


고출력 씽글드 태양광 모듈의 온도 저감에 따른 출력 특성 분석

배재성, 유장원, 지홍섭, 이재형 

성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Analysis of Output Characteristics of High-Power Shingled Photovoltaic Module due to Temperature Reduction

Jae Sung Bae, Jang Won Yoo, Hong Sub Jee, and Jae Hyeong Lee

Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

(Received August 11, 2020; Revised August 24, 2020; Accepted August 26, 2020)

Abstract: An increase in the temperature of photovoltaic (PV) modules causes reduced power output and shorter lifetime. Because of these characteristics, demands for the heat dissipation of PV modules are increasing. In this study, we attached a heat dissipation sheet to the back sheet of a shingled PV module and observed the temperature changes. The PV shingled module was tested under Standard Test Conditions (STCs; irradiance: 1,000 W/m², temperature: 25°C, air mass: 1.5) using a solar radiation tester, wherein the temperature of the PV module was measured by irradiating light for a certain duration. As a result, the temperature of the PV module with the heat dissipation sheet decreased by 3°C compared to that without a heat dissipation sheet. This indicated that the power loss was caused by a temperature increase of the PV module. In addition, it was confirmed that the primary parameter contributing to the reduced PV module output power was the open circuit voltage (Voc).

Keywords: Shingled photovoltaic module, Heat dissipation sheet, Temperature reduction

1. 서론

태양광발전은 재생에너지 중에서 풍력과 함께 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 또한 정부에서도 중점적으로 추진하고 있는 에너지사업이다 [1]. 하지만 태양광 발전의 경우 화력발전에 비해 발전단가가 높기 때문에 발전단가를 낮추기 위해서는 고출력 태양광 모듈이 필요하다 [2]. 고출력 태양광 모듈을 제작하는 여러 방법 가운데 씽글드 기술은 태양전지를 여러 개로 분할 후, 전도성 접착제(electrically conductive adhesive,

ECA)를 이용하여 접합한다. 이를 통해 씽글드 태양광 모듈은 일반적인 모듈에서 발생하는 태양전지 간의 전기적 분리를 위한 공간이 없어지고, 더 많은 셀이 집적됨으로써 높은 출력을 나타내게 된다 [3]. 또한 씽글드 모듈은 분할 셀의 접합 수가 증가함에 따라 전압이 증가하게 되므로 일반 모듈보다 고전압, 저전류로 제작될 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 높은 동작 전압으로 제작된 모듈의 경우, 온도가 증가함에 따라 전압의 감소가 커지기 때문에 출력은 더 급격히 하락하게 된다. 특히, 기온이 가장 높은 7~8월의 경우, 고출력 모듈도 낮은 성능이 나타나게 된다 [4]. 또한, 이러한 고온의 환경이 지속될 경우, 모듈의 수명도 단축되기 때문에 태양광 모듈의 긴 수명과 출력의 안정화를 위해서는 모듈의 온도를 저감하기 위한 기술이 필요하다 [5].

현재 태양광 모듈의 온도를 낮추기 위한 기술로는

✉ Jae Hyeong Lee; jaehyeong@skku.edu

Copyright ©2020 KIEEME. All rights reserved.
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

스프링클러 방식과 금속 방열판을 사용한 기술이 있다. 스프링클러 방식의 경우, 직접 물을 모듈에 분사하여 냉각 효과 및 클리닝 효과를 가지게 된다 [6]. 하지만 일정 주기마다 물을 분사해 주어야 하므로 스프링클러 작동을 위한 전력 소모뿐만 아니라 그에 따른 설비가 필요하므로 발전단가 상승의 원인이 되며, 설비 관리의 번거로움이 발생한다. 또한, 주기적으로 물을 분사하게 되면 태양광 모듈이 습한 환경에 자주 노출되면서 오히려 태양광 모듈의 수명이 단축될 수 있다 [7]. 금속 방열판을 사용한 경우, 우수한 방열성을 가지고 있지만, 옥외에서 수분과 공기의 접촉으로 인해 쉽게 산화되어 성능이 빠르게 저하될 수 있으며, 부착 시 모듈의 부피 및 중량 증가로 인한 시공 상의 어려움 및 비용이 증가한다. 그에 비해 방열시트의 경우, 스프링클러와 달리 추가적인 전력을 소모하지 않는다. 또한 금속 방열판과 달리 외부에서 사용되더라도 쉽게 산화되지 않고, 금속 방열판에 비해 매우 얇은 두께의 방열시트가 적용되어도 태양광 모듈의 부피 및 중량이 거의 증가하지 않아 시공 상의 문제가 상대적으로 적다.

