


# 고출력 모듈을 위한 NDC 공정에 따른 Half-Cut 태양전지의 특성 분석

함금희, 이재형 

성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

## Analysis of Characteristics of Half-Cut Solar Cells According to the NDC Process for High-Power Modules

Guemhee Ham and Jaehyeong Lee

Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

(Received July 2, 2024; Revised July 26, 2024; Accepted August 15, 2024)

**Abstract:** One method to increase the output of solar modules is the application of the Half-cut technique, which requires a scribing process involving direct irradiation of infrared lasers on the solar cells. During this process, the laser melts the surface of the solar cells at high temperatures, enabling mechanical division, but this can lead to output loss due to thermal degradation caused by the laser. To minimize such losses, a low-temperature and low-loss division method has been devised. In this study, we compared the electrical characteristics and leakage currents affecting output degradation between the newly devised low-temperature and low-loss cell division method and the conventional laser division method. Additionally, we conducted a 3-point flexural test to evaluate the mechanical properties of both methods.

**Keywords:** High power module, Half-cut solar cell, Non-destructive cutting, High efficiency, Half-cut, IR laser cutting

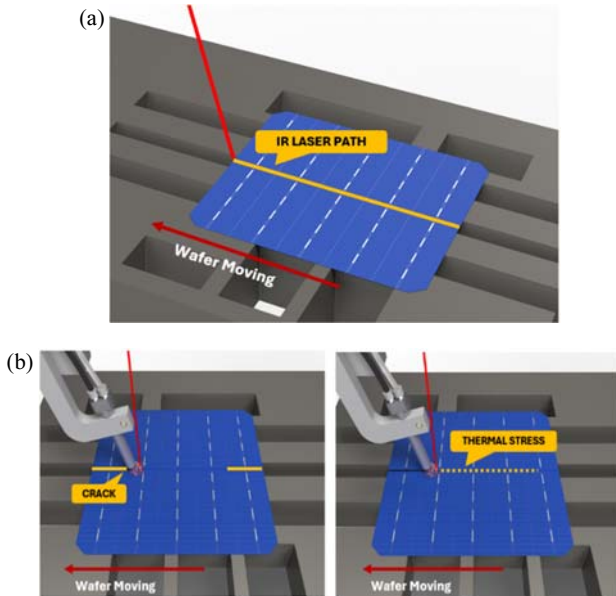
### 1. 서론

최근 고출력 태양광 패널에 대한 수요가 폭발적으로 증가함에 따라, 모듈의 출력을 증가시키는 방식 중 하나인 half-cut 기술이 접목된 고출력 태양광 모듈 개발에 대한 관심이 높아지고 있다. Half-cut 기술은 태양전지를 레이저로 스크라이빙 한 뒤 분할하여 전류를 반으로 줄임으로써 저항을 감소시켜 출력을 향상시키는 방식이다. 일반적으로 태양전지를 분할하기 위한 레이저 스크라이빙 공정은 그림 1과 같이 레이저를 태양전지 표면에 직접 조사하게 되는데, 열에 약한 구조를 갖는 태양전지의 경우 이러한

직접적인 레이저 조사 방식으로 인해 단면이 열화되고 결과적으로 태양전지의 출력이 감소하게 된다 [1,2]. 이와 같이 기존 레이저 분할 방식에서 오는 출력 손실을 최소화하기 위해 저온 및 저손실 스크라이빙(non-destructive cutting, NDC) 방식이 제안되었는데 [3], NDC 방식은 기존의 레이저 분할 방식과 달리 두 가지의 레이저를 사용한다. 먼저, IR pulse 레이저로 태양전지의 양 끝단에 수 mm 이내의 균열을 만들고, 그 사이를 IR continuous wave (CW) 레이저로 스캐닝하여 열팽창에 의한 인장력과 압축력 구배를 기반으로 하여 태양전지를 분할함으로써 레이저의 직접적인 조사에 의한 열화 및 그로 인한 출력 손실을 최소화하게 된다 [4]. 본 연구에서는 기존 IR 레이저를 이용한 스크라이빙 방식과 새롭게 고안된 저온 및 저손실 분할 방식으로 분할된 half-cut 태양전지의 전기적 특성 분석을 통해 half-cut 태양전지의 효율성을 최적화 및 출력 분석을 진행하였다. 또한, 3점하중 굽힘 시험을 통해 기존 IR

