



유기 트랜지스터 기반 유연/신축성 센서

DOI: 10.3938/PhiT.26.030

이무열·권오영·이상진·유종현·오준학

Flexible/Stretchable Sensors Based on Organic Transistors

Moo Yeol LEE, O Young KWEON, Sang Jin LEE, Jong Heun YOO and Joon Hak OH

Molecule-based organic electronics has been regarded as a core component of future electronics such as wearable, attachable, and implantable electronics. Recent advances in the internet of things (IoT) platform have also given a possibility to organic electronics for applications as high-performance sensors owing to advantages of organic semiconductors, including abilities of molecule design, flexibility/stretchability, cost-efficiency, and mass-production. Herein, we introduce the recent progress of organic transistor-based sensors depending on types of external stimuli (i.e., chem/biosensor, photosensor, and pressure sensors). In addition, the potential

of organic electronics for next-generation electronic devices will be described.

서론

최근 사물인터넷(internet of things, IoT) 기술의 급진적인 발전으로 인해 사물인터넷 환경 구축을 위한 기반 기술에 대한 관심이 폭발적으로 증가하고 있다. 일반적인 정의의 사물인터넷은 사람, 사물, 공간, 데이터 등 모든 것이 인터넷으로 서로 연결되어, 정보가 생성, 수집, 공유, 활용되는 초연결 인터넷 환경을 의미한다. 이러한 사물인터넷 환경을 구축하기 위해서는 전자소자 제조기술, 데이터 분석/처리 기술 등 기술 전 분야의 동시적인 개발이 요구된다. 여러 가지 핵심 기술 요소 중 주변 환경의 정보를 감지하고 인지할 수 있는 고성능 센서 기술은 사물인터넷의 핵심 개념인 구성 요소 간의 정보 공유를 위하여 개발이 필수적이다.

유기 저분자 및 고분자를 포괄하는 분자기반 전자소재(molecule-based electronic materials)는 우수한 유연성(flexibility), 신축성(stretchability), 저비용 대량 생산의 적합성 등 다양한 장점을 지니기 때문에 고성능 센서의 핵심 소재로서 이점을 가진다. 특히, 분자 설계를 통해 사용목적에 맞게 물리/화학적 특성 조절이 가능하기 때문에 소비자의 수요에 따라 커스터마이징(customizing)이 가능하다. 이는 공급 중심 시장에서 수요 중심 시장으로 변화하고 있는 현대 시장 트렌드에도 부합한다.

분자기반 전자소재를 전하 이송층(charge transporting layer)으로 사용하는 유기 전계효과 트랜지스터(organic field-effect transistors, OFETs)는 게이트(gate) 전극을 통한 신호 증폭(signal amplification)으로 인해 미세 전류 변화를 실시간으로 감지할 수 있기 때문에 고감도 센서의 기반소자로 활용하기 매우 적합하다. 또한, OFET 기반 센서는 다양한 종류의 외부 자극에 따라 복합적인 상호작용을 통하여 감지 신호로 출력하기 때문에 화학/바이오/광/압력센서 등 다양한 종류의 센서로 응용될 수 있다. 최근에는 지속적인 연구개발에 의해 분

저자약력

이무열 학생은 2013년 울산과학기술원(UNIST) 에너지공학부에서 석사학위를 취득하였고 현재 POSTECH 화학공학과 박사과정생으로서 고성능 분자기반 전자소재 개발 및 센서 응용에 대해 활발히 연구하고 있다.

권오영 학생은 2011년 서울대학교 화학생물공학부에서 석사학위를 취득하였고 현재 POSTECH 화학공학과 박사과정생으로서 유연 나노 소재 및 구조체의 개발 및 압력센서 응용에 대해 활발히 연구하고 있다.

이상진 학생은 2016년 단국대학교 고분자공학과에서 학사학위를 취득하였고 현재 POSTECH 화학공학과 석/박사 통합과정생으로서 유기반도체 기반 유연/신축성 전자소자 개발에 대해 연구하고 있다.

유종현 학생은 2016년 POSTECH 화학공학부에서 학사학위를 취득하였고 현재 POSTECH 화학공학과 석/박사 통합과정생으로서 젤 합성 및 소자 응용에 대한 연구를 수행하고 있다.

오준학 교수는 2004년 서울대학교 화학생물공학부에서 박사학위를 취득하였고 삼성전자 책임연구원, Stanford University 박사후 연구원, UNIST 에너지 및 화학공학부 조교수를 거쳐 현재 POSTECH 화학공학과 부교수로 재직 중이다. 현재 오준학 교수는 유기 반도체 및 고분자 나노소재의 개발과 이를 기반으로 하는 소자 응용에 대해 활발히 연구하고 있다. (joonhoh@postech.ac.kr)

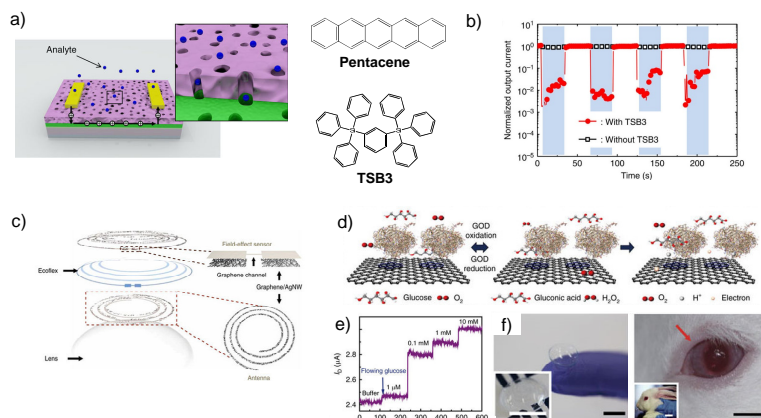


Fig. 1. a) Schematic diagram of an OFET-based sensor with microporous layers made of pentacene and TSB3. b) Variation of the output current in the sensor as a function of time. The blue regions indicate the flow of methanol gas (analyte). Reproduced with permission.^[1] Copyright 2014, Nature Publishing Group. c) Schematic of the wearable contact lens sensor, integrating the glucose sensor and intraocular pressure sensor. d) Schematic illustration and principle of glucose detection with the GOD-pyrene functionalized graphene. e) Real-time continuous monitoring of glucose. f) Photograph images of the contact lens sensor integrated onto the eyes of a live rabbit (Scale bar = 1 cm). Reproduced with permission.^[2] Copyright 2017, Nature Publishing Group.