따라서 본 논문에서는 방열시트를 적용하여 고효율 싱글드 모듈의 온도 저감과 그에 따른 모듈의 출력 특성 변화를 분석하고자 한다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 태양광 모듈의 온도에 따른 출력 특성 및 방열 시트 적용에 따른 온도 저감 특성을 조사하기 위해 셀 분할 및 접합기술을 적용한 싱글드 태양광 모듈(TH410PM5-72S, TW SOLAR, China)을 사용하였다. 표 1은 TW SOLAR사에서 제공하는 모듈의 파라미터이고, 표 2는 STC (standard test condition, 대기질량 AM 1.5 G, 온도 25°C, 광량 1,000 W/m²) 기준에서 솔라 시뮬레이터(DKSMT-1520SUL, DENKEN, Japan)를 이용하여 직접 측정한 싱글드 태양광 모듈의 파라미터이다. 제조사에서 제공한 모듈의 파라미터와 실제 측정된 모듈의 파라미터는 다소 차이가 있음을 알 수 있다.

표 3은 온도에 따른 싱글드 태양광 모듈의 출력 특성을 나타낸 것이다. 또한 싱글드 태양광 모듈의 온도 계수는 IEC 61215 규격에 맞추어 계산하였다. 온도계수를 구하기 위해 모듈의 온도는 40°C, 45°C, 50°C로 선정하였다. 각 온도에서의 모듈의 특성을 측정하였고, 최소자승법을 통해 싱글드 모듈의 온도계수를 산출하

Table 1. Characteristics of the shingled photovoltaic (PV) module (supported values by the manufacturer).

Specification	Value
Size (cm ²)	20,759.98
I _{sc} (A)	11.43
J _{sc} (mA/cm ²)	0.551
V _{oc} (V)	45.3
FF (%)	79.16
Eff (%)	19.7
V _{pm} (V)	37.5
I _{pm} (A)	10.93
P _m (W)	410
Temperature coefficient of P _{max} (%/°C)	-0.34
Temperature coefficient of V _{oc} (%/°C)	-0.27
Temperature coefficient of I _{sc} (%/°C)	0.04

Table 2. Characteristics of the shingled photovoltaic (PV) module (measured values under STC).

Specification	Value
Size (cm ²)	20,759.98
I _{sc} (A)	11.16
J _{sc} (mA/cm ²)	0.537
V _{oc} (V)	45.31
FF (%)	77.44
Eff (%)	18.88
V _{pm} (V)	37.40
I _{pm} (A)	10.47
P _m (W)	391.95

Table 3. Shingled PV module parameters measured at various temperatures before applying heat dissipation sheet.

Specification	55.2°C	57.9°C	60.6°C
P _m (W)	350.7	348.3 (-2.4 W)	345.8 (-2.5 W)
I _{pm} (A)	11.1	11.1	11.2
V _{pm} (V)	31.59	31.37	30.87
I _{sc} (A)	12.35	12.36	12.36
V _{oc} (V)	40.2	39.8	39.4
FF (%)	75.34	75.09	75.10

였다. 그림 1에 그래프에 나타나는 기울기를 표 2의 측정된 모듈의 특성을 기준으로 백분율로 계산하면 P_{max}는 -0.335%/°C, I_{sc}는 0.043%/°C, V_{oc}는 -0.276%/°C로 제조사 측에서 제공한 표 1의 온도계수 값과 유사함을 알 수 있다.

