

신경형 컴퓨팅을 위한 초소형 유기 시냅스 소자 구현

고성능 유기 뉴로모픽 소자의 소형화와 컴퓨팅 능력은 뇌에서 영감을 받은 인간형 지능 기술 개발에 필수적인 요소이다. 그러나 대부분의 유기 재료의 구조적 비균질성으로 인해 유기 뉴로모픽 소자를 나노 스케일로 축소하고 안정적 소자 구동을 확보하면서 고밀도로 통합하는 것은 여전히 어려운 과제로 남아있다. 이에 본 연구에서는 정렬된 구조를 갖는 반결정성 고분자 PBFCL10을 설계하여 전도성 나노필라멘트의 균일한 형성을 조절함으로써, 50 nm의 소자 크기의 작고 가장 높은 1 Kb의 밀도를 갖는 유기 시냅스를 개발했다. 연구팀은 organic macromolecule의 결정도를 조절하는 전략을 통해 반결정성 고분자 poly(butylene furandicarboxylate)90-b-(ϵ -caprolactone)10 (PBFCL10)를 switching matrix로 활용하여 ion-based organic memristive synapse를 개발하였는데, 초소형 유기 신경형 장치를 구현하기 위해 두 가지 key point를 고려하여 설계하였다. 한가지로는 폴리머 PBFCL10에 포함되어 있는 다수의 oxygen-containing moieties로 인해 상당한 이온-분자 상호 작용이 가능해져 이온 이동과

전도성 필라멘트(CF) 형성을 통해 전기적 거동을 미세 조절할 수 있다는 점이었고, 다른 한가지는 단단한 rigid furan chromophore의 강한 π - π ordering으로 형성된 고밀도 배향 나노스케일 분자가 금속 나노 필라멘트의 크기, 간격 및 공간 배열을 효과적으로 조절할 수 있다는 점이였다. PBFCL10 박막에서 방향성 폴리머 입자를 따라 형성된 CF 형성 크기를 나노미터 규모로 축소함으로써, 50 nm 수준의 작은 크기를 가진 소자를 제작하고 32×32 의 유기 시냅스 소자 기반 신경 매트릭스를 구현할 수 있었다. 제작된 PBFCL10 시냅스는 98.89%의 높은 사이클 간 균일성과 99.71%의 소자 간 균일성을 갖는 32개의 전도도 상태 사이를 선형적으로 전환할 수 있으며, 이는 유기 소자 중 최고의 결과이다. 이를 활용하여 궁극적으로 유기 neuromatrix와 FPGA 컨트롤러를 기반으로 한 mixed-signal 뉴로모픽 하드웨어 시스템을 구현하여 의사 결정 작업을 위한 스파이크-가소성 관련 알고리즘을 실행했다.

본 연구결과는 “An ultrasmall organic synapse for neuromorphic computing”의 제목으로 2023년 *Nature Communications*에 게재되었다.

<S. Liu *et al.*, *Nat. Commun.*, **14**, 7655 (2023), DOI: 10.1038/s41467-023-43542-2>

