

GIST, 차세대 슈퍼커패시터 기술 개발

빠른 충전과 긴 수명은 그대로,

에너지 밀도는 배터리 수준으로 '업그레이드'

- 화학과 박찬호 교수 및 신소재공학과 유승준 교수 공동연구팀, 듀얼 레독스 시스템과 다공성 탄소 전극으로 자가방전 억제 및 성능 극대화... 에너지 저장 용량과 효율 동시에 확보
- 전극-전해질 계면 정밀 제어와 미세-중형 기공을 균형 있게 설계한 탄소 소재로 에너지 밀도 125Wh/kg 달성... 고성능 수계 에너지 저장장치 개발 기대, 국제학술지 《Small》 게재



▲ (왼쪽부터) GIST 화학과 박찬호 교수, 신소재공학과 조영훈 박사과정생, 신소재공학과 유승준 교수, (우측 상단) 김종경 박사(GIST 화학과 졸업)

신재생에너지의 활용이 증가하면서 과다 생산된 전기를 효율적으로 저장할 수 있는 에너지 저장 장치에 대한 관심이 높아지고 있다.

특히 빠른 충·방전 속도와 긴 수명을 가진 커패시터*가 주목받고 있지만, 에너지 저장량(밀도)이 낮아 배터리를 대체하기에는 한계가 있다. 이에 따라 커패시터의 장점을 유지하면서도 배터리 수준의 에너지 밀도를 갖춘 차세대 에너지 저장 기술의 개발이 요구되고 있다.

* **커패시터(Capacitor)**: 전기를 저장했다가 빠르게 방출하는 부품으로 충·방전 속도가 빠르고 수명이 긴 장점이 있어, 고속 반응이 필요한 장치에 사용된다.

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 **화학**과 박찬호 교수와 **신소재공학과** 유승준 교수 공동연구팀이 전극과 전해질 사이의 계면에서 일어나는 상호작용을 정밀하게 제어함으로써 **레독스 슈퍼커패시터의 에너지 저장 성능을 크게 향상시키는 데 성공**했다고 밝혔다.

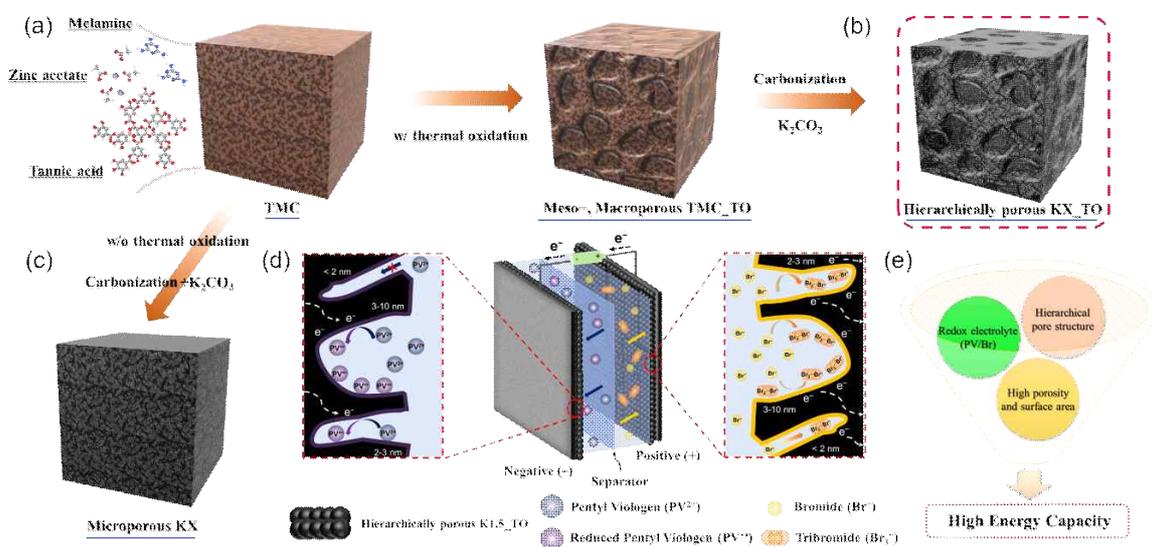
이번 연구는 **커패시터의 빠른 반응성과 긴 수명은 유지하면서, 배터리에 가까운 높은 에너지 밀도를 구현**했다는 점에서 차세대 에너지 저장 장치 개발에 중요한 전환점이 될 것으로 기대된다.

