

자연광 스펙트럼 분포에 의한 단결정 PV 모듈의 전기적 특성

Electrical Characteristics of c-Si PV Module for the Spread of Natural Light Spectrum

홍종경^{1,a}, 강기환², 박지홍¹, 정태희¹, 류세환¹, 화이티루 로렌스¹, 안형근¹, 한득영¹
(Jong-kyu Hong^{1,a}, Gi-Hwan Kang², Chi-Hong Park¹, Tae-hee Jung¹, Sehwan Ryu¹, Waithiru L¹,
Hyungkeun Ahn¹, and Deuk-Young Han¹)

Abstract

Recently, characteristic research by the changes in the spectrum, one of the factors that influence analysis of maximum output power of PV module, has been studied. In this paper, a one-day intensity of solar irradiation, change of spectrums with time and electrical output for spectrums are analyzed. As a result, blue-rich wavelength compared with red-rich wavelength has large variation of solar irradiance with time, so we recognized that change of solar irradiance is dominated by variation of blue-rich wavelength. Also in same intensity of solar irradiance, electrical output in blue-rich wavelength was 3-8 % higher than one in red-rich wavelength.

Key Words : Spectrum, Irradiance, Wavelength, PV module

1. 서 론

최근 PV 모듈의 출력 특성을 영향을 미치는 요소들 중 하나인 스펙트럼 변화에 따른 특성 연구가 진행되어 오고 있다. 실제 자연광에서는 스펙트럼의 변화와 일사강도의 변화가 같이 동반된다. 현재 태양전지 전류식을 살펴보면 일사강도에 의한 Photo current를 유도한다. 단결정 실리콘 태양전지의 경우 실리콘이라는 재료의 특성에 의해 약 350에서 1100 nm사이의 영역에서 동작을 한다. 일사강도의 단위는 $[W/m^2/nm]$ 로 단위 면적당 파장에 의한 에너지로 표현이 되며, 파장영역안의 넓이를 에너지로 하여 이를 일사강도로 표현한다. 이론적으로 보면 일사강도가 동일하면 전기적 출력 또한 같아야 할 것이다. 이러한 부분을 고려해서 본 논문에서의 자연광 상태에서 스펙트럼의 변화에

따른 PV모듈의 전기적 출력 특성 및 동일한 일사강도가 주어졌을 조건에서의 단결정 실리콘 태양전지의 동작 영역에서 가시광선 영역과 긴 파장이 PV모듈의 출력특성에 미치는 영향을 이론적으로 접근하였고 실험을 통해 증명하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

실험에 앞서 스펙트럼의 분포에 따른 출력 변화를 알아보기 위해 170 W급 단결정 태양전지 모듈을 사용하였다. 측정 장비로는 스펙트럼을 분석할 수 있는 EKO사의 MS-720을 사용 하였으며, 이 장비는 0에서 1350 nm사이의 파장 영역을 분석할 수 있다. 일사강도의 측정을 위해 동일 회사의 제품인 Solar pyranometer MS-420을 이용하여 일사강도를 측정하고 이 데이터와 온도센서를 이용하여 PV 모듈의 전기적 출력을 측정 할 수 있는 EKO사의 MP-160을 사용하였다. 표 1은 단결정 태양전지 모듈의 파라미터를 보여주고 있으며, 그림 1은 모듈과 측정 장비의 설치 모습을 보여주고 있다.

1. 건국대학교 전기공학과
(서울시 광진구 화양동 1)
2. 한국에너지기술연구원 태양광연구단
a. Corresponding Author : jkddaeng82@empal.com
접수일자 : 2008. 12. 3
1차 심사 : 2009. 2. 13
심사완료 : 2009. 2. 20

표 1. 170 W 단결정 태양전지 모듈의 파라미터.
Table 1. 170 W single-crystalline PV module parameter.