자기반 전자소재의 전기적 특성이 비정질 실리콘(amorphous silicon)의 전기적 특성을 상회하는 수준에 이르렀고, 유연/신축성 전자소재의 개발 및 패터닝을 통한 집적회로(integrated circuits)의 개발 등을 통해 웨어러블 전자기기, 신체 부착형 전자기기(attachable electronics), 나아가 인체 이식형(implantable electronics) 전자소자의 응용을 위하여 학/산업계에서 활발히 연구되고 있다.

본 총설은 사물인터넷 환경 구축의 핵심 구성 요소로 주목 받고 있는 OFET 기반 센서의 최근 연구동향 및 향후 미래형 전자소자의 핵심 요소로서의 가능성에 대해서 다루고자 한다. 외부 자극의 종류에 따라 화학/바이오센서, 광센서, 압력센서로 나누어 기술하고자 하며 각 센서의 종류별 메커니즘 및 최신 연구결과에 대해서 살펴보고자 한다.

본 론

1. 화학/바이오센서

전 세계적으로 화학물질 누출 사고와 같은 안전사고가 빈번하게 발생하여 인명피해가 지속적으로 일어나고 있어, 일반인들도 실시간으로 유해물질을 감지하고 건강상태를 모니터링하여 특정 질병의 조기 예방 및 진단을 할 수 있는 센서에 대한 관심이 증가하고 있다. 특히 OFET 기반의 화학/바이오센서는 분자 설계(molecular design), 표면 기능화(surface functionalization)로 반도체 층과 표적 물질(target analyte)의 상호작용을 유도할 수 있기 때문에 학/산업계에서 활발한 연구가 진행 중이다.

OFET의 유기 반도체 박막은 구부렸을 때도 트랜지스터 특성이 그대로 유지되기 때문에 유연/신축성 전자기기의 핵심적인 소재로 많은 관심을 받고 있다. 하지만 기존 유기 반도체는 전하의 이동도가 낮아 실제 전자소자의 응용 시 동작 속도나 전류 공급에 한계가 있었다. 이를 해결하기 위해 본 연구팀과 조길원 교수 공동연구팀은 펜타센(pentacene)과 유기 분자 절연체 *m*-bis(triphenylsilyl)benzene (TSB3)을 활용하여 펜타센 박막 구조를 제어하였다.

생성된 펜타센 박막은 결정립계(grain boundary)가 보이지 않고 단결정 층과 비슷하게 매우 향상된 결정성을 보였다. 이는 상대적으로 부드러운 표면을 갖고 있는 TSB3층이 펜타센 박막의 결정형성을 도와주기 때문이다. 이러한 고결정성 박막은 일반적인 펜타센 박막 트랜지스터보다 4배 더 높은 전하 이동도(hole mobility ~ 6.3 cm² V⁻¹ s⁻¹)를 보였다. 동시에 수백 nm 크기의 다공성 구조가 형성되어 외부의 물질이 트랜지스터의 채널 영역까지 효과적으로 침투할 수 있어, 미세한 양의 메탄올 증기를 판별할 수 있는 고성능 화학센서로 활용될 수 있었다(그림 1a-b).^[1]

반도체 박막의 모폴로지(morphology)를 조절하는 것과 달리 반도체 박막의 표면 기능화를 통해 센서에 선택성을 부여할 수 있다. 당뇨병의 진단은 혈액 내 포도당(혈당)의 농도를 기준으로 하는데, 기준치보다 높은 상태가 2시간 이상 지속되면 당뇨병으로 파악한다. 일반적으로 당뇨병을 진단하기 위해 피를 뽑아서 혈당을 측정하지만 눈물모도 측정이 가능하기 때문에 혈당 측정을 위한 콘택트렌즈기반 센서 개발이 꾸준히 이루어왔다. 박장용 교수 연구팀은 글루코오스 산화 효소(glucose oxidase, GOD)로 기능화된 그래핀과 안압에 따라 두께가 달라지는 유전층을 이용하여 혈당과 안압을 동시에 측정할 수 있는 센서를 소프트 콘택트렌즈에 적용했다. 이 렌즈는 혈당과 안압을 실시간으로 파악하여 무선으로 정보를 전송할 수 있다. 본 연구결과는 실시간으로 사용자의 건강상태를 진단할 수 있는 웨어러블 진단기기를 실현시킬 방법을 제시하였다(그림 1c-f).^[2]

본 연구결과는 실시간으로 사용자의 건강상태를 진단할 수 있는 웨어러블 진단기기를 실현시킬 방법을 제시하였다(그림 1c-f).^[2]

REFERENCES

- [1] B. Kang, M. Jang, Y. Chung, H. Kim, S. K. Kwak, J. H. Oh and K. Cho, Nat. Commun. 5, 4752 (2014).
- [2] J. Kim, M. Kim, M. S. Lee, K. Kim, S. Ji, Y. T. Kim, J. Park, K. Na, K. H. Bae, H. Kyun Kim, F. Bien, C. Young Lee and J. U. Park, Nat. Commun. 8, 14997 (2017).