✉ Jaehyeong Lee; [jehyeong@skku.edu](mailto:jehyeong@skku.edu)

Copyright ©2024 KIEEME. All rights reserved.  
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



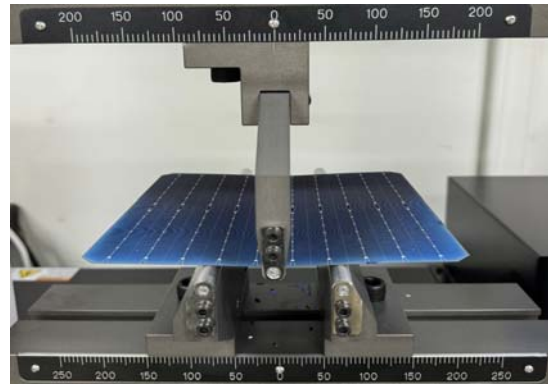
**Fig. 1.** (a) The conventional IR laser scribing is a method where an IR laser across the middle of a solar cell to divide it and (b) non-destructive scribing uses an IR pulse laser to create cracks at both ends of the cell (then, an IR CW laser is used to apply thermal stress across the middle of the solar cell).

레이저를 이용하여 분할한 태양전지와 저온 및 저손실 방식으로 분할한 태양전지의 기계적 특성을 비교함으로써 분할 과정에서 발생할 수 있는 미세 크랙으로 인한 태양전지 특성을 비교 분석하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서는 M10 (182 mm × 182 mm) 면적의 양면형 passivated emitter and rear cell (JS Solar Co., Ltd. China)을 사용하였다. 기존의 IR 레이저 스크라이빙 방식을 통한 태양전지 분할은 IR 레이저 장비(JYAS-1500-210, Wuxi New Glenn Intelligent Technology Co., Ltd. China)를 사용하였으며, IR 레이저 스캔 속도는 500 mm/s로 고정하였다. IR 펄스 파워는 130 W에서 170 W 까지 총 5가지 조건으로 설정하여 가변적으로 실험을 진행하였다.

새롭게 제시된 저온 및 저손실 스크라이빙 방식에서는 저온 및 저손실 스크라이빙 장비(SSC-8000B, Suzhou Autoway System Co., Ltd. China)를 사용하였다. IR 펄스 파워는 40 W에서 50 W으로 가변하였으며, IR CW 파워는 130 W에서 160 W로 설정하여 스크라이빙을 진행하



**Fig. 2.** Three-point bending test equipment used to evaluate the impact of the splitting method on the durability of solar cells.

였다.

전기적 특성을 평가하기 위해 솔라시뮬레이터(WXS-155S-L2, Wacom, Japan)를 이용하여 광 상태와 암 상태에서 전기 특성을 측정하였다. 또한 측정된 암전류-전압 특성으로부터 각 분할 방식에 따른 역포화 전류밀도( $J_0$ )를 추출하였다.

분할 방식에 따른 태양전지의 내구성에 미치는 영향을 평가하기 위해 3점 굽힘 시험(TCN-T001, TEST ONE Co., Ltd, Korea)을 진행하였으며 저온 및 저손실 스크라이빙 방식과 기존 방식으로 분할된 태양전지를 대상으로 그림 2처럼 시험 시편을 3점굽 시험기의 하부 지지점 위에 올려두고 상부 지점에서 일정한 속도로 하중을 가할 수 있도록 위치시켜 파괴응력을 측정하였다. 각 분할 방식에 따른 파괴응력을 비교 분석함으로써, 분할 과정에서 발생할 수 있는 미세 크랙과 같은 물리적 손상의 영향으로 기계적 강도를 계산하였다.

