

재사용 횟수를 고려한 재사용 포장 시스템과 단일사용 골판지 박스의 환경 영향 비교

임채원^{1,2}, 강동호¹, 이준혁¹, 심진기^{1,*}¹한국생산기술연구원 패키징기술센터, ²고려대학교 화공생명공학과

Environmental Performance of Reusable Packaging compared to Single-Use Corrugated Boxes considering Reuse Cycles

Chaewon Im^{1,2}, DongHo Kang¹, Junhyuk Lee¹, Jin Kie Shim^{1,*}¹Korea Packaging Center, Korea Institute of Industrial Technology, Bucheon 14449, Korea²Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University, Seoul 02841, Republic of Korea

ABSTRACT

The increasing demand for packaging driven by e-commerce and fresh food distribution has intensified environmental concerns associated with single-use packaging systems. Reusable packaging has emerged as a promising alternative; however, its environmental performance depends strongly on operational conditions, particularly reuse frequency. This study conducted a cradle-to-grave life cycle assessment (LCA) focusing on a reusable plastic container (RPC) incorporating post-consumer recycled (PCR) material, with comparison to a single-use corrugated box (CB). The analysis was based on real distribution data, and the effect of reuse cycles on environmental impacts was evaluated. The results show that RPC exhibited higher greenhouse gas emissions than CB in the first use cycle. However, the cumulative environmental impact of RPC decreased rapidly with reuse, becoming lower than that of CB from the second cycle onward. In addition, the environmental impact of RPC was primarily governed by the material supply stage. These findings indicate that reuse frequency is a key factor determining the environmental performance of reusable packaging systems, and that the combination of PCR material and repeated reuse can significantly enhance environmental benefits. This study provides a quantitative basis for the design of sustainable packaging systems under real distribution conditions.

Key words: life cycle assessment (LCA), reusable packaging, circular logistics

요약

전자상거래와 신선식품 유통의 확대에 따라 포장재 사용량이 증가하면서 단일사용 포장 시스템에 따른 환경 문제가 지속적으로 제기되고 있다. 이에 따라 재사용 포장 시스템이 대안으로 주목받고 있으나, 재사용 횟수와 같은 운영 조건에 따라 환경 성능이 크게 달라질 수 있다. 본 연구에서는 post-consumer recycled(PCR) 소재가 적용된 재사용 플라스틱 컨테이너(RPC)를 중심으로, 단일사용 골판지 박스(CB)와의 비교를 통해 cradle-to-grave 전과정평가를 수행하였다. 실제 유통 환경을 반영한 데이터를 기반으로 원료 생산, 제품 생산, 유통 및 사용, 폐기 단계를 포함하여 분석을 수행하였으며, 재사용 횟수에 따른 환경 영향 변화를 평가하기 위해 민감도 분석을 수행하였다. 분석 결과, RPC는 1회 사용 기준에서 상대적으로 높은 온실가스 배출량을 나타냈으나, 재사용 횟수가 증가함에 따라 누적 환경 영향이 빠르게 감소하였다. 특히 2회 사용 시점부터 단일사용 포장 시스템보다 낮은 수준으로 전환되었으며, 이후 반복 사용이 증가할수록 환경적 이점이 더욱 확대되는 경향을 보였다. 공정별 분석

Date Received: Mar. 30, 2026, Date Revised: Apr. 27, 2026, Date Accepted: Apr. 27, 2026

* Corresponding author : Jin Kie Shim, Tel: +82-32-624-4771, E-mail: jkshim@kitech.re.kr

© Copyright 2026 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.

결과, RPC의 환경 영향은 주로 원료 생산 단계에 의해 지배되며, 이는 폴리프로필렌 생산 및 재생 원료 처리 과정의 영향에 기인하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 재사용 횟수가 재사용 포장 시스템의 환경 성능을 결정하는 핵심 변수임을 보여주며, PCR 소재의 적용과 충분한 반복 사용이 결합될 경우 환경 부담 저감 효과가 더욱 강화될 수 있음을 시사한다. 본 연구는 실제 유통 조건을 반영한 정량적 분석을 통해 재사용 포장 시스템의 적용 가능성을 제시하고, 지속 가능한 포장 시스템 설계를 위한 실질적인 근거를 제공한다.

주제어: 전과정평가(LCA), 재사용 포장, 순환 물류

1. 서론

전 세계적으로 전자상거래와 신선식품 유통 산업의 급격한 성장에 따라 물류 포장재의 사용량이 지속적으로 증가하고 있다. 특히 신선 농산물 유통 과정에서는 제품의 품질 유지와 손상 방지를 위해 포장재가 필수적으로 사용되며, 이는 물류 효율성과 공급망 운영에 중요한 역할을 한다. 그러나 대부분의 포장재는 단일 사용 후 폐기되는 구조를 가지며, 이로 인한 자원 소비 증가와 폐기물 발생, 온실가스 배출 등 환경적 부담이 지속적으로 제기되고 있다. 현재 유통 시스템에서는 골판지 박스와 같은 단일사용 포장재가 널리 활용되고 있으며, 경량성과 취급 용이성 측면에서 장점을 가진다. 그러나 반복 사용이 어려운 구조적 특성으로 인해 사용 후 폐기되는 방식으로 운영되며, 이에 따른 환경 영향이 발생한다. 반면, 회수 물류를 기반으로 하는 재사용 플라스틱 컨테이너 시스템은 다회 사용이 가능하며, 반복 사용을 통해 단위 기능당 자원 소비를 감소시킬 수 있는 잠재력을 가진다. 특히 최근에는 post-consumer recycled (PCR) 소재를 적용하여 원료 단계에서의 환경 부담을 추가적으로 저감하려는 시도가 이루어지고 있다[1]. 그러나 재사용 포장 시스템은 회수, 세척 및 재분배를 포함하는 복합적인 운영 구조를 가지며, 이로 인해 추가적인 에너지 및 자원 투입이 요구된다. 선행 연구에 따르면 재사용 포장재의 환경 영향은 재사용 횟수, 회수율, 세척 공정, 그리고 회수 물류(reverse logistics) 구조 등에 크게 의존하는 것으로 보고되고 있다[2, 3]. 또한 운송 거리 및 포장재의 중량과 같은 물류 조건 역시 전체 환경 영향에 중요한 영향을 미치는 것으로 나타났다[4]. 이러한 특성으로 인해 재사용 포장 시스템과 단일사용 포장 시스템은 단순한 소재 비교가 아닌, 시스템 구조 자체를 고려한 평가가 필요하다.

