

특집 : 신축성 전자소자의 개발 동향

신축성 전자소자를 위한 신축성 전극 및 스트레인 센서 개발 동향

박진영¹ · 이원재¹ · 남현진² · 좌성훈^{1,†}

¹서울과학기술대학교 나노IT디자인융합대학원, ²서울과학기술대학교 일반대학원

Technology of Stretchable Interconnector and Strain Sensors for Stretchable Electronics

Jin Yeong Park¹, Won Jae Lee¹, Hyun Jin Nam², and Sung-Hoon Choa^{1,†}

¹Graduate School of Nano IT Design Fusion, Seoul National University of Science and Technology,
232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

²Dept. Of Manufacturing System and Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

(Received December 7, 2018: Corrected December 19, 2018: Accepted December 28, 2018)

Abstract: In this paper, we review the latest technical progress and commercialization of stretchable interconnectors, stretchable strain sensors, and stretchable substrates for stretchable electronics. The development of stretchable electronics can pave a way for new applications such as wearable devices, bio-integrated devices, healthcare and monitoring, and soft robotics. The essential components of stretchable electronic devices are stretchable interconnector and stretchable substrate. Stretchable interconnector should have high stretchability and high electrical conductivity as well as stability under severe mechanical deformation. Therefore several nanocomposite-based materials using CNT, graphene, nanowire, and metal flake have been developed. Geometric engineering such as wavy, serpentine, buckled and mesh structure has been well developed. Stretchable substrate should also pose high stretchability and compatibility with stretchable sensing or interconnecting material. We summarize the recent research results of new materials for stretchable interconnector and substrate as well as strain sensors. The Important challenges in development of the stretchable interconnector and substrate are also briefly discussed.

Keywords: Stretchable electronics, Interconnector, Strain sensor, Stretchable substrate

1. 서 론

최근 웨어러블(wearable) 기술 및 Internet of Things (IoT) 기술이 급속하게 성장함에 따라 유연하면서도 신축성이 있는 전자 소자 및 전자 기기에 대한 관심이 크게 증가하고 있다. 유연 전자 소자는 다양한 형태가 있는데 굽힐 수 있는 밴더블(bendable) 소자, 접을 수 있는 폴더블(foldable) 소자, 둘둘 말 수 있는 롤러블(rollable) 소자, 형태 변형이 가능한 디포멀블(deformable) 소자 등이 있다. 신축성 전자 소자 일명 스트레처블 소자(stretchable devices) 전자 소자는 이러한 유연 전자 소자의 뒤를 잇는 차세대 전자 소자가 될 것으로 예측하고 있다. 신축성 전자소자는 늘리거나 굽힘에도 소자의 특성을 잃지 않고 작동하며, 외력을 제거하더라도 소자의 특성을 유지할 수 있는 전자 소자이다. 가해지는 변형률로 표현하면, 신축성 소자는 통상 5% 이상의

인장 변형률(tensile strain)이 가해졌을 때 견딜 수 있는 소자를 의미한다. 신축성 소자는 다양한 기계적 변형에도 일정한 성능을 유지할 수 있기 때문에 신체, 인간의 피부, 의복 등 임의의 표면에 부착될 수 있는 장점이 있으며, 이에 따라 디스플레이, 태양전지, 착용 가능한 전자소자, 인공 피부, 로봇 등의 분야에 응용이 가능하다. 따라서 최근 신축성 배터리, 디스플레이, 센서 및 PCB 등 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{1,2)} 그러나 신축성 소재 및 부품에 대한 기술적 개발 및 상용화는 아직 초기 단계에 머무르고 있다.

신축성 전자소자로서 최근 큰 관심을 받고 있는 기술은 신축성 디스플레이(stretchable display)이다. 신축성 디스플레이는 유연 디스플레이(flexible display)의 최종 기술로서 형태에 제약을 전혀 받지 않기 때문에 의류나 인간의 피부 등 다양한 분야에 적용되어 기존과는 새로운 영역의 응용 분야를 창출해 낼 것으로 기대되고 있다. 최근 삼성디스

[†]Corresponding author
E-mail: shchoa@seoultech.ac.kr

© 2018, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

플레이는 SID 2017 심포지움에서 9.1 인치 stretchable AMOLED를 선보였다. 전시된 9.1 인치 신축성 AMOLED는 수축이 가능한 필름 기판 위에 폴리이미드(polyimide, PI)를 형성한 후 신축이 가능한 영역을 패터닝 하였다. 그리고 패터닝 된 PI위에 TFT와 OLED를 형성하는 구조로 제작되었으며, multi-touch 센서를 동시에 구현하였다. 이 신축성 디스플레이는 concave (∩) 형태에서 최대 12 mm 까지 늘어난다. 한편 LG디스플레이도 스트레처블 OLED를 개발할 예정이다. LG디스플레이는 올해 고려대와의 컨소시엄을 통해 20% 이상 신축성을 갖는 백플레인과 발광 화소용 소재, 소자 및 공정 원천기술을 국가과제를 활용하여 총 4년 동안 개발할 예정이라 발표하였다. 또한 최근 삼성전자는 2019년 출시를 예고한 신형 폴더블 스마트폰을 공개하였다. 폴더블폰은 종이 접듯이 반으로 접히는 접이식 기능이 탑재돼 태블릿급 디스플레이의 스마트폰을 주머니에 휴대할 수 있는 것으로 알려져 있다. 폴더블폰은 접었을 때 4.58인치, 펼쳤을 때는 7.3 인치가 될 것이라고 발표하였다. 유연전자 소자의 경우, 특히 밴더블 혹은 폴더블 전자 소자의 경우 굽혔을 때 소자에 작용하는 응력 및 변형률은 소자 및 기판의 총 두께에 비례한다. 따라서 응력을 감소시키면서 유연성을 증가시키기 위해서는 소자 및 기판의 두께를 가능한 얇게 하면 된다. 또한 neutral plane 개념을 이용하여 가장 유연성에 취약한 소자 혹은 재료를 neutral plane에 위치하도록 하는 설계 기법을 이용할 수 있다.³⁾ 그러나 신축성 소자의 경우 전문적인 방법을 사용할 수 없다.

최근 신축성 전자 소자의 관심이 크게 증가하면서 신축성 전자 소자의 연구 동향을 정리한 리뷰 논문도 많이 출판되고 있다. 2014년 Rogers 등⁴⁾이 신축성 전자 소자에 대한 다양한 구조 및 소재에 대해서 review 논문을 발표한 것을 시작으로 하여, Bao 등은 전자 피부에 활용될 수 있는 신축성 전자 소자에 대한 그 동안의 연구를 정리하였다.⁵⁾ Dang 등은 인쇄용 나노복합소재(nanocomposite)를 이용한 신축 인터커넥터 기술에 대하여 관련 기술을 정리하였다.⁶⁾ 또한 Trung 등은 투명 신축성 전자 소자에 대한 연구를 도체, 반도체, 절연체 소자로 구분하여 최근에 연구 결과 등을 정리하였다.⁷⁾ Lu는 유연 신축성 센서, 액추에이터 및 전력 소자를 포함하는 soft robot에 대한 연구를 요약하여 발표하였다.⁸⁾ 최근에 Liu 등은 웨어러블 헬스 모니터링용 유연 신축 센서에 대한 센싱 방법, 소재 및 공정 방법 등에 대한 기존의 연구를 정리하였다.⁹⁾

본 논문에서는 신축성 전자 소자 중에서 신축성 전극, 신축성 스트레인 센서, 신축성 기판에 대한 최신 기술 동향 및 상용화 동향에 대해서 설명하였다. 특히 최근 2년 간 (2017년부터 2018년)의 연구 논문들을 중점적으로 정리하였다.

