양면수광형 태양전지 성능평가를 위한 이중광원활용 측정 방법

김수민
태양광테스트베드센터
구미전자정보기술원

정상훈
태양광테스트베드센터
구미전자정보기술원

김용배
태양광테스트베드센터
구미전자정보기술원

최규석
태양광테스트베드센터
구미전자정보기술원

초 록

최근 산업용 태양광 발전시장에서 주목 받고 있는 양면수광형 태양전지의 경우 지면 반사광(Albedo)의 영향으로 추가적인 광생성(Photogeneration)이 발생하여 태양전지의 전환효율(Conversion efficiency)을 증가시켜 주기 때문에 시장에서 수요가 증가하고 있다. 이러한 장점에도 불구하고 몇 가지 문제에 대한 논의가 진행되고 있는데 그 중에서 가장 중요한 부분은 양면수광형 태양전지의 효율을 정의하는 부분이다. 양면수광형 태양전지의 효율을 정의하기 위하여 여러 가지 연구가 진행되었지만 현재까지 국제적인 기준이 제정되지 않아 정확한 효율의 정의가 어려운 상황이다. 양면수광형 태양전지의 성능 확인을 위한 측정 방식은 단일광원(Single light source) 조사 방식, 단일광원 분할(Single light splitter) 조사 방식, 이중광원(Double light source) 조사 방식으로 나눌 수 있다. 본고에서는 이중광원 조사 방식을 이용하여 후면 반사광의 광원을 개별적으로 정의함으로써 실제 발전 환경과 동일한 조건의 광량 정의를 통하여 다양한 지면 반사 조건에 대하여 정확한 태양전지의 전환효율을 측정하고 이를 통하여 다이오드 특성을 추출할 수 있는 측정 방식에 대하여 논하고자 한다.

서 론

최근 결정질 실리콘 태양전지의 효율이 mono-PERC를 기준으로 21% 이상을 달성하며, 태양전지 모듈의 가격은 0.34$/Wp에 도달하면서 향후 점진적으로 감소될 것으로 전망되고 있다.[1] 이러한 상황에서 많은 태양광 기업에서는 균등화발전비용(levelized cost of electricity, LCOE)의 절감을 위하여 태양전지의 전환효율(Power conversion efficiency)을 높일 수 있는 기술개발을 집중하였다. 하지만 태양전지의 효율이 이론적으로 달성 가능한 쇼클리-콰이저 한계(Shockley-Queisser limit) 가까이 도달하게 됨에 따라 효율 증진을 위한 투자에 비해 그 상승폭이 현저하게 낮아지게 되는 문제점이 발생하였다.[2] 이러한 문제를 해결하기 위하여 최근에는 양면수광형 태양전지(Bifacial solar cell)의 개념이 주목 받고 있는데, 양면수광형 태양전지는 1960년대부터 고안되었으며 다양한 형태로 적용되었지만 최근에 태양광 발전 효율을 높이는 수단으로 연구가 집중되고 있다.[3]

양면수광형 태양전지는 일반적으로 사용되는 후면전계형 태양전지(Back surface field, BSF)와는 다르게 태양광의 입사 방향이 전면만 사용하는 것이 아니라 후면의 전극 형태를 전면과 유사하게 제작하여 후면의 빛도 동시에 활용함으로써, 태양전지 내부의 광생성을 연속적으로 유지하는 원리를 가진다. 이러한 특성으로 인하여 양면수광형 태양전지를 이용하여 제작되는 모듈의 경우 기존과는 다르게 후면 봉지재로 사용되는 Back sheet 대신에 유리를 이용하는 G2G(Glass-to-glass) module 형태로 제작되게 된다. 이러한 특성으로 인하여 양면수광형 태양전지 모듈은 p-type PERL/PERC 모듈에 비하여 동일한 조건(climate, area, albedo, etc)의 지역에 설치했을 경우 더 많은 전력을 생성할 수 있게 된다.

