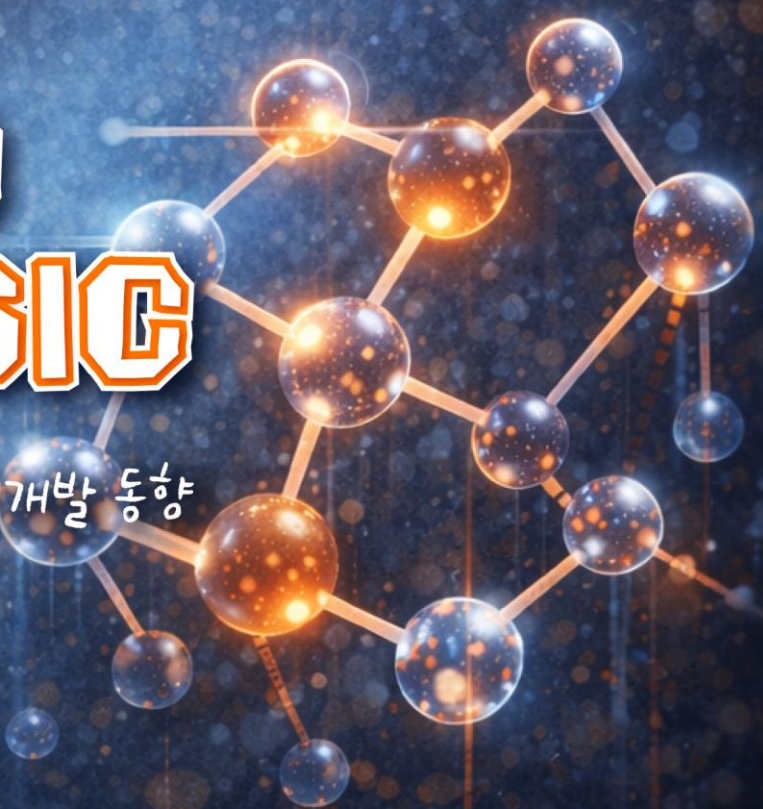


2차전지 OVERWEIGHT

BACK TO THE BASIC

배터리 기초 개념과 차세대 소재 개발 동향
(feat.인터배터리)



2025.3.16

Analyst 김현수 hyunsoo@hanafn.com

RA 홍지원 jiwonhong@hanafn.com

하나증권

2026년 3월 16일 | Equity Research

2차전지 Overweight

인터배터리 2026이 배터리 투자자에게 주는 함의

Summary

- ✓ ESS의 중요성 재확인
- ✓ 차세대 배터리, 전고체 전략 구체화
- ✓ 배터리 Up-stream 탈중국 공급망 구축 지속

Top Picks 및 관심종목

기업명	투자의견	목표주가(12M)	현재주가(3월13일)
LG에너지솔루션(373220)	BUY	518,000원	369,000원
삼성SDI(006400)	BUY	469,000원	388,000원

목차

1. 데이터센터로 이동하는 배터리 산업의 무게 중심	3
1) ESS: Grid용 LFP 중심의 구조적 성장	4
2) UPS 및 BBU: 데이터센터 내부 전력 보호 시장 중요성 증대	6
3) 소재 및 전력기기: LFP 양극재와 DC 인프라의 부상	8
2. 로봇/항공 배터리, 시기상조지만 전고체 중심 개발 흐름	10
1) 셀 - 전고체 개발 속도 가속화	10
2) 소재: 전고체 공급망 구축 시작 단계	13
3. 전기차, 정중등	14
1) 각형 중요성 증대 확인	14
2) 소재 및 장비: 하이니켈 고도화, 미드니켈 현실화, 실리콘 개발 지속	16
4. 배터리 Up-stream 탈중국 공급망 구축 지속	17
Appendix. 리튬이온전지의 기본 원리와 연구 방향	21
리튬이온전지의 구성요소	23
리튬이온전지의 제조 공정	37
전고체 개념 정리	46

2026년 3월 16일 | 산업분석_Industry In-depth

Overweight

Top Picks 및 관심종목

*CP 2026년 3월 13일

LG에너지솔루션(373220)

BUY | TP 518,000원 | CP 369,000원

삼성SDI(006400)

BUY | TP 469,000원 | CP 388,000원

2차전지

인터배터리 2026이 배터리 투자자에게 주는 함의

ESS의 중요성 재확인

인터배터리 2026을 통해 배터리 기업들의 ESS 집중 기조를 재확인할 수 있었다. 전기차의 성장폭 제한된 상황에서 전력망의 기초자산으로서 ESS 중요성 부각되며 한국 배터리 서플라이 체인은 Grid ESS 시장에 집중하는 모습이다. 이와 함께 데이터센터용 배터리 수요가 가파르게 증가하며, 비상 발전을 위한 배터리(UPS, BBU)의 중요성도 과거 행사 대비 더욱 강조되는 모습이었다. 그러나 2025년 하반기부터 새롭게 부각된 부하 조정용 신규 ESS 수요에 대한 기대감은 낮춰야 할 것으로 판단된다. 이번 행사에서 ESS 관련 엔지니어 및 마케터들과의 미팅을 통해 부하 조정을 위한 전력 버퍼 수요는 기존의 UPS 및 BBU로 대응이 가능하며 추가로 대규모의 ESS 설치가 필요하지는 않을 것이라는 의견을 공통적으로 확인할 수 있었다. 이를 고려한 현실적인 전망하에서 ESS 관련 이익 증가 가시성 높은 셀메이커(LGES, 삼성SDI), ESS용 LFP 양극재 생산 앞두고 있는 엘앤에프, ESS 냉각장치 수주 증가 예상되는 한중엔시에스 등의 수혜가 예상된다.

차세대 배터리, 전고체 전략 구체화

로봇 및 드론을 위한 차세대 배터리 역시 강조됐다. 다만, ESS가 이미 정해진 케미스트리 및 폼팩터 내에서 직선 주로 경쟁에 들어선 것과 달리, 차세대 배터리 시장의 경우 전고체 내에서도 케미스트리 및 폼팩터에 대한 논쟁이 치열하게 전개되는 모습이다. 고체 전해질의 물성으로서 황화물계 고체전해질이 표준으로 자리를 잡아가는 가운데, 양극 물질은 단결정 하이니켈 양극재, 리튬황이 부각되고 있었으며, 음극 물질은 실리콘과 리튬메탈에 대한 연구 개발이 병행되고 있음을 확인할 수 있었다. 아주 먼 미래 기술로 치부되던 전고체 기술이 최근 3년 사이 특별히 부각된 것은 소재 기술의 완성도(황화물계 고체전해질 이온전도도 상승, 음극 기술 안정화)가 높아졌기 때문이라는 엔지니어들의 공통적인 의견도 확인할 수 있었다. 고체전해질 밸류체인 최상단에 있는 이수스페셜티케미칼은 황화수소-황화리튬 수직 계열화 통해 황화리튬 원가 경쟁력을 높이는 전략을 제시하였고, 에코프로비엠은 에코프로 AP(황화수소), 에코프로이노베이션(황화리튬) 밸류체인 통해 고체 전해질 시장으로 진출한다는 계획을 공식화했다. 한편, 셀 메이커들이 타게팅하고 있는 전고체 배터리 시장은 자동차보다 로봇 및 UAM에 맞춰져 있다는 것도 확인할 수 있었다. 자동차의 경우 가격에 민감하고 배터리의 무게 및 부피에 대한 한계가 로봇이나 항공기 대비 덜해 전고체 배터리의 침투가 용이하지 않다고 판단한다. 부피의 제약이 큰 휴머노이드 로봇, 이륙을 위해 경량화가 필수적인 드론/eVTOL/UAM 등에서 전고체의 경쟁력이 부각될 것으로 판단한다.

배터리 Up-stream 탈중국 공급망 구축 지속

미국과 유럽이 요구하는 안전한 공급망, 즉 중국 의존도가 낮은 공급망 구축 노력 역시 지속되고 있다. 해외에서 광물 생산 공장의 지분을 갖고 있거나 체련 역량이 있는 포스코홀딩스, 고려아연, 에코프로, LS MnM 등이 관련해서 지속적인 투자를 이어나가고 있었다. 특히 LS MnM은 중국 기업과의 합작 지분이 없는 단독 공장 통해 2027년 하반기부터 인도네시아에서 니켈 생산을 시작하고, 2027년까지 2단계에 걸쳐 전구체 생산에 돌입한다. 향후 미국과 유럽이 요구하는 적격 광물 및 전구체 생산 역량 갖춘 기업들의 기업가치가 재평가될 수 있을 것으로 판단한다.



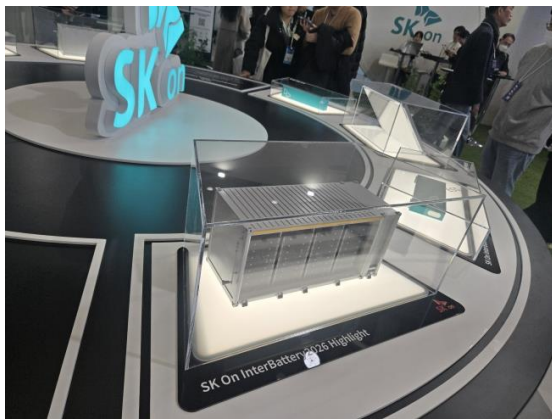
Analyst 김현수 hyunsoo@hanafn.com
RA 홍지원 jiwonhong@hanafn.com

1. 데이터센터로 이동하는 배터리 산업의 무게 중심

배터리 산업 내 ESS의 중요성 재확인한 인터배터리 2026

그동안 인터배터리의 주요 주제는 주로 전기차와 관련된 배터리 기술이었다. 그러나 2026년에는 AI 데이터센터와 ESS 이야기로 메인 테마가 바뀌었다. 전기차 대신 AI 데이터센터, ESS, 로봇, 드론 등과 관련된 기술이 전시장을 채운 가운데, 특히 배터리를 '전력 인프라'로서 강조하는 모습이 눈에 띄었다. 이를 가장 상징적으로 보여준 것이 삼성SDI 부스다. 전체 면적의 약 3/4을 AI 데이터센터와 관련한 배터리 전시에 할애했으며, 삼성SDI 연구소장은 컨퍼런스 발표를 통해 AI 데이터센터용 전력소비 급증에 힘입어 글로벌 ESS 시장이 2024년 399GWh에서 2035년 1,232GWh로 약 3배 성장할 것으로 전망했다.

도표 1. SK온 ESS 컨테이너



자료: 언론보도

도표 2. 삼성SDI AI 데이터센터 부스



자료: 언론보도

도표 3. 삼성SDI의 인터배터리 2026 부스 개념도



자료: 삼성SDI

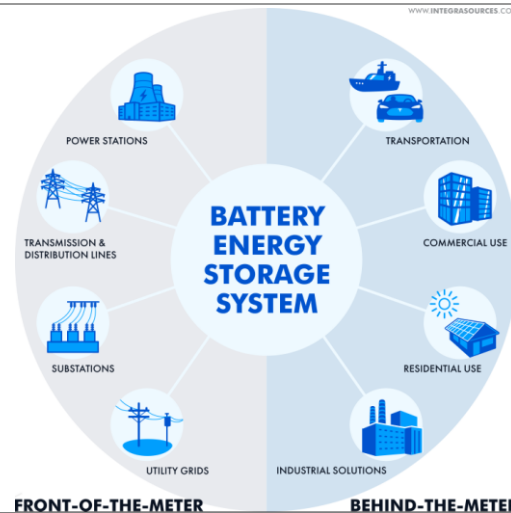
1) ESS: Grid용 LFP 중심의 구조적 성장

데이터센터 증가의
가장 큰 수혜처가 될
Grid ESS

데이터센터 수요 증가가 야기하는 배터리 시장의 가장 큰 수혜처 Grid 연계 ESS다. 데이터 센터와 ESS가 자주 하나의 키워드처럼 혼용되지만, 투자 관점에서는 구분이 필요하다. 가장 큰 시장은 데이터센터 내부 UPS가 아니라, 전력망 안정화를 위한 Grid ESS다. AI 데이터센터가 급증하면 전력 수요 피크가 높아지고, 전력 확보를 위해 건설 리드타임이 짧은 태양광·풍력 설치량이 증가하고 있다. 재생에너지 특성상 간헐성의 보완이 필요하므로 재생에너지 발전량 증가는 필연적으로 ESS 수요 증가로 이어지고 있으며, 하루 여러 차례 충방전을 요구하는 ESS 특성상 수명 특성이 매우 중요하기 때문에 Grid ESS는 LFP 위주로 성장이 지속될 전망이다.

LG에너지솔루션은 LFP 배터리 기반의 ESS 솔루션 ‘JF2 DC LINK 5.0’을 전면에 배치했고, 삼성SDI 역시 LFP 기반 SBB 2.0을 올해 12월 양산 목표로 제시했다.

도표 4. ESS의 사용처 - 현재 주를 이루는 시장은 좌측의 FTM(주로 Utility Grid) 시장



자료: Blackridge

도표 5. LG에너지솔루션 전력망용 LFP ESS 시스템 ‘JF2 DC LINK 5.0’



자료: 하나증권

도표 6. 삼성SDI 차세대 LFP ESS 시스템 ‘SBB 2.0’



자료: 삼성SDI

다양한 솔루션으로 나아가는
셀 메이커들의 ESS 사업 전략

구체적으로 살펴보면, 삼성SDI는 기존 NCA 기반 SBB 1.5(5.26MWh, 국내 생산)에 이어 NCA 각형 기반 SBB 1.7(6.14MWh, 미국 생산)과 LFP 각형 기반 SBB 2.0(5.0MWh, 미국 생산)로 구성된 라인업을 선보였다. SBB 1.7은 미국 현지 생산을 통한 ITC 수혜를 강조했으며, 12월 출시로 표기된 SBB 2.0 역시 미국에서 생산 예정이며 삼성SDI의 첫 LFP ESS 솔루션 제품이 될 전망이다.

LGES는 이미 LFP ESS 양산 체계를 갖춘 가운데 한 발 더 나아가 배전 연계 단독형 ESS를 통한 전력 중개 사업까지 영역을 확장하는 모습이다. SMP 예측 기반 차익거래 수익 창출 모델을 제시한 것으로, LFP ESS 시장 선점 이후 사업 내 수익성을 추가로 끌어올릴 수 있는 구조라고 판단된다.

SK온은 LFP 파우치형 셀 기반 ESS 컨테이너를 선보였고, 하이니켈 배터리 팩에 액침냉각 시스템을 적용해 열관리 효율과 화재 안전성을 끌어올린 차세대 솔루션을 전시했다. SK온은 기존 LFP 대비 에너지밀도를 14~19% 향상한 파우치형 ESS용 배터리도 공개하며, 올 하반기 충남 서산공장 라인 전환을 통한 국내 생산 계획을 밝혔다.

도표 7. 삼성SDI SBB(Samsung Battery Box) 라인업



자료: 하나증권

도표 8. LG에너지솔루션 ESS 배터리 라인업



자료: 하나증권

도표 9. SK온 ESS 컨테이너



자료: SK온

2) UPS 및 BBU: 데이터센터 내부 전력 보호 시장 중요성 증대

AI 서버 고전력화에 따른
BBU 시장 성장과
원통형 배터리의 부상

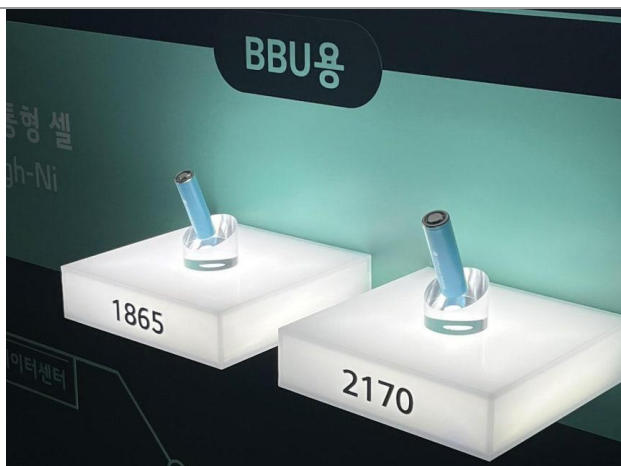
ESS가 데이터센터 '외부'의 전력 안정화 시장이라면, UPS와 BBU는 데이터센터 '내부'의 전력 보호 시장이다. 비상 발전원으로서 UPS가 일반적으로 널리 쓰이고 있는 가운데, AI 서버랙의 전력 밀도가 100~300kW 수준으로 높아지고, GPU 클러스터의 연산 중단 비용이 막대해지면서, 하이퍼스케일러들은 UPS → Rack BBU(Battery Backup Unit) → Server로 이어지는 2단계 전력 보호 구조를 일반화하고 있다. 이에 따라 소형 전지 중심의 BBU 시장도 함께 성장하고 있다.

LG에너지솔루션은 이에 대응해 AI 데이터센터용 무정전 전원 장치 기반 배터리 솔루션을 강조하는 모습이다. LFP 기반의 대형 UPS와 함께 원통형 전지 기반의 서버랙용 BBU를 함께 대응하고 있다.

UPS 시장내 높은 점유율을 유지해온 삼성SDI는 UPS용으로 LMO(리튬망간산화물) 양극재를 적용한 Gen4 (U8A1)를 공개했다. 최대 263kW급 고출력을 지원하며, 기존 대비 공간 효율 33% 개선, 15년 장수명과 5분 백업 성능을 확보했다. BBU 부문에서는 NCA 양극재와 SCN(실리콘-탄소 복합) 음극재를 결합한 원통형 배터리를 공개했으며, 18650 기반에서 21700 셀로의 전환과 탭리스 설계 적용을 통해 성능을 향상시켰다. 이는 NVIDIA 블랙웰에서 루빈 아키텍처로 전환되면서 서버랙당 전력 요구가 증가함에 따라 기존 18650에서 21700 셀로의 업그레이드 필요성이 구체화되는 시점과 맞닿아 있어 성장 가시성 높다고 판단된다.

LFP 기반의 그리드 시장에서는 LGES가 앞서나가고 있는 가운데 삼성SDI 역시 올해 12월부터 LFP ESS 공급 본격화한다는 점에서 양사 모두 긍정적인 상황이다. UPS용 BBU 시장의 경우 삼성SDI가 시장을 주도하고 있으며, LGES 역시 원통형 전지 강점 바탕으로 BBU 시장 본격적으로 진출하며 양사 모두 수혜가 확대될 전망이다.

도표 10. LG에너지솔루션 원통형 배터리



자료: 언론보도

도표 11. 삼성SDI 원통형 배터리



자료: 언론보도

부하 조정 수요 신규 시장 기대는 낮출 필요

기존 UPS 및 BBU로
신규 부하조정 수요 대응 가능

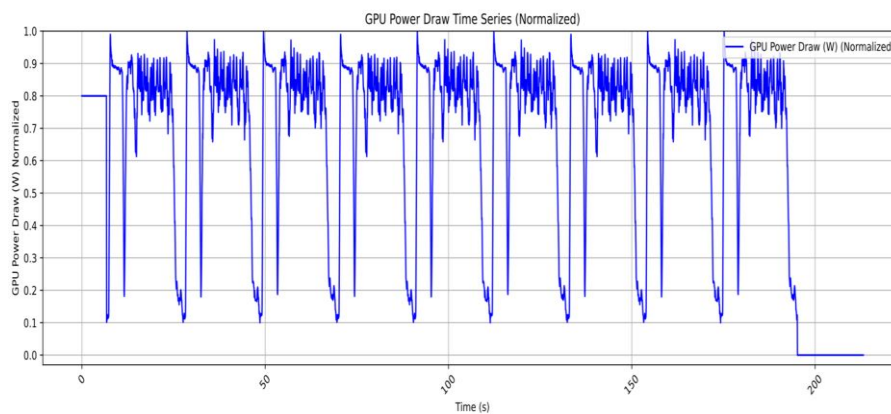
일각에서 기대하는 데이터센터 부하 조정용 추가 ESS 수요에 대해서는, 정작 배터리 기업들의 영업 및 기술 현장에서 크게 기대하지 않는 모습을 확인할 수 있었다. 배터리 3사의 엔지니어 및 마케팅 미팅을 통해 Grid ESS 및 UPS, BBU 외에 부하 조정용 배터리 시장이 추가로 열릴 수 있는지에 대한 목소리를 들을 수 있었는데, 그 내용은 다음과 같다.

