

★ 2026년 8월 15일(토) 조간 (온라인 8.14.(금), 낮 12:00 이후) 보도해 주시기 바랍니다.

보도자료	 한국연구재단 National Research Foundation of Korea
청렴한 연구지원 신뢰받는 NRF	<대외홍보실> 조은혜 팀장, 고흥숙 연구원 ☎ 042-869-6119

<자료문의> 인하대학교 화학과 김민규 교수(032-860-7671)

입자 간 충전 불균형으로 인한 리튬 이동이 배터리 수명을 갉아먹는다

- 전극 수준에서 일어나는 미시적인 상호작용과 열화 메커니즘 규명 -

- 배터리 수명을 갉아먹는 새로운 원인이 밝혀져 주목된다.
- 한국연구재단(이사장 홍원화)은 인하대학교 김민규 교수 연구팀이 배터리 전극 내부의 충전상태 불균형이 입자 간 자발적인 리튬이온 재분배를 유도하고, 이 과정에서 발생한 내부전류가 특정 입자에 집중돼 배터리 열화를 촉진한다는 사실을 규명했다고 밝혔다.
- 이번 연구성과는 과학기술정보통신부와 한국연구재단이 추진하는 나노·소재기술개발사업의 지원을 받아 수행됐으며, 에너지 소재 분야 국제학술지 ‘어드밴스드 에너지 머티리얼즈(Advanced Energy Materials)’에 7월 30일 게재되었다.
- 전기자동차와 에너지저장장치의 활용이 늘어남에 따라 고용량 배터리의 긴 수명을 확보하는 것이 필수 과제로 떠오르고 있다.
 - 하지만 이러한 고용량 배터리는 충·방전을 반복할수록 성능이 급격히 떨어지는 열화 문제가 발생하여 시장 확대와 장기 사용에 큰 걸림돌이 되어 왔다.
 - 특히 그간의 연구는 단일 소재 및 개별 입자의 구조적 안정성에 치중되어 있어, 전극 수준에서 복수 입자의 상호작용으로 발생하

는 열화 메커니즘을 규명하는 데 한계가 있었다.

- 고성능 배터리 설계의 한계를 극복하기 위해서는 전극 수준에서 일어나는 미시적인 상호작용과 열화 메커니즘을 명확히 규명하는 연구가 필수적이다.
 - 연구진은 크기가 다른 두 종류의 양극 입자를 여러 비율로 혼합한 복합전극을 제작한 뒤, 자체 개발한 반응 분해 분석 플랫폼과 방사광 기반 마이크로 X선 회절 매핑, 투과 X선 현미경 기술을 결합하여 전극 전체와 개별 입자 내부의 반응 분포를 추적했다.
 - 분석 결과, 외부 충전을 중단한 이후에도 두 입자군의 충전상태 차이를 해소하는 방향으로 리튬이온이 자발적으로 재분배되는 현상이 확인됐다.
 - 이러한 내부 리튬 이동은 전극의 충전상태를 동기화하는 과정이지만, 한쪽 입자군의 함량이 낮은 조성에서는 재분배 과정에서 발생하는 내부전류가 소수 입자에 집중돼 외부 전류로는 드러나지 않는 추가적인 국부 전기화학 부담을 유발했다.
 - 이렇게 내부전류가 몰린 입자는 전해질과의 부반응으로 유기물계 표면 피막이 두껍게 형성되었으며, 리튬이 이동할 수 있는 정상적인 층상 결정구조가 전기화학적으로 불활성한 암염상 구조*로 변형되어 결국 전극 전체의 열화를 가속하는 것으로 나타났다.
- * 암염상 구조 : 염화나트륨(NaCl, 암염)과 같이 양이온과 음이온이 정육면체 모양의 면심 입방격자(FCC)를 이루며 1:1 비율로 교대로 배치된 결정구조
- 김민규 교수는 “이번 연구는 우수한 소재라도 전극 안에서 다른 입자들과 반응 속도가 맞지 않으면 특정 입자가 선택적으로 망가질 수 있음을 보여준다”며, “앞으로는 전극을 구성하는 모든 입자가 균일하고 동기화된 방식으로 반응하도록 설계하는 것이 고용량·장수명 배터리 개발의 핵심 기준이 될 것”이라고 강조했다.

