

공기 중의 미세먼지에 의한 태양전지의 오염에 관한 연구

한진목¹ · 최수광¹ · 김세웅² · 정영관^{2,†}

¹금오공과대학교 기계공학과 대학원, ²금오공과대학교 기계공학과

A Study on the Contamination of Photovoltaic Cells by Fine Dust in the Air

JIN MOK HAN¹, SOOKWANG CHOI¹, SEWOONG KIM², YOUNGUAN JUNG^{2,†}

¹Graduate School, Kumoh National University of Technology, 61 Daehak-ro, Gumi 39177, Korea

²Department of Mechanical Engineering, Kumoh National University of Technology, 61 Daehak-ro, Gumi 39177, Korea

†Corresponding author :
jyg_kr@kumoh.ac.kr

Received 23 March, 2018

Revised 19 June, 2018

Accepted 30 June, 2018

Abstract >> The contamination of photovoltaic (PV) cells reduces the incidence of sunlight and reduces the power generation output of PV cells. The main factor influencing the contamination of PV cells installed outdoors is the fine dust in the air, but the influence of temperature, humidity, rain and wind can be considered. In this paper, experiments on the contamination of PV cells according to the fine dust density, the temperature and humidity of air were investigated. As results of this study, the contamination area of PV cells increases with contamination time and cumulative fine dust density in the air. The contamination of PV cells increases when the temperature is low and the humidity is high. Also, as the contamination of PV cells is affected to the wind, the deviation of contamination area is happened.

Key words : Photovoltaic cell(태양전지), Air(공기), Fine dust(미세먼지), Contamination(오염), Day and night(낮과 밤), Temperature(온도), Humidity(습도)

1. 서론

광전 효과에 의해 전기를 생산하는 태양전지는 햇빛의 조사량에 따라 발전량이 달라진다. 그러므로 태양전지는 건물의 옥상이나 고속도로 휴게소 주차장과 같이 햇빛이 잘 드는 장소에 설치되며, 재생에너지원으로 그 설치 면적이 크게 늘어나고 있다.

그러나 황사와 같은 자연현상이나 화력발전과 같은 산업 활동에서 발생하는 다양한 입자상 물질로

인하여 대기가 미세먼지로 오염이 되며, 미세먼지에 오염된 대기는 옥외 시설물을 오염시킨다. 이와 같은 대기 중의 미세먼지는 태양광발전 시설에 대한 오염 원으로 태양광발전 시설의 발전출력에 적지 않은 영향을 주는 것으로 밝혀지고 있다. 60 kW 규모의 태양광발전 시설의 태양전지부를 4년 동안 세척하지 않았을 경우 10% 정도의 발전출력 손실이 발생한 것으로 보고되었으며¹⁾, 최고 25% 이상의 발전출력 저하²⁾를 나타낸다는 국외의 연구보고도 있었다. 국내

에서도 유사한 보고를 통하여 태양전지부의 정기적인 세척의 필요성을 알리고 있다.

그러나 태양전지의 오염에 관한 연구로는 Kaldellis 등³⁾, Song 등⁴⁾, Sayyah 등⁵⁾ 그리고 Oh와 Chan⁶⁾이 인공 오염원을 이용한 인위적인 오염에 따른 발전효율에 관한 연구를, Kang 등⁷⁾이 자연오염과 보호유리의 광투과율에 따른 발전출력 변화에 관한 연구를, Ghazi 등⁸⁾은 평판형 태양전지 등에 대한 소일링(soiling)의 저감방안 등에 관한 연구를, Said⁹⁾는 보호유리 종류별 자연 상태 먼지의 부착 효과에 관한 연구를, Sarver 등¹⁰⁾은 수분 결합 입자의 고착과정 등에 관한 연구를 보고하였다. 이러한 연구들은 중동지역과 같이 대규모 모래폭풍, 황사 등의 소일링(soiling)에 대한 연구로 국내의 대기환경 상태와 차이가 많고, 인공오염원을 사용한 연구들이 주류를 이루고 있다.

자연 상태에서 대기 중의 태양전지 오염면적¹¹⁾과 대기 노출시간, 미세먼지농도¹²⁾, 낮과 밤¹³⁾에 차이가 큰 온도와 습도, 바람과 강수량에 따른 오염의 변화 등 오염에 영향을 미치는 다양한 인자들에 대한 정량적인 보고는 부족한 실정이다.

