

서론

태양광 발전의 핵심부품인 태양전지(셀, 모듈, 패널 등 다양한 형태 포함)는 빛에너지를 전력으로 변환하는 광전변환 소자(photovoltaic device)이다. 따라서 태양전지의 성능 중에서 가장 중요한 성능지수는 조사된 빛에너지를 얼마의 전기에너지로 변환할 수 있는지를 나타내는 광-전 변환효율이다. 광-전 변환효율의 평가에는 광측정기술과 전기 측정기술이 모두 필요하다. 하지만 이중 기술적 난이도가 높고 오차요인에 더욱 민감하여 전체 정확도를 제한하는 것은 광측정기술이다. 즉, 태양전지에 입사하는 빛에너지의 양을 측정하는 것이 태양전지 평가의 가장 중요한 이슈이다.

자외선부터 적외선까지 파장영역에 속하는 빛의 세기를 정량적으로 측정하는 분야를 복사측정(optical

태양전지 변환효율의 정의와 평가 조건

태양전지의 변환효율은 다음 식(1)과 같이 정의된다[1]. 여기서 η 는 변환효율, P_{max} 는 최대전력(단위 W), E 는 조사광의 복사조도(단위 W/m^2), 그리고 A 는 태양전지의 수광면적(단위 m^2)을 나타낸다.

$$\eta = \frac{P_{max}}{E \cdot A} \quad (1)$$

식(1)에서 최대전력 P_{max} 은 복사조도 E 가 조사되고 있는 조건에서 태양전지의 전류-전압특성 곡선을 측정하였을 때 구할 수 있다. 그림1은 태양전지의 최대전력을 측정하기 위한 전류-전압특성 측정의 예를 보여준다. 이때 태양전지가 부하가 전혀 걸리지 않았을 때 태양전지에 흐르는 전류 I_{sc} 를 단락전류(short-circuit current),

특집 ■ 태양광 기술

태양전지 변환효율 평가와 복사측정표준

이동훈*, 박승남*

radiometry)이라 하며 광학의 가장 기초적인 분야이다. 태양전지 변환효율의 정확한 평가는 태양전지가 응답하는 파장영역에서의 복사측정에 대한 측정표준이 확립되어 있어야 가능하다. 본 글에서는 국제규격으로 통용되고 있는 태양전지 변환효율 평가방법을 정리하고 정확한 변환효율 측정을 위해서 필요한 복사측정 이슈와 관련 측정표준에 대하여 설명한다.

1 영어에서는 고에너지 방사선측정도 radiometry라 하므로 광학영역은 optical radiometry라고 하여 구분한다. 우리말에서는 radiation을 방사(放射)와 복사(輻射)로 혼용하여 쓰이고 있는데 X선 등 고에너지 영역에서는 방사선, 광학영역에서는 복사광이라고 구분하여 쓰는 것이 일반적이다.

무한대 크기의 부하가 태양전지에 걸릴 때 전극 양단에 걸리는 전압 V_{oc} 를 개방전압(open-circuit voltage)이라 한다.

태양전지와 같은 광전변환 소자에서 빛의 조사량에 비례하여 변하는 측정량은 단락전류이다. 이는 광전변환 소자의 기본 원리인 반도체에서의 광전효과(photoelectric effect)로 설명할 수 있으며 입사된 광자수에 비례하여 전자-양공 쌍이 생성되어 전류에 기여하기 때문이다. 일단 조사광에 따라서 단락전류가 결정되면 개방전압을 비롯한 전류-전압특성은 태양전지의 전기적 특성, 즉 광전효과로 인해 생성된 전자와 양공의 소자 내부에서 운송특성에 따라 결정된다. 결국 태양전지

