“폭발위험 없고 고용량·고출력까지”
레독스전지 성능 혁신할 전해질 개발

- 지스트 유승준·홍석원 교수팀, 유기분자가 에너지저장원인 기능성 전해질 개발
- 용해도 6배 이상 높여 고용량 레독스전지 실현...「ACS 에너지 레터스」 게재

▲ (왼쪽부터) 신소재공학부 유승준 교수, 고진혁 석사과정생, 화학과 홍석원 교수, 변진환 박사과정생

오늘날 에너지저장시스템(ESS)*에 널리 쓰이는 리튬이온전지는 수명이 짧고 배터리 과열로 인한 폭발위험이 있어, 다양한 소재의 전지가 연구되고 있다. **상대적으로 저렴하고 수명이 긴데다가 폭발위험이 낮은 ‘레독스 전지’**도 그 중 하나다.

레독스(redox)는 환원(reduction)과 산화(oxidation)의 합성어로, 레독스 전지는 전해액 내의 활성물질*이 ‘산화-환원’ 작용을 일으키며 전기를 전해액의 화학적 에너지로 저장하고 방출하는 전지를 말한다. 수계(물) 전해질을 이용하므로 **배터리 과열로 인한 화재를 원천적으로 차단**할 수 있다.

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

* **활성물질(Active material)**: 전지 방전 시 화학적 반응으로 전기에너지를 생산하는 물질

지스트(광주과학기술원, 총장직무대행 박래길) 유승준 교수와 홍석원 교수 공동연구팀은 **레독스 활성 유기분자*의 성능을 크게 향상시키는 전해질**을 개발해 **고용량·고출력의 레독스 전지를 구현하는데 성공**했다.

고출력이 가능한 슈퍼커패시터*에 2차전지의 ‘산화-환원’의 에너지 저장·방출 메커니즘을 더해 **용량을 극대화한 하이브리드 전지**다.

* **레독스 활성 유기분자:** 다양한 합성법과 분자 구조 디자인을 통해 용해도나 전기화학적 레독스 전위를 조절할 수 있어, 높은 에너지 저장이 가능한 활성물질이다.

* **슈퍼커패시터:** 에너지를 저장한 뒤 필요할 때 순간적으로 고출력으로 전기를 공급하는 에너지저장장치로, 에너지 저장능력은 낮지만 순간 출력능력은 강하다.

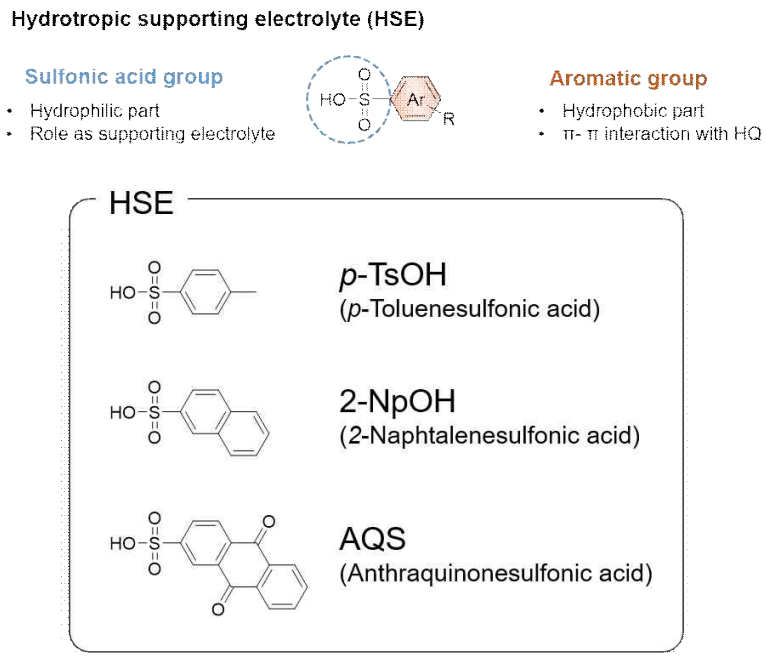
연구팀이 만든 '하이드로트로프 지지전해질'*을 이용하면 레독스 전지에 사용되는 **유기분자의 용해도가 기존보다 6배 수준으로 대폭 향상**되어 고용량 레독스 전지 개발이 가능해진다.

레독스 전지와 같은 전기화학 기반 ESS의 **에너지 용량을 높이려면 고농도의 활성물질이 전해액에 용해**될 수 있어야 한다. 그러나 활성물질 자체의 용해도가 낮거나, 이온전도도를 높이려고 지지전해질을 추가하면 **용해도가 저하**되는 문제점이 있었다.

연구팀은 물 분자와 쉽게 결합하지 않는 물질을 물에 잘 녹게 하는 '**하이드로트로프' 개념에 착안**해, 하이드로트로프 구조를 가지면서 지지전해질로 작용하는 분자를 개발했다. 이 지지전해질로 **활성물질의 용해도와 이온전도도를 동시에 향상**시킬 수 있게 됐다.

