



Fluorine-Free Strategies for Sustainable Battery Manufacturing: Materials, Processes, and Prospects

Jinsoo Kim^{1†}

¹Department of Energy Science and Engineering, Daegu Gyeongbuk Institute of Science and Technology (DGIST), Daegu, 42988, Republic of Korea

자속 가능한 이차전지 제조를 위한 비불소화 전략: 재료, 공정 및 전망

김진수^{1†}

¹대구경북과학기술원 에너지공학과

(Received November 14, 2025; Accepted December 03, 2025)

Abstracts

To decarbonize the battery value chain and comply with per- and polyfluoroalkyl substances regulations, a “fluorine-free” strategy is crucial, replacing fluorine-based electrolytes, binders, and processes. This review assesses the impacts of removing fluorine in lithium-ion battery production. Our review shows that using aqueous binders or dry coating process, can cut n-methyl-2-pyrrolidone and polyvinylidene fluoride generation toxicity and process energy by over 40%. Life cycle assessments indicate that a fully fluorine-free process can reduce CO₂ emissions by 30–45%, water usage by 40%, and hydrogen fluoride emissions entirely, thereby meeting the 2028 EU battery regulation carbon cap. Projections suggest over 15% of global cell production will adopt fluorine-free systems by 2030. We also address remaining technical challenges such as interface stability and recycling-friendly design, emphasizing the need for integrated research and regulatory demonstrations.

Keywords: Battery, Manufacturing, Fluorine, Sustainability

[†]Corresponding Author: jinsoo.kim@dgist.ac.kr

© 2025 The Korean Ceramic Society

This is an Open Access article distributed under the terms of Creative Attributions Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

■ 김진수

1. 서론

전 세계적으로 2050년 탄소중립을 달성하기 위한 노력이 가속화되면서, 에너지, 교통 분야의 탈탄소화는 더 이상 선택이 아닌 필수가 되었다. 전기자동차의 보급 확대와 재생에너지 기반 전력망의 확장은 이러한 전환의 핵심 축을 이루고 있으며, 이차전지, 특히 리튬이온전지는 그 중심에 위치한다. 그러나 배터리의 사용 단계가 온실가스 저감에 기여하는 것과 달리, 배터리 제조 과정은 상당한 탄소발자국과 유해물질 배출을 수반한다는 점에서 역설적인 환경 부담을 안고 있다. 실제로 Fig. 1에 나타난 바와 같이 최근 전과정 환경평가(Life cycle assessment, LCA) 연구에 따르면 전기차 1대당 배터리 팩 생산 과정에서 발생하는 이산화탄소 배출량은 수백 kg에서 톤 단위에 이르며, 전극 제조와 전해질 합성이 그 주요 기여 요인으로 지목된다.[1] 이러한 문제는 단순히 에너지 소비뿐만 아니라, 배터리 소재에 포함된 불소계 화합물의 사용과 직결되어 있다.[2]

상용 리튬이온전지는 전해질염으로 LiPF₆를, 전극

바인더로 Polyvinylidene fluoride (PVDF)를 주로 사용한다. 이들 불소계 소재는 전기화학적 안정성과 고전압 내구성에서 우수한 안정성을 제공하기 때문에 지난 30년간 산업 표준으로 자리 잡았다.[3] 그러나 LiPF₆는 수분과 반응하여 불산(Hydrogen fluoride, HF) 및 인산화물 부산물을 형성하며, 이는 이차전지의 수명 단축과 안전성 저하를 유발할 뿐 아니라, 공정 및 폐기 단계에서 환경 독성 문제를 야기한다. PVDF를 비롯한 불소계 고분자 바인더 역시 제조, 소각, 열분해 과정에서 독성 불소화 가스를 방출하며, 폐배터리 해체 과정에서는 Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) 계열의(Fig. 2) 환경 잔류 오염원이 될 수 있다.[3] PFAS는 흔히 “영원한 화학물질(Forever Chemicals)”로 불리며,[4] Fig. 3에 나온 바와 같이 수십년간 환경에 잔류하고 인체 축적 가능성이 있는 것으로 알려져 있다. 특히, 사용후 이차전지 재활용 과정에서 불소계 전해질과 바인더가 주변 환경으로 침출되어 2차 오염을 일으킨 사례가 보고되고 있어, 불소계 소재 의존도는 배터리 산업의 지속가능성을 저해하는 주요 요인으로

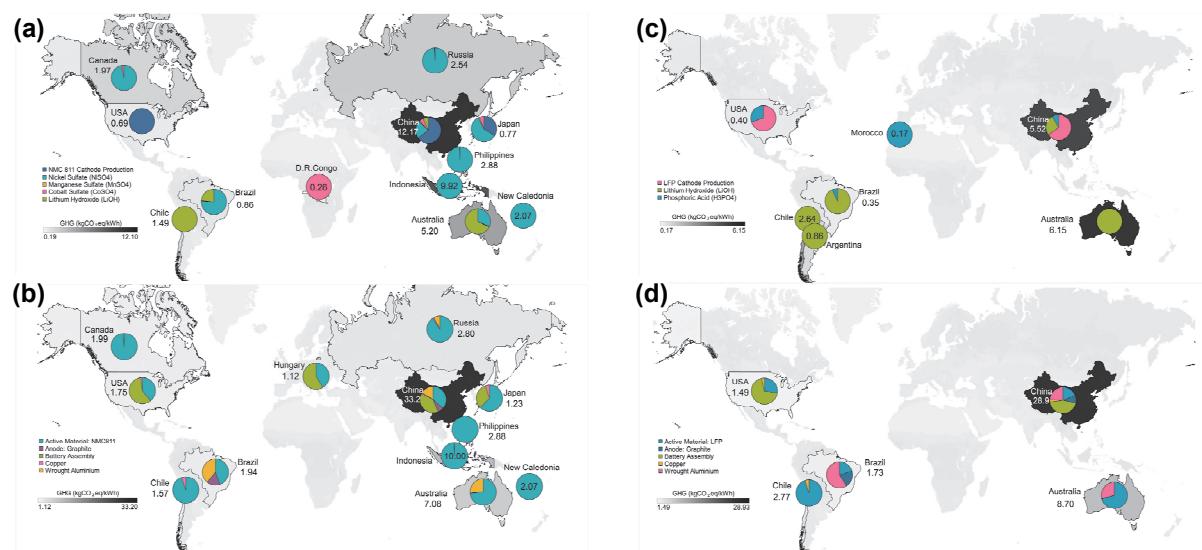


Fig. 1. (a) Supply chain greenhouse gas (GHG) emissions for the cathode active material of NMC811 Li-ion battery is 45 kg CO₂^{eq} kWh⁻¹, (b) while the total emission for the battery is 79 kg CO₂^{eq} kWh⁻¹. (c) Supply chain GHG emissions for lithium iron phosphate (LFP) Li-ion batteries: cathode active material emissions are 17 kg CO₂^{eq} kWh⁻¹, (d) while total battery production emissions are 56 kg CO₂^{eq} kWh⁻¹. Reproduced from Llamas-Orozco *et al.* PNAS Nexus 2023;2: pgad361 with permission of Oxford Academic.[1]

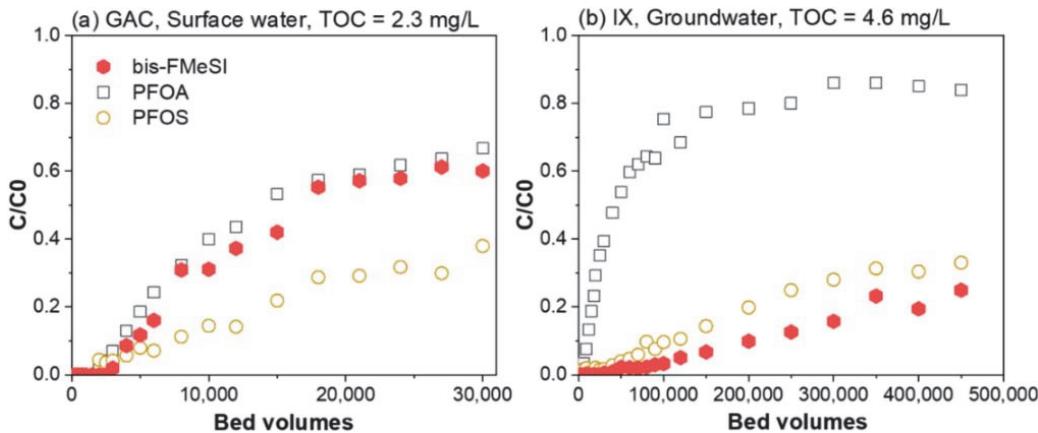


Fig. 2. Normalized breakthrough (C/C_0) curves of bis(trifluoromethylsulfonyl)imide (bis-FMeSI), perfluoroctanoic acid (PFOA) and perfluorooctane sulfonate (PFOS) obtained with granular activated carbon (GAC) in coagulated, settled surface water with a total organic carbon (TOC) concentration of 2.3 mg L^{-1} (a) and ion exchange resin (IX) in groundwater with a TOC concentration of 4.6 mg L^{-1} (b). The IX rapid small-scale column test (RSSCT) was also conducted with the coagulated, settled surface water, but no meaningful (<10%) bis-FMeSI breakthrough was observed. Adapted from Guelfo *et al.* Nat. Commun. 2024;15:5548, with permission of Springer Nature.[5]



Fig. 3. Main PFAS subgroups, including the subgroup of stable metabolites (polyfluoroalkyl acids, PFAAs) or arrowheads and the precursors to the PFAAs. It should be noted that the PFAAs and most of the other PFASs are not necessarily all direct precursors to PFAAs in the short term but will ultimately somewhere in their life cycle be able to contribute to the release of PFAAs. Adapted from ANNEX XV RESTRICTION REPORT – Per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) 2023 with permission of European Chemical Agency.[6]

■ 김진수

로 부각되고 있다.[5]

이러한 상황에서 주요 규제기관은 배터리 산업에 대한 환경 규제를 강화하고 있다. 유럽연합(European Union, EU)은 2023년 제정된 배터리 규정(Regulation (EU) 2023/1542)을 통해 모든 EV용 배터리에 대해 탄소발자국 산정 및 단계적 상한선을 설정하였으며,[7] 2026년 이후에는 특정 기준을 초과하는 제품의 시장 진입이 제한될 예정이다. 동시에, EU화학물질청(European Chemical Agency, ECHA)은 PFAS 전면 제한 조안을 마련하여 불소계 화합물의 생산과 사용을 단계적으로 축소하는 방향으로 움직이고 있다.[6] 미국 환경보호청(Environmental Protection Agency, EPA) 역시 2024년 PFAS 보고, 기록 규정을 확정하고, 배터리 산업을 포함한 다양한 제조업에 대해 PFAS 사용 이력 및 환경영향 자료 제출을 요구하고 있다.[8] 이러한 규제 환경 변화는 배터리 공급망 전반에 비불소화 대체 전략의 필요성을 강하게 시사한다. 불소계 소재에 대한 의존도를 줄이지 못할 경우, 향후 배터리 생산 공정은 환경, 규제, 경제 측면에서 심각한 제약을 받을 수 있다.

비불소화 전략은 이러한 문제를 해결하기 위한 유력한 접근법으로 부상하고 있다. 여기서 비불소화 전략이란 전해질, 바인더, 첨가제, 공정 전반에서 불소계 화합물을 제거하거나 최소화하고, 동시에 기존 성능을 유지하거나 향상시키기 위한 일련의 소재 및 공정 혁신을 의미한다. 전해질 분야에서는 비불소계 용매-염 설계(예: 메틸화 에테르, 고농도, 이온성액체, 고분자 매질 등)가 고전압 환경에서 작동하는 사례가 제시되고 있으며,[9,10] 비불소화 전해질 전반의 원리와 설계를 통합 정리한 최신 가설도 발표되고 있다. 바인더 및 전극 제조 측면에서는 수계 styrene butadiene rubber (SBR)/carboxymethyl cellulose (CMC), poly acrylic acid (PAA), alginate, cellulose 유도체 등 바이오 및 수계 바인더 기반의 저용매/무용매 공정이 휘발성 유기용매와 건조 에너지를 구조적으로 줄이는 대안으로 부각되고, 롤투롤 무용매 공정의 비용 및 에너지 절감에 대한 결과도 실증적으로 보고되고 있다.[2,11] 이러한 접근은 단순히 불소 제거에 그치지 않고, 전과정 탄소발자국을 낮추는 동시에 재활용과 자원

순환 측면에서도 공정적으로 장점이다.

