

건물 부착형 고경량 유연성 싱글드 태양광 모듈

김민섭 · 박민준 · 신진호 · 이은비 · 정채환*
한국생산기술연구원 그린에너지나노연구그룹, 광주광역시, 61012

Fabrication of Lightweight Flexible c-Si Shingled Photovoltaic Modules for Building-Applied Photovoltaics

Minseob Kim · Min-Joon Park · Jinho Shin · Eunbi Lee · Chaehwan Jeong*

Green Energy & Nano Technology R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Gwangju 61012, Korea

Received November 9, 2022; Accepted December 5, 2022

ABSTRACT: Lightweight and flexible photovoltaic (PV) modules are attractive for building-integrated photovoltaic (BIPV) applications because of their easy construction and applicability. In this study, we fabricated lightweight and flexible c-Si PV modules using ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) front cover and shingled design string cells. The ETFE front cover instead of glass made the PV modules lighter in weight, and the shingled design string cells increased the flexibility. Finally, we fabricated a PV module with a conversion power of 240.08 W at an area of 1.25 m² and weighed only 2 kg/m². Moreover, to check the PV module's flexibility, we conducted a bending test. The difference of conversion power between the modules before and after bending shown was only 1.7 W, which showed a power reduction rate of about 0.7%.

Key words: Lightweight, Flexible photovoltaic modules, Building-integrated photovoltaic, Ethylene tetrafluoroethylene, Shingled design

1. 서론

최근 화석연료 사용으로 인해 배출된 다량의 온실가스로 인하여 발생한 기후변화 위기에 대응하기 위하여 세계 각국은 대응 방안을 수립하고 있다¹⁾. 이에 사용 전력을 재생 에너지로 대체하도록 노력하고 있으며, 태양광 발전 시장은 이러한 각국의 기후변화 대응 관련 요구에 발맞춰 빠르게 성장하고 있다²⁾. 특히, 건물일체형 태양광 발전 기술(Building-Integrated Photovoltaic, BIPV)은 건물의 지붕 및 입면에 적용되는 태양광 발전 기술로 도심지에서 전력생산이 가능한 재생 에너지 발전 시스템으로 크게 각광받고 있다³⁾. 하지만 BIPV의 경우 신규 건축물의 경우 건축물의 설계단계에서 BIPV용 모듈의 시공 및 적용 방법 등을 결정할 수 있지만, 이미 건축이 완료된 건축물의 경우 제한된 방법으로서의 BIPV 모듈 적용이 불가피하다.

최근 건축물의 지붕 및 외벽면에 간단하게 시공이 가능한 경량 필름형 태양광 모듈에 대한 연구 개발이 활발하게 이루어지고 있다⁴⁾. 이러한 필름형 모듈은 가벼운 무게가 장점으로 기존

별크형 태양광 모듈과 비교하여 다양한 접착 방법으로 간편한 시공이 가능하므로 설치시간 및 노동력이 감소하여 설치단가가 줄어드는 효과가 있다^{5,6)}. 추가적으로 경량의 필름형 모듈의 경우 유연성을 가지고 있어 건축물의 곡면에도 적용할 수 있다. 하지만, 필름형 태양광 모듈은 주로 박막 태양전지를 이용한 연구가 주로 수행되었으며, 그로 인하여 기존 결정질 실리콘 태양광 모듈에 비하여 낮은 내구성과 광전환 효율을 보여 이에 대한 추가연구가 필요하다⁷⁾.

이를 극복하기 위하여, 최근 높은 신뢰성과 광전환 효율을 갖는 결정질 실리콘 태양전지를 이용한 필름형 경량 태양광 모듈 제작에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다⁸⁾. 결정질 실리콘 태양전지를 이용하여 필름형 모듈을 제작하기 위해서는 전면의 유리를 사용하지 않고 투명 필름으로 대체해야 한다. 전면 유리를 대체할 수 있는 투명 필름에는 Poly methyl methacrylate (PMMA), Poly carbonate (PC), ethylene tetra fluoroethylene (ETFE) 등의 물질들이 주로 사용된다⁹⁻¹¹⁾. 특히 ETFE 필름은 부식과 온도 변화에 대한 강한 저항력과 높은 용융점을 갖고 유리 와 동등한 수준의 광투과율을 보이는 필름으로 필름형 태양광 연구에 많이 응용되고 있다.

