

# 대면적 유기 태양전지, 친환경·고효율로 상용화 가능성 열다

- GIST·UNIST, 신규 광활성층 소재 개발로 200cm<sup>2</sup> 대면적 유기태양전지 효율 11.44% 돌파
- 독성 낮은 비할로겐 용매 및 슬롯-다이 코팅을 활용한 공정으로 상용화 촉진 국제학술지 『Adv. Funct. Mater.』 게재



▲ (왼쪽부터) GIST 강홍규 책임연구원, 이광희 교수, 이양수 연구원(제1저자)

국내 연구진이 독성이 낮은 비할로겐 용매\*로 제작된 200cm<sup>2</sup>의 대면적 유기 태양전지에서 11.44%의 광전 변환 효율(PCE)\*을 달성했다.

\* 비할로겐 용매 (Non-Halogenated Solvent): 할로겐 원소(염소, 브롬, 플루오린 등)가 포함되지 않은 용매로 할로겐 용매에 비해 독성과 환경 영향이 적어 친환경적이며, 안정성이 높은 특징을 가지고 있고 대표적인 비할로겐 용매로는 톨루엔, 자일렌 등이 있다.

\* 광전 변환 효율 (Power Conversion Efficiency, PCE): 태양광 에너지가 전기에너지로 변환되는 비율을 나타내며 태양전지의 성능을 평가하는 중요한 지표이다.

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 차세대에너지연구소 강홍규 책임연구원·신소재공학부 이광희 교수와 울산과학기술원(UNIST) 김봉수 교수 공동 연구팀이 비풀러렌 엑셉터\*의 알킬 체인\*을 비대칭적으로 확장함으로써 광활성층 필름의 균일도를 획기적으로 개선하고, 고효율의 대면적 유기 태양전지를 구현하는 데 성공했다고 밝혔다.

이번 연구 성과는 유기 태양전지의 상용화에 한 걸음 더 다가서는 중요한 전환점이 될 것으로 기대된다.

\* 비풀러렌 엑셉터 (Non-Fullerene Acceptor): 유기태양전지의 광활성층에서 전자를 받아들이는 역할을 하는 중요한 구성 요소이며, 풀러렌 기반 엑셉터에 비해 구조적 다양성이 크고 광 흡수 범위와 전기적 특성을 조절하기 용이하다.

\* 알킬 체인: 알킬기(alkyl group)는 탄화수소 분자에서 하나의 수소 원자가 제거된 형태로, 탄소와 수소로 이루어져 있으며, 이러한 알킬기들이 서로 결합하여 형성된 구조가 알킬체인이다.

유기 태양전지는 건물의 스마트 창문에서부터 웨어러블 기술까지 다양한 응용 분야에 쉽게 통합될 수 있는 잠재력이 있어 유기 태양전지의 상용화를 위한 대면적 유기 태양전지에 대한 관심이 높아지고 있다.