## 3. 결과 및 고찰

그림 3은 기존 레이저 분할 방식의 IR 레이저 출력을 130~170 W로 가변한 분할된 태양전지의 전후의 출력 변화를 보여준다. IR 레이저 출력을 가변 범위인 130~170 W 기반으로 분할 전후를 비교하였을 때, IR 레이저 150 W 경우가 분할 전후의 출력 손실이 2.141%로 가장 낮음을 표 1을 통해 확인할 수 있다. 따라서 IR 태양전지의 열화에 가장 영향을 주는 IR 레이저 출력이 150 W일 때 출력 손실이 낮았음을 확인할 수 있었다. 하지만 레이저 분할에 가변 조건은 공정 속도 또한 존재하므로, 공정 속도를 가변하여 최적화 조건을 확인하고자 했다. 그림 4는 공정 속도에 따른

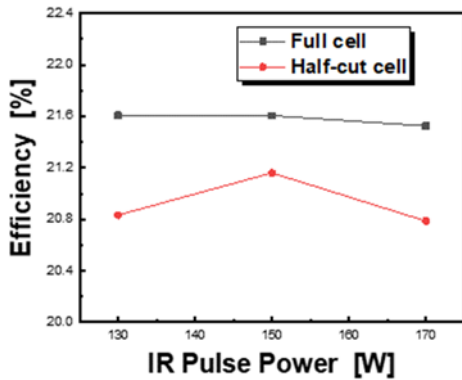


Fig. 3. Efficiency variation of solar cells according to IR pulse laser power before and after division by conventional laser splitting method.

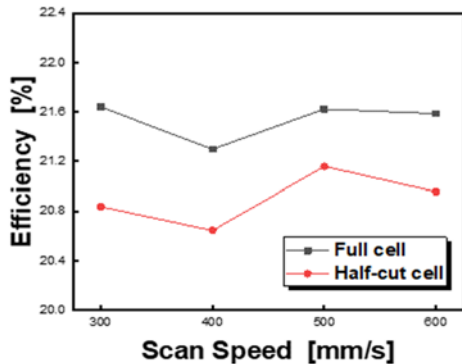


Fig. 4. Efficiency variation of solar cells according to scan speed before and after conventional laser cell division.

분할 전후 출력 변화를 비교했다. 공정 속도를 300 mm/s 에서 600 mm/s 범위를 지정하여 분할 전후 효율 손실을 비교하였을 때, 공정 속도가 500 mm/s인 조건이 2.140% 효율 손실이 가장 낮음을 표 2를 통해 확인할 수 있다. 이를 통해 기존 레이저 분할 방식의 경우 IR 레이저 출력이 150 W, 공정 속도가 500 mm/s일 때 효율 저하가 가장 적은 조건이다.

반면 저온 및 저손실 분할 방식의 경우, 기존 레이저 분할 방식과 다르게 레이저 헤드를 2개 사용하기 때문에 분할 과정에서 효율 저하와 관련된 영향을 주는 조건을 IR 레이저 파워, IR CW 레이저 파워, IR CW 공정 속도로 정하여 최적화 및 출력 분석을 하였다.

그림 4는 태양전지의 단면에 직접적인 열화를 주는 IR 레이저 파워를 40~50 W으로 가변 범위로 설정하여, 태양전지의 분할 전후 출력 변화를 비교하였다. 가변 조건인 IR 레이저의 파워가 50 W일 때, 분할 전후 효율 저하율이

Table 1. Efficiency and FF loss rate according to IR pulse variable conditions.

