

페디스플레이 재활용 기술의 전과정평가를 통한 환경·경제적 가치분석 연구

Analysis of Environmental and Economic Value through Life Cycle
Assessment(LCA) on Recycling Technologies for Flat Panel Display Devices

손민정¹, 차경훈¹, 안중우², 최아란², 이찬기³, 윤진호³, 박재량³, 조봉규⁴, 조영주⁴
¹에코에이블컨설팅(주), ²성신여자대학교, ³고등기술연구원, ⁴유용자원재활용기술개발사업단

Min Jung Son¹, Kyoung Hoon Cha¹, Joong Woo Ahn², Aran Choi², Chan Gi
Lee³, Jin Ho Yoon³, Jae Layng Park³, Bong Gyoo Cho⁴, Young Ju Cho⁴
¹Ecoable Consulting Corporation, ²Sungshin Women's University, ³Institute for Advanced
Engineering, ⁴R&D Center for Valuable Recycling

사단법인 한국전과정평가학회
The Korean Society for Life Cycle Assessment

페디스플레이 재활용 기술의 전과정평가를 통한 환경·경제적 가치분석 연구

손민정^{1*}, 차경훈¹, 안중우², 최아란², 이찬기³, 윤진호³, 박재량³, 조봉규⁴, 조영주⁴
¹에코에이블컨설팅(주), ²성신여자대학교, ³고등기술연구원, ⁴유용자원재활용기술개발사업단

Analysis of Environmental and Economic Value through Life Cycle
Assessment(LCA) on Recycling Technologies for Flat Panel Display Devices

Min Jung Son¹, Kyoung Hoon Cha¹, Joong Woo Ahn², Aran Choi², Chan Gi Lee³,
Jin Ho Yoon³, Jae Layng Park³, Bong Gyoo Cho⁴, Young Ju Cho⁴

¹Ecoable Consulting Corporation, ²Sungshin Women's University, ³Institute for Advanced
Engineering, ⁴R&D Center for Valuable Recycling

Abstract

This study analysis of environmental and economic value through Life Cycle Assessment(LCA) on recycling technologies for flat panel display devices. Environmental impacts were assessed for the five categories of impacts: global warming, resource depletion, acidification, eutrophication, and photochemical oxide production. When recycling 1kg of waste glass, global warming impact was 1.93E-02 kg CO₂-eq., resource depletion impact was 1.26E-04 kg Sb-eq., acidification impact was 3.29E-05 kg SO₂-eq., eutrophication impact was 6.13E-06 kg PO₄³⁻-eq., and the photochemical oxide production impact was 1.64E-05 kg C₂H₄-eq. When 1kg of recycled glass is produced, the result of analysis of environmental and economic value can be taken as 72 won. When producing 3,800 kg of recycled glass, it is possible to obtain 275,076 won of gain and 3,471,750 won in annual amount of waste glass.

1. 서론

현재 국내 발생 페디스플레이 양이 지속적으로 증가하고 있으나 이와 관련된 해체, 분리 기술 관련 플랜트 및 실증화 장비가 전무한 상황이다. 현재 국내에서 진행되고 있는 재활용 방법은 페디스플레이에 포함된 모듈을 각각 해체·분리하는 과정을 통해 이루어지고 있으나 단순 수작업을 통해 진행되고 있어 기술화가 필요하다. 페디스플레이 관련 재활용 기술의 안정성 및 경제력을 확보하기 위해서는 분리 시 배출되는 유해성 물질에 대한 관리 및 적절한 해체기술 개발이 필요하며 유용자원 가치 증대를 위한 재질별 선별기술 및 소재화 기술이 필수이다.

