

Shingled 모듈 적용을 위한 태양전지 전극 구조 최적화

오원제¹, 박지수¹, 황수현¹, 이수호¹, 정채환², 이재형^{1,a}

¹ 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

² 한국생산기술연구원 태양전지R&D센터

Optimization of Solar Cell Electrode Structure for Shingled Module

Won Je Oh¹, Ji Su Park¹, Soo Hyun Hwang¹, Su Ho Lee¹, Chae Hwan Jeong², and Jae Hyeong Lee^{1,a}

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

² Solar cell R&D center, Korea Institute of Industrial Technology, Gwangju 61012, Korea

(Received March 12, 2018; Revised March 30, 2018; Accepted April 3, 2018)

Abstract: The shingled photovoltaic module can be produced by joining divided solar cells into a string of busbarless structure and arranging them in series and parallel to produce a module, in order to produce a high output per unit area. This paper reports a study to optimize solar cell electrode structure for shingled photovoltaic module fabrication. The characteristics of each electrode structure were analyzed according to the simulation program as follow: 80.62% fill factor in the six-junction solar cell electrode structure and 19.23% efficiency in the five-junction electrode structure. Therefore, the split electrode structure optimized for high-density and high-output shingled module fabrication is the five-junction solar cell electrode structure.

Keywords: Solar cell, Divided cell, Shingled module, Electrode structure, Simulation

NOMENCLATURE

V_{oc}	: Open-circuit voltage
J_{sc}	: Short circuit current density
FF	: Fill-Factor
Eff	: Efficiency
V_{mp}	: Maximum power point voltage
I_{mp}	: Maximum power point current
J_{mp}	: Maximum power point current density
R_s	: Series resistance
R_{sh}	: Shunt resistance

a. Corresponding author; jaehyeong@skku.edu

Copyright ©2018 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.

1. 서론

태양광 발전은 오염이 없으며 지속 가능한 에너지라는 측면에서 사회 경제적 중요성을 가지게 되었고, 2014년 이후 세계적으로 태양전지의 연구 개발 투자가 활발히 진행되고 있다 [1]. 하지만 현재 태양전지 연구개발 과정에서 실리콘 태양전지의 효율은 한계치에 도달하였다. 실리콘 태양전지의 제조 단가가 상승하게 되면서 효율 향상의 문제 이외에도 단가 절감이 필수적이다. 태양광 발전 단가에는 태양전지 모듈의 가격, 토지 비용을 포함한 시스템 설치 비용 및 유지 비용 등이 있다 [2]. 따라서 태양광 발전단가를 줄이기 위해 태양전지의 고출력을 위한 고밀도, 고효율화 기술이 필요하다.

일반적인 태양광 모듈은 태양전지의 전면에 있는 Ag 버스바(busbar)를 인접한 다른 태양전지 후면에 금속 리본을 납땜하여 연결한다. 이 방법은 공정상 설

비가 단순하여 신뢰성이 높지만 출력저하를 일으키는 몇 가지 문제점을 가지고 있다. 먼저 태양전지 전면 리본으로 인해 전류 수집에 손실을 야기하며, 또한 솔더링 과정에서 태양전지에 국부적인 열전달과 압력으로 인한 스트레스와 미세 균열을 일으킬 수 있다. 그리고 여러 태양전지에서 출력되는 전류들이 리본을 통해 이동하면서 리본 저항에 의한 전류 손실이 발생할 수 있다 [3]. 이러한 문제점들을 해결할 수 있는 새로운 모듈 제작 기술들이 개발되고 있다. 이들 가운데 고효율, 고출력을 위한 새로운 태양전지 연결 방식인 shingled 모듈 제작기술은 셀의 분할/접합을 통해 버스바가 없는(busbar-less) 장점을 가진다. 이러한 버스바가 없는 분할/접합 구조의 스트링은 음영에 따른 출력 저하와 리본 솔더링으로 인한 스트레스를 제거할 수 있다. 또한 리본의 저항으로 인한 전기적 손실을 감소시켜 면적당 에너지 생산량을 늘려 모듈 단위에서 효율을 상승시킬 수 있다. 따라서 본 논문에서는 shingled 모듈에 적용 가능한 태양전지의 전극 구조들을 설계하였고 시뮬레이션을 통해 각각의 특성을 비교, 분석하여 최적화된 전극 구조를 최적화하였다. 또한 분할 전극 구조 셀을 제작하여 측정된 결과와 시뮬레이션 결과와 비교하여 유사성을 검증하였다.

