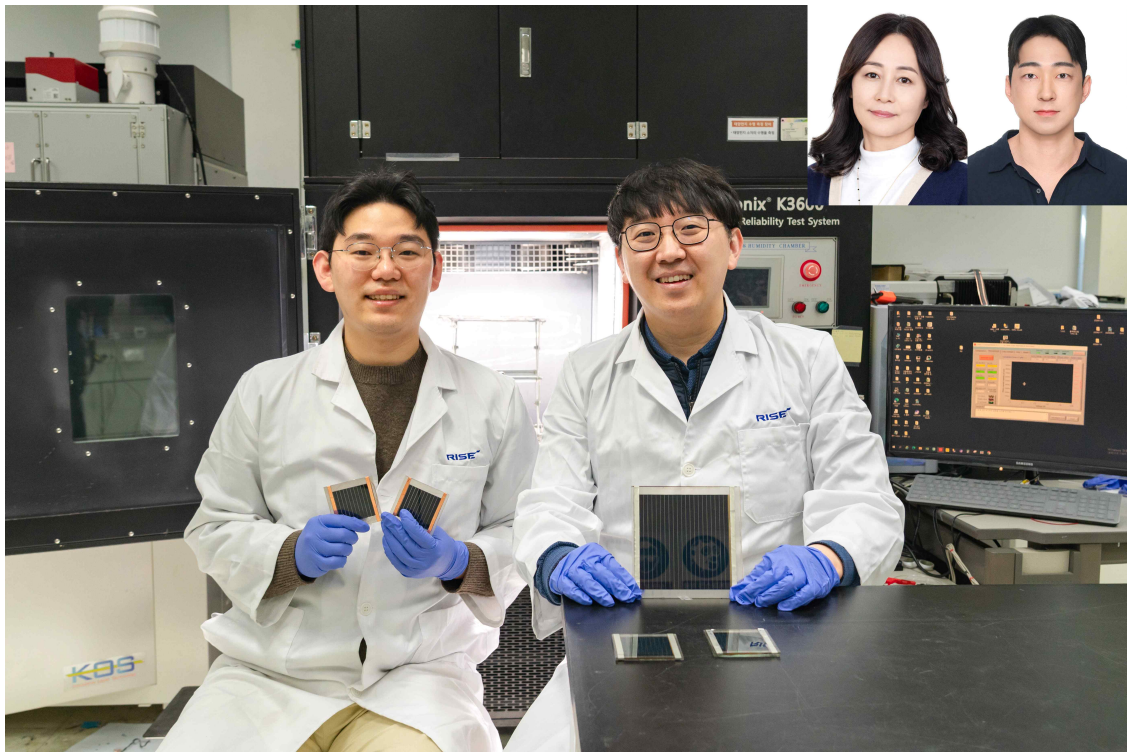


“크게 만들어도 성능은 그대로” GIST, 상용화 한계 넘는 대면적 태양전지 핵심 기술 개발

- 차세대에너지연구소 강홍규 부소장 연구팀, 전자수송층 형성 초기 단계에서 계면을 직접 제어하는 단순공정 구현... 대면적에서 박막이 고르지 않게 형성되며 발생하는 성능 손실 구조적 개선
- 24.8cm² 대면적 모듈에서 높은 효율(22.56%)과 장기 안정성(500시간 이상) 확보, 프린팅 기반 대량 생산 공정 적용 상용화 가능성 제시... 국제학술지 《Small》 게재