본 연구는 페디스플레이의 효율적인 재활용을 위해 유용자원재활용기술개발 사업단에서 개발한 재생

* 교신저자: 손민정 팀장 (05064) 서울특별시 광진구 자양변영로 72 2층 Tel: 02-6959-3840, Fax:070-4327-7279,
Email: mjson@ecoable.co.kr

유리 회수 기술에 대하여 전과정평가를 수행하였으며, 5대 환경영향범주에 대한 주요이슈를 분석하였다. 또한 재생유리 사용으로 신재유리를 대체함에 따른 환경영향의 회피효과를 분석함으로써 환경적 개선효과를 살펴보고자 한다. 또한 페디스플레이 재활용 기술을 통해 회수되는 재생유리의 환경·경제적 가치 분석을 수행하였다.

2. 연구 목적 및 범위

2.1 연구 목적

본 연구의 목적은 페디스플레이 재활용 공정에 대한 전과정평가를 수행하고, 환경영향범주별 주요이슈를 규명하는데 있다. 또한 전과정평가 결과를 바탕으로 페디스플레이 재활용 기술을 통해 회수되는 재생유리의 환경·경제적 가치 분석을 수행하였다.

2.2 연구범위

2.2.1 대상 시스템

본 연구의 전과정평가 대상 기술은 페디스플레이 재활용 공정을 통해 재생유리를 추출하는 기술이다.

2.2.2 기능, 기능단위 및 기준흐름 설정

본 연구는 페디스플레이 재활용 기술에 대한 환경성을 평가하기 위해 Table 1과 같이 기능, 기능단위 및 기준흐름을 나타내었다. 이 때 기능단위는 페디스플레이 처리를 기준으로 하였다.

Table 1 페디스플레이 재활용 기술의 기능, 기능단위 및 기준흐름

구분	페디스플레이 재활용
기능	페디스플레이 재활용 공정을 통한 유리 재활용
기능단위	페디스플레이 1kg 처리
기준흐름	페디스플레이 1kg 처리

2.2.3 시스템 경계

일반적으로 폐기물의 재활용 단계는 재생공정을 진행하기 전에 수집, 운송, 선별공정 등이 필요하다. 본 연구의 대상 기술은 현재 개발단계이기 때문에 관련 데이터 수집 가능성을 고려하여 시스템 경계를 재활용 공정(Gate to Gate)으로 설정하였다.

2.2.4 제외기준

본 연구에서는 재활용 공정에 투입, 배출되는 물질에 대한 모든 데이터를 포함하는 것을 원칙으로 하였다. 그러나 재활용 공정에 원료물질로 투입되는 페디스플레이에 대한 환경부하는 열린고리 재활용 시스템(Open loop recycling system)의 제외기준(Cut-off criteria)을 적용하여 제외하였다. 그 외 제품 생산과 직접적인 연관이 없는 사무시설 및 편의시설 등은 제외하였다.

2.2.5 가정 및 제한사항

본 연구의 페디스플레이 재활용에 대한 가정 및 제한사항은 다음과 같다.

- 1) 현재 개발단계의 데이터임으로 수집 할 수 없는 데이터는 관련 기술 전문가에 자문과 검토

- 등을 통해 계산에 의해 물질수지를 도출하였다.
- 2) 원료물질인 페디스플레이(폐유리)에 대한 환경영향은 Open loop recycling의 Cut-off 기준을 적용하여 본 연구에서 제외하였다.
 - 3) 투입되는 물질 중 국가 전과정 목록분석 데이터베이스(LCI DB, Life Cycle Inventory Database)가 없는 경우 해외 LCI DB를 적용하였으며, 국내외 LCI DB에서 동일한 물질에 대한 DB가 없는 경우 유사한 물질에 대한 LCI DB를 선정하여 적용하였다.(신재유리 : 판유리, 환경부)
 - 4) 개발단계의 기술로 원료물질 및 폐기물의 수송에 대한 정보가 존재하지 않아 수집, 선별 및 수송공정은 시스템경계에서 제외하였다.

