

“양파처럼 겹겹이 쌓인 고분자 막에 통로를 뚫더니...”

GIST·화중과기대 국제공동연구팀, 분자가 빠르게 드나드는 다층 다공성 입자 구현

- 이은지 지스트-이노코어 연구단장이 이끈 한중 공동연구팀, 모든 막을 안팎으로 관통하는 기공 구조 구현... 요오드 흡착량 기존 다층 입자의 약 1.6배
- 5회 재사용 후에도 초기 흡착량의 81.6% 유지... 단계적 전달체미세 반응기 설계에 활용 기대
- 국제학술지 《Nature Communications》 게재



▲ (왼쪽부터) GIST 이노코어 연구단 황준호 박사, 이은지 단장(신소재공학과 교수), (우측 상단의 왼쪽부터) 중국 화중과학기술대학교(HUST) 런화 덩(Renhua Deng) 교수, 진타오 주(Jintao Zhu) 교수

광주과학기술원(GIST·지스트, 총장 임기철)은 지스트-이노코어(GIST-InnoCORE) 연구단 이은지 단장(신소재공학과 교수) 연구팀이 중국 화중과학기술대학교(HUST) 진타오 주(Jintao Zhu)·런화 덩(Renhua Deng) 교수팀과 공동으로 여러 겹의 막을 관통해 분자가 이동할 수 있는 미세한 통로를 갖춘 새로운 다층 다공성 입자를 구현했다고 밝혔다.

공동연구팀이 개발한 ‘다층 메조다공성 베소좀(multilayer mesoporous vesosome)’은 고분자*로 만든 미세한 인공 입자다. 양파처럼 여러 겹의 막으로 공간을 나누면서도 각각의 막에 미세한 구멍을 만들어, 입자 바깥의 분자가 여러 겹의 막을 지나 안쪽까지 이동하기 쉬운 구조를 갖는 것이 특징이다.

이 입자는 **향후 여러 성분을 나눠 담았다가 단계적으로 내보내는 전달체**나, 입자 내부에서 여러 화학반응을 차례로 일으키는 **미세 반응기** 등을 설계하는 데 활용할 수 있다. 이번 연구에서는 **요오드를 시험 물질로 사용해 기공이 없는 기존 다층 입자보다 외부 분자를 빠르게 받아들이는 것을 확인했다.**

* **고분자(polymer):** 작은 분자들이 길게 이어져 만들어진 큰 분자로, 플라스틱·고무를 비롯해 다양한 소재를 만드는 데 쓰인다.

‘**베소솜(vesosome)**’은 하나의 입자 안에 여러 겹의 막이 양파처럼 겹겹이 쌓인 구조로, 여러 층에 성분을 나눠 담을 수 있다. 그러나 기존 다층 베소솜은 대부분 각각의 막에 구멍이 없어 바깥의 분자가 여러 겹을 지나 안쪽까지 빠르게 드나들기 어려웠다.

여러 개의 방은 만들어 놓았지만 방과 방 사이를 오갈 문이 부족했던 셈이다. 물질이 드나들 수 있도록 여러 겹의 막마다 수십 나노미터 크기의 미세한 구멍인 ‘**메조기공**’을 규칙적으로 만드는 것이 핵심이다. 이처럼 메조기공이 많이 형성된 구조를 ‘**메조다공성**’이라고 한다.

문제는 막에 구멍을 만들면 막 자체가 무너지기 쉽고, 반대로 막을 안정적으로 유지하면 구멍이 제대로 형성되지 않는다는 점이다. 이처럼 두 조건을 동시에 만족하는 범위가 매우 좁아 실험적으로 구현하기도 까다롭다.

공동연구팀은 고분자의 배열과 구조를 함께 조절해 여러 겹의 막마다 규칙적인 메조기공을 갖는 ‘**다층 메조다공성 베소솜**’을 구현했다.