그럼에도 불구하고 기존 전과정평가(LCA) 연구는 특정 포장재 또는 제한된 조건을 중심으로 수행된 경우가 많으며, 실제 유통 시스템에서의 다양한 운영 조건을 충분히 반영하지 못하는 한계를 가진다. 특히 재사용 포장 시스템과 단일사용 포장 시스템을 동일한 기능 단위에서 비교하면서, 회수 물류

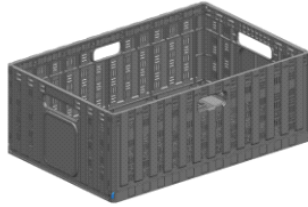

및 반복 사용 조건을 포함한 실제 운영 구조를 반영한 연구는 제한적으로 보고되고 있다[5]. 또한 일부 연구에서는 시스템 경계 설정 및 공정 정의 방식에 따라 결과가 크게 달라질 수 있음을 지적하고 있으며, 이는 비교 가능성 확보의 중요성을 시사한다. 따라서 재사용 포장 시스템의 환경적 성능을 평가하기 위해서는 단일사용 포장 시스템과의 구조적 차이를 고려하고, 실제 물류 운영 조건을 반영한 전과정평가가 필요하다. 특히 생산, 운송, 회수, 세척 및 폐기 단계를 포함하는 통합적인 시스템 경계 설정과 함께, 반복 사용 조건에 따른 환경 영향 변화를 정량적으로 분석하는 접근이 요구된다. 본 연구에서는 PCR 소재가 적용된 재사용 플라스틱 컨테이너와 단일사용 골판지 박스를 대상으로 cradle-to-grave 전과정평가를 수행하였다. 재사용 시스템의 특성을 반영하여 회수 물류 및 세척 공정을 포함하였으며, 단일사용 시스템과의 비교를 위해 동일한 기능 단위와 운송 조건을 적용하였다. 또한 재사용 횟수에 따른 환경 영향 변화를 분석하여, 재사용 포장 시스템이 환경적 이점을 나타내는 조건을 도출하고자 하였다. 이를 통해 실제 유통 환경에서 적용 가능하고 지속가능한 포장 시스템 설계에 기여하고자 한다. 이를 통해 본 연구는 재사용 포장 시스템의 실제 적용 가능성을 정량적으로 평가하고, 물류 포장 시스템의 지속가능성 향상을 위한 설계 및 운영 전략 수립에 기여하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 목표 및 범위 설정

전과정평가 방법론은 ISO 14040 및 ISO 14044에 따라 수행되었으며, 분석은 SimaPro 9.5 소프트웨어와 Ecoinvent 3.9.1 데이터베이스를 활용하였다. 환경 영향 평가는 Environmental Footprint (EF) 3.0 방법론을 적용하여 수행하였다. 재사용 플라스틱 컨테이너(reusable plastic container, RPC)와 단일사용 골판지 박스(corrugated box, CB)를 대상으로 두 포장 시스템의 환경 영향을 비교하였다. RPC는 회수 물류를 기반으로 반복 사용이 가능한 포장 시스템으로, post-consumer

Table 1. Technical characteristics and material compositions of the reusable container types (FC-R and corrugated box)

Sample	Reusable plastic container (RPC)	Corrugated box (CB)
Image		
Weight	1,320 g	540 g
Material	Virgin PP(50%) + PCR(50%)	Pulp-based
Dimensions	550*366*199 mm	460*342*210 mm

recycled(PCR) 소재가 적용된 컨테이너를 분석 대상으로 설정하였다. 반면 CB는 사용 후 폐기되는 단일사용 포장 시스템으로 가정하였으며, 데이터베이스에 포함된 통합 데이터셋을 활용하여 원료 생산 및 제조 단계를 반영하였다. 두 시스템은 동일한 기능 단위를 기준으로 비교 가능하도록 설정하였으며, 시스템 경계는 원료 생산, 제조, 운송, 사용, 회수 및 세척(재사용 시스템에 한함), 폐기 단계를 포함하는 cradle-to-grave with reuse 범위로 정의하였다. 단, CB의 경우 통합 데이터셋을 활용함에 따라 원료 생산 및 제조 단계는 개별 공정으로 분리하지 않고 반영하였다. 또한 재사용 포장 시스템의 특성을 반영하기 위해 RPC의 재사용 횟수를 주요 변수로 설정하였으며, 최대 14회 재사용 시나리오를 적용하여 단일사용 포장 시스템과의 환경 영향을 비교하였다. 이를 통해 재사용 포장 시스템의 환경적 이점이 나타나는 조건을 평가하였다.

