

“구멍을 늘렸더니 전기가 훨씬 잘 흐르기 시작했다”

GIST, 과일 동결건조 원리 적용한 수직형 전극 구조로 연료전지 성능 한계 돌파

- 화학과 박찬호 교수팀, 환경·에너지공학과 문승현 교수팀 등과 공동으로 동결건조 과일의 다공성 구조 원리를 연료전지 전극 설계에 적용한 고성능 일체형 막-전극 접합체(MEA) 개발
- 백금 촉매 사용량 증가 없이 출력과 안정성 동시에 향상시켜, 고출력·고내구성 요구하는 이동형 연료전지 적용 가능성 제시... 국제학술지 《Chemical Engineering Journal》 게재



▲ (왼쪽부터) GIST 화학과 박찬호 교수, 정현승 박사, 환경·에너지공학과 문승현 초빙석학교수, 포스코 홀딩스 김재훈 박사, GIST 이승태 석사과정생

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 **화학과 박찬호 교수와 환경·에너지공학과 문승현 초빙석학교수, 포스코 홀딩스(POSCO Holdings) 김재훈 박사** 공동 연구팀이 동결건조 과일처럼 내부에 구멍이 많은 다공성 구조를 연료전지 전극 설계에 적용해, 연료전지 전극의 출력과 안정성을 동시에 높일 수 있는 새로운 막-전극 접합체(MEA) 구조*를 개발했다고 밝혔다.

이번 연구의 핵심은 동결건조 기술로 만든 다공성 촉매층과 전해질막을 연속적으로 하나의 구조로 결합함으로써, 연료전지 반응의 핵심 공간인 ‘삼상계면*’을 평면이 아닌 3차원 입체 구조로 확장했다는 점이다. 이를 통해 가스 확산과 반응 효율을 동시에 개선하여, 이동형 연료전지 기술로의 활용 가능성을 크게 높였다.

* **막-전극 접합체(MEA, Membrane Electrode Assembly)**: 고분자전해질막 연료전지의 핵심 부품으로, 전해질막과 양극·음극 전극이 하나의 구조로 결합된 것으로 중앙의 전해질막을 중심으로 양쪽에 촉매가 코팅된 전극층이 배치돼 있으며, 수소와 산소의 전기화학 반응을 통해 전기가 생성된다. 이 과정에서 이온 전달과 전자 이동, 가스 확산이 동시에 일어나 연료전지의 성능과 수명을 좌우한다.

* 삼상계면(TPB, triple-phase boundary): 연료전지에서 산소환원반응이 실제로 일어나는 국소 지점으로, 고체 전극을 이동한 전자, 전해질을 통한 수소이온, 산소 기체 등 세 가지 상이 만나는 곳을 말한다. 이 삼상계면에 분포한 백금 촉매에서 산소와 수소이온이 결합해 물이 생성된다.

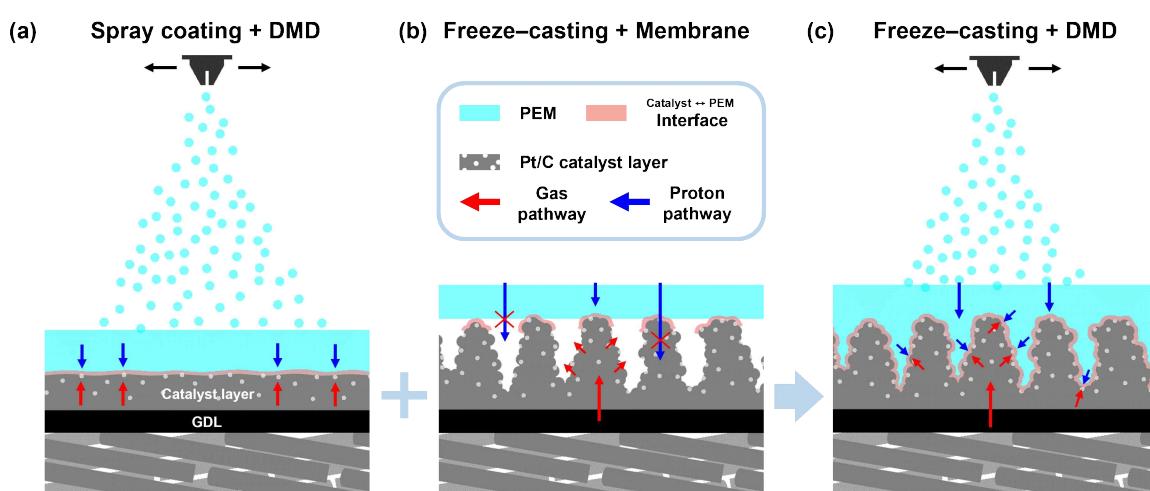
고분자전해질막 연료전지(PEMFC)*는 수소로 전기를 만들고 배출가스 대신 물만 내보내는 친환경 에너지 변환 기술로, 수소 전기차를 비롯한 중·대형 운송수단에 폭넓게 활용되고 있다.

