

# 미분류 열가소성 범용수지 폐기물 재자원화의 환경영향 저감효과 분석

이중효<sup>1</sup> · 황용우<sup>2,†</sup> · 김두영<sup>3</sup> · 박영수<sup>4</sup>

<sup>1</sup>인하대학교 순환경제환경시스템전공

<sup>2</sup>인하대학교 환경공학과

<sup>3</sup>(주)두영금속

<sup>4</sup>대금지오웰

## Analysis of environmental impact reduction effects of unclassified thermoplastic waste recycling

Jong Hyo Lee<sup>1</sup> · Yong Woo Hwang<sup>2,†</sup> · Doo Young Kim<sup>3</sup> · Young Su Park<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Program in Circular Economy Environmental System, Inha University

<sup>2</sup>Department of Environmental Engineering, Inha University

<sup>3</sup>Dooyoung Metal

<sup>4</sup>Daekeum Geowell Co.,Ltd.

**ABSTRACT:** This study conducted the environmental load comparative analysis between unclassified thermoplastic wastes incineration/landfill and recycled thermoplastic blocks manufacturing with considering the avoided burden effects of concrete bricks manufacturing by using the LCA methodology and quantitatively calculated the environmental advantages of recycling unclassified thermoplastic blocks manufacturing. As a result of the environmental impact assessment of the recycling unclassified thermoplastic blocks manufacturing, ODP was decreased by 1.49E-05 kg CFC-11-eq./unit, and the reduction ratio was 99.95% which implies removing most of all environmental impact. POCP also decreased by 1.64E+00 kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-eq./unit, and the reduction ratio was 99.88%. AP also was decreased by 2.30E+01 kg SO<sub>2</sub>-eq./unit, and the reduction ratio was 97.92%. EP also was decreased by 2.79E+00 kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-eq./unit and the reduction ratio was 96.86%. The reduced amount of GWP also was 1.49E+03 kg CO<sub>2</sub>-eq./unit and the reduction ratio was 83.77%. But, ADP was decreased by 1.92E-01 kg Sb-eq./unit and the reduction ratio was 15.09% which is the least reduction effect among the six environmental impact categories. The results of this study imply that recycling unclassified thermoplastic wastes can eliminate most of all environmental impacts in the four categories (ODP, POCP, AP, and EP) compared to thermoplastic waste incineration/landfill. In particular, the reduction of CO<sub>2</sub> emission can be visualized at the same level as the amount of annual greenhouse gas absorption of 634 pine trees or 421 oak trees. The implications derived from this study have a clear purpose as macroscopic basis data for the necessity of recycling waste thermoplastics and business strategy, and this suggests the possibility of derivative research through a more sophisticated data collection process in future research.

**Key words:** Unclassified thermoplastic waste, Recycled thermoplastic block, Life cycle assessment, Environmental impact assessment, Thermoplastic recycling technology

**요약문:** 본 연구는 미분류 열가소성 범용수지 폐기물의 소각·매립 공정과 펄라스틱 블록 생산 공정, 그리고 내장재 콘크리트 벽돌 생산에 대한 회피효과를 고려하여 환경영향 비교 분석을 수행하였다. 분석 결과, ODP는 1.49E-05 kg CFC-11-eq./unit 저감되었으며, 비율상으로는 99.95%로 거의 대부분의 환경영향을 제거하는 것으로 나타났다. POCP 또한 1.64E+00 kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-eq./unit 감소하는 것으로 나타났으며 비율상으로는 무려 99.88%에 육박한다. AP도 2.30E+01 kg SO<sub>2</sub>-eq./unit 감소하였으며 비율상으로는 97.92%에 달한다. EP도 마찬가지로 2.79E+00 kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-eq./unit 감소하였으며 비율상으로도 96.86%의 높은 저감폭을 보였다. GWP의 저감량 또한 1.49E+03 kg CO<sub>2</sub>-eq./unit이며 비율상으로는 83.77%로 높은 수준에서 환경영향이 저감되었다. ADP의 경우 감축량은 1.92E-01 kg Sb-eq./unit이며 비율상으로는 15.09%로 6대 환경영향범주 중 저감 효과가 가장 적은 것으로 나타났다. 본 연구의 결과는 미분류 열가소성 범용수지 폐기물을 재자원화할 경우 기존의 열가소성 범용수지 폐기물 소각·매립 대비 ODP, POCP, AP, EP의 4개 범주에서 거의 모든 환경영향을 제거할 수 있음을 의미하며 특히 CO<sub>2</sub>의 온실가스 저감효과는 소나무 634 그루, 신갈나무 421 그루가 연간 흡수하는 온실가스의 양과 동일한 수준이다. 본 연구를 통해 도출한 시사점은 미분류 열가소성 범용수지 폐기물 재자원화의 필요성 및 사업화 방법에 대한 거시적인 차원의 근거자료로써 분명한 목적을 띠고 있으며 이는 향후 보다 정교한 데이터 수집 과정을 통한 파생 연구의 가능성을 제시한다.

**주제어:** 미분류 열가소성 범용수지 폐기물, 열가소성 범용수지 재활용 블록, 전과정평가, 환경영향평가, 열가소성 범용수지 재활용 기술

## 1. 서론

코로나 19가 시작된 2020년 기준 국내 일평균 쓰레기 발생량은 540,872 ton으로 2019년 대비 8.8% 증가한 수치이다<sup>1)</sup>. 이는 발생량 그리고 증가 폭 측면에서 역대 최고 수준이다. 1인당 플라스틱 쓰레기 배출량 또한 88 kg으로 미국(130 kg)과 영국(99 kg)에 이어 세계 3위 수준이다<sup>2)</sup>.

플라스틱은 자연 상태에서 분해되기까지 최대 500년이 걸린다. 또한, 소재의 특성상 산업화 시대 이후 꾸준히 환경오염을 유발시켜 왔음에도 플라스틱의 수요는 꾸준히 증가 추세에 있다<sup>3)</sup>.

전 세계적으로 연간 플라스틱 생산량은 2000년 2억 3,400만 ton에서 2019년 4억 6,000만 ton으로 20년 새 두 배 이상 증가하였으며, 같은 기간 플라스틱 폐기물의 발생량은 1억 5,600만 ton에서 3억 5,300만 ton으로 두 배 이상 크게 증가하였다. 반면, 폐플라스틱의 재활용률은 9%대에 불과하며, 나머지 91%는 매립(50%), 소각(19%) 그리고 무단투기(22%) 등이다<sup>4)</sup>.

폐플라스틱의 소각 및 매립은 다이옥신, 납, 수은과 같은 독성 물질을 방출하며, 대기오염 및 기후변화의 원인이 되기도 한다<sup>5)</sup>. 따라서, 폐플라스틱 재활용은 순환경제의 실현과 직접적으로 연관되어있으며, 이는 현재 중요 아젠다인 탄소중립 이행 과정에 있어 환경적 측면에서의 분석이 반드시 이루어져야 하는 연구 주제이다.