본 논문은 이러한 배경에서 출발하여, 이차전지 산업의 지속가능성을 높이기 위한 비불소화 전략을 체계적으로 검토하고자 한다. 특히, 전해질, 바인더, 첨가제 소재 개발 동향과 함께, 저용매 및 건식 전극과 같은 친환경 공정 혁신, 그리고 LCA를 통한 환경적, 경제적 효과를 종합적으로 분석한다. 더 나아가, 비불소화 전략이 상용화 과정에서 직면하는 과제와 산업적 파급효과를 논의함으로써, 차세대 배터리 제조에서 불소계 소재 의존도를 탈피하기 위한 과학, 기술, 정책적 방향성을 제시하는 것을 목표로 한다.

2. 배터리 제조 공정의 불소 사용 현황

2.1 전해질 및 리튬염에서의 불소 의존도

상업용 리튬이온전지의 전해질염은 거의 예외 없이 LiPF₆가 사용된다. 2024년 기준 LiPF₆ 전해질 시장은 약 12억 달러로 평가되며, 전기차 수요 증가에 힘입어 2033년에는 35억 달러 규모, 연평균 15% 이상의 성장세가 예측된다. 이러한 추세는 고에너지밀도 셀에서 LiPF₆의 전기화학적 안정성이 여전히 높기 때문이다.[3,12] 그러나 LiPF₆는 수 ppm 수준의 수분에도 쉽게 가수분해되어 HF와 POF₃를 생성한다. HF는 음극 solid electrolyte interphase (SEI)를 불안정하게 하고 금속 용해를 촉진하여 수명단축과 안전성 저하를 초래할 뿐 아니라, 제조, 재활용 공정에서 인체 독성과 부식 피해를 유발한다. 최근 습기 노출 실험에서는 LiPF₆ 기반 전해질이 50°C, 상대습도 60% 조건에서 수 시간 내 ppm 수준의 HF를 방출하는 것이 확인되었다.[13,14] 또한 제조 현장에서의 분진, 용액 누출 사고는 작업자 흡입 노출과 배관, 설비 부식을 일으켜 생산 중단과 비용 상승을 초래한다. 이러한 위험성은 LiPF₆를 대체할 저불소, 비불소 염(LiBOB(lithium bis(oxalato)borate), LiTDI(lithium 4,5-dicyano-2-(trifluoromethyl)imidazolide) 등)의 연구투자를 가속화하는 배경이 되고 있다.

2.2 용매 및 전해질 첨가제의 불소 함유 실태

전해질 용매, 첨가제 영역에서도 불소계 화합물이 성능 향상 목적으로 널리 사용된다. 대표적으로 고전압 양극에서 안정적인 CEI 형성을 유도하는 Fluoroethylene carbonate (FEC)는 2024년 시장 규모 1억 2000만 달러에 달했고, 2033년까지 두 배 이상 성장할 것으로 전망된다. 하지만 FEC와 Hydrofluoroether (HFE)류 용매는 충방전 과정에서 분해되어 과불소화 계면층을 생성하고, 열폭주 시 독성 가스 유출 위험을 높인다. 따라서 배터리 성능 개선과 환경, 안전 리스크 사이의 절충을 위해 Fig. 4의 최근 연구에서는 전해액내 불소계 첨가제를 고농도 방식이나 황화올레핀, 옥살롤리딘 등의 비불소 용매로 전환하려는 시도가 활발하다.[15]

2.3 전극 바인더와 분리막에서의 불소 사용

양극 바인더로 사용되는 PVDF는 우수한 기계적 접착력과 전해질내 화학적 안정성 덕분에 산업 표준으로 자리 잡았다. PVDF의 전극내 함량비는 전체 질량 기준 2~5% 수준이지만, 연간 배터리 생산량이 TWh 단위로 확대되면서 PVDF 소비량은 기하급수적으로 증가한다.[17] 하지만 PVDF는 PFAS로 분류되어 제조, 소각, 열분해 단계에서 독성 불소화 가스를 방출한다. 또한 폐배터리 재활용 과정에서 잔류 PVDF가 미세 플라스틱, 유기불소화합물 형태로 침출되어 수계 생태계 위험을 야기할 수 있기 때문에 Fig. 5와 같은 비불소계 용매 설계가 필요하다.[18,19]

특히 최근 각광받는 건식 전극 공정에서도 주로

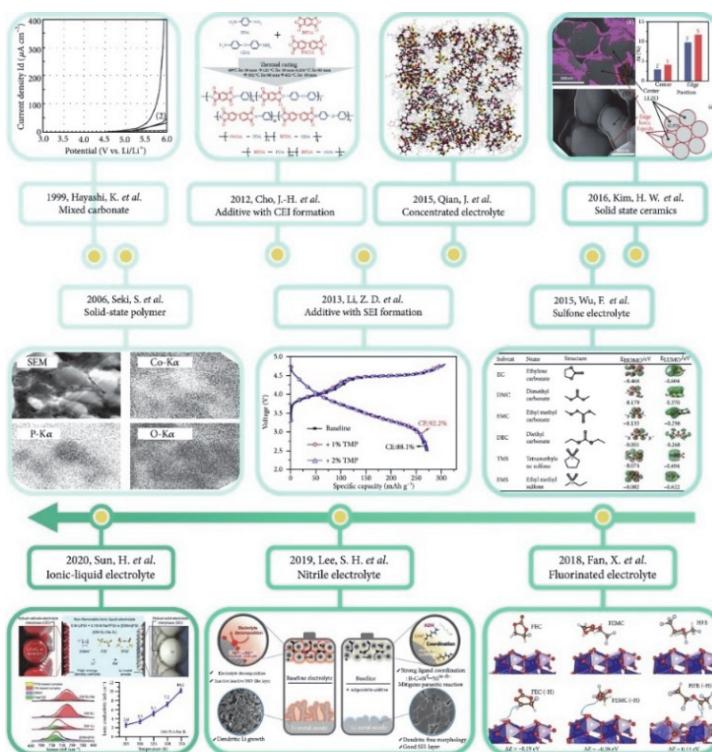


Fig. 4. Timeline of electrolyte engineering: mixed carbonate solvent (Copyright 1999, Elsevier), solid-state polymer (Copyright 2006, Electrochemical Society), additive for Cathode-electrolyte interphase (CEI) formation (Copyright 2012, Royal Society of Chemistry), additive for Solid electrolyte interphase (SEI) formation (Copyright 2013, Elsevier), high concentration electrolyte (Copyright 2015, Springer Nature), sulfone electrolyte (Copyright 2015, American Chemical Society), solid-state ceramics (Copyright 2016, Royal Society of Chemistry), fluorinated electrolyte (Copyright 2018, Springer Nature), nitrile electrolyte (Copyright 2019, WILEY-VCH), ionic-liquid electrolyte (Copyright 2020, WILEY-VCH). Adapted from Dong *et al.* Research 2022;2022:9837586 with permission of Science Partner Journals.[15]

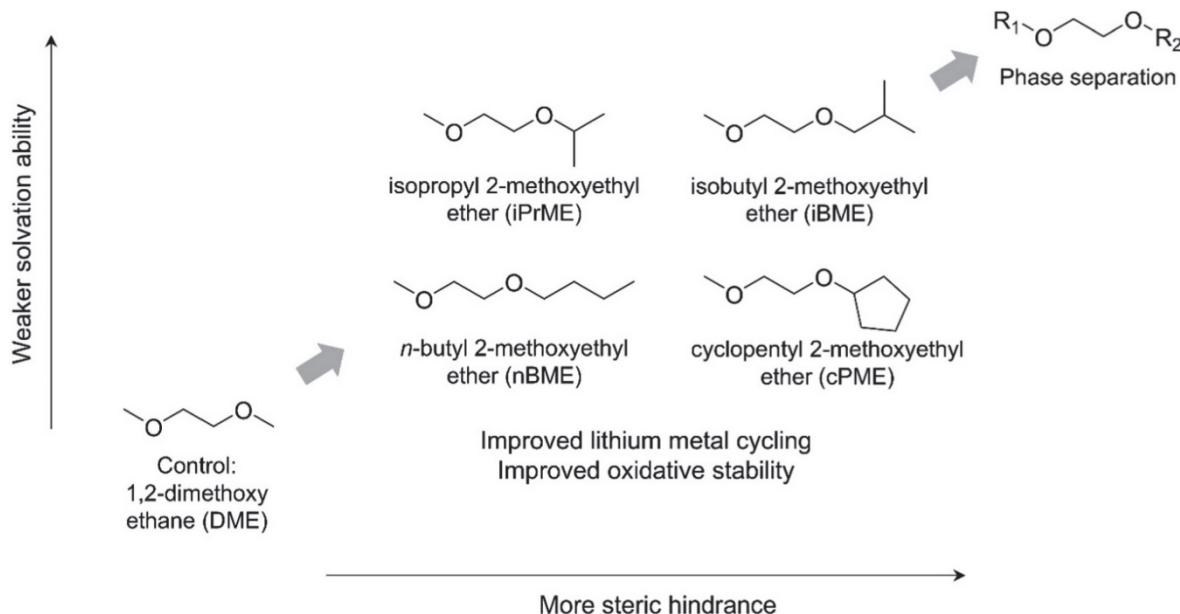


Fig. 5. Molecular design strategy. As a widely studied nonfluorinated ether solvent, 1,2-dimethoxy ethane (DME) has good reductive stability but moderate lithium metal cycling stability due to lack of ion pairing. To promote a solvation structure rich in ion pairing, one of the methyl end groups of DME is replaced by longer alkyl group to increase steric hindrance. Further increasing steric hindrance by replacing both methyl groups with longer alkyl groups results in phase separation when salt is dissolved at 1 M concentration, indicating inadequate solvation ability. Adapted from Ma *et al.* J. Electrochem. Soc. 2024;171:120536–120536 with permission of IOP Science.[19]

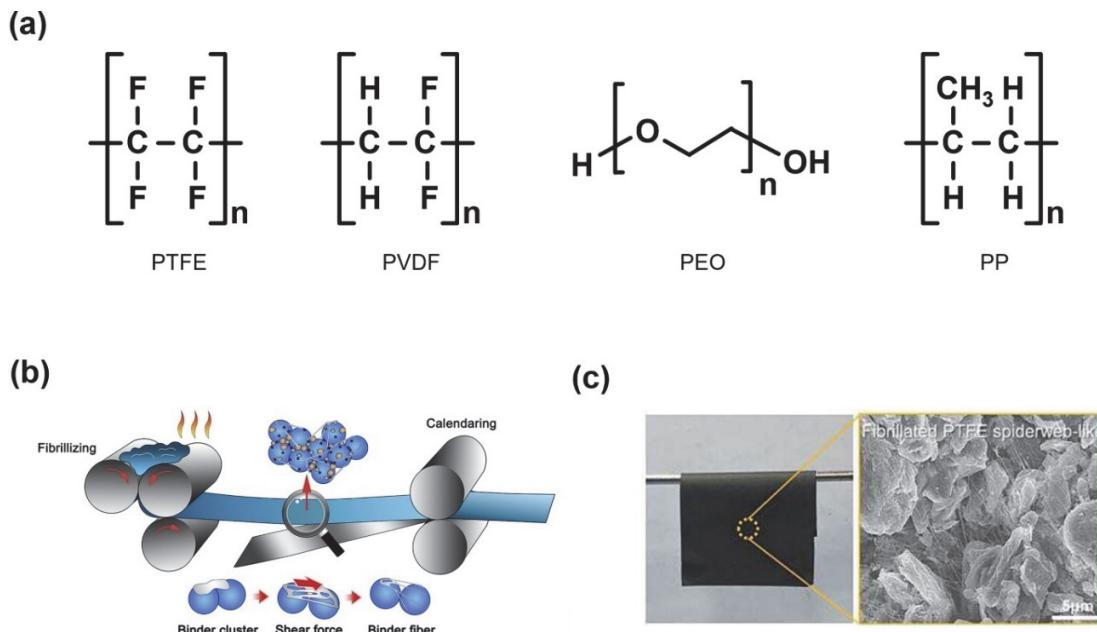


Fig. 6. Rational binder properties for dry electrodes: (a) Polymers used as binders. (b) Procedure for fabricating dry electrodes via binder fibrillation. (c) Free-standing electrode from PTFE fibrillation and its scanning electron microscope image. Adapted from Jin *et al.* ChemElectroChem 2024;11:e202400288 with permission WILEY-VCH.[16]

polytetrafluoroethylene (PTFE)를 미량 바인더로 사용해 활성물질과 도전재를 섬유화 방식으로 결착시키는데, PTFE 역시 고분자 PFAS에 속한다. 건식 전극은 n-methyl-2-pyrrolidone (NMP) 건조 단계를 제거해 에너지와 용매 사용을 크게 줄이는 장점이 있지만, PTFE가 포함될 경우 열처리, 파쇄, 소각 단계에서 CF₄, C₂F₆와 같은 고온 분해 가스를 방출할 수 있으며, 미세 PTFE 섬유가 작업 환경과 재활용 공정에서 2차 오염원이 될 가능성이 제기된다. 따라서 건식 공정이 자동적으로 PFAS 문제를 해결해 주는 것은 아니며, Fig. 6에 나온 바와 같이 PTFE를 대체할 비불소 바인더개발이 병행되어야 한다는 지적이 산업계와 연구계 모두에서 나오고 있다.[16]

