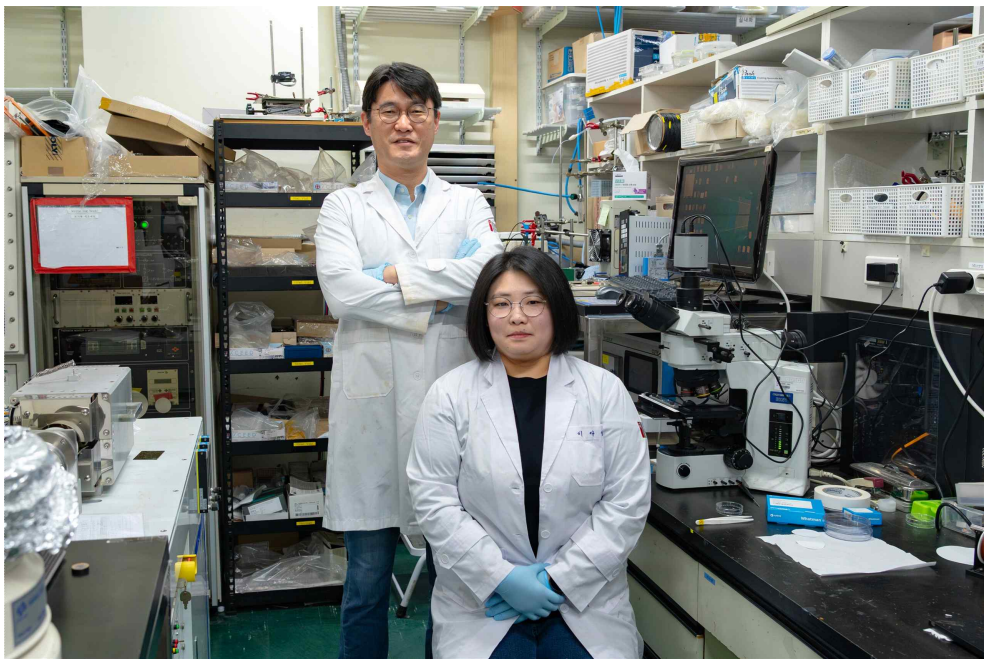
“값비싼 백금 촉매, 이제 ‘속’까지 다 쓴다”
GIST, 반응 공간 넓혀 수소 생산 효율 극대화한 차세대 촉매 기술 개발

- 신소재공학과 윤명한 교수팀, 고분자 필름을 다공성 나노구조로 설계해 백금이 전극 내부까지 침투·분산되도록 구현… 국제학술지《Small》게재
- 동일 백금 사용량으로 활성면적 2.4배, 촉매 성능 3.2배 향상
- 수소 생산·연료전지에 적용 가능한 차세대 전기화학 전극 플랫폼 제시



▲ (왼쪽부터) 윤명한 신소재공학과 교수, 이다영 박사

광주과학기술원(GIST·지스트, 총장 임기철)은 신소재공학과 윤명한 교수 연구팀이 **전기가 잘 통하면서 내부에 미세한 빈 공간이 있는 구조의 전도성 고분자 필름 ‘피도트 피에스에스**(PEDOT:PSS)[*]**’를 활용해, 수소 생산에 필수적인 백금**(Pt) **촉매가 전극의 ‘표면’을 넘어 ‘내부 전체’에 고르게 퍼지도록 하는 차세대 촉매 기술을 개발**했다고 밝혔다.

