

# 열전소자 온도조절법을 이용한 결정형 실리콘 태양전지의 성능 측정

## Performance of Crystalline Si Solar Cells with Temperature Controlled by a Thermoelectric Module

허기무(Kimoo Heo)<sup>1</sup>, 이대호(Daeho Lee)<sup>2†</sup>, 이재현(Jae-Heon Lee)<sup>3</sup>

<sup>1</sup>한양대학교 대학원 기계공학과, <sup>2</sup>가천대학교 공과대학 기계공학과, <sup>3</sup>한양대학교 공과대학 기계공학부

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Gachon University, Seongnam, 461-701, Korea

<sup>3</sup>Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea

(Received April 27, 2015; revision received June 5, 2015; Accepted: June 8, 2015)

**Abstract** A proper estimate of solar cell efficiency is of great importance for the feasibility analysis of solar cell power plant development. Since solar cell efficiency depends on temperature, several methods have been introduced to measure it by operating temperature modulation. However, the methods either rely on the external environment or need expensive equipment. In this paper, a thermoelectric module was used to control the operating temperature of crystalline silicon solar cells effectively and precisely over a wide range. The output characteristics of crystalline silicon solar cells in response to operating temperatures from  $-5^{\circ}\text{C}$  to  $100^{\circ}\text{C}$  were investigated experimentally. Their efficiencies decreased as the temperature rose, since the decrease in the open circuit voltage and fill factor exceeded the increase in the short circuit current. The maximum power temperature coefficient of the single crystalline solar cell was more sensitive to temperature change than that of the polycrystalline solar cell.

**Key words** Crystalline Si solar cell(결정형 실리콘 태양전지), Output characteristics(출력 특성), Thermoelectric module(열전소자), Temperature coefficient(온도계수)

† Corresponding author, E-mail: [dhl@gachon.ac.kr](mailto:dhl@gachon.ac.kr)

### 기호설명

$SC$  : 단결정(single crystalline)  
 $PC$  : 다결정(polycrystalline)  
 $I$  : 전류 [A]  
 $V$  : 전압 [V]  
 $T$  : 절대온도 [K]  
 $T$  : 섭씨온도 [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $t$  : 시간 [s]  
 $P$  : 단위면적당 출력량 [ $\text{mW}/\text{cm}^2$ ]  
 $I_{sc}$  : 단락전류 [mA]  
 $I_o$  : 암전류 [mA]  
 $J_{sc}$  : 단락전류밀도 [ $\text{mA}/\text{cm}^2$ ]  
 $V_{oc}$  : 개방전압 [V]  
 $FF$  : 곡선인자  
 $E_g$  : 밴드갭 에너지 [eV]  
 $q$  : 전하량 [C]  
 $k$  : 볼츠만 상수 [J/K]

$B$  : 상수  
 $h$  : 플랑크 상수 [ $\text{J} \cdot \text{s}$ ]  
 $N_D$  : 도핑농도 [ $\text{cm}^{-3}$ ]  
 $n_i$  : 진성캐리어 농도 [ $\text{cm}^{-3}$ ]  
 $D$  : 소수캐리어의 확산계수 [ $\text{cm}^2/\text{s}$ ]  
 $L$  : 소수캐리어의 확산거리 [cm]  
 $A$  : 면적 [ $\text{cm}^2$ ]  
 $m_e^*$  : 전자의 유효질량 [kg]  
 $m_h^*$  : 전공의 유효질량 [kg]

### 그리스 문자

$\beta$  : 최대출력 온도 계수 [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]

