

“폭발·화재 위험 없는 대용량·고성능 전지 나온다”

GIST, 수계·유기계 장점만 취한 차세대 전해질 개발

- 유승준 교수 연구팀 음극(아연 덴드라이트 발생)과 양극(브롬 활물질의 자가 방전)의 문제 모두 해결한 고성능 아연-브롬 전지 개발.. 대형화 및 실용화 ESS용 전지 기술 개발 기대
- 재료공학 분야 최상위 국제학술지 <Energy Storage Materials> 게재



▲ GIST 신소재공학부 유승준 교수 연구팀

최근 주요 건설사들이 태양광, 그린수소, 풍력 발전 등 신재생에너지 시장 공략에 나선 가운데 신재생에너지의 불안정한 전력 공급 문제를 보완하기 위해 **에너지 저장 장치***에 대한 관심도 커지고 있다.

이 가운데 소형전자기기에 주로 사용되는 **리튬이온전지**는 가연성 유기용매를 사용하기 때문에 **발화 위험이 있어** 유기용매를 물로 대체한 ‘**수계 전해질 기반의 전지**’가 주목받고 있다.

* **에너지저장장치(Energy Storage System)**: 태양광과 풍력 등으로 생산한 전기를 대용량으로 저장했다가 필요할 때 내보내는 장치로, 신재생에너지 확대에 필수적인 설비다.

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 신소재공학부 유승준 교수 연구팀이 **수계와 유기계 전해질의 장점을 모두 갖춘 차세대 전해질을 이용해 세계 최고 수준의 성능과 효율성을 가진 ‘무브롬 아연-브롬 전지’를 개발했다고 밝혔다.**

다양한 물 기반 전지 기술 중 아연과 브롬을 활물질*로 사용하는 아연-브롬 전지는 높은 구동 전압과 에너지 밀도를 갖고 있어 1970년대부터 지속적으로 개발돼 왔다.

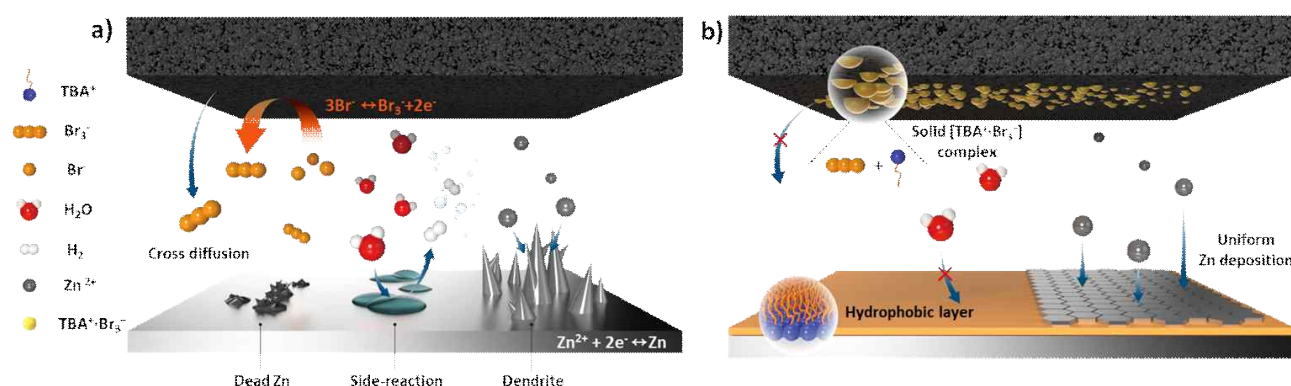
특히 '무흐름 아연-브롬 전지'는 기존 레독스 흐름 아연-브롬 전지 구동에서 반드시 필요한 전해질 저장소와 펌프를 제거하여 구조를 단순화한 셀 구조를 통해 가격 경쟁력을 확보할 수 있다는 장점이 있다.

* **활물질**: 전지의 양극과 음극에서 화학적으로 반응하여 전기 에너지를 생산하는 활성 물질

반면, 아연-브롬 전지는 음극에서 아연 금속과 수계 전해질 간의 계면 에너지가 불안정하기 때문에 덴드라이트*와 물 분해 반응에 따른 부산물이 발생한다는 치명적인 단점이 있다. 또한 양극에서는 브롬의 교차확산*에 의한 자가 방전이 발생해 효율성이 떨어져 상용화에 어려움을 겪고 있다.

