

보도자료



서울대학교
SEOUL NATIONAL UNIVERSITY

보도일시	즉시 보도
	2025. 3. 13.(목)
문의	연구단장/연구책임자 강지형 교수(02-880-6649) / 교신저자
	연구단/연구진 장진하 연구원 / 공동 제1저자

■ 제목/부제

제목	대칭성 결정 주입 신개념 전해질로 리튬 금속 음극 안정화 기술의 혁신을 이룬다 Achieving Innovation in Lithium Metal Battery with a Novel Electrolyte Based on Symmetric Crystal Injection
부제	리튬 금속 전지용 비발화 고성능 전해질 소재 설계 기술 개발 Development of Non-Flammable High-Performance Electrolyte Material Design Technology for Lithium Metal Batteries

■ 요약

연구 필요성	전기자동차와 드론 시장의 급성장에 따라 이들의 운행 시간을 늘리려는 수요가 높아지고 있으며, 이를 위해 고에너지 밀도를 가진 이차전지의 필요성 이 커지고 있다. 기존의 리튬 이온 전지는 낮은 비용량의 (372 mAh/g) 흑연 음극을 사용하여 충분한 에너지를 공급하지 못하였다. 리튬 금속을 음극으로 사용할 경우 , 흑연 음극에 비해 10배 이상의 높은 용량(3,860 mAh/g)과 낮은 표준 산화환원 전위(-3.04 V vs. SHE)가 결합되어 고에너지 밀도의 이차전지를 개발할 수 있다 . 그러나, 리튬 금속은 불균일한 리튬 증착으로 인해 전해질이나 상대 전극 (양극)을 공격하여 화재를 일으킬 수 있는 침상(dendrite) 리튬이 생성되므로, 이들을 효과적으로 제어하는 새로운 종류의 전해질이 필요하다.
연구성과/ 기대효과	서울대학교 화학부(제1저자 장진하 박사 및 강지형 교수 외), UCLA(제1저자 총재 왕 및 유장 리 교수 외) 및 LG 에너지솔루션 (LG Energy Solution-KAIST Frontier Research Laboratory) 연구진들의 공동연구를 통해 이온성 플라스틱 결정이 주입된 신개념 전해질을 개발할 수 있었다. 해당 플라스틱 결정은 대칭성으로 인해 높은 양이온-음이온 이온쌍 결합을 가지

	<p>는 특징을 갖고 있으며, 이를 전해질 시스템에 적용해, 용매화된 리튬의 과도한 음이온 클러스터화(anion clustering)가 억제된 새로운 종류의 소형 음이온-리튬 용매화(miniature anion-Li⁺ solvation)를 유도하였다.</p> <p>새롭게 확인된 리튬 용매화는 리튬 금속 음극에 음이온 환경을 조성하여, 이들을 토대로 고 안정성의 보호층을 음극 위에 형성해, 리튬 금속 전지의 수명을 기존 기술 대비 20배 이상으로 향상시킬 수 있었다. 또한, 해당 용매화는 기존 전해질 대비 3배 이상의 높은 리튬 이온 전도도와 낮은 탈용매화 에너지를 가짐으로 인해, 고용량 (> 3.6 mAh/cm²)의 리튬 금속 전지를 30분 이내로 완충하는 고속 충전 특성도 확보할 수 있었다. 마지막으로 이온성 플라스틱 결정의 비발화성 특성으로 인해, 못 침투 실험에서도 리튬 금속 전지의 화재 및 폭발이 일어나지 않는 고 안전성의 특성도 보일 수 있었다.</p> <p>이번 연구는 대칭성 결정 주입 신개념 전해질로 리튬 금속 음극의 안정성을 크게 높인 점과, 이전까지 개발된 바 없는 고 안정성, 고 안전성, 고속 충전 기능이 있는 실용적인 리튬 금속 전지를 성공적으로 개발하였으며, 본 성과는 LG Energy Solution와의 협업으로 리튬 금속 전지의 상용화에 크게 기여할 것으로 기대된다.</p>
Abstract	<p>Jinha Jang, Chongzhen Wang, Gumin Kang, Cheolhee Han, Jaekyeong Han, Jae-Sun Shin, Sunghyun Ko, Gihwan Kim, Jaewon Baek, Hee-Tak Kim, Hochun Lee, Chan Beum Park, Dong-Hwa Seo, Yuzhang Li*, Jiheong Kang*</p> <p>“Miniature Li⁺ solvation by symmetric molecular design for practical and safe Li-metal batteries”. Nature Energy., 2025, in press.</p> <p>Developing high-safety Li-metal batteries (LMBs) with rapid rechargeability represents a crucial avenue for the widespread adoption of electrochemical energy-storage devices. Realization of LMBs requires an electrolyte that combines non-flammability with high electrochemical stability. While recent electrolyte works have improved Li-metal cyclability, the rational electrolyte design capable of simultaneously addressing high-rate performance and safety remains a grand challenge. Herein, we report an electrolyte design concept to enable practical, safe, and fast-cycling LMBs. We created miniature anion-Li⁺ solvation structures by introducing symmetric organic salts into various electrolyte solvents. These structures exhibit a high ionic conductivity, low desolvation barrier, and interface stabilization. Our electrolyte design enabled stable, fast-cycling of practical LMBs with a record-high stability (LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O₂ cell (twice excessed Li): 400 cycles) and high-power density (pouch cell: 639.5 W kg⁻¹). Furthermore, the Li-metal pouch cell survived nail penetration, revealing its high safety. Our electrolyte design offers a viable approach for safe, fast-cycling LMBs.</p>
Journal Link	<p>https://doi.org/10.1038/s41560-025-01733-9</p>

