

## 옥외 관측을 통한 EVA, POE PV모듈의 열화 연구

김제하<sup>a</sup>

청주대학교 에너지융합학과

### Outdoor Testing and Degradation of EVA and POE Encapsulated Photovoltaic Modules

Jeha Kim<sup>a</sup>

Department of Energy Convergence, Cheongju University, Cheongju 28503, Korea

(Received August 31, 2016; Revised October 26, 2016; Accepted October 27, 2016)

**Abstract:** Using both EVA and POE encapsulants, we fabricated polycrystalline Si PV modules and performed a set of reliability tests of PID, DH, TC, and Complex prior to outdoor installation. The power output with temperatures and insolation as well as I-V characteristics had been monitored under outdoor environments for 18 months. In the entire period, the total power of 3,576 kWh from POE PV modules was observed larger than 3,449 kWh from EVA PV modules by 3.5%. All the PV modules showed a 5.6~9.2% drop in the conversion efficiency. As for the solar power generation, the PV modules performed through PID, TC test revealed distinct difference in between EVA and POE for which the POE PV module produced more power by +11.4% and +6.6%, respectively, as measured in the 18<sup>th</sup> month. In addition, POE was proved to protect better the solar cells under PID influence.

**Keywords:** EVA, POE, PV module, Outdoor monitoring, PID, DH, TC, Complex test, Reliability, Power output

#### 1. 서론

지구온난화 대응으로 글로벌 기후변화에 대한 인식이 제고되고 있다. 저탄소 친환경 태양광 (photovoltaic, PV) 기술은 셀의 광전환 효율 향상과 함께 모듈의 내구성 확보가 매우 중요한 요소가 되고 있다. 일반적으로 PV 모듈은 여러 태양전지 셀을 직렬 연결하여 원하는 출력전력을 결정하며, 셀의 앞/뒷면을 봉지재(encapsulant)로 둘러싼 양쪽에 각각 저철분 강화유리(Fe-glass)와 백시트(backsheet)로 밀봉 하게 된다. 이로써 태양전지 셀은 외부 대기 환경에서 20년 이상

의 내구성을 확보하게 된다.

태양전지 셀을 둘러싸는 봉지재는 습기, 먼지로부터 내부의 셀을 보호하고, 접착 및 완충 기능을 한다. 이는 PV 모듈의 내구성을 결정하는 중요한 요소이다. 셀 봉지재로서 EVA (ethylene vinyl acetate)가 가장 널리 사용되고 있으며, 최근에 신소재인 폴리올레핀 (poly olefin elastomer, POE)이 도입되고 있는 추세이다 [1,2].

EVA는 접착성, 유연성, 충격강도, 열융합성 등 고루 우수한 성질을 나타낸다. 그러나 분자구조상 초산비닐을 포함하고 있어, 고온다습한 환경에서는 초산이 발생할 확률이 높고, 이 초산이 모듈 내부소자에 접촉되어 산화반응하게 될 경우 셀 직렬저항의 증가를 발생하여 모듈 효율의 감소를 유발한다. 아울러 투습도가 상대적으로 높아서 대표적인 PV 모듈의 열화원인인 PID (potential induced degradation) 현상에 취약한 것

a. Corresponding author; [jeha@cju.ac.kr](mailto:jeha@cju.ac.kr)

**Table 1.** Summary of parameters of EVA, POE PV modules; before and after reliability test.

Parm.	Before reliability test				After reliability test				Encap-sulant
	Eff (%)	V <sub>oc</sub> (V)	I <sub>sc</sub> (A)	FF (%)	Eff (%)	V <sub>oc</sub> (V)	I <sub>sc</sub> (A)	FF (%)	
PID	15.67	38.3	8.9	74.2	13.01	37.3	8.7	65.1	EVA
	15.65	38.4	8.9	74.0	15.40	38.6	8.7	74.8	POE
TC	15.73	38.5	9.0	74.1	15.19	37.8	8.7	74.9	EVA
	15.64	38.3	8.9	74.0	15.18	37.8	8.7	74.9	POE
DH	15.68	38.3	8.9	74.0	14.40	38.1	8.7	74.8	EVA
	15.71	38.4	9.0	74.0	15.06	37.9	8.9	75.1	POE
Complex	15.69	38.3	8.9	74.2	15.40	37.9	8.8	75.1	EVA
	15.71	38.3	8.9	74.1	15.33	37.6	8.7	76.7	POE

으로 알려져 있다 [3,4]. 또한 자외선(UV)에 의한 변색으로 투과율이 감소되어 출력 저하가 발생한다 [5]. 이와 같은 이유로 POE가 대체재로서 검토되고 있으나 비싼 가격이 단점이다.