기존의 레독스 슈퍼커패시터는 에너지 밀도를 높이기 위해 전해질 속 레독스 활성 물질의 농도를 높이는 방식이 주로 사용됐다. 그러나 이 방법은 활성물질이 전극 사이를 자유롭게 이동하며 에너지가 새어 나가는 **자가방전 현상을 유발**하고, **충·방전 효율(쿨롱 효율)*도 떨어뜨리는 단점**이 있었다.

또한 활성물질의 분자 크기나 구조에 따라 전극과 전해질이 만나는 계면에서의 반응 특성이 크게 달라질 수 있지만, 이에 대한 연구는 상대적으로 부족한 상황이다.

* **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.

이에 연구팀은 **펜틸바이올로젠(pentyl viologen, PV)과 브로마이드(bromide, Br)**를 각각 음극과 양극의 전해질로 사용하는 **듀얼 레독스 시스템***을 도입했다. 두 물질은 충·방전 과정 중 고체 화합물을 형성하며 자가방전을 억제하고, 에너지 손실을 최소화하는 효과가 있다.

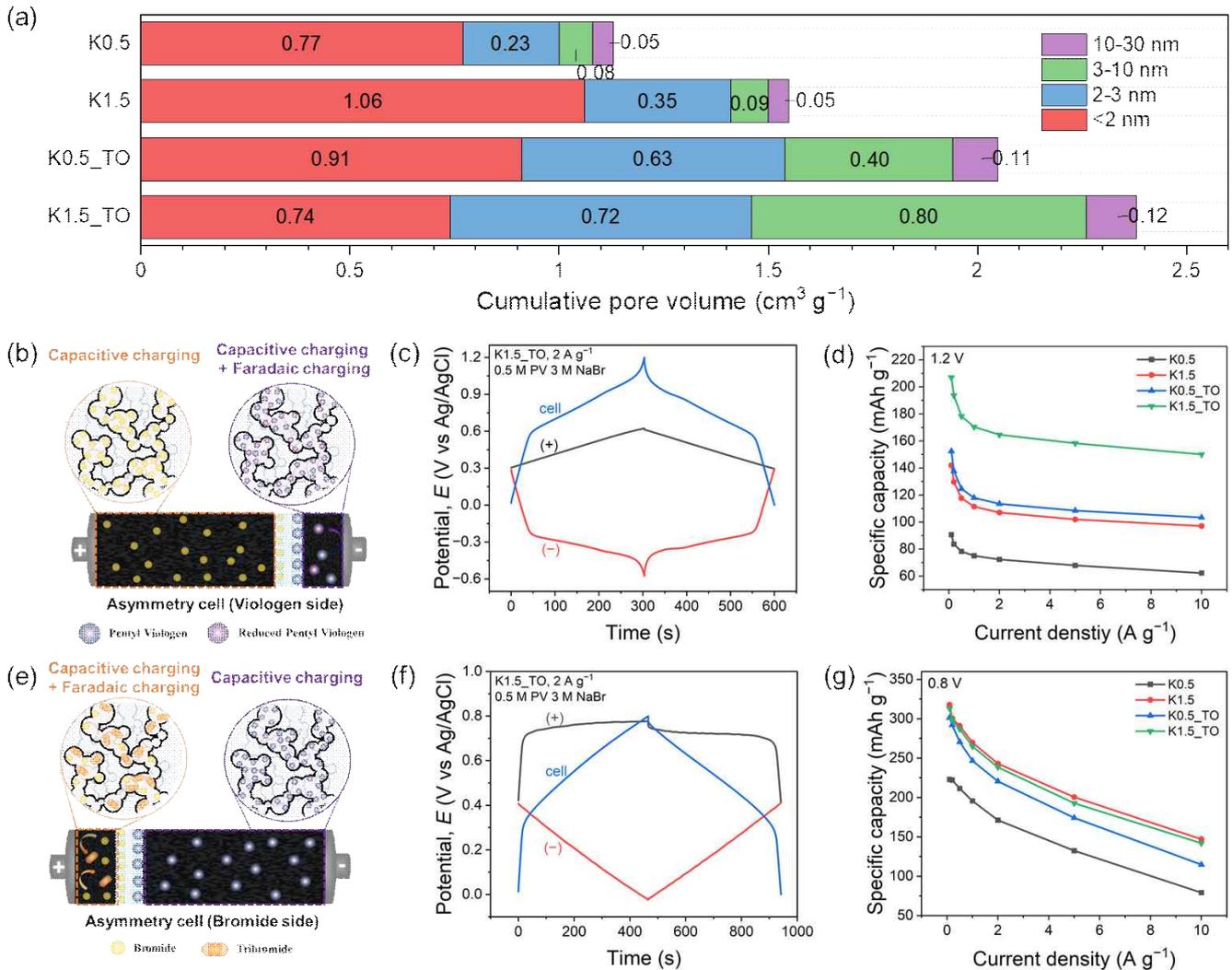


▲ **a-c) 저비용 전구체 설계 및 TO 기반 다공성 탄소 합성 과정** : Thermal oxidation(TO) 공정을 통해 미세-중형 기공 균형을 조절 및 고 비표면적 탄소 전극을 