

산업분석 Vol. 155

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

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

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

전고체 배터리 적용 가능성 있는 전해질 후보 물질의 계통별 특성

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 양산성이 확보 방안이 불명확
- 여타 차세대 배터리가 초기에 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 협작 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 품팩터를 바꾼 4680 셀을 공개하고 실제 적용하기까지 2년 이상 소요되었음을 감안하면, 새로운 화학적 조성과 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 현 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