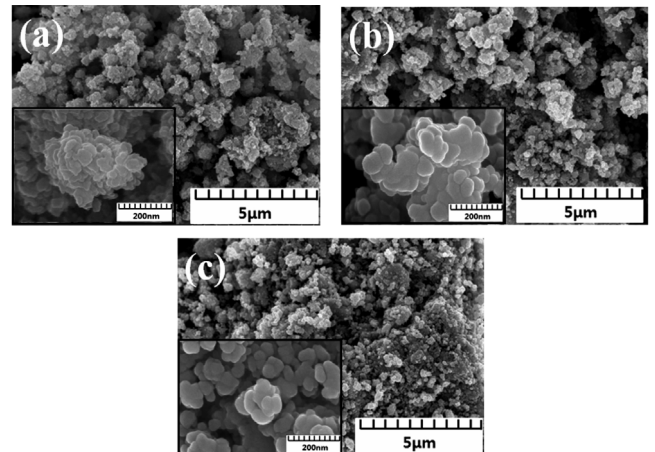


Figure 2. FE-SEM images (a) : NT, (b) : WT, and (c) : SWT.

을 막아 셀을 조립하였다. DSSC 셀 조립의 모식도를 Figure 1에 나타내었다.

### 2.4. 분석 방법

DSSC의 광전극 재료로 사용한 TiO<sub>2</sub>와 첨가된 WO<sub>3</sub>의 물질 평가는 field emission scanning electron microscopy (FE-SEM, Hitachi, S-5500)과 x-ray diffraction (XRD, D/MAX-2200 Ultima/PC, Rigaku, Japan)을 통하여 분석하였고, 제조된 광전극 재료의 입도 분석은 laser scattering particle size analyzer (HELOS/RODOS & SUCELL, Sympatec GmbH co. Germany)를 이용하였다.

전기화학적 특성 평가는 100 mW/cm<sup>2</sup>, AM 1.5의 조건으로 solar simulator (Pecell Technologies, PEC-L11) 및 photocurrent-voltage (I-V) curve analyzer (Pecell Technologies, Inc., PECK2400-N, version 2.1)로 I-V 곡선을 나타내어 에너지 전환 효율을 계산하였고, 전지 내부에서 일어나는 각 계면간의 저항 분석은 electrochemical work station (ZAHNER, IM6ex, 10 mHz~100 kHz)을 이용하여 해석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 제조된 NT, WT 그리고 SWT 광전극 재료의 입자 크기 및 표면 형상 분석

NT, WT 그리고 SWT의 입자 크기 및 표면 형상을 알아보기 위하여 FE-SEM 분석을 하였고 이를 Figure 2에 나타내었다. Figure 2(a)에

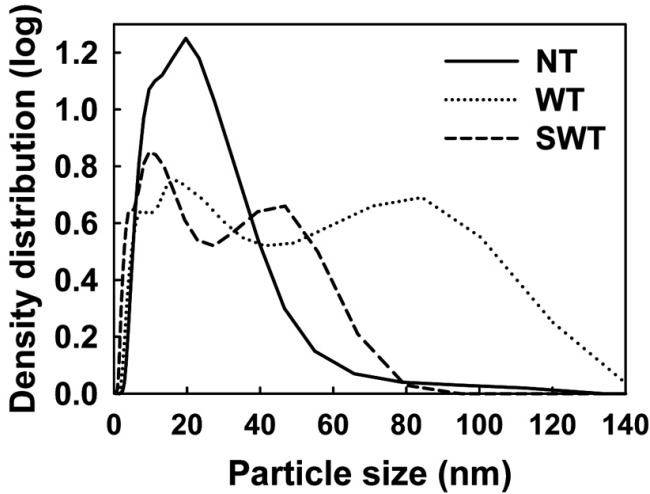


Figure 3. Particle size density distribution of NT, WT, and SWT samples.

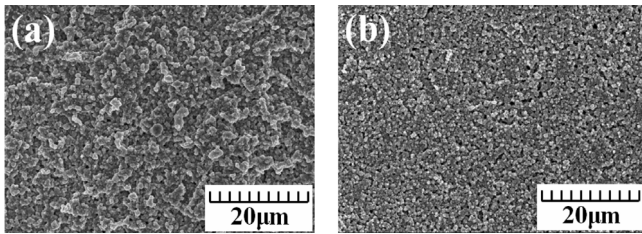


Figure 4. FE-SEM images of electrode coated WT (a) and SWT (b).

