

폐기물처리시설의 환경효율성 평가 방법론에 관한 연구

이소라¹ · 임혜숙^{1,2,*}

¹한국환경정책평가연구원 자원순환연구실

²서울대학교 에너지시스템공학부

A Study on the Methodology for Evaluating Eco-Efficiency of Waste Treatment Facilities

Sora Yi¹ · Hye Sook Lim^{1,2,*}

¹Division for Resource Circulation, Korea Environment Institute,

²Department of Energy Systems Engineering, College of Engineering, Seoul National University

요 약

본 연구는 폐기물처리시설에 대한 환경성 평가와 경제성 평가를 활용하여 환경효율성을 평가하기 위한 방법론을 구축하였다. 환경성 평가를 위하여 전과정평가를 활용하였으며, 제안된 환경효율성 방법론을 바탕으로 하여 개별 처리시설의 환경효율성을 도출하였다. 분석된 환경효율성 자료를 바탕으로 환경효율성 향상을 위한 주요 요소를 폐기물처리시설별로 도출하였다.

주제어: 전과정평가, 폐기물처리시설, 환경효율성 평가, 환경효율성 향상 요소

ABSTRACT: This study established a methodology for evaluating eco-efficiency by utilizing environmental evaluation and economic evaluation for waste treatment facilities. Life-cycle assessment was used for environmental assessment, and the eco-efficiency of individual treatment facilities was derived based on the proposed methodology. Based on the analyzed eco-efficiency results, key factors for improving environmental efficiency were derived from waste treatment facilities.

Key words: Life-cycle Assessment, Waste Treatment Facility, Eco-efficiency Evaluation, Factors for improving eco-efficiency

1. 서 론

환경효율성이란 제품과 서비스의 환경적 측면을 나타내는 환경지표 중 하나이다. 이는 제품과 서비스의 생산 및 제공 과정에서 환경영향을 최소화하여 더 큰 가치를 창출하는 개념을 지표화한 것으로 볼 수 있다. 일반적으로 환경에 미치는 영향은 전과정평가(Life-Cycle Assessment; 이하 LCA)를 활용하여 평가하지만, 가치에 대해서 평가할 때는 대상 제품과 서비스의 종류에 따라 다양한 지표와 형태로 나타난다. 환경효율성의 개념과 관련 지표를 그림으로 표현하면 다음과 같다.^[1]

세계 지속가능발전 기업협의회(WBCSD) (2006)^[2]는 환경효율의 정의를 '인류의 욕구와 생활의 질을 만족시킬 수 있는 시장 재화와 용역의 제공을 포함하며, 라이프사이클을 통해 제품의 생태영향과 자원 집약도를 최소한 자국의 추정 포용능력에 맞는 수준까지 전향적으로 감소시키는 것'으로 제안하였다.

환경효율성의 산정 방법은 국제적으로는 국제표준화기구의 전과정평가(ISO 14040)와 연계하여, 환경효율성 표

준화 작업(ISO 14045)에 의해 여러 가지 형태로 적용된다. 일반적으로 환경효율성은 제품과 서비스의 환경영향 대비 가치를 일컬으며, 환경효율의 개선도 평가를 위한 지표로서 "팩터(factor)"를 활용하고 있다. 팩터는 어느 기준점에 대한 환경효율성의 개선도를 의미하는 지표로서, 활용되는 상황에 따라 해석하는 방법이 달라지게 된다. 환경효율성 지표는 환경보전과 경제활동의 양립을 목표로, 제품·서비스의 가치 향상과 환경부하 절감이라는 양 측면에 모두 유효하게 활용할 수 있는 지표이다.

본 연구에서는 폐기물처리시설을 대상으로 환경성 평가 및 경제성 평가를 활용하여 환경효율성을 평가할 수 있는 방법론을 구축하고 폐기물처리시설별 주요 환경효율성 향

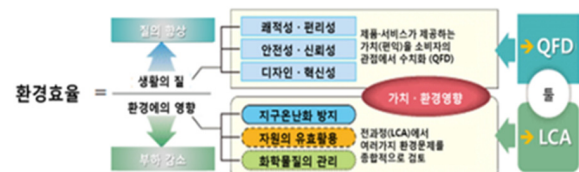


Fig. 1. Concept of eco-efficiency and related indicators.

