

# 태양광모듈의 열화진단 시험장치 구현 및 열화특성에 관한 연구

신건, 이후동, 태동현, 노대석\*  
한국기술교육대학교

## A Study on Degradation Phenomenon Based on Test Device for Aging Diagnosis in PV Modules

Jian Shen, Hu-Dong Lee, Dong-Hyun Tae, Dae-Seok Rho\*  
Korea University of Technology and Education

**요약** 일반적으로, 태양광모듈은 20년 이상의 장기간 동안 사용할 수 있다고 알려져 있지만, 설치된 주변 환경요인(염분, 온도, 습도, 자외선, 음영 등)에 따라 다양한 열화현상이 발생하여, 전기적 성능과 수명이 크게 감소할 수 있어 태양광모듈에 대한 정확한 열화특성 분석이 요구되고 있다. 그러나, 태양광모듈의 출력을 STC조건으로 보정하여 초기 사양과 비교분석하는 기존의 열화특성 분석방법은 데이터 보정 시 필연적으로 발생하는 데이터 오류로 인하여 객관성이 결여될 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 태양광전원 모듈부와 모니터링부로 구성된 열화진단 시험장치를 구축하여 모듈별 출력 데이터를 측정 및 수집하고, 태양광모듈의 출력 변동성과 통신 에러 및 지연에 따른 영향을 최소화하기 위하여, MATLAB을 이용한 열화특성 분석 모델링을 통하여 실측 데이터를 평활화한다. 또한, 이를 바탕으로 태양광모듈의 열화상태를 계절별 실측 출력특성에 따라 분석한 결과, 전체 구형모듈의 평균 열화율은 총 25.73%이고, 연평균 1.55%씩 열화됨을 진단할 수 있어, 본 논문에서 구축한 열화진단 시험장치의 유용성을 확인하였다.

**Abstract** Generally, a proper evaluation method of the aging phenomenon of PV modules is required as the electrical performance and lifespan of PV modules can degrade significantly due to several environmental factors, while they are generally known as devices that are used semi-permanently for more than 20 years. On the other hand, there is a lack of objectivity in the existing evaluation method of the aging phenomenon, which compares the adjusted PV output based on STC with the initial PV module specifications due to the data distortion while adjusting the measured data. Therefore, this study implemented a test device for an aging diagnosis to measure and collect actual data from a PV module section and modeled the data for aging using MATLAB S/W to minimize the variability of the PV output, communication error, and delay. Furthermore, this study confirmed the usefulness of the presented test device for aging diagnosis of the PV modules by diagnosing the total period and yearly-basis degradation rate of aging PV modules as 25.73% and 1.55%, respectively, according to the on-site output characteristics of the PV modules by season.

**Keywords** : PV Module, Aging Characteristics, Aging Factors, Output Characteristics, Aging Rate, Test Device, Matlab

---

본 연구는 2020년도 중소벤처기업부의 기술개발사업 지원에 의한 연구[S2854105]와 2020년 교육부 대학혁신지원사업 사업비를 지원받아 연구되었음.

\*CorresPanding Author : Dae-Seok Rho(Korea University of Technology and Education)  
email: dsrho@koreatech.ac.kr

Received March 12, 2021

Revised April 6, 2021

Accepted June 4, 2021

Published June 30, 2021

## 1. 서론

최근, 정부는 탈원전 및 신재생에너지의 확대 보급을 골자로 하는 제3차 에너지기본계획을 바탕으로, 2040년 까지 신재생에너지전원의 비중을 전체 에너지전원의 35%로 확충하는 사업을 적극적으로 수행하고 있고, 이에 따라 태양광전원이 전국적으로 광범위하게 설치되고 있다. 여기서, 태양광전원을 구성하는 핵심요소인 태양광모듈은 일반적으로 20년 이상 반영구적으로 사용할 수 있다고 알려져 있지만, 설치된 주변 환경요인(염분, 온도, 습도, 자외선, 음영 등)에 따라 다양한 열화현상이 발생하여, 전기적 성능과 수명이 크게 감소할 수 있어 태양광모듈에 대한 정확한 열화특성 분석이 요구되고 있다 [1]. 한편, 기존의 열화특성 분석방법에는 주로 측정된 태양광모듈의 출력을 STC(standard test condition)조건으로 보정하고, 이 값을 태양광모듈의 제조사에서 제공하는 초기 사양과 비교분석하는 방식이 있다. 이 방식은 온도, 일사량, 전압, 전류, 출력 등 여러 가지 파라미터를 고려하여 측정된 태양광모듈의 출력을 STC조건으로 보정하지만, 계산과정의 복잡성에 따라 데이터 보정시 필연적으로 발생하는 데이터 오류로 인하여 분석된 데이터에 대한 객관성이 결여될 수 있다[2,3].

