

양면형 태양광발전 소자의 성능변수 및 이에 대한 정확한 측정방법

안승규 · 안세진 · 어영주 · 유진수 · 박주형 · 김기환 · 조아라 · 조준식 · 윤재호 · 신동협 · 정인영 · 곽지혜*

태양광연구소, 한국에너지기술연구원, 대전광역시, 34129

Performance Parameters of a Bifacial PV Device and Accurate Measurement Method for the Parameters

Seungkyu Ahn · SeJin Ahn · Young Joo Eo · Jinsu Yoo · Joo Hyung Park · Kihwan Kim · Ara Cho · Jun-Sik Cho · Jae-Ho Yun · Donghyup Shin · Inyoung Jung · Jihye Gwak*

Photovoltaic Laboratory, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 34129, Korea

ABSTRACT: We have examined the issues on the measurement of bifacial photovoltaic(PV) devices that should be considered in order to ensure a measurement accuracy beyond a certain level and the comparability between the bifacial PV devices. Based on the results of various experiments and previous studies, solutions for these measurement issues are suggested. The most significant technical issues in the performance measurement of the bifacial PV devices are 1) elimination of the effect due to the light reflection on the sample holder surface and 2) the measurement of the expected power generation gain in outdoor operation. The effect due to the light reflection on the sample holder surface can be eliminated by using an anti-reflective sample holder. In case of a reflective sample holder, if the bifacial device have a linear characteristic with respect to the irradiance of incident light, it has been confirmed (through some previous studies and additional experiment) that exact measurement results can be obtained by the correction of the measurement data. In addition, it was also confirmed that the expected power generation gain in the outdoor operation can be obtained by three different methods along with the basic concepts of the bifaciality coefficient, the albedo, and the effective front irradiance.

Key words: Performance evaluation, Bifacial PV device, Performance parameters

1. 서론

태양광발전의 경제성 확보를 위한 저가, 고효율 태양전지 개발이 전 세계적으로 활발히 이루어지고 있다. 이러한 개발 흐름 속에, 가격 경쟁력을 갖춘 상용 화합물 박막 태양전지가 시장에 등장하였으며¹⁻³⁾, 유기, 염료, 및 Perovskite 물질을 기반으로 한 새로운 개념의 태양전지들 또한 속속 개발이 진행되고 있다⁴⁻⁶⁾. 한편 이러한 신개념의 태양전지 기술개발에 대응해서, 현재 태양광발전이 가장 널리 이용되고 있는 전지 기술인, 결정질 실리콘 태양전지 또한 그동안 많은 기술적 진보를 이루어왔다. 다양한 전극 구조^{7,8)}와 패시베이션(passivation) 기술들이 개발되었으며^{9,10)}, 그 외형에 있어서도 전통적인 단면형 버스바(bus-bar) 구조에서 탈피하여, 모든 전극을 후면에 배치한 후면전극형 태양전지⁸⁾나, 태양전지의 앞면과 뒷면을 모두 발전에 사용하는 양면형 태양전지^{9,10)} 등이 개발되었다.

특히 이러한 기술들 중에서 양면형 태양전지 기술은, 태양전지의 전면으로 들어오는 입사광뿐만 아니라 설치 지면에서 반사된 빛까지 발전에 이용하여 태양광발전 모듈이 출력하는 단위면적당의 전력 밀도를 높임으로서, 태양광 발전소의 설치면적과 관련된 비용까지 줄일 수 있기 때문에¹¹⁾ 최근 들어서 더 많은 주목을 받고 있다. 그러나 양면형 태양전지 기술은 아직까지 그 성능을 정확히 측정하기 위한 국제표준이 정립되어있지 않으며, 따라서 서로 다른 양면형 태양전지/또는 모듈 간에 성능을 비교하거나 나아가 양면형 태양광모듈의 야외에서의 실제 발전 성능을 예측하기가 쉽지 않다.

본 연구에서는, 일정 수준이상의 측정 정밀성과 소자 간의 상호 비교 가능성을 확보하기 위해서 고려되어야할, 양면형 태양광발전 소자 측정의 이슈들을 살펴보고, 다양한 실험 결과들을 토대로 이러한 측정이슈에 대한 해결 방안을 제시한다.

