

# 근적외선 유기 포토디텍터의 개발 동향

## Recent Advances in Near-Infrared (NIR) Organic Photodetectors

이아영 · 김종현 | Ah Young Lee · Jong H. Kim

Department of Molecular Science and Technology, Ajou University,  
206, World cup-ro, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi 16499, Korea  
E-mail: jonghkim@ajou.ac.kr

### 1. 서론

포토디텍터는 외부 광 신호를 전기 신호로 변환하여 광을 감지하는 소자이다. 현재까지 Si, InGaAs, GaN 등의 무기 반도체 기반 포토디텍터는 높은 전하 이동도, 작은 엑시톤 결합 에너지, 높은 안정성 등의 장점으로 인해 의료, 보안, 카메라, 이미징 시스템에서 광범위하게 연구되어 왔다.<sup>1</sup> 그러나 무기 포토디텍터는 높은 제조 비용, 단단하고 깨지기 쉬운 특성, 대면적 제조의 어려움 등의 단점이 있다.<sup>2,3</sup> 이러한 무기 포토디텍터가 지닌 한계를 극복하기 위한 대안으로 낮은 제조 비용, 우수한 유연성, 그리고 용액 공정의 적용 가능성과 같은 장점을 갖춘 유기 포토디텍터가 최근 많은 주목을 받고 있다.<sup>3,4</sup>

그 중에서도 근적외선(near-infrared(NIR): 780 - 1,200 nm) 영역의 빛을 감지할 수 있는 근적외선 유기 포토디텍터는 높은 투과력, 낮은 손상성, 광대역 통신 적합성 등의 장점으로 의료, 통신 및 산업 등의 다양한 분야에 적용할 수 있어 지난 몇 년 동안 활발하게 연구되고 있다.<sup>5-7</sup> 하지만, 근적외선 유기 포토디텍터는 무기 포토디텍터에 비해 높은 암전류를 나타내어 광검출력이 상대적으로 낮다는 한계가 있다. 이러한 이슈를 극복하기 위해서 최근 유기 포토디텍터의 성능을 무기 포토디텍터 수준으로 향상시키기 위해 광범위한 연구가 활발히 수행되고 있다.

기존의 무기 포토디텍터를 대체할 수 있는 고성능 유기 포토디텍터 개발을 위해서는 근적외선 영역에서 효과적인 광 흡수를 할 수 있는 적절한 재료의 선정 및 최적의 소자 구조 설계를 중요하게 고려해야 한다. 근적외선 영역의 빛 감지 능력을 향상시키기 위해 광활성층 소재의 밴드갭을 조절하여 광흡수 영역을 확장시키는 연구가 진행되고 있으며, 포토디텍터의 광검출력을 향상시키기 위해 암전류를 억제시키는 연구가 진행되고 있다.<sup>2,8-10</sup> 본 특집에서는 유기 포토디텍터의 성능을 향상시키기 위한 전략 및 개발 연구 동향과 이를 통한 소자 응용 결과에 대하여 소개하고자 한다.

### 2. 본론

#### 2.1 근적외선 흡수 비플러렌 엑셉터 개발 연구 동향

유기 포토디텍터 소자 구조는 광활성층 위, 아래로 전자, 정공 수송층이 형성되고 양 끝에 양극/음극 전극이 각각 형성된 유기 태양전지 소자 구조와 유사하다. 유기 포토디텍터의 광활성층은 일반적으로 전자공여성 유기소재(도너)와 전자수용성 유기소재(엑셉터)로 구성되며, 현재 보고된 대부분의 유기 포토디텍터는 도너/

Author



이아영

2021 순천향대학교 에너지시스템학과 (학사)  
2021-현재 아주대학교 분자과학기술학과 (석박통합과정)



김종현

2005 아주대학교 화학생명공학부 (학사)  
2007 서울대학교 화학생명공학부 (석사)  
2011 서울대학교 재료공학부 (박사)  
2015 University of Washington (Post-Doc.)  
2015-2016 충남대학교 화학공학교육과 조교수  
2016-현재 아주대학교 응용화학/ 분자과학기술학과 정교수

역셉터 계면이 풍부하여 엑시톤 분리 효율이 높은 고분자 도너와 단분자 역셉터가 혼합되어 형성된 벌크헤테로정선 박막을 기반으로 한다.<sup>11-13</sup> 그 동안 유기 태양전지 및 가시광 유기 포토디텍터에는 높은 전자 이동도, 등방성 전자 전달, 미세한 상분리 등의 장점을 지닌 PC<sub>61</sub>BM, PC<sub>71</sub>BM 등의 풀러렌 유도체들이 주로 역셉터로 사용되었다.<sup>14,15</sup> 그러나 풀러렌 유도체는 높은 합성 비용, 고온 불안정성, 근적외선 영역에서의 흡광 제한 등의 단점이 있다. 따라서, 최근에는 밴드갭 조절이 용이하면서도 근적외선 영역까지 흡수파장을 확장할 수 있는 비풀러렌 계열 역셉터가 근적외선 광 흡수 대안 소재로 제시되었다.