* Corresponding author: 임혜숙, Email: hslim@kei.re.kr

Table 1. Current status of eco-efficiency indicators in Korea.

분야	분석지표	환경성 인자	환경경제효율성 수식
공업용수 사용 수준	RP-Water	공업용수 사용량	$\frac{\text{산업별 부가가치 [백만원]}}{\text{산업별 공업용수 사용량 [m}^3\text{]}}$
			$\frac{\text{산업별 부가가치 [백만원]}}{\text{산업별 자원사용량 [톤]}}$
자원 사용 수준	RP-Resource	광물자원 사용량	$\frac{\text{산업별 부가가치 [백만원]}}{\text{산업별 자원사용량 [톤]}}$
	EE-Carbon	온실가스 배출량	$\frac{\text{산업별 부가가치 [백만원]}}{\text{산업별 탄소 배출량 [톤CO}_2\text{ eq.]}}$
환경친화 수준	EE-Airborne	대기오염물질 배출량	$\frac{\text{산업별 부가가치 [백만원]}}{\text{산업별 대기오염물질 배출량 [kg]}}$
	EE-Waterborne	폐수 배출량	$\frac{\text{산업별 부가가치 [백만원]}}{\text{산업별 폐수 배출량 [m}^3\text{]}}$
	EE-Waste	폐기물 발생량	$\frac{\text{산업별 부가가치 [백만원]}}{\text{산업별 폐기물발생량 [톤]}}$

상 요소를 도출하였다.

2. 환경효율성 평가 사례분석

2.1 환경효율성의 개념

2.2 환경효율성 관련 국내 연구 사례

2.2.1 환경효율성지표 구축

국가청정생산지원센터^[3]에서는 ‘산업환경통계’의 일환으로서 환경자원의 효율적 이용, 경제적 성과 창출, 환경영향의 최소화를 골자로 한 ‘환경경제효율성’ 통계자료를 구축하고 있다. 9차 한국표준산업분류에 따라 중분류 기준으로 제조업을 24개 산업군으로, 환경친화적 산업구조에 관한 법률¹⁾에 명시된 광업, 전기 등을 포함한 26개 산업군으로 분류하였다. 그리고 환경성 지표의 대표성, 통계조사가 가능성, 가공가능성 등을 고려하여 용수, 자원 소비량 및 온실가스, 대기오염물질, 폐수, 폐기물 발생량에 대한 6개 지표를 설정하였다(Table 1).

2.2.2 폐기물 관리 및 재활용 등의 환경효율성 연구 사례

2.2.2.1 재활용 환경효율성

정인태 등(2005)^[4]은 가전제품 폐기단계의 환경효율성을 산출하기 위해 제품 각 부품 및 재질에 대하여 전과정평가를 수행하고 환경효율성 평가를 위한 방법론을 연구하였다. 최종 소비자에 의해 배출된 폐세탁기가 리사이클링 센터에 투입된 후, 해체·기계 파쇄/분해를 거쳐 재질로 선별 가공되어 다른 업체에 가기 전까지를 시스템 경계로 설정하였다. 환경효율성 분석을 위한 환경영향은 전과정평가로 나타내고 경제지표에서 선별 가공하여 재활용한 부품의 가치를 판매가격으로 설정하였다. 폐기 단계의 세탁기의 부품별 환경효율성을 평가한 결과, transformer가 가장 높았으며 condenser, motor, clutch, plastic 순으로 높

았다.

양인목 등(2013)^[5]은 재활용 기술·시스템 비교를 위한 환경·경제 효율성 평가와 재활용과 폐기의 비교를 위한 환경·경제 효율성 평가방법론을 제안하였다. 환경·경제 효율성은 비교를 통해 환경적, 경제적 개선 정도를 나타내므로 평가 목적에 따라 지표가 달라진다. 재활용 기술·시스템 간 비교를 위한 환경·경제 효율성 평가는 재활용 시스템 또는 재활용 기술의 가치우위를 결정하는 데 도움이 될 것으로 보이며, 재활용과 관련된 모든 공정을 고려하고, 경제적 요소인 비용이 중요하다. 그 외의 요소인 폐기물의 수집, 운반에 대한 내용은 일반적으로 유사하므로 관련 공정은 제외해도 무방할 것으로 보인다. 제안된 평가 방법을 수식으로 표현하면 다음과 같다(Fig. 2).

