

낮은 결정성을 갖는 고분자 반도체 기반 신축성 전자 소자

기계적으로 안정한 신축성 전자소자(stretchable electronics) 개발을 위해서는 소자 제작에 사용되는 반도체 소재 역시 기계적으로 안정적인 물성을 만족해야만 한다. 이를 위해 탄성 계수(elastic modulus)가 낮은 탄성 중합체(elastomer) 등을 혼합하는 방식으로 소재 개발이 이루어지고 있으나, 부도체인 탄성 중합체의 첨가로 인한 전기적 특성 감소 및 상분리에 의한 모폴로지(morphology) 제어의 어려움 등의 문제에 직면해 있다.

본 연구에서는 indacenodithiophene-*co*-benzothiadiazole (IDTBT) 기반 고분자를 이용하여 본질적으로 신축성을 갖는(intrinsically stretchable) 고분자 반도체 소재를 개발하였다. 비정질 구조의 IDTBT 고분자를 이용할 경우 높은 전하이동도와 신축성이 동시에 확보 가능함을 보고하였다. IDTBT 고분자 박막은 100%까지 늘어남에도 금(crack)이 생기지 않았으며 오히려 고분자가 늘어난 방향으로 배향이 됨을 보여주었다. 향후 비정질 고분자의 구조 및 분자량 제어를 통해 차세대 신축성 전자소자용 핵심 소재로서 다양한 분야에 활용될 수 있을 것으로 기대된다(그림 1).

본 연구결과는 “An Intrinsically Stretchable High-Performance Polymer Semiconductor with Low Crystallinity”라는 제목으

로 2019년 *Advanced Functional Materials*에 게재되었다.

〈Y. Zheng et al., *Adv. Funct. Mater.*, **29**, 1905340 (2019),

DOI: 10.1002/adfm.201905340〉

신축성 능동형 유기발광 전기화학셀

능동형 유기 발광소자(active-matrix organic light-emitting diode, AMOLED)는 TV, 휴대폰 등 다양한 디스플레이 제품에 활용되고 있는 유기 전자소자이다. 다만 유기 단분자 기반 OLED 소자는 낮은 기계적 신축성으로 인해 신축성 소자 적용에는 한계가 있어 왔다.

본 연구에서는 유기 발광소자의 대안으로 신축성을 갖는 유기 발광 전기화학셀(organic light-emitting electrochemical cell, OLEC)과 유기 전계효과 트랜지스터(organic field-effect transistor, OFET)를 접목하여 신축성 능동형 유기 발광 전기화학셀 배열(array)을 구현하였다. 가교된 고분자 절연체 및 반도체를 활용하여 제작된 신축성 트랜지스터는 100% 변형률(strain)에도 안정적인 특성을 보여주었다. 또한 발광 고분자(super yellow)를 이용하여 제작된 신축성 유기 발광 전기화학셀 배열 역시 다양한 변형 조건에서도 안정적인 성능을 구현함으로써 차세대 신축성 디스플레이 소재로서의 활용 가능성을 보여주었다(그림 2).

본 연구 결과는 “Fully Stretchable Active-Matrix Organic

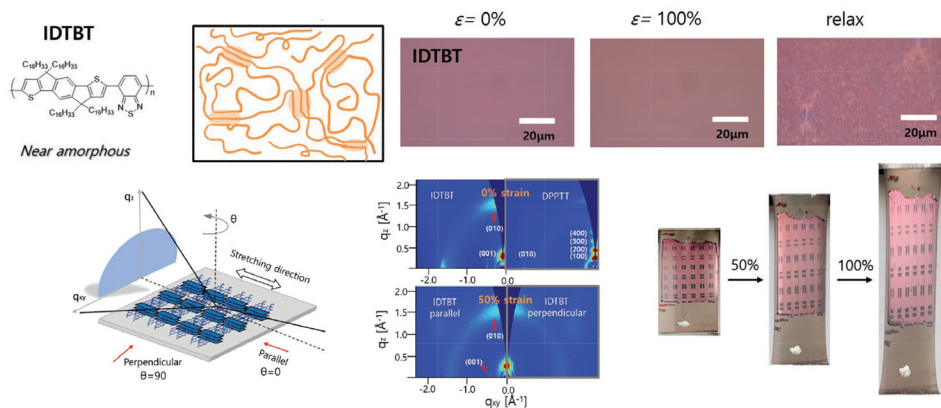


그림 1. 다양한 변형률에 따른 IDTBT 박막의 물성 변화.

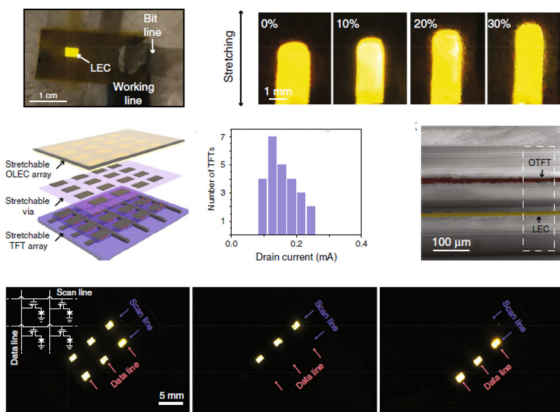


그림 2. 신축성 유기 발광 전기화학셀.

