

# 저조도 환경에서의 염료감응형 태양전지를 활용한 발전소자에 관한 연구

## A study on a power plant using Dye-sensitized solar cells in low light environments

김 순 금\*, 백 성 준\*

Sun-Geum Kim\*, Sung-June Baek\*

### Abstract

Recently, attention has been focused on renewable energy and carbon neutrality to resolve fossil energy depletion and environmental problems. In addition, high-rise urban buildings and an increase in building energy are rapidly increasing. There are many restrictions on installing solar power in urban areas. In addition, as buildings become taller, a lot of low-light environments in which shade is formed occur. Therefore, in this study, we intend to develop a power plant capable of generating electric power in an outdoor low-light environment and indoor lighting environment. The power plant in a low-light environment used a dye-sensitized solar cell. A unit cell and a 20cmX20cm module were manufactured, and the electrical characteristics of the power plant were measured using light sources of LED, halogen lamp, and 3-wavelength lamp. The photoelectric conversion efficiency of the unit cell was 17.2%, 1.28%, 19.2% for each LED, halogen lamp, and 3-wavelength lamp, and the photoelectric conversion efficiency of the 20cmX20cm module was 10.9%, 8.7%, and 11.8%, respectively. In addition, the maximum power value of the module was 13.1mW, 15.7 mW, and 14.2 mW for each light source, respectively, confirming the possibility of power generation in a low-light environment

### 요 약

최근 화석에너지 고갈 및 환경 문제 해결을 위하여 신재생에너지와 탄소중립에 관한 관심이 집중되고 있다. 또한, 도시 건물의 고층화와 건물의 증가에 따른 건물에너지의 증가가 급속하게 되고 있다. 도시의 중심에 신재생에너지원인 태양광 발전을 설치하는데 있어서 많은 제약사항이 있으며, 건물의 고층화가 됨에 따라 그늘이 형성되는 저조도 환경이 많이 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 실외의 저조도 환경 및 실내의 조명 환경에서 전력발생이 가능한 발전소자를 개발하고자 한다. 저조도 환경에서의 발전소자는 태양전지의 종류중에 하나인 염료감응형 태양전지를 활용하고자 한다. 염료감응형 태양전지의 단위셀과 20cmX20cm 모듈을 제작하였고, LED, 할로겐 램프, 3파장 램프의 광원을 활용하여 발전소자의 전기적 특성을 측정하였다. 단위셀의 광전변환효율은 LED, 할로겐 램프, 3파장 램프별로 17.2%, 1.28%, 19.2%로 결과를 나타냈으며 20cm×20cm 모듈의 광전변환효율은 각각 10.9%, 8.7%, 11.8%의 결과를 나타내었다. 또한 모듈의 최대전력값은 광원별로 각각 13.1mW, 15.7 mW, 14.2 mW로서 저조도 환경에서 발전 가능성을 확인하였다.

*Key words : Power plant, Dye-sensitized solar cells, low light environments, Solar module, Energy recycling*

\*School of Electronics and Computer Engineering, Chonnam National University

★ Corresponding author

E-mail : tozero@chonnam.ac.kr, Tel : +82-62-530-1795

※ Acknowledgment

Manuscript received May. 11, 2021; revised Jun. 8, 2021; accepted Jun. 15, 2021.

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.