POE는 수분투과율이 EVA의 10%로 낮고, 고온다습 환경에도 안정하여 수상태양광 모듈에 적합한 봉지재로 활용되고 있다. 초산비닐을 포함하고 있지 않아 초산이 발생하지 않고 [6], 체적저항 또한 EVA 보다 높아서 PID 현상에 견딜 수 있는 봉지재로 알려져 있다.

본 연구는 EVA, POE PV모듈을 옥외 대기 환경에 18개월 동안 (2014. 3 ~ 2015. 9) 노출시켜 발전특성을 모니터링 하였다. 이 기간 동안 봉지재 소재와 기후 변화에 따른 I-V 변수, 발전량 결과를 비교하고 모듈의 열화에 대한 실증평가 및 분석 결과를 보고하고자 한다.

## 2. 실험 방법

폴리실리콘 PV모듈은 250 W × 2패널/세트, 4 세트를 기준으로 설계하였으며, EVA 및 POE 봉지재를 사용하여 각각 제작하였다 (총 4 kW/16장). 제작된 모듈의 최대출력 P<sub>max</sub>는 253.7±0.8 W로 균일한 성능을 보였다. 각 모듈별 발전량을 관측하기 위하여 뒷면에 마이크로인버터 (㈜한솔, HSPV-250, 최대입력전압 = 270 W)를 부착하였다. 모듈 뒷면과 대기 중에 설치한 열전대 (TC, thermocouple) 온도계를 이용하여 PV 모듈 및 환경온도를 측정했다.

옥외 신뢰성 모니터링을 위하여 4 kW 태양광발전 테스트베드를 구축하였다 (그림 1). 발전량, 기후정보 (모듈 온도, 대기온도, 직달 및 수평 일사량) 데이터는 전력선 통신(power line communication, PLC)을 통해 PC에 전달하여 저장하였다 [7]. 옥외 모니터링은



**Fig. 1.** Outdoor test bed of 4 kW PV modules (16 panels) on the roof of Cheonju Univ. Old Eng. Bldg. (E127°29'49", N36°39'9").

2014년 3월부터 2015년 9월까지(18개월) 기후정보와 PV모듈의 발전량을 관측을 실행하였다.

옥외 설치에 앞서 각 PV모듈의 에이징(aging) 효과를 가속화하기 위하여 국제 표준 시험기준에 준하여 PID (potential induced damage), DH (damp heat), TC (thermal cycle), 및 Complex 시험 [8] 등 신뢰성 평가를 수행 하였다. 각 시험 방법에 따라 모듈 1 kW 씩 평가를 하였다 (EVA PV모듈 500 W (2 패널), POE PV모듈 500 W (2 패널)). 표 1은 이상 4가지 시험 전·후에 측정한 PV모듈의 I-V 특성결과를 요약한 것이다. 이 시험 후 모든 모듈은 전환효율(Eff), 개방전압(V<sub>oc</sub>), 단락전류(I<sub>sc</sub>)에서 모두 지표 값의 2~4%의 감소를 보였다. 한편, 채움인자(fill factor, FF)의 경우 PID 시료를 제외하고 1.1~3.5%의 증가를 보였다. 공통적으로 PID 시험 후 EVA PV모듈에서 가장 큰 17.0%의 효율 감소가 관측되었는데, 주로 FF의 감소 (-12.3%)에 따른 것이었다. 반면에 PID POE PV모듈은 단지 -1.6%의 효율 감소를 보였다. 결과적으로 출

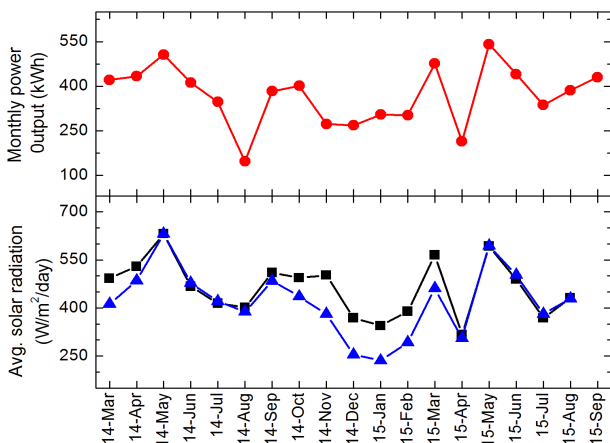
력 발전량의 감소는 PID EVA PV모듈에서 -16.4%로 가장 낮게 나타났으며, PID POE PV모듈은 -1.6%의 감소를 보였다. 본 연구는 이상의 신뢰성 테스트를 거친 모듈에 대하여 옥외발전량을 관측하였다.

