

# GIST, 수소 생산 효율 '극대화' 비결 찾았다

## 자연계 효소 원리 모사해

### 에너지 손실 없는 연속 전자 전달 구현

- 화학과 서준혁 교수팀, 전자스핀 상호작용 정밀 제어로 수소 생산 반응 메커니즘 규명
- 전기량 대비 100% 수소 생산, 초당 22만 개 수소 분자 생성... 고효율 철 기반 촉매 제시
- 생체모방 에너지 전환 기술 및 지속 가능 연료 생산에도 응용 가능해 연료전지 등 에너지 산업 전반에 파급 효과 예고... 국제학술지 《미국 화학회지(JACS)》 게재



▲ (왼쪽부터) 화학과 서준혁 교수, 이주은 석·박 통합과정 학생, 허동욱 GIFT 학·석·박 통합과정 학생  
탄소중립 실현을 위해 화석 연료를 대체할 친환경 에너지 저장 수단으로 수소(H<sub>2</sub>)의 중요성이 커지면서, 이를 효율적으로 생산할 수 있는 기술과 촉매 개발에 대한 관심이 높아지고 있다.

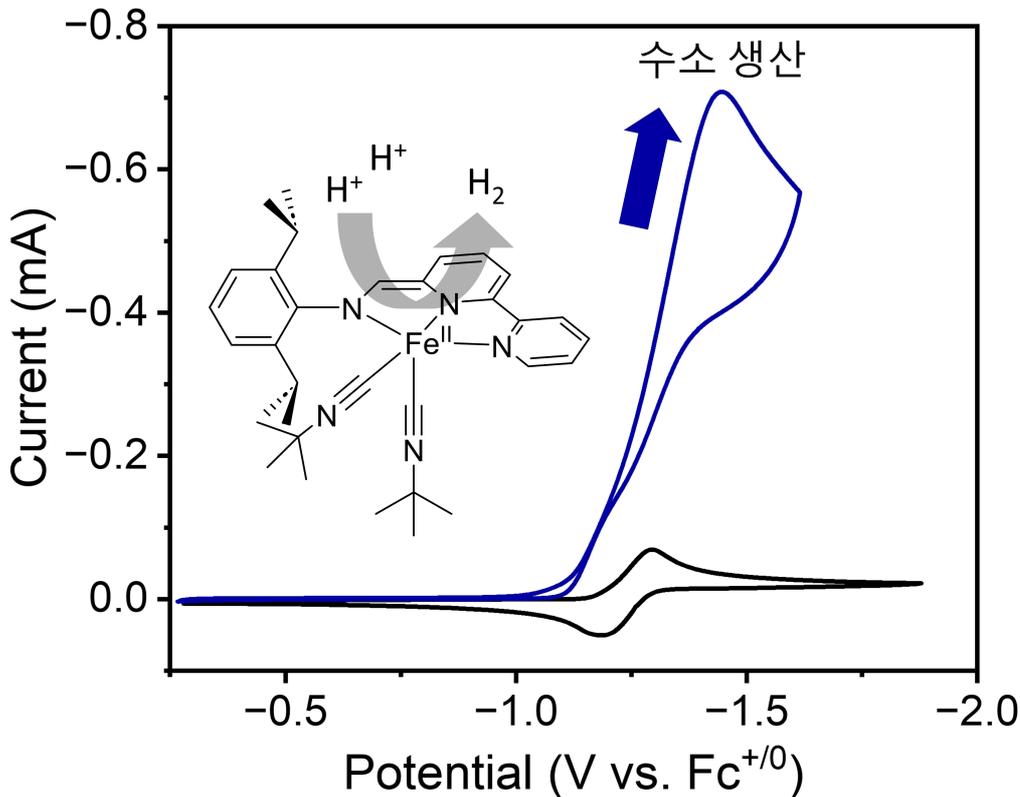
광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 화학과 서준혁 교수 연구팀이 철 (Fe) 기반 화합물 촉매에서 전자스핀 간 상호작용을 정밀하게 조절함으로써, 전자 이동이 더욱 빠르고 효율적으로 일어나는 수소 생산 반응 메커니즘을 규명했다고 밝혔다.

이번 연구는 철 화합물 내에서 전자스핀의 조절을 통해 연속적인 전자 전달을 유도하여 에너지 손실 없는 새로운 반응 경로를 제시했다는 데 큰 의의가 있다. 이 성과는 고성능 수소 촉매 개발은 물론, 생체모방 에너지 전환 기술과 지속 가능한 연료 생산에도 폭넓게 활용될 수 있다.

대부분의 화학 반응에서 핵심이 되는 '전자 전달' 과정은, 전자 하나하나의 회전 방향인 '스핀'의 상호작용에 따라 반응 속도와 효율이 크게 달라진다.

연구팀은 이러한 전자스핀 상호작용을 정밀하게 제어함으로써, 하나의 철 원자만으로도 추가적인 에너지 소모 없이 두 번의 전자 전달이 연속적으로 가능하다는 사실을 밝혀냈다.

