

# 태양광발전 운전 및 유지보수를 위한 모델기반 효율분석: 사례연구

유정운\*, 박성원\*\*, 손성용\*\*\*

## Model-based Efficiency Analysis for Photovoltaic Generation O&M: A Case Study

Jung-Un Yu\*, Sung-Won Park\*\*, Sung-Yong Son\*\*\*

**요약** 태양광발전시스템의 운영에 따른 손실은 설치 환경 뿐 만 아니라 운영 및 관리 방법에도 크게 영향을 받는다. 태양광발전시스템은 세계적으로 다양한 기후 조건에서 설치되고 있기 때문에 설치 위치의 특성에 맞는 운영 및 유지보수 기술이 필요하다. 기존의 태양광 발전효율과 관련된 연구에서 고온, 먼지 축적, 강수량, 습도, 풍속 등 환경 요인별로 단 기적인 손실에 대한 영향의 정량화는 활발히 이루어진 반면 장기적인 운영 관점에서의 전반적인 영향에 대한 분석은 제한적이다. 본 연구에서는 태양광 발전의 전력 흐름에 따른 손실 분류체계를 재분류하고 주요 손실요인에 대한 장기 운영에 따른 종합 효율 모델을 도출하였다. 기후 조건이 구분되는 각 지역에 대한 사례조사를 통하여 발전량 손실을 추정함으로써 효율 개선 잠재량을 분석하였다. 분석 결과, 오염 손실 개선을 위한 연평균 잠재량은 도하는 26.9%, 데스밸리 7.2%, 서울 3.8%로 나타났다. 열화 손실은 누적 손실로 20년차에 6.6%로 나타났다. 온도 손실으로 인한 연평균 잠재량은 연평균 도하 2.9%, 데스밸리 1.9%, 서울 0.2%로 나타났다.

**Abstract** This paper studies the method of estimating power loss and classifying the factors for improving the power generation efficiency through O&M. It is installed under various climatic conditions worldwide, operational and maintenance technologies suitable for the characteristics of the installation location are required. Existing studies related to solar power generation efficiency have been actively quantifying the impact on short-term losses by environmental factors such as high temperature, dust accumulation, precipitation, humidity, and wind speed, but analysis of the overall impact from a long-term operation perspective is limited. In this study, the potential for efficiency improvement was analyzed by re-establishing a loss classification system according to the power flow of solar power to derive a comprehensive efficiency model for long-term operation and estimating power loss through a case study for each region where climate conditions are classified. As a result of the analysis, the average annual potential for improving soiling loss was 26.9%, Death Valley 7.2%, and Seoul 3.8%. Aging losses was 6.6% in the 20th year as a cumulative. The average annual potential due to temperature loss was 2.9 % for Doha, 1.9% for Death Valley, and 0.2% for Seoul.

**Key Words** : Photovoltaic system, O&M, Climate, Environment

### 1. 서론

탄소 배출 저감의 중요성이 높아짐에 따라 재생

에너지 자원이 점진적으로 확대되고 있다. 재생에너지 자원 중 하나인 태양광발전의 글로벌 신규 설치량은 기후변화와 ESG 이슈 등으로 인해 2021

This work was supported by the Gachon University research fund of 2019(GCU-2019-0711) and Korea Energy Agency and the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE) of the Republic of Korea (No. 20194310100060).

\*Department of Next Generation Smart Energy System, Gachon University(kora@gachon.ac.kr)

\*\*Department of Electronic and Electrical Engineering, Youngsan University(swpark@gm.yyu.ac.kr)

\*\*\*Corresponding Author : Department of Electronic Engineering, Gachon University(xtra@gachon.ac.kr)

Received October 19, 2022

Revised October 22, 2022

Accepted October 24, 2022

년 290GW에 달했다[1]. 태양광발전은 약 20년의 기간에 걸쳐 수명주기가 형성되므로 지속적인 운전 및 유지보수 (operation and maintenance, O&M)가 요구된다. 태양광에너지의 증가 추세 및 신규 용량의 추가를 고려할 때 O&M 시장 또한 증가할 전망이다[2]. O&M의 핵심은 발전 효율의 저해 요인을 사전에 진단하거나 감지하고 손실을 개선하는데 있다.