A사, “현 단계 부하 급등락은 기존 UPS 배터리와 BMS로 충분히 대응 가능하며, 부하 조정 전용 셀-시스템에 대한 고객 문의는 아직 없는 것으로 파악된다. 향후, 부하 변동성이 더 커질 경우 더 높은 에너지 밀도의 셀 필요성은 인정하지만, 현재 개발 포커스는 새로운 애플리케이션 정의가 아니라 기존 UPS-ESS 스펙 최적화에 맞춰져 있다.”

B사, “향후 약 10년 내에는 UPS 배터리 탑재량 확대와 팩패키징 개선을 통해 문제를 해결할 수 있다. 공간 효율 저하는 기술 개발로 완화 가능하다고 본다. 또한 셀 변경보다는 GPU-서버 전력 설계와 BMS 기반 부하 제어 고도화가 먼저 적용될 것으로 예상해, 배터리 셀이 부하 조정의 중심 해법이 되지는 않을 것이다.”

즉, 해당 시장이 매우 작은 시장인데다 부하 변동 버퍼 역할에 대한 니즈는 기존 UPS 및 BBU로 대응 가능하다는 입장을 확인할 수 있었다. 부하 조정용 신규 수요에 대해서는 기대를 낮추는 것이 적절하다고 판단한다.

도표 12. 데이터센터의 전력 변동성 확대



자료: Moonlight

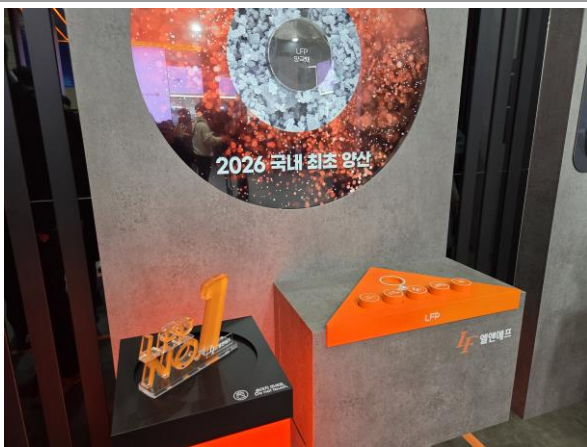
3) 소재 및 전력기기: LFP 양극재와 DC 인프라의 부상

ESS 시장 확대에 따라
LFP 개발에 박차를 가하는
국내 소재 기업들

셀 메이커들의 LFP ESS 대응이 가속화되면서, 소재 생태계도 빠르게 재편되고 있다. 2010년대 후반부터 2020년대 초반까지 하이니켈을 기술을 강조하던 양극재 기업들은 이번 인터배터리 2026에서 LFP 양극재 라인업 구축을 최우선 과제로 전면에 내세웠다.

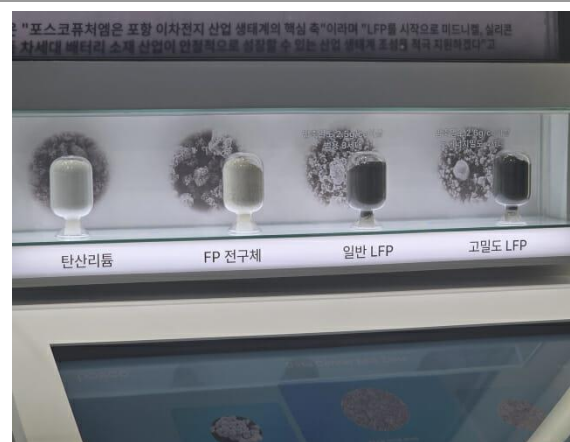
엘앤에프는 국내 최초 LFP 양극재 양산을 목표로 올 하반기 양산 계획을 재확인했다. 차세대 Fe_2O_3 공법을 적용한 무전구체 LFP 기술과 자체 인산철(FP) 기술을 처음 공개했으며, 전구체 공정을 생략하는 방식으로 생산 비용을 낮추고 중국 의존도를 줄일 수 있다고 설명했다. PD(분말밀도) 2.50g/cc 이상의 3세대 LFP 양산 계획과 2.70g/cc급 초고밀도 제품 개발 현황도 공개했다. 포스코퓨처엠은 7~8월까지 LFP 생산라인 구축을 완료하고, 3분기 인증 절차를 거쳐 연말에는 국내 고객사에 양산 제품을 공급할 예정이라고 밝혔다. 또한 포스코퓨처엠은 아르헨티나 염호와 호주 광산에서 확보한 리튬을 그룹 내에서 안정적으로 공급받을 수 있는 수직계열화 구조를 무기로, 원가 변동성이 큰 LFP 시장에서 차별적 경쟁력을 내세웠다. 에코프로비엠 역시 ESS 시장을 겨냥한 LFP 양극재를 함께 전시했으나 경쟁사 대비해서는 LFP 기술에 대한 highlight의 강도가 덜한 모습이다. 수익성이 낮은 LFP 사업에 대한 고민이 읽히는 부분이다.

도표 13. 엘앤에프 LFP 양극재



자료: 언론보도

도표 14. 포스코퓨처엠 LFP 양극재



자료: 언론보도

AI데이터센터 전력 인프라 관련 LS그룹의 토털 솔루션

한편, 데이터센터 관련 전력 인프라 측면에서는 LS그룹의 행보가 주목된다. 7개 계열사가 공동 전시관을 구성하며 '배터리 소재에서 데이터센터 전력 인프라까지'를 아우르는 토털 솔루션을 제시했다.

LS일렉트릭은 DC 팩토리 솔루션(반도체 변압기·DC-DC 컨버터·반도체 차단기 포함)을 전면에 내세웠다. 언비디아가 개발하는 800V 기반 아키텍처로 전환되면 교류(AC)로는 충당이 어려워 2년 후 DC 기반 솔루션이 상당히 보급되는 과정에서 수혜가 예상된다. LS일렉트릭은 지난해 데이터센터 관련 수주가 1조원을 넘어섰으며, 이 중 80% 이상이 미국에서 발생하고 있다.

LS머트리얼즈는 AI 데이터센터의 피크 전력 이슈 해결을 위한 울트라캐퍼시터(UC) 솔루션과 함께 AI 데이터센터 최적화 일체형 제품을 최초 공개했으며, LS사우타는 AI 영상 분석과 디지털 트윈 기반 열·기류 시뮬레이션을 통합한 데이터센터 인프라 관리 솔루션(Beyond X CUBE)을 선보였다.

도표 15. LS일렉트릭 DC 팩토리 솔루션



자료: 언론보도

도표 16. LS머트리얼즈 AI 데이터센터용 UC 솔루션



자료: LS머트리얼즈

2. 로봇/항공 배터리, 시기상조지만 전고체 중심 개발 흐름

1) 셀 – 전고체 개발 속도 가속화

삼성SDI,
전고체 배터리 '27년 하반기
양산 목표 재확인

로봇용 배터리 수요는 2025년 0.03GWh에서 2030년 1.4GWh, 2040년 138.3GWh로, UAM 용 배터리는 2030년 3.7GWh에서 2035년 68.0GWh로 확대될 전망이다(삼성SDI 연구소 발표 자료 기준). 이처럼 가파른 성장이 예상되는 로봇·드론 배터리 시장의 개발 방향은 명확하다. 현재 적용은 원통형 중심, 중장기 로드맵은 전고체 중심이다. 인터배터리 2026에서 배터리 업체들은 ESS뿐 아니라 로보틱스·드론·UAM 역시 차세대 주요 시장으로 강조하는 모습을 보여주었다. 다만 접근 방식은 다소 차이가 있었는데, LFP 기반 ESS와 원통형 기반 BBU를 전제로 지금 당장의 경쟁이 치열하게 전개되는 모습을 보여준 데이터센터 관련 배터리 시장과 달리, 로봇 및 드론 시장의 경우, “어떤 케미스트리와 폼팩터가 차세대 응용처에 적합한지”에 대한 논쟁이 아직 진행 중인 모습이다.

이와 관련해서 삼성SD는 ‘솔리드 스택’ 파우치형 전고체 샘플을 공개했다. 내년 하반기 양산을 목표로 하며, 휴머노이드 로봇을 1차 응용처로 언급했다. 삼성SDI는 각형 특허 1위 기업으로서 각형 기술의 강점이 있지만, 전고체에서는 파우치형을 전면으로 내세웠다는데 기술적 의의가 있다. 전고체 배터리는 황화물계 고체 전해질의 계면 접촉을 위해 외부 가압이 필요하다. 파우치 셀은 외부에서 균일한 강한 압력을 가하기 쉬운 구조로, 전고체 특유의 계면 저항 문제를 제어하는 데 각형이나 원통형보다 유리하다. 또한 파우치는 두께와 면적을 자유롭게 설계할 수 있어, 로봇의 복잡한 내부 공간에 배터리를 맞춤형으로 배치할 수 있다는 장점이 있다. 따라서, 로봇용 전고체 배터리의 경우 파우치를 중심으로 성장할 가능성이 높다고 판단된다.

도표 17. 삼성SDI 전고체 배터리 부스



자료: 삼성SDI

도표 18. 삼성SDI SolidStack



자료: 언론보도

로봇 - NCM/무음극 전고체
UAM - 리튬황/리튬메탈 전고체

물론, 각형 기술 개발도 병행 중이다. 삼성SDI는 현재 전고체 배터리를 파우치형과 각형 두 가지 폼팩터로 병행 개발 중이며, 기본 설계는 동일하게 유지하되 응용처에 따라 형태를 달리한다는 입장이다. 한편 소재 기술의 경우, 전해질은 황화물계, 음극은 별도의 음극 소재 없이 충전 중 리튬이온이 직접 음극을 형성하는 무음극(anode-less) 구조를 핵심 기술로 채택했다. 목표 에너지밀도는 약 900Wh/L로, 현재 전기차용 리튬이온 배터리(600~750Wh/L)를 상회한다.

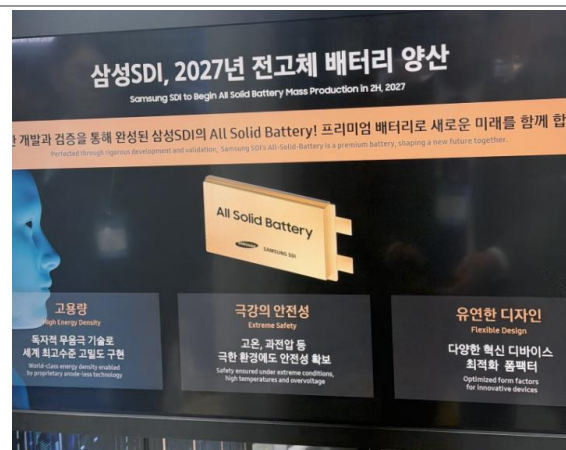
한편, 삼성SDI는 응용처별로 케미스트리를 차별화하는 전략을 구체적으로 제시했다. 로봇에는 NCM 기반 전고체 배터리를, UAM에는 전고체 리튬황 및 리튬메탈 배터리를 적용하겠다는 방향이다. 로봇은 관절 구동 시 순간 대전류와 높은 C-rate 특성이 필요하고, 하루에도 수백~수천 사이클에 준하는 부분 충방전을 반복한다. 리튬황은 전환반응 특성상 율속 특성이 나쁘고 사이클 열화가 빠르기 때문에, 로봇에는 검증된 인터칼레이션 반응 기반의 NCM 전고체를 채택하겠다는 것으로 해석된다. 반면 UAM은 배터리 무게가 이륙 가능 여부를 결정하는 구조적 제약 때문에 에너지밀도 자체를 크게 끌어올려야 한다. 현재 NCM 기반 배터리의 팩 레벨 에너지밀도(~300Wh/kg)로는 30분 항속도 빠듯하다. 황 양극은 이론 에너지밀도가 2,600Wh/kg으로 NCM 대비 2~3배 높아, UAM 상용화의 임계점을 돌파할 수 있는 거의 유일한 케미스트리로 평가 받는다. UAM은 비행당 수십 사이클 수준에 불과해 사이클 수명 요건이 로봇보다 완화된다는 점도 리튬황이 로봇보다 UAM에서 선택되는 이유라고 해석된다.

도표 19. 무음극 기술을 채택한 삼성SDI의 전고체 배터리



자료: 하나증권

도표 20. 응용처에 따라 폼팩터를 최적화



자료: 하나증권

LGES 황화물계 전고체 배터리 2029년 EV, 2030년 로봇/UAM

LGES 역시 황화물계 전고체 배터리를 강조했다. LGES는 프리미엄 전기차용과 로봇·UAM 용 배터리를 두트랙으로 구분해 개발을 진행하고 있으며, 각각 2029년과 2030년 양산을 목표로 하고 있다고 설명했다. 기술 구조 측면에서도 응용처 간 차이가 있었는데, 전기차 용은 기존 흑연 음극재를 사용하고 로봇·UAM용은 무음극 타입으로 설계하는 방식이다. LGES는 로봇 존에서 LG전자의 홈 로봇 'LG 클로이드(CLOiD)'와 베어로보틱스의 자율주행 서빙 로봇 'Carti100'을 전시했으며, 두 제품 모두 고출력·고에너지 원통형 배터리를 탑재해 장시간 운용이 가능한 구성으로 소개됐다. 혈액 수송용 드론, 항공·큐브위성도 함께 전시되며 드론과 UAM, 위성 등 새로운 산업 영역에서 배터리 수요가 확대되고 있음을 보여줬다. 한편, 현재 로봇에 원통형 배터리가 주로 쓰이는 이유는 표준화된 생산 공정에서 나오는 가격 경쟁력, 개별 셀 단위 관리로 인한 팩 수준의 안전 설계 용이성, 그리고 고출력 원통형 셀이 로봇의 구동 토크와 급가속 요건을 충족하기에 충분하기 때문이다. 다만, 전고체 배터리가 상용화되면 에너지밀도 향상과 안전성 우위를 바탕으로 파우치형이 로봇 응용처에서 원통형을 점진적으로 대체할 수 있다.

SK온은 하이니켈 삼원계 배터리를 탑재한 현대위아 물류 자율이동로봇(AMR)을 부스에 전시하며 배터리의 로봇 현장 적용 실적을 강조했다. 해당 AMR은 현대자동차그룹 메타플랜트 아메리카(HMGMA) 등 실제 생산 현장에 투입돼 물류 자동화에 활용되고 있다. SK온은 황화물계 전고체 배터리를 개발 중이며 2029년 양산을 목표로 하고 있고, 지난해 파일럿 플랜트를 준공해 연구개발을 진행하고 있으며, 배터리 수명을 기존 대비 약 3배 수준으로 향상시키는 데 성공했다고 언급했다.

도표 21. LG에너지솔루션 홈 로봇 클로이드



자료: 언론보도

도표 22. SK온 배터리 탑재한 현대위아 AMR



자료: 하나증권

2) 소재: 전고체 공급망 구축 시작 단계

황화물계 전고체 배터리 밸류체인 구축 중인 국내 배터리 기업들

전고체 기업 팩토리얼 에너지의 시유 황(Siyu Huang) CEO는 컨퍼런스 발표를 통해, “전고체 배터리가 아직 제조원가 때문에 일반 전기차에 바로 탑재되기는 어렵지만, 가격 저항이 낮고 고성능이 필수적인 드론·로봇·휴머노이드 시장에 먼저 안착할 것”이라고 전망했다. 특히 군용 드론의 경우 배터리 경량화로 비행거리를 두 배로 늘릴 수 있으며 이는 전장의 판도 자체를 바꿀 수 있는 수준의 성능 개선이라고 강조했다. 배터리 석학 셸리 멩(Ying Shirley Meng) 시카고대 교수도 같은 방향을 지목했다. 그는 “새로운 전고체 배터리가 기존 배터리를 단순히 대체하는 것이 아니라 로봇, 휴머노이드, 드론 등 새로운 시장의 가능성을 개척해야 한다”고 강조하며, 기존 액체 전해질로는 부피 팽창 제어가 어려웠던 리튬황 양극재와 실리콘 음극재의 조합을 전고체 고유의 강점으로 활용해야 한다고 주장했다. **“액체 전해질로 할 수 있는 일만 한다면 굳이 비싼 전고체 배터리를 만들 이유가 없다”는 언급은 향후 고체전해질 체제에서 양극과 음극에 많은 변화가 있음을 상징하는 코멘트였다.**

이수스페셜티케미컬은 전고체 배터리의 소재 공급망에서 가장 상위에 위치하는 원재료 황화리튬(Li₂S) 생산에 집중하는 모습이다. 현재 852억원을 투자해 울산 온산공장 내 황화리튬 상업 생산 설비를 구축 중이다. 연간 수백 톤 규모의 생산능력을 확보하는 것을 목표로, 연속식 공법과 자동화 설비를 적용해 대량 생산 체계를 구축하고 있으며, 초기 연산 150톤 규모로 시작해 최대 500톤까지 확장 가능하도록 설계됐다.

에코프로비엠 역시 황화물계 전해질에 집중하는 모습이다. 여러 고체 전해질 중 상업화에 가장 가까운 기술은 황화물계라는 전제하에 에코프로비엠은 2027년 황화물계 고체 전해질 양산을 목표로 하며, 이를 위해 지주사 에코프로가 황화수소를 생산하고 에코프로이노베이션이 이를 받아 합성하여 황화리튬을 생산한 후 에코프로비엠에게 공급해 이를 고체전해질로 생산한다는 계획을 제시했다. 에코프로비엠은 기존 하이니켈 양극재 위주의 매출 포트폴리오를 장기적으로 고체 전해질 등 새로운 프리미엄 제품군으로 확장하겠다는 모습을 보여 주고 있다.

도표 23. 에코프로그룹 황화수소-황화리튬-고체전해질 생산 밸류 체인



자료: 언론보도

3. 전기차, 정중동

1) 각형 중요성 증대 확인

삼성SDI, PrismStack 기반 각형
배터리 기술 경쟁력 강조

인터배터리 2026에서 전기차의 존재감은 과거보다 확실히 줄어들었음을 확인할 수 있었다. 과거 행사에서 최신 전기차가 다수 전면 배치됐던 것과 달리, 올해는 SK온이 제네시스 GV60 마그마 1대, LG에너지솔루션이 르노 세닉 1대를 전시했고, 삼성SDI는 전기차를 배치하지 않았다.

그러나 기업별로 EV 배터리 관련 기술개발은 지속되고 있었다. 이들의 연구 개발 방향은 크게 세 갈래다. 고성능 영역에서는 하이니켈·원통형, 대중화 영역에서는 미드니켈·LMR, 구조 혁신 영역에서는 각형·CTP·안전 기술 고도화다.

삼성SDI는 이번 전시에서 전기차 실차 대신 각형 배터리 기술 경쟁력을 전면에 내세웠다. 주용락 연구소장은 더 배터리 콘퍼런스에서 삼성SDI의 각형 배터리가 기술력에 비해 주목도가 낮다고 언급하며, 자사의 핵심 경쟁력으로 'PrismStack'을 강조했다. 이는 각형 셀 내부에서 전극과 분리막을 층층이 쌓는 적층형 구조를 뜻하며, 와인딩 대비 공간 활용도와 에너지 밀도 측면에서 장점이 있다는 것이 회사 측 설명이다. 삼성SDI는 각형 배터리 관련 특허를 약 1,200건 보유하고 있다고도 밝혔다. 각형은 구조적으로 캔 강성이 높고 팩 설계 측면에서 정렬이 용이해, 완성차 업체 입장에서는 안전성·패키징·생산 안정성 측면에서 매력적이다. 여기에 삼성SDI는 No TP(No Thermal Propagation) 기술을 통해 셀 이상 시 열이 인접 셀로 확산되는 것을 막는 안전 구조를 함께 강조하고 있다. 이처럼 삼성SDI가 특별히 이번 행사에서 각형 기술을 강조한데에는, 최근 자동차 기업들의 화재 사고 이슈로 인해 각형에 대한 주문량을 늘린데 기인한 것으로 풀이된다.