I. 서론

최근 화석에너지 고갈 및 환경 문제 해결을 위하여 신재생에너지와 탄소중립에 관한 관심이 집중되고 있다. 또한, 도시 건물의 고층화와 건물의 증가에 따른 건물에너지의 증가가 급속하게 되고 있다. 도시의 중심에 신재생에너지원인 태양광 발전을 설치하는데 있어서 많은 제약사항이 있으며, 건물의 고층화가 됨에 따라 그들이 형성되는 저조도 환경이 많이 발생하게 된다. 또한 최근 스마트 기기 보급 및 기능 발전에 따라 사물에 센서를 부착해 실시간 관리가 가능한 사물인터넷(Internet of Things, IoT) 관련 기술의 중요성이 증가하고 있으며 실내에서 소비되는 에너지(빛, 열, 진동 등)를 변환하는 방법에 대하여 큰 관심을 받고 있다[1-3]. 실내에서 소비되는 에너지 중 20%를 차지하는 조명기기의 소비전력을 재활용은, 향후 산업 trend와도 융합할 수 있는 적합한 에너지 절감 프로젝트 설정이 가능하며, 독립전원 형태의 발전 방식으로 추가적인 외부 설비 및 복잡한 설계 등 부차적인 비용을 절감하고, 광원이 발생하는 곳이라면 어느 곳이든 장소에 제약받지 않는 폭넓은 활용 가능성이 높은 기술로써 필요하다. 최근 저조도 환경에서 태양전지를 활용한 연구가 많이 진행되고 있다. 가장 쉽게 볼 수 있는 것은 실리콘 태양전지를 활용한 계산기의 보조전원이다. 최근까지 발표된 저조도 환경인 1000 lux에서의 태양전지 종류별 단위 셀 변환효율은 실리콘 태양전지는 10%[4], 화합물 반도체인 GaAs태양전지는 21%[5], 페로브스카이트 태양전지는 23.2%[6], 유기태양전지는 28%[7], 염료감응형 태양전지는 31%[8]로 보고되고 있다. 이러한 태양전지 중 염료감응형 태양전지가 저조도 환경에서 높은 변환효율을 나타내는 것을 알 수 있다.

또한 염료감응형 태양전지의 주요소재는 친환경적인 소재로써 인체에 무관함으로 실내에 사용하기 적합하며, 타 태양전지와 비교하여 제조공정이 쉽고 용이하다는 장점을 갖고 있다.

따라서 본 연구에서는 염료감응형 태양전지를 활용하여 단위 셀(유효면적 0.25cm<sup>2</sup>)과 20cm×20cm(유효면적 243cm<sup>2</sup>)을 제작하여 실내조명으로 많이 사용되고 있는 LED, 할로겐, 3파장램프 광원을 활용하여 전압-전류특성을 측정하여 분석하였다.

II. 본론

1. 염료감응형 태양전지 단위 셀 제작

염료감응형 태양전지의 구조는 투명유리 위에 코팅된 투명전극, 나노입자로 구성된 다공질 TiO<sub>2</sub> 입자, 단분자층으로 코팅된 염료고분자로 구성된 광전극과, 동일한 투명 유리 기판 위에 코팅된 투명전극에 백금 층으로 구성된 상대 전극, 그리고 두 전극 사이 50~100μm 두께의 공간을 산 환원용 전해질 용액으로 채우고 있는 샌드위치 구조를 지니고 있다[9-12]. 본 연구에서는 그림 1과 같은 공정으로 염료감응형 태양전지 단위 셀을 제조하였다.

가. 광전극 및 상대전극 제작

염료감응형 태양전지의 광전극과 상대전극은 그림 2와 같이 전도성 기판위에 도포하여 제작하였다. 광전극은 티타니아를 기반으로 하는 나노입자를 페이스트화된 물질로 제조된 TiO<sub>2</sub> 페이스트(제조사 : 오리온엔이에스)을 이용하였고, 상대전극은 전도성 기판에 백금 졸 형태로 되어 있는 platisol T/SP(제조사 : solaronix)을 이용하였다.

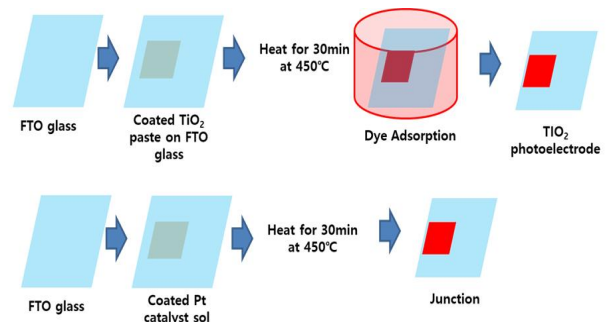


Fig. 1. The production process of Dye-sensitized solar cells. 그림 1. 염료감응형 태양전지 단위셀 제작 공정도