본 연구에서 태양광 모듈 온도 저감에 사용된 방열시트는 Toyo Tanso사의 PF-R2 모델로, 표 4는 제품의 특성을 나타낸 것이다. 고효율 싱글드 태양광 모듈

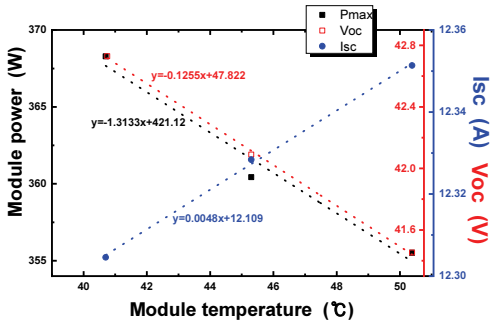


Fig. 1. Calculation of the temperature coefficients of the shingled PV module by the least squares method.

Table 4. Performance of the heat dissipation sheet used.

Classification	Unit	Value
Usage temperature	°C	-200~3,200
Thickness	mm	2
Thermal conductivity (25°C)	Vertical	200
	Horizontal	5
Electrical resistivity	$\mu\Omega\cdot m$	1,000

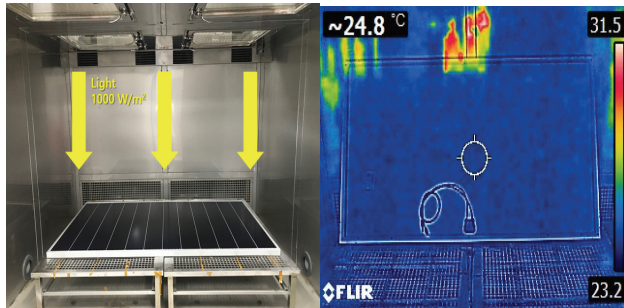


Fig. 2. Internal structure of the solar radiation chamber (left) and temperature distribution in the chamber (right).

의 표면 온도를 변화시키기 위해 일사복합시험기(AL SEC4100, ATLAS, USA)를 사용하여 광 조사시간 증가에 따른 모듈 온도변화를 측정하였다. 또한 방열시트 적용 전/후의 모듈 온도 증가에 따른 출력 특성을 분석하기 위해 PROFITEST (M360A, GOSSEN METRAWATT, Germany)를 사용하였다. 그림 2는 광조사 전 일사복합시험기 내부의 구조 및 온도 분포를 나타낸 것으로, 적외선 카메라로 촬영된 시험 챔버 내부의 대기 및 모듈 온도는 25°C로 거의 일정함을 볼 수 있다.

고출력 쉐글드 태양광 모듈의 온도와 출력 사이의 상관관계를 조사하기 위해 방열 시트를 모듈 후면에 부

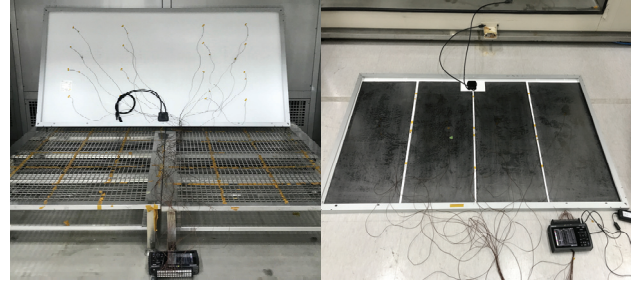


Fig. 3. Multichannel thermocouples attached to the rear side of the shingled PV module.

착하였다. 방열시트를 부착하기 전/후 동일한 온도 (25°C)에서 광 조사를 시작하여 조사 시간에 따른 모듈 온도를 측정하였다. 모듈의 온도를 측정하기 위해서 그림 3에서와 같이 후면에 다채널 열전쌍(multichannel thermocouple)을 부착하였고, 동시에 열화상 카메라 (FLIR Systems, FLIR E4, USA)를 사용하여 모듈의 온도 분포를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