태양광 발전의 손실에 미치는 영향을 정량적으로 식별하기 위하여 고온, 오염 및 에너지 변환 등 각각의 조건에서 산출하는 모델이 다양하게 연구되었다[3-6]. 성능 저하를 유발하는 요인별 연간 발생하는 손실을 개별적으로 입력 및 적용하여 수익을 산정하는 대표적인 시뮬레이션 도구로 HOMER, PVsyst, RETSCREEN, SAM 등이 대표적으로 사용된다[9]. 하지만, 이러한 시뮬레이션 도구는 시간대별 기후 변화 및 에너지 흐름을 반영하지 않기 때문에 손실 항목별 대략적인 추정치를 기반으로 발전량을 산정한다. 기후 조건 및 시간대에 따라 변화하는 발전량 및 손실을 도출하기 위해서는 손실 요인별 영향을 각각 구분하여 통합적으로 분석할 수 있는 수학적 모델 기반 시뮬레이터가 요구 된다.

태양광발전시스템 발전 성능 저하에 대한 위험을 완화하고 높은 신뢰성과 장기적인 경제성을 보장하기 위해 설치 입지 조건과 기후 환경이 고려될 필요가 있다. 본 연구에서는 현저히 구분된 기후조건을 가진 지역에 대한 사례연구를 통하여 효율저하에 미치는 주요 요인을 도출하고, 효과적인 O&M 방향을 검토하였다.

본 연구는 총 5개의 장으로 구성되어 있다. 2장에서는 태양광 발전 손실의 개념을 정의하고, 일사량으로부터 최종 발전에 이르는 전력의 생산 흐름 순으로 손실 요인을 분류하였다. 3장에서는 2장의 손실 요인에 근거하여 온도, 오염, 열화 영향을 고려한 기존 연구를 기반으로 추정 모델을 정식화 하고, 4장에서는 O&M 기법에 따라 효율 개선 가능 유무를 식별하였다. 5장에서는 기후 조건이 상이한 지역을 대상으로 태양광발전 운영 결

과에 대한 Case study를 진행하였다. 5장에서는 전체적인 연구 결과를 기술하였다.

## 2. 태양광발전 손실

### 2.1 태양광발전 손실 개념

태양광발전에서 발생하는 손실은 태양광발전 운영 시 생산되는 에너지에 부의 영향을 미치는 모든 요인이다. PVsyst 에서는 태양광발전시스템에서 발생하는 손실 요인을 참고문헌 [3]과 같이 17가지로 구분한다. 태양광발전은 빛이 태양광 모듈로 전달 전/후 에너지를 DC 전력으로 변환, 계통 전달을 위한 AC 전력으로 변환 등 순차적인 흐름에 따라 발생한다. 태양광 발전 손실은 단계별로 전달되어 해당 흐름에 따라 이해하는 것이 직관적이다. 본 연구에서는 태양광발전 에너지 전달 단계에 따라 손실을 1) 모듈 입사 전 단계, 2) 어레이 및 모듈 단계, 3) 시스템 손실 단계 3개의 단계와 고장손실로 구분하였으며, [3]에서 제시된 17가지 손실요인을 그림 1과 같이 각 단계별로 재분류하고 흐름 순으로 제시하였다. 손실 흐름과 별개인 운영 중 구성요소의 불특정 보수, 교체 등은 고장 손실로 분류하였다.

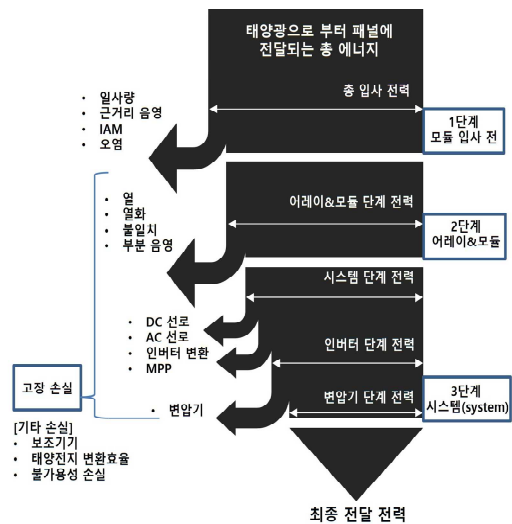


그림 1. 태양광발전 손실 흐름(Sankey Diagram)  
Fig. 1. Sankey diagram of PV system losses flow