근적외선 영역대에 흡수를 가지는 단분자 비풀러렌 역셉터를 개발하기 위해 흡수 파장을 확장하기 위한 다양한 전략들이 도입되었다.

대표적으로 기존 비풀러렌 역셉터인 ITIC의 골격을 기반으로 개발된 세 종류의 비풀러렌 역셉터가 보고된 바 있다.<sup>16</sup> CTIC-4F는 양쪽  $\pi$ -bridge에 모두 branched alkyl chain을, COTIC-4F는 모두 branched alkoxy chain을, CO1-4F는 각각 branched alkyl chain과 alkoxy chain을 하나씩 도입하였다. 전자 밀도를 증가시켜 HOMO 에너지 레벨을 상승시키고 흡수 스펙트럼을 장파장 쪽으로 확장시키는 branched alkoxy chain 도입으로 인해 밴드갭이 CTIC-4F(1.30 eV), CO1-4F(1.22 eV), COTIC-4F(1.10 eV) 순으로 좁아지며 흡수 스펙트럼이 장파장대역으로 확장되었다. CO1-4F 기반 유기 포토디텍터는 920 nm에서 0.46 A/W의 광민감도와  $1.5 \times 10^{12}$  Jones의 광검출력으로 가장 우수한 성능을 보였다. CO1-4F는

alkyl chain과 alkoxy chain을 양쪽  $\pi$ -bridge에 하나씩 도입함으로써 전자 구조와 박막 형성 간 균형을 가장 잘 유지하여 적절한 상분리와 전하 수송 특성을 보였다. 이는 한쪽은 선형 alkyl 치환기, 다른 한쪽은 전자 주개성이 강한 alkoxy 치환기를 도입한 비대칭 구조로, 분자 간  $\pi$ - $\pi$  stacking과 상호작용을 적절히 조절할 수 있었기 때문이다. 반면, CTIC-4F는 양쪽 모두 직선형 alkyl 치환기로 치환된 대칭적 구조로 인해 분자 간 강한 결정성이 유도되었고, 이로 인해 큰 상분리가 발생하였다. COTIC-4F는 bulky한 alkoxy 치환기가 양쪽에 도입된 대칭 구조로 인해 분자 간 스택킹이 제한되며, 낮은 결정성을 보이는 비정질 박막이 형성되었다. 특히 alkoxy 치환기의 산소 원자는 비공유 전자쌍을 가지고 있어 입체적으로 부피가 크며, 인접 분자와의  $\pi$ - $\pi$  stacking을 방해함으로써 packing 효율을 저해하는 주요 원인으로 작용한다. 결론적으로 해당 연구는 side chain 엔지니어링을 통해 분자의 결정 구조와 박막 모폴로지를 정밀하게 제어함으로써 고성능 유기 포토디텍터를 구현할 수 있음을 보여주며, 특히 CO1-4F와 같은 혼합형 side chain 전략이 근적외선 광 감도와 소자 안정성의 균형을 확보하는데 효과적이라는 것을 입증했다. 이 결과는 향후 광통신, 바이오 센싱, 이미지 센서 등 다양한 응용 분야에서 근적외선 유기 포토디텍터의 설계 방향을 제시하는 중요한 결과이다.

더하여, 기존 비풀러렌 역셉터 Y6-BO에 전자공여성 alkoxy thiophene 유닛을 도입하여 흡수 파장을 1,000 nm 이상으로 확장시킨 결과가 보고된 바 있다.<sup>17</sup> Y6-BO를 기반으로 alkoxy thiophene 유닛이 비대칭형 혹은 대칭형 도입됨에