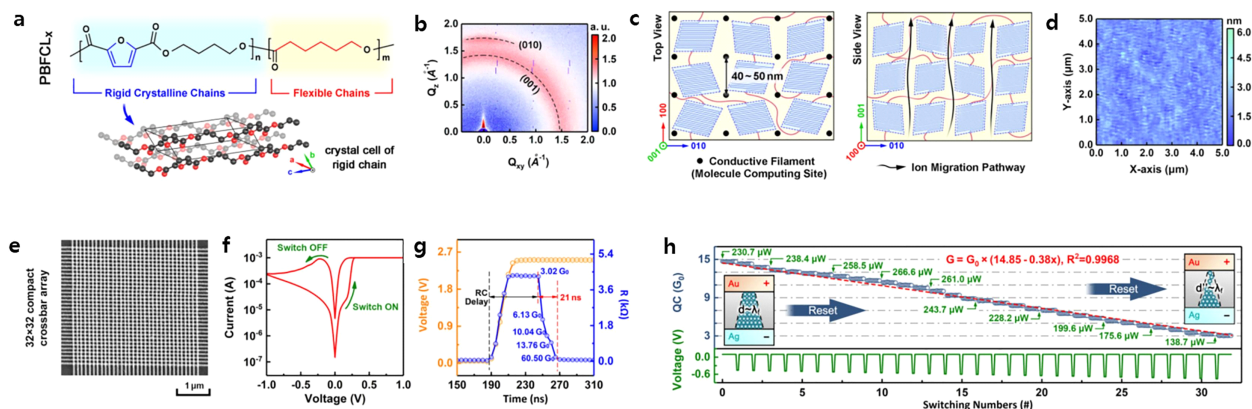


그림 1. 고신뢰성 유기 신경형 매트릭스를 위한 소재 설계. (a) 분자 구조, 결정질 단위 셀, (b) PBFCL10의 박막 2D GIWAXS 패턴. (c) PBFCL10 박막에서 정렬된 나노결정과 균일한 이온 이동 경로의 개략적 그림. (d) PBFCL10 박막의 형태 현미경 이미지. (e) 50 nmAu/PBFCL10/Ag 소자의 32×32 컴팩트 크로스바 어레이 현미경 이미지. (f) bistable 스위칭 동작을 보여주는 PBFCL10 소자의 전류-전압 특성. (g) 인가된 전압 자극에 대한 즉각적인 응답에서의 소자 저항. (h) 스위칭 전력 소비에 따른 32개 양자화된 상태에서 소자 전도도의 연속 변조.

다공성 맥신(MXene) 나노 리본 재료 기반 고민감도 질소산화물 가스 센서 개발

질소산화물을 비롯한 대기오염 유해가스를 검지하는 것은 환경 모니터링 기술 개발에 반드시 필요한 과정이다. 지난 수십년간 그래핀, 탄소나노튜브와 같은 탄소나노 재료부터, 금속, 반도체 나노 재료 등 다양한 종류와 구조를 지닌 나노 재료를 활용하여 질소산화물 가스 센서를 개발해 오고 있다. 여러가지 나노 재료에서 맥신(MXene)은 2차원 전이 금속 탄화물, 질화물 및 탄질화물의 대규모 계열로, 다양한 응용 분야에 적합한 뛰어난 전기적, 기계적 및 화학적 특성으로 인해 상당한 주목을 받았다. 뛰어난 성능을 기반으로 맥신 재료는 가스 분자와의 화학적 상호작용에 따라 전기적 신호를 민감하게 변하게 하여 가스 센서 개발에서 활용되어 오고 있다. 최근에는 가스 민감도를 높이기 위하여 맥신 나노 재료를 필름으로 만들고 적층하여 가스 센서를 개발하는 연구 성과도 보고되었다. 그러나, 적층된 맥신 나노 필름 재료는 가스 분자의 확산과 활성 부위의 상호 작용을 방해할 수 있어 가스 반응 특성이 저하되는 결과를 야기시킬 수 있다. 또한, 맥신 기반 가스 센서는 다른 재료에 비하여 선택성이 낮아 다른 가스의 교차 간섭을 일으키고 가스의 잘못된 식별 및 정량화를 초래할 수 있다. 이를 극복하기 위하여 다공성 3D 폴리머 네트워크에 맥신 나노재료를 적용시킬 경우 가스 분자의 접근성과 확산이 증가할 수 있다고 보고되었다. 이러한 연구결과에서는 흥미롭게도 부분적으로 산화된 산화티타늄 맥신($\text{TiO}_2/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Tx}$ ($\text{Tx} = -\text{OH}, -\text{O}, -\text{F}$ 등)은 산화티타늄의 강력한 가스 흡착 능력과 맥신의 뛰어난 전도도의

이점을 얻어 뛰어난 가스 감지 특성을 보였다. 그러나 맥신-산화티타늄 하이브리드 구조는 원래의 구조보다 더 두껍고 밀도가 높은 층상 구조를 형성할 수 있으며, 이는 표면을 통한 가스 분자의 확산에 대한 제한 요소로 작용할 수 있다.