따라서, 본 논문에서는 실측 데이터를 기반으로 태양광모듈의 열화특성을 정확하게 분석하기 위하여, 태양광전원 모듈부와 모니터링부로 구성된 열화진단 시험장치를 구축하고, 이 장치를 이용하여 태양광전원 모듈부에서 측정된 데이터를 모니터링부로 전송하여 실시간으로 수집 및 감시한다. 또한, 데이터 수집 시 주변 환경의 변화에 의한 출력의 변동성과 통신 에러 및 지연에 의한 영향을 최소화하기 위하여, 본 논문에서는 MATLAB S/W를 이용한 열화특성 분석 모델링을 제시하고, 이를 바탕으로 1분 간격으로 측정된 일사량, 온도 및 모듈별 출력 데이터를 평활화하여 수집된 데이터의 정확도를 향상시킨다. 한편, 계절별 온도 및 일사량 조건의 변화에 따라 태양광모듈의 출력특성이 상이하게 나타나므로 태양광모듈의 출력 및 열화특성을 더 정확하게 분석하기 위하여, 본 논문에서는 2020년 1월부터 10월까지의 실측 일사량 및 온도데이터에 따라 산정한 월별, 계절별, 연도별 파라미터를 바탕으로, 태양광모듈의 열화특성을 제시한다.

## 2. 태양광모듈의 열화요인 특성분석

태양광전원을 구성하는 핵심요소인 태양광모듈은 20

년 이상 사용이 가능하고, 설치장소에 따라서 소형에서 대형까지 시스템의 규모를 유연하게 구성할 수 있다. 하지만, 현장에 설치된 태양광모듈은 자외선, 온도, 습도, 오염 등 다양한 설치환경의 영향으로 전기적 성능과 수명이 감소하고 있다.

구체적으로 태양광모듈에서 발생한 열화현상을 나타내면 Fig. 1과 같으며, 외부환경의 영향으로 태양광모듈에서는 봉지재 변색(encapsulant discoloration)과 리본와이어 부식(ribbon wire corrosion), 백 시트 박리(back sheet delamination), 셀 크랙(cell crack) 등의 열화현상이 주로 발생한다.

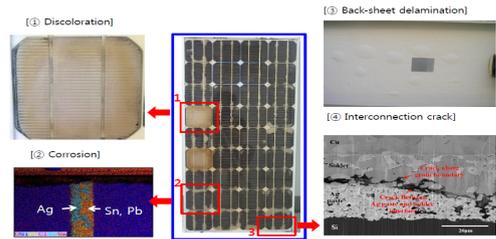


Fig. 1. Degradation phenomena of PV modules

여기서, 봉지재 변색은 태양광모듈이 장기간 자외선과 높은 온도에 노출될 경우, 과산화물의 광분해가 발생하여 태양광의 투과율이 감소하고 단락전류도 감소하게 된다. 또한, 리본와이어는 모듈내부에 수분이 침투하여 부식현상이 발생하고, 이로 인해 모듈의 내부저항이 증가하게 된다. 한편, 모듈의 후면에 노출되어 있는 백 시트는 습기와 온도차로 인하여 박리 현상이 발생하며, 이로 인하여 단락전류가 감소하게 된다. 또한, 셀 접합부 균열은 온도차로 인하여 팽창과 수축이 반복되는 과정에서 발생되며, 이로 인하여 태양광모듈 내부저항이 증가하게

Table 1. Deterioration characteristics of PV module

| degradation factor                   | degradation phenomenon                            | electrical characteristics                  |
|--------------------------------------|---|---|
| •ultraviolet<br>•high temperature    | •encapsulant discoloration (yellowing, whitening) | • $I_{SC}$ decrease<br>•efficiency decrease |
| •high temperature<br>•humidity       | •ribbon wire corrosion                            | • $R_S$ increase<br>• $FF$ decrease         |
| •temperature difference<br>•humidity | •back sheet delamination                          | • $I_{SC}$ decrease<br>•efficiency decrease |
| •temperature difference              | •cell crack                                       | • $R_S$ increase<br>• $FF$ decrease         |

된다. 따라서, 상기의 환경요인에 따른 태양광모듈의 열화현상을 분류하면 Table 1과 같다(4-7).

### 3. 태양광모듈의 열화진단 시험장치 구현

상기의 열화요인으로 인한 태양광모듈의 열화특성을 분석하기 위하여, 본 논문에서는 태양광전원 모듈부와 모니터링부로 구성된 열화진단 시험장치를 구축하고, 태양광전원 모듈부에서 측정된 데이터를 모니터링부로 전송하여 실시간으로 수집 및 감시한다.

#### 3.1 태양광전원 모듈부

태양광전원의 모듈부는 2001년부터 현장에 설치 및 운용되어 약 19년 동안 열화된 구형모듈과 2019년에 제조된 신형모듈로 구성하고, 각각의 상세 사양은 Table 2와 같다. 여기서, 신형 및 구형모듈의 출력특성에 의한 열화특성을 분석하기 위하여, 동일 모델의 제품을 사용해야 하지만, 구형모듈(53[W]급)의 단종으로 인하여 출력특성이 유사한 50[W]급의 신형모듈을 대상으로 한다.

