ISSN : 1226-7244 (Print)
ISSN : 2288-243X (Online)
논문번호 21-01-11
j.inst.Korean.electr.electron.eng.Vol.25,No.1,69~75,March 2021
https://doi.org/10.7471/ikeee.2021.25.1.69

티타늄 박막을 이용한 염료감응형 태양전지 모듈 특성에 관한 연구

A Study on the Characteristics of Dye-sensitized Solar Cell Module Using Titanium Thin Film

오 병 윤*, 김 필 중*★

Byeong-Yun Oh*, Phil-Jung Kim*★

Abstract

In this work, we consider the fabrication method and electrical characteristics of dye-sensitized solar cells (DSSCs), which use titanium (Ti) metal thin films to replace expensive fluorine tin oxide (FTO) electrodes. The thickness of the Ti thin film was changed by adjusting the deposition time of the Ti, and the surface resistance decreased as the thickness of the Ti thin film became thicker. The thickness of the Ti thin film was shown to be similar to the surface resistance of the FTO thin film at approximately 190nm and the DSSC with a thickness of approximately 250nm showed the highest energy conversion efficiency of 4.24%. Furthermore, the possibility of commercialization was confirmed by fabricating and evaluating the DSSC module.

요 약

본 연구에서는 티타늄(Ti) 금속 박막을 사용해서 값비싼 산화주석(FTO) 전극을 대체된 염료감응형 태양전지(DSSC)의 제작 방법과 전기적 특성에 대해서 고찰하였다. Ti 박막의 증착 시간을 조절하여 박막의 두께를 변화시켰으며, Ti 박막의 두께가 두꺼워지면서 표면저항은 감소하였다. 대략 190nm 두께에서 FTO 박막의 표면저항과 비슷해짐을 알 수 있었으며, 250nm 두께에서 DSSC의 에너지 변환효율 4.24%로 가장 높았다. 더 나아가 DSSC 모듈을 제작해 평가함으로써 상용화의 가능성을 확인하였다.

Key words : Dye-sensitized solar cells (DSSCs), Titanium (Ti) metal thin film, Fluorine tin oxide (FTO) electrode, DSSC module, Energy conversion efficiency

Ⅰ. 서론

최근 그린뉴딜 정책으로 신재생, 친환경 에너지가 주목받고 있으며, 신재생 에너지는 기존의 화석연료를 재활용하거나 재생 가능한 에너지를 변환시켜 이용하는 에너지로 태양 에너지, 지열 에너지, 해양 에너지, 바이오 에너지 등이 있다[1]-[2].

태양광발전 시스템의 가장 핵심적인 태양전지의

* R&D Division, Cheomdanlab Inc.
* Dept. of Electronics, Chosun College of Science&Tech.
★ Corresponding author
E-mail : philjung@cst.ac.kr, Tel : +82-62-230-8835
※ Acknowledgment
Manuscript received Feb. 16, 2021; revised Mar. 22, 2021; accepted Mar. 22, 2021.
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.

기본 단위는 셀(cell)이며, 이 셀들을 직·병렬로 연결하여 패널 형태로 제작한 것을 모듈(module)이라고 한다. 태양전지는 크게 실리콘 태양전지와 박막 태양전지로 나눠질 수 있으며, 현재 글로벌 태양전지 시장을 주도하고 있는 태양전지는 실리콘 태양전지이다[2]-[3]. 실리콘 태양전지는 이미 상용화되었으나 주재료인 실리콘의 제조 공정이 복잡하고 생산단가가 비싸 대량 보급에 한계가 있어, 최근 새로운 소재인 페로브스카이트와 같은 박막 태양전지가 주목받고 있다[3].