일반적으로 태양전지의 성능과 품질을 평가하기 위해서는 국제전기공학위원회(International Electrotechnical Commission, IEC) 에서 제정된 표준 측정 조건(Standard test condition: STC, 1000 W/m^2, AM1.5G, 25°C)을 유지하는 실내의 환경에서 측정되어야 하며, 일반적으로 사용되는 상용 BSF 태양전지의 경우 IEC 60904 규격이 적용된다.[4]

양면수광형 태양전지의 경우 옥외 설치 조건에서 후면광 반사(Albedo)로 인한 전면과 후면의 빛이 동시에 조사되기 때문에 이중광원 형태에 대한 태양전지의 반응 특성을 정의할 필요가 있다. 이러한 옥외 조건과 실내 조건과의 괴리로 인하여 양면수광형 태양전지 제조사는 후면 반사광의 크기에 따른 태양전지 전환 효율의 차이로 인하여 표준 측정법에 대한 정의가 어려운 문제를 겪는다.

이러한 표준 측정법의 부재로 인하여 대부분의 양면수광형 태양전지 제조업자는 전면으로 주입되는 광원을 이용한 STC 조건에서 측정된 전기적 특성을 보고하며, 태양전지의 전면과 후면을 개별적으로 측정하여 전환효율과 발전전력을 후면에서 조사된 빛의 비율에 따른 선형으로 계산하여 사용한다.[5,6] 이러한 방식은 one-diode 를 가정한 이론적인 예측 모델을 이용하여 양면수광형 태양전지의 성능을 1% 미만의 오차로 정교하게 계산할 수 있다고 주장하고 있다.[7-9] 하지만 양면수광형 태양전지의 효율과 전력은 단순히 전면과 후면의 효율을 더하는 방식의 광원 증가에 따라 정확한 선형반응을 보이지 않기 때문에 최종적인 발전 전력을 계산함에 있어 부정확하다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 태양전지의 전면과 후면에 태양광을 동시에 조사한 상태에서 광전류-전압(Light Current-Voltage, LIV) 분석을 수행하는 것이 바람직하기 때문에 몇몇 연구자들은 이러한 특성을 이용하여 양면수광형 태양전지의 성능을 분석하기 위하여 노력하였다.[7,8] 후면광원을 정의하여 측정하기 위하여 다양한 방법들이 시도되었지만 측정 방식에 따라 분류하면 단일광원 분할 조사 방식(Single light source split)과 이중광원 조사 방식(Double light source)으로 나눌 수 있다.

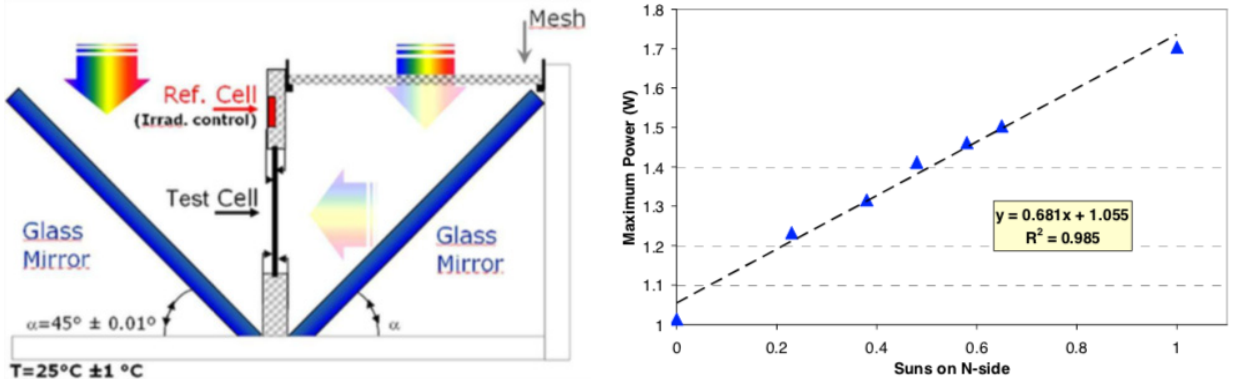
단일광원 분할 조사 방식의 경우 광원 분할 방법에 따라 양면수광형 태양전지가 발전할 수 있는 특정 옥외조건을 유사하게 정의할 수 있다는 점에서는 장점을 가진다. 그림 1(a)에 나타낸 바와 같이 측정하고자 하는 태양전지