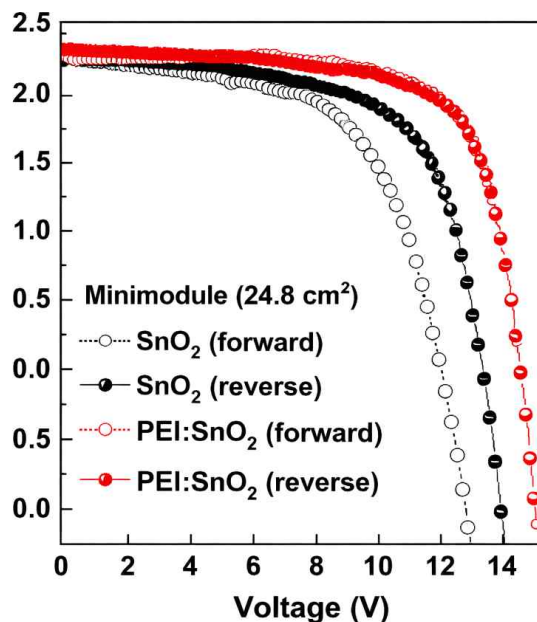
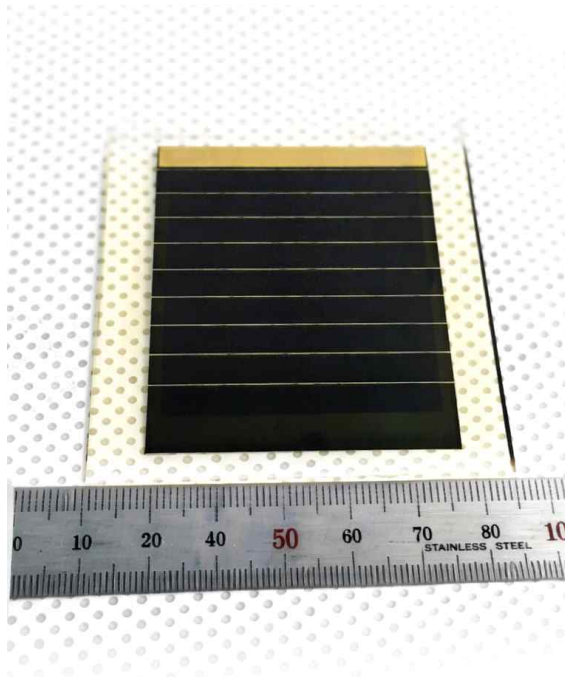
▲ (왼쪽부터) GIST 차세대에너지연구소 김상조 연구원·강홍규 부소장, (상단 왼쪽부터) 강원대학교 류미이 교수·조일욱 박사

상용화를 위해 태양전지를 큰 면적으로 제작해도 효율과 안정성이 떨어지지 않는, 차세대 소재 기반의 페로브스카이트 태양전지 핵심 기술을 국내 연구진이 개발했다.

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 차세대에너지연구소 강홍규 부소장 연구팀이 강원대학교 연구진과 함께, 페로브스카이트 태양전지 내부 층과 층 사이의 특성을 정밀하게 제어하는 계면공학 기술을 개발했다고 밝혔다.

이 기술을 적용한 결과, A4 용지의 약 4분의 1 크기(24.8cm²) 대면적 모듈에서도 22.56%의 높은 전력 변환 효율을 기록했으며, 500시간 이상 사용 후에도 초기 성능의 약 94%를 유지하는 안정성을 보였다.

페로브스카이트 태양전지는 기존 실리콘 태양전지보다 가볍고 공정이 간단해 차세대 태양전지로 주목받고 있다. 그러나 면적이 커질수록 성능과 수명이 급격히 저하되는 한계로 인해 상용화에는 어려움이 있었다.



▲ 페로브스카이트 모듈 사진과 효율 그래프 : PEI로 개질된 SnO₂를 사용하여 제작된 24.8 cm² 페로브스카이트 태양전지 모듈 사진과 개질 전과 후의 효율 그래프임

태양전지의 면적이 커질수록 내부 박막이 균일하게 형성되기 어렵고, 전자가 이동하는 과정에서 손실이 증가해 효율과 안정성이 함께 떨어지는 문제가 발생해 왔다.

연구팀은 이러한 문제의 핵심 원인으로 태양전지 내부에서 전자의 이동을 담당하는 '전자수송층*'의 계면 특성에 주목했다.

전자수송층으로 널리 사용되는 주석산화물(SnO₂)*은 전자 이동에는 유리하지만, 표면이 잘 젖지 않아 그 위에 형성되는 박막이 고르지 못하고 미세한 결함 때문에 전자가 중간에 사라지는 문제가 있었다.

* 전자수송층(electron transport layer): 태양전지 내부에서 빛을 받아 생성된 전자가 손실되지 않고 전극까지 이동해 전기로 활용될 수 있도록 돕는 층이다. 전자가 이동하는 통로 역할을 하며, 이 층의 특성에 따라 전자의 이동 속도와 손실 정도가 달라져 태양전지의 효율과 안정성에 큰 영향을 미친다.