박막 태양전지는 가격경쟁력 확보와 함께 유연성이 있는 태양전지의 개발이 진행되고 있으며, 박막 태양전지의 하나인 염료감응형 태양전지(DSSC, dye-sensitized solar cell)는 투명한 것이 특징이며 창문 자체를 태양전지로 만들 수 있다[4]. 염료감응형 태양전지는 다양한 학문 분야가 복합적으로 섞여 있어 광전극, 상대전극, 염료, 전해질, 대면적화를 위한 구조 등 수많은 연구가 진행되고 있다[5]-[7]. 이 중 태양전지 제작에는 2장의 투명전도성 기판(TCO, transparent conductive oxide)이 필요하며, 주로 산화주석(FTO, fluorine tin oxide) 유리기판을 사용하며 이는 전체 재료비 중 60%를 차지한다[8]. 제조단가를 절감하기 위해 투명전도성 기판을 대체하는 재료 및 구조의 연구가 진행되고, 주로 FTO 대체 물질로 티타늄(Ti)이 많이 연구되었으나 주로 단위 셀 평가에서 머물렀다[9]-[11].

본 연구에서는 염료감응형 태양전지 재료 저감 목적으로 Ti 박막을 전자빔 증착법을 사용하여 형성하고, 증착 시간을 달리하여 박막의 두께에 따라 단위 셀의 전기적 특성 변화를 관찰하며, 이 중 높은 변환효율 조건을 기반으로 모듈을 제작하여 전기변환효율 특성을 평가하고자 한다.

II. 본론

1. FTO 전극 대체 물질 선정

염료감응형 태양전지의 필수적인 4대 요소는 이산화티타늄(TiO_2), 백금(Pt), 염료(dye), 전해질(electrolyte)이며, 이와 더불어 재료비 원가에서 큰 비중을 차지하는 FTO 유리, 도전성 페이스트, 기타 보조재료로 구성되어 있다. 구조를 살펴보면 FTO 유리 위에 염료가 흡착된 TiO_2 박막으로 형성된 광전극과 다른 하나의 FTO 유리 위에 촉매작용을 하는 Pt가 형성된 상대전극이 서로 마주 보고 있으며, 내부는 전해질로 채워져 있다. 광전극과 상대전극으로 사용되는 FTO 유리는 전적으로 해외에 의존하고 있으며, 전체 염료감응 태양전지 재료비의 60%를 차지할 만큼 가격이 비싸다. 이러한 요인으로 염료감응 태양전지의 가격경쟁력이 떨어져 시장진입에 방해요인으로 작용하며 이를 대체할 수 있는 저렴한 기판을 개발할 필요성이 있다.

금속 전극 물질로 금(Au), 은(Ag), 인듐(in), 타이타늄(Ti), 알루미늄(Al), 철(Fe), 니켈(Ni), 등이 거론된다[8]-[12]. 태양광에 의해 생성되는 전자의 수송을 원활하게 하기 위해서는 산화물 반도체인 TiO_2와 금속 전극과의 계면에서 옴 접촉(ohmic contact)이 형성되는 것이 무엇보다 중요하다. 염료감응 태양전지에서 광전극으로 사용되는 TiO_2는 n-type의 반도체로서 전도 대역이 4.2eV 수준으로 전자 친화력이 4.2eV보다 조금 높다. 전극 물질로 사용되는 물질 중에 Au, Fe, Ni은 TiO_2와 금속 전극과의 계면에서 쇼트키 접촉(Schottky contact)이 형성되기 때문에 사용이 적합지 않다[12]. 이에 반해 In 및 Ag는 일함수가 4.12eV, 4.26eV로 옴 접촉이 형성되지만, 액체 전해질에 불안정하고, 4.28eV의 일함수를 갖는 Al의 경우는 장기안정성에 문제가 있다. 유일하게 금속 전극 후보물질 중에서 Ti 금속이 일함수 및 장기안정성 특성이 우수해 염료감응 태양전지의 FTO 물질을 대체하기에 적합하다. Ti 금속은 지구상에 매장량이 풍부하고 내부식성과 전도성이 우수한 특성을 가지고 있다.

