



LCA기법을 이용한 PET의 환경성평가에 관한 연구

박찬혁, 정재춘, 최석순*, 김성환**

연세대학교 환경공학부, 세명대학교 환경공학과*, 한국산업관계연구원**

A Study on the Environment Assessment of Waste Polyethylene Terephthalate (PET) by LCA

Chan-Hyuk Park, Jae-Chun Chung, Suk-Soon Choi*, Sung-Hwan Kim**

Department of Environmental Engineering, Yonsei University, Department of Environmental Engineering, Semyung University*, Korea Institute for Industrial Research**

ABSTRACT

In this study, life cycle assessment(LCA) technique was employed to evaluate the environmental impact of material recycling of polyethylene terephthalate(PET) bottle. Life cycle inventory was established based on the data collected from recycling companies in Korea. Simapro 5.0 LCA software and Eco-indicator 95 index were used for the analysis. The biggest impact by the material recycling of PET bottle on the environmental category was the global warming. It is because melting and production of the recycled PET product consume a significant amount of electricity and energy. In the environmental pollution discharge, CO₂ emission was the highest, followed by NO_x. This is probably due to the use of diesel and gasoline in the consumption of electricity and transportation. All the environmental impact showed (-) value except the ozone layer depletion, which means that the material recycling of PET bottle is environmentally fair. The use of recycled PET product greatly reduced the environmental impact.

Keywords: PET, Life Cycle Assessment, Material Recycling

초 록

본 논문은 PET의 하나인 물질재활용에 대해 전과정평가기법을 이용하여 환경성을 평가하였다. 이를 위하여 국내에서 재생업체를 대상으로 데이터를 수집하여 목록분석을 실시한 후 Eco-Indicator 95의 영향 평가방법을 사용하여 각 영향범주별 환경영향을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 폐플라스틱의 물질 재활용공정에서 가장 영향을 미치는 것은 지구온난화로 밝혀졌다. 이는 폐플라스틱인 PET에 대해 물질재

활용의 각 단위공정별 환경영향평가 결과에서 전력과 에너지를 가장 많이 사용하는 용융 및 재생원료화공정의 환경부하가 매우 높기 때문인 것으로 나타났다. 환경오염물질 배출량을 살펴보면 CO₂가 매우 높은 비중을 차지하였으며, 그 다음은 NO_x이었다. 이는 전력사용과 수송과정의 경유사용에 기인한 것이다. 페플라스틱의 물질재활용에 대한 영향평가결과는 오존층 파괴의 영향을 제외한 거의 모든 영향범주들이 음(-) 값이며 이는 환경성이 매우 좋은 것으로 나타났다. 또한, PET를 물질재활용공정과 이를 다시 재생원료로서 사용할 경우를 비교할 때 환경부하감감효과는 매우 크게 나타났다.

핵심용어 : PET, 전과정평가, 물질재활용

1. 서론

산업발전과 함께 발전한 플라스틱 산업은 석유화학공업의 발전으로 더욱 눈부시게 발전하여, 최근에는 플라스틱의 생산 및 활용이 그 나라 경제규모를 가늠하는 척도로 인식될 만큼 각종 분야에서 플라스틱이 활발하게 사용되고 있다.

한편, 1950년 이후 플라스틱 산업이 크게 성장하여 왔고, 여러 가지 기능적 우수성과 저렴한 가격 및 기존재료의 대체재로서 이용도가 높아 플라스틱의 사용 범위와 사용량은 계속적으로 확대되고 있어 폐기물로 발생하는 플라스틱도 지속적인 증가추세이다.¹⁾

우리나라의 플라스틱 생산량은 미국이 5,070만톤(38.6%), 독일이 1,730만톤(13.2%), 일본이 1,670만톤(12.7%)에 이어 920만톤(7.0%)으로 세계 4위 수준이다.²⁾ 플라스틱을 대체할 수 있는 다기능의 경제성 있는 재질 개발이 이루어지지 않아 5년 내에 연간 1,100만톤의 플라스틱을 생산하여 500만톤 이상의 폐플라스틱이 발생할 것으로 예상하고 있다.³⁾ 현재 폐플라스틱의 재활용이 20%에 그치고 있어 80% 이상이 매립이나 소각에 의해 처리되고 있으므로 환경문제뿐만 아니라 경제적인 손실도 상당한 것으로 평가되고 있다.⁴⁾

