

# 재활용 기술에 대한 환경·경제효율성 평가 방법에 대한 연구

A Study on Eco-Efficiency Evaluation Methodologies  
for Recycling Technologies

양인목, 김영실\*, 안중우\*, 조봉규\*\*, 조영주\*\*

에코디자인연구소, \* 성신여대, \*\* 폐금속·유용자원재활용기술개발사업단

Inmog Yang, Youngsil Kim\*, Joong Woo Ahn\*, Bong Gyoo Cho\*\*, Youngju Cho\*\*

Eco Design Institute, \* Sungshin Women's University, \*\* R&D Center for Valuable Recycling

# 재활용 기술에 대한 환경·경제효율성 평가 방법에 대한 연구

양인목, 김영실\*, 안중우\*, 조봉규\*\*, 조영주\*\*

(에코디자인연구소, \* 성신여대, \*\* 폐금속·유용자원재활용기술개발사업단)

## A Study on Eco-Efficiency Evaluation Methodologies for Recycling Technologies

Inmogh Yang, Youngsil Kim\*, Joong Woo Ahn\*, Bong Gyoo Cho\*\*, Youngju Cho\*\*

(Eco Design Institute, \* Sungshin Women's University, \*\* R&D Center for Valuable Recycling)

### Abstract

This study was conducted to develop an appropriate methodology for economic and environmental values evaluation of recycling technologies. As a result, it was suggested that two separate evaluation methods be applied based on the Eco-efficiency theory.

When compared between competing recycling systems, recycling materials and recycling processes were major concern, as opposed to recycling materials, the virgin materials, and waste treatment when compared between recycling and the final disposal. In addition, the selling price of the material and incurred cost of recycling were chosen as economic indicators while the LCA result as an environmental indicator. Some limitation still exist that in this study the entire processes of recycling system are not included such as infrastructure due to data relevant although the indicator selection principle was employed for the suggestion of suitable indicators for recycling technologies. It is expected that further studies with actual cases will help improve the suggested methodology.

Key words: Eco-efficiency, recycling technology, LCA, recycling technology evaluation

### 요약문

이 연구는 재활용 기술에 대한 환경적 가치와 경제적 가치를 합리적으로 평가할 수 있는 방법론을 개발하기 위해 수행되었다. 연구 결과 환경·경제 효율성(Eco-efficiency) 이론을 바탕으로 재활용 시스템들을 비교하는 경우와 재활용과 폐기 처리를 비교하는 경우로 나누어 평가 방법을 제시하였다. 재활용 시스템들을 비교하는 경우는 재활용 공정과 재활용된 소재에 초점을 맞추었으며, 재활용과 폐기 처리를 비교하는 경우는 재활용된 소재와 신재, 그리고 폐기물 처리에 중점을 두었다. 경제 지표 단위는 가격과 비용을, 환경 지표는 전과정평가(LCA) 결과를 선택하였다. 환경·경제 효율성 지표 선정 원칙에 따라 재활용 기술에 대한 적합한 평가 지표를 제안하기 위해 노력하였으나 전체 프로세스를 포함하지 못하는 한계점을 가지고 있다. 실제 평가를 수행하면서 평가 방법이 지속적으로 개선되기를 기대한다.

주제어: 환경·경제효율성, 재활용 기술, 전과정평가, 재활용 기술 평가

## 1. 서론

지속적인 인구 증가, 경제 성장 및 도시화는 자원 소모와 함께 폐기물 발생을 가속화시키고 있다(Minghua et al., 2009). 특히 아시아 태평양 지역에서는 급속한 경제 성장으로 말미암아 소비재와 천연자원의 지속 불가능한 소비 양상이 나타나고 있다(Chiu A.S.F., 2004). 폐기물은 주로 매립, 소각, 재활용의 세 가지 방법으로 처리하고 있는데, 매립과 소각은 2차 오염의 원인이 될 뿐만 아니라 자원 고갈 측면에서도 바람직하지 않다. 매립은 매립지의 고갈이라는 문제점과 함께 폐기물에서 흘러나오는 침출수로 인한 악취 및 토양오염을 야기하고, 소각은 소각 시 배출되는 각종 가스로 인한 대기오염의 우려가 있다(DOE of UK, 1995).

Chiu와 Ward, Massard(2009)는 생태 산업 단지 및 지속 가능한 소비와 생산으로의 발전이 지속 가능한 사회로의 변화에 주요 이슈이자 도전 과제라고 제안하였는데, 폐기물의 재활용을 통한 자원순환 시스템의 구축은 그 중요한 과제 중 하나가 될 것이다. 우리나라는 2011년 사업장 폐기물의 재활용 비율이 83%로 조사되어 OECD 국가 중에서 재활용 비율이 가장 높은 수준을 나타내고 있다. 그러나 아직도 재활용 가능 자원의 56%가 매립되고 있는 실정이다(김동현, 2013).

