

“용액을 떨어뜨려 말리면 완성” GIST, 간단한 코팅으로 차세대 리튬금속전지 수명·안정성 높여

- 차세대에너지연구소 조진현 박사 연구팀, 무기물 성분이 풍부한 보호막과 유연한 고분자층으로 리튬의 불규칙한 성장 억제... 부피 변화에도 보호 기능 유지
- 서로 다른 두 종류의 전해질에서 효과 확인... 고용량 전지 200회 충·방전 후 초기 용량 92.5% 유지, 별도 조건에서 500회 이상 충·방전 성공
- 화학공학 분야 국제학술지《Chemical Engineering Journal》 게재



▲ GIST 차세대에너지연구소 배터리·전기화학 연구센터 조진현 박사(제1저자)

광주과학기술원(GIST·지스트, 총장 임기철)은 차세대에너지연구소 배터리·전기화학 연구센터 조진현 박사와 신소재공학과 엄광섭 교수(차세대에너지연구소장) 연구팀이 리튬금속 표면에 얇은 보호층을 형성해 충·방전 과정에서 발생하는 불규칙한 리튬 성장을 억제하고, 부피 변화에 따른 손상을 줄이는 기술을 개발했다고 밝혔다. 이를 통해 차세대 리튬금속전지의 수명과 안정성을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

연구팀은 용액을 리튬금속 표면에 떨어뜨려 건조하는 간단한 방법으로 보호층을 형성했으며, 서로 다른 두 종류의 전해질을 사용하는 배터리에서 수명과 충·방전 안정성이 향상되는 효과를 확인했다.

전기자동차의 주행거리를 늘리기 위해서는 같은 무게나 부피에 더 많은 에너지를 저장할 수 있는 배터리가 필요하다. 현재 널리 사용되는 리튬이온전지는 주로 흑연을 음극 소재로 사용하는데, 흑연은 저장할 수 있는 리튬의 양에 한계가 있다.

이에 따라 흑연 대신 리튬금속을 음극으로 사용하는 ‘리튬금속전지’가 차세대 배터리로 주목받고 있다. 리튬금속은 단위 무게당 이론적 용량이 흑연보다 약 10배 커 더 많은 에너지를 저장하는 데 유리하다.

그러나 충·방전을 반복하면 리튬금속 표면에 나뭇가지 모양의 결정(덴드라이트)이 불규칙하게 자라거나 부피가 크게 변하는 문제가 발생한다. 이 과정에서 배터리 내부의 분리막이 손상돼 합선이 발생할 수 있고, 전해질이 지속적으로 분해되면서 배터리 수명도 짧아진다.

연구팀은 이러한 문제를 해결하기 위해 안정적인 보호막 형성을 돕는 질산마그네슘($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$)과 유연한 고분자 소재(PVDF-HFP)를 결합해 보호층을 개발했다.

두 물질을 녹인 용액을 리튬금속 표면에 떨어뜨려 건조하면 머리카락 굵기의 약 30분의 1에 해당하는 2~3마이크로미터(μm) 두께의 보호층이 형성된다.

이 보호층은 안쪽과 바깥쪽에서 서로 다른 역할을 한다. 리튬금속과 맞닿은 안쪽에는 단단한 무기물 성분이 풍부한 보호막이 형성돼 리튬이 불규칙하게 자라는 것을 억제한다. 바깥쪽의 유연한 고분자층은 충·방전 중 리튬의 부피가 변해도 보호층이 쉽게 손상되지 않도록 돕는다.

또한 보호층에 포함된 질산마그네슘 성분이 전해질로 조금씩 방출돼 안정적인 보호막이 형성되는 데 도움을 준다.

연구팀이 개발한 보호층이 실제로 리튬의 불규칙한 성장을 억제하는지 확인하기 위해, 보호층을 적용한 전극과 적용하지 않은 전극에 각각 리튬을 쌓아 표면 변화를 비교했다.

그 결과, 보호층이 없는 전극에서는 리튬이 불균일하게 쌓이며 돌출된 구조가 자랐지만, 보호층을 적용한 전극에서는 리튬이 비교적 균일하게 쌓이고 보호층의 형태도 유지됐다. 반복 충·방전 후에도 보호층이 리튬 표면을 덮고 있는 것을 확인했다.

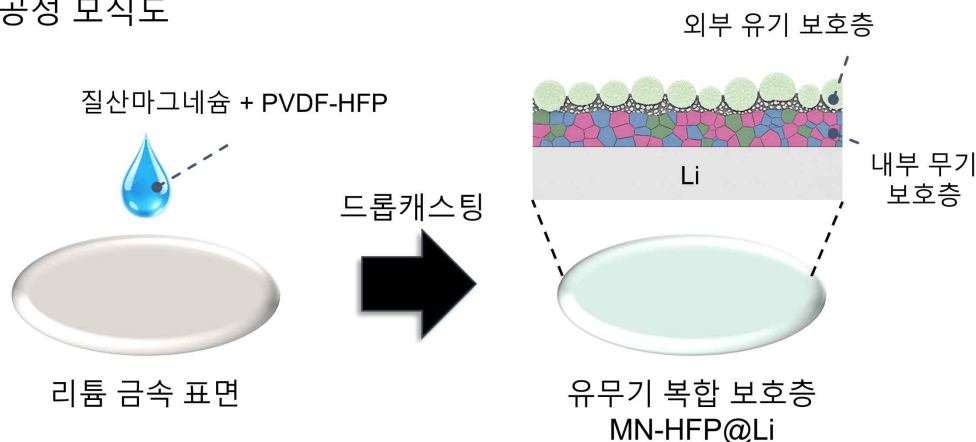
보호층을 적용한 전지에서는 충·방전 과정에서 리튬을 얼마나 효율적으로 회수해 다시 사용할 수 있는지를 나타내는 '쿨롱 효율'이 250회 충·방전 동안 평균 94%로 나타났다. 보호층이 없는 전지는 120회 동안 평균 92%를 기록해, 보호층 적용 시 리튬의 반복적인 저장과 방출이 더욱 안정적으로 이루어지는 것도 확인했다.

