

GIST, 사람 피부처럼 접촉·굽힘 구분하는 '스마트 소재' 개발... 촉각 체화형 소프트 로봇 구현

- 신소재공학과 하민정 교수팀, 자기장으로 정렬한 나노와이어 기반 소재로 접촉·굽힘 등 복합 힘의 방향 실시간 구분... 다중 센서·연산 없이 촉각 정보 분리
- 감각-구동 일체형 소프트 로봇 구조 구현... 유해 물질 자율 격리 작업 실증
- 국제학술지《Advanced Materials》게재



▲ (왼쪽부터) GIST 신소재공학과 김유빈 박사과정생, 하민정 교수

광주과학기술원(GIST·지스트, 총장 임기철)은 신소재공학과 하민정 교수 연구팀이 소재 자체가 복합적인 힘을 방향별로 구분할 수 있는 기술을 개발하고, 이를 적용한 '촉각 체화형(Perception-Embodied) 소프트 로봇'을 구현했다고 밝혔다.

이 로봇은 여러 종류의 센서와 복잡한 데이터 처리 없이도 접촉(압력)과 굽힘(변형)처럼 동시에 발생하는 복합적인 힘의 방향을 실시간으로 구별하고, 이러한 촉각 정보를 바탕으로 로봇이 스스로 다음 동작을 제어하는 '폐루프 피드백(closed-loop feedback)' 기능을 구현한 것이 특징이다.

연구 성과는 향후 ▲밀폐·비정형 환경 탐사 로봇 ▲스마트 전자 의수·의족 ▲원격 햅틱 인터페이스 ▲차세대 웨어러블 로봇 등에 활용될 것으로 기대된다.

사람처럼 자유롭게 휘어지고 변형되는 소프트 로봇이 다양한 형태의 물체를 정밀하게 다루기 위해서는 사람 피부처럼 접촉과 굽힘 등 서로 다른 다양한 기계적 자극을 구분할 수 있는 촉각 기능이 필수적이다.

그러나 기존 촉각 센서는 관절이 휘어질 때 발생하는 신호와 외부 물체가 닿을 때

발생하는 신호가 서로 섞이는 간섭(crosstalk) 문제가 있었다.

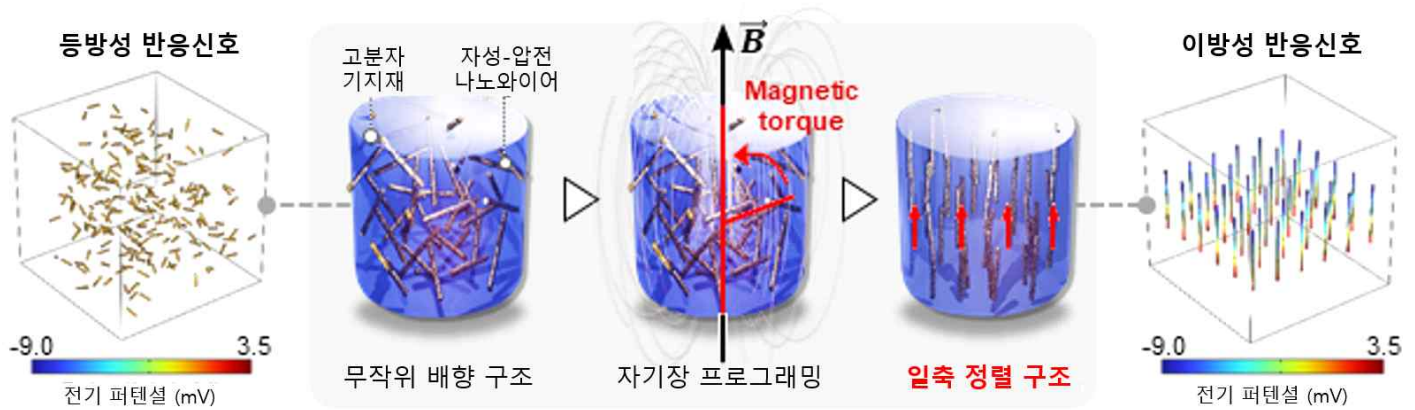
이를 해결하려면 여러 종류의 센서를 촘촘하게 배열하거나 복잡한 데이터 연산으로 신호를 분리해야 했고, 이 과정에서 **로봇의 유연성과 운동 자유도가 떨어지고 실시간 제어에도 한계**가 있었다.

연구팀은 이러한 한계를 극복하기 위해 **자기장을 이용해 나노와이어의 방향을 원하는 축으로 정렬하고, 그 방향에 따라 서로 다른 힘에 선택적으로 반응하도록 만드는 기술을 개발했다.**

이를 위해 연구팀은 머리카락보다 훨씬 가는 막대 모양의 나노 크기 소재인 '**나노와이어(nanowire)**'를 활용했다. 나노와이어는 **얇고 긴 구조 덕분에 외부 기계적 자극이 집중되어 민감하게 반응하는 특성이 있다.**

연구팀이 사용한 '**티탄산바륨(BaTiO_3) 나노와이어**'는 **힘이나 압력을 받으면 전기 신호를 만들어내는 압전(壓電) 특성**을 지니고 있어 외부에서 가해지는 힘을 감지할 수 있다.