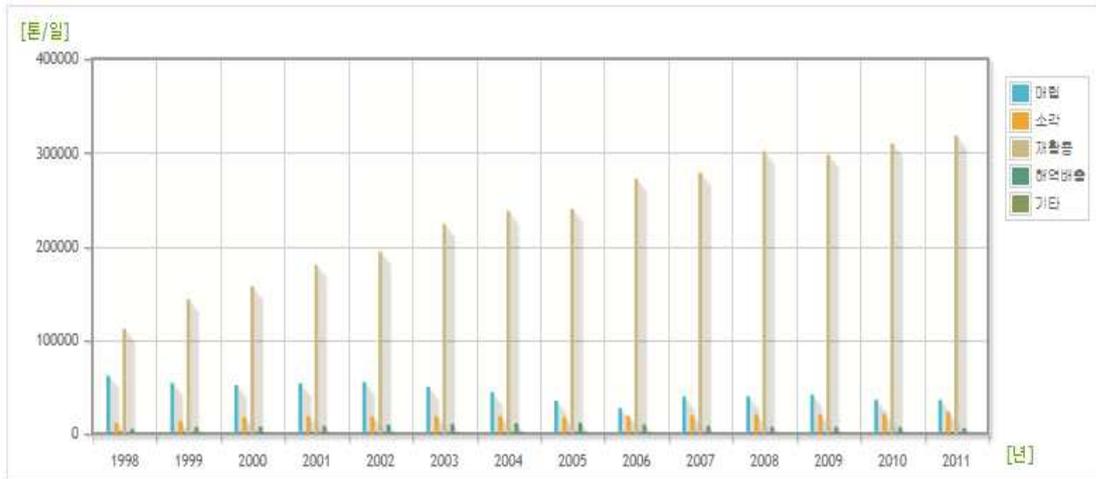


Fig. 1. Ratio of waste (including hazardous waste) treatment methods in Korea

재활용 산업은 환경오염을 줄이고 자원 생산성을 높이며 새로운 일자리 창출에 기여할 수 있다. 나아가 재활용 기술의 수출을 통하여 국가의 경제적 차원뿐만 아니라 지구 환경 보전에 기여하는 역할도 할 수 있다. 2013년 9월 17일 환경부가 입법 예고한 '자원순환사회환원촉진법'의 취지는 이러한 배경과 무관하지 않다.

한편 재활용 산업을 활성화시키기 위해서는 무엇보다도 재활용 기술에 대한 가치를 보다 합리적으로 평가하여 인식하는 것이 필요하다. 사실, 어떤 제품은 재활용 방법이 매우 다양하며, 그 방법들이 모두 환경적으로 긍정적인 영향을 미친다고 할 수는 없다. 또한 산업사회에서는 환경뿐만 아니라 경제도 중요한 요소이다. 재활용을 하는 것이 환경적으로 우수하다 하더라도 경제적인 타당성이 결여되어 있다면 실용화하기가 어려울 것이다. 지금까지 재활용에 대해 환경·경제적으로 평가하는 연구 사례를 살펴보면 환경적 차원에서는 전과정평가가 수행되어 왔으며 경제적으로는 재활용 과정에 투입되는 비용에 그 초점을 맞추고 있다. 이러한 접근 방법은 재활용 기술을 통해 얻게 되는 자원의 내재적 가치와 폐기 처리하지 하지 않음으로써 얻을 수 있는 경제적, 환경적 가치가 누락되는 결과를 초래한다. 이에 본 연구에서는 환경·경제 효율성 기법을 활용하여 재활용 기술에 대해 환경적·경제적으로 개선되는 가치를 정량적으로 산출함으로써 재활용 기술을 보다 합리적으로 평가하기 위한 방법을 제안하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1. 환경·경제 효율성(Eco-efficiency)

환경·경제 효율성은 기업뿐만 아니라 개인, 정부 및 여타 조직들이 조직, 사업, 제품에 대하여 지속가능성을 평가하는 방법론이다. ‘Eco-Efficiency’라는 용어는 1989년 Schaltegger와 Sturm이 처음 사용한 후, 1992년 WBCSD(World Business Council for Sustainable Development)에서 발행한 책 “Changing Course(Schmidheiny, 1992)”에 의해 본격적으로 알려지기 시작했다(Ehrenfeld, 2005).

Eco-Efficiency에서 Eco는 경제(Economy)와 생태(Ecology)의 두 가지 의미를 모두 가지고 있으며, 따라서 경제적 산출(제품과 서비스의 가치)과 환경오염을 발생시키는 투입(환경부하)의 비율로 나타낸다(WBCSD, 2000).

$$\text{Eco-efficiency} = \frac{\text{Product or Service Value}}{\text{Environmental Impact}}$$

환경·경제 효율성의 개념과 지수개발 방법론에 있어서는 국가에 따라 또는 이해관계자에 따라 다소 차이가 있으며(김연복, 엄정웅, 이중규, 2010) 조직 별 환경·경제 효율성의 정의는 Table 1.과 같다.