* 한국표준과학연구원 기반표준본부

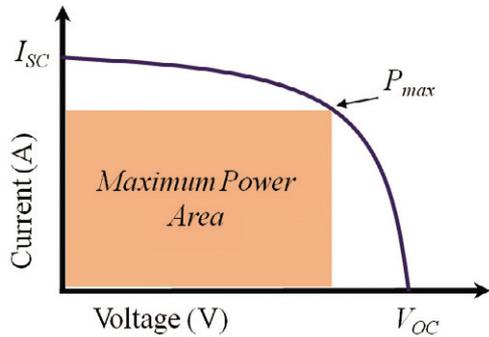
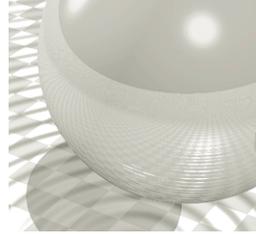


그림 1. 태양전지 전류-전압특성과 단락전류, 개방전압, 최대전력의 정의

광-전 변환효율 평가의 주요 이슈는 어떤 빛의 조사량에 대해 단락전류를 얼마나 정확히 측정하는가이다. 복사측정 분야에서는 입사 복사조도 E에 대한 단락전류 I_{sc} 를 복사조도 감응도(irradiance responsivity, 단위 $AW^{-1}m^{-2}$)라는 측정량으로 따로 정의하여 사용한다.

태양전지의 변환효율, 특히 단락전류와 관련된 복사조도 감응도는 여러 가지 조건에 따라 달라진다. 먼저 대부분의 태양전지는 선형적이지 못해서 조사강도에 따라 변환효율이 달라진다. 또한 광전효과의 특성상 태양전지의 감응도는 파장에 따른 함수이므로 조사광의 분광분포(spectral distribution), 즉 스펙트럼에 따라 변환효율이 달라지게 된다. 이 외에도 변환효율은 태양전지의 온도, 조사광의 안정도, 조사광의 공간적 균일도, 조사시간 등 여러 요인에 대한 함수이다. 따라서 변환효율 평가를 위한 조건을 규격화하지 않고서는 그 결과를 서로 비교할 수가 없다.

태양전지 변환효율 평가의 조건은 IEC 등 국제규격으로 통용되고 있다[1]. 이에 따르면 지표면에서 집광하지 않는 조건으로 사용하는 태양전지의 경우 다음과 같은 표준시험조건(standard test condition, STC)에서 변환효율을 평가하여야 한다:

- 조사광의 세기: 복사조도 $1000 W/m^2$ (= $100 mW/cm^2 = 1 sun$), 맑은 한여름 정오의 태양 복사조도 수준임.
- 조사광의 분광분포: Air Mass (AM) 1.5 global, 약 48도로 입사하여 대기에서 산란된 태양광 스펙트럼에 해당함 (그림2 참고).
- 태양전지의 접합온도: $25^{\circ}C$

위의 표준시험조건은 비록 실제 태양복사의 관측데이터에 기반하여 규격화된 것이기는 하지만 자연태양광은 실험을 원할 때 마다 얻기 어렵기 때문에 일조량이 풍부하지 않은 곳에서는 사용이 제한적이다. 대부분 변환효율 평가는 면적이 비교적 작은 셀과 모듈 단계에서 표준시험조건에 가까운 조사광을 제공하여 주는 태양모사광원(solar simulator)을 사용하여 실내에서 수행하고 있다.

태양모사광원과 기준태양전지

태양모사광원은 실험실 환경에서 평가대상 태양전지에 표준시험조건(STC)의 분광스펙트럼과 복사조도를 제공하여 규격에 부합하는 변환효율의 평가가 가능하게 하는 장비이다. 대부분 Xe방전등에 분광필터를 채용하여 조사광 세기와 분광분포가 규격에 근접하도록 구성되어 있다. 같은 복사조도 $1000 W/m^2$ 를 제공하더라도 분광분포가 AM 1.5에 얼마나 근접하는가, 시간적으로 얼마나 안정되어 있나, 그리고 조사면적에서 어느 정도의 공간 균일도를 제공하는가를 평가하여 class A, B, C 급으로 성능을 분류한다[2]. 따라서, 분광분포, 시간 안정도와 공간 균일도가 모두 최상급의 태양모사광원은 class AAA라고 부른다.