2. 신축성 전극

신축성 전극은 신축성 전자 소자에서 가장 중요한 핵심

부품이다. 기존의 실리콘 소재와 금속 및 산화물로 구성된 실리콘 기반 전자소자는 유연성이 없는 딱딱한 소재이기 때문에 신축성이 없다. 따라서 신축성 전자 소자에서는 이러한 전자 소자를 연결해주는 신축성 전극을 사용하여 신축 시 전극이 기계적인 변형에 따라 함께 변형 되면서 응력을 흡수하는 구조를 주로 사용한다. 따라서 신축성 전극의 개발은 매우 중요하며, 소자의 전기 전달에 문제가 발생하지 않고 신축성 소자가 잘 작동할 수 있게 된다. 신축성 전극에서 가장 중요한 요소는 신축성, 전기전도도 및 내구성이다. 신축성 전극을 제작하는 방법은 여러 가지가 있다. 그러나 크게 보면 구조설계 기반 신축성 전극과 소재 기반 신축성 전극이 있다. 구조설계 기반 신축성 전극은 전극의 형태를 물결(wavy), 버클링(buckled) 구조, 지그재그(zigzag), 말굽형(horseshoe), 나노 메쉬(nano mesh) 등 다양한 형태로 변형 혹은 가공하여 신축 시 변형을 흡수하여 신축성을 향상시키는 방법이다. 소재 기반 신축성 전극은 전도성 폴리머와 같은 신축성과 전도성을 모두 갖는 도전성 물질을 이용하거나 금속 나노 입자, 카본, CNT와 같은 전도성 물질과 폴리머를 혼합하여 만든 나노복합소재를 사용하는 것이다.

2.1. 구조설계 기반 신축성 전극

신축성 전극을 형성하기 위한 초기 구조로서 물결 구조, 주름진(wrinkled) 구조 혹은 버클링 구조를 이용하는 것이다. 이 방법은 기판을 특정 변형률까지 미리 신축시킨(pre-stretched) 상태에서 금속, 실리콘 소재 등을 transfer 기술을 사용하여 기판 표면에 부착시키게 되면 신축된 기판이 원래 상태로 수축될 때 압축 응력으로 인해하여 주름 혹은 버클링 구조가 형성이 되는 것이다.^{10,11)} 이 경우 전극은 신축한 정도의 변형률까지는 응력을 흡수할 수 있다. 기판을 신축시키는 방법은 기계적인 힘이나, 열적인 방법 등 다양한 방법을 사용할 수 있다. 이러한 방법으로 제작된 신축성 전극은 아코디언과 마찬가지로 신축 시 물결 구조가 늘어나면서 외부응력에 대응하기 때문에 기판 위에 제작된 실리콘 기반 소자에는 영향을 주지 않는다. 또 다른 응력을 흡수하는 설계로서 전극 자체를 지그재그, 말굽형, 나노 메쉬, 허니컴(honeycomb) 등 구불구불한(serpentine) 구조나 네트워크(network) 구조로 만드는 것이다.^{12,13,14)} 이러한 물결 혹은 주름 구조의 제조공정이 대단히 간단하다는 장점이 있는 반면, 물결 모양의 전극의 변형을 위해 능동소자 간의 여유 공간이 많이 필요하기 때문에 고집적 소자 응용에는 한계가 있으며, 여러 방향으로의 신축이 어렵다는 단점이 있다. 이러한 구조는 2D (in-plane) 구조에서 최근 3D 구조 즉 out-of-plane로 발전하고 있다. 즉 코일(coil), 헬리컬(helical), 키리카미(kirigami) 구조 및 스프링 구조와 같은 3D 구조를 갖는 전극이 개발되고 있다. 3D 코일 구조를 갖는 전극은 코일 구조가 신축하는 동안 전극에 형성된 국부 응력을 억제할 수 있기 때문에 2D 전극 구조보다 더 신축성이 있다고 알려져 있다. 이러한 구조는 금속을 이용한

으로써 낮은 저항의 전극을 만드는 장점이 있지만, 제작 과정이 매우 복잡하다는 단점이 있다. 또한 금속과 같은 전극 소재와 기판의 접착력이 우수해야 한다. 이러한 구조를 이용하여 2000% 이상의 신축성 전극을 형성할 수 있다는 연구가 보고되기도 하였다.¹⁵⁾

또 다른 기술로서 신축성 유연 기판에 작은 굴곡(mini-valley) 등을 형성한 후 금속 코팅을 함으로써 신축성 전극을 형성하는 것이다. 가령 모글스키의 울록볼록한 구조를 본 따서 만든 모듈 형태의 신축성 전극이 개발되었다. 포토 리소그래피 방법을 이용하여 모글 형태의 구조를 패터닝 하였으며 양방향으로 30% 이상 신축이 가능하다고 보고 하였다.¹⁶⁾ 또한 비아(via) 또는 공기 기공을 기판에 발생 시켜 기판 자체에 허니컴 격자 구조 또는 스폰지 같은 구조를 형성하기도 한다. 또는 가압 증기를 이용하여 PDMS (polydimethylsiloxane)와 같은 기판을 다공성 구조로 만드는 방법도 있다. 그 후 금속 전극을 코팅함으로써 전극을 형성시킨다.¹⁷⁾ Yu 등은 상용화된 전도성 폴리우레탄 스폰지(polyurethane sponge)를 이용하여 PDMS와 혼합한 뒤에 구리, 금과 같은 금속 코팅을 하여 면저항 1.5 Ω/square, 전도도 1200 S/cm의 신축 및 압축이 가능한 전극을 개발하였다.¹⁸⁾ 폴리머 기판의 외부 자극에 대한 팽창과 수축 특성을 이용하여 자연적으로 발생하는 주름 패턴을 이용하는 연구도 있었다. 이때 주름 패턴 위에 금속 코팅을 하거나 주름 사이에 도전성 소재를 충전하면 신축성과 전도성이 향상된 신축성 전극을 만들 수 있다.¹⁹⁾

2.2. 소재 기반 신축성 전극

신축성 전극을 만드는 가장 일반적인 방법은 전도성 물질과 유연한 탄성체에 골고루 분산시켜 나노복합체를 만드는 것이다. 즉 전도성 물질을 필러(filler)로 폴리머를 바인더(binder)로 사용하여 높은 전기전도도와 신축성을 동시에 갖도록 설계하는 것이다. 따라서 신축성과 전기전도도는 첨가된 필러의 양에 의해 결정된다. 나노복합체에서의 전기전도도는 잘 알려진 percolation 이론²⁰⁾과 근접한 필러 물질들 사이에 전자들이 tunneling 효과에 의하여 흐른다는 tunneling 이론²¹⁾에 의하여 결정된다. 전도성 필러의 양이 많으면 전기전도도는 증가하지만, 충전제에 의한 보강 효과가 커져서 강도가 증가하고 유연성이 저하된다. 한편 폴리머의 양이 너무 많으면 전기전도가 낮아지는 트레이드오프(trade off) 관계가 형성된다. 따라서 필러와 폴리머 바인더의 양 조절이 매우 중요하며 이를 위해서는 전도성 필러의 함량에 따라 전도도가 급격히 증가하는 percolation threshold을 예측하는 것이 필요하다. 또한 높은 전도도 물질 및 분산을 좋게 하는 적절한 설계 및 재료가 필요하다.