그러나 PEMFC에서 백금 촉매 사용량을 줄이면서도 높은 출력과 장기 안정성을 동시에 확보하는 것이 큰 과제다. 특히 실제 반응이 일어나는 삼상계면이 기존 박막형 촉매층에서는 촉매층과 전해질막 사이의 얇은 2차원 계면에 국한되어 있어, 가스 확산과 이온 전달이 원활하지 않고 계면 접합 안정성도 떨어진다는 한계가 있었다.

삼상계면은 전자·수소이온·산소가 만나는 지점으로, 전기가 만들어지는 촉매층과 수소이온 흐름을 돋는 전해질막 사이에서 주로 형성되며 그 유효 면적과 구조가 연료전지 성능을 좌우한다. 따라서 삼상계면과 전해질막의 접촉 면적을 얼마나 넓고 안정적으로 확보하느냐가 고성능 막-전극 접합체(MEA) 설계의 핵심 과제로 꼽혀 왔다.

* 고분자전해질막 연료전지(PEMFC, Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell): 수소를 연료로 전기를 생산하는 연료전지의 한 종류로, 전해질로 고분자막을 사용하는 것이다. 수소에서 생성된 수소이온이 전해질막을 통과하고 전자는 외부 회로를 통해 이동하면서 전기가 생산되며, 이 과정에서 물과 열만 배출되는 친환경 에너지 변환 장치이다. 낮은 작동 온도와 빠른 기동 특성을 바탕으로 수소 전기차와 이동형 전원에 널리 활용되고 있다.

연구팀은 이러한 문제를 해결하기 위해 얼음이 한쪽 방향으로 자라도록 하는 '동결주조(freeze-casting)*'와 '동결건조(freeze-drying)*' 공정을 결합한 새로운 전극 제조 방식을 도입했다. 얼음 결정이 특정 방향으로 성장하면서 내부에 벌집 모양처럼 수직으로 정렬된 구멍이 만들어지고, 이 구조 덕분에 촉매층 내부에서 가스가 원활하게 이동하며 가스 확산이 극대화됐다.



▲ 동결 주조(freeze-casting) 기법과 직접 전해질막 증착 (DMD) 기법의 혼합을 통한 일체형 막-전극 접합체 개략도: (a) 일반 촉매층에 DMD를 적용 (b) 동결 주조 촉매층에 일반 전해질 막을 부착 (c) 동결 주조로 제작한 촉매층에 DMD가 도입된 일체형 막-전극 접합체의 구조를 각각 나타낸다.

가스(빨강)와 수소 이온(파랑)의 확산 경로와 촉매층-전해질막 사이 계면(붉은색 영역)을 통해 비교할 수 있으며, 일체형 막-전극 접합체의 경우 3차원 계면 형성이 이루어져 보다 큰 유효 접촉 면적이 확보됨을 확인할 수 있다.