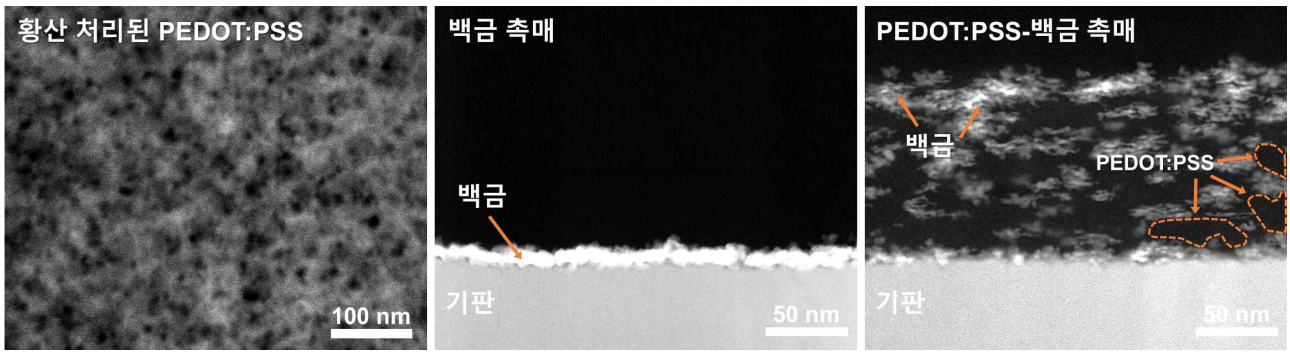
이번 연구는 **전자소자·센서·에너지 장치의 전극 재료로 널리 쓰이는 고분자의 수중 안정성과 전도성을 높이는 동시에, 촉매 반응을 전극 표면에서 내부 전체로 확장함으로써 적은 양의 백금으로도 높은 성능을 구현할 수 있는 새로운 설계 전략을 제시**했다는 점에서 의미가 있다.

*** 폴리(3,4-에틸렌디옥시티오펜) 폴리스티렌 설포네이트(PEDOT:PSS):** 전자와 이온을 모두 전달할 수 있는 대표적인 전도성 고분자 재료로, 유연하고 가공이 쉬워 전자소자·센서·에너지 소자 등에 널리 활용된다.

백금(Pt)**은 물을 전기분해해 수소를 만드는 수소 발생 반응**(HER)[*]**에서 가장 뛰어난 성능을 보이는 핵심 촉매**로, **반응 속도가 빠르고 수소를 안정적으로 생성하는 높은 활성도를 갖는다.**

그러나 **가격이 매우 비싸 전극 표면에 얇게 코팅하는 방식으로 제한적으로 사용**되며, 이로 인해 **실제 반응에 참여하는 면적이 좁다는 한계가 있다**. 또한 **시간이 지나면 입자가 뭉치거나 떨어져 성능이 저하**되는 문제도 있다.

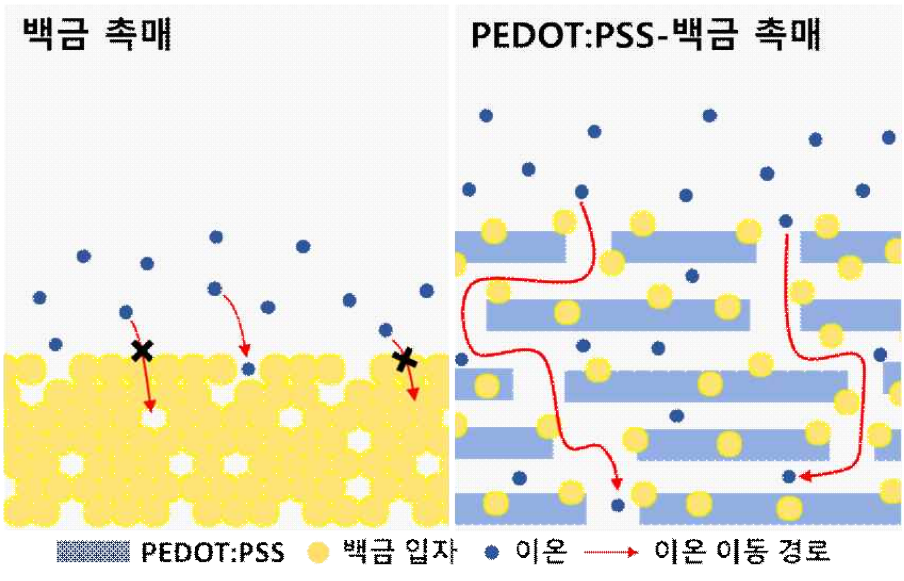
*** 수소 발생 반응(HER, Hydrogen Evolution Reaction)**: 전기화학 반응을 통해 수소를 생성하는 과정으로, 수전해 기반 친환경 수소 생산의 핵심 반응이다.



