

# 플렉서블 CIGS 태양전지의 굽힘 응력에 의한 셀 특성 변화 연구

김성준, 김제하<sup>ID</sup>

청주대학교 에너지융합학과

## Changes of Photovoltaic Properties of Flexible CIGS Solar Cell Under Mechanical Bending Stress

Sungjun Kim and Jeha Kim

Department of Energy Convergence Engineering, Cheongju University, Cheongju 28503, Korea

(Received September 26, 2019; Revised November 11, 2019; Accepted November 13, 2019)

**Abstract:** We studied the change of photovoltaic properties of a flexible  $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{Se}_2$  (CIGS) solar cell fabricated on polyimide by mechanical bending with curvature radii of 75 mm (75R) and 20 mm (20R). The flexible CIGS cells were flattened on a PET film, then placed and forced against the surface of a curved block fabricated with pre-designed curvatures. Both up (compressive) and down (tensile) bending were applied to a specimen of CIGS on PET with curvatures of 75R and 20R for 10,000 times and 2,000 times, respectively. From J-V measurements, we found that the conversion efficiency (Eff.) was reduced by 3% and 4% for up-and down-bending, respectively, at curvature 75R; it was greatly reduced by 15% for curvature 20R in the up-bending. However, the open circuit voltage ( $V_{oc}$ ) and short-circuit current density ( $J_{sc}$ ) seemed to change little, within 3%, for the applied mechanical stresses. The degradation in Eff. resulted from the deterioration of the series ( $R_s$ ) and shunt ( $R_{sh}$ ) resistances of the solar cell.

**Keywords:** Flexible CIGS, Solar cell parameters, Mechanical bending, Compressive and tensile stress, Curvatures

### 1. 서론

현재까지 주로 사용되는 실리콘 태양전지는 실리콘 웨이퍼를 기반으로 사용하여 제작되어 왔기 때문에 힘이 가해졌을 경우 칩사리 파손되는 문제점이 있었다. 파손을 포함한 외부 요인으로 인한 손상을 방지하기 위해 실리콘 태양전지는 저철분 유리wa와 ethylene vinyl acetate (EVA) 필름, 백시트 등의 필름으로 보호된 후 알루미늄 프레임으로 다시 감싸진다 [1]. 하지만 이러한 구조로 만들어진 실리콘 태양전지 모듈은 한 개당 20

kg에 육박하는 무게로써, 현재 많이 사용되고 있는 이동 수단, 웨어러블 기기 등의 용도에는 적합하지 않다. 이에 반해,  $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{Se}_2$  (CIGS) 혹은  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  (CZTS)의 박막 태양전지는 유연 기판에 제작이 가능하다 [2,3]. 두께가 200  $\mu\text{m}$ 인 결정 실리콘 태양전지에 비하여, 유연 기판 위에 총 두께가 약 5  $\mu\text{m}$ 인 박막형 태양전지는 굽힘에 의한 기계적 변형 에너지를 비교적 잘 흡수할 수 있어서 변형이 사라지면 원래대로 복원되는 특성이 있다 [4,5]. 하지만 힘의 정도 혹은 횟수에 따라 태양전지 내부 접합 간의 손상에 의해 태양전지의 성능이 나빠지고, 심하게는 전기적 단락이 될 수 있으므로 이에 대한 성능평가가 필요하다 [6,7].

본 연구에서는 유연 CIGS 태양전지를 굽힘 상태에서 원래의 상태로 되돌리는 굽힘 시험을 통해 각 곡률 반경(R)에 대한 굽힘에 의한 태양전지의 기계적 응력

✉ Jeha Kim; [jeha@cju.ac.kr](mailto:jeha@cju.ac.kr)

