[2020-12-PV-008]

# 태양전지 모듈의 설치방향에 따른 오염특성 분석

이충근 $^{1,2)} \cdot 신 
ho \overline{d}^{2)} \cdot 임종록^{2)} \cdot 
ho 영철^{2)} \cdot 황혜미^{2)} \cdot 고석환^{2)} \cdot 장효4^{3)^{*}} \cdot 강기환^{2)^{*}}$ 

# Analysis of Soiling for the Installation Direction of PV Module

Chung Geun Lee<sup>1),2)</sup> · Woo Gyun Shin<sup>2)</sup> · Jong Rok Lim<sup>2)</sup> · Young Chul Ju<sup>2)</sup> · Hye Mi Hwang<sup>2)</sup> · Suk Whan Ko<sup>2)</sup> · Hyo Sik Chang<sup>3)\*</sup> · Gi Hwan Kang<sup>2)\*</sup>

Received 7 October 2020 Revised 31 October 2020 Accepted 1 November 2020 Published online 8 December 2020

**ABSTRACT** Soiling on the surface of a PV module reduces the amount of light reaching the solar cells, decreasing power performance. The performance of the PV module is generally restored after contaminants on the module surface are washed away by rain, but it accumulates at the bottom of the module owing to the thickness of the module frame, causing an output mismatch on the PV module. Since PV modules are usually installed horizontally or vertically outdoors, soiling can occur at the bottom of the PV module, depending on the installation direction due to external environmental factors. This paper is analyzed the output characteristics of a PV module considering its installation direction and the soiling area. The soiling was simulated to use transparent films with 5% transmittance, and the transmission film was attached to the bottom part of the PV module horizontally and vertically. When the soiling area was 33% of the string at the bottom of the PV module, the power output decreased similarly regardless of installation direction. However, when the soiling area was 66% of the string at the bottom of the PV module, it was confirmed that the output performance decreased sharply when installed vertically rather than horizontally.

Key words c-Si Photovoltaic module and system(태양광 모듈 및 시스템), PV module installation direction(태양전지 모듈 설치 방향), Soiling(오염), Electrical output(전기적 출력), Performance ratio(성능 비)

#### Nomenclature

- $E_{out}$ : output energy of PV system, kWh
- $P_o$  : array power rating, kW
- $H_i$  : in-plate irradiation, kWh/m<sup>2</sup>
- 1) M.S. Candidate, Graduate School of Energy Science and Technology, Chungnam National University
- Researcher, Photovoltaics Research Department, Korea Institute of Energy Research
- 3) Professor, Graduate School of Energy Science and Technology, Chungnam National University
- \*Corresponding authors: hschang@cnu.ac.kr (HSC) Tel: +82-42-821-8603 Fax: +82-42-821-8839 ghkang@kier.re.kr (GHK) Tel: +82-42-860-3418 Fax: +82-42-860-3692

 $G_{i,ref}$ : plate of array irradiance, kW/m<sup>2</sup>

#### Subscript

PV: photovoltaicI-V: current-voltagePR: performance ratioSTC: standard test condition $P_{max}$ : maximum power $V_{oc}$ : open circuit voltage $V_{mp}$ : voltage at maximum power point $I_{sc}$ : short circuit current $I_{mp}$ : current at maximum power point

Copyright © 2020 by the New & Renewable Energy

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.

