

태양전지 모듈의 소일링에 의한 성능 저하

The Performance Loss by the Soiling of Photovoltaic Modules

오원욱* · 천성일*†

Oh Wonwook*, Chan Sung-II*†

(Received 26 March 2015 ; accepted 16 April 2015)

Abstract : Soiling is the accumulation of dirt on photovoltaic (PV) modules and can reduce the performance of the PV power plant depending on the site location. Nevertheless, the reason which can not be the great interest to researchers of PV reliability is the phenomenon of performance loss caused by external environmental factors, not the internal degradation of the PV module. In this paper, we provide the phenomenon, history, research overview and mitigation method in order to help understanding of the soiling.

Key Words : 소일링(Soiling), 먼지(Dust), 성능(Performance), 태양전지 모듈(PV module), 사막 (Desert), 세척(Cleaning)

기 호 설 명

k : 불츠만 상수
 E_g : 밴드갭 (eV)
 T : 온도 (°C)
 C : 상수

25년 이상 장기간 동안 발전할 수 있는 내구성을 갖도록 만들어 진다. 발전 시스템이 설치된 지역의 기후 조건에 따라 온도 및 일사량의 특성이 달라지고, 시스템의 출력에도 큰 영향을 미친다.¹⁾ 태양광을 이용한 효율적인 발전을 위해 높은 일사량, 긴 일조시간이 필수조건으로 작용한다. 이러한 측면에서 중동과 북아프리카 지역(Middle East and North Africa:MENA)은 최적의 입지 조건을 갖추고 있고, 태양광 시장은 2015년에 3.5GW에 달성할 것으로 기대하고 있다.²⁾ 사우디아라비아는 King Abdullah

1. 서 론

태양전지 모듈은 옥외에 설치되어 안정적인 전원 공급 장치로서의 역할을 수행하기 위해

*† 천성일(교신저자) : 전자부품연구원 시스템로버스트연구센터
E-mail : chansi@keti.re.kr, Tel : 031-789-7054
*오원욱 : 전자부품연구원 시스템로버스트연구센터

*† Chan Sung-II(corresponding author) : Korea Electronics Technology Institute.
E-mail : chansi@keti.re.kr, Tel : 031-789-7054
*Oh Wonwook : Korea Electronics Technology Institute.

Centre for Atomic and Renewable Energy(K.A. CARE)를 중심으로 2032년 까지 16GW의 태양광을 설치할 장기 계획을 마련하였다.²⁾ 우리나라의 태양광 업체들은 이 지역의 향후 시장 확대 가능성에 주목하여, 사막형 모듈 연구, 실증단지 구축 그리고 시장개척 등 활발히 진행 중이다. 태양광 발전을 위한 최적의 일사 조건이지만, 사막지역에 설치 후 모듈의 성능에 대한 신뢰성 및 장기 내구성의 문제에 대한 연구 및 실증이 필요하다.

사막 지역에서 태양광 발전 시스템의 출력 저하에 영향을 주는 환경 조건은 소일링과 온도이다. 소일링은 태양전지 모듈 위에 미세먼지, 모래, 황사와 같은 부유물들이 축적되는 현상을 말한다. 이전까지 많은 연구가 중동 및 사막 지역에서 이루어졌다. 그러나 최근 도심 지역에서의 소일링으로 인한 전력 손실 현상이 교외에 비해 높게 나타나는 것으로 연구되었다.³⁾ 국내 역시 중국의 사막에서 불어오는 황사로 인해 단기간에 2% 이상 출력 감소가 관찰되었다.⁴⁾ 소일링에 의한 출력 저하는 일반적으로 광을 차단하기 때문에 발생하는 단락전류(short circuit current: I_{sc}) 저하에 의해 일어난다. 태양전지 모듈의 신뢰성 연구 분야에서 소일링 현상이 크게 주목받지 않은 이유는 모듈 내부의 열화가 아닌 외적인 환경 요소에 의한 성능 저하로 인식되기 때문이다. 또한 옥외의 실시간 변하는 광조건에 따라 소일링이 발전량에 미치는 영향을 판별하기 어렵다. 태양전지 모듈의 장기 신뢰성, 옥외 성능 저하 및 개선 방안의 연구는 상당히 진행되고 있고, 관심 또한 증가하고 있다. 그 이유는 태양전지 셀의 고효율화 만큼 내구성 있고, 발전 성능이 높은 태양전지 시스템이 Levelized Cost of Electricity (LCOE)를 낮출 수 있는 방안이기 때문이다. 추가적으로 태양광 발전소의

Operation and Maintenance(O&M)이 태양광 발전사업자들의 Return On Investment(ROI)를 높여 줄 수 있는 방법이기도 하다.