3. 데이터 수집 및 계산

3.1 공정흐름도 작성

초기 수집된 공정흐름도(process flow diagram)를 근거로 현장데이터 수집단위인 단위공정을 결정하였다. 데이터 수집의 용이성, 공정 특성 등을 고려하여 단위공정을 페디스플레이(폐유리) 재활용 공정으로 결정하였다. 페디스플레이 재활용에 대한 공정흐름도는 다음 fig. 1에 제시하였다.

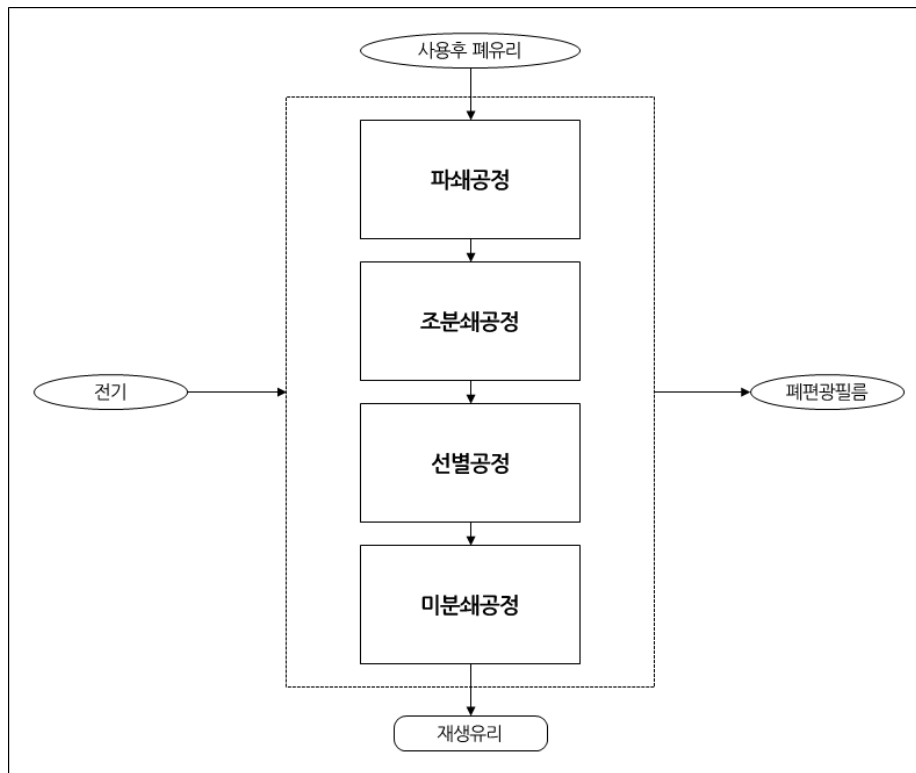


Fig. 1 페디스플레이 재활용 기술의 공정흐름도

3.2 데이터 수집 및 계산

3.2.1 데이터 수집

데이터 수집은 페디스플레이 재활용 기술 개발 업체의 현장데이터를 우선 적용하는 원칙에 따라

설문서를 통하여 투입·산출물에 대한 현장데이터를 수집하였다. 데이터 수집이 불가능한 경우 계산 및 추정을 통하여 데이터를 수집·보완하였다.

원료물질, 보조물질, 에너지, 폐기물 등 투입·산출물에 대한 환경영향을 산출하기 위해 LCI 데이터베이스를 활용하였다. 국내 LCI 데이터베이스는 환경부와 산업통상자원부(구 지식경제부)에서 구축한 데이터베이스를 적용하였다.

3.2.2 데이터 계산

물질수지, 단위공정, 기준단위, 데이터 통합 등은 전과정평가 일반원칙을 따라 데이터를 검증·계산하였다. 주요 원료 및 보조물질 등 투입물과 산출물에 대한 데이터 출처는 다음 Table 2와 같다.