## 2.2 입사 전 단계 손실

입사 전 단계 손실은 태양광 일사량이 패널에 입사하기 전까지의 손실을 의미한다.  $200 W/m^2$  미만 일사량 조건에서 PV 모듈 재질별 회로 내 병렬 저항 간 영향으로 발생하는 저 일사량 손실, 원거리 음영(far shading) 손실, 입사 빛과 태양광 패널 표면 입사각 증가에 따른 반사율이 증가함으로써 발생하는 IAM(incidence angle modifier) 손실, 태양광 패널이 빛에 노출됨으로써 산소 간 영향으로 발생하는 LID(light induced degradation) 손실, 오염(Soiling) 손실로 구분된다.

## 2.3 어레이&모듈 단계 손실

어레이&모듈 단계 손실은 태양광발전 시스템의 핵심 구성요소인 태양광 모듈과 모듈 배치 구조에 따라 발생하는 손실이다. 개별 모듈의 전력 차에 의해 발생하는 불일치(mismatch) 손실, PV 어레이 배치에 따라 발생하는 근거리 음영(near shading) 손실, 태양전지 제조 소재별 효율에 따른 태양전지 변환 손실 및 열화(Aging) 손실, 온도에 따른 효율 변화 손실 등으로 구분된다.

## 2.4 시스템 단계 손실

시스템 단계 손실은 태양광 어레이&모듈에서 전달된 에너지를 최종 소비 형태인 DC 또는 AC 전력으로 변환하는 과정에서 발생하는 손실이다. 일반적으로 구성요소의 특성에 따라 고정적인 비율로 태양광발전량 손실 추정 시 적용하여 산정한다. 대표적인 시스템 손실로 직교류 배선, 인버터, 보조기기, 변압기 순으로 에너지 전달 과정을 거치며 발생한다.

## 2.5 고장 손실

손실 흐름과는 별개로 운영 중 불특정하게 발생하는 고장 손실은 기기의 오동작, 고장 및 유지보수 등으로 일부 혹은 전체 전력 생산이 불가능한 상황으로 전환 될 경우 발생하는 손실을 의미한다. 고장 손실 개선을 위해 사전 진단, 고장 모

니터링 기법 등이 사용되며, 각 구성요소의 내구연한, 고장율에 따른 신뢰성 공학 기법의 추정에 대한 다양한 연구가 진행되었다. 하지만, 기기의 고장 특성은 발전소 운영에 의존하므로 일반적으로 발전량 추정 시 고정 값을 적용하여 산정한다.

## 3. 태양광발전량 추정 모델

태양광 손실 항목 중 O&M이 가능한 기술을 식별하여 시간에 따라 변화하는 손실 항목에 집중할 필요가 있다. 표 1은 17가지 손실 요인과 그 중 O&M 접근성이 용이하고 개선 가능성이 높은 손실을 구분한 것이다.

본 장에서는 손실 항목 중 오염, 열화, 온도 영향에 중점을 두어 태양광발전량 추정 수식을 정식화하였다. 2장에서 재분류한 손실 항목 중 일정하거나 추정이 어려운 손실은 기존 연구 내용을 참고하여 고정 손실률을 적용하였다.

표 1. 태양광발전 손실 중 O&M 적용 가능 군 식별표

Table1.O&M applicable loss of PV system

분류	약어	손실 항목	O&M 개선 가능 손실
모듈 입사 전	$\eta_{pre}$	저 일사량	
		원거리 음영	
		IAM	
		LID	
어레이&모듈	$\eta_{soil}$	오염 손실	○
		불일치	
	$\eta_{arr}$	근거리 음영	
		태양전지 변환 효율 (소재 조건)	
		$\eta_{mismatch}$	연간 성능저하율
시스템 손실	$\eta_{sys}$	온도 손실	○
		DC선로	
		MPP	
		인버터	
		AC선로	
고장 손실	$\eta_{un}$	보조기기	
		변압기	
		구성요소	
		고장 손실	

## 3.1 오염 영향 모델

기후 및 계절적 특성에 따른 차이가 발생하지만 오염 손실의 경우 먼지 축적 및 세척(Cleaning)

이 효율 개선에 미치는 영향 대한 다양한 연구가 수행되었다. 오염 손실 모델은 패널에 쌓이는 먼지 등의 오염물질에 의해 투과율 저하를 발생시킴으로 인해서 발생하는 손실로 정의된다.

