

결정질 실리콘 태양전지의 전면 전극의 패턴에 따른 전류 밀도 및 특성 저항 변화에 대한 영향과 효율 변화

정수정¹ · 신승현¹ · 최동진¹ · 배수현¹ · 강윤목² · 이해석² · 김동환^{1†}
¹고려대학교 신소재공학과, ²고려대학교 KU KIST 그린 스쿨 에너지 환경 대학원

Effect of Different Front Metal Design on Efficiency Affected by Series Resistance and Short Circuit Current Density in Crystalline Silicon Solar Cell

Sujeong Jeong¹, Seunghyun Shin¹, Dongjin Choi¹, Soohyun Bae¹,
Yoonmook Kang², Hae-seok Lee² and Donghwan Kim^{1†}

¹Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Anam-dong,
Seongbuk-gu, Seoul 02841, Republic of Korea

²KU KIST Green School, Graduate School of Energy and Environment, Korea University, Anam-dong,
Seongbuk-gu, Seoul 02841, Republic of Korea

(Received July 25, 2017 : Revised September 5, 2017 : Accepted September 5, 2017)

Abstract In commercial solar cells, the pattern of the front electrode is critical to effectively assemble the photo generated current. The power loss in solar cells caused by the front electrode was categorized as four types. First, losses due to the metallic resistance of the electrode. Second, losses due to the contact resistance of the electrode and emitter. Third, losses due to the emitter resistance when current flows through the emitter. Fourth, losses due to the shading effect of the front metal electrode, which has a high reflectance. In this paper, optimizing the number of finger on a 4×4 solar cell is demonstrated with known theory. We compared the short circuit current density and fill factor to evaluate the power loss from the front metal contact calculation result. By experiment, the short circuit current density(J_{sc}), taken in each pattern as 37.61, 37.53, and 37.38 mA/cm² decreased as the number of fingers increased. The fill factor(FF), measured in each pattern as 0.7745, 0.7782 and 0.7843 increased as number of fingers increased. The results suggested that the efficiency(Eff) was measured in each pattern as 17.51, 17.81, and 17.84 %. Throughout this study, the short-circuit current densities(J_{sc}) and fill factor(FF) varied according to the number of fingers in the front metal pattern. The effects on the efficiency of the two factors were also investigated.

Key words front metal pattern, shading loss, resistance loss, power loss analysis.

Nomenclature

J: current density, mA/cm²
V: voltage, V

Subscript

J_{sc} : short circuit current density
 V_{oc} : open circuit voltage
FF: fill factor
Eff: efficiency
 J_{mp} : current density of max power point

[†]Corresponding author

E-Mail : solar@korea.ac.kr (D. Kim, Korea Univ.)

© Materials Research Society of Korea, 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.

- V_{mp} : voltage of max power point
- A : width of unit cell
- B : length of unit cell
- S : pitch of finger to finger
- W_F : width of finger
- W_B : width of busbar
- ρ_{smf} : sheet resistivity of contact metal layer for the fingers
- ρ_{smb} : sheet resistivity of contact metal layer for the busbars
- ρ_c : contact resistivity between front metal and emitter
- ρ_s : sheet resistivity of emitter

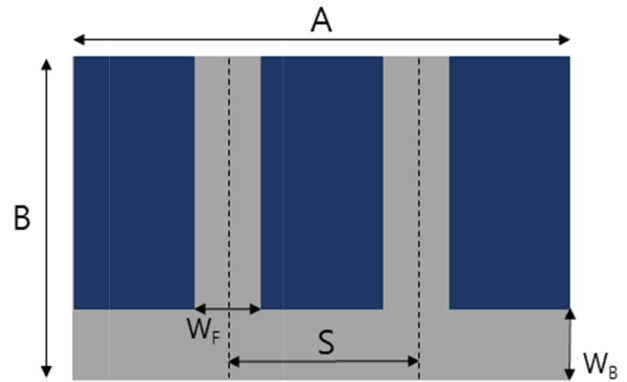


Fig. 1. Schematic of unit cell for designing front metal contact.

