

전고체 리튬이온 배터리의 가능성

기술정책실
맹진규 연구원

KATECH Insight

- ◆ 고체 전해질 기반 리튬이온 배터리(전고체 배터리)는 높은 에너지 밀도·열 안정성 등을 바탕으로 현존 리튬이온 배터리의 한계를 극복할 잠재력이 있어 상용화를 위한 다양한 기술개발이 진행 중
- ◆ 수명, 제조 공정 등 해결 과제가 남아 있으나, 주요국의 투자 동력 및 업계의 로드맵을 고려할 때 수년 내로 양산이 개시될 가능성이 있고, '30년 이후에는 자동차 적용도 가시화될 것으로 예상됨

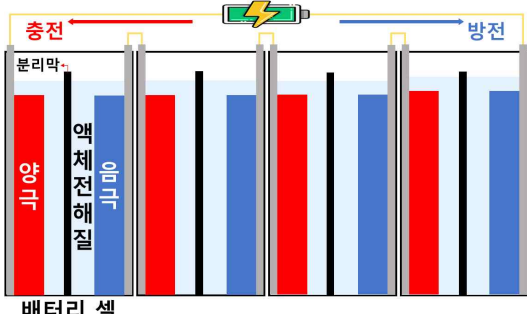
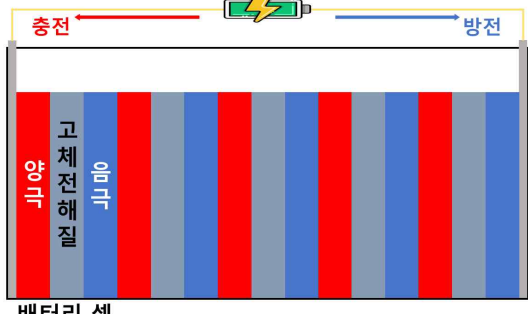
» 現 리튬이온 배터리의 한계를 극복하려는 흐름 속에서 전고체 배터리가 주목받고 있음

- 현존 리튬이온 배터리는 많은 강점에도 불구하고 열 안정성, 에너지 밀도 등에서 이론적 한계를 갖고 있으며, 이에 고체 기반의 전해질을 활용하는 전고체 배터리의 필요성이 부각
 - 기존 리튬이온 배터리는 높은 에너지 밀도, 낮은 자기 방전율, 긴 사이클 수명 등의 장점을 바탕으로 '90년대에 상용화된 후 많은 산업 변화를 이끌어냈으나, 액체 전해질 사용에 따른 근본적 한계가 존재
 - 액체 전해질 기반 리튬 이온 배터리는 가연성 유기 용매로 구성된 전해질로 인해 각종 부반응 및 열폭주가 발생할 수 있으며, 리튬 금속 음극의 사용이 제한되므로 에너지 밀도의 극적인 향상을 기대하기 어려움
- 그간 실험적 기술에 머물렀던 전고체 배터리의 상용화 개발이 10여 년 전부터 본격화되면서, 세계 주요 기업은 차세대 산업 변화를 주도할 기술로 전고체 배터리에 주목하고 있음
 - '80년대 리튬이온 배터리 개발 열풍 속에서 고체 전해질 기반 리튬 배터리가 실험적으로 구현되었으나, 당시에는 낮은 이온전도도, 짧은 사이클 수명 등의 단점 때문에 상용화는 요원하였음
 - 이후 높은 이온전도도를 가진 고체 전해질 후보 물질의 발견, 전기차 시장의 개화 등에 따라 상용화 가능성이 재부각되었고, 주요 배터리 기업 외 도요타, 닛산, 폭스바겐 등 완성차 기업이 개발에 합류

» 이론적으로 전고체 배터리는 높은 에너지 밀도·충전 속도, 열 안정성 등의 장점을 보유

- 고체 전해질 특성에 힘입어 리튬금속 음극 적용이 가능하고 고전압·고에너지밀도 구현 유리
 - 안정성을 위해 음극에 대개 흑연계 물질을 사용하는 현존 리튬이온 배터리와 달리 전고체 배터리는 리튬금속 등을 음극으로 사용할 수 있어 이론적으로 높은 에너지 밀도 및 빠른 충전 속도 확보 유리
 - 또한 고체 전해질을 활용하므로 전해질 누액, 단락을 막기 위해 각 셀을 개별 밀폐할 필요가 없고 전극-전해질-전극을 직접 적층함으로써 에너지 밀도가 높은 바이폴라(bipolar) 구조 구현도 가능
- 열 안정성이 높고 외부 충격에 따른 발화 위험이 상대적으로 작아 사용처를 넓힐 수 있음
 - 비 가연성 고체 전해질을 활용함으로써 전해질이 고온에서 분해·증발하지 않아 열 안정성이 높고, 외부 충격을 받아도 누액·단락으로 인한 발화 가능성이 낮아 리튬이온 배터리의 사용처 확대 가능

