

Homogeneous 에미터와 Selective 에미터 결정질 실리콘 태양전지의 온도에 따른 전류-전압 특성 변화 측정 및 분석

남윤정¹ · 박효민¹ · 이지은¹ · 김수민¹ · 김영도¹ · 박성은¹ · 강윤목² · 이해석^{1†} · 김동환^{1†}
¹고려대학교 신소재공학과, ²고려대학교 그린스쿨대학원 에너지환경정책기술학과

Measurement and Analysis of Temperature Dependence for Current-Voltage Characteristics of Homogeneous Emitter and Selective Emitter Crystalline Silicon Solar Cells

Yoon Chung Nam¹, Hyomin Park¹, Ji Eun Lee¹, Soo Min Kim¹, Young Do Kim¹,
Sungeun Park¹, Yoonmook Kang², Hae-seok Lee^{1†} and Donghwan Kim^{1†}

¹Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Anam-dong,
Seongbuk-gu, Seoul 136-713, Korea

²KU · KIST Green School, Graduated school of Energy and Environment, Korea University, Anam-dong,
Seongbuk-gu, Seoul 136-713, Korea

(2014년 5월 8일 접수: 2014년 6월 13일 최종수정: 6월 25일 채택)

Abstract Solar cells exhibit different power outputs in different climates. In this study, the temperature dependence of open-circuit voltage(V_{oc}), short-circuit current(I_{sc}), fill factor(FF) and the efficiency of screen-printed single-crystal silicon solar cells were studied. One group was fabricated with homogeneously-doped emitters and another group was fabricated with selectively-doped emitters. While varying the temperature (25, 40, 60 and 80 °C), the current-voltage characteristics of the cells were measured and the leakage currents extracted from the current-voltage curve. As the temperature increased, both the homogeneously-doped and selectively-doped emitters showed a slight increase in I_{sc} and a rapid degradation of V_{oc} . The FF and efficiency also decreased as temperature increased in both groups. The temperature coefficient for each factor was calculated. From the current-voltage curve, we found that the main cause of V_{oc} degradation was an increase in the intrinsic carrier concentration. The temperature coefficients of the two groups were compared, leading to the idea that structural effects could also affect the temperature dependence of current-voltage characteristics.

Key words temperature dependence, homogeneous emitter, selective emitter, crystalline silicon solar cells, current-voltage characteristics.

1. 서 론

최근 화석연료 자원의 고갈과 고유가화, 환경오염 문제가 대두됨에 따라 신·재생 에너지에 대한 관심이 높아지고 있다. 화석연료를 대체할 신·재생 에너지로는 태양광에너지, 바이오에너지, 풍력, 수력, 연료전지, 석탄액

화 및 가스화, 해양에너지, 폐기물에너지 등으로 각 분야에서 연구가 활발히 진행되고 있다.

태양광 에너지는 폭발적인 에너지 수요에 대응 할 수 있는 에너지 공급원 중 하나로 주목 받고 있다. 태양 전지는 반도체의 광기전력 효과를 이용하여 빛 에너지를 전기 에너지로 생성하는 방식이다. 즉, 빛이 조사되면 반

[†]Corresponding author

E-Mail : Ihseok@korea.ac.kr (H. Lee, Korea Univ.)

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.

도체는 광자에너지를 흡수하여 자유전자와 정공을 만들고, 자유전자는 n형 반도체 쪽으로, 정공은 p형 반도체 쪽으로 이동하여 외부회로에 전류가 흐르게 되면서 전기를 생성한다. 특히, 결정질 실리콘 태양전지는 변환 효율이 높고 안정성과 지속성이 좋으며 제조 기술의 최적화가 용이하기 때문에 많은 연구가 이루어져 왔다.^{1,2)} 태양전지는 가급적 많은 수의 광자를 흡수하여야 하기 때문에 일사량이 많을수록 출력이 증가한다. 하지만 일사량이 많은 지역은 대체적으로 온도가 높다. 온도가 높은 지역에 태양전지를 설치하게 될 경우, 태양전지의 작동 온도가 증가하여 효율이 저하된다. 이는 앞서 언급한 실리콘 태양전지의 경우, 이론적으로 온도 상승에 따라 약 $2.3 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ 의 전압이 감소하게 된다는 보고가 있으며 이에 따라 작동 온도 상승으로 인한 효율 감소 정도의 차이가 나타나며, 태양광 발전시스템의 효율을 높이기 위한 방법으로 태양전지의 온도를 낮추는 냉각시스템을 설치하는 방법 등의 온도에 따른 태양전지 효율 감소 저감을 위한 다양한 노력이 이루어지고 있다. 일반적인 모듈은 $40\text{--}50^\circ\text{C}$ 범위에서 작동하며 집광형 태양전지의 경우 그 이상의 온도까지 올라간다.³⁾ 우리나라의 경우 1년 동안 모듈의 온도는 0°C 부터 60°C 이상의 온도 범위를 오르내리게 된다.¹⁾ Martin A. Green 등에 의해 온도에 따른 태양전지 셀과 모듈의 효율에 대한 연구와 온도에 따른 태양전지의 누설전류 변화 등에 대한 연구가 이루어졌다.^{1,4,6)}

