KOREAN JOURNAL OF PACKAGING SCIENCE & TECHNOLOGY
Vol. 29, No. 3 181~193 (2023)
https://doi.org/10.20909/kopast.2023.29.3.181

신선식품용 재사용 EPE박스와 EPS박스에 대한 전과정 환경영향평가

김수연 · Charoensri Korakot · 신양재 · 박현진*
고려대학교 생명공학과

Comparative Life Cycle Assessment of Reusable and Disposable Distribution Packaging for Fresh Food

SY Kim, Charoensri Korakot, YJ Shin, and HJ Park*
Dept. of Biotechnology, Korea University

Abstract In this study, we conducted a comparative life cycle assessment (LCA) of two different products, considering reusable and single-use packaging for fresh food distribution. For reusable packaging, we utilized expanded polyethylene (EPE), while for comparison, a disposable box made of widely used expanded polystyrene (EPS) was selected. We comprehensively analyzed the environmental impacts of production, transportation, reprocessing (for reused boxes), and disposal across 18 impact categories. Upon analyzing the actual reuse of 300 rounds of fresh food, the cumulative global warming potential (GWP) values for the EPE box were found to be 280.21 kg carbon dioxide (CO_2) eq, demonstrating a significant 75% reduction compared to those of the EPS box. Furthermore, it was observed that the GWP values for the EPE boxes became equivalent to those of the EPS boxes after 12 rounds of reuse. In conclusion, reusable packaging shows substantial potential to contribute to the reduction of environmental burdens, aligning well with global environmental requirements for sustainable food distribution and related industries.

Keywords reusable packaging, EPE, EPS, life cycle assessment, global warming potential

서 론

한국을 비롯한 많은 국가에서 일회용 expanded polystyrene (EPS)는 신선식품 유통에 가장 널리 사용되는 포장재이다[1]. 특히 코로나19로 인한 비대면 배송 서비스로 일회용 포장재의 사용이 크게 증가하면서 폐기물 처리 및 이에 따른 사회적 문제에 대한 우려가 커지고 있다[2,3]. 우리나라의 경우 2021년 한국환경공단 통계에 따르면 연간 EPS 생산량은 2015년 25,334 톤, 2018년 36,792 톤, 2020년 50,148 톤, 2021년 59,952 톤으로 지속적으로 증가하고 있다[4,5]. 현재 국내 신선식품 유통업계에서는 EPS나 골판지박스 등의 일회용 용기를 대신하기 위해 세척과 수선이 가능한 재사용 가능한 물류용기가 사용되고 있다[6-8].

기존 단열포장의 환경영향에 대한 선행연구로서 생선포장용 일회용 포장재인 EPS박스, 골판지박스, polypropylene (PP) 박스를 life cycle assessment (LCA)를 통해 비교 분석한 연구가 있다[9]. 연구 내용을 요약하면, EPS박스를 프랑스 시장의 다른 포장 시스템과 비교할 때 광화학 산화제 형성 이외의 대부분의 환경영향 범주에서 PP박스 및 골판지박스와 유사하거나 더 나은 성능을 발휘한 것으로 분석되었다. 스페인 시장에서는 결과가 비슷하며, 광화학적 산화제 형성과 물 소비량 측면에서 PP박스가 EPS박스보다 적은 환경부하를 가진 것으로 나타났다. 스칸디나비아 시장에서 EPS박스와 PP박스는 여러 지표에서 비슷한 성능을 발휘하지만 EPS박스는 폐기물 생산에서 PP박스보다 우수하고 온실가스 배출 및 광화학 산화제 배출에 대해서는 높은 환경부하를 가진 것으로 분석되었다. 전체적으로 EPS박스는 폐기물 생성, 물 소비 및 물 부영양화 측면에서 골판지박스보다 환경부하가 적으며 에너지 소비, 온실가스 배출 및 광화학 산화제 측면에서는 골판지박스가 환경부하가 더 적고, 두 소재 모두 산성화 측면에서는 유사한 것으로 분석되었다. 단열 포장재가 환경에 미치는 영향에 대한 이전 연

*Corresponding Author: HJ Park
Dept. of Biotechnology, Korea University
Tel: +82-2-3290-3759
E-mail: hjpark@korea.ac.kr

구는 주로 일회용 포장재의 LCA에 중점을 두었으며, 식품용 재사용 박스에 대한 연구는 주로 해외 국가에서 식품 운송용 reusable plastic crates (RPCs)의 환경영향에 대해 평가한 것으로 우리나라의 신선식품용 재사용 박스에 대한 전과정 환경영향평가는 아직 이뤄지지 않아 분석이 필요한 실정이다[10-12].

본 연구의 목적은 다음과 같다. 환경 및 에너지 성능을 배송 횟수에 따라 평가하여 신선식품 배송용 재사용 단열 포장재의 전반적인 환경 지표에 대한 운송 단계의 기여도를 분석하며, 일회용 EPS 박스와 expanded polyethylene (EPE) 소재가 포함된 재사용 단열 포장재의 전 과정에서 환경에 미치는 영향을 비교한다.

재료 및 방법

1. 기능 단위 및 시스템 범위 설정

1.1. 기능 단위

본 연구에서 사용된 EPS 박스는 국내 EPS 박스 제조업체에서 생산된 박스로, 국내 신선식품 배송에 가장 많이 사용되는 박스이다. EPE 박스는 국내 대형 식품 재사용박스 유통업체에서 사용되는 박스를 선정하였으며 VIRGIN PE를 발포한 EPE 소재를 사용해 신선 식품 배송을 위한 재사용 단열 포장재로 제조되었다. 각 박스의 외관은 Figure 1과 같다.

본 연구에서는 기능 단위를 통해 박스의 전 과정에서 발생하는 투입, 배출물에 대한 환경 평가를 수행하였다. 본 연구에서 적용된 기능 단위는 냉장식품 유통 과정 중 10°C 미만의 온도에서 3 kg의 냉장식품과 0.52 kg의 아이스팩을 24시간 이상 유지하는 동일한 보냉성, 동일한 열관류율을 가지는 EPS 박스와 EPE 박스를 기준으로 하였다[13,14].

본 연구에서는 EPS 박스, EPE 박스의 보냉성이 동일하다고 가정하기 위해 열전도도를 측정해 각 박스의 단열 성능을 파악하였다. 박스의 단열 성능은 박스 소재의 열전도율과 밀접한 관련이 있으며, 일반적으로 열전도율이 낮을수록 단열 효과가 높아져 박스의 단열 성능이 향상된다[15,16]. 열전도도 측정에 사용된 각 박스의 무게는 EPS 박스 0.26 kg, EPE 박스 1 kg이며, 두께는 EPS 박스 24.7 mm, EPE 박스 20.54 mm이다. EPS 박스의 규격은 452 × 360 × 336 mm이고, EPE 박스의 규격은 445 × 330 × 200 mm이다.

EPE 박스를 420×290 mm 크기로 절단하고 Heat Flow Meter(HFM436 lambda, Netzsch,Germany)를 이용하여 열전도율을 측정하였다(Figure 2). EPE 박스의 열전도율은 57.89 K [mW/mK]로 측정되었다. EPS박스는 일반적인 EPS 박스의 열전도도 40 K [mW/mK]를 적용하였다[17].

열관류율 공식을 바탕으로 각 박스는 동일한 열관류율을 갖도록 계산되었으며, 동일한 열관류율을 가질 때 박스 두께의 변화에 따른 박스의 무게를 도출했다. 열관류율, 열전도도, 두께에 대한 공식은 다음과 같다[18].

$$U = \lambda / D \tag{1}$$

U는 열관류율을 나타내며 $W/m^2 \cdot K$ 단위로 측정된다. λ는 소재의 열전도도를 나타내며 W/m·K 단위로 표시된다. D는 소재의 두께를 나타내며 미터(m) 단위로 측정된다. 열전도율 측정과 열관류율 공식에 따른 계산 결과 본 연구에 기능단위로 사용된 박스는 무게 0.26 kg, 두께 24.7 mm, 규

Fig. 1. Picture of EPS box and EPE box.

Fig. 2. Measurement of Thermal Conductivity for EPE Boxes.

Table 1. Weight, thickness, and specifications of each box at functional unit.

