

온도에 따른 PV모듈의 출력에 영향을 미치는 요소 분석

Analysis of Factor on the Temperature Effect on the Output of PV Module

임종록* · 우성철** · 정태희*** · 민용기* · 원창섭§ · 안형근†

(Jong-log Lim · Sung-Cheol Woo · Tae-Hee Jung · Yong-Ki Min · Chang-Sub Won · Hyung-Keun Ahn)

Abstract - Generally, photovoltaic modules consist of glass, EVA, Solar Cell, back sheet and ribbon. But EVA, solar cell, ribbon affect electric output with temperature. EVA is a change in the transmittance of light from the sun. In addition, the solar cell output is decreased with temperature and the ribbon increases resistance. Transmittance and reflectance of glass and EVA were measured. In this paper, the characteristics of the components of PV module as EVA and Glass, ribbon were studied by variable temperature. effects on material properties investigated. As a result, glass is independent in temperature variation. EVA was the reduction 1~4% in transmittance. Solar cell decrease 0.469[%/°c] in electric output by temperature variation. Other factors was controlled in solar cell.

Key Words : Solar cell, PV module, Temperature coefficient, EVA

기호 설명

I_{sc}	: 태양전지 단락 전류
V_{oc}	: 태양전지 개방 전압
I_0	: 역포화전류
$F(\lambda)$: 광속(photon flux)[EA/m^2s]
A	: 태양전지 면적
λ	: 입사광의 파장
$F(\lambda)$: 태양스펙트럼 내에서 파장이 $\lambda \sim \lambda + d\lambda$ 인 범위의 광자 수
k	: 볼츠만 상수
T	: 온도
q	: 단위 전하량

1. 서론

태양광 발전은 태양으로부터 오는 빛 에너지를 전기에너지로 변환시켜 주는 태양전지(Solar Cell)를 활용하는 것으로 수십 개의 태양전지를 직, 병렬 구조로 연결하고 모듈화하여 발전하는 친환경 시스템을 말한다. 태양광 발전시스템은 실외에 태양광 어레이를 설치하여 발전하기 때문에 외부 환경요소에 노출되기 쉽고, 특히 온도에 의한 출력변화가 심

하게 나타난다.

PV 모듈(module)은 온도에 따라 Voc, Isc, 직렬 저항 등이 달라지며, 온도가 증가함에 따라 전체적으로 출력이 감소된다[1-3]. 이에 따라 발전 시 모듈의 온도를 낮추기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있다[4,5].

PV모듈의 온도에 따른 출력 변화 연구는 태양전지 또는 모듈에서 Voc, Isc, Rs등에 대해서만 연구가 진행되었다[1,2]. 이것은 온도에 대한 출력의 연구로 태양전지를 제외한 태양광 모듈의 소재별 온도변화에 대한 특성 연구는 이루어지지 않았다. 본 논문에서는 온도에 따른 손실을 중점적으로 분석하였다. 유리, EVA, 태양전지, Back sheet, Ribbon으로 구성된 PV 모듈 중 온도 변화에 민감한 요소는 EVA, 태양전지, 리본으로 간추릴 수 있는데, 기존 연구와 달리 본 논문에서는 온도변화에 대한 출력 보다는 전면부의 유리와 EVA의 온도 변화에 대한 광특성을 확인하였으며, 리본의 온도에 따른 전기적 저항 변화 등, 각 요소들의 온도에 따라 나타나는 특성이 출력에 어떻게 영향을 미치는 가를 분석하였다.

2. 본론

2.1 온도에 따른 Glass/EVA 반사율 투과율 비교 실험

2.1.1 실험장치 및 방법

온도에 따른 Glass/EVA의 반사·투과율 특성을 파악하기 위하여, 먼저 유리의 온도에 대한 특성을 알아보았다. 우선, 태양광 모듈에 많이 사용되는 저철분 유리와 일반 청유리의 온도특성을 비교 분석하기 위해 두 시료를 준비하였다. 저 철분 유리는 균일한 철분함량을 위하여 동일 생산 공정에서 나온 1장의 대형 유리를 사용하였다. 시료의 크기는 50*50[mm], 두께 3.2[mm] 로 재단하였고, 같은 방법으로 청 유리 시료를 제작하였다. 제작된 시료에 대한 반사율과 투

* Dept. of Electrical Engineering, Konkuk University, Korea.

