

# KS C 8562 평가를 통한 CIGS 태양광모듈의 출력 거동 분석

김경수\*

태양광연구단, 재생에너지연구소, 한국에너지기술연구원, 대전광역시, 34129

## Current-Voltage Measurement Behavior of the CIGS Solar Module through the Evaluation of KS C 8562 Standard

Kyung Soo Kim\*

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

Received May 15, 2024; Revised June 17, 2024; Accepted June 18, 2024

**ABSTRACT:** CIGS solar cells are thin film solar cells that have excellent light absorption coefficient and can be manufactured with high efficiency through the use of low materials. In Korea, they must pass KS certification for home and commercial installation. KS C 8562 is a standard for evaluating the durability of CIGS and thin film amorphous silicon solar modules and deals with contents such as light, temperature, humidity, and mechanical durability. Unlike general crystalline silicon solar modules, the CIGS solar module has a different behavior of output change through these environmental tests, so if it shows 90% or more of the rated output suggested by the manufacturer after the final test, it is judged to be a suitable product. In this paper, the output before and after individual tests was measured through the test method of KS C 8562 to observe the output change and to discover the vulnerabilities of the CIGS solar module when exposed to various environments. Through this, it was confirmed that humidity exposure was the most vulnerable and that it had output recovery characteristics for light (visible light and ultraviolet rays). This study attempted to present the output behavior characteristics and data of the CIGS module at the time when the high efficiency thin film photovoltaic module market is expected to be created in the future.

**Key words:** Solar module, Renewable energy, KS C 8562, CIGS thin film 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
- TC200 test : thermal cycle 200 test
- DH test: damp heat test
- NOCT: nominal operation cell temperature
- HF test : humidity freeze test
- UV test : ultraviolet test
- I-V : current-voltage

### 1. 서론 Intro

2023년 전 세계 태양광설비의 누적 설치량은 1.6 TW로 수준으로 2022년 대비 최소 407 GW에서 최대 446 GW 만큼 성장하였다. 중국은 누적 설치량 662 GW로 세계 최고이며 이어서 유럽, 미국 순으로 각각 268.1 GW와 169.5 GW 만큼 설치하였다. 한국의 누적 설치량은 27.8 GW로 전세계 10위를 차지하고 있다 (Fig. 1 참조)<sup>1)</sup>.

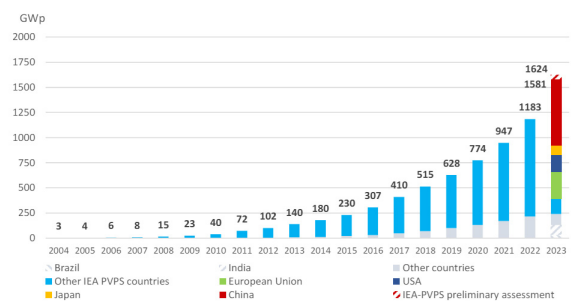


Fig. 1. Evolution of cumulative PV installations up to 2023

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

2023년에는 태양광 기술별 연간 생산량 비중은 c-Si(결정질 실리콘) PV 모듈 비중은 2022년 97.5%로 2021년 95.8%에서 소폭 증가했다. c-Si PV 기술 중 단결정-Si PV 비중은 2021년 88%에서 2022년 94.6%로 더욱 증가했다. 박막실리콘 기술 비중은 3.4%에서 2.5%로 소폭 감소했다. 2022년에는 약 9.5 GW의 박막 PV 모듈이 생산되었다(Fig. 1 참조). 박막 PV 모듈의 대부분은 미국, 말레이시아, 베트남의 First Solar가 생산한 CdTe PV 모듈이다. 2022년에 생산된 다른 박막 기술로는 500 MW 미만의 CIGS와 비정질 실리콘 PV 모듈이 있으며 박막 PV 모듈은 주로 말레이시아, 미국, 일본, 독일, 중국에서 생산되었다<sup>2)</sup>.

CIGS태양전지는 I-III-VI<sub>2</sub>족으로 이루어진 CIS (CuInSe<sub>2</sub>) chalcopyrite 화합물 반도체로 광흡수계수가 ~10<sup>5</sup> cm<sup>-1</sup> 정도로 반도체중 가장 높고 직접 천이형 밴드갭 구조를 가지고 있어 수 μm 이내의 얇은 박막으로도 고효율 태양전지를 제조할 수 있는 장점이 있는 재료이다. 현재 CIGS 박막 태양전지 최고 효율은 Fig. 2와 같이 2023년 NREL에서 측정된(제조:Evolar/UU, 스웨덴) 23.6%(사이즈: 0.899 cm<sup>2</sup>)으로 2018년 11년 Solar Frontier의 23.35%(사이즈: 1.043 cm<sup>2</sup>)이후 상업용 태양전지모듈의 제조는 중단된 상태이다<sup>3)</sup>.