*Corresponding author:

Received August 21, 2017; Revised September 19, 2017;

Accepted September 20, 2017

© 2017 by Korea Photovoltaic Society

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License

(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>)

which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

2. 양면형 태양광발전 소자 측정의 기술적 이슈들

2.1 시료거치대의 반사

앞에서도 언급했듯이, 양면형 태양전지는 태양전지의 전면 뿐만 아니라 후면으로 입사하는 빛도 발전에 이용한다. 따라서 전면의 광발전 특성(photovoltaic characteristics)뿐만 아니라 후면의 광발전 특성 또한 양면형 태양전지의 성능을 평가하는데 매우 중요한 요소이다. 양면형 태양전지의 전/후면 광발전 특성을 정확히 측정하기 위해서는, 전통적인 단면형 태양전지 측정에서 고려되는 사항들 이외에, 추가적으로 시료거치대의 반사 문제를 해결해야만 한다.

일반적으로, 단면형 태양전지의 경우 후면의 전체 면이 광학

적으로 불투명한 금속 재질의 전극으로 덮여 있다. 따라서 단면형 태양전지의 전면으로 입사한 빛은 후면의 전극을 투과하지 못하며, 반대로 후면으로 입사한 빛은 후면전극에 막혀서 광흡수층에 도달하지 못한다. 그러나 양면형 태양전지의 경우, 전면으로 입사한 빛의 일부가 태양전지를 투과하여 후면으로 방출될 수 있으며, 후면으로 입사한 빛 또한 광흡수층에 도달하여 흡수될 수 있다.

양면형 태양전지의 이러한 투광성은 전/후면의 IV 특성곡선 측정이나, 분광응답도 측정에 있어서 측정결과를 왜곡 시키는 주요한 원인이 될 수 있다. 예를 들어, 파장에 따라 일정수준 이상의 반사율을 갖는 금속성 시료거치대를 사용할 경우, 양면형 태양전지의 한쪽 면으로 입사한 빛 중의 일부가 태양전지를 투과한 후 시료거치대에서 반사되고, 이 반사된 빛이 다시 양면형 태양전지의 반대쪽 면을 통해 광흡수층으로 흡수됨으로서, 측정되는 광전류가 실제보다 과대평가(overestimation) 된다.

Fig. 1은 일반적인 결정질 실리콘 양면형 태양전지의 분광응답도와 투과도(a), 금-도금된 시료거치대의 반사도(b), 그리고 실내용 솔라시뮬레이터의 분광조사강도(SI; Spectral Irradiance)와 양면형 태양전지를 통과하여 금-도금된 시료거치대의 표면에서 반사된 빛의 분광조사강도(c)를 보여준다. 여기서 Fig. 1-(c)에 나타난 반사광의 분광조사강도는 같은 그림에 있는 한국에너지기술연구원의 XHS-220S1(SAN-EI Inc.) 고근사솔라시뮬레이터의 전면 분광조사강도 데이터 및 Fig. 1-(a)와(b)의 데이터를 이용하여 계산된 값이다.

그림에서 보듯이 양면형 태양전지의 한쪽 면의 IV 특성곡선이나 분광응답도를 측정할 때, 반사율이 높은 금속성 시료 거치대를 사용할 경우 상당히 많은 양의 빛이 반대쪽 면으로 입사되는 것을 알 수 있으며, 이러한 반사광의 흡수는 측정결과 왜곡의 원인이 된다.

2.2 야외 동작 시의 전력생산이득(power generation gain) 측정

양면형 태양전지가 전면과 후면을 모두 발전에 이용함으로써 얻는 가장 큰 이점은, 양면형 태양전지를 모듈화 하여 야외에서 동작 시킬 때 동일한 설치 면적에서 전통적인 단면형 태양광 모듈 보다 더 큰 전력 생산을 기대할 수 있다는 점이다. 그런데, 이러한 야외 동작 시의 전력생산이득(power generation gain)은 모듈의 설치 방법이나 주위 환경(특히 설치면 반사율(albedo))에 크게 영향을 받는다. 따라서 야외 동작 시의 전력생산이득을 정량화 하고, 이를 통하여 서로 다른 양면형 태양전지나 모듈간의 야외 발전 성능을 비교할 수 있도록 하는, 기준 측정법을 만드는 것은 매우 중요하다.