구현함. **d, e) 레독스 전해질-전극 간 상호작용 및 시너지 모식도** : 레독스 활성 물질의 크기 및 특성에 최적화된 기공 구조 설계를 통해 전극/전해질 간 효율적 상호작용을 유도하며, 이는 레독스 슈퍼커패시터 성능 향상의 핵심 요소임을 나타냄.

아울러 연구팀은 레독스 활성물질이 효과적으로 흡착되고 확산될 수 있도록, **미세기공(2 nm 이하)과 중형기공(2~50 nm)이 적절히 분포된 다공성 탄소* 전극을 개발해 전극과 전해질 사이 계면의 반응을 극대화했다.**

* 이 시스템은 PV를 음극 전해질, 브로마이드를 양극 전해질로 사용하여, 두 물질이 함께 반응하면서 에너지 저장 효율을 높이는 방식이다.

* **다공성 탄소:** 매우 많은 기공(구멍)을 가진 탄소 소재로, 표면적이 넓고 에너지 저장에 유리하다.



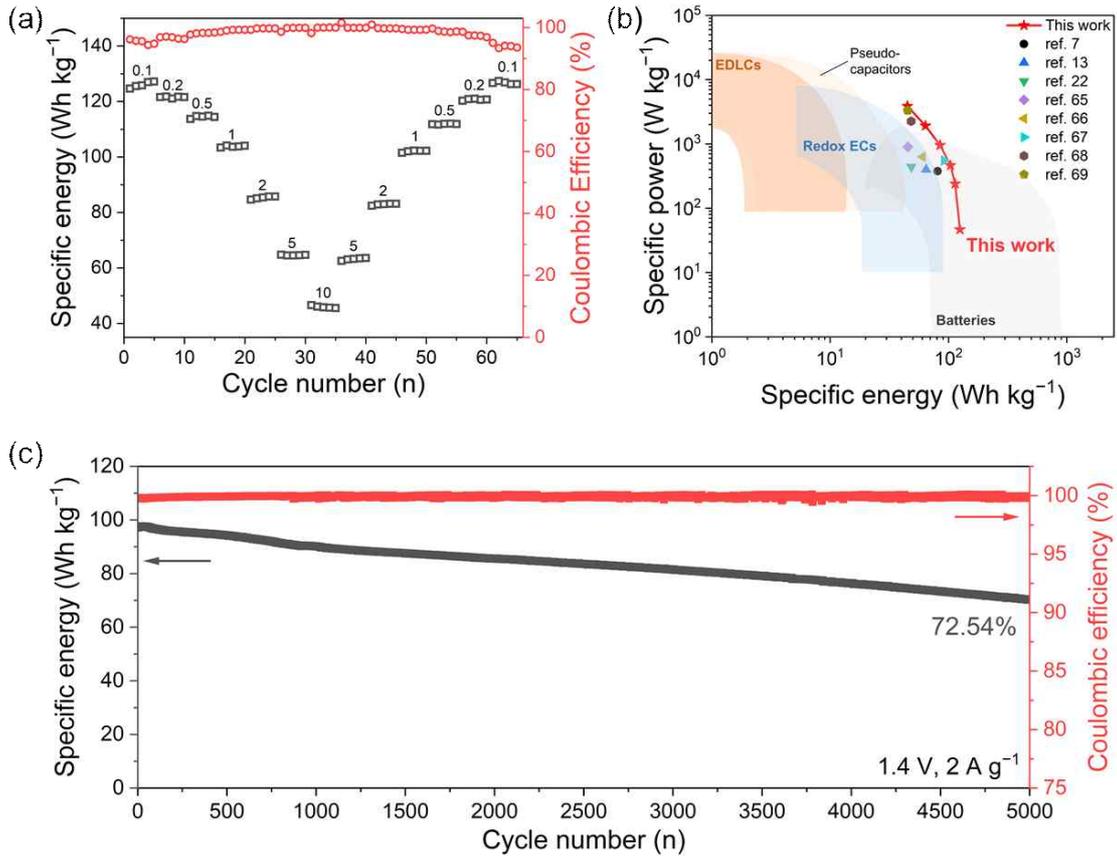
▲ a) 탄소 소재의 기공 크기별 부피 분포, b-d) PV 중심 비대칭 셀 구성 및 전기화학 성능, e-g) Br 중심 비대칭 셀 구성 및 전기화학 성능 : 비대칭 셀 기반 분석을 통해 레독스 물질별 반응 및 성능 기여도를 정량적으로 규명하였으며, 중형 기공(2~10 nm)이 PV의 흡착·확산에 결정적 역할을 함을 확인함.