	EPS box	EPE box
Weight (kg)	0.26	1.74
Thickness (mm)	24.7	35.75
Specification (mm)	452×360×336	471×371×241

격 452 × 360 × 336 mm의 EPS 박스와 무게 1.74 kg, 두께 35.75 mm, 규격 471 × 371 × 241 mm의 EPE 박스이며, 박스의 제조, 유통, 사용 및 폐기를 포함한 전 과정을 평가하였다. 기능단위로 사용된 박스의 무게, 두께, 규격은 Table 1과 같다.

1.2. 시스템 범위

본 연구에서는 EPE 재사용 박스의 원자재 취득, 박스 제조, 유통, 재사용(세척, 수선), 폐기 단계를 포함한 전과정을 고려했으며, 운송 시스템에서 발생하는 재사용 박스의 흐름과 1회 사용 후 폐기되는 EPS 박스의 흐름을 비교하여 재사용의 효과를 분석했다. EPS 박스의 경우 원재료 생산 단계에서는 polystyrene (PS) 및 박스 포장재의 제조공정이 포함되었다. 박스 생산 단계에서는 PS 발포 및 박스의 포장공정이 포함되었다. 운송 단계에서는 상자의 원재료 생산지부터 상자 제조업체, 신선식품 제조업체, 소비자, EPS 상자 재활용 업체까지의 유통 데이터가 포함되었다. 폐기물 처리 단계에서는 박스의 재활용, 소각, 매립의 과정이 포함되었다(Figure3).

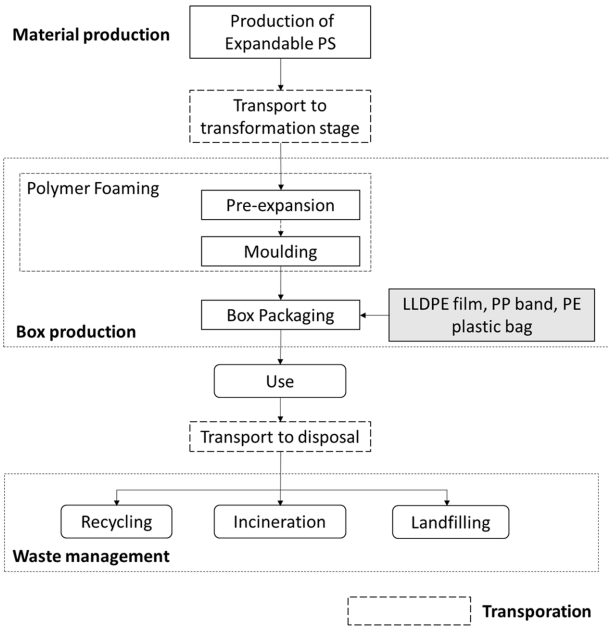

Fig. 3. System boundary of EPS box.

EPE 박스의 경우 원재료 생산 단계에서는 박스 제작을 위한 원재료 생산 및 운송에 필요한 자재와 에너지가 포함된다. 박스 제작 단계에서는 Polyvinyl Chloride (PVC)시트, PVC 필름, EPE 시트, 패브릭, 칸막이 메시, 스트립, 벨크로, 송장 포켓이 포함되었다. 재사용 운송단계에서는 신선식품과 냉매가 담긴 박스를 소비자에게 운송하고, 운송 후 박스를 세척, 수선하고, 소비자에게 다시 운송하기 전

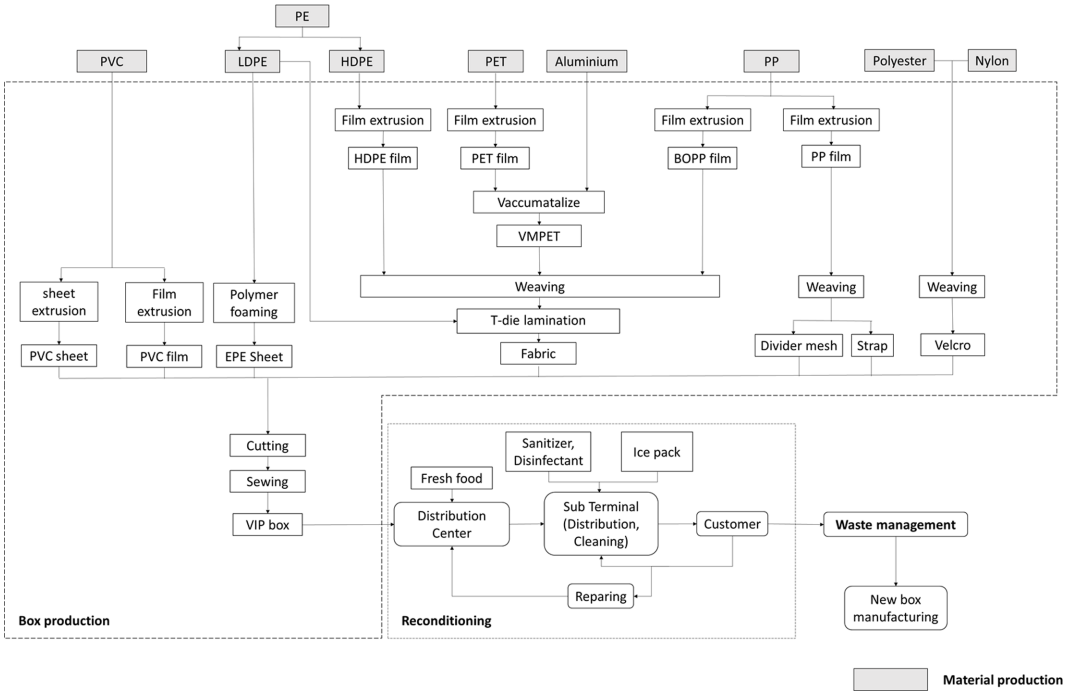

Fig. 4. System boundary of EPE box.

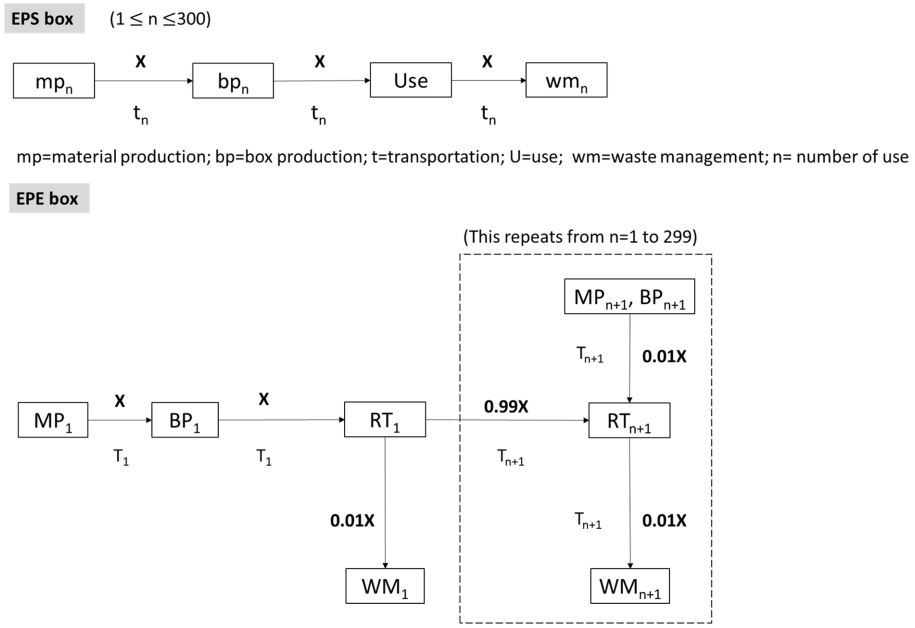

Fig. 5. Simplified chart of the life cycle of EPS boxes, EPE boxes as the number of rotations changes.

중간물류센터(sub-terminal)에서 박스를 살균 및 소독하는 과정이 포함된다. 폐기물 처리 단계에서는 박스 사용 및 폐기 후 재활용, 소각, 매립 과정이 포함되었다(Figure 4).