고온의 작동 온도에서도 높은 출력을 나타내는 태양전지 제작을 위해서는 태양전지 구조별 온도에 따른 태양전지 특성에 대한 분석이 필요하다. 본 연구에서는 homogeneous 에미터와 selective 에미터 구조를 가지는 상용 스크린 프린트드 단결정 실리콘 태양전지의 전류-전압 특성을 측정했다. 온도에 따른 단락전류(I_{sc}), 개방전압(V_{oc}), 충전율(FF), 효율, 그리고 누설전류(I_0 , I_{01} , I_{02}) 변화를 분석하였다.

2. 실험 방법

Cz법을 통해 성장된 $1\text{--}3 \Omega\cdot\text{cm}$ 비저항의, 브론이 도핑된 p-type (100) 실리콘 기판을 이용하여 태양전지를 제작하였다. 실리콘 기판 전면은 요철구조(Texturing)를 형성하여 광 흡수를 늘렸다. 이후 샘플은 두 그룹으로 나누어 첫 번째 그룹은 인(P)을 확산시켜서 homogeneous 면저항을 가지는 n+ 에미터 층을 형성하였고, 두 번째 그룹은 전면전극의 접촉 영역만 고농도로 도핑하고 그 외 영역은 저농도로 도핑하여 selective 에미터를 형성한 고효율 구조를 적용하였다. 에미터를 형성한 후에는 PSG 층을 제거했다. 이후 Plasma Enhanced Chemical Vapor

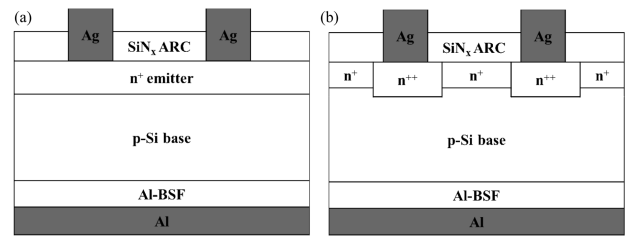


Fig. 1. (a) Conventional screen-printed crystalline silicon solar cell with homogeneous emitter, (b) High efficiency screen-printed crystalline silicon solar cell with selective emitter.

