

## 굽힘 시험에 의한 플렉시블 CZTS 태양전지의 I-V 특성 변화에 관한 연구

김성준<sup>1</sup>, 김제하<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>청주대학교 전자공학과 학생, <sup>2</sup>청주대학교 에너지융합학과 교수

## Change of I-V Properties of Flexible CZTS Solar Cell Through Mechanical Bending Test

Sungjun Kim<sup>1</sup>, Jeha Kim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Student, Department of Electronic Engineering, Cheongju University

<sup>2</sup>Professor, Department of Energy Convergence, Cheongju University

**요약** CZTS 태양전지는 Cu, Zn, Sn, Se, S으로 구성된 흡수층을 사용하는 박막 태양전지로, In, Ga이 사용되는 CIGS 태양전지보다 저렴하며 Pb, Cd이 사용된 페로브스카이트, CdTe 태양전지보다 친환경적이다. 본 연구에서 우리는 유연기판인 Mo foil 위에 제작된 유연 CZTS 태양전지를 지정된 곡률만큼 휘게 하는 bending test를 진행하였다. 태양전지에 압축응력이 가해지는 inner bending과 인장응력이 가해지는 outer bending의 방향에서 실험은 진행되었으며, 50 mmR의 곡률 반경으로 진행된 1,000 회의 굽힘 횟수 동안 태양전지의 효율은 최고 12.7%까지 감소하였으며, 두 방향 모두에서 효율 감소의 가장 큰 원인은 병렬저항의 큰 감소로 나타났다.

**주제어** : CZTS 태양전지, 기계적 굽힘 시험, 유연 태양전지, 유연기판, 신뢰성 시험

**Abstract** The CZTS solar cell is a thin film solar cell using an absorption layer composed of Cu, Zn, Sn, Se, and S, and is cheaper than a CIGS solar cell using In and Ga and more eco-friendly than a perovskite and CdTe solar cell using Pb and Cd. In this study, we conducted a bending test for flexible CZTS solar cells. Experiments were conducted in the direction of inner bending with compressive stress and outer bending with tensile stress, and during the number of bending 1,000 times with a radius of curvature of 50 mmR, the efficiency of the solar cell decreased by up to 12.7%, and the biggest cause of efficiency reduction in both directions was a large decrease in parallel resistance.

**Key Words** : CZTS solar cell, Mechanical bending test, Flexible solar cell, Flexible substrate, Reliability test

\*This research was partially supported by the Cheongju University Research Scholarship Grants in 2021.

\*Corresponding Author : Jeha Kim(jeha@cju.ac.kr)

Received January 25, 2022

Revised February 17, 2022

Accepted March 20, 2022

Published March 28, 2022

## 1. 서론

최근 산업 및 생활환경이 급격히 변화하며 발생하는 에너지 소비의 증가로 인해 환경문제가 조명받고 있다 [1]. 우리나라에서도 RPS (Renewable Portfolio Standard; 공급의무화) 제도 등의 지원을 시행하고 있다 [2]. CZTS 태양전지는 Cu, Zn, Sn, Se, S로 이뤄진 광흡수층으로 발전되는 박막 태양전지이다 [3-8]. In, Ga이 사용되는 CIGS 박막 태양전지, Pb, Cd가 사용되는 페로브스카이트, CdTe 태양전지들에 비해서 CZTS 태양전지는 저비용·친환경 소재를 사용하는 태양전지로 알려져 있고, 1.3 - 1.5 eV의 밴드갭에너지를 갖고 있으며 유연 기판에 제작하여 유연 태양전지로 사용될 가능성 또한 열려있다 [3, 7-8]. 하지만 박막 태양전지의 경우 PN 접합 및 전자 정공 수송을 위한 여러 층의 박막으로 구성되어 있어, 휘어지는 등의 형태 변화가 일어나면, 층 간 crack이 발생해 직렬저항 혹은 병렬저항 등을 포함한 태양전지의 특성에 변화가 생겨 태양전지의 효율에 영향을 끼칠 수 있다 [9-15]. 그러므로, 유연 태양전지의 굽힘 등의 형태 변화가 어떤 특성 변화를 일으키는지, 또한 이를 방지하기 위해서는 어떤 해결책이 필요한지에 관한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 자체 제작한 기계적 굽힘 시험 장비를 이용하여 유연 CZTS 태양전지 시료를 일정한 곡률로 굽힘 후에 펴는 무장력 굽힘 시험을 진행하였다. 유연 기판의 종류 중 하나인 Mo foil 위 제작된 CZTS 태양전지가 50 mmR의 곡률 반경에서 각각 압축응력과 인장응력이 가해지는 방향으로 각각 1,000회 씩 진행되었으며, 200회 씩의 단위에서 태양전지의 I-V 특성 및 각 지표를 측정하여 태양전지의 굽힘에 따른 I-V 특성 변화를 측정하고 분석하여 가장 취약한 요소를 결정하였다.