1. 서 론

상용 실리콘 태양전지는 전면과 후면에 광 생성 전류 수집을 위한 전극이 존재하며, 그 중 전면 전극의 경우 전류 수집과 동시에 빛을 흡수해야 하므로 전기적, 광학적 손실 계산을 통한 전극 디자인 많은 연구가 진행되었다. 전면 전극에서 일어나는 전력 손실은 네 종류로 구성되어 있다. 금속의 선저항으로 인한 손실, 에미터와 전극의 접촉에 의하여 생기는 접촉저항으로 인한 손실, 에미터의 저항으로 인한 전류가 전극으로 수집될 때까지의 수평 거리만큼의 저항 손실, 전면에서 전극에 의한 빛가림으로 인한 shading 손실이 있다. 전면 전극 설계 시, 저항 손실을 줄이기 위해서는 에미터와 전극 접촉 면적을 늘리는 것이 바람직하지만 반대로 태양광 수집에 있어서는 넓은 전극 패턴이 전류 밀도의 감소의 원인이 되므로 저항 손실과 광 손실이 서로 상반된 경향을 보인다. 따라서 태양전지의 전면 전극 설계 시 저항 손실과 광 손실을 동시에 고려하여 최적 디자인을 찾는 것이 태양전지 효율 증가를 위해 중요하다.¹⁻³⁾

본 연구에서는 먼저 문헌을 바탕으로 태양전지의 전면 전극 패턴에 따른 최소의 전력 손실을 갖는 계산 과정을 분석하여 면적당 최적의 전극 개수를 구하는 계산을 진행하였다.⁴⁾ 다음으로 설계된 최적 전극 개수의 검증은 위하여, 나머지 공정은 동일한 상태에서 전극 개수만을 달리한 동일한 면적의(4 cm × 4 cm) 태양전지를 제작하여 태양전지 패턴에 따른 효율 변화를 측정 및 검증하였다.

2. 실험 방법

2.1 Theoretical approach

전면 전극 설계를 위한 계산은 Martin Green의 Solar Cells의 문헌을 바탕으로 진행하였다.⁴⁾ 태양전지의 전면

전극 패턴 설계를 위하여, busbar와 Finger의 구조를 포함한 기본 단위인 unit cell을 설정하였다. Finger와 busbar의 면적에 따른 선저항으로 인한 최대 전력값에 대한 표준화된 전력 손실율(P_{rf} , P_{rb})은 다음과 같은 식(1,2)으로 나타낼 수 있다.

$$P_{rf} = \frac{1}{3} B^2 \rho_{smf} \frac{J_{mp} S}{V_{mp} W_F} \quad (1)$$

$$P_{rb} = \frac{1}{3} A^2 B \rho_{smb} \frac{J_{mp}}{V_{mp} W_B} \quad (2)$$

finger와 busbar의 면적에 따른 빛 가림으로 인해 발생하는 최대 전력값에 대한 표준화된 전력 손실율(P_{sf} , P_{sb})에 관한 식(3,4)은 다음과 같다.¹⁾

$$P_{sf} = \frac{W_F}{S} \quad (3)$$

$$P_{sb} = \frac{W_B}{B} \quad (4)$$

finger에서의 접촉저항(ρ_c)으로 인한 최대 전력값에 대한 표준화된 전력 손실율은 다음과 같은 식(5)으로 표현 가능하며, busbar로 수집될 때 생기는 접촉저항 손실은 finger의 단면적에 비해 busbar 면적이 약 10배 이상 넓기 때문에 본 계산에서는 생략하였다.

$$P_{rf} = \rho_c \frac{J_{mp} S}{V_{mp} W_F} \quad (5)$$

마지막으로 특정 면저항(ρ_s)을 갖는 태양전지 에미터에서의 전류 흐름 발생시 수평 저항에 의한 표준화된 전력 손실율에 관한 식(6)은 다음과 같다.