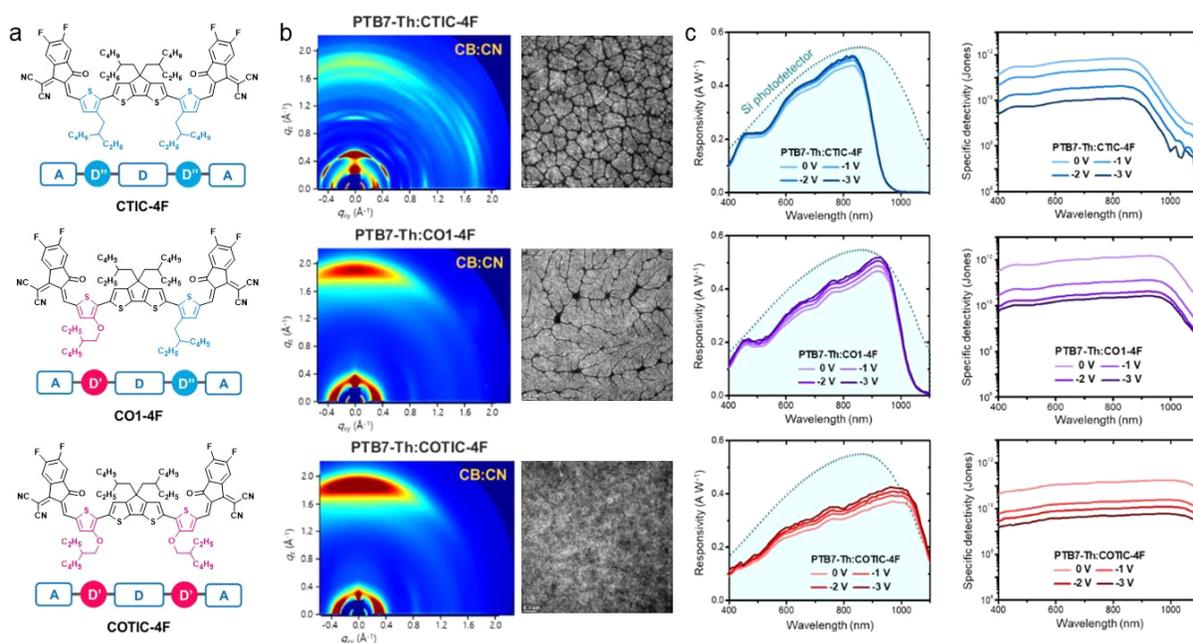


그림 1. (a) 근적외선 흡수 비풀러렌 역셉터들의 화학 구조, (b) 근적외선 흡수 비풀러렌 역셉터 기반 벌크헤테로정선 박막의 GIWAXS 패턴, TEM 이미지, (c) 근적외선 흡수 비풀러렌 역셉터 기반 유기 포토디텍터의 광민감도 및 광검출력 스펙트럼.<sup>16</sup>

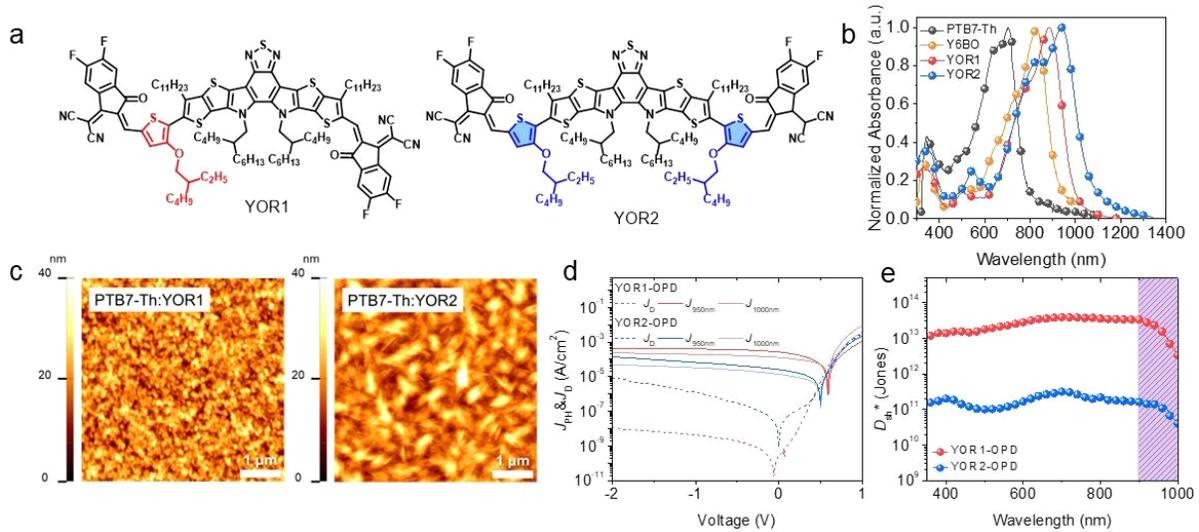


그림 2. (a) 근적외선 흡수 비폴러렌 엑셉터들의 화학 구조, (b) 근적외선 흡수 비폴러렌 엑셉터 기반 벌크헤테로정선 박막의 흡수 스펙트럼, (c) 근적외선 흡수 비폴러렌 엑셉터 기반 벌크헤테로정선 박막의 AFM 이미지, (d) 근적외선 흡수 비폴러렌 엑셉터 기반 유기 포토디텍터의 J-V curve, (e) 근적외선 흡수 비폴러렌 엑셉터 기반 유기 포토디텍터의 광검출력 스펙트럼.<sup>17</sup>

