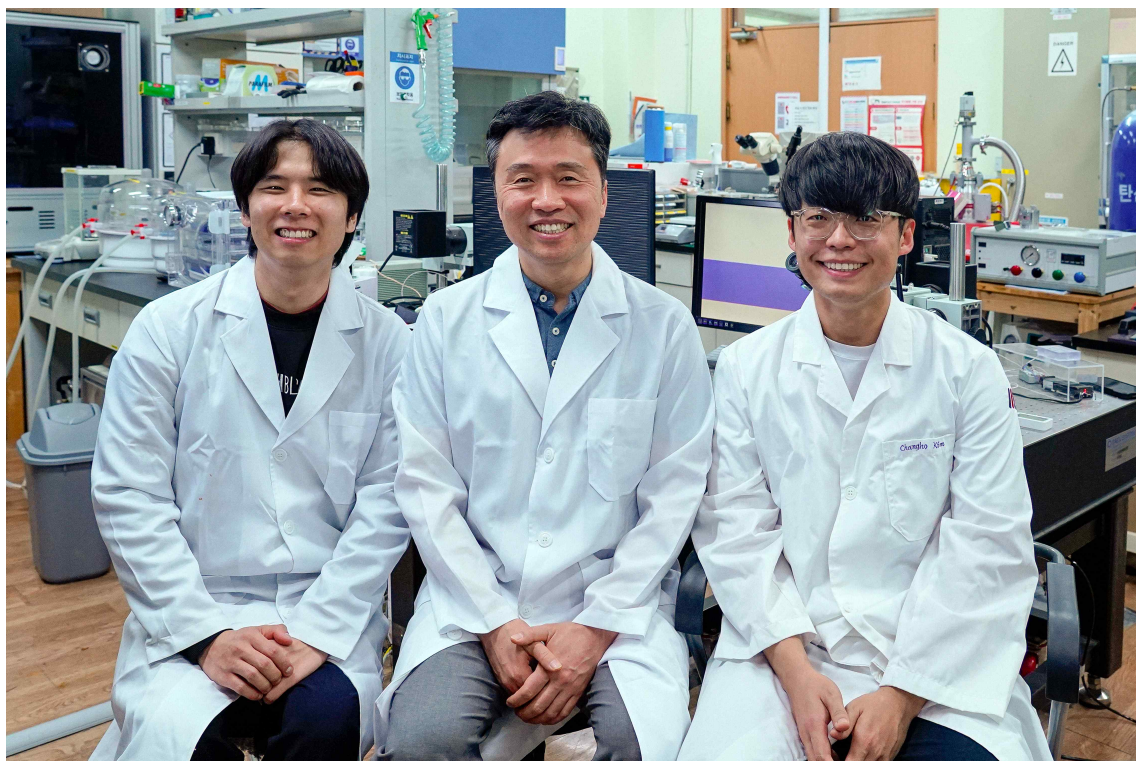


“만능 ‘접착제’ 반데르발스 힘으로 오염 없이 쌓는다”

GIST, 2차원 물질 고순도 정밀 공정 기술 개발

- 기계로봇공학과 설재훈 교수팀, 동종 2차원 물질 간 반데르발스 힘 이용해 다양한 조작 가능한 공정 기술 개발... 고분자 잔류물 문제 해결, 고성능 소자 개발 청신호
- 다양한 2차원 소재에 적용 가능 확인, 오염 없는 고순도 조작 기술로 고품질 이중구조체 제작 및 차세대 전자·광소자 성능 향상 기대... 국제학술지 《Advanced Materials》 게재



▲ (왼쪽부터) 기계로봇공학과 이민영 박사과정생, 설재훈 교수, 김창호 석박사통합과정생

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 기계로봇공학과 설재훈 교수 연구팀이 2차원 물질*을 외부 오염 없이 고순도로 확보하고, 이를 정밀하게 조작할 수 있는 획기적인 공정 기술을 개발했다고 밝혔다.

