



[2018-3-PV-006]

# 투과-곡선형 a-Si:H single-junction 태양전지 모듈의 1년 옥외 출력 분석

정재성<sup>1)\*</sup> · 박창균<sup>2)</sup>

## 1-year Outdoor Performance of a-Si:H Single-junction Photovoltaic Module of See-through and Curved Type

Jae-Seong Jeong<sup>1)\*</sup> · Chang-Kyun Park<sup>2)</sup>

Received 6 November 2017 Revised 16 March 2018 Accepted 20 March 2018

**ABSTRACT** An a-Si:H single-junction PV module was developed with see-through and curved physical characteristics. Its effective cell area was 74 cm<sup>2</sup> and its peak power and efficiency were 22.5 Wp and 5.26%, respectively (at 1000 W/m<sup>2</sup>, AM 1.5 G, 25°C). The power characteristics of the a-Si:H PV module were analyzed under authentic environmental conditions for one year. The module was installed horizontally, as required for use in automobiles. For the performance analysis, the system was constructed as a DC stand-alone power system and included an MPPT DC-DC charge controller, battery, and LED load resistor. The monitoring system simultaneously measured the output performance (voltage and current at the maximum power) and environmental factors (horizontal solar irradiation, ambient and module temperature, and wind speed) for the a-Si:H PV module, in order to analyze the changes in its performance caused by the environment. Data were measured every 10 s. The effective solar irradiation that could produce an output of 1 Wh or higher was in the range of 100 Wh/m<sup>2</sup>~110 Wh/m<sup>2</sup>. The maximum peak power after one year decreased by approximately 2.7 W (11.6%) at a horizontal solar irradiation of 1000 W/m<sup>2</sup> at an ambient temperature of approximately 35°C and module temperature of 52~56°C). The DC power yield, which was dependent on the solar irradiance (kWh/m<sup>2</sup>), was the highest in August.

**Key words** a-Si:H single-junction PV module(비정질 박막태양전지 모듈), see-through and curved type(곡선투과형), outdoor performance(옥외 출력)

### 1. 서론

비정질실리콘 박막 태양전지(hydrogenated amorphous silicon photovoltaic, a-Si:H PV)의 상용화 기술은 현재 single, tandem, triple 구조로 개발되어 있고 효율(power conversion efficiency, PCE)은 Solar cell efficiency

tables에 기반하여 14.0%까지 개발되어 있다<sup>[1,2]</sup>. 하지만 결정질 태양전지와 이를 기반한 태양전지에 비해 발전효율 극복에 어려움이 있어 a-Si:H PV가 가지고 있는 차별화된 장점을 부각시킨 제품들이 개발되고 있다.

반투과형 a-Si:H PV 모듈은 Fig. 1의 건물일체형 태양 전지(building integrated photovoltaic module, BIPV), Fig. 2의 자동차용 sun-roof(vehicle integrated photovoltaic module, VIPV)용으로 적용하는 시도가 계속되고 있다<sup>[3,4]</sup>. 또한 플렉서블 a-Si:H PV 모듈은 군사, 커튼월, 웨어러블 등 다양한 niche market에 적용하고 있다.

1) Electronic convergence material & device research center, Korea Electronics Technology Institute (KETI)

2) Advanced solar cell group, Jusung Engineering Co. Ltd.

\*Corresponding author: jjseicp@keti.re.kr

Tel: +82-31-789-7052

Fax: +82-31-789-7249



Fig. 1. BIPV system of Hanergy Co. Ltd



Fig. 2. New solar roof option for the 2017 Prius Prime developed by Panasonic

일반적인 그라운드 발전시스템과 같이 위도에 따라 최대 일사 각도로 설치된 태양광 발전시스템의 경우 발전량을 예측하기가 용이하다<sup>[5]</sup>. 그러나 태양전지 모듈이 자동차와 같은 이동형시스템, 건물과 같은 태양광 반사각 및 음영 변화 등 예측 불가능한 시스템은 실증을 통한 출력량 분석은 매우 중요하다.

