

2026

나노 리서치 트렌드 리포트

Nano Research Trend Report

나노기술연구협회의 나노에너지분회

실제 작동 조건에서 오래가는
수전해 장치를 위한
나노 계면 설계와 내구성 평가



2026

나노 리서치 트렌드 리포트

Nano Research Trend Report

실제 작동 조건에서 오래가는 수전해 장치를 위한 나노 계면 설계와 내구성 평가

〈나노 리서치 트렌드 리포트〉는 나노기술 핵심 이슈와 최신 연구 트렌드를 전문가 시사점 중심으로 정리한 리포트로, 나노기술연구협의회 산하 6대 나노기술 분야별 전문가 네트워크인 '기술분회' 소속 전문가를 통해 작성되었습니다. 본 리포트는 기술분야별 국내외 주요 학회에 기술분회 소속 전문가들이 직접 참여하여, 학회에서 발표된 연구 성과와 논의 내용을 조사·분석하고, 이를 바탕으로 전문가의 시사점을 반영한 최신 연구 트렌드를 제시하고자 기획되었습니다. 이를 통해 연구자들의 창의적인 선행연구와 향후 핵심 이슈로 부상할 가능성이 높은 주제를 선제적으로 발굴함으로써, 연구현장의 흐름을 파악하는 선행지표로 활용하고자 합니다. 〈나노 리서치 트렌드 리포트〉에 많은 관심 부탁드립니다. 나노기술연구협의회는 앞으로도 미래 나노기술 이슈를 지속적으로 발굴하고 공유함으로써, 국가 나노기술 연구 및 산업 발전에 기여할 수 있도록 노력하겠습니다.

발간번호 | 2026-01

I S S N | 3140-2151

집필자 | 나노에너지분회 박승학 (성균관대학교 조교수)

발행연월 | 2026년 5월

발행처 | 나노기술연구협의회


발행인 | 김주선 회장

주소 | 서울특별시 서초구 남부순환로 354길 14, 3층

전화 | 02-2057-8506

홈페이지 | <https://www.kontrs.or.kr>

담당자 |곽정원 팀장, 손소미 대리

본 콘텐츠는  과학기술정보통신부 「나노과학기술 연구진흥 및 협력 네트워크 확산 연구」 사업을 통해 제작되었습니다.

본 리포트의 무단 전재 및 재배포를 금합니다.

Nano Research Trend Report

한국전기화학회 2026년도 춘계총회 및 학술발표회

나노기술연구협의회 나노에너지분회 - 박승학 (성균관대학교 / 조교수)

요약문

학회명

한국전기화학회 2026년도 춘계총회 및 학술발표회

개회 기간

2026. 4. 1.(수)~3.(금)

개회 장소

국 가 | 대한민국

도 시 | 부산광역시

장 소 | BEXCO

주관 기관

한국전기화학회

학회 소개

- 한국전기화학회는 전기화학 관련 학문과 과학기술, 산업의 발전에 기여하기 위해 1998년에 설립된 국내 대표 전기화학 전문 학술단체이며, 연 2회 (봄, 가을) 총회 및 학술대회를 정기적으로 개최하고 있음
- 학회는 영문학술지 (Journal of Electrochemical Science and Technology), 국·영문학술지 (Journal of the Korean Electrochemical Society), 기술정보지 (E.Chem Magazine) 등을 발간하고 있음

해당 기술분야 및 발표규모

- 해당 기술분야: 전기화학 기반 에너지 전환 및 저장 기술 전반
- 해당 분야 발표 규모: 수소 에너지 관련 분과에서 4개 세션이 운영되었으며, 구두 발표와 포스터 발표가 폭넓게 이루어짐
 - 수소 생산 전기화학: 차세대 수전해 기술
 - 수소 연료전지 전기화학: 내구성·계면·MEA
 - 고온 수전해 및 연료전지 기술의 최신 연구 동향
 - 수소 전극·촉매의 Operando / In-situ 전기화학 분석