Deposition(PECVD)을 통하여 실리콘 질화막 반사방지막을 증착하였다. 스크린 프린팅을 이용하여 전면 Ag 전극, 후면 Al 전극을 형성하였으며, 제작된 태양전지의 구조는 Fig. 1에 나타내었다. 태양전지 제작 후 대면적 태양광 모사장치를 이용하여 온도에 따라 개방전압(Open circuit voltage, V_{oc}), 단락전류(Short circuit current, I_{sc}), 충전율(Fill factor, FF), 효율을 측정하였다. 온도를 25 , 40 , 60 , 80°C 로 변화시켜가며 태양전지 특성을 측정했고 상온(25°C)의 효율 대비 80°C 에서의 태양전지 특성 저하율을 계산하였다. 단락전류 상승의 원인을 설명하기 위해 온도에 따른 진성 캐리어 농도 변화를 계산하였으며, 개방전압 저하를 설명하기 위해 전류-전압 특성을 측정하고, Space Charge Region(SCR)과 Quasi-Neutral Region(QNR)의 누설전류를 추출해냈다. 온도 별 누설전류 값을 통해 homogeneous 에미터와 selective 에미터 구조의 태양전지를 비교하였다. 위의 측정, 추출 및 계산을 통하여 온도별 태양전지 특성 변화를 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 homogeneous 에미터 태양전지와 selective 에미터 태양전지의 Light I-V 특성을 나타낸 그래프이다. 온도가 증가함에 따라 두 셀의 I_{sc} , V_{oc} , FF , 그리고 효율의 변화를 나타내었다. homogeneous 에미터 태양전지와 selective 에미터 태양전지의 I_{sc} (Fig. 2(a))는 온도가 25°C 부터 80°C 로 증가 하면서, 각각 8.997 A 에서 9.255 A 로, 9.004 A 에서 9.258 A 로 증가하는 경향을 보였고 I_{sc} 증가율은 각각 2.87% , 2.82% 로 계산되었다. 반면에 V_{oc} 는 두 셀에 대해 모두 온도에 따라 특성이 감소하는 결과를 얻었다(Fig. 2(b)). homogeneous 에미터 태양전지의 경우 온도가 20°C 에서 80°C 로 증가 하였을 때 626 mV 에서 532 mV 22.2% 의 감소율을 보였고, selective 에미터 태양전지의 경우 638 mV 에서 508 mV 로 20.3% 감소율을 보이고 있다. 또한 FF 도 V_{oc} 와 마찬가지로 온도에 따라 특성이 감소하는 경향이 보인다(Fig. 2(c)). 25°C 에서 80°C 로 온도가 증가할 때

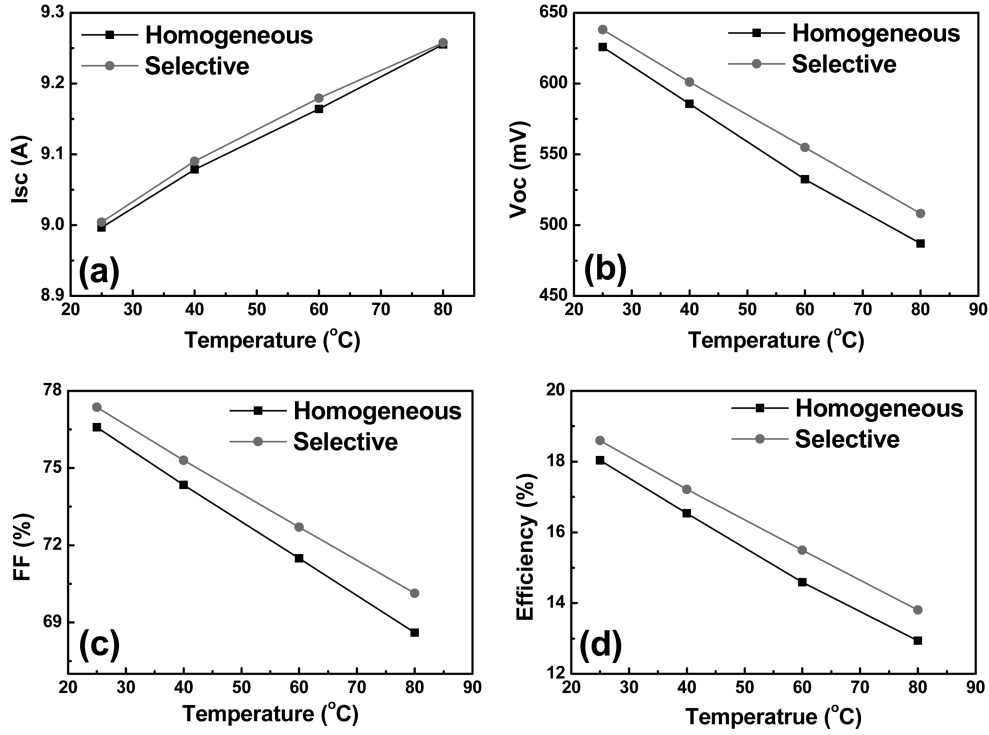


Fig. 2. Temperature dependence of (a) short-circuit current, (b) open-circuit voltage, (c) fill factor and (d) efficiency of homogeneous and selective emitter single crystalline silicon solar cells.

homogeneous 에미터 셀은 76.6% 에서 68.6% 로 초기 FF 대비 감소율 약 10.4%, selective 에미터 셀은 77.4% 에서 70.1% 로 초기 FF 대비 감소율 약 9.34% 를 나타냈다. 결과적으로 효율은 homogeneous 에미터 셀의 경우 18.0% 에서 12.9% 로 초기 효율과 대비하여 28.3% 의 효율이 감소했으며 selective 에미터 셀은 18.6% 에서 13.8% 로 초기 효율 대비 25.8% 의 감소율을 보였다(Fig. 2(d)).

Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 homogeneous 에미터 태양전지와 selective 에미터 태양전지의 I_{sc} 가 온도에 따라서 각각 2.87%, 2.82% 로 증가 경향을 보이고 있다. I_{sc} 증가의 식 (1)을 통해서 원인을 유추해 볼 수 있다.

$$I_{sc} = \frac{qAD}{LN_D} n_i^2 \exp\left(\frac{qV_{oc}}{kT} - 1\right) \quad (1)$$

q 는 전하량, A 는 면적, D 는 소수 캐리어의 확산계수, L 은 소수 캐리어 확산 거리, N_D 는 도핑 농도, k 는 볼츠만 상수, T 는 온도이다. 식 (1)에서 온도에 따른 I_{sc} 변화와 관련된 요소들은 D , L , V_{oc} , 그리고 n_i 로 볼 수 있다. 또한 식 (2)를 통해 n_i 의 온도 의존성을 알 수 있다.

$$n_i^2 = 4 \left(\frac{2\pi kT}{h^2} \right)^3 (m_e^* m_h^*)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_{Go}}{kT}\right) \quad (2)$$

T 는 온도를 나타내고 h 는 플랑크 상수, $m_e^* m_h^*$ 는

각각 전자와 정공의 유효 질량, k 는 볼츠만 상수, E_{Go} 는 0 K 에서의 에너지 밴드갭을 나타낸다. Misiakos K, Tsamakis D.은 온도에 따른 실리콘의 진성 캐리어 농도를 식(3)과 같이 정리하였다.⁷⁾

$$n_i = 5.29 \times 10^{19} \left(\frac{T}{300} \right)^{2.54} \exp\left(\frac{-6726}{T}\right) \quad (3)$$

25°C 에서 실리콘의 n_i^2 은 6.73×10^{19} 이며 80°C 에서는 1.80×10^{23} 으로 증가한다. 따라서, 온도가 증가 하면서 태양전지 종류에 상관 없이 결정질 실리콘 내부의 n_i 가 증가 하게 되고 이러한 원인에 의해서 I_{sc} 증가에 가장 직접적 원인으로 판단된다.

온도 증가에 의한 n_i 증가는 전류 요소뿐만 아니라 V_{oc} 에도 영향을 줄 것으로 예측 된다. Fig. 2(b)에서 보는 바와 같이 온도가 25°C 에서 80°C 로 증가함에 따라 homogeneous 에미터 태양전지의 경우 22.2% 의 V_{oc} 감소율을 보이고, selective 에미터 태양전지의 경우 20.3% 의 감소율을 보였다. 온도의 증가에 따라 V_{oc} 가 감소하는 원인을 식 (3)을 통해 예측할 수 있다.

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \left[\ln \frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right] \quad (4)$$

