

자가발전 스마트 액정 윈도우를 위한 염료감응 태양전지 서브 모듈 설계 및 평가

오병윤 

(주)첨단랩 기업부설연구소

Design and Evaluation of Dye-Sensitized Solar Cell Submodule for Self-Powered Smart Liquid Crystal Window

Byeong-Yun Oh

Research and Development Department, Cheomdanlab Inc., Gwangju 61009, Korea

(Received April 2, 2024; Revised April 16, 2024; Accepted April 17, 2024)

Abstract: The possibility of a dye-sensitized solar cell (DSSC) submodule was evaluated as an independent power source that can drive a smart liquid crystal window (SLW) that selectively blocks sunlight when electricity is applied. In order to save energy and increase the functionality of buildings, SLW operation was supplied directly from DSSC submodule, rather than connecting to the existing power system and external power sources. It was confirmed that the SLW can control light transmittance through self-generation using the DSSC submodule composed of 6 cells at low light of 2,500 lux. These results imply that there is a high possibility of combining smart windows and DSSCs suitable for window-type building-integrated photovoltaic (BIPV) systems. DSSCs, which can self-generate power in low light, are expected to increase their usability in urban BIPV systems through combination with smart window technology.

Keywords: Dye-sensitized solar cell, DSSC submodule, Smart liquid crystal window, Building integrated photovoltaic, Low light

1. 서론

스마트 윈도우 기술은 전기적인 자극을 주어 자연광 및 인공광을 선택적으로 차단하는 기능을 구현하는 것이다 [1]. 이 기술은 스마트 빌딩에서 스스로 실내 온도를 조절해 에너지 절감 기능을 하며 커튼이나 블라인드 스크린처럼 작동하여 채광·차광을 조절한다 [1,2]. 유리의 투명/불투명 상태 전환과 빔 프로젝터 스크린 등으로 활용해 사

무실, 회의실, 매장 쇼윈도, 인테리어, 전시장, 쇼케이스, 디지털 특수영상 연출 등 다양한 분야에 적용할 수 있다. 스마트 윈도우는 유리와 필름 형태로 종류로는 로이유리, 열변색 유리(thermochromic), 광변색 유리(photochromic)의 수동형과 고분자 분산형 액정(PDLC), 분극 입자 배향형 소자(SPD), 전기변색 유리(EC) 기술의 능동형이 있다 [1]. 능동형 스마트 윈도우는 액정 등을 이용해 인위적으로 외부 자극(스위치 on/off)을 인가해 햇빛을 선택적으로 조절하는 방식으로 건축 에너지 효율화 정책 기조에 맞추어 건물 일체형 태양전지(BIPV)와 함께 스마트빌딩 기술의 주요한 구성요소가 되고 있다 [3-5]. 참고 문헌에 의하면, 스마트 윈도우를 동작하기 위한 전원의 공급은 기존 전력 계통 또는 외부 전원으로 연결하는 방식에서 벗어나 태양 광

✉ Byeong-Yun Oh; ohnleeu@nate.com

Copyright ©2024 KIEEME. 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.

원을 활용할 수 있는 투광형 태양전지를 활용하여 편의성과 심미성을 개선하는 연구가 진행 중이다. 즉 스마트 윈도우 구동을 위한 독립전원 기술로서 BIPV와 스마트 윈도우 기술의 결합을 통하여 활용성은 더욱 증대되고 있다 [4,5].

창문형 스마트 윈도우는 햇빛이 직접적으로 창문에 입사될 때 주로 빛을 차단하는 역할을 하지만, 임의로 실내 분위기 연출 및 사생활 보호를 위해 조명 또는 조도가 낮은 난반사된 자연광을 차단하는 경우도 있다. 일반적인 태양전지의 경우 조도가 낮은 음영 지역에서는 전력 생산이 어려워 스마트 윈도우의 기능을 발휘하기가 쉽지 않다. 현재의 도시환경은 고층 건물들이 들어서고 있으며, 이러한 고층 건물로 인하여 장소에 따라 일조량이 천차만별이다. 따라서 폭넓은 광도 범위에서 전력 생산이 용이한 태양전지에 대한 연구가 시급하다. 후보군으로 염료감응 태양전지는 기존 태양전지에 비해 적은 빛으로도 고효율의 에너지 변환이 가능하며, 가시광선을 통과시키는 투명한 성질과 염료에 따른 다양한 색 발현이 가능해 외장 BIPV용 태양전지나 자동차, 생활용품 등에 유리 패널로 대체할 수 있는 특징이 있다 [6]. 또한 음영 지역과 같은 저조도에서도 전력발전이 가능해 실내 가전 기기와 사물인터넷(IoT)에 저전력 발전용 태양전지라도 응용 가능성이 매우 높다 [6,7].

