

# 전과정평가 기법을 이용한 폐리튬이온전지 재활용 공정에 대한 환경성 평가

최용기, 정수정, 이지용, 허탁, \*손정수

(건국대학교 화학생물공학부, 친환경제품 및 시스템 연구실, \*한국지질자원연구원 자원활용소재연구부)

## Environmental Impacts Assessment of Spent LIBs (Lithium Ion Batteries) Recycling System Using Life Cycle Assessment

Yong-ki Choi, Soojeong Jeong, Ji-yong Lee, Tak Hur, \*Jeong-soo Sohn

(Eco-Product and System Laboratory  
Dept. of Chemical and Biological Engineering, Konkuk University, \*Minerals & materials processing  
division, Korea institute of geoscience & mineral resources)

### ABSTRACT

This study intended to identify the environmental aspects associated with the lithium ion battery recycling system. The potential environmental impacts were evaluated by using Life Cycle Assessment (LCA) method. The leaching test of heavy metals was conducted for tracking their long-term effects on the environment after recycling process. The recycling system was a level of pilot plant scale. Hence, it was expected to perform more positive consequence which was ultimately reduced environmental burdens due to the recycling system if the system optimized as a Cu and Al separated, feasibly.

Key Words : Lithium ion battery (LIB), Life Cycle Assessment (LCA), Recycling system

### 요 약 문

본 연구에서는 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)기법을 이용하여 휴대폰의 전원장치로 사용된 후 폐기된 폐리튬이온전지의 재활용 공정에 대한 환경성 평가를 실시하였다. 또한 재활용 공정을 거친 후 발생하는 폐기물의 매립 시, 중금속 용출로 인한 환경영향을 알아보고자 중금속 용출실험 데이터를 사용하여 장기적인 관점에서의 환경영향도 분석해보았다. 폐리튬이온전지의 재활용 공정은 현재 재활용 기술을 개발 중인 pilot plant scale 수준으로, 금속의 재활용이 최적화되지 않은 상태이다. 따라서, Cu와 Al의 분리공정이 최적화 된다면 폐리튬이온전지의 재활용 시스템의 환경부하를 좀 더 감소시켜 나갈 수 있을 것으로 기대된다.

주제어 : 폐리튬이온전지(폐LIBs), 전과정평가(LCA), 재활용

### 1. 서 론

21세기에 접어들면서 전자기기 및 정보통신의 발달이 가속화되고 그 중에서도 휴대폰의 발달은 최대의 전성기를 맞고 있다. 휴대폰은 단순히 통신용의 목적뿐만 아니라 동영상 구연에서부터 파일전송에 이르기까지 다양한 기능을 갖춘 전자기기로써 발전을 거듭하

여 현대문화의 대표적 아이콘으로 자리 잡고 있는 동시에 신제품 출시와 휴대폰의 교체시기도 점점 빨라지고 있는 추세이다. 휴대폰의 교체시기가 빨라지면서 교체량 만큼의 폐휴대폰이 발생하게 되어, 이에 대한 적절한 처리가 중요하게 되었다.

니카드전지나 납축전지 등의 2차 전지에는 Ni, Cd, Pb 등의 유해 중금속이 함유되어 있어 적절한 처리

방법에 대한 연구가 되어왔지만, 리튬이온전지는 이러한 금속들을 포함하지 않고 있다는 이유로 환경친화적인 전지라고 여겨 왔다. 그러나 페리튬이온전지(이하 폐LIBs)는 Cu, Al, Co, Li 등의 금속을 함유하고 있으며 이 금속들은 폐기 시에 환경영향을 발생하는 폐기물인 동시에 재활용을 통해 회수할 수 있는 자원으로서의 가치를 지니고 있다.

