

태양전지 성능평가 기술(측정과 보정)

안승규 · 신기식 · 윤경훈

1. 서론

최근 지속적인 유가 상승과 더불어 신재생에너지, 특히 태양광 에너지에 대한 관심이 증폭되면서, 세계 태양광발전 시장은 2005년에 1.46 GW, 2008년에 6.08 GW, 그리고 2010년에는 18.23 GW 규모로 급속한 증가 추세를 보이고 있다.¹ 이에 따라 핵심 기술인 태양전지 개발을 비롯한 관련 분야에는 각 나라별로 수많은 학교, 연구기관 및 기업들이 기술개발에 참여하고 있으며, 국내에서도 매우 활발하게 연구가 진행되고 있다.

태양광발전 기술의 특성상 개발된 태양전지 혹은 태양광 모듈의 성능을 정확하게 측정하는 것이 매우 중요한데, 이는 현재 개발되어 있는 태양전지 및 모듈의 성능을 정확히 측정할 수 있어야 새로운 기술 개발을 위한 방향을 올바르게 설정할 수 있기 때문이며, 아울러 태양전지 및 태양광 모듈의 시장 가격이 그들의 발전 성능에 따라 결정되기 때문이다. 따라서 현재 태양광 분야 국제규격은 태양광발전을 위한 소재, 소자, 모듈 및 시스템 기술 이외에 성능평가 부분까지 포함하여 제정되고 있으며, 각 나라의 기업 및 연구기관들은 해당 국제규격에 따라 자신들이 개발한 태양전지 및 모듈의 성능을 평가하고, 그 결과를 기준으로 시장에서 거래를 하거나 학계에 발표하고 있다.

태양광발전에 통용되는 국제규격을 섬의, 제정, 운영하는 국제기구인 IEC (international electrotechnical commission, 국제전기기술위원회)이며, 현재 IEC 규격에는 실리콘 기반 태양전지 및 모듈의 성능평가 방법, 태양광 발전 시스템 요소 부품들의 성능평가 방법, 그리고 태양전지 성능평가에 사용되는 1, 2차 기준 태양전지의 교정 방법 등이

내용으로 포함되어 있다.

여기에서는 태양전지 성능평가와 관련된 다양한 측정 기술의 원리 및 태양전지 성능평가의 전반적인 절차에 대하여 기술하고자 한다. 여기에서 기술된 내용들은 원리적으로 태양광 모듈에도 동일하게 적용될 수 있다.

2. 태양전지 성능평가의 개요

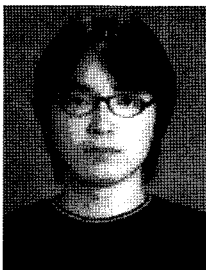
2.1 태양전지 성능평가란?

태양전지는 태양빛을 받아 전력을 생산하는 반도체 소자로서 단락전류(I_{sc}), 개방전압(V_{oc}), 최대 출력(P_m), 충전률(F.F.), 변환 효율(η) 등의 지표는 태양전지의 성능 및 시장에서의 거래 가격을 결정하는 주요 요소이다. 이러한 태양전지 성능지표는 IEC 규격에서 제시하는 특정한 스펙트럼 및 조사 강도를 가지는 빛에 태양전지를 노출시킨 후, 태양전지가 출력하는 전류-전압 특성을 측정함으로써 확인할 수 있다(그림 1).



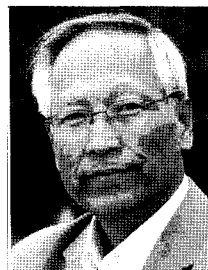
신기식

1975 서울대학교 응용물리학과(학사)
1988 충남대학교 물리학과(석사)
1992 프랑스 파리12대학 에너지공학과(박사)
1982~ 현재 한국에너지기술연구원 태양에너지연구단 책임연구원



안승규

2002 한양대학교 물리학과(학사)
2004 한국과학기술원 물리학과(석사)
2008 한국과학기술원 물리학과(박사)
2008~ 2009 한국과학기술원 물리학과 연수연구원
2009~ 현재 한국에너지기술연구원 태양에너지연구단 선임연구원

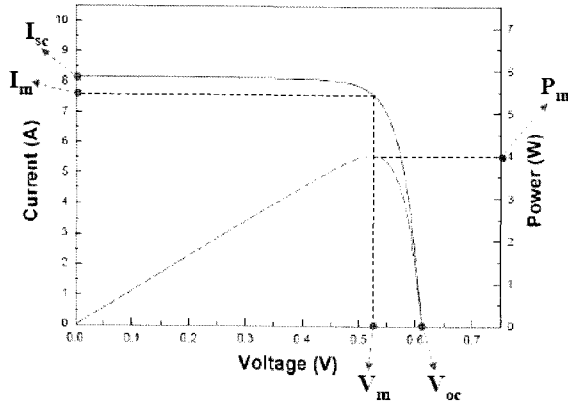


윤경훈

1975 서울대 재료공학과(학사)
1977 서울대 대학원 요업공학과(석사)
1986 프랑스 Limoges(리모주)대학 재료공학과(박사)
1980~ 현재 한국에너지기술연구원 태양에너지연구단 책임연구원(영년직)
1994~ 현재 IEA 태양광발전 협력사업의 "정보 교환 및 확산 프로그램" 한국 대표 참여
2005~ 현재 IEC TC 82(태양광발전) "태양광 모듈 시험 규격" WG 2 한국 대표 참여

Performance Evaluation Technique for Solar Cells (Measurement and Correction)

한국에너지기술연구원 태양에너지연구단 (Ahn Seung Kyu, Shin Kee Shik, and Yoon Kyung Hoon, Solar energy research center, Korea Institute of Energy Research, 152 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea)
e-mail: notask@kier.re.kr



I_{sc} : 태양전지의 양단 사이 전압 차이가 0일 때
 (즉 단락 상태) 드레인에 흐르는 전류
 V_{oc} : 드레인에 흐르는 전류가 0일 때 태양전지의
 양단 사이에 걸리는 전압
 $P_m = V_m I_m$: 최대 출력, 태양전지의 유효점인
 동작점
 $F.F. (Fill Factor) = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}}$
 $\eta (efficiency) = \frac{V_m I_m}{P_{light} \cdot A_{cell}}$

P_{light} : 입사광의 조사강도
 A_{cell} : 태양전지의 면적

그림 1. 광 조사상태에서 측정되는 태양전지의 전류-전압 특성곡선.