여기에 **자기장에 반응하는 산화철(Fe_3O_4) 나노입자**를 표면에 입혀 '**자기-압전 나노와이어***'를 제작했다. 이어 이를 **형상기억고분자****에 고르게 분산시킨 뒤 외부 자기장을 이용해 원하는 방향으로 정렬했다.



▲ **자기장을 이용한 자성-압전 복합 소재의 방향성 제어.** 고분자 안에 무작위로 분산된 자성-압전 나노와이어가 외부 자기장의 힘을 받아 특정 축으로 정렬되며, 이를 통해 소재가 힘의 방향을 구분하는 방향성을 갖게 된다.

이렇게 정렬된 나노와이어는 고분자 내부에 고정돼 배열 방향을 유지하며, 특정 방향에서 가해지는 힘에만 선택적으로 반응하도록 설계됐다.

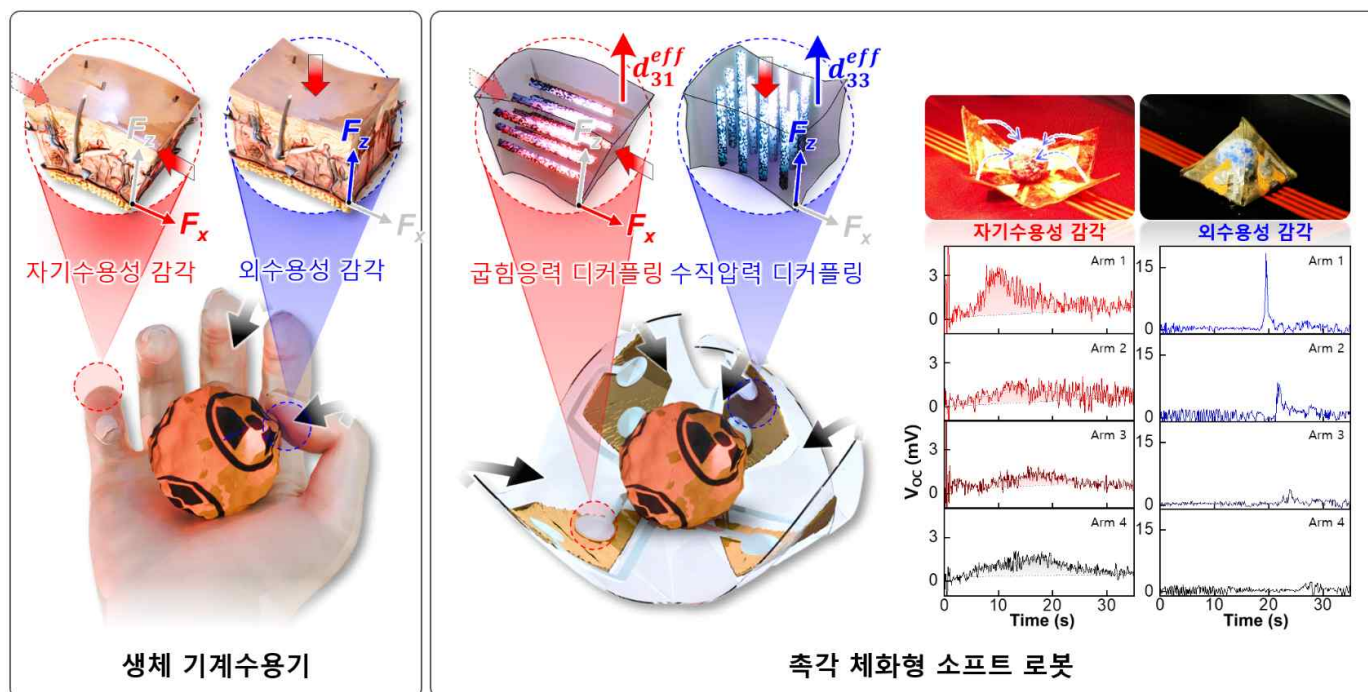
* **자기-압전 나노와이어:** 기계적 힘을 전기 신호로 변환하는 압전 나노와이어에 자기장에 반응하는 산화철 나노입자를 입힌 복합 소재이다.

** **형상기억고분자:** 열 등 외부 자극을 받으면 원래 형태로 되돌아가는 특성을 가진 고분자로, 본 연구에서는 나노와이어를 고정해 정렬된 방향을 유지하는 역할을 한다.

수직(z축) 방향으로 정렬한 나노와이어 구조는 외부 접촉에 의한 '수직 압력'에 민감하게 반응했고, 수평(x축) 방향으로 정렬한 구조는 관절이 휘어질 때 발생하는 '굽힘 힘'에 선택적으로 반응했다.

