

# View Factor를 고려한 마이크로그리드 적용용 고효율 P-Type Si 양면형 태양광 모듈의 출력량 예측

최진호, 김광순, 차혜림, 김규광, 방병관, 박소영, 안형근<sup>a</sup>

건국대학교 전기공학과 차세대태양광모듈 및 발전시스템연구센터

## Power Prediction of P-Type Si Bifacial PV Module Using View Factor for the Application to Microgrid Network

Jin Ho Choi, David Kwangsoon Kim, Hae Lim Cha, Gyu Gwang Kim, Byeong Gwan Bhang,  
So Young Park, and Hyung Keun Ahn<sup>a</sup>

Next Generation Photovoltaic Module and Power System Research Center,  
Department of Electrical Engineering, Konkuk University, Seoul 05029, Korea

(Received January 16, 2018; Revised February 7, 2018; Accepted February 8, 2018)

**Abstract:** In this study, 20.8% of a p-type Si bifacial solar cell was used to develop a photovoltaic (PV) module to obtain the maximum power under a limited installation area. The transparent back sheet material was replaced during fabrication with a white one, which is opaque in commercial products. This is very beneficial for the generation of more electricity, owing to the additional power generation via absorption of light from the rear side. A new model is suggested herein to predict the power of the bifacial PV module by considering the backside reflections from the roof and/or environment. This model considers not only the frontside reflection, but also the nonuniformity of the backside light sources. Theoretical predictions were compared to experimental data to prove the validity of this model, the error range for which ranged from 0.32% to 8.49%. Especially, under  $700 \text{ W/m}^2$ , the error rate was as low as 2.25%. This work could provide theoretical and experimental bases for application to a distributed and microgrid network.

**Keywords:** View factor, Solar radiation, Backside reflection, Nonuniformity

### 1. 서론

최근 전 세계적으로 발생하는 기후 변화의 주된 요인의 일부는 화석 연료의 사용에 기인한다고 보고되고 있다 [1]. 이러한 문제들을 줄여 나가기 위하여 국가들이 기후 변화 협약을 체결하였으며 [2] 기후 변화 협약은 전 세계가 탄소배출량을 일정 부분 줄여 가면서,

기후 변화의 속도를 늦추는 데 목적이 있다. 최근 들어 신재생에너지원 중 하나인 태양광 발전은 이러한 문제 해결 방법의 하나로 주목받고 있다 [3]. 우리나라 특성상 좁은 발전 넓이에서 최대의 전기 생산을 하기 위하여 고효율 태양광 모듈이 개발되고 있다 [4]. 기존 단면형 모듈에서 더 나아가 양면형 태양광 모듈로 모듈의 효율을 증가시키는 노력을 하고 있다 [5]. 단면형 모듈은 모듈 전면의 광으로 모듈 출력을 예측할 수 있으나, 양면형 태양광 모듈은 단면모듈과는 다르게 전면에서뿐만 아니라 후면의 일사량을 이용하여 발전이 가능하다. 따라서 양면형 모듈의 출력 예측을 위해서는 후면의 일사량을 예측해야 한다.

a. Corresponding author; [hkahn@konkuk.ac.kr](mailto:hkahn@konkuk.ac.kr)