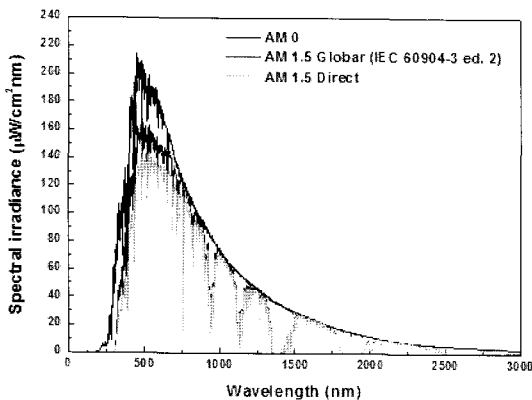


그림 2. 태양광 스펙트럼.

IEC 규격에 명시된 태양전지 성능평가 조건을 표준시험조건 (standard test condition, STC)이라 하며, 태양전지에 조사되는 빛의 스펙트럼은 AM 1.5 G 기준 스펙트럼, 빛의 조사강도는 100 mW/cm^2 , 측정하는 동안 태양전지 온도는 25°C 가 되는 조건을 말한다. 이때, AM은 Air Mass(대기 질량지수)의 약자로서 지표면에 연직인 가상의 선과 태양이 이루는 각도를 θ 라 할 때 $AM=1/\cos\theta$ 로 정의된다. 즉, AM 1.5는 θ 가 약 48.2° 일 때 (태양이 지표면으로부터 약 41.8° 의 각도로 떠 있을 때) 지표로 입사하는 태양광 스펙트럼을 의미하며, G는 Global의 의미로서, 태양으로부터 직접 전달되는 직달(direct) 광과 지표에서의 반사 및 대기입자에 의한 산란에서 기인하는 산란(diffuse) 광을 더한, 지표로 입사하는 유효 태양광 스펙트럼을 의미한다. 그림 2는 대기 질량지수 AM에 따른 태양광 스펙트럼을 보여주며, 그림에서 AM 0는 대기권 밖에서 측정되는 태양광 스펙트럼이다.

2.2 태양전지 성능평가의 일반적인 과정

그림 3은 태양전지 성능평가의 기본 과정을 나타낸 것이다. 태양전지 성능평가 시에는 표준시험조건(의 빛과 유사한 빛을 인공적으로 발생시켜주는 솔라시뮬레이터, 측정 시간동안 태양전지의 온도를 25°C 로 유지시켜주는 온도 유지 장치, 태양전지의 전류-전압 특성곡선을 측정해주는

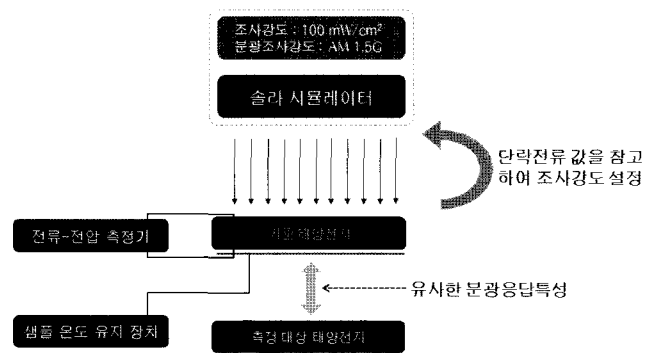


그림 3. 솔라시뮬레이터를 이용한 태양전지 성능평가의 개념도.

전류-전압 측정기, 그리고 기준 태양전지 등의 장치가 요구되며, 측정된 전류-전압 특성곡선을 보정해야 할 필요가 있을 경우 태양전지 분광응답 측정기, 분광복사계 등이 추가로 요구된다. 기준 태양전지는 표준시험조건에서 항상 일정한 단락전류를 출력하는 특성이 매우 안정된 태양전지로서, 솔라시뮬레이터의 조사강도를 표준시험조건(의 값인 100 mW/cm^2)으로 조정하는데 사용한다.

기준 태양전지를 이용하여 솔라시뮬레이터의 조사강도를 조정 한 후에는, 사용한 기준 태양전지를 제거하고, 기준 태양전지가 있던 자리에 측정하고자 하는 태양전지를 거치한 후, 측정대상 태양전지의 전류-전압 특성곡선을 측정하면 된다. 이때, 언급된 과정들이 진행되는 동안 샘플 온도 유지 장치를 사용하여 기준 태양전지와 측정대상 태양전지의 온도가 측정시간 동안 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 이내로 유지되도록 하여야 하며, 솔라시뮬레이터의 스펙트럼이 AM 1.5 G 기준 스펙트럼과 유사할수록, 그리고 사용된 기준 태양전지와 측정대상 태양전지의 분광응답 특성이 유사할수록 정확한 측정 결과를 얻을 수 있다.

2.3 기준 태양전지

앞에서도 언급했듯이 기준 태양전지는 표준시험조건 하에 있을 때 항상 일정한 단락전류(I_{sc}) 값을 출력하며, 넓은 광 조사강도 영역에서 출력 신호가 빛의 조사강도에 대해 선형성(linearity)을 가지고 있는, 광전기적 특성이 매우 안정된 태양전지로서, 태양전지 성능평가 시 솔라시뮬레이터의 광 조사강도 조정을 위한 기준기(reference)로 사용된다. IEC 규격에서는 기준 태양전지를 1년에 1회씩 재교정하도록 권고하고 있

* 조사강도(irradiance)는 측정면으로 입사하는 빛의 단위 시간당 단위 면적당 복사 에너지로 정의되며, W/cm^2 의 단위를 갖는다.