국내의 경우 현재 CIGS모듈 제조사는 전무한 상태이며 연구기관을 통한 유연화 기술과 텐덤 기술을 통한 적용성 및 고효율 기술 개발에 집중하고 있는 상황이다. CIGS모듈은 KS C 8562 (박막 태양전지 모듈(성능))을 통하여 인증평가를 진행하고 있다. 결정질 실리콘 태양전지에 대비하여 CIGS 태양전지모듈은 내구성 평가 전·후에 최대출력 측정시 그 결과값이 매우 급변하는 상태를 나타낸다. 일반적으로 결정질 실리콘 태양전지 모듈의 경우 시험 전후 I-V 측정을 진행하며 시험 전·후 최대 -5%의 출력 감소를 보이며 각 개별 시험후 출력 특성을 판단할 수 있다. 그러나 박막태양전지의 경우 개별 내구성 시험 후 I-V 측정을 진행하지 않고 모든 시험이 종료된 후 안정화(stabilization, light soaking test) 시험을 통하여 최종 출력을 측정하는 프로세스로 진행하고 있어 개별 시험을 통한 전기적 특성 변화에 대한 이해가 많이 부족한 것이 현실이다.

이에 본 논문에서는 대면적 CIGS 박막 태양전지를 이용하여 KS C 8562 시험 방법을 이용하여 시험에 따른 I-V 측정을 단계

별로 비교하여 CIGS 모듈의 환경 노출에 따른 전기적 특성의 거동 변화의 관찰 결과를 제공하고자 하였다. 이를 통하여 CIGS 박막 모듈의 취약점에 대한 사전 검증에 대한 이해도를 높이고 장기 신뢰성을 갖춘 태양전지 및 모듈의 개발에 도움을 주고자 하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 CIGS 모듈 제조

CuInSe<sub>2</sub>의 밴드갭은 약 1.0 eV이고 CuGaSe<sub>2</sub>의 밴드갭은 1.68 eV, CuInS<sub>2</sub>의 밴드갭을 1.54 eV로서, Ga/(In+Ga) 비율 및 S/(S+Se) 비율을 조절함으로써 밴드갭의 조절이 가능하여 최적의 밴드갭을 맞출 수 있다. 일반적으로 태양전지의 제조단가를 낮추기 위해 단위 셀의 폭을 증가시키면 투명전극의 저항으로 인해 효율이 감소하기 때문에, 총 3회의 패터닝 공정을 이용하여 cell을 분리, 직렬로 연결함으로써 대면적 모듈을 제조하였다.

CIGS 태양전지모듈의 CIGS 단일 접합으로 900 mm × 1600 mm 사이즈로 안정화 효율 약 170 W 급으로 Glass (3 mm)/Mo/Cu(in,Ga) (Se,S)<sub>2</sub>/CdZ(ZnS)/ZnO/MgF/Al/Glass 구조로 제조되었다. 금속 프리커서는 Cu, Ga, In 등의 금속을 스퍼터링으로 증착하였고 금속 프리커서를 H<sub>2</sub>Se, H<sub>2</sub>S 분위기에서 분위기 열처리 공정에 의해 화합물 반도체인 Cu (In,Ga)(Se,S)를 만드는 셀렌화(selenization, Se(化) 공정에 의해 광흡수층을 형성하였다. 그리고 CBD (Chemical Bath Deposition)법을 이용한 Zn와 S를 포함한 용액 내에서의 이온반응을 이용한 simple dip 방식을 이용한 버퍼층(ZnS)을 형성하였다. 봉소가 도핑된 ZnO 투명전극은 LPCVD를 이용하여 형성하였다(Fig. 3 참조)<sup>4, 5)</sup>.

### 2.2 CIGS 모듈 최대출력 결정

CIGS태양전지는 1세대 실리콘 태양전지에 대비하여 특이한 점이 있는데, 첫째 암실(dark condition storage)에서는 출력 감소가 발생하고, 빛이 조사되는 상태에서는 출력이 증가하는 특징이 있다. 이에 매 시험 후 출력 측정을 통한 전기적 특성의 변화를 관찰하기 위해서는 정밀하고 신뢰할 수 있는 측정법의 선택이 반드시 필수되어야 한다.