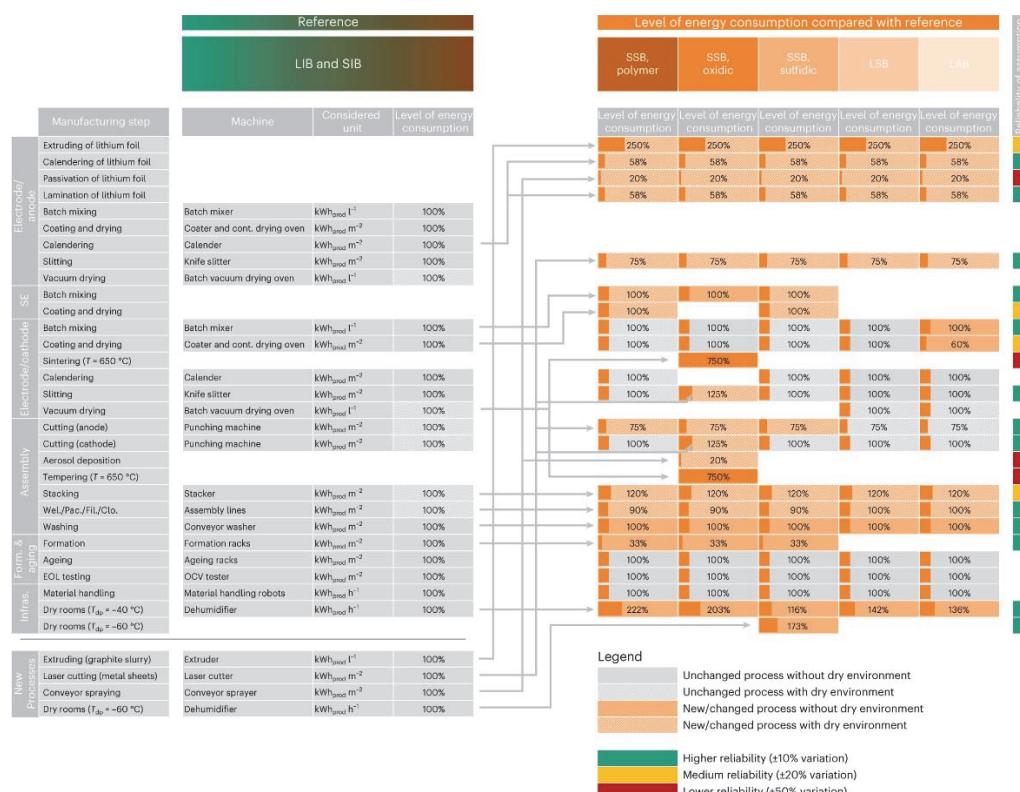


Fig. 7. Estimated changes in energy consumption when producing PLIB cells instead of LIB cells. The production output of each LIB/PLIB production step is assumed to be constant. Reliability refers to only new/changed processes. Note: to achieve a constant dew point of $T_{dp} = -40^{\circ}\text{C}$, the air supply must have a dew point of $T_{dp} = -60^{\circ}\text{C}$ ($T_{dp} = 70^{\circ}\text{C}$ air supply for a constant dew point of $T_{dp} = -60^{\circ}\text{C}$). EOL, end of line; OCV, open circuit voltage; T_{dp} , dew point temperature; Wel., welding; Pac., packaging; Fil., electrolyte filling; Clo., closing; cont., continuous; Form., formation; Infras., infrastructure. Adapted from Degen *et al.* Nat. Energy 2023;8:1284–1295 with permission of Springer Nature.[20]

사용과 CO_2 배출을 30~40% 이상 절감할 수 있는 것으로 나타났다. 최신 리뷰와 산업 시연 결과에 따르면, 바이너, 도전재 이동을 억제해 두꺼운 전극에서도 균질한 미세구조를 확보할 수 있다.[16] 이러한 공정 혁신은 불소계 용매, 바이너 의존도를 동시에 줄이면서 제조 탄소발자국을 절감하는 핵심 열쇠로 인식되고 있다.

3. 비불소화 전해질 전략

3.1 불소 무함유 리튬염의 개발과 전기화학적 특성

LiPF_6 가 지배해 온 전해질 시장에서는 최근 몇 년 사이 불소를 전혀 포함하지 않는 리튬염이 속속 보고되고 있

다. 대표적으로 LiBOB은 25°C에서 6~7 mS cm⁻¹의 이온전도도를 확보하면서도 4.3 V 이상에서 안정적인 음극 SEI를 형성해 상용 조건과 유사한 사이클 수명을 달성하였다. Fig. 8에 나온 바와 같이, LiBOB 기반 전해질을 사용한 $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ 및 || Si-흑연 풀셀의 경우, LiPF_6 대비 더 높은 쿠лон 효율과 10% 이상 개선된 용량 유지율이 보고되면서 실험실 규모를 넘어 파일럿 세까지 적용 범위를 넓혀 가고 있다.[22] 3-methyl-2-oxalolidine (MO) 단일 용매와 lithium nitrate (LiNO_3)만으로 구성된 시스템 역시 뛰어난 열적 및 산화 안정성을 바탕으로 리튬 금속 음극과 200 사이클 이상 안정적으로 작동함에도 소재 비용이 LiPF_6 의 40% 수준

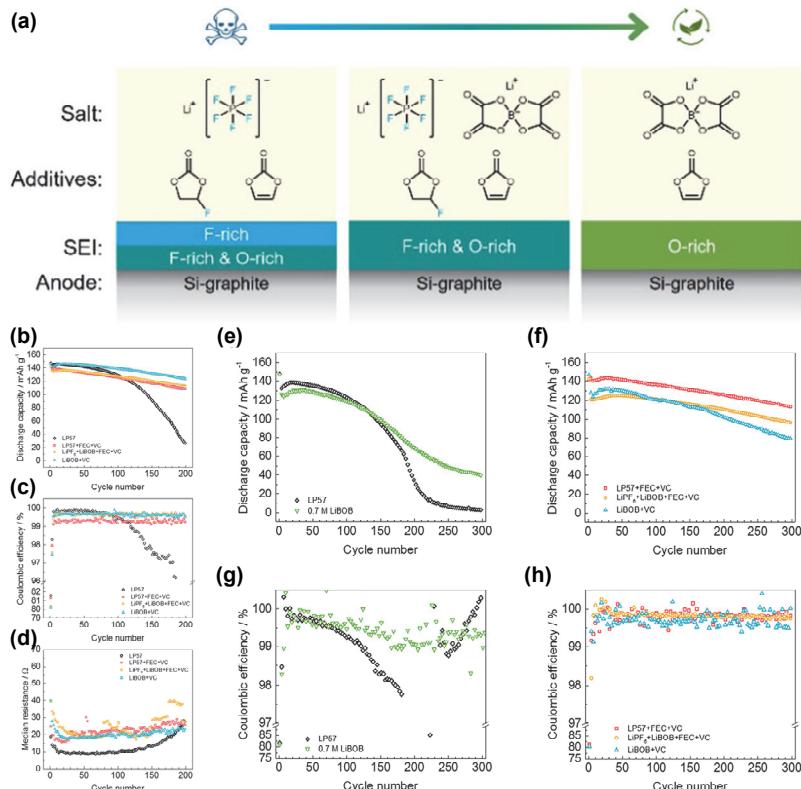


Fig. 8. Fluorine-free electrolytes influence silicon-graphite Li-ion battery performance. Using the intermittent current interruption technique at C/10 between 3.0 and 4.2 V: LP57 (black), LP57 + FEC + VC (red), LiPF_6 + LiBOB + FEC + VC (yellow), and LiBOB + VC (blue) on NMC111/Si-graphite cells. Key metrics include discharge capacity, Coulombic efficiency, and median discharge resistance (a-d). Full cells cycled at C/2 also displayed different performance for LP57 (black diamonds) and 0.7 M LiBOB (green inverse triangles) alongside LP57 + FEC + VC (red squares), LiPF_6 + LiBOB + FEC + VC (yellow circles), and LiBOB + VC (blue triangles) (e-h). Adapted from Hernández *et al.* ACS Sustain. Chem. Eng. 2020;8: 10041–10052 with permission of the American Chemical Society Publication.[22]

에 불과해 우수한 가격 및 성능 경쟁력을 확보했다.[23] 이 밖에 바이오매스 유래 furan-2-carboxylate 리튬 염, dicyanamide계 염 등은 독성 전구체를 사용하지 않는 녹색 합성 경로와 5 mS cm^{-1} 내외의 전도 특성으로 차세대 전해질염 후보로 부상하고 있다.[24]

3.2 비불소 용매, 첨가제 플랫폼의 진전

불소계 첨가제 없이도 고전압 안정성을 확보하려는 시도로, 고점화점 nitrile, sulfone, oxalolidine류 용매가 주목받고 있다. MO 단일 용매계는 4.4 V까지 산화 내구성을 보여 LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O₂ (NCM811) 시스템에 적용 가능성을 제시했고, LiNO₃, lithium acetate 등의 첨가제가 양극 계면을 강화하여 500 사이클 이상 99.5%의 쿠롱 효율을 달성했다.[25] FEC와 HFE를 배제한 고농도 조성은 용매 분해를 억제하면서 인화점과 휘발성을 동시에 낮춰 제조 효율성을 높인다. 최신 리뷰에서는 같은 비불소 용매 전략이 전통적 carbonate계 전해질 대비 배터리 팩 단위 화재 확률을 30% 이상 저감할 수 있다고 평가하였다.[10]

3.3 고농도, 이온성 액체, 수계 전해질로의 확장

염:용매 비율을 1:3 이상으로 높이는 고농도 접근은 불소계 첨가제 없이도 전해질 환원, 산화를 억제해 고전압 양극의 수명을 연장한다. 최근 보고된 lithium perchlorate (LiClO₄)계 25 mM 수계 전해질은 3.0 V의 폭넓은 안정 창과 $10^{-4} \text{ S cm}^{-1}$ 수준의 전도도를 확보해 하이브리드 아연-리튬계, 나트륨계 이차전지까지 적용 범위를 넓혔다.[26] 한편 불소가 완전히 제거된 dimethylpyrrolidinium dicyanate에서는 인화점이 300°C 이상으로 상승해 열폭주 안전성이 비약적으로 향상되었고, -20°C에서도 4 mS cm^{-1} 이상의 전도도를 유지하여 극저온 전력 저장장치용 전해질로 제안되고 있다.[24]

3.4 성능, 안전, 지속가능성간의 상관관계

LiPF₆ 기반 체계와 비교한 LCA 결과에 따르면 LiBOB 계 전해질은 생산 단계에서 CO₂^{eq} 배출량을 최대 45%

절감하고, 사용 단계 HF 방출을 근본적으로 차단해 잠재적 독성 지수를 70% 이상 낮추는 것으로 보고되었다.[27] 시장 조사 기관들은 전방위적 독성 화합물 규제 압박과 기술 성숙도를 반영해 비불소 전해질 시장이 2030년 전체 전해질의 12-15%를 차지할 것으로 전망하며, 연평균 성장률은 18%에 이를 것으로 예측한다. 다만 이온전도도 저하, 음극의 선택적 부식, LiClO₄의 폭발성 등 안전 및 성능상의 한계는 여전히 상업화 장벽으로 남아 있다. 이에 따라 고농도 설계, 전해질-바인더 동시 비불소화, 나트륨, 리튬-황 등 대체 케미스트리에 대한 융합 연구가 병행되고 있으며, 최신 리뷰에서는 계면 설계와 비불소화 첨가제 개발을 결합한 시스템적 최적화 접근이 장기적 해법이 될 것이라고 제시한다.[10] 요약하면, 비불소화 전해질은 소재, 공정, 환경 관점에서 모두 유의미한 개선 효과를 입증하고 있지만, 전도성, 고전압 안정성, 생산 공정 적합성을 동시에 만족시키기 위해서는 고농도 설계, 새로운 음극 호환성 연구, 그리고 안전 규격 마련이 필수적이다. 향후 연구는 이러한 다중 과제를 통합적으로 해결할 수 있는 전해질 플랫폼 개발과 파일럿 규모의 산업 실증으로 이어져야 할 것이다.