** Solar Business Team, LG CNS, Korea.

*** Solar Energy department, Korea Institute of Energy Research, Korea.

§ Smart Grid Lab, Power Conversion Team, LS Korea.

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Konkuk University, Korea.

E-mail : hkahn@konkuk.ac.kr

Received : October 31, 2012; Accepted : February 26, 2013

과율을 Photospectro meter로 측정하였다.

그 다음으로 모듈의 구조상 유리와 EVA가 경계면을 이루고 있기 때문에 유리와 EVA를 적층하여 온도에 따른 투과율을 측정하였다. 일반적으로 사용되는 3개사의 EVA를 사용 모듈화 하였으며 라미네이션 공정에 대한 조건은 표 1과 같다.

제작된 시료를 통해 유리와 EVA의 온도에 대한 반사율 및 투과율을 측정하였다.

표 1 라미네이션 공정 조건

Fig. 1 Condition of Lamination process

공정	세부조건	Plate 온도
Pumping Time	6min	120℃
Fast Press	100mmHg	120℃
Curing Time	5min	145℃

2.1.2 실험결과

먼저 유리 종류에 따라 본 실험이다. 그림 1을 보면, 반사율에서 청유리보다 저철분 유리의 반사율이 높게 나오는 것을 확인할 수 있다. 그에 비해 자외선 영역인 300nm이하에서는 저철분 유리의 반사율이 작게 나오는 것을 알 수 있다. 이 그림을 통하여 온도에 따른 반사율 변화는 영향이 없다는 것을 확인할 수 있었다.

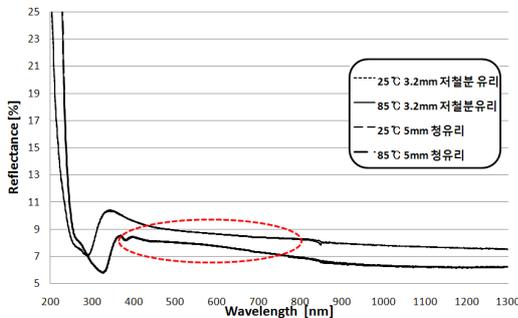


그림 1 온도에 따른 Glass의 반사율
Fig. 1 Reflectance of Glass by Temperature

두 번째로, 유리와 EVA의 온도에 대한 실험이다.

시료는 저철분 유리를 사용하여 3개사 EVA를 Lamination하고 Curing Time을 변화를 주면서 가교율 측정 및 투과율 실험 하였다. Curing time을 각각 2,4,6[min]으로 변화시켰고, 그에 따른 가교율은 82~91[%]이 나왔고 이를 표 2에 나타내었다. 온도에 따른 투과율 실험 결과, 실험을 실시한 시료(Glass/EVA) 3개에서 온도가 상승함에 따라 투과율이 저하되는 동일한 경향을 보였다. 그림 3을 보면 초기치 25[℃] 대비 85[℃]에서 전체적으로 투과율이 0.8~3%까지 감소하는 경향을 확인된다.

표 2 Curing time별 가교율

Fig. 2 Cross-linking rate in curing time

시료	여과지 무게 [g]	EVA 무게 [g]	여과지+EVA 무게 [g]	Cross-linking Rate [%]	Curing Time [min]	
A사	S-T1	1.6248	2.0064	3.0187	83.132	2
	S-T2	1.656	2.0139	3.1564	86.027	4
	S-T3	1.6431	2.0139	3.2766	89.598	6
B사	K-T1	1.6618	2.0041	3.0609	83.497	2
	K-T2	1.661	2.0061	3.2105	87.549	4
	K-T3	1.6394	2.0116	3.3509	91.78	6
C사	J-T1	1.6517	2.0059	3.0016	82.065	2
	J-T2	1.6548	2.0157	3.1939	87.015	4
	J-T3	1.6601	2.0137	3.2988	89.793	6

위의 그림 1에서 온도에 따른 유리의 특성이 반사율에서는 영향을 거의 주지 않는다. 또한 그림 2에서 보면 유리의 파장과 온도에 따른 투과율 변화는 전 영역에서 0.1[%] 이내로 동일한 형태를 보여, 유리의 온도 상승에 따른 투과율 저하가 무관함을 보였다.

