

Shingled PV 모듈 적용을 위한 Ag Paste 저감 전극 구조 설계

오원제, 박지수, 이재형 

성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Design of Electrode Structure for Reducing Ag Paste for Shingled PV Module Application

Won Je Oh, Ji Su Park, and Jae Hyeong Lee

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

(Received February 18, 2019; Revised March 27, 2019; Accepted April 1, 2019)

Abstract: A shingled PV module is manufactured by dividing and bonding. In this method, the solar cell is divided by lasers and bonded using electrically conductive adhesives (ECAs). Consequently, the manufacturing cost increases because a process step is added. Therefore, we aim to reduce the production cost by reducing the amount of Ag paste used in the solar cell front. Various electrode structures were designed and simulated. The number of fingers was optimized by designing thinner fingers, and the number of fingers with the maximum power conversion efficiency was confirmed. The simulation confirmed the maximum efficiency in the 4-divided electrode pattern. The amount of Ag paste used for each electrode pattern was calculated and analyzed. The number of fingers was optimized by decreasing the width of the finger; this will not only reduce the amount of Ag paste required but also increase the efficiency.

Keywords: Solar cell, Shingled PV module, Electrode structure, Simulation, Ag paste

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

1. 서론

현재 태양광 산업은 고출력 발전을 위해 태양전지부터 PV 모듈까지 다양한 단계에서 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이 중에서도 새로운 모듈 제조 방식으로 제작된 shingled PV 모듈이 있다 [1]. 이 PV 모듈은 태양전지에 분할 접합 기술을 적용하여 고출력, 고밀도로 제작된다. 분할 접합 기술은 레이저로 스크라이빙(scribing)하여 태양전지를 분할하고, ECA (electrically conductive adhesives)로 분할된 태양전지를 접합하여 스트링(string)으로 제작된다. 분할된 셀을 접합함으로써 전면에 버스바(busbar)가 겹쳐지기 때문에 버스바에 의한 음영은 제거되어 단위 면적당 출력이 증가하게 된다 [2-4]. 따라서 효율은 증가되고 고밀도, 고출력 모듈 제작이 가능하다. 하지만 일반 PV 모듈과 비교하여 추가적인 공정과 재료가 필요하기 때문에 생산단가가 증가된다. 따

✉ Jae Hyeong Lee; jaehyeong@skku.edu

라서 이 기술의 생산성을 높이기 위해서는 단가 절감이 필수적인 상황이다. 또한 이 기술에 적용되는 태양전지의 전극 패턴은 고착화되어 있지 못한 실정이다. 그렇기 때문에 분할 접합 기술을 적용하기 위한 태양전지의 전극 구조를 다양하게 설계하여 그 특성을 분석할 필요가 있다.

본 논문에서는 shingled PV 모듈에 적합한 태양전지의 전극 패턴을 설계하였다. 태양전지의 전극 금속화에 사용되는 Ag (silver) 페이스트를 저감하여 태양전지의 제조단가를 낮출 수 있다. 결과적으로 다양한 분할 접합용 전극 구조를 설계하고 핑거의 폭과 개수에 따라 시뮬레이션하였고 이의 특성을 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 전극 구조 설계

분할 접합이 이루어지기 위해서는 일반적인 태양전지와는 다른 전극 구조를 가져야 한다. 일반 전극 구조를 가진 태양전지는 버스바의 배치가 전면 면적에 균일하게 분포되어 있는데 반면에 분할된 셀의 크기에 따라 분할되기 전 태양전지의 버스바의 개수, 위치가 다르게 설계된다. 또한 전면 전극에 포함되는 핑거의 폭을 줄여나감에 따라 최대 효율을 가지는 핑거의 개수는 다르다. 이를 고려하여 각 분할 전극 구조별로 핑거 폭, 개수에 따라 시뮬레이션하였다.