이에 본 연구에서는 폐플라스틱의 대부분을 차지하는 미분류 열가소성 범용수지 폐기물의 재활용 기술을 분석하고, 가장 적용 가능성이 높은 기술의 환경부하 저감효과를 정량화하고자 한다.

## 2. 연구 배경

### 2.1 폐플라스틱 재활용의 경제적·정책적 전망

탄소중립 아젠다를 기조로 다양한 측면에서의 글로벌 환경규제가 등장하면서, 다국적 기업들의 ESG (Environmental, Social, Governance) 경영 활동 또한 폭넓게 전개되고 있다. 이 중에서도 폐플라스틱 재활용은 가장 각광을 받고 있는 사업 분야 중 하나이다.

경제적인 관점에서, 폐플라스틱 재활용 시장은 전 세계적으로 친환경 소비가 확산함과 동시에 빠른 속도로 성장하고 있다. 2019년 시장조사업체 Acumen Research and Consulting의 보고서에 따르면, 2018년 68억달러(약 8조 원) 규모였던 글로벌 폐플라스틱 재활용 시장 규모가 2026년에는 125억달러(약 15조 원) 수준으로 두 배 가량 성장할 것이라 전망했다. 이와 같은 전망으로 특히, 석유화학업계는 폐플라스틱 재자원화를 위한 기술 개발과 시장 선점에 박차를 가하고 있다<sup>6)</sup>.

환경부의 자원순환정보시스템 통계를 보면 2022년 11월 기준, 전국 평균 압축 PET의 가격은 1 kg 당 451.1원,

Table 1. Plastic scrap price trend (2020, 2022)<sup>7)</sup>

	Plastic wastes price (unit: per won/kg)		Price increase rate
	2020.11	2022.11	
PET (Compressed)	210.9	451.1	113.89%
PE (Compressed)	269.4	498.2	84.93%
PP (Compressed)	240.3	406.6	69.21%
Average			88.16%

압축 PE의 가격은 1 kg 당 498.2원, 압축 PP의 가격은 406.6원으로 나타났다. 이는, 2020년 11월 대비 압축 PET(210.9원)는 113.89%, 압축 PE(269.4원)는 84.93%, 압축 PP(240.3원)는 69.21%로 평균 88.16% 폭등한 수준에서 가격대가 형성되어 있다(Table 1)<sup>7)</sup>.

이와 같은 폐플라스틱 가격 폭등은 국제유가변동, 품목별 수급 상황 변화 등 다양한 요인에 기인한다. 특히, 우크라이나-러시아 전쟁과 같은 대외적 요인, 기업들의 폐플라스틱 수요 증가 등 산업 요인 변화는 폐플라스틱 가격 상승에도 큰 영향을 미치는 것으로 볼 수 있다<sup>8)</sup>.

소비자들의 수요 변화 또한 폐플라스틱 가격 상승의 원인이 된다. 최근, 친환경 제품 선호 트렌드와 맞물려 의류, 화장품 용기, 포장재 등 재생 플라스틱을 활용한 제품의 수요량이 증가 추세에 있다<sup>9)</sup>. 이는 폐플라스틱 재생 소재를 원재료로 하는 제품 수요의 증가를 의미하며, 수요의 증가는 자연스럽게 폐플라스틱 가격의 상승으로 이어진다.

정책적 관점에서 또한 폐플라스틱 재활용 산업의 전망은 밝다.

환경부는 2050 탄소중립 실현을 위해 「전 주기 脫플라스틱 대책」을 마련하고, 2025년까지 폐플라스틱 발생량을 2021년 발생량(492만 ton, 잠정) 기준 80% 수준(393만 ton)으로 감량 목표를 설정하였다. 그리고 이와 더불어서 재생 원료 사용률을 현재 0.2%에서 10%로, 물질 재활용률을 현재 18%에서 25%로, 바이오 플라스틱 기술 수준(미국 대비)을 현재 85%에서 90%까지 상향 조정하고, 소각형 재활용 비중을 현재 69%에서 55%까지 낮추었다<sup>10)</sup>. 즉, 정부의 탈플라스틱 정책은 지속적으로 강화되고 있는 추세이며, 이러한 정책 트렌드는 폐플라스틱 재활용 산업의 성장 가능성에 긍정적인 영향을 주는 외재적 요인으로 볼 수 있다.

### 2.2 폐플라스틱 재활용 기술 동향과 한계점

앞서 논의한 폐플라스틱 재활용의 경제적·정책적 전망을 보았을 때, 폐플라스틱 재활용 사업은 탄소중립 아젠다에 부응한다는 점에서 당위성과 더불어 변화하는 법·제도적 여건에 상당한 타당성을 가지고 있는 것으로 보인다. 하지만, 폐플라스틱을 수거하고 재활용하는 과정에서 수

반되는 비용은 실제 사업을 수행하는 중소기업 단위에서 감당하기 어려운 수준이다.

폐플라스틱은 일반적으로 열가소성 플라스틱(범용수지, 엔지니어링 플라스틱 등)과 열경화성 플라스틱으로 분류되며 이 중 열가소성 플라스틱의 일종인 범용수지만 재활용이 가능하다. 범용수지는 저밀도폴리에틸렌(LDPE), 고밀도폴리에틸렌(HDPE) 폴리프로필렌(PP), 폴리스티렌(PS), 폴리에틸렌 테레프탈레이트(PET), 폴리염화비닐(PVC)의 6개 소재가 대표적이며, 이들이 전체 범용수지 시장에서 차지하는 비중은 90%를 상회한다<sup>11)</sup>.

열가소성 범용수지 폐기물의 재활용을 위해서는 인력을 활용한 성상별 분류가 필수적이다<sup>12)</sup>. 성상별로 분류되지 않은 범용수지는 매립 또는 소각처리된다. 일반가정에서는 범용수지를 성상별로 분류하여 배출하는 것이 쉽지 않으며, 최근에는 복합 소재 범용수지의 비중이 높아지면서 플라스틱 재활용률은 더욱 감소하는 추세이다<sup>13)</sup>.

미분류 폐플라스틱 재활용에서 가장 큰 비중을 차지하는 비용 항목은 인건비이다. 최근 인건비의 가파른 상승으로 인해 중소기업 단위에서는 폐플라스틱을 재활용하였을 때 취할 수 있는 편익이 거의 없거나 손해가 발생한다는 것이 재활용 업계의 중론이다. 그뿐만 아니라, 인력을 활용하여 폐플라스틱을 성상에 맞게 분류하더라도 이를 재활용이 가능한 수준까지 분류해내기 위해서는 반복적인 분류 작업을 필요로 하며, 이는 상당한 시간과 인건비가 추가 비용으로 부담되어야 함을 의미한다. 즉, 현재 폐플라스틱 재활용은 실질적으로 경제성을 확보하기가 매우 어려우며, 분류가 이루어진 이후에도 플라스틱이 성상별로 분류되지 않은 채 여러 소재가 혼재되어 있는 경우가 많아 실질적으로 재활용되는 양은 더욱 적다<sup>14)</sup>.