를 수직으로 거치한 뒤 동일 광원을 활용하여 전면에는 AM1.5G One-SUN 스펙트럼이 주입되고 후면에는 지면조건(Ground condition) 과 유사한 반사광원을 생성하기 위하여 메쉬를 통한 빛의 세기를 감소시키는 방식을 활용한다. 이러한 방식의 단일광원 분할 조사 측정법은 기존의 태양광 모사 장치의 변경이 없이 태양전지의 지그만 변경하여 분석이 가능하다는 장점이 있어 초기에 많은 시도가 있었다. 하지만 모의 태양광 조사 장치의 조사면적에 모든 태양광 강도가 일정하지 않으며 지면 반사의 특성을 정확히 조절하기 어렵기 때문에 측정 결과에 있어 몇 가지 문제점을 드러내고 있다. 그림 1(b)에서 확인할 수 있는 것과 같이 태양전지 후면으로 입사되는 광원의 조절이 정확히 정의되기 어려운 간격을 가지는 것을 알 수 있으며, 광원의 크기가 증가함에 따라 태양전지의 출력이 정확하게 선형으로 이루어 지지 않음을 알 수 있다.

이러한 문제들에 대하여 양면수광형 태양전지의 성능을 정확하게 분석하기 위하여 본고에서는 태양전지의 전면과 후면에 독립적인 광원을 정의하여 실제 옥외 설치 조건과 유사한 형태로 성능 분석을 수행하는 이중광원 측정법에 대하여 논하고자 한다.

본 론

이중광원 조사 방식을 이용한 태양전지 측정방법을 시험하기 위하여 그림 2(a)와 같은 시스템을 구축하였다. 시



(a) (b)

그림 1. (a) 단일광원 분할 양면수광형 태양전지 측정 구조, (b) 후면광원 크기에 따른 태양전지 출력 변화(출처: (a), (b) Design of a special set-up for the IV characterization of bifacial photovoltaic solar cells, EUPVSEC, 2008)

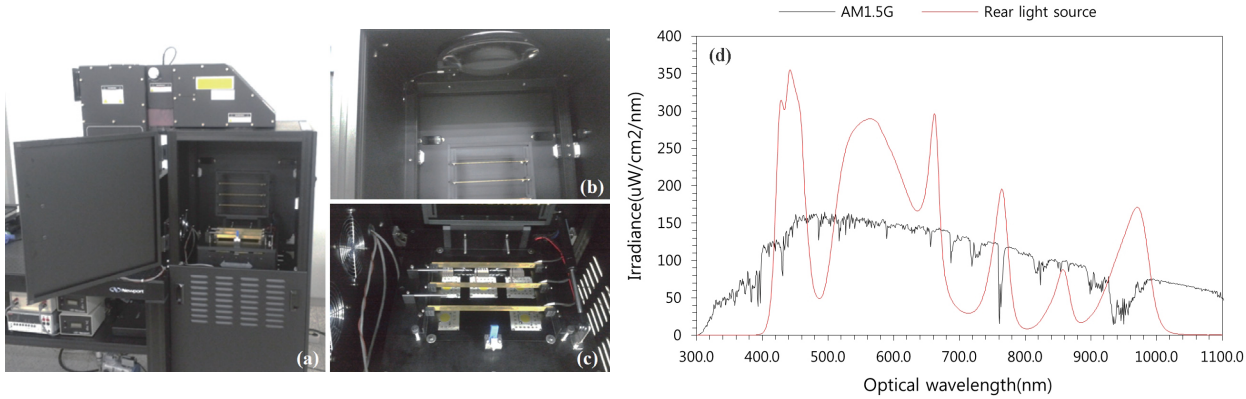


그림 2. (a) 이중광원 양면수광형 태양전지 측정 시스템, (b) 전면 AM1.5G Xenon light source, (c) 후면 LED light source, (d) 후면 LED light source spectrum

표 1. LED 광원 스펙트럼 클래스 분석 결과

Wavelength(nm)	Energy ratio	AM1.5G	Matching	Class
400–499	21.66	18.4	1.18, A	C
500–599	29.65	19.9	1.49, C	
600–699	17.22	18.4	0.94, A	
700–799	9.24	14.9	0.62, B	
800–899	7.67	12.5	0.61, B	
900–1099	15.57	15.9	0.92, A	

*IEC 60904 spectrum matching class standard: A (0.75-1.25), B (0.6-1.4), C (0.4-2.0)