$$P_{rb} = \frac{\rho_s J_{mp} S^2}{12 V_{mp}} \quad (6)$$

위에서 설명된 전력 손실 요인들은 finger의 폭 및 finger간 거리에 따라 모두 변화하는 값으로 전면 전극을 설계할 경우 손실의 4가지 요인을 모두 고려하여 최소의 전력 손실을 가지는 결과를 도출할 필요가 있다.

$$(P_{rf} + P_{sf} + P_{cf} + P_{tl})_{min} = 2B \sqrt{\frac{\rho_{smf} + 3\rho_c/B^2 J_{mp}}{3}} \frac{J_{mp}}{V_{mp}} \quad (7)$$

최소의 전력손실을 가지는 최적의 조건은 finger간의 간격(S)이 매우 작아 에미터의 면저항으로부터 생기는 전력 손실(P_{tl})이 매우 작아 무시할 수 있다고 가정한다. 이때, finger의 shading loss가 resistive loss와 contact loss의 합이 동일할 때이다. 위 가정을 적용하여, 식(7)을 정리하면 다음 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{W_F}{S} = 2B \sqrt{\frac{\rho_{smf} + 3\rho_c/B^2 J_{mp}}{3}} \frac{J_{mp}}{V_{mp}} \quad (8)$$

따라서 finger의 너비(W_F), finger 사이의 간격(S), unit cell의 길이(B), finger와 에미터사이의 금속 면저항(ρ_{smf}), 접촉 저항(ρ_c)값은 위 (8)식과 최적화한 전면 전극을 디자인하기 위해 서로 연관되어 있다. 태양전지는 한정된 길이(B)를 가지고 있으며 접촉 저항(ρ_c)은 TLM 패턴의 측정을 통해 측정을 통해 구할 수 있으며 금속 면저항(ρ_{smf})은 전면 전극 금속(Ag)의 비저항으로부터 계산 가능하다. 이후 pre-test 태양전지를 인쇄하여 최대 전력 값에서의 전류밀도(J_{mp})과 최대 전력값에서의 전압(V_{mp})과 같은 매개변수값을 구함으로써 한정된 면적 안에서의 finger의 너비(W_F)에 따른 finger 사이의 간격(S)을 구할 수 있다. 즉, 4 cm × 4 cm의 finger 사이의 간격을 구하여 내부에 들어가는 finger의 개수를 구할 수 있다.

$$N_F = \frac{A}{S} \quad (9)$$

위 (9)식을 통하여 unit cell내부에 들어가는 finger의 너비에 따른 finger 개수를 구할 수 있다.

본 연구에서 전면 전극 최적화 설계를 위해 사용한 매

Table 1. parameters for calculation optimized number of front contact fingers for 4 cm × 4 cm solar cell.

| | |
|--|-----------|
| W_F (um) | 90 |
| B(mm) | 40 |
| ρ_{smf} (Ω /sq) | 1.4167e-4 |
| ρ_c (Ω /cm ²) | 0.2e-3 |
| ρ_s (Ω /sq) | 60 |
| J_{mp} (mA/cm ²) | 34.76 |
| V_{mp} (V) | 0.527 |
| NF(ea) | 19 |

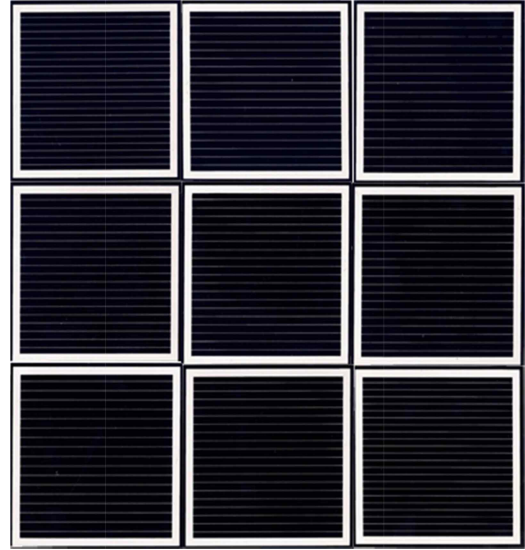


Fig. 2. 9 cell pattern solar cell which have 17, 19, 22 ea fingers pattern on.