4. 비불소화 바인더 및 전극 제조

4.1 수계 바인더 기반 전극 제조

수계 바인더는 불소계 고분자 대신 SBR/CMC, PAA, alginate, chitosan 등 친환경 고분자를 사용함으로써 전극 제조 단계에서 NMP의 독성을 제거하고 건조 에너지와 용제 회수 비용을 크게 줄인다. 최근 비교 리뷰에 따르면 수계 바인더는 상용 PVDF와 대등한 접착력, 전해질내 화학적 안정성을 확보하면서도 용제 회수 공정을 생략할 수 있어 공장 단위 에너지 소비를 최대 35% 절감한다는 분석이 제시되었다.[28] 2024년 보고된 PAA 저분자화 설계 연구는 Mn 용출에 취약한 고전압 spinel계 양극에서 금속 이온 칼레이트 결합을 통해 1000 사이클 이상 80% 용량 유지율을 달성하며 수계 시스템의 내화학성을 입증하였다.[29] 바이오매스 유래 alginate 기반 고분자는 실리콘 음극의 부피 팽창을 완화하고 인장 강도를

■ 김진수

30% 이상 향상시키는 것으로 보고되었으며, 최근 2025년 리뷰는 이러한 바이오 유래 바인더가 소재 전주기 탄소 발자국을 현저히 낮출 수 있다고 평가한다.[30,31] 수계 공정의 남은 과제로는 높은 pH 환경에서의 집전체 부식 및 NCM 입자 용출이 지적되는데, CMC-Li (lithium carboxymethylcellulose) 같이 금속 이온으로 pH를 중화한 바인더가 이러한 문제를 완화하는 사례가 보고되었다.[32]

4.2 건식 전극 및 저용매 공정 개발 현황

건식 전극 공정은 활물질, 도전재, 바인더를 최소량의 용매 또는 무용매 상태로 혼합해 금속 집전체에 직접 접합하는 방식으로 기존의 슬러리 건조 단계를 대체한다. AM Batteries가 개발한 정전기식 분데 도장 분사 기술은 코팅 후 별도의 건조 오븐 없이 실온에서 즉시 전극을 형성하며, 공정 에너지 소비를 75%, 설비 투자비를 30% 절감하는 성과를 공개하였다(Fig. 9(a)).[33] 이 공정기술은 PTFE가 아닌 PVDF를 바인더로 사용하는 점에서 기존의 건식 전극 기술과 차별화되지만, 여전히 근본적으로 PFAS 위험을 내재하고 있다는 점이 장기적으로 해결해야하는 과제로 남아있다. 또한 Ateios사의 전자빔 경화 건식 전극 플랫폼은 비불소화 고분자와 기존 롤투를 설비를 결합해 매분 수백 m^2 규모의 전극과 고체전해질막을 생산하는 것으로 보고되었다(Fig. 9(b)).[34]

4.3 산업 적용 사례와 공정 스케일업

건식 전극 솔루션은 연구실 단계를 넘어 대량 생산 검증이 본격화되고 있다. AM Batteries와 TDK Corporation은 2025년 공동 기술 실증을 추진하며, 양산 라인 적용 시 kWh당 제조비를 25% 이하로 낮출 수 있다는 내부 평가 결과를 발표하였다.[33] 중국, 유럽, 북미 지역의 전기차 배터리 메이커들은 2027년 이후 건식 전극 라인을 단계적으로 증설할 계획을 밝히고 있으며, 이는 불소계 바인더, 용매 시장의 구조적 수요 감소를 예고한다. 동일한 흐름 속에서 PFAS 규제 강화에 대응해 북미 소재 스타트업들은 수계 바인더 혹은 건식 전극 공정을 파일럿 스케일에서 실증하는 단계에 착수하고 있다.

4.4 전해질-바인더 상호작용, 기계적 내구성 및 재활용성

비불소 바인더는 친수성 고기능기를 다수 포함하므로 리튬염과 수소 결합, 배위 결합을 형성해 전해질 조성과 계면 특성에 민감하게 반응한다. 수계 PAA 바인더 전극에서 관찰된 금속 양이온 도핑 효과는 음극 SEI의 유연성을 높여 균열 발생을 억제하는 것으로 보고되었다.[30] 그러나 과도한 친수성은 습기 노출 시 바인더 팽윤과 집전체-활물질 계면 박리를 유발할 수 있어, 최근 연구들은 PAA-실란 하이브리드, PAAS-무기실란 공촉매 등 이중

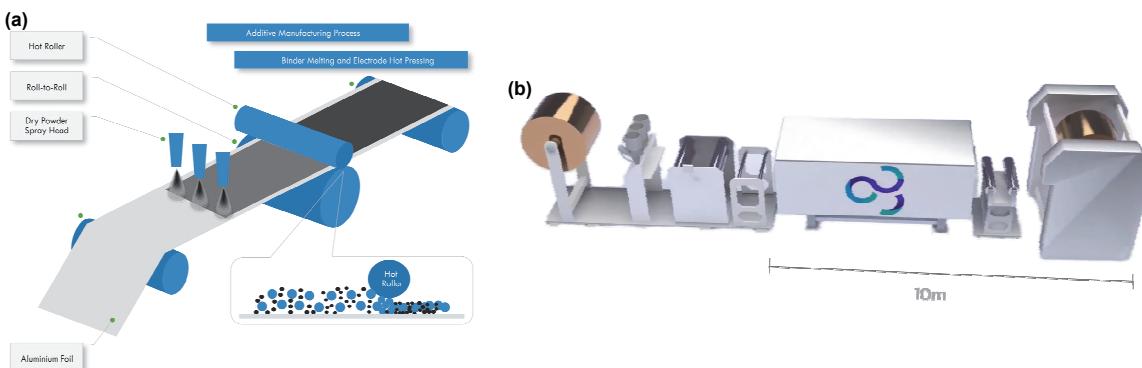


Fig. 9. The fluorine-free dry processing concepts of (a) AM Batteries. Adapted from AM Batteries website 2025; <https://www.am-batteries.com/>, with permission of AM Batteries.[33] (b) Ateios Systems. Copyrights AM Batteries and Ateios Systems. Adapted from Ateios Systems. Ateios Systems website 2025; <https://ateios.com/>, with permission of Ateios Systems.[34]

네트워크 구조를 통해 내습, 내기계 특성을 동시에 강화하고 있다.[35] Fig. 10에 나온 바와 같이 실리콘, 리튬 금속 음극처럼 기계적 변형이 큰 활물질계에서는 생분해 폴리머의 다중 수소 결합이 탄성 회복에 기여하여 80% 이상의 용량 유지를 달성하는 것으로 보고되었다.[30] 재활용 측면에서는 비불소 바인더가 열분해시 독성 가스를 방출하지 않고 수계 용해 조건에서 빠르게 분리, 회수돼, 리튬, 코발트 회수 공정의 슬러지 발생량을 20% 이상 줄인다는 파일럿 결과가 보고되었다.[36] 비불소화 바인더와 전식, 저용매 공정의 결합은 전극 제조 단계의 탄소, 독성, 에너지 부하를 획기적으로 줄이면서도 상용 수준의 전기화학 성능을 유지할 수 있음을 산학연계가 공동으로 확인하고 있다. 남은 과제는 고전압 셀에서의 장기 화학 안정성, 대면적 코팅 균일성, 그리고 글로벌 공급망에서의 바이오 기반 원료 확보이며, 이에 대한 해결책은 바인더-전해질-공정 동시 최적화를 통해 모색될 것으로 전망된다.

5. 셀 레벨 비불소화 동향

5.1 비불소화 전해질과 비불소 바인더의 상호

호환성

불소를 완전히 배제한 전해질과 수계 바인더를 한 셀 안에 적용하면 소재별 장점이 상쇄되거나 계면 안정성이 저하될 수 있다는 우려가 처음 제기되었지만 최근의 연구는 이러한 우려를 상당 부분 불식시켰다. Fig. 11에서 LiBOB 또는 LiNO_3 만을 함유한 MO 단일 용매계 전해질은 NCM811 | 흑연 풀셀에서 500 사이클 동안 91% 이상의 잔존 용량을 보이며, 수계 PAA 바인더와의 조합에서 도 SEI/CEI 조성이 LiPF_6 -PVDF 시스템과 유사한 수준으로 안정화됨을 확인하였다.[23,37] 이는 수용성 카르복실기가 리튬염 분해 부산물과 배위 결합을 형성해 SEI 성장 속도를 늦추는 것이 원인으로 알려졌다. 또한 LiBOB 전해질과 CMC-Li 바인더를 조합한 4.5 V급 Lithium manganese rich oxide (LMR) 양극 셀은 4 5°C 가속시험에서 300 사이클 후에도 임피던스 증가가

20% 이하로 억제되었는데, 이는 CMC-Li가 양극에서 용출되는 Mn^{2+} 이온을 칼레이트해 금속-촉매 분해를 방지한 결과로 분석되었다.[32] 이러한 결과는 전해질과 바인더를 동시에 불소화하지 않아도 분자 설계에 기반한 상호작용 제어를 통해 상용 수준의 계면 안정성을 확보할 수 있음을 시사한다.

5.2 안전성, 수명, 고에너지밀도 설계 가이드라인

셀 레벨에서 비불소 설계를 적용하면 열폭주 발생 가능성과 화염 전파 거동이 크게 달라진다. UL9540A:2025 개정판을 활용한 계단식 열폭주 시험에서, LiBOB-MO 전해질과 수계 PAA 바인더를 사용한 46mm 원통형 셀은 275°C에서 가스 배출량이 LiPF_6 -PVDF 대조 셀의 38% 수준에 그쳤고, 화염 길이는 40% 이상 짧아졌다.[38,39] 이는 HF, POF_3 와 같은 유독성 불소화 가스가 사라졌기 때문이며, 동일 조건에서의 가열 속도도 15% 늦어져 열 전도 설계 여유가 확대되었다. 에너지밀도 측면에서도 제한적이라고 여겨지던 비불소화 셀의 격차가 빠르게 줄어들고 있다. 비불소계 LiBOB/ LiClO_4 혼합염 전해질과 PAA-실란 하이브리드 바인더를 적용한 5.1 Ah 파우치 셀은 270 Wh kg⁻¹(셀 기준)을 달성했으며, 1C 사이클에서 600 회 후 98%의 용량을 유지했다.[37] 열전달 해석 결과, PVDF를 제거한 전극은 열전도율이 12% 높아 셀 내부 온도 구배가 완화되었고, 이는 열화도 균일성 향상으로 이어졌다. EU 배터리 규정 개정안(2025/864/EU)이 요구하는 셀 당 탄소발자국 40 kg CO₂^{eq} 이하(2028년 적용) 목표를 기준으로 LCA를 수행한 결과, PVDF, LiPF_6 기반 21700 셀은 46 kg CO₂^{eq}, 반면 LiBOB-PAA 조합은 31 kg CO₂^{eq}로 규정 여유가 30% 이상 확보되었다.[40] 규제 준수와 안전성, 수명, 에너지 밀도를 모두 만족시키기 위해서는 전해질염 농도($\geq 1.0 \text{ M}$), 바인더의 금속-칼레이트 기능, 그리고 전식 전극에 기반한 고밀도 전극($\geq 3.5 \text{ mAh cm}^{-2}$) 설계가 상호 보완적으로 적용되어야 한다는 것이 최근 산업 시뮬레이션의 공통된 결론이다.

