

“충전 오래 반복해도 성능 유지되는 아연 배터리” GIST-에너지연(KIER)-이화여대, 아연 전극에 ‘보호층’ 만드는 새로운 전해질 원리 규명

- GIST 화학과 김상륜 교수가 이끈 공동연구팀, 전해질 첨가제로 아연 전극 표면에 보호층 형성해 성능 저하 유발하는 전극 손상과 수소 발생 억제
- 실제 배터리 구조에서 5,000회 충방전 후 초기 용량 96.55% 유지·쿨롱 효율 99.8% 달성
- 국제학술지《Chemical Engineering Journal》게재



▲ (왼쪽부터) GIST 화학과 김상륜 교수, 오희정 석박통합과정생

광주과학기술원(GIST·지스트, 총장 임기철)은 화학과 김상륜 교수 연구팀이 한국에너지기술연구원(KIER), 이화여자대학교 연구팀과 공동으로 착수소화물(Complex hydride)*을 활용해 ‘수계(水系) 아연 금속전지’의 전극 손상을 억제하고 수명을 높일 수 있는 새로운 전해질 설계 원리를 규명했다고 밝혔다.

기존에는 함께 해결하기 어려웠던 ‘전극 안정성’과 ‘장기 충·방전 성능’을 동시에 높일 수 있는 새로운 전해질(배터리 안에서 이온이 이동하는 액체) 설계 전략을 제시했다.

* 착수소화물(Complex hydride): 수소를 포함한 복합 구조의 물질로, 이번 연구에서는 착(Complex) 수소화물(hydride)의 일종인 $Zn(B_{12}H_{12})$ 를 전해질 첨가제로 활용했다.

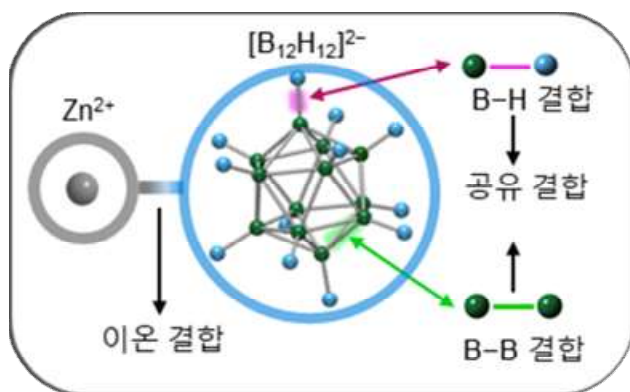
최근 대규모 에너지저장장치(Energy Storage System, ESS)의 중요성이 커지면서 안전성과 경제성을 갖춘 ‘수계(水系) 아연 금속전지’가 차세대 이차전지로 주목받고 있다.

‘수계 아연 금속전지’는 휘발성과 독성이 있는 유기용매(Organic Solvent) 대신 물을 기반으로 한 전해질을 사용해 안전성을 높였으며, 가격이 저렴하고 저장 용량이 큰 아연을 전극으로 활용한다는 장점이 있다.

그러나 충·방전을 반복하면 물과 아연이 반응하면서 수소가 발생하고 산화아연

(ZnO) 등 부산물이 생성된다. 이와 함께 아연이 전극 표면에 불균일하게 쌓이면서 전극이 점차 손상돼 장기간 안정적으로 사용하는 데 한계가 있었다.

연구팀은 이러한 문제를 해결하기 위해 수계 아연 금속전지의 전해질에 착수소화물을 첨가하고, 충·방전 과정에서 아연 금속 표면과 전해질에서 일어나는 변화를 분석했다.



