

폐플라스틱 재활용과 전과정평가(LCA)

1. 서론

경제성장을 통한 도시화와 산업화의 결과로 현재 우리 인류는 많은 물질적, 비물질적 혜택을 제공받을 수 있었다. 그러나 경제성장 제일주의로 인한 대량생산과정에서 막대한 자원과 에너지가 소모되고 오염물질이 배출되었을 뿐만 아니라 무절제한 소비형태에 따른 대량소비와 대량폐기로 이어지게 되었다. 인구 증가와 더불어 인류의 욕구를 충족시키기 위한 대량형 사회 형태가 불가피하게 되고, 이로 인한 자원고갈, 지구온난화, 오존층파괴 등의 전세계적인 환경문제는 날로 심각해지고 있다.

이에 따라 환경문제를 근본적으로 해결하기 위해 인식의 전환에 대한 필요성이 제기되었다. 즉, 종래의 환경문제에 대한 접근방식이 사후처리(End-of-Pipe)의 수동적 접근방식을 통한 배출기준 준수에 머물렀던 것에서, 환경영향을 사전에 줄일 수 있는 방식으로의 변화가 요구되고 있다. 이를 위해서는 제품의 생산 및 사용단계에서 자원 및 에너지를 가급적 덜 사용하면서 환경부하가 적고 폐기물 발생량이 적은 청정생산기술의 도입이 필요하다. 폐기물 발생을 억제하고, 그 처리를 용이하게 할 뿐만 아니라 천연자원을 대체할 수 있는 재활용은 청정생산기술들 중에서 가장 현실적인 대안으로 인식되고 있다. 하지만, 재활용이 반드시 환경친화적인 방법이라는 인식은 오도된 정책 결정을 낳을 수 있다. 다른 공정과 마찬가지로 재활용 공정 역시 폐기물을 처리하기 위해 물질 및 에너지를 공급 받고 재활용 공정 동안 고형, 수계, 대기 폐기물들을 배출하게 되며, 최종적으로 재활용 공정을 통해 생산된 산출물은



허탁
건국대학교 공업화학과 교수

- 서울대학교 공업화학과 졸업
- 서울대학교 공업화학과 공학석사
- 미국 Lehigh대학교 공학박사
- 미국 Lehigh대학교 Post-Doc.

새로운 물질 및 에너지를 제조하고 폐기 처분하는데 발생하는 부하를 줄이게 된다. 올바른 재활용 방법을 선택하고 도입하기 위해서는 이 두 가지 환경영향에 대한 분석이 면밀히 이루어져야 할 것이다.

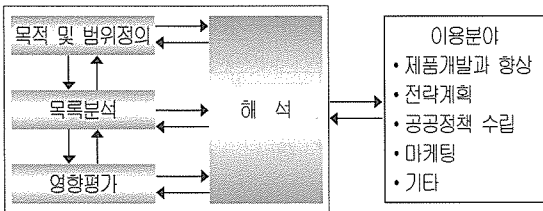
위와 같이 재활용이 친환경적이고 최선의 대안으로 선택되기 위해서는 전체적인 환경성을 평가하기 위한 방법이 요구된다. 이의 유효한 방법으로 대두되고 있는 기법이 전과정평가(Life Cycle Assessment)이다. 전과정평가는 제품이나 공정의 전과정 동안에 발생하는 환경영향을 과학적이며, 정량적으로 평가하려는 취지에서 대두된 것으로 어떤 제품이나 공정, 활동의 전과정에 걸쳐 소모되고 배출되는 에너지 및 물질들의 양을 정량화하여 이들이 환경에 미치는 영향을 평가하고 이를 통해 환경개선의 방안을 모색하고자 하는 객관적인 환경영향평가 기법을 말한다. 전과정평가를 통해 제품의 원료취득에서 폐기과정에 걸쳐 환경에 미치는 영향을 조사하고, 재활용이 자원을 보존하고 환경오염을 개선시키는가에 대한 평가가 이루어질 수 있을 것이다.