개변수값을 Table 1에 명시하였다.⁵⁾ 이를 통해 전면 전극을 설계하고자 하는 태양전지의 4 cm × 4 cm 크기에 적합한 finger의 개수를 19 ea로 계산하였다.⁶⁻⁷⁾

2.2 Experimental procedure

본 실험에서는 계산된 전면 전극 패턴에 따른 전력 손실값을 검증하기 위하여 4 cm × 4 cm 규격의 태양전지를 제작하였다. 태양전지 간 다른 태양전지 공정의 오차를 최소화하기 위하여 동일한 6 inch 웨이퍼 내에 전극 개수가 상이한 9개의 태양전지를 제작하였다.

실리콘 태양전지의 제작 프로세스는 다음과 같다. 초크랄스키(Czochralski)-Si *p-type* (100)방향의 웨이퍼의 두께 200um, 6 inch 사이즈, 비저항 1.0-1.5 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ 실리콘 웨이퍼를 사용하였다. 다음으로 KOH+첨가제 용액으로 전후면 texturing을 진행하였다. 에미터 형성은 튜브 퍼니스를 사용하여 인(Phosphorus)을 웨이퍼 내부로 확산시켜 형성하였다. 전면 패시베이션 및 반사 방지막 효과 증가를 위해 전면에 PECVD(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) 장비를 통한 실리콘 질화막(SiNx)을 약 70 nm의 두께로 형성 하였다. 동일한 공정을 거친 웨이퍼 위 설계된 전극 개수를 바탕으로 태양전지 전극은 스크린 프린트를 통해 인쇄하였다. 전면 전극 패턴은 은(Ag)으로 인쇄하고, 후면전극은 전체 웨이퍼 영역에 대해 알루미늄(Al)을 인쇄하였다. 이후, 전후면 동시 소성을 위해 RTP(Rapid Temperature Process) 장비를 이용하여 최대 온도 750 °C에서 3초간 열처리를 진행하였다.

계산된 최적 finger 개수인 19개를 기준으로 작거나 큰 패턴(17, 22개)을 각 3개씩 배치하여 총 9개의 소면적

태양전지를 제작하였다. 같은 웨이퍼 위 각각의 단위 태양전지는 에미터의 연결 단절 및 사이즈 규격화를 위해 다이싱 공정을 통하여 정확히 4 cm × 4 cm로 절단하였다. 이후 서로 다른 finger 수를 갖는 각 단위 태양전지의 특성을 Light I-V로 평가하였다. finger 개수에 따른 최대 전력 값, Eff , V_{oc} , J_{sc} 와 같은 태양전지 성능을 비교 분석 하였다. 또한 quantum efficiency(QE)추정을 통해, 전면 전극의 shading loss를 포함하지 않은 J_{sc} 값과 Light I-V 상의 J_{sc} 값을 비교함으로써 실제로 finger에 의해 shading loss가 얼마만큼 일어나는지 측정하여 보았다. 마지막으로 계산과 실제 실험 결과의 오차율이 어느 정도 차이가 나는지를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 전면 전극 패턴 별 Light I-V 비교

각 finger 수에 따른 패턴별로 측정한 Light I-V curve (Fig. 3)와 그로부터 추출한 특성 저항(R_s)과 충전율(FF)을 Fig. 4에 나타내었다. Light I-V curve로부터 추출한 각 17, 19, 22 ea의 finger 수를 가지는 패턴의 충전율은 각각 0.7745, 0.7781, 0.7843 으로 측정되었으며 특성 저항값은 각각 34.29, 31.64, 21.47 mΩ으로 측정되었다.

이 실험으로부터 같은 면적 안의 태양전지 내부의 finger 개수가 증가할수록 충전율(FF)이 증가하는 양상을 보이며 이는 특성 저항 값이 감소하기 때문으로 생각된다. 이론적으로, 같은 면적 안에 금속 전극이 차지하는 면적이 늘어나면 금속 저항, 접촉 저항이 줄어들어 특성 저항(R_s)이 줄어들기 때문에 전력손실이 감소하는 것으로 설명할 수 있다.