폐기물을 재활용하는 경우와 폐기하는 경우를 비교하기 위한 환경·경제 효율성 평가는 폐기 과정과 재활용 과정의 공정비교와 재활용 소재와 신재의 경제적 가치 비교가 중요한 평가요소이다. 재활용 공정에는 폐기물 수집 및 운반 단계의 분류 과정에 필요한 비용과 환경부하를 고려해야 한다.²⁾ 관련 인프라를 평가하는 경우, 신재와 재활용 인프라에 대한 비교 가능성은 낮은 편이며, 폐기물 처리 인프라는 폐기물과의 연관성을 정량적으로 파악하는 것이 어렵기 때문에 제외된다. 폐기와 재활용을 비교하여 각각의 공정에 따른 가치 비교에 대한 결과는 관련 정책과 제도의 마련에 시사점을 줄 수 있다. 양인목 등(2013)에서 제안된 평

$$\text{Eco-efficiency} = \frac{\text{재활용된 소재의 가격} * \text{재활용 인프라 및 운영비용}}{\text{재활용 공정에 대한 LCA}}$$

*: 가격은 품질 조건을 고려해야 함

자료: 양인목 등(2013)

Fig. 2. Eco-efficiency evaluation method proposed when comparing recycling systems.

1) 환경친화적 산업구조로의 전환촉진에 관한 법률
 2) 다만, 해당과정이 재활용 공정에 포함되어 있다면 제외하여도 무방하다.

가 방법을 수식으로 표현하면 다음과 같다(Fig. 3).

2.2.2.2 환경효율성 평가방법

Arne Eik(2001)^[6]는 WBCSD의 개념에서 출발하여, 재활용 시스템의 환경효율성을 평가하기 위한 새로운 지표를 제시하였다. 기존에 제시된 경제성 지표(제품/서비스 생산 또는 판매와 순 매출액 등), 환경영향 지표(에너지 소모, 용수 사용, 물질 소모, 온실가스 배출, 오존층 파괴물질 배출 등)을 기반으로 재활용 시스템에 적용 가능한 지표를 새로 제안하였다. 순 매출액의 경우 재활용 소재의 품질과 시장에서의 경제적 가치를 제대로 반영하기 어려워 총비용을 지표로 사용할 것을 제안하였다. 환경부하는 재활용률, 총 에너지 소모량, 총 CO₂ 배출량을 제시하고, 물질 소모량과 용수 사용량 등은 재활용 시스템에 대하여 환경효율성을 평가하기에는 적합하지 않은 지표로 판단하였다. 그리고 기존의 재활용 시스템을 개선하거나 변경할 때에는 적용 대상별로 시스템 전과정에서 가장 큰 영향을 미치는 부분을 특정한 지표로 개발할 필요가 있음을 제시하였다. 특정한 지표의 예시로는 재활용된 물질의 가격, 재활용된 제품의 양(kg) 등이 있다.

Plastic Europe(2011)^[7]은 재활용 비율과 환경효율성은

$$\text{Factor} = \frac{\text{재활용된 소재의 가격}}{\text{재활용 공정 LCA}} \div \frac{\text{신재 가격} - \text{폐기물 처리 비용}}{\text{신재 LCA} + \text{폐기물처리 LCA}}$$

자료: 양인목 등(2013)

Fig. 3. Eco-efficiency evaluation method proposed when comparing recycling and disposal.

정비례 관계가 아니며, 환경효율성 평가 방법은 효율적인 폐기물 처리방안을 고려하는 데 활용될 수 있다고 제안하였다.

본 연구에서 분석한 환경효율성 평가방법 연구·적용 사례와 지표 사례를 각각 Table 2와 Table 3과 같이 정리하였다.

