

# GIST, 원하는 크기와 모양으로 재단하고 반복 사용 가능한 필름 형태 나노반응기 개발

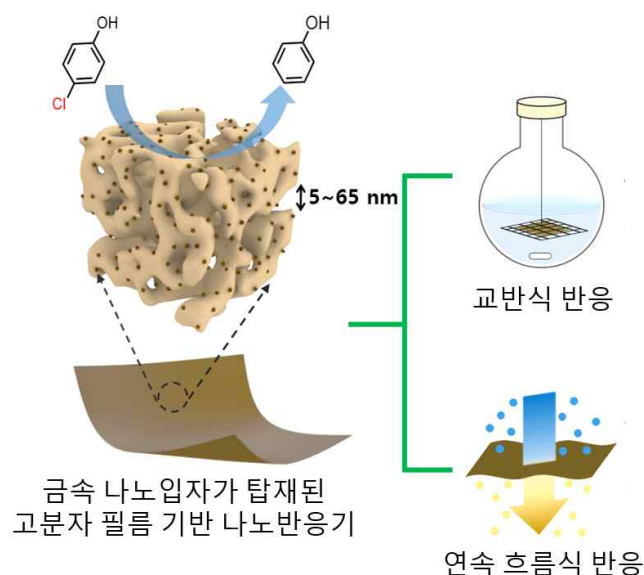
- 신소재공학부 박지웅 교수팀, 새로운 삼차원 나노다공성 고분자 필름 제조 방법 및 기공의 내벽 따라 일정한 밀도로 금속 나노입자를 고르게 형성하는 기술로 기존 나노반응기 단점 극복
- 한정된 나노 공간 안에서 화학반응 일으켜 수율 및 선택성을 향상할 수 있는 멤브레인 촉매 반응기 소재 분야 개척... 국제학술지「Small」표지 논문 선정



▲ (오른쪽부터) 신소재공학부 박지웅 교수, 정다운 박사과정생

최근 나노 기공을 가진 구조 안에 촉매를 넣어 두고 이 공간 안에서 화학반응을 일으켜 수율이나 선택성을 올리기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 신소재공학부 박지웅 교수 연구팀이 **원하는 크기와 모양으로 재단할 수 있고, 반복하여 재사용할 수 있는 필름 형태 나노반응기\***를 개발했다고 밝혔다.



▲ 금속 나노입자가 탑재된 고분자 필름 기반 나노반응기. 합성된 나노반응기는 교반식뿐만 아니라 연속 흐름식 반응 시스템에도 효과적으로 적용할 수 있다.

이번 연구 성과는 제약·정밀화학 분야를 비롯해 **화학반응을 매개로 하는 소자 분야에서의 활용**이 기대된다.

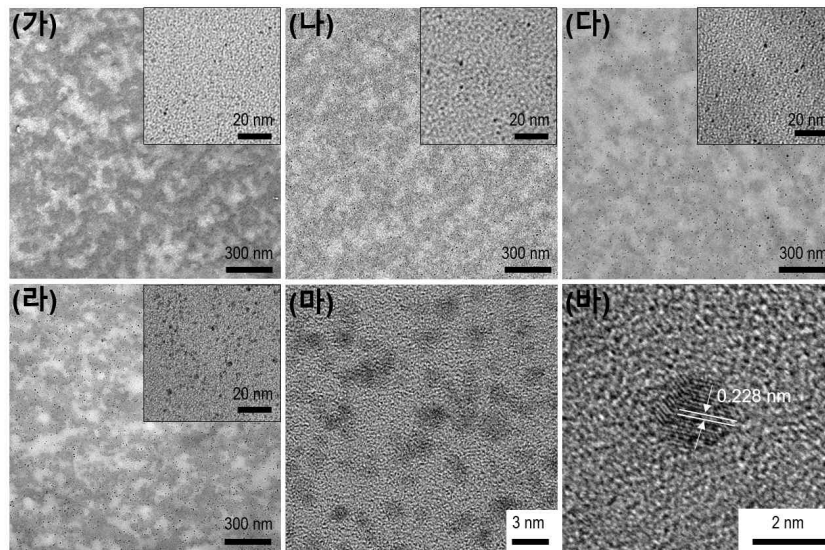
\* **나노반응기**: 수 나노미터에서 수백 나노미터 정도인 크기를 가진 공간 안에 촉매를 함유하고 있으며 외부에서 반응물이 유입되어 화학반응이 일어난 다음 생성물이 방출될 수 있도록 만든 나노구조.

연구팀이 개발한 '**다공성 멤브레인 필름형 나노반응기**'는 반응물질이 나노 다공성 필름을 통과하면서 생성물질로 전환되게 하는 기능을 가지며, 촉매를 함유한 나노 공간 안에서 화학반응이 일어나게 하여 수율과 선택성을 높일 수 있는 나노반응기의 특징을 가지면서, 기존 나노반응기의 단점인 ▲복잡한 제조 방법 ▲조절하기 어려운 촉매의 양과 입자 크기 ▲**사용 후 회수 및 재사용의 어려움을 해결**하였으며, 스케일업이 용이하고 교반식 반응뿐만 아니라 **연속 흐름 반응 시스템에도 효과적으로 적용**할 수 있다는 장점이 있다.

