

고효율 및 고출력 태양광 모듈을 위한 셀 스트링 연구

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

¹ 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

² 한국생산기술연구원 태양전지R&D센터

A Study on the Cell String for High Efficiency and High Power Photovoltaic Modules

Ji Su Park¹, Soo Hyun Hwang¹, Won Je Oh¹, 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 11, 2018; Revised March 30, 2018; Accepted April 3, 2018)

Abstract: In this work, we conducted a study on cell strings of high efficiency and high power solar cell modules via simulation. In contrast to the conventional module manufacturing method, the simulation was performed by connecting cutting cells divided into four parts from 6-in size using the electrically conductive adhesive (ECA). The resistance of the ECA added in series connection was extracted using an experimental method. This resistance was found to be 3 m Ω . Based on this simulation, we verified the change in efficiency of the string as a function of the number of cutting cell connections. Consequently, the cutting cell efficiency of the first 20.08% was significantly increased to 20.63% until the fifth connection; however, for further connections, it was confirmed that the efficiency was saturated to 20.8%. Connecting cutting cells using ECA improves the efficiency of the string; therefore, it is expected that it will be possible to fabricate modules with high efficiency and high power.

Keywords: Cutting cell, PSpice modelling, Solar cell module, ECA, String

1. 서론

태양광 발전은 태양으로부터 빛에너지를 전기에너지로 변환하여 전력을 생산하며 화석연료와 다르게 저탄소, 미래에도 고갈되지 않는 지속 가능한 친환경 에너지이다. 세계시장에서 신재생에너지(new and renewable energy)는 지난 5년간 연평균 28.2% 성장하여 앞으로 2035년까지 총 발전량의 약 30%를 차지할 전망이다 [1]. 국내에서도 신재생에너지의 비중을 2015년에 4.5%, 2020년에 7%, 2025년에 11%로 크게 확대하여 본래

11% 달성 시기인 2035년에서 2025년으로 10년 단축하고자 계획하고 있다. 그래서 2035년에는 전체 전력량 중 13.4%를 신재생에너지로 공급할 계획이고 특히 태양광을 핵심 에너지원으로 1차 에너지 비중을 2012년도 2.7%에서 2035년도까지 14.1%까지 확대할 예정이다 [2]. 하지만 태양광 발전은 화석연료와 비교하여 경제성이 떨어지는 에너지원이다. 비록 태양광 발전단가는 2010년부터 2015년까지 평균 54% 하락하였고 앞으로 2020년이면 발전단가가 1 W당 1 \$ 미만까지 떨어지는 소위 그리드패리티(태양광 발전 단가와 화석연료의 발전 단가가 같아지는 시점)에 진입할 것으로 전망하지만 아직까지 실리콘 태양전지와 발전 시스템의 가격이 비싸 화석연료에 비해 경제성을 갖기 어려운 상황이다 [3]. 화석연료와 비교하여 경쟁력을 갖추기 위해서는 태양광 발전의 핵심 소자인 태양전지 또는 태양광 모듈의 효율

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.

을 크게 증가시켜 높은 출력을 생산해야 한다 [4].

기존의 모듈 제작 방식은 셀과 셀을 금속 리본(metal ribbon)으로 연결하여 제작하는 방식으로 셀들을 금속 리본으로 연결하여 스트링 제작 시 셀들을 전기적으로 분리하기 위한 공간이 필요하다. 이로 인해 모듈에 전류를 생성하지 않는 빈 여백이 있어 출력 손실이 발생한다. 또한 셀에 전면 버스바(busbar)를 포함하고 있기 때문에 이 부분에는 전류 생성이 불가능하여 출력 손실을 유발한다. 이와 다르게 분할 셀의 전면 버스바에 ECA (electrically conductive adhesives)를 도포하여 다른 분할 셀의 후면 Ag 패드와 접합하는 방식은 전면에 버스바가 없는(busbar less) 구조이기 때문에 버스바에 의한 광학적 손실을 감소시킬 수 있고 기존 모듈과 달리 셀 분리를 위한 공간이 없어서 동일 면적에 보다 많은 셀이 들어가 상대적으로 높은 출력을 생산할 수 있다 [5].