Table 1. Definition of Eco-efficiency

조직	정의
WBCSD	경영 전과정에서 환경적 영향을 최소화하면서 가치 창출을 극대화하여 경제적, 환경적 성과를 동시에 향상시키는 전략
OECD	생태적 자원들을 인간의 욕구를 충족시키기 위해 효율적으로 사용하는 것
EEA	자연을 덜 훼손시키면서 더 풍요로운 복지를 누리게 하는 것
JEMAI	제품의 경제적 가치와 제품 설계, 생산, 폐기 전 과정에서 에너지와 자원절감을 통한 환경영향의 개선 정도를 나타내는 척도
BASF사	가능한 배출량을 적게 유지하면서 제품 생산에서 가능한 한 자원과 에너지를 적게 사용하는 것

EA; 유럽 환경청, The European Environment Agency

JEMAI; 일본산업환경관리협회, Japan Environmental Management Association for Industry

상기 환경·경제 효율성의 정의를 살펴보면 기업 경영적 접근은 WBCSD, 사회 전체를 보는 접근은 OECD와 EEA, 생산 공정에 가장 잘 연결되는 것은 BASF사, 제품에 대한 부분은 JEMAI가 가장 어울리는 것으로 나타난다.

환경·경제 효율성은 환경적 입장만을 다루지 않고 경제적 차원을 동시에 고려하기 때문에 산업계의 거부감이 적은 편이며, 비록 측정이 완전하지 않다 하더라도 환경론자, 사회책임 관계자, 정부 및 산업계 모두 선호하고 있는 척도이기도 하다(홍승용, 박승욱, 김연복, 김종대, 2013).

## 2.2. 환경·경제 효율성 활용 사례

환경·경제 효율성에 대한 연구와 적용은 독일과 일본을 중심으로 이루어져 왔다. 특히, 일본은 JEMAI에서 2000년부터 협회 회원사를 중심으로 조직과 제품에 대한 환경·경제 효율성 측정 사례를 발표해 오고 있다. JEMAI는 제품에 대한 경제적 지표로는 제품 판매량으로 환경적 지표로는 전과정 환경영향을 측정하였다(홍승용 등, 2013).

일본에서 기업의 환경·경제 효율성 평가에 적용된 사례를 보면 경제적 지표로는 매출액, 환경적 지표로는 화학물질 사용량, 온실가스 배출량, 폐기물 배출량이 주로 사용되고 있다(박지혜, 옥해명, 차경훈, 허탁, 2006). 반면, 제품의 환경·경제 효율성 평가에서는 경제적 가치로 제품의 기능이 주로 사용되었다.

일본의 전기전자업계는 환경·경제 효율성에 팩터(Factor) 개념을 접목하고 있다. 팩터는 1990년대 초반 독일 부퍼탈 연구소(Wuppertal Institute)의 에른스트 폰 바이츠제커(Ernst U. von Weizsacker)가 개발한 개념으로, 경제적 가치가 2배 향상시키면서 환경부하를 1/2로 줄이면 환경 생산성이 4배가 되는 것이며 이를 팩터 4로 표시한다. 팩터 개념은 기존의 수준과 새로운 수준을 비교하여 표현하는 것이므로 제품의 환경·경제 효율성을 활용하는데 매우 유용하다.

$$\text{Factor} = \frac{\text{새로운 제품의 환경·경제 효율성}}{\text{기존 제품의 환경·경제 효율성}}$$

후지쯔는 컴퓨터의 환경·경제 효율성을 측정하는데 경제 지표로 기능적 요소인 CPU clock speed(GHz), 메모리 용량(MB), 하드디스크 용량(GB)을, 환경 지표로는 전과정평가 결과를 사용하였다(Oikawa, Ebisu, Fuse, 2006).

도시바는 환경경제 효율성 평가 시 QFD와 LIME을 사용하고 있다. LIME은 일본의 산업기술총합연구소(AIST, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)가 전과정평가를 바탕으로 개발한 환경성 평가 틀이다. 엘리베이터 평가에서 QFD 평가는 건물에의 적용 용이성, 재해 대응성, 편안함 등이 사용되었다.

