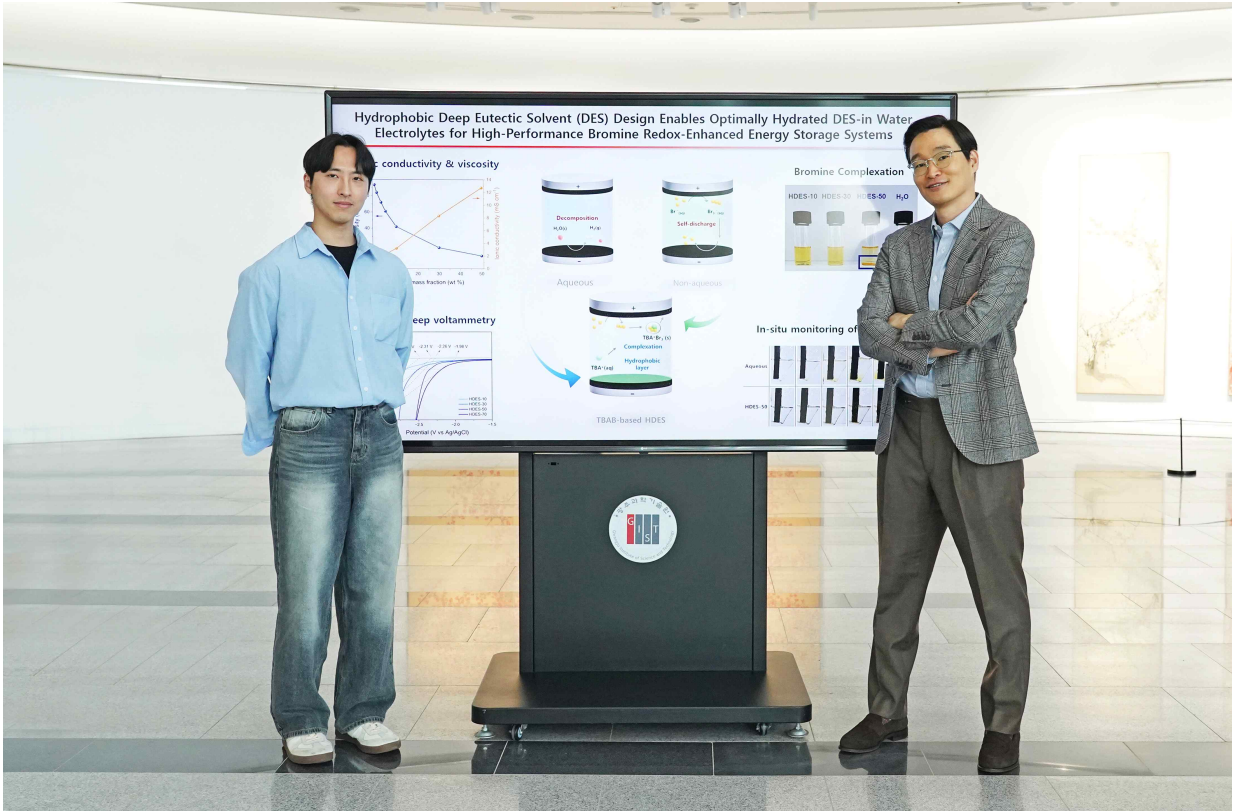


“물과 유기 전해질의 황금 비율” GIST, 차세대 전해질 개발 에너지 저장 장치 성능 혁신

- 신소재공학과 유승준 교수 연구팀, 고전압·비발화성·고효율의 차세대 레독스 전해질 개발
- 슈퍼커패시터 에너지 밀도 및 안정성 향상... 1만회 충·방전, 고온 충·방전에도 높은 저장 효율 유지
- 상용화 기대감 높아... 국제학술지 《Advanced Functional Materials》 게재



▲ (왼쪽부터) GIST 신소재공학과 엄태평 박사과정생, 유승준 교수

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 신소재공학과 유승준 교수 연구팀이 차세대 에너지 저장 장치로 주목받는 브롬 기반 레독스 슈퍼커패시터(Redox EC)의 성능을 획기적으로 향상시킬 수 있는 새로운 전해질을 개발했다고 밝혔다.