### 3. 결과 및 고찰

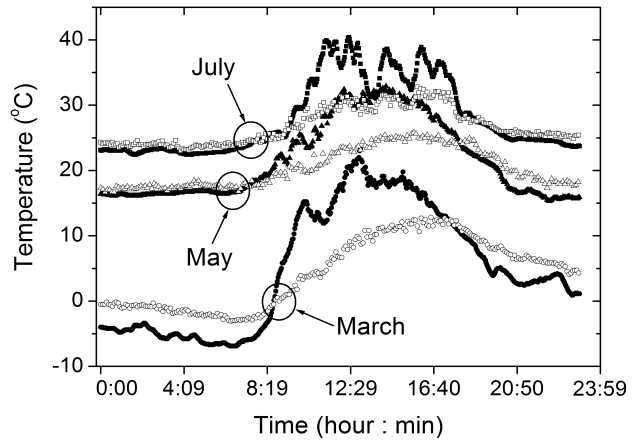
#### 3.1 기후 계측과 발전량

그림 2는 모듈의 월별 누적 발전량(위)과 수평, 수직 일사량과의 비교 그래프이다. 월별 발전량은 수평 일사량(global irradiance)보다는 직달 일사량(direct irradiation)과 직접적인 상관관계를 보였다. 가장 높은 월 평균 일사량은 5월에 가장 높았다 ( $631.8 \text{ W/m}^2$  (2014. 5),  $592 \text{ W/m}^2$  (2015. 5)). 그렇지만 월별 누적 발전량은 2015년 5월이 541 kWh로 가장 높았다. 옥외 테스트 베드 지점(청주; E127°29'49", N36°39'9")의 일사량은 여름에 오히려 낮아지다가 여름이 지나면서부터 다시 증가했다. 그 이유는 여름의 장마 기간의 흐린 날씨가 일사량에 포함되었기 때문이다.

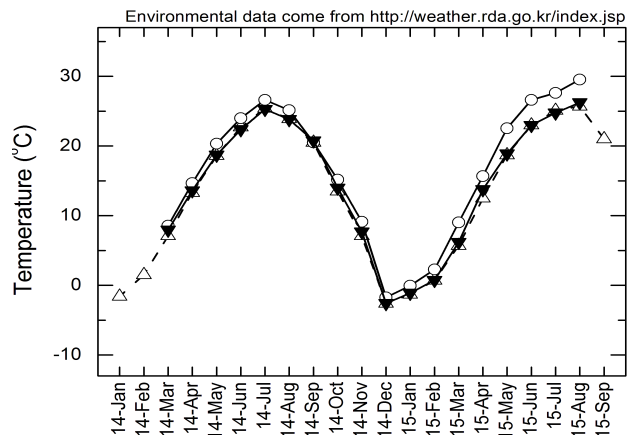
그림 3은 하루 동안 (24시간) 관찰한 대기(ambient) 온도와 PV모듈 온도의 변화이다 (2014년 3월, 5월, 7월). PV모듈의 온도는 대기온도보다 최고점에 더 3~4시간 빨리 도달했다. 최고 온도는 7월에  $40.3^\circ\text{C}$ 였으며 대기온도와 차이는 약  $8^\circ\text{C}$ 로 PV모듈 온도가 높았다.



**Fig. 2.** Monthly power output of all 16 modules (top) and average insolation (bottom); direct (■) and global solar irradiation (▲).



**Fig. 3.** Daily variation of PV module (closed symbol) and ambient temperatures (open symbol) in march, may and july 2014.



**Fig. 4.** Variation of temperature for PV module (○) ambient (▼), and KMA data (△) for the entire period of monitoring.