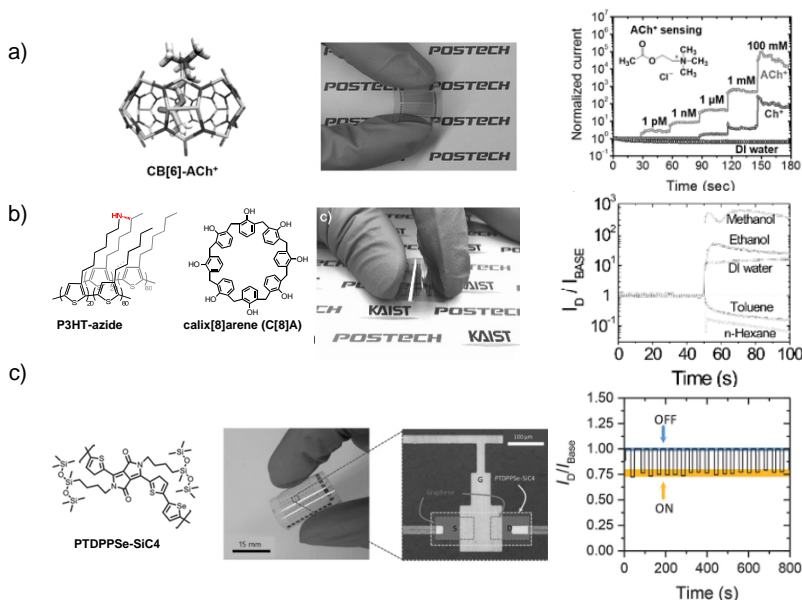


Fig. 2. The chemical structures, photographs, and real-time response of the OFET-based sensors; a) OFET-based acetylcholine sensor. Reproduced with permission.^[3] Copyright 2015, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. b) Liquid-phase OFET-based sensor using a solvent-resistant semiconducting polymer (P3HT-azide). Reproduced with permission.^[5] Copyright 2015, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. c) OFET-based acetone gas sensor array patterned by photolithography. Reproduced with permission.^[6] Copyright 2017, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

아세틸콜린(acetylcholine, ACh⁺)은 기억력과 학습능력을 활성화시키는 신경전달물질로 체내에 아세틸콜린 농도가 정상수치보다 비이상적으로 높을 경우 파킨슨병을 유발하고, 낮을 경우 알츠하이머병에 걸릴 수 있는 것으로 알려져 있다. 본 연구팀과 김기문 교수 공동연구팀은 파킨슨병과 알츠하이머병의 조기진단을 위해 아세틸콜린을 선택적으로 감지할 수 있는 초분자체(supramolecule)인 ‘나노호박’ (allyloxy)12cucurbit[6]uril (AOCB[6])를 합성하여 OFET 기반 바이오센서의 감지층으로 활용하였다. AOCB[6]는 가운데에 구멍이 뚫려 있는 구조의 초분자체로서 아세틸콜린과 선택적으로 상호작용할 수 있다. 연구팀은 이 초분자체로 OFET의 반도체층 표면을 기능화하여 기존 효소기반 센서들보다 100만 배 이상 높은 민감도를 가진 아세틸콜린 센서를 개발하였고, 나아가 고분자 기판과 절연체를 이용하여 플렉시블 센서를 제조하였다(그림 2a). 본 연구결과는 뇌질환과 관련된 신경전달물질을 매우 낮은 농도에서 검출하여 뇌질환을 조기진단하는 웨어러블 진단 기기로 응용 가능할 것으로 기대된다.^[3] 박장용 교수 연구팀은 그래핀 표면을 폴리피롤(polypyrrole, PPy)로 표면 기능화하여 독성이 있는 신경작용제의 유사화합물인 dimethyl methylphosphonate(DMMP) 가스를 감지할 수 있는 신축성 센서를 제조하였다.^[4]

최근까지 유기반도체는 유기용매에 취약한 단점이 있어 감지물질의 선택에 한계가 있고 무기반도체에서 사용되는 공정을

사용하기 어려웠다. 대부분의 연구 결과는 주로 유기용매 증기나 수용액상의 화학물질을 사용하였다. 따라서 센서의 폭넓은 활용을 위해서는 트랜지스터의 안정성의 확보가 요구된다. 이를 해결하기 위해 본 연구팀과 김범준 교수 공동연구팀은 고분자 반도체에 가교(crosslinking)가 가능한 작용기(azide, -N₃)를 도입하여 액체상의 유기용매에도 안정한 유기 고분자 반도체를 합성하였다. 연구진은, 제조한 용매 안정성 반도체 표면을 추가적으로 컨테이너 분자(container molecule) calix[8]arene(C[8]A)로 기능화하여 센서의 민감도와 선택도를 동시에 향상시킨 액체상 유기용매 감지용 플렉시블 센서를 제조하였다. 액체상 유기용매와의 직접적인 접촉을 통하여 감지할 수 있는 본 연구결과를 통하여 실시간 환경 감지 화학센서의 상용화에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다(그림 2b).^[5]

최근에는 고분자의 결사슬(side chain)기에 높은 화학안정성을 지니는 실록세인(siloxane)기를, 도입하여 고성능 양극성 고분자 반도체를 합성하였다. 합성된 유기 고분자 반도체의 뛰어난 화학안정성을 통해 무기 반도체에만 적용되던 포토리소그래피(photolithography) 공정을 유기 고분자 반도체에 적용하여 대면적 유기 트랜지스터 집적 어레이 플렉시블 소자를 제작하였다. 제작된 어레이 소자는 아세톤 증기를 감지할 수 있는 센서로 응용되었다. 본 연구결과를 통해 차세대 웨어러블 스마트기기 상용화를 앞당길 수 있을 것으로 기대된다(그림 2c).^[6]