이와 관련한 연구들 역시 지난 수년간 활발히 진행이 되어왔으며¹²⁻¹⁴⁾, 현재는 그 결과들을 정리하여 국제 전기기술 위원회(International Electrotechnical Commission; IEC)에서 국제 표

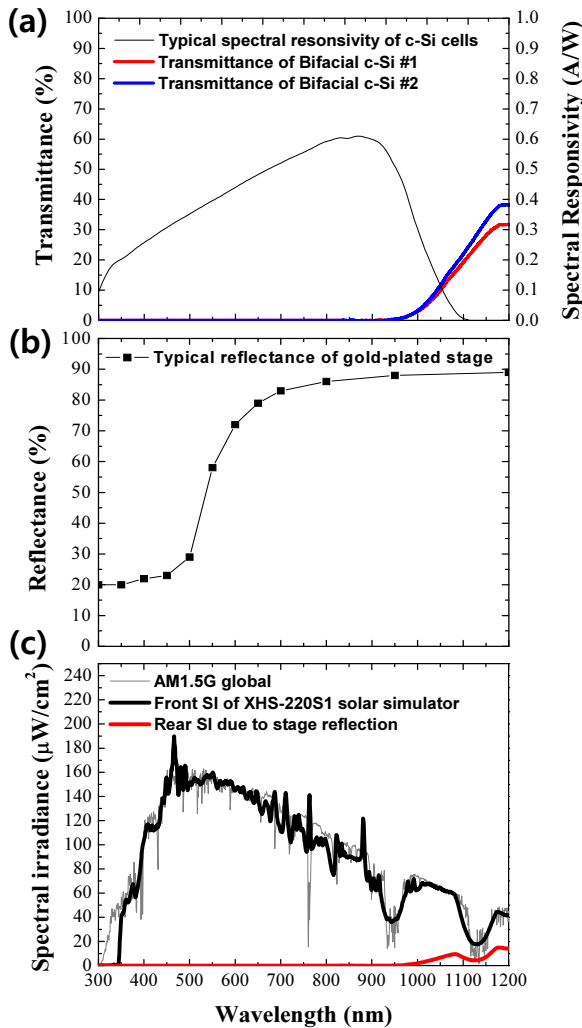


Fig. 1. Typical spectral responsivity and transmittances of a crystalline silicon bifacial solar cell, (b) typical reflectance of a gold plated sample stage, and (c) the spectral irradiance of a high-fidelity solar simulator light and that of the simulator light transmitted into the bifacial solar cell and reflected from the surface of the gold plated sample stage.

준화가 진행 중이다¹⁵⁾. 언급된 기술적 이슈들에 관한 해결방안 및 표준화 진행방향은 다음 장에서 논의하도록 하겠다.

3. 기술적 이슈에 대한 해결책

3.1 시료거치대의 반사 문제에 대한 해법

시료거치대의 반사로 인한 양면형 태양전지 측정 데이터의 왜곡을 해결하는 가장 쉬운 방법은 반사율이 매우 낮은 무반사성 시료거치대를 이용하는 것이다. 그러나 실제 실험실 환경에서는 양면형 태양전지의 전면과 후면을 동시에 전기적으로 접촉한 상태에서 측정을 진행해야 하므로, 무반사성 시료거치대를 이용하기가 쉽지 않다(일정 수준 이상의 전기 전도도를 가진 금속 물질들은 모두 입사광에 대한 반사성이 있으며, 이것이 금속 고유의 광택으로 나타난다는 점을 상기하자). 따라서 양면형 태양전지의 한쪽 면과 우수한 전기 접촉을 하면서도 샘플 거치면이 무반사성을 갖도록 특수하게 설계/제작된 측정 JIG¹⁵⁾를 제외하고는, 대부분의 실험실에서 시료거치대의 반사와 관련된 이슈를 해결하기가 쉽지 않다.

그러나 이러한 이슈에 대한 해결방법이 전혀 없는 것은 아니며, 관련해서 Hohl-Ebinger et al.¹⁶⁾ 및 Shimura et al.¹⁷⁾에 의해 체계적으로 연구가 되었다. 이들은 연구를 통해서 표준시험조건(Standard Test Conditions; AM 1.5G 기준 스펙트럼, 조사강도 1000 W/m², 시료온도 25°C인 조건)에서 양면형 태양전지 전면의 IV 특성곡선이나 분광응답도 측정 시, 시료거치대의 반사에 의해서 측정값이 왜곡되는 정도를 정량화하는 관계식을 제시하였으며, 그 식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} SR_{meas}(\lambda) &= SR_{front}(\lambda) + SR_{rear, contrib}(\lambda) \\ &= SR_{front}(\lambda) + T_{cell}(\lambda)R_{chuck}(\lambda)SR_{rear}(\lambda) \end{aligned} \quad (1)$$

$$I_{SC\ rear, contrib} = \int E(\lambda) T_{cell}(\lambda) R_{chuck}(\lambda) SR_{rear}(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