* **덴드라이트**: 금속 이온이 금속 전극 표면에 전착될 때 형성되는 나뭇가지 형태의 결정체

* **교차확산에 의한 자가방전**: 양극 전해액에 용해된 브롬이 충전 후 음극으로 원치않는 확산을 하면서 전지의 충전용량이 저절로 감소하는 현상



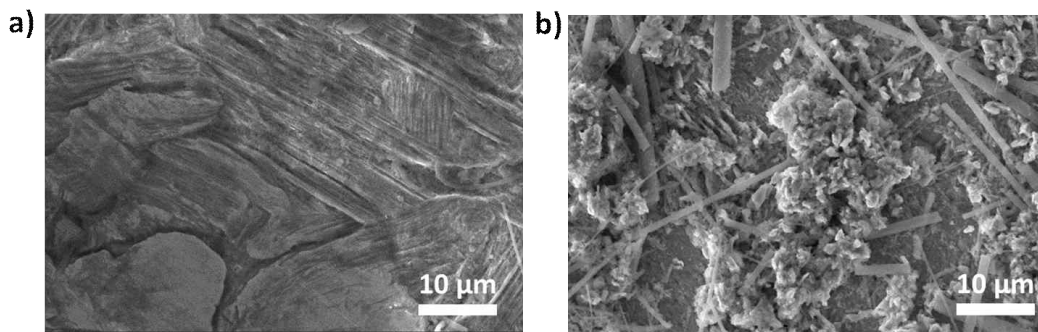
▲ 무흐름 아연-브롬 전지에서 a) 수계 전해질의 문제점 및 b) 수화된 깊은 공용 용매 (Hydrated deep eutectic solvent) 전해질 사용시 효과 도식화 : 기존 아연-브롬 전지의 문제점인 덴드라이트 형성과 브롬의 교차확산 문제를 수화된 깊은 공용 용매 전해질을 통해 동시에 해결할 수 있음.

연구팀은 브롬과 고체 착화물을 형성하면서 교차확산을 억제하고 덴드라이트 형성도 차단할 수 있는 다기능성 '브롬 착화제(Bromine complexing agents)'를 활용하여 양극과 음극의 문제를 동시에 해결하는 전략을 제시했다.

최근까지 아연 기반의 전해질에서 브롬 착화제의 용해도가 매우 낮다는 문제로 사용이 제한되었다. 연구팀은 용해도 문제를 해결하기 위해 아연 이온의 양을 기존보다 3배로 늘리고 수분 함량을 30%로 최적화한 "수화된 깊은 공용 용매* 전해질"을 개발했다.

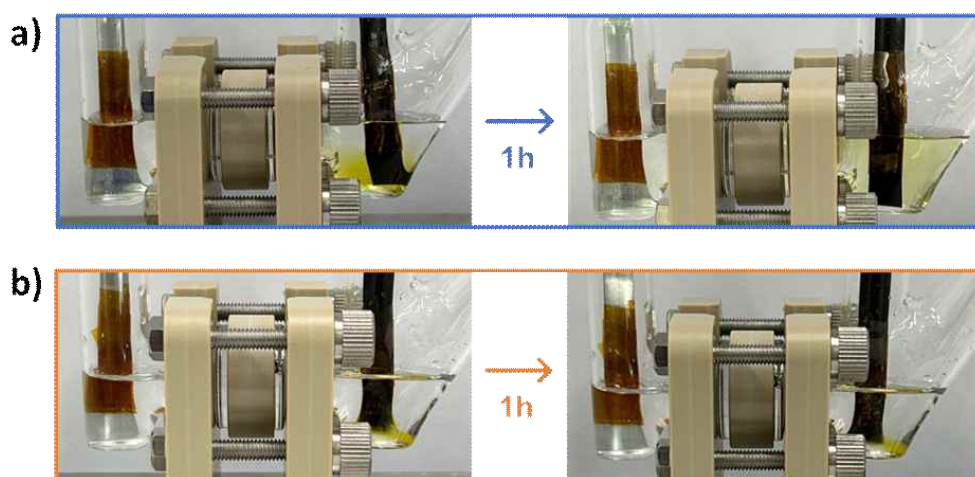
* **수화된 깊은 공용 용매(Hydrated deep eutectic solvent)**: 두 개 이상의 화학 물질이 특정 비율로 혼합될 때 이론보다 낮은 용해점을 가지는 깊은 공용 용매(deep eutectic solvent)에 물을 첨가한 시스템

이번 연구에서 개발된 전해질은 음극의 경우, 아연 금속 표면에 물의 부반응을 막을 수 있는 소수성 보호층을 형성하여 덴드라이트 형성을 억제하는 데 성공했다.