IR pulse	Full cell		Half-cut cell		FF loss [%]	Eff loss [%]
	FF [%]	Eff [%]	FF [%]	Eff [%]		
130	79.412	21.607	79.279	20.803	0.168	3.580
150	79.993	21.623	77.549	21.161	3.056	2.141
170	79.359	21.525	79.201	20.787	0.198	3.429

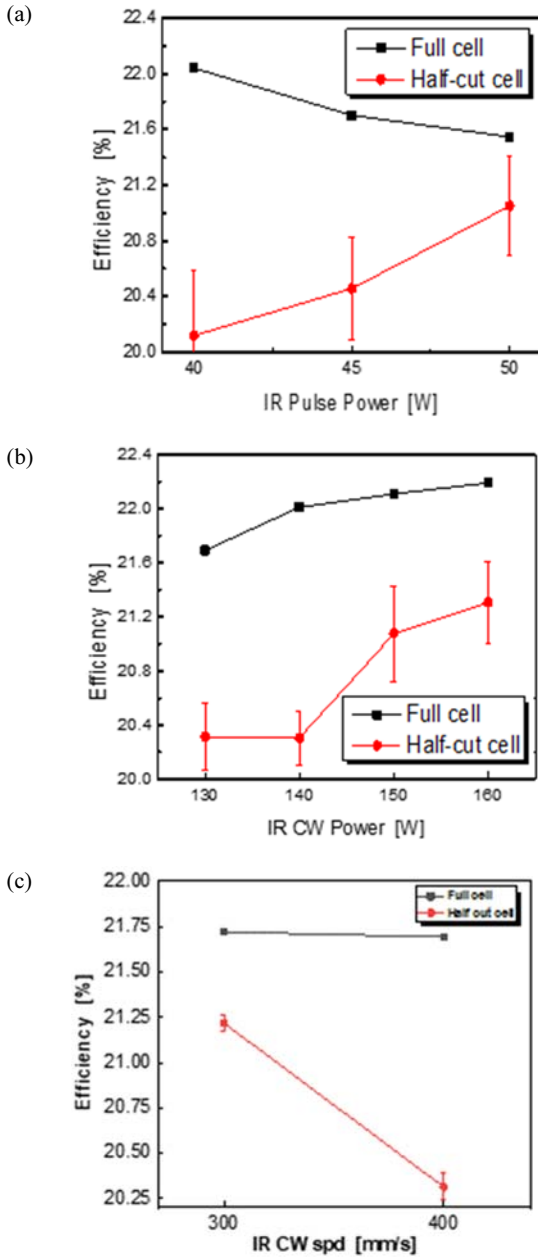
Table 2. Efficiency and FF loss rate according to IR scan speed variable condition.

Scan speed	Full cell		Half-cut cell		FF loss [%]	Eff loss [%]
	FF [%]	Eff [%]	FF [%]	Eff [%]		
300	79.13	21.64	77.223	20.837	2.409	3.711
400	78.366	21.699	77.904	20.646	0.59	3.069
500	79.993	21.623	77.549	21.161	3.056	2.141
600	79.989	21.586	78.861	20.957	1.410	2.914

Table 3. Efficiency changes according to scanning speed of IRCW laser before and after NDC cell division.

IR pulse [W]	Full cell		Half-cut cell		FF loss [%]	Eff loss [%]
	FF [%]	Eff [%]	FF [%]	Eff [%]		
40	81.675	22.041	76.927	20.119	6.172	9.552
45	80.384	21.702	77.893	20.457	3.199	6.087
50	79.371	21.546	80.347	21.050	-1.214	2.357

