

STI Brief

—
건식전극 공정 기술

Top Premier international
tier research Consortium

I 서 론

1

1. 개요	1
2. 배경 및 필요성	2
3. 기술의 정의 및 범위	4

II 국내·해외 동향

6

1. 해외 정책 동향	6
2. 국내 정책 동향	13
3. 시장·산업 동향	15
4. 기술개발 동향	19
5. 국제협력 동향	31

III 결 론

36

1. 시사점	36
--------------	----

IV 참고문헌

38

I 서 론

1. 개요

▣ 건식전극 공정 : 이차전지 차세대 전극 제조기술

- (정의) 이차전지 제조에 활용되는 건식전극 공정은 최근 전 세계적으로 가장 주목받는 차세대 전극 제조기술로서, 기존 습식전극 공정의 한계를 근본적으로 개선하면서, 친환경, 저비용, 고에너지 밀도 배터리 생산을 가능하게 하는 핵심기술
 - 동 기술은 전극 제조시 용매를 사용하지 않고, 활물질, 전도재, 바인더를 건식상태에서 혼합 후 시트화, 라미네이션(압착) 후 전극층을 형성하는 무용매 전극 제조 기술
- (습식전극과 건식전극 공정) 건식전극 공정은 기존의 습식전극 공정이 가지고 있던 복잡한 공정구조와 환경적 제약을 근본적으로 개선한 진화된 형태 전극 제조 기술
 - (기술적 차이점) 습식공정에서는 활물질과 바인더를 용매에 섞어 슬러리로 만든 뒤 이를 집전체에 코팅하고 건조해야 하지만, 건식공정은 ‘용매사용’과 ‘건조단계’를 제거
 - (건식전극 공정의 장점) 제조 에너지 소비 절감, 공정시간 단축, 유해용매(NMP) 사용으로 인한 환경부담 제거와 동시에 후막전극(두꺼운 전극)을 안정적 제조 가능



출처 : 배터리인사이드 건조 과정을 없애 제조 효율화를 높인 혁신 기술, ‘건식 전극 공정’(2024.09.12)

| 건식전극과 습식전극 공정의 차이점 |

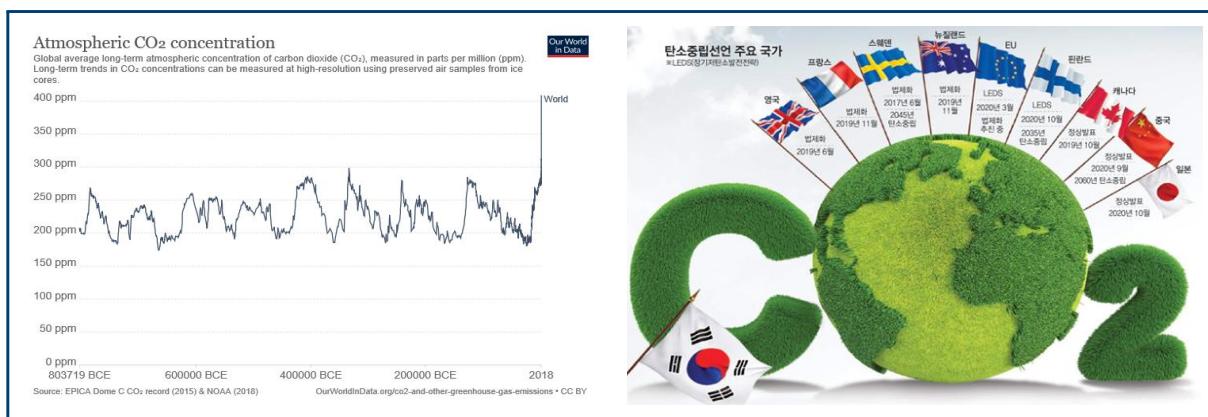


2. 배경 및 필요성

1 배경

■ 습식공정 대안으로서 건식공정 주목

- 기존 배터리 제조에 널리 활용되고 있는 습식공정은 용매 사용으로 인한 에너지, 설비부담, 환경오염 위험, 총 분리로 인한 전극 불균일성 등 고효율, 친환경 공정 구현에 한계 보유
- 또한 습식 공정에서 발생하는 대량의 용매 증발과 건조 과정은 에너지 소비를 증가시켜, 산업 부문의 이산화탄소 배출 저감 목표 달성을 저해하는 주요 요인으로 지적
- 아울러 탄소중립 및 자원효율 제고를 핵심 정책 기조로 삼는 국가들이 확대되며, 고에너지, 고용매 기반의 습식 공정을 대체할 수 있는 친환경, 저탄소형 건식공정 개발 필요성 확대



| 전 세계 대기 중 이산화탄소 농도 그래프 및 탄소중립선언 주요국 |

■ 배터리산업의 국가전략사업화

- 글로벌 주요국은 배터리 산업을 국가전략산업으로 인식하고, 친환경, 저비용, 고효율 제조 공정 혁신을 통한 기술, 공급망 경쟁력 강화에 주목
- 이 과정에서 기존 습식 공정의 한계를 극복할 수 있는 대안으로 ‘건식 전극공정’의 중요성이 급부상하고, 이를 지원할 수 있는 제조공정 혁신 및 정책적 지원책 마련
 - 유럽연합(EU)은 2050년 탄소중립 달성을 위해 European Green Deal(EGD) 정책을 수립하여 지속가능한 산업·사회 전환을 국가 핵심 아젠다로 추진 및 저탄소·무용매 제조 혁신을 위해 건식공정 기술 개발과 산업 적용을 적극 지원 중



| EU 친환경 정책 구조도 |

2 필요성

▣ 환경, 원가 절감, 성능 제고를 위한 건식공정 개발 필요

- (환경 및 안정) 건식공정은 용매를 사용하지 않아 VOC 배출 및 화학물질 취급 위험을 최소화하고, 에너지 소비 및 탄소배출 저감을 통한 탄소중립 규제에 대한 선제적 대응을 위한 핵심 대안
- (원가 및 설비) 건조, 용매 회수 공정이 불필요해 라인 단순화 및 설비 투자비, 운영비 절감이 가능하며 제조 효율 향상을 통해 가격 경쟁력 확보에 기여
- (성능 제고) PTEF 섬유화 기반의 자립 필름 구조를 활용해 고하중, 후막 전극 구현이 가능 하므로, 에너지 밀도 향상 및 셀, 팩 단가 절감 등 고성능, 고효율 전지 생산을 위한 핵심 기술 개발 필요



| 기술·환경·경제 파급효과 모식도 |



3. 기술의 정의 및 범위

◆ 전극기술 정의 및 범위 구성

- (정의) 전극기술은 이차전지의 에너지 저장, 방출 성능을 좌우하는 핵심 기술군으로, 소재 선정부터 구조설계, 제조공정, 성능평가에 이르기까지 전 과정에 걸친 기술영역 포괄
- (범위구성) 전극기술은 크게 소재, 설계, 공정, 성능평가 네 축으로 구분

| 전극기술 범위 구성 |

구분	주요 내용	세부 기술 영역
① 소재 기술	에너지 저장 반응에 직접 관여하는 물질의 개발 및 최적화	<ul style="list-style-type: none"> • 활물질(양극 : NCM, NCA, LFP 등 / 음극 : 흑연, Si-C, Li금속 등) • 도전재(Carbon Black, CNT 등) • 바인더(PVDF, PTFE, CMC/SBR 등) • 집전체(AI, Cu 등 금속박 소재)
② 설계 기술	전극 구조 및 물리·전기화학적 특성의 최적화	<ul style="list-style-type: none"> • 전극 두께 및 밀도 설계(후막화, 고하중) • 기공도 및 이온 확산 경로 제어 • 전극 내부 균일성 확보 • 전극-전해질 계면 안정화 설계
③ 공정 기술	전극 제조 및 양산 효율화를 위한 공정 기술	<ul style="list-style-type: none"> • 습식공정(슬러리 혼합, 코팅, 건조, 압연) • 건식공정(용매 미사용 혼합·압착 방식) • 공정 자동화 및 연속화(Roll-to-Roll 등) • 에너지 절감형·친환경 제조기술
④ 성능 평가 및 신뢰성 기술	전극 성능·수명·안정성 검증 및 품질 확보	<ul style="list-style-type: none"> • 전기화학적 성능평가(용량, 저항, 수명 등) • 열·기계적 안정성 평가 • 미세구조 분석 및 열화 메커니즘 규명

◆ 이차전지 전극 공정기술 개요

- 전극기술의 핵심은 전극 제조로서 일반적으로 두 가지 공정기술로 구분
 - (습식공정) 활물질·도전재·바인더를 용매(NMP 등)와 혼합해 슬러리 형태로 만든 뒤, 금속 집전체 위에 코팅·건조·압연하는 방식
 - (건식공정) 용매를 사용하지 않고 활물질·도전재·바인더를 고체 상태로 혼합 후 압착·성형하여 전극을 제조하는 방식

| 건식 전극 공정과 습식 전극 공정 비교 |

제조과정	습식 전극 공정	건식 전극 공정
비용	<ul style="list-style-type: none"> • 건조 및 용매 회수 관련 에너지 비용 : 47% • 설비 투자비 : 14.2~19.0% • 용매 재료비 1~2% 	<ul style="list-style-type: none"> • 건조 및 용매 회수 공정이 없어 전체 비용의 약 15% 절감 • 건식 전극 코팅 관련 에너지 및 설비비 필요
환경적 영향	<ul style="list-style-type: none"> • 독성 용매 사용 및 높은 에너지 소비로 인한 CO₂ 배출 증가 	<ul style="list-style-type: none"> • 용매 미사용으로 친환경적이며, 에너지 소비 약 1/3 수준 • 10 kWh 생산당 약 1,000 kg CO₂ 배출 저감
제조 효율	<ul style="list-style-type: none"> • 슬러리 제조–코팅–건조–용매 회수 등 7단계 공정 소요 • 건조·회수 과정에 3 시간 이상 소요 	<ul style="list-style-type: none"> • 공정 단계 5단계로 단축, 건조 공정 불필요 • 작업시간 약 16.2~21.4% 절감
에너지 소비	<ul style="list-style-type: none"> • 테슬라 개선형 Continuation • PTFE + PVDF/CMC/PEO 등 복합 바인더 적용, 전극 밀도·전단응력 조건 개선 	<ul style="list-style-type: none"> • 건조 및 용매 회수 공정 제거로 에너지 비용 38~40% 절감
적용성	<ul style="list-style-type: none"> • 용매에 민감한 고체전해질(Sulfide, Garnet)에 비적합 	<ul style="list-style-type: none"> • Sulfide, Oxide, Polymer계 SSE와 모두 호환 가능
전기화학적 성능	<ul style="list-style-type: none"> • 두꺼운 전극(> 4 mAh/cm²)에서 바인더 농도 구배 및 취약성, 다공도 증가(+4~10%) 	<ul style="list-style-type: none"> • 균일한 바인더 분포, 낮은 다공도, 우수한 접착력 및 고용량(> 5 mAh/cm²) 구현 가능

출처 : Zhang et al, Dry electrode technology, the rising star in solid-state battery industrialization, Matter, 2022



출처 : 배터리인사이드, 건조 과정을 없애 제조 효율화를 높인 혁신 기술, '건식 전극 공정'(2024.09.12)

| 건식전극과 습식전극 공정의 차이점 |



II

국내·해외 동향

1. 해외 정책 동향

- 주요국은 건식 전극 공정 기술 확보 및 경쟁력 강화를 위해 산업정책과 글로벌 넷제로(Net Zero) 달성을 위한 환경정책을 병행 추진하며, 글로벌 전략기술 경쟁 시대에 대응

| 건식 전극 공정과 습식 전극 공정 비교 |

국가	산업정책(제조·투자·보조금 등)	환경정책(용매/NMP·PFAS·탄소규제 등)
미국	• IRA §45X 생산세액공제 : 배터리 부품·광물 생산 인센티브 (국내 생산 요건) (Federal Register)· DOE 배터리소재/제조·리사이클링 보조금(BIL §40207, 수십억 달러 규모)	• EA NMP(용매) TSCA 위험관리 규칙안(2024.6)을 통해 특정 용도 금지·작업자 보호 요구 등(건식공정 확산에 간접 유인)
EU	• IPCEI Batteries·역내 산업정책 패키지로 배터리 밸류 체인 투자 촉진(회원국 보조금·RRF 연계)	• EU 배터리 규정(2023/1542)을 통해 공급망 실사·탄소 발자국·재활용 함량 의무 등(친환경 공정 압력)·REACH NMP 제한(작업자 노출 한도 의무) (EUR-Lex)·PFAS 규제 추진(PVDF/PTFE 등 바인더 영향)
영국(UK)	• UK Battery Strategy(산업전략)·Faraday Battery Challenge('17-'25, £610m)·Automotive Transformation Fund(ATF) 등으로 생산·스케일업 지원	• UK REACH 위험관리 우선순위·PFAS 관련 규제 검토 진행(자국 체계)
일본	• GX(그린 트랜스포메이션) 정책 내 배터리 지원('24 회계 연도 2,385억 엔 등)·배터리산업전략(METI)·NEDO 차세대전지/전고체 대형 R&D 투자(상용화 가속)	• GX 기본방침/전환채권 등 탈탄소 로드맵(제조공정 탄소 중립화 압박)
중국	• 공업정보화부(MIIT) 리튬전지 산업 관리지침·표준 강화 : 과잉증설 억제, 품질·기술혁신, 생태보호·에너지절약 연계 (입지 제한 포함)	• 환경·안전 요구를 강화하는 제조 표준/지침 개정 추진 (오염·안전관리 강화)
호주	• National Battery Strategy(2024) : 배터리 제조·공급망 다변화 전략·ARENA Battery Breakthrough Initiative (5억 AUD) 등 산업화 촉진	• 순환경·재활용·안전기준 강화 방향(전략 내 명시)

■ 미국 : 산업·에너지 안보 중심 제조 인센티브 확대

- (정책기조) 미국은 산업 및 에너지 강화를 핵심으로 제조 인센티브 확대를 통한 배터리와 전극 산업의 경쟁력 강화 추진
- (법적·제도 기반) 「인플레이션 감축법(IRA, 2022)」, 「Unleashing American Energy EO (2025)」
- (세제·재정지원) 자국 내 배터리 부품, 제조설비 투자비, 전기차 구매 대상 세액공제 등 다양한 지원정책 추진
 - IRA를 통해 국내 배터리 부품·전극 생산 단위당 세액공제, 제조설비 투자비의 최대 30% 공제(25년 60억 달러 2차 배분) 및 전기차 구매세액 공제(중국산 부품 제외) 추진