2. 광센서

광센서는 활성층에 도달한 빛의 파장, 세기에 감응하여 전류를 신호로 출력하는 장치로 이중 광트랜지스터는 두 개의 전극으로 이루어진 광 다이오드와 달리 추가적인 전극으로 인해

REFERENCES

- [3] M. Jang, H. Kim, S. Lee, H. W. Kim, J. K. Khedkar, Y. M. Rhee, I. Hwang, K. Kim and J. H. Oh, *Adv. Funct. Mater.* **25**, 4882 (2015).
- [4] J. Park, J. Kim, K. Kim, S. Y. Kim, W. H. Cheong, K. Park, J. H. Song, G. Namgoong, J. J. Kim, J. Heo, F. Bien and J. U. Park, *Nanoscale* **8**, 10591 (2016).
- [5] M. Y. Lee, H. J. Kim, G. Y. Jung, A.-R. Han, S. K. Kwak, B. J. Kim and J. H. Oh, *Adv. Mater.* **27**, 1540 (2015).
- [6] E. K. Lee, C. H. Park, J. Lee, H. R. Lee, C. Yang and J. H. Oh, *Adv. Mater.* **29**, 1605282 (2017).

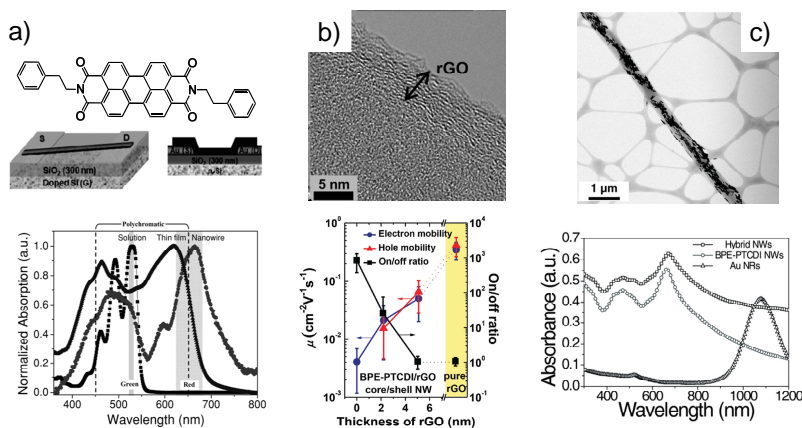


Fig. 3. BPE-PTCDI nanowire-based phototransistor. a) The chemical structure of BPE-PTCDI and its UV-vis spectra compared with vacuum-deposited thin film, and a nanowire network film, Reproduced with permission.^[8] Copyright 2013, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. b) The transmission electron microscope (TEM) image of rGO shell in BPE-PTCDI/rGO core/shell NW and average hole-to-electron mobility ratio (μ_h/μ_e) and Dirac point variations as a function of the thickness of rGO layer. Reproduced with permission.^[7] Copyright 2015, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. c) HR-TEM image of a hybrid BPE-PTCDI nanowire/Au nanorod and UV-vis spectra of the hybrid nanowire and BPE-PTCDI nanowires, Au nanorods, Reproduced with permission.^[9] Copyright 2017, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

노이즈의 증가 없이 신호의 증폭이 일어나 높은 광응답도 (photoresponsivity)를 가진다.^[7] 현재 상용화된 고성능 광센서는 주로 무기 반도체 재료가 주를 이루지만, 유기 반도체 재료는 분자구조의 디자인을 통해 광특성을 용이하게 조절할 수 있는 장점을 가진다. 따라서 이를 적외선부터 자외선에 이르는 스펙트럼 중 특정 파장의 빛을 선택적으로 감지하는 광센서로 응용 가능해 학/산업계의 많은 관심을 받고 있다.^[8]

광트랜지스터의 대표적인 두 성능지수는 광응답도와 광전류 점멸비(photo-current/dark-current ratio)이다. 광응답도는 작은 세기의 빛에도 높은 전류 신호가 발생되는지 나타내는 지표이며 광전류 점멸비는 빛의 유무에 따른 전류 신호 세기의 비를 나타낸다. 이러한 광트랜지스터의 특성 향상을 위해 본 연구팀은 N,N'-bis(2-phenylethyl)-perylene-3,4,9,10-tetracarboxylic diimide(BPE-PTCDI) n-channel 저분자 반도체를 단결정 나노와이어(nanowire) 형태로 제조하고 광특성을 조사하였다. 나노와이어 형태로 제조된 BPE-PTCDI는 기존 박막(thin film) 형태 대비 전하이동도의 에너지 장벽으로 작용하는 결정립계가 적고 동시에 적색 광에서 높은 흡광계수를 가졌다. 따라서 이를 활용한 광트랜지스터는 박막형 대비 적색광에 대해 13배 높은 전하 이동도를 보였다(그림 3a).^[8] 이 연구의 응용으로 BPE-PTCDI 단결정 나노와이어를 환원된 산화 그래핀(reduced graphene oxide, rGO)로 감싼 코어-셸(core-shell) 구조의 BPE-PTCDI 나노와이어가 보고되었다. rGO 셸은 높은 이동도를 가져 코어에서 생성된 전하의 전하이동채널(charge

transport channel) 역할을 하였으며 이를 기반으로 제조된 광트랜지스터는 기존 단결정 나노와이어 소자 대비 141.8% 향상된 광응답도를 보였다(그림 3b).^[7] 또한, BPE-PTCDI 단결정 나노와이어에 적외선에 흡광계수를 가지는 금 나노막대를 도입하여 나노와이어 기반 광트랜지스터의 감지 파장 영역을 근적외선 영역까지 넓힌 연구도 보고되었다(그림 3c).^[9]