* **하이드로트로프(Hydrotrope)**: 물과 기름에 모두 친화적인 '양친성'을 가지는 저분자량 물질로, 기존의 계면활성제와는 달리 비정형의 나노구조를 통해 물에 잘 녹지 않는 물질의 수계 용해도를 향상시키는 것으로 알려진 분자구조를 총칭한다.

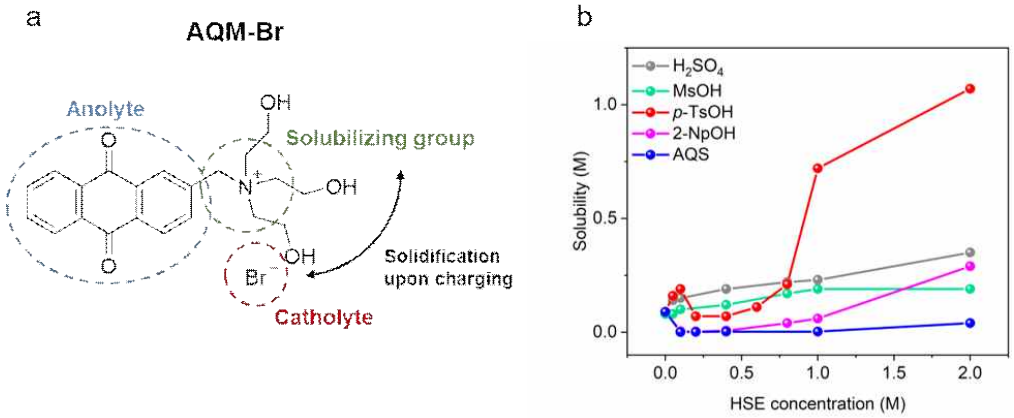
* **지지전해질(Supporting eletrolyte)**: 전기화학 기반 전지 등에서 용액의 저항을 낮출 목적으로 용해하는 전해질



[그림1] 하이드로트로프 지지전해질 (HSE) 분자구조와 각 구조의 기능 및 본 연구에서 사용된 HSE의 종류.

또, 연구팀은 이 지지전해질에 최적화된 레독스 활성 유기분자를 고안해 고농도의 전해액에서도 전지가 안정적으로 작동하게 했다.

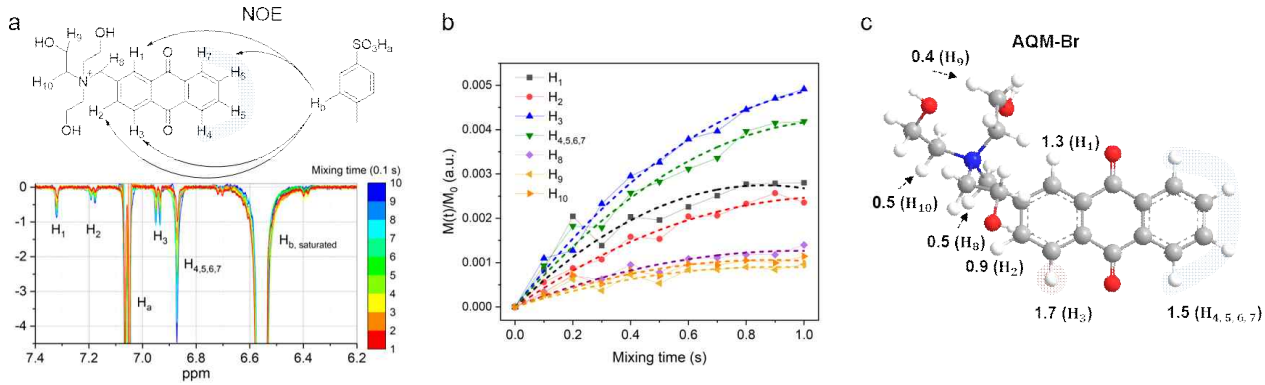
고농도(0.5Mol/L) 전해액에서도 활성 유기분자는 안정적으로 작동했다. 현재까지 개발된 퀴논류(quinone) 기반 레독스 전지 중 **최고 농도**다.



[그림2] a. 새로이 개발된 HSE에 최적화된 전기화학활성 (레독스 활성) 유기물 분자 2-[N,N,N-tris(2-hydroxyethyl)]anthracenemethanaminum-9,10-dione bromide (AQM-Br)
b. AQM-Br의 각 HSE 용액에서의 농도별 용해도 변화 그래프. p-TsOH 전해질 사용시 급격히 향상되는 용해도를 확인할 수 있음.

