

Review

유기태양전지에서의 광활성층 물질 합성: 분자의 비대칭성적 접근

정우택 · 홍세화 · 문성모* · 손성윤*[†]

포항공과대학교 화학공학과, *광운대학교 화학과

(2024년 9월 6일 접수, 2024년 10월 16일 수정, 2024년 10월 18일 채택)

Synthesis of Photoactive Layer Materials in Organic Photovoltaics: an Asymmetric Molecular Approach

Wooteak Jung, Sehwa Hong, Sung Mo Moon*, and Sung Yun Son*[†]

Department of Chemical Engineering, Pohang University of Science and Technology, 77 Cheongam-Ro, Nam-Gu, Pohang, Gyeongbuk 37673, Korea

*Department of Chemistry, Kwangwoon University, 20 Kwangwoon-Ro, Seoul 01897, Korea

(Received September 6, 2024; Revised October 16, 2024; Accepted October 18, 2024)

초록: 유기 태양전지에서 광활성층 물질은 태양전지의 효율을 결정짓는 가장 중요한 요소이다. 하지만 현재 광활성층 물질의 효율이 이론적 한계에 접근하면서 새로운 형태의 분자 설계가 요구되고 있다. 대부분의 광활성층 물질은 도너(Donor)와 어셉터(Acceptor)로 구성되며, 이들은 단분자 혹은 고분자 형태로 합성한다. 지금까지의 도너와 어셉터는 비교적 합성과 분석이 용이한 대칭 구조로 설계되었다. 하지만 이런 단순한 구조는 효율을 보다 증가하는데 있어 한계점이 분명하다. 이를 극복하기 위해 새로운 형태의 광활성층 물질로서 비대칭구조가 제시되었으며, 비대칭 구조 분자간의 강한 상호작용을 유도하는 연구가 많이 진행되고 있다. 본 총설에서는 현재 주목받고 있는 비대칭분자를 구현한 국내외 기술 동향을 소개하고자 한다.

Abstract: The photoactive layer materials in organic solar cells are the most critical factor determining the efficiency of the cells. However, as the efficiency of current photoactive materials approaches theoretical limits, novel molecular designs are increasingly necessary. Typically, photoactive materials are composed of donor and acceptor components, synthesized as small molecules or polymers. Traditionally, these donors and acceptors have been designed with symmetric structures due to their simple synthesis and analysis. However, such uncomplicated structures have clear limitations in further enhancing efficiency. To overcome these challenges, asymmetric structures have been proposed as a new type of photoactive material, with significant research focused on inducing strong interactions between these asymmetrically structured molecules. This review aims to introduce the latest domestic and international trends in the development of asymmetric molecules, which are currently gaining significant attention.

Keywords: organic solar cells, photoactive layer materials, asymmetric structure, small molecule, polymer.

서론

현재 전 세계는 에너지의 생산에 있어 화석연료에 의존하고 있다. 하지만 화석연료를 통한 에너지 생산은 대량의 미세먼지와 이산화 탄소를 생산한다. 현재 많은 국가들은 지속 가능한 미래 환경을 조성하기 위해 국가 간의 이산화탄소 수치 절감 조약을 체결하였으며, 그에 따라 신재생 에너지 시스템의 필요성이 대두되고 있다. 그 중 태양에너지는 방대한

에너지원으로서 주목받고 있다. 하지만 현재 상용화되어있는 실리콘 기반의 태양전지는 높은 공정 비용에 더불어 생산 과정에서 환경에 치명적인 불산(HF)을 사용한다는 단점이 있다.¹ 또한 현재 활발하게 연구가 되고 있는 납 기반 페로브스카이트 태양전지의 경우 납의 유출로 인한 환경오염 문제와 소자의 장기 안정성 문제가 아직 큰 장벽으로 남아있다.² 반면 유기태양전지는 광활성층 물질로서 독성이 적고 소재의 가격이 비교적 저렴한 유기물을 사용하며, 유기 소재의 특성상 분자의 구조 변화가 쉽고 그에 따른 다양한 크기의 에너지 밴드갭을 갖는 광활성층 물질을 제작할 수 있다.³ 또한 광흡수계수가 높아 수 백 nm 정도의 얇은 두께로도 태양 전지의 제작이 가능하다.^{4,5} 유기태양전지는 기존의 실리콘 태양전

[†]To whom correspondence should be addressed.
syson@kw.ac.kr, ORCID[®] 0000-0003-1563-5474
©2024 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

지에 비해 가볍고 유연하며 투명한 필름의 형태로 제작이 가능하다.⁶ 이를 통해 실내용 태양전지와 투명한 태양전지 등을 다양한 형태의 소자를 제작할 수 있으며, 단순한 에너지 전환을 넘어 친환경 인테리어 산업에 적용하는 등 여러 분야에 적용할 수 있다는 장점을 갖고 있다.⁷⁻¹⁰

유기 태양전지는 태양빛 에너지를 이용하여 전류를 생산하는 장치이다. 현재 상용화 되어 있는 무기 태양전지는 태양빛 노출 시 전자와 양공이 생성되어 양쪽 단자로 유입이 되는 반면, 유기 태양전지는 전자와 양공이 결합되어 있는 exciton이 형성되어 서로 다른 전자친화도와 이온화도를 갖는 물질 계면 사이에서 전자와 양공으로 분리되는 것으로 알려져 있다.¹¹ 초기 매우 높은 결정성을 갖고 있는 단일 단위체 poly(3-hexylthiophene)(P3HT) 고분자 구조에서부터 전도성 고분자 연구가 시작되었다.¹² 하지만 P3HT는 2.0 eV의 밴드갭을 가져, 태양광 스펙트럼의 약 33%만을 흡수할 수 있어 최대 이론 효율이 7%로 제한되는 한계를 가지고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 P3HT의 다양한 구조와 형태의 단위체를 도입하여 고분자 밴드갭을 조절함으로써 태양전지의 효율을 향상시키려는 다양한 연구가 진행되었다. 그러나 높은 결정성을 가진 소재 기반의 유기 태양전지는 대면적화가 어려우며,¹³ 균일한 성능을 구현하는 데 큰 장벽이 존재하여 최근 비정질 유기 태양전지가 주목받기 시작하였다. 1995년 이후 접합 구조의 도입으로 용매 기반의 유기물 태양전지의 본격적인 연구가 진행되었으며 고분자를 적절하게 잘 배합하여 고분자 간의 연결을 극대화하는 이중 접합 구조가 발표되었다.¹⁴ 이러한 이중 접합 구조는 전자와 양공간의 강력한 네트워크를 형성하여 매우 높은 광효율을 보일 수 있는 기본적인 구조로 자리잡게 되었다. 현재는 고분자내 도너와 어셉터가 같이 결합된 공중합체의 형태의 구조로 고분자내 퀴노이드(qunoidal) 형태의 공명구조를 유도하여 구조적 평면성으로 인한 전자 전공이동도와 다양한 정도의 밴드 갭 조절을 기대할 수 있게 되었다.¹⁵⁻¹⁷ 이러한 여러 기술들의 개발로 19.2%의 에너지 효율을 태양전지로 달성할 수 있었으며, 여러 태양전지의 기술 개발은 태양전지 산업의 상용화에 한 발 더 다가갈 수 있는 원동력이 되고 있으며 기타 태양전지 기술과 경쟁할 수 있는 잠재력을 보여주고 있다.

