

산학연 연구실 소개(2)

한국과학기술연구원 소프트융합소재연구센터 K-lab: 신축성 에너지/전자 소자 연구팀 (Stretchable Energy/Electronic Devices Lab., KIST)

주소: 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5, 한국과학기술연구원 소프트융합소재연구센터 L4343 (우: 02792)

전화: 02-958-5317

E-mail: jgson@kist.re.kr, Homepage: <http://nanohybrid.kist.re.kr/>



연구책임자 | **손정곤** 박사
한국과학기술연구원
소프트융합소재연구센터

1. 연구실 소개

한국과학기술연구원에서는 지속가능한 미래 사회 구현을 위하여 차세대 고분자 기반 나노하이브리드 소재 및 친환경 기능성 복합소재, 그리고 소프트 특성을 지닌 미래형 소자 개발에 집중하기 위해, 전신이었던 광전하이브리드연구센터를 기반으로 2020년에 소프트융합소재연구센터를 새롭게 설립하였다. 소프트융합소재연구센터는 기능화 발현을 위한 고분자 및 다양한 소재의 물리화학적 융합을 바탕으로 다차원 나노하이브리드 소재 및 프로그래밍 가능한 스마트 고분자, 그리고 친환경 기능성 복합소재를 개발하고, 이를 활용하여 다양한 기계적 변형에 대응하는 미래형 전자/에너지 소자를 개발하는 연구를 수행하고 있다. 특히, 자극감응형 스마트 고분자 소재, 분해 가능한 친환경 고분자 및 순환형 복합소재와 함께 자유롭게 변형 가능한 고성능 에너지 하베스팅 및 저장 소자, 그리고 다양한 기능을 포함한 소프트 전자소자 연구 개발을 함께 수행해 오고 있다.

본 신축성 에너지/전자 소자 연구팀은 2021년 9월부터 KIST 내 우수한 연구팀에게 수여하는 K-lab 육성 프로그램을 통해 소프트융합소재연구센터 내 만들어진 연구팀으로, 손정곤 박사를 팀 리더로, 이상수 박사, 김희숙 박사, 박종혁 박사, 정승준 박사, 김태안 박사를 구성원으로, 복합 소재 기술을 기반으로 다양한 기계적 변형에도 다양한 신호나 전자, 에너지 전달 특성의 변화를 최소화할 수 있는 전자/에너지 소자를 개발하는 연구를 선도하는 연구팀으로 발돋움하고자 한다. 특히, 본 연구팀이 지향하는 자유형상 소프트 시스템은 임의의 형상을 가지는 사물간의 빈틈없는 인터페이스를 가능하게 하여 기존의 단단한 전자기기로는 접근할 수 없었던 다양한 정보를 높은 신뢰도로 획득, 처리하고 공유함으로써, 만물인터넷(Internet of Everything)의 구현을 가속화할 것으로 기대하고 있다. 본 연구팀의 주요 연구 분야는 다음과 같다.

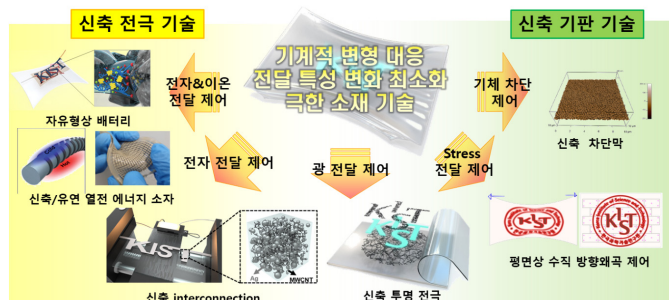


그림 1. 신축성 에너지/전자 소자 연구팀의 주요 연구분야.