기존 일사량 예측식은 후면 일사량을 예측하기 위하여 직접광(DNI)와 수평면일사량(GHI)을 사용하였다 [6]. 그러나 DNI와 GHI는 이론적 계산치이기 때문에 현재 날씨를 반영하지 못하는 한계가 있고, 고방사도 일사량에서만 후면 출력을 예측할 수 있는 한계가 있다. 이러한 문제점을 본 논문에서는 고방사도 일사량뿐만 아니라 저방사도 일사량상에서 적용 가능한 모델을 제시하고자 한다. DNI와 GHI의 개념을 사용함과 동시에 현재 운량으로 인한 저방사도 상황과, 전면과 후면 일사량에 영향을 주는 요인들을 고려해 주기 위하여 새로운 변수를 전면 일사량에 추가하여 후면 일사량을 예측하는 모델을 제시하였다. 이를 이용하여 전면과 후면의 출력으로 실제 측정되는 발전량을 예측하였다. 또한, 모듈의 설치 높이에 따라서 발생하는 불균일성을 불균일도 [7]와 불균일계수의 개념을 적용하였다. 실제 발전량을 예측한 결과를 검증하기 위하여 수도권소재 5층 건물의 콘크리트 옥상 환경에 실증 사이트를 구현하여 실험을 진행하였다. 예측 실험을 위하여 p-type 72cell 양면형 모듈을 제작하였고 양면형 셀의 양면성을 유지하기 위하여 투명 백시트를 적용하여 제작하였다. 그리고 후면의 알베도( $\alpha$ )를 위하여 색상 중에서 가장 높은 반사도를 구현하는 흰색 페인트를 사용하여 모듈의 후면의 환경을 조성하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 태양광 모듈 전후면 일사량 설계

양면형 태양광 모듈의 빛은 전면과 후면의 광으로 나누어진다. 전면광은 크게 직접광과 간접광으로 나뉘고, 후면광은 크게 산란광과 반사광으로 나누어진다. 정면광과 후면광을 더 정확하게 이해하기 위해서 view factor (VF)의 개념을 사용하였다 [8].

VF는 한 표면에서 또 다른 표면으로 광이 반사될 때, 도달하는 정도를 계산하는 방법이다. 어떠한 1면에서 2면의 VF를  $VF_{12}$ 라 나타낸다. VF는 식 (1)을 이용하여 구할 수 있다 [9].

$$VF = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2 da_1 da_2}{\pi r^2} \quad (1)$$

전면과 후면에 들어오는 일사량에 따른 발전량은 전면과 후면 각각의 발전량을 구한 후에 더하여, 양면형

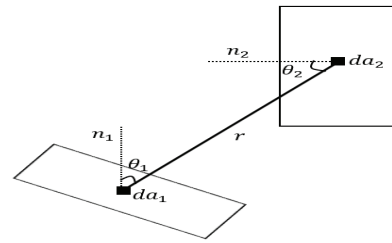


Fig. 1. Two surfaces for calculating the view factor.

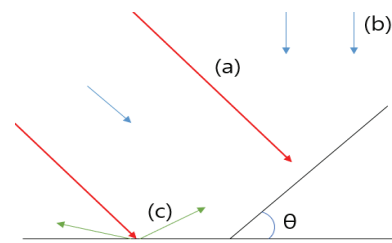


Fig. 2. Different light resources entering into the front side of the module (a)  $x_{direct}$ , (b)  $x_{diff}$ , and (c) reflected light from ground ( $S_3$ ).

모듈을 이용하여 얻을 수 있는 발전량을 계산하였다. 그리고 현재의 운량 등을 반영하기 위하여, 일사량계에 측정되는 모듈 전면의 일사량을 Liu와 Jordan의 모델 [10]을 확장하여 새로운 이론을 제시하였다.  $S_{front}$ 는 전면의 일사량의 총합이며  $S_1$ 은 현재의 운량을 고려를 위하여  $x_{direct}$ 라는 새로운 변수를 사용하였다.  $S_2$  산란광에 의한 일사량이고,  $S_3$ 는 바닥의  $\alpha$ 에 의해서 반사되어 들어오는 일사량이다. 세 가지 일사량은 각각 식 (3), (4), (5)와 같이 나타내었다.

$$S_{front} = S_1 + S_2 + S_3 \quad (2)$$

$$S_1 = x_{direct} \quad (3)$$

$$S_2 = x_{diff} \times VF_{sky,module} \quad (4)$$

$$S_3 = \alpha \times (x_{direct} + x_{diff}) \times VF_{ground,module} \quad (5)$$

위의 식에서  $S_{front}$ 는 일사량계로 측정된 일사량이고,  $x_{direct}$ 는 대기를 통과한 일사량으로 가정하였다.  $\beta$ 는 모듈의 설치 각도이고  $x_{diff}$ 는 수평면으로 들어오는 산란광이다.  $x_{diff}$ 는  $S_{front}$ -DNI의 식을 사용하였다 [6].