식에서 $SR_{meas}(\lambda)$, $SR_{front}(\lambda)$, $SR_{rear}(\lambda)$ 는 각각, 양면형 태양전지 전면의 분광응답도 측정값, 전면의 실제 분광응답도 및 후면의 실제 분광응답도를 나타내며, $T_{cell}(\lambda)$, $R_{chuck}(\lambda)$, $E(\lambda)$ 는 각각, 양면형 태양전지 전면의 투과율, 시료거치대 표면의 반사율 및 입사광의 분광 조사강도를 나타낸다. $SR_{rear, contrib}(\lambda)$ 와 $I_{SC\ rear, contrib}$ 는 각각, 분광응답도 및 단락전류 측정값에 대한 시료거치대에서 반사하여 후면으로 재입사한 빛의 기여분을 나타낸다.

위에서 제시된 식(1)과(2) 그리고 ref. 18)의 IV 특성곡선 보정 식을 이용할 경우, 표면 반사율이 큰 시료거치대를 이용해서 측정된 분광응답도 및 IV 특성곡선 측정 데이터를 보정하는 것

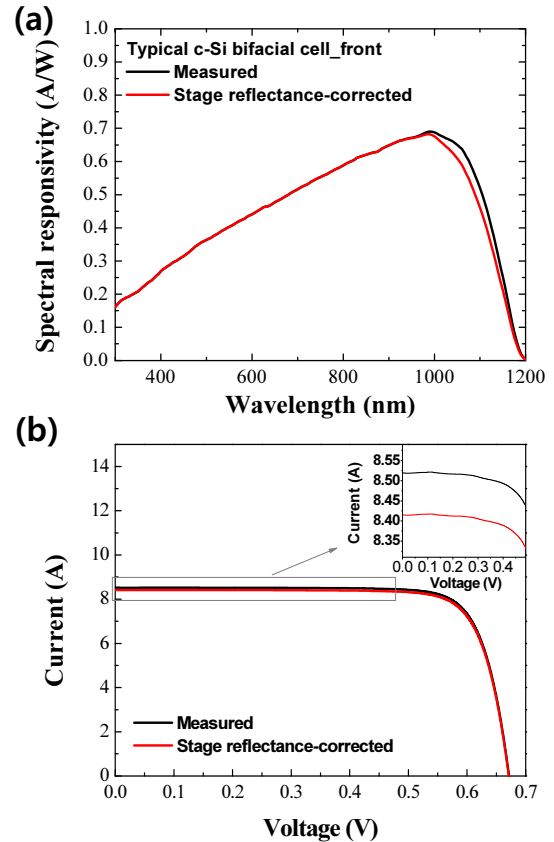


Fig. 2. (a) the measured and corrected front side spectral responsivities of a 6 inch N-type bifacial c-Si solar cell and (b) the measured and corrected front side IV curves of another 6 inch N-type bifacial c-Si solar cell. Here, the spectral responsivity measurement was performed using a copper sample stage, and its correction was performed based on the Eq. (1). Similarly, the IV curve measurement was performed using a gold-plated sample stage and its correction was performed based on the Eq. (2) and the equations in ref 18).

이 가능하다. Fig. 2는 이러한 분광응답도 측정값 및 IV 특성곡선 측정데이터를 보정한 모습을 보여준다.

한편, 위의 식(1), (2) 및 ref. 18)의 관계식들은 전/후면으로 입사하는 입사광의 조사강도에 대해서 선형적인(linear) 특성변화를 보여주는 양면형 태양전지에 유효하며, 비-선형성을 갖는 태양전지에는 유효하지 않다는 것에 유의해야 한다. Fig. 2에서 보여주는 데이터들 또한 입사광의 조사강도에 대해서 선형적인(linear) 특성을 가진 결정질 실리콘 양면형 태양전지 샘플에서 얻은 것이다.

다행스러운 점은, 현재 결정질 실리콘 태양전지 기술이 성숙됨에 따라, 특별한 경우를 제외하고는 대부분의 양산형 결정질 실리콘 양면형 태양전지가 약 400 W/m²부터 4000 W/m²의 조사강도 범위에서 전/후면 입사광에 대해 선형적인 특성변화를 보이며¹⁹⁾, 따라서 위 식의 적용이 가능하다는 것이다. 반면, 선형성이 입증되지 않은 태양전지의 경우 위 식들을 적용할 수 없

며, 이때는 반사율이 매우 낮은 무반사성 시료거치대를 사용하는 것이 최선의 선택이 될 것이다.