나노소재 신축성 전극 개발을 위한 초기 연구는 저렴하고 비교적 높은 전도도를 갖고 있는 카본블랙(CB),²²⁾ 카본 나노튜브(CNT),²³⁾ 그래핀(graphene)²⁴⁾ 등 카본 계열의 소재를 사용한 것이다. 카본블랙의 경우는 전도성이 낮기 때

문에 보통 전도성이 뛰어난 MWNT (multi-wall CNT), SWNT (single-wall CNT) 및 그래핀을 많이 사용한다. 카본 나노튜브의 경우 분산성에 문제가 많이 발생하여 전기전도도가 불균일하다는 단점이 있다. 그래핀의 경우 높은 표면적과 높은 전기전도의 특성으로 인하여 낮은 양의 첨가에도 높은 전도도를 나타내는 장점이 있다. 그러나 합성하는 과정에서 발생하는 결함으로 인하여 전도도는 감소하며, 또한 신축과정에서 나타나는 그래핀 균열은 전기전도성의 감소를 초래한다. 따라서 카본을 사용한 나노복합체 신축 전극은 여전히 낮은 전도도가 문제가 되고 있다. 이를 극복하기 위하여 금속 나노와이어(nanowire) 및 금속 나노입자(nanoparticle)의 사용이 대안으로 떠오르고 있다. 은 나노와이어(Ag nanowire, NW)의 경우 높은 종횡비(high aspect ratio)와 높은 전기전도도로 인하여 기판에 직접 삽입(embedding)하는 형태로도 많이 사용하고 있다. 그러나 은나노와이어 자체로는 신축성이 크지 않기 때문에 폴리머와 합성하여 복합체 물질로 신축성 전극을 만드는 것이 보통이다. 한편 은나노와이어는 상대적으로 가격이 높다는 단점이 있다. 따라서 최근 구리 나노와이어(Cu NW)를 이용한 소재가 개발되고 있다. 그러나 구리 나노와이어는 산화가 잘되는 특성으로 장시간 사용 시 전극의 부식으로 인한 전기전도의 감소를 피할 수 없다.²⁵⁾ 이러한 단점을 극복하기 위하여 은 나노와이어와 은 나노입자를 혼합한 하이브리드 전극이 개발되기도 하였다.²⁶⁾ 또한 최근 구형의 나노입자보다 높은 접촉 면적을 갖는 플레이크(flake) 형태의 금속 나노입자를 전도성 필러로 사용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. Matsuhisa 등은 Ag 플레이크와 불소 고무(fluorine rubber)로 구성된 나노복합체를 사용하여 182 S/cm의 전도도와 215%의 신축성을 갖는 신축성 전극을 개발하였다.²⁷⁾ 일반적으로, 이러한 나노 복합 재료 또는 잉크는 필러, 바인더 및 용매로 구성된다. 따라서 폴리머 매트릭스에 전도성 필러를 적절하게 혼합하여 나노 복합체를 합성하는 것이 성능과 신축성에 매우 중요한 요소이다. 또한, 이들 나노 복합체 잉크는 인쇄 후 용매 및 유기 성분을 제거하기 위한 경화(curing) 공정이 필요하다. 그러나 경화 공정의 온도가 기판 소재의 유리전이온도보다 높은 경우가 많아서 이에 대한 대책이 필요한 실정이다. 한편 전술한 CNT, 그래핀, 은 나노와이어, 금속 나노입자 등의 물질을 혼합하여 장점을 살린 하이브리드 형태의 전극 개발도 꾸준히 진행되고 있다.

또한 기본적으로 전도성을 갖고 있는 폴리머인 전도성 폴리머를 사용하여 신축성 전극을 개발하려는 연구도 꾸준히 진행되고 있다. 전도성 폴리머는 대표적으로 polyaniline (PANI), polypyrrole (PPy) 및 poly(3,4-ethylenedioxythiophene): poly(4-styrenesulfonate) (PEDOT:PSS)를 많이 사용하고 있다.²⁸⁾ 그러나 전도성 고분자는 전기전도도가 금속에 비하여 충분치 않고, 습한 상황에서 전기 전도도가 저하되는 현상 등 아직 해결해야 될 문제가 많다. 기본적으로 전도성을 갖고 있는 후보 물질로 액체 금속(liquid metal)도 연구가

활발한 분야이다. 특히 유해성이 검증된 eutectic Gallium Indium (eGaln) 물질이 많이 활용되고 있다.²⁹⁾ 액체 금속은 높은 전기전도도와 신축성으로 매우 매력적인 신축성 전극 물질이다. 그러나 액체 금속은 고가격이며 액체금속을 패키징하기 위한 밀봉 구조를 항상 필요로 한다는 단점이 있다.

3. 신축성 스트레인 센서

현재 매우 다양한 신축성 센서들이 개발되고 있다. 특히 인체의 온도, 압력, 모션을 측정할 수 있는 신축성 스트레인 센서, 온도 센서, 압력 센서 등의 개발이 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 그 중에서 제일 개발이 활발한 신축성 스트레인 센서 개발에 대해서 정리하고자 하였다. 일반적으로 현재 사용하고 있는 스트레인 센서는 유연 기판에 동, 니켈, 니켈크롬 합금 금속을 사용한 얇은 금속 포일막이 코팅된 것으로 신축 시 금속의 전기저항이 변화(증가)하는 것을 이용하는 센서이다. 그러나 금속 기반의 스트레인 센서의 신축성은 3% 미만이다. 따라서 기존의 메탈 기반의 스트레인 센서는 신축성 센서로 사용할 수가 없다. 신축성 스트레인 센서는 호흡이나 맥박 같은 작은 움직임에서부터 관절운동 모션 등과 관련한 데이터를 지속적으로 수집할 수 있도록 하기 때문에 휴먼 인터페이스 기술(human-interface technology)의 핵심기술이 되고 있으며 최근 스마트 장갑(smart glove) 등에 활용되고 있다.

신축성 스트레인 센서의 종류는 크게 저항형(resistive), 커패시터형(capacitive) 및 압전형(piezoelectric) 타입이 있다. 그 중에서 공정이 비교적 간단한 저항형 타입이 가장 많이 개발되고 있다. 저항형 센서는 기계적 변형에 따라서 전기 저항이 변하는 압저항(piezoresistive) 효과를 이용한 것으로, 신축성 기판 위에 도전성 센싱 재료를 코팅하여 신축 시 도전성 재료의 저항이 변하게 된다. 커패시터 타입은 신축성 전극과 전극 사이의 신축성 유전체로 구성되어 있다. 이 센서는 커패시터의 특성 즉 커패시터는 커패시터 전극 사이의 거리에는 반비례하고 전극의 단면적에 비례한다는 특성을 이용하는 것으로 신축 시 신축성 전극 사이의 거리 및 단면적이 변하는 특성을 이용하는 것이다. 커패시터형 센서는 우수한 선형성(linearity)과 온도에 민감하지 않다는 장점이 있지만, 감도는 대부분 낮은 단점이 있다. 저항형 스트레인 센서에 사용되는 센싱 물질은 신축성 전극 물질과 유사하다. 단지 신축성 전극의 경우 센싱 소재의 비저항 혹은 면저항이 낮은 것이 중요하지만, 스트레인 센서의 경우 감도, 선형성, 히스테리시스 등 센서의 기본 성능이 중요하다. 저항형 센서의 센싱 소재로는 카본블랙, 카본 나노튜브, 그래핀, 나노와이어, 금속 나노 입자, 나노 파이버, 전도성 폴리머 등이 사용되며, 최근에는 폴리머와 이러한 소재들을 혼합하여 제작한 복합 소재가 많이 사용되고 있다. 스트레인 센서는 높은 신축성과 높은 전기적 성능 그리고 내구성과 신뢰성을 요구한다. 물론 신축성 스트

레인 센서의 신축성은 응용 분야에 따라 다르다. 가령 인체에 적용되는 스트레인 센서의 경우 손, 팔, 다리, 손가락과 같은 관절 운동을 검출하는 센서는 50% 이상의 신축성을 요구한다. 그러나 얼굴, 가슴 및 얼굴 및 목 등의 움직임을 검출하는 센서는 30% 미만의 신축성을 요구한다. 한편 피부와 같은 e-skin의 경우 100% 이상의 신축성을 요구한다.^{30,31)}

신축성 스트레인 센서가 갖춰야 될 전기적 성능은 감도 혹은 gauge factor (GF), 선형성(linearity), 히스테리시스(hysteresis), 응답성 및 회복 특성(recovery) 등이 있다. GF란 센서의 감도를 의미하며 가해진 변형(응력 혹은 변형률)에 대한 전기 신호(저항 혹은 커패시턴스)의 상대적인 변화에 대한 기울기를 의미한다. 따라서 GF는 가능한 커야 한다. 저항 타입의 스트레인 센서의 경우 GF는 주로 센싱 재료들 간의 단락(disconnection) 효과에 의하여 발생한다. 즉 신축 시 센싱 재료들의 미세한 크랙의 발생, tunneling 효과, 전기적 연결 네트워크의 파괴 등으로 인하여 저항이 증가한다. 따라서 기존 메탈 포일 스트레인 센서의 경우 GF는 5 이하이지만, 신축성 스트레인 센서의 GF는 매우 큰 범위를 갖는다. 최근 결과에 의하면 GF가 100 이상인