축적 먼지량  $\Delta M$  의 누적에 의한 효율 저하는 해당 설치환경의 먼지 밀도, 먼지 입자 크기, 먼지 구성요소에 의해 결정되며, 축적 먼지 량 산정식은 수식 (1)과 같다.

$$\Delta M = x_{ref} \cdot D^\alpha \quad (1)$$

$\Delta M$  은 패널에 쌓인 먼지량( $g/m^2$ ),  $x_{ref}$ 는 먼지 상수,  $D$ 는 일일 먼지 축적량( $mgd^{-1}m^{-2}$ ),  $\alpha$ 는 기간-먼지 축적량 간 상관계수이다. 먼지에 노출된 기간에 따라 태양광발전량에 미치는 영향 모델은 I. Niknia et al.(2012) 모델을 참조하였으며, 수식 (2)와 같다.

$$\eta_{soil} = \Delta \eta_{soil} = (1 - e^{-A_{eq} \cdot \Delta M}) \quad (2)$$

$\eta_{soil}$ 은 오염손실 적용 시 효율,  $A_{eq}$ 는 패널 표면에 쌓인 먼지축적량과 상관관계 계수이다.

### 3.2 열화 영향 모델

열화 영향 모델은 모듈의 운영 및 노후화에 따라 영구적으로 누적되어 나타나는 손실 영향이며, 모듈 소재에 따라 상이하다. 모듈 소재별 성능 저하율은 Sandia&NREL 보고서를 참조하였으며 표 2와 같다[7]. 본 연구에서 적용하는 단결정 모듈 시장이 지배적임에 따라 해당 내용을 분석에 적용하였다.

표 2. 태양전지 소재별 열화율(%/year)  
Table2.Degradation rate by solar cell material

소재	열화율(%/yr)
a-Si	0.87
Mono c-Si	0.36
Multic-Si	0.64
CdTe	0.40
ClGS	0.96
Concentrator(CPV)	1.00

태양전지 효율에 미치는 영향을 정식화하면 수식(3)과 같이 지수형태로 표현된다.

$$\eta_{aging} = (1 - \lambda_{aging})^i \quad (3)$$

여기서,  $i$ 는 운영 연도,  $\lambda_{aging}$ 는 연간 성능 저하율[%/year]을 의미한다.

### 3.3 온도 영향 모델

온도 영향은 태양광발전 모듈의 온도 변화에 따라 효율에 미치는 영향을 정식화한 모델로 일사량, 온도, 풍속 등과 같은 기상환경 데이터를 기반으로 Christofare et al(2006), Skoplaski et al(2009) 모델이 대표적으로 사용된다[11-12]. 그림 2는 셀온도 추정결과의 예를 보여준다.

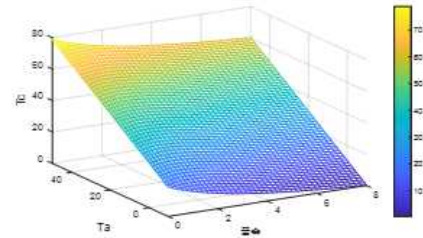


그림 2 외기온도, 풍속 조건에 따른 셀온도 추정  
Fig. 2. Cell temperature estimation result

셀 동작온도는 실측 운영데이터를 통해 습득이 가능하므로 Skoplaski et al(2009) 모델을 사용하여 셀 동작온도를 추정가능하며, 기상 환경 조건에 따른 태양전지 효율과 셀온도 추정은 수식 (4)와 (5)로 나타낼 수 있다.

$$\eta_{temp} = [1 - \beta(T_{cell} - T_{ref}) + \gamma \log_{10} G] \quad (4)$$

$$T_{cell} = T_a + \left( \frac{0.32}{8.91 + 2 \cdot V_w} \right) \cdot G \quad (5)$$

여기서,  $T_a$ 는 외기온도[ $^{\circ}C$ ],  $V_w$ 는 풍속[m/s] 그리고  $T_{cell}$ 은 셀 동작온도[ $^{\circ}C$ ],  $\eta_{temp}$ 은 열 손실 변환효율[%],  $\beta$ 는 온도 계수[%/ $^{\circ}C$ ],  $T_{cell}$  셀 동작온도[ $^{\circ}C$ ],  $r$ 은 일사량 상관계수,  $G$ 는 측정 일사량 [ $W/m^2$ ]을

의미 한다.

