

## 사용 후 리튬이온 배터리 재활용 공정의 전과정평가에 대한 고찰

황인성\*\*\*, §김영민\*, 김용환\*\*\*, 한승연\*\*\*

\*한국생산기술연구원 지능화부리기술연구소 유연생산연구부문, \*\*한양대학교 공과대학교 융합기계공학과,  
\*\*\*한국생산기술연구원 지능화부리기술연구소 소재공급망연구부문

### Review on Life Cycle Assessment of Waste Lithium-ion Battery Recycling Process

Insung Hwang\*\*\*, §Young-Min Kim\*, Yong Hwan Kim\*\*\* and Seungyun Han\*\*\*

\*Flexible Manufacturing R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology, Incheon 21999, Korea

\*\*Department of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea

\*\*\*Materials · Supply Chain R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology, Incheon 21999, Korea

#### 요 약

최근 전 세계적으로 리튬이온 배터리(lithium-ion battery, LIB)의 사용이 급증함에 따라, 폐 LIB의 재활용이 필수적인 과제로 떠오르고 있다. 폐 LIB의 재활용 공정에 대한 전과정평가(Life cycle assessment, LCA)는 환경적, 경제적, 사회적 영향을 종합적으로 평가하는데 중요한 역할을 한다. 하지만 국내에서는 폐 LIB 재활용 공정의 LCA에 대한 연구가 활성화 되어 있지 않다. 본 논문은 다양한 연구자들이 수행한 폐 LIB 재활용 공정의 전과정평가 사례를 소개하는 것을 목적으로 한다. 고찰한 연구들은 다양한 재활용 기술(습식제련 공정, 건식제련 공정, 직접 재활용 공정)을 비교 분석하고 있으며, 각 공정의 에너지 소비, 온실가스 배출, 유해 물질의 배출 등을 정량적으로 평가하였다. 또한, 각 재활용 공정의 장단점을 환경적, 경제적 관점에서 비교하여 최적의 재활용 전략을 제시하였다. 본 논문은 이러한 다양한 연구 결과를 종합하여 LIB 재활용 공정의 현재와 미래 방향성을 제시하고자 하며, 향후 연구와 정책 개발에 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

**주제어** : 폐 리튬이온 배터리, 전과정평가, 재활용, 건식제련, 습식제련

#### Abstract

With the rapid global rise in lithium-ion battery (LIB) usage, recycling spent LIBs has become a critical challenge. Conducting life cycle assessments (LCA) of recycling processes for spent LIBs is crucial for evaluating their environmental, economic, and social impacts comprehensively. However, in Korea, research on the LCA of waste LIB recycling processes remains limited. This study introduces various life-cycle assessment cases of waste LIB recycling, carried out by different researchers. The studies reviewed analyzed and compared multiple recycling technologies, including hydrometallurgical, pyrometallurgical, and direct recycling, and quantitatively evaluated factors such as energy consumption, greenhouse gas emissions, and the release of hazardous materials. Moreover, the advantages and disadvantages of each recycling process are compared from environmental and economic perspectives to propose optimal recycling strategies. This review aims to synthesize these diverse research findings to outline the current status of and future directions for LIB recycling processes, thereby providing foundational data for further research and policy development.

**Key words** : Waste lithium-ion battery, life cycle assessment, recycling, pyrometallurgy, hydrometallurgy

· Received : August 20, 2024 · 1st Revised : September 19, 2024 · 2nd Revised : September 24, 2024 · Accepted : September 24, 2024

§ Corresponding Author : Young-Min Kim (E-mail : ymkim77@kitech.re.kr)

Flexible Manufacturing R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology, Gaetbeol-ro 156, Yeonsu-gu, Incheon Metropolitan City 21999, Korea

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서 론

리튬이온 배터리(lithium-ion battery, LIB)는 휴대폰, 노트북, 전기 자동차 등 다양한 전자 기기의 필수 부품으로서, 현대 사회의 에너지 저장 및 공급에 중요한 역할을 하고 있다<sup>1-4)</sup>. 이에 따라 폐기되는 LIB의 양도 증가하고 있으며, 이는 환경오염과 자원 고갈 문제를 야기할 수 있다<sup>5)</sup>.

폐 LIB에는 리튬, 코발트, 니켈 등의 유가금속 자원이 포함되어 있어, 이를 효율적으로 재활용하는 것은 자원 순환경제 구축과 환경 보호 측면에서 매우 중요하다<sup>6-9)</sup>. 이러한 폐기물에서 유가금속을 회수하는 기술에는 크게 습식제련 및 건식제련이 있다. 습식제련은 용액을 이용하여 금속을 추출하는 방법으로, 높은 추출율과 순도를 얻을 수 있다는 장점이 있지만, 다량의 화학약품 사용, 폐수 처리 문제 등의 단점도 존재한다.

또 다른 금속 회수 기술인 건식제련의 경우에는 폐 LIB를 고온에서 열분해하여 금속 성분을 회수하는 방법으로 습식제련에 비해 짧은 공정시간, 높은 처리량 및 유해물질 배출량이 적다는 장점을 가지고 있다. 또한 건식제련은 자동화가 용이하고 비교적 안전하여 상업적인 활용 가능성이 높은 것으로 평가되고 있다. 하지만 습식제련에 비해 처리 가능한 LIB 종류가 제한적이고, 일부 성분의 회수율이 낮다는 단점이 있다.

이러한 재활용 공정기술을 활용한 LIB 재활용의 경우 폐수 처리 문제, 에너지 소비량 증가, 대기 오염 등의 환경 문제 발생 가능성이 있다. 이로 인해 LIB 재활용 공정의 환경영향 평가를 위해서는 전과정평가(Life Cycle Assessment,

LCA)가 유용하게 활용될 수 있다. LCA는 제품이나 서비스의 생명주기 전체 단계에서 발생하는 환경 영향을 평가하는 방법론이다<sup>10-12)</sup>. LCA는 원료 확보부터 생산, 사용, 폐기까지 모든 단계를 고려하여 환경 영향을 평가하기 때문에, 개별 단계만을 평가하는 것보다 포괄적이고 정확한 평가가 가능하다. LCA를 폐 LIB 재활용 공정에 적용한다면 각 재활용 공정의 에너지 소비량, 폐기물 발생량, 대기 오염 물질 배출량 등을 정량적으로 비교 분석할 수 있으며, 이를 통해 환경 친화적인 폐 LIB 재활용 공정을 개발하는 데 도움이 될 수 있다.