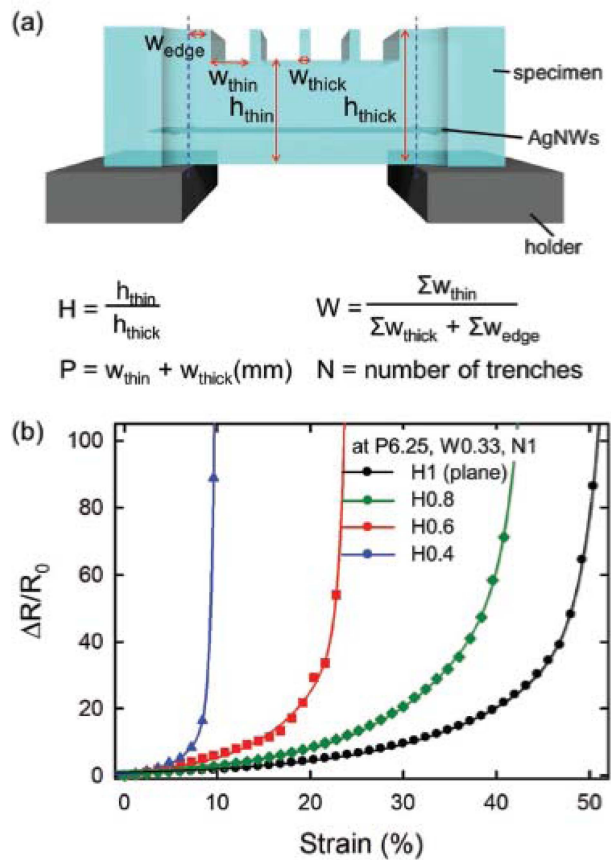


Fig. 1. (a) Geometric structures of the stretchable strain sensor. (b) Resistance change as a function of strain in AgNW-based strain sensors with various relief structures in the PDMS substrate.³⁶⁾

Table 1. Summary of research results of recently reported stretchable strain sensors.

Reference	Sensing material	Substrate material	Stretchability (%)	Gauge factor (GF)
37	SWCNT	PDMS (sylgard184)	160	134
38	CNT	PDMS	50	-
39	Silver-coated polystyrene spheres	PDMS (sylgard184)	80	78.6
40	PANI	Thermoplastic PU	80	20
41	Graphene oxide	Ecoflex	400	31.6
42	MWCNT	PDMS (sylgard184)	60	-
43	PVA/MWCNT/PEDOT:PSS	PDMS (sylgard184)	50	5.2
44	SWCNTs/CB	PDMS (sylgard184)	120	1.25
45	SWCNTs/CB	Polyurethan	320	2.14
46	Chitosan-based water ink	-	60	64
47	Thin layer of platinum	Thermoplastic PU	150	30
48	AgNP/CNT	PDMS (sylgard184)	60	14.9
49	Ag Flake/Nanoparticle	PDMS (sylgard184)	80	7.1
50	PA-co-GO/ENR	PDMS (sylgard184)	1200	-
51	AgNW/Graphene/Fullerene	Polyurethan	50	> 400

매우 감도가 높은 신축성 스트레인 센서도 많이 개발되고 있다.^{32,33)}

최근에는 GF를 제어하기 위한 연구 개발도 선을 보이고 있다. 즉 CNT 혹은 그래핀과 같은 센서 재료의 양을 조절하던가, 공정 수 가령, 프린팅 및 증착 횟수를 조절함으로써 GF를 손쉽게 제어할 수 있는 연구들이 수행되었다.^{34,35)} Yoon 등은 PDMS 기판에 Ag NW를 transfer 프린팅 공정으로 코팅한 후 신축성 스트레인 센서를 제작하였다.³⁶⁾ 특히 Fig. 1와 같이 PDMS 기판에 규칙적인 트랜치를 제작하여 감도를 자유롭게 조절할 수 있는 스트레인 센서를 개발하였다. 이 트랜치의 깊이와 개수를 조절함으로써 Ag NW에 걸리는 응력을 변화시켜 궁극적으로 감도가 변하게 되는 구조이다.

일반적으로 높은 감도와 높은 선형성 및 신축성 사이에는 트레이드오프 관계가 있다. 그 이유는 높은 감도를 위해서는 신축 시 센싱 재료들의 구조적 변화가 필요한 반면, 높은 신축성 및 선형성을 위해서는 센싱 재료들이 큰 변형 시 온전한 형태로 유지되는 것이 필요하기 때문이다. 즉 고 감도의 스트레인 센서는 일반적으로 높은 비선형성 및 낮은 신축성을 갖는 문제가 있다. 따라서 100% 이상의 신축성과 GF 50 이상의 감도를 갖는 신축성 스트레인 센서를 만드는 것이 매우 어려운 것으로 여겨졌다. 그러나 최근의 연구 결과를 보면 신축성과 감도를 획기적으로 향상시키는 연구 결과들이 나오고 있어서 이러한 문제도 곧 해결될 것으로 판단된다. Table 1은 최근 2년간 출판된 신축성 스트레인 센서 관련 논문이다. 신축성 및 GF 면에서 상당한 진전이 있음을 알 수 있다. 신축성 면에서는 신축성 300%를 넘는 연구 결과 및 GF도 50이 넘는 스트레인 센서 관련 연구가 많이 진행되고 있음을 알 수 있다. 그러나 전술한 바와 같이 100% 이상의 신축성과 50 이상의 GF를 갖는 만

족할 만한 신축성 스트레인 센서의 개발은 아직 부족한 상황이다.³⁷⁻⁵¹⁾

한편 큰 변형을 받은 신축성 센서에서 선형성은 매우 중요하다. 특히 변형에 따라서 스트레인 센서가 선형적으로 반응하지 않는다면 변형에 따라 감도가 변하는 문제가 발생한다. 특히 저항형 센서의 경우 변형이 증가할수록 비선형 특성이 증가하는데 이는 저항 소재에 미세 균열이 증가하면서 소재가 불균일한 구조가 되어 발생하며 나노복합재를 사용한 경우 사용된 폴리머의 점탄성 특성으로 인하여 비선형성이 증가하게 된다. 특히 나노 소재 필러와 폴리머를 혼합한 나노복합재의 경우 히스테리시스 특성이 매우 나쁘다. 이는 전술한 바와 같이 폴리머의 점탄성 특성 때문이다. 그런 면에서 커패시터 타입 스트레인 센서가 히스테리시스 및 선형성 특성이 저항형 센서에 비해 좋다. 이러한 히스테리시스 특성은 Ag NW 혹은 CNT를 PDMS나 Ecoflex에 혼합한 스트레인 센서에서 잘 나타나고 있다.⁵²⁾ 이러한 문제점을 해결하기 위하여 최근 자기치유(self-healing) 기능을 갖는 신축성 스트레인 센서가 개발되고 있다. He 등⁵³⁾은 감광성 이온성 액체(ionic liquids)를 자기치유 폴리머와 함께 섞어서 센서를 만들었으며, CNT (SWCNT), 그래핀 및 Ag NW의 다양한 전도성 물질을 자기치유 하이드로 겔에 첨가했다. 이렇게 제작된 센서는 파손 및 자기치유 후 반복 가능하고 동일한 성능을 나타내었으며 빠른 자기치유 속도 (3.2 초 이내) 및 높은 자기치유효율 (98 ± 0.8%) 및 높은 신축성 (최대 1000%)을 유지하고 있었다.

4. 신축성 스트레인 센서 상용화

현재 상용화된 스트레처블 스트레인 센서로는 StretchSense사의 Fabric Stretch SensorTM라고 하는 커패시터 타입



Fig. 2. Picture of Fabric Stretch Sensor [Source: Stretch Sense™, <https://www.stretchesense.com>].

