

“新 배터리 기술로 전기차 주행거리 대폭 늘린다”

GIST-현대차, 삼차원 고분자 구조체 적용한 고에너지밀도 리튬금속전지 안정성 향상 기술 개발

- 신소재공학부 엄광섭 교수팀과 현대자동차 배터리연구팀 공동연구... 기존 리튬금속 음극의 구리 집전체에 삼차원 고분자 구조체 도입해 에너지 밀도와 수명 2배 향상된 리튬금속전지 구현
- “기존 리튬금속전지의 충.방전 시 나타나는 불안정성 해결할 수 있는 새로운 대안 제시” 차세대 전기자동차에 활용 기대... 국제학술지 「Chemical Engineering Journal」 게재



▲ (왼쪽부터) 엄광섭 교수, 조진현 박사과정생

전 세계 자동차 시장에서 전기차 판매가 꾸준히 이어지고 있는 가운데 상용화되어 있는 리튬이온전지보다 용량이 크고 충방전이 빠른 차세대 이차전지에 대한 관심이 높아지고 있다.

기존 리튬이온 전지의 음극 소재*인 흑연은 이론적 한계 용량에 거의 도달한 상태로, 에너지 밀도를 높이기 위해서는 용량이 더 높은 음극 소재의 개발이 필요한 상황이다.

* 음극 소재(anode material): 양극에서 나온 리튬이온을 저장했다가 방출하면서 전류를 흐르도록 하여 배터리의 충전 속도와 수명에 중요한 역할을 함.

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 신소재공학부 엄광섭 교수팀이 현대자동차 배터리연구팀과 함께 고분자가 코팅된 삼차원 절연 구조체를 음극에 도입해 고에너지 리튬금속전지의 고질적인 부피팽창 문제를 해결하고, 충방전 내구성을 향상시키는 기술을 개발했다고 밝혔다.

음극 소재를 흑연에서 리튬 금속으로 대체한 리튬금속전지는 이론적으로 리튬이온 전지보다 10배 높은 음극 용량을 구현할 수 있어 주목받고 있다.

하지만 리튬금속전지의 충·방전 중 리튬의 수지상 결정* 성장이 일어나면서 분리막* 을 뚫고 전지의 단락(短絡, short circuit)을 일으키는 현상을 비롯해 리튬이 도금되면서 부피 팽창이 일어나 배터리가 부풀고 내부의 압력이 증가하는 등 안전성 및 내구성의 문제가 상용화에 걸림돌이 되고 있다.

* 리튬 수지상 결정(Li-dendrite): 리튬금속전지를 충전하는 과정에서 전극에 리튬이 전극에 불균일하게 전착되며 수지상으로 성장함. 붙임 용어설명 참고.

* 분리막: 배터리 내부의 양극과 음극이 접촉하지 않도록 하는 절연 소재의 얇은 막. 배터리의 안전성과 관련됨.

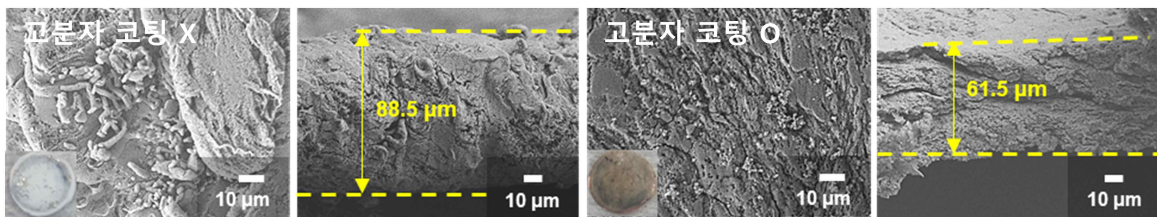
연구팀은 리튬금속 배터리에서 폴리테트라플루오로 에틸렌(Polytetrafluoroethylene)을 이용하여 합리적인 다공성 구조를 설계했으며, 간단한 자가-고분자화 반응을 통해 삼차원 구조체 표면에 폴리도파민(Polydopamine)을 코팅하여 극성 작용기*가 풍부한 삼차원 구조체를 만들었다.

* 극성 작용기(Polar functional group): 전기 음성도가 높은 N, O, F와 같은 원소가 전기 음성도가 낮은 물질과 공유결합을 하고 있어 전자가 상대적으로 한쪽으로 쏠리게 되어 극성을 가지는 작용기를 의미한다.

개발된 삼차원 구조체의 절연 특성이 리튬을 내부에서부터 도금하고, 풍부한 극성 작용기가 리튬 이온의 유량을 균질화하여 수지상 결정 성장이 억제되는 효과를 보였다.