스템의 전면 광원은 AM1.5G 스펙트럼 Xenon 램프를 이용한 Class AAA 급 광원을 사용하여 STC 조건에 부합되도록 설계하였다. 후면 광원의 경우 다양한 지면 조건에 대한 반사광을 모사하고 특정 광량으로 조정하기 위하여 LED모듈을 이용한 후면 광원을 정의하였다. 후면 LED 모듈 구성은 White, 450nm, 650nm, 750nm, 850nm의 6종의 LED로 구성되었으며 그림 2(d)에 광 스펙트럼을 나타내었다. 후면 광원으로 사용된 LED 램프는 표 1에 나타낸 바와 같이 C class의 정합도를 가지고 있으며 최종적인 광원 등급은 Class CBA 를 나타낸다. 양면수광형 태양전지는 (100)면을 기준으로 하는 p-type 태양전지를 이용하였으며, 특성을 비교하기 위하여 2개의 기업 제품을 대상으로 비교하였다.

단일광원 방식과 이중광원 방식을 비교하기 위하여 양면수광형 태양전지의 전/후면에 각각 단일광원을 활용하여 측정하고 이를 이용하여 모델링을 통한 효율 예측과, 후면광원의 크기를 변경시키면서 측정한 이중광원의 결과를 확보하였다. 이중광원의 경우 후면 광원의 크기를 0.1SUN에서 1.0SUN까지 0.1SUN 단위로 세분화하여 측정하였으며, 외부의 빛과 온도를 차단하기 위하여 그림 2(b), 2(c)와 같이 폐쇄된 챔버내에 시스템을 설치하였다.

단일광원 모델링 이론

양면수광형 태양전지의 성능을 분석하기 위한 단일광원 측정방식의 경우 Singh et. al.에서 시도하였다.[10,11] 기본적으로 태양전지를 One-diode 모델로 정의하여 양면수광형 태양전지의 특성을 해석하려고 시도하였으며, 후면광원의 크기에 비례하여 선형적으로 전류가 증가하는 것을 가정하였다. 하지만 실제 양면수광형 태양전지의 성능은 후면 광원에 선형적으로 반응하지 않기 때문에 이러한 특성을 확인하고자 본고에서는 단일광원모델과 이중광원 측정 결과를 비교하였다.

단일광원을 사용하여 양면수광형 태양전지의 성능을 분석하기 위해서는 STC 조건에서 전면을 측정하여 추출되는 단락전류(I_{sc-f})와 후면을 측정하여 추출되는 단락전류(I_{sc-r})를 정의해야 한다. 후면광원의 크기에 따른 선형성을 가정한 경우에 양면수광형 태양전지가 옥외에서 발전하는 상황의 단락 전류는 다음과 같이 정의된다.

$$I_{sc-bi} = I_{sc-f} + xI_{sc-r} = R_{I_{sc}} I_{sc-r} \quad (1)$$

여기서 $R_{I_{sc}}$ 는 무차원의 전후면 단락전류의 상대 비율을 의미하고, x 값은 전면과 후면의 광원의 세기 비율을 나타낸다. $R_{I_{sc}}$ 에 대하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$R_{I_{sc}} = \frac{I_{sc-f} + xI_{sc-r}}{I_{sc-f}} = 1 + x\frac{I_{sc-r}}{I_{sc-f}} \quad (2)$$

One-diode 모델에서부터 양면수광형 태양전지의 개방전압은 다음과 같은 형태로 정의할 수 있다.

$$V_{oc-bi} = V_{oc-f}\frac{\ln\left(R_{I_{sc}}\frac{I_{sc-f}}{I_0}\right)}{\ln\left(\frac{I_{sc-f}}{I_0}\right)} \quad (3)$$

여기서 V_{oc-f}는 STC 조건에서 측정한 전면의 개방전압 값을 의미하고 V_{oc-r}는 후면의 값을 의미한다. I_0는 암상태의 포화전류(Saturation current) 값을 의미한다. 포화전류는 태양전지의 다이오드 손실 전류를 의미하며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I_0 = \frac{I_{sc-f}}{\exp\left(\frac{qV_{oc-f}}{nkT}\right)} \quad (4)$$