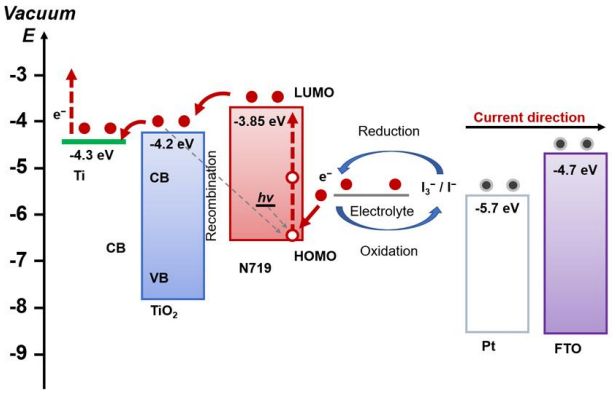

Fig. 1. DSSC with various energy levels.
그림 1. 염료감응형 태양전지 에너지 수준[7]

그림 1은 염료감응 태양전지의 에너지밴드 구조를 나타내고 있다[7]. 광전극으로 사용되는 TiO_2

물질은 4.26eV의 전도성 밴드 수준을 가지고 있으며, 일함수가 4.33eV를 갖는 Ti 금속은 TiO_2와 계면 접촉 물질로 적합할 뿐만 아니라 FTO의 에너지 수준과 비슷하다[7].

2. 실험 방법

박막을 형성시키는 방법에는 크게 물리적 증착(PVD, physical vapor deposition)법과 화학적 증착(CVD, chemical vapor deposition)법이 있는데, PVD법은 증착, 스퍼터링, 이온플레이팅법으로 나뉘고 증착에는 저항열, 아크방전, 전자빔, 레이저 등을 이용하는 방법들이 있다. 저항열을 이용하는 방법은 증발원과 원재료 물질이 직접 접촉하는 방식으로 증발원이 원재료 물질보다 고온이기 때문에 원재료 물질에 불순물 혼입, 원재료와 반응, 원재료 융점에 의한 제약 등의 문제가 있다. 이러한 문제를 회피하기 위해서 고안된 방법이 전자빔(electron beam)을 이용한 증착법이다. 전자빔을 이용한 진공증착은 매우 높은 전압을 가하여 필라멘트에서 방출된 열전자들을 원재료에 충돌시킴으로써 발생하는 열에 의해 원재료를 증발시켜 기판에 박막을 형성시키는 방법이다. 고진공하에서 도가니를 사용하므로 저항가열식의 단점인 오염이 비교적 적고 고에너지를 가진 열전자로 접촉하기 때문에 고융점 재료도 쉽게 증착을 할 수 있으며 증착 속도 조절이 용이하여 최근에 널리 사용되고 있는 증착 방법이다.

가. Ti 금속 물질 박막 형성

본 연구에서는 염료감응형 태양전지의 재료 저감 목적으로 FTO 유리기판 대신 Ti 박막을 전자빔 증착법(electron beam evaporator)을 사용하여 형성하였고, 박막의 두께에 따른 박박 특성을 분석하고자 하였다. 우선 유리(non-alkali glass) 기판을 15×13mm로 재단하고 초음파 세척기를 이용하여 세정하였다. 세정한 유리기판을 이빔 장비(electron beam evaporator)에 로딩한 후 2×10^{-6}Torr 고진공하에서 Ti 박막을 증착하였다. Ti 증착 시간을 조절하여 박막의 두께를 190nm에서 509nm까지 대략 50nm 간격으로 조절하였다.

나. DSSC 단위셀 제작 및 모듈 제작

(1) 단위셀 제작

Ti 금속 전극이 증착된 유리기판에 TiO_2(Ti-Nanoxide T/SP, Solaronix)를 닥터 블레이드 방법으로 코팅한 후 120℃에서 20분간 건조한 후 450℃에서 30분간 소성하였다. 소성 후 0.5mM N719(Ruthenizer 535 bis-TBA, Solaronix) 염료에 넣고 40℃에서 4시간 동안 염료를 흡착시킨 후, 에틸알코올을 이용하여 과흡착된 염료를 세척하여 광전극을 제작하였다. 상대전극은 FTO 유리기판 위에 백금(Solaronix, Platisol T/SP)을 닥터 블레이드 방법으로 코팅한 후 120℃에서 20분간 건조한 후 450℃에서 30분간 소성하였다. 광전극과 상대전극은 60㎛의 두께를 갖는 Surlyn(Meltonix 1170-60 series, Solaronix)을 사용하여 120℃에서 10분간 열을 가하여 샌드위치 모양으로 접합하였다. 전해액을 주입하여 염료감응형 태양전지 단위셀을 제작하였다. 전해액은 3-methoxypropionitrile 용액 내에 0.1M lithium iodide (LiI), 0.05M iodine(I_2), 0.5M 4-tert-butylpyridine, 0.6M IonLic DMPII (1,2-dimethyl-3-propylimidazolium iodide, Solaronix)으로 제조한 것을 사용하였다.