Table 2 페디스플레이 재활용 기술의 데이터 출처

구분	물질명	용도	데이터 출처			비고
			실측	계산	추정	
페디스플레이 재활용 공정	투입	폐유리	원료	V		환경부하 제외
	에너지	전기	유리재 활용 장비 인듐 회수 장비		V	
	산출	재활용 유리	제품	V		
		폐편광필름	일반폐기물처리	V		

3.3 전과정 영향평가

전과정 영향평가는 환경부 영향평가 방법론(Type III*)을 적용하였다. 전과정평가 소프트웨어인 SimaPro를 활용하여 지구온난화, 자원소모, 산성화, 부영양화, 광화학적산화물생성의 5대 영향 범주에 대해 환경영향을 평가하였다.

Table 3 영향범주별 특성화 모델(TypeIII)

환경영향범주	단위	출처
지구온난화 (GWP)	kg CO ₂ -eq.	IPCC 1996, GWP 100 years.
자원소모 (ADP)	kg Sb-eq.	EIA, International Energy Annual 2000, 2002 (Crude oil, Natural Gas, Coal 에 해당) U.S Geological Survey(USGS) 2001~2002(그외)
산성화 (AP)	kg SO ₂ -eq.	CML 1999, Hauschild & Wenzel, 1998
부영양화 (EP)	kg PO ₄ ³⁻ -eq.	Heijungs et al 1992, (with some modifications)
광화학적산화물 생성 (POCP)	kg C ₂ H ₄ -eq.	CML 1999, Jenkin & Hayman, 1999; Derwent et al. 1998; high NOx

* TypeIII는 환경라벨 유형의 한 가지로, 제품의 환경성에 대한 정보를 정량화하여 제품에 표시하는 것을 의미함. 우리나라는 환경부에서 운영하는 환경성적표지제도가 있으며, 이는 재료 및 제품의 환경성 제고를 위해 생산, 유통, 소비 및 폐기단계 등의 전과정에 대한 환경성 정보를 정량적으로 표시하는 제도임.

4. 환경성 평가 결과

4.1 주요이슈 분석

페디스플레이 1kg 재활용에 대한 영향평가결과를 다음 Table 4, Fig. 2에 제시하였다. 지구온난화(GWP)는 1.93E-02 kg CO₂-eq.으로 분석되었으며, 자원고갈(ADP)은 1.26E-04 kg Sb-eq., 산성화(AP)는 3.29E-05 kg SO₂-eq., 부영양화(EP)는 6.13E-06 kg PO₄³⁻ eq., 광화학산화물생성(POCP)은 1.64E-05 kg C₂H₄-eq.의 환경영향이 발생하는 것으로 조사되었다. 모든 환경영향 범주에서 전기로 인한 영향이 대부분의 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Table 4 페디스플레이 재활용 기술의 특성화 결과값(기능단위: 페유리 1kg 처리 기준)

구분	지구온난화 (GWP)	자원소모 (ADP)	산성화 (AP)	부영양화 (EP)	광화학산화물 생성 (POCP)
	kg CO ₂ eq.	kg Sb eq.	kg SO ₂ eq.	kg PO ₄ ³⁻ eq.	kg C ₂ H ₄ eq.
전기	1.93E-02	1.25E-04	3.26E-05	6.06E-06	1.63E-05
편광필름 매립	4.82E-05	3.20E-07	3.62E-07	6.70E-08	7.07E-08
합계	1.93E-02	1.26E-04	3.29E-05	6.13E-06	1.64E-05