* 주석산화물(SnO₂): 주석(Sn)과 산소(O₂)로 이루어진 산화물 반도체 소재로, 전자가 빠르고 안정적으로 이동하는 특성을 지닌다. 화학적 안정성과 투명도가 높아 페로브스카이트 태양전지에서 전자수송층으로 널리 사용되며, 태양전지의 전자 추출 효율과 수명에 중요한 역할을 한다.

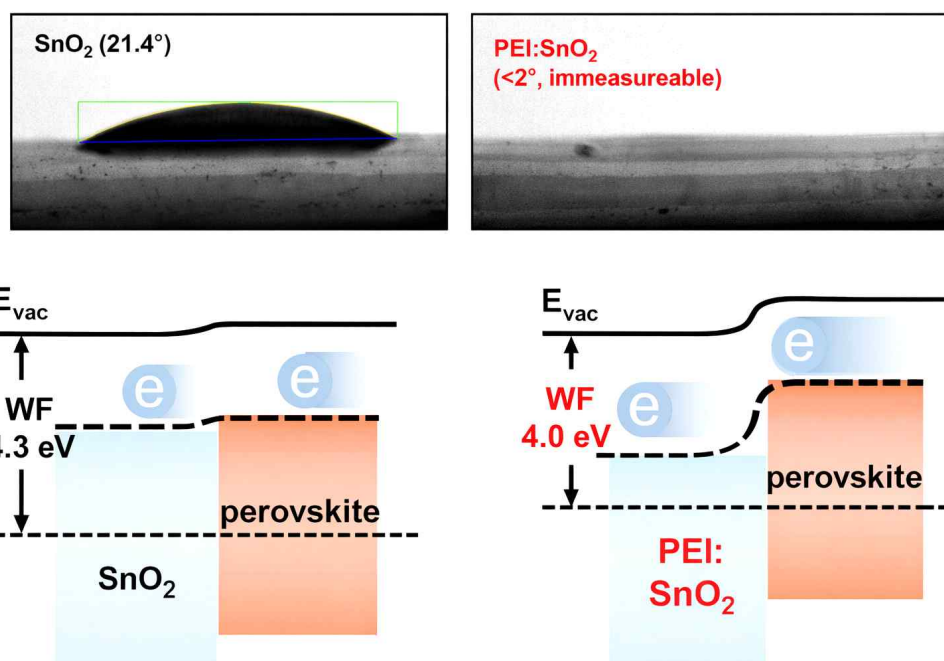
이에 연구팀은 전자수송층을 형성하는 초기 단계에서 고분자 물질인 'PEI(polyethyleneimine)*'를 주석산화물(SnO₂)과 함께 혼합하는 간단한 공정 방식을 도입해, 한 번에 두 가지 문제를 해결했다.

고분자 물질 PEI는 주석산화물(SnO₂) 표면의 미세한 결함을 메워 전자 손실을 줄이고, 계면의 전기적 환경을 개선해 전자가 보다 원활하게 이동할 수 있도록 돕는다.

이로 인해 태양전지 내부에서 전자 이동 장벽이 낮아지고, 태양전지 전체의 효율과 안정성이 동시에 향상됐다.

* **PEI(polyethyleneimine)**: 아민(amine) 작용기를 포함한 고분자 물질로, 표면과 잘 결합하는 특성을 지닌다. 페로브스카이트 태양전지에서는 전자수송층 표면의 미세한 결함과 결합해 전자 손실을 줄이고, 계면에 전기적 쌍극자를 형성해 전자가 더 쉽게 이동할 수 있도록 돕는 역할을 한다. 이를 통해 태양전지의 효율과 안정성을 함께 향상시킨다.

이번 연구의 가장 큰 특징은 하나의 단순한 공정만으로 박막이 고르게 형성되도록 하는 특성(표면 젖음성)과 전자 이동 특성 조절을 동시에 구현했다는 점이다.