(2) 모듈 제작

Ti 금속 전극을 사용한 염료감응형 태양전지 모듈은 단위셀과 달리 하나의 기판 내에 셀들을 분리시켜 태양 빛에 의해 변환되는 전력을 증가시킬 수 있다. 설계된 모듈은 3셀의 Z-타입(type)이였으며, 유리기판을 43×46mm 크기로 재단하였다. 단위셀 공정과는 달리 Ti 박막을 레이저 패터닝해서 3개의 셀로 분리시켰으며 기판을 세척하였다. Ti 박막이 증착된 기판에 TiO_2 광전극 페이스트를 코팅해서 광전극 기판을 형성하고, 투명한 전도성 기판에는 Pt 페이스트를 인쇄하여 상대전극 기판을 형성하였다. 전자를 원활히 포집하기 위해서 도전성 페이스트를 인쇄해서 그리드(grid)와 버스바(busbar)를 형성시켰다. 120℃에서 건조공정을 거쳐 450℃에서 광전극 및 상대전극 기판을 소성한 후 광전극을 0.5mM N719 염료에 담지해 염료를 흡착하였다. 염료가 흡착된 광전극 기판과 상대전극 기판을 60㎛의 두께를 갖는 Surlyn을 사용하여 120℃에서 10분간 열을 가해 접합하였다. 최종적으로 전해질을 주입하고 외부를 실링하여 염료감응형 태양전지 모듈을 제작한 후 에너지 변환효율을 평가하였다.

그림 2는 염료감응형 태양전지 모듈 제작 공정을 나타내고 있으며, 사용한 재료는 단위셀 제조 방법에서 상용 것과 동일하다.

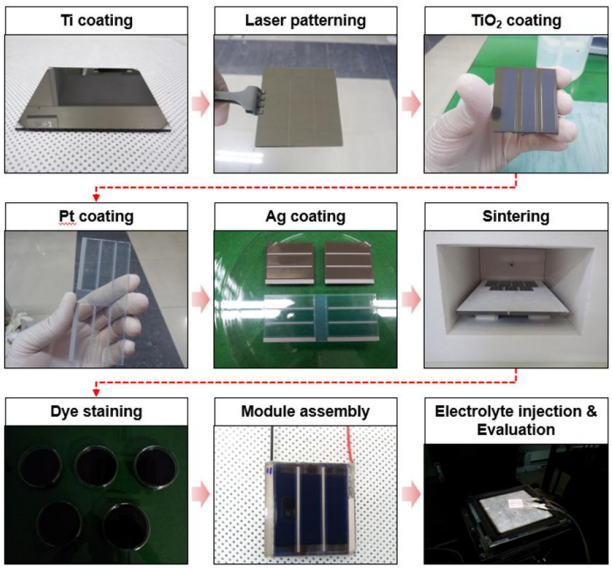

Fig. 2. DSSC module fabricating process diagram.
그림 2. 염료감응형 태양전지 모듈 제작 공정도

다. 박막 특성 평가

유리기판 위에 증착된 Ti 금속 전극은 면저항을 측정하기 위해 4-point probe(CMT-SR2000, CHANG MIN CO. LTD.)를 사용하였고, 표면형상과 두께를 확인하기 위해 FESEM(field emission scanning electron microscope, S-4700, Hitachi)을 이용하여 관찰하였다. 태양전지의 광전변환 특성은 AM 1.5 (100㎽/㎠) 조건 하에서 솔라시뮬레이터(solar simulator, WXS-155S-L2, WACOM)를 이용해서 측정하였다.

