전면 유리wa EVA의 광 반사에 의한 PV모듈의 광전류 손실 예측 시뮬레이션

A Simulation of Photocurrent Loss by Reflectance of the Front Glass and EVA in the Photovoltaic Module

이 상 훈* · 송 희 은** · 강 기 환† · 안 형 근*** · 한 득 영§

(Sang-hun Lee · Hee-eun Song · Gi-hwan Kang · Hyung-keun Ahn · Deuk-young Han)

Abstract - The solar cell is a device to convert light energy into electric, which supplies power to the external load when exposed to the incident light. The photocurrent and voltage occurred in the device are significant factors to decide the output power of solar cells. The crystalline silicon solar cell module has photocurrent loss due to light reflections on the glass and EVA(Ethylene Vinyl Acetate). These photocurrent loss would be a hinderance for high-efficiency solar cell module. In this paper, the quantitative analysis for the photocurrent losses in the 300-1200 wavelength region was performed. The simulation method with MATLAB was used to analyze the reflection on a front glass and EVA layer. To investigate the intensity of light that reached solar cells in PV(Photovoltaic) module, the reflectance and transmittance of PV modules was calculated using the Fresnel equations. The simulated photocurrent in each wavelength was compared with the output of real solar cells and the manufactured PV module to evaluate the reliability of simulation. As a result of the simulation, We proved that the optical loss largely occurred in wavelengths between 300 and 400 nm

Key Words : Photovoltaic module, Reflection, Cell to module loss, Optical loss, Photocurrent

기 호 설 명

$I_{ph(cell, module)}$	: 광전류(태양전지, PV모듈)[A]
$I_{sc(cell, module)}$	: 단락전류(태양전지, PV모듈)[A]
S_c	: 태양전지 면적[m ²]
$\lambda_{(m)}$	: 파장(최대값)[m]
R_{cell}	: 태양전지의 반사율[%]
q	: 전하량[C]
F	: 광속(photon flux)[EA/m ² s]
EQE	: 태양전지의 외부양자효율[%]
IQE	: 태양전지의 내부양자효율[%]
$n_{(i, t)}$	: 입사매질, 투과매질의 굴절률
$\theta_{(i, t)}$	: 빛의 입사각, 굴절각[°]
$n_{(0, 1, 2, 3)}$	: 공기, 유리, EVA, 태양전지의 굴절률
$r_{(\perp, \parallel)}$	: (s-편광파의, p-편광파의)반사계수
R	: 반사율[%]
T	: 투과율[%]

T_r	: 최종 투과율[%]
H	: 빛의 입사강도[W/m ²]
h	: 플랑크 상수[J·s]
c	: 빛의 속도[m/s]

1. 서 론

태양전지(Solar cell)는 광자 에너지를 전기 에너지로 변환시키는 pn접합소자로서, 빛이 입사되면 광전효과에 의해 전류와 전압이 발생하여 부하에 전력을 공급하게 된다. 이때 광전효과에 의해 발생하는 전류를 광전류(Photocurrent)라 하며 이는 파장의 함수이기 때문에 같은 파장의 빛을 받더라도 파장별로 나타나는 태양전지의 각 특성에 따라 더 높은 광전류를 얻을 수 있다. 개방전압과 내부저항의 크기가 같은 태양전지의 경우 더 높은 광전류를 얻는 쪽이 더 높은 최대출력을 얻을 수 있기 때문에 태양전지가 흡수할 수 있는 파장대역을 더 넓히고, 반사율을 낮추어 광전류를 증가시키려는 연구들이 진행되어 왔다[1][2]. 하지만 실제로 태양전지가 PV(Photovoltaic) 모듈화가 되었을 때에는 앞선 연구들에 반하는 많은 출력 손실이 발생하게 된다. 출력손실의 원인은 태양전지가 PV모듈화가 되면서 발생하는 CTM(Cell To Module) Loss이며 이는 전기적 손실과 광 손실로 구분된다[3]. 전기적 손실의 대부분은 직렬저항 성분에 의해 발생하며, 광 손실은 모듈 부속재에 의한 빛의 반사 및 흡수가 주요인이다. PV모듈의 출력 손실을 저감하기 위해서는 모듈화 손실에 대한 정량적 해석과 원인 분석이 이루어져야만 한다. 이에 따라 본 논문에서는 PV모듈의 광 손실에 의한 출력 손실을 예측하는 시뮬레이션을 제안하였으며,

