

“우리 집 창문이 밝은 잘 보이면서 전기도 생산한다면?”

GIST, 차세대 반투명 태양전지 개발

고투과·고효율 동시 구현

- 차세대에너지연구소 강홍규 책임연구원·신소재공학과 이광희 교수 공동연구팀, 전하 이동을 최적화하는 첨가제를 단순한 소자 설계에 도입해 투명도-효율 상충 관계 동시 극복
- 투명도 37.5%, 발전 효율 10.7% 동시 달성하고, 광 이용 효율(LUE)도 4.01%로 세계 최고 수준 기록... 창문·건물 외장재·차량 유리 등 실용화 응용 가능성 입증
- 국제학술지《Journal of Materials Chemistry A》 '핫 페이퍼(Hot Paper)' 선정



▲ (왼쪽부터) GIST 차세대에너지연구소 강홍규 책임연구원, 신소재공학과 이광희 교수, 오주희 석박 통합과정생(제1저자), 김주현 박사(제1저자)

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 차세대에너지연구소 강홍규 책임연구원과 신소재공학과 이광희 교수 공동연구팀이 차세대 반투명 유기태양전지(ST-OPVs)*의 투명도와 발전 효율을 크게 향상시킬 수 있는 원천 기술을 개발했다고 밝혔다.

이번 성과는 기존처럼 복잡한 다층 구조에 의존하지 않고, 단순한 소자 설계로 투명도와 발전 효율을 모두 확보할 수 있는 새로운 설계 전략을 제시한 것으로, 반투명 유기태양전지가 실제 응용 가능한 차세대 에너지 기술임을 입증했다.

* 반투명 유기태양전지(Semitransparent Organic Photovoltaics): 빛을 받아 전기를 생산하는 유기태양전지(OPVs)의 한 형태로, 가시광선의 일부를 투과시키는 특성을 갖는다. 따라서 창문이나 건물 외장재처럼 투명성이 요구되는 곳에 적용할 수 있으며, 건물 일체형 태양광(BIPV), 차량용 태양광(VIPV), 휴대형 전자기기 등 다양한 응용이 가능하다.

유기태양전지*는 가볍고 유연하며 용액 공정을 통한 대량 생산이 가능해 건물 일체형 태양광 발전(BIPV), 차량용 태양광(VIPV), 휴대용 전자기기 등 다양한 응용이 가능한 차세대 태양전지로 주목받고 있다. 특히 반투명 유기태양전지는 가시광선을 투과시키고 근적외선 영역만을 선택적으로 흡수해 전기를 생산하기 때문에 '태양광 창문'처럼 활용할 수 있다.

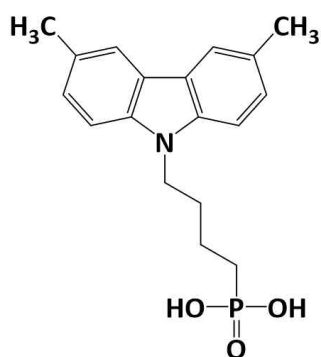
그러나 지금까지는 반투명 구조의 특성상 투명도(AVT)를 높이면 발전 효율(PCE)이 떨어지고, 발전 효율을 높이면 투명도가 줄어드는 **상충 관계(trade-off)*** 때문에 두 성능을 동시에 만족시키는 데 어려움이 있었다.

* **유기태양전지(Organic Photovoltaics, OPVs)**: 태양광을 전기로 변환하는 태양전지의 한 형태로, 유기 반도체 소재(고분자·소분자 등)를 광활성층으로 사용한다. 가볍고 유연하며 인쇄 공정을 통해 저비용·대면적 제작이 가능하다는 장점이 있어 건물 외장재, 창호, 차량, 웨어러블 기기 등 다양한 응용이 가능하다.

* **상충관계(trade-off) 문제**: 태양전지는 빛을 흡수해야 전기를 생산할 수 있다. 그런데 반투명 유기태양전지처럼 '투명성'을 확보해야 하는 경우, 빛을 많이 투과시킬수록 흡수되는 빛이 줄어들어 발전 효율이 낮아진다. 반대로, 효율을 높이려면 빛을 최대한 많이 흡수해야 하는데, 이 경우 투명도가 떨어져 창문처럼 투과성을 요구하는 응용(건물 창호, 차량용 패널 등)에 적합하지 않게 된다.