2. 주요 연구 분야

2.1 인쇄 가능하며, 신축 안정성 및 접착력이 극대화된 신축 전극 배선 기술

신축성 전자 장치의 핵심은 액티브 소자의 고유 신축성을 떠나 각각의 단위 소자를 전기적으로 연결하는 전기 배선의 신축 안정성 확보에 있다. 기존에 연구되고 있는 전기 배선의 신축성 부여 방법은, 액체 금속, 탄소 나노 소재 등의 소재적 접근과 사전 인장을 통한 주름 구조나 계층화된 서펜틴 구조, 3차원 헬리컬 구조 등의 구조적 접근으로 나눌 수 있다. 신축성 배선의 경우, 단위 소자와의 연결을 위해 신축 전도성을 가지면서도 접착 특성이 매우 중요하나, 신축성 기관과의 접착력에 한계가 있어 기관으로부터 쉽게 분리되는 문제가 있다. 본 연구팀의 김희숙 박사는 신축성 물질과의 접착력이 뛰어나 기존의 접착제를 대신할 수 있으면서도 배선 또는 전극 물질로도 활용 가능한, 신축 시 저항 변화가 최소화된 고안정성을 가지고 인쇄가 가능한 잉크 타입의 전도성 신축 접착 소재를 개발한 바 있다. 특히, 신축성 탄소 고분자와 금속 전도성 필러의 모양(입자, 플레이크 및 나노와이어) 및 크기, 분율에 따라 신축 복합소재의 전도성 및 기계 안정성의 최적화 기술을 확보하고 있으며, 이를 인쇄 공정을 통해 신축성 소자의 배선으로 적용하는 기술을 보유하여, 이를 다양한 소자의 신축성 부여를 위한 배선으로 적용하는 연구를 수행 중에 있다.

2.2 고전도성 및 고투명성에 신축/장기 안정성까지 확보한 신축 투명 전극 기술

신축성 배선 소재 이외에도 신축 디스플레이나 신축 태양 전지, 심미성의 웨어러블 기기 등의 개발에 필수적인 투명성을 가지는 신축성 전극 소재 기술 개발에 대한 필요성

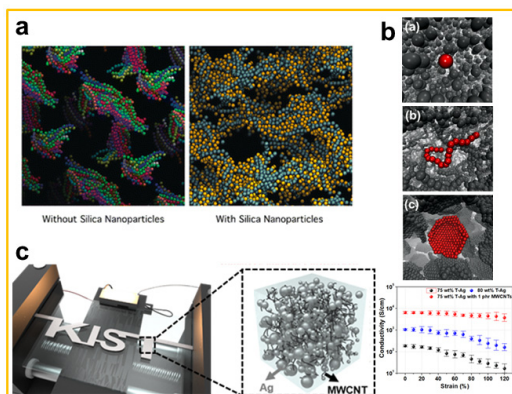


그림 2. (a) 비전도성 필러의 유무에 따른 금속 나노와이어 복합체 구조의 퍼콜레이션과 전도 특성 변화에 대한 연구, *ACS Nano*, **7**, 851 (2013). (b) 전도성 필러의 다면성과 유연성의 변화에 따른 퍼콜레이션 및 전기 전도성 변화에 대한 연구, *Phys. Rev. E*, **93**, 032501 (2016). (c) 인쇄 가능한 배선 소재로서 우수한 전기적 안정성을 가진 신축성 있는 전도성 접착제 개발 연구, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **11**, 37043 (2019).

이 크게 대두되고 있다. 신축성 투명 전극은 전도성 고분자나 탄소 소재, 금속 나노와이어 네트워크 등을 통해 연구되고 있지만, 투명 전도성 소재의 단단하면서도 쉽게 끊어지는 기계적 특성 때문에 투명도와 고전도도를 동시에 확보하기가 매우 어렵다. 본 연구팀의 이상수 박사, 박종혁 박사와 손정곤 박사는 용매와 접촉되어 있는 상황에서 금속 나노와이어 네트워크의 압축 공정을 진행하여, 기존 기관의 사전 인장을 진행하는 경우 나노와이어에 불균일한 스트레스를 전달하게 되고 스트레스가 집중되는 곳의 나노 와이어가 수회의 반복 인장에 끊어지는 문제를 해결하였다. 용매를 접촉하면 금속 나노와이어 네트워크의 접점의 고분자 체인이 팽윤되어 압축 공정에서 나노와이어가 서로 미끄러질 수 있어, 상대적으로 나노와이어 전체에 균일한 스트레스의 전달이 이루어지며, 상대적으로 큰 곡률반경으로 휘어 있는 금속 나노와이어 네트워크를 구현할 수 있다. 큰 곡률반경으로 휘어있는 나노와이어 네트워크는 매우 낮은 나노와이어 밀도에서도 높은 전도도와 신축 안정성을 확보할 수 있어, 90% 이상의 고투명도에서 30 Ω/□ 이하의 면저항(고전기 전도도), 50% 반복 인장을 1,000 회 반복 시에도 저항 변화가 거의 없는 신축 안정성을 동시에 확보할 수 있는 이상적인 신축 투명 전극 구조라고 말할 수 있다. 본 연구팀은 이러한 신축성 투명 전극을 신축 투명 디스플레이의 투명 전극으로