### 1. 서 론

재생에너지 3020 보급 정책에 따라 국내 태양광시스템 설치가 증가되고 있다. 태양광발전시스템 중 태양전지모듈 은 옥외에 설치되어 20년 이상의 장기간 동안 태양에너지 를 전기에너지로 변환하는데 일사량, 온도와 같은 외부환 경 요인에 영향을 받는다. 또한, 태양광발전소 주변의 나무 나 장애물 또는 구름에 의해 음영이 발생될 수 있으며, 음 영이 발생하게 되면 부정합 손실이 발생하여 태양광 시스템 의 발전성능이 저하된다<sup>[1~3]</sup>, 최근 환경오염으로 미세먼지, 황사와 같은 대기오염의 심각성이 커지고 있으며, 이런 환 경오염으로 태양광발전소의 발전량이 감소하고 있다<sup>[4~7]</sup> 특히 봄철의 송홧가루, 황사로 인하여 태양전지 모듈 표면 이 오염되면 입사되는 빛의 양을 감소시켜 발전 효율이 저 하되며, 오염 물질의 종류나 오염 량에 따라 발전성능이 달 라지다<sup>[8~10]</sup>. 일반적으로 모듈 표면에 쌓인 오염물들은 비 에 의해 씻겨내려 발전 성능을 회복하는 경우가 대부분이지 만, 태양전지모듈 프레임의 두께로 인해 빗물이 자연적으 로 흘러 내려가는 것을 방해하여 오염된 빗물이 고이는 현 상이 발생하게 된다. 반복적인 현상은 물때의 영향이 되기 도 하며, 오염물들은 모듈 하단부에 축적되어 발전 성능을 저하시킨다. 최근 태양전지모듈 제조업체들은 태양전지와 태양전지 사이 간격을 줄이고, 태양전지 면적을 크게 하는 방법 등으로 모듈의 출력 용량과 효율을 증가시키고 있다. 하지만 이로 인해 태양전지모듈 내 여백이 줄어들어 모듈 하단부에 축적되는 오염에 의해 성능 저하가 발생할 가능 성이 높아진다. 그러므로 태양전지모듈을 초기 설치할 때 부터 오염으로 인한 발전 성능 저하를 고려하여 설치할 필 요성이 있다.

본 논문에서는 태양전지 모듈의 설치 방향에 따라 다르 게 형성되는 오염을 모의하여 태양전지 모듈의 전기적인 특 성과 성능 비를 분석하였다. 우선 태양전지 모듈이 가로 혹 은 세로로 설치되었을 경우 각각 모듈 하단부에 쌓이는 오염 들이 끼치는 영향을 분석하였다. 장기간 모듈 표면에 쌓인 오염을 가정하기 위해 태양전지 모듈에 입사되는 빛의 양을 줄일 수 있는 투과 필름을 사용하였으며, Solar Simulator 를 이용해 오염물들의 면적에 따른 I-V 특성곡선을 측정하 였다. 옥외 조건에서 태양전지의 결정질 종류와 모듈 설치 방향에 따라 발생되는 오염으로 인한 출력 저하 특성을 분 석하였다. 옥외 특성 분석을 위해 60 cell 단결정과 다결정 태양전지 모듈을 각각 2장씩 설치하였다. 실리콘 결정질 모듈 종류별 특성을 알아보기 위하여 장기간동안 실증을 진행하였고, 각 모듈의 출력성능을 성능 비(PR)로 비교분 석하였다.

# 태양전지 모듈의 설치 방향과 오염 면적에 따른 전기적 특성 분석

태양광발전시스템은 발전소의 설치 면적 및 장소와 주변 환경에 따라 최적 경사각을 고려하여 태양전지 모듈을 세로 혹은 가로로 설치하게 된다<sup>[11]</sup>. 이때 모듈이 설치되는 방향 과 각도에 따라서 오염 물질들이 표면에 쌓이는 정도가 다 르게 된다. 일반적으로 사용되는 60 cell 규격(6 × 10)의 태양전지 모듈을 가로로 설치하였을 경우에는 Fig. 1의 (a),



(a) Horizontally installed PV modules and location of soiling



(b) Vertically installed PV modules and location of soiling

Fig. 1. Each installation direction of PV modules and locations of soiling

세로로 설치하였을 경우는 Fig. 1의 (b)와 같다. 태양전지 모듈 표면에 먼지나 황사와 같은 오염 물질이 쌓일 경우 일 반적으로 모듈의 하단부에 축적된다. 즉, 모듈이 가로로 설 치된 경우에는 Fig. 1의 (a)와 같이 모듈 하단부에 10장의 태양전지들이 오염 물질에 의해 영향을 받게 되며, 모듈이 세로로 설치된 경우에는 Fig. 1의 (b)와 같이 모듈 하단부 에 6장의 태양전지 셀들이 오염에 영향을 받는다.