3. 실험 결과 및 분석

가. Ti 금속 박막 두께 변화에 따른 면저항 변화

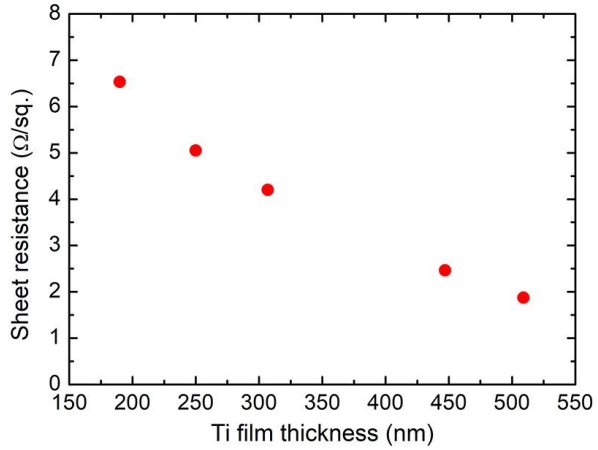

Fig. 3. Change in surface resistance according to Ti thin film thickness changes.
그림 3. Ti 박막 두께 변화에 따른 면저항 변화

그림 3은 이빔 장비(electron beam evaporator)를 이용해서 유리기판 위에 증착한 Ti 박막의 면저항을 두께에 따라 측정한 결과는 나타내고 있다. 박막의 두께가 두꺼워질수록 면저항은 지수 함수적으로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 상용 FTO 박막의 면저항은 대략 8Ω/sq.이며, 이때 두께는 대략 670nm 정도이다. 대략 Ti 두께가 190nm일 때 FTO 박막과 비슷한 면저항을 얻을 수 있었다.

나. Ti 금속 박막 두께 변화에 따른 표면형상 변화

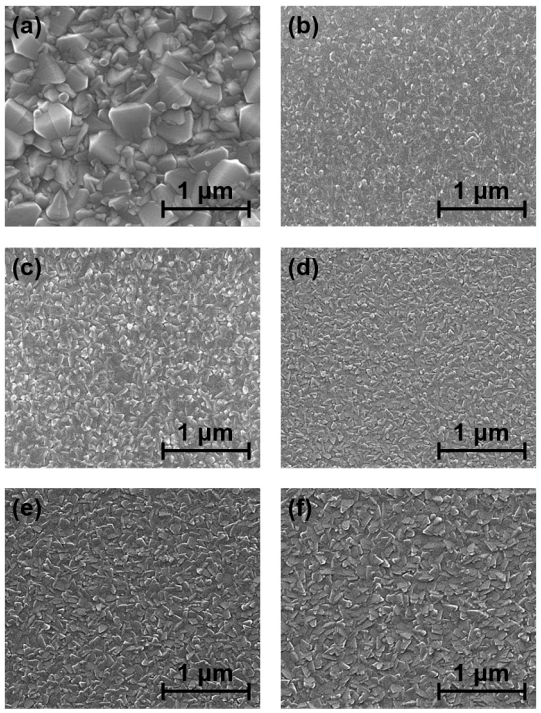

Fig. 4. (a) FTO thin film surface shape and change in surface shape with Ti thin film thickness of (b) 190 nm, (c) 250 nm, (d) 307 nm, (e) 447 nm, and (f) 509 nm.
그림 4. (a) FTO 박막 표면형상 및 Ti 박막 두께에 따른 표면형상 변화 [(b) 190nm, (c) 250nm, (d) 307nm, (e) 447nm, (f) 509nm]

그림 4는 유리기판 위에 증착한 Ti 박막 두께 변화에 따른 표면형상 변화를 보여주고 있다. 그림 4(a)는 FTO 박막의 표현 형상이며, 그림 4(b)에서 (f)까지는 그림 3과 동일한 샘플의 표면 형상을 나타내고 있다. Ti 박막의 두께가 두꺼워질수록 표면의 flat sheet grain들은 작은 덩이 모양(nubby)의 grain으로 변하였고, 다공성(porous)의 형상에서 치밀해지고 있음을 알 수 있다. 이것은 Ti 박막의 결정성이 향상됨을 의미한다. 이러한 형상은 빛을 산

란시켜 에너지 변환효율 향상을 가져올 수 있으며, Ti 금속 박막 위에 코팅될 TiO_2 광전극 재료와의 부착력이 향상될 것으로 기대된다. 염료감응형 태양전지에 사용되는 FTO 박막의 경우에도 박막 표면이 nubby grain의 형상을 하고 있으며 이로 인해 haze의 값은 증가하고 빛을 산란시켜 효율을 향상시켜준다.