### 1. 서 론

화석연료 소비급증으로 인한 환경오염 문제와 함께

자원 고갈에 대한 우려로 대체 에너지 개발의 필요성이 커지고 있다. 태양열, 태양광, 풍력, 지력, 바이오물질 등을 이용한 여러 형태의 대체 에너지 중 태양광 에너지를 이용하는 태양전지는 오랜 기간 동안 가장 활발하게 연구되고 있는 주제이며, 발전설비용으로서 특히 중요한 위치를 차지하고 있다. 태양전지는 실리콘, 유기물, 나노물질 등의 구성 재료에 따라 다양한 형태로 제작된다. 이 중 단결정과 다결정 실리콘을 이용한 태양전지는 가장 널리 상용화되어 있는 형태이며, 높은 효율과 규격화된 생산 공정으로 인하여 발전설비용으로 주로 사용되고 있다. 최근에 많은 연구자들의 관심을 끌고 있는 페로브스카이트 광흡수체를 이용한 유기태양전지를 비롯하여<sup>(1)</sup> 기존의 실리콘 태양전지의 효율에 근접한 비실리콘 계열의 전지들에 대한 연구<sup>(2)</sup>가 진행되어 왔으나, 아직 실제 상용화 단계에는 이르지 못하는 못하고 있다. 실리콘 계열 태양전지 중 단결정과 다결정 실리콘 태양전지는 각각 효율과 가격 면에서 우위를 점하고 있으나, 제조공정의 발전으로 인하여 성능 및 생산비용의 차이는 점차 줄어들고 있는 추세이다.

태양전지의 효율을 정확히 예측하는 것은 태양전지 설비의 규모 및 사업성 여부를 고려할 때 반드시 필요한 절차이다. 태양전지 플랜트를 건설 시, 동일한 태양전지를 이용한다 하더라도, 해당 지역의 기후에 따라 발전 효율이 변하기 때문에 필요 발전량에 따른 설비 규모가 달라지게 되며, 이는 부지 선정에서부터, 건설비용, 최종 에너지 공급량에 이르기까지, 사업의 전반적인 사항에 영향을 미치게 된다.

특히 일교차 및 연교차가 매우 큰 지역에서는 상온 이하의 낮은 온도에서부터 상당히 높은 온도까지, 보다 넓은 온도 범위에서의 효율 데이터가 필수적이다. 태양전지 효율의 온도 특성에 관한 연구들은 꾸준히 진행되어 왔다. 팬을 이용한 공랭식,<sup>(3)</sup> 충돌제트<sup>(4)</sup> 또는 입자비산<sup>(5)</sup>을 이용한 수냉식, 히팅챔버를 이용한 온도 조절 방식,<sup>(6)</sup> 열충격 시험장치를 이용한 온도 조절 방식<sup>(7)</sup> 등 다양한 온도 조절 방식을 이용한 연구가 진행되었으나, 넓은 온도 범위에서 온도를 구간별로 정확하게 컨트롤하기 힘들고, 외부 환경의 변화에 따라 실험 장치 및 조건이 달라져야 하거나, 고가의 장비가 필요한 방법들이었다. 보다 정확한 효율을 예측하기 위해서는 정밀하게 제어된 온도에서의 데이터가 필요하며, 이를 실험실 환경에서 얻기 위해서는 보다 간단한 장치로 온도를 제어할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다. 한편, 태양전지의 특성 상 일반적으로 태양전지의 작동온도를 상온 이상으로 높이는 실험환경을 조성하는 것은 비교적 용이하지만, 실험실 환경에서 작동온도를 상온 이하로 유지한 채 효율을 측정하기 위해서는 별도의 냉각장치를 이용해야하기 때문에 어려움이 따른다.

본 논문에서는 열전소자<sup>(8)</sup>를 이용하는 비교적 간단한 온도 제어 방법을 이용하여, 결정형 실리콘 태양전지의 효율 변화를 측정하고, 각 온도 구간에서 태양전지 출력의 온도계수를 도출하였다.