이에 본 고에서는 재활용 시스템에서 전과정평가의 기법과 폐플라스틱 재활용방법들에 대한 사례를 통해 전과정평가가 재활용산업의 환경영향평가와 개선에 어떻게 응용될 수 있는지를 소개하고자 한다.

2. 전과정평가

전과정평가는 목적 및 범위정의(Goal & Scope Definition), 전과정목록분석(Life Cycle Inventory Analysis), 전과정영향평가(Life Cycle Impact Assessment)와 전 과정 해석 (Life Cycle Interpretation)의 4가지로 구성된다. 전과정평가의 구조는 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

(그림 1) 전과정평가 구조



2.1

목적 및 범위정의 연구를 수행하는 목적과 적용할 분야, 연구결과를 전달할 대상자를 명확히 설정하고 수행하고자 하는 시스템의 경계, 기능단위 등을 설정한다. 제품의 전과정에서 환경적으로 가장 중요한 단계를 확인하여 기존제품의 환경개선을 위한 방향을 지적하거나 새로운 제품이나 서비스의 설계에 도움이 되는 자료 제공 등을 목적으로 할 수 있다. 연구범위는 연구의 적용목적과 일관되도록 설정하며 제품 시스템의 기능, 기능단위, 대상 제품 시스템, 시스템 경계, 데이터의 품질 요건, 할당, 영향평가방법, 정밀검토 등을 포함한다.

2.2 전과정목록분석

선정된 시스템을 대상으로 해당 시스템에 투입되는 에너지 및 원료, 그리고 산출되는 제품, 부산물, 배출물 등의 종류와 양을 파악하여 정량화하는 과정이다. 목록 분석은 흐름도 작성, 자료수집, 환경부하 계산 및 목록분

석결과에 대한 해석 등의 단계로 진행되며 데이터 수집 과정에서 적용목적에 부합하는 데이터를 수집할 수 없는 경우 목적 및 범위를 수정하는 반복적인 과정을 거친다.

2.3 전과정영향평가

목록분석단계에서 규명된 에너지 및 자원의 소요와 배출물이 환경에 미치는 잠재적인 영향을 정량적, 정성적으로 파악하고 평가하는 과정으로 목적과 범위에 맞추어 영향범주 및 모델을 선정하고 선정된 환경영향 범주별로 목록분석결과를 분류하는 분류화, 분류된 항목들이 해당 범주에 미치는 영향의 정도를 정량화하는 특성화, 각 영향범주별로 영향 정도의 단위를 동일하게 하는 정규화, 그리고 환경영향의 범주별 중요도를 결정하는 가중화의 단계로 수행한다.

2.4 전과정해석

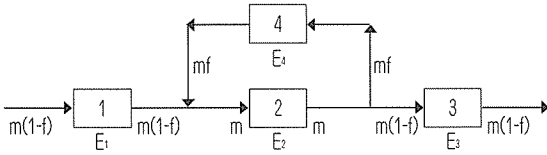
전과정평가의 목적에 대한 해석은 평가 결과와 비교하여 신뢰성과 유효성을 검토하게 된다. 영향평가 결과를 가지고 환경영향의 정량적인 평가, 각 환경문제의 상대적 중요성을 단일지표에 의해 상대평가, 제품 시스템의 개선점에 대한 검토를 할 수 있다. 해석단계에서는 가장 중요한 산출물, 잠재적인 영향을 규명하고 연구의 완전성, 민감도, 일관성을 평가한다. 최고경영자 등 의사 결정권자에게 보고하기 위해 전과정평가의 결과를 바탕으로 최종적인 결론을 도출하고 환경영향이나 자원 또는 에너지 사용을 줄이기 위한 대안을 모색하여 건의한다. 전과정평가의 최종적인 결과를 초기에 설정한 목적 및 범위에 적합하도록 해석하여 보고한다.

