

# 폐기되는 용액 공정 유기 기반 태양전지의 재활용을 위한 기술

손 해 정 (한국과학기술연구원 차세대태양전지연구센터 책임연구원)

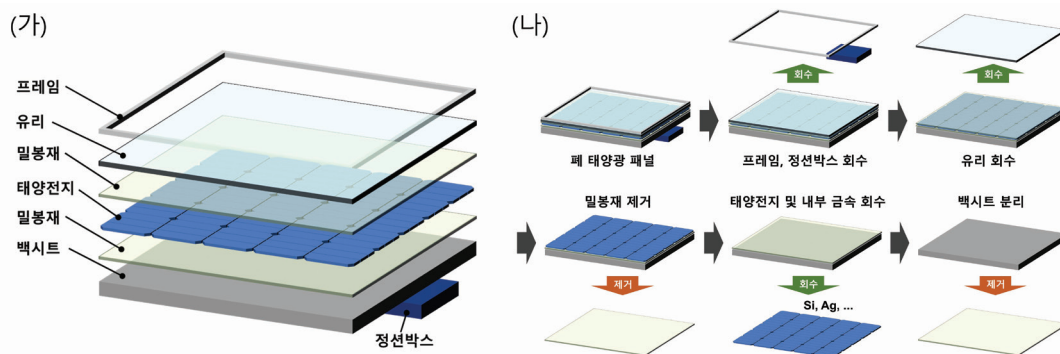
윤 성 원 (한국과학기술연구원 박사후연구원)

## 서론

태양광은 안전하면서도 무한한 신재생 에너지원으로 오래전부터 인식되어왔다.<sup>1</sup> 태양전지는 이러한 태양광을 전력으로 변환할 수 있는 장치로, 대표적으로 실리콘을 비롯하여 구리-인듐-갈륨-셀레늄 (CIGS), 구리-아연-주석-황(CZTS) 등 다양한 무기 반도체를 광활성층으로 사용하여 제작할 수 있는데, 이러한 태양전지는 계산기, 장난감 등 소형 기기부터 전기 자동차, 건물 일체형 태양광 발전 시스템 (building-integrated photovoltaic, BIPV) 등

에 포함되는 태양광 패널 등 다양한 분야에서 폭넓게 사용되고 있다. 이러한 태양광 에너지는 각국의 탈탄소 및 친환경 에너지 정책에 부응하여 최근 투자가 급격히 증가하였는데,<sup>2</sup> 국제에너지기구(IEA)의 발표에 따르면, 세계 태양광 발전 용량은 2010년에는 4만 MW에 불과했지만 2025년에는 151만 MW 이상으로 성장할 것으로 전망했다.

태양광 패널의 수요가 급증하는 만큼, 폐기되는 태양광 패널의 처리 또한 최근 중요한 이슈로 부상하고 있다. 국제재생에너지기구(IRENA)의 발표에 따르면 세계 태양광 폐패



[그림 1] (가) 일반적인 무기 태양광 패널의 구조와 (나) 폐 태양광 패널의 회수 절차

널의 누적 배출량 규모는 2016년 최대 25만 톤 규모에서 2030년에는 최대 800만 톤 규모로 증가하고, 2050년에는 최대 7,800만 톤 규모가 될 것으로 전망하고 있다.<sup>3</sup> 폐기되는 실리콘 태양광 패널에서 각 부분의 회수는 그림 1(나)와 같은 순서로 진행되는데, 현재로서는 별도의 공정 없이 분리가 가능한 프레임과 정선박스를 제외하고는 온전한 형태로 분리하기 어려워, 각 층을 온전하고 순도 높은 상태로 분리해내기 위한 연구를 진행하고 있다.