Table 2. Specification of aging and new PV modules

| classification                    | aging modules(PA) | new modules(PN) |
|-----------------------------------|-------------------|-----------------|
| manufacturer                      | L                 | H               |
| model                             | GMG01530          | KWSP50          |
| date of manufacture               | 2001~2002         | 2019            |
| type of crystal                   | monocrystal       | monocrystal     |
| maximum output(W)                 | 53                | 50              |
| open-circuit voltage(V)           | 21.7              | 21.5            |
| short-circuit current(A)          | 3.25              | 3.19            |
| voltage at maximum power point(V) | 17.4              | 17.5            |
| current at maximum power point(A) | 3.05              | 2.86            |

#### 3.2 모니터링부

태양광 열화진단 시험장치의 모니터링부는 Fig. 2와 같이 일사량과 온도 및 각 모듈별 전압, 전류, 출력 데이터를 실시간으로 측정하고, 태양광모듈의 외관상태도 확인한다. 또한, 모니터링부는 운용상태를 감시하기 위하여, 구형 및 신형 태양광모듈에 연결된 계통연계용 인버터의 입, 출력 전압, 전류 및 전력을 감시한다.



Fig. 2. Configuration of PV monitoring section

#### 3.3 열화진단 시험장치 전체구성

열화진단 시험장치는 Fig. 3와 같이 8개의 신형모듈(PN1-1-1~PN2-2-2)과 구형모듈(PA1-1-1~PA2-2-2)을 2직렬, 4병렬의 스트링으로 구성하고, 700[W]급 DC-AC 인버터에 각각 연결하여 구성한다.

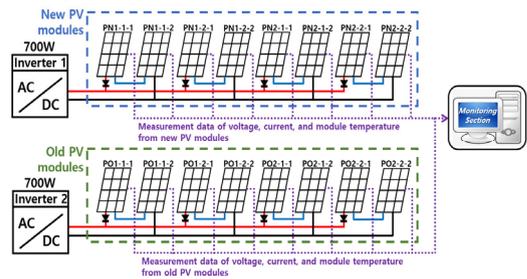


Fig. 3. Configuration of testbed for aging diagnosis

### 4. MATLAB에 의한 열화특성 분석 모델링

열화진단 시험장치에서 데이터를 수집하는 경우, 주변 환경의 변화에 의한 출력의 변동성과 통신 에러 및 지연에 의한 영향을 최소화하기 위하여, 본 논문에서는 MATLAB S/W를 이용하여 다항회귀필터(Polynomial regression filter)를 모델링하고, 이를 바탕으로 1분 간격으로 측정된 일사량, 온도 및 모듈별 출력 데이터를 평활화한다. 일반적으로, 다항회귀 모델을 기반으로 하는 이동평균필터링 방식은 구현이 용이하지만, 샘플링 범위를 일괄적으로 선정하기 때문에 순간적인 피크 값에 취약한 한계점을 가지고 있다. 이를 보완하기 위하여, 데이터별 최적 샘플링 범위를 효과적으로 계산할 수 있는 Savitzky-Golay(S-G) 필터링 방식이 주로 적용되고 있다.

구체적으로, S-G 필터를 적용한 최적의 회귀모델  $p(n)$ 은 식 (1)과 같이  $n$ 의  $N$ 차 다항식으로 구성되고, 식 (1)의 값과 실측 데이터  $x(n)$  사이의 에러는 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$p(n) = \sum_{k=0}^N a_k n^k \quad (1)$$

$p(n)$ :  $-M \leq n \leq M$ 에서 평활화된 데이터  
 $n$ :  $0 \sim M$ 사이의 임의의 수  
 $a_k$ : 실측 데이터와의 에러를 최소로 만드는 계수  
 $k$ :  $1 \sim N$ 사이의 정수  
 $N$ : 다항회귀모델의 차수

$$e_N = \sum_{n=-M}^M \left( \sum_{k=0}^N a_k n^k - x(n) \right)^2 \quad (2)$$

$e_N$ : 최적 다항회귀모델과 실측 데이터의 에러  
 $x(n)$ : 실측데이터  
 $M$ : 데이터 샘플링 범위

여기서, 최적의 데이터 샘플링 범위( $M$ )는 식 (3)과 같이 에러  $e_N$ 에 대한 편미분이 0을 만족하는 조건으로 구하고, 이 값을 식 (1)에 대입하면 최종 평활화된 데이터 값  $p(n)$ 이 산정된다[8,9].

$$\frac{\delta e_N}{\delta a_k} = \sum_{n=-M}^M 2 \left( \sum_{k=0}^N a_k n^k - x(n) \right) n^k = 0 \quad (3)$$

즉, 상기의 S-G 필터링 기법을 바탕으로 데이터 평활화 과정을 플로우차트로 나타내면 Fig. 4와 같다. 먼저, 모니터링부에서 측정된 온도, 일사량 및 태양광 모듈별 출력 데이터를 바탕으로, 최적 샘플링 범위를 산정하고, S-G 필터링 함수를 이용하여 각 시간대별로 평활화된 데이터  $p(n)$ 을 구한다. 또한, 평활화된 데이터들 중에서 태양광모듈의 최대 출력은 일별로 Maximum 함수를 통하여 추출하고, 온도 및 일사량은 시간별로 Average 함수를 이용하여 계산한다.