유연성 유기 광트랜지스터는 근적외선을 혈류에 조사 후 반사된 빛을 실시간으로 감지, 분석을 통해 맥박수, 산소포화도, 혈압과 같은 건강 지표들을 감지하는 웨어러블 광응답막(PPG) 센서와 가볍고 유연한 대면적 이미지 센서 등 다양한 응용 분야를 가진다.^[10,11] 하지만 이를 제조하기 위해서 기존 광트랜지스터의 모든 구성 요소의 유연화와 동시에 광활성층의 광특성 유지 및 향상이 필수적이기 때문에 유연성 확보를 위한 섬유, 직물, 박막, 탄성중합체 등 다양한 형태의 재료연구와 이들의 광특성 연구가 학

계에 많은 관심을 받아 왔다.

고성능 광트랜지스터 개발의 일환으로서 본 연구팀은 박막형 유기 광트랜지스터의 광활성층에 루테튬 복합체(Ru complex)를 도입하여 광특성을 향상시켰다. 도입된 루테튬 복합체는 추가적인 흡광을 통해 전하를 생성하고 이를 금속-리간드 전하이동(metal to ligand charge transport)를 통해 반도체층으로 주입하여 소자의 광응답도를 향상시켰다. 루테튬 복합체가 도입된 광활성층에 BPE-PTCDI와 그래핀(graphene)이 각각 반도체 물질로 사용되었으며 이를 유연성 기판인 polyimide(PI)에 박막을 제조하였다. 이를 통해 제조된 광트랜지스터는 높은 광응답도($7,230 \text{ A W}^{-1}$)를 보였으며, 10,000번의 구부림과 40°의 비틀림에도 전하이동도의 변화가 나타나지 않는 높은 기계적 유연성을 보였다(그림 4a).^[12,13]

REFERENCES

[7] H. Yu, P. Joo, D. Lee, B.-S. Kim and J. H. Oh, *Adv. Opt. Mater.* **3**, 241 (2015).
 [8] H. Yu, Z. Bao and J. H. Oh, *Adv. Funct. Mater.* **23**, 629 (2013).
 [9] J. H. Jung, M. J. Yoon, J. W. Lim, Y. H. Lee, K. E. Lee, D. H. Kim and J. H. Oh, *Adv. Funct. Mater.* **27**, 1604528 (2017).
 [10] H. Xu, J. Li, B. H. Leung, C. C. Poon, B. S. Ong, Y. Zhang and N. Zhao, *Nanoscale* **5**, 11850 (2013).
 [11] T. Someya, A. Dodabalapur, J. Huang, K. C. See and H. E. Katz, *Adv. Mater.* **22**, 3799 (2010).
 [12] X. Liu, E. K. Lee, D. Y. Kim, H. Yu and J. H. Oh, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **8**, 7291 (2016).
 [13] X. Liu, E. K. Lee and J. H. Oh, *Small* **10**, 3700 (2014).

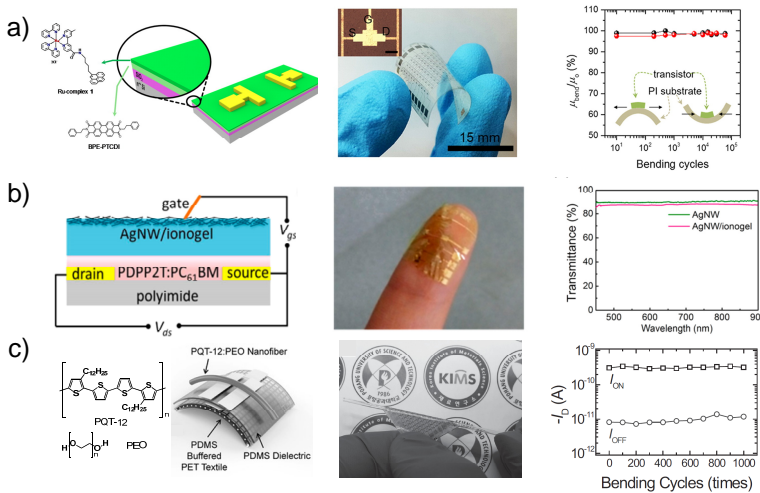


Fig. 4. Flexible phototransistors; a) Ru-complex/BPE-PTCDI phototransistor, the photographic image of it upon bending, and results of strain cycles. Reproduced with permission.^[12] Copyright 2016, American Chemical Society. b) Phototransistor with AgNW/ionogel gate, the photographic image of it upon bending, and transmittance spectra results. Reproduced with permission.^[15] Copyright 2017, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. c) Textile-based phototransistors, Photograph of it upon bending, and the results of bending cycles. Reproduced with permission.^[16] Copyright 2016, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

김영규 교수 연구팀은 전극을 제외한 모든 구성요소에 고분자를 도입하여 높은 유연성을 가지는 all-polymer 광트랜지스터를 제조하였다. 기판과 유전체(dielectric)에 각각 polyethylene terephthalate(PET)와 polymethyl methacrylate(PMMA)를 사용하였으며, 반도체층에는 poly(3-hexylthiophene)(P3HT)와 hexylthiophene end capped poly(3-hexylthiophene-co-benzothiadiazole)(THBT-ht) 이중접합(bulk heterojunction, BHJ) 박막을 사용하였다. 기존 P3HT 대비 THBT-ht 고분자 반도체를 첨가한 활성층은 높은 전하분리효율(charge separation efficiency)과 향상된 적색광 흡광계수를 보였으며 이를 이용하여 제조된 광트랜지스터는 유연성을 보였다.^[14]