먼저 태양전지 분할 전극 구조의 변화에 따라 특성 변화를 시뮬레이션하기 위해 전극 구조 도면을 제작해야 한다. 그림 1은 5분할 전극 구조의 태양전지를 예시로, 분할 접합용 태양전지의 전면 전극 구조의 상세 도면이다. 전면의 Ag 버스바 및 후면의 Ag 패드(pad)는 점선으로 이루어진 위치를 기준으로 레이저에 의하여 스크라이빙되어 분할된다. 태양전지 크기로는 156.75 mm × 156.75 mm, 스크라이빙되어 분할되는 버스바의 폭은 3 mm이며, 그렇지 않은 양쪽 끝의 태양전지의 버스바는 1.5 mm 폭을 가진다. 전후 면 전극 구조를 인쇄하는 과정에서 공정 마진을 고려하여 edge margin은 0.5 mm로 설계하였다. 다양한 분할 패턴별 시뮬레이션을 위해 3, 4, 5, 6분할 전극 구조로 4가지 패턴에 대하여 핑거 폭과, 개수를 변경하여 도면을 제작하였고, 핑거 폭은 50 μm , 45 μm , 40 μm , 35 μm 로 4가지에 해당되며, 핑거 개수는 60에서 165개로 분할 패턴별 범위가 상이하게 제작하였다. 총 249개의 도면

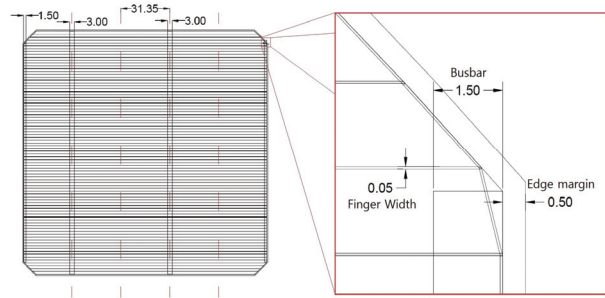


Fig. 1. Detailed drawing of divided electrode structure.

을 제작하였으며, 제작된 도면들을 사용하여 전극 패턴 시뮬레이션을 진행하였다.

2.2 전극 구조 시뮬레이션

시뮬레이션은 Griddler 2.5는 태양전지 전후 면의 금속화에 대해 기하학의 정의를 이용하여, 태양전지의 특성을 계산할 수 있는 시뮬레이션 프로그램이다 [5]. 이 프로그램은 설계한 전극 패턴과 파라미터를 입력하면 태양전지 평면을 세분화하여 각각에 등가회로를 형성한다. 이 태양전지 등가회로는 두 개의 다이오드 모델에 적용하였으며, 세분화된 등가회로를 모두 연결하여 태양전지의 등가회로를 결정한다. 본 논문에서는 여러 전극 패턴을 제작하고 본 프로그램을 사용하여 해당 전극 패턴에 대한 전기적인 특성을 확인하고 분석하는 과정을 가진다.

표 1은 Griddler 2.5 시뮬레이션에 입력 파라미터로 사용된다. 입력 파라미터 중 버스바와 핑거는 같은 Ag (은)으로 면저항(sheet resistance)은 버스바와 핑거의 두께를 측정하여 비저항과 계산하여 2.25 m Ω /sq 사용하였다. 전면에서 핑거와 실리콘 사이에 존재하는 접촉 저항은 접촉 면적을 고려하여 0.265 m Ω /sq 값을 사용하였다. 에미터(emitter)층의 면저항은 p-type PERC 결정질 실리콘 태양전지의 문헌 값을 사용하였다 [6]. 그리고 J_{01} 과 J_{02} 는 재결합과 관련된 파라미터로 문헌을 참고하여 실리콘 태양전지의 평균적인 값을 취하였다 [7-10]. J_L , non-shaded area는 전면 전극에 의한 음영이 없을 경우에 최대 가질 수 있는 단락 전류 밀도로서, 여러 재조사의 스펙을 참고하여 평균으로 얻어졌다. 시뮬레이션의 정확도를 검증하기 위해 이렇게 얻어진 입력 파라미터를 사용하여 T사 태양전지의 전극 패턴을 입력한 뒤, 시뮬레이션 결과와 제조사에서 제공하는 태양전지 스펙과 비교하였다. 그 결과를 표 2로

Table 1. Input parameters of simulation program.