본 논문에서는 공기 중의 노출시간, 미세먼지의 농도, 대기온도 그리고 습도가 태양전지의 오염에 미치는 영향을 실험을 통하여 연구하였다.

2. 실험 방법

본 연구를 위한 태양전지 셀은 시중에서 손쉽게 구할 수 있는 대만 Motech Solar사의 셀을 이용하였다. 공기 중의 미세먼지에 의하여 태양전지의 자연적인 오염을 진행시키기 위한 설치장소로, 주변에 자연 녹지와 농업지역 그리고 국가공단은 물론 다양한 교통망의 영향을 받고 있고, 근처에 태양광발전 시설이 설치되어 있는 경북 구미시 양호동의 건물 옥상을 이용하였다.

상용 태양전지 모듈과 비교하여 출력과 수광면적이 작은 태양전지 셀의 오염에 미치는 영향은 공기 중의 미세먼지에 대한 오염 외에 조류의 분변과 같은 크기가 매우 큰 오염에 의한 영향은 물론 실험용

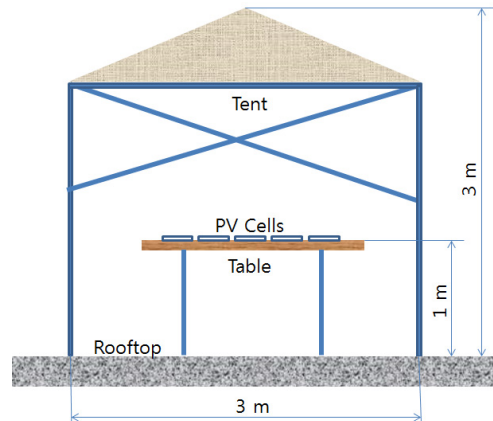


Fig. 1. The outdoor facility for the contamination of photovoltaic (PV) cells

태양전지 셀이 지표면에서 튀어 오르는 지표오염 물질에 의한 크게 영향을 받을 수 있으며, 강우에 의한 영향을 받으므로, 지표오염과 강우에 의한 영향을 줄일 필요가 있다. 따라서 미세먼지 이외의 영향을 피하기 위하여, Fig. 1과 같이 4층 건물의 옥상에 1m 높이의 거치대와 3m 높이에 약 3×3 m² 넓이의 지붕과 사방이 개방된 텐트를 설치하였다. 또한, 오염에 미치는 거리의 영향을 줄이기 위하여 태양전지 셀들을 작은 면적에 밀집시켜 오염실험을 실시하였다.

계절에 따라 변화가 심한 황사와 소나무류 꽃가루의 영향을 배제하기 위하여 8월 중순부터 9월 말경까지 오염실험을 실시하였다.

대기 중의 미세먼지 농도와 온도 및 습도에 대한 신뢰성을 높이기 위하여 실험장소의 근거리의 관측 시설이 있는 기상청의 자료를 사용하였다. PM10 기준 하루 평균 미세먼지농도를 이용하였으며, 날짜의 경과에 따른 미세먼지농도는 하루 평균치의 누적 농도값을 이용하였다.

Fig. 2와 Fig. 3은 태양전지 셀의 오염을 진행시키기 위한 2016년 9월 초순에서 9월 말경까지 23일간의 낮과 밤의 온도 변화와 습도 변화를 보여준다. 낮 동안 온도가 높았던 공기 중의 수분은 온도가 낮은 밤 동안에 결로되며, 안개와 같은 공기 중의 미세 수분입자가 증가하여 습도가 높아진다. 따라서 대기의 자연적인 온도와 습도의 영향이 태양전지 셀의 오염