(stress)에 따른 특성곡선 변화를 조사하였다. 유연기판의 종류 중 하나인 polyimide (PI) 필름에 제작된 CIGS 태양전지를 곡률반경(R)과 굽힘 횟수(N)을 변화시켜 굽힘 테스트를 진행하였다. 태양전지의 N-전극 표면을 기준으로 위로 휘어지는 압축(compressive)응력이 가해지는 up-bending과 그 반대 방향으로 휘어지는 인장(tensile)응력이 가해지는 down-bending의 굽힘 방향과 R = 75 mm 및 R = 20 mm의 곡률반경, N = 10,000회까지의 굽힘 횟수의 조건에서 변화되는 태양전지의 특성 변화를 측정하고 분석하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 굽힘 시험 방식

굽힘 시험(bending test)에 사용된 태양전지는 굽힘에 자유로운 폴리이미드(polyimide, PI) 기판 위에 플렉시블 CIGS 태양전지를 이용하였다. 이 태양전지의 소자 구조 및 각 박막의 두께의 구성은 다음과 같았다. PI/Mo (500 nm)/CIGS (2.5  $\mu\text{m}$ )/CdS (40~60 nm)/i-ZnO (50 nm)/ITO (150 nm)/(Ni)Al/MgF<sub>2</sub> (110 nm)의 구조로 제작되었다 [3]. 이 유연 CIGS/PI 태양전지는 소다라임글래스(SLG) 기판 위에 고정되어 제작되었으며 소자 layer들의 CTE (coefficient of thermal expansion)의 불일치로 인하여 제작 후 그림 1(a)와 같이 압축응력을 받는 것으로 나타났다. 굽힘 시험 시료는 그림 1(a)의 셀을 편평한 PET 기판에 테이프를 사용하여 고정하여 제작하였다. 이 굽힘용 태양전지 시료는 그림 1(b)와 같이 미리 설정한 곡률반경(R)에 맞추어 일정 횟수(N)만큼 굽혀지도록 하였으며, 마이크로프로세서 구동을 제어하였다.

굽힘 시험은 두 방향으로 진행하였다. 태양전지의 N-전극 표면을 기준으로 위로 굽혀지는 up-bending (compressive), 그 반대인 down-bending (tensile)으로 구분하였다. 그림 1(b)는 태양전지가 up-bending 시 변형되는 형태를 보이고 있으며, down-bending은 시료의 방향이 반대가 되도록 위치시킨 후 진행하였다. 한편, down-bending 시 태양전지 전극을 보호하기 위하여 캡톤 테이프를 사용하였다. 각 굽힘 시험의 방향 별로 태양전지에 가해지는 힘은 그림 1(c)와 같이 up-bending에서는 압축응력(compressive stress)이, down-bending에서는 인장응력(tensile stress)이 가해진다.

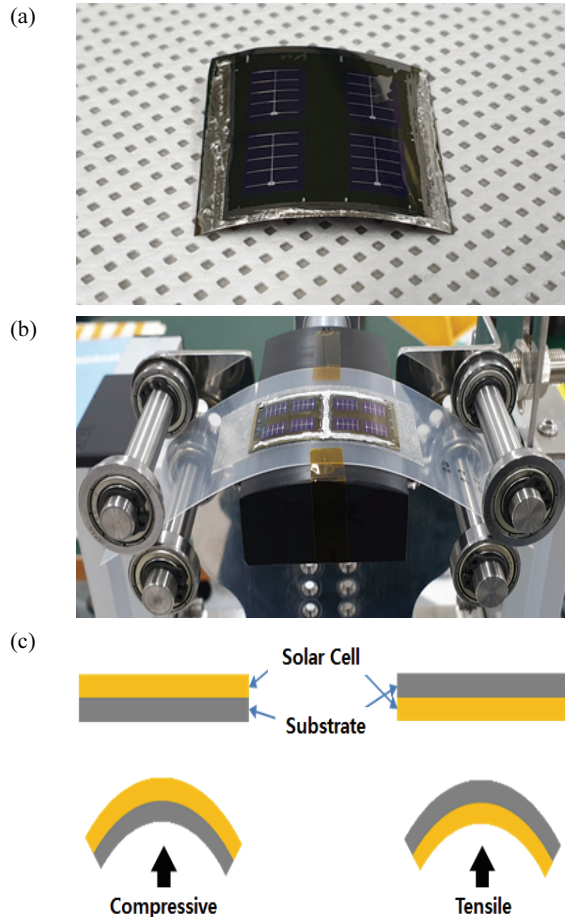


Fig. 1. (a) CIGS sample used for bending test, (b) changing form of solar cell during bending, and (c) stresses applied at each bending test.