본 연구에서는 스마트 윈도우와 결합하기 위해서 폭넓은 광도에서도 전력 생산이 가능한 염료감응 태양전지 서브 모듈 설계와 제작을 통해 조도가 낮은 음영지역에서 스마트 액정 윈도우와 연결하여 독립전원으로서의 가능성을 평가하였다. 염료감응 태양전지 서브 모듈을 설계하기 위해서 스마트 액정 윈도우의 전압과 투과율의 상관관계를 통해 필요한 구동 전압을 확인하였다.

2. 스마트 액정 윈도우 구동용 염료감응 태양전지 서브 모듈 설계 및 제작

2.1 스마트 액정 윈도우 전압-투과도 특성

스마트 액정 윈도우는 액정 디스플레이(LCD) 셀을 대면적으로 제작한 것으로 인가 전압 변화에 따라 투과도 조절이 가능하다. LCD 제작 및 특성에 대해서는 연구 학술지와 기사에 많이 소개되어 있으며, 빛/전기적 신호로 변환된 정보를 영상이나 그림, 문자 등의 화상 정보를 변환시켜 주는 장치를 말한다 [8,9]. 스스로 발광하지 않기 때문에 전력을 거의 소비하지 않는다. 백라이트가 없는 LCD를 주로 사용하는 휴대용 계산기의 경우, 작은 태양광 패널이나 저용량 배터리만으로도 긴 수명을 가진다. 대부분의 LCD의

경우 후면에 백라이트를 두고, 전면에 액정을 두어 액정이 전기신호에 따라 빛을 차단하거나 통과시키는 방식으로 빛을 낸다. 이러한 특성으로 인해 스마트 윈도우의 기능과 유사하다고 볼 수 있다 [8,9].

액정은 고체와 액체의 성질을 동시에 가지는 물질로, 평상시에는 액정의 불규칙한 배열이 빛의 진동 방향을 바꾸어 한 번 편광판에 걸리진 빛이 다음 편광판을 통과할 수 있지만, 전압을 가하면 액정의 배열이 한 패턴으로 고정되어 한 번 편광판을 통과한 빛이 첫 번째 편광판과 수직으로 배열된 두 번째 편광판을 통과하지 못하고 차단된다. 이런 특징을 가진 LCD는 액정의 편광 정도를 조절하여 입사되는 빛을 투과/차단하는 역할을 할 수 있다. 그림 1은 LCD 기술을 이용한 스마트 액정 윈도우의 전압-투과율 특성을 보여주고 있으며, 인가 전압 변화에 따라 투과율이 변하는 것을 볼 수 있다. 스마트 액정 윈도우는 normally white mode로 작동하며, 전압을 인가하지 않을 때 빛이 통과하게 되고, 전극에 전압을 인가하면 빛이 통과하지 못한다 [9].

여기서 $V_{90\%}$ 은 투과 수준(transmission level)의 90%에서의 전압을 말하며, 문턱 전압(V_{th})이라고 한다. $V_{10\%}$ 은 투과 수준의 10%에서의 전압을 말하며, 포화 전압(V_{sat})이라고 한다. 제작한 스마트 액정 윈도우의 문턱 전압은 1.33 V이고, 포화 전압은 2.36 V를 보였다. 결과적으로 3 V의 전압을 인가하면 스마트 액정 윈도우가 구동될 수 있음을 확인하였다.

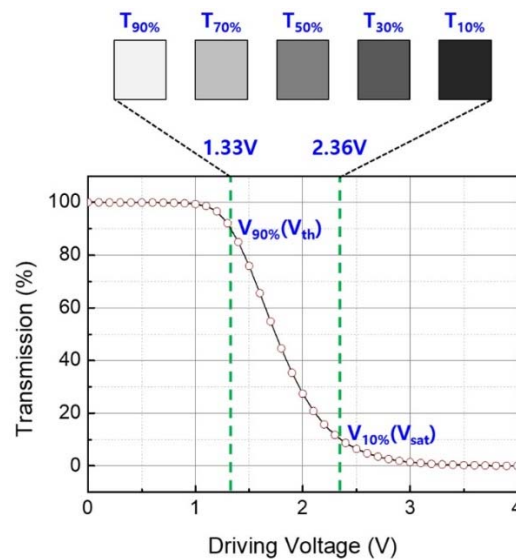


Fig. 1. Correlation between smart liquid crystal window operating voltage and light transmittance.