H. Xu 교수 연구팀은 이온겔(ionogel) 유전체에 실버 나노와이어 전극을 코팅하여 제조한 나노 복합체를 투명 게이트 시스템으로 이용하여 유연한 광트랜지스터를 제조하였다. 기존 광트랜지스터의 투명 게이트 시스템에 사용되던 indium tin oxide(ITO)는 취성을 가지지만, 이온겔은 나노와이어 나노 복합체는 매우 높은 광투과율과 유연성을 가져 고성능 유연 광트랜지스터 제조에 적합하다. 따라서 이 나노복합체와 poly(diketopyrrolopyrrole-thienothiophene):[6,6]-Phenyl C61 butyric acid methyl ester (PDPP2T:PC₆₁BM) 반도체층을 PI 기판 위에 형성하여 제조한 광트랜지스터는 2,000번의 반복적 구부림 테스트 후에도 안정한 광특성을 보였으며 1,500 A W⁻¹의 높은 광응답도를 보였다(그림 4b).^[15]

본 연구팀은 유연한 구조를 가지는 광활성층, 기판을 통해 높

은 유연성을 가지는 광트랜지스터를 제조하였으며, 기판과 광활성층에 각각 PET/polydimethylsiloxane (PET/PDMS) 직물 형태의 복합체, poly(3,3''-didodecylquaterthiophene):poly(ethylene oxide)(PQT-12:PEO) 나노 섬유를 사용하였다. 기존의 PET 직물의 유연하지만 거칠고 공동이 많은 표면을 유연성 고분자인 PDMS의 첨가를 통해 평탄화하여 소자 제작 적합성이 향상된 기판을 제조하고, p-type 반도체인 PQT-12를 전기 방사를 통해 나노 섬유 형태로 제조하여 유연한 구조를 가진 광활성층을 제조하였다. 이 재료들을 기반으로 10×10 배열 형태로 제작된 광센서는 이차원 광원의 감지가 가능했으며, 1,000번의 반복적 구부림 테스트 후에도 구동 안정성을 보였다(그림 4c).^[16]

3. 압력센서

압력센서는 압력(pressure), 변형(strain), 전단력(shear forces), 진동(vibration) 등의 물리적 변화량을 전기적 신호로 나타내는 전자소자로서, 저항(piezoresistance)식, 정전용량(capacitance)식, 압전소자(piezoelectric)식 센서 등 다양한 메커니즘을 활용한 압력센서들이 개발되어 왔다. 최근 유연압력센서의 반도체층, 유전체층, 소스-드레인 전극 및 게이트 전극에 압력에 민감한 감압(pressure-sensitive)성 유연/신축성 소재를 도입함으로써 고감도 및 고유연성 압력센서에 대한 연구가 진행되고 있다.

먼저, 압저항식 센서는 전도성 구성요소의 저항을 변형시키거나 전도성 구성요소들 사이의 접촉 저항을 변형시켜서 변형 상태를 저항 값의 변화로 감지하는 센서이다. 이 센서들은 간단한 구조와 쉬운 판독 메커니즘 및 낮은 제작비용으로 인해 집중적으로 연구되고 있다. 또한 압저항식 센서는 유연한 재료로 쉽게 제작할 수 있고, 넓은 압력 범위에서 사용하기에 적합하다는 장점이 있다. 감압층(pressure-sensitive layer)으로서 전도성 충전제(fillers)가 삽입된 탄성고분자(elastomeric polymer)가 널리 사용되는데, 탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT)나 그래핀과 같은 탄소재료에서부터 전도성 고분자, 액체 금속 등이 쓰인다.

REFERENCES

[14] H. Hyemi, N. Sungho, S. Jooyeok, J. Jaehoon, K. Hwajeong, D. D. C. Bradley, K. Youngkyoo, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **22**, 147 (2016).
 [15] H. Xu, Q. Zhu, Y. Lv, K. Deng, Y. Deng, Q. Li, S. Qi, W. Chen and H. Zhang, ACS Appl. Mater. Interfaces **9**, 18134 (2017).
 [16] M. Y. Lee, J. Hong, E. K. Lee, H. Yu, H. Kim, J. U. Lee, W. Lee and J. H. Oh, Adv. Funct. Mater. **26**, 1445 (2016).

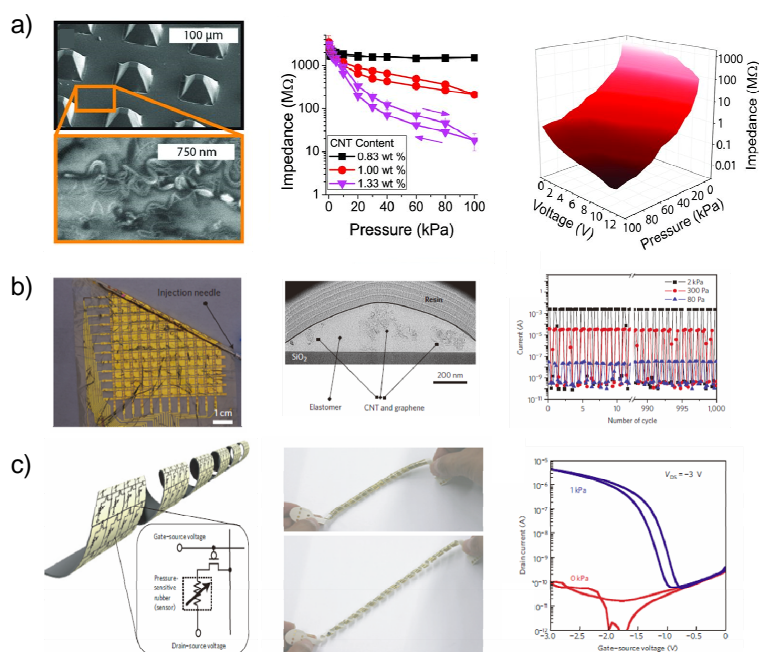


Fig. 5. a) Microstructured pyramidal piezoresistive sensors and pressure vs. resistance plot. Reproduced with permission.^[17] Copyright 2015, AAAS. b) Electrospun fiber and CNT-based piezoresistive sensor and real-time pressure sensing. Reproduced with permission.^[18] Copyright 2016, Nature Publishing Group. c) Circuit diagram of an ultraflexible pressure sensor and transfer characteristics of an individual sensor cell. Reproduced with permission.^[19] Copyright 2010, Nature Publishing Group.