기술의 발전과 더불어 원심력을 이용한 비중선별, 정전 분리장치를 이용한 정전선별, 가시광선을 이용한 색상선별, 근적외선/레이저/초분광 기술, 인공지능을 이용한 이미지 인식 선별 등 폐플라스틱 분류에 적용되는 다양한 기술이 존재하기는 하나<sup>15)</sup>, 설비 투자비용 및 인건비 대비 편익이 적어 다양한 최첨단 기술의 등장에도 불구하고 대부분의 플라스틱 성상별 분류 작업은 20년 전 수준에 머물러 있는 실정이다.

성상별로 분류가 이루어진 플라스틱 또한 재활용의 경제성이 없다는 문제점이 있다. 대표적인 예로, 열가소성 범용수지 폐기물을 가열해 나프타, 경유, 메탄가스 등을 추출하여 재자원화하는 기술이 등장하였기는 하나 플라스틱 제조 과정에서 첨가된 화학물질 제거를 위한 별도의 정제 과정이 필요한 탓에 경제성을 확보하지 못한다는 문제점이 있다. 즉, 현재 폐플라스틱 재활용 과정에서의 비용 발생 구조는 성상별 분류 과정에서 발생하는 인건비와 재자원화 과정에서 발생하는 추가 비용으로 인해 경제성을 지니지 못하며 이는 곧, 폐플라스틱 재활용 과정의 비용 구조 자체를 개선하지 못하면 현재의 낮은 재활용률 또한

개선이 어려움을 의미한다.

### 2.3 가열 후 압착 성형 기술을 적용한 분류 전 폐 열가소성 범용수지 재활용

앞선 논의들을 바탕으로 미루어 볼 때, 폐플라스틱 재활용 사업에서 경제성을 확보하기 위해서는 첫째, 성상이 분류되지 않은 폐플라스틱이 분류과정을 거치지 않고 재활용을 할 수 있어야 하며, 둘째, 재활용 과정에서 특별한 화학적 처리과정을 거치지 않아야 한다. 위 2개 조건을 모두 만족하는 폐플라스틱 재활용 방법은 가열 후 압착 성형 기술을 적용한 미분류 열가소성 범용수지 재활용(이하 범용수지 압착 성형)이 유일하다. 범용수지 압착 성형 과정은 다음과 같이 요약할 수 있다(Fig. 1).

첫째, 다중 칼날 분쇄기에 미분류 열가소성 범용수지 폐기물을 투입하여 균일한 크기로 분쇄된 혼합 열가소성 범용수지 플레이크를 생산한다. 둘째, 고온·고압의 수증기를 분사하여 혼합 열가소성 범용수지 플레이크를 세척한 후, 고온으로 달구어진 압축기 내 금형에 혼합 열가소성 범용수지 플레이크를 투입한다. 셋째, 단위 면적당 균일한 힘이 작용하는 유압모터를 사용하여 혼합 열가소성 범용수지 플레이크를 균일한 힘으로 압축한다.

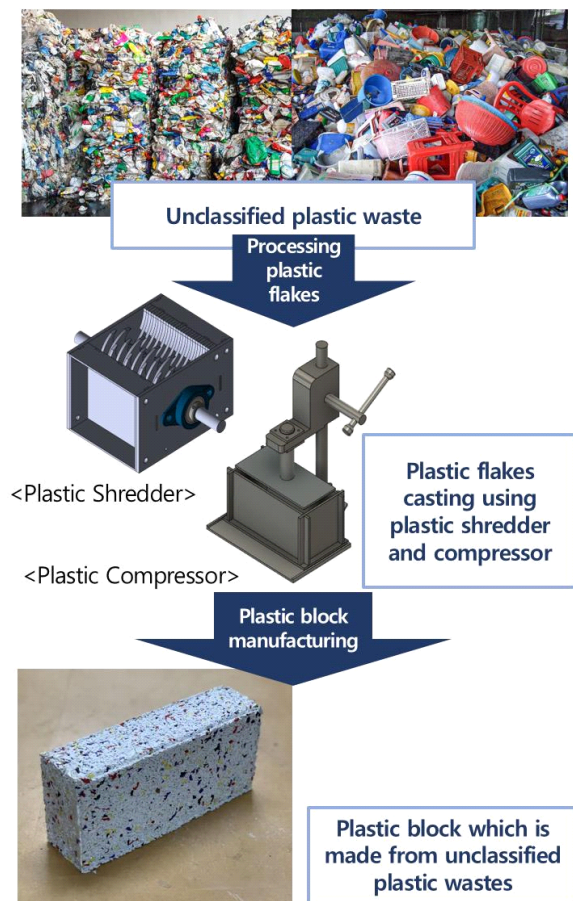


Fig. 1. Process of plastic block manufacturing made from unclassified thermoplastic waste

위 과정을 거친 혼합 열가소성 범용수지 플레이크는 단위 면적당 받는 압력과 고온의 수증기가 냉각되면서 응축되는 힘이 결합하여 건축용 내장 재료로 사용 가능한 수준의 강도를 지닌 블록이 된다.

### 3. 연구 대상 및 연구 문제 설정

연구 배경을 통해 알아본 바와 같이, 미분류 열가소성 범용수지 폐기물 재활용 사업은 최근 중요성이 나날이 부각되고 있는 탄소중립 아젠다와 맞물려 그 당위성을 충분히 갖춘 사업이다. 또한, 재활용 과정에서 인건비의 문제가 경제성 확보와 직결되는 만큼 별도의 분류 과정을 거치지 않고 재활용을 하는 것이 사업을 지속적으로 영위함에 있어 매우 중요한 조건으로 보인다. 즉, 앞선 논의를 바탕으로 미루어 볼 때, 미분류 열가소성 범용수지 폐기물 압착 성형 제품의 환경성 평가는 연구 대상으로 다루기에 매우 적합한 소재이다.

미분류 열가소성 범용수지 폐기물 압착 성형은 압착 및 성형 과정에서 어떠한 형태의 금형을 사용하느냐에 따라서 다양한 제품으로 생산이 가능하다. 하지만, 금형 제작에 비용이 많이 발생하고, 미관상의 문제 등으로 의자, 책상과 같은 생활용품은 수요가 형성되어 있지 않아, 실질적인 생산업체는 국내에서 거의 전무하다시피 하다. 그나마 일부 업체에서 열가소성 범용수지 플레이크를 압착·성형하여 플라스틱 블록을 제작, 건축내장재 업체에 납품하는 사례가 규모와 거래량 측면에 있어 가장 대표적인 폐플라스틱 재활용 사업이라고 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 미분류 열가소성 범용수지 폐기물 압착 성형을 통한 폐플라스틱 재활용 블록 제품을 연구 대상으로 설정하고, 이를 단순 소각 및 매립 처리와 비교하였을 때 취할 수 있는 환경적 이점을 연구 문제로 도출하였다.