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

** Senior researcher, Solar Energy department, Korea Institute of Energy Research, Korea

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

§ Professor, Dept. of Electrical Engineering, Konkuk University, Korea

† Corresponding Author : Group Leader, Solar Energy department, Korea Institute of Energy Research, Korea
 E-mail : ghkang@kier.re.kr

Received : October 24, 2012; Accepted : December 26, 2012

MATLAB을 이용하여 PV모듈화에 의한 광전류 손실을 정량적으로 해석하였다.

태양전지 및 PV모듈의 광전류를 예측하는 시뮬레이션 기법은 이전의 몇몇 연구를 통해 소개된 바 있었지만 선행연구들의 해석기법에서는 파장에 따른 굴절률의 값이 일정하게 적용되어 광 손실 해석결과에 영향을 미쳤을 것으로 사료된다[5][6]. 실제로 굴절률은 물질고유의 특성으로 매질 종류에 대해서는 그 값이 일정하지만, 파장이 바뀌면 다른 값을 갖기 때문에 반사에 의한 광전류 손실을 더 정확하게 예측하기 위해서는 각 파장에 대한 굴절률 값을 적용해야 한다. 그리고 광 손실을 파악하려는 연구목적에 맞게 시뮬레이션 해석모델에서 백시트에 의한 출력 증대 효과를 제외시킬 필요가 있었다.

따라서 본 논문에서는 이러한 점들을 고려하여 ‘광전류 시뮬레이션’을 구현하였으며, 시뮬레이션의 결과로서 도출되는 모듈화 전후의 광전류 예측값을 실제 측정값과 비교하고 평가하였다.

2. 이론적 배경

2.1 태양전지의 발전 원리

태양전지는 기본적으로 그림 1과 같은 pn접합의 구조를 가지며 광전류 발생 메커니즘은 다음과 같다. 빛이 태양전지에 입사되면 태양전지는 그 빛의 일부를 반사시키고 나머지는 흡수시켜 EHP(Electron Hole Pair)를 생성시킨다. 생성된 EHP가 내부전계에 의해 각각 다른 극으로 이동하면서 광전류가 발생되며 식 (1)과 같이 얻어질 수 있다. 본 논문에서는 이상적인 태양전지를 가정하였고, 따라서 광전류는 단락전류의 크기와 같다[7].

$$I_{ph(cell)} = I_{sc(cell)} = S_c \int_0^{\lambda_m} (1 - R_{cell}(\lambda)) qF(\lambda) IQE(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

그림 1 태양전지의 광전효과

Fig. 1 Photoelectric effect in the solar cell

2.2 PV모듈의 광 특성

그림 2는 PV모듈의 부속재가 어떠한 형태로 구조를 이루고 있는지 보여주고 있다. 빛이 입사되는 PV모듈의 수광면에는 저철분 강화유리가 사용되며 그 뒤로 태양전지의 산화방지를 위한 EVA(Ethylene Vinyl Acetate) sheet가 태양전지를 감싸는 형태로 존재하고, 후면재로 Backsheet가 사용되어 PV모듈내로 습기가 침투하는 것을 방지한다.

그림 2 PV모듈의 구조 및 부속재

Fig. 2 The components in the structure of PV module

그리고 그림 3은 PV모듈 구조에 대한 단면도로서 PV모듈에 입사된 빛이 이동하는 경로를 보여준다. 그림과 같이 PV모듈에 입사된 빛은 전면 유리 및 EVA로 이루어진 각 층의 계면에서 일부가 반사되어 손실되고, 결국 반사되고 남은 빛만이 태양전지로 흡수되어 PV모듈의 발전에 기여하게 된다. PV모듈에서 발생하는 광 손실의 종류와 비중치를 도식한 그림 4를 통해 흡수에 의한 손실은 전체 입사광의 3% 정도이며, 거의 대부분이 반사에 의한 손실이라는 사실도 알 수 있다[4].