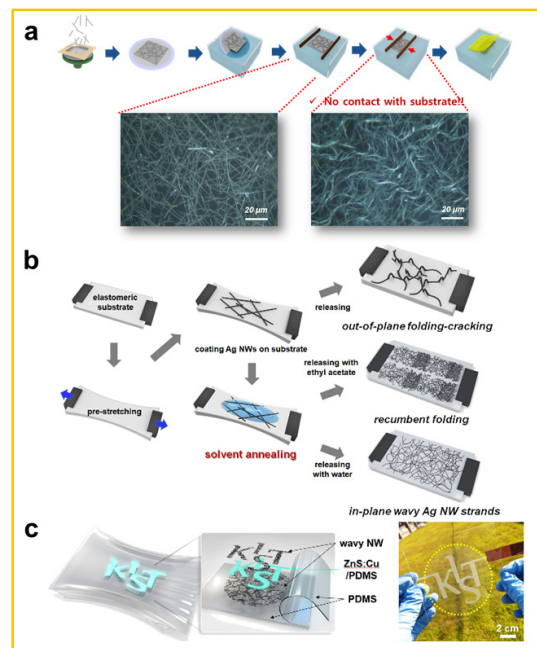


그림 3. (a) 은 나노와이어 네트워크를 물 위에 띄우고 압축 공정을 통해 형성한 큰 곡률반경으로 휘어있는 은 나노와이어 네트워크와 이를 바탕으로 한 신축성 투명 전극, *Nanoscale*, **7**, 16434 (2015). *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **8**, 2582 (2016). *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **9**, 10865 (2017). (b) 사전 인장 이후에 나노와이어 네트워크의 용매 접촉을 통해 유연화하는 공정을 통해 이후 인장을 해소하여 큰 곡률반경의 휘어있는 나노와이어 네트워크를 제작하는 공정. (c) 이를 바탕으로 하는 신축성 투명 전극과 이를 신축성 투명 발광 소자로 적용한 예, *Adv. Funct. Mater.*, **30**, 1910214 (2020).

적용하는 연구를 ZnS:Cu 입자를 함유하는 alternating current electroluminescence(ACEL)를 통해 보여주었고, 현재는 신축성 태양 전지의 투명 전극으로 적용하는 연구를 수행하고 있다.

2.3 신축성을 가지는 에너지 저장 시스템 개발

에너지 저장 장치가 신축 변형이 가능하다면, 전자 기기도 프리폼 형태의 색다른 차원의 전자 기기를 구현하는 에너지원으로 사용될 수 있다. 하지만, 배터리로 대표되는 에너지 저장 장치는 전하집전체, 음극, 양극, 전해질, 분리막에 패키징까지 많은 컴포넌트들을 포함하고 있으며 충방전에 따라 전극의 부피가 변하고 실제적인 이온이라는 물질 전달까지 원활해야 하므로 신축 안정성을 확보하기가 매우 어렵다. 기존의 신축성 에너지 저장 장치 연구는 신축성을 부여하기 위하여 주로 많은 양의 비전도성 엘라스토머를 투입하여 전극의 신축성을 신축성 소재에 의존하는 형태로 진행되어 왔다. 하지만, 비활성 소재의 비율이 커짐에 따라 배터리의 부피/질량 당 에너지 밀도가 낮아지고, 전극 내 전자/이온 전달이 방해되므로 저장 장치로서의 본질적인 에너지 저장 성능이 크게 낮아지는 한계를 가진다.