우리나라는 1995년 종량제의 전국 확대 실시 후 대부분의 지방자치단체가 폐플라스틱을 분리수거하여 재활용을 추진하고 있으나 수거 및 선별비용이 과다할 뿐 아니라 선별한 플라스틱 재활용품도 판매가격의 불안정성 등으로 여러 가지 문제를 야기시키고 있다.⁵⁾ 한편, 국내의 폐플라스틱 재활용

업체들은 대부분 영세하고 인력에 의한 단순선별과 처리를 하고 있는 실정으로 관련 기술의 낙후성과 플라스틱을 제조단계부터 재생을 고려한 제품이 생산되지 않고 있으며, 보다 심각한 것은 자원화기술의 대부분이 수거나 선별과 같은 기계 및 장비의 운영에 한정된 단순 기술이 많아 자원화를 통해 회수되는 폐자원의 경제적 가치를 높이지 못하고 있다고 지적하고 있다.⁶⁾ 국내에서는 아직 국내 실정에 맞는 폐플라스틱에 대한 LCI 데이터베이스가 충분치 못하여 대부분 외국의 자료를 인용하고 있는 실정이다.

본 연구는 LCA 기법을 이용하여 폐플라스틱 PET의 물질재활용에 대한 환경성을 평가하고, 이를 통해 향후 국내의 합리적인 폐플라스틱의 재활용정책 방안을 제시하기 위한 기초 자료를 제공하는데 있다.

2. 연구내용 및 방법

본 연구는 폐플라스틱 PET 물질에 대한 처리 및 처분에 관한 시스템을 분석함으로써 폐기물 리사이클시스템에 적용이 가능한 전과정평가(LCA)기법을 이용하여 폐플라스틱의 처리단계의 목록을 수집, 분석하여 각종 자원화 방법에 대한 환경성을 비교 평가하는 것을 목적으로 하였다.

본 연구에서 사용된 데이터는 한국자원재생공사의 “전국 폐기물 중간처리업 및 재활용 신고업체 현황” 중 폐플라스틱의 분리 선별 및 재생원료화 업체를 중심으로 현장 공정 조사 및 업체 관계자의 의견을 청취조사에 의해 수집하였다. 대부분의 폐

플라스틱의 재생업체는 영세하고 설비도 낙후되어 있는 경우가 많으나, 우리나라의 폐플라스틱 재생업체의 공정은 이러한 수준에서 이루어지고 있으므로 이러한 업체에서 수집한 데이터를 기초로 분석하였다.

국내 폐플라스틱 물질재활용방법에 대한 현장조사를 통해 자료를 수집·분석하여 각 공정의 분리배출, 수집·운반, 선별, 재활용공정을 각 유형별로 구분하고, 폐플라스틱의 재활용에 대한 공정별 환경부하를 분석하기 위해 LCA 소프트웨어인 시마프로 5.0을 사용하고, 물질재활용의 주요 환경적 이슈를 규명하였다.

3. 폐플라스틱 PET에 대한 물질재활용의 개요

플라스틱 수지는 종류별, 색깔별로 분류된 양질의 폐플라스틱 원료를 사용하여, 재생 펠릿과 과립 등으로 가공하여 플라스틱제품의 성형용 원료로 사용하는 것이다. 플라스틱제품 제조에는 상기 원

료를 단독으로 사용하거나 신품 수지와 혼합하여 사용한다. 대상수지는 주로 열가소성의 범용수지로 다른 플라스틱 종류에 비하여 사용량이 많은 PE, PP, PS 등의 재활용 방법으로 이용된다.