- 「48C」는 제조 설비 투자비의 최대 30%를 공제하며, 2025년 1월 기준 두 번째 배분(Second Allocation)에서 약 60억 달러가 추가 지원
- 「45X」는 미국 내에서 생산된 배터리 부품 및 핵심 광물에 대해 단위당 세액공제를 제공하며, 건식 전극에 필요한 전극 시트 및 롤 역시 적용 대상에 포함

| IRA 주요 지원 내용 |

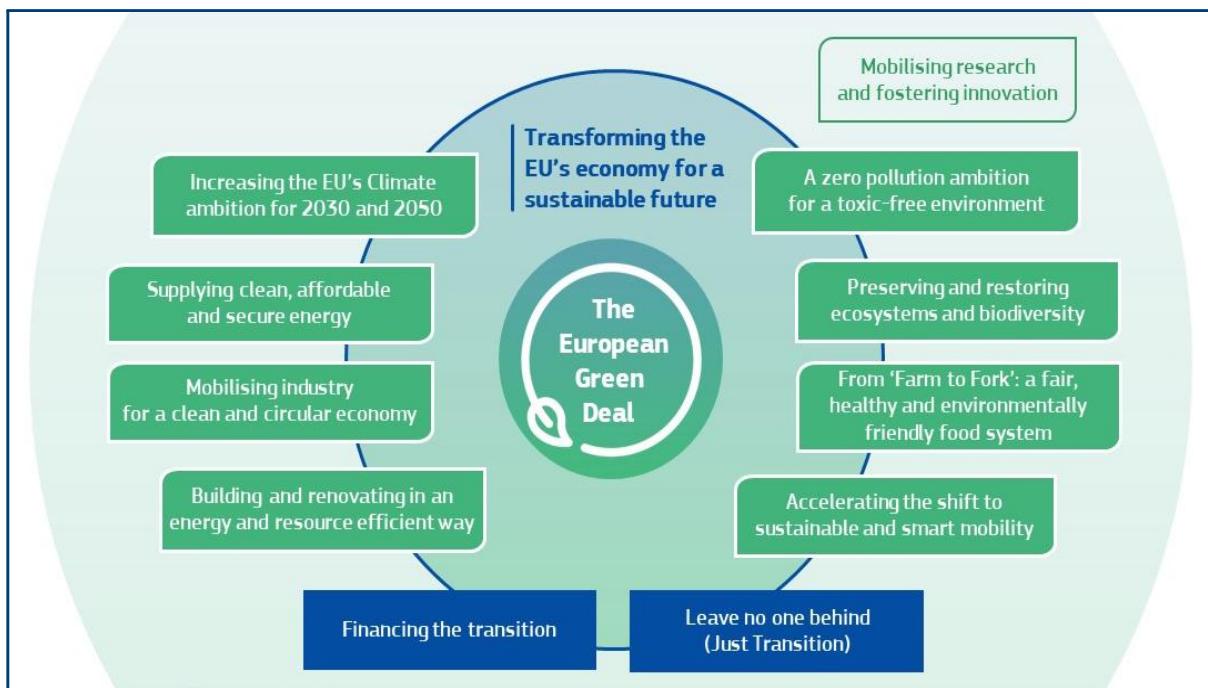
- (규제·환경정책) 美 환경보호청(EPA) TSCA¹⁾에 근거하여 NMP·PFAS 관리 강화, 불소계 바인더 규제 및 VOC 저감 병행 추진
 - (NMP) EPA TSCA에 기반한 NMP 사용 제한(2024) 추진
 - (관리강화) PFAS Reporting Rule (2023) 및 PFAS Strategic Roadmap에 따라 PVDF·PTFE 관리 강화
- (산업조달정책) 전기차, 배터리 제조라인 현지화 촉진 및 에너지 규제 완화로 민간 제조 투자 확대를 위한 조달정책 추진
 - 배터리·전극 라인 현지화 촉진, 청정에너지 보조금(45Y·48E) 재검토 중이며, 건식전극 기술의 국산화 및 탄소저감 제조라인 우선 지원 추진

1) Toxic Substances Control Act



▣ 유럽연합 : 탄소중립 및 지속가능 제조 중심 규제·지원 병행

- (정책기조) 유럽연합은 2050년 탄소중립 실현과 산업의 탈용제·저탄소 제조 전환을 위해, 규제 강화와 재정 지원을 병행하는 녹색산업 전략 추진
- (법적·제도 기반) 건식공정을 포함한 저탄소·무용제 제조공정을 산업 전반의 표준화 대상으로 규정하고, 관련 법제 기반 강화
 - 「European Green Deal(2019)」, 「Fit for 55(2021)」을 통해 2050년 넷제로, 2030년 온실가스 55% 감축 법제화
 - 「산업배출지침(IED)」, 「VOC Solvents Directive」로 유해물질 배출 및 용제 사용 관리 강화



출처 : European Commission, Communication from the Commission, The European Green Deal, 2019

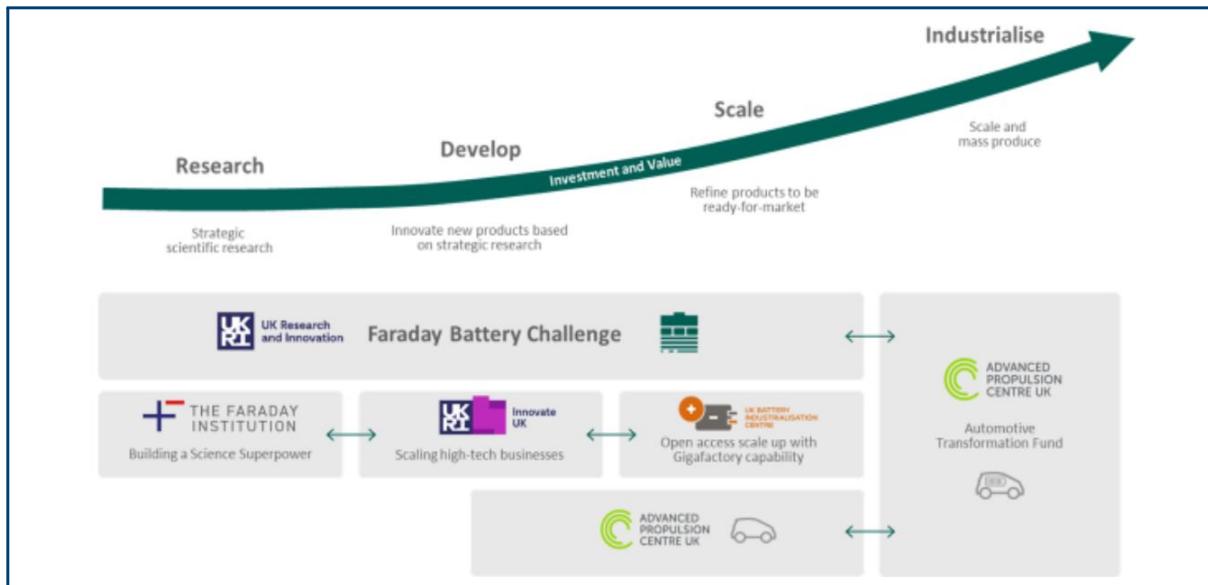
| European Green Deal 목표 및 지원분야 |

- (세계·재정지원) 산업의 친환경 전환과 건식전극 실증을 촉진하기 위해 대규모 재정·융자 지원 프로그램 운영
 - 「Cohesion Policy 2021–2027」 420억 유로 중 75%를 녹색산업화 프로젝트 투입
 - Horizon Europe Dry Coating 실증 과제(HORIZON-CL5-2025-D3-01) 추진
 - EIB(유럽투자은행) 융자 및 세제 혜택을 통한 재생·저탄소 설비 투자 촉진

- (규제·환경정책) 에너지 효율·화학물질 규제·자원순환을 포괄하는 다층적 규제 체계를 통해 환경 기준 강화
 - 「REDⅢ(2023/2413)」를 통한 재생에너지 비중 42.5% 목표 달성, 「EED(2023/1791)」을 통한 연 1.49% 에너지 절감 의무 부과
 - 「PFAS Restriction」 및 「PPWR(2025)」를 통한 불소계 물질 전면 금지 추진
- (산업조달정책) 녹색 제조 공정에 대한 조달 우대와 산업보조금 체계를 통해 건식공정 확산 유도
 - REPowerEU·녹색산업인증제 기반으로 저탄소 제조공정에 우선 구매 기준 적용하며 Dry Process를 ‘지속가능한 배터리 제조 표준’으로 지정

❖ 영국 : 기후변화 대응과 에너지안보 동시 달성을 위한 실용적 녹색전략

- (정책기조) 영국은 탄소중립(Net Zero) 달성과 에너지안보 확보를 병행하며, 녹색 제조 공정 혁신을 국가 성장전략 추진
- (법적·제도 기반) 기후변화 대응과 녹색산업 육성을 제도적으로 통합하여 건식전극 등 친환경 제조 전환 기반 마련
 - 「Climate Change Act(2008, 개정)」으로 2050 넷제로 법제화 및 「Net Zero Growth Plan (2023)」으로 산업·에너지정책 일원화



출처 : Department for Business and Trade, UK Battery Strategy, 2023

| 영국 정부의 배터리 산업화 로드맵 및 주요 지원기관 구조 |



- (세제·재정지원) PFAS 및 폐기물 관리 강화를 통해 불소계 공정의 단계적 전환 유도
 - 「UK REACH PFAS RMOA(2023)」에 따른 PFAS 단계적 규제 및 폐기물 내 PFAS 혀용농도 기준 강화
- (규제·환경정책) PFAS 및 폐기물 관리 강화를 통해 불소계 공정의 단계적 전환 유도
 - 「UK REACH PFAS RMOA(2023)」에 따른 PFAS 단계적 규제 및 폐기물 내 PFAS 혀용농도 기준 강화
- (산업조달정책) 순환경 경제 및 ESG 조달기준 확립을 통해 친환경 배터리 제조 기반 강화
 - 배터리 여권(Battery Passport) 및 재활용 표준화 및 녹색조달 정책 기반 산업전반 ESG 강화

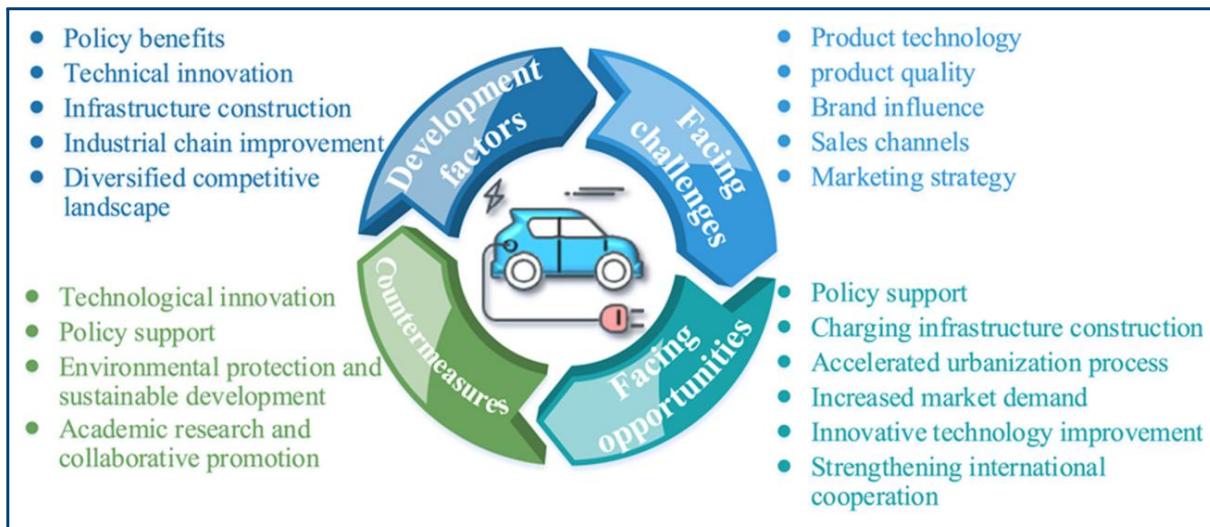
일본 : 차세대 산업경쟁력 확보 중심의 기술주도형 혁신정책 추진

- (정책기조) 일본은 차세대 전지 및 핵심소재 분야를 국가 전략산업으로 지정하고, 기술혁신을 통한 제조 효율성 제고와 탄소감축을 병행 추진
- (법적·제도 기반) 정부 차원의 중장기 연구개발 프로그램과 산업전략을 통해 건식공정을 핵심 혁신영역으로 제도화
 - 「그린기술혁신펀드(GIF, 2021)」로 이차전지 기술개발 지원 및 「배터리산업전략(2025 개정안)」에서 제조공정 효율화 및 건식공정 기술 명시
- (세제·재정지원) 대규모 국가펀드와 공공연구기관을 중심으로 건식전극 공정 및 전고체 전지 기술개발 집중 지원
 - 2조 엔 규모의 GIF를 통해 전극·전해질·공정 효율화 과제 수행, NEDO의 프로젝트²⁾를 통해 건식 혼합·압착 기술 연구 및 중소기업청 및 AIST 주도로 파일럿 설비 구축 지원
- (규제·환경정책) PFAS 등 불소계 물질 규제 강화와 함께, 비불소계(F-free) 바인더 및 친환경 공정으로의 전환 촉진
 - 「화학물질심사규제법(CSCL, 2024)」 개정으로 PFAS 138종 제조·수입 금지 및 비불소계 대체소재 개발 및 공정 안전기준 강화
- (산업조달정책) 건식공정 기반의 생산라인 효율화 및 표준화 추진을 통해 전고체전지 상용화 지원을 위한 산업조달정책 추진
 - 제조라인 소형화·전력절감 중심 기술개선 및 전극·장비 표준화 및 국제규격 대응 강화

2) 차세대 전고체 축전지 소재 프로젝트

◆ 중국 : 정부주도형 저탄소 제조전환 및 자립화 강화

- (정책기조) 중국은 신에너지차 산업을 중심으로 저탄소 제조공정 전환과 자국 내 공급망 자립화 추진
- (법적·제도 기반) 국가 중장기 산업계획을 통해 건식전극 등 친환경 제조공정을 제도적 지원
 - 「신에너지차 산업발전계획(2021~2035)」에서 친환경 공정 전환을 명문화 및 MIIT 주도로 제조표준 및 품질관리제도 수립



출처 : Overview of Chinese new energy vehicle industry and policy development, 2024

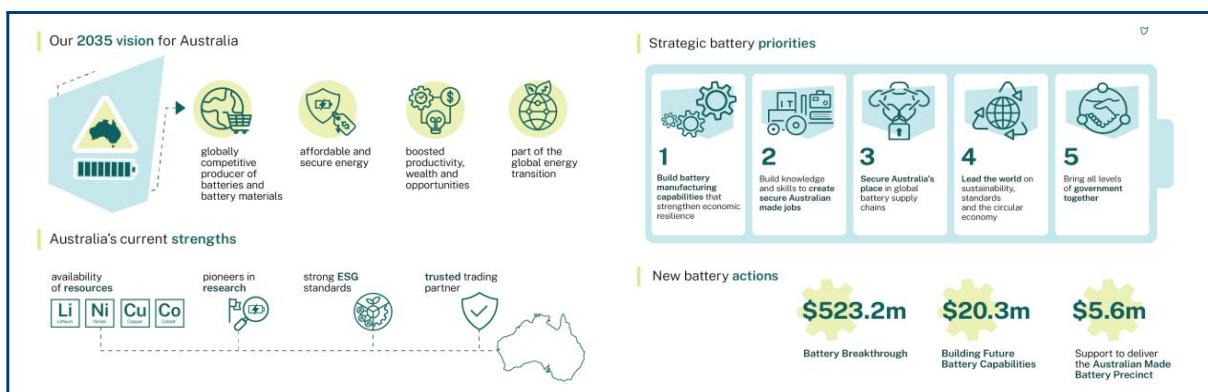
| 중국 신에너지차 산업 발전 계획(2021~2035) 개요 |

- (세제·재정지원) 국가 및 지방정부 주도의 보조금·세제지원으로 Dry Process 상용화 및 지역산업 육성 추진
 - Dry Process 시범라인 구축 지원, 지역산업 클러스터 조성 및 R&D 보조금 제공 및 탄소 절감형 설비투자 세액공제 추진
- (규제·환경정책) 에너지소비 절감, 탄소배출 감축, 재활용 체계 구축을 통한 지속가능 산업 기반 마련
 - 배터리 생산단계 에너지소비 20% 절감, 탄소배출 30% 감축 목표 달성을 및 생산-유통-재활용 전주기 관리제도 수립
- (산업조달정책) 산학연 협력과 지역별 산업 분산화를 통해 친환경 공정 확산 기반 마련
 - Dry Process 실증 및 산업클러스터별 기술보급 및 표준화·재활용 통합 생태계 조성