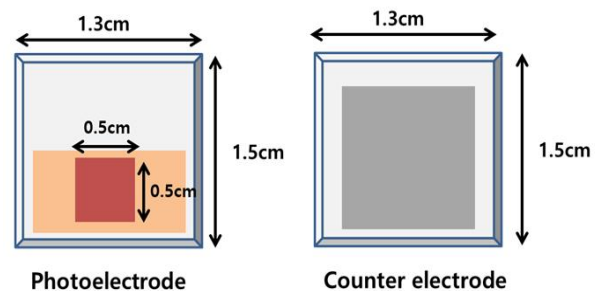


Fig. 2. Photo and counter electrode of Dye-sensitized solar cells.

그림 2. 염료감응형 태양전지의 광전극 및 상대전극

나. 염료흡착

염료는 붉은색 계열의 N719(Ruthenizer 535 bis-TBA, CIS-diisothiocyanato-bis(2,2'-bipyridyl-1-4,4'-icarboxylato) ruthenium(II) bis(Tetrabutyl ammonium, solaronix)을 에탄올 용매에 0.5 mM로 12시간 동안 용해하여 제조하였고, 제조된 광전극을 24시간 동안 침전시켜 염료를 흡착 시켰다.

다. 접합 및 전해질주입

염료가 흡착된 광전극과 상대전극을 실링제(제조사 three bond)을 활용하여 접합하였고, 전해질주입을 위하여 상대전극에 2개의 구멍을 천공하여 전해질을 주입하였다. 전해질은 I<sup>-</sup>/I<sup>3-</sup>의 산화 환원 중으로 3-MPN (3-methoxy propionitrile, WaKo) 10 ml 용매에 LiI (lithium iodide, Aldrich), I<sup>2</sup> (iodine, Aldrich), DMP II (1,2-dimethyl-3-n-propylimidazolium iodide, Solaronix) 및 4-TBP (4-tert-butyl pyridine, Aldrich)을 각각 0.5, 0.05, 0.6 및 0.5 M의 비율로 하여 12시간 동안 교반하여 용해시켜 제조 하였다.

2. 염료감응형 태양전지 모듈 제작

염료감응형 태양전지 모듈 제작은 단위셀 제조 공정과 유사하게 광전극, 상대전극, 염료흡착, 실링 공정, 전해질 주입으로 공정이 유사하다. 그러나 모듈 제작을 위하여 각각 해당하는 층의 마스크를 제작하여 스크린 프린터를 활용하여 모듈을 제작하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 그림 3과 같은 스크린 마스크를 제작하여 그림 4와 같은 염료감응형 태양전지 모듈을 제작하였다.

모듈 제작은 전도성 기판인 FTO 유리를 제단한 후 설계된 셀 수에 맞게 레이저 패터닝을 하였고, 패터닝이 된 FTO 유리기판 가장자리에 홀을 형성하여 전해질 주입구를 확보하였다. 레이저 패터닝된 FTO를 초음파 세척기를 이용하여 아세톤, 에탄올, 증류수 순으로 세척하였고 수분을 제거한 후 120°C에서 5분간 건조시켰다. 세척된 기판위에 광전극을 3회 인쇄하였고, 상대전극은 2회를 인쇄하였다. 그리드의 경우 16 um 두께로 제어하였다. 인쇄된 FTO 전극기판을 450°C에서 소성시켰으며, 소성 후 기판의 온도가 상온에 가까워진 후 염료에 담지해서 흡착하였다. 광전극과 상대전극은 셀에서와 동일한 실링제를 활용하였다.

