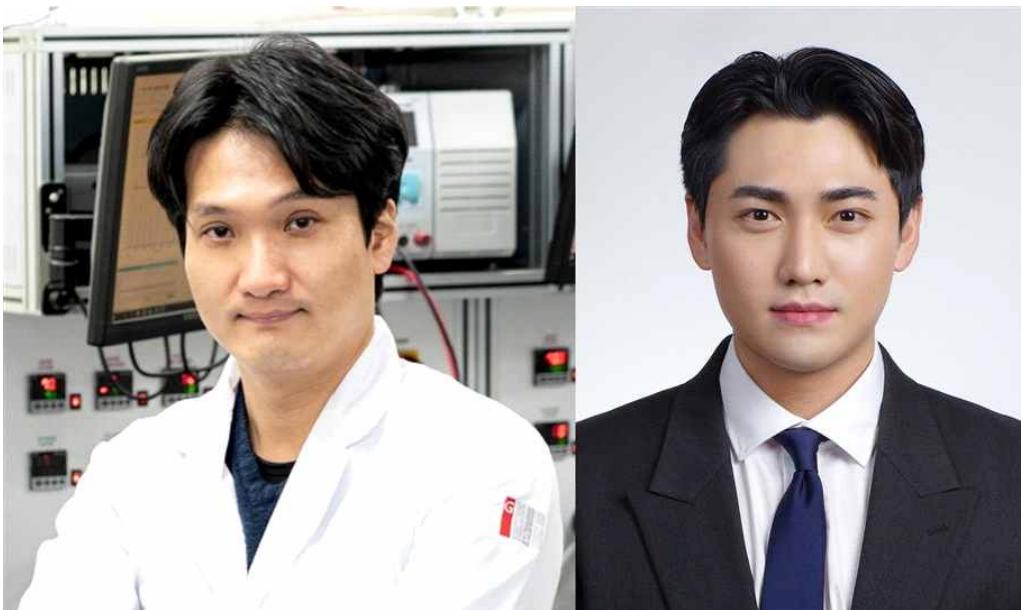


GIST, 2분 공정으로 리튬금속전지 최대 난제 해결

차세대 전기차 배터리 구현에 한 걸음... 리튬 이동 24배 향상,
900시간 이상 안정 작동, 480회 고속 충·방전 후 용량 98.2% 유지

- 신소재공학과 엄광섭 교수팀 짧은 전기 신호를 반복적으로 가하는 전기화학적 공정으로 리튬금속전지 음극 계면 단 2분 만에 형성... 덴드라이트 형성 억제
- 고속 충전 안정성과 긴 수명 동시 확보해 차세대 전기차에너지저장장치(ESS)용 고에너지 배터리 상용화 가능성 제시.. 국제학술지《Energy Storage Materials》거제



▲ (왼쪽부터) 신소재공학과 엄광섭 교수, 이창현 박사과정생

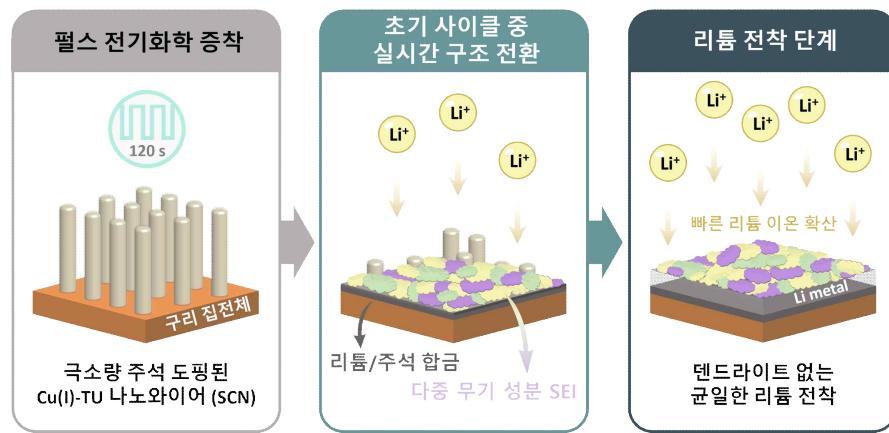
광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 차세대에너지연구소 엄광섭 소장(신소재공학과 교수) 연구팀이 짧은 전기 신호를 반복적으로 가해 전극 표면을 정밀하게 다듬는 방식(전기화학적 펄스 증착 공정)으로, 리튬금속전지 음극에서 리튬 이동과 안정성을 결정하는 표면(계면)을 단 2분 만에 형성하는 기술을 개발했다고 밝혔다.

