



REVIEW

# 신축성 유기 광검출기의 설계 전략: 구조적 설계에서 본질적 설계로의 전환

강현범<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>울산대학교 에너지화학공학부 에너지분자공학트랙

## Stretchable Organic Photodetectors: From Structural to Intrinsic Design

Hyunbum Kang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Energy & Chemical Engineering, University of Ulsan, Ulsan, Korea

### ABSTRACT

Stretchable organic photodetectors (OPDs) have emerged as key components for next-generation human-centric optoelectronics, enabling conformal sensing, wearable health monitoring, and soft-machine interfaces. While organic semiconductors offer mechanical compliance and versatile optoelectronic tunability, achieving stable photodetection under mechanical deformation remains a fundamental challenge due to the intrinsic trade-off between molecular ordering and mechanical softness. Early efforts primarily relied on structural strain-relief strategies, such as buckling geometries and island-bridge layouts, which mitigate mechanical stress but introduce limitations in scalability, device density, and design flexibility. Recent advances have shifted the focus toward intrinsically stretchable material systems, where mechanical deformability is embedded at the material level through molecular engineering and elastomer-semiconductor composite strategies. In particular, the integration of elastomer networks with semiconducting pathways has enabled new opportunities to simultaneously maintain charge transport continuity and suppress dark current under strain. This review provides a comprehensive overview of stretchable OPDs, emphasizing the transition from structural to intrinsic design strategies. We first discuss the operating principles of OPDs and the impact of mechanical deformation on key performance metrics, including responsivity and detectivity. We then examine recent advances in molecular design, composite systems, morphology engineering, and device architecture. Finally, we highlight emerging applications and outline critical challenges for future development of intrinsically stretchable photodetection systems.

Key Words: Stretchable OPDs; Intrinsic stretchability; Elastomer composites; Morphology control

\*Correspondence: hbkang@ulsan.ac.kr

## 1. 서론

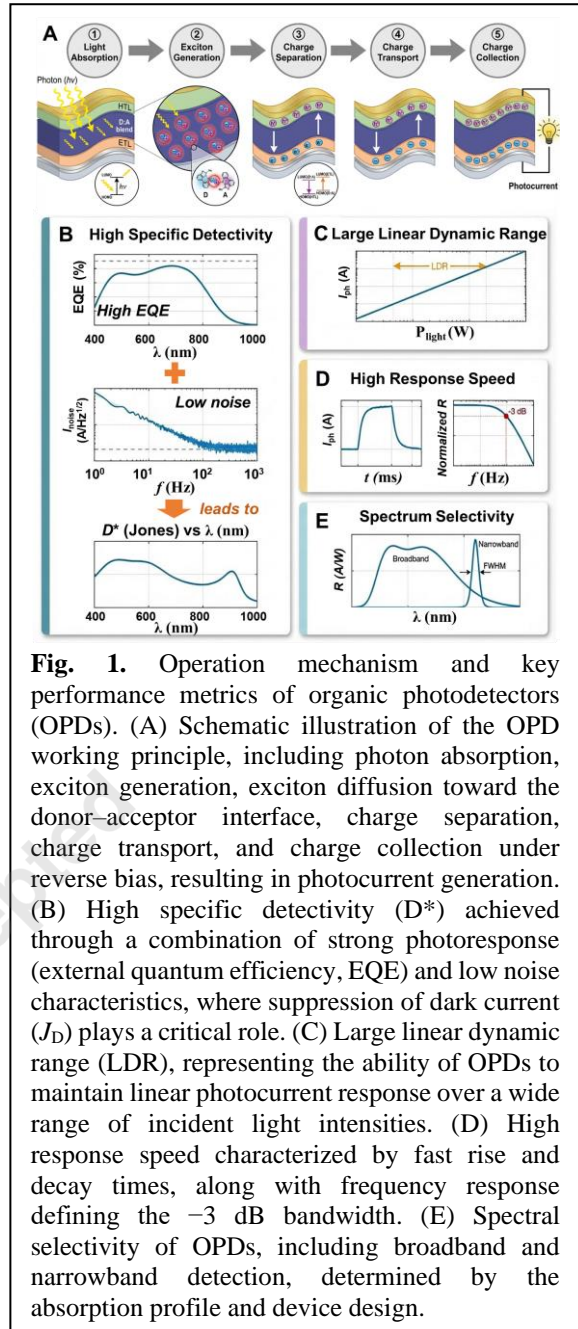
웨어러블 전자기기와 소프트 전자소자의 발전은 전자소자의 설계 패러다임을 근본적으로 변화시키고 있다. 기존 전자소자는 평면 기판 위에서 고정된 형태로 동작하는 것을 전제로 설계되었으나, 최근에는 인체와 밀착되어 동작하거나 자유롭게 변형되는 환경에서 사용되는 경우가 증가하고 있다. 이러한 변화는 전자소자에 단순한 유연성(flexibility)을 넘어 반복적인 기계적 변형을 견딜 수 있는 신축성(stretchability)을 요구하고 있다 [1-3]. 특히 광검출기(photodetector)는 빛을 전기 신호로 변환하는 핵심 소자로서, 생체신호 모니터링, 의료 이미징, 환경 센싱, 광통신 인터페이스 등 다양한 응용 분야에서 중요한 역할을 수행한다 [4-6]. 웨어러블 환경에서는 photodetector 가 피부와 밀착된 상태를 유지하면서도 인체 움직임에 따른 기계적 변형을 견뎌야 하며, 실제로 손목이나 관절 부위에서는 수십 퍼센트 이상의 strain 이 발생할 수 있다 [7,8]. 이러한 조건에서도 안정적인 광검출 성능을 유지하는 것은 차세대 웨어러블 전자소자의 핵심 요구사항이다. 기존 무기 반도체 기반 photodetector 는 높은 광전 성능을 제공하지만, 높은 탄성계수와 낮은 변형률로 인해 인체와의 기계적 적합성이 떨어지는 한계를 가진다 [9,10]. 이러한 기계적 mismatch 는 장시간 착용 시 불편함을 유발할 뿐만 아니라, 센서와 피부 사이의 접촉 불안정으로 인해 신호 왜곡을 초래할 수 있다. 이를 해결하기 위해 초박막 반도체 소자나 구조 기반 strain-relief 설계가 제안되었으나, 근본적인 기계적 한계를 완전히 극복하기는 어렵다 [11,12]. 이러한 한계를 극복하기 위한 대안으로 유기 광검출기(organic photodetector, OPD)가 주목받고 있다. 유기 반도체는 분자 구조 설계를 통해 광흡수 파장을 조절할 수 있으며, 용액 공정을 기반으로 대면적 제조가