3. 환경효율성 평가 방법론 구축

환경효율성은 환경영향에 대한 경제적 가치로 나타난다. 본 연구에서는 처리시설의 환경영향으로는 전과정 평가를 통하여 도출된 처리시설의 환경부하를 환경영향으로 활용하였다. 전과정평가는 시스템의 전과정에 관련된 투입물과 산출물의 잠재된 환경영향을 평가하는 방법론이므로 시설의 운영에서 발생하는 환경영향을 반영하고 있기 때문이다. 그리고, 처리시설에서 창출되는 경제적 가치는 처리시설의 운영에 필요한 비용과 창출되는 수익을 활용하고자 하였다. 처리시설에서는 폐기물 처리 과정에서 여러 부수적인 수익이 발생한다. 이는 폐기물 처리를 통하여 발생하는 경제적 가치를 반영한다고 볼 수 있다.

3.1 환경성 평가

환경성 분석은 폐기물처리시설별 전과정평가를 통하여 분석하였다. 전과정평가는 크게 시나리오 개발 및 자료 수집, LCI 구축 및 LCA 평가, 종합검토의 세 가지 단계로 나뉜다.

3.2 경제성 평가

경제성을 평가하기 위해 경제적 비용과 편익항목을 설정하고 계량화 하는 것이 필요하다.

Table 2. Research on eco-efficiency evaluation method and application cases.

연구자/사례조직	연구/평가 내용
Arne Eik ^[6]	<ul style="list-style-type: none"> WBCSD의 환경효율성 개념에서 시작하여 재활용 시스템에서의 환경효율성 평가방법 제안 환경영향 지표: 재활용 비율, 총 에너지 소모량, 총 CO₂ 배출량 경제성 지표: 총비용 경제적인 상황에서 총비용이 아닌 다른 인자의 사용 가능성을 제시 재활용 공정에서 오염물질이 배출되는 경우 환경부하 지표에 인간독성과 같은 특정 지표를 추가로 사용 가능
Jaco Huisman [*]	<ul style="list-style-type: none"> 폐가전제품 회수시스템의 개선을 위한 환경효율성 평가 연구를 수행 환경영향 지표: QWERTY/EE(Eco-efficiency) 경제성 지표: 폐기물 처리비용 및 수익 연구결과 제품 중 희유금속의 함유에 대한 개선 필요, 폐가전제품 회수시스템의 경우 제품 회수를 높이는 방향으로 개선 필요
Plastic Europe ^[7]	<ul style="list-style-type: none"> 유럽(15개의 EU회원국)의 플라스틱 포장폐기물에 대해 폐기물 처리 시나리오에 따른 환경효율성 분석 환경영향 지표: 자원고갈, 연료자원고갈, 지구온난화 등 12개 범주를 고려하여 전과정평가를 수행 경제성 지표: 수집, 선별, 관리 비용 폐기물 처리 시나리오: 재활용 비율 15%, 25%, 35%, 50%인 경우로 설정하여 매립률 100%의 경우, 현재 재활용 비율에 의한 환경효율성과 비교 연구결과 재활용 비율 15%: 환경효율성이 가장 좋게 나타남 재활용 비율 50%: 가장 낮은 환경성을 보이나, 경제적 비용이 높아 환경효율성이 낮음 재활용 비율 25% 및 35%: 비슷한 환경성을 보이며, 경제적 비용에서 재활용 비율 25%가 더 낮게 나타남

*: 양인목 등(2013)에서 재인용

Table 3. Indicators for evaluating eco-efficiency.

연구자/사례조직	연구/평가 목적	경제성 지표	환경성 지표	비고
Anne Eik (2001)*	재활용 시스템과 폐기단계의 환경·경제 효율성 평가지표 개발	총비용	LCA 값	경제적 지표로 순이익이나 순 매출액 사용 가능
정인태 외(2005)*	가전제품 폐기단계의 환경·경제효율성 평가지표 개발	판매가격	LCA 값	
일본자동차부품공업협회 (2005-2007)	자동차 부품의 환경·경제효율성 평가지표 개발	QFD 값	LCA 값	
Shinichiro Nakamura (2007)*	기존모델과 최신모델의 환경·경제 효율 비교	LCC	LCA 값	
APME (2011)*	효율적인 플라스틱 포장재 재활용 시스템 개발	총비용	LCA 값	
양인목 등(2013)	재활용 기술에 대한 평가방법 연구	소재가격 및 총비용	LCA 값	

*: 양인목 등(2013)에서 재인용

Table 4. LCA by waste treatment facility.

