

고출력 태양광 모듈을 위한 와이어 솔더링 조건에 따른 셀 스트링 특성

황서희, 어승아, 노요한, 이재형 

성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Characteristics of Cell Strings According to Wire Soldering Conditions for High Power Solar Module

See Hee Hwang, Seung Ah Ur, Yo Han Noh, and Jae Hyeong Lee

Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

(Received July 2, 2024; Revised July 15, 2024; Accepted July 16, 2024)

Abstract: MBB (multi-busbar) technology is a module technology to achieve high power, and the use of a number of thin circular metal wires increases light-receiving capacity and reduces resistance. In the process of interconnection using a wire, the stress of the cell increases depending on the degree of coupling between the wire and the cell and the degree of damage caused by heat, or the mobility of current decreases due to poor bonding. The degree of such loss is affected by IR lamp, hot plate temperature and wire thickness. In addition, the values of contact resistance were compared and analyzed to analyze the cause of the decrease in electrical characteristics. In this study, process condition optimization was carried out through peeling test, SEM analysis, EL test, and pre/post bonding efficiency characteristic analysis of the bonded cell according to process conditions, compared the contact resistance.

Keywords: Cell interconnection, Wire soldering, Multi-busbar, Photovoltaic module

1. 서론

태양광 모듈의 효율을 높이기 위해 기존의 단결정 실리콘 웨이퍼의 M2 사이즈(156.75 mm × 165.75 mm)가 아닌 M6 사이즈(166 mm × 166 mm), 혹은 M10 사이즈(200 mm × 200 mm)의 실리콘 웨이퍼 기반의 대면적 태양전지를 이용한 대면적 태양광 모듈의 개발이 많이 진행되어 고출력 및 고효율화된 대면적 태양전지가 많이 사용되고 있다 [1].

대면적 태양전지의 출력을 최적화하는 방법은 저항 성분으로 인한 전기적 손실을 최소화하고, 음영으로 인한 광학적 손실을 전면 그리드 설계를 개선하여 손실을 감소시키는 것이다 [2]. 태양전지의 출력을 높이는 기술 중 하나인 MBB (multi-busbar)는 half-cut으로 분할된 셀을 주로 사용한다. 그림 1과 같이 버스바의 개수가 늘어남에 따라 하나의 버스바에 흐르는 전류가 줄어들게 된다. 또한, 증가한 버스바의 개수만큼 전류 수집률이 높으며 half-cut을 통해 낮아진 저항만큼 출력 이득을 볼 수 있다 [3]. 버스바의 폭이 줄어들고 개수가 늘어나기 때문에 다수의 얇은 원형 와이어를 사용한다. 기존의 태양전지를 리본으로 솔더링 하였을 때보다 더 높은 광 포집으로 인해 더 많은 active area를 가진다. 또한, 이는 균일하고 낮은 직렬 저항을 가져 고출력을 달성하기 위한 모듈에 많이 사용되고

✉ Jae Hyeong Lee; jaehyeong@skku.edu

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.

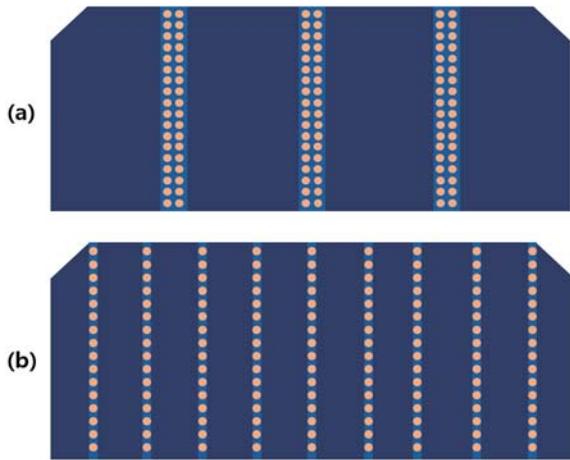


Fig. 1. (a) Conventional half-cut cell and (b) multi-busbar half-cut cell.

있으며 [4], 다수의 원형 와이어로 접합하는 공정은 일반 태양전지의 접합 공정보다 균일한 스트레스 분포를 보이며 더 나은 기계적 안정성을 나타낸다 [5].

고출력 태양광 모듈을 제작하기 위하여 MBB 태양전지에 와이어를 버스바 위에 솔더링하여 셀과 셀을 연결하는 접합 과정에 따라 전기적인 손실이 발생하게 되며, 이러한 손실은 와이어의 두께, hot plate 온도, IR lamp 온도에 의하여 영향을 받는다.

