

리튬 이온 배터리 재활용 기술

한국과학기술정보연구원
 전문연구위원 김성호
 (shghyym@reseat.re.kr)

1. 서론

- 폐전기전자제품(WEEE) 발생량은 빠르게 성장하고 있다. 그 부피는 2013년부터 2017년까지 33% 증가가 예측된다. 다량의 WEEE는 환경 독성, 인체 독성, 처분장 토지 점유와 같은 유해한 기능을 생성한다.
- 휴대용 전자장비 활용 증가와 더불어 가장 선호하는 휴대용 배터리인 리튬이온 배터리(LIB)는 사용량이 2013년부터 2019년까지 2배 증가가 예측된다. WEEE 가운데 하나인 폐 LIB 재활용으로 에너지 소비량은 감소하고, 온실가스 배출량은 감소하며, 매립(landfill)에 비해 천연 자원도 51.3% 절약된다. 이 장점은 주로 신생(virgin) 물질 생산 회피로 얻어진다. 그러나 폐 LIB 재활용은 새로운 환경 영향을 유발한다.
- 현재 호주에서는 LIB를 재활용하지 않고, 98.3%를 매립하고 있다. 비영리 단체인 호주 배터리 재활용 이니셔티브(ABRI)에서는 모든 유형의 폐배터리 회수량 늘리기 활동을 전개하고 있다. 이러한 활동을 위해 폐배터리 회수 장소가 결정되어야 한다. 회수 장소 결정에 필요한 주요 인자는 다음과 같다: 비용, 재활용 효율, 환경 영향.
- 여기서는 휴대용 LIB 재활용에 현재 사용되고 있는 공정들의 환경 영향을 소개하려 한다. 구체적으로, 이들 공정은 회수 물질, 비용, 효율, 환경 영향 등과 같은 측면에서 비교된다. 또한, 재활용 및 매립의 영향이 비교된다.
 - 다양한 공정들로는 습식제련 공정, 건식제련 공정, 습식 및 건식 조합 공정 등이 있다. 각 공정별로 회수되는 물질은 11 개의 재활용 현행 기업들 조사(survey)를 통해 제시된다. 두 가지 공정, 즉 습식제련 공정 및 건식제련 공정에서 환경 영향을 평가하기 위해 비교 LCA가 수행된다.

- 환경 영향에서 가장 큰 기여 인자는 전기 생산 공정, 플라스틱 소각 공정, 잔여물 매립 공정 등이다. 그러므로 환경 영향과 관련하여, 가장 유익한 인자는 저온 활용 공정, 플라스틱 회수 공정 등이 된다.

2. 방법론

- 폐 LIB 재활용의 환경 영향을 평가하기 위해 LCA가 활용된다. 대상 제품은 휴대용 LIB로 정의된다. 평가 목표는 이 배터리 재활용 공정들을 비교하는 것이다. 기능 단위는 폐 LIB 1톤 이다. 범위에는 제품의 말기(EOL; end of life)만 포함된다. LIB는 리튬 코발트 산화물 양극(cathode), 철-니켈 합금 케이싱으로 구성된다.
- 고려된 영향 카테고리는 다음과 같다: 100년 동안 지구 온난화 지표(GWP 100; 100-year global warming), 인간 독성 지표(HTP; human toxicity potential), 육상 에코독성 지표(TETP; terrestrial ecotoxicity potential) 등 이다. GWP 100은 이산화탄소 증가 kg 으로, HTP 및 TETP는 디클로로벤젠 증가 kg 으로 표현된다.
- 평가 도구로는 GaBi LCA 소프트웨어가 사용된다. 습식제련 및 고온제련 공정에서는 2004년도 2차 목록 데이터를 사용한다. GaBi LCA 소프트웨어에서는 목록(inventory) 데이터를 투입물로 사용하여, 세 가지 영향 카테고리에 미치는 영향을 산출물로 계산한다. 모든 특성화 분석은 CML 2001년~2013년 4월 DB를 사용하여 수행된다.
- 정규화 단계에서는 'World, Year 2000' 인자를 사용한다. 정규화 결과는 영향지수/개인/년 단위로 표현된 기준치(reference value)와 비교 된다. 결과는 특정 지역에 대한 기준 없이 개인 증가 또는 영향지수/개인/년 등으로 표현된다.
- 재활용 공정 기술은 세 가지로 구분된다: 1) 기계적 공정; 2) 습식제련 공정; 3) 건식제련 공정 또는 고온제련 공정.
- 기계적 공정에서는 배터리 해체 단계, 부품 방출 단계, 절단 단계, 파쇄 단계, 분리 단계, 분류(sorting) 단계 등을 포함한다. 분류 단계에

서는 물성에 따라 자기 분리, 공기 탄도 분리, 체질하기 기술 등을 활용한다.

- 습식제련 공정에서는 산 또는 염기를 사용하여 분쇄 금속을 용액으로 침출하고, 이 침출 용액으로부터 물질을 추출하여 금속을 회수한다. 이 공정에는 기계적 전처리 공정이 포함된다.
- 고온제련 공정에서는 물질을 회수하기 위해 고온을 적용한다. 이러한 공정에는 열분해(pyrolysis), 용해(smelting), 증류, 정제 등이 포함된다. 리튬, 종이 및 플라스틱과 같은 유기 화합물 등은 고온제련 공정만으로 회수되지 못한다.