시나리오 개발·자료 수집	<ul style="list-style-type: none"> 대상 시설의 규모별, 공정별 특성 파악을 통한 시나리오 선정 공정 및 운영단계와 생산품 수송, 생산품 소각 등 단계별 시나리오 작성 폐기물처리시설에서 운영평가시스템을 통해 입력 자료 확보
LCI 구축·LCA 평가	<ul style="list-style-type: none"> 대상 시설의 연료사용량, 약품사용량, 폐기물 반입량, 폐기물 조성, 대기 및 수질 배출현황을 근거로 LCI를 구축 영향평가에는 자원고갈, 지구온난화, 오존층파괴, 광화학스모그, 산성화, 부영양화, 생태독성, 인간독성의 8개 항목 포함 TOTAL 5.0 프로그램 활용하여 LCA 평가
종합 검토	<ul style="list-style-type: none"> 수집운반, 공정 및 운영단계, 생산품 수송, 생산품 소각, 회피효과 등 과정별 LCA 결과 검토 물질 재활용 등 기타 처리방법에 의한 RDF 품질 변화에 따른 영향 정도 파악 효율·수송방법별 영향 정도 파악 시설별·규모별 민감도 분석 실시

비용 항목으로는 조사대상 시설들에 대해 시설 고정비용, 연료비용 및 운영비용, 처리용량 및 설비 이용률 등을 조사하였다. 조사된 자료를 바탕으로 시설 투자비용과 연간 운영비용을 추정하고, 비용을 현재가치화 하기 위하여 감가상각률, 할인율, 물가상승률 및 자본회수계수 등을 반영하였다. 본 연구에서는 환경비용을 고정배출원 및 이동배출원에 따른 대기오염 피해비용으로 정의하고 이를 기반으로 분석하였다. 고정배출원의 경우 SOx, NOx, CO 및 먼지의 연간 배출량과 오염물질 원단위 대기오염 피해비용을 바탕으로 고정배출원에 따른 환경피해비용을 산출하였다. 이동배출원의 경우, 단위 거리 수송에 따른 환경피해비용을 고려하여, 발생한 폐기물이 시설로 반입되는 과정에서 발생하는 비용을 고려하였다.

편익 항목으로 각 시설에서 판매하는 에너지 판매, 재활용 판매 및 기타 수익을 선정하였다. 고품연료시설의 경우 고품연료 판매 수익을 조사하였으며, 발전시설의 경우 전력 판매수익, 소각시설의 경우 열공급에 따른 판매수익을

조사하여 이를 수익항목에 적용하였다. 사회적 편익으로는 온실가스 감축 효과편익, 민원 발생에 따른 주민 지원금의 2가지 항목을 고려하여 선정하였다. 그러나, 주민지원금의 경우, 모든 조사대상시설이 주민지원금이 별도로 책정되지 않아 해당 값을 배제하였다. 온실가스 감축 편익의 경우, 소각시설과 연료화 및 연료화 발전 시설별 온실가스 배출량을 계산하여 동일 규모 소각시설 대비 온실가스 배출량이 클 경우에는 (-)편익으로, 소각시설 대비 배출량이 적을 경우에는 (+)편익으로 고려하였다.

항목별 조사된 내용을 바탕으로 직접적 비용 편익, 환경적 비용 편익, 사회적 비용 편익을 각각 산정하고, 감가상각비, 설비 운영비와 기타 비용과 편익을 산정하여 비용과 편익의 합을 각각 구하였다. 특히 경제성 분석결과를 평가할 수 있는 톤당 처리비, B/C비율(편익·비용 비율), 순현재가치 등을 산출하였다.