Irrad.[W/m ²]	T[°C]	I _{sc} [A]	V _{oc} [V]	P _{max} [W]
1000	25	5.12	44.5	170

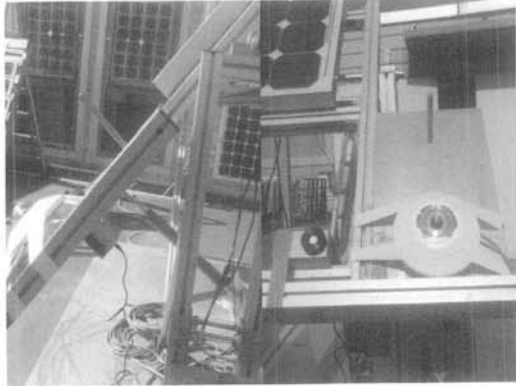


그림 1. 실험 장비 설치.
Fig. 1. Testing equipment installed.

2.2 실험

Tracking을 위해 모듈과 스펙트럼 분석기, 일사강도 계측기를 동일한 방향으로 설치하였고, 모듈 후면에 온도센서를 부착하여 I-V checker MP-160에 연결하여 실험준비를 마쳤다. 시간과 일사강도 변화에 의한 스펙트럼 분석 및 동일한 일사강도에서 단결정 실리콘의 동작 영역 내 짧은 파장과 긴 파장의 전기적 출력 특성을 알아보기 위해 맑은 날과 흐린 날을 선정한 후, 맑은 날의 경우 오전 6시부터 오후 7시까지 15분 단위로 측정을 하였으며, 긴 파장이 많은 일출과 일몰시간의 경우 1분단위로 측정을 실시하였다. 흐린 날의 경우는 짧은 파장이 많은 시간인 오전 9시부터 오후 4시까지 스펙트럼 및 전기적 출력 특성을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 이론적 접근

반도체를 빛으로 조사하면 광자는 광자의 에너지와 반도체의 Band gap 에너지 E_g 에 따라 흡수되거나 반도체를 통과할 수 있다. 만약에 광자의 에너지가 E_g 보다 작으면 광자는 쉽게 흡수되지 않

는다. 이 경우에는 빛은 물질을 통하여 투과하고 반도체는 투명하게 보인다.

광자의 에너지가 E_g 보다 큰 경우 공핍층에서 전자-정공쌍이 생성이 되며 초과분의 에너지는 전자와 정공에게 추가적인 운동 에너지로 주어졌다가 반도체내에서 열로 소모된다.

빛 흡수는 반도체의 두께에 의존한다. 초기에 입사된 빛의 세기(Intensity)는 I_0 이고 단위는 에너지/cm²-s 로 표시한다. $I(x)$ 는 표면으로부터 x에서의 빛의 세기이고, δI 는 그림 2에 나타낸 것처럼 x에서의 두께 δx 를 갖는 미소 부피 내에서 광자 흡수에 의해 생기는 빛 세기 변화라 가정한다. 그러면 광자의 수는 두께에 의존하며 식 (1)과 같다[1].

$$\delta I = -\alpha I(x) \delta x \tag{1}$$

여기서 α 는 흡수 계수(absorption coefficient)로 파장에 의존하는 상수이며, 단위는 거리의 역수 [cm^{-1}]이다.

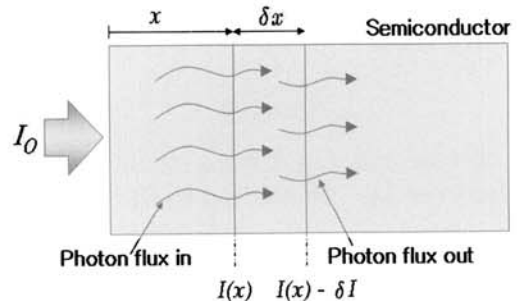


그림 2. 미소 부피 내의 광자 흡수.
Fig. 2. Photon absorption in differential-volume.

일정한 파장을 갖는 빛이 조사되는 경우에 대하여 식 (1)을 적분하면 투과하는 빛의 세기가 두께에 따라 지수 함수적으로 감소한다는 것을 알 수 있다[1].

$$I(x) = I_0 \exp(-\alpha x) \tag{2}$$

식 (2)로부터 빛의 세기는 물질에서 흡수하는 정도에 따라서 지수함수 적으로 급격하게 감소함을 알 수 있다. 결정질 실리콘의 흡수계수는 약 10^3 cm^{-1} 를 갖는다.