### 2.2 굽힘 실험의 조건

본 실험에서는 미리 설정된 곡률반경으로 제작된 곡률블록(R = 75 mm, 20 mm, 폭 50 mm)을 제작하여 사용하였다. 이 곡률블록에 태양전지를 올리고, 편평한 태양전지(solar cell on PET) 면이 곡률블록에 완전히 접촉될 때까지 굽혔다 펴는 기계적인 변형을 반복하였다. 굽힘 시험은 마이크로프로세서를 이용하여 정해진 굽힘 횟수(N)가 될 때까지 반복 진행하였으며, 굽혀지는 속도는 표 1 및 표 2와 같이 0.311 cm/s의 속도로 진행하였다.

굽힘이 일정 횟수(N)로 진행된 후 태양전지의 특성곡선 변화를 1 sun STC조건에서 solar simulator를 사용하여 측정하였다. 해당 태양전지 특성 측정은 75R (R = 75 mm)의 곡률 조건 기준, bending test 전

**Table 1.** Experimental condition of bending test at R = 75 mm.

Classification	Unit	Value
Curvature	R (radius)	75
Bending times	Times	10,000
Bending speed	cm/s	0.311
Bending direction	-	Up/Down
Area of the cell	cm <sup>2</sup>	0.48

**Table 2.** Experimental condition of bending test at R = 20 mm.

Classification	Unit	Value
Curvature	R (radius)	20
Bending times	Times	2,000
Bending speed	cm/s	0.311
Bending direction	-	Up/Down
Area of the cell	cm <sup>2</sup>	0.48

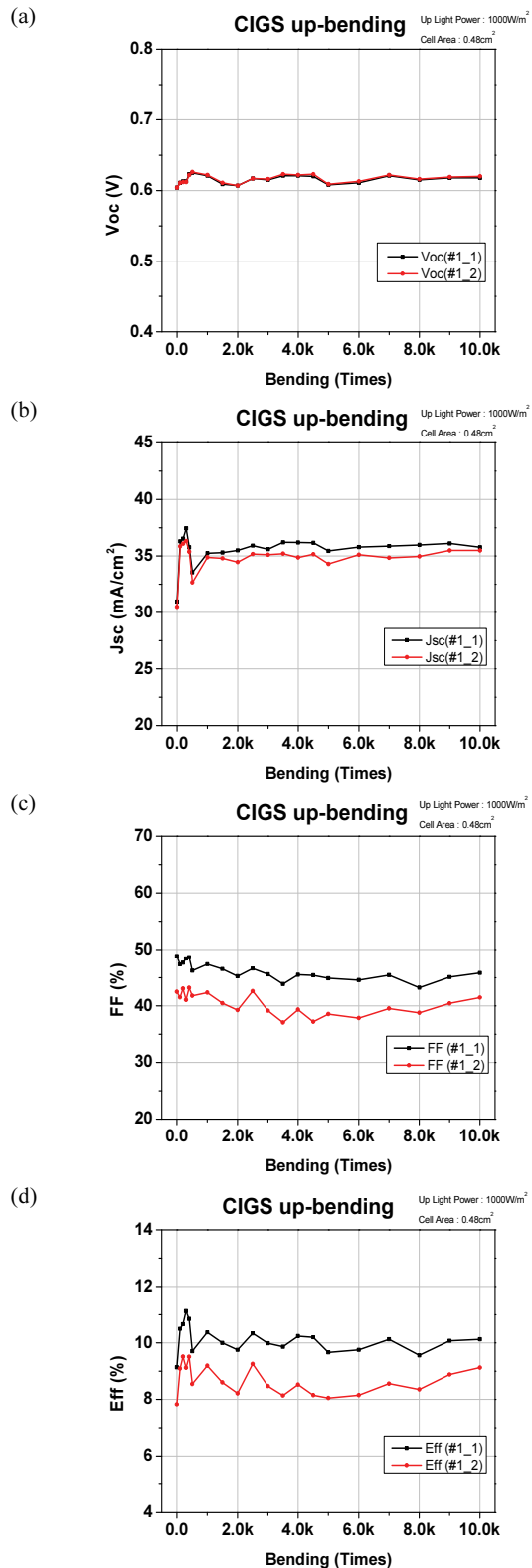
(N = 0회)에서 시작하여 (1) N = 500회까지는 매 100회 굽힘 후에, (2) N = 5,000회까지는 매 500회 굽힘 후에 그리고 (3) N = 10,000회까지는 매 1,000회 굽힘 후에 측정하였다. 그리고 R = 20 mm (20R) 곡률반경 조건 시험은 75R 곡률에서 N = 10,000회의 굽힘 시험이 끝난 시료를 대상으로 N = 400회까지 매 100회의 단위로 그리고 매 200회의 단위로 N = 1,800회까지 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 75R 곡률에서의 굽힘 시험 결과

