

고출력 태양광 모듈을 위한 분할 셀 종류에 따른 싱글드 스트링 특성 시뮬레이션

박지수, 오원제, 이재형 

성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Simulation of Shingled String Characteristics Depending on Cell Strips Type for High Power Photovoltaic Modules

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

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

(Received July 28, 2019; Revised September 17, 2019; Accepted September 18, 2019)

Abstract: Recently, with the increase in the use of urban solar power, solar modules are required to produce high power in limited areas. In this report, we proposed the fabrication of a high-power photovoltaic module using shingles technology, and developed accurate string characteristic simulations based on circuit modeling. By comparing the resistance components between the interconnected cells and the cell strips, the ECA resistance was determined to be 0.003Ω . Based on the equivalent circuit of the modeled shingled string, string simulation was performed according to the type of cell strip. As a result, it was determined that the cell efficiency of the 4-cell strip was the highest at 19.66%, but the efficiency of the string simulated with the 6-cell strip was the highest at 20.48% in the string unit.

Keywords: Photovoltaic modules, Shingled string, ECA (electrically conductive adhesives), Laser scribing, Solar cell

1. 서론

전기에너지의 주요 공급원인 화력발전이 온실가스 및 환경오염의 주범으로 부각되면서, 신재생에너지 개발은 유럽과 북미지역을 중심으로 주목되고 있다 [1]. 특히, 태양광 발전은 방대한 태양에너지를 전기에너지로 변환시키는 친환경 에너지원으로, 2018년 세계 태양광수요는 전년대비 9% 증가한 108 GW를 달성하면서 세계 태양광 시장은 100 GW 시대로 돌입하였다 [2]. 최근에는 도심형 발전으로 건물 옥상에 설치하는 루프탑(roof top)과

건물집적형 태양전지(building integrated photovoltaic, BIPV) 등이 주목받고 있으며, 이를 ESS (energy storage system)와 접목하여 특정 시간대에 한시적으로 부족한 전력수요를 충당하면서 발전사업자에게는 발전수익을 가져다주는 이점이 부각되고 있다 [3,4]. 이로 인해 현재 태양광시장은 제한된 면적에서 높은 출력을 생산하기 위한 고출력 모듈과 발전 수익을 보장하기 위한 정확도 높은 출력 예측이 요구되고 있다 [5].

기존의 태양광 모듈은 6인치 크기의 태양전지를 금속 리본(metal ribbon)으로 연결하여 제작하는 방식이다. 따라서 다수의 셀들을 연결하여 스트링(string)을 제작할 때 셀들 사이에 전기적으로 절연하기 위한 공간이 필요하다. 이 공간은 전류를 생성할 수 없는 빈 공간으로 CTM (cell-to-module) 손실을 발생시킨다. 또한 셀 전면에 버스바(busbar)가 존재하기 때문에 버

✉ Jae Hyeong Lee; jaehyeong@skku.edu

스바에 의해 가려지는 영역은 광전류 생성이 불가능하여 추가적이 출력 손실을 유발한다 [6].

반면, 싱글드(shingled) 태양광 모듈은 풀 셀의 전면 버스바를 따라 여러 개의 셀로 분할하고 분할된 셀(cell strip)의 전면 버스바에 ECA (electrically conductive adhesives)를 도포하여 다른 분할 셀의 후면과 접합하는 방식으로 제작된다. 분할 셀의 전면 버스바 영역을 다른 분할 셀과 오버랩하여 연결되면서 버스바가 없는 (busbar-less) 구조로 스트링이 제작되기 때문에 버스바에 의한 광학적 손실을 크게 감소시킬 수 있다 [7]. 또한 기존 태양광 모듈과 달리 셀들을 전기적으로 분리하기 위한 공간이 없고 동일 면적에 많은 셀을 집적할 수 있기 때문에 고출력 및 고밀도 모듈을 제작할 수 있다. 하지만 싱글드 스트링은 접합되는 분할 셀의 특성에 따라 스트링의 출력 및 효율이 영향을 받게 된다. 따라서 고출력 싱글드 스트링을 제작하기 위해서는 분할 셀의 종류 및 전극 구조(버스바 두께, 핑거 개수 등)에 따른 접합 특성을 최적화하는 작업이 요구된다 [8,9].