▣ 호주 : 제조기반 강화 및 에너지 자립 중심 산업 다변화

- (정책기조) 호주는 청정에너지 전환과 제조기반 강화, 핵심광물 활용을 통한 산업 구조 고도화 추진
- (법적·제도 기반) 배터리 산업을 전략산업으로 지정하고, 제조자립 및 청정공정 혁신을 위한 법제 기반 마련
 - 「National Battery Strategy(2024)」를 통해 배터리 산업 국가전략화 및 「Future Made in Australia Act(2024)」로 제조업 자립 기반 구축



출처 : National Battery Strategy, 2024

| (좌)호주 배터리전략 비전 및 강점 / (우) 동 전략 우선순위 및 지원규모 |

- (세제·재정지원) 건식전극 등 청정 제조공정을 실증·확산하기 위한 대규모 재정지원 추진
 - 「Battery Breakthrough Initiative」(5.2억 AUD)에 기반한 「Innovation Fund」(17억 AUD)로 건식공정 지원
 - 「Critical Minerals Production Tax Incentive」(2027~2041)에 기반한 광물 가공비 10% 세액 환급
- (규제·환경정책) PFAS 등 불소계 화학물질 전면 규제를 통한 친환경 공정 전환 촉진
 - 「PFAS NEMP 3.0(2025)」을 통한 500종 PFAS 수입·사용 금지 및 「IChEMS」 표준에 따라 산업용 불소계 화합물 전면 제한
- (산업조달정책) 국가 단위의 배터리 제조 인프라 조성과 청정공정 실증을 병행 추진
 - 「Australian Made Battery Precinct」(1억 AUD) 설립 및 ARENA·DISR 주도로 파일럿 설비 구축 및 기술 검증 지원

2. 국내 정책 동향

- 정부는 2030 이차전지 전략을 통해 건식전극 공정을 친환경, 저탄소, 고생산성 제조 혁신의 핵심 축으로 규정하고 R&D, 장비국산화, 공정 최적화, 규제, 재정 인센티브가 결합된 단계적 실증 중심 정책 패키지로 지원

- (정책목표) 정부의 「2030 이차전지 산업 발전전략」은 제조혁신(생산성 향상, 원가 절감, 탄소 저감)을 핵심 목표로 설정하여, 건식전극 공정을 무용매·무건조 기반의 후막 전극 구현이 가능한 차세대 핵심 제조기술로 규정하여 정책적 우선순위 기술로 공식화

**2030 이차전지 산업(K-Battery)
발전 전략**

2021. 7.

관계부처 합동

□ **고생산성 저탄소 공정, 디지털·스마트화** 등 제조공정의 생산성 제고

- 에너지 다소비* 공정인 건조공정을 효율화하는 장비개발, 건조공정이 필요 없는 **건식 공정** 개발로 친환경성 및 생산성 제고** 동시 달성
 - * 전지 제조공정 中 건조공정의 에너지 소비량이 82% 차지(Swedish Energy Agency, '19년)
 - ** 탄소저감형 중대형 이차전지 혁신제조기술개발 ('22~'25년, 산업부)
- AI·디지털 트윈 등 첨단기술을 활용한 혁신적 제조공정 도입**
 - * 가상 이차전지 양극재 Pilot 제조설비를 구축하고, 원격으로 현장설비 운영 지원 및 데이터 시뮬레이션을 통해 최적 공정 개발

출처: 2030 이차전지 산업 발전전략, 관계부처 통합, 2021

| 2030 이차전지 산업 발전전략 중 건식공정 개발 |

- (R&D정책) 정부(산업부 및 KEIT)는 건식전극 공정을 '탄소 저감형 고효율 전극 제조'로 지정하고 단순 기초연구가 아닌 기술성숙도(TRL)기반 R&D 대상으로 지원
 - (단계별 지원구조) ①기초·응용 연구, ②파일럿(실증) 라인 지원, ③장비 국산화·양산 전환 펀딩의 구조로 단계별 지원추진
 - (연구분야) 바인더(무용매·저비용), 전도재/복합소재, 건식 혼합·시트화·라미네이션 공정, 대면적 균일성·계면접착성 개선, 공정진단·수율관리 기술 등. 포괄적 지원
 - (디지털/AI 연계 R&D) 디지털 트윈·AI 기반 공정 최적화 플랫폼 연계 지원으로 공정 안정화·스케일업 촉진 지원
 - (산업정책) 정부는 기술 상용화를 위해 산업생태계 전주기 연계를 강화하고 핵심수단으로 컨소시엄 촉진, 인프라 구축, 장비 국산화 및 인력양성 측면 정책 지원
 - (컨소시엄 촉진) 대기업·중견·중소·연구기관이 참여하는 실증형 과제를 우선 지원하여 관계 주체간 컨소시엄 구축 촉진

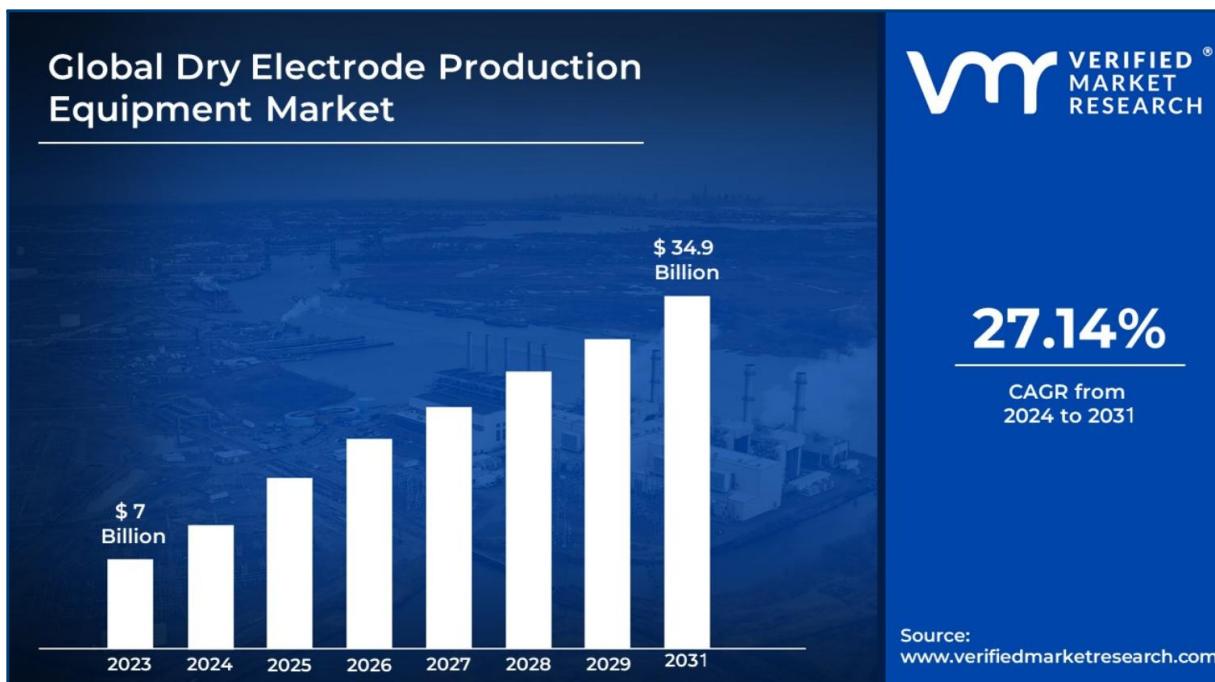
- (파일럿·실증 인프라) 공공·민간 파일럿 라인 비용 보조, 테스트베드 제공을 통해 인프라 구축 지원
- (장비 국산화 정책) 보조금, R&D, 세제, 인센티브 지원을 통해 롤투롤, 라미네이터 등 핵심 장비 국산화·성능 고도화 견인
- (인력양성·스킬업) 스마트팩토리·디지털제어 운영 가능 인력 양성 프로그램 연계를 통해 전문인력 양성 지원
- (규제정책) 건식공정은 NMP 등 유해용매 제거와 건조 에너지 대폭 축소를 통해 정부의 탄소중립, 화학물질 규제목표에 정합하여, 친환경, 에너지절감 정책과 연계 지원
 - (재정·세재) 뮤용매, 저탄소, 공정 도입 프로젝트에 대한 보조금, 세재 우대 지원
 - (지방 인센티브) 공장부지, 전략, 인프라 지원 등 지방정부의 투자유치 혜택 결합 지원
 - (규제완화 및 우대) 친환경 공정 도입시 환경규제 부담 경감 또는 인증, 공공조달 우대 지원
- (파급효과) 정부는 건식전극 공정에 대한 여러 정책적 지원을 통해 우리 산업경쟁력 및 소부장 자립을 동시에 확보하는 것이 핵심으로 하기와 같은 파급효과 기대
 - 단가, 에너지 탄소 모두 개선되어 원가 및 제조 경쟁력 제고
 - 후막전극의 고에너지 밀도 셀 구현을 통해 제품 경쟁력 향상
 - 장비, 바인더, 전도재 등 국산화 및 관련 산업 발전
 - 장비, 제조, 디지털 솔루션, 실증 인프라 관련 신산업 창출은 통한 일자리 확산

3. 시장·산업 동향

1 국내외 시장동향

- 글로벌 건식전극 장비시장은 2023년 기준 약 70억 달러 수준으로 평가되며, 2031년까지 약 349억 달러 규모로 연평균 약 27% 성장 전망

- 건식 전극 생산장비 시장은 EV·ESS 확대, 배터리 기술 혁신, 친환경 제조 전환이라는 세 가지 글로벌 메가트렌드에 의해 빠르게 성장하고 있으며, 향후 지속 가능한 고효율 배터리 생산의 핵심 산업 인프라로 부상 전망



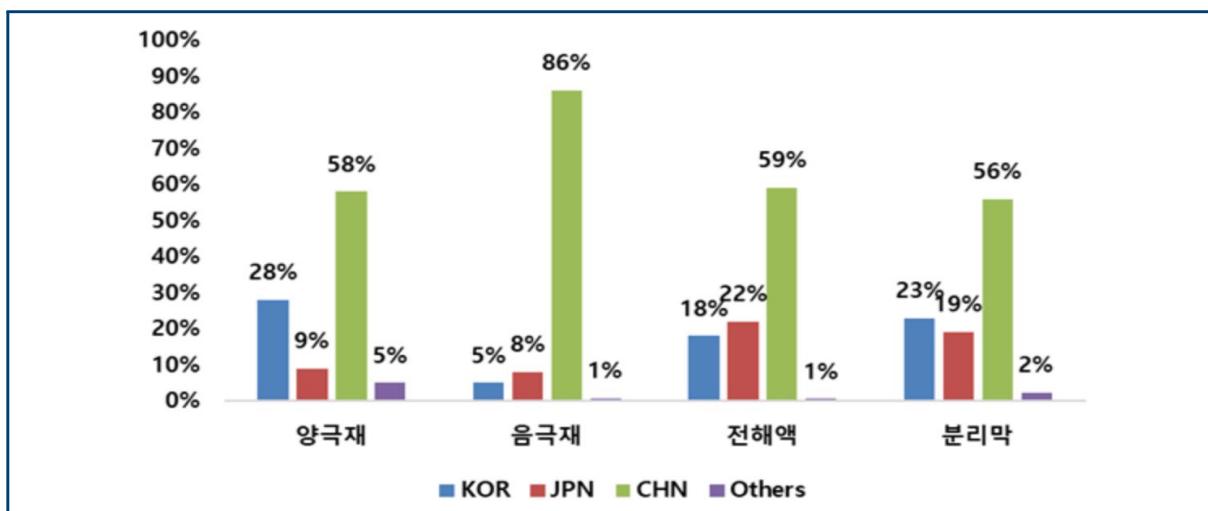
출처 : Global Dry Electrode Production Equipment Market Size and Scope, VMR, 2024

- 응용 측면에서는 전기차(EV) 배터리 시장의 성장, 고에너지밀도 전지 수요 증대, 친환경 제조 공정에 대한 요구 증가가 건식 전극 기술 채택을 빠르게 견인
 - EV 산업성장과 휴대용 전자기기 고성능화 트렌드와 정부의 친환경 인프라 확충 정책이 맞물리며, 건식 전극 기술을 통한 고효율, 저탄소 제조가 핵심시장 성장축으로 부상³⁾

3) https://www.pristinemarketinsights.com/dry-battery-electrode-market-report?utm_source=chatgpt.com

▣ 국내 건식전극 공정 관련 이차전지 제조 장비 산업 역시 글로벌 시장의 성장에 발맞춰 확대될 것으로 전망하며, 이는 동 기술의 핵심 보유국이 한중일이 될 것이라는 시장 분석에 기반

- 글로벌 이차전지 제조장비 시장은 2023년 약 17조 원 규모를 기록했으며, 2030년에는 50조 원 이상으로 성장할 것으로 전망하며, 관련 핵심 소재분야에서 한중일이 90&이상 점유하고 있어 글로벌 경쟁을 선도할 것으로 분석⁴⁾



출처 : SNE Research <2023> LIB 4대부재 SCM 분석 및 시장 전망(~'30) 리포트

| 건식전극 공정 4대 소재 3개국 생산 점유율('22) |

▣ 건식전극 공정은 습식전극 공정 대비 제조비용 절감, 에너지 효율 향상, 후막 전극 구현 등 다방면의 경쟁력을 확보하고 있음에도 불구하고, 시장 전망 관점에서는 여전히 기술적·산업적 한계가 존재하는 것으로 평가

- 건식전극 공정은 기술성숙도, 초기투자비용, 소재·공정 호환성, 상용화 경험 등 도전과제를 안고 있으며, 산업 경쟁력 강화와 시장 확대를 위해 해결이 필수적
 - (기술성숙도) 대면적·대량 생산에서 균일한 전극 두께·기공 구조 유지가 어려워 양산 안정성 확보가 과제
 - (초기 투자비용) 신규 장비(롤투롤 프레스, 코팅기 등) 도입 비용이 높아 소규모 기업·신규 진입자 부담 존재
 - (소재·공정호환성) 기존 바인더·활물질 일부는 건식 공정과 호환이 어려워 소재 개발 병행 필요
 - (상용화 경험 부족) 습식 공정 대비 실증·운영 경험 부족, 품질 안정성·수율 데이터 제한

4) 한국기계연구원, 기계기술정책 제117호('24)

