

티타니아 나노튜브를 이용한 염료감응 태양전지

김태현 · 정지훈[†]

경기대학교 화학공학과
16227 경기도 수원시 영통구 광교산로 154-42
(2018년 4월 18일 접수, 2018년 5월 1일 수정본 접수, 2018년 5월 8일 채택)

Titanium Nanotube-based Dye-sensitized Solar Cells

Taehyun Kim and Jihoon Jung[†]

Department of Chemical Engineering, Kyonggi University, 154-42, Gwanggyosan-ro, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, 16227, Korea

(Received 18 April 2018; Received in revised form 1 May 2018; accepted 8 May 2018)

요 약

HF, NaF, NH₄F와 같이 플루오르 이온(F⁻)이 함유된 전해질에서 티타늄 금속판을 양극산화시켜 0.34 μm부터 최대 8.9 μm까지 다양한 길이의 티타니아 나노튜브(TNT)를 제조하였다. 양극산화에 의해 제조된 TNT를 450 °C에서 소성시키면 광 활성을 가지는 아나타제 결정이 생성되었다. TNT 기반 염료감응 태양전지(DSSC)는 TNT 길이가 2.5 μm일 때 광전환 효율이 4.71%로 최대를 나타내었다. 이 값은 티타니아 페이스트를 코팅하여 제작한 FTO 기반 DSSC의 광전환 효율 보다 약 18% 높았다. 또한 TNT-DSSC의 단락전류밀도(J_{sc})는 9.74 mA/cm²로 FTO-DSSC의 7.19 mA/cm²보다 약 35% 이상 높았다. TNT-DSSC 태양전지의 광전환 효율이 더 높은 이유는 염료에서 생성된 광전자가 TNT를 통해 전극 표면으로 빨리 전달되어 광전자와 염료가 재결합 되는 것이 억제되었기 때문이다.

Abstract – Titanium nanotubes (TNT) of various lengths ranging from 0.34 μm to a maximum of 8.9 μm were prepared by anodizing a titanium metal sheet in an electrolyte containing fluorine ion (F⁻) of HF, NaF and NH₄F. When TNT prepared by anodizing was calcined at 450 °C, anatase crystals with photo activity were formed. The TNT-based dye-sensitized solar cell (DSSC) showed a maximum conversion efficiency of 4.71% when the TNT length was 2.5 μm. This value was about 18% higher than photo conversion efficiency of the FTO-based DSSC coated with titania paste. And the short circuit current density (J_{sc}) of the TNT-DSSC was 9.74 mA/cm², which was about 35% higher than the 7.19 mA/cm² of FTO-DSSC. The reason for the higher conversion efficiency of TNT-DSSC solar cells is that photoelectrons generated from dyes are rapidly transferred to the electrode surface through TNT, and the recombination of photoelectrons and dyes is suppressed.

Key words: DSSC, Titania nanotube, Anodizing

1. 서 론

태양전지는 1954년 AT&T 벨 연구소의 Chapin 등에 의하여 고효율 실리콘 물질을 이용한 태양전지가 4.5%의 에너지 변환 효율을 보이면서 본격적으로 개발되기 시작하였다[1]. 현재 널리 사용되고 있는 실리콘 태양전지는 상대적으로 높은 효율을 나타내지만 재료 공급의 한계, 제조공정의 복잡화 등의 문제를 가지고 있다. 이를 대체하기 위해 다양한 태양전지가 개발되고 있으며 그 중 하나가 염료감응형 태양전지(DSSC)이다. DSSC는 1991년 O'Regan과

Gratzel에 의하여 개발 되었는데[2], DSSC는 자원의 제한을 적게 받으며 전지의 제조 공정이 비교적 단순하고 기술개발에 따른 원가 혁신이 가능한 미래가치가 높은 태양전지이다. 또한 공해물질의 방출이 적고 투명하며 다양한 색상구현이 가능하다는 특성을 가지고 있어서 다방면에 응용이 가능하다. 그러나 실리콘 태양전지에 비해 낮은 효율과 실용화 단계에서의 안정성 등의 문제를 가지고 있어 이를 극복하기 위한 연구가 많이 진행되고 있다[3, 4]. DSSC의 효율을 저하시키는 요인으로는 염료의 낮은 광흡수 효율, 전하이동에 의한 전압손실 등 매우 다양하다. 그 중에서도 염료로부터 생성된 전자가 전극표면으로 이동하지 못하고 정공과 재결합하게 되면 전지의 효율은 크게 저하된다.

전자와 정공의 재결합을 억제하기 위해서는 염료에서 생성된 광전자의 이동속도를 증가시키면 되는데, Yoshikawa 등은 수열합성

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jhjung@kgu.ac.kr

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.