주요내용 설명

<작성 : 인하대학교 김민규 교수>

논문명	SOC Mismatch-Driven Inter-Particle Synchronization via Internal Li-Ion Transfer: An Unrecognized Electrode-Emergent Degradation Pathway in Ni-Rich Composite Cathodes
저널명	Advanced Energy Materials
키워드	State-of-Charge Mismatch(충전상태 불일치), Internal Li-Ion Transfer(내부 리튬이온 이동), Ni-Rich Cathode(고니켈 양극), Composite Electrode(복합전극), Electrode-Emergent Degradation(전극 수준의 집단적 열화)
DOI	10.1002/aenm.71377
저자	김민규 교수(교신저자/인하대학교), 오세현 석사(공동 제1저자/인하대학교), 김수영 통합과정(공동 제1저자/인하대학교), 김인호 박사과정(공동 제1저자/인하대학교), 안강우 박사(공동저자/포항공대속기연구소), 빈민욱 박사(공동저자/포항공대속기연구소)

1. 연구의 필요성

- 전기자동차와 에너지저장장치의 보급 확대로 높은 에너지밀도와 긴 수명을 동시에 갖춘 리튬이온배터리 개발이 요구되고 있다. 고니켈 NCM811 양극은 높은 용량을 구현할 수 있지만, 충·방전 과정에서 발생하는 결정구조 변화와 표면 부반응으로 장기 성능이 저하될 수 있다.
- 기존 배터리 열화 연구는 주로 개별 양극 입자의 균열, 결정구조 변화, 표면 재구성 및 전해질과의 부반응을 규명하는 데 집중해 왔다. 이에 따라 개별 입자의 구조와 표면 안정성을 높이는 것이 배터리 수명 향상의 핵심 전략으로 여겨졌다.
- 그러나 실제 전극은 크기와 반응 특성이 다른 수많은 입자가 도전재와 바인더로 연결된 복합체이다. 동일한 조건에서도 입자마다 리튬 이동속도와 계면반응 속도가 달라 입자 간 충전상태 불일치가 발생할 수 있다. 서로 다른 충전상태의 입자가 전기적·이온적으로 연결되면 외부 충전이 끝난 뒤에도 입자 사이에서 리튬이 이동할 수 있다.

- 이러한 내부 리튬이온 이동은 입자 간 충전상태를 맞추는 과정이지만, 내부전류가 특정 입자에 반복적으로 집중되면 계면과 결정구조의 열화를 촉진할 가능성이 있다.
- 따라서 실제 복합전극의 열화를 이해하기 위해서는 개별 입자의 안정성뿐 아니라, 전극 내부 입자들의 상호작용과 집단적 반응을 함께 분석해야 한다.

2. 연구내용

- 연구진은 동일한 NCM811 조성을 가지면서 크기와 반응 특성이 다른 두 종류의 입자군을 여러 비율로 혼합해 복합 양극을 제작했다. 단일 입자군 전극과 여러 혼합비의 복합전극을 비교해 입자 크기, 반응속도 및 혼합 비율이 충전상태 불일치와 열화에 미치는 영향을 분석했다.
- 연구진은 자체 개발한 반응 분해 분석(RDA, Reaction Distribution Analysis) 플랫폼을 활용해 복합전극의 평균 신호에 함께 나타나는 두 입자군의 반응을 분리했다. 이를 통해 일반적인 전기화학 측정으로는 구분하기 어려운 각 입자군의 충전상태와 반응량을 독립적으로 추적했다.
- 분석 결과, 충전 과정에서 빠르게 반응하는 입자군은 먼저 높은 충전상태에 도달한 반면, 느리게 반응하는 입자군은 상대적으로 낮은 충전상태를 유지했다.
- 외부 충전 전류를 중단한 이후에도 충전상태가 낮은 입자군에서 높은 입자군으로 리튬이 이동하면서 두 입자군의 충전상태가 점차 동기화됐다. 이는 외부에서 전류가 측정되지 않는 휴지 상태에도 전극 내부에서는 국부적인 전기화학 반응이 지속될 수 있음을 의미한다.
- 특히 한쪽 입자군의 비율이 낮은 전극에서는 충전상태를 재조정하기 위한 내부전류가 소수 입자에 집중됐다. 이에 따라 소수 입자군은 반복적인 추가 반응과 더 큰 국부적 전기화학 부담을 받았다.
- 연구진은 방사광 기반 마이크로 X선 회절 매핑과 투과 X선 현미경을 통해 전극 및 개별 입자 내부의 충전상태와 반응 분포를 분석했다. 그 결과 전극 평균값으로는 확인하기 어려운 공간적 반응 불균일과 특정

입자군에 집중된 충전상태 변화를 확인했다.

