

## Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 코팅에 따른 염료감응 태양전지의 효율 향상

박선영 · 정수권 · 김정현<sup>†</sup>

서울시립대학교 화학공학과  
130-743 서울시 동대문구 전농동 90  
(2010년 3월 17일 접수, 2010년 6월 14일 채택)

### Enhancement of Conversion Efficiency of Dye-Sensitized Solar Cells(DSSCs) by Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Coating on TiO<sub>2</sub> Electrode

Seonyeong Park, Sukwon Jung, and Jung Hyeun Kim<sup>†</sup>

Department of Chemical Engineering, University of Seoul, 90 Jeonnon-dong, Dongdaemun-gu, Seoul 130-743, Korea  
(Received 17 March 2010; accepted 14 June 2010)

#### 요 약

염료감응 태양전지에서 TiO<sub>2</sub>의 표면에서 일어나는 전자의 재결합 현상은 태양전지의 변환효율을 떨어뜨리는 주요한 원인이다. 본 연구에서는 이 전자의 재결합 현상을 제어하기 위해 TiO<sub>2</sub>의 표면에 에너지 장벽을 도입하여 변환효율을 향상시키고자 하였다. TiO<sub>2</sub> 나노전극에 에너지 장벽의 역할을 하는 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>를 코팅시켰다. 코팅의 영향을 알아보기 위해 코팅횟수를 변화시키며 실험하였다. 가시광선 영역에서의 반사율로부터 코팅의 유무를 확인하고 회절패턴으로부터 코팅물질이 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>임을 확인하였다. 재결합을 제어할 수 있는 코팅막의 두께를 측정해 본 결과, 12회 코팅하였을 때 코팅막의 두께는 약 5 nm로 1회 코팅시 적층되는 코팅막의 두께는 약 0.417 nm로 볼 수 있었다. 코팅횟수에 따른 변환효율의 변화는 코팅막이 없는 경우 2.55%에서 2회 코팅한 경우 4.25%로 약 1.7배 증가하여 2회 코팅의 경우 효율이 가장 높았다. 따라서 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 2회 코팅의 경우 코팅막의 두께가 약 0.834 nm로 전자의 재결합을 가장 잘 제어할 수 있었다.

**Abstract** – Electron recombinations in electrolyte solution reduce light-to-energy conversion efficiency at the nanoporous electrode surface of dye sensitized solar cells. In this study, we improved the conversion efficiency using an energy barrier at the nanoporous electrode surface to control the recombination process. The energy barrier was formed by coating nanoporous TiO<sub>2</sub> electrode with Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> material. We investigated the influence of energy barrier on the cell efficiency depending on the coating thickness. Nanoporous TiO<sub>2</sub> electrode was coated about 5 nm thickness by 12 times coatings, and so the coating layer was grown about 0.417 nm for every time. Enhancement of conversion efficiency from 2.55% to 4.25% was achieved at 0.834 nm coating thickness, and it was believed as the optimum thickness for minimizing the electron recombination process in our experimental system.

Key words: Dye Sensitized Solar Cells, Core-Shell nanoporous electrode, Energy barrier, Recombination

#### 1. 서 론

화석연료는 현재까지 주 에너지원으로 사용되어왔지만 매장량이 한정되어 있고 환경오염을 유발하기 때문에 전세계적으로 화석연료를 대체할 친환경 에너지의 개발이 활발히 진행되고 있다. 친환경 대체에너지 중 태양광은 기후나 지형에 비교적 크게 영향을 받지 않기 때문에 태양광을 이용하는 태양전지의 개발에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 염료감응 태양전지는 태양전지 중 3세대인 차세대 태양전지로 유기재료인 염료를 사용하는 태양전지이다. 염료감응 태양전지는 실리콘계 태양전지에 비해 제조 단가가 저렴하고 제

조 공정이 간단한 장점이 있다. 또한 염료감응 태양전지는 재료의 투명성과 유연성으로 인해 건물이나 생활용품 등 다양한 분야에 활용이 가능하다.