그림 4는 PV모듈 온도, 관측 대기온도, 기상청 보고 온도의 평균값 [9]을 비교한 그래프이다. 관측한 대기온도와 기상청 보고값의 차이는 1% 이내로 일치하였다. 2015년 8월 PV모듈 온도는  $29.5^\circ\text{C}$ , 대기온도는  $26.3^\circ\text{C}$ 로 가장 높았으며, 발전량은 386 kWh로 측정되었다 (그림 5). 반면 발전량이 가장 높았던 2015년 5월은 평균 모듈온도  $22^\circ\text{C}$ , 외기온도  $18.9^\circ\text{C}$ 로 측정되었다. PV모듈로부터 생산되는 발전량은 5월의 최고 일사량에서 최대값을 출력하였으며 (그림 2), 대기온도가 높은 7, 8월은 결정형 실리콘 태양전지의 온도에 따른  $V_{oc}$ 의 열화에 의한 효율감소와 우기의 일사량 부족의 결과로 분석되었다.

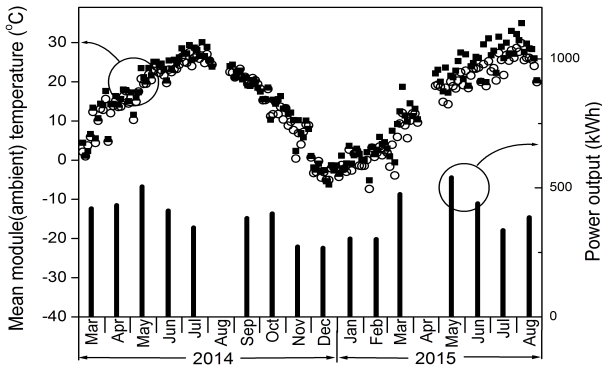


Fig. 5. Comparison of temperature (● for PV module, ○ for ambient data) and peak power output (kWh) of electricity (bar graph).

3.2 PV모듈의 발전량 분석

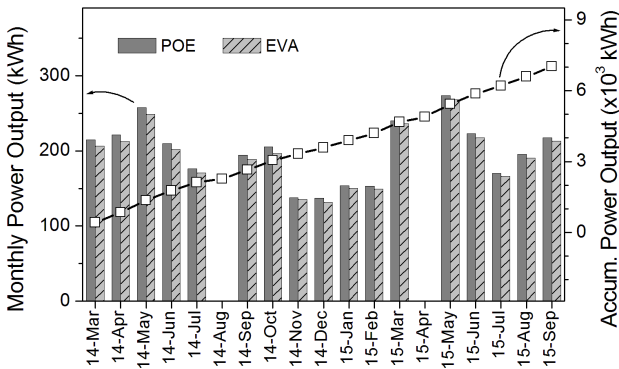


Fig. 6. Monthly power output for POE and EVA PV modules and accumulated power output for all period of monitoring for 18 months.

그림 6은 EVA와 POE PV모듈에 따른 총 발전량을 비교이다. POE PV모듈의 총 발전량은 188.2 kWh, 총 18개월간의 누적 발전량은 3,576 kWh였다. EVA모듈의 한 달 평균 발전량은 181.5 kWh, 18개월간 총 3,449 kWh로 발전되었다. 이 기간 동안 POE PV모듈의 발전량은 EVA PV모듈의 발전량에 비해 약 3.5% 많았다.

4가지 신뢰성 평가 중 PID 시험을 거친 EVA PV모듈과 POE PV모듈 사이의 I-V 특성 차이가 가장 많이 났기 때문에(표 1), 봉지재에 따른 PID 시험 모듈의 출력 차이를 비교하였다. POE PV모듈의 최대출력량,  $P_{max}$ 은 EVA PV모듈에 비하여 22% 많았다.

그림 7은 신뢰성 평가별 총 누적 발전량을 나타낸 것으로서 DH, 복합, TC, PID 시험 순으로 출력량이 많았다. 이는 또한, EVA와 POE PV모듈의 발전량 차이가 많이 나는 순서와 같다. EVA와 POE의 발전량 차이에 있어서 DH 시험 모듈이 누적 발전량이 가장 컸으며, 차이도 0.6%로 가장 적었다. 나머지 시험 모듈의 발전량은 POE PV모듈의 발전량이 더 높게 측정되었다. POE PV모듈은 EVA PV모듈에 비하여 PID 및 DH 시험 모듈에서 18개월 후 전력량 생산은 각각 +11.4%와 +6.6% 더 크게 나타났다(그림 7 (a), (c)). 시간이 진행됨에 따라 발전량의 격차는 더욱 커질 것으로 예상된다.