EPS 박스, EPE 재사용 박스의 유통단계 순환 흐름은 Figure 5와 같다. EPS 박스는 사용 후 별도의 운송과정 없이 전량 폐기된다. 재사용 박스의 경우 1회전(n = 1) 동안 사용 후 X개의 박스 중 1%가 폐기되고 99%가 세척 또는 수선된다. 2회전(n = 2)에는 1회전에서 폐기된 박스를 새로 생산하고, 1회전에서 회수된 상자와 함께 새로 생산된 박스를 사용하며, 1%는 폐기되고, 99%는 세척, 수선된다. 이 과정은 2회전부터 300회전까지 유사하게 계속된다.

각 박스의 사용횟수에 따른 누적 GWP 값을 방정식을 이용하여 일반화하였다. EPS 박스의 방정식은 다음과 같다.

$$y = \sum_{n=1}^{300}(mp_n + bp_n + t_n + wm_n) \quad (2)$$

n은 박스의 개수, mp_n은 n개의 EPS박스를 사용시 박스 소재의 제조단계에서 발생하는 GWP 환경영향값이다. bp_n, t_n, wm_n은 각각 n개 박스의 제조단계, 운송단계, 폐기단계에서 발생하는 GWP 환경영향 값이다. EPS 박스를 1개 사용하는 경우 GWP 환경 영향 값 y는 다음과 같이 표현할 수 있다. $mp_1 + bp_1 + tp_1 + wm_1$. EPS 박스를 2개 사용하는 경우 GWP 환경 영향 값 y는 $mp_1 + bp_1 + tp_1 + wm_1 + mp_2 + bp_2 + tp_2 + wm_2$로 표현할 수 있다. EPS 박스를 2개 사용시 환경 영향 값은 동일하므로$mp_1 + mp_2 + mp_3 = \cdots = mp_{300}$이며, bp_1, tp_1, wm_1값 또한 동일하다.

EPE 박스의 경우 300회의 재사용 횟수를 고려할 때 원자재 생산, 박스 제조, 운송, 회수 운송, 폐기물 처리 단계를 포함한 전과정을 다음과 같은 단일 공식으로 표현할 수 있다[3].

$$y = MP_1 + BP_1 + T_1 + WM_1 + \sum_{n=1}^{300} RT_n + \sum_{n=2}^{300} (MP_n + BP_n + T_n + WM_n) \quad (3)$$

n은 박스의 회전 수, MP_n는 n회 사용시 박스소재의 제조단계에서 발생하는 GWP환경영향값이다. BP_n, T_n, WM_n, RT_n은 각각 n회 사용시 박스의 제조단계, 운송단계, 폐기단계, 재사용단계에서 발생되는 누적 GWP 환경영향값이다. 박스를 1회 사용하는 경우 GWP 환경영향 값 y는 $MP_1 + BP_1 + T_1 + WM_1 + RT_1$로 표현할 수 있다. WM_1은 박스의 1%가 폐기될 때 발생하는 환경영향 값을 나타내며, RT_1은 박스의 99%의 운송, 세척 및 수선 과정에 대한 환경 영향 값을 나타낸다. 박스를 2회 사용하는 경우 GWP 환경 영향 값 y는 $MP_1 + BP_1 + T_1 + WM_1 + RC_1 + MP_2 + BP_2 + T_2 + WM_2 + RC_2$으로 표현할 수 있다. MP_2, BP_2, T_2는 1회전에서 폐기된 박스의 1%가 새로 제조되었을 때 발생하는 환경영향 값을 나타낸다. 2회전 이상 재사용하는 경우 박스의 폐기 및 재사용 흐름은 1회전과 동일하게 유지되므로 WM_2 및 RT_2 값은 WM_1 및 RT_1 값과 동일하다.

2. 전과정 목록분석

2.1. 원료취득단계

EPS 박스의 원료로 사용되는 EPS 비드는 국내에서 생산되었다. EPE 박스의 원재료는 해외에서 생산되었으며, 원

재료 공급원과 박스 제조 시설 사이의 거리는 108 km이다.

2.2. 박스 제조단계

EPS 박스는 국내 EPS 박스 제조사에서 발포, 성형, 포장을 진행했다. 박스 제조 단계에서 사용된 물, 전기, 가스 사용량 및 포장재(Linear Low-Density Polyethylene(LLDPE) 필름, PP밴드)에 대한 데이터는 국내 EPS 박스 제조사의 2021년 사용량을 기준으로 했다. 박스 포장 시 사용된 포장재(PE plastic bag) 데이터는 유럽 EPS 산업 협회(EUMEPS)의 "Life Cycle Assessment of the Industrial Use of Expanded Polystyrene Packaging in Europe Case Study Packaging System for TV sets"보고서에서 참조되었다.

Table 2. Transportation distance of EPS box

Transportation	km	Description
Transport of raw materials	500	From EPS material supplier to EPS box manufacturing plant
Transport of box	120	From EPS box manufacturing plant to fresh food manufacturing plant
Transport of box with fresh food and ice pack	41	From fresh food manufacturing plants to consumers near the market (average distance according to distribution ratio by distributor)
Transport of box for recyling	15	From consumers to EPS box recycling company

Table 3. Transportation and Reconditioning transportation distance of EPE box

		km	Description
Transportation	Transport of box material and box	1798	From overseas box material manufacturing plant to box manufacturing plant and then to domestic distribution center
	Transport of box for treatment	15	From consumers to box treatment center (average distance)
Reconditioning transportation	Transport of box with fresh food	44	From domestic distribution center to sub-terminal (average distance)
	Transport of box with fresh food and ice pack	8.7	From domestic sub-terminal to customers (average distance)
	Transport of box for washing	8.7	From customers to sub-terminal (average distance)
	Transport of box for recovery	60	From customers to domestic recovery center (average distance)
	Transport of box for reuse after recovery	65	From recovery center to domestic fullfillment center (average distance)

EPE 박스의 원재료 생산 및 박스 제조는 해외 공장에서 이루어졌으며, 해외 공장과 국내 유통센터 간의 거리는 1,798 km이다.

2.3. EPS 박스 유통 단계

원재료 생산시설과 EPS박스 제조시설 간 거리는 500 km, 박스 제조시설과 신선식품 제조공장 간 거리는 120 km이다. 신선식품 제조공장에서는 운송을 위해 신선식품과 냉매를 포장한다. 신선식품 제조공장과 고객 사이의 거리는 41 km (유통사별 유통비율 기준)이다. 소비자로부터 EPS박스 재활용 업체까지의 거리는 15 km이다. 운반용 냉매는 아이스 팩 3개(각각 0.52kg)로 총 1.56 kg을 사용했다. 아이스 팩의 내용물은 물이며, 사용된 포장재는 Low-Density Polyethylene (LDPE)필름이다. 신선식품은 3 kg을 운송한 것으로 가정했다.

2.4. EPE 박스 재사용 단계

EPE 박스의 경우, 대형 식품 재사용 박스 유통업체의 데이터를 바탕으로 박스의 유통, 세척, 수선을 포함한 회수 경로를 정했다. 국내 유통 경로와 재사용 경로는 매번 동일한 것으로 가정했다. 조사된 국내 물류센터와 중간물류센터 간의 평균 거리는 44 km였으며, 11톤 트럭으로 운송됐다. 물류센터는 신선식품 운송을 담당하고, 중간물류센터는 냉매(아이스 팩)와 사용 후 회수된 박스 세척에 대한 운송을 담당한다. 국내 중간물류센터와 고객 간 평균 거리는 8.7 km이며, 1 톤 트럭으로 운송된다. 고객과 국내 회수센터간 평균 거리는 60 km이며, 1 톤 트럭으로 운송된다. 회수센터

Table 4. Potential impact results for scenarios (1 cycle).