## 2. 실험 방법 및 조건

### 2.1 굽힘 시험의 방식 및 조건

굽힘 시험이 진행된 CZTS 태양전지는 유연 기판 중 하나인 Mo foil 위에 제작되었고, 해당 태양전지의 소자 구조는 Mo foil(100 nm) / NaF (10 nm) / Zn (300 nm) / Cu (300 nm) / Sn (300 nm) / CdS (50 nm) / ZnO (50 nm) / Al doped ZnO (300 nm) / Al (700 nm) [3] 이다. Fig. 1.(a)는 실험에 사용된 CZTS 태양전지이며, 크기는 25 mm × 25 mm 이다.

Fig. 1(b)와 같이 태양전지는 4개의 셀로 나뉘어져 있으며, 각 셀의 크기는 4.5 mm × 12.3 mm = 0.55 cm<sup>2</sup> 이다 [3]. Fig. 2는 굽힘 시험에 사용된 기계적 굽힘 시험 장비(bending machine)와 굽힘시험이 진행되는 방식을 나타낸 그림이다. Fig. 2.(a)의 bending machine에는 Fig. 2(b)의 시료 고정 파트가 있으며, Fig. 2(c)와 같이 시료가 고정된다. 이후 위·아래로 힘이 가해지며 Fig. 2(d)와 같은 압축응력이 가해지는 inner bending과 Fig. 2(e)와 같은 인장응력이 가해지는 outer bending이 진행된 후 다시 Fig. 2(c)의 형태로 돌아오는 것을 1회의 굽힘으로 설정하여 시험을 진행하였고, 가해지는 응력의 차이에 따른 특성 변화의 차이를 알고자 하였다.

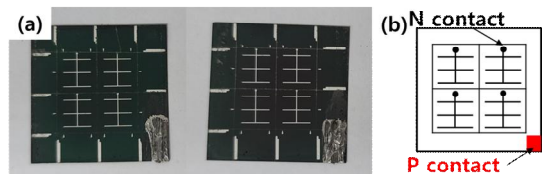


Fig. 1. (a) Flexible CZTS solar cells and (b) Schematic of the inner cells

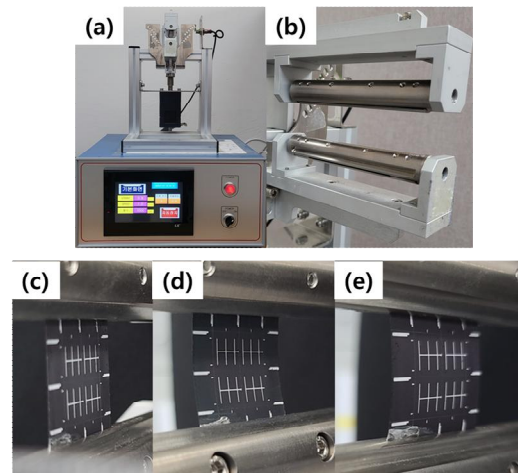


Fig. 2. (a) Mechanical bending test equipment, (b) sample holding part, (c) Sample form in an unbent state, (d) inner bending state and (e) outer bending state

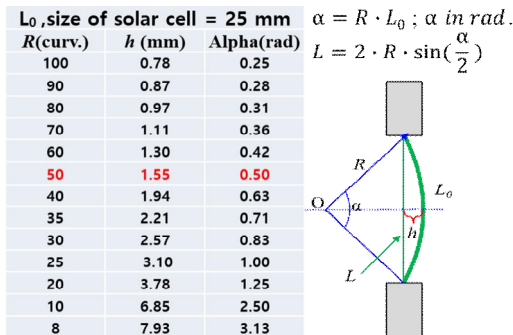
본 연구에서는 Fig. 2와 같이 태양전지의 상단과 하단 끝단을 고정하여 굽힘 시험을 진행하였으며, 평평하게 고정된 태양전지가 하단의 모터를 통해 하단의 부위가 위아래로 움직여 태양전지에 굽힘 방향별 응력을 주게 된다. 해당 실험의 조건은 아래의 Table 1과 같으며,