이번 연구 성과는 충전 후 자연스럽게 방전되는 문제(자가 방전)로 인한 낮은 효율 문제를 해결하고, 기존 수계 전해질의 안정성을 크게 개선할 것으로 기대된다.

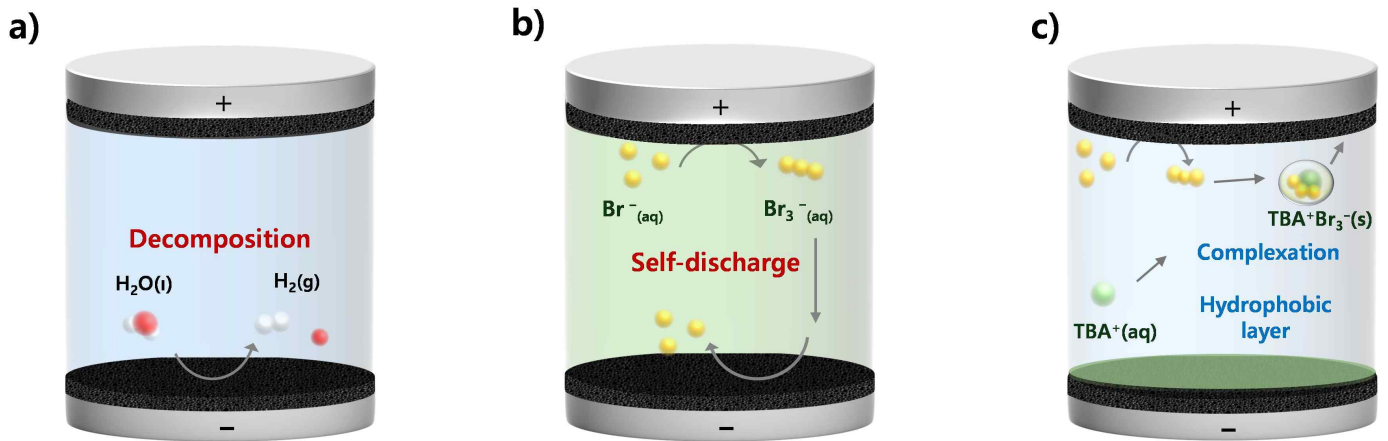
슈퍼커패시터는 빠른 충전 속도와 긴 수명을 갖춘 미래형 에너지 저장 장치로 주목받고 있다. 그러나 낮은 에너지 밀도와 자가 방전 문제는 상용화의 걸림돌로 작용해왔다.

이러한 한계를 극복하기 위해 개발된 레독스 슈퍼커패시터는 전해질 내에서 일어나는 레독스 반응(산화-환원 반응)을 활용하여 추가적인 전하를 저장할 수 있도록 설계되었으며, 이를 통해 높은 에너지 밀도와 빠른 반응 속도를 동시에 제공하는 혁신적인 기술로 평가받고 있다.

특히 브롬 기반 레독스 시스템*은 전자를 쉽게 받아들이는 성질(높은 환원 전위)과 브롬이 전해질에 잘 녹는 특성(우수한 용해도) 덕분에 유망한 기술로 주목받았다. 하지만 충전 과정에서 생성된 폴리브로마이드가 전지 내부에서 예상치 못한 방향으로 이동하는 문제(교차확산 문제)로 인해 자가 방전이 발생하고, 충·방전 효율(쿨롱 효율*)이 낮아지는 단점이 있다. 또한, 기존 전해질은 화학적으로 불안정하고 가연성이 있어 실용화에 어려움을 겪어왔다.

