

“전극 아닌 전해질 설계로 해법 찾았다”

GIST, 분자 크기 정밀 제어로

차세대 레독스 슈퍼커패시터 성능 대폭 향상

- 신소재공학과 유승준 교수 연구팀, 전극 맞춤형 분자 설계로 고성능·장수명 에너지 저장 기술 실현... 고비용 이온교환막 없이도 에너지 밀도·수명·자가방전 문제 동시에 해결
- 차세대 에너지 저장 장치 가능성 열어... 국제학술지 《Chemical Engineering Journal》 게재



▲ (왼쪽부터) GIST 신소재공학과 조영훈 박사과정생, 유승준 교수

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 신소재공학과 유승준 교수 연구팀이 분자의 크기를 정밀하게 조절해 레독스 슈퍼커패시터(Redox EC)*의 성능을 획기적으로 향상시킬 수 있는 기술을 개발했다고 밝혔다.

연구팀은 유기 레독스 분자의 크기를 옹스트롬(Å) 단위까지 정밀하게 설계해 다공성 탄소* 전극과 효과적으로 반응하도록 최적화했다.

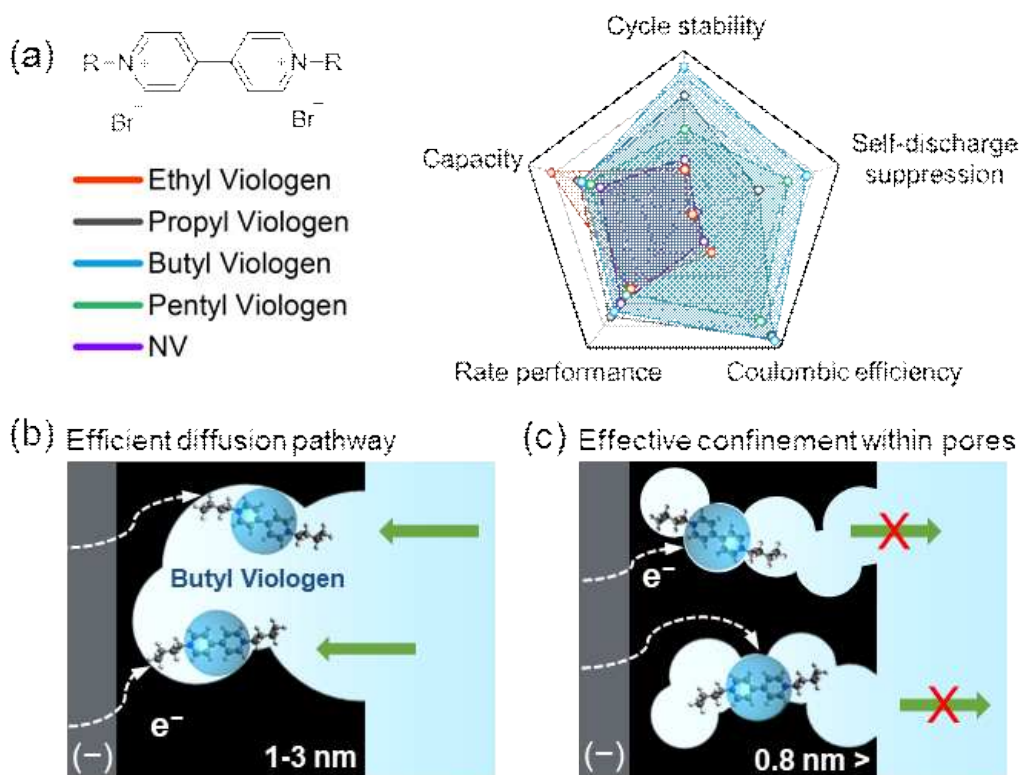
* 레독스 슈퍼커패시터(Redox EC, Redox-Enhanced Electrochemical Capacitor): 전해질 속에 레독스 활성물질(산화-환원 반응을 할 수 있는 물질)을 넣어 이 물질들이 전자를 주고받으며 추가적인 에너지 저장을 할 수 있도록 한 장치이다.

* 다공성 탄소: 표면에 수많은 미세한 구멍이 뚫려 있는 탄소 소재로, 표면적이 매우 넓고 전기 전도성도 뛰어나다. 전기 에너지를 저장하거나 화학 반응을 촉진하는 데 유리해 배터리, 슈퍼커패시터, 흡착제, 촉매 지지체 등 다양한 분야에서 활용된다.

이를 통해 연구팀은 에너지 밀도가 높고, 자가방전이 적으며, 긴 수명까지 갖춘 고성능 수계(水系) 레독스 슈퍼커패시터를 개발하는 데 성공했다.