▲ **촉매의 구조적 특징.** 황산 처리로 재구성된 피도트 피에스에스(PEDOT:PSS)의 다공성 나노섬유 구조(왼쪽)를 기반으로, 기존 백금 촉매에서는 백금이 전극 표면에만 형성되는 반면(가운데), 피도트 피에스에스(PEDOT:PSS) 백금 촉매에서는 백금이 전도성 고분자 내부까지 균일하게 분산된 구조를 확인할 수 있다(오른쪽).

연구팀은 이러한 한계를 극복하기 위해, 백금 입자를 단순히 작게 만드는 대신 **'촉매가 작동할 수 있는 공간 자체'를 전극 내부까지 확장하는 새로운 전략을 제시**했다.

이를 위해 **전기가 잘 통하고 물속에서 부풀 수 있도록 설계한 머리카락 굵기의 1,000분의 1 수준**(약 60 나노미터(nm))**의 매우 얇은 전도성 고분자**(PEDOT:PSS) **필름을 황산으로 처리해, 전도성이 낮은 성분을 제거하고 내부에 미세 통로가 형성된 '다공성 나노섬유 구조'로 만들었다**.



▲ **촉매 작동 개념도**. 기존 백금 촉매(왼쪽)는 반응이 전극 표면에만 제한되지만, 피도트 피에스에스(PEDOT:PSS) 백금 촉매(오른쪽)는 이온이 다공성 고분자 내부까

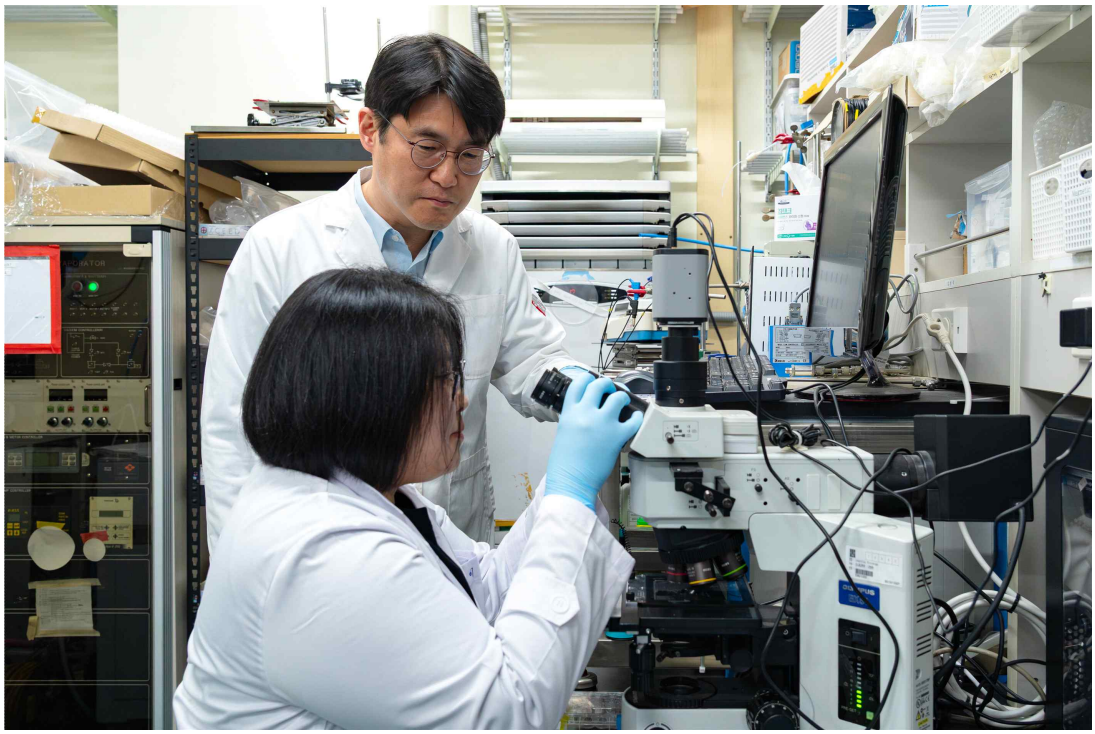
지 침투해 반응 영역이 전극 전체로 확장된다. 덕분에 같은 양의 백금으로도 더 많은 활성 부위를 실제 반응에 활용할 수 있다.