도표 24. 삼성SDI PrismStack



자료: 언론보도

LGES, EV용 배터리 제품 세분화
SK온, 프리미엄 EV용 배터리 강조

LG에너지솔루션은 보다 구체적으로 EV 시장 세분화에 집중하는 모습이다. 모빌리티 존에서 전기차용 배터리를 고성능(Premium)·표준(Standard)·보급형(Affordable)으로 나눠 전시했다. 고성능 영역에는 하이니켈 기반 ‘46시리즈’와 ‘2170 원통형 셀’을, 표준형에는 ‘파우치형 HV Mid-Ni 셀’과 ‘파우치형 LMR 셀’을, 보급형에는 ‘파우치형 LFP 셀’을 배치했다. 전시 차량인 르노 세닉은 LG에너지솔루션의 최초 자동차용 미드니켈 배터리 양산 모델로 소개됐고, LMR은 GM과 공동 개발 중이며 2028년 상용화 목표가 제시됐다. 이는 EV 시장이 한 가지 chemistry로 수렴하지 않고, 성능·원가·차급별로 다층화되고 있음을 보여준다. 특히 LG에너지솔루션의 전시는 EV 시장에서 하이니켈 일변도에서 벗어난 포트폴리오 분화가 본격화되고 있음을 시사한다. 고성능 스포츠카, SDV, 장거리 주행이 필요한 세그먼트에는 46시리즈와 2170 같은 고출력·고에너지밀도 원통형이 들어가고, 버스·중형 세단·대중차 영역에서는 미드니켈과 LMR이 비용 효율적인 대안으로 부상하는 구조다. 이는 **배터리 업체가 더 이상 최고 성능만 추구하는 경쟁이 아니라, 고객 세그먼트별 최적 chemistry를 맞추는 경쟁으로 이동하고 있음을 보여준다.**

SK온은 전기차 파트에서, 부스 중앙에 제네시스 GV60 마그마를 배치했고, 이 차량에는 SK온의 파우치형 하이니켈 NCM 배터리가 탑재됐다고 강조했다. 니켈 함량 88~90% 수준의 배터리 양산 역량을 강조했고, 고성능 EV에 적합한 NCM의 에너지 밀도 강점을 부각했다. 동시에 차세대 초급속 충전 기술, CTP 구조 등을 제시하면서, EV 시장이 위축된 구간에서도 프리미엄 EV 중심으로는 여전히 삼원계의 경쟁력이 유효하다는 점을 강조했다. 최근 중요성이 부각되는 각형(파우치 셀과 통합) 셀 기술도 선보였다.

도표 25. SK온 부스에 전시된 제네시스 GV60



자료: 언론보도

도표 26. LG에너지솔루션 부스에 전시된 르노 세닉



자료: 하나증권

도표 27. LG에너지솔루션 모빌리티 존



자료: 하나증권

EV 배터리 성능·원가 경쟁 핵심 요소 부각

2) 소재 및 장비: 하이니켈 고도화, 미드니켈 현실화, 실리콘 개발 지속

소재·장비 영역에서도 EV 관련 메시지는 사라지지 않았다. 이번 인터배터리에서 확인된 전기차 소재 방향성은 세 가지로 요약된다. 첫째, 하이니켈은 여전히 프리미엄 EV의 핵심 소재다. 둘째, 미드니켈-LMR은 대중화 구간의 현실적 대안으로 부상하고 있다. 셋째, 실리콘 음극재는 당장 대세는 아니지만 에너지 밀도 개선을 위한 핵심 옵션으로 조금씩 상용화되고 있다.

하이니켈의 경우, 이번 전시에서 과거처럼 전면 강조되지는 않았지만, 주요 기업들의 강조 강조 메시지는 여전했다. 포스코퓨처엠은 자율주행 EV의 주행거리와 안정성을 높이기 위한 소재로 니켈 95% 이상 Ultra High-Ni 양극재를 전면내 내세웠다. 에코프로 역시 하이니켈 중심의 삼원계 라인업을 유지하면서, 전고체 소재까지 외연을 넓히는 구조를 제시했다. 이는 LFP의 중요성이 부각되고 있다 하더라도, 프리미엄 EV·고성능 EV·자율주행 EV에서는 여전히 높은 에너지 밀도를 제공하는 삼원계, 그중에서도 하이니켈이 핵심 축이라는 인식이 유지되고 있음을 보여준다.

미드니켈은 이번 인터배터리를 통해 시장 내 중요성이 더욱 부각되고 있음을 보여주었다. LG에너지솔루션이 세닉에 적용된 미드니켈 배터리를 전면내 내세운 것이 상징적이다. 미드니켈은 하이니켈 대비 원가 부담을 낮추면서도 기존 NCM 수준의 성능을 일정 부분 유지할 수 있다는 점에서, 중형 세단·SUV·버스 등 성능과 원가의 균형이 중요한 시장에 적합하다. 이외에 LMR까지 상용화되면 망간 비중을 높여 원가를 더 낮출 수 있다. 이번 전시에서 LMR이 2028년 상용화 목표로 제시되었는데, EV 시장의 다음 경쟁 포인트가 고에너지 밀도에서 합리적인 비용으로 이동하고 있음을 시사한다.

실리콘 음극재는 이번 인터배터리의 주인공은 아니었지만, 중장기 EV 경쟁력 측면에서는 계속 추적이 필요한 기술 영역이다. 포스코퓨처엠은 공식 전시 자료에서 전고체용 양극재와 함께 실리콘 음극재 개발 현황과 로드맵을 소개하였다. 실리콘 음극재는 흑연 대비 높은 이론 용량을 바탕으로 셀 에너지 밀도 개선 여력이 크기 때문에, 향후 전기차에서 같은 부피 내 주행거리 개선 또는 배터리 소형화에 중요한 역할을 할 수 있다. 해당 시장 내 선두주자인 대주전자재료 역시 관련 제품의 상용화가 점진적으로 진행되고 있음을 재확인시켜주었다.

장비·공정 측면에서는 셀 구조 혁신과 제조 혁신이 강조됐다. 삼성SDI의 PrismStack, LG에너지솔루션의 46시리즈 및 CAS(Cell Array Structure), SK온의 CTP와 초급속 충전 플랫폼은 모두 같은 방향을 가리킨다. 단순히 케미스트리만 바꾸는 것이 아니라, 셀 구조·열관리·팩 통합·급속충전 공정 최적화를 통해 성능과 원가를 함께 잡으려는 것이다. EV 시장이 침체될수록 완성차와 셀업체는 더 엄격하게 원가와 성능을 따지게 되면서, 이러한 공정/구조 기술의 중요성은 오히려 커지고 있음을 확인할 수 있었다.

4. 배터리 Up-stream 탈중국 공급망 구축 지속

인터배터리 2026의 또 다른 메시지: 배터리는 공급망 구축 중요성 재확인

배터리 업스트림 공급망 탈중국화 흐름

인터배터리 2026의 전면 테마는 AI 데이터센터, ESS, 로봇, 전고체였지만, 그 이면에서 중요하게 읽어야 하는 흐름은 업스트림 공급망의 탈중국화가 멈추지 않고 있다는 점이다. 단순히 셀 및 소재 성능 경쟁을 넘어 소재·광물·재활용·전력 인프라까지 밸류체인에 걸쳐 “누가 더 안정적인 비중국 공급망을 갖고 있느냐” 경쟁이 병행되고 있음을 확인할 수 있었다. 특히 최근 공급망 재편은 단순한 원가 이슈가 아니라 정책과 지정학의 문제다. 미국 OBB, 유럽의 IAA, 중국의 핵심 광물·중간재 장악, 동남아 중심의 니켈 공급망 재편 등이 동시에 진행되면서, 한국 배터리 생태계 입장에서는 업스트림 확보가 곧 기업 경쟁력이 되었다.

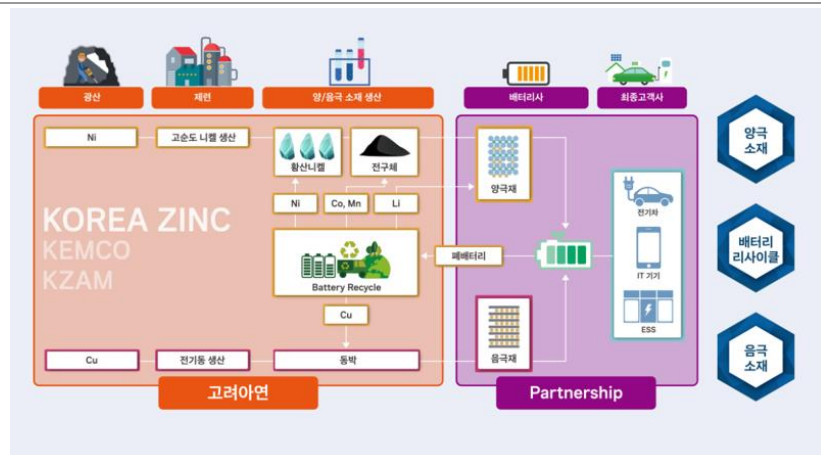
고려아연: 제련 기반 업스트림 구축

고려아연, 전략광물 기반 배터리 소재 밸류체인 구축 강조

이번 인터배터리에서 고려아연은 자신들이 단순 금속 제련업체가 아닌, “전략 광물 공급망 보유 기업”이라는 점을 강조했다. 전시 부스를 Value Chain Diorama, Copper Foil, Nickel Sulfate & Precursors, Strategic Minerals, U.S. Integrated Smelter 등 8개 존으로 구성했고, 배터리 소재 사업이 니켈황산-전구체-동박으로 이어지는 순환 체인이라는 점을 전면 에 내세웠다. 특히 자회사 кем코(KEMCO)의 니켈황산과 한국전구체주식회사(KPC)의 전구체를 함께 보여주며, 제련 기반 원료 조달에서 전구체까지 연결되는 밸류체인을 시각적으로 강조했다.

현재 한국 배터리 산업의 가장 취약한 고리 중 하나는 중국 의존도가 높은 전구체인데, 고려아연은 제련 역량을 기반으로 니켈황산과 전구체를 동시에 가져가며, 이 병목 구간을 겨냥하고 있다. 실제로 회사와 кем코가 보유한 NCM 전구체 기술은 한국 정부로부터 국가핵심 기술로 분류된 바 있다. 이는 단순 기술 보호를 넘어, 한국 내 전구체 국산화와 공급망 자립이 전략 산업 차원에서 중요하다는 점을 보여준다. 또 하나의 포인트는 고려아연이 리사이클 기반 원료 확보를 병행하고 있다는 점이다. 전시에서는 100% 재활용 전기동을 활용한 동박도 함께 소개됐다. 이는 업스트림 탈중국이 꼭 신규 광산 투자만을 뜻하는 것이 아니라, 제련·회수·재활용을 통해 국내에서 다시 금속을 순환시키는 구조까지 포함한다는 점을 시사한다.

도표 28. 고려아연 광물 소재 밸류체인



자료: 고려아연

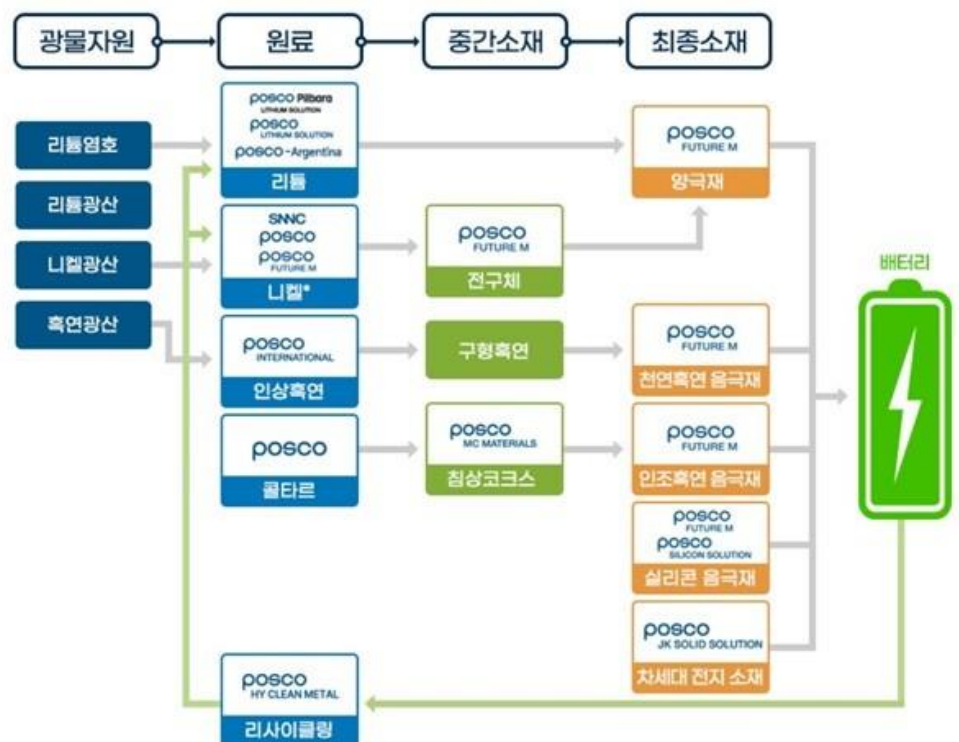
포스코그룹: 광산에서 리사이클링까지 가장 넓은 밸류체인 확보

포스코그룹, 리튬 확보부터
양-음극재-재활용까지
엔드투엔드 배터리 공급망 구축

포스코그룹은 이번 인터배터리에서 가장 정석적인 의미의 ‘엔드투엔드 공급망’을 보여줬다. 포스코퓨처엠 전시의 Sustainable Supply Chain Zone은 리튬 염수와 광산 확보, 양-음극재 생산, 리사이클링까지 이어지는 그룹 차원의 공급망 전략을 소개하는 데 초점을 맞췄다. 공개된 내용에 따르면 포스코그룹은 아르헨티나 리튬 염수, 호주 리튬 광산, 아프리카 흑연 광산 등을 통해 핵심 원료를 확보하고 있으며, 저농도 염수에서도 경제적으로 리튬을 추출할 수 있는 DLE(Direct Lithium Extraction) 기술도 함께 제시했다.

포스코의 강점은 단순히 광산 자산을 갖고 있다는 데 그치지 않는다. 그룹 차원에서 확보한 리튬을 포스코퓨처엠의 양극재 생산과 연결하고, 음극재 쪽에서는 국내 구형흑연 공장까지 추진하면서 원료-소재-재활용의 내적 연결성을 높이고 있다는 점이 중요하다. 올해 전시에서 포스코퓨처엠이 “Battery of Things”를 내세우며 EV, ESS, 로봇을 아우르는 소재 포트폴리오를 보여준 배경에도 결국 이 공급망 전략이 있기 때문에 가능했다. 하이니켈, LFP, 차세대 소재를 모두 논할 수 있는 이유는 upstream이 받쳐주기 때문이다. 단순히 중국산 원료를 다른 나라에서 사오는 수준이 아니라, 리튬 추출 기술과 소재 내재화를 함께 가져가고 있다는 점에서 특히 의미가 있다.

도표 29. 포스코 배터리 소재 밸류체인



* 니켈 : 포스코홀딩스 호주 니켈 전문 회사 레이브소프 지분 인수, 인도네시아 니켈 투자

자료: POSCO

에코프로: 인도네시아 니켈과 유럽 현지화로 확장하는 삼원계 공급망

에코프로, 니켈 제련·유럽
현지 생산·리사이클링 아우르는
배터리 공급망 구축

에코프로는 이번 인터배터리에서 “Perfect Chain, Connected Value”를 주제로 전시를 구성했다. 특히 지난 4년간 약 8,000억 원을 투자해 니켈 제련 사업에 진출했다는 점을 강조했다. 또 헝가리 양극재 공장을 통해 유럽 역내 규제에 대응할 수 있는 국내 유일의 배터리 소재사라고 강조했다. 헝가리 공장에는 에코프로비엠의 양극재뿐만 아니라 에코프로이노베이션의 수산화리튬이 공장이 함께 위치해 있어 리튬 역내 생산까지 가능하다는 점이 주목할 만한 부분이다. 동시에 에코프로는 리사이클링까지 포함한 배터리 생애주기 관리 체계도 함께 제시했다.

LX: 한국 업스트림 다변화의 숨은 축

LX그룹, 니켈·리튬 광산
오프테이크 기반 배터리
업스트림 공급망 확대 추진

LX는 인터배터리에서 일반적으로 포스코나 에코프로처럼 전면에 부각되는 기업은 아니었다. 그러나 한국 배터리 업스트림 탈중국화라는 큰 그림에서 굉장히 중요한 역할을 담당해 갈 것으로 판단한다. 현재 LX그룹은 해외 니켈 광산 및 제련소, 리튬 광산, 리튬 컨버전 플랜트, 황산니켈 원료 공급, 폐배터리 리사이클링까지 이어지는 배터리 밸류체인 확대를 시도하고 있으며, 특히 인도네시아 솔라웨시의 AKP 니켈 광산에서 60% 오프테이크 권리를 확보했고, 니켈 광산-제련을 기반으로 중간재 공급까지 연결하는 로드맵을 이번 행사에서 제시했다.

LX의 역할은 상사형 자원개발·오프테이크·트레이딩 네트워크를 통해 업스트림을 뒷받침하는데 있다. 한국이 현재 니켈 공급망 다변화를 위해 동남아, 특히 필리핀·인도네시아와의 연계를 강화하고 있는 상황에서, LX인터내셔널 같은 플레이어의 가치는 지속 증대될 것으로 판단한다.

도표 30. 에코프로 헝가리 거점 소개 영상



자료: 언론보도

도표 31. 에코프로 글로벌 생산 거점



자료: 언론보도

LX MnM: 적격 니켈 및 전구체 강조

LS MnM, 인니 니켈-전구체
생산 기반 Non-PFE 광물
공급망 부각

배터리 광물 관련해 가장 눈에 띄는 기업은 LS MnM이었다. IRA의 FEOC에서 시작되어 OBB의 PFE 조항으로 이어진 미국의 광물 공급망 탈중국 정책으로 인해 Non-PFE 광물(금지외국 집단과 무관한 광물)의 중요성이 높아지며 중국 기업과의 합작 지분투자 없이 단독 공장에서 생산하는 니켈 및 전구체의 필요성이 증대되고 있다.

LS MnM은 인도네시아 제련소에서 2027년 하반기부터 니켈 양산에 돌입하며, 전구체는 2026년 1단계 양산 후 2027년부터 2단계 본격 양산에 돌입한다. 2028년부터 크게 강화되는 PFE 적격요건으로 인해 LS MnM이 보유한 non-China 광물 공급망의 가치가 부각될 것으로 판단한다.