Light-Emitting Electrochemical Cell Array”라는 제목으로 2020년 *Nature Communications*에 게재되었다.

〈J. Liu *et al.*, *Nat. Commun.*, **11**, 3362 (2020), DOI: 10.1038/s41467-020-17084-w〉

다공성 금속 막대/고분자 섬유 기반 생체 신호 측정용 신축성 전극

피부에 부착되는 전자 소자(on-skin electronics)용 전극은 접촉 부위의 통기성을 높이기 위해 높은 전기전도도, 신축성과 함께 다공성을 갖춘 소재여야 한다. 이를 위해 탄성 중합체와 금속 나노 소재를 혼합하는 방식으로 소재 개발이 이루어지고 있으나, 다공성 소재 특성 상 나노 소재 간 접착력이 좋지 않아 전기전도도 및 신축성이 감소하는 문제가 있다.

본 연구에서는 계면 수소 결합을 통해 고분자 나노 섬유(nanofiber)와 금속 나노 막대(nanowire)의 층상 구조(layer-by-layer structure)를 유도함으로써 다공성 나노-메쉬(nano-mesh) 형태의 신축성 전극을 개발하였다. 은 나노 막대(Ag nanowire)와 폴리우레탄(polyurethane, PU) 나노 섬유를 이용해 높은 전기전도도($9,190 \text{ S cm}^{-1}$), 기계적 변형률(310%) 및 내구성(1,000회 변형 후 82% 저항 증가)을 동시에 구현하는 신축성 전극이 보고되었다. 또한 나노 구조물 간 수소 결합을 통해 접착력이 향상 됨으로써 젤(gel)이나 테이프(tape) 없이도 피부에 부착되어 관절 움직임을 실시간 모니터링하는 스트레인 센서(strain sensor)에 적용되어 연속적인 전기생리학적 신호(electrophysiological signal) 감지를 위한 전극 소재로서의 가능성을 보여주었다(그림 3).

본 연구결과는 “Highly Stretchable Metallic Nanowire Networks Reinforced by the Underlying Randomly Distributed Elastic Polymer Nanofibers via Interfacial Adhesion Improvement”

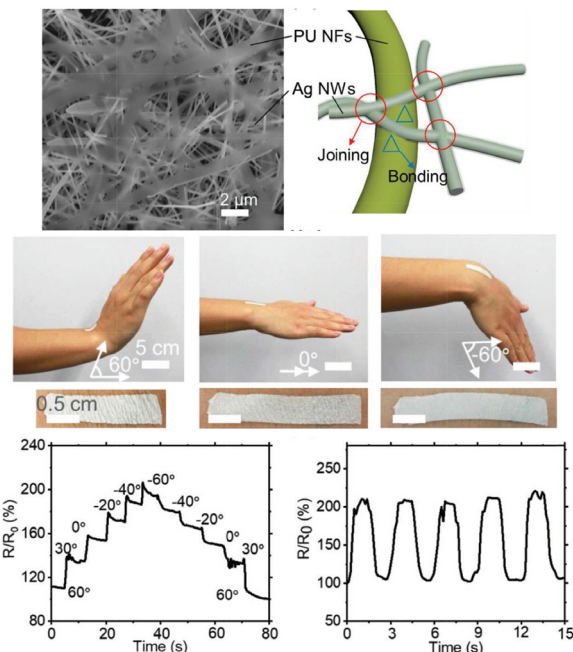


그림 3. 신축성 나노-메쉬 전극을 이용한 스트레인 센서.

라는 제목으로 2019년 *Advanced Materials*에 게재되었다.

〈Z. Jiang *et al.*, *Adv. Mater.*, **31**, 1903446 (2019), DOI: 10.1002/adma.201903446〉

3D 액체 금속/고분자 네트워크 구조를 갖는 신축성 전자파 차폐막

유/무기 금속 소재 및 고분자 기반 복합체를 이용하여 전자파 간섭(electro-magnetic interference, EMI)을 차폐(shielding)시킬 수 있는 신축성 차폐막을 개발하고자 하는 연구가 최근 활발히 진행되고 있다. 그 중 액체 금속(liquid metal)과 고분자의 복합체를 활용하여 기계적으로 잘 늘어나는 차폐막이 개발되고 있으나, 은 나노입자(Ag nanoparticle) 또는 탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT) 등을 이용한 신축성 차폐막은 우수한 기계적 신축성에도 불구하고 차폐막이 늘어남에 따라 전자파 간섭 차폐 효과(EMI shielding effectiveness, EMI SE)가 감소되는 문제가 있다.