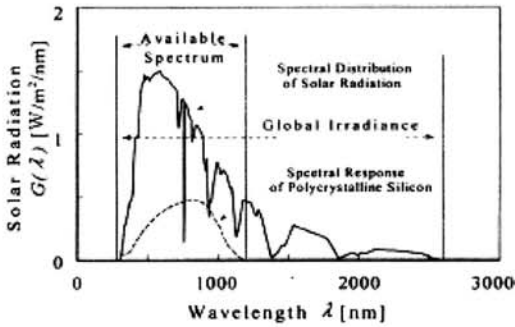


그림 3. 사용가능한 스펙트럼 영역.
Fig. 3. Available spectrum.

그림 3에서는 단결정 실리콘 태양전지가 운전될 수 있는 스펙트럼 영역을 보여주고 있다[2]. 단결정 실리콘(c-Si) 태양전지는 1.12 eV의 에너지 레벨을 가지고 있다. 흡수계수와 태양전지의 두께가 동일하기 때문에 발전되는 양 또한 동일할 것이며, 태양전지가 흡수할 수 있는 스펙트럼 영역은 식 (3)과 (4)로부터 유도할 수 있다[1,3].

$$\lambda_g = \frac{c}{\nu} = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{hv[eV]} [nm] \quad (3)$$

식 (3)에 의해 에너지 레벨이 1.12 eV인 단결정 실리콘(c-Si) 태양전지는 1100 nm의 파장영역을 가지게 된다. 1100 nm이상의 파장영역은 태양전지의 E_g 을 넘을 수 있는 에너지가 없기 때문에 흡수되지 못하고 통과하게 된다.

식 (4)에서는 사용가능한 스펙트럼 영역의 에너지를 나타내고 있으며, 이는 일사강도(irradiance)라 표현한다[4].

$$E_{irr} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} E_{\lambda}(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

일사강도에 의해 캐리어가 발생되고 이는 전류의 증가로 나타난다. 하지만 식 (4)의 경우 이상적인 양자효율에서만 적용이 가능하므로 실제 자연광에서 발생하는 광전류는 다음과 같다.

$$I_{SC} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} I_S(\lambda) F(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

$I_S(\lambda)$ 는 태양전지의 절대 분광감도, $F(\lambda)$ 는 입사광의 포톤 수의 스펙트럼을 나타낸다. 식 (6)의 정

우 단락전류를 캐리어의 생성률과 수집확률을 고려한 식으로 식 (2)로부터 유도된다[1,3,4].

$$I_{SC} = q \int_0^W G(x) C(x) dx \quad (6)$$

$$G(x) = \alpha N e^{-\alpha x} \quad (7)$$

$G(x)$ 는 캐리어의 생성률을 나타내며, N 은 광자속(photon flux)을 나타낸다. $C(x)$ 는 수집확률로 표현되며 x 는 빛이 침투하는 깊이를 나타낸다.

그림 4는 실리콘 태양전지의 양자효율을 보여준다. 실제 태양전지의 경우는 반사와 재결합으로 인해 양자효율이 떨어지는 것을 알 수 있다.

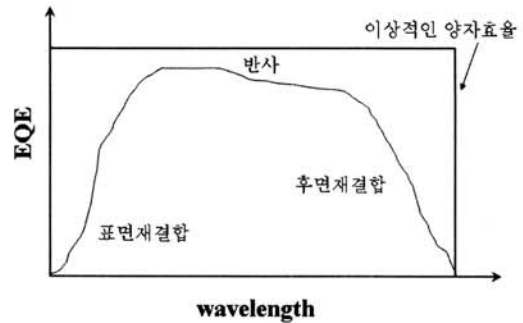


그림 4. 실리콘 태양전지의 양자효율.
Fig. 4. External quantum efficiency(EQE) of Si.

하지만 실제 양자를 측정 할 수 없기 때문에 태양전지로부터 분광반응도(SR : Spectral Response)를 통해 양자효율을 구한다[2,4].

$$SR = \frac{I_{SC}}{P_{in}(\lambda)} = \frac{q \times n_e}{\frac{hc}{\lambda} \times n_{ph}} = \frac{q\lambda}{hc} EQE \quad (8)$$

$$EQE = (1 - R) \times IQE \quad (9)$$

$$IQE = \frac{1}{(1 - R)} \times \frac{q \times n_e}{\frac{hc}{\lambda} \times n_{ph}} \quad (10)$$

R 은 표면 반사율, EQE 는 외부 양자효율, IQE 는 내부 양자효율을 나타낸다. 분광반응도는 특정 파장에서의 빛 세기를 그 파장에서의 광자속으로 바꿈으로써 양자효율을 결정할 수 있다.