전자, 통신기기의 기술 개발이 상대적으로 앞서왔던 일본은 현재 폐LIBs의 재활용 기술에 관한 한 특허 보유수가 세계에서 가장 많고 기술도 다양한 것으로 알려져 있다. 반면 우리나라는 현재 명실상부한 휴대폰 강국임에도 불구하고 최근에 들어서서야 폐LIBs 재활용 기술 개발 및 생산자책임재활용제도(EPR)를 실시를 예정하고 있는 등 대책이 미흡한 것이 사실이다. 또한 폐LIBs가 얼마나 버려지고 재활용되고 있는지에 대한 신뢰할만한 통계수치가 없고 폐LIBs의 처리가 환경에 미치는 영향을 분석한 자료도 거의 없는 실정이다.

이에 본 연구에서는 폐LIBs의 재활용 공정에 대한 전과정평가(LCA, Life Cycle Assessment)를 수행하여 잠재적인 환경영향을 평가하고 폐LIBs의 적절한 처리방안 제시를 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

## II. 이론적 배경

### 1. 전과정평가(LCA)

전과정평가는 제품이나 서비스의 전과정(원료채취, 제품생산, 사용, 폐기)에 걸친 환경부하 즉, 대상 시스템의 투입, 산출물을 정량화 하고 객관적, 과학적 방법으로 이들의 환경영향을 평가, 규명하여 환경 개선을 위한 대안을 제시하는 과정이라고 할 수 있다.

전과정평가는 EIA(환경영향평가), RA(위해성평가) 등과 함께 환경관리기법 중 하나로 정립되어가고 있고 ISO 14000 Series의 기술적 근간을 이루고 있어 다른 기법에 비해 국제적으로 보다 중요시되는 기법이라 할 수 있다.

따라서 오늘날 각종 환경문제에 직면하고 있는 기업체 및 행정기관, 소비자들은 각자의 입장에서 효과적인 환경보존방안을 모색하고자 하는 목적을 달성하

기 위해 전략적, 정책적 의사결정도구로서 전과정평가를 활용할 수 있다.

### 2. 영향평가 방법론

본 연구에서는 환경성평가를 위하여 네덜란드 PRe consulting 기관에서 개발한 종말점(end-point) 개념의 Eco-indicator99(EI99) 방법론을 적용하였다. EI99 방법론에서는 3가지 피해 범주(damage category) 즉, 인간 건강(human health), 생태계 건강(ecosystem quality), 자원(resource)을 3가지 피해 범주로 고려하고 있다. 이들 범주는 또 다시 각각의 내부 범주로서 발암성, 호흡기 영향, 기후 변화, 방사능, 오존층, 생태독성, 산성화, 토지이용, 자원 및 연료 채취 등으로 나뉜다.

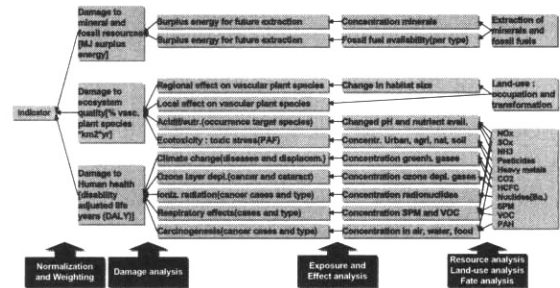


Fig. 1 EI99 방법론 개요

Fig. 1 에 EI99 영향평가 방법론의 기본 개념을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 자연계로 오염물질이 배출되면 배출물의 경로, 노출정도 및 영향 등을 분석하고 최종적인 피해 분석을 거침으로써 종말점 수준(end-point level)에서 환경영향을 평가하는 방법론이다.

Table. 1 EI99 방법론에서의 피해 영향범주들과 피해 지수

Damage categories		Damage unit
Human health	carcinogenic effect	DALY
	respiratory (organic)	DALY
	respiratory (inorganic)	DALY
	climate change	DALY
	ionizing radiation	DALY
	ozone depletion	DALY
Ecosystem quality	ecotoxicity	PDF*m2*yr
	acidification/nuttrification	PDF*m2*yr
	land-use	PDF*m2*yr
Resources	minerals	MJ
	fossil	MJ