본 연구진의 손정곤 박사는 이를 해결하기 위해, 에너지 저장 활성 전극 소재로만 이루어진 2차원의 안쪽으로 굽어진 마이크로-벌집모양 셀룰러 구조체를 고안하고 이를 신

축성 에너지 전극의 플랫폼으로 사용하였다. 특히, 그래핀과 CNT만을 이용하여 신축성 슈퍼커패시터 전극을 제작하고 젤 전해질과 함께 셀을 조립하여, 늘어나지 않는 기존의 슈퍼커패시터와 비슷한 수준의 높은 용량과 에너지 저장 밀도를 가지면서도 50% 이상의 인장시와 1,000 회 이상의 반복 인장에서도 성능 저하가 거의 없는 기계적 안정성을 보여주었다. 더 나아가, 안쪽으로 굽어진 벌집 구조체를 리튬이온 배터리의 활물질인 LTO, LFP와 그래핀/CNT를 복합화하여 제작함으로써 전극 소재만으로 신축성을 가지는 리튬이온 배터리 전극을 제작하고 이를 유기 젤 전해질과 신축성 봉지 필름과 함께 조립하여 신축성 리튬이온 배터리를 제작하였다. 이 신축성 리튬이온 배터리는 고전압의 유기계 전해질을 사용함으로써 기존 리튬이온 배터리와 에너지 저장 성능은 유사하면서도 50% 수준의 신축 안정성과 공기중에서의 장기안정성까지 확보하였다. 최근에는 고유 신축성을 가지는 신축성 리튬이온 배터리 전극과 위의 복합체 기반의 배선 기술을 이용한 신축 집전체 및 고체 젤 전해질등을 모두 인쇄하는 공정을 통해 다양한 형태의 신축성 자유형상 배터리의 프로토타입을 개발하고 장기안정성까지 확보하여 실제로 적용가능한 신축성 자유형상 배터리 기술을 개발하는 연구를 수행하고 있다.

2.4 신축성/자유형상 열전 에너지 소자 개발

다양한 정보를 높은 신뢰도로 획득할 수 있는 자유형상 소프트 시스템이 개발되더라도 전원공급을 위해 유선의 공급장치나, 단단한 배터리를 사용하게 된다면 편의성이 크게 떨어지고 타겟에 영구적 부착이 어렵다. 최근 별도의 전원 없이 자가발전 시스템 구현을 위해, 지속적으로 생성되

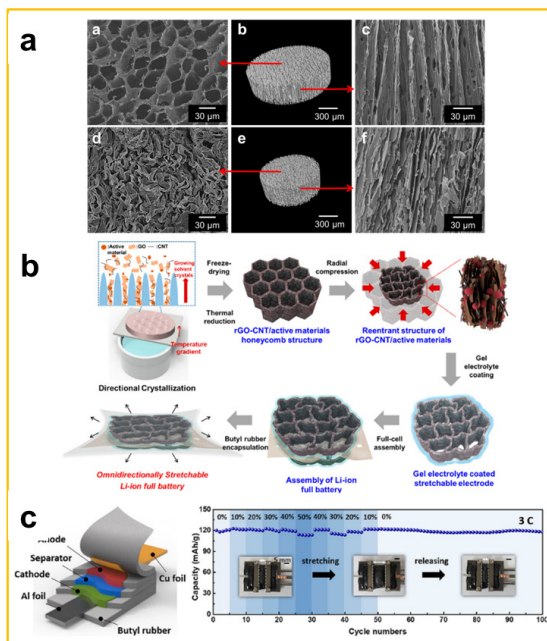


그림 4. (a) Directional freezing을 통해 구현한 그래핀/CNT의 벌집모양 마이크로 2D 셀룰러 구조와 이를 방사형 압축 공정을 통해 제작한 안쪽으로 굽어있는 2D 셀룰러 구조를 가지는 신축/전도성 슈퍼커패시터 전극, *Nanoscale*, **9**, 13272 (2017). (b) 안쪽으로 굽어있는 2D 셀룰러 구조를 가지는 그래핀/CNT/활물질 입자 복합체 전극과 이를 이용한 신축 리튬이온 배터리 셀의 제조 모식도. (c) 이를 통해 제작한 신축 리튬이온 배터리의 신축시의 성능 변화, 반복인장시 성능 변화 및 장기안정성 테스트 결과 및 신축시에도 LED 소자 작동이 가능함을 보여주는 사진, *ACS Nano*, **14**, 3660 (2020).