		EPS box				EPE box				
Impact category	Unit	Material production	Box production	Transportation	Waste management	Material production	Box production	Transportation	Reconditioning transportation	Waste management
Global warming	kg CO_2 eq	7.2321677	0.000743299	0.81838871	-4.3841203	26.795749	7.7601193	0.74455432	0.73761155	-0.258535
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	1.01825E-06	2.98933E-10	2.7752E-07	-1.706E-07	2.7117E-05	2.73909E-06	2.83287E-07	4.48524E-07	-9.42E-07
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	0.31517866	8.92939E-05	0.01517696	-0.1771265	0.29073504	0.75063409	0.016242856	0.037909374	-0.046492
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	0.015152298	1.59221E-06	0.00484212	-0.0078073	0.0535876	0.023382114	0.005384806	0.002685086	-0.00062
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	0.00551332	1.61123E-06	0.00120578	-0.003972	0.0274197	0.016443483	0.001662761	0.001338758	-0.000345
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq	0.017954741	1.60476E-06	0.00491815	-0.0081885	0.05547656	0.024928475	0.005456726	0.002750864	-0.000637
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	0.014790439	2.43193E-06	0.00289729	-0.0112167	0.08209379	0.028149044	0.004496616	0.002521579	-0.000653
Freshwater eutrophication	kg P eq	0.000995489	3.56341E-07	8.3019E-05	-0.0005087	0.00206594	0.002986395	7.43667E-05	0.000210588	-0.000137
Marine eutrophication	kg N eq	9.72113E-05	3.08828E-08	7.9983E-06	-3.599E-05	0.00030093	0.000529946	6.84013E-06	1.94068E-05	-2.71E-06
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	3.9932675	0.000518852	8.4632869	-1.2863629	12.883838	14.413244	7.5676979	4.2198004	-0.367396
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	0.066827366	1.55397E-05	0.02393586	-0.0169556	0.23764676	0.21419801	0.017512034	0.02778697	0.000302
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	0.091940621	2.1577E-05	0.03669731	-0.0230074	0.31248568	0.29367092	0.027590192	0.038249026	0.000159
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	0.18982602	3.34867E-05	0.06940025	-0.0972214	5.8588	0.4517906	0.055259097	0.050798055	-0.017065
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	1.8702914	0.000579612	0.7367031	-0.5994994	5.0290474	6.9667197	0.54867688	0.65430739	-0.094006
Land use	m2a crop eq	0.05813456	2.74118E-05	0.02893741	-0.0245537	0.25580595	0.80057552	0.026360893	0.033319454	-0.010638
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	0.002904452	3.43194E-07	0.00223544	-0.0012236	0.0200941	0.010170758	0.001665193	0.001840143	-0.000652
Fossil resource scarcity	kg oil eq	3.2049929	0.000183694	0.26865742	-2.1355768	13.01902	2.0065544	0.24103882	0.27516648	-0.10787
Water consumption	m^3	0.089905962	5.68578E-06	0.00166167	-0.0594499	0.76711465	0.17085749	0.001454591	0.016124851	-0.002426

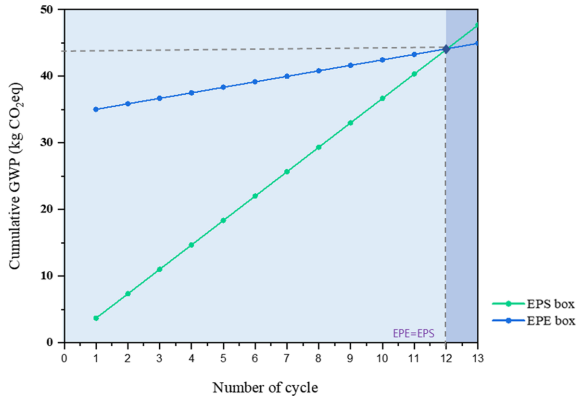

Fig. 6. Potential impact results for scenarios (cumulative GWP).

에서 물류센터까지의 평균 거리는 65 km이며, 1 톤 트럭으로 운송된다. 사용 후 박스의 99%는 재사용되고, 1%의 폐기되는 박스를 대체하기 위해 새로 생산된다[19]. 박스는 2021년 10월부터 2023년 5월까지 국내 대형 식품 재사용 박스 유통 업체의 재사용 용기 500개를 유통하여 얻은 평균 재사용 횟수인 300회전을 기준으로 재사용 횟수를 정하였다.

2.5. 폐기 단계

박스의 재활용 단계에서 분쇄 및 압축 공정에 사용된 전력량은 국내 EPS 폐기물 처리업체에서 제공한 데이터를 참고했다. EPS 상자와 재사용 상자의 소각 시 발열량(Calorific Value(CV))은 40 MJ로 가정하였다[20]. 한국환경공단이 발표한 2020년 국내 포장폐기물 발생 및 재활용 통계에 따라 EPS박스의 폐기처리율은 재활용 88%, 소각 9%, 매립 3% 로 설정했다[21]. EPE 박스의 경우 2021년 환경부 통계자료를 기준으로 재활용 56.7%, 소각 24.9%, 매립 12.9%로 폐기처리율을 설정하였다[22]. 소비자와 EPS, EPE 박스재활용 업체 간의 평균 거리는 60 km이며, 1 톤 트럭으로 운송된 것으로 가정하였다. 박스 별 제조, 운송, 폐기 및 재사용의 전체 프로세스에 대한 거리 데이터는 Table 2, Table 3에 나와 있다.

Table 5. Potential impact results for scenarios (300 cycle)

		EPS box				EPE box				
Impact category	Unit	Material production	Box production	Transporta-tion	Waste manage-ment	Material production	Box production	Transpor-tation	Recondi-tioning Transporta-tion	Waste manage-ment
Global warming	kg CO_2 eq	2.17E+03	2.23E-01	2.46E+02	-1.32E+03	1.07E+02	2.87E+01	3.10E+00	2.21E+02	-7.76E+01
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	3.05E-04	8.97E-08	8.33E-05	-5.12E-05	1.08E-04	1.01E-05	1.17E-06	1.35E-04	-2.82E-04
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	9.46E+01	2.68E-02	4.55E+00	-5.31E+01	1.16E+00	2.95E+00	6.71E-02	1.14E+01	-1.39E+01
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	4.55E+00	4.78E-04	1.45E+00	-2.34E+00	2.14E-01	7.72E-02	2.22E-02	8.06E-01	-1.86E-01
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	1.65E+00	4.83E-04	3.62E-01	-1.19E+00	1.09E-01	6.06E-02	6.82E-03	4.02E-01	-1.03E-01
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq	5.39E+00	4.81E-04	1.48E+00	-2.46E+00	2.21E-01	8.32E-02	2.25E-02	8.25E-01	-1.91E-01
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	4.44E+00	7.30E-04	8.69E-01	-3.37E+00	3.28E-01	9.89E-02	1.84E-02	7.56E-01	-1.96E-01
Freshwater eutrophication	kg P eq	2.99E-01	1.07E-04	2.49E-02	-1.53E-01	8.24E-03	1.17E-02	3.09E-04	6.32E-02	-4.11E-02
Marine eutrophication	kg N eq	2.92E-02	9.26E-06	2.40E-03	-1.08E-02	1.20E-03	2.09E-03	2.85E-05	5.82E-03	-8.13E-04
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	1.20E+03	1.56E-01	2.54E+03	-3.86E+02	5.14E+01	3.49E+01	3.15E+01	1.27E+03	-1.10E+02
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	2.00E+01	4.66E-03	7.18E+00	-5.09E+00	9.48E-01	8.02E-01	7.36E-02	8.34E+00	9.06E-02
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	2.76E+01	6.47E-03	1.10E+01	-6.90E+00	1.25E+00	1.09E+00	1.16E-01	1.15E+01	4.78E-02
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	5.69E+01	1.00E-02	2.08E+01	-2.92E+01	2.34E+01	1.64E+00	2.31E-01	1.52E+01	-5.12E+00
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	5.61E+02	1.74E-01	2.21E+02	-1.80E+02	2.01E+01	2.62E+01	2.30E+00	1.96E+02	-2.82E+01
Land use	m2a crop eq	1.74E+01	8.22E-03	8.68E+00	-7.37E+00	1.02E+00	3.12E+00	1.10E-01	1.00E+01	-3.19E+00
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	8.71E-01	1.03E-04	6.71E-01	-3.67E-01	8.02E-02	3.56E-02	6.99E-03	5.52E-01	-1.96E-01
Fossil resource scarcity	kg oil eq	9.61E+02	5.51E-02	8.06E+01	-6.41E+02	5.19E+01	7.29E+00	1.00E+00	8.25E+01	-3.24E+01
Water consumption	m^3	2.70E+01	1.71E-03	4.99E-01	-1.78E+01	3.06E+00	6.77E-01	6.06E-03	4.84E+00	-7.28E-01

