

# RF Magnetron 스퍼터링 공정을 이용한 BIPV용 산화 금속 다중층 컬러 유리 구현 기술 연구 Metal Oxide Multi-Layer Color Glass by Radio Frequency Magnetron Sputtering for Building Integrated Photovoltaic System

Akpeko Gasonoo<sup>1\*</sup>, 안 현 식<sup>1\*</sup>, 김 민 회<sup>2</sup>, 이 재 현<sup>2\*</sup>, 최 윤 석<sup>1\*</sup>

Akpeko Gasonoo<sup>1\*</sup>, Hyeon-Sik Ahn<sup>1\*</sup>, Min-Hoi Kim<sup>2</sup>, Jae-Hyun Lee<sup>2\*</sup>, Yoon-seuk Choi<sup>1\*</sup>

## Abstract

In this study, we propose the structure of color glass for BIPV (Building Integrated Photovoltaic System) and develop process technology to realize it. It was verified through computer simulation based on wave optics that two different kinds of metal oxide thin films with different refractive indices could be integrated to realize different colors with good transmittance. To fabricate the structure, we used RF Magnetron deposition method to achieve the target thickness uniformly. The optical analysis of the samples was carried out by comparing with the results of computer simulations and it was found that this technique can be stably implemented on lab scale. The stability test over weeks was confirmed at room temperature. This method is expected to be very useful in BIPV buildings.

## 요 약

본 연구에서는 건물 외벽 태양광 발전 통합 시스템(BIPV: Building Integrated Photovoltaic System)용 컬러 유리의 구조를 제안하고 이를 구현하기 위한 공정 기술을 개발하였다. 굴절률 값이 다른 두 종류의 산화 금속 박막을 집적함으로써 투과도가 우수하면서도 서로 다른 컬러를 구현할 수 있음을 파동광학에 기반한 전산모사를 통해서 확인하였다. 선택된 구조를 구현하기 위해 RF Magnetron 증착 방법을 통해 목표로 하는 두께를 균일하게 얻을 수 있는 공정을 개발하였다. 실험 시편에 대한 광학적 분석을 전산모사 결과와 비교하여 분석한 결과, 원하는 컬러 유리를 랩 스케일에서 안정적으로 구현할 수 있음을 알 수 있었으며, 상온에서 일주일 이상의 안정성을 갖는 것을 확인하였다. 이러한 기술은 BIPV 건축물을 구축하는 데에 유용할 것으로 기대된다.

*Key words : BIPV, Color Glass, RF Sputtering, Metal Oxide, Multi-Layer, Solar Panel*

\* These authors contributed equally to the work.

1 Department of Electronic Engineering, Hanbat National University, Republic of Korea

2 Department of Creative Convergence Engineering, Hanbat National University, Republic of Korea

★ Corresponding author

Correspondence should be addressed to Yoonseuk Choi(ychoi@hanbat.ac.kr/042-821-1134) and

Jae-Hyun Lee(jhyunlee@hanbat.ac.kr/042-821-1970)

※ Acknowledgment

This work was supported by the KETEP and the MOTIE of the Republic of Korea (No. 20183010013840) and Basic Science Research Program through the NRF funded by the Ministry of Education(No. 2018R1A6A1A03026005).

Manuscript received Dec. 7, 2018; revised Dec. 13, 2018; accepted Dec. 21, 2018

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 에너지의 효율적인 생산과 소비는 환경 변화와 더불어 가장 중요한 연구주제가 되고 있다. 특히, 건축 설계 단계에서부터 태양 에너지를 사용한 전기 생성, 즉 태양광 패널(solar panel)을 건물의 외벽에 통합시키는 시스템에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이를 건물 외벽 태양광 발전 통합 시스템(BIPV : Building Integrated Photovoltaic System)이라고 하며, 이를 바탕으로 한 건축 구조가 많이 등장하고 있다[1, 2].

태양 에너지는 점차 증가하는 건축물의 에너지 사용량을 해결하는 가장 좋은 방법의 하나로, 최근 태양 에너지 기술의 발전으로 효율이 높은 태양광 패널들이 많이 등장하고 있다. BIPV 기술이 적용된 건물들은 친환경적이며, 에너지 자립 혹은 절약이 가능하므로 경제적으로도 매우 효율적이라는 것이 보고되고 있다[3, 4].