연구문제 : 미분류 열가소성 범용수지 폐기물의 단순 소각·매립 처리 대비 압착 성형 블록 생산이 지니는 환경영향 저감효과는 어느 정도인가?

### 4. 연구 방법: 전과정평가(Life cycle assessment, LCA)

지속가능한 발전, 탄소중립사회로의 이행이라는 패러다임에 부응하여 환경평가를 수행하고 시대적 조류인 사후규제에서 사전예방으로의 정책변화에 능동적으로 대처하기 위해서는 적절한 환경부하 평가기법의 도입이 필수적이다. 그리고 전과정평가(LCA, Life Cycle Assessment, 이하 LCA)는 이를 지원하는 강력한 수단으로 90년대 이후부터 꾸준히 그 필요성이 강조되어 온 방법론이다<sup>16)</sup>.

LCA는 제품 또는 시스템의 모든 과정인 원료채취 단계, 가공, 조립, 수송, 사용, 폐기의 모든 과정에 걸쳐 에너지와 광물자원의 사용과 이로 인한 대기 및 수계, 토양으로의 환경 부하량을 정량화하고 이들이 환경에 미치는 잠

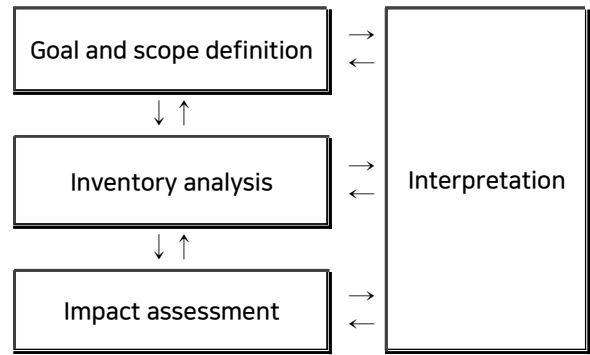


Fig. 2. LCA framework (ISO 14044).

재적 악영향을 규명하고, 환경부하가 환경에 미치는 영향을 평가하여, 이를 저감, 개선하고자 하는 기법이다<sup>17)</sup>.

LCA는 관련된 투입물과 산출물에 대한 목록을 작성하고 이들과 연관된 잠재적인 환경영향을 평가하며, 연구목적과 관련해서 목록분석 결과와 영향평가 결과를 해석함으로써 제품과 연관된 환경측면과 잠재적인 환경영향을 평가한다. LCA의 기본적인 수행은 목적 및 범위의 설정, 목록분석, 영향평가, 결과해석으로 이루어져 있다(Fig. 2)<sup>18)</sup>.

#### 4.1 목적 및 범위 설정

본 연구에서의 LCA 수행 목적은 분류 전 폐 열가소성 범용수지의 단순 소각·매립 처리 과정(이하 소각·매립)과 분쇄·압착 성형을 통한 재활용 블록 제품 생산(이하 블록 생산)의 환경영향을 평가하고, 소각·매립 대비 블록 생산의 환경영향 저감효과를 산정하는 것이다. 연구 대상의 기능단위는 폐플라스틱 재활용업체 D社의 연간 최대 폐플라스틱 블록 생산량인 2,880 kg으로 설정하였다(Table 2).

#### 4.2 시스템 경계 설정

시스템 경계 설정은 제품수명주기 전반에 걸쳐 연구목적에 맞게 제품공정에서의 분석 경계를 설정하는 단계이다.

본 연구에서는 1개 분석 대상이 폐기단계(소각·매립)이므로, 소각·매립은 폐기단계만을 시스템 경계로 설정하였으며, 블록 생산 또한 제품의 특성상 사용 과정에서의 추

Table 2. Purpose, scope and functional unit of LCA

Purpose	Analyzing the difference of environment effect between ① unclassified plastic wastes incineration/landfill and ② recycled plastic blocks
Scope	① Disposal ② Raw material extraction and production → product manufacturing
Functional unit	1) Unclassified plastic wastes incineration/landfill 2,880 kg 2) Recycled unclassified plastic blocks 2,880 kg

가 투입 물질이 없고, 있더라도 그 양이 매우 미미하며, 사용 기간 또한 반영구적이므로 블록의 사용, 폐기단계를 시스템 경계에서 제외하였다(Figs. 3, 4).

4.3. 투입물질 및 유틸리티 목록분석

목록분석은 제품별 투입 물질과 산출물에 대한 데이터를 수집하여 정리하고, 이를 기능단위에 맞게 정량화하는 일련의 과정이다. 본 연구에서는 폐플라스틱 재활용 업체인 D社로부터 블록 생산에 필요한 투입물 데이터를 취득하여 이를 바탕으로 물질목록을 작성하였다. 그리고, 제품 생산을 위해 투입되는 각 물질에 대응하는 LCI DB를 환경부, 산업통상자원부의 국가 데이터베이스로부터 확보하여 실제 LCA 수행이 가능한 물질목록으로 가공하였다. 또한, 각 물질의 투입량을 기입하기 위해, 블록을 구성하는

물질 비율을 기능단위에 적용하여 분석 대상인 소각·매립과 블록 생산의 물질 투입량으로 반영하였다.

블록 생산을 위해 투입되는 유틸리티의 데이터는 D社의 전력 사용량을 토대로 기능단위(폐플라스틱 2,880 kg) 생산에 필요한 전력 사용량을 산정하였다. 소각·매립은 폐기단계이므로 별도의 유틸리티 투입량 없이 처리되며 블록 생산의 경우 전기 이외의 유틸리티 투입은 없는 것으로 간주하였다. D社는 60 W/h 분쇄기 1대에 40 W/h 압축기 2대를 1개 생산라인으로 구성하여 총 2개의 생산라인을 운용한다. 또한, 본 연구에서의 기능단위는 D社에서 연간 최대 생산 가능한 블록이므로 각 생산라인(2)의 전력 사용량(140 W = 60 W + 40 W + 40 W)과 일 평균 가동시간 8시간, 연간 평균 가동일 수 260일을 곱하여 582.4 kW를 총 전력 사용량으로 산정하였다(수식 1).

