

플라스틱 생수병의 전과정평가: PC와 PET 재질 및 사용후 PET병 처리 방식에 따른 환경영향 비교·분석

김민경¹, 배재근¹, 정재식^{2,3*}

¹서울과학기술대학교 환경공학과, ²한국과학기술연구원(KIST) 물자원순환연구단, ³과학기술연합대학원대학교(UST) 에너지-환경융합전공

Life Cycle Assessment of Plastic Water Bottles: Comparing Environmental Impact of PET and PC, with a Focus on Different End-of-Life Treatment Methods

Min Kyung Kim¹, Jae-Guen Phae¹, Jaeshik Chung^{2,3*}

¹Department of Environmental Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Korea

²Water Cycle Research Center, Korea Institute of Science and Technology (KIST), Korea

³Division of Energy and Environmental Technology, KIST School, Korea University of Science and Technology (UST), Korea

ABSTRACT

This study evaluates the environmental impact of PET and PC water bottles from a life cycle perspective, including the production, use, and end-of-life (EoL) phases. The environmental impacts were analyzed across 11 impact categories at the midpoint level based on the CML-Baseline methodology. For the EoL phases, incineration, landfilling, and recycling (PET only) were considered. Under the considered scenarios, PET bottles had lower environmental impacts than PC bottles in categories such as fossil fuel depletion, acidification, global warming, photochemical oxidation, and terrestrial ecotoxicity. In contrast, PC bottles had lower impacts on abiotic resource depletion, eutrophication, freshwater ecotoxicity, human toxicity, marine ecotoxicity, and ozone layer depletion. These findings reflect differences in the production and disposal processes of the two materials. At the same time, recycling effectively reduces most environmental impacts, such as PET bottles. Additionally, environmental impact contributions from each unit process with sensitivity analysis were conducted for categories such as global warming and photochemical oxidation to assess the impact from transportation distances, highlighting the significance of transportation. This study emphasizes the importance of policies aimed at reducing environmental impacts and the role of recycling in waste reduction and resource conservation, supporting the transition to a circular economy.

Key words: LCA, PET, PC, recycling, uncertainty

요약

본 연구는 PET 및 PC 재질 생수병의 생산-사용-사용후 과정을 아우르는 생애주기에서의 환경 영향평가를 수행하였다. OpenLCA 소프트웨어와 Ecoinvent 데이터베이스를 사용하며 CML-Baseline 방법론에 의거해 midpoint 수준에서 11가지 영향 범주에 따른 환경 영향을 비교하였다. PET생수병과 PC 생수병의 폐기에는 소각, 매립 및 (PET 생수병의 경우) 재활용이 포함되었다. 분석 결과, Cradle to Grave 분석에서는 PET 생수병이 화석연료 소모, 산성화, 지구온난화, 광화학적 산화, 육상 생태 독성 측면에서 PC 생수병보다 환경 부담이 적었으며 비생물적 자원 고갈, 부영양화, 담수 생태 독성, 인간 독성, 해양 생태 독성, 오존층 파괴 측면에서는 PC 생수병이 더 적은 환경 영향을 보였다. PET 생수병의 폐기 방식에 따른 분석에서 매립 및

Date Received: Sep. 29, 2024, Date Revised: Dec. 22, 2024, Date Accepted: Dec. 28, 2024

* Corresponding author: Jaeshik Chung, Tel: +82-2-958-5816, E-mail: jschung@kist.re.kr

© Copyright 2024 The Korean Society for Life Cycle Assessment. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

소각 과정은 환경 오염에 크게 기여했으며, 상대적으로 재활용은 추가 공정에서의 투입 및 배출물질들을 고려하더라도 환경 오염을 줄이는 데 효과적으로 나타났다. 또한 시나리오 연구의 특성상 불확실성이 큰 운송 거리에 따른 민감도 분석을 진행함으로써 관련시설의 입지 선정의 중요성을 살펴보았다. 본 연구는 생애주기 관점에서의 종합적 환경 영향을 고려한 정책의 필요성을 시사하며, 재활용을 통해 폐기물 최소화와 자원 이용 효율성 향상을 위한 순환 경제로의 전환의 필요성을 강조한다.

주제어: LCA, PET, PC, recycling, uncertainty

1. 서론

플라스틱 폐기물 문제는 현대 사회에서 해결해야 할 중요한 환경적 과제로 주목받고 있다. 경제협력개발기구(OECD)가 발간한 ‘2022 글로벌 플라스틱 전망 보고서에 따르면 플라스틱 생산량이 2000년에 2억 4,300만 톤, 2019년에 4억 6,000만 톤, 현 추세 지속 시 2060년에는 12억 3,100만 톤이 예상된다 [1]. 플라스틱 생수병은 전 세계적으로 대량 생산되고 있으며, 이는 상당 부분이 폐기물로 전환되는 실정이다. 이에 따라 생수병으로 인한 플라스틱 폐기물은 장기적인 환경 부담을 초래한다. 생수병으로 흔히 사용되는 플라스틱으로 Polyethylene terephthalate(PET) 및 Polycarbonate(PC) 등이 있다. PET는 주로 일회용 용기에 사용되며, 재활용이 상대적으로 용이하다는 장점이 있지만, 생산 과정에서 높은 에너지를 소비하고 적절히 폐기되지 않을 경우 환경에 장기간 잔류할 수 있다[2]. 반면 PC는 상대적으로 강도와 내열성이 뛰어나 주로 재사용 가능한 병에 사용되지만, 비스페놀-A(BPA), 포스젠(phosgene)과 같은 화학물질 첨가제와 관련된 위해성 문제와 더불어 재활용이 어렵다는 단점이 있다[3,4]. 이처럼 두 소재의 차이는 생애주기 전반에서 다양한 환경적 영향을 나타낼 것으로 예상되며, 이를 객관적으로 평가하는 것이 필요하다. 상술한 PC와 PET의 물리·화학적 특성을 Table 1에 나타내었다.

플라스틱 생수병 관련 전과정 평가 연구는 이전에도 다수 진행되었으나 대부분 PET병의 폐기 옵션에 대한 비교 연구이며[5,6], 일회용, 다회용의 관점에서 다양한 재질의 생수병에 대한 비교연구사례는 많지 않다. 본 연구에서는 PET와 함께 생수병에 많이 사용되는 PC에 대하여 생산부터 재이용, 폐기까지 시나리오 기반의 전과정 평가를 수행하여 두 소재의 환경 영향을 비교하고자 한다. 또한 PET의 경우 사용 후 처리 방법으로 소각, 매립, 재활용의 환경 영향의 차이를 알아보고 수송공정에 대한 불확실성 정량화를 위한 추가적인 비교연구를 진행하였다.