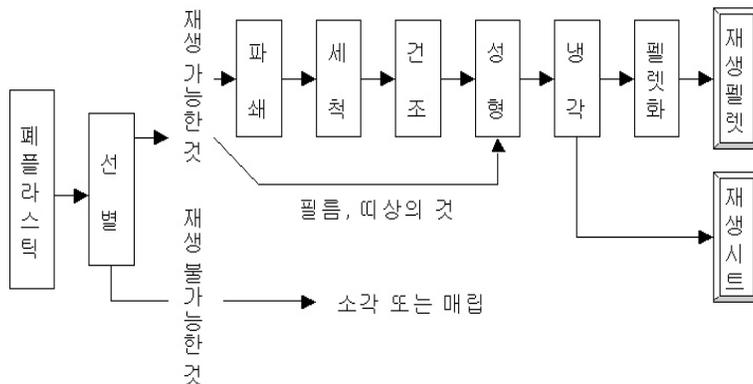
단순재생기술은 양질의 수지를 종류별로 분류하여 재생 펠릿을 만드는 것으로 압출성형 기술을 그대로 적용할 수 있다.

이러한 기술은 이물질의 제거에 특별히 주의하여야 하고, 단일 수지의 재생에 한정되지 않고 다른 수지, 신품수지 및 첨가제 등을 추가하여 생산제품의 내충격성 및 유동성을 증가시키기도 한다. 국내 폐플라스틱 단순재생공정의 일례를 [Fig. 1]에 나타냈다.

4. 폐플라스틱 PET의 물질재활용에 대한 전과정 목록 분석

4.1 제품시스템의 기능, 기능단위

본 연구의 물질재활용 시스템은 재생플라스틱의



[Fig1] Recycling process of waste plastics.

[Table1] System of Product and Function and Function Unit

classification	definition
Fuction	Material recycling of waste plastic PET
Fuction Unit	Material recycling of waste plastic PET 1kg

재질인 PET에 대하여 수행하였다.[Table 1]

4.2 시스템 경계

시스템 경계는 페플라스틱의 배출원에서 분리선별 및 재생원료화까지로 하였다. 또, 실제 공정 데이터는 현장 데이터를 수집하는 것으로 하고, 공정에 사용되는 물질이나 에너지에 대해서는 국내·외에 구축된 데이터를 상위흐름으로 연결하였다.

데이터의 시간적 경계는 분리·선별업체의 경우 2003년 현장 공정 수집데이터를 기준으로 하고, 대상업체 외부데이터의 경우 가능한 최신데이터를 사용하였다. 공간적 경계로는 대상업체의 내부 데이터는 현장 공정데이터로서 한국으로 하였으며 대상업체 외부의 데이터로는 실제 대상업체에서 사용하는 물질 및 에너지의 생산지 데이터로 하였으나 불가능할 경우 유사한 데이터를 사용한다.

기술적 경계는 재생업체에서 사용하고 있는 실제 공정기술과 외부 데이터의 경우 사용 물질 및 에너지 생산에 사용되는 기술로 하였다.

4.3 가정 및 제한

본 연구의 가정 및 제한에 대한 사항은 아래와 같다.

공정 관련 설비 및 인프라(Infra)를 구축하는 과정에 대한 환경부하는 고려하지 않았으며, 공정 데이터 중에서 상위 또는 하위흐름 환경데이터베이스가 없는 투입·산출물의 경우에는 기본흐름(elementary flow)으로 가정하였다.

파쇄 및 세척공정의 용수사용량과 폐수처리에 대

한 데이터는 충분하지 않아서 재질별 조사업체의 평균치를 사용하였으며, 파쇄 및 용융공정에서 발생하는 분진, VOC등의 대기 배출물은 조사대상업체에서 작성해 놓은 데이터를 수집할 수 없어서 고려하지 못했다. 마지막으로 각 단위 공정간의 수송 거리는 업체의 경유사용량과 국내 수송 데이터베이스를 이용하여 추산하였으며, 재질별로 동일하게 적용하였다.

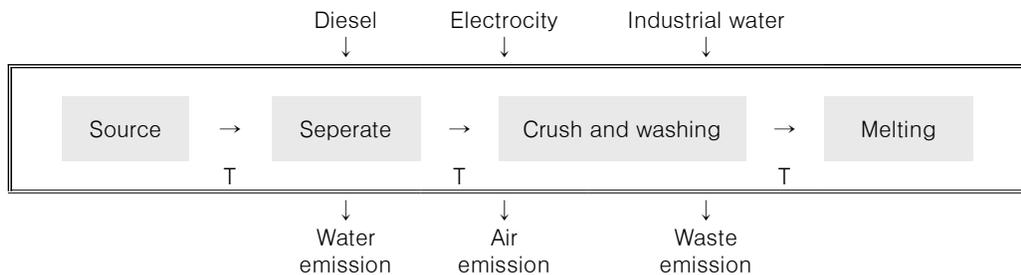
4.4 대상업체 외부 데이터 수집

페플라스틱의 재생에 사용되는 상위 및 하위흐름의 데이터베이스는 [Table 2]와 같이 연결시켰다⁷⁾.