각각 굽힘 방향 별 1개 시료씩, 총 2개 시료에 대해 진행되었다. 특정 횟수에 굽힘에서 급격한 변화가 일어나는 등의 변수를 확인하기 위해 태양전지에 대한 특성 측정은 시험 전(0회), 200회, 400회, 600회, 800회, 1000회 굽힘마다 솔라 시뮬레이터(DKIVT-30 PV Cell IV tester, DENKEN)를 이용해 측정하였다.

**Table 1. Experimental condition of bending test at 50 mmR**

Classification	Unit	Value
Curvature	mmR	50
Number of bending	-	1,000
Bending speed	cm/s	0.311
Bending Direction	-	Inner / Outer
Length of the solar cell specimen	mm	25

굽힘 시험이 진행되는 곡률은 아래 Fig. 3과 같이 계산되었으며, 50 mmR의 곡률 하에서 태양전지의 기반인 Mo foil의 소성변형은 일어나지 않았다. 굽힘 시험은 시료가 L 위치에서 Lo의 위치로 굽혀지며 중앙으로부터 멀어지는 h 값을 조절해 50 mmR의 곡률(R)로 설정하였다.



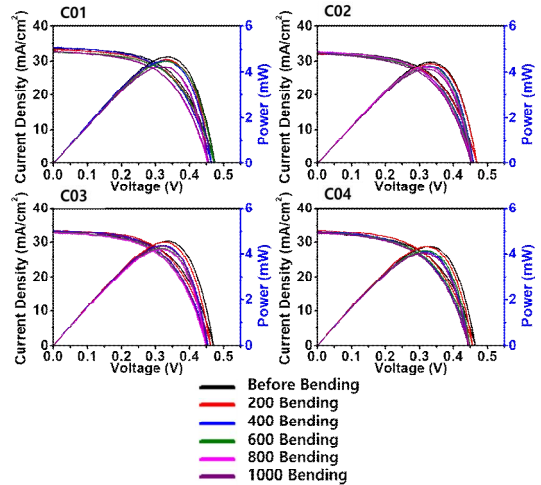
**Fig. 3. The curvature calculation method for the bending test**

### 3. 결과 및 분석

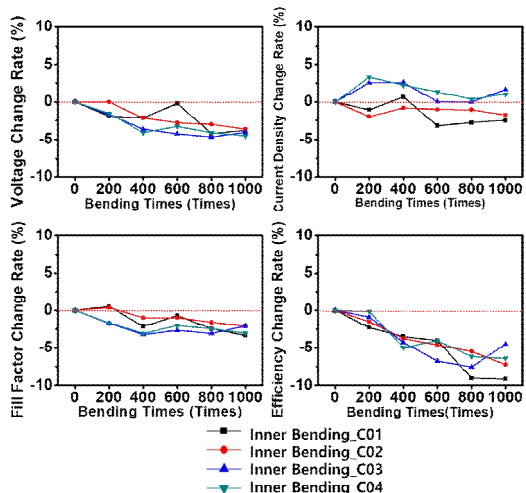
#### 3.1 Inner bending에 따른 태양전지 I-V 특성 변화

Fig. 4는 Inner Bending이 진행된 시료 내 4개 셀(C01 ~ C04)에 대해 굽힘 횟수별 태양전지의 I-V 곡선 변화도이다. 검정색의 굽힘 이전(before bending) 부터 보라색의 굽힘 종료(1,000 times bending)까지 개방전압과 단락전류밀도가 함께 감소하는 것이 확인되었다. Fig. 5는 각 굽힘 횟수별 시료의 Fig. 4의 I-V 특성 곡선으로부터 관측한 4개 셀의 개방전압, 단락전류밀도,

충진율, 효율의 변화를 상대적 증감률로 나타낸 그래프이다. 최종적으로 개방전압과 단락전류밀도는 각각 최대 4.54 %, 2.5 % 감소, 충진율의 경우 최대 3.32 % 감소했다. Fig. 6은 충진율에 영향을 끼치는 직렬저항과 병렬저항을 굽힘 횟수에 따른 상대적 비율로 나타낸 그래프이다. 약 5 % 내외로 증가하거나 오히려 감소하는 등의 큰 변화가 없었던 직렬 저항에 비해, 최대 35.66 %의 큰 폭으로 감소한 병렬저항을 확인할 수 있지만, 충진율의 측면에서는 3.32 %의 작은 폭의 감소만 있었고, 효율의 감소는 4.5 ~ 9.2 %에 그쳤다.