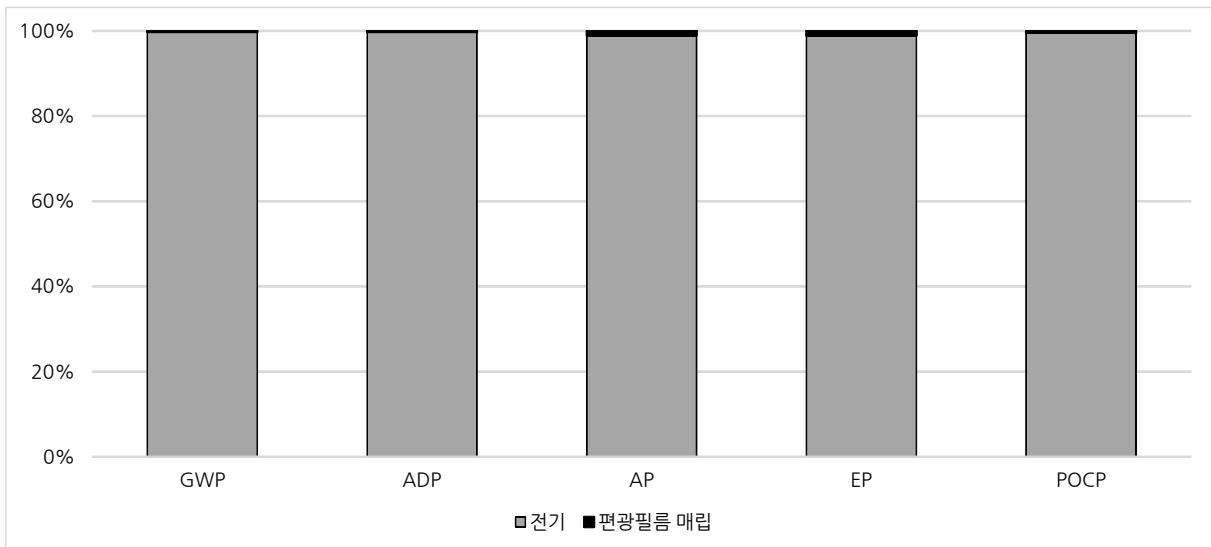


Fig. 2 페디스플레이 재활용 기술의 특성화 기여도

4.2 신재 대체로 인한 회피영향(Avoided impact) 분석

환경영향에 대한 회피영향(Avoided impact) 분석은 시스템경계를 모든 관련된 전과정 시스템으로 확장시켜 할당하는 것이다. 예를 들어 어떤 한 전과정 시스템에서 물질이 사용된 후 재활용되어 다음 단계의 원료물질로 사용되는 경우, 이 재활용된 물질의 사용으로 인하여 다음 단계에서 감소된 환경영향에 대한 이득을 전 단계 전과정 시스템에 부여하는 방법이다.

본 연구의 페디스플레이 재활용 공정에서는 재생유리가 생산되며, 이는 다른 제품의 시스템 경계에서 사용될 수 있으므로 재생유리에 대한 회피영향을 고려해 주어야 된다. 즉, 페디스플레이 처리공정에서 재생유리가 생산되지 않는다면 그만큼의 유리를 생산하기 위해서 원료의 채취부터 생

산에 이르기까지의 투입·산출물에 의한 환경부하가 발생하였을 것이지만, 재생유리의 회수로 인해 그러한 환경부하가 생기는 것을 방지한 것과 동일한 효과를 얻게 된다. 이를 회피영향이라 정의하며 일반적으로 음(-)의 값을 갖는다.

회피영향을 분석하기 위해 페디스플레이 재활용 공정에서 생산된 재생유리 미분이 신재유리를 대체한 것으로 설정하였다. 회피영향을 산정하기 위하여 신재유리는 LCI DB를 통해 지구온난화 영향을 도출하였으며, 이때 환경부에서 개발한 판유리 LCI DB를 활용하였다. 두 기술의 환경영향 비교를 위해서는 기본적으로 시스템경계를 동일하게 맞춰야 한다. 연구대상 재활용 기술은 재생유리 미분을 만드는 공정까지만 포함되어 있어, 환경부의 판유리 LCI DB와는 시스템경계가 다르다. 따라서 투입·산출물의 세부내역을 확인할 수 있는 해외 LCI DB를 활용하여 연구대상 기술의 환경영향에 판유리를 만드는 공정의 환경영향을 추가적으로 고려하여 회피영향을 분석하였다.