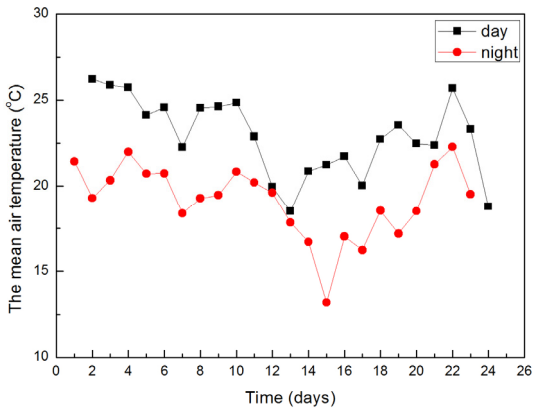


Fig. 2. The temperature change during the day and night

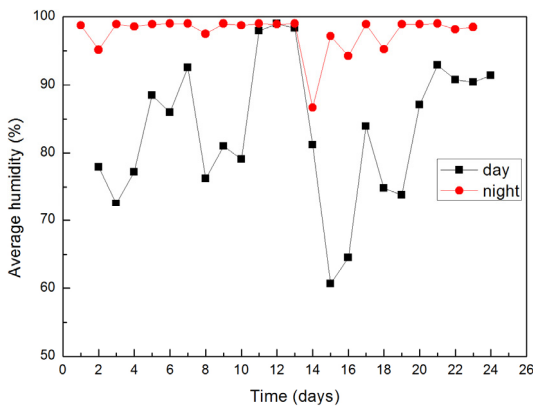


Fig. 3. The humidity change during day and night

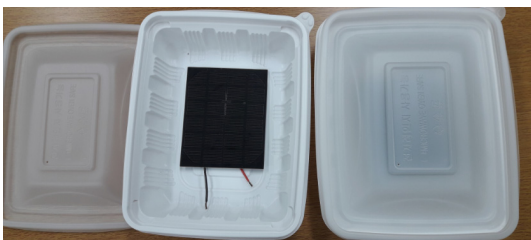


Fig. 4. The experiment vessels to contaminating photovoltaic (PV) cells during day and night

에 미치는 영향을 측정하기 위하여 온도와 습도의 차이가 뚜렷한 낮 또는 밤의 동안에만 23일에 걸쳐 오염을 진행시키는 실험도 실시하였다. 태양전지 셀의 오염에 미치는 대기의 온도와 습도의 영향을 관찰하기 위한 태양전지 셀은 Fig. 4와 같이 덮개가 있

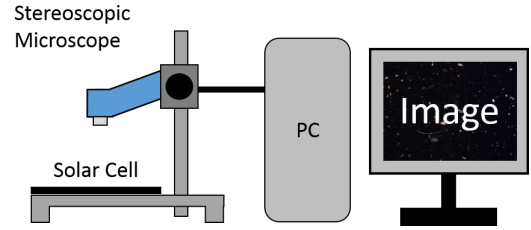


Fig. 5. The equipment for measuring the contamination areas of PV cells

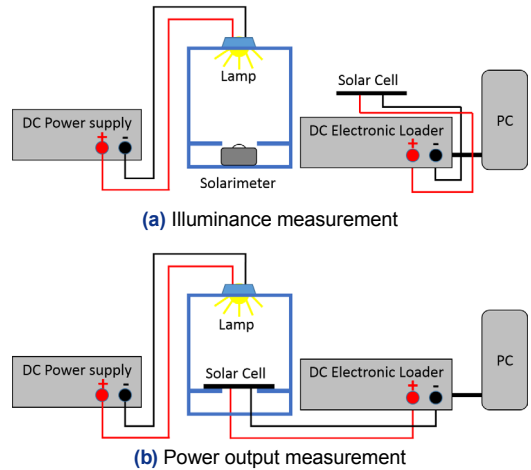


Fig. 6. The equipment systematic diagram for measuring the illuminance and the power output of photovoltaic (PV) cells

는 용기에 태양전지 셀을 넣고 낮 또는 밤 동안에만 각각의 용기덮개를 개방하여 오염을 진행시켰다.

태양전지 셀의 오염 측정은 Fig. 5와 같이, Sometech사의 SV32 실체현미경을 이용하여 100배로 확대 촬영을 한 후에, National Institutes of Health사의 Image Javascript 프로그램을 이용하여 오염 픽셀수를 산출하고 촬영된 태양전지 국부면적에 대한 오염면적의 비인 오염면적률을 계산하였다. 태양전지 셀의 발전 출력은 Agilent사 N3302A 전자부하기를 이용하여 측정하였다. Fig. 6에서 보여주는 것처럼, 외부의 광원에 의한 영향을 피하기 위하여 면적 20×20 cm, 높이 30 cm 크기의 암실에 OSRAM사 64653ELC 할로겐전구를 설치하여 전구의 밝기가 동일한 조도 값을 갖도록 설정한 후에 오염 전과 오염 후의 태양전지 셀을 장착하여 발전출력을 측정하였다.