태양모사광원의 성능지표 중 기술적으로 어려운 과제는 분광분포를 일치시키는 것이다. 그림 2는 class A 태양모사광 장비의 분광분포를 실제 측정된 결과와 AM 1.5 global 규격 분광분포를 같이 그려서 비교한 것이다.

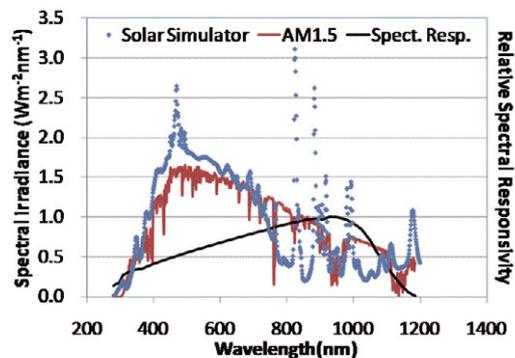


그림 2. Class A 태양모사광원의 분광분포 측정 예(푸른 점)와 AM 1.5 규격 분광분포(붉은 선)와의 비교. 검은색 선은 단결정 실리콘 기준태양전지의 분광응답함수임

태양전지 변환효율 평가와 복사측정표준

대부분 태양모사광은 색온도가 높은 방전등과 필터 등을 조합하여 최대한 규격 분광분포에 가깝게 만들지만 규격에서 정한 분광분포와 완전히 일치시킬 수는 없다. 이러한 분광분포의 불일치 때문에 태양전지 단락전류 측정에서 다음 식(2)와 같은 분광불일치 오차(spectral mismatch error)를 유발하게 된다[1].

$$M = \frac{\int s_{STC}(\lambda)r(\lambda)d\lambda}{\int s_m(\lambda)r(\lambda)d\lambda} \quad (2)$$

식(2)에서 $s_{STC}(\lambda)$, $s_m(\lambda)$ 는 각각 규격으로 정한 AM 1.5의 분광분포와 실제 태양모사광의 분광분포를 나타내며, $r(\lambda)$ 은 측정대상 태양전지의 분광응답함수, 즉 규격화된 분광감응도이다. 적분은 측정대상 태양전지가 의미있는 감응도를 가지는 영역, 즉 $r(\lambda) \neq 0$ 인 파장영역에서만 고려하면 되며, 실리콘 태양전지의 경우 250 nm부터 1100 nm까지가 해당된다. 태양전지 변환효율의 정확한 측정을 위해서는 태양모사광의 분광분포 $s_m(\lambda)$ 와 대상 태양전지의 분광응답함수 $r(\lambda)$ 를 별도로 측정하여 식(2)의 오차를 계산한 후 이를 실제 측정된 단락전류 값에 곱하여 보정하여 주어야 한다.

단락전류는 분광분포 뿐만 아니라 복사조도 1000 W/m²라는 표준시험조건에 맞추어 측정하여야 한다. 태양모사광원에서 태양전지에 조사하는 복사조도가 규격에서 요구하는 값과 일치하도록 맞추기 위해서는 기준태양전지(reference solar cell)를 사용한다[1,3]. 기준태양전지는 표준시험조건에서 단락전류가 얼마이고 변환효율이 얼마인지 공인기관이 평가하여 인증한 태양전지이다. (그림 3 참고)따라서 기준태양전지를 측정위치에 두고 기준온도로 설정한 다음 정확히 복사조도 1000 W/m²라는 조건에 맞는 단락전류가 발생하도록 태양모사광원을 조절하면 원하는 조사 조건이 얻어진 것이다.