특히 연구팀은 관련 분야에서는 최초로 핵 오버하우저 효과*를 이용하는 핵자기공명 측정법을 도입해 하이드로트로프 전해질이 레독스 활성물질의 용해도를 높이는 물리화학적 원리를 규명했다. 하이드로트로프의 작용 메커니즘이 활성물질의 구조에 따라 다르게 일어나고 있음을 확인했으며 각 메커니즘에 최적화된 분자구조의 가이드라인을 제시했다.

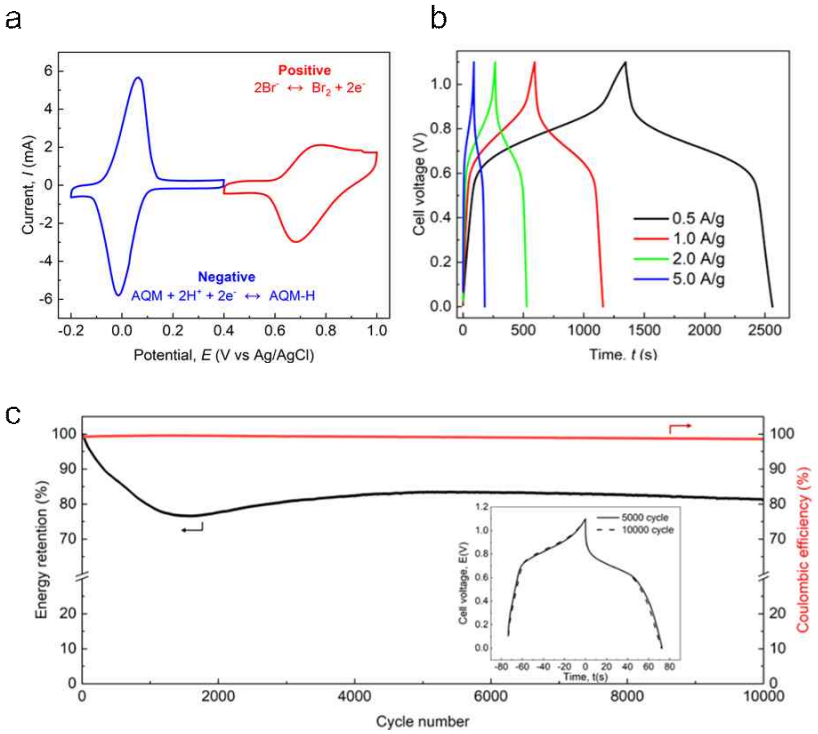
* **분자간 핵 오버하우저 (Intermolecular nuclear overhauser) 효과**: 서로 다른 분자에 존재하는 수소원자 간의 핵스핀 전달을 이용하여, 각 분자내 수소 원자 간의 거리를 측정하는 방법이다.



[그림3] a. 분자 간 핵 오버하우저 효과 측정 개념도 및 실제 획득된 스펙트럼
b. 시간에 따른 핵 오버하우저 스펙트럼의 세기변화
c. AQM-Br 내 각 수소의 핵 오버하우저 효과 세기 분포도 및 하이드로트로프와의 간접적인 거리.

신소재공학부 유승준 교수는 "이번 연구성과로 **레독스 활성 유기분자의 고질적인 한계인 낮은 용해도를 향상**할 수 있게 되어, 고용량·고출력 레독스 전지 개발뿐 아니라 다양한 분자구조의 에너지저장원 개발에도 성과가 있을 것으로 기대된다"며,

"향후 액체를 에너지저장원으로 사용하는 장점을 활용하면 **ESS 대형화와 같은 응용기술 개발**에도 도움이 될 것이다"라고 말했다.



[그림4] AQM-Br을 이용한 레독스 슈퍼커패시터 성능 분석.

a. 순환 전압법으로 측정한 AQM-Br 의 전기화학적 안정성 측정

b. 전류세기에 따른 슈퍼커패시터의 충방전 성능 측정

c. 10,000회의 충방전 동안 성능이 안정적으로 유지됨을 확인함

이번 연구는 신소재공학부 유승준 교수가 주도하고 화학과 홍석원 교수가 공동 교신저자로 참여했으며 변진환 박사과정생, 고진혁 석사과정생이 공동 제1저자로 수행했다. 과학기술정보통신부·한국연구재단의 개인기초연구 사업의 지원을 받았으며, **전기화학 및 에너지 분야의 국제 저명 학술지인 ACS 에너지 레터스(ACS Energy Letters)**에 4월 21일 게재됐다.

논문의 주요 정보

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : ACS Energy Letters (IF = 23.991; 2023년 기준)
- 논문명 : Solubility-Enhancing Hydrotrope Electrolyte with Tailor-Made Organic Redox-Active Species for Redox-Enhanced Electrochemical Capacitors
- 저자 정보 : 유승준 교수(대표 교신저자, 신소재공학부), 홍석원 교수(공동 교신저자, 화학과), 변진환 박사과정생(공동 제1저자, 화학과), 고진혁 석사과정생(공동 제1저자, 신소재공학부)