

“폭염에 달궈져도 끄떡없다” GIST, 유기태양전지 '고온 열화' 막는 계면 제어 기술 개발

- '세계 최초 페로브스카이트 태양전지 상용화 전략연구사업단(단장 이광희), 유기태양전지가 고온에서 성능이 떨어지는 원인 규명... 산화몰리브덴이 광활성층 내부로 이동하는 현상 밝혀
- 계면 제어 기술 적용해 85°C에서 2,000시간 동안 초기 광전변환효율 약 18.1% 유지
- 초기 성능 급감 현상인 '번인 손실'도 억제... 국제학술지《Small》게재



▲ (왼쪽부터) '세계 최초 페로브스카이트 태양전지 상용화 전략연구사업단(전략연구사업단)' 이광희 단장, 차세대에너지연구소 강홍규 부소장, 히거신소재연구센터 이산성 박사

광주과학기술원(GIST·지스트, 총장 임기철)은 '세계 최초 페로브스카이트 태양전지 상용화 전략연구사업단(이하 전략연구사업단)' 이광희 사업단장(신소재공학과 초빙 석학) 연구팀이 유기태양전지가 고온에서 성능이 떨어지는 원인을 밝혀내고, 이를 억제하는 새로운 계면 제어 기술을 개발했다고 밝혔다.

연구팀이 개발한 기술을 적용한 유기태양전지는 85 °C에서 2,000시간 이상 작동한 뒤에도 초기 광전변환효율 약 18.1 %를 거의 그대로 유지했다. 특히 유기태양전지에서 흔히 나타나는 초기 성능 급감 현상인 '번인 손실(Burn-in loss)*'도 나타나지 않았다.

* 번인 손실(Burn-in loss): 태양전지가 열이나 빛 등에 노출된 초기 단계에서 광전변환효율이 급격히 감소하는 현상이다.

유기태양전지는 햇빛을 전기로 바꾸는 핵심 소재로 유기물을 사용하는 태양전지다. 실리콘 태양전지보다 가볍고 유연하게 만들 수 있고, 용액을 이용해 비교적 낮은 온도에서 제작할 수 있다는 장점이 있다.

하지만 열에 약하다는 점은 상용화의 걸림돌이다. 실제 태양광 발전 환경에서는 태

양전지가 햇빛을 받으면서 높은 온도에 노출될 수 있기 때문에, 장시간 사용해도 성능을 유지할 수 있는 기술이 필요하다.

연구팀은 유기태양전지의 발전을 담당하는 광활성층 자체가 아니라, 광활성층과 전극 사이에서 전하의 이동을 돕는 '계면'에 주목했다.

유기태양전지는 햇빛을 받으면 전자와 전자가 빠져나간 빈자리인 '정공'이 만들어지고, 이들이 각각 전극으로 이동하면서 전기를 만든다.

이 가운데 정공이 전극으로 이동하도록 돕는 '정공수송층'에는 산화몰리브덴(MoO_x)이 널리 사용된다.

문제는 이 산화몰리브덴이 고온에서 제자리에 머물지 못한다는 것이었다.

연구팀은 유기태양전지를 85 °C에서 가열하면서 소자 내부에서 어떤 변화가 일어나는지 추적했다.

그 결과, 산화몰리브덴이 고온에서 원래 있던 위치를 벗어나 태양전지의 발전을 담당하는 광활성층 내부로 서서히 퍼져 나가는 현상을 확인했다.

이렇게 이동한 산화몰리브덴은 광활성층 안에 전하의 이동을 방해하는 결함을 만들고, 전극까지 전하가 제대로 이동·수집되는 것을 방해했다. 결국 태양전지의 전기 생산 능력이 떨어지는 것이다.

이를 통해 연구팀은 산화몰리브덴의 전기적 특성이 변하는 것보다, 산화몰리브덴이 광활성층으로 이동하는 것이 고온 성능 저하의 보다 중요한 원인임을 밝혀냈다.

연구팀은 산화몰리브덴이 움직이지 못하도록 계면에서 안정화하면 고온 열화를 막을 수 있을 것이라는 데 착안했다.

이를 위해 산화몰리브덴과 광활성층 사이에 'PBN'이라는 작은 분자를 삽입했다.