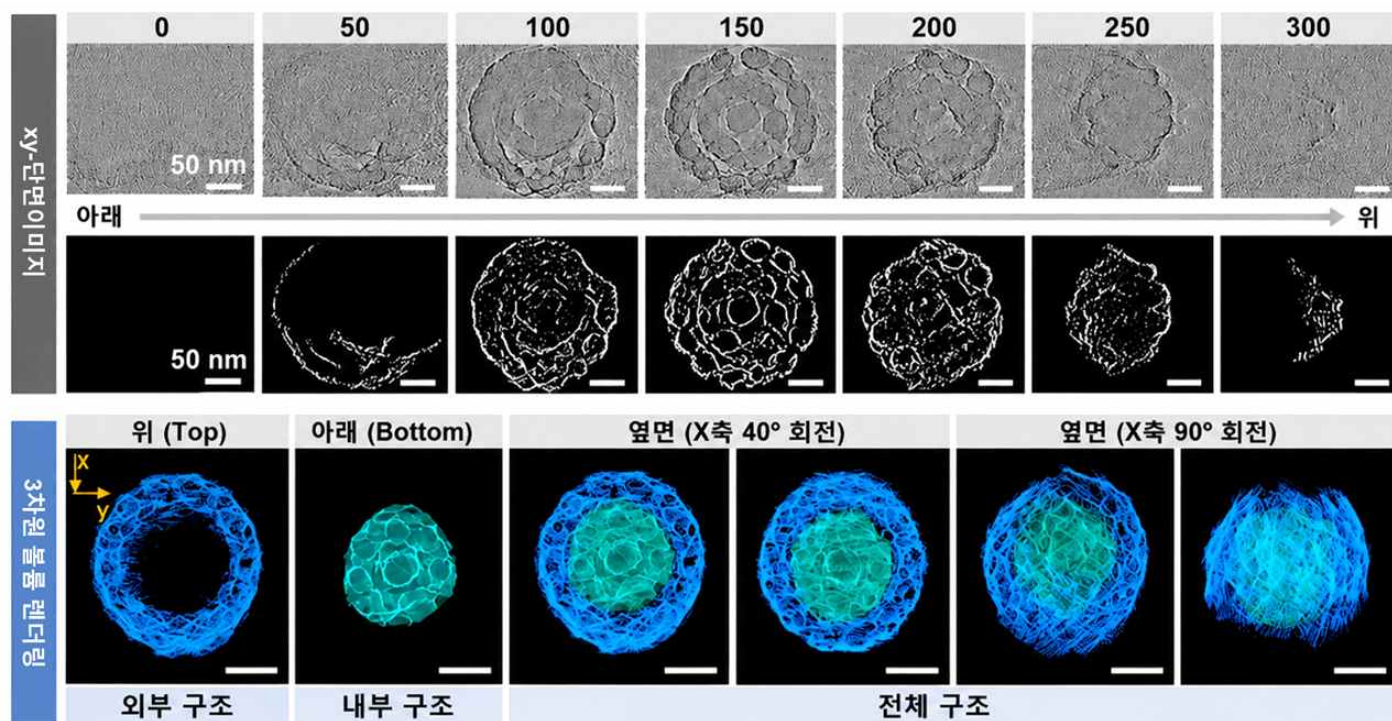


▲ 다층 메조다공성 베소솜의 형성 과정과 기존 베소솜과의 구조 비교. 고분자의

배열과 구조를 조절하고 3차원 구속 자기조립을 이용해, 여러 겹의 막마다 규칙적인 기공을 갖는 다층 메조다공성 베소솜을 형성하는 과정을 나타냈다. 아래는 기존 베소솜과 이번 연구에서 구현한 구조의 차이를 보여준다.

고분자에 특정 성분을 붙여 구멍을 만들기 적합한 형태로 분자들이 모이도록 유도하고, 만들어진 여러 겹의 구조가 무너지지 않도록 일부를 서로 연결해 고정했다. 이후 앞서 붙였던 성분을 선택적으로 제거하자 여러 겹의 골격은 유지되고 막마다 미세한 구멍이 형성됐다.

