

GIST, 친환경적 수계 슈퍼커패시터의 고속 충·방전 위한 전해질 최적농도 찾았다

- 전해질 내 이온-이온, 이온-물분자 사이의 상호작용 분석 및 다공성 탄소전극 표면과의 흡/탈착 메커니즘 규명... 재료공학 분야 저명 국제학술지 「Energy Storage Materials」 게재
- 배터리, 수소연료전지, 센서 등 고성능 수계 전자소자 개발 기대



▲ (왼쪽부터) GIST 유승준 교수, GIST 윤명한 교수, 홍익대학교 이동욱 교수, GIST 박재일 박사과정생
광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 신소재공학부 유승준 교수와 윤명한 교수, 홍익대학교 신소재공학과 이동욱 교수 공동연구팀이 전해질(용매+염)에서 염의 농도를 변화시켜 슈퍼커패시터(Supercapacitor)의 주요 성능을 크게 향상시키는 데 성공했다고 밝혔다.

슈퍼커패시터는 화학반응을 이용한 리튬계 배터리와는 다르게 전극과 전해질 계면에서 이온들의 물리적 흡/탈착을 통해 에너지를 저장하는 에너지 저장 장치로, 일반 커패시터에 비해 **충전 용량이 훨씬 크고 에너지 밀도가 높다**. 따라서 울트라커패시터 또는 초고용량 커패시터라고 부르기도 한다.

또한 급속 충·방전 시 ▲**높은 전력 공급 대비 낮은 열 발생** ▲**반영구적인 사이클 수명의 이점이 있어 차세대 에너지저장장치로 주목받고 있으며, 급격히 높아지는 전력 공급이 필요한 애플리케이션에도 적합하다**. 이러한 특성 때문에 태양광·풍력과 같은 재생 가능 에너지원의 사용 증가로 슈퍼커패시터에 대한 수요 역시 늘고 있다.

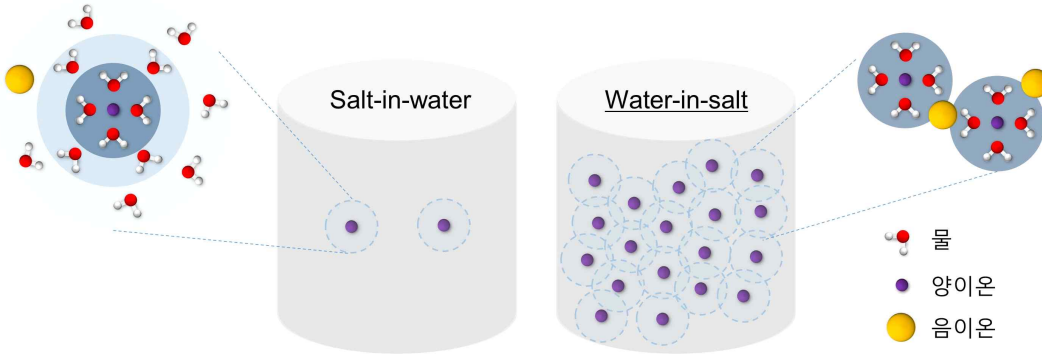
기존 슈퍼커패시터에 사용되고 있는 가연성의 유기 용매 기반 전해질은 폭발의 위험과 환경 문제 등의 우려가 있어 최근에는 **폭발의 위험이 없고 친환경적인 물 기반의 수계전해질을 이용한 에너지저장장치 개발에 관심이 집중되고 있다**.

하지만 일반적으로 물은 1.24 V에서 전기 분해되어 작동전압을 넓히기 어렵고, 0℃에서 얼기 때문에 겨울철 에너지 저장 성능을 내는 데 한계가 있어 **상용화 연구 개발에 어려움**이 있다.

