

GIST, 2배 멀리 가고 안전성 높은 차세대 배터리 기술 개발... 12분이면 완충

- 업광섭 차세대에너지연구소장 연구팀, 리튬이 이레쪽부터 균일하게 쌓이도록 유도하는 3차원 구조 설계로 덴드라이트 형성과 부피 팽창 동시 억제하는 리튬금속전지 구현
- 전기차·ESS 등 상용화 가능성 제시... 국제학술지 《Energy & Environmental Materials》 게재



▲ (왼쪽부터) 업광섭 차세대에너지연구소장(신소재공학과 교수), 조진현 박사

전기자동차 보급이 확대되면서 한 번 충전으로 더 멀리 주행할 수 있고, 충전 시간은 짧은 배터리에 대한 수요가 증가하고 있다.

현재 전기차와 스마트폰 등에 널리 쓰이고 있는 배터리인 리튬이온전지*는 음극* 소재인 흑연이 저장할 수 있는 리튬 이온의 양이 거의 한계에 도달해, 성능을 획기적으로 높이는 데 어려움이 있다.

* 리튬이온전지(Lithium-ion battery, LIB): 리튬 금속 대신 흑연과 같은 탄소계 물질을 음극으로 사용하고, 충·방전 과정에서 리튬 이온이 양극과 음극 사이를 이동하며 에너지를 저장·방출하는 상용 배터리 기술이다. 비교적 높은 에너지 밀도와 안정성, 긴 수명을 갖춰 현재 전기차, 스마트폰, 노트북, 에너지저장장치(ESS) 등에 가장 널리 사용되고 있다.

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

광주과학기술원(GIST·지스트, 총장 임기철)은 차세대에너지연구소 업광섭 소장(신소재공학과 교수) 연구팀이 전기가 통하는 고분자를 표면에 입힌 3차원 구조체를 활용해 리튬금속전지의 충전 속도와 안정성을 향상시키는 기술을 개발했다고 밝혔다.

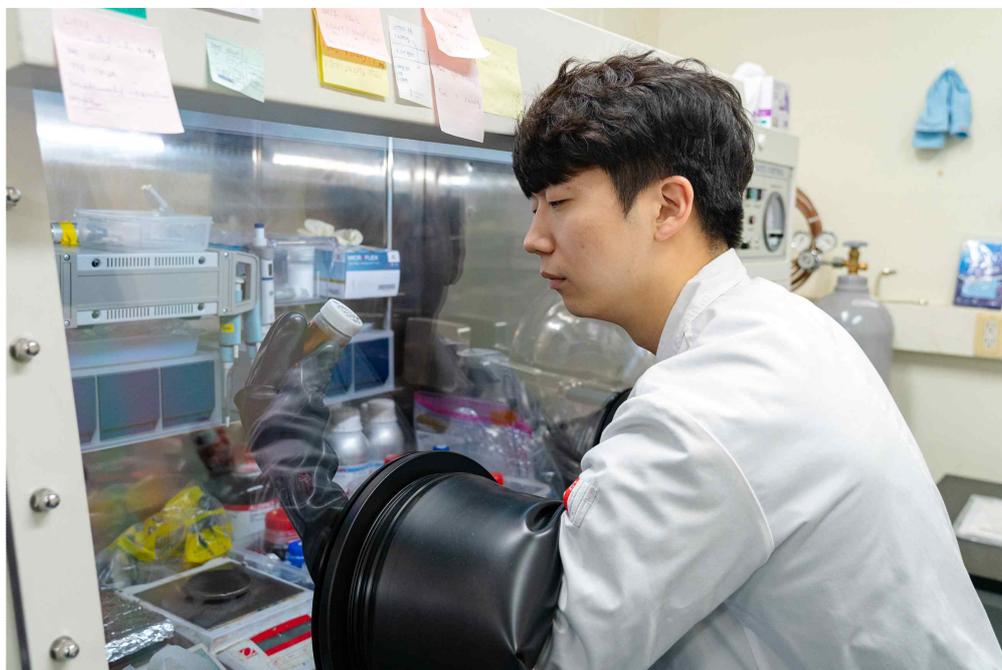
전기차(EV)에는 전기를 저장했다가 필요할 때 안정적으로 사용하는 것이 중요한데, 현재 전기차 등에 널리 쓰이는 리튬이온전지는 크기와 무게에 비해 많은 에너지를 저장할 수 있는 장점이 있다.

차세대 배터리로 주목받는 리튬금속전지는 기존 리튬이온전지보다 이론적으로 약 2배 높은 에너지 밀도를 구현할 수 있지만, 충·방전 과정에서 리튬이 음극 표면에 고르게 쌓이지 않고 나뭇가지처럼 뽕족하게 자라는 ‘리튬 수지상 결정(덴드라이트)*’이 발생할 수 있다는 문제가 있다.

이러한 수지상 결정은 배터리 내부의 분리막*을 뚫어 양극과 음극이 직접 닿아 전기가 한꺼번에 흐르는 ‘단락’ 현상을 유발할 수 있으며, 동시에 부피 팽창을 일으켜 배터리의 수명과 안전성을 크게 저하시킨다.