나타낸 NT 샘플은  $36 \pm 5$  nm의 입자 크기를 가지며, 작은 입자들이 뭉치면서 입자덩어리를 이루고 있다. Figure 2(b)에 나타낸 WT 샘플은 NT 샘플보다 커진  $45 \pm 4$  nm의 입자 크기를 가졌다. 이와 같은 결과는  $TiO_2$ 와 첨가된  $WO_3$ 가 열처리 과정에서 결합되면서 입자 크기가 증가된 것으로 여겨진다. SWT 샘플(Figure 2(c))은 입자 크기가  $39 \pm 3$  nm로 NT 샘플보다는 입자 크기가 증가하였지만, WT 샘플보다는 입자 크기가 감소하였다. 이와 같은 결과는 회쇄에 따른 효과로 여겨지며, 회쇄 효과는 입자 크기뿐만 아니라 입자덩어리의 크기도 감소하였음을 알 수 있다. 제조된 샘플의 입자 크기 변화는 Figure 3에 나타낸 입도 분석 데이터에서도 확인할 수 있었다. NT 샘플과 비교하였을 때 WT 샘플은 보다 큰 입자 크기의 분포를 나타내고, SWT 샘플은 WT 샘플보다 작은 입자 크기의 분포를 보이지만 NT 샘플과 비교 시 큰 입자 크기의 분포를 확인하였다. 이와 같은 결과는 FE-SEM 분석과 동일하며 위에서 설명했듯이  $WO_3$ 를 첨가함으로써 입자 크기가 증가하고, 회쇄 과정 후 입자 크기는 감소한 것으로 여겨진다.

Figure 4에는 페인트 웨이커를 이용하여 얻어진 입자덩어리의 회쇄 정도를 관찰하기 위하여, SWT 샘플과 WT 샘플로 코팅된 전극의 FE-SEM 분석을 나타내었다. Figure 4(a)는 WT 샘플로 코팅된 전극으로써 전극 표면의 입자덩어리의 크기는  $900 \pm 500$  nm의 불규칙적인 크기를 갖는 것을 알 수 있었다. 또한 전극 표면의 코팅은 불균일하게 되어 있는 것을 알 수 있었다. 반면에 SWT 샘플로 코팅된 Figure 4(b)는 입자덩어리가  $400 \pm 100$  nm의 크기로 WT 샘플에 비하여 작은 크기를 가지며, 전극 표면에 균일하게 코팅되어 있는 것을 확인할 수 있었다. FE-SEM분석을 통하여 알 수 있듯이 페인트 웨이커에 의하여 입자덩어리가 회쇄 됨으로써  $WO_3$ 가 첨가된  $TiO_2$ 의 입자 및 입자덩어

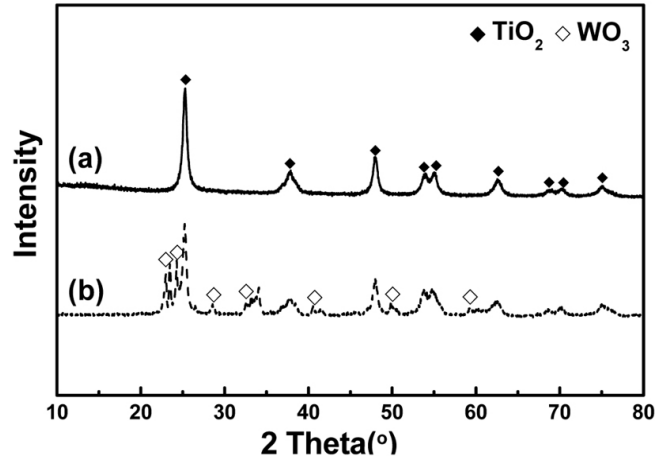


Figure 5. XRD peaks of (a) : NT and (b) : SWT.

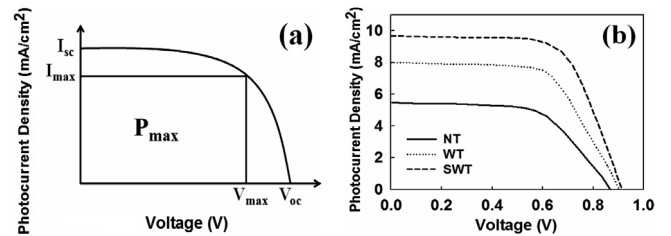


Figure 6. I-V characteristics of DSSC (a) Typical shape of the current-voltage curve of a photovoltaic cell (b) measured NT, WT and SWT.