정면의 VF는 NREL에 따르면, 식 (6)으로 나타낼 수 있다 [11].

$$VF_{sky,module} = \frac{1 + \cos\theta}{2}$$

$$VF_{ground,module} = \frac{1 - \cos\theta}{2} \quad (6)$$

여기서  $VF_{sky,module}$ 는 대기에서 모듈로 바라본 VF이고  $VF_{ground,module}$ 은 지면에서 모듈로 바라본 VF로 정의한다.

## 2.2 양면형 모듈 후면 일사량

후면광은 후면 직사광과 후면 산란광으로 나뉜다 [6]. 본 논문에서는 전술한 2가지 빛에, 후면의 모듈에 의한 반사빛에 의한 요소를 포함하여 총 3가지 빛이 후면에 들어올 수 있다고 가정하였다.

$S_3$ 는 정면에서의 경우와 같으며  $S_4$ 는 후면모듈의 반사율( $\beta$ )에 의해서 반사된 빛에 의한 일사량이다.  $S_5$ 는  $S_2$ 과 같은 개념으로, 산란광이 후면으로 들어올 때의 일사량을 나타내었다. 이 밖에 후면으로 들어올 수 있는 빛은 본 논문에서는 제외하였다.

$$S_{rear} = S_3 + S_4 + S_5 \quad (7)$$

$$S_4 = \beta \times (S_1 + S_2) \times VF_{module,module}$$

$$S_5 = x_{diff} \times VF_{sky,module} \quad (8)$$

NREL에 따르면 후면의 VF는 식 (9)로 나타낼 수 있다 [11].

$$VF_{sky,module} = \frac{1 - \cos\theta}{2}$$

$$VF_{ground,module} = \frac{1 + \cos\theta}{2} \quad (9)$$

## 2.3 평행한 모듈 사이의 View Factor

하나의 대규모 태양광 발전소 상에서는 모듈과 모듈 사이의 반사율을 고려해야 한다. 그리고 모듈과 모듈은 평행하게 설치한다. 따라서  $VF_{module,module}$ 는 두 면이 평행할 때의 VF의 식으로 구하여야 한다.  $VF_{module,module}$ 는 식 (10)을 이용하여 구할 수 있다 [12].

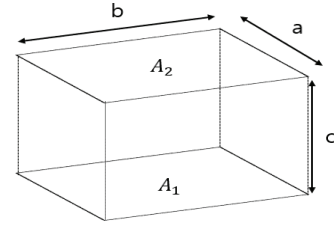


Fig. 3. Parallel plates of equal size.

$$VF_{module,module} = \frac{2}{\pi XY} \quad (10)$$

$$\left\{ \ln \left( \frac{(1+X^2) \times (1+Y^2)}{1+X^2+Y^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right.$$

$$+ X\sqrt{1+Y^2} \tan^{-1} \frac{X}{\sqrt{1+Y^2}}$$

$$+ Y\sqrt{1+X^2} \tan^{-1} \frac{Y}{\sqrt{1+X^2}}$$

$$\left. + X \tan^{-1} X - Y \tan^{-1} Y \right\}$$

위 식에서 X, Y는  $X = a/c$ ,  $Y = b/c$ 이며 그림 3은 실제 설치 시 동일한 태양광모듈 면적( $A_1$ ,  $A_2$ )을 제시한 구조도이다.