주요 발표내용

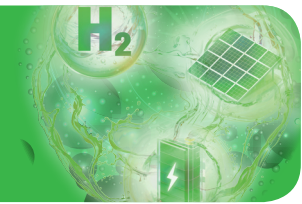
- **Shannon W. Boettcher** (Professor, University of California, Berkeley, USA)
 - **발표제목** Building the Ultimate Water Electrolyzer
 - **발표내용** 신재생에너지 연계형 수전해 장치의 궁극적인 형태와, 이를 달성하기 위한 연구 내용 및 향후 전망
- **정동영** (부교수, KAIST, 대한민국)
 - **발표제목** Real-Time Analytical Approaches for Stability Evaluation and Lifetime Prediction of Water Electrolysis Systems
 - **발표내용** 변동부하 조건에서의 수전해장치 내구성 측정 지표 제시

핵심 키워드

- 청정 수소 생산
- 차세대 저온 수전해
- 나노 계면 엔지니어링

시사점 요약

- 최근 수전해 분야의 나노기술 트렌드는 단순히 고효성의 새로운 촉매 조성을 찾는 데서 나아가, 실제 장치 내부의 촉매-이오노머-막 계면을 나노미터 수준에서 정밀하게 설계하고 보호하는 방향으로 이동하고 있음. 이는 실제 작동 조건에서 성능과 내구성을 함께 확보하기 위한 흐름으로 해석됨
- 이번 학회에서 소개된 두 발표는 이러한 흐름을 서로 다른 측면에서 보여줌. 하나는 오래 가는 계면을 어떻게 만들 것인가, 다른 하나는 그 계면과 촉매가 실제 운전 환경에서 얼마나 안정적인지를 어떻게 평가할 것인가에 초점을 맞추고 있음
- 이에 따라 수전해 분야의 핵심 연구개발 이슈는 “실제 작동 조건에서 다층 계면의 성능 저하 원인을 밝히고, 이를 억제하는 나노 계면 엔지니어링 기술을 개발하는 것”으로 정리할 수 있음. 이는 개발된 소재를 실제 수전해 장치에 적용하기 위해 필요한 중요한 방향 전환으로 판단됨