연구팀은 이렇게 만든 기공이 입자 표면에서 끝나지 않고 각각의 막을 관통하는 이동 통로로 이어지는지 확인하기 위해 입자 내부를 3차원으로 재구성했다. 분석 결과, 기공은 막 중간에서 끊기지 않고 입자 안팎을 관통하는 통로로 이어졌으며, 이러한 구조가 여러 겹의 모든 막에서 확인됐다.

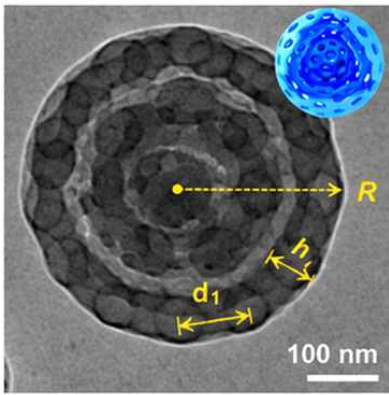


▲ 3차원으로 확인한 여러 겹의 막과 관통형 기공. 여러 각도에서 촬영한 전자현미경 영상을 3차원으로 재구성한 결과, 기공이 막 중간에서 끊기지 않고 안팎을 관통하며 이러한 구조가 여러 겹의 모든 막에 형성돼 있음을 확인했다.

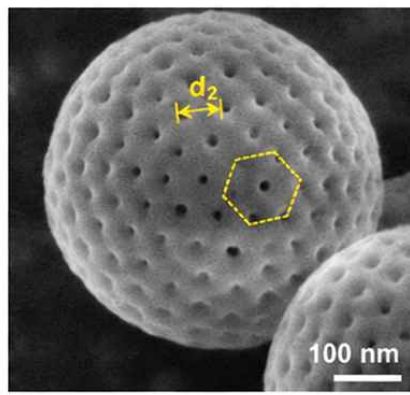
막마다 통로가 생기면서 바깥에서 들어온 분자가 접촉할 수 있는 입자 내부의 표면적도 크게 늘었다. 이를 나타내는 비표면적*은 기공이 없는 기존 다층 입자보다 약 11.2배 넓었다. 전자현미경으로 관찰한 표면 기공의 평균 크기는 약 22.5나노미터(nm)로, 사람 머리카락 굵기의 약 4,000분의 1에 해당한다.

* 비표면적: 같은 무게의 물질이 외부와 접촉할 수 있는 전체 표면의 넓이다. 일반적으로 기공이 많을수록 넓어진다.

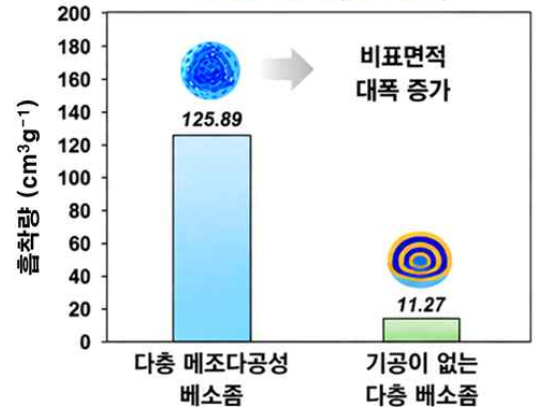
다층 구조 (단면 TEM)



표면 메조기공 (SEM)