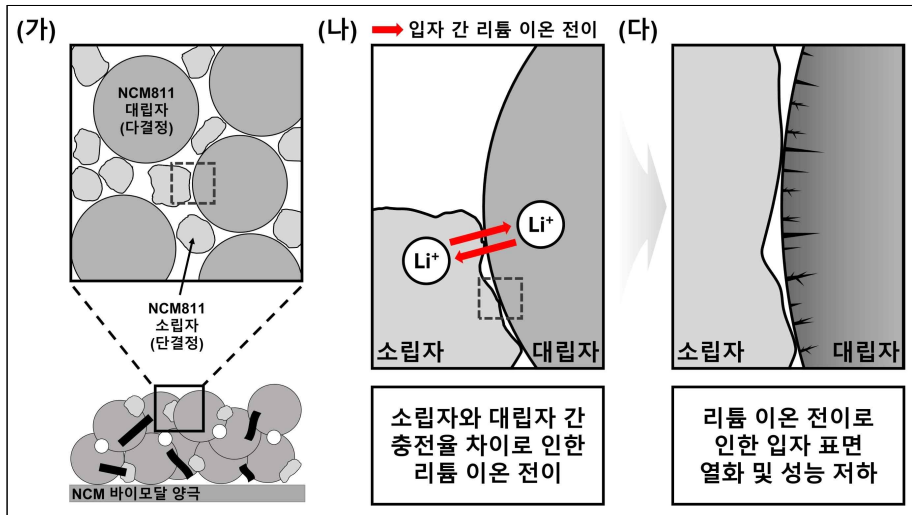
- X선 광전자분광법과 고분해능 투과전자현미경 분석에서는 내부전류가 집중된 입자에서 표면 피막 성분이 증가하고, 충상구조의 표면이 전기화학적으로 불활성한 암염상 구조로 재구성되는 현상이 관찰됐다. 이러한 계면 및 구조 열화는 리튬이온 이동을 방해하고 전극 저항을 높여 장기적인 성능 저하를 유발할 수 있다.
- 연구진은 이상의 결과를 바탕으로 다음의 열화 과정을 제시했다.
 - 충전 중 반응속도가 다른 입자 사이에 충전상태 차이가 형성된다.
 - 외부 전류가 중단된 뒤에도 입자 사이에서 리튬이 재분배된다.
 - 혼합 비율이 불균형하면 내부전류가 소수 입자에 집중된다.
 - 반복적인 추가 반응이 특정 입자의 표면 및 결정구조 열화를 촉진한다.
- 이번 연구는 배터리 전극의 열화가 개별 입자에서 독립적으로 발생하는 현상의 합이 아니라, 전극 내부 입자들의 집단적 상호작용에서도 새롭게 발생할 수 있음을 보여준다.

3. 연구성과/기대효과

- 이번 연구는 입자 간 충전상태 차이에서 발생하는 내부 리튬이온 이동이 특정 입자의 선택적 열화를 유발할 수 있음을 규명하고, 이를 새로운 전극 수준의 열화 경로로 제시했다.
- 연구 결과는 개별 양극 소재의 용량과 구조적 안정성만으로 실제 복합전극의 수명을 충분히 예측하기 어렵다는 점을 보여준다.
- 이러한 설계 개념은 고니켈 양극뿐 아니라 서로 다른 소재를 사용하는 혼합 양극, 재활용 소재 기반 전극 및 다양한 차세대 복합전극에 적용될 수 있다.
- 연구진이 개발한 반응 분해 분석 플랫폼은 평균적인 전기화학 성능만으로 확인하기 어려운 입자군별 반응 불균일과 열화 집중 현상을 진단하는 데 활용될 수 있으며, 장기적으로는 고용량·장수명 배터리를 위한 입자 크기, 소재 조합 및 혼합 비율을 선정하는 설계 도구로 발전할 것으로 기대된다.

- 향후에는 다양한 양극 소재와 입자 조합, 고로딩·대면적 전극 및 실제 배터리 조건에서 내부 리튬이온 이동의 영향을 검증하고, 내부전류 집중을 완화할 수 있는 정량적 전극 설계 기준을 확립할 필요가 있다.

그림 설명



(그림 1) 혼합 양극재(바이모달 전극) 내부의 리튬 이온 이동 및 열화 메커니즘 분석 (그림 1, 가). 크기가 큰 다결정 입자(대립자)와 크기가 작은 단결정 입자(소립자)를 혼합하여 제작한 배터리 전극(바이모달 양극)의 내부 구조 모식도임. 서로 다른 크기와 특성을 가진 두 입자가 전극 내에 공존하며 얹혀있는 형태를 나타냄.

(그림 1, 나). 배터리 작동 시 두 입자 간의 충전 속도 차이(불균형)로 인해 발생하는 현상을 해석함. 입자 간 충전율의 차이를 해소하기 위해 전극 내 이온·전자 전달경로를 통해 입자군 사이에서 리튬이온이 자발적으로 재분배되는 내부 반응을 보여줌.