일반적으로 유기태양전지의 광활성층은 도너와 어셉터로 구분이 되는데 이 두 물질은 합성이 간편한 단순 도너-어셉터의 구조로 이루어진 고분자 혹은 낮은 분자량을 갖는 단분자의 물질을 사용하여 합성할 수 있다.^{14,18-22} 하지만 대부분의 고분자는 단분자의 물질에 비해 분석이 복잡하기 때문에 다양한 변수를 두고 합성하기 보다는, 대칭적인 구조를 형성하여 비교적 쉬운 정량적인 분석방법을 이용하여 특징지어왔다.²³⁻²⁵ 그렇지만 현재 NMR의 해상도의 개발 등 여러 기술의 발전으로 인하여 분자 내부 한개의 싸이오펜(thiophene)의 유무 조차도 쉽게 확인할 수 있게 되었으며^{26,27} 이러한 NMR 기술은

무작위 중합 고분자(random copolymer)의 정성적인 분석방법으로 사용될 수 있다.²⁸ 또한 분자량이 작은 단분자의 경우 적절한 금속 촉매를 사용하여 선택적인 치환을 하여 비대칭성 물질을 개발한 사례도 보고되고 있다.²⁹⁻³¹ 이에 본 리뷰에서는 태양전지의 효율을 증가시키기 위하여 연구되고 있는 다양한 비대칭 물질 합성에 접근 방향에 대하여 소개하여 최근 유기 태양전지 기술에 대한 이해를 돕고자 한다.

비대칭 단분자 광활성층 물질

2015년도 Zhan 연구진에 의하여 처음 합성된 접합 고리계 전자 수용체(fused-ring electron acceptor, FREA) 분자는 ITIC를 기반으로 하여 다양한 연구가 진행되었다.^{33,34} 대부분의 연구는 분자의 평면성을 증가시키기 위하여 접합계의 고리 개수를 양쪽으로 동일하게 증가시키는 것에 초점을 맞추었다.^{18,35,36}

하지만 2019년 Zhan 교수 연구진은 그 전까지의 연구와 달리, 한쪽 방향으로 성장시킨 AOIC를 개발하였다.

AOIC는 indacenodithiophene(IDT)분자로부터 시작하여

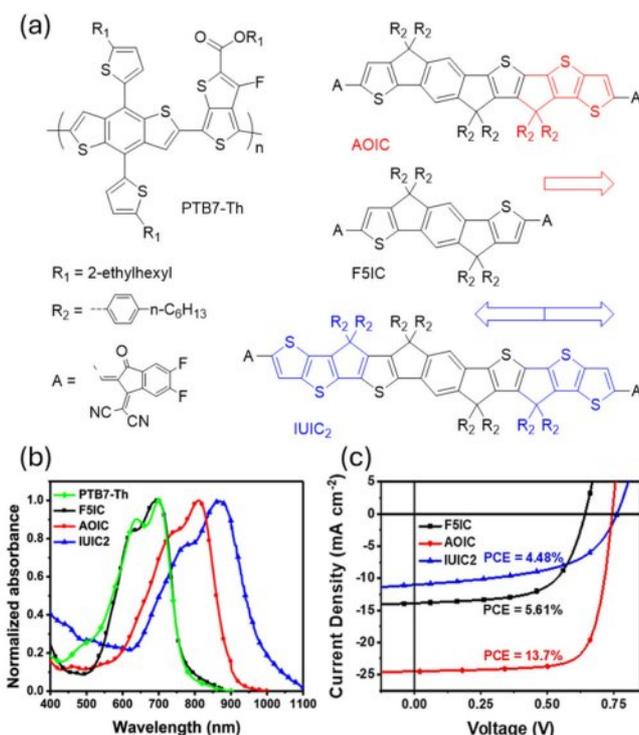


Figure 1. Asymmetry small molecule photoactive layer materials: (a) molecular formula of F5IC, AOIC, IUIC2 and PTB7-Th; (b) UV-Vis spectroscopy of F5IC, AOIC and IUIC2; (c) power conversion efficiency of F5IC, AOIC and IUIC2. Reproduced with permission from Ref. 32, Jia, B. *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.*, **2019**, 141, 19023-19031. © 2019, American Chemical Society.

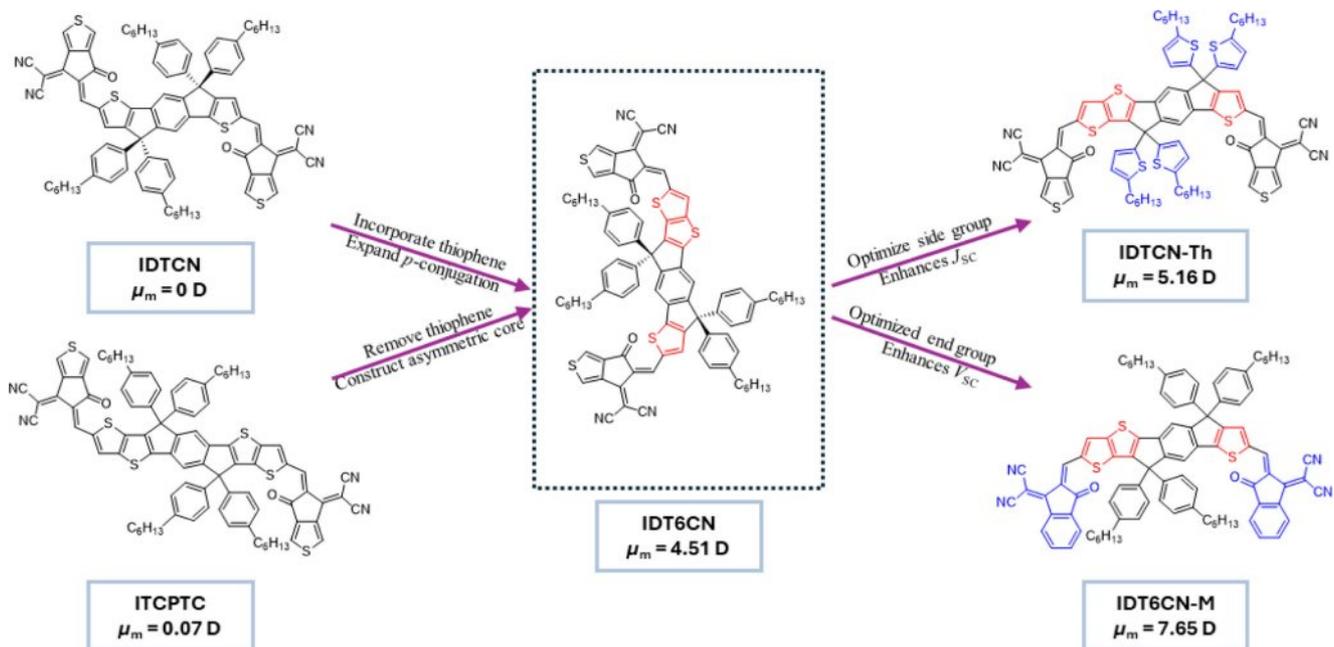


Figure 2. IDT6CN-Th-IDT6CN-M based asymmetry small molecule photoactive layer materials. Reproduced with permission from Ref. 37, Hu, H. *et al.*, *Adv. Energy Mater.*, **2024**, 14, 2304242. © 2024, Wiley; Ref. 39, Gao, W. *et al.*, *Adv. Mater.*, **2018**, 30, 1800052. © 2018, Wiley.

AOIC와 IUC2를 합성하였으며, 강한 독성을 갖고 있는 유기 주석화합물이 아닌 아연염화물을 사용하여 한 쪽 방향으로 선택적인 고리의 성장을 유도하였다. 유효 공액계 길이(effective conjugation length)가 큰 IUC2의 경우 적외선 파장 영역에서 흡광 특성을 보였다. Figure 1(b)과 같이 AOIC, F5IC 순으로 파장이 더 짧은 영역에서 흡광 특성을 보이는 것을 확인할 수 있다.