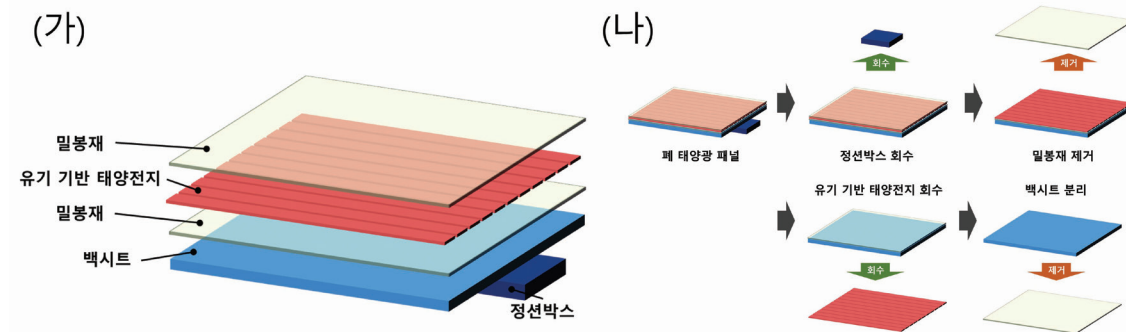
한편, 유기 태양전지, 유·무기 하이브리드 페로브스카이트 태양전지와 같은 유기 기반 태양전지는 위의 무기 반도체 대신 유기 기반 반도체를 광활성층으로 이용한 태양전지로, 현재 소면적 소자 기준 유기 태양전지는 약 20%,<sup>4</sup> 페로브스카이트 태양전지는 26% 이상의 효율이 보고되고 있다.<sup>5</sup> 이러한 유기 기반 반도체는 상술한 결정형 무기 반도체와 비교하여 1) 용액 공정으로 제작이 가능하고, 2) 수 십~수 백 nm 수준의 훨씬 얇은 두께로도 태양광을 더 효율적으로 흡수할 수 있기 때문에, 유기 기반 태양전지는 무기 태양전지와는 달리 연속 인

쇄공정을 통해 대량 생산이 가능하고 가벼운 이점을 가진다. 이러한 강점들에 힘입어, 유기 기반 태양전지는 최근 웨어러블 장치, 로봇, 전기 자동차, 넷-제로 건물 등에 적용될 차세대 독립 에너지원으로 각광받고 있다.

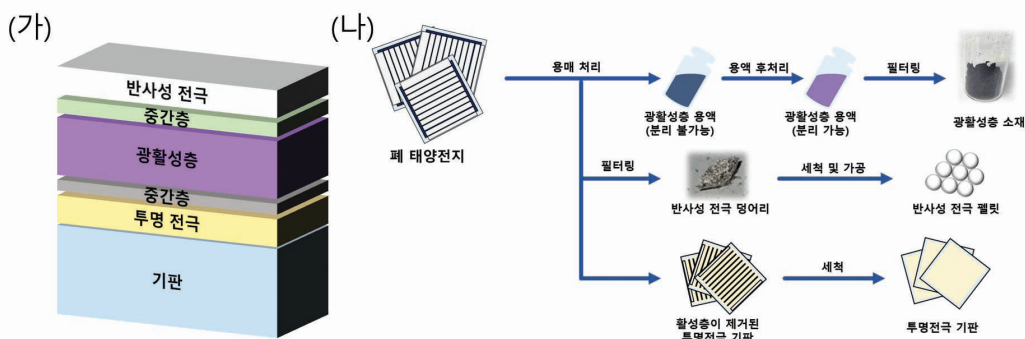
이러한 유기 기반 태양전지를 기반으로 한 태양광 패널은 현재 한화 큐셀을 비롯하여 Heliatek, InfinityPV 등의 소수 기업에서만 제조하는 상용화 초기 단계이지만, 상술한 버려지는 태양광 패널은 시간이 지남에 따라 필연적으로 발생할 수밖에 없다고 할 수 있다. 그러나 버려지는 유기 기반 태양전지의 회수 및 재활용 프로세스는 현재까지 연구가 거의 진행되지 않은 실정이다. 이에 본 지상초대석에서는 용액 공정 유기 기반 태양전지를 재활용하기 위한 기술들을 소개하고자 한다.

## 본론

현재 상용화된 유기 기반 태양광 패널의 구조(그림 2(가))와 상기 폐 태양광 패널의 회수 절차를 함께 고려하면, 폐 유기 기반 태양광 패널



[그림 2] (가) 유기 기반 태양광 패널의 구조와 (나) 폐 태양광 패널의 회수 절차



[그림 3] (가) 일반적인 유기 기반 태양전지의 구조와 (나) 폐 유기 기반 태양전지의 재활용 절차

의 재활용은 아래의 그림 2(나)와 같이 진행할 수 있다.