* 리튬 수지상 결정(Li-dendrite): 리튬금속전지의 충·방전 과정에서 리튬이 음극 표면에 고르게 쌓이지 않고, 나뭇가지처럼 뽕족한 형태로 성장하는 결정 구조이다. 배터리 내부에서 분리막을 손상시켜 양극과 음극의 단락을 유발할 수 있으며, 배터리의 수명과 안전성을 크게 저하시킨다.

* 분리막(separator): 배터리 내부에서 양극과 음극이 서로 직접 닿지 않도록 막아주는 매우 얇은 절연막이다. 전기는 통과시키지 않으면서 리튬 이온만 이동할 수 있게 해 배터리가 정상적으로 작동하도록 돕기 때문에 배터리의 안전성을 좌우하는 핵심 부품이다.



▲ 조진현 박사가 글로브 박스에서 삼차원 구조체에 고분자 코팅하는 실험을 진행하고 있다.

연구팀은 리튬이 쌓이는 위치와 방식이 배터리 성능을 좌우한다는 점에 주목해, 리튬이 구조체 내부에서부터 균일하게 쌓이도록 유도하는 3차원 구조체 (SP-PPy@pPVDF)를 설계했다.

가볍고 내구성이 뛰어난 고분자 소재인 ‘폴리비닐리덴 플로라이드(PVDF)’로 내부에 빈 공간이 많은 구조를 만들고, 여기에 전기가 일부만 통하는 고분자 ‘폴리피롤 (Polypyrrole)*’을 코팅했다.

특히 구조체의 표면은 전기가 통하지 않도록 설계해, 리튬이 표면이 아닌 내부에서

부터 차곡차곡 쌓이도록 유도했다.

* **폴리피롤(Polypyrrole)**: 전기가 일부만 통하는 고분자 소재로, 리튬이 충·방전 과정에서 한쪽으로 몰리지 않고 고르게 쌓이도록 돕는다. 이로 인해 배터리 내부 반응이 안정적으로 유지되며, 안전성과 수명이 함께 향상된다. 특히 리튬이 잘 달라붙는 환경을 만들어 초고속 충전 조건에서도 리튬 수지상 결정의 성장을 효과적으로 억제하는 기능성 물질이다.



▲ (왼쪽부터) 엄광섭 차세대에너지연구소장(신소재공학과 교수)과 조진현 박사가 실험실에서 실험을 진행하고 있다.

이러한 구조는 전류 흐름을 조절해 리튬이 아래쪽부터 ‘바텀업(bottom-up)’ 방식으로 차곡차곡 쌓이도록 유도해, 덴드라이트 형성과 부피 팽창을 동시에 억제한다.

그 결과 기존 리튬이온전지보다 에너지 저장 밀도를 2배 이상 높이고, 부피 팽창 문제도 크게 개선했다.

또한 충전 속도를 크게 단축해 약 12분 만에 완전 충전이 가능한 초고속 충전 성능을 구현했다.

이와 함께, 기존 구조에서는 어려웠던 고속 충전 조건(5C*, 약 12분 충전)에서도 안정적인 성능을 확보했다.

기존의 구리 집전체 기반 리튬 음극이나 일반적인 다공성 구조체는 약 80회 충·방전 이후 성능이 급격히 저하되는 반면, 연구팀이 설계한 구조는 200회 이상 반복 사용 후에도 초기 용량의 94.7%를 유지했다.

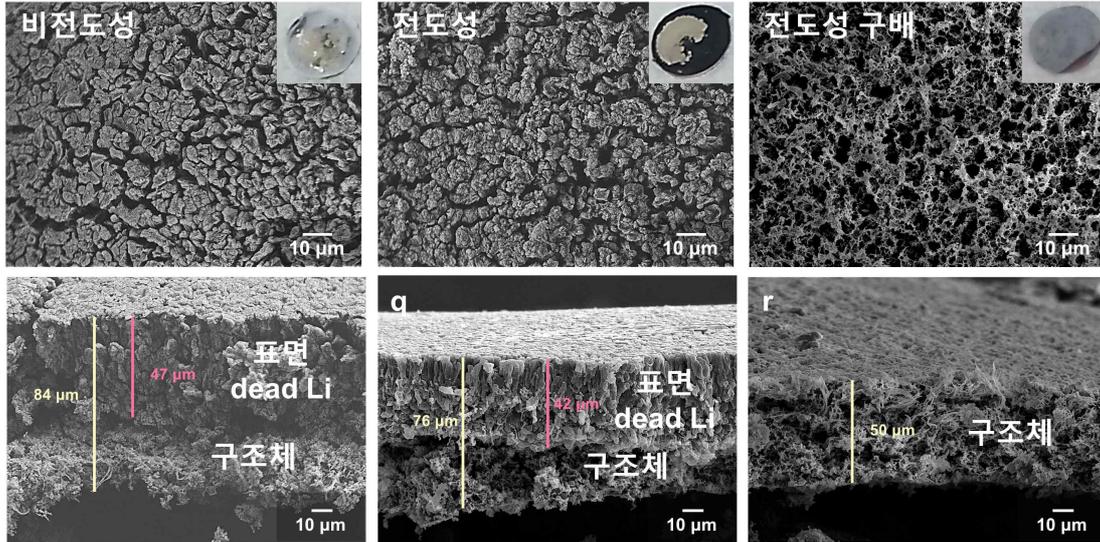
충·방전 과정에서 발생하는 부피 팽창도 관찰되지 않아, 고속 충전 환경에서도 안정성을 입증했다.