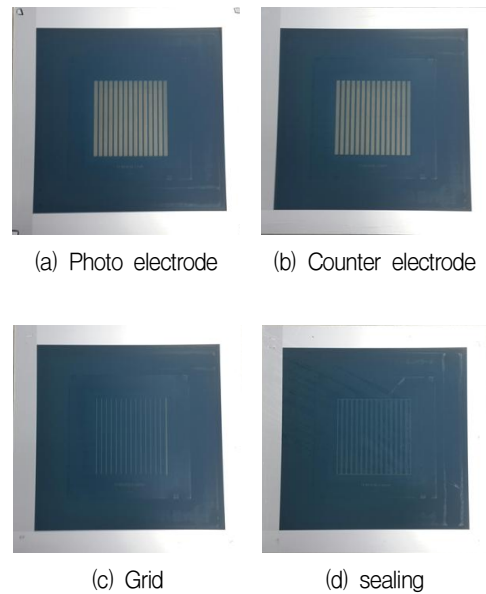


Fig. 3. Screen Mask of Dye-sensitized solar cells. 그림 3. 염료감응형 태양전지 각 층 마스크

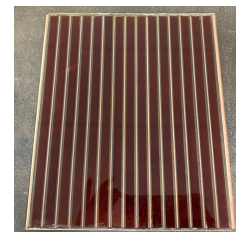


Fig. 4. Dye-sensitized solar Module(20x20cm). 그림 4. 20x20cm 염료감응형 태양전지 모듈

3. 염료감응형 태양전지 전류-전압(I-V) 특성 측정

염료감응형 태양전지의 저조도 환경에서의 전류-전압(I-V)특성을 측정하기 위하여 실내조명으로 주로 사용되는 LED, 할로겐 램프, 3파장 LED 램프를 광원으로 하는 그림 5의 simulator((주)맥사이언스)를 활용하였다. 태양전지의 특성 측정 조건은 1sun을 기준으로 한다. 저조도 환경에서의 특성측정을 1sum 기준으로 할 수 없기 때문에 1sun 기준으로 광원에서 나오는 빛의 양인 방사조도로 계산하여 저조도 simulator에 표 1과 같이 조도별 방사

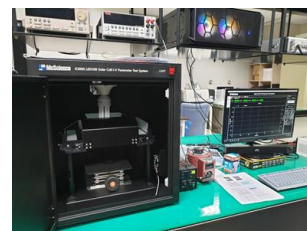


Fig. 5. low Illuminance simulator. 그림 5. 저조도 시뮬레이터

조도 값을 입력하여 측정하게 된다.

단위셀의 경우는 1000lux, 모듈은 2000lux 조건에서 측정을 하였다. 셀과 모듈은 빛을 받을 수 있는 면적이 다르므로 조도값을 다르게 하여 측정하였다.

Table 1. Irradiance value for each lamp.

표 1. 램프별 방사조도

	LED	Halogen	3Band
Illuminance(LUX)	Irradiance value(Irr)		
500	0.21	4.19	0.24
600	0.26	4.71	0.31
700	0.29	5.22	0.36
800	0.34	5.70	0.40
900	0.38	6.14	0.45
1000	0.43	6.64	0.49
1100	0.47	7.00	0.54
1200	0.51	7.42	0.59
1300	0.56	7.94	0.63
1400	0.60	8.38	0.24
1500	0.64	8.79	0.31
1600	0.68	9.14	0.36
1700	0.73	9.49	0.40
1800	0.77	9.87	0.45
1900	0.81	10.25	0.49
2000	0.86	10.54	0.54
3000	1.29		0.59
4000	1.72		0.63

#### 4. 염료감응형 태양전지 전류-전압(I-V) 특성 측정 결과

제작한 염료감응형 태양전지의 단위셀의 측정결과를 그림 6과 표 2에 나타내었다. 태양전지가 받아들이는 빛 에너지로부터 얼마나 많은 에너지를 만들 수 있는 효율인 광전변환효율은 식 1과 같이 측정할 수 있다.

$$\frac{\text{출력된전기에너지}(W/m^2)}{1m^2\text{에 입사한빛에너지}(W/m^2)} \times 100(\%) \quad \text{식(1)}$$

램프별 광전변환효율 측정 결과는 17.21%, 1.28%, 19.22%의 결과로 3Band 파장이 가장 높았다. 이러한 결과는 3파장의 Band의 경우 태양광 흡수스펙

트럼과 비슷하며 빛을 받은 염료와 반응 할 수 있는 단파장 빛이 많이 들어오기 때문에 빛의 흡수량이 증가되기 때문으로 판단된다.

