

가로세로 폭의 제어가 가능한 싱글드 디자인 태양광 모듈 제조

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

Fabrication of Shingled Design Solar Module with Controllable Horizontal and Vertical Width

Min-Joon Park · Minseob Kim · Eunbi Lee · Yu-Jin Kim · Chaehwan Jeong*

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

Received May 16, 2023; Revised August 7, 2023; Accepted August 28, 2023

ABSTRACT: Recently, the installation of photovoltaic modules in urban areas has been increasing. In particular, the demand for solar modules installed in a limited space is increasing. However, since the crystalline silicon solar module's size is proportional to the solar cell's size, it is difficult to manufacture a module that can be installed in a limited area. In this study, we fabricated a solar module with a shingled design that can control horizontal and vertical width using a bi-directional laser scribing method. We fabricated a string cell with a width of 1/5 compared to the existing shingled design string cells using a bi-directional laser scribing method, and we fabricated a solar module by connecting three strings in parallel. Finally, we achieved a conversion power of 5.521 W at a 103 mm × 320 mm area.

Key words: Building integrated photovoltaics, Shingled, Designable solar module, Crystalline silicon solar cell, Electrically conductive adhesive

1. 서론

화석연료 사용으로 인한 기후변화에 대응하기 위하여 신재생에너지 시장이 크게 발전하고 있다. 특히 태양광 발전의 경우 2022년까지 누적 설치용량이 약 1.2[TW]에 달하며, 태양광 발전 시장은 매년 30% 이상의 성장을 기록하고 있다^{1,2)}. 최근 태양광 발전 시장은 기존의 태양광 발전소 형태의 발전 방식에서 벗어나, 도시의 건물 및 건축구조물, 유휴 공간 등에서의 태양광 발전을 이용해 전기를 생산하여 소비할 수 있는 도심형 태양광 발전 시스템 연구가 활발히 진행되고 있다³⁾.

도심형 태양광 발전 시스템은 도시 외곽지역에서 발전된 전기를 도심지역까지 이송할 필요가 없어 전력 운송시 전력 손실을 줄일 수 있고, 도심지의 유휴 공간을 효율적으로 이용할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 도심지에 설치되는 태양광 발전 모듈의 특성상, 제한적인 설치 공간과 시공 난이도의 상승으로 인한 가격경쟁력 약화라는 단점을 피할 수 없다⁴⁾. 최근 이러한 단점을 극복하기 위하여 제한된 설치범위에서 출력 향상을 위한 태양광 모듈의 고출력화, 태양광 모듈의 경량화를 통한 시공성

향상, 컬러적용 등을 통한 모듈의 심미성 향상 연구 등이 활발하게 이루어지고 있다⁵⁻⁸⁾.

결정질 실리콘 태양전지를 이용한 태양광 모듈은 높은 발전 효율과 가격경쟁력을 기반으로 전체 태양광 모듈 시장의 90% 이상을 차지하고 있다²⁾. 결정질 실리콘 모듈의 경우 일반적으로 생산성의 향상을 위하여 60셀, 72셀 등으로 규격화가 이루어져 있다. 또한 결정질 실리콘 태양전지는 가격경쟁력 향상을 위한 웨이퍼 크기의 대면적화가 이루어지고 있으며, 최근 주목받고 있는 M12급 웨이퍼를 이용하여 제작된 태양전지의 경우 210[mm]의 가로세로 폭을 보인다. 또한 일반적인 결정질 실리콘 태양광 모듈의 경우, 태양전지의 배열에 따라 모듈의 크기가 결정되므로 모듈의 가로세로 길이가 태양전지 크기에 비례하게 증가하는 단점이 있다. 이러한 결정질 실리콘 태양광 모듈의 규격화 및 대면적화로 인하여 도심형 태양광 발전 시스템의 제한된 설치 공간에 집적화된 모듈 적용이 어려운 단점이 발생한다.

본 연구에서는 이러한 단점을 극복하기 위하여 가로세로 폭의 제어가 가능한 싱글드 디자인 태양광 모듈 제조 연구를 진행하였다. 기존 단방향의 셀 scribing공정 이후 분할 접합하는 방식의 싱글드 모듈 제조공정을 응용하여, 양방향 셀 scribing하고 단방향으로 분할 접합하는 방식으로 스트링을 제작한 후 반대

*Corresponding author: chjeong@kitech.re.kr

방향으로 분할하여 다양한 폭과 길이를 갖는 스트링의 제작이 가능하다. 우리는 양방향 5분할을 위한 셀 scribing공정을 통하여 다양한 면적에 적용가능한 싱글드형 태양광 모듈 제조 및 특성평가를 진행하였다.