2 국내외 산업동향

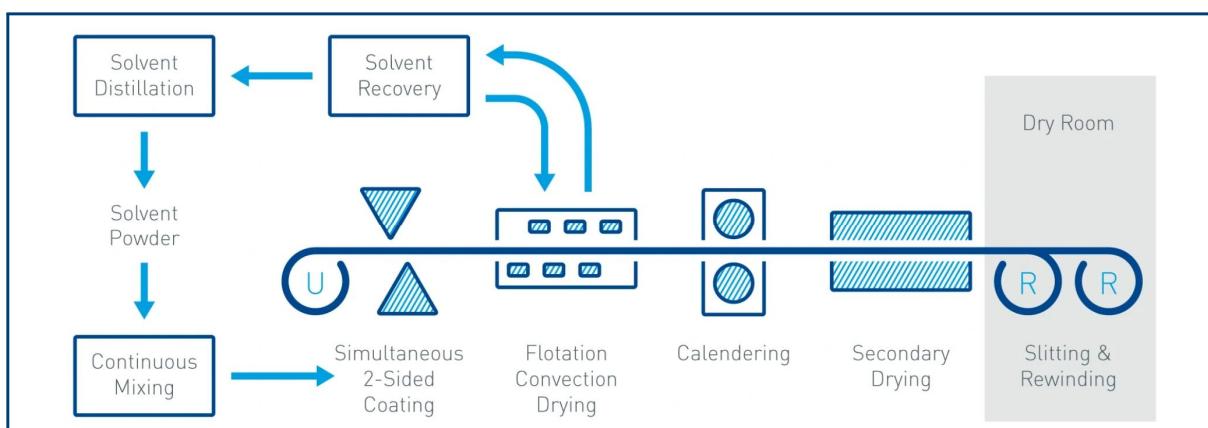
■ 현재 글로벌 이차전지 건식전극 공정의 도입은 산업적 관점에서 초기 단계에 있으며, 국내외 주요 기업들은 기술 혁신을 통해 경쟁력 확보를 추진 중

- 글로벌 건식전극 공정 분야에서 AM Batteries와 Dürr Group이 기술 선도와 산업 경쟁력을 확보하며 시장 주도, 중국의 LEAD Intelligent Equipment도 적극적인 기술 개발과 투자로 추격 중
 - (AM Batteries) 동 기업은 건식 코팅 기술을 개발하였으며, 전극제조에 있어 전통적인 슬러리 투코닝과 건조단계를 제거하는 방식으로 제조설비 및 공정비용 절감 주도
 - (Dürr Group) 배터리 제조용 장비 및 설비 솔루션을 제공하는 독일 기계·플랜트 전문기업으로서 건식코팅 기술을 적용한 공정개발 및 파일럿 설비 구축 진행

| 국내 기업의 건식 전극 기술 개발 현황 및 진행 상황 |

기업	건식 전극 기술 현황 및 진행상황
AM Batteries	<ul style="list-style-type: none"> • "Powder-to-Electrode™" 방법을 개발했고, 자사 전극 룰을 주요 배터리 셀 출하('24) • 일본 Zeon Corporation과 제휴하여 건식 전극용 바인더 개발을 공동 추진
Dürr Group	<ul style="list-style-type: none"> • 배터리업체 Cellforce Group(포르쉐 계열)과 제휴해 건식 코팅 라인 구축 • 건식 코팅 공정 도입을 위한 장비·시스템 측면에서의 선두주자
LEAD Intelligent Equipment	<ul style="list-style-type: none"> • LEAD는 건식 코팅 시스템(폭 1,000 mm, 속도 양극 60 m/min, 음극 80 m/min 개발) • 장비 측면에서 건식 공정 확산의 핵심 인프라를 공급 기업

출처 : SNE Research(2025), 글로벌 배터리사들 건식 전극 기술 현황



출처 : Dürr Group, <https://www.durr.com/en/duerr-more/simultaneous-two-sided-electrode-coating>

| Dürr社 양면 동시 전극 코팅 프로세스 |



- 국내 주요 이차전지 제조기업들은 건식 전극 공정을 새로운 제조 패러다임으로 인식 및 기존 습식 공정 중심의 생산 설비를 건식 기반으로, 점진적으로 전환 중
 - (LG에너지솔루션) 충북 오창 공장에 건식 전극 파일럿 라인을 구축 중이며, '28년까지 건식 전극 기반의 양산 체제로 전환을 목표
 - (피엔티) (주)윤성에프앤씨, (주)승진시계, 대구기계부품연구원과 협력해 정밀제어 기술이 적용된 건식 전극 제조장비를 개발 중으로 초고속·초광폭·초고압 사양을 적용한 차세대 건식 전극 장비 기술 공개를 통해 글로벌 기술경쟁력 강화
 - (SK온) 건식 공정을 자사 전고체 전지(Solid-state Battery) 및 실리콘 음극(Silicon Anode) 기술과 연계하여 친환경·고효율 제조 생태계를 조성하기 위한 전략 추진
 - (삼성 SDI) 충남 천안 공장에 건식 전극 파일럿 라인을 구축하고 있으며 공정 최적화를 위한 연구 실행

| 국내 기업의 건식 전극 기술 개발 현황 및 진행 상황 |

기업	건식 전극 기술 현황 및 진행상황
LG 에너지 솔루션	<ul style="list-style-type: none"> • 오창 플랜트 등에서 건식 전극 공정 파일럿 라인 운영 • 시험 결과 기반으로 공정 개선 진행
삼성 SDI	<ul style="list-style-type: none"> • 건식 전극 파일럿 라인 구축 • 공정 최적화 연구 진행
SK On	<ul style="list-style-type: none"> • 건식 전극 공정 관련 파일럿 라인 일부 운영 • 미국 스타트업과 기술 협력 체결

출처 : SNE Research(2025), 글로벌 배터리사들 건식 전극 기술 현황

▣ 건식전극 공정은 산업적으로 건식 전극기술의 사용화, 파일럿 라인 구축, 장비·소재 협업 등의 측면에서 활발하게 성장하고 있으며, 기술,장비 공정 다방면 진전

- ‘바인더 혁신’, ‘건식 코팅 설비’, ‘파일럿 를 출하’, ‘양산 목표 시점’ 등이 공통 키워드로 부상하고 있으며, 건식전극 공정은 기술적 진입장벽에도 불구하고 점진적 성장세를 보이는 핵심 혁신 분야로 평가
- 국내 기업들도 글로벌 흐름에 맞춰 기술 확보와 상용화 전략을 적극 추진하고 있으며, 이에 따라 국내 시장 경쟁력 강화와 산업 생태계 확충 측면에서 유의미한 성장 기반을 확보 중

4. 기술개발 동향

1 해외 기술개발 동향

▣ 건식 전극기술의 분류

- 건식 전극기술은 용매 없는 전극 제조공정이라는 공통점을 갖고 있지만, 전극의 극성(양극/음극), 활물질의 물리·화학적 특성과 적용되는 셀구조(액체/고체전해질)를 기준으로 기술 분류

| 건식 전극기술별 비교 |

구분	기술 개요	주요 특징
① 양극재 건식 전극 기술	<ul style="list-style-type: none"> • 용매를 사용하지 않고 활물질·도전재·바인더를 직접 혼합·압연하여 고하중 후막 양극 제조. • 전극 밀도·기계적 안정성·집전체 접착력 확보가 핵심 	<ul style="list-style-type: none"> • PTFE·PVDF-TrFE 기반 섬유화 바인더 • 정전분무·Direct Calendering 등 고온 라미네이션 적용 • 고니켈 계열 균열 억제 및 후막화(<150 μm) 실현
② 음극재 건식 전극 기술	<ul style="list-style-type: none"> • 흑연·Si계 분말을 용매 없이 압연하여 후막 전극 제조. Si 팽창 억제·도전성 네트워크 안정화가 관건 	<ul style="list-style-type: none"> • PTFE·PAA·비불소계 바인더 적용 • CNT 복합 도전재로 전도성 강화 • Brush Application, 고전단 캘린더링 기술 확산
③ 전고체전지용 건식 전극 응용기술	<ul style="list-style-type: none"> • 고체전해질 계면 저항 최소화를 위한 무용매·저온 라미네이션 기반 전극-전해질 일체화 기술. • 계면 안정화와 이온 전도 경로 확보가 핵심 	<ul style="list-style-type: none"> • Binder-free 또는 저함량 바인더 구조 • 라미네이션/정전분사·건식압연 공정 활용 • 전극-전해질 계면에 세라믹 코팅층 도입

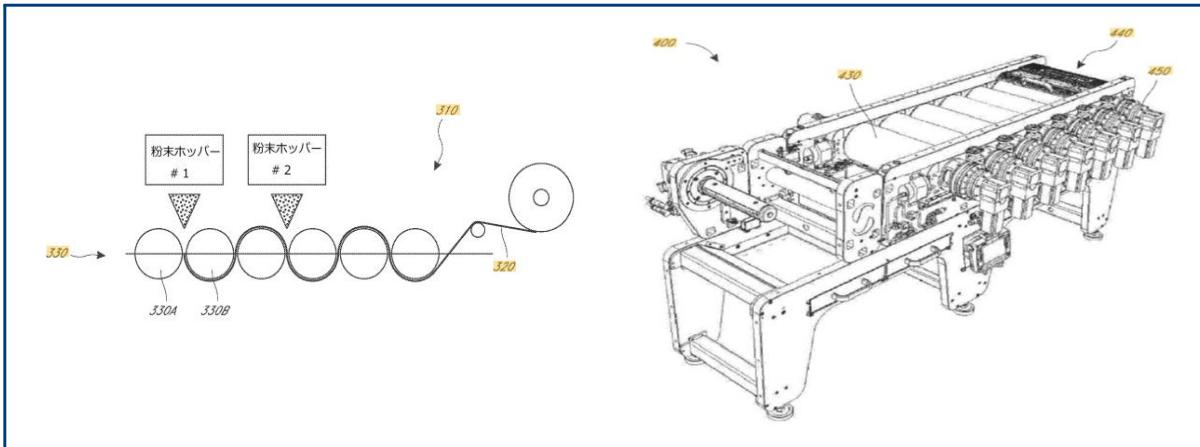
▣ 양극재 건식 전극 기술

- 미국 주요 기업

① TESLA

- Tesla의 건식전극 기술은 배터리 제조 비용 및 설비 효율을 크게 개선할 수 있는 잠재력을 갖고 있으며, 특히 4680 셀을 중심으로 전략적으로 추진하고 있지만, 아직 완전한 양극 건식전극 양산 전환에는 기술적·생산적 과제가 남아 있는 상태

- Maxwell Technologies의 건식 코팅 기술을 인수(2019년)하여 분말 상태의 활물질·도전재·바인더를 롤투롤(roll-to-roll) 방식으로 압착하는 독자 공정 개발
- 테슬라(Tesla)는 2019년 맥스웰(Maxwell) 인수를 통해 Free-standing 기반 건식 전극 공정을 확보하고, 고니켈 NCM 계열 양극에 적용하기 위한 공정 안정화 연구 진행



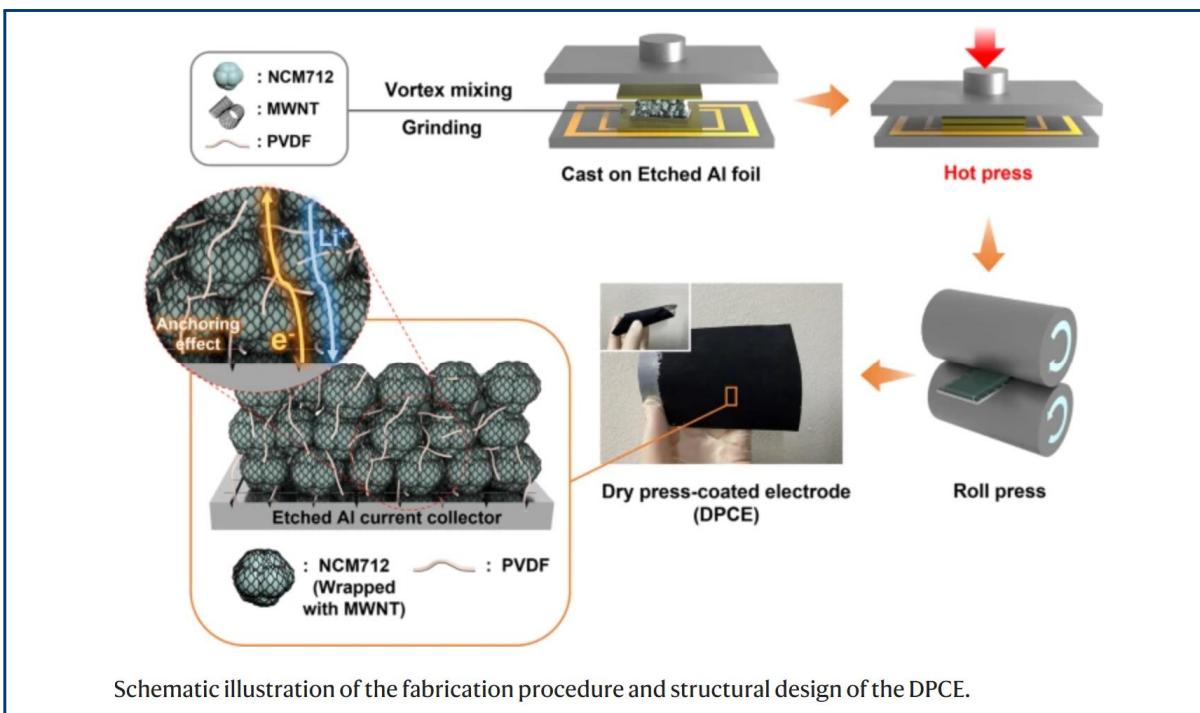
출처 : 리튬이차전지건식 공정 기술 동향 및 시장 전망, SEN Research, 2025.04.29

| 맥스웰社 건식 전극 제조 시스템 및 공정 특허 개요 |

② AM Batteries

- AM Batteries(AMB)는 미국 매사추세츠주 빌레리카(Billerica)를 본사로 둔 리튬이온 배터리 전극의 건식(dry) 코팅 기술 개발 기업
- 특히 Powder to Electrode™ Dry Coating Process라는 고유 공정을 통해, 양극재(cathode) 및 음극재(anode) 모두에 적용할 수 있는 건식 전극 제조를 목표

- AM Batteries는 정전 분무(Electrostatic spraying) 기술을 활용한 Ni-rich 계열 양극용 건식 코팅을 개발 중이며, DOE 지원 아래에 대면적(>100 mm) 코팅 균일도 검증 수행

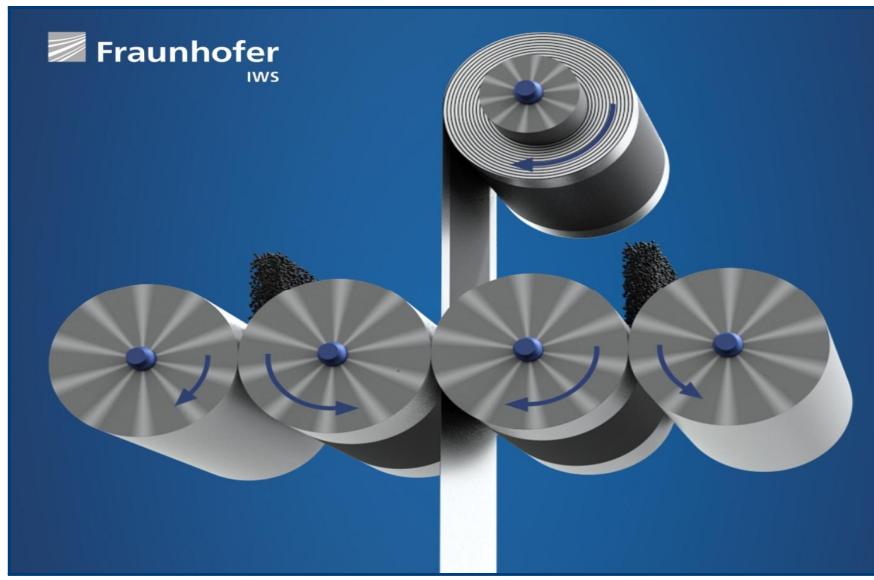


출처 : Nature Communications(2023)

| AM Batteries社 무용매 리튬이온 배터리 전극 제작을 위한 초고적재량 건식 공정 |

● 독일 : Fraunhofer 연구소

- 독일 프라운호퍼 연구소는 배터리 전극 제조 분야에서 활발한 연구를 진행 중이며, 특히 건식 전극 기술인 DRYtraec® 공정을 통해 후막 전극 제작 기술 개발
- Fraunhofer 연구소는 Direct Calendering 방식을 기반으로 후막 양극($>150 \mu\text{m}$) 제작 기술 개발공정 중 전단력 제어를 통한 입자 분포 균일화 및 계면 접착 향상 달성