이 구조는 **물속에서 적절히 팽창하며 내부에 통로를 형성해 전하와 이온이 자유롭게 이동할 수 있도록 하고, 백금이 필름 내부 깊숙이 침투해 나노 입자로 자리잡을 수 있는 환경을 제공**한다.

연구팀은 이어 **백금 이온이 포함된 용액에서 '펄스 전류 전기전착*' 공정을 적용해, 백금이 필름 표면이 아닌 내부까지 스며들어 균일하게 형성**되도록 했다.

그 결과, 기존처럼 표면에만 집중되던 백금과 달리 **필름 전체에 고르게 분산된 구조를 구현하는 데 성공**했다.

*** 펄스 전류 전기전착(pulse-current electrodeposition)**: 전기를 일정하게 계속 흘리지 않고, 짧게 끊어가며 반복해서 금속을 형성하는 공정이다. 이렇게 하면 금속 입자가 한꺼번에 크게 뭉치는 것을 줄이고, 더 작고 균일하게 형성되도록 도울 수 있다.



▲ GIST 신소재공학과 윤명한 교수, 이다영 박사가 실험을 하고 있다.

이렇게 제작된 전극은 **물속에서도 안정적으로 구조를 유지하면서 적절히 팽창**해, **물 분자와 백금이 필름 내부까지 자유롭게 이동**할 수 있도록 함으로써 **전극 '전체 부피'에서 촉매 반응이 일어나도록 한다**.

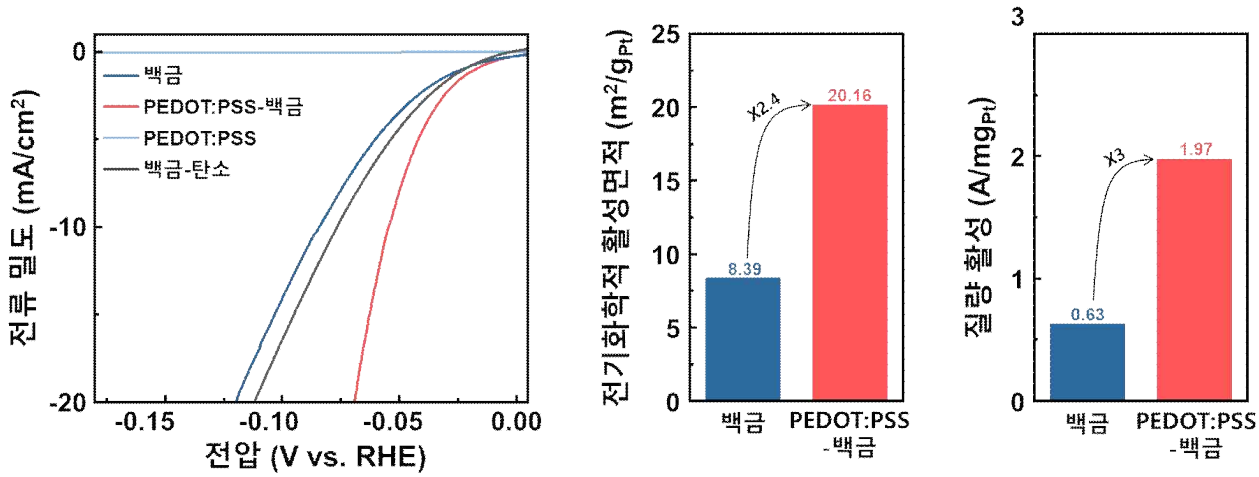
연구팀은 이 구조를 통해 **동일한 양의 백금을 사용할 때 실제 반응에 참여하는 면적**(ECSA)*을 **기존 대비 2.4배 이상 확대**하고, **백금 1g당 촉매 성능을 약 3.2배 향상**시켰다.