Simulation input parameters	
Busbar sheet resistance ($m\Omega/sq$)	2.25
Finger sheet resistance ($m\Omega/sq$)	2.25
Finger contact resistance ($m\Omega/sq$)	0.265
Emitter sheet resistance (Ω/sq)	85
Passivated area- J_{01} (fA/cm^2)	220
Passivated area- J_{02} (nA/cm^2)	8
Metal contact area- J_{01} (fA/cm^2)	2,200
Metal contact area- J_{02} (nA/cm^2)	8
J_L , non-shaded area (mA/cm^2)	41.7785

Table 2. Comparison of solar cell characteristics.

	Simulation result	Cell specification
Eff (%)	20.61	20.60
P_{mp} (W)	5.04	5.03
V_{mp} (mV)	0.556	0.550
I_{mp} (A)	9.064	9.145
V_{oc} (mV)	651	657
I_{sc} (A)	9.682	9.686

나타내었다. 시뮬레이션 결과 값과 제조사가 제공하는 셀 스펙과 거의 동일하다는 것을 볼 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 시뮬레이션 결과 분석

우리는 3~6분할 전극 패턴에 대하여 각각 핑거 폭과 개수를 변경하여 제작하였다. 각 핑거의 폭에 해당하는 최적의 핑거 개수를 구하였다. 그림 2는 핑거 개수와 폭에 따른 각 분할 패턴에 대한 효율 변화이다. 분할 전극 패턴에 관계없이 핑거 수가 증가함에 따라 태양 전지의 변환 효율은 증가하여 최대치 이후 다시 감소하는 경향을 나타낸다. 또한 모든 분할 패턴은 핑거 폭이 얇아질수록 효율은 증가하였으며, 더 많은 핑거 개수에서 최대 변환 효율이 나타났다.

표 3은 4분할 전극 패턴을 예시로 각 핑거 폭에서 최대 효율을 가지는 핑거 개수의 특성을 나타낸 것이다. 최대 변환 효율에서 핑거 폭이 감소함에 따라 핑

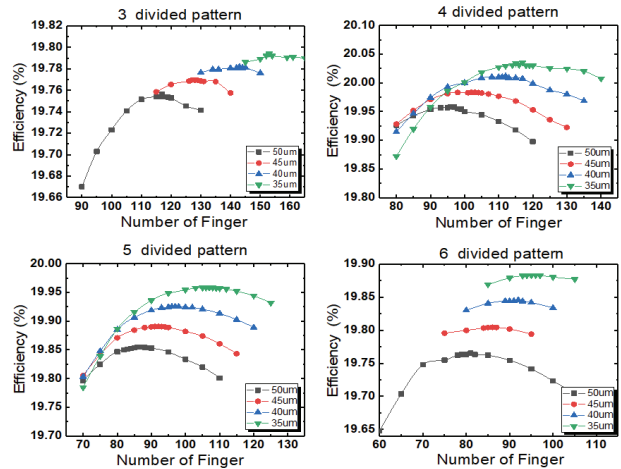


Fig. 2. Change in efficiency according to electrode pattern.

Table 3. Results of 4-divided electrode pattern simulation.

Finger width	50	45	40	35
Finger number	95	103	112	117
J_{sc} (mA/cm^2)	39.081	39.096	39.120	39.219
V_{oc} (mV)	646.39	646.63	646.86	647.10
FF (%)	79.089	79.075	79.078	78.946
Eff (%)	19.958	19.983	20.011	20.035
Shading ratio (%)	6.555	6.456	6.361	6.126

거의 개수가 증가하게 되지만, 전면 전극으로 인한 음영 비율을 계산하여 비교한 결과 핑거 개수가 증가하여 음영이 증가한 것보다 폭이 얇아져 음영을 감소시킨 요소가 더 크게 작용하였다. 이로 인해 핑거 폭이 얇아질수록 금속 전극에 의한 음영 비율의 감소로 인해 수광 면적이 증가되며, 이에 따라 단락전류 및 변환 효율이 증가하게 되었다. 결과적으로 모든 전극 구조의 최대 변환 효율은 핑거 폭 35 μm 에서 나타났으며, 3분할 전극 구조의 경우 핑거 개수가 153개인 경우에서 나타났고, 4분할 전극 구조의 경우 117개, 5분할 전극 구조는 106개, 6분할 전극 구조는 96개에서 나타났다.