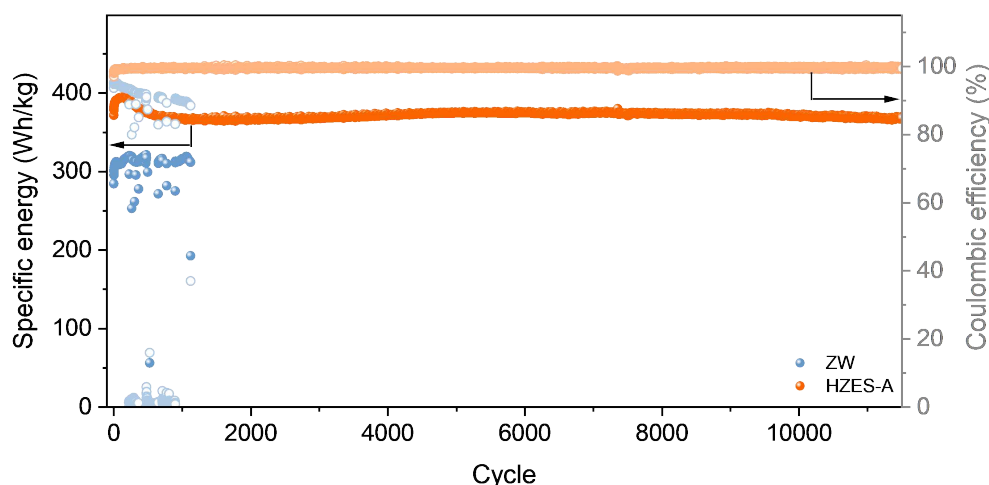
▲ 50 사이클 후, 아연 금속의 SEM 이미지. a) 수화된 깊은 공용 용매(Hydrated deep eutectic solvent) 전해질, b) 수계 전해질 : 수계 전해질에서는 덴드라이트가 형성되었지만 (그림2b), 수화된 깊은 공용 용매 전해질에서는 덴드라이트 형성을 억제된 것을 보여줌 (그림2a).

양극에서는 브롬의 상변화를 통하여 교차확산이 억제되는 것을 확인했고, 이로 인해 셀의 자가 방전을 억제하는 데 성공했다.



▲ 충전 완료 1시간 후의 H 셀 이미지. a) 수계 전해질, b) 수화된 깊은 공용 용매(Hydrated deep eutectic solvent) 전해질 : 수계 전해질에서는 노란색을 띠는 브롬이 반대 전극까지 확산했지만, 수화된 깊은 공용 용매 전해질에서는 확산하지 않고 탄소전극 근처에 머물러있는 모습을 보여줌.

결과적으로 연구팀은 고용량(297 mAh/g)으로 10,000 사이클 이상 안정적으로 충방전이 가능한 차세대 아연-브롬 전지를 개발하는 데 성공했다.



▲ 수계 전해질과 수화된 깊은 공용 용매(Hydrated deep eutectic solvent) 전해질을 사용한 전지의 사이클 수명 성능 비교 : 수계전해질에서는 1000 사이클 후, 셀 구동이 불안정해진 반면에, 수화된 깊은 공용 용매 전해질에서는 셀이 10,000 사이클 이상 안정적으로 구동함.

연구팀이 개발한 새로운 전해질은 전지의 안정성과 고효율을 확보하여 고용량 장수명 충방전 성능과 함께 폭발, 화재의 위험이 없으며, 더불어 저렴하고 제조가 용이하여 대용량화에 매우 적합하다. 따라서 상용화를 통해 향후 에너지 저장 장치에 활용될 것으로 기대된다.

유승준 교수는 “이번 연구에서 개발한 차세대 전해질은 기존 수계 전해질의 장점(친환경, 저비용, 비발화성)은 유지하면서 낮은 효율성, 메탈전극과 물의 부반응 등 단점은 보완함으로써 향후 다양한 금속 전극 기반 전지에 전해질로 활용할 수 있을 것으로 기대된다”며, “또한 간단한 제조공정의 장점을 활용하여 대형화 및 실용화 ESS용 전지 기술 개발에 도움이 될 것”이라고 강조했다.

GIST 신소재공학부 유승준 교수(교신저자)가 주도하고, 임윤지 석사과정생, 이건우 석사과정생이 공동 제1저자로 수행한 이번 연구는 과학기술정보통신부·한국연구재단, 개인기초연구 사업의 지원을 받았으며, 재료과학 분야 최상위 저널(JCR 랭킹 상위 5%, IF= 20.4)인 ‘에너지 스토리지 머티리얼즈(Energy Storage Materials)’에 2024년 3월 12일 온라인 게재됐다.

논문의 주요 내용

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Energy Storage Materials (IF = 20.4; 2024년 3월 기준)
- 논문명 : Tetrabutylammonium Bromide Incorporated Hydrated Deep Eutectic Solvents: Simultaneously Addressing Anode Stability and Cathode Efficiency in Zinc-Bromine Batteries
- 저자 정보 : 유승준 (교신저자, GIST 신소재공학부), 임윤지 석사과정생 (공동 제1저자, GIST 신소재공학부), 이건우 석사과정생 (공동 제1저자, GIST 신소재공학부)