

보도자료



보도일시	즉시보도
	2023. 8. 3.(목)
문의	연구단/연구책임자: 화학부 임종우 교수(02-880-2236) 교신저자, Martin Z. Bazant (MIT) 교신저자
	연구단/연구진 구본호 연구원(02-880-2237) / 제1저자

국내 연구진, 실시간 나노 화학 이미징으로 인산철 배터리의 고속 방전에서의 효율저하 원인 규명 -인산철 배터리의 고속 충·방전

■ 요약

연구 필요성	<p>리튬이온 배터리의 가장 강력한 장점 중 하나는 충전 과정을 통해 에너지를 저장하고, 저장해둔 에너지를 언제 어디서나 사용할 수 있다는 것입니다. 그러나 아직 리튬이온 배터리에서 해결되지 않은 큰 문제점 중 하나는 충전 때 저장된 화학적 에너지를 고속으로 출력시킬 때(예를 들어 전기차의 고속주행, 노트북의 고성능 모드 등) 매우 큰 저항과 에너지손실이 발생한다는 것입니다. 이러한 에너지 비효율성은 많은 배터리 전지에서 특징적으로 나타나지만, 이 현상에 대한 명확한 원인은 아직 규명되지 않았습니다.</p> <p>고속 방전에서의 성능 저하는 특히 전극 내에서 상이 분리되는 상 분리 전극(대표적으로 인산철 배터리, LiFePO_4)에서 더욱 심하게 나타납니다. 그러나 상 분리 전극에서는 리튬이온의 분포가 매우 불균일하기 때문에, 원인이 되는 리튬이온 분포 및 움직임을 알아내는 것이 매우 어렵습니다. 또한, 사람 머리카락 굵기의 1/100 미만 크기의 전극 입자 내부에서 변화하는 리튬 분포를 충·방전 중 실시간으로 관측하는 것은 매우 난이도가 높은 실험입니다. 이러한 이유로 아직 인산철 배터리를 포함한 양극재 대부분에서 고속 충전과 방전의 비대칭적인 에너지 효율에 대한 원인 규명이 안 되어 있습니다.</p>
연구성과/기대효과	본 연구진은 방사광 가속기 기반 실시간 X선 현미경을 이용하여 ~1 μm 크기의 인산철 배터리 입자 표면/내부에서 충·방전 중 시시각각 변화하는 리튬이온의 분포와 입자 내에 흐른 전류밀도를 나노미터 단위에서 전 세계 최초로 관측해 냈습니다. 이

연구를 통해 충·방전 속도에 따라 전극 입자의 표면과 내부에서 리튬이 이동하는 경로가 완전히 바뀐다는 사실을 밝혀냈습니다. 특히, 방전 속도가 높아짐에 따라 입자의 표면에 리튬이 많은 상(phase)이 더욱더 많이 형성되는데, 이는 리튬 이온전달에 있어 더 높은 저항을 만들어 내고 이것이 고속 방전에서 출력을 저하시키는 근본적인 원인을 규명하였습니다. 본 연구를 통해 인산철 전극의 고속 충·방전 성능 개선에 있어 표면상 형성에 관한 연구가 필수적임을 제시하였고, 이에 대한 정확한 제어가 이뤄진다면 대폭 출력이 향상된 인산철 전지를 만들 수 있을 것이라 기대됩니다.

■ 본문

□ 실험 동기 및 내용

- 리튬이온 배터리는 충전/방전 과정을 통해 화학적 에너지와 전기 에너지 사이의 가역적인 변환이 가능하도록 설계되었습니다. 그러나 저장해둔 에너지를 출력시킬 때(일반적으로 1시간 이내의 방전)에서는 큰 과전압과 에너지손실이 일어나며, 이는 고속으로 갈수록 매우 심각한 성능 저하를 가져옵니다. 현재까지 연구자들은 이러한 현상을 전극 내 리튬이온의 확산속도가 느리다는 이유로 설명하였었습니다. 그러나 이에 대한 원인이 명확히 규명된 바가 없었습니다.
- 인산철 배터리와 같은 상이 분리되는 특징을 가진(상전이) 전극에서는 이 현상이 더욱 뚜렷하게 나타나는데, 상전이 전극의 경우 전극 내부의 매우 불균일한 리튬이온의 분포 및 이동 때문에 더욱더 원인 규명이 어려웠습니다.
- 본 연구진은 방사광 가속기 기반 실시간 X선 현미경을 활용하여 사람 머리카락 굵기의 1/100 미만 크기의 인산철(LiFePO₄) 전극 입자의 표면 및 내부 모두에서 리튬이온이 충·방전 시 어떻게 이동하고 분포하는지 전 세계 최초로 관측해 내었습니다. 또한, 입자 표면 및 내부에서 시시각각 변하는 리튬 농도를 관측하여 나노미터 단위에서 흐른 전류밀도를 측정해 내었습니다.
- 연구진은 이를 분석하여 인산철 배터리의 충·방전에 필요한 전기화학적 과전압(overpotential)이 입자 표면에서 나노미터 단위에서 시시각각 변하는 리튬의 농도에 의해 결정된다는 사실을 규명하였습니다. 또한, 고속 방전시 입자 표면에 리튬이 많은 상(phase)이 형성된다는 사실을 최초로 확인하였고, 이 표면의 상이 높은 방전저항을 만들어 고속 출력을 저해한다는 사실을 입증하였습니다.
- 본 연구를 통해 기존에 대립되던 인산철 배터리의 여러 충·방전 모델을 모두 통합하였으며, 고