가능하고, 상대적으로 낮은 기계적 강성을 가지기 때문에 연성 전자소자에 적합하다 [13-15]. 특히 bulk heterojunction (BHJ) 구조를 기반으로 한 OPD 는 높은 광흡수 계수와 효율적인 전하 분리 특성을 통해 가시광 및 근적외선 영역에서 고감도 광검출이 가능하다 [16,17]. 그러나 OPD 역시 본질적인 한계를 가진다. 공액 고분자 및 저분자 반도체는 높은 전하 이동 특성을 확보하기 위해 강한  $\pi$ - $\pi$  stacking 과 높은 결정성을 필요로 하며, 이는 기계적 취성(brittleness)을 증가시키는 요인으로 작용한다 [18]. 그 결과 인장 변형이 가해질 경우 활성층 내 미세 균열이 형성되고 전하 수송 경로가 단절되며, 계면 결함이 증가하여 leakage current 가 증가하게 된다. 이러한 현상은 photodetector 의 핵심 성능 지표인 dark current 증가 및 detectivity 저하로 직결된다 [19]. 초기 stretchable OPD 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 주로 외재적(extrinsic) 접근법이 활용되었다. buckling 구조, pre-strain 기판, island-bridge 설계 및 serpentine interconnect 는 활성층에 직접적인 strain 이 전달되지 않도록 설계된 대표적인 전략이다 [1,2]. 이러한 접근은 기존의 고성능 소재를 그대로 활용할 수 있다는 장점이 있으나, 구조적 복잡성이 증가하고 stretchability 가 제한적이며, 대면적 공정 적용성이 낮다는 한계를 가진다. 최근에는 이러한 한계를 극복하기 위해 소재 자체에 기계적 신축성을 부여하는 내재적(intrinsic) 설계 전략이 주목받고 있다. intrinsically stretchable polymer semiconductor, elastomer-semiconductor blending, 그리고 stretchable electrode 설계를 통해 strain 환경에서도 전하 수송 경로와 계면 안정성을 유지하려는 연구가 활발히 진행되고 있다 [18,19]. 특히 elastomer 기반 복합 활성층은 기계적 변형을 효과적으로 흡수하면서도 전하 수송 네트워크를 유지할 수 있어, stretchable

OPD 구현에 중요한 역할을 수행한다. 그럼에도 불구하고, 현재까지의 관련 리뷰는 flexible photodetector 또는 일반적인 stretchable electronics 를 중심으로 다루는 경우가 많으며, stretchable OPD 가 외재적 구조 설계에서 내재적 소재 설계로 어떻게 전환되고 있는지를 중심으로 체계적으로 정리한 연구는 상대적으로 부족하다. 따라서 본 리뷰에서는 stretchable OPD 기술의 발전을 외재적 접근에서 내재적 설계로의 전환이라는 관점에서 정리한다. 먼저 OPD 의 동작 원리와 strain 이 광전 성능에 미치는 영향을 살펴보고, 이어서 소재 및 소자 엔지니어링 전략의 진화 과정을 논의한다. 마지막으로 stretchable OPD 의 응용 가능성과 향후 연구 방향을 제시한다.

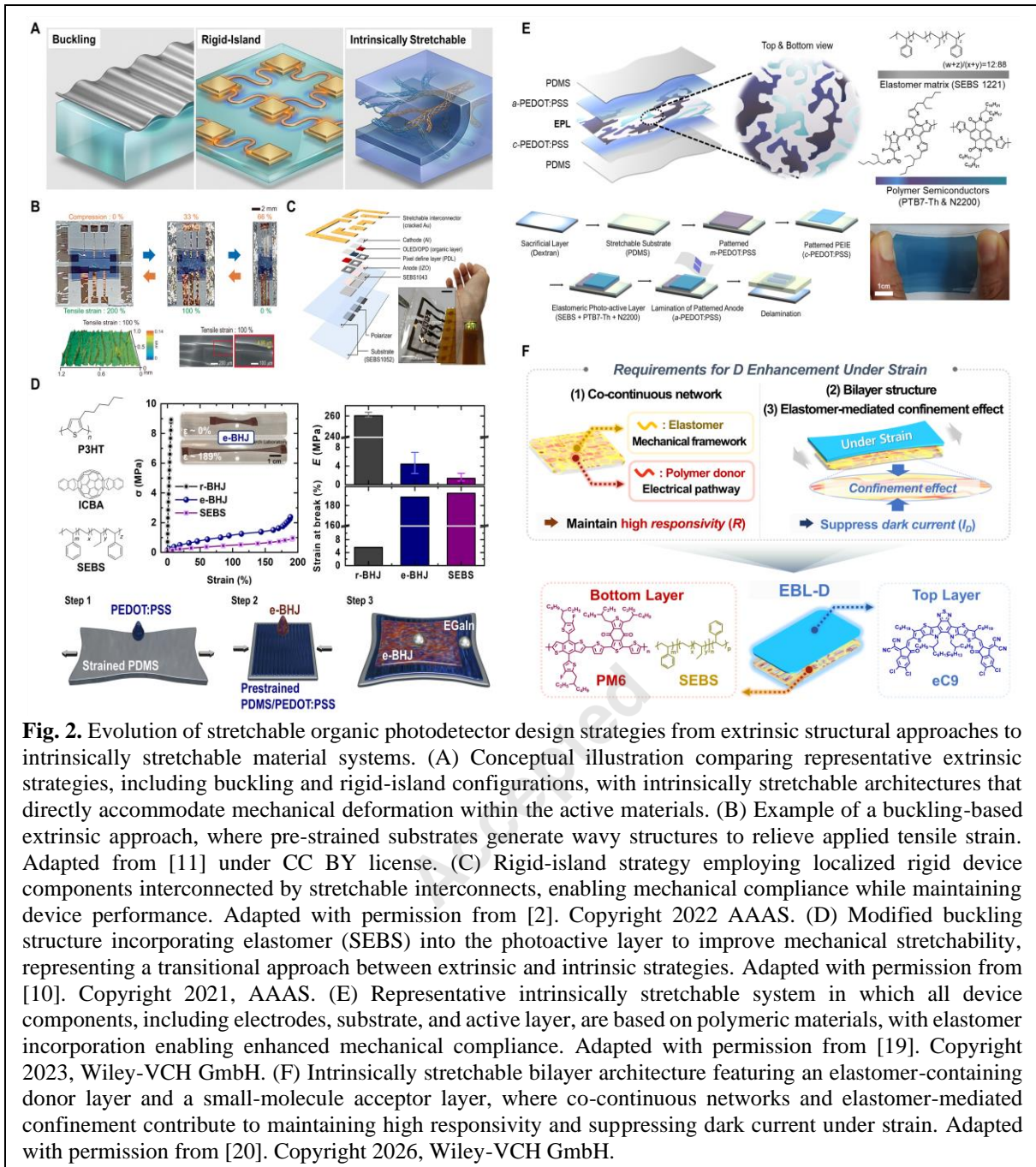
## 2. 유기 광검출기 동작 메커니즘 및 기계적 변형의 영향

Organic photodetector (OPD)는 광활성층에서 빛을 흡수하여 exciton 을 생성하고, donor-acceptor 계면에서 전하 분리를 거쳐 자유 전하를 생성한 뒤, 이를 전극으로 수집함으로써 photocurrent 를 형성하는 소자이다. 일반적으로 유기 반도체는 낮은 유전상수를 가지기 때문에 광흡수 직후 자유 전하가 아닌 결합된 exciton 이 형성되며, 이 exciton 은 수 nm 수준의 확산 길이를 가지므로 donor-acceptor 계면의 형성이 필수적이다 [16,17]. 이러한 특성으로 인해 OPD 는 대부분 bulk heterojunction (BHJ) 구조를 기반으로 설계되며, donor 와 acceptor 간의 나노 스케일 상분리 구조를 통해 exciton dissociation 과 charge transport 를 동시에 최적화한다. 이후 생성된 전하들은 전극 방향으로 이동하며, 이 과정에서 전하 수송 특성, 계면 상태, 그리고 에너지 준위 정렬이 소자 성능을 결정짓는 주요 요소로 작용한다.