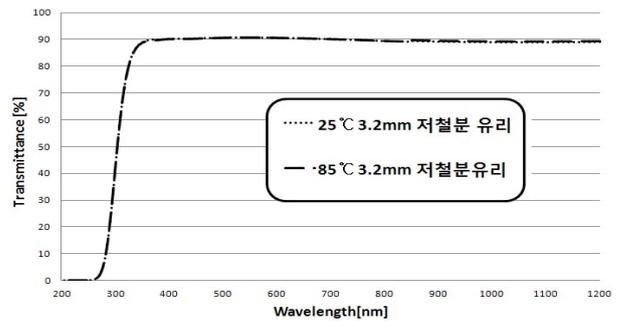


그림 2 온도에 따른 Glass의 투과율
Fig. 2 Transmittance of Glass by Temperature

투과율은 실제 유리 및 EVA에 영향을 받으나 유리는 온도 변수에 독립적이며, 온도 변수에 의한 영향은 EVA라는 것을 알 수 있다.

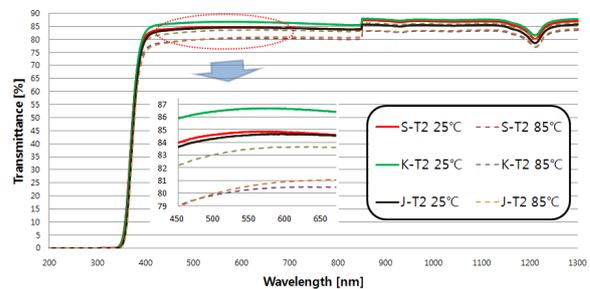


그림 3 온도에 따른 시료의 투과율 비교
Fig. 3 Comparison Transmittance of Sample(Glass/EVA) by Temperature

그림 3을 보면, Glass/ EVA 시료는 25[℃] 대비 85[℃]에서 투과율이 최대 4.2[%] 이내로 감소한다. 또한 기존에

EVA의 광 특성으로 보고된 파장 1200[nm]부근에서 저하되는 특징과 380[nm]에서 cut-off되는 특징을 확인 할 수 있다.

총 3가지 종류의 Fast-cure 방식의 EVA를 실험한 결과, 시료 별 온도에 대한 투과율 변화가 발생함을 보였다. 이는 온도에 따른 투과율의 차에 의한 시료의 구분을 할 수 있음을 나타낸다. 또한 PV 모듈 발전에 있어서 영향이 큰 400[nm]~800[nm] 파장에서 투과율 저하가 크다는 것을 확인할 수 있다.

위의 투과율을 이용하여 I_L 에 대한 정의를 하면 아래와 같은 식으로 나타낸다[10].

$$I_L = qA \int_0^{\lambda_m} F(\lambda)[1 - R(\lambda)]SR(\lambda)d\lambda \quad (1)$$

기존의 광생성 전류식은 태양전지에 적용되었던 것으로 입사되는 빛을 1로 가정하고 파장의 함수 $R(\lambda)$ 를 빼는 것으로 적용 되었었다. 본 논문에서는 모듈의 관점에서 태양광이 유리와 EVA를 투과한다는 점을 착안하여 두 시료를 적용한 후 측정된 투과율을 식1에 적용하였으며 이를 식 2와 같이 나타내었다.

$$I_L = qA \int_{280}^{1200} F(\lambda)T(\lambda)SR(\lambda)d\lambda \quad (2)$$

실제 태양전지 모듈에서 280[nm]파장 이하는 사실상 투과하지 못하고 1200[nm]이상에서 파장이 갖는 에너지가 작으므로 광의 범위는 280~1200[nm] 범위에서 적분하였다. 또한 $T(\lambda)$ 는 각 파장별 투과율을 제시해 구할 수 있다. λ_m 은 태양전지가 흡수 할 수 있는 최대 파장을 나타내고 적분 범위로 한정되었다. $F(\lambda)$ 는 파장별 입사되는 포톤의 개수에 해당하는 에너지, $SR(\lambda)$ 는 파장별 스펙트럼 응답률이다.