나노반응기는 주로 촉매를 함유한 다공체 입자를 반응 용액에 분산시켜 만든 콜로이드 형태와 고체 기질 위에 촉매를 함유한 다공성 구조를 만든 고체지지체 형태로 나눌 수 있다.

콜로이드 형태는 회수와 재사용이 어렵고, 고체지지체 형태는 과량의 금속 전구체 용액에 담가 촉매를 형성하므로 고가의 금속 원료가 낭비될 수밖에 없으며 촉매 침출로 인해 성능이 저하되고 반복 사용이 어렵다는 문제점이 있다.

따라서 **과량의 전구체를 사용하지 않으면서 정량적으로 촉매를 탑재**하고 촉매 입자의 크기 및 분포를 제어할 수 있는 방법으로 제조할 수 있으며, 회수와 반복 사용 등이 용이한 나노반응기 구조의 개발이 필요하다.



▲ 고분자 필름 내 탑재된 금속 나노입자의 담지량에 따른 필름의 단면적 투과 전자 현미경 사진. (가-라) 담지된 금속의 양이 증가 할수록 나노입자의 사이즈(1~2nm)를 균일하게 유지하면서 개수를 조절할 수 있음. (마,바) (라)의 확대된 그림. 정교한 사이즈의 나노입자가 고르게 분포됨.

'다공성 멤브레인 나노반응기'는 수 나노미터에서 수십 나노미터까지의 너비를 가진 기공이 삼차원 미로처럼 연결된 채널 구조를 가지며, **고온이나 유기용매에서 변형되거나 함몰되지 않고 잘 유지된다.**

이 멤브레인을 금속 전구체\*의 용액에 담그면 그 농도에 따라 나노 기공 내벽 표면에 흡착되는 금속 전구체의 흡착량이 정밀하게 조절되는 특성을 이용하여 **나노 반응기 안에 형성되는 금속 나노입자의 양과 밀도를 정밀하게 제어할 수 있다.**

이때 나노 기공 내벽에 고르게 형성된 금속 나노입자는 기공 안에 유입되는 반응물의 화학반응에 촉매로 작용한다. 분자의 확산이나 외부 물질의 유입이 나노 기공에 의해 제한되는 환경에서 일어나는 화학반응은 큰 반응용기에서와는 다르게 **반응 생성물의 수율이 향상되거나 조성이 다르게 나타날 수 있다.**

\* **전구체**: 화학반응에 의해 어떤 물질로 변하기 전 단계의 화합물

연구팀은 삼차원으로 연결되고, 팔라듐 전구체에 친화적인 화학작용기가 코팅된 기공 채널을 가진 **나노다공성 고분자 필름을 합성하여 기공 내벽에 팔라듐 전구체를 정량적으로 균일하게 흡착한 후, 환원을 거쳐 팔라듐 나노입자가 탑재된 나노반응기를 제조하였다.**

교반식 반응기에서는 이 필름형 나노반응기를 용기 안에 담근 채 반응용액을 휘저으면(攪拌) 반응물/생성물이 삼차원적인 채널을 따라 쉽게 드나들며 화학반응이 일어나고, **반응이 끝나면 필름을 집어내어 새 반응 용액에 넣어 반복 사용할 수 있다.**

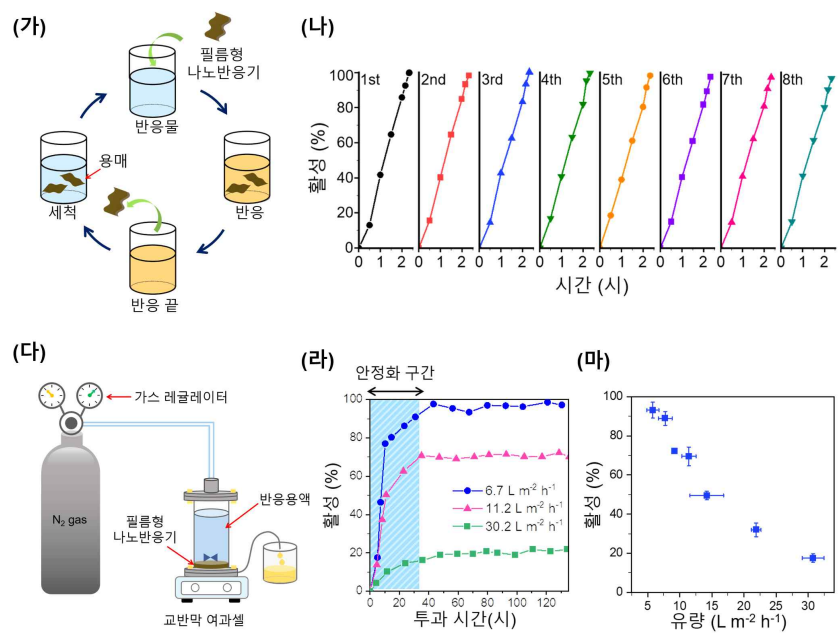
연속 흐름 반응기에서는 반응 용액을 나노반응기 필름의 한 면에서 가압하여 투과하도록 하면 생성물의 용액이 반대면으로 흘러나온다. 이 경우, **용액의 농도와 유속 등을 제어하여 반응 수율 및 선택성 등을 제어할 수 있다.**