3.2 실험결과

일사강도 및 시간이 경과함에 따라 변화하는 스펙트럼을 측정하였으며, 결과를 보여주고 있다.

실험결과 일사강도의 감소로 인해 스펙트럼의 강도역시 낮아지고, 시간이 경과함에 단파장 영역이 장파장 영역에 비해 눈에 띄게 감소하는 것을 확인 할 수 있었다.

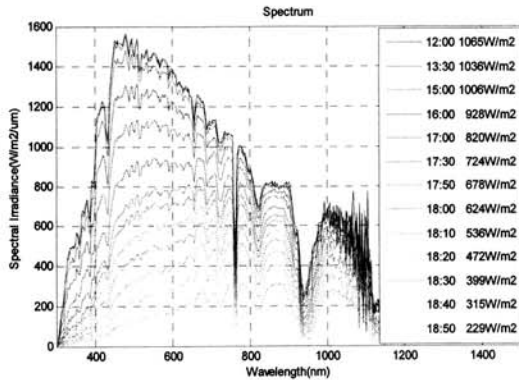
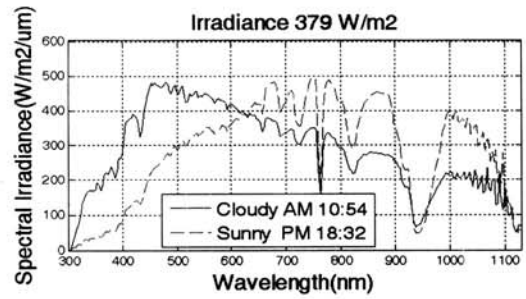


그림 5. 일일 실제 스펙트럼의 변화.

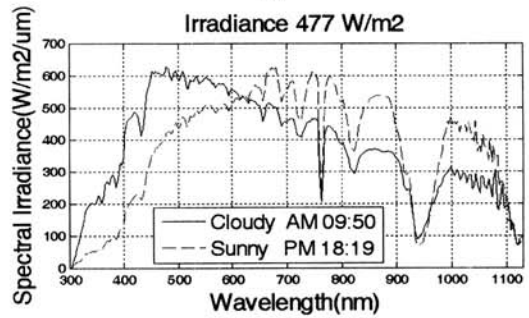
Fig. 5. Solar spectra measured on one day.

동일한 일사강도에서 각각 동작하는 태양전지 파장영역 내에 가시광선 범위가 높게 나타날 때와 긴 파장의 범위가 높을 경우의 스펙트럼 및 PV 모듈의 I-V 출력 특성 결과를 그림 6, 7과 표 2에 나타내었다.

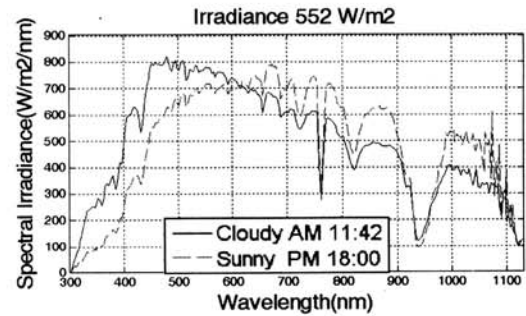
실험결과 가시광선 분포 범위가 클 경우 높은 출력을 얻었다. 식 (6)과 그림 4에서 캐리어 생성률과 수집확률 그리고 재결합에 의한 손실을 살펴 보았다. 실험결과 짧은 파장이 많이 분포한 경우 표면에서 재결합에 의한 손실이 긴 파장이 많이 분포한 경우 보다 적다는 것을 알 수 있다. 이유는 긴 파장의 경우 후면 재결합만이 아니라 낮은 확산거리로 인해 양자효율을 감소한다고 볼 수 있다. 하지만 위의 실험 결과는 온도에 의한 변수를 고려하지 않았으므로, 보다 정확한 전기적 출력 특성 비교를 위해 다음과 같이 보정하였다. 온도가 1 °C 증가하게 되면 식 (11)에 의해 전류가 미소하게 증가하나 식 (12)에 의해 전압이 크게 떨어져 전체적인 출력이 크게 감소한다. 결과적으로 Pmax를 살펴보면 식 (13)과 같고, 최종 보정 후 출력 비교를 표 3에서 보여주고 있다[3].