## 5. 태양광모듈의 열화특성 분석

### 5.1 시험 조건

계절에 따른 온도 및 일사량 조건의 변화에 따라 태양광모듈의 출력특성 또한 상이하게 나타나기 때문에 태양광모듈의 출력 및 열화특성을 더 정확하게 분석하기 위

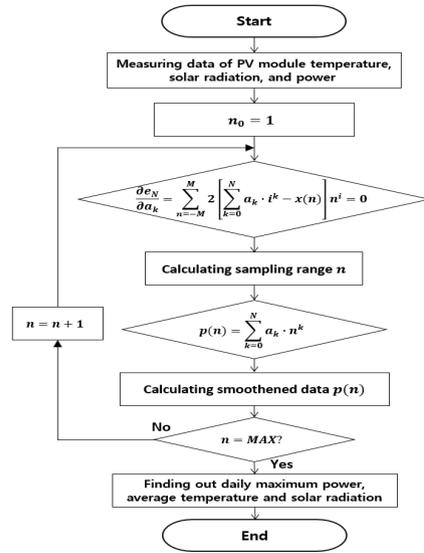


Fig. 4. Procedure of the degradation analysis modeling

하여, 태양광전원 설치지점에서의 계절별 일사량 및 온도 조건에 대한 분석이 요구된다. 따라서, 본 논문에서는 하기와 같이 2020년 1월부터 10월까지의 실측 일사량 및 온도데이터를 바탕으로 계절별로 분류하여 분석한다.

#### 5.1.1 일사량 조건

Fig. 5는 2020년 1월부터 10월까지, 오전 7시에서 오후 5시까지의 시간별 평균 일사량을 계절별로 나타낸 것이다. 여기서, 사계절 중 최저 일사량이 발생하는 계절은 겨울철이고, 다음은 가을철인 것을 알 수 있다. 특히, 봄철과 여름철의 평균 일사량은 거의 비슷한 수준으로 나타났는데, 이것은 2020년 여름철에 발생한 기록적인 폭우로 인하여 평균 일사량이 대폭 저하된 것으로 분석된다[10]. 따라서, 태양광모듈의 출력은 일사량 조건에 비례하므로, 이와 같은 특수한 날씨 조건에 따른 출력특성도 고려되어야 한다.

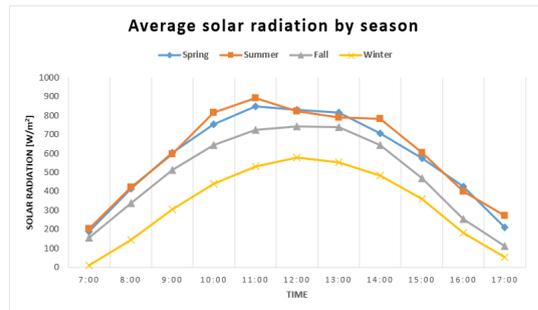


Fig. 5. Characteristics of season-basis solar radiation

5.1.2 온도 조건

Fig. 6은 일사량 조건과 동일한 방법으로 계절별 온도를 시간대별로 나타낸 것으로서, 통상적인 계절별 온도변화 트렌드에 부합함을 알 수 있다. 하지만, 태양광모듈의 특성상 온도가 낮아짐에 따라 출력은 높아질 수 있으므로 이러한 조건도 고려되어야 한다.

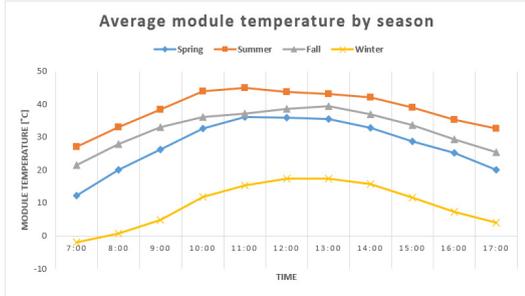


Fig. 6. Characteristics of season-basis temperature

5.2 Matlab에 의한 열화특성 분석 모델링의 평가

1월에 대한 신형모듈의 출력특성을 선정하여 평활화를 수행하기 전과 후의 데이터를 비교하면, Fig. 7과 같이 실데이터의 에러 성분들이 대부분 제거되어 평활화된 것을 확인할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 구형 및 신형모듈의 출력데이터에 대하여 동일하게 S-G필터링 기법을 적용하고, 이를 바탕으로 구형모듈의 열화특성을 평가한다.