**Fig. 1.** Operation mechanism and key performance metrics of organic photodetectors (OPDs). (A) Schematic illustration of the OPD working principle, including photon absorption, exciton generation, exciton diffusion toward the donor-acceptor interface, charge separation, charge transport, and charge collection under reverse bias, resulting in photocurrent generation. (B) High specific detectivity ( $D^*$ ) achieved through a combination of strong photoresponse (external quantum efficiency, EQE) and low noise characteristics, where suppression of dark current ( $J_D$ ) plays a critical role. (C) Large linear dynamic range (LDR), representing the ability of OPDs to maintain linear photocurrent response over a wide range of incident light intensities. (D) High response speed characterized by fast rise and decay times, along with frequency response defining the  $-3$  dB bandwidth. (E) Spectral selectivity of OPDs, including broadband and narrowband detection, determined by the absorption profile and device design.

(Fig.1) OPD 의 성능은 responsivity ( $R$ ), external quantum efficiency (EQE), detectivity ( $D^*$ ), response speed, 그리고 dark current density ( $J_D$ )와 같은 지표로 평가된다. 특히 detectivity는 noise와 밀접하게 연관되며, dark current는 shot noise의 주요 원인으로 작용한다. (Fig.1) 따라서 OPD에서는 높은 photocurrent뿐만 아니라 낮은 dark current를 동시에 달성하는 것이 매우 중요하다 [17]. Stretchable OPD에서는 기계적 변형이 이러한 성능 지표에 직접적인 영향을



미친다. 인장 strain이 가해질 경우, 활성층 내에서 미세 균열이 형성되거나 donor-acceptor 계면이 변형되며, electrode-active layer 계면에서도 접촉 불안정성이 발생할 수 있다. 이러한 구조적 변화는 전하 수송 경로를 단절시키고 leakage pathway를 형성하여 dark current를 증가시키며, 결과적으로 detectivity를 저하시킨다 [19]. 또한 strain은 광학적 특성에도 영향을 미친다. 활성층이 인장되면서 두께 감소가 발생하고,

내부 nanostructure가 재배열되며, 이는 optical field distribution과 absorption efficiency 변화를 유도할 수 있다. 특히 BHJ 구조에서는 phase separation 구조의 변화가 exciton generation 및 dissociation efficiency에 영향을 줄 수 있으며, 이는 OPD 성능 변동의 또 다른 원인으로 작용한다 [20]. 따라서 stretchable OPD 에서는 단순한 초기 성능 향상보다, strain 하에서 photodetection 성능이 얼마나 안정적으로

유지되는가가 핵심 설계 기준이 된다. 이러한 관점에서 OPD 설계는 기계적 안정성과 전기적 성능을 동시에 고려하는 통합적인 접근이 요구된다.

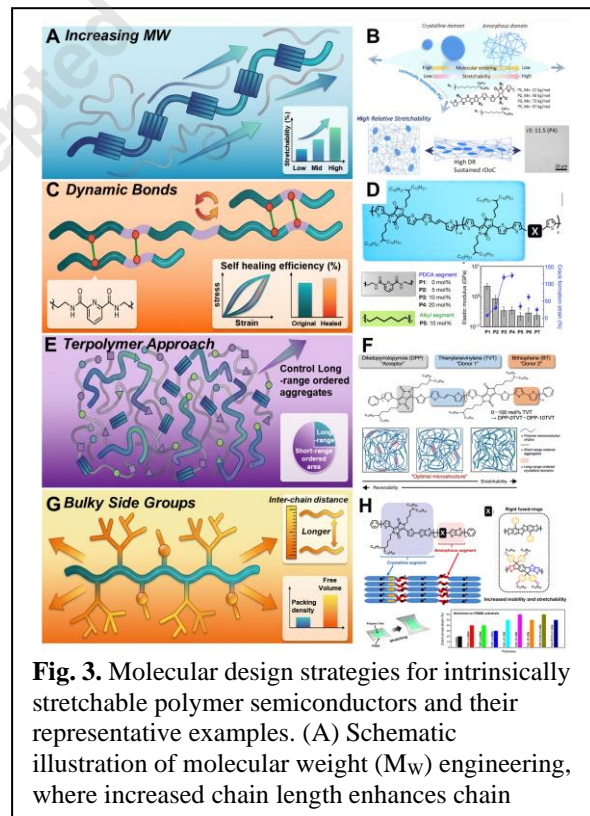
### 3. 스트레처블 유기 광검출기의 디자인 전략

신축성 유기 광검출기의 설계는 초기에는 구조적 접근을 중심으로 발전하였으나, 최근에는 재료 자체에 기계적 신축성을 부여하는 방향으로 빠르게 전환되고 있다. 이러한 변화는 단순히 기계적 변형을 허용하는 수준을 넘어, 변형 환경에서도 광전 성능을 안정적으로 유지하는 것을 목표로 한다는 점에서 중요한 의미를 가진다. 특히 photodetector는 낮은 dark current와 높은 detectivity를 동시에 요구하기 때문에, strain에 의해 발생하는 구조적 변화와 계면 불안정성이 성능에 미치는 영향이 매우 크다. 따라서 stretchable OPD의 설계는 재료, 구조, 소자 공학이 결합된 통합적인 접근을 필요로 한다.

#### 3.1. 구조 기반 strain 완화 전략

초기 stretchable OPD 연구에서는 buckling 구조, pre-strain 기판, island-bridge 구조, serpentine interconnect와 같은 구조 기반 strain-relief 전략이 널리 활용되었다 [1,2]. (Fig.2A) 이러한 접근은 외부에서 가해지는 기계적 변형을 기하학적으로 분산시켜 활성층이 직접적인 strain을 받지 않도록 하는 방식으로 작동한다. 예를 들어, pre-strain 기판 위에 박막 소자를 형성한 후 strain을 해제하면 buckling 구조가 형성되어 이후 인장 변형 시 소자가 평탄화되면서 strain을 흡수할 수 있다 [10-12]. (Fig.2B) 또한 island-bridge 구조에서는 rigid한 기능층을 island 형태로 배치하고, 이를 stretchable interconnect로 연결하여 변형 시 interconnect가 strain을 흡수하도록 설계된다.