Ⅰ 액체 전해질 vs 고체 전해질 기반 리튬이온 배터리 비교 (저자 직접 작성) Ⅰ

구분	액체 전해질 기반 (현존 리튬이온 배터리)	고체 전해질 기반 (전고체 배터리)
단면도		
에너지 밀도	이론상 한계에 근접 (셀 기준 300Wh/kg 이하)	높은 에너지 밀도 (셀 기준 500Wh/kg 이상 가능)
사이클 수명	우수 (2,000회 이상 충·방전 대응)	개선 필요 (1,000회 미만 충·방전 대응)
생산 단가	기술 성숙, 규모의 경제 형성으로 낮음	상용화 전으로 생산 단가 높음
열 안정성	열 안정성이 제한되어 다양한 발화 억제책 필요	열 안정성 우수, 발화 가능성 낮음
기타	각 셀을 개별적으로 밀폐	전극-전해질-전극 적층으로 바이폴라 구조 가능

- 고체 전해질 후보 물질에는 황화물계, 산화물계, 고분자계 등이 있으며 각기 다른 특성을 보유
 - 황화물계 기반 고체 전해질이 성능상 이점을 바탕으로 액체 전해질 기반 리튬이온 배터리를 대체할 가능성이 높게 평가되나, 양산 난이도가 높은 문제 때문에 산화물계·고분자계도 연구도 진행 중
 - 계통별 단점을 최소화하기 위해, 초기 단계지만 “황화물계+고분자계” 또는 “산화물계+고분자계” 등 두 가지 이상의 전해질 계열을 조합하여 균형 잡힌 특성을 확보하는 복합계(composite) 접근도 존재

Ⅰ 전고체 배터리 적용 가능성이 있는 전해질 후보 물질의 계통별 특성 Ⅰ

구분	장점	단점
황화물계 (Sulfide-based)	고체 전해질 중 가장 높은 이온전도도 확보가 가능하고, 전극과의 물리적 접촉성이 우수	수분·공기 등과의 반응성이 높고, 고전압에서 계면 안정성이 부족
산화물계 (Oxide-based)	화학적·전기화학적 안정성이 높아 고전압 및 고열 대응 능력이 우수	상대적으로 이온전도도가 낮고, 전극과의 접촉성이 낮아 계면 저항 증가
고분자계 (Polymer-based)	유연성이 뛰어나 적층 설계에 유리하고, 저온·저비용 제조가 용이	황화물·산화물계 대비 이온전도도가 낮아, 고출력·고전압 요구 분야에의 적용이 제한

*자료: KISTEP, POSCO 등의 관련 자료를 참고하여 저자 작성

» 장점에도 불구하고, 상용화에는 수명, 제조 공정, 대안 기술이라는 도전 요인이 존재

- 전고체 배터리 상용화를 위해 실사용 가능한 수명 확보, 양산에 적합한 제조 기술 마련이 필요
 - 전기차를 예로 들면 상용 제품은 2,000회 이상의 충·방전이 가능해야 하나, 현재 전고체 배터리 시제품은 대개 1,000회 미만의 충·방전에만 대응할 수 있는 만큼 일부 성능 우위에도 불구하고 내구성이 부족
 - 또한 고체 전해질 기반의 셀을 생산하려면 원료 가공, 전극 및 셀 제조를 포함하여 불량률을 최소화하는 공정 기술과 전용 시설에 대한 투자가 필요하나, 현재는 경제적 측면에서 양산성 확보 방안이 불명확
- 여타 차세대 배터리가 조기에 상용화되면 전고체 배터리 상용화의 의미가 퇴색할 가능성도 존재
 - 예컨대 액체 전해질 기반 리튬금속 배터리, 실리콘 음극 리튬이온 배터리도 에너지 밀도, 충전 속도 측면의 강점을 내세우고 있으므로, 양산성이 확보되면 전고체 배터리의 우위를 희석시킬 여지가 있음