즉, 여러 종류의 센서를 따로 사용하거나 복잡한 연산으로 신호를 분리하지 않아도 정렬된 나노와이어 구조만으로 접촉과 굽힘 신호를 물리적으로 분리(디커플링, Decoupling*) 할 수 있음을 확인했다.

* 디커플링: 여러 방향의 힘이 복합적으로 인가될 때 이를 구별하는 것으로 본 연구에서는 다중 센서·연산 없이 소재의 정렬 구조만으로 이루어진다.



▲ '촉각 체화형 소프트 로봇'의 작동 원리. 자기장으로 정렬된 나노와이어가 복잡한 연산 없이 관절의 움직임과 외부 접촉을 각각 구분해 인식하며, 이를 바탕으로 로봇이 스스로 동작을 제어한다.

연구팀은 나아가 서로 다른 방향으로 정렬한 나노와이어를 직각으로 배치해 x·y·z축에서 동시에 작용하는 복합적인 3차원 힘의 방향까지 구분하는 데 성공했다.

이는 기존처럼 감각 부품과 구동 부품을 따로 조립하는 방식이 아니라, 로봇 몸체 자체가 힘을 감지하고 움직이는 '감각-구동 일체형 구조'를 구현한 것이다.

연구팀은 이 기술을 적용한 '촉각 체화형 소프트 로봇'을 제작해 실제 자율 임무를 수행하도록 했다.

로봇은 스스로 접히는 과정에서 발생하는 자신의 굽힘 신호와 물체에 닿았을 때 발생하는 접촉 신호를 서로 구분하며 동작했고, 이를 바탕으로 유해 화학 물질을 격리하는 작업을 성공적으로 수행했다.

촉각 체화형 소프트 로봇



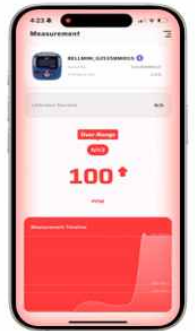
사용자 알림 발송



피드백 제어



램프 전원 on (저온)



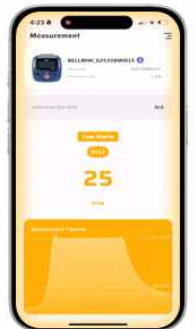
사용자 알림 발송



피드백 제어



램프 전원 on (고온)



고유 수용성 신호



피드백 제어



램프 전원 off



▲ '촉각 체화형 소프트 로봇'의 유해 물질 자율 격리 시연. 로봇이 스스로 구조를 변형해 유해 물질(암모니아 계열 화합물)을 격리하며, 접촉 촉각 신호를 실시간으로 피드백 받아 동작을 제어하는 '페루프 제어' 과정을 보여준다.

특히 이 과정은 외부 카메라나 복잡한 계산 시스템에 의존하지 않고, 로봇 내부에 내장된 촉각 정보만으로 이루어졌다는 점에서 차세대 자율 소프트 로봇 구현 가능성을 보여준다.

하민정 교수는 "이번 연구는 다종의 센서와 대규모 연산에 의존하던 기존 로봇 감각 시스템과 달리, 소재 자체가 복합적인 힘을 구분하도록 설계했다는 점에서 의미가 있다"며 "반복적인 변형에도 안정적으로 작동하고, 시각 정보 확보가 어려운 환경에서도 높은 정확도로 촉각을 인식할 수 있어 실시간 자율 로봇 제어 기술 발전에 기여할 것으로 기대한다"고 말했다.

GIST 신소재공학과 하민정 교수가 지도하고 김유빈 박사과정생이 제1저자로 참여한 이번 연구는 과학기술정보통신부·한국연구재단 글로벌영커넥트 사업의 지원을 받았다.

연구 결과는 재료과학 분야 국제학술지 《어드밴스드 머티리얼즈(Advanced Materials)》에 2026년 7월 18일 온라인으로 게재됐다.

한편 GIST는 이번 연구 성과가 학술적 의의와 함께 산업적 응용 가능성까지 고려한 것으로, 기술이전 관련 협의는 기술사업화센터(hgmoon@gist.ac.kr)를 통해 진행할 수 있다고 밝혔다.

논문 정보

○ 논문명, 저자 정보

- 저널명 : Advanced Materials (IF: 29.1, 2026년 기준)
- 논문명 : Field-Programmed Anisotropy in Magneto-Piezoelectric Composites for Material-Encoded Mechanoperception
- 저자 정보 : 김유빈(제1저자, GIST 신소재공학과 박사과정생),
권유민(공저자, GIST 신소재공학과 석사),
김다빈(공저자, 연세대 신소재공학과 박사),
오민선(공저자, GIST 신소재공학과, 석박통합과정생),
정진영(공저자, KIST 복합소재기술연구소 학생연구원),
김동영(공저자, GIST 신소재공학과, 석박통합과정생),
홍구택(공저자, 전남대 신소재공학과 교수),
황준연(공저자, KIST 복합소재기술연구소 책임연구원),
김상우(공저자, 연세대 신소재공학과 교수),
하민정(교신저자, GIST 신소재공학과 교수)