이어 연구팀은 보호층의 효과가 특정 전해질에만 국한되지 않는지 확인하기 위해, 서로 다른 전해질과 양극 소재를 사용하는 배터리를 제작해 성능을 비교했다.

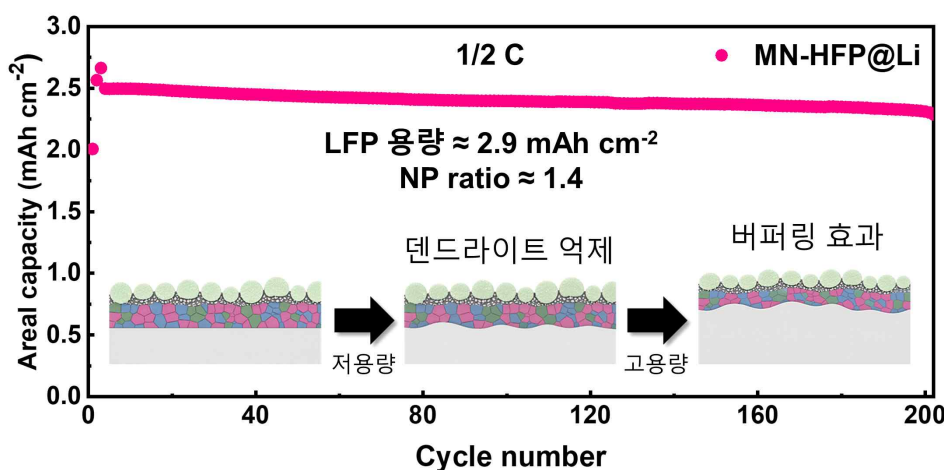
탄산염계 전해질과 니켈·코발트·망간계(NCM811) 양극 소재를 사용한 전지에서는 80회 충·방전 후에도 초기 용량의 90.6%를 유지했다. 반면 보호층을 적용하지 않은 전지는 30회 이후 용량이 빠르게 감소했다.

에터계 전해질과 리튬인산철(LFP) 양극 소재를 사용한 전지에서도 500회 이상 안정적으로 충·방전할 수 있었다. 특히 단위 면적당 더 많은 에너지를 저장하도록 양극의 용량을 높인 조건에서는 **200회 충·방전 후에도 초기 용량의 92.5%를 유지했다.**

- 공정 모식도



- 고용량 완전셀 성능 향상



▲ **리튬금속 보호층의 제작 과정과 배터리 성능.** 위쪽은 질산마그네슘과 유연한 고분자 소재를 섞은 용액을 리튬금속 표면에 떨어뜨려 얇은 보호층을 만드는 과정과 보호층의 구조를 보여준다. 리튬금속과 맞닿은 안쪽의 단단한 보호막은 리튬이 불규칙하게 자라는 것을 억제하고, 바깥쪽의 유연한 고분자층은 충·방전 중 부피 변화에 따른 손상을 줄인다. 아래쪽 그래프는 보호층을 적용한 리튬금속전지가 단위 면적당 용량이 높은 리튬인산철(LFP) 양극을 사용한 조건에서도 200회 충·방전 후 초기 용량의 92.5%를 유지한 결과를 보여준다.

연구팀은 실제 배터리에 사용되는 형태와 유사한 파우치형 전지에서도 **70회 이상 안정적인 충·방전 성능을 확인했다.** 이를 통해 개발한 보호층이 여러 전지 구성에서 리튬금속의 안정성을 높이는 데 효과가 있음을 검증했다.

차세대에너지연구소 조진현 박사는 “이번 연구는 **간단한 용액 코팅 공정**으로 형성한 얇은 보호층이 **리튬금속의 불안정한 표면 반응과 부피 변화 문제를 완화**하고, 서로 다른 전해질 환경에서도 **효과적으로 작동할 수 있음을 확인**했다는 데 의의가

있다”며 “앞으로 보호층의 제조 공정과 장기 내구성을 추가로 검증해 고용량·고안전성 리튬금속전지의 실용화에 기여하고자 한다”고 말했다.

GIST 신소재공학과 엄광섭 교수(차세대에너지연구소장)가 지도하고 차세대에너지연구소 배터리·전기화학 연구센터 조진현 박사가 제1저자로 참여한 이번 연구는 산업통상자원부·한국산업기술진흥원의 지역혁신클러스터육성사업의 지원을 받았다.

연구 결과는 화학공학 분야 국제학술지 《Chemical Engineering Journal》에 2026년 10월 5일 온라인으로 게재됐다.

논문 정보

○ 논문명, 저자 정보

- 저널명 : Chemical Engineering Journal
(Impact factor: 12.5, JCR 상위 4.5% (2025년 기준))
- 논문명 : Realization of high-capacity Lithium metal batteries across carbonate- and ether-based electrolytes via adoption of organic-inorganic hybrid surface protection material
- 저자 정보 : 조진현 박사(GIST 차세대에너지연구소 배터리·전기화학 연구센터, 제1저자), 이창현 석박사통합과정생(GIST 신소재공학과, 공저자), 심기연 박사(GIST 신소재공학과, 공저자), 엄광섭 교수(GIST 신소재공학과, 교신저자)