## 2. 실험장치의 구성 및 방법

### 2.1 실험장치의 구성

Fig. 1은 본 실험에서 사용한 열전소자를 이용하는 태양전지 성능 측정 시스템의 개략도를 나타낸다. 직경 8cm의 Xe 램프를 광원으로 사용하는 솔라시뮬레이터를 사용하였고, 태양전지 셀의 I-V특성 측정을 위해 전류-전압 측정기(source meter)를 연결하였다. 셀 표면의 온도측정을 위해서는 K-type 열전대를 이용한 온도계를 사용하였다. 열전소자의 작동을 위해 직류전원공급기를 연결하였고, 발열부의 열을 효과적으로 제거하기 위해서 태양전지 셀 뒷면에 구리와 알루미늄의 혼합재질로 만들어진 방열판(heat sink)을 부착하였다.

실험용 실리콘 태양전지로는 다결정인 경우 KPE사의 M156-2BB-SM3 모델, 그리고 단결정인 경우 Motech사의 IS156B3 제품을 사용하였다.

### 2.2 실험방법

솔라시뮬레이터의 일사강도가 솔라셀 표면에서 100 mW/cm<sup>2</sup>(AM 1.5G)가 되도록 맞춘 후, 셀 후면에 부착된 열전소자에 인가되는 전력을 조절하여 셀 표면의 온도를 -5℃[다결정인 경우 5℃]에서부터 100℃까지, 5℃ 간격으로 변화시키며 셀의 단락전류(short circuit current), 개방전압(open circuit voltage), 곡선인자(fill factor), 최대출력(maximum power output)을 측정하였다. 실험 기간 동안 외기 온도는 평균 28℃이었다. 표면온도

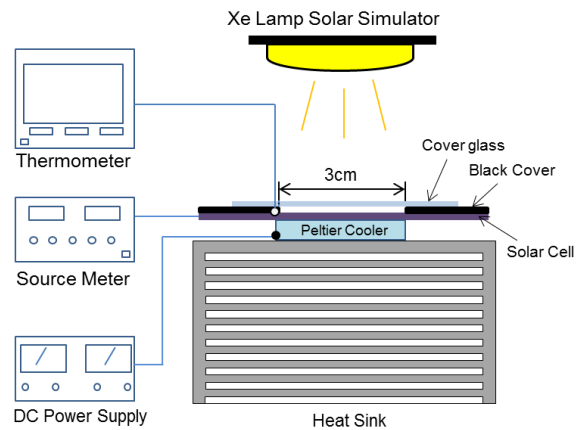


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup.

-5°C~30°C의 데이터 측정을 위해서는 태양전지 셀의 뒷면에 열전소자의 냉각면을 부착하였고, 30°C~100°C의 데이터 측정을 위해서는 열전소자의 발열면을 부착하였다. 동일한 실험장치와 외기온도에서 단결정 셀은 표면온도를 -5°C까지 하강시킬 수 있었으나 다결정 셀 표면의 도달 가능 최저 온도는 5°C에 그쳤다. 이는 다결정 실리콘과 단결정 실리콘의 열전도도 차이에 기인한 것으로 판단된다. 상온 근처에서, 다결정 실리콘의 열전도계수는 결정입계(grain boundary)에서의 포논산란(phonon scattering) 효과에 의해 단결정 실리콘보다 4~5배 낮는데,<sup>(9)</sup> 이 때문에 다결정 셀 표면의 열이 열전소자를 통하여 외부로 방출되는 것이 덜 효과적이기 때문이다.

태양전지 셀의 크기가 솔라시뮬레이터의 광원 직경보다 크기 때문에 태양전지 가운데 부분의 정사각형 면적 3×3 cm<sup>2</sup>을 제외한 부분은 검은색 덮개를 이용하여 표면 조사가 되지 않도록 하였다. 또한 셀 표면의 온도가 이슬점 아래로 내려갈 때, 표면에서의 수증기 응결에 의한 조사량 변화 효과를 최소화하기 위해 얇은 유리 덮개를 장착하였다. 셀의 온도측정을 위한 열전대는 조사면에 가장 가까운 부분(Fig. 1에 흰색 원으로 위치 표시)에 부착하여 작동온도와 측정온도의 차이를 최소화하였다.

