

“전류만 모으던 부품이 스스로 촉매로” GIST, 공정 교체 없이 차세대 연료전지 성능·수명 다 잡았다

- GIST 주종훈 교수 연구팀, POSTECH·KIER와 '촉매 일체형 집전체' 기술 공동 개발
- 메테인 직접 써도 탄소 침적량 75% 감소... 상용화 호환성 입증하며 국제학술지 게재



▲ GIST-POSTECH-KIER 공동연구팀 단체사진. (왼쪽부터) GIST 환경·에너지공학과 주종훈 교수, 이희지 졸업생(석사), 남경덕 박사, KIER 고온수전해연구실 김선동 박사, POSTECH 신소재공학과 이동화 교수, 채수윤 학생(박사과정)

광주과학기술원(GIST·지스트, 총장 임기철)은 환경·에너지공학과 주종훈 교수 연구팀이 포항공과대학교(POSTECH) 이동화 교수 연구팀, 한국에너지기술연구원(KIER) 김선동 박사 연구팀과 공동으로, 메테인을 직접 연료로 사용하는 고체산화물전기화학셀의 발전 성능과 내구성을 동시에 높일 수 있는 '촉매 일체형 집전체' 기술을 개발했다고 밝혔다.

연구팀은 단순히 전류를 모으는 역할만 하던 기존 니켈 폼 집전체에 구리-니켈 합금과 가돌리늄 도핑 세리아(GDC)* 촉매층을 결합했다. 이로써 수소를 생산하는 메테인 개질 기능과 기기의 수명을 늘리는 탄소 침적 억제 기능을 동시에 갖추게 됐다.

* 가돌리늄 도핑 세리아(Gadolinium-Doped Ceria, GDC): 이산화세륨에 가돌리늄을 소량 첨가(도핑)하여 산소 이온 전도도를 극대화한 고성능 세라믹 전해질 물질이다.

무엇보다 복잡한 설비 교체 없이 집전체 하나만 개선해 기기의 성능과 내구성을 높였다는 점이 핵심이다. 기존 세라믹 셀의 소재나 제조 방식을 전혀 바꾸지 않아 당장 실제 산업에 적용하기에도 유리하다.

고체산화물전기화학셀은 고온에서 전기를 효율적으로 생산하는 차세대 발전 장치다. 수소는 물론 메테인 등 탄화수소 연료를 두루 활용할 수 있어 범용성이 뛰어나다.

메테인을 셀 내부에서 직접 수소로 바꾸면 부피가 큰 외부 장치를 줄일 수 있어

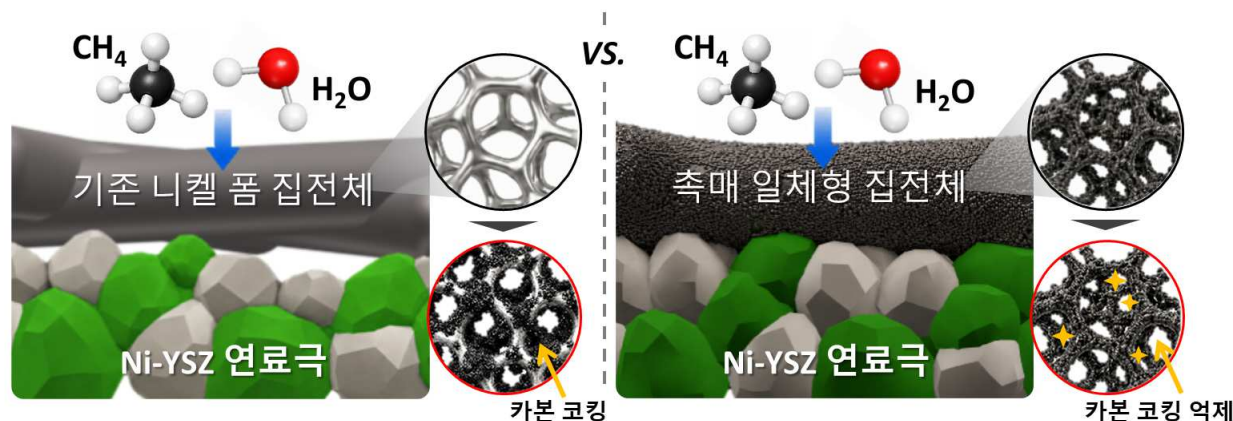
훨씬 효율적이다. 하지만 여기에는 치명적인 단점이 있다. 기존의 일반적인 니켈 기반 연료극을 쓰면 메테인이 분해되는 과정에서 탄소 찌꺼기가 쌓이는 '탄소 침적(Coking)'이 발생해 기기의 수명과 성능을 크게 떨어뜨리기 때문이다.