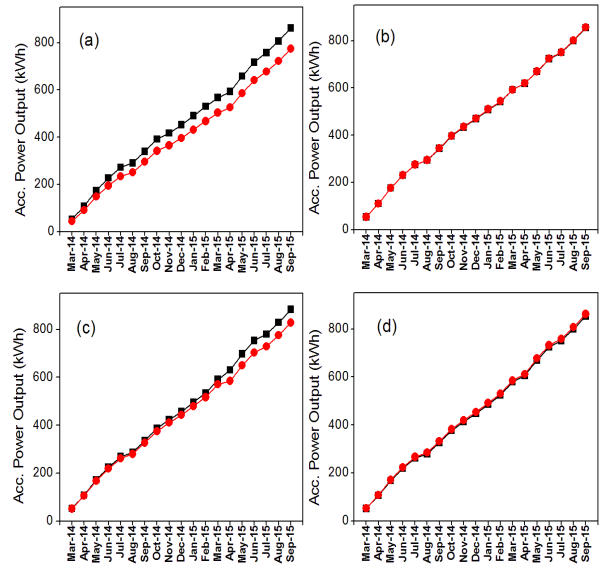
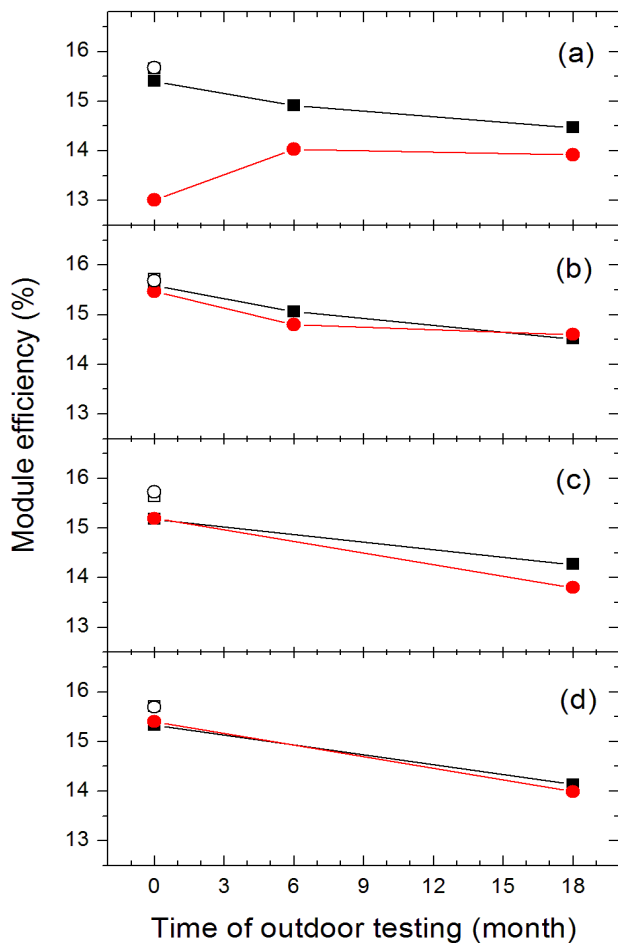


Fig. 7. Comparison of accumulated power output of EVA(●), and POE(■) PV modules for each reliability test; (a) PID (b) DH, (c) TC, and (d) complex.

3.3 PV모듈의 전환효율 변화

그림 8은 신뢰성 시험에 따른 각 EVA(○, ●)와 POE(□, ■) PV모듈의 옥외 실증기간 동안의 변환효율 변화를 보인다. 신뢰성 평가 전·후, 그리고 옥외노출 6개월 지난 후(PID, DH만)와 18개월 지난 후의 효율을 측정하였다. 시험 평가 후 모든 PV모듈에서 효율은 감소하였다. 특히, 그림 8(a)에 보이듯이 PID 시험 후 EVA PV모듈 효율(●)은 초기 효율 15.7%에서 13.0%로 시험 전 대비 17%나 급격하게 감소하였다.



**Fig. 8.** Degradation of conversion efficiency of EVA(●), POE (■) PV modules; (a) PID, (b) DH, (c) TC, and (d) complex.