4.5 전과정 목록분석

목적 및 범위설정 단계를 통해 연구대상 시스템의 데이터를 수집하고 이에 따라 각 단위공정별 투입물과 산출물에 대한 물질수지를 분석하였다. 또한, 전과정평가 수행 중에 시간과 비용이 가장 많이 소요되는 단계로서, 물질수지를 객관적이고 과학적으로 분석 및 계산하여 정량적인 환경 부하량을 산출하는 단계이다.

전과정 목록분석표는 현장에서 수집된 데이터를 계산하여 페플라스틱의 PET에 대하여 각 투입물과 산출물에 대한 물질수지에 의해 데이터베이스를 구축하여 [Table 3]에 나타내었다.



[Fig.2] Boundary of system.

[Table2] Upstream and Downstream Data List

parameter	source	year
industrial water	Ministry of environment	1998
electricity	Ministry of commerce, industry and energy	1998
diesel	Ministry of environment	1998
phosphoric acid	Ministry of environment	1998
sodium hydroxide	Ministry of environment	1998
urea	IDEMAT 2001	2001
PET	IDEMAT 2001	2001

[Table3] Inventory of the Material Recycling PET(gate-to-gate)

classification	item	unit	volume	
Input	raw material	waste PET	kg	1.000E+00
	Fuel use	Diesel	kg	7.116E-02
	Energy use	electricity	kWh	3.905E-01
	Waste use	industrial water	kg	2.812E+00
	Chemicals	소포제	kg	2.294E-05
	Chemicals	condensations	kg	1.913E-04
	Chemicals	중균제	kg	2.294E-05
	Chemicals	액반	kg	5.354E-03
	Chemicals	phosphoric acid	kg	2.677E-05
	Chemicals	urea	kg	1.913E-05
	Chemicals	sodium hydroxide	kg	2.307E-03
	Output	recycled material	PET pellet	kg
air emission		CO	kg	8.825E-04
air emission		CO ₂	kg	2.283E-01
air emission		HC	kg	1.578E-04
air emission		NOx	kg	3.075E-03
air emission		Dust	kg	1.649E-04
water emission		waste water	kg	1.913E+00
water emission		pH	-	1.400E-05
water emission		COD	kg	1.088E-04
water emission		BOD	kg	6.764E-05
water emission		SS	kg	6.031E-05
water emission		N-H	kg	3.598E-06
water emission		ABS	kg	7.766E-08
solid waste	waste	kg	2.751E-01	

5. 전과정 영향평가

본 논문은 목적 및 범위 정의에서 제시한 각 영향 범주별 상응인자 값을 이용하여 전과정영향평가를 수행하였다. 물질재활용공정의 물질수지를 통해 목록분석을 실시한 후 전과정평가 소프트웨어인 Simapro 5.0을 이용하여 각 영향범주별 환경영향을 정량화하였다.

이 때, 재생원료화 전공정에 투입되는 투입산출물로 인한 환경부하(Original Impact)와 재생원료의 신재 대체를 고려한 환경부하 삭감효과(Avoided Impact)를 합한 최종 영향 평가를 토대로 환경측면에서의 주요 이슈를 규명하였다.

본 논문의 전과정 영향평가 방법은 Eco-Indicator 95를 사용하였으며, 국내에서 주로 사용되는 영향범주를 고려하여 다음과 같은 6가지 영향범주를 이용하여 평가하였다.

Eco-Indicator 95의 환경영향 범주^{8)~10)}는 다음과 같다.