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 열전소자의 냉각 효과

상온 이하의 셀 특성 실험에 필요한 열전소자의 냉각효과를 극대화하기 위해서는 열전소자 발열면의 열을 효과적으로 배출해야 한다. 그렇지 않으면 발열면에서 발생하는 많은 열이 냉각면의 온도를 상승시키는 역효과를 가져오기 때문이다. Fig. 2는 열전소자에 인가된 전력 별, 시간에 따른 열전소자 냉각면의 온도 변화를 나타낸다. 열전소자 냉각면에 방열판을 부착하지 않았을 경우는 처음 10초 동안에만 어느 정도 냉각효과를 보이다가 그 이후에는 다시 급격하게 온도가 상승했으며, 온도 상승의 정도는 열전소자에 인가된 전력이 높을수록 더 컸다. 반면, 방열판 부착 시에는 약 40초 이후 온도가 저온에서 안정화 되면서 냉각효과가 오랜 시간 동안 유지되었고, 인가된 전력이 높을수록 높은 냉각효과를 나타내었다.

#### 3.2 단결정/다결정 태양전지 셀의 온도에 따른 성능 특성

Fig. 3는 단결정 셀의 작동 온도 변화에 따른 셀 특성(개방회로전압(V<sub>oc</sub>), 곡선인자(FF), 단락전류밀도(J<sub>sc</sub>))

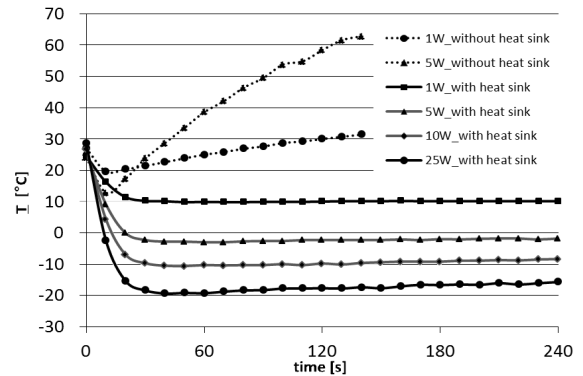


Fig. 2 Temperature of the cold side of the thermoelectric module with time at different power inputs.

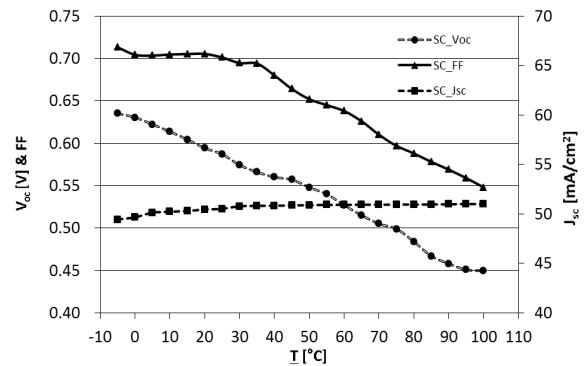


Fig. 3 Temperature dependence of open circuit voltage(V<sub>oc</sub>), fill factor(FF) and short circuit current(J<sub>sc</sub>) of the single crystalline(SC) solar cell.

값의 변화를 나타낸다. 작동온도가 증가할수록 개방회로전압 및 곡선인자 값은 하락하지만 단락전류밀도는 증가했다. Fig. 4는 다결정 셀 특성값의 온도에 따른 변화를 나타낸다. 단결정 셀과 마찬가지로 개방회로전압 및 곡선인자 값은 하락하는 반면 단락전류밀도는 증가함을 보였다.

측정 온도 구간 내에서 개방회로전압은 단결정 셀에서 전체적으로 높은 값을 나타내었다. 단결정 셀의 곡선인자 값은 상온 이하의 온도에서는 다결정 셀보다 높았으나 온도에 따른 변화 정도가 커서 고온에서는 다결정 셀보다 낮은 값을 나타내었다. 단락전류밀도는 약 70°C 이하에서는 단결정 셀에서 전반적으로 높게 측정되었으나 70°C 이상의 온도에서는 다결정 셀에서 약간 더 높게 측정되었다.