리의 크기가 감소한 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과로부터 회쇄된  $WO_3$  첨가  $TiO_2$ 는 염료 및 전해질과의 접촉 면적이 증가되면서 전지 효율이 향상될 것으로 기대된다.

### 3.2. NT 및 SWT 샘플의 구조적 특성 평가

XRD 분석을 통하여 NT와 SWT의 구조적 특성을 조사하였고 이를 Figure 5에 나타내었다. Figure 5(a)에 NT 샘플의 XRD 분석 결과를 나타내었는데, 전형적인 아나타아제 타입의  $TiO_2$  (JCPDS card No. 21-1272) peak가 존재함을 확인하였다. SWT (Figure 5(b))는 아나타아제 타입의  $TiO_2$  peak와 함께  $WO_3$  (JCPDS card No. 32-1395)의 peak를 확인함으로써  $TiO_2$ 와  $WO_3$ 가 혼재하고 있음을 알 수 있었다. 여기에서  $TiO_2$  peak이  $WO_3$  peak보다 더 높게 나오는 것은 넣어준 양의 차이에 기인한 것으로 생각된다.

### 3.3. DSSC의 광 전기화학적 특성 평가

DSSC의 전기화학적 특성 평가는 일반적으로 I-V 곡선으로 계산될 수 있다. Figure 6(a)에 나타낸 것처럼 개로전압( $V_{oc}$ )과 단락전류( $I_{sc}$ )는  $I = 0$  mA,  $V = 0$  V일 때 측정된 값이고, 최대전압( $V_{max}$ )와 최대전류( $I_{max}$ )는 측정된 I-V 곡선에서 최대전력( $P_{max}$ )을 가질 때의 전압과 전류를 의미한다. 따라서, 최대전력은 다음 식으로 계산할 수 있다[18-20].

$$P = V \times I \tag{1}$$

또한, 에너지 효율을 나타내는 인자인 Fill factor (FF)와 효율( $\eta$ )은 다음 식으로 계산 할 수 있다.

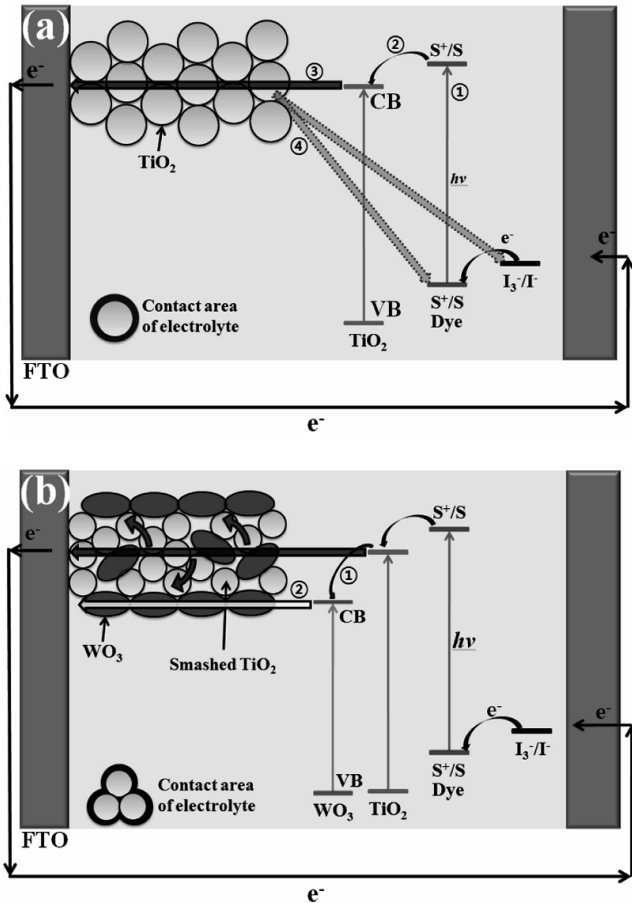


Figure 7. Suggested mechanism of improved efficiency of prepared DSSC using (a) : NT and (b) : SWT.

$$FF = (V_{max} \times I_{max}) / (V_{oc} \times I_{sc}) \quad (2)$$

$$\eta (\%) = [(V_{oc} \times I_{sc} \times FF) / (P_{in} \times S)] \times 100 (\%) \quad (3)$$

식 (3)에서 P<sub>in</sub>, S는 각각 조사된 빛의 세기(100 mW/cm<sup>2</sup>)와 제조된 전극의 면적(1 cm<sup>2</sup>)을 나타낸다.