### 3.4 발전량 추정 모델

전체 손실을 반영한 태양광발전량 산출 수식은 다음 수식(6)~(9)와 같다.

$$P_{PV} = Y_{PV} \times \frac{G}{G_T} \times \eta_{temp} \times \eta_{pre} \times \eta_{arr} \times \eta_{sys} \quad (6)$$

$$\eta_{pre} = \eta_{soil} \times \eta_{fixed,pre} \quad (7)$$

$$\eta_{arr} = \eta_{aging} \times \eta_{temp} \times \eta_{fixed,arr} \quad (8)$$

$$\eta_{sys} = \eta_{fixed,sys} \quad (9)$$

여기서,  $P_{PV}$  는 태양광발전 출력,  $Y_{PV}$  는 표준 시험조건(Standard test condition: STC) 기준 태양광발전시스템 용량(kWp),  $G$ 는 측정 일사량 ( $W/m^2$ ),  $G_T$ 는 기준 일사량( $1000 W/m^2$ ),  $\eta_{soil}$ 는 오염 손실 적용 시 효율,  $\eta_{aging}$ 는 성능저하 적용 시 효율,  $\eta_{temp}$ 는 온도 영향 적용 시 효율,  $\eta_{fixed,pre}$ ,  $\eta_{fixed,arr}$ ,  $\eta_{fixed,sys}$ 는 분류체계 중 단계별 고정 손실을 나타낸다.

## 4. 태양광발전 O&M 기법 및 영향

태양광 발전성능 저하에 대한 원인 규명을 위한 국내외 다양한 연구가 진행 중이며, 태양광 발전소의 O&M은 효과적 해결 방안으로 떠오르고 있다[8]. 따라서 운영환경에 따라 태양광발전의 효율을 개선할 수 있는 요소를 구분하는 것은 O&M 측면에서 중요하다. 효율 개선을 위한 대표적인 O&M 기법은 세척, 쿨링, 열화 개선 기법이 있다.

### 4.1 세척(Cleaning) 기법 및 영향

태양광 패널은 세척 기술을 통해 발전 전력 효율을 크게 개선할 수 있으며, 패널의 수명 및 내구성 향상 등 부가적인 효과를 가져 올 수 있다. 세척 기술로는 세척 기기 사용, 패널 코팅, 마이크로컨트롤러 기반 자동 세척 방법 등이 사용된다[4].

### 4.2 쿨링(Cooling) 기법 및 영향

태양광 패널에 입사되는 에너지의 일부는 전기로 변하고 나머지는 PV 셀 내부에 흡수된다. 외기 온도, 풍속 등의 영향이 복합적으로 발생하여 패널의 온도가 높아지면, 변환 성능은 감소하고 효율성을 저해한다. 상변화물질(phase change material, PCM)을 활용한 쿨링, 공기 또는 물을 활용한 액티브, 패시브 쿨링 기법 등이 사용되기도 한다[5].

### 4.3 열화(Aging) 개선 기법 및 영향

태양광발전 모듈은 온도, 자외선, 온도, 습도, 풍속이 변화하는 조건에서 핫스팟(hot spot)이 가속화 되어 나타난다. 다년간 축적되는 실증 데이터를 기반으로 연구되며, 지역별 특성에 따라 연간 4.9%/year 씩 저하 된다는 연구결과도 제시되었다[6]. 열화 방지를 위한 기술로는 부분 오염, 습도 모니터링을 통한 주기적인 예방 보수 및 교체 및 오프라인 보수가 적용된다. 열화 개선 기법은 PV 모듈의 제품 특성, 유지보수 기간 및 간격에 대한 전략적 접근 방법이 요구된다[7].