그림 3 PV모듈의 단면도와 빛의 이동경로

Fig. 3 The path of light on the PV module's cross section

그림 4 PV모듈의 광 손실 요인

Fig. 4 Optical loss factor in PV module

그리고 PV모듈에는 Zero depth concentration effect라는 광 특성이 존재한다. 이는 그림 3에서 PV모듈 내부로 입사된 빛이 PV모듈 후면에 위치한 백시트 안쪽 면에서 반사되어 태양전지 후면으로 입사되거나, 전면유리에서 재반사되어 태양전지 전면에 빛이 추가로 입사되는 현상으로 PV모듈의 광전류를 증가시킨다[8]. 대부분의 PV모듈이 부속재에 의한

광 손실을 가짐에도 불구하고 모듈화 전보다 더 높은 단락 전류를 가지는 이유는 이 효과가 광 손실을 보상하고도 남을 만큼의 광 이득을 제공하기 때문이며, 본 논문의 시물레이션에서 백시트의 반사 효과를 제외한 이유도 여기에 있다.

3. PV모듈의 광전류 손실 해석

이번 장에서는 기존의 해석모델과 다른 PV모듈의 해석모델을 제시하였고, PV모듈 부속재에 의한 광 손실을 해석할 수 있는 광전류 수식을 제안하여 시물레이션을 수행하였다.

3.1 적층구조를 고려한 PV모듈 모델링

앞서 언급했듯이 반사에 의한 손실은 PV모듈의 전면부에서 발생하기 때문에 PV모듈 후면부에 있는 백시트는 광전류 손실 해석을 하는데 있어서 불필요하다. 따라서 이전 장에서 보였던 그림 3의 PV모듈 적층구조를 그림 5처럼 백시트 층이 제거된 형태로 변형하여 광전류 손실 해석을 위한 새로운 모델로 제안했다. 새롭게 제안된 모델은 백시트 층이 없어 광전류 해석에 Zero depth concentration effect를 고려하지 않아도 되므로 광 손실 해석에 최적화된 형태라 할 수 있다.

그림 5 광전류 해석을 위한 PV모듈 모델

Fig. 5 The model for the analysis on photocurrent of PV module

3.2 PV모듈 각 층의 투과율

PV모듈에서 광전효과가 발생하는 개체는 결국 태양전지이기 때문에 PV모듈로 입사된 빛이 모듈 부속재에 의해 반사되는 손실분을 계산하여 적용하면 PV모듈의 광전류를 예측할 수 있다. 빛이 PV모듈 내의 태양전지로 입사되는 양을 계산하기 위하여 그림 5의 적층구조에서 태양전지까지의 투과율을 계산해야 하는데, 이 계산을 한 번에 수행할 경우 매우 난해한 계산으로 이어질 가능성이 높아 그림 5를 그림 6~8과 같이 PV모듈 각 층간의 계면을 중심으로 다시 나누어 각 계면에서의 반사 및 투과현상에 대하여 먼저 해석하였다.

빛은 각각의 그림에서 표현된 바와 같이 산란되지 않고 광선의 형태로만 진행한다고 가정하였고, 식 (2)에 보인 스넬의 법칙과 식 (3~4)의 편광에 대한 반사계수를 표현한 프레넬 방정식을 이용하여 반사율을 식 (5)와 같이 계산하였다[9].

