

고출력 싱글드 태양광 모듈 제작을 위한 스트링 연결에 관한 연구

김주휘¹, 김정훈², 정채환³, 최원용⁴, 이재형¹ 

¹ 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

² (주) 탑선 기술연구소

³ 한국생산기술연구원 스마트에너지나노융합연구그룹

⁴ (주) 제너셈 R&D 센터

Study on Shingled String Interconnection for High Power Solar Module

Juhwi Kim¹, Junghoon Kim², Chaehwan Jeong³, Wonyoung Choi⁴, and Jaehyeong Lee¹

¹ Department of Electrical Engineering, Sungyunkwan University, Suwon 16419, Korea

² Research Institute, Topsun Co, Jangseong 57241, Korea

³ Smart Energy & Nano R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Gwangju 61012, Korea

⁴ R&D Center, Genesem Inc, Incheon 21984, Korea

(Received July 28, 2021; Revised August 13, 2021; Accepted August 14, 2021)

Abstract: Interest and investment in renewable energy have increased worldwide, highlighting the need for renewable energy. Solar energy was the most promising energy of all renewable energy sources, and it has the highest investment value. Because photovoltaics require a certain amount of area for installation, high density and high output performance are required. Shingled module is a promising technology in that they are featured by higher density and higher output compared to the conventional modules. Shingled technology uses a laser scribing to divide solar cells that are to be bonded with electrically conductive adhesive (ECA) to produce and connect strings, which has a higher output in the same area than the conventional modules. In the process of producing solar modules, metal ribbons are used to interconnect cells, but they are also needed for string connections in shingled solar cells. Accordingly, in this study, we researched the interconnection that best suits the connector that joins the string to the string. The module outputs produced under the conditions of the string interconnection were compared and analyzed.

Keywords: Shingled module, Electrically conductive adhesive (ECA), String interconnection, Soldering

1. 서 론

최근 세계적으로 환경 문제가 대두되며 신재생에너지에 대한 필요성이 부각되어 연구가 활발히 진행되고 있다 [1].

✉ Jaehyeong Lee; jaehyeong@skku.edu

Copyright ©2021 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.

대규모의 투자가 신재생에너지에 지원되고 있으며 그중 태양광발전(photovoltaic, PV)은 기존 화석 연료를 능가하는 최대 에너지원이 될 가능성이 높은 에너지원이다 [2]. 태양광산업은 동일 면적대비 고효율, 고밀도의 태양광 모듈을 제작하고자 하며 이에 따라 싱글드 기술이 더욱 각광받고 있다. 기존 태양광 모듈은 그림 1에서와 같이 폴 사이즈 태양전지들을 전면 버스바에 금속 리본(ribbon)을 솔더링(soldering)하여 연결하기 때문에 전면의 금속 리본에 의한 음영(shading)이 발생하고 리본 저항으로 인하여 출