염료감응 태양전지(Dye Sensitized Solar Cells, DSSCs)는 반도체 나노입자가 코팅된 작동전극, 광감응형 염료, 전해질, 상대전극으로 구성된다. 태양광을 받은 염료에서 여기된 전자는 반도체 나노입자로 이동하고 염료의 빈 전자전공은 전해질의 요오드이온에 의해 채워진다. 그리고 전자는 나노 반도체입자에서 투명전극으로, 그리고 투명전극에서 외부회로를 통해 상대전극으로 이동한다. 요오드이온은 상대전극의 표면에서의 산화-환원 반응을 통해 이온을 얻는다[1]. 반도체 나노물질로는 주로 TiO<sub>2</sub>를 사용한다. TiO<sub>2</sub>는 광촉매로 이용되어 대기 중의 NO 제거 또는 Ag와 같은 중금속의 제거나 탈색 등

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: jhkimad@uos.ac.kr

다양하게 응용되는 재료이다[2-4]. 태양전지에 사용되는 TiO<sub>2</sub>는 나노튜브의 형태와 나노입자의 형태로 만들 수 있는데 나노입자가 나노튜브보다 더 높은 효율을 보였다[5]. 태양전지의 변환효율을 향상시키기 위해 넓은 표면적을 가진 나노다공성 TiO<sub>2</sub> 입자를 사용하여 염료의 흡착량을 증가시킬 수 있었으나 TiO<sub>2</sub>의 넓은 표면적은 전자의 재결합 현상의 증가로 인하여 변환효율을 떨어뜨리는 요인이 되기도 하였다. 전자의 재결합 현상은 TiO<sub>2</sub>의 표면에서 일어나는 현상으로 TiO<sub>2</sub>로 이동된 전자가 투명전극으로 이동하지 않고 전해질이나 염료로 이동하는 현상으로 이렇게 손실된 전자는 태양전지의 효율을 떨어뜨린다.

전자의 재결합현상을 막고 태양전지의 효율을 향상시키기 위한 방법에는 크게 두 가지가 있다. 하나는 전극표면을 물리적으로 막는 것으로 염료 흡착 후 반도체에 절연층을 만드는 것이다[6]. 다른 하나는 투명전극 쪽으로 이동하는 전자의 에너지 구배를 형성시키는 것으로 전도대 전위가 다른 두 물질로 나노다공성 전극을 만드는 것이다[7,8]. 전자는 더 높은 전도대 전위를 가진 물질 쪽으로 이동하는 경향이 있기 때문에 전도대 전위가 더 낮은 물질로 에너지 장벽을 만들 수 있다[9]. 전도대의 에너지준위가 높은 물질을 shell, 전도대의 에너지 준위가 상대적으로 낮은 물질을 core 물질이라 하여 core-shell 이중구조를 통해 전자의 재결합현상을 제어하고 태양전지의 효율을 향상시키는 연구가 진행 되었다. 그 중, Diamant 등[10]은 다양한 shell 물질(Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, ZnO, SrTiO<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, SnO<sub>2</sub>)을 적용한 core-shell 이중구조 전극을 통하여 태양전지 특성 변화를 살펴 보았으며, 효율이 증가한 4종류의 shell 물질(Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, ZnO, SrTiO<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 중 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>의 효율이 37.3% 증가하여 가장 높은 효율향상을 보였고 효율이 감소한 2종류의 shell 물질(ZrO<sub>2</sub>, SnO<sub>2</sub>) 중 SnO<sub>2</sub>가 45.3% 감소하여 가장 높은 효율 감소를 보였다. Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>의 전도대 전위는 TiO<sub>2</sub>보다 100 mV 정도 더 낮으며[11], 따라서 TiO<sub>2</sub> 나노입자에 코팅된 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>는 에너지 장벽의 역할을 하여 전자의 재결합을 막아 주는 것으로 보고되었다[12].

재결합 현상을 제어하기 위한 방법으로 에너지 장벽의 도입에 대한 연구가 많이 진행되어 왔으나 대부분의 연구는 코팅물질의 특성에 관한 것이었다. 따라서 본 연구에서는 shell 물질로 높은 효율 향상을 보였던 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>를 사용하여 코팅두께에 따른 염료감응 태양전지 특성 변화를 알아보았다. 본 연구에서는 코팅횟수를 달리하여 TiO<sub>2</sub> 나노입자 전극에 코팅된 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>의 두께를 확인하고 이에 따른 염료감응 태양전지의 특성변화를 측정하여 최적의 코팅조건을 찾고자 하였다.