■ 본문

- 서울대학교 화학부(제1저자 장진하 박사 및 강지형 교수 외), 캘리포니아 대학교 로스앤젤레스(제1저자 총젠 왕 및 유장 리 교수 외) 및 LG 에너지솔루션(LG Energy Solution-KAIST Frontier Research Laboratory) 연구진들의 공동연구를 통해 이온성 플라스틱 결정이 주입된 신개념 전해질을 개발할 수 있었다.
- 이온성 플라스틱 결정은 격자 내부에 이온성의 유기 분자 양이온과 음이온으로 구성되어 있으며, 각 구성요소의 높은 분자 회전성으로 인해, 외부 응력에 대해 분자 간 미끄러짐이 일어나며 소성변형(plastic deformation)을 보이는 특징을 가지고 있다. 공동연구팀은 이온성 플라스틱 결정에 대칭성의 알킬 사슬을 도입해 이러한 분자 회전에 의한 입체 장애효과를 완화하였으며, 이로 인해 유기 양이온의 음이온에 대한 이온쌍 결합을 강화시켰다.
- 이러한 분자 특성은 리튬 금속 전지 전해질 시스템에서도 적용되어, 이온성 플라스틱 결정의 대칭성 유기 양이온이 전해질의 음이온과 강하게 결합하여 용매화된 리튬의 과도한 음이온 클러스터화(anion clustering)를 억제하여 다수의 소형 음이온-리튬 용매화(miniature anion-Li⁺ solvation)를 유도해, 이들의 리튬 금속 음극으로의 전달속도를 표준 전해질 대비 3배 이상 증가시켜, 음극 표면에 음이온이 풍부한 환경을 조성할 수 있게 하였다. 또한, 대칭성 유기 양이온은 음극 표면에 자기 조립에 의해 조밀한 양극층을 형성하여 근처의 음이온을 끌어들이어 이들의 보호층 형성 반응을 촉진해, 리튬 금속 음극의 안정성을 크게 높일 수 있었다. 대칭 사슬 중 예선 ‘*n*-에틸 사슬’이 최적의 보호층을 만든다는 것을 확인했다.
- 대칭성 결정 주입 전해질에 의한 리튬 금속 음극의 안정화를 통해, 균일한 리튬 증착이 유도되어 침상 리튬의 형성을 비약적으로 억제할 수 있었으며, 이들이 희박 전해액(E/C, electrolyte/cathode ratio=2.0 g/Ah), 초박막 리튬(두께 20 μm)과 같은 실용적인 조건에서 삼원계(니켈·고발트·망간) 전지에 사용된 경우, 30분 만에 완충이 가능하며 (2C rate), 400 사이클 동안 전극 용량이 90% 이상 유지되는 높은 사이클 안정성을 보였다. 이는 기존 기술 대비 20배 이상 향상된 결과이다. 또한, 해당 전해질의 비가연성으로 인해 못 침투 실험에서도 리튬 금속 전지의 화재 및 폭발이 일어나지 않는 고 안전성의 특성도 보일 수 있었다. 종합하여, 본 연구는 대칭성 결정 주입 신개념 전해질로 리튬 금속 음극의 안정성을 크게 높인 점과, 이전까지 개발된 바 없는 고 안전성, 고속 충전 기능이 있는 실용적인 리튬 금속 전지를 성공적으로 개발하였다는 것에 의의가 있다.
- 서울대 화학과 장진하 박사가 제1 저자로 참여한 이번 연 결과는 국제 학술지 ‘네이처 에너지’에 게재되었다.