본 연구에서는 갈륨-인듐 합금(eutectic gallium-indium alloy, EGaIn) 액체 금속과 탄성 중합체를 이용한 복합체를 개발하여 3차원 구조의 액체 금속 네트워크를 갖는 신축성 전자파 간섭 차폐막을 제작함으로써 차폐막을 늘리는 과정에서 차폐 효과가 크게 감소하지 않으며 오히려 약 2배까지 향상되는 결과를 보고하였다. 인간의 피부와 유사한 물성을 갖는 탄성 중합체를 활용함으로써 향후 전자 피부(electronic

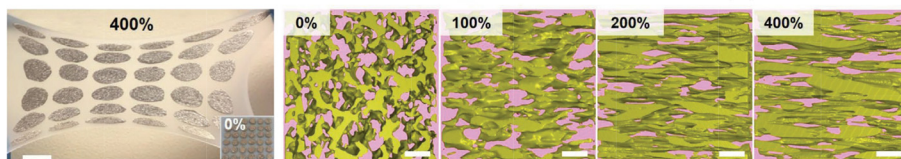
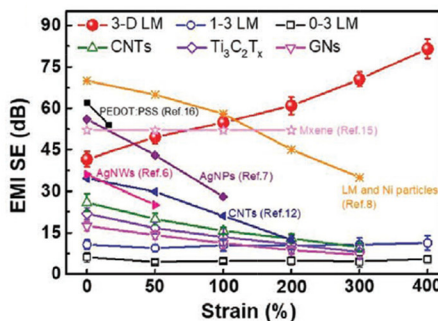
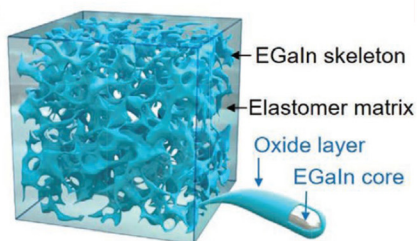


그림 4. 변형률에 따른 3D 전극 네트워크 구조 및 차폐 효과.

skin) 등의 분야에 적용될 수 있을 것으로 기대된다(그림 4).

본 연구결과는 “Highly Stretchable Polymer Composite with Strain-Enhanced Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness”라는 제목으로 2020년 *Advanced Materials*에 게재되었다.

<B. Yao *et al.*, *Adv. Mater.*, **32**, 1907499 (2020), DOI: 10.1002/adma.201907499>

신축성 열전 소자용 전도성 탄성 복합체

대표적인 전도성 고분자인 poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS)는 최근 열전 소자용 에너지 변환 소재로서 많은 연구가 이루어지고 있으나, 단단하고 깨지기 쉬운 구조 및 나노 입자 간 약한 결합력으로 인해 신축성 열전 소자 적용에는 한계가 있다. 이렇듯 탄성 중합체를 도입하여 신축성을 높이려는 시도가 계속되고 있으나 높은 전기전도도, 낮은 탄성 계수, 우수한 기계적 신축성을 동시에 달성하기에는 어려움이 있다.

본 연구에서는 PEDOT:PSS 전도성 고분자, 수분산(water-borne) 폴리우레탄, 이온성 액체(ionic liquid)를 동시에 혼합하는 방식으로 높은 전기전도도(>140 S cm⁻¹), 우수한 신축성(>600%), 낮은 탄성계수(<7 MPa)를 갖는 신축성 유기 열전 소재를 개발하였다. 이온성 액체의 종류 및 양에 따라 변화하는 전기전도도, 영률(Young's modulus), 열전 상수(Seebeck coefficient 등)에 대한 분석을 통해 개발된 전도성

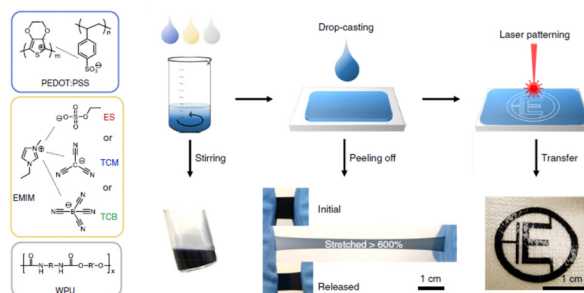


그림 5. 열전 소재용 전도성 탄성 복합체.

탄성 복합체가 신축성 열전 소재로서 활용 가치가 크다는 것을 보여주었다. 또한 개발된 전도성 탄성 복합체를 이용하여 40%의 변형률까지 성능 저하가 없는 열전 모듈(module)을 개발 하였으며, 향후 섬유 및 피부와 같은 거칠고 늘어나는 표면에 적용 가능한 신축성 열전 모듈 개발이 기대된다(그림 5).

본 연구결과는 “Elastic Conducting Polymer Composites in Thermoelectric Modules”라는 제목으로 2020년 *Nature Communications*에 게재되었다.

<N. Kim *et al.*, *Nat. Commun.*, **11**, 1424 (2020), DOI: 10.1038/s41467-020-15135-w>

<이병훈, email: leebhoon@ewha.ac.kr>