다. Ti 금속 박막 두께 변화에 따른 염료감응형 태양전지 변환효율

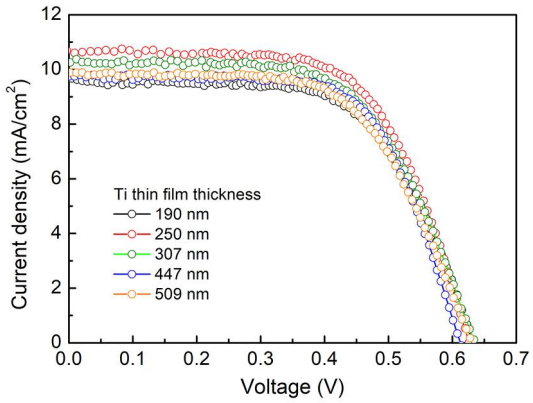

Fig. 5. DSSC energy conversion efficiency according to Ti thin film thickness changes.
그림 5. Ti 박막 두께 변화에 따른 DSSC 에너지 변환효율

그림 5는 Ti 박막 두께 변화에 따른 에너지 변환효율 곡선을 나타내고 있다.

그림 3에서 언급했듯이, Ti 박막 두께 변화에 따라 면저항 값이 감소되는 것을 알 수 있었다. 금속 박막이 전극용으로 사용될 때 저항이 낮게 되면 태양광에 의해 생성된 전자의 이송에 도움을 주기 때문에 박막의 두께 변화가 에너지 변환효율에 미치는 영향을 살펴보았다.

FTO 기판과 면저항이 비슷한 Ti 박막의 두께가 190nm일 때 에너지 변환효율은 3.78%였으며, 250nm일 때 최고의 효율인 4.24%를 보였다. 표 1은 Ti 박막 두께 변화에 따른 염료감응형 태양전지의 광전특성을 보여주고 있다.

여기서 Voc는 개방전압(open circuit voltage), Jsc는 단락전류밀도(short circuit current density), F.F는 충진율(fill factor), η은 에너지 변환 효율(energy conversion efficiency)이다.

Ti 박막의 두께가 두꺼워질수록 면저항이 감소하였기 때문에 에너지 변환효율이 지속적으로 증가

Table 1. Photovoltaic characteristics of DSSCs with change in Ti thin film thickness.
표 1. Ti 박막 두께 변화에 따른 염료감응 태양전지의 광전특성

Thickness (nm)	*Voc* (V)	*Jsc* (mA/cm²)	*F.F* (%)	*η* (%)
190	0.632	9.652	61.896	3.775
250	0.626	10.666	63.427	4.235
307	0.635	10.259	61.512	4.010
447	0.613	9.743	65.769	3.925
509	0.631	9.886	61.116	3.815

할 것으로 기대되었으나, 에너지 변환효율이 다시 감소하는 경향을 보였다. 이것은 Ti 박막의 두께의 두꺼워짐에 따라 단락전류밀도가 감소했기 때문으로 볼 수 있다[11].

라. Ti 금속 박막 두께 변화에 따른 염료감응형 태양전지 모듈의 변환효율

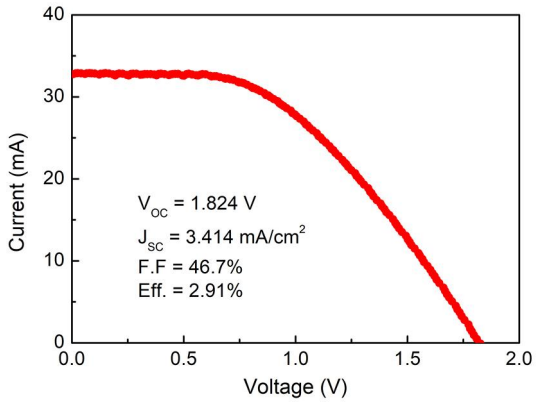

Fig. 6. DSSC module with Ti thin film and energy conversion efficiency.
그림 6. Ti를 적용한 DSSC 모듈 및 에너지 변환효율

