

# 장기 고온고습 내구성능 평가를 통한 태양전지모듈의 전기적 특성 변화 관찰

김경수\*

태양광연구단, 재생에너지연구소, 한국에너지기술연구원, 대전광역시, 34129

## A Study on the Change of the Electrical Characteristics of PV Modules by Evaluation of Long-Term Damp-Heat Test

Kyung Soo Kim\*

Photovoltaics Research Department, Renewable Energy Institute, Korea Institute of Energy Research (KIER), Daejeon, 34129, Korea

Received November 18, 2024; Revised January 6, 2025; Accepted February 5, 2025

**ABSTRACT:** Solar cells are a constituent material of photovoltaic modules and are rapidly developing according to various sizes and technological developments. A photovoltaic system generates electricity using such photovoltaic modules as a basic constituent element. In order to ensure stable electricity generation for at least 30 years, the stability and durability of all constituent elements are of course important. In my personal opinion, it is judged that the durability of solar cells should be given priority. In the evaluation of the durability of such photovoltaic modules, domestic and foreign test standards and evaluation standards have already been established, and in Korea, crystalline silicon solar cell modules are evaluated according to KS C 8561. Among the 20 evaluation items, the this paper will discuss the results of evaluation against damp-heat test. The damp-heat test is a very harsh environmental evaluation test in which a chamber test is performed at 85°C and a relative humidity of 85% for 1000 hours. Recently, it is easy to check the evaluation contents of manufacturers and test institutions on the durability performance up to 3000 hours, which far exceeds 1000 hours. Therefore, this research results shared the test contents for the validity of such a long-term damp-heat test and took a scientific approach to obtain long-term reliability.

**Key words:** Solar module, Renewable energy, KS C 8561, Crystalline solar cell, Durability test

### Nomenclature

$P_{mp}$  : maximum power point, W

$I_{sc}$  : short circuit current, A

$V_{oc}$  : open circuit voltage, V

$I_{mp}$  : current at maximum power point, A

$V_{mp}$  : voltage at maximum power point, V

### Subscript

STC : standard test condition

DH test : damp heat test

QE : quantum efficiency

EL camera : electroluminescence camera

$R^2(\text{COD})$  : R square (coefficient of determination)

I-V : current-voltage

### 1. 서론

태양광모듈은 태양전지를 주요 소재로 라미네이션 공정을 통하여 제조된다. 생산된 태양전지모듈은 최소 30년 이상의 안정적인 전기 생산을 제조사를 통하여 보증하고 있으며 국제적으로는 IEC 61215 표준 시리즈를 통하여 내구성 및 안정성 평가를 수행하고 있다. 국내의 경우 KS C 8561 시험 기준으로 실리콘 기반 태양광모듈을 평가 및 인증하고 있다. KS C 8561 시험에는 자외선, 가시광선 등의 태양빛에 의한 노후화 특성을 평가하는 부분과 챔버 시험을 통한 온습도 변화에 대한 내구성을 평가는 부분으로 크게 나뉜다<sup>1)</sup>. 또한 급작스런 외부 충격인 우박 및 충격 등에 대비하여 기계하중시험, 우박시험, 단자강도 시험 등을 수행하게된다. 특히 20여 건의 KS C 8561 시험 항목 중 고온고습 시험은 고온고습 상태에서의 태양광모듈의 열적 스트레스와 적성을 시험하며 이때 접합 재료의 밀착력의 저하를 관찰하는 목적이 있다.

\*Corresponding author: kskim@kier.re.kr

고온고습 시험은 온도 85°C, 상대 습도 85%에서 1000시간 동안 태양광모듈의 백시트(backsheet), 봉지재(encapsulant) 및 테두리(edge) 및 단자함(junction box)를 통한 습기 침투를 통한 태양전지와 접합 리본(connecting ribbon)의 산화 및 부식을 일으켜 전기적 특성 저하를 주로 야기하여 접촉 저항의 증가로 최대출력 감소 발생의 주요 원인이 된다. 또한 이런 형태의 부식은 봉지재의 박리(delamination)을 일으켜 모듈의 구조적인 형태를 파괴한다<sup>2-6)</sup>.