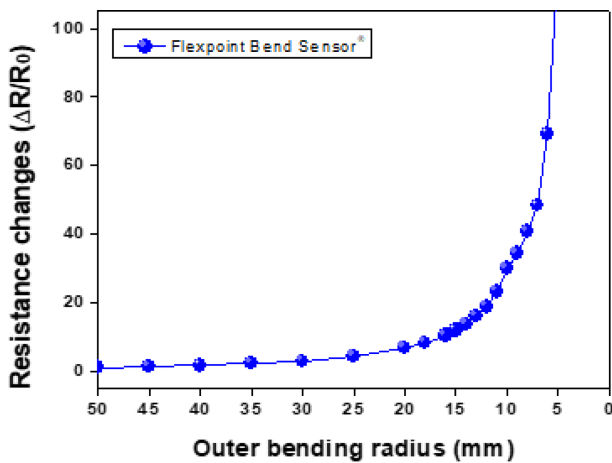


Fig. 3. Relative resistance change of Bend Sensor with decreasing bending radius.

의 스트레인 센서가 있다. 이 센서는 실리콘 기판을 사용하였으며, 최대 80%까지 신축이 가능하며 감도는 3.82 pF/mm이다. Fig. 2는 이 센서의 실제 사진이다. 이 센서는 운동복이나 다양한 의류에 적용이 가능하도록 제작되었다. 신축성 스트레인 센서는 아니지만, 굽힐 수 있는 스트레인 센서로서 Flexpoint sensor system사의 Bend Sensor™이 있다. 이 센서는 플라스틱 기판에 카본/폴리머 소재를 사용하여 신축하였을 때 소재에 마이크로 크랙이 발생하고 이에 따라서 소재에서 발생하는 저항의 변화를 감지하여 굽힘의 정도를 측정할 수 있는 센서이다. 저자가 수행한 굽힘 시험에 의하면 이 센서는 곡률 반경 약 5 mm까지 굽힐 수 있는 것으로 판명되었다. 곡률 반경이 5 mm 이하가 되면 저항이 급격하게 증가하는 것을 알 수 있었다. Fig. 3은 Flexpoint사의 Bend Sensor의 굽힘 시험을 수행한 결과로서 곡률 반경의 변화에 대한 저항의 변화를 나타내고 있다. 하지만 이 센서는 굽히는 것은 가능하지만, 신축성은 미미하기 때문에 신축성 센서로서의 적용은 힘들다.

스트레인 센서는 아니지만 LG 이노텍에서 유연 신축성 섬유형 압력센서를 개발하여 선을 보였다. 의료기기, 자동

차 등에 장착돼 압력을 측정하고 분석해 사용자의 건강상태나 주행환경에 따른 맞춤형 서비스에 활용이 가능하다고 한다. 정전용량방식의 센서로서 폴리우레탄과 신축성 있는 특수 소재를 사용해 착용감이 우수하고, 또한 넓은 면적에서 고른 압력 측정이 가능하여 힘이 가해지는 모든 부위의 압력을 측정할 수 있는 것으로 알려져 있다. 개발된 섬유형 플렉시블 압력센서는 1 mm의 얇은 두께와 1 mm²의 크기이다. 또한 센서를 여러 장 붙이거나 작은 사이즈로 잘라 쓰는 것도 가능해 다양한 활용이 가능하다. 신축성 압력 센서로서 Pressure Profile Systems사의 TactArray Sensor™가 있다. 이 센서는 커패시티브 타입의 소재를 사용하였으며 약 10%까지 신축이 가능하고 350 kPa까지의 압력을 측정할 수 있다.

5. 신축성 기판 소재

기판의 선택에 있어 중요한 부분은 소재의 신축성, 반복 변형에 대한 안정성 및 열적 안정성과 같은 물리적인 성능이다. 특히 신축성이 가장 중요한 특성이다. 기존 유연전자 소자에서 사용되었던 PET, PI, PEN 등은 약 4-5% 정도에서 영구 변형이 발생하거나 파괴된다. 따라서 신축성 기판으로 새로운 소재가 필요하다. 신축성 전자소자에서는 최소 5-10% 이상의 인장, 굽힘, twisting 등의 다양한 변형을 견뎌야하기 때문에 흔히 탄성중합체 혹은 탄성체 (elastomer)라 불리는 재료를 기판으로서 사용한다. 특히 e-skin과 같이 피부에 적용할 경우, 피부의 탄성율은 약 75% 정도이다.^{54,55} 또한 신체 부착할 경우 무릎이나 팔꿈치의 변형률은 100% 정도이다. 따라서 피부 혹은 신체에 적용하기 위해서는 100% 이상의 변형률을 갖는 기판 소재의 개발이 필요하다. 탄성체의 범주에 포함되는 다양한 종류의 재료들 중 각각의 기계적, 전기적, 광학적 특성과 공정 적합성 등을 판단해 기판으로 적합한 재료가 선택되는데, 아직까지 기초 연구 수준에 머물고 있으나, 최근 다양한 소재들이 지속적으로 상용화되고 있다. 또한 화학적인 안정성(chemical inertness)도 중요한데 신축성 소자를 제작하는 과정에서 다양한 솔벤트 및 화학 약품이 사용되며, 이들 화학 용액에 소재가 손상을 입거나, 화학적인 반응을 하여 체적 팽창(volume expansion)이 발생할 수가 있다. 따라서 화학 용액에 대한 안정성이 매우 중요하다. 또한 인체친화적인 혹은 인체에 적합한 소재이어야 한다. 특히 인체에 적용되는 경우에는 우선적으로 고려되어야 할 항목이다.

신축성 전자소자에 사용되는 신축성 소재는 크게 폴리우레탄(polyurethane) 계열의 소재와 실리콘(silicone) 계열의 소재로 나눌 수 있다. 폴리우레탄 계열의 소재로는 다양한 물성을 갖는 폴리우레탄 소재와 Clearflex™ 30 (Smooth-On Inc.) 제품이 있다. 폴리우레탄 계열의 소재는 표면이 친수성(hydrophilic)인 특성이 있다. 실리콘 계열의 소재로는 PDMS, Ecoflex™ (Smooth-On Inc.) 및 Dragon Skin이 있다. 실리콘 계열의 소재는 주로 소수성(hydrophobic)인 경

우가 많다. 따라서 프린팅 등 표면 특성에 민감한 제조 공정에서 스트레처블 전극 소재 등의 표면 특성을 고려하여야 한다. 그렇지 않을 경우 기판과 전극 혹은 센서 소재와의 접착력(adhesion) 특성이 저하될 수 있다. PDMS 소재의 경우 표면이 $-OSi(CH_3)_2O-$ 그룹인 소수성을 나타내고 있다. 그러나 자외선(ultraviolet)이나 산소 플라즈마(oxygen plasma) 처리를 하게 되면 쉽게 친수성으로 변하는 특성이 있어서 프린팅 및 패터닝을 원활하게 할 수 있다.

신축성 기판으로 가장 많이 사용되는 것은 PDMS이다. PDMS는 투명성, 인체적합성 및 화학적 안정성이 우수하다. 또한 기계적 강도도 어느 정도 우수하여 약 1.8 MPa의 탄성계수를 갖고 있다. PDMS는 베이스 재료인 prepolymer와 경화제인 cross-linker를 조합하여 제조할 수 있으며, 베이스와 경화제의 양을 조절함으로써 다양한 강도를 갖는 PDMS 기판을 만들 수 있다. 특히 검증된 인체적합성으로 인하여 e-skin 분야에 다양하게 적용되고 있다. 그러나 PDMS의 신축성은 100% 이하로서 한정된 신축성을 갖는 단점이 있다. 또한 대부분의 점탄성(viscoelastic) 탄성체가 갖는 특성으로서 높은 변형률에서 히스테리시스(hysteresis) 및 비선형(nonlinear)의 기계적인 특성을 갖고 있다. 즉 변형이 증가할 때의 특성과 변형이 감소할 때의 특성이 다르거나, 외력이 제거되면 본래의 모습으로 돌아가야 하지만 그 변형한 상태로 유지된다. 이러한 특성으로 인하여 반복적인 하중 하에서 전극이나 센서의 기판으로 사용 시 성능의 불안정성을 초래한다. Jeong 등⁵⁶⁾의 결과에 의하면 PDMS의 비선형 특성은 베이스와 경화제의 비율에 따라 변할 수 있다고 보고되고 있다. 경화제의 양이 증가하면 비선형 및 히스테리시스 특성이 증가하며 이는 PDMS의 softening 현상 및 잔류 변형률에 기인한 것이다. 또한 베이스 소재의 양을 늘리게 되면 softening 현상이 감소하며 따라서 비선형성과 히스테리시스는 감소한다.

