전기차 폐배터리 자원순환을 위한 친환경 회수 기술 동향

이찬민*, †

1. 서 론

전기자동차(EV) 시장의 급격한 성장은 지속 가능한 모빌리티로의 전환을 이끄는 동시에, 수명이 다한 폐배터리의 누적이라는 막대한 환경적·기술적 과제를 야기한다 [1, 2]. 글로벌 EV 판매량은 2017년 연간 100만 대를 돌파한 이후 지속적으로 증가하여 2024년 말에는 1,400만 대를 넘어설 것으로 전망된다 [1, 2]. 폐배터리는 적절히 처리되지 않을 경우 토양·수질 오염, 유독가스 발생, 화재 및 폭발 등 심각한 위험을 초래하지만 [2], 리튬, 니켈, 코발트 등 전략 금속이 집약된 고부가가치 이차 자원(Secondary source)으로 평가받는다 [1]. 1차 광산 채굴 시 1톤의 리튬 생산에 1,900톤의 수자원이 소비되는 반면 [1], 폐배터리 28톤(약 256대 분량)을 재활용하면 동일한 양을 회수할 수 있어 환경 부하와 공급망 불안정성을 완화하는 핵심 대안이 된다 [1]. 자원 관리 위계상 잔존 수명(SOH) 진단을 통한 재사용(Re-use)이 일차적으로 선호되나 [1, 2], 완전한 순환경제(Circular economy) 달성을 위해서는 폐배터리의 최종 귀결점이 자원 회수(Recycling) 공정이 되어야 한다 [1, 2]. 그러나 기존 상용화된 건식 제련(Pyrometallurgy)과 습식 제련(Hydrometallurgy)은 고에너지 소비, 유독가스 배출, 다량의 화학 시약 사용 및 강산성 폐수 발생이라는 명확한 한계를 지닌다 [1, 2]. 전과정 평가(LCA) 연구들에 따르면 기존 방식은 primary 생산 대비 온실가스 감축 효과가 미미하거나 특정 환경 지표를 악화시키기도 한다 [1, 3]. 이에 따라 양극재 결정 구조를 유지·복원하는 직접 재활용(Direct recycling)을 비롯해 [1, 4], 심공융 용매(DES) [2, 5], 초임계 CO_2(SCO_2) [2, 6], 미생물 기반 생물학적 추출(Bioleaching) [2, 7] 등 환경 오염과 탄소 발자국을 최소화하는 차세대 친환경 기술로의 패러다임 전환이 요구되고 있다 [1, 2]. 본 논문에서는 폐배터리 전처리 기술부터 기존 제련 공정의 한계, 최신 친환경 자원 회수 기술 연구 동향을 종합 고찰하고, 기술별 정량적 특성을 비교하여 지속 가능한 이차전지 자원순환 생태계 구축을 위한 지향점을 제시하고자 한다 [1, 2].

2. 본 론

2.1 폐배터리 전처리 및 진단·해체 기술 동향

폐배터리의 안전하고 효율적인 자원화를 위해서는 전처리 및 해체 단계의 기술 확보가 필수적이다 [1, 2]. 폐배터리는 잔존 수명(SOH) 및 상태(SOC)에 따라 재사용, 재제조, 재활용 여부가 결정된다 [1, 2]. 전기화학

* 한국생산기술연구원 지속가능기술연구소 녹색순환연구부문 / 수석연구원(보) / clee@kitech.re.kr / 교신저자

임피던스 분광법(EIS) 등 비파괴 검사 기술을 통한 신속 진단이 중요하며 [1], 해체 시 화재·폭발 방지를 위해 염수(Brine) 침지 방전 [1], Ohmic 방전 [1], 또는 비활성 가스(CO_2, Ar) 분위기 하에서의 파쇄/가스 블랭킷 공정이 적용되고 있다 [1, 2]. 현재 배터리 팩 및 모듈 해체는 고전압 감전 위험성 속에 수작업으로 이루어지고 있어 높은 인건비와 안전 리스크가 발생한다 [1]. 제조사별로 상이한 폼팩터(원통형, 각형, 파우치형)와 팩 구조의 불규칙성을 극복하기 위해 AI 컴퓨터 비전, 3D RGB-D 센서, 힘 제어 로봇 arm을 활용한 자동화 해체(Automated Disassembly) 기술이 개발되고 있다 [1, 2, 8]. 아울러 배터리 전주기 이력을 추적하는 배터리 여권(Battery Passport) 및 블록체인 기반 데이터 관리 기술 도입이 본격화하고 있다 [1, 2].