수상태양광용 태양광모듈의 경우는 지상형과 다르게 수상의 고습 환경에서 운영되는 특성으로 KS C 8561 시험 기준에 고내구성·친환경 태양광발전 모듈로 명명되어 온도 (85±2)°C, 상대 습도 (85±5)%로 최대 3000시간 까지 고온고습 평가를 진행한다<sup>1)</sup>.

국내외 기업은 IEC 및 KS 시험 규격인 고온고습 시험 시간을 초과하여 2000~3000시간 이상에 대하여 평가를 수행하며 자사 제품의 우수성을 장기 평가를 통하여 입증하고 있다.

최근 IEC에서는 다음과 같은 순수 태양전지에 대한 신규 표준을 제정하였다.

- IEC 63202-1 Edition 1.0 Photovoltaic cells - Part 1: Measurement of light-induced degradation of crystalline silicon photovoltaic cells 태양전지의 초기 광열화 특성 평가 방법임. 2019년 제정됨.
- IEC TS 63202-2 Edition 1.0 Photovoltaic cells - Part 2: Electroluminescence imaging of crystalline silicon solar cells 결정질 실리콘의 전류 인가에 따른 EL 이미지 측정으로 불량에 대한 유형을 정리하였으며, 2021년 제정됨.
- IEC TS 63202-3 Edition 1.0 Photovoltaic cells - Part 3: Measurement of current-voltage characteristics of bifacial photovoltaic cells 양면 실리콘 태양전지의 IV 측정에 대한 표준임. 2023년 제정됨.
- IEC TS 63202-4 Edition 1.0 Photovoltaic cells - Part 4: Measurement of light and elevated temperature induced degradation of crystalline silicon photovoltaic cells 고온 및 광에 의한 출력 저하를 평가하는 표준임. 2022년 제정됨.

추후 국내의 태양광 개발자들도 충분히 숙지하고 상업용으로 진행하기 전에 고유 태양전지만으로의 사전 평가가 필수적으로 진행되어야 한다고 판단된다.

이에 본 논문에서는 고온고습 시험을 장기적으로 수행시 시험 시간에 따른 태양광모듈의 출력 특성을 분석하였다. 특히 습도 침투에 따른 태양광모듈의 영향을 관찰하기 위하여 순수 태양전지를 고온고습 시험에 투입하여 장기적인 고온 및 고습 상황에서의 재료적 전기적 특성 변화의 관찰진행하였다.

고온고습 평가 방법을 이용하여 태양전지 및 모듈의 시험 시간에 I-V측정을 단계별 진행하였고 SEM (Scanning Electron Microscope) 및 QE (Quantum Efficiency) 측정을 통하여 재료

적 광학적 특성 변화를 관찰하였다. 이를 통하여 고온고습 시험에 대한 순수 태양전지 및 모듈의 장기적인 출력 변화에 대한 이해도를 높이고 장기 신뢰성을 갖춘 태양전지 및 모듈의 개발에 도움을 주고자하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 고온·고습 내구성능 평가 방법

본 시험 시료인 태양전지 및 태양광모듈은 KS C 8561에 시험 방법에 따라 온도 85°C, 상대 습도 85% 조건에서 챔버 시험을 진행하였다.

태양전지의 시험 전후의 I-V 측정을 위하여 Yamashita Denso 사의 50 msec~800 msec까지 조사가 가능한 Class A급의 솔라 시뮬레이터를 사용하였고(Fig. 1 참조), 태양광모듈은 PasaIIIIB Class A급의 솔라 시뮬레이터를 이용하여 측정하였다.