## 5. 기후 환경별 태양광발전 운영결과

### 5.1 사용 데이터 및 사례 연구 설정

#### 5.1.1 사용데이터

태양광발전은 운영환경에 따라 크게 좌우되기 때문에 미계측 지역에 태양광발전소를 설치할 경우 생산 가능한 발전량을 추정하기 위한 기상 데이터가 요구된다. 지역의 특성에 따라 대표적으로 열대, 건조, 온대, 냉대, 한대 기후 등으로 구분되며, 본 문헌에서 고려하는 손실 요인인 열, 열화, 오염과 상관관계가 높을 것으로 추정되는 건조기후(데스벨리-먼지 적음, 도하-먼지 많음), 온대기후(대한민국) 이상 3개 지역의 NASA(National Aeronautics and Space Administration)에서 제공하는 MERRA2 기후 재해석 데이터를 사용하였다[10]. 지역별 기후 데이터에 대한 정보는 표 3과 같다.

표 3. MERRA2 데이터 요약(국가별)

Table3. MERRA2 Data summary of countries

국가명	지역	온도		습도		풍속		일사량	연강수량 평균			PM10(±분산)
		단위: ℃		단위:%		단위:m/s		단위: Wh/m <sup>2</sup>	단위: mm			단위: ug/m <sup>3</sup>
		평균	표준 편차	평균	표준 편차	평균	표준 편차	평균	평균	최대	최소	일평균
카타르	도하	27.7	±7.2	53.5	±17.5	4.2	±2.3	251.9	94	189	43	겨울 140(±50) 여름 156(±60)
미국	데스벨리	18.8	±10.7	29.5	±19.3	2.8	±1.9	246.8	114	206	24	16(±16)
대한민국	서울	10.8	±11.0	75.8	±16.3	3.5	±2.1	186.9	1151	1755	728	42(±22)

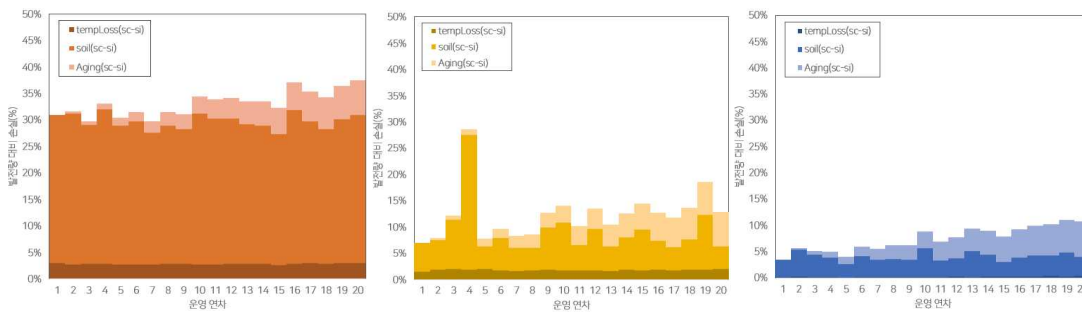


그림 3 운영환경별 오염, 열화, 온도 손실(도하, 데스벨리, 서울)

Fig. 3. Distribution of Heat, Dust, and Degradation Loss by Operating Environment (Doha, Death valley, Seoul)

5.1.2 사례 연구 설정

운영 시 자연 세척 조건에 따라 일일 5mm 이상 강수 발생 시 패널 세척에 충분하다는 연구결과에 따라 해당 조건을 적용하였다[13]. 축적 된 먼지량 기준 상수는 국가별 연간 평균 PM10과 비교하여 비례결과 적용하였으며, 데이터는 대기오염지수를 측정하는 국가 기관별 포털을 참고하였다. 태양광 패널 모듈 소재는 단결정, 다결정, CIGS 등으로 구분되어 있으나, 현재 시장 점유율이 가장 높은 단결정 모듈은 사례 분석에 활용하였다. 또한, 열화 영향은 단결정 모듈 기준 연간 열화 값(-0.36%/year)을 설정하였다.