본 연구에서는 와이어를 접합하는 과정에서 발생하는 효율 손실을 조건별로 비교하고, 전기적 및 기계적 특성을 분석하고자 한다. 전기적 특성인 접촉저항을 추출하고, 기계적 특성을 비교하기 위하여 박리강도 테스트, SEM (scanning electron microscope) 및 EL (electroluminescence) 이미지의 결과를 비교하여 최종적으로 출력 손실이 다르게 나오는 원인을 조사하고자 하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 P-Type PERC (passivated emitter and rear contact) 태양전지를 IR laser (JYAS-1500-210, Wuxi New Glenn Intelligent Technology Co., Ltd. China)로 반으로 자른 하프 컷 셀을 사용하였다. 태양전지 셀의 면적이 절반으로 줄어들면 전류도 절반으로 줄어들기 때문에 저항에 의한 손실이 줄어들고 더 많은 전력을 생산할 수 있다 [6].

와이어(SN69PB40) 굵기는 260 μm , 320 μm 두 가지를 사용하였고, IR Lamp (infrared lamp)의 온도는 100°C에

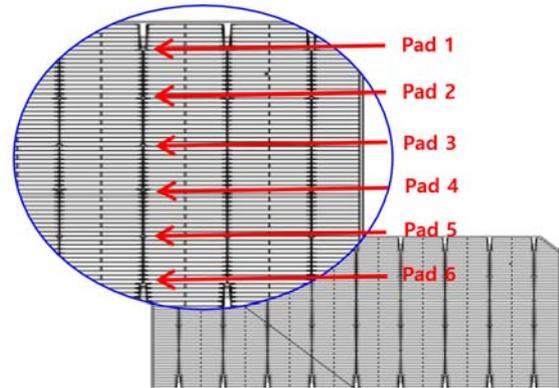


Fig. 2. Pad position of peel strength test.

서 160°C, hot plate의 온도는 80°C에서 180°C까지 가변할 수 있는 조건으로 샘플을 제작하였다. 와이어 솔더링은 IR lamp 방식의 multi-wires half-cut cell 전용 장비 [ZM-LM1221M-0010, (주)제우스, 대한민국]를 사용하였으며, hot plate의 열처리와 IR lamp의 빛조사가 동시에 이루어지며 솔더링 되는 방식이다 [7]. 와이어의 두께, 접합 공정에서의 hot plate 온도와 IR lamp의 온도를 가변하여 손실의 차이를 비교하고자 각 조건별 샘플을 제작하였다.

전기적 특성 저하의 원인을 해석하기 위하여 손실의 원인 중 하나인 와이어링 전과 후의 접촉저항의 값을 분석하였다. 이를 위해 PSPice (OrCAD 17.2, San Jose, CA, USA) 시뮬레이션을 통하여 접촉저항을 추출하였다. 접촉저항의 손실은 태양전지와 금속 접촉 사이의 계면에서 발생한다. 시뮬레이션 모델링은 이중 다이오드 모델을 기반하였고, 솔라 시뮬레이터(WXS-155S-L2, Wacom, Japan)와 DENKEN (DKSCT series, DENKEN Co., Ltd, Japan) 장비를 이용하여 추출한 셀의 IV 커브 데이터로 다이오드 소자를 모델링 하여 셀의 와이어링 전과 후의 최대출력 값을 비교하여 접촉저항을 추출하였다.

또한, 솔더링 조건에 따라 기계적 특성을 비교하기 위하여 DS2 Digital Force Gauge 장비를 이용하여 박리 강도 테스트를 진행하였다. 이는 분할 셀에 얇고 둥근 와이어를 솔더링하여 와이어 끝에 시험기를 걸어 90°로 박리시켜 하중 값 또는 강도 값을 측정하는 시험이다. 실험에 사용된 패드의 경우 그림 2와 같이 총 6개로, 각 솔더링 조건별로 패드에 접착된 와이어를 박리시킬 때의 강도를 측정할 후 각 패드의 load 값을 정리하여 그래프로 나타내었다.

와이어와 셀의 접합 상태가 전기적으로 어떤 영향을 미치는지 알아보기 위하여 EL 이미지를 찍어 비교하였다.

EL 이미지는 태양전지의 결함을 시각적으로 보여주어 이미지를 분석하여 전력 출력을 일으키는 결함 부분을 식별할 수 있다. 전면 및 후면 와이어에 굵은 리본을 솔더링하여 휴대용 EL 장비를 이용하여 EL 이미지를 분석하였다.