V_{oc} 를 결정짓는 요인들은 식에 따라서 I_{sc} 와 누설전류 I_0 로 볼 수 있다. I_0 에 대한 특성을 얻기 위해 암상태

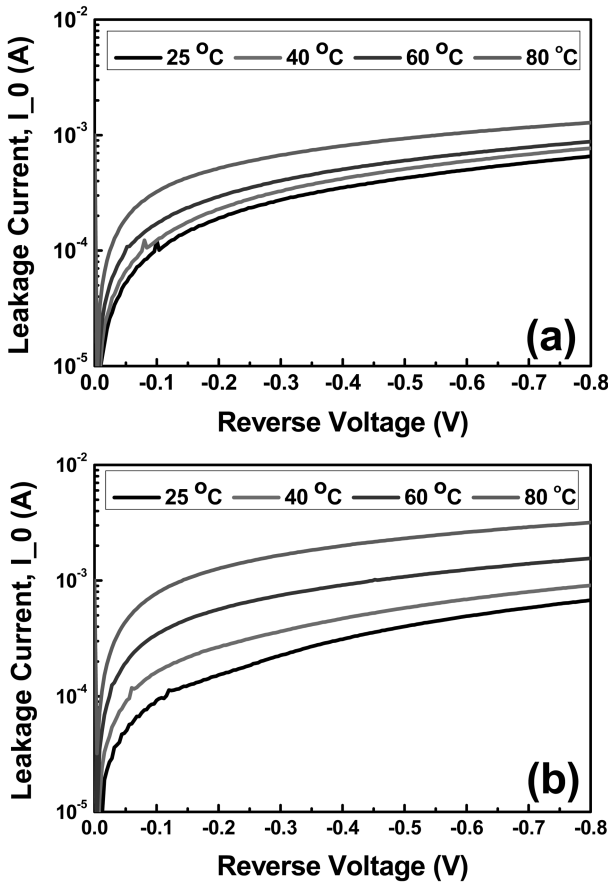


Fig. 3. Dark reverse current of (a) homogeneous emitter solar cell and (b) selective emitter solar cell depending on different temperatures.

에서 전류-전압 특성을 측정한 결과, Fig. 3(a), (b)에서 보는 바와 같이 homogeneous 에미터 태양전지와 selective 에미터 태양전지 모두 온도가 증가함에 따라 I_0 가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. I_{sc} 또한 온도에 따라 증가하지만 온도가 25 °C 에서 80 °C 로 증가함에 따라 I_{sc} 는 1.03 배, I_0 는 1.95 배 증가한다. 따라서 V_{oc} 가 온도에 따라 감소하게 되는 것이다. 식 (5)를 통해서 I_0 도 I_{sc} 처럼 n_i 에 영향을 받는 것을 알 수 있다.

$$I_0 = qA \frac{Dn_i^2}{LN_D} \tag{5}$$

q 는 전하량, A 는 면적, D 는 소수 캐리어의 확산계수, L 은 소수 캐리어 확산 거리, N_D 는 도핑 농도를 나타내게 된다. 앞서 언급했듯이 온도에 따른 확산계수와 소수캐리어 확산거리의 변화보다 온도의 지수에 비례하는 n_i 가 가장 큰 영향을 줄 것으로 보인다.

누설전류가 발생하는 영역을 더 명확히 알아보기 위해서 암상태에서 측정한 전류-전압 곡선을 이용해 SCR 과 QNR 영역에서의 누설전류를 추출했다. 암상태에서의 전류-전압 관계는 다음의 식처럼 영역을 나누어서 생각할

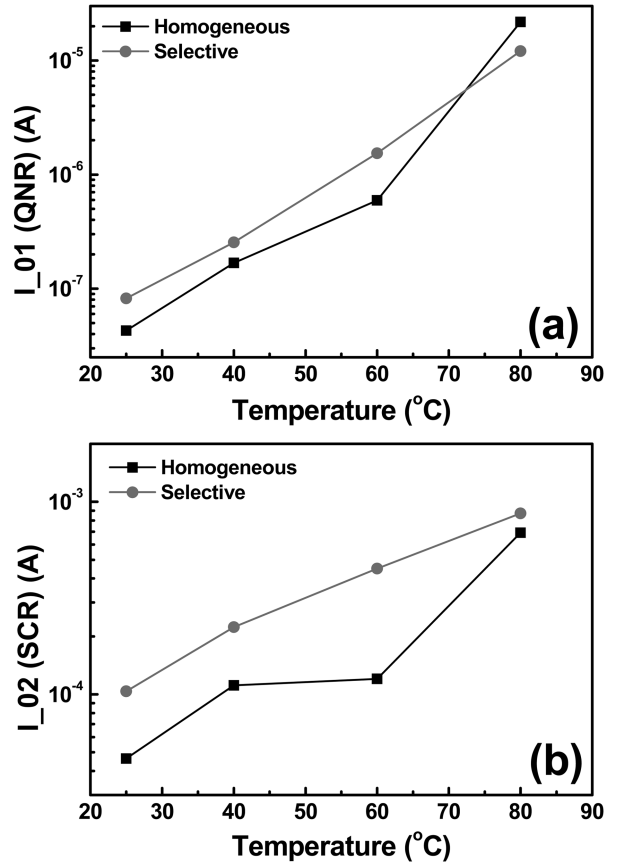


Fig. 4. Temperature dependence of leakage current of (a) QNR and (b) SCR for homogeneous emitter solar cell and selective emitter solar cells.