으로 제조된 TiO_2 나노 와이어를 구형 입자와 혼합하여 전자 이동 속도를 증가시켰으며[5], Kim 등은 전극을 TiCl_4 로 처리하여 입자의 조밀도를 증가시켜 전하 이동 증가와 전자의 재결합을 감소시켰다[6]. 최근에 티타니아 나노튜브(TNT)가 다른 형태의 TiO_2 에 비해 광전자 혹은 외부로부터 전달된 전자를 튜브를 통해 신속하게 전달시킨다는 것이 알려졌다. 이를 이용하면 빛을 받아 생성된 광전자를 티타니아 튜브를 통해 신속하게 전달시켜 전자와 정공의 재결합을 억제하여 DSSC의 효율을 향상시킬 수 있다[7-10].

본 연구팀은 앞선 연구에서 티타늄을 양극산화 시켜 다양한 길이와 특성을 가지는 티타니아 나노튜브를 제조하기 위한 전해질의 종류, 양극산화 시간, 양극산화 전압 등을 밝힌바 있다[12,13]. 이에 본 연구에서는 기존 연구를 바탕으로 티타늄 금속 표면에 양극산화를 이용하여 다양한 길이의 TNT 박막을 생성시키고, 이를 이용하여 DSSC를 제조한 후, 그 효율을 측정하여 TNT가 DSSC 효율에 미치는 영향을 파악하였다.

2. 실험

2-1. 양극산화를 이용한 티타니아 나노튜브(TNT) 제조

양극산화를 실시하기 전 티타늄(Aldrich, 99.7%) 표면의 산화막 제거를 위해 HNO_3 , HF, 증류수가 3:1:1로 혼합된 용액으로 세척하였다. 세척 과정을 거친 티타늄은 직류전원 공급장치를 이용하여 주어진 전압, 시간 및 전해질에서 양극산화를 실시하였으며 음극으로는 백금을 사용하였다[11]. TNT 제조에 사용된 전해질은 불소이온(F^-)이 포함된 HF, NaF, NH_4F 를 수용성 용매 및 포름아마이드(formamide)가 포함된 유기성 용매와 혼합하여 사용하였다. 길이가 긴 TNT의 제조를 위해서는 수용성 전해질 대신 유기 용매 전해질이 효과적이라고 알려져 있다[14,15]. 양극산화는 1시간에서 최대 9시간까지 진행하였으며, 이때 양극산화 전압은 20 V로 고정하였다. 전해질 종류에 따른 양극산화 조건을 Table 1에 나타내었다. 양극산화가 진행되는 동안 전해질의 온도는 항온조를 이용하여 25 °C로 유지시켰으며, 양극산화 후 증류수와 에탄올로 세척 후 110 °C 오븐에서 30분 동안 건조시켰다. 양극산화가 끝난 TNT는 결정 성장을 위해 공기분위기에서 450 °C에서 2시간 동안 열처리하였다.

2-2. 염료감응 태양전지(DSSC) 제조

광전극(anode)은 양극산화법으로 제조된 2 cm×2 cm 크기의 TNT 표면에 염료의 결합력을 증가시키기 위해 TiO_2 페이스트(Dysol, DSL 90T)를 스크린 프린팅하여 제조하였다. 이때 TNT 길이에 따라 스크린 프린팅 횟수를 조절하여 광전극의 TiO_2 두께(TNT + TiO_2 페이스트)를 11~12 μm 로 맞추었다. TiO_2 페이스트를 프린팅한 광전극은 125 °C 오븐에서 6분간 건조시키고, 450 °C에서 30분 동안 열처리하여 페이스트에 포함된 바인더를 제거하였다. 이후 루테늄 계열의 염료인 40 mM N719 (Solaronix)를 용해시킨 acetonitrile과 tert-butyl alcohol 혼합액에 24시간 동안 담가 TiO_2 표면에 염료를

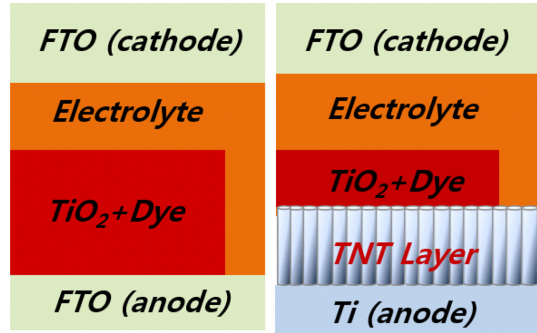


Fig. 1. Diagram of Dye-sensitized solar cell assemblies, (left) FTO-based DSSC, (right) TNT-based DSSC.

흡착시켰다. TNT 광전극과 광전환 효율을 비교하기 위해 FTO (Fluorine doped Tin Oxide) 유리에 TiO_2 페이스트를 1회에서 5회까지 스크린 프린팅한 광전극도 함께 제작 하였다.