따라 Y6-BO, YOR1, YOR2 순으로 흡수 파장대가 장파장 영역으로 확장되었다(그림 2a,b). 고분자 도너 PTB7-Th와 혼합하여 벌크헤테로정선 박막을 제작하였을 때, YOR1 혼합 박막은 나노스케일 상분리를 형성하는 반면, YOR2 혼합 박막은 YOR2 분자의 대칭성 및 우수한 결정성으로 인해 매우 큰 피브릴 구조가 형성되며 큰 상분리를 보였다(그림 2c). YOR2의 강한 분자 간 상호 작용 능력으로 인해 혼합 박막에서도 큰 결정 구조를 형성하여 엑시톤 분리에 불리하고 전하 재결합이 많이 일어나 YOR2 기반 포토디텍터의 성능이 상대적으로 낮을 것을 예상하였다. YOR1, YOR2 기반 포토디텍터를 평가한 결과 YOR1 기반 포토디텍터는 YOR2 기반 포토디텍터에 비해 훨씬 억제된 암전류 및 향상된 광전류 값을 보였으며, 결과적으로  $-0.1$  V,  $950$  nm에서  $1.31 \times 10^{11}$  Jones의 광검출력을 보인 YOR2 기반 포토디텍터보다 훨씬 높은 광검출력( $1.98 \times 10^{13}$  Jones)을 기록하였다(그림 2d,e).

전극으로부터의 전자 주입을 막기 위해 전자 차단층으로 poly-TPD를 도입하였다. Poly-TPD를 도입함으로써 전자 주입을 효과적으로 억제할 수 있었으며, PEDOT:PSS를 대체하여 사용했을 때 약 1,000배 감소된 암전류를 얻을 수

## 2.2 근적외선 유기 광검출기의 암전류 억제를 위한 개발 연구 동향

### 2.2.1 전하 차단층 도입 전략

일반적으로 유기 포토디텍터의 암전류는 무기 포토디텍터의 암전류에 비해 높은 문제점으로 인해 상대적으로 낮은 광검출력을 나타낸다. 따라서 고성능 근적외선 유기 포토디텍터를 구현하기 위해서는 암전류를 효과적으로 억제하는 것이 필수적이며, 이를 위한 소자 구조 설계 전략이 보고된 바 있다.<sup>18</sup> 대표적인 연구사례로, 암전류의 주요 원인을 외부 전극으로부터 주입되는 전하에 의한 전류와 계면 결합에 의한 재결합 전류로 분석한 연구결과가 있다(그림 3a). 해당 연구에서는 암전류를 감소시키기 위해 두 가지 전략을 도입하였다. 첫째로 외부

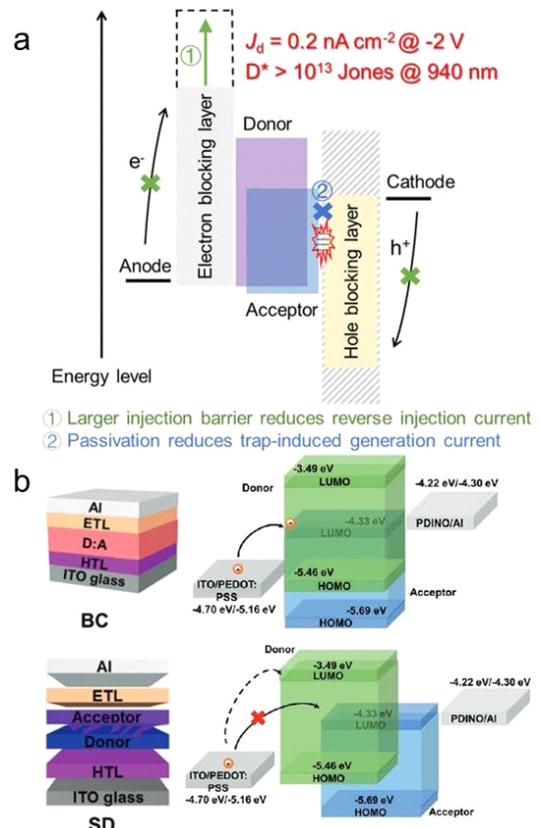


그림 3. (a) 전하 차단층 도입을 통한 암전류 억제 전략,<sup>18</sup> (b) bilayer 도입을 통한 암전류 억제 전략.<sup>19</sup>