a-Si:H PV 모듈의 옥외 출력분석을 통해 다양한 결과가 연구되었다. 남아프리카공화국에서 single, tandem, triple a-Si:H PV 모듈을 2년간 평가하여 출력변화와 열화를 분석하였다<sup>[6]</sup>. NREL에서는 a-Si 박막태양전지의 성능과 신뢰성을 확보하기 위해 a-Si:H 4개 제조사 별로 옥외평가를 통해 출력변화를 연구하였다<sup>[7]</sup>. 일본에서는 a-Si:H single-junction PV 모듈을 1991년도부터 11년간 옥외 가동을 통해 연간 열화율 2.0~2.8%가 평가되었다<sup>[8]</sup>. 열대기후와 같은 열악조건에서 a-Si:H PV 모듈과 다른 기술의 태양전지 간 출력 비교분석은 지속적으로 이루어지고 있다<sup>[9]</sup>. a-Si:H PV의 고유특성인 광열화 평가와 안정화 기법도 필드데이터 간 비교를 통해 연구되고 있다<sup>[10]</sup>.

투과-곡선형 a-Si:H single-junction PV 모듈(hydrogenated amorphous silicon single-junction photovoltaic

module of see-through and curved type)이 개발되었다. 본 연구에서는 실환경하에서 1년 동안 개발된 a-Si:H PV 모듈의 출력 특성을 분석하였다. 이 결과를 이용하여 최대 및 최소 DC 전력 생산량을 얻고 개발된 모듈의 에너지 활용률을 극대화하고자 한다.

## 2. a-Si:H single-junction PV 모듈

개발된 투과-곡선형 a-Si:H single-junction PV 모듈은 Fig. 3(a,b)과 같다. a-Si:H cell은 n-i-p 싱글 레이어 구조이고 plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) 공정으로 제작되었다. 전면과 후면 전극(TCO, transparent conductive oxide)은 molecular organic chemical vapor deposition(MOCVD) 공정으로 제작된 boron-doped Zinc oxide(ZnO:B)이 적용되었다. 상부 유리는 강화 유리이고, 기판 유리는 반강화 유리를 적용하였다. 봉지제는 황변과 같은 변색(discoloration)을 방지하기 위해 polyvinyl butyral(PVB) 필름을 적용하였고 리본



(a)



(b)

Fig. 3. Developed a-Si:H single-junction PV module of see-through and curved type (a) Top view (b) bottom view

Table 1. Electrical characteristics of the a-Si PV module under STC.

Parameters		unit	Values
Open circuit voltage	Voc	V	61,45
Open circuit current	Isc	A	0,62
Voltage at the maximum power point	Vmp	V	46,42
Current at the maximum power point	Imp	A	0,48
Max. peak power	Pmp	W	22,54
Series resistance	Rs	Ohm	16,42
Shunt resistance	Rsh	Ohm	702,20
Fill factor	FF		58,65
Power conversion module efficiency	Eff.	%	5,26

와이어(ribbon wire)는 3M의 유연 리본을 적용하였다. 투과율은 10%(@350~780nm)이고 곡선률 R=35~45mm이다. 태양전지 유효 셀 크기는 74cm<sup>2</sup> 이다. 솔라시뮬레이터(nisshinbo, sun 4600-S)를 이용하여 측정된 기준 출력 및 효율은 1000W/m<sup>2</sup>(AM 1.5G, 25°C) 측정조건하에서 Table 1의 I-V 그래프로 측정된 결과에서 볼 수 있듯이 각각 22.5Wp와 5.26%로 측정되었다.

### 3. 모니터링 시스템

자동차 선루프 태양전지 모듈 적용 시 발전량을 분석하기 위해 발전시스템과 모니터링은 Fig. 4와 같이 설계되었다. 이를 반영하기 위해 투과-곡선형 a-Si:H single-junction PV 모듈의 설치각을 그라운드와 동일 각도 0°인 수평으로 설치하였다. 일사량에 따른 최대 출력되기 위한 MPPT DC-DC charge controller, battery, LED load를

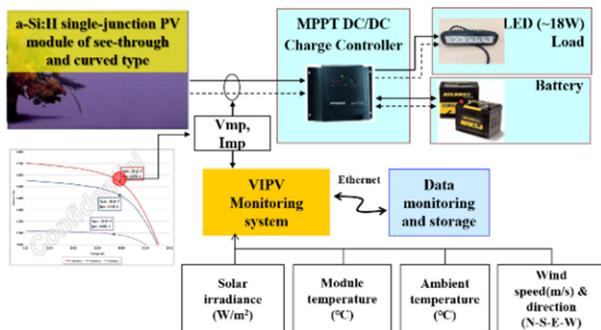


Fig. 4. DC Stand-alone power system for Monitoring



Fig. 5. Monitoring system used in outdoor testing for developed a-Si:H single-junction PV module