본 연구에서는 단일 다이오드(single-diode) 모델을 통해 분할 셀을 등가회로로 나타내고 이를 ECA 저항 성분이 추가하여 직렬로 연결함으로써 싱글드 스트링의 등가회로를 모델링하였다. 모델링된 스트링의 등가회로를 기반으로 분할 셀 종류에 따른 접합 시뮬레이션을 통해 고출력 싱글드 스트링 제작을 위한 최적 분할 셀 종류를 도출하였다.

2. 실험 방법

2.1 시뮬레이션 모델링

그림 1은 기존의 스트링과 싱글드 스트링의 단면 모식도를 나타낸다. 그림 1(b)에서와 같이 싱글드 스트링은 분할 셀이 ECA에 의해 연결되기 때문에 본 연구에서 단일 다이오드 모델을 이용하여 분할 셀의 등가회

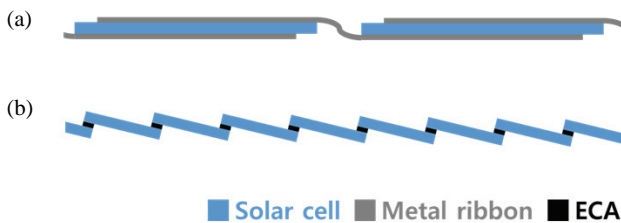


Fig. 1. Concepts of (a) conventional and (b) shingled string.

로를 나타내고 이를 직렬로 연결하여 싱글드 스트링의 특성 시뮬레이션을 진행하였다.

그림 2는 태양전지의 단일 다이오드 모델을 나타낸 것으로, I_L (light generated current)은 광 생성전류, I_D (diode current)는 다이오드전류, I_{sh} (shunt current)는 병렬전류, I (output current)는 출력전류, V (output voltage)는 출력전압, R_s (series resistance)는 직렬저항, R_{sh} (shunt resistance)는 병렬저항이다.

단일 다이오드 모델의 전압-전류 특성은 식 (1)과 같다 [10]. 여기서, I_s (saturation current)는 다이오드 포화전류, V_T ($= kT/q$, thermal voltage)는 열 전압, T 는 셀 온도, q 는 전자 전하, n (ideality factor)은 다이오드 이상 계수이다.

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

태양전지를 전기적 등가회로로 나타내기 위해 필요한 파라미터(I_s , R_s , R_{sh} , I_L , n)는 솔라 시뮬레이터 (WXS-155S-LS, Wacom, Japan)와 전류-전압 분석기 (DKSCT-3T, Denken, Japan)에 의해 측정된 태양전지의 파라미터(I_{sc} , V_{oc} , I_{pm} , V_{pm} , R_s , R_{sh})를 통해 계산되었다 [11].

그림 3은 n개의 분할 셀을 연결한 싱글드 스트링의 등가회로를 나타낸 것이다. 단일 다이오드 모델을 이용해 나타낸 분할 셀의 등가회로를 ECA 저항 성분을 통해 직렬로 연결하여 모델링하였다. 여기서 I_{L1} 은 첫 번째 분할 셀의 광 생성전류, D_1 은 첫 번째 분할 셀의 다이오드, R_{s1} 은 첫 번째 분할 셀의 직렬저항, R_{sh1} 은 첫 번째 분할 셀의 병렬저항, I_{Ln} 은 n 번째 분할 셀의 광 생성전류, D_n 은 n 번째 분할 셀의 다이오드, R_{sn} 은 n 번째 분할 셀의 직렬저항, R_{shn} 은 n 번째 분할 셀의 병렬저항, R_{ECA} 는 ECA의 저항성분, V 는 싱글드 스트링의 출력전압이다.

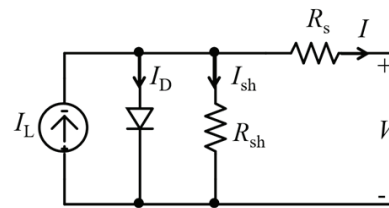


Fig. 2. Single-diode model of solar cell.

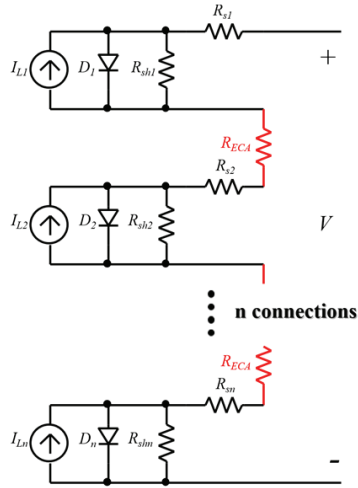


Fig. 3. Circuit model of shingled string through an electrically conductive adhesive.