3. 재활용 시스템

재활용공정에 대한 전과정평가를 수행하기 위해서는 대상 시스템에 대한 이해가 요구된다. 본 고에서는 일반적인 재활용 시스템, 닫힌 고리형 재활용 시스템(Closed Loop Recycling System)과 열린 고리형 재활용시스템(Open Loop Recycling System)이 전과정평가에 적용되기 위해서 물질 및 에너지가 어떻게 고려되는지를 소개하고자 한다.

3.1 닫힌 고리형 재활용

(그림 2) 닫힌 고리형 재활용 시스템



닫힌 고리형 재활용 시스템은 물질이나 에너지가 재활용되어 그 제품 시스템 내에서 사용되는 시스템을 의미한다. 병 회수 시스템과 플라스틱을 회수하여 원료로 사용하는 시스템이 여기에 포함될 수 있다. 이 시스템에 대한 물질 및 에너지의 흐름을 파악하기 위해서는 간단한 계산 절차가 요구된다. 위의 그림 2는 재활용 시스템에 대한 질량 m 의 원료와 에너지 E 의 흐름을 나타낸다. 재활용을 따른 질량 m 의 흐름은 다음 식(1)과 같이 나타낼 수 있으며, 여기서 f 는 재활용분율, M 은 제품 총량을 나타낸다.

$$M = m + mf + mf^2 + mf^3 + mf^4 + \dots \quad (1)$$

재활용분율을 $f=50$ 으로 가정하면 제품 총량은 $M=2m$ 즉, 1kg의 원료로부터 2kg의 제품을 얻게 된다. 따라서 식(1)을 통해 원료물질 소비와 제품생산에 대한 물질적 흐름을 규명할 수 있다.

각 단위공정의 단위 산출물당 필요한 에너지를 E_1, E_2, E_3, E_4 라고 가정하고 에너지 흐름을 살펴보면 재활용이 없을 경우 재활용 시스템 에너지 E_s 는 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$E_s = m(E_1 + E_2 + E_3) \quad (2)$$

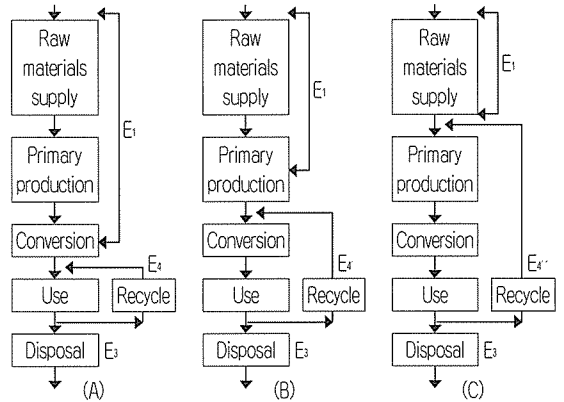
재활용 고리를 포함한 시스템 에너지 E_s' 는

$$\begin{aligned} E_s' &= (1-f)mE_1 + mE_2 + (1-f)mE_3 + fmE_4 \\ &= m(E_1 + E_2 + E_3) + fm(E_4 - E_1 - E_3) \\ E_s' &= E_s + fm(E_4 - E_1 - E_3) \quad (3) \end{aligned}$$

$$\Delta E_s = E_s - E_s' = fm(E_1 + E_3 - E_4) \quad (4)$$

이 재활용 시스템의 에너지 흐름은 식(3)과 같이 표현될 수 있으며, 식(4)의 에너지 절약효과 ΔE_s 가 양의 값이면 에너지가 절약될 것이고, 반대로 음의 값이면 재활용 고리의 도입으로 인해 추가의 에너지가 필요하게 된다. 따라서 에너지를 절약하기 위한 재활용 시스템은 연료에너지와 원료에너지의 변화를 주의 깊게 분석해야 한다.

(그림 3) 3가지 다른 유형의 닫힌 고리형 재활용 시스템



예로, 그림 3과 같은 3가지 유형의 닫힌 고리 재활용 시스템을 살펴보자. (A), (B), (C)가 모두 동일한 주요 생산 공정으로 이루어져 있으나 재활용된 물질은 각각 다른 공정으로 되돌아간다고 가정하자. (A)의 예로는 병 회수 시스템이 있다.