2. 실험방법

Fig. 1은 가로세로 폭의 제어가 가능한 태양광 모듈 제조를 위한 스트링 셀 제조 공정의 계략도이다. 우리가 사용한 태양전지는 M6급 p-type PERC(Passivated Emitter rear Cell)형 태양전지로 5분할이 가능한 싱글드 디자인의 전면 전극 패턴을 보인다. 태양전지의 scribing 공정을 위하여 레이저소스(1064[nm],

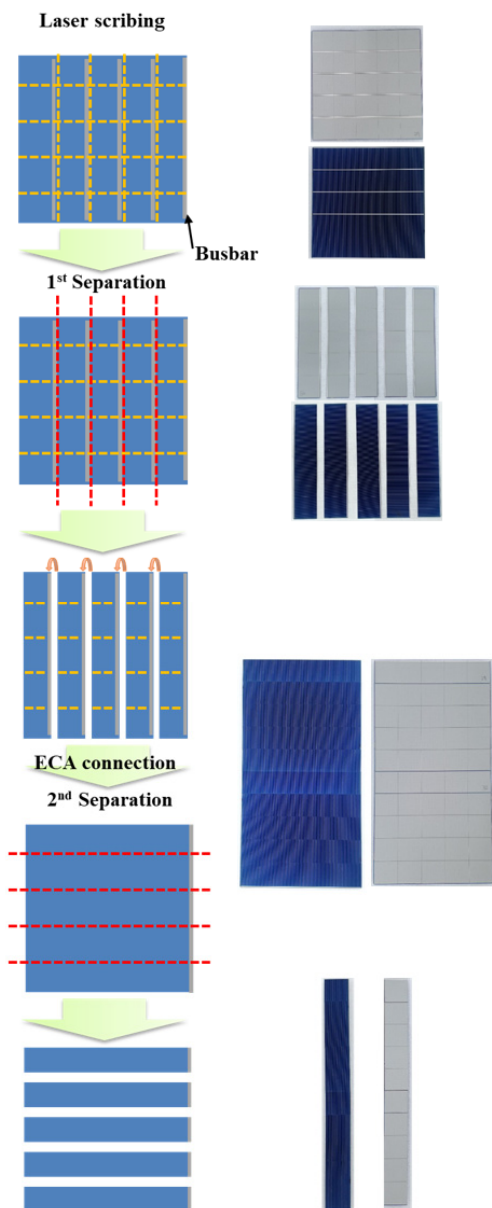


Fig. 1. Schematic of Shingled design solar string cells with controllable horizontal and vertical width of solar modules

50[kHz], 20[ns], 10[W], Coherent)를 이용하여 1회 scribing 공정을 진행하였다. 전면 버스바와 수직 및 수평 방향으로 각각 5분할이 가능하도록 같은 간격으로 4번의 scribing을 진행한 후, 전면 전극의 버스바와 수평 방향으로 물리적인 방법을 통하여 절단하였다. 이후 분할된 셀을 이용하여 스트링을 제작하기 위해 electrically conductive adhesive (ECA, XCA-8311, Hankel)를 전면 버스바에 분사한 후 다음 분할셀의 후면부분과 접합시켰다. 이때, 접합공정 온도는 140[°C]이며, 공정시간은 10[s] 동안 진행했다. 안정적인 스트링 제작을 위하여 분할셀간의 overlap width는 1.6[mm]로 제작하였다. 이러한 접합공정을 통하여 스트링을 제작한 후에 남아있던 버스바와 수직 방향의 scribing 흔적을 기준으로 물리적인 방법을 통하여 스트링을 분리한다.

이와 반대로, 버스바와 수직 방향의 scribing을 먼저 진행하지 않고, 일반 싱글드형 스트링 셀 제작 후 레이저 scribing 공정을 통하여 버스바와 수직 방향으로 2차 scribing 공정 후에 절단을 할 수 있다. 하지만 ECA를 이용한 접합 공정을 통하여 두꺼워진 분할 셀간의 overlap 부분에서 scribing 공정이 원활히 일어나지 않아 파손되는 경우가 발생 된다. 이에, 파손율 감소를 위하여 두 방향의 scribing 공정 후 각각 분할하는 공정 방법을 사용하였다.