Table. 1에서 보는 바와 같이 인간 건강 범주에서는 발암성, 호흡기 장애 등으로 인해 인간이 장애를 가지고 살아가는 기간 (DALY, Disability Adjusted Life Years)을 지표로 하여 종말점 수준의 지수를 도출할 수 있다. 생태계 건강 또한 자연계로 오염물질이 배출되어 산성화, 생태독성에 의해 단위면적(m<sup>2</sup>)당 생물종이 잠재적으로 사라질 확률(PDF\*m<sup>2</sup>\*yr), 자원고갈 범주에서는 자원 1kg을 채취하기 위해 투입되는 잉여 에너지를 각각 지표로 선정하여 종말점 수준의 피해지수를 도출한다. 인간 건강, 생태계 건강, 자원에 대해 각각 도출된 종말점 수준의 피해지수들은 정규화(normalization)와 가중치 부여(weighting) 단계를 거쳐 최종적으로 하나의 지수가 도출된다.

본 연구에서는 특성화, 정규화 단계까지 고려하여 분석하였으며 생태계 건강 범주에서 고려하는 토지 이용부분은 데이터의 부재로 고려대상에서 제외하였다.

### III. 전과정 평가 수행

#### 1. 연구의 범위 정의

##### (1) 기능 및 기능 단위

폐LIBs 재활용 시스템의 기능단위 및 기준흐름은 휴대폰의 전원공급장치로 사용된 후 폐기된 폐LIBs 1kg 재활용 하는 것으로 정의하였다.

##### (2) 시스템 경계

Fig. 2에서 보는 바와 같이 시스템 경계는 분리수거된 폐LIBs가 재활용 공정으로 들어온 후 파쇄, 선별을 거쳐 유기금속이 회수되기까지이다.

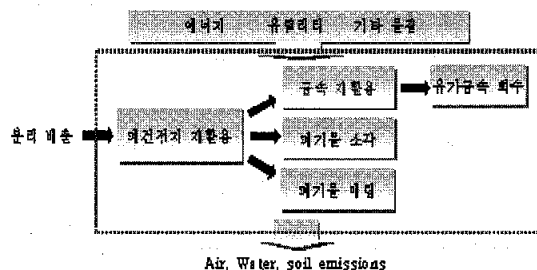


Fig. 2 LIBs 재활용 공정의 시스템 경계

#### (3) 데이터 품질요건

Table 2. LIBs 재활용 공정의 데이터 품질요건

구분	소각 공정 내부	소각 공정 외부
시간적 경계	2003년	가능한 최신의 데이터베이스
공간적 경계	Pilot plant in Korea	대상업체와 유사한 지역의 데이터
기술적 경계	Lab. scale	Best available technology

#### (4) 가정 및 제한사항

- 재활용 공정 장비는 최소 3-5년, 기본적으로 10년 정도의 수명을 가지므로 폐LIBs 1kg의 재활용과 관련된 장비의 환경부하는 미미하므로 고려하지 않는다.
- 폐LIBs 재활용 공정은 아직 상용화 되지 않고 개발 중이므로 재활용 공정 관련 데이터는 pilot plant scale 데이터를 사용하였다.
- LiCoO<sub>2</sub> 파우더의 재활용 공정은 업체의 공정 공개 거부로 데이터 수집이 불가능하여 Co의 가격과 LiCoO<sub>2</sub> 파우더의 가격(Co의 50-70% 가격이며 worst case로 50%를 적용)을 조사한 후, 가격비를 적용하여 환경이득 효과를 나타내었다.
- 1차 파쇄~입자선별 공정의 전력은 실측치를 수집하였으며, 열처리~2차 입자선별 공정(공정 개발중)의 전력량은 기계 출력과 실측 효율로 계산한 데이터를 사용하였다.

#### 2. 전과정 목록분석

##### (1) 공정흐름도 및 단위공정

Fig. 3에서 보는 바와 같이 폐LIBs의 재활용 시스템은 폐LIBs가 투입된 후에 1차 파쇄, 자력선별, 공기분급, 입자선별, 열처리, 2차 파쇄, 2차 선별 등의 공정을 거쳐 LiCoO<sub>2</sub> 파우더, Al과 Cu 혼합물, 페플라스틱이 산출물로 나오게 된다. 이 때, LiCoO<sub>2</sub> 파우더는 재활용되고, Al과 Cu 혼합물은 매립, 페플라스틱은 소각된다.