Fig. 5는 셀 표면 온도에 따른 단결정 실리콘 셀과 다결정 실리콘 셀의 단위면적당 최대 출력량을 나타낸다.

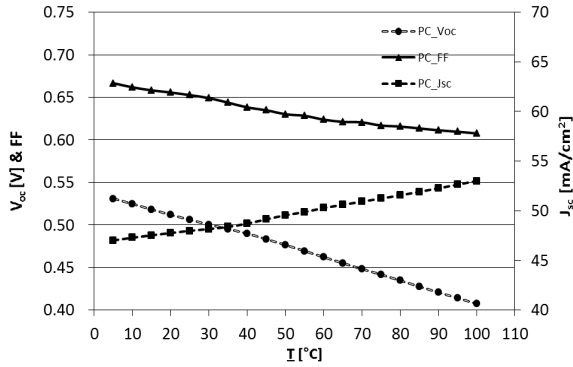


Fig. 4 Temperature dependence of open circuit voltage ( $V_{oc}$ ), fill factor(FF) and short circuit current( $I_{sc}$ ) of the polycrystalline(PC) solar cell.

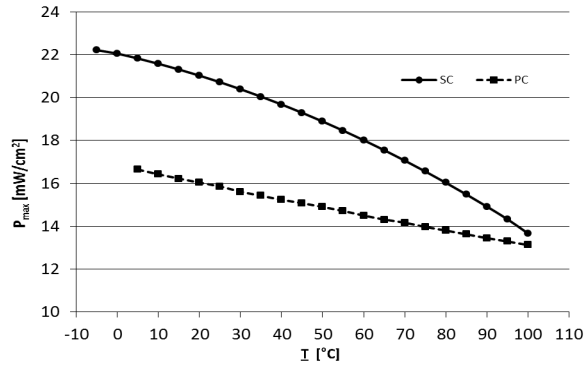


Fig. 5 Temperature dependence of the maximum power output of the single crystalline(SC) and polycrystalline(PC) solar cell.

단결정 셀의 경우, 표면온도가  $-5^{\circ}\text{C}$ 부터  $100^{\circ}\text{C}$ 로 증가할 때 최대출력량은  $22.2\text{ mW}/\text{cm}^2$ 에서  $13.6\text{ mW}/\text{cm}^2$ 로 38.7% 하강하였으며 온도 구간별 출력 하강의 정도는 온도가 증가할수록 더 커졌다. 다결정 실리콘 셀에서는 표면온도가  $5^{\circ}\text{C}$ 부터  $100^{\circ}\text{C}$ 로 증가할 때,  $16.6\text{ mW}/\text{cm}^2$ 에서  $13.1\text{ mW}/\text{cm}^2$ 로 21.1% 하강하였으며 전체 온도 영역에 걸쳐 거의 일정한 기울기로 감소함을 알 수 있었다.

### 3.3 실험 결과 분석

일반적으로 온도가 증가하면 실리콘 내 전자의 에너지가 증가하므로 실리콘의 밴드갭(band gap)이 작아지게 되어 식(1)<sup>(10)</sup>에서 알 수 있듯이 진성캐리어농도(intrinsic carrier concentration)가 증가하게 되고, 식(2)<sup>(10)</sup>에 의해 결과적으로는 암전류(dark current)가 증가하게

된다. 또한 암전류의 증가는 식(3)<sup>(10)</sup>에 의해 개방회로 전압이 감소하는 결과를 가져오게 된다.