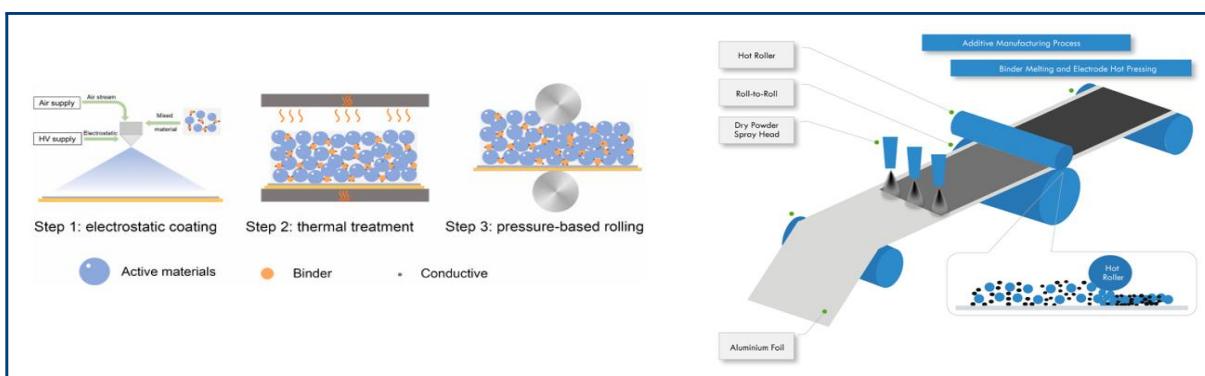


출처 : Fraunhofer, https://www.battery-dresden.de/ko/dry_coating.html

| Fraunhofer研, DRYtraec® 공정을 통한 배터리 전극 동시 양면 코팅 |

● 중국 : CATL社

- CATL은 중국 후베이성 하이테크존에 양극재 소재, 전구체, 원료, 재활용 등 배터리 소재 분야의 수직 통합형 산업단지 건설을 추진하며, 대규모 투자를 통해 고압·고밀도 LFP 양산 역량 강화
- CATL은 Maxwell 식 Free-standing 공정을 변형하여 LFP·NCM 계열 양극재에 적용 2024년 기준 후막 전극(두께 200~250 μm) 시제품 제조 및 전기차용 파일럿 셀 실증 완료



출처 : 리튬이차전지건식 공정 기술 동향 및 시장 전망, SEN Research, 2025.04.29

| 건식 전극 정전 분무 공정 단계 및 롤투롤 제조 개념도 |



■ 음극재 건식 전극 기술

● 미국 주요 기업

① TESLA

- 테슬라는 Maxwell 공정을 흑연·SiO 복합 음극에 상용 적용 완료했으며, PTFE 섬유화 공정 조건 최적화를 통해 기계적 안정성 확보 및 균일 압연(roll pressing) 실현

② LiCAP Technologies

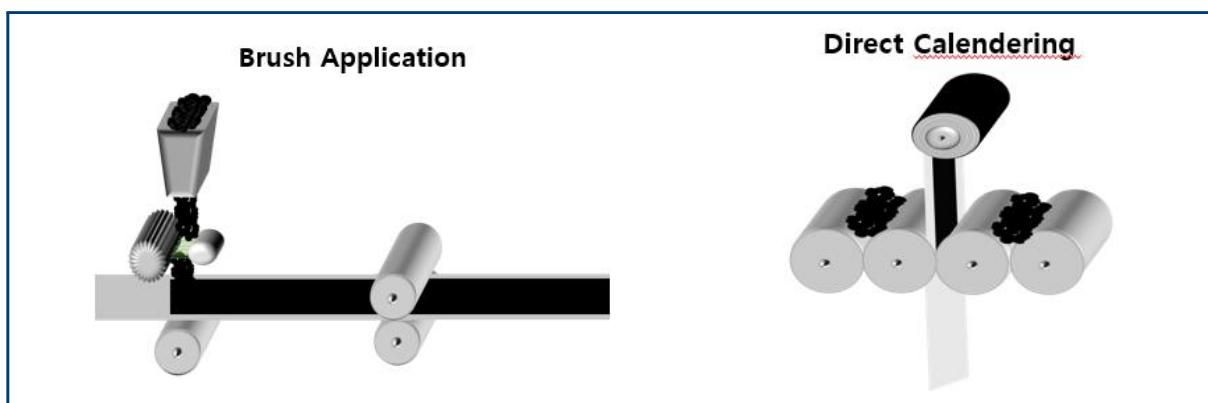
- LiCAP Technologies(이하 LiCAP)는 미국 캘리포니아주 새크라멘토(Sacramento)를 기반으로 건식 전극(Dry Electrode) 제조 공정을 개발해 온 배터리 전극소재/공정 기술 기업
- 핵심 기술인 Activated Dry Electrode[®] 공정은 슬러리 코팅 방식(습식) 대신 용매를 거의 또는 전혀 사용하지 않는 방식으로, 전극 제조 시 건조·용매 회수 등의 에너지·설비 부담을 대폭 절감

- LiCAP Technologies는 Maxwell 개발진이 설립한 기업으로, 고전단 캘린더링 장비를 활용한 고밀도 흑연 음극 건식 전극 기술을 개발 중

● 독일 : Fraunhofer 연구소

- 프라운호퍼 연구소는 배터리 전극 공정에서 습식 슬러리 코팅 방식의 한계(용매 사용, 건조로 긴 설비길이, 에너지 소비 등)를 극복하기 위해 건식 또는 솔벤트 최소화 전극 제조공정 개발
- Fraunhofer ILT(아헨)은 음극(그래파이트 기반) 및 양극 소재에 대한 레이저 건조(Roll-to-Roll) 기술을 개발하여 건식 또는 반건식 공정 구현

- Fraunhofer는 Brush Application 방식을 활용한 흑연 건식 코팅 기술을 검증 중
- 공정 중 입자 이송 불균일 해소를 위해 니들 롤러 평탄화 기술을 적용



출처 : 리튬이차전지건식 공정 기술 동향 및 시장 전망, SEN Research, 2025.04.29

| (좌) Brush Application 공정 / (우) Direct Calendering 공정 |

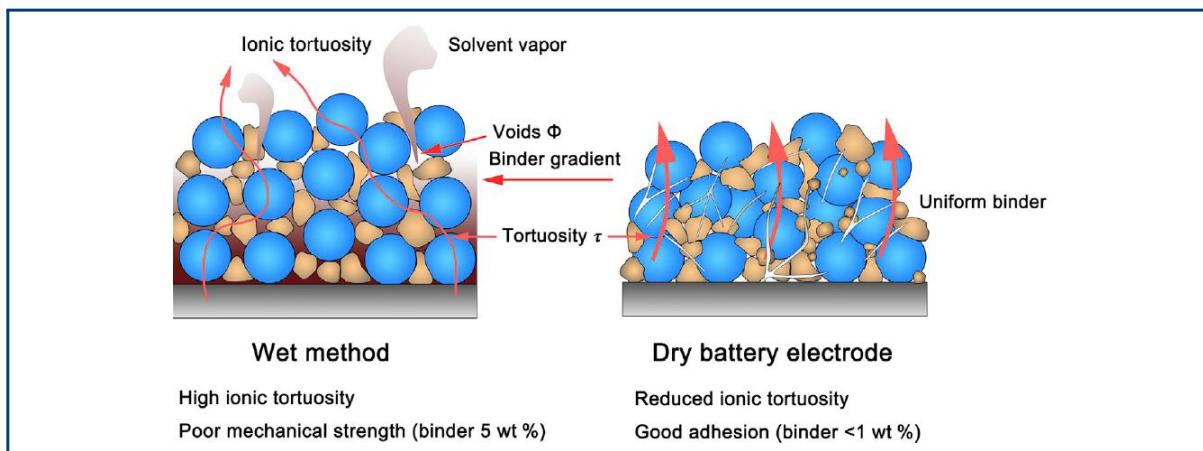
● 영국 : Anaphite

- Anaphite는 2018년 영국 브리스톨에서 설립된 배터리 전극 기술 스타트업으로, 용매 없이 건식 코팅(dry-coating) 방식을 이용해 전극 제조 공정 혁신기업
- 이들이 개발한 핵심 기술은 “Dry Coating Precursor (DCP[®])”라 불리는 복합 전극용 분말로, 이를 통해 전극 제조 시 습식 슬러리·건조 오븐·용매 사용 등의 공정 대체
- Anaphite는 CNT 복합 소재 기반 고전도성 음극 전극 시트를 개발 중이며, CNT의 균일 분산 및 PTFE 대체 바인더 적용으로 저저항·고전도성 건식 전극 구현 목표

- (CNT 균일 분산 기술) 건식 전극 제조 과정에서는 전극 내 소재들을 고르게 분산시키는 것이 매우 어려운데, 아나파이트는 CNT를 균일하게 분산시키는 기술을 통해 이 문제 해결
- (PTFE 대체 바인더) 기존 건식 공정에서 흔히 사용되는 PTFE 바인더는 접착력이 약하고 저항이 높은 단점이 있습니다. 아나파이트는 이를 대체하는 새로운 바인더를 적용해 전극의 접착력과 전도성을 개선
- (저저항 및 고전도성 구현) 균일하게 분산된 CNT와 새로운 바인더를 결합하여 전극의 내부 저항을 낮추고 전도성을 극대화
- (건식 전극 기술(DCP[®])) 아나파이트는 ‘드라이 코팅 전구체(DCP[®])’ 기술을 통해 배터리 생산 비용을 낮추고 탄소발자국을 줄이는 것이 목표

◆ 전고체전지용 건식 전극 응용

- 전고체전지는 전해질로 액체가 아닌 고체 전해질을 사용하여 안전성, 에너지밀도, 수명 측면에서 기존 리튬이온전지 성능을 개선한 전지
- 전고체전지는 전해질이 고체 상태로 이온 전도도가 낮아, 전극 내부의 이온 통로 확보가 중요하며, 건식 전극 공정은 균일한 바인더 분포와 낮은 이온 토서처리를 통해 한계를 보완할 수 있는 핵심 기술로 평가



출처 : Zhang et al, Dry electrode technology, the rising star in solid-state battery industrialization, iScience, 2022

- (일본) Toyota, Nissan, Panasonic은 전고체전지용 양극·음극 모두에 Dry coating 공정을 적용 중
 - (Toyota) 2025년 이후 전고체 셀 양산라인에 건식 래미네이션 기반 전극 제조공정을 적용계획
 - (Panasonic) 테슬라와 공동으로 전고체 대응 건식 전극(High-density composite electrode)을 개발 중이며, 고체전해질-전극계면 접착성 개선 및 공정 간소화 목표
- (미국) QuantumScape(미국)는 Li metal 음극 건식 코팅 기술을 확보하여, 고체전해질과의 계면 저항을 줄이는 Binder-free 건식 층 적층 공정 적용
- (독일) Fraunhofer는 고체전해질 입자 분산용 건식 압연 공정을 개발 중으로, 산화물계 전고체전지(LLZO)의 전극 접합 강도 향상 검증
- (중국) BYD, ProLogium(대만) 등은 전고체전지용 후막 전극 건식 코팅 공정을 연구 중이며, 황화물계 고체전해질과의 열가교 접착 기술을 병행 개발

| 주요 해외 건식 공정 특허 |

회사명	주요내용	출원 번호
Fraunhofer	<ul style="list-style-type: none"> • 롤투롤 건식 필름화 기술 • 두 룰의 주속 차이를 이용해 분말 혼합물을 건식 필름으로 형성, 전극·전해질 층에 적용 	DE102017208220A1
Panasonic	<ul style="list-style-type: none"> • 건식 분말 PTFE 바인더(섬유상 비율·입자치 규정)로 전극 혼합물 시트 형성 • 건식 럭팅·라미네이션 공정 명시 	EP4190841A1
Tesla	<ul style="list-style-type: none"> • 맥스웰 원천기술 기반 • PTFE 기반 건식 캘린더링 공정 (Maxwell 기술의 Continuation) 	US10741843B2
	<ul style="list-style-type: none"> • 테슬라 개선형 Continuation • PTFE + PVDF/CMC/PEO 등 복합 바인더 적용, 전극 밀도·전단응력 조건 개선 	US12040474B2
	<ul style="list-style-type: none"> • 테슬라 단독 개발 • 간헐 코팅(Intermittent coating)을 적용한 건식전극 제조/장치, 탭영역·비코팅부 확보 	US11799069B2
Maxwell	<ul style="list-style-type: none"> • 맥스웰 원천기술 원본 • 프리스탠딩 건식전극 필름 제조: PTFE 섬유화 기반, 용매無, 필름을 집전체에 라미네이션 	WO2017151518A1
3M	• 비수계 건식전극용 복합 바인더 및 CNT 네트워크 형성 기술	US11658152B2
CATL	• 건식전극용 고전단 혼련장치 및 분말 유동 제어 공정	CN114623607A

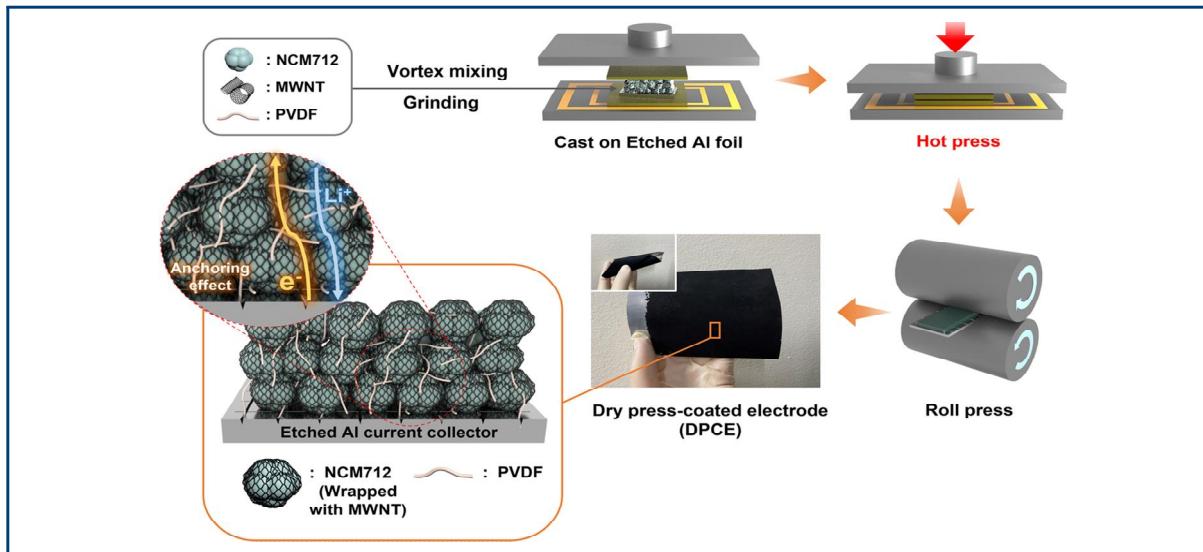
출처 : Fraunhofer(2017), Panasonic(2023), Tesla 및 Maxwell Technologies(2017–2024), 3M Company(2023), CATL(2022)