* 브롬 기반 레독스 시스템(Bromine-Based Redox System): 브롬(Br_2)과 브롬 이온(Br^-) 간의 산화-환원 반응을 활용하는 에너지 저장 기술이다.

* 쿨롱 효율(Coulombic Efficiency, CE): 배터리가 충전된 전하량 대비 실제로 방전할 수 있는 전하량의 비율을 나타내는 지표로서 배터리가 얼마나 효율적으로 충전과 방전을 수행하는지를 보여 준다.



▲ 브롬 전지에서 a) 수계 전해질의 문제점, b) 비수계 전해질의 문제점 및 c) TBAB 기반 HDES 전해질 시스템의 도식화 : 수계 전해질의 물 분해 및 전기화학적 불안정성 문제와, 비수계 전해질에서 폴리브로마이드의 교차확산을 해결하는데 어려움이 존재. TBAB의 음극에서 Hydrophobic layer 형성과, 양극에서 bromine complexation을 통해 음극과 양극의 문제를 동시에 해결함.

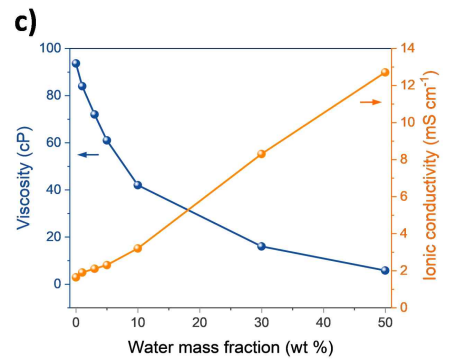
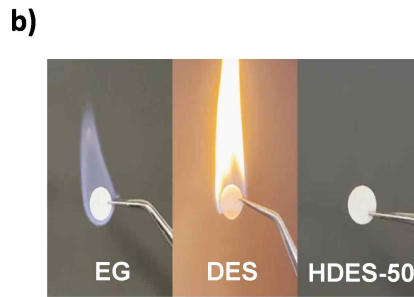
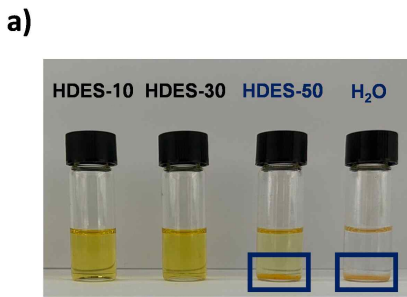
연구팀은 이러한 문제를 해결하기 위해 테트라부틸암모늄 브로마이드(TBAB)와 에틸렌글리콜(EG)을 조합하여 물이 포함된 '심층 공용 용매(HDES)' 전해질*을 개발했다.

TBAB의 소수성(hydrophobic, 물과 잘 섞이지 않는 성질)을 활용하여 브롬 기반 레독스 시스템의 전기화학적 성능을 향상시키고, 자가 방전을 억제*하는 데 성공했다.

* 심층 공용 용매(HDES, Hydrophobic Deep Eutectic Solvent): 특정한 두 가지 이상의 물질을 섞었을 때, 원래보다 낮은 온도에서 녹아 액체가 되는 용매이다. 특히 물과 잘 섞이지 않는 특성(소수성)이 있다.

* 테트라부틸 암모늄(TBA^+) 이온은 음극에서 전극 표면에 소수성 층을 형성하여 물과의 직접적인 접촉을 차단하고, 양극에서는 폴리브로마이드와 착화합물을 형성하여 교차확산을 억제함으로써 자가 방전을 줄이는 역할을 한다.

또한 연구팀은 기존 연구에서 불안정성으로 인해 구현이 어려웠던, '물 함량이 높은 (DES-in-Water)' 전해질을 개발하는 데 성공했다.