분할 수가 증가할수록 최적의 핑거 개수가 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이는 분할 수가 증가하게 되면, 버스바 사이의 간격이 줄어들면서 핑거 하나당 수집하는 전류량이 감소하기 때문에 핑거 개수가 더 적은 곳에서 최대 변환 효율을 가지게 된다. 3~6 분할 패턴 중에서 가장 효율이 높은 전극 패턴은 4분할 전극 패턴

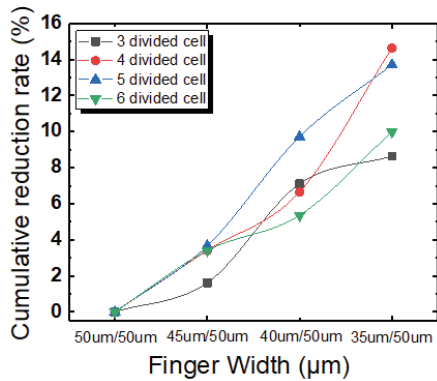


Fig. 3. Paste cumulative reduction rate with finger width.

으로 나타났다. 4분할 전극 패턴은 핑거 폭 35 μm , 핑거 수 117개에서 20.035%로 확인되었다. 모든 분할 패턴에서 핑거 폭이 얇아짐에 따라 핑거 개수는 증가하지만 결과적으로 음영 비율은 낮아진다. 음영 비율이 낮아짐에 단락 전류 밀도는 증가하게 되어 효율이 증가되는 효과를 얻을 수 있으며, 동시에 전면 전극에 사용되는 Ag 페이스트의 사용량을 저감시킬 수 있게 된다.

위에서 각각의 분할 개수에 따른 전극 패턴에 대해 핑거 폭을 달리하여 핑거 개수를 최적화하였다. 핑거 폭이 감소할수록 최대 효율을 가지는 핑거의 개수는 증가하기 때문에 전극 패턴에 의한 음영 면적을 이용하여 페이스트의 사용량을 계산할 필요가 있다. 이를 바탕으로, 그림 3은 핑거 폭 50 μm 를 기준으로 폭이 45 μm , 40 μm , 35 μm 로 얇아짐에 따라, 50 μm 일 때 전극의 면적에 비해 감소된 면적을 백분율로 계산하였으며, 이 백분율을 사용되는 Ag 전극 페이스트의 저감률로 나타내었다.

3분할 전극 구조의 경우 핑거 폭이 50 μm 에서 35 μm 로 감소되면 핑거 인쇄에 사용되는 Ag 페이스트가 8.64% 감소하며, 4분할 패턴인 경우 14.63% 감소되고, 5분할은 13.71%, 6분할은 9.98% 감소되었다. 패턴에 따라 페이스트 사용 저감률이 다소 차이가 있지만 4분할 전극 패턴에서 Ag 페이스트 저감률이 가장 높은 14.63%로 확인되었다.