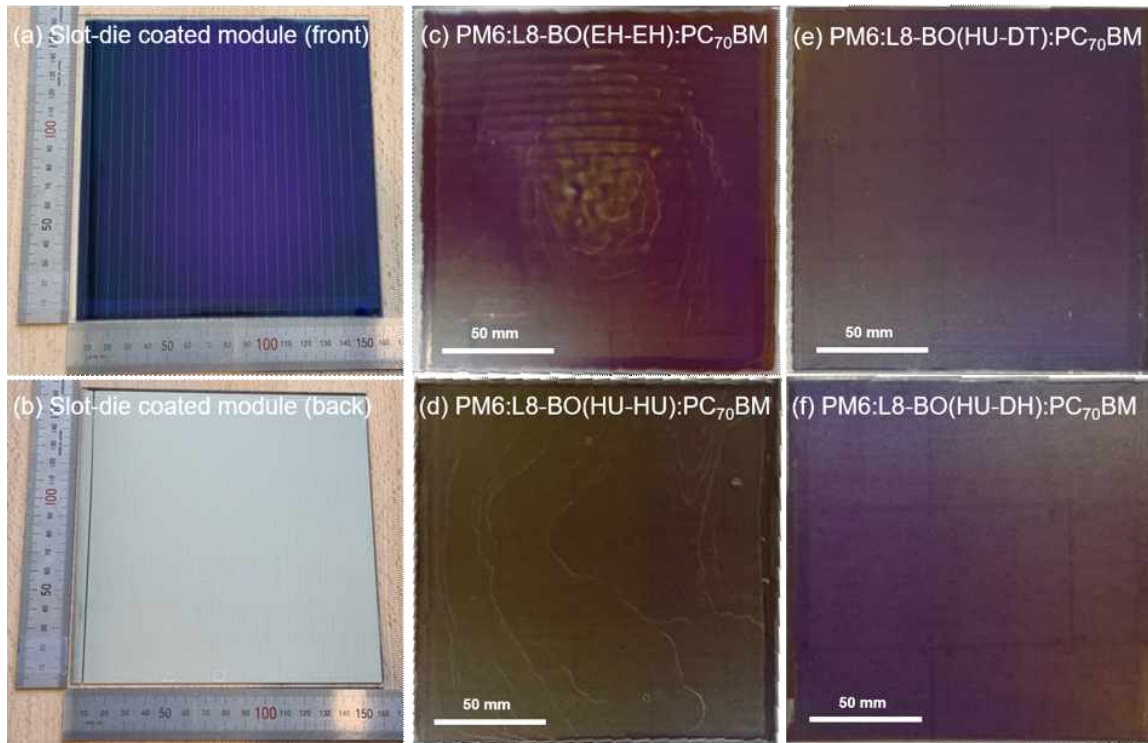
기존 대면적 유기 태양전지는 독성이 강한 할로겐 용매를 사용하여 환경과 인체에 해로우므로 **상용화에 어려움**을 겪었고, 독성이 낮은 비할로겐 용매는 비폴러렌 엑셉터의 '몽침 현상'으로 필름의 균일도가 낮아져 **유기 태양전지의 활성층의 면적이 커질수록 효율이 감소하는 문제**가 있었다.

따라서 비할로겐 용매를 사용했을 때 비폴러렌 엑셉터의 몽침 현상을 줄인 균일한 대면적 광활성층 필름을 형성할 수 있는 새로운 소재 개발의 필요성이 촉구되고 있다.

연구팀은 **비폴러렌 엑셉터의 알킬 체인을 비대칭적으로 확장**하는 방법을 사용했다. 비할로겐 용매에서 비폴러렌 엑셉터의 용해도가 향상됨에 따라 **몽침 현상이 효과적으로 감소되어 200cm<sup>2</sup>의 큰 면적에서도 균일한 광활성층 필름을 형성할 수 있었다.**

\* **할로겐 용매 (Halogenated Solvent):** 염소, 브롬, 플루오린 등의 할로겐 원소를 포함하는 용매로, 유기 화합물에 대한 용해도가 높아 널리 사용된다(ex: 클로로포름, 이염화메틸렌, 클로로벤젠 등). 독성이 있어 인체 및 환경에 대한 유해성이 높아 사용과 처리에 주의가 필요하다.

\* **몽침 현상 (Aggregation):** 분자들이 모여 덩어리를 형성하는 현상. 유기 태양전지에서 광활성층의 과한 몽침 현상은 필름의 균일성을 저하시키며, 상분리로 인해 전하 이동 경로를 방해하여 태양전지의 효율을 감소시킨다.