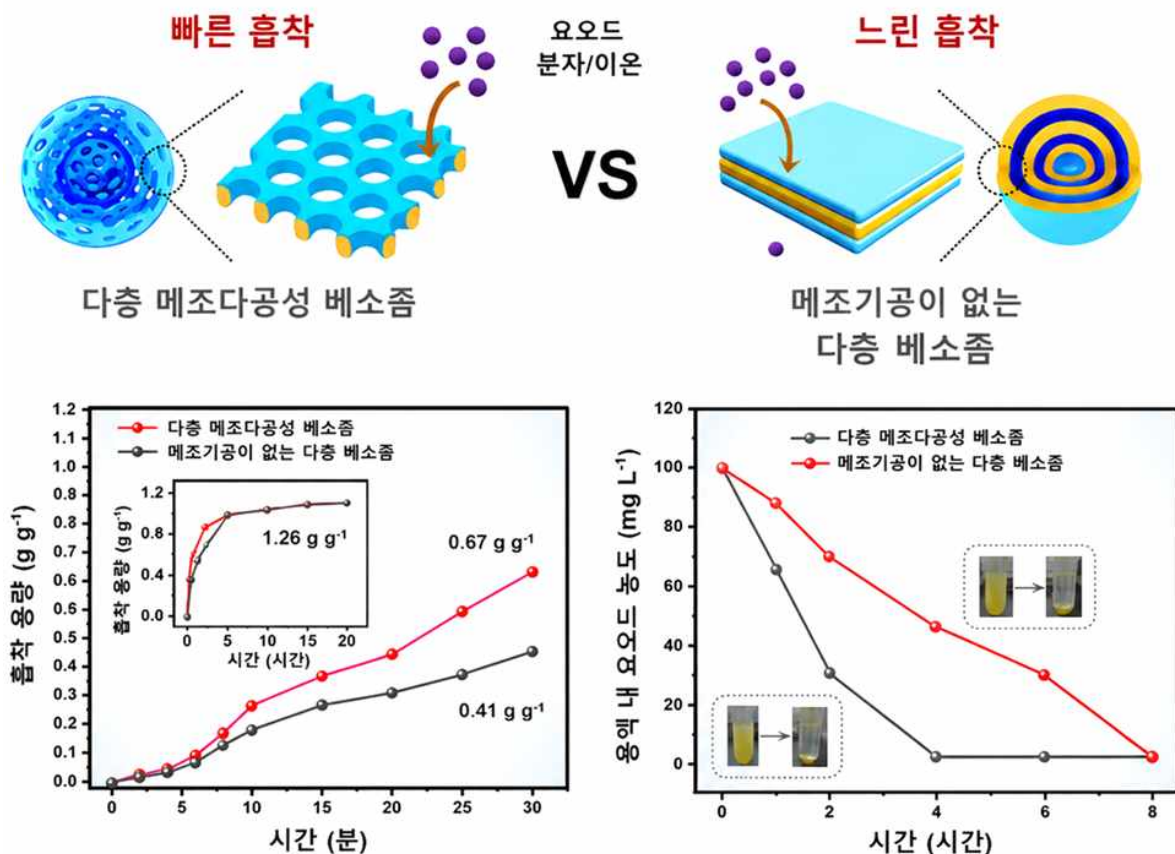
비표면적 증가 (BET 분석)



▲ 전자현미경으로 관찰한 다층 메조다공성 베소솜의 구조. 전자현미경으로 관찰한 결과, 입자 내부에는 여러 겹의 막이 형성돼 있고 표면에는 미세한 기공이 규칙적으로 배열돼 있음을 확인했다. 표면 기공의 평균 크기는 약 22.5나노미터(nm)로, 사람 머리카락 굵기의 약 4,000분의 1에 해당한다.

연구진은 각 막을 관통하는 기공이 실제로 외부 분자를 더 빠르게 받아들이는 데 도움이 되는지 확인하기 위해, 입자에 잘 달라붙는 요오드를 시험 물질로 사용해 '구멍이 있는 입자'와 '구멍이 없는 입자'의 흡착 속도를 비교했다.

요오드에 노출한 지 30분 뒤 '구멍이 있는 입자'는 1g당 0.67g을 흡착해 '구멍이 없는 입자(0.41g/g)'보다 같은 시간 동안 약 1.6배 많은 요오드를 받아들였다. 최종 흡착량은 입자 1g당 최대 1.26g이었다.