2.2 ECA의 저항 성분 추출

ECA 저항 성분은(R_{ECA}) 두 가지 방법으로 추출되었다. 첫 번째는 식 (2)에 나타난 전기저항식을 이용하여 추출되었으며, 여기서 ρ 는 제조사에서 제공한 ECA의 비저항, A 는 분할 셀의 전면 버스바에 위에 형성된 ECA의 면적, l 은 ECA 두께의 수치를 대입하여 추출하였다. ECA의 두께와 면적은 FE-SEM과 광학현미경을 통해 측정되었다.

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2)$$

두 번째는 접합 전 두 개의 분할 셀 직렬저항의 합과 ECA로 두 개의 분할 셀이 연결된 접합 셀(inter-connected cell)의 직렬저항을 서로 비교하여 ECA의 저항 성분을 추출하였다 [12]. 셀의 직렬 저항은 광조사량 변화에 따른 I-V 커브의 변화를 이용한 측정 방법을 사용하였다 [13]. 실험에 사용된 셀은 단결정 PERC (passivated emitter and rear cell, shinsungeng, korea)으로 셀 전면은 텍스처(texture) 처리된 표면에 실리콘 질화막으로 반사방지 및 패시베이션(passivation)층이 형성되었고 후면은 산화알루미늄과 실리콘 질화막으로 패시베이션층이 존재한다. 면적 $15.675 \text{ cm} \times 15.675 \text{ cm}$ 에 두께 $210 \mu\text{m}$, 붕소가 도핑된 단결정 p타입 웨이퍼에서 제조되었다.

그림 4는 단결정 PERC의 전/후면을 나타내며, 전면

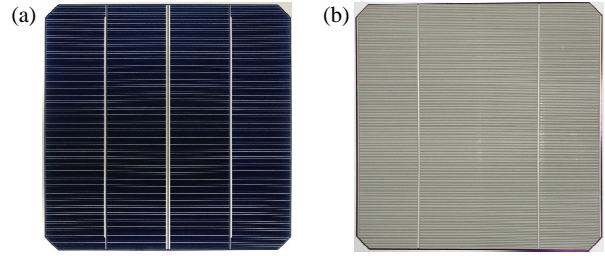


Fig. 4. (a) Front and (b) back photographs of passivated emitter and rear cell.

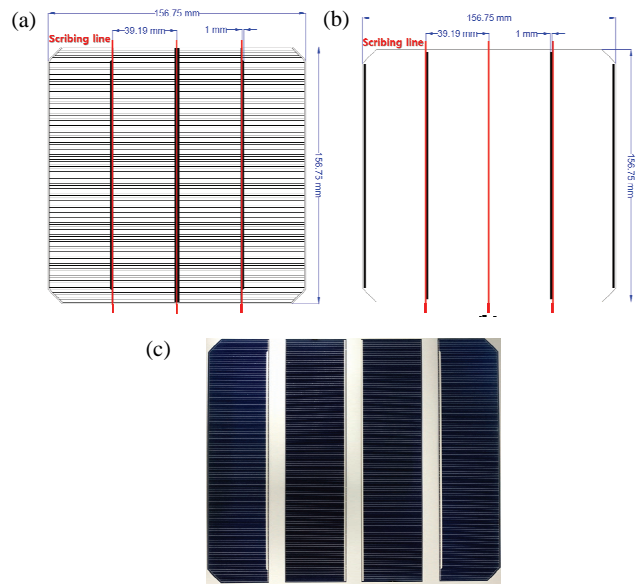


Fig. 5. Laser-scribed lines on the (a) front and (b) rear sides, and (c) photograph of cell strips.

에 두께 1 mm 의 버스바가 4개 존재하며 후면에는 두께 1 mm 의 Ag pad가 4개 존재한다.

그림 5는 풀 셀을 분할하기 위한 레이저 스크라이빙 라인과 분할된 셀을 보여주며, 그린 레이저(MATRIX 532-14-40, coherent, USA)을 이용하여 네 개의 서브 셀로 분할하였다. 셀 접합에는 가운데 두 개의 서브 셀이 사용되었다.

스크라이빙 조건은 레이저 조사속도 $1,300 \text{ mm/s}$, 주파수 50 kHz , 레이저 파워 80% , 조사 횟수 30회로 진행하였다. 분할 셀은 스트링거(genesem inc, Korea)을 사용하여 전면 버스바를 따라 전도성 접착제 (ABLESTIC CA-3556 HF, Henkel, USA)를 도포하고 다른 분할 셀의 후면과 1.7 mm 폭으로 겹쳐 접합하였다. ECA는 온도 150°C 에 시간 5s 로 경화되었으며,

분할 셀과 접합 셀의 특성은 AM 1.5 조건에서 솔라시뮬레이터로 측정되었다.