넓은 작동전압, 안정적인 SEI(Solid Electrolyte Interphase)*, 적절한 이온전도도를 가지는 초고농도 수계전해질(water-in-salt electrolyte: WiSE)*을 사용해 기존 수계전해질의 문제를 극복하려는 연구가 활발히 진행되어 왔으나, **고농도 전해질에 대한 고려 없이 성능 개선에만 초점을 맞췄을 뿐 체계적인 분석은 이뤄지지 않았다.**

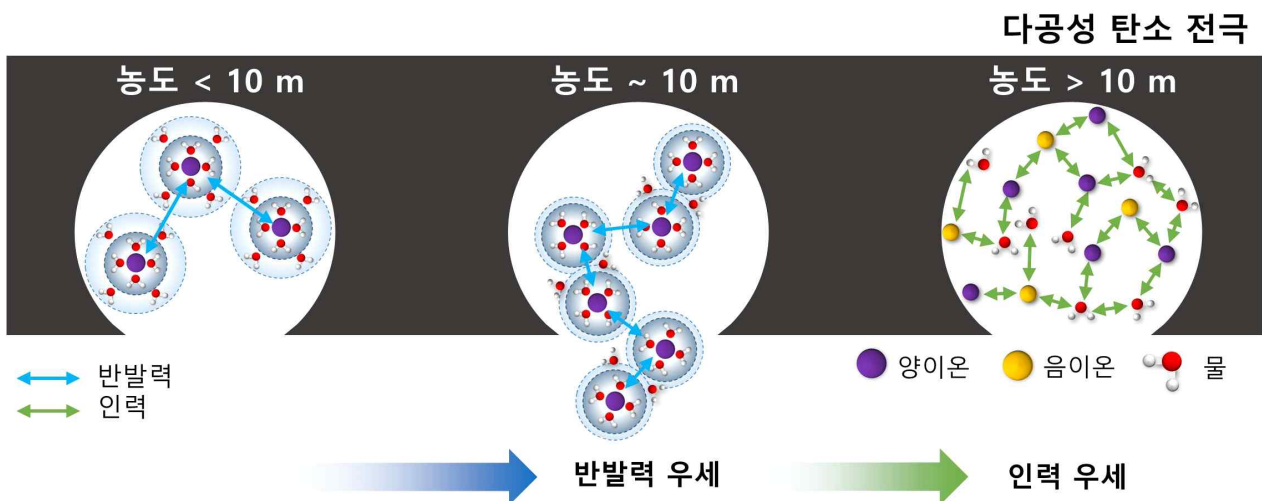
* **SEI(Solid Electrolyte Interphase)**: 전해질은 일반적으로 리튬염과 전해액, 첨가제로 구성된다. 배터리의 충전 과정에서 전해질 내 물질들이 전기분해를 일으켜 전극-전해질 계면에 고체막을 형성하는데, 이 고체막을 SEI라고 한다.

* **Water-in-salt electrolyte(WiSE)**: 일반적인 수계전해질처럼 과량의 물에 약간의 염이 녹아 있는 수용액과는 다르게 WiSE는 약간의 물에 과량의 염이 녹아 있는 초고농도 수용액을 의미한다.



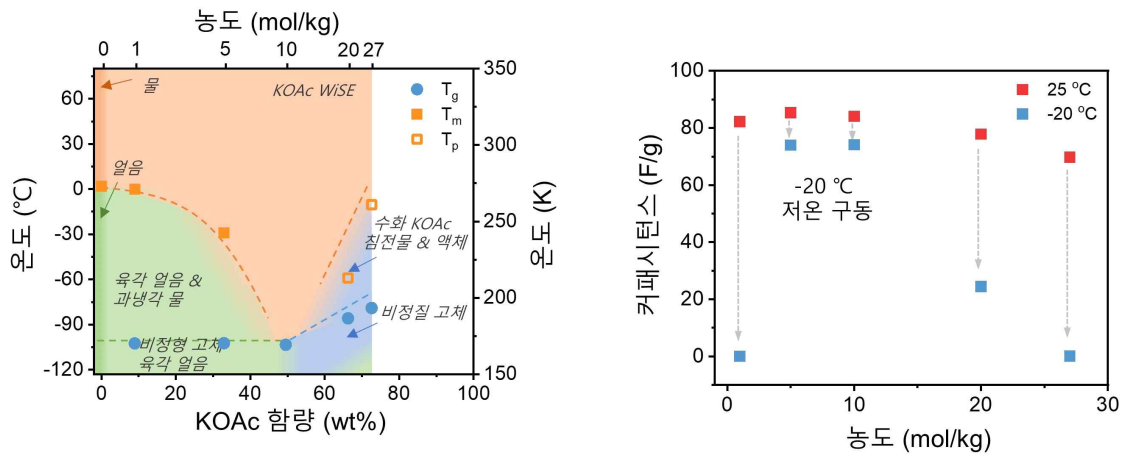
▲ (좌) 묽은 수계전해질 (salt-in-water) 및 (우) 초고농도 수계전해질 (water-in-salt)의 수화구조. 묽은 용액에서 이온은 물분자에 의해 양이온과 음이온으로 분리되어 존재하지만, 초고농도 용액에서 이온은 물분자의 양이 부족해 ion-ion간 강한 상호작용을 할 수 있으며 물분자의 원치 않는 반응성을 억제할 수 있음.