이러한 한계점을 극복하기 위하여 최근 연구에서 다공성 맥신 나노 리본 재료 합성 및 이용하여 고민감도, 고선택도 질소산화물(nitrogen dioxide, NO_2) 가스 센서를 개발하였다. 가스 센서 개발 과정에서 화학적 산화 작용을 통하여 맥신 나노 리본 구조는 이산화티타늄 나노 입자와의 새로운 조합을 통하여 하이브리드 구조를 형성하였으며, 뛰어난 질소산화물 감도와 응답 시간을 나타내었다. 또한, 풍부한 가스 활성 및 반응 영역, 금속 산화물 표면, 맥신 구조의 높은 전도도를 결합하여 맥신 나노리본은 실온에서 높은 이산화질소 가스 감지 성능을 보였다. 또한, 맥신 나노리본의 빠른 응답 시간, 우수한 회복, ppb 수준의 검출 한계, 뛰어난 선택성이 나타났다. 이러한 고민감도 가스 검출 능력을 얻는 데에는 이산화질소 가스에만 민감했지만 맥신-이산화티타늄 하이브리드 구조는 이산화질소와 암모니아 가스에 모두 민감하게 반응하였다. 순수한 맥신 나노 재료와 달리 맥신 나노리본 구조는 다공성 구조를 지녀 효과적인 가스 분자 확산 및 가스 분자와 맥신 나노리본 구조간의 상호작용을 위한 활성 표면적을 제공 가능하다는 점에서 장점을 지닌다.

본 연구결과는 “Ultrasensitive and highly selective NO_2 gas sensing of porous MXene nanoribbon assemblies”의 제목으로 2024년 *Carbon*에 게재되었다.

〈B. Yamunasree *et al.*, *Carbon*, **228**, 119364 (2024), DOI: 10.1016/j.carbon.2024.119364〉

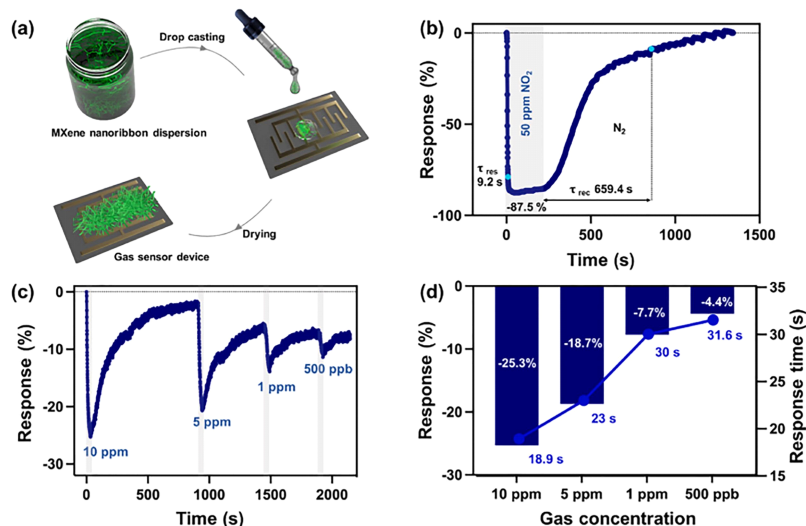


그림 2. (a) 맥신 나노 리본을 이용한 가스 센서 소자 제조 공정. (b) 50 ppm 질소산화물(NO_2)에 노출된 센서 소자의 동적 응답-회복 곡선. (c) 다양한 농도의 질소산화물(10 ppm ~ 500 ppb)에 노출된 센서 소자의 동적 응답-회복 곡선. (d) 질소산화물 가스 농도에 따른 가스 센서의 응답 및 응답 시간.