시험에 사용된 태양전지는 다결정 BSF (back surface field) 기술로 제작되었으며 5장의 태양전지는 평균 3.88 W급이다. Table 1는 5장의 태양전지의 고온고습 시험 진행에 대하여 요약하였으며 100시간, 200시간, 300시간, 500시간, 700시간, 800시간, 1000시간, 1400시간, 1900시간, 2400시간 이후 챔버에

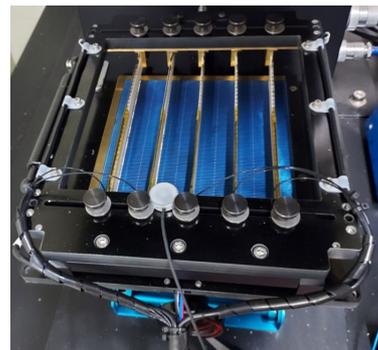


Fig. 1. Current-voltage measurement image of solar cell

Table 1. Test summary of solar cells

Damp-heat Test Time (hours)	Test Sample Name					1 Cell Module
	A	B	C	D	E	
100	√	√	√	√	√	√
200	√	√	√	√	√	
300	√	√	√	√	√	√
500	√	√	√	√	√	√
700	√	√	√	√	√	√
800	√	√	√	√	√	√
1000	√	√	√	√		√
1400	√	√	√			√
1900	√		√			√
2400			√			√

서 꺼내어 STC 조건에서 I-V 측정을 진행하였다. 각 시료의 고온고습 시험 시간은 다음과 같다. A 시료 1900시간, B 시료 1400시간, C 시료 2400시간, D 시료 1000시간, E 시료 800시간.

순수 태양전지와 모듈화하였을 때의 고온고습 시험을 비교하기 위하여 1장의 태양전지를 Glass/EVA/SolarCell/EVA/Backsheet로 제작하여 동일한 챔버에서 평가를 진행하였다. 총 2400시간 까지 시험을 진행하였으며 태양전지와 함께 챔버에 투입하고 동일한 시간에 꺼내어 I-V 측정을 진행하여 비교하였다(Table 1 참조). 한장의 셀을 라미네이션한 샘플의 이름을 1CellModule로 명명하였다.

그리고 사용 모듈의 1000시간 이상에서 고온고습 시험의 내구성을 관찰하기 위하여 총 8개 종의 모듈을 Table 2와 같이 최대 6000시간 까지 고온고습 시험을 진행하였다.

**2.2 태양전지 장기 고온고습 시험 결과**

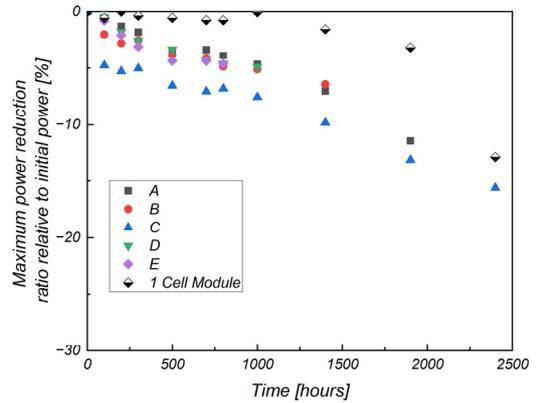
5장의 순수 태양전지와 1CellModule을 최대 2400시간 동안 고온고습 시험한 결과를 Table 3에 정리하였다. 개별 시료의 출력 감소율을 초기 출력에 대비하여 비교한 결과, E 시료는

**Table 2.** Test summary of solar modules

Damp-heat Test Time (hours)	Test Sample Name							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1000	√	√	√	√	√	√	√	√
2000	√	√				√	√	√
3000	√	√	√	√	√		√	√
4000	√						√	√
5000	√							
6000	√							

**Table 3.** Summary of solar cells and 1CellModule's maximum power reduction ratio relative to initial power after damp-heat test

Damp-heat Test Time (hours)	Test Sample Name & maximum power reduction ration (unit W: %)					
	A	B	C	D	E	1 Cell Module
0	0	0	0	0	0	0
100	0.26	-2.02	-4.79	-0.49	-0.79	-0.56
200	-1.30	-2.80	-5.29	-1.79	-2.08	
300	-1.82	-2.54	-5.04	-2.57	-3.10	-0.36
500	-3.64	-3.84	-6.55	-3.34	-4.38	-0.56
700	-3.38	-4.10	-7.05	-4.38	-4.38	-0.77
800	-3.90	-4.87	-6.80	-4.64	-4.64	-0.77
1000	-4.68	-5.13	-7.56	-4.90		N.A
1400	-7.01	-6.43	-9.82			-1.57
1900	-11.43		-13.12			-3.19
2400			-15.62			-12.87