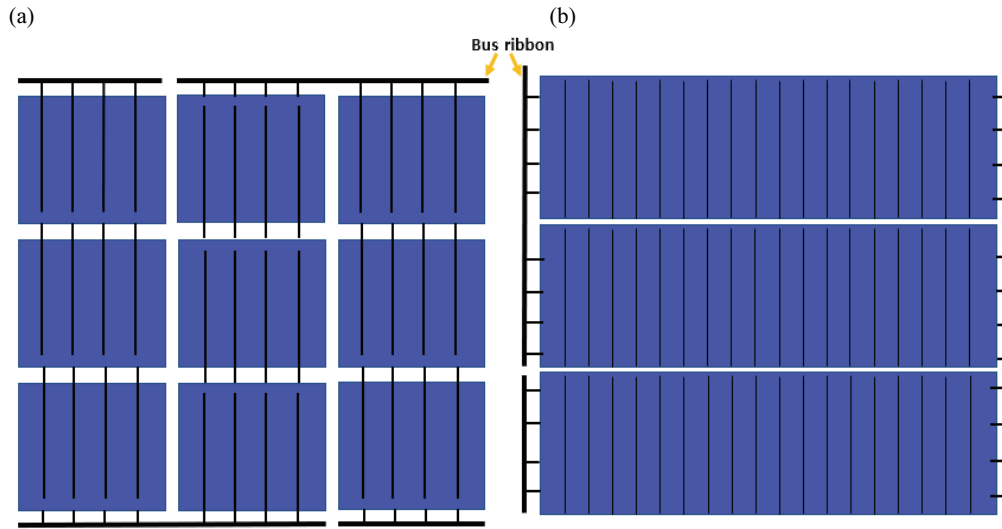


Fig. 1. Method of interconnection (a) conventional and (b) shingled PV module.

력이 감소하는 문제가 있다 [3,4]. 쉐글드(shingled) 기술의 경우, 풀사이즈 태양전지를 레이저를 사용해 분할하고, 전기전도성접착제(electrically conductive adhesive, ECA)를 이용하여 분할 셀(divided cell strip)들을 접합하여 스트링을 제작하는 방식으로 같은 면적에서 더욱 많은 수광영역이 존재한다 [5,6].

태양광 모듈 제작 과정에서 기존 태양광 모듈은 전면에 솔더링한 리본들을 이어 각 풀사이즈 셀들이 하나의 스트링을 구성하기 때문에 스트링과 버스 리본(bus ribbon)의 연결이 필요하였다 [7]. 쉐글드 모듈 제작의 경우, 분할 셀들을 접합하여 하나의 스트링이 구성되며, 이 스트링들을 연결하여 모듈을 제작하게 된다. 따라서 일반 모듈에서와 같이 스트링 끝 단 분할 셀의 버스바(busbar)와 버스 리본(bus ribbon) 연결이 필요하다. 이때, 사용되는 리본의 폭과 성분 등에 따라 휘어짐의 정도, 접착 강도 등에 차이가 발생하고 이는 출력 차이와 공정 작업 과정에서의 불량률에 큰 영향을 미친다 [8,9].

본 연구에서는 쉐글드 스트링과 버스 리본을 연결하는 금속 리본 커넥터(connector)의 유형에 따른 특성을 비교하였다. 또한 커넥터 방식에 따른 쉐글드 태양광 모듈을 제작하여 출력 특성을 조사하였다.

2. 실험 방법

본 논문에서는 p-type 20.7% 효율 및 5.05 W 출력의 단결정 실리콘 태양전지(Mono TNM5-156 PERC, Topsky

Energy, China)를 나노초 그린레이저(AVIA NX 532-65, Coherent, USA)를 사용하여 스크라이빙을 진행하였다. 스크라이빙 장비의 scan speed 값을 1,300 mm/s, 반복 횟수를 35회로 설정하였고 frequency 값과 current는 50 kHz, 80%로 고정하였다. 레이저로 스크라이빙된 셀은 물리적인 힘을 가해 5개의 셀 스트립(cell strip)으로 분할하였다. 먼저 최적 솔더링 온도를 조사하기 위해 쉐글드 스트링 양 끝 분할 셀에 300~400°C 온도 범위에서 금속 리본을 솔더링 한 후 태양전지의 효율 변화를 조사하였다. 솔더링 전후의 효율은 AM 1.5G의 스펙트럼 빛을 조사할 수 있는 솔라 시뮬레이터(WXS-155S-L2, WACOM, Japan)를 사용하여 측정하였다. 이후, 각 셀들을 분사량 100 rpm 조건으로 ECA (ABLESTIC CA-3556 HF, Henkel, USA)를 통해 접합하여 쉐글드 스트링을 제작하였다.