2.3 분할 셀 종류에 따른 접합 특성 시뮬레이션

Griddler 프로그램을 통해 15.675 cm × 15.675 cm 크기에 두께 200 μm, 면저항 85 Ω/sq, p타입의 단결정 웨이퍼로 동일한 조건을 설정한 상태에서 웨이퍼를 3등분한 크기 5.225 cm × 15.675 cm의 3분할 셀, 4등분한 크기 3.918 cm × 15.675 cm의 4분할 셀, 5등분한 크기 3.135 × 15.675 cm의 5분할 셀, 6등분한 크기 2.612 cm × 15.675 cm의 6분할 셀로 종류를 나누어 전면 전극 구조 변경을 통해 분할 셀의 특성을 비교하였다 [14]. 분할 셀 종류에 따른 전면 버스바 두께를 1.5 mm로 동일하게 고정하였고 핑거의 개수를 70개에서 130개까지 가변하여 가장 높은 출력 특성이 나타나는 핑거 개수를 최적화하였다. 이후 싱글드 스트링의 등가회로를 이용하여 분할 셀 종류에 따른 접합 특성을 시뮬레이션 하였고 고효율 싱글드 스트링 제작을 위한 최적 분할 셀 종류를 도출하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 6은 ECA의 두께와 폭을 측정한 이미지이다. 그림 6(a)는 접합 셀의 단면을 통해 ECA의 두께를

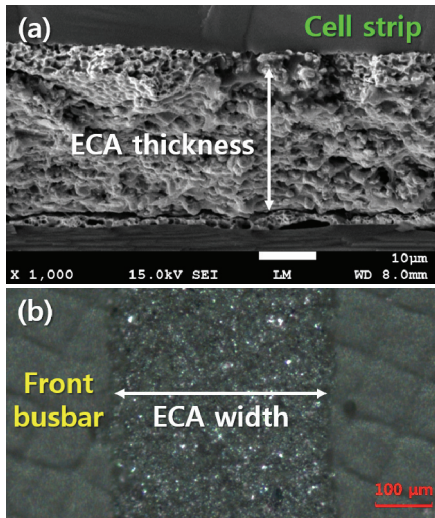


Fig. 6. (a) Cross-sectional image of interconnected cell and (b) ECA image applied on front busbar.

FE-SEM으로 측정한 것으로 두께는 35 μm로 확인되었다. 그림 6(b)는 접합 셀을 분리하여 전면 버스바 위에 형성된 ECA의 폭을 광학현미경을 통해 측정한 것으로 폭은 400 μm로 확인되었다.

ECA는 분할 셀의 전면 버스바를 따라 15.6 cm 길이로 도포되었기 때문에 폭과 도포 길이를 곱하여 ECA의 면적 A 를 계산할 수 있었다. 따라서 ECA 저항 성분을 추출하는 첫 번째 방법으로 ECA의 두께, 면적, 제조사에서 제공한 비저항($0.0025 \Omega \cdot \text{cm}$)을 전기저항 식 (2)에 대입하여, R_{ECA} 는 $16 \mu\Omega$ 로 계산되었다.

표 1은 단결정 PERC의 분할 셀과 접합 셀의 특성을 나타낸 것이다. 분할 셀과 접합 셀의 직렬 저항 비교를 통해 실험적으로 ECA 저항 성분을 추출하였다. 분할 셀의 직렬 저항은 0.0112Ω 이고 접합 셀의 직렬 저항은 분할 셀 두 개가 연결되었기 때문에 분할 셀의 두 배인 0.0224Ω 으로 예상할 수 있으나, 실제 측정된 접합 셀의 직렬 저항은 이보다 두 배 이상 높은 0.0254Ω 으로 나타났다. 따라서 ECA 저항성분을 추출하는 두 번째 방법으로 R_{ECA} 는 셀 접합 후 ECA 저항성분에 의해 추가적으로 발생한 0.003Ω 임을 알 수 있었다. 접합 셀의 출력은 분할 셀 두 개가 연결되었기 때문에 분할 셀 출력의 두 배에 가깝게 나타났지만 추가적인 ECA 저항으로 인해 접합 전 분할 셀의 FF (fill factor) 78.04%에서 접합 후 77.44%로 감소하였다. 하지만 FF의 감소에도 불구하고 셀 오버랩에 의한 분할 셀의 전면 버스바가 수광영역으로 바뀌면서 접합 후 효율은 20.38%에서 20.63%로 증가하였다.