본 절에서는 태양전지 모듈의 오염 위치에 따른 전기적 특성을 분석하기 위해 Solar Simulator를 이용하여 출력 성능을 측정하였다. 출력성능 측정 모듈은 옥외 설치된 모 듈과 동일한 60 cell 규격의 다결정 태양전지 모듈을 사용 하였으며, 측정된 모듈의 출력성능 데이터는 Table 1과

Table 1. Spec. of PV module

$P_{\rm max}$ [W]	$V_{oc}$ [V]	$V_{mp}$ [V]	$I_{sc}$ [A]	$I_{mp}$ [A]
267.59	38.6	31.2	9.26	8.58



 (a) Experiment according to soiling area of horizontally installed PV module



(b) Experiment according to soiling area of vertically installed PV module

Fig. 2. Experiment to analyze according to soiling area of each PV module installation direction 같다.

모듈의 설치 방향과 오염 면적에 따른 특성을 분석하여 위해 오염 면적을 변화시키며 출력특성을 측정하였다. 장기 간에 걸쳐 오염이 심하게 발생하였을 경우를 가정하여 투과 율이 5%인 필름을 붙였으며, 오염 면적은 모듈 하단부의 1 개 스트링을 전부 가렸을 경우를 최대로 가정하고 Fig. 2와 같이 오염 면적을 1/3씩 줄여가며 실험하였다. 전기적 출 력을 측정하기 위해 광원 등급이 AAA인 Solar Simulator 를 사용하였으며, 표준시험 조건(Standard Test Condition, Insolation = 1,000 W/m<sup>2</sup>, Ambient Temperature = 25℃)에서 실험을 실시했다.

태양전지 모듈에 발생한 오염의 위치 및 면적에 따른 전 기적 출력 측정 결과, Fig. 3의 (a)와 같이 모듈이 가로로 설치된 경우에는 오염에 의해 바이패스 다이오드가 동작하 였다. 하지만, 세로로 설치된 경우에는 오염이 발생했음에



(a) I–V characteristic curve for each soiling area of PV module installed in horizontal direction



- (b) I–V characteristic curve for each soiling area of PV module installed in vertical direction
- Fig. 3. I–V characteristic cure accoding to installation direction and soiling area

도 Fig. 3의 (b)와 같이 바이패스 다이오드가 동작하지 않았다.

가로 설치의 경우에는 모듈 내 1개의 스트링에만 오염이 발생하므로, 오염이 발생하지 않은 스트링들과의 전위차가 발생하게 된다. 이로 인해 해당 스트링과 연결된 바이패스 다이오드가 동작하게 된다. 따라서 Fig. 3의 (a)와 같이 바 이패스 다이오드가 동작한 계단식 I-V 특성곡선이 나타나 며, 오염 면적이 증가할수록 출력은 감소하게 된다. 세로 설치의 경우에는 오염으로 인한 음영이 모듈 전체에 영향을 주었다. 즉, 오염으로 인해 모듈 내 전위차가 발생하지 않 았으며, 이로 인해 바이패스 다이오드가 동작하지 않아 Fig. 3의 (b)와 같은 I-V 특성곡선을 나타내게 된다.

모듈의 설치 방향은 오염 발생 위치를 다르게 하므로, 이 로 인한 바이패스 다이오드의 동작 여부가 달라지면서 모듈 의 출력 특성도 변화하게 된다. Table 2와 3은 각각 모듈이 가로와 세로로 설치되었을 경우의 오염 면적별 출력 특성을 나타낸다. 정상일 경우와 오염 면적이 1/3인 경우 모듈의 설치 방향과 상관없이 거의 비슷한 최대출력(*P*<sub>max</sub>)이 나타 났지만, 2/3 면적부터는 모듈의 설치 방향에 따라 최대출 력이 변화하였다.