또한 PTB7-Th와 혼합한 활성층의 표면 형태를 원자력 현미경(atomic force microscope, AFM)을 통해 확인한 결과 PTB7-Th:AOIC는 PTB7-Th:IUC2와 PTB7-Th:F5IC보다 더 매끄러운 표면 굴곡을 갖고 있으며, 이러한 요인으로 결국 PTB7-Th:AOIC가 Figure 2(c)에서 보인 것과 같이 13.7%의 PCE로 F5IC(5.61%)와 IUC2(4.48%) 보다 더 높은 효율을 달성하였다.

Chuluo Yang교수 연구진은 Zhan 교수 연구진과 비슷한 방

식으로 IDT구조에서 출발하여³⁸ 양쪽 방향에 서로 다른 치환기를 부착하여 IDT6CN을 합성했다. 결과지의 치환기를 다르게 합성한 IDT6CN-Th와 IDT7CN-M는 소자의 단락전류(open-circuit voltage, J_{sc})와 개방전압(open circuit voltage, V_{oc}), 충전률(fill factor, FF)를 증가시키는 효과를 가져왔다.³⁹

고분자의 도너와 어셉터의 비율을 조절하여 고분자의 흡광 파장대를 조절하여 단분자 어셉터 간의 상보적인 흡광 파장을 실현한 발표도 있으나 해당 연구진은 자외선 및 가시광선(UV-Vis) 분광 흡광계를 통하여 분석한 결과 IDTCN, ITCPTC, IDT6CN, IDT6CN-Th와 IDT6CN-M의 밴드갭은 각각 1.67, 1.58, 1.63, 1.61과 1.65 eV로 유의미한 차이를 보이지 않았다.

따라서 각 분자의 최대 흡광 파장은 각각 706, 736, 721, 713, 708 nm로 모두 소자 제작에 사용된 PBDB-T와 상보적인 흡광영역을 보였다.

Table 1. V_{oc} , J_{sc} , FF and PCE of PBDB-T:IDT Based Asymmetry Small Molecule Photoactive Layer Materials³⁵

Active layers	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA cm ⁻²)	FF (%)	PCE _{max}
PBDB-T:IDTCN	0.85 (0.842 ± 0.005)	12.06 (12.01 ± 0.14)	62.48 (62.47 ± 1.06)	6.40 (6.33 ± 0.06)
PBDB-T:ITCPTC	0.84 (0.843 ± 0.005)	17.53 (17.13 ± 0.21)	72.77 (72.41 ± 0.36)	10.74 (10.52 ± 0.14)
PBDB-T:IDT6CN	0.83 (0.834 ± 0.009)	15.14 (15.22 ± 0.18)	73.77 (42.49 ± 0.81)	9.27 (9.21 ± 0.06)
PBDB- T:IDT6CN·Th	0.81 (0.815 ± 0.009)	16.75 (16.70 ± 0.13)	76.72 (75.81 ± 0.43)	10.41 (10.32 ± 0.07)
PBDB- T:IDT6CN·M	0.91(0.921 ± 0.009)	16.02 (15.92 ± 0.13)	76.83 (76.01 ± 0.39)	11.20 (11.11 ± 0.06)

Reproduced with permission from Ref. 37, Hu, H. *et al.*, *Adv. Energy Mater.*, **2024**, 14, 2304242. © 2024, Wiley; Ref. 39, Gao, W. *et al.*, *Adv. Mater.*, **2018**, 30, 1800052. © 2018, Wiley.

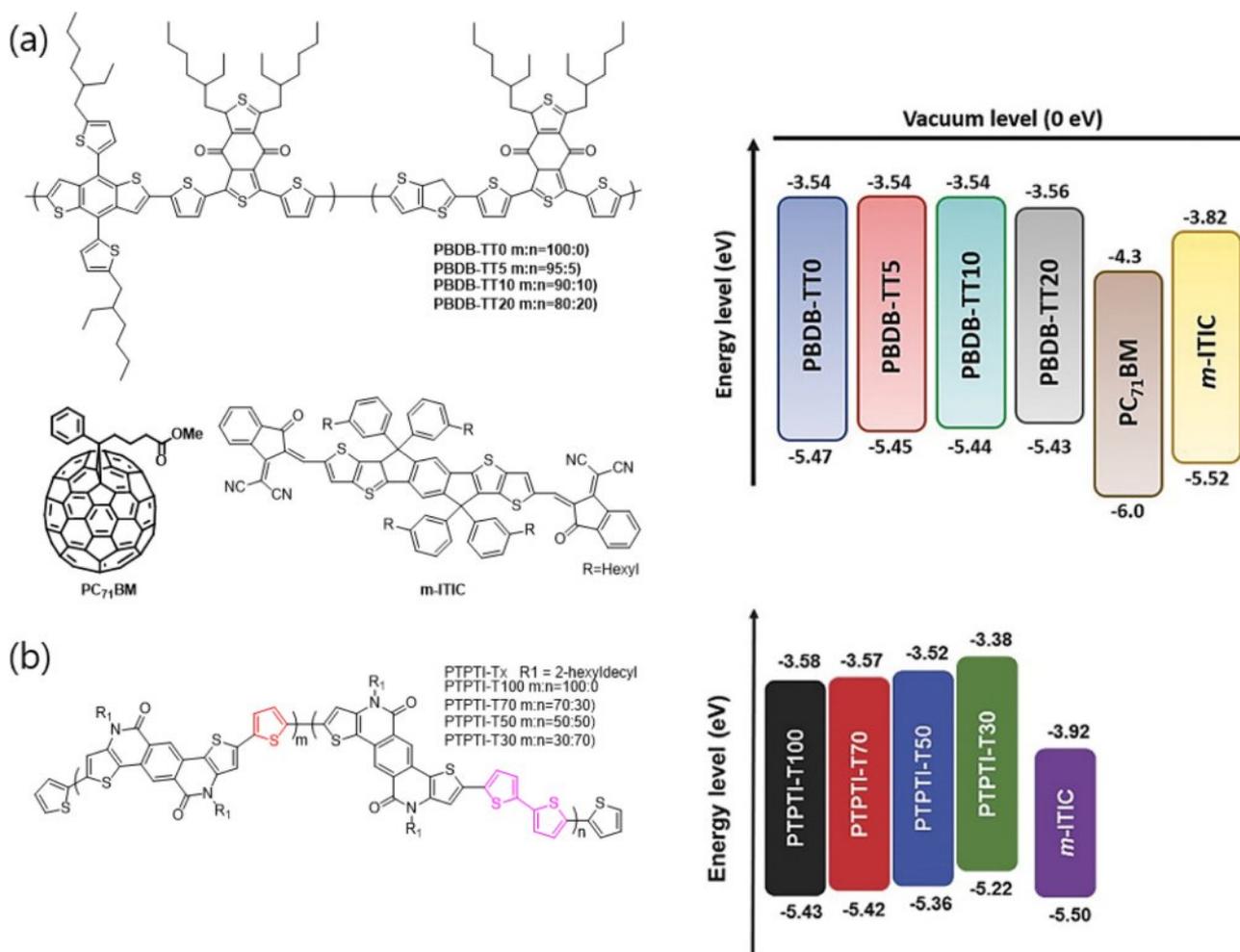


Figure 3. Asymmetry polymer photoactive layer materials: (a) PBDB-TT_n copolymer structure and energy bandgap diagram. Reproduced with permission from Ref. 40, Jeong, M. *et al.*, *Adv. Energy Mater.*, **2017**, 8, 1702166. © 2017, Wiley; (b) PTPTI-T_x copolymer structure and energy bandgap diagram. Reproduced with permission from Ref. 41, Chen, S. *et al.*, *Adv. Energy Mater.*, **2017**, 7, 1701125. © 2017, Wiley.