기존 전해질



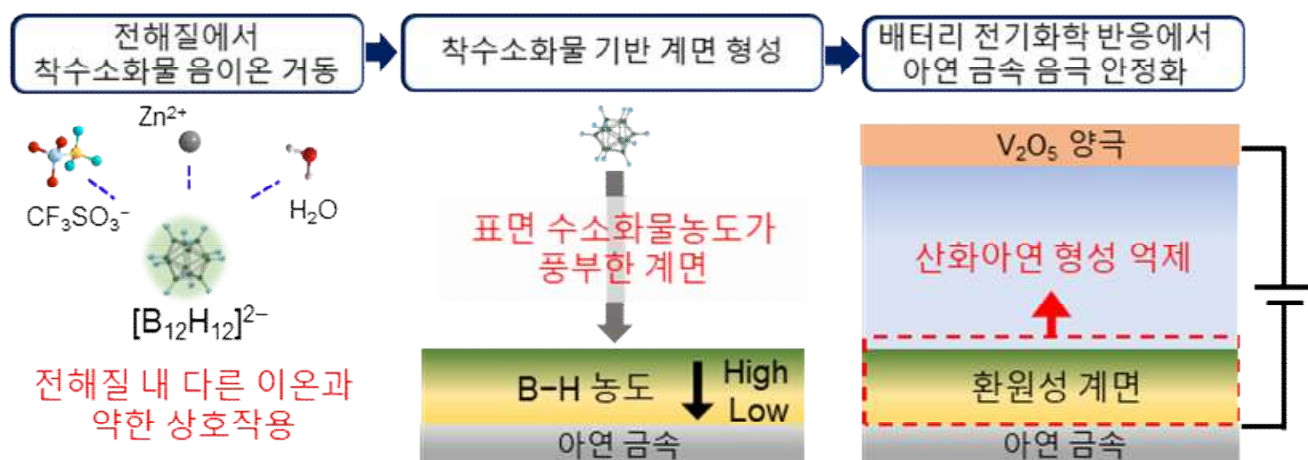
착수소화물
기반 전해질

▲ **착수소화물의 구조와 이를 첨가한 전해질.** 착수소화물은 양이온과 착음이온이 결합한 구조로, 착음이온 내부에는 붕소-수소(B-H)와 붕소-붕소(B-B) 결합이 존재한다. (오른쪽) '착수소화물 기반 전해질'은 '기존 전해질'과 유사한 상태를 유지해, 착수소화물 첨가가 전해질의 특성을 크게 변화시키지 않음을 보여준다.

이번 연구에 사용한 착수소화물($\text{Zn}(\text{B}_{12}\text{H}_{12})$)은 물에 녹으면 아연 이온(Zn^{2+})과 착음이온($[\text{B}_{12}\text{H}_{12}]^{2-}$)으로 나뉜다. 이 착음이온은 물이나 주변 이온과 약하게 상호작용해 기존 전해질의 구조와 이온전도도, 점도 등 주요 특성을 거의 변화시키지 않았다.

* **착음이온:** 중심 원자에 여러 개의 분자 또는 이온이 붙어 있는 구조로, 음전하를 띤 다원자 이온 구조이다.

반면 충·방전이 시작되면 착음이온은 아연 전극 표면에서 반응하며 '수소화물 기반 보호층(계면층)(hydride-rich interphase)'을 형성했다.



▲ **착수소화물을 이용한 아연 전극 보호 원리.** 수계 전해질에 도입된 착음이온($[\text{B}_{12}\text{H}_{12}]^{2-}$)이 충·방전 과정에서 아연 전극 표면에 '수소화물 기반 계면층'을 형성해,

물과 아연의 반응과 산화아연 생성을 억제함으로써 전극을 안정화하는 원리를 보여준다.

다시 말해, 전해질 자체는 그대로 유지하면서도, **충·방전이 일어나는 아연 표면에만 보호층(계면층)이 형성되는 것이다.** 이 보호층은 물과 아연의 직접적인 반응을 줄여 전극 손상을 일으키는 수소 발생 반응*과 아연 산화를 억제하고, 아연이 전극 표면에 보다 균일하게 쌓이도록 했다.

* 수소 발생 반응: 충·방전 과정에서 물이 분해돼 수소 기체가 발생하는 불필요한 반응(부반응)으로, 배터리의 안정적인 작동을 방해한다.