그리고 6개월 후 14.0%로 다시 회복하였다가 18개월 후 13.9%로 하락하는 추세를 보였다. 이런 회복 현상은 재생(regeneration) 현상으로 아직 어떤 원리로 발생하는지 구체적으로 밝혀지지 않았지만 옥외노출 후 지속적인 PID 현상이 일어나지 않아 회복된 것으로 추정된다 [10,11]. 반면 POE 모듈은 시험 전·후의 효율 차이가 0.2%, 옥외에 노출되어 노화함에 따라 18개월 동안 단지 1.2%의 효율 감소가 측정되었다.

PID, DH, TC 시험 후 POE, EVA PV모듈 효율은 18개월 지난 후 약 5.6%~6.9%의 감소를 보였다. TC EVA PV모듈에 큰 -9.2%의 감소폭을 관측하였다. 복합(complex)시험을 거친 EVA, POE PV 모듈은 8.2~9.2%의 비교적 큰 변화를 보인 것으로 관측되어 이 시험은 모듈에 대한 손상을 가장 크게 주는 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

본 연구에서 EVA 및 POE 봉지재를 이용하여 PV모듈을 제작하여, PID, DH, TC, Complex 신뢰성 가속 시험을 하였으며, 18개월 동안 발전량 및 I-V 특성 변화를 모니터링 하였다. 이 기간 동안 POE PV모듈의 총 발전량은 3,576 kWh로 EVA PV모듈 대비 약 3.5% 많이 출력하였다. PID, DH, TC 시험 후 POE, EVA PV모듈 효율은 18개월 지난 후 약 5.6%~6.9%의 감소를 보였다. Complex 시험이 모듈 효율 감소는 8.2~9.2%였으며, 가장 큰 악영향을 주었다. POE 및 EVA PV모듈 간 성능 차이는 PID와 TC가 영향이 가장 컸는데, 18번째 달에 측정된 전력량 차이가 각각 +11.4%와 +6.6%로 나타났다. 시간이 경과함에 따라 그 차이는 더 커질 것으로 예상된다. POE는 PID 현상으로부터 PV모듈을 잘 보호하는 것으로 나타났다.

#### 감사의 글

이 논문은 2016학년도 청주대학교 산업과학연구소가 지원한 학술연구조성비(특별연구과제)에 의해 연구되었음.

#### REFERENCES

- [1] J. Yang, D. Lee, D. Baek, D. Kim, J. Nam, and P. Huh, *RSC Adv.*, **5**, 51258 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1039/C5RA03663A>]
- [2] I. Fidalgo, R. Merino, and B. Pérez, *Proc. 31<sup>st</sup> EU PVSEC* (Munich, Germany, 2016).
- [3] A. W Czanderna and F. J. Pern, *Sol. Energ. Mat. Sol. Cell.*, **43**, 101 (1996). [DOI: [https://doi.org/10.1016/0927-0248\(95\)00150-6](https://doi.org/10.1016/0927-0248(95)00150-6)]
- [4] P. S. Cast, H. Nagel, D. Wagenmann, J. Schoen, P. Schmitt, C. Reichel, S. W. Glunz, M. Hofmann, J. Rentsch, and R. Preu, *Proc. 28<sup>th</sup> EU PVSEC* (Paris, France, 2013) p. 789.
- [5] T. Kojima and T. Yanagisawa, *Sol. Energ. Mat. Sol. Cell.*, **81**, 119 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2003.09.003>]
- [6] K. Koch et. al., *Metallocene-based Polyolefins, Preparation, Properties, and Technology*, **2** (eds. J. Scheirs and W. Kaminsky) (Wiley, New York, 1999).
- [7] J. Kim and J. Shim, *J. Ind. Sci.*, **32**, 197 (2015).
- [8] UV, Temperature, Humidity, and Freezing Test (KS C

IEC 61215 Standard); UV test (280~385 nm, Optical Power  $\geq 15$  kWh/m<sup>2</sup>), solar power degradation below 4%; Photovoltaic module temperature 60±5°C; Relative Humidity 85%.

- [9] Rural Development Administration Weather Service, <http://weather.rda.go.kr/index.jsp>
- [10] J. Oh, S. Bowden, and G. TamizhMan, *IEEE J. Photovolt.*, **5**, 1540 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2015.2459919>]
- [11] E. S. Lee, T. H. Jung, S. H. Go, Y. C. Ju, H. S. Chang, and G. H. Kang, *J. Kor. Sol. Energ. Soc.*, **35**, 57 (2015).