## 2.4 양면형 모듈의 불균일도와 불균일계수

모듈 후면의 일사량은 전면에서의 일사량과는 다르게 모듈과 지면 사이의 거리에 따라 불균일하게 측정된다. 모듈과 지면 사이의 거리가 3 m 이상의 이격거리로 설치 시에는 후면 불균일도( $\kappa$ )를 무시할 수 있으나 [7] 그 이내인 경우에는  $\kappa$ 를 고려하여 불균일계수( $\gamma$ )를 곱하여 보상된 수치로 나타낼 수 있다.  $\gamma$ 는 식 (11)에 나타내었다.

$$\gamma = \frac{\min S_{rear}}{\max S_{rear}} \quad (11)$$

## 2.5 실험을 위한 모듈 제작

제시한 이론적 모델을 검증하기 위하여 그림 4에서와 같은 p-type 양면형 모듈을 제작하였으며, 표 1은 모듈을 만들 때 사용한 셀의 특성이다.

공정 시 SK사의 투명 후면시트를 적용하였고, 1,949 × 985 mm 크기의 프레임을 사용하였다. 양면형 모듈의 발전량( $P_{total}$ )은 전면의 발전량( $P_{front}$ )과 후면의 발전량( $P_{rear}$ )의 합으로 구할 수 있다 [6].

**Table 1.** Electrical characteristics of bifacial cells.

Classification	Unit	Value
Efficiency	%	20.8
Pmax	W	5.082
Voc	V	0.657
Isc	A	9.735
Vmp	V	0.556
Imp	A	9.149



**Fig. 4.** 6×10 Bifacial PV module fabricated.

$$P_{total} = P_{front} = P_{rear} \quad (12)$$

식 (13)은 일사량( $S$ )이  $S_{front}$ 와  $S_{theoretical}$ 일 때, 발전량( $P$ )은 STC 조건의 일사량과 출력의 비율로 [6] 계산할 수 있다.

$$S: P = S_{STC} : P_{STC} \quad (13)$$

실험에 사용한 모듈을 STC 조건하에서 특성평가를 진행한 결과는 표 2이다. STC 조건에서 모듈의 특성을 앞면과 뒷면 각각 측정하였으며 측정 시 전면과 후면 각 면에서 반사가 최대한 일어나지 않도록 기존 인증지원센터의 STC 측정용 실험 장비를 사용하였다. 측정된  $S_{front}$ 와 이론값  $S_{theoretical}$ 을 식 (13)을 이용하여  $P_{front}$ 와  $P_{rear}$ 를 합하여 구한  $P_{total}$ 은 식 (14)이다.

$$P_{total} = \frac{S_{front} \times P_{STC,front} + S_{theoretical} \times P_{STC,rear}}{1000} \quad (14)$$

식 (14)에서  $P_{STC,front}$ 와  $P_{STC,rear}$ 는 STC 조건에서의 각각 전면과 후면의 모듈 출력량이다.

**Table 2.** I-V characteristics of bifacial module on STC condition.

Classification	Unit	Front	Rear
Power	W	340.449	221.178
Isc	A	9.308	5.895
Voc	V	47.744	46.853
Vmp	V	38.495	40.442
Imp	A	8.844	5.469
FF	%	76.6	80.1

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 출력 예측

모듈의 설치 각도는 30°로 설치를 하였고, 측정 위치의 위도는 37.54° 서울을 기준으로 하였다. 일반 흰색페인트는  $\alpha$ 가 0.5인 페인트를 사용하였다.  $S_{front}$ 는 전면에서 일사량계에 측정되는 값이다. 전면의 일사량은 자연광하에서 실험을 진행하였고, 측정에는 G사의 I-V checker을 이용하여 측정 실험을 진행하였다.

$VF_{sky,module}$ 와  $VF_{ground,module}$ 는 모듈의 설치 각도( $\beta$ )에 의하여 정해지고,  $x_{direct}$ 를 제외한 모든 변수들의 값을 계산을 통하여 구할 수 있으므로,  $x_{direct}$  값을 계산할 수 있다.