표 2는 그림 3의 싱글드 스트링 등가회로에서 R_{ECA} 에 첫 번째 ECA 저항 값인 $16 \mu\Omega$ 을 적용한 접합 셀의 시뮬레이션 결과와 두 번째 ECA 저항 값인 $3 \text{ m}\Omega$ 을 적용한 접합 셀의 시뮬레이션 결과를 측정된 접합 셀의 특성과 비교한 것이다. 전기저항 식을 이용한 ECA 저항 값은 버스바와 ECA 사이의 컨택 저항이 고려되지 않았기 때문에 시뮬레이션 결과가 측정값과 다르게 나타난 것으로 보이며, 싱글드 스트링 시뮬레이션

Table 1. Properties of interconnected cells and cell strips.

Parameter	Cell strips	Interconnected cells
J_{sc} [mA/cm^2]	38.85	19.97
V_{oc} [V]	0.672	1.335
FF [%]	78.04	77.44
Eff [%]	20.38	20.63
P_m [W]	1.253	2.479
R_s [Ω]	0.0112	0.0254

Table 2. Comparison of measured interconnected cells and simulation results.

Parameter	Interconnected cell simulation ($R_{ECA}: 16 \mu\Omega$)	Interconnected cell simulation ($R_{ECA}: 3 \text{ m}\Omega$)	Measured value
J_{sc} (mA/cm ²)	19.88	19.88	19.97
V_{oc} (V)	1.340	1.340	1.335
FF (%)	78.01	77.53	77.44
Eff (%)	20.79	20.66	20.63
P_m [W]	2.499	2.483	2.479

Table 3. Optimized characteristics of cell strips depending on cell strips type.

Parameter	3 cell strips	4 cell strips	5 cell strips	6 cell strips
J_{sc} [mA/cm ²]	39.07	38.96	38.71	38.36
V_{oc} [V]	0.631	0.630	0.628	0.627
FF [%]	79.31	80.22	80.82	81.03
Eff [%]	19.53	19.66	19.62	19.48
P_m [W]	1.600	1.208	0.965	0.798
Metal area [%]	6.471	6.731	7.340	8.165

은 두 번째 방법으로 추출한 3 mΩ의 ECA 저항성분이 사용되었다.

표 3은 분할 셀의 종류에 따라 최적화된 셀의 특성을 나타내며, 3분할 셀은 핑거 개수가 117개, 4분할 셀은 96개, 5분할 셀은 86개, 6분할 셀은 83개에서 가장 높은 출력을 보였다. 4분할 셀이 19.66%로 가장 높은 셀 효율이 나타났으며, 6분할 셀은 19.48%로 가장 낮은 셀 효율이 나타났다.

그림 7은 분할 셀 종류에 따른 싱글드 스트링의 효율 변화를 나타낸다. 분할 셀 종류에 따른 스트링 효율 비교를 위해 3분할 셀은 17개, 4분할 셀은 22개, 5분할 셀은 28개, 6분할 셀은 33개가 직렬로 연결되어 스트링의 등가회로를 구성하였다. 그림 7의 x축은 분할 셀 연결 개수에 따른 스트링의 길이를 나타낸다. 분할 셀의 전면 버스바 폭은 1.5 mm로, 접합에 의한 음영이 발생하지 않도록 오버랩을 1.5 mm로 설정하여 시뮬레이션을 진행하였다. 분할 셀 종류 중, 4분할 셀이 가장 높은 효율을 보였지만, 스트링 효율은 20.17%로 포함되었다. 반면에, 6분할 셀은 가장 낮은 셀 효율을 보였지만 스트링 효율은 20.47%로 포함되면서 가장 높게 나타났다.

그림 8은 분할 셀 종류에 따른 전면 금속 비율과 분할 셀 및 싱글드 스트링의 효율 관계를 나타낸다. 전면 금속 비율은 3분할 셀에서 6분할 셀로 갈수록 셀의

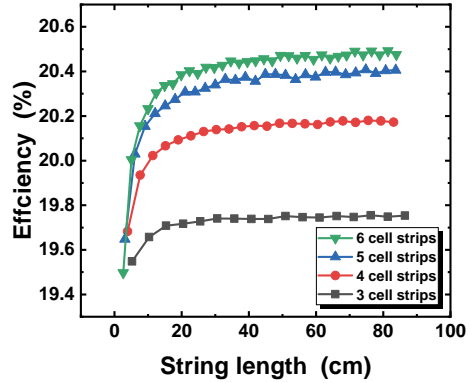


Fig. 7. Change of shingled string efficiency depending on cell strips type.