Table 1에서 보이는 것과 같이 비대칭 단분자 광활성층 분자는 대칭 단분자 광활성층에 비해 최대 50%이상 증가된 광전 변환 효율을 보였다. 해당 연구인 IDT6CN의 경우 광활성층으로 불리하게 작용할 수 있는 가장자리 구조(edge on)를 상당수 형성하지만 높은 광전 변환 효율을 보이는데 의문을 남겼다.

연구자는 이러한 현상을 설명하기 위하여 분자 내부의 극성을 주요 원인으로 삼았다. 앞에서 설명한 두 연구진의 연구 방향처럼 분자의 구조를 비대칭으로 만들게 되면 분자 내부에 강한 극성을 갖게 되어 분자간의 거리가 가까워져 효율적인 π-π 전하 전도를 실현시킬 수 있다. 하지만 이러한 특성이 태양전지 및 유기물 반도체에서 광범위하게 사용되고 있지 않는 이유는 해당 접근 방법이 다양한 도너와 어셉터 쌍에 적용하기에는 경향성이 부족하기 때문이다.⁴² 또한 AOIC를 포함한 현 단계의 합성의 경우, 단순히 반응의 동역학을

통해 일정 단계에서 한 개 치환된 반응물과 전부 치환된 반응물을 분리 및 정제하는 방식은 매우 낮은 수득을 보인다 (AOIC 26.7%). 따라서 이러한 방법으로 물질을 대량으로 생산하기에는 분명 한계점이 존재하며, 이는 결국 상업적으로 적용할 수 없다는 결론에 도달한다. 이를 개선하기 위하여 생산 과정에서 한쪽 방향에 강하게 친화도를 갖는 전반적인 비대칭 구조를 형성하거나, 단방향 친화성을 갖는 촉매를 개발할 필요가 있다.

비대칭 고분자 광활성층 물질

전도성 고분자는 초기에 균일하고 큰 결정 구조를 갖는 고분자를 시작으로 현재 도너와 어셉터의 공중합을 통해 합성하는 형태로 발전되어왔다.¹⁶ 특히 유기물 반도체와 태양전지와 같이 반도체의 전기 전도성이 중요한 물질의 경우 도너-어셉

터 공중합 구조는 고분자 사슬의 공명구조를 길게 형성할 수 있어 전기 전도성 측면에서 큰 이점을 볼 수 있다. 최근 몇 년간 적절한 공중합체 쌍을 찾는 연구가 꾸준히 진행이 되었으며, 방대한 연구 수행되었지만 아직 무기물 태양전지에 비해 부족한 효율을 보이고 있다. 이러한 단순 1도너-1어셉터 구조의 관한 연구는 최근 포화 상태에 이르렀다고 단언할 수 있다.^{43,44} 또한 1도너-1어셉터 구조의 고분자의 경우 분자의 극성이 약하여 분자간의 상호작용이 부족하여 결국 광활성층 내부에 도너와 어셉터 분자간의 분리를 유도하게 된다. 이러한 현상을 방지하기 위하여 분자 결사슬에 특이적 구조를 삽입함으로 물리적으로 분자간의 거리를 좁히는 등의 시도가 있었지만 아직 무기물 태양전지에 비해 도드라지는 발전을 이루지 못하였다. 현재 계산화학분야의 발전함에 따라 많은 계산화학자들은 방대한 실험 결과를 통하여 가장 효율적인 도너-어셉터쌍에 대해 시뮬레이션을 통한 계산을 시도하였다. 새로운 구조의 도너 중심코어를 예측하는 등 다양한 시도가 진행이 되었지만, 1도너-1어셉터의 단순 구조의 유기태양전지는 더 이상 효율적인 구조가 아님을 결론짓게 되었다. 도너-어셉터 사이 일정한 간격을 두는 방식이 화두가 되었지만 아직은 여러 형태의 분자를 합성하기에는 한계가 있어 상용화가 쉽게 되지는 않고 있다. 이를 보완하기 위하여 이미 알려진 도너와 어셉터쌍에서 시작하여 단순 1도너 1어셉터

가 아닌, 분자내 도너와 어셉터의 개수를 무작위로 연결하는 방식이 현재 큰 화제가 되고 있다.

Figure 3에서는 비대칭 어셉터-도너 고분자를 합성한 도너 고분자의 구조를 표현하였다. PBDB-TTx계열에서는 polybenzo[1,2-b;4,5-b']dithiophene(BDT)을 대조군으로 설정하였으며 thieno[3,2-b]thiophene(TT)의 함량을 증가시켜 중합하였다. PTPTI-Tx계열은 thieno[2',3:5'-6']pyrido[3,4-g]thieno[3,2c]isoquinoline5,11-(4H,10H)-dione-based polymer(PTPTI)과 싸이오펜과 바이싸이오펜의 함량을 다르게하여 합성했다.³⁸ 이러한 방법으로 합성한 고분자의 경우 일반적으로 분자의 대칭성이 파괴되어 물질의 구조가 쉽게 정의되지 않고, 대부분 침전물 형태로 물질의 생성되어 소자 제작에 큰 어려움이 있다.^{45,46} 하지만 해당 연구진은 각 도너와 어셉터의 함량을 조절하여 소자 제작이 가능하게 했다. 이러한 고분자의 장점은 물질의 비대칭성에 의하여 고분자내 큰 극성을 유발하여 분자와 분자 사이의 거리가 가까워져, 빛에 의해 생성된 전자와 정공을 매우 효율적으로 전달하는 장점이 있다 또한 어셉터와 도너의 비율을 조절함으로 고분자의 가장 높은 점유된 분자궤도함수(HOMO)와 가장 낮은 비 점유된 분자궤도함수(LUMO)의 에너지 준위를 조절할 수 있다는 큰 장점을 갖게 된다. 추가적으로 도너와 함께 상보적으로 사용한 어셉터를 m-ITIC으로 사용해 비 풀러렌 계열을 도입함으로써 풀러렌

Table 2. Asymmetry Polymer Photoactive Layer Materials of PBDB-TTx:m-ITIC Based Materials³⁷ and PTPTI-Tx:m-ITIC Based Materials.

Blending system		V_{oc} (V)	J_{sc} (mA cm ⁻²)	FF (%)	PCE (%)	Calculated J_{sc} (mA cm ⁻²)		
Acceptor	Donor							
m-ITIC	PBDB-TT0	0.930 0.931 ± 0.006	16.27 16.17 ± 0.30	60.04 59.02 ± 1.07	9.08 8.98 ± 0.09	15.45		
	PBDB-TT5	0.913 0.914 ± 0.003	17.53 17.34 ± 0.21	69.79 68.58 ± 1.33	11.17 11.10 ± 0.08	16.69		
	PBDB-TT10	0.900 0.900 ± 0.003	17.06 17.10 ± 0.29	58.54 58.22 ± 0.40	8.99 8.87 ± 0.12	16.21		
	PBDB-TT20	0.885 0.882 ± 0.005	16.81 16.23 ± 0.45	54.38 54.31 ± 0.73	8.09 7.90 ± 0.17	15.98		
Devices	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA cm ⁻²)	FF (%)	PCE (%)	Calculated J_{sc} (mA cm ⁻²)	μ_h (10 ⁻⁴ cm ² v ⁻¹ s ⁻¹)	μ_e (10 ⁻⁴ cm ² v ⁻¹ s ⁻¹)	Thickness (nm)
PTPTI-T100:m-ITIC	0.96 0.95±0.004	13.90 13.84±0.13	68.34 67.67±1.06	9.10 8.97±0.09	13.21	5.79	2.33	98
PTPTI-T70:m-ITIC	0.93 0.93±0.006	17.12 16.90±0.21	69.26 68.23±1.08	11.02 10.86±0.12	16.34	7.15	5.02	102
PTPTI-T50:m-ITIC	0.91 0.91±0.007	14.97 14.72±0.23	65.66 65.06±1.10	8.95 8.79±0.13	14.23	4.39	1.17	91
PTPTI-T30:m-ITIC	0.91 0.90±0.005	14.40 14.38±0.30	62.14 63.00±1.14	8.13 7.99±0.15	13.76	4.02	1.06	89

Reproduced with permission from Ref. 40, Jeong, M. *et al.*, *Adv. Energy Mater.*, **2017**, 8, 1702166. © 2017, Wiley; Ref. 41, Chen, S. *et al.*, *Adv. Energy Mater.*, **2017**, 7, 1701125. © 2017, Wiley.