따라서 본 논문에서는 화석연료에 비해 태양광 발전의 발전 단가가 높아 경제성이 부족한 점을 해결하기 위해 고효율 및 고출력 모듈을 위한 셀 스트링 연구를 진행하였고 그 방법으로 기존의 모듈 제작 방식과 다른 방식인 분할 셀을 ECA로 접합하는 방식을 사용하였다 [6]. 연구는 PSpice 시뮬레이션을 통해 분할 셀이 ECA로 접합되는 것을 ECA 저항성분을 포함한 회로상의 직렬연결로 구현하였고 분할 셀의 접합 수에 따라 접합된 스트링의 특성이 어떻게 변화하는지 경향성을 확인하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험에 사용된 셀

본 연구에서 사용된 셀은 PERC (passivated emitter and rear cell)으로 156×156 mm 면적에 두께가 210 μm, 단결정의 붕소가 도핑된 p타입 웨이퍼에서 제조되었다.

셀 분할-접합 기술을 이용한 모듈은 먼저 6인치 크기의 셀을 Green 레이저(532 nm, scan-speed = 1,300

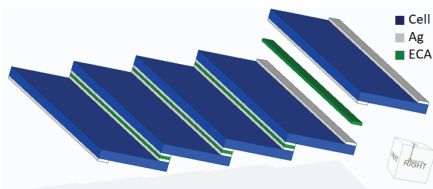


Fig. 1. Concept of connecting cutting cell.

mm/s, frequency = 50 kHz, current = 80%)를 이용하여 네 개의 셀로 분할하였다. 이때 분할된 셀의 크기는 156×3.92 mm이고 이것을 단위 셀로 하여 시뮬레이션을 진행하였다. 분할된 셀들은 그림 1에서처럼 ECA로 직렬 접합하여 스트링을 제작하였다.

2.2 분할 셀의 모델링 및 파라미터 추출

PSpice 시뮬레이션에서 분할 셀을 회로상의 소자로 나타내어야 이후에 ECA 저항성분을 포함한 분할 셀 간의 직렬연결을 통해 접합 셀의 I-V 곡선을 얻을 수 있고, 연결된 스트링의 특성을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 그림 2의 single-diode 모델을 통해 분할 셀을 등가회로로 나타냈다.

Single-diode 모델의 전압-전류 관계는 식 (1)과 같이 주어지며, 분할 셀의 특성을 다이오드 모델에 나타내기 위해서는 식 (1)의 파라미터인 n (ideality factor), I_s (saturation current), R_s (series resistance), R_{sh} (shunt resistance), I_L 를 분할 셀로부터 추출해야 한다.

$$I = I_L - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} - I_s \left(\exp \frac{V + IR_s}{nV_T} - 1 \right) \quad (1)$$

그림 3은 빛이 조사되었을 때의 분할 셀의 전류-전

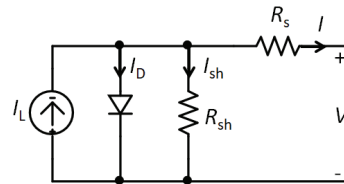


Fig. 2. Single-diode model of solar cell.

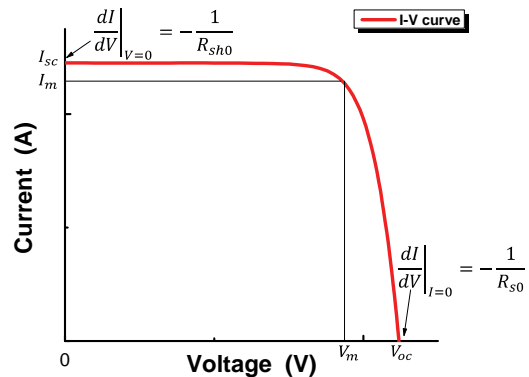


Fig. 3. I-V curve at a given illumination.

압 곡선을 나타내며, 분할 셀의 측정값을 통해서 I_{sc} (short-circuit current), V_{oc} (open-circuit voltage), I_m (current at maximum power point), V_m (voltage at maximum power point), R_{s0} , R_{sh0} 을 얻을 수 있고 각 파라미터를 식 (2)에서 (6)까지 대입하여 식 (1)에 만족하는 n , I_s , R_s , R_{sh} , I_L 을 추출하였다 [7].

$$n = \frac{V_m + I_m R_{s0} - V_{oc}}{V_T \left\{ \ln \left(I_{sc} - \frac{V_m}{R_{sh0}} - I_m \right) - \ln \left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \right) + \frac{I_m}{I_{sc} - (V_{oc}/R_{sh0})} \right\}} \quad (2)$$

$$I_s = \left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \right) \exp \left(\frac{-V_{oc}}{n V_T} \right) \quad (3)$$

$$R_s = R_{s0} - \frac{n V_T}{I_s} \exp \left(\frac{-V_{oc}}{n V_T} \right) \quad (4)$$

$$R_{sh} = R_{sh0} \quad (5)$$

$$I_L = I_{sc} \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) + I_s \left(\exp \frac{I_{sc} R_s}{n V_T} - 1 \right) \quad (6)$$