며, 재교정 결과가 최초 교정 결과에서 5% 이상 벗어날 경우 기준 태양전지로서의 적합성을 상실한 것으로 간주하여 폐기처분해야 한다고 규정하고 있다.² 기준 태양전지의 포장 방법 또한 IEC 규격에 명시되어 있으며, **그림 4**는 기준 태양전지의 포장 방법 및 현재 가장 일반적으로 사용되고 있는 기준 태양전지의 외관을 보여준다.

기준 태양전지는 교정 정밀도에 따라 1차 기준 태양전지와 2차 기준 태양전지로 나눌 수 있는데, 2차 기준 태양전지의 경우 자연광이나 인공광원 하에서 1차 기준 태양전지와와의 상대 비교를 통해 교정된 기준 태양전지로서, 일반적인 상용 태양전지 성능평가에 주로 사용된다. 1차 기준 태양전지는 태양전지보다 상위의 광 조사강도 측정 표준기들을 사용하여 교정된 태양전지로서, SI 단위계 혹은 국제복사기준(world radiometric reference, WRR)에 대한 소급성을 가지고 있다.

2.4 태양전지 성능평가의 유의점

태양전지 성능평가 시 솔라시뮬레이터 조사광과 AM 1.5 G 기준 스펙트럼 사이의 일치도가 충분한 수준이 아니고, 사용한 기준 태양전지와 측정대상 태양전지의 분광응답 특성 또한 유사성이 떨어진다면, 측정된 결과를 신뢰성 있는 데이터로 받아들일 수 없다는 것이다. 이것의 원인은 스펙트럼 불일치에 의한 측정결과 왜곡 때문인데, **그림 5**를 살펴보면 이를 이해하기 쉽다. **그림 5**에서 (1)은 사용하고자 하는 솔라시뮬레이터의 분광조사강도(spectral irradiance; 두꺼운 실선)와 AM 1.5 G 기준 스펙트럼(얇은 실선)을 나타낸 것이며, 이해를 돕기 위하여 솔라

시뮬레이터의 분광조사강도를 그림에서와 같은 모양으로 가정하였다. (2)는 일반적인 결정질 실리콘 기준 태양전지의 분광응답도(spectral responsivity)를 나타낸 것이며, (3)은 해당 결정질 실리콘 기준 태양전지를 이용하여 (1)의 솔라시뮬레이터를 조정한 결과를 나타낸 것이다. (3)에서 보느냐와 같이 결정질 실리콘 기준 태양전지를 이용하여 (1)의 솔라시뮬레이터를 조정할 경우, 결정질 실리콘 기준 태양전지의 분광응답 영역인 300~1200 nm 영역에서는 솔라시뮬레이터 조사광과 AM 1.5 G 기준 스펙트럼이 잘 일치 하지만, 그 이외의 영역에서는 솔라시뮬레이터 조사광과 AM 1.5 G 기준 스펙트럼이 제대로 일치하지 않는 것을 알 수 있다. 이러한 상황에서 (4)와 같은 분광응답 특성을 가지는 (즉, 결정질 실리콘 기준 태양전지와 전혀 다른 분광응답 특성을 가지는) 태양전지를 측정한다면, 측정된 전류-전압 특성곡선은 AM 1.5 G에서의 측정값이라 볼 수 없으며, 따라서 믿을 수 없는 결과가 된다.

이러한 스펙트럼 불일치로 인한 측정결과 왜곡을 최소화하기 위해서, 최근에는 결정질 실리콘 태양전지용 기준 태양전지 이외에 다양한 종류의 기준 태양전지들이 해외를 중심으로 보급되고 있다. 예를 들어 유기, 염료감응 및 일부 박막 태양전지 성능평가에 사용되는 전용 기준 태양전지들이 일본, 미국, 독일 등 선진국가의 교정기관으로부터 생산/보급되고 있으며 (이러한 태양전지 들은 기존의 결정질 실리콘 기준 태양전지에 필터를 장착하여 제작된다). 최근에는 이와 관련한 규격들도 활발히 제정되고 있는 실정이다.

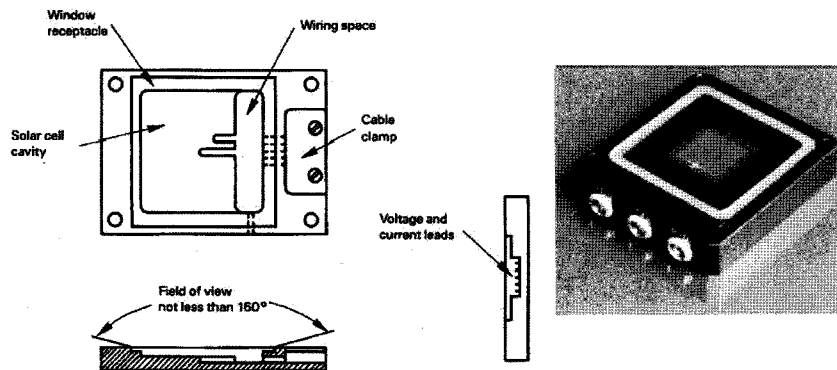


그림 4. 기준 태양전지의 외관 및 포장 방법 개략도.