구체적으로, 촉매층을 코팅한 직후의 전극을 차가운 냉판 위에 올려두면 얼음 결정이 바닥에서 위쪽으로 수직으로 성장한다(동결 주조). 이후 동결 건조를 진행하면 얼음이 승화하면서 마치 동결건조 과정처럼 내부가 비어 있는 벌집 모양의 정렬된 다공성 구조가 형성된다.

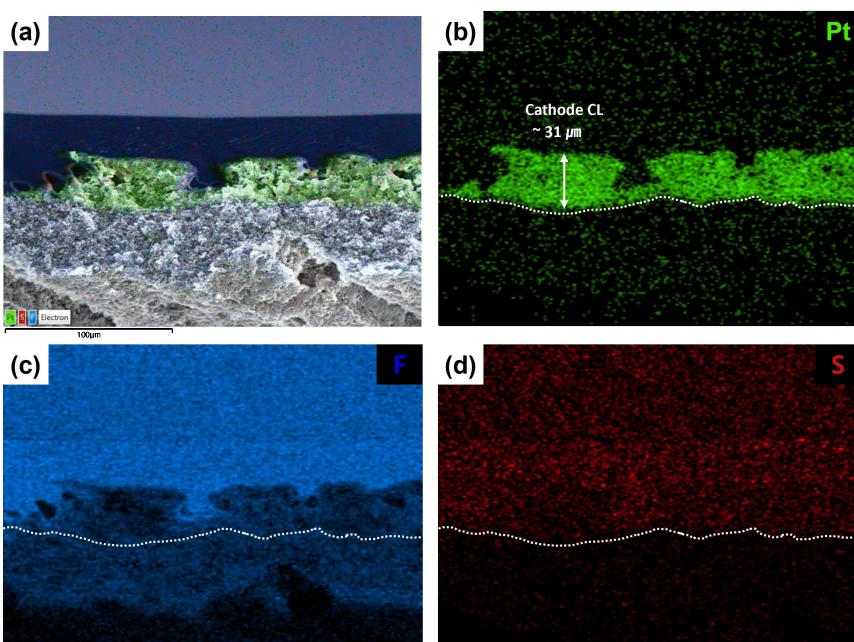
이 방식으로 제작된 촉매층은 두께가 약 30 마이크로미터(μm)로, 내부에 직선에 가까운 가스 이동 통로가 형성됐다. 기공률은 약 49%, 기공 부피는 0.27 밀리리터/그램(mL/g) 수준으로 증가해, 기존 스프레이 방식 촉매층보다 두 배 이상 많은 기공을 확보했다. 이러한 구조는 산소 확산과 물 배출을 원활하게 하여 반응 효율을 높이는 데 직접적인 역할을 한다.

* **동결 주조(freeze-casting):** 동결건조 이전 단계에서 용매를 얼려 구조를 형성하는 기법으로, 한쪽은 낮은 온도로 냉각하고 반대쪽은 온도를 유지해 특정 방향으로 물이 어는 방향성을 유도한다. 동결 주조 방식으로 촉매 잉크를 얼릴 경우, 얼음 결정이 일방향으로 성장하면서 내부에 정렬된 기공 구조가 형성된다.

* **동결 건조(freeze-drying):** 용매의 어는점 이하(물의 경우 0°C 미만)로 온도를 낮춰 액체를 고체로 만든 뒤, 진공 상태에서 고체 상태의 용매를 승화시켜 제거하는 건조 방식이다. 본 연구에서는 촉매층 코팅 후 내부의 다공성 구조가 붕괴되지 않도록 동결 건조 방식을 적용했다.

여기에 더해 연구팀은 완성된 전해질막을 전극에 접합하는 기존 방식 대신, 전해질 고분자를 촉매층 위에 직접 도포해 막을 형성하는 '직접 전해질막 증착' 기법을 적용했다.

이 방법을 통해 전해질 고분자가 다공성 촉매층 내부까지 스며들어 막과 전극이 3차원으로 맞물리는 구조 (3D 인터로킹(interlocking))를 이루게 된다. 그 결과 계면 결착력이 강화되고, 전자와 수소 이온의 이동 경로가 동시에 개선됐다.