2. 연구방법

전 과정평가는 제품 및 서비스의 생애주기에 따르는 모든

Table 1. Comparison of PET and PC bottles

Properties	PC	PET
Strength (Mpa)	70-80	55-75
Heat resistance (°C)	135-145	70-80
Density (g/cm ³)	1.2	1.38
Recyclability	Difficult	Easy
Typical additives	BPA, phosgene	Antimony
Example picture		

투입물(input)과 산출물(output)의 데이터를 추적하여 환경에 대한 잠재적인 영향을 평가하는 기법이다[6]. Fig. 1과 같이 전 과정평가는 목적 및 범위 설정, 전 과정 목록 분석, 전 과정 영향 평가, 전 과정 해석의 4가지 단계를 거쳐 진행된다[7].

2.1. 연구 목표 및 범위 설정

2.1.1. 연구 목표

본 연구는 PET 및 PC 재질 생수병의 전과정평가를 수행하여 11가지 환경 영향 범주에 대해 두 소재의 환경 영향을 비교

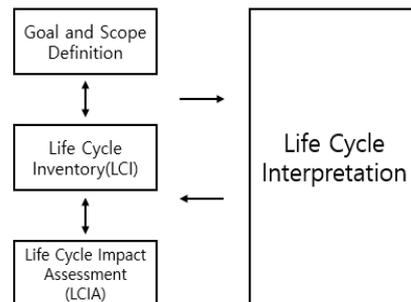


Fig. 1. Life cycle assessment.

한다. 또한 PET 생수병의 처리 방식에 따른 전 과정평가를 진행하여 PET 재활용의 당위성을 나타내는 객관적 근거를 제시하고자 한다.

2.1.2. 범위 설정

목록분석의 기준이 되는 기능단위(functional unit)는 생수병 1개를 기준으로 설정하였으며 시스템 경계는 다음 2가지(사용 후 매립/소각을 고려한 Cradle to grave; C2G 및 1회 재활용 후 소각을 고려한 Cradle to cradle; C2C) 접근방식을 사용하였다. C2G 접근방식은 자원을 채취해 제품생산 후 사용 후 폐기까지의 과정을 선형경제를 대표한다고 볼 수 있으며, C2C 접근방식의 경우 자원순환의 개념을 더해 사용 후 제품에 대한 재활용, 업사이클링을 통해 순환경제를 나타낸다고 볼 수 있다.

2.1.2.1. C2G 기반 시나리오

Fig. 2에는 PET, PC 소재 생수병의 생산부터 폐기까지의 전 과정 생애주기를 나타내었다. 사용 후 처리방식으로 PC, PET 병에 대해 소각, 매립 2가지 폐기 방법을 각각 적용하였다. 이 때 생산과정에서의 기준흐름은 물 1 L를 담을 수 있는

PC/PET 용기 1개의 무게(g), 폐기과정에서의 기준흐름은 소각/매립 대상이 되는 물 1 L를 담을 수 있는 빈 PC/PET 용기 1개의 무게(g)로 설정했다.

2.1.2.2. C2C 기반 시나리오 (PET병 한정)

Fig. 3에는 Smith et al. [11]을 통해 확인한 PET의 재활용 공정을 추가한 시스템 경계를 나타내었다[7]. PET 생수병의 경우, PC 소재 대비 재활용이 용이함에 따라 자원 순환의 가능성에 초점을 맞추었다. 본 연구에서는 Chung et al. [8]에 제시된 시스템 경계를 참고해 1회 재사용 후 폐기하는 단순한 가정을 통해 재활용의 효과를 살펴보았다[8]. 이 때 기준흐름은 재활용 대상이 되는 물 1 L를 담을 수 있는 빈 PET 용기 1개의 무게(g)로 설정했다.

2.2. 목록 분석

목록 분석은 LCA 적용 대상에 대한 투입물과 배출물 데이터를 정리하고 정량화하는 단계로, 투입물에는 원재료, 부재료, 연료, 에너지 등이 포함되고, 배출물에는 대기 배출물, 수계 배출물, 고형 폐기물 등이 포함된다. 본 연구에서는 목록 분석에 필요한 공정별 화학물질과 에너지의 투입물 및 배출물

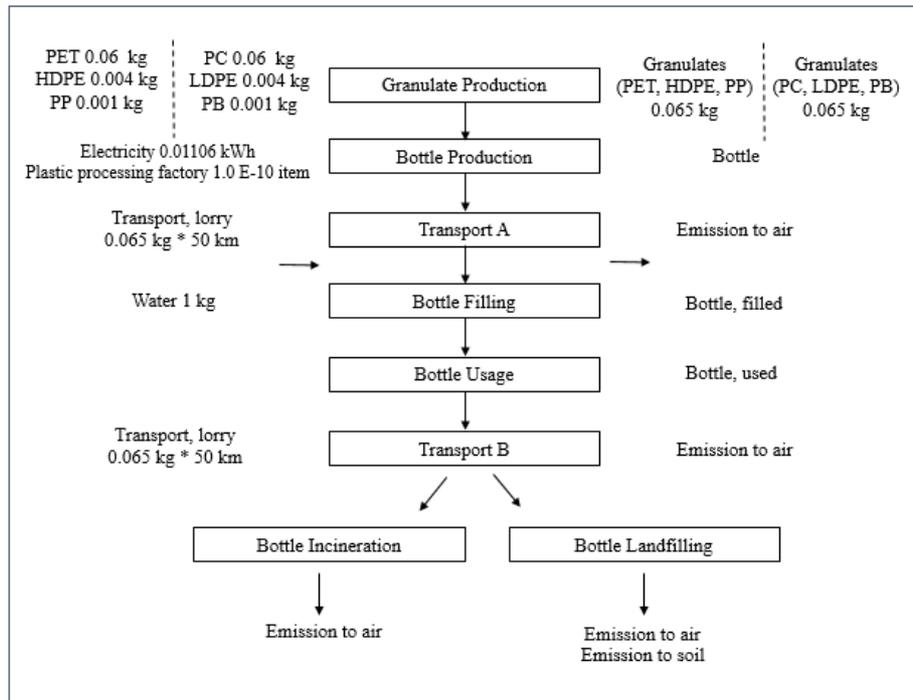


Fig. 2. System boundary for PET and PC bottle production, usage, disposal (incineration, landfilling).