우리는 가로세로 폭의 제어가 가능한 싱글드 디자인 태양광 모듈 제조를 위하여 위의 방법으로 제작된 스트링셀 3줄을 병렬로 연결하였다. 전면커버는 투명 필름인 ethylene tetrafluoroethylene copolymer (ETFE)를 사용하였으며, 봉지재로는 ethylene vinyl acetate (EVA)를 사용하였다. 이를 이용하여 ETFE/EVA/태양전지 스트링/EVA/back sheet/EVA/절곡강판의 순서로 적층 후 라미네이션 공정을 이용하여 모듈을 제작하였다. 라미네이션 공정의 온도는 140[°C]이며, 공정시간은 660[s] 동안 진행했다.

제작된 스트링 및 모듈의 전기적 특성분석을 위하여 솔라시뮬레이터(WXS-155S-L2, WACOM)와 I-V 측정장치(DKSCT-3T, DENKEN)을 이용하여 AM1.5G (1000[W/m²]) 환경에서 분석을 진행하였다. 또한 싱글드 스트링 및 모듈의 데미지 및 파손 등을 분석하기 위하여 electroluminescence (EL) 시스템(Portable EL, 600[W], TNE TECH)을 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 레이저 scribing 공정 후 태양전지의 SEM 분석 이미지이다. Fig. 2 (a)에서 확인할 수 있듯이, 우리가 보유하고 있는 레이저소스를 이용하여 scribing 공정을 진행한 결과 scribing width는 약 20[μm]인 것을 확인하였다. 추가적으로 스크라이빙된 부분의 왼쪽 부분에 상부 busbar가 존재하면 laser scribing된 부분과 약 300[μm] 떨어진 것을 확인할 수 있다. Fig. 2 (b)는 분할된 셀의 절단면을 분석한 SEM image로, laser scribing 공정시

발생하는 열에 의해 형성된 불균일한 단면의 depth를 측정하였다. scribing depth는 약 85[μm]로 태양전지의 두께인 180[μm]의 약 47%인 것을 확인하였다.

우리는 M6급 PERC 태양전지를 전면 버스바에 수평 방향으로 5분할이 가능하도록 scribing 공정을 진행한 후, 버스바에 수직 방향으로 5분할이 가능하도록 scribing 공정을 진행하였다. 이렇게 scribing 공정이 마무리된 태양전지를 전면 버스바와 수평 방향으로 5분할 한 후, 분할된 셀 10개를 ECA를 이용하여 직렬로 접합하여 스트링 셀을 제작하였다. 이렇게 제작된 스트링 셀을 기존의 전면 버스바와 수직 방향으로 5분할하여 가로세로 폭의 제어가 가능한 스트링 셀을 제작하였다. Fig. 3의 (a)는 가로세로 폭의 제어가 가능한 싱글드 디자인 10접합 스트링 셀의 이미지와 EL 분석 이미지이다. 전면 버스바와 수직 방향으로 5분할하여 가로 33.2[mm], 세로 317.6[mm]의 폭을 갖는 스트링 셀을 제작하였다. 제작된 스트링 셀의 EL 분석 이미지에서 알 수 있듯이 싱글드 스트링 셀 제조 공정중 큰 출력 감소를 일으킬 수 있는 대미지나 파손 등에 대한 현상은 발견되지 않았다.

Fig. 3의 (b)는 가로세로 폭의 제어가 가능한 싱글드 디자인 10접합 스트링 셀의 출력분포도이다. 총 12장의 10접합 스트링 셀을 제작하여 출력을 측정하였다. 우리가 제작한 스트링 셀의 평균 출력은 1.867 ± 0.033 [W]의 출력을 나타냈다. Fig. 3 (b)에