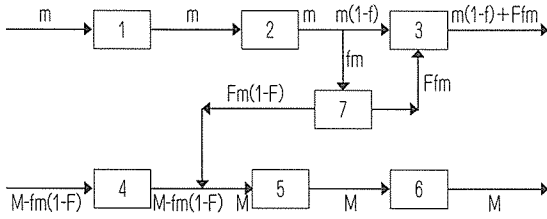
E_1 에 비하여 E_4 가 매우 작으므로 상당한 양의 에너지를 절약할 수 있을 것이다. 플라스틱을 회수하여 세척한 후에 입자로 만들어서 다시 제품으로 만드는 경우는 (B)에 해당한다.

재활용 공정에 필요한 에너지, E_4' 는 (A)의 경우보다 클 것이다. 동시에 E_1' 은 감소하므로 에너지 절약이 (A)의 경우보다 작게 된다. (C)는 플라스틱을 회수하여 세척하고 화학적으로 처리하여 단량체로 전환시키는 경우를 말한다.

E_4' 는 E_4 와 E_4' 보다 크고 동시에 E_1' 는 E_1 과 E_1' 보다 작으므로 예상되는 에너지 감소의 범위는 훨씬 줄어들 것이다.

3.2 열린 고리형 재활용

(그림 4) 열린 고리형 재활용 시스템



열린 고리형 재활용 시스템은 물질이나 에너지가 시스템 경계를 넘어 재활용되어 다른 제품 시스템에서 다시 사용되는 재활용 시스템을 말하는 것으로 페플라스틱 재활용 공정과 폐지의 재활용이 그 대표적인 예이다. 그림 4는 두 개의 생산 공정이 재활용 공정에 의해 연결된 것을 보여준다. 이때 투입물질의 수용량, D는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$D = m + M - fm(1-F) \dots\dots\dots (5)$$

식(5)를 살펴보면 재활용을 통해 투입물의 양이 $fm(1-F)$ 만큼 감소하고 동시에, 시스템에서 배출되는 고형폐기물의 양도 $fm(1-F)$ 만큼 감소하게 된다.

에너지의 측면을 살펴보면, 재활용 공정이 없을 경우에 필요한 에너지, E_s 는

$$E_s = m(E_1 + E_2 + E_3) + M(E_4 + E_5 + E_6) \dots\dots\dots (6)$$

재활용 공정이 도입되면, 시스템에서 필요한 총 에너지, E_s' 는 식(7)과 같다.

$$E_s' = [m(E_1 + E_2 + E_3) + M(E_4 + E_5 + E_6)] - [fm(E_3 + E_4 - E_7)] + [Ffm(E_3 + E_4 + E_7)] \dots\dots\dots (7)$$

재활용 공정에서 폐기물이 발생되지 않는다고 가정하면, ΔE_s 는 다음과 같다.

$$\Delta E_s = fm(E_3 + E_4 - E_7) \dots\dots\dots (8)$$

ΔE_s 는 서로 다른 제품 생산공정의 에너지(E_3, E_4)에 의존하게 된다. 따라서 어느 제품의 공정이 에너지 절약에 대해 더 많이 기여했는지를 판단하기가 쉽지 않다. 첫 번째 생산과정(공정 1, 2, 3)에서는 두 번째 생산공정을 위한 원료를 공급하므로 서로 자기들이 기여를 많이 한다고 할 수 있고, 두 번째 생산과정(공정 4, 5, 6)은 그들이 폐기물을 사용했으므로 더 큰 기여를 했다고 주장할 수 있다.