2.2 기능단위

포장 시스템의 기능은 신선 농산물을 손상 없이 운송하는 것으로 정의하였다. 이에 따라 기능 단위(functional unit)는 동일한 물류 기능을 수행할 수 있도록 설정하였다. 기능단위는 실제 유통 시스템에서 공장 1회 생산량에 해당하는 신선 농산물 10,800개를 기준으로 설정하였으며, 이는 현장 운영 데이터를 반영한 값이다. 또한 하나의 생산 단위가 물류 과정을 거쳐 회수되는 전체 과정을 하나의 cycle로 정의하였으며, 1 cycle의 평균 소요 시간은 약 25일로 나타난 실제 운영 데이터를 기반으로 설정하였다. 본 연구에서는 신선 농산물을 개별 포장 단위로 간주하여, 농산물 1개당 포장재 1개가 사용되는 것으로 가정하였다. 이에 따라 기능단위를 충족하기 위해 RPC와 CB는 각각 동일한 수량으로 사용되는 것으로 설정하

였다. 이러한 가정은 실제 유통 환경에서 농산물의 종류 및 포장 방식에 따라 적재 용량이 상이한 점을 고려하여, 두 포장 시스템을 동일한 기준에서 비교하기 위해 적용하였다. 재사용 플라스틱 컨테이너(RPC)는 회수 및 재사용이 이루어지는 시스템 특성을 반영하여 모델링하였으며, 사용 과정에서 회수되지 않거나 파손된 일부 컨테이너에 한해 신규 생산이 이루어지는 것으로 설정하였다. 반면, 단일사용 골판지 박스(CB)는 사용 후 폐기되는 구조로, 기능단위를 충족하기 위해 필요한 물량이 모두 신규 생산되는 것으로 설정하였다. 이러한 설정을 통해 실제 유통 시스템의 운영 방식을 반영하면서도, 기능단위 기준에서 두 포장 시스템 간 환경 영향을 정량적으로 비교할 수 있도록 하였다.

2.3 시스템 경계

본 연구에서는 재사용 플라스틱 컨테이너(RPC)와 단일사용 골판지 박스(CB)를 대상으로 cradle-to-grave 관점에서 전 과정 환경 영향을 평가하였다. 시스템 경계는 포장재의 원료 생산부터 제조, 유통 및 사용, 회수 및 세척(재사용 시스템에 한함), 그리고 최종 폐기 단계까지를 포함하도록 설정하였다. 분석 대상은 신선 농산물 유통 과정에서 실제 적용되는 물류 구조를 반영하였다.

RPC 시스템은 공정을 개별적으로 구분하여 모델링하였다. 원료 생산(material supply) 단계에서는 폴리프로필렌(virgin PP)과 post-consumer recycled(PCR) 폴리프로필렌의 생산을 포함하였으며, 재생 원료 생산 과정에서의 전력 및 보조물질 투입을 반영하였다. 제품 생산(container production) 단계에서는 사출 성형 공정과 이에 수반되는 전력 사용을 포함하였다. 유통(distribution) 단계에서는 제조공장에서 농가(T1), 농가에

서 물류 거점(T2), 물류 거점에서 유통 매장(T3)으로 이어지는 전방 물류와, 회수 및 세척을 위한 역물류(T4)를 포함하였다. 세척 공정은 반복 사용 구조를 반영하여 일정 주기마다 수행되는 것으로 설정하였으며, 세척 과정에서 사용되는 물, 세정제 및 전력 소비를 고려하였다. 폐기(waste management) 단계에서는 회수되지 않거나 파손된 컨테이너의 처리 과정을 포함하였으며, 손실분은 신규 생산으로 대체되는 구조로 모델링하였다.

반면 CB 시스템은 Ecoinvent 3.9.1 데이터베이스의 “Corrugated board box {RoW} | production | APOS, U” 통합 데이터셋을 활용하여 모델링하였다. 해당 데이터셋은 골판지 박스의 원료 생산(라이너보드 및 플루팅지 생산), 판지 성형 및 박스 제조 공정, 전력 및 열에너지 사용, 보조 재료(전분, 잉크 등) 투입, 그리고 생산 과정에서 발생하는 폐지, 슬러지 및 폐수 처리 흐름을 포함하는 통합 공정으로 구성되어 있다. 또한 사용 후 폐기 단계 역시 데이터베이스에 포함된 처리 공정을 통해 반영된다. 따라서 CB 시스템은 원료 생산부터 제조 및 폐기까지 하나의 통합 공정으로 모델링되었으며, 실제 유통 조건을 반영하기 위해 운송 공정만 별도로 추가하였다. CB는 단일사용 구조이므로 회수 및 세척 공정은 포함하지 않았다.

두 시스템 간 비교 가능성을 확보하기 위해 동일한 기능 단위와 운송 조건을 적용하였다. 시스템 전반에서 사용되는 전력 및 연료 생산과 같은 보조 공정은 포함하였으며, 설비 및 장비와 같은 자본재(capital goods), 운송되는 농산물 자체, 그리고 인프라 구축에 따른 영향은 시스템 경계에서 제외하였다.