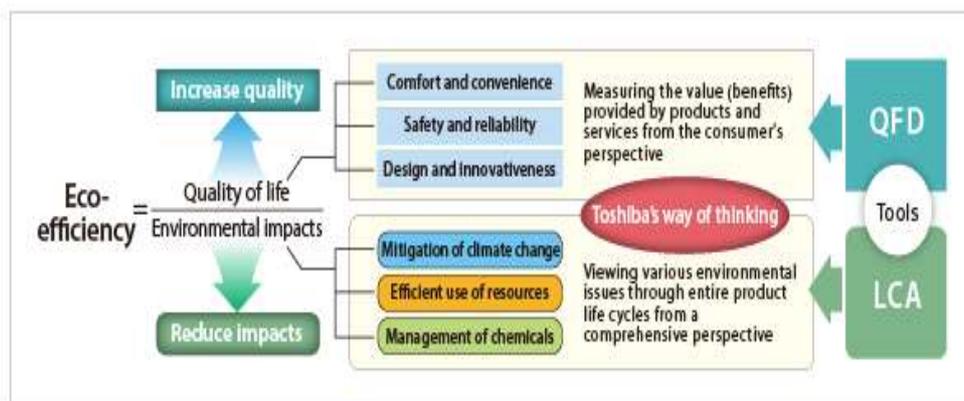


Fig. 2. eco-efficiency evaluation method of Toshiba

독일 화학기업인 BSAF는 제품 전략 설정 및 마케팅 의사소통 도구로 SEEBALANCE(환경, 경제, 사회적 영향을 고려한 도구)를 사용하고 있다. SEEBALANCE 내에 환경·경제 효율성이 포함되어 있는데 경제적 가치는 전과정에서 발생하는 총 비용을, 환경 부하는 탄소 발자국을 포함하는 전과정 평가 결과를 사용한다.

### Eco-efficiency portfolio:

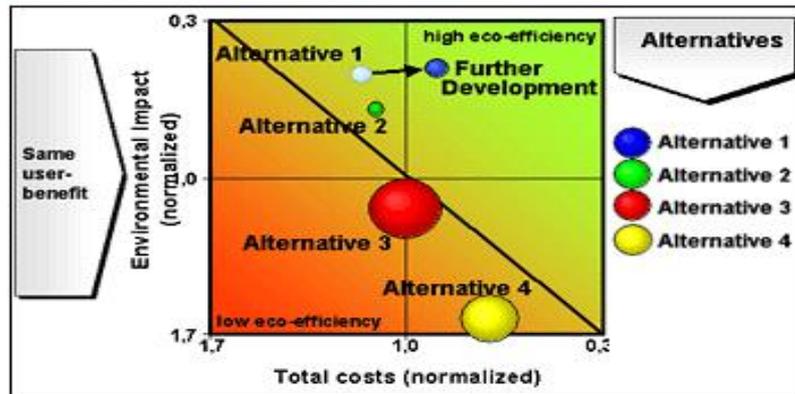


Fig. 3. Eco-efficiency portfolio of BASF

## 2.3 환경·경제 효율성 연구 사례

### 2.3.1. 제품의 환경·경제 효율성 연구사례

일본자동차부품공업협회(Japan Auto Parts Industries Association)는 2005년부터 2007년까지 에코디자인에 대한 연구를 수행하였는데, 이 연구에서 자동차 부품의 환경·경제 효율성 평가 시 경제적 지표로 QFD 평가 점수를 환경적 지표로 전과정평가 점수를 사용하였다.

Shinichiro Nakamura(2007)는 에어컨에 대해서 2002년 제품 대비 2005년 제품의 환경·경제적인 지속가능성을 비교하기 위하여 환경·경제 효율성을 평가하였다. 이 연구에서 환경, 경제 지표로는 전과정평가와 전과정비용(LCC, Life Cycle Cost)을 사용하였다. 연구 결과 2005년의 제품이 사용단계의 효율이 높아지면서 사용 단계의 비용이 크게 감소한 것을 확인할 수 있었으며, 이산화탄소 배출과 매립에서의 환경성도 크게 개선되었다.

최요한, 정인태, 이건모, 김용기(2006)는 전동차의 환경·경제 효율성 평가 방법론을 개발하는 연구를 수행하였다. 이 연구에서 환경성은 부품이 많고 수명이 긴 전동차의 특성을 고려하여 전과정평가 결과를 활용하였다. 실제 사용한 지표는 가장 관심을 많이 받고 있는 지구온난화지수였다. 경제성은 2가지로 구분하여 적용하였는데, 첫 번째 지표는 전동차의 가장 주요한 기능인 인원 수송에 초점을 맞추어 수송실적을 수송 능력으로 나눈 운영효율이었다. 두 번째는 경제적 가치에 중점을 두어 운송사업수익이 선택되었다. 평가 결과 환경·경제 효율성의 차이는 주로 환경영향에 의해 나타났으며, 경제 지표로서 운영효율은 전동차의 운영관리에, 운송사업수익은 이해관계자와의 의사소통과 마케팅에 활용할 수 있을 것으로 나타났다.