기존 슈퍼커패시터는 빠른 충전 속도와 긴 수명이라는 장점이 있지만, 에너지 밀도가 낮아 저장 용량에 한계가 있었다. 이러한 단점을 보완한 레독스 슈퍼커패시터는 전해질에 녹아 있는 레독스 활성물질이 전자를 주고받으며 추가적인 에너지를 저장할 수 있도록 설계된 차세대 기술이다.

그러나 활성물질이 전해질 내에서 자유롭게 확산되면서 자가방전이 발생하고, 고가의 이온교환막에 의존해야 하는 문제로 인해 상용화에 어려움이 있었다.

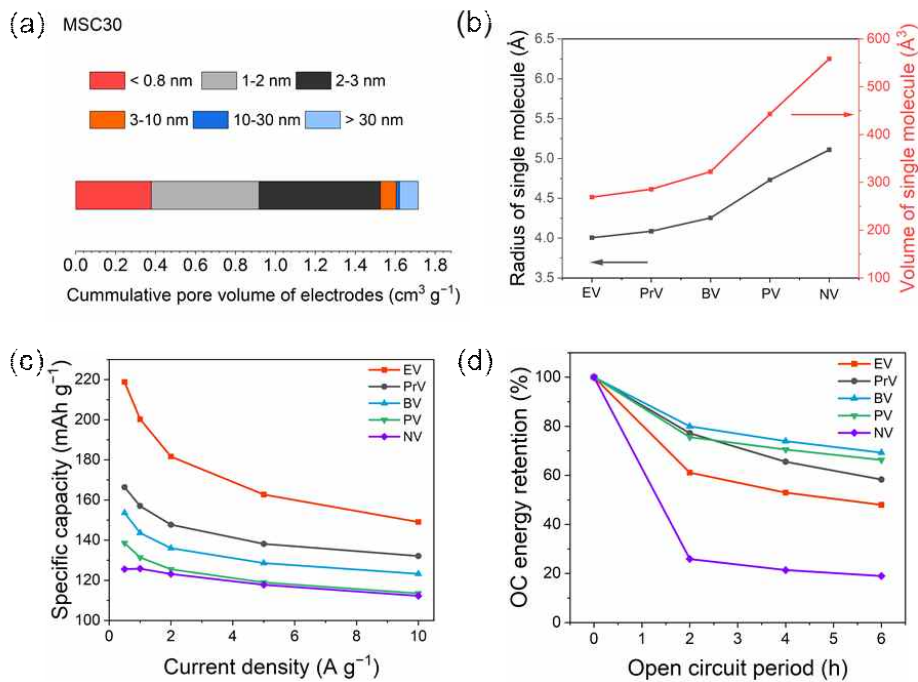


▲ a) 바이올로젠의 치환기 변화에 따른 셀 성능 변화 모식도, b) 1-3 nm 크기의 기공 내에서 BV의 흡착 및 확산 경향, c) 0.8 nm 이하의 미세기공에서 BV와 기공 간 매칭을 통한 자가방전 억제 메커니즘. 레독스 분자의 크기에 따라 셀 성능이 달라짐을 나타냄. 사용된 전극에서 BV가 가장 높은 구조적 호환성을 보여 최적의 용량, 속도, 자가방전 억제 및 장기 안정성을 나타냄.

연구팀은 이러한 문제를 해결하기 위해 활성물질* 분자의 크기를 다공성 탄소 전극의 미세한 기공 구조에 맞춰 정밀하게 설계함으로써, 별도의 이온교환막 없이도 고성능을 구현할 수 있는 새로운 해법을 제시했다.

* **활성 물질(Active material):** 충·방전 과정에서 전기에너지를 저장하거나 내보내는 핵심 물질
이 기술의 핵심은 전극과 전해질이 맞닿는 '계면'에서 일어나는 반응에 있다. 기존에는 전극의 기공 크기를 바꾸는 방식으로 계면 반응을 조절했지만, 이 방법은 제조 공정이 복잡하고 비용이 많이 드는 한계가 있었다.

이에 연구팀은 전극 구조를 바꾸기보다, 전해질 내 분자 크기를 조절해 계면 상호작용을 정밀하게 설계하는 방식으로 전환함으로써 제조의 효율성과 성능을 동시에 확보하는 데 성공했다.

