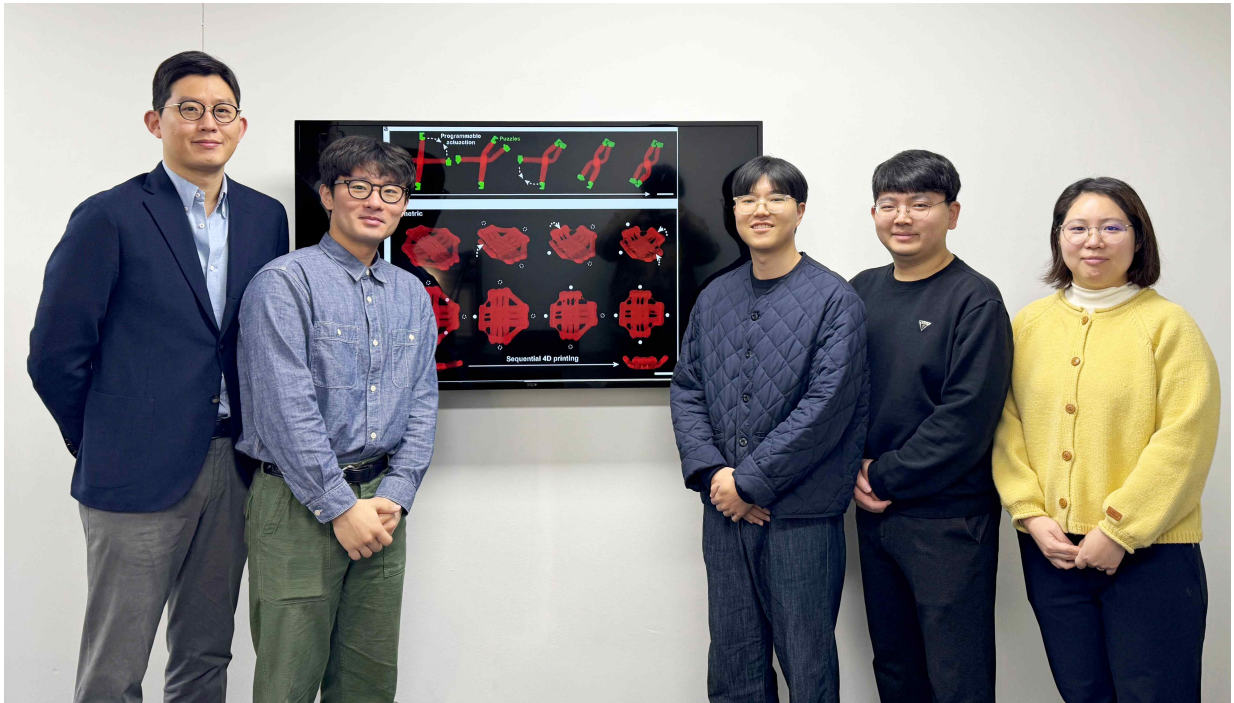


GIST, 트랜스포머 마이크로 로봇 기술 개발

빛을 쬔여 자유롭게 변형 가능한 수화젤, 퍼즐 맞추고 물체 잡는 정밀한 동작 가능

- 신소재공학과 최영재 교수팀, 마이크로 수화젤에 다양한 움직임과 모양의 변화를 줄 수 있는 초정밀 변형 메커니즘 개발... 《Advanced Materials》 표지논문 게재
- 복잡한 구조 없이 빛과 DNA 가교제만으로 구조환경의 제약 넘어 변형 가능한 '스마트 수화젤'... 혈관 속에서 정밀한 활동 해야 하는 마이크로 로봇 등에 활용 가능



▲ (왼쪽부터) 신소재공학과 최영재 교수, 박성준 석사과정 학생, 노준호 석사과정 학생, 김희성 석박통합과정 학생, 최은진 박사

빛과 DNA 가교제*를 이용하여 자유자재로 변형 가능한 수화젤이 국내 연구진에 의해 개발됐다. 이 수화젤은 특히 **마이크로 로봇틱스***에 사용될 수 있어 **스마트 소재의 한계를 극복할 것으로 기대된다.**

* **DNA 가교제:** DNA 가닥 간의 화학적 또는 물리적 연결을 형성하여 구조적 안정성을 부여하거나 물질의 특성을 제어하는 역할을 하며, 주로 바이오센서, 하이드로젤, 약물 전달 시스템 등에 활용된다.