3.3 환경효율성 평가 방법론 구축

환경성 및 경제성 평가를 통하여 분석된 결과를 바탕으로 환경효율성 평가 방법론을 구축하고 폐기물처리시설의 환경효율성을 평가하였다. 환경효율성이 제품과 서비스의 생산 및 제공 과정에서 환경영향을 최소화하여 더 큰 가치를 창출하는 개념을 지표화한 것임에 따라, 처리시설의

환경성 평가를 위해 주요 요소에 대해 전과정평가를 수행하여 톤당 발생하는 환경영향을 산정하였다. 전체 환경영향에는 폐기물 수송으로 인한 환경영향, 폐기물 처리 시 발생하는 환경영향, 자원이나 에너지 회수에 의한 회피효과가 모두 포함되었다.

경제성 평가를 위해 시설 고정비용, 연료비용 및 운영비용 등을 조사하여 시설 투자비용과 연간 운영비용을 계산하고, 감가상각률, 할인율 등을 반영하여 현재가치로 환산하였다. 환경비용으로는 폐기물처리시설의 배출가스, 폐수, 악취 등 고정배출원의 환경비용을 산정하였다. 산정된 경제성 평가결과를 톤당 처리비용으로 평가하였으며 본 연구에서는 운영비용에서 수익을 차감하는 경우를 기준으

로 하여 환경효율성 계산에 활용하였다.

본 연구에서는 회피효과(소각열 이용, 바이오가스 판매 등)를 경제적 평가와 환경성 평가에서 중복 반영하지 않도록 환경성 평가에서 회피효과는 제외하고 직접적인 환경부하만 산정하여 환경효율성을 평가하였다. 환경효율성 평가식은 기존의 환경효율성 개념과 제안 식들을 바탕으로 본 연구 대상에 적합한 형태로 변형하였다. 우선 환경효율성을 정의에 따라 간략히 표현하면, $\frac{\text{경제성}}{\text{환경영향}}$ 이므로, 이는 본 연구에서 $\frac{\text{시설수익} - \text{운영비용}}{\text{시설의 환경영향}}$ 을 의미하게 된다. 이러한 개념에 따르면, 경제적 가치가 높을수록 또는 환경부하가 적을수록 환경효율성은 좋아지지만 경제적 가치가 음수 값을 가질 때, 일반적인 계산식을 따르면 환경효율성 평가 시 오류가 발생할 가능성이 있다. 경제적 가치(시설수익-운영비용) 값이 음수인 두 시설을 비교할 때, 환경영향이 작은 시설의 환경효율성이 더 작게 나타나게 된다. 예를 들어, 두 폐기물 처리 시설 A, B의 경제적 가치가 동일하게 '-1'이고 A 시설의 환경영향이 10, B 시설의 환경영향이 100이라면 개념적으로는 A 시설이 더 친환경적인 시설이다. 그러나, 일반적인 계산식으로 따라 계산할 시 A 시설의 환경효율성은 -0.1, B 시설의 환경효율성은 -0.01 로 B 시설의 환경효율성이 더 큰 값을 가지게 되어 B가 더 친환경적으로 보이게 되는 오류가 발생할 수 있다.

이에 본 연구에서는 이러한 오류를 방지하기 위하여, 일부 음수 값을 가지는 경제적 가치를 양수 값으로 전환하고자 하였다. 산정된 모든 경제적 가치의 결과 값에 일정한 정수값을 더하여 모두 양수 값으로 일차 전환하였다. 그리고 일반적인 계산식으로 환경효율성을 산정하고, 다시 같은 값(앞서 더한 일정한 정수 값)을 차감하여 원래의 경제적 가치로 복원시키는 수치이동 방법을 사용하여 환경효율성을 계산하였다. 따라서 본 연구에서 환경효율성 평가 시 사용한 산정식은 다음과 같이 정리할 수 있다.(수식 1)

$$\text{환경효율} = \frac{(\text{수익} - \text{운영비용}) + \text{수치이동 값}}{\text{회피효과를 제외한 환경부하}} - \text{수치이동 값} \dots (1)$$

실제 계산에 반영한 수치이동 값은 본 연구 대상의 특이성으로 추가한 요소이며 계산과정에서 가감됨에 따라 최종적으로는 사라지는 값이 된다. 따라서, 이러한 추가적인 특이 요소를 제외하고 환경영향과 처리시설의 발생가치 등의 주요 개념만을 정리하면 본 연구에서 제안하는 환경효율성 평가방법론은 다음과 같이 개념화 할 수 있다(수식 2).

$$\text{환경효율성} = \frac{\text{물질, 에너지 재활용 수익} - \text{처리시설 건설 및 운영 비용}}{\text{처리시설별 환경영향}} \dots (2)$$

4. 폐기물처리시설별 환경효율성 주요 요소 도출

실제 폐기물처리시설에 대한 환경효율성 평가를 수행하

고 도출된 결과를 바탕으로 폐기물처리시설별 환경효율성에 영향을 주는 주요 요소를 분석하였다.