그림 2는 R = 75 mm (75R)의 곡률 조건에서 진행된 up-bending 시험의 태양전지 변수들의 특성 변화이다. 태양전지의 개방전압( $V_{oc}$ )은 굽힘 전·후로 변하지 않는 경향을 나타냈고, 단락전류밀도( $J_{sc}$ ) 또한 초기의 측정 오차를 제외하였을 때, 변화가 아주 적은 것으로 나타났다. 충전율(FF)과 발전효율(Eff.)의 경우 3% 이내로 감소하는 변화를 관측할 수 있었다. 그 이유로는 그림 3(a)에서 나타나는 바와 같이 직렬저항( $R_s$ )의 소폭 상승과 병렬저항( $R_{sh}$ )의 감소가 영향을 끼친 것으로 보인다. 이로써 충전율의 변화와 결과적으로 발전효율의 변화에 영향을 준 것으로 분석된다.

한편, 반대 방향인 down-bending test에서는 그림 4와 같이 개방전압은 1%, 단락전류밀도는 3%의 미세



**Fig. 2.** Up-bending results at 75R vs. N; (a)  $V_{oc}$ , (b)  $J_{sc}$ , (c) FF, and (d) Eff.

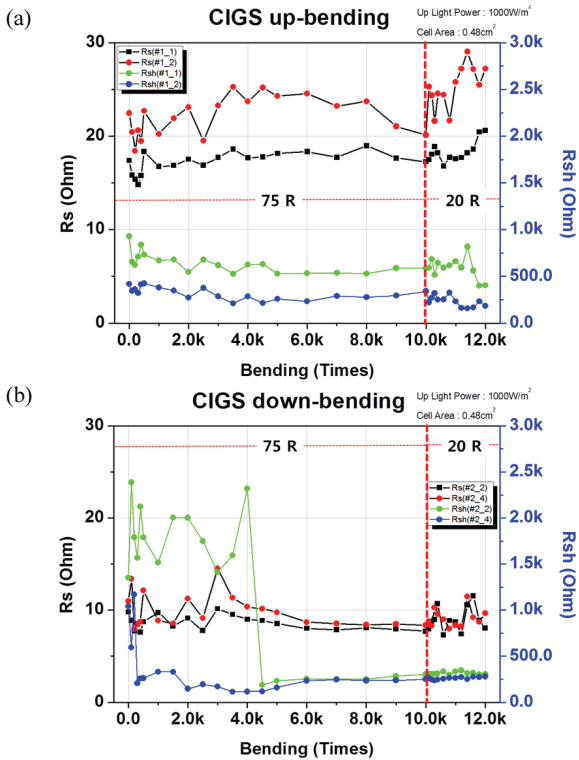


Fig. 3. Results of  $R_s$  and  $R_{sh}$  for (a) up-bending test and (b) down-bending test.