2.357%로 가장 낮았음을 표 3을 통해 확인할 수 있다. IR 레이저와 다르게 태양전지 전반적으로 열 스트레스를 주는 IR CW 레이저의 파워를 가변 조건으로 태양전지의 출력 전후를 비교하였다. IR CW 레이저 파워의 경우 130~160 W로 범위를 정하여 진행하였으며, 그림 4와 표 4를 통해, IR CW 레이저가 160 W의 파워로 분할하였을 때, 분할 전후 효율 저하율이 4.165%로 가장 낮았다. 또한, IR CW 스캔 공정 속도를 공정 변수로 추가하여 진행하였다. IR CW 레이저의 공정 속도를 300~400 mm/s으로 정하여 분할 전후를 비교하였을 때, IR CW 레이저의 공정 속도가 300 mm/s일 때, 분할 전후의 효율 저하율이



**Fig. 5.** (a) Efficiency variation of solar cells according to IR CW laser power before and after NDC cell division, (b) efficiency variation according to IR laser power before and after NDC cell division, and (c) efficiency variation of IR CW laser according to scan speed before and after NDC cell division.

로 가장 작음을 그림 4와 표 5를 통해 확인할 수 있다. 앞서 진행한 가변 공정 조건에 기반한 저온 및 저손실 분할 방식의 경우 IR pulse power가 45 W, IR CW 레이저의 파워가 160 W, IR CW 레이저의 공정 속도가 300 mm/s일 때 출력 저하가 가장 적은 조건이다.

**Table 4.** Changes in solar cell efficiency according to IRCW laser power before and after low-temperature and low-loss battery division.

Scan speed	Full cell		Half-cut cell		FF loss [%]	Eff loss [%]
	FF [%]	Eff [%]	FF [%]	Eff [%]		
130	79.853	21.692	77.832	20.314	2.596	6.788
140	80.712	22.015	77.866	20.305	3.656	8.420
150	81.057	22.113	79.977	21.076	1.351	4.921
160	81.436	22.195	79.437	21.307	2.516	4.165

**Table 5.** Efficiency changes according to scan speed of IR CW laser before and after NDC scribing.

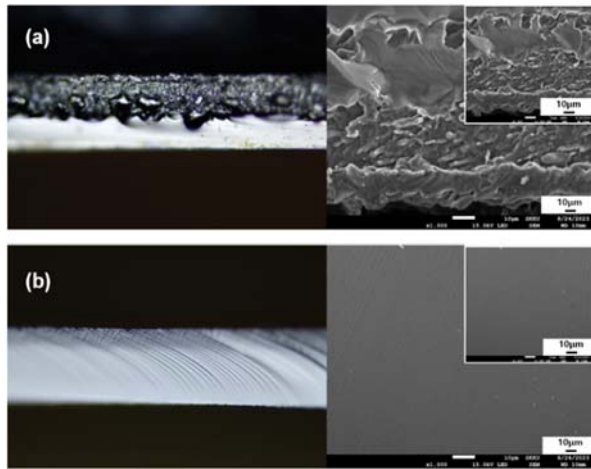
Scan speed	Full cell		Half-cut cell		FF loss [%]	Eff loss [%]
	FF [%]	Eff [%]	FF [%]	Eff [%]		
300	80.92	21.568	79.215	21.310	2.107	1.196
400	79.853	21.693	77.832	20.314	2.596	6.788

레이저 분할에 따른 태양전지의 단면 손상을 확인하기 위해서 전자현미경과 SEM으로 단면을 비교하였다. 그림 6은 기존 분할 방식으로 분할된 태양전지의 손상된 단면과 저온 및 저손실 방식으로 분할된 태양전지의 손상된 단면으로, 저온 및 저손실 방식으로 분할된 태양전지 단면이 레이저 열로 인한 데미지가 적음을 확인할 수 있으나, 단면 손상으로 발생된 누설 전류를 추가로 비교 분석을 진행하였다. 누설 전류는 태양전지의 단면 손상과 연관되어 있으며, 이 누설 전류는 태양전지의 효율 감소에 크게 영향을 미친다 [2-4]. 이처럼 태양전지의 효율 감소에 영향을 주는 누설 전류(역포화전류밀도,  $J_0$ )를 추출하기 위해서는 다이오드 방정식 (1)을 기반으로 유도된다 [5-7].  $I_0$ 를 유도하기 위해 자연로그를 양변으로 취하여 식 (2)로 나타낼 수 있다 [5,6]. 식 (2)는  $I_0$ 는 포화전류,  $T$ 는 온도,  $n$ 은 이상 계수이며,  $q$ 는 전하량( $1.6021 \times 10^{-19}$  J/K),  $k$ 는 볼츠만 상수 ( $1.3806 \times 10^{-23}$  J/K)이다 [8,9].