이번 연구의 핵심은 배터리 음극에서 전류를 전달하는 구리 표면에 주석(Sn)을 극 소량만 도입해, 머리카락보다 훨씬 가는 나노와이어 전구체(SCN)* 구조를 형성한 것이다. 이를 통해 리튬 금속이 한쪽으로 뭉치지 않고 고르게 쌓일 수 있는 안정적인 계면을 빠르고 간단한 공정으로 구현할 수 있음을 입증했다.

* 리튬금속전지(LMB, Lithium metal battery): 흑연 대신 리튬 금속을 음극으로 사용하는 차세대 배터리로, 흑연 대비 약 10배 높은 이론용량을 바탕으로 2배 이상의 에너지 밀도 구현이 가능하다. 이론적으로 1200 Wh/L, 400~500 Wh/kg 수준의 성능이 기대돼 차세대 전기차용 배터리로 주목받고 있다.

* 나노와이어 전구체(SCN, Sn-doped Cu nanowire): 주석(Sn)이 도핑된 구리 나노와이어 구조로, 안정적인 고체전해질계면 형성을 유도하는 계면 설계 기술이다.

전기차(EV)와 에너지저장장치(ESS)는 전기를 저장했다가 필요할 때 안전하고 안정적으로 사용하는 것이 중요하다. 현재 이러한 시스템에는 상용 리튬이온전지가 주로 사용되고 있다.



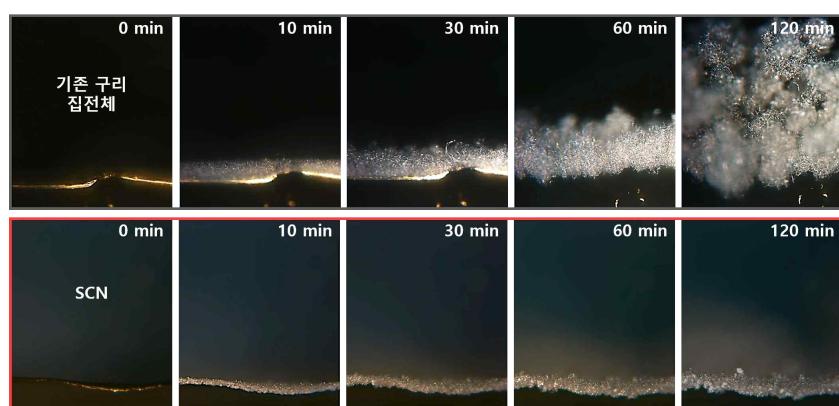
▲ **리튬 전착 단계 개념도.** 펄스 전기화학 증착으로 제조된 SCN 집전체에서 초기 사이클 동안 리튬/주석 합금화와 다중 무기 성분 SEI가 실시간으로 형성되어 Li 이온 확산이 균일화되고 덴드라이트 없는 리튬 석출이 구현되는 과정을 나타낸다.

리튬이온전지는 크기와 무게에 비해 많은 에너지를 저장할 수 있다는 장점이 있지만, **흑연으로 만든 음극*의 구조적 한계로 인해 저장할 수 있는 에너지의 양에는 한계가 있다.** 이 때문에 기존 리튬이온전지를 넘어서는 차세대 고에너지 배터리 기술에 대한 관심이 커지고 있다.

음극(anode): 충·방전 과정에서 리튬이온을 저장하고 방출하는 전극으로, 배터리 에너지의 밀도와 수명을 좌우하는 핵심 구성 요소이다.

연구팀은 흑연 대신 리튬 금속을 음극으로 사용하는 '리튬금속전지' 주목했다. 리튬금속전지는 이론적으로 매우 많은 에너지를 저장할 수 있어, 차세대 고에너지 배터리로 큰 잠재력을 지닌 기술이다.

그러나 충·방전 과정에서 리튬 이온이 계면을 따라 고르게 이동하지 않으면, 음극 표면에 리튬이 한쪽으로 쌓이면서 뾰족한 결정 구조인 '덴드라이트'가 자라날 수 있다.