추출된 n , I_s , R_s , R_{sh} , I_L 를 통해 다이오드 모델의 회로를 그림 4(a)와 같이 구성하였고, 이를 그림 4(b)처럼 블록다이어그램으로 나타내 분할 셀의 직렬연결에 용이하게 하나의 소자로 간소화하였다. 그림 4(a)에서 종속 전류원은 식 (7)의 수식으로 동작하며 여기서 V_{input} 은 복사조도의 값(W/m^2)을 회로 상에서 나타내기 위한 전압을 의미한다.

$$Dependent\ current\ source = \frac{J_{sc} A}{1000} V_{input} \quad (7)$$

(A는 셀의 면적, V: 노드 3과 1 사이의 전압)

식 (7)은 J_{sc} (short-circuit current density) 값이

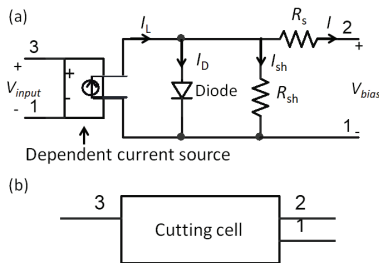


Fig. 4. (a) Cutting cell circuit and (b) PSpice model of cutting cell.

표준 측정 조건(AM 1.5G, $1,000\ W/m^2$, $T_{cell} = 25^\circ C$)에서 측정되는 것으로 간주하며, 이는 일반적으로 측정이 이루어지는 조건이다. 식 (7)은 조사량과 단락 전류 간의 비례가 유지되면 모든 조사량에서 단락 전류의 값이 반환된다 [8]. 즉 복사 조도의 값이 1-SUN ($1,000\ W/m^2$)에 해당하는 $1,000\ V$ 를 노드 3과 1 사이에 인가하면 수식을 통해 전류원은 $J_{sc} \times A = I_{sc}$ 가 되어 생성된 I_{sc} 를 그대로 회로에 흐르게 하였다.

2.3 분할 셀 접합에 의한 스트링 모델링

분할 셀을 ECA로 접합하여 스트링을 제작하는 방식은 기존의 모듈 제작방식과 다르게 ECA가 추가된다. 따라서 접합된 셀들의 모델링을 위해서는 ECA에 의한 저항 성분을 결정해야 한다. 이를 위해 먼저 접합 전 분할된 셀 및 접합된 셀의 직렬저항을 측정하였다. 그림 5에서처럼 조사되는 빛의 세기를 달리하여 태양전지의 I-V 곡선들을 그린다. 각 I-V 곡선의 I_{sc} 로부터 일정한 전류 ΔI 만큼 떨어진 지점을 표시하고 표시된 지점들을 일직선으로 연결한다. 이렇게 구한 직선의 기울기를 통해 식 (2)와 같이 저항 성분을 추출하였다 [9].

표 1은 실험적인 방법으로 추출한 분할 셀과 2접합 셀의 R_s 를 정리한 것이다. 분할 셀과 접합 셀을 비교하여 분할 셀 2개를 ECA로 접합하였을 때 저항 성분이 2배 늘어나고도 추가적으로 $0.003\ \Omega$ 이 증가하여, 이 값을 ECA에 의한 저항 성분으로 추정하였다.

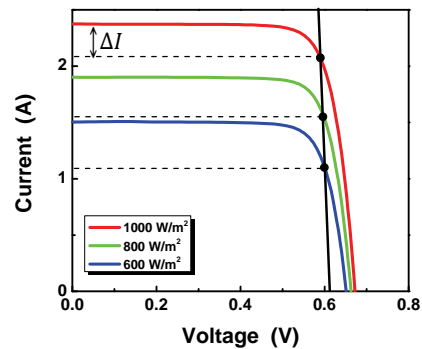


Fig. 5. Experimental determination of series resistance.

Table 1. Series resistance value.

Connection	Series resistance (Ω)
Cutting cell	0.0112
2-connection	0.0254

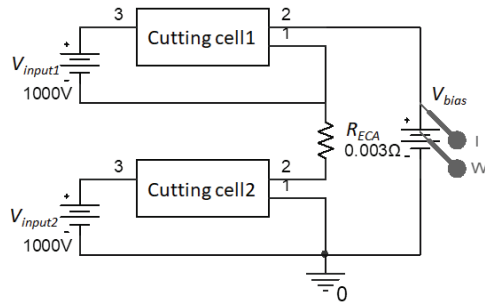


Fig. 6. Equivalent circuit of connecting cutting cells.