3.2 야외 동작 시의 전력생산이득(power generation gain)

측정 방법

양면형 태양전지 또는 태양광모듈의 야외 동작 시 전력생산 이득을 정량화하기 위해서는, 기존의 단면형 태양광발전 소자 성능측정에서 요구되던 성능변수 이외에, 몇 가지 추가적인 성능변수들의 측정이 요구된다. 양면형 태양광발전 소자의 양면성 계수(bifaciality coefficient)나, 주어진 설치면 반사율에서의 기대 최대출력 (expected maximum power), 또는 이득 효율 (gain-efficiency) 등이 그것이며, 이와 관련한 연구는 Shingh *et al.*¹³⁾에 의해 정립되었다.

양면형 태양광발전 소자의 양면성 계수 φ 는 표준시험조건 (STC) 하에서 측정된 양면형 태양광발전 소자 전/후면의 IV 특성곡선으로부터 계산할 수 있으며, 다음과 같이 정의된다.

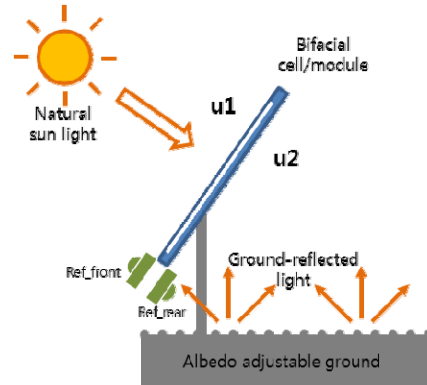
$$\varphi_{I_{sc}} = \frac{I_{sc,r}}{I_{sc,f}}, \varphi_{P_{max}} = \frac{P_{max,r}}{P_{max,f}}, \varphi_{V_{oc}} = \frac{V_{oc,r}}{V_{oc,f}}, \text{ etc.} \quad (3)$$

식에서 $\varphi_{I_{sc}}, \varphi_{P_{max}}, \varphi_{V_{oc}}$ 는 각각, 양면형 태양광발전 소자의 단락전류(I_{sc})의 양면성 계수, 최대출력(P_{max})의 양면성 계수 그리고 개방전압(V_{oc})의 양면성 계수를 나타내며, 색인 f 와 r 은 각각, 양면형 태양광발전 소자의 전면과 후면을 나타낸다. 양면성 계수는 일반적인 단면 조사용 솔라시뮬레이터를 이용해서도 도출할 수 있으며, 다만 이를 위해 양면형 태양광발전 소자의 전면과 후면 IV 특성곡선을 측정할 때에는, 3.1절에서 언급했듯이 반사율이 매우 낮은 무반사성 시료거치대를 이용하거나, 그러지 못할 경우 시료거치대의 반사를 고려해서 측정된 IV 특성곡선을 보정해 주어야 한다.

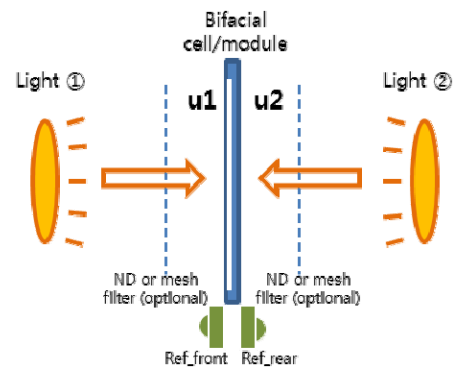
주어진 설치면 반사율에서 양면형 태양광발전 소자의 기대 최대출력(expected maximum power; $P_{max, BiFi}$) 또는 이와 유사한 개념인 이득 효율(gain-efficiency)을 측정하기 위해서는 좀 더 복잡한 시험 장치 혹은 절차들이 필요하다. 이를 측정하는 방법으로는 현재까지 약 3가지 정도가 알려져 있다. 첫 번째는 자연태양광을 이용한 측정법이며, 두 번째는 방사광의 조사각도를 조절 가능한 양면 조사용 솔라시뮬레이터를 이용하는 방법, 그리고 마지막은 조사각도 조절이 가능한 단면 조사용 솔라시뮬레이터를 이용하는 방법이다.