실제 작동 조건에서 오래가는 수전해 장치를 위한 나노 계면 설계와 내구성 평가

1 | 연구 트렌드 소개

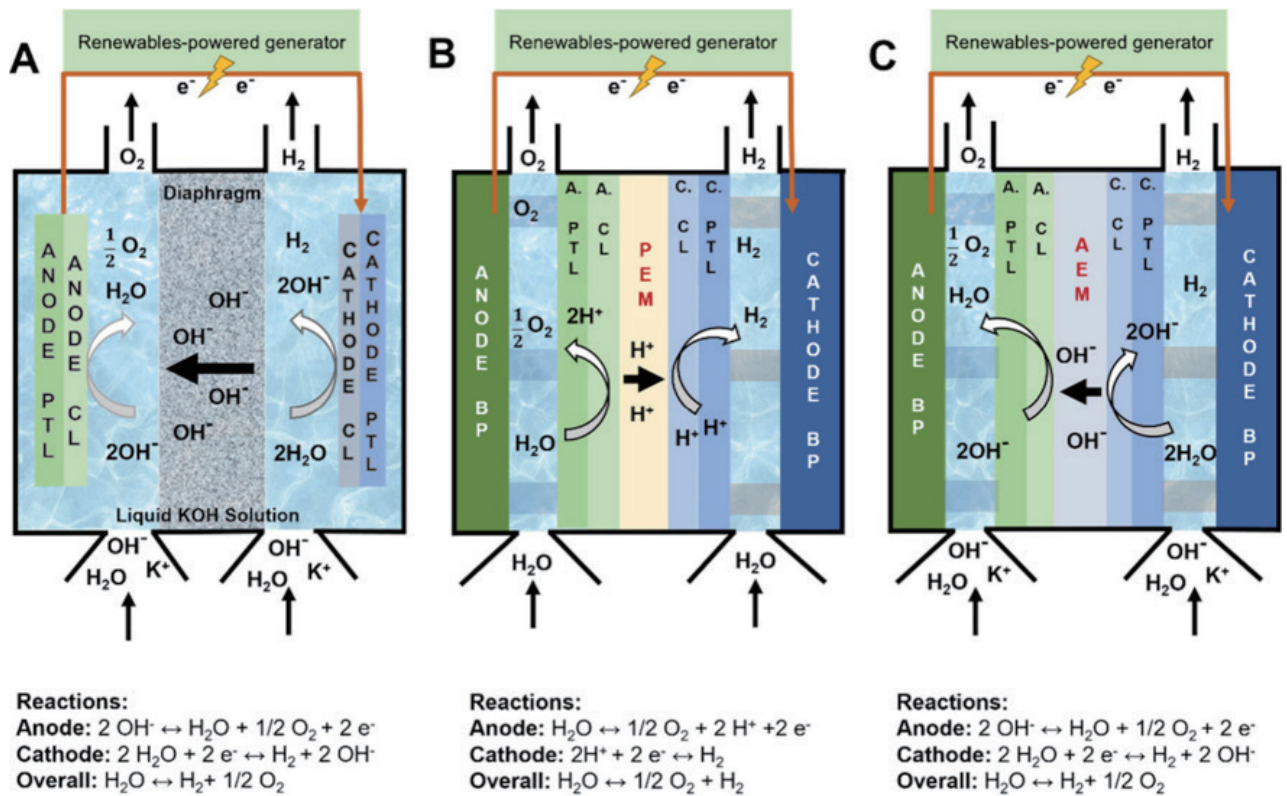
수전해는 물을 전기화학적으로 분해해 수소를 생산하는 기술임. 이 기술은 재생전력을 화학에너지 형태로 저장하거나 전환할 수 있어, 전력 부문의 변동성 대응과 산업 부문의 친환경 수소 공급을 동시에 가능하게 하는 핵심 기술로 주목받고 있음. 현재 전 세계 수소 생산은 여전히 이산화탄소를 배출하는 화석연료 공정에 크게 의존하고 있지만, 수전해 설비는 빠르게 확대되고 있어 수소경제 전환의 핵심 인프라로 자리 잡고 있음

현재 상용화된 대표적 수전해 기술 중 하나인 알칼라인 수전해 (Alkaline Water Electrolysis, AWE)는 가장 오랜 산업적 이력을 가진 기술임. 액상 알칼리 전해질과 다공성 다이어프램 기반의 비교적 단순한 셀 구조를 사용하므로, 니켈 (Ni)과 철 (Fe) 같은 비귀 금속 촉매와 상대적으로 저렴한 소재를 활용할 수 있음. 이에 따라 대형화와 비용 측면에서 강점을 가지지만, 액체 전해질 기반 구조는 전류밀도와 응답성을 제한하므로 재생에너지 연계형 가변 운전에는 상대적으로 불리함

또 다른 상용 기술인 양이온 교환막 수전해 (Proton Exchange Membrane Water Electrolysis, PEMWE)는 액체 전해질 대신 고체 고분자막 전해질을 이용하는 시스템임. 이 기술은 높은 전류밀도, 빠른 부하 응답성, 소형 장치 구성, 고압 수소 생산이 가능하다는 장점이 있어 태양광과 풍력에 직접 연계되는 동적 운전 환경에 적합함. 다만 산성 환경에서 안정한 촉매와 소재가 필요하므로, 이리듐 (Ir), 백금 (Pt), 티타늄 (Ti) 등 고가·희소 재료 의존성이 크다는 한계가 있음

재생에너지 연계를 통한 친환경 수소 생산의 중요성이 커짐에 따라서, 최근에는 기존 알칼라인 수전해 및 양이온 교환막 수전해 기술의 고도화와 함께, 이 두 기술의 장점을 결합하려는 방향에서 음이온 교환막 수전해 (anion exchange membrane water electrolysis, AEMWE) 등의 차세대 플랫폼 기술 개발도 활발히 진행되고 있음