**Fig. 4. I-V curve change diagram of 4 cells (C01 ~ C04) in the sample that has undergone inner bending**



**Fig. 5. I-V property's change rate of 4 cells (C01 ~ C04) in the sample that has undergone inner bending**

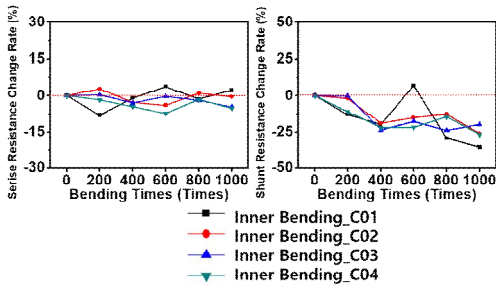


Fig. 6. Resistance change rate of 4 cells (C01 ~ C04) in the sample that has undergone inner bending

3.2 Outer bending에 따른 태양전지 I-V 특성 변화

Fig. 7은 Outer Bending이 진행된 셀(C05 ~ C08)에 대한 I-V 곡선 변화를 나타낸 그래프이다. Fig. 8. 은 각 굽힘 횟수별 개방전압, 단락전류밀도, 충전율, 효율의 변화를 굽힘 초기에 대비하여 나타낸 그래프이다. 개방전압과 단락전류밀도는 최대 6.31 %, 2.73 % 감소하였다. 충전율 감소는 6.18 %로 Inner Bending에 비해 86 % 더 크고, 효율의 경우 6.0 ~ 12.7 %로 Inner Bending 보다 크게 감소하였다. Fig. 9. 는 굽힘 시험에 따른 직렬저항과 병렬저항의 변화를 나타낸 그래프이다. 직렬저항은 최대 6.36 % 증가하였고, 병렬저항의 경우에는 최대 47.77 %으로 Inner bending에 비해 더 크게 감소하였다.

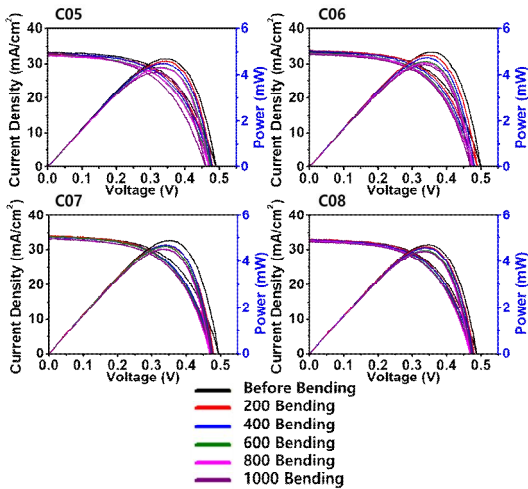


Fig. 7. I-V curve change diagram of 4 cells (C05 ~ C08) in the sample that has undergone outer bending

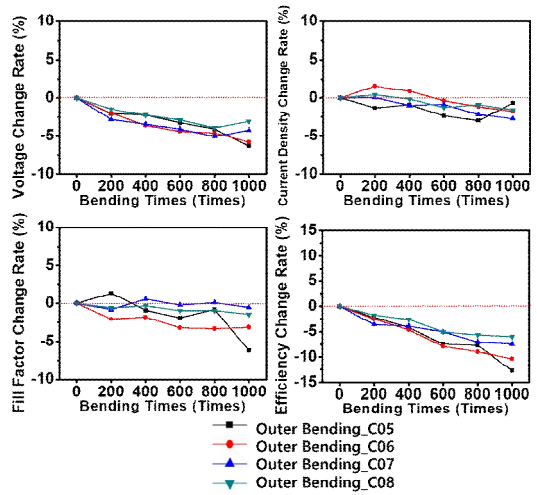


Fig. 8. I-V property's change rate of 4 cells (C05 ~ C08) in the sample that has undergone outer bending