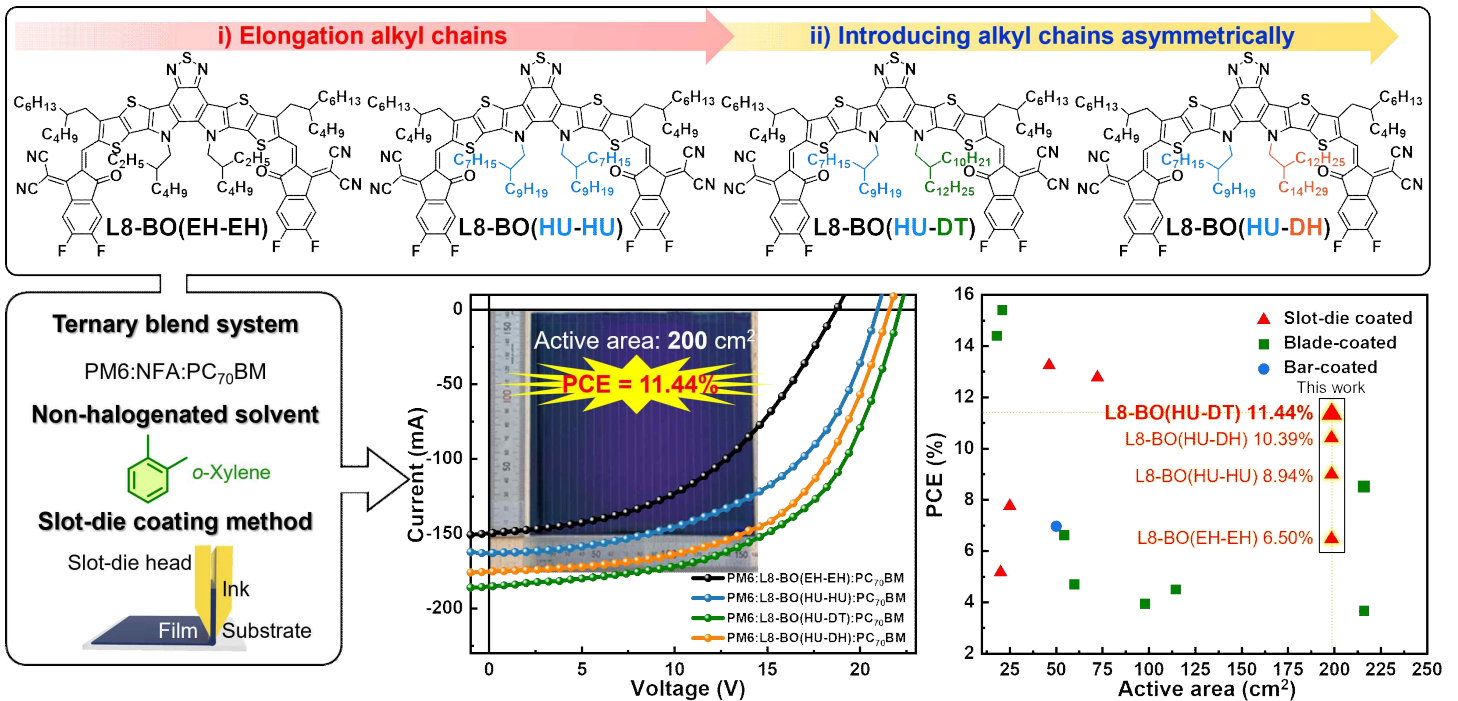
▲ 광활성층 면적 200 cm<sup>2</sup>의 대면적 유기 태양전지 사진 (a) 앞, (b) 뒤, (165 mm × 160 mm), (c—f) 슬롯-다이 코팅 기법으로 제작된 광활성층 필름의 사진. 신규 비폴러렌 엑셉터 L8-BO(HU-DT), L8-BO(HU-DH)를 사용한 광활성층 필름에서 몽침 현상 없이 균일한 대면적 광활성층 필름이 제작된 것을 확인할 수 있음.

이번 연구는 **비폴러렌 엑셉터의 알킬 체인을 비대칭적으로 확장**하는 것이 비할로겐 용매로 제작한 대면적 유기 태양전지의 효율을 향상시키는 데 효과적인 전략임을 입증하였으며, 이러한 접근법은 광활성층 내에서 비폴러렌 엑셉터의 몽침 현상을 줄이고 필름의 균일도를 크게 개선하여 대면적 유기 태양전지의 효율을 높였다.