**Fig. 2.** Maximum power reduction ratio relative to initial power of solar cells and 1 Cell Module after damp-heat test

800시간 동안 -4.64%, D 시료는 1000시간 동안 -4.9%, B 시료는 1400시간 동안 -6.43%, A 시료는 1900시간 동안 -11.43%, C 시료는 2400시간 동안 -15.62%의 출력 변화가 나타났다. 1CellModule 시료는 2400시간 동안 초기 출력 대비 최종 -12.87%의 변화가 발생하였다. Fig. 2은 측정 결과를 그림으로 나타낸 것으로 고온고습 시험의 증가에 따른 출력 감소의 형태를 확인할 수 있다.

**2.3 태양광모듈 장기 고온고습 시험 결과**

8장의 태양광모듈을 최대 6000시간 동안 고온고습 시험한 결과를 Table 4에 정리하였다. 개별 모듈의 출력 변화는 초기 출력에 대비하여 감소율을 기록하였는데 그 결과, 6번 시료는 2000시간 동안 -4.8%, 2번 3번 4번 5번 시료는 3000시간 동안 각각 -2.8%, -4.3%, -17%, -3%의 출력 감소가 발생하였다. 4000시간동안 시험이 진행된 7번 8번 시료는 각각 -60.7%, -67.8%의 출력 감소가 나타났다. 최장 6000시간 동안 진행된 1번 시료의 경우는 -27%의 출력 감소가 나타났다<sup>7)</sup>. Fig. 3는 측정 결과를 그림으로 나타낸 것으로 고온고습 시험의 증가에 따른 출력 감소의 형태를 확인할 수 있다.

**Table 4.** Summary of solar modules' maximum power reduction ratio relative to initial power after damp-heat test

Damp-heat Test Time (hours)	Test Sample Name & maximum power reduction ration (unit W: %)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1000	-0.5	-0.8	-1.9	-1.6	-0.7	-0.1	-1.0	-1.1
2000	-1.5	-1.9				-4.8	-2.8	-2.5
3000	-2.0	-2.8	-4.3	-17.0	-3.0		-12.6	-24.6
4000	-2.1						-60.7	-67.8
5000	-14.8							
6000	-27.0							

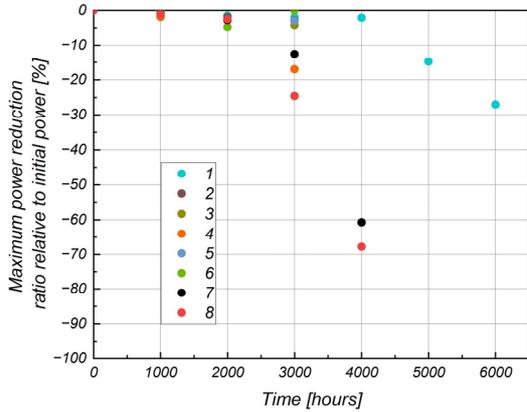


Fig. 3. Maximum power reduction ratio relative to initial power of PV modules after damp-heat test

### 3. 태양전지 및 모듈 평가 결과 및 분석

#### 3.1 고온고습 시험 결과 비교

Fig. 4은 태양전지와 태양광모듈의 장기 고온고습을 통한 초기 출력대비 최대출력 감소를 같은 그림으로 표현한 것으로 고온고습 1000시간 동안 순수 태양전지는 평균 -5.5% 출력 감소를 보이며 1900시간을 초과하면 -10%이상의 급격한 출력 변화를 나타낸다. 그러나 라미네이션 공정을 거친 1CellModule 모듈의 경우 1900시간에 -3.19%의 출력 감소만 발생되었다. 1CellModule과 1~8번의 태양광모듈의 출력변화를 관찰하면 고온고습 2000시간까지는 초기 대비 -5% 이내의 출력 감소율로 우수한 특성을 나타내지만 3000시간 이후로는 개별 모듈마다 출력 감소 특성이 다르게 나타남을 확인할 수 있었다.