주의할 점은 기준태양전지를 사용할 때도 기준태양전지와 평가대상 태양전지의 분광응답함수가 다를 경우 식(2)와 같은 분광불일치 오차가 발생한다는 것이다. 다만, 기준태양전지가 평가대상 태양전지와 동일한 분광응답함수를 가지면, 즉 $r_{ref}(\lambda) = r(\lambda)$ 이면 각 오차인자는 서로 상쇄되어 별도의 고려가 필요하지 않게 된다. 따라서 기준태양전지는 분광응답함수가 측정대상 태양전지와 유사할 때 분광불일치 오차의 보정을 생략할 수 있기 때문에 그 실용적 의미가 크다. 실제 측정대상 태양전지와



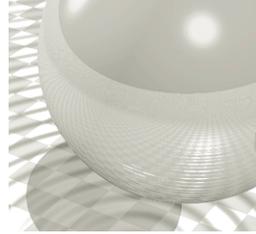
그림 3. 상용 공급되고 있는 IEC 규격 기준태양전지의 예

동일한 재질(예: 단결정 실리콘)로 제작한 기준태양전지를 사용할 경우 분광응답함수 차이가 심각하지 않아서 별도의 분광불일치 오차 보정을 고려하지 않더라도 단락전류 혹은 변환효율 측정의 오차가 대부분 상대오차로써 5%를 넘지 않는다.

하지만 높은 수준의 정확도를 요구하는 측정이 필요하거나 새롭게 개발한 태양전지와 같이 기준태양전지와 분광응답함수가 다른 경우에는 분광불일치 오차의 보정은 매우 중요하다. 기준태양전지 소급체계 최상위에서 다른 기준태양전지 없이 절대적으로 변환효율을 평가해야 할 경우 또한 이런 상황에 해당한다. 대부분 태양전지 변환효율 측정의 정확도는 사용한 기준태양전지의 인증값의 정확도와 분광불일치 오차 보정의 정확도에 따라 결정된다. 식(2)를 통해서 알 수 있듯이 분광불일치 보정을 위해서는 태양모사광의 분광분포, 측정대상 태양전지의 분광응답함수, 그리고 기준태양전지의 분광응답함수의 측정값이 필요하다.

분광불일치 오차 보정을 위한 복사측정 표준

분광불일치 오차의 보정을 위해서는 먼저 태양모사광원의 분광분포, 즉 식(2)의 $s_m(\lambda)$ 를 측정대상 태양전지의 감응 파장영역에서 측정하여야 한다. 이 측정을 위해서는 빛의 세기를 파장에 대한 함수로 측정하여 주는 분광복사계(spectroradiometer) 장비가 필요하다. 분광복사계는 수광부의 종류와 교정 방식에 따라 분광복사조도, 분광복사휘도, 그리고 이의 규격화된 상대값인 분광분포를 측정하는데 사용할 수 있으며 장비의 성능에 따라 측정 파장영역과 정밀도도 매우 다양하다. 하지만 정확한 측정을 위해서는 사용하기 전에 분광복사조도 표준램프



를 사용한 교정이 매우 중요하다 [4]. 특히, 파장오차, 분광띠폭 (spectral bandwidth)의 변화, 미광(stray light)의 영향, 검출신호의 비선형성 등 중요한 오차 및 불확도(uncertainty) 요인을 세심하게 평가하여 측정결과에 반영하여야만 높은 정확도의 결과를 얻을 수 있다[5].

분광불일치 오차 보정을 위한 다른 하나의 측정량은 태양전지의 분광응답함수, 즉 식(2)의 $r(\lambda)$ 이다. 이는 일반 검출기의 분광감

응도(spectral responsivity) 측정과 원리적으로 유사하지만 태양전지의 비선형성을 고려하여 1000 W/m^2 수준의 높은 조사강도 조건에서 측정해야 하므로 기술적인 난이도가 높다. 따라서 미분적 분광감응도(differential spectral responsivity, DSR)라는 측정원리를 적용하는데 이는 배경노이즈를 제거하여 감도를 높이는 modulation lock-in detection 방법과 유사하다. 즉, 광원을 백색 연속(DC) 바이어스광원과 변조된(AC) 분광광원 두 종류로 구분하여 바이어스 광원으로 충분한 조사강도에 대한 광전류를 생성하고 동시에 특정 파장의 변조 분광광원을 중첩하여 그 파장에서 변조된 광전류 신호를 구분하여 기록하는 방식이다[6]. 이러한 원리를 적용한 분광응답함수 측정장비는 이미 상용화되어 공급되고 있으며, 측정의 정확도는 분광광원의 출력을 측정하는데 사용하는 기준검출기(reference detector)에 의하여 주로 결정된다. 기준검출기는 측정표준 공인기관에서 분광감응도 값을 A/W 단위 혹은 $\text{A}/(\text{Wm}^2)$ 단위로 교정 인증한 광다이오드이다. 태양전지의 분광응답함수는 단위가 없는 규격화된 측정량이지만 이를 파장별 분광복사조도 감응도 절대값으로 측정할 수 있으면 태양모사광이 전혀 필요없이 표준시험조건에서의 단락전류를 측정할 수 있다. 독일 측정표준기관인 PTB는 전통적으로 이러한 DSR 기반 절대측정 방법을 태양전지 교정에 적용하고 있으며 최근 한국표준과학연구원도 기술을 개발 보유하고 있다[7].