2.2 온도에 따른 Ribbon의 저항 실험

2.2.1 실험조건

Ribbon은 현재 상용화 되어 있는 제품으로 K사 제품을 사용하였다. 오차를 줄이기 위해 시료의 길이는 10M로 하여 측정하였으며, 온도는 항온항습기 내에서 목표 온도의 ± 0.2 [°C]의 범위 내에서 측정하였다.

실험은 각 온도 25, 40, 55, 70, 85[°C]로 측정하였으며, 저항 측정 장비는 10[$\mu\Omega$]까지 측정 가능한 고정밀 LCR Meter를 사용하였다.

리본은 기본적으로 순도 99[%]이상의 구리로 되어있는 전선이다. 모듈 공정 중 Tabbing 공정에서 태양전지에 ribbon을 부착 하게 되는데 그때의 soldering 온도를 낮추고 접착을 좋게 하기 위해 Solder가 코팅된다. 이 Solder의 두께는 보통 20[μm] ± 4 이며, 실험에 사용된 리본은 순수 구리와 Solder 두 종류를 비교하였다. 시장에서 가장 상용화 된 두 제품인 60Sn40Pb와 62Sn36Pb2Ag를 실험에 사용하였고, 그 특성은 표 3에 나타내었다

표 3 리본의 규격

Table 3 Specifications of Ribbon

Sample	Cross Section[mm ²]	Solder	Solder thickness	Length
C1	0.225	-	-	10m
S1		62Sn36Pb2Ag	20 $\mu m \pm 4$	
C2	0.3	-	-	
S2-1		62Sn36Pb2Ag	20 $\mu m \pm 4$	
S2-2		60Sn40Pb	20 $\mu m \pm 4$	
C3	0.375	-	-	
S3		62Sn36Pb2Ag	20 $\mu m \pm 4$	
C4	0.4	-	-	
S4		60Sn40Pb	20 $\mu m \pm 4$	

2.2.2 이론적 접근

저항 R은 물질의 비저항 ρ 과 길이 l 에 비례하고 면적 A에 반비례한다. 리본의 구조는 중심의 구리를 Solder가 접촉하면서 감싸고 있는 형태이다. 이것을 병렬구조 이므로 다음 식 5와 같다[11].

$$R_{Ribbon} = \frac{R_{copper} + 2R_{solder}}{2R_{solder}R_{copper}} \quad (5)$$

다음은 각 저항성분에 온도계수(α)를 추가하고, 길이에는 열팽창계수(β)를 적용한다.

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(T_1 - T_0)] \quad (6)$$

$$l = l_0 [1 + \beta(T_1 - T_0)] \quad (7)$$

식 6에서는 300K에서 비저항 값에 초기 온도 T_0 와 실제 온도 T_1 의 차에 온도 계수(α)를 곱하여 계산한다. 길이(l)는 열에 의한 팽창이 단면적으로는 극히 적어 무시하고, 시료의 열팽창 계수(β)를 적용하였다[11].

$$R = \rho \frac{l}{A} = \rho_0 [1 + \alpha(T_1 - T_0)] \times \frac{l_0 [1 + \beta(T_1 - T_0)]}{(A_{copper} + A_{solder})} \quad (8)$$

식 8은 저항의 온도에 따른 변화요소를 포함한 것이다. 식 8을 식 5에 적용하면 Ribbon의 저항을 온도변화에 따라 산출할 수 있다. Solder의 두께는 20[μm]로 적용하였다.