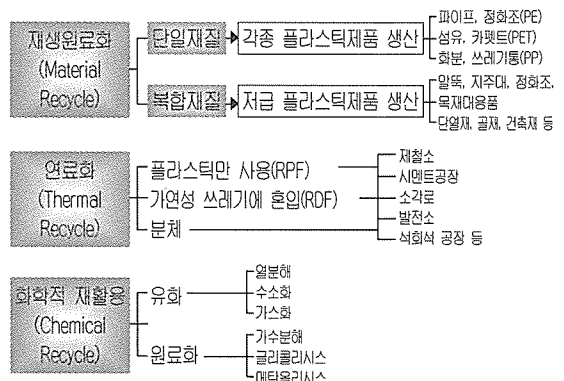
실제의 열린 고리형 재활용 시스템은 두 개의 제품 생산과정뿐만 아니라 여러 개의 제품 생산공정이 서로 연결되어 이루어질 수 있으므로 훨씬 더 복잡하다. 따라서 이런 시스템에 대한 분석이 올바르게 이루어지기 위해서는 시스템에 대한 이해와 원료, 에너지, 폐기물에 대한 분석이 철저히 이루어져야 할 것이다.

4. 페플라스틱 재활용에 대한 전과정평가

다음은 '산업폐기물재활용기술개발사업'의 일환으로 진행된 '페플라스틱의 자원화촉진을 위한 LCA기법 개발 및 적용방안연구'의 전과정평가가 수행 결과를 요약 하였다.

여기서는 그림 5와 같은 페플라스틱 재활용공정, MR(Material Recycle), CR(Cheical Recycle), TR(Thermal Recycle)을 대상으로 전과정평가를 통해 환경성을 비교함으로써 국내 현실에 적합한 최적의 폐기물 자원화 전략 수립 및 정책 방향을 제시하고자 하는 목적으로 수행되었다.

(그림 5) 플라스틱 재활용방법



폐플라스틱 재활용 방법별 기능, 기능단위, 기준흐름은 표 1 과 같으며, 데이터 수집을 위해 한국자원재생공사에 등록 또는 신고된 업체들을 대상으로 설문지, 전화 문의, 방문을 통해 자료를 수집하여 gate to gate 목록을 구축하였다.

〈표 1〉 폐플라스틱 재활용 방법별 기능, 기능단위, 기준흐름

System	MR, TR, CR
Function	Resource reproduction of the waste plastic
Functional Unit	Resource reproduction of the waste plastic 1kg
Reference flow	Waste plastic 1kg

구축된 목록을 통해 전과정목록분석, 전과정영향평가가 수행되었으며, 전과정평가의 결과는 MR은 플라스틱 원료를, CR은 오일을, TR은 스팀 생산시스템을 대체한다고 가정하여 avoided impact를 고려한 것이다.

(그림 6) MR, CR, TR의 CO₂ 배출량 및 저감량

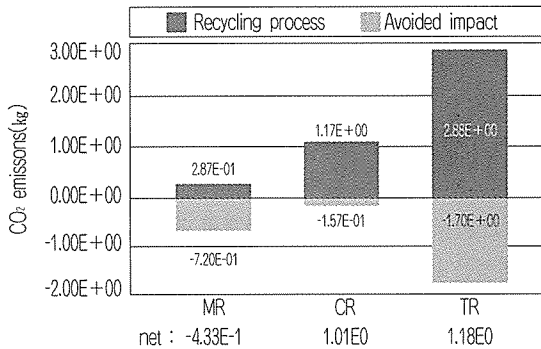
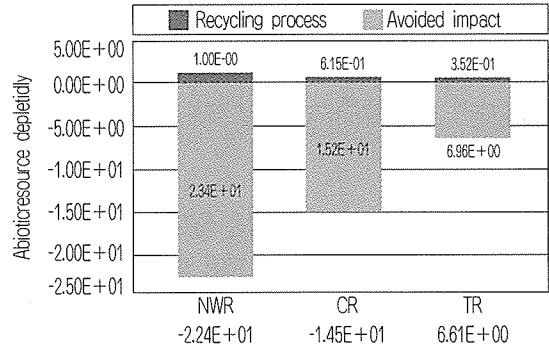


그림 6은 재활용 공정별 CO₂ 배출량 및 저감량을 나타내고 있다. CO₂ 배출량은 CR, TR공정에서 크게 나타나고 있으며 이 배출량은 에너지회수를 통해 얻을 수 있는 CO₂ 저감량보다 더 크게 나타나고 있다. 재활용을 통해 CO₂ 저감을 볼 수 있는 공정은 MR공정으로 나타나고 있으며, 이 폐플라스틱 재활용 공정을 통해 CO₂ 배출의 저감효과를 얻을 수 있다.