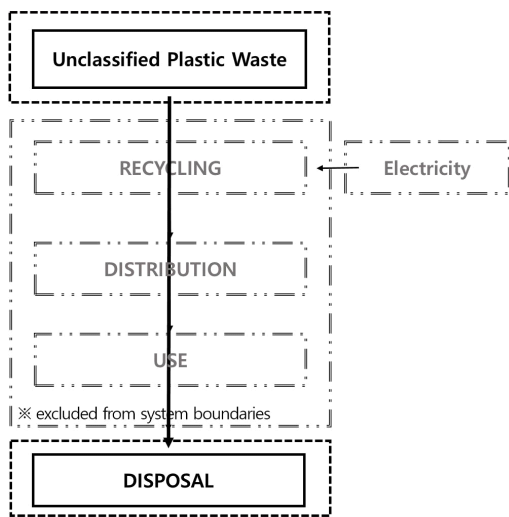


Fig. 3. System boundary of unclassified plastic wastes incineration/landfill

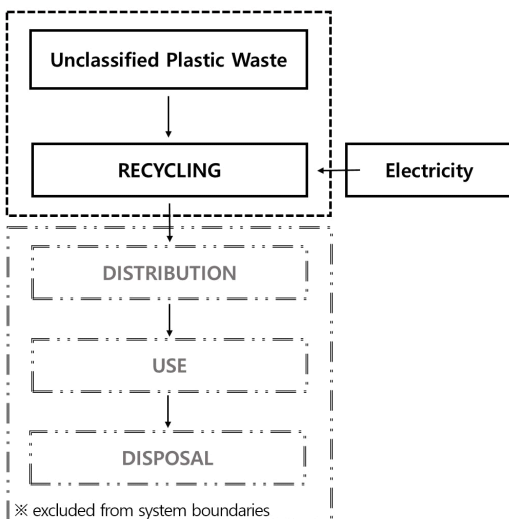


Fig. 4. System boundary of Recycled unclassified plastic blocks

$$EC = \left( \sum_{k=1}^n PS_n \right) \cdot OT \cdot AOD \dots \dots \dots (1)$$

$EC$  = 전력 사용량 (Electricity Consumption)  
 $PS_n$  = 분쇄기 및 압축기 전력 사용량 (Plastic Shredder & Compressor Electricity Consumption)  
 $OT$  = 가동시간 (Operation Time)  
 $AOD$  = 연간가동일수 (Annual Operating Days)  
 $582,400 = \{2 \cdot (60 + 40 + 40)\} \cdot 8 \cdot 260$

물질목록분석을 통해 정리한 데이터는 각각 Table 3, 4와 같다.

Table 3. Input and output of unclassified thermoplastic wastes incineration/landfill

Input	Unit	Qty	LCI DB	Source
Mixed plastic wastes	kg	2,880.00	Mixed plastic	Ministry of Environment
Output	Unit	Qty	LCI DB	Source
Plastic waste (landfill)	kg	2,134.90	Plastic waste (landfill)	Ministry of Environment
Plastic waste (incineration)	kg	745.10	Plastic waste (incineration)	Ministry of Environment

Table 4. Input and output of recycled thermoplastic wastes blocks manufacturing

Input	Unit	Qty	LCI DB	Source
Mixed plastic wastes	kg	2,880.00	Mixed plastic	Ministry of Environment
Electricity	kWh	582.40	Electricity	Ministry of Trade Industry and Energy
Output	Unit	Qty	LCI DB	Source
Mixed plastic block	kg	2,880.00	Mixed plastic block	Ministry of Environment

#### 4.4 회피효과 반영

본 연구에서는 열가소성 범용수지 폐기물 재자원화에 따른 회피효과의 고려가 필요하다. 폐플라스틱 블록은 생산량만큼 기존 내장재 콘크리트 벽돌의 사용량을 대체할 수 있기 때문이다.

D社의 자료에 따르면 폐플라스틱 블록의 압축강도는 9.2 ~ 11.2 MPa로 콘크리트 2종 벽돌 수준의 압축 강도를 가지나, 소재의 특성상 투수성(透水性)을 지니지 못한다. 다만, 열전도도의 경우 콘크리트 벽돌 0.6 ~ 0.7 W/mK 수준인 반면, 폐플라스틱 벽돌의 경우 0.3 ~ 0.4 W/mK 수준으로 콘크리트 벽돌보다 1.5 ~ 2.3배 가량 냉·난방 효율이 좋은 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구에서는 회피효과의 대상을 기존의 건축 내장재로 주로 이용되는 콘크리트 블록으로 설정하고, 국토교통부의 콘크리트 벽돌(Concrete bricks) 데이터베이스를 이용하여 콘크리트 벽돌 2,880 kg을 생산 시 발생하는 환경영향을 추가 감소하였다.

#### 5. 연구 결과

본 연구에서 고려한 영향범주는 Table 5에 나타난 바와 같이, 환경성적표지(EDP2013) 영향평가방법을 기준으로 6개의 영향범주에 대한 영향평가를 수행하였다.

연구 결과는 첫째, 폐플라스틱 소각·매립과 블록 생산의 환경영향평가 단순 비교, 둘째, 콘크리트 벽돌 생산의 환경영향 회피효과 반영의 2개 형식으로 분석 방법을 구분하였다.

단순 환경영향 비교 결과, 블록 생산은 소각·매립 대비 평균 53.06%의 환경부하 저감효과가 있는 것으로 나타났다. 이 중 저감 폭이 가장 큰 환경영향항목은 광화학스모그(이하 POCP)에 영향을 주는 에틸렌(Ethylene, 이하 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)으로 저감된 수치는 1.57E+00 kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-eq./unit이고 비율상으로는 99.87%로 거의 대부분의 환경영향이 저감되는 것으로 나타났다. 오존층파괴(이하 ODP)에 영향을

주는 삼염화 플루오린화 탄소(Trichloro fluoromethane, 이하 CFC-11) 또한 1.34E-06 kg CFC-11-eq./unit 감소하는 것으로 나타났으며 비율상으로도 99.41%로 POCP 저감 효과와 비슷한 수준이다. 산성비(이하 AP)에 영향을 주는 이산화황(Sulfur dioxide, 이하 SO<sub>2</sub>)도 2.25E+01 kg SO<sub>2</sub>-eq./unit 감소하였으며 비율상으로는 97.88%에 달한다. 부영양화(이하 EP)에 영향을 주는 인산염(Phosphate, 이하 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>)도 마찬가지로 2.73E+00 kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-eq./unit 감소하였으며 비율상으로도 96.78%의 높은 저감폭을 보였다. 지구온난화(GWP)에 영향을 주는 이산화탄소(Carbon dioxide, 이하 CO<sub>2</sub>)의 저감량 또한 1.13E+03 kg CO<sub>2</sub>-eq./unit이며 비율상으로는 79.72%로 높은 수준에서 환경영향이 저감되었다. 반면, 자원고갈(이하 ADP)에 영향을 주는 안티모니(Antimony, 이하 Sb)의 경우 블록 생산에서 오히려 환경부하가 약 1.5배(6.57E-01 kg Sb-eq./unit, 155.32%) 가량 증가하는 것으로 나타났다. 이는 블록 생산 과정에 투입되는 전력의 화석연료 간접 사용량에 기인하는 것으로 해석할 수 있다. 영향평가 결과는 Fig. 5, Table 6과 같다.