2.2.3 실험결과

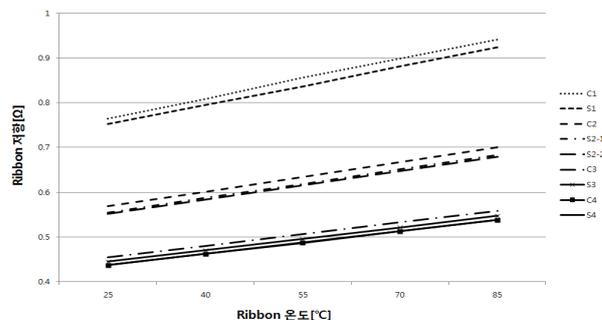


그림 4 온도에 따른 리본 저항 그래프
Fig. 4 Graph of ribbon resistance by temperature

그림 4를 보면 저항은 온도에 선형적으로 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 각 리본의 Solder가 더해지면 면적의 증가로 1[%]내외의 저항 감소가 나타났다.

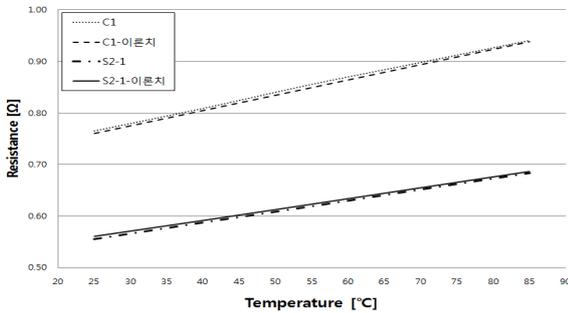


그림 5 실제 저항 값과 이론값 비교
Fig. 5 comparison of resistance

표 3에서 제시했던 시료 중 두 가지만 실제 저항 값과 이론값 비교를 그림 5에 제시하였다. 실제 저항 값과 계산된 값은 오차 0.5[%] 이내의 결과를 보였다.

2.3 온도에 따른 태양전지의 출력 비교 실험

2.3.1 실험조건

리본을 붙이지 않은 상태의 태양전지로 지그의 온도를 25[°C], 45[°C], 65[°C], 85[°C]로 변화하면서 I_{sc} 증가와 V_{oc} 의 큰 폭의 감소를 확인한다. 열은 태양전지 밑면을 통해 전도 되도록 구성하였으며, 충분한 열이 전도되게 시간을 두었다. 온도는 디지털 온도계인 Data Log 장비로 측정하였으며, 각 온도 기준 $\pm 1[^\circ\text{C}]$ 이내에서 솔라 시뮬레이터를 이용, 측정하였다. 실험 조건은 STC(Standard test condition) 조건에 맞추었다.

실험에 사용한 솔라 시뮬레이터는 제논 램프를 광원으로 사용하였고, 광원의 균일성을 나타내는 등급은 AA이다.

2.3.2 이론적 접근

태양전지 직렬저항의 요소들은 대부분 전극 물질에 영향을 많이 받으며, 태양전지에서 생성된 캐리어가 Finger, Ag Paste, Ribbon을 거쳐 이동한다. 위에서 실험했듯이 태양전지에서 생성된 전류가 저항의 영향을 직접적으로 받아 R_s 값이 변화되는 것을 보았다. 이상적인 p-n 접합의 전류식으로부터 태양전지 식을 식 9와 같이 표현할 수 있다.

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{nkT}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (9)$$

이상적인 경우 병렬저항 $R_{sh} = \infty$, $R_s = 0$ 이고, 입사광의 세기가 클 경우는 R_{sh} 의 영향은 나타나지 않는다.

온도에 따른 출력 변화를 보기 위해서는 I_0 값에 주목해야 한다. I_0 는 역 포화전류로 온도 함수를 내포하고 있다. 이상적 다이오드에서 I_0 는 다음과 같이 정의된다.

$$I_0 = eA \left(\frac{D_p}{N_d L_p} + \frac{D_n}{N_a L_n} \right) n_i^2 \quad (10)$$

여기서 n_i 는 진성캐리어 농도이며 다음의 제곱식 형태로 표현된다.

$$n_i^2 = A_0 T^3 e^{-e V_{go}/kT} \quad (11)$$

I_0 의 온도변화는 n_i^2 의 온도변화에 의하여 결정되므로, I_0 의 변화율을 다음과 같이 표현한다.

$$\frac{dI_0}{dT} = \frac{d(\ln I_0)}{dT} = \frac{3}{T} + \frac{e V_{go}}{kT^2} \quad (12)$$

위의 식을 바탕으로 온도 T 에 관한 식 I_{0T} 식으로 표현한다.

$$I_{0T} = I_0 \exp \left[\frac{qEg}{k} \times \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right] \times \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^3 \quad (13)$$

기존의 태양전지 기본식 식 9에 대입하여 다음식 으로 표현 할 수 있다.

$$I = I_L - I_{0T} \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{nkT_2}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (14)$$

2.4.2 실험결과

결정질 실리콘 태양전지의 온도에 따른 특성 및 직렬저항 변화, I_0 변화에 대한 실험을 실시하였다.