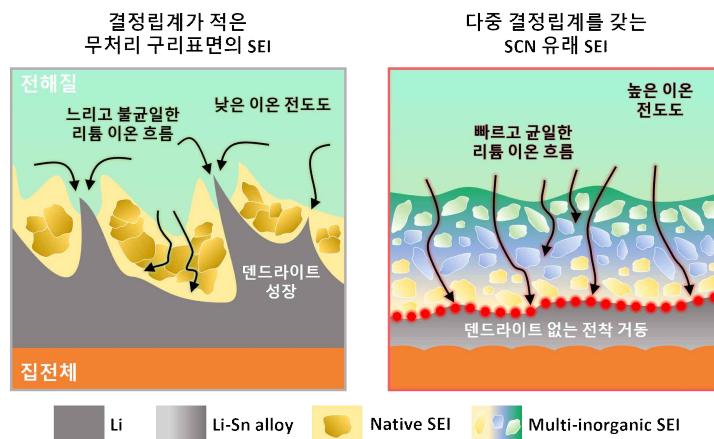
▲ **실시간 광학현미경(in situ optical microscopy)을 통한 실시간 리튬 전착 거동 분석도.** 기존 구리 집전체 대비 약 24배 높은 리튬 이온 확산 속도를 구현해 고용량 리튬 전착 시에도 (위) 기존 구리 집전체 대비 (아래) 펄스 전기화학 전착 유래 SCN 활용 집전체에서 효과적으로 리튬의 덴드라이트 성장을 억제함을 확인하였다.

덴드라이트가 성장하면 전극 계면이 불안정해지고, 배터리 성능과 수명이 빠르게 떨어진다. 이 때문에 리튬금속전지를 실제로 사용하기 위해서는 리튬 이온이 빠르고 균일하게 이동하도록 제어할 수 있는 새로운 전극·계면 설계 기술이 필요하다.

* **덴드라이트(Dendrite):** 리튬 배터리 충·방전 과정에서 음극 표면에 쌓이는 고체전해질계면(SEI, Solid Electrolyte Interphase)이 반복적으로 파괴되며 성장하는 수지상 구조이다. 지속적으로 성장할 경우 내부 저항 증가와 발열을 유발해 배터리 수명 및 안정성을 저하시킨다.

연구팀은 필요한 기능만 살리고 부작용은 줄이는 정밀한 설계 전략을 적용했다. 이를 통해 주석(Sn)을 원자 수준으로 극소량만 도입해, 재료가 과도하게 섞이거나 변형되는 문제 없이도 리튬이 잘 달라붙는 음극 계면을 만드는 데 성공했다.

그 결과 리튬 금속이 한쪽으로 뭉치지 않고 고르게 쌓이도록 유도할 수 있었으며, 전극 구조의 변형과 성능 저하도 효과적으로 억제할 수 있음을 확인했다.

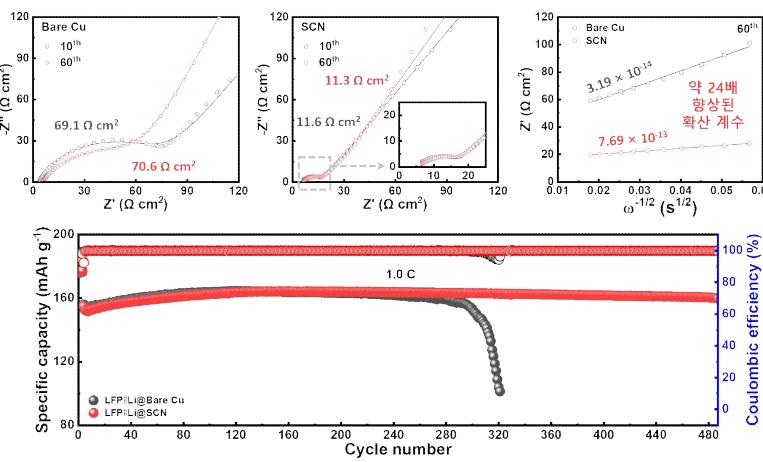


▲ 결정립계 밀도가 낮은 무처리 구리(Cu) 표면에서 형성된 고유 고체전해질계면(SEI)과 다중 결정립계를 갖는 SCN 유래 고체전해질계면(SEI)을 비교한 모식도. 나노와이어 전구체(SCN)로부터 형성된 SEI는 높은 이온 전도도를 바탕으로 리튬 이온의 이동을 균일하게 유도해 덴드라이트 성장을 효과적으로 억제하며, 안정적인 리튬 석출 거동을 구현한다.

특히 머리카락보다 훨씬 가는 나노 구조의 계면은 충전 초기에 자연스럽게 보호막 역할을 하는 고체전해질계면(SEI)*으로 바뀌면서, 리튬 이온이 빠르고 안정적으로 이동할 수 있는 통로를 형성한다.

