

# 폐 형광등으로부터 재생된 유가자원의 환경성과 및 경제적 가치에 대한 연구

안중우, 양인목, \*이승희, \*\*조봉규, \*\*조영주  
성신여자대학교, \*경기대학교, \*\*유용자원재활용기술개발사업단

A study on the environmental performance and economic value of recycled resources from spent fluorescent lights

Joong Woo Ahn, Inmog Yang, \*Seung-Whee Rhee, \*\*Bong Gyoo Cho, \*\*Youngju Cho  
Sungshin Women's University, \*Kyonggi University, \*\*R&D Center for Valuable Recycling

## Abstract

This study was conducted to figure out environmental performance and the performance based economic value in order to confirm the value and necessity on the recycling technology of spent fluorescent lights. The comparison result of environmental impact of recycled six materials shows 1.33% of resource depletion, 3.23% of global warming, 1.70% of human toxicity, respectively. The assessment results of economic value of the environmental performance correspond to 266,000won/ton for six impact categories except toxicity. In addition, the environmental impact of recycling process can be improved by yield and energy efficiency increase.

## 1. 서론

국내 폐 형광등은 2012년 기준 연간 약 1억 4천만 개 이상 발생<sup>1)</sup>되고 있으나 71% 이상이 재활용되지 못하고 있다.<sup>2)</sup> 폐 형광등은 40W 직관형광등을 기준으로 평균 25mg의 수은이 함유되어 있어, 폐 형광등 1억 4천만 개 속에는 3.5톤의 수은이 포함되어 있고 이 중 재활용되지 못하는 71%인 2.45톤의 수은이 매립되고 있는 실정이다.<sup>3)</sup>

수은은 독성 물질로 인체에 신경과 소화기 장애를 유발시키며 미나마타병의 주범으로 알려져 있다. 2013년 10월 유엔 환경계획 주최로 수은 사용과 배출을 줄이기 위한 미나마타 협약이 체결되었으며 이에 따라 우리나라 환경부에서는 수은 함유 폐기물의 안전관리를 위해 “수은 함유 폐기물 관리체계 개선 추진계획(2012~2016)”을 수행하고 있다.<sup>4)</sup>

유용자원재활용기술개발 사업단에서는 이 추진 계획에 따라 2011년부터 경기대학교에 위탁하여 폐 형광등 수은으로 인한 환경오염을 예방하고 수은 함유 폐기물의 안전관리체계 개선을 위해 폐 형광등 재활용 기술을 개발하고 있다. 본 연구는 현재 개발 중인 재활용 기술에 의해 재생되는 유가자원의 환경영향을 평가하고 신재와 비교함으로써 재생재의 환경성과 환경성능 기반의 경제적 가치를 파악하기 위해 수행되었다.

## 2. 재활용 기술 전과정평가

### 2.1 목적 정의

본 폐 형광등 재활용 기술에 의해 재생되는 유용자원은 유리, 알루미늄, 구리, 철, PVC, 형광물질, 총 6개 자원이다. 본 전과정평가는 폐 형광등 재활용 기술 및 이 재활용 기술을 통해 재생되는 6개 유용자원의 환경영향을 파악하고, 재생자원과 6개 유용자원 신재의 환경영향 비교를 통해 재생 자원의 환경 및 경제적 성과를 평가하기 위하여 수행되었다.

### 2.2 범위 정의

#### 2.2.1 기능 및 기능단위 설정

본 재활용 기술로 재생되는 자원의 종류가 다양하여 재활용 기술과 폐 형광등 무게를 기준으로 기능 및 기능단위를 설정하였다. 본 전과정평가의 기능, 기능단위 및 기준흐름은 Table 1과 같다.

Table 1 폐 형광등 재활용 기술 전과정평가를 위한 기능 및 기능단위, 기준흐름

구분 \ 제품명	재생 유용자원
기능	폐 형광등 재활용 기술에 의해 재생되는 유용자원
기능단위	재생 유용자원 무게
기준흐름	재생 유용자원 0.9699321kg (유리 0.8244423kg, 알루미늄 0.0552861kg, PVC 0.0455868kg, 철 0.0252182kg, 구리 0.0087294kg, 형광분말 0.0106693kg) - 폐 형광등 1kg 재활용 시 재생되는 유용자원 무게임.