그동안 학계에서는 이러한 탄소 침적을 막기 위해 부품의 소재를 아예 바꾸거나 내부에 촉매를 억지로 집어넣는 방식을 주로 연구해 왔다. 그러나 이 방식은 고온에서 부품을 굽는 과정 중 원치 않는 화학반응을 일으키거나 처리 공정이 너무 복잡해 실제 산업 현장에서 크기를 키우거나 대량 생산하기에는 뚜렷한 한계가 있었다.

연구팀이 이번에 선보인 촉매 일체형 집전체는 복잡한 공정 대신 부품을 용액에 담갔다 빼고(딥코팅) 고온에서 굽는(열처리) 비교적 간단한 방식을 적용해 기존의 한계를 단번에 극복했다.

전류가 가장 먼저 통과하는 집전체 표면에서 니켈은 메테인이 수소로 바뀌는 반응을 촉진하고, 구리는 탄소 침적을 막아준다. 여기에 GDC 소재가 더해져 산소 이동을 활발하게 만들어 표면에 붙은 탄소까지 깨끗하게 청소해 주며, 부품 본연의 전기전도성도 유지한다.

이렇게 개발된 촉매 일체형 집전체는 부품 간의 전기적 접촉을 크게 향상시켜 압도적인 성능 개선을 이뤄냈다.



▲ 기존 니켈 폼 집전체와 연구팀이 개발한 촉매 일체형 집전체를 이용한 메테인 개질 촉진 및 니켈 기반 연료극의 탄소 침적 억제 모식도 비교. 기존 니켈 폼 집전체는 메테인 연료 사용 시 연료극 표면에 탄소가 침적되어 성능 저하가 발생할 수 있다. 반면, 촉매 일체형 집전체는 메테인 개질 반응을 촉진해 연료극에서의 탄소 침적을 억제한다.

연구팀의 측정 결과, 기존 연료(수소) 사용 시 최대출력밀도가 800℃ 기준 기존 2.22에서 2.84 W cm⁻²(제곱센티미터당 와트)로 약 28% 높아졌다.

메테인을 직접 연료로 주입했을 때는 최대출력밀도가 기존 1.48에서 2.44 W cm⁻²

로 약 65%나 급격히 상승했으며, 전력 손실을 유발하는 음 저항과 분극저항도 40% 이상 크게 줄어든 것으로 나타났다.

내구성 측면에서도 기존 부품과의 성능 격차가 확연했다. 탄소가 침적되기 쉬운 고속 코킹 조건에서 실험한 결과, 기존 부품은 약 50시간 만에 성능이 급격히 떨어진 반면, **연구팀의 집전체는 200시간 동안 안정적인 전류밀도와 메테인 전환율을 유지**했다.

실제 장기 운전 후 정밀 분석한 결과에서도 기존 부품 대비 탄소 침적량이 약 75%나 감소한 것으로 확인됐다. 또한 밀도범함수이론(DFT) 계산을 통해 **구리와 GDC가 탄소가 표면에 들러붙는 것을 방해하고 이를 쉽게 산화시켜 제거한다는 과학적 원리도 완벽히 규명**했다.

GIST 환경·에너지공학과 주종훈 교수는 “기존에는 메테인 사용에 따른 탄소 침적을 줄이기 위해 연료극 소재 자체를 바꾸는 데 주력했다면, 이번 연구는 **기존 공정을 그대로 유지하면서 집전체 부품 하나에 새로운 기능을 부여해 문제를 해결한 발상의 전환**”이라고 설명했다.

이어 “앞으로 대면적 셀과 스택으로 연구를 확장해 **실제 발전소나 분산발전 시스템에 바로 적용할 수 있는 고효율 연료전지 기술로 발전시키겠다**”고 포부를 밝혔다.

이번 연구는 ▲산업통상부 ‘에너지기술선도국제공동연구’ 사업 ▲과학기술정보통신부 ‘H2 NEXT ROUND’ 사업 ▲GIST ‘미래선도 특화연구’ 사업 등의 지원을 받아 수행됐다.

연구 결과는 환경·에너지 분야 세계적 권위의 국제학술지 《어플라이드 카탈리시스 (Applied Catalysis) B: 환경과 에너지(Environment and Energy)》에 2026년 9월 15일 온라인으로 게재됐다.

논문 정보

○ 논문명, 저자 정보

- 저널명 : Applied Catalysis B: Environment and Energy(IF: 19.7, 2025년 기준)
- 논문명 : Catalyst-integrated current collector strategy for coke-resistant, high-performance direct-hydrocarbon solid oxide electrochemical cells
- 저자 정보 : 주종훈(교신저자, GIST 환경·에너지공학과), 이희지(공동제1저자, GIST 환경·에너지공학과), 남경덕(공동제1저자, GIST 환경·에너지공학과), 채수윤(공동제1저자, POSTECH 신소재공학과), 이동화(공동교신저자, POSTECH 신소재공학과), 김선동(공동교신저자, KIER 고온수전해연구실) 등