- Global warming potential GWP(CO₂-eq/kg)
- Ozone depletion potential ODP(CFC11-eq/kg)
- Acidification potential AP(SO₂-eq/kg)
- Eutrophication potential EP(PO₄-eq/kg)
- Photochemical oxidant creation potential POCP (C₂H₄-eq/kg)
- Carcinogenesis potential CP(B(a)P eq/kg)

5.1 PET의 물질 재활용에 대한 주요 이슈

5.1.1 지구온난화(Global Warming Potentials)

PET의 재생원료가 플라스틱 신재의 대체재로 사용되어 신재 생산공정의 환경부하 삭감효과를 감안하지 않는다면 재생공정은 환경부하를 발생시키는 것으로 나타났지만 다시 원료로서 재활용되어 사용되어질 때와의 환경영향을 비교해보면 환경삭감효과가 크게 나타났다. 또한, 신재를 생산할 때 지구온난화에 미치는 환경부하가 크기 때문에 재활용에 의한 지구온난화의 삭감효과가 큰 것으로 나타났다. 또한, 지구온난화에 대한 투입물별 기여도는 전체적으로 음(-)의 값으로써 이는 페플라ستيك의 투입물이 미치는 환경부하보다 페플라ستيك PET가 원료로서 다시 재활용될 때 미치는 환경부하삭감효과가 가장 큰 것으로 나타났다. 또한, 전력생산과 상위와 하위흐름으로 연결되지 않는 공정자체에서 발생하는 CO₂가 지구온난화에 부정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다.

5.1.2 오존층 파괴(Ozone Depletion Potentials)

오존층 파괴의 잠재적인 영향은 PET가 원료로서 재활용될 때와 재활용되지 않을 때의 환경영향이 동일하기 때문에 삭감효과가 없는 것으로 나타났다. 오존층 파괴의 투입물별 기여도는 전체 환경부하가 경유사용으로 인한 환경부하와 거의 비슷한 수준이며, 경유이외의 투입물들에 대한 영향은 미비하기 때문에 무시해도 좋은 것으로 사료된다.

[Table4] Impact Category of PET Recycling Process

Impact category	Unit	Total	PP	water for industrial use	Diesel	PAA (Phosphoric acid)	Urea	Sodium hydroxide	Electricity
GWP	kg CO ₂	4.470E-01	2.280E-01	3.180E-04	2.510E-02	9.280E-05	3.180E-07	1.620E-03	1.920E-01
ODP	kg CFC11	1.210E-07	-	1.180E-14	1.210E-07	8.930E-12	-	2.250E-10	7.120E-12
AP	kg SO ₂	3.250E-03	2.150E-03	1.590E-06	1.260E-04	8.420E-07	2.940E-08	1.080E-05	9.620E-04
EP	kg PO ₄	4.870E-04	4.020E-04	1.000E-07	2.380E-05	1.170E-07	5.160E-09	7.960E-07	6.050E-05
CP	kg B(a)P	3.300E-10	-	4.190E-16	3.260E-10	1.790E-12	-	1.940E-12	2.540E-13
POCP	kg C ₂ H ₄	1.060E-05	-	6.140E-09	6.840E-06	2.360E-08	1.570E-15	4.160E-08	3.680E-06

5.1.3 산성화(Acidification Potentials)

페플라스틱 PET에 대한 산성화의 영향은 음(-)의 값으로 나타났으며 이를 재활용함으로써 산성화에 대한 환경부하감효과가 큰 것으로 나타났다. 그 중 PET 신재를 생산할 때의 삭감효과가 가장 큰 것으로 나타났다.

산성화에 대한 투입물별 기여도는 재생 PET 플라스틱이 플라스틱 신재를 대체할 때 환경부하 삭감효과가 커서 전체 환경부하가 삭감되는 것으로 나타났다. 투입물별로는 전력생산과 공정자체에서 발생하는 산성화에 주요영향인자는 SO²와 NO²로서 이는 화학약품인 액가성소다와 요소의 사용에 기인한 것으로 사료된다.

