

염료감응형 태양전지로의 응용을 위한 얇은 TiO_2 가 코팅된 WO_3 역오팔 광전극의 개발

Maheswari Arunachalam¹ · 콰서의² · 이인호² · 김청수³ · 이상권⁴ · 강순형^{4†}

¹전남대학교 화학과, ²과학영재학교 광주과학고등학교, ³한국세라믹기술원 시험분석센터, ⁴전남대학교 화학교육과

Development of Ultra-Thin TiO_2 Coated WO_3 Inverse Opal Photoelectrode for Dye-Sensitized Solar Cells

Maheswari Arunachalam¹, Seoui Kwag², Inho Lee², Chung Soo Kim³, Sang-Kwon Lee⁴ and Soon Hyung Kang^{4†}

¹Department of Chemistry, Chonnam National University,
77 Yongbong-ro, Buk-gu, Gwangju 61186, Republic of Korea

²Gwangju Science Academy For the Gifted, 215 Chumdan, Buk-gu, Gwangju 61186, Republic of Korea

³Testing Analysis Center, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology,
Jinju 660-031, Republic of Korea

⁴Department of Chemistry Education, Chonnam National University,
77 Yongbong-ro, Buk-gu, Gwangju 61186, Republic of Korea

(Received July 10, 2019 : Revised July 22, 2019 : Accepted July 29, 2019)

Abstracts In this study, we prepare pure WO_3 inverse opal(IO) film with a thickness of approximately 3 μm by electrodeposition, and an ultra-thin TiO_2 layer having a thickness of 2 nm is deposited on WO_3 IO film by atomic layer deposition. Both sets of photoelectrochemical properties are evaluated after developing dye-sensitized solar cells(DSSCs). In addition, morphological, crystalline and optical properties of the developed films are evaluated through field-emission scanning electron microscopy(FE-SEM), High-resolution transmission electron microscopy(HR-TEM), X-ray diffraction(XRD) and UV/visible/infrared spectrophotometry. In particular, pure WO_3 IO based DSSCs show low V_{OC} , J_{SC} and fill factor of 0.25 V, 0.89 mA/cm^2 and 18.9 %, achieving an efficiency of 0.04 %, whereas the TiO_2/WO_3 IO based DSSCs exhibit V_{OC} , J_{SC} and fill factor of 0.57 V, 1.18 mA/cm^2 and 50.1 %, revealing an overall conversion efficiency of 0.34 %, probably attributable to the high dye adsorption and suppressed charge recombination reaction.

Key words dye-sensitized solar cell, WO_3 , atomic layer deposition, TiO_2 , inverse opal.

1. 서 론

화석연료와 같은 기존 연료 고갈과 온실 가스 발생으로 인한 전세계적인 환경 문제로 인해 새로운 에너지의 필요성이 대두되고 있고, 신재생 에너지가 대표적인 에너지원으로 여겨지고 있으며, 그 중에서도 태양광 에너지가 많은 연구가 되고 있다. 태양전지의 대규모 상용

화를 위해서는 고효율화와 저가화라는 두 가지 방향을 제시할 수 있는데, 고효율화는 전지의 가격은 높지만 효율을 크게 높여 발전단가를 낮추는 방법으로 실리콘이나 화합물 반도체 기반 태양전지가 이에 해당된다. 저가화는 비록 효율은 낮지만 전지의 제조 단가를 낮춰 초기 설치 투자비를 낮춰서 광합성의 원리를 이용한 염료 감응형 태양전지(dye-sensitized solar cells, DSSCs)와 같

[†]Corresponding author

E-Mail : skang@jnu.ac.kr (S. H. Kang, Chonnam Nat'l Univ.)

© Materials Research Society of Korea, All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