2.4 전과정 목록(LCI)

본 연구에서 사용된 실제 운영 데이터는 재사용 물류 포장 시스템을 제조 및 운영하는 국내 기업인 엔피씨 주식회사에서 제공한 현장 데이터를 기반으로 수집되었다. 데이터는 2024년 1월부터 5월까지 약 5개월간의 운영 기간 동안 측정된 전력 사용량 및 물류 운영 정보를 포함하며, 이를 바탕으로 사출 성

형 공정의 전력 사용량, 회수율, 세척 빈도 및 재사용 cycle과 같은 주요 파라미터를 산정하였다. 기능단위 설정에 사용된 신선 농산물 10,800개는 해당 기업의 월 평균 생산량을 기준으로 설정된 값으로, 실제 유통 운영 규모를 반영한 생산 단위이다. 다만 본 데이터는 특정 기업 및 운영 조건에 기반한 것으로, 다양한 유통 구조 및 지역 조건을 대표하는 데에는 한계가 있다.

전과정 목록(LCI)은 재사용 플라스틱 컨테이너(RPC)와 단일사용 골판지 박스(CB)를 대상으로 실제 생산 및 운영 데이터를 기반으로 구축하였다. 분석은 SimaPro 9.5 소프트웨어와 Ecoinvent 3.9.1 데이터베이스(allocation: cut-off by classification)를 이용하여 수행하였다. 기능 단위는 공장에서 1회 생산되는 신선 농산물 10,800개의 운송으로 정의하였다. LCI는 원료 생산, 제품 생산, 유통 및 사용, 폐기의 네 가지 단위 공정으로 구분하였다.

원료 생산 단계에서는 RPC 제조에 사용되는 폴리프로필렌을 포함한 주요 원료의 생산을 고려하였다. RPC는 신재 폴리프로필렌과 post-consumer recycled(PCR) 폴리프로필렌이 혼합된 구조로 구성되며, 재생 원료 생산 과정에서의 전력 사용 및 보조 물질 투입을 포함하였다.

제품 생산 단계에서는 사출 성형 및 포장 공정을 포함하였다. 사출 성형 공정은 실제 생산 데이터를 기반으로 전력 사용량을 반영하였으며, 운송 안정성 확보를 위한 스트레치 필름 포장 사용을 고려하였다.

유통 단계는 다수의 물류 구간을 통합하여 모델링하였다. 운송은 제조공장에서 농가(T1), 농가에서 물류 거점(T2), 물류 거점에서 유통 매장(T3)으로 이어지는 전방 물류와, 회수 및 세척을 위한 회수 물류(T4)를 포함하도록 설정하였다. 세척 공정은 실제 운영 데이터를 기반으로 평균 5회 사용당 1회 수행되는 것으로 반영하였으며, 이를 cycle 기준으로 환산하여 적용하였다. 세척 공정에는 수돗물, 세정제 및 전력 사용을 포함하였으며, 관련 입력 데이터는 Ecoinvent 데이터셋을 활용하

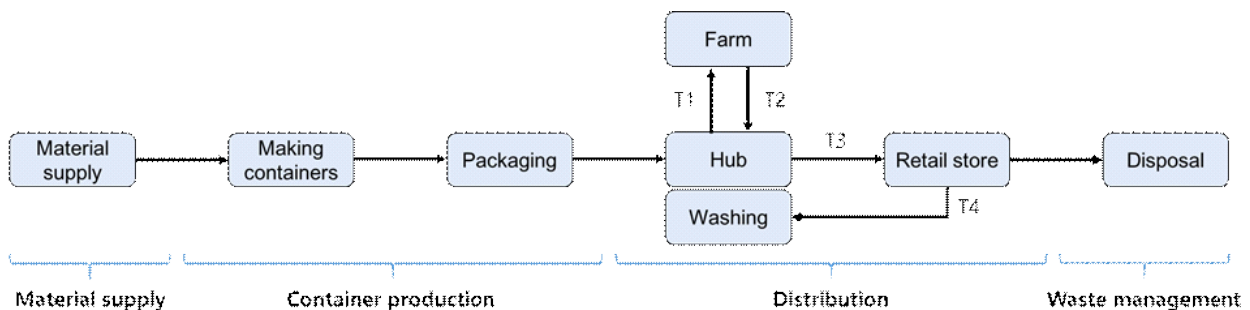


Fig. 1. System boundary for the cradle-to-grave life cycle assessment of reusable plastic containers

여 모델링하였다.

폐기 단계에서는 재사용 과정에서 회수되지 않은 컨테이너의 처리 과정을 반영하였다. 실제 운영 데이터에 따르면 회수율은 약 97%로 나타났으며, 이를 반영하여 각 cycle마다 약 3%의 컨테이너가 손실되어 폐기되고, 해당 물량은 다음 cycle에서 신규 생산으로 보충되는 구조로 모델링하였다. 이에 따라 초기 생산 이후에도 일정 비율의 컨테이너가 지속적으로 보충되는 것으로 모델링하였다. CB 시스템의 경우, 원료 생산, 제조 및 폐기 단계는 데이터베이스에 포함된 통합 데이터셋을 활용하여 반영하였으며, 실제 유통 조건을 반영하기 위해 운송 공정만 별도로 추가하였다. 각 단위공정별 상세 전과정 목록 데이터는 Table 2 및 Table 3에 제시하였다.