제작된 쉐글드 스트링들을 모듈로 제작하기 위해 커넥터가 필요한데, 본 연구에서는 세 종류의 커넥터에 따른 접합 및 모듈 특성을 조사하였다. 그림 2는 버스 리본과의 연결을 위한 쉐글드 스트링 커넥터 종류를 나타낸 것이다. Type-1은 스트링 edge에 있는 분할 셀 버스바 위에 수평 리본(horizontal ribbon)을 솔더링 한 후 추가적으로 수직 리본(vertical ribbon)을 솔더링 하여 버스 리본과 연결하는 방식이며, type-2는 분할 셀의 버스바에 솔더링한 수평 금속 리본이 버스 리본의 역할을 동시에 수행한다. Type-3는 분할 셀 버스바에 수직 리본을 솔더링하여 버스 리본과 접합하는 방식이다. 접합에 사용된 수평 리본의 폭 및 두께는 1 mm와 0.1 mm이었고, 수직 리본은 4 mm (w)와 0.15mm (t)이었다. Oh 등 [10]는 수직 리본의 개수가

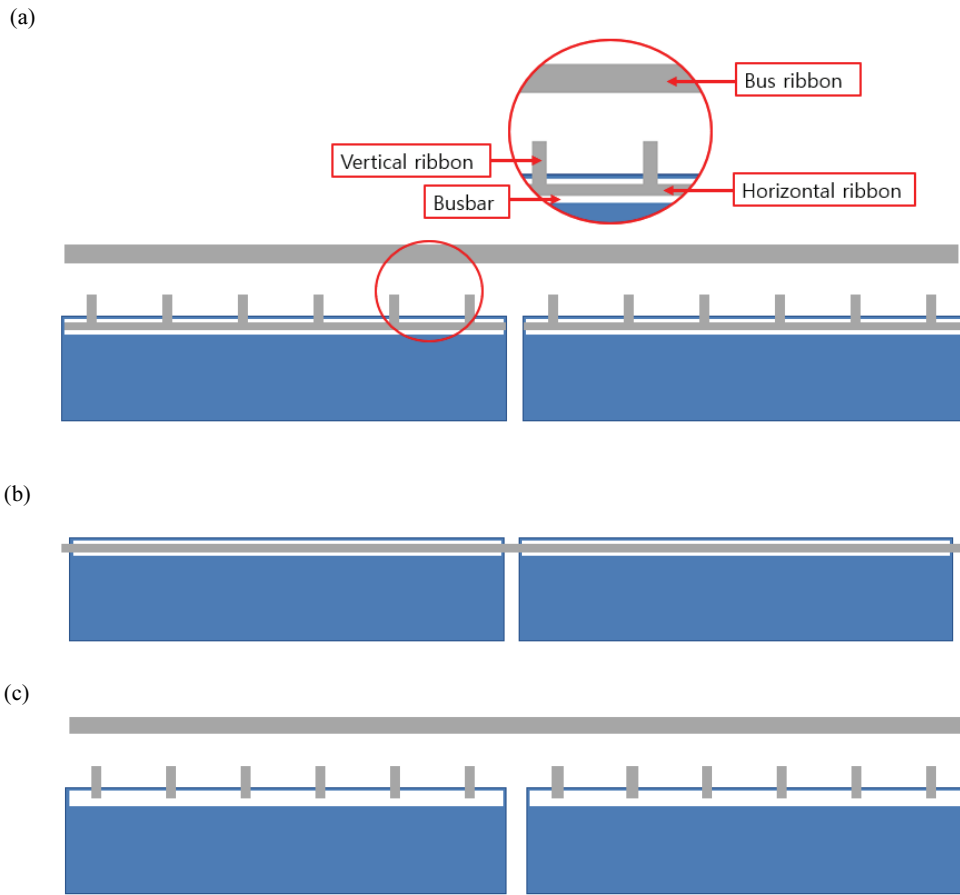


Fig. 2. Three connector types for shingled string interconnection: (a) type-1, (b) type-2, and (c) type-3.