2. 실험 방법

2.1 셀 분할 수에 따른 전극 구조 설계

분할/접합 구조의 스트링은 분할된 태양전지를 ECA (electrically conductive adhesive)로 접합하여 하나의 스트링으로 만들어진다. 이러한 스트링을 직렬 또는 병렬로 배열하여 그림 1과 같은 모듈을 제작하게 된다.

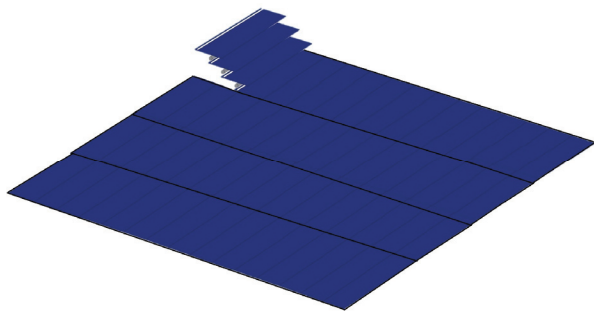


Fig. 1. Singled photovoltaic module structure.

Shingled 모듈에 적용되는 태양전지는 분할 패턴에 따라 셀의 특성이 변화되고 결과적으로 이를 이용한 스트링 또는 모듈의 출력이 제한된다. 본 논문에서는 3분할에서 6분할 패턴까지의 태양전지 전극 구조를 설계하고, Griddler 시뮬레이션 프로그램 [4]을 이용하여 셀 특성 변화를 조사하였다. 그림 2는 분할 패턴의 전극 구조 중 5분할 전극 패턴을 예를 들어 나타낸 것으로 빨간색 선은 전면 핑거(finger)와 버스바, 파란색은 후면 Ag 패드를 나타낸 것이다. 셀 크기는 가로, 세로 156.75 mm, 핑거의 개수는 104개, 핑거의 폭은 50 μm이다. 절단 선은 노란색 점선으로 표현했으며 분할 전극 구조의 특성상 절단되어 다른 분할 셀과 접합되는 부분의 Ag 버스바는 3 mm이며, 절단이 이루어지지 않는 양 끝단의 버스바의 폭은 1.5 mm이다. 그림 3은 분할 후 태양전지의 시뮬레이션 결과 확인을 위해 제작한 5분할된 태양전지 구조이다. 버스바는 1.5 mm이며 분할된 태양전지이기 때문에 웨이퍼 폭은 31.15 mm이다.

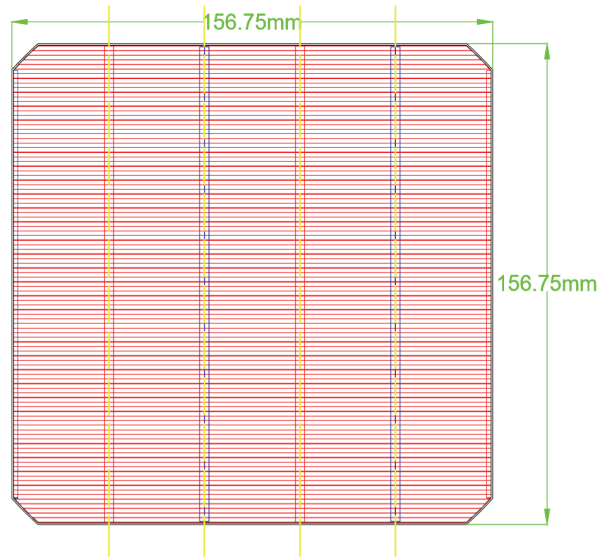


Fig. 2. Electrode structure for five shingled solar cell.

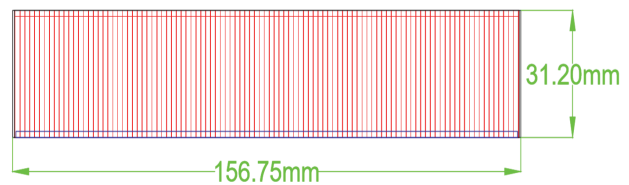


Fig. 3. Electrode structure of 5 divided solar cell.