위에서 기술한 바와 같이 분광불일치 오차 보정을 위해 필요한 분광복사계와 분광응답함수 측정장치의 정확도

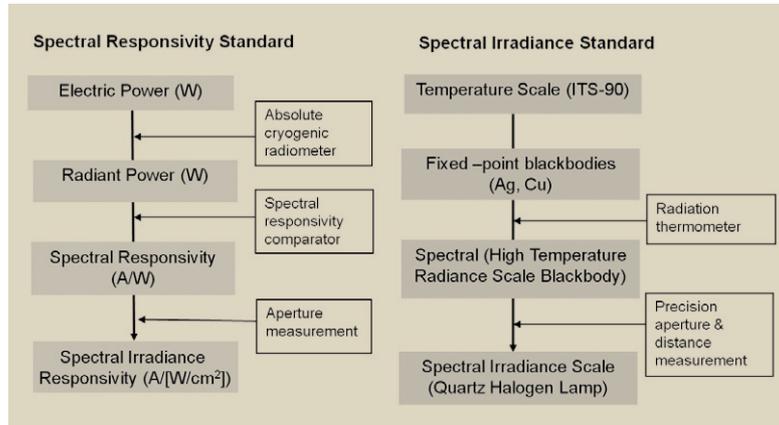


그림 4. 태양전지 변환효율 측정에 소급성을 제공하는 분광복사조도 및 분광감응도 측정표준의 소급체계

및 신뢰도는 분광복사조도 표준램프와 분광감응도 기준 검출기를 통하여 복사측정 표준으로부터 제공된다. 그림 4는 한국표준과학연구원서 공급하고 있는 분광복사조도 및 분광감응도 측정표준 소급체계를 그림으로 나타내었다. 분광복사조도 측정표준은 고온흑체의 복사온도 측정에 소급되며 분광감응도 측정표준은 극저온 절대복사계를 사용한 레이저 출력의 전기치환 측정에 소급된다. 이 두 가지 복사측정 표준의 정확도가 태양전지의 변환 효율 측정이 도달할 수 있는 최상의 정확도를 결정한다.

일차 기준태양전지와 국제표준 소급성

일차 기준태양전지(primary reference solar cell)는 일반적인 기준태양전지와 다음과 같은 항목에서 구별된다[8]. 첫째는 정확도로, 인증된 표준시험조건에서의 단락전류와 변환효율의 불확도가 2% 이내이어야 한다. 둘째는 소급성으로 국제표준에 직접적인 소급성을 확보하여 이를 공인받아야 한다. 따라서 일차 기준태양전지는 다른 기준태양전지를 교정하는데 사용하는 것으로 인증 값을 부여하기 위한 측정이 국제표준에 직접 소급하여 높은 정확도로 수행되어야 한다.

일차 기준태양전지의 교정(calibration) 방법에는 여러 가지가 있으나 국제표준 소급성에 따라 다음과 같이 분류할 수 있다. 첫째는 국제복사능급(world radiation reference, WRR)에 소급하여 교정하는 것으로 전지구적 태양복사 측정에 사용하여 국제적으로 일치도가 검증

태양전지 변환효율 평가와 복사측정표준

된 절대일조계(absolute pyrhelimeter 혹은 absolute cavity radiometer)를 복사조도 측정의 기준으로 사용하는 것이다[9]. 미국 에너지연구기관인 NREL이나 한국의 에너지기술연구원에서 이러한 소급성에 따라 일차 기준태양전지를 교정하고 있다.