Fig. 5은 태양전지 C의 양자효율 곡선으로 초기와 고온고습 1900시간 후 변화를 나타낸 것이다. 전체적으로 양자효율이 초기대비 감소하는 경향을 나타남을 확인할 수 있었다.

순수 태양전지의 고온고습 노출 환경에서의 재료적인 특성 변화를 관찰하고자 SEM EDS 측정을 통하여 성분 분석을 수

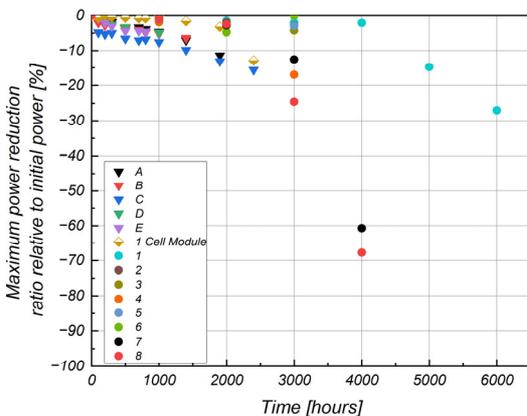


Fig. 4. Maximum power reduction ratio relative to initial power of PV modules and cells after damp-heat test

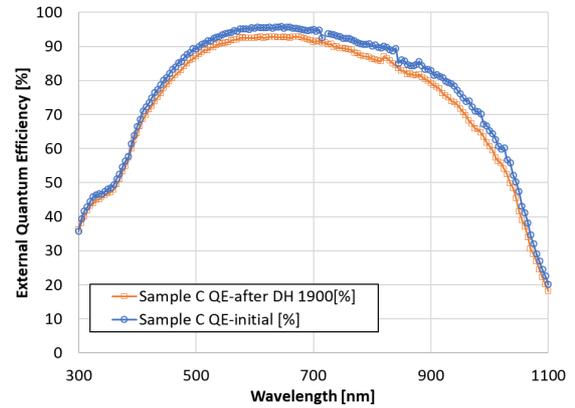


Fig. 5. QE images of sample C solar cell after damp-heat test 1900 hours

Sample C - Initial		Sample C -after DH 1900 h																												
upper electrode																														
Ag element on upper electrode																														
O element on upper electrode																														
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Wt%</th> <th>At%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>SiK</td> <td>01.24</td> <td>04.61</td> </tr> <tr> <td>AgL</td> <td>98.76</td> <td>95.39</td> </tr> <tr> <td>Matrix</td> <td>Correction</td> <td>ZAF</td> </tr> </tbody> </table>		Element	Wt%	At%	SiK	01.24	04.61	AgL	98.76	95.39	Matrix	Correction	ZAF	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Element</th> <th>Wt%</th> <th>At%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>OK</td> <td>05.42</td> <td>27.15</td> </tr> <tr> <td>SiK</td> <td>01.24</td> <td>03.54</td> </tr> <tr> <td>AgL</td> <td>93.34</td> <td>69.31</td> </tr> <tr> <td>Matrix</td> <td>Correction</td> <td>ZAF</td> </tr> </tbody> </table>		Element	Wt%	At%	OK	05.42	27.15	SiK	01.24	03.54	AgL	93.34	69.31	Matrix	Correction	ZAF
Element	Wt%	At%																												
SiK	01.24	04.61																												
AgL	98.76	95.39																												
Matrix	Correction	ZAF																												
Element	Wt%	At%																												
OK	05.42	27.15																												
SiK	01.24	03.54																												
AgL	93.34	69.31																												
Matrix	Correction	ZAF																												

Fig. 6. SEM analysis of sample C's cross section view and Ag-Oxygen element after damp-heat test 1900 hours

행하였다. Fig. 6의 SEM 성분 분석을 확인해 보면 초기 대비 고온고습 1900시간 이후 전면 전극에 산화가 급격히 발생한 것으로 확인되었다. 장기적으로 습도에 노출된 태양전지는 표면 전극인 Ag의 급속한 산화 발생이 나타남을 확인하였다<sup>8)</sup>.