도표 32. LS MnM의 적격 전구체 개념 - PFE 니켈 관련 영상



자료: LS MnM

도표 33. LS MnM의 적격 전구체 개념 - PFE 니켈 설명 영상



자료: LS MnM

도표 34. LS MnM의 적격 전구체 개념 - Non PFE 요건 충족



자료: LS MnM

도표 35. LS MnM의 적격 전구체 개념 - Non PFE 요건 관련 영상

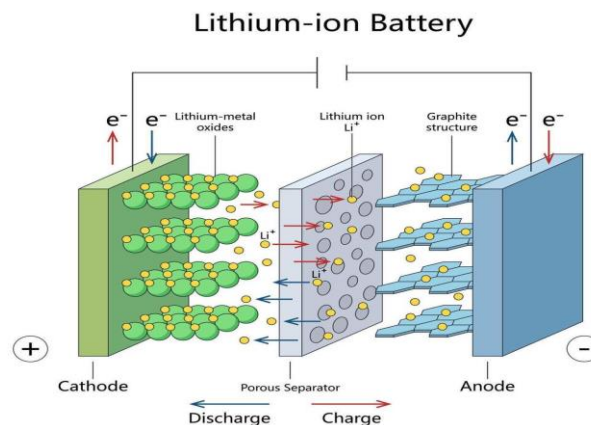


자료: LS MnM

Appendix. 리튬이온전지의 기본 원리와 연구 방향

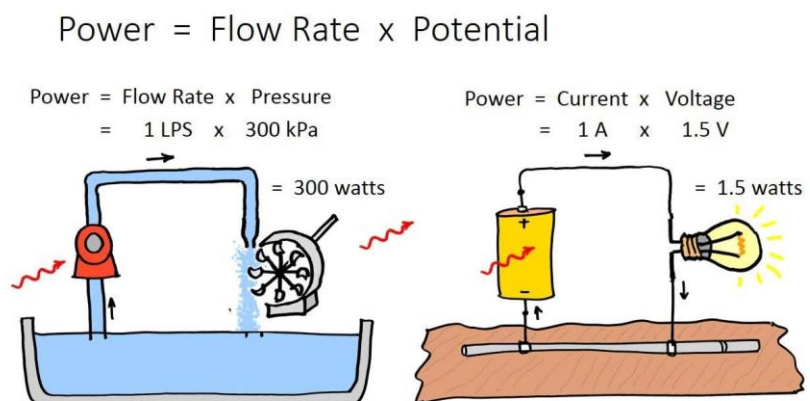
전지 연구의 목표는 에너지를 극대화하는 것이다. 에너지는 전압(V) x 전하량(용량, Ah)의 함수다. 따라서 전지 연구는 전압을 높이고 전하량을 늘리는 방향으로 전개된다. 리튬이온 전지는 양극과 음극 사이에서 리튬 이온이 이동하며 전기에너지를 저장하고 방출하는 장치다. 전지가 전기를 만들어내는 근본적인 힘은 두 전극 소재 사이의 '전위 차이', 즉 전압에서 비롯된다. 마치 물이 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐르는 것과 유사한 개념이다. 양극과 음극의 전위 차이는 댐의 낙차와 같다. 낙차가 클수록 물레방아를 더 강하게 돌릴 수 있듯이 전지도 전위차가 클수록 전압이 높아진다. 오늘날 가장 널리 쓰이는 전지의 기본 개념이 리튬이온전지인 것도, 리튬이 모든 금속 중 가장 낮은 *표준환원전위(-3.04V)를 가지기 때문이다. 납축전지에 쓰이는 납(Pb)은 -0.13V, 니켈수소전지의 니켈(Ni)은 -0.26V, 알카라인 전지의 아연(Zn)은 -0.76V, 그나마 낮은 편인 나트륨(Na)조차 -2.71V에 불과한 것과 비교하면, 리튬의 -3.04V는 타 소재 대비 전위가 월등히 낮아 가장 큰 전위차, 즉 댐의 낙차를 가장 크게 만들어 낼 수 있다. 이 압도적인 전위 차이가 높은 전압과 높은 에너지밀도로 직결되기 때문에, 같은 무게로 훨씬 많은 에너지를 저장할 수 있는 리튬이온전지가 현대 에너지저장 시장의 표준으로 자리잡게 된 것이다.

도표 36. 리튬 이온 배터리의 작동 원리



자료: Vecteezy

도표 37. 전위차



자료: Vecteezy

이해를 돕기 위해 표준환원전위의 개념을 설명할 필요가 있다. 어떤 물질이 전자를 얼마나 잘 받으려 하는지(환원되려는 경향)를 절대적인 수치로 측정하는 것은 물리적으로 불가능하다. 전위는 반드시 두 지점 사이의 차이로만 측정할 수 있기 때문이다. 온도계로 온도를 재려면 기준점(0°C)이 필요하듯, 전위를 측정하려면 기준이 되는 전극이 필요하다.

그래서 국제적으로 표준수소전극(SHE, Standard Hydrogen Electrode)을 0V로 약속하고, 측정하려는 물질을 SHE와 전기화학 전지로 연결한 뒤 그 전압 차이를 측정한 값이 바로 표준환원전위다. 예를 들어 리튬의 경우, 리튬 전극과 SHE를 연결했을 때 -3.04V의 전압 차이가 측정되었고, 이것이 리튬의 표준환원전위 -3.04V vs. SHE가 된 것이다. 결국 표준환원전위는 "SHE를 0V로 놓았을 때, 해당 물질의 상대적인 전위가 얼마인가"를 나타내는 수치로, 표준수소전극을 기준으로 한 상대적인 전압 차이를 정량화한 값이다.

한편, 전지에 저장되는 에너지의 양은 상기한 전압(낙차의 높이)과 전하량(흘려보낼 수 있는 물의 양)을 곱한 값으로 결정된다. 수력 댐에 물이 많을수록, 그리고 낙차가 클수록 더 많은 전기를 만들 수 있는 것처럼, 전지도 전압이 높고 저장할 수 있는 전하량이 많을수록 더 많은 에너지를 담을 수 있다. 전하량은 전극 소재가 리튬 이온을 얼마나 많이 품을 수 있는지에 달려 있는데, 이는 댐의 저수 용량과 같다. 현재 주목받는 실리콘 음극은 기존 흑연 음극보다 약 10배 더 많은 리튬 이온을 저장할 수 있어, 댐의 저수 용량이 10배 커지는 것과 같은 효과를 낸다.

상기한 개념을 종합하여 단위 무게당 얼마나 많은 에너지를 담을 수 있는지를 나타내는 지표가 에너지밀도(Wh/kg)이며, 이는 전지 성능을 평가하는 가장 핵심적인 기준이다. 에너지밀도를 높이는 방법은 크게 두 가지로, 낙차(전압)를 키우거나 저수 용량(전하량)을 늘리는 것이다. 전압을 높이려면 전위 차이가 더 큰 소재 조합을 선택하면 되고, 전하량을 늘리려면 리튬 이온을 더 많이 품을 수 있는 소재를 개발하면 된다. 결국 같은 무게의 전지라도 어떤 소재를 쓰느냐에 따라 담을 수 있는 에너지의 양이 크게 달라진다.

문제는 전압과 전하량을 단순히 높인다고 해서 좋은 전지가 되는 것이 아니라는 점이다. 댐의 낙차를 지나치게 키우면 수압을 견디지 못해 댐 벽에 균열이 생기듯, 전압을 무리하게 높이면 전해질이 분해되고 전극 표면에 부반응이 생긴다. 저수 용량을 크게 늘리면 충·방전 때마다 전극 소재가 팽창과 수축을 반복하면서 마치 스펀지가 반복 사용으로 형태를 잃듯 전극 구조가 무너진다. 이렇게 되면 충·방전을 거듭할수록 실제로 쓸 수 있는 에너지가 점점 줄어들어 수명이 짧아지고, 심한 경우 열이 견잡을 수 없이 올라가는 열폭주로 이어져 안전 문제가 발생하게 된다.

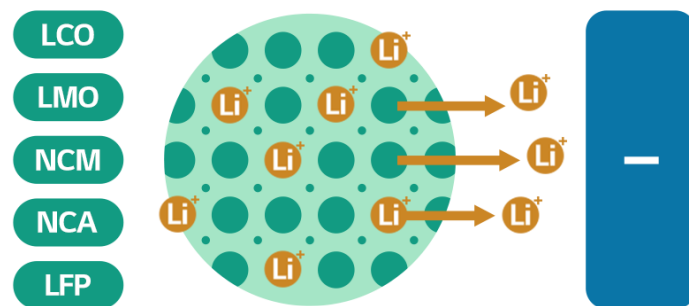
따라서 현재 리튬이온전지 연구의 핵심 목표는 세 가지로 요약된다. 1) 소재 간 전위 차이를 최대한 활용해 에너지밀도를 높이는 것, 2) 충·방전을 반복해도 전극 구조와 용량이 유지되도록 수명 특성을 개선하는 것, 3) 고전압·고용량 환경에서도 부반응과 열적 위험을 억제하여 안전성을 확보하는 것이다. 높은 낙차, 큰 저수 용량, 그리고 절대 무너지지 않는 댐을 동시에 만드는 것이 현재 배터리 연구의 핵심과제이다. 다음 장에서는 상기한 세가지 연구 개발의 방향이 리튬이온전지의 각 구성요소에서 어떻게 이뤄지고 있는지 다루었다

1. 리튬이온전지의 구성요소

1) 양극(Cathode)

리튬이온전지에서 양극은 배터리의 용량과 전압을 결정하는 핵심 영역이다. 앞서 설명했듯 전지는 양극과 음극 사이의 전위 차이로 전기를 만들어내는데, 이때 리튬 이온이 양극에서 나왔다가 음극으로 들어가고(충전), 다시 양극으로 돌아오는(방전) 과정에서 전자의 흐름, 즉 전기가 생성된다. 리튬은 반응성이 매우 강한 원소여서 순수한 금속 상태로는 공기 중 수분이나 산소와 즉각 반응해 폭발에 가까운 불안정성을 보인다. 따라서 실제 양극에는 리튬을 산소와 결합시킨 리튬산화물, 즉 리튬과 전이금속(니켈·코발트·망간·철 등)이 함께 구성된 복합 산화물이 사용된다. 이처럼 전극 반응에 직접 참여하는 이 소재를 활물질(Active Material)이라 부르며, 어떤 활물질을 쓰느냐가 배터리의 에너지밀도, 수명, 안전성, 원가를 결정하는 핵심 변수가 된다.

도표 38. 양극 활물질



자료: BatteryInside

(1) 활물질 비교

리튬이온은 충전 시에 양극 활물질에서 빠져나와 음극으로 이동하고, 방전 시에는 다시 돌아와 제자리에 끼어든다. 댐에 비유하면 양극활 물질의 내부의 공간이 저수지이고, 리튬이온이 저수지를 채웠다 비웠다를 반복하는 셈이다. 이 구조가 얼마나 안정적으로 리튬이온을 받아들이고 내보낼 수 있는지가 곧 배터리의 수명과 안전성을 결정한다.

현재 시장에서 사용되거나 상용화를 앞둔 주요 양극 활물질은 크게 네 가지로 구분된다. 첫 번째로 NCM (니켈·코발트·망간 산화물, LiNiCoMnO_2)은 현재 전기차 배터리 시장의 주류 소재다. 니켈(N), 코발트(C), 망간(M)의 배합 비율에 따라 NCM523, NCM622, NCM811 등으로 세분화되며, 니켈 함량이 높을수록 용량이 커진다. 공칭 전압은 약 3.6~3.7V이며, 작동 범위는 3.0~4.2V다. 용량(전하량)은 145~220mAh/g 수준이다. 니켈이 용량을, 망간이 구조 안정성을, 코발트가 전도성과 출력을 담당하는 역할 분담 구조다. 전기차, 전동공구, ESS 등 고에너지밀도가 요구되는 전 분야에 폭넓게 적용되며 현재 글로벌 전기차 배터리 시장에서 가장 높은 점유율을 차지하는 소재다.

NCA (니켈·코발트·알루미늄 산화물, LiNiCoAlO_2)는 망간 대신 알루미늄을 사용해 구조 안정성을 확보한 소재다. NCA는 NCM과 마찬가지로 니켈 기반의 고에너지밀도와 높은 출력 특성을 공유하며, 주로 고성능 전기차에 사용된다. 공칭 전압은 NCM과 유사한 약 3.6V이고, 용량(전하량) 역시 180~220mAh/g 수준으로 비슷하나, 니켈 함량이 특히 높은 고니켈 NCA는 셀 수준에서 NCM을 상회하는 에너지밀도를 구현하기도 한다. 다만 알루미늄이 망간보다 열안정성 확보에 덜 유리해 안전 관리가 더 까다롭고, 제조 공정도 복잡한 편이다. 테슬라가 오랜 기간 NCA를 채택해온 것으로 잘 알려져 있다.

LFP (리튬인산철, LiFePO_4)는 니켈·코발트를 전혀 사용하지 않고 철과 인산염으로 구성된 소재로, 올리빈(Olivine) 구조를 가진다. 층상구조가 아닌 격자 구조 덕분에 충·방전 시 구조 변화가 거의 없어 안정성이 탁월하다. 공칭 전압은 약 3.2V로 NCM 대비 낮고, 용량(전하량)은 145~170mAh/g 수준이다. 그러나 사이클 수명은 3,000~5,000회 이상으로 매우 길고, 열폭주 위험이 낮아 안전성 면에서 가장 우수한 케미스트리로 평가받는다. 원자재 가격도 저렴해 중국 전기차와 ESS(에너지저장장치) 시장에서 압도적인 점유율을 보이며, 최근에는 셀투팩(Cell-to-Pack) 기술과 결합해 팩 수준의 에너지밀도 격차를 빠르게 좁히고 있다.

LMR (리튬망간리치, Lithium Manganese-Rich)은 현재 상용화 직전 단계에 있는 차세대 소재다. 리튬과 망간을 기존 NCM보다 훨씬 높은 비율로 함유한 복합 층상구조를 가지며, 양이온(전이금속)과 음이온(산소) 모두가 전기화학 반응에 참여하는 독특한 메커니즘으로 높은 용량을 구현한다. 이론 용량은 200 mAh/g 이상으로, LFP 대비 높고 기존 NCM과 유사한 수준이다. 코발트를 거의 사용하지 않는 설계로 원가 경쟁력도 뛰어나다. 그러나 사이클 반복 시 전압이 3.7V에서 3.0V 이하로 지속 하락하는 전압 감쇠(Voltage Fade) 현상이 100~200사이클 이후부터 나타나는 것이 상용화의 핵심 걸림돌로 꼽히고 있다.

(2) 리튬이온 확산 경로 비교

배터리 성능을 결정하는 요소는 크게 두 가지다. 얼마나 많은 에너지를 담을 수 있는가(에너지밀도)와 그 에너지를 얼마나 빠르게 넣고 뺄 수 있는가(출력·충전속도)다. 앞서 설명한 전압과 용량이 전자를 결정한다면, 후자를 결정하는 핵심 변수가 바로 리튬이온이 양극 소재 안에서 얼마나 빠르고 원활하게 이동할 수 있는가, 즉 리튬이온 확산 경로다.

충전이란 결국 리튬이온이 양극 활물질 결정 구조 속으로 빠르게 들어가는 과정이고, 방전은 그 반대다. 아무리 용량이 크고 전압이 높은 소재라도 리튬이온이 드나드는 통로가 좁거나 막혀 있으면, 마치 아무리 큰 저수지라도 수문이 작으면 물을 빨리 흘려보낼 수 없는 것처럼 빠른 충·방전이 불가능하다. 급속 충전 성능, 순간 출력, 저온 특성이 모두 이 확산 경로의 구조적 특성에 달려 있으며, 이것이 같은 리튬이온전지라도 양극 소재에 따라 충전 속도와 출력 특성이 크게 달라지는 근본 이유다. 나아가 확산 경로가 얼마나 반복적으로 안정되게 유지되느냐가 수명 특성에도 직결되기 때문에, 소재 연구자들이 결정 구조를 분석할 때 확산 경로를 가장 먼저 들여다보는 것은 당연한 순서다.

층상구조는 전이금속-산소 층이 마치 아파트 층처럼 일정한 간격으로 반복해서 쌓여 있고, 리튬이온은 그 층과 층 사이의 공간, 즉 각 층의 복도에 자리 잡고 있다. 충·방전 시 리튬이온은 이 복도를 따라 수평으로 자유롭게 이동한다. 복도 안에서는 어느 방향으로든 움직일 수 있으니 2차원 평면 이동이 가능한 구조다. 그러나 위아래 층으로의 이동, 즉 전이금속-산소 결합층을 수직으로 관통하는 것은 불가능하다. 아파트에서 천장을 뚫고 위층 복도로 올라갈 수 없는 것과 같다. 다행히 복도 자체가 넓고 이동 장벽이 낮아 수평 방향으로 빠른 확산이 가능하다. 다만 고니켈(High-Ni) 소재처럼 충·방전이 반복될수록 층간 거리가 불균일하게 변하면 복도 폭이 들쭉날쭉해지고, 리튬이온의 이동이 점점 불안정해지면서 수명이 단축된다.

올리빈구조에서는 인산염(PO_4) 사면체가 3차원으로 촘촘하게 맞물려 있어 공간 대부분이 막혀 있다. 리튬이온이 이동할 수 있는 통로는 오직 b축 방향으로 뚫린 하나의 일직선 터널뿐이다. 아파트 비유를 이어가면, 복도도 없고 계단도 없이 오직 하나의 일직선 터널만 있는 구조다. 1차원 이동만 가능하다.

이 구조의 치명적 약점은 터널 중간에 불순물이나 결함이 하나라도 생기면 그 터널 전체가 막혀버린다는 점이다. 고속도로 한 차선뿐인 도로에서 사고 차량 한 대가 길을 막으면 뒤에 아무리 많은 차가 있어도 전혀 앞으로 나아가지 못하는 것과 같다. 이것이 LFP가 구조적으로 확산 속도에서 불리한 근본 이유다.

그런데 실제 상용 LFP는 빠른 충전이 충분히 가능하다. 입자 크기를 수십~수백 나노미터 수준으로 극소화해 터널의 실제 길이를 아주 짧게 만들고, 탄소 코팅으로 전자 전도성을 보완했기 때문이다. 1차선 도로라도 거리 자체가 100m밖에 안 된다면 차가 금방 통과할 수 있는 것과 같은 원리다. LFP의 빠른 충전은 소재 자체의 구조적 장점이 아니라 나노화와 코팅이라는 공정 기술로 단점을 만회한 결과라는 점을 이해하는 것이 중요하다.

스피넬구조에서 리튬이온은 x, y, z 세 방향 모두로 이동할 수 있는 3차원 통로를 가진다. 아파트로 치면 복도도 있고, 계단도 있고, 엘리베이터도 있는 완전한 입체 이동이 가능한 구조다. 확산 자유도가 가장 높아 순간적으로 대전류를 흘리는 고출력 상황에서 구조적으로 가장 유리하다. 그러나, 3차원 통로를 유지하려면 구조적 제약이 따른다. 리튬이온이 들어올 수 있는 자리가 상대적으로 제한되어 있어 용량이 낮고, 충·방전이 반복되면 망간이 전해질에 녹아나오는 문제(망간 용출)가 생겨 수명이 짧아진다는 단점이 있다. 이동 통로는 가장 많지만 저수지가 작고 구조가 오래 버티지 못하는 셈이다.

결국 세 구조는 서로 다른 트레이드오프 관계를 가진다. 층상구조는 넓은 복도 덕분에 에너지밀도와 확산 속도의 균형이 좋지만 구조 안정성이 과제이고, 올리빈구조는 단일 터널의 한계를 나노 공정으로 극복해 안전성과 수명에서 독보적이며, 스피넬구조는 3차원 확산으로 출력 특성이 우수하지만 에너지밀도와 수명에서 한계를 보인다. 차세대 소재 연구의 방향은 결국 이 세 구조의 장점을 하나로 통합하거나, 각 구조의 근본적 한계를 소재 설계와 공정 기술로 극복하는 것에 맞춰져 있다.

도표 39. 양극재 구조 비교



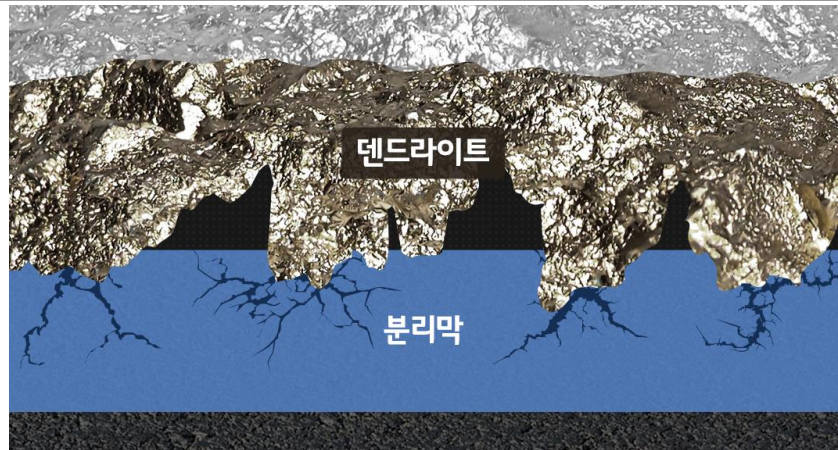
자료: LG에너지솔루션

2) 음극(Anode): 리튬이온을 받아내는 그릇

리튬이온전지에서 음극은 양극으로부터 나온 리튬이온을 받아 저장했다가 다시 돌려보내는 역할을 한다. 충전 시에는 양극에서 빠져나온 리튬이온이 전해질을 통해 음극으로 이동해 음극 소재 안으로 흡수되고, 이와 동시에 전자는 외부 회로를 통해 흘러 전류가 만들어진다. 방전 시에는 반대로 음극에 저장된 리튬이온이 다시 양극으로 돌아가고, 전자가 다시 외부 회로를 통해 흐르면서 전자기기를 작동시킨다. 이처럼 리튬이온을 받아들이고 내보내는 과정이 반복적인 충·방전 과정에서 손실 없이 일어나야 하는데, 이를 가역적(Reversible) 흡수·방출이라고 표현한다. 가역성이 높을수록 충·방전을 반복해도 용량 손실이 적고 수명이 길어진다. 그렇다면 리튬메탈, 흑연 등이 음극재로 활용된 이유는 무엇일까? 이를 이해하려면 간단히 배터리 개발의 역사를 되짚어 봐야 한다.