이번 연구에서는 같은 종류의 물질 사이에 작용하는 ‘반데르발스 힘*’을 이용하여 2차원 물질 기반 소자를 제작할 때 흔히 발생하는 오염 문제를 근본적으로 해결할 수 있는 방법을 제시했다. 이를 통해 소자의 성능과 신뢰성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

* 2차원 물질(Two-dimensional materials): 원자 몇 개 층 두께의 초박막 구조를 가지고 있어 매우 가볍고 얇으면서도, 전기 및 열 전도성이 뛰어나고 기계적 강도도 우수하다. 또한 빛과의 상호작용 특성이 탁월해 광학 소자나 센서에 적합하며, 유연하면서도 견고한 성질 덕분에 플렉서블 디스플레이나 웨어러블 기기 같은 차세대 전자·광소자에 매우 적합한 소재로 주목받고 있다.

* 반데르발스 힘(van der Waals force): 분자나 원자 사이에서 작용하는 약한 인력으로 이온 결합이나 공유 결합처럼 강한 화학 결합은 아니지만, 2차원 물질의 층을 서로 붙잡아 주는 데 핵심적인 역할을 한다. 전하의 일시적인 분포 차이에서 발생하는 이 힘은 특히 그래핀이나 이황화몰리브덴 같은 2차원 물질이 층층이 쌓일 수 있도록 도와주며, 서로 다른 물질을 붙일 때도 화학적 손상 없이 결합시킬 수 있어 정밀한 소자 제작이나 이중구조체 공정에 매우 유용하게 활용된다.

‘그래핀’이나 ‘이황화몰리브덴(MoS_2)’처럼 독특한 물리적 특성을 가진 2차원 물질은 전자·광학·에너지 등 다양한 분야에서 활발히 연구되고 있다. 하지만 이러한 물질은 워낙 얇고 민감하기 때문에, 제작 과정에서 생기는 불순물이나 미세한 기계적 손상도 그 특성을 크게 떨어뜨릴 수 있다.

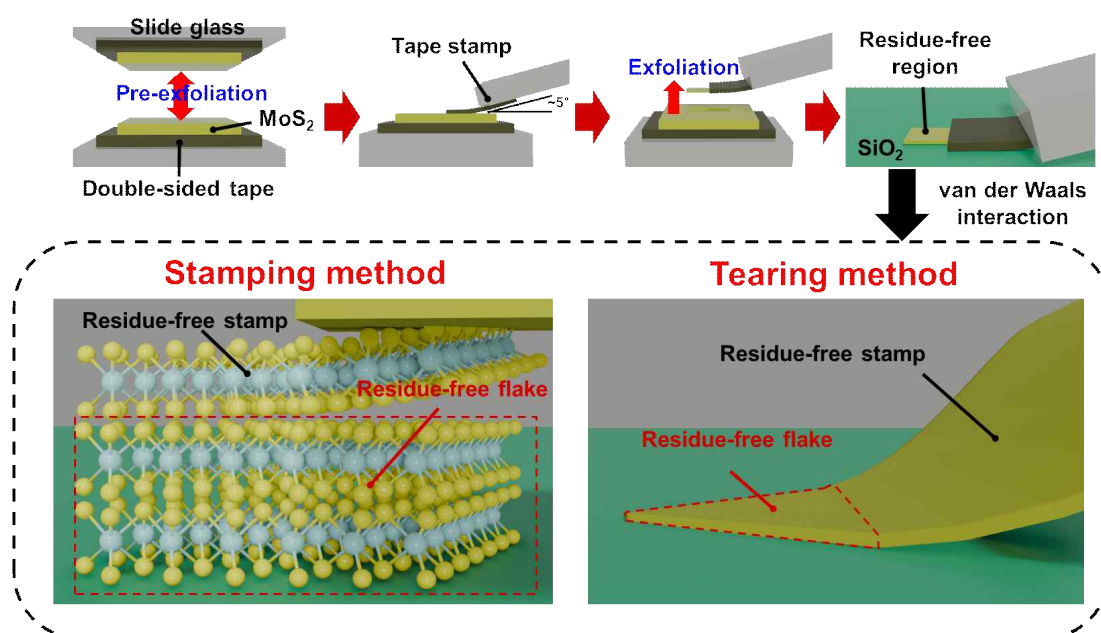
특히, ‘폴리메틸메타크릴레이트(PMMA)*’와 같은 고분자 물질을 사용하는 기존 공정 방식은 현재도 널리 활용되고 있지만, 해당 물질을 제거한 뒤에도 잔류물이 표면에 남는다는 문제가 있다. 이로 인해 소자의 성능이 저하될 수 있고, 그만큼 신뢰성도 떨어질 수 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 물질 제거 과정 자체가 필요 없는 새로운 공정 기술이 요구되고 있으며, 이는 2차원 물질의 고유한 특성을 온전히 살릴 수 있는 핵심적인 해결책으로 주목받고 있다.