대전극(cathode)은 FTO 유리를 광전극과 같은 2 cm×2 cm 크기로 자르고 전해질 주입 구멍을 뚫은 후, 표면에 5 mM H_2PtCl_6 (Aldrich) 용액을 30초간 1500 RPM으로 스핀코팅 하였다. 이후 400 °C에서 15분 동안 열처리 하여 대전극 표면에 Pt만 남겼다.

제조한 두 전극을 surlyn (solaronix-60)으로 125 °C에서 접합시킨 후, 전해질을 주입하고 구멍을 막았다. 전해질은 0.60 M Butyl methyl imisazolium iodide (BMII), 0.03 M Iodine I_2 , 0.1 M Guanidinium thiocyanate, 0.5 M 4-tert-butylpyridine을 acetonitrile과 valerionitrile을 85:15로 섞은 용매에 녹여 사용하였다. Fig. 1에 FTO 유리 위에 TiO_2 페이스트를 코팅한 기존 FTO 기반 DSSC와 티타늄 금속판 위에 생성된 TNT를 이용한 TNT 기반 DSSC의 구조를 나타내었다.

2-3. TNT 특성 확인 및 DSSC 효율 측정

TNT의 표면 및 단면의 형태는 FE-SEM (JEOL Model JSM-6500F)으로 관찰하였으며 결정구조는 X선 회절 분석기 (PANalytical)로 확인하였다. 스크린 프린팅한 TiO_2 의 두께는 알파스텝으로 측정하였다.

태양전지의 광전환 효율을 확인하기 위한 전류-전압 곡선은 모의 태양장치(Luzchem Photoreactors, LZCX-SSR)와 소스미터(Keithley, 2400)를 사용하여 AM-1.5 (100 mW/cm^2) 밝기 하에서 측정하였다. 태양전지의 광전환 효율 측정시에는 빛을 광전극(anode) 방향에서 조사하는 것이 일반적이지만, TNT 광전극은 불투명하여 빛이 투과되지 않으므로 대전극(cathode) 방향에서 빛을 조사하여 효율을 측정하였다. 따라서 비교대상인 FTO 광전극을 가진 DSSC의 효율도 대전극 방향에서 빛을 조사하여 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 티타니아 나노튜브(TNT) 특성 분석

Fig. 2는 아세트산을 포함한 수용액에 0.5 vol.% HF를 첨가한 전

Table 1. Anodizing conditions for preparing TNT

Composition of Electrolytes	Anodizing time (hr)	Anodizing voltage
0.5 vol.% HF in water and acetic acid	1	
0.5 wt% NaF + 0.5 M Na_2SO_4 + 0.2 M sodium citrate in water	9	20 V
0.27 M NH_4F + 5 vol% water in formamide	1, 2	

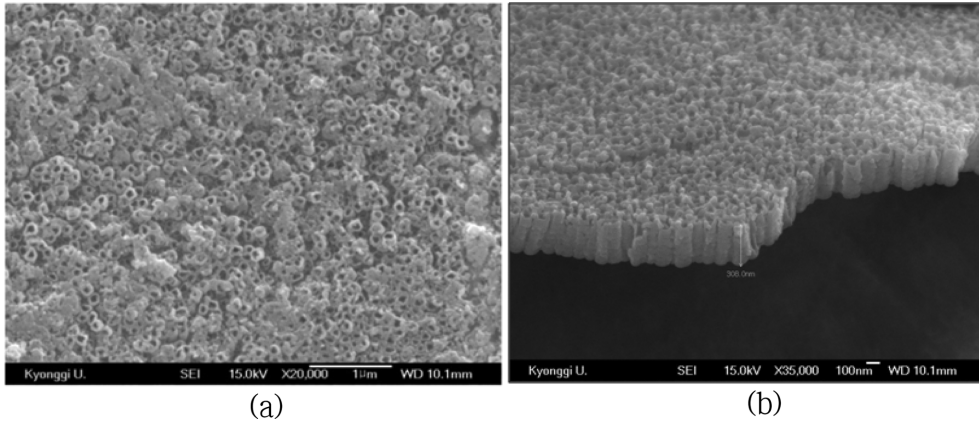


Fig. 2. FE-SEM images of TNT films prepared by anodizing at 20 V, 1 hr in 0.5 vol% HF aqueous solution electrolyte. (a) surface view, (b) cross sectional view.