한 변화를 나타냈다. 그림 3(b)와 같이  $N = 4,500$ 회 굽힘 후 병렬저항이 약 77%로 크게 감소하였다. 하지만 직렬저항은 약 20%로 비교적 적은 감소를 보였다. 그렇지만 FF와 Eff.은 4% 정도의 비교적 적은 감소를 보였다.

75R, Up 및 Down 굽힘 시험에서 불안정한 초기 측정을 제외하면, 기계적 응력에 대하여  $V_{oc}$ 와  $J_{sc}$ 는 변화는 3% 이하로 변화하였으며, FF와 Eff.는 4% 이내의 소폭 감소 경향을 보였다. 이 변화는 직렬저항과 병렬 저항의 변화 경향과 유사한 것으로 나타났다.

### 3.2 20R 곡률에서의 굽힘 시험 결과

곡률반경  $R = 75$  mm (75R)에서  $N = 10,000$ 회 동안 굽힘 시험에서 4%의 태양전지 특성의 감소를 보인 동일 시료를 곡률반경  $R = 20$  mm (20R)으로 기계적인 응력을 증가시켰을 때 특성 변화를 확인하기 위하여  $N = 2,000$ 회의 굽힘 시험을 추가로 진행하였다. 그림 5는 20R에서 측정한 up-bending 시험 결과이다. 75R에서와 같이 개방전압( $V_{oc}$ )과 단락전류밀도( $J_{sc}$ )의 변화는 1% 이내로 거의 변화하지 않았고, 충전율(FF)은 각각