평가대상 시설은 폐기물처리방법별로 지역, 규모, 처리 유형 등을 고려하여 선정하였다. 특히 기존에 수행된 폐기물 처리시설에 대한 실태평가⁸⁾ 자료를 활용하여 해당 평가에서 우수시설로 평가된 시설과 그렇지 않은 시설이 모두 포함되도록 하였다. 처리방법별로 5개 그룹(중량제봉투 폐기물: 소각시설, 가연성폐기물 연료화시설, 매립시설; 음식물류폐기물: 유기성폐기물 바이오가스화시설, 음식물류 폐기물 자원화시설)의 79개 시설을 1차 대상으로 선정하고, 각 시설에서 제출한 자료와 평가결과의 신뢰도를 고려하여 최종적으로 42개 시설을 선정하고 선정된 시설의 환경성 및 경제성을 분석하였다. 폐기물처리시설의 규모에 대한 영향을 파악하기 위하여 소형시설(100 ton/일 미만), 중형시설(100 ton/일 이상~300ton/일 미만), 대형시설(300 ton/일 이상)으로 구분하였다. 세부시설 유형은 음식물류폐기물 자원화시설의 경우 자원화 방식별로 감량화·사료화·퇴비화 시설로, 매립시설의 경우 불연물 매립시설·일반 매립시설로 구분하여 선정하였다.

소각시설의 환경성 분석 결과 소각열 이용(스팀 자체 이용 및 판매, 전기 자체이용 및 판매)이 자원고갈, 지구온난화 등의 범주에서 환경성을 낮추는 역할을 하였다. 그러나 대기오염물질 배출과 에너지 사용량이 높을수록 환경성이 높아져 환경효율성에 영향을 미쳤다. 경제성 분석결과, 소각열 이용이 많은 시설에서는 운영비가 낮아지는 것으로 나타났다.

가연성폐기물 연료화시설의 경우, SRF 판매에 의한 회피효과가 환경성을 높이는 역할을 하였다. 생산한 SRF의 저위발열량도 환경성에 영향을 주었으며, 폐기물 건조공정의 사용 연료로 인해 환경영향이 크게 나타났다. 에너지 사용량이 높을수록 환경성은 낮게 도출되었고 운영비가 적을수록 환경효율성이 높았다.

매립시설은 반입 폐기물 성상이 환경성에 큰 영향을 주었다. 일반 매립시설에서 매립가스 이용으로 회피효과 발생이 관찰되었으나, 폐수발생량 또한 많아져서 회피효과로 인한 환경부하 감소는 미미하였다.

유기성폐기물 바이오가스화시설의 경우, 폐수배출량이 환경성에 가장 큰 영향을 주었다. 폐수배출량 다음으로는 에너지 사용량의 영향이 큰 것으로 나타났다. 경제성 분석결과, 운영비가 적을수록 경제성이 좋게 나타났으며, 바이오가스 생산량도 시설 수익에 영향을 주고 있었다.

음식물류폐기물 자원화시설의 경우도 유기성폐기물 바이오가스화시설과 동일하게 폐수배출량이 환경성에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 연료와 에너지 사용량도 환경성에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 경제성 부분에서는 시설 운영비가 가장 큰 영향을 주었으며, 사료와 퇴비 판매수익도 영향 요소로 나타났다.

폐기물처리시설에 대한 환경효율성 평가 결과를 분석·

Table 5. Key factors for improving eco-efficiency by waste treatment facilities.