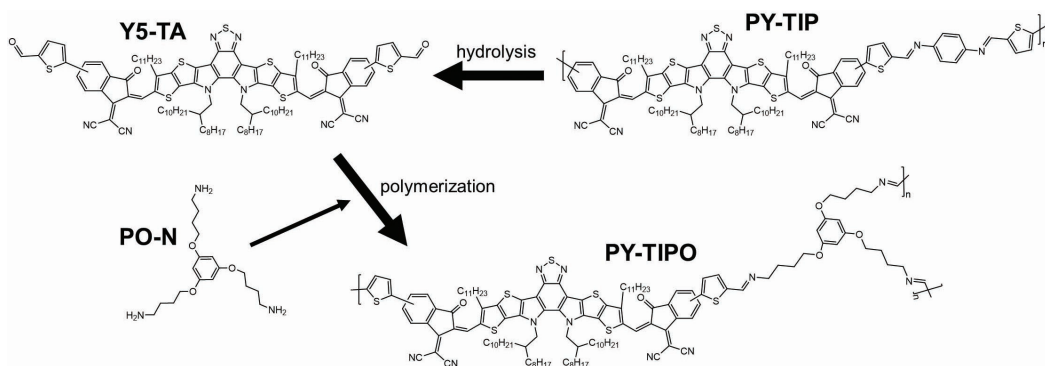
그림에서 보이는 바와 같이, 전체적인 절차는 무기 태양광 패널의 회수 과정과 거의 비슷하지만, 유기 기반 태양전지는 용액 공정을 이용하여 제작할 수 있기 때문에, 마찬가지로 용액 공정을 이용하여 구성 요소들을 회수할 수 있다. 유기 기반 태양전지 재활용은 그림 3(나)와 같이 진행된다.

위의 그림 3(나) 회수 절차를 요약하면 광활성층을 회수하여 재활용하는 절차와 전극 및 기판을 회수하여 재활용하는 절차로 나뉘어짐

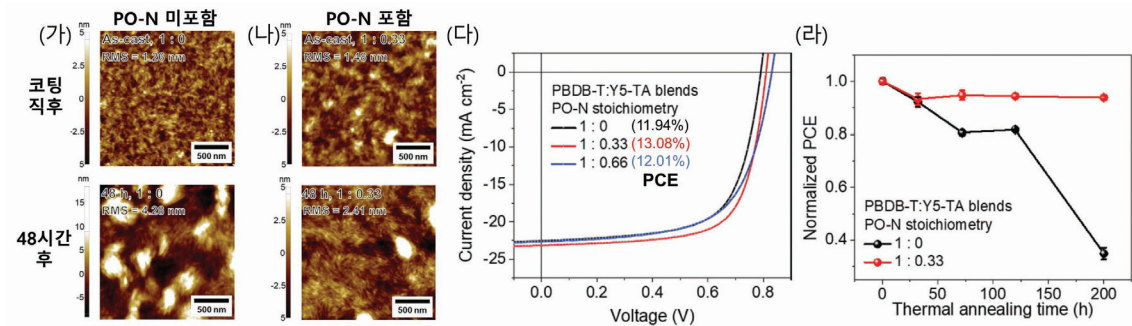
을 알 수 있다.

## 1. 광활성층의 재활용 방법 및 효과

유기 기반 태양전지의 광활성층은 용매를 이용해 용해하여 회수할 수 있다. 유기 태양전지의 경우, 최근 보고되는 고성능 유기 태양전지의 광활성층은 1)고분자 전자 주개/단분자 전자 받개로 구성되거나 2)고분자 전자 주개/고분자 전자 받개로 구성되는 경우가 많다. 이중 1)의 경우에는 고분자와 단분자 사이에 분자량 차이가 크기 때문에 실리카 겔 필터를 이용하여 두 성분을 분리하여 회수할 수 있지만,



[그림 4] 단분자로 회수가 가능한 고분자 전자 받개 소재의 반응 경로<sup>6</sup>



[그림 5] PO-N 포함 유무에 따른 (가,나) PBDB-T:Y5-TA 박막의 열처리에 따른 모폴로지 변화 (130°C, 48시간), (다) 유기 태양전지의 전류 밀도 - 전압 특성, (라) 유기 태양전지의 열처리 시간에 따른 성능 변화 (130°C)<sup>6</sup>

2)의 경우에는 일반적인 방법으로는 분리해내기 어렵다. 이러한 유기 광활성층을 구성하는 두 소재를 효과적으로 분리하기 위해, 한 연구에서는 아래의 그림 4와 같이 특정 조건을 적용하면 단분자로 분리할 수 있는 고분자 전자 받개(PY-TIP)를 합성하였다.<sup>6</sup>

합성한 고분자에 산 처리를 진행하면 가수분해 반응을 통해 PY-TIP 고분자가 단분자(Y5-TA)로 분해되는데, 분해 후 필터링을 통해 고분자 전자 주개 소재와 분해로 얻은 단분자를 각각 회수할 수 있게 된다.