▲ 관통형 기공에 따른 요오드 흡착 속도 비교. 관통형 기공을 갖는 다층 메조다공

성 베소솜은 기공이 없는 기존 다층 베소솜보다 요오드를 빠르게 흡착했다. 요오드에 노출한 지 30분 뒤 입자 1g당 0.67g을 흡착해 기공이 없는 구조(0.41g/g)보다 약 1.6배 많았으며, 물속에서도 더 빠르게 요오드를 흡착하는 것을 확인했다.

물속에서 진행한 실험에서는 두 입자가 최종적으로 제거한 요오드의 양은 비슷했지만 흡착 속도에서 차이가 나타났다.

‘구멍이 있는 입자’는 약 4시간 만에 최종 수준에 도달한 반면 ‘구멍이 없는 입자’는 약 8시간이 걸렸다. 여러 겹의 막에 만든 통로를 통해 외부 분자가 입자 안쪽까지 더 빠르게 이동할 수 있음을 보여주는 결과다.

‘구멍이 있는 입자’는 5차례 요오드를 흡착했다가 다시 빼내는 과정을 반복한 뒤에도 처음 흡착할 수 있었던 양의 81.6%를 유지했다.

이은지 단장은 “이번 연구는 여러 겹의 구조를 안정적으로 유지하면서 모든 막에 분자가 드나들 수 있는 통로를 구현했다는 데 의미가 있다”며 “GIST-InnoCORE 세계석학멘토인 진타오 주 교수와 한중교류-공동연구사업을 통해 이어온 협력이 이번 성과로 이어진 만큼, 앞으로도 국제 공동연구를 통해 연구를 발전시켜 나가겠다”고 말했다.

공동 제1저자인 황준호 박사는 “2차원 전자현미경 영상만으로는 여러 겹의 막 안에서 기공이 어떻게 이어지는지 확인하기 어려웠다”며 “여러 각도의 영상을 3차원으로 재구성해 각 막의 기공이 안팎을 관통하고 있음을 직접 확인했다”고 말했다.

이번 연구는 GIST-InnoCORE 연구단 이은지 단장(신소재공학과 교수)과 중국 HUST 진타오 주(Jintao Zhu)·런화 덩(Renhua Deng) 교수가 지도하고 GIST-InnoCORE 연구단 황준호 박사·HUST 미안 왕(Mian Wang) 등이 공동제1저자로 수행한 이번 연구는 과학기술정보통신부·한국연구재단 한중공동연구사업과 과학기술정보통신부 지스트-이노코어(GIST-InnoCORE) 사업의 지원을 받았다.

연구 결과는 국제학술지 《네이처 커뮤니케이션즈(Nature Communications)》에 2026년 9월 1일 온라인으로 게재됐다.

한편 GIST는 이번 연구 성과의 기술사업화 및 산업적 활용에 관심 있는 기업·기관의 문의를 창업혁신진흥원 기술사업화센터(hgmoon@gist.ac.kr)를 통해 받고 있다고 밝혔다.

1. 논문명, 저자 정보

- 저널명 : Nature Communications (IF: 18.1), 2025년 기준
- 논문명 : Multilayer Mesoporous Vesosomes of Block Copolymer
- 저자 정보 : 미안 왕(Mian Wang, 공동제1저자, 중국 HUST), 황준호 박사(공동제1저자, GIST 신소재공학과, GIST-InnoCORE 연구단), 황옌 셴(Huangyan Shen, 공동제1저자, 중국 푸단대학교), 시황 정(Xihuang Zheng, 공저자, 중국 HUST), 쓰단 텐(Sidan Tian, 공저자, 중국 HUST), 선빈 천(Senbin Chen, 공저자, 중국 HUST), 김형준 교수(공저자, 서강대학교 화공생명공학과), 웨이화 리(Weihua Li) 교수(공동교신저자, 중국 푸단대학교), 런화 덩(Renhua Deng) 교수(공동교신저자, 중국 HUST), 이은지 교수(공동교신저자, GIST 신소재공학과, GIST-InnoCORE 연구단), 진타오 주(Jintao Zhu) 교수(공동교신저자, 중국 HUST)