* 폴리메틸메타크릴레이트(PMMA, Poly(methyl methacrylate)): 투명 플라스틱의 일종으로, 가볍고 가공이 쉬워 다양한 산업에 사용된다. 2차원 물질 전사 공정에서 지지체로 널리 활용되지만 제거 과정에서 표면에 잔류물이 남아 물질의 성능을 저하시킬 수 있다.

연구팀은 전자소자 등에 널리 쓰이는 2차원 물질인 이황화몰리브덴*을 주요 소재로 사용해 불순물 없이 순수한 2차원 물질 조각(플레이크)을 확보하는 데 성공했다.

특히 눈에 띄는 점은, 같은 물질 간에 작용하는 반데르발스 힘을 활용해 기존처럼 PMMA 등 고분자 물질을 사용하지 않고도 전사(붙이기), 뒤집기, 적층(쌓기) 같은 정밀한 조작이 가능한 새로운 공정 기술을 개발했다는 것이다.

* 이황화몰리브덴(MoS_2 , Molybdenum disulfide): 몰리브덴(Mo)과 황(S)이 결합한 2차원 물질로, 얇은 층 구조와 반도체 특성을 가지고 있어 전자소자, 센서, 에너지 저장 장치 등에 널리 활용된다.



▲ 반데르발스 상호작용을 이용한 2차원 물질 획득 과정 모식도. 전박리(Pre-exfoliation)된 2차원 물질 결정의 표면에서 불순물이 없는 깨끗한 영역을 분리한 후, 두 가지 방식(Stamping method, Tearing method)을 통해 고순도 2차원 물질 플레이크와 동일 물질로 구성된 스탬프를 동시에 얻는 과정을 나타낸다.

다양한 광학적 분석 결과, 이번에 개발된 새로운 공정을 거친 2차원 물질은 **잔류물, 결함, 산화, 기계적 변형 없이 매우 깨끗한 상태를 유지하는 것으로** 확인됐다.

또한 전기적 성능 실험에서도 뛰어난 결과를 보였다. **전계 효과 트랜지스터(FET)*를 이용한 측정에서, 전계 효과 이동도*는 $60 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, On/Off 전류비*는 약 10^8 로 나타나, 고성능 전자소자 구현에 적합한 수준임을 입증했다.**

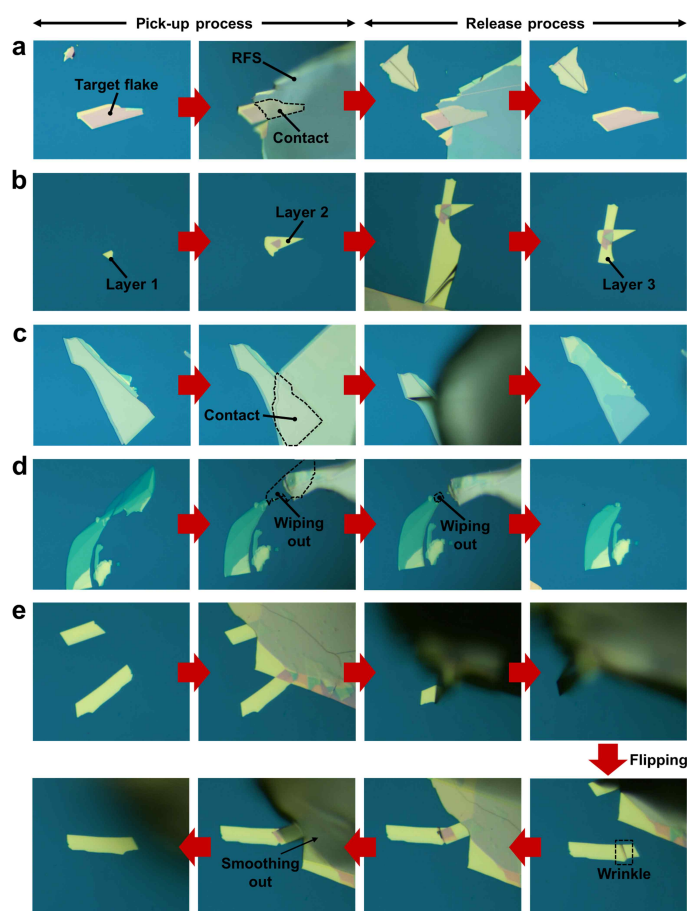
* **전계 효과 트랜지스터(FET, Field-effect transistor):** 전기장을 이용해 전류의 흐름을 조절하는 소자. 트랜지스터의 성능 평가에 자주 사용되며, 반도체 소자나 논리 회로 등에서 핵심 역할을 한다.