$$I = I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

$$\ln I = \ln I_0 + \left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2)$$

유도한 식 (2)에서  $J_0$ 를 구하기 위해 암 상태에서 측정한  $V$ 와  $I$ 를 매개변수(parameter)로 설정하여 다중 선형 회귀



**Fig. 6.** (a) (left) Cross-section cut by IR laser (X20), (right) cross-section cut by IR laser SEM (X1000) and (b) (left) cross-section cut by NDC scribing equipment (X20), (right) cross-section cut by NDC scribing equipment (X1000).

모델의 형태로  $J_0$  값을 추출하였다 [6]. 이때, 추출된  $J_0$ 의 데이터의 적합도를 판단하기 위해서는 선형 회귀(linear regression) 모델에서 적합도를 판단할 수 있는 결정계수  $R^2$ 의 수치가 0.9 이상이어야 한다 [9,10]. 결정계수  $R^2$ 는 변수 영향을 인과관계를 수치로 나타내는 방식으로, 식 (3)은 측정값에서 측정값의 평균을 뺀 수치의 총량을 나타낸 값을 기준으로 측정값에서 추정값을 뺀 수치의 총량을 나타내는 식 (4)를 나눠 식 (5)를 통하여 나타낸다. 이렇게 유도된  $R^2$  값이 0.9를 넘도록 적합시켰다 [9].

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \tag{3}$$

$$SSR = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \tag{4}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \tag{5}$$

**Table 6.** Comparison of  $J_0$  before and after NDC scribing split and  $J_0$  before and after IR scribing split.

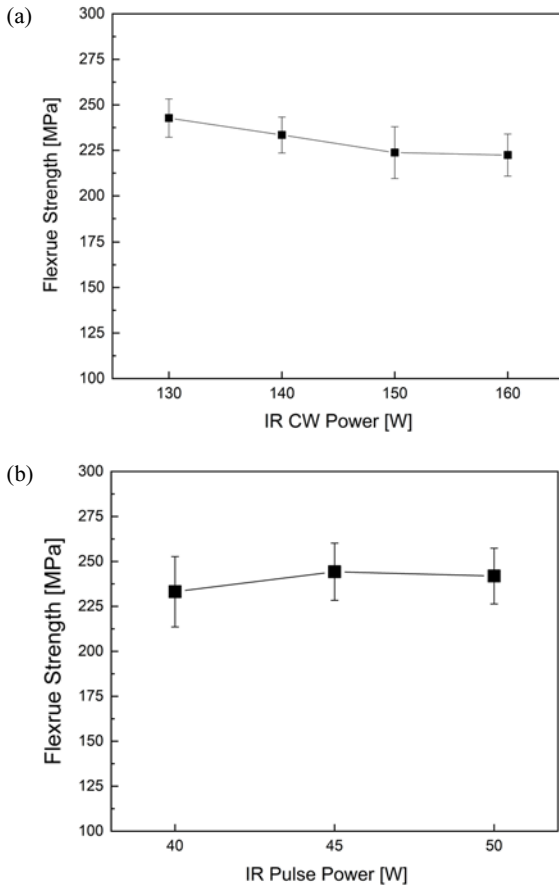
Type		$J_0$ (A/cm <sup>2</sup> )
NDC	Full cell	3.74305×10 <sup>-8</sup>
	Half-cut cell	4.90699×10 <sup>-8</sup>
IR	Full cell	2.22529×10 <sup>-8</sup>
	Half-cut cell	4.92518×10 <sup>-8</sup>