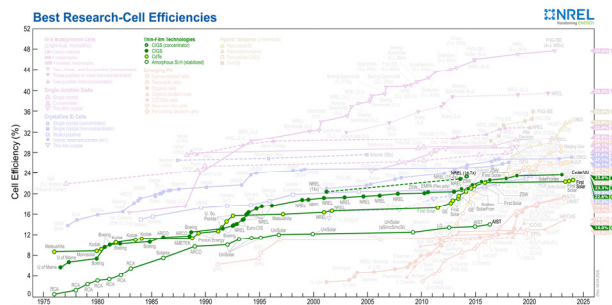


Fig. 2. Best research-cell efficiency chart

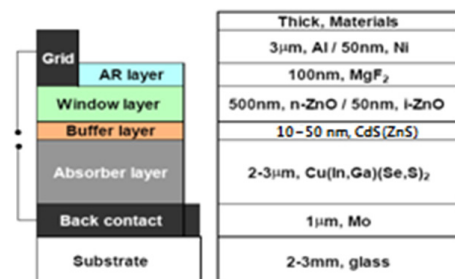


Fig. 3. Cross view of CIGS PV module



Fig. 4. Long-pulse type solar simulator with CIGS test module

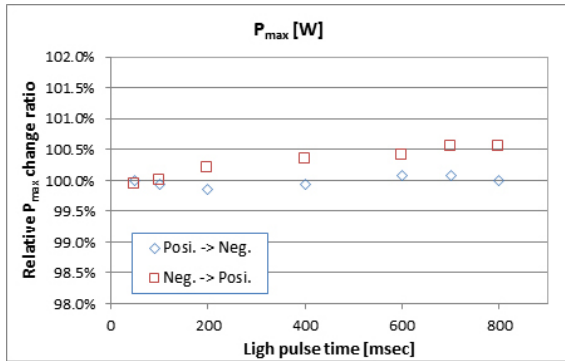


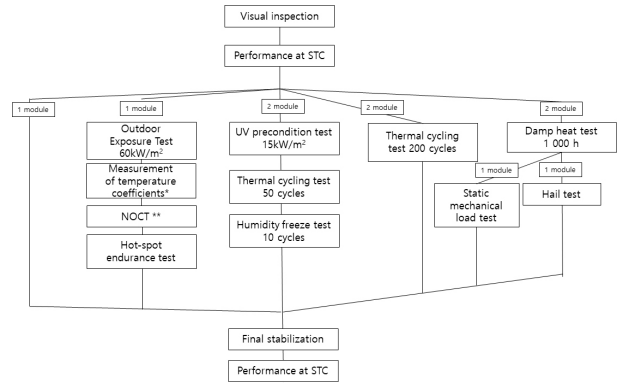
Fig. 5. Determination of maximum power of CIGS PV module depending on light pulse time and voltage scan direction

Table 1. Initial I-V measurement result of CIGS PV module

Serial Number	$P_{mp}$ [W]	$V_{oc}$ [V]	$I_{sc}$ [A]	$V_{mp}$ [V]	$I_{mp}$ [A]
CIGS-01	178.1	108.0	2.54	80.45	2.21
CIGS-04	148.2	104.6	2.65	65.96	2.24
CIGS-06	174.0	109.2	2.67	75.67	2.30
CIGS-09	173.2	104.0	2.56	77.15	2.24
CIGS-10	166.5	107.9	2.61	72.24	2.24
CIGS-13	160.5	107.3	2.58	73.49	2.18
CIGS-15	175.2	107.8	2.51	80.34	2.18

CIGS박막 태양전지의 I-V 측정을 위하여 사용된 일본 Wacom사의 50 msec ~ 800 msec까지 조사가 가능한 Class A급의 솔라 시뮬레이터이다(Fig. 4 참조). 출력 측정의 재현성 및 신뢰정도를 알아보기 위하여 Light Pulse Duration 시간과 Voltage Sweeping 방향에 따른 출력의 변화를 살펴보았다. 모듈에 입사되는 솔라 시뮬레이터의 Pulse 조사 시간을 고정하고 Voltage sweeping을  $V_{oc} \rightarrow I_{sc}$  및  $I_{sc} \rightarrow V_{oc}$  방향에 따른 최대 출력 변화를 Fig. 5와 같이 측정하였다. 이를 통하여 100 msec에서 가장 안정적으로 측정 조건이며 이후 시험 모듈은 Light Pulse Duration 100 msec, Voltage Sweep 방향은  $V_{oc} \rightarrow I_{sc}$ 으로 고정하여 내구성 평가 후 효율 및 최대 출력 변화를 관찰하였다<sup>6)</sup>.

Table 1은 CIGS박막 태양전지 총 15대에 대하여 각 모듈의 초기 출력을 측정한 것이다. 제작 후 측정한 결과로 안정화 효율은 아니며 최소 148.2 [W]에서 최대 178.1 [W] 편차를 보이는 값을 나타내었다.