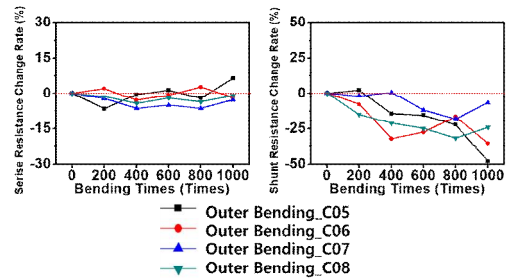


Fig. 9. Resistance change rate of 4 cells (C05 ~ C08) in the sample that has undergone outer bending

Table 2. Changes in species properties by bending test

Change Rate (%)	Inner bending		Outer bending	
	Min.	Max.	Min.	Max.
$\Delta n / n_0$	- 4.50	- 9.17	- 5.99	-12.70
$\Delta FF / FF_0$	- 2.07	- 3.32	- 0.56	- 6.18
$\Delta J_{sc} / J_{sc0}$	+ 1.65	- 2.50	- 0.67	- 2.73
$\Delta V_{oc} / V_{oc0}$	- 3.62	- 4.53	- 3.08	- 6.31
$\Delta R_{sh} / R_{sh0}$	-19.86	- 35.66	- 6.78	- 47.77
$\Delta R_s / R_{s0}$	- 5.25	+ 2.29	- 2.78	+ 6.36

$$Efficiency(\%) = \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times FF}{100mW/cm^2 \times cellarea(cm^2)} \times 100$$

$$FF(\%) = \frac{V_{max} \times I_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} \times 100$$

Table 2는 굽힘 1000회 후의 특성이 굽힘 전(0회)에 비해 변화한 값을 상대적으로 나타낸 표이며, 위의 식은 효율과 충전율의 계산식이다. 위 식과 같이 개방전압, 단락전류, 충전율이 곱해져 효율을 이루기 때문에, 감소에 가장 큰 영향을 끼친 것은 86 % 감소된 충전율의 영향으로 판단되며, 충전율이 감소된 원인은 최대전력점전압(Vmax)과 최대전력점전류(I<sub>max</sub>)의 감소로, 병렬저항의 감소와 직렬저항의 증가가 원인으로 판단된다[10-15].

#### 4. 결론

본 연구에서는 유연 CZTS 태양전지를 대상으로 응력을 가해 휘어지게끔 하였을 때, 태양전지의 특성 변화, 주된 효율 감소 원인을 파악하기 위해 50 mmR의 곡률 환경에서 진행된 굽힘 시험에 의해 압축응력과 인장응력이 가해지며 변화하는 태양전지의 I-V 특성을 조사하였다. Inner bending과 outer bending의 방향에서 1,000회간 진행된 굽힘 시험 이후, 효율과 병렬저항을 제외한 모든 지표의 변화는 6 % 이내로 크지 않았다. 하지만 병렬저항은 각각 35.66 %, 47.77 %의 큰 폭으로 감소했으며, 해당 감소로 인한 충전율의 변화는 최대 3.32 %, 6.18 % 감소하였으며, 이는 9.2 %, 12.7 %의 효율 감소가 나타나게 된 주요한 원인으로 판단된다.

태양전지가 굽혀지며 가해지는 응력에 의해 태양전지의 구조층 간의 안정도를 나타내는 척도인 병렬저항이 감소하고, 전자 분리부터 전극까지의 저항을 나타내는 직렬저항이 증가하였고, 이에 따라 충전율이 감소하여 효율의 감소가 일어났다. 만약 이후 지속적인 굽힘이 진행된다면 지속해서 결함이 발생해, 더 큰 저항 변화가 나타날 것이며, 더 큰 효율 변화가 발생할 것으로 예상되므로, 유연 태양전지 제작에는 직·병렬 저항의 손상을 최소화하기 위한 기판의 탄성 한계, 박막 태양전지의 층간 접합을 견고히 하여야 태양전지의 특성 감소를 방지할 수 있다.