앞서 양극 부분에서 언급한 것처럼 배터리 전극 소재 연구는 표준수소전극(SHE) 기준의 표준환원전위에서 출발했다. 이 기준에서 리튬은 -3.04V 로 모든 금속 중 가장 낮은 값을 가진다. 표준환원전위가 낮다는 것은 환원되려는 경향이 약하고 반대로 산화되려는, 즉 전자를 내어놓으려는 경향이 강하다는 의미다. 이 성질을 그대로 활용하면 양극과의 전위차를 극대화할 수 있어, 초기 연구자들은 리튬 금속을 음극으로 직접 사용하는 리튬 금속 전지를 개발했다. 그러나 리튬 금속 음극은 충·방전 반복 과정에서 표면에 덴드라이트가 성장하는 구조적 불안정성을 드러냈다. 리튬이 음극 표면에 균일하게 석출되지 않고 특정 지점에 집중적으로 쌓이면서 수지상 결정이 자라고, 이것이 분리막을 관통해 내부 단락과 열폭주로 이어지는 안전 문제가 상용화의 근본적 걸림돌이 되었다.

도표 40. 덴드라이트



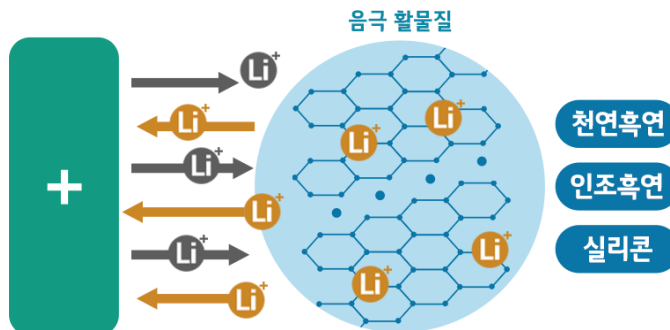
자료: BatteryInside

이 문제를 해결하기 위한 핵심 전략은 리튬 금속을 전극으로 직접 사용하지 않으면서도, 리튬 금속에 준하는 낮은 작동 전위를 구현할 수 있는 대체 음극 소재를 찾는 것이었다. 이때 전극 소재 평가의 기준점도 자연스럽게 SHE에서 Li/Li⁺로 전환되었다. 배터리 내부의 모든 전기화학 반응이 리튬을 중심으로 일어나는 만큼, 리튬메탈을 0V로 설정한 Li/Li⁺ 기준이 전극 소재의 작동 전위를 평가하는 데 훨씬 직관적이고 실용적이었기 때문이다.

이 기준에서 이상적인 음극 소재의 조건은 명확했다. 리튬 금속(0V vs. Li/Li⁺)에 최대한 근접한 낮은 작동 전위를 가지면서도, 리튬이온을 안전하고 가역적으로 저장·방출할 수 있는 구조적 안정성을 갖춰야 했다. 흑연이 바로 이 조건을 충족하는 소재였다. 흑연은 층상구조의 층간 공간에 리튬이온을 삽입·탈리하는 반응이 약 0.1~0.2V vs. Li/Li⁺에서 일어나, 리튬 금속의 0V에 매우 근접한 낮은 작동 전위를 구현한다. 동시에 리튬이온이 항상 이온 상태로 흑연 층간에 저장되기 때문에 금속 리튬의 석출이 일어나지 않아 덴드라이트 문제를 근본적으로 회피할 수 있었다.

결국 흑연 음극의 채택은 단순한 소재 교체가 아니라, 리튬 금속이 가진 탁월한 전기화학적 특성(낮은 전위)을 최대한 모사하되 금속 상태의 리튬이 초래하는 구조적 불안정성을 제거한 정교한 전기화학적 설계의 결과였다.

도표 41. 음극 활물질



자료: BatteryInside

잠시 양극 이야기를 다시 할 필요가 있다. 이러한 음극 사용 물질의 전환은 양극에도 큰 변화를 가져왔다. 흑연을 음극으로 채택하는 순간, 리튬 공급원이 사라지는 문제가 생기기 때문이다. 리튬 금속 전지에서는 음극 자체가 리튬 금속이었으니 리튬 공급원이 음극에 있었다. 그런데 음극을 흑연으로 바꾸면 흑연은 리튬이온을 저장하는 그릇일 뿐, 리튬을 자체적으로 공급하지 못한다. 빈 그릇인 셈이다. 따라서 리튬의 공급원을 반드시 양극 쪽에서 해결해야 했고, 이것이 양극재 개발 방향을 근본적으로 바꾼 결정적 계기가 된다. 이때 등장한 개념이 바로 리튬을 전이금속 산화물 구조 안에 미리 품고 있는 리튬 함유 전이금속 산화물, 즉 LiCoO_2 (LCO)다. 1980년 굿이너프(Goodenough) 교수가 LCO를 발견하고, 1991년 소니가 이를 양극으로, 흑연을 음극으로 채택한 리튬이온전지를 최초로 상용화한 것이 바로 이 흐름의 완성이다. 즉, 양극재 개발의 방향 전환은 다음과 같은 논리 흐름에서 나온 결과다. 리튬 금속 음극 채택 → 덴드라이트 문제 발생 → 흑연으로 음극 교체 → 음극에서 리튬 공급원 소멸 → 양극이 리튬 공급원을 담당해야 함 → 리튬을 구조 안에 품은 전이금속 산화물(LCO 등) 양극재 개발 → 리튬이온전지 탄생. 오늘날 우리가 당연하게 여기는 “양극에 리튬이 들어있다”는 구조는 처음부터 설계된 것이 아니라, 음극 소재 문제를 해결하는 과정에서 필연적으로 도달한 결론이었다.

다시 음극 이야기로 돌아오자. 상기한 것처럼 흑연의 전극전위는 약 0.1~0.2V vs. Li/Li^+ 로 매우 낮아, 양극 소재(NCM 기준 약 3.7V vs. Li/Li^+)와의 전위 차이를 크게 확보할 수 있다는 점이 부각되어 음극재의 표준 소재로 활용될 수 있었다. 전하량 측면에서도 장점이 명확하다. 흑연은 층상구조로 이루어져 있어 층과 층 사이에 리튬이온을 규칙적으로 삽입할 수 있다. 탄소 원자 6개당 리튬이온 1개를 저장하는 방식(LiC_6)으로, 이론 용량은 372 mAh/g이다. 이 수치는 경쟁 소재들과 비교했을 때 특별히 높은 수준은 아니지만, 충·방전을 수천 번 반복해도 구조가 거의 변하지 않아 가역성이 매우 높다는 점이 결정적인 장점이다. 에너지밀도, 안전성, 수명, 원가를 모두 고려했을 때 흑연이 수십 년째 음극 소재의 표준으로 자리 잡고 있는 이유가 바로 여기에 있다.

(1) 천연흑연과 인조흑연

상용 배터리에 사용되는 흑연은 크게 천연흑연과 인조흑연으로 나뉘며, 같은 흑연이라도 제조 방법과 특성이 크게 다르다. 천연흑연(Natural Graphite)은 광산에서 채굴한 흑연 원석을 정제하고 구형화 처리한 소재다. 자연적으로 형성된 결정 구조가 이미 잘 발달되어 있어 층간 구조가 규칙적이고, 이 덕분에 이론 용량에 가까운 높은 용량 구현이 가능하다. 원자재를 채굴해서 가공하는 방식이므로 생산 원가가 상대적으로 낮다는 것도 장점이다. 다만 구형화 과정에서 표면이 불규칙하게 깎여 전해질과의 부반응이 상대적으로 많이 일어나고, 빠른 충전 시 리튬이온이 층간에 고르게 삽입되지 못하고 표면에 석출되는 리튬 플레이팅(Li plating) 위험이 인조흑연보다 높다.

인조흑연(Artificial Graphite)은 석유·석탄 부산물인 코크스(Coke)나 피치(Pitch) 등 탄소 전구체를 2,800~3,000°C의 고온에서 장시간 열처리(흑연화 공정)하여 만든 소재다. 인위적으로 만들어진 만큼 결정 구조의 균일성과 순도를 정밀하게 제어할 수 있다. 입자 표면이 천연흑연보다 매끄럽고 구조가 규칙적이어서 리튬이온이 층간으로 고르게 삽입되고, 고온·고속 충전 환경에서 안정성이 뛰어나다. 수명 특성도 우수하다. 단점은 2,800°C 이상의 고온 공정에 막대한 에너지가 소비되어 천연흑연 대비 생산 원가가 높다는 점이다.

두 소재의 차이를 비유하자면, 천연흑연은 자연산 원목을 잘 다듬은 것이고 인조흑연은 원하는 규격대로 설계해서 만든 합판이다. 원목이 자연의 결을 그대로 살려 용량 면에서 매력적이지만 결이 고르지 않을 수 있는 반면, 합판은 균일하고 예측 가능한 성능을 내도록 설계된 소재다. 현재 프리미엄 전기차용 배터리에는 수명과 급속충전 안정성이 뛰어난 인조흑연이 주로 채택되고, 원가 경쟁이 치열한 보급형 배터리에는 천연흑연이 더 많이 쓰이는 것도 이러한 특성 차이에서 비롯된다.

도표 42. 천연흑연과 인조흑연



자료: 포스코퓨처엠

(2) 흑연의 한계와 차세대 음극 소재

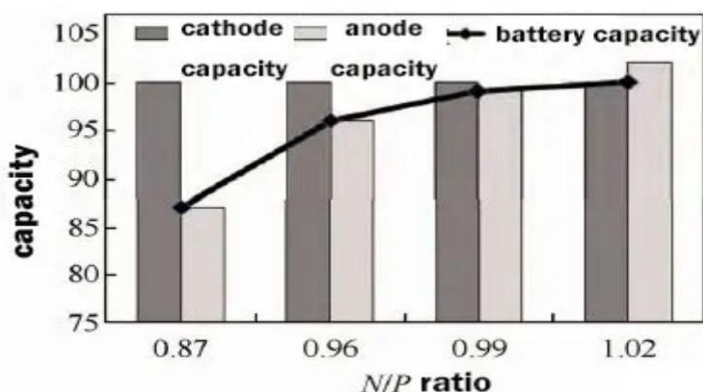
흑연은 안정적이지만 372 mAh/g이라는 용량의 벽이 뚜렷하다. 배터리 에너지밀도를 획기적으로 높이려면 음극 용량도 함께 끌어올려야 하는데, 이 때문에 실리콘(Si)이 차세대 음극 소재로 주목받고 있다. 실리콘의 이론 용량은 3,579 mAh/g으로 흑연의 약 10배에 달한다. 그러나 실리콘은 리튬이온을 흡수할 때 부피가 최대 300%까지 팽창했다가 방출 시 다시 수축하는데, 이 과정이 반복되면 입자가 부서지고 전극 구조가 무너져 수명이 급격히 짧아진다. 현재는 실리콘을 소량(수~10%) 흑연에 혼합하는 실리콘-흑연 복합 음극이 상용화 단계에 있으며, 실리콘 비중을 높이면서도 팽창 문제를 억제하는 소재·공정 기술 개발이 음극 분야의 핵심 연구 과제로 남아 있다.

(3) 실리콘 음극재에 대한 상세 설명

실리콘음극재에 대해서 투자자들이 만날 때 많은 질문을 받는 부분이 용량에 대한 부분이다. 양극은 대략 200~250mAh/g 수준이고 흑연 음극은 372mAh/g이니 이미 음극 그릇이 더 큰 것 아닌가, 그렇다면 굳이 실리콘 음극이 왜 필요한가라는 질문이다. 겉으로 보면 맞는 말이다. 하지만 실제 배터리 설계에서는 단순히 이론 용량 숫자만 보고 판단하지 않는다.

배터리를 리튬이라는 물을 담은 두 개의 물통으로 생각해보면 이해가 쉽다. 양극 물통과 음극 물통이 있고 충전과 방전을 할 때 물이 두 통 사이를 왔다 갔다 한다. 여기서 중요한 점은 음극 물통은 항상 양극보다 조금 더 크게 만들어야 한다는 것이다. 물이 딱 차면 넘치기 때문이다. 배터리에서는 이 넘침이 바로 리튬 plating인데, 이 현상이 생기면 수명이 급격히 줄고 안전 문제가 발생한다. 그래서 실제 셀 설계에서는 음극 용량을 양극보다 약 5~20% 정도 더 크게 설계한다. 이를 N/P ratio라고 부른다(Negative/Positive ratio의 약자. 음극(Negative electrode)과 양극(Positive electrode)의 용량 비율을 나타내는 설계 지표. $N/P \text{ ratio} = \text{음극 용량} \div \text{양극 용량}$. 이 값이 1.0이면 음극과 양극 용량이 정확히 같다는 의미이고, 실제 설계에서는 앞서 설명한 리튬 플레이팅 방지를 위해 음극을 약간 더 크게 만들어 1.1~1.2 수준으로 유지).

도표 43. N/P ratio



자료: tyorum

하지만 여기서 진짜 중요한 문제는 그릇의 무게가 아니라 부피다. 전기차 배터리는 자동차 바닥이라는 제한된 공간 안에 최대한 많은 에너지를 넣어야 한다. 즉 물통이 얼마나 큰가보다 얼마나 공간을 차지하는가가 더 중요하다. 흑연은 리튬을 꽤 많이 담을 수 있지만 그만큼 부피가 크다. 반면 실리콘은 같은 공간에서 훨씬 많은 리튬을 저장할 수 있다. 비유하면 흑연은 큰 플라스틱 물통이고 실리콘은 같은 공간에 더 많은 물이 들어가는 압축 물통이다.

그래서 음극에 실리콘을 섞으면 같은 리튬을 저장하는 데 필요한 부피가 줄어든다. 그리고 이 변화는 배터리 설계에서 매우 중요한 의미를 갖는다. 음극이 차지하는 공간이 줄어들면 그 공간만큼 양극 활물질을 더 많이 넣을 수 있기 때문이다. 배터리의 에너지는 결국 양극에서 결정되기 때문에 양극 활물질을 더 많이 넣을 수 있다는 것은 곧 셀 에너지 밀도가 높아진다는 의미다. 즉 실리콘 음극은 단순히 음극 용량을 높이는 기술이 아니라 같은 셀 부피 안에서 양극 활물질을 더 많이 담을 수 있게 만드는 기술이다.

여기에 또 하나의 장점이 있다. 흑연 음극은 충전을 빠르게 하면 물이 물통 안으로 들어가지 못하고 밖에 넘쳐 흐르듯이 리튬 금속이 표면에 쌓이는 현상이 발생한다. 이것이 리튬 plating이고 급속 충전을 제한하는 핵심 원인이다. 반면 실리콘은 리튬을 저장할 수 있는 공간이 훨씬 크기 때문에 급속 충전에서도 여유가 더 크다.

즉 실리콘 음극이 필요한 이유는 단순히 용량 숫자가 크기 때문이 아니다. 같은 공간에서 더 많은 리튬을 저장할 수 있고, 그 결과 음극 부피를 줄여 양극 활물질을 더 많이 넣을 수 있으며, 급속 충전에서도 안정성을 높일 수 있기 때문이다.

그래서 현재 전기차 배터리는 대부분 흑연에 5~15% 정도의 실리콘을 섞는 구조로 발전하고 있다. 완전히 새로운 배터리가 아니라 기존 흑연 음극을 조금씩 업그레이드하는 방식이며, 이것이 최근 실리콘 음극 기술이 배터리 산업에서 주목받는 이유다.

3) 전해질(Electrolyte): 리튬이온의 이동 통로

양극과 음극이 각각 리튬이온을 저장하고 내보내는 역할을 한다면, 전해질은 그 리튬이온이 두 전극 사이를 실제로 이동할 수 있도록 돕는 매개체다. 전자는 외부 회로를 통해 흐르고, 리튬이온은 전해질을 통해 이동한다. 전해질이 없으면 리튬이온이 이동할 수 없어 전지 반응 자체가 일어나지 않는다. 따라서 전해질의 핵심 요건은 리튬이온을 얼마나 빠르고 원활하게 이동시킬 수 있는가, 즉 이온전도도가 높아야 한다는 것이다. 동시에 양극과 음극 사이의 넓은 전압 범위에서 분해되지 않는 전기화학적 안정성, 넓은 온도 범위에서의 작동 안정성, 그리고 낮은 원가와 안전성까지 갖춰야 한다. 현재 상용 리튬이온전지에 사용되는 액체 전해질은 전해질염, 유기용매, 첨가제 세 가지로 구성된다.

(1) 전해질염 - LiPF₆

전해질염은 전해질 안에서 리튬이온을 실제로 공급하는 역할을 한다. 소금이 물에 녹으면 이온으로 분리되어 전기를 전도하듯, 전해질염이 유기용매에 녹으면서 Li⁺와 음이온으로 분리되고 이 Li⁺가 전극 사이를 이동하는 운반체가 된다. 현재 가장 널리 쓰이는 전해질염은 LiPF₆(육불화인산리튬)으로, 이온전도도, 전기화학적 안정성, 알루미늄 집전체와의 호환성 등 여러 조건을 균형 있게 충족하기 때문이다. 다만 열적 안정성이 다소 낮아 고온에서 분해되어 불산(HF)을 생성할 수 있다는 단점이 있어, 이를 보완하는 연구가 지속되고 있다.

(2) 유기용매 - Solvent

전해질염만으로는 이온이 이동할 수 없고, 이를 녹여 이온이 자유롭게 움직일 수 있는 환경을 만들어주는 것이 유기용매다. 물처럼 이온을 잘 녹이면서도 넓은 전압 범위에서 분해되지 않아야 하기 때문에, 주로 에틸렌카보네이트(EC), 디메틸카보네이트(DMC), 에틸메틸카보네이트(EMC) 등의 카보네이트 계열 용매가 혼합 사용된다. EC는 리튬이온을 잘 녹이는 높은 유전율을 가지지만 점도가 높아 저온에서 이온 이동이 느려지고, DMC·EMC는 점도가 낮아 이온 이동을 빠르게 하지만 유전율이 낮다. 두 종류를 적절히 혼합해 서로의 단점을 보완하는 것이 일반적인 설계 방식이다. 그러나 유기용매는 가연성이 있어 전지 손상 시 발화 위험의 근본 원인이 되기도 한다.

(3) 첨가제 - VC, FEC 등

첨가제는 전해질 전체의 1~5% 수준으로 소량 첨가되지만, 전지의 수명과 안전성에 미치는 영향은 매우 크다. 첨가제의 핵심 역할은 음극 표면에 SEI(Solid Electrolyte Interphase, 고체 전해질 계면층)를 형성하는 것이다. SEI는 전해질이 음극 표면과 직접 반응하는 것을 막아주는 얇은 보호막으로, 마치 과일 껍질처럼 내부를 보호하면서도 리튬이온은 통과시키는 선택적 투과 기능을 한다. 이 SEI가 얼마나 안정적으로 형성되느냐가 전지의 초기 효율, 수명, 저온 특성을 좌우한다. 대표적인 첨가제로는 비닐렌카보네이트(VC)와 플루오로에틸렌카보네이트(FEC)가 있는데, VC는 흑연 음극에서 균일하고 안정적인 SEI 형성에 효과적이고, FEC는 실리콘 음극처럼 부피 변화가 큰 소재에서 SEI의 유연성을 높여 수명 특성을 개선하는 데 특히 유리하다.

(4) 고체 전해질: 액체의 한계를 넘으려는 시도

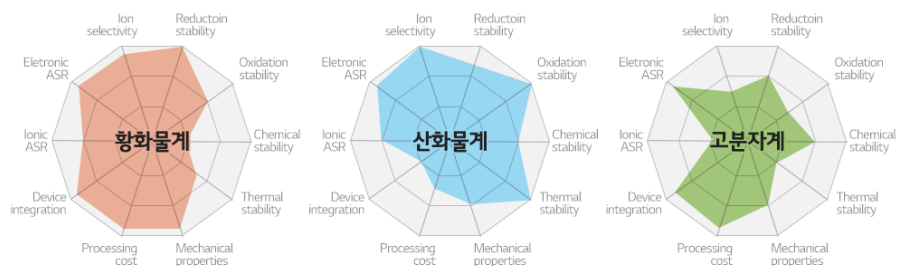
액체 전해질 기반의 리튬이온전지는 수십 년간 지속적으로 발전해왔지만, 근본적인 한계가 있다. 유기용매의 가연성에서 비롯되는 발화 위험, 고전압 환경에서의 전기화학적 분해, 리튬 금속 음극과의 호환성 문제가 대표적이다. 이 한계를 근본적으로 해결하려는 시도가 바로 고체 전해질(Solid Electrolyte) 기반의 전고체 전지(All-Solid-State Battery)다.