(a)



(b)



(c)

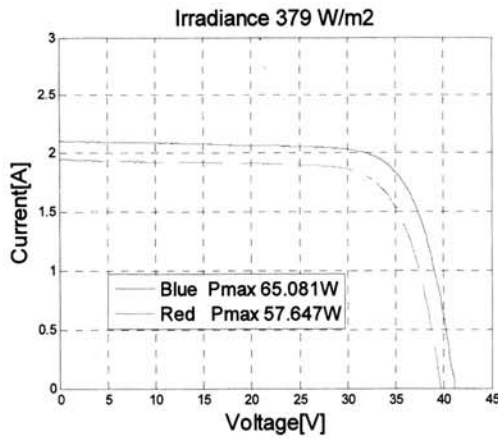
그림 6. 동일한 일사강도에서 실리콘 태양전지의 동작하는 파장영역 내 짧은 파장과 긴 파장의 분포. (a), (b), (c)

Fig. 6. Available c-Si solar spectrum for short and long wavelength at same irradiance. (a), (b), (c)

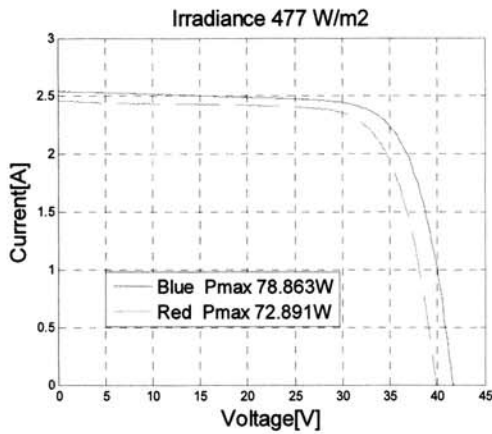
$$\frac{1}{I_{sc}} \frac{dI_{sc}}{dT} \approx +0.0006 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad (11)$$

$$\frac{1}{V_{oc}} \frac{dV_{oc}}{dT} \approx -0.003 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad (12)$$

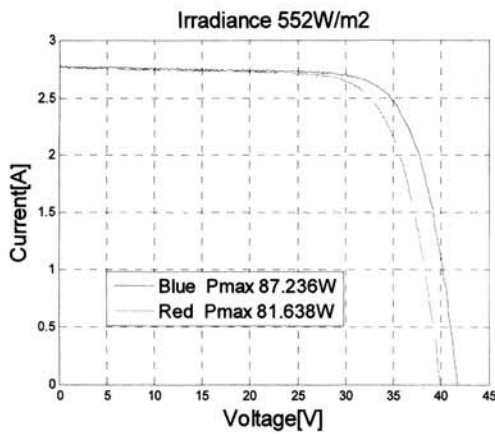
$$\frac{1}{P_{max}} \frac{dP_{max}}{dT} \approx -0.005 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad (13)$$



(a)



(b)



(c)

그림 7. 동일한 일사강도 일 때 PV 모듈의 I-V 출력 특성. (a), (b), (c)

Fig. 7. I-V output characteristics of PV module at same irradiance. (a), (b), (c)

표 2. 동일한 일사강도 일 때 PV 모듈의 I-V 출력 특성 파라미터. (a), (b), (c)

Table 2. I-V output characteristic parameter of PV module at same irradiance. (a), (b), (c)

Irrad. [W/m ²]	conditi ons	T [°C]	Isc [A]	Voc [V]	Pmax [W]
379(a)	Sunny	37.3	1.95	39.70	57.64
	Cloudy	28.7	2.10	41.07	65.08
477(b)	Sunny	38.9	2.46	39.90	72.89
	Cloudy	27.2	2.54	41.62	78.86
552(c)	Sunny	39.3	2.769	39.91	81.64
	Cloudy	27.6	2.771	41.71	87.26

표 3. 온도 보정 후 PV 모듈의 I-V 출력 특성.