BIPV를 적용할 때는 다양한 요소가 고려되어야 한다. 태양광 패널의 효율, 투과도가 높은 보호 유리의 사용, 패널의 방수 및 방오 기능, 태양 에너지를 극대화하기 위한 구조의 적용 등이 그것이다. 본 논문에서는 이러한 고려 요소 중, 심미성을 향상하기 위한 컬러 유리 구현 기술에 관하여 연구하였다.

일반적으로 건물의 지붕이나 정면의 넓은 영역에 설치되는 기존의 태양광 패널은 검은색 또는 파란색을 띠고 있어서 사용자 대부분이 선호하지 않는다. 따라서 미적 요소가 중요하게 고려되는 건축설계에서는 이러한 BIPV 모듈의 적용이 제한적이게 된다. 컬러 유리를 적용하면 태양광 패널의 심미성을 크게 높일 수 있어 건물 외벽에 대한 디자인 자유도가 높아지고, 현재 개발 중인 반투명, 원형 등 다양한 형태의 BIPV 모듈과 동시에 연계되어 모든 형태의 건물 외벽에 BIPV 모듈을 적용할 수 있게 하는 연구도 활발하게 진행되고 있다[5, 6].

컬러 유리는 원하는 파장에서의 반사를 극대화시켜 정면에서 바라볼 때 다양한 색상을 보임으로써 컬러 유리에 결합하는 태양광 패널의 색상(주로 검은색)을 감출 수 있어 컬러 유리와 결합한 BIPV 모듈에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔다[7, 8]. 특히 컬러 유리로 기존에 있던 태양광 패널의 전면 유리를 대체하면 건축물 외벽의 심미성을 높일 수

있을 뿐만 아니라, 특정 파장을 제한함으로써 시간이 지날수록 성능이 저하되지 않는 안정성도 갖출 수 있다. 컬러 유리의 구현을 위해서는 나노(nano)미터 수준의 박막(thin film)에 대한 코팅을 통한 크로마틱스(chromatics) 제어 기술의 개발이 필수적이다[9]. 최근 다양한 컬러 유리 개발에 관한 연구가 BIPV 시스템의 심미성 확보 및 에너지 효율 향상을 위해 진행되고 있다[7, 8, 10, 11].

컬러 유리의 색을 조절하기 위한 박막 코팅 재료인 금속 산화물(metal oxide)은 다양한 특성과 구조를 나타내는 물질이다[10]. 기판 위에 금속 산화물 박막을 만들기 위해 물리적 증착(physical vapor deposition)[12], 화학적 증착(chemical vapor deposition)[13] 등의 방법들이 적용되고 있다. 이들은 일반적으로 높은 온도와 진공을 필요로 하는 방법으로, 컬러 유리 구현을 위한 재료의 선택과 증착된 두께의 최적 조합을 찾는 것이 매우 중요하다[14].

본 논문에서는 산화 알루미늄( $Al_xO_y$ ) 및 산화 티타늄( $Ti_xO_y$ )으로 구성된 다중 박막을 상대적으로 낮은 온도에서 높은 증착 속도를 제공할 수 있는 Radio Frequency(RF) reactive sputtering으로 제작하는 컬러 유리 제작 공정을 제시하였다. 기본 구조에 대한 광학 특성에 대한 분석은 입사광과 반사광 간의 간섭을 파동광학 기반으로 분석하여 전산모사(시뮬레이션 : simulation)을 통해 이루어졌으며, 실험을 통해 얻은 결과와 전산모사 결과를 비교분석 하였다. 산화 알루미늄 및 산화 티타늄 층의 두께를 미세하게 조정하여 원하는 파장에서 목표하는 반사도(reflectance) 및 투과도(transmittance)를 가진 컬러 유리를 구현하고자 하였다. 또한, 실험을 통해 제작된 컬러 유리가 시간이 지남에 따라 성능 저하가 일어나지 않아 안정하다는 것을 확인하였다.