최종적으로 설정한 조건에 따라 와이어링 전과 후의 손실을 솔라 시뮬레이터를 이용하여 측정하여 보았다. 솔더링 전의 셀 효율을 먼저 측정하고, 이후에 분할 셀에 조건별로 가변하여 솔더링 된 셀을 동일한 광 조건에서 효율 특성을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

와이어링 접합 공정에 따른 효율 손실 정도를 비교하고, 전기적 및 기계적 특성을 분석한 결과로 PSPice를 통하여 추출한 접촉저항은 그림 3과 같이 와이어 두께 260 μm, IR lamp 160°C, hot plate 160°C일 때 $1.145 \times 10^{-3} \Omega$ 으로 가장 작게 추출되었고, 와이어 두께 320 μm, IR lamp 160°C, hot plate 180°C일 때 $5.885 \times 10^{-3} \Omega$ 으로 가장 크게 추출되었다. 기계적 강도를 비교하기 위하여 실험한 결과에서의 효율 손실이 최소화된 조건은 와이어 두께 260 μm, IR lamp 160°C, hot plate 160°C으로 전기적 특성의 결과와 동일하게 나타났음을 알 수 있다. 해당 조건에서의 효율 손실은 1.007%로 나타났다.

분할 셀에 와이어를 연결하는 과정에서 조건을 달리하여 전기적 특성을 분석하여 보았을 때, hot plate 온도가 160°C 이상일 때, 와이어의 두께가 320 μm보다는 260 μm일 때 접촉저항이 낮게 추출되었다. 또한, 전기적 특성을 비교하여 보았을 때, hot plate 온도가 180°C 이상일 때, 와이어의 두께가 320 μm이라면 접촉저항이 증가하여 효율 손실로 이어지는 것으로 나타났다.

그림 4의 박리 강도 테스트 결과를 보았을 때, 접촉 면적이 넓을수록 접촉 강도가 개선됨을 알 수 있다. 그러나 접촉 강도가 높은 조건이 효율 손실이 적은 것은 아니므로, 박리 강도가 높으면서도 균일도 및 솔더링 전후 효율 분석을 통해 최적 조건을 찾아야 한다.

IR lamp의 온도가 120°C 이하이거나, hot plate 온도가 140°C 이하일 경우 전면 및 후면의 와이어가 육안으로 눈에 띄게 접합이 되지 않거나 불안정한 형태를 보여 측정이 불가하였다. 이로 인한 결과로 IR lamp의 온도 조건은 120°C 이상이어야 함을 알 수 있다. 또한, 와이어의 두께 260 μm, IR lamp 온도 100°C, hot plate 온도 80°C의 조건은 후면 와이어가 불안정하게 접착되어 EL 이미지 특성 분석이 불가하였다. 이의 원인은 IR lamp 온도가 낮아 솔

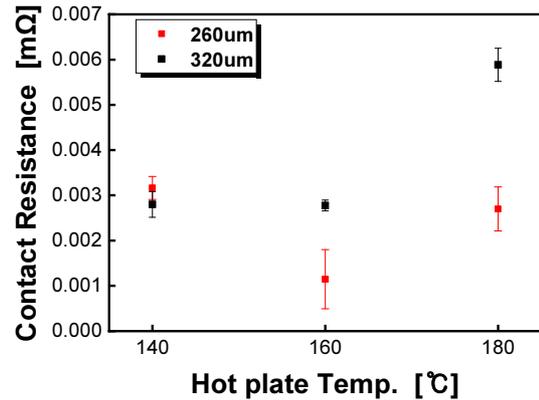


Fig. 3. IR lamp temp 160°C fixed, contact resistance varying hot plate temperature.

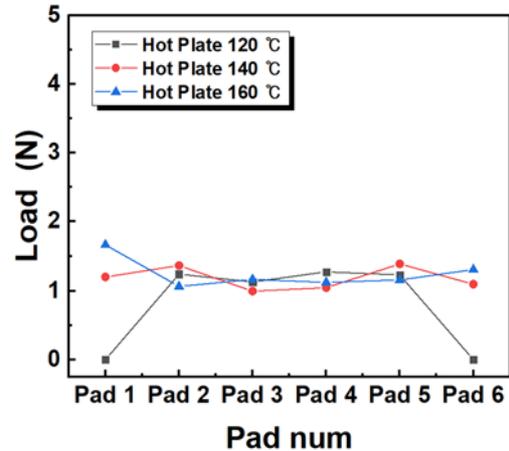


Fig. 4. Wire thickness 260 μm, IR lamp temp 140°C fixed, peel strength test conducted by varying hot plate temperature.