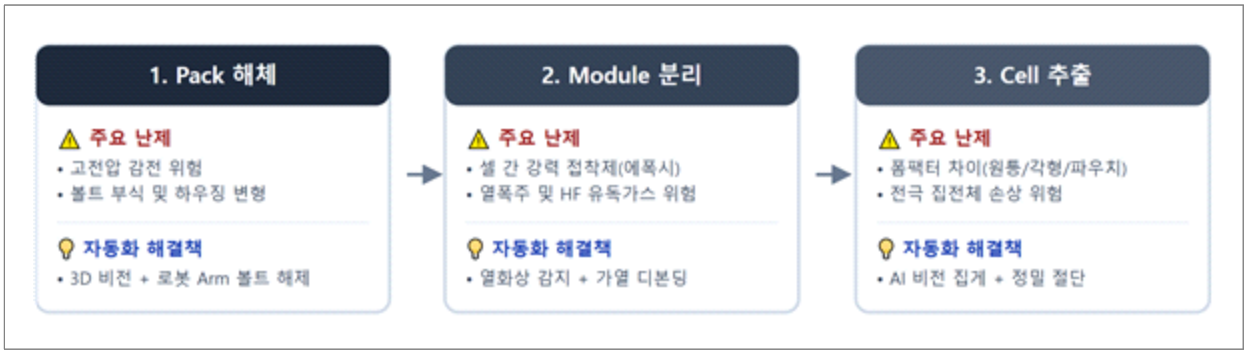


그림 1. 전기차 폐배터리 단계별 해체 난제 및 자동화 해결책

2.2 전통적 유용 금속 회수 기술 및 공정 한계

상용화된 대규모 배터리 재활용 공정은 크게 건식 제련과 습식 제련으로 구분된다 [1, 2]. 건식 제련(Pyrometallurgy)은 고온 용융로를 이용해 금속 산화물을 Co-Ni-Cu-Fe 합금 형태로 환원 추출하는 방식이다 [1]. 팩/모듈 단위의 직접 투입이 가능하여 공정 유연성이 높고 기술 성숙도가 뛰어나다 [1, 2]. 그러나 1,000℃ 이상의 고온 운전에 따른 높은 에너지 소비와 유독가스 배출이 단점이며, 리튬(Li), 알루미늄(Al), 플라스틱 및 전해액 등의 유기 소재가 슬래그 및 가스로 소실되어 회수율이 낮다는 치명적 한계가 있다 [1, 2].

습식 제련 (Hydrometallurgy)은 배터리를 파쇄하여 얻은 블랙 파우더(Black Powder)를 황산(H_2SO_4) 등 무기산과 환원제(H_2O_2)를 사용해 침출한 뒤, 용매 추출 및 침전 반응을 통해 고순도 금속 Salts를 회수하는 기술이다 [1]. 리튬을 포함한 주요 금속의 회수율이 높은 장점이 있으나, 다량의 강산 시약 소비, 중화 공정 비용, 대규모 산성 폐수 발생이라는 2차 환경 오염 문제를 수반한다 [1, 2].

2.3 차세대 친환경 자원 회수 연구 동향

기존 공정의 환경적 한계를 극복하기 위해 유독 시약을 대체하고 탄소 발자국을 줄이는 친환경 기술이 활발히 연구되고 있다 [1, 2].