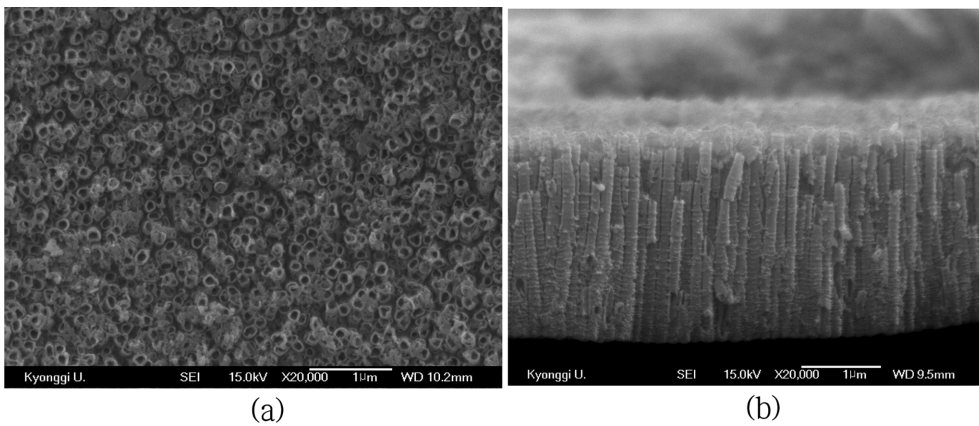


Fig. 3. FE-SEM images of TNT films prepared by anodizing at 20 V, 9 hr in 0.5 wt% NaF aqueous solution electrolyte. (a) surface view, (b) cross sectional view.

해질에서 20 V의 전압으로 1시간동안 양극산화 시킨 TNT의 표면 및 단면의 FE-SEM 결과이다. 양극산화 후 갈라지는 현상 없이 TNT가 서로 조밀하게 붙어 있는 형태로 약 0.3 µm길이의 TNT가 관찰되었다. 양극산화 시간을 더 증가시켜도 나노튜브 길이는 크게 늘어나지 않았다[12].

Fig. 3은 수용액에 0.5 M Na₂SO₄, 0.2 M sodium citrate, 0.5 wt% NaF를 첨가 후, H₃PO₄로 pH를 4.2로 조절한 전해질에서 20 V의 전압으로 9시간 양극 산화시킨 TNT 평면과 단면의 FE-SEM 결과이다. 양극산화 시작후 5시간까지는 완전한 나노튜브가 성장되지 않았으며[12], 9시간의 양극산화 후 산화층의 덮임이 없는 완전한 튜브형태의 기공이 표면에 나타났다. 단면에서도 완전한 형태의 TNT가 성장했음을 확인할 수 있었으며 길이는 약 2.5 µm로 측정되었다.

Fig. 4는 포름아미드에 0.15 M NH₄F와 5 vol% 증류수를 첨가한 전해질을 사용하여 20V에서 양극산화 시켜 제조한 TNT 표면 및 단면의 FE-SEM 결과이다. 포름아미드를 사용한 전해질에서는 수용액을 용매로 한 전해질에 비해 짧은 시간 안에 보다 긴 TNT를 얻을 수 있었다. 양극산화후 1시간에 약 5.3 µm 길이의 TNT가 형성되었고, 2시간에 약 9 µm 길이의 TNT가 성장되었다. 양극시간을 증가시키면 TNT의 길이가 더욱 길게 할 수 있었으나[12], 길이가 길어질수록 기계적 강도가 약해져서 전극으로 사용하기에는 부적합하였다.

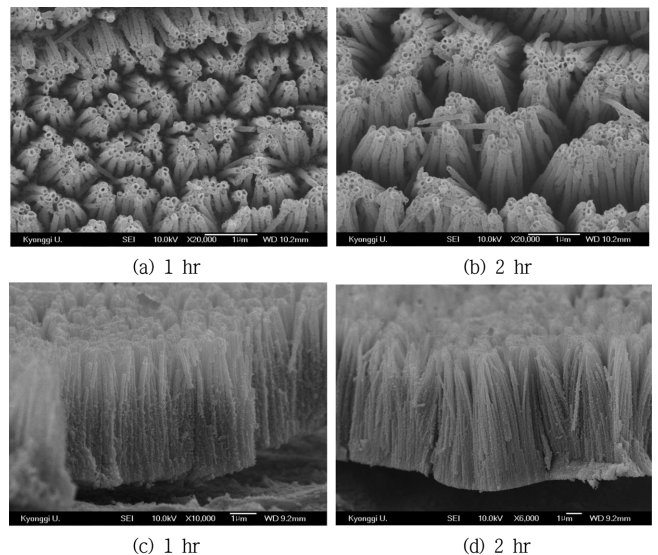


Fig. 4. FE-SEM image of TNT films prepared by anodizing at 20 V in formamide electrolyte with 0.15 M NH₄F. (a), (b) surface view; (c), (d) cross sectional view.