5.2 운영 시뮬레이션 결과

태양광발전 운영환경에 따라 운영기간 중 발생하는 손실이 운영 연차에 따라서 다른 비율로 나타날 수 있다. 사례 연구 수행 지역은 카타르-도하, 미국-데스벨리, 대한민국-서울로 지정하였으

며, 또한 시간 또는 다른 변화 요인에 의해 변하는 손실로 열, 오염, 열화의 영향 결과를 그림 3과 같이 시각화하고 분석하였다.

카타르-도하의 경우 먼지 밀도가 다른 두 지역에 비해 높은 만큼 오염 영향이 높게 나타났으며, 기후 특성상 온도에 의한 영향이 평균적으로 높은 비율로 발생하였다.

미국-데스벨리의 경우 대표적인 건조기후 지역으로 비가 오지 않는 건조기 발생빈도가 높으므로 오염에 의한 손실이 상대적으로 높게 발생하였다. 특히, 강수량이 상대적으로 낮은 4차년도의 경우 오염 손실이 다른 년차에 비해 높게 나타났다.

대한민국-서울의 경우 열손실의 영향이 상대적으로 낮으며, 계절 특성 상 1년에 7-8월에 해당하는 기간 동안 일시적으로 열 손실의 영향이 나타나지만 다른 두 지역 운영환경에 비해 다소 적은 영향이 발생하였다.

표 4. 태양광발전 설치 위치별 개선 가능 잠재량

Table4. Potential improvement by PV installation location

손실 구분	손실별 개선 가능 잠재량(%)								
	카타르 (도하)			미국 (데스벨리)			대한민국 (서울)		
	연차								
	1year	20year	Avg	1year	20year	Avg	1year	20year	Avg
오염	28.0	27.9	26.9	5.5	4.2	7.2	3.2	3.6	3.8
열화	0	6.6	3.3	0	6.6	3.3	0	6.6	3.3
온도	3.0	3.0	2.9	1.6	2.1	1.9	0.2	0.4	0.2

### 5.3 O&M 기술별 잠재량 고찰

기후 조건이 다른 3개의 지역에서 태양광발전소 운영 시 O&M 기술을 통해 개선 가능한 잠재량을 운영 연차별로 1년차, 20년차, 연평균 비율로 산정한 결과는 표 4와 같다.

오염 손실 개선을 위한 잠재량은 도하(카타르)의 경우 연평균 26.9%로 다른 2개의 환경 비해 상대적으로 높다. 데스벨리(미국)의 경우 연평균 7.2%로 1년차 2년차 잠재량에 비해 높은데 이는 4년차 기상데이터 중 강수량이 상대적으로 낮은 빈도로 발생한 것이 잠재량에 기인하였다. 서울(한국)의 오염 손실 잠재량은 연평균 3.8%로 건조기후인 도하, 데스벨리에 비해 낮게 나타났다.

손실이 누적되는 형태로 증가하는 열화 개선 잠재량은 20년차에 6.6%로 3개 장소 동일한 수치적 결과를 보였다. 하지만, 이는 이론적인 결과이므로 모니터링 또는 점검 시 PV 모듈의 재질 또는 제조사에서 제공하는 성능을 고려할 필요가 있다.

개선 가능한 온도 손실에 대한 연평균 잠재량은 도하 2.9%, 데스벨리 1.9%, 대한민국 0.2%로 지역별 기후 데이터가 잠재량 산정 결과에 기인하였다. 패널 냉각과 관련된 O&M을 시행할 경우 시간/월/계절영향을 고려한 분석을 통해 냉각 소요시간 및 비용을 고려하여 O&M 계획을 수립해야 할 것으로 사료 된다.

### 6. 결 론

기존의 태양광 발전효율과 관련된 연구에서 고온, 먼지 축적, 강수량, 습도, 풍속 등 환경 요인별로 단기적인 손실에 대한 영향의 정량화는 활발히 이루어진 반면, 장기적인 운영 관점에서의 전반적인 영향에 대한 분석은 제한적이다. 본 연구에서는 태양광 발전의 전력 흐름에 따른 손실 분류체계를 재정리하여 장기 운영에 따른 종합 효율 모델을 도출하였다. 기후 조건이 구분되는 미국, 카타르, 대한민국의 각 지역에 대한 기상데이터 기반 발전량 및 손실을 추정함으로써 효율 개선 잠재량에 대한 사례 분석을 수행하였다.