#### 2.2.2 시스템 경계

일반적으로 재활용을 위해서는 재생 공정 전에 수집, 운송, 선별 공정이 필요하다. 본 폐 형광등 재활용에서는 수집 시스템이 갖추어져 있고, 선별 공정이 불필요하여 재활용 공장으로 이동하는 운송 공정과 유용자원 생산을 위한 재생 공정이 포함된다. 본 전과정평가에서는 대상 기술이 현재 개발 중이어서 운송 데이터 수집이 불가능한 점을 고려하여 재생 공정만을 시스템 경계로 설정하였다.

#### 2.2.3 가정 및 제한사항

본 연구에서 투입 물질인 폐 형광등은 기존에 폐기물인 점을 감안하여 환경부하를 “0”으로 가정하였다. 또한, 일반폐기물 매립에 대한 국내 데이터가 부재하여 Eco-invent의 데이터베이스를 사용하였다.

#### 2.2.4 할당

본 전과정평가에서는 재생되는 유용자원을 하나의 재생재 그룹으로 규정하여 할당을 수행하지 않았다. 재생재 그룹은 [Fig. 1]에 표현하였다.

### 2.3 전과정 목록분석

#### 2.3.1 공정흐름도

본 연구 대상 공정의 흐름도는 Figure 1과 같다.

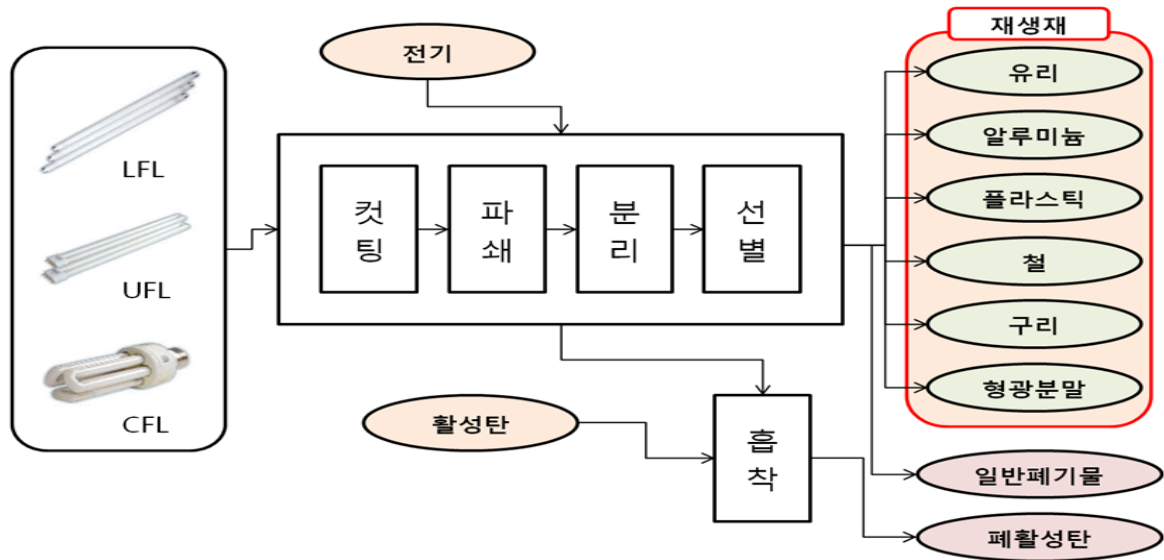


Figure 1 폐 형광등 재활용 공정 흐름도

### 2.3.2 데이터 수집

전과정평가를 위한 데이터는 폐 형광등 재활용 기술을 개발하고 있는 대한민국 수원시 소재 경기대학교 실험실의 2015년 8월 현장 데이터를 수집하였다. 데이터 출처는 Table 2와 같으며, 데이터 값은 개발 중인 기술인 관계로 작성하지 않았다.