2 국내 기술개발 동향

항목	개요	기술개발 동향
후막·고로딩 (Thick-film / High-loading electrodes)	<ul style="list-style-type: none"> 전극 두께(면적당 적재)를 높여 셀의 에너지 밀도 향상 핵심 난제 : 전극 내부의 이온/전자 전달 불균일, 하부 영역의 활성도 저하, 충분리/팽창 문제 	<ul style="list-style-type: none"> 국내 대학·연구소에서 후막 전극 구조 설계(동결건조·위상전환 등)와 공정(분무건조 기반 분말 제조)을 통한 고로딩 구현 연구가 활발. 관련 학술·연구보고서에서 20~30 mg·cm⁻² 이상 고로딩 적용 사례·결과 보고
바인더 과학 (Binder science, including dry-binders)	<ul style="list-style-type: none"> 건식·저용매 공정으로 전환하려면 바인더가 '섬유화(fibrillation)'·기계적 접착·전해질·집전체 호환성을 만족 필요 바인더는 전극의 기계적 강도, 전도 네트워크 유지, 계면 안정성에 결정적 역할 	<ul style="list-style-type: none"> 국내에서는 건식 바인더 관련 특허·기술(유기 용매 불사용, 섬유형 파이버라이즈드 바인더 등)이 다수 출원·등록 중 건식 전극 상용화를 염두에 둔 바인더 물성·혼합 공정 연구(바인더 파우더 제조, PTFE·기능성 폴리머 조성 등)가 진행 중
공정 물리 (Process physics)	<ul style="list-style-type: none"> 캘린더링 압력·전단력·롤 속도 등 물리 인자가 입자 재배열·밀도·계면 접착에 직결 멀티스케일(입자 → 전극 → 셀) 물리 시뮬레이션이 공정 최적화에 필요 	<ul style="list-style-type: none"> 국내 연구기관·기업이 롤-투-롤 플래시/레이저 건조, DEM·멀티피직스 기반 제조 시뮬레이션, 공정 최적화 도구 개발에 투자 KIMM 등에서 R2R 친환경 플래시 공정 도입 사례 발표, 시뮬레이션(입자 수준) 기반 공정 모델링 연구도 보고
전도 경로 공학 (Conductive-pathway engineering)	<ul style="list-style-type: none"> 고로딩/후막 전극에서 전극 내부에 균일한 전도 네트워크(CNT, MWCNT, 카본 블랙 분포 등)를 설계·구축해야 고속 충·방전과 낮은 내부저항 달성을 가능 	<ul style="list-style-type: none"> 한국 대학·연구팀들이 분무건조 기반 분말 설계로 CNT/MWCNT를 균일 분산시켜 고로딩 전극에서 우수한 전도성 네트워크를 구현한 논문·연구가 다수 보고
Ni-rich / 전고체 확장 (Ni-rich cathodes & ASSB applicability)	<ul style="list-style-type: none"> Ni-rich(Ni-고함량) 층상계 양극은 높은 에너지밀도의 핵심(하지만 열/구조 안정성·계면반응 취약) 전고체(ASSB) 적용 시 계면·치밀화 설계가 필수 	<ul style="list-style-type: none"> 국내에서 Ni-rich 소재 안정화(도핑, 표면코팅) 연구가 활발(예: 칼슘도핑 등) 전고체 적용 관점의 양극·고체전해질 인터페이스 설계·치밀화 연구보고도 존재하며, 관련 정부·연구과제에서 NCM계/고니켈의 전고체 적용성 검토·모델링을 진행 중

▣ (후막·고로딩) MWNT-PVDF 기반 드라이 프레스(Dry press) 코팅 활용

- 연세대학교 박종혁 교수 연구팀은 후막·고로딩을 위해 Multiwall CNT-PVDF 복합 분말과 에칭 Al 집전체를 활용한 완전 무용매 드라이 프레스(Dry press) 코팅 공정 제시
 - 100 mg cm⁻²(17.6 mAh cm⁻²) 급 고하증 전극 달성, pouch cell 기반 360 Wh kg⁻¹ / 701 Wh L⁻¹ 성능 시연. 공정 자체가 롤투롤(양면) 전개에 유리함을 실증
 - 건식 후막화의 기계적 강도/접착과 전도 네트워크(CNT 스캐폴드) 설계를 동시 해결하여 산업화 친화 공정 제시
 - 공정은 롤투롤(양면) 연속 생산에 유리한 구조로 설계되어, 건식 후막화 시 발생하는 기계적 강도·접착 문제와 전도 네트워크 형성 문제(CNT scaffold)를 동시에 해결한 것으로 평가

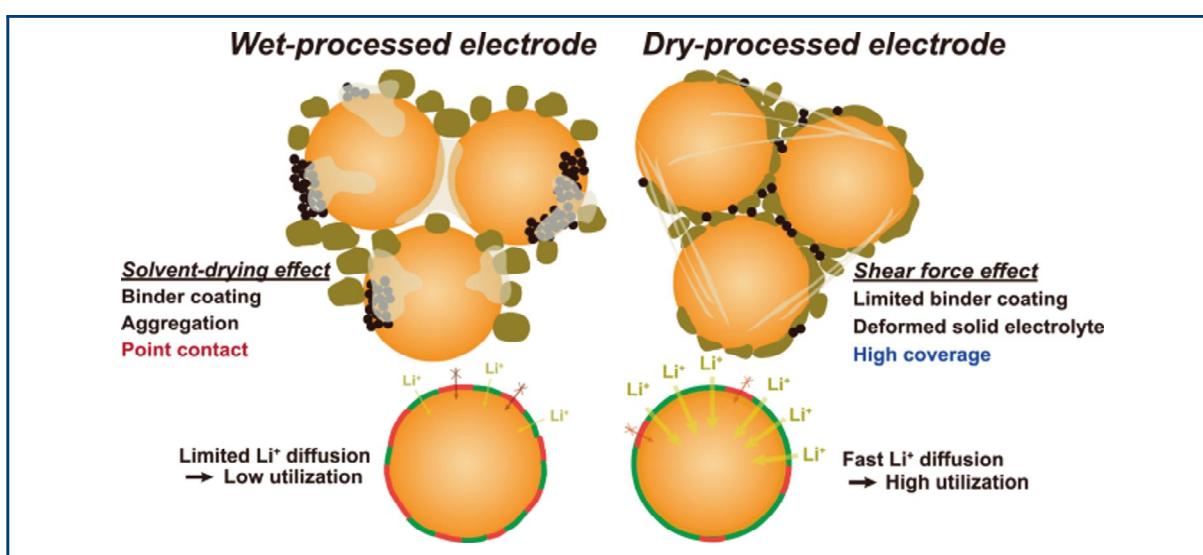


자료 : *Nat Commun*, 14, 1316(2023)

| MWNT-PVDF 기반 드라이 프레스 전극 제조과정의 모식도 |

❖ (공정 물리) 전단력-접촉피복률 정량화 기반의 성능 지표 규명

- 국내 고려대학교 유동주 교수 연구팀은 습식, 건식 및 펠릿 전극을 비교하여 전단력이 전해질-활물질 간 접촉 피복률을 약 67%까지 향상 규명
 - 이미지 분석과 물리 모델로 정량화하였으며, 건식이 내부 저항·극화 저감과 속도 특성에 유리함 설명
 - 건식 전극은 혼합 균일 수준을 넘어, 전단-입자 변형-접촉망 형성이라는 공정-구조-성능 인과 고리를 제시하면서 후막·ASSB 건식 설계 지표 제공

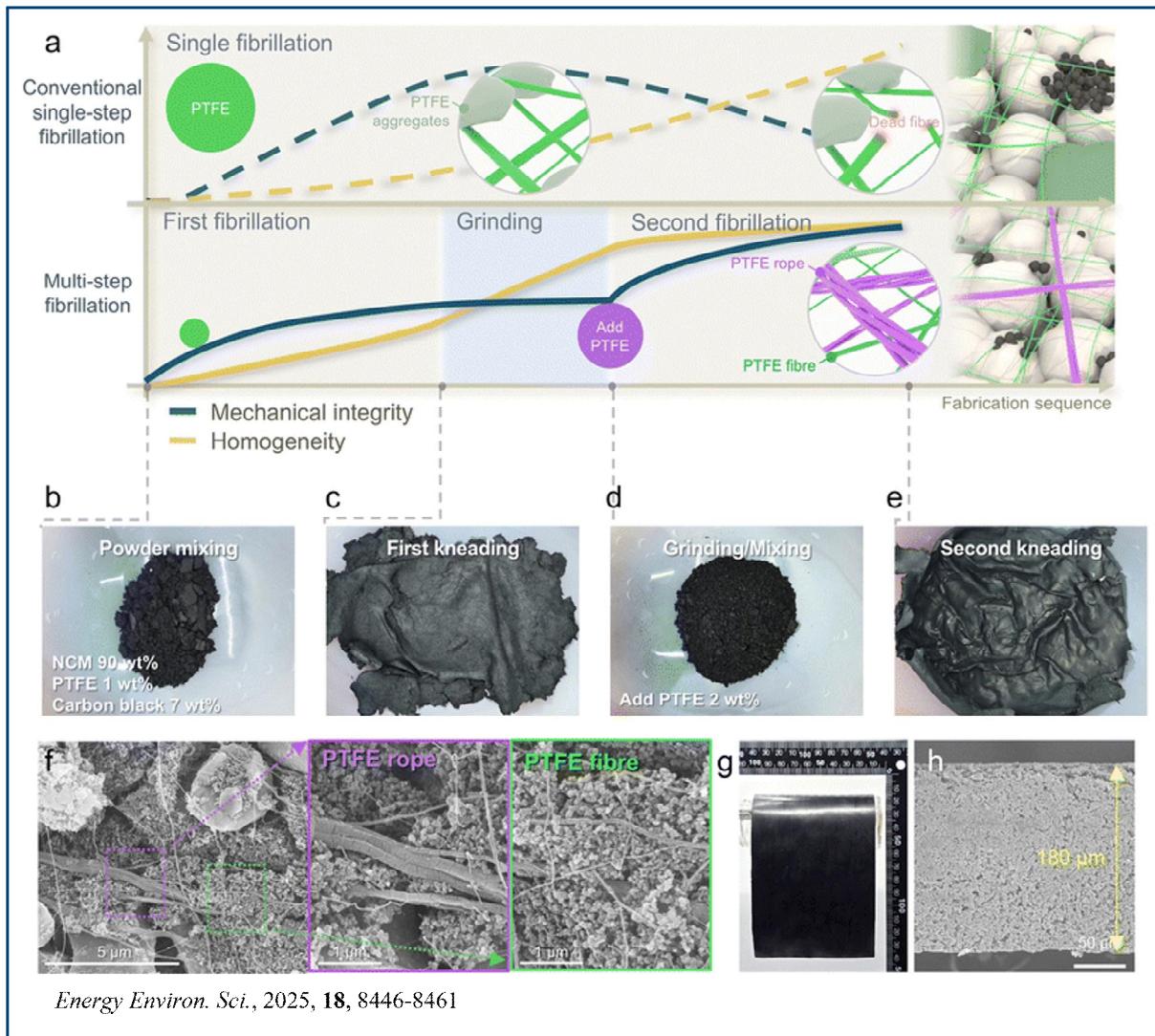


자료 : *Nat Commun*, 15, 8446–8461(2024)

| 습식 전극과 건식 전극의 구동을 비교하는 모식도 |

◆ (바인더 과학) PTFE 섬유화(fibrillation) 구조 제어로 두께 균일·기계적 건전성 향상

- 한국에너지기술연구원 송규진 박사 연구팀과 울산대학교 김태희 교수 연구팀은 이중 섬유(dual-fibrous) PTFE 설계(그라인딩/니딩 단계 최적화)로 건식 전극 균일성 및 내구성을 동시에 개선하는 연구를 진행하였음.
 - 건식 전극의 병목인 PTFE 섬유화 정도-네트워크 강성-전도 경로를 재료공학적으로 제어하며 전극을 균일하게 박리가 적고 두께 편차를 줄인 로드맵 제시

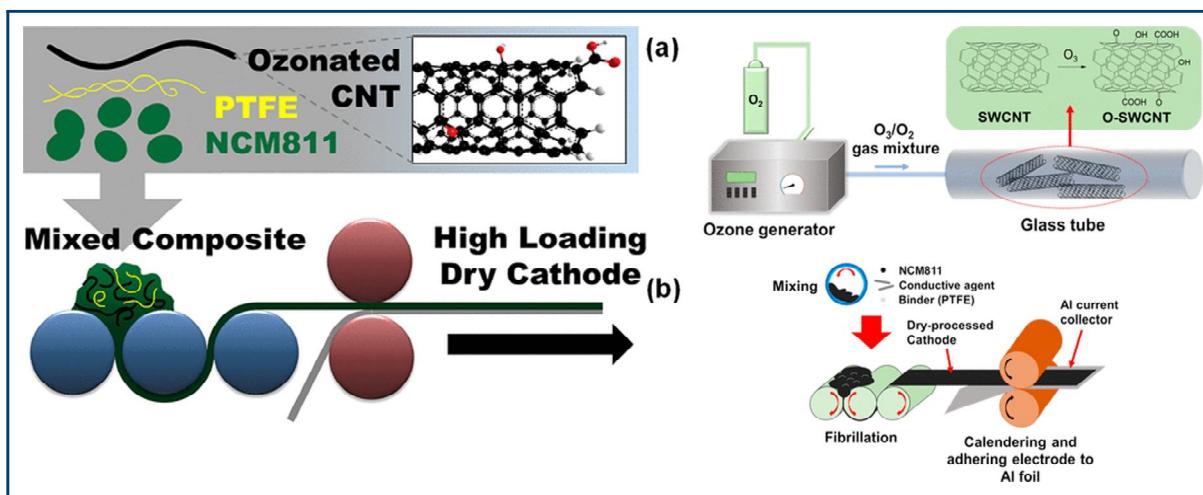


자료 : Energy Environ. Sci., 2025, 18, 8446-8461

| 건식 전극에서 PTFE설계 모식도 |

▣ (전도 경로 공학) 건식 전극에 최적화된 전도재·복합체 설계

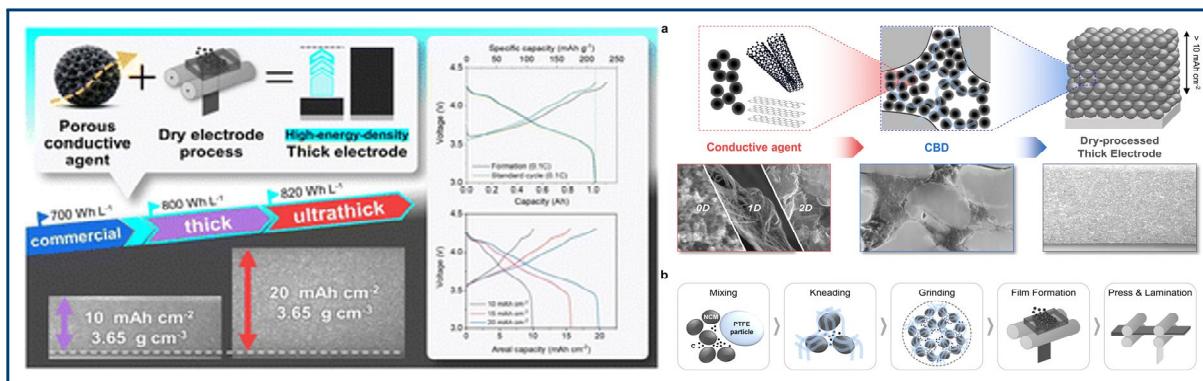
- 연세대학교 박종혁 교수 연구팀은 MWNT-PVDF 복합체를 적용하여 건식 분말 혼합체가 전기/기계 스캐폴드로 작동하며 고로딩 전극의 접착, 연성 및 전도성을 동시에 보강하는 연구 진행 중
- 또한, 서울대학교의 강종훈 교수 연구팀은 오존 처리한 CNT를 건식 공정 전도재로 적용하여 계면 결합과 분산 개선 및 저에너지, 저비용 건식 제조 가능성 보고