\*Temperature coefficient test is conducted with a mini-module  
 \*\* Latest KS C 8562 has NOCT test deleted

Fig. 6. CIGS PV module long-term test tree

### 2.3 CIGS 모듈 내구성 평가 방법

CIGS 태양전지모듈은 KS C 8562 기반 시험법으로 Fig. 6과 같은 시험 순서로 진행되었다. 초기 육안 검사 및 I-V 출력 측정 그리고 절연저항을 측정하였으며, 이후 모듈을 각 시험 카테고리에 맞추어, 옥외폭로시험(Outdoor Exposure) 1매, 온도사이클 200 (TC200) 2매, 고온고습(DH, Damp-heat) 시험 2매, 자외선(UV) 2함에 각 2매를 투입하였다<sup>7)</sup>. 온도계수시험을 위하여 동일하게 셀 제조와 라미네이션 공정된 30 cm × 30 cm 미니모듈(mini-module)을 이용하여 측정하였다.

### 3. CIGS 모듈 내구성 평가 결과 및 분석

#### 3.1 고온고습 시험 결과

고온고습 시험(Damp-heat test)은 고온 및 고습에서의 태양 전지 및 구성 재료의 변형을 관찰하는 것으로 CIGS-1, CIGS-4의 두 모듈이 온도 85°C, 습도 85%의 상태로 1,000시간 챔버에 투입되었다. 고온고습 시험 후 I-V를 측정한 결과 Fig. 7 및 Fig. 8과 같이 태양전지의 내구 직렬 저항의 증가로 F.F(충진율)이 급격히 감소하였으며, 개방전압( $V_{oc}$ )의 감소도 발생하였다. 출력

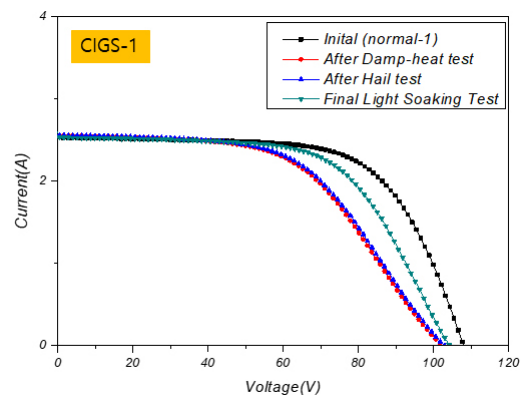
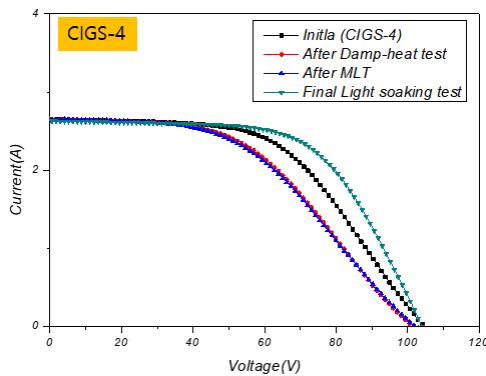


Fig. 7. I-V curves of CIGS-1 PV module after damp-heat, hail test and final light soaking test

**Table 2.** Summary of I-V results of CIGS-1 PV module after damp-heat, hail test and final light soaking test

	Initial	DH	Hail	Final
$P_{mp}$ [W]	178.1	140.1	142.1	161.3
$V_{oc}$ [V]	108	102.3	102.9	104.3
$I_{sc}$ [A]	2.54	2.56	2.56	2.55
$V_{mp}$ [V]	80.45	65.4	65.6	73.43
$I_{mp}$ [A]	2.21	2.14	2.16	2.19



**Fig. 8.** I-V curves of CIGS-4 PV module after damp-heat, MLT and final light soaking test

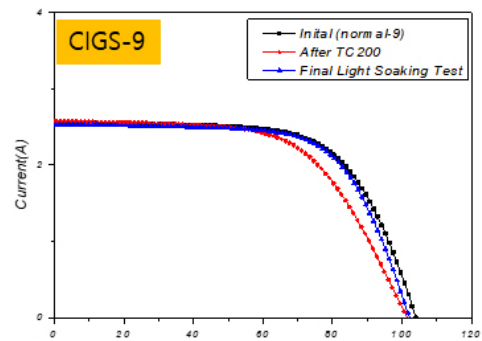
**Table 3.** Summary of I-V results of CIGS-4 PV module after damp-heat, MLT and final light soaking test

	Initial	DH	MLT	Final
$P_{mp}$ [W]	148.2	128.8	126.5	166.6
$V_{oc}$ [V]	104.6	101.5	102.1	104.1
$I_{sc}$ [A]	2.65	2.66	2.66	2.64
$V_{mp}$ [V]	65.96	59.75	58.71	72.77
$I_{mp}$ [A]	2.24	2.15	2.15	2.28

은 약 -22%의 감소가 되었다. 고온고습 시험이 종료된 2장의 모듈은 각 우박시험(Hail Test)와 기계하중시험(Mechanical Load Test)을 진행하였다.