더링이 충분히 되지 않았기 때문으로 결론지었다.

IR lamp가 140°C인 조건에서는 hot plate의 온도가 120°C의 경우에 가장 낮은 효율 손실률을 보이지만, 박리 강도 시험 결과에 따르면 이러한 경우에 모든 패드에 접합되지 않고 불안정한 접착 형태를 보이기 때문에 160°C로 부착하였을 경우가 최적화된 조건이다.

와이어 두께 260 μm, IR lamp 온도 100°C, hot plate 온도 80°C의 조건의 경우, 아예 후면 쪽의 솔더링 된 와이어가 남아 있지 않았기 때문에 EL 이미지 측정이 불가하였으며, 나머지 조건에 의해 솔더링 된 셀의 EL 특성 분석 결과, 불안정한 접합 형태를 보였던 조건인 와이어 두께 260 μm, IR lamp 100~120°C, hot plate 80~140°C의 경우 셀의 중앙 부분과 끝부분의 밝기 차이가 있는 것을 알 수 있었다. 불안정한 스트링의 경우 EL 이미지가 어둡거나 측정

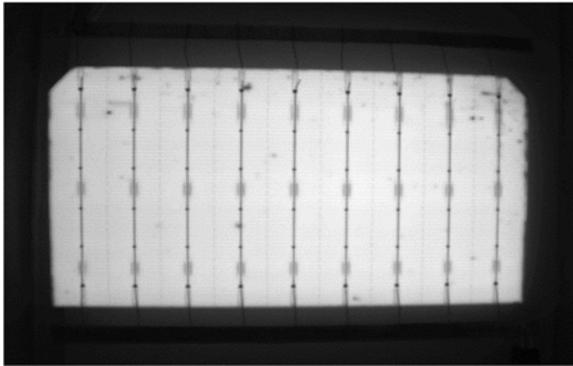


Fig. 5. EL image with wire thickness of 260 μm , IR lamp 160 $^{\circ}\text{C}$, and hot plate 160 $^{\circ}\text{C}$.

이 불가하였다. 그림 5와 같이 비교적 높은 온도에서 와이어와 셀이 잘 결합될수록 EL 이미지가 선명하게 나오는 것을 확인할 수 있었다.

솔라 시뮬레이터를 이용하여 추출한 IV 커브 분석 결과, IR lamp의 온도가 120 $^{\circ}\text{C}$ 미만인 경우, 셀의 직렬저항이 매우 커져 커브의 기울기가 매우 증가하여 와이어링 전과 후의 비교 시 많은 출력 손실로 이어지는 것으로 나타났다. 또한, 낮은 온도에서는 와이어가 제대로 접촉되어 있지 않아 IV 커브의 그래프의 차이가 크게 나타났다. 출력 손실은 솔더링이 불안정하여 핑거바에서 오는 전류 수집에서의 손실이 생겨 IV 커브 그래프에서의 전류 차이가 생긴다. 직렬저항이 커지게 되면 태양전지 곡선인자에 영향을 주나, 개방전압에 큰 영향을 미치지 않는다 [8]. 태양전지의 저항은 전면 전극에서의 저항이 가장 높은 비중을 차지하며, 그중 핑거바 전극에 의한 손실이 가장 큰 것으로 보고되고 있다 [9]. 정량적인 비교를 위하여 효율 손실의 정도를 솔더링 조건별로 비교해 본 결과, IR lamp 120 $^{\circ}\text{C}$ 이하의 조건은 다른 조건들에 비하여 충전율(fill factor)의 저하로 인한 효율 손실의 정도가 매우 큰 것으로 나타났다. 또한, IR lamp의 온도는 120 $^{\circ}\text{C}$ 이상이 필수 조건이며, 140 $^{\circ}\text{C}$ 이상일 때의 효율 손실 정도를 계산해 보았을 때 모든 조건에서 hot plate 온도와 관계없이 3% 이내의 손실을 가진다.

4. 결론

본 연구에서는 고출력 태양광 모듈을 위한 MBB (multi-busbar) 분할 셀을 사용하여 와이어를 솔더링 하였을 때의 전/후 손실 효율을 비교하고, 전기적 및 기계적 특성을 비교하고자 하였다.