▲ 개질되지 않은 SnO_2 와 개질된 SnO_2 의 젖음성과 계면에서의 전자 수송 현상 그림 : 접촉각 측정기를 통해 SnO_2 표면에서 페로브스카이트 용매에 대한 접촉각을 나타내며, 개질된 SnO_2 의 경우 젖음성 향상으로 인해 용매가 표면에서 접촉각 측정이 안될 정도로 빠르게 퍼짐을 확인함. 또한 개질을 통한 일함수 변화에 의해 계면에서의 전자 수송 특성이 향상됨을 확인함.

연구팀은 주석산화물(SnO_2) 전자수송층을 만드는 초기 단계에서 계면을 직접 제어함으로써, 추가 공정 없이도 큰 면적으로 제작해도 박막이 균일하고 품질 편차가 적도록 했다. 이는 잉크를 인쇄하듯 박막을 형성하는 프린팅 방식 등 대량 생산에 적합한 태양전지 제조 공정에서 특히 유리한 접근법이다.



▲ (왼쪽) 대면적 페로브스카이트 태양전지 모듈 성능 데이터에 대해 연구진이 논의하고 있는 모습 (오른쪽) 솔라 시뮬레이터를 활용해 대면적 페로브스카이트 태양전지 모듈의 광전 변환 효율을 측정하는 실험 장면

그 결과, 소면적 셀뿐만 아니라 큰 면적으로 제작한 태양전지 모듈에서도 높은 효율과 안정성을 꾸준히 유지할 수 있었으며, 대량 생산과 상용화 가능성을 크게 높였다는 평가를 받는다.

이는 태양전지의 면적이 커질수록 문제가 됐던 박막이 고르지 않게 형성되는 현상과, 박막 내부나 층 사이에 생긴 미세한 틈이나 불완전한 접합 부위에서 전자가 사라져 전기로 활용되지 못하는 손실(비발광 재결합* 현상)을 효과적으로 줄일 수 있음을 의미한다.

* 비발광 재결합: 빛을 받아 생성된 전자와 정공이 전극으로 이동해 전기를 만들어야 하지만, 소자 내부에 존재하는 결함이나 계면에서 서로 다시 결합하면서 빛이나 전기를 내지 못한 채 에너지로 소멸되는 현상이다. 이 과정이 많아질수록 태양전지 내부에서 실제로 활용되는 전자의 수가 줄어들어 발전 효율이 떨어지고 소자의 안정성도 함께 저하된다.

강홍규 GIST 차세대에너지연구소 부소장은 "이번 연구는 대면적 페로브스카이트 태양전지의 핵심 난제로 꼽혀온 젖음성과 박막 균일성 문제를 간단한 공정으로 동시에 해결했다는 점에서 의미가 크다"며, "높은 에너지 변환 효율과 장기 안정성을 함께 확보한 만큼, 향후 페로브스카이트 기반 대면적 태양전지의 상용화를 앞당기는 데 기여할 것으로 기대된다"고 말했다.

이번 연구는 교육부·한국연구재단 기초연구사업, 산업통상자원부 산업기술개발사업, 교육부·강원특별자치도 지역혁신중심 대학지원체계(RISE) 사업, GIST 미래선도형 특성화 연구과제의 지원을 받았다.

연구 결과는 국제학술지 《스몰(Small)》에 2025년 12월 19일 온라인으로 게재됐다.

한편 GIST는 이번 연구 성과가 학술적 의의와 함께 산업적 응용 가능성까지 고려한 것으로, 기술이전 관련 협의는 기술사업화센터(hgmoon@gist.ac.kr)를 통해 진행할 수 있다고 밝혔다.

논문의 주요 내용

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Small (2023 JCR 상위 7.2%, Impact Factor: 12.1)

- 논문명 : Dual-Function Interface Engineering of SnO₂ Electron Transport Layers: Wettability Enhancement and Work Function Tuning for Efficient and Stable Perovskite Solar Cells and Minimodules
- 저자 정보 : 조일욱(GIST 차세대에너지연구소, 강원대학교, 제1저자), 김상조(GIST 차세대에너지연구소, 공동제1저자), 황문태(강원대학교), 김흥식(강원대학교, 한국에너지공과대학교), 강홍규(GIST 차세대에너지연구소, 공동 교신저자), 류미이(강원대학교, 대표 교신저자)