

고출력 싱글드 모듈 제작을 위한 결정질 실리콘 태양전지 분할 셀의 전기적 특성

노은빈¹, 배재성¹, 김정훈², 유종현³, 이재형¹ 

¹ 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

² (주) 탑선 기술연구소

³ (주) 제너셈 R&D 센터

Electrical Characteristics of Crystalline Silicon Solar Cell Strip for High Power Photovoltaic Modules

Eun Bin Noh¹, Jae Sung Bae¹, Jung Hoon Kim², Jong Hyun You³, and Jaehyeong Lee¹

¹ Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

² Research Institute, Topsun Co., Jangseong 57241, Korea

³ R&D Center, Genesem Inc., Incheon 21984, Korea

(Received June 25, 2021; Revised July 25, 2021; Accepted July 26, 2021)

Abstract: As the demand for new and renewable energy increases due to the depletion of fossil fuels, solar power generation, a core energy source for new and renewable energy, requires research on solar modules for high output power generation. In this paper, the electrical characteristics of solar cell strip at the edge and in the center of single-crystal silicon having a semi-square shape were analyzed. The cell strip located in the center showed the efficiency increase by 0.26% compared to the cell strip at the edge of the solar cell. A shingled photovoltaic module was manufactured for each cell strip. As a result, the output power of the module using the cell strip located in the center was higher by 0.992%.

Keywords: Shingled photovoltaic module, Single crystalline silicon, Solar cell strip, Electrical properties

1. 서론

화석연료의 고갈로 인하여 대체 에너지의 개발이 주목되고 있으며 환경오염과 온실효과를 초래하지 않는 신재생 에너지 필요성이 날이 높아지고 있다 [1]. 특히, 태양광 발전은 태양 에너지를 전기 에너지로 변환시키는 신재

생 에너지의 핵심 에너지원으로 주목받고 있다 [2]. 태양광 산업은 높은 발전량을 위해 태양광 모듈에 관련된 연구가 활발히 이루어지고 있다. 기존의 태양광 모듈은 6인치 크기의 태양전지를 금속 리본(metal ribbon)으로 연결하여 제작하는 방식으로 다수의 셀들을 연결하여 스트링(string)을 제작할 때 셀들 사이의 전기적으로 분리하기 위한 공간이 필요하다. 이 공간은 모듈에 전류가 생성되지 않는 빈 여백으로 CTM (cell-to-module) 손실이 발생한다 [3-5]. 반면, 싱글드(shingled) 태양광 모듈은 전면 버스바(busbar)를 따라 분할 후 분할된 셀(cell strip)의 전면 버스바에 ECA (electrically conductive adhesives)를 도

✉ 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.

포하여 다른 분할 셀의 후면과 접합하는 방식으로 제작된다. 분할된 셀을 접합하는 방식은 전면에 버스바가 겹쳐지기 때문에 버스바에 의한 광학적 손실이 감소되어 단위 면적당 출력이 증가한다 [6,7]. 싱글드 태양광 모듈은 CTM 손실을 줄일 수 있는 효과적인 방법 중 하나이다 [8]. 이에 더하여 싱글드 태양광 모듈의 고효율화를 위해서는 고효율 단결정 태양전지를 사용할 필요가 있다. 단결정 실리콘은 정사각형 모형이 아니기 때문에(semi-square) 분할할 경우 분할 셀의 형태가 다르다. 특히, 단결정 실리콘의 가장자리(edge) 부분은 빈 공간이 발생하기 때문에 고밀도 태양광 모듈을 제작하기 어렵다 [9]. 이러한 형태를 가진 태양전지는 분할 시 가장자리 셀(edge cell)과 가운데 셀(center cell)의 효율이 다르게 나타날 수 있다 [10].

본 논문에서는 고효율 싱글드 태양광 모듈 제작을 위해 사용되는 태양전지를 분할 시 가장자리와 가운데(center) 부분 분할 셀의 전기적 특성 및 효율 손실 원인을 분석하였고, center 및 edge cell을 사용하여 싱글드 모듈을 제작하여 비교하였다.