* **전계 효과 이동도(Field-effect mobility):** 전계 효과 트랜지스터 내에서 전자가 얼마나 빠르게 이동할 수 있는지를 나타내는 값으로, 값이 높을수록 전자 이동이 빠르고 성능이 우수하다는 것을 의미한다.

* **On/off 전류비(On/off ratio):** 트랜지스터가 '꺼짐(off)' 상태일 때와 '켜짐(on)' 상태일 때의 전류 차이를 나타내는 지표. 비율이 높을수록 전류 제어 능력이 뛰어나고, 소자 성능이 우수함을 의미한다.

또한 연구팀은 이번에 개발된 기술이 **다층 그래핀(MLG)*, 이황화몰리브덴(MoS_2), 육방정계 질화붕소(h-BN)* 등 다양한 2차원 물질에도 적용 가능하다는 사실을 확인했다.**

이를 바탕으로, 서로 다른 2차원 물질을 층층이 쌓아 만드는 반데르발스 이종구조체*를 원하는 순서와 위치에 맞춰 정밀하게 적층하는 데에도 성공했다.



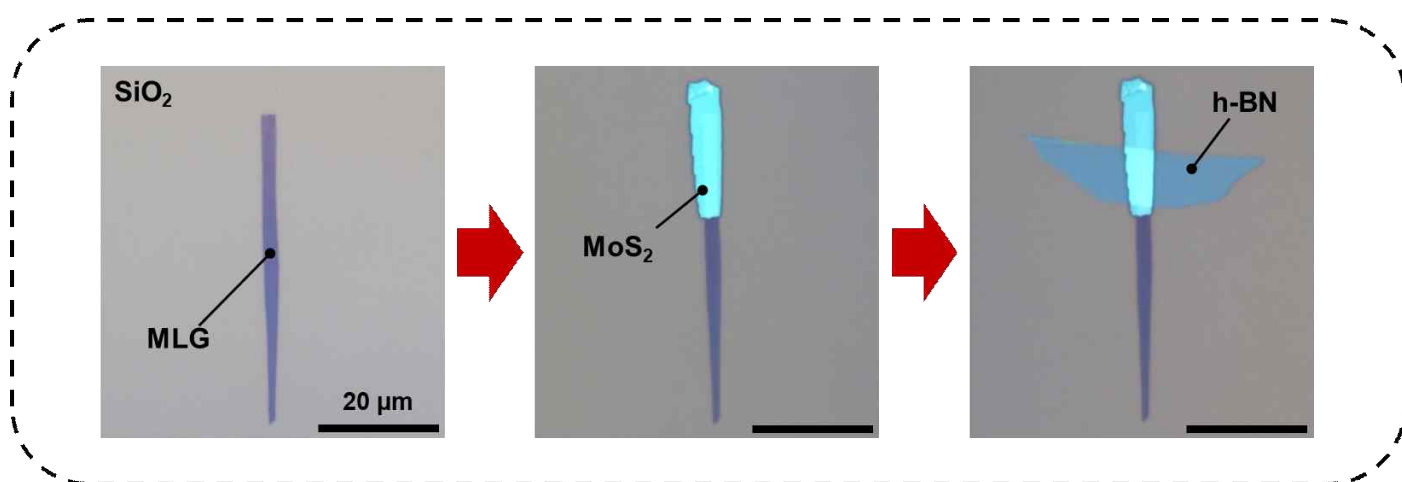
▲ **반데르발스 힘을 이용한 다양한 물질 조작 과정.** 반데르발스 상호작용을 이용한 2차원 물질 획득 과정을 통해 확보한 고순도 이황화몰리브덴을 동일한 물질로 이동, 적층, 박리, 제거, 뒤집기, 주름 제거하는 방법을 순차적으로 나타낸다. 이미 얻어진 물질에 대해서도 반데르발스 힘을 이용하여 추가 조작이 가능함을 나타낸다.