- 재생유리 제조공정 : 재생유리 미분 제조공정(연구대상 재활용기술) + 판유리 제조공정
→ 활용 LCI DB: Flat glass, uncoated, at plant, Ecoinvent(공정에서 소비되는 에너지 영향만 고려)
- 신재유리 제조공정 : 신재 판유리 제조공정
→ 활용 LCI DB: 판유리, 환경부

다음 Table 5, Fig. 3은 신재유리 대체에 따른 회피영향을 고려한 지구온난화 결과이다. 재생유리 1kg을 생산할 때 3.87E-01 kg의 이산화탄소를 배출하는데, 재생유리가 신재유리를 대체함으로써 7.89E-01 kg의 이산화탄소가 배출되는 것을 방지한 것과 동일한 효과를 나타낸다. 따라서 신재유리의 회피영향을 고려한 재생유리 1kg 생산에 대한 지구온난화 영향은 -4.02E-01 kg CO₂-eq.이다.

Table 5 신재유리 대체로 인한 회피영향을 고려한 재생유리 생산의 지구온난화 영향

재생유리 1kg 생산기준					
구분	재생유리 미분 제조공정 (연구대상 재활용 기술)		판유리 제조공정	신재 유리 Avoided impact	재생유리 1kg 생산 시 환경영향 (신재유리 Avoided impact 고려)
	전기	편광필름 매립			
지구온난화 특성화 결과 (kg CO ₂ eq.)	2.03E-02	5.07E-05	3.67E-01	-7.89E-01	-4.02E-01