그림 6은 온도에 따른 V_{oc} 를 측정한 결과로, 온도가 증가함에 따라 V_{oc} 의 값은 큰 폭으로 감소하는 반면 I_{sc} 의 값은 작게 증가함을 보인다.

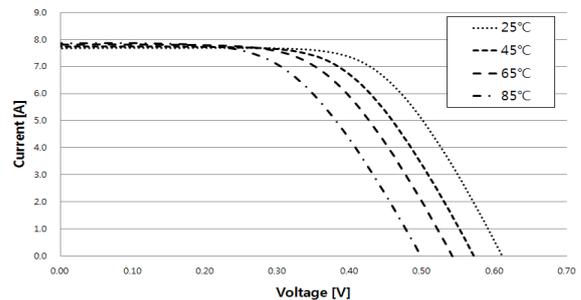


그림 6 K사 다결정 태양전지의 온도별 I-V 곡선
Fig. 6 I-V Curve of K's poly crystalline Solar cell

위 실험 결과를 바탕으로 식 14에 대한 모델링 결과를 Matlab을 이용하여 그림 7로서 확인 하였다.

실험에 사용된 리본은 두 종류로 면적이 0.15*2.0[mm]인 리본과 0.3*4.0[mm]인 bus-bar 리본이 사용되었다. 저항은 최소 0.012[Ω]이며, 태양전지 측정시 사용되었던 지그의 저

항이 무시 할 수 없을만큼 커서 모델링에서 R_s 값으로 넣었다. 실험결과와 식 14의 결과를 확인한 그림 7을 보면 Matlab을 통한 태양전지의 온도 변화에 따른 전기적 출력 변화를 최대 오차 0.9% 이내의 예측 가능함을 확인할 수 있었다.

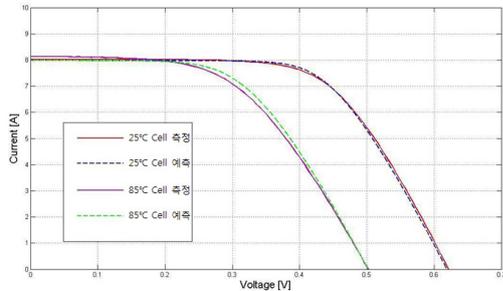


그림 7 온도에 따른 태양전지 출력 예측
Fig. 7 Output of solar cell by temperature

3. 결 론

PV모듈의 구성 중 온도 변화에 민감한 요소는 EVA, 태양전지, 리본으로 축약 할 수 있으며, 온도 변화에 따른 특성을 알기 위한 실험을 진행하였고, 이론적으로 해석하였다.

유리와 EVA의 온도 변화에 따른 반사율 및 투과율을 Photospectro meter로 측정하였고, 시료는 실제 모듈과 동일한 구조로 온도를 가변하며 측정하였다.

측정결과 유리는 온도에 독립적이며, EVA는 물질의 고유 특성으로 1~4[%]까지 투과율이 변화하였다.

리본은 온도에 비례하여 저항이 증가하였고, 표면에 20 [μ m] 두께로 코팅된 Solder는 비저항이 구리에 비해 100배 크므로 리본저항에 주는 영향은 미미하였다. 온도에 따른 리본의 저항은 유도된 식을 통해 계산하였고, 측정된 저항값과 0.5[%]이내의 오차를 갖는다. 또한 태양전지의 식을 기반으로 각 소재의 온도 변수에 대한 식을 유도하였다.