있었다. 두번째로 외부 전극으로부터의 정공 주입을 막기 위해, 그리고 계면 결합 패시베이션을 위해  $C_{60}:\text{LiF}$  층을 도입하였다.  $C_{60}$ 와 절연체인 LiF를 함께 증착하여 형성된  $C_{60}:\text{LiF}$  층은 정공 차단뿐만 아니라 계면 결합 밀도를 감소시키는 패시베이션 효과를 제공함으로써 암전류를 효과적으로 억제시켰다. 이를 입증하기 위해 광활성층 위에 각각  $C_{60}:\text{LiF}/C_{60}$  층,  $C_{60}/C_{60}:\text{LiF}$  층,  $C_{60}:\text{LiF}$  층을 형성한 조건의 포토디텍터의 암전류 및 커패시턴스 분석을 진행하였다. 암전류 분석 결과, 외부 전극으로부터 정공의 주입을 차단하는  $C_{60}:\text{LiF}$  층이 전극과 분리된  $C_{60}:\text{LiF}/C_{60}$  조건의 암전류가 가장 높았다. 이를 통해  $C_{60}:\text{LiF}$  층이 정공 주입 차단에 효과적임을 확인하였다. 추가적으로 커패시턴스 분석 결과, 계면 결합 패시베이션 역할을 하는  $C_{60}:\text{LiF}$  층이 광활성층과 분리된  $C_{60}/C_{60}:\text{LiF}$  조건에서 가장 큰 커패시턴스가 측정되었으며, 이는 계면 결합 밀도가 가장 높음을 의미한다. 이를 통해  $C_{60}:\text{LiF}$  층이 계면 결합을 효과적으로 억제하였음을 확인하였다. 결과적으로 전하 차단층과 계면 패시베이션 층을 도입한 근적외선 유기 포토디텍터는 외부 전극에서 주입되는 전하를 효과적으로 차단하고, 계면에서 발생하는 결합 유도 생성 전류를 억제함으로써  $-2\text{ V}$ 에서  $2 \times 10^{-8}\text{ A/cm}^2$ 의 낮은 암전류 값을 보였다. 결과적으로  $-2\text{ V}$ ,  $850\text{ nm}$ 에서  $\sim 10^{13}$  Jones 이상의 광검출력을 기록하였다.

### 2.2.2 Bilayer 전락 도입

일반적으로 유기 포토디텍터의 광활성층은 도너와 억셉터를 혼합한 용액을 코팅하여 박막을 형성한다. 이러한 블렌드 캐스팅(blend casting, BC) 방식으로 제작한 포토디텍터는 광활성층 내 도너와 억셉터가 무작위로 혼합되어 전극 계면에서 불리한 전하 주입이 발생하며, 이는 높은 암전류 및 낮은 광검출력으로 이어진다. 이를 해결하기 위해 순차 증착(sequential deposition, SD) 방식을 통해 수직 상 분리 구조를 형성하는 전략을 도입하였다.<sup>19</sup> SD 방식은 도너와 억셉터 박막을 각각 독립적으로 코팅하여 하단에는 도너, 상단에는 억셉터가 분포된 수직 상 분리 박막을 형성한다(그림 3b). 이 구조는 외부 전극으로부터 정공이 도너의 HOMO 에너지 레벨로 주입되는 경로와 전자가 억셉터의 LUMO 에너지 레벨로 주입되는 경로를 차단시킴으로써 역방향 전하 주입을 효과적으로 억제하였다. 결과적으로 SD 기반 수직 상 분리 구조가 암전류를 효과적으로 억제하여 고성능 근적외선 유기 포토디텍터 구현에 유의미한 접근임을 확인하였다.

## 2.3 근적외선 유기 광검출기 응용 분야

### 2.3.1 Photoplethysmogram(PPG) 센서 응용

근적외선 유기 포토디텍터는 생체신호 감지, 광통신, 환경 모니터링 등 다양한 응용 분야에서 각광받고 있다. 특히

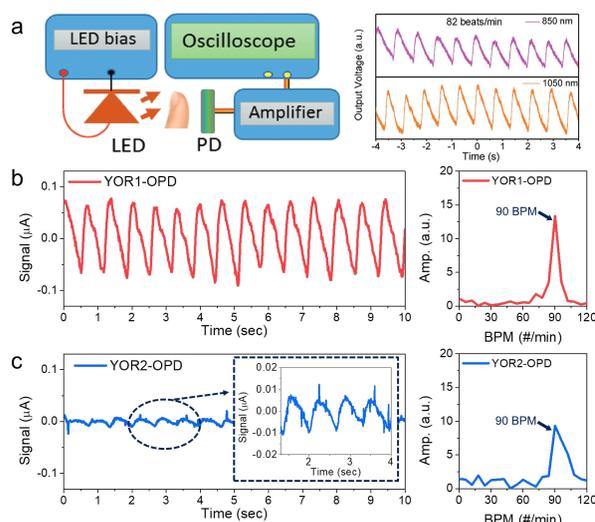


그림 4. (a) PPG 측정 셋업 모식도와 측정된 PPG 신호,<sup>20</sup> (b) YOR1 기반 포토디텍터를 사용하여 측정된 PPG 신호와 BPM, (c) YOR2 기반 포토디텍터를 사용하여 측정된 PPG 신호와 BPM.<sup>17</sup>