우리는 사우디아라비아의 제다(Jeddah)에 2014년 58kW급 실증단지를 구축하면서 모니터링 한 결과, 사막지역 태양광 모듈 설치시 소일링 현상에 대한 이해가 필요하다. 본 논문에서는 옥외 설치된 태양광 모듈에서 흔히 관찰되지만, 관심을 갖지 않는 소일링 현상 사례와 연구 역사, 성능 감소 요인 및 완화 방법을 보고된 다양한 문헌을 통해 분석한다.

2. 본 론

2.1 소일링 현상

태양광발전 시스템에 장착된 PV 모듈은 장기간의 외부 환경에 노출되면서 자외선, 계절 변화와 온도 및 습도, 그리고 오염 물질의 부착 등의 복합적인 환경 인자들로 인해 성능 열화 및 고장모드가 발생되고 있다. 특히 오염 물질의 부착으로 인한 성능 열화는 PV 모듈 표면에 부착된 오염 물질이 제거되면 성능이 회복되므로 PV 모듈 내부에서 열화가 발생한 문제가 아니며, 외부 환경에 직접적으로 영향을 받는 현상이다.

그림 1은 사막지역에 설치된 태양광 시스템의 1년 동안 쌓인 소일링⁵⁾과 모래 폭풍⁶⁾ 현상을 보여주고 있다. 이러한 지역에서 먼지 및 모래의 적층이 심한 경우, 표면이 오염된 PV 모듈은 3개월 내 25%, 1년 내에 35%의 발전 감소를 보여준다.⁵⁾ 하단의 두 이미지는 전자 부품연구원의 테스트베드가 설치된 방글라데시와 본원(경기도 성남시)의 모듈 이미지이다. 방글라데시의 경우 클리닝한 모듈과 1년간 클리닝 하지 않은 모듈로 고온다습한 지역에서 소일링 현상으로 잦은 비에 의한 자연

세척이 반복되면서 불균일하게 흡착된 현상이고, 우리나라의 2015년 2월 23일 황사경보가 발령된 다음 날 모듈 이미지로 균일하게 소일링 되었고, 2일 후 소량의 비로 인하여 세척되었다.



Fig. 1. Dust layer accumulation on PV modules in desert (top left)⁵⁾, sand storm (top right)⁶⁾, comparison with cleaning and non-cleaning modules in Bangladesh (bottom left), and yellow dust in Korea (bottom right)

이와 같은 먼지 적층은 사막뿐만 아니라 도심 지역에서도 발생하며 강수량과 밀접한 관계가 있다. 강수량이 적은 시기가 끝나고 비가 내려 태양전지 모듈 표면이 세척되면 효율은 쉽게 회복된다.³⁾ 그러나 사막 지역은 낮은 강수량에 의하여 자연적인 표면 세척 효과가 미미하고, 저위도 지역의 모듈 설치 각도가 수평에 근접하여, 소일링에 취약한 설치 환경이다. 비가 내리지 않는 건조한 기간 동안 태양광시스템의 효율은 선형적으로 감소하게 된다. 소일링에 의한 발전량 감소는 사막지역이 가장 크며, 시골이나 도시교외보다 공기오염이 심한 고속도로, 공항, 도심 인근에서 더 크게 나타난다. 즉, 대기 중 먼지 농도가 소일링 현상에 영향을 미친다.⁵⁾

2.2 소일링 연구의 역사

소일링 현상과 성능의 옥외 테스트 결과는 1942년에 Hottel와 Woertz⁷⁾에 의해 처음으로 태양열 집광판의 연구에서 보고가 되었다. 1990년까지의 연구는 대부분 바람의 속도 및 방향과 먼지 축적에 미치는 영향의 연구, 소일링 물질과 축적 속도의 유형 연구이고, 소수의 연구들은 투과율과 클리닝의 관계 등의 주제로 현상학적인 결과들로 보고되었다.⁸⁾ 또한, 이시기는 태양광 모듈 보다는 태양열 집광판의 연구가 활발히 진행되었다. 그 이후 중동 및 사막지역에 설치된 태양광 모듈 중심으로 보고되고 있다. El-Shobokshy와 Hussein^{9,10)}에 의한 연구 이후 태양광 모듈의 성능과 먼지의 영향에 대한 포괄적인 연구가 진행되기 시작하였다.⁸⁾ 현재까지 약 500여 편의 소일링 관련 논문이 발표되었다.