적용하여 Fig. 5와 같이 DC 독립형 발전시스템(Stand-alone power system)으로 구축하였다. 시스템은 전자부품연구원 옥상에 위치하였다. PV 모듈과 MPPT DC-DC charge controller 간 최대 전압(Voltage at the maximum power point, Vmp[V])과 전류(Current at the maximum power point, Imp[A])가 모니터링 시스템을 통해 수집된다. 동일 시간에 일사량(solar irradiance, W/m<sup>2</sup>), 외기온도(ambient temperature, °C), 모듈온도(module temperature, °C), 풍속(wind speed, m/s), 풍향(wind direction, N-S-E-W)의 5가지 환경 인자가 수집된다. 모든 데이터는 10초당 1회 데이터가 수집된다. 10초당 수집된 데이터는 1분 평균데이터와 1시간 평균데이터로 가공되어 서버에 저장된다.

### 4. 초기 및 1년 옥외 출력 특성

투과-곡선형 a-Si:H single-junction PV 모듈의 옥외 평가를 통한 1년간 수평일사량에 따른 최대 전력(maximum peak power, Pmp[W])의 분포값이 Fig. 6과 같이 측정되었다. 모듈은 제작 후 실험실에서 광열화 에이징을 하지 않고 초기상태로 옥외 평가를 실시하였다. 10초 데이터 기반 시간 평균으로 분석된 데이터를 통해 약 3Wh 분산특성을 보였다. 1Wh 이상의 출력 발생 유효일사량은 Fig. 7과 같

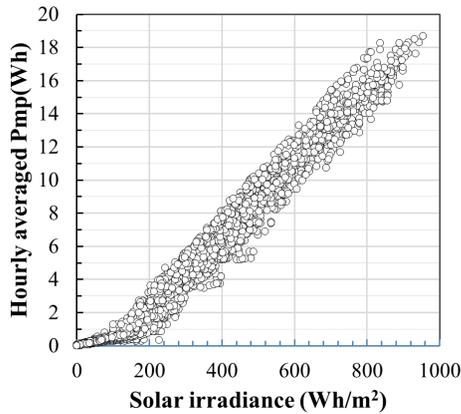


Fig. 6. Pmp distribution according to solar irradiance for 1-year outdoor performance of a-Si:H PV module

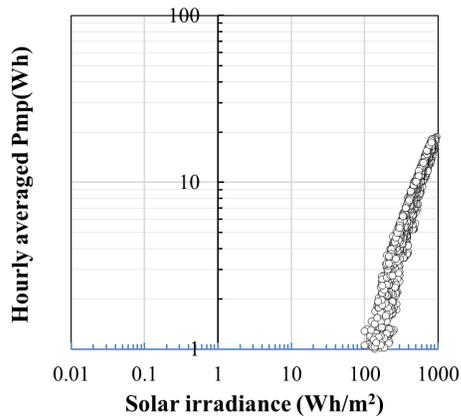


Fig. 7. solar irradiation range that can generate  $\geq 1$ Wh power

이  $100\text{Wh/m}^2 \sim 110\text{Wh/m}^2$  임을 알 수 있다.

투과-곡선형 a-Si:H single-junction PV 모듈의 옥외 평가를 통한 1년 동작 후 전기적 특성 열화를 분석하였다. Fig. 8(a~c)에서 볼 수 있듯이 초기 '16.7.28~31일 측정된 분 평균 데이터를 기준으로 '17.7.28~31일 측정된 데이터와 비교되었다.

옥외 수평일사량  $1000\text{W/m}^2$  (@외기온도  $\approx 35^\circ\text{C}$ , 모듈온도  $52^\circ\text{C} \sim 56^\circ\text{C}$ ) 조건에서 Fig. 8(a)와 같이 1년 후 Pmp는 약 2.7W(11.6%) 저하되었다. 이것은 Fig. 8(b~c)의 Vmp와 Imp 두 인자 모두 저하에 기여되었다.