여기서 q는 단위 전하 상수를, k는 볼츠만 상수를 의미한다. n은 다이오드의 비이상적인 계수를 의미한다. 이러한 포화전류의 개념은 양면수광형 모델의 효율을 계산하는데 필요한 변수를 줄이는 도움을 준다. 여기에 일반적으로 사용되는 pseudo fill factor 의 경우 식 (3), (4)를 이용하여 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$${}_pFF_{bi} = \frac{\left(\frac{qV_{oc-bi}}{nkT}\right) - \ln\left(\frac{qV_{oc-bi}}{nkT} + 0.72\right)}{\left(\frac{qV_{oc-bi}}{nkT} + 1\right)} \quad (4)$$

이러한 pseudo FF 값은 실험적인 경험값을 반영하고 있기 때문에 실측치와 더 일치하게 된다. 식(1)–(4)를 이용하여 양면수광형 태양전지의 충진도(Fill factor: FF)는 다음과 같이 정의된다.

$$FF_{bi} = {}_pFF_{bi} - \frac{R_{I_{sc}}\left({}_pFF_f - FF_f\right)V_{oc-f}}{V_{oc-bi}} \quad (5)$$

충진도의 정의로부터 양면수광형 태양전지의 최대 전력은 일반적인 관계식을 통하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$P_{bi} = I_{sc-bi}V_{oc-bi}FF_{bi} \quad (6)$$

식(1)~(6)을 이용하여 정리하게 되면 양면수광형 태양전지의 전력전환효율은 다음의 식으로 표현할 수 있게 된다.

$$\eta_{bi} = \frac{P_{bi}}{A_{cell}(G_f + G_r)} = \frac{I_{sc-bi}V_{oc-bi}FF_{bi}}{A_{cell}(G_f + G_r)} \quad (7)$$

여기서 A_{cell}은 양면수광형 태양전지의 면적을 의미하고, G_f는 전면에서 입사하는 광원의 에너지, G_r은 후면에서 입사하는 에너지를 나타내며 단위는 W/m^{2}의 크기를 가진다.

결과 및 논의

양면수광형 태양전지 2 종류를 STC 조건에 맞추어 개별적으로 전면과 후면에 대하여 측정하였다. 결론적으로 양면수광형 태양전지 제조사에 따라 다른 특성을 확인할 수 있었으며 표 2에 나타낸 바와 같이 전/후면 성능비율(Bifaciality) 특성도 96%와 86.5%로 다름을 확인할 수 있으며 태양전지의 성능과 비례하지 않음을 알 수 있다.

단일광원 분석 방법을 이용할 경우 상기에 정의한 바와 같이 모델링을 이용하여 계산하게 되는데 전/후면의 STC 측정 자료와 해당 양면수광형 태양전지의 다이오드 이상계수(diode ideality factor, n)가 반드시 필요하게 된다. 본고에서는 여기에 사용되는 태양전지의 다이오드 이상계수를 구하기 위하여 이중광원 분석 방식을 이용하여 측정된 태양전지 성능을 통하여 선형회귀 방식을 이용한 추출법으로 One-diode 모델의 다이오드 이상계수를 계산하여 표 2에 나타내었다. 결과에서 확인할 수 있는 바와 같이 태양전지의 다이오드 이상 계수는 전면광 태양전지 효율이 더 높은 B-type 태양전지에서 더 낮은 다이오드 특성을 보고하였으며, 실제 태양전지의 특성을 잘 반영하는 것으로 판단된다.

표 2. 단일광원 조사 방식을 이용한 양면수광형 태양전지 분석 결과

Cell type		Isc(A)	Voc(V)	FF(%)	Pm(W)	η(%)	R_{Bi}(%)*	n
A	Front	9.53	0.634	74.81	4.52	18.92	96.0	1.21
	Rear	9.17	0.631	75.02	4.34	18.17		
B	Front	9.92	0.659	79.10	5.17	21.65	86.5	1.08
	Rear	8.58	0.659	79.07	4.47	18.72		