이러한 단점을 극복하기 위하여 최근 Ecoflex 및 poly(styrene-b-butadiene-b-styrene) (SBS) 소재 등을 이용한 신축성 전자소자의 연구가 진행되고 있다. 이들 소재는 매우 높은 신축성을 갖고 있으며, Ecoflex는 생분해성(biodegradability) 특성,⁵⁷⁾ 그리고 SBS는 높은 기계적 안정성⁵⁸⁾을 갖고 있다고 알려져 있다. Ecoflex는 Smooth-On 사의 Dragon Skin을 기반으로 한 탄성체로서 탄성계수 및 경도가 다른 4 종류의 소재가 있다. Ecoflex 소재는 platinum-catalyzed 실리콘 계열의 소재로서 탄성 계수가 10에서 120 KPa의 매우 부드러운 탄성체이다. 특히 인간 피부의 탄성 계수(20 KPa)와 매우 비슷한 값을 갖고 있고, 인간친화적인 물질로서 인간의 피부 및 몸에 부착할 수 있다는 장점이 있다. 또한 500% 이상, 크게는 800%의 변형에도 파괴가 발생하지 않는 ultra-stretchable 기판 소재로서 현재 다양한 연구가 진행 중에 있다. 그러나 Ecoflex 등은 투명한 기판이 아니기 때문에 이에 대한 보완이 필요하다. 따라서 궁극적으로는 투명성과 안정된 기계적인 강성을 갖는 소재의 개발이 향후 필요할 것으로 판단된다. 한편 폴리우레탄 및

폴리아크릴레이트(polyacrylate) 소재도 기판으로 많이 사용된다. 특히 열가소성 폴리우레탄(thermoplastic polyurethane, TPU)은 투명하고, 내마모성이 우수하여 직물 기반의 웨어러블 소자에 적용하기에 유리하다. 또한 높은 표면 에너지를 갖고 있어 기판과 전도성 소재 혹은 센서 소재와의 접착력도 우수하다. 따라서 표면에너지를 높이기 위한 추가적인 표면 처리가 없어도 쉽게 적용할 수 있는 장점이 있다.⁵⁹⁾

최근에는 e-skin 및 인체 및 신체에 적용하기 위한 소재 특히 인체의 피부를 모방할 수 있는 소재의 개발도 활발히 진행되고 있다. 인체 피부는 특이한 특성을 지니고 있는데, 낮은 변형률에서는 매우 높은 신축성을 보여주나, 변형률이 증가하면 (통상적으로 30% 이상의 변형률) 피부의 탄성 한계가 급격히 증가하여 파괴를 방지하는 특성이 있으며, 이를 self-limiting 특성이라고 한다.⁶⁰⁾ 따라서 인체 피부와 같은 소재를 개발하기 위해서는 강건성 뿐만이 아니라 self-limiting 특성이 있어야 한다. 최근 Hanif 등⁶¹⁾은 PDMS 기판에 압전 물질이며, 탄성계수가 높은 poly((vinylidene fluoride)-co-trifluoroethylene) (P-(VDF-TrFE)) 나노 파이버(nanofiber)를 filler로 사용하여 합성함으로써 인간의 피부와 유사한 기판을 개발하였다. 합성된 기판은 투명하며, 강도 조절이 가능하고, 또한 압전 물질인 P(VDFTrFE)로 인하여 피부처럼 압력과 온도를 측정할 수 있었다.

비록 신축성 기판 및 소재에 대한 많은 연구가 활발히 진행되고 있지만 아직 추가적인 개발이 더 필요하다. 우선 점탄성 특성을 갖는 탄성체의 특성이 갖는 히스테리시스 및 비선형성이 개선이 되어야 한다. 전자소자에 적용하기 위하여 기판에 요구되는 수분 및 산소 차단 특성이 개선되어야 하며, 특히 고온에 매우 취약하기 때문에 소자 제조 공정을 견디기 힘들다는 문제도 있다. 또한 신축이 되었을 때 신축성 전자 소자의 파괴가 주로 신축 방향에 수직인 횡 방향으로 진행되는 크랙에 의하여 발생함으로 기판의 포아송비(Poisson's ratio)가 적어야 한다. 또한 응용 분야에 따라서 투명성과 인체적합성이 더 향상되어야 한다. 특히 인간 피부와 같은 소재를 위해서는 더 낮은 탄성계수를 갖는 소재가 개발되어야 한다.

5. 결 론

현재 다양한 웨어러블 기기가 선을 보이고 있다. 향후 웨어러블 기기는 신체 및 의복에 자유롭게 부착할 수 있는 부착형, 인체 삽입형 등 다양한 형태로 진화될 전망이다. 이러한 웨어러블 기기의 핵심 기술 중의 하나가 신축성 전극이다. 신축성 전극은 센서, 능동 및 수동 소자 등 부품을 연결하면서 신축 시의 변형을 흡수할 수 있는 중요한 요소이다. 따라서 신축성 전극은 높은 신축성, 높은 전기전도도 및 내구성을 요구한다. 현재 다양한 형태 및 소재를 활용한 신축성 전극의 개발이 많이 진행되고 있지만, 신축성 전극의 개발은 아직 초기 단계에 있으며, 아직 내구성, 신축성 및 전

기전도도 면에서 부족한 것이 사실이다. 특히 신축 시에 발생하는 전기 저항의 증가를 피할 수 없는데 시스템 측면에서 어느 정도까지 허용될지 적용성 및 응용성 검토가 하루 빨리 이루어져야 한다고 여겨진다. 또한 사용하는 전도성 물질이 온도, 습도, 공기 등의 환경의 영향을 받는 경우, 환경의 변화에 의한 저항변화를 고려해야 한다. 또한 경제성 측면 및 공정성도 고려해야 한다. 즉 신축성 전극은 웨어러블 소자 및 스트레처블 전자 소자에 기본적으로 사용될 것임으로 가격적인 측면을 고려하지 않을 수 없다. 또한 공정이 가능한 간단하고 신뢰성이 있어야 한다. 그러나 현재의 연구 개발 속도를 고려하면 머지않아 상용화가 가능한 신축성 전극이 개발될 것으로 판단된다.

궁극적으로 신축성 전극을 이용하여 신축성 전자 소자를 제작할 경우 부품의 연결 및 패키지 기술이 매우 중요할 것이다. 서로 다른 재료의 조합의 특성상 더 많은 기계적인 물성의 불일치성으로 인하여 박리현상이나 파괴가 발생할 수 있으며, 소자의 성능에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서 신축성 전자소자의 상용화를 위해서는 부품의 연결 및 통합 기술과 패키지 기술의 개발이 우선적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