2.2 시뮬레이션 모델 변수 설정

분할 패턴 태양전지의 특성을 분석하기 위해서 Griddler 시뮬레이션 프로그램에 앞서 제작한 도면을 입력시킨다. 그 후에 변수들은 표 1의 값을 사용했다. 버스바와 핑거는 같은 Ag로 면저항(sheet resistance)은 $3 \text{ m}\Omega/\text{sq}$ 를 사용했고, 전면에서 핑거와 실리콘 사이에 존재하는 접촉 저항은 약 $1\sim 3 \text{ m}\Omega/\text{cm}^2$ 으로 $2 \text{ m}\Omega/\text{cm}^2$ 를 사용하였다 [5]. 레이어 면저항은 에미터 층의 면저항에 해당하는데 일반적인 결정질 실리콘 태양전지에서의 평균값인 $80 \text{ }\Omega/\text{sq}$ 사용하였다 [6].

Table 1. Input parameters of griddler simulation program for electrode structure optimization.

Input parameters	
Finger sheet resistance	$3 \text{ m}\Omega/\text{sq}$
Busbar sheet resistance	$3 \text{ m}\Omega/\text{sq}$
Finger contact resistance	$2 \text{ m}\Omega/\text{cm}^2$
Emitter sheet resistance	$80 \text{ }\Omega/\text{sq}$

2.3 분할/접합 태양전지 제작과 특성 비교

Shingled 모듈에 적용 가능하기 위해서는 시뮬레이션 뿐만 아니라 실제 셀을 분할/접합하여 특성 변화를 확인해 보아야 한다. 따라서 태양전지의 분할 전후의 특성 변화와 접합 전/후의 특성 변화에 대해 분석하였다.

먼저 셀 분할 장비를 사용하여 태양전지를 분할하였다. 분할 장비에는 green 레이저를 사용했으며 레이저의 파장은 532 nm , scan-speed는 $1,300 \text{ mm/s}$, 주파수는 50 kHz 이다. 분할된 태양전지를 ECA로 접합된 태양전지를 제작했다. 본 논문에서는 4분할 전극 구조의 태양전지를 분할/접합하여 특성 변화를 확인하고 분할 전후와 접합 전후의 특성 변화에 대해 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 분할 수에 따른 특성 해석

표 2와 그림 4는 분할 전극 종류에 따른 특성 변화를 시뮬레이션 결과로 나타낸 것이다. 시뮬레이션에 사용된 입력 파라미터들은 모든 패턴에 동일하기 때문에

Table 2. Simulation result of solar cell with different electrode structure for cell division.

Division number	3	4	5	6
V_{oc} (mV)	657	657	657	656
J_{sc} (mA/cm ²)	37.23	36.91	36.5	36.18
FF (%)	76.63	78.83	80.25	80.62
Eff (%)	18.76	19.12	19.23	19.13
V_{mp} (mV)	541	552	559	561
I_{mp} (A)	8.47	8.47	8.41	8.33
J_{mp} (mA/cm ²)	34.66	34.65	34.4	34.11
R_s (m Ω)	5.8095	4.9655	4.5058	4.2142
Shading ratio (%)	5.98	6.8	7.83	8.64

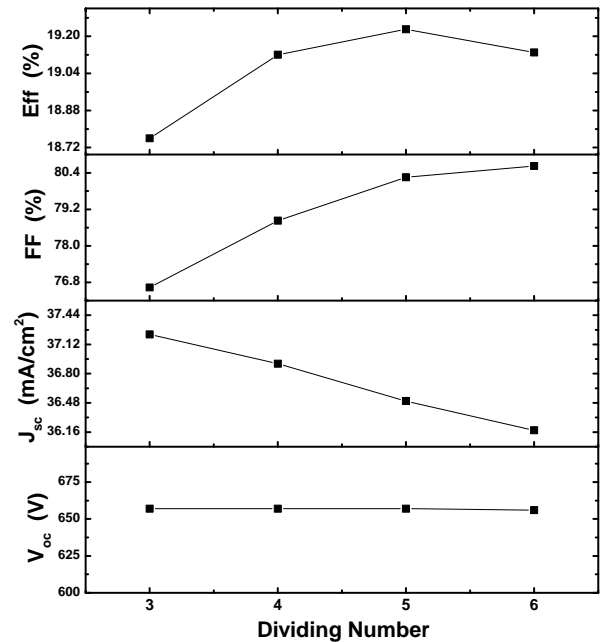


Fig. 4. Photovoltaic characteristics of the solar cell with various electrode structure for cell division.