유기태양전지가 갖고 있는 장기 안정성을 비롯해 열과 기계적 안정성의 한계를 뛰어 넘을 수 있을 것이라 기대한다.⁴⁷⁻⁴⁹

Table 2에서 요약된 것과 같이 PBDB-TTx:m-ITIC 계열에서 대조군으로 사용된 PBDB-TT0:m-ITIC에서 단락전류는 16.27 mAcm⁻², 충전율을 60.04%, 개방전압 0.930 V로 광전 변환 효율은 9.08%이었지만, TT의 함량이 증가한 PBDB-TT5: mITIC에서 증가한 17.53 mAcm⁻²의 단락전류, 69.79%의 충전율과 11.17%의 광전 변환 효율을 보였다. 하지만 개방전압은 0.913V으로 대조군에 비해 낮은 수치를 보였다. 같은 경향으로 TT의 함량이 증가함에 따라 PBDB-TT10:m-ITIC, PBDB-TT20:m-ITIC의 개방전압이 0.900 V, 0.885 V순으로 낮아짐을 보였으며, 그에 따라 PBDB-TT5:m-ITIC에서 가장 이상적인 광전 변환 효율을 보임을 알 수 있었다. 이와 비슷한 경향으로 PTPTI-Tx:m-ITIC 계열에서도 바이싸이오펜 함량의 증가함에 따라 개방 전압이 낮아지는 경향을 관측할 수 있었으며, PTPTI-T70:m-ITIC에서 가장 높은 11.02%의 광전 변환 효율을 확인할 수 있었다.

양교수 연구진은 앞의 비대칭 고분자를 도입함으로써 생기는 구조적 차이를 증명하기 위하여 방사선 가속기 GI-WAXS를 이용하여 대면 구조(face on)과 가장자리 구조의 비율을 확인하였다. GI-WAXS 결과에 따라 이러한 방법으로 합성한 고분자 사슬은 소자에서 비교적 높은 대면 구조의 비율을 갖고

있어 유기 태양전지의 광전 변환 효율이 높을 것이라 예측하였으며, 이 경향성은 각 소자의 특성과 잘 일치하는 경향을 보였다.

하지만 이러한 분자 구조의 설계는 몇몇 분자에 한정될 수 있다는 단점이 있다. 가장 우려가 되는 점은 바로 고분자의 다 분산 지수(PDI)이다. 일반적으로 고분자의 물리적 특성은 해당 고분자의 분자량에 크게 영향을 받으며 일정한 고분자 분자량은 해당 소자의 성능의 재현성을 확보하기 위한 최소한의 장치이다. 하지만 양교수 연구진의 고분자의 경우 PBDB-TT0, PBDB-TT5, PBDB-TT10 와 PBDB-TT20는 각각 3.21, 2.50, 3.60, 4.12의 PDI를 갖기 때문에, 소자의 특성이 PDI에 영향을 받아 단순히 TT의 함량에만 영향을 미칠 것이라는 확답을 내리기는 어려울 뿐만 아니라, 실험 조건에 따른 영향에 대한 우려가 있다.

비대칭 고분자 광활성층 물질 분자량의 영향

앞서 언급한 바와 같이, 유기태양전지에서 어셉터와 도너 고분자의 네트워크가 잘 형성되는 것은 해당 소자의 효율을 결정하는데 있어 매우 중요한 요소가 된다. 또한 적절한 고분자 분자량 조절은 고분자의 결정성과 섞임 정도로 결정하기 때문에 유기태양전지에 또 다른 큰 요소가 된다. 하지만

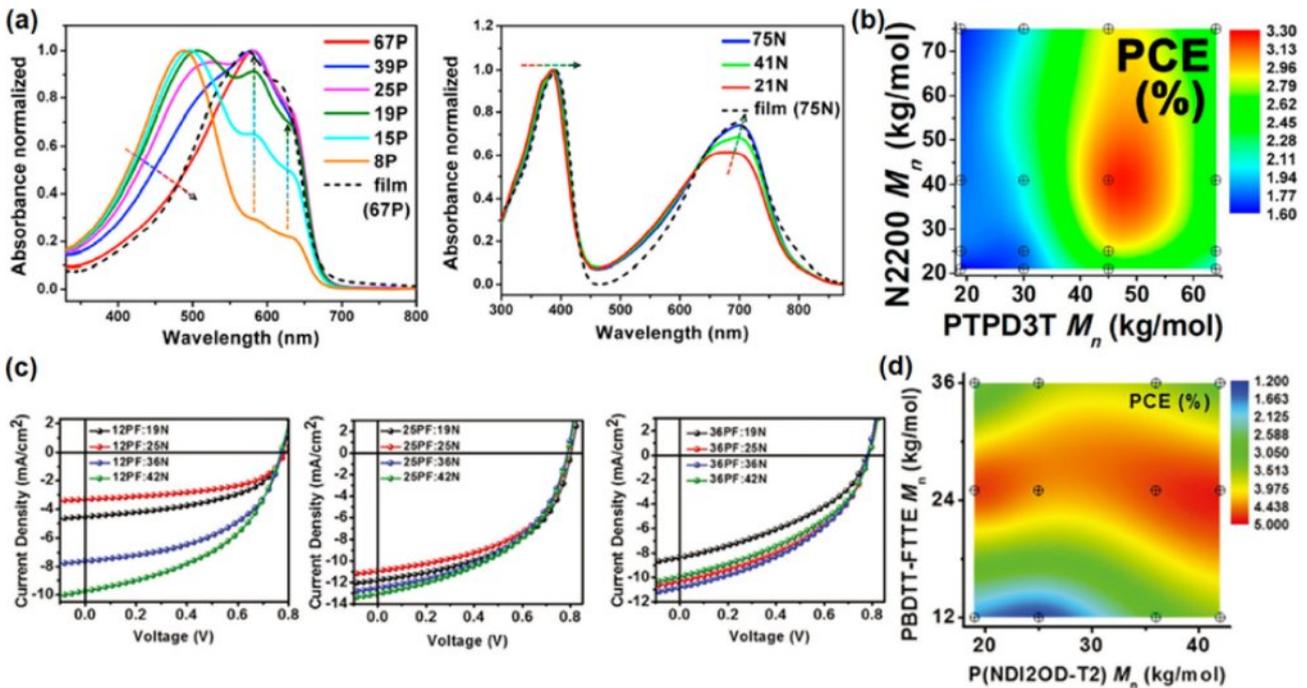


Figure 4. Asymmetric polymer molecular weight active layer: (a) UV-Vis absorption spectra of PTPD3T and N2200 with different molecular weights dissolved in chloroform; (b) 2D representation of the photo-efficiency of PTPD3T. Reproduced with permission from Ref. 52, Zhou, N. *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.*, **2016**, 138, 1240-1251. © 2016, American Chemical Society; (c) efficiency of PBDTT-ETTE and P(NDI2OD-T2) with different molecular weights; (d) 2D representation of the photo-efficiency of PBDTT_FTTE. Reproduced with permission from Ref. 53, Wang, G. *et al.*, *Adv. Energy Mater.*, **2018**, 8, 1702173. © 2018, Wiley.