수 있다. 식 (6)는 암상태의 다이오드의 전류-전압 관계를 나타낸다.⁸⁾

$$I = I_0 \left[\exp\left(q \frac{V - R_S I}{nkT}\right) \right] = I_{01} \left[\exp\left(q \frac{V - R_S I}{n_1 kT}\right) - 1 \right] + I_{02} \left[\exp\left(q \frac{V - R_S I}{n_2 kT}\right) - 1 \right] \tag{6}$$

I_{01} 은 QNR에서의 누설전류, I_{02} 는 SCR 에서의 누설전류, n_1 과 n_2 는 각각 QNR 과 SCR 에서의 다이오드 팩터, R_S 는 직렬저항이다. 위 식을 이용하여 암상태에서 측정한 전류-전압 곡선으로부터 온도에 따른 I_{01} 과 I_{02} 값을 추출해 낼 수 있었다. Fig. 4에서 나타낸 바와 같이 I_{01} 과 I_{02} 모두 온도에 따라 증가하는 경향을 보였으므로 전체 누설전류 I_0 또한 증가했다고 볼 수 있다. I_{01} 과 I_{02} 를 비교해 보면, 25~80 °C 구간에서 I_{02} 가 I_{01} 보다 $10^2 \sim 10^3$ 배 정도 크다. 즉, SCR에서의 누설전류가 전체 누설전류를 지배한다고 생각된다. 따라서 전체 I_0 가 온도에 따라 증가하는 이유는 온도가 상승하면서 n_i^2 이 증가하여 점점 더 많은 양의 캐리어가 SCR에 누설전류를 만들어내기 때문이라고 생각되며 이는 곧 V_{oc} 를 감

Table 1. Temperature coefficient of current-voltage characteristics of homogeneous emitter and selective emitter solar cells.

| Cell Type | I_{sc} | V_{oc} | FF | Efficiency | R_s | R_{sh} |
|---------------------|----------|----------|--------|------------|-------|----------|
| | | | (‰/°C) | | | |
| Homogeneous Emitter | 0.052 | -0.40 | -0.19 | -0.51 | 0.21 | -1.44 |
| Selective Emitter | 0.051 | -0.37 | -0.17 | -0.47 | 0.45 | -1.31 |

소시키는 원인인 것으로 판단된다.

Fig. 2(c)에서 나타난 바와 같이 FF 또한 감소하는 경향을 보이고 있다. FF 는 온도가 25 °C 에서 80 °C 로 증가하면서 homogeneous 에미터 태양전지의 경우 10.4 %의 감소율을, selective 에미터 태양전지는 9.34 %의 감소율을 보였다. FF 은 전류-전압 곡선 모양에 따라 결정되는데 이 곡선의 모양을 바꾸는 요인 중에는 직렬저항 (R_s)과 병렬저항(R_{sh})이 있다. 실제로 R_s 과 R_{sh} 각각에 의해 저하되는 FF 는 다음 경험식으로 식 (7), 식 (8)로 설명이 된다.⁹⁾

$$FF_s = FF_0(1 - 1.1R_s) + \frac{R_s^2}{5.4} \quad (7)$$

$$FF_{sh} = FF_0 \left(1 - \frac{V_{oc} + 0.7FF_0}{V_{oc}} \frac{1}{R_{sh}} \right) \quad (8)$$

FF_s 는 R_s 에 의해 저하되는 FF , FF_{sh} 는 R_{sh} 에 의해 저하되는 FF , FF_0 는 이상적인 태양전지의 FF 을 나타낸다. 두 식을 보면 R_s 이 낮을수록, R_{sh} 이 높을수록 FF 이 향상되는 것을 알 수 있다. 실제 본 실험 결과를 이용하여 R_s 과 R_{sh} 을 계산해 본 결과, homogeneous 에미터 태양전지와 selective 에미터 태양전지 모두 온도에 따라 R_s 이 증가 할 뿐만 아니라, R_{sh} 또한 감소하는 경향을 보였다. 자세하게 homogeneous 에미터 태양전지의 R_s 는 25 °C의 6.11 mΩ에서 80 °C의 6.81 mΩ으로 증가했다. Selective 에미터 태양전지의 R_s 도 5.90 mΩ에서 7.36 mΩ으로 증가했다. 반면, homogeneous 에미터 태양전지의 R_{sh} 은 34.1 Ω에서 7.02 Ω으로 감소했고 selective 에미터 태양전지의 R_{sh} 도 67.1 Ohm에서 18.8 Ohm으로 감소하는 경향을 나타냈다.