전과정영향평가는 산업자원부에서 개발한 영향평가 방법론(K-ecoinicator)을 활용하였으며, 이 방법론에서는 영향범주를 8가지로 분류하여 수행하였다. 여기

서는 자원고갈과 지구온난화에 대한 특성화 결과를 살펴보고자 그림 7에 폐플라스틱 재활용방법별 자원고갈과 지구온난화결과를 도식화하였다.

(그림 7) MR, CR, TR에 대한 특성화결과



폐플라스틱 재활용을 통한 자원고갈의 영향범주에서 공정 자체의 환경영향은 MR, CR, TR 순으로 크게 나타나고 있으나, 각 공정별로 얻을 수 있는 환경영향은 MR의 환경이득이 가장 크게 나타나고 있다. 최종적으로 자원고갈의 영향범주에서 MR공정이 환경적으로 가장 우수한 공정으로 나타나고 있다.

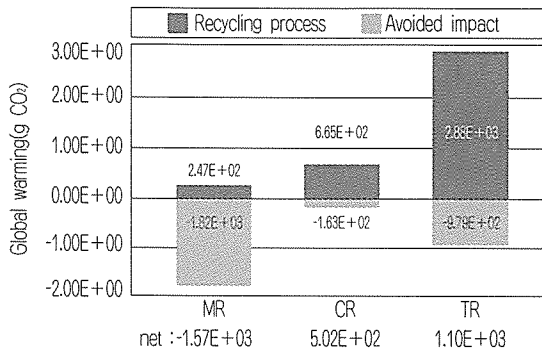
지구온난화의 경우 CO₂에 의한 환경부하와 이득이 지배적이다. 그림 5의 CO₂ 배출량과 유사하게 TR의 환경부하가 크고 MR의 환경이득이 큰 것을 볼 수 있다. TR공정은 환경이득보다 재활용 공정 자체의 환경부하가 더 커서, 재활용 활동이 환경적으로 더 악영향을 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. 이 영향범주에서 환경적으로 우수한 공정은 플라스틱 원료가 산출물인 MR공정으로 나타나고 있다.

정규화와 가중화를 통해 단일지수로 도출된 환경영향을 살펴보면 다음 표 2와 그림 8과 같이 나타난다.

〈표 2〉 MR, CR, TR에 대한 가중화결과

category	unit	MR	CR	TR
ARD(자원고갈)	pe-yr/f.u.	-2.90E-04	-1.88E-04	-8.55E-05
GW(지구온난화)	pe-yr/f.u.	-6.85E-05	2.19E-05	8.25E-05
OD(오존층고갈)	pe-yr/f.u.	-4.55E-08	-1.13E-08	-2.31E-08
POC(광화학산화물생성)	pe-yr/f.u.	-3.28E-05	-6.49E-06	-2.98E-05
AP(산성화)	pe-yr/f.u.	-2.11E-05	1.67E-06	-1.34E-06
EP(부영양화)	pe-yr/f.u.	-1.05E-05	2.43E-06	1.15E-06
ET(생태독성)	pe-yr/f.u.	-1.00E-04	-7.55E-05	-2.20E-05
HT(인간독성)	pe-yr/f.u.	-4.11E-06	2.59E-07	-7.47E-07