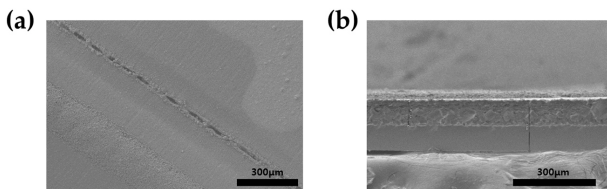


Fig. 2. (a) Top and (b) cross sectional SEM images of the separated solar cells

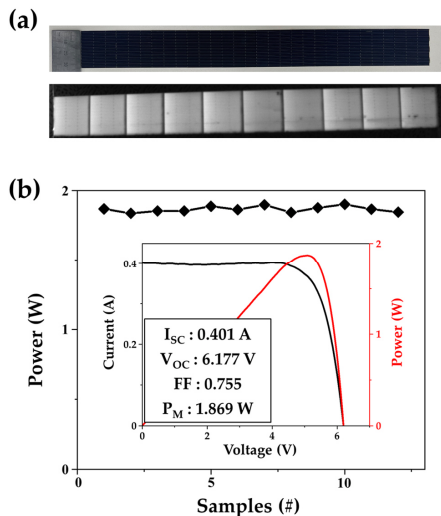


Fig. 3. (a) Photo and EL images of shingled design string cells. (b) Conversion power distribution of 12 string cells. Inset: I-V curve of shingled design string cell

삽입된 그래프는 첫 번째 스트링셀을 측정한 I-V 데이터이다. 일반적으로 셀 분할시 발생하는 열적, 물리적 데미지로 인하여 출력감소가 발생한다. 특히, 우리가 제작한 스트링셀의 경우 6.177[V]의 낮은 Voc를 보이는데, 셀 분할시 Voc의 감소는 셀 분할 공정에서 emitter 부분의 물리적 데미지로 인하여 발생하며, 1회 분할시 약 0.2%의 Voc 감소가 발생한다⁹⁾. 가로세로 폭의 제어가 가능한 싱글드 모듈 제작을 위해서는 총 2회의 셀 분할 공정이 포함되므로 Voc 및 출력감소를 최소화할 수 있도록 공정 최적화를 진행할 예정이다.

우리는 가로세로의 폭 조절이 가능한 싱글드 디자인의 결정질 실리콘 태양광 모듈을 제조하기 위하여, 전면버스바의 수직 방향으로 5분할된 스트링셀 3개를 이용하여 태양광 모듈을 제조하였다. 전면버스바의 수직 방향으로 5분할된 스트링셀 3개는 전기적으로 병렬 연결하였다. 모듈을 제작하기 위하여 전후면 커버로 투명 ETFE 필름과 투명 백시트를 이용하였으며, 봉지재로 EVA를 이용하였다. Fig. 4 (a)는 가로세로의 폭 조절이 가능한 싱글드 디자인의 결정질 실리콘 태양광 모듈의 실제 이미지이다. 각 스트링셀의 양 끝단에 리본전극을 연결하였으며, 모듈의 크기는 가로 103[mm], 세로 320[mm]의 크기로 약 0.033[m²]의 유효면적을 갖는다. 기존 M6급의 태양전지를 이용할 경우 166[mm]이하의 폭을 갖는 태양광 모듈 제작이 불가능 하지만, 본 연구를 통하여 개발된 분할접합 기술을 이용하면 Fig. 4 (a)와 같은 크기의 태양광 모듈도 제작 가능하다. Fig. 4 (b)는 가로세로의 폭 조절이 가능한 싱글드 디자인의 결정질 실리콘 태양광 모듈의 EL 분석 이미지이다. 제작된 모듈의 EL 분석 이미지에서 알 수 있듯이 싱글드 스트링 셀 제조 공정중 큰 출력 감소를 일으킬 수 있는 대미지나 파손 등에 대한 현상은 발견되지 않았다. 하지만 수작업으로 모듈의 제작이 진행된 관계로 스

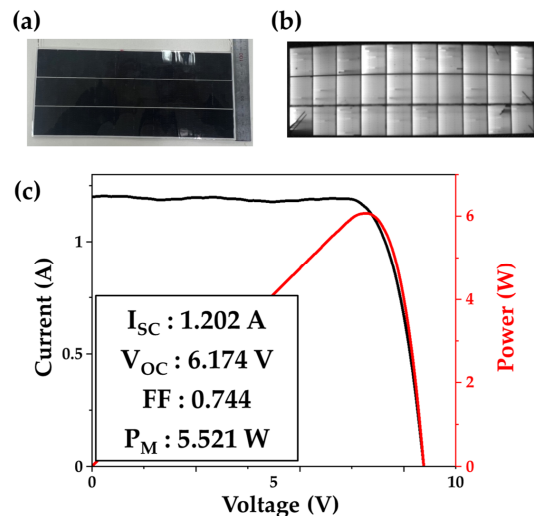


Fig. 4. (a) Photo and (b) EL images of shingled PV modules with controllable horizontal and vertical width. (c) I-V curve of shingled PV modules with controllable horizontal and vertical width

트링과 금속 리본에서 발생한 불완전 접합으로 어두운 부분이 발생한 것으로 판단 된다. 이는 추후 공정 조건 개선 및 최적화를 통하여 최소화할 예정이다.