본 실험에서 WO<sub>3</sub>가 첨가된 TiO<sub>2</sub>를 이용하여 제조된 DSSC에 대하여 전압-전류(I-V)를 측정하였고 이를 Figure 6(b)에 나타내었다. 또한, Figure 6(b) 얻어진 그래프로부터 식 (3)으로 계산된 값을 Table 1에 나타내었다.

NT와 SWT 샘플의 V<sub>oc</sub> 값을 비교하면 SWT 샘플의 값이 약간 증가(4.9%)하지만 I<sub>sc</sub> 값을 비교하여 보면 5.482 mA/cm<sup>2</sup>에서 9.686 mA/cm<sup>2</sup>로 약 2배 정도 증가하였다. I<sub>sc</sub>의 증가는 FF 및 효율의 증가에 영향을 주는 것으로 알려져 있는데, 제조된 DSSC의 FF 값은 NT, WT 및 SWT 대하여 각각 59.467, 62.681 그리고 68.045%로 점차 증가되었고, 효율은 각각 2.839, 4.531 및 6.024%로 증가되었다.

### 3.4. WO<sub>3</sub> 첨가 및 회쇄 된 TiO<sub>2</sub>를 이용한 DSSC의 메커니즘

본 실험에서 얻어진 DSSC의 광 전기화학적 특성 평가로부터 WO<sub>3</sub> 첨가 및 회쇄 된 TiO<sub>2</sub>를 이용한 DSSC의 메커니즘을 Figure 7에 나타내 보았다. Figure 7(a)는 일반적으로 알려져 있는 것처럼, 미처리 TiO<sub>2</sub>를 광전극으로 하여 제조된 DSSC의 메커니즘을 나타내었는데, 반응 ①과 같이 염료가 태양광을 흡수하면 염료의 HOMO에서 LUMO로 전

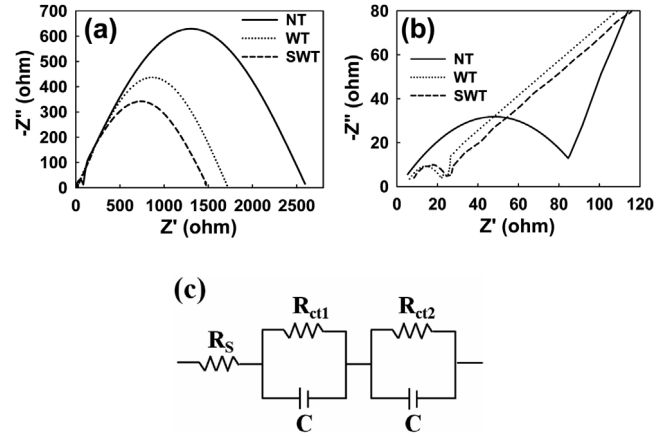


Figure 8. Nyquist plots of NT, WT and SWT samples measured by EIS; measured in (a) : Hz and (b) : Hz range and (c) : equivalent circuit used to represent interface in composite solar cells.

자가 여기 되고 여기 된 전자는 반응 ②와 같이 TiO<sub>2</sub>의 conduction band (CB)로 전달된다. 또한 전달된 전자는 반응 ③과 같이 TiO<sub>2</sub>를 통해 FTO glass로 흐르면서 전자가 작동하게 된다[21-23]. 이 과정에서 반응 ④와 같이 전달되는 전자는 반도체 산화물인 TiO<sub>2</sub>에 주입되는 속도 및 통과하는 속도의 차이로 인하여 전부 TiO<sub>2</sub>로 전달되는 게 아니라 일부만 전달이 되고 나머지 전자는 염료 및 전해질과 재결합이 일어나면서 전체적인 전류 양이 감소하여 효율이 감소하게 된다.