지 (Nature Energy)에 3월 (7)일 字 온라인판에 게재됐다. 강지형 교수는 “이번 연구는 장수명 리튬 금속 배터리 구현을 위한 전해질 설계 방향을 새롭게 제시했다는 점에서 의미가 있다”고 하면서, “이번에 개발된 신개념 전해질은 급속도로 성장하고 있는 배터리 소재 시장에 게임 체인저가 될 것으로 기대된다.”고 말했다. 한편 이번 연구는 LG Energy Solution-KAIST Frontier Research Laboratory, 연구재단 선도연구센터, 나노소재기술개발사업, ETRI 창의도전연구실 사업의 지원을 받아 수행됐다.

□ 그림설명

그림 1. (a) 각 전해질 조건에서의 리튬 용매화 구조에 대한 모식도. (b-d) 각 전해질 조건에서의 리튬 금속 음극 보호층 형성 메커니즘. 가까운 이온쌍 패킹을 통해 대칭성 이온성 플라스틱 결정의 양이온은 컴팩트한 고정층과 소형 음이온-Li⁺ 용매화를 생성한다. 고정층은 용매화된 Li⁺의 음이온을 리튬 금속 전극 위에 고르게 분포시켜 무기가 풍부하고 균일한 보호층을 생성한다. 다른 전해질은 불완전한 고정층으로 인해 불균일한 보호층을 생성한다.

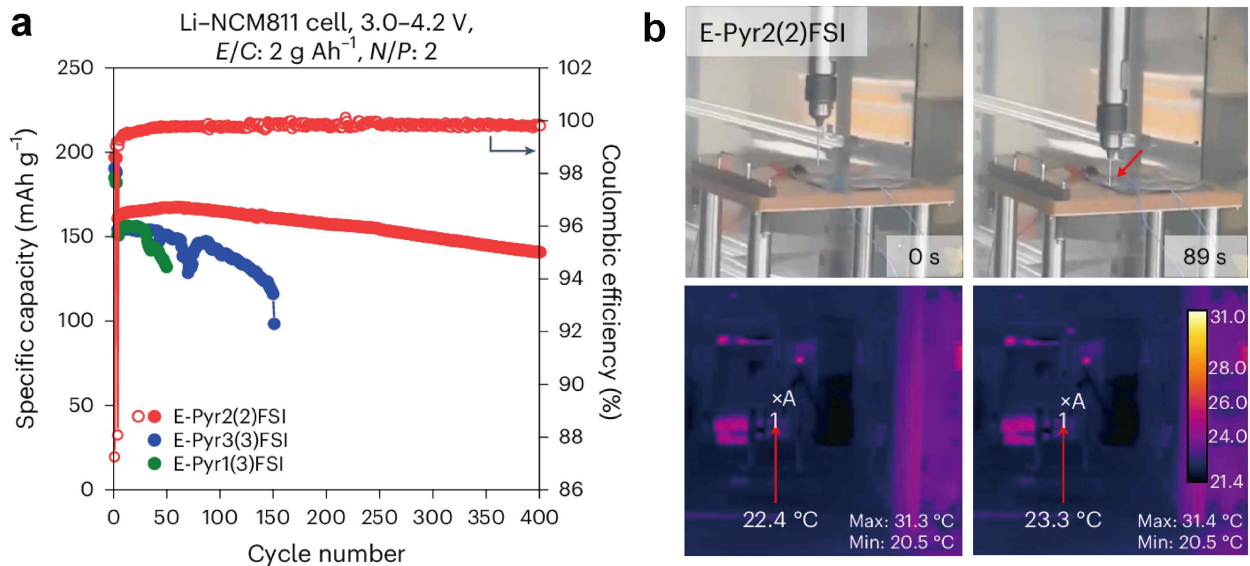
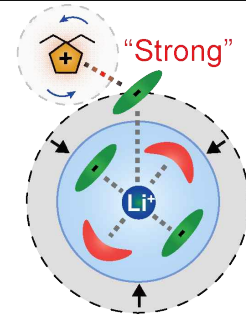
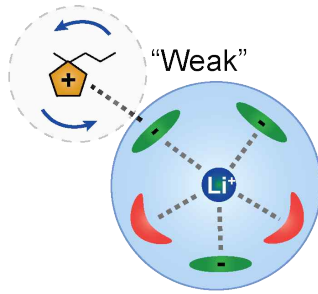
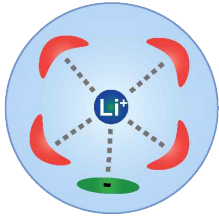