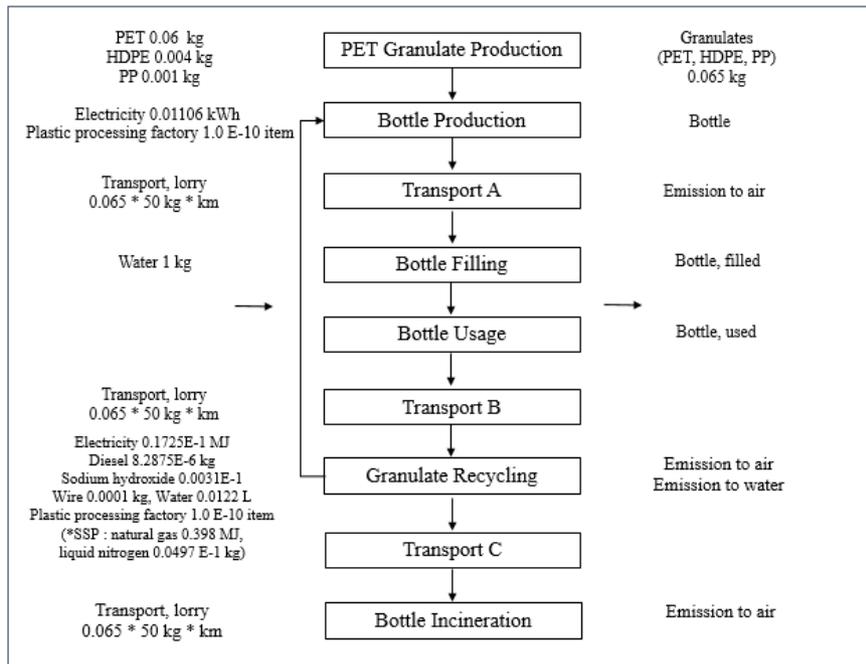


Fig. 3. System boundary for PET bottle recycling (1 cycle and incineration).

*SSP: Solid-state polymerization [10].

을 Ecoinvent 데이터베이스와 Greendelta에서 제공하는 문헌을 바탕으로 산정하였다[9-13]. 본 연구는 시스템 경계 및 구성 공정 관점에서 실존하는 특정 케이스를 그대로 재현한다기보다, 비교적 단순한 시나리오 기반에서 복수 개의 문헌들로부터 구성된 전과정 인벤토리를 이용하여 복합공정을 분석, 전체 공정 중 취약한 부분을 제시하는 데에 그 의의를 갖는다. 이에, 특정 지역의 특성을 반영하는 DB를 사용하기보다는 전세계 평균값 (Ecoinvent 데이터베이스 상의 GLO, RoW 항목)을 사용해 분석을 진행하였다. 해당 내용은 전과정 인벤토리인 Table 3 및 Table 4에 정리해 놓았다.

2.3. 영향 평가

상기 목록분석을 이용해 영향평가에 사용된 소프트웨어는 OpenLCA(ver. 2.2.0)며, 데이터 수집은 Ecoinvent(ver. 3.6)의 표준화된 cut-off 데이터베이스와 재활용 공정에 필요한 투입/배출물 등 추가적으로 필요한 정보는 peer-review를 거친 문헌을 통해 획득함으로써 과정 및 결과의 신뢰성을 높이는 데 기여하였다. 영향평가 방법론으로는 CML-IA(Baseline)을 사용하여 midpoint 수준에서 11가지 주요 환경 영향 카테고리에 대한 평가가 수행되었다. CML-IA(baseline)는 국제기구인 IPCC가 공식화한 데이터를 사용해 과학적 신뢰도가 높으며

간단한 중간 지표를 사용해 불확실성을 줄일 수 있다. 다양한 물질에 의해 발생가능한 환경영향평가 범주에 대해 각 항목별로 대표 물질로 정규화된 단위를 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Unit of used impact category used in CML-IA (baseline)

Impact category	Unit
Abiotic depletion	kg Sb eq
Abiotic depletion (Fossil fuels)	MJ
Acidification	kg SO ₂ eq
Eutrophication	kg PO ₄ ³⁻ eq
Fresh water aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq
Global Warming (GWP 100a)	kg CO ₂ eq
Human toxicity	kg 1,4-DB eq
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq
Photochemical oxidation	kg C ₂ H ₄ eq
Terrestrial ecotoxicity	kg 1, 4-DB eq

3. 결과

LCA 분석결과 제시에 앞서 본 연구에 사용된 PET, PC 생수병 생산, 폐기 및 재활용 각 세부공정에 대한 투입물, 산출물 및 배출물질들을 기능단위인 1병(0.065 kg)에 대해 정규화하여 Ecoinvent 3.6 데이터베이스 내 제공된 정보와 함께 Table 3 및 Table 4에 나타내었다.

3.1. PC 와 PET 생수병의 생산-(재)사용-폐기 전과정 환경영향 평가 (C2G 시나리오)

본 연구에서는 PC 생수병과 PET 생수병의 원료 추출부터

생산, 사용 후 폐기(소각 및 매립)하는 C2G 방식으로 CML-Baseline 방법을 사용한 11개의 환경 영향 범주의 잠재적 환경 영향의 결과의 상대적 비교를 Fig. 4에 나타내었다. 11가지 모든 범주에서 PET 생수병과 PC 생수병의 소각, 매립에 따른 비교 그래프는 비슷한 양상을 보였고, 이는 분석대상인 전체 공정 중 EoL 단위공정이 차지하는 영향이 크지 않다는 것을 시사한다. 비생물적 자원 고갈 범주에서는 양쪽 모두 PET의 환경 영향이 PC에 비해 매우 높게 나타나는데, 이는 상대비교의 특성상 강조된 것으로 판단되며(절대값은 SI에 별도로 수록함), PET 제조 공정에서 희토류 금속인 안티모니 등이 중합 과정에 촉매로 사용되기 때문으로 추측된다. 한편 PC 원료 제

Table 3. Inputs used in the life cycle assessment of PET, PC bottle production, transportation, and PET bottle recycling