김연복, 엄정웅, 이중규(2010)는 세제에 대해 기준 제품(가루형) 대비 평가 제품(시트형)의 환경·경제 효율성을 비교하는 연구를 수행하였다. 환경부하는 제조단계에서 배출된 온실가스의 양으로, 제품의 가치는 세정력으로 설정하였다. 비교 분석 결과 시트형 제품이 가루형 제품보다 환경·경제 효율성이 우수함이 확인되었다. 하지만 이 연구에서는 제품 가치의 지표로 세척력만 고려하였기 때문에 세척력을 높이면서 같이 높아진 제조원가로 인한 소비의 변화를 판명할 수 없다는 한계점을 노출하였다.

### 2.3.2 재활용에 대한 환경·경제 효율성 연구사례

Arne Eik(2001)은 재활용 시스템과 폐기단계에서의 환경·경제 효율성을 평가하기 위해 지표를 산출하는 연구를 수행하였다. 경제적 지표로 재활용 시스템에서는 총 비용을, 환경적 지표로는 전과정평가를 통해 산출된 에너지 소비량 및 CO<sub>2</sub>배출량과 물질의 재활용 비율을 고려하는 것이

적합하다고 하였다. 그러나 경제적인 상황에 따라 다른 경제적인 인자를 활용할 수 있다는 가능성을 제시하였다. 소각과정에서 다이옥신이 발생하거나 재활용 공정 중에 토양, 수계, 대기에 오염 물질이 발생하는 경우에는 환경적으로 특정한 인자(인체독성 등)가 추가적으로 필요 할 수도 있다고 하였다.

정인태, 이상용, 이진모(2005)는 가전제품 폐기단계에서의 환경·경제 효율성을 평가하는 방법론을 개발하기 위하여 폐 세탁기가 재활용센터로 들어와 분해공정(수작업) 및 기계 파쇄와 선별 공정을 거쳐 재질(부품)로 선별 가공되어 원료물질로 사용하는 업체에 가기 전까지를 시스템 경계로 설정하여 연구하였다. 이 연구에서는 재활용된 부품의 가치를 판매 가격으로 설정하고, 환경영향은 전과정평가를 통해 산출한 8개 영향범주를 지표로 사용하였다. 이를 통해 세탁기의 폐기단계에서의 각 재질(부품)별로 환경·경제 효율성을 평가한 결과, transformer가 가장 높게 나타났으며 condenser, motor, clutch, plastic 순으로 나타났다. 그러나 일반적으로 재활용 부품의 판매 가격은 폐기단계에서의 발생하는 비용(회수, 분해선별, 유지관리, 잔재물 처리비용 등)을 반영하지 않아 환경·경제 효율성을 왜곡시킬 수 있다는 우려를 한계점으로 지적하였다.

Jaco Huisman과 Ab L, N. Stebels(2006)는 최적의 폐가전제품 회수시스템(take-back system)을 수립하기 위해 투자금액 대비 환경개선의 성과를 확인 할 수 있는 환경·경제 효율성 평가 방법을 개발하는 연구를 수행하였다. 평가 방법은 델프트 공대에서 개발 한 QWERTY/EE(Eco-efficiency)를 활용하였다. QWERTY는 폐기단계에서의 시나리오를 최소 환경영향 및 최소 비용(최상의 시나리오), 최대 환경영향 및 최대 비용(최악의 시나리오) 및 실제 환경영향 및 비용(현실)의 3가지로 나누어 각 결과간의 거리를 계산하는 사후관리에서의 환경 및 경제 모델이다. 활용 된 경제적 지표는 폐기물 처리 비용 및 수익이 사용되었고, 환경성 지표는 Eco-Indicator'99로부터 산출 된 LCA 값을 활용하였다. 연구를 통해 회유금속을 함유하고 있는 제품에 대한 개선과 회수를 높이는 방향으로 시스템을 설정하는 것이 필요하다는 결과를 얻었다.

APME summary report(2011)는 도시고형폐기물(MSW, Municipal Solid Waste)과 산업 및 유통포장폐기물(IW, Industrial and Distribution Packaging Waste)으로부터 발생 된 플라스틱 포장재 재활용에 대한 환경·경제 효율성을 분석하였다. 이 연구에서는 플라스틱 포장재의 폐기단계에서 매립과 자원회수 및 에너지 회수의 비율에 따른 환경·경제 효율성을 평가하기 위해 경제성 지표로 수집, 선별, 관리(분쇄, 세척, 재활용되기 위한 가공, 연료로서 사용되기 위한 준비)의 비용을 활용하였고, 환경성의 지표로는 전과정평가를 수행하여 나타난 12개의 환경영향을 고려하여 평가하였다. 이에 100% 매립과 15%, 25%, 35%, 50% 및 현재 재활용의 비율로 나누어진 6개 시나리오의 환경·경제효율성을 평가 한 결과 15%의 재활용 비율을 가진 시나리오가 가장 높은 환경·경제 효율성을 보였다. 50%의 재활용 비율의 시나리오는 6개의 시나리오 중 가장 높은 비용과 가장 낮은 환경영향으로 극단적인 결과를 나타내었다. 이를 통해 재활용의 비율을 높이는 것이 우수한 환경·경제 효율성으로 직결되지 않음을 알 수 있었으며 또한 이 평가 방법이 효율적인 폐기물 처리 방안 선정에 활용 될 수 있을 것으로 보인다.