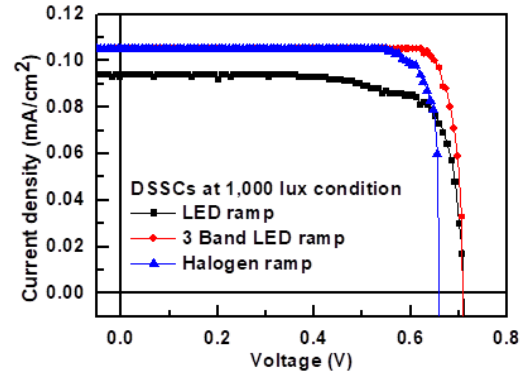


Fig. 6. I-V characteristics of DSSC unit cell at low illuminance. 그림 6. 염료감응형 태양전지 단위 셀의 저조도 전압-전류 특성

Table 2. I-V characteristics of DSSC cell at low illuminance.

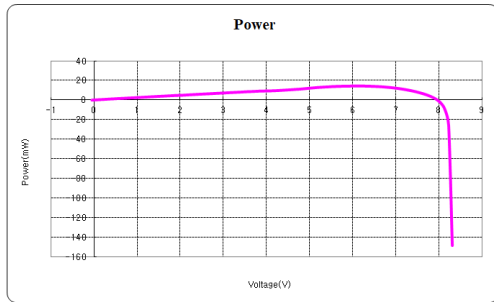
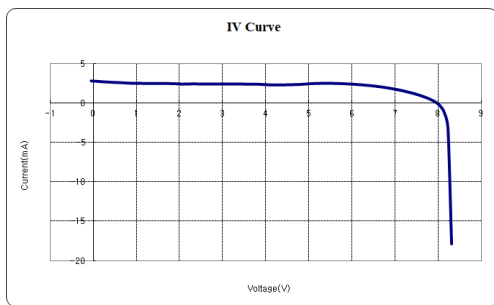
표 2. 염료감응형 태양전지 셀의 저조도 전압-전류특성

Items	Unit	LED	Halogen	3Band
		Result		
Voc	V	0.709	0.659	0.709
Jsc	mA/cm <sup>2</sup>	0.133	0.150	0.150
Fill Factor	%	78.28	86.64	88.61
Pmax	mW	0.052	0.060	0.066
Efficiency	%	17.21	1.28	19.22

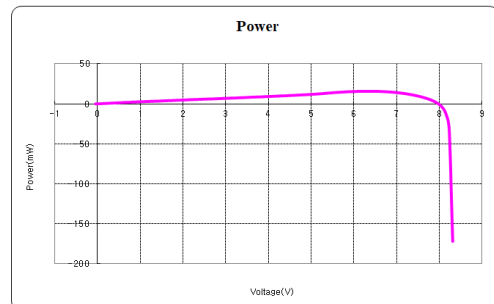
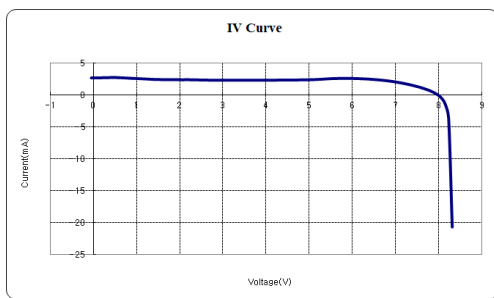
제작한 염료감응형 태양전지모듈을 LED, 할로겐, 3파장 LED의 조도인 2000lux에서 측정한 결과를 그림 7에 나타내었으며 이에 해당하는 값을 표 3에 나타내었다. 측정결과 램프별 광전변환효율은 10.9%, 8.7%, 11.8%의 결과를 얻을 수 있었다. 발생하는 전류와 전압 값을 곱한 것을 전력으로 표시할 수 있으며, 결과 값으로 power 곡선으로 계산하여 최대전력값을 계산하다. 발생 최대전력값은 각각 13.1mW, 15.7mW, 14.2mW로써 광전변환효율은 단위 셀과 같이 3파장 램프가 가장 높았으며, 최대전력값은 할로겐램프가 가장 높은 특성을 나타내었다. 할로겐램프의 경우 광전변환효율은 낮으나 할로겐램프에서 발생하는 열과 사용한 염료의 흡수 피크인 근적외선 부분에서 다른 광원과 비교하여 흡수 피크가 크기 때문에 태양전지 모듈의 전력량을 증가시킬 수 있다고 판단된다.