착용형 전자기기를 위한 전환 가능한 접착력을 가진 운동 적응형 피부 패치

인간 피부와 원활하게 통합되어 다양한 생리학적 신호를 지속적으로 모니터링할 수 있는 빠르게 발전하는 생체전자기기 중 피부 인터페이스 전자기기는 개인화된 건강 모니터링, 경피 약물 전달, 인간-기계 상호작용 등 여러 분야에서 혁신을 일으킬 잠재력을 가지고 있다. 사용자 편안함과 고품질 생체 신호 획득을 위해, 피부 인터페이스 전자기기는 피부와의 강력하고 밀착된 접착을 구현이 필수적이다. 접착력이 부족하면 신호 저하를 초래할 수 있으며, 이는 기기의 신뢰성에 심각한 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 정적 및 동적 움직임에도 안정적인 피부 접착을 유지할 수 있어야 한다. 따라서 기기들은 피부에 맞춰 변형되며, 운동에 적응할 수 있어야 한다. 그러나 피부가 복잡한 표면을 가지고 있고 상당한 거칠기와 동적

특성을 갖고 있기 때문에 정적 및 동적 조건에서 밀착된 접촉을 유지하기 도전적인 실정이다. 전통적인 접근법은 화학 접착제를 사용하여 해결했으나, 이는 특히 취약한 영유아와 노인의 경우 피부 자극을 초래할 수 있고, 온도나 땀과 같은 환경적 요인은 장기적인 접착 안정성을 저하시킬 수 있다는 한계를 가지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 전자기기들은 최소한의 화학 접착제로 피부의 표면 형상에 맞춰 변형시키는 연구가 보고되었다. 이러한 접근법은 신호 품질을 향상시키면서 피부 손상을 완화시킨다. 그러나 이러한 피부 전자기기들은 일반적으로 반데르발스 힘에 의존하는 약한 피부 접착을 갖는다. 이 약한 접착력은 무선 통신 모듈과 배터리와 같은 대형 전자 부품의 통합을 제한한다. 또한, 극단적인 얇기는 기기 취급, 내구성 및 재사용성에서 어려움을 초래할 수 있다.

이를 위한 해결책으로 자가 치유 고분자를 활용한 착용형 전자기기가 연구되기 시작했다. 자가 치유 고분자는 주어진 접착 에너지(G_c)에 대해, 접착력은 실제 접촉 면적(A)의