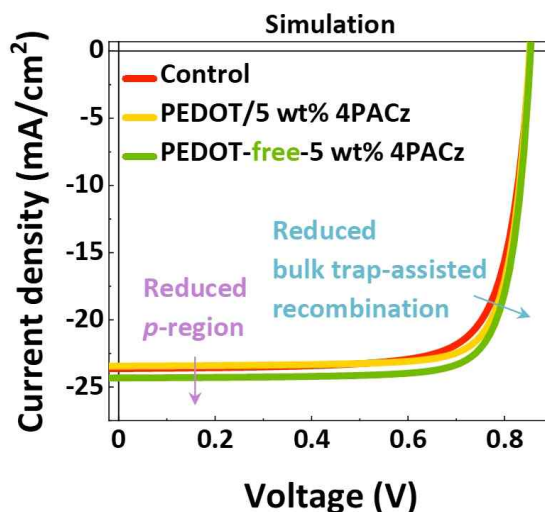
연구팀은 이 문제를 해결하기 위해, **가시광선을 흡수하는 소재인 전자주개*의 함량을 줄여 투명도를 높이고, 대신 전기 흐름이 원활히 이어지도록 돕는 정공* 수송 첨가제(Me-4PACz)를 도입했다.**

가.



Me-4PACz

나.



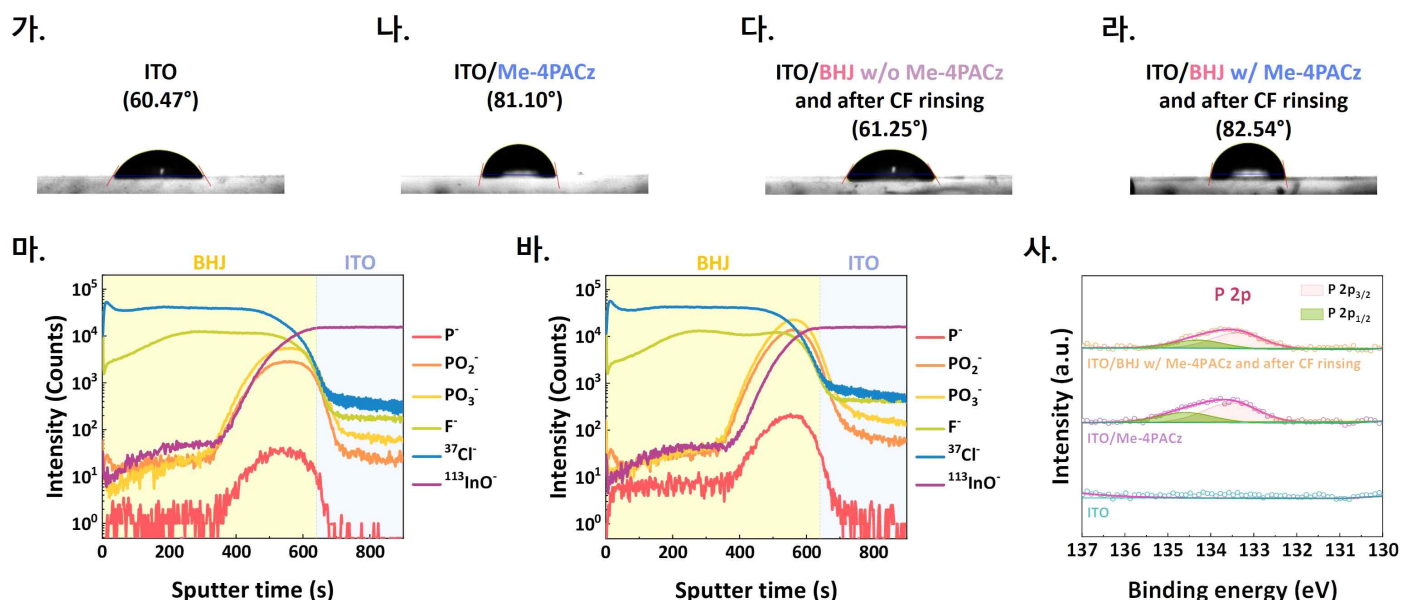
▲ (가) 본 연구에 사용된 첨가제(Me-4PACz)의 화학 구조, (나) 소자 성능 시뮬레이션 결과 (Me-4PACz는 자기조립이 가능한 정공수송층 소재로, 광활성층에 첨가되면 ITO/광활성층 계면과 벌크 내부의 결함 및 재결합을 줄인다는 것을 전류-전압(J-V) 시뮬레이션을 통해 확인함).

이 첨가제(Me-4PACz)는 **태양전지의 광활성층 내부에 고르게 퍼져 있으면서 동시에 전극 표면에 전류가 잘 흐를 수 있는 얇은 층인 홀 전송층(HTL)***을 스스로 형성하는 특성이 있다. 이를 통해 전기가 이동하는 길(전하 이동 경로)이 최적화되고 불필요한 손실이 줄어들어, 높은 투명도와 발전 효율을 동시에 확보하는 데 성공했다.