도핑 농도 등과 같은 공정 변수에 의해 영향 받는 개방전압(open-circuit voltage)은 분할 전극 구조에 상관없이 거의 일정함을 볼 수 있다. 단락전류밀도(short-circuit current density)는 셀 분할 개수가 많아짐에 따라 전극으로 인한 광학적 손실 증가로 인해 감소한다. 즉 3분할 패턴 셀의 경우, 전극에 의해 가려지는 면적 비율이 5.98%였으나, 6분할 전극 패턴에서는 8.64%로 증가하였다. 그 결과 전면 전극으로 인한 음영으로 발생하는 전류량이 감소하여 그림 5와 같이 분할 셀 수

가 많아질수록 Shading J_{sc} 가 감소하는 것을 볼 수 있다.

곡선인자(fill factor)의 경우, 셀의 직렬저항(series resistance)과 병렬저항(shunt resistance)에 영향을 받으나, 여기에서는 전극 구조만 고려하고 있으므로 R_s 가 FF 변화의 주된 원인으로 볼 수 있다. 그림 6은 분할 전극 종류에 따른 FF와 직렬저항의 변화를 나타낸 것이다. 3분할 전극 셀의 R_s 는 5.8 m Ω 이며 분할 수가 많아질수록 직렬저항이 작아져 6분할 전극 셀의 경우 4.2 m Ω 이다. 셀 분할 수가 증가함에 따라 전면에서의 전극면적 증가로 인해 직렬저항이 감소하며, 그 결과 FF가 향상된다 [7]. 효율은 5분할 전극 구조에서 19.23%로 다른 전극 구조보다 가장 높은 수치를 나타냈다.

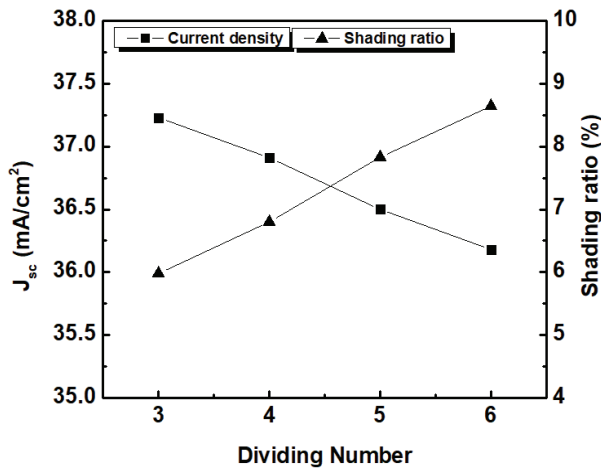


Fig. 5. Dependence of cell division number on the J_{sc} and shading ratio.

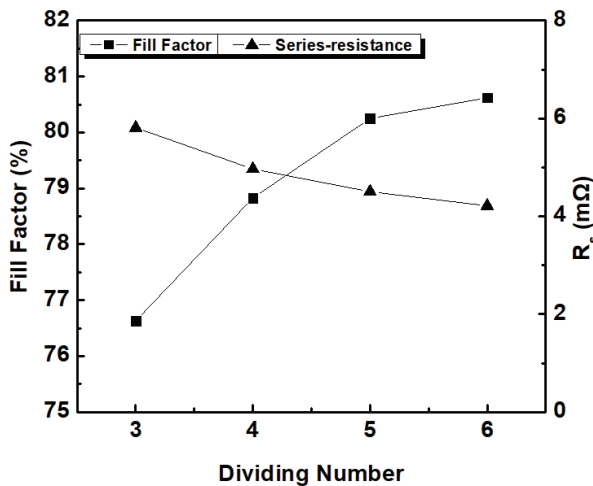


Fig. 6. FF and R_s as a function of cell division number.

3.2 분할 태양전지의 특성 비교

최적화된 분할 패턴의 태양전지를 shingled 모듈에 적용하기에 앞서 시뮬레이션을 통해 분할 전후의 태양전지 특성을 비교 분석하였고 실제로 분할 태양전지를 제작한 후에 특성을 변화를 조사하였다. 또한 분할된 태양전지를 ECA로 접합하여 접합된 셀의 특성 변화를 분석하였다.