속 충·방전 간의 비대칭성을 최소화하여 에너지 효율을 높일 수 있는 명확한 연구 방향성을 제시하였습니다.

- 이러한 결과는 인산철 배터리 이외에도 상전이가 일어나는 LiCoO_2 , $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$, Ni-rich NMC와 같은 상용화된 배터리 전극에 대한 이해도를 높일 뿐 아니라, 전도도를 변화하여 정보를 저장할 수 있는 리튬이온 기반 멤리스터(Lithionic memristor) (예: $\text{Li}_{4/3}\text{Ti}_{5/3}\text{O}_4$ 및 LiCoO_2)에도 응용될 수 있으리라 기대됩니다.
- 본 연구는 국제학술지 **Energy & Environmental Science (EES)**에 6월 6일 논문으로 온라인 게재되었으며, 8월호 저널의 표지로 선정되어 출판 예정입니다.
- 본 연구는 삼성미래기술육성사업, 한국연구재단 지원으로 수행되었습니다.

□ 자연과학 및 국제교류등의 영향

- 새로운 배터리 메커니즘 규명을 바탕으로 새로운 인산철 배터리의 성능의 한계와 발전전략을 세울 수 있었습니다.
- 서울대 연구원들이 포항방사광가속기연구소의 X선 현미경을 통해 밝혀낸 연구성과입니다.
- 서울대 연구원들이 전세계 독일 헬름홀츠 연구소 산하 BESSY 방사광가속기연구소, 캐나다 방사광 가속기 연구소, 미국 MIT과 공동연구를 수행하였고, 독일,캐나다,미국 공동연구진에 직접 파견을 나가서 연구를 진행하였습니다.
- 특히, 코로나시기 국제여행이 제한된 상황에서도 독일 베를린 헬름홀츠 BESSY연구소에서 연구를 수행한 성과는 현지 인터넷 기사로 실렸습니다.

<https://science.hzbblog.de/korean-scientists-battery-research-bessy2>

□ 연구결과

Dynamic surface phases controlling asymmetry of high-rate lithiation and delithiation in phase-separating electrodes

리튬이온 배터리의 가장 강력한 장점 중 하나는 충전 과정을 통해 에너지를 저장하고, 저장해 둔 에너지를 언제 어디서든 사용할 수 있다는 것입니다. 그러나 아직 리튬이온 배터리에서 해결되지 않은 큰 문제점 중 하나는 충전 때 저장된 화학적 에너지를 고속으로 출력시킬 때 (예를 들어 전기차의 고속주행, 노트북의 고성능 모드 등) 매우 큰 저항과 에너지손실이 발생한다는 것입니다. 연구자는 이에 대한 원인을 느린 리튬이온의 확산으로 추측하였으나 명확한 원인은 현재까지 규명되지 않았었습니다.

본 연구진은 방사광 가속기 기반의 실시간 X선 현미경을 활용하여, 사람 머리카락 굵기의 1/100 미만 크기의 인산철 배터리 입자의 표면과 내부에서 충·방전 중에 시시각각 변화하는 리튬이온의 분포 및 전류밀도를 나노미터 단위에서 전세계 최초로 관측하였습니다. 이 연구를 통해 충·방전 속도에 따라 전극 입자의 표면과 내부에서 리튬의 이동 경로가 완전히 변화한다는 사실을 확인하였으며, 이러한 현상이 고속 충·방전 시 발생하는 에너지 비효율성의 주요 원인임을 밝혀냈습니다. 특히 방전 과정에서 방전 속도가 증가함에 따라 입자의 표면에 리튬이 많은 상이 더욱 형성되는 것을 관측해 내었고, 이러한 표면의 상이 방전 시 더 큰 저항을 만들어 고속 출력을 저해하는 주요 원인임을 규명하였습니다.

본 연구를 통해 인산철 전극의 고속 충·방전 성능을 개선하기 위해서 전극 표면의 리튬이온 분포에 관한 연구가 필수적임을 제시하였으며, 이에 대한 정확한 제어가 이루어진다면 획기적으로 향상된 인산철 전지를 개발할 수 있을 것이라 기대할 수 있습니다.