이 과정에서 연구의 중심도 달라지고 있음. 과거에는 높은 반응 속도를 내는 새로운 촉매 물질을 찾고 합성하는데 초점이 있었다면, 최근에는 실제 장치 적용 가능성을 고려한 작동 조건에서의 성능과 내구성을 함께 확보하는 방향으로 이동하고 있음. 따라서 단순히 촉매 소재만 고려하는 것을 넘어서, 실제 수전해 장치 내부 구조인 촉매·이오노머·막·다공성 수송층이 맞는 다양한 계면을 나노 수준에서 이해하고 최적화하는 연구가 핵심 흐름으로 자리 잡을 것으로 예상됨. 즉, 최근 수전해 분야의 나노기술 트렌드는 단순한 촉매 나노입자 합성 경쟁을 넘어, 실제 작동 조건에서 오래 기능하는 다층 계면을 설계하고 평가하는 방향으로 이동하고 있다고 보여짐



[그림 1] 대표적인 저온 수전해 장치 구조 비교: 알칼라인 수전해, 양이온 교환막 수전해, 음이온 교환막 수전해
(출처: Chemical Reviews 2025, 125, 15, 6906-6976)

2 | 연구의 특징 및 핵심 기술

Shannon W. Boettcher 교수 연구팀은 ‘Building the Ultimate Water Electrolyzer’라는 제목의 발표에서 차세대 저온 수전해 장치의 유력한 후보로 음이온 교환막 수전해 (AEMWE)를 제시하고, 이 기술의 상용화를 위한 지난 10년 이상의 연구개발 결과를 소개하였음

음이온 교환막 수전해 기술은 고체 전해질막 기반 장치 구조를 유지하면서도 음이온을 전달하는 교환막을 사용해 알칼리 환경에서 작동하기 때문에, 이론적으로 양이온 교환막 수전해의 구조적 장점과 알칼라인 수전해의 재료 선택 자유도를 함께 추구할 수 있음

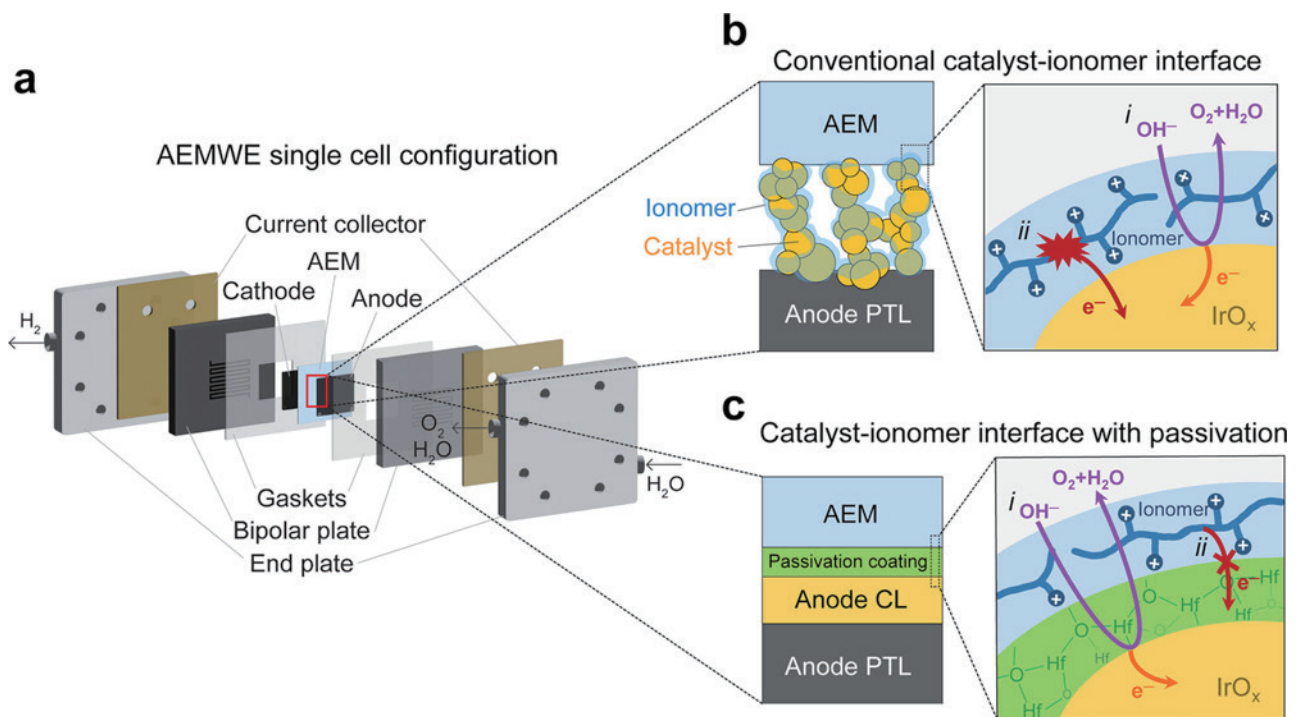
촉매 소재와 이온전도성 고분자막 소재의 개발을 통해 AEMWE의 성능은 꾸준히 향상되어 왔음. 그러나 실제 상용화 관점에서는 순수 물만을 공급하는 조건에서 산화 전극 계면의 열화가 빠르게 진행되어 내구성이 제한되는 문제가 핵심 병목으로 남아 있음