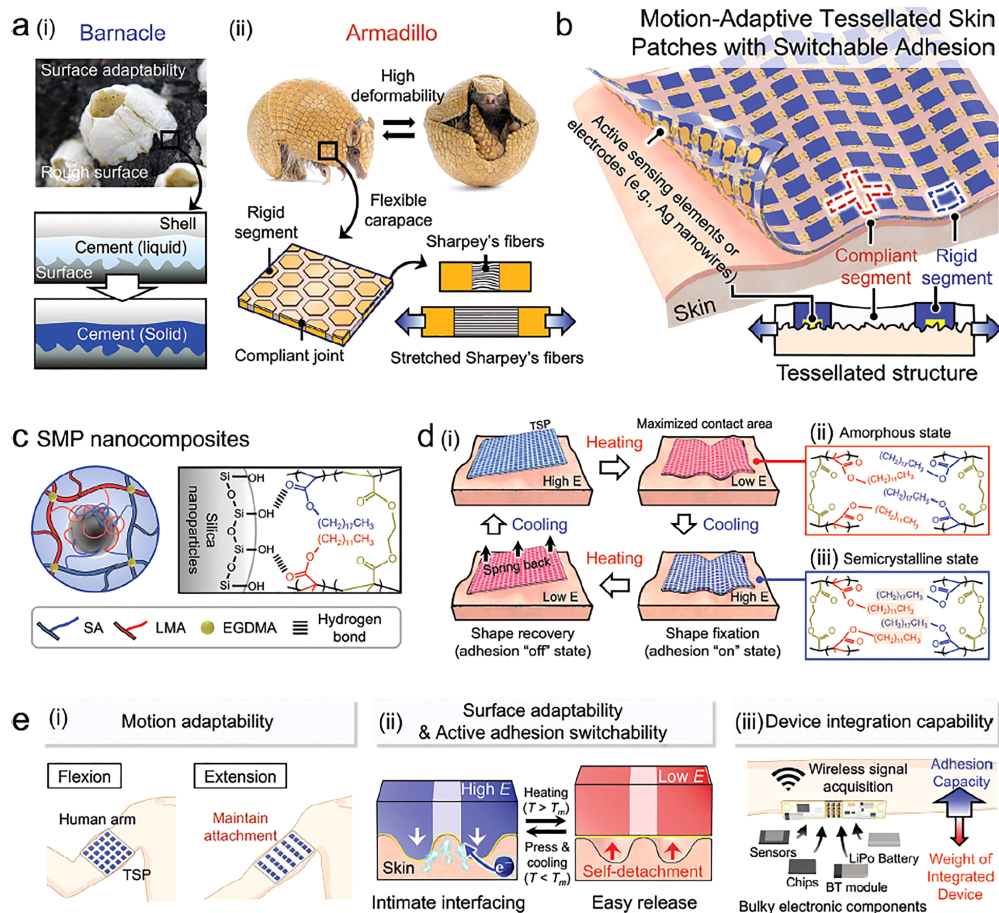


그림 3. 운동 적응형 피부 패치의 디자인. (a) i) 거친 표면에 있는 따개비의 표면 적응성과 ii) 아르마딜로의 높은 변형 가능성. (b) 동적 피부 기질에 일체형으로 부착된 TSP 디자인 및 강직성과 유연성을 가진 세그먼트로 구성된 격자 구조와 센서 및 전극 통합 구조. (c) 실리카 나노 입자 보강이 적용된 자가치유고분자 나노 복합체의 화학 구조. (d) i) 거친 피부 표면에서 자가치유고분자 나노복합체의 접착 메커니즘, ii) 고온에서 비결정성 축색의 화학 구조와 iii) 실온에서 반결정성 축색의 화학 구조. (e) 피부패치의 주요 장점: i) 운동 적응성, ii) 전환 가능한 능동 접착, iii) 다양한 장치 통합 능력.

제공근에 비례하고 접착 시스템의 유연성(C)에 반비례하는 특성을 가지고 있는데, 이러한 원리를 이용하여, 접촉 면적을 최대화하고 재료 강성을 증가시켜 접착력을 개선할 수 있다. 또한 자가 치유 고분자는 열 자극에 반응하여 접촉 기하학과 강성을 동적으로 조정할 수 있어 접착력 조절이 가능하기 때문에 원할 때 탈착 및 부착을 시킬 수 있다. 이러한 자가 치유 고분자를 기반으로, 얇은 필름 플랫폼에서 재료 및 구조적 하이브리드 이질성을 활용한 다기능 피부 접착 패치가 개발되었다. 이 패치는 격자 모양으로 배열된 개별적인 강직한 자가 치유 고분자와 유연한 자가 치유 고분자를 통합한 구조로 설계되었다. 이 디자인은 인상적인 풀오프 강도(1070.2 kPa), 박리 접착력(200.9 N m^{-1}), 놀라운 접착 전환 비율(47.7), 높은 재사용성(500회 이상) 및 우수한 기계적 변형 능력(218.8 kPa)의 우수한 성능을 구현하였다. 또한,

이 패치는 낮은 접촉 저항($38.8 \text{ k}\Omega \mu\text{m}$), 낮은 피부 접촉 임피던스(10 Hz에서 $44.1 \text{ k}\Omega$), 높은 신호 대 잡음비(22.5 dB)를 보여준다. 이러한 특성은 피부 접착을 손상시키지 않으면서 대형 전자 부품의 원활한 통합을 가능하게 하여 다양한 생리학적 신호를 정확하게 무선으로 감지할 수 있다.

본 연구결과는 “Motion-Adaptive Tessellated Skin Patches With Switchable Adhesion for Wearable Electronics”의 제목으로 2024년 *Advanced Materials*에 게재되었다.

<G. Choi *et al.*, *Adv. Mater.*, 2412271 (2024),
DOI: 10.1002/adma.202412271>

<정용진, email: yjjeong@ut.ac.kr>