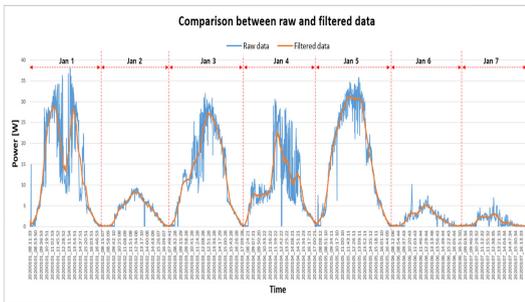


Fig. 7. Comparison between raw and filtered data

5.3 태양광모듈의 출력 및 열화특성 분석

5.3.1 계절별 태양광모듈의 출력특성 분석

본 논문에서 구축한 열화진단 시험장치에 의하여 봄철에 측정된 구형 및 신형 태양광모듈의 출력특성은 Table 3과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 각 모듈의 평균 태양광

출력(average PV output)은 열화분석 모델링을 통해 산정된 하루 최대 출력을 월별 평균으로 나타낸 것이고, 봄철에 대한 태양광모듈의 출력특성(season-basis average)은 3월부터 5월까지의 평균값을 산정한 것이다. 한편, 정격출력이 각각 50[W], 53[W]인 신형모듈과 구형모듈의 열화특성을 정확하게 분석하기 위하여, 보정계수(1.06)를 신형모듈에 곱하여 구형 모듈과 동일한 용량으로 환산한다.

Table 3. Output characteristics of new PV modules in spring

| module No. | average PV output(W) |       |       | season-basis average(W) | adjusted season-basis average(W) |
|------------|----------------------|-------|-------|-------------------------|----------------------------------|
|            | Mar                  | Apr   | May   |                         |                                  |
| PN 1-1-1   | 27.38                | 24.75 | 26.08 | 26.07                   | 27.63                            |
| PN 1-1-2   | 29.03                | 24.79 | 26.75 | 26.85                   | 28.46                            |
| PN 1-2-1   | 35.83                | 33.93 | 37.31 | 35.69                   | 37.83                            |
| PN 1-2-2   | 38.16                | 35.96 | 41.22 | 38.44                   | 40.75                            |
| PN 2-1-1   | 38.34                | 36.04 | 28.78 | 34.39                   | 36.45                            |
| PN 2-1-2   | 37.41                | 35.17 | 27.56 | 33.38                   | 35.38                            |
| PN 2-2-1   | 28.51                | 29.15 | 37.54 | 31.73                   | 33.64                            |
| PN 2-2-2   | 28.81                | 28.54 | 36.62 | 31.33                   | 33.21                            |

또한, 상기와 같은 방법으로 신형 및 구형모듈의 계절별 출력특성을 모듈별로 산정하면 각각 Table 4, Table 5와 같이 나타낼 수 있다. Table 4와 같이, 신형모듈의 계절별 최대 출력은 봄, 여름, 가을, 겨울철에 대하여 각각 PN1-2-2 모듈에서 40.75[W], PN2-2-1 모듈에서 36.15[W], PN1-1-2 모듈에서 28.56[W], PN1-1-2 모듈에서 37.26[W]로 산정되고, 모듈별 평균출력의 최대값은 PN1-2-2 모듈에서 35.65[W]로 계산된다.

Table 4. Output characteristics of new PV modules by season

| module No. | average of new PV output(W) |        |       |        | average output(W) |
|------------|-----------------------------|--------|-------|--------|-------------------|
|            | spring                      | summer | fall  | winter |                   |
| PN 1-1-1   | 23.15                       | 16.14  | 26.77 | 35.41  | 26.49             |
| PN 1-1-2   | 22.45                       | 17.25  | 28.56 | 37.26  | 27.90             |
| PN 1-2-1   | 37.83                       | 32.87  | 26.09 | 34.53  | 32.83             |
| PN 1-2-2   | 40.75                       | 35.93  | 28.71 | 37.20  | 35.65             |
| PN 2-1-1   | 36.45                       | 23.83  | 28.33 | 34.48  | 30.77             |
| PN 2-1-2   | 35.38                       | 22.80  | 28.06 | 32.70  | 29.74             |
| PN 2-2-1   | 33.64                       | 36.15  | 28.49 | 32.20  | 32.62             |
| PN 2-2-2   | 33.21                       | 35.62  | 28.14 | 32.69  | 32.42             |

한편, Table 5와 같이 봄, 여름, 가을, 겨울철에 대하여, 구형모듈의 최대 출력은 각각 PA1-2-2 모듈에서 26.89[W], PA2-1-2 모듈에서 20.44[W], PA2-2-1 모듈에서 27.38[W], PA1-2-1 모듈에서 33.76[W]로 산정되고, 각 모듈에 대한 평균출력의 최대 값은 PA1-2-2 모듈에서 25.18[W]로 계산된다.