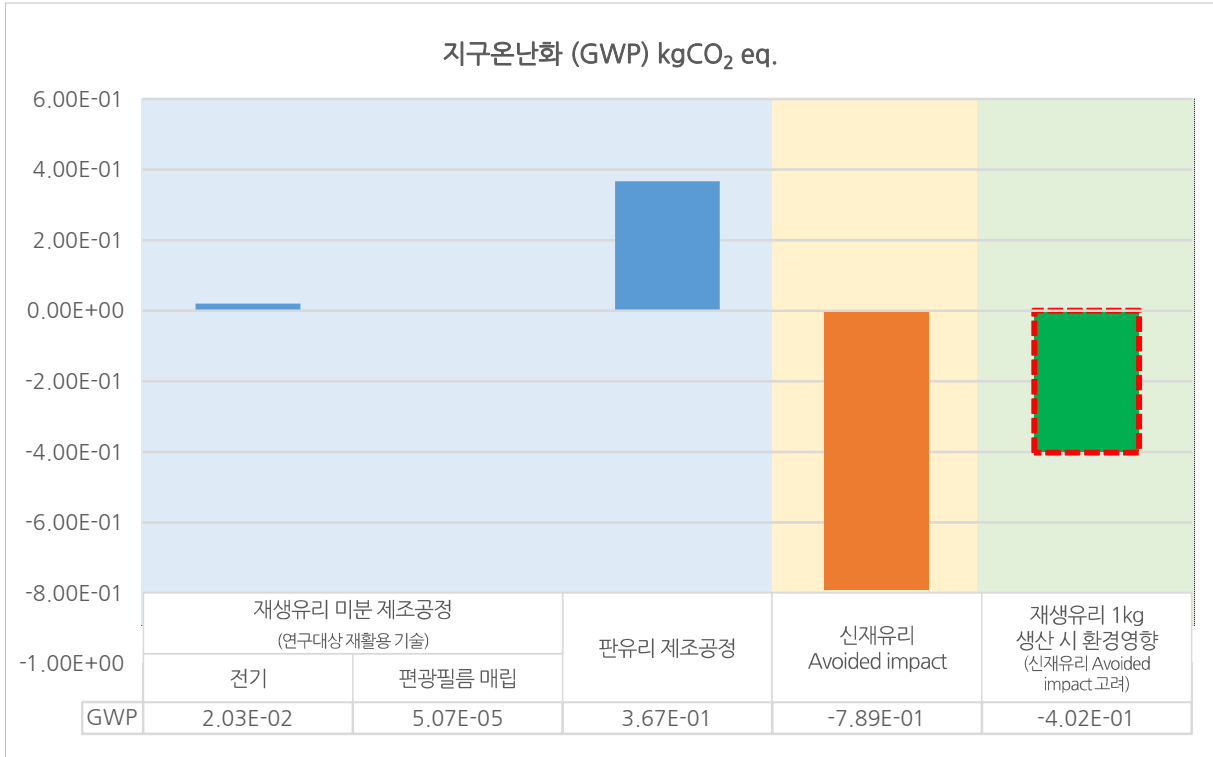


Fig. 3 신재유리 대체로 인한 회피영향을 고려한 재생유리 생산(단위: kg CO₂ eq)

5. 신재 대비 재생재의 환경영향 개선에 따른 경제적 가치 분석 결과

페디스플레이 재활용 기술로 회수되는 재생유리의 환경·경제적 가치를 분석하기 위해 다음과 같이 지구온난화, 자원소모, 산성화, 부영양화, 광화학적산화물생성의 5대 영향범주에 대해 사회적 편익을 포함하는 영향범주별 경제적 원단위를 적용하였다.

Table 6 영향범주별 경제적 원단위

환경영향 범주	경제적 원단위 산정 기준	경제적 원단위
지구온난화 (GWP)	영국 정부 탄소가치 추정 결과	26.65 원/kgCO ₂ eq.
자원소모 (ADP)	안티몬(Sb) 국제 거래 가격	11,408 원/kgSbeq.
산성화 (AP)	영국 정부에서 발간한 대기질 경제성 분석의 대기오염물질별 피해비용의 추정치를 국내 기준으로 전환	2,599 원/kgSO ₂ eq.
부영양화 (EP)	우리나라 하수 처리장의 수질오염물질 제거 단가	15,253 원/kgPO ₄ ³⁻ eq.
광화학적산화물 생성 (POCP)	C2H4단위 배출에 따른 피해비용 (박필주, 김만영(2010))	3,030 원/kgC ₂ H ₄ eq.

* 출처: 전과정평가 영향범주별 경제가치 분석에 관한 연구, 안중우 외 4명, 2015, 한국전과정평가학회지

신재유리의 환경성 평가 결과와 본 연구의 대상인 페디스플레이 재활용을 기술을 통한 재생유리의 환경성 평가 결과를 비교하여 환경성 개선효과를 다음 Table 7과 같이 도출하였다. 페디스플레이

이 처리를 통해 재생유리를 회수하는 경우가 신재유리 대비 지구온난화 영향은 104%의 환경영향이 감소하였으며, 자원소모 영향은 277%, 광화학산화물생성 영향은 206% 감소하였다. 반면 산성화 영향과 부영양화 영향은 신재유리의 환경영향보다 증가한 것으로 확인되었다.

Table 7 신재유리 및 재생유리의 환경성 평가 결과

환경영향 범주	단위	환경성 평가 결과		
		신재유리 1kg 생산기준 (A)	재생유리 1kg 생산기준 (B)	재생유리 생산으로 인한 환경성 개선효과 (A-B)/B*100
지구온난화 (GWP)	kgCO ₂ eq.	7.89E-01	3.87E-01	지구온난화 영향 104% 감소
자원소모 (ADP)	kgSbeq.	7.83E-03	2.08E-03	자원소모 영향 277% 감소
산성화 (AP)	kgSO ₂ eq.	5.50E-03	7.25E-03	산성화 영향 24% 증가
부영양화 (EP)	kgPO ₄ ³⁻ eq.	3.93E-04	4.94E-04	부영양화 영향 20% 증가
광화학적산화물 생성 (POCP)	kgC ₂ H ₄ eq.	1.06E-03	3.46E-04	광화학적산화물생성 영향 206% 감소

위에서 도출된 환경성 개선효과에 영향범주별 경제적 원단위를 곱하면 환경·경제적 가치분석 결과가 도출된다. 재생유리 1kg 생산을 기준으로 하였을 때 환경·경제적 가치분석 결과 72원의 이득을 취할 수 있으며, 공정 1cycle인 3,800kg의 재생유리를 생산할 경우 275,076원의 이득을 얻을 수 있으며, 연간 폐유리 발생량을 기준으로 할 경우 3,471,750원의 이득을 얻을 수 있다.