(그림 8) MR, CR, TR에 대한 가중화결과



MR은 모든 영향범주에서 (-)값 즉, 환경이득을 얻을 수 있는 것을 볼 수 있으며 또한 그림 8에서 보는 바와 같이 TR, CR, MR 순으로 공정 자체의 환경부하가 크게 나타나고 있다. TR은 오존층고갈, 광화학산화물생성, 산성화, 부영양화, 인간독성의 영향범주에서 CR에 비해 우월하게 나타나고 있지만 전체적인 환경영향은 TR이 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 자원고갈과 생태독성에서 CR이 큰 환경이득을 갖기 때문이다. 최종적으로, MR을 통한 폐플라스틱의 재활용이 공정에서의 환경부하가 다른 방법에 비해 상대적으로 적고 생산된 재생플라스틱의 활용을 통해 원료물질을 저감할 수 있어 가장 친환경적인 처리방법이라는 결론을 얻을 수 있다. 그러나 전과정평가는 수많은 환경관리 기법들 중 한가지일 뿐이지 모든 상황에 항상 이용할 수 있는 완벽한 도구는 아니다. 즉, 다른 모든 기술들과 마찬가지로 전과정평가에는 제한사항이 존재한다. 여기서 고려해야 하는 중요한 제한사항으로 재활용으로 인한 환경성 저감 효과가 대체시스템(MR의 경우 플라스틱 생산, CR의 경우 오일생산, TR의 경우 스팀생산)의 환경데이터베이스 선택에 따라 편차가 생길 수 있으며, MR, CR, TR에 투입되는 폐플라스틱의 성상이 다르다

는 것이다. MR의 경우 상대적으로 품질이 좋고 재질별로 분리가 용이한 형태의 폐플라스틱이 공급되는 반면 CR과 TR의 경우 MR로 투입되기 어려운 형태의 플라스틱이 공급되는 점이 고려되지 못했다.

또한, 실제로 최선의 재활용 방법을 제시하기 위해서는 환경적 측면의 고려와 동시에 경제적, 사회적 측면의 고찰이 이루어져야 할 것이다. 따라서 전과정평가가 EIA(Environmental Impact Assessment), RA(Risk Assessment), LCC(Life Cycle Cost), TCA(Total Cost Assessment), WE(Working Environment) 등의 사회적·경제적 평가와 더불어 활용될 때 최선의 결론이 도출될 것이다.

6. 요약

대량생산, 대량소비, 대량폐기의 사회구조에서 자원소모의 감소와 폐기물 발생 억제를 위해 재활용이 가장 현실적인 대안으로 제시되고 있다. 폐기물관리 방안에서 재활용이 올바르고 효율적으로 적용되기 위해서는 다양한 재활용기술 개발과 더불어 재활용 시스템에 대한 환경성평가가 이루어져야 한다.

환경성평가 도구로서 전과정평가는 전체적인 환경영향을 평가함으로 시스템에 대한 개선점을 도출하고 적절한 재활용방법을 제시할 수 있는 유용한 도구이다. 본 고에서는 폐플라스틱 재활용 공정별 전과정평가 수행 사례를 통해 전과정평가가 재활용분야에 어떻게 응용되고 어떤 결론을 도출할 수 있는가에 대한 고찰을 하였다. 전과정평가를 통해 재활용 공정 전반에 걸쳐 다양한 지점에서 환경적 측면을 향상시킬 기회를 발견할 수 있을 뿐만 아니라 전략적 계획, 우선순위 부여 및 설계·재설계 등과 같은 산업계나 정부 및 비정부기관의 의사결정에 도움을 줄 수 있다.

참고문헌

1. 폐플라스틱의 자원축진을 위한 LCA 기법개발 및 적용 방안 연구, 과학기술부/환경부 (2003)
2. 허 탁, 고분자의 전과정평가 기법, 고분자과학과 기술 Vol. 6 (1995)
3. Michael Hauschild and Henrik Wenzel, Environmental Assessment of Products, CHAPMAN & HALL (1998)
4. Lars-Gunnar Lindfors et. al, Nordic Guidelines on Life Cycle Assessment (1995)
5. ISO 14000 series : Life Cycle Assessment