본 논문에서는 폐 LIB 재활용 공정의 LCA 연구 동향에 대해 재활용 공정(건식제련 및 습식제련)의 몇 가지 연구 사례를 중심으로 리뷰하고자 한다. 전과정평가를 위한 기능단위, 목적 및 범위 정의, 전과정 목록 분석 및 영향 평가 등의 전과정평가의 단계별로 내용을 리뷰하였다.

## 2. 폐 LIB 재활용 공정 전과정평가

### 2.1. 폐 LIB 재활용 공정 개요

우선 폐 LIB 재활용 공정에 대해서 알아보려 한다. Larouche<sup>13)</sup>은 폐 LIB의 재활용 방식은 크게 건식제련, 습식제련 그리고 직접 재활용, 이렇게 3가지가 있다고 보고 하였다. Fig. 1은 폐 LIB의 3가지 재활용 공정의 개념도를 보여주고 있다. 첫번째 재활용 방식인 건식제련의 경우는 주로 코발트, 망간, 니켈 등 LIB에서 경제적 가치가 높은 재료에 중점을 둔다. 이는 LIB 생산에 원자재로 재사용되거나 저가 제품으로 다운사이클 될 수 있다. 두번째 방식

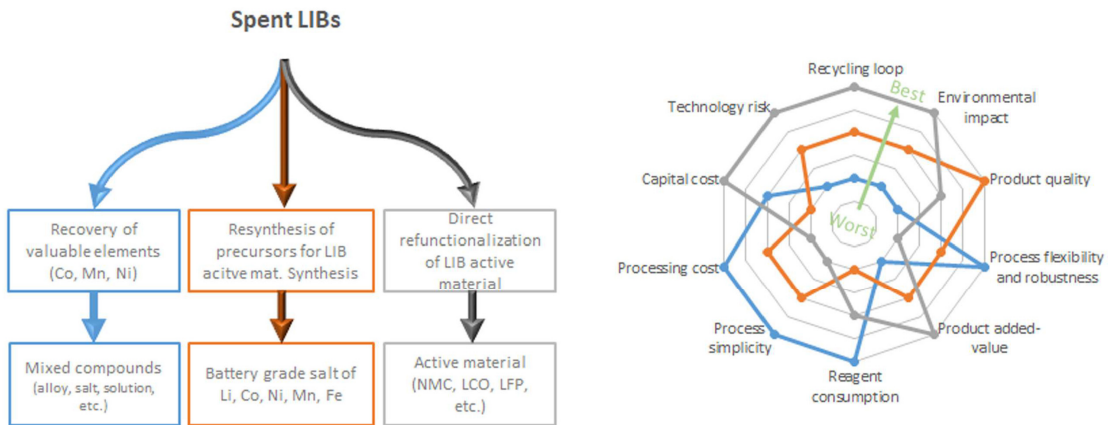


Fig. 1. Schematic flow and comparison of three approaches for recycling spent LIBs<sup>13)</sup>.

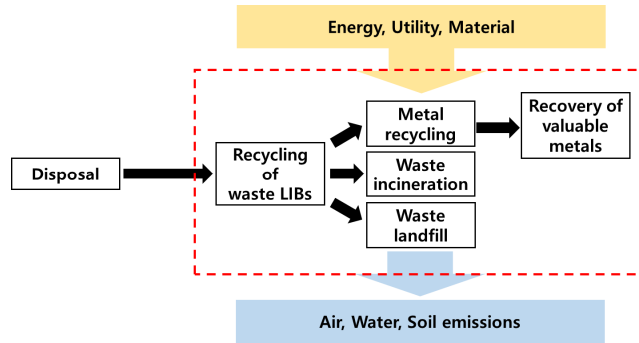


Fig. 2. The system boundary of the life cycle assessment by Ref. 14.

인 습식제련의 경우에는 LIB에 사용된 재료를 고품질로 최대한 회수하여 새로운 LIB 생산에 재사용하는 것이 주된 목표이다. 세번째 방식인 직접 재활용 방식의 목표는 새로운 LIB 생산에 사용되는 변경과 수정을 최소화하면서 LIB의 활물질을 재사용하는 것이다.

## 2.2. 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)

전과정평가(LCA)는 제품, 공정 또는 서비스의 전과정(원료획득, 제조 및 생산, 유통 및 사용, 폐기 및 재활용)를 포함한 모든 산업활동이 환경에 미치는 영향을 평가하는 방법을 의미한다. 즉, 대상 시스템의 투입, 산출물을 정량화하고 과학적 방법으로 이들의 환경영향을 평가, 규명하여 환경적 지속 가능성을 평가하고 개선하는데 중요한 도구이다<sup>14)</sup>.

LCA의 순서는 다음과 같다. 우선 첫번째로 평가를 수행하는 목적을 정의하고, 대상 제품과 평가의 범위 및 방법론을 설정한다(목적 및 범위 정의). 두번째 단계로 해당 시스템을 대상으로 에너지, 원료, 제품, 부산물, 오염물질 등의 종류와 양을 파악하여 정량화한다(목록 분석). 이 단계에서는 시스템의 공정 흐름도를 작성하고 관련된 입력 자료를 수집한다. 세번째 단계로 목록 분석 결과를 분류하고, 해당 범주에 미치는 영향을 정량적 및 정성적으로 파악하여 환경 영향을 평가한다(전과정 영향평가). 그 후 마지막으로 평가 결과를 바탕으로 주요 이슈를 규명하고, 실제 제품 시스템에 LCA 결과를 적용한다.

### 2.2.1. 기능단위, 목적 및 범위 정의

LCA의 첫번째 단계인 기능단위, 목적 및 범위 정의에 대한 연구사례에 대해서 살펴보고자 한다. Choi<sup>14)</sup>는

LCA 기법을 이용하여 휴대폰의 전원장치로 사용된 후 폐기된 폐 LIB의 재활용 공정에 대한 환경성 평가를 실시하였다. 이 연구에서는 시스템의 목적 및 범위를 휴대폰의 전원공급장치로 사용된 후 폐기된 폐 LIB 1kg을 재활용하는 것으로 정의하였다. 또한 시스템의 경계는 분리수거된 폐 LIB가 재활용 공정으로 들어온 후 파쇄, 선별을 거쳐 유가금속의 회수까지로 정의했으며 분석의 객관성 유지를 위해 정확하지 않은 데이터는 제외하거나 가정을 수집이 어려운 데이터의 경우는 가정을 통해 분석을 수행하였다. Fig. 2은 LIB 재활용 공정의 시스템 경계를 설명하고 있다.