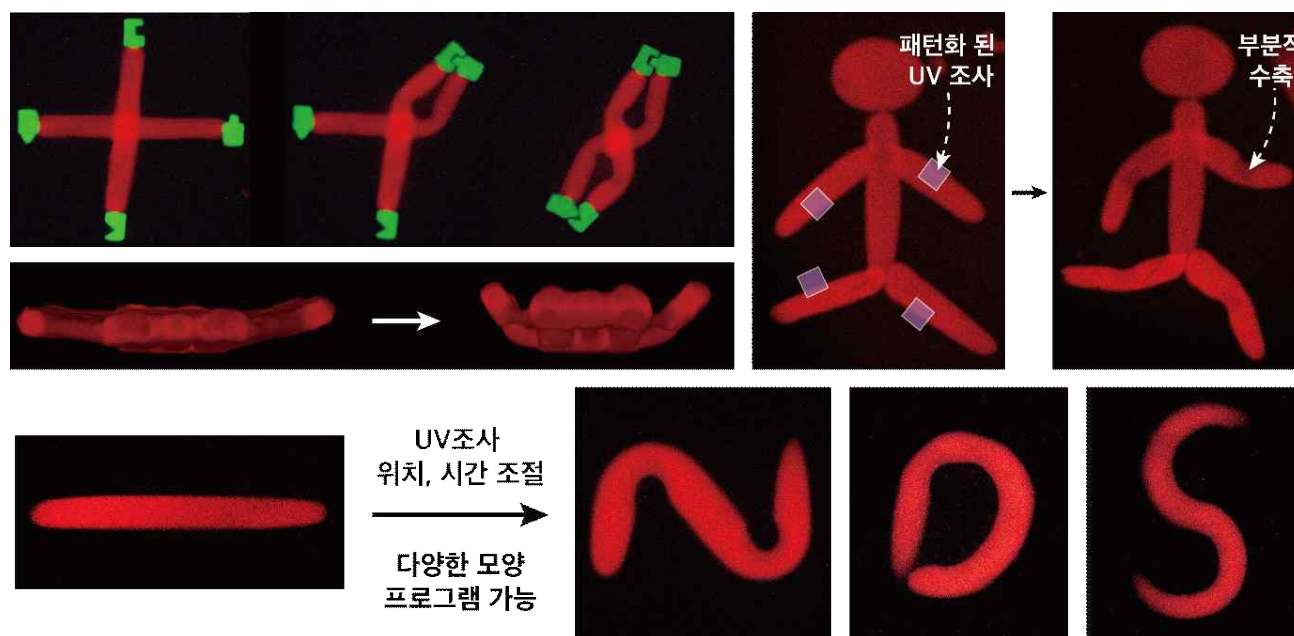
* **마이크로 로봇틱스:** 매우 작은 크기의 로봇을 설계, 제작, 제어하는 학문으로, 주로 의료, 생명공학, 환경 모니터링 등에서 정밀 작업과 혁신적인 솔루션을 제공하는 데 활용된다.

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 신소재공학과 최영재 교수 연구팀이 빛(LED를 이용한 자외선(UV)과 가시광선)을 이용하여 **원하는 모양으로 변형 및 반복 재구성**이 가능한 **마이크로 수화젤**을 개발했다고 밝혔다.

이 수화젤을 활용하여 만들어진 로봇 팔은 마이크로 사이즈의 퍼즐을 움직여 맞추고, 물체를 잡는 등 **마이크로 로봇*의 동작을 구현하여 정밀한 작업에 활용될 수 있다.**

* **마이크로 로봇**: 마이크로 로봇은 세포 크기에 가까운 초미세 구조를 지니며, 큰 로봇과는 달리 특수한 구동 메커니즘이 필요하여 정밀한 동작과 에너지 효율성을 통해 의료, 환경, 제조 등 다양한 분야에서 역할을 수행한다.

물과 상호작용하여 부피가 늘어나는 고분자 물질인 수화젤(하이드로젤)은 빛과 온도, 수소이온농도(pH)와 같은 외부 자극과 환경에 반응하여 부피가 변하는 등 모양의 변화를 조절할 수 있다.



▲ 광 반응성 마이크로 수화젤 로봇. 퍼즐을 움직여 맞추고, 그리퍼(gripper) 역할을 할 수 있도록 3D 구조로 접힐 수 있다. 패턴화된 UV 조사 시간과 위치를 조절하면 수화젤이 구부러지는 정도와 위치를 자유롭게 설정할 수 있고, 이러한 구부러짐을 프로그래밍하여 로봇의 동작을 구현할 수 있다.

기존의 모양 변형 수화젤은 서로 다른 반응 특성을 갖는 여러 재료를 결합하여 구성하는 방식으로 제작되었으나 위치, 방향, 정도 등 단일 모양으로 고정되어 다채로운 변형이 어렵다는 한계가 있다.

또한 온도나 pH에 반응하는 수화젤을 사용할 경우, 변형 및 온도 유지를 위해 에너지를 지속적으로 주입해야 하며, 모양을 원래 상태로 되돌리기 위해서는 용액을 교체하여 pH를 변화시키는 과정이 필요하다.