#### 3.2 일사량 모델링 계산

모델링한 계산과 실제 값을 비교하기 위하여 실험을 진행하였다. 처음으로 모델링한 값의 계산을 위하여  $DNI$ 에 사용된 모든 변수를 구하였으며, 모듈이 설치되는 지역의 위도( $\phi$ )는 37.5°,  $\beta$ 는 30°를 각각의 식에 대입하여 전면과 후면의 일사량을 예측하고, 각각 예측한 일사량으로 전면과 후면 출력량을 계산하였다. 식 (7), (8)을 이용하여 일사량 간격마다의  $S_{theoretical}$ 을 계산하였다.  $VF_{module,module}$ 은 모듈 사이의 간격을 최소 이격거리로 설치하였을 때를 기준으로 계산을 하였고, 모듈의 정면 유리는 저철분 강화유리를 사용하였으며 이의 반사율은 8%를 기준으로 계산하였다. 식 (10)의 계산 결과  $VF_{module,module}$ 는 0.0013이다. 모델링을 통하여 얻은 발전량은 전면과 후면의 값을 각각 더하여 구하였다.

#### 3.3. 이론적 모듈 출력 예측

$\kappa$ 는 모듈의 설치 높이와 모듈의 설치 각도에 의존하며 모듈의 설치 높이가 낮을수록  $\kappa$ 가 높다 [7]. 본 논

문의 실험에서 모듈을  $\kappa$ 가 발생하는 높이에 설치하였을 때, 태양광 모듈의 발전량을 계산을 통하여 구하였다. 실제 실험에는 모듈의 설치 높이를 0.2 m에서 진행하였으며 0.2 m 높이에  $30^\circ$  각도로 모듈을 설치하였을 때의 불균일성을 보정하기 위하여 보정계수를 구하였으며, 그 값은 식 (11)로 얻을 수 있다. 후면에서 측정할 수 있는 최대 및 최소 일사량 측정 실험 결과, 후면 최대 일사량이  $160 \text{ W/m}^2$ 일 때, 모듈 거치대에 의해 가려진 부분의 일사량이  $23 \text{ W/m}^2$ 이었다.

불균일성이 후면에서 발생하였을 때, 최대 후면 일사량과 최소 후면 일사량은 6.96:1의 비율을 가진다. 전체 태양광 모듈의 출력은 출력이 가장 작은 스트링의 출력으로 인해 결정된다 [13,14]. 모듈이 지면으로부터 0.2 m 높이에 위치한 곳의  $\gamma$ 는 6.96으로 계산되어, 불균일계수로 보정된 이론적 후면 일사량은 다음과 같이 나타낸다.

$$S_{rear} = \gamma S_{rear,theoretical} \quad (16)$$

식 (16)의 결과  $S_{rear}$ 을 식 (14)의  $S_{theoretical}$ 에 대입하여  $\gamma$ 로 보정된 이론적 출력량인  $P_{total}$ 을 계산하였다.

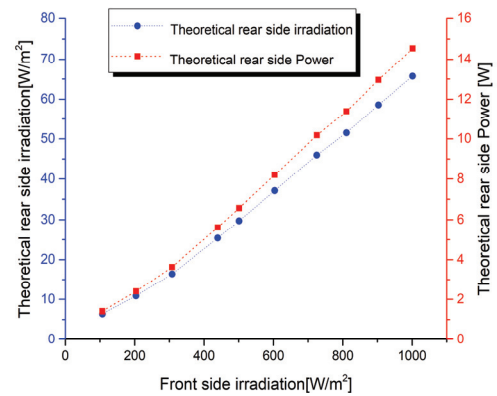
표 3은 전면 일사량 변화에 따른  $DNI$ 와 후면의 최대 일사량인  $S_{rear,theoretical}$ 와  $\gamma$ 를 이용한 이론적 후면 일사량인  $S_{rear}$ 를 각각 나타내었다. 또한 그림 5는 식 (7)과 (8), (13)을 이용하여 전면 일사량에 대한 이론적 후면 일사량과 후면 발전량으로 전면 일사량 대비 6~7%의 일사량 크기를 나타내는 것으로 판단된다.