2.5 가정 및 한계

본 분석은 재사용 기반 유통 시스템을 반영하기 위해 수행되었으며, 주요 운영 조건은 실제 유통 시스템 운영 데이터를 기반으로 반영하였다. 하나의 사용 주기는 실제 운영 데이터에 따라 약 25일로 나타났으며, 본 분석에서는 1 cycle을 기준으로 환경 영향을 산정하였다. 초기 1회 사용에서는 기능 단위를

충족하기 위해 모든 RPC가 신규 생산되는 것으로 가정하였다. 이후 각 사용 주기마다 전체 컨테이너의 3%가 손실되거나 파손되는 것으로 설정하였다. 원료 생산 단계에서는 1차 데이터가 확보되지 않은 공정에 대해 Ecoinvent 데이터베이스의 2차 데이터를 활용하였다. 데이터베이스에 포함되지 않은 일부 첨가제는 유사 물질 데이터셋으로 대체하였다. 사출 성형 공정의 전력 사용량은 실제 운영 데이터를 기반으로 단위 제품당 값으로 환산하였다. 유통 단계에서는 일부 세척제가 데이터베이스에 존재하지 않아 구연산 데이터셋으로 대체하였다. 세척은 5회 사용당 1회 수행되는 것으로 확인되었으며 평균 0.256 회/cycle로 가정하여 적용하였다.

단일사용 골판지 박스(CB)는 국내 이커머스 유통 환경에서 일반적으로 사용되는 중량 540 g 제품을 기준으로 모델링하였다. 원료 생산부터 제조 및 폐기 단계는 Ecoinvent 데이터베이스의 통합 데이터셋(Corrugated board box {RoW} | production | APOS, U)을 활용하여 반영하였다. 운송 단계는 RPC와 동일한 물류 경로를 적용하였으며 회수 및 세척을 위한 회수 물류 과정은 제외하였다. 다만 해당 데이터셋은 RoW(Region of the World) 기반의 데이터로, 국내 골판지 제

Table 2. Life cycle inventory (LCI) inputs for the RPC system

Stage	RPC LCI database	Amount	Unit
Material supply	Polypropylene, granulate {GLO} market for APOS, U	7.E+03	kg
	Hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state {GLO} market for APOS, U	2.E+01	kg
	Polypropylene, granulate {GLO} market for APOS, U	1.E+02	kg
	Electricity, medium voltage {KR} market for APOS, U	3.E+03	kWh
Container production	Electricity, high voltage {KR} production mix APOS, U	1.E+04	kWh
	Packaging film, low density polyethylene {RoW} production APOS, U	1.E+01	kg
	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO6 {RoW} APOS, U	9.E+03	kgkm
	Tap water {RoW} market for APOS, U	4.E+03	kg
	Citric acid {GLO} market for APOS, U	6.E-01	kg
	Soap {GLO} market for APOS, U	3.E-01	kg
	Electricity, high voltage {KR} production mix APOS, U	3.E+02	kWh
Waste management	Waste plastic, mixture {RoW} treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration APOS, U	4.E+02	kg

Table 3. Life cycle inventory (LCI) inputs for the CB system

Stage	CB LCI database	Amount	Unit
Material supply	Corrugated board box {RoW} production APOS, U	6.E+03	kg
Distribution	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO6 {RoW} APOS, U	4.E+07	kgkm

조 공정의 특수성 및 재활용 체계가 충분히 반영되지 못한 한계가 있다. 또한 통합 데이터셋을 활용함에 따라 공정별 세부 기여도 분석에 있어 RPC 시스템과 비교 시 해상도의 차이가 존재할 수 있다. 분석에 사용된 데이터는 특정 제조업체 및 유통 시스템의 운영 조건을 기반으로 구축되었으며, 다른 지역이나 물류 조건에 대한 일반화에는 한계가 있을 수 있다.

또한 본 연구에서 설정한 기능단위는 신선 농산물 10,800개의 운송을 기준으로 하며, 이때 “농산물 1개”는 특정 품목의 실제 개별 단위를 의미하는 것이 아니라 다양한 농산물의 포장 및 유통 형태를 일반화하기 위한 기준 단위로 정의하였다. 이에 따라 포장재 단위당 적재량은 기능단위 기준으로 정규화하여 적용하였으며, 실제 유통 환경에서의 품목별 적재 방식 및 포장 형태의 차이는 반영되지 않은 한계가 있다.

2.6 민감도 분석

재사용 포장 시스템의 특성을 반영하기 위해 재사용 횟수에 따른 환경 영향 변화를 평가하는 민감도 분석을 수행하였다. 하나의 사용 주기는 실제 운영 데이터에 따라 약 25일로 나타났으며, 이를 기준으로 재사용 횟수 변화에 따른 영향을 평가하기 위해 민감도 분석 범위를 설정하였다. 민감도 분석에서는 RPC의 재사용 횟수를 1 cycle부터 최대 14 cycle까지 단계적으로 증가시키며 기능 단위 기준 환경 영향을 산정하였다. 여기서 최대 14 cycle은 실제 운영 조건에서 약 25일의 사용 주기를 기준으로 연간 재사용 가능 횟수를 반영하여 설정한 값이다. 초기 1 cycle에서는 모든 컨테이너가 신규 생산되는 것으로 반영하였으며, 2 cycle 이후부터는 실제 운영 데이터에서 확인된 회수율 97%를 반영하여 각 cycle마다 약 3%의 컨테이너가 손실되고 해당 물량이 신규 생산으로 보충되는 구조를 동일하게 적용하였다. 단일사용 골판지 박스(CB)의 경우 동일한 기능 단위를 충족하기 위해 매 사용 주기마다 신규 생산된 전량이 사용 후 폐기되는 구조로 가정하였다. 반면, RPC 시스템은 반복 사용 구조를 가지며, 각 cycle에서 손실되는 일부 물량만 신규 생산으로 보충되는 방식으로 적용하였다. 모든 시나리오에서 회수율 손실률 및 세척 조건과 같은 주요 변수는 일정하게 유지하여 재사용 횟수 변화에 따른 영향만을 평가할 수 있도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 환경 영향 비교 및 공정별 기여도 분석