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad (2)$$

$$r_{\perp} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \quad (3)$$

$$r_{\parallel} = \frac{n_t \cos \theta_i - n_i \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \quad (4)$$

$$R = \frac{1}{2}(r_{\perp}^2 + r_{\parallel}^2) \quad (5)$$

그리고 흡수에 의한 손실을 무시하면 식 (6)이 성립하고, 투과율도 구할 수 있다.

$$1 - R = T \quad (6)$$

그림 6~8에 대한 PV모듈의 적층구조를 해석하기에 앞서 수식화의 편의를 위해 공기 및 PV모듈 내 각 매질(부속재)은 0부터 3까지의 번호를 빛의 입사방향 순으로 부여하였고, 각 매질의 굴절률은 배경된 번호와 동일하게 n_0 (공기), n_1 (유리), n_2 (봉지재:EVA), n_3 (태양전지)로 표현하였다. 그리고 반사율은 R , 투과율은 T , 경계면에 대한 빛의 총 투과율은 T_{tot} 로 표현하였으며, 아래첨자로 표현된 숫자는 빛의 진행 방향을 의미한다. 아래첨자의 각 숫자는 앞서 지정된 각 매질의 번호와 대응되며, 빛이 앞자리 숫자에 대응하는 매질에서 뒷자리 수에 대응하는 매질 방향으로 진행한다는 것을 뜻한다.

그림 6 공기-유리 매질에 입사된 빛의 이동경로

Fig. 6 The path of the incident light on air and glass materials

공기-유리 매질의 구조를 이루는 그림 6의 모델에서 빛은 공기 매질에서 유리 매질 방향으로 초기 입사되어 공기-유리의 경계면에서 1차적으로 반사되고 남은 빛이 투과된다. 유리 표면에서 반사된 빛은 무한한 공기 영역으로 이동하기 때문에 식 (7)과 같이 유리표면에서 처음 투과된 빛의 비율이 총 투과율이 된다.

$$T_{\text{tot}} = T_{01} \quad (7)$$

그림 6에서 투과된 빛은 그림 7의 초기 입사광으로 주어지며, 이전 모델에서와 동일하게 서로 다른 매질의 경계면에서 1차 반사광과 투과광으로 나뉜다. 하지만 이전 공기-유리 매질의 모델과는 달리 유리-EVA 매질의 모델은 1차 반사광이 공기-유리 매질의 경계면에서 일부가 다시 한 번 반사되어 초기 입사광과 동일한 방향으로 진행하게 된다. 그리고 이 빛은 유리-EVA 매질의 경계면에서 초기 입사광과 동일한 과정을 거쳐 2차 반사광 및 투과광으로 나뉜다. 유

그림 7 유리-EVA 매질에 입사된 빛의 이동경로

Fig. 7 The path of the incident light on glass and EVA materials

리-EVA 매질의 모델에서는 이러한 과정이 광자수가 0이 될 때까지 무한히 반복하게 되며, 이 과정을 수학적으로 전개하면 식 (8)과 같다.

$$Tr_{12} = T_{12} + R_{21}R_{01}T_{12} + R_{21}R_{01}R_{21}R_{01}T_{12} + \dots + (R_{21}R_{01})^{k-1}T_{12} \quad (8)$$

유리-EVA매질 경계에 대한 빛의 총 투과율 Tr_{12} 는 무한수열이 초기치 T_{12} 와 공비 $R_{21}R_{01}$ 을 가지는 규칙성을 이용하여 식 9와 같이 표현할 수 있고, 이는 식 (10)과 같이 근사화된 수열의 합으로 표현 가능하다.

$$Tr_{12} = \sum_{n=1}^{\infty} T_{12}(R_{21}R_{01})^{k-1} \quad (9)$$

$$Tr_{12} = \frac{T_{12}}{1 - R_{21}R_{01}} \quad (10)$$

그림 8 EVA-태양전지 매질에 입사된 빛의 이동경로

Fig. 8 The path of the incident light on EVA and solar cell materials

이후 EVA-태양전지 경계에 대한 빛의 총 투과율(Tr_{23})은 앞선 과정과 동일하게 계산되었으며, 이는 식 (11)과 같다.