* **전자주개(Donor)**: 유기태양전지 광활성층을 구성하는 물질로, 밴드갭 이상의 태양광을 흡수하면 전자와 정공이 쌍으로 생성된다. 생성된 전자와 정공은 전자주개와 전자받개(Acceptor) 계면에서 분리되어 전자는 전자받개로, 정공은 전자주개 쪽으로 이동한다. 일반적으로 전자주개는 가시광선을 강하게 흡수하기 때문에 반투명 유기태양전지를 만들 때는 함량을 줄여야 하지만, 이 경우 전자와 정공의 이동 균형이 깨져 전하 손실이 증가하고 효율이 낮아지는 한계가 있다.

* **정공(Hole):** 전자가 빠져나가 생긴 빈자리로, 양전하처럼 움직이는 전하 단위. 태양전지에서는 전자와 정공이 균형 있게 이동해야 전하 손실을 줄이고 발전 효율을 높일 수 있다.

* **홀 전송층(HTL, Hole Transport Layer):** 태양전지에서 생성된 정공(Hole)을 효율적으로 전극 쪽으로 이동시키는 역할을 하는 층. 전자와 정공의 이동 경로를 분리하고, 전하 재결합을 줄여 태양전지의 전하 수송 효율과 전체 발전 효율을 높이는 데 중요하다.



▲ (가-라) ITO, ITO/Me-4PACz, ITO/BHJ w/o Me-4PACz and after CF rinsing, 그리고 ITO/BHJ w/ Me-4PACz and after CF rinsing의 물 접촉각 이미지, (마) ITO/PEDOT:PSS/BHJ의 비행시간형 이차이온 질량분석 곡선, (바) ITO/BHJ w/ Me-4PACz의 비행시간형 이차이온 질량분석 곡선, (사) 엑스선 광전자 분광 그래프(Me-4PACz가 ITO 표면에 자기조립되어 정공 수송층을 이루는 것을 확인함. 특히 이 층이 점차적인 농도 분포로 형성되어 정공 수송에 더 유리하게 작용함을 알 수 있음).

연구팀은 핀란드 아보 아카데미 대학교(Åbo Akademi University) 오스카르 샌드버그(Oskar J. Sandberg) 박사 연구팀과 함께 전기·광학 시뮬레이션(Electro-optical Device Simulation)*을 진행해, 첨가제가 실제로 어떤 방식으로 성능 향상에 기여하는지 분석했다.

그 결과, 첨가제가 태양전지 내부의 계면(Interface)*과 벌크(Bulk)* 두 영역에서 모두 작용해, 전하가 다시 만나 소멸되는 재결합(recombination)* 현상을 억제하는 것이 확인됐다.

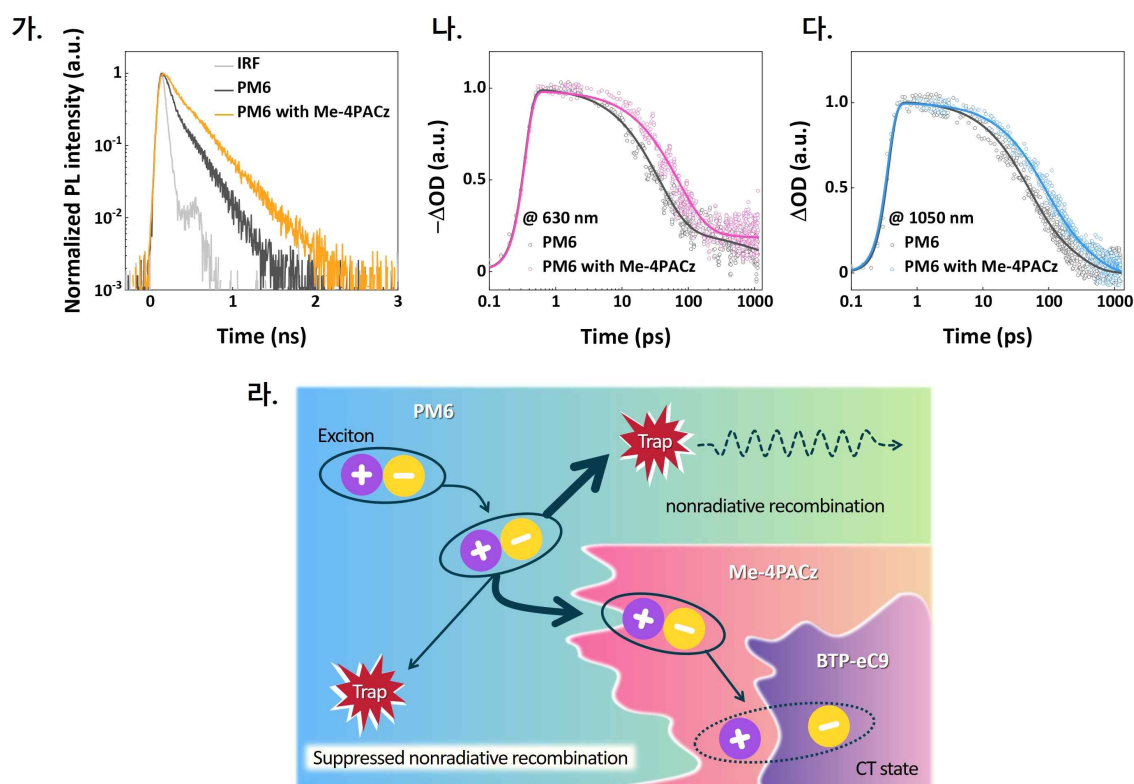
* **계면(Interface):** 서로 다른 두 물질이 맞닿아 있는 경계 부분. 본 연구에서는 ITO 전극과 광활성층 사이의 계면을 의미하며, 전하 이동과 분리에 중요한 역할을 한다.