2.3 사막지역의 환경

사우디아라비아는 아열대 고기압지대의 영향을 받는 전형적인 사막성기후로 낮에는 지표의 열이 최대로 올라가나 밤이 되면 지표의 열이 급격하게 방출되면서 기온이 급강하한다. 바람은 낮 동안에 계속 부는데 때로는 강한 북동풍이 불어 많은 먼지와 모래바람을 동반하는 경우가 있다. 그림 2는 세계 여러 지역의 연평균 일사량과 소일링에 의한 전력 손실을 보여준다. MENA 지역은 높은 일사량과 긴 일조시간에 의한 연평균 일사량은 약 5.5kWh/m² 이상으로 관측된다. 사우디아라비아의 경우 소일링으로 인한 일일 전력 손실은 1% 이상으로 일사량 및 위도 위치가 유사한 타 지역보다 크게 나타난다.¹¹⁾

제다의 경우 여름철 평균 기온은 35.2℃이고, 최고기온은 49℃까지 올라가며 겨울철에도 최고기온이 31℃에 이른다. 연평균 일사량

이 6,030Wh/m²으로 서울의 연평균 일사량 3,042Wh/m²보다 2배정도 많다. 풍속은 연평균 7.6m/s로 서울보다 4.6m/s 빠르게 불어와 바람을 타고 먼지 및 모래가 운반되어 이동할 가능성이 높다.¹²⁾

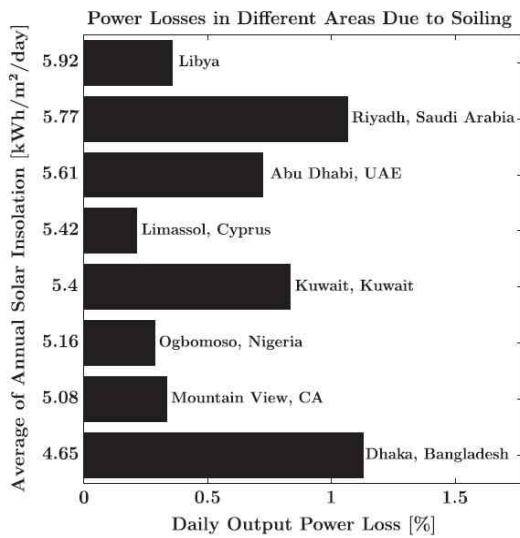


Fig. 2. Daily power loss of solar plants in different parts of the world¹¹⁾

공기 중 먼지 밀도는 Particle pollution 또는 Particulate matter (PM)으로 나타낸 지도로 확인할 수 있다. PM10은 입자의 크기가 10μm 보다 작은 미세 먼지의 평방미터 당 μg (μg/m³)으로 나타낸 지표로 미세 먼지의 오염도이다.¹³⁾ 그림 3의 PM10 world map에서 사우디아라비아는 가장 오염도가 높은 지역으로 (96-142μg/m³) Zone 4에 해당되며, 국내 미세 먼지 오염도는 30-44μg/m³에 속하는 Zone 2로 국내 기상청 미세먼지 예보 등급 보통 (PM10 기준 31-80)에 준한다.¹⁴⁾ 사우디아라비아의 연평균 PM10 농도는 100이상으로 높아 국내 기준으로 나뉘어 (PM10 기준 80-150)에 속한다.