증가할수록 솔더링 이후 분할 셀의 효율 감소가 개선됨을 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 솔더링 작업성을 고려하여 수직 리본의 개수를 6개로 고정하였다. 또한 세 종류의 커넥터로 싱글드 스트링들을 연결하여 태양광 모듈(면적: $6,985 \text{ cm}^2$)을 제작하였고, 모듈의 출력 특성을 0.1%의 측정오차율의 대면적 솔라 시뮬레이터(DKSMT-1520SUL, Denken, Japan)를 사용하여 STC조건(AM 1.5 G기준 스펙트럼, 빛의 조사강도 $1,000 \text{ W/m}^2$, 측정온도 25°C)에서 측정하였다. 이때 출력 값은 5회 측정의 평균값으로 정하였다. 또한 커넥터 리본의 두께 및 폭에 따른 태양광 모듈의 전기적 특성을 조사하였다[11]. 이때 type-1과 type-3의 금속 리본 폭은 각각 4 mm와 6 mm, 두께는 0.1 mm, 0.15 mm로 변화시켜서 태양광 모듈(면적: $8,187 \text{ cm}^2$)을 제작하고 출력 특성을 비교하였다. 그림 3은 본 연구에서 제작한 싱글드 태양광 모듈의 사진을 나타낸 것이다.

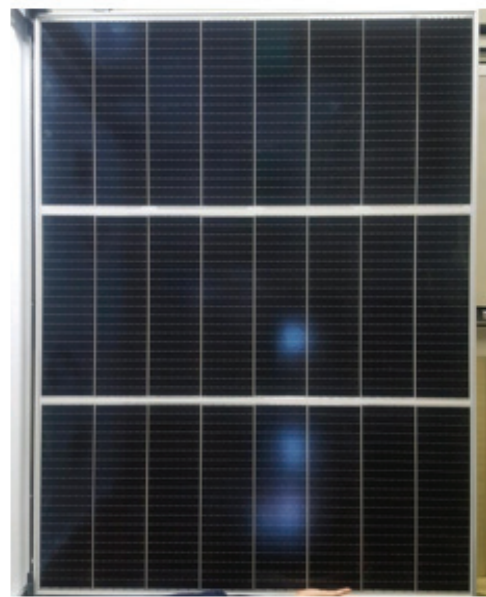


Fig. 3. Photo of the shingled PV module.

3. 결과 및 고찰

그림 4는 솔더링 온도에 따른 분할 셀의 전후 효율 변화를 나타낸 것이다. 금속 리본의 솔더링 온도가 325°C일 때 가장 낮은 효율 감소를 나타냈다. 그러나 솔더링 시 상대적으로 낮은 온도인 325°C에서는 작업성이 좋지 않고 불량률이 많이 발생하였기 때문에 본 연구에서는 350°C의 온도에서 솔더링을 진행하였다.

그림 5는 싱글드 스트링 커넥터 종류에 따른 분할 셀의 bending 특성을 나타낸 것이다. Type-1의 경우, 수평 리본이 전체 버스바에 솔더링 되기 때문에 bending 정도가 심하고, 태양전지에 크랙이 발생하였다. 또한, 추가적인 수직 리본의 솔더링 과정이 진행되기 때문에 버스바와 접합 시 파손율이 높은 문제가 발생하였다. Type-2의 커넥터도 type-1과 같이 3 mm 이상의 bending이 발생하였다. Type-3의 경우, 솔더링 이후 bending 현상이 발생하지 않지만, 수직 리본과 버스바와의 솔더링 면적이 적기 때문에 약간의 충격에도 박리가 일어나고 라미네이션(lamination) 이후에도 접합 부분의 박리 현상으로 인해 불량률이 빈번하게 발생하였다. Bending의 발생 원인은 금속 리본의 SnPb 도금층의 melting을 위하여 350°C의 높은 온도로 가열, 접합하기 때문에 금속 리본(25 ppm/°C)과 태양전지(2.61 ppm/°C) 사이의 열팽창계수 차이로 인한 tension으로 생각된다 [12-14].