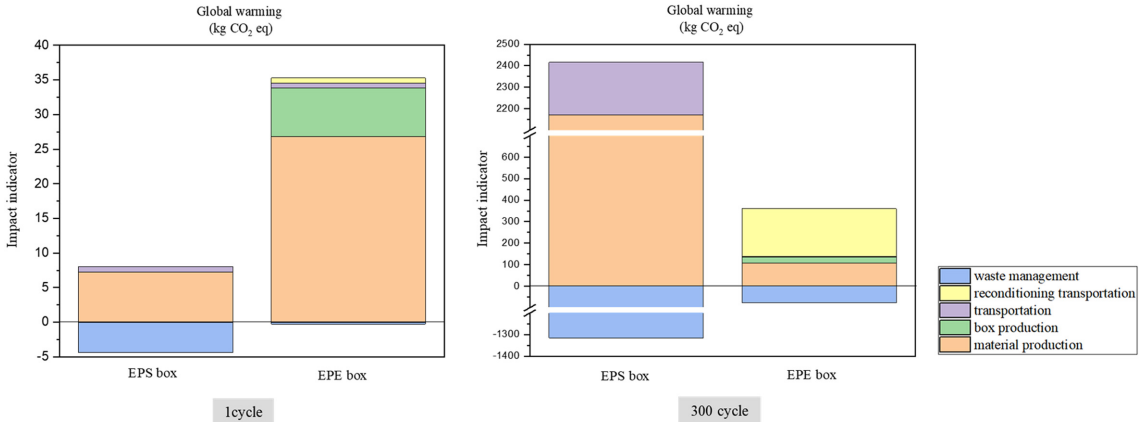

Fig. 7. Global warming potential results for scenarios.

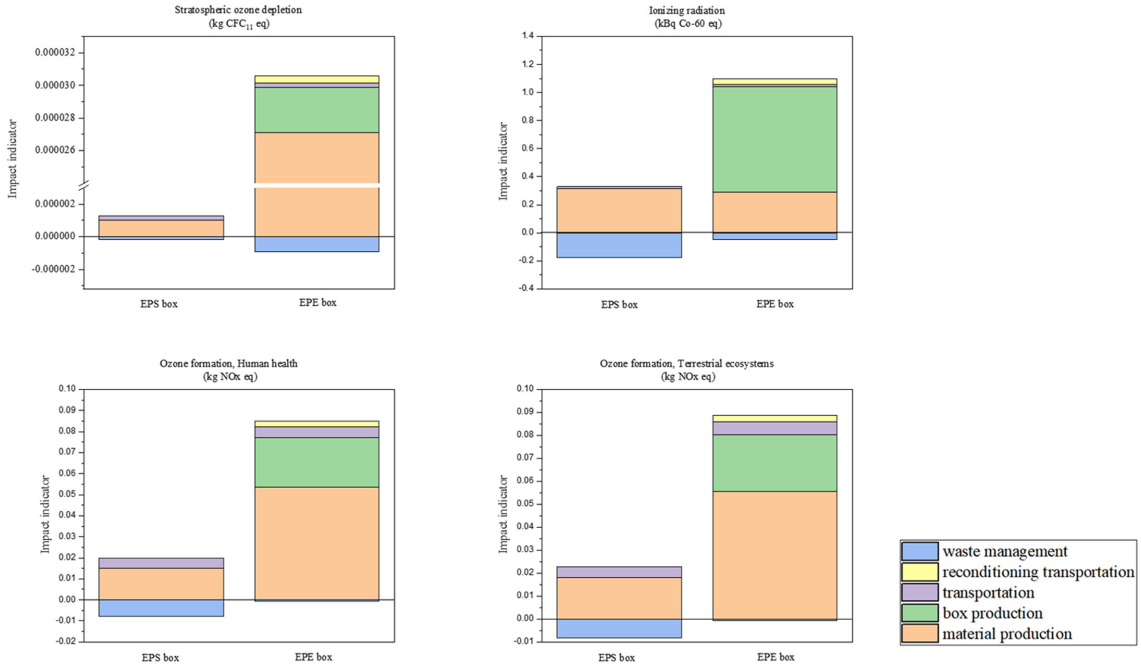

Fig. 8. Potential impact results for scenarios 1 (1cycle).

3. 전과정 영향평가

본 연구에서는 ecoinvent v3 데이터베이스와 함께 Simapro v9.4.0.2 소프트웨어를 활용했다. 전체 프로세스 영향평가 방법으로는 ReCiPe 2016 Midpoint(H) V1.05를 사용하였다. 환경영향평가 결과는 지구온난화, 오존층 감소, 자원고갈, 미세먼지 형성, 산성화, 생태독성 등 18개 영향범주로 분류하여 분석, 평가되었다.

결과 및 고찰

전과정평가 분석 결과 박스의 지구온난화지수(global warming potential(GWP)) 항목의 환경영향 값을 비교 시 EPS 박스 1개의 전과정 총 환경부하량은 3.67 kg carbon dioxide (CO_2) eq로 분석되었다. EPE박스의 경우 1회전시 35.03 kg CO_2 eq의 환경부하를 갖는 것으로 나타났다. EPS 박스 1개 사용, EPE박스 1회전 기준시 EPE박스가 EPS박스에 비해 높은 중량과 다양한 박스소재, 유통경로로 인해 GWP환경영향값이 9.5배 더 높은 것으로 분석되었으며, 두 박스 모두 재료 생산 단계에서 가장 큰 환경 영향이 발생하는 것으로 나타났다. 1개 사용(1회전)시 전과정 단계별, 박스 별 환경영향 값은 Table 4와 같다.

EPE 박스는 2회전시 1회전보다 0.82 kg CO_2 eq의 환경부하를 더 가지는 것으로 분석되었으며, 이는EPS박스 1개 사용시 CO_2 배출량(3.67 kg CO_2 eq)보다 78% 저감된

것으로 나타났다. EPE 박스의 재사용 횟수가 증가함에 따라 EPS박스와 환경영향 값이 동일할 경우 EPE 박스의 회전수는 12회전으로 분석되었다. 각 박스의 사용횟수에 따른 누적 GWP 값은 Figure 6에 나타내었다. 재사용 물류용기의 평균 재사용 횟수인 300회전을 기준으로 분석 결과 EPS 박스는 300개 사용시 1101 kg CO_2 eq, EPE 박스는 300회 재사용시 280.21 kg CO_2 eq의 환경 부하를 갖는 것으로 나타나 EPS박스에 비해 75% 낮은 환경부하를 배출

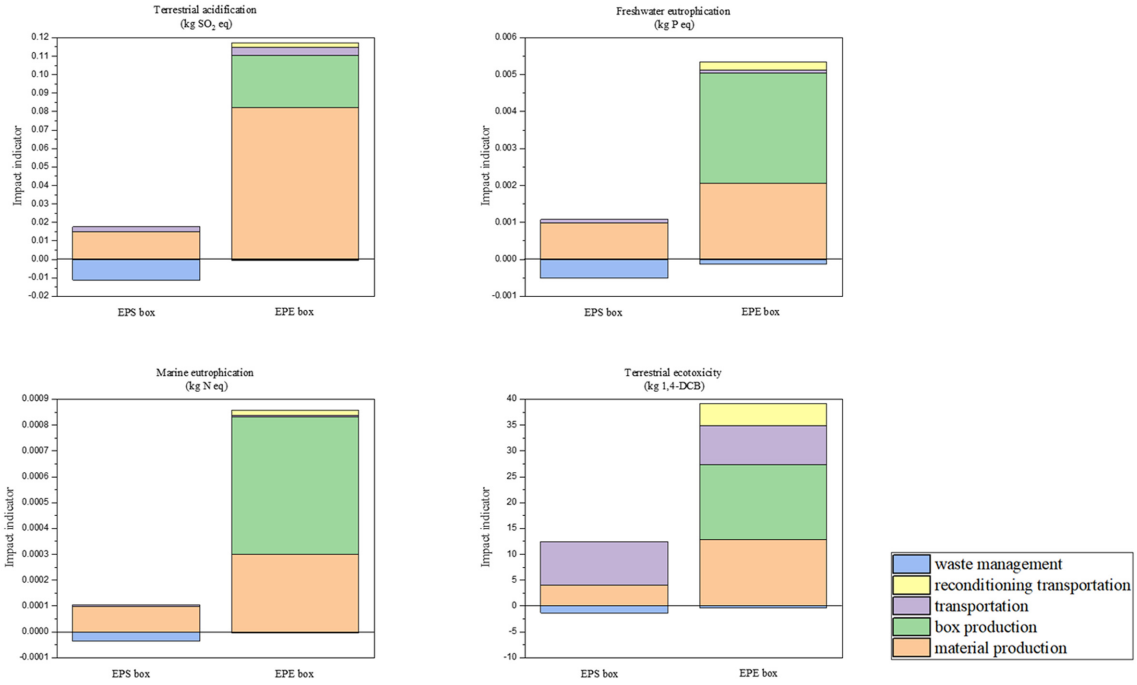

Fig. 9. Potential impact results for scenarios 2 (1cycle).