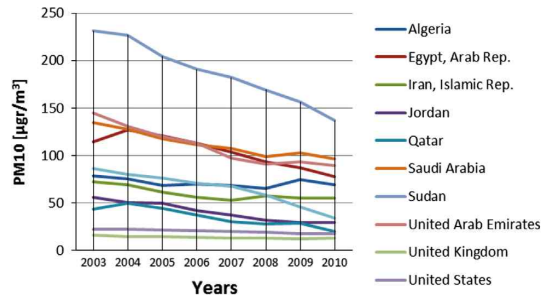
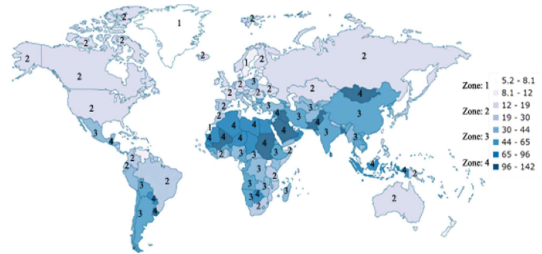


Fig. 3. PM10 world map (top) and PM10 for some countries from 2003 to 2010 (bottom)⁵⁾

제다의 실증단지에 설치된 태양전지 모듈의 소일링된 먼지를 수거하여 입도분석 결과(그림 4)로 평균 입경 20.6μm이다.

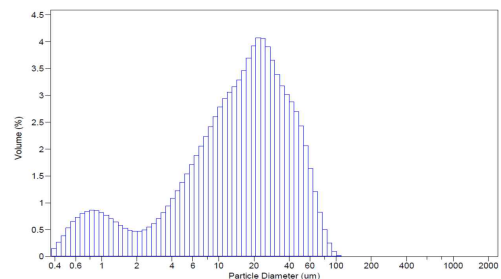


Fig. 4. Distribution of soiling dust in Jeddah

2.4 소일링에 의한 광학적 특성

먼지 및 모래와 같은 대기 중 부유물이 증착되면 PV 모듈에 부정적인 영향을 준다. 이러한 현상은 PV의 광학적 특성 및 전기적 특성에 변화를 발생시키게 된다. 모래와 같은 먼지 증착은 유리의 투과도를 감소시켜 셀에 도달하는 태양광 세기를 약하게 하여 효율이 감

소하게 되는 것이다. 투과도 감소 현상은 PV 모듈을 설치하는 경사각(tilt angle)과 먼지의 종류 및 증착 밀도에 영향을 받는다. 경사 각도가 커질수록 투과도 감소는 작아진다. 그리고 노출기간이 길수록 모듈 각도가 작을수록 단위면적당 적층되는 먼지양 및 투과도 감소가 심해진다.(그림5)⁵⁾¹¹⁾¹⁵⁾

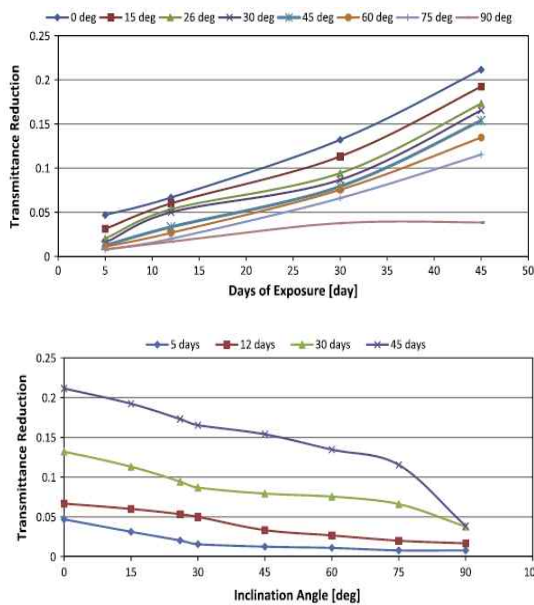


Fig. 5. The transmittance reduction after soiling with exposure periods for different tilt angle (top) and with tilt angle for different exposure periods (bottom)¹⁵⁾

먼지 증착 밀도가 높아질수록 투과도 감소가 커진다. 먼지의 종류 및 입자의 크기가 영향을 주는데 입자의 크기가 작은 경우 같은 무게의 먼지가 적층되었을 때 투과도 감소에 더 큰 영향을 준다. 그림 6은 3가지 종류의 인공적인 소일링 입자(white sand, clay, cement)를 이용하여 같은 농도로 소일링 후 투과도 결과이다. 입자가 큰 white sand(250 μ m)보다 입자가 미세한 cement(10 μ m)의 경우가 투과도의 감소가 더 크게 나타났다.¹⁶⁾