450 °C에서 열처리 전후의 TNT 박막 X선 회절분석 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5의 (a), (b), (c)에 나타낸 열처리 전 분석결과에는 모든 TNT에서 티타늄 피크 만 관찰되며 아나타제(anatase)나 루타

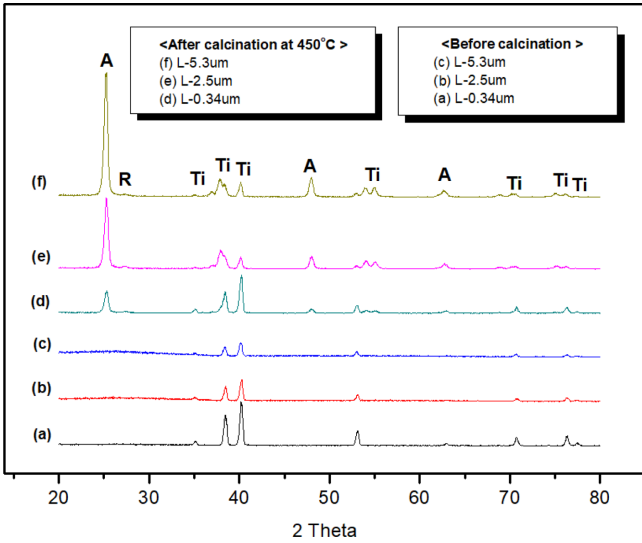


Fig. 5. XRD patterns of the TNT before and after calcination. A, R, and Ti represent anatase, rutile, and titanium, respectively.

일(rutile)의 티타니아 결정은 관찰되지 않았다. Fig. 5의 (d), (e), (f)에 나타낸 450 °C에서 2시간동안 열처리한 후 분석결과에는 모든 TNT에서 아나타제 결정($2\theta=25.2^\circ, 48.0^\circ, 62.6^\circ$)이 생성됨을 확인할 수 있으며, 루타일 결정($2\theta=27.7^\circ$)은 거의 나타나지 않았다. TNT 길이가 길수록 아나타제 결정 피크가 보다 강하게 관찰되었다. 일반적으로 티타니아의 아나타제 결정이 높은 광학활성을 가지며 루타일 결정은 상대적으로 활성이 낮고, 비정질의 티타니아는 광학활성이 거의 나타나지 않는다고 알려져 있다. 따라서 양극산화에 의해 제조된 TNT는 열처리를 통해 DSSC에 접합한 아나타제 결정이 생성되었음을 알 수 있다.

3-2. DSSC의 효율 분석

3-2-1. FTO 광전극으로 만든 DSSC

FTO 표면에 TiO₂ 페이스트를 1회에서 5회까지 스크린 프린팅했을 때 TiO₂ 박막의 두께 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 알파스텝으로 측정한 TiO₂의 두께는 1회 프린팅 시에 4 μm, 2회 프린팅 시에 7 μm, 3회 프린팅 시에 10 μm, 4회 프린팅 시에 12 μm, 5회 프린팅 시에 14 μm로 증가하였다.

Fig. 7은 대전극(cathode) 방향으로 빛을 조사하여 측정한 TiO₂ 두께에 따른 전류-전압 그래프이며, Table 2는 전류전압 그래프로 부터 계산한 단락전류(J_{sc}), 개방전압(V_{oc}), 충전률(Fill factor), 광전환 효율(eficiency) 등을 표로 정리한 것이다. TiO₂ 두께가 증가함에 따라 J_{sc} 와 효율이 증가하였으며, TiO₂ 두께가 14 μm인 전극이 가장 높은 3.98%의 광에너지 전환 효율을 나타내었다. V_{oc} 는 TiO₂ 두께에 관계없이 평균 0.76 V로 거의 일정하였고, Fill Factor는 0.74

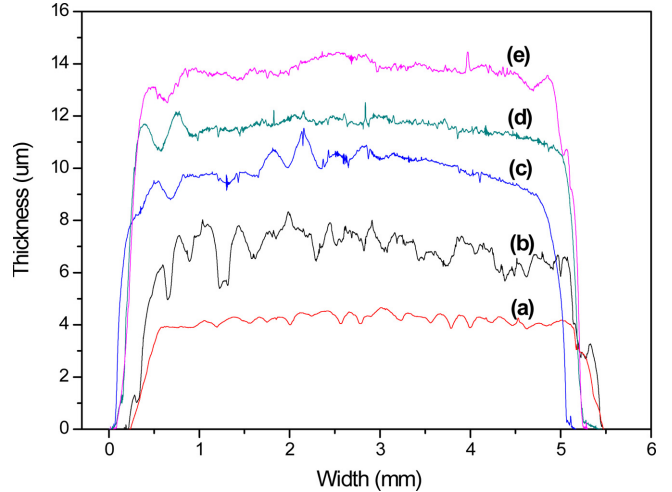


Fig. 6. TiO₂ thickness change according to the number of screen printing times, (a) 1 time, 4 μm, (b) 2 times, 7 μm, (c) 3 times, 10 μm, (d) 4 times, 12 μm, (e) 5 times, 14 μm.