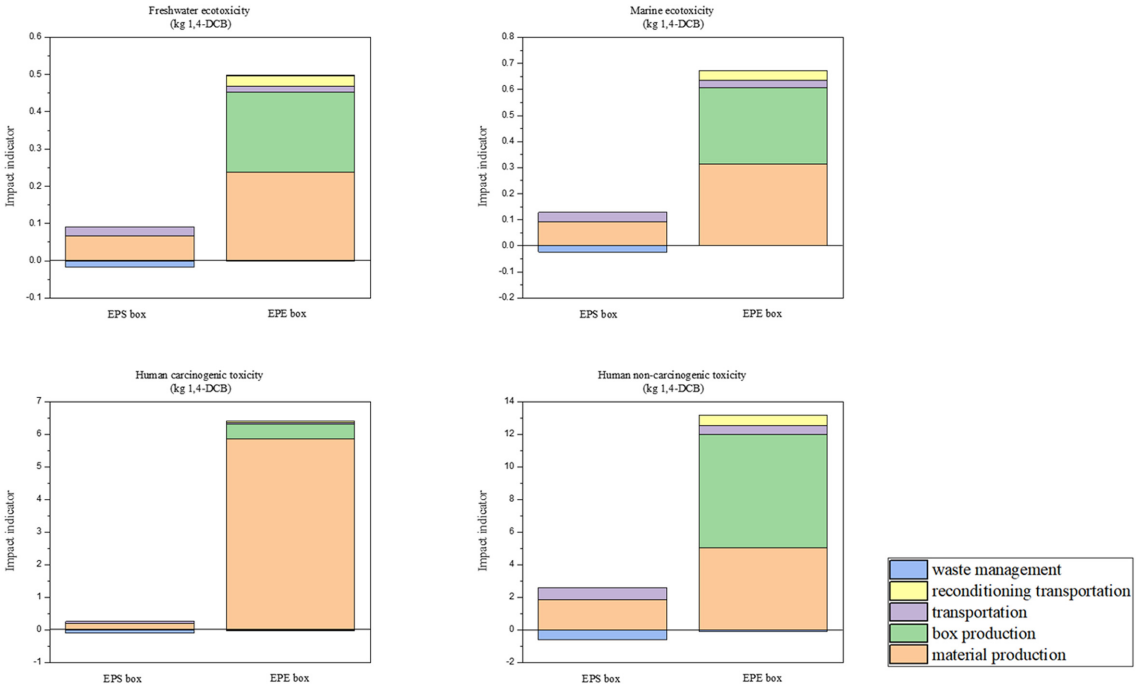

Fig. 10. Potential impact results for scenarios 3 (1cycle).

한 것으로 분석되었다. 이를 바탕으로 현재 국내 유통환경에서 신선식품 유통시 재사용박스를 사용하면 기존 1회용 EPS박스에 비해 CO_2배출을 75% 저감할 수 있다고 분석된다. 300개 사용, 300회전 동안 각 단계별 박스의 환경영향 값은 Table 5와 같다. 1회 사용과 300개 사용, 300회전에 대한 각 단계별 박스의 GWP 값을 Figure 7에 나타내었다. 1회 사용과 300개 사용,300회전에 대한 각 단계별 박스의 17개 영향 범주에 대한 환경영향 값을 Figure 8-16에 나타내었다.

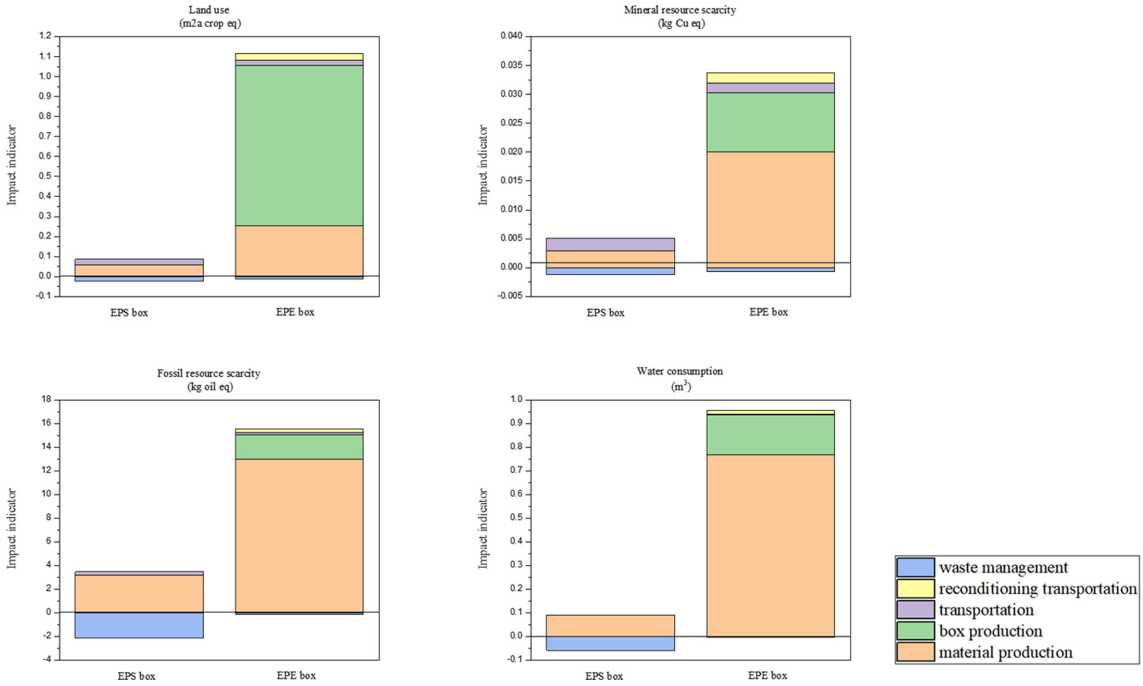

Fig. 11. Potential impact results for scenarios 4 (1cycle).