Boettcher 교수 연구팀은 이러한 문제를 해결하기 위해 촉매 조성 자체의 개선을 넘어서, 촉매층-이오노머 계면을 나노 수준에서 정밀하게 설계하는 나노 계면 엔지니어링 전략을 핵심 기술로 제시하였음

- 첫 번째 전략은 2~3 nm 두께의 비정질 HfOx 박막을 원자층 증착법으로 계면에 형성해 산화 전극 계면의 열화를 낮추는 방법임. 이 박막은 전자 전달은 차단하면서도 음이온 전달은 허용하는 선택적 계면으로 작동해, 촉매층과 고분자 이오노머의 직접적인 전기화학적 접촉을 줄이는 방향으로 열화를 억제함
- 이 접근을 통해 전이금속 CoOx 기반 촉매를 이용해 1 A cm⁻² 전류밀도에서 100시간 동안 이오노머의 열화를 억제하며 성능 저하를 최소화할 수 있었음

- 두 번째 전략은 ZrOx 기반의 분자 계면층을 형성하는 방법임. 촉매-이오노머 계면 형성 과정에서 이오노머에 Zr alkoxide 첨가제를 넣어 Zr-oxo/hydroxo 나노클러스터가 형성된 이오노머를 만들고, 이를 이용해 촉매-이오노머 계면층을 나노 수준에서 개질하였음
- 이 분자 계면층은 단순한 물리적 보호막이 아니라, 유무기 나노클러스터를 형성해 계면의 기계적 안정성과 이온 전도도를 동시에 유지하면서 촉매-이오노머 계면의 지속적인 산화를 억제하는 역할을 함
- 그 결과, 순수 물을 이용한 음이온 교환막 수전해 셀 작동 조건에서 2 A cm^{-2} 전류밀도 기준 400시간 이상 안정성 시험을 수행하였으며, 0.5 mV h^{-1} 이하의 내구성을 달성하였음. 이는 기존 대비 20배 이상 향상된 수치임

이러한 결과는 음이온 교환막 수전해 기술의 실용화를 위해 계면을 나노미터 두께 수준에서 제어하고 안정화하는 기술이 열화 방지와 내구성 향상의 핵심 돌파구가 될 수 있음을 보여줌



[그림 2] 음이온 교환막 수전해 셀 산화 전극 계면 안정화를 위한 개념도
(출처: ACS Energy Lett. 2024, 9, 3, 1025–1034)