또한 **수소 생성 반응뿐 아니라 메탄올 산화 반응**(MOR)*에서도 **더 높은 활성도를 보였으며, 빛을 비추면 반응 속도가 더욱 증가하는 효과도 확인**했다.

이를 통해 **적은 양의 귀금속으로도 높은 활성과 반응 속도를 구현할 수 있는 다기능 전극 플랫폼으로의 활용 가능성을 확인**했다.

*** 전기화학적 활성면적(ECSA)**: 촉매 표면 중 실제 전기화학 반응에 참여할 수 있는 유효 면적을 뜻한다. 값이 더 많은 활성 부위가 반응에 활용된다는 의미다.

*** 메탄올 산화 반응(Methanol Oxidation Reaction, MOR)**: 메탄올이 반응하면서 전기를 만들어내는 데 관여하는 전기화학 반응이다. 직접메탄올연료전지(DMFC)와 같은 에너지 변환 장치의 핵심 반응 중 하나로, 촉매가 성능을 확인하는 데 활용된다.



▲ 촉매의 수소 발생 반응 성능 비교. 피도트 피에스에스(PEDOT:PSS) 백금 촉매는 백금만 있는 촉매보다 수소 발생 반응에서 뛰어난 전기화학 성능을 보였고, 상용 백금-탄소 촉매와 비교해도 높은 활성을 나타냈다(왼쪽). 또한 전기화학적 활성 면적(가운데)과 백금 1그램(g)당 활성(오른쪽)도 크게 향상되어, 전도성 고분자 내부까지 확장된 반응 구조 덕분에 백금 활용도가 높아졌음을 보여준다.

윤명한 교수는 "이번 연구는 **백금을 전극 표면에만 올리는 기존 방식에서 벗어나, 전극 구조 자체를 설계해 반응 공간을 내부까지 확장함으로써 귀금속 촉매의 활용 효율을 극대화**한 사례"라며 "적은 양의 백금으로도 높은 성능을 구현할 수 있어 **수소 생산, 연료전지, 다양한 전기화학 에너지 변환 기술은 물론 바이오·생체 친화 전기화학 장치에도 폭넓게 활용**될 수 있을 것"이라고 밝혔다.

GIST 신소재공학과 윤명한 교수가 지도하고 이다영 박사(제1저자) 등이 수행한 이번 연구는 **과학기술정보통신부·한국연구재단 중견연구자지원사업과 글로벌 매칭형(스웨덴) 기초연구사업, 산업통상부·한국산업기술기획평가원 소재부품기술개발사업, 과학기술정보통신부 지스트-이노코어(GIST-InnoCORE) 사업의 지원**을 받았다.

연구 결과는 **국제학술지 《스몰(Small)》에 3월 31일 온라인으로 게재**됐다.

한편 GIST는 이번 연구 성과가 학술적 의의와 함께 산업적 응용 가능성까지 고려한 것으로, **기술이전 관련 협의는 기술사업화실**(hgmoon@gist.ac.kr)**을 통해 진행**할 수 있다고 밝혔다.

논문의 주요 정보

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Small (IF:12.1, 2024년 기준)
- 논문명 : A Highly Porous Nanofibrillar PEDOT:PSS Matrix for Beyond-Surface Precious-Metal Utilization and Volumetric Electrocatalysis
- 저자 정보 : 이다영 (제1저자, GIST), 신혜민 (공동저자, GIST), 김지환 (공동저자, GIST), 윤명한 (교신저자, GIST)