이 메커니즘은 수소 분자를 생성하는 데 필요한 조건을 만족시키며, 수소 생산 효율을 높이는 핵심 원리로 작용할 수 있다.



▲ **고효율 철 착화합물의 반응 모식도 및 촉매 순환 전압 전류 곡선.** 스핀 상태를 조절할 수 있는 리간드의 효율적 설계를 통해 2개의 전자를 빠르게 전달하여 높은 효율의 수소 생산 반응을 진행함. 가파르게 증가하는 촉매 전류는 고효율의 촉매 성능을 나타냄.

자연계에서 수소를 생성하는 효소인 '하이드로제네이스(Hydrogenase)'는 두 개의 철 원자가 결합한 구조를 통해 전자를 연속으로 전달한다. 하지만 지금까지 인공적으로 모사한 구조에서는 이러한 고효율 전자 전달이 잘 재현되지 않았다.

이번 연구는 **하나의 철 원자만으로도 자연계 효소와 유사한 방식의 연속 전자 전달이 가능함을 실험적으로 입증했다는 점에서 주목된다.**

연구팀은 철 이온과 결합하는 '리간드(Ligand)\*'라는 분자를 이용해 이러한 반응을 유도했다. 기존에는 이런 반응이 일어나기 위해 많은 에너지가 필요했지만, **철과 리간드 간 상호작용을 정밀하게 조정함으로써 에너지 소모를 줄이면서도 연속 전자 전달이 가능하다는 사실을 확인했다.**

\* **리간드(Ligand):** 금속과 결합해 금속의 전자 구조나 성질을 조절하는 분자로, 촉매의 안정성과 반응성을 크게 좌우하는 중요한 역할을 한다. 예를 들어, 금속이 전자를 주고받기 쉽게 돕고, 반응이 일어날 때 필요한 에너지를 낮추는 기능도 한다.

일반적으로는 전자를 한 번 전달한 후, 두 번째 전자를 보낼 때 전자들 사이의 반발력 때문에 더 많은 에너지가 필요하다.

하지만 이번 연구에서는 전자스핀 상호작용을 정교하게 제어하고 철 화합물의 에너지를 안정화함으로써, **에너지 장벽 없이 연속적인 전자 전달이 가능한 반응 경로를 구현했다.**

이 철 기반 촉매는 **전기량 대비 100% 수소 생산 효율**을 기록했으며, **초당 22만 개 이상의 수소 분자를 생산하는 높은 반응 성능**을 보였다.

서준혁 교수는 "이번 연구는 **전자스핀 조절을 통해 전자 이동의 효율을 높일 수 있다는 점을 입증한 기초과학적 성과**"라며, "이 원리는 수소 생산뿐만 아니라 **연료전지, 전기화학 기반 이산화탄소 전환 등 다양한 에너지 전환 기술에 적용될 수 있는 중요한 기반이 될 것**"이라고 설명했다.

GIST 화학과 서준혁 교수가 지도하고 이주은 박사과정생과 허동욱 박사과정생이 주저자로 참여한 이번 연구는 한국연구재단의 지원을 받았다. 연구 결과는 국제학술지 《미국 화학회지(JACS, Journal of the American Chemical Society)》에 2025년 4월 23일 온라인 게재됐다.

한편, **공동 1저자인 허동욱 학생은 GIST의 학·석·박 통합 프로그램 GIFT\* 1기생으로, 서준혁 교수 연구팀에 조기 합류하여 이번 연구에 주도적으로 참여했다.**

\* **GIFT(Graduate Integrated Fast Track):** GIST가 2024년 가을학기부터 운영 중인 우수 과학기술 인재 양성 프로그램으로, 연구 잠재력과 역량이 뛰어난 학부 입학생을 조기에 선발해 학사부터 박사까지 약 7년 안에 학위를 마칠 수 있도록 설계된 제도다. 이 프로그램은 기존보다 빠른 진학과 체계적인 연구 참여 기회를 제공해, 학생들이 학부 시절부터 연구에 몰입할 수 있는 환경을 조성하고, 미래 과학기술을 이끌 전문 연구자로 조기에 성장할 수 있도록 지원한다.

허동욱 학생은 **GIFT 프로그램을 통해 조기에 GIST 석·박사통합 과정에 진입해 활발한 연구 활동을 펼치며, 우수한 성과를 창출함으로써 GIFT의 성공적인 사례로 주목 받고 있다.**

## 논문의 주요 정보

### 1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Journal of the American Chemical Society (IF: 14.5 , 2023년 기준)
- 논문명 : Enhanced catalytic activity via rapid two-electron transfer in low-spin Fe(II) complex and spin-state dependent proton reduction pathways
- 저자 정보 : 이주은 (제1저자, GIST), 허동욱 (제1저자, GIST), 이원중 (공저자, GIST) 서준혁 (교신저자, GIST)