PPG 센서로의 상용화 가능성이 대두되고 있으며, 최적화된 근적외선 유기 포토디텍터를 이용한 PPG 센서 개발 연구가 다양하게 보고되고 있다.<sup>6,17,20,21</sup> PPG 센서는 손가락 끝이나 귓볼과 같은 피부를 통과하는 근적외선 광의 강도 변화를 모니터링하여 동맥 혈류량의 변화를 측정하고 실시간 심박수를 확인한다. 최적화된 근적외선 유기 포토디텍터를 사용하여 PPG 시그널을 측정하였다. 포토디텍터의 출력 신호는 오실로스코프를 사용하여 기록되었으며,  $850\text{ nm}$ 와  $1,050\text{ nm}$  광원을 사용하였을 때 모두 PPG 시그널이 정확하게 측정됨을 확인하였다(그림 4a).<sup>20</sup>

더하여, 최적화된 YOR1, YOR2 기반 포토디텍터를 사용하여 PPG 센서로의 실제 적용을 수행하기 위해  $980\text{ nm}$  근적외선 레이저와 유기 포토디텍터를 각각 손가락 위/아래 위치시켜 피부 투과 모드 PPG 센서를 구성하였다. YOR1, YOR2 기반 포토디텍터 모두 혈관을 통해 흐르는 혈류량에 비례하여 연속적이고 주기적인 신호가 측정되었으며,  $90\text{ BPM}$ 의 심박수를 검출하였다. YOR1 기반 포토디텍터의 높은 광민감도와 낮은 암전류 값으로 인하여 YOR1 기반 포토디텍터는 YOR2 기반 포토디텍터에 비해 신호 대 잡음 비(SNR)가 개선되어 PPG 시그널이 더 선명하게 측정되었다(그림 4b,c).<sup>22</sup> 따라서 명확한 수축 및 이완 피크를 포함한 맥박 파형은 YOR1 기반 포토디텍터를 사용했을 때 더 정확하게 측정되었으며, 이는 YOR1 기반 포토디텍터의 고감도 및 연속 신호 모니터링 유기 PPG 센서 적용 가능성을 제시하였다.

### 2.3.2 초유연성 소재 응용

유기반도체소재의 장점인 유연성을 이용하여 피부부착형 등 초유연성 유기 포토디텍터가 보고되고 있다.<sup>23-25</sup> 해당

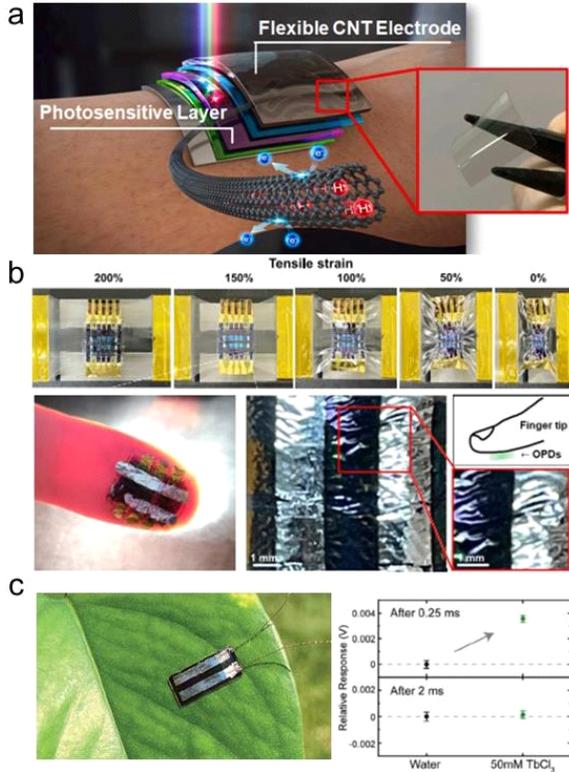


그림 5. (a) 손목에 유연한 유기 포토디텍터를 부착한 사진,<sup>25</sup> (b) parylene 기반 유기 포토디텍터의 기계적 특성 및 손가락에 parylene 기반 유기 포토디텍터를 부착한 사진,<sup>26</sup> (c) 테르븀 이온 감지를 위한 셋업 모식도 및 감지 결과.<sup>27</sup>