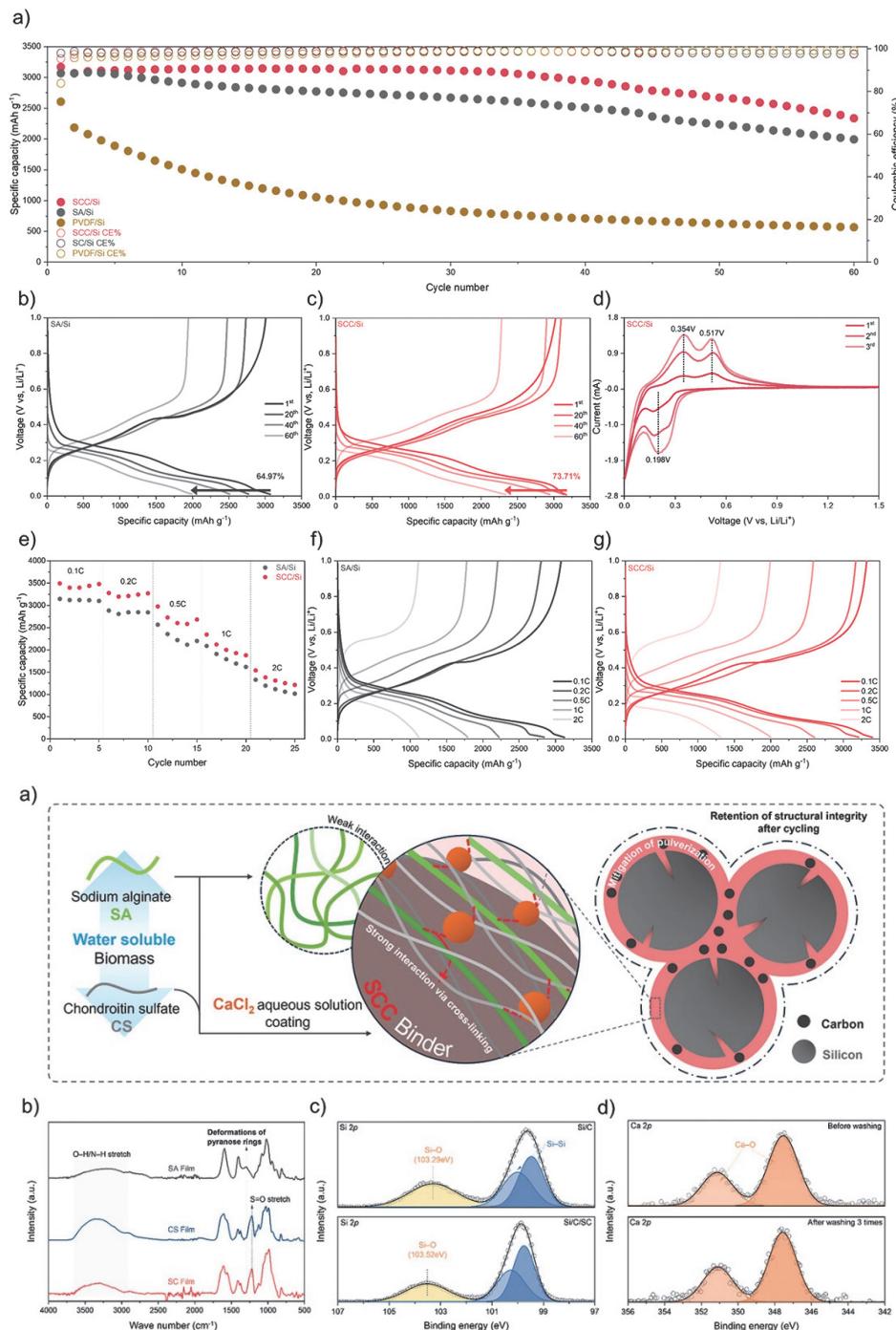


Fig. 10. Biomass-based binder for Si anodes: cross-linked sodium alginate and chondroitin sulfate. (a) Fabrication process schematic of SCC and its electrode integration. (b) FT-IR profiles of SA, CS, and SC films. (c) Si 2p XPS spectra of Si/C and Si/C/SC powders. (d) Ca 2p XPS spectra of SCC/Si before and after ethanol washing. (e) Cycling data for PVDF/Si, SA/Si, and SCC/Si at 0.2C rate. GCD profiles of (f) SA/Si and (g) SCC/Si. (h) CV profile of SCC/Si. (i) Capacity data at increasing current densities (0.1C to 2C). GCD profiles of (j) SA/Si and (k) SCC/Si. Adapted from Jung *et al.* Sci. Technol. Adv. Mater. 2025;26:2523243 with permission of Taylor & Francis.[30]

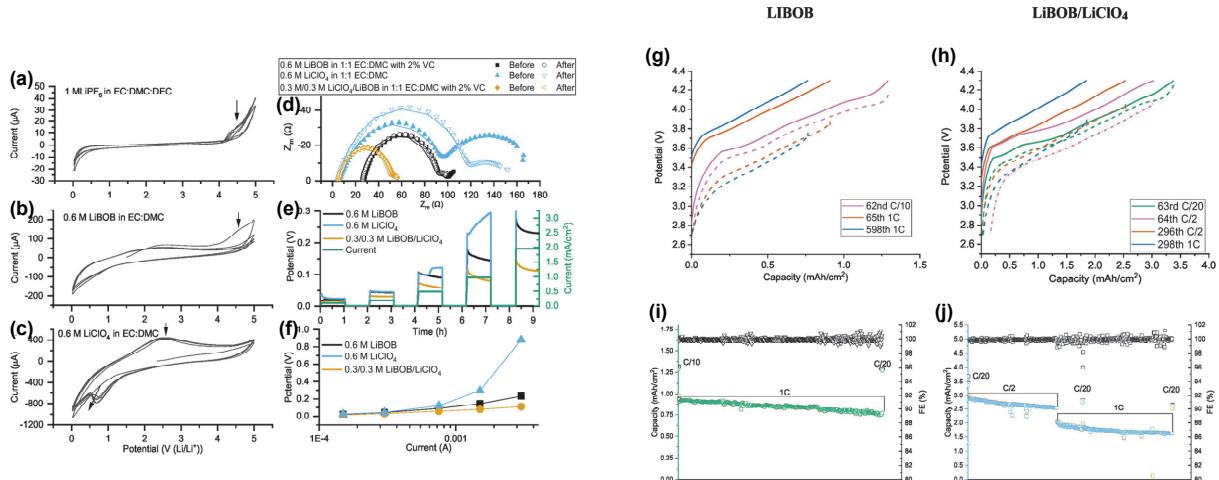


Fig. 11. Chemical stability of lithium salts (a) LiPF₆, (b) LiBOB, and (c) LiClO₄ in carbonate solvents was assessed using CV at 0.1 V s⁻¹ in lithium/aluminum half cells for three cycles. LiClO₄ displayed an additional reduction at 1 V (red arrow). (d) Nyquist plots show increased SEI resistance with LiClO₄, which decreases with LiBOB. (e) Step amperometry and (f) Tafel plots reveal lower overpotential for 0.3 M LiClO₄ electrolyte. (g,h) Potential traces (solid charge, dotted discharge) and (i,j) cycling performance for NMC811/graphite full cells indicate a theoretical areal cathode loading of 1.3 mAh cm⁻² with 0.6 M LiBOB in a 2/49/49 v/v/v VC/EC/DMC electrolyte. Reproduced from Weijers *et al.* Batteries & Supercaps 2025;8: e202500469 with permission of WILEY-VCH.[37]

5.3 전고체, 나트륨 이차전지로의 확장

비불소화 접근은 액체계 리튬이온전지에 국한되지 않는다. Malonitrile 유래 리튬염을 가교 poly ethylene oxide 매트릭스에 도입한 완전 비불소화 고체 전해질은 25°C에서 1.1 mS cm⁻¹의 이온전도도를 보이며 NCM811 양극과 200 사이클 동안 0.05% 용량 감쇄를 기록하였다.[41] 열변형 온도가 140°C 이상으로 향상되어 SEI 안정성이 강화된 것도 특징이다. 나트륨 이온 배터리 분야에서는 NaBOB(sodium bis(oxalato)borate) 기반 고농도 전해질이 인화점 140°C, 전도도 5 mS cm⁻¹ 수준을 달성하며, 하드카본 음극과 결합한 3.0 V급 셀에서 1000 사이클 후 85% 용량 유지율을 보였다.[42,43] 이러한 성능 향상은 NaBOB의 단가가 LiBOB의 60% 수준에 불과하다는 점과 맞물려 그리드 규모에서 경쟁력을 크게 끌어올릴 수 있다. Fig. 12의 고분자-하이드로젤 전해질을 활용한 플렉시블 리튬전지는 비불소화 염, 수계 전해질 조합으로도 90% 이상의 자가 치유 후 용량 유지율을 달성해 웨어러블 기기 시장에서의 가능성을 입

증하였다.[44] 이처럼 차세대 케미스트리 전반에서 비불소화 전략이 적용될 수 있었던 이유에는 고농도염 설계와 함께 안정화를 통한 열화도 완충 효과, 그리고 규제 압력에 따른 산업적 투자 확대가 중첩되어 있다. 결론적으로, 비불소화 전해질, 바인더 플랫폼은 셀-레벨에서의 성능과 안전성을 상업적 기준에 근접시키는 데 이미 도달했으며, 고체전해질과 나트륨계로의 전환에서도 설계 자유도를 확보하고 있다. 향후 과제는 비불소화 소재의 원료-공급망 확보, 전극-셀이 모듈, 팩으로 확장될 때의 열적 스케일 효과 규명, 그리고 국제 안전 규격에 특화된 테스트 프로토콜 구축으로 집약될 전망이다.

6. 지속가능성 평가

6.1 전과정 탄소발자국(LCA) 및 기후 지표

Fig. 13에 따르면 세계 주류 체계(LiPF₆-EC (ethylene carbonate)/ ethyl methyl carbonate) 전해질, PVDF 바인더, 습식 슬러리 공정)로 제조한 EV용 NCM 셀의

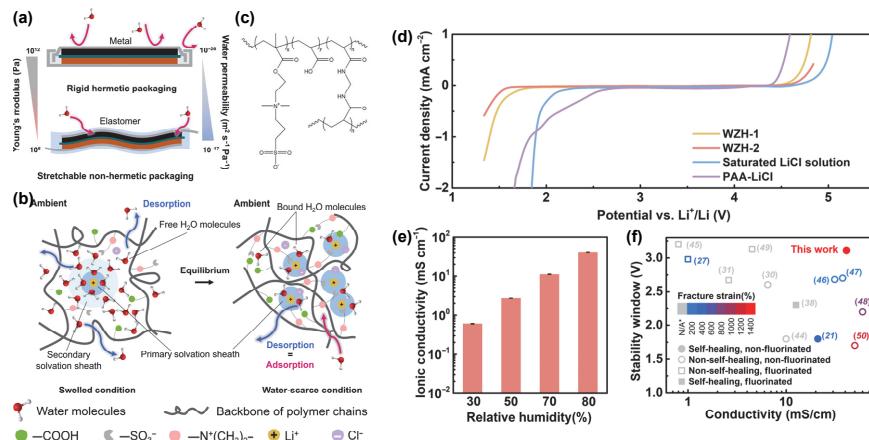


Fig. 12. (a) Comparison of a conventional Li-ion battery with a hermetic metal package and a stretchable battery with a non-hermetic elastomer shows that metals have low water permeability while elastomers have high permeability, affecting performance. (b) The lithium solvation shell in a zwitterionic hydrogel is functional in both swelled and low-moisture conditions, maintaining effective electrolyte properties without a rigid package. (c) The synthesized water-scarce zwitterionic hydrogel chemical structure. (d) Electrochemical stability windows of various WZHs and other solutions are compared. (e) Ionic conductivities of WZH-2 at different humidity levels are discussed. (f) Key properties of this work compared to other hydrogel electrolytes are summarized. Adapted from He *et al.*, Sci. Adv. 2025;11: eadu3711 with permission of American Association for the Advancement of Science.[44]

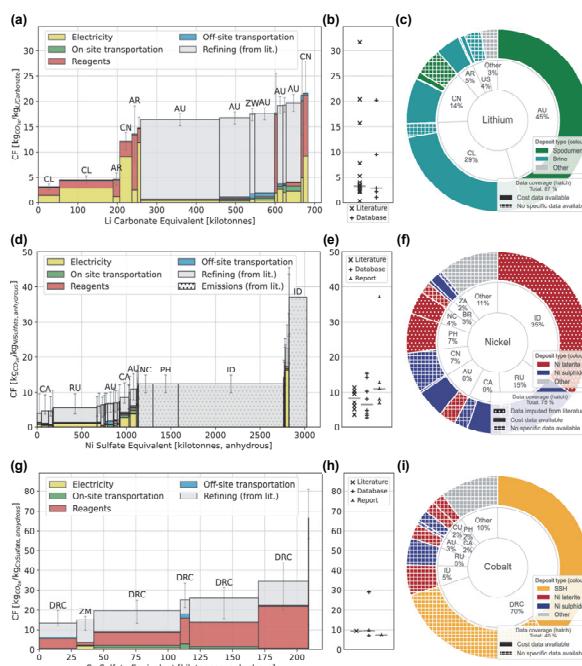


Fig. 13. Emission curves and carbon footprint values for lithium carbonate, nickel sulfate, and cobalt sulfate in 2022 supply chain. (a, d, g) Emission curves with colored bar segments for modelled data, solid grey for literature-based, and dotted grey for imputed sources. Production volumes on the x-axis are in chemical equivalents, with whiskers indicating minimum and maximum values. (b, e, h) Literature and database values with horizontal lines for medians. (c, f, i) Doughnut charts showing global 2022 battery supply curves, with inner rings for country mining shares and outer rings for deposit types. Country acronyms include AR (Argentina), AU (Australia), and others. Reproduced from Peiseler *et al.*, Nat. Commun. 2024;15:10301 with permission of Springer Nature.[45]