직접 재활용 (Direct Recycling): 양극재의 결정 구조를 파괴하지 않고 분리하여, 사용 중 손실된 리튬을 수열

리튬화 (Hydrothermal Lithiation)나 고상 소결을 통해 재충전함으로써 고성능 양극재로 직접 재생하는 기술이다 [1, 2, 9]. 긴 화학 분해/정제 과정을 거치지 않아 온실가스를 34%~98% 감축할 수 있고 에너지 소비가 매우 적으나 [1, 2], 정밀한 사전 분리 공정이 요구되며 세대별 양극재 조성 변화에 대한 유연성이 부족하다 [1, 2].

친환경 용매 침출 (Green Solvent Leaching): Choline chloride 기반의 심공융 용매(DES)는 증기압이 낮고 생분해성이 뛰어난 녹색 침출제로, 수소결합 구조를 조절하여 유용 금속을 선택적으로 침출할 수 있다 [2]. 한편, 초임계 CO_2(SCO_2)는 유독 용매(NMP 등)를 사용하지 않고도 PVDF 바인더를 선택적으로 제거하고 전해액을 친환경적으로 추출·정제하는 데 활용된다 [2, 10].

생물학적 및 유기 폐기물 활용 회수 (Bioleaching & Waste-to-Waste): 미생물이 생성하는 유기산을 이용해 금속을 용출시키는 Bioleaching 공정은 에너지 소비와 온실가스 배출을 대폭 줄일 수 있다 [2, 11]. 아울러 과일 껍질(시트르산 성분), 차 폐기물, 철 스크랩 등 바이오/산업 폐기물을 강산 및 H_2O_2 대신 환원제로 활용하는 Waste-to-waste 접근법도 자원 순환율을 극대화하는 신기술로 평가받는다 [2, 12].

전기화학 지원 침출 (Electrochemically Assisted Leaching): 외부 전장(Electric Field)을 환원제로 활용하여 불용성 금속 이온을 선택적으로 환원·침출시키는 기술로, 화학 시약 사용을 크게 줄이면서 리튬을 선택적으로 고순도 회수할 수 있다 [2, 13].



그림 2. 폐배터리 전처리 및 자원 회수 공정 프로세스 흐름도 (PFD)

2.4 주요 자원 회수 공정의 종합 정량 비교

전기차 폐배터리 자원 회수 공정은 기술 성숙도, 온실가스 감축 효과, 주요 회수 대상 및 한계점에서 명확한 차이를 보인다 [1, 2]. 상용화 단계인 건식 제련은 팩/모듈의 직접 투입이 가능하나, 고온 운전에 따른 막대한 에너지 소비와 Li, Al 등 주요 소재의 소실 한계가 있다 [1, 2]. 습식 제련은 Li, Co, Ni 등 다종 금속을 고순도로 회수할 수 있어 상용화 비중이 높으나, 강산성 시약 사용과 산성 폐수 처리 부하가 크다 [1, 2]. 반면, 연구·실증 단계 (TRL 2~5)의 차세대 친환경 공정은 환경 부하를 크게 낮춘다 [1, 2]. 직접 재활용은 양극재 결정 구조를 재충전·재생하여 온실가스를 최대 98% 감축하나 정밀 분리가 필수적이다 [1, 2]. 친환경 용매 및 생물 추출은 유독 시약을 대체하고 온실가스 배출을 대폭 절감 (Bioleaching 기준 최대 8배 감축)하는 저탄소 대안으로, 용매 점도 개선 및 반응 시간 단축 등 스케일업 연구가 전개되고 있다 [2].

표 1. 폐배터리 자원 회수 공정별 종합 비교

공정 구분	기술 성숙도 (TRL)	온실가스 감축 효과	주요 회수 대상	핵심 한계점 및 기술적 과제
건식 제련	TRL 8~9 (상용화)	2.8% ~ 60% 감축	Co, Ni, Cu 합금	고에너지 소비, 유독가스 배출, Li/Al/유기물 소실
습식 제련	TRL 8~9 (상용화)	10% ~ 37.7% 감축	Co, Ni, Cu, Li, Mn Salts	강산 시약 다량 소비, 중화 비용 및 산성 폐수 발생
직접 재활용	TRL 3~5 (실증 단계)	34.5% ~ 98% 감축	양극재/음극재 결정 구조 자체	정밀 분리 필수, 불순물 민감성, 소재 변화 유연성 부족
친환경 용매	TRL 3~4 (연구 단계)	정량적 데이터 축적 중	유용 금속, 전해액, 바인더	용매 점도 및 재사용성 문제, 고압 설비 비용
생물 추출	TRL 2~3 (기초 연구)	타 공정 대비 최대 8배 감축	Co, Ni, Li, Mn	느린 추출 속도(긴 시간), 미생물 독성 민감성