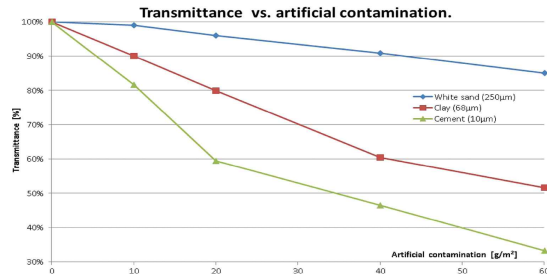


Fig. 6. Transmittance for artificial soiling¹⁶⁾

증착 밀도가 높아지면 PV 표면에서 먼지입자로 인해 빛이 충돌하여 반사도가 커진다. 먼지 증착에 의한 반사도 증가는 단파장보다 장파장에서 큰 영향을 받으며 증착 밀도가 높을수록 그 차이는 심해진다. 먼지 증착 밀도가 0.3mg/cm² 이하로 낮을 때는 입자크기에 큰 영향을 받지 않는다. 그러나 증착 밀도가 1mg/cm² 이상으로 높아지면 동일 증착 밀도에서 작은 크기의 먼지보다 큰 입자의 먼지가 쌓였을 때 반사도가 눈에 띄게 크게 증가한다.(그림 7)¹⁷⁾

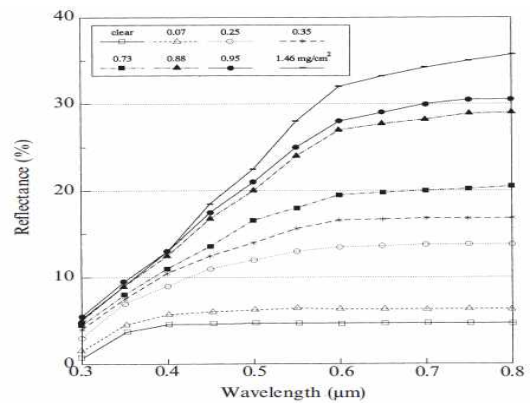


Fig. 7. reflectance of dusty glass for different dust amounts¹⁷⁾

2.5 소일링에 의한 성능 특성

PV 모듈 표면이 오염되면 성능 특성에도 변화가 발생한다. 이러한 태양전지의 전기적 특성 변화 역시 표면의 먼지가 제거되면 다시

회복되는 일시적인 현상으로, 광학적 특성 변화와 같이 먼지 증착 밀도가 증가할수록 모듈의 출력 및 효율은 감소한다. 증착 밀도가 증가할 때 투과도와 출력은 거의 비슷한 경향으로 감소한다.¹⁶⁾ 모듈의 효율 감소는 동일한 먼지 증착 밀도에서 먼지의 종류나 입자 크기에 따라 다르게 나타난다. 같은 적층 밀도로 먼지가 증착되더라도 입자의 크기가 작을수록 효율 감소가 크다.⁸⁾

그림 8은 전압-전류 측정 결과로 I_{sc} 감소폭이 V_{oc} 감소폭보다 크다. 1-100 μm 크기가 혼합된 먼지를 0-22 g/m^2 까지 모듈 표면에 증착할 때 I_{sc} 값이 100%에서 78%로 감소한다. 그러나 V_{oc} 값의 감소폭은 6%정도로 I_{sc} 값 감소와 비교하여 먼지증착밀도에 크게 영향을 받지 않는 것으로 보인다.¹⁸⁾