Tao<sup>15)</sup>는 3원계 LIB의 생산, 사용 및 재활용의 전체 프로세스를 포괄하는 LCA를 수행하였다. 세계에서 가장 큰 전기 자동차 시장인 중국의 사례를 들어 5가지 재활용 기술에 대한 환경 영향에 대해서 분석하였다. 이 연구에서는 기능단위를 3원계 LIB 시스템의 1kWh로 정의하였으며 시스템 관련 변수는 배터리 용량, 무게 및 에너지 밀도, 배터리 셀의 개수, 무게 및 에너지 밀도로 제시하였다. 이 연구에서 LCA를 위한 시스템의 경계는 3원 LIB의 배터리 소재, 배터리 셀 및 배터리 시스템에서 전기 자동차를 포괄할 뿐만 아니라 다양한 재활용 기술을 사용하여 폐 LIB를 처리하는 과정을 포함한다.

Castro<sup>16)</sup>는 LIB의 해체, 방전, 셀 개방, 열 전처리, 침출, 침전으로 구성된 재활용 경로를 LCA 방식으로 조사하였다. 이 연구에서는 배터리 팩 1개(3.8kg, 148.5Wh)와 배터리 셀 1개(569g, 37.1Wh)을 기능단위로 정의하였다. 또한 시스템의 경계는 재활용 프로세스만을 포괄하며, 폐기물 처리 영향과 회피된 제품을 설명하기 위한 시스템 확장도 함께 포함하였다. 그리고 연구 기술의 영향을 받지

않는 수명 주기 단계는 고려되지 않았다.

Chen<sup>17)</sup>은 NCM 811 배터리 1kWh 를 기능단위로 정의하였고, NCM 811 배터리의 탄소배출 계산을 위한 완벽한 폐쇄루프 접근방식을 시스템 경계로 설정하였다. Hoof<sup>18)</sup>는 유럽에서 100 kton의 폐 LIB 모듈을 재활용하는 것을 기능단위로 정의하였으며, 열 기계적 전처리-습식제련, 건식-습식제련 공정을 시스템 경계로 설정하였다.

이 외에도 다양한 연구에서 폐 LIB의 재활용 공정에서의 LCA 기법을 통한 환경 영향 평가를 위해 기능단위 및 시스템 경계 설정하였다. Rajacifar<sup>12)</sup>는 3가지 건식제련 기법을 통한 폐 LIB 재활용 공정의 LCA 결과에 대해서 비교하였다. 이 연구에서 비교한 3가지 건식제련 기술은 DC 플라즈마 제련기술(Sc-1), 전처리 단계가 포함된 DC 플라즈마 제련기술(Sc-2), 그리고 초고온(UHT) 가열로(Sc-3) 기술이다. 이 연구에서의 기능 단위는 다양한 건식제련 기술을 사용한 1톤 LIB 모듈 처리이다. 또한 Kallitsis<sup>19)</sup>는 폐 LIB 재활용 공정의 LCA를 위해 NMC333 배터리 pack 1kWh를 기능단위로 정의하였으며, 폐 자동차 전인 배터리 팩의 재활용 공정을 시스템 경계로 선정하였다.

이렇듯 기능단위 및 시스템 경계를 설정함에 있어서 각 공정에 대한 정의가 다르기 때문에 LCA 적용을 위해서는 각각의 재활용 공정에 대한 적절한 기능단위의 선정 및 명확한 범위 설정 제시가 중요하다고 판단된다. 기능단위의 경우 1kg의 폐 LIB가 가장 일반적으로 사용되며, 특정 연구 목표에 따라 1kWh의 배터리 용량이 적절할 수도 있다. LCA의 목적에 따라 폐 LIB 재활용 공정에서 시스템 경계를 설정함에 있어 원료 채취부터 재활용, 최종 폐기까지

모든 단계를 평가할지, 아니면 특정단계(예: 재활용 공정)만을 포함할지를 명확히 해야 한다. 시스템 경계는 재활용 공정의 범위를 정의해, LCA 결과를 정확하고 일관되게 비교하는 중요한 역할을 한다.

### 2.2.2. 전과정 목록(Life cycle inventory, LCI) 분석

전과정 목록(LCI) 분석은 시스템에 대한 입력 및 출력 흐름 목록 작성을 위한 필수적 단계이다. 시스템의 흐름에는 물, 에너지 및 원자재의 입력, 제품의 출력 및 대기, 토양 및 수역으로의 배출이 포함된다. LCI는 실험, 연구 및 문헌 등의 방법을 통해 확보할 수 있다.

Choi<sup>14)</sup>는 폐 LIB 재활용을 위한 LCA의 전과정 목록 분석을 위해 공정 흐름도 및 단위공정, 데이터 수집 및 데이터 계산의 단계를 거쳐 투입물과 산출물 목록을 분석하여 정량화하였다. 투입물로는 폐 LIB 구성성분과 에너지 원인 전력이 있으며, 산출물로는 재활용을 위해 회수되는 금속, 폐금속, 폐플라스틱 및 대기 배출물 등이 있다. 이때 전력 소비량의 경우는 Table 1와 같이 폐 LIB 500kg 처리 시 전력 사용량을 통해 계산하였으며, 대기 배출물의 경우에는 바인더와 전해액의 성분을 조사한 후 연소방정식을 사용하여 대기 배출물을 계산하였다.

Tao<sup>15)</sup>는 크게 3가지 단계로 LIB 재활용을 위한 LCA의 전과정 목록 분석을 수행하였다. 첫번째 및 두번째 재활용 단계에서는 생산 및 사용 단계의 각 공정에서 에너지 물질 소비 및 환경 오염 물질 배출 목록을 정의하였다. 세번째 재활용 단계에서 배터리 재활용 기술을 구체적인 기술인 습식제련 재활용 공정 A, B, 건식제련 재활용 공정,

**Table 1.** Power consumption when processing 500 kg of waste LIB<sup>14)</sup>

Process	Maximum Power Output (kW)	Maximum Power Consumption (kwh)	Actual Power Consumption (kwh)
1 <sup>st</sup> shredding	22.37	22.37	13.87
Belt conveyor	0.75	0.75	0.47
Magnetic sorter	10.75	0.75	0.47
Air classification (dust collector)	5.22	5.22	3.24
Particle sorter	2.24	2.24	1.39
Electric furnace	11.56	0.87	0.54
2 <sup>nd</sup> shredding	22.37	3.36	2.08
2 <sup>nd</sup> screening	2.24	0.34	0.21
Total	-	-	22.26