'16.8월 분 평균 데이터는 일사량과 모듈 온도 조건에서 초기 발전 기간인 '16.7.28~31일 데이터보다 현저히 저하된 것을 Fig. 8(a)와 Fig. 9의 비교를 통해 알 수 있다. 옥외 수평일사량  $1000\text{W/m}^2$  (@외기온도  $\approx 35^\circ\text{C}$ , 모듈온도  $52^\circ\text{C} \sim 56^\circ\text{C}$ ) 조건에서 '16. 7. 28일~8. 24일 기간 동안 Pmp는

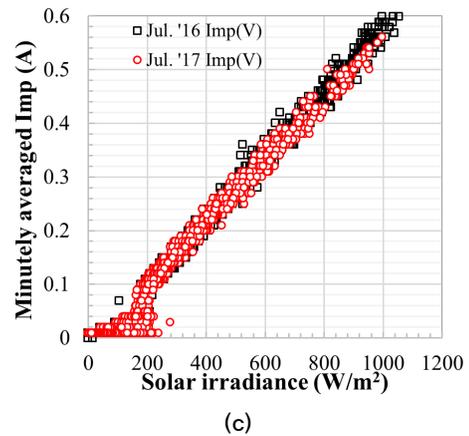
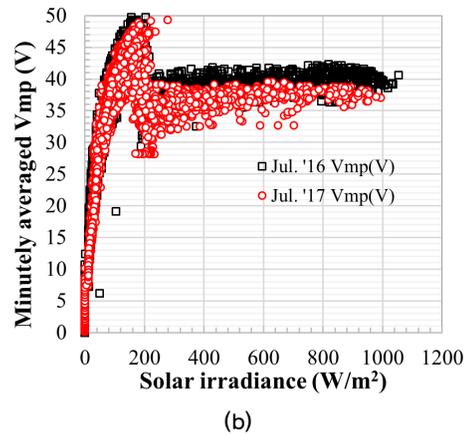
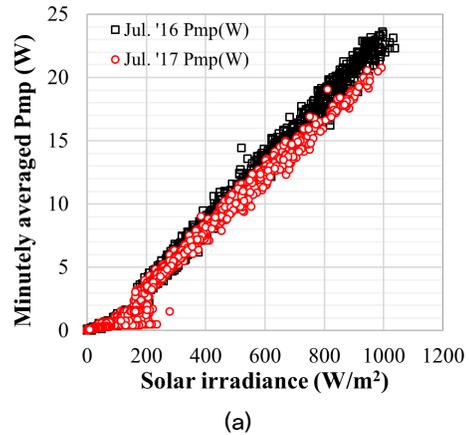


Fig. 8. Comparison of initial (July) and after 1-year (July) outdoor performance of a-Si:H PV module (a) Pmp (b) Vmp (c) Imp

약 3.8W(16%)가 저하되었다. 이것은 a-Si:H의 고유 특성인 광열화로 인해 발생하는 것으로 판단된다<sup>[9]</sup>. 같은 기간 '16.8월과 '17.8월을 비교하면 Fig. 10과 같이 '17.8월이 일사량  $500\text{W/m}^2$  이상에서 출력이 높아졌다. '16.8월은 초기 옥외노출 기간으로 광열화로 인해 지속적으로 출력 저하가

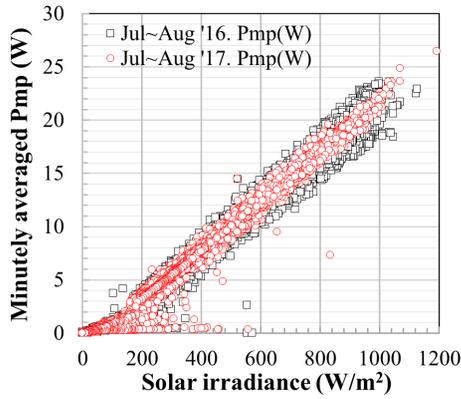


Fig. 9. Comparison of Jul~Aug. '16 and Jul~Aug. '17 after 1-year outdoor performance of a-Si:H PV module