은 유기 반도체 태양전지를 일컫는다. 이 DSSC는 스위스의 Michael Grätzel 교수가 1991년 나노 기공의 TiO₂ 광전극을 이용해서 광감응제 Ru(II) 계열의 염료를 흡착시켜서 처음으로 7% 넘는 효율을 보고하면서 세계적인 이목을 집중시켰고,¹⁾ 그후로 지속적으로 효율 향상을 위해서 연구자들이 연구를 하고 있다. 현재 염료 감응형 태양전지의 광전극 물질로는 이산화 티타늄(Titanium Dioxide, TiO₂)이 가장 많이 사용된다. TiO₂는 염료 흡착성이 우수하고 광활성이 높아 11%의 높은 효율을 가진다는 장점이 있다.²⁾ 그러나 상업적으로 응용하기 위해서는 15%의 효율 달성이 필요하고, 효율 향상을 위해서는 기존의 TiO₂가 가지고 있는 단점인 높은 밴드갭[E_g = 3.2 eV(anatase 상)]을 극복하기 위한 다양한 소재(ZnO, SnO₂, WO₃, Nb₂O₅, In₂O₃, SrTiO₃) 등이 연구되고 있다.³⁻⁵⁾ 그 중에 하나는 밴드갭이 작은 물질을 사용하는 것으로 보다 많은 가시광선의 태양광을 흡수 할 수 있는 물질로의 연구가 되고 있다. 대표적으로 많이 연구되는 광전극으로는 텅스텐 산화물(WO₃, E_g = 2.6~3.1 eV)을 들 수 있으며,⁶⁾ 기존의 TiO₂보다는 가시광선 영역대의 빛을 흡수 할 수 있는 장점을 지닌다. 또한 나노입자, 나노플레이트, 나노로드, 나노와이어 등의 다양한 나노 구조물을 가진다.⁷⁾ WO₃는 TiO₂와 비교했을 때 효율은 떨어지지만, 강산의 환경에서도 매우 안정하다는 장점이 있으며, 전자 전달이 용이하다는 장점을 지닌다. 본 연구에서는 WO₃의 역오팔(inverse opal, IO) 구조를 폴리스타일렌 비드(polystyrene bead, PS bead)을 이용하여 합성하고, 염료 흡착량을 높이고, 전하 재결합을 낮추기 위해서 얇은 TiO₂ 층을 원자층 증착법(atomic layer deposition, ALD)을 이용해서 코팅하고자 한다. TiO₂의 코팅 유무에 따른 두 박막의 특성을 비교하고, 염료감응형 태양전지의 광전극으로의 활용을 통해서 광변환 효율을 비교하고자 한다.

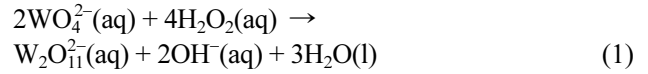
2. 실험 방법

2.1 WO₃ IO 박막 및 TiO₂/WO₃ IO 박막 합성

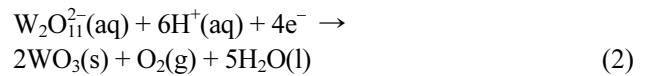
WO₃ IO 구조를 제작하기 위해서는 제일 먼저 PS bead을 이용한 다층 오팔 구조를 만들고, WO₃을 이들 공극 사이에 전기 도금을 통해서 채운다. 전기도금은 삼전극계로 구성되며, 작업 전극으로는 불소 도핑된 주석 산화물(F:SnO₂, FTO) 기판 위에 형성된 PS bead 박막, 상대 전극으로는 백금(Pt) 선을 이용해서 준비한다. 기준 전극으로는 실험실에서 제작된 Ag/AgCl 기준 전극을 사용했다. 도금액으로는 0.025 M Na₂WO₄·2H₂O, 0.03 M H₂O₂와 0.05 M HNO₃로 이루어진 전해질이 사용되었다. 도금액 준비와 관련된 화학 반응식(1) 및 실지 전기 도금

상황에서의 환원 반응식(2)은 아래와 같다.

전해질 구성 및 발생하는 반응식은 다음과 같다. 우선 0.025 M Na₂WO₄·2H₂O(aq), 0.03 M H₂O₂(aq)와 0.05 M HNO₃(aq) (pH = 0.80) 포함된 수용액에서는 다음과 같은 반응이 진행된다.⁸⁾



형성된 W₂O₁₁²⁻(aq)을 이용해서 전기 도금 시 일어나는 반응은 아래와 같다.



이때 전기 도금은 -0.47 V(실험실에서 제작된 Ag/AgCl 기준 전극 대비)에서 10분간 전기 도금이 이루어지며, 600 mC/cm²가 증착이 된다. WO₃ 전기도금 후 건조시킨 박막은 결정성 향상을 위해서 350 °C에서 30분간 소성한다. 또한 대략 2 nm의 TiO₂의 층을 WO₃ 역오팔 박막에 원자층 증착법(ALD)법을 이용해서 올리기 위해서는 ALD 진공관 내에서 실험이 수행되며, 이때 사용되는 Ti 전구체는 titanium isopropoxide(Ti{OCH(CH₃)₂}₄, UP Chemical, Korea)와 산소의 전구체는 삼차 증류수가 사용됐으며, 성장 온도는 250 °C로 유지된다. TiO₂의 성장 속도는 대략 0.13 nm/cycle로 낮은 결정성의 TiO₂ 층이 형성된다. 결정성 향상을 위해서 후열처리 공정이 450 °C에서 30분 동안 공기 분위기에서 이루어진다.