$$Tr_{23} = \frac{T_{23}}{1 - R_{32}R_{12}} \quad (11)$$

PV모듈을 구성하는 각 매질의 경계면에 대한 투과율을 모두 얻었기 때문에 초기 입사광 대비 PV모듈 내의 태양전지로 입사되는 빛의 비율(Tr)을 식 (12)와 같이 구할 수 있었다.

$$Tr = Tr_{01}Tr_{12}Tr_{23} \quad (12)$$

3.3 PV모듈 부속재의 굴절률

PV모듈 부속재들의 굴절률은 시뮬레이션의 변수로서 적용되며, 정밀한 시뮬레이션을 위해 파장별 값이 요구되었다. 따라서 파장별 굴절률은 각 모듈 부속재의 반사율을 계측장비를 이용하여 측정한 후에 식 (13)을 이용하여 역으로 산출하였다. 여기서 빛이 입사되는 매질의 굴절률이 '1'인 이유는 부속재의 반사율을 측정할 때 빛은 언제나 공기 중에서 입사되기 때문이며, 공기의 파장별 굴절률 값이 시뮬레이션 결과에 영향을 미치지 않을 정도로 균일했기 때문에 '1'로 고정시켰다[10].

$$R = \left(\frac{n_t - 1}{n_t + 1} \right)^2 \quad (13)$$

3.4 PV모듈의 광전류

PV모듈에서도 광전효과가 발생하는 개체는 태양전지이기 때문에 PV모듈의 수식적 모델은 태양전지의 광전류 식에서 광 손실을 고려한 변수를 추가하여 식 (14)과 같이 표현하였다. 식 (14)에서 광 손실이 반영된 변수는 앞 절에서 구한 PV모듈 내 태양전지로 입사되는 빛의 비율(Tr)이다.

$$I_{ph(module)} = S_c \int_0^{\lambda_m} (1 - R_{cell}(\lambda)) q F(\lambda) IQE(\lambda) Tr(\lambda) d\lambda \quad (14)$$

다음으로 PV모듈의 광전류 식에 대한 나머지 변수들이 선정되었으며, 시뮬레이션에 적용된 변수는 아래와 같다.

먼저 태양전지면적(S_c)의 경우 시제작된 PV모듈과 동일하게 6inch 다결정 태양전지의 면적 243.36cm^2 를 시뮬레이션에 적용하였고, 단위 전자당 전하량(q)은 $1.614 \times 10^{-16}\text{C}$ 을 적용하였다. 태양전지의 반사율(R_{cell})은 계측장비를 이용한 측정값을 적용하였으며, 내부양자효율(IQE)은 측정된 외부양자효율 값으로부터 이론적으로 추정된 값을 적용하였다. 태양전지의 파장별 반사율을 측정한 장비는 'JASCO'사의 'Spectro-parameter V-670'이며, 측정 결과를 그림 9에 도시하였다. 그리고 외부 양자효율의 측정은 'SOMA Optics'사의 'S-9230'을 사용하였으며, 측정된 외부양자효율을 식 (15)를 이용하여 내부양자효율로 변환하였다. 측정된 외부양자효율

그림 9 태양전지의 반사율

Fig. 9 Reflectance of the solar cell

과 변환된 내부양자효율을 그림 10에 도시하였다.

$$IQE(\lambda) = \frac{EQE(\lambda)}{(1 - R(\lambda))} \quad (15)$$

그림 10 태양전지의 양자효율

Fig. 10 Efficiency of the solar cell

그리고 파장별 광자 수(F)는 파장별 입사강도 데이터를 문헌을 통하여 얻은 후, 식 (16)을 이용하여 역으로 산출하였다[7]. 파장별 광자 수에 대한 값은 그림 11과 같다.