2.2 염료감응 태양전지 서브 모듈 설계 및 제작

2.2.1 염료감응 태양전지 서브 모듈 설계

스마트 액정 윈도우를 구동시키기 위해서는 약 3 V 전압이 필요하며, 필요한 전압을 발생시키기 위해서 염료감응 태양전지 서브 모듈을 설계하였다. 염료감응 태양전지의 한 개 셀에서 발전할 수 있는 기전력은 두 전극 사이의 산화/환원 소재, Li 이온 전해질을 포함하는 구조로 0.6~0.9 V이다 [4]. 태양전지 한 개 셀의 기전력 0.6 V를 가정하면, 3 V를 얻기 위해서는 5셀을 직렬로 연결해야 한다. 하지만 자연광은 구름이 없는 맑은 날을 제외한 구름에 의해 햇빛

이 가려지고, 높은 건물들에 의해 직접 햇빛이 닿지 않는 저조도 음영 지역을 고려하면 조금 더 높은 전압이 필요하다.

본 연구에서는 조도가 낮은 환경을 고려해서 6셀을 갖는 염료감응 태양전지 서브 모듈을 설계하였다. 서브 모듈의 구조는 Z 타입, W 타입, 모놀리딕(monolithic) 타입, 그리고 In-plane의 서브 모듈이 있으며, 대부분 높은 출력 전압으로 인해 Z 타입의 모듈이 많이 연구 개발되고 있다 [10,11].

그림 2는 염료감응 태양전지 Z 타입 서브 모듈의 단면을 나타내고 있다. 염료감응 태양전지의 구조는 투명전극 필름이 증착된 두 유리 기판을 양극(염료가 흡착된 나노 구조의 다공성 TiO₂ 박막, 광전극)과 음극(Pt, 상대전극)으로 나누고, 그 사이에 위치한 전해질(I⁻/I₃⁻의 산화 환원 쌍)로 이루어져 있다. 더불어 전해질이 두 기판 사이에서 새어나오지 않기 위해서 실링재(encap)와 셀에서 이웃한 셀로 전자가 이동할 수 있도록 전도성 물질(silver grid)로 구성된다 [10,12].

서브 모듈을 설계하는 데 가장 고려해야 하는 점은 양극 셀의 폭이며 약 8 mm로 설계하였다 [11]. 이 기준에 따라 대부분의 치수가 결정되고, 그림 3은 설계된 6셀 서브 모듈의 2D 도면을 보여주고 있다.

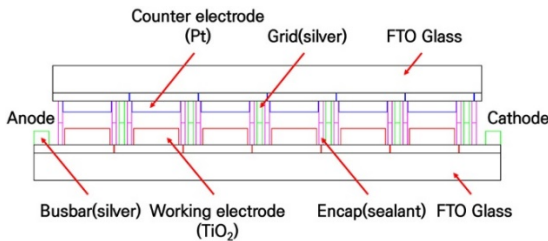


Fig. 2. Sectional structure of Z-type dye-sensitized solar cell submodule.