2.2 염료 감응형 태양전지 제작

5 mM N719[Di-tetrabutylammonium cis-bis(isothiocyanato) bis(2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylato)ruthenium(II)] 용액을 에탄올 용매를 사용해서 제조하고, 준비된 두 박막(WO₃ IO와 TiO₂/WO₃ IO)의 경우 실온에서 염료 용액에 12시간 이상 흡착시킨다. 흡착 후 염료 용액에서 꺼낸 광전극은 에탄올 용매로 깨끗이 세척하고 질소 가스를 이용해서 말린다. 제작한 작업 전극의 활성 면적(1 cm × 1 cm)이 아닌 부분을 긁어낸 후, 열을 가해서 Surlyn 고분자 재료를 이용하여 광음극 층과 광양극층(Pt 상대 전극: 5 mM H₂PtCl₆ 용액을 FTO 기판 위에 스핀 코팅 후, 350 °C에서 30분간 열처리 후 제작)과 열적 접합을 한다. 이때 Pt 상대 전극 쪽에 다이아몬드 드릴을 이용해서 전해질 투입 입구를 위한 미세한 구멍을 2개 만든다. 접합 후 I₃⁻/I⁻ 전해질을 이 구멍을 통해서 주입하고, 입구는 유리 커버로 Surlyn 테이프를 이용해서 열적으로 막는다.

2.3 광전극 및 염료감응형 태양전지의 특성 평가

WO₃ 역오팔 구조를 이용한 전극, WO₃ 역오팔 구조에

2 nm의 TiO₂ 층이 코팅된 WO₃ 역오팔 전극의 특성 조사 및 비교를 위하여 전계 방출형 주사 전자현미경(field-emission scanning electron microscopy, FE-SEM, S4800, HITACHI Inc.)을 통해서 형상 비교를 하였으며, X-선 회절분석기[X-ray diffraction, XRD, PANalytical, X'Pert PRO, 작동 전압(40 kV) 및 전류(30 mA)]를 이용해서 결정성 확인을 했다. 또한 TiO₂의 코팅 유무를 명확하게 확인하기 위해서 고해상도 투과 전자현미경(High-Resolution Transmission Electron Microscopy, a JEOL-3010, 작동 전압(300 kV))을 통해서 WO₃ IO와 TiO₂/WO₃ IO 박막이 분석되었다. 또한 곡각의 환형 암시야(하디프 HAADF: high angle annular dark field) 검출기를 사용해서 각 시료의 성분 조성의 분포도를 확인하였다. 이외에도 인공 태양광(solar simulator)을 이용하여 J-V 곡선을 측정해서 광변환 효율을 측정했으며, 자외선-가시광선 분광기[Ultraviolet-Visible/Infrared(UV/Vis/IR) spectrophotometer, PerkinElmer LAMBDA-900]를 이용해서 광학적 특성 및 염료 흡착 정도를 확인했다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1는 ALD법을 이용한 2 nm의 TiO₂ 층의 코팅 유무에 따른 WO₃ 전극 표면의 FE-SEM 이미지를 보여준다. Fig. 1(a,b)는 WO₃ 역오팔 박막의 FE-SEM 이미지

이고 대략 두께는 3 μm를 지닌다. 전체적으로 잘 배열된 역오팔 구조가 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 후열처리 공정을 통한 폴리스타일렌(polystyrene) 오팔 층을 태워 없애는 과정에서 역오팔 구조의 부분적인 깨짐과 끊어짐을 확인할 수 있었다. 또한 여기서 이용한 WO₃ IO의 직경은 대략 300 nm이고, 본래 사용된 400 nm의 직경을 지닌 오팔 구조보다는 다소 줄어든 나노 기공 구조를 보여준다. 이는 전기도금을 통해서 올려진 WO_x의 액체 부피 감소와 무정형에서 결정화되면서 상변화를 통한 WO₃ 박막의 고밀도화를 통해서 직경의 감소를 유발한 것으로 보인다.⁹⁾ 또한 역오팔 구조를 구성하는 벽의 두께는 대략 50 nm로 구성이 되었으며, 이를 통해 전하 전달이 원활하게 진행될 수 있을 것으로 보인다. Fig. 1(c,d)는 TiO₂/WO₃ IO 박막의 형상을 보여주고, TiO₂을 올린 후 직경 및 역오팔의 벽 두께는 변화가 없다. 여기서도 마찬가지로 육각형 구조의 벌집 형상을 보여주고 있지만, 부분적으로 깨짐과 끊어짐을 확인할 수 있었다.