자료 : ACS Energy Lett. 2023, 8, 8, 3460–3466

| SWCNT의 오존화 및 건식 공정의 활용 |

- UNIST의 전경민 교수 연구팀은 건식 공정에 특화된 다공성 형태의 구형인 전도재를 채택해 이온/전자 동시 수송과 조성 최적화로 후막 건식 전극의 성능을 개선한 연구 결과 보고

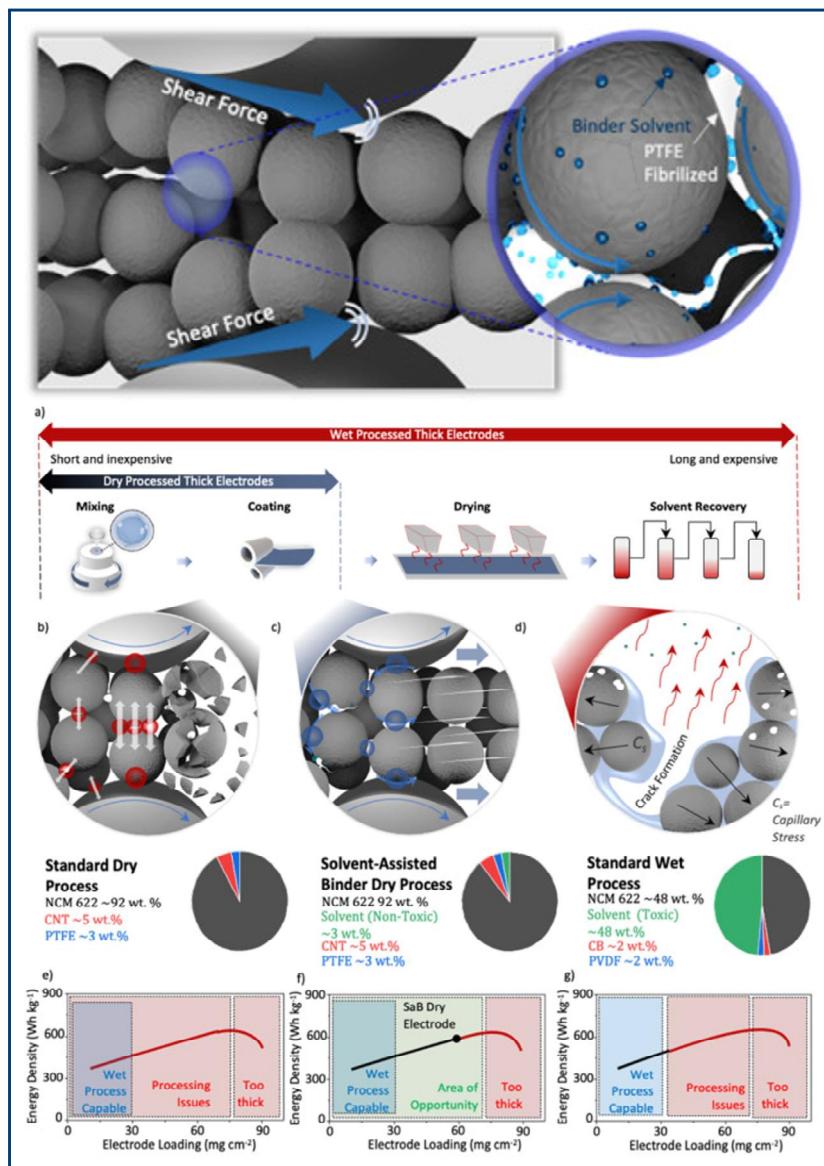


자료 : Energy Environ. Sci., 2025, 18, 645–658

| 건식 후막 전극 기술 모식도 |

▣ (Ni-rich/전고체 확장) Ni-rich·ASSB로의 건식 전개

- 부경대학교 오필건 교수 연구팀과 박민준 교수 연구팀은 고에너지 밀도 후막 건식 전극의 Ni-rich 양극재의 기공 및 저항 이슈를 공정·재료 동시 최적화로 개선할 수 있다는 연구 진행
 - 또한, 후막 전극의 균열 방지와 입자 간 접촉 안정화를 위해 바인더-활물질 계면 상호작용 메커니즘을 규명하고, 용매 사용을 최소화하면서도 기계적 강도와 전기적 전도성을 동시에 확보하는 재료·공정 복합 최적화 전략 제시



자료 : *Energy storage Materials.*, 2024, 71, 103542

| 전극 종류별 바인더-활물질 계면 상호작용 메커니즘 모식도 |



▣ (국내 특허) 건식 전극 관련 주요 기술 확보 동향

- 국내 배터리 선도기업들은 건식 전극 공정의 핵심 기술 확보를 위해 필름 제조, 분체 조성, 표면 균일화, 캘린더링, 래미네이션 장비 기술 등 다양한 특허를 출원 · 등록
- LG에너지솔루션은 건식 전극 제조 전반의 공정 최적화에 대한 특허를 다수 보유
 - (이차전지용 건식 전극의 제조 방법) 분말 상태 전극 혼합물의 바인더 분포 균일화와 전기 화학적 성능 향상을 위한 단계 제시
 - (건식 전극 필름 제조 방법 및 시스템) '댐(dam) 구조와 프라이머 층' 위에 분체를 정량 도포 후 캘린더링(압착)으로 흘러내림 방지·두께 균일성 확보.
 - (건식 전극 필름 제조 방법) 표면 연마(웨이브니스 제거) 후 캘린더링하여 두께·밀도 균일성 확보 및 균열 억제
 - (건식 전극 제조용 전극 분체 및 제조 방법) 건식 공정용 전극 분체 조성·입도·분산 조건 최적화로 전도성·접착성·가공성 동시 확보
 - (리튬 이차전지용 건식 전극 제조 방법) 고분자 바인더 용해도 차를 이용한 균일 바인더 네트워크 형성으로 기계·전기적 안정성 향상
- 삼성SDI는 건식 전극 필름 제조 프로세스 국제 특허 확보 및 래미네이션 장비기술 역시 병행 개발 중
 - (이차전지용 래미네이션 장치 및 방법) 가열 롤러와 열 접합·위치 정렬 제어 기술을 통해 양면 래미네이션 품질을 향상시키는 건식 전극 전용 장비 설계
- 이들 특허군은 전 과정(분체 조성 → 분말 도포 → 캘린더링 → 필름화 → 래미네이션)을 포괄하며, 두께·밀도 균일성, 공정 단축, 에너지 절감, 연속 생산 신뢰성 확보를 목표
- 전반적으로, 건식 전극 기술의 상용화 핵심 기술(두께 편차 ±3%, 연속 가동 신뢰성, 균열 억제) 확보를 위한 공정·장비·소재 융합형 특허 포트폴리오가 구축 중

| 국내 기업의 건식 전극 기술 관련 특허 |

출원인	공개번호/등록번호	출원 연도	특허명(요약)
LG에너지 솔루션	KR20230149755A	2023	이차전지용 건식 전극의 제조방법
	KR20230022038A	2023	건식 전극 필름 제조 방법 및 전극 필름 제조 시스템
	KR20230033001A	2023	건식 전극 필름을 포함하는 건식 전극 제조 방법
	KR102696472B1 (공개 KR20220052852A)	2024 등록	이차전지용 건식 전극 제조용 전극 분체 및 제조방법
	KR20250109175A	2025	리튬 이차전지용 건식 전극 제조방법
삼성 SDI	US20240322112A1 (패밀리 EP4439693A1, 한국 우선권 출원)	2024	Method of Preparing Dry Electrode Film
기타 (장비기술)	KR20180119946A (패밀리 WO2020116846A1)	2018	이차전지용 라미네이션 장치 및 방법

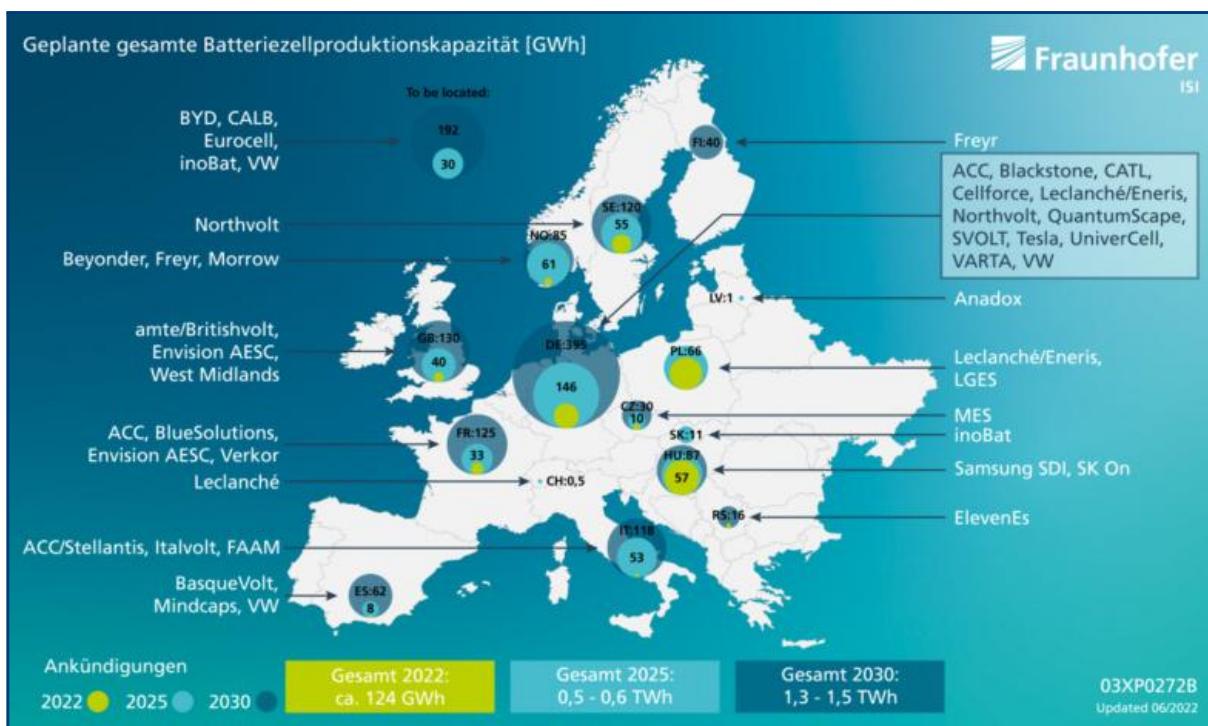
출처 : Google Patents

5. 국제협력 동향

1 해외

 「Horizon Europe」 기반 EU 배터리 2030⁺ 이니셔티브

- EU Battery 2030⁺는 유럽연합이 「Horizon Europe」 프로그램의 전략 프로젝트로 추진 중인 차세대 배터리 기술혁신 중장기 연구 이니셔티브
 - 본 프로그램은 유럽의 배터리 산업 경쟁력 강화를 목표로, 2030년 이후를 대비한 근본적 기술혁신에 중점 추진
 - 주요 추진내용
 - (AI 및 데이터 기반 소재 탐색) 인공지능과 빅데이터를 활용해 배터리 소재의 설계, 성능, 수명 예측을 가속화 및 신소재 개발의 시간·비용의 획기적 단축
 - (자가복구형 전극 및 스마트셀 개발) 자가 진단 및 복원기능을 갖춘 전극과 지능형 셀 모니터링 기술을 통해 배터리의 수명, 안전성, 에너지 밀도를 동시에 향상
 - (지속 가능한 제조 및 순환경제 구현) 용매저감, 자원재활용, 탄소배출 최소화를 핵심과제로 명시하고, EU 내 친환경 제조 기반 강화 추진



출처 : Fraunhofer, EU Battery 2030+, 2022

| EU 배터리2030+ 참여 국가 현황 |



▣ 국제에너지기구 기술협력 프로그램(IEA Technology Collaboration Programme, TCP)

- IEA 산하 회원국 간 기술협력 체계로, 에너지 저장 및 첨단 배터리 제조를 포함한 기술 혁신 및 지식 공유 촉진
 - “Advanced Battery Manufacturing TCP”와 “Energy Storage TCP” 등을 통해 에너지 저장 장치 및 배터리 제조공정의 효율화, 탈탄소화를 위한 공동 연구 추진
 - IEA의 「Net Zero by 2050」로드맵은 배터리 제조 공정의 에너지 소비 50% 감축 및 저탄소 제조 체계 전환을 목표로 제시하며, 각국의 기술 정책 수립의 기준 활용
 - 제조공정의 탈용매화, 전력 효율 향상, 재활용 강화 등을 중점으로 설정하고 있어, 건식 전극을 포함한 저탄소 제조 기술 확산을 간접적으로 지원



출처 : IEA TCP Expert Meeting, 2019

| IEA TCP 전문가 회의 전경 |

▣ 그린 파워드 퓨처 미션(Green Powered Future Mission, GPFM)

- 그린 파워드 퓨처 미션은 중국, 영국, 이탈리아의 공동 주도로 2030년까지 청정 전력 시스템 전환과 대규모 재생에너지 통합을 위한 기술 혁신 국제협력체
 - 미국·EU 회원국·세계은행 등 20여 개 기관이 참여하여 장주기 저장⁵⁾ 및 전력망 안정화 기술 실증 추진
 - 제조·배터리 실증 프로젝트를 통해 고에너지 밀도 셀 제조 및 공정 효율화 연구 병행

5) Long Duration Energy Storage, LDES



출처 : Green Powered Future Mission Overview

| Green Powered Future Mission 참여국 및 기업 |

▣ 글로벌 배터리 얼라이언스(Global Battery Alliance, GBA)

- 세계경제포럼(WEF) 주도로 2017년 출범한 글로벌 협력체로, 배터리 가치사슬 전반의 지속 가능성·책임성·투명성 강화 목표
 - UN Environment Programme, EU 집행위, OECD, Tesla, CATL, LG Energy Solution 등 175개 이상 기관이 참여하며, ESG 표준화와 공급망 투명성을 위한 'Battery Passport' 체계 운영
 - 2024년 파일럿 프로그램에서 디지털 제품여권(Digital Product Passport)과 탄소발자국 (GHG Rulebook) 기준을 시범 적용하였으며, EU 배터리 규제(2023) 및 미 IRA 정책과의 호환성 확보.
 - 배터리 제조 전 과정의 환경영향 저감을 주요 목표로 설정하여, 용매 없는 전극 제조 등 친환경 공정 확산에 대한 국제적 합의 기반 마련