(Fig.2C) 이러한 구조적 접근은 기존의 고성능 유기 및 무기 반도체를 그대로 활용할 수 있다는 장점이 있으며, 실제로 초기 stretchable electronics 및 optoelectronics 연구에서 중요한 역할을 하였다. 그러나 이러한 방식은 photodetector에 적용할 경우 몇 가지 구조적인 한계를 가진다. 첫째, 구조 설계에 의해 active area가 분할되거나 비균일해질 수 있으며, 이는 광검출 균일성에 영향을 미친다. 둘째, 복잡한 패터닝 및 공정 과정이 필요하여 대면적 제조 및 고밀도 집적에 불리하다. 셋째, 반복적인 기계적 변형 환경에서 interconnect 피로, 계면 delamination, 국소적 stress concentration 등의 문제가 발생할 수 있다. 특히 photodetector는 넓은 활성 영역과 균일한 광응답이 요구되기 때문에, 구조 기반 접근은 근본적인



**Fig. 3.** Molecular design strategies for intrinsically stretchable polymer semiconductors and their representative examples. (A) Schematic illustration of molecular weight ( $M_w$ ) engineering, where increased chain length enhances chain

entanglement and energy dissipation, leading to improved mechanical robustness. (B) Representative example demonstrating enhanced stretchability and sustained charge transport with increasing molecular weight, highlighting improved ductility and maintained degree of crystallinity under strain. Adapted from [23] under CC BY license. (C) Dynamic bonding and conjugation breaker strategies, enabling reversible bond interactions and localized structural flexibility for effective strain dissipation and self-healing behavior. (D) Representative example showing polymer systems incorporating dynamic bonding or conjugation-modulated backbones, exhibiting improved mechanical compliance while maintaining semiconducting performance. Adapted with permission from [22]. Copyright 2022, American Chemical Society. (E) Terpolymer approach introducing backbone randomness to disrupt excessive crystallinity and enhance mechanical deformability without significantly compromising charge transport pathways. (F) Representative example of terpolymer-based systems exhibiting optimized microstructure, where controlled phase behavior leads to improved stretchability and balanced electronic performance. Adapted from [25] under CC BY license. (G) Bulky side-chain engineering to increase interchain spacing and reduce packing density, thereby mitigating brittle fracture and enhancing mechanical flexibility. (H) Representative example of polymer semiconductors with bulky side groups, showing reduced aggregation, improved mechanical stretchability, and stable charge transport under deformation. Adapted with permission from [26]. Copyright 2021, American Chemical Society.

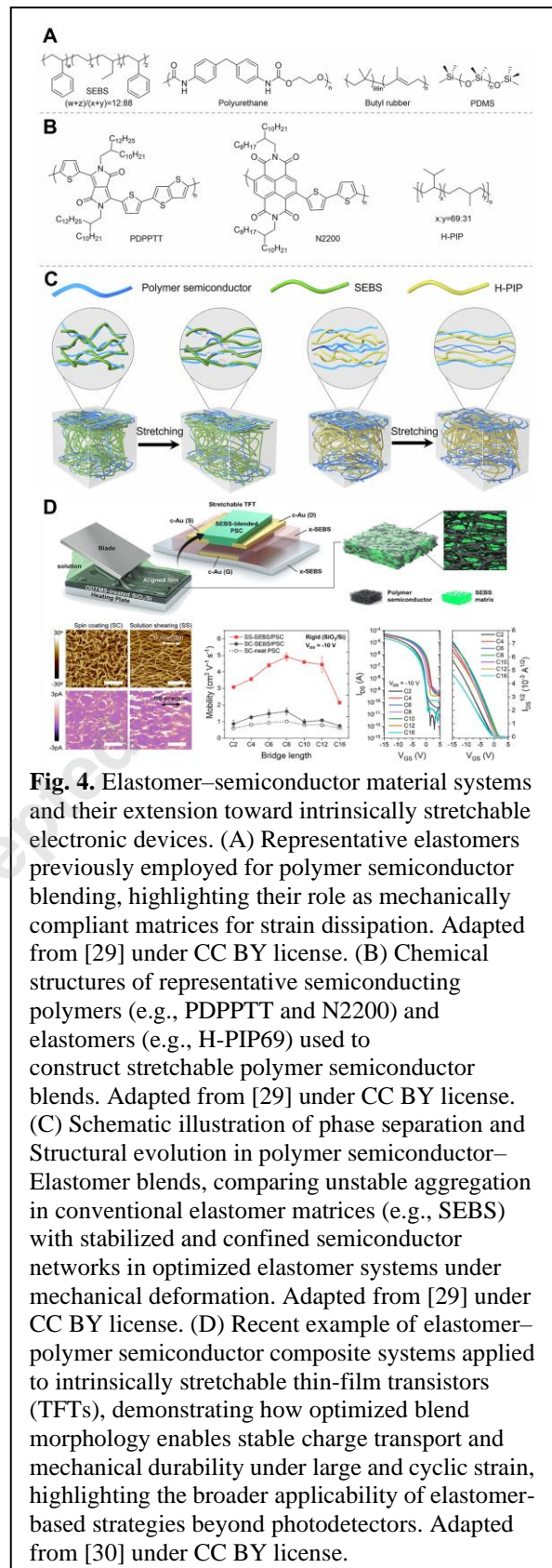
해결책이라기보다 제한적인 보완 전략으로 이해될 수 있다. 이에 따라 최근 연구는 구조적 strain 완화에서 벗어나 재료 자체의 기계적 순응성을 확보하는 방향으로 이동하고 있다.

### 3.2. 분자 설계 기반 내재적 신축성 확보

재료 자체에 신축성을 부여하기 위한 가장 근본적인 접근은 공액 고분자의 분자 구조를 조절하는 것이다. 공액 고분자는 backbone과 side chain 구조, 그리고 분자 간 상호작용을 통해 전하 수송 특성과 기계적 특성을 동시에 결정한다 [18]. 일반적으로 높은 전하 이동도를 확보하기 위해서는 강한  $\pi$ - $\pi$  stacking과 높은

결정성이 요구되지만, 이러한 구조는 필름의 취성을 증가시키는 주요 요인으로 작용한다. 즉, 전기적 성능과 기계적 신축성 사이에는 구조적으로 상충되는 관계가 존재한다. 이러한 trade-off를 완화하기 위해 다양한 분자 설계 전략이 제안되어 왔다. 대표적으로 backbone에 flexible spacer를 도입하여 사슬의 유연성을 증가시키거나, side chain의 길이 및 branching을 조절하여 분자 간 packing density를 완화하는 방식이 있다 [22]. 최근에는 보다 정교한 설계 접근으로, 분자량 조절을 통해 다중 에너지 소산(multi-modal energy dissipation)을 유도하는 전략이 보고되었으며, 이를 통해 높은 상대 신율(relative stretchability)을 유지하면서도 전하 수송 특성을 동시에 확보할 수 있음이 확인되었다 [23]. (Fig.3A-3B) 특히 고분자 사슬 길이의 분포와 얽힘(entanglement)을 제어함으로써 strain 하에서 균열 전파를 억제하고 기계적 안정성을 향상시키는 것이 가능하다. 또한 conjugated backbone에 의도적으로 conjugation breaker를 도입하거나, dynamic bonding을 포함하는 분자 설계 역시 중요한 접근으로 부각되고 있다 [24]. (Fig.3C-3D) 이러한 전략은 backbone의 국소적인 강성을 완화하여 기계적 유연성을 증가시키는 동시에, strain 하에서 에너지를 분산시키는 역할을 수행한다. 특히 hydrogen bonding, reversible covalent bond, 그리고 다양한 비공유 결합 상호작용은 외부 변형에 대한 자가 적응(self-adaptive) 특성을 부여하여 반복 변형 환경에서도 구조적 안정성을 유지하는 데 기여한다. 한편, 최근에는 terpolymer 설계를 통해 기계적 특성과 전자적 특성을 동시에 제어하려는 시도가 보고되고 있다. 서로 다른 기능을 가지는 세 가지 단위를 하나의 backbone에 도입함으로써, 결정성과 유연성을 동시에 조절할 수 있으며,