실험결과 가로로 설치된 모듈은 오염 면적이 2/3일 경우

Table 2. Output characteristics of horizontally installed PV module by each soiling area

	Not Soiling	1/3 Soiling	2/3 Soiling	1 Soiling
$P_{\max}$ [W]	267.59	217.41	175.66	175.12
$V_{oc}$ [V]	38.6	38.4	38.3	39
$V_{mp}$ [V]	31.2	33.7	20.1	20.1
$I_{sc}$ [A]	9.26	9.21	9.2	9.26
$I_{mp}$ [A]	8.58	6.646	8.72	8.58

Table 3. Output characteristics of vertically installed PV module by each soiling area

	Not Soiling	1/3 Soiling	2/3 Soiling	1 Soiling
$P_{\max}$ [W]	267.59	217.69	136.03	49.24
$V_{oc}$ [V]	38.6	38.4	38.4	38.2
$V_{mp}$ [V]	31.2	33.7	33.7	36
$I_{sc}$ [A]	9.26	6.67	4.04	1.5
$I_{mp}$ [A]	8.58	6.46	3.81	1.37

최대 출력이 175.66 W이였으며, 오염 면적이 1일 경우 최 대 출력은 175.12 W로 2/3인 경우와 비교하여 0.54 W의 출력 차이가 발생하였다. 특히, 오염 면적이 증가하지만 단 락 전류(*I<sub>sc</sub>*)값은 약 9.2~9.26 A로 거의 변하지 않았다. 그 러나 세로로 설치된 모듈은 오염 면적이 2/3일 경우 최대 출력이 160.03 W이였으며, 오염 면적이 1일 경우 최대 출 력이 49.24 W로 2/3 대비 86.79 W의 출력 차이가 발생하 였다.

가로 방향 설치 모듈의 경우에는 바이패스 다이오드가 동작하여 단락 전류의 큰 변화가 없었으나, 오염 면적에 따 라 최대 출력점이 변화하였다. 이러한 차이에 의해 가로 설 치 모듈의 경우에는 오염 면적이 증가하여도 출력이 크게 감소하지 않았다. 하지만 세로방향 설치 모듈의 경우, 바이 패스 다이오드가 동작하지 않아 오염 면적이 증가할수록 모 듈의 단락 전류가 지속적으로 감소한다. 단락 전류가 감소 하면서 최대 전류 또한 감소하게 되어 최대 출력이 가로 설 치에 비해 크게 감소하게 된다.

# 옥외 환경에서의 태양전지 모듈의 설치 방향 및 오염에 따른 PR 분석

앞에서는 실내 환경에서 태양전지 모듈의 I-V 특성곡선 을 측정하여 오염 위치와 면적에 따라 출력 특성이 다르다 는 것을 확인하였다. 하지만 실제 태양전지 모듈이 발전하 는 환경은 옥외 환경이기 때문에, 본 절에서는 옥외 환경에 서 태양전지 모듈의 설치 방향 및 오염에 따른 성능 분석 실 험을 수행하였다.

실험은 Fig. 4와 같이 태양전지 모듈의 성능(전압, 전류, 출력)과 일사량을 측정할 수 있는 연구원 내 옥외 성능 시 험 장소에서 실시하였으며, 모듈의 설치 각도는 30°, 설치 방향은 정남향이었다. 오염의 정도는 2절과 같이 5% 투과 율을 갖는 필름을 사용하였으며, 모듈 설치 방향(가로, 세 로)을 고려하여 필름을 부착하였다.

실험 조건은 오염이 없는 경우와 오염 면적이 모듈 하단 부 태양전지의 1/3 및 2/3을 가리는 경우로 가정하였다. 실험에는 단결정과 다결정 태양전지 모듈을 각각 2장씩 사 용했으며, 모듈의 사양은 Table 4와 같다. 모듈 간의 출력 편차를 고려해 성능 비를 이용하여 오염과 설치 방향에 따 른 성능을 분석하였다. 성능 비의 계산 방법은 식 (1)과 같 으며, *E<sub>out</sub>*은 태양전지 모듈의 실제 시간당 발전량, *P*<sub>0</sub>는 태양전지 모듈의 정격 출력, *H<sub>i</sub>*는 시간당 모듈면의 일사 량, *G<sub>i,ref</sub>*는 표준시험 조건에서 기준 일사 강도(1 *kW*/m<sup>2</sup>) 이다.