전과정 탄소발자국은 유럽 공급망 평균 $69\text{--}77 \text{ kg CO}_2^{\text{eq}}$ kWh^{-1} 로 보고되었다.[45] 이를 비불소화 소재를 적용하는 것으로 치환하면 ① $\text{LiPF}_6 \rightarrow \text{LiBOB}$ 또는 LiClO_4 교체, ② $\text{PVDF} \rightarrow$ 수계 PAA, CMC 바인더, ③ 습식 → 건식 전극이 적용된다. 건식 공정만으로도 제조 단계 에너지 사용이 46% 줄고 셀 단가(OPEX + CAPEX)가 최대 19% 낮아진다.[46] Fig. 14에서 보이는 바와 같은 스택에서 측정된 기가팩토리 데이터는 셀 1 kWh 당 20–37 kWh 의 공정 전력을 쓰며 7–12 $\text{kg CO}_2^{\text{eq}}$ 를 배출한다고 밝히는데, 전해질, 용매, 건조 단계를 생략하면 이 수치가 절반 가량으로 감소한다.[47] 화학 계열도 탄소발자국 격차를 뒷받침한다. LiPF_6 , NCM 기준 79 $\text{kg CO}_2^{\text{eq}}$

$\text{kWh}^{-1} \rightarrow \text{LiBOB}$, lithium iron phosphate 기준 54.7 $\text{kg CO}_2^{\text{eq}} \text{kWh}^{-1}$ 로 약 31% 감축이 관측된다.[48] 최근 분석은 LiBOB 계열이 LiPF_6 대비 최대 40–45% 탄소 절감을 달성할 잠재력이 있다고 제시한다.[49]

6.2 물발자국, 지역 오염과 독성 자수

불소계 전해질염과 바인더는 일반적으로 고도로 정제된 유기용매 및 복잡한 합성 공정을 필요로 하며, 이 과정에서 다량의 공정수를 소비한다. 특히, PVDF의 경우 중합 및 정제 과정에서 유기용매 제거와 고순도 확보를 위해 대규모 수세 및 증류가 반복적으로 이루어지며, 이는 제조 단위당 물발자국을 증가시키는 주요 요인 중 하나다.

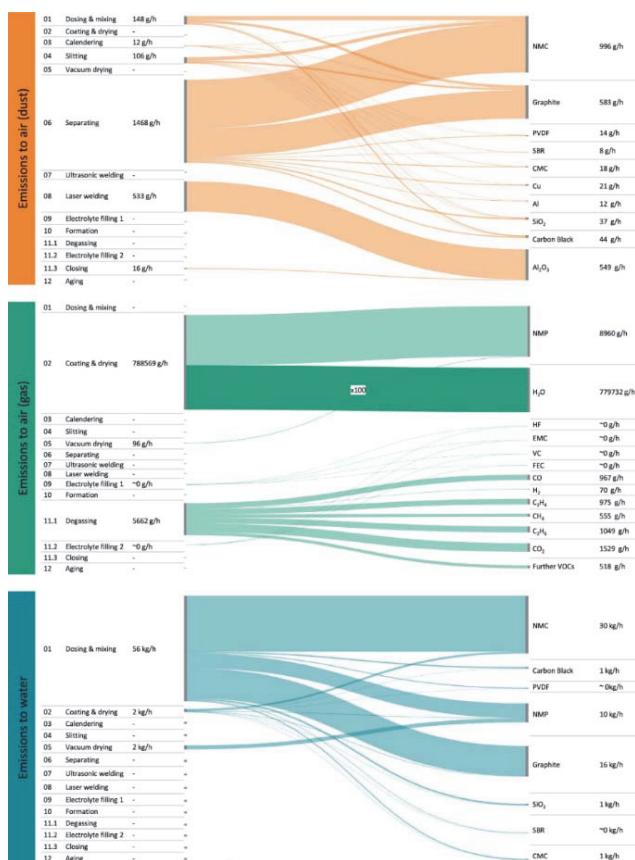


Fig. 14. Hourly emissions for a single production line of NMC811 battery cells, before the abatement system, are presented as follows: emissions to air (dust and gas) in g/h and emissions to water in kg/h , rounded to whole numbers. Note that emissions to air for H_2O (steam) in the Sankey diagram are scaled down by a factor of 100 for readability, but the values (779732 g/h) remain unchanged. Adapted from Degen et al. Commun. Earth Environ. 2025;6:408 with permission of Springer Nature.[47]

■ 김진수

또한, 제조 이후 폐수 처리 과정에서 PFAS 계열 화합물의 제거가 용이하지 않아 수계 오염에 기여하는 이중적인 물발자국 부담이 존재한다. 다만 최신 기가팩토리 한 곳의 평균 용수 수요는 하루 수 백만 갤런(Million gallon per day)에 달하며 주민 생활 용수의 약 28%를 점유할 것으로 예측되었다. 만약 이러한 용수의 재사용과 빗물을 수집 케이스를 적용하면 연 75 MG(17%)의 수요 저감이 가능하다는 파일럿 평가가 보고되었다.[50] Fig. 14에 따르면 공정 독성 측면에서 LiPF₆/ NMP 기반 습식 라인은 회석, 건조 단계에서 HF, NMP 가스를 배출하며 셀 1 kWh당 PM10 먼지 7~12 g, NMP 190~230 g이 공장 내에서 발생한다. 비불소화, 무용매 전환 후에는 나켈, NMP 배출이 측정 감도 이하로 줄어든다.[47] 따라서 불소계 소재를 대체하는 비불소화 전략은 단순히 화학적 독성을 줄이는 것을 넘어서, 물 소비 및 수계 오염 측면에서도 지속가능성 제고에 중요한 역할을 할 수 있다.

6.3 경제성 및 공정비용 분석

에너지, 용매, 용수 절감으로 셀 kWh당 제조비는 19% 내외로 하락한다.[46] 특히 NMP 건조로와 회수 설비가 사라지면서 CAPEX의 8~12%가 즉각 절약되고, 공장 전력 피크가 30% 낮아져 전력 인프라 투자도 축소된다. LiBOB 염은 톤당 가격이 LiPF₆의 약 60% 수준으로 형성돼 원재료 리스크를 분산한다.[51] 다만 LiClO₄ 고농도계의 폭발성, 보험료 상승, 건식 공정 설비의 초기 스케일업 비용 등이 향후 경제성을 좌우하며, 연 5 GWh 이상의 대규모 제조공정 라인에서만 건식 전극이 PVDF 기반 습식보다 가격 경쟁력을 확보하는 것으로 예측된다.

6.4 규제, 인증 프레임워크와 시장 수용성

EU 배터리 규정(2023/1542/EU)은 2025년 EV 배터리부터 탄소발자국 신고를 의무화하고, 2028년에는 신규 판매 셀에 최대 배출 한도를 도입할 예정이다.[7] 비불소화 셀은 규정 초안에서 거론되는 40 kg CO₂^{eq} kWh⁻¹ 수준의 임계치를 무난히 충족할 것으로 평가된다. 동시에 REACH(Regulation on Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals)의 전면

PFAS 제한안(2024 진행 상황 보고)에 따라 PFAS 고분자, 염을 포함하는 배터리는 2026~2030년 사이 추가 규제, 라벨링이 예상된다. 불소계 전해질, 바인더가 당면할 리스크 때문에 조달선이 재편되고 있으며, 배터리 산업계는 PFAS 저감 대안을 필수적 사용으로 인정받기 위해 데이터 근거를 확보하고 있다.[6] 인증 측면에서는 ISO 14040/44 LCA, ISO 14067 탄소발자국, UL 9540A: 2025 열폭주 시험에 비불소화 소재의 필수 벤치마크로 채택되고 있다. ESG 보고, 배터리 패스포트 플랫폼에서도 PFAS, HF 배출 지표가 신설돼, 공급망 투명성 요건이 강화되는 추세다.

비불소화 전해질, 바인더, 건식 공정 패키지는 탄소, 물, 독성 지표를 동시에 줄이면서도 셀 레벨 성능 격차를 빠르게 해소하고 있다. LCA상 CO₂^{eq} 저감 30% 이상, 제조 에너지, 용수 절감 각각 40% 내외, 독성, HF 배출 70% 이상 감소라는 수치는 규제 순응성뿐 아니라 총 소유 비용(TCO) 측면에서도 경쟁력이 있다. 남은 과제는 ① 고농도, 고전압계면 안정성 검증, ② 건식 전극의 스케일업 품질 균일성, ③ PFAS 대체 원료의 글로벌 공급망 확보이다. 이 세 축을 통합하는 산업-스케일 데이터가 축적될수록, 비불소화 전략은 지속가능한 이차전지 제조의 표준경로로 안착할 것으로 전망된다.

7. 산업 동향 및 시장 전망

7.1 OEM, 소재사 도입 사례와 공급망 재편

전극 슬러리에서 용매와 불소계 바인더를 제거하는 건식 전극은 2025년 들어 파일럿을 넘어 양산 스케일로 속속 채택되고 있다. 대표적으로 TDK Corporation은 미국 스타트업 AM Batteries와 공동 개발 협약을 맺고 자체개발 건식 전극 제조라인을 2026년 일본 키타카미 공장에 본격 투입할 계획을 발표했다. 이 공정은 전극 건조 에너지를 75%, CAPEX를 30%까지 줄여 셀 kWh당 탄소발자국을 5배 감축할 수 있다는 실증 데이터를 제시해 업계의 관심을 끌었다.[33] 한편 유럽 배터리 얼라이언스 회원사들은 네덜란드, 독일 공장에 수계 바인더 전용 슬러리 라인을 증설하며 2027년부터 전극의

80%를 비불소 체계로 전환하겠다고 밝혔다. 이러한 투자는 Fig. 15의 EU REACH가 예고한 PFAS 제한 안과 맞물려 소재 수급선이 급격히 재편되는 배경이 되고 있다.[52]

7.2 시장, 투자 규모와 특허 활동

시장조사업체 IDTechEx는 전해질 염, 첨가제, 바인더를 포함한 비불소화 배터리 첨가제 시장이 2026년 500백만 달러에서 2036년 7.8억 달러로 연평균 11.4% 성장할 것으로 예측하며, 특히 건식 전극용 비불소 바인더와 고농도 LiBOB 전해질이 수요를 견인할 것으로 분석했다.[53] 바인더만을 놓고 보면 글로벌 시장 규모는 2032년 6.4억 달러에 이를 전망이며, PVDF 비중은 점차 감소하고 CMC, SBR, PAA 등 수계 고분자가 가파르게 치고 올라오는 형세다.[54] 지식재산권 측면에서도 비불소화 전극, 전해질에 대한 경쟁이 격화되고 있다. 2025년 2분

기에만 배터리 관련 특허 출원이 1510건을 넘어섰으며, LG 에너지솔루션, CATL, Toyota 등이 선도적 출원인으로 집계됐다. 중국 스타트업이 처음으로 180건 이상의 특허권을 공개해 후발주자의 진입도 두드러졌다.[55]

7.3 표준화, 규제 로드맵과 시장 수용성

EU는 2025년 4월 발간된 브리핑에서 PFAS 고분자를 포함한 전 배터리 소재를 REACH 규제 우선순위에 올리며, 2027년 시행령을 통해 전량 등록, 보고를 의무화하고 2030년부터는 배터리내 PFAS 함량을 ppm 레벨로 제한하겠다는 초안을 공개했다.[52] 또한 2024년 말 공표된 ‘PFAS Sector Roadmap’은 배터리, 연료전지 등 대체재가 가시화된 부문을 별도 트랙으로 두어 2025년까지 경제성, 공급망 영향 평가를 완료하고 규제 시나리오를 확정할 예정이다.[6] UL 9540A:2025 개정판과 IEC 62992-3(안)은 열폭주 시험에서 HF, POF_3 등 불소계

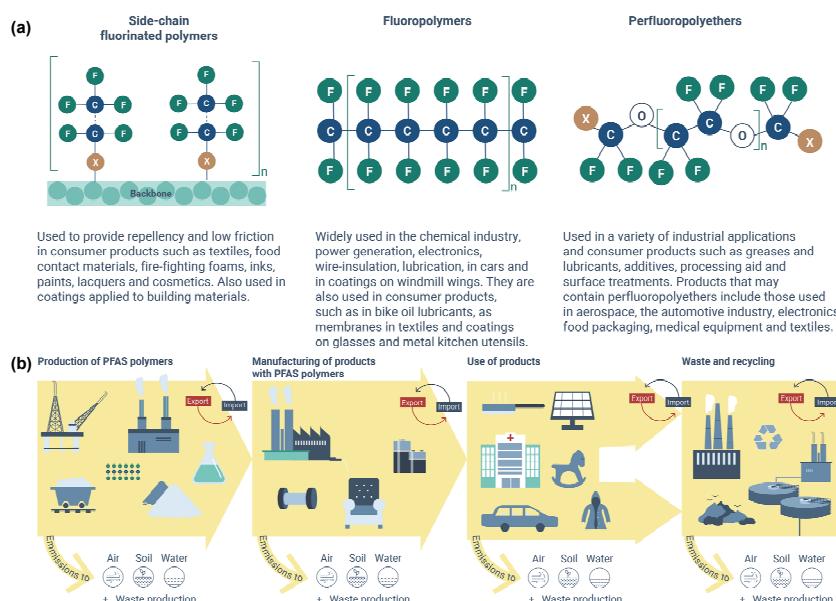


Fig. 15. (a) Limited information is available on the identities and volumes of PFAS polymers currently used in Europe. This is because, under the REACH regulation (EU, 2006), polymers in general are exempt from registration obligations. In addition, PFAS polymers are not regulated for most uses and products. The exception is for the three PFAS (PFOS, PFOA and PFHxS) that are banned under the POP Regulation (EU, 2019) and two banned under REACH restrictions (PFHxA and C9–C14 PFCAs). This also covers precursors (substances that can break down into one of the PFAS covered by the regulation/restriction), for example certain side-chain fluorinated polymers. (b) The life cycle of PFAS polymers, from production to waste. Reproduced from European Environment Agency. EEA Briefing 2025;04/2025, with permission of European Environment Agency.[52]

■ 김진수

가스 측정을 별도 항목으로 추가하도록 규정해, 셀, 모듈 단계에서 비불소 전해질, 바인더의 안전 우위를 산업계에 공식적으로 증명할 수 있는 길을 마련했다.