Table 2 폐 형광등 재활용 기술 데이터 출처

구분	물질명	용도	데이터 출처			비고
			실측	계산	추정	
투입	폐 형광등	원료	√			환경부하 “0”
	활성탄	수은 흡착	√			
에너지	전기	원료 가공		√		
배출	재생 자원	제품	√			
	일반폐기물	폐기물		√		매립
	폐활성탄	폐기물		√		소각

상위흐름 및 하위흐름 연결을 위한 LCI 데이터베이스는 환경부(활성탄, 폐활성탄 소각)와 산업통상자원부(전기)에서 구축한 데이터베이스를 사용하고, 국내에 없는 것은 Eco-invent에서 구축한 것(일반폐기물)을 사용하였다.

## 2.4 전과정 영향평가

### 2.4.1 특성화 결과

폐 형광등 재활용 재생 자원에 대한 전과정평가를 수행 한 결과 다음과 같이 특성화 결과 값이 나타났다. 전과정평가의 특성화 값은 산업부의 방법론을 적용하여 오존층 파괴, 산성화, 자원소모, 부영양화, 광화학산화물생성, 인체 독성, 생태 독성의 8대 영향 범주에 대하여 도출하였다. 생태 독성은 수생태계(Fresh water aquatic ecotoxicity), 해양생태계(Marine aquatic ecotoxicity), 육상 생태계(Terrestrial ecotoxicity) 독성을 포함한다.

특성화 결과 오존층 파괴와 산성화에는 수은 흡착을 위해 투입되는 활성탄이, 자원고갈(75.8%)과 지구온난화(86.8%), 부영양화에는 전기에너지 사용이 가장 큰 영향요인으로 나타났다. 인체 독

성에는 폐 활성탄이 57.8%로 가장 큰 요인으로 나타났다.

Table 3 특성화 결과 값

영향 범주	Unit	활성탄	전기	일반폐기물	폐 활성탄	Total
오존층 파괴	kg CFC11	8.87.E-10	1.78.E-11	2.17.E-11	3.79.E-12	9.30.E-10
산성화	kg SO2	5.19.E-05	4.32.E-05	2.16.E-05	2.96.E-06	1.20.E-04
자원고갈	1/yr	2.47.E-05	8.94.E-05	9.72.E-07	2.52.E-06	1.18.E-04
지구온난화	kg CO2	3.05.E-03	2.56.E-02	1.32.E-04	7.48.E-04	2.95.E-02
부영양화	kg PO43-	3.11.E-06	8.06.E-06	3.54.E-07	3.67.E-07	1.19.E-05
광화학산화물생성	kg Ethylene	2.24.E-06	1.91.E-06	2.37.E-08	6.75.E-09	4.18.E-06
인체독성	kg 1,4 DCB	1.31.E-03	8.02.E-05	1.40.E-03	3.82.E-03	6.62.E-03
생태독성	kg 1,4 DCB	9.04.E-02	1.15.E-02	4.27.E-01	3.03.E-01	8.32.E-01