이를 해결하기 위해 연구팀은 가격이 저렴한 **포타슘 아세테이트(KOAc) 기반 초고농도 수계전해질 내 이온-이온간, 이온-물분자간 물리화학적 상호작용 및 전해질의 농도별 구조 특성을 분석하였고, 다공성 전극 표면에서의 흡/탈착 거동을 밝혀냄으로써 이온전도도와 에너지 저장 특성이 최적화된 농도(5 m(몰랄 농도): 용매 1 kg 당 용질의 몰수))를 확인하는 데 성공했다.**



▲ 농도에 따른 이온-이온간, 이온-물분자간 물리화학적 상호작용을 분석하고 이를 토대로 다공성 탄소 전극 표면에서의 이온의 흡/탈착 거동을 밝혀내었음. 10 m까지는 반발력이 우세하고, 10 m 이후로는 인력이 우세한 이온간 상호작용을 확인하고 이 상호작용을 최적화할 수 있는 농도를 규명함.

또한 해당 결과를 토대로 초고농도 수계 전해질의 상평형도를 제시했으며, 영하 20 °C에서도 얼지 않고 안정적으로 구동(74 F/g의 충전 성능)되는 수계 슈퍼커패시터를 개발하는 데 성공했다.



▲ (좌) 포타슘 아세테이트 기반 초고농도 수계 전해질의 상평형도 및 (우) 농도에 따른 25 °C와 -20 °C에서의 에너지 저장 성능을 제시하였음. 5 m, 10 m는 -20 °C에서도 얼지 않고 안정적인 에너지 저장 특성을 보임을 확인함.

초고농도 수계 전해질의 농도를 최적화함으로써 수계 슈퍼커패시터를 만드는 새로운 기준을 제시한 이번 연구 성과는 향후 배터리, 수소연료전지, 센서 등 고성능 수계 전자소자 개발에 크게 기여할 것으로 기대된다.

유승준 교수는 "초고농도 수계 전해질 내 구성 요소의 물리화학적, 구조적 상호작용을 이해하고 다공성 탄소전극 표면에 이온의 흡/탈착 거동을 체계적으로 분석한 결과, 염의 농도 변화만으로 에너지 저장 특성의 최적화를 이룰 수 있는 것을 확인했다"며, "기존에 사용되는 염 혹은 향후 개발될 전해질 최적화에 가이드라인을 제공할 수 있을 것으로 기대된다"고 전망했다.

이번 연구는 GIST 신소재공학부 유승준 교수(교신저자)가 주도하고, GIST 신소재공학부 박재일 박사과정생이 수행하였으며, GIST 신소재공학부 윤명한 교수(공동교신저자), 홍익대학교 이동욱 교수(공동교신저자)의 공동연구로 수행됐다.

과학기술정보통신부·한국연구재단, 개인기초연구 사업의 지원을 받아 수행되었으며, 재료과학 분야 최상위 저널(JCR 랭킹 상위 5%, IF= 20.4)인 '에너지 스토리지 머티리얼즈(Energy Storage Materials)'에 2023년 12월 23일 온라인 게재되었다.

논문의 주요 내용

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Energy Storage Materials (IF = 20.4; 2023년 기준)
- 논문명 : Unraveling Concentration-Dependent Solvation Structures and Molecular Interactions in Water-in-Salt Electrolytes for Enhanced Performance of Electric Double-Layer Capacitors
- 저자 정보 : 유승준 (교신저자, GIST), 이동욱 (공동교신저자, 홍익대학교), 윤명한 (공동교신저자, GIST), 박재일 (제1저자, GIST)