

Nb₂O₅ light scattering layer를 사용한 염료감응형 태양전지 성능 개선

최석원*, 손민규*, 최진호*, 김수경*, 김병만*, 김희제*
부산대학교*

Improvement of performance of dye-sensitized solar cells using Nb₂O₅ light scattering layer

Seok-Won Choi*, Min-Kyu Son*, Jinho Choi*, Soo-Kyoung Kim*, Byungman Kim*, Hee-Je Kim*
Pusan National University*

Abstract - 염료 감응형 태양전지(Dye-sensitized Solar Cells, DSC)에서 고효율화를 위해 light scattering layer가 반도체 산화물 TiO₂와 함께 많이 사용되고 있다. 이것은 light scattering layer에 의해 빛의 이용률을 증가시킴으로써 DSC의 성능을 증대시킬 수 있기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 입자크기가 크고 반사율이 좋은 Nb₂O₅를 light scattering layer로 사용하여 TiO₂ layer를 통과한 빛을 다시 반사시켜 빛의 이용률을 증대시킴으로써 DSC 성능면에서 light scattering layer를 사용하지 않았을 때보다 전류밀도와 효율을 크게 증가시키고자 하였다. 그 결과 Voc는 0.74V, Jsc는 17.95mA/cm², FF는 0.63, η는 8.38%로 기존의 DSC 보다 전류밀도가 약 30%, 효율이 약 31% 증가한 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 서 론

염료 감응형 태양전지(Dye-sensitized Solar Cells, DSC)는 1991년 스위스 EPFL의 Michael Gratzel 교수가 식물의 광합성 원리를 이용하여 처음 개발한 광전기 화학 태양전지로서[1], nano결정 구조로 이루어진 산화물 반도체에 루테늄계의 염료가 흡착된 광전극과 백금이 도포된 상대전극 사이에 산화환원을 하는 전해질이 위치해있는 샌드위치 구조로 되어 있다. 이러한 DSC는 기존의 실리콘 태양전지에 비하여 제조 단가도 저렴하면서 투명하여 다양한 응용이 가능하다는 이점을 가지고 있다. 하지만 DSC는 현재 낮은 효율로 인해 상용화에 어려움이 있어 많은 연구진들에 의해 DSC 고효율화 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 연구 중 입자가 작은 TiO₂ layer 위에 입자가 큰 light scattering layer를 입혀 빛의 흡수량을 늘려 효율을 높이는 연구는 대표적인 DSC 고효율화 연구로 각광받고 있다[2]. 따라서 본 연구에서는 투명하면서 높은 표면적을 가진 TiO₂ layer 위에 입자가 큰 Nb₂O₅를 light scattering layer로 사용하여 DSC의 성능 향상을 도모하고자 하였으며 Nb₂O₅가 light scattering layer로 사용하기에 적합함을 분석해보았다.

2. 실험 방법

2.1 Nb₂O₅ paste 제조

먼저 Nb₂O₅를 light scattering layer로 도포하기 용이하게 하기 위하여 paste 형태로 제작하였다. 이를 위해 Nb₂O₅(Sigma-Aldrich) powder 1g을 막자사발에 넣고 20분간 분쇄한 뒤 분쇄한 Nb₂O₅ powder를 Acetic acid(Sigma-Aldrich) 0.5ml와 함께 Ball milling(PM100, Retsch)에 넣어 400rpm의 속도로 10분간 섞는다. 그 후에 증류수 0.2ml를 넣고 5분간, 에탄올 0.5ml를 넣고 30분간 Ball milling에 넣어 섞는다. 이렇게 만들어진 paste를 분자들간의 화학적인 결합과 점성질을 좋게 하기 위하여 Triton-X(BIO BASIC INC) 0.5ml와 magnetic stir을 넣어 Hot plate(PC-420D, Corning)위에 올려놓고 65℃, 650rpm의 속도로 10시간 섞어 주어 Nb₂O₅ paste를 완성하였다.

2.2 광전극 제조

광전극을 제작하기 위하여 투명 전도성 기판(TCO: transparent conducting oxide)은 FTO(Fluorine doped SnO₂:13Ω/cm²)를 사용하였다. FTO를 아세톤, 에탄올, 증류수로 각각 10분간 세척한 후 TiO₂ paste(Ti-Nanoxide T/SP, Solaronix)를 Doctor Blade 방법을 이용하여 유효면적 0.25cm²로 도포하고 450℃에서 30분간 소성하여 일반적인 광전극을 제조하였다. 그 후, Nb₂O₅ light scattering layer를 적용하기 위하여 제조된 Nb₂O₅ paste를 Doctor Blade 방법을 이용하여 유효면적 0.25cm²로 도포하고 450℃에서 30분간 소성하였다. 소성된 광전극은 0.3mM의 N719염료(Ruthenium 535 bis-TBA (cis-bis (isothiocyanato) bis(2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylato) - ruthenium(II) bis-tetrabutyl-ammonium)용액에 상온에서 24시간동안 침지시켜 염료를

흡착시켰다.