고출력 쉐글드 태양광 모듈 온도 상승률을 조사하기 위해 일사복합시험기를 통해 1시간 동안 광을 조사하였다. 그림 4는 방열 시트 부착 전/후의 광조사 시간에 따른 모듈 온도변화를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 방열 시트를 부착하기 전, 태양광 모듈의 온도는 광조사 시간 증가에 따라 상승하여 1시간 후에는 약 60°C까지 상승하였다. 방열 시트를 부착하여 동일한 시간 광조사를 진행하였을 때, 모듈 온도는 약

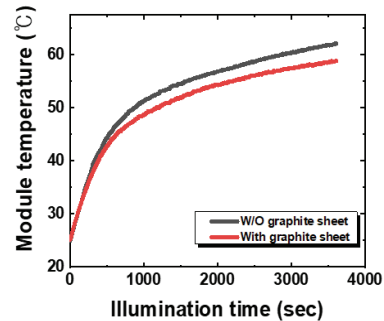


Fig. 4. Measured temperature variation of the shingled PV module without and with heat dissipation sheet as a function of the illumination time.

57°C까지 상승하였다. 25~45°C 온도 범위에서는 방열 시트 부착 여부와 관계없이 온도 차이가 크지 않았으나, 45°C 이상의 온도 영역에서는 방열 시트 부착에 따른 모듈의 온도 저감 효과가 나타남을 볼 수 있다.

그림 5는 쉐글드 태양광 모듈에 1시간 동안 광을 조사한 후 열화상 카메라로 촬영한 사진을 나타낸 것이다. 방열 시트 부착 전/후 모듈의 온도 차이는 그림 4의 열전쌍으로 측정된 데이터와 거의 유사한 약 3°C로 조사되었다.

표 5는 고출력 쉐글드 태양광 모듈의 방열시트 부착 전 모듈 온도에 따른 출력변화를 나타낸다. 이는 모듈 온도가 증가함에 따라 모듈 출력이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 그림 6은 고출력 쉐글드 태양광 모듈의 방열시트 부착 전/후의 광조사 시간에 따른 출력 변화를 나타낸 것이다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 광조사 시간의 증가는 모듈 온도의 상승을 의미하므로 태양광 모듈의 출력은 방열시트 적용 여부와 관계없이 온도 증가에 따라 급격히 감소함을 알 수 있다. 또한 방열 시트 적용 후, 60.6°C 온도에서 모듈 출력이 약 4 W 증가하는데, 이것은 방열 시트로 인해 모듈의 온도가 감소하기 때문이다. 온도에 따른 태양광 모듈의 출력은 식 (1)로 표현된다.

$$P_T = P_{Tref} + \left(\frac{\beta_{ref} * P_{Tref}}{100}\right)(T - T_{ref}) \tag{1}$$

$$= P_{Tref} * \left(1 + \frac{\beta_{ref}}{100}(T - T_{ref})\right)$$

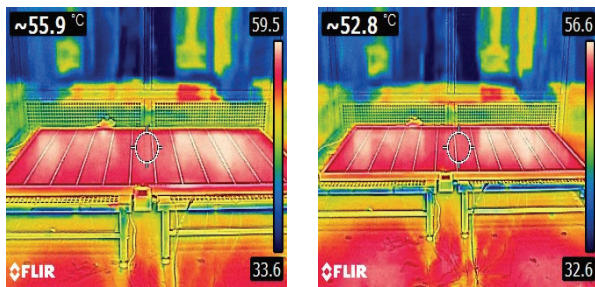


Fig. 5. Infrared camera photographs of the shingled PV modules before (left) and after (right) applying heat dissipation sheet.

Table 5. Measured output power variation of the shingled PV module for different temperature (W/O graphite sheet).

Temperature (°C)	40.7	45.3	50.4	55.2	60.6
Pm (W)	368.3	360.4	355.5	350.7	345.8

여기서 P_T 는 모듈 온도에 대한 출력, P_{Tref} 는 25°C에서의 출력, β_{ref} 는 출력에 대한 온도계수(-0.335%/°C), T 는 모듈의 온도, T_{ref} 는 25°C이다 [8]. 그림 7은 식 (1)을 통해 계산된 광조사 시간에 따른 쉐글드 태양광 모듈의 출력 변화를 나타낸 것이다. 이때 출력에 대한 온도계수는 그림 1로부터 구한 -0.335%/°C 값을 사용하였다. 방열 시트 적용과 관계없이 그림 6의 측정된 모듈의 출력 변화와 유사한 경향을 나타내었다. 60.6°C의 온도에서 계산된 출력과 측정된 출력의 차이는 약 -0.6 W로 거의 유사하였다.