## II. 컬러 유리 구조 Simulation

본 연구에서는 상용 광학해석 프로그램인 D사의 Essential Macleod 프로그램을 사용하여 입사각과 증착된 두께에 따른 반사도와 투과도, CIE 좌표계, 색상 등에 대한 결과를 전산모사 하였다. 연구의 초기에는 기본적으로 컬러 유리 구현에 사용이 용이한 4가지 물질, 즉, 티타늄(Ti), 알루미늄(Al), 실리콘(Si), 아연(Zn)을 기반으로 한 산화물 및 단일

금속 구조를 서로 다른 두께 및 배열구조로 조합하여 컬러 유리 구조를 제안하였다. 1차적으로 조합에 따라 단층 구조(단일 물질로 구성된 구조) 16개, 다중층 구조(4가지 물질의 서로 다른 조합) 208개에 대한 simulation 데이터를 분석하였다. 이 중, 그림 1에 나타난 바와 같이 알루미늄과 티타늄을 기반으로 한 컬러 유리 구조를 선택하여 이에 대한 광학특성 분석과 실험을 진행하기로 하였다. 그림 1(a)는 산화 티타늄 단층 구조이며, 그림 1(b)는 산화 알루미늄과 산화 티타늄의 다중층 구조이다. 이러한 구조를 선택한 이유는 산화 티타늄은 굴절률이 상대적으로 높아 두께를 조금만 변화시켜도 다양한 컬러 구현이 가능하며, 산화 티타늄-산화알루미늄 다중층은 두께에 덜 민감하면서도 다양한 컬러 구현이 가능하기 때문이다.

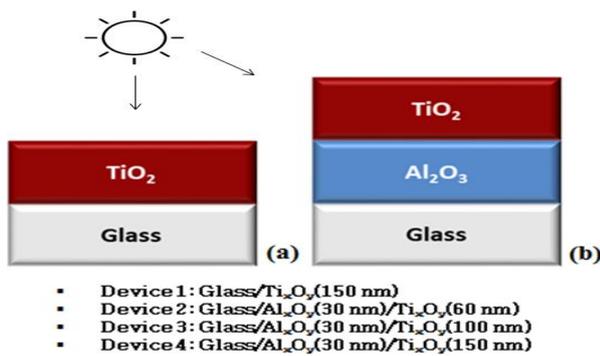


Fig. 1. Basic structure of (a) single layer and (b) multi-layer color glass.

그림 1. (a) 단일층 및 (b) 다중층 컬러 유리의 기본 구조

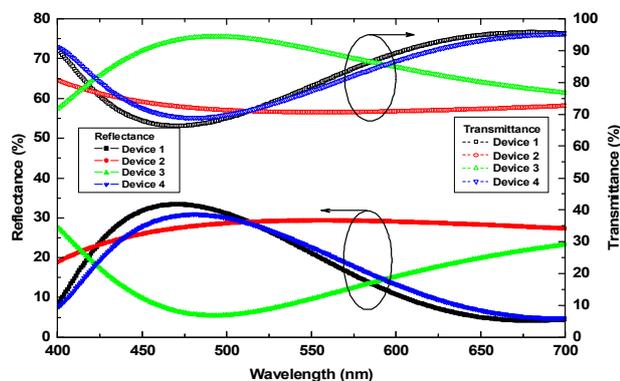


Fig. 2. Reflectance and transmittance spectra from simulation results of devices 1, 2, 3 and 4.

그림 2. 디바이스1~4의 반사도 및 투과도 simulation

그림 2는 다중층 재료와 기판의 굴절률과 소광계수를 바탕으로 빛의 흡수 및 다중 반사 등의 효과

를 고려한 서로 다른 구조와 두께를 갖는 4개의 디바이스의 반사도 및 투과도 simulation 결과이다. 디바이스 별 세부 두께와 구조는 그림 1에 상세히 나타나 있다. Simulation을 통해 분석한 결과, 기본 유리 기판 위에 산화 티타늄을 증착한 단층 구조의 경우 일반적으로 일정한 반사도, 투과도 범위 내에서 두께의 미세한 변화(~10nm)에 따라 컬러가 많이 달라진다는 것을 확인할 수 있었다. 본 논문에서는 산화 티타늄의 두께가 150nm인 경우를 선택하여 488nm 정도에서 반사도가 최대인 Cyan 컬러(476~495nm)를 기준으로 제시하였다(Device 1). 산화 알루미늄이 증착(30nm)된 다중층 구조의 경우에는 산화 티타늄의 두께에 따라 반사도와 투과도, 그리고 색상이 급격하게 변화하는 특성을 그림 2의 결과를 통해 확인할 수 있었다. 이 중 Device 4의 경우, Device 1과 반사도, 투과도 및 색상이 매우 유사하게 나타나는 구조임을 확인할 수 있었다.