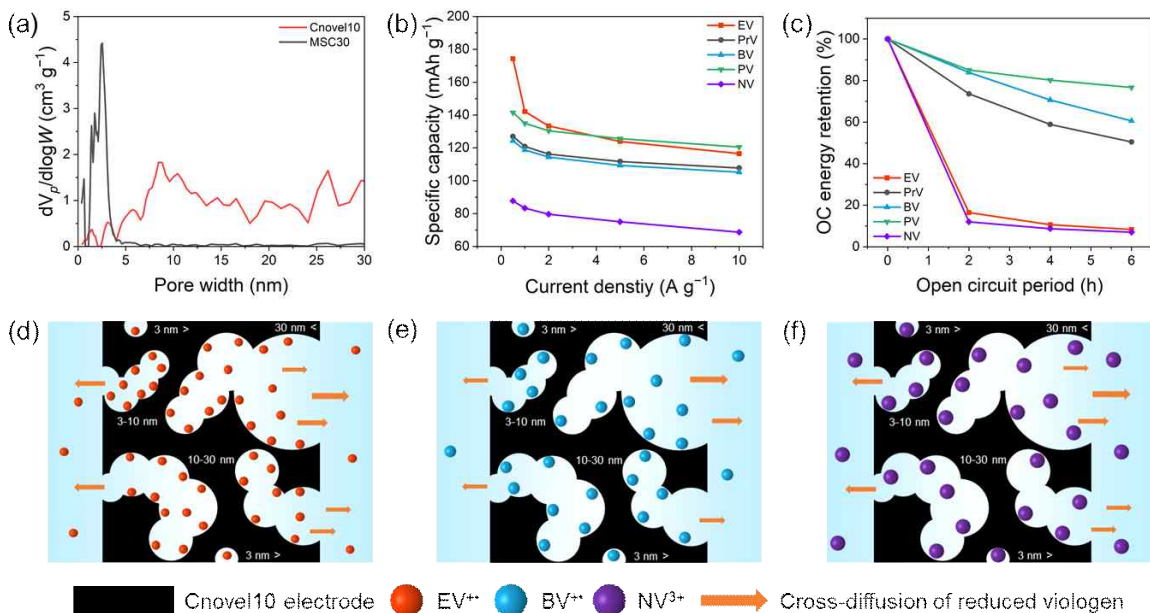


▲ a) MSC30의 기공 부피 분포, b) 바이올로젠의 반지름 및 분자 부피 (DFT 계산), c) 바이올로젠 종류별 비대칭형 셀 용량 비교, d) 바이올로젠 종류별 자가방전 억제 성능 비교. 비대칭 셀을 통해 바이올로젠 크기에 따른 성능 변화 관찰 가능. 미세기공이 주로 발달된 MSC30 전극에서 분자 크기에 따라 성능 차이가 뚜렷하게 나타났으며, 유기 분자 구조 조절을 통한 계면 제어의 중요성을 확인함.

* 비대칭형 셀(Asymmetric cell) : 한쪽 전극에서의 레독스 반응만을 선택적으로 관찰하고 비교하기 위해, 반대쪽 전극의 질량을 현저히 증가시켜 해당 전극에서는 레독스 반응이 일어나지 않도록 설계된 셀이다.

연구팀은 전기화학적 특성이 우수한 ‘바이올로젠(viologen)* 유도체를 다양한 형태로 합성한 뒤, 이를 전극 구조에 정확히 맞도록 조정했다.

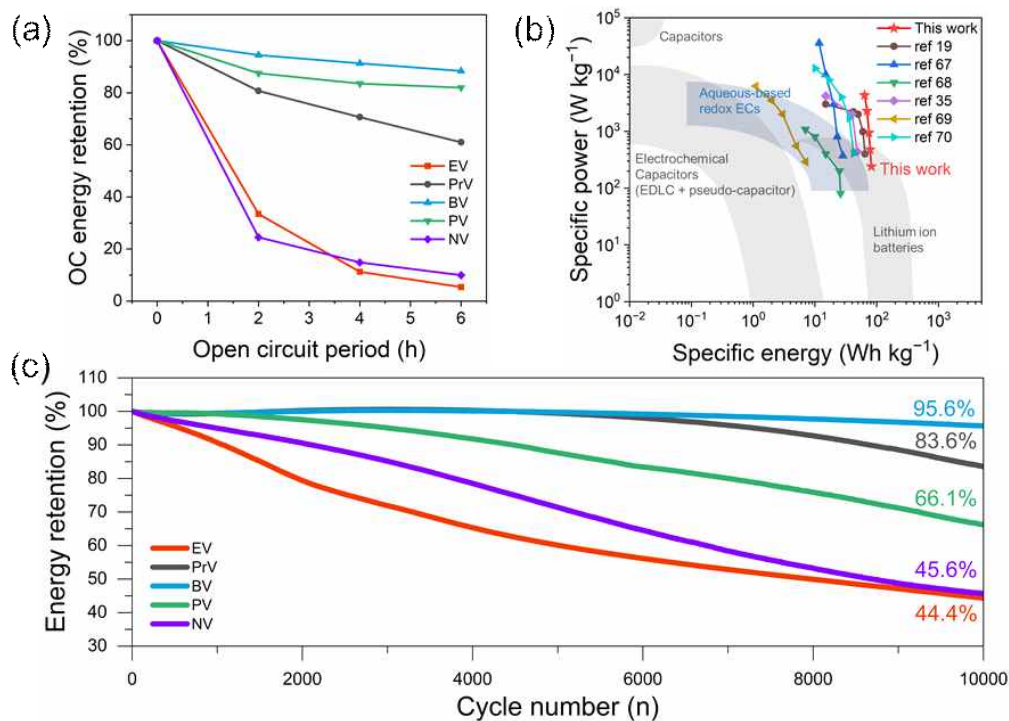
실험 결과, 1.4V 기준 82.3Wh/kg(킬로그램당 와트시 에너지 밀도)의 높은 에너지 밀도를 달성했으며, 10,000번의 충·방전 후에도 초기 성능의 95% 이상을 유지하는 뛰어난 내구성을 확인했다. 충전 후 6시간이 지난 시점에서도 에너지의 88.4%가 남아 있어 자가방전이 거의 없는 것으로 나타났다.