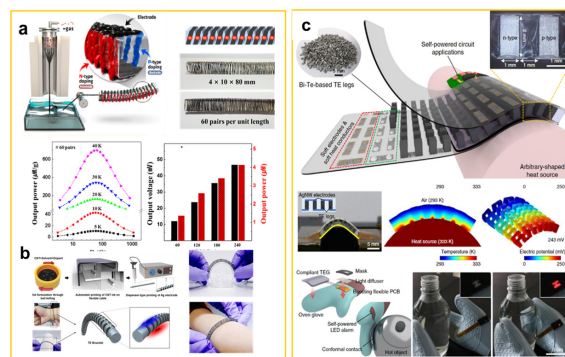


그림 5. (a) 고품질의 단일/이중벽 탄소나노튜브 yarn 제조, 이를 팔찌 형태로 제작하고 n-,p-형 도핑을 번갈아 진행하여 높은 열에너지 변환 효율을 확보하는 유연 열전 소자를 제작하는 공정에 대한 모식도, *ACS Nano*, **11**, 7608 (2017). (b) CNT ink 기반의 인쇄공정과 도핑 공정 최적화를 통해 집적화가 극대화된 유연 열전 소자를 제작한 모식도와 실제 소자의 사진, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **13**, 6257 (2021). (c) 비스무스 텔루라이드(Bi_2Te_3) 레그를 신축성 플랫폼 내에 최적화된 폼팩터로 집적화하고 신축성 배선과 열전도도를 최적화한 구조를 구현하여 곡면 열원에도 최고수준의 에너지 수득이 가능한 신축 열전 소자에 대한 모식도와 실제로 곡면 열원에서 구동 가능한 열 센서에 대한 사진, *Nat. Commun.*, **11**, 5948 (2020).

는 열에너지를(예. 체온) 이용하여 안정적인 전기에너지를 만들 수 있는 유연 열전소자 시스템을 자가발전 웨어러블 시스템에 적용하려는 시도가 많이 발표되고 있다. 하지만 기존의 유연 열전소자는 비스무스 텔루라이드(Bi_2Te_3)와 같은 무기 열전재료를 전극으로 연결한 후 빈 공간을 탄성 중합체로 채우는 방식으로 제작하며, 고강성의 재료들로 인해 매우 제한적인 유연성을 보여준다. 따라서 임의의 형상을 가지는 3차원 열원에 완벽히 붙어 높은 열에너지를 전달 받아 동작하기 위해서는 고무 수준으로 낮은 모듈러스를 갖는 고유 신축성의 고성능 열전재료 개발과 높은 집적도를 가지는 열전소자 공정 기술 개발이 요구된다.

본 연구팀의 김희숙 박사는 반도체 특성과 높은 전기전도도를 가지는 이중벽/단일벽 탄소나노튜브를 꼬아 만든 CNT 실에 주목하여 이를 팔찌 형태의 형상으로 제작하고 각각의 면에 N형과 P형 도핑 공정을 통해 매우 높은 열전 성능을 가지는 팔찌 형태의 유연 열전 소자를 제작하였다. 또한, CNT ink의 최적화된 도핑 공정과 정밀한 인쇄 공정을 통해 팔찌 형태의 유연 열전 소자의 집적도를 극대화 했으며, 이를 통해 에너지 변환 특성의 극대화를 구현할 수 있었다. 본 연구팀의 정승준 박사와 김희숙 박사의 협업을 통해, 비스무스 텔루라이드 레그를 신축성 플랫폼 내에 최적화된 폼팩터로 집적화하고 신축성 배선과 열전도도를 최적화한 구조를 도입함으로써 실제적으로 곡면 형상이나 피부등의 열원에 컨포멀하게 부착하여 높은 효율로 에너지를 수득할 수 있는 신축 열전 소자를 제작하였다. 특히, 이 신축성 열전 소자를 실제적으로 사용하여 곡면 열원에서 온도차를 통해 에너지를 수득하여 온도 센서가 구동되는 모습을 실증하였

다. 최근에는, 자기조립이 가능한 소프트 열전소재 개발, 자기장 기반 자기조립을 이용한 대면적 고유 신축성 열전소자의 개발, 체온과 같은 저온에서도 발전이 가능한 전력관리 회로설계 등이 있으며, 이를 신축 에너지 저장 소자와 집적화하는 연구를 진행하고 있다.