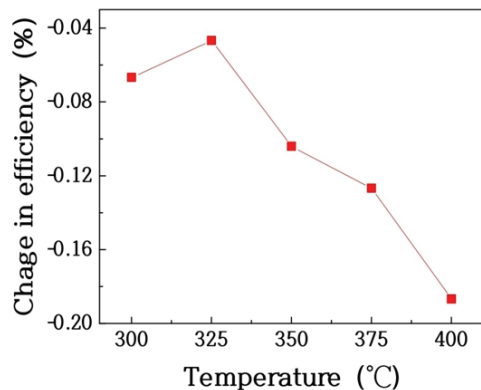


Fig. 4. Dependence of the soldering temperature on the cell strips efficiency.

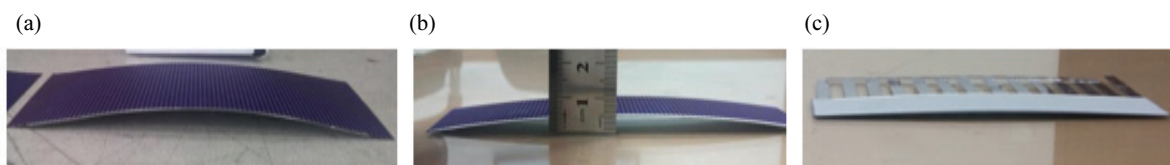


Fig. 5. Bending characteristics of divided cell strips: (a) type-1, (b) type-2, and (c) type-3.

표 1은 커넥터 유형에 따른 싱글드 태양광 모듈의 출력 특성을 나타낸 것이다. Type-1과 type-3의 커넥터 유형을 갖는 모듈의 출력은 비슷하지만, type-2에서는 상대적으로 낮은 값을 보였다. Type-1과 type-3에 비해 type-2의 버스바와의 커넥터 접촉 면적이 작기 때문에 싱글드 스트링과의 접촉저항이 증가하여 출력이 저하되는 것으로 생각된다.

표 2는 금속 리본의 폭 및 두께에 따른 싱글드 태양광 모듈의 출력 특성을 나타낸 것이다. 이때 모듈 제작에 사용된 커넥터 유형은 type-1과 type-3이었다. 커넥터의 폭이 4 mm에서 6 mm로 증가할 경우, bending 특성이 가장 우수한 type-3 유형의 커넥터보다 type-1에서 보다 높은 출력 특성을 보였다. 또한 동일한 커넥터 유형에서 금속리본이 두꺼워질수록 출력이 증가함을 알 수 있었다. 그러나 커넥터의 두께가 0.15 mm인 경우, 모듈 제작 과정에서 분할 셀의 힘에 의한 크랙 발생률이 높아지는 문제점이 발생하였다. 본 연구에서는 폭 6 mm, 두께 0.15 mm를 갖는 type-1의 커넥터로 제작한 모듈의 출력이 165.4 W로 가장 높은 값을 나타내었다.

Table 1. Comparison of the output power of shingled PV module having different string connectors.

	Type-1	Type-2	Type-3
Sub-module output (W)	127.1	120.3	127.6

Table 2. Effects of the width and thickness of metal ribbon on the output characteristics of the shingled module.

	Module-A	Module-B	Module-C
Connector type	Type-3	Type-1	Type-1
Connector dimension	4 mm (width), 0.15 mm (thickness)	6 mm (width), 0.1 mm (thickness)	6 mm (width), 0.15 mm (thickness)
Output (W)	164	164.1	165.4