다른 방법은 국제단위계(SI)에 소급하여 교정하는 것으로 분광복사계 장비를 분광복사조도에 대한 절대 감응도로 교정하여 태양광 혹은 태양모사광의 분광복사조도를 직접 측정하는 방법과 기준태양전지의 감응도를 분광복사조도에 대하여 절대 측정하는 절대 DSR 방법 등이 있다. 독일 측정표준기관인 PTB가 절대 DSR 방법의 대표적인 선두주자이며[10] 한국표준과학연구원에서는 절대 분광복사조도 측정방법과 절대 DSR 방법을 병행하여 일차 기준태양전지를 교정하고 있다[7]. 위의 두 소급성의 일치도는 여러 연구결과와 세계광전눈금(world photovoltaic scale, WPVS) 제정을 위한 수차례 국제비교 결과를 통하여 검증되었다[3,11].

결론

태양전지의 변환효율을 평가하는 표준화된 방법과 관련한 복사측정 표준을 정리하였다. 높은 정확도의 태양전지 변환효율 평가를 위해서는 사용하는 태양모사광의 분광분포가 규격 분광분포와 달라서 발생하는 분광불일치 오차를 보정해야 하며 이를 위해서는 분광복사계를 사용한 분광분포 측정과 미분적 분광감응도 측정장치를 사용한 분광응답함수 측정이 필요한 것을 설명하였다. 궁극적인 변환효율의 정확도는 WRR 및 SI 단위계 등 국제표준에 직접 소급한 일차 기준태양전지에 의하여 달성될 수 있다. 현재 국내에서는 한국표준과학연구원과 한국에너지기술연구원에서 각각 독립적인 소급체계를 가지고 일차 기준태양전지를 정확하게 평가하는 능력을 확보하여 국내 태양전지 변환효율 평가체계의 정확도와 신뢰도를 높이는 데 기여하고 있다.

참고문헌

1. KS C IEC 60904 시리즈 (1 ~ 10).
2. KS C IEC60904-9 및 ASTM E927-10.
3. C. R. Osterwald et al., The world photovoltaic scale: an international reference cell calibration program, Prog. Photovoltaics: Res. Appl. 7, 287 (1999).
4. ASTM G 138-96.
5. 박성종 등, 광원 및 디스플레이 기기의 색특성 측정의 불확도 평가, 한국광학회지 20, 110 (2009).
6. ASTM E 1021-06.
7. Ghufron Zaid et al. Differential spectral responsivity measurement of photovoltaic detectors with a light-emitting-diodebased integrating sphere source, Applied Optics 49, 6772 (2010).
8. ASTM E 1125-05.
9. H. Muellejans et al. Calibration of photovoltaic reference cells by the global sunlight method, Metrologia42, 360 (2005).
10. J. Metzdorf et al. Radiometry in photovoltaics: calibration of reference solar cells and evaluation of reference values, Metrologia 37, 573 (2000).
11. H. Muellejans et al. Comparison of traceable calibration methods for primary photovoltaic reference cells, Prog. Photovoltaics: Res. Appl. 13, 661 (2005).

약 력



이동훈

- 현재 책임연구원, 광도센터장, 한국표준과학연구원
- 현재 측정과학전공 겸임교수, 과학기술연합대학원대학교(UST)
- 2000년 독일 Kaiserslautern 대학교 물리학 박사
- 2003-현재 한국표준과학연구원 재직



박승남

- 현재 영년직연구원, 기반표준본부장, 한국표준과학연구원
- 현재 측정과학전공 책임교수, 과학기술연합대학원대학교(UST)
- 2004-2007 겸직교수, 한남대학교대학원 물리학과
- 1995년 한국과학기술원 물리학 박사
- 1985-현재 한국표준과학연구원 재직