그림 8과 9는 광조사 시간에 따른 단락전류(short-circuit current, I_{sc})와 곡선인자(fill factor, FF)의 변화를 나타낸 것이다. I_{sc} 와 FF는 광 조사시간에 따라 거의 변화하지 않음을 볼 수 있다. 앞서 언급했듯이 단락전류의 온도계수는 0.043%/°C로 매우 작기 때문에 모듈 온도에 큰 영향을 받지 않는다. 즉, 모듈의 온도가 상승하여도 출력에는 영향이 적음을 확인할 수 있다. 한편, FF는 광조사 시간 증가에 따라 다소 감소하는 경향을 나타내는데, 식 (2)를 통해 알 수 있듯이

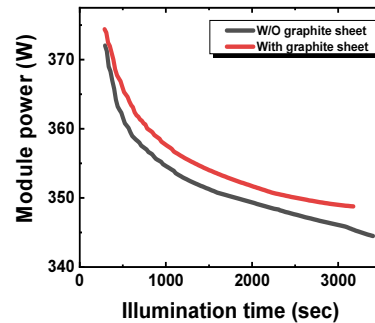


Fig. 6. Measured output power variation of the shingled PV module illuminated for different times.

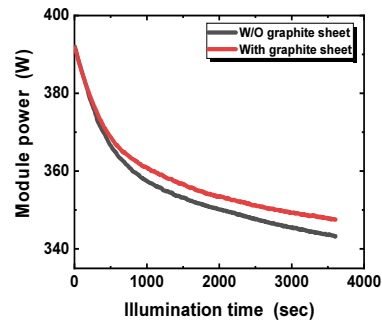


Fig. 7. Calculated output power variation of the shingled PV module illuminated for different times.

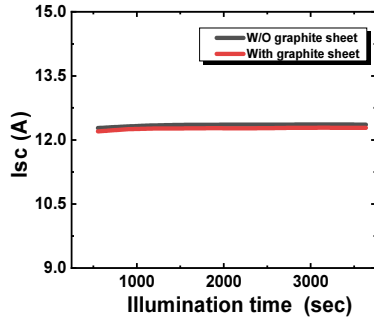


Fig. 8. Measured short-circuit current (I_{sc}) variation of the shingled PV module illuminated for different times.

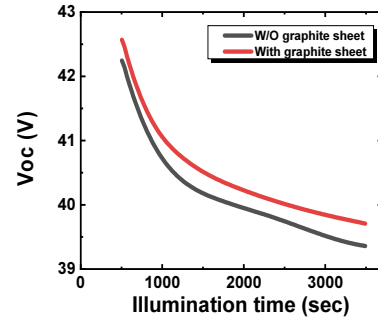


Fig. 10. Measured open-circuit voltage (V_{oc}) variation of the shingled PV module illuminated for different times.

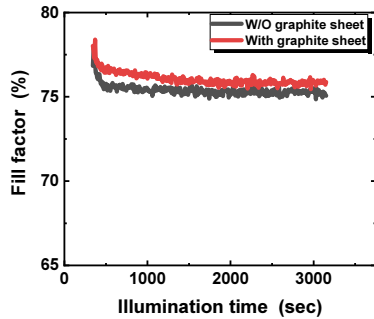


Fig. 9. Measured fill factor variation of the shingled PV module illuminated for different times.

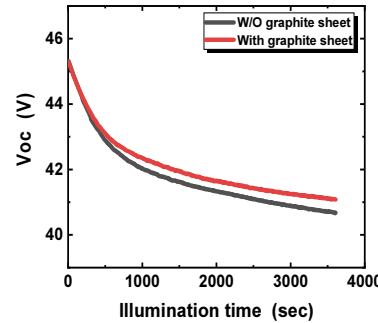


Fig. 11. Calculated open-circuit voltage (V_{oc}) variation of the shingled PV module illuminated for different times.