4. 결론

본 연구에서는 싱글드 태양광 모듈의 연결에 적합한 커넥터의 최적화를 위한 연구를 진행하였다. 솔더링 온도에 따른 효율 감소를 보기 위해 온도를 변화시켜 효율 저하를 비교하였고 여러 요소 등을 고려하여 350°C로 실험을 진행하였다. 여러 유형의 커넥터를 휘어짐, 출력 값, 불량률 및 작업성 등을 고려하여 비교, 분석하였다. Type-1과 type-2의 경우 휘어짐이 많이 발생하였고 type-3의 경우 휘어짐이 거의 발생하지 않았다. Type에 따른 출력 값을 비교하기 위해 각각 서브 모듈을 제작하여 비교하였다. Type-1과 type-3의 형태로 제작한 서브 모듈의 출력 값이 127.1 W와 127.6 W로 높았고 type-2의 출력 값이 120.3 W로 가장 낮았다. 그중 출력값이 더 높았던 type-1과 type-3의 형태로 리본의 폭 및 두께를 비교하기 위해 모듈을 제작하였다. 4 mm의 리본 폭 type-1과 6 mm의 리본 폭 type-3을 비교하였을 때, 6 mm의 폭 리본의 type-3의 출력이 더 높았다. 또한, 리본의 두께를 0.1 mm와 0.15 mm로 설정하였을 때, 0.15 mm에서의 출력이 높았지만 휘어짐이 더 많이 발생하였다. 휘어짐 등의 요소를 고려하였을 때, 금속 리본과 bus ribbon이 결합된 일체형 커넥터가 더욱 높은 출력을 낼 것으로 기대된다.

ORCID

Jaehyeong Lee

<https://orcid.org/0000-0003-2918-4694>

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (No.20213030010290).

REFERENCES

- [1] Y. H. Kim, D. H. Yoo, H. Han, and J. S. Bae, *J. Clim. Change Res.*, **10**, 317 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.15531/ksecr.2019.10.4.317>]
- [2] J. Jean, P. R. Brown, R. L. Jaffe, T. Buonassisi, and V. Bulović, *Energy Environ. Sci.*, **8**, 1200 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1039/C4EE04073B>]
- [3] S. Pareek and R. Dahiya, *Energy*, **95**, 561 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.036>]
- [4] T. H. Jung, H. E. Song, H. K. Ahn, and G. H. Kang, *Sol. Energy*, **103**, 253 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.01.032>]
- [5] W. Oh, J. Park, S. Dimitrijević, E. K. Kim, Y. S. Park, and J. Lee, *Sol. Energy*, **195**, 527 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.095>]
- [6] H. Jee, S. Lee, C. Jeong, and J. Lee, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **19**, 1360 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1166/jnn.2019.16200>]
- [7] N. Klasen, A. Mondon, A. Kraft, and U. Eitner, "Shingled Cell Interconnection: A New Generation of Bifacial PV-Modules," in *7th Workshop on Metallization & Interconnection for Crystalline Silicon Solar Cells* (Konstanz, Germany, 2017). [DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3152478>]
- [8] A. M. Gabor, M. Ralli, S. Montminy, L. Alegria, C. Bordonaro, J. Woods, and L. Felton, *21st European Photovoltaic Solar Energy Conference* (WIP, Dresden, USA, 2006). [https://www.steelandsilicon.com/pubs/Gabor_20060914.pdf]
- [9] M. T. Zarmai, N. N. Ekere, C. F. Oduoza, and E. H. Amalu, *Appl. Energy*, **154**, 173 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.120>]
- [10] W. J. Oh, J. S. Park, M. Kwon, J. Lee, E. K. Kim, Y. Park, and C. Jeong, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **20**, 6992 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1166/jnn.2020.18836>]
- [11] S. Roberts, K. C. Heasman, and T. M. Braton. *Sixteenth European Photovoltaic Solar Energy Conference* (Routledge, 2020) p. 0. [<https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9781315074405-82/reduction-module-power-losses-optimisation-tabling-ribbon-roberts-heasman-braton>]
- [12] K. M. Kumar, V. Kripesh, and A.A.O. Tay, *J. Alloys Compd.*, **455**, 148 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.01.045>]
- [13] M. Knausz, G. Oreski, M. Schmidt, P. Guttman, K. Berger, Y. Voronko, G. Eder, T. Koch, and G. Pinter, *Polym. Test.*, **44**, 160 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2015.04.009>]
- [14] F. Kraemer, J. Seib, E. Peter, and S. Wiese, *2014 15th International Conference on Thermal, Mechanical and Mult-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE)* (IEEE, Ghent, Belgium, 2014) pp. 2378-2382. [DOI: <https://doi.org/10.1109/EuroSimE.2014.6813853>]