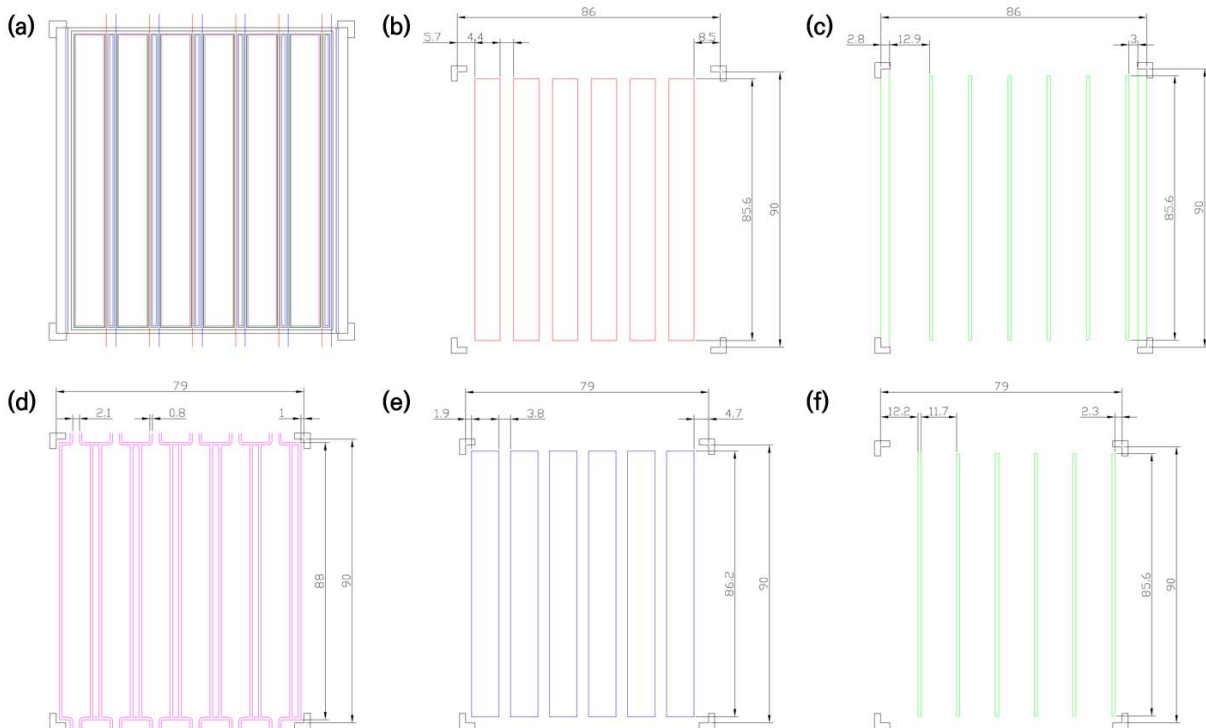


Fig. 3. Design of (a) the dye-sensitized solar cell submodule consisting of 6 cells with laser patterning, (b) TiO₂ photoelectrode, (c) silver grid and busbar, (d) sealant, (e) Pt counter electrode, and (f) silver grid.

6개 셀로 구성된 서브 모듈은 인쇄 방식으로 태양전지 소재를 코팅하기 위해 스크린 마스크를 설계하여야 한다. 셀을 분리하기 위한 레이저 패터닝, 광전극, 상대전극, 양극 및 음극용 그리드, 접합용 실링재 총 6개의 도면을 설계하였다. 일반적으로 서브 모듈 스크린 마스크의 개수는 양극과 음극의 유리 기판 크기가 동일하기 때문에 4개 또는 5개로 설계하는 것이 일반적이지만, 본 연구에서는 스마트 액정 윈도우와 태양전지와의 전극 연결을 쉽게 하기 위해서 태양전지의 양극과 음극 유리 기판 크기를 다르게 설계하였고, 이에 따라 서브 모듈 스크린 마스크 개수가 하나 더 많다.

2.2.2 염료감응 태양전지 서브 모듈 제작

염료감응 태양전지 6셀 서브 모듈은 그림 4의 순서대로 제작되었다. 서브 모듈의 anode 기판 면적은 86×90 mm 였으며, cathode 기판 면적은 79×90 mm였다.

서브 모듈을 제작하기 위해서 불소 도핑 산화주석(FTO, 8 Ω/sq., Pilkington) 기판을 재단한 후 세척하였다. 셀을 분리하기 위해 레이저(3-λ femtosecond pulsed laser)를 이용해서 일정한 간격으로 패터닝을 한 후 세척하였다. 스크린 프린팅 방법으로 광전극 Titania paste (Ti-Nanoxide T/SP, Solaronix)를 FTO 기판 위에 인쇄하였고, 상대전극 Platinum paste (Platisol T/SP, Solaronix)를 FTO 기판 위에 인쇄한 후 120°C에서 10분 건조하였다.