단위 셀의 경우 대략 0.9V까지 전압 출력이 가능하지만, 실생활에 사용하기에는 너무나 작은 전압이기 때문에 상용화하기 위해서는 염료감응형 태양전지 모듈 개발이 필수적이다. 모듈의 구조는 Z-type, W-type, Parallel, 그리고 Monolithic 상호연결 모듈 등이 있다. 대부분 높은 출력전압으로 인해 Z-상호연결 모듈이 많이 연구되고 있다[13]. 그림 6은 3셀 염료감응형 태양전지 모듈의 에너지 광전변환 곡선을 나타내고 있다.

광전극의 유효면적은 9.6㎠였으며, 3셀로 분리되어 있으므로 개방전압(Voc)가 증가하였다. 태양전

지 모듈의 크기가 작기 때문에 상용화하기 위해서는 다소 작은 전압이긴 하지만, 소형기기의 구동하기엔 충분한 수준이다. 효율은 단위 셀에 비해 다소 감소된 경향을 보였고, 이것은 태양전지의 면적이 커지면서 내부저항 상승과 전자의 손실로 인해 발생되는 것으로 알려져 있다. 3셀 염료감응형 태양전지 모듈의 광전변환효율을 측정한 결과 평균 2.91%로 측정되었다.

Ⅲ. 결론

본 연구에서는 염료감응형 태양전지(DSSC) 제조단가를 상승시키는 주원인 중 하나인 산화주석(FTO) 도전성 재료를 대체할 수 있는 물질에 대해 고찰하였다. 도전성 재료를 대체할 수 있는 물질로 티타늄(Ti) 금속 전극 사용을 제안하였으며, 전기적 특성을 향상시키기 위해서 Ti 박막의 두께 변화하였다. Ti 박막의 두께가 두꺼워질수록 표면의 미세 입자들은 작은 덩이 모양의 입자로 변하였고, FTO 기판보다 낮은 8Ω/sq. 이하의 면저항을 갖는 Ti 박막의 두께는 250nm 이상이었다. Ti 박막의 두께가 250nm일 때 DSSC 에너지 광전변환 효율이 4.24%까지 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보였다. 이것은 단락전류밀도가 감소했기 때문으로 볼 수 있다. 더 나아가 상용화의 가능성을 평가하기 위해서 3셀 DSSC 모듈을 제작하였고, 태양전지 면적이 커지면서 내부저항 상승과 전자의 손실로 인해 셀 효율보다 낮은 2.91%로 얻을 수 있었다.

References

[1] D. Gielen, F. Boshell, D. Saygin, M. D. Bazilian, N. Wagner and R. Gorini, “The role of renewable energy in the global energy transformation,” *Energy Strateg. Rev.*, vol.24, pp.38-50, 2019.
DOI: 10.1016/j.esr.2019.01.006

[2] J. Oyekale, M. Petrollese, V. Tola and G. Cau, “Impacts of renewable energy resources on effectiveness of grid-integrated systems: succinct review of current challenges and potential solution strategies,” *Energies*, vol.13, pp.4856(48pp), 2020.

[3] G. M Wilson, M. Al-Jassim, W. K Metzger, S. W Glunz, P. Verlinden, G. Xiong, L. M Mansfield, B. J Stanbery, K. Zhu, Y. Yan, J. J Berry, A. J Ptak, F. Dimroth, B. M Kayes, A. C Tamboli, R. Peibst, K. Catchpole, M. O Reese, C. S Klinga, P. Denholm, M. Morjaria, M. G Deceglie, J. M Freeman, M. A Mikofski, D. C Jordan, G. TamizhMani and D. B Sulas-Kern, “The 2020 photovoltaic technologies roadmap,” *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol.53, pp.493001(47pp), 2020. DOI: 10.1088/1361-6463/ab9c6a

[4] H. M. Lee and J. H. Yoon, “Power performance analysis of a transparent DSSC BIPV window based on 2 year measurement data in a full-scale mock-up,” *Appl. Energ.*, vol.225, pp.1013-1021, 2018. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.04.086