I-V 측정결과 우박시험에 따른 출력의 변화는 없었으며 약 2 [W]의 출력 회복이 되었는데 이는 암실(Dark storage condition) 상태에서 챔버 외부로 정제된 시간이 있어 빛에 의한 회복으로 판단된다. 최종 출력을 측정된 결과 초기 출력인 178.1 [W]에 대비하여 출력회복이 -9.4%가 발생되어 최종 CIGS-1 모듈의 최대출력은 161.3 [W]로 측정되었다.

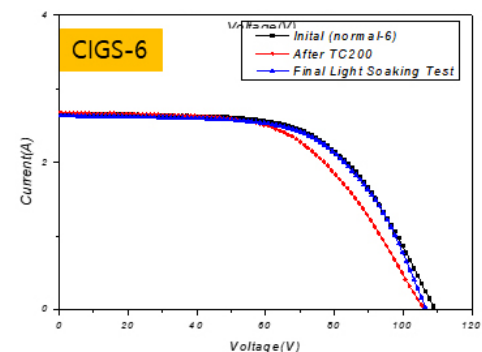
고온고습 시험이 종료된 모듈로 기계하중시험을 진행하였다. 재시험에서는 최대 응력 2400 Pa, 총 3사이클에 걸쳐 진행된 결과 모듈의 파손 및 전류 흐름의 연속성(current continuity)에서도 문제가 없이 잘 통과되었다. 기계하중 시험 후 출력변화는 Table 3과 같이 -1.8%의 출력 감소가 있었다. 최종 출력을 측정된 결과 초기 출력인 148.2 [W]에 대비하여 출력회복이 +12.4%가 발생되어 최종 CIGS-4 모듈의 최대출력은 166.6 [W]로 측정되었다.



**Fig. 9.** I-V curves of CIGS-9 PV module after TC200 and final light soaking test

**Table 4.** Summary of I-V results of CIGS-9 PV module after TC200 and final light soaking test

	Initial	TC200	Final
$P_{mp}$ [W]	173.2	156	171.2
$V_{oc}$ [V]	104	101.5	102.2
$I_{sc}$ [A]	2.57	2.58	2.55
$V_{mp}$ [V]	77.15	70.34	76.44
$I_{mp}$ [A]	2.24	2.21	2.24



**Fig. 10.** I-V curves of CIGS-6 PV module after TC200 and final light soaking test

**Table 5.** Summary of I-V results of CIGS-6 PV module after TC200 and final light soaking test

	Initial	TC200	Final
$P_{mp}$ [W]	174	159.6	172.6
$V_{oc}$ [V]	109.2	106.1	106.7
$I_{sc}$ [A]	2.67	1.68	2.64
$V_{mp}$ [V]	75.67	69.57	76.45
$I_{mp}$ [A]	2.30	2.29	2.25

### 3.2 온도사이클 200 시험 결과

온도사이클 시험(Temperature Cycling Test)은 고온 및 저온의 반복적인 온도 변화에 의하여 태양전지 및 구성 재료의 이질성 및 내구력을 관찰하는 것으로 CIGS-6, CIGS-9의 두 모듈이 최소 온도 -40°C, 최대온도 +85°C의 주기를 총 200회 반복되는 상태로 챔버에 투입되었다.

시험 후 CIGS-6의 모듈의 경우 -8.2%의 출력 감소가, CIGS-9 모듈의 경우 -9.9%의 출력 감소가 발생되었다. 고온고습 시험과 유사하게 Dark Storage 상태에서의 온도변화 및 고온고습의 상태는 CIGS 태양전지의 출력 감소의 주요 원인인 것으로 판단되었다.

최종 광조사 시험 후 온도사이클 200 시험 후의 시료는 출력의 회복이 되었다. CIGS-9의 시료는 9.7%, CIGS-6의 시료는 8.1%의 출력 증가가 나타났으며 최종 출력대비 CIGS-9의 시료는 -1.1%, CIGS-6의 시료는 -0.8%의 출력 감소가 발생되었다.

### 3.3 자외선 시험 결과

CIGS-10와 CIGS-13 시료는 자외선 시험에 투입되었다. 총 15 kWh/m<sup>2</sup>의 노출을 통하여 CIGS-13은 2.6%, CIGS-10은 3.7%의 출력 증가가 되었는데 이는 이전의 고온고습 시험, 온도 사이클 시험과 같이 빛의 노출이 없는 경우와는 대조적인 현상이었다.

온도 사이클 50회 후 최종 출력 측정결과 CIG-10는 -11.7%, CIGS-13은 -8.9%의 출력 감소가 발생되었다. 빛이 없는 챔버에서의 환경 조건은 CIGS 박막 태양전지의 전기적 출력 감소 일지킴을 확인할 수 있었다.