3.2 전면 전극 패턴 별 단락전류밀도 비교

전면 전극의 shading 효과를 제거한 태양전지의 내부에서 생성되는 최대 전류를 각 태양전지별로 비교하기 위하여, 빔 사이즈를 finger 사이 1 mm × 4 mm 영역으로 제한하여 EQE(External quantum efficiency)를 측정하고 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 측정된 QE data로부터 J_{sc} 값을 구할 수 있으며 이를 shading loss 효과가 포함된 Light I-V curve의 J_{sc} 와 비교함으로써 전류 감소량을 측정할 수 있다.

EQE로부터 추출한 각 17, 19, 22 ea의 finger 수를 가지는 미세전극 패턴별 전류밀도값은 39.4, 39.39, 39.46 mA/cm² 으로 최대, 최소값의 차이가 0.07 mA/cm² 로써 태양전지 내부의 재결합에 의한 광생성 전류의 최대값은 유사함을 확인하였다. 한편 Light I-V curve에서 추출한 전류밀도 값은 37.61, 37.53, 37.38 mA/cm² 로써 최대, 최소값의 차이가 약 0.24 mA/cm² 으로 측정되었다.

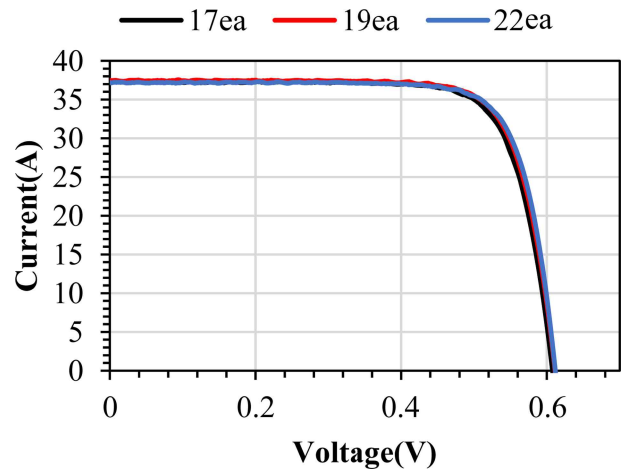


Fig. 3. Light I-V curve for each solar cell which has different fingers number.

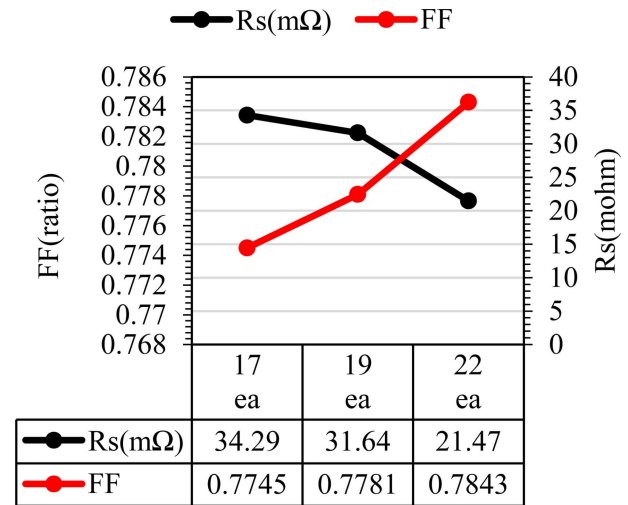


Fig. 4. Fill factor & series resistance for each solar cell which has different fingers number.

이론적으로, 같은 면적의 태양전지 안의 finger 개수가 증가할수록 J_{sc} 가 감소하는 양상을 보이며 이는 태양전지 전면에서 금속전극이 차지하는 면적이 증가하여 빛을 반사하는 비율이 늘어나기 때문이며 이를 실험적으로 설명할 수 있다.