#### 2.4 기업 사례와 연구 사례 분석

앞에서 소개한 기업 사례와 연구 사례를 종합하여 환경·경제 효율성 평가 지표를 정리해 보면 Table 2와 같다.

Table 2.에 정리한 내용을 분석해 보면 환경경제 효율성 평가 시 환경성 지표로는 11개 모두 전과정평가 결과가 사용되었다. 11개 사례 중 2개는 전과정평가 결과의 일부인 온난화 값을 사용하였으며, 1개는 전과정평가를 기반으로 하는 다른 평가 방식이 사용되었다. 경제성 지표는 두 가지로 구분된다. 하나는 비용에 초점을 맞춘 것이며, 다른 하나는 기능, 즉 품질에 초점을 맞춘 것이다. 판매 가격을 고려한 사례도 있었으나 이는 품질 측면으로 판단하였다. 경제성 지표로 비용이 사용된 경우는 주로 재활용에 대한 연구 사례로서 시스템 개발에 목적을 둔 연구였다. 품질을 지표로 사용한 사례는 주로 제품 가치에 대한 평가에서 발견되었다.

Table 2. Eco-efficiency indicators

연구자/ 사례조직	연구/평가 목적	경제성 지표	환경성 지표	비고
후지쯔	내부 목표관리 및 외부 공시	기능 값	LCA 값	
도시바	내부 목표관리 및 외부 공시	QFD 값	LIME 값	LIME은 LCA를 기반으로 함.
바스프	제품 전략 및 마케팅	총 비용	LCA 값	
Arne Eik(2001)	재활용 시스템과 폐기단계에서의 환경·경제 효율성 평가 지표 개발	총 비용	LCA 값	경제적 지표로 순 이익이나 순 매출액 사용 가능
정인태 등(2005)	가전제품 폐기단계의 환경·경제효율성 평가 지표 개발	판매가격	LCA 값	
일본자동차부품공업협 회 (2005-2007)	자동차 부품의 환경·경제효율성 평가 지표 개발	QFD 값	LCA 값	
최요한 등(2006)	전동차의 환경·경제효율성 평가 지표 개발	기능 값	지구온난화지 수	전동차의 경우 기능항목은 인원수송, 운송사업수익
Huisman and Stebels(2006)	Take-Back 시스템 개발	총 비용 및 수익	LCA 값	LCA(Eco-Indicator' 99)
Shinichiro Nakamura (2007)	기존모델과 최신모델의 환경·경제 효율 비교	LCC	LCA 값	
김연복 등(2010)	제품 전략 및 마케팅	기능 값	온실가스 배출량	세제의 경우 기능 항목은 세척력
APME(2011)	효율적인 플라스틱 포장재 재활용 시스템 개발	총 비용	LCA 값	

### 3. 재활용 기술에 대한 환경·경제 효율성 평가 방법론

재활용 기술에 대한 환경·경제 효율성 평가를 위해 프로세스의 범위를 결정하는 것이 중요하다. 재활용을 위해서는 폐기물을 수집, 운반하여야 하며 재활용 공정을 통해 소재가 재생된다. 폐기하는 경우 업무 프로세스를 보면 폐기물을 수집, 운반하고 매립 또는 소각 등의 방법으로 폐기물을 처리한다. 여기에 재활용을 통해 재생된 소재를 자연으로부터 만들어내는 프로세스가 포함된다. 재활용 프로세스와 폐기 프로세스의 범위를 넓히면 연구 및 인프라 구성 관련 내용이 포함된다. 이를 비교하여 나타내면 Fig. 5와 같다.