Fig. 2는 HR-TEM과 고각환형 암시야(HAADF) 이미지를 보여준다. Fig. 2(a₁, a₂)과 2(b₁, b₂)의 HR-TEM 이미지를 보면, WO₃ IO와 TiO₂/WO₃ IO 박막의 이미지는 FE-SEM 이미지에서 보듯이 육각형 벌집 형태를 띠고 있으며, 잘 정렬된 구조를 확인할 수 있다. TiO₂의 코팅 유무를 명확하게 확인하기 위해서 3차원의 고각환

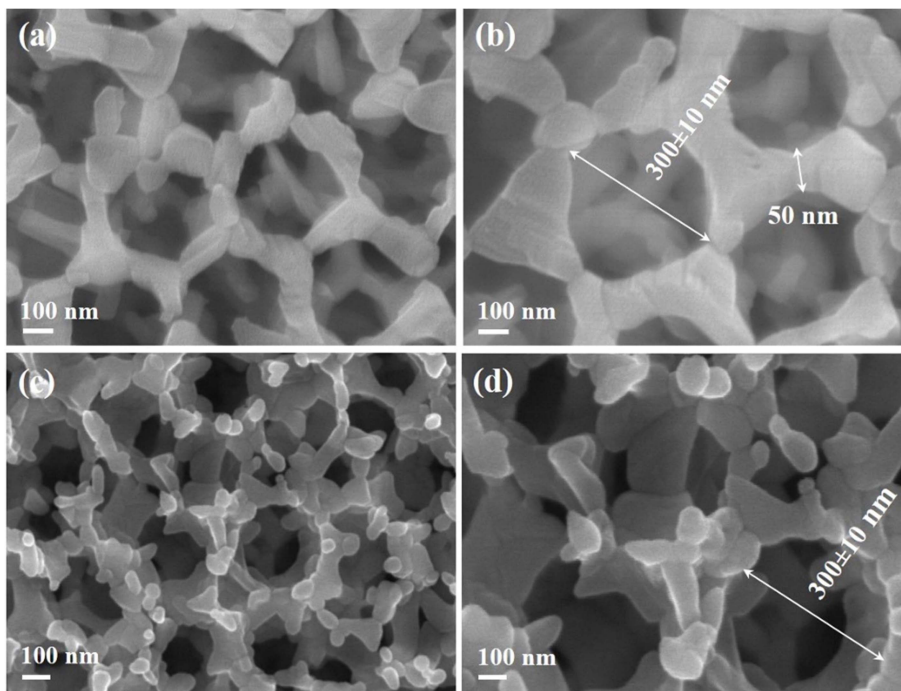


Fig. 1. FE-SEM images of (a, b) WO₃ IO and (c,d) TiO₂/WO₃ IO films.