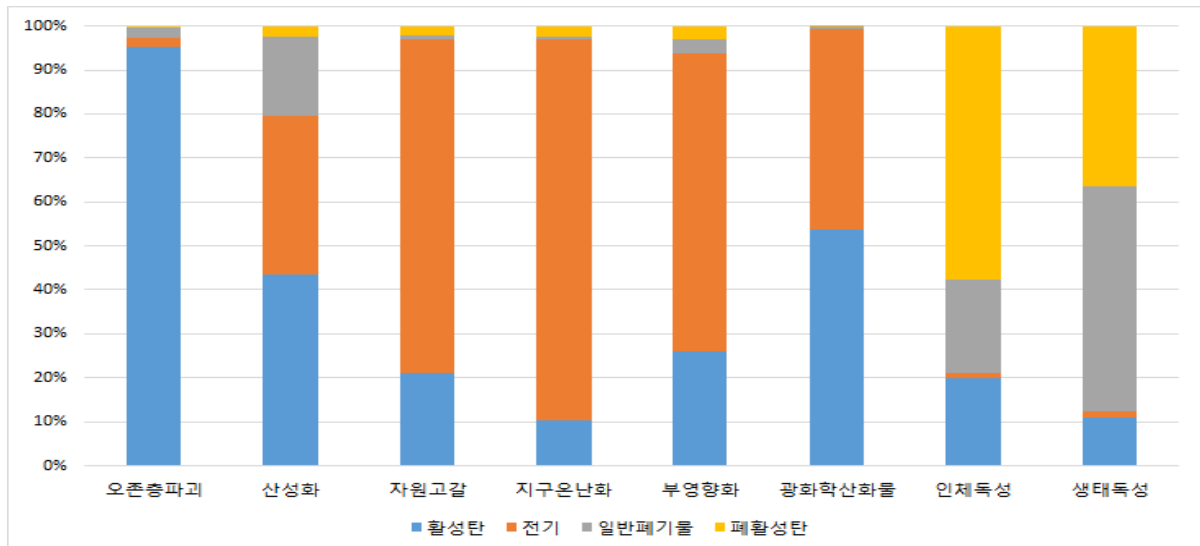


Figure 2 폐 형광등 재활용 공정 물질 별 환경영향

#### 2.4.2 정규화 결과

본 전과정평가에서 정규화 결과 값은 Table 4와 같다.

Table 4 정규화 결과 값

영향 범주	활성탄	전기	일반폐기물	폐 활성탄	Total	%
오존층 파괴	2.18.E-11	4.38.E-13	5.33.E-13	9.32.E-14	2.29.E-11	0.01%
산성화	1.30.E-09	1.09.E-09	5.42.E-10	7.43.E-11	3.00.E-09	0.71%
자원고갈	9.92.E-10	3.59.E-09	3.91.E-11	1.01.E-10	4.73.E-09	1.12%
지구온난화	5.52.E-10	4.64.E-09	2.38.E-11	1.35.E-10	5.35.E-09	1.27%
부영양화	2.37.E-10	6.15.E-10	2.70.E-11	2.80.E-11	9.07.E-10	0.22%
광화학산화물생성	2.18.E-10	1.85.E-10	2.30.E-12	6.55.E-13	4.06.E-10	0.10%
인체독성	8.89.E-10	5.42.E-11	9.46.E-10	2.58.E-09	4.47.E-09	1.06%
생태독성	8.37.E-08	1.68.E-09	3.05.E-07	1.18.E-08	4.02.E-07	<b>95.54%</b>
Total	8.79.E-08	1.18.E-08	3.07.E-07	1.48.E-08	4.21.E-07	100%
%	<b>21%</b>	3%	<b>73%</b>	4%	100%	

정규화 계산 결과, 환경영향 범주에서는 생태독성이 95.54%를 차지하여 가장 영향이 큰 범주로 나타났으며 물질별 영향은 일반폐기물과 활성탄이 각각 73%와 21%를 차지하는 것으로 나타났다. 일반폐기물과 활성탄이 주로 생태독성에 영향을 미치는 바, 독성 범주를 제외하고 정규화 값을 계산한 결과 지구온난화(37%)와 자원고갈(33%)이 주요 환경영향 범주로 나타났으며, 영향 요인은 전기 에너지 사용이 70%로 나타났다.

Table 5 독성 제외 정규화 결과 값

영향 범주	활성탄	전기	일반폐기물	폐 활성탄	Total	%
오존층 파괴	2.18.E-11	4.38.E-13	5.33.E-13	9.32.E-14	2.29.E-11	0.2%
산성화	1.30.E-09	1.09.E-09	5.42.E-10	7.43.E-11	3.00.E-09	21%
자원고갈	9.92.E-10	3.59.E-09	3.91.E-11	1.01.E-10	4.73.E-09	<b>33%</b>
지구온난화	5.52.E-10	4.64.E-09	2.38.E-11	1.35.E-10	5.35.E-09	<b>37%</b>
부영양화	2.37.E-10	6.15.E-10	2.70.E-11	2.80.E-11	9.07.E-10	6%
광화학산화물생성	2.18.E-10	1.85.E-10	2.30.E-12	6.55.E-13	4.06.E-10	3%
Total	3.32E-09	1.01E-08	6.35E-10	3.39E-10	1.44E-08	100%
%	23%	<b>70%</b>	4%	2%	100%	

### 3. 재생자원과 신재의 환경영향 비교

폐 형광등 재활용에 따른 환경 개선 효과를 파악하기 위해 폐 형광등의 재활용을 통해 재생되는 유용자원과 신재의 환경영향을 비교하였다. 이를 위해 신재의 환경영향을 산출하였다.