1. T.-S. Han, D.-K. Kim, O.-Y. Kwon, and S.-H. Choa, "Study of Standardization and Test Certification for Wearable Smart Devices", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 23(4), 11 (2016).
2. H. A. Oh, D. Park, K. S. Han, and T. S. Oh, "Elastic Modulus of Locally Stiffness-variant Polydimethylsiloxane Substrates for Stretchable Electronic Packaging Applications", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 22(4), 91 (2015).
3. S. Lee, J.-Y. Kwon, D. Yoon, H. Cho, J. You, Y. T. Kang, D. Choi, and W. Hwang, "Bendability optimization of flexible optical nanoelectronics via neutral axis engineering", *Nanoscale Res. Lett.*, 7, 256 (2012).
4. J. A. Rogers, "Materials for semiconductor devices that can bend, fold, twist, and stretch", *MRS Bull.*, 39(6), 549 (2014).
5. S. J. Benight, C. Wang, J. B. H. Tok, and Z. Bao, "Stretchable and self-healing polymers and devices for electronic skin", *Prog. Polym. Sci.*, 38(12), 1961 (2013).
6. W. Dang, V. Vinciguerra, L. Lorenzelli, and R. Dahiya, "Printable stretchable interconnects", *Flex. Print. Electron.*, 2(1), 013003 (2013).
7. T. Q. Trung and N.-E. Lee, "Materials and devices for transparent stretchable electronics", *J. Mater. Chem. C.*, 5, 2202 (2017).
8. N. Lu and D.-H. Kim, "Flexible and Stretchable Electronics Paving the Way for Soft Robotics", *SOFT ROBOT*, 1(1), 53 (2013).
9. Y. Liu, H. Wang, W. Zhao, M. Zhang, H. Qin, and Y. Xie, "Flexible, Stretchable Sensors for Wearable Health Monitoring: Sensing Mechanisms, Materials, Fabrication Strategies and Features", *Sensors*, 18(2), 645 (2018)
10. J. Nam, B. Seo, Y. Lee, D.-H. Kim, and S. Jo, "Cross-buckled structures for stretchable and compressible thin film silicon solar cells", *Sci. Rep.*, 7, 7575 (2017).
11. Y. Sun, V. Kumar, I. Adesida, and J. A. Rogers, "Buckled and Wavy Ribbons of GaAs for High-Performance Electronics on Elastomeric Substrates", *Adv. Mater.*, 18(21), 2857 (2006).
12. P. Gutruf, S. Walia, M. N. Ali, S. Sriram, and M. Bhaskaran, "Strain response of stretchable micro-electrodes: Controlling sensitivity with serpentine designs and encapsulation", *Appl. Phys. Lett.*, 104, 021908 (2014).
13. C. F. Guo, T. Sun, Q. Liu, Z. Suo, and Z. Ren, "Highly stretchable and transparent nanomesh electrodes made by grain boundary lithography", *Nat. Commun.*, 5, 3121 (2014).
14. H. Y. Jang, S.-K. Lee, S. H. Cho, J.-H. Ahn, and S. Park, "Fabrication of Metallic Nanomesh: Pt Nano-Mesh as a Proof of Concept for Stretchable and Transparent Electrodes", *Chem. Mater.*, 25(17), 3535 (2013).
15. A. C. C. Sepulveda, M. S. D. Cordero, A. A. A. Carreño, J. M. Nassar, and M. M. Hussain, "Stretchable and foldable silicon-based electronics", *Appl. Phys. Lett.*, 110(13), 134103 (2017).
16. H.-B. Lee, C.-W. Bae, L. T. Duy, I.-Y. Sohn, D.-I. Kim, Y.-J. Song, Y.-J. Kim, and N.-E. Lee, "Mogul-Patterned Elastomeric Substrate for Stretchable Electronics", *Adv. Mater.*, 28(16), 3069 (2016).
17. G. S. Jeong, D. H. Baek, H. C. Jung, J. H. Song, J. H. Moon, S. W. Hong, I. Y. Kim, and S. H. Lee, "Solderable and electroplatable flexible electronic circuit on a porous stretchable elastomer", *Nat. Commun.*, 3, 977 (2012).
18. Y. Yu, J. Zeng, C. Chen, Z. Xie, R. Guo, Z. Liu, X. Zhou, Y. Yang, and Z. Zheng, "Three-Dimensional Compressible and Stretchable Conductive Composites", *Adv. Mater.*, 26(5), 810 (2014).
19. X. Wang, H. Hu, Y. Shen, X. Zhou, and Z. Zheng, "Stretchable Conductors with Ultrahigh Tensile Strain and Stable Metallic Conductance Enabled by Prestrained Polyelectrolyte Nanoplateforms", *Adv. Mater.*, 23(27), 3090 (2011).
20. S. Kumar, J. Y. Murthy, and M. A. Alam, "Percolating conduction in finite nanotube networks", *Phys. Rev. Lett.*, 95(6), 066802 (2005).
21. W. S. Bao, S. A. Meguid, Z. H. Zhu, and G. J. Weng, "Tunneling resistance and its effect on the electrical conductivity of carbon nanotube nanocomposites", *J. Appl. Phys.*, 111(9), 93726 (2012).
22. X. D. Wu, Y. Y. Han, X. X. Zhang, Z. H. Zhou, and C. H. Lu, "Large-Area Compliant, Low-Cost, and Versatile Pressure Sensing Platform Based on Microcrack-Designed Carbon Black@Polyurethane Sponge for Human-Machine Interfacing", *Adv. Funct. Mater.*, 26(34), 6246 (2016).
23. Y. Zhang, C. J. Sheehan, J. Zhai, G. Zou, H. Luo, J. Xiong, Y. Zhu, and Q. Jia, "Polymer-Embedded Carbon Nanotube Ribbons for Stretchable Conductors", *Adv. Mater.*, 22(28), 3027 (2010).
24. C. Y. Yan, J. X. Wang, W. B. Kang, M. Q. Cui, X. Wang, C. Y. Foo, K. J. Chee, and P. S. Lee, "Highly Stretchable Piezoresistive Graphene-Nanocellulose Nanopaper for Strain Sensors", *Adv. Mater.*, 26(13), 2017 (2014).