$$n_i^2 = 4 \left( \frac{2\pi kT}{h^2} \right)^3 (m_e^* m_h^*)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_{G0}}{kT}\right) \quad (1)$$

$$= BT^3 \exp\left(-\frac{E_{G0}}{kT}\right)$$

$$I_o = \frac{qADn_i^2}{LN_D} \quad (2)$$

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_o}\right) \quad (3)$$

이론식에 의한 이러한 예측은 Fig. 3과 Fig. 4에서 보인 개방회로전압의 변화 추세와 일치한다. 반면, 온도 증가로 밴드갭이 작아지면, 전자-정공쌍(electron-hole pair)을 형성할 수 있는 광자들의 양이 많아지므로 단락전류는 증가하게 된다. 곡선인자의 온도 의존성은 경험식인 식(4)<sup>(11)</sup>와 같이 개방회로전압의 변화와 관계가 있으며 음의 값을 갖는 우변으로 인하여 곡선인자와 온도변화는 서로 반대의 관계에 있음을 알 수 있으며 이는 Fig. 3과 Fig. 4에서 보인 본 실험의 결과와 일치한다.

$$\frac{dFF}{dT} \approx FF \left( \frac{1}{V_{oc}} \frac{dV_{oc}}{dT} - \frac{1}{T} \right) \quad (4)$$

최대 출력량은 식(5)와 같이 곡선인자, 개방전압, 단락전류의 함수이며 온도 변화에 따른 최대 출력량이 Fig. 5와 같은 추세를 보이는 것은 온도증가에 따른 단락전류의 증가 효과는 개방회로전압과 곡선인자의 감소효과에 비해 적음을 의미한다.

$$P_{max} = FF \cdot V_{oc} \cdot J_{sc} \quad (5)$$

최대 출력의 온도계수  $\beta$ 는 식(6)에 의하여 산정 될 수 있으며 본 연구에서 측정된 태양전지 셀의 최대전력 값을 이용한 결과 값을 Fig. 6에 나타내었다. 여기에서는  $5^{\circ}\text{C}$  온도 구간에서 출력이 선형적으로 변화한다고 가정하고 계산하였으며, 각 온도구간의 중간값에서의 온도계수를 표시하였다.

$$\beta = \frac{P_{max,2} - P_{max,1}}{P_{max,1} \cdot (T_2 - T_1)} \quad (6)$$

단결정 셀이나 다결정 셀 모두 음의 최대 출력 온도계수를 가지며, 이는 온도가 감소함에 따라 출력이 향상됨을, 즉 온도가 증가함에 따라 출력이 감소함을 의미한다. 그러나 온도 구간 별 온도계수의 변화는 단결

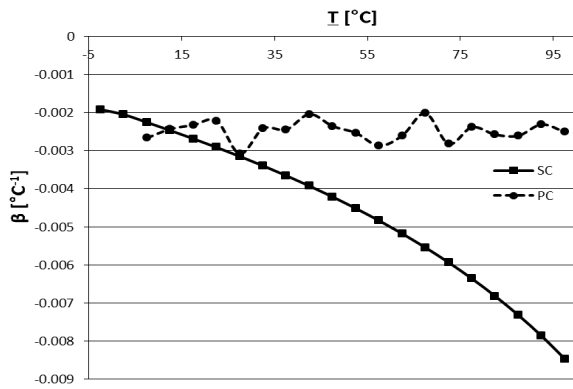


Fig. 6 Temperature coefficient of the maximum power output of the single crystalline(SC) and polycrystalline(PC) solar cells.

정 셀과 다결정 셀에서 상당히 다른 경향을 보인다. 단결정 셀의 경우 온도가 증가함에 따라 온도계수의 절대치가 점점 증가하지만, 다결정 셀의 경우 온도 계수 값은 다소 불규칙하면서 측정 온도 범위에서 온도 구간별 차이가 크지 않고 상온 근처의 온도에서는 단결정 셀의 온도계수에 근접하였다. 즉, 단결정 셀의 성능이 다결정 셀의 경우 보다 더 온도에 민감하고 작동 온도가 높아질수록 온도변화에 따른 성능저하가 더 크게 나타남을 알 수 있다. 이러한 단결정셀과 다결정셀의 온도에 대한 민감도의 차이는 솔라셀 제조업체에서 제시하는 정보<sup>(12)</sup>와도 일치한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 열전소자를 이용한 온도 제어 방법을 통하여 -5~100°C 온도 범위에서 온도 변화에 따른 결정형 실리콘 태양전지 셀의 성능 특성을 측정하여 아래와 같은 결론을 얻었다,