#### 3.1 재생 유용자원 별 신재의 전과정평가 결과 값

폐 형광등 재활용 기술로 재생되는 유용자원은 유리, 철, 알루미늄, 구리, 플라스틱(PVC), 형광 물질로서 폐 형광등 1kg 재활용 시 재생되는 양은 유리 0.8244423kg, 철 0.0252182kg, 알루미늄

0.0552861kg, 구리 0.0087294kg, 플라스틱(PVC) 0.0455868kg, 형광분말 0.0106693kg이다.

각 유용자원 신재의 전과정평가를 위한 데이터는 환경부(판유리, 탄소강), 산업부(구리, PVC, 알루미늄), 해외 Eco-invent(형광물질)의 LCI 데이터베이스를 활용하였다. 형광물질은 데이터가 없어 Chemicals inorganic 데이터를 사용하였다.

재생 유용자원별 신재에 대한 특성화 결과 값과 정규화 결과 값은 Table 6, 7과 같다.

Table 6 신재 특성화 결과 값

영향 범주	Unit	유리	알루미늄	PVC	철	구리	형광분말	Total
오존층 파괴	kg CFC11	2.15.E-07	1.68.E-07	3.90.E-08	6.41.E-10	1.46.E-09	9.08.E-07	1.33.E-06
산성화	kg SO2	4.67.E-03	5.13.E-04	1.39.E-04	4.97.E-05	1.70.E-04	1.56.E-04	5.70.E-03
자원고갈	1/yr	6.41.E-03	1.48.E-03	9.54.E-04	2.25.E-05	4.22.E-04	5.85.E-05	9.35.E-03
지구온난화	kg CO2	6.71.E-01	1.05.E-01	6.28.E-02	6.07.E-02	4.11.E-02	2.09.E-02	9.61.E-01
부영양화	kg PO4 <sup>3-</sup>	2.95.E-04	7.03.E-05	2.52.E-05	9.39.E-06	1.48.E-05	2.01.E-05	4.35.E-04
광화학산화물생성	kg Ethylene	2.03.E-04	2.12.E-05	7.72.E-05	5.22.E-06	4.74.E-06	6.73.E-06	3.18.E-04
인체독성	kg 1,4 DCB	2.73.E-01	1.06.E-01	2.06.E-03	1.99.E-03	1.67.E-02	8.13.E-03	4.09.E-01
생태독성	kg 1,4 DCB	1.50.E+02	2.17.E+00	4.57.E+00	5.82.E-01	3.81.E-01	1.12.E+01	1.69.E+02

Table 7 신재 정규화 결과 값

영향 범주	유리	알루미늄	PVC	철	구리	형광분말	Total	%
오존층 파괴	5.30.E-09	4.14.E-09	5.95.E-10	1.58.E-11	3.60.E-11	2.23.E-08	3.28.E-08	0.1%
산성화	1.17.E-07	1.29.E-08	3.49.E-09	1.25.E-09	4.26.E-09	3.91.E-09	1.43.E-07	0.6%
자원고갈	2.58.E-07	5.97.E-08	3.84.E-08	9.06.E-10	1.70.E-08	2.35.E-09	3.76.E-07	1.7%
지구온난화	1.21.E-07	1.90.E-08	1.14.E-08	1.10.E-08	7.44.E-09	3.79.E-09	1.74.E-07	0.8%
부영양화	2.25.E-08	5.36.E-09	1.92.E-09	7.16.E-10	1.13.E-09	1.54.E-09	3.32.E-08	0.1%
광화학산화물생성	1.97.E-08	2.06.E-09	7.49.E-09	5.06.E-10	4.60.E-10	6.53.E-10	3.09.E-08	0.1%
인체독성	1.85.E-07	7.19.E-08	1.39.E-09	1.35.E-09	1.13.E-08	5.49.E-09	2.76.E-07	1.2%
생태독성	1.81E-05	2.06E-06	1.69E-07	5.65E-08	2.77E-07	5.96E-07	2.12.E-05	95.2%
Total	1.88.E-05	2.23.E-06	2.34.E-07	7.22.E-08	3.18.E-07	6.36.E-07	2.23.E-05	100%
%	84.3%	10.0%	1.0%	0.3%	1.4%	2.9%	100%	

### 3.2 재생재와 신재의 환경영향 비교

앞서 수행한 재생재의 전과정 환경영향 값과 신재의 환경영향 값을 비교하였다. 비교는 동등한 품질 조건하에 수행되어야 하므로 재생재의 품질 수준을 본 재활용 기술을 개발하고 있는 전문가의 의견인 95%로 적용하였다.