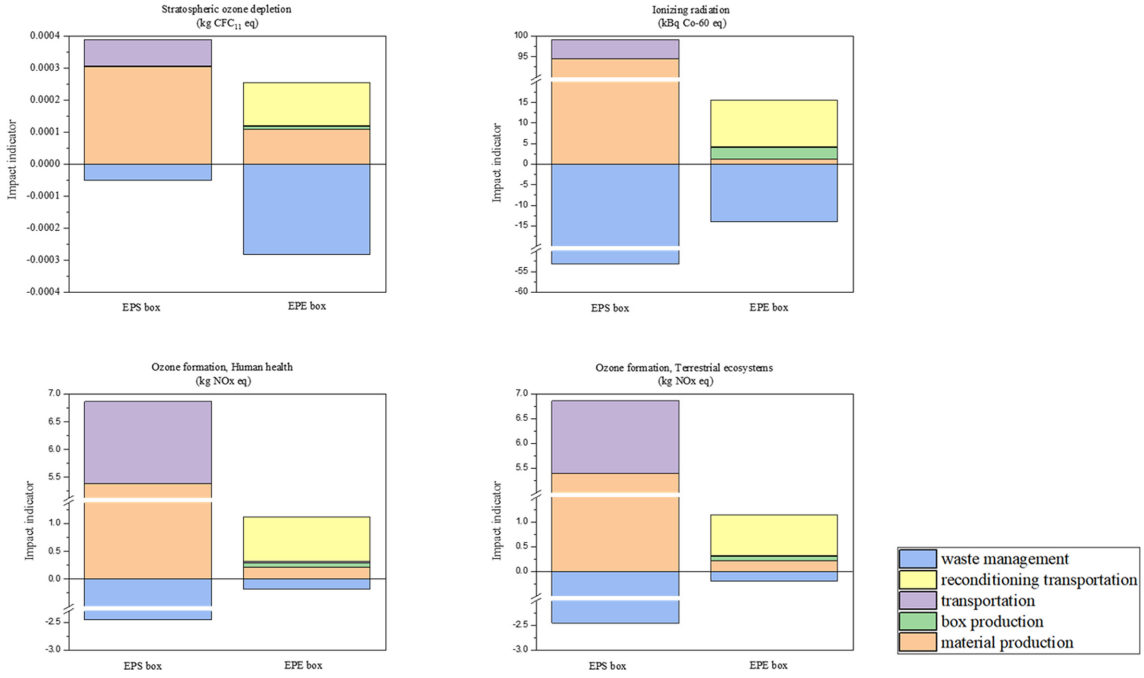

Fig. 12. Potential impact results for scenarios 1 (300 cycle).

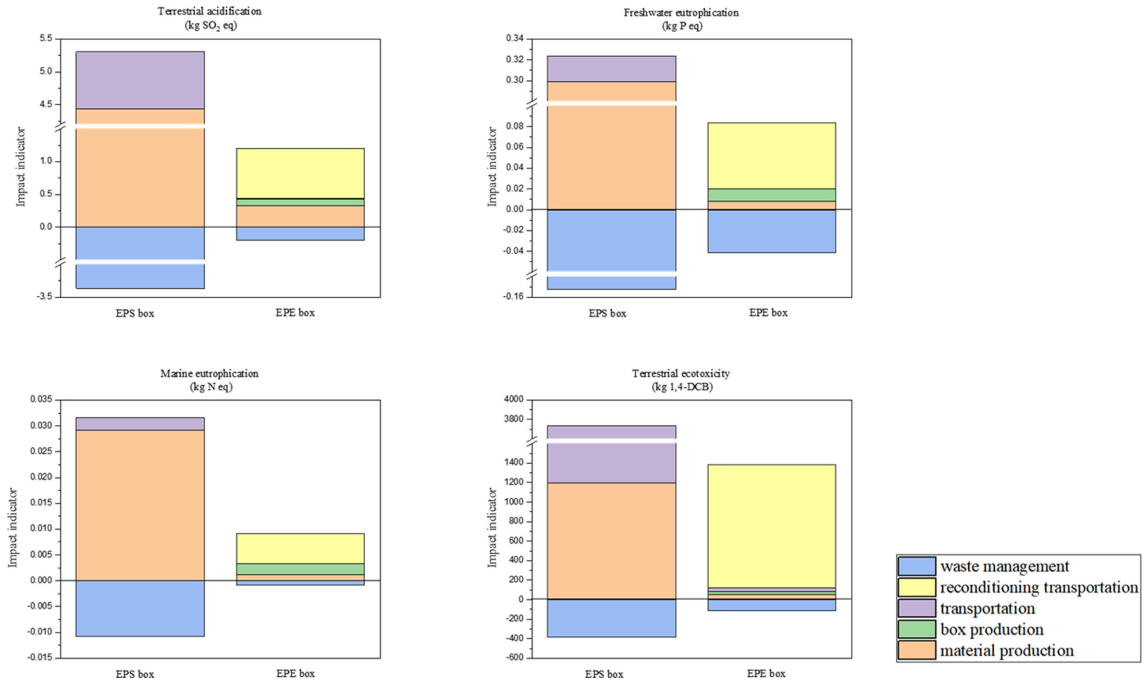

Fig. 13. Potential impact results for scenarios 2 (300 cycle).

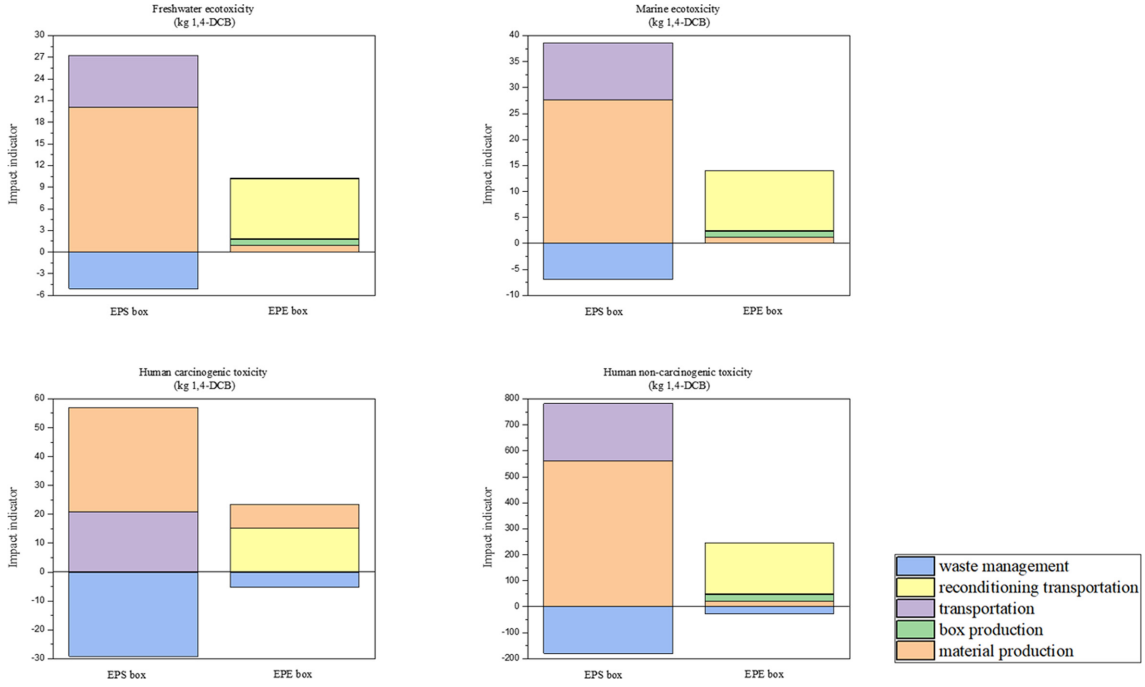

Fig. 14. Potential impact results for scenarios 3 (300 cycle).

결 론

본 연구에서는 EPE 재사용 상자와 일회용 EPS 상자의 전과정 환경영향을 정량적으로 평가하고 비교했다. 또한 재사용 박스의 반복 사용에 따른 환경영향도 비교 분석되었다. LCA 분석 결과, 1회 사용 기준 EPE박스는 EPS 박스에 비해 GWP 환경 영향 값이 9.5배 더 높은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나 결과적으로 EPE박스의 재사