**Table 7.** Comparison of mechanical strength of NDC scribing method and conventional laser scribing method.

Type/parameter	Full cell	Half-cut cell	
		IR	NDC
Flexural strength [MPa]	272.63	199.74	244.79
Flexural strength degradation ratio [%]	-	-26.74%	-10.21%

결정계수가 0.9가 넘도록 적합시킨 누설 전류의 값을 레이저 분할 방식에 따라 비교하였다. 기존의 레이저 분할 방식으로 분할된 태양전지의 누설 전류 값이 저온 및 저손실 분할 장비로 분할한 태양전지의 누설 전류 값보다 4.69E-06 더 높은 수치를 가지고 있음을 표 6을 통해서 확인할 수 있다. 따라서 기존 레이저 분할 방식에서 발생하는 태양전지의 누설 전류가 저온 및 저손실 분할 방식에서 발생하는 태양전지의 누설 전류가 많다는 것을 알 수 있다. 또한, 분할 과정에서 발생할 수 있는 미세 균열은 모듈 제작 및 스트링 제작할 때 태양전지의 내구성에 영향을 주기 때문에 추가적으로 3점 굽힘 시험을 진행하였다 [4]. 공정 전의 태양전지의 굽힘 강도 저하(flexural strength degradation)와 기존 분할 방식으로 분할된 태양전지의 굽힘 강도 저하를 비교했을 때, -26.74%로 분할 전 태양전지에 비해 낮은 기계적 강도를 보였다. 공정 전의 태양전지와 저온 및 저손실 분할 장비로 분할한 태양전지의 굽힘 강도 저하를 비교했을 때, -10.21%로 분할 전 태양전지에 비해 낮은 기계적 강도를 보이는 경향성을 보였다. 하지만 저온 및 저손실 분할 장비로 분할한 태양전지와 기존 분할 방식으로 분할한 태양전지의 저하(degradation)를 비교했을 때, 저온 및 저손실 분할 장비를 이용한 경우 16.53% 높은 굽힘 강도 저하를 보임을 표 7을 통해 확인할 수 있다.

저온 및 저손실 분할 장비로 분할한 태양전지 역시, IR CW 레이저의 power, IR 레이저의 power에 따라 기계적 강도가 다르므로 추가 비교 분석을 진행하였다. IR CW 레이저의 파워는 열 스트레스를 주는 동시에 열 균열(thermal cracking)을 발생할 수 있도록 간접적으로 영향을 주기 때문에, IR CW 레이저의 파워를 130~160 W 범위에 따라 분할된 분할 태양전지로 3점 굽힘 시험을 진행하였다. 그림 7은 IR CW 레이저 파워를 가변함에 따른 분할된 태양전지의 굽힘 강도(flexural strength)를 비교한 그래프이다. IR CW 레이저의 130 W, 140 W에서 분할된 태양전지의 굽힘 강도는 감소하나, 150 W, 160 W의 조건에서는 비슷한 기계적 강도로 측정됨을 확인할 수 있다. 반



**Fig. 7.** (a) Mechanical strength according to IR CW power variable conditions and (b) mechanical strength according to IR pulse power variable conditions.

면, 셀에 직접적으로 균열을 만들어 직접적으로 영향을 주는 IR 레이저 파워를 40~50 W로 가변하여 기계적 강도 테스트를 진행하였다. 그림 7을 통해, IR 레이저의 파워를 가변하여 분할한 태양전지들의 굽힘 강도는 크게 차이 나지 않았음을 확인할 수 있다. 따라서 IR CW 레이저의 파워가 160 W에 가까워질수록 저온 및 저손실 분할 장비를 이용한 태양전지의 기계적 강도는 조금씩 감소하는 경향을 보이나, 이 외의 다른 공정 변수에 따른 기계적 강도 저하는 확인되지 않았다.