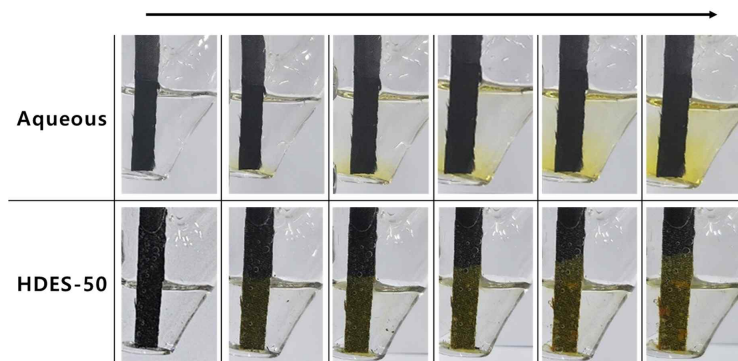
▲ 수분 함량 조절에 따른 전해질 특성 분석. a) Bromine complexation 테스트, b) 점화성 테스트, c) 이온 전도도 및 점도 분석. : 수분 함량에 따른 특성을 분석함으로써 전해질 최적화를 진행함. 50%의 수분 함량의 HDES는 뛰어난 bromine complexation 뿐 아니라 불에 타지 않으면서 높은 전도도 및 낮은 점도를 가짐.

이 전해질은 유기 전해질이 가진 전기화학적·열적 안정성과 수계 전해질의 높은 이온 전도도 및 난연성(불에 잘 타지 않는 성질)을 동시에 갖추고 있다. 또한 **심층 공용 용매(HDES) 속 물의 양을 조절해 브롬이 일정한 고체 형태로 형성되도록 유도** 하고, 자가 방전을 줄이며 장기적인 안정성을 확보했다.

* **DES-in-Water** : 낮은 수분 함량을 가진 일반적인 심층 공용 용매와 달리, 물이 많이 포함된 심층 공용 용매를 의미한다.