분석 결과, 사례 분석을 통해 오염, 열, 성능저하와 관련 된 손실 요인이 운영환경과 시간의 경과에 따라 O&M에 미치는 영향이 지속적으로 변화함을 확인하였다. 향후 태양광발전사업자 측면에서 본 연구에서 제시하는 사례분석 결과 및 제안된 방법을 이용하면 미 계획 지역에서 특정 도시의 과거데이터를 기반으로 잠재량 추정이 가능하다. 태양광발전소 전체 운용기간에 대한 운영 계획에 적용할 경우 운영환경에 적합한 O&M 기술을 제시하는 방안으로 활용될 수 있을 것이다.

### REFERENCES

- [1] IEA(International Energy Agency), "Renewable Energy Market Update", 2022.
- [2] Shawn Rumery, Aaron Holm, Rachel Goldstein, Justin Baca, "Solar Market Insight Report 2019 Q2, SEIA, 2019.

[3] A. Mermoud, "PVsyst - Software for the Study and Simulation of Photovoltaic Systems", Univ. Geneva, www.pvsyst.com.

[4] Saravanan V.S, Darvekar S.K, "Solar Photovoltaic Panels Cleaning Methods A Review", Bhivarabai Sawant College, 2018.

[5] Sharaf.M, Yousef. M, Huzayyin. A., "Review of cooling techniques used to enhance the efficiency of photovoltaic power systems", Environmental Science and Pollution Research, Vol 29, 2022.

[6] J. Kim, M. Rabelo, S.P. Padi, H. yousuf, EC. Cho, J. Yi, "A Review of the Degradation of Photovoltaic Modules for Life Expectancy", Energies, Vol 14, 2021.

[7] NREL/Sandia/Sunspec Alliance SuNLaMP PV O&M Working Group, "Best Practices in Photovoltaic System Operations and Maintenance", 2nd Edition, 2016.

[8] 안혜원, 조용성, "태양광발전소 O&M 관리를 통한 발전 성능 향상 방안", Journal of Climate Change Research, Vol. 6, No. 2, pp105~111, 2015.

[9] 유정운, 박성원, 손성용, "태양광발전 운영 환경 및 기간에 따른 사례기반 요인별 손실 영향 연구", 대한 전기학회, 2020.

[10] Gelaro, "Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications(MERRA), 2017. <https://bit.ly/3EPhieo>.

[11] E. Skoplaki, "On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations", Solar Energy, Vol83, 2009.

[12] G. Notton, C. Cristofari, M. Mattei, P. Poggi, "Modelling of a double-glass photovoltaic module using finite difference", Applied Thermal Engineering 25, 2854-2877, 2005.

[13] M. Al-Housani, Y. Bicer, M. Koc, "Assessment of Various Dry Photovoltaic Cleaning Techniques and Frequencies on the Power Output of CdTe-Type Modules in Dusty Environments", Sustainability Vol11. Issue10, 2019.

저자약력

유 정 운 (Jung-Un Yu)

[개인회원]



- 2016년 8월 : 가천대학교 에너지 IT학과(학사)
- 2020년 2월 : 가천대학교 나노과학기술융합학과 전기공학(석사)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 가천대학교 나노과학기술융합학과 전기공학 (박사과정)

스마트그리드, 태양광발전, ESS, 전력 데이터 분석

박 성 원 (Sung-Won Park)

[개인회원]



- 2018년 가천대학교 전기공학과 박사
- 2018년 ~2020년 가천대학교 연구교수
- 2018년 7월 ~ 2019년 9월, University of Bath(영국), Visiting Researcher
- 2020년 ~ 현재 영산대학교 전기전자공학과 조교수

스마트그리드, VPP, 차세대 배전계통 운영(DSO, DMO)

손 성 용 (Sung-Yong Son)

[중심회원]



- 1990년 KAIST 학사
- 1992년 KAIST 석사
- 2000년 Univ. of Michigan, ANN Arbor 박사
- 2006년 ~ 현재 : 가천대학교 전기공학과 교수

스마트그리드, 스마트홈, 스마트시티