» 전고체 배터리는 자동차를 포함한 모빌리티 전반에서 전동화 확산의 촉매가 될 수 있음

- 액체 전해질 기반 리튬이온 배터리는 전기차 시장 창출에 기여한 바 크지만, 소비자 입장에서 내연기관차를 대체할 만한 확고한 이점을 제공하지 못했다는 점에서 일정한 한계를 노정
 - Deloitte(2025)에 의하면 소비자들은 주행거리, 충전 시간 등 배터리 관련 우려로 인해 여전히 내연기관차를 선호하며, 중국을 제외한 주요국에서 전기차(BEV) 구매 의향은 전체의 5~14%에 불과
- 모빌리티 산업에 있어 전고체 배터리의 상용화는 전기차·전동화차 시장을 확대하는 것 외에, 다양한 육상·항공 이동 수단의 전동화를 촉진할 수 있다는 의미가 있음
 - 전고체 배터리는 전동화차에 대한 소비자 수용성을 제고하여 관련 시장 성장을 가속화함은 물론이고, 산업용 차량, 항공 모빌리티 등 기술적으로 현존 배터리의 적용이 제한되는 이동 수단의 전동화가 가능

» 주요 배터리 선도국의 경쟁적 지원을 바탕으로 전고체 배터리의 개발 동력은 지속될 전망

- [한국] 민·관 합작 체제를 바탕으로, 전기차 및 미래형 ESS 등에 적용 가능한 고출력·고안정성 전고체 배터리 셀 구현을 위한 정부 R&D 투자가 활발히 진행 중
 - 정부는 車 산업의 일부로 인식하던 배터리 기술을 '23년 국가전략기술로 지정하며 단독 주력 기술로 전환하고, '30년까지 민·관 R&D 투자 및 국내 마더팩토리 구축 계획을 발표하는 등의 지원 정책 추진
- [중국] 중앙·지방 정부는 '25년 전고체 배터리 산업 지원책을 발표하고 기술 표준화 작업을 진행 중으로, 민·관 투자가 맞물리며 전고체 배터리 실증 단계에 도달한 것으로 평가
 - 중국 전고체 배터리 산업은 정책, 자본, 기술이라는 요소가 유기적으로 결합하면서 성장 기반을 확보, 모터쇼 등을 통해 그간의 연구 성과가 대중에 공개되며 투자·개발 동력 지속
- [일본] 기존 민간 중심 발전 체계에서 정부가 배터리 산업에 적극 개입하는 체계로 전환한 후, 도요타, 파나소닉, NEDO 등 차세대 배터리 실증을 위한 민관 기술개발 연계 강화
 - 일본 정부는 배터리 산업을 탄소중립 실현의 핵심 산업으로 규정하고, 민관 연계형 공동 플랫폼 Solid-NEXT 운영을 통해 전고체 배터리 소재에서 재활용에 이르는 전주기 실증연구 수행

» 업계 로드맵을 볼 때 수년 내 양산 가능성이 있으나 장기간 기존 기술과의 공존이 예상됨

- 업계의 양산 목표 시점과 개발 동향을 고려할 때 이르면 '27~'28년 소형 전고체 배터리의 소량 생산이 개시될 가능성이 있고, 전기차 등 차량 적용은 그보다 늦은 '30년 이후로 예상됨
 - 통상적으로 완성차사가 신기술을 검증하는데 2~3년이 걸리는 점, 탑재 비용 대비 성능 이점 등을 고려하면 전고체 배터리의 전기차 적용은 소형 가전제품 대상 적용 이후가 될 것으로 판단됨
 - * 과거 Tesla가 배터리 셀 폼팩터를 바꾼 4680 셀을 공개하고 실제 적용하기까지 2년 이상 소요되었음을 감안하면, 새로운 화학적 조성 and 형태를 갖는 전고체 배터리의 전기차 탑재는 보다 오랜 시간이 소요될 가능성도 있음
- 전고체 배터리가 성능·경제성 등 총체적인 우위를 확보하려면 규모의 경제 달성이 관건이므로, 상용화 이후에도 기존 리튬이온 배터리와 장기간 공존할 가능성이 높음
 - 현 전고체 배터리의 제조 비용은 액체 전해질 기반 리튬이온 배터리보다 3~5배 더 높은 것으로 분석되며, '30년대에 규모의 경제 확보를 통해 現 리튬이온 배터리와 제조 비용 등가가 가능할 전망 (Wards Auto)
 - * 한편, 현존 리튬이온 배터리의 성능·경제성이 급격히 개선될 경우 전고체 배터리의 보편화는 보다 지연될 가능성도 존재