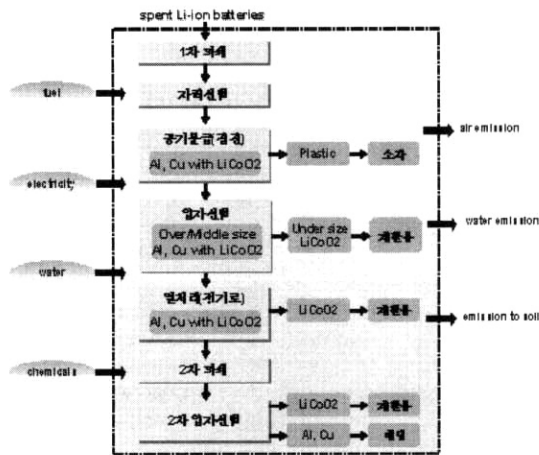


Fig. 3 폐LIBs 재활용 시스템의 공정흐름도

(2) 데이터 수집

1) LIBs 구성성분 데이터

폐기처리 공정에 대한 LCA는 대표적인 다중투입물 (multi-input) 시스템으로서 투입물, 산출물 간의 인과관계를 규명하기 위해서는 투입물 성분에 대하여 알고 있어야 한다. Table. 3은 LIBs의 구성성분 데이터를 보여주고 있다

Table. 3 LIBs의 구성성분

구분	구분	g/단위전지 1개	kg/전지1kg	%
휴대폰배터리외장	Acrylonitrile Butadiene Styrene(ABS)	6.48	2.308E-01	23.1
	Copper	1.15	4.106E-02	4.1
IC 기판	Gold	0.00	1.303E-04	0.0
	Lead	0.06	2.085E-03	0.2
	Zinc	0.00	8.689E-05	0.0
	Silver	0.00	1.303E-04	0.0
	plastics	0.29	1.033E-02	1.0
단위전지외장	Aluminum	3.32	1.182E-01	11.8
	plastic	0.27	9.615E-03	1.0
분리막	Polyethylene(PE)	0.3	1.068E-02	1.1
	Polypropylene(PP)	0.3	1.068E-02	1.1
집전체	Aluminum foil	0.75	2.671E-02	2.7
	Copper foil	2.05	7.301E-02	7.3
양극	Lithium cobalite(LiCoO2)	6.47	2.304E-01	23.0
음극	Carbon powder	3.11	1.108E-01	11.1
전해액	Propylene carbonate(PC)	1.17	4.184E-02	4.2
	Diethyl carbonate(DEC)	1.17	4.184E-02	4.2
	Lithium hexafluoro phosphate(LiPF6)	0.29	1.034E-02	1.0
바인더	Polyvinylidene fluoride (PVDF)	0.88	3.134E-02	3.1
합계		28.08	1.000E+00	100.0

2) 재활용 공정 데이터

재활용 공정은 아직 상업화되지 않은 공정으로 시운전 중의 데이터를 수집하였다. 수집된 공정데이터에는 투입물로는 에너지원인 전력이 있으며 산출물로는 재활용을 위해 회수되는 금속 및 폐금속, 폐플라스틱 및 대기배출물 등이 있다.

(3) 데이터 계산

1) 전력 소비량

1차 파쇄~ 입자선별공정은 실제 가동이 되고 있어 전력계로 직접 전력을 구하였으나 그 이외의 공정은 아직 개발 중이므로 기계 spec.을 통하여 실측된 전력의 효율을 구하여 계산하였다.