콘크리트 벽돌 대체에 따른 회피효과를 고려할 경우, 특정 환경영향범주의 저감효과가 크게 증가하는 것으로 나타났다. 저감 폭이 가장 큰 환경영향항목은 ODP로 저감된 수치는 1.49E-05 kg CFC-11-eq./unit(99.95%) 저감되었다. 이와 유사한 수준에서 POCP는 1.64E+00 kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-eq./unit (99.88%), AP는 2.30E+01 kg SO<sub>2</sub>-eq./unit (97.92%), EP는 2.79E+00 kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-eq./unit (96.86%) 저감된 것으로 나타났다. ODP의 경우 회피효과를 반영한 경우가 그렇지 않은 경우보다 10배 이상 환경영향 저감효과가 높았으나, 회피효과를 반영하지 않더라도 블록 생산 공정이 기존의 소각·매립 공정에 비하여 지니는 환경영향 저감효과가 매우 높아 비율상의 변화는 미미하였다. POCP, AP, EP의 경우 회피효과 반영 시 0.01% ~ 0.08% 정도의 환경영향이 추가 저감되는 수준으로 나타났다. GWP는 1.49E+03 kg CO<sub>2</sub>-eq./unit 저감되었으며 비율상으로는 83.77%로 회피효과 반영 이전보다 4.05% 증가한 수준이다. 가장 눈에 띄는 항목은 ADP로 회피효과 반영 이전에는 블록 생산이 환경영향을 더 발생시키는 것으로 나타났으나, 회피효과를 반영하였을 때는 환경영향이 1.92E-01 kg Sb-eq./unit 저감되는 것으로 나타났으며 비율상으로는 15.09%이다. 분석 결과는 Fig. 6, Table 7과 같다.

#### 6. 결론

본 연구에서는 전과정평가 방법론을 이용하여 열가소성 범용수지 폐기물의 소각·매립 처리 대비 폐플라스틱 블록 생산, 그리고 이로부터 발생하는 콘크리트 벽돌 생산의 회피효과를 환경영향평가 관점에서 정량화하였다.

전과정평가를 통한 환경영향평가 결과, 미분류 열가소성 범용수지 폐기물을 활용한 블록 생산은 소각·매립 처리

**Table 5.** Impact category and equivalency unit

Impact category	Equivalency unit
ADP (Abiotic Depletion Potential)	kg Sb-eq.
GWP (Global Warming Potential)	kg CO <sub>2</sub> -eq.
ODP (Ozone layer Depletion Potential)	kg CFC-11-eq.
AP (Acidification Potential)	kg SO <sub>2</sub> -eq.
EP (Eutrophication Potential)	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -eq.
POCP (Photochemical oxidation Potential)	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq.

대비 평균적으로 53.06% 가량의 환경영향 저감효과가 있는 것으로 나타났다.

6대 환경영향범주 중 가장 저감폭이 큰 POCP는 1.57E+00 kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-eq./unit 저감되었으며 비율상으로는 99.87%로 기존에 비하여 거의 대부분의 환경영향이 사라지는 수준이다. ODP 또한 1.34E-06 kg CFC-11-eq./unit 감소하는 것으로 나타났으며 비율상으로도 99.41%로 POCP 저감 효과와 비슷한 수준이다. AP도 2.25E+01 kg SO<sub>2</sub>-eq./unit 감소하였으며 비율상으로는 97.88%에 달한다. EP도 마찬가지로 2.73E+00 kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-eq./unit 감소하였으며 비율상으로도 96.78%로 높은 저감폭을 보였다. GWP의 저감량 또한 1.13E+03 kg CO<sub>2</sub>-eq./unit이며 비율상으로는

79.72%로 높은 수준에서 환경영향이 저감되었다. 반면, ADP는 블록 생산에서 오히려 환경부하가 약 1.5배(6.57E-01 kg Sb-eq./unit, 155.32%) 증가하였다.

블록 생산에 따른 환경영향 저감효과는 콘크리트 벽돌 생산의 회피효과를 고려하였을 때 더욱 증가하였다. 블록 생산은 평균 82.24%의 환경부하 저감효과가 있는 것으로 나타났으며, 이 중 ODP는 1.49E-05 kg CFC-11-eq./unit 저감되었고 비율상으로는 99.95%로 회피효과를 고려하기 이전과 마찬가지로 거의 대부분의 환경영향이 저감되는 것으로 나타났다. POCP 또한 1.64E+00 kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-eq./unit 감소하는 것으로 나타났으며 비율상으로도 99.88%로 ODP 저감 효과와 비슷한 수준이다. AP는 2.30E+01

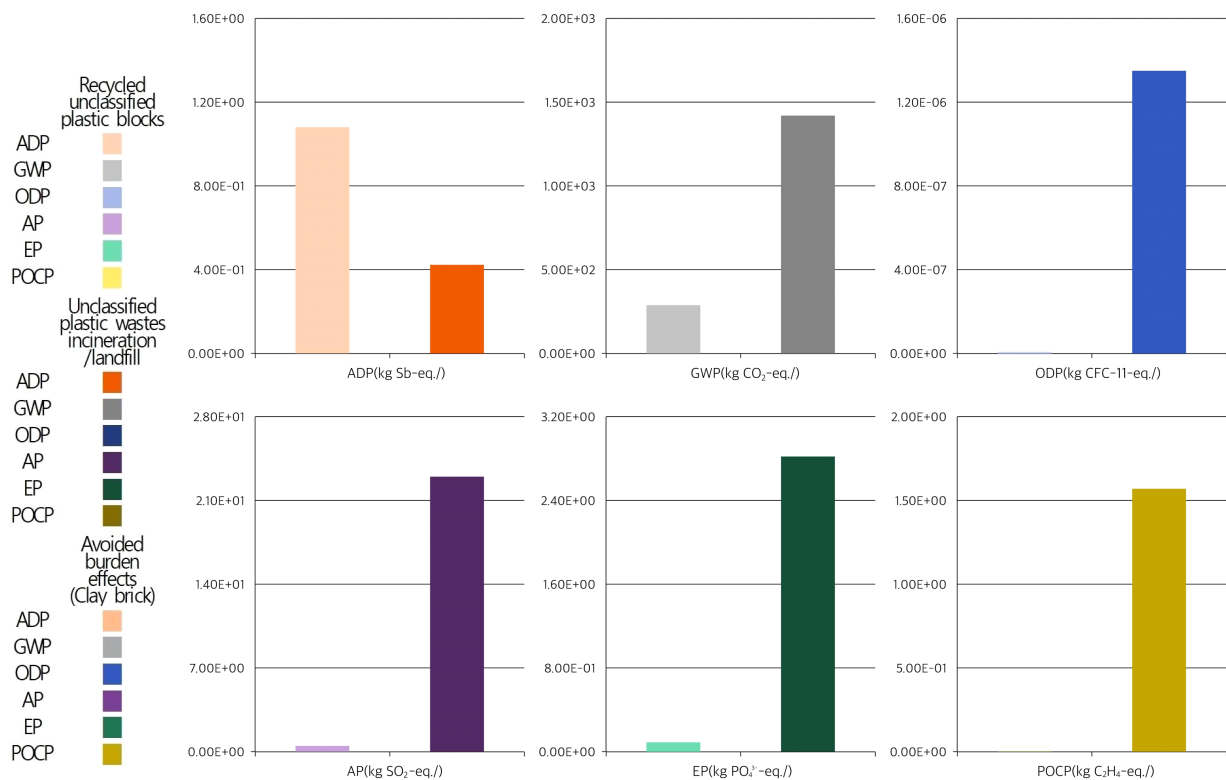


Fig. 5. Comparing environmental effect between unclassified thermoplastic wastes incineration/landfill and recycled plastic blocks (visualized).