## 2. 실험

### 2-1. 실험재료 및 시약제조

태양전지의 기판으로 fluorine-doped tin oxide(FTO, Pilkington, 8 Ω/cm<sup>2</sup>) 기판을 사용하였고, I<sup>-</sup>/I<sub>3</sub><sup>-</sup> 전해질 용액(HC-DII, TG-energy), 봉인제로 surlyn(50 μm, Peccell Technologies)을 사용하였다. TiO<sub>2</sub> 페이스트 제조에서는 TiO<sub>2</sub>(P-25, Degussa), polyethylene oxide(average M<sub>n</sub>:100,000, Sigma-Aldrich Inc.)를 사용하였다. 용매로 증류수를 사용하여 PEO와 TiO<sub>2</sub>를 혼합한다. 금속산화물의 전구체 용액의 제조에서 전구체 물질로 niobium ethoxide(99.95%, Sigma-Aldrich Inc.)를, 용매로 ethanol(anhydrous 99.50%, Sigma-Aldrich Inc.)을 이용하여 실험에 사용할 0.02 M niobium 전구체 용액을 제조하였다. 전구체

용액의 제조는 niobium ethoxide가 공기 중의 수분과 반응하는 것을 막기 위해 수분을 제거한 질소분위기에서 진행하였다. 상대전극의 Pt 코팅을 위해 H<sub>2</sub>PtCl<sub>6</sub>(99.90%, Sigma-Aldrich Inc.)와 용매로 2-propanol(99.50%, Sigma-Aldrich Inc.)을 사용하여 실험에 사용할 7×10<sup>-3</sup> M Pt 용액을 제조하였다. 염료 흡착에 사용할 염료용액은 염료(HC-R2T N719, TG-energy)와 용매로 ethanol을 사용하여 3×10<sup>-4</sup> M로 제조하였다.

### 2-2. Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 코팅 및 DSSCs 제작

기판 위에 doctor blade법을 이용하여 TiO<sub>2</sub> 페이스트로 TiO<sub>2</sub> 전극막을 제조하였다. 전극막의 두께는 약 20 μm로 조절하였고, 전극막의 면적은 정사각형 형태인 1cm×1cm로 하였다. 이 전극막을 450 °C에서 30분간 소결하고 상온에서 식힌 후 코팅을 진행하였다. 코팅은 TiO<sub>2</sub> 전극막을 30초간 전구체 용액에 담가둔 후 500 °C에서 30분간 소결하는 방법으로 진행하였고, 이를 반복하여 코팅횟수를 증가시켰다. 코팅막의 특성을 알아보기 위한 샘플을 제작할 때는 기판으로 유리판을 사용하였고, 염료감응 태양전지를 제작할 때는 FTO 기판을 사용하였다. Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 코팅 후 FTO 기판을 염료용액에 24 시간 동안 담가두어 염료를 흡착시키고 ethanol로 세척하여 작동전극을 제작하였다. 그리고 FTO 기판 위에 Pt 용액으로 코팅하여 450 °C에서 20분간 소결하여 상대전극을 제작하였다. 상대전극에 전해질 주입을 위한 구멍을 뚫고 봉인제를 이용하여 상대전극과 작동전극을 겹치게 붙인 후 전해질 용액을 주입하였다. 그 후에 전해질 주입 구멍을 막아 효율 측정을 위한 solar cell을 제작하였다.

### 2-3. 분석 방법

UV-vis spectrophotometer(UV; S-4100, SCINCO CO.), X-ray diffraction(XRD; D8 Discover, Bruker AXS), Transmission Electron Microscope(TEM; Tecnai 20, Philips)을 이용하여 코팅막의 특성을 알아보았다. 코팅횟수에 따라 코팅막의 변화를 측정하였다. 가시광선 영역에서 반사율을 측정하여 코팅막의 유무를 확인하였다. XRD 측정을 통해 회절패턴을 알아보고 이로부터 코팅 물질인 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>의 존재를 확인하였다. 또한 TEM 측정으로 core-shell 구조를 확인하고 shell 두께를 측정하였다. 염료감응 태양전지의 성능을 평가하기 위해 solar simulator(PEC-L11, Peccell Technologies)를 이용하여 효율을 측정하였다. 사용된 빛의 조사강도는 1,000 W/m<sup>2</sup>로 설정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1. 코팅막의 확인