3.3 패턴 별 solar cell efficiency 비교

태양전지 전면 전극의 finger 수가 각 17, 19, 22 개가 인쇄된 패턴의 태양전지의 V_{oc} , J_{sc} , FF, Eff 을 각각 Tabel 2에 정리하였다. 앞서 살펴본 바와 같이 finger의 개수가 증가할수록 충전율(FF)은 증가하는 양상을 보이며 전류밀도(J_{sc})는 감소하는 양상을 보인다. 이 두 가지 요소는 태양전지의 효율에 미치는 영향이 서로 상반되는 관계에 있다. 따라서 적절한 finger 개수를 설정하는

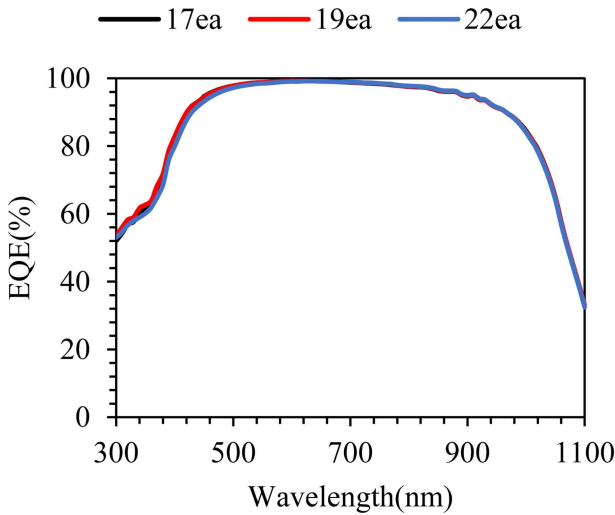


Fig. 5. Quantum efficiency of each solar cell which have different fingers number.

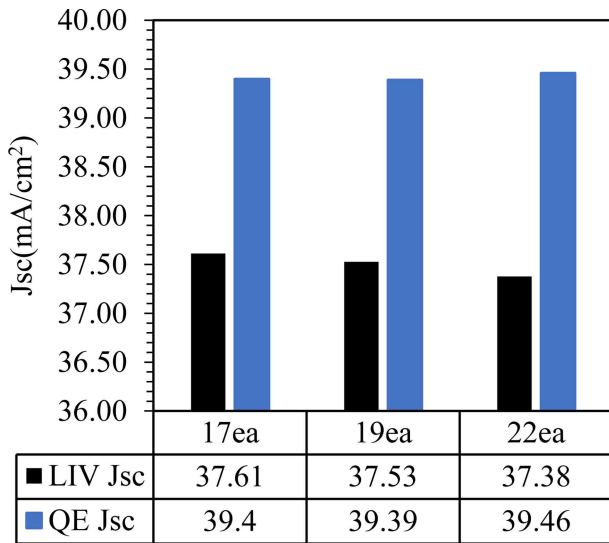


Fig. 6. short circuit current density(J_{sc}) compare from Light I-V curve and QE of each solar cell which has different fingers number.

Table 2. parameters of each solar cell which has different numbers of finger on front metal pattern.

| | 17 ea | 19 ea | 22 ea |
|--------------------------------|--------|--------|--------|
| V_{oc} (mV) | 607.5 | 611.0 | 611.3 |
| J_{sc} (mA/cm ²) | 37.61 | 37.53 | 37.38 |
| FF(ratio) | 0.7745 | 0.7781 | 0.7843 |
| Eff(%) | 17.51 | 17.81 | 17.84 |

것이 태양전지의 효율을 최적화 하는 데 있어서 매우 중요한 요소이다.