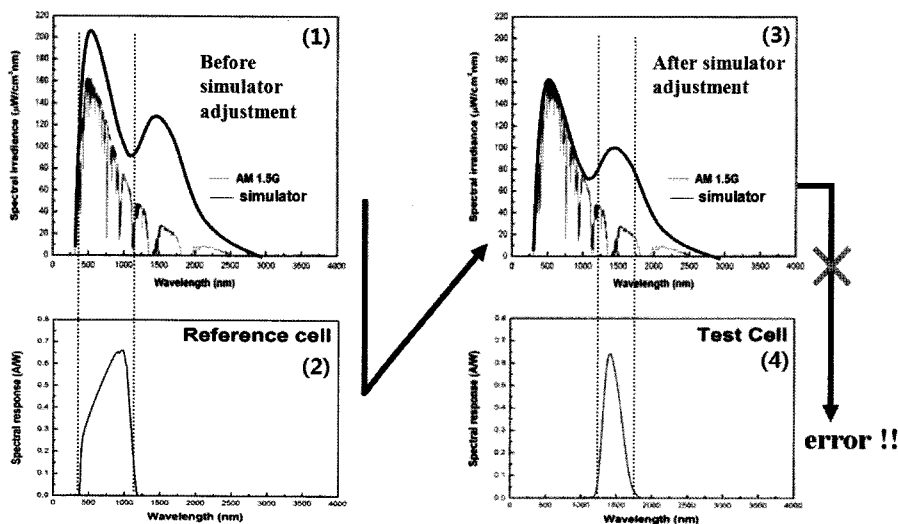


그림 5. 기준 태양전지와 측정대상 태양전지의 분광응답 특성 불일치로 인하여 측정결과에 왜곡이 발생하는 과정.

3. 측정된 전류-전압 특성곡선의 보정

3.1 보정이 필요한 이유

실제 태양전지 성능평가 시에는, 솔라시뮬레이터 조사광과 표준시험조건이 요구하는 광조건 사이의 유사도가 충분한 수준이 아닌 경우가 많으며, 또한 기준 태양전지와 측정대상 태양전지의 분광응답 특성에도 어느 정도 차이가 항상 존재하게 된다. 따라서 실험실 수준이 아닌 인증을 위한 정밀 성능평가를 위해서는 측정된 전류-전압 특성곡선을 보정해주는 과정이 반드시 필요하게 되며, 이 보정과정 또한 태양전지 성능평가의 범주에 포함된다. 태양전지 성능평가 시 보정이 필요한 이유를 좀 더 세분화 하여 정리해 보면 다음과 같다.

1) 기준 태양전지를 이용하여 솔라시뮬레이터의 조사강도를 조정하는 것은 시험자의 감각에 의존하는 일이기 때문에 완벽하게 100 mW/cm²을 맞추기가 매우 어렵다. 따라서 대부분의 경우 조사강도에 약간의 오차가 있는 상태에서 측정이 이루어지게 되며, 이에 따른 보정이 필요하다. 아울러 기준 태양전지(2×2 cm²) 보다 면적이 큰 태양전지를 측정할 때에는 솔라시뮬레이터 조사광의 공간 균일도까지 고려해주어야 하며, 이 경우에는 전체 측정 면에서의 조사강도 평균값을 산출하여 보정이 이용한다.

2) 솔라시뮬레이터의 스펙트럼이 AM 1.5 G 기준 스펙트럼과 완벽하게 같을 수는 없기 때문에 항상 어느 정도의 불일치가 존재하며, 아울러 솔라시뮬레이터 조정을 위해 사용한 기준 태양전지와 측정대상 태양전지의 분광응답 특성 또한 완벽히 같을 수가 없다. 따라서 정밀한 성능평가를 원한다면 이러한 스펙트럼 불일치 효과에 대한 보정이 필요하다. (IEC 규격에서 정한 AAA 등급 솔라시뮬레이터를³ 사용했다 할지라도 측정된 전류-전압 특성곡선만으로 신뢰성을 확보하기에는 충분하지 못한 경우가 많다)

3) 추가로, 측정을 수행하는 동안 태양전지의 온도가 25±1 °C 이내로 유지되지 않았을 경우, 이를 반영하여 추가적인 보정이 이루어져야 한다. 단, 25±1 °C의 조건이 지켜졌다면, 측정기간 동안의 온도 변화(±1 °C)는 앞의 두 효과에 비해 상대적으로 미미한 효과를 주기 때문에 이에 대한 보정은 무시해도 좋다.

다음으로는 언급된 원인들에 대한 보정 방법을 이론적으로 간단히 살펴보고자 한다.

3.2 온도 및 조사강도에 대한 보정

측정을 수행하는 동안 태양전지의 온도나 솔라시뮬레이터의 조사강도가 표준시험조건에서 제시하는 값과 달랐을 경우에는 식 (1)과 (2)를 이용하여 측정된 전류-전압 특성곡선을 보정할 수 있다.

$$I_{cor} = I_m + I_{sc,m} \left[\frac{G_{REF}}{G_{simulator}} - 1 \right] + \alpha(T_{REF} - T_m) \quad (1)$$

$$V_{cor} = V_m - R_s(I_{cor} - I_m) - K I_{cor}(T_{REF} - T_m) + \beta(T_{REF} - T_m) \quad (2)$$

여기서, I_m 과 V_m 은 측정된 전류-전압 특성의 데이터값, I_{cor} 과 V_{cor} 은 보정된 전류-전압 특성의 데이터값, $I_{sc,m}$ 은 측정된 단락전류, $G_{simulator}$ 는 기준 태양전지로 측정된 솔라시뮬레이터의 조사강도, G_{REF} 는 표준시험 조건의 조사강도, T_m 은 측정 시의 태양전지 온도, T_{REF} 는 표준시험조건의 샘플온도(즉, 25 °C), α 와 β 는 표준시험조건 근처에서 측정대상 태양전지의 전류 및 전압 온도계수, R_s 는 측정대상 태양

전지의 직렬저항, 그리고 K 는 곡선 보정인자이다.