* **벌크(Bulk):** 재료 전체 또는 내부 영역을 의미하는 용어. 유기태양전지에서는 광활성층 내부, 즉 전자주개와 전자받개가 섞여 있는 영역을 가리키며, 이곳에서 전하가 생성되고 이동하는 특성이 태양전지 효율을 결정한다.

* **재결합(Recombination):** 태양전지에서 빛을 흡수해 생성된 전자와 정공이 다시 만나 소멸하는 현상. 이 과정에서는 전기가 생성되지 않고 에너지가 손실되므로, 재결합을 최소화하는 것이 고효율 태양전지 개발의 핵심 과제이다.

보다 구체적으로, 계면에서는 첨가제가 스스로 정공 수송층을 형성해 전극과의 접촉 저항을 낮추고 전하가 쉽게 빠져나가도록 했다. 벌크 영역에서는 빛을 흡수해 생긴 전자-정공 쌍(엑시톤)이 안정적으로 분리·이동하도록 도와 불필요한 손실을 막았다.

이러한 메커니즘 덕분에 전류 손실이 줄고 소자의 수명도 늘어나, 반투명 유기태양전지의 실용화 가능성을 크게 높인 것으로 평가된다.



▲ (가) 시간 분해 광 발광 스펙트럼 (나) ground state bleaching 영역에서의 감쇠 곡선, (다) photo-induced absorption 영역에서의 동역학 곡선, (라) Me-4PACz 첨가 여부에 따른 벌크 헤테로정선 내 전하 이동 모식도(Me-4PACz 첨가 시 전자주개에서 생성된 엑시톤이 첨가제로 이동하며 비복사 재결합과 트랩 손실이 줄어드는 것을 확인함. 모식도는 이러한 벌크 내 전하 이동 메커니즘을 시각적으로 보여줌).

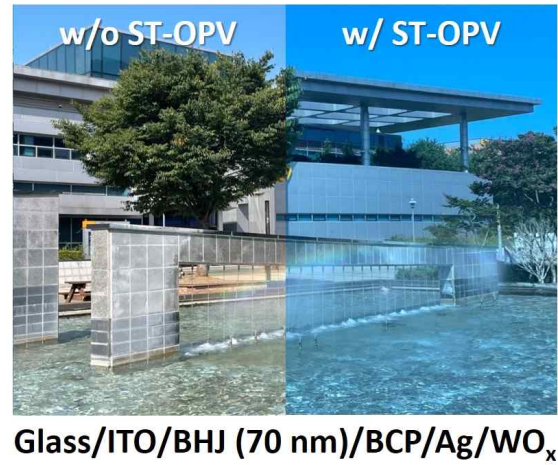
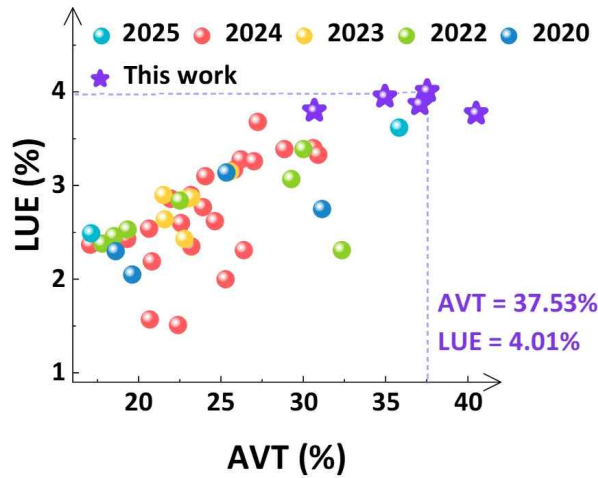
실제 성능에서도 의미 있는 성과를 거뒀다. 연구팀은 **평균 가시광선 투과율(AVT)* 37.53%, 전력 변환 효율(PCE)* 10.7%**를 달성했다. 또한 두 지표를 종합 평가하는 **광 이용 효율(LUE, Light Utilization Efficiency)***에서도 최고 수준인 **4.01%**를 기록하며, 동일 조건 내 반투명 유기태양전지 중 최상의 성능을 구현했음을 입증했다.