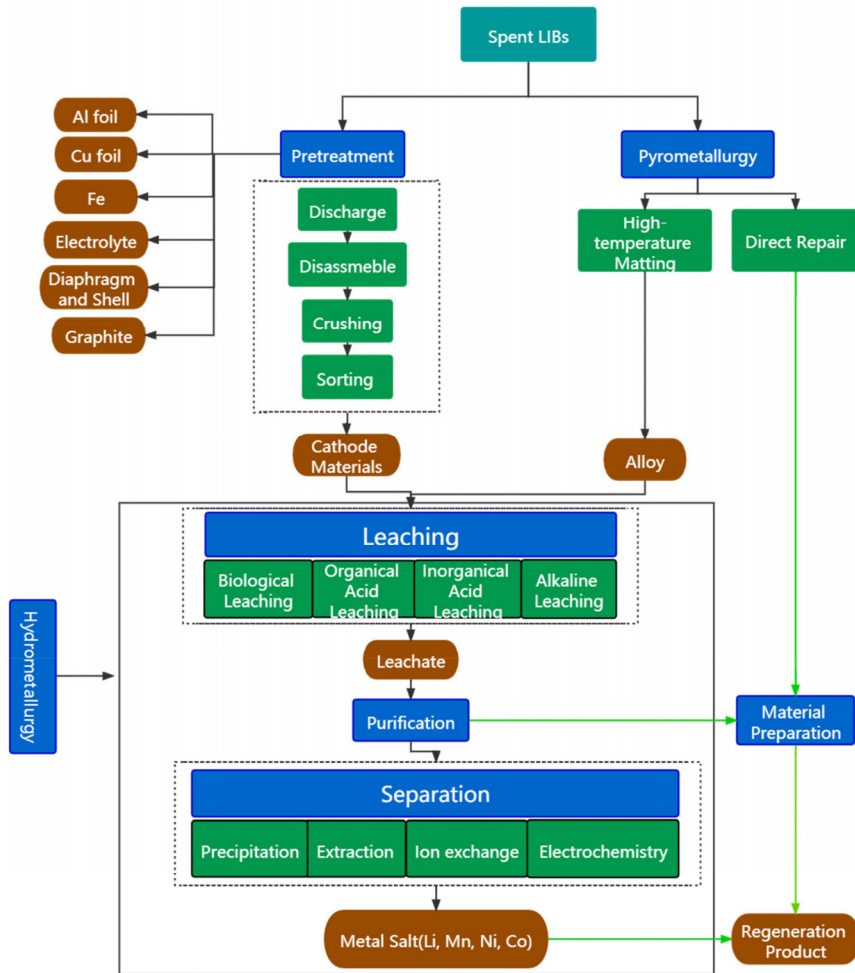


Fig. 3. Flowchart for recycling spent LIBs<sup>20)</sup>.

건식-습식 복합 재활용 공정으로 구분하여 전과정 목록을 분석하였다. 습식제련 재활용 공정에서의 전과정 목록은 input 목록으로는 전기, 스템, 물, 폐 LIB 등이 있으며, output 목록으로는 대기오염 물질, 수질오염 물질 및 생산품 등이 있다. 이에 반해 건식제련 재활용 공정의 경우 LCI는 input 목록으로는 전기, 폐 LIB, 코크스 분말, 슬래깅제, 석회암 등이 있으며, output 목록으로는 대기오염 물질과 생산품이 있으며 이 모든 LCI에 대해서 정량화하였다<sup>15)</sup>.

Castro<sup>16)</sup>의 연구에서는 LIB 재활용 프로세스의 목록은 1차 데이터를 기반으로 했으며 2차 데이터는 재료 정량화가 불가능한 경우에만 포함하였다. 재활용 경로의 전

체 질량 flow 평가를 통해 목록 분석을 진행하였으며, 이때 분해 단계는 결과가 배터리 셀과 관련된 경우 시스템 경계에서 제거되었다. 이런 flow를 LCA input 데이터로 사용하였다. Chen<sup>17)</sup>은 LCI를 크게 3단계로 구분했다. 배터리 생산, 사용 및 재활용 단계로 LCI를 구분하였다.

Fig. 3는 폐 LIB의 일반적인 재활용 흐름도를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 폐 LIB의 재활용을 위한 공정은 전처리, 건식제련 및 습식제련으로 분류할 수 있으며 각 공정별 항목에 따라 LCA를 위한 LCI를 추출할 수 있다. Table 2는 건식제련, 습식제련 및 직접 재활용 공정의 일반적인 전과정목록을 input 및 output 항목을 구분해서 보여주고 있다. 건식제련의 경우 배터리의 금속 성분을

**Table 2.** Typical life cycle inventories of pyrometallurgy, hydrometallurgy, and direct recycling processes for waste lithium-ion batteries

Process	Input	Unit	Output	Unit
Pyrometallurgy	Spent LIBs	kg	Recovered metals (Co, Ni, Mn, Cu)	kg
	Energy (electricity/fuel)	MJ	Slag	kg
	Oxygen	m <sup>3</sup>	Dust/fume (emissions)	kg
	Fluxing agents	kg	CO <sub>2</sub> (carbon dioxide)	kg
	Cooling water	m <sup>3</sup>	SO <sub>2</sub> (sulfur dioxide)	kg
	Air	m <sup>3</sup>	Solid waste	kg
	Refractory material	kg	Heat (energy recovery)	MJ
Hydrometallurgy	Spent LIBs	kg	Recovered metals (Li, Co, Ni, Mn)	kg
	Acid (e.g., sulfuric acid)	kg	Wastewater	m <sup>3</sup>
	Alkali (e.g., sodium hydroxide)	kg	Solid waste (filter residue)	kg
	Leaching agent	kg	Emissions to air (SO <sub>2</sub> , NOx)	kg
	Energy (electricity)	MJ	Dissolved elements	kg
	Water	m <sup>3</sup>	Recycled water	m <sup>3</sup>
	Reducing agent (e.g., hydrogen peroxide)	kg	CO <sub>2</sub> (carbon dioxide)	kg
Direct Recycling	Spent LIBs	kg	Recycled cathode material	kg
	Binder removal agents (organic solvents)	kg	Emissions to air (solvent vapor)	kg
	Energy (electricity)	MJ	Solid waste (impurities, separator material)	kg
	Water	m <sup>3</sup>	Reusable electrolyte	kg
	Cleaning agents	kg	Recovered anode material	kg
	Mechanical processing equipment	units	CO <sub>2</sub> (carbon dioxide)	kg