Input	Amount	LCI database (providers from Ecoinvent 3.6)
PET bottle production		
Polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade	0.06 kg	Polyethylene terephthalate production, granulate, bottle grade Cutoff, U - RoW
Polyethylene, high density, granulate	0.004 kg	Polyethylene production, high density, granulate Cutoff, U - RoW
Polypropylene, granulate	0.001 kg	Polypropylene production, granulate Cutoff, U - RoW
Water, completely softened	1 kg	Water production, completely softened Cutoff, U - RoW
Electricity, medium voltage	0.1106 kWh	Electricity production, medium voltage, petroleum refinery operation Cutoff, U - RoW
Plastic processing factory	1.0 E-10 item	Plastic processing factory construction Cutoff, U - RoW
Transport*		
Transport, freight, lorry, unspecified	0.065 kg×50 km	Transport, freight, lorry, all sizes, unregulated to generic market for transport, freight, lorry, unspecified Cutoff, U - GLO
PET bottle recycling**		
Electricity, medium voltage	0.01725 MJ	Electricity production, medium voltage, petroleum refinery operation Cutoff, U - RoW
Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state	0.00031 kg	Market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state Cutoff, U - GLO
Tap water	0.0122 kg	Tap water production, conventional treatment Cutoff, U - RoW
Natural gas, burned in gas motor, for storage	0.398 MJ	Natural gas, burned in gas motor, for storage Cutoff, U - RoW
Diesel	8.2875 E-6 kg	Market for diesel Cutoff, U - RoW
Wire drawing, steel	0.0001 kg	Market for wire drawing, steel Cutoff, U - GLO
Plastic processing factory [13]	1.0 E-10 item	Plastic processing factory construction Cutoff, U - RoW
Nitrogen, liquid	0.00497 kg	Air separation, cryogenic Cutoff, U - RoW

Table 3. Continued

Input	Amount	LCI database (providers from Ecoinvent 3.6)
PC bottle production		
Polycarbonate	0.06 kg	Polycarbonate production Cutoff, U - RoW
Polyethylene, low density, granulate	0.004 kg	Polyethylene production, low density, granulate Cutoff, U - RoW
Polybutadiene	0.001 kg	Polybutadiene production Cutoff, U - RoW
Water, completely softened	1 kg	Water production, completely softened Cutoff, U - RoW
Electricity, medium voltage	0.1106 kWh	Electricity production, medium voltage, petroleum refinery operation Cutoff, U - RoW
Plastic processing factory	1.0 E-10 item	Plastic processing factory construction Cutoff, U - RoW

*Each transport distance is assumed to be 50 km for simplicity.

**Obtained from Smith et al. (2022) [11].

Table 4. Outputs used in the life cycle assessment of PET bottle recycling, disposal, and PC bottle disposal

Output	Amount	LCI database (providers from Ecoinvent 3.6)
PET bottle recycling		
Wastewater, average	0.01226 L	Treatment of wastewater, average, capacity 1E9l/year Cutoff, U - RoW
Greenhouse gases	0.0073 kg CO ₂ eq	No provider (elementary flow)
Additional emissions	See the supplementary	No provider (elementary flow)
PET bottle disposal		
Waste polyethylene terephthalate	0.065 kg	Treatment of waste polyethylene terephthalate, municipal incineration Cutoff, U - RoW
Waste polyethylene terephthalate	0.065 kg	Treatment of waste polyethylene terephthalate, sanitary landfill Cutoff, U - RoW
PC bottle disposal		
Waste plastic, mixture	0.065 kg	Treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration Cutoff, U - RoW
Waste plastic, mixture	0.065 kg	Treatment of waste plastic, mixture, sanitary landfill Cutoff, U - RoW

조 공정에서는 아민 계열의 촉매가 사용되며 금속 기반 촉매가 필요하지 않기 때문에 PET에 비해 낮은 환경 영향을 나타낸 것으로 판단된다[14]. 플라스틱이 석유로부터 추출되는 물질임을 고려할 때 상대적으로 더 중요하다고 판단되는 화석연료 고갈 측면에서는 PC 생수병이 더 높은 환경 영향을 보였다. PC의 생산 공정에서는 석유와 천연가스에서 유래한 비스페놀 A와 포스젠이 주로 사용되며 PET보다 밀도가 높아 사용되는 화석 연료의 양이 PET보다 더 높을 수 있다고 판단된다. 산성화 잠재력 또한 PC 생수병의 환경 영향이 상대적으로 매

우 높게 나타나고 있다. 이는 PC를 생산할 때 발생하는 자일렌 연소과정에서 많은 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x)이 배출될 수 있기 때문으로 사료된다. 부영양화 범주에서는 PET 생수병의 환경 영향이 높았으며 이 경우에는 폐기 방식에 따른 영향 인자의 차이가 나타났다. 부영양화는 질소, 인 등의 성분이 수계에 유입되어 나타나는 현상으로, 소각의 경우 부영양화에 기여할 수 있는 물질들이 대기 중으로 배출되나 매립의 경우 침출수를 통해 직접 수계로 이어질 가능성이 높아 폐기 과정에서 높은 기여도를 나타낸 것으로 판단된다. 담수 독

플라스틱 생수병의 전과정평가: PC와 PET 재질 및 사용후 PET병 처리 방식에 따른 환경영향 비교·분석

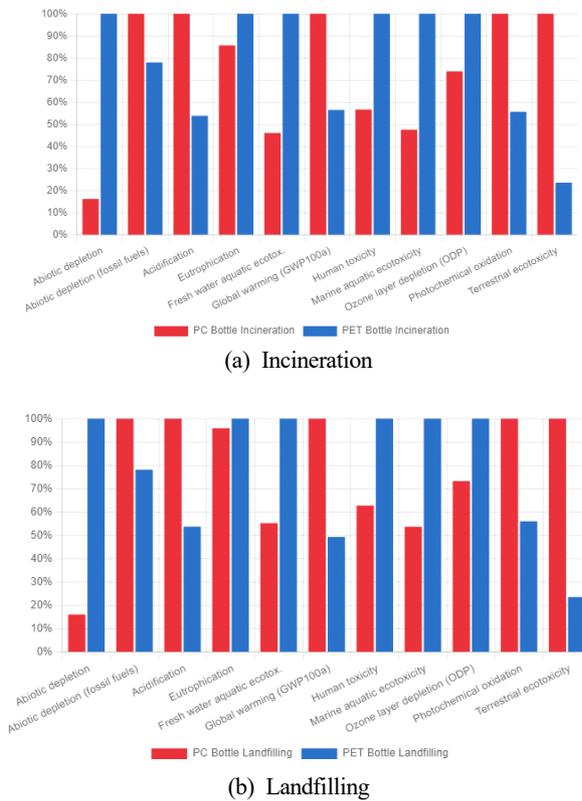


Fig. 4. The life cycle environmental impact assessment of PET and PC water bottles. EoL process is treated (a) and (b).