3. 실험결과 및 검토

Fig. 7은 태양전지 셀을 공기 중에 방치시켜 오염시킨 3일, 7일, 12일, 17일, 24일 동안에 누적된 PM10의 누적미세먼지농도를 나타내고 있다. 2016년 9월 초순에서 10월 초순까지 대기 중의 누적미세먼지농도가 방치시간 3일의 $97 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 24일의 $489 \mu\text{g}/\text{m}^3$

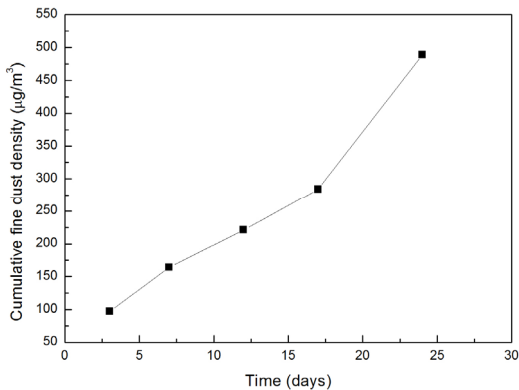


Fig. 7. The cumulative fine dust density in air over time

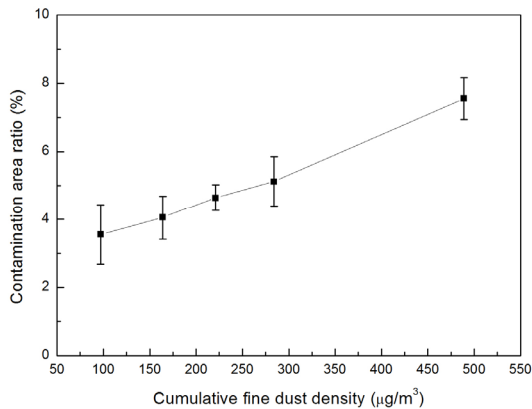


Fig. 8. The relational between cumulative fine dust density and contamination area of photovoltaic (PV) cells

로 약 5배까지 점진적으로 증가하여 태양전지 셀의 성능에 영향을 미쳤다.

Fig. 8은 누적미세먼지농도와 태양전지 셀의 오염면적률의 관계를 보여주고 있다. 시간의 경과에 따라 누적미세먼지농도가 증가하고 태양전지 셀의 오염시간 3일에서 24일까지 오염면적률이 약 3.6%에서 약 7.6%까지 약 2.1배로 점진적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 3일에서 24일까지 누적미세먼지농도가 약 5배 증가하는 것과 비교하여 오염면적률은 약 2.1배 증가하였다. 또한, 작은 면적 안에서 오염을 진행시켰음에도 불구하고, 오염시간의 경과에 따른 오염면적률의 편차는 오염시간 12일의 최소편차 약 $\pm 0.4\%$ 로부터 3일의 최대편차 약 $\pm 0.9\%$ 로 변하여 편차비가 약 2.3배에 이르는데, 이는 습도와 바람 등의 변화에 의한 영향으로 추측된다.

Fig. 9는 태양전지 셀을 옥외에 방치시켜 공기 중의 미세먼지에 의해 3일에서 24일 동안 자연 오염을 진행시킨 태양전지 셀의 실제현미경 확대 사진이다. 시간의 경과와 함께 태양전지 셀의 미세먼지 오염면적과 큰 미세먼지가 증가하고 있다. 이로 인하여 태양광의 입사면적이 감소되어 발전출력의 저하가 발생할 수 있다는 것을 보여주고 있다.

Fig. 10은 3일, 7일, 12일, 17일, 24일 동안 공기 중에 노출시켜 오염된 태양전지의 출력 변화를 나타낸 전압-전력 그래프이다. 공기 중에 노출시킨 시간에 비례하여 오염면적률이 증가하므로 입사광이 감소하여 발전출력이 줄어드는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 태양전지 셀의 오염면적률과 발전출력과의 관계를 나타내고 있다. 공기 중의 미세먼지에 의한 오염면적률의 증가와 함께 발전출력이 감소한다는 것을 알 수 있다. 오염면적률이 24일간 7.6%까