Fig. 3은 이러한 3가지 측정방법의 개념도를 보여준다. 그림에서 (a), (b), (c)는 각각, 자연 태양광을 이용한 방법, 조사각도 조절이 가능한 양면 조사용 솔라시뮬레이터를 이용한 방법, 그리고 조사각도 조절이 가능한 단면 조사용 솔라시뮬레이터를 이용한 방법 등을 보여주며, 여기서 (a)와 (b)는 원리적으로 전/후면으로 입사하는 입사광의 조사각도에 대해서 비-선형성

(a) Natural sunlight



(b) Irradiance adjustable dual light source



(c) Irradiance adjustable single light source without Back reflection (G_E method)

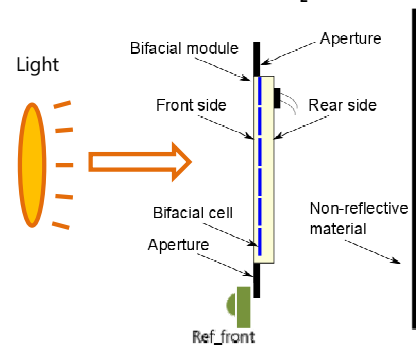


Fig. 3. Schematic views of the methods to measure the expected maximum power of a bifacial PV device at a given albedo ($P_{max, BiFi}$). (a) the method using the natural sunlight, (b) the method using a solar simulator with adjustable irradiance levels for double-side illumination, and (c) the method using a solar simulator with adjustable irradiance levels for single-side illumination.

(non-linearity)을 갖는 양면형 소자에도 적용이 가능한 방법이지만, (c)는 입사광의 전/후면 조사각도에 대해서 선형적인 특성 변화를 보여주는 소자(즉, 양면 조사 효과(bifacial illumination effect)²⁰⁾가 없는 소자)에만 적용이 가능한 방법이다. 다만 앞에서도 언급했듯이, 특별한 경우를 제외하고는 대부분의 양산형 결정질 실리콘 양면형 태양전지가 관심 조사각도 영역에서 전/

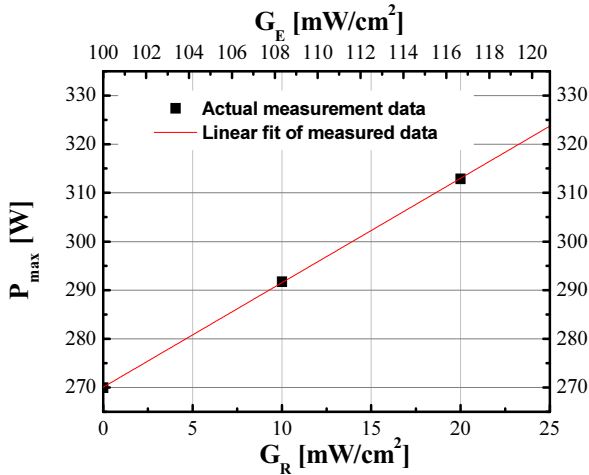


Fig. 4. Example of the data processing to derive the expected maximum power at a given albedo ($P_{\max, BiFi}$). In the case of a PV device having the linearity with respect to the incident front & rear irradiance, the $P_{\max, BiFi}$ at given G_R can be calculated by the linear interpolation of the measured P_{\max} values.

후면 입사광의 조사강도에 대해 선형적인 특성변화를 보이며, 따라서 (c)의 방법이 적용 가능하다.

한편, Fig. 3의 방법들을 적용해서 양면형 태양광발전 소자의 설치면 반사율에 따른 기대 최대출력 $P_{\max, BiFi}$ 을 도출하기 위해서는 다음과 같은 절차에 따라야 한다. 우선 식 (3)을 통해 계산된 양면성 계수들 중에서 $\varphi_{I_{SC}}$ 와 $\varphi_{P_{\max}}$ 중에서 작은 값을 선택하여, 이를 소자의 최종 양면성 계수 φ 로 선택한다. 즉,

$$\varphi = \min(\varphi_{I_{SC}}, \varphi_{P_{\max}}) \quad (4)$$

다음으로, 양면형 태양광발전 소자의 전면으로 조사강도 1000 W/m^2 의 빛이 입사하고, 이에 더해 후면으로는 다양한 후면 조사강도 G_R 의 빛이 입사하는 조건을 형성하여, 양면형 태양광발전 소자의 IV 특성곡선을 측정한다. 이때, 후면으로 입사하는 빛의 조사강도 G_R 은 최소 3개 이상의 서로 다른 값이 되어야 하며, 일반적으로 약 $0 \sim 300 \text{ W/m}^2$ 사이의 값들이 권장된다.