성 측면에서는 PET 생수병이 높은 환경 영향을 보였다. 이는 PET를 소각, 매립하는 과정에서 배출된 중금속과 유기 화합물이 PC보다 독성 계수가 높은 경우가 많아 결과적으로 더 큰 영향을 미친 것으로 파악된다. 지구 온난화 잠재력은 PC가 2 배 이상 큰 영향을 보였는데, PC를 생산하는 과정에서 상대적

으로 다량의 이산화탄소가 배출되는 것으로 파악된다. 인간 독성과 해양 독성 측면에서는 소각, 매립에 따른 결과가 다르게 나타났다. 소각의 경우 PET가 다소 높았지만, 매립의 경우 PC가 높았다. 소각의 경우 PC는 매우 안정한 고분자로 소각 시 방출되는 독성 화합물이 PET에 비해 제한적이며 방출 속도가 느리다. 이로 인해 인간 독성 측면에서 PET에서 배출되는 에틸렌글리콜, 테레프탈산 등의 유해 물질 배출의 영향이 더 크게 작용한 것으로 파악된다. 오존층 파괴 측면에서는 PET 생수병이 PC 생수병보다 큰 환경 영향을 보였다. 이는 PET 제조 공정에 쓰이는 염소화 화합물이 오존층 파괴 물질을 PC 대비 더 많이 생성하기 때문으로 판단된다. 광화학적 산화, 육상 생태 독성 범주에서는 소각, 매립 시 모두 PC 생수병이 상대적으로 매우 높은 환경 영향을 보였는데, 이는 모두 PC의 제조 공정에서 기여도가 높았다. 광화학적 산화 측면에서는 PC 제조 시 생성되는 VOC가 대기 중으로 방출되면서 NO_x 등과 반응해 오존과 같은 2차 오염물질을 생성하기 때문으로 추정된다. 육상 생태 독성 측면에서는 PC 제조 및 폐기 공정에서 생성가능한 난분해성 염소화 화합물 때문으로 추측된다.

한편 서두에 제시했듯 PC재질의 플라스틱병은 Table 1에 제시한 재질의 특성상 재사용을 염두해 두고 생산된다. 이에, PC와 PET 생수병의 다회용, 일회용이라는 차이점을 고려하여 PC는 각각 1회 생산 후 1, 2, 4, 9번(세척 후)재사용하고 소각하였을 경우, PET는 2, 3, 5, 10번 매번 새롭게 생산 후 소각하였을 경우에 대하여 환경 영향을 평가해 보았다. 그 결과 본 연구에 사용된 전과정 인벤토리 조건 하에서는 3회 이상 재사용하였을 때 두 가지 대표 범주(온실가스 발생, 광화학적 산화)에서 PC의 환경 영향이 PET보다 우월해질 수 있음을 확인하였다(Fig. 5). 두 영향범주는 산업활동에 따른 기후변화를 대표하는 범주들로서 Endpoint 수준에서도 인체 및 자연환경

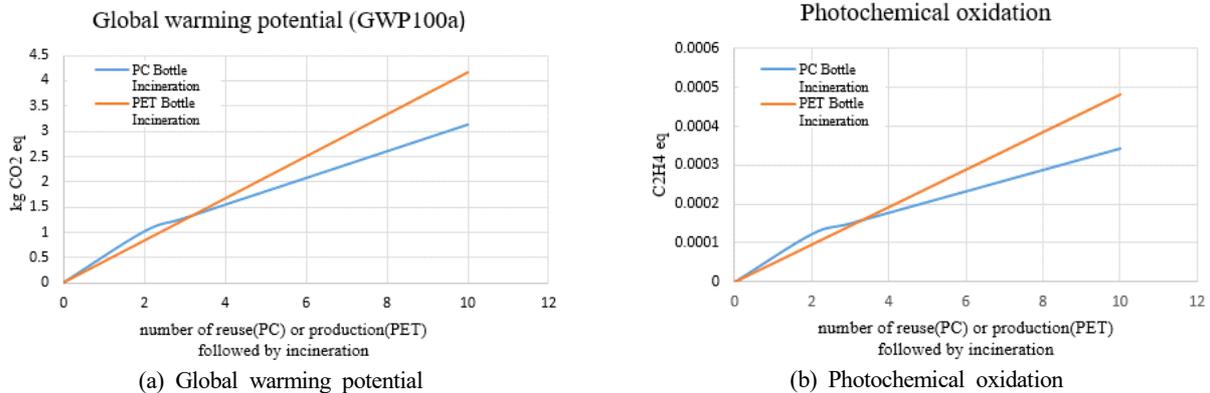


Fig. 5. Environmental Impact based on reuse cycles (PC) and production cycles (PET).

에 다양하게 영향을 미치며, 특히 광화학적 산화의 경우 플라스틱 제조시 사용되는 화학물질의 영향을 효과적으로 반영할 수 있다고 생각된다.

3.2. 사용 후 PET 생수병의 처리 방식에 따른 환경 영향 비교

PET 생수병의 사용 후 처리 방식에 따른 환경 영향을 Fig. 5에 나타내었다. 이는 생산 과정부터 소각 또는 매립까지 전 과정을 고려한 C2G 접근방식(Fig. 2), 생산 과정부터 재활용 과정까지의 C2C 접근방식(Fig. 3), 시스템 경계를 포함한다. 여기서 재활용의 경우, 총 2회 사용을 가정하여 1회 재활용 후 소각을 진행한 결과이며(Fig. 3의 시스템 경계 참조) 소각, 매립의 경우 2개의 PET병 생산 후 각각 폐기한 것으로 간주하여 단순히 3.1섹션에서의 1회 생산-사용-폐기 분석값의 2배를 적용하였다. 비생물적 자원 고갈과 화석연료 소모에 대한 분석 결과, 각각 소각 시, 매립 시 $5.62E-5$ Sb eq, $1.18E+1$ MJ로 동일한 에너지 소비를 보였으나, 1회 재활용 후 소각은 $3.25E-5$ Sb eq, 6.74 MJ로 자원 고갈이 현저히 줄어들었다. 이는 재활용의 경우, 추가적인 PET Granulate를 생산하는 데 자원 소모를 하지 않기 때문으로 판단된다.