Table 8 재생재와 신재의 환경영향 특성화 결과 비교

영향 범주	Unit	재생재	품질 적용	신재	%
오존층 파괴	kg CFC11	9.30E-10	9.79E-10	1.33E-06	0.07%
산성화	kg SO2	1.20E-04	1.26E-04	5.70E-03	2.22%
자원고갈	1/yr	1.18E-04	1.24E-04	9.35E-03	<b>1.33%</b>
지구온난화	kg CO2	2.95E-02	3.11E-02	9.61E-01	<b>3.23%</b>
부영양화	kg PO43-	1.19E-05	1.25E-05	4.35E-04	2.88%
광화학산화물생성	kg Ethylene	4.18E-06	4.40E-06	3.18E-04	1.38%
인체독성	kg 1,4 DCB	6.62E-03	6.97E-03	4.09E-01	<b>1.70%</b>
생태독성	kg 1,4 DCB	8.32E-01	8.76E-01	1.69E+02	0.52%

재생재와 신재의 환경영향을 비교한 결과 주요 영향 범주인 자원고갈과 지구온난화, 인체독성 범주에서 재생재가 신재의 1.33%, 3.23%, 1.70%를 나타내었다.

#### 4. 신재 대비 재생재의 환경영향 개선에 따른 경제적 가치

재생 유용자원의 환경영향 저감에 대한 경제적 가치를 안중우의 4인의 전과정평가 영향범주별 경제 가치 분석에 관한 연구 결과인 Table 10를 기준으로 계산하였다. 경제적 원단위가 환경부 특성화 단위에 맞추어져 있어서 환경부 특성화 값으로 계산하였다. 계산 결과 Table 11과 같이 폐형광등 1kg을 본 기술로 재활용할 경우 환경영향 저감에 따른 경제적 가치는 kg당 266원, 톤 당 266,000원으로 평가되었다.

Table 10 환경영향범주별 경제적 원단위<sup>5)</sup>

영향범주	경제적 원단위 산정 기준	경제적 원단위
자원소모	안티몬(Sb) 국제 거래 가격	11,408원/kg Sb
지구온난화	영국 정부 탄소가치 추정 결과	26.65원/kg CO <sub>2</sub>
오존층영향	일본의 피해 산정형 전과정 영향평가 방법론(LIME2: )의 오존층 영향 평가 결과	139,970원/kg CFC11
산성화	영국 정부에서 발간한 대기질 경제성 분석의 대기오염물질별 피해비용의 추정치	2,599원/kg SO <sub>2</sub>
부영양화	우리나라 하수 처리장의 수질오염물질 제거 단가	15,253원/kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
광화학산화물생성	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> 단위배출에 따른 피해비용(박필주, 김만영(2010))	3,030원/kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>

Table 11 재생 유용자원의 공정 환경영향 저감의 경제 가치

영향 범주	Unit	재생재 (품질적용)	신재	차이	단가(원)	경제가치 (원/kg)
광화학산화물생성	kg C2H4 eq	2.59.E-05	2.21.E-03	2.19.E-03	3,030	7
자원고갈	kg antimony	1.83.E-04	1.81.E-02	1.79.E-02	11,408	205
산성화	kg SO2 eq	1.14.E-04	3.55.E-03	3.43.E-03	2,599	9
부영양화	kg PO43- eq	1.13.E-05	5.58.E-04	5.47.E-04	15,253	8
지구온난화	kg CO2 eq	2.81.E-02	1.42.E+00	1.39.E+00	26.65	37
오존층 파괴	kg CFC11 eq	1.03.E-09	4.91.E-08	4.80.E-08	139,970	0.01
						266

## 5. 결론

본 폐 형광등 재활용 기술로 재생되는 유용자원들의 환경영향은 영향 범주별로 자원고갈 1.33%, 지구온난화 3.23%, 인체독성 1.70%의 우수한 결과를 보여주고 있다.