$$H = F \times \frac{hc}{\lambda} \quad (16)$$

그림 11 광원의 파장대역별 광자 수

Fig. 11 Spectral photon flux of the light source

앞서 구한 변수들을 적용하여 광전류 시뮬레이션을 한 결과, 태양전지의 광전류 8.828A 및 PV모듈의 광전류 8.312A를 얻을 수 있었으며, 각 변수들의 파장별 특성을 고려한 시뮬레이션을 했기 때문에 표 1 및 그림 12와 같이 단위 파장별 광전류 생성량을 파악하는 것이 가능했다. 시뮬레이션을 통해 계산된 광전류 손실은 0.516A이며, 그림 13과 같은 파장별 분포를 이루고 있었다. 여기서 그림 12와 13을 비교했을 때, 광전류 생성량이 적은 300~400nm 파장에서의 손실이 그보다 큰 광전류를 생성하는 파장대역만큼 발생했다는 사실을 알 수 있고, 이는 단파장 대역의 빛이 모듈 부착재에 의해 대부분 반사되어 손실된다는 것을 의미한다. 단파장 대역에서 이처럼 큰 손실이 발생한 이유는 전면 유리 및 EVA의 자외선 차단 특성 때문으로 사료된다[3].

표 1 광전류 시뮬레이션 결과

Table 1 Result of the simulation on the photocurrent

wavelength [nm]	solar cell [A]	PV module [A]	current loss [A]
300 ~ 400	230.54	186.55	43.99
400 ~ 500	961.30	903.80	57.50
500 ~ 600	1421.10	1359.10	62.00
600 ~ 700	1639.60	1568.30	71.30
700 ~ 800	1474.70	1403.00	71.70
800 ~ 900	1444.70	1363.30	81.40
900 ~ 1000	826.90	774.90	52.00
1000 ~ 1100	737.10	674.00	63.10
1100 ~ 1200	91.85	79.01	12.84
300 ~ 1200	8827.79	8311.96	515.83

그림 12 태양전지 및 PV모듈의 광전류

Fig. 12 Photocurrent in the solar cell and PV module

그림 13 태양전지 및 PV모듈의 광전류

Fig. 13 Photocurrent in the solar cell and PV module

4. 결과 및 고찰

4.1 PV모듈 제작

앞서 언급한 바와 같이 시뮬레이션은 백시트에 의한 Zero depth concentration effect가 제외되었으므로 해석 범위가 PV모듈 전면부에 대해 한정되어있다. 따라서 시뮬레이션을 평가하기 위한 PV 모듈도 해석모델과 동일한 형태로 백시트가 없는 상태로 유리/EVA/태양전지의 순으로 적층된 후, 라미네이션(Lamination) 공정을 거쳐 제작되었다. PV모듈의 크

기는 700mm×1000mm이며 6inch 다결정 실리콘 태양전지 24장이 4×6 형태로 배열되었다.

4.2 시제작 모듈의 광전류

시제작된 PV모듈의 출력을 Sun simulator를 사용하여 측정하였고, 출력 측정 결과를 전 장의 시뮬레이션 결과와 비교하여 표 2에 나타냈다.

표를 통하여 평가했을 때, 시뮬레이션은 태양전지와 PV모듈에 대해 각각 -5.09%, -0.88%의 오차율을 가져 신뢰성 있는 예측 결과를 보였다고 판단된다. 하지만 광전류 손실을 비교해보면 시뮬레이션에 의해 계산된 값은 0.516A이며, 실제 측정값은 0.160A로 비교적 큰 차이를 보였다. 본 논문에서는 시뮬레이션 결과 값이 실제 측정값보다 더 큰 손실을 보인 이유를 다음과 같이 판단했다.

광전류 시뮬레이션은 프레넬 방정식에 이론적 근거를 두기 때문에 해석 과정에서 직사광만을 다루게 된다. 따라서 PV모듈 내에서 산란되는 빛에 의한 발전량은 시뮬레이션에 반영되지 못하기 때문에 광전류 손실이 실제보다 크게 발생한 것으로 보인다.