염료감응 태양전지의 효율을 측정하기에 앞서 코팅막의 유무와 코팅된 물질이 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>임을 확인해 보고자 하였다. 코팅막의 존재를 확인하기 위한 측정 샘플은 유리판 위에 필름을 제작하여 두께를 측정하였다. Fig. 1은 코팅횟수에 따른 TiO<sub>2</sub> 필름의 반사율을 보여주고 있다. 자외선 영역에서는 코팅횟수에 따른 반사율의 변화가 없지만, 약 420 nm 파장에서 코팅횟수 증가에 따라 반사율이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 자외선 영역에서는 코팅된 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>의 양이 TiO<sub>2</sub>에 비해 상당히 미량이기 때문에 코팅횟수에 따른 반사율의 차이가 거의 나타나지 않았다. 따라서 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>의 코팅은 TiO<sub>2</sub> 밴드갭에 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다. 하지만 가시광선 영역에서는 코팅을 할수록 같은 파장에서의 반사율이 증가하였다. 이 결과는 TiO<sub>2</sub>에

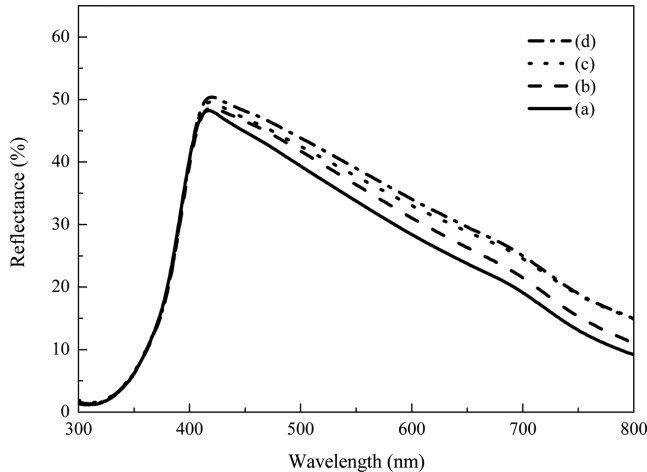


Fig. 1. The reflectance spectra: (a)sintered  $\text{TiO}_2$  film only, (b) $\text{TiO}_2$  film with 2 coatings, (c) $\text{TiO}_2$  film with 10 coatings, and (d) $\text{TiO}_2$  film with 12 coatings.

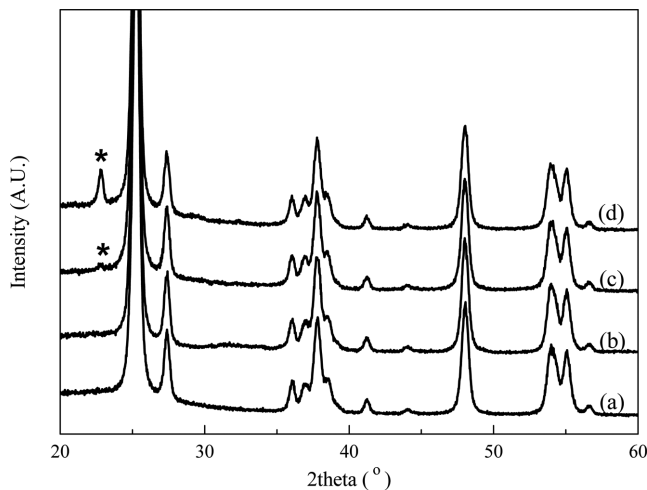


Fig. 2. XRD patterns: (a)sintered  $\text{TiO}_2$  film only, (b) $\text{TiO}_2$  film with 2 coatings, (c) $\text{TiO}_2$  film with 10 coatings, and (d) $\text{TiO}_2$  film with 12 coatings. \*: Orthorhombic  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , (001) plane.

$\text{Nb}_2\text{O}_5$ 가 코팅되면서 코팅막에 의해 반사율이 변했기 때문이라고 생각된다. 따라서 반사를 결과로부터 코팅막의 존재를 확인할 수 있었으며, 코팅횟수가 증가할수록 코팅막이 두꺼워졌음을 확인할 수 있었다.