**Table 3.** Calculated data from front side irradiation measured.

$S_{front}$ [ $\text{W/m}^2$ ]	$DNI$ [ $\text{W/m}^2$ ]	$S_{rear,theoretical}$ [ $\text{W/m}^2$ ]	$S_{rear}$ [ $\text{W/m}^2$ ]
106.9	147.4	44.32	6.37
204.0	374.2	75.54	10.85
308.1	563.5	114.24	16.41
439.5	663.2	176.64	25.38
501.3	701.7	206.80	29.71
603.8	753.7	257.97	37.07
725.2	798.5	320.22	46.01
810.9	889.4	358.40	51.49
902.9	902.3	407.62	58.57
1,001.5	895.4	457.68	65.73

표 4는 실제 실험의 결과와 계산된 이론식 결과와의 차이인 에러율(ER)로 저저도 및 고저도에서 중저도 대비 산란광 예측에 관한 오차로 인해 상대적인 에러의 증가를 보이는 특성을 나타내고 있다. 그 결과 고저도 일사량에서 최대 8.49%의 ER을 가졌고, 중저도에서 최소 0.32%의 ER을 나타냈으며 평균 3.65%의 오차로 계산되었다.

따라서 보다 높은 정확도를 제시하기 위해서는 본 연구에서 무시한 후면 프레임에 의한 영향과 저저도 시의 산란광에 의한 이론이 재제시되어야 할 것으로 판단되며 또한 높은 일사량에서의 후면 조건에 따른 직접 반사광의 적용과 모듈의 높이와 각도에 따른 불균일도를 고려할 필요성이 제시되었으며, 또한, 계절



**Fig. 5.** Theoretical rear side irradiation and power depending on front side irradiation.

**Table 4.** Comparison of measured data with theoretical prediction.

$S_{front}$ [ $\text{W/m}^2$ ]	$P_{measured}$ [W]	$P_{total}$ [W]	ER [%]
106.9	36.77	37.80	2.81
204.0	74.86	71.85	4.02
308.1	111.83	108.52	2.96
439.5	157.42	155.24	1.38
501.3	177.80	177.24	0.32
603.8	210.69	213.76	1.46
725.2	250.09	257.07	2.79
810.9	271.6	287.46	5.84
902.9	295.27	320.34	8.49
1,001.5	331.13	352.47	6.45

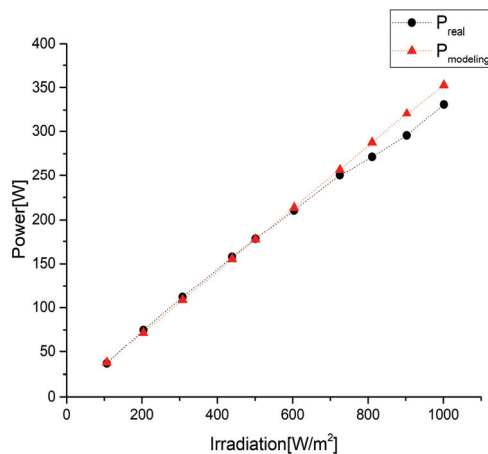


Fig. 6. Comparison of theoretical prediction with experimental data of Power with solar radiation.

영향에 따른 변화에 대한 변수를 추가하면 양면형 모듈의 출력을 보다 정확히 예측할 수 있는 이론적 토대를 완성할 수 있으리라 판단되어 적은 면적에서 높은 출력을 제시할 수 있는 마이크로그리드 시스템에 적용 가능한 후면 반사조건 및 시스템을 구현할 수 있으리라 확신된다.