표 2 시뮬레이션과 측정값의 비교

Table 2 A comparison of simulation with measurements

	시뮬레이션	측정값	오차율
태양전지 광전류	8.828 A	8.400 A	-5.09 %
PV모듈 광전류	8.312 A	8.240 A	-0.88 %

5. 결 론

본 연구에서는 PV모듈화에 의한 광 손실에 대하여 연구하였으며, 모듈 부착제에 의한 광 손실에 기인한 광전류 손실을 예측하는 시뮬레이션을 제안하였다. 광전류 시뮬레이션은 태양전지와 모듈 부착제의 파장별 광 특성을 변수로 가지며, 각 파장에 대해 정량적인 광전류 생성량을 제공한다. 시뮬레이션은 태양전지 및 PV모듈의 광전류를 각각 8.82A, 8.312A로 예측하였으며, 파장별 광전류 그래프를 통하여 300~400nm 파장대역에서 유리 및 EVA의 자외선 차단 특성에 의한 광전류 손실이 크게 발생함을 증명하였다.

이러한 시뮬레이션 결과를 검증하기 위해 PV모듈을 제작하여 출력을 측정하였고, 실험 결과 태양전지의 경우 -5.09%, PV모듈의 경우 -0.88%의 오차율을 가졌다. 하지만 광전류 손실량을 비교했을 때에는 측정값 0.160A와 시뮬레이션 예측값 0.516A 사이에 비교적 큰 차이가 있었다. 이러한 오차의 원인은 시뮬레이션이 산란광을 해석하지 못하는 데서 발생했다고 사료되며, 추후 연구에서는 산란광에 의한 오차를 줄이기 위한 방안들이 마련될 것이다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No.20113010010010-11-1-000)

참 고 문 헌

- [1] D. Bouhafs, "Design and simulation of antireflection coating systems for optoelectronic devices", Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol.52, Issues 1-2, pp. 79-93, March 1998.
- [2] L. A. Hussain, "Back-reflection effect on the long-wavelength spectral response of solar cells", Applied Physics, Vol.11, Issue 11, August 1978.
- [3] S. Lee, "A study for reduction of the power loss of PV modules", Proceedings of the KSES autumn annual conference, Vol.31, No.2, pp. 45-50, 2011.
- [4] J. Jaus, D. M. Doble, "Approaches to energy yield improvement in PV modules", Reliability of Photovoltaic Cells, Modules, Components, and Systems III, Vol.7773, 2010.
- [5] N. Yoon, "Prediction of output power for PV module with tilted angle and structural design", A Master's thesis in Dept. of Electrical Engineering at Konkuk University, Korea, 2012.
- [6] T. Yamada, "Reflection loss analysis by optical modeling of PV module", Vol.67, Issues 1-4, pp. 405-413, March 2001.
- [7] ASTM, "ASTM G173-03(2008) standard tables for reference solar spectral irradiances: Direct normal and hemispherical on 37° tilted surface", ASTM Standards, Vol.14.04, 2008.
- [8] S.R. Wenham, M.A. Green, "Applied photovoltaics", Earthscan Publications Ltd., pp. 85-88, 2007.
- [9] E. Hecht, Optics, Addison Wesley, 2008.
- [10] J. Jhang, "Precision refractive index measurements of air, N₂, O₂, Ar, and CO₂ with a frequency comb", Applied optics, Vol.47, Issue 17, pp. 3143-3151, 2008.

저 자 소 개

이 상 훈 (李尙勳)

건국대학교 전기공학과
전기전자재료 및 센서 석사과정(4차)
E-mail : ghooslee@kier.re.kr

송 희 은 (宋嬉媛)

2002년 이화여자대학교 화학과 이학석사,
2009년 Dept. of Chem., University of Washington 이학박사, 현 한국에너지기술연구원, 태양에너지 연구단 선임연구원
E-mail : hsong@kier.re.kr

강 기 환 (姜 琦 煥)

1993년 건국대학교 전기공학과 공학석사,
2009년 건국대학교 전기공학과 공학박사,
현 한국에너지기술연구원, 태양에너지 연구
구단 책임 연구원

E-mail : ghkang@kier.re.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

한 득 영 (韓 得 永)

1974년 연세대학교 전기공학과 공학석사,
1984년 연세대학교 전기공학과 공학박사,
현 건국대학교 전기공학과 교수

E-mail : dyhan@konkuk.ac.kr