3. 결 론

전기자동차 보급 확대에 따른 폐배터리 리사이클링은 단순한 폐기물 처리를 넘어, 핵심 원자재의 공급망 안보를 확보하고 글로벌 탄소중립 목표를 달성하기 위한 필수 산업이다. 첫째, 기존 건식·습식 제련 중심의 대량 처리 공정이 지닌 고에너지 소비 및 폐수 발생 등의 한계를 극복하기 위해, 양극재 직접 재생, 친환경 용매 추출, 생물학적 침출 등 저탄소·고효율 친환경 자원화 기술로의 전환이 시급하다. 둘째, 친환경 자원 회수의 효율성을 높이기 위해서는 안전한 전처리 및 AI·로봇 기반의 자동화 해체 플랫폼 구축이 필수적이며, 초기 배터리 설계 단계부터 재활용성을 고려하는 'Design for Recycling' 체계가 확립되어야 한다. 셋째, 차세대 친환경 회수 공정의 실질적인 상용화를 위해 연속 운전 및 스케일업(Up-scaling) 실증 연구가 지속되어야 하며, 배터리 전주기 이력 추적 및 전과정 평가에 기반한 온실가스 감축 검증 체계를 구축하여 지속 가능한 이차전지 순환경제 생태계를 완성해야 한다.

참고문헌

[1] Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E., Driscoll, L., Slater, P., Stolkin, R., Walton, A., Christensen, P., Heidrich, O., Lambert, S., Abbott, A., Ryder, K., Gaines, L. and Anderson, P., Nature, 575(7781) (2019) 75.

[2] Amusa, H. K., Sadiq, M., Alam, G., Alam, R., Siefan, A., Ibrahim, H., Raza, A. and Yildiz, B., Journal of Material Cycles and Waste Management, 26(4) (2024) 1959.

[3] Ciez, R. E. and Whitacre, J. F., Nature Sustainability, 2(2) (2019) 148.

[4] Shi, Y., Chen, G., Liu, F., Yue, X. and Chen, Z., ACS Energy Letters, 3(7) (2018) 1683. [5] Alder, C. M., Hayler, J. D., Henderson, R. K., Redman, A. M., Shukla, L., Sneddon, H. F. and Walker, M. D., Green Chemistry, 18(13) (2016) 3879.

[6] William, B., Noémie, P., Brigitte, E. and Géraldine, P., Chemical Engineering Journal, 383 (2020) 123106.
[7] Moazzam, P., Boroumand, Y., Rabiei, P., Baghbaderani, H. A., Mokrian, P. and Rabiei, M., Chemosphere, 277 (2021) 130196.
[8] Adjigble, M., Marturi, N., Ortenzi, V., Rajasekaran, V., Kuo, J. and Stolkin, R., IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), (2018) 2933.
[9] Yu, J., Lin, R., Wu, X., Liu, M., Zhang, Y. and Chen, Y., ACS Applied Materials & Interfaces, 14(12) (2022) 14200.
[10] Fu, Y., Schuster, J., Petranikova, M. and Ebin, B., Resources, Conservation and Recycling, 172 (2021) 105666.
[11] Alipanah, M., Reed, D., Thompson, V. and Sun, X., Journal of Cleaner Production, 383 (2023) 135274.
[12] Gu, K., Xia, W., Zhou, J. and Wang, Y., ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 11(36) (2023) 13606.
[13] Adhikari, B., Chowdhury, N. A., Diaz, L. A. and Harrup, M. K., Resources, Conservation and Recycling, 193 (2023) 106973.