4. 결론

본 논문에서는 shingled PV 모듈에 적용 가능하며, 동시에 Ag paste의 사용량을 저감시킬 수 있는 태양

전지의 전극 패턴에 대해 연구를 진행하였다. 분할, 접합용 전극 패턴의 특성상 분할 수에 따른 다양한 전극 구조가 존재하므로, 이에 따른 시뮬레이션하였다. 또한 전극 패턴의 핑거 폭을 줄여나감에 따라 최대 변환 효율을 가지는 최적 핑거 개수를 확인하여 최적화하였다. 또한 모든 분할 전극 패턴의 핑거 폭이 얇아짐에 따라 최대 전력 변환 효율을 가지는 핑거 개수는 증가하였다. 하지만 핑거 개수가 증가하더라도 전면 전극에 의한 음영은 감소하였고 전력 변환 효율은 증가되었다. 모든 분할 패턴은 핑거 폭이 35 μm 에서 최대 변환 효율을 가졌으며, 특히 4분할 전극 패턴은 핑거 개수가 117개에서 20.035%로 모든 패턴 중에서 가장 높은 효율을 확인하였다. 최적화된 각각의 분할 전극 패턴의 전면 Ag 페이스트 사용량을 확인하였으며, 4분할 전극 패턴에서 페이스트의 14.63%에 해당하는 저감률을 확인하였다. 태양전지 제조 공정 단가를 줄이기 위한 방법으로 Ag 페이스트 사용량을 저감하는 방식이 있다. 하지만 페이스트 사용량을 줄이기 위해 핑거 폭을 감소시키면, 태양전지의 효율이 낮아지게 된다. 본 논문에서는 폭을 줄여나감에 따라 핑거 개수를 최적화하여 Ag 페이스트 저감뿐만 아니라 효율의 상승이 수반될 수 있다. 이러한 Ag 페이스트 저감을 통해 shingled PV 모듈의 제조 가격을 절감할 수 있어 가격 경쟁력을 가질 수 있을 것으로 기대된다.

ORCID

Jae Hyeong Lee

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

감사의 글

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

REFERENCES

- [1] N. Wöhrlé, T. Fellmeth, E. Lohmüller, P. Baliozian, A. Fell, and R. Preu, *Proc. 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC, Amsterdam, Netherlands, 2017)* p. 844. [DOI: <https://doi.org/10.4229/EUPVSEC2017-2CV.2.33>]

- [2] M. Mittage, T. Zech, M. Wiese, D. Bläsi, M. Ebert, and H. Wirth, *Proc. 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference 2017* (IEEE, Washington, USA, 2017).
- [3] N. Klasen, A. Mondon, A. Kraft, and U. Eitner, *Proc. 7th Workshop on Metallization and Interconnection for Crystalline Silicon Solar Cells, 2017* (Constance, Germany, 2018). [DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.3152478>]
- [4] H. Jee, S. Lee, C. Jeong, and J. Lee, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **19**, 1360 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1166/jnn.2019.16200>]
- [5] J. Wong, *Proc. 2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)* (IEEE, Tampa, USA, 2013) p. 0933. [DOI: <https://doi.org/10.1109/PVSC.2013.6744296>]
- [6] P. Saint-Cast, S. Werner, J. Greulich, U. Jäger, E. Lohmüller, H. Höfler, and R. Preu, *Phys. Status Solidi A*, **214**, 1600708 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1002/pssa.201600708>]
- [7] F. Book, A. Dastgheib-Shirazi, B. Raabe, H. Haverkamp, G. Hahn, and P. Grabitz, *Proc. 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference* (EU PVSEC, Hamburg, Germany, 2009) p. 1719. [DOI: <https://doi.org/10.4229/24thEUPVSEC2009-2CV.5.3>]
- [8] A. Fell, K. R. McIntosh, P. P. Altermatt, G.J.M. Janssen, R. Stangl, A. Ho-Baillie, H. Steinkemper, J. Greulich, M. Müller, B. Min, K. C. Fong, M. Hermle, I. G. Romijn, and M. D. Abbott, *IEEE J. Photovoltaics*, **5**, 1250 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2015.2430016>]
- [9] V. Shanmugam, A. Khanna, P. K. Basu, A. G. Aberle, T. Mueller, and J. Wong, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **147**, 171 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.12.006>]
- [10] F. Ye, W. Deng, W. Guo, R. Liu, D. Chen, Y. Chen, Y. Yang, N. Yuan, J. Ding, Z. Feng, P. P. Altermatt, and P. J. Verlinden, *Proc. 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)* (IEEE, Portland, USA, 2016) p. 3360.