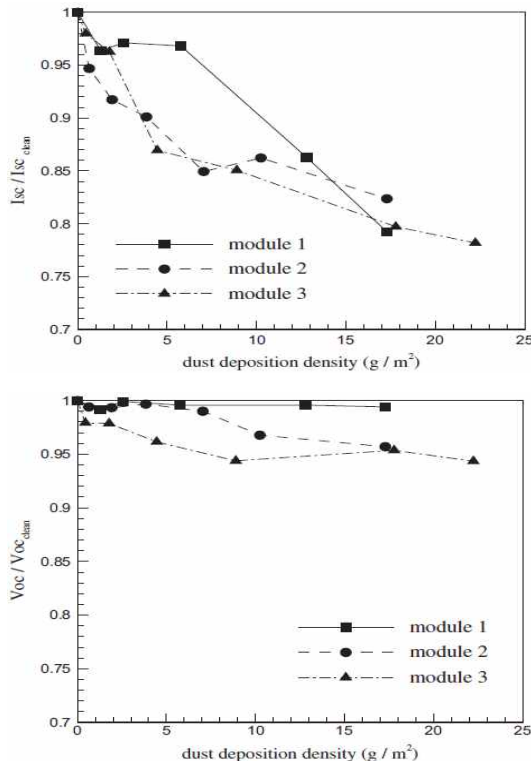


Fig. 8. Variation of I_{sc} (top) and V_{oc} (bottom) for different dust deposition densities¹⁸⁾

평균 입경이 16 μm 인 A2 fine standard dust를 이용하여 인공적으로 미니모듈 표면 위 40 μm 소일링 전후 External quantum efficiency(EQE)를 평가한 결과(그림 9) 약 6%의 J_{sc} 감소하였다.

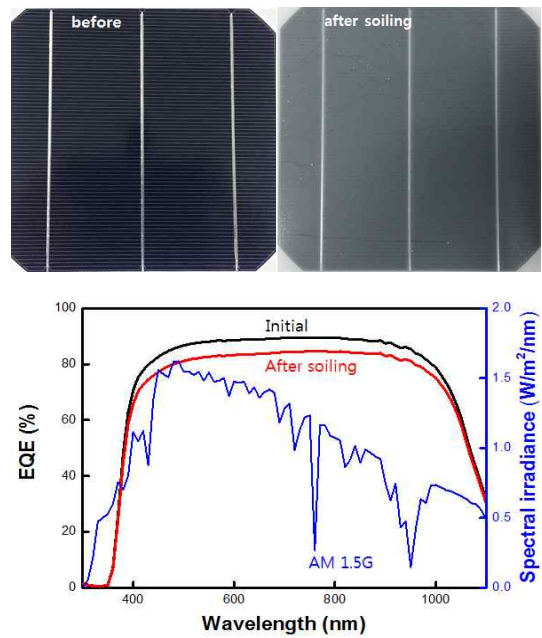


Fig. 9. mini-module image before/after 40 μm -thick artificial soiling (top) and EQE(bottom)¹⁹⁾

소일링 후 출력(P_{max}) 저하에 영향을 주는 요소는 I_{sc} , V_{oc} , FF(Fill factor:충진률)이다 (식 1). P_{max} 저하율과 3가지 요소 저하율의 상관관계를 살펴보았다. 챔버 내부의 온도 및 모듈의 온도를 45도로 유지하고, 광조사를 시작하였다. 그 후 광조사에 의한 모듈의 온도 상승이 멈춘 이후 전류-전압 특성을 측정하였다. 그 결과(그림 10), 소일링에 의한 I_{sc} 감소와 온도 상승에 의한 V_{oc} 감소 현상이 발생하였다. 소일링 물질은 광흡수 및 표면으로부터 열방출을 차단하여 소일링 후 모듈 온도가 상승하고, 다이오드의 특성인 J_0 (Reverse Saturation

Current density)가 증가하게 된다(식 2). 이로 인해, J_0 의 증가에 의하여 V_{oc} 는 감소한다(식 3).²⁰⁾ 소일링 후 P_{max} 는 8.41% 감소하였고, I_{sc} 는 6.77%, V_{oc} 는 1.22%, FF는 0.44% 각각 감소하였다.¹⁹⁾

$$P_{max} = I_{sc} \times V_{oc} \times FF \quad (1)$$

$$J_0 = CT^3 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \quad (2)$$

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{J_{sc}}{J_0} + 1\right) \quad (3)$$