고분자 분해를 통해 얻은 단위체(Y5-TA)는 그대로 재활용할 수도 있지만 여러 다른 구조의 단위체와 함께 합성을 진행하여 다양한 특성의 새로운 고분자 소재를 얻는 재활용(upcycling)에 사용할 수도 있다. 유기 태양전지의 경우, 열을 가하면 열역학적으로 안정해지기 위해 광활성층의 모폴로지가 변화하고, 이에 따라 소자의 성능이 변화하는데, 네트워크 형태의 고분자를 광활성층에 적용하면 이러한 모폴로지의 변화를 억제할 수 있어, 열에 보다 안정적인 광활성층을 형성할 수 있다.<sup>7</sup> 상

기 연구에서는 고분자를 단분자로 분해하는 데에서 더 나아가, 형성한 단분자와 반응하여 네트워크 형태의 고분자를 형성할 수 있는 단위체(PO-N)를 사용하여 네트워크 형태의 고분자인 PY-TIPO를 합성하였다. 그림 5(가,나)를 보면, 48시간 동안 섭씨 130도로 가열한 후 고분자 전자 주개(PBDB-T)와 Y5-TA를 혼합한 박막의 모폴로지를 확인한 결과, PO-N을 포함하지 않은 경우에 비해 PO-N을 포함한 경우 열처리에 따른 모폴로지의 변화가 적는데, 이는 박막에 존재하는 Y5-TA와 반응하여 네트워크 형태의 고분자를 형성하기 때문이다. 그림 5(다,라)에서 확인할 수 있는 바와 같이, 광활성층에 적정량의 PO-N을 첨가하여 소자의 성능은 오히려 증가하면서도 열에 대한 소자의 성능 안정성은 비약적으로 향상함을 확인할 수 있다.

유·무기 하이브리드 페로브스카이트 태양전지의 경우, 유기 태양전지와는 달리 광활성층이 단일 소재로 구성되어있지만, 박막 용해 과정에서 구성 원소들이 이온화되기 때문에, 재사용하기 위해서는 이온을 전구체 소재로 변환

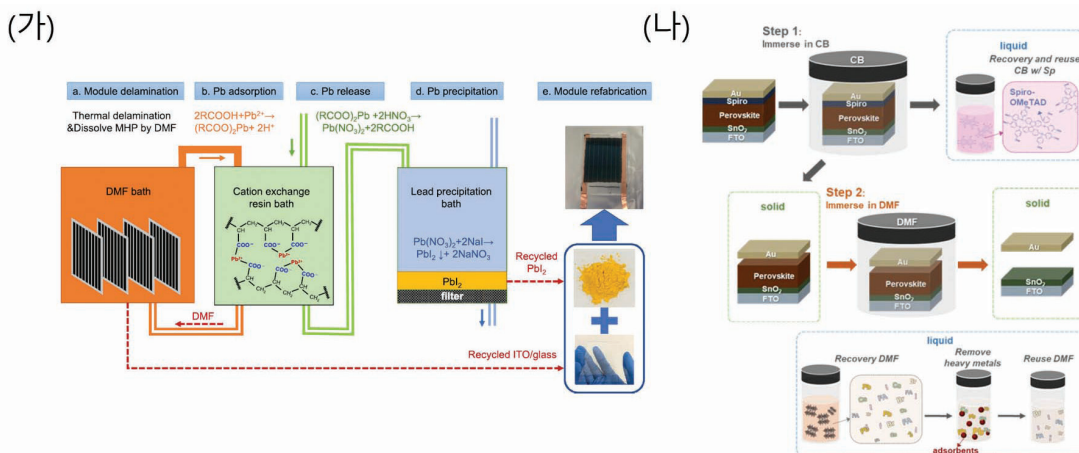


그림 6. (가) 이온 교환 수지를 이용하여 유·무기 하이브리드 페로브스카이트로부터 납 이온을 추출하여 재활용하는 과정,<sup>8</sup>  
(나) 두 용매를 사용하여 페로브스카이트 태양전지의 광활성층과 중간층을 모두 재활용하는 과정<sup>9</sup>