Table 3. I-V characteristics of DSSC module at low Illuminance.  
 표 3. 염료감응형 태양전지 모듈의 저조도 전압-전류특성

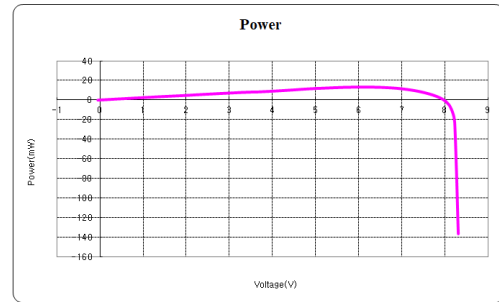
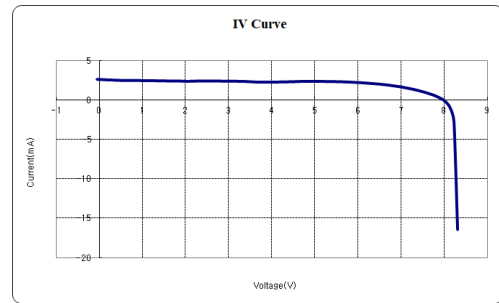
Items	Unit	LED	Halogen	3Band
		Result		
Voc	V	7.97	7.98	7.96
Isc	mA	2.58	2.65	2.76
Jsc	mA/cm <sup>2</sup>	0.026	0.018	0.028
Fill Factor	%	64.04	74.16	64.81
Pmax	mW	13.1	15.7	14.2
Efficiency	%	10.9	8.7	11.8



(a) LED



(b) Halogen lamp



(c) 3 Band

Fig. 7. I-V characteristics of DSSC module at low Illuminance.  
 그림 7. 염료감응형 태양전지 모듈의 저조도 전압-전류특성

### III. 결론

본 연구에서는 저조도 환경인 실내의 조명 빛을 활용하여 전력을 발생시킬 수 있는 발전소자를 개발하기 위하여 염료감응형 태양전지 단위셀과 모듈을 제작하였고 실내조명의 광원으로 주요 사용되는 LED, 할로겐램프, 3Band 램프를 활용하여 특성측정을 하였다.

제작한 단위셀의 광전변환효율은 17.21%, 1.28%, 19.22%의 결과를 얻었으며, 모듈의 경우는 10.9%, 8.7%, 11.8%의 결과를 얻었다. 최대전력값은 각각 13.1mW, 15.7mW, 14.2mW로써 광전변환효율은 단위 셀과 같이 3파장 램프가 가장 높았으며, 최대전력값은 할로겐램프가 가장 높은 특성을 나타내었다. 이러한 측정결과 모듈의 경우 저조도 환경에서 발전이 가능하다는 것을 확인하였다. 측정된 발전량은 계산기, 손목시계(필요발전량 1μW), RFID tag, 무선센서노드, 리모컨(10μW, 100μW), 소형 라디오(1mW), 블루투스(10mW)의 독립 전원으로 사용이 가능한 발전량이다.

따라서 본 연구에서 제조된 염료감응형 태양전지를 활용한 발전소자는 저조도 환경에서 발전이 가능하고 이는 실내의 IoT센서와 소형전자기기의 독립전원으로 사용이 가능하다고 판단된다.