고온에서 처리하여 회수하는 방식이기 때문에 투입자원으로는 폐 LIB, 에너지(전기, 연료), 산소 등이 있으며, 금속(Co, Ni, Mn, Cu)이 회수되고, 부산물로는 슬래그, CO<sub>2</sub>와 같은 배출물들이 발생한다. 습식제련의 경우는 배터리에서 금속을 화학적으로 추출하는 방식이기 때문에 투입자원으로는 폐 LIB, 산(예: 황산), 알칼리, 전기 등이 사용되며, Li, Co, Ni 등 고품질 금속이 회수되고, 폐수와 대기 배출물이 발생한다. 직접 재활용 공정의 경우는 배터리의 활물질(양극, 음극)을 최대한 유지하면서 재사용하는 공정이기 때문에 폐 LIB, 에너지, 유기 용매 등이 투입되고, 회수된 양극과 음극재료가 생산되며, 용매 증발에 따른 배출물과 불순물 등 고형 폐기물이 발생한다.

2.2.3. 영향평가(Impact assessment)

영향평가(Impact assessment)는 LCA의 필수적인 요소로서, 조사분석 과정에서 집적된 각 공정별, 에너지, 자원소비량, 환경소비량 및 환경오염 부하량 등을 기준으로

평가하는 기술적, 정량적 과정이다.

Choi<sup>14)</sup>는 폐 LIB의 재활용 공정에 대한 환경성 평가를 위해 end-point 개념의 Eco-indicator99(EI99) 방법론을 적용하였는데, EI99는 자연계로 오염물질이 배출되는 배출물의 경로, 노출정도 및 영향 등을 분석을 통해 최종적인 피해 분석을 거침으로써 end-point 레벨에서 환경영향을 평가하는 방법론이다. 특성화를 통한 단기 및 장기 영향 분석을 통해 인간건강 영역에서는 폐기물 소각 시 배출되는 NOx와 재활용 공정에서 배출되는 이산화탄소에 의한 영향이 90% 이상을 차지하였다. 생태계 건강 영역에서는 폐기물 소각으로 인한 NOx 및 아연 배출이 주된 영향(99.8%)이었으며, 자원고갈 영역에서는 전력사용과 폐기물 소각 공정에서의 전력 및 보조연료에 의한 가스와 오일 소모가 주요 원인(99.2%)이라고 보고하였다. 하지만 코발트 회수에 의해 NOx 및 아연 배출 저감 효과가 매우 커 인간 건강 및 생태계 건강 영역의 특성화 값이 음(-)의 값을 보였고 이는 코발트 회수를 통해 환경적 이득이 발생



**Table 3** Characterization results in a short period of time<sup>14)</sup>

	Human health [DALY] (%)	Ecosystem [PDF*m2&yr] (%)	Resource [MJ] (%)
Process Emissions	1.10E-7 (30.3%)	0.00E+0 (0.00%)	0.00E+0 (0.0%)
Electrical energy	1.33E-8 (3.6%)	3.93E-4 (16.2%)	1.38E-2 (30.2%)
Landfill of scrap metal	1.48E-10 (0.0%)	7.10E-6 (0.3%)	3.69E-4 (0.8%)
Waste incineration	2.43E-8 (66.3%)	2.03E-3 (83.5%)	3.15E-2 (69.0%)
Total	3.67E-7 (100.0%)	2.43E-3 (100.0%)	4.57E-2 (100.0%)
Cobalt avoid	-7.06E-7 (-192.6%)	-2.09E-2 (-858.6%)	-7.32E-1 (-1601%)

함을 보여준다(Table 3). 또한 정규화를 통해 폐 LIB 재활용 시스템에서 상대적인 영향에 대해 비교한 결과 코발트 금속 회수에 의한 환경이득이 재활용 공정의 환경부하보다 4.6배 정도 커서, 폐 LIB 소각, 매립 시스템에 비해 환경영향이 작다고 보고하였다.

Tao<sup>15)</sup>는 LCA 소프트웨어 eBalance를 사용하여 5가지 재활용 기술의 영향에 대해서 평가하였다. 총 7개의 지표, 비생물적 고갈 잠재력(Abiotic Depletion Potential, ADP: 광물자원과 화석 연료 같은 비생물적 자원의 고갈 정도), 산성화 잠재력(Acidification Potential, AP: 산성 물질이 대기로 방출되면서 산성비나 산성화 현상을 유발하는 정도), 중국 비생물적 고갈 잠재력(Chinese Abiotic Depletion Potential, CADP: 중국에서 주로 사용하는 비생물적 자원 고갈 잠재력), 1차 에너지 고갈(Primary Energy Demand, PED: 제품의 전 과정에서 소비되는 1차 에너지(석탄, 석유, 천연가스 등 화석연료와 재생 가능 에너지를 포함)의 총량을 측정), 지구 온난화 잠재력(Global Warming Potential, GWP: 지구 온난화에 기여하는 온실가스 배출량), 부영양화 잠재력(Eutrophication Potential, EP: 질소와 인 등의 영양물질의 배출로 인한 수질오염에 대한 환경적 영향), 호흡 무기물(Respiratory Inorganics, RI: 무기물 입자들이 사람의 호흡기 건강에 미치는 영향)를 선정하여 이에 대해 평가하였다. 환경 영향 평가 결과 예설론 사용 기술이 가장 좋은 성과를 보였으며, 그 다음으로 습식제련 재활용 A, 건식-습식제련 복합 재활용 기술, 습식제련 재활용 B, 건식제련 재활용 순이었다.

Castro<sup>16)</sup>는 LIB의 해체, 방전, 셀 개방, 열 전처리, 침출, 침전으로 구성된 재활용 경로를 LCA방식으로 조사하였다. 평가결과 구연산 사용이 18개 영향 범주 중 13개에서 전체 영향에 대한 주요 기여 인자였다. 그다음으로는

인산 사용 및 에너지 소비였다. 또한 최적 시나리오 분석에서는 기본 시나리오와 비교하여 모든 영향 카테고리에서 영향이 감소했다.