2. 실험 방법

그림 1은 태양전지의 분할 전후 전기적 특성을 비교 및 효율 손실 원인 분석을 위해 설계된 단결정 실리콘 태양전지의 전, 후면 전극 패턴을 나타낸다. 태양전지는 156.75 mm × 156.75 mm 면적에 버스바의 폭은 1 mm이며, edge margin은 0.8 mm로 설계하였다. 태양전지를 4분할하기 위한 전면 및 후면 전극 구조로 핑거(finger) 40 μm 폭을 가지며, 핑거 개수는 106개로 제작하였다.

그림 2는 4분할 전극 패턴을 갖는 태양전지를 분할하기 위한 레이저 스크라이빙 라인을 나타내며, green 레이저(coherent matrix 532-14-40, scan-speed=1,300 mm/s, frequency=50 kHz, current=80%, spot-size=27 μm)을 이용하여 스크라이빙 하였다. 분할된 셀의 크기는 39.19 mm × 156.75 mm이고 분할 후 풀 셀의 중간 부분에 해당하는 분할 셀(center cell)은 직사각형을 이루지만 양 끝에 위치했던 분할 셀(edge cell)은 중간 부분에 해당하는 분할 셀과 다르게 chamfer 형태를 이루는 것을 알 수 있다.

싱글드 태양광 모듈의 출력 차이를 조사하기 위해 4분할 전극 패턴을 갖는 center 및 edge cell을 사용하여 제작되었다. 싱글드 태양광 모듈은 기존의 태양전지를 분할 후 접합하여 만들어진 스트링으로 제작하기 때문에 사용되는 분할 셀 세로 길이는 4분할 전극 패턴을 갖는 태양전지 길이인 156.75 mm로 정해져 있다. 이때 싱글드 스트링 제작

시 39.19 mm × 156.75 mm 크기의 분할 셀을 스트링거(stringer, Genesem Inc, Korea) 장비를 이용하여 전면 버스바에 ECA를 도포하여 14개를 직렬 접합하였다. 총 24개의 스트링 직렬 연결하여 1,302 mm × 1,634 mm 크기의 모듈을 제작하였다.

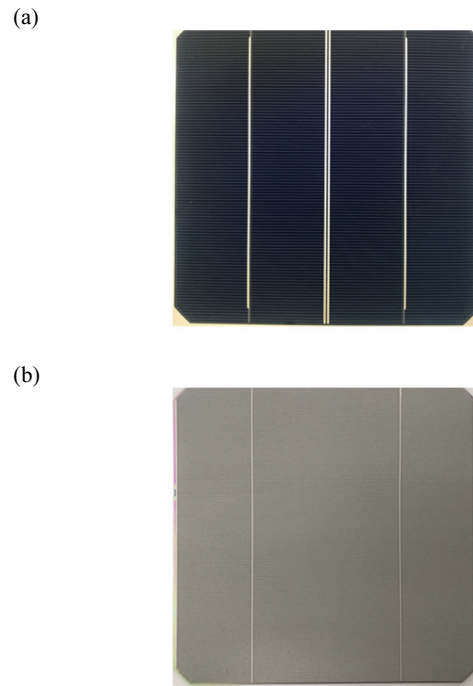


Fig. 1. (a) Front and (b) back electrode structure single crystal silicon solar cell.

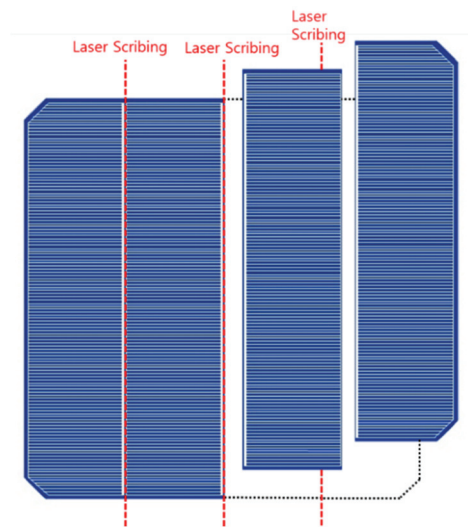


Fig. 2. Laser scribed lines for single crystal silicon solar cell.