Fig. 2는 반사율 측정 샘플과 동일한 샘플의 XRD 측정 결과를 나타낸 것이다. 이 회절패턴으로부터 코팅 후  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ 의 존재를 확인할 수 있었다.  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ 의 주 피크는  $2\theta$ 의  $23^\circ$ 에서 강하게 측정되는데 코팅 10회의 경우  $23^\circ$  근처에서 약한 피크가 관찰되었고, 12회 코팅한 경우 피크가 증가하는 것으로 보아  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ 가 코팅되었다는 사실을 확인할 수 있었다. 하지만 코팅 2회의 경우 피크가 나타나지 않음을 볼 때, 코팅 10회 미만의 경우 본 측정에 사용된 XRD로 측정할 수 있는 범위의 결정이 존재하지 않는 것으로 생각된다. 또한  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ 의 회절패턴에서 주 피크 외의 다른 피크는  $\text{TiO}_2$ 의 피크와 겹치거나 강도가 약해 확인이 어려웠다.

코팅횟수를 증가시켰을 때  $23^\circ$ 에 피크가 생긴 것을 제외하고 다른 피크에는 변화가 없는 것을 보면  $\text{TiO}_2$ 의 상은 변하지 않았음을 예측할 수 있다. 코팅을 반복할 때마다 소결 후  $\text{TiO}_2$  전극을 완전히 식히

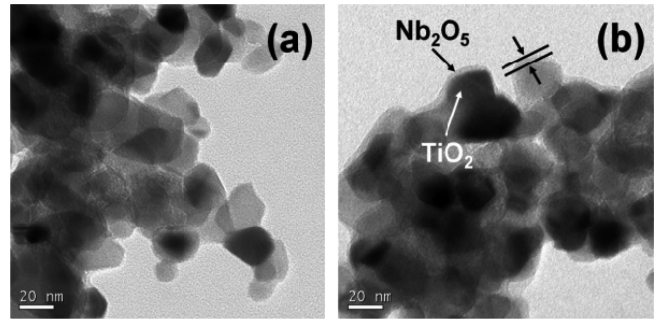


Fig. 3. TEM images: (a)sintered  $\text{TiO}_2$  particles only and (b)sintered  $\text{TiO}_2$  particles with  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  coatings 12 times.

고 전구체 용액에 담근 후 열처리를 했기 때문에 대부분의 열에너지는  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ 의 형성에 사용되었을 것으로 생각된다.

Fig. 3은 코팅 전과 후의 TEM 측정 사진이다. 코팅 10회 미만의 경우  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ 의 적은 양으로 인하여 TEM 측정 시 core-shell 구조의 확인이 어려웠으며, 코팅 12회의 경우 TEM을 통하여 확실한 core-shell 구조를 확인할 수 있었다. Fig. 3(a)는 코팅 전의  $\text{TiO}_2$  입자들만 나타나 있는 사진이고 Fig. 3(b)는 코팅 12회의 사진으로 core-shell 구조가 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig. 3(b)에  $\text{TiO}_2$  입자와 코팅된  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ 를 나타내었다. 사진에 나타난  $\text{TiO}_2$  입자를 덮고 있는 코팅막의 두께는 약 5 nm로 코팅 12회일 때 코팅막의 두께이다. 코팅은 같은 방법을 반복하여 진행한 것이므로 코팅 1회마다  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ 가 일정하게 적층되었다고 생각할 수 있다. 따라서 코팅 1회에서 코팅막의 두께는 약 0.417 nm라는 것을 예측할 수 있다.

### 3-2. 태양전지의 효율

코팅막의 특성을 확인한 것을 바탕으로 하여 코팅횟수를 달리하여 FTO 기판으로 제작한 염료감응 태양전지의 성능을 확인해 보았다. 앞서 확인한 코팅막의 특성을 보면 코팅횟수를 증가시킬수록 코팅막의 두께가 두꺼워지는 것을 알 수 있었다. 이렇게 형성된 코팅막의 존재는 에너지 장벽의 역할을 하여 코팅을 하지 않은 경우보다 높은 효율을 보일 것이라 예상할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 코팅막의 두께에 따라 최적의 효율을 보이는 두께를 파악하기 위해,