분야에 적용하기 위해 실제로 유연하고 피부에 부착할 수 있는 유기 포토디텍터가 보고된 바 있다(그림 5a,b).<sup>25,26</sup> 탄소나노튜브(CNT) 투명 전극을 개발하여 제작한 유연한 유기 포토디텍터는 반복적인 굽힘 테스트 후에도 안정적인 성능을 유지하였으며, 우수한 기계적 유연성을 보였다. 더하여, parylene 기판 위에 제작된 유기 포토디텍터는 7 μm 수준의 굽힘 반경에서도 전기적 특성이 유지되었고, 200% 압축-신장 변형을 반복하였을 때에도 광전류, 암전류, 광검출력이 안정적으로 유지되었다. 이와 같이 제작된 유기 광검출기는 사람 피부에도 부착 가능하며, 이를 통해 유기 포토디텍터의 피부 밀착형 생체 신호 감지 센서로의 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

더하여 유연한 유기 포토디텍터를 식물 앞에 직접 부착하여 희토류 금속을 감지한 결과가 보고된 바 있다.<sup>27</sup> 지속 가능한 농업과 환경 모니터링 기술의 발전과 함께, 식물 기반 생물 센서에 대한 관심이 증가하고 있으며, 특히 식물체에 흡수된 특정 이온이나 오염 물질을 비침습적으로 감지할 수 있는 센서 개발이 필요하다. 최적화된 유연한 유기 포토디텍터는 2 mm 굽힘 반경에서도 4,000회 이상 반복 동작이 가능함을 확인하였다. 이를 식물 앞에 부착하여 희토류 금속인 테르븀( $Tb^{3+}$ ) 이온을 처리한 식물체에서 외부 자극에 의해 유도되는

형광을 감지하여 식물의 금속 흡수 여부를 실시간으로 판단할 수 있었다. 이를 통해 유기 포토디텍터의 환경 및 중금속 흡수 모니터링 응용 가능성을 확인하였다.

### 3. 결론

본 글에서는 근적외선 유기 포토디텍터의 성능 향상을 위한 최신 연구 동향과 응용에 대해 고찰하였다. 비풀러렌 역셉터의 분자 구조 설계를 통해 광흡수 파장대의 확장과 박막 모폴로지 제어가 고성능 근적외선 유기 포토디텍터 개발에 필수적임을 확인하였다. 또한 암전류 억제를 위한 전하 차단층 도입 및 수직 상 분리 구조 형성과 같은 소자 구조적 접근은 고감도 근적외선 유기 포토디텍터 구현에 매우 효과적임을 알 수 있었다. 더불어, 근적외선 유기 포토디텍터는 PPG 센서, 피부 밀착형 소자, 희토류 금속 및 환경 모니터링 센서 등 다양한 분야로의 적용 가능성을 확인하였다. 본 연구 동향은 소재 및 소자 설계를 통한 근적외선 유기 포토디텍터의 성능 극대화 전략을 요약하였으며, 나아가 바이오 센싱, 웨어러블 소자, 광통신 등 다양한 분야에 활용 가능한 차세대 유기 포토디텍터 기술의 발전 방향에 대해 제시하였다.

### 참고문헌

1. X. Liu, Y. Lin, Y. Liao, J. Wu, and Y. Zheng, *J. Mater. Chem. C*, **6**, 3499 (2018).
2. U.-H. Lee, B. Park, S. Rhee, J.-W. Ha, D. R. Whang, H. J. Eun, J. H. Kim, Y. Shim, J. Heo, C. Lee, B. J. Kim, S. C. Yoon, J. Lee, and S.-J. Ko, *Adv. Opt. Mater.*, **11**, 2300312 (2023).
3. Q. Li, Y. Guo, and Y. Liu, *Chem. Mater.*, **31**, 6359 (2019).
4. J. Huang, J. Lee, J. Vollbrecht, V. V. Brus, A. L. Dixon, D. X. Cao, Z. Zhu, Z. Du, H. Wang, K. Cho, G. C. Bazan, and T.-Q. Nguyen, *Adv. Mater.*, **32**, 1906027 (2020).
5. X. Hu, Y. Dong, F. Huang, X. Gong, and Y. Cao, *J. Phys. Chem. C*, **117**, 6537 (2013).
6. B.-H. Jiang, F.-C. Hsiao, Y.-R. Lin, C.-H. Lin, Y. A. Shen, Y.-Y. Hsu, P.-H. Lee, Y.-W. Su, H.-R. Lu, C.-W. Lin, C. K. Chan, and C.-P. Chen, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **15**, 10907 (2023).
7. T. Liu, Z. Jia, Y. Song, N. Yu, Q. Lin, C. Li, Y. Jia, H. Chen, S. Wang, Y. Wei, Y. Lin, F. Huang, Z. Tang, Y. Li, L. Meng, and H. Huang, *Adv. Funct. Mater.*, **33**, 2301167 (2023).
8. J.-W. Ha, H. J. Eun, B. Park, H. Ahn, D. R. Hwang, Y. S. Shim, J. Heo, C. Lee, S. C. Yoon, J. H. Kim, and S.-J. Ko, *Adv. Funct. Mater.*, **33**, 2211486 (2023).
9. P. Jacoutot, A. D. Scaccabarozzi, T. Zhang, Z. Qiao, F. Aniès, M. Neophytou, H. Bristow, R. Kumar, M. Moser, A. D. Nega, A. Schiza, A. Dimitrakopoulou-Strauss, V. G. Gregoriou, T. D. Anthopoulos, M. Heeney, I. McCulloch, A. A. Bakulin, C. L. Chochos, and N. Gasparini, *Small*, **18**, 2200580 (2022).