$$PR[\%] = \frac{E_{out}[kWh] / P_0[W]}{H_i[kWh/m^2] / G_{i,ref}[kW/m^2]}$$
(1)

실험은 각 조건(오염이 없는 경우, 1/3 오염, 2/3 오염) 에서 약 10일 정도 일사량 및 발전량을 측정하였다. 오전 10시부터 오후 4시 사이에 측정된 10분 평균 데이터를 이 용하여 분석을 하였으며, 오염에 의한 명확한 성능 차이를 확인하기 위해 600~1,000 W/m<sup>2</sup> 구간의 데이터를 사용하 여 성능 비를 계산하였다.

Table 5와 Fig. 6은 태양전지 모듈의 설치 방향과 오염 면적에 따른 실험 결과를 나타낸다. 모듈 표면에 오염이 없 는 경우, 모든 모듈의 성능 비는 87~89%로 정상적인 발전 을 확인할 수 있었다. 모듈 하단부의 태양전지모듈 면적의



Fig. 4. Test bed for PR analysis

Table 4.	Spec.	of	ΡV	modules
----------	-------	----	----	---------

	Mono #1	Mono #2	Poly #1	Poly #2
$P_{\max}$ [W]	247.77	249.7	255.33	256.91
$V_{oc}$ [V]	37.9	37.8	37.6	37.6
$V_{mp}$ [V]	29.9	29.5	30.4	30
$I_{sc}$ [A]	8.83	8.91	8.99	9.12
$I_{mp}$ [A]	8.28	8.47	8.39	8.57

33% 이상을 가리는 오염에서 성능 비는 세로방향 설치 경 우 70.82%(단결정), 71.46%(다결정), 가로방향 설치 경 우 71.00%(단결정), 68.52%(다결정)였다. 오염에 의한 모듈의 전체적인 성능 비는 감소하였다. 모듈별 성능 비는 약 1%정도의 차이가 있지만, 2절의 실험 결과와 같이 33% 오염에서는 모듈의 설치 방향에 따른 출력 차이는 발생하지 않았다. 모듈 하단부의 태양전지모듈 면적의 66% 이상을 가리는 오염에서의 성능 비는 세로 설치의 경우 43.58% (단결정), 47.12%(다결정), 가로 설치의 경우 56.18%(단 결정), 55.32%(다결정)였다. 이 경우에는 모듈의 설치 방 향에 따라 성능 비의 차이가 발생하였다. 가로 설치와 세로 설치의 성능 비의 차이는 약 10% 정도가 발생하였으며, 2 절의 실험결과와 같은 경향을 나타내었다.

실험 결과, 모듈의 하단 부 오염이 태양전지 면적의 1/3 인 경우에는 모듈의 설치 방향에 관계없이 발전 성능이 동등한 수준임을 확인하였다. 하지만, 태양전지모듈 면







- (b) PR according to soiling area for each crystalline type in horizontally installed PV module
- Fig. 5. PR according to the installation direction of PV module and soiling area

Crystalline type		Si	ngle	Multi		
Installation direction		Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	
Cumulative power generation [kWh]	Not Soiling	62.02 63.18		64.08	63.33	
	1/3 Soiling	41.60	42.30	42.97	41.73	
	2/3 Soiling	28.06	36.45	31 <u>.</u> 33	36.93	
Cumulative irradiation [kWh/m <sup>2</sup> ]	Not Soiling	283.27				
	1/3 Soiling	237.06				
	2/3 Soiling	259.87				
	Not Soiling	88.36	89 <u>.</u> 33	88.60	87.03	
PR [%]	1/3 Soiling	70.82	71.46	71.00	68.52	
	2/3 Soiling	43.58	56.18	47.21	55.32	

Table 5. Results according to each installation direction and soiling area of PV module

적의 66% 이상 가려지는 오염인 경우 모듈의 세로방향 설 치가 가로방향 설치 보다 발전 성능이 크게 저하됨을 확인 하였다.