Table 6. Comparing environmental effect between unclassified thermoplastic wastes incineration/landfill and recycled thermoplastic blocks

Impact category (Unit)	Unclassified thermoplastic wastes incineration/landfill(A)	Recycled thermoplastic blocks(B)	Environmental impact reduction effect(A-B)	Reduction ratio(%) (1-(B/A))
ADP(kg Sb-eq./unit)	4.23E-01	1.08E+00	-6.57E-01	-155.32%
GWP(kg CO <sub>2</sub> -eq./unit)	1.42E+03	2.88E+02	-1.13E+03	--79.72%
ODP(kg CFC-11-eq./unit)	1.35E-06	7.97E-09	-1.34E-06	--99.41%
AP(kg SO <sub>2</sub> -eq./unit)	2.30E+01	4.88E-01	-2.25E+01	--97.88%
EP(kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -eq./unit)	2.82E+00	9.07E-02	-2.73E+00	--96.78%
POCP(kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq./unit)	1.57E+00	2.05E-03	-1.57E+00	--99.87%

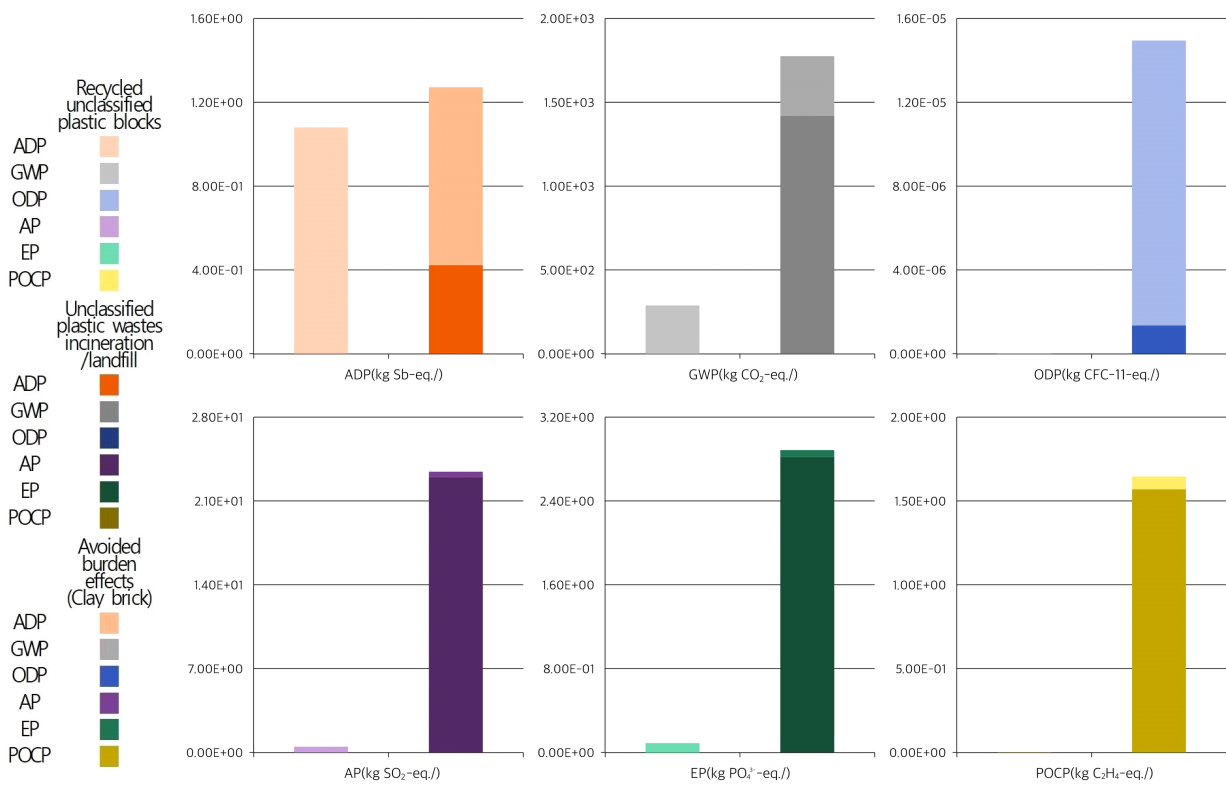
kg SO<sub>2</sub>-eq./unit 감소하였으며 비율상으로는 97.92%에 달한다. EP 또한 2.79E+00 kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-eq./unit 감소하였으며 비율상으로도 96.86%의 높은 저감폭을 보였다. GWP도 마찬가지로 1.49E+03 kg CO<sub>2</sub>-eq./unit 저감되었으며 비율상으로는 83.77%로 높은 수준에서 환경영향이 저감되었다. ADP는 회피효과를 고려하기 이전에는 벽돌 생산에서 더 많은 환경부하가 발생하는 것으로 나타났으나 회피효과를 고려할 경우 1.92E-01 kg Sb-eq./unit 저감되는 것으로 나타났으며 비율상으로는 15.09% 저감되었다.

이와 같은 연구 결과는 다음과 같이 해석할 수 있다.

첫째, 콘크리트 벽돌의 회피효과를 고려하였을 때, ODP, POCP, AP, EP의 경우 96.86% ~ 99.95%의 매우 높은 수

준에서 환경영향 저감효과가 발생한다. 콘크리트 벽돌의 회피효과를 고려하지 않더라도 ODP, POCP, AP, EP의 4개 범주에서 발생하는 환경영향 저감효과는 96.78% ~ 99.87%에 달한다. 이는 미분류 열가소성 범용수지 폐기물을 재자원화할 경우 기존의 소각·매립 대비 ODP, POCP, AP, EP의 4개 범주에서 거의 모든 환경영향을 제거할 수 있음을 의미한다.

둘째, GWP에 영향을 주는 CO<sub>2</sub>의 경우 온실가스 배출량의 기준이 되는 단위인 만큼 보다 구체적으로 저감효과를 가시화할 수 있다. 폐플라스틱 블록 생산을 통해 취할 수 있는 온실가스 배출 저감량은 콘크리트 벽돌 생산의 회피효과를 고려하였을 때 1.49E+03 kg CO<sub>2</sub>-eq./unit 이고



**Fig. 6.** Comparing environmental effect between unclassified thermoplastic wastes incineration/landfill and recycled plastic blocks with avoided burden effects (visualized).