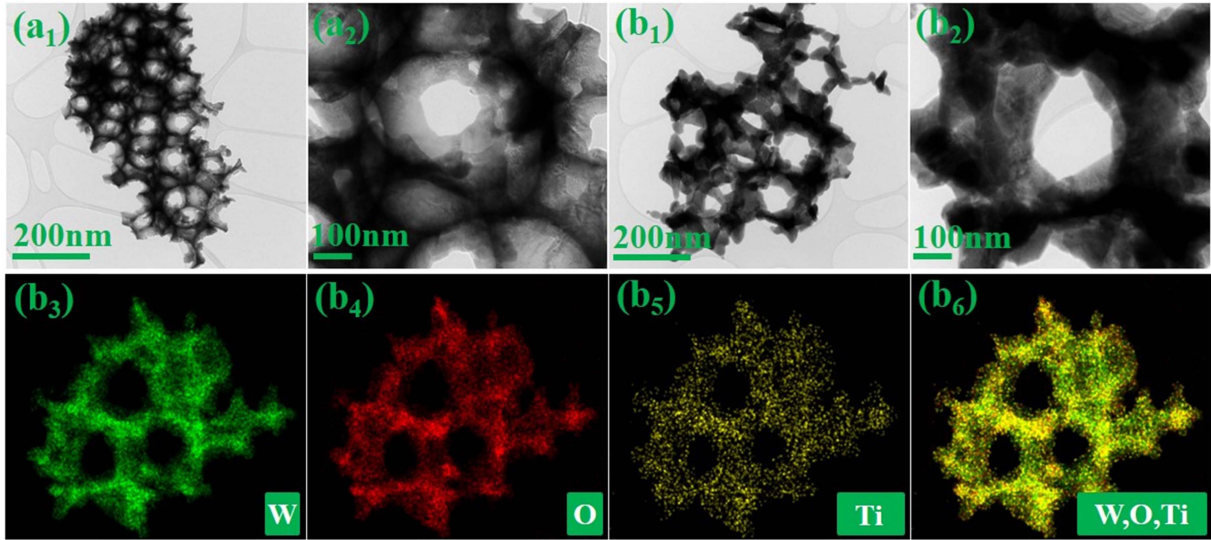


Fig. 2. HR-TEM images of (a₁, a₂) WO₃ IO and (b₁, b₂) TiO₂/WO₃ IO films and (b₃, b₄, b₅ and b₆) HAADF and cumulative element mapping images of TiO₂/WO₃ IO film.

형 암시야 이미지 및 성분 조성에 따른 분포도를 알 수 있는 이미지를 함께 측정해서 박막의 일부분의 형상을 확인할 수 있으며, 3차원적인 나노 기공 구조를 가지는 것을 알 수 있다. 각 성분에 따른 분포도를 색의 진함 정도에 따라서 분석을 해보았을 때, W과 O의 성분이 전체적인 역오팔 구조를 통해서 강하게 존재하는 것을 알 수 있고, Ti 성분 또한 전체적으로 고르게 분포하는 것을 확인할 수 있다. 색의 진함 정도는 다소 W과 O 성분에 비해서는 약하다라도 전체적으로 고르게 분산된 것을 알 수 있다.

또한 얇은 층의 TiO₂ 코팅 유무에 따른 WO₃ 전극의 결정성 확인을 위해서 XRD 분석을 수행하였다. Fig. 3의 XRD 그래프 상에서는 WO₃의 peak은 뚜렷하게 나타나지만, TiO₂의 peak은 나타나지 않았다. 즉, WO₃ peak은 단사정계(monoclinic system)에 속하며, (002), (020)과 (200) peak이 23.1°, 23.6°와 24.3°도에 나타나는 것을 확인했다.¹⁰⁾ 그런데 코팅 된 TiO₂ 층의 두께가 얇거나, 결정성이 약해서 TiO₂와 관련된 peak은 확인할 수 없었다. 두 시료 모두 XRD 결정성의 크기나 peak의 이동이 나타나지 않았으며, 거의 동일한 특성의 결정성을 보여주는 것을 확인할 수 있었다.

또한 박막의 광학적 특성을 확인하기 위해서 TiO₂를 코팅하지 않은 경우와 TiO₂를 코팅한 전극의 흡광도를 UV-vis 분광기를 이용하여 측정하였고, 또한 염료의 흡착 정도를 염료 탈착 실험을 통해서 측정하였다. Fig. 4(a)는 두 샘플의 흡광도 그래프이다. WO₃ IO의 박막의 경우 WO₃ 박막의 밴드갭(~2.8 eV)로 인해 대략 450

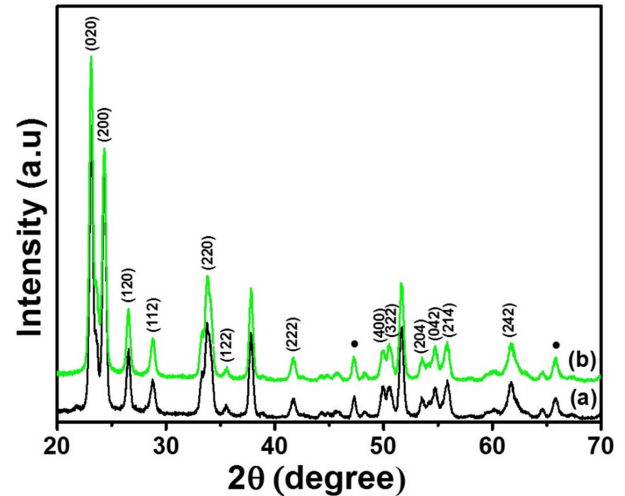


Fig. 3. XRD patterns of (a) WO₃ IO and (b) TiO₂/WO₃ IO films including the full circle representing the FTO substrate.