#### 3.2 장기 고온고습 시험 예측

태양전지 및 모듈의 고온고습 환경에서의 출력 저하는 Fig. 7와 같이 챔버 시험 증가에 따른 출력 저하값의 수학적인 피팅(curve fitting)이 가능할것을 판단되어 OriginPro 프로그램을 통하여 시도한 결과 3차 방정식의 형태인  $y = Intercept + B1*x^1 + B2*x^2 + B3*x^3$  의 수식으로 나타낼 수 있음을 확인하였다.

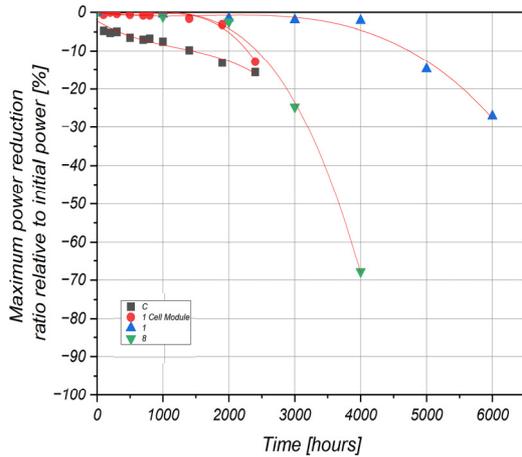


Fig. 7. Maximum power reduction ratio's curve fitting graphs of cells and modules

태양전지의 장기 고온고습 시험에 따른 curve fitting 결과를 Table 5에 정리하였다. R<sup>2</sup>(COD, coefficient of determination) 값은 평균 97%이며 고온고습의 영향에서의 태양전지의 출력 변화는 3차 방정식의 형태로 표현 가능하고 장기 예측 또한 가능함을 알 수 있었다.

태양광모듈의 경우 역시 Table 6에 고온고습 시험을 진행한 1, 7, 8 모듈의 curve fitting 결과를 통하여 태양전지의 출력 감소 특성과 동일한 형태로 최대출력 감소 특성을 나타남을 확인할 수 있었다. 이때 COD 값은 99%로 매우 높으며 3차 방정식으로 출력 변화를 예측할 수 있음을 확인하였다.

### 4. 결론

태양광모듈은 KS 및 IEC 시험 기준에서 고온고습 시험 1000시간을 통과해야 한다. 출력 감소는 시험전 대비 -5% 이내여야 하며 습기 침투에 따른 전기적, 재료적 변화가 최소화되어 태양전지 전극과 리본은 접합 부위의 상태가 제조 초기 상태로 유지되어야 한다. 최근 태양광 제조사에서는 고온고습 2000시간 이상의 시험 시간에서도 평가를 진행하여 제품의 우수성을 입증하고 있다. 본 연구를 통하여 순수 태양전지 또한 고온고습 1000시간동안 출력 변화가 -5% 이내로 나타나는 경우가 있음을 확인하고 그 이후의 시간에서는 급격한 전면 전극의 산화가 발생되어 출력 감소의 주요 원인을 SEM 분석을 통하여 확인하였다. 태양광모듈의 경우 2000시간 고온고습 시험까지 출력 변화가 -5% 이내로 모두 우수한 특성을 나타내었으며 3000시간이 초과해서는 출력 변화가 -5% 이상 급격히 감소하는 특성이 나타났다.

추후 다양한 신규 태양전지 기술의 태양전지와 모듈에 대하여 고온고습 실험을 진행할 계획이며 또한 페로브스카이트가 적용된 탠덤 태양전지 및 모듈에 대하여도 추후 관련된 연구

Table 5. Curve fitting results of maximum power reduction ratio relative to initial power of cells and 1 Cell Module after damp-heat test