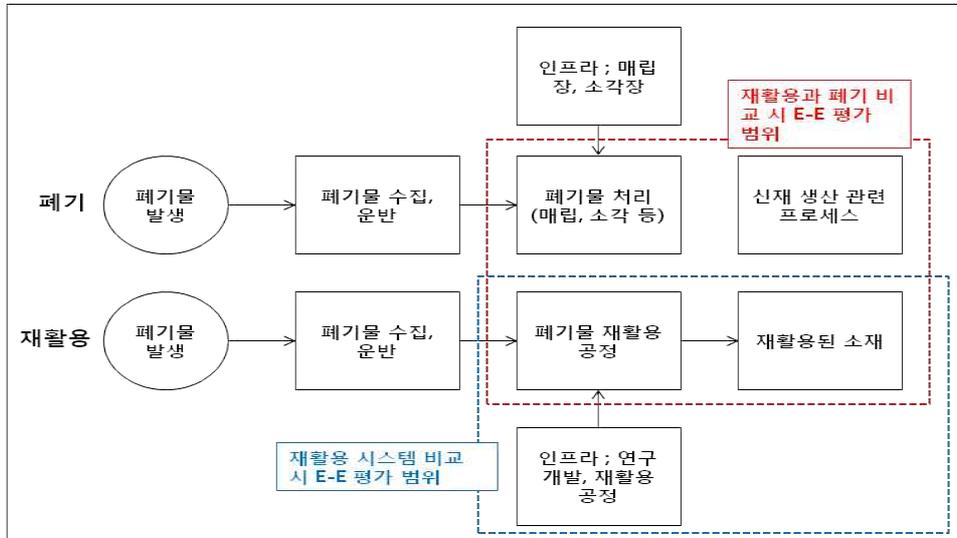


Fig. 5. Comparison of recycling processes and disposal processes

### 3.1 재활용 시스템 비교 시 환경·경제 효율성 평가 방법론

환경·경제 효율성은 비교를 통해 환경·경제적 개선의 정도를 나타내는 것이 의미가 있는 것이기 때문에 평가 목적에 따라 지표가 달라질 수 있다. 재활용 방법 또는 제도 간의 비교를 위해서는 재활용과 관련된 모든 프로세스를 고려하는 것이 적절할 것이다. 이 경우 경제적 가치로 비용 측면이 중요하다. 폐기물 처리 기준의 비교를 위한 선행 연구에서 경제적 가치는 비용 측면(Eik, Huisman, Nakamura, APME)이 주로 사용되었다. 이 평가는 어떤 재활용 시스템에 우수한지, 어떤 재활용 기술이 더 가치가 있는지를 결정하는데 도움을 줄 수 있을 것이다. 일반적으로 재활용 시스템이 다르더라도 폐기물의 수집, 운반에 대한 내용을 유사할 것이기 때문에 폐기물수집 및 운반 공정은 제외해도 무방할 것이다.

$$\text{Eco-efficiency for 재활용 시스템 비교} = \frac{\text{재활용된 소재의 가격} * - \text{재활용 인프라 및 운영 비용}}{\text{재활용 공정에 대한 LCA}}$$

\* : 가격은 품질 조건을 고려하여야 한다.

### 3.2 재활용과 폐기 비교 시 환경·경제 효율성 평가 방법론

폐기물을 재활용하는 경우와 폐기 처리하는 경우를 비교하기 위한 환경·경제 효율성 평가는 Fig. 5. 에 명시된 폐기와 재활용간의 프로세스를 비교하여야 한다. 이 경우 재활용된 경제적 가치가 신재와 재활용된 소재가 비교의 핵심이 된다.

$$\text{Factor} = \frac{\text{재활용된 소재의 환경·경제 효율성}}{\text{폐기 처리 및 신재의 환경·경제 효율성}}$$

폐기물의 수집, 운반 프로세스에서는 수집과 운반에 비해 분류 과정에 대한 비용과 환경부하가 재활용 과정에 추가될 것이다. 이 비용과 환경부하가 재활용 공정에 포함되어 있다면 수집, 운반 프로세스를 제외하여도 무방할 것이다. 인프라 관련 내용은 신재 인프라와 재활용 인프라의 비교

가능성이 매우 낮으며, 폐기물 처리를 위한 인프라는 평가 대상이 되는 폐기물에 대한 연관성을 정량적으로 파악하는 것에 한계가 있기 때문에 제외한다.

폐기와 재활용의 비교 목적은 다양한 이해관계자와의 의사소통에서 가장 중요하다. 폐기하는 것보다 재활용하는 것이 얼마만큼 가치 있는 것인지에 대한 결과는 정책 및 제도 수립에 영향을 미치기 때문이다. 선행 연구에서 의사소통을 위한 평가 시 경제적 가치로는 품질(후지쯔, 도시바, 최요한, 김연복)과 가격(정인태, 최요한)이 주로 사용되었다. 환경 부하는 전과정 평가가 주도적이었으며, 온실가스 관련 부하에 집중한 사례도 있었다(최요한, 김연복).

**재활용된 소재의 가격\***

**재활용 공정 LCA**

$$\text{Factor} = \frac{\text{신재 가격} - \text{폐기물 처리 비용}}{\text{신재 LCA} + \text{폐기물 처리 LCA}}$$

\* : 가격은 품질 조건을 고려하여야 한다.

#### 4. 결론

재활용 기술에 대한 가치를 보다 합리적으로 평가할 수 있는 방법으로 환경·경제 효율성 평가 기법을 활용하여 재활용 시스템을 비교하는 경우와 재활용과 폐기를 비교하는 경우로 나누어 제안하였다. 기업 사례와 선행 연구 사례를 조사하여 평가 대상 및 목적에 따른 경제성 지표와 환경성 지표를 정리하였으며, 재활용 및 폐기 프로세스 범위를 규정한 후 선행 사례 분석 결과와 접목하였다. 연구 결과 재활용 시스템을 비교하는 경우에는 폐기물의 수집과 운반을 제외한 전 재활용 프로세스에 대해 재활용재의 가격과 총 비용, 그리고 전과정 환경 부하를 중심으로 환경·경제 효율성을 평가하고, 재활용과 폐기를 비교하는 경우는 재활용재와 신재의 생산 공정에 초점을 맞추고 폐기물의 폐기 공정을 부가적으로 포함하여 환경·경제 효율성을 평가하는 방법을 제시하였다.