광전극 기판에 conductive paste (S-3600, iMD)를 인쇄한 후 120°C/10분 건조한 후 400°C/30분 소성하였고, 상대전극 기판에 conductive paste를 인쇄한 후 120°C/10분 건조한 후 450°C/30분 소성하였다. 소성한 광전극 기판을 0.5 mM ruthenium dye (Ruthenizer 535-bisTBA, Solaronix)에 침지시켜 40°C/4시간 염료를 흡착하고, 무수에탄올을 이용하여 세척한 후 건조하였다. 광전극 기판에 자외선(UV) curing sealant (TB3035B,

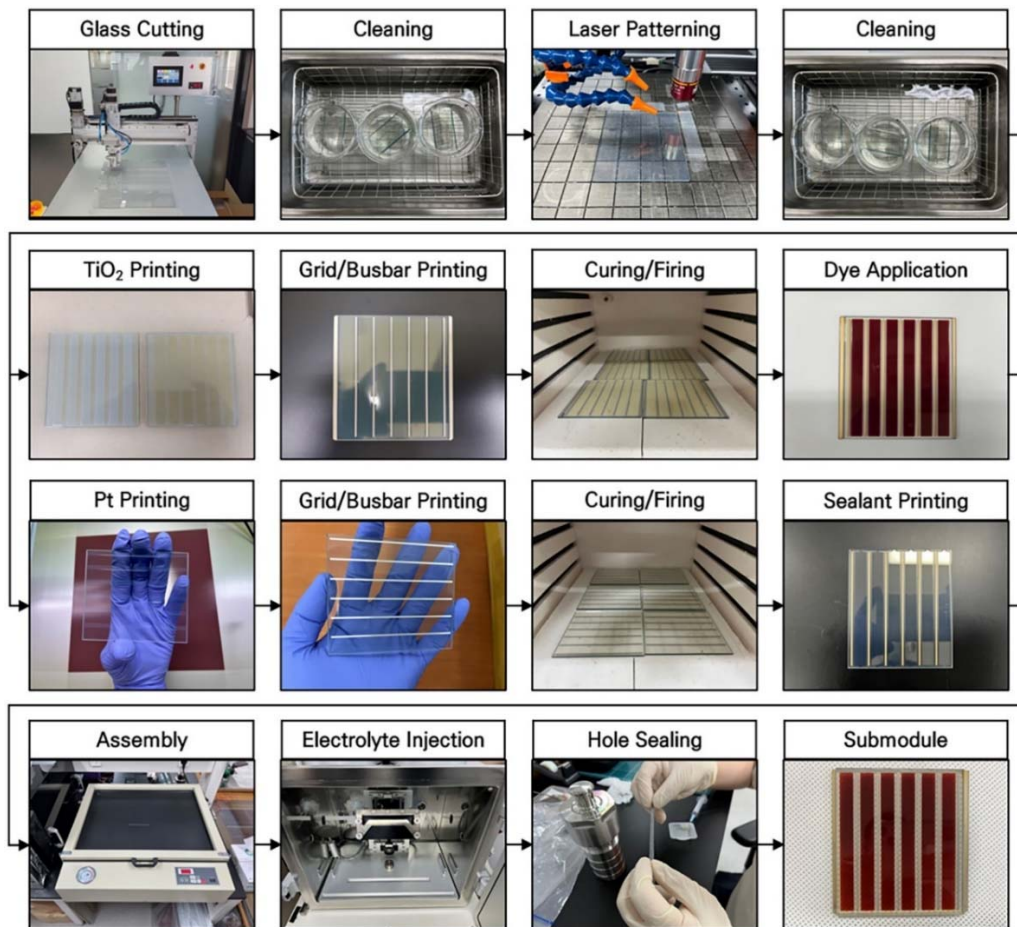


Fig. 4. Manufacturing process of the dye-sensitized solar cell submodule consisting of 6 cells.

ThreeBond)를 인쇄한 후 상대전극 기판과 서로 맞대 UV 조건에서 진공압을 가한 후 30초간 접합하였다. Electrolyte (Iodolyte AN-50, Solaronix)을 서브 모듈 내에 주입한 후 주입구를 실링해 염료감응 태양전지 6셀 서브 모듈 제작을 완성하였다.

3. 염료감응 태양전지 서브 모듈 평가 및 저조도 음영 지역에서 스마트 액정 윈도우 구동 결과

3.1 염료감응 태양전지 서브 모듈의 에너지 변환효율 평가

염료감응 태양전지 6셀 서브 모듈의 에너지 변환효율은 solar simulator (K3000 LED100 Solar Cell I-V Parameter Test System, McScience Inc.)을 이용하여 2,500 lux 조건에서 측정하였다.