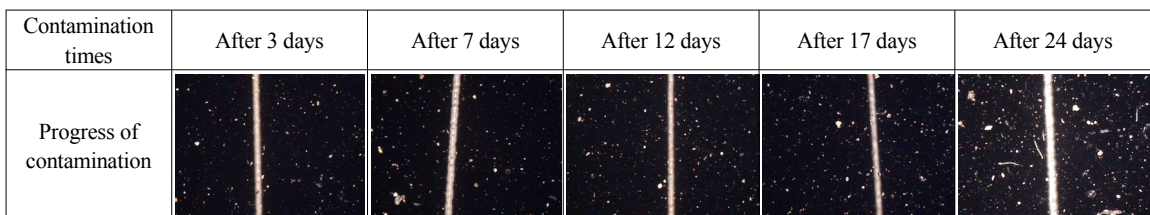


Fig. 9. Photographs on the progress of contamination of photovoltaic (PV) cells during contamination times

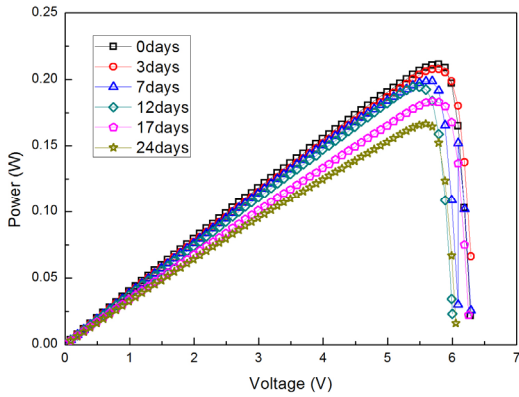


Fig. 10. The relation between contamination area ratio of PV cells and power generation output

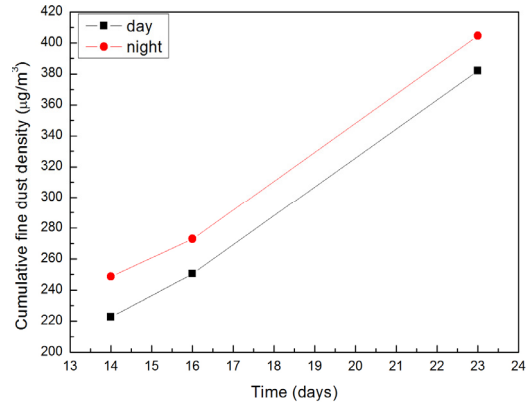


Fig. 12. The change of cumulative fine dust density in air on the day and night during 23 days

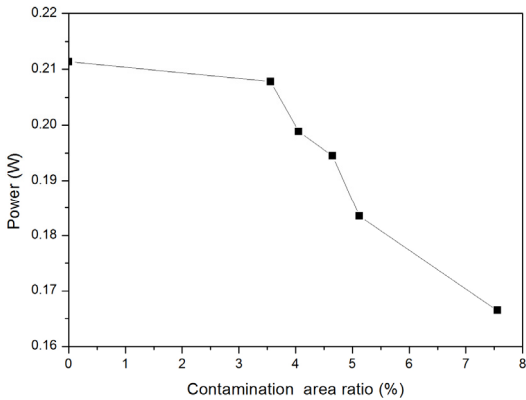


Fig. 11. The relation between contamination area ratio of photovoltaic (PV) cells and power generation output

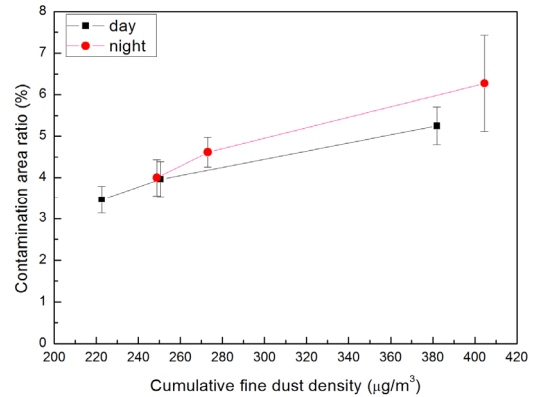


Fig. 13. The relation between cumulative fine dust density and contamination area ratio of photovoltaic (PV) cells exposed in air only for days and nights

지 증가함에 따라서 태양전지 셀의 발전출력은 약 21.2% 감소되었다.