본 논문은 온도의 영향이 태양전지뿐만 아니라 그 외의 요소(Glass, EVA, Ribbon)들의 온도 영향에 대하여 이론적 해석 및 실험 분석을 하고 모듈의 온도 변수 전류 식을 유도함으로써 앞으로의 온도에 따른 PV 모듈의 연구에 기반이 될 것이라 기대된다. 또한, 지속적으로 온도에 대하여 미치는 영향을 각 요소뿐만 아닌 태양전지 모듈 전체에 대한 이론적 접근 및 연구를 진행할 계획이다.

참 고 문 헌

[1] J. Park, "Temperature Study of the Efficiency in single-crystalline Photovoltaic Module" Kieeme. Vol.6 pp.111-112, 2005 July 07
[2] B.Marion "A Method for Modeling the

Current-Voltage Curve of a PV Module for Outdoor Conditions." Wiley Volume 10, page 205-214 May 2002

[3] J. Kim "Effects of Ambient Temperature on the Thermal Characteristics of Photovoltaic Modules." Proceedings of the KSES autumn annual conference pp. 48-52, 2008 Nov 14
[4] B. J. HUANG, T. H. LIN, W. C. HUNG and F. S. SUN "PERFORMANCE EVALUATION OF SOLAR PHOTOVOLTAIC/THERMAL SY STEMS" Solar Energy No. 5, pp. 443-448. 2001
[5] H. Shin, "The efficiency of solarcell related to temperature" Proceedings of the Kiiee autumn annual conference, pp. 356-359 2009 May 07
[6] A. D. JONES and C. P. UNDERWOOD "A THERMAL MODUEL FOR PHOTOVOLTAIC SYSTEMS", Solar Energy Vol. 70, No. 4, pp. 349-359, 2001
[7] M. Mattei, G. Notton, C. Cristofari, M. Muselli, P. Poggi "Calculation of Polycrystalline PV module temperature using a simple method of energy balance" , Renewable Energy 31 (2006) 553-567
[8] K. Nishioka, T. hatayama, Y. Uraoka, T. Fuyuki, R. Hagihara, M. Watanabe "Field-test analysis of PV system output characteristics focusing on module temperature" Solar Energy Materials & Solar Cells 75 (2003) 665-671
[9] Y.-J. Wang P.-C. Hsu "Analytical modelling of partial shading and different orientation of photovoltaic modules" Renewable power Generation Vol 4, pp. 272-282. 2010
[10] J. Lee, "Solar Cell Engineering", Green, pp. 38-38. 2007
[11] S. Woo, "A Study on The Electrical Characteristics in Ribbon by Temperature Changes", Kieeme, 2010 roceedings of the Kiiee summer annual conference Vol.11 pp.67-67 2010 June 16

저 자 소 개



임 종 록 (林 宗 緣)

건국대학교 전기공학과, 전기전자재료 및 센서 석사과정(4차)

E-mail : bangsil82@hanmail.net



우 성 철 (禹 成 哲)

2012년 건국대학교 전기공학과 공학석사,
현 LG CNS, 태양광 사업팀 Solar 에너
지비즈니스 연구원

E-mail : scwoo@lgcns.com



정 태 희 (鄭 泰 熙)

2005년 건국대학교 전기공학과 공학석사,
2012년 건국대학교 전기공학과 공학박사,
현 한국에너지기술연구원, 태양에너지 연
구단 연구원

E-mail : thjung@kier.re.k



민 용 기 (閔 勇 基)

2011년 한양대학교 전자공학과 공학석사,
현 건국대학교 전지공학과 전기전자재료
및 센서 박사과정(4차)

E-mail : yk_solar@naver.com



원 창 섭 (元 昌 燮)

1998년 건국대학교 전기공학과 공학석사,
2004년 건국대학교 전기공학과 공학박사,
현 LS산전, 스마트그리드연구단 전력변
환연구팀 책임연구원

E-mail : cswon1@konkuk.ac.kr



안 형 근 (安 亨 根)

1985년 연세대학교 전기공학과 공학석사,
1993년 Dept. of EE., University of
Pittsburgh 공학박사, 현 건국대학교 전
기공학과 교수

E-mail : hkahn@konkuk.ac.kr