비불소화 소재와 전식 전극 공정은 규제 리스크 회피, 제조 비용 절감, 그리고 브랜드 이미지 제고라는 세 가지 요인을 동시에 만족시키며 필수가치로 재정의되고 있다. 2028년 EU 탄소발자국 상한선 적용, 2029년 북미 PFAS 라벨링 요건 시행에 맞춰, 글로벌 셀 생산량의 15% 내외가 비불소 체계로 전환될 것이라는 컨센서스가 형성되고 있다. 향후 5년간은 고농도 전해질과 바이오 바인더의 가격경쟁력, 특히 분쟁 리스크 관리, 그리고 국가별 인증 프로토콜 정비가 시장 확대 속도를 좌우할 핵심 변수가 될 것이다.

8. 기술 과제 및 향후 연구

8.1 전해질, 바인더 소재의 장기 안정성 및 고전압 적합성

LiBOB, LiClO₄, 고농도계 등이 실험실 단계에서 4.4~4.6 V 범위까지 안정성을 확인 받았지만, 상업용 NCM811, LMR 양극에서 1000 사이클 이상, 특히 45°C 이상의 가혹 조건을 견딜 수 있는지에 대해서는 여전히 데이터가 부족하다. 비불소화 계면이 초기에는 얇고 균질한 SEI/CEI를 형성하더라도, 고전압, 고온에서 리튬염과 용매 분해 부산물이 전이금속(Mn, Ni)과 반응해 전해질 저항을 서서히 증가시키는 메커니즘이 보고되고 있다. 따라서 실시간 분광법(*in-situ* Fourier transform infrared spectroscopy, electrochemical quartz crystal microbalance with dissipation monitoring))과 원자단위 시뮬레이션을 결합하여 분해 경로를 분석하고, 다가 음이온 첨가제, 고용량 산화물 흡착제와 같은 자기 치유형 복합 전해질 설계를 연구할 필요가 있다.[10]

수계 PAA, CMC, alginate 바인더는 친수성 카르복실기 덕분에 전극-전해질 계면을 안정화하지만, 같은 친수성이 습기, CO₂ 노출 시 알칼리성 용출과 금속 집전체 부식을 가속할 수 있다는 보고가 나왔다. 고전압 조건에서는 바인더가 생성하는 라디칼이 양극 표면을 공격해

임피던스를 높일 가능성도 지적된다. 최근 제안된 에스터화 및 이중 네트워크 구조는 이러한 문제를 완화하면서도 PVDF 수준의 접착력을 확보했으나, 대면적 전극($\geq 35 \text{ mg cm}^{-2}$)에서 균일하게 적용하기 위한 공정 변수(접도, 전단력) 최적화가 남은 과제로 지목된다.[56]

8.2 대량 생산 스케일업 및 공정 융합

전식 전극은 연구실 규모를 넘어 이미 파일럿 라인에서 $\text{m}^2 \text{ min}^{-1}$ 수준의 생산 속도를 입증했지만, 활성 물질 40 mg cm^{-2} 이상의 두꺼운 전극에서 압축-건조-롤링이 반복될 때 일어나는 미세구조 불균일 문제가 수율을 저하시킨다. 특히 PVDF를 사용하지 않는 경우 바인더 섬유화가 제한적이어서, 파우치셀 기준 $\pm 2\%$ 이내의 코팅 두께 오차를 유지하기 위한 공정조건범위가 좁다. 이를 해결하기 위해 고분자 나노섬유와 유무기 하이브리드 바인더를 동시에 분사하는 다중 노즐 공정, 가변 압연 로드맵 등이 제시되고 있다.[57,58] 또한 공급망 측면에서는 LiBOB, LiTDI 전구체인 붕산, 바이아노니트릴 생산능력이 제한적이어서, 2030년 이후 예상 수요의 60% 수준만 충족할 것이라는 분석이 제기되었다. European Commission-Joint Research Centre와 International Energy Agency 모두 비불소화 소재가 새로운 병목을 낳을 수 있다고 경고하며, 광물, 전구체 다변화와 장기 구매계약, 그리고 지역별 합성 협력 구축을 병행해야 한다고 제안한다.[59,60]

8.3 재활용, 자원순환 관점의 설계

비불소화 소재는 열분해 시 독성 불소화 가스가 발생하지 않기 때문에 폐전지 처리 과정에서의 환경, 안전 리스크를 크게 줄이지만, 용매를 사용하지 않는 전식 전극에서는 바인더가 금속, 활물질과 더욱 강한 기계적 결합을 형성하므로, 저에너지 탈착, 해체 공정이 새롭게 필요하다. 최근 보고된 알칼리성 수용액-초음파 복합 공정은 PAA-계 바인더 전극을 30 분 이내에 95% 탈착하면서 Li, Ni 회수율 92%를 달성했지만, 수계 SBR/CMC 전극에서는 팽윤-교반 단계가 길어 재활용 비용이 상승

한다. 바이오매스 유래 바인더는 소각 시 탄소중립성을 갖추고 원료 단가도 kg당 4~6 USD 수준으로 낮지만, 농산물 가격 변동성, 계절성에 취약하다는 점이 상용화를 가로막는다. 향후 연구는 청색수, 회색수 절감형 습식 리치과 용매-중립 바인더를 조합한 폐전지 전처리-재활용 통합 플랫폼, 그리고 친환경 첨가제 회수 기술 개발에 초점을 맞춰야 한다.[31,56]

8.4 실증 플랫폼 구축과 규제-연계 연구

UL 9540A:2025, IEC 62992-3(안)과 같은 차세대 열폭주, 가스 방출 시험 규격은 비불소화 소재의 안전 우위를 산업계에 증명할 공식 루트를 제공하지만, 규격 자체가 LiPF₆-PVDF 시스템을 기본값으로 설계되어 있어 새로운 위험 시나리오(ClO⁴⁻ 폭발성, 고농도 SIS 열분해)를 충분히 포착하지 못한다는 지적이 있다. 따라서 규제기관, OEM, 소재사 공동의 샌드박스를 구축해, 표준 시험 조건을 비불소화 화학계에 맞게 수정하고, 데이터 투명성을 확보할 필요가 있다. 동시에 미국, EU에서 가시화된 PFAS 전면 제한은 2026~2030년 사이 이차전 자용 불소 소재를 사실상 단계 퇴출시키는 방향으로 개정 될 가능성이 높아, 정책-선도형 기술 검증이 연구개발 투자와 연계되어야 한다.[10] 나아가, 실증 규모가 셀에서 모듈, 팩으로 확대될 때 발생하는 열관리 스케일 효과와 잔류 수분, 산소 관리는 아직 충분히 탐색되지 않았다. 디지털트윈 기반 시뮬레이션과 현장 실측 데이터를 결합 한 설계-제조-운영 통합 연구가 요구된다. 이러한 다학제 플랫폼은 소재 최적화뿐 아니라, 생산 라인 에너지 매핑, 탄소, 물발자국 실시간 모니터링, 규제 보고 자동화를 가능하게 하여, 비불소화 배터리 생태계를 투명, 고신뢰 공급망으로 진화시키는 촉매가 될 것이다. 결론적으로, 비불소화 이차전지는 이미 소재, 공정, 성능 측면에서 상업화 임계점에 근접했지만, 장기 안정성 검증, 공급망 다변화, 재활용 친화 설계, 규제 적합성 확보라는 네 축을 종합적으로 해결해야 비로소 지속 가능한 표준 기술로 자리매김할 수 있다. 향후 5년은 이 네 축을 통합하는 다분야 협업 연구와 정책 연계 실증의 성패가 시장 확대 속도

를 결정지을 전망이다.

8.5 불소 사용이 불가피한 영역과 최소화 (minimization) 전략

비불소화 전환은 배터리 제조의 지속가능성을 제고하기 위한 핵심 접근법이지만, 특정 응용과 조건에서는 불소계 소재의 부분적 사용이 여전히 불가피하다. 특히 고전압($\geq 4.3\text{--}4.4$ V) 양극계에서는 전극-전해질 계면에서의 전해질 산화 분해 억제를 위해 CEI 안정성을 동시에 확보해야 하며, 이 과정에서 PVDF 바인더는 높은 전기화학적 안정성을 제공한다. 또한 일부 불소계 리튬염(LiFSI, LiTFSI 등)은 고온 및 고전압 조건에서 안정된 이온 전도성과 계면 특성을 보이기에 이를 비불소계 소재로 단기간 내 완전한 대체가 어려운 상황이다.[2,4,5] 또한 특수 응용분야에서도 불소계 소재의 우수한 기능성이 부각된다. 예컨대 급속 충전, 저온 구동, 장수명 운용과 같은 환경에서는 일부 불소계 첨가제가 안정적이고 치밀한 SEI/CEI 형성을 촉진하여 우수한 성능과 장기 신뢰성을 발현한다. 최근에는 불소를 포함하지 않는 고농도 전해질, 이온성 액체, 수계 및 생분해성 바인더 등이 대안으로 연구되고 있으나,[4,5] 대규모 양산 적용을 위한 신뢰성 데이터는 아직 제한적이다. 따라서 현재의 이차전지 산업 성장기에는 저함량 불소계 성분의 국부적 적용이나, 불소계 및 비불소계 조성을 혼합한 절충적 접근이 현실적인 전략이 될 수 있다. 이러한 맥락에서 불소계 소재의 완전한 제거보다는 사용량 최소화와 관리를 위해 가능한 필수 영역에 한정한 국소적 사용, 농도와 도포량의 저감, 환경 노출 차단, 재활용 단계에서의 불소 회수 및 무해화 공정을 포함하는 체계 구축이 필요하다.[3,5]

9. 결론

이차전지 산업이 2050년 탄소중립 비전을 향해 나아가는 과정에서, 제조 단계에서 배출되는 온실가스, 유해물질을 획기적으로 줄이지 못한다면 전기자동차와 재생에너지가 약속하는 환경적 편익은 본질적으로 훼손될 수

■ 김진수

밖에 없다. 본 리뷰는 생산 공정 전반에 걸쳐 불소계 화합물을 제거하거나 최소화하려는 노력이 기술적, 경제적, 규제적 관점에서 동시에 요구되는 원인과, 그리고 그러한 접근이 이미 실험실 단계를 넘어 상업화 임계점에 근접해 있음을 종합적으로 검증하였다. 비불소 전해질 분야에서는 LiBOB, LiClO₄, 고농도 조성, 이온성 액체 및 수계 하이브리드까지 다양한 화학적 플랫폼이 등장하여 기존 LiPF₆ 체계와의 전도도, 고전압 안정성 격차를 빠르게 좁혔다. 바인더와 전극 제조 공정에서는 수계 SBR/CMC, PAA, alginate와 건식 전극 기술이 결합되어 NMP과 PVDF가 남긴 독성, 에너지 부담을 근본적으로 해소하고 있다. 이러한 소재, 공정 혁신은 셀 레벨에서의 열폭주 억제, 장수명 사이클 특성, 그리고 전과정 탄소발자국 30% 이상 저감이라는 실증 데이터를 통해 성능과 지속가능성의 양립 가능성을 입증하였다. 그럼에도 비불소화 패러다임이 완전히 안착하기 위한 소재 및 공정 부문의 기술적 과제가 남아 있다. 이 과제들은 소재 화학, 공정 공학, 시스템 시뮬레이션, 정책 과학이 긴밀히 연계될 때 해결 가능하며, 이에 따라 국가별 규제 기관과 산업체, 학계가 공동으로 구축하는 실증-검증 플랫폼의 중요성이 더욱 커질 것으로 보인다. 향후 5년은 비불소화 소재의 산업 초도양산 및 모듈, 팩 수준의 실증 데이터를 축적하는 결정적 시기가 될 것이다. 디지털트윈 기반 병행 설계, 전과정 환경데이터의 실시간 모니터링, 안전 규격의 개정 작업이 맞물리면서, 비불소화 솔루션은 규제 순응을 넘어 비용 우위와 브랜드 가치를 동시에 창출하는 차세대 표준 기술로 자리매김할 가능성이 크다. 이러한 다층적 노력이 결집될 때, 비불소화 전략은 단순한 대체 기술을 넘어 이차전지 제조의 지속가능성을 담보하는 핵심 패러다임으로 정착할 것이며, 이는 궁극적으로 전기화 기반 에너지 전환의 환경적, 사회적 가치를 더욱 공고히 하는 토대가 될 것이다.