2.3 상대전극 제작 및 DSC 완성

상대전극은 FTO에 Sand-blast(Ultra-Fine Sandblaster Type FG 1-93 Restauro, SANDMASTER)를 이용하여 전해질 주입을 위한 구멍을 제작한 후 아세톤, 에탄올, 증류수로 각각 10분간 세척하였다. Pt paste(Pt-catalyst T/SP, Solaronix)를 Doctor Blade 방법을 이용하여 상대전극에 도포한 후 400℃에서 30분간 소성하였다. 이렇게 만들어진 광전극과 상대전극은 60μm 두께의 hot-melt sealing sheet(SX 1170-60, Solaronix)를 사용해 접합시킨 후 전해질(0.5M LiI, 0.05M I₂, 0.5M 4-tertbutylpyridine in acetonitrile)을 주입시켜 DSC를 완성하였다.

2.4 결과 측정

완성된 DSC는 디지털 소스 미터(Model 2400, Keithley Instruments Inc)를 이용하여 Air Mass(AM) 1.5 조건(100mW/cm²)에서 측정되었다. 셀의 출력특성은 IV-Curve로 나타내었고 셀의 효율은 ①, ②번식에 의해 계산되었다. Voc는 개방전압, Isc는 단락전류, FF는 충전계수, η는 효율, P_{MAX}는 최대전력이고 P_e는 입사광 에너지이다.

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad \text{①}$$

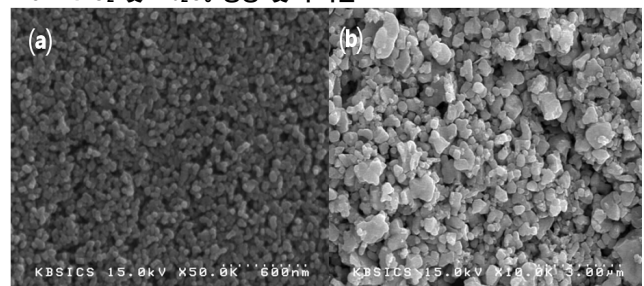
$$\eta = \frac{FF \cdot V_{oc} \cdot I_{sc}}{P_e} \times 100(\%) \quad \text{②}$$

셀 내부의 저항성분의 변화를 확인하기 위해 태양전지 화학분석기(SP-150, Bio Logic science instruments)를 이용하여 EIS(Electrochemical Impedance Spectroscopy)를 측정하였다. EIS는 500kHz~100mHz의 주파수 범위로 측정하였고 임피던스의 특성은 Nyquist diagram으로 나타내었다.

또한, 제작된 TiO₂ layer와 Nb₂O₅ light scattering layer의 형상관찰은 주사전자현미경 FE-SEM(Field Emission Scanning Electron Microscopy, S-4200, Hitachi)을 통해 관찰되었고 제작된 TiO₂ layer와 Nb₂O₅ light scattering layer의 반사정도를 확인하기 위하여 UV-Vis spectrophotometer(3220UV, Mecasys Inc)장비를 이용하여 투과율도 측정하였다. 그리고 광전극에 흡착되어있는 염료의 양을 확인하기 위하여 염료가 흡착된 광전극을 10mM의 NaOH용액에 담궈서 염료를 떨어뜨린 후 UV-Vis spectrophotometer장비를 이용하여 흡광스펙트럼을 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