Table 8 재생유리 생산에 대한 환경·경제적 가치분석 결과

환경영향 범주	경제성 여부	환경/경제적 가치분석 결과		
		재생유리 1kg 생산기준	재생유리 3,800kg 생산기준 (공정 1cycle)	재생유리 47,960kg 생산기준 (연간폐유리발생량)
지구온난화	환경·경제적 이득	11 원	40,743 원	514,215 원
자원소모	환경·경제적 이득	66 원	249,232 원	3,145,569 원
산성화	환경·경제적 손해	-5 원	-17,272 원	-217,992 원
부영양화	환경·경제적 손해	-2 원	-5,835 원	-73,645 원
광화학적산화물생성	환경·경제적 이득	2 원	8,209 원	103,602 원
합산		72 원	275,076 원	3,471,750 원

6. 결론 및 고찰

본 연구에서는 페디스플레이 재활용 공정에 대한 전과정평가를 수행하였으며, 이를 바탕으로 재활용 기술로 회수되는 재생유리의 환경·경제적 가치 분석을 수행하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 페디스플레이 1kg 재활용에 대한 영향평가결과를 다음 Table 3, Fig. 2에 제시하였다. 지구온난화(GWP)는 1.93E-02 kg CO₂-eq.으로 분석되었으며, 자원고갈(ADP)은 1.26E-04 kg Sb-eq., 산성화(AP)는 3.29E-05 kg SO₂-eq., 부영양화(EP)는 6.13E-06 kg PO₄³⁻-eq., 광화학산화물생성(POCP)은 1.64E-05 kg C₂H₄-eq.의 환경영향이 발생하는 것으로 조사되었다. 모든 환경영향 범주에서 전기로 인한 영향이 대부분의 영향을 미치는 것으로 나타났다.
- 2) 재생유리 1kg을 생산할 때 3.87E-01 kg의 이산화탄소를 배출하는데, 재생유리가 신재유리를 대체함으로써 7.89E-01 kg의 이산화탄소가 배출되는 것을 방지한 것과 동일한 효과를 나타낸다. 따라서 신재유리의 회피영향을 고려한 재생유리 1kg 생산에 대한 지구온난화 영향은 -4.02E-01 kg CO₂ - eq.이다.
- 3) 재생유리 1kg 생산을 기준으로 하였을 때 환경·경제적 가치분석 결과 72원의 이득을 취할 수 있으며, 공정 1cycle인 3,800kg의 재생유리를 생산할 경우 275,076원의 이득을 얻을 수 있으며, 연간 폐유리 발생량을 기준으로 할 경우 3,471,750원의 이득을 얻을 수 있다.

사사

본 논문은 환경부 글로벌탑 환경기술개발사업 중 유용자원재활용기술개발사업의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다(과제번호:GT-11-C-010-000-0).

Reference

- 1) 허탁 외 2명, 환경 전과정평가(LCA)의 이론과 지침, 한국품질환경인증협회(KAB). 1998
- 2) 안중우 외 4명, 전과정평가 영향범주별 경제 가치 분석에 관한 연구, 전과정평가 학회지, 2015.9.
- 3) 환경성적표지 LCI 데이터베이스, www.edp.or.kr
- 4) Ecoinvent 데이터베이스, www.ecoinvent.org
- 5) ISO 14040, 2006: Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework.
- 6) ISO 14044, 2006: Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guideline.