고체 전해질은 액체 대신 고체 소재가 리튬이온의 이동 통로 역할을 한다. 가연성 유기용매가 없어 열폭주 위험이 근본적으로 낮아지고, 전기화학적 안정 범위가 넓어 고전압 양극재 적용이 용이하며, 액체 전해질에서 불가능했던 리튬 금속 음극의 안정적 사용도 가능해진다. 리튬 금속 음극을 쓸 수 있다는 것은 앞서 설명한 흑연 음극의 용량 한계(372mAh/g)를 완전히 뛰어넘을 수 있다는 의미이기도 하다.

고체 전해질 소재는 크게 산화물계(LLZO 등), 황화물계(LGPS 등), 폴리머계로 나뉜다. 황화물계는 이온전도도가 액체 전해질에 근접할 만큼 높아 가장 유력한 후보로 주목받고 있으나, 공기 중 수분과 반응해 유독가스(H₂S)를 발생시키는 문제가 있어 제조 환경 제어가 까다롭다. 산화물계는 안정성이 높지만 이온전도도가 낮고 전극과의 계면 저항이 크다는 과제가 있다.

전고체 전지는 에너지밀도, 안전성, 수명 모든 면에서 기존 액체 전해질 전지를 뛰어넘을 잠재력을 가진 차세대 기술로, 현재 삼성SDI, 도요타, QuantumScape 등 글로벌 배터리·자동차 기업들이 상용화 경쟁을 벌이고 있다. 다만 고체-고체 계면에서의 높은 저항, 대면적 전극 제조의 어려움, 원가 문제 등이 해결 과제로 남아 있어 본격적인 양산은 2027~2030년 이후로 전망되고 있다.

도표 44. 고체 전해질 종류



자료: Battery Inside

4) 분리막(Separator): 최후의 안전막

양극과 음극은 전위차가 큰 두 전극이다. 이 둘이 직접 접촉하는 순간 단락(Short Circuit)이 발생해 전류가 한꺼번에 쏟아지고 열폭주로 이어진다. 분리막은 이 두 전극 사이에서 물리적 접촉을 막아주는 얇은 다공성 막으로, 전지의 정상적인 작동과 안전성을 동시에 담보하는 핵심 소재다.

분리막이 수행해야 하는 역할은 언뜻 상충되어 보이는 두 가지 조건을 동시에 충족해야 한다는 점에서 독특하다. 첫째는 전자의 이동을 완전히 차단해야 한다는 것이다. 전자가 외부 회로가 아닌 전해액을 통해 양극과 음극 사이를 직접 오가면 전지 반응이 무너지고 단락이 발생한다. 둘째는 리튬이온의 이동은 원활하게 허용해야 한다는 것이다. 분리막 내부의 수십~수백 나노미터 크기의 미세한 기공(Pore)이 이 역할을 담당하는데, 전자는 통과시키지 않으면서 이온만 선택적으로 투과시키는 구조다. 즉 분리막은 물리적 차단재인 동시에 이온 전도 경로이기도 하며, 이 두 가지 조건을 동시에 충족해야 한다는 점이 분리막 소재 설계의 핵심 난제다.

(1) 분리막의 두께: 에너지밀도와 안전성의 트레이드오프

분리막 설계에서 가장 중요한 물리적 변수는 두께다. 분리막이 얇을수록 전지 전체에서 분리막이 차지하는 부피 비중이 줄어들고, 그만큼 양극과 음극 활물질을 더 많이 채울 수 있어 에너지밀도가 높아진다. 현재 상용 분리막의 두께는 5~20 μm (마이크로미터) 수준으로, 머리카락 두께(약 70 μm)의 10분의 1도 안 되는 극박 소재다.

그러나 얇아질수록 기계적 강도가 낮아져 전극의 돌기나 이물질에 의해 쉽게 손상될 수 있고, 이것이 내부 단락으로 이어질 위험이 커진다. 에너지밀도를 높이기 위해 분리막을 얇게 만들수록 안전성 여유가 줄어드는 구조적 트레이드오프가 존재한다. 이 때문에 단순히 두께를 줄이는 것을 넘어, 얇으면서도 기계적 강도와 열적 안정성을 동시에 확보하는 소재·코팅 기술이 분리막 산업의 핵심 경쟁력이 된다.

분리막이 안전성의 최후 보루라고 불리는 이유도 여기에 있다. 전지 내부에서 이상 반응이 시작되더라도 분리막이 버텨주는 한 양극과 음극의 직접 접촉은 막을 수 있다. 특히 온도가 급격히 올라가면 분리막의 기공이 스스로 닫혀 이온 이동을 차단하고 반응을 멈추게 하는 셧다운(Shutdown) 기능이 작동하는데, 이것이 열폭주를 막는 마지막 방어선 역할을 한다. 다만 온도가 셧다운 온도를 넘어서면 분리막 자체가 수축·용융되면서 오히려 단락을 일으킬 수 있어, 고온에서의 열수축 억제가 분리막 안전성 연구의 핵심 과제 중 하나다.

(2) 습식 분리막과 건식 분리막: 제조 방식의 차이가 성능을 가른다

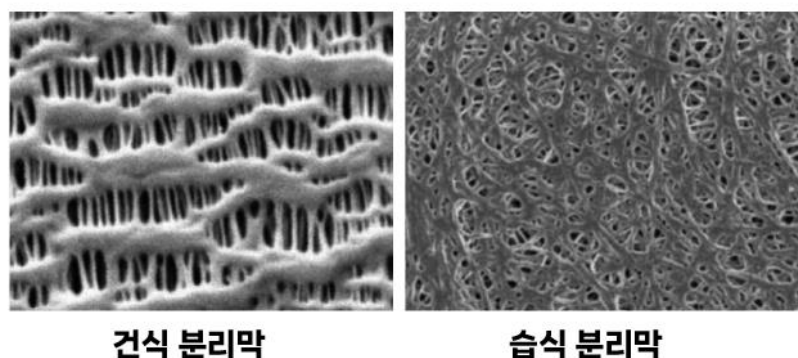
분리막은 제조 방식에 따라 크게 습식과 건식으로 나뉘며, 동일한 폴리에틸렌(PE)-폴리프로필렌(PP) 소재를 쓰더라도 공정에 따라 기공 구조와 물성이 크게 달라진다.

건식 분리막(Dry Process)은 폴리머 필름을 고온에서 연신(拉伸, 잡아당겨 늘리는 것)하는 과정에서 결정 구조 사이에 기공이 자연스럽게 형성되는 방식이다. 제조 공정이 단순하고 유기용매를 사용하지 않아 환경 부담이 적으며 원가가 낮다. 기공이 일정한 방향성을 가진 슬릿(Slit) 형태로 형성되어 기계적 강도가 높다는 장점이 있다. 다만 기공 크기와 분포의 균일성이 습식 대비 낮아 이온 투과성이 상대적으로 제한적이고, 두께를 극단적으로 얇게 만들기 어렵다는 한계가 있다.

습식 분리막(Wet Process)은 폴리머에 오일 등 가소제를 혼합해 필름을 만든 뒤, 유기용매로 가소제를 추출해 제거하는 과정에서 균일한 기공이 형성되는 방식이다. 기공 크기와 분포가 균일하고 두께를 훨씬 얇게 제조할 수 있어 이온 투과성과 에너지밀도 측면에서 유리하다. 현재 고에너지밀도가 요구되는 전기차용 배터리에는 습식 분리막이 주로 채택되는 이유다. 반면 공정이 복잡하고 유기용매 사용에 따른 환경·비용 부담이 있으며, 건식 대비 기계적 강도가 낮아 코팅 처리로 이를 보완하는 경우가 많다.

현재 상용 분리막의 주류는 습식 공정으로 제조된 PE 단층 혹은 PP/PE/PP 삼층 구조 분리막에 세라믹(Al_2O_3 , SiO_2) 코팅을 더한 형태다. 세라믹 코팅은 열수축을 억제하고 기계적 강도를 높여 안전성을 강화하는 동시에, 전해질과의 친화성을 높여 이온 전도성도 개선하는 효과를 낸다. 분리막 산업에서 코팅 기술의 중요성이 갈수록 높아지는 것도 이 때문이며, 단순한 기재 제조에서 고기능성 코팅 분리막으로의 전환이 현재 업계의 핵심 트렌드다.

도표 45. 건식 분리막과 습식 분리막 기공



자료: 삼성SDI

2. 리튬이온전지의 제조 공정

배터리 제조는 크게 전극 공정, 조립 공정, 활성화 공정의 세 단계로 나뉜다. 그 첫 번째인 전극 공정은 양극과 음극 소재를 실제 전극판으로 만들어내는 과정으로, 이 단계에서의 품질이 배터리의 에너지밀도, 수명, 안전성을 근본적으로 결정한다. 전극 공정은 믹싱, 코팅, 압연, 슬리팅의 네 단계로 구성된다.

1) 전극 공정

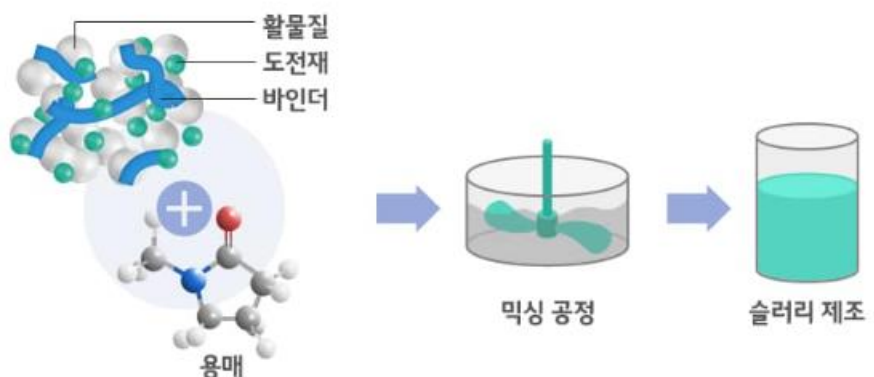
(1) 1단계 믹싱(Mixing): 전극 슬러리 제조

전극 공정의 시작은 활물질, 바인더, 도전재를 용매에 혼합해 전극 슬러리(Slurry)를 만드는 믹싱 공정이다. 슬러리란 페인트와 비슷한 점성을 가진 액체 혼합물로, 이것이 나중에 금속 호일 위에 코팅되어 전극이 된다.

슬러리의 구성 성분은 각자 명확한 역할을 가진다. 활물질(Active Material)은 실제로 리튬이온을 저장하고 방출하는 핵심 소재로, 양극에는 NCM·LFP 등, 음극에는 흑연·실리콘 등이 사용된다. 바인더(Binder)는 활물질 입자들이 금속 호일에 잘 달라붙도록 접착제 역할을 한다. 양극에는 주로 PVDF(폴리불화비닐리덴)가, 음극에는 SBR(스티렌부타디엔고무)과 CMC(카르복시메틸셀룰로오스) 조합이 사용된다. 도전재(Conductive Agent)는 활물질 입자 사이의 전자 이동을 돕는 소재로, 카본블랙이나 탄소나노튜브(CNT)가 주로 쓰인다. 활물질 자체의 전자 전도성이 낮은 경우 도전재가 전자 이동 네트워크를 형성해 출력 특성을 보완한다. 용매(Solvent)는 이 모든 성분을 균일하게 분산시키는 매개체로, 양극 공정에는 NMP(N-메틸피롤리돈)가, 음극 공정에는 물이 주로 사용된다.

믹싱 공정에서 가장 중요한 것은 균일성이다. 활물질이 고르게 분산되지 않으면 전극 내 특정 부위에 리튬이온이 집중되거나 반응이 불균일하게 일어나, 국부적인 열 발생과 수명 저하로 이어진다. 이 때문에 믹싱 장비의 교반 속도, 온도, 혼합 순서, 점도 관리가 공정 품질의 핵심 변수가 된다. 윤성에프앤씨, 티에스아이, 제일엠앤에스가 LG에너지솔루션, 삼성SDI, SK온 등 국내 배터리 기업에 믹싱 장비를 납품하는 대표 기업들이다

도표 46. 믹싱 공정



자료: LG에너지솔루션

(2) 2단계 코팅(Coating): 슬러리를 금속 호일에 입히는 과정

믹싱으로 완성된 슬러리를 얇은 금속 호일 위에 균일하게 도포하는 공정이다. 양극에는 알루미늄(Al) 호일이, 음극에는 구리(Cu) 호일이 집전체(Current Collector)로 사용된다. 집전체는 전극 반응에서 생성된 전자를 모아 외부 회로로 전달하는 역할을 한다.

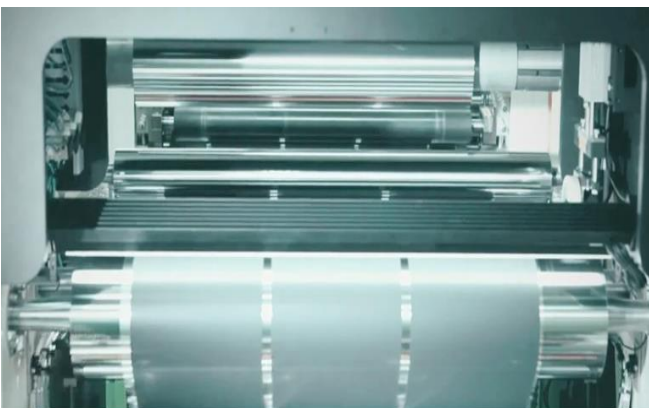
코팅 방식은 슬롯 다이(Slot Die) 코팅이 주류로, 슬러리를 일정한 압력으로 밀어내 호일 위에 균일한 두께로 도포한 뒤 건조로(Drying Oven)를 통과시켜 용매를 증발시킨다. 코팅 두께의 균일성은 에너지밀도와 직결되는데, 두껍게 코팅할수록 단위 면적당 활물질량이 많아져 에너지밀도가 높아지지만, 너무 두꺼우면 리튬이온이 전극 내부 깊숙이 이동하기 어려워 출력 특성과 수명이 저하된다. 코팅 속도, 건조 온도, 용매 증발 속도를 정밀하게 제어하는 것이 이 공정의 핵심이며, 특히 양극에 사용되는 NMP 용매는 고가이고 환경 부담이 커서 회수·재활용 시스템이 필수적으로 요구된다.

(3) 3단계 압연(Calendering): 전극 조직을 치밀하게 만드는 과정

코팅·건조된 전극을 고압의 롤러 사이로 통과시켜 압축하는 공정이다. 코팅 직후의 전극은 활물질 입자 사이에 공극(빈 공간)이 많아 밀도가 낮은 상태인데, 압연을 통해 이 공극을 줄이고 전극을 치밀하게 만든다.

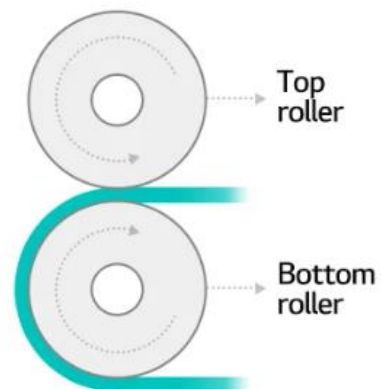
압연의 효과는 두 가지다. 첫째, 전극 밀도가 높아지면서 단위 부피당 활물질량이 증가해 에너지밀도가 향상된다. 둘째, 활물질 입자 간의 접촉이 촉진되어 전자 이동 경로가 개선되고 전기 전도성이 높아진다. 그러나 압연 압력이 과도하면 활물질 입자가 파괴되거나 기공이 지나치게 막혀 리튬이온의 이동 통로가 사라지는 문제가 생긴다. 특히 실리콘 함량이 높은 음극은 압연 시 입자 파괴가 쉽게 일어나 공정 조건 제어가 더욱 까다롭다. 압연 후 전극의 기공률(Porosity)을 최적 범위로 유지하는 것이 에너지밀도와 출력 특성을 동시에 확보하는 핵심이다.

도표 47. 코팅 공정



자료: LG에너지솔루션

도표 48. 압연 과정



자료: LG에너지솔루션

(4) 4단계 슬리팅(Slitting): 단위 전극으로 재단하는 과정

압연까지 완료된 대면적 전극 롤을 실제 전지에 들어갈 크기로 정밀하게 재단하는 공정이다. 대형 원단 롤을 셀 규격에 맞는 폭으로 세로 방향으로 절단하는 방식으로, 칼날의 정밀도와 절단면의 품질이 핵심 관리 포인트다.

슬리팅 품질이 중요한 이유는 절단면의 상태가 안전성에 직결되기 때문이다. 절단면이 불균일하거나 금속 버(Burr, 절단 시 생기는 미세한 돌출부)가 발생하면 이것이 분리막을 손상시켜 내부 단락을 일으킬 수 있다. 또한 전극 폭이 규격을 벗어나면 조립 공정에서 정렬 불량 이 생겨 전지 성능과 안전성 모두에 영향을 미친다. 슬리팅 후에는 전극 롤의 외관 검사와 두께·폭 측정이 이루어지며, 이 단계를 통과한 전극 롤이 다음 조립 공정으로 넘어간다.

2,3,4단계 세 공정은 롤투롤(Roll-to-Roll) 방식으로 연속 진행되는 특성상, 코팅·압연·슬리팅 장비를 함께 공급하는 기업이 많다. 피엔티는 코팅·압연·슬리팅 세 공정 장비를 모두 공급하는 전극 공정 대표 기업이다. 씨아이에스는 Coater, Calender, Slitter 등 전극 공정 전반의 장비를 생산하며, 한화모멘텀은 세계 최초 무인 코팅 기술을 보유하고 풀 턴키 솔루션을 제공하며 북미 시장 공략을 가속화하고 있다. 필에너지는 레이저 기반 롤투롤 기반의 코팅·슬리팅 장비에 강점을 보유하고 있다.

도표 49. 전극 슬리팅



자료: LG에너지솔루션

도표 50. 피엔티 롤투롤 장비



자료: 피엔티

2) 조립 공정(Assembly Process): 배터리의 형태를 만드는 과정

전극 공정에서 만들어진 양극·음극 전극 롤이 실제 배터리 셀의 형태를 갖추는 단계가 조립 공정이다. 이 단계에서는 전극을 정밀하게 재단하고, 양극·음극·분리막을 순서에 맞게 쌓고, 외장재로 포장하고, 전해액을 주입하는 일련의 과정이 진행된다. 조립 공정의 품질은 배터리의 내부 단락 위험과 직결되는 만큼, 미크론 단위의 정밀도와 이물질 관리가 핵심이다.

(1) 1단계 노칭(Notching): 전극을 단위 셀 형태로 재단

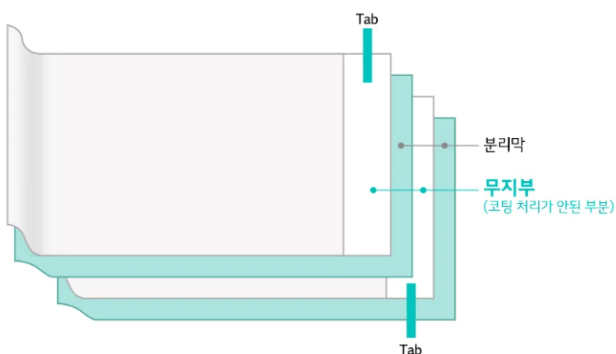
슬리팅 공정에서 일정 폭으로 재단된 전극 롤을 셀 규격에 맞게 가로 방향으로 절단하고, 전류를 외부로 연결하는 탭(Tab)을 만들기 위해 전극의 특정 부위를 V자 또는 U자 형태로 절개하는 공정이다. 이 탭이 나중에 양극·음극 단자와 연결되는 전류 출력 경로가 된다.