Table 5. Output characteristics of aging PV modules by season

| Module No. | average of aging PV output(W) |        |       |        | average output(W) |
|------------|-------------------------------|--------|-------|--------|-------------------|
|            | spring                        | summer | fall  | winter |                   |
| PA 1-1-1   | 20.53                         | 7.64   | 25.26 | 28.49  | 20.48             |
| PA 1-1-2   | 19.44                         | 7.26   | 26.95 | 27.64  | 20.32             |
| PA 1-2-1   | 26.39                         | 12.89  | 24.61 | 33.76  | 24.41             |
| PA 1-2-2   | 26.89                         | 13.38  | 27.08 | 33.38  | 25.18             |
| PA 2-1-1   | 24.13                         | 19.11  | 27.17 | 17.17  | 21.89             |
| PA 2-1-2   | 26.14                         | 20.44  | 26.47 | 17.84  | 22.72             |
| PA 2-2-1   | 26.22                         | 13.90  | 27.38 | 30.86  | 24.59             |
| PA 2-2-2   | 26.44                         | 14.50  | 26.55 | 32.09  | 24.90             |

따라서, 구형 모듈에 대한 열화특성을 분석하기 위하여, Table 4와 Table 5를 바탕으로 봄철에 대한 신형모듈 대비 구형모듈의 출력감소율을 구하면 Fig. 8와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 신형 및 구형 모듈의 최대 출력은 각각 PN1-2-2 모듈에서 40.75[W], PA1-2-2 모듈에서 26.89[W]이므로 구형모듈이 신형모듈에 비하여 34.01%의 출력이 감소하여 열화됨을 알 수 있고, 전체 모듈의 평균치에 대해서는 각각 34.18[W]와 24.52[W]로 산정되어 구형모듈이 신형모듈에 비하여 28.25%의 출력이 감소하여 열화됨을 알 수 있다.

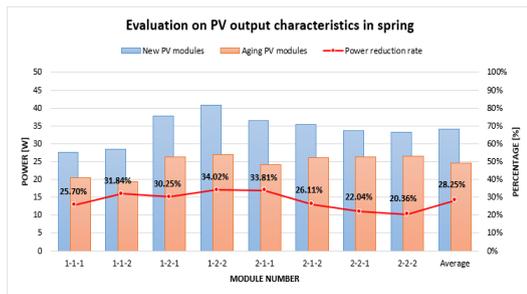


Fig. 8. Output characteristics between new and aging PV modules in spring

상기의 봄철에 대한 분석방식에 따라 여름, 가을, 겨울철에 대한 출력특성을 분석하면 각각 Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 여름철에 대한 신형 및 구형 모듈의 최대 출력은 Fig. 9와 같이 각각 PN2-2-1 모듈에서 36.15[W], PA2-1-2 모듈에서

20.44[W]이므로 구형모듈이 신형모듈에 비하여 43.46%의 출력이 감소하여 열화됨을 알 수 있고, 전체 모듈의 평균치에 대해서는 각각 27.57[W]와 13.64[W]로 산정되어 신형모듈이 구형모듈에 비하여 50.53%의 출력이 감소하여 열화됨을 알 수 있다.

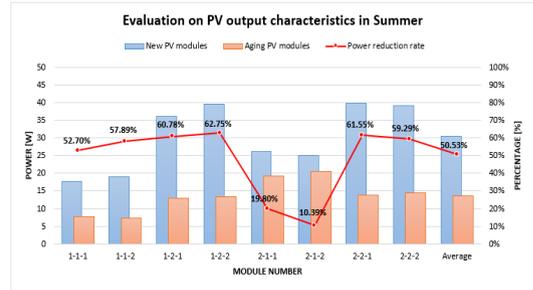


Fig. 9. Output characteristics between new and aging PV modules in summer

또한, 가을철에 대한 신형 및 구형 모듈의 최대 출력은 Fig. 10과 같이 각각 PN1-2-2 모듈에서 28.71[W], PA2-2-1 모듈에서 27.38[W]이므로 구형모듈이 신형모듈에 비하여 4.63%의 출력이 감소하여 열화됨을 알 수 있고, 전체 모듈의 평균치에 대해서는 각각 27.89[W]와 26.43[W]로 산정되어 신형모듈이 구형모듈에 비하여 5.23%의 출력이 감소하여 열화됨을 알 수 있다.

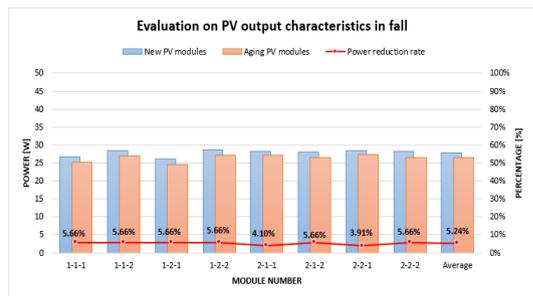


Fig. 10. Output characteristics between new and aging PV modules in fall

한편, 겨울철의 경우 신형 및 구형 모듈의 최대 출력은 Fig. 11과 같이 각각 PN1-1-2 모듈에서 37.26[W], PA2-2-1 모듈에서 33.76[W]이므로 구형모듈이 신형모듈에 비하여 9.39%의 출력이 감소하여 열화됨을 알 수 있고, 전체 모듈의 평균치에 대해서는 각각 34.56[W]와 27.6[W]로 산정되어 신형모듈이 구형모듈에 비하여 20.01%의 출력이 감소하여 열화됨을 알 수 있다.