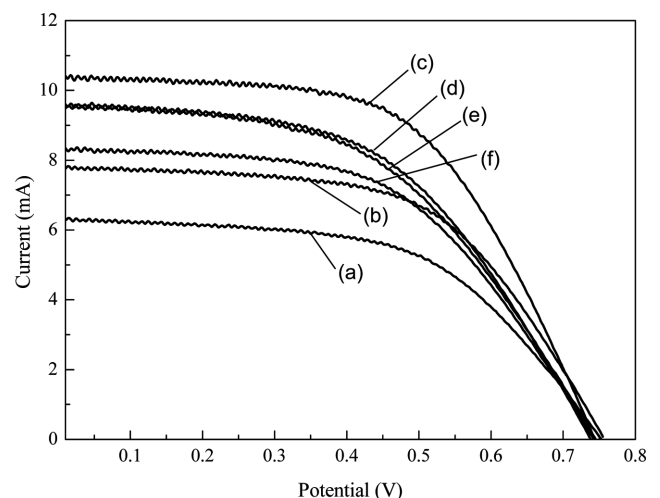


Fig. 4. I-V curves: (a) $\text{TiO}_2$  film only, (b) $\text{TiO}_2$  film with 1 coating, (c) $\text{TiO}_2$  film with 2 coatings, (d) $\text{TiO}_2$  film with 3 coatings, (e) $\text{TiO}_2$  film with 4 coatings, and (f) $\text{TiO}_2$  film with 5 coatings.

Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 코팅횟수를 1회부터 증가시켜가며 효율변화를 관찰하였다.

Fig. 4는 전압에 따른 전류의 변화 그래프로 코팅을 5회까지 변화시킨 결과를 나타낸 것이다. 이 그래프에서  $I$ (전류)의 값이 0일 때 나타나는 Potential(전압)이 개방전압( $V_{oc}$ )이고 Potential의 값이 0일 때 나타나는  $I$ 가 단락전류( $I_{sc}$ )이다. 코팅횟수에 따라  $V_{oc}$ 는 거의 비슷하게 나타나고,  $I_{sc}$ 는 2회까지 크게 증가하고 3회부터 다시 하락함을 알 수 있다. Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 코팅을 한 경우 단락전류가 증가한 것은 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>의 코팅으로 인하여 전자의 재결합이 약화되어 TiO<sub>2</sub>에서 투명전극으로 이동하는 전자의 양이 증가했기 때문이라고 판단된다. 2회 코팅 시 최대 단락전류가 증가한 이후 3회 이상 코팅 시 단락전류가 감소한 이유는 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>를 연속해서 TiO<sub>2</sub> 나노입자 전극 표면에 코팅함에 따라 TiO<sub>2</sub> 나노입자 전극의 표면적 감소와 이에 따른 염료 흡착량 감소로 인하여 발생할 수 있는 전자가 감소했기 때문이라고 생각된다. 하지만 이 경우에도 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>의 코팅으로 인하여 전자의 재결합이 약화되어 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>를 코팅하지 않은 경우보다 단락전류가 향상됐음을 확인할 수 있었다.

전지 효율은 식 (1)로 계산할 수 있다. 여기서  $P_{IN}$ 은 입사광 에너지이고 FF(Fill Factor)는 실제 최대전력과 이상 최대전력의 비로 전류-전압 그래프가 사각형에 가까울수록 1에 가까운 값이 나타난다.

$$\eta = \frac{I_{sc} \times V_{oc} \times FF}{P_{IN}} \quad (1)$$

Table 1은 코팅횟수에 따른 태양전지의 특성 및 변환효율을 정리한 것이다. 코팅을 하지 않은 경우 변환효율이 2.55%인 것에 비해 코팅을 한 경우 변환효율이 코팅 전에 비하여 상승하는 것을 볼 수 있었으며, 특히 코팅을 2회한 경우 4.25%로 효율이 가장 높았다. 이러한 효율향상은 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 코팅에 따른 전자 재결합 현상의 억제에 의한 단락전류 향상에 기인한 것으로 판단된다. 하지만 본 실험에서 시행한 코팅 방법은 반복적인 열처리에 의한 것이므로 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 코팅 시 반복되는 열처리로 인한 염료감응 태양전지 효율 변화의 영향을 고려하기 위하여 같은 실험 조건에서 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>를 코팅하며 열처리한 경우와 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>를 코팅하지 않고 TiO<sub>2</sub> 나노전극만을 열처리한 경우를 비교할 필요가 있다. 따라서 이에 대하여 실험한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 1회 열처리를 한 경우 두 조건 모두 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>를 코팅하지 않았을 때의 효율을 보여주는 것이고, 2회 열처리를 한 경우부터 코팅 유무에 따른 효율 변화를 나타낸 것이다. Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>를 코팅하지 않고 반복적인 열처리를 한 경우 열처리 횟수를 증가함에 따라 약간의 효율 향상을 확인할 수 있었다. 하지만 전반적으로 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>를 코팅하며 열처리를 한 경우보다 효율이 낮음을 확인할 수 있었다. 특히 3회 열처리했을 때(여기서 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 코팅 횟수는 2회이다). Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>의 코팅으로 인하여 코팅을 하지 않았을 때보다 상당히 효율이 향상되었음을 알 수 있었다. 따라서 이 결과로부터 반복적인 열처리에 따른 염료감응 태양전지의 효율 향상보다 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>의 코팅에 의한 효