BIPV용 컬러 유리에서 내부에 설치되는 태양광 패널의 효율을 높이기 위해서 유리의 반사도와 투과도의 조절은 필수적이다. 유리의 투과도가 높게 나타나게 되면 유리가 투명해지기 때문에 내벽에 설치되는 태양광 모듈이 비치게 되고 심미성이 떨어진다. 반면 투과도가 너무 낮은 경우에는 태양광 패널의 효율이 급격하게 떨어진다. 따라서 산화 알루미늄 층의 제어를 통해 반사도와 투과도를 조절하고, 상대적으로 고굴절 물질인 산화 티타늄 층의 제어를 통해 색상을 조절할 수 있는 다중층 구조가 본 연구에 적합하다고 판단된다. 이에 Cyan 컬러를 갖는 Device 4 구조에 대해 제작을 위한 공정조건을 연구하였다.

### III. 실험 및 결과

본 절에서는 RF magnetron sputter를 이용하여 고굴절 물질(Ti, Al)의 적층을 통해 산화 금속 다중층 구조를 제작하고 광학적 특성을 분석한 내용을 설명하도록 하겠다. 먼저 유리 기판을 아세트 및 IPA로 15분 동안 초음파 세척 후, IPA로 15분간 가열한 다음 150°C의 오븐에서 15분 동안 건조하였다. Al<sub>x</sub>O<sub>y</sub> 및 Ti<sub>x</sub>O<sub>y</sub> 층은 알루미늄 및 티타늄 타겟을 사용하여 증착시켰다.

그림 3(a)는 본 연구에 사용된 RF magnetron sputter를 보여준다. RF sputter는 가스를 챔버 내

로 주입하여 증착하고자 하는 타겟 물질(Al or Ti)과 충돌시켜 플라즈마를 생성시킨 후 이를 유리 기판에 코팅시키는 방법으로 가스는 아르곤(Ar)가스와 산소(O<sub>2</sub>)가스를 혼합하여 사용하였다. 그림 3(b)는 챔버 내부의 단면을 보여준다. 챔버 내에 스퍼터 건을 밀어 넣은 상태로 증착하고자 하는 타겟 물질(Al, Ti)를 설치하고 물질과 기판의 거리를 9cm로 선정하였다. 그림 3(c)는 스퍼터링 공정 중 챔버 내의 사진을 보여준다. 물질의 스퍼터링 공정 조건은 Ar가스와 O<sub>2</sub>가스 혼합물의 압력 20mTorr의 챔버 내에서 RF Power 300w로 설정하고 알루미늄과 챔버 내의 산소와 반응 시켜 10분 동안 증착을 진행하였다. 유리기판 위에 알루미늄을 증착시킨 후 동일한 공정 조건에서 티타늄으로 타겟을 교체하여 60분간 진행하였다. 이렇게 얻어진 시편을 분석한 결과, 각 층의 두께는 각각 30nm, 150nm로 얻어졌다.

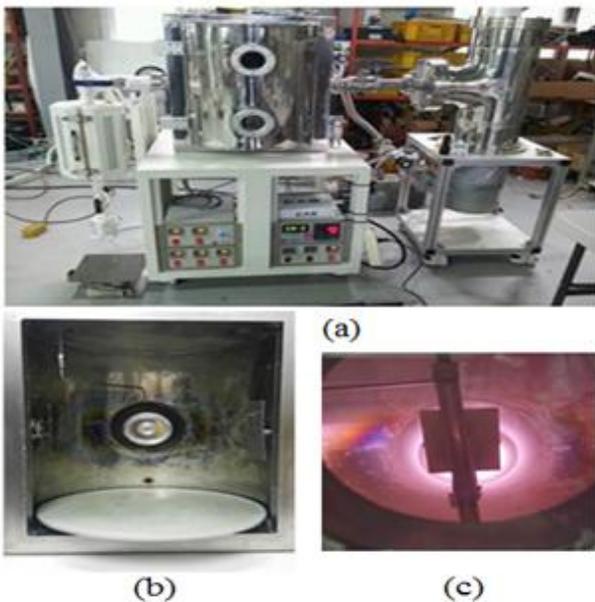


Fig. 3. Photographs of (a) RF magnetron sputter, (b) the cross section of deposition chamber, and (c) the deposition chamber during sputtering process. 그림 3. RF 마그네트론 스퍼터, (b) 증착 챔버의 단면 및 (c) 스퍼터링 공정 중 증착 챔버의 사진