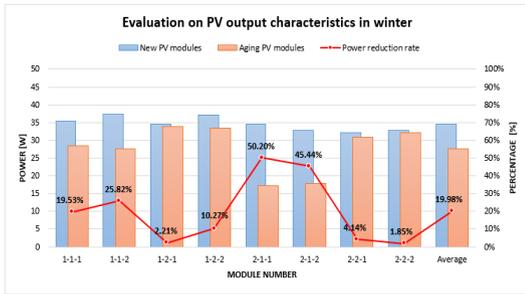


Fig. 11. Output characteristics between new and aging PV modules in winter

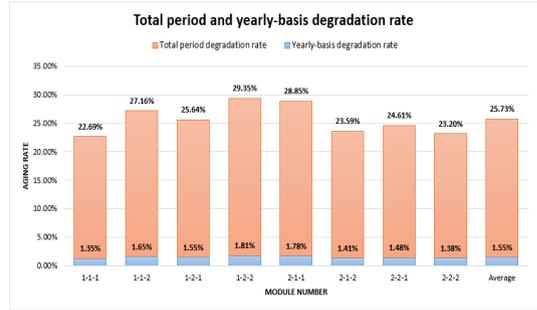


Fig. 12. Total period and yearly-basis degradation rate

### 5.3.2 태양광모듈의 열화특성 분석

상기의 태양광모듈의 출력특성에 의하여, 구형모듈에 대한 계절별 출력감소율 및 전체 열화율, 연간 열화율을 산정하면 Table 6과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 우천이 빈번하게 발생한 2020년 여름철의 경우를 예로 들면, 적은 일사량과 높은 온도조건으로 인하여 구형모듈의 최소 및 최대 출력감소율은 각각 10.39%, 62.75%이며, 평균 50.53%로 산정된다. 한편, 상대적으로 맑은 날씨가 많았던 가을철의 경우, 여름철보다 많은 일사량과 낮은 온도조건으로 인하여 출력감소율은 3.91%~5.66%의 범위에서 분포되고, 평균 5.24%로 산정되어, 구형모듈의 출력특성은 계절별 환경조건에 따라 크게 달라지는 것을 알 수 있다. 이를 바탕으로, 구형모듈의 전체 및 연간 열화율을 구하면, Fig. 12와 같이 PA1-2-2 모듈은 19년 동안 총 29.35%로 연 1.81%씩 열화되고, PA1-1-1 모듈은 총 22.69%로 연 1.35%씩 열화되어 모듈 간에 상당한 편차가 있음을 알 수 있다. 또한, 전체 구형모듈의 평균 열화율은 총 25.73%이므로, 연평균 1.55%씩 열화됨을 알 수 있다.

Table 6. Degradation rate of Aging PV module

| module No. | output reduction rate(%) |        |      |        | degradation rate(%) |                |
|------------|--------------------------|--------|------|--------|---------------------|----------------|
|            | spring                   | summer | fall | winter | total period        | yearly average |
| PA1-1-1    | 25.70                    | 52.70  | 5.66 | 19.53  | 22.69               | 1.35           |
| PA1-1-2    | 31.84                    | 57.89  | 5.66 | 25.82  | 27.16               | 1.65           |
| PA1-2-1    | 30.25                    | 60.78  | 5.66 | 2.21   | 25.64               | 1.55           |
| PA1-2-2    | 34.02                    | 62.75  | 5.66 | 10.27  | 29.35               | 1.81           |
| PA2-1-1    | 33.81                    | 19.80  | 4.10 | 50.20  | 28.85               | 1.78           |
| PA2-1-2    | 26.11                    | 10.39  | 5.66 | 45.44  | 23.59               | 1.41           |
| PA2-2-1    | 22.04                    | 61.55  | 3.91 | 4.14   | 24.61               | 1.48           |
| PA2-2-2    | 20.36                    | 59.29  | 5.66 | 1.85   | 23.20               | 1.38           |
| average    | 28.25                    | 50.53  | 5.24 | 19.98  | 25.73               | 1.55           |

## 6. 결론

본 논문에서는 실측 데이터를 기반으로 태양광모듈의 열화특성을 분석하기 위하여, 태양광전원 열화진단 시험장치를 구축하고, MATLAB S/W에 의한 열화특성분석 모델링을 바탕으로, 신형 및 구형모듈에 대한 출력특성과 열화특성을 평가한다. 이에 대한 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 2020년 1월부터 10월까지 총 10개월에 대하여, 구형 및 신형 모듈에 대한 출력특성을 분석한 결과, 열화된 구형모듈의 평균출력은 신형모듈에 비하여 계절별로 각각 28.25%, 50.53%, 5.23%, 20.01%가 감소하고, 그중에서 여름철에서의 출력감소율이 50.53%로 최대값임을 알 수 있다.
- (2) 우천이 빈번하게 발생한 2020년 여름철의 경우를 예로 들면, 적은 일사량과 높은 온도조건으로 인하여 구형모듈의 최소 및 최대 출력감소율은 각각 10.39%, 62.75%이며, 평균 50.53%로 산정되고, 상대적으로 맑은 날씨가 많았던 가을철의 경우, 여름철보다 많은 일사량과 낮은 온도조건으로 인하여 출력감소율은 3.91%~5.66%의 범위에서 분포되고, 평균 5.24%로 산정되어, 구형모듈의 출력특성은 계절별 환경조건에 따라 크게 달라지는 것을 알 수 있다.
- (3) 구형모듈의 전체 및 연간 열화율을 구하면, PA1-2-2 모듈은 19년 동안 총 29.35%로 연 1.81%씩 열화되고, PA1-1-1 모듈은 총 22.69%로 연 1.35%씩 열화되어 모듈 간에 상당한 편차가 있음을 알 수 있고, 전체 구형모듈의 평균 열화율은 총 25.73%이므로, 연평균 1.55%씩 열화됨을 알 수 있다.