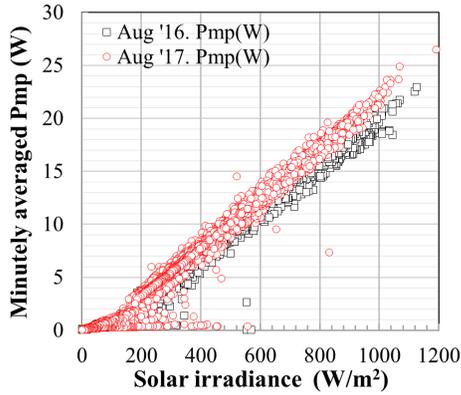


Fig. 10. Comparison of Aug. '16 and Aug. '17 after 1-year outdoor performance of a-Si:H PV module

발생되는 시점이고, '17.8월은 광열화가 안정된 후 모듈 온도 증가로 인한 어닐링 효과에 의한 것으로 판단된다<sup>[11-13]</sup>.

따라서 a-Si:H PV 모듈의 옥외 열화 평가기준은 Fig. 6의 시간 평균 연간 데이터 분포 변화와 Fig. 9의 평가 첫 달의 분 평균 데이터 분포, 두 가지를 활용하여 효과적인 평가가 가능함을 제안 할 수 있다.

투과-곡선형 a-Si:H single-junction PV 모듈은 Fig. 11~12와 같이 옥외 평가 1년 중 유효 모니터링 데이터 288일 동안 15.7kWh의 전력을 생산하였다. 전력 생산에 기여한 일사량은 Fig. 13과 같이 약 1012kWh/m<sup>2</sup>이다. 월별 전력생산량이 가장 큰 월은 봄인 5월이다. 그러나 kWh/m<sup>2</sup> 당 가장 많은 전력을 생산하는 월은 Fig. 14와 같이 8월이었다. 그 원인은 Fig. 15~16에서 분석된 결과와 같이 온도가 높을수록 출력은 증가되었다. 이것은 어닐링 효과에 의한 출력 증가로 해석된다.