만약 (c)의 방법을 이용할 경우에는, 양면형 태양광발전 소자의 후면으로 기생 반사광(parasitic reflection light)이나 떠돌이광(stray light)이 입사하는 것을 차단¹⁵⁾한 상태에서, 소자의 전면으로 1000 W/m^2 이 입사하고 후면으로는 G_R 이 입사할 때와 동일한 단락전류가(또는, 최대출력이) 출력되도록 하는, 유효 조사강도 G_E 의 빛을 소자의 전면에서 조사한 상태에서 IV 특성곡선 측정을 수행한다. 이러한 유효 조사강도 G_E 는 다음의 관계식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$G_E = 1000 \text{ W/m}^2 + \varphi \cdot G_R \quad (5)$$

다양한 후면 조사강도 조건(또는, 이와 대등한 전면 조사조건)에서의 IV 특성곡선 측정들이 완료되면, 후면 조사강도 G_R 또는 전면 유효 조사강도 G_E 대비 P_{\max} 의 변화를 보여주는 그래프를 그린 후(Fig. 4 참조), 일련의 데이터를 선형 내삽(linear interpolation)하여, 원하는 설치면 반사율에서의 기대 최대출력 $P_{\max, BiFi}$ 을 도출한다. 이러한 선형 내삽법에 의한 기대 최대출력 추정이 충분히 작은 불확도를 가지려면, 앞에서 언급한 바와 같이 최소 3개 이상의 G_R 조건(또는 이에 대응하는 G_E 조건)에서 측정된 데이터들이 사용되어야 하며, 측정되는 조사강도 조건의 수가 많을수록 내삽 추정의 정밀성이 높아진다. 참고로, 이러한 $P_{\max, BiFi}$ 추정 절차는 현재 국제표준화가 진행되고 있는 것으로서¹⁵⁾, 추후 전 세계적인 의견 수렴을 거치는 과정에서, 세부 절차들이 일부 수정될 가능성도 있으나, 그 큰 틀은 현재와 같이 유지될 것으로 예상된다.

4. 결론

일정 수준이상의 측정 정밀성과 소자 간의 상호 비교 가능성을 확보하기 위해서 고려되어야 할, 양면형 태양광발전 소자 측정의 이슈들을 살펴보았으며, 다양한 실험 결과들을 토대로 이러한 측정이슈에 대한 해결 방안을 제시하였다. 양면형 태양광발전 소자 측정에 있어서 가장 큰 문제가 되는 기술적 이슈들은 시료거치대의 반사 문제와 야외 동작 시 기대되는 전력생산이득(power generation gain)을 측정하는 문제이다.

시료거치대의 반사 문제를 해결하는 최선의 방법은 반사율이 매우 낮은 무반사성 시료거치대를 사용하는 것이지만, 실제 실험 상황에서는 이 방법을 사용할 수 없는 경우도 많다. 그러나 이렇게 무반사성 시료거치대를 사용할 수 없는 상황에서도, 양면형 태양광발전 소자의 광발전 특성이 전/후면 입사광의 조사강도에 대해서 선형적이기만 하다면, 측정된 데이터들을 보정하여 올바른 측정결과를 얻을 수 있다는 것을, 앞선 선행연구들과 몇 가지 추가적인 실험을 통해 확인할 수 있었다.

아울러, 야외 동작 시 기대되는 전력생산이득을 측정하기 위해서는 양면성 계수(bifaciality coefficient)나 설치면에서 반사되어 모듈의 후면으로 입사하는 빛의 조사강도 G_R 및 전면 유효 조사강도 G_E 등의 개념을 이해할 필요가 있으며, 이러한 개념들을 이용하면 3가지 다른 방법을 통해서 야외 동작 시 기대할 수 있는 전력생산이득을 도출할 수 있다는 것을 확인하였다.

야외 동작 시 1000 W/m^2 의 전면 입사광에 대한 기대 최대출력 $P_{\max, BiFi}$ 는, 양면형 태양광발전 소자가 설치면에서 반사된 빛을 흡수함으로써, (기존의 단면형 태양광발전 소자와 비교하여) 얼마나 많은 발전량 이득을 얻을 수 있는지를 판단하는 지표로 사용될 수 있다.