* **평균 가시광선 투과율(Average Visible Transmittance)**: 눈으로 볼 수 있는 가시광선 영역(380~780 nm)에서 태양전지가 얼마나 빛을 통과시키는지 나타내는 지표. 값이 높을수록 유리처럼 투명한 성질을 의미함.

* **전력 변환 효율(Power Conversion Efficiency)**: 태양전지가 들어온 태양광 에너지를 얼마나 전기 에너지로 바꿀 수 있는지를 나타내는 지표. 값이 높을수록 전력 생산 능력이 우수함을 의미함.

* **광 이용 효율(Light Utilization Efficiency)**: 반투명 태양전지의 발전 성능을 나타내는 전력변환효율과, 투명성을 나타내는 평균 가시광선 투과율을 곱한 값으로 정의함.

가.



▲ (가) 평균 가시광 투과율과 광 이용 효율 그래프, (나) 본 연구에서 구현한 반투명 유기태양전지 사진(본 연구에서 구현한 소자는 평균가시광투과율과 광이용효율 모두에서 우수한 성능을 기록함. 실제 사진에서도 높은 투명도가 확인되어 건물·차량용 투명창호 응용 가능성을 보여줌).

강홍규 책임연구원은 "이번 연구는 반투명 유기태양전지 분야의 오랜 숙제였던 투명도-효율 간 상충관계를 해소했다는 점에서 의미가 크다"며, "앞으로 건축물 창호 나 차량 유리 등 투명 구조물과 결합한다면, 도시의 친환경 에너지 자립에 크게 기여할 수 있을 것"이라고 전망했다.

이광희 교수는 "이번 성과는 단순한 소재 개선을 넘어, 소자의 계면과 내부 영역을 동시에 제어할 수 있는 새로운 접근법을 제시한 것"이라며, "첨가제가 스스로 계면에 정공 수송층을 형성하고 동시에 광활성층 내부에서 전하 손실을 억제해 성능을 크게 향상시켰다"고 말했다.

GIST 차세대에너지연구소 강홍규 책임연구원과 신소재공학과 이광희 교수가 교신 저자로 참여하고, 오주희 석박통합과정생과 린셰핑대학교(Linköping University)·히거 신소재연구센터 김주현 박사가 수행한 이번 연구는 과학기술정보통신부·한국연구재단 중견연구사업과 세종과학펠로우십의 지원을 받았다.

연구 결과는 국제학술지 《저널 오브 머티리얼즈 에이(Journal of Materials Chemistry A)》에 2025년 8월 21일 온라인 게재됐으며, 학문적·산업적 파급력이 크고 주목할 만한 성과로 인정받아 핫 페이퍼(Hot Paper)로 선정됐다.

논문의 주요 정보

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Journal of Materials Chemistry A(IF: 9.5 , 2024년 기준)
- 논문명 : Achieving excellent charge balance and transport in low-donor bulk heterojunctions for high-performance semitransparent organic photovoltaics
- 저자 정보 : 오주희(제1저자, GIST 신소재공학과), 김주현(제1저자, Linköping University, 히거신소재연구센터) Oskar J. Sandberg(Åbo Akademi University), 김용륜(National University of Singapore), 오창목(GIST 고등광기술연구소), 황인욱(GIST 고등광기술연구소), Gangadhar Banappanavar (Linköping University) 박기영(GIST 신소재공학과), 이산성(GIST 신소재공학과), 강홍규(공동교신저자, GIST 차세대에너지연구소), 이광희(대표교신저자, GIST 히거신소재연구센터, 신소재공학과)