nm에서 빛의 흡수가 시작되는 것을 알 수 있고, 염료로 인한 빛의 흡수는 대략 650 nm 영역대에서 시작되는 것을 알 수 있다. 그러나 WO₃ 표면에 흡착된 염료의 경우, 대략 최대의 흡수는 550 nm 부근에서 보여지는데 그 흡수되는 정도가 상당히 낮은 것을 알 수 있다. 반면에 TiO₂가 코팅된 샘플의 경우, 전체적인 흡광도의 그래프는 WO₃ IO 박막과 유사하며, 염료가 흡착된 박막의 경우, 550 nm 영역대에서 상당히 높은 빛의 흡수가 일어나는 것을 확인할 수 있다. 염료의 흡착 정도를 정량적으로 보다 명확하게 알아보기 위해서 0.5M

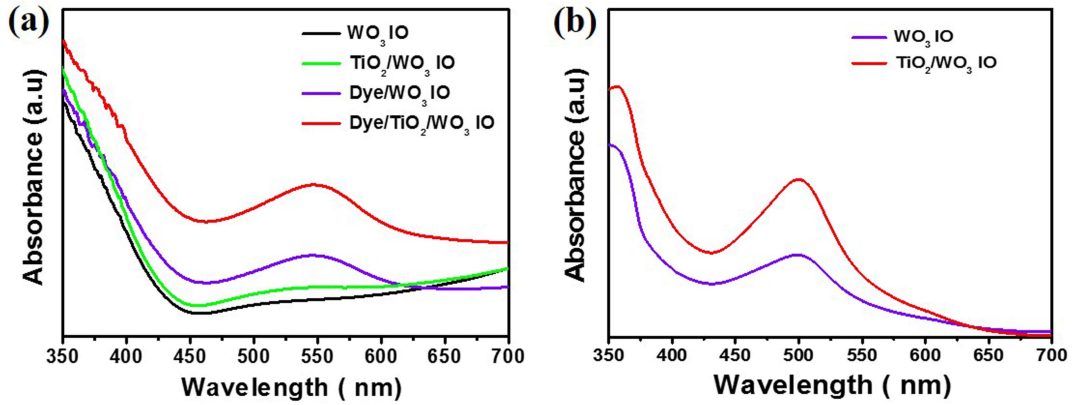


Fig. 4. UV-vis absorption spectra of (a) WO₃ IO and TiO₂/WO₃ IO films and (b) the N719 dye molecules desorbed from WO₃ IO and TiO₂/WO₃ IO films in 0.5 M NaOH solution.

NaOH 수용액에서 염료를 탈착하는 실험을 수행했다. 탈착된 염료를 통해서 염료의 흡착량을 상대적으로 알 수 있으며, Fig. 4(b)을 통해서 탈착된 염료의 흡광도 그래프를 보여준다. 여기서도 마찬가지로 TiO₂/WO₃ IO 박막층이 코팅된 샘플이 높은 염료 흡수 스펙트럼을 보여주고 있으며, 512 nm에서의 N719 염료 용액의 몰 흡광 계수(ϵ , L·cm⁻¹·mol⁻¹)을 사용해서 Lambert-Beer 법칙에 따라서 정량적인 흡착량을 계산해보면,¹¹⁾ WO₃ IO과 TiO₂/WO₃ IO 박막은 대략 3.15×10^{16} 과 4.85×10^{16} 의 염료 흡착량을 보여준다. 이 결과를 통해서 TiO₂가 코팅된 WO₃ IO 박막의 경우 염료 흡착량이 50% 정도 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 TiO₂ 표면 처리가 염료 흡착율을 높여서 전반적인 효율 향상에 기여할 수 있다는 점을 알 수 있다.

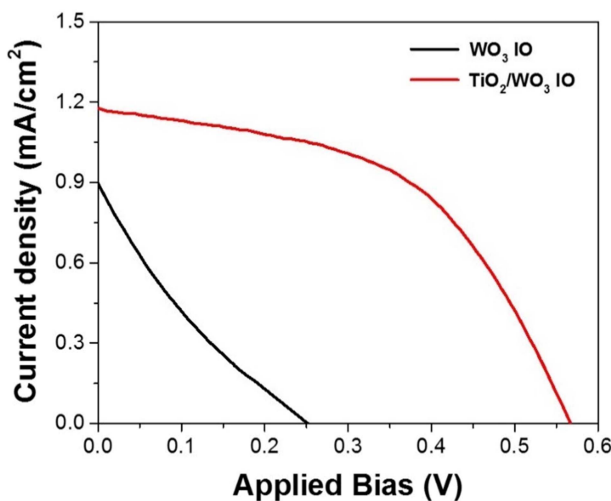


Fig. 5. J-V curves of DSSCs composed of WO₃ IO and TiO₂/WO₃ IO films.