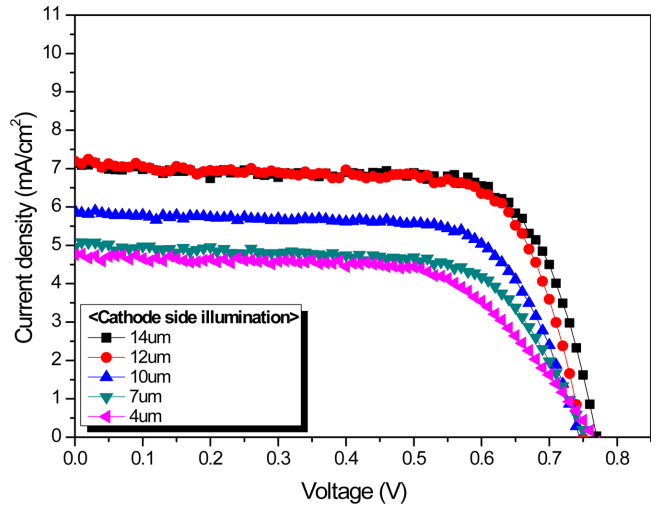


Fig. 7. Photovoltaic I-V curve of FTO-DSSC with cathode side illumination.

에서 0.56로 TiO₂의 두께가 증가함에 따라 감소하였다. 대전극(cathode) 방향으로 빛을 조사한 경우는 광전극(anode) 방향으로 빛을 조사했을 경우보다 J_{sc} , V_{oc} , FF, 효율 모두 감소한다. 이는 빛이 대전극의 Pt 코팅과 전해질을 지나면서 염료에 도달하는 빛의 양이 감소하여 광전자 생성량이 줄어들기 때문이다.

3-2-2. TNT 광전극으로 만든 DSSC

Fig. 8과 Table 3은 대전극 방향으로 빛을 조사하여 측정한 TNT 길이에 따른 DSSC의 전류-전압 그래프와 전류전압 그래프로부터

Table 2. Photovoltaic characteristics of FTO-DSSC with cathode side illumination

TiO ₂ thickness (μm)	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (V)	Fill factor (FF)	Efficiency, η (%)
14	7.14	0.77	0.72	3.98
12	7.19	0.75	0.72	3.86
9	5.91	0.75	0.70	3.08
7	4.96	0.75	0.67	2.53
4	5.27	0.76	0.63	2.27

Table 3. Photovoltaic characteristics of TNT-DSSC with cathode side illumination

TNT+TiO ₂ Thickness (μm)	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (V)	Fill factor (FF)	Efficiency, η (%)
12 (0+12)	5.33	0.57	0.37	1.14
12.3 (0.34+12)	5.34	0.73	0.69	2.73
12.5 (2.5+10)	9.74	0.71	0.68	4.71
12.3 (5.3+7)	5.94	0.76	0.68	3.05
12.9 (8.9+4)	5.17	0.75	0.66	2.58

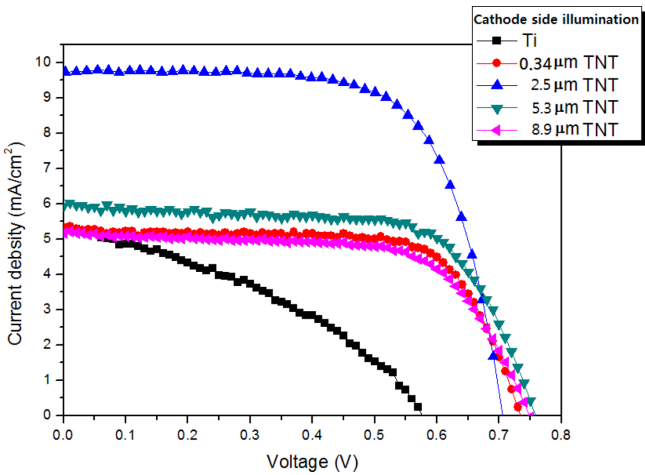


Fig. 8. Photovoltaic I-V curve of TNT-DSSC with cathode side illumination.

계산한 단락전류, 개방전압, 충전률, 광전환 효율 등이다. TNT를 성장시키지 않은 티타늄 평판에는 TiO₂ 페이스트를 4회 프린팅하여 TiO₂ 두께를 12 μm로 하였고, 길이가 각각 0.35 μm, 2.5 μm, 5.3 μm, 8.9 μm인 TNT 표면에는 TiO₂ 페이스트를 각각 4회(12 μm), 3회(10 μm), 2회(7 μm), 1회(4 μm) 프린팅하여 TNT와 TiO₂를 합한 전체 두께를 각각 12.3 μm, 12.5 μm, 12.3 μm, 12.9 μm로 만든 후 광전환 효율을 측정하였다.