Fig. 12는 선택적으로 낮에만 오염시킨 태양전지 셀과 밤에만 오염시킨 태양전지 셀의 14일, 16일, 23일 동안에 누적된 PM10의 누적미세먼지농도를 나타내고 있다. 14일과 23일 낮의 누적미세먼지농도는 각각 $225.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $382.060 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, 14일과 23일 밤의 누적미세먼지농도는 각각 $248.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $404.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 낮보다 밤의 미세먼지 농도가 약 5.9-11.8% 정도 높은 것을 알 수 있다. 이는 낮 동안 미세먼지가 태양 복사열에 의해 발생하는 상승기류를 따라서 부상하는 반면에 밤에는 복사열의 부재로 하강기류가 발생하여 지상에서의 미세먼지농도가 증가하는 것을

그 원인으로 생각할 수 있다.

Fig. 13은 23일간 낮 또는 밤에만 선택적으로 공기 중에 노출시킨 태양전지 셀의 누적미세먼지농도와 오염면적률의 관계를 보여주고 있다. 14일과 23일 동안에, 낮에만 공기 중에 노출시킨 태양전지 셀은 3.5%에서 5.3%로 오염면적률이 증가하였으며, 밤에만 노출시킨 태양전지 셀은 4.0%에서 6.3%로 오염면적률이 증가하였다. 밤의 오염면적률은 낮과 비교하여 약 0.5% (약 15.5% 증가)와 약 1.0% (약 19.5% 증가)만큼 더 많이 증가하였다. 이는 밤 동안 높아지는 습도로 인한 접착성 향상¹⁰⁾과 낮보다 증가하는 미세먼지농도 등이 태양전지 셀의 오염을 크게 증가시킨데 기인한 것으로 생각할 수 있다. 그러나 낮과 밤

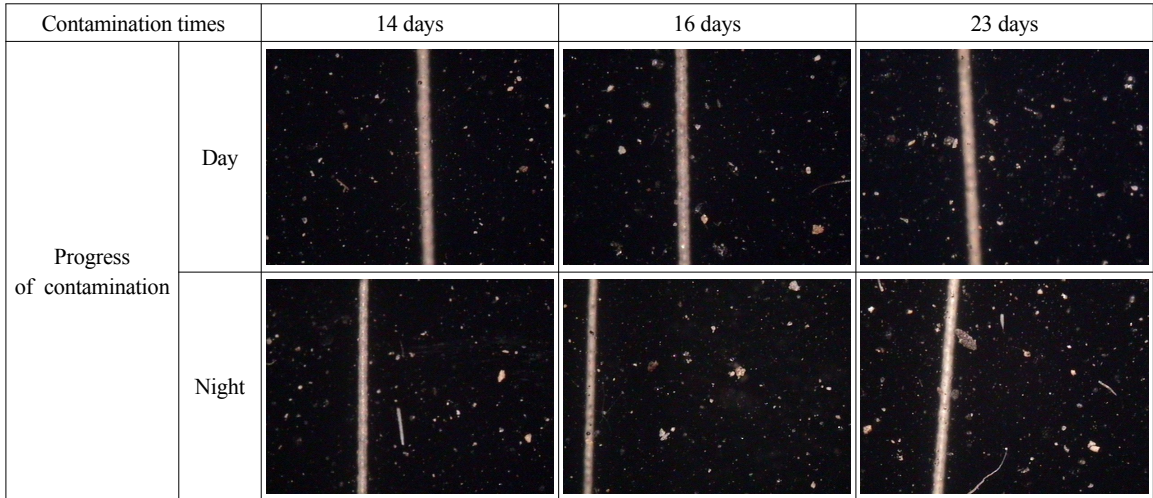


Fig. 14. Photographs on the progress of contamination of photovoltaic (PV) cells exposed in air only in days and nights during 23 days

의 누적미세먼지농도의 증가와 비교하여 오염면적률의 증가는 작다. 시간의 경과에 따른 오염면적률 편차의 경우에는 습도가 감소하는 14일간의 낮에만 오염시킨 셀은 $\pm 0.3\%$ 의 최소편차로, 습도가 증가하는 23일간의 밤에만 오염시킨 $\pm 1.2\%$ 의 최대편차와 비교하면 약 3.5배의 편차가 발생하고 있다. 이는 습도에 의한 영향 이외에 바람의 영향도 작용한 것으로 사료된다.