#### REFERENCES

[1] J. H. Park, W. S. Nam & J. S. Jang. (2020). Urban Design cases study analysis using solar cell : Focusing on the use CIGS Thin Film Solar cell *Journal of the Korea Convergence Society*, 11(3), 163-170. DOI : 10.15207/JKCS.2020.11.3.163

[2] H. Baek & T. Kim. (2021). Analysis of the Effect on Domestic PV Capacity under the REC Revision and Mandatory Supply. *Journal of the Korea Convergence Society*, 12(6), 139-150. DOI : 10.15207/JKCS.2021.12.6.139

[3] K. J. Yang et al. (2019). Flexible Cu<sub>2</sub>ZnSn(S,Se)<sub>4</sub> solar cells with over 10% efficiency and methods of enlarging the cell area. *Nat Commun* 10, 2959. DOI : 10.1038/s41467-019-10890-x

[4] K. Dalapati et al. (2017), Impact of molybdenum out diffusion and interface quality on the performance of sputter grown CZTS based solar cells. *Sci. Rep.*, 7, 1350. DOI : 10.1038/s41598-017-01605-7

[5] C. Wadia, A. P. Alivisatos & D. M. Kammen (2009). Materials availability expands the opportunity for large-scale photovoltaics deployment. *Environ. Sci. Technol.* 43, 2072-2077. DOI : 10.1021/es8019534

[6] R. N. Gayen & T. Chakrabarti. (2019). Effect of series and shunt resistance on the photovoltaic properties of solution-processed zinc oxide nanowire based CZTS solar cell in superstrate configuration. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 100, 1-7. DOI : 10.1016/j.mssp.2019.04.018

[7] M. I. Khalilet et al. (2021). CZTS thin film solar cells on flexible Molybdenum foil by electrode position-annealing route. *Journal of Applied Electrochemistry volume 51*, 209-218. DOI : 10.1007/s10800-020-01494-1

[8] S. Lopez-Marino, et al. (2016) Alkali doping strategies for flexible and light-weight Cu<sub>2</sub>ZnSnSe<sub>4</sub> solar cells. *J Mater Chem A*, 4(5), 1895-1907. DOI : 10.1039/C5TA09640E

[9] S. J. Kim & J. Kim. (2020). Changes of Photovoltaic Properties of Flexible CIGS Solar Cell Under Mechanical Bending Stress. *Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers*, 33(3), 163-168. DOI : 10.4313/JKEM.2020.33.3.163

[10] B. M. Chan et al. (2019) Impact of Buffer Layer Process and Na on Shunt Paths of Monolithic Series-connected CIGSSe Thin Film Solar Cells. *Sci Rep* 9, 3666. DOI : 10.1038/s41598-019-38945-5

[11] K. Bouzidi, M. Chegaar & A. Bouhemadou. (2007). Solar cells parameters evaluation considering the series and shunt resistance. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91(18), 1647-1651.

DOI : 10.1002/pip.3102

- [12] P. Singh & N. M. Ravindra. (2012). Analysis of series and shunt resistance in silicon solar cells using single and double exponential models. *Emerging Materials Research*, 1(1), 33-38.  
DOI : 10.1680/emr.11.00008
- [13] A. D. Dhass, E. Natarajan & L. Ponnusamy. (2012). Influence of shunt resistance on the performance of solar photovoltaic cell. *2012 ICETEEEM*, 382-386.  
DOI : 10.1109/ICETEEEM.2012.6494522
- [14] E. L. Meyer & E. E Van Dyk. (2005). The effect of reduced shunt resistance and shading on photovoltaic module performance. *IEEE Conference, 2005*, 1331-1334.  
DOI : 10.1109/PVSC.2005.1488387
- [15] Y. Li et al. (2017). Ultra-high open-circuit voltage of perovskite solar cells induced by nucleation thermodynamics on rough substrates. *Scientific Reports*, 7, 46141.  
DOI : 10.1038/srep46141

김 성 준(Sungjun Kim)

[정회원]



- 2018년 2월 : 청주대학교 태양광 에너지공학과(공학사)
- 2020년 2월 : 청주대학교 에너지 융합공학과(공학석사)
- 2020년 2월 ~ 현재 : 청주대학교 전자공학과(박사과정)

- 관심분야 : 에너지, 태양광
- E-Mail : game8283@gmail.com

김 제 하(Jeha Kim)

[정회원]



- 1982년 2월 : 서강대학교 물리학과 (이학사)
- 1985년 2월 : 서강대학교 물리학과 (이학석사)
- 1993년 8월 : Univ of Arizona 박막물리학과(이학박사)

- 1993년 ~ 2012년 : 한국전자통신연구원 부장(연구직)
- 2006년 ~ 2007년 : University of California, Irvine 객원연구원
- 2010년 ~ 2012년 : 연합대학원(UST) 교수
- 2012년 ~ 현재 : 청주대학교 에너지광기술융합학부 교수
- 관심분야 : 에너지, 태양광
- E-Mail : jeha@cju.ac.kr