▲ 일체형 막-전극 접합체의 전자현미경 (SEM) 단면 및 원소 분포 이미지: (a) 전체 원소, (b) 백금 분포, (c) 불소 분포, (d) 황 분포. (a)에서 전해질막과 촉매층의 맞물림 구조가 관찰되며, (b)의 백금 분포 분석을 통해 이를 더욱 명확히 확인할 수 있다. 또한 전해질 고분자에 포함된 불소(F) 분포와 비교하면, 전해질이 촉매층 내부까지 스며들어 수소 이온을 보다 원활하게 전달할 수 있음을 확인할 수 있다.

전기화학 분석 결과, 삼상계면이 평면에서 입체 구조로 확장되면서 전기가 흐르고 수소 이온이 이동하는 과정이 모두 원활해졌다('수소이온 확산저항' 및 '전하 전달 저항' 모두 감소). 이로 인해 연료전지 반응 효율이 높아지고, 전체 성능이 개선된 것으로 확인됐다.

* 직접 전해질막 증착(Direct membrane deposition, DMD): 촉매층에 전해질막이 부착된 막-전극 접합체를 만드는 방법 중 하나. 기존의 방법으로는, 완성된 상용 전해질막을 촉매층과 조립하여 압착하는 방식으로 막전극접합체를 만들지만 DMD는 전해질막 고분자를 알코올에 녹인 후 촉매층 위에 직접 분무하는 것으로, 촉매층과 전해질 막 사이 계면이 고르게 결착되도록 하여 막전극 접합체를 구성.

성능 평가 결과, 연구팀이 개발한 일체형 막-전극 접합체는 80°C, 상대습도 100%의 산소 공급 조건에서 제곱센티미터(cm^2)당 약 1.62 와트(W)의 최대 출력밀도를 기록했다. 이는 기존 막-전극 접합체 구조보다 10% 이상 향상된 것으로, 같은 면적에서 더 많은 전기를 만들어낼 수 있다는 의미다. 즉, 연료전지 효율이 크게 개선된 것을 보여준다.

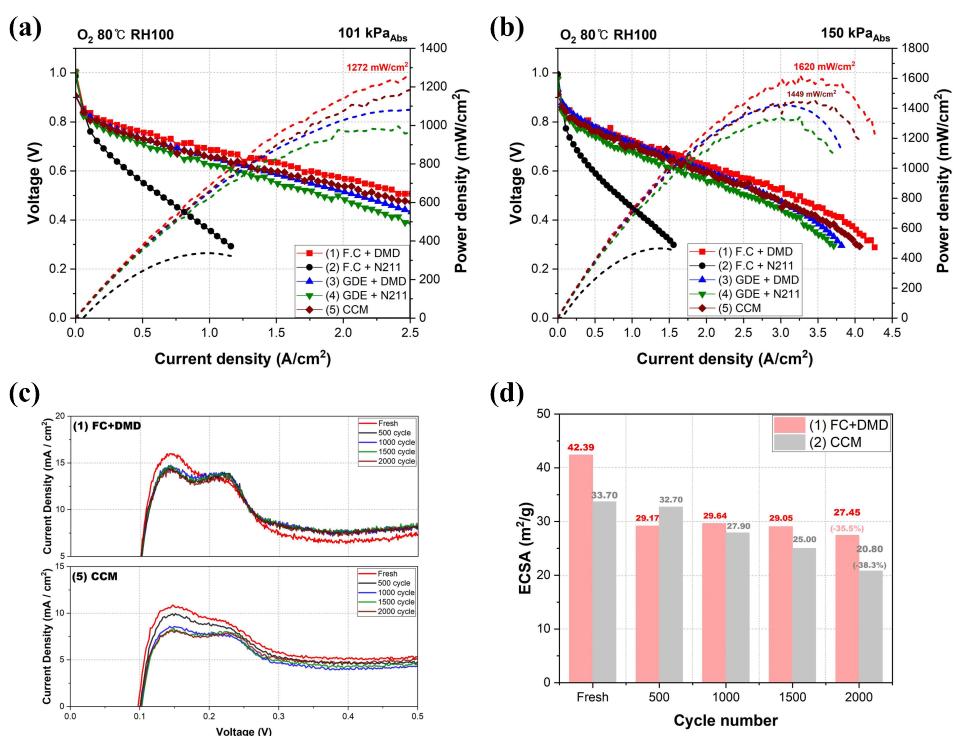
특히 이러한 성능 향상은 백금 촉매 사용량을 늘리지 않고 전극 미세구조와 막-전극 계면 설계만으로 달성됐다는 점에서 산업적 활용 가치가 높다.