DeSimone과 Popoff(1997)가 강조한 지표 선정 원칙을 참조하여 용도와 이용 가치에 적합하도록 지표를 제안하였으나, 전체 프로세스를 포함하지 못하는 한계점이 있음을 밝혀 둔다. 환경·경제 효율성은 궁극적으로 최적의 환경·경제 효율성을 달성하기 위한 과정(DeSimone and Popoff, 1997)이므로 실제적인 평가 적용을 통해 본 연구에서 제안한 기법이 지속적으로 개선되기를 기대한다.

#### 5. 사사

본 연구는 폐금속·유용자원재활용기술개발사업단의 폐자원별 환경·경제 효율성 평가를 통한 사업성과 분석 과제에 포함되어 수행되었습니다.

## 6. 참고 문헌

- (1) 김연복, 엄정웅, 이종규, "국내기업의 제품 환경경제효율 도입 사례", 환경경영연구, 8(2), pp. 95-113(2010)
- (2) 박지혜, 옥해명, 차경훈, 허탁, "국내 전기전자 산업의 에코효율성 측정 및 평가 동향", Korean Journal of LCA, 7(1), pp. 33-38(2006)
- (3) 박필주, "생산자와 소비자의 의사소통 도구로서의 생태효율성 - 제품 및 기업 레벨을 중심으로" -, TEN 전문가 분석 리포트(2006. 5)
- (4) 정인태, 이상용, 이건모, "가전제품 폐기단계의 생태효율성", 대한환경공학회 춘계학술발표논문집, 2005(0), pp. 737-741(2005)
- (5) 최요한, 정인태, 이건모, 김용기, "전동차 생태효율성(Eco-efficiency)방법론 개발"(2006)
- (6) 홍승용, 박승욱, 김연복, 김종대, "QEFD를 활용한 제품 환경효율성 측정 사례 연구", Journal of Korean Society for Quality Management, 41(2), pp. 197-208(2013)
- (7) Arne Eik, "Indicators for Eco-efficiency in Recycling Systems", The Science and culture of Industrial Ecology-conference, Leiden, pp. 12-14. November(2001)
- (8) Chiu A.S.F., "Synthesis speech: Asia Pacific outlook.", Proceedings of the 5thAsiaPacificroundtablefor cleaner production (APRCP5), (2004)
- (9) Department of the Environment, UK, " Landfill design, construction and operational practice", waste management paper no. 26B, London: Crown Copyright, (1995)
- (10) Jaco Huisman, Ab L, N. Stebels, "Eco-Efficiency of Take-Back and Recycling, a Comprehensive Approach", IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRONICS PACKAGING MANUFACTURING, 29(2), pp. 83-90(2006)
- (11) John R Ehrenfeld, "Eco-efficiency Philosophy, Theory, and Tools", Journal of Industrial Ecology, 9(4), pp 6-8(2005)
- (12) Plastics Europe, "Assessing the eco-efficiency of plastics packaging waste recovery", APME summary report, (2011)
- (13) Satoshi Oikawa, Katsuji Ebisu, Kensuke Fuse, "Fujitsu's Approach for Eco-efficiency Factor", Fusitsu Sci. Tech. J., 41(2), pp. 236-241(2006)
- (14) Shinichiro Nakamura , "Evaluating eco-efficiency of appliances by integrated use of hybrid LCA and LCC tools", CIRP 14th, pp. 445-448(2007)
- (15) Shun Fung Chiu , Jon V. Ward , Guillaume Massard, "Introduction to the special issue on Advances in Life-Cycle Approaches to Business and Resource Management in the Asia-Pacific Region" Journal of Cleaner Production, 17, pp. 1237-1240(2009)
- (16) WBCSD , "Eco-efficiency-Creating More Value with Less Impact"(2000)
- (17) Zhu Minghua, Fan Xiumin, Alberto Rovetta, He Qichang, Federico Vicentini, Liu Bingkai, Alessandro Giusti, Liu Yi, "Municipal solid waste management in Pudong New Area, China", Waste Management, Vol. 29, pp. 1227-1233(2009)
- (18) <http://www.toshiba.co.jp/env/en/products/ecp/factor.htm>
- (19) <http://www.basf.com/group/corporate/en/sustainability/eco-efficiency-analysis/eco-efficiency-analysis>
- (20) <http://stat.me.go.kr/nesis/main.do> 환경부 환경통계포털