TNT를 성장시키지 않은 티타늄 평판으로 제조한 DSSC는 J_{sc}=5.34 mA/cm², V_{oc}=0.57V, FF=0.37, η=1.14%로 FTO-DSSC 보다도 낮은 값을 나타내었다. 이는 티타늄 금속표면과 TiO₂ 입자간에 결합력이 낮고 전자전달 과정이 원활하지 못하기 때문으로 생각된다. 0.34 μm 길이의 TNT로 만든 DSSC의 경우 J_{sc}=5.34 mA/cm², V_{oc}=0.73V, FF=0.69, η=2.73%으로 측정되었다. 2.5 μm 길이의 TNT로 만든 DSSC의 경우 J_{sc}=9.74 mA/cm², V_{oc}=0.71 V, FF=0.68, η=4.71%로 TNT-DSSC 중 가장 광전환 효율이 높았다. 5 μm과 8 μm 길이의 TNT 전극으로 만든 DSSC는 각각 J_{sc}=5.94 mA/cm², V_{oc}=0.76, FF=0.68, η=3.05%와 J_{sc}=5.17 mA/cm², V_{oc}=0.75 V, FF=0.66, η=2.58%로 측정되었다. 즉 길이가 5 μm과 8 μm인 TNT로 만든 DSSC의 효율이 길이가 2.5 μm인 TNT로 만든 DSSC 보다 효율이 오히려 감소했다. 이러한 결과는 TNT가 구형 티타니아 보다는 전자를 잘 전달하지만 TNT가 구형(sphere) 티타니아 보다 염료와의 결합 능력이 떨어지므로 TNT의 길이가 길어지면 광전자가 생성되는 염료와 전극표면의 거리가 멀어져서 둘 사이의 저항이 높아지기 때문이라고 생각된다.

대전극 방향으로 빛을 조사한 TNT 기반 DSSC와 FTO 기반 DSSC의 광전환 효율을 비교해 보면 최대 효율이 각각 4.71%와

3.98%로 TNT로 제작된 DSSC의 효율이 18% 정도 높음을 알 수 있다. 이는 티타니아 나노튜브 형태가 구형의 티타니아에 비해 전자확산 속도를 증가시켜 광전환 효율을 상승시킬 것이라는 예상과 일치하는 결과이다. 이 결과는 전자의 이동 속도를 가늠해 볼 수 있는 단락 전류밀도(J_{sc}) 값을 비교해 보면 더욱 분명히 알 수 있다. 즉 가장 높은 TNT 기반 DSSC의 J_{sc}가 9.74 mA/cm²인 반면에 FTO 기반 DSSC의 J_{sc}는 7.19 mA/cm²으로, TNT 기반 DSSC의 J_{sc}가 약 35% 이상 높음을 알 수 있다. 이러한 결과는 TNT의 전자 이동 저항이 구형의 티타니아에 비해 현저히 낮기 때문에 나온 것이다.

앞에서 언급한 바와 같이 TNT 기반 DSSC는 광전극(anode)이 불투명한 금속으로 되어있어 어쩔 수 없이 대전극(cathode) 방향으로 빛을 조사해야 되기 때문에 광전극 방향으로 빛을 조사하는 기존 투명전극 기반의 DSSC와 비교해서는 절대적인 광전환 효율이 낮다. 그러나 기존 투명 광전극에 비해 저렴한 전극 가격과 단순한 제조공정 등 많은 장점을 가지고 있어 앞으로 추가 연구를 통해 광전환 효율을 지속적으로 높여 나가야 할 것으로 생각된다.

4. 결 론

HF, NaF, NH₄F 등 플루오르 이온(F⁻)이 함유된 전해질에서 티타늄 금속판을 양극 산화시켜 표면에 수직으로 배열된 티타니아 나노튜브(TNT)를 생성시켰다. 이때 전해질 조성, 시간에 따라 0.34 μm 부터 최대 8.9 μm까지 다양한 길이의 TNT를 제조하였으며, 수용성 전해질에 비해 포름아마이드와 같은 유기 용매 전해질에서 상대적으로 길이가 긴 TNT를 제조할 수 있었다. 양극산화로 제조된 TNT는 450 °C의 소성 과정을 거쳐 광학 활성을 가지는 아나타제(anatase) 결정이 형성되었음을 XRD 분석을 통해 확인하였다.