모듈 온도 증가에 따른 개방전압(open-circuit voltage, V_{oc})의 감소로 인해 FF가 감소한다.

$$FF(\text{Fill Factor}) = \frac{V_{oc} - \ln(V_{oc} + 0.72)}{V_{oc} + 1} \quad (2)$$

그림 10은 광조사 시간에 따른 싱글드 태양광 모듈의 개방전압(open-circuit voltage, V_{oc}) 변화를 나타낸 것이다. 방열 시트 적용과 관계없이 모듈 온도가 증가함에 따라 V_{oc} 는 그림 6의 출력 그래프와 유사하게 감소한다. 또한 방열 시트 적용 후, 모듈의 온도에 따른 V_{oc} 감소율은 낮아진다. 한편, V_{oc} 의 온도에 따른 변화는 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$V_{oc} = V_{ocd} * \left(1 + \frac{\beta_{V_{oc}}}{100} (T - T_{ref})\right) \quad (3)$$

여기서 V_{oc} 는 모듈의 개방전압, V_{ocd} 는 25°C에서 모듈의 개방전압, $\beta_{V_{oc}}$ 는 개방전압의 온도계수를 나타낸다.

그림 11은 식 (3)을 통해 계산된 광조사 시간에 따른 싱글드 태양광 모듈의 V_{oc} 변화를 나타낸 것이다. 이때 V_{oc} 에 대한 온도계수는 그림 1로부터 구한 $-0.276\%/^{\circ}\text{C}$ 값을 사용하였다. 60.6°C 온도에서 계산된 V_{oc} 와 측정된 V_{oc} 의 차이는 -1 V 로 다소 차이가 있지만, 변화 경향성은 그림 10과 유사한 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 고출력 싱글드 태양광 모듈의 온도를 저감하기 위해 기존에 사용되고 있는 태양광 모듈의 방열 방법에 비해 시공 시간편하고, 지속성이 좋은 흑연 방열 시트를 사용하였다. 방열 시트 적용 후 싱글드 태양광 모듈의 온도는 약 3°C 가량 낮아졌고, 그 결과 출력 감소를 저감시킬 수 있었다. 모듈 온도에 따른 출력 특성을 분석한 결과, 개방전압이 출력 감소에 가장 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있었다. 이는 고전압으로 제작될 수 있는 싱글드 모듈의 장점을 살리기 위해 방열이 더욱 필요함을 알 수 있었다.

ORCID

Jae Hyeong Lee

<https://orcid.org/0000-0001-7775-1142>**감사의 글**

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (No.20203030010200).

REFERENCES

- [1] Y. H. Kim, D. H. Yoo, H. Han, and J. S. Bae, *J. Clim. Change Res.*, **10**, 317 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2019.10.4.317>]
- [2] S. H. Bae, *Electric Power*, **14**, 56 (2020).
- [3] J. S. Park, S. H. Hwang, W. J. Oh, S. H. Lee, C. H. Jeong, and J. H. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **31**, 295 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2018.31.5.295>]
- [4] S. W. Cho, *Trans. Korea Soc. Geotherm. Energy Eng.*, **14**, 8 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.17664/ksgee.2018.14.3.008>]
- [5] F. Lasnier and T. G. Ang, *Photovoltaic Engineering Handbook, 3rd Edition* (CRC Press, Boca Raton, USA), p. 92.
- [6] K. C. Heo, *Proc. the Korean Environmental Sciences Society Conference* (The Korean Environmental Sciences Society, Korea, 2014) p. 895.
- [7] M. S. Kang, Y. J. Jeon, D. S. Kim, and Y. E. Shin, *J. Energy Eng.*, **21**, 243 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.5855/ENERGY.2012.21.3.243>]
- [8] E. Skoplaki and J. A. Palyvos, *Sol. Energy*, **83**, 614 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.008>]