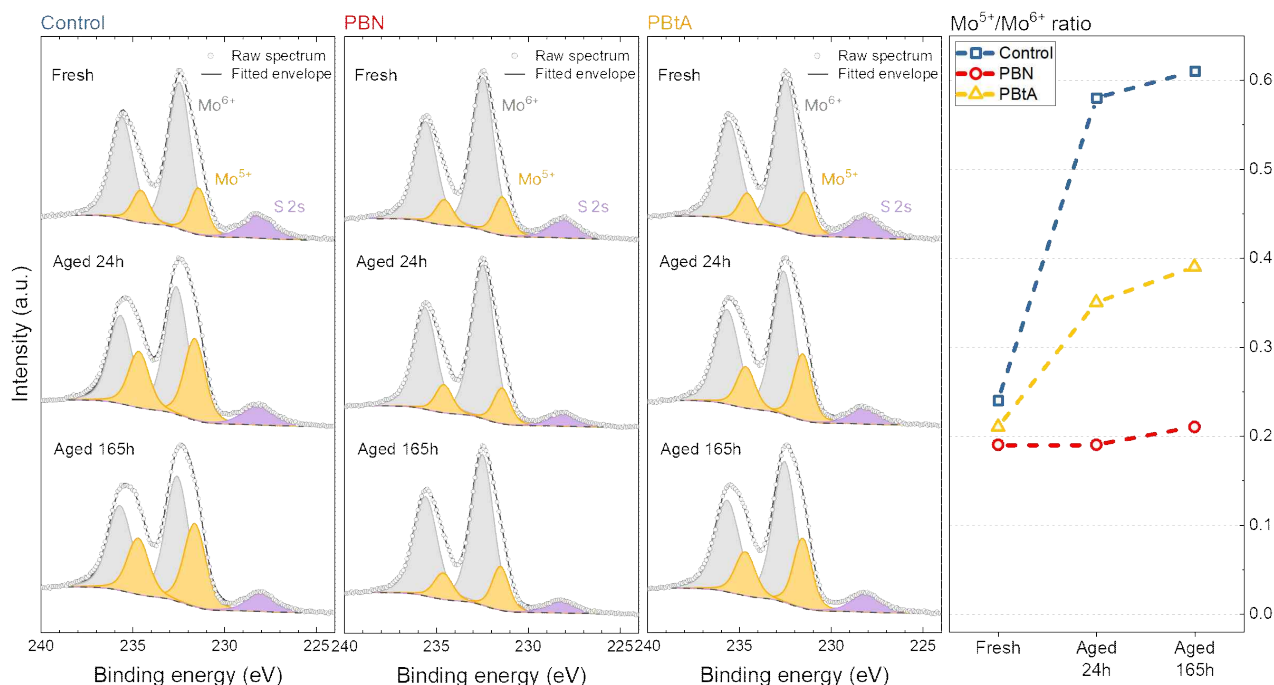
PBN에는 분자 안에서 특정한 화학적 성질을 나타내는 원자들의 묶음인 '나이트론(nitrone) 작용기'가 있다. 이 작용기는 산화몰리브덴 표면의 불안정한 부분과 강하게 상호작용해 표면을 안정화하고, 고온에서 산소가 빠져나가 생기는 '산소 결함'도 억제했다.

쉽게 말해 PBN이 산화몰리브덴과 광활성층 사이에서 일종의 '보호 역할'을 하면서 산화몰리브덴이 광활성층 안으로 퍼지는 것을 막은 것이다.

실제 태양전지에 PBN을 적용한 결과, 고온에서도 매우 안정적인 성능이 확인됐다.

PBN을 적용한 유기태양전지는 85 °C에서 2,000시간이 지난 뒤에도 초기 광전변환 효율 약 18.1 %를 100 % 수준으로 유지했다.

반면 PBN을 적용하지 않은 태양전지는 고온에 노출된 지 2시간 만에 효율이 약 20 % 감소했고, 24시간 뒤에는 약 25 % 감소했다.



▲ 고온에서 산화몰리브덴 표면에 생기는 산소 결함과 PBN의 결함 억제 효과. 85 °C에서 열을 가하며 미처리(Control), PBN 처리, 비교군(PBtA) 처리에 따른 산화몰리브덴의 화학적 변화를 X선 광전자 분광법(XPS)으로 분석했다. 미처리 표면은 시간이 지날수록 산소 결함을 나타내는 Mo^{5+} 비율이 증가한 반면, PBN을 처리한 표면은 165시간 후에도 $\text{Mo}^{5+}/\text{Mo}^{6+}$ 비율의 변화가 거의 나타나지 않았다. 이를 통해 PBN의 나이트론 작용기가 고온에서 산화몰리브덴 표면의 산소 결함 생성을 억제하는 효과를 확인했다.