그림 6은 ECA에 의해 분할 셀 2개가 접합된 2접합 셀의 PSpice 모델을 나타낸 것이다. 블록 다이어그램으로 기호화되어 있는 분할 셀 회로 1, 2에 직류전압 1,000 V를 인가하여 1-SUN을 만족시키고 셀이 직렬로 연결되는 부분에 추가적인 저항성분인 R_{ECA} 를 연결하였다. 그리고 전압원인 V_{bias} 에 0 V에서 1.4 V까지 0.001 V의 간격으로 DC sweep하여 2접합 셀에서의 I-V 곡선을 얻었다.

3. 결과 및 고찰

그림 4의 분할 셀 및 그림 6의 접합 셀의 PSpice 모델을 통해서 분할 셀, 2접합, 3접합, 4접합에서의 I-V 곡선을 얻었고, 추출한 I-V 곡선과 식 (8), (9)를 사용하여 접합 셀에서의 FF (fill factor), I_{sc} , V_{oc} , J_{sc} , efficiency를 추출하였다 [10]. 이후 시뮬레이션을 통해서 얻은 파라미터와 실제 각 접합에서의 측정된 파라미터를 표 2에서 표 5까지 비교하였다. 표 2~5는 효율이 20.2에서 20.4%의 PERC 셀을 사용하였고 각 분할 셀, 2접합, 3접합, 4접합의 데이터 값은 4개 샘플의 평균을 나타낸 값이다.

$$FF = \frac{I_m \times V_m}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (8)$$

$$\eta = \frac{P_m}{P_{input}} = \frac{J_m \times V_m}{P_{input}} = \frac{V_{oc} \times J_{sc} \times FF(\%)}{P_{input}} \quad (9)$$

시뮬레이션 결과와 실제 측정된 파라미터 값을 비교하면 1% 미만의 오차를 보였다. 한편, 분할 셀을 접합한 경우, ECA의 저항 성분으로 인해 접합 셀의 직렬 저항 증가로 FF 가 감소함에도 접합 전보다 효율이 상승하는 것을 볼 수 있다. 이는 표 6을 보면 ECA로 접

Table 2. Comparison of cutting cell between experiment and simulation value.

Parameter	Cutting cell-experiment	Cutting cell-simulation
I_{sc} (A)	2.397	2.397
J_{sc} (mA/cm ²)	38.987	38.984
V_{oc} (V)	0.668	0.668
FF (%)	77.93	77.993
Efficiency (%)	20.274	20.294

Table 3. Comparison of 2-connection between experiment and simulation value.

Parameter	Cutting cell	2-connection-experiment	2-connection-simulation
I_{sc} (A)	2.389	2.402	2.385
J_{sc} (mA/cm ²)	38.857	19.97	19.833
V_{oc} (V)	0.67	1.335	1.342
FF (%)	78.105	77.44	77.759
Efficiency (%)	20.333	20.634	20.687

Table 4. Comparison of 3-connection between experiment and simulation value.

Parameter	Cutting cell	3-connection-experiment	3-connection-simulation
I_{sc} (A)	2.392	2.398	2.391
J_{sc} (mA/cm ²)	38.907	13.392	13.35
V_{oc} (V)	0.671	1.999	2.012
FF (%)	78.005	77.871	77.526
Efficiency (%)	20.337	20.843	20.809

Table 5. Comparison of 4-connection between experiment and simulation value.

Parameter	Cutting cell	4-connection-experiment	4-connection-simulation
I_{sc} (A)	2.393	2.401	2.392
J_{sc} (mA/cm ²)	38.923	10.093	10.054
V_{oc} (V)	0.671	2.66	2.685
FF (%)	77.83	77.346	77.209
Efficiency (%)	20.314	20.759	20.835

합한 셀은 전면 버스바가 겹쳐져 버스바가 없는 구조이므로 유효 수광면적의 비율이 증가하여 기존의 메탈 리본으로 직렬 연결하는 방식보다 J_{sc} 가 증가하게 된다. 따라서 그림 7에 따라 접합 시 FF 의 감소에 의한 효율 감소분보다 J_{sc} 이득으로 인한 효율 증가분이 더 크기 때문에 식 (9)를 통해 효율은 증가하게 된다.

Table 6. J_{sc} between metal ribbon connection and ECA connection.