5.1.4 부영양화(Eutrophication Potentials)

부영양화에 대한 환경부하는 산성화와 마찬가지로 환경부하삭감효과가 크게 나타났으며, 그 중 PET의 신재 대체에 따른 환경부하삭감효과가 가장 큰 것으로 조사되었다. 부영양화에 대한 투입물별 기여도를 살펴보면 전체 환경부하가 삭감되는 것으로 나타났다. 이는 재생된 PET 플라스틱이 플라스틱 신재를 대체할 때 환경부하삭감효과가 크기 때문이었다. 또한, 공정자체에서 발생하는 환경부하가 가장 크며, 전력과 경유사용이 부영양화에 다소 부정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 부영양화의 원인인 질소산화물과 인이 주 원인인 것으로 나타났으며 이는 화학물질중 요소사용

에 의한 것으로 사료된다.

5.1.5 발암성(Carcinogenesis Potentials)

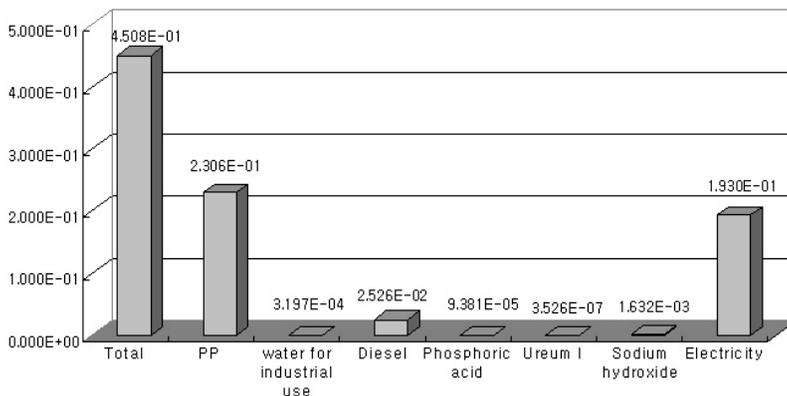
발암성에 대한 환경영향은 대부분 미비한 수준이며, 페플라스틱 PET를 재활용할 때의 환경부하삭감효과가 다소 있는 것으로 나타났다. PET 재질에 대한 환경부하삭감효과가 가장 크게 나타났다.

발암성에 대한 투입물별 기여도는 경유사용을 제외하고 환경부하가 적게 나타났으며, 페플라스틱 PET의 재생원료가 플라스틱 신재의 대체재로 다시 재활용될 때의 환경부하삭감효과가 큰 것으로 나타났다. 또한, 여기서 주요한 영향을 미치는 환경부하는 경유사용에 따라 발생하는 독성물질인 PAH's, Benzo(a)pyrene이 주 원인으로 확인되었다.

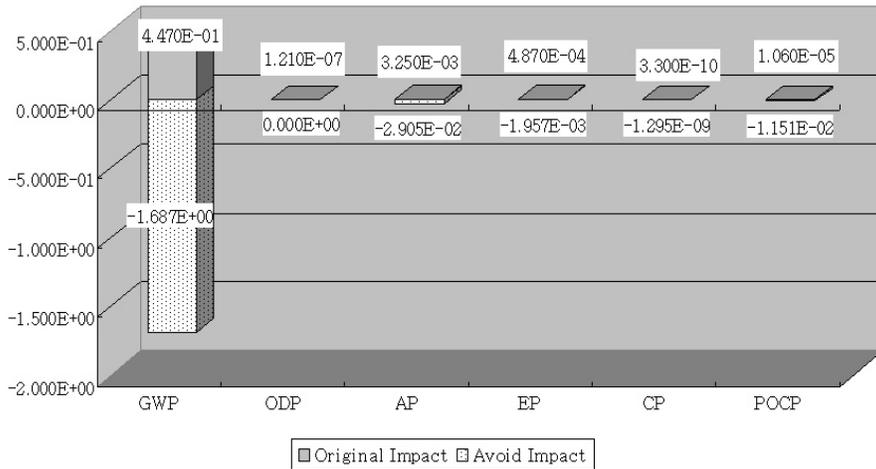
5.1.6 광화학산화물 생성(Photochemical Oxidant Creation Potentials)

광화학산화물 생성에 대한 환경영향은 PET신재의 재활용으로 인한 환경부하삭감효과가 매우 크게 나타났다. 광화학산화물 생성에 대한 투입물별 기여도는 플라스틱 신재를 생산시 환경 부하 삭감효과가 크게 나타났으며, 나머지 투입물에 대한 영향은 무시할 수 있을 정도로 미비한 수준이다. 그 중 가장 중요한 영향을 미치는 오염물질은 VOC, NO₂, CO로 나타났다.