온도 사이클 50 이 종료된 시료를 결로동결(HF) 챔버에 투입하였는데, 최종 출력 측정결과 CIGS-10는 -7.8%, CIGS-13은 -9.8%의 출력 감소가 발생되었다.

최종 광조사 시험 후 CIGS-10과 CIGS-13 시료는 온도사이클 및 결로동결 시험을 통한 출력 감소에 대한 회복이 발생하였다. 결로 동결 시험 후 CIGS-10의 시료는 21.9%, CIGS-13의 시

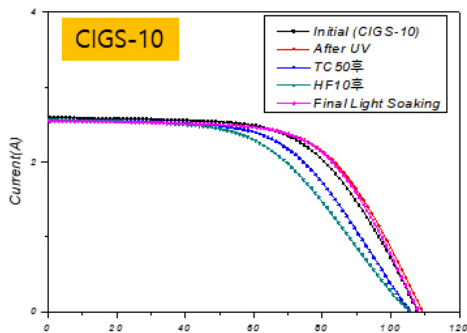


Fig. 11. I-V curves of CIGS-10 PV module after UV, TC50, HF10 and final light soaking test

Table 6. Summary of I-V results of CIGS-10 PV module after UV, TC50, HF10 and final light soaking test

	Initial	UV	TC50
$P_{mp}$ [W]	166.5	172.7	152.4
$V_{oc}$ [V]	107.9	109.4	105.9
$I_{sc}$ [A]	2.615	2.57	2.57
$V_{mp}$ [V]	74.24	77.54	69
$I_{mp}$ [A]	2.24	2.22	2.18

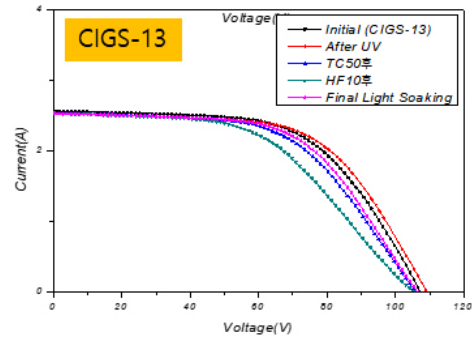


Fig. 12. I-V curves of CIGS-13 PV module after UV, TC50, HF10 and final light soaking test

Table 7. Summary of I-V results of CIGS-13 PV module after UV, TC50, HF10 and final light soaking test

	Initial	UV	TC50
$P_{mp}$ [W]	160.5	164.7	149.9
$V_{oc}$ [V]	107.3	109.2	106.1
$I_{sc}$ [A]	2.58	2.551	2.54
$V_{mp}$ [V]	73.49	75.96	70.04
$I_{mp}$ [A]	2.18	2.16	2.14

료는 14.5%의 출력 증가가 나타났으며 최종 초기 출력대비 CIGS-10의 시료는 2.8% 증가, CIGS-13의 시료는 -3.4%의 출력 감소가 발생되었다.

### 3.4 옥외노출 시험 결과

옥외 폭로 시험(60 kWh/m<sup>2</sup>)을 진행한 CIGS-15 모듈은 시험 후 Fig. 13과 같이 I-V 측정결과 초기 출력대비 1.3%의 출력 상승이 발생하였다.

NOCT는 옥외 폭로 시험과 마찬가지로 모듈의 공칭작동온도를 측정하지만 결국 옥외에서 태양빛에 노출되는 형태이므로 모듈 출력 감소는 초기 출력대비 -0.5% 수준으로 거의 비슷한 수준이었다.

햇스팟 시험 후 모듈의 I-V 측정을 진행하였는데 -4.8%의 모듈의 출력이 감소되었다. 보통 햇빛에 노출되면 태양전지 모듈

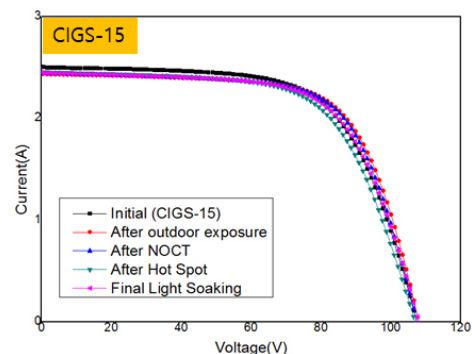


Fig. 13. I-V curves of CIGS-15 PV module after outdoor exposure, NOCT, Hot-Spot and final light soaking test

**Table 8.** Summary of I-V results of CIGS-15 PV module after outdoor exposure, NOCT, Hot-Spot and final light soaking test