▲ a) MSC30 (검정색)과 Cnovel10 (빨간색) 간 기공 크기 분포 비교, b) 바이올로젠 종류별 비대칭형 셀의 정전 용량 비교, c) 바이올로젠 종류별 비대칭형 셀의 자가방전을 비교, d) EV⁺, e) BV⁺, f) NV⁺가 Cnovel10의 기공 내에서 보이는 흡착 및 확산 거동 모식도. 기공 크기가 커지면 바이올로젠 분자 크기에 따른 성능 차이 경향이 없어지고 자가방전 억제 효과가 저하됨을 확인함.

또한 전해질이 전극 내부 깊숙한 부분까지 효과적으로 침투할 수 있도록, '진공/질소 압력 순환 침지법'이라는 새로운 주입 기술도 개발했다. 이를 통해 활성물질의 흡착량이 2배 이상 늘었고, 전극 계면에서의 반응 효율도 극대화됐다.

* **바이올로젠(viologen)**: 기본적으로 보라색(비올렛)을 띠며, 독특한 전기화학적 특성을 가진 유기 화합물이다. 바이올로젠의 기본 구조에 다양한 화학 작용기(Functional group)를 결합하여 변형한 바이올로젠 유도체를 통해, 전기화학적 특성, 용해도, 분자 크기 등을 자유롭게 조절할 수 있다.



▲ a) 바이올로젠 종류별 대칭셀 자가방전 억제 성능 비교, b) 수계 기반 레독스 슈퍼커패시터 에너지 및 출력 밀도 비교, c) 바이올로젠 종류별 대칭셀 장사이클 성능 비교. 가장 매칭이 잘된 BV 사용 시 가장 뛰어난 자가방전 억제 및 장사이클 안정성을 확인하였으며, 기존 수계 레독스 슈퍼커패시터 대비 우수한 성능을 나타냄을 확인.

유승준 교수는 "분자 크기를 옴스트롬 단위로 정밀하게 조절해 전극의 미세기공 구조와 완벽하게 맞물리는 최적의 전해질-전극 조합을 구현했다"며 "이번 연구는 레독스 슈퍼커패시터의 성능을 좌우하는 핵심 원리를 새롭게 규명한 성과"라고 설명했다.

그는 또 "고성능 에너지 저장 장치를 설계하는 데 새로운 방향을 제시한 것으로, 향후 다양한 분야에 응용 가능성이 높다"고 덧붙였다.

GIST 유승준 교수(교신저자)가 이끌고 조영훈 박사과정생이 수행한 이번 연구는 한국연구재단 중견연구자지원사업의 지원을 받았다. 연구 결과는 국제학술지 《케미컬 엔지니어링 저널(Chemical Engineering Journal)》에 2025년 4월 19일 온라인 게재됐다.

논문의 주요 내용

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Chemical Engineering Journal (IF = 13.4 ; 2023년 기준)
- 논문명 : Molecular Engineering of Redox Electrolytes for Size-Matched Interfacial Coupling with Microporous Carbon in Redox-Enhanced Electrochemical Capacitors
- 저자 정보 : 조영훈 박사과정생 (제1저자, GIST 신소재공학과), 변진환 (공동저자, GIST 화학과), 이건우 석사과정생 (공동저자, GIST 신소재공학과), 엄태평 박사과정생 (공동저자, GIST 신소재공학과), Xiulei Ji (공동교신저자, 오리건 주립대학교 화학과) 유승준 (대표교신저자, GIST 신소재공학과)