Chen<sup>17)</sup>은 LCA를 통해 배터리 생산, 사용 및 재활용 과정에서의 탄소 배출 및 탄소 배출량 저감 잠재력을 평가하였다. 그중 배터리 재활용 과정에서의 탄소 배출 및 탄소 배출량 저감 잠재력 평가결과를 살펴보고자 하자. 배터리 재활용 및 재제조에 따른 탄소 배출량을 평가한 결과 건식 제련을 활용한 경우에 탄소 배출량이 5.11 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh로 3가지 재활용 공정 중 탄소 배출량이 가장 높았다. 탄소 배출량은 제련 공정에서 소모되는 화석 에너지에서 비롯되며, 이를 통해 많은 직간접 탄소 배출량이 생성된다. 또한 양극의 흑연은 건식제련 공정으로는 재활용할 수 없으며, 고온 환경에서 흑연을 열분해하면 탄소 배출량이 발생한다고 보고하였다. 이러한 결과를 통해 건식제련 공정은 경제적으로는 가치를 가져올 수 있는 공정이지만 환경영향 평가 결과를 보면 생태적인 가치는 이상적이지 않다고 말하고 있다. 습식제련 공정의 경우는 탄소 배출량이 건식제련 공정에 비해 28.6%가 낮으며 직접 물리적 재활용 방법은 건식제련 공정에 비해 47%에 낮게 나타났다. 이러한 이유는 직접 물리적 재활용의 제품은 배터리 생산에 직접 사용할 수 있는 재료이므로 복잡한 재료 재생산 단계와 2차 오염이 줄어들기 때문이다. 탄소 배출량 저감 잠재력은 탄소 배출량과 반대이기 때문에 직접 물리적 재활용 방법이 3가지 재활용 방법 중 가장 높은 탄소 배출량 저감 잠재력을 보여주고 있다.

Boyden<sup>21)</sup>은 전세계 여러 재활용 회사로부터의 설문조사를 통해 습식 및 건식제련을 통한 휴대용 리튬 이온 배터리의 재활용에 관한 LCA를 진행 및 비교하였다. 이 연구에서는 환경에 가장 큰 영향을 미치는 요인이 전기 발전,

**Table 4.** Life cycle impact assessment, pyrometallurgical process<sup>21)</sup>

Process	GWP 100 (kg CO <sub>2</sub> -eq)	HTP (kg DCB-eq)	TETP (kg DCB-eq)
Electricity generation	36.4	3.07	0.0891
Processing	0	0.0558	0
Plastics incineration	645	0.402	0.00499
Total	681	3.53	0.0941
Total (PE)	1.63e-11	1.37e-12	8.61e-14

**Table 5.** Life cycle impact assessment, hydrometallurgical process<sup>21)</sup>

Process	GWP 100 (kg CO <sub>2</sub> -eq)	HTP (kg DCB-eq)	TETP (kg DCB-eq)
Electricity generation	16	1.36	0.0169
Processing	0	0.000792	9.87e-6
Landfill gypsum	817	0.754	0.493
Landfill residue	487	0.449	0.294
Total	1320	2.57	0.803
Total (PE)	3.16e-11	9.95e-13	7.35e-13

플라스틱 조각, 매립 잔여물이라고 보고하였다. Tables 4와 5는 건식제련과 습식제련의 LCA 평가 결과를 보여주고 있다.

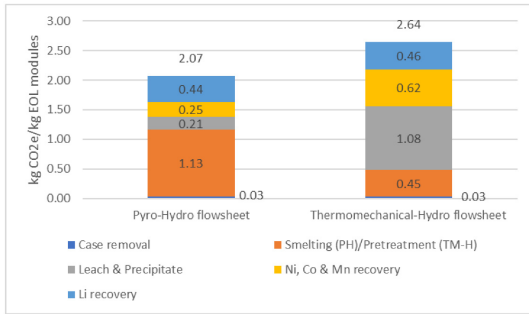
이 표에 따르면 건식제련 공정의 경우 전과정 영향평가에서 지구 온난화 잠재력(Global Warming Potential, GWP)에 대해서는 플라스틱 조각이 가장 큰 영향을 미치고 인체 독성 잠재력(human toxicity potential, HTP: 제품의 전과정에서 배출되는 유해 화학물질이 인간의 건강에 미치는 영향)과 육상생태 독성 잠재력(terrestrial ecotoxicity potential, TETP: 제품이나 공정에서 발생하는 화학물질이 육상 생태계에 미치는 독성 영향)에 대해서는 전기 발전이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이에 반해 습식제련 공정의 경우 전과정 영향평가에서 GWP와 TETP에 대해서는 매립 석고가 HTP에 대해서는 전기 발전이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 보고하였다.

또한 건식제련과 습식제련 공정의 환경영향을 매립과 비교하였는데 Tables 4와 5에 나와있는 GWP 100의 경우 매립은 다른 건식 및 습식제련 공정에 비해 영향이 낮았는데 그 이유는 건식 및 습식제련 공정의 경우 재활용에 필요한 많은 공정으로 인해 이산화탄소 배출이 높아지기 때문이다. 이에 반해 HTP 및 TETP 등 독성에 미치는 영향은 매립이 건식 및 습식제련 공정에 비해서 3~4배 이상 높

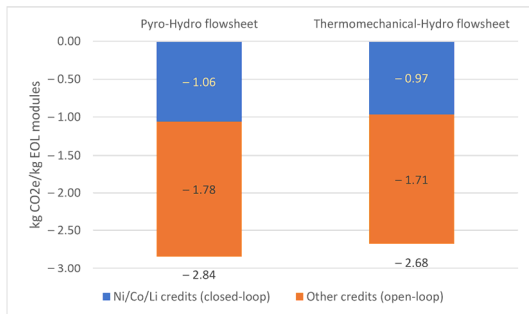
게 나타났으며 그 이유는 배터리를 구성하는 여러 가지 구성요소가 포함되어 있기 때문에 매립을 하게 된다면 환경 오염을 야기하기 때문에 독성에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. 이러한 결과를 토대로 환경 영향 측면에서 건식제련, 습식제련 공정 및 매립을 고려하였을 때 가장 유익한 공정은 저온을 활용하고 플라스틱을 회수할 수 있는 공정으로 제안하였다.