3. 결과 및 고찰

표 1은 4분할 전극 패턴을 갖는 단결정 실리콘 태양전지의 분할 전후의 특성 변화를 나타낸 것으로 풀 셀의 중앙 부분에 위치한 center cell의 효율은 분할 전보다 높은 것으로 나타나지만 가장 자리에 위치했던 edge cell은 효율이 감소하였다. 태양전지를 분할함에 따라 V_{oc} (open-circuit voltage) 및 FF (fill factor)의 감소에도 불구하고 center cell은 J_{sc} (short-circuit current density)의 증가로 인해 edge cell에 비해 0.26% 효율 증가를 보여주었다. 태양전지의 재결합 성분에 의한 누설전류를 확인하기 위해 역포화 전류(reverse saturation current) I_{01} , I_{02} 를 2-diode 모델의 log J-V의 특성곡선을 통해 계산하였다.

Table 1. Comparison of solar cell characteristics before and after dividing.

Parameter	Measured characteristics		
	Full cell	Divided center cell	Divided edge cell
I_{sc} (A)	9.402	2.425	2.342
J_{sc} (mA/cm ²)	38.466 (±0.267)	39.454 (±0.338)	38.527 (±0.304)
V_{oc} (V)	0.676	0.672	0.672
FF (%)	78.157	77.660	77.488
Efficiency (%)	20.329 (±0.193)	20.592 (±0.255)	20.135 (±0.429)
V_{pm} (V)	0.563	0.558	0.559
I_{pm} (A)	8.829	2.266	2.191
R_s (mΩ)	5.464	22.855	23.601
R_{sh} (mΩ)	40.290	260.435	613.616
I_0 (μA)	0.183	0.217	0.587

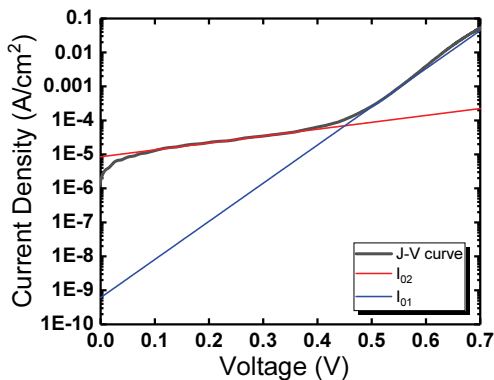


Fig. 3. Dark J-V characteristic curve of reverse saturation current.

I_{01} 누설전류는 그림 3에서 0.45 V에서 0.55 V에 접선을 그어 Y절편에 해당하는 값이며, I_{02} 는 0.3 V에서 0.35 V에서 접선의 Y절편 값을 통해 추출하였다. 이를 통해 재결합 성분에 의한 누설 전류 I_0 를 얻을 수 있다. 태양전지를 분할함에 따라 edge에서의 passivation layer 제거로 인한 재결합 증가로 인해 I_0 가 분할 전 0.183 μA, 분할 후 center cell은 0.217 μA, edge cell은 0.587 μA로 분할 후 I_0 의 증가는 V_{oc} 와 FF의 감소에 영향을 미치는 것을 식 (1)과 (2)를 통해 볼 수 있다 [11].

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right) \quad (1)$$

$$FF = \frac{V_{oc} - \ln(V_{oc} + 0.72)}{V_{oc} + 1}, \text{ where } V_{oc} = \frac{q}{nkT} V_{oc} \quad (2)$$

그림 4는 EL 측정을 통한 분할 전후 풀 셀 중심부의 center cell과 가장 자리의 edge cell의 전계 발광 세기를 나타낸 것이다. 흰색 부분은 전계 발광 현상이 잘 일어나는 부분이고 초록색 영역은 전계 발광 현상이 잘 일어나지 않는 부분을 나타낸다. 풀 셀의 모서리 부분은 edge recombination effect로 인해 중심부보다 발광의 세기가 작다. Center cell의 경우, 풀 셀에 비해 전체 면적에서 전계 발광이 강하게 나타나는 면적 비율이 커지는데, 이것은 전극을 통해 유효하게 수집되는 캐리어 수 또는 J_{sc} 의 증가를 의미한다. 풀 셀의 전체 면적에서 초록색 부분은 전계 발광이 약하게 나타나는 영역이며, 그 면적의 비율은 6.867%로 나타낼 수 있다. Center cell의 경우 2.55%, edge cell은 11.114%로 나타난 반면에, edge cell의 경우에 edge recombination effect로 인해 풀 셀과 center cell에 비해 전계 발광 현상이 잘 일어나지 않는 것을 확인할 수 있으며 측정된 결과에서도 상대적으로 낮은 J_{sc} 를 확인하였다.