이때, 일반적인 상용 결정질 실리콘 태양전지의 경우 α , β , R_s 및 K 의 값이 충분히 작기 때문에, 솔라시뮬레이터의 조사강도를 100 mW/cm²에 매우 가깝게(수 % 이내로) 조정하고, 측정을 수행하는 동안 태양전지의 온도를 25±1 °C 이내로 유지하였다면, 식 (1)과 (2)에서 ($T_{REF} - T_m$) 및 ($I_{cor} - I_m$)이 포함된 항들은 무시가 가능하며, 아래와 같이 간단한 형태로 바꿀 수 있다.

$$I_{cor} \approx I_m + I_{sc,m} \left[\frac{G_{REF}}{G_{simulator}} - 1 \right] \quad (3)$$

$$V_{cor} \approx V_m \quad (4)$$

아울러 온도 및 조사강도에 대한 보정 방법은 추가로 몇 가지가 더 개발되었지만⁴ 언급된 식들을 이용하는 방법이 가장 널리 쓰이고 있으며, 기타 α , β , K 및 R_s 를 구하는 자세한 방법은 참고문헌 3을 참조하도록 한다.

3.3 스펙트럼 불일치에 대한 보정

측정된 전류-전압 특성곡선에 대해 스펙트럼 불일치 보정을 하려면 솔라시뮬레이터의 분광조사강도 측정이나, 기준 태양전지 및 측정대상 태양전지의 분광응답도 측정이 추가로 필요하다. 이러한 추가 측정이 완료되면 아래 식 (5)을 통해 스펙트럼 불일치 보정을 할 수 있다.⁵

$$I_{cor} = I_m \times MMF = I_m \times \frac{\int \Phi_{AM1.5}(\lambda) S_{sample}(\lambda) d\lambda}{\int \Phi_{simulator}(\lambda) S_{sample}(\lambda) d\lambda} \times \frac{\int \Phi_{simulator}(\lambda) S_{ref}(\lambda) d\lambda}{\int \Phi_{AM1.5}(\lambda) S_{ref}(\lambda) d\lambda} \quad (5)$$

여기서, $\Phi_{simulator}$ 와 $\Phi_{AM1.5}$ 는 솔라시뮬레이터의 분광조사강도와 AM 1.5 G 기준 스펙트럼의 분광조사강도, S_{ref} 와 S_{sample} 은 기준 태양전지와 측정대상 태양전지의 분광응답도, 그리고 MMF 는 스펙트럼 불일치 보정인자(spectral mismatch correction factor)를 나타낸다. 이때 식 (5)에서 ①항은 측정대상 태양전지를 솔라시뮬레이터 조사광과 AM 1.5 G 기준 스펙트럼 하에 각각 두었을 때 측정대상 태양전지가 출력하는 전류값의 비율(엄밀하게 말하면 단락전류밀도의 비율)을 나타내며, ②항은 솔라시뮬레이터의 분광조사강도가 AM 1.5 G 기준 스펙트럼과 얼마나 유사한가를 비교하는 항으로서, 유사도를 비교하는 기준은 사용한 기준 태양전지가 된다.* 아울러 식 (5)에는 한 가지 중요한 특징이 있는데, S_{ref} 와 S_{sample} 그리고 $\Phi_{simulator}$ 가 모두 분자와 분모에 동시에 들어가 있다는 점이다. 이것의 의미는 스펙트럼 불일치를 보정하기 위해 식 (5)를 계산할 경우, S_{ref} 와 S_{sample} 그리고 $\Phi_{simulator}$ 의 절대값(absolute value)이 필요하지는 않고 파장별 상대값(relative value)만 정확히 측정하면 된다는 것이다.

일반적으로 온도 및 조사강도에 대한 보정과 스펙트럼 불일치에 대한 보정을 모두 수행할 필요가 있는 경우에는 온도 및 조사강도에 대한 보정을 먼저 수행하고, 해당 결과에 대해 다시 스펙트럼 불일치 보정을 수행하도록 한다.

3.4 온도, 조사강도 및 스펙트럼 불일치 효과의 일괄 보정

최근 개정된 전류-전압 특성곡선 보정관련 IEC 규격에서는 온도, 조사강도 및 스펙트럼 불일치 효과에 대한 보정을 한 번에 수행하는 통합

* $\int \Phi(\lambda) S(\lambda) d\lambda$ 는 분광조사강도 Φ 인 빛을 분광응답도 S 인 태양전지에 조사했을 때 해당 태양전지가 출력하는 단락전류밀도라는 점에 유의하도록 하라.

된 방법이 소개되어 있다.⁶ 이 방법에서는 우선 스펙트럼 불일치 보정인자 MMF 를 이용하여 식 (6)으로 정의되는 솔라시뮬레이터의 유효 조사강도를 계산하도록 한다.

$$G_{eff} \text{ (at ref. spectrum)} = G_{simulator} / MMF \quad (6)$$

여기서, $G_{simulator}$ 는 기준 태양전지로 측정된 솔라시뮬레이터의 조사강도이고, G_{ref} 는 AM 1.5 G 기준 스펙트럼의 빛을 측정대상 태양전지에 조사하여, 측정대상 태양전지가 솔라시뮬레이터 조사강도 $G_{simulator}$ 하에서 출력했던 단락전류와 동일한 크기의 단락전류를 출력하도록 하였을 때, 이 상태에서 기준 스펙트럼의 조사강도를 의미한다. 이렇게 G_{eff} 를 계산하고 나면 이 계산결과를 앞의 식 (1)에 대입(즉, 식 (1)의 $G_{simulator}$ 자리에 G_{eff} 를 대입)한 후, 새로워진 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 보정을 수행하면 된다. 이렇게 하면 온도, 조사강도 및 스펙트럼 불일치 효과에 대한 보정을 한 번에 수행하는 것이 되며, 결과 또한 온도 및 조사강도에 대한 보정과 스펙트럼 불일치에 대한 보정을 따로 수행하는 방법과 동일하다.