이를 통해 high mobility와 stretchability를 동시에 만족시키는 고분자 반도체가 개발되고 있다. 이러한 접근은 단일 구조 단위로는 달성하기 어려운 복합적인 물성 조절을 가능하게 한다는 점에서 중요한 의미를 가진다 [25]. (Fig.3E-3F) 이와 함께 bulky side chain을 도입하여 고분자 간 packing을 의도적으로 방해하고, 결정성을 완화함으로써 기계적 유연성을 향상시키는 전략도 활발히 연구되고 있다. 특히 conjugated fused-ring 구조에 bulky side group을 결합하는 방식은 backbone의 전자적 특성을 유지하면서도  $\pi$ - $\pi$  stacking을 적절히 약화시켜 crack formation을 억제하는 효과를 나타낸다. 이러한 설계는 높은 전하 이동도를 유지하면서도 큰 strain에서도 안정적인 동작이 가능한 고분자 반도체 구현에 기여한다 [26]. (Fig.3G-3H) 이러한 분자 설계 전략들은 stretchable transistor 분야에서 특히 활발히 연구되어 왔으며, 실제로 100% 이상의 strain에서도 안정적인 전하 이동도를 유지하는 사례들이 다수 보고되었다. 또한 일부 stretchable organic solar cell 연구에서도 유사한 접근이 활용되어, 기계적 안정성과 광전 변환 효율을 동시에 개선하는 결과가 보고되고 있다 [27]. 그러나 photodetector의 경우에는 상황이 더욱 복잡하다. photodetector는 단순히 높은 mobility만을 요구하는 것이 아니라, 광흡수, exciton 분리, 낮은 dark current, 계면 안정성 등 다양한 요소가 동시에 고려되어야 한다. 특히 낮은 dark current를 유지하는 것이 detectivity 확보에 필수적이기 때문에, 분자 설계 과정에서 발생하는 disorder나 trap state 증가가 성능에 직접적인 영향을 미칠 수 있다 [19,20]. 또한 photodetector는 상대적으로 두꺼운 활성층을 필요로 하는 경우가 많아, strain 하에서 균열 발생 가능성이 더욱 높다. 따라서 분자 설계만으로 모든 요구 조건을 동시에 충족하기에는 한계가 존재하며, 이를 보완하기 위한 추가적인 구조 설계 및 복합화 전략이



**Fig. 4.** Elastomer–semiconductor material systems and their extension toward intrinsically stretchable electronic devices. (A) Representative elastomers previously employed for polymer semiconductor blending, highlighting their role as mechanically compliant matrices for strain dissipation. Adapted from [29] under CC BY license. (B) Chemical structures of representative semiconducting polymers (e.g., PDPPTT and N2200) and elastomers (e.g., H-PIP69) used to construct stretchable polymer semiconductor blends. Adapted from [29] under CC BY license. (C) Schematic illustration of phase separation and Structural evolution in polymer semiconductor–Elastomer blends, comparing unstable aggregation in conventional elastomer matrices (e.g., SEBS) with stabilized and confined semiconductor networks in optimized elastomer systems under mechanical deformation. Adapted from [29] under CC BY license. (D) Recent example of elastomer–polymer semiconductor composite systems applied to intrinsically stretchable thin-film transistors (TFTs), demonstrating how optimized blend morphology enables stable charge transport and mechanical durability under large and cyclic strain, highlighting the broader applicability of elastomer-based strategies beyond photodetectors. Adapted from [30] under CC BY license.

병행되어야 한다. 이러한 관점에서 분자 설계는 stretchable OPD 구현을 위한 필수적인 기반

요소이지만, 단독으로 완결된 해결책이라기보다는 이후에 논의될 elastomer 복합 전략 및 morphology engineering과 결합되어야 하는 핵심 구성 요소로 이해될 수 있다.

### 3.3. Elastomer–Semiconductor 복합 전략

앞서 논의한 분자 설계 기반 접근은 공액 고분자 자체의 기계적 유연성을 향상시키는 데 중요한 역할을 수행하지만, 높은 광전 성능과 기계적 신축성을 동시에 만족시키기에는 여전히 한계가 존재한다. 이러한 한계를 보완하기 위한 확장 전략으로 elastomer–semiconductor 복합 설계가 제안되었으며, 이는 단순한 hybrid 구조가 아니라 intrinsically stretchable 시스템을 구현하기 위한 핵심 소재 설계 패러다임으로 이해될 수 있다. (Fig.4A-4B) 이 시스템에서 elastomer는 낮은 탄성계수와 높은 신율을 바탕으로 외부에서 가해지는 기계적 변형을 효과적으로 흡수하는 역할을 수행하며, semiconductor는 전하 수송 경로를 형성하는 기능적 네트워크를 제공한다. 중요한 점은 두 성분이 단순히 균일하게 혼합되는 것이 아니라, 상분리된 상태에서도 전기적으로 연결된 percolation network를 형성해야 한다는 것이다. (Fig.4C) 이러한 구조적 특징은 strain 하에서도 전하 수송 경로의 연속성을 유지하는 데 필수적인 요소로 작용한다. 초기 elastomer–semiconductor 복합 전략은 stretchable organic transistor 분야에서 활발히 연구되었으며, 공액 고분자와 elastomer를 혼합한 시스템에서 높은 신율과 안정적인 전하 이동도를 동시에 확보할 수 있음이 보고되었다 [28-30]. (Fig.4D) 이 경우 elastomer matrix는 strain을 효과적으로 분산시키고 crack formation을 억제하는 역할을 수행하며, semiconductor domain은 elastomer 내부에서 연속적인 percolation network를 형성하여 전기적 기능을 유지한다. 이후 이러한 접근은 stretchable organic solar cell로 확장되었으며,

donor–acceptor 기반 bulk heterojunction (BHJ) 시스템에 elastomer를 도입함으로써 기계적 안정성과 광전 변환 효율을 동시에 개선하려는 시도가 이루어졌다 [31]. 최근에는 이러한 복합 전략이 stretchable photodetector로 확장되면서 새로운 설계 방향을 제시하고 있다. (Fig.2C-E) photodetector의 경우 낮은 dark current와 높은 detectivity를 동시에 요구하기 때문에, strain에 의해 유발되는 leakage current 증가와 noise amplification을 억제하는 것이 핵심 과제로 작용한다. 이에 따라 elastomer가 포함된 활성층에서는 elastic modulus 감소와 crack suppression이 동시에 달성될 뿐만 아니라, strain 하에서의 leakage pathway 형성이 억제되어 dark current가 감소하고, 결과적으로 detectivity가 유지되거나 향상되는 결과가 보고되고 있다 [19-21]. 이러한 결과는 elastomer가 단순한 기계적 보조재를 넘어, 전기적 noise를 제어하는 기능적 요소로 작용할 수 있음을 의미한다. 이와 같은 복합 시스템에서 morphology는 기계적 안정성과 광전 성능을 동시에 결정하는 핵심 요소로 작용한다. 특히 BHJ 구조에서는 donor–acceptor 간의 nanoscale phase separation이 exciton dissociation과 charge transport 효율을 좌우하며, domain size, interfacial area, 그리고 percolation network의 연속성이 주요 설계 변수로 작용한다. elastomer가 도입된 시스템에서는 이러한 morphology가 strain 하에서 보다 안정적으로 유지될 수 있는데, 이는 elastomer matrix가 semiconductor domain의 재배열을 물리적으로 제한하고, 국소적인 strain을 분산시키는 역할을 수행하기 때문이다. 구체적으로, elastomer–semiconductor 복합 시스템에서는 vertical phase separation, nanoconfinement, 그리고 3차원 percolation network 형성과 같은 구조가 형성될 수 있으며, 이는 strain 환경에서도 charge transport pathway의 연속성을 유지하는 데 기여한다. 또한 elastomer의 존재는 domain