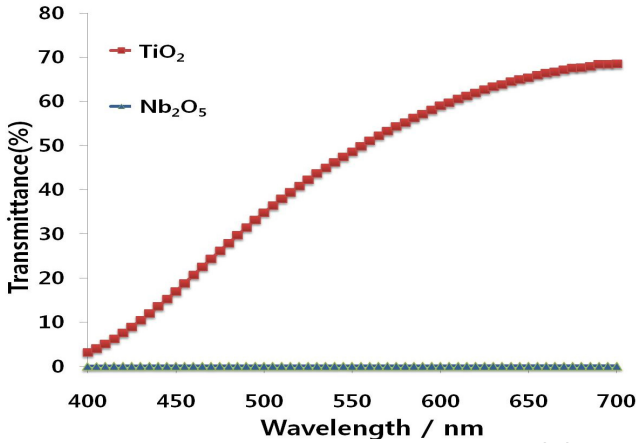
3.1 TiO₂ 및 Nb₂O₅ 형상 및 투과율



〈그림 1〉 (a)TiO₂와 (b)Nb₂O₅ paste의 FE-SEM 사진

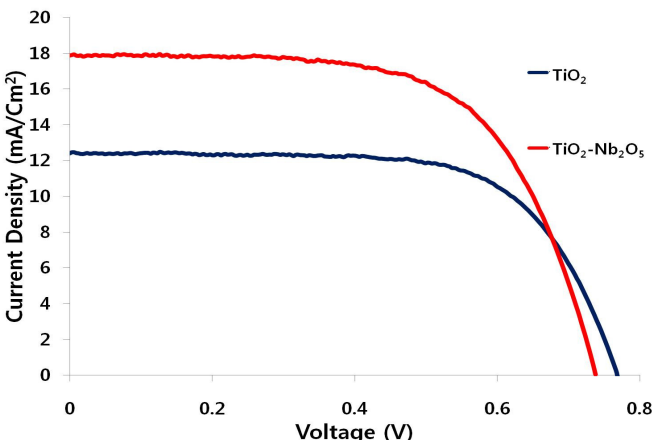
그림 1은 FE-SEM으로 관찰한 TiO₂와 Nb₂O₅ paste의 입자이다. 그림에서 보듯이 TiO₂의 입자는 약 20nm이고 Nb₂O₅의 입자는 약 300nm이

다. 이를 통하여 Nb₂O₅ 입자가 TiO₂ 입자보다 훨씬 크기가 클 수 확인 할 수 있었다. 그림2는 TiO₂와 Nb₂O₅ layer의 투과율을 측정 한 것이다. 그림에서 보듯이 TiO₂의 입자는 입자의 크기가 작아 높은 파장대의 빛은 잘 흡수하지 못하고 통과하여 투과율이 높은 것을 볼 수가 있다. 하지만 Nb₂O₅의 입자는 입자의 크기가 TiO₂의 입자보다 훨씬 크기 때문에 빛을 잘 반사하여 투과율이 낮은 것을 볼 수가 있다. 이를 통해 Nb₂O₅는 light scattering layer로써 사용하기에 적합하다는 것을 확인할 수 있었다.



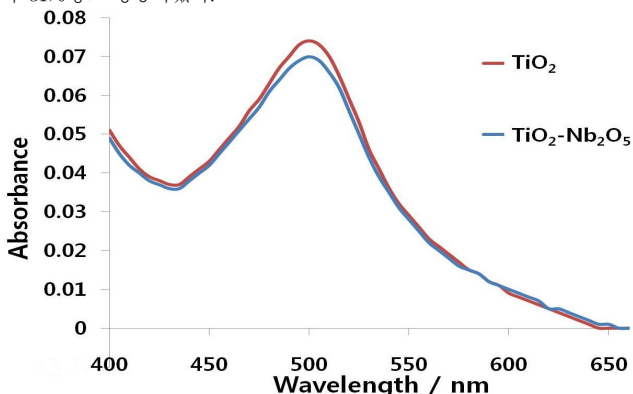
<그림 2> TiO₂와 Nb₂O₅ layer의 Transmittance(%)

3.2 DSC 성능 및 EIS 분석



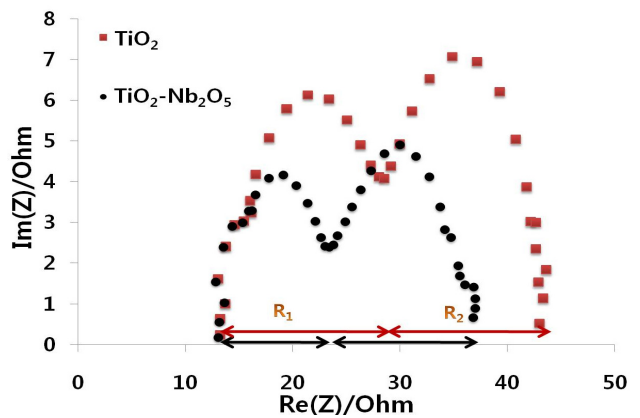
<그림 3> TiO₂와 TiO₂-Nb₂O₅ layer가 적용된 DSC의 I-V Curve 특성

그림 3은 TiO₂와 TiO₂-Nb₂O₅ layer가 적용된 DSC의 출력 특성을 나타내는 I-V Curve이다. TiO₂ layer는 표면적이 높아 빛을 많이 흡수하여 전자를 많이 내놓지만 높은 영역의 파장대는 흡수하지 못해 Nb₂O₅를 light scattering layer로 사용한 TiO₂-Nb₂O₅ layer보다 전류밀도뿐만 아니라 효율도 낫다. 이것은 Nb₂O₅ light scattering layer에서 TiO₂ layer가 흡수하지 못하고 통과한 파장대의 빛을 반사하여 빛의 이용률을 증대하기 때문이다. 따라서, 그림에서 보는바와 같이 TiO₂-Nb₂O₅ layer의 경우 TiO₂ layer의 경우보다 전류밀도는 약 30%, 에너지 변환 효율은 약 31%정도 상승하였다.