하는 과정이 필요하다. 한 연구에서는 페로브스카이트에 포함되는 원소 중 납 이온 ( $Pb^{2+}$ )을 이온 교환 수지를 이용하여 광활성층을 용해한 용액으로부터 흡착하여 회수하고, 다른 용매에 방출한 후 침전 반응을 일으켜 페로브스카이트의 전구체 소재 중 하나인 요오드화 납 ( $PbI_2$ )을 확보하는 방법을 보고하였다 (그림 6(가)).<sup>8</sup> 해당 방식을 적용하면 광활성층 용액에 포함된 납 이온의 99% 이상을 요오드화 납으로 전환하여 재사용할 수 있게 되므로, 소재의 재활용 이외에도 중금속 배출에 따른 환경 오염도 상당 부분 방지할 수 있다. 그러나 해당 방식으로는 중간층을 따로 회수하기 어렵는데, 중간층과 납 이온을 모두 회수할 수 있는 후술할 방법이 최근 보고되었다 (그림 6(나)).<sup>9</sup>

## 2. 중간층과 전극의 재활용 방법

중간층은 소자 구조에서 전극과 광활성층 사이에 위치하는데, 광활성층에서 태양광을 받아

형성된 전하 운반자들을 전극까지 전달하는 것을 돕거나 전극에서 광활성층으로 주입되는 전하 운반자를 막는 층이다. 이러한 중간층은 소재에 따라 일반적인 광활성층의 두께인 수 백 nm 수준보다 얇은, 수 nm에서 수십 nm 수준의 두께를 가지기 때문에 일반적으로는 광활성층을 용해하는 동안 손상되기 쉽다. 이를 방지하기 위해서는 1) 광활성층 용해 과정에서 손상되지 않는 중간층을 사용하거나, 2) 광활성층을 용해하기 전에 중간층을 선택적으로 용해할 수 있는 프로세스를 적용하여 중간층을 먼저 회수하는 방법이 있다. 전자의 경우, 산화 아연( $ZnO$ )이나 산화 주석( $SnO_2$ )과 같은 금속 산화물 박막을 졸-겔 반응을 이용하여 형성하거나 나노 입자를 소결(sintering)하여 형성한다면 광활성층 용해 과정에서 중간층이 손상되지 않게 유지할 수 있다. 후자의 경우는 광활성층을 용해하기 전에 중간층을 선택적으로 용해시킬 수 있는 용매로 중간층을 먼저 분리하여, 결



과적으로 중간층과 광활성층을 모두 회수할 수 있는 방법이다. 그림 6(나)에서와 같이, 광활성층에는 영향을 주지 않고 중간층만 용해할 수 있는 용매인 클로로벤젠을 이용하여 중간층을 먼저 분리하고 이를 추후 다방면으로 재활용할 수 있기 때문에, 소재의 재활용 측면에서 전자에 비해 더 자유롭다고 할 수 있다. 또한, 특정 소재 또는 공정 방법만 가능한 전자와 달리 적합한 용매만 찾을 수 있다면 소자의 성능 향상을 위해 더 자유롭게 중간층을 설계할 수 있는 장점도 있다.

유기 기반 태양전지의 전극은 일반적으로 기판 위에 위치한 하부 투명전극과 상부 금속 전극으로 구성되는데, 상부 전극인 금속 전극층의 두께는 약 100 nm 수준으로, 광활성층이나 중간층 용해 과정에서 박리되어 해당 용액과 혼합한 상태로 존재하게 된다. 해당 용액을 필터링한 후, 세척과 가공 과정을 거치게 되면 고순도의 금속 전극을 확보할 수 있다. 비록 실험실 수준의 소형 유기 기반 태양전지에서는 적은 양이 회수되지만, 추후 대형 유기 기반 태양광 패널로부터 회수한다면 재사용이 가능할 정도로 상당한 양을 회수할 수 있을 것으로 예상된다. 하부 투명 전극의 경우 주로 인듐 주석 산화물 (indium tin oxide, ITO)이나 불소가 도핑된 산화 주석 (fluorine-doped tin oxide, FTO)이 사용되는데, 해당 전극은 용매를 이용한 광활성층이나 중간층의 용해 등과 같은 일반적인 유기 기반 태양전지의 회수 공정으로는 손상되지 않고 재사용이 가능하기 때문에, 유기 기반 태양전지의 재활용에 적합한 전극이라고 할 수 있다.