*Corresponding author: chjeong@kitech.re.kr

본 연구에서는 전면 유리를 대신하여 ETFE 필름을 사용하였으며, 후면의 검정 백시트를 적용하여 태양광 모듈의 심미성을 향상하였다. 또한 일반적인 리본전극을 이용한 결정질 태양광 모듈의 어레이의 경우 유연성의 한계가 발생하므로 태양전지를 분할·접합하는 싱글드 디자인을 접목하여 제작하였다. 싱글드 디자인의 경우 기존 결정질 실리콘 태양전지를 5~6조각으로 분할된 셀을 전도성 접착제(Electrically Conductive Adhesive, ECA)를 이용하여 접합하는 방식으로 ECA를 이용해 접합한 부분에서의 유연성 확보가 가능하다. 추가적으로 싱글드 디자인은 고효율 결정질 실리콘 모듈 디자인의 한 종류로 단일면적 대비 더 많은 수의 태양전지를 집적할 수 있는 기술로 기존 필름형 태양광 모듈의 단점인 낮은 광전환 효율을 극복할 수 있다. 마지막으로 M12급 p-PERC 셀을 사용하여 높은 광전환 효율을 얻을 수 있는 모듈 디자인을 확보하였다.

2. 실험방법

우리는 싱글드 디자인의 스트링 셀을 제작하기 위하여 M12급 p-PERC 태양전지를 레이저 스크라이빙 장비(1064[nm], 20[kHz], 19.8[W], Wuxi New Glenn Intelligent Technology Co., Ltd.)를 이용하여 6개의 분할셀을 제작하였다. 분할된 셀들의 버스바에 ECA (XCA-8311, Hankel)을 디스펜싱 방법으로 분사한 후, 다른 분할된 셀의 후면을 접합시켜 싱글드 디자인의 스트링 셀을 제작한다⁸⁾. ECA를 이용한 접착공정의 공정온도는 140[°C]이며, 공정시간은 10[s]이다. 안정적인 싱글드 디자인 스트링 셀을 제작하기 위하여 분할된 셀과 다음 분할된 셀의 접합길이는 1.6[mm]로 설정하였다. 이러한 방법을 이용하여 분할된 셀 28개를 접합하여 하나의 스트링 셀을 제작하였다. 이렇게 제작된 스트링 셀 6장을 2직렬 3병렬로 연결하여 스트링 어레이를 제작하였다. 추가적으로 ETFE 필름의 광학적 특성 분석을 위

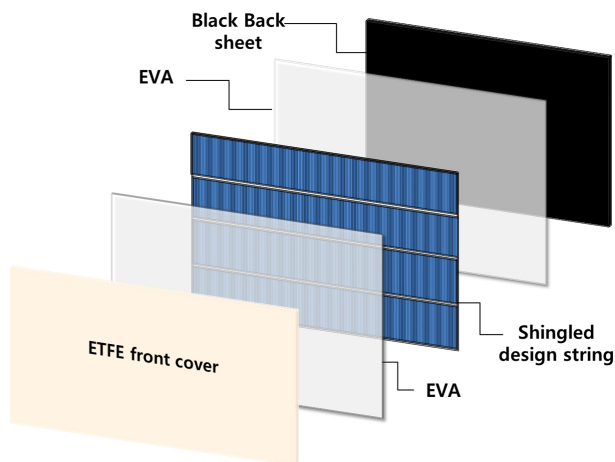


Fig. 1. Schematic of the lightweight flexible c-Si shingled photovoltaic modules

하여 UV-Vis spectrophotometer (Lambda 750, Perkin Elmer)를 이용하여 광 투과율을 측정하였다.

Fig. 1은 고경량 유연성 싱글드 태양광 모듈의 모식도이다. 스트링 셀 6장을 이용하여 제작된 스트링 어레이는 전면 ETFE 필름(150[μm], Jolywood)과 후면 검정 백시트(350[μm], Jolywood)를 접합하여 모듈로 제작하였으며, 싱글드 스트링 어레이와 전후면 필름의 접합을 위하여 ethylene-vinyl acetate (EVA, 600[μm], SVECK) 필름을 이용하였다. ETFE/EVA/싱글드 스트링 어레이/EVA/검정 백시트의 순서대로 배열한 후, 라미네이션 공정을 통하여 모듈을 완성하였다. 라미네이션 공정온도는 140[°C]이며, 공정시간은 660[s]이다. 라미네이션 공정시 기계적 지지력이 부족한 필름모듈의 단점을 개선하기 위하여 유리기판을 사용하였다.