*Power, rear/front

이러한 다이오드의 특성을 추출하기 위하여 이중광원을 이용한 양면수광형 태양전지 효율 분석을 그림 3과 같이 수행하였다. 기존의 단일광원 연구 결과와 달리 양면수광형 태양전지 성능은 후면 광원에 선형적으로 반응하지 않는 것을 확인하였다. 단일광원 연구에서 정의한 바와 같이 후면광원의 증가에 따라 양면수광형 태양전지 내부의 광생성(Photogeneration)은 거의 선형인 것으로 그림 3(a), 3(f)에서 확인되는 바와 같이 분석되며, 전력의 경우도 유사하다. 그러나 개방전압과 충진도의 경우는 예측 모델과 실측 결과가 매우 상이함을 확인할 수 있다. 결론적으로 양면수광형 태양전지 성능분석에서 발견할 수 있는 이러한 비선형성으로 인하여 태양전지의 효율은 기존의 단일광원 분석 방식으로는 예측하기 어려운 결과를 나타냄을 알 수 있다. 이러한 이유로 단일광원 태양전지의 다이오드 이상계수를 추출할 수는 있지만 이러한 추출 값의 경우 선형회귀를 위한 분산의 정도가 매우 크기 때문에 신뢰성이 낮아지는 문제점을 동시에 보여주고 있다.

결론적으로, 양면수광형 태양전지의 경우 기존의 단일광원 측정 혹은 단일광원 분할 측정 방식을 사용할 경우 정확한 성능을 예측하기가 어려우며, One-diode 모델을

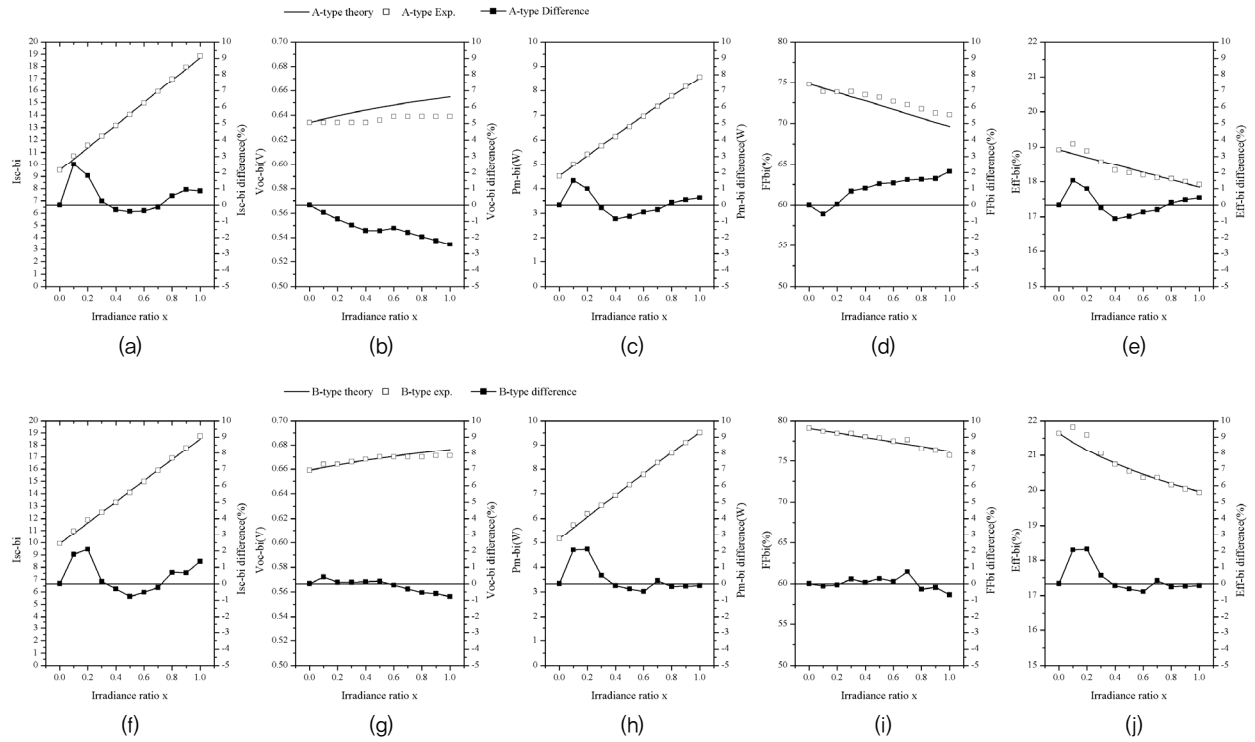
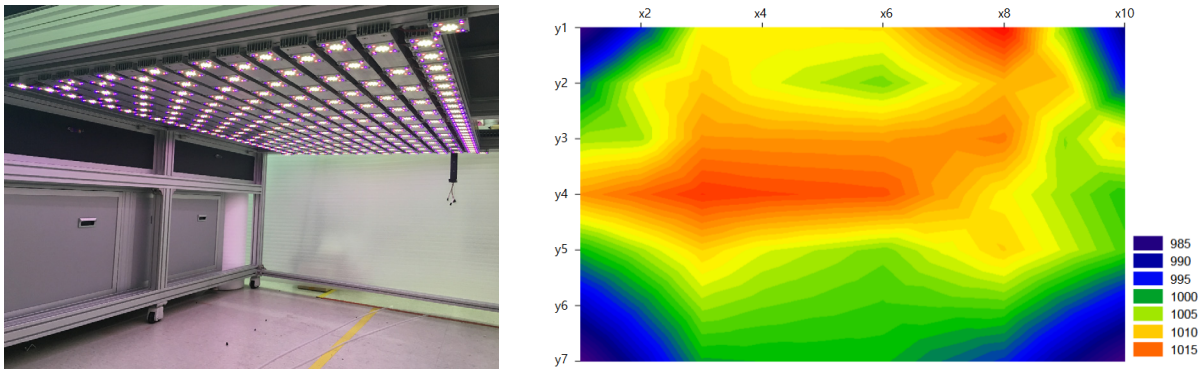