표 3은 시뮬레이션을 통해 태양전지 분할 전후의 특성을 비교한 것이다. 표에서 볼 수 있듯이 셀 분할 전과 후의 특성 변화는 아주 작다. 표 4는 실제 제작한 태양전지를 분할하기 전후로 측정하여 비교한 것이다. 분할하기 전 태양전지와 분할된 두 개의 태양전지를 비교했을 때 특성 변화가 미비한 것을 볼 수 있다. 표 5는 분할된 태양전지를 ECA로 접합한 후의 특성 변화를 나타낸 것이다. 두 개의 분할된 셀을 접합할 경우, 접합 전에 비해 효율이 증가함을 볼 수 있다. 이는 버스바 음영으로 인한 손실을 제거하는 효과로, 전체 면적당 수광 면적이 증가하여 태양전지의 특성이 개선된 것으로 보인다.

Table 3. Simulation results before and after divided solar cell into 5 divisions.

	Before divided cell	After divided cell
V_{oc} (mV)	657	656
J_{sc} (mA/cm ²)	36.5	36.43
FF (%)	80.25	80.45
Eff (%)	19.23	19.24
V_{mp} (mV)	559	560
I_{mp} (A)	8.41	1.68
J_{mp} (mA/cm ²)	34.4	34.36

Table 4. Characteristics before and after 4 divided solar cell.

	Before divided cell	After divided cell-1	After divided cell-2
V_{oc} (mV)	664.5	660.8	660.7
J_{sc} (mA/cm ²)	38.217	39.4369	39.3719
FF (%)	77.924	76.9091	77.4755
E_{ff} (%)	19.789	20.0419	20.1523
V_{mp} (mV)	550.9	548.6	545.7
I_{mp} (A)	8.7835	2.2456	2.27

Table 5. Characteristics before and after bonding.

	Divided cell-1	Divided cell-2	2 cells connection
V_{oc} (mV)	660.8	657.2	1320
J_{sc} (mA/cm ²)	39.4369	39.368	20.1764
FF (%)	76.9091	77.3302	76.9368
Eff (%)	20.0419	20.0087	20.4899
V_{mp} (mV)	548.6	543.8	1089.6
I_{mp} (A)	2.2456	2.2403	2.27

4. 결론

본 논문에서는 shingled 모듈에서 적용 가능한 태양 전지 전극 구조 최적화에 대해 연구를 진행하였다. 3분할에서 6분할까지의 전극 구조를 설계하고 시뮬레이션 한 결과, 5분할 전극 구조에서 19.23%의 가장 높은 효율을 나타내었으며 분할 후에도 특성 변화는 거의 없는 것으로 조사되었다.

한편 실제 셀 분할 및 접합 실험을 통해 태양전지 효율이 향상됨을 할 수 있었고, 이러한 분할/접합 구조의 스트링으로 모듈을 제작할 경우, 출력이 증가할 것으로 예상된다. 향후 PERC (passivated emitter and rear cell) 셀과 같은 고효율 태양전지에 적용할 전극 최적화에 대한 연구를 진행하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No.20173010013740).

REFERENCES

- [1] C. H. Park, *Latest Technology Trends and Market / Policy Status in Photovoltaic Field* (Ministry of Environment, KEITI, Sejong, Seoul, 2017) p. 2.
- [2] W. S. Han, H. S. Kim, B. S. Choi, and D. K. Oh, *Electron. Telecommun. Res. Inst.*, **22**, 86 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2007.J.220509>]
- [3] G. Beaucarne, *Energy Procedia*, **98**, 115 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.087>]
- [4] J. W. Ho, *The Handy Solar cell Simulator*, <http://www.seris.nus.edu.sg/activities/griddler-2.5.html> (2017).
- [5] I. Zafirovska, M. K. Juhl, J. W. Weber, J. Wong, and T. Trupke, *IEEE J. Photovoltaics*, **7**, 1496 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2017.2732220>]
- [6] J. Wong, *Proc. 2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference* (IEEE, Tampa Bay, 2013) p. 933.
- [7] A. Khanna, T. Mueller, R. A. Stangl, B. Hoex, P. K. Basu, and A. G. Aberle, *IEEE J. Photovoltaics*, **3**, 1170 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2013.2270348>]