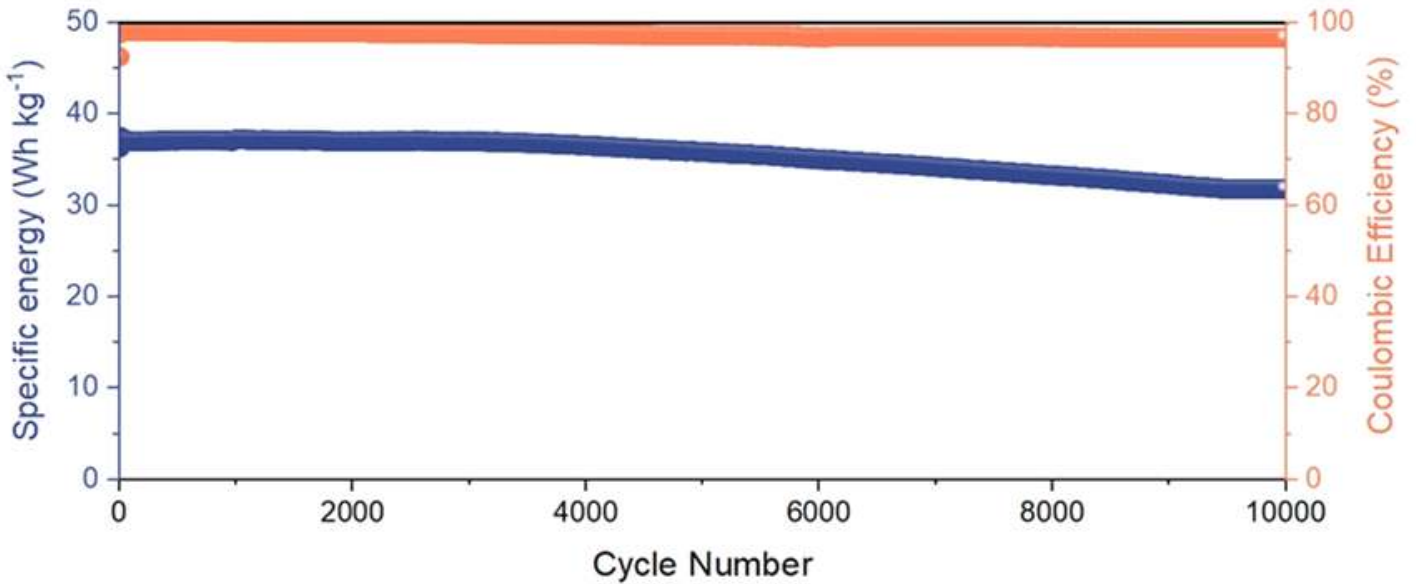
Charging



▲ H 셀 이미지와 각 전해질에서 충전 상태에 따른 디지털 이미지. 수계 (aqueous) 전해질에서 충전이 지속됨에 따라 노란색을 띠는 폴리브로마이드의 형성과 확산이 관찰되고 있음. 반면, HDES-50 (최적화된 수분 함량의 HDES) 전해질에서 확산하지 않고 탄소전극 근처에 묻혀있는 모습을 보여줌.

연구팀은 부틸 바이올로젠 음극과 브롬 양극을 적용한 **'이중 레독스 시스템 풀 셀 (full cell, 실제로 작동할 수 있도록 조립된 전지)'**을 제작하여 장기 충·방전 테스트를 진행했다.

실험 결과, 1.4 V에서 36.3 Wh/kg의 에너지 밀도를 기록하며 기존 슈퍼커패시터보다 월등히 높은 성능을 보였다. 또한, 10,000회 이상의 충·방전 사이클 후에도 초기 용량의 87% 이상을 유지했으며, 60 °C 고온 환경에서도 안정적인 성능을 보여 실용화 가능성을 높였다.



▲ HDES 전해질을 활용한 부틸바이올로젠/브로마이드 풀셀의 성능 평가 : 음극에서 바이올로젠 / 양극에서 브롬의 레독스 반응을 활용하는 풀셀 시스템에서 HDES 전해질을 적용하였음. 10,000 사이클 이상동안 높은 쿨롱 효율(97.5%) 및 방전용량(36.3 Wh/kg)을 유지하며 안정적으로 구동함.

유승준 교수는 “이번 연구를 통해 친환경적이면서도 높은 안정성을 갖춘 차세대 전해질을 개발했다”며, “특히 기존 수계 및 유기 전해질의 장점을 결합함으로써, 에너지 저장 장치의 수명을 연장하고 충·방전 효율을 극대화하는 데 기여할 것으로 기대된다”고 밝혔다.

또한 그는 “이번 연구에서 개발한 전해질은 브롬 기반 레독스 슈퍼커패시터뿐만 아니라, 대형 에너지 저장 시스템(ESS) 및 차세대 배터리 등 다양한 에너지 저장 기술 발전에도 크게 기여할 것”이라고 전망했다.

GIST 신소재공학과 유승준 교수(교신저자)가 주도하고, 임태평 박사과정생과 이건우 석사과정생이 공동 제1저자로 수행한 이번 연구는 한국연구재단 중견연구사업의 지원을 받았으며, 연구 결과는 국제학술지 《Advanced Functional Materials》에 2025년 3월 27일 온라인 게재됐다.

논문의 주요 내용

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Advanced Functional Materials (IF = 18.5 ; 2023년 월 기준)
- 논문명 : Hydrophobic Deep Eutectic Solvent (DES) Design Enables Optimally Hydrated DES-in-Water Electrolytes for High-Performance Bromine Redox-Enhanced Energy Storage Systems
- 저자 정보 : 엄태평 박사과정생 (공동 제1저자, GIST 신소재공학과), 이건우 석사과정생 (공동 제1저자, GIST 신소재공학과), 조영훈 박사과정생 (공동저자, GIST 신소재공학과), 임윤지 석사과정생 (공동저자, GIST 신소재공학과), 유승준 (교신저자, GIST 신소재공학과)