3.5 보정의 한계

앞에서 살펴본 바와 같이 표준시험조건과 다소 차이가 있는 실험조건에서 측정대상 태양전지의 전류-전압 특성곡선을 얻었다 할지라도, 몇 가지 정보를 이용하여 적절히 보정을 해주면 표준시험조건에서의 전류-전압 특성곡선으로 환산할 수 있다. 그러나 이러한 보정이 언제나 유효한 것은 아니다. 언급된 전류-전압 특성곡선 보정이 유효하려면 측정대상 태양전지가 온도 및 파장별 조사강도에 대해 선형성(linearity)을 가지고 있어야 한다. 즉, 온도 혹은 파장별 조사강도가 변하면 태양전지의 전기적 특성 또한 이에 따라 선형적으로 변해야 하는데, 기준 태양전지를 제외한 대다수의 태양전지들은 표준시험조건 근처의 제한적인 영역에서만 이러한 성질이 보장된다. 따라서 전류-전압 특성곡선 측정 시 표준시험조건과의 유사성이 현저히 떨어지는 실험조건을 사용한 경우, 측정된 결과를 보정한다 하더라도 표준시험조건에서의 전류-전압 특성곡선으로는 환산되지 않으며, 가능한 표준시험조건과 유사한 실험조건에서 측정을 해야만 보정을 통해 표준시험조건에서의 전류-전압 특성곡선을 얻을 수 있다.

4. 솔라시뮬레이터 분광조사강도 측정 및 태양전지 분광응답도 측정

본 절에서는 측정된 전류-전압 특성곡선의 스펙트럼 불일치 보정에 요구되는 솔라시뮬레이터 분광조사강도 측정과, 태양전지 분광응답도 측정에 대하여 기술하고자 한다. 태양전지의 분광응답도는 스펙트럼 불일치 보정 이외에도 태양전지 분석을 위해 자주 사용되는 측정 데이터 중 하나이다.

4.1 솔라시뮬레이터 분광조사강도 측정

솔라시뮬레이터의 분광조사강도는 솔라시뮬레이터가 방출하는 빛의 파장별 조사강도로서 단위는 W/cm^2nm 이다. 솔라시뮬레이터의 분광조사강도 측정을 위해서는 분광복사계(spectroradiometer)라는 측정기와 표준전구(standard lamp)라는 표준기(standard)가 요구되는데, 표준전구는 정해진 동작전류에서 항상 일정한 빛(스펙트럼과 세기가 일정한 빛)을 방출하는 특성이 매우 안정된 전구이다. 표준전구는 각 국가의

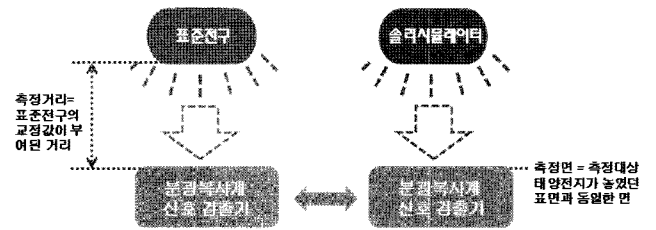


그림 6. 표준전구와 분광복사계를 이용한 솔라시뮬레이터 분광조사강도 측정의 원리.

표준유지기관(한국의 경우, 한국표준과학연구원)에서 교정되어 공급되며, SI 단위계에 대한 소급성(traceability)을 가지고 있다.⁷

그림 6은 표준전구와 분광복사계를 이용한 솔라시뮬레이터 분광조사강도 측정의 원리를 간단히 나타낸 것이다. 솔라시뮬레이터 분광조사강도 측정(분광복사계를 이용하여) 표준전구가 방출하는 빛과 솔라시뮬레이터가 방출하는 빛을 서로 비교하는 방식으로 이루어지며, 이러한 측정원리 때문에 측정의 정밀성이 표준전구의 교정정밀도에 크게 영향을 받는다. 아울러, 앞서도 언급했듯이, 스펙트럼 불일치 보정에는 솔라시뮬레이터 분광조사강도의 절대값 측정이 필요치 않고, 파장별 상대값만 정확히 측정하면 된다는 것을 기억하자. 따라서 표준전구와 분광복사계 센서 사이의 거리 혹은 솔라시뮬레이터와 분광복사계의 센서 사이의 거리가 극도로 정밀해야 할 필요는 없다.

4.2 태양전지의 분광응답도 측정

태양전지의 분광응답도는 입사하는 빛의 파장별 조사강도(W/cm^2)에 대해 태양전지가 출력하는 단락전류밀도(A/cm^2)의 비율, 혹은 입사하는 빛의 파장별 출력(W)에 대해 태양전지가 출력하는 단락전류(A)의 비율로 정의되며, 단위는 A/W 이고, 입사하는 빛의 파장에 관한 함수로 주어진다. 태양전지 분광응답도 측정의 기본원리는 측정용 단색광원을 표준검출기(standard detector)와 측정대상 태양전지에 번갈아 비추어가며 두 소자가 출력하는 응답전류를 비교하는 것이다.⁸ 분광응답도 측정용 표준검출기로는 특성이 안정되어 있는 Si 광다이오드나, InGaAs 광다이오드 등이 주로 사용되는데, 이들 또한 각 국가의 표준유지기관에서 교정된 후 공급되며, SI 단위계에 대한 소급성을 가지고 있다.

그림 7은 태양전지 분광응답도 측정 시스템의 일반적인 구조를 나타낸 것이다. 그림에서 monochromator와 filter wheel은 백색광원에서 나온 빛을 측정용 단색광으로 변환시켜 주는 장치이고, 표준검출기는 이 측정용 단색광의 출력 혹은 조사강도를 측정하는데 사용된다. 표준검출기를 이용하여 측정용 단색광의 파장별 출력이나 조사강도를 측정하고 나면, 측정대상 태양전지를 표준검출기가 있던 자리에 위치시킨 후, 해당 태양전지에 단색광을 조사하며 단락전류 혹은 단락전류밀도를 기록한다. 이 과정들이 끝나고 나면 2가지 데이터를 얻을 수 있는데, 첫째는 표준검출기로 측정한 측정용 단색광의 파장별 출력(혹은 조사강도) 데이터이고, 둘째는 측정대상 태양전지가 측정용 단색광에 반응하여 출력한 단락전류(혹은 단락전류밀도)이다. 이렇게 두 가지 데이터를 얻고 나면, 정의에 따라 이 두 데이터들을 서로 비교하여 분광응답도를 계산할 수 있다.