마지막으로 제작된 태양광 모듈의 전기적 특성평가를 확인하기 위하여, 우리는 대면적 솔라시뮬레이터(Solar module test, Beijing Delicacy Laser Optoelectronics Co., Ltd.)를 이용하여 AM 1.5 G (100 [mW/cm²]) 환경에서 전기적 특성평가를 진행하였다. 또한 싱글드 스트링과 모듈의 테이저 및 공정 중 파손 여부 등을 분석하기 위하여 electroluminescence (EL) 시스템 (Portable EL, 600W, TNE TECH)을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

먼저 전면 유리 커버를 대체하는 ETFE 필름의 광 투과율을 분석하였다. Fig. 2는 UV-Vis spectrophotometer를 이용하여 ETFE 필름의 광학적 특성 분석 데이터이다. ETFE 필름의 경우 400[nm]~1200[nm]의 파장대 영역에서 평균 88%의 높은 광 투과율을 보여주고 있다. 측정된 전면 ETFE 필름의 광 투과율은 일반적으로 태양광 모듈에 적용되는 전면 유리의 광 투과율과 매우 유사한 경향을 보인다¹²⁾. Fig. 2에 삽입된 이미지는 우리가 사용한 ETFE 필름의 이미지이다.

Fig. 3(a)는 M12급 p-PERC 태양전지를 이용하여 제작된 싱글드 스트링 셀의 이미지이다. M12 태양전지를 6등분하여 1.6[mm]의 접합길이를 ECA를 이용한 접합공정을 통하여 28개

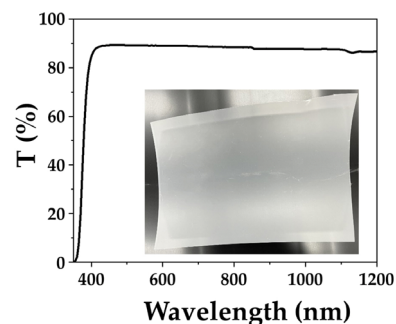


Fig. 2. Transmittance of ETFE front cover. Inset: Photo image of ETFE front cover

의 분할된 셀을 직렬로 접합하였다. 이렇게 접합된 싱글드 스트링 셀은 Fig. 3(b)와 같이 유연성을 갖는 것을 볼 수 있다. 싱글드 스트링의 경우, 일반 결정질 실리콘 태양전지 어레이와 다르게 태양전지를 세로방향으로 절단하여 ECA로 접착하여 제작된다. 이렇게 ECA로 접착된 부분은 결정질 실리콘 태양전지와 다르게 유연성을 갖게 되므로 기존의 일반 결정질 실리콘 태양전지 어레이에 비하여 높은 유연성을 보이게 된다. Fig. 3(c)는 제작된 싱글드 스트링 셀의 출력 분포도를 나타낸 그래프이다. 우리가 제작한 싱글드 스트링 셀의 경우 제작된 총 15개의 스트링 셀은 41.18 ± 0.51 [W]의 출력을 보였다. 이렇게 제작된 6개의 싱글드 스트링 셀을 이용하여 고경량 유연성 태양광 모듈을 제작하였다.

Fig. 4(a)는 우리가 제작한 고경량 유연성 싱글드 태양광 모듈의 이미지이다. 제작된 모듈은 약 1.25 [m²]의 면적으로 싱글드 구조의 경우 태양전지의 전면 버스바 부분이 다른 분할된 셀과 겹쳐져 ECA로 접착되기 때문에 전면 버스바가 보이지 않는 특징을 갖는다. 이에 후면 검정 백시트를 적용하면 높은 심미성을 갖는 태양광 모듈 제작이 가능하다. Fig. 4(b)는 우리가 제작한 모듈의 전기적 특성을 측정한 데이터이다. 제작된 모듈은 240.08 [W]의 출력을 보였으며 이는 19.2%의 광전환 효율을 나타낸다.