표면에 TNT가 생성된 티타늄 금속판을 광전극으로 사용하여 DSSC를 제조하였다. TNT 기반 DSSC의 대전극 방향에서 빛을 조사하여 효율을 측정한 결과 2.5 μm 길이의 TNT에 TiO₂를 코팅한 DSSC의 광전환 효율이 4.71%로 최대값을 나타내었다. 이는 FTO 표면에 TiO₂ 페이스트를 코팅한 FTO 기반 DSSC 최고효율 3.98% 보다 약 18% 높은 값이었다. 단락전류밀도(J_{sc})의 경우도 TNT 기반 DSSC가 9.74 mA/cm²로 FTO 기반 DSSC의 7.19 mA/cm² 보다 약 35% 이상 높았다. 즉 TNT를 DSSC에 적용하면 구형의 티타니아에 비해 전자 이동 속도가 상승하여 광전자와 염료의 재결합을 억제되고 결과적으로 염료감응 태양전지의 광전환 효율이 상승되었다.

감 사

본 연구는 2015학년도 경기대학교 학술연구비(일반연구과제) 지원에 의하여 수행되었음.

References

1. Chapin, D. M., Fuller, C. S. and Pearson, G. L., "A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power," *J. Appl. Phys.*, **25**, 676(1954).
2. O'Regan, B. and Gratzel, M., "A Low-cost, High-efficiency Solar Cell Based on Dye-sensitized Colloidal TiO₂ Films," *Nature*, **335**, 737(1991).
3. Rho, W., Jeon, H., Kim, H., Chung, W., Suh, J. and Jun, B., "Recent Progress in Dye-Sensitized Solar Cells for Improving Efficiency: TiO₂ Nanotube Arrays in Active Layer," *J Nanomaterials*, **2015**, 247689(2015).
4. Kim, J., Sim, E., Dao, V. and Choi, H., "Carbon Nanotube-based Nanohybrid Materials as Counter Electrode for Highly Efficient Dye-sensitized Solar Cells," *Korean Chem. Eng. Res.*, **54**(2), 262 (2016).
5. Suzuki, Y., Ngamsinlapasathian, S., Yoshida, R. and Yoshikawa, S., "Partially Nanowire-Structured TiO₂ Electrode For Dye-Sensitized Solar Cells," *Central Eur. J. Chem.*, **4**(3), 476(2006).
6. Kim, G., Kim, K., Cho, K. and Ryu, K., "Effects of Multi-layer and TiCl₄ Treatment for TiO₂ Electrode in Dye-sensitized Solar Cell," *Appl. Chem. Eng.*, **22**(2), 90(2011).
7. Gratzel, M., "Conversion of Sunlight to Electric Power by Nanocrystalline Dye-sensitized Solar Cells," *J. Photochem, Photobiol. A, Chem.*, **164**, 3(2004).
8. Law, M., Greene, L., Johnson, J., Saykally, R. and Yang, P., "Nanowire Dye-Sensitized Solar Cells," *Nat. Mater.*, **4**(6), 455(2005).
9. Tenne, R. and Rao, C. N. R., "Inorganic Nanotubes," *Philos. Trans. R, Soc. Lond. A*, **362**, 2099(2004).
10. Adachi, M., Murata, Y., Okada, I. and Yoshikawa, S., "Formation of Titania Nanotubes and Applications for Dye-Sensitized Solar Cells," *J. Electrochem. Soc.*, **150**, G488(2003).
11. Gong, D., Grimes, C. A., Varghese, O. K., Hu, W., Singh, R. S., Chen, Z. and Dickey, E. C., "Titanium Oxide Nanotube Arrays Prepared by Anodic Oxidation," *J. Mater. Res.*, **16**, 3331(2001).
12. Lee, Y. and Jung, J., "Preparation of Titania Nanotube Thin Films by Anodizing," *Korean Chem. Eng. Res.*, **49**(1), 28(2011).
13. Lee, Y. and Jung, J., "Preparation and Characterizations of Titania Nanotube Thin Films," *Korean Chem. Eng. Res.*, **49**(5), 652(2011).
14. Paulose, M., Shankar, K., Yoriya, S., Prakasham, H. E., Varghese, O. K., Mor, G. K., Latempa, T. A., Fitzgerald, A. and Grimes, C. A., "Anodic Growth of Highly Ordered TiO₂ Nanotube Arrays to 134 Microm in Length," *J. Phys. Chem. B*, **110**(33), 16179 (2006).
15. Paulose, M., Prakasham, H. E., Varghese, O. K., Peng, L., Popat, K. C., Mor, G. K., Desai, T. A. and Grimes, C. A., "TiO₂ Nanotube Arrays of 1000 μm Length by Anodization of Titanium Foil: Phenol Red Diffusion," *J. Phys. Chem. C*, **111**(41), 14992(2007).