Z. Bao 교수 연구팀은 탄성고분자, CNT 및 그래핀과 같은 수많은 재료의 미세 구조 복합 재료를 개발하여 매우 민감한 광대역 임피던스 압저항체(wide-impedance piezoresistor)를 제조하였다(그림 5a).^[17] 피라미드형 미세 구조로 성형된 폴리우레탄(PU) 탄성체에 CNT를 분산시켜, 지엽적으로 모듈러스(modulus)를 감소시키고 압저항성을 증가시켜 일반 필름 형태에 비해 감도가 향상된 압저항체를 개발하였다. 또한 용액 공정을 기반으로 한 유기 트랜지스터의 대면적 제조 기술과 압력 감응 재료를 융합하여, 실용적인 유기 트랜지스터 기반 압력센서를 구현하기 위한 솔루션을 제공하였다.

T. Someya 교수 연구팀은 복합 나노 섬유를 사용하여 매우 유연하고 광학적으로 투명한 유기 트랜지스터기반 고감도 압저항식 센서를 제조하였다.^[18] 200 nm 두께의 패릴렌(parylene) 게이트와 활성층으로 dinaphtho[2,3-b:2',3'-f]thieno[3,2-b]thiophene(DNTT)를 사용하였다. 그림 5b에 도시된 바와 같이, CNT/그래핀 혼합물을 갖는 플루오르화 공중합체 나노섬유로 이루어진 감압 시트가 제조되고 지면에 연결되었다. 굴곡 반경 80 μm로 구부린 조건에서 감압 시트의 저항은 매우 적은 양의 압력(~800 Pa)대에서도 급격한 변화량을 보여주었다. 그 외에도, T. Someya 교수 연구팀은 매우 유연한 소재에 얇은 유기 트랜지스터를 제작하여, 휘어지고 접히는 센서 어레이를

제작하였다(그림 5c).^[19] 펜타센 기반의 얇은 카테터 모양으로 제조된 압력센서는 소자가 굴곡반경 100 μm으로 접힌 동안에도 성능저하 없이 작동함을 보여 주었고, 4x36 어레이를 제작하여 압력 분포에 대한 매핑을 하였다.

다양한 구동방식의 압력센서 중 정전용량식 압력센서도 활발하게 연구되었는데, 구동방식의 핵심인 정전용량은 유전체가 전하를 축적하는 능력을 나타내는 물리량으로서, 소자 전극의 면적에 비례하며, 전극 간 거리에 반비례한다. 유연/신축성을 지닌 유전체는 압력에 의해 용량 변화가 강하게 증폭되는데, 이때 변형에 의해 면적, 전극 간 거리가 쉽게 변화하고, 이를 이용하여 변형 정도를 측정하는 것이 가능하다. 높은 신축성을 지닌 유전체일수록 높은 감응도를 갖게 하며, 미세 구조를 지닌 공기 갭(air gap) 디바이스가 일반적으로 사용되고 있다. 정전용량 디바이스의 장점으로는 높은 감응도를 갖는 것과 온도에 민감하지 않다는 장점이 있다.

기존 정전용량식 센서에 쓰인 박막 형태의 고체 유전체는 높은 감응도를 보이는 반면, 재료의 점탄성(viscoelastic)으로 인해서 반응/회복시간이 느린 단점이 있었다. 이를 개선하기 위해서, Z. Bao 교수 연구팀은 피라미드 형태의 미세구조를 지닌 유전체를 개발

함으로써 플레이트와 유전체 사이의 접촉면적 및 점성을 줄이고, 빠른 속도로 반응이 가능한 정전용량식 압력센서를 개발하였다(그림 6a).^[20] 또한, 매우 얇은 유전체 두께로 작은 유전체 두께와 높은 정전용량을 갖는 고감응성 감압 트랜지스터의 제조가 가능했다. 김우수 교수 연구팀은 나노 바늘 구조의 고분자 유전체 막으로 구성된 매우 민감한 정전용량식 압력센서를 제작하였다(그림 6b).^[21] 3 μm 높이의 나노 바늘 플러머 필름

REFERENCES

[17] B. C. Tee, A. Chortos, A. Berndt, A. K. Nguyen, A. Tom, A. McGuire, Z. C. Lin, K. Tien, W. G. Bae, H. Wang, P. Mei, H. H. Chou, B. Cui, K. Deisseroth, T. N. Ng and Z. Bao, *Science* **350**, 313 (2015).
 [18] S. Lee, A. Reuveny, J. Reeder, S. Lee, H. Jin, Q. Liu, T. Yokota, T. Sekitani, T. Isoyama, Y. Abe, Z. Suo and T. Someya, *Nat. Nanotech.* **11**, 472 (2016).
 [19] T. Sekitani, U. Zschieschang, H. Klauk and T. Someya, *Nat. Mater.* **9**, 1015 (2010).
 [20] S. C. B. Mannsfeld, B. C.-K. Tee, R. M. Stoltenberg, C. V. H.-H. Chen, S. Barman, B. V. O. Muir, A. N. Sokolov, C. Reese and Z. Bao, *Nat. Mater.* **9**, 859 (2010).
 [21] J. Kim, T. Nga Ng and W. Soo Kim, *Appl. Phys. Lett.* **101**, 103308 (2012).