Table. 4 폐LIBs 500kg 처리 시 전력 사용량

구분	최대출력 (kw)	최소소비전력 (kwh)	실제소비전력 (kwh)
1차 파쇄	22.37	22.37	13.87
벨트콘베어	0.75	0.75	0.47
자력선별기	0.75	0.75	0.47
공기분급 (집진기)	5.22	5.22	3.24
입자선별기	2.24	2.24	1.39
전기로	11.56	0.87	0.54
2차파쇄	22.37	3.36	2.08
2차선별	2.24	0.34	0.21
합계	-	-	22.26

2) 대기 배출물

구리 및 알루미늄 등의 금속에 붙어 있는 LiCoO2의 회수율을 높이기 위해 전기로를 사용하여 바인더 및 전해액을 연소시키는 과정을 거치게 된다. 본 연구에서는 바인더와 전해액의 성분을 조사한 후 연소방정식을 사용하여 대기 배출물을 계산하였다.

Table. 5 열처리에 의한 대기배출물 계산

구분	구조식	분자량	탄소함량 (wt%)	이산화탄소량 (kg CO2/kg)
Carbon	C	12	100.0	3.67
PC	C4H6O3	102.09	47.0	1.72
DEC	(C2H5)2CO3	118.13	50.8	1.86
PVDF	-[CH2-CF2]-	64.03	37.5	1.38
LiPF6	LiPF6	151.91	0.0	-

### 3. 전과정 영향평가

본 연구에서는 EI99 영향평가 방법론을 적용하여 인간건강, 생태계건강, 자원의 3가지 피해 범주에 대하여 특성화, 정규화의 순서로 영향평가를 실시하였다. 또한 시간에 따른 중금속의 영향을 평가하기 위해 단기 및 장기의 두 가지 시간대별로 나누어 수행하였다.

## IV. 결과 및 고찰

### 1. 특성화(Characterization)

#### 1) 단기 영향 분석

Table. 6에서 보는 바와 같이 인간건강 범주에서는 폐기물 소각 시 배출되는 NOx와 재활용 공정에서 배출되는 공정배출물인 이산화탄소에 의한 영향이 대부분이었으며, 생태계건강 범주에서는 폐기물 소각으로 인한 대기오염의 NOx 배출 및 아연의 배출이 주요 원인이었다. 자원고갈 범주에서는 재활용 공정에서 전력 사용과 폐기물 소각 공정에서의 전력 및 보조연료에 의한 natural gas와 crude oil 소모가 주요 원인이었다. 그러나 코발트 회수로 인한 영향(avoided impact)의 대기오염 배출되는 NOx와 아연의 배출 저감효과가 더 크기 때문에 인간건강 및 생태계건강 범주의 특성화 결과는 (-)값을 나타내고 있다. 이는 코발트회수로 환경적 이득이 발생함을 의미한다. 자원고갈 범주에서도 코발트 회수로 인한 bauxite가 저감되

는 효과가 크기 때문에 역시 특성화 결과는 (-)값을 나타내고 있다.

#### 2) 장기 영향 분석

장기 영향 분석에서는 중금속 용출 실험 데이터를 적용하여 영향평가를 실시했으나 매립 대상인 Al, Cu가 용출되지 않거나 미량이므로 단기 영향 분석의 경우와 동일한 특성화 결과를 갖는다고 할 수 있다.

본 연구에서는 우리나라의 폐기물 공정 시험법에 따라 용출 실험을 수행하였다. 그러나 각 나라별로 중금속 용출 실험에 대한 기준이 다르기 때문에 실험 기준이 달라진다면 그에 따라 결과는 달라질 것이다. 유럽의 경우, 중금속 용출 실험법에서 규정하고 있는 실험조건이 우리나라보다 더 엄격하므로 금속에 따라서는 용출량에 있어서 수백 배 내지 수천 배까지 차이가 나기도 한다. 중금속이 시간에 따라 장기적으로 미치는 영향에 대한 연구는 실제 영향을 측정하기에는 많은 시간과 노력이 필요하고 한 세대에서 끝날 수 없는 일이기 때문에 지속적인 연구가 필요한 부분이다.