Hoof<sup>(8)</sup>는 2가지 배터리 재활용 공법('Pyro-Hydro' 및 'Thermomechanical-Hydro')에 대한 LCA를 통해 탄소 배출량을 비교하였다. Environmental Footprint impact assessment라는 방법론을 통해 LCA를 수행하였으며, 정량적 분석을 통해 'Pyro-Hydro' 공법이 2가지 공법 중 탄소 배출량이 낮았다고 보고하였다. Fig. 4는 2가지 재활용 공정에 의해 발생하는 탄소배출량을 보여주고 있다. 2가지 재활용 공정에서 제련 및 침출/침전('Pyro-Hydro' 공법) 또는 전처리 및 침출/침전 공정('Thermomechanical-Hydro' 공법)시 발생하는 탄소배출량(1.34 vs. 1.53kg CO<sub>2</sub>e/kg EOL modules)의 차이는 크게 다르지 않았다. 전체적인 재활용 공정에 따른 탄소배출량(Credits 제외)은 Fig. 4에서 보듯이 'Pyro-Hydro'의 경우는 2.07, 'Thermomechanical-Hydro'의 경우는 2.64kg CO<sub>2</sub>e/kg EOL modules로 'Pyro-Hydro'가 낮게 나타났다. 또한 Fig. 5에서 보듯이 'Pyro-





**Fig. 4.** Carbon footprint from the recycling operation (excluding credits) for the ‘Pyro-Hydro’ and ‘Thermomechanical-Hydro’ battery recycling: breakout by process step for both flowsheets<sup>18)</sup>.



**Fig. 5.** Carbon footprint credits for the various types of materials valorized in both flowsheets<sup>18)</sup>.

Hydro’ 공법의 경우가 Ni, Co 및 Li의 효과적인 회수로 인해 함께 credit가 더 높게 나타났다. 정리해 보면 이러한 2가지 재활용 공정의 burden과 credit를 합한 결과 Table 6에서 보듯이 2가지 공법 모두 재활용으로 환경에 긍정적인 영향을 미치지만 ‘Pyro-Hydro’ 공법의 탄소배출량이 더 적었다. ‘Pyro-Hydro’ 공정은 연소 과정에서 직접 배출하는 탄소량이 더 많고, ‘Thermomechanical-Hydro’는 외부 처리 과정에서 발생하는 간접 배출 탄소량이 더 많은 것이다.

Chen<sup>22)</sup>은 리튬 2차전지의 재활용 공정의 LCA를 통해 탄소 배출량, 가격 책정 궤적 및 향후 탄소 가격 책정 파급 효과에 대해 분석하였다. 그 결과 재활용 공정 시 탄소배출량은 공정에 따라 49.2~81.1kgCO<sub>2</sub>eq/kWh에 이른다고 하였으며, 특히 건식제련의 탄소 배출이 습식제련 및 물리적 회수 기술의 탄소 배출보다 훨씬 높다고 보고하였다. 또한 배터리 화학 성분에 맞춰 전략적으로 수명을 다한 제

**Table 6.** Summary of the carbon footprint results for both flowsheets<sup>18)</sup>

kg CO <sub>2</sub> e/kg EOL Modules	‘Pyro-Hydro’	‘Thermomechanical-Hydro’
Burdens	2.07	2.64
Credits	-2.84	-2.68
Net result	-0.77	-0.03

품을 선택하면 부적절한 폐기 방법에 비해 탄소 배출량을 최대 46%까지 줄일 수 있다고 했다.

앞에서 언급한 다양한 연구결과를 통해 폐 LIB의 재활용 공정에 대한 LCA결과에 대해서 정리해보면 다음과 같다.

첫째, LCA를 위한 기능 단위는 LCA에서 분석 대상의 기능성 성과를 정의하는 기준이다. LIB의 경우 기능단위는 에너지 저장용량, 배터리 무게 또는 배터리 수량 등으로 설정할 수 있다. 이러한 기능 단위의 선택은 분석의 목표와 범위에 따라 달라질 수 있다.

둘째, 시스템 경계 설정은 LCA에서 고려할 공정의 범위를 결정하는 것이다. 시스템 경계는 원료 채취, 생산, 사용, 수거 및 재활용, 폐기 등의 범주를 포함할 수 있다. 기능단위와 마찬가지로 시스템 경계에 설정에 따라 LCA 결과는 달라질 수 있다. 예를 들자면, 원료 채취에서부터 폐기까지 모든 단계를 포함할 것인지, 아니면 재활용 공정에만 초점을 맞출 것인지에 따라 결과가 크게 달라질 수 있기 때문에 분석의 최종 목적에 따라 시스템 경계 설정을 할 수 있다.

셋째, 전과정목록 분석은 각 공정 단계에서 소모되는 자원과 발생하는 배출물 등을 정리하는 단계이다. 이를 통해 각 공정이 환경에 미치는 영향을 세부적으로 파악할 수 있다. LIB 재활용 공정에서 고려할 수 있는 항목은 건식제련의 경우 투입자원으로는 폐 LIB, 에너지(전기, 연료), 산소 등이 있으며, 금속이 회수되고, 부산물로는 슬래그, CO<sub>2</sub>와 같은 배출물들이 발생한다. 습식제련의 경우는 투입자원으로는 폐 LIB, 산, 알칼리, 전기 등이 사용되며, 고품질 금속이 회수되고, 폐수와 대기 배출물이 발생한다. 직접 재활용 공정의 경우는 폐 LIB, 에너지, 유기 용매 등이 투입되고, 회수된 양극과 음극재료가 생산되며, 용매 증발에 따른 배출물과 불순물 등 고형 폐기물이 발생한다.

앞의 3가지 항목을 이용하여 LIB 재활용 공정의 영향

분석을 통해 환경적 및 경제적 영향에 대해서 살펴보면 다음과 같다. 환경적 영향을 살펴본다면 기계적(물리적) 재활용 공정은 에너지 소비와 오염이 적은 반면, 습식제련 재활용 공정은 화학 물질에 의한 환경 영향이 클 수 있다. 건식제련 재활용 공정은 높은 에너지 사용으로 인한 온실가스 배출이 문제이다. 각각의 재활용 공정의 경제적 영향을 살펴보면 우선 기계적(물리적) 재활용 공정은 낮은 비용으로 운영 가능하지만, 회수 금속의 부가가치가 낮을 수 있다. 습식제련 재활용 공정은 높은 금속 회수율로 인해 경제성이 좋을 수 있지만, 초기 투자와 운영 비용이 높을 수 있다. 건식제련 재활용 공정은 에너지 비용이 많이 들 수 있지만, 다양한 금속 회수가 가능한 이점이 있다.