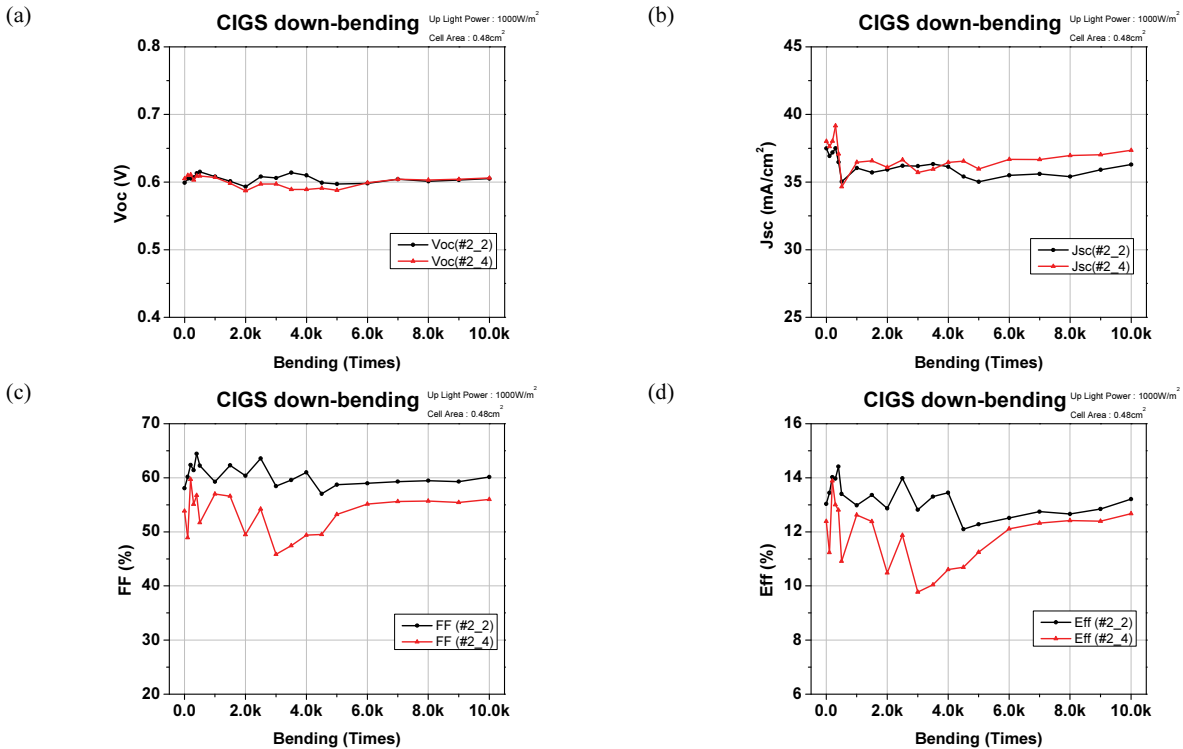


Fig. 4. Results of down-bending at 75R vs. N, (a)  $V_{oc}$ , (b)  $J_{sc}$ , (c) FF, and (d) Eff.

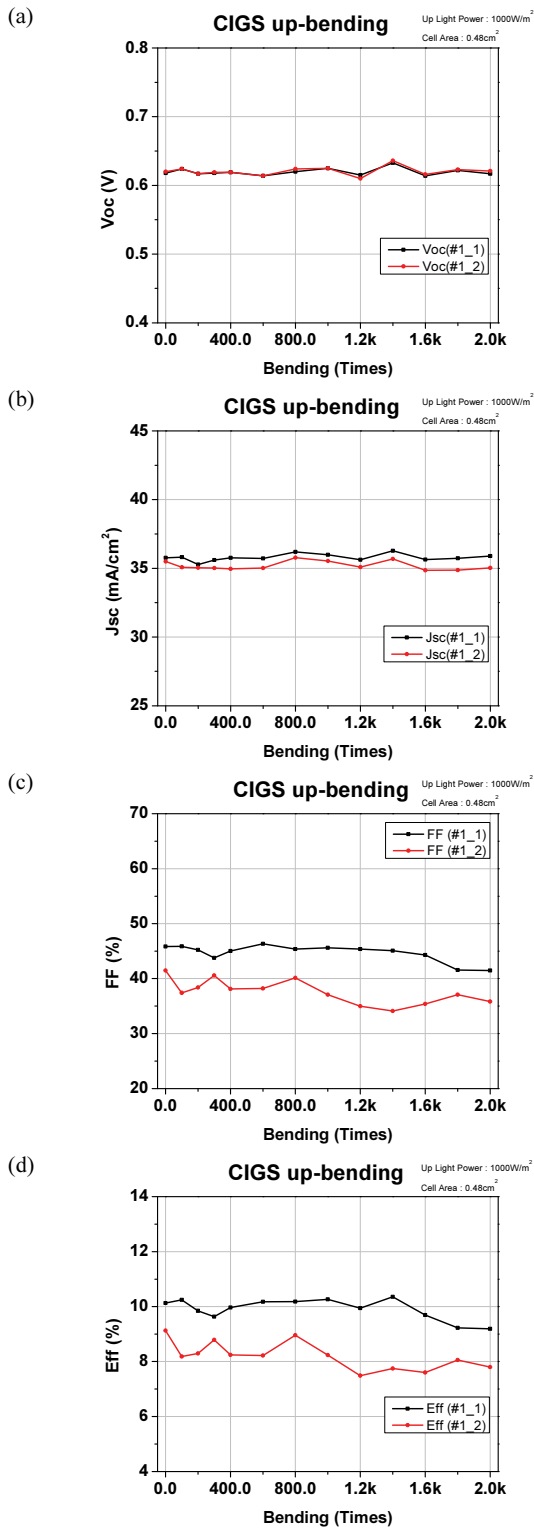


Fig. 5. Results of up-bending at 20R vs. N, (a)  $V_{oc}$ , (b)  $J_{sc}$ , (c) FF, and (d) Eff.