한편, Figure 7(b)에 본 실험에서 수행한 WO<sub>3</sub> 첨가 및 회쇄 된 TiO<sub>2</sub>를 이용하여 제조한 DSSC의 메커니즘을 나타내었다. 전자가 반도체 산화물에 주입되는 속도와 통과하는 속도의 차이로 발생하는 재결합 현상이 TiO<sub>2</sub>의 CB 보다 낮은 WO<sub>3</sub>의 CB를 통하여 전달됨으로써 감소하게 될 것으로 기대된다. 재결합 현상의 감소로 증가된 많은 전자로 인하여 전체적으로 전지내의 전류 양이 증가되어 에너지전환 효율이 증가하게 되는 것으로 여겨진다. 또한 회쇄 효과에 의하여 WO<sub>3</sub>가 첨가된 TiO<sub>2</sub>는 염료 및 전해질에 대한 접촉 면적이 증가되어 계면에서 이뤄지는 전자 전달도 향상될 것으로 기대된다. 이와 같은 메커니즘을 통하여 Figure 6(b)에 나타낸 I-V 곡선에서 NT, WT 그리고 SWT의 순으로 효율이 증가하는 것을 설명 할 수 있다.

### 3.5. 임피던스를 통한 제조된 DSSC의 내부 저항 변화 분석

첨가된 WO<sub>3</sub> 및 회쇄 된 TiO<sub>2</sub>를 이용한 DSSC의 내부 저항 변화를 알아보기 위하여 임피던스를 측정하고 이를 Figure 8에 나타내었다. 일반적으로 DSSC의 임피던스는 전체 주파수 영역에 대하여 3개의 반원으로 나타나는 것으로 알려져 있다. 이때, 1 MHz 이상의 영역은 FTO glass의 표면저항에 의한 저항 값이고 고주파 영역(100 Hz ~ 1 MHz)의 첫 번째 반원은 상대 전극에서의 전하수송, 중간 주파수 영역(1 ~ 100 Hz)의 두 번째 반원은 TiO<sub>2</sub>/염료/전해질 계면에서의 전자 이동, 마지막 저 주파수 영역(10 mHz ~ 1 Hz)의 반원은 전해질 내의 I<sub>3</sub><sup>-</sup>/I<sub>3</sub><sup>+</sup>의 이동에 관한 내부 저항 값으로 알려져 있다[24-26]. 본 실험에서 얻어진 임피던스 값을 전기적인 등가회로로 나타내면 Figure 8(c)와 같이 나타낼 수 있다. 제조된 DSSC의 임피던스 결과, 저 주파수 영역의 반원은 나타나지 않고 두 개의 반원만 나타났다. 이와 같은 결과는 제조된 DSSC 전극간의 공간이 너무 작기 때문에 저 주파수 영역에서의 측정이 용이하지 않기 때문으로 예상된다[27]. 제조된 DSSC는 동일한 전해질을 이용하였고 본 연구의 목적에는 큰 영향을 주지

않기 때문에 저 주파수 영역의 반원은 본 논문에서 고려하지 않았다. Figure 8(a)는 중간 주파수 영역을 나타낸 것인데 NT 샘플과 SWT 샘플의 반원 크기를 비교하면 NT 샘플에 비해 SWT 샘플의 반원 크기가 감소하였고  $\text{WO}_3$  첨가 및 회색 효과로  $\text{TiO}_2$ /염료/전해질 계면에서의 저항이 감소하였음을 알 수가 있다. Figure 8(b)에 나타난 고 주파 영역에서도 반원의 크기가 NT 샘플에 비해 WT 및 SWT 샘플이 감소하였는데  $\text{WO}_3$  첨가 및 회색 효과가 상대전극에서 나타나는 저항 값에도 영향을 주는 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

$\text{TiO}_2$ 에  $\text{WO}_3$ 를 첨가하여 제조된 광전극은  $\text{TiO}_2$ 의 전도대보다 낮은 전도대를 갖는  $\text{WO}_3$ 를 이용하여 전자가 염료 및 전해질과 재결합되기 전에  $\text{WO}_3$ 의 전도대를 통하여 전달되어 전자의 재결합 현상이 감소되고, 감소된 재결합 현상으로 보다 많은 전자가 전달하게 되기 때문에 전체 전류의 양이 증가된 것을 알 수 있었다. 또한  $\text{WO}_3$ 가 내침된  $\text{TiO}_2$ 는 입자덩어리를 회색함으로써 염료 및 전해질과의 접촉면적이 증가하게 되어 계면에서의 전자 전달이 향상됨을 임피던스의 결과로부터 확인할 수 있었다. 본 실험 조건에서 DSSC 효율은  $\text{WO}_3$ 의 첨가 및 회색 효과로 인하여 2.8에서 6.0%로 약 2배 이상 증가하였다.