#### 4. 결론

기존 분할 방식으로 진행하였을 때, IR 레이저의 파워가 150 W, IR 레이저의 공정 속도가 500 mm/s일 때 출력 저하가 가장 낮은 조건이며, 저온 및 저손실 레이저 분할 방

식의 경우 IR 레이저 파워가 45 W, IR CW 레이저 파워가 130 W, IR 레이저 공정 속도 300 mm/s일 때 출력 저하가 가장 낮은 조건임을 확인할 수 있었다. 위의 가변 조건들을 통해 최적화된 조건을 기반으로 기존 분할 방식으로 분할할 태양전지 출력 손실률이 저온 및 저손실 분할 방식으로 분할한 태양전지 출력 손실률보다 0.94% 높았으며, 누설 전류도  $4.69E-06$  더 컸다. 이를 통해 기존 분할 방식으로 분할하였을 때, 태양전지의 단면이 새롭게 고안된 저온 및 저손실 분할 방식보다 더 손상됨을 확인할 수 있다. 또한, 저온 및 저손실 분할 방식으로 분할된 태양전지와 기존 방식으로 분할한 태양전지의 굽힘 강도를 비교해 보면 저온 및 저손실 분할 방식으로 분할한 태양전지가 더 우수한 기계적 강도를 가지고 있다. 따라서 저온 및 저손실 분할 방식은 기존의 분할 방식에 비해 태양전지에 손상을 주지 않아 출력 저하율이 적다.

#### ORCID

Jaehyeong Lee

<https://orcid.org/0000-0003-2918-4694>

#### 감사의 글

본 연구는 한국에너지기술평가원의 '태양광 설치단가와 LOCE 경쟁력 확보를 위한 700 W+ 고출력 모듈 개발 및 양산성 검증'(과제번호: 2022303001 0180)의 일환으로 수행되었습니다. 본 연구는 2023년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(RS-2023-00266248).

#### REFERENCES

- [1] J. S. Park, W. J. Oh, S. H. Lee, and J. H. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **32**, 187 (2019). doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2019.32.3.187>
- [2] J. Kim, S. Ur, D. Lim, and J. Lee, *J. Korean Sol. Energy Soc.*, **43**, 63 (2023). doi: <https://doi.org/10.7836/KSES.2023.43.3.063>
- [3] Z. Otgongerel, J. Moon, D. Y. Jun, G. Park, H. Nam, O. Kwon, H. Lim, and S. H. Kim, *J. Korean Phys. Soc.*, **83**, 437 (2023). doi: <https://doi.org/10.1007/s40042-023-00910-x>
- [4] S. Hwang and Y. Kang, *Energy Rep.*, **10**, 678 (2023). doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.07.023>
- [5] S. E. Lee, J. S. Park, W. J. Oh, and J. H. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **33**, 291 (2020).

- doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2020.33.4.291>
- [6] E. B. Noh, J. S. Bae, J. H. Kim, J. H. You, and J. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **34**, 433 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2021.34.6.5>
- [7] S. W. Choi, J. H. Ryu, and C. G. Lee, *J. Korea Acad. Ind. Coop. Soc.*, **12**, 847 (2011).  
doi: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.2.847>
- [8] P. Marić, I. Marasović, I. Bevanda, and T. Betti, *Proc. 2022 7th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)* (IEEE, Split/Bol, Croatia, 2022).  
doi: <https://doi.org/10.23919/splitech55088.2022.9854346>
- [9] C. G. Park and K. E. Lee, *J. Korean Data Inf. Sci. Soc.*, **25**, 305 (2014).  
doi: <https://doi.org/10.7465/JKDI.2014.25.2.305>
- [10] H. You, M. Kang, S. Yi, S. Hyun, and C. Kim, *J. Weld. Joining*, **39**, 36 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.5781/JWJ.2021.39.1.4>