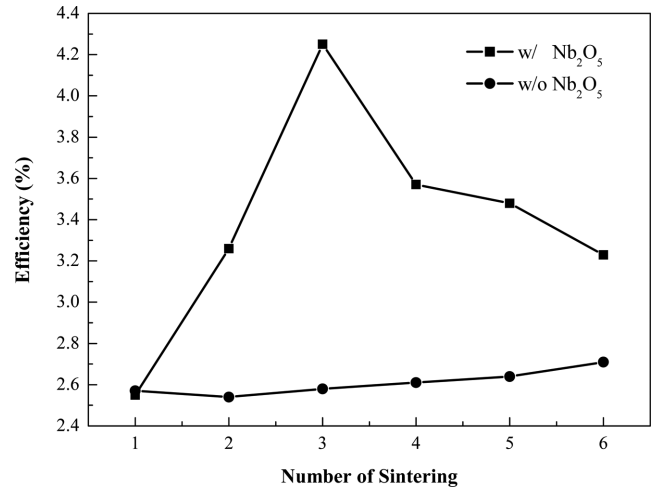


Fig. 5. The comparison of repeated sintering effect on the efficiency of dye-sensitized solar cell with Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (square line) and without Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (circle line).

율 향상이 우세함을 확인할 수 있었으며, 2회 코팅이 현 실험 조건에서의 최적 코팅 두께로 판단할 수 있었다. 코팅 2회의 경우 코팅 12회의 경우와는 달리 코팅된 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>의 양이 적기 때문에 XRD와 TEM 측정 결과로부터 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>의 존재를 확인할 수 없었지만 반사율 결과를 통해 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 코팅막의 존재를 확인할 수 있었으며, 코팅 후 전류밀도( $J_{sc}$ )가 증가하여 태양전지 효율이 향상된 것으로 볼 때 전자의 재결합을 억제할 수 있는 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>의 코팅막이 형성되었음을 판단할 수 있었다. 따라서 앞의 TEM 측정 결과로부터 최고 태양전지 효율을 보이는 코팅 2회에서 코팅막 두께는 0.834 nm로 예측할 수 있으며, 이 두께의 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 코팅막이 현 실험 조건에서 전자의 재결합을 가장 효율적으로 막을 수 있을 것이라 생각한다.

이 연구의 결과는 염료감응 태양전지의 효율을 향상시킬 수 있는 하나의 방법으로 사용 가능할 것으로 판단된다. 또한 코팅물질에 따라 효율적인 코팅막의 두께가 다를 것이라 예상되므로 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 이외의 물질을 이용할 경우엔 최적의 코팅막 두께를 찾는 것이 효율 향상의 주요 인자가 될 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

TiO<sub>2</sub> 나노전극의 core-shell 구조를 형성함에 있어 shell 물질로 쓰이는 금속 산화물 중 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>를 사용하여 TiO<sub>2</sub> 표면에 에너지 장벽을 도입하여 전자의 재결합 현상을 제어하였다. 에너지 장벽의 존재만으로도 염료감응 태양전지의 변환효율은 증가하나 에너지 장벽의 역할을 하는 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 코팅막의 특성에 대해 더 자세히 알아보기 위해 코팅횟수를 달리하여 코팅막의 두께에 따른 효율을 알아보았다. UV-