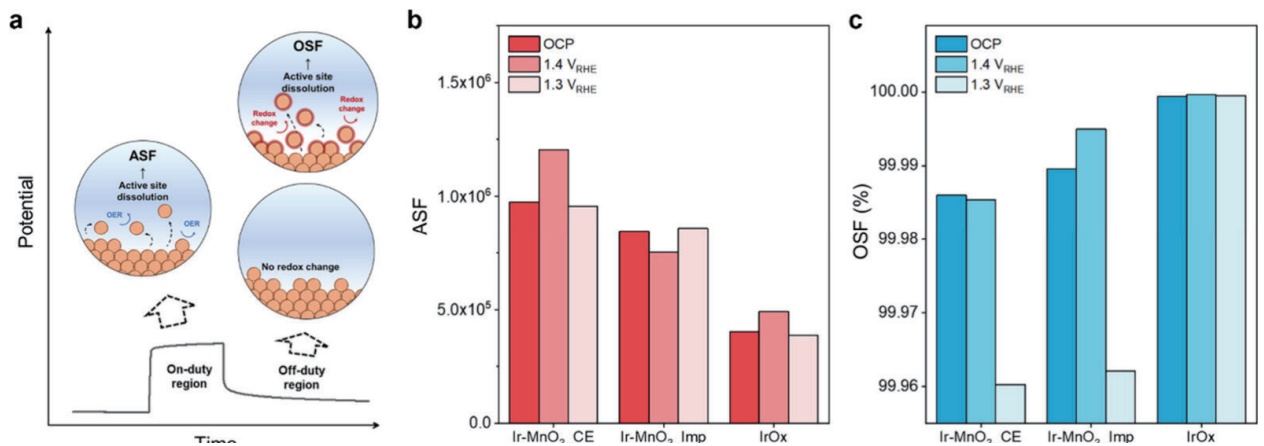
‘Real-Time Analytical Approaches for Stability Evaluation and Lifetime Prediction of Water Electrolysis Systems’라는 제목으로 발표한 정동영 교수 연구팀은, 수전해 촉매의 안정성을 평가하는 기존 방식이 실제 재생에너지 연계형 운전 환경을 충분히 반영하지 못한다는 문제를 제기하였음. 기존 평가는 주로 일정 전압 또는 일정 전류를 오래 유지하는 정적 조건에서 이루어졌으며, 이 과정에서 성능 변화나 금속 용출을 측정하는 방식이 주로 사용되어 왔음

그러나 실제 수전해 시스템은 태양광과 풍력의 출력 변화에 따라 잦은 정지와 재가동, 저부하 대기, 반복적인 전압 변화에 노출됨. 따라서 실제 운전 환경에서는 반응이 활발한 구간뿐 아니라, 상대적으로 낮은 전압 구간에서도 예상하지 못한 열화가 누적될 수 있음

정동영 교수 연구팀은 이러한 문제를 반영하기 위해 운전 안정성 지표 (operational stability factor, OSF)를 제안하고, 실시간 용출 분석을 통해 동적 부하 조건에서 나타나는 새로운 열화 양상을 보고함

- 구체적으로, Ir-MnO₂, IrOx와 같이 양이온 교환막 수전해 기술에 활용되는 촉매 물질을 모델시스템으로 사용해, 전기화학 반응이 일어나지 않는 전압조건까지의 누적된 촉매 용출 양 전체를 포함해서 OSF 지표를 도출함
- 실시간 용출 분석 실험 결과, Ir-MnO₂ 계열 촉매는 특히 인가 전압 조건이 낮아질수록 급격한 용출 양 증가로 인한 안정성 저하를 보임. 특히, 수전해 반응이 일어나지 않는 1.3 V 이하까지 전압을 내리는 경우 IrOx에 비해 현저한 용출량 증가와 성능 손실을 관찰하였음
- 이는 주어진 촉매가 전기화학 반응이 실제로 일어나는 조건에서는 높은 활성과 상대적으로 양호한 안정성을 보이더라도, 변동 부하 조건에서 반복되는 저전위 환경 노출에 의한 소재 내부 산화수 변화 때문에 실제 변동 부하 조건에서는 훨씬 빠르게 열화 될 수 있음을 의미함