[5] B.-Y. Oh, J Jang, G.-S. Heo, H. C. Ki and M.-H. Ham, “Binder-free pastes fabricated from sol-gel-derived TiO_2 by ammonia addition for low-temperature photoelectrodes,” *Sci. Adv. Mater.*, vol.6, no.11, pp.2496-2500, 2014.
DOI: 10.1166/sam.2014.2233

[6] A. Aslam, U. Mehmood, M. H. Arshad, A. Ishfaq, J. Zaheer, A. U. H. Khan and M. Sufyan, “Dye-sensitized solar cells (DSSCs) as a potential photovoltaic technology for the self-powered internet of things (IoTs) applications,” *Sol. Energy*, vol.207, pp.874-892, 2020.
DOI: 10.1016/j.solener.2020.07.029

[7] N. Katumo, S. W. Mugo, J. M. Ngaruiya, P. K. Ngumbi and B. M. John, “Graphene supported platinum counter electrode for dye sensitized solar cells,” *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.*, vol.4, no.12, pp.12251-12258, 2015.
DOI: 10.1021/am200721x

[8] K. S. Lee, H. K. Lee, D. H. Wang, N.-G. Park, J. Y. Lee, O. O. Park and J. H. Park, “dye-sensitized solar cells with Pt- and TCO-free counter electrodes,” *Chem. Commun.*, vol.46, pp.4505-4507, 2010.

[9] H. Y. Jeong, H. C. Ki and H. B. Goo, “Fabrication of TCO-less Dye-sensitized Solar Cells by Using Low Cost Ti Layer Deposited Glass Substrate,” *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, vol.27, no.11, pp.725-729, 2014.

DOI: 10.4313/JKEM.2014.27.11.725
[10] S. Y. Park, H. W. Seo, M. G. Son, S. K. Kim, N. Y. Hong, J. Y. Song, Prabakar and H. J. Kim, "A Study on FTO-less Dye Sensitized Solar Cell with Ti Deposited Glass," *Trans. Korean. Inst. Elect. Eng.*, vol.62, no.2, pp.208-212, 2013. DOI: 10.5370/KIEE.2013.62.2.208
[11] Y. H. Joo, N.-H. Kim and Y. S. Park, "Characteristics of Ti thin films and application as a working electrode in TCO-less dye-sensitized solar cells," *Trans. Electr. Electron. Mater.*, vol.18, no.2, pp.93-96, 2017.
[12] D. Ding, K. Liu, S. He, C. Gao and Y. Yin, "Ligand-exchange assisted formation of Au/TiO_2 Schottky contact for visible-light photocatalysis," *Nano Lett.*, vol.14, no.11 pp.6731-6736, 2014.
DOI: 10.1021/nl503585m
[13] H. Seo, M. Son, J. Hong, D.-Y. Lee, T.-P. An, H. Kim and H.-J. Kim, "The fabrication of efficiency-improved W-series interconnect type of module by balancing the performance of single cells," *Sol. Energy*, vol.83, pp.2217-2222, 2009. DOI: 10.1016/j.solener.2009.09.003

BIOGRAPHY

Byeong-Yun Oh (Member)

2004 : B.S. degree in Physics, Hanseo University.
2006 : M.S. degree in Metallurgical Engineering, Yonsei University.
2011 : Ph.D. degree in Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University.
2011~2013 : Director, Optical Device Research Institute, LINKLINE I&C Co., Ltd.
2013~2014 : Research Fellowship, Materials Science and Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology (GIST).
2015~2018 : Chief Executive Officer (CEO), Adminstration Division, ZeSHTech Co., Ltd.
2018~2020 : Director, Research and Development Division, BMC Co., Ltd.
2020~Present : Director, Research and Development Division, Cheomdanlab Inc.

Phil-Jung Kim (Member)

1994 : B.S. degree in Electronic Engineering, Chosun University.
1996 : M.S. degree in Electronic Engineering, Chosun University.
2000 : Ph.D. degree in Electronic Engineering, Chosun University.
1996~1999 : Researcher, Memory Research & Development Center, SK Hynix Inc.
2001~2012 : Assistant Professor, Dept. of IT, Sunghwa College.
2015~Present : Assistant Professor, Dept. of Electronics, Chosun College of Science&Technology.