실험을 통해 만들어진 소자의 증착 속도와 두께는 각각 STM-2XM(Instruments Sycon)와 알파 스텝을 사용하여 측정하였고, 제작된 소자의 반사도 및 투과도는 Lambda 950 UV-vis-NIR spectrophotometer (PerkinElmer)로 측정하였다.

그림 4는 Al<sub>x</sub>O<sub>y</sub>/Ti<sub>x</sub>O<sub>y</sub> 다중층이 증착된 Device 4의

반사도와 투과도를 simulation과 비교한 결과를 나타낸다. 이를 통해 제작된 소자의 스펙트럼이 simulation 결과와 유사한 경향성을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 실험결과, 최대 반사도가 495nm에서 나타나 simulation 예측치인 488nm 보다 7nm 만큼 적색 파장 쪽으로 이동하여 Ti<sub>x</sub>O<sub>y</sub>층이 150nm보다 다소 두껍게 형성된 것으로 보이나, 거의 차이가 없다고 할 수 있고 또한 전체적인 스펙트럼의 경향은 매우 유사하였다. Simulation에서 사용된 박막의 이론적 굴절률 값은 실제 성막한 박막의 굴절률 값과 차이를 보여 다소 실험값에서 낮은 반사도를 가진 것으로 판단된다. 투과도의 경우 실험치와 simulation 예측치가 큰 차이가 없었다.

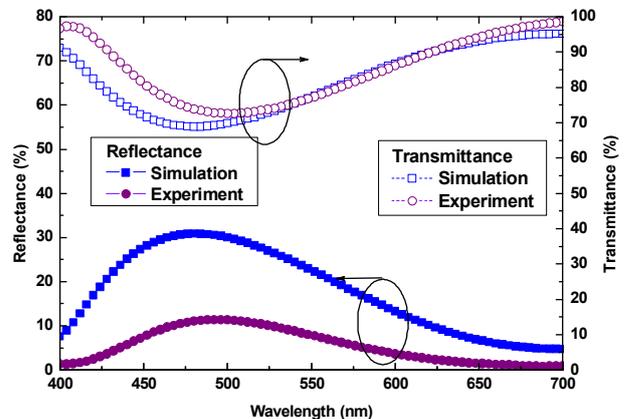


Fig. 4. Reflectance and Transmittance spectra from simulation and experimented Device 4.

그림 4. Device 4 구조의 실험 및 simulation의 반사도 및 투과도 그래프

본 실험에 사용된 유리는 AR 코팅 등 표면처리가 되지 않은 기본 유리를 사용한 것으로 향후 유리에 대한 표면처리 기술 확보 등을 통해 목표하는 반사도와 투과도를 달성할 수 있을 것으로 기대된다.

그림 5는 Device 4 구조에 대한 실제 제작된 시편의 색상과 CIE 좌표값, simulation 된 색상과 CIE 좌표값의 분석 결과를 보여준다. 색상은 spectrum을 프로그램에 입력하여 도출된 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 실제 제작된 시편과 simulation 예측 색상이 거의 유사함을 알 수 있다. CIE 좌표계 분석에서도 두 경우가 각각 실제 제작 시편의 좌표값(x : 0.2429, y : 0.2895)과 simulation 좌표값(x : 0.2585, y : 0.3228)이 x값은 거의 유사하고 y값이 다소 차이가 있었다. 이러한 오차는 제작된 시편의 절대 굴절률 값 정밀측정 등을 통해 보완될 예정이다.

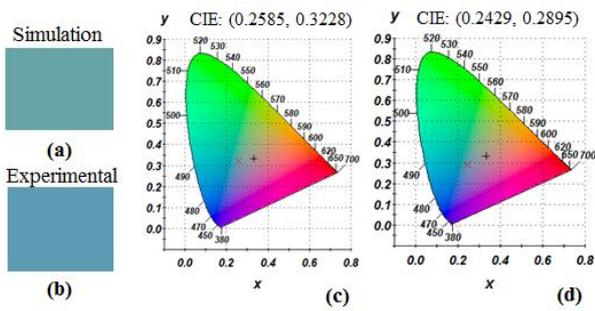


Fig. 5. (a) Color and (c) CIE plot from simulated Device 4 and (b) Color and (d) CIE plot from fabricated Device 4, respectively.