**Table 7.** Comparing environmental effect between unclassified thermoplastic wastes incineration/landfill and recycled thermoplastic blocks with avoided burden effects

Impact category (Unit)	Unclassified thermoplastic wastes incineration/landfill(A)	Recycled thermoplastic blocks(B)	Avoided burden effects (Clay brick)(C)	Environmental impact reduction effect(A-B+C)	Reduction ratio(%) (1- {B/(A+C)})
ADP(kg Sb-eq./unit)	4.23E-01	1.08E+00	8.49E-01	1.92E-01	15.09%
GWP(kg CO <sub>2</sub> -eq./unit)	1.42E+03	2.88E+02	3.55E+02	1.49E+03	83.77%
ODP(kg CFC-11-eq./unit)	1.35E-06	7.97E-09	1.36E-05	1.49E-05	99.95%
AP(kg SO <sub>2</sub> -eq./unit)	2.30E+01	4.88E-01	4.50E-01	2.30E+01	97.92%
EP(kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -eq./unit)	2.82E+00	9.07E-02	6.51E-02	2.79E+00	96.86%
POCP(kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq./unit)	1.57E+00	2.05E-03	7.64E-02	1.64E+00	99.88%



비율상으로는 83.77%이다. 즉, 본 연구의 기능단위를 기준으로, 연간 2,880 ton의 폐플라스틱 블록 생산에 따른 온실가스 저감효과를 수목 식재효과로 치환할 경우 소나무의 경우 634 그루, 신갈나무의 경우 421 그루를 식재하였을 때 연간 취할 수 있는 온실가스 흡수 효과와 동일한 수준이다.

셋째, ADP는 미분류 열가소성 범용수지 폐기물 재자원화에서 회피효과를 적극 고려해야하는 환경영향범주로 사료된다. 회피효과를 고려하지 않았을 때의 블록 생산은 소각·매립보다 환경영향이 약 1.5배 더 큰 것으로 나타난 반면, 회피효과를 고려할 경우 블록생산은 소각·매립보다 15.09% 정도 환경영향이 작은 것으로 나타났다. 이는 블록 생산과 소각·매립의 환경영향을 단순 비교할 경우, 블록 생산 과정에서 전력 사용에 따른 화석 연료 간접 사용으로 인해 자원고갈 관점에서 만큼은 블록 생산이 소각·매립보다 환경부하를 더 발생시킴을 의미하며, 이를 상쇄하기 위해서는 유사 제품의 생산 대체에 따른 환경영향 저감 효과인 회피효과를 반드시 고려해야 함을 시사한다.

본 연구는 연간 2,880 ton의 폐플라스틱 블록 생산을 가정하였다는 점에서 연구 결과를 실제 산업 현장에 적용하는 것에는 일정 부분 한계점을 지니고 있다. 본 연구에서의 가정 사항은 연간 생산되는 2,880 ton의 폐플라스틱 블록의 수요·공급 네트워크가 구축되어 생산량 전체가 판매되는 시장을 의미한다. 따라서, 실제 산업 현장의 실태를 반영한 자료를 바탕으로 사업 타당성을 가늠(예, 경제성 분석 등)하는 별도의 분석·연구가 필요하다.

그러나, 앞서 밝힌 한계점에도 불구하고 본 연구의 결과가 시사하는 점은 아주 명확하다. 발생량의 대부분이 소각·매립으로 처리되던 분류 전 폐 열가소성 범용수지의 재자원화가 지니는 환경영향 저감효과를 가시화하였다는 점에서 관련 산업 분야의 경영지원 및 정책지원 자료로서 활용도가 있다고 할 수 있다. 특히, 최근 들어 폐플라스틱과 관련한 환경적 문제가 점차 강조되고 있는 만큼, 본 연구를 통해 도출한 시사점은 폐플라스틱 재자원화의 필요성 및 사업화 방법에 대한 거시적인 차원의 근거자료로써 분명한 목적을 띠고 있으며 이는 향후 보다 정교한 데이터 수집 과정을 통한 파생 연구의 가능성을 제시한다.

## 사 사

이 논문은 정부(환경부)의 재원으로 한국환경산업기술원의 지원을 받아 수행된 연구(지식기반 환경서비스 특성

화대학원사업)임.

## REFERENCES

- 1) [http://www.kwaste.or.kr/bbs/content.php?co\\_i\\_d=sub0401](http://www.kwaste.or.kr/bbs/content.php?co_i_d=sub0401).
- 2) Law, K. L., Starr, N., Siegler, T. R. Jambeck, J. R., Mallos, N. J. and Leonard, G. H., "The United States' contribution of plastic waste to land and ocean", *Science Advances*, 6(44), eabd0288 (2022).
- 3) 한국환경공단, "굿바이! 플라스틱 지구", 자연 가까이 사람 가까이, 36, 인천광역시, pp. 8-11 (2019).
- 4) 이성희, "국제사회의 플라스틱 규제 현황과 시사점", KIEP 세계경제 포커스, 5(13), pp. 1-14 (2022).
- 5) 김이서, 플라스틱 대한민국, 일회용의 유희, 그린피스동아시아 서울사무소, 서울특별시(2019).
- 6) Acumen Research and Consulting, Recycled Elastomers Market By Raw Material: (Styrene butadiene rubber, Nitrile butadiene rubber, Propylene rubber, Chloroprene rubber, Natural rubber, Polyurethane rubber, Others) By Application: (Medical, Agriculture, Sports product, Playground surfaces, Infrastructure, Home & garden) – Global Industry Analysis, Market Size, Opportunities and Forecast, 2019 - 2026, Acumen Research and Consulting, Maharashtra(2019).
- 7) <https://www.recycling-info.or.kr/sds/marketIndex.do?menuNo=M130301>.
- 8) 도원빈, 강내영, 국제원자재 가격과 원화환율의 변동요인 및 우리 경제에 미치는 영향, Trade Focus 2022, 17, 서울특별시(2022).
- 9) 엄영숙, "순환경제 시대 소비자들의 친환경 소재 제품에 대한 수용성과 지불의사: 미세플라스틱 배출저감 소재의류를 사례로", 자원 환경경제연구, 31(1), pp. 1-30 (2022).
- 10) 환경부, 전 주기 脫플라스틱 대책(2022).
- 11) 허승은, 투명페트병 재활용의 오해와 진실, 녹색연합, 서울특별시(2022).
- 12) 김광웅, "플라스틱의 재활용", 항공산업연구, 42, pp. 21-39 (1997).
- 13) 한국폐기물협회, 2020년도 내 손안의 분리배출 앱 Q&A 사례 100 (2021).
- 14) 정기철, 정장훈, 최이중, 조용희, 2020년도 예비타당성조사 보고서 미세플라스틱 통합관리 기술개발사업, 과학기술정책연구원(2021).
- 15) 문영백, 정훈, 허태욱, ICT기반 폐플라스틱 관리 전주기 기술동향, 전자통신동향분석, 37(4), pp. 28-35(2022).
- 16) 황용우, 건설산업의 종합적인 환경부하 평가를 위한 LCA의 필요성, 대한토목학회지, 48(1), pp. 13-18 (2000).
- 17) United States Environmental Protection Agency, Life cycle assessment: principle and practice, Scientific Applications International Corporation(2006).
- 18) <https://www.iso.org/standard/38498.html>.