2.5 특정 방향 인장시 수직 방향의 변형(푸아송 비) 제어 가능한 신축 기반 기술

신축성 기반은 탄성 소재 고유의 포아송비(~ 0.5)로 인해 기계적 변형 하에서(예. 1축 방향으로의 연신) 변형의 수직 방향에 대해 원치 않는 수축이 일어나게 된다. 이러한 포아송비의 영향으로 인해 신축성 소자의 구동 안정성 및 신뢰성이 저하되고 디스플레이용 기관의 경우 화면의 왜곡이 일어나기 때문에, 가변형 자유형상 디바이스 플랫폼으로 신축성 기관이 사용되기 위해서는 포아송비를 제어하는 기술이 반드시 요구된다. 일반적인 탄성 소재로 제작된 신축 기관에 음의 포아송비를 가지는 기계적 메타물질(=오그제틱(auxetic) 구조체)을 삽입하거나 기계적인 이방성 특성을 도입하여 기존의 양의 값을 가지는 포아송비를 '0'에 가깝게 만들 수 있다. 본 연구팀의 정승준 박사는 신축성 기관에 주기적으로 딱딱한 구조물을 삽입하여 변형에 민감한 소자도 함께 집적할 수 있는 신축성 전자 소자의 기관 플랫폼을 개발한 바 있으며, 시뮬레이션을 통한 기계적 메타물질 구조체-탄성소재기관 간의 기계적 거동 예측 플랫폼을 제작하고 기계적 메타물질 구조를 최적화하여 30% 이상 연신이 가능하면서도 2축 방향의 변형률은 이론값 1/5 이하를 가지는 신축성 기관을 구현하였다. 손정곤 박사는 신축성 기관으로 기계적 이방성 소재를 제시하여 수직방향 수축이 거의 일어나지 않으면서도 투명하며 수분차단 특성까지 확보할 수 있는 기술들을 개발하였다. 이를 통해 본 연구팀은, 다수의 특허를 출원, 등록하였으며, 실제적 기관으로 적용하기 위한 연구를 계속 수행중에 있다.

3. 연구실 현황 및 비전

50년 이상의 KIST 역사와 함께해 온 고분자 복합 연구실은 현재 첨단소재기술연구본부 내 소프트융합연구센터에서 그 역사를 계속해서 써오고 있다. 특히, KIST 내 우수한 연구팀에게 수여하는 K-lab 육성 프로그램을 통해 만들어진 '신축성 에너지/전자 소자 연구팀'은 6명의 PI가 한 팀으로 8명의 postdoc과 30명의 학생과 연구원들과 함께 연구를 진행해 오고 있다. 본 연구팀이 오래도록 수행해 왔던 복합 소재 기술을 기반으로, 다양한 기계적 변형에도 다양한 신호나 전자, 에너지 전달 특성의 변화를 최소화할 수 있는 플랫폼에 대한 전문성을 확보하고, 이를 바탕으로 한 차세대 자유형상의 소프트 전자/에너지 소자를 개발하는 연구를 세계적으로 선도하는 연구팀으로 나아가고자 한다.

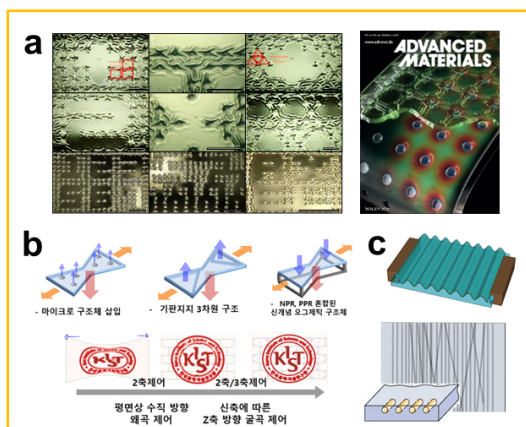


그림 6. (a) 신축성 기관에 주기적으로 딱딱한 구조물을 삽입하여 변형에 민감한 소자도 함께 집적할 수 있는 신축성 전자 소자의 기관 플랫폼의 사진 및 모식도, *Adv. Mater.*, **30**, 1802290 (2018). (b) 오그제틱 구조체와 기관을 지지하는 3차원 구조체를 삽입하여 평면상 수직 방향의 왜곡 제어와 함께 z축 방향의 굴곡까지 제어하는 신개념 오그제틱 구조체에 대한 모식도, 한국 특허 등록: 10-2020-0160346, 10-2020-0160349, 10-2020-0160360, 10-2020-0160365. (c) 단방향 주름이나 배향 구조체를 통해 구현한 기계적 이방성을 가지는 신축성 투명 기관에 대한 모식도, 한국 특허 등록: 10-2020-0172777, 10-2020-0172778.