그림 5. 각각 Simulation된 Device 4의 (a) 색상 및 (c) CIE 좌표, 실제 제작된 Device 4의 (b) 색상 및 (d) CIE 좌표

BIPV에서는 건물 외벽이 유리로 만들어지기 때문에 유리의 안정도가 중요하다. 따라서 본 실험을 통해 개발된 소자의 안정도 테스트를 추가로 진행하였고 그 결과를 그림 6에 나타내었다. 상온에 시편을 방치하고 반사도와 투과도의 변화하는 정도를 확인한 결과 1주일 이상이 지남에도 거의 차이가 없음을 확인하였다. 향후 습도와 온도를 가속하는 실험을 통해 보다 장기적인 안정도에 대한 평가가 이루어질 예정이다.

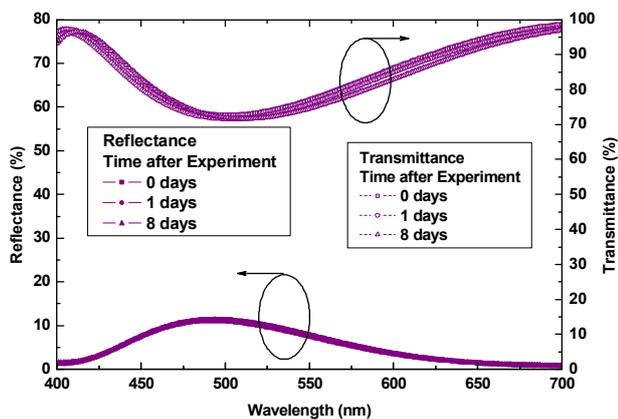


Fig. 6. Spectra of fabricated Device 4 measured over a week. 그림 6. 제작된 Device 4의 안정도 평가 그래프

#### IV. 결론

본 연구에서는 산화 금속인  $Al_xO_y$  및  $Ti_xO_y$ 의 다중층을 기반으로 BIPV 전면 패널용 컬러 유리기술을 연구하였다.  $Ti_xO_y$  단일층(150nm) 및  $Al_xO_y$  (30nm)/ $Ti_xO_y$ (60~150nm) 다중층 구조에 대한 simulation을 통해 다양한 컬러 유리 구조에 대한

분석을 수행하였다. Cyan 컬러를 나타내는  $Al_xO_y$  (30nm)/ $Ti_xO_y$ (150nm) 구조를 선정하여 낮은 온도에서 간단한 공정 및 빠른 증착 속도를 보여주는 RF (Radio Frequency) 스퍼터링 장비로 실험을 진행하였다. Simulation 및 실험을 통해 제작된 소자는 각각 488 및 495nm에서 30.8% 및 11.4%의 최대 반사도를 나타냈으며 CIE 좌표계 색상 또한 좌표값 (0.2585, 0.3228) 및 (0.2429, 0.2895)으로 유사하게 나타남을 확인하였다. 본 실험을 통해 제작된 소자는 시간이 지남에 따라 특성이 변하지 않는 안정성을 가진다. 이러한 기술의 개발을 통해 향후 색상 선택이 자유로운 컬러 유리의 개발이 가능할 것으로 기대되며 심미성과 에너지 효율성을 높인 BIPV에 응용될 것이다.