(그림 1, 다). 입자 간 자발적인 리튬 이온 이동이 배터리 성능에 미치는 영향을 분석함. 지속적인 리튬 이온 전이 현상이 특정 입자의 계면 열화와 암염상 표면 재구성을 촉진해 장기 성능 저하를 가속한다, 이것이 결과적으로 배터리의 전반적인 수명 감소(열화)를 가속화하는 핵심 원인임을 규명함.

연구 이야기

<작성 : 인하대학교 김민규 교수>

□ 연구를 시작한 계기나 배경은?

배터리 전극은 흔히 하나의 균일한 소재처럼 표현되지만, 실제로는 크기와 반응 특성이 서로 다른 수많은 입자가 함께 작동하는 복합체입니다. 마치 뛰어난 연주자들이 모여 있더라도 서로 다른 속도로 연주하면 전체 합주가 흐트러질 수 있는 것처럼, 성능이 우수한 양극 입자들도 반응속도가 서로 맞지 않으면 전극 전체의 성능이 저하될 수 있습니다. 기존 연구에서는 주로 하나의 입자 안에서 발생하는 결정구조 변화나 표면 열화에 집중해 왔습니다. 그러나 저희 연구진은 실제 배터리에서는 입자들이 서로 전기적·이온적으로 연결돼 있기 때문에 한 입자의 반응이 다른 입자에도 영향을 줄 수 있다는 점에 주목했습니다. 특히 충전이 끝난 뒤 외부에서는 전류가 흐르지 않더라도, 충전상태가 서로 다른 입자 사이에서는 리튬이 이동할 수 있습니다. 이러한 내부 리튬이온 이동이 전극의 충전상태를 맞추는 데 그치지 않고 장기적인 열화에도 영향을 미칠 수 있다는 가설에서 이번 연구를 시작했습니다.

□ 연구 전개 과정에 대한 소개

복합전극의 일반적인 측정값에는 모든 입자의 반응이 함께 나타나기 때문에 입자군별 반응을 구분하기 어렵습니다. 연구진은 자체 개발한 반응 분해 분석을 이용해 크기가 다른 NCM811 입자군의 충전상태 변화를 각각 추적했습니다. 이어 방사광 X선 분석과 전자현미경 분석을 결합해 입자 간 내부 리튬이온 이동이 특정 입자의 계면 및 결정구조 열화로 이어지는 과정을 규명했습니다.

□ 연구하면서 어려웠던 점이나 장애요소는 무엇인지? 어떻게 극복(해결)하였는지?

가장 어려웠던 점은 외부 전류가 흐르지 않는 휴지 상태에서도 입자 사이에서 리튬과 내부전류가 이동한다는 사실을 입증하는 것이었습니다. 연구진은 반응 분해 분석으로 입자군별 반응을 분리하고, 마이크로 X선 회절, 투과 X선 현미경, X선 광전자분광법 및 전자현미경 결과를 교차 검증해 내부 리튬이온 이동과 선택적 열화의 연관성을 확인했습니다.

□ 이번 성과, 무엇이 다른가?

기존 연구가 개별 입자의 자체적인 열화에 집중했다면, 이번 연구는 입자 간 상호작용 자체가 새로운 열화 원인이 될 수 있음을 보여줬습니다. 특히 입자군의 혼합 비율이 불균형하면 충전상태를 맞추기 위한 내부전류가 소수 입자에 집중돼 선택적 열화를 촉진한다는 사실을 규명했습니다. 이는 복합전극의 수명이 개별 소재의 성능뿐 아니라 입자 간 반응의 동기화에도 좌우됨을 의미합니다.

□ 실용화된다면 어떻게 활용될 수 있나? 실용화를 위한 과제는?

이번 연구는 양극의 입자 크기와 혼합 비율, 전극 내부의 전자·이온 전달경로를 최적화하는 데 활용될 수 있습니다. 모든 입자가 유사한 속도로 반응하도록 설계하면 특정 입자에 내부전류와 열화가 집중되는 현상을 줄일 수 있습니다. 실용화를 위해서는 고로딩·대면적 전극과 실제 파우치셀에서 이를 검증하고, 산업적으로 적용할 수 있는 정량적 설계 기준을 마련해야 합니다.

□ 꼭 이루고 싶은 목표나 후속 연구계획은?

향후 다양한 니켈계 및 혼합 양극에서 내부 리튬이온 이동이 열화에 미치는 영향을 분석하고, 반응 분해 분석을 실제 배터리 전극의 불균일을 조기에 진단하는 기술로 발전시키고자 합니다. 궁극적으로 모든 입자가 균일하고 동기화된 방식으로 작동하는 복합전극 설계 원리를 확립하는 것이 목표입니다.