## References

- [1] Ministry of Trade, Industry and Energy, "Third Energy Master Plan", Korea, 6, 2019.  
URL: [https://www.motie.go.kr/common/download.do?fid=bs&bbcs\\_cd\\_n=81&bbbs\\_seq\\_n=161753&file\\_seq\\_n=1](https://www.motie.go.kr/common/download.do?fid=bs&bbcs_cd_n=81&bbbs_seq_n=161753&file_seq_n=1).
- [2] Y.-J. Lee and Y.-S. Kim, "Prediction and Accuracy Analysis of Photovoltaic Module Temperature based on Predictive Models in Summer," *Journal of the Korean Solar Energy Society*, vol. 37, no. 1, pp. 25-38, Feb. 2017.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.7836/kses.2017.37.1.025>
- [3] Springer, Cham, Dombi J., Dineva A. "Adaptive Multi-round Smoothing Based on the Savitzky-Golay Filter". *Soft Computing Applications, Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 633, 2016.  
DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-62521-8\\_38](https://doi.org/10.1007/978-3-319-62521-8_38)
- [4] SHEN JIAN, "A Study on Deterioration Diagnosis Algorithm for photovoltaic Modules by Considering Electrical Characteristics and Environmental Factors." *Domestic Master's Thesis Graduate School, Korea University of Technology and Education*, 2018. Chungcheongnam-do  
<http://www.riss.kr/link?id=T14798647>
- [5] K.-H. Lee, S.-S. Choi, B.-K. Kim, J.-Y. Jung, C.-H. Kim, and D.-S. Rho, "Development of Aging Diagnosis Algorithm for Photovoltaic Modules by Considering Electric Characteristics and Environment Factors," *The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 64, no. 10, pp. 1411-1417, Oct. 2015.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2015.64.10.1411>
- [6] Geun-Sang Lee, Jong-Jo Lee, "The analysis of Photovoltaic Power using Terrain Data based on LiDAR Surveying and Weather Data Measurement System", *Journal of Cadastre & Land InformatiX*, Vol. 49, No. 1, pp. 17-27, 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.22640/lxsiri.2019.49.1.17>
- [7] A.R.GxashekaaE. E.van Dyk, "Evaluation of performance parameters of PV modules deployed outdoors", *Department of Physics, University of Port Elizabeth*, 6031 Port Elizabeth, South Africa, Vol. 30, P 611-620, April 2005.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/i.renene.2004.06.005>
- [8] K.-H. Lee, S.-S. Choi, B.-K. Kim, J.-Y. Jung, C.-H. Kim, and D.-S. Rho, "Development of Aging Diagnosis Algorithm for Photovoltaic Modules by Considering Electric Characteristics and Environment Factors," *The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 64, no. 10, pp. 1411-1417, Oct. 2015.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2015.64.10.1411>
- [9] J-Y. Ha, "Numerical comparison of Savitzky-Golay filter and Least Square filter." *Doctoral thesis in Korea Graduate School of Ewha Womans University*, 1999. Korea  
<http://www.riss.kr/link?id=T7352526>

- [10] Wikipedia, "2020 Korean floods", 2020.  
URL: <https://ko.wikipedia.org/wiki>

---

### 신 건(Jian Shen)

[정회원]



- 2011년 2월 : 한국기술교육대학교 기계공학과 (공학사)
- 2017년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2021년 3월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야>

배전계통 운용, MVDC, 신재생 에너지, micro-grid, ESS

---

### 이 후 동(Hu-Dong Lee)

[정회원]



- 2016년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2018년 8월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2018년 9월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야>

전력 및 배전계통, 신재생에너지, 전기저장장치

---

### 태 동 현(Dong-Hyun Tae)

[정회원]



- 2014년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2016년 8월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2019년 9월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야>

배전계통 운용, 신재생에너지, 마이크로그리드

노 대 석(Dae-Seok Rho)

[종신회원]



- 1985년 2월 : 고려대학교 전기공학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1997년 3월 : 일본 북해도대학교 대학원 전기공학과(공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1998년 8월 : 한국 전기연구소 연구원/선임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신 공학부 교수

<관심분야>

전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석