내구성 평가에서도 우수한 결과가 나타났다. 가습과 건조를 반복하는 가속 열화 시험에서 전극의 촉매 반응 가능 면적(전기화학적 활성면적)의 감소폭이 약 35% 수준에 그쳐, 기존 구조보다 오래 사용해도 성능이 안정적으로 유지되는 것을 확인했다.

특히 500회 이후 2,000회까지의 반복 구간에서도 성능 저하(활성 면적의 감소) 속도가 완만하게 유지돼, 막-전극의 3차원 맞물림 구조가 계면 안정성과 장기 내구성 향상에 기여한다는 사실을 확인했다.

이번 연구에서 개발된 통합형 막-전극 접합체는 높은 기공률과 큰 기공 부피를 통해 가스 확산을 향상시키는 동시에, 수소이온 확산저항과 전하 전달저항을 감소시키는 최적화를 통해 고출력과 우수한 내구성을 함께 달성한 것이 특징이다.

이러한 구조적·전기화학적 이점은 향후 전기차·트럭 등 중·대형 이동형 연료전지 시스템을 비롯한 고성능 응용 분야에서 활용 가능성을 크게 넓힐 것으로 기대된다.



▲ 막-전극 접합체 구조 별 단위 전지 평가 결과 비교: (a) 상압 산소 조건, (b) 가압 산소 조건, (c) 가속열화 내구성 평가 후 전기화학 활성면적 그래프 측정 결과, (d) 가속열화 내구성 사이클 별 전기화학 활성면적 변화 그래프. (b) 결과에 따르면, 제안된 FC+DMD 구조의 출력밀도는 1,620 mW/cm²로 기존 CCM (1,449 mW/cm²) 대비 약 11.8% 높았다. 가속 열화 시험 후 활성 면적 감소율 역시 -35.5%로 CCM의 -38.3%보다 작아, 내구성이 향상된 것으로 확인되었다.

박찬호 교수는 “동결 주조와 직접 막 증착을 결합한 일체형 구조를 통해 가스, 전자, 수소 이온의 이동 경로를 동시에 최적화할 수 있었다”며 “청정에너지인 수소를 전기로 전환하는 연료전지의 성능과 안정성을 함께 개선할 수 있는 새로운 전극·막 제조 공정을 제시했다는 점에서 향후 전극 구조 개발의 방향성을 제시하는 중요한 연구”라고 설명했다.

GIST 화학과 박찬호 교수가 주도하고, 환경·에너지공학과 문승현 초빙석학 교수, 포스코 홀딩스 김재훈 박사와 함께 GIST 차세대에너지연구소 정현승 박사가 수행한 이번 연구는 한국에너지기술평가원의 연구사업 및 포스코 홀딩스의 지원을 받았다.

연구 결과는 국제학술지 《케미컬 엔지니어링 저널(Chemical Engineering Journal)》에 2025년 12월 16일 온라인으로 게재됐다.

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

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Chemical Engineering Journal (IF: 13.2, 2024년 기준)
- 논문명 : Integrated MEA for polymer electrolyte membrane fuel cells enabled by freeze-casting and direct membrane deposition
- 저자 정보 : 정현승 (제1저자, GIST), 이승태 (공동저자, GIST), 문승현 (교신저자, GIST), 박찬호 (교신저자, GIST), 김재훈 (교신저자, POSCO Holdings)