## 맺음말

최근 여러 국가에서 탄소중립을 위한 탈탄소 및 친환경 정책이 대두됨에 따라 탄소가 발생하지 않는 신재생 에너지원인 태양광을 이용한 발전이 주목을 받기 시작했고, 유기 태양전지나 유·무기 하이브리드 페로브스카이트 태양전지와 같은 유기 기반 태양전지는 여러 장점과 더불어 최근 높은 성능까지 보고되기 시작하여 차세대 태양전지 형태로 특히 이목을 끌고 있다. 이와 더불어, 수십 년 전부터 사용되기 시작한 무기 태양광 패널 중 수명을 다하고 폐기되는 패널이 해가 갈수록 증가할 것으로 예측되어, 이에 대한 효과적인 처리 방안이 필요한 상황이라고 할 수 있다. 이러한 상황은 유기 기반 태양광 패널이 상용화된 후에도 발생할 것이 자명하므로, 본 지상초대석에서는 이에 대해 폐기되는 유기 기반 태양광 패널을 재활용할 수 있는 연구 결과들을 소개하였다. 비록 현재 유기 기반 태양광 패널이 상용화 초기 단계이고, 이를 재활용할 수 있는 기술은 연구 초기 단계이지만, 무기 태양광 패널에서의 재활용 사례를 거울삼아 연구를 계속해서 진행한다면 유기 기반 태양광 패널이 상용화된 후 버려지는 태양광 패널의 재활용에 대한 부담이 무기 태양광 패널에 비해 상당 부분 완화될 것으로 기대한다.

## 참고문헌

1. Nayak, P. K.; Mahesh, S.; Snaith, H. J.; Cahen, D., Photovoltaic solar cell technolo-

- gies: analysing the state of the art. *Nat. Rev. Mater.* **2019**, 4, 269.
2. 정인수, ASTI market insight 2022 [태양광 패널 재활용], **2022**.
  3. 지식산업정보원, 폐자원 산업별 리사이클링 R&D 분석. **2023**.
  4. Zhu, L.; Zhang, M.; Xu, J.; Li, C.; Yan, J.; Zhou, G.; Zhong, W.; Hao, T.; Song, J.; Xue, X.; Zhou, Z.; Zheng, R.; Zhu, H.; Chen, C.-C.; MacKenzie, R. C. I.; Zou, Y.; Nelson, J.; Zhang, Y.; Sun, Y.; Liu, F., Single-junction organic solar cells with over 19% efficiency enabled by a refined double-fibril network morphology. *Nat. Mater.* **2022**, 21, 656.
  5. NREL Cell Efficiency Chart (<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>)
  6. Jin, H.; Kim, K.; Park, S.; Rhee, J.H.; Ahn, H.; Kim, D. J.; Kim, K.; Noh, J. H.; Kim, T.-S.; Shin, E.-Y.; Son, H. J., Chemically recyclable conjugated polymer and one-shot preparation of thermally stable and efficient bulk-heterojunction from recycled monomer. *Adv. Funct. Mater.* **2023**, 2304930 (DOI: 10.1002/adfm.202304930).
  7. Park, S.; Kim, T.; Yoon, S.; Koh, C. W.; Woo, H. W.; Son, H. J., Progress in materials, solution processes, and long-term stability for large-area organic photovoltaics. *Adv. Mater.* **2020**, 32(51), 2002217.
  8. Chen, B.; Fei, C.; Chen, S.; Gu, H.; Xiao, X.; Huang, J., Recycling lead and transparent conductors from perovskite solar modules. *Nat. Commun.* **2021**, 12, 5859.
  9. Kim, H. J.; Gong, O. Y.; Kim, Y. J.; Yoon, G. W.; Han, G. S.; Shin, H.; Jung, H. S., Environmentally viable solvent management in perovskite solar cell recycling process. *ACS Energy Lett.* **2023**, 8(10), 4330.

••손 해 정••



2000 성균관대학교 화학과 (학사)  
 2002 한국과학기술원 화학과 (석사)  
 2002-2004 삼성중합기술원 연구원  
 2005-2012 시카고대학교 (박사 및 Post-Doc.)  
 2012-현 재 한국과학기술연구원  
 선임/책임연구원  
 2019-현 재 KU-KIST 에너지환경대학원 교수

••윤 성 원••



2015 중앙대학교 화학신소재공학부 (학사)  
 2017 중앙대학교 화학신소재공학과 (석사)  
 2020 대구경북과학기술원  
 에너지공학전공 (박사)  
 2020-현재 한국과학기술연구원 박사후연구원