Test Sample name	A	B	C	D	E	1 Cell Module
Equation	y = Intercept + B1*x^1 + B2*x^2 + B3*x^3					
Intercept	0.38328 ± 0.386	-0.44669 ± 0.401	-2.25787 ± 0.943	0.11897 ± 0.210	0.13523 ± 0.246	0.06648 ± 1.942
B1	-0.00914 ± 0.002	-0.01161 ± 0.003	-0.01003 ± 0.004	-0.00988 ± 0.002	-0.01234 ± 0.003	-0.00234 ± 0.003
B2	6.58307E-6 ± 2.94966E-6	1.16794E-5 ± 5.32752E-6	5.38335E-6 ± 4.45607E-6	5.4304E-6 ± 4.82027E-6	5.4302E-6 ± 9.4422E-6	1.62958E-6 ± 1.2539E-6
B3	-2.66229E-9 ± 1.04118E-9	-4.6147E-9 ± 2.47832E-9	-1.49603E-9 ± 1.2631E-9	-5.77506E-10 ± 3.13927E-9	3.45533E-9 ± 7.92497E-9	-3.34721E-10 ± 1.37162E-10
R-Square (COD)	0.986	0.962	0.934	0.991	0.990	0.980

Table 6. Curve fitting results of maximum power reduction ratio relative to initial power of modules after damp-heat test

Test Sample name	1	7	8
Equation	y = Intercept + B1*x^1 + B2*x^2 + B3*x^3		
Intercept	0.06648 ± 1.94254	0.33 ± 2.74119	-0.28571 ± 2.37332
B1	-0.00234 ± 0.00307	-0.01098 ± 0.00697	-8.45238E-4 ± 0.00604
B2	1.62958E-6 ± 1.2539E-6	1.145E-5 ± 4.42741E-6	2.90714E-6 ± 3.83326E-6
B3	-3.34721E-10 ± 1.37162E-10	-3.125E-9 ± 7.27582E-10	-1.73333E-9 ± 6.29941E-10
R-Square (COD)	0.980	0.997	0.998

내용을 논문 등을 통하여 지속적으로 게재할 예정이다.

### 후 기

이 논문은 2020년도(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지공단 지원과 (과제번호 : 20012492 과제명: 태양광 분야 국제표준대응 기반조성) 2023년도(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원과 (과제번호 : RS-2023-00303745 과제명: 탄소배출이 적고 재활용이 용이한 모듈 소재 및 공정 기술개발) 2024년도(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호 : RS-2024-00460123 과제명: 페로브스카이트/결정질 실리콘 탠덤 태양전지 및 모듈 효율측정 기술 고도화).

### References

1. KS C 8561 : Crystalline silicone photovoltaic (PV) module (performance) (2023).

2. M. Rabelo, H. Park, Y. Kim, E.-C. Cho, J. Yi, Corrosion, LID and LeTID in silicon PV modules and solution methods to improve reliability. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 22, 575-583 (2021).
3. J. Karas, A. Sinha, V. S. Pavan Buddha, F. Li, F. Moghadam, G. Tamizhmani, S. Bowden, A. Augusto, Damp heat induced degradation of silicon heterojunction solar cells with Cu-plated contacts. *IEEE J. Photovolt.* 10 (2020).
4. I. Faye, A. Ndiaye, R. Gecke, U. Blieske, D. Kobor, M. Camara, Experimental study of observed defects in mini-modules based on crystalline silicon solar cell under damp heat and thermal cycle testing. *Sol. Energy.* 191, 161-166 (2019).
5. X. Wu, C. Sen, X. Wang, Y. Cheng, R. Lv, H. Song, Y. Yu, B. Liao, S. Ma, M. U. Khan, A. Ciesla, B. Hoex, Unveiling the origin of metal contact failures in TOPCon solar cells through accelerated damp-heat testing. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 278, 113188 (2024).
6. C. Sen, X. Wu, H. Wang, M. U. Khan, L. Mao, F. Jiang, T. Xu, G. Zhang, C. Chan, B. Hoex, Accelerated damp-heat testing at the cell-level of bifacial silicon HJT, PERC and TOPCon solar cells using sodium chloride. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 262, 112551 (2023).
7. K. Kim, Characterization of long-term reliable crystalline silicon PV module through environmental acceleration test method, a doctoral dissertation, CNU (2013).
8. W. Oh, S. Kim, S. Bae, N. Park, Y. Kang, H.-S. Lee, D. Kim, The degradation of multi-crystalline silicon solar cells after damp heat tests. *Microelectron. Reliab.* 54, 2176-2179 (2021).