산성화 잠재력 분석에서는 소각과 매립이 $2.17E-3$, $2.14E-3$ SO_2eq 로 1회 재활용 후 소각($1.41E-3$ kg SO_2eq)에 비해 높은 영향을 나타냈다. 이는 대기오염물질 생성량의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 부영양화 측면에서는 인근 수계로 침출수가 직접 이어질 가능성이 높은 매립이 $1.26E-3$ kg PO_4^{3-} eq로 가장 높은 영향을 보였고, 소각($7.22E-4$ kg $PO_4^{3-}eq$)과 1회 재활용 후 소각($4.98E-4$ kg $PO_4^{3-}eq$)은 상대적으로 낮은 값을 보였다. PET 소각, 매립 시 유해 물질을 수생 생태계로 유입시킬 수 있는 담수 생태 독성 측면에서는 소각, 매립이 각각 1.26 , $9.97E-1$ kg 1, 4 DB eq로 재활용 후 소각($7.99E-1$ kg 1, 4 DB eq)보다 높은 환경 영향을 보였다. 지구 온난화 영향에서는 고온의 소각로 운전으로 이산화탄소 등 온실가스 발생이 높을 것으로 예상되는 소각이 $8.85E-1$ CO_2eq 로 가장 큰 영향을 미쳤으며, 매립($6.28E-1$ kg CO_2eq)과 1회 재활용 후 소각($5.12E-1$ kg CO_2eq)은 비교적 낮았다. 인체 독성 잠재력에서도 소각 1.27 kg 1,4-DB eq, 매립 1.08 kg 1, 4-DB eq으로 1회 재활용 후 소각($9.12E-1$ kg 1, 4-DB eq)보다 높은 환경 영향을 보였다. 재활용의 경우 특히 인간 독성 측면에서 다른 범주보다 높은 환경 영향을 보였는데, 이는 재활용 공정에서 파쇄, 세척 등의 개별공정에서 전기, 화학 약품 등을 추가적으로 사용함으로써 독성 물질의 환경배출이 유발되기 때문으로 판단된다. 해양 수생 독성에서는 소각이 $1.53E+3$ 4-DB eq로

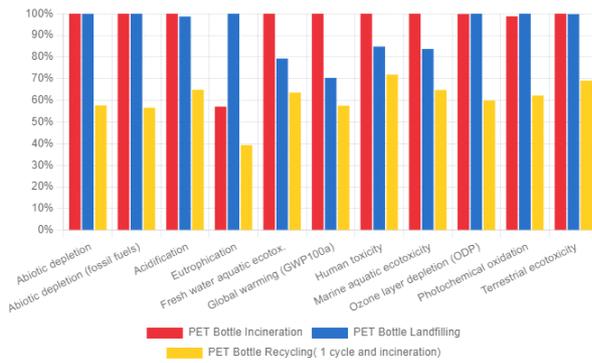
가장 높은 영향을 나타냈으며, 매립($1.28E+3$ kg 1, 4-DB eq)과 1회 재활용 후 소각($9.92E+2$ kg 1, 4-DB eq)은 이보다 낮았다. 이는 소각 시 발생가능한 유해 물질이 대기를 통해 매립 시 발생하는 침출수 내 유해물질보다 해양 생태계에 축적될 가능성이 높음을 시사한다. 오존층 파괴 측면에서는 소각($5.57E-8$ kg CFC-11 eq)과 매립($5.57E-8$ kg CFC-11 eq)은 동일한 영향을 보였지만 재활용($3.38E-8$ kg CFC-11 eq)에 대해서는 다소 낮은 영향을 보였다. 이는 2회차에서 추가적인 PET의 생산 과정이 불필요하여 오존층 파괴 물질을 덜 생산하기 때문으로 추정된다. 광화학적 산화 측면에서는 소각($1.22E-4$ kg C_2H_4 eq), 매립($1.23E-4$ kg C_2H_4 eq)은 비슷한 경향을 보였고 재활용($7.68E-5$ kg C_2H_4 eq)의 경우 영향이 줄어들었다. 이 또한 PET의 생산 과정에서 생성되는 NO_x 및 VOC의 영향이 줄어든 것으로 파악된다. 마지막으로 육상 생태 독성에서는 소각($9.13E-4$ kg 1, 4-DB eq), 매립($9.12E-4$ kg 1, 4-DB eq)는 거의 동일한 영향을 보였지만 재활용($6.33E-4$ kg 1, 4-DB eq)의 경우 다소 낮은 환경 영향을 보였다. 이는 재활용을 함으로써 화석 연료의 사용이 감소되고 연쇄적으로 해당 독성 유발물질의 배출을 줄일 수 있음에 기인한다. 결론적으로 소각에 의해서는 비생물적 자원 고갈, 화석연료 소모, 산성화, 담수 생태 독성, 인간 독성, 해양 생태 독성, 육상 생태 독성이 큰 영향을 받았으며 매립에 의해서 부영양화, 광화학적 산화 등이 높은 영향을 받았다. 재활용 측면에서는 1회 재활용 공정에서 투입되는 화학물질과 에너지가 일부 환경 영향을 야기할 수 있으나, 이를 고려하더라도 전체적으로 소각, 매립으로 인한 환경 영향보다 적어진다는 것을 알 수 있다.

3.3. 개별공정이 차지하는 기여도 및 민감도 분석을 통한 불확실성 정량화

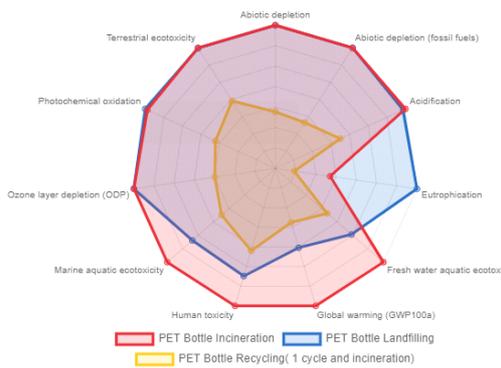
PET 병의 재활용 공정(1회 재활용 후 소각)을 분석한 결과, 지구 온난화, 광화학적 산화 범주에서 다음과 같은 개별공정의 기여도 비율을 얻을 수 있었다(Fig. 7).

지구온난화 측면에서 전체 공정 중 PET 생수병을 생산하는 공정이 52.4%로 가장 높은 비율을 나타냈다. 다음으로 소각 공정이 38.85%를 차지했다. PET Granulate를 재활용하는 공정은 8.37%를 차지하였고 운송이 0.38%를 차지했다. 광화학적 산화 측면에서는 PET 생수병을 생산하는 공정이 78.41%로 가장 높은 비율을 차지했으며 운송의 기여도는 0.24%로 미미함을 확인할 수 있다. 다만 본 연구에서 운송 거리는 서울에서 경기권으로의 이동을 가정하고 일괄적으로 50 km를 적용하였으나, 이는 집하장, 처리장의 위치 등에 따라 가변적이고, 운송거리가 개별 공정 중 변동

플라스틱 생수병의 전과정평가: PC와 PET 재질 및 사용후 PET병 처리 방식에 따른 환경영향 비교·분석



(a) Bar chart



(b) Radar chart

Fig. 6. Results of the life cycle environmental impact assessment of PET recycling.