# 4. 결 론

본 논문에서는 태양전지 모듈의 설치 방향과 하단 부 오 염 면적 변화에 따른 출력 특성을 분석하였다. 먼저, 표준 시험 조건에서 모듈의 설치 방향과 오염 면적을 고려하여 I-V 특성 곡선을 측정하였다. 가로 방향의 경우에는 모듈 하단 부 오염에 의해 바이패스 다이오드가 동작하지만, 세 로 방향의 경우에는 바이패스 다이오드가 동작하지 않았 다. 이러한 차이로 인해 오염 면적이 일정 수준(1/3)이상으 로 커지면 세로 방향 설치 모듈의 출력이 가로 설치 모듈보 다 크게 감소하였다. 다음으로, 옥외 환경에서의 발전 성능 을 분석하였다. 1/3 오염에서는 모듈의 설치 방향에 관계없 이 동일한 성능 비를 나타내었지만, 2/3 오염에서는 세로 설치 모듈의 성능 비가 가로 방향 설치 모듈보다 약 10%정 도 낮았다. 이는 표준 시험 조건과 같은 결과로 모듈 하단 부 오염 면적이 커질수록 세로 방향 설치 모듈이 가로 설치 모듈보다 성능이 낮은 것을 확인하였다.

본 논문의 실험 결과로부터, 모듈을 세로 방향으로 설치 하는 것보다 가로 방향으로 설치하는 것이 하단 부 오염으 로 인한 출력 손실을 저감 할 수 있는 방안으로 판단되며, 하단 부 오염의 적절한 청소만으로도 발전소의 성능을 상 승시킬 수 있을 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평 가원의 지원을 받아 수행한 결과입니다(No: 20183020010990).

#### References

- Lobera, D.T., and Valkealahti, S., 2013, "Mismatch losses in PV power generators caused by partial shading due to clouds", Proceedings of the 2013 4th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG 2013), 1-7.
- [2] LLappalainen, K., and Valkealahti, S., 2017, "Photovoltaic mismatch losses caused by moving clouds", Solar Energy, 158, 455-461.
- [3] Lorente, D.G., Pedrazzi, S., Zini, G., Dalla Rosa, A., and Tartarini, P., 2014, "Mismatch losses in PV power plants", Solar Energy, 100, 42-49.
- [4] Bergin, M.H., Ghoroi, C., Dixit, D., Schauer, J.J., and Shindell, D.T., 2017, "Large reductions in solar energy production due to dust and particulate air pollution", Environ. Sci. Technol. Lett., 4(8), 339-344.
- [5] Schill, C., Brachmann, S., and Koehl, M., 2015, "Impact of soiling on IV-curves and efficiency of PV-modules", Solar Energy, **112**, 259-262.
- [6] Oh, W., and Chan, S.I., 2015, "The performance loss by the soiling of photovoltaic modules", J. Korean Solar Energy, 35(2), 63-71.
- [7] Maghami, M.R., Hizam, H., Gomes, C., Radzi, M.A., Rezadad, M.I., and Hajighorbani, S., 2016, "Power loss due to soiling on solar panel: A review", Renew. Sust.

Energy Rev., 59, 1307-1316.

- [8] Urrejola, E., Antonanzas, J., Ayala, P., Salgado, M., Ramírez-Sagner, G., Cortés, C., Pino, A., and Escobar, R., 2016, "Effect of soiling and sunlight exposure on the performance ratio of photovoltaic technologies in Santiago, Chile", Energy Convers. Manage., 114, 338-347.
- [9] Gholami, A., Khazaee, I., Eslami, S., Zandi, M., and Akrami, E., 2018, "Experimental investigation of dust deposition effects on photo-voltaic output performance",

Solar Energy, 159, 346-352.

- [10] Al-Addous, M., Dalala, Z., Alawneh, F., and Class, C.B., 2019, "Modeling and quantifying dust accumulation impact on PV module performance", Solar Energy, 194, 86-102.
- [11] Kim, J.C., and Kim, H.N., 2018, "Study on the regional differences of optimal orientation and tilt angle for photovoltaic systems: Simulations by a system advisor model", New. Renew. Energy, 14(2), 9-20.