노칭 방식은 크게 기계식과 레이저식으로 나뉜다. 기계식은 칼날로 절단하는 방식으로 속도가 빠르지만 절단면에 버(Burr)가 발생할 수 있고, 레이저식은 절단면이 매끄럽고 버 발생이 없어 분리막 손상 위험이 낮지만 장비 원가가 높다. 최근에는 배터리 고용량화·고밀도화 추세에 따라 정밀도가 뛰어난 레이저 노칭으로의 전환이 가속화되고 있다. 관련 기업으로는, 유일에너지테크(노칭기, 스태킹기, 탭결합기 등 조립 공정 핵심 장비), 디이엔티(레이저 노칭 장비에 강점), 피엔티(슬리팅에 이어 노칭 장비까지 공급하며 전극 공정 전반 커버) 등이 있다.

(2) 진공 건조(Vacuum Drying): 수분을 완전히 제거하는 과정

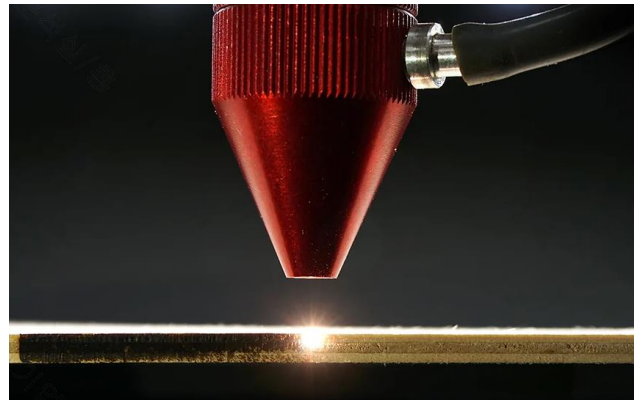
노칭까지 완료된 전극을 조립에 투입하기 전, 진공 오븐에서 고온·진공 상태로 열처리하여 전극 내부에 잔류하는 수분을 완전히 제거하는 공정이다. 이 단계가 중요한 이유는 수분이 전해액의 LiPF₆ 전해질염과 반응해 불산(HF)을 생성하고, 이것이 전극 소재와 분리막을 부식시켜 수명 저하와 가스 발생을 일으키기 때문이다. 수분 함량이 수십 ppm 수준 이하로 관리되지 않으면 이후 모든 공정이 무의미해질 수 있기에, 배터리 제조에서 드라이룸(Dry Room) 환경 유지와 함께 가장 엄격하게 관리되는 공정 중 하나다.

도표 51. 노칭 공정



자료: LC에너지솔루션

도표 52. 레이저 노칭



자료: LC에너지솔루션

(3) 3단계 스택킹(Stacking): 양극·분리막·음극을 쌓는 과정

노칭·건조된 양극과 음극 전극을 분리막과 함께 순서에 맞게 반복적으로 쌓아 올려 스택 셀(Stack Cell)을 만드는 공정이다. 양극-분리막-음극-분리막-양극의 순서로 수십~수백 겹을 정밀하게 적층하는 것이 핵심이다. 전극 한 장이라도 어긋나면 양극과 음극이 분리막 없이 접촉하는 내부 단락이 발생하므로, 적층 정렬도(Alignment)는 수십 마이크로 이하로 관리된다.

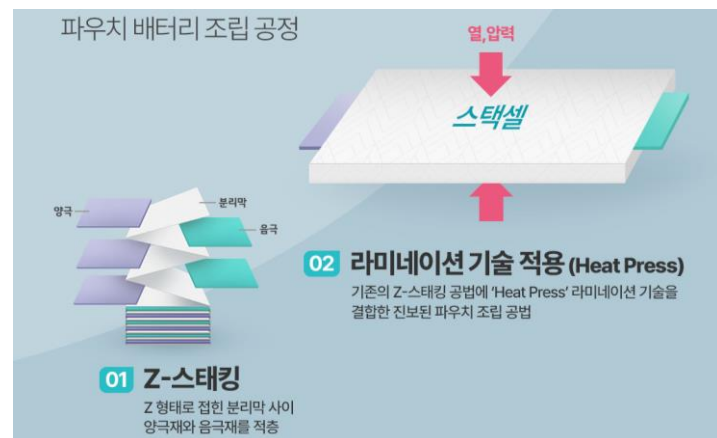
스택킹 방식은 크게 Z-폴딩(Z-Folding)과 라미네이션-스택킹(Lamination & Stacking)으로 나뉜다. Z-폴딩은 분리막을 지그재그로 접으면서 양극·음극을 번갈아 끼워 넣는 방식으로 공정이 단순하지만 적층 속도가 느리고, 라미네이션-스택킹은 양극·음극과 분리막을 먼저 합지(라미네이션)한 뒤 스택킹하는 방식으로 정렬 정밀도와 생산성이 높아 현재 주류 공법으로 자리 잡고 있다. 관련 기업으로는 유일에너지(노칭과 함께 스택킹 장비까지 일괄 공급), 앰플러스(파우치형 전기차용 리튬이온전지 조립 공정 장비 제조, 라미네이션-스택킹 장비 강점) 등이 있다.

(4) 4단계 파우치 성형 및 실링(Pouch Forming & Sealing): 외장재 포장

파우치형 배터리의 경우, 완성된 스택셀을 알루미늄 라미네이트 필름으로 만든 파우치 케이스에 삽입하고 열과 압력으로 밀봉하는 공정이다. 파우치 필름을 프레스로 눌러 전극 포켓과 가스 포켓 형태를 만들고, 스택셀을 전극 포켓에 정밀하게 삽입한 뒤 3면을 실링한다. 나머지 1면은 전해액 주입을 위해 잠시 열어두었다가 주입 후 최종 실링한다. 실링 강도와 기밀성이 배터리의 수명과 안전성을 좌우하는 핵심 품질 변수다.

각형 배터리의 경우 알루미늄 캔에 젤리롤을 삽입하고 캡을 레이저 용접으로 밀봉하는 방식이 사용되며, 엠오티(코스닥)가 각형 배터리 조립 공정 장비를 주력으로 삼성SDI 등에 공급하고 있다.

도표 53. 파우치 배터리 스택킹 방식



자료: LG에너지솔루션

(5) 5단계 탭 웰딩 및 단자 용접(Tab Welding): 전류 출력 경로 연결

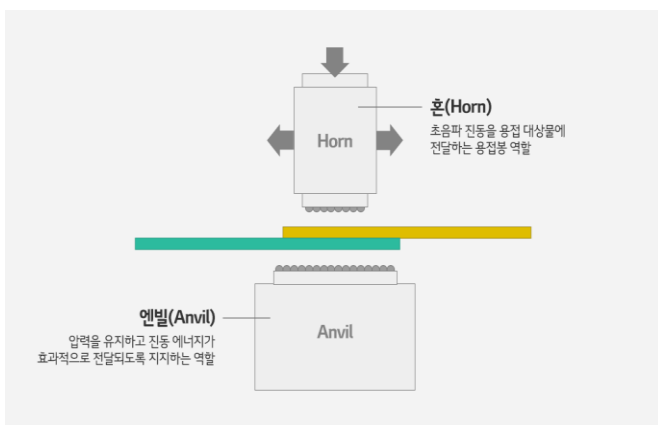
스택셀에서 나온 양극·음극 탭들을 한곳으로 모아 용접하고, 이를 외부 단자(리드, Lead)에 연결하는 공정이다. 수십 겹의 얇은 금속 탭을 균일하게 용접해야 하기 때문에 초음파 용접이나 레이저 용접이 사용된다. 용접 불량은 접촉 저항 증가와 발열로 이어지기 때문에 용접 강도와 접촉 면적의 균일성이 엄격하게 관리된다. 주요 기업으로는 하나기술(탭 웰딩, 패키징 등 조립·화성 공정 전반), 엠플러스(탭 웰딩과 패키징 장비 함께 공급) 등이 있다.

(6) 6단계 전해액 주입 및 검사(Electrolyte Injection & Inspection): 이온 이동의 통로를 만드는 마지막 단계

밀봉 직전 열려 있는 파우치 한 면을 통해 전해액을 정밀하게 주입하는 공정이다. 전해액이 전극과 분리막의 미세한 기공 속까지 완전히 스며들어야 리튬이온이 원활하게 이동할 수 있기 때문에, 주입 후 일정 시간 함침(Impregnation) 과정을 거친다. 전해액 주입량이 부족하면 이온 이동이 원활하지 않아 출력과 수명이 저하되고, 과다하면 내부 압력 상승과 가스 발생 문제가 생긴다. 주입 전 과정은 수분이 철저히 차단된 드라이룸 환경에서 진행된다.

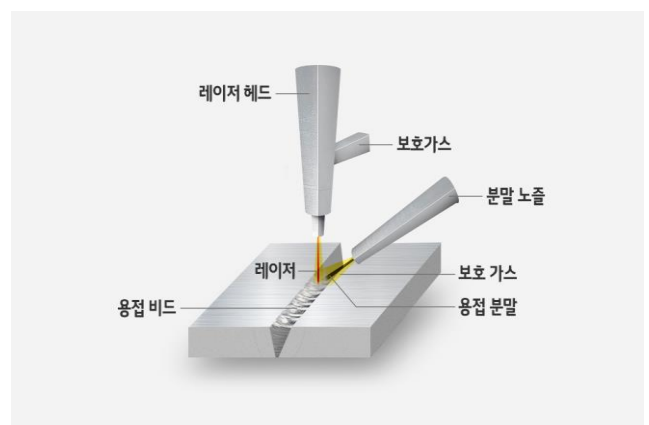
전해액 주입 후에는 외관 검사, X-ray 검사, 단락 검사 등을 통해 내부 이물질, 전극 정렬 불량, 용접 품질 등을 확인하는 검사 공정이 이어진다. 이 단계에서 불량을 걸러내지 못하면 현장에 투입된 이후 안전 사고로 이어질 수 있어, 배터리 제조 공정 전체에서 가장 중요한 품질 관문 중 하나다. 관련 기업으로 원익피앤이(조립 공정 패키징 장비와 디개싱·폴딩 장비를 함께 공급), 하나기술(전해액 주입 및 실링 장비를 포함한 턴키 라인) 등이 있다.

도표 54. 초음파 용접



자료: LG에너지솔루션

도표 55. 레이저 용접

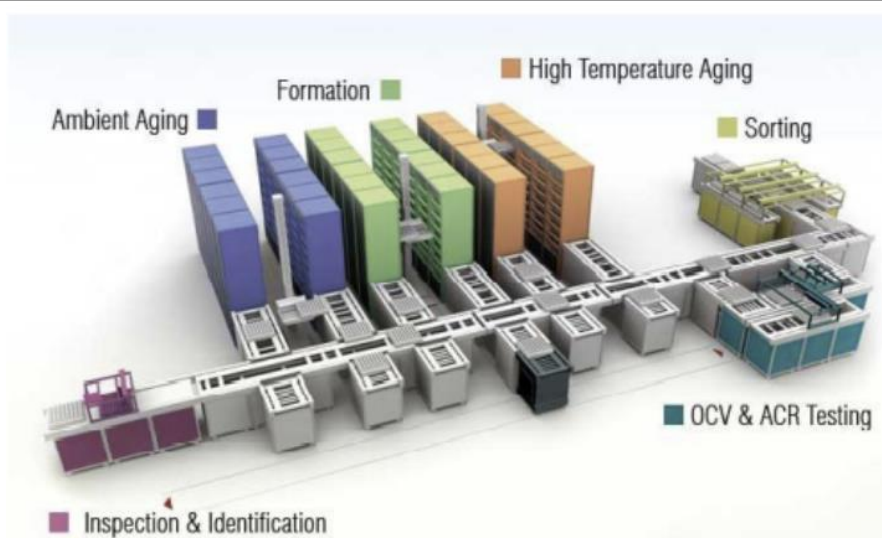


자료: LG에너지솔루션

3) 활성화 공정(Formation Process): 배터리에 전기적 생명을 불어넣는 과정

전극 공정과 조립 공정을 거쳐 만들어진 셀은 아직 배터리로서의 전기적 기능을 갖추지 못한 상태다. 단순히 소재를 쌓아 놓은 구조물에 불과한 셀을 실제로 에너지를 저장하고 방출하는 배터리로 만드는 과정이 활성화 공정, 즉 화성(化成) 공정이다. 이 공정에서 양극과 음극 사이에 처음으로 전기적 신호가 인가되고, 전극 표면에 보호막이 형성되며, 배터리의 용량과 수명이 확정된다. 같은 소재와 설계로 만들어진 셀이라도 활성화 공정의 조건에 따라 최종 성능이 크게 달라지기 때문에, 이 단계는 배터리 제조의 마지막이자, 가장 정밀한 공정이라 할 수 있다.

도표 56. 활성화 공정



자료: 언론보도

(1) 1단계 1차 에이징(Pre-Aging): 셀을 깨우는 준비 단계

전해액이 주입된 직후의 셀은 전해액이 전극과 분리막의 미세한 기공 속까지 완전히 스며들지 않은 상태다. 1차 에이징은 이 셀을 상온 또는 고온 환경에서 일정 시간 방치해 전해액을 전극 내부 깊숙이 침투시키고, 전해액과 전극 계면이 안정적인 초기 상태를 갖출 수 있도록 준비하는 단계다. 마치 새 장판을 깔고 가구를 들이기 전에 장판이 바닥에 완전히 밀착되도록 두는 것과 같다. 고온 에이징의 경우 전해액의 점도를 낮춰 함침 속도를 높이는 효과도 있다. 이 단계를 충분히 거치지 않으면 이후 충·방전 과정에서 전극 일부가 활성화되지 않아 용량 손실과 불균일한 전류 분포가 생긴다.

(2) 2단계 포메이션(Formation): 배터리에 전기적 특성을 부여하는 핵심 단계

활성화 공정의 핵심으로, 셀에 처음으로 전류를 인가해 충·방전을 수행하는 단계다. 이 과정에서 가장 중요한 것은 음극 표면에 SEI(Solid Electrolyte Interphase, 고체 전해질 계면층)가 형성되는 것이다. 전해질 설명에서 언급했듯 SEI는 전해액이 음극 표면에서 분해되면서 형성되는 얇은 보호막으로, 이후 충·방전 시 전해액이 음극과 직접 반응하는 것을 막아주는 역할을 한다. SEI가 얼마나 균일하고 안정적으로 형성되느냐가 배터리의 초기 효율, 수명, 저온 특성 모두에 영향을 미친다.

포메이션은 매우 느린 속도(0.05~0.1C)로 조심스럽게 첫 충전을 진행한다. 너무 빠른 전류를 인가하면 SEI가 불균일하게 형성되고 전극 구조가 손상될 수 있기 때문이다. 이 과정에서 전해액 일부가 분해·소모되며 이것이 초기 비가역 용량 손실(Initial Capacity Loss)로 나타난다. 첫 충·방전 시 이론 용량 대비 실제 용량의 비율을 초기 쿨롱 효율(Initial Coulombic Efficiency)이라 하며, 이 수치가 높을수록 우수한 소재와 공정 품질을 의미한다.

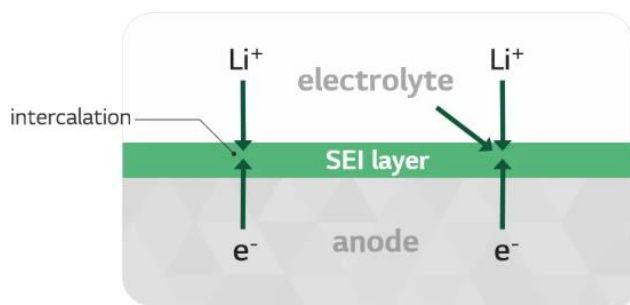
포메이션 공정의 조건(전류 크기, 온도, 전압 범위, 충·방전 횟수)은 배터리 셀 업체마다 핵심 노하우로 관리되며, 공개되지 않는 경우가 대부분이다. 최근에는 일반적인 정전류(DC) 방식 대신 펄스(Pulse) 전류를 인가하는 방식이 SEI 품질 향상과 공정 시간 단축에 효과적인 것으로 알려지며 차세대 포메이션 기술로 주목받고 있다. 관련 기업으로는, 에이프로(활성화 장비 전문 기업, 고온가압충방전기(jig Formation), 충방전기(Formation), IROCV 검사기 등 포메이션 공정 전반 장비 공급), 원익피앤이(포메이션(48.3%), 사이클러(25.2%), 디개싱·폴딩(26.5%) 장비 공급), 하나기술(조립 공정과 활성화 공정을 턴키로 공급, 원통형·각형·파우치형 세 가지 형태 배터리 모두 대응) 등이 있다.

도표 57. 에이징



자료: LG에너지솔루션

도표 58. 포메이션



자료: LG에너지솔루션

(3) 3단계 디개싱(Degassing): 내부 가스를 제거하는 공정

포메이션 과정에서 SEI가 형성될 때 전해액의 부반응으로 CO₂, H₂ 등의 가스가 필연적으로 발생한다. 파우치형 배터리의 경우 외장재가 유연한 필름이기 때문에 이 가스가 내부에 축적되면 셀이 부풀어 오르고(스웰링), 전극과 분리막의 밀착성이 떨어져 저항이 증가하고 성능이 저하된다. 디개싱은 파우치의 가스 포켓 부분을 천공하거나 개봉해 내부 가스를 진공으로 빼낸 뒤 다시 밀봉하는 공정이다.

디개싱은 파우치형 배터리에만 존재하는 공정이다. 원통형·각형 배터리는 딱딱한 금속 케이스 내부에 가스를 수용할 여분 공간이 설계되어 있어 별도의 디개싱이 불필요하다. 디개싱 후에는 셀 내부 단락 여부를 검사하는 OCV(Open Circuit Voltage) 측정이 이루어지는데, 단락이 있는 셀은 자가 방전 속도가 빠르기 때문에 OCV 변화량으로 불량 셀을 선별할 수 있다. 관련 기업으로는 원익 피앤이(디개싱·폴딩 장비를 조립 공정 패키징 장비와 함께 공급하며 파우치형 배터리 후공정 전반을 커버), 에이프로(패키징·디개싱·포메이션을 하나로 통합한 하이브리드 장비) 등이 있다.

(4) 4단계 2차 에이징(Post-Aging): 전기적 특성을 안정화하는 마지막 방치

디개싱까지 완료된 셀을 상온에서 장시간(수일~수주) 방치하며 전기적 특성을 최종 안정화하는 단계다. 1차 에이징이 전해액 함침을 위한 물리적 준비였다면, 2차 에이징은 포메이션 과정에서 형성된 SEI와 전극 내 리튬이온 분포가 균일하게 자리 잡도록 안정화하는 전기화학적 숙성 과정이다. 방치 기간 중 OCV(개회로 전압)를 주기적으로 측정하여 자가 방전 속도를 체크하고, 기준치를 벗어난 셀을 불량으로 선별한다. 자가 방전이 과도한 셀은 내부 미세 단락이 있거나 SEI가 불안정하게 형성된 것으로, 이 단계에서 걸러내지 못하면 실사용 중 안전 문제로 이어질 수 있다.

2차 에이징은 공정 시간이 길다는 것이 가장 큰 단점으로, 배터리 제조 전체 리드타임의 상당 부분을 차지한다. 이 때문에 고온 에이징으로 방치 기간을 단축하거나, AI 기반 자가 방전 예측 모델로 에이징 시간을 줄이는 연구가 활발히 진행 중이다.

(5) 5단계 EOL 검사 및 출하(End of Line Inspection): 최종 품질 관문

2차 에이징까지 완료된 셀에 대해 용량, 내부 저항, OCV, 외관, X-ray 내부 구조 등 전항목을 종합적으로 검사하는 최종 품질 검사 관문이다. 이 단계를 통과한 셀만이 정상 제품으로 분류되어 팩·모듈 조립 라인으로 넘어가고, 기준에 미달한 셀은 등급별로 분류되어 용도에 맞게 재활용되거나 폐기된다. 관련 기업으로는 이노메트릭(X-ray 검사 장비를 공급하며 배터리 내부 구조 결함을 비파괴 방식으로 검출), 인텍플러스(3D/2D 자동 외관 검사 장비), 에스에프에이(검사 및 자동화 장비, 배터리 라인 전반의 물류 자동화 시스템도 함께 공급) 등이 있다.

3. 전고체 개념 정리

1) 왜 전고체 전지인가?