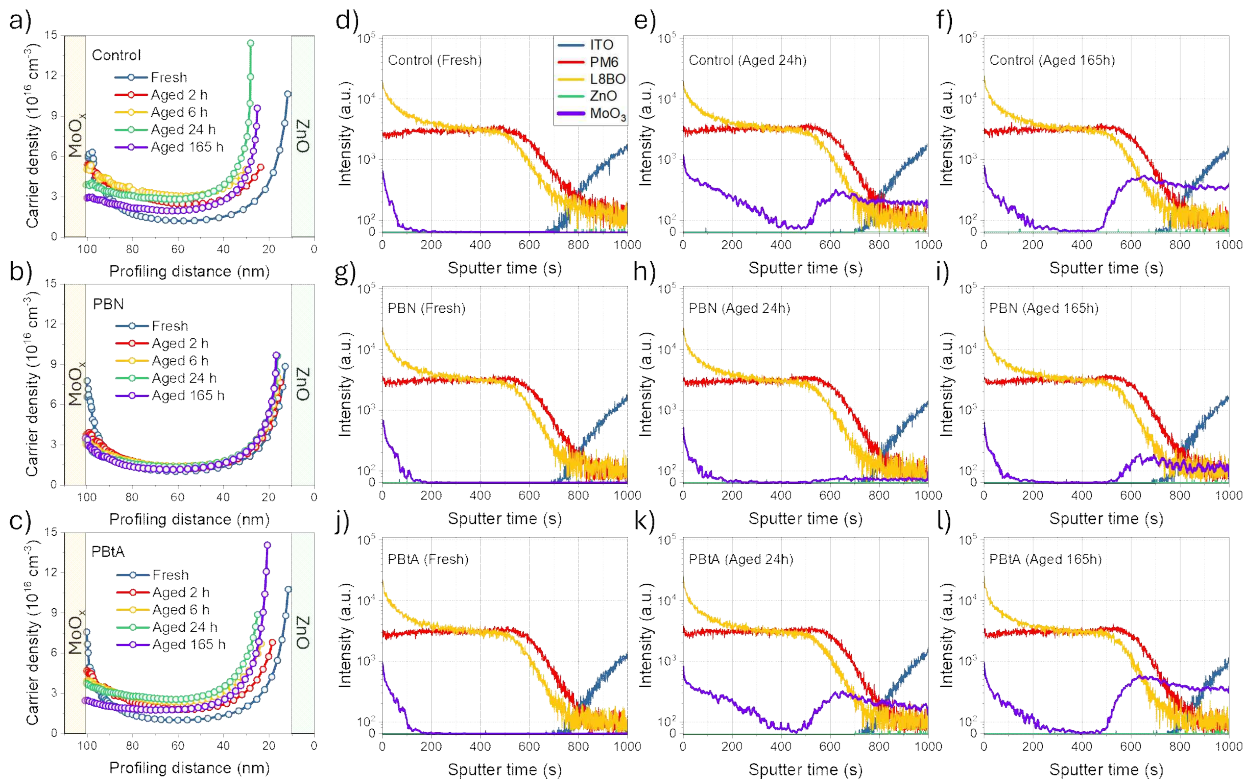
연구팀은 PBN에서 나이트론 작용기가 실제로 중요한 역할을 하는지 확인하기 위해, PBN과 구조가 비슷하지만 나이트론을 구성하는 산소가 빠진 'PBtA'를 비교 실험에 사용했다. 그 결과 PBtA는 산화몰리브덴을 안정화하는 효과가 PBN보다 크게 떨어졌으며, 이를 통해 PBN의 나이트론 작용기가 산화몰리브덴 계면을 안정화하는 핵심 요소임을 확인했다.

연구팀은 이번 기술이 특정 소재 조합에서만 효과가 있는지 확인하기 위해, 서로 다른 소재를 조합해 만든 두 종류의 유기태양전지에도 PBN을 적용했다.