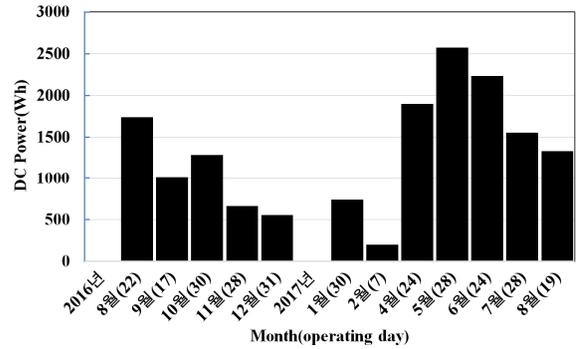


Fig. 11. DC power output each month

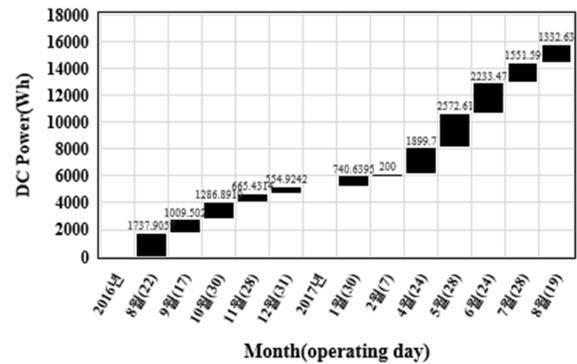


Fig. 12. Accumulation quantity of DC power each month

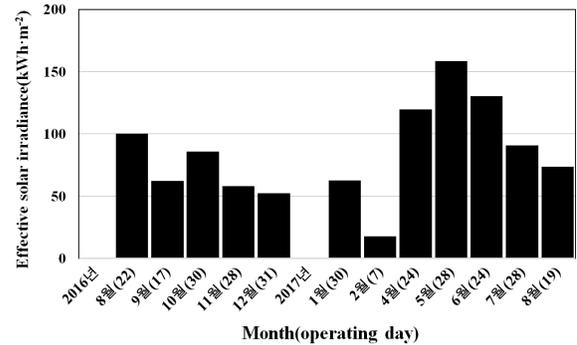


Fig. 13. Effective solar irradiation each month

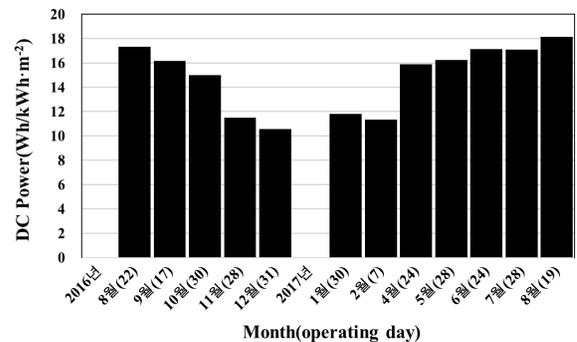


Fig. 14. DC power output per kWh·m<sup>2</sup> each month

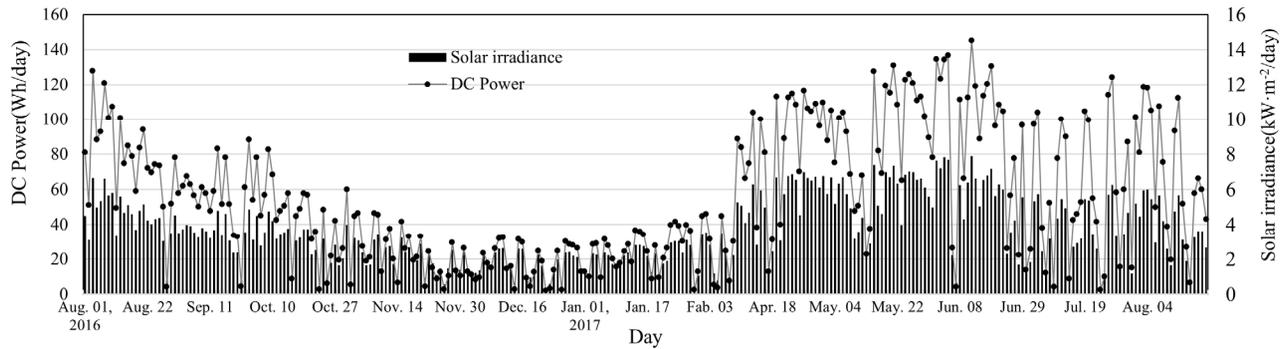


Fig. 15. DC power output according to solar irradiance

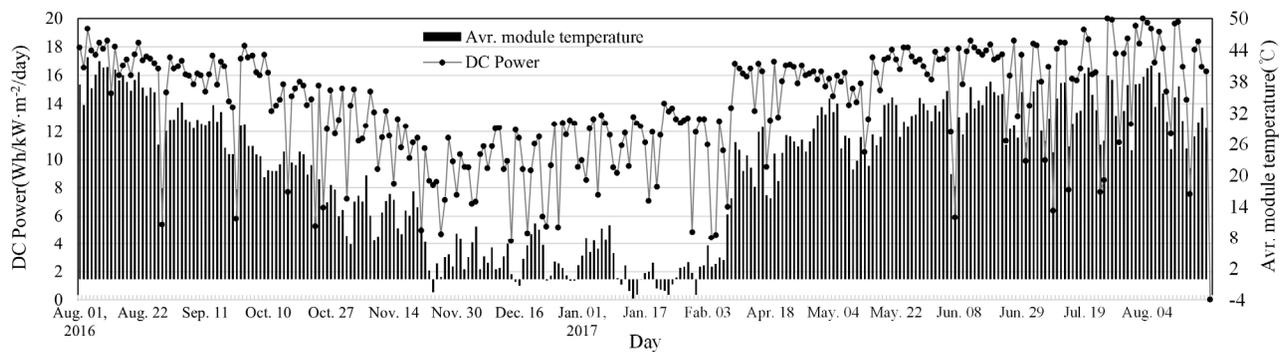


Fig. 16. DC power output under averaged module temperature

#### 4. 결론

개발된 투과-곡선형 a-Si:H single-junction PV 모듈에 대한 1년간 옥외 조건에서 출력을 분석하였다. 자동차 선루프 응용 조건을 반영하여 수평조건과 독립형 충전시스템으로 시스템을 구성하였고, 모니터링시스템을 연결하여 환경 인자와 태양전지의 출력을 동시간에 10초에 1회씩 데이터를 측정/수집하였다. 옥외 노출 시작 기간인 '16.7.28~31일'과 1년 후 동일 '17.7.28~31일' 간 데이터를 비교하면 Pmp는 약 2.7W(11.6%) 저하됨을 확인할 수 있었다. 옥외 노출 1년 경과 후 동일 하절기 기간인 8월에는 출력이 더 상승되었으며 이것은 모듈온도로 인한 어닐링 효과가 작용된 것으로 판단되었다. 월별 기준 일사량 kWh/m<sup>2</sup>으로 DC power yield는 8월에 가장 높았다.