Fig. 5(a)는 제작된 모듈의 유연성을 분석하는 이미지이다. 모듈의 굽힘 정도를 표현하기 위하여 그림과 같이 전면과 구부러진 태양광 모듈의 각도를 기준으로 모듈의 굽힘에 의한 출력 감

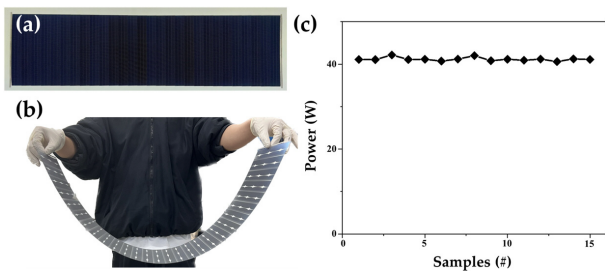


Fig. 3. (a) Images of shingled string cell and (b) flexibility of shingled string cell, (c) conversion power of shingled string cells

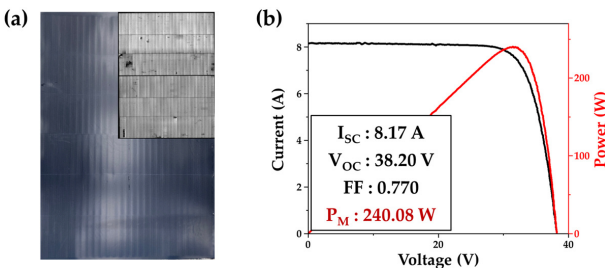


Fig. 4. (a) Photo and EL Images of flexible c-Si shingled photovoltaic modules, (b) I-V curve of flexible c-Si shingled photovoltaic modules

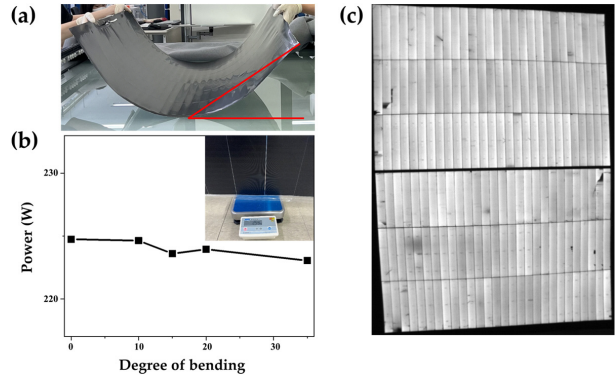


Fig. 5. (a) Photo Images of flexible c-Si shingled photovoltaic modules, (b) Conversion power of flexible c-Si shingled photovoltaic modules after banding tests. Inset: Weight of flexible c-Si shingled photovoltaic (c) EL Images of flexible c-Si shingled photovoltaic modules after banding tests

소율 측정을 진행하였다. Fig. 5(b)는 모듈을 그림과 같이 구부렸을 때, 지면과의 각도를 각각 10, 15, 20, 35[°]의 각도로 구부러진 후 펼쳐서 모듈의 출력을 측정한 데이터이다. 이에 나타난 굽힘 전과 후 모듈의 출력차는 1.7[W]로 약 0.7%의 출력감소율을 확인하였다. 이는 제작된 모듈을 굽혔을 때의 출력감소가 거의 나타나지 않다는 것을 의미한다.

마지막으로 Fig. 5(b)에 삽입된 이미지는 우리가 제작한 모듈의 무게를 측정된 이미지이다. 우리가 제작한 모듈의 무게는 2.54 [kg]으로 2.03 [kg/m²]의 단위 면적당 무게를 갖는다. 이는 전면 유리와 후면 백시트를 사용한 모듈의 경우 일반적으로 $12 \sim 15$ [kg/m²]의 무게를 갖는 점과 비교하면 1/7 수준의 모듈 무게인 것을 알 수 있다¹³⁾.