* **다층 그래핀(MLG, Multilayer graphene)**: 하나의 원자층으로 이루어진 그래핀이 여러 층 겹쳐진 형태로, 높은 전도성과 기계적 강도를 가지고 있어 다양한 전자소자에 사용된다.

* **육방정계 질화붕소(h-BN, Hexagonal boron nitride)**: 육각형 구조를 가진 절연성 2차원 물질로, 전기 절연성과 열 안정성이 우수해 2차원 소자에서 보호층이나 기판으로 자주 사용된다.

* **반데르발스 이종구조체(Van der Waals heterostructure)**: 서로 다른 2차원 물질을 층층이 쌓아 만든 구조체로, 각 물질이 가진 특성을 조합해 새로운 기능을 구현할 수 있다. 층 사이에는 반데르발스 힘이라는 약한 상호작용이 작용한다.

이번 연구를 통해 개발된 공정은 기존 방식과 달리, 같은 물질로 만든 스탬프를 사용해 각 층을 쌓기 때문에 불순물이 발생하지 않는다. 이로 인해 **구조체의 청정도와 정밀도가 매우 뛰어나며, 고품질·고정밀 반데르발스 이종구조체를 안정적으로 구현할 수 있음을 입증했다**. 또한 이 기술은 **다양한 2차원 소재에도 적용할 수 있어 높은 범용성**을 지니고 있다는 점도 확인됐다.



▲ **육방정계 질화붕소/이황화몰리브덴/다층 그래핀 반데르발스 이종구조체 제작 과정**. 반데르발스 힘을 이용해 확보한 고순도 육방정계 질화붕소, 이황화몰리브덴, 다층 그래핀 플레이크를 순차적으로 적층한 과정을 보여준다. 각 물질은 동일 물질 기반 스탬프를 통해 정밀한 위치에 오염 없이 배치되었으며, 이를 통해 고품질 반데르발스 이종구조체의 제작이 가능함을 입증하였다.

설재훈 교수는 “이번 연구는 **2차원 물질의 고유한 특성을 그대로 유지하면서도 다양한 2차원 소재를 활용해 맞춤형 소자 구조를 자유롭게 제작할 수 있는 길을 열었다는 점에서 큰 의미가 있다**”며 “**향후 2차원 물질 기반 전자 및 광전자 소자의 성능 향상에 크게 기여할 것으로 기대된다**”고 말했다.

GIST 기계로봇공학과 설재훈 교수가 지도하고 이민영 박사과정생과 김창호 석박사 통합과정생이 수행한 이번 연구는 과학기술정보통신부·한국연구재단 중견연구자지원사업, 기초연구실(심화형), 나노소재기술개발사업, 그리고 GIST-MIT AI국제협력사업의 지원을 받았다. 연구 결과는 재료과학 분야 국제학술지 《어드밴스트 머티리얼즈(Advanced Materials)》에 2025년 4월 2일 온라인 게재됐다.

논문의 주요 정보

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Advanced Materials [JCR 기준, JIF 27.4 (2023), JCI 상위 1.08 % (2023)]
- 논문명 : Residue-Free Fabrication of 2D Materials Using van der Waals Interactions
- 저자 정보 : 이민영(공동 제1저자, GIST), 김창호(공동 제1저자, GIST), 권순용(공저자, UNIST), 이가영(공저자, KAIST), 곽기윤(공저자, GIST), 임현섭(공저자, GIST), 설재훈(교신저자, GIST)