* **고체전해질계면(SEI, Solid Electrolyte Interphase):** 배터리 최초 충전 시 전해질의 분해 반응으로 음극 표면에 형성되는 유·무기 복합 고체막이다. 전해질과 전극 내부의 직접 접촉을 차단해 전해질 분해를 억제하고 이온 전도성을 유지한다.

연구팀은 정밀하게 설계한 음극 계면 구조를 통해 리튬 이온이 이동하는 속도를 기존 구리 계면보다 약 24배 빠르게 만들었다. 그 결과 리튬금속전지에서 오래된 문제로 꼽혀 온 리튬이 고르게 쌓이지 않는 현상과 덴드라이트 성장을 효과적으로 억제할 수 있었다.



▲ (위) 무처리 구리(Bare Cu) 집전체와 나노와이어 전구체(SCN) 집전체에서 형성된 고체전해질계면(SEI)의 전기화학적 특성 비교 결과. SCN 집전체에서 형성된 SEI는 초기(10회)와 장기 사이클(60회) 이후 모두에서 계면 저항이 낮고, 리튬 이온이 더 빠르게 이동하는 특성을 나타냈다.

(아래) 1.0C 조건의 장기 충·방전 시험 결과. SCN 집전체를 적용한 전지는 무처리 구리 집전체 대비 높은 비용량과 안정적인 쿠롱 효율을 유지하며 우수한 사이클 안정성을 보였다.

이 구조(나노와이어 계면 구조)를 적용한 배터리는 900시간 이상 안정적으로 작동했으며, 리튬인산철(LFP)* 양극을 적용한 실제 배터리 시험에서도 약 1시간 이내에 충·방전이 이뤄지는 고속 조건(1.0C)에서 480회 사용 후에도 초기 용량의 98.2%를 유지하는 결과를 보였다.

이는 고속 충전과 긴 배터리 수명을 동시에 확보했다는 점에서, 전기차와 에너지저장장치 등 산업 현장에서의 활용 가능성이 크다는 의미다.

* 리튬인산철(LFP): 전기차와 ESS에 가장 널리 사용되는 양극 소재 중 하나로, 리튬인산철 기반 완전셀 성능 검증은 기술의 상용화 가능성을 보여주는 중요한 지표다.



▲ 신소재공학과 엄광섭 교수와 이창현 박사과정생이 실험을 진행하고 있다.

엄광섭 교수는 “이번 연구는 리튬금속전지 상용화의 가장 큰 난제로 꼽혀 온 덴드라이트 형성 문제를 리튬 음극의 전기화학적 계면 설계만으로 효과적으로 해결할 수 있음을 입증했다는 점에서 의미가 크다”며, “2분 이내에 구현 가능한 간단한 공정으로도 고속 충전과 긴 수명을 동시에 확보할 수 있어, 기존 배터리 제조 공정에 바로 적용할 수 있는 실용적 기술”이라고 말했다.

이어 “앞으로는 기존 리튬이온전지보다 2배 이상 많은 에너지를 저장할 수 있는 리튬금속전지의 상용화를 앞당기는 데에도 기여할 수 있을 것으로 기대한다”고 덧붙였다.

GIST 신소재공학과 엄광섭 교수(교신저자)가 지도하고 이창현 박사과정생(제1저자)이 수행한 이번 연구는 과학기술정보통신부·한국연구재단 중견연구자지원사업과 미래방사선 강점기술 고도화사업의 지원을 받았다.

연구 결과는 국제학술지《에너지 스토리지 머티리얼즈(Energy Storage Materials)》에 2026년 1월 29일 온라인으로 게재됐다.

한편 GIST는 이번 연구 성과가 학술적 의의와 함께 산업적 응용 가능성까지 고려한 것으로, 기술이전 관련 협의는 기술사업화센터(hgmoon@gist.ac.kr)를 통해 진행 할 수 있다고 밝혔다.

논문의 주요 정보

1. 논문명, 저자 정보

- 저널명 : Energy Storage Materials (Impact factor: 20.2, JCR 상위 4.7% (2024년 기준))
- 논문명 : Construction of Heterostructured Multi-Grain Solid Electrolyte Interphase with Trace Alloying for Fast Li ion Transfer and Dendrite-Free Lithium Metal Batteries

※ DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2026.104934>

- 저자 정보 : 이창현 박사과정생 (GIST 신소재공학과, 제1저자), 엄광섭 교수 (GIST 신소재공학과, 교신저자)