#### 4. 결론

양면형 모듈의 전면의 일사량을 Liu와 Jordan의 모델을 확장하여 모델링을 진행하였다. 태양광 모듈을 설치한 곳의 환경 변수들로 후면의 일사량을 예측하였고, 예측을 통하여 얻은 값과 실험에 사용한 모듈의 STC 조건에서의 측정치로 실증 사이트에 설치된 양면형 모듈의 출력량을 예측하였다.

또한 후면의 불균일성을 보상하기 위하여  $\gamma$ 를 추가하여 고려였고, 이론적 예측 값과 실제 측정기에 측정되는 결과를 비교하였다. 그 결과, 고저도 일사량에서 최대 8.49%의 ER을 가졌고 중저도에서 최소 0.32%의 ER을 나타냈으며, 저저도 일사량일 때 평균 2.25%로 낮은 오차를 가졌고 모든 일사 범위에서는 평균 3.65%의 오차로 계산되었다. 보다 높은 정확도를 제시하기 위해서는 본 연구에서 무시한 후면 프레임에 의한 영향과 저저도 시의 산란광에 의한 영향이 고려되어야 할 것으로 판단된다. 또한 빛의 반사와 굴절에 따른 파장의 변화에 대하여 추가적으로 고려된다면, 더욱 정확한 예측결과를 얻을 수 있을 것이라 생각된다.

#### 감사의 글

본 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 20153010012060). 또한 이 논문은 2017학년도 건국대학교의 연구년교원 지원에 의하여 연구되었습니다.

#### REFERENCES

- [1] S. M. Oh, *Proceedings of the Korean Society for Bio-Environment Control Conference*, **17**, 15 (2008).
- [2] J. Y. Kim, S. B. Kim, and S. Y. Park, *Korean Soc. Public Adm.*, **27**, 131 (2016).
- [3] J. S. Yu, *The Magazine of the IEEK*, **6**, 82 (2008).
- [4] B. K. Kham, *Output 20% ↑, manufacturing cost ↓ Development of double-sided Next Generation PV Module and Power System Research center*, <http://www.etnews.com/20160621000238> (2016).
- [5] J. G. Kang, *Journal of the Korean Solar energy society*, **35**, 57 (2015).
- [6] H. L. Cha, *Power Prediction of Bifacial Si PV Module and Its Application to Inverse Engineering*, p. 22-33, Konkuk University, Seoul (2017).
- [7] C. Deline, S. MacAlpine, B. Marion, F. Toor, A. Asgharzadeh, and J. S. Stein, *IEEE J. Photovoltaics*, **7**, 575 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2017.2650565>]
- [8] C. W. Hansen, J. S. Stein, C. Deline, S. MacAlpine, B. Marion, A. Asgharzadeh, and F. Toor, *Proc. 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)* (IEEE, Portland, USA, 2016) p. 0138.
- [9] C. W. Hansen, J. S. Stein, C. Deline, S. MacAlpine, B. Marion, A. Asgharzadeh, and F. Toor, *Proc. 43th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* (IEEE, Portland, USA, 2016) p. 138.
- [10] S. Nijmeh and R. Mamlook, *Renewable Energy*, **20**, 75 (2000). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(99\)00091-9](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(99)00091-9)]
- [11] U.S. Department of energy office of scientific and technical information, *A Practical Irradiance Model for Bifacial PV Modules: Preprint*, <https://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/1364146> (2017).
- [12] M. F. Modest, *Radiative Heat Transfer* (Elsevier, Netherlands, 2013) p. 152.
- [13] S. R. Wenham, *Applied Photovoltaics* (Earthscan, UK, 2007) p. 75.
- [14] T. H. Jung, G. H. Kang, and H. K. Ahn, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, **15**, 279 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.4313/TEEM.2014.15.5.279>]