태양전지의 분광응답도를 측정할 때에는 몇 가지 주의해야 할 점이 있다. 첫째, 원칙적으로 분광응답도 측정은 표준시험조건과 동일한 환경에서 이루어져야 한다는 점이다. 성능이 안정된 결정질 실리콘 태양전지를 제외하고 많은 수의 태양전지들은 빛을 비추는 상태에서 비추지 않은 상태에서의 광응답 특성이 다르다. 이에 따라 해당 태양전지가 실제로 작

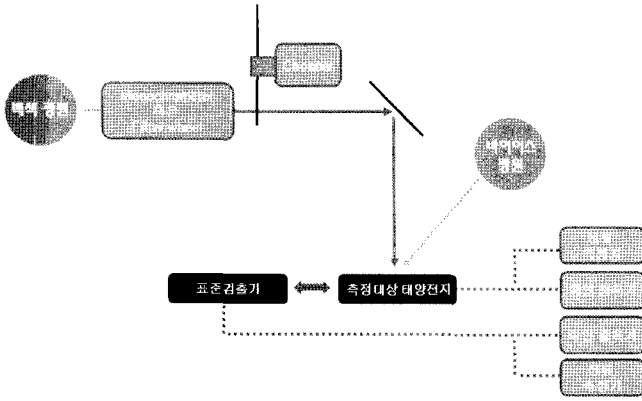


그림 7. 태양전지 분광응답도 측정 장치의 개략도(측정의 편의성과 정밀성 향상을 위해 monochrometer와 chopper 사이에 모니터 검출기를 두고 실시간으로 측정용 단색광의 출력을 모니터링하는 경우도 있다).

동되는 영역에서의 분광응답도를 측정하려면, 측정 대상 태양전지에 AM 1.5 G 기준 스펙트럼과 유사한 빛을 조사한 상태에서 측정이 이루어져야 하며, 측정 동안 태양전지의 온도도 25 ± 1 °C로 유지되어야 한다.

이와 같은 목적에서 대부분의 분광응답도 측정 장치들은 그림 7에서 보는 바와 같이 바이어스 광원을 가지고 있으며, 이 바이어스 광원을 이용해서 측정 동안 AM 1.5 G와 유사한 빛을 태양전지에 비추게 된다. 바이어스 광을 태양전지에 비추는 상태에서 분광응답도를 측정하려면, 측정용 단색광을 AC로 변조해야 할 필요성이 추가적으로 생긴다. 바이어스 광원이 비춰진 상태에서 DC 형태의 측정용 단색광을 사용하면, 바이어스 광에 대응하는 태양전지 응답전류와 측정용 단색광에 대응하는 응답전류의 구분이 불가능하기 때문이다. 측정용 단색광을 AC 변조하여 태양전지에 조사하면, 해당 단색광에 대응하는 태양전지의 응답전류 역시 AC 형태로 출력되게 되며, 이러한 AC 전류는 락인(lock-in) 증폭기를 이용하여 측정이 가능하다. 측정용 단색광의 AC 변조는 광학 초퍼(chopper)를 이용하여 수행하는데, 측정하고자 하는 태양전지의 광 응답 속도에 따라 적절한 초퍼 주파수를 선택해야 한다.

태양전지의 분광응답도를 측정할 때 두 번째로 중요한 점은 광학 초퍼의 초퍼 주파수 선택이다. 실리콘 계열 및 대다수 화합물 박막 태양전지는 대부분 수십 μsec 이하의 매우 빠른 광 응답속도를 가지고 있다. 이러한 태양전지들은 수십~100 Hz의 초퍼 주파수를 사용하면 적절한 분광응답도 측정이 가능하다. 그러나 염료감응 태양전지와 같은 일부 태양전지들은 수~수십 msec 이상의 상대적으로 느린 광 응답속도를 가지고 있으며, 이 경우에는 일반적인 분광응답도 측정 장비에서 제공하는 수십~100 Hz의 초퍼 주파수는 제대로 된 측정이 불가능하다. 광 응답속도가 느린 태양전지에 빠른 초퍼 주파수로 AC 변조시킨 측정용 단색광을 조사하면, 측정용 단색광에 대응하여 태양전지의 응답전류가 안정된 상태로 포화될 수 없기 때문이다. 수십 msec 정도의 느린 광 응답속도를 가진 태양전지의 경우, 올바른 분광응답도 측정을 위해서는 1 Hz 이하의 낮은 초퍼 주파수가 요구된다.

태양전지 분광응답도 측정의 세 번째 중요한 점은 현재 시중에서 판매되는 거의 모든 장비들이 절대 분광응답도(absolute spectral responsivity)를 제대로 측정할 수 없는 장비들이라는 점이다. 이것의 의미는 측정된 분광응답도의 파장별 상대분포는 신뢰할 수 있지만, 그 절대값(A/W라는 단위 앞에 있는 숫자들)은 믿을 수 없다는 것이다. 이러한 이유는 분광응답도 측정 장치에 사용되는 표준검출기의 교정에서 오는 한계