그림 5는 center 및 edge cell을 적용하여 직렬 구조로 연결하여 제작한 싱글드 모듈을 나타낸 것이다.

표 2는 4분할 전극 패턴을 갖는 단결정 실리콘 태양전지의 center 및 edge cell을 적용한 모듈 특성을 나타내었다. 모듈 출력 분석한 결과 center cell을 사용한 모듈 출력특성은 edge cell을 사용한 모듈 출력특성보다 약 0.992% 높게 분석되었다. 이는 edge cell을 사용한 모듈은 center cell을 사용한 모듈보다 빈 공간이 많기 때문에 단락전류 (short circuit current, I_{sc})의 감소로 모듈 출력이 낮은 것으로 생각된다. 따라서 태양전지의 center cell을 사용한 모듈이 edge cell을 사용한 모듈보다 출력 특성이 더 좋은 것을 알 수 있다.

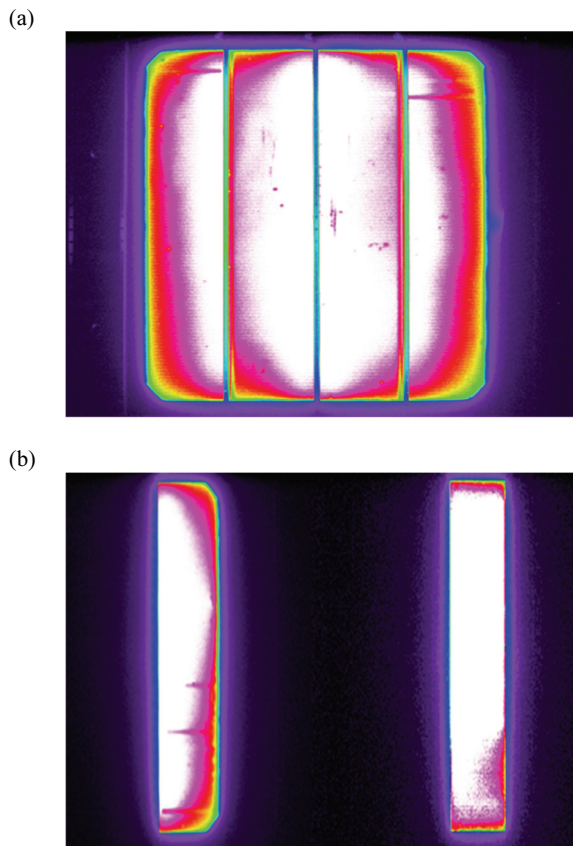


Fig. 4. (a) EL image of full cell and (b) comparison EL image: edge cell vs center cell.

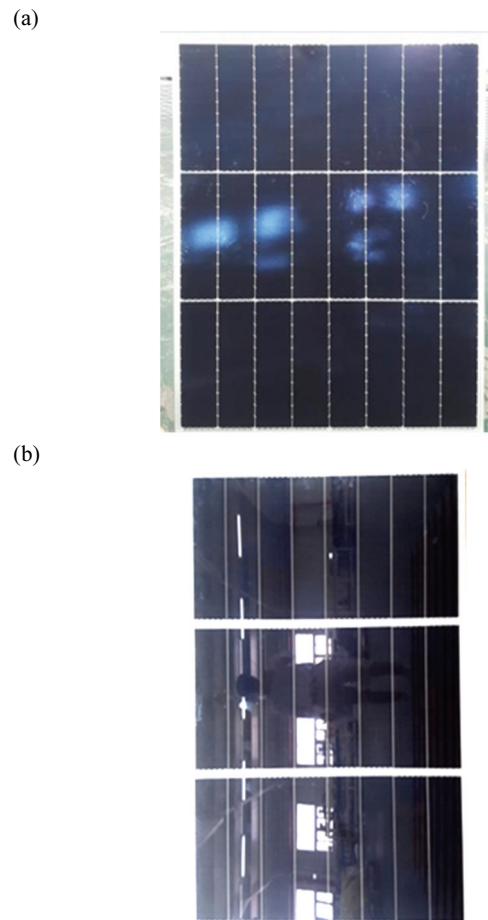


Fig. 5. Mini photo of shingled module edge (a) center and (b) cell strip.