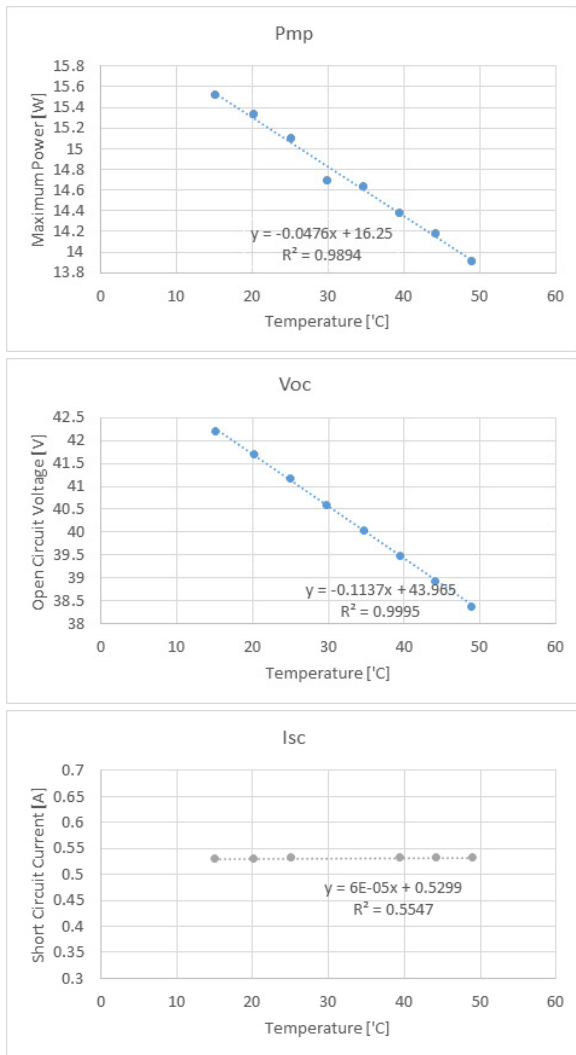
	Initial	Outdoor exp.	NOCT	Hot Spot	Final
$P_{mp}$ [W]	175.2	177.6	176.2	167.6	172.4
$V_{oc}$ [V]	107.8	108	107.4	107	108.1
$I_{sc}$ [A]	2.51	2.48	2.48	2.49	2.48
$V_{mp}$ [V]	80.3	82.7	81.9	79.0	80.8
$I_{mp}$ [A]	2.18	2.14	2.14	2.11	2.13

**Table 9.** Summary of temperature coefficient test of CIGS-15 PV module for  $P_{mp}$ ,  $V_{oc}$  and  $I_{sc}$

$\Delta P_{mp}$	$\Delta V_{oc}$	$\Delta I_{sc}$
-0.32%	-0.28%	0.01%

**Table 10.** Summary of I-V result initial and final test

Serial Number	Initial	Final sta bilization	Maximum power change ratio (Final stabilization-Initial)/(Initial) x 100%
	$P_{max}$ [W]	$P_{max}$ [W]	
CIGS-01	178.1	161.3	-9.4 %
CIGS-04	148.2	166.6	12.4 %
CIGS-06	174	172.6	-0.8 %
CIGS-09	173.2	171.2	-1.1 %
CIGS-10	166.5	171.3	-2.8 %
CIGS-13	160.5	154.9	-3.4 %
CIGS-15	175.2	172.4	-1.5 %



**Fig. 14.** Results of temperature coefficient test of CIGS-15 PV module for  $P_{mp}$  (picture (a)),  $V_{oc}$  (picture (b)) and  $I_{sc}$  (picture (C))

의 출력이 상승하는 것이 앞의 실험을 통하여 얻어진 결론이지만, 본 핫스팟 실험에서의 가려진 태양전지의 문제로 출력이 감소된 것으로 판단된다.

최종 광조사 시험 후 CIGS-15 박막모듈의 I-V를 측정된 결과 핫스팟 시험 후 최대출력에 대비하여 2.8% 출력 상승이 있었으며, 초기 출력대비 -1.6%의 출력 감소가 발생하였다.

시제품 CIGS 박막 태양전지모듈의 온도 상승 및 하강에 대한 전류, 전압 및 최대 출력의 온도계수를 측정하였다. Fig. 14와 같이 최대 출력은 온도 1°C 증가에 대한 최대 출력의 변화율은 -3.2%였으며, 개방 전압은 -0.28%, 단락 전류는 0.01% 이었다.

KS C 8562 시험을 진행한 박막 태양전지의 시험결과와 Table 10과 같이 초기 측정값 대비 안정화 이후의 최종 값으로 정리할 수 있다. 그리고 빛의 조사가 없이 온습도의 영향으로 인한 출력의 감소가 뚜렷했으며, 빛(가시광선+자외선)은 CIGS 모듈의 출력 상승의 회복을 일으키는 것으로 나타났다.