기후변화 영향(GWP)을 기준으로 RPC와 CB의 환경 영향을 비교한 결과, RPC는 28,573.34 kg CO₂eq, CB는 27,333.59

kg CO₂eq로 나타나 RPC가 약 4.53% 높은 값을 보였다. 두 시스템 간 총 배출량 차이는 크지 않으나 공정별 영향 분포와 주요 기여 요인에서는 차이가 확인되었다. RPC의 공정별 기여도를 살펴보면 원료 생산 단계가 전체 GWP에서 가장 큰 비중을 차지하였다. 특히 폴리프로필렌 생산이 약 82.58%로 가장 높은 기여를 보였으며 PCR 원료 생산 과정에서의 전력 사용이 약 7.63%를 차지하였다. 제품 생산 단계에서는 사출 성형 공정의 전력 사용이 약 86.76%로 대부분의 영향을 차지하였다. 유통 단계에서는 도로 운송이 주요 영향 요인으로 나타났으며 전체 유통 단계 영향 중 약 61.84%를 차지하였다. 폐기 단계에서는 소각 공정이 약 98.2%의 비중을 차지하여 해당 단계의 환경 영향이 대부분 소각에 의해 결정되는 것으로 나타났다. CB의 경우 원료 생산 제조 및 폐기 단계가 통합 데이터셋으로 반영됨에 따라 개별 공정 구분은 제한적이나 전체 GWP 중 약 39.14%가 골판지 박스 생산 공정에서 기인하는 것으로 나타났다. 유통 단계에서는 도로 운송이 약 66.93%로 가장 높은 기여를 보였다. 이와 같이 RPC는 원료 생산과 제조 단계에서 높은 기여도를 보이며 여러 공정에 걸쳐 환경 영향이 분산되는 구조를 나타낸다. 반면 CB는 생산 공정과 운송 단계에 영향이 집중되는 특징을 보였다. 이러한 차이는 재사용 시스템과 단일사용 시스템 간 구조적 차이에 기인하며 포장 시스템의 환경 영향은 주요 원료 생산과 운송 조건에 의해 크게 영향을 받는 것으로 해석된다.

3.2 민감도 분석 결과

재사용 횟수에 따른 환경 영향을 분석한 결과, RPC는 1회 사용 기준에서 28,573 kg CO₂ eq로 나타나 CB(27,703 kg CO₂ eq)보다 높은 기후변화 영향(GWP)을 보였다. 그러나 재사용 횟수가 증가함에 따라 RPC의 누적 GWP는 완만하게 증가하는 반면, CB는 사용 횟수에 비례하여 크게 증가하는 경향을 보였다. 이에 따라 2회 사용 시점에서는 RPC의 GWP가 33,449 kg CO₂ eq, CB는 55,406 kg CO₂ eq로 나타나, RPC가 CB 대비 약 39.6% 낮은 수준으로 전환되는 것으로 확인되었다. 이후 재사용 횟수가 증가할수록 두 시스템 간 차이는 더욱 확대되었으며, 14회 사용 시점에서는 RPC의 GWP가 91,961 kg CO₂ eq, CB는 387,841 kg CO₂ eq로 나타나 RPC가 CB 대비 약 76.3% 낮은 수준을 보였다. 이러한 경향은 RPC가 초기 생산 단계에서 상대적으로 높은 환경 부담을 가지지만, 반복 사용을 통해 단위 기능당 환경 영향이 분산되는 구조적 특성에 기인한다. 반면 CB는 단일사용 구조로 인해 매 사용 시 신규 생산과 폐기가 반복되며, 이에 따라 환경 영향이 사용 횟수에 비례하여 누적되는 특성을 보인다. 따라서 재사용