이러한 결과를 바탕으로 환경적·경제적 영향을 고려할 때, 혼합공정이 최적의 재활용 공정이 될 수 있다. 앞서 언급한 연구들에서도 혼합공정에 대한 LCA를 수행한 것을 볼 수 있었다. 기계적(물리적) 공정으로 초기 분쇄 및 선별을 통해 에너지 소비를 줄이고, 습식제련 공정으로 고부가가치 금속을 추출하며, 건식제련 공정을 통해 나머지 금속을 회수하는 방법이다. 이러한 혼합 공정은 각 공정의 장점을 결합하여 최대한의 효율성과 최소한의 환경 영향을 도모할 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 폐 LIB 재활용 공정의 전과정평가에 대한 여러가지 연구사례를 살펴보고 리뷰하였다. 앞의 연구 결과에서도 보듯이 폐 LIB의 재활용 공정에 대한 LCA 결과는 시스템 경계와 기능 단위 설정 및 LCI 분석에 따라 다양하게 해석될 수 있다. 예를 들어, 배터리 재활용의 환경적 장점을 강조하고자 한다면 금속 회수율이나 에너지 절약 측면에 초점을 맞출 수 있다. 반면, 화학적 처리에서의 오염물질 배출을 줄이는데 중점을 두고자 한다면 폐수 처리 기술 개선과 같은 방안을 고려해야 한다. 따라서 전과정 평가를 통해 각 재활용 공정의 장단점을 명확히 하고, 환경 영향을 최소화할 수 있는 최적의 재활용 전략을 수립하는 것이 중요하다.

### 감사의 글

본 연구는 환경부 재원으로 한국환경산업기술원 이차

전지 순환이용성 향상 기술개발사업(이차전지 재활용 공정 발생 오염물질 저감 기술개발) 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호: RS-2024-00345911).

### References

1. Tarascon, J. M., Armand, M., 2001: Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries(Review), *Nature*, 414(6861), pp.359-367.
2. Goodenough, J. B., Park, K.-S., 2013 : The Li-Ion Rechargeable Battery: A Perspective Journal of the American Chemical Society, 135, pp.1167-1176.
3. Goodenough, J. B., Kim, Y., 2010 : Challenges for Rechargeable Li Batteries, *Chemistry of Materials*, 22, pp.587-603.
4. Armand, M., Tarascon, J. M., 2008 : Building better batteries, *Nature*, 451, pp.652-665.
5. Mrozik, W., Rajaeifar, M. A., Heidrich, O., et al., 2021 : Environmental impacts, pollution sources and pathways of spent lithium-ion batteries, *Energy & Environmental Science*, 14, pp.6099-6121.
6. Gaines, L., Sullivan, J., Burnham, A., 2011 : Life-Cycle Analysis for Lithium-Ion Battery Production and Recycling, Transportation Research Board 90th Annual Meeting, Washington, DC., Paper No. 11-3891.
7. Dewulf, J., Van der Vorst, G., Denturck, K., et al., 2010 : Recycling rechargeable lithium ion batteries : Critical analysis of natural resource savings, *Resource, Conservation and Recycling*, 54(4), pp.229-234.
8. Fisher, K., Wallén, E., Laenen, P. P., et al., 2006 : Battery waste management life cycle assessment, Final report for publication, London : Environmental Resources Management (ERM), Ltd.
9. Hischer, R., Wäger, P., and Gauglhofer, J., 2005 : Does WEEE recycling make sense from an environmental perspective? : The environmental impacts of the Swiss take-back and recycling systems for waste electrical and electronic equipment (WEEE), *Environmental Impact Assessment Review*, 25(5), pp.525-539.
10. Heijungs, R., Guinée, J., and Huppes, G., 1997 : Impact categories for natural resources and land use, Centre of Environmental Science (CML), Report 138 : Section Substances & Products, Leiden University, Netherlands.
11. International Organisation for Standardisation (ISO), ISO 14040 : 2006 Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. <https://www.iso.org/standard/37456.html>, August 20, 2024.
12. Rajaeifar, M. A., Raugei, M., Steubing, B., et al., 2021 :

Life cycle assessment of lithium-ion battery recycling using pyrometallurgical technologies, *Journal of Industrial Ecology*, 25, pp.1560-1571.

13. Larouche, F., Tedjar, F., Amouzegar, K., et al., 2020 : Progress and Status of Hydrometallurgical and Direct Recycling of Li-Ion Batteries and Beyond, *Materials*, 13(3), pp.801.
14. Choi, Y.-K., Jeong, S., Lee, J.-Y., et al., 2005 : Environmental Impacts Assessment of Spent LIBs (Lithium Ion Batteries) Recycling System Using Life Cycle Assessment, *Korean Journal of LCA*, 6(1), pp.41-46.
15. Tao, Y., Wang, Z., Wu, B., et al., 2023 : Environmental life cycle assessment of recycling technologies for ternary lithium-ion batteries, *Journal of Cleaner Production*, 389, pp.136008.
16. Castro, F. D., Mehner, E., Cutaia, L., et al., 2022 : Life cycle assessment of an innovative lithium-ion battery recycling route : A feasibility study, *Journal of Cleaner Production*, 368, pp.133130.
17. Chen, Q., Lai, X., Gu, H., et al., 2022 : Investigating carbon footprint and carbon reduction potential using a cradle-to-cradle LCA approach on lithium-ion batteries for electric vehicles in China, *Journal of Cleaner Production*, 369, pp.133342.
18. Van Hoof, G., Robertz, B., and Verrecht, B., 2023 : Towards Sustainable Battery Recycling : A Carbon Footprint Comparison between Pyrometallurgical and Hydrometallurgical Battery Recycling Flowsheets, *Metals*, 13, pp.1915.
19. Kallitsis, E., Korre, A., Kelsall, G. H., 2022 : Life cycle assessment of recycling options for automotive Li-ion battery packs, *Journal of Cleaner Production*, 371, pp.133636.
20. Xu, R., Xu, W., Wang, J., et al., 2022 : A Review on Regenerating Materials from Spent Lithium-Ion Batteries, *Molecules*, 27(7), pp.2285.
21. Boyden, A., Soo, V. K., Doolan, M., 2016 : The Environmental Impacts of Recycling Portable Lithium-Ion Batteries, *Procedia CIRP*, 48, pp.188-193.
22. Chen, W. H., Hsieh, I. Y. L., 2023 : Techno-economic analysis of lithium-ion battery price reduction considering carbon footprint based on life cycle assessment, *Journal of Cleaner Production*, 425, pp.139045.

---

**황인성**

- 한양대학교 기계공학과 석사
- 현재 한국생산기술연구원 유연생산연구부 연구원

---

**김영민**

- 포항공과대학교 신소재공학과 박사
- 현재 한국생산기술연구원 유연생산연구부 수석연구원

---

**김용환**

- 고려대학교 금속공학과 박사
- 현재 한국생산기술연구원 소재공급망연구부 수석연구원

---

**한승연**

- 인하대학교 재료공학과 석사
  - 현재 한국생산기술연구원 소재공급망연구부 기술원
-