<그림 4> TiO₂, TiO₂-Nb₂O₅ layer의 Absorbance

그림 4는 TiO₂와 Nb₂O₅ layer의 염료 흡착량을 나타낸 그래프이다. 그림에서 보듯이 Nb₂O₅가 light scattering layer로 사용된 TiO₂-Nb₂O₅ layer의 염료흡착량이 TiO₂ layer로만 되어 있는 경우보다 전체적으로 작다는 것을 알 수 있다. 그림에도 불구하고 Nb₂O₅ light scattering layer가 포함된 DSC 효율이 높은 이유는 TiO₂ layer를 통과한 빛이 Nb₂O₅의 의해 반사되어 염료에 다시 흡수되어 빛의 이용률이 증가하였기 때문이다. 그렇기 때문에 염료 흡착량이 상대적으로 작아도 전류밀도와 효율이 높아지게 되는 것이다.



<그림 5> Nyquist Diagram (EIS)

그림 5는 DSC의 주파수에 따른 내부 임피던스 성분을 나타낸 Nyquist diagram이다. 500kHz-100mHz의 범위에서 주파수를 변화시켜 EIS를 측정하게 되면 4가지의 성분이 관찰되는데 고주파 영역(500kHz-100Hz)에서는 Z₁, 중간주파수 영역(100Hz-1Hz)에서는 Z₂, 저주파영역(1Hz-100mHz)에서는 Z₃, 그리고 TCO의 Sheet Resistance(R_s)가 관찰된다. 여기서 고주파영역에서 관찰되는 Z₁은 상대전극의 전자 이동에 관련된 임피던스, 중간주파수영역에서 관찰되는 Z₂는 TiO₂/dye/electrolyte interface상에서의 전자 이동에 영향을 주는 임피던스, 저주파 영역에서 관찰되는 Z₃는 전해질 내에서의 전자이동에 영향을 주는 임피던스이다.

하지만 DSC는 DC조건에서 동작하므로 실질적으로 DSC에 영향을 주는 것은 Z₁, Z₂, Z₃의 실수부인 R₁, R₂, R₃와 R_s 이 4가지 내부 저항 성분이다[3]. 그림에서 보듯이 Nb₂O₅ light scattering layer를 포함하고 있는 DSC가 일반 DSC보다 R₁과 R₂가 작음을 확인할 수 있다. 이는 light scattering layer에 의해 빛의 이용률이 증가하여 전체적으로 전자가 많이 생성되고 전자의 이동이 활발해졌기 때문이다. 그러므로 Nb₂O₅ light scattering layer가 적용된 DSC가 그렇지 않은 DSC에 비해 전류밀도는 약 30%, 에너지 변환효율은 약 31%정도 상승하게 된다.

3. 결 론

본 연구를 통해 Nb₂O₅는 입자 크기가 기존의 TiO₂보다 크고 반사율이 높아 light scattering layer로 적합함을 알 수 있었다. 그리고 이를 실제 DSC의 light scattering layer에 적용하였을 경우, TiO₂ layer에서 통과된 빛을 다시 반사시켜 빛의 이용률을 높임으로써 오직 TiO₂ layer 층으로부터 사용했을 때 보다 전류밀도와 효율이 크게 상승하였음을 확인 하였다. 결과적으로 Nb₂O₅를 light scattering layer로 사용된 DSC는 유효면적 0.25cm²에서 V_{oc}는 0.74V, J_{sc}는 17.95mA/cm², FF는 0.63, η는 8.38%로 기존의 DSC보다 전류밀도가 30%, 변환 효율이 31% 상승된 결과를 얻을 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] B. O'Regan, M. Grätzel, "A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films." Nature, Vol. 353, p. 737, 1991.
- [2] Sarmimala Hore, Carmen Vetter, Rainer Kern, Herman Smit, Andreas Hinsch, "Influence of scattering layers on efficiency of dye-sensitized solar cells", Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 90, p. 1176-1188, 2006.
- [3] N. Koide, A. Islam, Y. Chiba, L. Han, "Improvement of efficiency of dye-sensitized solar cells based on analysis of equivalent circuit" Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, Vol. 182, p. 296-305, 2006.