Table 3. I-V output characteristic of PV module after temperature compensation. (a), (b), (c)

Irrad. [W/m ²]	conditi ons	T [°C]	Pmax [W]	DFP [W]	DFP [%]
379(a)	Sunny	28.7	60.44	4.64	7.13
	Cloudy	28.7	65.08		
477(b)	Sunny	27.2	75.69	3.71	4.70
	Cloudy	27.2	78.86		
552(c)	Sunny	27.6	84.90	2.64	3.02
	Cloudy	27.6	87.26		

실험결과 동일한 일사강도에서 태양전지가 동작하는 파장영역 중에서 가시광선 영역에서의 전기적 출력이 평균 3.66 W 높았다. 이는 가시광선 영역이 긴 파장에 비해 3~8 % 정도 더 높음을 알 수 있다. 결과적으로 표면 재결합과 반사에 의한 손실보다 후면 재결합과 낮은 에너지로 인한 짧은 확산거리의 손실이 더 크다는 것을 알 수 있었다[3].

또한 PV 모듈의 출력은 가시광선 영역의 파장 분포에 의한 의존도가 높다는 것을 알 수 있다.

단결정 태양전지의 흡수계수는 약 10^3 cm^{-1} 이다 [1,3,6]. 태양전지 셀들이 동일한 두께를 가졌다고 가정하면, 단결정 실리콘 태양전지의 두께가 200 μm 내외이므로, 동작하는 파장영역 안에서는 입사되는 광을 모두 흡수 할 수 있다고 가정하였다. 일사강도는 각각의 파장의 에너지를 합친 것으로 표현이 된다. 하지만 동일한 일사강도에서도 파장의 분

포가 다르면 재결합 발생의 차이가 생긴다는 것을 이론을 통해 접근하였고, 실험을 통해서 실제 출력이 얼마나 차이가 나는지 알 수 있었다.

4. 결 론

본 논문은 일일 태양광의 일사강도와 시간에 따라 변화하는 스펙트럼과 그에 따른 출력을 비교분석하기 위한 실험으로 실제 가시광선 영역이 긴 파장에 비해 시간에 따른 변화가 큰 것을 알 수 있었으며, 따라서 일사량의 변화는 파장이 짧은 영역의 변화에 의해서 좌우됨을 인식 할 수 있었다. 또한 동일한 일사강도에서 단결정 실리콘 태양전지 모듈의 출력은 파장 분포에 의해서도 영향을 받으며, 특히 후면 재결합률에 의한 손실이 크다는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 신재생에너지기술개발사업의 일환 (2007-N-PV12-P-01-3-010-2008)으로 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] Donald A. Neamen, "Smiconductor Physics and Devices", McGraw-Hill, 2004.

[2] Y. Hirata, T. Inasaka, and T. Tani, "Output variation of photovoltaic modules with environmental factors-ii: Seasonal variation", *Solar Energy*, Vol. 63, No. 3, p. 185, 1998.

[3] S. R. Wenham, M. A. Green, and M. E. Watt, "Applied Photovoltaics", Earthscan, p. 3, 2007.

[4] A. Virtuani, E. Lotter, and M. Powalla, "Influence of the light source on the low-irradiance performance of Cu(In,Ga)Se₂ solar cells", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 90, p. 2141, 2006.

[5] Zhou C.-L., Wang W.-J., Li H.-L., Zhao L., Diao H.-W., and Li X.-D., "Influence of ring oxidation-induced stack faults on efficiency in silicon solar cells", *Beijing Solar Energy Research Institute*, Vol. 25, No. 8, p. 3005, 2008.

[6] T. Minemoto, S. Nagae, and H. Takakura, "Impact of spectral irradiance distribution and temperature on the outdoor performance of amorphous Si photovoltaic modules", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 91, p. 919, 2007.

[7] 홍종경, 박지홍, 강기환, 화이티루, 류세환, 안형근, 한득영, "PV모듈에서 자연광 스펙트럼의 특성에 따른 전기적 특성 분석", 한국전기전자재료학회, 2008하계학술대회논문집, p. 16, 2008.