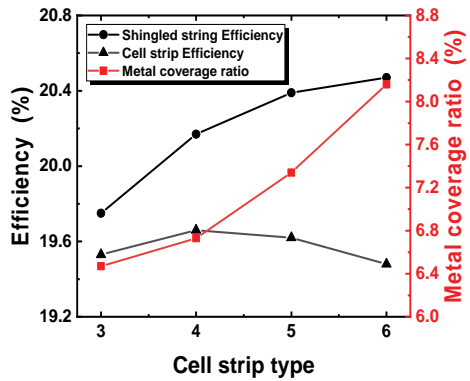


Fig. 8. Relationship between front metal ratio and efficiency of cell strip and shingled string according to cell strip type.

면적은 감소하고 버스바 면적은 1.5 mm × 156 mm로 동일하기 때문에 6.47%에서 8.16%까지 증가하였다. 그래서 6분할 셀이 전면 금속 비율이 가장 높아 수광면적이 낮기 때문에 19.48%로 가장 낮은 셀 효율이 나타났다. 하지만 6분할 셀을 이용하여 싱글드 스트링을 제작 시, 셀 전면 버스바가 수광영역으로 바뀌는 비율이 가장 크게 작용하면서 20.47%로 가장 높은 스트링 효율이 나타났다. 따라서 6분할 셀을 이용하여 싱글드 스트링 및 모듈 제작 시, 고출력 및 고효율 태양광 모듈을 제작할 수 있을 것으로 보인다.

4. 결론

싱글드 스트링 특성을 시뮬레이션하기 위해 측정된 분할 셀을 등가회로로 나타내고, ECA 저항을 추가하여 셀을 직렬함으로써 스트링의 등가회로를 모델링하였다. ECA 저항성분은 접합 셀과 분할 셀의 저항성분

비교를 통해 추출한 0.003 Ω 이 적용되었다.

모델링된 싱글드 스트링 등가회로를 기반으로 분할 셀의 종류에 따른 접합 시뮬레이션을 진행했으며 그 결과, 4 분할 셀에서 19.66%로 가장 높은 셀 효율을 보였으나 스트링 단위에서는 6분할 셀로 시뮬레이션된 스트링 효율이 20.47%로 가장 높았다. 따라서 6분할 셀을 이용한 싱글드 모듈 제작을 통해 태양광 모듈의 고출력 및 고효율화가 가능할 것으로 보인다.

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] The Export-Import Bank of Korea, *Photovoltaic Industry Report for the First Quarter of 2019* (EXIM Bank, Seoul, Korea, 2019).
- [2] The Export-Import Bank of Korea, *Photovoltaic Industry Trends for the Fourth Quarter of 2018 Quarterly Report* (EXIM Bank, Seoul, Korea, 2019).
- [3] T. Meyer and J. Luther, *Energy Convers. Manage.*, **45**, 2639 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.12.023>]
- [4] A. G. Olabi, *Energy*, **136**, 1 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.054>]
- [5] J. J. Song, Y. S. Jeong, and S. H. Lee, *J. Digital Convergence*, **12**, 243 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.14400/JDC.2014.12.3.243>]
- [6] A. W. Blakers, *J. Appl. Phys.*, **71**, 5237 (1992). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.350580>]
- [7] N. Klasen, A. Mondon, A. Kraft, and U. Eitner, *Proc. 7th Workshop on Metalization and Interconnection for Crystalline Silicon Solar Cells, 2017* (SSRN Electronic Journal, Konstanz, 2017) p. 1. [DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.3152478>]
- [8] 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>]
- [9] W. J. Oh, J. S. Park, and J. H. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **32**, 267 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2019.32.4.267>]
- [10] G. Cibira and M. Koščová, *Appl. Surf. Sci.*, **312**, 74 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.05.080>]
- [11] 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>]
- [12] J. S. Park, S. H. Hwang, W. J. Oh, S. H. Lee, C. H. Jeong, and J. H. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **31**, 295 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2018.31.5.295>]
- [13] 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)]
- [14] J. Wong, *2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)* (IEEE, Tampa, USA, 2013) p. 933. [DOI: <https://doi.org/10.1109/PVSC.2013.6744296>]