연구팀은 비할로겐 용매인 *o*-자일렌에서 비폴러렌 엑셉터의 **뭉침 현상에 알킬 체인의 비대칭적 확장이 미치는 영향**을 조사했다. 이번 연구에서는 L8-BO(EH-EH)의 알킬 체인을 연장하여 2-헵틸운데실(HU), 2-데실테트라데실(DT), 2-도데실헥사데실(DH) 그룹으로 대체하여 각각 L8-BO(HU-HU), L8-BO(HU-DT), L8-BO(HU-DH)의 **신규 비폴러렌 엑셉터 3종**을 개발하였다.

알킬 체인이 확장된 신규 비폴러렌 엑셉터들은 *o*-자일렌에 대한 용해도가 기존 L8-BO(EH-EH)에 비해 크게 향상되고 **뭉침 현상이 억제되어 더 균일한 광활성층 필름**을 형성하는 데 기여했다. 특히 알킬 체인이 비대칭적으로 확장된 비폴러렌 엑셉터 중 L8-BO(HU-DT)가 포함된 혼합 필름에서 **가장 적은 뭉침 현상이** 확인되었다.

그 결과, 광활성층 면적 200cm<sup>2</sup>의 대면적 유기 태양전지에서 L8-BO(HU-DT)를 사용한 PM6:L8-BO(HU-DT):PC<sub>70</sub>BM 기반 유기 태양전지가 **11.44%의 고효율**을 달성했다. 이는 비할로겐 용매로 제작된 대면적 유기 태양전지 중에서도 매우 높은 효율에 해당하며, 동일한 면적의 PM6:L8-BO(EH-EH):PC<sub>70</sub>BM 기반 유기 태양전지보다(6.50%) **훨씬 우수한 성능**을 나타낸다.



▲ **본 연구에 사용된 물질의 화학구조 및 대면적 유기 태양전지 효율 비교**: 기존 L8-BO(EH-EH)의 알킬 체인을 비대칭적으로 확장시켜 신규 비폴러렌엑셉터 L8-BO(HU-HU), L8-BO(HU-DT), L8-BO(HU-DH)를 합성함. PM6:비폴러렌 엑셉터:PC<sub>70</sub>BM 광활성층을 비할로겐 용매인 *o*-자일렌을 이용하여 슬롯-다이 코팅 방법으로 제작함. 그 결과, 광활성층 면적 200 cm<sup>2</sup>의 대면적 유기 태양전지에서 최고 11.44%의 높은 광전 변환 효율을 기록함.

강흥규 박사는 “이번 연구 성과를 통해 **독성이 낮은 비할로겐 용매를 사용함으로써 차세대 유기 태양전지의 상용화**에 크게 기여할 것으로 기대되며, 슬롯-다이 코팅 방법이 **롤투롤(Roll-to-Roll) 공정**에 적합하여 대면적 유기 태양전지의 대량 생산 및 상용화 가능성을 크게 높였다”고 설명했다.

GIST 차세대에너지연구소 강홍규 책임연구원이 지도하고 차세대에너지연구소 이양수 연구원이 수행한 이번 연구는 과학기술정보통신부와 한국연구재단이 지원하는 기후변화대응기술개발사업, GIST 차세대에너지연구소 기관고유사업의 지원을 받았으며, 재료 분야 세계적 학술지인 '어드밴스트 펑셔널 머티리얼즈(Advanced Functional Materials)'에 2024년 7월 18일 온라인으로 게재됐다.

## 논문의 주요 정보

### 1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Advanced Functional Materials(2023 JCR 상위 4.3%, IF: 18.5)
- 논문명 : Asymmetrical Elongation of Branched Alkyl Chains in Non-Fullerene Acceptors for Large-Area Organic Solar Modules
- 저자 정보 : 김보미(제1저자, UNIST), 이양수(제1저자, GIST 차세대에너지연구소), 엄두현(제1저자, UNIST), 정원(GIST 차세대에너지연구소), 이슬(UNIST), 김광민(UNIST), 남규민(UNIST), 황혜경(UNIST), 김수현(UNIST), 김태윤(UNIST), 이광희(GIST 히거신소재연구센터, 신소재공학과, 교신저자), 강홍규(GIST 차세대에너지연구소, 교신저자), 김봉수(UNIST, 교신저자)