환경영향의 차이를 경제적 가치로 환산한 결과 폐 형광등 1톤 재활용에 266,000원으로 계산되었으며, 2012년 기준 매립되는 폐 형광등의 10%만 본 재활용 기술로 재생재를 생산한다면 연간 69억 원 이상의 경제적 가치를 창출할 수 있고, 온실가스인 이산화탄소량으로는 36,920톤을 저감시킬 수 있는 것으로 나타났다. 본 연구의 경제적 가치 평가에서 제외한 인체 독성과 생태 독성 범주를 정책연구 2009-28의 저탄소 녹색성장을 위한 과학기술정책 과제<sup>6)</sup>에서 연구된 62,380원/kg 1,4DCB(디클로로벤젠)을 적용하여 계산하면 인체 독성은 톤당 2,500만 원 이상, 생태 독성은 톤 당 100억 원 이상의 경제적 가치가 산출된다. 하지만, 독성 데이터의 신뢰도와 민감성을 고려할 때 참고적으로만 활용될 수 있을 것이다.

본 연구 결과로 나타난 환경영향과 경제적 가치가 모두 국내에 직접적으로 해당된다고 볼 수는 없으나, 주요 환경요인으로 나타난 일반폐기물과 전기에너지가 국내에 직접적인 영향을 미친다는 것을 주목할 필요가 있다. 재활용 공정에서 주요 환경요인으로는 일반폐기물이 73%로 가장 비중이 높았으며, 95.54%의 지배적인 영향을 차지하고 있는 생태독성 범주 제외 시에는 전기 에너지 사용이 70%를 차지하는 것으로 나타났다. 일반폐기물은 수율을 높이는 노력을, 전기 에너지는 에너지 효율성 제고를 통해 재활용 공정의 환경성적을 보다 개선할 수 있을 것이다.

비교 연구에서는 결과의 일관성을 위해 동일한 데이터베이스가 사용되어야 하나 일부 데이터베이스가 존재하지 않아 유사 데이터를 사용한 것과 재생자원에 대한 할당이 중량으로 이루어진 점은 한계점이다. 또한 비교 시 기능의 동일성을 위해 재생재의 품질을 고려하였으나, 품질의 차이에 비해 환경영향의 차이가 클 수 있다는 것도 결과에 영향을 미칠 수 있다. 환경영향의 경제적 가치는 환경영향의 가치를 인식하는데 기여할 수 있어 중요하지만, 계산 과정에서 범위와 지역적 특성, 미래 가치 등과 같은 요소들을 모두 수렴했다고 보기 어려운 점도 한계점이다. 더하여, 폐 형광등 재활용이 이루어진다면 폐 형광등의 매립을 회피할 수 있으므로 이로 인한 환경영향의 개선도 추가적으로 고려하여야 할 사항이다.

## 6. 사사

본 연구는 폐금속·유용자원재활용기술개발사업단의 지원을 받아 수행되었습니다.



## 7. 참고문헌

1. 한국조명재활용협회, [www.recyclinglamp.org](http://www.recyclinglamp.org)
2. 환경부, 폐기물 발생 및 처리 현황, 2013.
3. 이승희·박헌수, 삼파장과 일반 폐형광등 구성물질에서의 수은 분포 특성, *Journal of Korea Society of Waste Management*, 2013. 4.
4. 환경부 보도자료, 수은 함유 폐기물 안전관리 강화, 국제수은협약 대응한다, 2013. 3. 22.
5. 안중우·김대수·양인목·조봉규·조영주, 전과정평가 영향범주별 경제 가치 분석에 관한 연구, 전과정평가학회지, 2015. 9.
6. 장진규 외, 저탄소 녹색성장을 위한 과학기술정책 과제, 과학기술정책연구원, 2009.
7. 환경성적표지 LCI 데이터베이스, [www.edp.or.kr](http://www.edp.or.kr)
8. Eco-invent 데이터베이스, 2007.
9. ISO 14040, 2006: Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework.
10. ISO 14044, 2006: Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guideline.