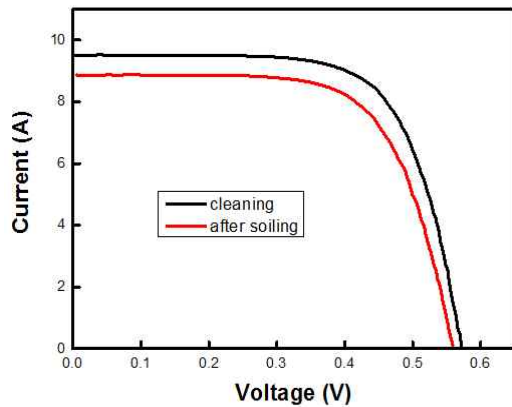


Fig. 10. L-IV curve before/after soiling¹⁹⁾

2.6 완화 방법

모듈 설치 위치의 지리적, 기후적 환경에 따라 주기적으로 PV 모듈 유리의 오염물을 제거하여 청결을 유지하면 성능손실을 완화시킬 수 있다. 태양전지 모듈 표면에 부착된 이물질 제거하는 방법은 표 1과 같이 구분할 수 있다.¹¹⁾

비나 바람, 쌓인 눈이 녹는 등의 자연적으로 표면이 세척될 수 있으나 태양광 시스템의 안정적인 발전 효율을 유지하기 위해서는 인공적인 방법이 필요하다. 인공적인 방법은 모듈 설치 전에 태양전지 표면을 친수성(hydrophilic)

이나 소수성(hydrophobic)으로 특수 처리하는 전처리 방법으로 PV 모듈 설치 전에 모듈 제작 단계에서 표면 유리를 특수 처리하여 소일링 현상을 사전에 방지하는 방법이다. 먼지 및 모래에 의한 출력 저하를 완화시키기 위해 친수성 자가세정 코팅 및 오염방지를 위한 정전기적 오염방지 코팅 방법이 있다.^{5,21)} 코팅재의 내구성 문제와 코팅 비용이 높다는 단점이 있다.

Table 1. Cleaning methods

Classification	Cleaning method
Natural cleaning	- Rain - Wind - Melting snow
Pre processing	Passive surface treatment - Hydrophilic - Hydrophobic
Post processing	Automatic cleaning - Microcontroller-based surface brushing - Automatic water spray - Cleaning robots - Emerging methods
	Manual cleaning - Water-cloth wiping - Detergent/water rinsing - Surfactant - Water jet/surface brushing

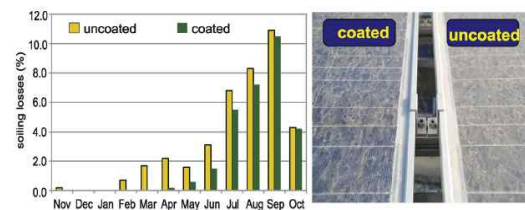


Fig. 11. Monthly soiling losses of coated and uncoated glass²¹⁾

후처리방법은 모듈 표면에 부착된 오염 물질을 소일링 현상이 발생하였을 때 또는 일정 주기로 반복하여 제거하는 방법이다. 기후별 지역별로 클리닝 방법은 달리 적용되고, 사막의 경우 물의 희소성으로 인해 워터젯 세척이

사용 불가하다. 물을 사용하지 않는 경우 에어 블로잉 또는 브러쉬 등을 이용한 기계적 방법은 소규모 시스템에서 가능하다.⁵⁾ 각각의 지역의 PV 설치환경이나 비용적인 문제를 고려한 적합한 방법 선택이 이루어져야 한다.



Fig. 12. Cleaning methods: water spray (left), self-cleaning robot (middle), hydrophobic coating (right)⁵⁾

3. 결 론

소일링 현상 사례와 연구의 역사, 광학적, 특성, 성능 특성 그리고 완화 방법과 관련된 연구들을 정리하였다. 태양전지 모듈의 성능과 수명은 외부 환경에 의해 결정되므로, 사용 지역의 환경 특성에 따라 적합한 모듈 구성 재료 및 유지관리가 필요하다. 사막지역의 태양광 발전 시스템의 경우 소일링에 의한 출력 저하를 고려하여 출력 성능을 향상시킬 수 있는 전/후처리 방법을 적용하여 더 높은 발전량을 확보해야 할 것이다. 실시간 모니터링 시스템에 발전량 예측/진단으로 대처 시기 등을 접목하면 발전 시스템 성능을 향상시킬 수 있는 방안이 될 수 있다.

후 기

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20133010011770). 본 논문의 인용된 모든 그림 및 표는 Copyright Clearance Center로부터 License Agreement를 취득하였습니다.