그림 2. (a) 이온성 플라스틱 결정 주입 전해질에 의한 실용적인 삼원계 리튬 금속 전지 구동. 리튬 금속 음극의 안정화로 인해, 400 사이클 동안 초기 용량의 90%를 유지하는 고 안정성 및 고성능 특성을 보이고 있다. (b) 이온성 플라스틱 결정 주입 전해질에 의한 안정성 demo 실험. 신개념 전해질의 비가연성으로 인해 못 관통 중에도 화재나 폭발이 일어나지 않는 고 안정성을 보이고 있다.

a

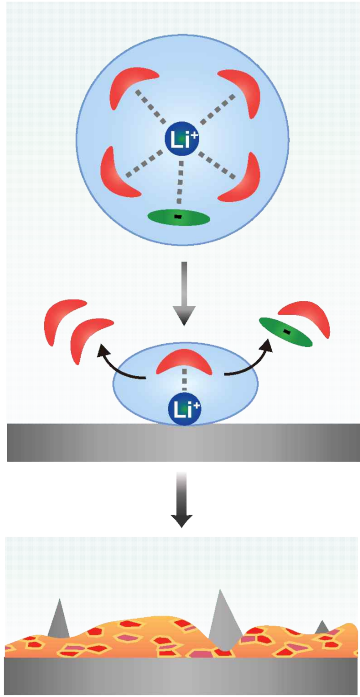


✔ 표준 전해질
용매 기반 Li^+ 용매화
낮은 전기화학적 안정성
낮은 음극 안정성

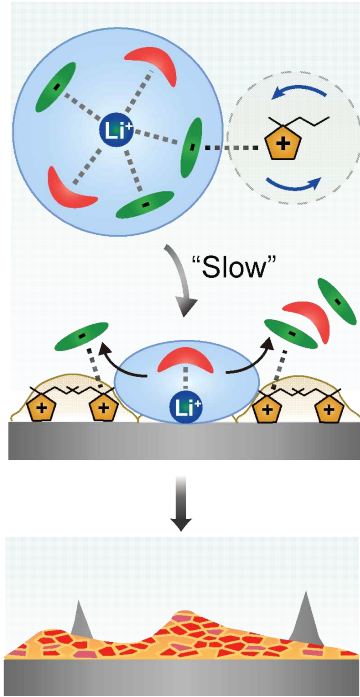
✔ 이온성 액체 전해질
응집된 anion-Li^+ 용매화
느린 이온 전달
제한된 음극 안정성

✔ 이온성 결정 전해질
소형화된 anion-Li^+ 용매화
빠른 이온 전달
높은 음극 안정성

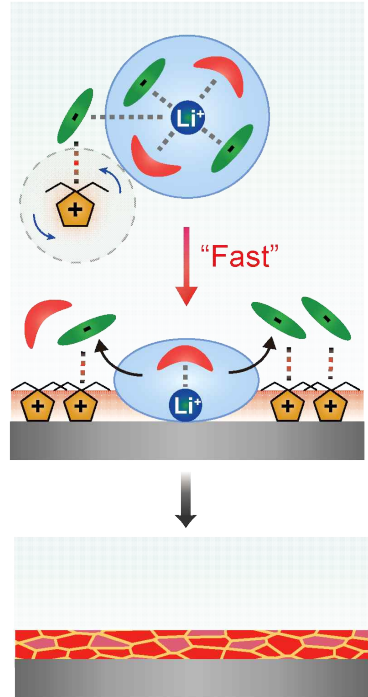
b



c



d



전해질 용매 음이온 무기물 결정 (보호층)

□ 연구자

- 성 명 : 강지형
- 소 속 : 서울대학교 화학부
- 연락처 : jiheongkang@snu.ac.kr

□ 연구자

- 성 명 : 장진하
- 소 속 : 서울대학교 화학부
- 연락처 : jjh651910@snu.ac.kr