가능성, 즉 불확실성이 큰 변수임을 감안할 때 추가 연구가 필요하다고 판단되어 운송 거리에 대해 민감도 분석을 시도하였다. LCA와 같은 시스템 모델에서 입력변수의 불확실성 정량화는 결과의 신뢰도를 높이는 데에 필수적이며, 여기에서는 여러군데 출처로부터 얻은 자료의 평균값을 사

용할 수 있다. 예를 들어 본 연구의 전과정목록(Table 3)에 사용된 전기사용 항목에 대한 LCI DB는 유럽을 제외한 전 세계평균 값으로(rest of world, RoW) 같은양의 전기를 생산하더라도 그 방식(예: 화력, 원자력, 재생 에너지 등)에 따라 환경영향은 현저하게 다양하게 나타나며, 이는 LCA를 적용하고자 하는 특정 국가의 DB를 적용함으로써 불확실성을 줄이며 동시에 지역적 특성을 반영할 수 있다[15]. 또한, 입력값의 확률분포를 가정한 뒤 이에 기반한 반복 수행을 통한 출력값의 분포를 얻는 몬테카를로 기법을 통해서도 불확실성의 정량화가 가능하다[16]. 본 연구에서는 One-at-a-time 방식으로 민감도 분석을 수행했는데 이는 다른 변인들을 통제된 뒤, 한 번에 한 가지 요인(이 경우에는 운송 거리)을 변경하여 출력에 어떤 영향을 미치는지 확인하는 간단한 민감도 분석 방법이다[17]. 수송의 경우, 생산 및 재활용 공장의 입지에 따라 달라지기에 다른 요소공정 대비 상대적으로 불확실성이 크다고 볼 수 있으며(본 연구에서는 생략한 운송대상의 무게 변화를 제외한다면) 비교적 다른 영향인자들과 독립적이라고 판단된다. Fig. 8에서는 운송 시나리오 상 있을법한 거리(10-500 km; 행정구역상 구 단위부터 광역시·도 단위 가정)에 따라 각 범주의 환경 영향이 커지는 경향을 보였으며, 특기할만한 점으로 전 구간에서 선형적으로 증가하는 것이 아니라 특정 구간을 지나며 급격히 커지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 개별 범주하에서 요소공정으로서의 수송이 전체 공정에 차지하는 기여도가 다르기 때문으로, 집하장, 처리장 등의 환경 시설 입지선정에 있어 운송되는 물질의 무게와 이동거리의 영향이 세부평가 항목별로 다르게 나타나며, 이들 입지선정(예: 중앙집중형 vs. 분산형 등)에 종합적인 고려가 필요함을 알 수 있다. 구체적으로, 본 연구에서 사용된 시나리오 하에서는 온실가스발생 및 광학적 산화 모두 100~500

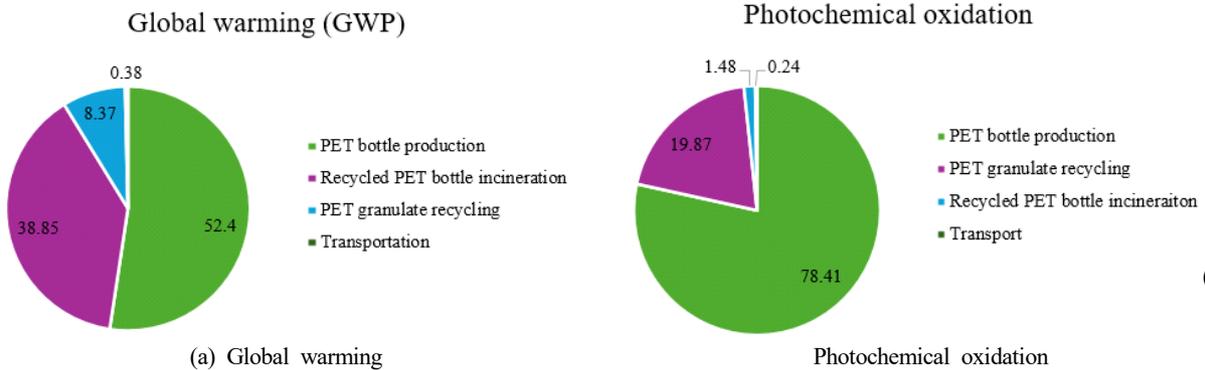


Fig. 7. Environmental impact contributions of unit process.

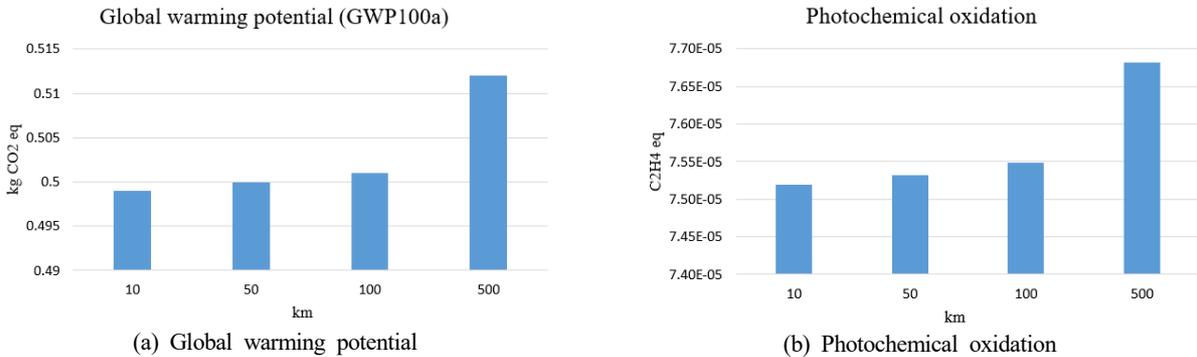


Fig. 8. Sensitivity analysis of different transportation distances.

km 구간에서 증가폭이 가장 커 집하지, 재활용 공장, 매립지 및 소각장의 입지 선정시 이동거리를 100 km 이하로 줄일 경우 해당 환경영향을 효과적으로 줄일 수 있음을 시사한다.