#### 참 고 문 헌

- H. Chang, T. L. Chen, K. D. Huang, S. H. Chien, and K. C. Hung, *J. Alloy. Compd.*, **504**, 435 (2010).
- M. Grätzel, *C. R. Chim.*, **9**, 578 (2006).
- W. H. Lai, Y. H. Su, L. G. Teoh, and M. H. Hon, *J. Photochem. Photobiol. A-Chem.*, **195**, 307 (2008).
- J. K. Lee, B. H. Jeong, S. Jang, Y. G. Kim, Y. W. Jang, S. B. Lee, and M. R. Kim, *J. Ind. Eng. Chem.*, **15**, 724 (2009).
- S. U. Lee, W. S. Choi, and B. Hong, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **94**, 680 (2010).
- F. L. Chen, A. Letortu, C. Y. Liao, C. K. Tsai, H. L. Huang, I. W. Sun, Y. L. Wei, and H. P. Wang, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A-Accel. Spectrom. Dect. Assoc. Equip.*, **619**, 112 (2010).
- Y. Lee, J. Chae, and M. Kang, *J. Ind. Eng. Chem.*, **16**, 609 (2010).
- S. Hao, J. Wu, L. Fan, Y. Huang, J. Lin, and Y. Wei, *Sol. Energy*, **76**, 745 (2004).
- S. H. Kang, M. S. Kang, S. H. Choi, J. Y. Kim, H. S. Kim, T. Hyeon, and Y. E. Sung, *Electrochem. Commun.*, **10**, 1326 (2008).
- V. Ganapathy, B. Karunagaran, and S. W. Rhee, *J. Power Sources*, **195**, 5138 (2010).
- K. Fan, T. Peng, B. Chai, J. Chen, and K. Dai, *Electrochim. Acta*, **55**, 5239 (2010).
- J. H. Lee, N. G. Park, and Y. J. Shin, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **95**, 179 (2011).
- S. Sakthivel, M. V. Shankar, M. Palanichamy, B. Arabindoo, D. W. Bahnemann, and V. Murugesan, *Water Res.*, **38**, 3001 (2004).
- H. Xu, X. Tao, D. T. Wang, Y. Z. Zheng, and J. F. Chen, *Electrochim. Acta*, **55**, 2280 (2010).
- M. K. Parvez, G. M. Yoo, J. H. Kim, M. J. Ko, and S. R. Kim, *Chem. Phys. Lett.*, **495**, 69 (2010).
- S. M. Waita, B. O. Aduda, J. M. Mwabora, C. G. Granqvist, S. E. Lindquist, G. A. Niklasson, A. Hagfeldt, and G. Boschloo, *J. Electroanal. Chem.*, **605**, 151 (2007).
- L. Meng, T. Ren, and C. Li, *Appl. Surf. Sci.*, **256**, 3676 (2010).
- J. Wu, G. Xie, J. Lin, Z. Lan, M. Huang, and Y. Huang, *J. Power Sources*, **195**, 6937 (2010).
- Z. Tang, J. Wu, Q. Li, Z. Lan, L. Fan, J. Lin, and M. Huang, *Electrochim. Acta*, **55**, 4883 (2010).
- Y. Lee and M. Kang, *Mater. Chem. Phys.*, **122**, 284 (2010).
- L. Dupuy, S. Haller, J. Rousset, F. Donsanti, J. F. Guillemoles, D. Lincot, and F. Decker, *Electrochem. Commun.*, **12**, 697 (2010).
- L. Lu, R. Li, K. Fan, and T. Peng, *Sol. Energy*, **84**, 844 (2010).
- P. Balraju, P. Suresh, M. Kumar, M. S. Roy, and G. D. Sharma, *J. Photochem. Photobiol. A-Chem.*, **206**, 53 (2009).
- K. Pan, Y. Dong, C. Tian, W. Zhou, G. Tian, B. Zhao, and H. Fu, *Electrochim. Acta*, **54**, 7350 (2009).
- J. A. Mikroyannidis, M. M. Stylianakis, M. S. Roy, P. Suresh, and G. D. Sharma, *J. Power Sources*, **194**, 1171 (2009).
- L. Bay, K. West, B. W. Jensen, and T. Jacobsen, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **90**, 341 (2006).
- L. Y. Lin, C. P. Lee, R. Vittal, and K. C. Ho, *J. Power Sources*, **195**, 4344 (2010).