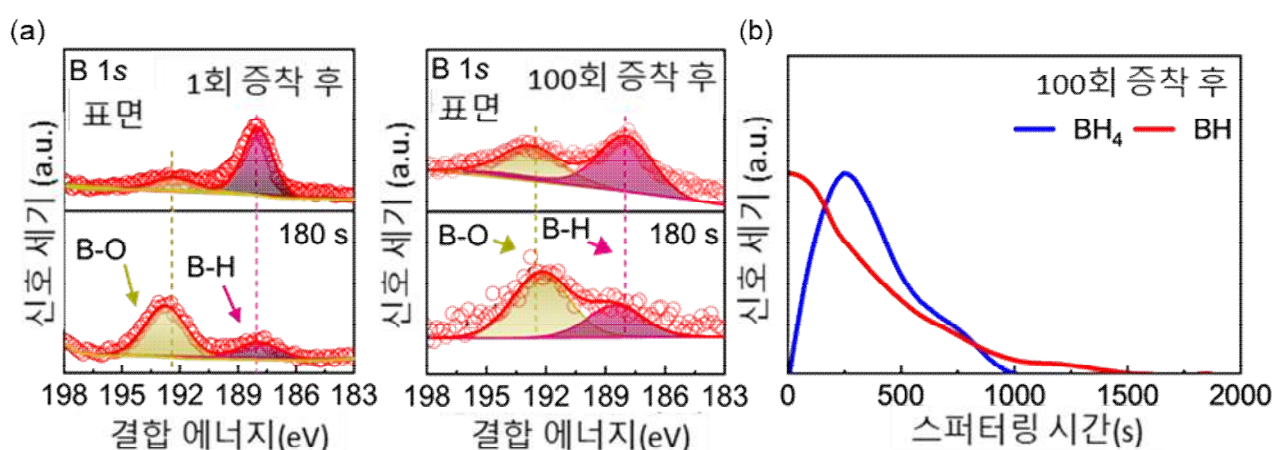
연구팀은 X선 광전자 분광법(X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)*과 비행시간 이차이온 질량분석법(ToF-SIMS)*을 이용해 이러한 '**수소화물 기반 계면층**'의 형성과 분포를 확인했다.

물질의 화학적 결합 상태를 분석하는 XPS 분석 결과, **착수소화물($Zn(B_{12}H_{12})$)에서 유래한 붕소-수소(B-H) 결합이 첫 번째 충·방전 과정부터 아연 표면에 확인됐으며, 100회 충·방전 이후에도 유지됐다.** 이는 착수소화물에서 유래한 '**수소화물 기반 계면층**'이 안정적으로 형성됐음을 보여준다.

표면 성분의 분포를 분석하는 ToF-SIMS 분석에서는 수소화물 유래 성분이 아연 표면에 집중적으로 분포하는 것을 확인해, '**수소화물 기반 계면층**'의 형성을 뒷받침했다.

* X선 광전자 분광법(X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS): 물질 표면에 X선을 조사해 방출된 전자를 분석함으로써 표면의 원소와 화학적 결합 상태를 파악하는 분석 기법

** 비행시간 이차이온 질량분석법(ToF-SIMS): 시료 표면에 이온 빔을 조사해 방출되는 이차이온의 질량을 측정해 표면의 화학 조성과 분포를 파악하는 분석 기법



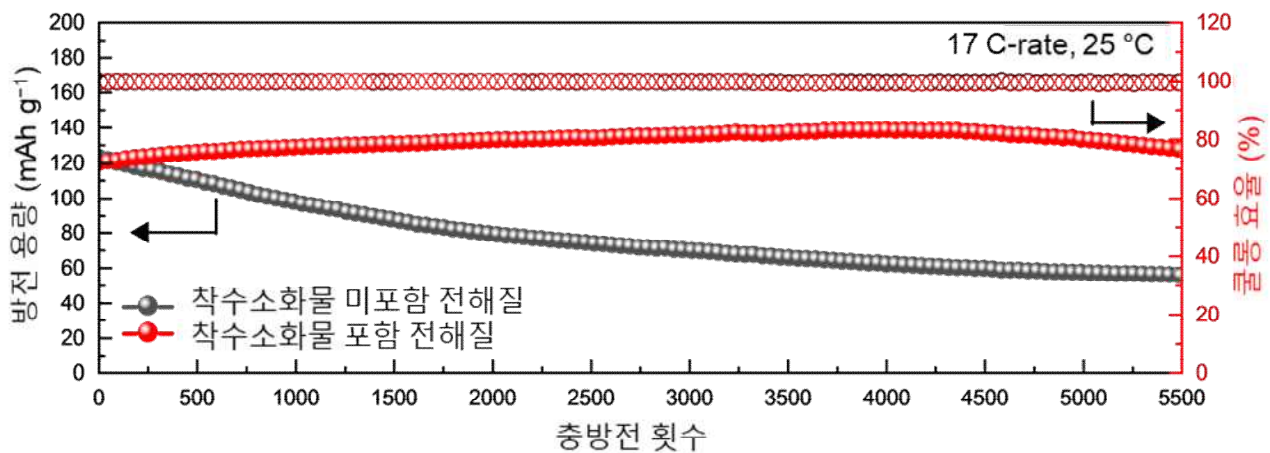
▲ 아연 전극 표면에 형성된 수소화물 기반 계면층 분석 결과. (a) XPS 분석 결과, 첫 번째 아연 증착 후부터 착수소화물에서 유래한 붕소-수소(B-H) 결합이 확인됐으며, 100회 증착·탈리 후에도 유지됐다. 또한 표면을 일부 제거한 뒤에도 B-H 결합이 검출돼 수소화물 기반 계면층이 형성됐음을 확인했다. (b) ToF-SIMS 분석 결과,