Fig. 4 (c)는 본 연구를 통하여 제작된 태양광 모듈의 전기적 특성을 분석한 I-V 데이터이다. 제작된 모듈의 출력은 5.521[W]를 기록하였고, 변환효율은 18.22%를 기록하였다. 현재 개발된 모듈 제조기술을 기반으로 모듈의 대면적화 및 다양한 모듈의 제조가 가능한 자동화 장비 개발 관련 연구를 진행할 예정이다.

4. 결론

본 연구에서는 양방향 태양전지 scribing 공정을 이용하여 가로세로의 폭 조절이 가능한 싱글드 디자인의 결정질 실리콘 태양광 모듈 제조기술을 개발하였다. 우리는 M6급 p-PECR 태양전지를 전면 버스바의 수직과 수평 방향으로 각각 5분할하여 가로 33.2[mm], 세로 317.6[mm]의 폭을 갖는 스트링 셀을 제작하였다. 이렇게 제작된 스트링셀 3개를 병렬 연결하여 기존의 M6급 태양전지보다 작은 폭을 갖는 가로 103[mm], 세로 320[mm]의 태양광 모듈을 제작하였다. 우리가 제작한 태양광 모듈은 약 0.033[m²]의 면적으로, 제작된 모듈의 전기적 특성을 분석한 결과 5.521[W]의 출력을 확인하였으며 이는 18.2%의 광전환 효율을 나타낸다. 현재 개발된 모듈 제조기술을 기반으로 모듈 면적의 다양화 및 생산성 향상을 위한 자동화 장비 연구를 진행중이다. 이렇게 개발된 가로세로의 폭 조절이 가능한 싱글드 디자인의 결정질 실리콘 태양광 모듈은 향후 모듈 설치 면적이 제한되는 건물, 차량, 선박 등의 고부가가치 태양광 모듈 제조 기술로 발전될 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 2021년도 산업통산자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원 과제인 “장기신뢰성(25년 이상)과 안전성이 확보된 건물형 태양광 핵심소재 개발”(No. 20213030010290)을 통해 수행한 과제입니다.

References

1. Snapshot of Global PV Markets 2023. Available online: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2023/04/IEA_PV_PS_Snapshot_2023.pdf
2. Photovoltaic report. Available online: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/P_hotovoltaics-Report.pdf
3. Rakowska J., Maciejczak M., Batyk I. M., Farelnik E., “Rural-Urban Differences in Solar Renewable Energy Investments Supported by Public Finance in Poland,” *Energies*, 15, 8476 1-19 (2022).
4. Jelle B. P., Breivik C., Røkenes H. D., “Building integrated photovoltaic products: A state-of-the-art review and future research opportunities,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 100, 69-96 (2012).
5. Kuhn T. E., Erban C., Heinrich M., Eisenlohr J., Ensslen F., Neuhaus D. H., “Review of technological design options for building integrated photovoltaics (BIPV),” *Energy & Buildings*, 231, 110381 1-26 (2021).
6. Baumgartner F., Büchel A., Carigiet F., Baumann T., Epp R., Wirtz A., Huegeli A., Graf U., ““URBAN PLANT” lightweight Solar System FOR PARKING AND Other URBAN DOUBLE USE APPLICATIONS,” 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Paris (2013).
7. Martins A. C., Chapuis V., Virtuani A., Ballif C., “Robust Glass-Free Lightweight Photovoltaic Modules With Improved Resistance to Mechanical Loads and Impact,” *IEEE J. Photovolt.*, 9, 245-251 (2019).
8. Lee H., Song H., “Current status and perspective of colored photovoltaic modules,” *WIREs Energy and Environ.*, 10, e403 1-31 (2021).
9. Han H., Jia X., Ma C., Wu Y., “A novel laser scribing method combined with the thermal stress cleaving for the crystalline silicon solar cell separation in mass production,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 240, 111714 1-8 (2022).