연구팀은 수질오염물질인 유기염소화합물의 탈염소화반응\*을 진행한 결과, **10회 이상 교반식 반응에 재사용하거나 200시간 이상 연속흐름반응을 지속해도 촉매의 활성이 감소하지 않고 유지됨을 확인하였다.**

\* **탈염소화반응**: 염소(Cl) 가 달린 유기화합물의 염소를 제거하는 촉매반응

이 합성법의 특징은 **고분자 필름의 기공 내벽을 따라 흡착되는 금속 전구체의 양을 정밀하게 조절할 수 있고, 흡착된 전구체를 환원시켜 생성된 금속 나노입자의 사이즈를 1~2 나노미터 수준으로 유지하면서 균일하게 기공 내벽에 분포시킬 수 있다는 것이다.**

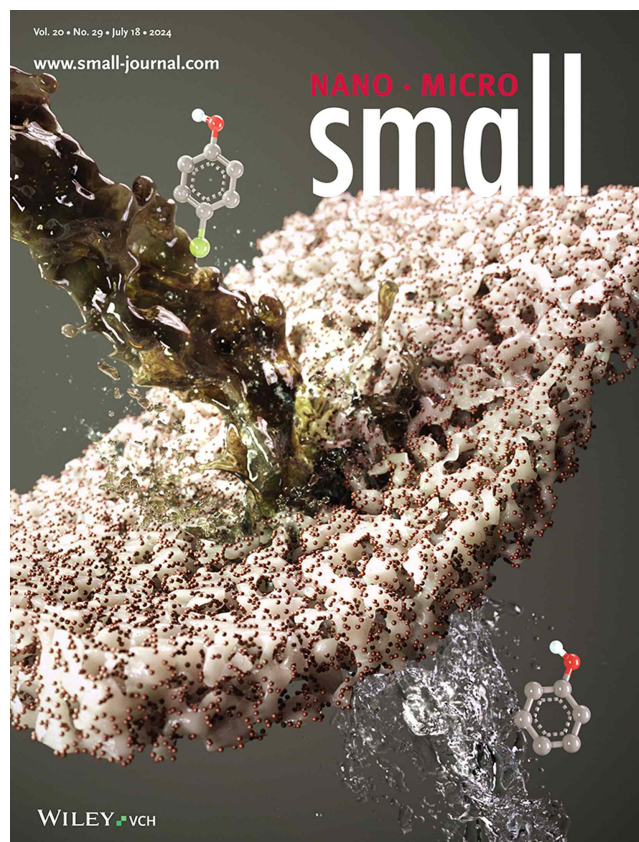
또한, 기존 합성법과 달리 전구체를 흡착한 후에 **남은 전구체 용액을 재사용할 수 있어 금속 남용을 예방할 수 있어 친환경적이다.**



▲ 금속 나노입자가 탑재된 필름형 나노반응기의 촉매 성능 테스트. (가,나) 교반식 반응에서 재사용 실험 과정과 8번의 재사용 테스트 후에도 촉매 성능 유지. (다-마) (다) 연속 흐름 반응 모식도 및 (라,마) 유체의 유량 조절에 따른 활성 변화와 100시간 가량의 장시간 반응 테스트 결과.

박지웅 교수는 “필름 형태의 나노반응기는 다른 종류의 금속 촉매 또는 효소도 쉽게 탑재할 수 있으며, 효율적이고 친환경적인 화합물 제조법을 개발하거나 원하는 모양으로 만들어 화학 센서나 반응기로서 휴대용 기기에 내장하는 데 활용될 수 있다”고 설명했다.

신소재공학부 박지웅 교수가 지도하고 정다운 박사과정생과 오왕석 박사가 수행한 이번 연구는 한국연구재단 기초연구사업(중견연구)의 지원을 받았으며, 재료과학 분야 상위 10% 국제학술지 '스몰(Small)'에 2024년 7월 18일 표지 논문(Back Cover)



▲ 우수성을 인정받아 'Small'표지 논문(Back Cover)에 선정

# 논문의 주요 정보

## 1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Small (IF: 13.3, 2024년 기준)
- 논문명 : 3D-Continuous Nanoporous Covalent Framework Membrane Nanoreactors with Quantitatively Loaded Ultrafine Pd Nanocatalysts
- 저자 정보 : 정다운 (GIST 박사과정, 제1저자), 오왕석 (일리노이 대학 어바나-샴페인, 공동저자), 박지웅 (GIST, 교신저자)