후 기

본 연구는 대한민국 산업통상자원부 산하 한국에너지기술평가원(KETEP)의 에너지기술개발사업(No.20163010012430) 및 한국에너지기술연구원의 주요사업(B7-2421-01)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

1. First Solar Press Release. "First Solar achieves world record 18.6 % thin film module conversion efficiency", 15 June 2015.
2. Sugimoto, H. "High efficiency and large volume production of CIS-based modules", *40th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Denver, 2014.
3. <http://www.miasole.com> (accessed 01 August, 2017)
4. Hosoya, M., Oooka, H., Nakao, H., Gotanda, T., Mori, S., Shida, N., Hayase, R., Nakano, Y., Saito, M., "Organic thin film photovoltaic modules", *Proceedings of the 93rd Annual Meeting of the Chemical Society of Japan*, pp. 21-37, 2013.
5. Komiya, R., Fukui, A., Murofushi, N., Koide, N., Yamanaka, R., Katayama, H., "Improvement of the conversion efficiency of a monolithic type dyesensitized solar cell module", *Technical Digest, 21st International Photovoltaic Science and Engineering Conference*, Fukuoka, 2011.
6. Yang, W.S., Noh, J.H., Jeon, N.J., Kim, Y.C., Ryu, S., Seo, J., Seok, S.I., "High-performance photovoltaic perovskite layers fabricated through intramolecular exchange", *Science*, 348(6240), pp. 1234-1237, 2015.
7. Mehlich, H., Kirchhoff, F., Leonhardt, M., Hausmann, J., Burkhardt, S., Waltinger, A., König, M., Grimm, M., Belgardt, C., Yao, Y., Bonnet-Eymard, B., Beyer, S. Gragert, M., Söderström, T. "Investigation on half cells for heterojunction modules", *32nd European PV Solar Energy Conference and Exhibition*, Munich, 2016.
8. Tomasi, A., Paviet-Salomon, B., Lehmann, M.J., Lachenal, D., Geissbuhler, J., Sief, J.P., Barraud, L., Descoedres, A., Christmann, G., Badel, N., Watanabe, H., Faes, A., Nicolay, S., Strahm, B., Despeisse, M., De Wolf, S., Ballif, C., "22.9% simplified back-contact silicon heterojunction solar cell", *32nd European PV Solar Energy Conference and Exhibition*, Munich, 2016.
9. Chen, S., Liu, H., Chang, H., Chiu, Y., Wang, Y., Lin, Y., Yu, S., Lih, W., Du, C. "Bifacial solar cell fabricated by PERC process for mass production", *32nd European PV Solar Energy Conference and Exhibition*, Munich, 2016.
10. Wu, C., Ni, P., Wei, Q., Lu, J., Lian, W., Hu, Y., Liu, X., Zhang, S., "The bifacial nPERT solar cell coupling boron spin-on with POCl₃ diffusion and its glass-glass module performance", *32nd European PV Solar Energy Conference and Exhibition*, Munich, 2016.
11. Hezel, R., "A novel high-efficiency reare-contact solar cell with bifacial sensitivity", *High-Efficiency Low-cost Photovoltaics. Springer Series in Optical Sciences*, 140, pp. 65-93, 2009.
12. Duran, C., Deuser, H., Harney, R., Buck, T. "Approaches to an improved IV and QE characterizaion of bifacial silicon solar cells and prediction of their module performance", *Energy Procedia*, 8, pp. 88-93, 2011.
13. Singh, J.P., Walsh, T.M., Aberle, A.G., "A new method to characterize bifacial solar cells", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 22, pp. 903-909, 2014.
14. Singh, J.P., Aberle, A.G., Walsh, T.M., "Electrical Characterization method for bifacial photovoltaic modules", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 127, pp. 136-142, 2014.
15. IEC/TS 60904-1-2. "Photovoltaic devices - part 1-2: Measurement of current-voltage characteristics of bifacial photovoltaic (PV) devices" (to be published)
16. Hohl-Ebinger, J., Warta W. "Bifacial solar cells in STC measurement." *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Valencia. 2010.
17. Shimura, H., Sasaki, A., Ohshima, H., Hishikawa Y. "Accurate performance evaluation of conventional and bifacial crystalline silicon solar cells", *6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Kyoto, 2014.
18. IEC 60891 Ed. 2 "Photovoltaic devices - Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics"
19. Ohtsuka, H., Sakamoto, M., Koyama, M., Tsutsui, K., Uematsu, T., and Yazawa Y., "Characteristics of bifacial solar cells under bifacial illumination with various intensity levels", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 9, pp. 1-13, 2001.
20. McIntosh, K.R., Honsberg, C.B., Wenham, S.R., "The impact of rear illumination on bifacial solar cells with floating junction passivation", *Proceeding of the 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion*, pp.1515-1518, 1998.