## References

- [1] G. Apostolou, A. Reinders, M. Verwaal, "Comparison of the indoor performance of 12 commercial PV products by a simple model," *Energy Sci. Eng.* Vol.4, pp.69–85, 2016. DOI: 10.1002/ese3.110
- [2] J. S. Goo, S.-C. Shin, Y.-J. You, J. W. Shim, "Polymer surface modification to optimize inverted organic photovoltaic devices under indoor light conditions," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol.184, pp.31–37, 2018. DOI: 10.1016/j.solmat.2018.04.023
- [3] K. Warmerdam, A. Pandharipande, D. Caicedo, "In Connectivity in IoT indoor lighting systems with visible light communications," *IEEE Online Conference on Green Communications*, pp.47–52, 2015. DOI: 10.1109/OnlineGreenCom.2015.7387378
- [4] Francesca D. R. Tadeo P. Thomas M. B. "Characterization of photovoltaic devices for indoor light harvesting and customization of flexible dye solar cells to deliver superior efficiency under artificial lighting," *Appl. Energy*, Vol.156, pp.413–422, 2015. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.07.031
- [5] Freitag, M., Teuscher, J., Saygili, Y. el, "Dye-sensitized solar cells for efficient power generation under ambient lighting," *Nature photonics*, Vol.11, pp.372–378, 2017.
- [6] Meng Li, Chao Ahao, Ahao-kuo Wang, el. "Interface Modification by Ionic Liquid: A Promising Candidate for Indoor Light Harvesting and Stability Improvement of Planar Perovskite Solar Cells," *Adv. Energy Materials*, Vol.8, pp.1801509, 2018. DOI: 10.1002/aenm.201801509
- [7] J. S. Goo, J. H. Lee, S. C. Shin, J. S. Park and J. W. Shim "Undoped ZnO electrodes for low-cost indoor organic photovoltaics," *J. Materials Chemistry A*, Vol.46, pp.23464–23472, 2018.
- [8] Y. Cao, Y. Liu, S. M. Zakeeruddin, A. Hagfeldt, M. Grätzel "Direct Contact of Selective Charge Extraction Layers Enables High-Efficiency Molecular Photovoltaics," *Joule*, Vol.2, pp.1108–1117, 2018. DOI: 10.1016/j.joule.2018.03.017
- [9] Juan Bisquert, "Physical electrochemistry of nanostructured devices," *Physical Chemistry Chemical Physics*, Vol.10, pp.49–72, 2008.
- [10] Y. Yang, "Recent research progress on polymer electrolytes for dye-sensitized solar cells," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol.93, pp.1167–1175, 2009. DOI: 10.1016/j.solmat.2009.01.009
- [11] Qifeng Zhang, Christopher S. Dandeneau, Xiaoyuan Zhou and Guozhong Cao, "ZnO Nanostructures for Dye-Sensitized Solar Cells," *Advanced materials*, Vol.21, No.41, pp.4087–4108, 2009. DOI: 10.1002/adma.200803827
- [12] H. Zhu, J. Wei, K. Wang, and D. Wu, "Applications of carbon materials in photovoltaic solar cells," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol.193, pp.1461–1470, 2009. DOI: 10.1016/j.solmat.2009.04.006

## BIOGRAPHY

### Sun-Geum Kim (Member)



2012 : BS degree in Hydrogen Energy Department, DongShin University.  
 2018 : MS degree in Electronics and Computer Engineering, Chonnam National University.  
 2012~Present : Chief Executive Officer (CEO), Administration Division, CS Energy Co., Ltd

### Sung-June Baek (Member)



1989 : BS degree in Electronics Engineering, Seoul National University.  
 1992 : MS degree in Electronics Engineering, Seoul National University.  
 1999 : PhD degree in Electronics Engineering, Seoul National University.

2002~Present : Professor, Dept. of Electronics and Computer Engineering, Chonnam National University.