때문이다. 분광응답도 측정용 표준검출기들은 일반적으로 극저온 복사계나 포획 검출기들을 이용해서 교정된다. 이때 이 극저온 복사계와 포획 검출기 모두 미세한 광 출력을 측정하는 장치들로서, 이러한 장치들로 교정된 분광검출기 역시 매우 작은 광 출력에서만 교정값의 절대수치를 믿을 수 있다. 따라서 AM 1.5 G와 유사한 바이어스 광(분광응답도 표준검출기 교정에 사용되는 빛보다 조사강도가 몇 승 이상 강한 빛)을 비추며 태양전지의 분광응답도를 측정하는 것은 본질적으로 표준검출기 교정이 이루어지는 조건과 판이하게 다르며, 이 상황에서는 표준검출기의 조사강도에 대한 선형성이 검증되어있지 않는 한, 측정된 분광응답도의 절대값을 믿을 수 없게 된다. 단 여기서 말하는 “믿을 수 없다”의 기준은 측정된 분광응답도의 절대값에 수~10% 정도 오차가 있을 수 있다는 이야기이며, 수백% 씩 차이가 나서 전혀 믿지 못할 값이라는 의미는 아니다. 절대 분광응답도를 제대로(불확도 2% 이내로) 측정할 수 있는 장비는 현재 독일 PTB를 포함하여 전세계적으로 몇 군데의 표준유지기관 및 교정기관에서 운용하고 있다. 해당 기관들은 이 장비들을 1차 기준 태양전지 교정에 사용하고 있으며, 이와 같이 절대 분광응답도 측정을 이용하여 1차 기준 태양전지를 교정하는 방법을 미분적 분광응답도 교정법(differential spectral responsivity, DSR) 이라한다.

4.3 분광응답도와 양자효율

분광응답도와 유사한 개념으로 양자효율(quantum efficiency, QE)이 사용되기도 한다. 양자효율은 태양전지로 입사한 파장별 광자 수에 대해 태양전지에 의해 수집된 캐리어 수의 비율로 정의되며, 분광응답도와는 다음의 관계를 만족한다.

$$SR = \frac{q\lambda}{hc} QE \quad (7)$$

여기서, SR은 분광응답도, q 는 전자의 전하량, λ 는 입사광의 파장, h 는 플랑크 상수, c 는 광속도, QE는 양자효율이다. 양자효율은 분광응답도 측정결과를 식 (7)에 대입하여 얻을 수 있다.

태양전지의 분광응답도나 양자효율은 입사광에 대한 반사(reflection)나 투과(transmission) 등 태양전지가 가진 광학적 손실을 포함한 양이다. 그런데 경우에 따라서는 이러한 광학적 손실분을 제외하고 남은 빛에 대한 양자효율을 구하는 것이 유용할 때도 있다. 이렇게 태양전지가 가진 광학적 손실을 제외하고 구한 양자효율을 내부 양자효율(internal quantum efficiency, IQE)이라 하며, 내부 양자효율과의 구분을 위해서 식 (7)로 정의된 양자효율을 외부 양자효율(external quantum efficiency, EQE)이라 부르기도 한다. 내부 양자효율은 태양전지의 파장별 반사율과 투과율을 따로 측정함으로써 외부 양자효율로부터 계산할 수 있다. 참고로 외부 양자효율을 “입사 광자 대 전자 변환 효율”(incident photon-to-electron conversion efficiency, IPCE)이라 부르는 경우도 있다.

5. 결론

지금까지 태양전지 성능평가의 기본과정과 유의할 점들에 대해서 알아보았다. 태양전지 성능평가에는 솔라시뮬레이터, 샘플 온도 유지 장치, 태양전지 전류-전압 특성 측정기, 그리고 기준 태양전지 등 다양한 장치가 요구되며, 이때 기준 태양전지는 솔라시뮬레이터의 조사강도 조정에 사용되는 성능이 매우 안정된 태양전지이다. 태양전지 성능평가 시에

는 광원으로 사용되는 솔라시뮬레이터의 스펙트럼이 AM 1.5 G 기준 스펙트럼과 유사할수록, 그리고 사용된 기준 태양전지와 측정대상 태양전지의 분광응답 특성이 유사할수록 정확한 결과를 얻을 수 있다. 만약 이러한 조건들이 만족되지 않았을 경우에는 광원의 분광조사강도 및 태양전지의 분광응답도를 측정하여 전류-전압 특성 곡선을 보정함으로써 어느 정도 결과의 정밀도를 높일 수는 있지만, 이러한 보정에도 명확한 한계점이 존재하며, 가능한 보정이 최소화될 수 있도록 해야 한다.

이렇게 보정을 최소화하고, 성능평가의 정확도를 높이기 위해서는 측정대상 태양전지와 매우 유사한 분광응답 특성을 가지고 있는 전용 기준 태양전지의 사용이 요구된다. 이러한 목적으로 다양한 분광응답도를 가지는 기준 태양전지들이 일본, 미국, 독일 등에서 교정/보급되고 있으며, 이들은 새로이 시장에 출현하는 신형 태양전지들의 성능평가에 사용된다. 한편, 국내에서는 아직까지 결정질 실리콘 태양전지에 대한 성능평가 기술만이 확보되어 있는 실정으로(일부 박막 태양전지의 성능평가가 가능하나 극히 제한적이다), 신형 태양전지 성능평가를 위한 전용 기준 태양전지 교정 기술 및 성능평가 기술의 확보가 필요한 시점이다.

참고문헌

1. Solarbuzz, Marketbuzz® 2010 & 2011.
2. IEC 60904-2, Requirements for reference solar cells, 1989.
3. IEC 60904-9(e.d.2), Solar simulator performance requirements, 2007.
4. IEC 60891(e.d.2), Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics, 2009.
5. C. R. Osterwald, *Solar cells*, **18**, 239 (1986).
6. IEC 60904-7(e.d.3), Computation of the spectral mismatch correction for measures of photovoltaic devices, 2008.
7. H. W. Yoon, C. E. Gibson, and P. Y. Barnes, *Applied Optics*, **41**, 5879 (2002).
8. IEC60904-8(e.d.2), Measurement of spectral response of a photovoltaic (PV) device, 1998.