CIGS 박막 태양전지는 습기의 영향을 많이 받는다고 보고되어 있다. 습도는 태양전지 내에서 나트륨 이동을 유발하여 분해를 증가시키기 때문에 습도가 높은 지역에서는 CIGS 태양광 패널을 사용하지 않는 것이 좋다<sup>8,9)</sup>.

이외에도 CIGS 태양전지모듈에 영향을 주는 것으로는 PID (potential induced degradation)가 있으며, PID는 CIGS 태양전지에서 특정 조건에 노출되면 성능이 저하되는 현상이다. PID 상태에서는 CIGS 셀의 접합부에서 bulk doping concentration 과 built-in potential에 변화가 발생한다. 이는 전위차와 관련이 있으며, 이는 태양전지 특성의 변화로 이어질 수 있다<sup>10)</sup>.

또한 부분적인 음영은 CIGS 태양전지 성능에도 영향을 미칠 수 있으며 셀의 일부가 음영 처리되면 국부적인 가열과 전류 불일치가 발생하여 전체 효율에 영향을 미칠 수도 있다<sup>11)</sup>.

### 4. 결론

박막태양전지 모듈의 시장 점유율은 현저히 낮은 상태이며 특히 CIGS태양전지의 상업화는 거의 활성화되어있지 않다. 박막태양전지의 경우 KS 및 IEC 시험 방법을 통하여 내구성능 평

가를 진행하지만 개별 시험을 통한 전기적 특성 변화에 대한 데이터는 사용자에게 공개된 내용이 미미하여 본 논문을 통하여 온도, 습도, 빛(자외선, 가시광선), 기계적 스트레스(기계하중, 우박)등의 환경 변화에 따른 데이터 제공을 목적으로 하였다. 본 연구를 통하여 높은 습도 환경이 CIGS 모듈의 운영에 가장 취약한 조건임을 확인하였고 온도계수 측정값은 일반 결정질 실리콘 태양전지 대비 낮은 값으로 습도가 낮고 고일사 조건에서는 운영이 유리할 것으로 판단된다. 또한 박막 태양전지의 제조 특성상 부분음영이 들지 않고 PID로 인한 성능 저하에 대한 대비를 하여 설치 및 운영을 계획한다면 경쟁력 있는 기술이 될 것으로 판단된다.

추후 페로브스카이트 및 실리콘+페로브스카이트 등의 박막 태양전지가 적용한 태양전지모듈의 시장 확대가 필수불가결적으로 예상되는 상황에서 추후 관련된 연구 내용을 논문 등을 통하여 지속적으로 게재할 예정이다.

## 후 기

이 논문은 2011년도(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원과(과제번호 : 2011T100100038 과제명: 대면적(900×1600 mm<sup>2</sup>) 고효율(16%) CIGS 박막태양전지 기술 개발) 2023년도(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호: RS-2023-00303745 과제명: 탄소배출이 적고 재활용이 용이한 모듈 소재 및 공정 기술개발).

## References

1. PVPS, "Snapshot of Global PV Markets 2024", IEA PVPS, T1-42 (2024).
2. PVPS, "Trends in Photovoltaic Applications 2023 Report", IEA PVPS, T1-43 (2023).
3. The National Renewable Energy Laboratory (NREL), <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (accessed on 5 15 2024)
4. Industrial Convergence Source Technology Development Project, Low-Cost, High-Efficiency and Large-Area CIGS Thin-Film Solar Modules, Project number 2011T100100038, KETEP (2011).
5. J. Nam , Y. Kang , D. Kim , D. Baek , D. Lee , J. Yang , The oxidation effect of a Mo back contact on Cu(In,Ga)(Se,S)<sub>2</sub> thin-film solar modules, Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 144, 445-450 (2016).
6. K.-S. Kim, G.-H. Kang, G.-J Yu, S.-G. Yoon, Performance measurement method of several types of photovoltaic module depending on efficiency, J. Korean Solar Energy. 31, 93-99 (2011).
7. KS C 8562 : Thin film photovoltaic (PV) module (performance) (2022).
8. J. Dennis, Life prediction for CIGS solar modules part 1: Modeling moisture ingress and degradation, Prog. Photovolt.: Res. Appl. 21, 156-172 (2013).
9. S. Boulhidja, A. Mellit, Performance degradation of CIGS photovoltaic modules by light soaking and reverse bias, 2015 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE), pp. 1-4 (2015).
10. S. Lee, S. Bae, S. J. Park, J. Gwak, J. H. Yun, Y. Kang, D. Kim, Y.-J. Eo, H.-S. Lee, Characterization of potential-induced degradation and recovery in CIGS solar cells, Energies. 14, 4628 (2021).
11. K. Bakker, A. Weeber, M. Theelen, Reliability implications of partial shading on CIGS photovoltaic devices: A literature review. Journal of Materials Research (JMR). 34, 3977-3987 (2019).