100회 충·탈리 후 수소화물 유래 성분이 아연 전극 표면에 집중적으로 분포하는 것으로 나타났다.

실제 전기화학 실험 결과, **착수소화물을 첨가한 전해질**은 수소 발생과 불균일한 아연 성장을 억제했으며, **아연 전극의 안정성을 평가하는 대칭전지 실험에서도 최대 3,000시간 동안 안정적으로 작동했다.**

이어 **아연-산화바나듐 배터리**에서도 **5,000회 충·방전 후 초기 용량의 96.55%를 유지**하고, **99.8%의 쿨롱 효율(Coulombic efficiency)*을 기록**했다. 같은 조건의 기존 전해질 전지는 초기 용량의 46.40%만 유지했다.

* **쿨롱 효율(Coulombic efficiency)**: 충전할 때 저장한 전하량 대비 방전할 때 되돌려받는 전하량의 비율로, 100%에 가까울수록 충·방전 과정에서 손실이 적다는 것을 의미한다.



▲ **수계 아연 금속 전지의 전기화학적 성능.** 착수소화물($\text{Zn}(\text{B}_{12}\text{H}_{12})$)을 적용한 수계 아연 금속 전지는 고전류밀도 조건에서도 5,000회의 충·방전 동안 100%에 근접한 쿨롱 효율과 가역적인 방전용량을 나타냈다. 이러한 결과는 수소화물 기반 계면 형성을 통한 안정적인 배터리 작동을 보여준다.

김상륜 교수는 “이번 연구는 수계 전해질에서 착수소화물 기반 계면 형성 메커니즘을 규명함으로써 기존 착수소화물 연구를 수계 전기화학 분야로 확장하고, 차세대 수계 금속전지용 전해질 설계의 새로운 연구 방향을 제시했다는 점에서 의미가 크다”고 말했다.

GIST 화학과 김상륜 교수(에너지융합대학원 겸무)가 지도하고 오희정 석박통합과정생이 제1저자로 수행한 이번 연구는 ▲과학기술사업화진흥원 ‘차세대 유망 Seed 기술 실용화 패스트트랙’ ▲교육부·광주광역시 ‘지역혁신중심 대학지원체계(RISE) 사업’ ▲산업통상자원부·한국산업기술진흥원 ‘산업기술혁신사업’ ▲과학기술정보통신부·한국연구재단 ‘우수연구-신진연구(유형B)’ 등의 지원을 받았다.

연구 결과는 재료과학 및 화학 분야 국제학술지 《Chemical Engineering Journal》에 2026년 7월 26일 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 진행할 수 있다고 밝혔다.

논문 정보

1. 연구 정보

- 저널명 : Chemical Engineering Journal (IF: 12.8, 2024년 기준)
- 논문명 : Closo-type complex hydride-derived interphase for stable aqueous zinc metal batteries
- 저자 정보 : 오희정(제1저자, GIST 화학과 석박통합과정생),
노재현(공동저자, 한국에너지기술연구원(KIER) 박사과정생),
김소정(공동저자, 한국전자통신연구원(ETRI) 석사후연구원),
김정현(공동저자, 한국전자기술연구원(KETI) 석사후연구원),
박예은(공동저자, GIST 화학과 석박통합과정생),
이상호(공동저자, GIST 화학과 석사과정생),
강승재(공동저자, GIST 화학과 석박통합과정생),
조영인(공동저자, GIST 에너지융합대학원 석박통합과정생),
김아영(공동저자, 이화여자대학교 인턴연구원),
마지영(공동저자, 한국에너지기술연구원(KIER) 선임연구원),
박찬호(공동저자, GIST 화학과 교수),
남관우(공동저자, 이화여자대학교 화학공학 및 신소재공학 교수),
김상륜(교신저자, GIST 화학과 교수)