- (1) 열전소자를 이용하여 태양전지 셀의 작동온도를 넓은 범위에 걸쳐 간단하면서도 정교하게 제어할 수 있었다.
- (2) 단결정, 다결정 태양전지 셀은 작동 온도가 높아질수록 단락전류는 증가하지만, 개방회로 전압과 곡선인자 값의 하락 정도가 더 크므로, 결과적으로 셀의 최대 출력은 낮아지며, 따라서 음의 최대 출력 온도 계수를 갖는다. 단결정 셀의 경우, 표면온도가 -5°C 부터 100°C로 증가할 때 최대 출력량은 38.7% 하강하였으며, 다결정 실리콘 셀의 최대 출력량은 표면온도가 5°C부터 100°C로 증가할 때 21.1% 하강하였다.
- (3) 단결정 셀의 경우 최대 출력 온도계수의 절대값이 온도 상승에 따라 거의 선형적으로 증가하지만, 다결정 셀의 경우 온도 계수 값은 다소 불규칙하면서

측정 온도 범위에서 온도 구간별 차이가 크지 않고 상온 근처의 온도에서는 단결정 셀의 온도계수에 근접하였다.

#### References

1. Pyun, S. H., 2014, Technological progress towards commercialization of organometal halide perovskite solar cells, Journal of the Korean institute of electrical and electronic material engineers, Vol. 27, No. 12, pp. 776-791.
2. Lee, S. K., Jeong, E, Im, J. S., and Lee, Y.-S., 2011, Electrochemical Characterization of Hybrid Semiconductor-Based Dye-Sensitized Solar Cells, Korean Chem, Eng, Res., Vol. 49, No. 2, pp. 175-180.
3. Tonui, J. K. and Tripanagnostopoulos Y., 2008, Performance improvement of PV/T solar collectors with natural air flow operation, Solar Energy, Vol. 82, No. 1, pp. 1-12.
4. Han, J.-S., Kim, Y.-H., Ji, H.-K., and Yu, S.-P., 2012, Long-term experiments of the cooling/cleaning on the surface of the PV power array, Proceedings of KSES, Vol. 32, No. 1, pp. 248-254.
5. Yum, S.-B., Choi, H.-K., Choi, Y.-J., Hong, S.-G., and Kim, T.-H., 2009, Solar photovoltaic according to installation of cooling system, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 23, No. 5, pp. 66-71.
6. Bae, J.-G., Kim, K.-S., Kang, G.-H., Ahn, H.-G., and Han, D.-Y., 2011, The analysis of temperature and light intensity characteristics of PV modules with solar cell type, Proceeding of KIEE, Vol. 7, pp. 20-22.
7. Kang, M.-S., Kim, D.-S., Jeon, Y.-J., and Shin Y.-E., 2012, The study on thermal shock test characteristics of solar cell for long-term reliability test, Journal of Energy Engineering, Vol. 21, No. 1, pp. 26-32.
8. Rowe, D. M., 2010, CRC handbook of thermoelectrics, CRC press.
9. Terry, M. T., 2004, Thermal conductivity : theory, properties, and applications, Springer Science and Business Media, pp. 175-177.
10. Lee, J.-S., Kim, K.-S., Kim, D.-Y., Kim, J.-D., Yoon, K.-H., Lee, C.-H., Lee, H.-S., and Lim, D.-K., 2013. Introduction of solar cell engineering, Green Publishing group.
11. Honsberg, C. and Bowden, S., PV cdrom (pveducation.org).
12. <http://www.tindsolar.com.au/poly-vs-mono-crystalline>.