본 실험에서는 전면 전극 finger의 개수가 22 ea 인 패턴의 태양전지의 효율이 17.84 % 로 가장 높게 측정되

Table 3. Comparison of max power density between experimental result and calculation result.

| | Experiment | Calculation | Error(%) |
|---------------------------------|------------|-------------|----------|
| $P_{m,d}$ (mW·cm ²) | 17.85 | 17.15 | 3.8 |

었다. 실험적으로는 finger 개수의 증가로 인한 shading loss로 인한 전력 손실보다 특성 저항을 낮춤으로써 얻는 전력 이득이 더 큰 것으로 생각된다. 이것은 전면 전극 패턴 설계를 위한 모델링을 구성할 때, 평평한 평면 위에 finger가 인쇄되어 finger 아래 부분에서 shading loss가 일어나는 것으로 가정하였다. 하지만 실제 제작된 실리콘 태양전지는 textured 표면을 갖고 있기 때문에 설계 모델과는 다른 광흡수경로를 가지게 된다. 이러한 실제와 설계 모델과의 차이점이 계산 결과와 실험 결과와의 오차의 원인이 되는 것으로 생각된다. 전면 전극 패턴을 계산할 때, 최적화된 태양전지의 최대 전력 값을 예상할 수 가 있으며 이를 실제 실험값과 비교하여 오차의 정도를 계산하여 보았다.

Table 3에 실험값과 계산으로 구한 최대 전력 밀도를 표기하였으며 이를 통해 계산과 실제 실험값은 3.8 % 정도의 오차를 가짐을 알 수 있다. 이 오차의 원인은 실제 태양전지의 전면에서는 반사도를 낮추기 위해 textured 모양으로 식각되어 있어 이론적으로 설계한 모델링과의 차이가 있으며 이론 계산에서 무시한 에미터에서의 면저항에 의한 전력 손실의 영향인 것으로 생각된다.

4. 결 론

태양전지의 전면전극 패턴의 설계함에 있어 전력 손실을 최소화하기 위하여 finger에서 생기는 자체적인 금속 저항으로 생기는 전력 손실(resistive loss), 에미터와의 접촉저항으로 생기는 전력 손실(contact resistive loss), 그립자로 인하여 생기는 전력손실(shading loss), 에미터의 면저항으로부터 생기는 전력 손실(emitter lateral loss)을 모두 고려하여 설계하여야 한다. 이를 반영하여 단일 태양전지 상에 동일한 면적을 가진 서로 다른 finger수를 가진 패턴들을 인쇄하여 각 패턴에서 측정되는 충전율(FF), 특성 저항(R_s), 전류밀도(J_{sc})를 비교하였다.

4 cm × 4 cm 면적안의 finger 수를 17, 19 22 개로 설계하여 각각의 충전율(FF), 특성 저항(R_s), 전류밀도(J_{sc})를 Light I-V와 QE를 통해 측정하였다. 계산 과정과 동일하게, finger의 수가 많을수록 저항으로부터 생기는 손실이 줄어 드는 것을 충전율이 증가하는 것으로부터 확인하였으나 전면의 금속 전극이 차지하는 비율이 늘어나 생성되는 전류밀도가 낮아지는 현상을 실험적으로 관찰하였다. 계산 결과와 실험 수치로 구한 최대 전력값

의 오차는 약 3.8%이며 이는 설계 모델과 실제에서 표면의 형상 차이 때문으로 생각된다. 후에 textured 표면 형상이 고려된 설계 모델을 고려하여 최적화된 최대 전력값의 오차를 줄일 수 있는 방안을 연구할 계획이다.

Acknowledgement

This work was supported by the Energy Technology Development Program of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) grant(2015-3010012100).

This work was supported by the KU-KIST Graduate School Project.

References

1. H. E. Song, J. H. Hong, M. G. Kang and N. S. Kim, J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng., **25**, 1015 (2012) (in Korean).
2. S. Braun, G. Micard and G. Hahn, Energy Procedia, **27**, 227 (2012).
3. W. P. Mulligan, M. J. Cudzinovic, T. Pass, D. Smith and R. M. Swanson, U.S. Patent No. 7388147. B2, (2008).
4. M. A. Green, Silicon Solar Cells : Advanced principles & practice, University of New South Wales, (1995).
5. J. H. Lee, K. Y. Cho and S. H. Lee, J. Korean Sol. Energy Soc., **4**, 235 (2009).
6. D. Y. Shin and Y. R. Kim, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, **38**, 539 (2014).
7. P. Stummer, H. Maurer and A. G. Green, Geophysics, **69**, 120 (2004).