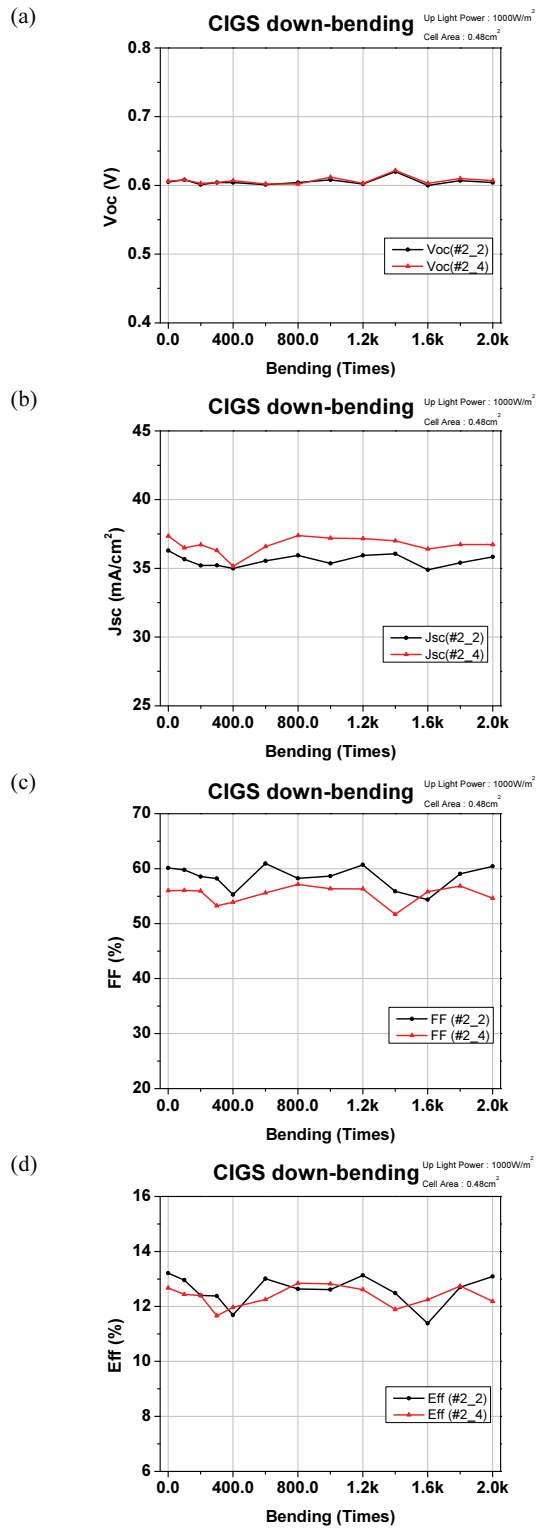


Fig. 6. Results of down-bending at 20R vs. N, (a)  $V_{oc}$ , (b)  $J_{sc}$ , (c) FF, and (d) Eff.

10%, 14% 감소하였다. 이는 그림 3(a)에서 나타나듯, 병렬저항이 각각 31%, 46%로 크게 감소함과 동시에 직렬저항이 각각 19%, 35% 증가한 때문으로 분석되며, 발전효율은 각각 9%, 15%으로 크게 감소하였다.

그림 6은 20R에서 시험한 down-bending 결과이다. 그림 5의 결과와 마찬가지로 개방전압( $V_{oc}$ )과 단락전류밀도( $J_{sc}$ )의 변화는 2% 이내로 아주 적은 변화만 관측되었다. 하지만 up-bending test와는 달리 병렬저항은 2%, 12% 증가, 직렬저항의 경우에는 4%, 16% 만큼 증가하였다. 결과적으로 충전률(FF)에는 변화가 없었으며, 발전효율(Eff.)은 각각 1%, 4% 감소하여 up-bending에 비해 적게 변화를 보였다.

그림 2, 그림 4와 같은 75R 곡률반경 조건의 굽힘 시험에 비하여 추가적으로 기계적 응력(mechanical stress)을 증가시킨 20R 곡률반경 조건의 굽힘 시험에서 태양전지의 발전효율이 더 감소하는 경향을 보였다. 개방전압( $V_{oc}$ )과 단락전류밀도( $J_{sc}$ )는 up- 및 down-bending에서 뚜렷한 변화는 보이지 않았다. 한편 up-bending (압축응력)에서 직렬저항( $R_s$ )과 병렬저항( $R_{sh}$ )의 변화가 커졌으며, 결과적으로 충전율(FF)과 발전효율(Eff.)가 급격히 감소한 것으로 분석된다.