준비된 광전극을 이용해서 염료감응형 태양전지를 제작했으며, 인공 태양광을 이용해서 성능 평가를 했다. 인공 태양광(AM 1.5, one sun condition)을 이용해서 측정된 J-V 곡선이 Fig. 5와 같다. 전개방 전압(open-circuit voltage, V_{OC}), 단락 전류(short-circuit photocurrent, J_{SC}), 곡선의 내삽을 통한 최대 V_{MAX} × J_{MAX}가 보여주는 값을 통해서 염료감응형 태양전지의 Fill Factor(FF, %)가 식 (3)을 통해서 계산된다.¹²⁾

$$FF(\%) = \frac{V_{\max} \times J_{\max}}{V_{oc} \times J_{sc}} \times 100(\%) \quad (3)$$

얻어진 J-V 곡선을 통해서 각 부분의 성능 지표를 Table 1에 정리했다. TiO₂를 코팅하지 않는 경우와 TiO₂를 코팅한 전극의 FF를 비교해 보았다. FF는 태양전지의 효율을 나타내는 중요 인자 중의 하나인데, 2가지 샘플의 FF 차이는 확연하게 TiO₂/WO₃ IO 박막을 이용한 염료감응형 태양전지가 높게 나온 것을 알 수 있으며, 이는 전체적으로 태양광 아래 광전자 전달이 원활해지면 전체적인 박막의 전자 전달이 원활해지고, 이는 전지의 저항 감소를 이끈 것으로 볼 수 있다. 또한 V_{OC}와 J_{SC}의 변화를 보면, WO₃ IO 박막에 비해서, TiO₂ 코팅 샘플의 박막이 상당히 높은 효율을 보여준다. 특히, V_{OC}의 급격한 증가뿐만 아니라 J_{SC}의 향상 또한 전체적인 성능 증가에 영향을 주었다. 전체적인 효율은

Table 1. Summary of photovoltaic performance of WO₃ IO and TiO₂/WO₃ IO based DSSCs.

	V _{OC} (V)	J _{SC} (mA/cm ²)	FF(%)	η(%)
WO ₃ IO	0.25	0.89	18.9	0.04
TiO ₂ /WO ₃ IO	0.57	1.18	50.1	0.34

WO₃ IO 박막(0.04%)에 비해, TiO₂을 얇게 도포한 WO₃ IO 박막의 경우 0.34%의 상당히 높은 효율 향상을 보여준다. 특히 WO₃ 표면보다는 TiO₂ 표면으로 일정한 두께로 코팅함으로써 전하 재결합 공간을 줄임으로써 V_{oc}가 향상된 것을 알 수 있고, 또한 WO₃의 전도도가 TiO₃보다는 낮아서, TiO₃가 코팅된 광전극의 전도도가 향상함으로써 V_{oc}의 증가를 유도할 수 있다. 또한 얇게 도포된 TiO₂ 층으로 인해서 표면적 향상 및 염료 흡착량의 증가를 통해서 J_{sc}가 향상된 것을 알 수 있다.^{13,14)} 또한 TiO₂가 코팅된 박막은 염료 흡착량이 높아서 전반적으로 성능 향상이 더 높게 나타난 것으로 보인다. 따라서 WO₃의 역오팔 광전극을 이용해서 염료감응형 태양전지로의 응용이 시도됐으며, 효율 향상을 위해서 표면 개질을 수행했으며, TiO₂을 이용해서 최적의 표면 상태를 만들었으며, 전반적으로 효율 향상에 기여한 것으로 확인했다.