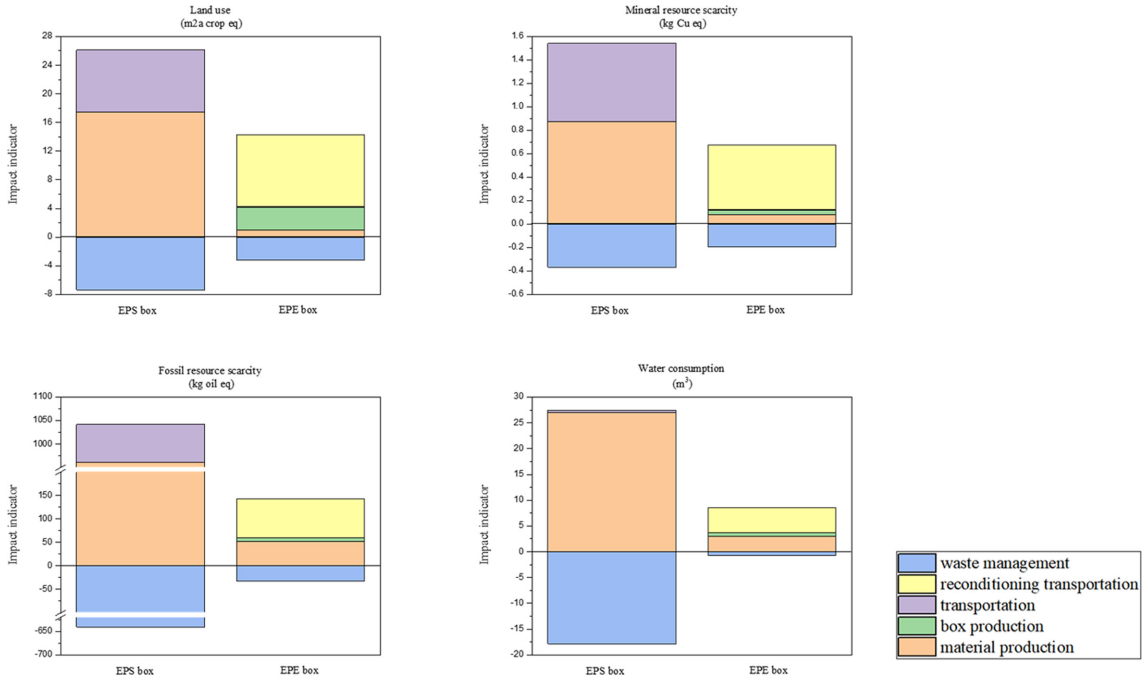

Fig. 15. Potential impact results for scenarios 4 (300 cycle).

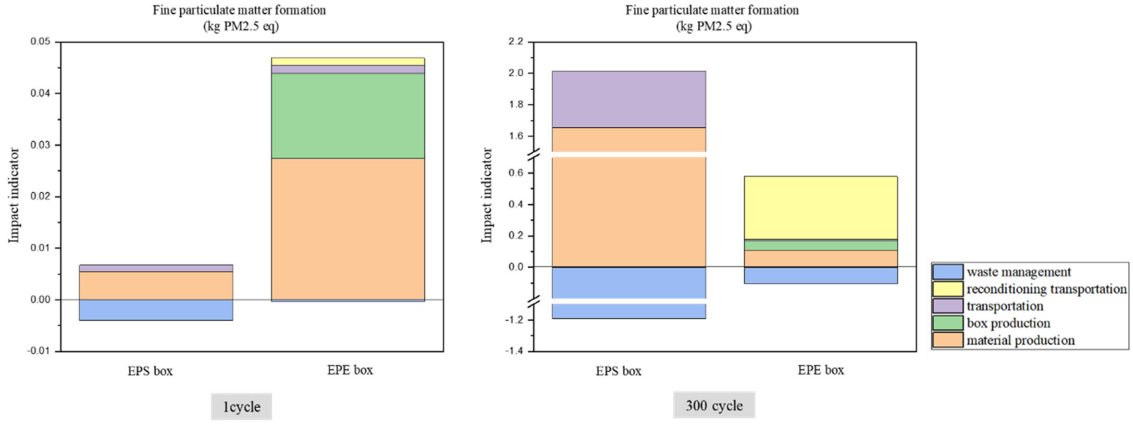

Fig. 16. Fine particulate matter formation results for scenarios.

용 횟수가 증가함에 따라 누적 GWP값은 EPS 상자의 12개 사용시와 EPE박스의 12회전시의 GWP 영향과 동일 해졌다. 또한 300회전을 기준으로 EPE박스는 EPS 박스에 비해 75% 낮은 GWP 환경영향 값을 가진 것으로 분석되었다. 기존 연구에서는 주로 해외 국가에서 식품 운송용 플라스틱 재사용 컨테이너의 재사용에 대한 전과정평가가 수행되어왔으나, 국내 물류업계의 실제 유통시스템을 반영하고, 신선식품을 소비자까지 배송 후 회수해 물류센터를 통해 재사용하는 풀링시스템 전체에 대한 전과정평가는 수행되지 않아 본 연구를 통해 국내 주요 식품물류업체에서 사용되는 신선식품 배송용 재사용 박스의 환경부하 저감 효과를 정량화하고 기존 일회용 EPS박스와 비교분석한 것은 의미 있다고 할 수 있다. 결론적으로 산업에서 재사용 박스를 활용하면 플라스틱 자원 소비를 크게 줄이고 재사용을 통해 자원 순환성을 향상시킬 수 있어 상당한 부가가치를 창출할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2021년 산업통상자원부의 클린팩토리 기술개발사업 (과제번호: 20015687)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

1. Kim, S.H. and Lee, M.A., Jung, H.M. 2021. Packaging Design of EPS Cooling Box by Theoretical Heat Flow and Random Vibration Analysis. KOREAN JOURNAL OF PACKAGING SCIENCE & TECHNOLOGY 27(3): 175-180.
2. Lee, G.i. and Kim, S.h., Shin, S.y. 2021. Report on Agricultural Household Activity. In Korea Rural Economic Institute. 7-32.
3. Strand, J. and Feld, L., Bach, L. 2019. SURVEY OF POLYSTYRENE FOAM (EPS AND XPS) IN THE BALTIC SEA. Aarhus University.
4. Korea Environment Corporation. 2021. Generation and Recycling Amounts of Packaging Waste for EPR (Extended Producer Responsibility) Target in 2021. In Korea resource recirculation information system.
5. Fischer, C. L. J. H. E. 2017. EPS Post-Consumer Waste Generation and Management in European Countries.
6. Choi, J. S. 2013. Trends in EPS Production and Recycling in the Packaging Industry. Korea Styrene Foam Recycling Association.
7. Choi, J. S. 2006. Consumption Trends of EPS in the Packaging Industry. Korea Styrene Foam Recycling Association.
8. Kim, D. S. 2014. Supply Trends and Prospects of EPS Packaging Materials from a Recycling Perspective. Korea Styrene Foam Recycling Association.
9. The European Manufacturers of Expanded Polystyrene (EUMEPS) association. 2011. Life Cycle Assessment of the Industrial Use of Expanded Polystyrene Packaging in Europe Case Study: Comparison of Three Fishbox solutions. EUMEPS.
10. Coopers, P. W. 2001. Life Cycle Assessment of the Industrial Use of Expanded Polystyrene Packaging in Europe. Case Study: Packaging System for TV sets. PWC. Chapter 2001(2): 1-4.
11. Ross, S. and Evans, D. 2003. The environmental effect of reusing and recycling a plastic-based packaging system. Journal of Cleaner Production. 11(5): 561-571.
12. Tan, R.B and Khoo, H.H. 2005. Life cycle assessment of EPS and CPB inserts: design considerations and end of life scenarios. J Environ Manage. 74(3): 195-205.
13. Saleh, Y. 2016. Comparative life cycle assessment of beverages packages in Palestine. Journal of Cleaner Production. 131(10): 28-42.
14. Almeida, C. M. V. B. and Rodrigues, A. J. M., Bonilla, S. H., Giannetti, B. F. 2010. Emergy as a tool for Ecodesign: evaluating materials selection for beverage packages in Brazil. Journal of Cleaner Production, 18(1): 32-43.
15. Fan, L. and Khodadadi, J. M. 2011. Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermal energy storage: a review. Renewable and sustainable energy reviews. 15(1): 24-46.
16. Buratti, C. and Belloni, E., Lunghi, L., Barbanera, M. 2016. Thermal conductivity measurements by means of a new ‘Small Hot-Box’apparatus: Manufacturing, calibration and preliminary experimental tests on different materials. International journal of thermophysics. (37) 1-23.
17. Omnexus, Expanded Polystyrene (EPS): Ultimate Guide on Foam Insulation Material. SpecialChem.
18. Jose Tomas Franco. 2018. How to Calculate the Thermal Transmittance (U-Value) in the Envelope of a Building. Archdaily.
19. Tua, C. and Biganzoli, L., Grosso, M., Rigamonti, L. 2019. Life Cycle Assessment of Reusable Plastic Crates (RPCs). Resources. 8(2): 110.
20. Das, P. and Tiwari, P. 2018. Valorization of packaging plastic waste by slow pyrolysis. Resources, Conservation and Recycling. 128: 69-77.
21. Korea resource recirculation information system. 2020. 2020 packaging waste generation and recycling amount subject to Extended Producer Responsibility.
22. Korea resource recirculation information system. 2022. National waste generation and disposal status.