이러한 결과는 수전해 촉매 소재 연구의 핵심이 단순히 높은 초기 활성과 초기 안정성을 달성하는 데 있지 않고, 실제 작동 조건인 변동 부하 조건에서 성능이 얼마나 안정적으로 유지되는지까지 포함해 평가하는 것이 중요함을 암시함. 즉, 개발된 나노 촉매 소재의 우수성 판단 기준 자체가 정적 조건에서의 초기 활성 및 안정성 중심에서 실제 운전 조건에서의 안정성을 포함하는 방향으로 이동해야 함을 보여주며, 이는 장치의 실 사용성을 가능하게 하는 데 매우 중요한 시사점을 제공할 것으로 생각됨



[그림 3] 변동 부하 조건에 따른 촉매 용출량 측정 데이터 및 OSF 수치 비교
(출처: ACS Energy Lett. 2025, 10, 6, 2574-2581)

3 | 기존과 비교 시 연구 (기술)의 우수성과 가능성

이번 학회에서 소개된 두 발표의 공통점은 수전해 연구의 기준 자체가 바뀌고 있음을 보여준다는 점임. 기존 연구는 주로 새로운 촉매 조성을 발굴하고, 그 촉매가 잘 정의된 정적인 환경에서 얼마나 높은 활성을 보이는지를 비교하는 데 초점이 있었음. 이에 비해 최근 연구는 실제 장치 내부에서 열화가 시작되는 반응 계면과 실제 전력 변동 조건에서의 운전 안정성을 함께 다루고 있음

Boettcher 교수의 연구가 제시한 차별점은, AEMWE의 핵심 병목을 단순한 소재 성능 부족이 아니라 촉매-이오노머 계면의 나노 구조 문제로 재해석했다는 데 있음. 즉, 촉매를 더 강하게 만드는 접근이 아니라 계면을 더 오래 가게 만드는 접근으로 관점을 전환한 것임

정동영 교수 연구의 차별점은, 안정성 평가 또한 정적인 실험실 조건에 머물러서는 안 되며 실제 작동 환경의 변동성을 반영해야 한다는 점을 실험적으로 보여주었다는 데 있음. 이는 앞으로 수전해용 나노소재와 나노 계면의 우수성을 평가하는 기준이 더 엄격하고 실제적인 방향으로 바뀔 수 있음을 의미함

정리하면, 기존 연구가 “무엇이 잘 반응하는가”를 찾는 데 가까웠다면, 최신 연구는 “무엇이 실제 장치 안에서 오래 작동하는가”를 묻고 있음. 이러한 변화는 수전해 분야의 나노기술 활용 방식이 촉매 나노입자의 조성 및 형상 제어 중심에서, 나노 계면 설계와 실제 운전 조건 기반 평가 중심으로 이동하고 있음을 보여줌

표1 저온 수전해 분야의 연구 트렌드 변화

NO	항목	기존 연구 트렌드	최신 연구 트렌드
1	연구 대상	• 고효성의 신규 촉매 조성 발굴	• 촉매-이오노머-막 계면을 포함한 실제 수전해 장치 계면에서의 연구
2	나노기술 활용 방식	• 나노입자 조성, 크기, 형상 제어	• 중간 계면층 형성 등 나노 계면 구조 설계 기술
3	평가 방식	• 초기 활성 중심 비교	• 정적인 조건 및 변동부하 조건에서의 장기 안정성 평가

4 | 향후 전망 및 기대

이번 학회에서 소개된 연구들은 앞으로 수전해 기술의 경쟁력이 단순히 가장 높은 성능 수치만으로 결정되지 않을 수 있음을 보여 주었음. 앞으로는 실제 장치 안에서 계면을 얼마나 안정하게 만들 수 있는지, 그리고 전력이 계속 변하는 환경에서도 그 성능을 얼마나 오래 유지할 수 있는지가 더욱 중요해질 것으로 보임