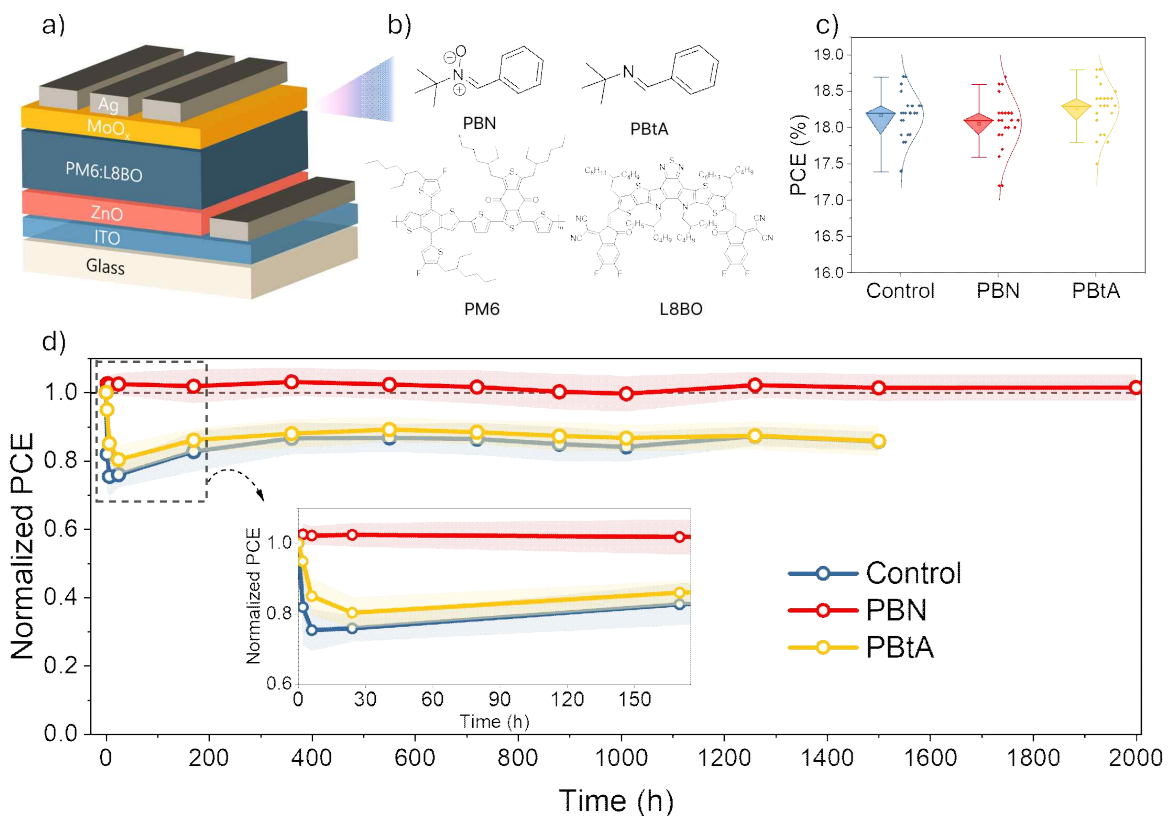
그 결과, 두 종류의 유기태양전지 모두 PBN을 적용한 소자는 85 °C에서 초기 효율을 거의 유지한 반면, PBN을 적용하지 않은 소자는 빠르게 성능이 떨어졌다.

이를 통해 이번 기술이 특정 소재에만 국한되지 않고, 다양한 유기태양전지의 고온

성능 저하를 억제하는 데 활용될 가능성을 확인했다.



▲ 고온에서 산화몰리브덴이 광활성층 내부로 퍼지는 과정과 PBN의 확산 억제 효과. (a~c) 85°C에서 열을 가하며 태양전지 내부의 전하 밀도 분포를 분석한 결과, 미처리(Control) 및 PBtA 적용 소자는 시간이 지날수록 전하 밀도 분포가 변하고 계면 부근에 전하 수집이 어려운 영역이 나타난 반면, PBN 적용 소자는 비교적 안정적인 분포를 유지했다. (d~l) OrbiSIMS 분석 결과, 미처리 및 PBtA 적용 소자에서는 산화몰리브덴 성분이 광활성층 내부로 퍼진 뒤 시간이 지나면서 반대편 ZnO 계면까지 이동·축적됐다. 반면 PBN 적용 소자는 165시간 후에도 산화몰리브덴의 내부 확산이 억제된 것으로 나타났다.