일반적으로 나무 그늘의 음영 지역은 10,000 lux 정도이며, 2,500 lux는 이보다 조도가 4배 낮은 조건으로 전자 부품 조립공정의 조도보다 조금 높은 수준이다. 음영 지역보다 더 낮은 조도임에도 개방 전압(V_{oc})은 2.91 V로 측정되었으며, 단락 전류(I_{sc})는 약 1.15 mA로 보였다. 스마트 액정 윈도우를 구동시키기 위해서는 태양전지의 출력 전압이 중요하며, 측정된 V_{max} 의 값은 2.41 V였다. 이 값은 앞에서 언급된 스마트 액정 윈도우의 포화 전압 2.36 V보다 조금 높은 수치이므로 90% 이상 투과율 변화 조절이 가능하다. 2.53 mW의 최대출력과 5.76% 에너지 변환효율이 측정되었다.

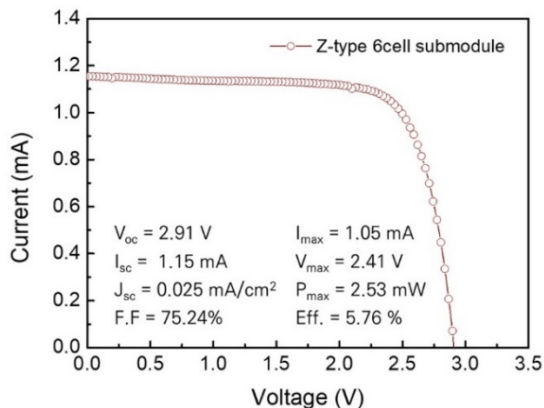


Fig. 5. Current-voltage characteristic curve of the dye-sensitized solar cell submodule consisting of 6 cells under the low light intensity of 2,500 lux.

3.2 음영 지역 조건에서 스마트 액정 윈도우 구동 결과

설계한 염료감응 태양전지 서브 모듈이 음영 지역에서 스마트 액정 윈도우를 작동시킬 수 있는지를 확인하였다. 그림 6은 햇빛이 직접 비치지 않는 건물 밖에서 태양전지로부터 발생하는 전력을 이용해 스마트 액정 윈도우의 투과율 변화를 보여주고 있다.

그림 6(a)는 스마트 액정 윈도우에 전압을 가하지 않은 상태로 빛을 투과시키기 때문에 스마트 액정 윈도우를 통해서 실외 배경을 볼 수 있으며, 그림 6(b)는 염료감응 태양전지 서브 모듈로부터 발생한 전압이 스마트 액정 윈도우에 인가되어 빛의 투과를 차단해 실외 배경을 볼 수 없다. 결과적으로 음영 조건에서 염료감응 태양전지 서브 모듈로부터 발생하는 독립전원을 이용해서 스마트 액정 윈도우에 전압을 인가해 스마트 액정 윈도우가 원활하게 작동되므로 염료감응 태양전지 서브 모듈 설계가 잘 되었다는 것을 알 수 있다.

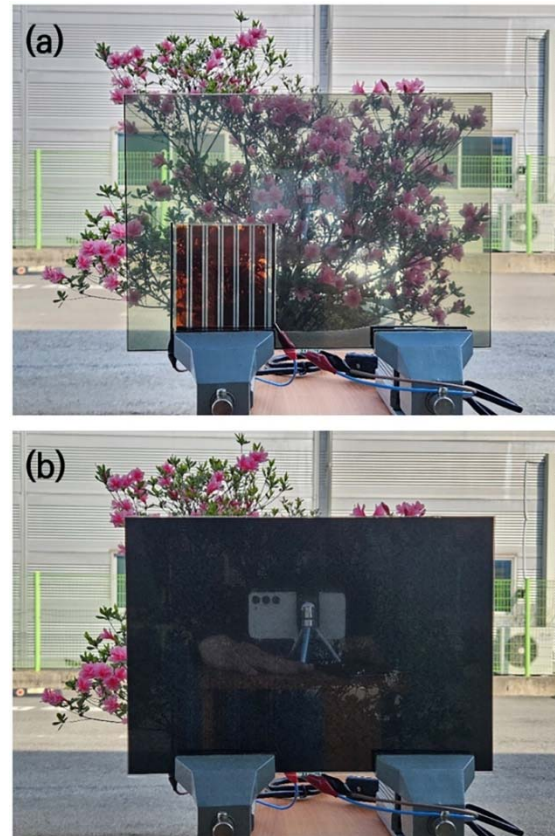


Fig. 6. Voltage-transmittance change of smart liquid crystal window due to voltage applied from dye-sensitized solar cell submodule operating in shaded area: (a) off state and (b) on state.