4. 결론

본 연구에서는 결정질 실리콘 태양전지를 이용한 고경량 유연성 싱글드 태양광 모듈을 제작하였다. 우리는 M12급 p-PERC 태양전지를 분할접합 방식을 통하여 스트링을 제작한 후, 제작된 스트링 셀을 어레이로 연결하여 모듈을 제작하였다. 모듈의 경량화를 위하여 전면 유리커버를 대신하여 ETFE 필름을 사용하였고, 모듈의 심미성 향상을 위하여 후면 검정 백시트를 사용하였다. 우리가 제작한 태양광 모듈은 약 1.25 [m²]의 면적으로 2.03 [kg/m²]의 단위 면적당 무게로 일반 유리 전면커버를 사용한 모듈의 비하여 약 1/7로 모듈의 무게가 경량화된 것을 확인하였다. 제작된 모듈의 전기적 특성을 분석한 결과 240.08 [W]의 출력을 확인하였으며 이는 19.2%의 광전환 효율을 나타낸다. 마지막으로 모듈의 유연성을 확인하기 위하여 모듈의 굽힘 전과 후의 출력감소량을 측정하였다. 이에 나타난 굽힘 전과 후 모듈의 출력차는 1.7[W]로 약 0.7%의 출력감소율을 보였다.

후 기

본 연구는 2021년도 산업통산자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원 과제인 “양면형 모듈 경쟁력 강화를 위한 핵심 기술개발”(No. 20213030010430)을 통해 수행한 과제입니다.

References

- Zarmai, M. T., Ekere, N. N., Oduoza, C. F., Amalu, E. H., “A review of interconnection technologies for improved crystalline silicon solar cell photovoltaic module assembly,” *Appl. Energy*, 154, 173-182 (2015).
- An, S. H., Woo, J. R., “Comparative Economic Analysis of RE100 Implementation Methods in South Korea,” *Current Photovolt. Res.*, 10(2), 62-71 (2022).
- Dai, Y., Bai, Y., “Performance Improvement for Building Integrated Photovoltaics in Practice: A Review,” *Energies*, 14, 178 1-22 (2021).
- Reddy, R., Gupta, M. V. N. S., Nundy, S., Karthick, A., Ghosh, A., “Status of BIPV and BAPV System for Less Energy-Hungry Building in India—A Review,” *Appl. Sci.*, 10, 2237 1-24 (2020).
- Halbe, A., Novak, J., Sharpe, K., Housser, G., and Haldars, P., “Evaluation of Mounting Mechanisms for the Installation of Lightweight PV Systems on Commercial Rooftops,” *IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 3539-3542 (2014).
- Honeker, C., Fuller, E., Watts, A., Booth, D., Flaherty, B., and Mao, E., “Reducing Installed Costs of Residential Solar by the use of Adhesive Mounted Lightweight Solar Modules,” *IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 3135-3140 (2016).
- Jelle, B. P., “Building Integrated Photovoltaics: A Concise Description of the Current State of the Art and Possible Research Pathways,” *Energies*, 9, 21 1-30 (2016).
- Kopecek, R., Libal, J., “Towards large-scale deployment of bifacial photovoltaics,” *Nature Energy*, 3, 443-446 (2018).
- Kajisa, T., Miyauchi, H., Mizuhara, K., Hayashi, K., Tokimitsu, T., Inoue, M., Hara, K., Masuda, A., “Novel lighter weight crystalline silicon photovoltaic module using acrylic-film as a cover sheet,” *J. J. Appl. Phys.*, 53, 092302 1-7 (2014).
- Shin, W., Lim, J., Ko, S., Kang, G., Ju, Y., Hwang, H., “Electrical Output and Reliability of Photovoltaic Module Using Ethylene Tetrafluoroethylene Film,” *J. Korea Solar Energy Soc.*, 40, 13-22 (2020).
- Park, M., Youn, S., Jeon, K., Lee, S., Jeong, C., “Optimization of Shingled-Type Lightweight Glass-Free Solar Modules for Building Integrated Photovoltaics,” *Appl. Sci.*, 12, 5011 1-7 (2022).
- Kim, K., Kang, G., Yu, G., “Analysis of Optical Characteristics of Transparent Glasses for PV and Glass-Glass Module Application,” *J. Korean Solar Energy Soc.*, 28, 8-13 (2008).
- Nussbaumer, Z., Klenk, M., Keller, N., “Small Unit Compound Modules: A New Approach For Light Weight PV Modules,” *32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 56-60 (2016).