펜틸바이올로젠(PV)과 브로마이드(Br)는 각각 약 2 nm와 0.19 nm의 분자 크기를 가지며, 이처럼 크기 차이가 큰 활성물질을 모두 효과적으로 다루기 위해서는 **기공 크기 조절이 핵심**이다. 하지만 기존의 기공 조절 방식은 미세기공이 무너질 위험이 있어 복잡하고 비용이 많이 드는 공정이 필요했다.

연구팀은 이러한 문제를 해결하기 위해 **간단하면서도 저렴한 합성법을 개발해, 미세기공을 손상시키지 않으면서도 중형기공의 비율을 효과적으로 늘린 새로운 탄소 소재**를 만들었다.

이 탄소 전극을 PV/Br 기반 레독스 슈퍼커패시터에 적용한 실험 결과, **PV 분자의 흡착량이 에너지 밀도에 중요한 영향을 미친다**는 사실과 함께, **2~10 nm 크기의 중형기공이 PV 분자의 흡착과 확산에 가장 효과적임을 확인했다.**

연구팀은 전해질 농도를 최대한 높이고 비표면적 3,309 m²/g, 기공 부피 2.38 cm³/g의 탄소 전극(K1.5_TO)을 사용하여, 수계 레독스 커패시터 시스템에서 **125 Wh/kg**라는 높은 에너지 밀도를 안정적으로 구현했다.



▲ a) 다양한 전류 밀도에서의 에너지 밀도 및 쿨롱 효율, b) 기존 레독스 슈퍼커패시터와의 성능 비교, c) 5,000 사이클 수명 안정성 및 쿨롱 효율 : 고농도 전해질과 K1.5_TO 전극 적용을 통해 최대 125 Wh/kg의 에너지 밀도와 장기 사이클 안정성 확보. 기공 구조 최적화가 PV 확산 및 흡착을 극대화하여 성능 향상에 기여함.

박찬호 교수는 “이번 연구는 전극과 전해질 계면에서의 물질 상호작용을 정밀하게 제어함으로써, 레독스 슈퍼커패시터의 성능을 획기적으로 향상시킬 수 있음을 입증한 사례”라며 “고성능 수계 에너지 저장장치 개발에 새로운 방향성을 제시할 것”이라고 말했다.

유승준 교수는 “에너지 저장 장치의 성능을 끌어올리기 위해서는 단순히 소재의 성능뿐만 아니라, 소재 간의 상호작용에 대한 이해가 필수적”이라며, “이번 연구는 레독스 전해질과 다공성 탄소 전극의 상호작용을 기반으로 높은 에너지 밀도를 구현한 사례로, 향후 다양한 고성능 레독스 전지 설계에 중요한 지침이 될 것”이라고 강조했다.

박찬호 교수와 유승준 교수가 주도하고 김종경 박사와 조영훈 박사과정생이 공동 1저자로 참여한 이번 연구는 한국연구재단 단계도약형 탄소중립 기술개발사업 및 중견연구자지원사업의 지원을 받았다. 연구 결과는 국제학술지 《스몰(Small)》에 2025년 4월 28일 온라인 게재됐다.

논문의 주요 내용

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Small (Impact Factor : 13.0 ; 2023년 기준)
- 논문명 : Hierarchically Tailored Porous Carbon via Precursor Engineering for Dual-Redox Electrochemical Capacitors with Record-High Energy Density
- 저자 정보 : 김종경(공동 제1저자, GIST), 조영훈(공동 제1저자, GIST), 유승준(교신저자, GIST), 박찬호(교신저자, GIST)