특히, AEMWE에서는 순수 물 조건에서의 계면 열화 문제를 해결하는 기술이 상용화의 핵심이 될 가능성이 큼. 이 과정에서 나노미터 두께의 보호 계면층이나 분자 수준의 중간 계면층 설계는 단순한 성능 개선 기술이 아니라, 실제 장치 수명을 좌우하는 핵심 기술로 발전할 수 있음

동시에 안정성 평가 체계도 바뀔 것으로 예상됨. 재생에너지 연계형 수전해 장치의 경우, 정지와 재가동·저부하 운전·전압 변화가 반복되므로, 향후 이러한 조건을 반영한 표준화된 평가 프로토콜과 내구성 지표가 점차 중요해질 가능성이 큼

결국, 앞으로의 수전해 연구는, 오래 가는 계면을 설계하는 기술과 그 계면의 수명을 실제 운전 환경에서 검증하는 평가 기술이 함께 발전하는 방향으로 전개될 것으로 예상됨. 이 두 축이 결합할 때 차세대 수전해 장치의 실용화 가능성도 한층 커질 것으로 판단됨

5 | 연구개발 이슈 제시

이번 학회에서 확인된 가장 중요한 방향성은 수전해 내구성 문제가 더이상 개별 촉매 소재 하나의 문제가 아니라, 실제 장치 내부에서 서로 맞닿아 있는 다층 계면 전체의 문제로 확장되고 있다는 점임. 최신 연구는 촉매-이오노머 계면 보호와 변동부하 조건의 안정성 평가에 의미 있는 진전을 보였지만, 실제 전해조에서는 촉매·이오노머·막·다공성 수송층이 함께 작동하므로 열화 또한 이러한 다층 구조의 상호작용 속에서 시작되고 전파될 가능성이 큼

따라서 향후 핵심 연구개발 이슈는 개별 소재의 초기 성능을 비교하는 수준을 넘어, 실제 작동 조건에서 다층 계면의 열화가 어디서 시작되고 어떻게 전파되는지를 정량적으로 규명하고, 이를 억제하는 계면 엔지니어링 기술을 개발하는 것으로 정리할 수 있음. 특히 다공성 수송층은 물 공급·기체 배출·전류 분포·젖음성·내구성에 모두 영향을 미치므로, 그 나노 및 미세 기공 구조를 최적화하는 연구가 중요한 설계 변수로 부상할 가능성이 큼

또한, 실제 수전해 장치는 전압 변화뿐 아니라 온도 변화, 기체 축적과 배출, 반복 운전 등의 복합 환경에 놓이므로, 향후 이러한 조건을 함께 반영한 장기 내구성 평가 체계가 필요함. 요약하면, 앞으로의 연구는 실제 작동 조건 기반 다층 계면 열화 메커니즘 규명과, 이를 억제하기 위한 나노 계면 엔지니어링 기술 개발을 중심으로 전개될 필요가 있음. 이에 수전해 분야의 핵심 연구개발 이슈로 “실제 작동 조건에서 수전해 장치의 다층 계면 성능 저하 원인을 규명하고, 이를 억제하는 나노 계면 엔지니어링 기술 개발”을 제시함

표2 주요 기술용어 설명

NO	용어명	내용
1	수전해	• 물에 전기를 가해 수소와 산소로 분해하는 기술로, 탄소 배출이 적은 친환경 수소 생산에 활용됨
2	이오노머	• 이온이 이동할 수 있도록 만든 고분자 물질로, 수전해 장치에서는 반응이 일어나는 촉매층 근처에서 이온이 이동하는 길을 제공함
3	계면 엔지니어링	• 서로 다른 두 물질이 맞닿는 경계면의 구조와 성질을 조절해 성능을 높이는 기술
4	다공성 수송층	• 물과 기체가 이동할 수 있도록 미세한 기공을 가진 층으로, 수전해 장치 내부에서 물 공급, 생성된 기체 배출, 전류 분포에 큰 영향을 주는 중요한 구성 요소임
5	변동부하	• 전력 공급이 일정하지 않고 계속 변하는 운전 조건



2026
나노 리서치 트렌드
리포트



나노기술연구협의회
Korea Nanotechnology Research Society