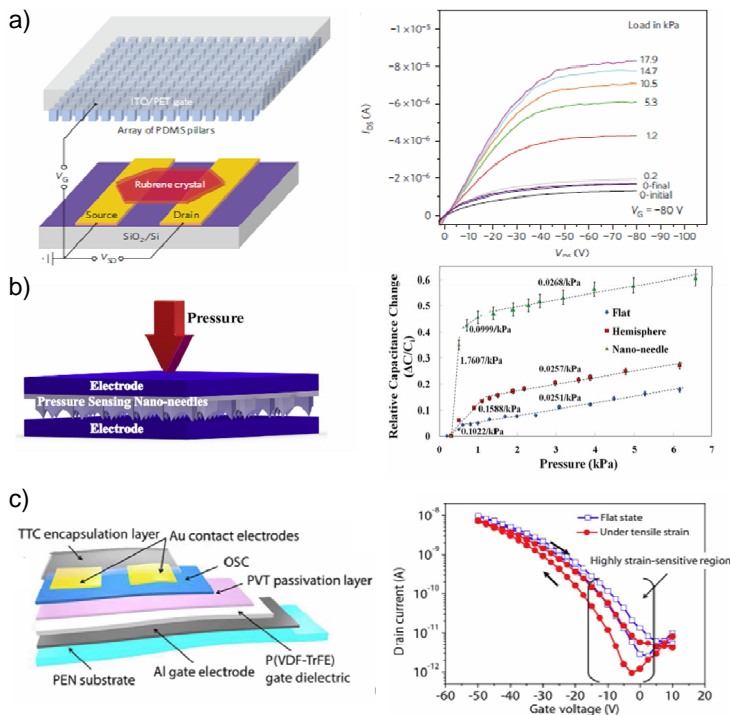


Fig. 6. a) Capacitance-type organic single-crystal pressure sensor and output characteristics. Reproduced with permission.^[20] Copyright 2010, Nature Publishing Group. b) Capacitance-type sensor with nano-needle and pressure vs. capacitance curve. Reproduced with permission.^[21] Copyright 2012, American Institute of Physics. c) Piezoelectric OFET-embedded microcantilever and transfer characteristics of the cantilever. Reproduced with permission.^[22] Copyright 2016, Nature Publishing Group.

은 스탬핑을 포함한 간단한 제작 방법을 사용하여 제조되었으며, 센서 어레이는 유전체 필러의 잉크젯 프린팅 및 패터닝을 통해 제조되었고 1 kPa 이하의 낮은 압력 감지가 가능하였다. 유기 트랜지스터 센서의 상부 전극에 압력이 가해졌을 때, 게이트 전극 위에 위치한 나노 바늘막의 두께가 감소하게 되고 전극 사이의 정전용량 증가로 야기된 트랜지스터 채널의 전하량 증가가 드레인 전류를 증가시키는 결과를 가져온다.

그 외에도 물리적 응력이 가해질 때 변형된 재료의 정렬된 영구 쌍극자(oriented, permanent dipole)로 인해 전하를 생성하는 압전 효과(piezoelectricity)를 이용한 압전식 압력센서도 다양하게 연구되어왔다. 압전성에 기인한 센서는 진동을 감지하고, 시간에 따른 힘의 변화를 측정하는 데에 매우 효과적이다. 또한 감도가 높고 응답 시간이 빠르기 때문에 음향 진동과

같은 동적 압력(dynamic force) 감지에 널리 사용되지만, 정적 압력(static force) 측정이 어려우며, 온도 변화에 민감한 단점이 있다.

최근 C. Ayala 교수 연구팀에서 압전소재인 poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene)(PVDF-TrFE)를 유기 트랜지스터에 도입하여, 0.045% 인장력을 감지할 수 있는 고감도를 지닌 캔틸레버(cantilever) 휨 센서를 개발하였다(그림 6c).^[22] 고감도 휨 센서의 경우, 압전물질의 쌍극자들이 한 방향으로 향하기 쉽도록 폴링(poling) 작업을 실시하였으며, DNTT 및 펜타센 등 여러 유기반도체를 도입하여 다양한 유기반도체의 적용가능성에 대해 시사하고 있다.

결론

유연/신축성을 지니는 분자기반 전자재료를 활용한 유기 트랜지스터 센서의 최근 연구 동향 및 전망에 대해서 외부자극의 종류에 따라 화학/바이오/광/압력센서 분야로 나누어서 살펴보았다. 사물인터넷 환경과 웨어러블 전자소자 개발에 대한 관심과 수요의 증가로 유연/신축성 전자소자에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 저분자 및 고분자 소재를 기반으로 하는 유기 트랜지스터 기반 센서는 저비용, 대면적, 맞춤형 소자 제조가 가능하여 최근 매우 활발히 연구되고 있다. 유기 트랜지스터 기반 센서는 미래형 전자소자의 핵심부품으로 적합하지만 상용화를 앞당기고 응용 분야를 더 넓히기 위해서는 소자의 신뢰성과 안정성 확보가 매우 중요하며, 최근 이러한 난제를 극복하고자 하는 도전적 연구가 활발히 진행 중에 있다. 이러한 분자기반 고성능 센서 제조 기술은 향후 웨어러블 스마트 헬스케어 기기 또는 환경 모니터링 기기 등과 같은 사물인터넷의 핵심 구성 요소로서 우리의 삶을 더욱 풍요롭게 해줄 것이다.

REFERENCES

[22] D. Thuau, M. Abbas, G. Wantz, L. Hirsch, I. Dufour and C. Ayala, *Sci. Rep.* **6**, 38672 (2016).