coarsening이나 phase segregation의 과도한 진행을 억제하여, 초기 형성된 nanoscale morphology를 안정적으로 유지하는 데 도움을 줄 수 있다. 이러한 morphology 안정화 효과는 단순히 photocurrent 유지에 그치지 않고, trap formation 및 leakage pathway 생성을 억제함으로써 dark current 증가를 방지하는 데에도 중요한 역할을 한다. 더 나아가 일부 연구에서는 strain에 의해 polymer chain alignment가 향상되거나, percolation pathway가 재구성되면서 전하 수송 특성이 개선되는 현상이 보고되고 있다. 이러한 strain-induced ordering은 특정 조건에서 detectivity 향상으로 이어질 수 있으며, 이는 stretchable OPD가 단순히 성능 열화를 억제하는 수준을 넘어 strain을 능동적으로 활용할 수 있는 가능성을 보여준다. 다만 이러한 현상은 재료 시스템과 구조에 강하게 의존하기 때문에 일반적인 설계 원리로 확립되기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다. 또한 최근에는 단순한 bulk blending을 넘어 bilayer 구조 또는 gradient 구조를 활용한 설계도 제안되고 있다. 예를 들어 elastomer가 포함된 donor-rich layer를 통해 기계적 안정성과 hole transport를 확보하고, acceptor-rich layer를 통해 광흡수 및 charge separation을 최적화하는 방식이 보고되었다. 이러한 접근은 elastomer의 기계적 역할과 semiconductor의 광전 기능을 공간적으로 분리하면서도 상호 보완적으로 작동하도록 설계할 수 있다는 점에서 중요한 의미를 가진다. 결과적으로 elastomer-semiconductor 복합 전략은 단순한 hybridization을 넘어, 기계적 변형 하에서도 전하 수송 경로와 morphology를 안정적으로 유지함으로써 photodetector의 핵심 성능인 dark current와 detectivity를 동시에 제어할 수 있는 통합적인 설계 전략으로 자리 잡고 있다. 이는 stretchable OPD 구현에 있어 가장 실질적이고 효과적인 intrinsic 설계 접근으로 평가될 수 있다.

### 3.4. Fully Stretchable OPD로의 확장

앞서 논의한 분자 설계, elastomer-semiconductor 복합 전략, 그리고 morphology engineering은 궁극적으로 기계적 변형 하에서도 광전 성능을 유지할 수 있는 재료 및 구조를 구현하기 위한 기반을 제공한다. 이러한 접근은 점차 개별 구성 요소 수준을 넘어, 소자의 모든 요소가 기계적 신축성을 갖는 fully intrinsic stretchable system으로 확장되고 있다. fully stretchable OPD는 active layer, electrode, substrate, 그리고 encapsulation까지 포함한 모든 구성 요소가 신축성을 가지는 시스템을 의미하며, 구조적 strain-relief 설계 없이도 높은 기계적 변형을 수용할 수 있다는 특징을 가진다. 이는 기존의 extrinsic 접근 방식에서 벗어나, 재료 자체의 특성을 기반으로 신축성을 구현한다는 점에서 중요한 패러다임 전환을 보여준다. 특히 all-polymer 기반 stretchable OPD는 이러한 방향성을 대표적으로 보여주는 사례로, 공액 고분자 반도체, elastomer, 그리고 polymer electrode를 조합함으로써 전 구성 요소의 기계적 특성을 통합적으로 설계할 수 있다. 이러한 시스템에서는 높은 strain 조건에서도 연속적인 charge transport pathway가 유지되며, 반복적인 인장-이완 사이클에서도 안정적인 photocurrent와 detectivity를 확보할 수 있음이 보고되고 있다 [19]. 이는 elastomer-semiconductor 복합 전략과 morphology 안정화가 device-level 성능 유지로 직접적으로 이어질 수 있음을 보여준다. 또한 최근에는 stretchable transparent electrode, stretchable interlayer, 그리고 compliant substrate를 포함하는 다층 구조 설계를 통해, 소자 전체의 기계적 신축성과 전기적 안정성을 동시에 확보하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 예를 들어 PEDOT:PSS 기반 전극, Ag nanowire network, graphene, 그리고 다양한 hybrid electrode 시스템이 활용되고 있으며, 이러한 구조는 높은

투과도와 낮은 sheet resistance를 유지하면서도 strain 하에서 crack-free 특성을 확보할 수 있다 [31]. 동시에 charge blocking layer와 energy level alignment를 최적화함으로써 dark current를 억제하고 detectivity를 유지하는 설계가 병행되고 있다. 이와 함께 일부 연구에서는 strain 환경에서 오히려 photodetector 성능이 향상되는 현상이 보고되고 있으며, 이는 morphology 재정렬, polymer chain alignment, 그리고 noise suppression과 같은 효과와 관련이 있는 것으로 해석되고 있다. 이러한 결과는 stretchable OPD가 단순히 기계적 변형에 대한 내성을 확보하는 수준을 넘어, strain을 능동적으로 활용하여 성능을 향상시킬 수 있는 가능성을 제시한다 [20]. 그러나 이러한 현상은 아직 특정 시스템에 국한되어 있으며, 일반적인 설계 원리로 확립되기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다. 그럼에도 불구하고 fully stretchable OPD의 실용화를 위해서는 여전히 해결해야 할 과제가 존재한다. 대표적으로 대면적 공정 및 array fabrication 기술, 장기 신뢰성, 환경 안정성, 그리고 실제 웨어러블 환경에서의 동작 안정성 확보가 중요한 문제로 남아 있다. 특히 imaging array와 같은 고집적 시스템에서는 strain 하에서 pixel 간 uniformity 유지, electrical cross-talk 억제, 그리고 signal stability 확보가 동시에 요구된다. 결과적으로 fully stretchable OPD는 재료, morphology, 소자 구조, 그리고 시스템 설계가 유기적으로 결합된 다중 스케일 접근을 필요로 하며, 향후 이러한 요소들을 통합적으로 최적화하는 방향으로 연구가 진행될 것으로 예상된다. 이는 stretchable optoelectronics 분야에서 photodetector가 단순한 센서 소자를 넘어, 인간-기계 인터페이스 및 차세대 광전자 시스템의 핵심 플랫폼으로 확장될 수 있음을 시사한다 [32].