4. 결 론

본 실험에서는 WO₃을 전기도금을 통해 올린 박막에 원자층 증착법으로 올린 TiO₂ 코팅 유무를 변인으로 하여 박막을 제작하였으며, 이를 염료 감응형 태양전지로의 응용을 통해서 성능 평가를 수행했다. 제작한 태양전지는 FE-SEM, HR-TEM, XRD, UV-vis 분광기, 인공 태양광을 이용하여 박막의 특성 및 전지의 광전기화학적 특성을 알아보았다. FE-SEM을 이용한 박막의 형상 변화의 경우 WO₃ 역오팔 박막이 전기 도금을 통해서 잘 형성된 것을 알 수 있으며, 부분적인 끊어짐은 확인할 수 있었지만 전체적으로 육각형 구조의 벌집 형상을 보여주었다. 대략 2 nm의 TiO₂가 코팅된 WO₃ IO 박막의 경우도 마찬가지로 전체적인 역오팔 구조가 잘 형성된 것을 확인할 수 있었으며, 직경(대략 300 nm) 및 두께(대략 50 nm)가 거의 변화되지 않고 같은 구조를 보여주었다. 또한 TiO₂의 코팅 유무를 확인하기 위해서 HR-TEM 측정 결과 전체적으로 고르게 코팅된 것을 확인했으며, TiO₂/WO₃ IO 박막이 WO₃ IO 박막에 비해서 높은 염료 흡착량을 보여주었다. 이를 기반으로 염료감응형 태양전지를 제작해서 측정한 결과, TiO₂/WO₃ IO 박막이 WO₃ IO 박막에 비해서 V_{oc}, J_{sc} 및 FF가 전체적으로 고르게 향상되었으며, 기존의 WO₃ IO(0.04%)에 비해서 0.34%의 효율을 보여주는 것을 알 수 있었다. 이는 전체적으로 염료 흡착량이 증가하면서 광전자가 많이 발생하고, 이들로 인해서 원활한 전자 전달이 되면서 전체적인 효율 향상에 기여한 것으로 보인다. 또한 TiO₂을 얇게 도포함으로써 전하 재결합을 늦추고, 높은 전도도를 가진 TiO₂로 인해 V_{oc}의 향상에 기여할 수 있

었으며, 이로 인해 살아서 전도성 기판에 도달하는 광전자의 확률을 높인 것으로 보인다. 이러한 분위기에 박막은 전도성이 향상되면서 전체적인 전지의 저항을 낮추면서 FF를 향상시키는데 기여한 것으로 보인다. 본 연구를 통해서 WO₃가 다양한 환경에서 높은 안정성을 보이고 작은 밴드갭을 가지고 있을 뿐만 아니라 다양한 나노 구조물로서의 활용 가능성을 가진다는 것과 역오팔 구조가 전자의 긴 재결합 시간과 빠른 이동속도를 가진다는 사실을 고려해 보았을 때, TiO₂를 효과적으로 코팅한다면 기존의 TiO₂를 광전극 물질로 사용하는 DSSC를 충분히 대체할 수 있을 것이라는 가능성을 확인하였다.

감사의 글

This work was supported by Priority Research Centers Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology (2018R1A6A1A03024334).

References

1. B. O'Regan and M. Grätzel, *Nature*, **353**, 737 (1991).
2. A. Yella, H. -W. Lee, H. N. Tsao, C. Yi, S. M. Zakeeruddin and M. Grätzel, *Science*, **334**, 629 (2011).
3. M. McCune, W. Zhang and Y. Deng, *Nano Lett.*, **12**, 3656 (2012).
4. R. Ghosh, M. K. Brennaman, T. Uher, M.-R. Ok, E. T. Samulski, L. E. McNeil, T. J. Meyer and R. Lopez, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **3**, 10 (2010).
5. S. Burnside, J. -E. Moser, K. Brooks, M. Grätzel and D. Cahen, *J. Phys. Chem. B*, **103**, 9328 (1999).
6. H. Zheng, Y. Tachibana and K. Kalantar-zadeh, *Langmuir*, **26**, 19148 (2010).
7. S. H. Kang, S. -H. Choi, M. -S. Kang, J. -Y. Kim, H. -S. Kim, T. Hyeon and Y. -E. Sung, *Adv. Mater.*, **20**, 54 (2008).
8. Y. O. Kim, S. -H. Yu, K. -S. Ahn, S. K. Lee and S. H. Kang, *J. Electroanal. Chem.*, **752**, 25 (2015).
9. H. S. Lee, R. Kubrin, R. Zierold, A. Y. Petrov, K. Nielsch, G. A. Schneider and M. Eich, *Opt. Mater. Express*, **3**, 1007 (2013).
10. G. Yun, M. Arunachalam and S. H. Kang, *J. Phys. Chem. C*, **120**, 5906 (2016).
11. F. M. Rajab, *J. Miner. Mater. Charact. Eng.*, **2**, 169 (2014).
12. J. Gong, K. Sumathy, Q. Qiao and Z. Zhou, *Renew. Sustainable Energy Rev.*, **68**, 234 (2017).
13. M. D. Brown, T. Suteewong, R. S. S. Kumar, V. D'Innocenzo, A. Petrozza, M. M. Lee, U. Wiesner and H. J. Snaith, *Nano Lett.*, **11**, 438 (2011).
14. X. Hu and H. Wang, *Front. Optoelectronics*, **11**, 285 (2018).