또한 이 기술은 간단한 용액 공정만으로 고분자 코팅과 표면 절연 처리를 동시에

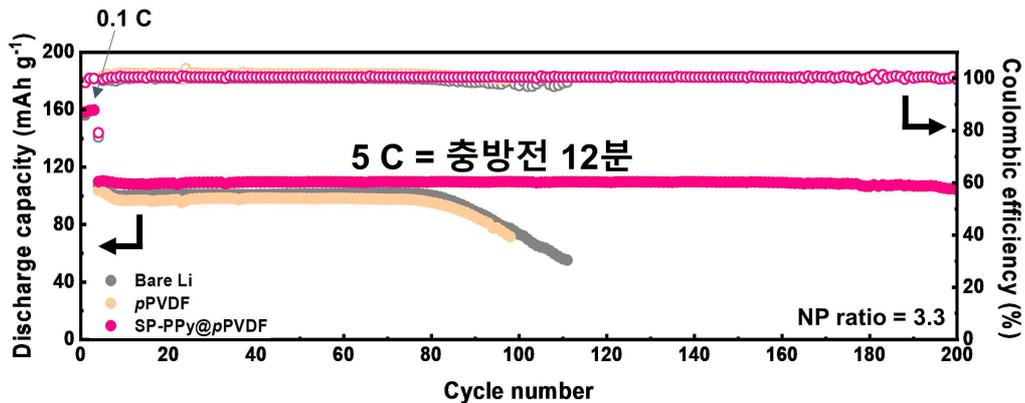
구현할 수 있어, 대면적 생산에도 유리하다. 특히 전기자동차 배터리, 에너지저장장치(ESS), 항공 모빌리티용 배터리 등 다양한 분야에 적용될 수 있어 향후 상용화 가능성을 높였다는 점에서 의의가 있다.

* **C-rate(C율):** 배터리의 충·방전 속도를 나타내는 지표로, 1C는 1시간, 5C는 약 12분 만에 완전 충전되는 속도를 의미한다.

• 리튬 도금 형상 변화



• 완전 셀 성능 향상



▲ 전도성 구배 코팅 유무에 따른 리튬 금속 성장 모양과 배터리 성능 비교. 구조체 표면에 리튬 친화적인 폴리피롤(PPy)을 코팅하고, 내부는 전기가 통하고 외부는 절연되도록 설계한 '전도성 구배' 구조를 적용한다. 덕분에 리튬이 골고루 성장하여 뾰족하게 쌓이는 문제가 줄어든다(위). 이렇게 만든 배터리를 12분 만에 충전하는 초고속 조건(5C)에서 시험한 결과, 기존 리튬 금속 음극보다 2배 이상 오래 사용할 수 있으며, 200회 충·방전 후에도 안정적인 성능을 유지한다(아래).

엄광섭 교수는 "이번 연구는 리튬금속전지의 고질적인 문제로 지적돼 온 충·방전 과정에서의 덴드라이트 형성과 그로 인한 부피 팽창 문제를 동시에 해결할 수 있는 구조적 해법을 제시했다는 점에서 의미가 있다"고 말했다.

이어 "현재 사용되는 리튬이온전지 대비 2배 이상의 에너지 저장 밀도를 갖는 리튬금속전지가 상용화될 경우, 전기자동차와 항공 모빌리티의 주행거리를 2배 이상 늘

리고 약 12분 수준의 초고속 충전이 가능한 기술로 발전할 것으로 기대된다"고 덧붙였다.

GIST 차세대에너지연구소 엄광섭 소장(신소재공학과 교수, 교신저자)가 지도하고 조진현 박사(제1저자)가 수행한 이번 연구는 과학기술정보통신부·한국연구재단 중견연구자지원사업의 지원을 받았다.

연구 결과는 재료과학 에너지 분야의 권위 있는 국제학술지 《Energy & Environmental Materials》에 2026년 3월 29일 온라인으로 게재됐다.

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

논문의 주요 정보

1. 논문명, 저자정보

- 저널명: Energy & Environmental Materials (Impact factor: 14.1, JCR 상위 7%, 2024년 기준)
- 논문명: Architecture of semiconductive macroporous polymer scaffold to realize ultra-fast charging in lithium metal batteries
- 저자 정보: 조진현 박사(GIST 차세대에너지연구소, 제1저자),
엄광섭 교수(GIST 차세대에너지연구소·신소재공학과, 교신저자)