아래의 [Fig 3]은 PET의 물질재활용에 대한 각



[Fig3] Contribution Input of PET recycling process.



[Fig4] Life cycle assessment of material recycling PET

영향범주에 대한 환경영향의 전체 기여도를 나타낸 것이다. PET물질재활용 공정에서는 전력에 대한 환경부하가 1.930E-01로 가장 크게 기여한 것으로 조사되었고, 그 다음이 경유로써 2.306E-01로 나타났다. 이는 재생원료화 공정에서 사용되는 전력사용량인 것으로 밝혀졌다.

6. 결론

본 연구는 페플라스틱 PET제품을 물질재활용에 대한 각 영향범주별 환경성을 평가하였다. 이를 위하여 국내에서 PET의 재생업체를 대상으로 데이터를 수집하여 목록분석을 실시한 후 Eco-Indicator 95의 영향평가방법을 사용하여 각 영향범주별 환경영향을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

또한, 영향범주별 전과정영향평가의 수행을 근거로 환경적인 측면에서 주요 이슈를 규명하였다. 페플라스틱 PET의 재활용부분을 고려하지 않은 영향(Original impact)과 페플라스틱 PET가 재활용되어 다음단계의 원료물질로 다시 사용되는 경우의 환경회피 영향(Avoid impact)을 재질별로 구분하여 나타내었다. 또한, 페플라스틱 PET에 대한 상위 및 하위흐름의 데이터베이스가 연결되지 않

은 공정데이터(On-site) 항목과 각 투입물별 기여도의 값을 비교하는 방법을 사용하였다.

페플라스틱 PET의 물질재활용공정에서 가장 영향을 미치는 것은 전력사용인 것으로 나타났다. PET에 대한 물질재활용의 각 단위공정별 환경영향평가 결과에서 전력과 에너지를 가장 많이 사용하는 용융 및 재생원료화공정의 환경부하가 매우 높은 것으로 나타났다.

PET의 환경오염물질 배출량을 살펴보면 CO₂가 매우 높은 비중을 차지하였으며, 그 다음은 NO_x이었다. 이는 전력사용과 수송과정의 경유사용에 기인한 것이다.

PET의 물질재활용에 대한 영향평가결과는 오존층 파괴의 영향을 제외한 거의 모든 영향범주들이 음(-) 값이며 이는 환경성이 매우 좋은 것으로 나타났다. 또한, 페플라스틱 PET를 물질재활용공정과 이를 다시 재생원료로서 사용할 경우를 비교할 때 환경부하삭감효과는 매우 크게 나타났다.

7. 참고 문헌

1. Dijkema, G. P. J., M. A. Reuter, and E. V. Verhoef. "A new paradigm for waste management." Waste Manage-

- ment. 20. pp. 633-638 (2000).
2. 김혜태. 『혼합폐플라스틱 발생 실태 및 재활용기술 현황에 관한 조사연구』. 한국자원재생공사 (1996).
 3. 민병일. “우리나라 혼합 폐플라스틱의 특성 및 처리 방향”. 97 폐기물 관리체계 및 재활용 기술에 관한 국제 심포지엄 (1997).
 4. 손영배. “폐플라스틱의 재활용 실태” 월간 폐기물21 (2001. 10).
 5. 오길중 외 3인. 우리나라 폐플라스틱 발생 및 재활용 실태분석. 한국폐기물학회 춘계학술대회 (2002).
 6. 조봉규. 폐플라스틱 재활용 기술 개발 현황. 자원순환형 폐기물관리의 현황과 전망. 환경의 날 기념 국제세미나 (2004).
 7. Wu, R. H. and Chen, C. Y. “On the Application of Input-Output Analysis to Energy Issues.” Energy Economics. Vol. 12, No. 1, pp. 71-76 (1990).
 8. ISO 14040 : Life cycle assessment - Principles and framework.
 9. ISO 14041. Life cycle assessment - Goal and scope difinition and inventory anaylsis.
 10. Norris GA. Integrated life cycle cost analysis and LCA. International journal of LCA 6(2):118~21 (2001).