이러한 특성에도 불구하고 많은 연구에서는 일반적으로 높은 분자량을 갖는 고분자 사슬의 경우 긴 유효 공액계의 길이를 갖고 있을 것이라 판단하여 분자량의 크기에 대한 분석을 진행하지 않고 있는 것이 현실이다.^{50,51}

Figure 4(a)는 Marks 연구실에서 진행된 분자량과 유기태양전지 효율과 관련된 논문에서 실린 그림이다. Figure 4(c)는 PTPD3T(donor)와 P(NDI2OD-T2)(acceptor)를 서로 다른 분자량으로 합성한 뒤 각각 소자에 적용하여 그 소자의 효율을 분석한 결과이다. 일반적으로 알려져 있듯이 중간 정도의 분자량에서 도너와 어셉터 고분자는 상당히 잘 섞여 있는 형태를 갖고 있었으며, 상대적으로 매우 연속적인 고분자 형태를 갖고 있었다. 이는 해당 소자가 높은 효율을 갖을 수 있는 이 유리기도 하다.⁵²

하지만 모든 소자에서 중간 정도의 분자량이 높은 효율을 보이는 것은 아니다. 2019년 Marks 연구진들은 PBDTT-ETTE, P(NDI2OD-T2)를 서로 다른 분자량으로 제작하여 소자를 만든 결과 Figure 4에서 볼 수 있듯이 P(NDI2OD-T2) 분자의 분자량과 소자 광전 변환 효율과는 매우 밀접한 관계가 없음을 알 수 있었으며, 특히 PBDTT-ETTE 고분자의 분자량과는 매우 밀접한 관계가 있어 앞서 설명한 중간 정도의 분자량을 갖는 고분자가 가장 높은 효율을 보임을 알 수 있었다.⁵³

또한 소자의 투과전자현미경 사진에서 P(NDI2OD-T2)의 분자량이 일정 수준 이상으로 확보가 되면 고분자 간의 섞임 정도에 크게 영향을 주지 않지만, PBDTT-ETTE의 경우는 반대로 분자량에 대하여 고분자의 섞임 정도의 차이가 매우 심해 소자 효율에 크게 영향을 주는 것으로 예상할 수 있다. 이전까지의 유기태양전지의 연구는 반응의 열역학적 관점에 초점을 맞추어 반응의 진행 여부에 관심을 가졌다면, 차세대 유기태양전지의 연구는 열역학적 관점에 더해 동역학적 관점에 따라 반응이 진행되는 정도와 시간에 따른 분자의 성장 속도 또한 고려하여 더욱 효율적인 분자를 합성할 수 있을 것이라 생각된다.

결론 및 전망

유기 태양전지의 활성층을 담당하는 광활성층 물질은 초기 P3HT의 개발부터 시작하여 현재 19.2%의 효율을 보이면서 최근 5년간 급속도로 성장하고 있다. 특히 현재 발표되고 있는 유기 태양전지의 효율의 성장이 한계에 이르고 있으며, 이는 더욱 고성능의 광활성층 물질의 개발이 필요함을 의미한다. 새로운 광활성층 물질을 합성하기 위하여 물질의 합성 방법을 개선하는 방법부터, 합성의 동역학까지 아우르는 설계가 필요하다.

대칭 광활성층 물질은 물질의 합성과 특성의 분석이 비교적 간단하지만, 태양전지의 효율을 증가시키는데 있어 빠르게 한

계를 맞이하였다. 이를 극복하기 위해 제안된 비대칭 광활성층 물질의 경우 분자간의 극성을 높임으로 분자간의 상호작용을 증가시켜 분자간의 전하 이동을 매우 유리하게 하지만, 현재까지 이를 분석하는 방법에 한계가 있으며, 특정 분자에만 적용되는 단점이 있다. 또한 분자간의 매우 강한 상호작용은 분자 내부에 결정성이 증가하여 구부러지고 휘어지는 소자 개발에는 불리한 요소로 작용할 수 있으며 더욱 나아가 용액 공정을 불가능하게 할 수 있다. 또한 고분자의 단량체가 무작위로 부착하게 되면 분자간의 쌓임 구조를 방지하여 오히려 비정질로 전환이 될 수 있기 때문에 조금 더 보편화된 경향이 연구되어 유기 태양전지 광활성층 개발에 새로운 패러다임을 창출시켜야 할 필요가 있다.

감사의 글: 이 연구는 한국연구재단(NRF)의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다 (No. 2022R1C1C2013379).

이해상충: 저자들은 이해상충이 없음을 선언합니다.

참고 문헌

1. Yuda, A. P.; Koraag, P. Y. E.; Iskandar, F.; Wasisto, H. S.; Sumboja, A. Advances of the Top-down Synthesis Approach for High-performance Silicon Anodes in Li-ion Batteries. *J. Mater. Chem. A* **2021**, *9*, 18906.
2. Meng, R.; Xufang, Q.; Yuetian, C.; Tianfu, W.; Yixin, Z. Potential Lead Toxicity and Leakage Issues on Lead Halide Perovskite Photovoltaics. *J. Hazard. Mater.* **2022**, *426*, 127848.
3. Cheon, H. J.; An, T. K.; Kim, Y. H. Diketopyrrolopyrrole (DPP)-Based Polymers and Their Organic Field-Effect Transistor Applications: A Review, *Macromol. Res.* **2022**, *30*, 71-84.
4. Chau, H. D.; Kataria, M.; Kwon, N. Y. Improved Photovoltaic Performance of Ternary All-Polymer Solar Cells by Incorporating a New Y6-based Polymer Acceptor and PC₆₁BM, *Macromol. Res.* **2022**, *30*, 587-596.
5. Yousif, Q. A.; Agbolaghi, S. Retraction Note to: A Comparison Between Functions of Carbon Nanotube and Reduced Graphene Oxide and Respective Ameliorated Derivatives in Perovskite Solar Cells, *Macromol. Res.* **2022**, *30*, 686.
6. Lee, M.; Hwang, E.; Kim, T.; Kwon, T.-H. Advancements in Non-fullerene Acceptors for Organic Solar Cells: Brief Review of Research Trends. *Bull. Korean Chem. Soc.* **2024**, *45*, 664-674.
7. Gayathri, R. D.; Gokulnath, T.; Park, H. Y. Facile and Stable Fluorene Based Organic Hole Transporting Materials for Efficient Perovskite Solar Cells, *Macromol. Res.* **2022**, *30*, 745-750.
8. (a) Jong, W. H.; Jung, J. G.; Ryu, D. H.; Lee, S. H.; Song, C. E.; Lim, B. G.; Jung, Y. G.; Park, J. M.; Hwang, D. H. Thienoquinolinone-based Acceptor- π -acceptor-type Building Block for Polymer Donors in Organic Solar Cells. *Macromol. Res.* **2023**, *31*, 25-31. (b) Lee, G. S.; Oh, J. G.; Suh, E. H. Naphthalene-Diimide-Based Small Molecule Containing a Thienothiophene Linker for n-Type Organic