구분	환경적 지표	경제적 지표
소각시설	에너지 사용량, 대기오염물질 배출량(온실가스 및 기타 대기오염물질), 폐기물 자원화 생산량(소각 열 회수)	폐기물 자원화 생산품 판매수익(소각열 회수)
가연성폐기물 연료화시설	저위발열량, 에너지 사용량, 폐기물 자원화 생산량(고형연료제품 생산)	운영비
매립시설	폐기물 성장, 수질오염물질 배출량(폐수 및 BOD 등)	운영비, 폐기물 자원화 생산품 판매수익(매립가스 이용)
유기성폐기물 바이오가스화시설	수질오염물질 배출량(폐수 및 BOD 등)	운영비, 폐기물 자원화 생산품 판매수익(바이오가스 생산)
음식물류폐기물 자원화시설	에너지 사용량, 수질오염물질 배출량(폐수 및 BOD 등)	운영비, 폐기물 자원화 생산품 판매수익(퇴비 생산, 사료 생산 등)

정리하여, 시설별로 환경효율성 평가에 큰 영향을 미치는 요소를 다음과 같이 도출하였다(Table 5).

5. 결론

본 연구에서는 기존의 폐기물 관련 환경효율성 평가 연구 및 사례들을 분석하여 폐기물처리시설에 대하여 환경효율성을 평가하기 위한 방법론을 구축하였다. 기존 연구에서 제안된 환경성 지표와 경제성 지표를 바탕으로, 본 연구에서는 환경성 지표로는 전과정 평가를 수행하여 가중화 환경영향을 산정하고 경제성 지표로는 시설의 수익에서 운영비를 제외한 톤당 비용을 활용하였다.

평가 대상 시설은 기존의 실태평가결과와 자료의 활용성 등을 바탕으로 선정하였으며, 총 42개 시설에 대한 환경효율성 평가를 수행하였다. 환경효율성 수행 결과를 바탕으로 폐기물처리시설별로 환경효율성 평가에 영향을 미치는 주요 요소를 도출하였다. 소각 시설의 경우 에너지 사용량·대기오염물질 배출량·폐기물 자원화 생산량, 가연성 폐기물 연료화시설의 경우 저위발열량·에너지 사용량·폐기물 자원화 생산량이 주요 요소로 도출되었다. 매립시설·유기성폐기물 바이오가스화시설·음식물류폐기물 자원화시설의 경우 공통적으로 수질오염물질 배출량이 주요환경적 지표로 나타났다. 경제적 지표로는 운영비, 폐기물 자원화 생산품 판매수익 등이 주요 요소로 도출되었다. 이러한 주요 요소는 향후 시설의 환경적·경제적 효율을 개선하고자 할 때 활용될 수 있을 것으로 기대할 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 한국환경정책·평가연구원(KEI)의 기본연구사업(RE2018-04) “폐기물처리방법별 환경효율성(Eco-efficiency) 평가 연구”로 수행된 연구결과입니다.

REFERENCES

- 1) 도시바 홈페이지, “Eco-efficiency”, <http://www.toshiba.eu/generic/environment-greening-of-products>, 검색일: 2018.3.22.
- 2) 세계 지속가능발전 기업협의회(WBCSD), *Eco-efficiency Learning Module* (2006).
- 3) 국가청정생산지원센터 홈페이지, “환경경제효율성 통계 구축 현황”, https://www.kncpc.or.kr/green/stats_state.asp, 검색일: 2018.3.22.
- 4) 정인태, 이상용, 이진도, “가전제품 폐기단계의 생태효율성 (Eco-Efficiency)”, 대한환경공학회 2005년도 춘계학술발표논문집, 대한환경공학회, pp. 738-740 (2005).
- 5) 양인목, 김영실, 안중우, 조봉규, 조영주, “재활용 기술에 대한 환경·경제효율성 평가 방법에 대한 연구”, 한국전과정평가학회지, 14(1), 5-10 (2013).
- 6) Arne Eik, *Indicators for Eco-efficiency in Recycling System* (2001).
- 7) Plastic Europe, “Assessing the Eco-efficiency of Plastics Packaging Waste Recovery”, *APME summary report* (2011).
- 8) 환경부, 한국환경공단, 2016 폐기물처리시설 설치·운영실태평가결과 보고서, pp. 2-4, p. 10, pp. 29-47 (2017).