▣ IPCEI on Batteries(Important Projects of Common European Interest on Batteries)

- 유럽연합(EU)이 승인한 범유럽 산업 협력 프로젝트로, 회원국 간 공동 R&D·투자를 통해 배터리 밸류체인의 혁신과 자금 역량 강화를 추진
 - 2019년 “IPCEI on Batteries I”, 2021년 “IPCEI on Batteries II”가 차례로 승인되어 프랑스, 독일, 이탈리아, 스웨덴, 핀란드 등 12개국 참여
 - Northvolt, BASF, BMW 등이 참여하여 전극 소재·셀 제조·재활용 분야의 기술 실증과 상용화 추진



▣ 아시아 배터리 네트워크(Asian Battery Network)

- 일본 주도로 아시아·태평양 지역의 배터리 기술 및 정책 협력을 강화하기 위해 형성된 비공식 산학연 협의체
 - 일본, 한국, 대만, 태국, 말레이시아, 인도네시아 등이 참여하며, ESS 기술 교류, 제조공정 데이터 공유, 장주기 저장 실증 프로젝트 등 진행
 - 각국의 배터리 제조 및 소재 기업들이 후막 전극·고밀도 셀 제조 등을 중심으로 협력

2 국내

▣ 건식전극 공정분야 국제협력 확대 추진

- 국내 기업들 중심으로 글로벌 배터리 기업 및 기술 스타트업과의 협업을 통해 건식 전극 공정 기술의 상용화 및 글로벌 진출 가속화 추진
 - SK On은 미국 Sakuu사와 Kavian® 드라이 프린팅 플랫폼을 기반으로 한 건식 전극 프린팅 기술의 공동개발(JDA)을 체결, 무용매 공정·공정 단축·비용 절감 등 친환경·고효율 생산 체계를 확보
 - PNT는 자사의 건식 전극 공정 장비 기술을 핵심 성장축으로 선언하고, 해외 배터리 제조사들과의 장비 공동개발·수출 협력 가능성을 모색

▣ 드라이 전극 프린팅 플랫폼 기반 협업(SK On ↔ Sakuu)

- SK On이 미국 Sakuu의 Kavian® 드라이 전극 프린팅 기술과 상용화를 위한 공동 개발추진
 - SK On과 미국 배터리 프린팅 회사 Sakuu는 Kavian® 드라이 프린팅 플랫폼을 기반으로 건식 전극 프린팅 기술 상용화를 목표로 하는 공동개발 계약(Joint Development Agreement, JDA) 체결
 - 이 협업은 무용매 생산, 공정 단축, 비용 절감, 친환경 제조를 동시에 달성하려는 전략으로 SK On은 미국 조지아주(Georgia) 공장 등 글로벌 생산 거점과 연결해 글로벌 건식 전극 생산 역량을 확보하는 교두보로 삼으려는 계획의 일환으로 평가



| SAKUU 사이프레스 리튬 금속 배터리 |

▣ 건식 전극 공정 분야 국제협력 추진(PNT)

- PNT는 건식 전극 공정 장비 중심 사업 강화를 발표하며 국제협력 가능성 타진 중
 - PNT는 올해 실적 설명 자리에서 “건식 전극 공정 장비 사업이 회사의 미래 성장 중심축”이라고 발언, 아직 공식적 해외 공동개발 발표는 적지만, 장비사로서 해외 배터리 대형 기업과의 협업 또는 수출 가능성 타진

III 결 론

1. 시사점

▣ 정책적 시사점

- 탄소중립 제조체계 전환의 전략적 추진 필요
 - 건식 전극 공정은 무용매 기반의 저탄소 제조기술로, 탄소중립 및 ESG 경영 기조에 부합 하므로 적극적인 투자와 지원이 필요
 - 정부는 탄소 저감형 전극 제조를 “국가 전략기술”로 지정하고, R&D·실증·양산 전 단계를 포괄하는 전주기 지원 프로그램을 마련 필요
- 디지털 트윈 기반 공정 최적화 인프라 확충
 - 공정설계 및 제어에 데이터를 기반한 접근이 필수화되고 있는 가운데, 공정 데이터 공유 표준 정립 필요
 - 산학연 공동 디지털 트윈 플랫폼을 구축하여 건식 전극의 공정변수 및 품질 인과관계 모델의 정령화 지원 필요
- 장비 국산화 및 글로벌 협력 병행 추진
 - PNT 등 국내 장비사는 기술 역량을 축적 중이나, 글로벌 협력 확대가 필요한 상황인바, 정부는 해외 선도기업과의 공정, 장비, 공동검증 프로그램 지원을 통해 국내 장비기업의 국제표준 인증 획득 및 수출 연계 프로그램 마련 필요

▣ 기술적 시사점

- 후막 고하중 전극 구조 설계 기술 강화 필요
 - 바인더 섬유화 제어와 CNT 전도 네트워크 최적화가 핵심기술요소로 부상되는 상황에서 후막 전극용 복합 바인더 구조체 설계를 위한 오픈 R&D 플랫폼 구축 필요
- 공정단축 및 에너지 절감 효과 극대화 견인
 - 건식 공정은 용매 미사용으로 공정이 단순화되나, 대면적 전극의 균일도 화보가 관건이므로 전단력제어, 압연조건 최적화를 위한 AI 기반 공정 시뮬레이션 개발과 대면적 샘플 실증 및 장비 피드백 루프가 병행 필요

- 성능·신뢰성 향상 위한 미세구조 제어 연구 강화

- 두꺼운 전극의 이온 수송 저항과 전극 균열 문제가 상용화의 주요 한계이므로 이를 해결하기 위해 전극 내부의 다공성 분포, 입자 응집, 계면 접착 특성을 실시간으로 관찰·피드백 할 수 있는 인라인 분석 기술을 확보

기타 시사점(산업·환경·경제적 관점)

- 산업적 측면

- 건식 공정은 생산라인 단순화와 CAPEX⁶⁾ 절감을 가능하게 하므로 국내 배터리 3사를 중심으로 건식 전극 양산 데모라인 구축을 추진하고, 소재·장비·공정 통합 실증 생태계 조성

- 환경적 측면

- 정부 차원에서 건식 전극 공정의 탄소감축 효과를 정량 평가할 수 있는 LCA(Life Cycle Assessment) 지표를 마련해, 친환경 인증·인센티브 제도와 연계 필요

- 경제적 측면

- 건식 공정은 CAPEX 및 OPEX⁷⁾ 절감으로 경제성이 높으며, 공정기술 수출 가능성도 확대되므로, 장비 수출형 지원사업과 국가 간 공동 파일럿 라인 프로젝트 추진하여 한국형 건식 전극 기술의 글로벌 상용화 및 표준 선점 도모

6) Capital Expenditure, 자본적 지출

7) Operating Expenditure, 운영비용



참고문헌

1. 산업통상자원부(MOTIE)(2021), 「2030 이차전지 산업 발전전략」, 관계부처 합동 보도자료.
2. 산업통상자원부(MOTIE)(2024), 「배터리 공정 디지털 트윈 기반 고도화 플랫폼(Battery Process Digital Twin-based Advancement Platform)」사업 공고문, K-PASS 플랫폼.
3. 한국산업기술평가관리원(KEIT)(2024), 「산업기술 R&D 로드맵 – 탄소저감형 고효율 전극 제조기술」.
4. 국가과학기술지식정보서비스(NTIS)(2023), 「고에너지밀도(400 Wh/kg) 이차전지용 탄소저감형 건식 후막 전극 기술 개발」과제 DB.
5. 한국에너지기술연구원(KIER)(2024), 「무용매 건식 컴파운드 기반 후막 전극 통합 솔루션 발표자료」, 에너지움 (Energium).
6. 울산과학기술원(UNIST)(2024), 「건식 전극 단위공정 정의 및 반제품 평가체계 연구 보고서」, UNIST News Center.
7. 한국기계연구원(KIMM)(2023), 「이차전지 제조장비 동향 보고서」, 정책지 No.117.
8. SNE리서치(SNE Research)(2024), 「리튬이차전지 후막 전극용 건식 공정 보고서」.
9. Zhang Q, et al. (2021), iScience, 24, 102332
10. Wang Y, et al. (2022), Matter, 5, 876-898
11. 미국 에너지부(United States Department of Energy, DOE)(2023), Dry Electrode Energy Reduction and Alternative Coating Technologies Report, DOE Energy Efficiency & Renewable Energy Office.
12. 국립재생에너지연구소(National Renewable Energy Laboratory, NREL)(2023), Thick Electrode Ion Transport Modeling and Pore Structure Optimization, NREL Technical Paper.
13. White House(2023), Building a Clean Energy Economy: A Guidebook to the Inflation Reduction Act's Investments in Clean Energy and Climate Action, Washington D.C.
14. BlueGreen Alliance(2025), What Survived: Inflation Reduction Act Implementation and Labor Impacts, Minneapolis, MN.
15. Department for Energy Security & Net Zero(2023), Powering Up Britain: Energy Security Plan, Government of the United Kingdom.
16. Department for Business and Trade(2023), UK Battery Strategy, Government of the United Kingdom.
17. European Commission(2019), Europeans' Attitudes on EU Energy Policy, Eurobarometer Special 492, Brussels.
18. European Commission, DG REGIO(2021), C4T ASB Knowledge Piece: Implementing Renewable Energy Investments with Cohesion Policy to Enable Sustainability Transitions, Brussels.
19. European Parliamentary Research Service(2023), Energy Transition in the EU.

20. European Commission(2024), Energy Policy Update: LIFE NGOs Call – Energy Efficiency and Renewable Energy Directives, Brussels.
21. International Energy Agency(IEA)(2025), Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector (Corrected Edition), Paris.
22. European Commission(2022), BATTERY 2030⁺ Roadmap – Revision Edition, Coordinated by Kristina Edström, Uppsala University.
23. European Commission(2014), Criteria for the Analysis of the Compatibility with the Internal Market of State Aid to Promote the Execution of Important Projects of Common European Interest (IPCEI), Brussels.
24. Flow Batteries Europe(2024), Report on Regions: Asia-Pacific – Analysis of Energy Storage Policies, Focusing on Flow Batteries, Brussels.
25. Global Battery Alliance(2024), Battery Passport 2024 – Core Concepts and Approach, Geneva, Switzerland.
26. Mission Innovation(2021), Green Powered Future Mission: Joint Roadmap of Global Innovation Priorities.
27. Australian Renewable Energy Agency(ARENA)(2024), Battery Breakthrough Initiative Open for Consultation, Media Release, 11 September 2024.
28. International Energy Agency(IEA)(2023), Australia 2023 Energy Policy Review, OECD/IEA, Paris.
29. Department of Industry, Science and Resources(DISR)(2024), National Battery Strategy: Leading the Charge towards a Competitive and Diverse Australian Battery Industry, Canberra.
30. Australian Government(2024), Future Made in Australia Act: Policy Framework for Clean Energy Manufacturing, Canberra.
31. Ministry of Economy, Trade and Industry(METI, Japan)(2023), 「次世代全固体蓄電池材料の評価・基盤技術開発プロジェクト (Evaluation and Fundamental Technology Development of Next-Generation All-Solid-State Battery Materials Project)」, Tokyo.
32. Ministry of Economy, Trade and Industry(METI, Japan)(2025), 「蓄電池産業戦略の推進に向けて：次世代技術の開発/人材育成・確保の強化 (Battery Industry Strategy 2025: Development of Next-Generation Technologies and Human Resource Strengthening)」, Tokyo.
33. State Council of the People's Republic of China(2020), Notice on Issuing the New Energy Vehicle Industry Development Plan (2021–2035), Beijing.
34. European Chemicals Agency & European Commission(2025), UK-EU PFAS Regulatory Divergence: Comparative Table of Controls and Proposed Restrictions, Brussels.
35. U.S. Environmental Protection Agency(EPA)(2024), Final Recommended Aquatic Life Criteria and Benchmarks for Select PFAS, Federal Register, Vol. 89, No. 194 (October 7, 2024), Washington D.C.
36. U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Office of Pollution Prevention and Toxics(2024), Instructions for Reporting PFAS Under TSCA Section 8(a)(7), EPA-705-G-2023-3727, Washington D.C.
37. Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water(DCCEW)(2025), PFAS National Environmental Management Plan 3.0, Canberra.

38. LG에너지솔루션(LG Energy Solution)(2024), “건식 전극 공정 기술 개요 및 혁신 방향,” Battery Inside 기술 블로그, <https://inside.lgensol.com/2024/09/battery-manufacturing-efficiency> (2025년 10월 16일 접속).
39. LG에너지솔루션(2024), “오창 공장 건식 파일럿 라인 구축 계획,” 공식 보도자료.
40. 배터리투데이(2025.08.22), “피엔티·윤성에프앤씨·승진기계·대구기계부품研, 건식 전극 장비 국책과제 착수.”
41. The Elec(2025.03.12), “피엔티, 건식 전극용 르프레스 장비 초고속·초광폭 사양 개발.”
42. SK온(SK On)(2024), “SK온, 미국·한국서 건식 공정 기반 친환경 생산체계 구축,” 공식 보도자료.
43. ZDNet Korea(2024.09.27), “건식 전극 공정, 전극 제조비용 17~30% 절감 가능.”
44. QYResearch(2024), Global Dry Electrode Market Forecast 2024–2030.
45. BusinessWire(2024.07.08), “Sakuu and SK On to Collaborate on Advancing EV Battery Manufacturing,” <https://www.businesswire.com/news/home/20240708213032/en/Sakuu-and-SK-On-to-Collaborate-on-Advancing-EV-Battery-Manufacturing> (2025년 10월 16일 접속).
46. Ryu, J.-H. et al.(2023), Nature Communications, 14, 1316. “Dry-press coating for solvent-free high-loading lithium-ion battery electrodes with 360 Wh kg⁻¹ energy density.”
47. Lee, H. et al.(2024), Nature Communications, 15, 4382. “Quantifying shear force–coverage relationships in dry, wet, and pellet electrodes for all-solid-state batteries.”
48. Lee, J. et al.(2025), Energy & Environmental Science, 18, 2764–2778. “Dual-fibrous PTFE architecture enabling uniform and thick dry electrodes for high-performance lithium batteries.”
49. Kim, S. et al.(2023), ACS Energy Letters, 8, 5124–5132. “Ozone-treated carbon nanotube networks for enhanced dry and solvent-free electrode fabrication.”
50. Oh, Y. et al.(2025), Energy & Environmental Science, 18, 4312–4323. “Porous spherical conductive additives enabling ion–electron dual optimization in dry thick electrodes.”
51. Embleton, T. et al.(2024), Cell Reports Physical Science, 5, 102631. “Dry-free Ni-rich cathode manufacturing using binder-engineered solventless processing.”
52. Lee, K. et al.(2025), Nature Communications, 16, 3724. “Co-rolling dry process for stabilized thin solid-state electrolyte layers enabling low-pressure operation.”
53. Charged EVs(2024.07.09), “Sakuu to Collaborate with SK On to Industrialize Dry-Process EV Battery Manufacturing Platform,” <https://chargedevs.com/newswire/sakuu-to-collaborate-with-sk-on-to-industrialize-dry-process-ev-battery-manufacturing-platform/> (2025년 10월 16일 접속).
54. Sakuu(2024), Press Release – Joint Development Agreement (JDA) with SK On, <https://www.sakuu.com/news/sakuu-and-sk-on-to-collaborate-on-advancing-ev-bat> (2025년 10월 16일 접속).