Reference

1. K.S. Kim, J.H. So, G.H. Kang, G.J. Yu, S.G. Yoon, Evaluation of Electric and Thermal Characteristics of Photovoltaic Module under Various Temperature and Irradiance Conditions. Journal of the Korean Solar Energy Society (in Korean) Vol. 30, No. 6, pp. 125-130, 2010.
2. PV in MENA: Turning policy into projects, PV insider, 2014.
3. A. Kimber, L. Mitchell, S. Nogradi, H. Wenger, The Effect of Soiling on Large Grid-Connected Photovoltaic Systems in California and the Southwest Region of the United States, Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on, Vol. 2, pp. 2391-2395, 2006.
4. G.H. Kang, K.S. Kim, C.H. Park, G.J. Yu, H.K. Ahn, D.Y. Han, The Analysis on Maximum Output Power Characteristics of Crystalline Silicon Photovoltaic Module by Change of Environmental Effects. Journal of the Korean Solar Energy Society (in Korean) Vol. 27, No. 3, pp. 23-28, 2007.
5. S. Ghazi, A. Sayigh, K. Ip, Dust effect on flat surfaces - A review paper, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 33, pp. 742-751, 2014.
6. T. Sarver, A. Al-Qaraghuli, L.L. Kazmerski, A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches, Renewable and sustainable energy Reviews, Vol. 22, pp. 698-733, 2013.
7. H.C. Hottel, B.B. Woertz, The performance of flat plate solar heat collectors, ASME Trans, Vol. 64, pp. 91 - 104, 1942.
8. M. Mani, R. Pillai, Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations, Renewable and

- Sustainable Energy Reviews, Vol. 14, pp. 3124-3131, 2010.
9. M.S. El-Shobokshy, F.M. Hussein, Effect of the dust with different physical properties on the performance of photovoltaic cells, *Solar Energy*, Vol. 51, No. 6, pp. 505-511, 1993.
 10. M.S. El-Shobokshy, F.M. Hussein, Degradation of photovoltaic cell performance due to dust deposition on to its surface *Renew Energy*, Vol. 3, pp. 585-590, 1993.
 11. A. Sayyah, M.N. Horenstein, M.K. Mazumder, Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels, *Solar Energy*, Vol. 107, pp. 576-604, 2014.
 12. S. A. M. Said, M. A. Habib, M. O. Iqbal. Database for building energy prediction in Saudi Arabia. *Energy conversion and management*, Vol. 44. No. 1, pp. 191-201, 2003.
 13. <http://en.wikipedia.org/wiki/Particulates>
 14. J.J. Lee, C.H. Kim, Characteristics of Recent occurrence Frequency of Asian dust over the Source Regions - Analysis of the dust occurrences since 2002, *Atmosphere*, Vol. 18, No. 4, pp. 493-506, 2008.
 15. S.A.M. Said, H.M. Walwil, Fundamental studies on dust fouling effects on PV module performance, *Solar Energy*, Vol. 107, pp. 328-337, 2014.
 16. R. Appels, B. Lefevre, B. Herteleer, H. Goverde, A. Beerten, R. Paesen, K.D. Medts, J. Driesen, J. Poortmans, Effect of soiling on photovoltaic modules, *Solar Energy*, Vol. 96, pp. 283-291, 2013.
 17. A.Y. Al-Hasan, A new correlation for direct beam solar radiation received by photovoltaic panel with sand dust accumulated on its surface, *Solar Energy*, Vol. 63, No. 5, pp. 323-333, 1998.
 18. H. Jiang, L. Lu, K. Sun, Experimental investigation of the impact of airborne dust deposition on the performance of solar photovoltaic (PV) modules, *Atmospheric Environment*, Vol. 45, pp. 4299-4304, 2011.
 19. W.W. Oh, Manuscript submitted for publication.
 20. P. Singh, N.M. Ravindra, Temperature dependence of solar cell performance-an analysis, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 101, pp. 36-45, 2012.
 21. M. Piliouguine, C. Cañete, R. Moreno, J. Carretero, J. Hirose, S. Ogawa, M. Sidrach-de-Cardona, Comparative analysis of energy produced by photovoltaic modules with anti-soiling coated surface in arid climates, *Applied Energy*, Vol. 112, pp. 626-634, 2013.