Table 1. The solar cell parameters presented in Fig. 4

Sample	Coating condition	Efficiency (%)	$V_{oc}$ (V)	$J_{sc}$ (A/m <sup>2</sup> )	Fill factor (%)
A	Reference TiO <sub>2</sub> without coating	2.55	0.7433	63.28	54.19
B	Coating 1 time	3.26	0.7469	78.49	55.53
C	Coating 2 times	4.25	0.7329	105.3	55.09
D	Coating 3 times	3.57	0.7273	97.61	50.22
E	Coating 4 times	3.48	0.7332	97.58	48.60
F	Coating 5 times	3.23	0.7306	84.66	52.14

spectrometer, XRD, TEM 을 이용하여 코팅물질의 존재를 확인하였고, 코팅 1회마다 적층되는 코팅막의 두께가 약 0.417 nm임을 알 수 있었다. 코팅시 변환효율이 증가하는데 코팅 2회일 때 DSSCs의 변환효율이 약 70% 상승함을 보였으며, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 코팅막이 0.834 nm 두께에서 전자의 재결합현상을 가장 효율적으로 제어할 수 있는 두께임을 알아낼 수 있었다.

## 감 사

본 연구는 서울시립대학교 2008년 학술연구용 첨단장비 지원사업에 의하여 구입된 장비를 활용하였으며 이에 감사합니다.

## 참고문헌

1. Graetzel, M., "Perspectives for Dye-sensitized Nanocrystalline Solar Cells," *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, **8**, 171-185(2000).
2. Na, Y. S., Song, S. K. and Park, Y. S., "Photocatalytic Decoloration of Rhodamine B by Immobilized TiO<sub>2</sub>/UV in a Fluidized-bed Reactor," *Korean J. Chem. Eng.*, **22**(2), 196-200(2005).
3. Lee, Y. G., Lee, T. G. and Kim, W. S., "Comparison of the Mercury Removal Efficiency Using TiO<sub>2</sub> Powder under Various Light Source," *Korean Chem. Eng. Res.*, **43**(1), 170-175(2005).
4. Kwon, T. R., Roo, W. H., Lee, C. W. and Lee, W. M., "Preparation of Wall Paper Cated with Modified TiO<sub>2</sub> and their Photocatalytic Effects for Removal of No in Air," *Korean Chem. Eng. Res.*, **43**(1), 1-8(2005).
5. Kim, G. S., Kim, Y. S., Kim, H. I., Seo, H. K., Yang, O. B. and Shin, H. S., "The Preparation and Property of Dye Sensitized Solar Cells using TiO<sub>2</sub>," *Korean Chem. Eng. Res.*, **44**(2), 179-186(2006).
6. Gregg, B. A., Pichot, F., Ferrere, S. and Fields, C. L., "Interfacial Recombination Processes in Dye-sensitized Solar Cells and Methods to Passivate the Interfaces," *J. Phys. Chem. B*, **105**(7), 1422-1429(2001).
7. Bedja, I. and Kamat, P. V., "Capped Semiconductor Colloids. Synthesis and Photoelectrochemical Behavior of TiO<sub>2</sub>-capped SnO<sub>2</sub> Nanocrystallites," *J. Phys. Chem.*, **99**(22), 9182-9188(1995).
8. Tada, H., Hattori, A., Tokihisa, Y., Imai, K., Tohge, N. and Ito, S., "A Patterned-TiO<sub>2</sub>/SnO<sub>2</sub> Bilayer Type Photocatalyst," *J. Phys. Chem. B*, **10**(19), 4585-4587(2000).
9. Chappel, S., Chen, S. G. and Zaban, A., "TiO<sub>2</sub>-Coated Nonporous SnO<sub>2</sub> Electrodes for Dye-Sensitized Solar Cells," *Langmuir*, **18**, 3336-3342(2002).
10. Diamant, Y., Chappel, S., Chen, S. G., Melamed, O. and Zaban, A., "Core-shell Nanoporous Electrode for Dye Sensitized Solar Cells: the Effect of Shell Characteristics on the Electronic Properties of the Electrode," *Coord. Chem. Rev.*, **248**, 1271-1276(2004).
11. Sayama, K., Sugihara, H. and Arakawa, H., "Photoelectrochemical Properties of a Porous Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Electrode Sensitized by a Ruthenium Dye," *Chem. Mater.*, **10**(12), 3825-3832(1998).
12. Chen, S. G., Chappel, S., Diamant, Y. and Zaban, A., "Preparation of Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Coated TiO<sub>2</sub> Nonporous Electrodes and Their Application in Dye-Sensitized Solar Cells," *Chem. Mater.*, **13**, 4629-4634(2001).