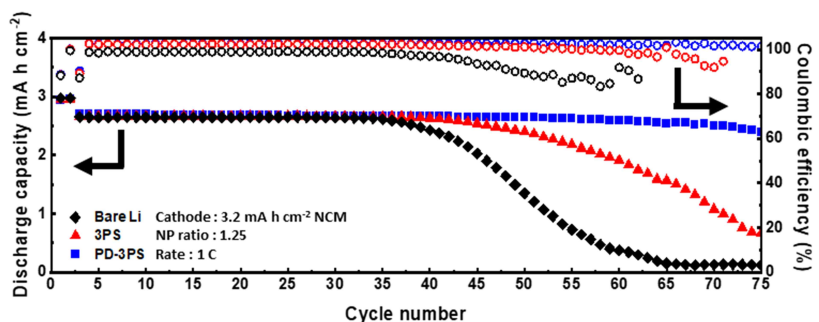
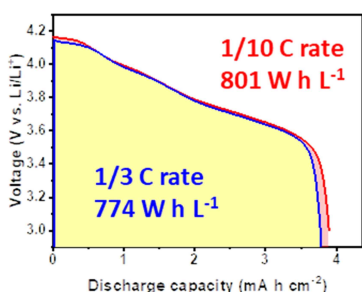
연구팀은 개발한 삼차원 고분자 구조체를 리튬금속 음극으로 활용한 결과, 기존의 구리 집전체 기반 리튬금속 음극보다 2배 이상의 에너지 밀도와 2배 정도의 수명을 갖는 리튬금속전지를 만드는 데 성공했다.

• 리튬 도금 형상 변화



리튬 수지상의 과도한 형성 & 부피 팽창 리튬 수지상 형성 억제 & 부피 유지

• 완전 셀 성능 향상



▲ 폴리도파민 코팅 유무에 따른 리튬 금속 도금 형상 및 완전 셀 성능 비교: 위 그림은 고분자를 코팅한 삼차원 구조체에서의 리튬 성장 형성과 부피 팽창 억제, 완전 셀에서의 개선된 성능을 보여준다.

기존의 구리 집전체는 약 35회의 충·방전 사이클 이후에서 급격하게 용량이 줄어들어 60회 충·방전 사이클부터는 발현 용량이 거의 0에 가깝게 되지만, 새로 개발한 삼차원 고분자 구조체를 도입한 리튬금속 음극은 75회 충·방전 사이클 이상에서도 초기 용량 대비 90% 이상의 이례적으로 안정적인 성능을 보였다.

나아가 간단한 자가-고분자화 과정을 통해 고분자 코팅을 할 수 있어 모든 종류의 다공성 구조체에 적용시킬 수 있을 것으로 기대된다.

특히, 고분자 구조체를 활용한 연구팀의 NCM(니켈·코발트·망간) 양극 기반 리튬금속전지(고집적 NCM 양극, NP ratio(음극/양극 용량비율): 1.0)는 기존 리튬이온전지보다 두 배 이상 큰 최대 801 Wh/L의 방전 기준 에너지 밀도를 보였다.

따라서 동일한 전기차에 같은 크기의 전지를 장착하였을 때, 이번 연구에서 개발된 리튬금속전지는 두 배 이상의 에너지를 저장함으로써 주행거리를 크게 향상시킬 수 있다는 것을 의미한다.

엄광섭 교수는 "이번 연구 성과는 기존 리튬금속전지의 고질적인 문제인 충·방전 동안에 일어나는 불균형한 돌기 형성(덴드라이트, dendrite)과 그로 인한 부피 팽창 문제를 해결할 수 있는 새로운 대안을 제시했다"면서, "향후 안정성이 보장된 고에너지 리튬금속 전지를 차세대 전기자동차에 이용할 수 있게 된다면 전기자동차의 1회 충전 주행거리를 크게 향상시킬 수 있을 것"이라고 밝혔다.

GIST 신소재공학부 엄광섭 교수가 지도하고 조진현 박사과정생이 주도적으로 수행한 이번 연구는 현대자동차 배터리연구팀과 공동으로 수행되었으며, 현대엔지비(NGV) 외에도 한국연구재단, GIST 중앙기기연구센터(GAIA)의 지원을 받아 수행하였다. 연구 성과는 세계적인 화학공학 분야 권위 학술지 '화학 공학 저널(Chemical Engineering Journal), JCR 상위 3.7%'에 2024년 6월 22일 온라인 게재되었다.

논문의 주요 내용

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Chemical Engineering Journal (Impact factor: 13.3, JCR 상위 3.7% (2023년 기준))
- 논문명 : Rational design of polymer-based insulating scaffolds for high-capacity lithium metal batteries

※ DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.153383>

- 저자 정보 : 조진현 박사과정생 (GIST 신소재공학부, 제1저자), 엄광섭 교수 (GIST 신소재공학부, 교신저자)