4. 결론

본 연구에서 음영 지역에서 스마트 액정 윈도우에 전력 공급을 위해 염료감응 태양전지 서브 모듈을 설계하였다. 이를 위해 스마트 액정 윈도우의 전압과 투과율의 상관관계를 통해 필요한 구동 전압을 확인하였고, 필요한 전압을 얻기 위해 염료감응 태양전지를 6셀로 분리했다. 스마트 액정 윈도우의 포화 전압 2.36 V보다 높은 2.41 V 전압을 얻음으로써 음영 지역에서 스마트 액정 윈도우가 잘 구동됨을 확인하였다. 이러한 결과는 염료감응 태양전지 서브 모듈 설계가 잘 되었다는 것을 의미하며, 가까운 미래에 스마트 윈도우 구동을 위한 독립전원 기술로서 BIPV와 스마트 윈도우 기술의 결합을 통한 활용성이 더욱 기대된다.

ORCID

Byeong-Yun Oh

<https://orcid.org/0000-0002-6638-8947>

감사의 글

이 논문은 2021년 산업통상자원부의 재원으로 한국산업단지공단 산하 산업집적지경쟁력강화 사업의 지원을 받아 수행한 연구 결과임(과제번호: IRGJ2104). 스마트 액정 윈도우 제작에 도움을 주신 한국생산기술연구원 허기석 수석님께 감사드리며, 염료감응 태양전지 에너지 변환효율 측정에 도움을 주신 한국광기술원 기현철 책임님께 감사드립니다.

REFERENCES

[1] S. Wu, H. Sun, M. Duan, H. Mao, Y. Wu, H. Zhao, and B. Lin, *Cell Rep. Phys. Sci.*, **4**, 101370 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2023.101370>

[2] M. N. Mustafa, M.A.A.M. Abdah, A. Numan, A. Moreno-Rangel, A. Radwan, and M. Khalid, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, **181**, 113355 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113355>

[3] Q. Lin, Y. Zhang, A. V. Mieghem, Y. C. Chen, N. Yu, Y. Yang, and H. Yin, *Energy Build.*, **223**, 110173 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110173>

[4] K. S. Lee, J. W. Lim, M. Kang, K. H. Kim, and H. Ryu, *Electron. Telecommun. Trends*, **34**, 36 (2019).
doi: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2019.J.340504>

[5] S. H. Pyun, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **28**, 753 (2015).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2015.28.12.753>

[6] J. Barichello, P. Mariani, L. Vesce, D. Spadaro, I. Citro, F. Matteocci, A. Bartolotta, A. D. Carlo, and G. Calogero, *J. Mater. Chem. C*, **12**, 2317 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1039/D3TC03220E>

[7] M. C. Sil, L. S. Chen, C. W. Lai, Y. H. Lee, C. C. Chang, and C. M. Chen, *J. Power Sources*, **479**, 229095 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.229095>

[8] H. W. Chen, J. H. Lee, B. Y. Lin, S. Chen, and S. T. Wu, *Light: Sci. Appl.*, **7**, 17168 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1038/lsa.2017.168>

[9] J. Jung, H. B. Park, H. Y. Jung, S. E. Jung, S. G. Kim, T. H. Kim, Y. J. Lim, B. C. Ku, M. S. Kim, and S. H. Lee, *J. Inf. Disp.*, **25**, 121 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1080/15980316.2023.2281224>

[10] A. Fakhruddin, R. Jose, T. M. Brown, F. Fabregat-Santiago, and J. Bisquert, *Energy Environ. Sci.*, **7**, 3952 (2014).
doi: <https://doi.org/10.1039/c4ee01724b>

[11] B. Y. Oh, S. K. Kim, and D. G. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **26**, 298 (2013).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2013.26.4.298>

[12] M. Kokkonen, P. Talebi, J. Zhou, S. Asgari, S. A. Soomro, F. Elsehrayy, J. Halme, S. Ahmad, A. Hagfeldt, and S. G. Hashmi, *J. Mater. Chem. A*, **9**, 10527 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1039/D1TA00690H>