그림 3. 이중광원 양면수광형 태양전지 측정 결과, (a, f) short-circuit current (b, g) open-circuit voltage, (c, h) max power, (d, i) fill factor, (e, j) conversion efficiency



(a) (b)

그림 4. 이중광원 양면수광형 태양전지 모듈 측정 장치, (a) LED 후면 광원 모듈, (b) 후면광원 균일도 분포(Class A)(출처: (a), (b) 양면 모듈 측정 시스템, TNE tech co. LTD)

이용한 예측이 실제와 차이가 많기 때문에 더 정확한 성능 분석을 위해서는 이중광원 분석법이 더 유용할 것으로 생각된다. 이러한 비이상성은 양면수광형 태양전지 셀에서만 발생되는 것이 아니라 G2G 양면수광형 태양전지 모듈에서도 동일하게 발생될 것으로 사료된다. 이를 해결하기 위해서는 태양전지 모듈 단계에서도 이중광원을 활용한 태양전지 모듈의 효율 분석이 필요한 상황이다.

현재 구미전자정보기술원에서는 양면수광형 모듈의 성능 분석을 수행하기 위하여 그림 4와 같이 대면적 후면광원을 제작하여 태양전지 모듈 성능 측정을 수행할 수 있도록 시스템을 구축하였다. 양면수광형 태양전지 모듈용 후면광원의 경우 IEC 60904 규격에 의거한 Class AAA 급을 적용하였으며, 광원의 조사 면적은 1,000mm×2,000mm의 대면적 광조사가 가능하다. 양면수광형 태양전지의 성능 분석을 위한 I-V 시험 장치의 경우 최대 600W의 측정이 가능하며 300V의 전압과 20A 이하의 전류범위 내에서 분석 가능하게 구축되어 있다.