이러한 한계를 극복하고 문제점을 해결하기 위해선 단순한 구조를 가지면서 용액 교체 과정 없이 빛만으로 다양한 변화를 줄 수 있는 수화젤의 개발이 요구된다.

연구팀이 개발한 광반응성 마이크로 수화젤은 패턴화된 빛을 이용하여 원하는 영역에서의 팽창·수축 조절을 통해 자유롭게 모양 변형이 가능하다.

또한 이번 연구에 사용된 DNA 가교제는 광반응성 이성질체*인 아조벤젠(Azobenzene)을 포함하고 있어 빛의 파장에 따라 DNA의 결합과 분리를 조절할 수 있다. 예를 들어 가시광선을 쬐이면 아조벤젠은 *Trans* 구조*를 가지며 DNA 결합을 가능하게 한다.

반대로 자외선(UV)을 쬐이면 아조벤젠은 *Cis* 구조*를 가지며 공간적으로 DNA 염기쌍 사이의 수소결합을 방해하여 DNA의 분리를 유발한다. 따라서 가시광선 아래에서는 DNA 가닥의 연쇄적인 결합을 통해 가교제의 길이가 증가하여 수화젤이 팽창하고 UV 아래에서는 결합된 DNA 가닥이 분리되며 가교제의 길이가 짧아지고 수화젤이 수축한다.

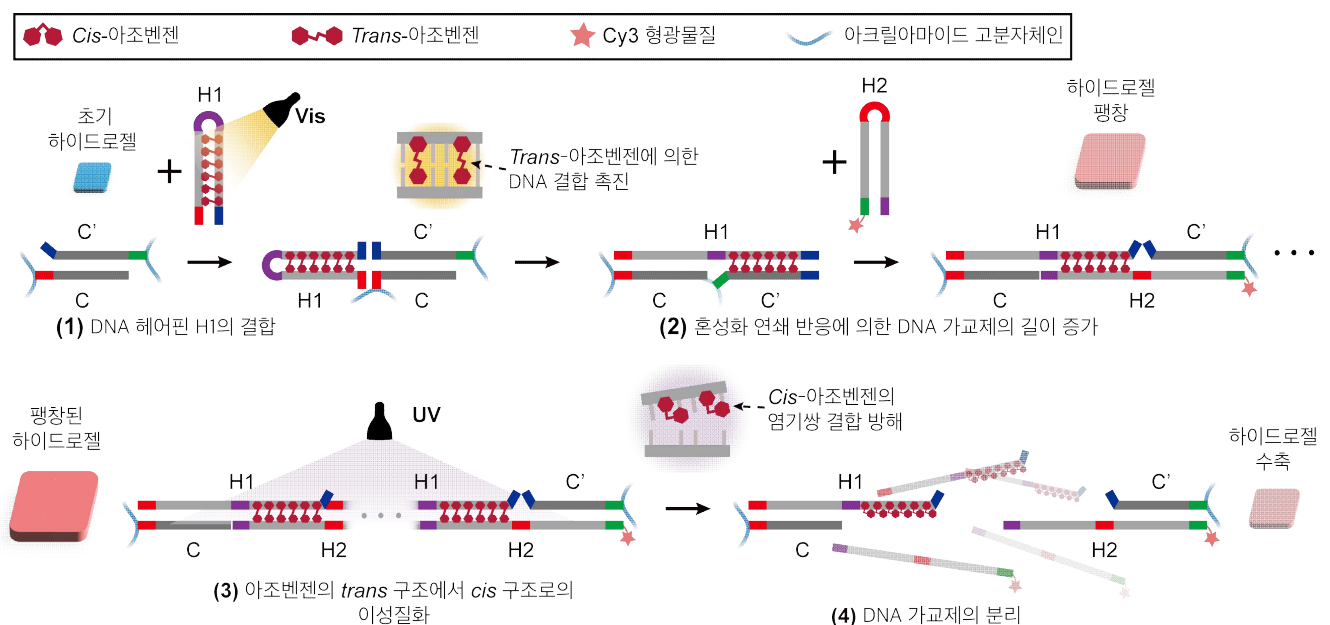
* **광반응성 이성질체**: 광반응성 이성질체는 빛을 받으면 분자의 구조가 바뀌는 특별한 분자이다. 예를 들어, 특정 빛을 쬐면 분자가 일직선(Trans)에서 꺾인(Cis) 모양으로 변하고, 다른 빛을 쬐면 다시 원래 모양으로 돌아온다.