3. 결과 및 논의

- 회수 물질은 여덟 개의 글로벌 기업들 조사 결과 분석 또는 2 차 정보 원으로부터 도출된다. 궤 LIB에서부터 재활용 기술을 통해 고 유가 금속인 구리와 코발트가 회수된다. 철, 니켈, 알루미늄도 회수된다. 저 유가 금속인 철은 기계적 공정이 먼저 적용되면 자기 분류를 통해 쉽게 회수된다. 알루미늄은 수요 충족을 만족시키기 위해 천연 광산으로부터 생산 시 고 비용과 고 에너지가 필요하다. 그러므로 알루미늄은 경제성이 높은 재활용을 통해 회수되고 있다.
- 단일 고온제련 공정에서는 소량의 물질을 회수한다. 이 공정의 제어는 투입물에서 가장 유연하지만 산출물에서 쉽지 않다. 반면에, 습식제련 공정은 배터리 특정적이므로 대량의 물질을 회수한다.
- 비용과 관련하여, 재활용 기업들은 코발트 함유 배터리 즉 궤 LIB를 비용을 지불하고 구입하여 처리하고 있다. 이는 코발트가 고 유가 물질이므로 재활용 기업들이 경제성이 있다고 보기 때문이다.
- 효율과 관련하여, 평균적으로 단일 기계적 공정에서는 최고 70%, 습식제련 공정 및 조합 공정에서는 60%, 고온제련 공정에서는 평균 56%, 최저 43% 이다.
- 환경 평가와 관련하여, 습식제련 공정은 고온제련 공정 또는 매립에 비해 지구온난화 지수에 커다란 영향을 준다. 반면에, 매립은 독성(즉, 인

체 독성 및 육상 에코독성)에 가장 큰 영향을 준다.

- 습식제련 공정은 매립이 유발하는 지구 온난화 지수 및 육상 에코독성 지수에, 전기 생산이 유발하는 인체 독성 지수에 최대 영향을 준다. 고온제련 공정은 플라스틱 소각이 유발하는 지구 온난화 지수에, 전기 생산이 유발하는 인체 독성 지수, 육상 에코독성 지수에 최대 영향을 준다.
- 평가 결과는 보수적 접근법에 바탕을 두고 있다. 매립 평가에는 배터리 부품이 포함되지 않는다. 재활용이 원료 추출을 방지하는 것과 같은 부정적 영향은 재활용 결과에 고려되지 않는다.

4. 결론

- 가장 공통적인 회수 물질은 최고 유가 금속인 구리, 니켈, 코발트이다. 습식제련 공정에서 고온제련 공정에 비해 평균적으로 더 많은 물질이 회수된다.
- 폐 LIB에서 처리를 위해 이송도 전반적인 환경 영향에서 중요한 인자이다.
- 휴대용 LIB 재활용이 주는 환경 영향을 감소하기 위해 저온 활용 공정, 플라스틱 회수 공정 등이 사용되어야 한다. 또한, 수집 장소와 재활용 장소 사이 이송 거리를 줄이면, 환경 영향이 감소된다.

출처 : Boyden A., et al., "The Environmental Impacts of Recycling Portable Lithium-Ion Batteries", *Procedia CIRP*, 48, 2016, pp.188-193

◁ 전문가 제언 ▷

- 배터리(battery; 전지)는 물리 전지와 화학 전지로 구분된다. 화학 전지에는 일회용인 일차 전지, 200~1,000회 재충전하는 이차 전지, 연료 전지 등이 있다. 일차 전지에는 Hg 전지, 산화은 전지, 알칼리 망간 전지, Mn 전지, Li 전지 등이 있다. 이차 전지에는 납축전지, 니카드 배터리, 리튬이온 배터리(LIB; Lithium-ion battery) 등이 있다.
- 특히, LIB는 직류 전기에너지에 바탕을 둔 디지털 과학문화가 확산하면서 휴대용으로는 모바일 ICT 장치 등에, 부착용으로는 전기 자동차 등에서 수요처가 증가하면서 생산 및 소비가 함께 증가하고 있다.
- LIB는 4대 핵심 부품인 양극, 음극, 전해질, 분리막과 기타 부품인 집전체, 외장재, 보호회로 등으로 구성된다. 활물질(active material)인 양극(cathode)은 LiCoO_2 , 도전재, 바인더, Al 박막 등으로, 음전극은 흑연계 탄소, 도전재, 바인더, Cu 박막 등으로, 전해질은 LiPF_6 , LiBF_4 같은 리튬염과 탄산염계 용매로 구성된다.
- 그러나 LIB를 구성하는 양극 활물질은 리튬, 코발트, 망간, 니켈과 같은 전략 금속에 속한다. 대부분 수입에 의존하고 있는 이들 전략 금속은 자원 민족주의 추세로 자원 수급안보 문제에 노출되고 있다. 따라서 자원 부족, 환경오염, 처분 토지 점유와 같은 다각적 문제를 해결하기 위해 제조 시 발생하는 스크랩 재활용, 폐 LIB의 재활용 필요성이 커지면서 재활용 기술의 연구 개발이 활발해지고 있다.
- 폐 LIB의 재활용 기술은 전처리, 금속 회수 기술로 구분된다. 전처리 분야는 건식 열처리, 파쇄/분쇄, 농축 기술 등으로, 금속 회수 기술 분야는 건식, 습식, 전/습식 조합 기술 등으로 세분된다.
- 국내 현황 및 향후 연구 개발 동향 : 폐 LIB 재활용의 환경성 평가 기술과 관련하여, 국내에서는 2004년에 건국대학교에서는 휴대폰에서 발생하는 폐 LIB의 공정(즉 재활용, 소각, 매립)별 환경성 평가 기술을 연구하였다. 향후에는 재활용에서 유가 금속 회수 기술(예: 습식, 건식, 조합)의 환경성 평가 기술이 개발돼야 한다.

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.