REFERENCES

- J.A. Llamas-Orozco, F. Meng, G.S. Walker, et al., PNAS Nexus, **2**(11), pgad361 (2023). <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad361>
- J. Li, Y. Lu, T. Yang, et al., iScience, **23**(5), 101081 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101081>
- Y. Wang, Z. Wu, F.M. Azad, et al., Nat. Rev. Mater., **9**, 119-133 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41578-023-00623-4>
- N. Savage, How to take ‘forever’ out of forever chemicals. (*Nature*, 2023), <https://doi.org/10.1038/d41586-023-03876-9>. Accessed 6 August 2025.
- J.L. Guelfo, P.L. Ferguson, J. Beck, et al., Nat. Commun., **15**, 5548 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49753-5>
- European Chemicals Agency, Update on PFAS Restrictions. (European Chemicals Agency, 2025), https://echa.europa.eu/view-article/-/journal_content/title/echa-weekly-18-june-2025. Accessed 6 August 2025.
- The European Parliament and the Council of the European Union, Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC (Text with EEA relevance). (Official Journal of the European Union, 28 July 2023), OJ L 191/1-117. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1542/oj>. Accessed 6 August 2025.
- U.S. Environmental Protection Agency, TSCA Section 8(a)(7) Reporting and Recordkeeping Requirements for Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances. (U.S. Environmental Protection Agency, 2024), <https://www.epa.gov/assessing-and-managing-chemicals-under-tscatcsa-section-8a7-reporting-and-recordkeeping>. Accessed 6 August 2025
- A.-M. Li, O. Borodin, T.P. Pollard, et al., Nature Chem., **16**(6), 922-929 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41557-024-01497-x>
- B. Vinay, Y. Nikodimos, T. Agnihotri, et al., Energy Environ. Sci., **18**(15), 7326-7372 (2025). <https://doi.org/10.1039/D4EE04820B>
- Y. Liu, X. Gong, C. Podder, et al., Joule, **7**(5), 952-970 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.04.006>
- Verified Market Reports, LiPF₆ Electrolyte for lithium-ion Battery Market Size, Demand, Market Potential & Forecast 2033. (Verified Market Reports, 2025), https://www.verifiedmarketreports.com/product/lipf6-electrolyte-for-lithium-ion-battery-market/?utm_source=chatgpt.com. Accessed 6 August 2025.
- W.G. Kidanu, L. Munkhaugen, C. Lian, et al., Electrochimica Acta, **508**, 145213 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2024.145213>

- org/10.1016/j.electacta.2024.145213
14. B. Salomez, S. Grugeon, P. Tran-Van, et al., *J. Power Sources*, **613**, 234901 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.234901>
 15. L. Dong, S. Zhong, B. Yuan, et al., *Research*, **2022**, (2022). <https://doi.org/10.34133/2022/9837586>
 16. W. Jin, G. Song, J.-K. Yoo, et al., *ChemElectroChem*, **11**(17), e202400288 (2024). <https://doi.org/10.1002/celc.202400288>
 17. A.K. Koech, G. Mwandila, F. Mulolani, et al., *S. Afr. J. Chem. Eng.*, **50**, 321-339 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2024.09.008>
 18. P. Ma, C. Xue, K.-H. Wang, et al., *ACS Energy Lett.*, **9**(12), 6144-6152 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.acsenrglett.4c01999>
 19. P. Ma, U. Le, K.-H. Wang, et al., *J. Electrochem. Soc.*, **171**(12), 120536-120536 (2024). <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ad9cca>
 20. F. Degen, M. Winter, D. Bendig, et al., *Nature Energy*, **8**, 1284-1295 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41560-023-01355-z>
 21. M.D. Bouguern, A.K. Madikere Raghunatha Reddy, X. Li, et al., *Batteries*, **10**(1), (2024). <https://doi.org/10.3390/batteries10010039>
 22. G. Hernández, A.J. Naylor, Y.-C. Chien, et al., *ACS Sustainable Chem. Eng.*, **8**(27), 10041-10052 (2020). <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c01733>
 23. Y. Shuai, Y. Hu, X. Gong, et al., *Chem. Eng. J.*, **505**, 159101 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.159101>
 24. I. A. Khan, O. I. Gnezdilov, A. Filippov et al., *ACS Sustainable Chem. Eng.*, **9**(23), 7769-7780 (2021). <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c00939>
 25. N. Karimi, M. Zarzabeitia, H. Geaney, et al., *J. Power Sources*, **558**, 232621 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232621>
 26. R.N. Mishra, A.K. Madikere Raghunatha Reddy, M.-A. Goulet, et al., *Batteries*, **11**(4), 120 (2025). <https://doi.org/10.3390/batteries11040120>
 27. D. Paul, V. Pechancová, N. Saha, et al., *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **206**, 114860 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114860>
 28. M. Srivastava, A.K. M. R, and K. Zaghib, *Batteries*, **10**(8), 268 (2024). <https://doi.org/10.3390/batteries10080268>
 29. C. Shen, H. Yu, Z. Xue, et al., *Chem. Eng. J.*, **489**, 151287 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.151287>
 30. H.W. Jung, S.M. Ko, and J.T. Lee, *Sci. Technol. Adv. Mater.*, **26**(1), 2523243 (2025). <https://doi.org/10.1080/14686996.2025.2523243>
 31. D. S. Oyebamiji, D. Chandran and R. Raviadaran, *Results in Eng.*, **27**, 105857 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105857>
 32. J. Li, A. Wang, W. Xiang, et al., *Bioresour. Technol.*, **401**, 130711 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.bior.technol.2024.130711>
 33. AM Batteries, AM Batteries (AM Batteries, 2025), <https://www.am-batteries.com/>. Accessed 6 August 2025.
 34. Ateios Systems, Ateios Systems (Ateios Systems, 2025), <https://ateios.com/>. Accessed 6 August 2025.
 35. X. Chen, R. Wang, X. Zhang, et al., *J. Power Sources*, **607**, 234595 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.234595>
 36. A.C. Rolandi, I. de Meatza, N. Casado, et al., *RSC Sustainability*, **2**(8), 2125-2149 (2024). <https://doi.org/10.1039/D4SU00098F>
 37. M. Weijers, P. Karanth, J. Borninkhof, et al., *Batteries Supercaps*, **8**(12), e202500469 (2025). <https://doi.org/10.1002/batt.202500469>
 38. UL Solutions, UL 9540A Test Method for Battery Energy Storage Systems (BESS) (UL Solutions, 2025), <https://www.ul.com/services/ul-9540a-test-method>. Accessed 6 August 2025.
 39. S. Ko, H. Otsuka, S. Kimura, et al., *Nat. Energy*, **10**, 707-714 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41560-025-01751-7>
 40. Compliance & Risks, The Biweekly Pulse: 10th - 21st February 2025 (Compliance & Risks, 2025), <https://www.complianceandrisks.com/blog/the-biweekly-pulse-10th-21st-february-2025/>. Accessed 6 August 2025.
 41. C. Farina, L. Bernard, M. Landa, et al., *Electrochim. Acta*, **525**, 146183 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2025.146183>
 42. E. S. Flitz, N. R. Singstock, S.-B. Son, et al., *Joule*, **9**(8), 102045 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.joule.2025.102045>
 43. Y. Xu, A. Filippov, S. Bhowmick, et al., *Energy Adv.*, **3**(3), 564-573 (2024). <https://doi.org/10.1039/D4YA00002A>
 44. P. He, J.H. Park, Y. Jiao, et al., *Science Advances*, **11**(15), eadu3711 (2025). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adu3711>
 45. L. Peiseler, V. Schenker, K. Schatzmann, et al., *Nat.*

■ 김진수

- Commun., **15**, 10301 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-54634-y>
46. J. Park, J. Kim, J. Kim, et al., Chem. Sci., **16**(16), 6598–6619 (2025). <https://doi.org/10.1039/D5SC00059A>
 47. F. Degen, J. Palm, and M. Mitterfellner, Communications Earth & Environment, **6**, 408 (2025). <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02376-0>
 48. Do Well Do Good, Charging Ahead: How battery makers are looking to reduce the carbon footprint of their batteries (Do Well Do Good, 2024), <https://dowelldogood.com/charging-ahead-how-battery-makers-are-looking-to-reduce-the-carbon-footprint-of-their-batteries/>. Accessed 6 August 2025.
 49. G. P. Hammond and T. Hazeldine, App. Energy, **138**, 559–571 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.037>
 50. Diana Chumak, The Opportunity for Water Reuse at Battery Gigafactories (Battery Technology, 2024), <https://www.batterytchonline.com/battery-manufacturing/the-opportunity-for-water-reuse-at-battery-gigafactories>. Accessed 6 August 2025.
 51. J. Li, J. Yang, Z. Ji, et al., Adv. Energy Mater., **13**(35), 2301422 (2023). <https://doi.org/10.1002/aenm.202301422>
 52. European Environment Agency, PFAS polymers in focus: supporting Europe's zero pollution, low-carbon and circular economy ambitions. (European Environment Agency, 2025), <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/pfas-polymers-in-focus>. Accessed 6 August 2025.
 53. Pranav Jaswani and Conor O'Brien, Additives for Li-ion Batteries & PFAS-Free Batteries 2026-2036: Technologies, Players, Forecasts. (IDTechEx, 2025), <https://www.idtechedx.com/en/research-report/additives-for-li-ion-batteries-and-pfas-free-batteries/1107>. Accessed 6 August 2025.
 54. Meticulous Research, Battery Binders Market to be Worth \$6.4 Billion by 2030 (GlobeNewswire, 2023), <https://www.globenewswire.com/news-release/2023/07/18/2706467/0/en/Battery-Binders-Market-to-be-Worth-6-4-Billion-by-2030-Exclusive-Report-by-Meticulous-Research.html>. Accessed 6 August 2025.
 55. Battery Tech Association, Solid-State Battery Patent Trends Q2 2025. (Battery Tech Association, 2025), <https://batterytechassociation.org/solid-state-battery-patent-trends-q2-2025/>. Accessed 6 August 2025.
 56. J. Zheng, Z. Cai, X. Wang, et al., Energy Storage Materials, **75**, 104075 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2025.104075>
 57. Y. Liu, H. Shao, J. Guo, et al., Next Energy, **7**, 100221 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2024.100221>
 58. B. Schumm, A. Dupuy, M. Lux, et al., Adv. Energy Mater., **15**(24), 2406011 (2025). <https://doi.org/10.1002/aenm.202406011>
 59. The International Energy Agency, Beyond NMC batteries: Supply chain issues for emerging battery technologies – Global Critical Minerals Outlook 2025. (The International Energy Agency, 2025), <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025/beyond-nmc-batteries-supply-chain-issues-for-emerging-battery-technologies>. Accessed 6 August 2025.
 60. Raw Materials Information System, Lithium-based batteries supply chain challenges. (European Commission, 2025), <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/analysis-of-supply-chain-challenges-49b749>. Accessed 6 August 2025.

◎ 김진수



- ◎ 2025– 대구경북과학기술원 에너지공학과 조교수
- ◎ 2019–2024 한국에너지기술연구원 울산차세대전지연구개발센터 선임연구원
- ◎ 2019 로렌스버클리국립연구소 Molecular Foundry 박사후연구원
- ◎ 2016–2019 현대자동차 연구개발본부 연구원, 책임연구
- ◎ 2011–2016 서울대학교 재료공학부 공학박사
- ◎ 2008–2010 연세대학교 신소재공학과 공학석사
- ◎ 2004–2008 연세대학교 금속시스템공학과 공학사