1년 동안의 옥외 성능 평가를 통해 개발된 투과-곡선형 a-Si:H single-junction PV 모듈의 안정된 출력 성능을 검증할 수 있었다.

향후 3년 이상의 옥외 출력 분석을 통해 투과-곡선형

a-Si:H single-junction PV 모듈에 대한 성능과 열화를 모니터링하고 분석할 것이다.

#### Acknowledgment

본 연구는 2014년도 산업통상부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20143030011420).

#### References

- [1] Martin A. Green, Yoshihiro Hishikawa, Wilhelm Warta, Ewan D. Dunlop, Dean H. Levi, Jochen Hohl-Ebinger, Anita W.H. Ho-Baillie, "Solar cell efficiency tables (version 50)", Progress in Photovoltaics: Research and Applications 2017, 25(7): 668-676 DOI: 10.1002/pip.2909.
- [2] Elena Lorena Salabaş, Aurel Salabaş, Bogdan Mereu, Onur

- Caglar, Markus Kupich, Julian S. Cashmore and Ivan Sinicco, 2016, "Record amorphous silicon single-junction photovoltaic module with 9.1% stabilized conversion efficiency on 1.43m<sup>2</sup>", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 2016; 24(8): 1068-1074 DOI: 10.1002/pip.2760.
- [3] Rustu Eke, Ali Senturk, 2013, "Monitoring the performance of single and triple junction amorphous silicon modules in two building integrated photovoltaic (BIPV) installations", *Applied Energy* 109 (2013) 154-162.
- [4] Stephen Edelstein, "Now that's a sunroof: Toyota Prius Prime features Panasonic-built solar panels", *Digital trend*, Posted on March 1, 2017.
- [5] Jinqing Peng, Lin Lu, Hongxing Yang, Tao Ma, "Validation of the Sandia model with indoor and outdoor measurements for semi-transparent amorphous silicon PV modules", *Renewable Energy* 80 (2015) 316-323.
- [6] C. Radue n, E.E.vanDyk, "A comparison of degradation in three amorphous silicon PV module technologies", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 94, Issue 3, March 2010, Pages 617-622.
- [7] Stiebig, H., Reetz, W., Zahren, C., Repmann, T., Rech, B., "Stability of Thin-Film Silicon Solar Cells", *Conference record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, Volume: 2, 2006, Page(s) 1521-1524.
- [8] Kohji MASUDA, "Results of Field Tests in Japan", *International PV Module Quality Assurance Forum*, July 15<sup>th</sup> 2011, Moscone Center, San Francisco, CA, US.
- [9] Seung Duck Kim, Byung Euk Koh, Jin Hee Park and Dae In Cheon, "Comparative Study on Performance of Grid-Connected Photovoltaic Modules in Tropical Monsoon Climate under Thailand condition", *New&Renewable Energy* 2014. 9 Vol. 10, No. 3(39).
- [10] Kyungsoo Kim, "Current Induced Stabilization (CIS) of Large Area Commercial Amorphous Silicon Photovoltaic Module and Its Performance Variation", *New&Renewable Energy*, 2017. 3 Vol. 13, No.1(54).
- [11] M. Stutzmann, W. B. Jackson, and C. C. Tsai, "Light-induced metastable defects in hydrogenated amorphous silicon: A systematic study", *Phys. Rev. B* 32, 23-47 (1985).
- [12] Takeshi Yanagisawa, Takeshi Kojima, Tadamasa Koyanagi, Kiyoshi Takahisa, Kuniomi Nakamura, "Changes in the temperature coefficients of the characteristics of amorphous silicon solar cells subjected to light degradation and recovery", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 69, Issue 3, October 2001, Pages 287-291.
- [13] Tetsuyuki Ishii, Takumi Takashima, Kenji Otani, "Long-term performance degradation of various kinds of photovoltaic modules under moderate climatic conditions", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 2011; 19(2): 170-179 DOI: 10.1002/pip.1005