Fig. 14는 태양전지 셀을 14일, 16일, 23일 동안 온도와 습도의 변화가 큰 낮 또는 밤 시간에만 노출시킨 태양전지 셀의 국소부분에 대한 실체현미경 확대 관찰 사진이다. 낮과 비교하여 밤에만 오염시킨 태양전지의 오염정도가 크다는 것을 알 수 있다. 또한, 밤에만 오염시킨 태양전지 셀에서 낮에만 오염시킨 태양전지 셀과 비교하여, 상대적으로 큰 미세먼지가 많다는 것을 알 수 있다. 이것은 야간에 공기 중의 수분의 결로로 인하여 미세먼지의 응집력이 증가하는 것을 그 원인으로 생각할 수 있다.

이상의 결과로부터 태양전지는 공기 중의 미세먼지농도가 높고 노출시간이 길수록 오염이 증가할 뿐만 아니라 온도가 낮고 습도가 높아도 오염이 증가하고 바람의 영향도 받는 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 인공오염이 아닌 자연 대기 중에서 오염된 태양전지 셀에 대한 오염시간, 공기 중의 누적미세먼지농도 그리고 공기의 온도와 습도에 의한 따른 태양전지 셀의 오염면적과 출력의 변화에 관한 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 공기 중에 노출되는 오염시간과 공기 중의 누적미세먼지농도의 증가에 비례하여 태양전지의 오염면적은 증가한다. 24일 동안에 누적미세먼지농도가 약 5배 증가하였을 때 태양전지의 오염면적률은 약 2.1배 증가하였다.

2) 23일 동안에 낮보다 밤의 누적미세먼지농도와 오염면적이 각각 약 11.8%와 약 19.5%가 크게 나타났으며, 온도가 낮을수록 상승기류가 줄어 태양전지의 오염면적은 증가한다.

3) 아울러, 습도가 높을수록 수분에 의한 점착력과 응집력 증대로 인하여 상대적으로 큰 입자들의 오염원이 증가하며, 오염면적도 증가한다.

4) 국소면적에 노출시킨 태양전지 셀들의 오염면적률의 편차가 최대 3.5배로 크고, 누적미세먼지농도가 약 5배의 증가하는 것과 비교하여 오염면적률이 약 2.1배로 작은 것은 바람의 영향이라고 추정할 수 있다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비 지원으로 수행되었다.

References

1. PV-laboratory of HTA Burgdorf, 2nd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, Austria, 1998.
2. J. M. Chua, Live Science Contributor, Live Science Planet Earth, Air Pollution May Make Solar Panels Less Efficient, June 30, 2017.
3. J. K. Kaldellis, P. Fragos, and M. Kapsali, "Systematic experimental study of the pollution deposition impact on the energy yield of photovoltaic installations", *Renewable Energy*, Vol. 36, No. 10, 2011, pp. 2717-2724.
4. J. H. Song, T. Kim, W. H. Ryu, and H. H. Cho, "Study on Complex Efficiency Reduction by Increasing Temperature and Pollutant of Photovoltaic Module", *KSME, 15EP-02B03*, Spring Conference, 2015. 6, pp. 59-61.
5. A. Sayyah, M. N. Horenstein, and M. K. Mazumder, "Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels", *Solar Energy*, Vol. 107, 2014, pp. 576-604.
6. W. Oh and S. I. Chan, "The Performance Loss by the Soiling of Photovoltaic Modules", *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 35, No. 2, 2015, pp. 63-71.
7. G. H. Kang, K. S. Kim, C. H. Park, G. J. Yu, H. K. Ahn, and 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*, Vol. 27, No. 3, 2007, pp. 23-28.
8. S. Ghazi, A. Sayigh, and K. Ip, "Dust effect on flat surfaces - A review paper", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 33, 2014, pp. 742-751.
9. S. A. M. Said, "Fundamental studies on dust fouling effects on PV module performance", *Solar Energy*, Vol. 107, 2014, pp. 328-337.
10. T. Sarver, A. Al-Qaraghuli, and 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, 2013, pp. 698-733.
11. Y. Jung, S. Lee, J. Kim, K. Lee, D. Lee, and J. Lee, "A Study on Pollution of Solar Cell", *KHNES*, 2015, p. 160.
12. Y. G. Jung and S. M. Lee, "A Study on Fine Dust Quantification of Solar Cell", *KHNES*, 2016, p. 201.
13. Y. G. Jung, J. Y. Cho, J. H. Baek, M. H. Ahn, J. W. Son, and J. H. Park, "The Study on Dust pollution of the Solar cell during day and night", *KHNES*, 2016, p. 161.