* **Trans 구조, Cis 구조**: 아조벤젠은 빛에 반응하여 trans와 cis 두 가지 이성질체 구조로 변환된다. Trans 구조는 선형으로 안정적이며, 분자 간 상호작용이 강한 반면, cis 구조는 구부러진 형태로 분자 밀도를 줄이고 상호작용을 약화시키는 특징이 있다.

마스크리스 리소그래피 시스템(Maskless lithography system)*을 통해 패턴화된 빛을 쬐이면 광반응성 DNA 가교제의 길이를 특정 영역에서 선택적으로 조절할 수 있다.

막대 모양 수화젤의 특정 영역에 패턴화된 UV를 조사하면 해당 영역이 수축하고 주변 영역과의 팽창률 차이로 인해 수화젤이 구부러지게 된다. 연구팀은 UV 조사 위치와 시간 조절을 통해 구부러짐을 프로그래밍하여 로봇의 정밀한 동작을 구현하는 데 성공했다.

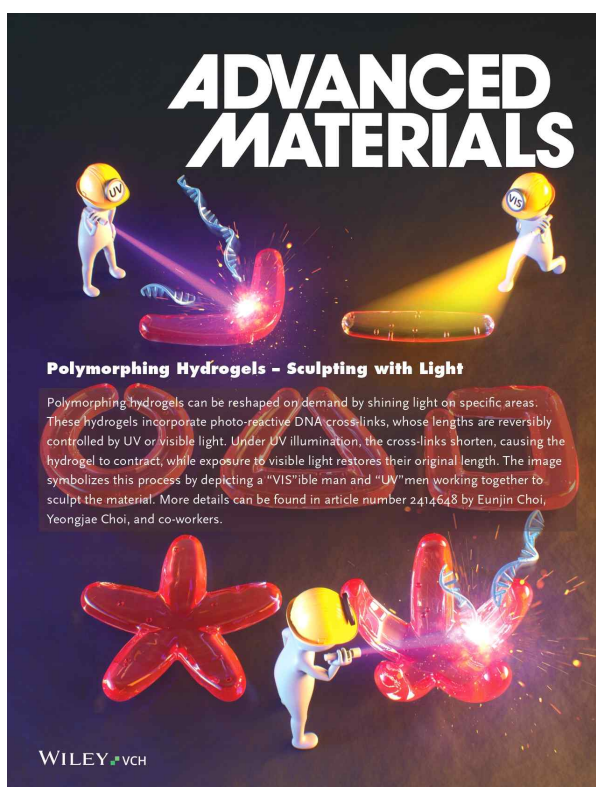
* **Maskless lithography system**: 반도체나 미세 구조를 제작할 때 사용하는 기술로, 전통적인 마스크(빛의 패턴을 만드는 틀) 없이도 원하는 패턴을 직접 빛으로 그릴 수 있는 장비이다. 쉽게 말해, 마치 프린터로 종이에 그림을 그리듯이, 컴퓨터에서 디자인한 패턴을 바로 표면에 빛으로 새겨 넣는 기술이다.



▲ **빛의 파장에 따른 수화젤 가교제의 길이 변화**. 가시광선 아래에선 DNA가 연쇄적으로 결합하며 가교제의 길이가 길어져 수화젤이 팽창하고, UV를 조사하면 DNA 가닥이 분리되면서 가교제의 길이가 짧아지고 수화젤이 수축한다.

최영재 교수는 “이번 연구 성과를 통해 복잡한 구조와 추가적인 자극 없이 **광 반응성 DNA 가교제와 빛으로 수화젤 로봇을 프로그래밍할 수 있다는 것을 확인했다**”며 “향후 DNA 디자인을 통한 반응 메커니즘 다양화를 통해 알고리즘처럼 작동하여 고도화된 변형을 보일 수 있는 수화젤 로봇 개발이 가능할 것으로 기대한다”고 말했다.

신소재공학과 최영재 교수, 최은진 박사가 지도하고 노준호 석사과정생과 박성준 석사과정생이 함께 수행한 이번 연구는 과학기술정보통신부 우수신진연구사업과 STEAM연구사업(미래융합기술파이오니어)의 지원을 받았으며, 국제학술지 《어드밴스드 머티리얼즈(Advanced Materials)》에 2025년 2월 5일 표지논문으로 게재되었다.



▲ Advanced Materials 표지논문 게재

논문의 주요 정보

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Advanced Materials (IF: 27.4, 2023년 기준)
- 논문명 : Polymorphing hydrogels regulated by photo-reactive DNA cross-links
- 저자 정보 : 노준호(제1저자, 신소재공학과), 박성준(공동 1저자, 신소재공학과), 김희성(신소재공학과), 김우진(신소재공학과), 김진호(신소재공학과), 박철헌 박사·최한솔 박사·송서우 박사·최은진 박사(교신저자, 신소재공학과) 최영재 교수(교신저자, 신소재공학과)