### 2. 정규화(Normalization) 및 가중화(Weighting)

각 범주별 서로 다른 지표를 사용하여 지수를 산출하는 특성화 결과만으로는 범주들 간의 비교가 불가능하여 정규화를 수행하여 폐LIBs 재활용 시스템에서 각 범주 사이의 상대적인 영향에 대하여 비교하였다.

Table 6. 단기간에서의 특성화 결과

구분	human health[DALY] (%)	ecosystem[PDF*m2*yr] (%)	resource[MJ] (%)
공정 배출물	1.10E-7 (30.3%)	0.00E+0 (0.0%)	0.00E+0 (0.0%)
전력	1.33E-8 (3.6%)	3.93E-4 (16.2%)	1.38E-2 (30.2%)
폐금속매립	1.48E-10 (0.0%)	7.10E-6 (0.3%)	3.69E-4 (0.8%)
폐기물소각	2.43E-8 (66.3%)	2.03E-3 (83.5%)	3.15E-2 (69.0%)
합계	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%)

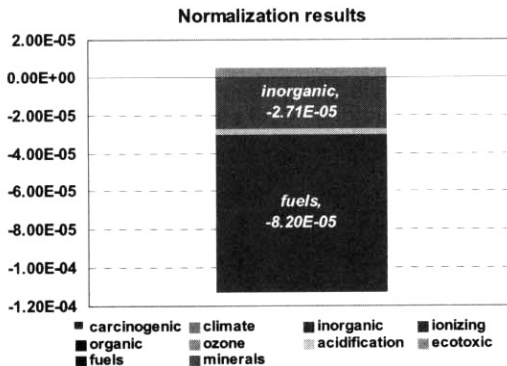


Fig. 4 폐LIBs 재활용 시스템에 대한 정규화 결과

그 결과 코발트 금속 회수로 인하여 코발트 금속

생산을 대체함으로써 투입되는 에너지가 저감되어 얻는 환경이득이 폐LIBs 재활용 공정의 환경부하보다 4.6배 정도 큰 것으로 나타났다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 자원고갈 범주의 환경이득이 대부분이다. 이는 코발트 원석을 채취하여 가공하는데 필요한 에너지가 저감되는 효과와 코발트 생산 시 배출되는 NO<sub>x</sub>와 아연 등의 대기 배출물이 저감되어 나타나는 이득이다.

## V. 결 론

재활용 공정에서 환경이득 효과를 고려하지 않은 환경부하만은 2.90E-05로 매립의 환경부하보다 더 크지만 코발트를 재활용함으로써 얻는 환경이득이 -1.37E-04이므로 전체적인 환경영향은 -1.08E-04가 되어 소각, 매립 시스템에 비해 환경영향이 가장 작다. 그러나 현재 Al과 Cu의 분리가 힘들고 Al과 Cu의 회수가 이루어지지 않고 있는 실정이다. 재활용 공정은 아직 상용화 단계가 아닌 기술개발 단계이기 때문에 앞으로 scale-up을 통한 공정의 효율이 개선되고 Al, Cu, Co, Li 등의 유가금속 회수 기술이 개발되어 공정 개선이 이루어진다면 환경부하가 감소될 수 있는 여지가 크다. 따라서 향후 공정 개선을 통하여 코발트 뿐 아니라 구리 및 알루미늄 등의 재활용이 이루어져야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

- 1) 이진모, 허락, 김승도, 환경 전과정평가(LCA)의 이론과 지침, 한국인정원, 1998
- 2) 임송택, 생활폐기물 소각 및 매립 공정에 대한 전과정평가 연구, 2003
- 3) 환경부, 환경백서, 2003
- 4) 환경부, 2001전국폐기물통계조사, 2002
- 5) G. Finnveden, Life Cycle Assessment of Integrated Solid Waste Management Systems, Systems engineering models for waste management, 1998
- 6) J. Sundqvist, Landfilling and incineration in LCA and system analyses, Systems engineering models for waste management - International workshop, Sweden, 1998
- 7) EU, Technical data for waste incineration.

8) Bernt Johnke, Emission from waste incineration