4. 결론

본 연구에서는 PET와 PC 소재 생수병의 전 과정 평가를 통해 각각의 생산 및 폐기 과정에서 발생하는 환경적 영향을 비교하였다. 연구 결과, C2G 접근에서는 PET 생수병이 화석 연료 소모, 산성화, 지구 온난화, 광화학적 산화, 육상 생태 독성 측면에서 PC 생수병보다 환경 부담이 적었으며 비생물적 자원 고갈, 부영양화, 담수 생태 독성, 인간 독성, 해양 생태 독성, 오존층 파괴 측면에서는 PC 생수병이 더 적은 환경 영향을 보였다.

C2C 접근에서는 PET 생수병의 사용후 처리공정으로서 매립과 소각, 그리고 재활용을 비교함으로써 매립 시 장기적으로 환경에 축적되는 폐기물의 문제, 소각 시 발생하는 온실가스 유해 물질 배출이 심각한 환경적 부담을 초래한다는 것을 수치상으로 확인할 수 있었다. 이러한 결과 매립, 소각과 같은 선형 경제 방식은 지속 가능하지 않다는 것을 뒷받침한다. 반면 C2C 분석에서는 PET 생수병의 재활용이 전반적으로 매립과 소각에 비해 현저히 적은 영향을 미치는 것을 확인하였다. 또한 불확실성이 큰 변수로서 운송 거리에 대한 민감도 분석 결과, 운송 거리가 늘어날수록 대기오염물질을 비롯한 환경영향물질 배출이 급격히 증가할 수 있음을 확인하였으며, 이는 관련 시설의 최적 입지선정 등에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

비록 본 연구는 제한된 경제조건 및 작은 기능단위(생수병 1개)의 단순한 시나리오 기반으로 수행되었으나 목록분석과

정에 있어 가능한 구체적인 문헌값에 근거했음에 의의를 가지며, 해당 결과는 순환 경제의 중요성을 강조하며 재활용 체계를 적극적으로 도입하고 강화하는 것이 환경적 부담을 최소화하는 효과적인 방법임을 수치로 제시하였다. 다만 본 연구에서는 환경영향과 더불어 관련 산업 발전 핵심 요인으로서의 경제적 측면은 고려되지 않았으며, 이를 위해 향후에는 재활용 인프라 구축과 기술적 발전을 통해 재활용의 효율을 더욱 높임과 동시에 해당 방향과 맞는 정부의 정책적 지원을 통해 재활용이 일상적으로 이루어질 수 있는 체계를 마련하는 접근이 필요할 것이다.

사 사

본 연구는 한국과학기술연구원 기본사업(2V10170, 2E33092, 2E33081)의 지원을 받아 수행되었습니다.

Supplementary Materials

Supplementary materials are only available online from: <https://doi.org/10.62765/kjlca.2024.25.2.85>

References

1. OECD. Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options. OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/de747aef-en> (2022).
2. Kit, F., Haq, R., Manshoor, B., Ghafir, M., Rahman, M., Hoffmann, J., Marwah, O., Khirotdin, R. Mechanical properties of recycled polyethylene terephthalate/polycarbonate/methylene diphenyl diisocyanate (r-PET/PC/MDI) composite. Journal of Advanced Research in Applied

- Mechanics 120(1), pp. 1-13 (2024).
3. Loganathan, M., Rajendraprasad, M., Murugesan, A., Yi, J., Manjappa, K. Sustainable recovery of monomers from PET and PC waste via thermocatalytic depolymerization for synthesis of polycarbonates and co-polycarbonates. *European Polymer Journal* 221, p. 113516 (2024).
 4. Kim, B. Development of eco-friendly resourcing and re-using technology for wasted polycarbonate (PC). Korea Research Institute of Chemical Technology pp. 3 (2018).
 5. Marathe, K.V., Chavan, K.R., Nakhate, P. Life Cycle Assessment (LCA) of PET Bottles. *Plastics Design Library* pp. 149-168 (2019).
 6. Foolmaun, R.K., Ramjeeawon, T. Comparative life cycle assessment and social life cycle assessment of used polyethylene terephthalate (PET) bottles in Mauritius. *Int. J. Life Cycle Assess.* 18, pp. 155-171 (2013).
 7. Choe, C., Moon, J., Gu, J., Lee, A., Lim, H. Life cycle sustainability assessment for sustainable energy future: A short review on opportunity and challenge. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 50, p. 100974 (2024).
 8. Chung, J., Seo, B., Lee, J., Kim, J. Comparative analysis of I₂-KI and HNO₃ leaching in a life cycle perspective: Towards sustainable recycling of end-of-life c-Si PV panel. *Journal of Hazardous Materials* 404, Part B, p. 123989 (2021).
 9. Loganathan, M., Rajendraprasad, M., Murugesan, A., Yi, J., Manjappa, K. Sustainable recovery of monomers from PET and PC waste via thermocatalytic depolymerization for synthesis of polycarbonates and co-polycarbonates. *European Polymer Journal* 221, p.113516 (2024).
 10. Gileno, L.A., Turci, L.F.R. Life cycle assessment for PET-bottle recycling in Brazil: B2B and B2F routes. *Cleaner Environmental Systems* 3, p. 100057 (2021).
 11. Smith, R., Takkellapati, S., Riegerix, R. Recycling of plastics in the United States: Plastic material flows and polyethylene terephthalate (PET) recycling processes. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 10(6), pp. 2084-2096 (2022).
 12. GreenDelta. OpenLCA tutorial: Basic modelling in OpenLCA. <https://www.openlca.org/tutorial-basic-modelling>. (2020).
 13. Thonemann, N., Schulte, A. From laboratory to industrial scale: A prospective LCA for electrochemical reduction of CO₂ to formic acid. *ACS Publications* 53(21), p. 12324 (2019).
 14. Heo, Y., Yang, M., Cho, Y., Ahn, K., Lee, Y., Chung, H., Kwon, O., Park, J. Antimony content of natural mineral water in Korean market and migration into water from bottle material. *Journal of Korean Society on Water Environment* 30(2), pp. 199-205 (2014).
 15. Seo, B., Kim, J., Chung, J. Overview of global status and challenges for end-of-life crystalline silicon photovoltaic panels: A focus on environmental impacts. *Waste Management* 128, pp. 45-54 (2021).
 16. Chung, J., Seo, B., Lee, M., Park, B., Kim, J. Techno-environmental analysis of resource recovery processes from end-of-life PV panels. *Resources, Conservation and Recycling* 201, p. 107312 (2024).
 17. Hajdu, F., Környei, L., Kuti, R. One-at-a-time sensitivity study of a tree burning simulation. *AK Journals* 19(1), pp. 53-59 (2023).