Serial connection	Metal ribbon connection J_{sc} (mA/cm ²)	ECA connection J_{sc} (mA/cm ²)
2	19.536	19.832
3	12.963	13.349
4	9.726	10.532

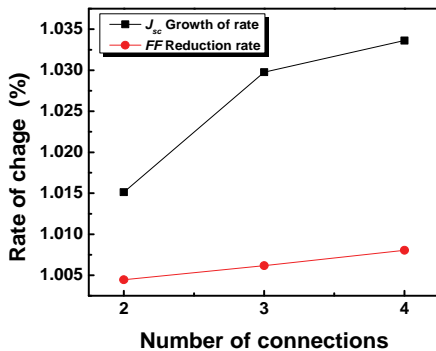


Fig. 7. Change of J_{sc} and FF on the number of cell connections.

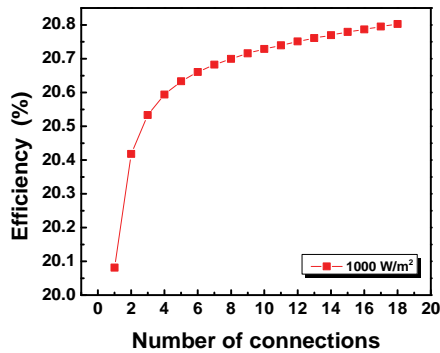


Fig. 8. Dependence of efficiency on the number of cell connections.

5접합 이상에서의 특성을 확인하는 데 있어서 그림 8처럼 효율이 20.08%의 분할 셀을 선정하여 동일한 셀 데이터로 5접합 이상의 시뮬레이션을 진행하였다.

시뮬레이션 결과 초기 20.08% 효율에서 5접합까지 20.63% 효율 증가 폭이 높았지만 이후 접합 수가 늘어남에 따라 20.8%대로 효율이 포화되는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

분할 셀을 ECA로 접합하여 스트링을 제작할 시 분할 셀 간에 전면 버스바와 후면 Ag 패드가 겹쳐서 연

결하기 때문에 기존의 스트링 제작 방식보다 동일 면적 많은 수의 셀로 모듈을 제작할 수 있다. 이는 기존 모듈의 동일 면적 대비 고출력을 실현하는 데 기인한다. 게다가 본 논문에서 시뮬레이션을 통해 분할 셀의 접합 수에 따른 효율 변화를 확인한 결과 접합 수가 늘어남에 따라 스트링의 효율이 증가된 일정 효율로 포화되는 것을 알 수 있었다. 이는 기존의 모듈 제작 방식보다 셀 분할-접합 기술을 이용한 모듈 제작 방식이 전류이득이 더 많아 효율이 증가하는 특성을 보였다. 따라서 연구된 스트링 특성을 통해 모듈을 제작하였을 때 기존의 모듈보다 고출력 및 고효율 모듈이 제작될 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 2016년 선정 기초연구개발과제 연구비에 의해 지원되었습니다(과제번호: R17XA05-1).

REFERENCES

- [1] C. S. Lee, S. Y. Yoo, K. J. Han, J. H. Cha, and E. C. Jeon, *J. Clim. Change Res.*, **8**, 91 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.15531/kscrr.2017.8.2.91>]
- [2] Ministry of Trade, Industry and Energy, *4th Renewable Energy Plan* (MOTIE, Sejong, 2014) p. 5.
- [3] Ministry of Trade, Industry and Energy, *The Fourth Industrial Revolution: In Search of a Korean Route* (MOTIE, Sejong, Korea, 2017) p. 99.
- [4] J. H. Lee, *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, **25**, 7 (2017).
- [5] H. Jee, W. Choi, J. Lee, and C. Jeong, *Curr. Photovoltaic Res.*, **5**, 95 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.21218/CPR.2017.5.3.095>]
- [6] M. Mittan, T. Zech, M. Wiee, D. Blasi, M. Ebert, and H. Wirth, *44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, (IEEE, Washington DC, 2017) p. 1.
- [7] D.S.H. Chan and J.C.H. Phang, *IEEE Trans. Electron Devices*, **34**, 286 (1987). [DOI: <https://doi.org/10.1109/T-ED.1987.22920>]
- [8] L. Castañer and S. Silvestre, *Modelling Photovoltaic Systems Using PSpice* (John Wiley & Sons, New York, 2002) p. 42.
- [9] R. J. Handy, *Solid State Electron.*, **10**, 765 (1967). [DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(67\)90159-1](https://doi.org/10.1016/0038-1101(67)90159-1)]
- [10] J. S. Lee, G. H. Kang, Y. G. Park, J. J. Park, Y. J. Lee, Y. S. Jeon, and B. D. Choe, *Solar Cell Measurement and Analysis* (Green, Seoul, 2016) p. 25.