Table 2. Comparison of electrical characteristics of shingled photovoltaic module with center and edge cell strip.

Parameter	Module 1			Module 2		
	Edge-1	Edge-2	Edge-3	Center-1	Center-2	Center-3
V_{oc} (V)	214.3	214.2	214.9	214.1	213.4	213.8
I_{sc} (A)	2.184	2.182	2.190	2.214	2.209	2.205
FF (%)	78.896	78.974	78.466	78.683	79.104	79.126
V_{pm} (V)	177.7	177.8	177.2	177.1	177.4	177.8
I_{pm} (A)	2.078	2.076	2.084	2.106	2.102	2.098
P_{max} (Wp)	369.184	369.081	369.284	372.995	372.918	373.095
CTM loss [%]	-4.072	-4.098	-4.046	-3.081	-3.101	-3.055

4. 결론

본 논문에서는 고출력 싱글드 태양광 모듈 제작을 위해 싱글드 태양광 모듈에 사용되는 결정질 실리콘 태양전지의 center 및 edge cell의 특성과 적용된 모듈의 출력 특성 분석을 진행하였다. 싱글드 모듈을 만들기 위해서 태양전지를 분할하는 과정이 필요하다. 이때 태양전지의 가운데 부분과 가장자리 부분의 특성이 다르게 나타나는데 center cell이 레이저 스크라이빙에 의해 J_{SC} 의 증가로 인해 효율 약 0.26%의 증가를 보여주었다. 또한 태양전지의 edge cell과 0.457% 효율 차이를 보였다. center cell을 사용한 모듈 출력이 약 0.992% 높게 나타났고, 결정질 실리콘 태양전지의 center cell을 사용할수록 모듈 출력이 높게 나타나는 결과를 만들었다. 이는 태양전지의 중간 부분에 해당하는 center cell strip을 사용하여 싱글드 기술을 이용한 모듈 제작 시 기존의 모듈보다 공간 활용이 높아 상대적으로 높은 출력과 효율을 얻을 수 있을 것으로 기대한다.

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.20203030010200).

REFERENCES

- [1] A. Sfetsos, *Renewable Energy*, **27**, 163 (2002). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(01\)00193-8](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(01)00193-8)]
- [2] T. Meyer and J. Luther, *Energy Convers. Manage.*, **45**, 2639 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.12.023>]
- [3] M. T. Zarnai, 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>]
- [4] A. W. Blakers, *J. Appl. Phys.*, **71**, 5237 (1992). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.350580>]
- [5] P. P. Altermatt, *J. Comput. Electron.*, **10**, 314 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s10825-011-0367-6>]
- [6] J. Zhao, A. Wang, E. Abbaspour-Sani, F. Yun, and M. A. Green, *IEEE Electron Device Lett.*, **18**, 48 (1997). [DOI: <https://doi.org/10.1109/55.553040>]
- [7] N. Wöhrle, E. Lohmüller, M. Mittag, A. Moldovan, P. Baliozian, T. Fellmeth, K. Krauss, A. Kraft, and R. Preu, *Photovoltaics International* (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg, Germany, 2017) p. 48 [<https://www.pv-tech.org/technical-papers/solar-cell-demand-for-bifacial-and-singulatedcell-module-architectures/>]
- [8] M. Mittag, T. Zech, M. Wiese, D. Blasi, M. Ebert, and H. Wirth, *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)* (IEEE, Washington, USA, 2017) p. 1531. [DOI: <https://doi.org/10.1109/PVSC.2017.8366260>]
- [9] A. Fell, J. Schön, M. Müller, N. Wöhrle, M. C. Schubert, and S. W. Glunz, *IEEE J. Photovoltaics*, **8**, 428 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2017.2787020>]
- [10] W. J. Oh, J. S. Park, S. H. Hwang, S. H. Lee, C. H. Jeong, and J. H. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **31**, 290 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2018.31.5.290>]
- [11] B. Qi and J. Wang, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **15**, 8972 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1039/C3CP51383A>]