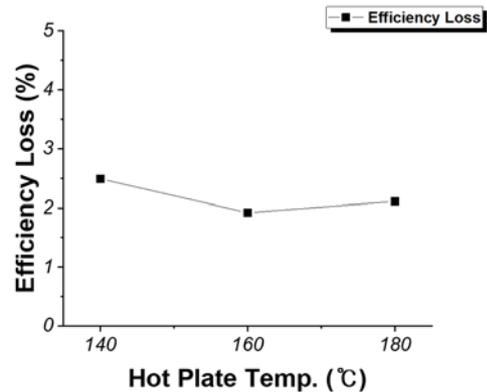


Fig. 6. Wire thickness 260 μm , IR lamp temp 160 $^{\circ}\text{C}$ fixed, efficiency loss ratio varying hot plate temperature.

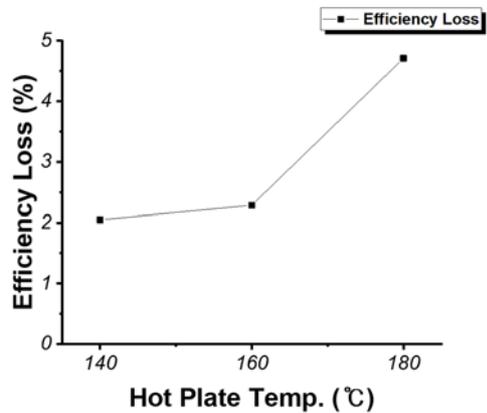


Fig. 7. Wire thickness 320 μm , IR lamp temp 160 $^{\circ}\text{C}$ fixed, efficiency loss ratio varying hot plate temperature.

접합 공정 중 와이어의 두께, IR lamp의 온도, hot plate의 온도를 가변하여 셀과 와이어를 연결하는 과정에서의 손실을 최소화하고자 하였다. MBB (multi-busbar) 태양전지는 일반 태양전지보다 버스바의 개수가 많고, 셀과 셀을 연결하는 접합 공정에서 다수의 얇은 원형 와이어를 사용하여 접합하기 때문에 유효 수광 면적이 늘어나게 되므로, 기존 태양전지보다 효율 특성이 좋게 나타난다. 결론적으로, 솔더링 조건에 따라 전기적 및 기계적 특성을 분석한 결과, 설정한 13가지 조건 중 그림 6과 그림 7에서 볼 수 있듯이 와이어 두께 260 μm , IR lamp 160 $^{\circ}\text{C}$, hot plate 160 $^{\circ}\text{C}$ 에서 효율 손실이 최소화되었다.

ORCID

Jae Hyeong Lee

<https://orcid.org/0000-0001-7775-1142>

감사의 글

본 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구입니다 [20213030010290, 장기 신뢰성(25년 이상)과 안정성이 확보된 건물형 태양광 핵심 소재 개발].

본 논문은 2023년도 산업통상자원부의 재원으로 한국 에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(RS-2023-00266248).

REFERENCES

- [1] Y. Noh, J. Yoo, and J. Lee, *Curr. Photovoltaic Res.*, **10**, 111 (2022).
doi: <https://doi.org/10.21218/CPR.2022.10.4.111>
- [2] T. Panda, S. Sadhukhan, S. Acharyya, P. Banerjee, A. Nandi, S. Bose, N. Mondal, G. Das, S. Maity, P. Chaudhuri, and H. Saha, *Sol. Energy*, **236**, 790 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.03.051>
- [3] J. Kim, S. Ur, D. Lim, and J. Lee, *J. Korean Sol. Energy Soc.*, **43**, 63 (2023).
doi: <https://doi.org/10.7836/kses.2023.43.3.063>
- [4] J. H. Kim, H. J. Son, and S. H. Kim, *Curr. Photovoltaic Res.*, **7**, 65 (2019).
doi: <https://doi.org/10.21218/CPR.2019.7.3.065>
- [5] J. Walter, L. C. Rendler, C. Ebert, A. Kraft, and U. Eitner, *Energy Procedia*, **124**, 515 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.288>
- [6] A. Joshi, A. Khan, and A. Sp, *Proc. 2019 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)* (IEEE, Dubai, United Arab Emirates, 2019).
doi: <https://doi.org/10.1109/ICASET.2019.8714488>
- [7] J. J. Lee, H. J. Son, and S. H. Kim, *Curr. Photovoltaic Res.*, **5**, 83 (2017).
doi: <https://doi.org/10.21218/CPR.2017.5.3.083>
- [8] J. Park, Y. Jeon, M. Jang, M. Kim, and D. Lim, *Curr. Photovoltaic Res.*, **9**, 123 (2021).
doi: <https://doi.org/10.21218/CPR.2021.9.4.123>
- [9] J. A. Nelson, *The Physics of Solar Cells* (World Scientific Publishing Company, 2003).