Table 4. Life cycle environmental impacts of RPC by life cycle stage

Impact category	Unit	Total	Material supply	Container production	Distribution	Waste management
Climate change	kg CO ₂ eq	2.9.E+04	1.8.E+04	6.9.E+03	3.1.E+03	1.0.E+03
Ozone depletion	kg CFC11 eq	1.2.E-03	1.3.E-04	4.0.E-04	6.2.E-04	2.4.E-06
Ionising radiation	kBq U-235 eq	4.0.E+03	8.9.E+02	2.8.E+03	2.8.E+02	6.1.E-01
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	5.7.E+01	3.5.E+01	1.7.E+01	4.9.E+00	2.7.E-01
Particulate matter	disease inc.	9.0.E-04	6.4.E-04	8.1.E-05	1.7.E-04	1.2.E-06
Human toxicity, non-cancer	CTUh	6.4.E-05	5.1.E-05	4.3.E-06	8.0.E-06	3.8.E-07
Human toxicity, cancer	CTUh	7.2.E-07	6.2.E-08	1.5.E-07	5.0.E-07	3.7.E-09
Acidification	mol H ⁺ eq	9.6.E+01	6.2.E+01	2.5.E+01	9.4.E+00	2.4.E-01
Eutrophication, freshwater	kg P eq	7.7.E+00	2.1.E+00	5.1.E+00	4.5.E-01	2.7.E-03
Eutrophication, marine	kg N eq	2.1.E+01	1.2.E+01	7.6.E+00	1.7.E+00	1.3.E-01
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	2.2.E+02	1.3.E+02	7.5.E+01	1.8.E+01	1.1.E+00
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	1.8.E+05	4.0.E+04	1.1.E+05	3.0.E+04	2.0.E+03
Land use	Pt	3.6.E+04	3.5.E+03	1.0.E+04	2.2.E+04	5.9.E+01
Water use	m ³ depriv.	6.6.E+03	5.2.E+03	9.7.E+02	3.9.E+02	6.3.E+01
Resource use, fossils	MJ	7.2.E+05	5.4.E+05	1.3.E+05	4.6.E+04	1.8.E+02
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	1.6.E-02	7.8.E-04	9.5.E-04	1.4.E-02	3.0.E-05
Climate change - fossil	kg CO ₂ eq	2.9.E+04	1.8.E+04	6.9.E+03	3.1.E+03	1.0.E+03
Climate change - biogenic	kg CO ₂ eq	3.1.E+01	2.7.E+01	2.9.E+00	9.1.E-01	3.3.E-02
Climate change - land use and LU change	kg CO ₂ eq	1.1.E+01	1.9.E+00	6.0.E+00	3.2.E+00	5.6.E-03
Human toxicity, non-cancer - organics	CTUh	6.3.E-06	4.6.E-06	5.8.E-07	1.1.E-06	4.6.E-09
Human toxicity, non-cancer - inorganics	CTUh	6.2.E-05	5.1.E-05	4.1.E-06	7.0.E-06	3.7.E-07
Human toxicity, non-cancer - metals	CTUh	4.7.E-08	9.5.E-09	2.9.E-08	4.5.E-09	4.0.E-09
Human toxicity, cancer - organics	CTUh	7.2.E-07	6.2.E-08	1.5.E-07	5.0.E-07	3.7.E-09
Human toxicity, cancer - inorganics	CTUh	9.6.E-15	1.1.E-15	3.3.E-15	5.1.E-15	5.5.E-18
Human toxicity, cancer - metals	CTUh	0.0.E+00	0.0.E+00	0.0.E+00	0.0.E+00	0.0.E+00
Ecotoxicity, freshwater - organics	CTUe	3.5.E+03	7.4.E+02	4.2.E+02	2.4.E+03	3.8.E+00
Ecotoxicity, freshwater - inorganics	CTUe	2.2.E+04	4.3.E+03	8.9.E+03	6.8.E+03	1.9.E+03
Ecotoxicity, freshwater - metals	CTUe	1.6.E+05	3.5.E+04	1.0.E+05	2.1.E+04	1.3.E+02

Table 5. Life cycle environmental impacts of CB by life cycle stage

Impact category	Unit	Total	Corrugated board box production	Distribution
Climate change	kg CO ₂ eq	2.7.E+04	6.4.E+03	2.1.E+04
Ozone depletion	kg CFC11 eq	4.9.E-03	5.1.E-04	4.4.E-03
Ionising radiation	kBq U-235 eq	2.3.E+03	8.2.E+02	1.5.E+03
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	4.5.E+01	1.4.E+01	3.1.E+01
Particulate matter	disease inc.	1.5.E-03	3.0.E-04	1.2.E-03
Human toxicity, non-cancer	CTUh	6.9.E-05	1.3.E-05	5.6.E-05
Human toxicity, cancer	CTUh	5.3.E-06	1.7.E-06	3.6.E-06
Acidification	mol H ⁺ eq	9.0.E+01	2.8.E+01	6.1.E+01
Eutrophication, freshwater	kg P eq	5.2.E+00	3.0.E+00	2.2.E+00
Eutrophication, marine	kg N eq	2.0.E+01	9.5.E+00	1.0.E+01
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	1.8.E+02	6.8.E+01	1.1.E+02
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	5.5.E+05	3.5.E+05	1.9.E+05
Land use	Pt	4.0.E+05	2.5.E+05	1.5.E+05
Water use	m ³ depriv.	2.8.E+03	1.1.E+03	1.8.E+03
Resource use, fossils	MJ	3.9.E+05	8.5.E+04	3.0.E+05
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	1.7.E-01	6.7.E-02	9.9.E-02
Climate change - Fossil	kg CO ₂ eq	2.7.E+04	6.3.E+03	2.1.E+04
Climate change - Biogenic	kg CO ₂ eq	1.2.E+02	1.1.E+02	5.4.E+00
Climate change - Land use and LU change	kg CO ₂ eq	6.5.E+01	5.5.E+01	1.0.E+01
Human toxicity, non-cancer - organics	CTUh	1.1.E-05	2.8.E-06	8.0.E-06
Human toxicity, non-cancer - inorganics	CTUh	6.0.E-05	1.1.E-05	4.9.E-05
Human toxicity, non-cancer - metals	CTUh	6.5.E-08	3.9.E-08	2.6.E-08
Human toxicity, cancer - organics	CTUh	5.3.E-06	1.7.E-06	3.6.E-06
Human toxicity, cancer - inorganics	CTUh	2.6.E-13	2.2.E-13	3.6.E-14
Human toxicity, cancer - metals	CTUh	0.0.E+00	0.0.E+00	0.0.E+00
Ecotoxicity, freshwater - organics	CTUe	1.9.E+04	2.0.E+03	1.7.E+04
Ecotoxicity, freshwater - inorganics	CTUe	6.0.E+04	1.3.E+04	4.7.E+04
Ecotoxicity, freshwater - metals	CTUe	4.7.E+05	3.4.E+05	1.3.E+05