▲ PBN 계면 처리에 따른 유기태양전지의 초기 효율과 장기 열안정성 평가. (a) 연구에 사용한 유기태양전지의 구조, (b) PBN·PBtA 및 광활성층 소재의 화학 구조를 나타낸다. (c) PBN을 계면에 적용한 뒤에도 초기 광전변환효율은 약 18.1~18.3 % 수준으로 유지돼 계면 처리에 따른 초기 성능 저하가 나타나지 않았다. (d) 85°C에서 장기 열안정성을 평가한 결과, 미처리(Control) 및 PBtA 적용 소자는 초기에 효율이 급격히 떨어지는 '번인 손실(Burn-in loss)'이 나타난 반면, PBN 적용 소자는 번인 손실 없이 2,000시간 동안 초기 효율을 거의 그대로 유지했다.

이광희 전략연구사업단장은 “이번 연구는 유기태양전지가 고온에서 성능이 떨어지는 핵심 원인을 찾아내고, 그 원인이 되는 소재의 움직임을 계면에서 직접 억제할 수 있는 방법을 제시했다는 데 의미가 있다”며 “이번 기술이 유기태양전지뿐만 아니라 페로브스카이트 태양전지와 유기-페로브스카이트 탠덤 태양전지 등 차세대 태양전지의 장기 안정성을 높이는 데에도 활용될 수 있을 것으로 기대한다”고 말했다.

차세대에너지연구소 강홍규 부소장은 “앞으로 소면적 소자에서 확인한 이번 계면 제어 기술을 대면적 모듈로 확대하고, 장기 신뢰성 평가와 산업계 공동 연구·실증을 거쳐 실제 제품에 적용할 수 있는 기술로 발전시킬 계획”이라고 말했다.

GIST 이광희 전략연구사업단장과 차세대에너지연구소 강홍규 부소장이 공동 교신저자로 참여하고, 히거신소재연구센터 이산성 박사가 제1저자로 수행한 이번 연구에는 포항공과대학교(POSTECH), 핀란드 오보 아카데미 대학교(Åbo Akademi), 스웨덴 린셰핑대학교(Linköping Univ.), 경기대학교, 전남대학교, 한국기초과학지원연구원(KBSI), 한국과학기술연구원(KIST) 연구진이 공동으로 참여했다.

이번 연구는 ▲기후에너지환경부·한국에너지기술평가원 지원사업 ▲과학기술정보통신부·한국연구재단 지원사업 ▲교육부·한국연구재단 지원사업(LAMP 사업) ▲중소벤처기업부 지원사업 ▲과학기술정보통신부·GIST 전략연구사업(ISD)의 지원을 받았다.

연구 결과는 재료과학 분야 국제학술지 《스몰(Small)》에 2026년 7월 31일 온라인으로 게재됐다.

한편 GIST는 이번 연구 성과의 기술사업화 및 산업적 활용에 관심 있는 기업·기관의 문의를 창업혁신진흥원 기술사업화센터(hgmoon@gist.ac.kr)를 통해 받고 있다고 밝혔다.

○ 논문명, 저자정보

- 저널명 : Small (IF: 12.1, Physics, Applied 분야 상위 7.2%, 2024년 기준)
- 논문명 : Burn-in-Loss-Free Organic Solar Cells with Over 2,000 h of Thermal Stability through Nitrone-Based Interface Passivation
- 저자 정보 : 이산성(제1저자, GIST), 박기영(공저자, GIST), 이창훈(공저자, POSTECH), Oskar J. Sandberg(공저자, 핀란드 오보 아카데미 대학교(Åbo Akademi)), 김주현(공저자, 스웨덴 린셰핑대학교(Linköping Univ.)), 기태윤(공저자, GIST), 이종훈(공저자, 경기대), 신동근(공저자, 전남대), 진종성(공저자, 한국기초과학지원연구원(KBSI)), 성지영(공저자, 한국기초과학지원연구원(KBSI)), 황인욱(공저자, GIST), 장주빈(공저자, GIST), 김기태(공저자, 한국과학기술연구원(KIST)), 박수형(공저자, 한국과학기술연구원(KIST)), 심지훈(공저자, 포항공과대학교(POSTECH)), 강홍규(공동교신저자, GIST), 이광희(공동교신저자, GIST)