배터리 업계가 수십 년간 공들여 완성한 리튬이온전지는 지금도 빠르게 발전하고 있지만, 구조적 한계는 존재한다. 전고체 전지는 그 한계를 근본적으로 우회하려는 시도다. 세 가지 오래된 숙제가 전고체 전지의 성장 당위를 만들어주고 있다.

(1) 발화 문제 - '가연성 심지' 제거

현재 리튬이온전지의 전해질은 유기 용매를 기반으로 한다. 에너지를 운반하는 매개체로서는 훌륭하지만, 온도가 올라가거나 충격을 받으면 불이 붙는다. 이를 '가연성 전해질'이라 한다. 전고체 전지는 이 유기 용매 전해질을 불에 타지 않는 고체 전해질로 대체한다. 심지 자체를 없애는 것이다. 발화의 근원을 구조적으로 차단하므로, 분리막 파손이나 과충전 같은 이상 상황이 발생하더라도 화재로 이어지는 연결고리가 끊긴다.

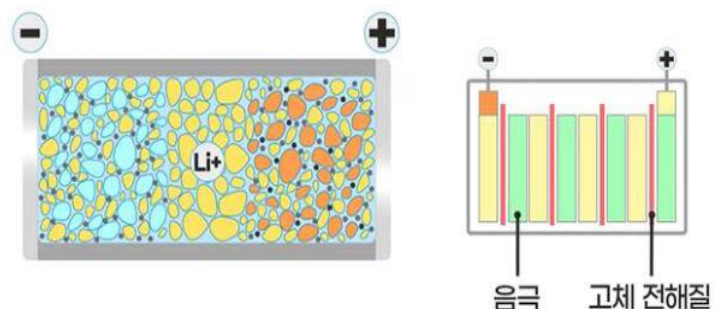
(2) 주행거리 문제 - 더 큰 그릇

전기차의 1회 충전 주행거리를 늘리려면 배터리에 에너지를 더 많이 담아야 한다. 현재 리튬이온전지의 음극 소재인 흑연은 이론 용량 한계(372 mAh/g)에 거의 도달했다. 전고체 전지는 리튬금속 음극을 사용할 수 있다는 점이 핵심이다. 리튬금속의 이론 용량은 흑연의 약 10배(3,860 mAh/g)에 달하며, 밀도도 낮아 가볍다. 그릇 자체가 비교할 수 없이 커지는 것이다. 에너지밀도 400~500 Wh/kg 수준도 이론상 가능하며, 이는 현재 최고급 리튬이온전지 대비 1.5~2배 수준이다. 다만 리튬금속 음극은 아직 해결해야 할 과제가 많아, 상용화된 전고체 전지의 초기 버전은 실리콘 음극을 먼저 채용하는 방향이 유력하다.

(3) 수명 열화 예측 문제 - '예고 없는 절벽' 제거

리튬이온전지의 수명 열화 패턴에는 불편한 특징이 있다. 충·방전 사이클 초중반에는 용량이 천천히 줄어들다가, 어느 순간 갑자기 빠르게 감소하는 '절벽형' 패턴을 보인다. 이는 계면(界面) 열화가 연쇄적으로 가속되는 cascade 현상 때문이다. 전기차 운전자 입장에서는 멀쩡히 달리던 차가 어느 날부터 갑자기 주행거리가 급감하는 경험으로 나타난다. 바람직한 열화 패턴은 반대다. 초기에 다소 빠르게 떨어지더라도 이후 아주 천천히 완만하게 감소하는 'self-limiting' 패턴이 선호된다. 이는 계면에 안정적인 보호막(passivation layer)이 형성되어 이후 반응을 스스로 억제하는 현상이다. 예측이 가능하고 관리가 용이하다. 전고체 전지는 300사이클 이상에서도 용량이 완만하게 감소하는 특성을 보이며, 리튬이온전지가 300 사이클 이후 급감하는 것과 대비된다. 고체 전해질이 전극 계면을 안정적으로 유지하기 때문이다. 자동차 타이어를 생각해 보자. 서서히 마모되다가 어느 날 갑자기 터지는 타이어와, 마모 속도는 약간 빠르더라도 끝까지 완만하게 닳아 미리 교체 시점을 알 수 있는 타이어. 운전자에게 안전한 것은 단연 후자다.

도표 59. 전고체 배터리 구조



자료: 언론보도

2) 리튬이온전지의 발화 기작과 전고체의 해법

리튬이온전지의 발화는 우연한 사고가 아니라 구조적으로 내재된 위험이 발현되는 것이다. 그렇다면 그 내재적 위험 경로를 이해해야 전고체가 왜 해법인지 납득할 수 있다.

발화의 경로는 다음 단계를 거친다 : 단락 → 산소 방출 → 열폭주 → 점화. 배터리 내부에 단락(단락: 양극과 음극이 직접 연결되는 상태)이 발생하면 국소적으로 과열이 시작된다. 단락의 원인은 주로 두 가지다. 하나는 공정 불량(전극 절단 시 발생한 금속 이물질, 분리막 결함 등)이고, 다른 하나는 반복된 과충전으로 음극에 리튬이 수지(나뭇가지) 형태로 자라는 덴드라이트(dendrite)가 분리막을 뚫는 것이다.

과열이 시작되면 양극 활물질(NCM, NCA 등)의 결정 구조가 무너지면서 내부에 잠겨 있던 산소가 방출된다. 이 산소는 전해액의 유기 용매와 만나면 급격한 산화 반응을 일으킨다. 반응열이 더 많은 산소를 방출시키고, 그 산소가 다시 반응열을 만들어내는 자기 강화 루프, 즉 열폭주(thermal runaway)가 시작된다. 가연성 전해액은 바로 이 열폭주의 연료가 된다.

전고체 전지는 가연성 유기 용매 전해질을 고체 전해질로 교체함으로써 열폭주의 '연료'를 없앤다. 내부 단락이 발생하더라도 태울 것이 없으면 화재는 일어나지 않는다. 이는 발화 위험을 관리하는 것이 아니라 구조적으로 원천 차단하는 것이다. 나아가 고체 전해질은 기계적으로 단단하기 때문에 덴드라이트 성장을 물리적으로 억제하는 효과도 기대된다. 다만 이 부분은 소재와 공정 조건에 따라 편차가 크며, 완전히 해결된 과제는 아니다.

물론, 전고체 전지가 무조건 발화에 안전한 것은 아니다. 황화물계 고체 전해질과 NCM 양극재를 조합할 경우, 고온 상태에서 화학적 불안정성이 발생하고 특정 가열 속도 조건에서 여전히 열폭주가 발생할 수 있다는 연구 결과가 있다. '불연성 전해질 = 완전한 안전'이라는 단순 도식은 경계해야 한다.

도표 60. 열폭주 현상



자료: 언론보도

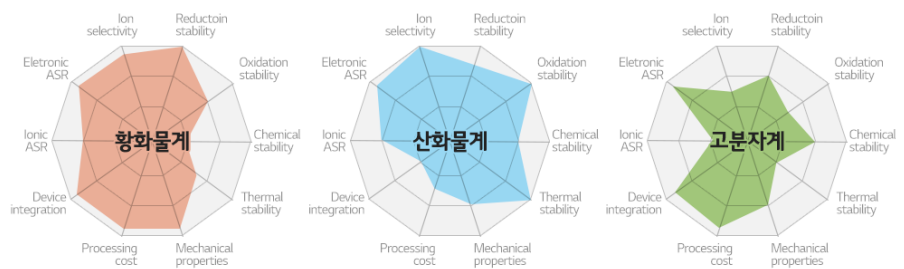
3) 고체 전해질 소재: 세 가지 후보의 경쟁

전고체 전지의 성능과 공정은 고체 전해질 소재에 의해 결정된다. 현재 세 가지 계열이 경쟁 중이다. : 황화물계(Sulfide), 산화물계(Oxide), 폴리머계(Polymer). 현재 전기차용 전고체 전지의 주류 방향은 황화물계 전고체 전지, 또는 산화물계 고체 전해질 + 소량 액체 전해질 혼합 방식이다.

특히, 황화물계가 주목받고 있는데 가장 큰 이유는 이온전도도와 계면저항이다. 황화물계 고체 전해질의 이온전도도는 기존 액체 전해질에 근접한 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ S/cm 수준으로, 세 계열 중 압도적으로 높다. 배터리의 내부 저항을 낮게 유지할 수 있어 고출력·급속충전 특성에 유리하다. 계면 저항도 낮아 전극과의 밀착성이 좋다는 장점이 있다.

단점은 대기 안정성이다. 수분과 반응하면 황화수소(H_2S)를 발생시키며, 이는 독성이 있고 부식성이 강하다. 따라서 극도로 건조한 드라이룸 환경에서만 공정이 가능하며, 이것이 제조 비용 상승의 주된 원인이다.

도표 61. 고체 전해질 소재



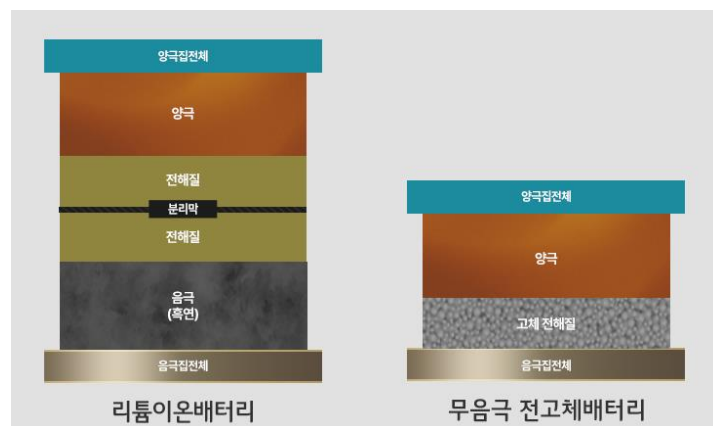
자료: BatteryInside

4) 삼성이 제시한 무음극 전고체 전지

2020년 삼성종합기술원(SAIT)이 국제학술지 네이처 에너지에 발표한 논문은 전고체 전지 연구의 중요한 이정표가 됐다. 핵심 아이디어는 은나노입자로 리튬 증착을 제어한다는 것이다. 기존 리튬금속 음극의 문제는 충전 시 리튬이온이 음극 표면에 불균일하게 증착된다는 것이다. 특정 지점에 리튬이 집중되면서 덴드라이트가 자라고, 이것이 단락과 수명 저하의 원인이 된다. 삼성 연구팀은 음극 집전체 표면에 은나노입자(Ag-C composite layer)를 적용했다. 은나노입자가 리튬이온이 증착될 때 핵생성(nucleation) 지점 역할을 하여, 리튬이 표면 전체에 고르게 얇은 층을 이루며 증착되도록 유도하는 것이다. 이를 무음극(anode-free) 설계라 부르는데, 충전 전 상태에서는 금속 음극이 없다가 충전 시 리튬이 자동으로 형성된다. 0.6 Ah 용량의 파우치 셀 기준 99.8%의 초기 쿨롱 효율 달성에 성공했고, 1,000 사이클 수명 달성 (60°C, 0.2C 조건)했으나, 60°C 고온 + 0.2C 저속이라는 조건에서만 우수한 성능이 발현되는 한계가 있다. 즉, 상온(25°C)·고속 충전 조건에서는 성능이 급격히 저하된다.

미국 UC샌디에이고와 LG에너지솔루션이 공동 발표한 연구는 상온에서도 구동 가능한 황화물계 전고체 전지의 가능성을 제시했다. 다만 이 연구에서는 약 50 MPa(메가파스칼)에 달하는 초고압 조건이 필요했다. 50 MPa는 수심 5,000m의 수압과 유사한 수준이다. 셀 성능을 유지하는 데 필요한 압력이 이 수준이라면 현실적인 배터리 팩 설계가 불가능하다. 상온 구동의 원리는 증명했지만, 제조 가능성 측면에서는 아직 갈 길이 멀다는 의미다.

도표 62. 무음극 전고체 배터리



자료: BatteryInside

5) 남겨진 과제들

(1) WIP 가압 공정: 가장 중요한 양산 과제

전고체 전지, 특히 황화물계는 전극과 전해질 사이의 계면을 밀착시키기 위해 외부 압력이 필수적이다. 고체끼리는 액체처럼 자연스럽게 빈틈을 채우지 못하기 때문이다. 현재 사용되는 방식이 WIP(Warm Isostatic Press, 온간 등방 가압)다. 시료를 밀폐 용기에 넣고 유체를 통해 모든 방향에서 균일하게 압력을 가하는 공정이다. 유체의 성질 덕분에 파스칼의 원리에 따라 어느 방향이든 동일한 압력이 작용한다. 균일한 압력 분포가 핵심 장점이다. 문제는 불연속 공정이라는 점이다. 매 시료를 용기에 넣고 밀폐한 뒤 가압하고, 다시 꺼내는 과정을 반복해야 한다. 마치 세탁기에 세탁물을 한 번씩 넣고 돌리는 것처럼, 연속 생산이 불가능하다. 자동차 배터리처럼 대규모 양산이 필요한 용도에서는 이것이 치명적인 병목이다.

(2) 저압 구동: 방전 시 공극 문제

충·방전 사이클이 반복되면 리튬이온이 음극에서 빠져나가면서 체적이 수축하고 빈 공간(공극)이 생긴다. 액체 전해질이라면 이 공간을 메꾸지만, 고체 전해질은 그럴 수 없다. 공극이 생기면 전극-전해질 계면이 분리되어 저항이 급증하고 성능이 급격히 열화된다. 저압 조건에서 이 현상은 더 빠르게 진행된다. 이를 억제하기 위해서는 리튬이온 flux(단위 면적당 이온 이동량)가 전극 표면에 균일하게 분산되어야 한다. 특정 지점에 이온이 집중되면 그곳에서 먼저 공극이 생기고, 이것이 주변으로 전파된다. 균일한 이온 분포를 위한 전극 구조 설계, 바인더 최적화, 음극 활물질 선정이 중요 과제다.

(3) 계면 열화: 양극재와 전해질의 부반응

양극재와 고체 전해질 사이에는 화학적 부반응이 존재한다. 두 소재의 계면에서 새로운 화합물이 형성되어 이온 전도를 방해하는 것이다. 이는 액체 전해질에서도 존재하는 문제지만, 고체-고체 계면에서는 물리적 접촉 압력이 일정하지 않을 경우 더욱 심화된다. 양극재 표면 코팅(LiNbO₃, Li₃PO₄ 등)이나 고체 전해질 조성 최적화를 통해 상당 부분 완화할 수 있음이 확인되었지만, 완전한 해결은 아직이다.

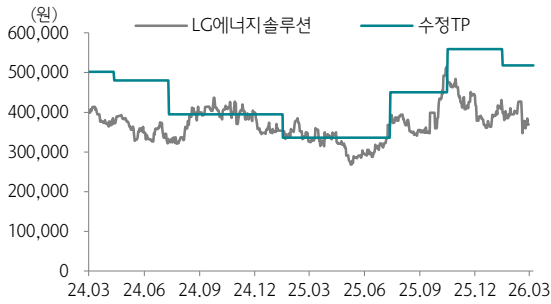
(4) 테슬라는 왜 전고체 전지에 관심이 없나?

전고체 전지가 차세대 배터리의 표준으로 주목받는 가운데, 테슬라의 행보는 이례적이다. 테슬라는 전고체 전지 개발에 적극적으로 뛰어들지 않고 있다. 그 이유는 테슬라의 배터리 전략 방향에서 찾을 수 있다. 테슬라는 '4680 원통형 셀'로 상징되는 셀 설계 혁신, 건식 전극 공정(드라이 코팅)을 통한 원가 절감, 그리고 배터리 팩을 차체 구조재로 활용하는 셀-투-바디(Cell-to-Body) 기술에 집중하고 있다. 즉, 소재 혁신보다는 공정·구조 혁신을 통한 원가 경쟁력 확보가 테슬라의 전략이다.

전고체 전지는 기술적 잠재력은 높지만, 현재로서는 제조 원가가 리튬이온전지 대비 수배에 달하고 양산 공정의 불확실성도 크다. 테슬라 입장에서는 양산성이 검증되지 않은 기술에 자원을 집중하는 것보다, 현재의 리튬이온전지를 더 싸고 더 빠르게 만드는 것이 현재 시장에서 유리하다는 판단으로 해석된다.

투자 의견 변동 내역 및 목표주가 괴리율

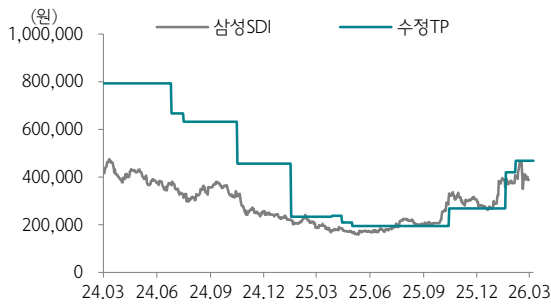
LG에너지솔루션



날짜	투자 의견	목표주가	괴리율	
			평균	최고/최저
26.1.30	BUY	518,000		
25.10.31	BUY	559,000	-25.16%	-13.33%
25.7.28	BUY	450,000	-14.66%	14.22%
25.1.31	Neutral	336,000	-3.53%	-20.24%
24.10.29	Neutral	395,000	-3.37%	-12.78%
24.7.26	BUY	395,000	-3.77%	10.51%
24.4.26	BUY	480,000	-26.10%	-18.13%
24.1.29	BUY	502,000	-21.79%	-16.43%

투자 의견 변동 내역 및 목표주가 괴리율

삼성SDI



날짜	투자 의견	목표주가	괴리율	
			평균	최고/최저
26.2.20	BUY	469,000		
26.2.3	BUY	420,000	-8.65%	-2.86%
25.10.29	Neutral	268,000	15.57%	-2.05%
25.5.16	Neutral	195,000	1.79%	60.00%
25.4.28	Neutral	210,000	-17.31%	-12.57%
25.1.31	Neutral	233,010	-14.72%	3.78%
24.10.31	BUY	457,208	-44.86%	-27.73%
24.7.31	BUY	632,455	-46.46%	-40.02%
24.7.10	BUY	667,701	-48.31%	-42.89%
24.1.31	BUY	793,017	-49.75%	-40.00%

Compliance Notice

- 당사는 2026년 3월 16일 현재 해당회사의 지분을 1%이상 보유 하고 있지 않습니다
- 본 자료를 작성한 애널리스트(김연수)는 자료의 작성과 관련하여 외부의 압력이나 부당한 간섭을 받지 않았으며, 본인의 의견을 정확하게 반영하여 신의성실 하게 작성하였습니다.
- 본 자료는 기관투자자 등 제 3자에게 사전 제공한 사실이 없습니다
- 본 자료를 작성한 애널리스트(김연수)는 2026년 3월 16일 현재 해당회사의 유가증권을 보유하고 있지 않습니다

본 조사자료는 고객의 투자에 정보를 제공할 목적으로 작성되었으며, 어떠한 경우에도 무단 복제 및 배포 될 수 없습니다. 또한 본 자료에 수록된 내용은 당사가 신뢰할 만한 자료 및 정보로 얻어진 것이나, 그 정확성이나 완전성을 보장할 수 없으므로 투자자 자신의 판단과 책임하에 최종결정을 하시기 바랍니다. 따라서 어떠한 경우에도 본 자료는 고객의 주식투자의 결과에 대한 법적 책임소재의 증빙자료로 사용될 수 없습니다.

투자등급 관련사항 및 투자 의견 비율공시

- 투자 의견의 유효기간은 추천일 이후 12개월을 기준으로 적용
- 기업의 분류
BUY(매수)_목표주가가 현재가 대비 15% 이상 상승 여력
Neutral(중립)_목표주가가 현재가 대비 -15%~15% 등락
Reduce(비중축소)_목표주가가 현재가 대비 15% 이상 하락 가능

- 산업의 분류
Overweight(비중확대)_업종지수가 현재지수 대비 15% 이상 상승 여력
Neutral(중립)_업종지수가 현재지수 대비 -15%~15% 등락
Underweight(비중축소)_업종지수가 현재지수 대비 -15%~15% 등락

투자등급	BUY(매수)	Neutral(중립)	Reduce(매도)	합계
금융투자상품의 비율	96.76%	3.24%	0.00%	100%

* 기준일: 2026년 03월 13일