#### 4. 결론 및 전망

본 리뷰에서는 신축성 유기 광검출기(stretchable organic photodetector, OPD)의 설계 전략을 구조 기반 strain 완화 접근에서 재료 기반 내재적(intrinsic) 설계로의 전환이라는 관점에서 체계적으로 정리하였다. 초기 stretchable OPD 연구는 buckling 구조, island-bridge 설계, serpentine interconnect와 같은 외재적(extrinsic) 구조 설계를 통해 기계적 변형을 수용하고자 하였으나, 이러한 접근은 구조적 복잡성, 낮은 집적도, 그리고 광응답의 비균일성과 같은 한계를 가지는 것으로 나타났다. 이에 따라 최근에는 재료 자체에 신축성을 부여하고, 변형 환경에서도 광전 기능을 유지할 수 있는 intrinsic 설계 전략이 핵심 연구 방향으로 부상하고 있다. 특히 공액 고분자의 분자 설계, elastomer-semiconductor 복합 전략, 그리고 morphology engineering은 stretchable OPD 구현을 위한 핵심 설계 축으로 자리 잡고 있으며, 이들 요소는 분자-나노구조-소자 수준에서 유기적으로 연결된 다중 스케일 설계(multiscale design)로 이해될 필요가 있다. 이러한 접근은 단순한 기계적 신축성 확보를 넘어, 전하 수송 경로의 안정성 유지, leakage current 억제, 그리고 dark current 감소를 통해 detectivity를 효과적으로 제어할 수 있는 방향으로 발전하고 있다. 특히 elastomer 기반 복합 시스템은 morphology 안정화와 전기적 noise 억제를 동시에 달성할 수 있는 실질적인 설계 전략으로서 중요한 의미를 가진다. 더 나아가 최근에는 strain에 의해 유도되는 morphology 재정렬 및 전하 수송 경로 재구성이 photodetector 성능 향상으로 이어질 수 있다는 가능성이 제시되고 있으며, 이는 stretchable OPD가 단순히 기계적 변형에 대한 내성을 확보하는 수동적 개념을 넘어, strain을 능동적으로 활용하는 기능성 소자로 발전할 수 있음을 시사한다. 이러한 관점은 향후 stretchable optoelectronics 설계에서

중요한 전환점을 제공할 것으로 기대된다. 한편, 최근 OPD 연구는 단일 소자 성능 향상을 넘어, 시스템 수준에서의 통합 가능성으로 빠르게 확장되고 있다. 유기 반도체 기반 OPD 는 기계적 유연성, 경량성, 그리고 파장 선택성을 기반으로 웨어러블 헬스케어, 인간-기계 인터페이스, 이미징 및 머신비전, 그리고 광통신 시스템 등 다양한 응용 분야에서 활용 가능성이 제시되고 있다. 특히 OPD 는 기존 CMOS 기술과의 적층 및 통합이 가능하며, OLED 와의 결합을 통해 sensing 과 emission 을 동시에 수행하는 복합 광전자 시스템으로 확장될 수 있다. 이러한 특성은 OPD 가 단순 센서를 넘어, 차세대 소프트 전자 시스템의 핵심 플랫폼 기술로 자리 잡을 수 있음을 보여준다 [32]. 그럼에도 불구하고, stretchable OPD 의 실용화를 위해서는 여전히 해결해야 할 과제가 존재한다. 첫째, 재료 수준에서는 기계적 신축성과 높은 광전 성능을 동시에 만족시키는 설계 원리가 보다 정교하게 확립될 필요가 있다. 둘째, morphology-strain-device performance 간의 상관관계를 정량적으로 이해하고 이를 설계에 반영하는 체계적인 접근이 요구된다. 셋째, 제조 및 시스템 측면에서는 대면적 공정, 인쇄 기반 fabrication 기술, 그리고 고집적 array 구현을 위한 균일성 확보가 중요하다. 특히 실제 응용 환경에서는 장기 신뢰성, 환경 안정성, 그리고 반복 변형 조건에서의 성능 유지가 필수적으로 요구된다. 또한 향후 stretchable OPD 의 발전은 단일 소자 성능 최적화를 넘어, 인공지능 기반 데이터 처리, 광신호 기반 인터페이스, 그리고 차세대 통신 기술과의 융합을 통해 더욱 확장될 것으로 예상된다. 이러한 기술적 융합은 OPD 를 단순한 광센서가 아닌, 인간-기계 상호작용을 위한 핵심 인터페이스이자, 소프트 전자 기반 지능형 시스템의 중심 구성 요소로 발전시키는 데 중요한 역할을 할 것이다. 결과적으로

stretchable OPD 는 재료, 구조, 소자, 그리고 시스템 설계가 유기적으로 결합된 통합적 플랫폼 기술로 진화하고 있으며, 향후 이러한 다중 스케일 설계와 시스템 통합이 동시에 발전할 때, 실제 산업 및 응용 환경에서의 본격적인 활용이 가능할 것으로 기대된다.

## ACKNOWLEDGEMENTS

### Author Contributions

KHB drafted the manuscript. All authors read and approved the final manuscript.

### Funding

This work was supported by the 2025 Research Fund of University of Ulsan.

### Declarations of Competing Interests

The authors declare that they have no competing interests.

## AUTHORS



강현범

2009년: 성균관대학교 화학공학과 학사

2014년: 한국과학기술원 생명화학공학과 석박사

2025년: 삼성전자종합기술원 재료연구센터

책임 및 수석급 연구원

2025년 9월~현재: 울산대학교

에너지화학공학부 에너지분자공학트랙

조교수

[관심분야] 유기 반도체 소재, 유기전자소자

## REFERENCES

- [1] Lee, Y.; Chung, J. W.; Lee, G. H.; Kang, H.; Kim, J.-Y.; Bae, C. et al. Standalone Real-Time Health Monitoring Patch based on a Stretchable Organic Optoelectronic System. *Sci. Adv.* 2021, 7, eabg9180.
- [2] Lee, G. H.; Kang, H.; Chung, J. W.; Lee, Y.; Yoo, H.; Jeong, S. et al. Stretchable PPG Sensor with Light Polarization for Physical Activity-Permissible Monitoring. *Sci. Adv.* 2022, 8, eabm3622.
- [3] Fuentes-Hernandez, C.; Chou, W.-F.; Khan, T. M.; Diniz, L.; Lukens, J.; Larrain, F. A. et al. Large-Area Low-Noise Flexible Organic