온도가 1 °C 변함에 따라 인자가 변화하는 정도를 나타내는 온도계수를 계산할 수 있는데 이 값을 이용하여 태양전지의 성능을 예측할 수 있다. Table 1에서 나타난 각 태양전지 별로 인자의 온도계수를 비교하였을 때 V_{oc} 의 값이 온도에 민감하게 나타났다. 이는 n_i 의 증가에 기인한 것으로 판단된다. 또한 온도계수를 태양전지의 종류에 따라 비교해 보았을 때, I_{sc} 는 homogeneous 에미터 태양전지가 $4.64 \times 10^{-3} \text{ A/}^\circ\text{C}$ 이고 selective 에미터 태양전지는 $4.57 \times 10^{-3} \text{ A/}^\circ\text{C}$ 로 상대적으로 homogeneous 에미터 태양전지의 값이 높은 값을 보였다. 그리고 V_{oc} 와 FF 의 온도계수가 homogeneous 에미터 태양전지가 $-2.53 \text{ mV/}^\circ\text{C}$

와 $-0.145 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ 로 selective 에미터 태양전지의 V_{oc} 와 FF 온도계수 값인 $-2.35 \text{ mV/}^\circ\text{C}$ 와 $-0.131 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ 보다 상대적으로 높은 값을 보였다. 이러한 결과로 유추 해 보았을 때 n_i 뿐만 아니라 어떤 구조의 형태가 되느냐에 따라서 온도에 따른 특성변화가 있을 것으로 판단된다. 이는 추후 여러 구조의 태양전지를 비교하여 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단한다.

4. 결 론

고온의 지역, 혹은 일교차 및 연교차가 큰 지역에서 태양전지의 성능 변화를 파악하기 위해 homogeneous 에미터를 가지는 결정질 실리콘 태양전지와 selective 에미터의 구조를 가지는 결정질 실리콘 태양전지 두 가지 셀의 전류-전압 특성을 측정하였다. 온도를 25 °C, 에서 80 °C 로 증가시킴에 따라 두 가지 셀 모두에서 J_{sc} 가 좁은 폭으로 상승했으나 V_{oc} 이 크게 감소했으며 FF 또한 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 온도 증가에 따라 J_{sc} 가 증가한 원인은 n_i 농도가 증가하였기 때문이다. V_{oc} 이 크게 감소한 이유 또한 n_i 농도가 크게 증가함에 따라 I_0 가 크게 증가한 것이 원인인 것으로 판단된다. 따라서 온도에 따른 태양전지의 전류-전압 특성을 결정하는 주된 요인은 n_i 농도라고 판단된다. 또한 태양전지 성능을 나타내는 온도계수가 구조에 따라서 차이가 나는 결과를 보았는데 이는 n_i 농도증가 외에 태양전지의 구조적인 적인 요소 또한 원인으로 작용한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 20133010011770).

References

1. M. I. Jeong V. Janardhanam, K. W. Moon, J. S. Kim, K. S. Shin and C. J. Choi, Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 37th IEEE, 002881-002884 (2011).
2. M. Y. Feteha, G. M. Eldallal and M. M. Soliman, Renewable Energy, **22**, 269 (2001).
3. J. C. C. Fan, Solar Cells, **17**, 309 (1986).

4. M. A. Green, Progress in Photovoltaics, **11**, 333 (2003).
5. P. Singh, N. M. Ravindra, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, **101**, 36 (2012).
6. K. S. Shin, J. S. Kim, J. Moon, V. Janardhanam, M. I. Jeong, H K. Lee and C. J. Choi, Meeting Abstracts, 25, 1653-1653, 28th Electrochem. Soc. (ECS) (2010).
7. K. Misiakos, D. Tsamakis, J. appl. phys., **75**, 3293 (1993).
8. D. K. Schroder, Semiconductor Material and Device Characterization, 3rd ed., p.186, A John Wiley & Sons, Inc., USA (2006).
9. M. A. Green, Solar Cells Operating Principles, Technology, and System Applications, p.97, Prentice-Hall, USA (1982).