결 론

태양전지의 효율이 증가함에 따라 이론적 한계치로 여겨지던 쇼클리-콰이저 한계 부근에 도달하게 되면서 태양전지의 성능 향상 폭이 줄어들게 되고 비용이 증가하게 됨에 따라 균등화 발전 비용이 늘어나는 문제가 발생하게 되었고, 이를 해결하기 위한 방안으로 양면수광형 태양전지 구조가 주목 받고 있다. 하지만 양면수광형 태양전지의 경우 옥외 설치시 전면과 후면에 들어오는 태양광을 모두 활용할 수 있기 때문에 기존의 IEC 60904 규정에 의한 STC 측정 방법으로는 정확한 효율을 정의하기 어려운 문제가 있다. 이를 해결하기 위하여 양면수광형 태양전지의 전면과 후면을 개별적으로 측정하여 One-diode 모델을 이용하여 후면광원의 크기에 따라 달라지는 양면수광형 태양전지의 특성을 예측하는 단일광원 측정방식이 보고되었다. 하지만 실제 옥외조건과의 성능 차이로 인하여 지면 조건에 대하여 실제 분석을 수행하기 위한 단일광원 분할 측정 방식이 추가적으로 제기 되었다. 하지만 반사면의 특성으로 인하여 미세한 후면광 분할이 어려우며 대면적으로 적용할 수 없다는 점이 단점으로 지적되었다. 본고에서는 전면과 후면에 독립적으로 적용되는 이중광원 분석법을 이용하여 양면수광형 태양전지의 특성을 분석하였다. 분석의 신뢰성을 확인하기 위하여 2종류 이상의 기업에서 제조된 양면수광형 태양전지를 사용하였으며, 기존에 사용되던 단일광원 분석의 One-diode 모델과의 비교를 진행하였다. 이중광원 분석을 통하여 기존의 단일광원 분석에서 정확히 정의하기 어려웠던 다이오드 이상계수를 정확히 추출할 수 있었으며, 태양전지의 성능 분석 결과와 추출된 이상계수의 특성이 유사함을 확인할 수 있었다. 또한 후면

광원의 크기를 0.1SUN 단위로 변화시켜서 양면수광형 태양전지의 성능을 분석함으로써 단일광 태양전지 분석에서 가정하는 양면수광형 태양전지 성능의 선형성에 대한 검증을 진행하였다. 이중광원을 이용한 분석결과 단락전류와 전력의 경우 선형성을 나타내는 것으로 확인되었지만 개방전압과 충진도는 비선형성을 가지는 것으로 측정되었으며, 이로 인하여 양면수광형 태양전지의 전환효율 특성이 비선형적 특성이 뚜렸하게 나타나는 결과를 확인하였다. 이러한 비선형적 특성은 양면수광형 태양전지 모듈에서도 그대로 나타날 것으로 예상되며 이를 해결하기 위하여 구미전자정보기술원에서는 양면수광형 태양전지 모듈의 이중광원 분석을 위한 시스템을 구축하였다. 상기의 연구를 통하여 향후 개발될 양면수광형 태양전지 모듈의 정확한 분석에 도움이 될 것으로 전망한다.

감사의 글

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE) of the Republic of Korea (No.20183010014320).

참고문헌

[1] IW GROUP, et al. International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) 2017 Results. SEMI, Berlin, Germany, 2017.

[2] SHOCKLEY, William; QUEISSER, Hans J. Detailed balance limit of efficiency of p–n junction solar cells. Journal of applied physics, 1961, 32.3: 510–519.

[3] HIROSHI, Mori. Radiation energy transducing device. U.S. Patent No 3,278,811, 1966.

[4] STANDARD, I. E. C. 60904–3, Photovoltaic Devices–Part 3: Measurement Principles for Terrestrial Photovoltaic (PV) Solar Devices with Reference Spectral Irradiance Data, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland. International Electrotechnical Commission, Geneva Google Scholar, 2007.

[5] P. Corporation, Bifacial photovoltaic module bifacial photovoltaic module VBHN225DJ06 HIT double 225, 2014.

[6] P. S. Technologies, Prism Solar Installation Manual, B265(L), B260, B255, B250, B245, B200, B150, HB180, 2015.

[7] H. Ohtsuka, M. Sakamoto, M. Koyama, K. Tsutsui, T. Uematsu, and Y. Yazawa, Progress in Photovoltaics: Research and Applications 9, 1 (2001).

[8] EDLER, A. et al. Flasher setup for bifacial measure–ments. In: pr senté à BIFIPV workshop, Konstanz. 2012.

[9] SINGH, Jai Prakash; ABERLE, Armin G.; WALSH, Timothy M. Electrical characterization method for bifacial photovoltaic modules. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2014, 127: 136–142.

[10] SINGH, Jai Prakash; ABERLE, Armin G.; WALSH, Timothy M. Electrical characterization method for bifacial photovoltaic modules. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2014, 127: 136–142.

[11] SINGH, Jai Prakash; WALSH, Timothy M.; ABERLE, Armin G. A new method to characterize bifacial solar cells. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2014, 22.8: 903–909.