이 플렉시블 태양전지는 그림 1(a)에 보인 바와 같이 압축응력(compressive stress)이 작용된 채로 제작되었다. 따라서 반대방향으로 응력이 가해지는 down-bending 시험에서 비교적 큰 감소를 보일 것이라 예상했으나, up-bending 시험에서, 또한 본래 받았던 힘보다 큰 압축응력이 작용하는 20R의 곡률 반경 환경에서, 발전효율(Eff.)이 최대 15%까지 현저히 감소하는 경향으로 나타났다.

#### 4. 결론

본 연구는 플렉시블 CIGS 태양전지 셀을 이용하여 75R과 20R 곡률반경의 굽힘 시험에서 태양전지 셀 특성 변화 거동을 조사하였다. 75R, up-(압축응력) 및 down-bending(인장응력) 시험 결과 충전율(FF)과 발전효율(Eff.)은 각각 3%, 4%의 작은 변화폭을 보였다. 기계적 응력이 증가된 20R up-bending 시험에서 병렬저항

( $R_{sh}$ )이 31%, 46%의 현저하게 감소하고 직렬저항( $R_s$ ) 역시 19%, 35%의 대폭 증가함으로써 충전율(FF)이 10%, 14% 감소하였고, 이로 인하여 발전효율(Eff.)이 9%, 15% 감소한 것으로 분석되었다. 굽힘 시험에 의하여 가해진 기계적 응력은 태양전지의 병렬저항( $R_{sh}$ )과 직렬저항( $R_s$ )의 열화를 촉진하였으며, 이는 태양전지의 발전효율 감소에 대한 직접적인 원인으로 작용하였다.

#### ORCID

Jeha Kim

<https://orcid.org/0000-0001-9022-2384>

#### REFERENCES

- [1] C. H. Kim, H. T. Jang, J. S. Park, J. K. Yoon, E. S. Noh, J. S. Park, and K. W. Koo, *Trans. Korean Inst. Elect. Eng.*, **67**, 448 (2018). [DOI: [https://10.5370/KIEE.2018.67.3.448](https://doi.org/10.5370/KIEE.2018.67.3.448)]
- [2] K. Kim, J. Kim, M. G. Gang, S. H. Kim, S. Song, Y. Cho, D. Shin, Y. J. Eo, I. Jeong, S. K. Ahn, A. Cho, J. Kim, S. Yoon, P. P. Choi, W. Jo, J. H. Kim, J. Gwak, and J. H. Yun, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **195**, 280 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.03.008>]
- [3] W. C. Tsai, S. R. Thomas, C. H. Hsu, Y. C. Huang, J. Y. Tseng, T. T. Wu, C. H. Chang, Z. M. Wang, J. M. Shieh, C. H. Shen, and Y. L. Chueh, *J. Mater. Chem. A*, **4**, 6980 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1039/C5TA09000H>]
- [4] B. J. Kim, D. H. Kim, Y. Y. Lee, H. W. Shin, G. S. Han, J. S. Hong, K. Mahmood, T. K. Ahn, Y. C. Joo, K. S. Hong, N. G. Park, S. Lee, and H. S. Jung, *Energy Environ. Sci.*, **8**, 916 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1039/C4EE02441A>]
- [5] A. Gerthoffer, F. Roux, F. Emieux, P. Faucherand, H. Fournier, L. Grenet, and S. Perraud, *Thin Solid Films*, **592**, 99 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2016.09.006>]
- [6] C. K. Cho, W. J. Hwang, K. Eun, S. H. Choa, S. I. Na, and H. K. Kim, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **95**, 3269 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.07.009>]
- [7] T. F. O'Connor, A. V. Zaretski, S. Savagatrup, A. D. Printz, C. D. Wilkes, M. I. Diaz, E. J. Sawyer, and D. J. Lipomi, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **144**, 438 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.09.049>]