- Field-Effect Transistors. *Macromol. Res.* **2022**, *30*, 470-476.
9. Choi, H.; Ryu, S. U.; Lee, D. H.; Kim, H.; Song, S.; Kim, H. I.; Park, T. Advancements in Organic-Based Hybrid Tandem Solar Cells Considering Light Absorption and Spectral Matching of Organic Materials. *ACS Energy Lett.* **2024**, *9*, 3136-3168.
 10. Kim, H. U.; Kim, T.; Kim, C.; Kim, M.; Park, T. Recent Advances in Structural Design of Efficient Near-Infrared Light-Emitting Organic Small Molecules. *Adv. Funct. Mater.* **2022**, *33*, 2208082.
 11. Huarui, Z.; Guangliu, R.; Xinyue, C.; Yuqiang, L.; Zhe, Y.; Dawei, L.; Xueqing, M.; Wenlong, L.; Hao, L.; Rui, L.; Lei, C.; Wenkai, Z.; Siru, G.; Hongxiang, L.; Jifa, Y.; Yi, L.; Yahui, L.; Guanghao, L.; Zaifei, M.; Pei, C.; Zhishan, B. Mitigating Exciton Recombination Losses in Organic Solar Cells by Engineering Nonfullerene Molecular Crystallization Behavior. *Adv. Energy Mater.* **2023**, *13*, 2302063.
 12. Lim, E. P3HT-Based Polymer Solar Cells with Unfused Bithiophene-Rhodanine-based Nonfullerene Acceptors, *Bull. Korean Chem. Soc.* **2020**, *41*, 644-649.
 13. Lee, H.; Moon, B.; Son, S. Y.; Park, T.; Kang, B.; Cho, K. Charge Trapping in a Low-Crystalline High-Mobility Conjugated Polymer and Its Effects on the Operational Stability of Organic Field-Effect Transistors. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* **2021**, *13*, 16722-16731.
 14. (a) Ryu, Y. H.; Choi, K.; Oh, D. H. Ionic Cross-Linkable Alendronate-Conjugated Biodegradable Polyurethane Films for Potential Guided Bone Regeneration. *Macromol. Res.* **2022**, *30*, 99-106. (b) Oh, D. H.; Thi, P. L.; Park, K. D. A Comparative Study of Enzyme-Mediated Crosslinking of Catechol- and Phenol-Functionalized Tetrionic Hydrogels. *Macromol. Res.* **2022**, *30*, 190-197.
 15. Nguyen, T. T. T.; Nguyen, H. T.; Trinh, H. T.; Effect of the Morphological Characteristic and Composition of Electrospun Polyvinylidene Fluoride/Graphene Oxide Membrane on Its Pb²⁺ Adsorption Capacity. *Macromol. Res.* **2022**, *30*, 124-135.
 16. (a) Jeong, H.; Lee, D. Y.; Yang, D. H. Mechanical and Cell-Adhesive Properties of Gelatin/Polyvinyl Alcohol Hydrogels and Their Application in Wound Dressing. *Macromol. Res.* **2022**, *30*, 223-229. (b) Lee, S.; Jeon, I. S.; Jho, J. Y. Mechanical Properties of Polyetheretherketone Composites with Surface-Modified Hydroxyapatite Nanofibers and Carbon Fibers. *Macromol. Res.* **2022**, *30*, 261-270.
 17. Choi, J.; Jung, W.; Gonzalez-Carrero, S.; Durrant, J. R.; Cha, H.; Park, T. Understanding Charge Carrier Dynamics in Organic Photocatalysts for Hydrogen Evolution. *Energy Environ. Sci.* [Online early access]. DOI: 10.1039/D4EE01808G. Published Online: Jul 20, 2024. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2024/ee/d4ee01808g> (accessed Jul 20, 2024).
 18. Temurlu, S.; Abureesh, M. A. A.; Abourajab, A.; Karsili, P.; Dinleyici, M.; Altınışık, S.; Koyuncu, S.; Icil, H. Grafting of Perylene and Naphthalene Fluorophores Onto Chitosan for Improved Thermal, Optical and Electrical Properties. *Macromol. Res.* **2024**, *32*, 281-297.
 19. Do, Y.; Park, H.; Gokulnath, T. Significance of Siloxane Functionalized Side-Chain π -Conjugated Polymer Donor: Optimization of Active Layer Morphology Toward the Stable All-Polymer Solar Cells. *Macromol. Res.* **2022**, *30*, 183-189.
 20. Haris, M.; Ullah, Z.; Lee, S.; Ryu, D. H.; Ryu, S. U.; Kang, B. J.; Jeon, N. J.; Kim, B. J.; Park, T.; Shin, W. S.; Song, C. E. Amplifying High-Performance Organic Solar Cells Through Differencing Interactions of Solid Additive with Donor/Acceptor Materials Processed from Non-Halogenated Solvent. *Adv. Energy Mater.* **2024**, *14*, 2401597.
 21. Kim, M.; Ryu, S. U.; Park, S. A.; Choi, K.; Kim, T.; Chung, D.; Park, T. Donor-Acceptor-Conjugated Polymer for High-Performance Organic Field-Effect Transistors: A Progress Report. *Adv. Funct. Mater.* **2020**, *30*, 1904545.
 22. Lim, E. Two A-D-A-type Non-Fullerene Small Molecule Acceptors Based on 1,3-Dimethylbarbituric Acid for OPVs. *Bull. Korean Chem. Soc.* **2017**, *38*, 285-288.
 23. Lee, S. W.; Jeong, M.; Whang, D. R.; Kim, J. H.; Chang, D. W. Effect of Fluorine Atom on Photovoltaic Properties of Triphenylamine-Substituted Quinoxaline-Based D-A Type Polymers. *Macromol. Res.* **2020**, *28*, 1297-1303.
 24. Abbas, Z.; Ryu, S. U.; Haris, M.; Song, C. E.; Lee, H. K.; Lee, S. K.; Shin, W. S.; Park, T.; Lee, J. C. Optimized Vertical Phase Separation via Systematic Y6 Inner Side-chain Modulation for Non-halogen Solvent Processed Inverted Organic Solar Cells. *Nano Energy.* **2022**, *101*, 107574.
 25. Kim, M.; Ryu, S. U.; Park, S. A.; Pu, Y. J.; Park, T. Designs and Understanding of Small Molecule-based Non-fullerene Acceptors for Realizing Commercially Viable Organic Photovoltaics. *Chem Sci.* **2021**, *12*, 14004-14023.
 26. Kim, I. B.; Kim, Y. J.; Kim, D. Y.; Jang, S. Y. A Thiophene Based Dopant-Free Hole-Transport Polymer for Efficient and Stable Perovskite Solar Cells. *Macromol. Res.* **2022**, *30*, 391-396.
 27. (a) Amarasekara, A. S.; Leday, L. J.; Wang, D. Synthesis and Characterization of a New Cellulose Ether Derivative: Sodium Levulinate Cellulose. *Macromol. Res.* **2023**, *31*, 941-948. (b) Zhang, Q.; Chen, J.; Jin, B. A New Linear Heptafluoro Glycidyl Ether Binder: Synthesis, Characterization, and Mechanical Properties. *Macromol. Res.* **2023**, *31*, 699-709.
 28. Kim, T.; Shin, G.; Park, T.; Kim, M. Molecular Design Leveraging Non-Covalent Interactions for Efficient Light-Emitting Organic Small Molecules. *Adv. Funct. Mater.* [Online early access]. DOI: 10.1002/adfm.202412267. Published Online: Aug 30, 2024. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adfm.202412267> (accessed Aug 30, 2024).
 29. Ha, J. W.; Jung, J. G.; Ryu, D. H.; Lee, S.; Song, C. E.; Lim, B.; Jung, Y. J.; Park, J. M.; Hwang, D. H. Thienoquinolinone-based Acceptor- π -acceptor-type Building Block for Polymer Donors in Organic Solar Cells. *Macromol. Res.* **2023**, *31*, 25-31.
 30. Park, S. A.; Kim, D. H.; Chung, D.; Kim, J.; Park, T.; Cho, S.; Kim, M. Asymmetric Polymer Additive for Morphological Regulation and Thermally Stable Organic Solar Cells. *ACS Appl.* **2023**, *15*, 27026-27033.
 31. Aryal, U. K.; Lee, J.; Kranthiraja, K.; Reddy, S. S.; Sree, V. G.; Park, T.; Song, M.; Jin, S. H. The Effect of Irregularity From Asymmetric Random π -conjugated Polymers on the Photovoltaic