10. Y. Zheng, Y. Chen, Y. Cao, F. Huang, Y. Guo, and X. Zhu, *ACS Mater. Lett.*, **4**, 882 (2022).
11. A. Mishra and P. Bäuerle, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **51**, 2020 (2012).
12. G. Simone, M. J. Dyson, S. C. J. Meskers, R. A. J. Janssen, and G. H. Gelinck, *Adv. Funct. Mater.*, **30**, 1904205 (2020).
13. R. Estrada, J. Liman, B. Harsono, and I. Karnadi, *Results Eng.*, **25**, 104009 (2025).
14. S. A. Backer, K. Sivula, D. F. Kavulak, and J. M. J. Fréchet, *Chem. Mater.*, **19**, 2927 (2007).
15. P. Sonar, J. P. F. Lim, and K. L. Chan, *Energy Environ. Sci.*, **4**, 1558 (2011).
16. J. Lee, S.-J. Ko, H. Lee, J. Huang, Z. Zhu, M. Seifrid, J. Vollbrecht, V. V. Brus, A. Karki, H. Wang, K. Cho, T.-Q. Nguyen, and G. C. Bazan, *ACS Energy Lett.*, **4**, 1401 (2019).
17. J.-W. Ha, A. Y. Lee, H. J. Eun, J.-H. Kim, H. Ahn, S. Park, C. Lee, D. W. Seo, J. Heo, S. C. Yoon, S.-J. Ko, and J. H. Kim, *ACS Nano*, **17**, 18792 (2023).
18. W. Yang, W. Qiu, E. Georgitzikis, E. Simoen, J. Serron, J. Lee, I. Lieberman, D. Cheyns, P. Malinowski, J. Genoe, H. Chen, and P. Heremans, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **13**, 16766 (2021).
19. Y. Wei, H. Chen, T. Liu, S. Wang, Y. Jiang, Y. Song, J. Zhang, X. Zhang, G. Lu, F. Huang, Z. Wei, and H. Huang, *Adv. Funct. Mater.*, **31**, 2106326 (2021).
20. N. Li, Z. Lan, Y. S. Lau, J. Xie, D. Zhao, and F. Zhu, *Adv. Sci.*, **7**, 2000444 (2020).
21. J. Simões, T. Dong, and Z. Yang, *Adv. Mater. Interfaces*, **9**, 2101897 (2022).
22. A. Bilgaiyan, F. Elsamnah, H. Ishidai, C.-H. Shim, M. A. B. Misran, C. Adachi, and R. Hattori, *ACS Appl. Electron. Mater.*, **2**, 1280 (2022).
23. S. Li, Y. Wang, L. Hao, Z. Tan, Y. Huang, W. Zhong, S. Dong, X. Yang, and F. Huang, *Adv. Funct. Mater.*, **35**, 2415142 (2025).
24. G. Yang, D. Zhang, R. Wang, M. Wu, and J. Yu, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **16**, 23643 (2024).
25. W. Jang, B. G. Kim, S. Seo, A. Shawky, M. S. Kim, K. Kim, B. Mikladal, E. I. Kauppinen, S. Maruyama, I. Jeon, and D. H. Wang, *Nano Today*, **37**, 101081 (2021).
26. H. J. Eun, H. Lee, Y. Shim, G. U. Seo, A. Y. Lee, J. J. Park, J. Heo, S. Park, and J. H. Kim, *iScience*, **25**, 104194 (2022).
27. H. M. Schrickx, S. Gyurek, C. Moore, E. Hernández-Pagán, C. J. Doherty, M. W. Kudenov, and B. T. O' Connor, *Adv. Opt. Mater.*, **12**, 2400005 (2024).