25. W. L. Hu, R. R. Wang, Y. F. Lu, and Q. B. Pei, "An Elastomeric Transparent Composite Electrode Based on Copper Nanowires and Polyurethane", *J. Mater. Chem. C.*, 2(7), 1298 (2014).
26. S. Lee, S. Shin, S. Lee, J. Seo, J. Lee, S. Son, H. J. Cho, H. Algadi, S. Al-Sayari, D. E. Kim, and T. Lee, "Ag Nanowire Reinforced Highly Stretchable Conductive Fibers for Wearable Electronics", *Adv. Funct. Mater.*, 25(21), 3114 (2015).
27. N. Matsuhisa, M. Kaltenbrunner, T. Yokota, H. Jinno, K. Kuribara, T. Sekitani, and T. Someya, "Printable elastic conductors with a high conductivity for electronic textile applications", *Nat. Commun.*, 6, 7461 (2015).
28. Y. Wen, and J. Xu, "Scientific Importance of Water-Processable PEDOT-PSS and Preparation, Challenge and New Application in Sensors of Its Film Electrode: A Review", *J. Polym. Sci. Part Polym. Chem.*, 55(7), 1121 (2017).
29. S. Kim, J. Lee, and B. Choi, "Stretching and twisting sensing with liquid-metal strain gauges printed on silicone elastomers", *IEEE Sens. J.*, 15(11), 6077 (2015).
30. L. Li, S. Jiang, P. B. Shull, and G. Gu, "SkinGest: artificial skin for gesture recognition via filmy stretchable strain sensors", *Adv. Robot.*, 32(21), 1112, (2018).
31. J. J. Park, W. J. Hyun, S. C. Mun, Y. T. Park, and O. O. Park, "Highly stretchable and wearable graphene strain sensors with controllable sensitivity for human motion monitoring", *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 7(11), 6317 (2015).
32. S. Wu, S. Peng, Z. J. Han, H. Zhu, and C. H. Wang, "Ultra-sensitive and Stretchable Strain Sensors Based on Mazelike Vertical Graphene Network", *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 10(42), 36312 (2018).
33. J. Kim, S. W. Lee, M. H. Kim, and O. O. Park, "Zigzag-Shaped Silver Nanoplates: Synthesis via Ostwald Ripening and Their Application in Highly Sensitive Strain Sensors", *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 10(45), 39134 (2018).
34. X. Wang, J. Li, H. Song, H. Huang, and J. Gou, "Highly Stretchable and Wearable Strain Sensor Based on Printable Carbon Nanotube Layers/Polydimethylsiloxane Composites with Adjustable Sensitivity", *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 10(8), 7371 (2018).
35. J. J. Park, W. J. Hyun, S. C. Mun, Y. T. Park, and O. O. Park, "Highly Stretchable and Wearable Graphene Strain Sensors with Controllable Sensitivity for Human Motion Monitoring", *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 7(11), 6317 (2015).
36. Y. Heo, Y. Hwang, H. S. Jung, S. H. Choa, and H. C. Ko, "Secondary Sensitivity Control of Silver-Nanowire-Based Resistive-Type Strain Sensors by Geometric Modulation of the Elastomer Substrate", *Small*, 13(23), 1700070 (2017).
37. D. Cho, J. Park, J. Kim, T. Kim, J. Kim, I. Park, and S. W. Jeon, "Three-Dimensional Continuous Conductive Nanostructure for Highly Sensitive and Stretchable Strain Sensor", *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 9(20), 17369 (2017).
38. M. S. Kim, D. Kwon, S. Kim, K. Kim, and I. Park, "Surface Micro-Structured Stretchable Strain Sensor toward Biaxial Sensitivity and Performance Enhancement", *Proc. 30th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Las Vegas*, 1044, IEEE (2017).
39. Y. Hu, T. Zhao, P. Zhu, Y. Zhang, X. Liang, R. Sun, and C. Wong, "A low-cost, printable, and stretchable strain sensor based on highly conductive elastic composites with tunable sensitivity for human motion monitoring", *Nano Res.*, 11(4), 1938 (2018).
40. S. K. Hong, S. Yang, S. J. Cho, H. Jeon, and G. Lim, "Development of a Waterproof Crack-Based Stretchable Strain Sensor Based on PDMS Shielding", *Macromol. Mater. Eng.*, 18(4), 1700389 (2018).
41. M. Xu, J. Qi, F. Li, and Y. Zhang, "Highly Stretchable Strain Sensors with Reduced Graphene Oxide Sensing Liquids for Wearable Electronics", *Nanoscale*, 10, 5264 (2018).
42. S. A. Khan, M. Gao, Y. Zhu, Z. Yan, and Y. Lin, "MWCNTs based flexible and stretchable strain sensors", *J. Semicond.*, 38(5), 053003 (2017).
43. H. Park, D. S. Kim, S. Y. Hong, C. Kim, J. Y. Yun, S. Y. Oh, S. W. Jin, Y. R. Jeong, G. T. Kim, and J. S. Ha, "A skin-integrated transparent and stretchable strain sensor with interactive color-changing electrochromic displays", *Nanoscale*, 9(22), 7631 (2017).
44. X. Guo, Y. Huang, Y. Zhao, L. Mao, L. Gao, W. Pan, Y. Zhang, and P. Liu, "Highly stretchable strain sensor based on SWCNTs/CB synergistic conductive network for wearable human-activity monitoring and recognition", *Smart Mater. Struct.* 26(9), 095017 (2017).
45. Y. Huang, Y. Zhao, Y. Wang, X. Guo, Y. Zhang, P. Liu, C. Liu, and Y. Zhang, "Highly stretchable strain sensor based on polyurethane substrate using hydrogen bond-assisted laminated structure for monitoring of tiny human motions", *Smart Mater. Struct.*, 27(3), 035013 (2018).
46. W. Tang, T. Yan, J. Ping, J. Wu, and Y. Ying, "Rapid Fabrication of Flexible and Stretchable Strain Sensor by Chitosan-Based Water Ink for Plants Growth Monitoring", *Adv. Mater. Technol.*, 2(7), 17000219 (2017).
47. H. Jeon, S. K. Hong, M. S. Kim, S. J. Cho, and G. Lim, "Omni-Purpose Stretchable Strain Sensor Based on a Highly Dense Nanocracking Structure for Whole-Body Motion Monitoring", *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 9(48), 41712 (2017).
48. Q. Zhang, L. Liu, D. Zhao, Q. Duan, J. Ji, A. Jian, W. Zhang, and S. Sang, "Highly Sensitive and Stretchable Strain Sensor Based on Ag@CNTs", *Nanomaterials*, 7(12), 424 (2017).
49. I. Kim, K. Woo, Z. Zhong, P. Ko, Y. Jang, M. Jung, J. Jo, S. Kwon, S. H. Lee, S. Lee, H. Youn, and J. Moon, "A photonic sintering derived Ag flake/nanoparticle-based highly sensitive stretchable strain sensor for human motion monitoring", *Nanoscale*, 10(17), 7890 (2018).
50. Q. Guo, Y. Luo, J. Liu, X. Zhang, and C. Lu, "A well-organized graphene nanostructure for versatile strain-sensing application constructed by a covalently bonded graphene/rubber interface", *J. Mater. Chem. C.*, 6(8), 2139 (2018).
51. X. Shi, S. Liu, Y. Sun, J. Liang, and Y. Chen, "Lowering Internal Friction of 0D-1D-2D Ternary Nanocomposite-Based Strain Sensor by Fullerene to Boost the Sensing Performance", *Adv. Funct. Mater.*, 28(22), 1800850 (2018).
52. M. Amjadi, A. Pichitpajongkit, S. Lee, S. Ryu, and I. Park, "Highly stretchable and sensitive strain sensor based on silver nanowire-elastomer nanocomposite", *ACS Nano*, 8(5), 5154 (2014).
53. Y. He, S. Liao, H. Jia, Y. Cao, Z. Wang, and Y. Wang, "A Self-Healing Electronic Sensor Based on Thermal-Sensitive Fluids", *Adv. Mater.* 27(31), 4622 (2015).
54. A. Chortos, J. Liu, and Z. Bao, "Pursuing prosthetic electronic skin", *Nat. Mater.*, 15, 937 (2016).
55. D. Qi, Z. Liu, W. R. Leow, and X. Chen, "Elastic substrates

- for stretchable devices”, MRS Bull., 42(2), 103 (2017).
56. T. K. Kim, J. K. Kim, and O. C. Jeong, “Measurement of non-linear mechanical properties of PDMS elastomer”, Microelectron. Eng., 88(8), 1982 (2011).
57. M. Irimia-Vladu, P. A. Troshin, M. Reisinger, G. Schwabegger, M. Ullah, R. Schwoediauer, A. Mumyatov, M. Bodea, J. W. Fergus, V. F. Razumov, H. Sitter, S. Bauer, and N. S. Sariciftci, “Environmentally sustainable organic field effect transistors”, Org. Electron., 11(12), 1974 (2010).
58. M. Shin, J. H. Song, G. H. Lim, B. Lim, J. J. Park, and U. Jeong, “Highly stretchable polymer transistors consisting entirely of stretchable device components”, Adv. Mater., 26(22), 3706 (2014).
59. F. Long, X. D. Zhang, T. Björninen, and J. Virkki, “Implementation and wireless readout of passive UHF RFID strain sensor tags based on electro-textile antennas”, Proc. 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Lisbon, 2164, IEEE (2015).
60. A. Kalra, A. Lowe, A. M. Al-Jumaily, “Mechanical Behaviour of Skin: A Review”, J. Mater. Sci. Eng., 5, 2169 (2016).
61. A. Hanif, T. Q. Trung, S. Siddiqui, P. T. Toi, and N. E. Lee, “Stretchable, Transparent, Tough, Ultrathin, and Self-limiting Skinlike Substrate for Stretchable Electronics”, ACS Appl. Mater. Interfaces., 10(32), 27297 (2018).



- 좌성훈(左聖薰)
- 서울과학기술대학교 NID융합대학원
- MEMS, Flexible electronic device, Semiconductor packaging & reliability
- E-mail: shchoa@seoultech.ac.kr



- 박진영(朴鎭永)
- 서울과학기술대학교 NID융합대학원
- MEMS, packaging, flexible device mechanical and thermal simulation
- E-mail: jpark0825@gmail.com



- 이원재(李元載)
- 서울과학기술대학교 NID융합대학원
- MEMS, packaging, flexible device mechanical and thermal simulation
- E-mail: leewj1206@naver.com



- 남현진(南賢眞)
- 서울과학기술대학교 스마트생산융합공학
- Conductive paste, screen printing, printing electrode, polymer
- E-mail: hjnam1203@naver.com