- Photodiodes for Detecting Faint Visible Light. *Science* 2020, 370, 698.
- [4] Yokota, T.; Nakamura, T.; Kato, H.; Mochizuki, M.; Tada, M.; Uchida, M. et al. A Conformable Imager for Biometric Authentication and Vital Sign Measurement. *Nat. Electron.* 2020, 3, 113.
- [5] Khan, Y.; Han, D.; Pierre, A.; Ting, J.; Wang, X.; Lochner, C. M. et al. A Flexible Organic Reflectance Oximeter Array. *PNAS.* 2018, 115, E11015.
- [6] Lee, H.; Kim, E.; Lee, Y.; Kim, H.; Lee, J.; Kim, M. et al. Toward All-Day Wearable Health Monitoring: An Ultralow-Power, Reflective Organic Pulse Oximetry Sensing Patch. *Sci. Adv.* 2018, 4, eaas9530.
- [7] Yokota, T.; Zalar, P.; Kaltenbrunner, M.; Jinno, H.; Matsuhisa, N.; Kitanosako, H. et al. Ultraflexible Organic Photonic Skin. *Sci. Adv.* 2016, 2, e1501856.
- [8] Kim, J.; Salvatore, G. A.; Araki, H.; Chiarelli, A. M.; Xie, Z.; Banks, A. et al. Battery-Free, Stretchable Optoelectronic Systems for Wireless Optical Characterization of the Skin. *Sci. Adv.* 2016, 2, e1600418.
- [9] Lochner, C. M.; Khan, Y.; Pierre, A.; Arias, A. C. All-Organic Optoelectronic Sensor for Pulse Oximetry. *Nat. Commun.* 2014, 5, 5745.
- [10] Park, Y.; Fuentes-Hernandez, C.; Kim, K.; Chou, W.-F.; Larrain, F. A.; Graham, S. et al. Skin-Like Low-Noise Elastomeric Organic Photodiodes. *Sci. Adv.* 2021, 7, eabj6565.
- [11] Kim, J.-H.; Choi, H.; Fukuda, K.; Jeong, J.; Choi, J.-G.; Lee, S. et al. Skin Conformal MHz Speed Organic Photodetectors for Angle Free and Long Range Near Infrared Communication. *Nat. Commun.* 2025, 16, 11041.
- [12] Eun, H. J.; Lee, H.; Shim, Y.; Seo, G. U.; Lee, A. Y.; Park, J. J. et al. Strain-Durable Dark Current in Near-Infrared Organic Photodetectors for Skin-Conformal Photoplethysmographic Sensors. *iScience* 2022, 25, 104194.
- [13] Wang, S.; Xu, J.; Wang, W.; Wang, G.-J. N.; Rastak, R.; Molina-Lopez, F. et al. Skin Electronics from Scalable Fabrication of an Intrinsically Stretchable Transistor Array. *Nature* 2018, 555, 83.
- [14] Xu, J.; Wang, S.; Wang, G.-J. N.; Zhu, C.; Luo, S.; Jin, L. et al. Highly Stretchable Polymer Semiconductor Films through the Nanoconfinement Effect. *Science* 2017, 355, 59.
- [15] Oh, J. Y.; Rondeau-Gagné, S.; Chiu, Y.-C.; Chortos, A.; Lissel, F.; Wang, G.-J. N. et al. Intrinsically Stretchable and Healable Semiconducting Polymer for Organic Transistors. *Nature* 2016, 539, 411.
- [16] Yang, Y.; Sun, Y.; Gao, D.; Chen, C.; Zhou, J.; Cheng, J. et al. High Performance Near Infrared Organic Photodetectors Realized by Non Fullerene Acceptors with Reduced Static Energetic Disorder. *Adv. Funct. Mater.* 2026, 36, e12335.
- [17] Jiang, C.; Hu, J.; Sun, S.; Xu, Y.; Liu, X.; Zhao, Q. et al. Toward High Performance Infrared Organic Photodetectors. *Adv. Funct. Mater.* 2026, 36, e28366.
- [18] Root, S. E.; Savagatrup, S.; Printz, A. D.; Rodriguez, D.; Lipomi, D. J. Mechanical Properties of Organic Semiconductors for Stretchable, Highly Flexible, and Mechanically Robust Electronics. *Chem. Rev.* 2017, 117 (9), 6467.
- [19] Kang, H.; Lee, Y.; Lee, G. H.; Chung, J. W.; Kwon, Y.-N.; Kim, J.-Y. et al. Strain Tolerant, High Detectivity, and Intrinsically Stretchable All Polymer Photodiodes. *Adv. Funct. Mater.* 2023, 33 (13), 2212219.
- [20] Jeon, H.; Oh, J.; Lee, J.-W.; Eun, H. J.; Kang, W. J.; Ryu, D. H. et al. Strain Induced Detectivity Enhancement in Intrinsically Stretchable Organic Photodetectors. *Adv. Mater.* 2026, 38 (16), e14951.
- [21] Qin, M.; Bian, Y.; Wang, C.; Sun, J.; Shi, W.; Liu, K. et al. Intrinsically Stretchable Organic Photodiodes for Faint Near Infrared Light Detection and Extendable Cryptographic Imaging. *Adv. Funct. Mater.* 2024, 34 (40), 2403770.
- [22] Zheng, Y.; Zhang, S.; Tok, J. B.-H.; Bao, Z. Molecular Design of Stretchable Polymer Semiconductors: Current Progress and Future Directions. *J. Am. Chem. Soc.* 2022, 144 (11), 4699.
- [23] Wu, H.-C.; Nikzad, S.; Zhu, C.; Yan, H.; Li, Y.; Niu, W. et al. Highly Stretchable Polymer Semiconductor Thin Films with Multi Modal Energy Dissipation and High Relative Stretchability. *Nat. Commun.* 2023, 14, 8382.
- [24] Oh, J. Y.; Rondeau-Gagné, S.; Chiu, Y.-C.; Chortos, A.; Lissel, F.; Wang, G.-J. N. et al. Intrinsically Stretchable and Healable Semiconducting Polymer for Organic Transistors. *Nature* 2016, 539, 411–415.
- [25] Mun, J.; Ochiai, Y.; Wang, W.; Zheng, Y.; Zheng, Y.-Q.; Wu, H.-C. et al. A Design Strategy for High Mobility Stretchable Polymer Semiconductors. *Nat. Commun.* 2021, 12, 3572.
- [26] Liu, D.; Mun, J.; Chen, G.; Schuster, N. J.; Wang, W.; Zheng, Y. et al. A Design Strategy for Intrinsically Stretchable High Performance Polymer Semiconductors: Incorporating Conjugated Rigid Fused Rings with Bulky Side Groups. *J. Am. Chem. Soc.* 2021, 143 (30), 11679–11689.
- [27] Lee, J.-W.; Oh, E. S.; Lee, S.; Phan, T. N.-L.; Kim, T.-S.; Lee, J.-Y. et



- al. Strain Induced Power Output Enhancement in Intrinsically Stretchable Organic Solar Cells. *Joule* 2025, 9 (2), 101792.
- [28] Zheng, Y.-Q.; Bao, Z. Molecularly Designed and Nanoconfined Polymer Electronic Materials for Skin Like Electronics. *ACS Cent. Sci.* 2024, 10 (12), 2188–2199.
- [29] Gao, C.; Chenchai, K.; Huang, L.; Li, C.; Zhang, X.; Zhang, G. et al. Polymer Semiconductor Blends with Remarkably Stable Semiconducting Performance under Large and Cyclic Mechanical Deformation. *Nat. Commun.* 2025, 16, 10388.
- [30] Kang, H.; Kim, H.; Kuzumoto, Y.; Lee, B.-L.; Kim, E.; Choi, A. et al. Exploring Wide Range Alkyl Bridge Length Variations in Polymer Semiconductors: From Pristine to Blend Films for High Mobility Stretchable TFTs. *Small* 2026, 22 (13), e11011.
- [31] Lee, J.-W.; Oh, J.; Kang, W. J.; Oh, E. S.; Lee, S.; Lee, I. et al. Dual Layered Percolative Networks of Photoactive Materials and Elastomers for Highly Stretchable, Efficient Organic Photovoltaics with Strain Induced Power Enhancement up to 60% Strain. *Energy Environ. Sci.* 2025, 18, 7089.
- [32] Zhang, K.; Wu, J.; Sun, C.; Chung, D. S.; Geng, Y.; Ye, L. The Rising Promise of Organic Photodetectors in Emerging Technologies. *Nat. Rev. Mater.* 2025, 10, 487.

Accepted