Table 6. GWP contribution of input processes within each life cycle stage

Product	Stage	Input	Contribution
Reusable plastic container (RPC)	Material supply	Polypropylene production	82.58%
		Electricity for PCR production	7.63%
	Container production	Electricity consumption for injection molding	86.76%
		Road transportation	61.84%
	Distribution	Electricity consumption	3.79%
		Waste management	Incineration

Table 6. Continued

Product	Stage	Input	Contribution
Corrugated box (CB)	Material supply		
	Container production	Corrugated board box production	39.14%
	Waste management		
	Distribution	Road transportation	66.93%

횟수가 증가할수록 RPC의 환경적 이점은 더욱 뚜렷하게 나타나며, 재사용 횟수는 포장 시스템의 환경 성능을 결정하는 주요 변수로 작용한다. 실제 운영 조건에서 일정 수준 이상의 재사용이 확보될 경우 재사용 포장 시스템은 단일 사용 포장 시스템 대비 환경 부담 저감에 효과적인 대안이 될 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 재사용 플라스틱 컨테이너(RPC)와 단일사용 골판지 박스(CB)를 대상으로 전과정평가를 수행하여 두 포장 시스템의 환경 성능을 비교하였다. 분석 결과, RPC는 초기 사용 단계에서는 상대적으로 높은 환경 영향을 나타냈으나, 재사용이 이루어질 경우 환경 부담이 빠르게 감소하며 일정 횟수 이상의 반복 사용에서 CB보다 낮은 환경 영향을 보였다. 이러한 결과는 포장 시스템의 환경 성능이 단순한 소재 차이가 아니라 시스템 구조와 운영 방식에 의해 결정됨을 보여준다. 특히 재사용 횟수는 환경 영향에 가장 큰 영향을 미치는 핵심 변수로 작용하며, 충분한 반복 사용이 확보될 경우 재사용 포장 시스템이 단일사용 시스템 대비 효과적인 저탄소 대안이 될 수 있음을 확인하였다. 또한 RPC에 적용된 재생원료(PCR)는 원료 생산 단계에서의 환경 부담을 저감하는 데 기여할 수 있으며, 재사용 구조와 결합될 경우 그 효과가 더욱 강화될 수 있음을 시사한다. 이는 재사용 시스템 설계 시 단순한 내구성 확보뿐 아니라, 소재 구성의 최적화가 함께 고려되어야 함을 의미한다. 본 연구는 실제 유통 조건을 반영한 데이터를 기반으로 재사용 포장 시스템의 환경적 성능을 정량적으로 평가하였다는 점에서 의의를 가진다. 특히 재사용 횟수에 따른 환경 영향 변화를 함께 분석함으로써, 재사용 포장 시스템의 적용 가능성을 보다 현실적인 관점에서 제시하였다. 향후 연구에서는 회수율, 운송 거리, 세척 조건과 같은 운영 변수에 따른 영향 분석을 확대할 필요가 있으며, 다양한 유통 환경 및 지역 조건을 반영한 추가적인 연구가 요구된다. 이를 통해 재사용 포장 시스템의 환경적 이점을 극대화할 수 있는 설계 및 운영 전략을 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

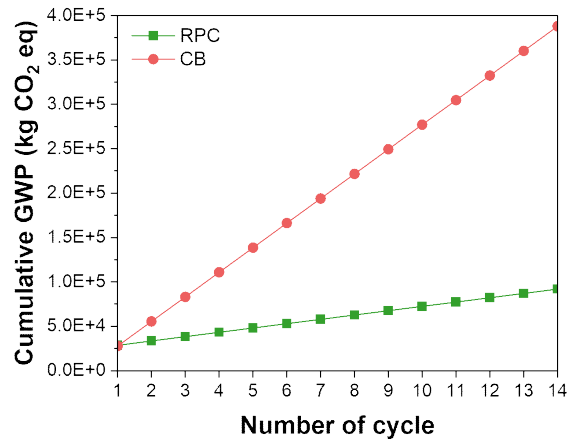


Fig. 2. Cumulative global warming potential (GWP) of reusable container systems (RPC) and a single-use(CB) system as a function of reuse cycles.

사 사

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. RS-2024-00400653)

References

1. Ng, S., Rogers, N. The future of PCR packaging to 2026.
2. Accorsi, R., Cascini, A., Cholette, S., et al. Economic and environmental assessment of reusable plastic containers: A food catering supply chain case study. International Journal of Production Economics 152, pp. 88-101 (2014).
3. Zhou, K., Song, Y., Xian, X., et al. A comprehensive comparison of the life-cycle environmental impacts of traditional and returnable express delivery packaging in

- China. *Journal of Cleaner Production* 434, p. 140017 (2024).
4. Koskela, S., Dahlbo, H., Judl, J., et al. Reusable plastic crate or recyclable cardboard box? A comparison of two delivery systems. *Journal of Cleaner Production* 69, pp. 83-90 (2014).
 5. Gao, S., Yao, J., Zhao, X., et al. Review on life cycle analysis (LCA) studies of reusable plastic crates for fruit and vegetables. *International Journal of Sustainable Engineering* 18, p. 2457345 (2025).
 6. Del Borghi, A., Parodi, S., Moreschi, L., Gallo, M. Sustainable packaging: An evaluation of crates for food through a life cycle approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 26, pp. 753-766 (2021).
 7. Levi, M., Cortesi, S., Vezzoli, C., Salvia, G. A comparative life cycle assessment of disposable and reusable packaging for the distribution of Italian fruit and vegetables. *Packaging Technology and Science* 24, pp. 387-400 (2011).