- Performance of Fullerene-free Organic Solar Cells. *Polym. Chem.* **2019**, *10*, 4407-4412.
32. Jia, B.; Wang, J.; Wu, Y.; Zhang, M.; Jiang, Y.; Tang, Z.; Russell, T. P.; Zhan, X. Enhancing the Performance of a Fused-Ring Electron Acceptor by Unidirectional Extension, *J. Am. Chem. Soc.* **2019**, *141*, 19023-19031.
 33. Lee, J. Y.; Han, J. G.; Lee, S. H.; Kim, D. H.; Lee, Y. S. Synthesis and Characterization of an Isoindigo-Naphthalene Polymer along with a Small Molecule of Naphthalene-Isoindigo-Naphthalene. *Bull. Korean Chem. Soc.* **2015**, *36*, 2974-2977.
 34. Lin, Y.; Wang, J.; Zhang, Z. G.; Bai, H.; Li, Y.; Zhu, D.; Zhan, X. An Electron Acceptor Challenging Fullerenes for Efficient Polymer Solar Cells. *Adv. Mater.* **2015**, *27*, 1170-1174.
 35. Park, J.; Chetan, L.; Kim, H.; Jee, J. S.; Gal, Y. S.; Jin, S. H. New Pyrazine-based π -conjugated Polymer for Dopant-free Perovskite Solar Cell. *Macromol. Res.* **2024**, *32*, 505-513.
 36. Seo, J. Y.; Kang, S. H.; Lee, M. R.; Synthesis of Thermo-Controlled Cyclic Olefin Polymers via Ring Opening Metathesis Polymerization: Effect of Copolymerization with Flexible Modifier. *Macromol. Res.* **2022**, *30*, 205-211.
 37. Hu, H.; Ge, J.; Chen, Z.; Song, W.; Xie, L.; Ge, Z. The Asymmetric Strategy of Small-Molecule Materials for Organic Solar Cells. *Adv. Energy Mater.* **2024**, *14*, 2304242.
 38. Hoang, M. H.; Park, G. E.; Phan, D. L.; Ngo, T. T.; Nguyen, T. V.; Park, C. G.; Cho, M. J.; Choi, D. H. Synthesis of Conjugated Wide-Bandgap Copolymers Bearing Ladder-Type Donating Units and Their Application to Non-Fullerene Polymer Solar Cells. *Macromol. Res.* **2018**, *26*, 844-850.
 39. Gao, W.; Zhang, M.; Liu, T.; Ming, R.; An, Q.; Wu, K.; Xie, D.; Luo, Z.; Zhong, C.; Liu, F. Asymmetrical Ladder-Type Donor-Induced Polar Small Molecule Acceptor to Promote Fill Factors Approaching 77% for High-Performance Nonfullerene Polymer Solar Cells. *Adv. Mater.* **2018**, *30*, 1800052.
 40. Jeong, M.; Chen, S.; Lee, S. M.; Wang, Z.; Yang, Y.; Zhang, Z. G.; Zhang, C.; Xiao, M.; Li, Y.; Yang, C. Feasible D1-A-D2-A Random Copolymers for Simultaneous High-Performance Fullerene and Nonfullerene Solar Cells. *Adv. Energy Mater.* **2017**, *8*, 1702166.
 41. Chen, S.; Cho, H. J.; Lee, J.; Yang, Y.; Zhang, Z. G.; Li, Y.; Yang, C. Modulating the Molecular Packing and Nanophase Blending via a Random Terpolymerization Strategy toward 11% Efficiency Nonfullerene Polymer Solar Cells. *Adv. Energy Mater.* **2017**, *7*, 1701125.
 42. Kim, S. W.; Choi, J.; Bui, T. T.; Lee, C.; Cho, C.; Na, K.; Jung, J.; Song, C. E.; Ma, B.; Lee, J. Y.; Shin, W. S.; Kim, B. J. Rationally Designed Donor-Acceptor Random Copolymers with Optimized Complementary Light Absorption for Highly Efficient All-Polymer Solar Cells. *Adv. Funct. Mater.* **2017**, *27*, 1703070.
 43. (a) Namikoshi, T.; Watanabe, Y.; Kaneda, A.; Ishikawa, K.; Watanabe, S.; Murata, M. Controlled Cationic Polymerization of Sulfide-Containing Vinyl Ethers. *Macromol. Res.* **2022**, *30*, 16-25.
 - (b) Gunasekara, D. S. W.; Niu, X.; Lqbal, W.; He, Y.; Liu, H. Pyrrole Coating with *In Situ* Polymerization for Piezoresistive Sensor Development - A Review. *Macromol. Res.* **2022**, *30*, 153-162.
 44. Salma, S. A.; Kim, J. H. Effect of the Side Chain Functionality of the Conjugated Polyelectrolytes as a Cathode Interlayer Material on the Photovoltaic Performances. *Macromol. Res.* **2022**, *30*, 146-151.
 45. Kim, J.; Park, J.; Song, D.; Jee, J.; Gokulnath, T.; Han, S. C.; Jin, S. H.; Lee, J. W. BDT-based Donor Polymer for Organic Solar Cells to Achieve High Efficiency over 15% for Ternary Organic Solar Cells. *Macromol. Res.* **2023**, *31*, 489-497.
 46. Rasanani, A. H.; Kaffashi, B.; Ahmadi, S. Assessment of Surface, Structural, and Viscoelastic Properties of Immiscible Poly(lactic Acid)/Poly(vinylidene Fluoride) Blends. *Macromol. Res.* **2022**, *30*, 285-294.
 47. Jeong, Y. G.; Park, S. Y.; Kim, J. S. Relationship Between the Chemical Structure, Morphology, and Water Absorption of Styrene-co-itaconate Ionomers. *Macromol. Res.* **2023**, *31*, 245-255.
 48. Ghalia, M. A.; Inuwa, I.; Hassan, A. RETRACTED ARTICLE: Viscoelastic Behavior and Mechanical Properties of Polypropylene/Nano-Calcium Carbonate Nanocomposites Modified by a Coupling Agent. *Macromol. Res.* **2022**, *30*, 842-852.
 49. Raj, M. R.; Kim, H. I.; Lee, G. Y.; Kim, G. W.; Park, T. Morphological Study of Polymer/fullerene Interfaces via benzene-PCBM Interaction. *Org. Electron.* **2015**, *26*, 230-238.
 50. Kim, M.; Choi, Y.; Hwan Lee, D.; Min, J.; Pu, Y. J.; Park, T. Roles and Impacts of Ancillary Materials for Multi-Component Blend Organic Photovoltaics towards High Efficiency and Stability. *ChemSusChem.* **2021**, *14*, 3475-3487.
 51. Wang, G.; Melkonyan, F. S.; Facchetti, A.; Marks, T. J. All-Polymer Solar Cells: Recent Progress, Challenges, and Prospects. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **2019**, *58*, 4129-4142.
 52. Zhou, N.; Dudnik, A. S.; Li, T. I.; Manley, E. F.; Aldrich, T. J.; Guo, P.; Liao, H. C.; Chen, Z.; Chen, L. X.; Chang, R. P. All-Polymer Solar Cell Performance Optimized via Systematic Molecular Weight Tuning of Both Donor and Acceptor Polymers. *J. Am. Chem. Soc.* **2016**, *138*, 1240-1251.
 53. Wang, G.; Eastham, N. D.; Aldrich, T. J.; Ma, B.; Manley, E. F.; Chen, Z.; Chen, L. X.; de la Cruz, M. O.; Chang, R. P. H.; Melkonyan, F. S. Photoactive Blend Morphology Engineering through Systematically Tuning Aggregation in All-Polymer Solar Cells. *Adv. Energy Mater.* **2018**, *8*, 1702173.

출판자 공지사항: 한국고분자화학회는 게재된 논문 및 기관 소속의
 관할권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.