#### References

- [1] A. N. Tombazis, "Architectural design: A multifaceted approach," *Renewable energy*, vol.5, no.5, pp.893-899, 1994. DOI:10.1016/0960-1481(94)90109-0
- [2] Y. Yang, Q. Wang, D. Xiu, Z. Zhao and Q. Sun. "A building integrated solar collector: All-ceramic solar collector," *Energy and Buildings*, vol.62, pp.15-17, 2013. DOI:10.1016/j.enbuild.2013.03.002
- [3] (Ed: F. P. Sioshansi), *Distributed Generation and Its Implications for the Utility Industry*, Elsevier, 2014.
- [4] M. Amado and F. Poggi, "Solar Energy Integration in Urban Planning: GUUD Model," *Energy Procedia*, vol.50, pp.277-284, 2014. DOI:10.1016/j.egypro.2014.06.034
- [5] A. K. Shukla, K. Sudhakar and P. Baredar, "Recent advancement in BIPV product technologies: A review," *Energy Build.* vol.140, pp.188-195, 2017. DOI:10.1016/j.enbuild.2017.02.015
- [6] A. Schueler, C. Roecker, J. Boudaden, P. Oelhafen and J.-L. Scartezzini, *Coatings for colored glazed thermal solar collectors and solar active glass facades*, CISBAT, 2003.
- [7] A. Schueler, C. Roecker, J. Boudaden, P. Oelhafen and J.-L. Scartezzini, "Potential of quarterwave interference stacks for colored thermal

solar collectors,” *Solar Energy*, vol.79, no.2, pp.122–130, 2005. DOI:10.1016/j.solener.2004.12.008

[8] S. Mertin, V. Hody-Le Caër, M. Joly, I. Mack, P. Oelhafen and J.-L. Scartezzini, A. Schueler, “Reactively sputtered coatings on architectural glazing for coloured active solar thermal facades,” *Energy and Buildings*, vol.68, PART C, pp.764–770, 2014. DOI:10.1016/j.enbuild.2012.12.030

[9] N. Jolissaint, R. Hanbali, J.-C. Hadorne and A. Schueler, “Colored solar facades for buildings,” *Energy Procedia*, vol.122, pp.175–180, 2017. DOI:10.1016/j.egypro.2017.07.340

[10] C. N. R. Rao, “Transition Metal Oxides,”

*Ann. Rev. Phys. Chem.*, vol.40 pp.291–326, 1989.

[11] H. Chatham, “Oxygen diffusion barrier properties of transparent oxide coatings on polymeric substrates,” *Surface and Coatings Technology*, vol.78, no.1–3, pp.1–9, 1996. DOI:10.1016/0257-8972(95)02420-4

[12] A. Bemanose, M. Comte and P. Vouaux, “A new method of emission of light by certain organic compounds,” *J. Chim. Phys.* vol.50, no.64, pp.64–68, 1953.

[13] A. G. Erlat, B. M. Henry, C. R. M. Grovenor, A. G. D. Briggs, R. J. Chater and Y. Tsukahara, “Mechanism of Water Vapor Transport through PET/AlOxNy Gas Barrier Films,” *J. Phys. Chem. B*, vol.108, no.3, pp.883–890, 2004. DOI:10.1021/jp036244y

[14] A. Schueler, C. Roecker, J.-L. Scartezzini, J. Boudaden and P. Oelhafen, *Designing thin film multilayer for colored glazed thermal collectors*, EUROSUN, vol.2. pp.858–865, 2004.

## BIOGRAPHY

### Akpeko Gasonoo (Member)



2013 : BS degree in Computer Engineering, KNUST, Ghana  
 2017 : MS degree in Electronic Engineering, Hanbat Nat'l Univ.  
 2017 ~ present: PhD degree in Electronic Engineering, Hanbat National University.

### Hyeon-Sik Ahn (Member)



2013 ~ present: BS degree course of Electronics & Control Engineering, Hanbat Nat'l Univ.

### Min-Hoi Kim (Member)



2006 : BS degree in Electrical Engineering, Yonsei University.  
 2013 : PhD degree in Electrical and Computer Engineering, Seoul Nat'l Univ.

2013~present: Associate Professor, Hanbat National University.

### Jae-Hyun Lee



2002: BS degree in Material Science and Engineering, Korea University.  
 2011: PhD degree in Material Science and Eng., Seoul Nat'l Univ.  
 2011~2012 : Post Doc. Researcher, IAPP, TU Dresden (Germany).

2012 ~ present: Associate Professor, Hanbat National University.

### Yoonseuk Choi (Member)



1999: BS degree in Electrical Engineering, Seoul Nat'l Univ.  
 2006: PhD degree in Electrical and Engineering, Seoul Nat'l Univ.  
 2006~2008 : Principal Researcher, Hanyang Univ.  
 2008~2010 : Post Doctoral Scholar, Case Western Reserve Univ.

2010~present: Associate Professor, Hanbat National University.