

세척 방식에 따른 다회용 텀블러의 환경적 손익분기점 분석: 일회용 종이컵 및 PET 컵과의 전과정 온실가스 배출량 비교

한태경, 최원재*

이화여자대학교 휴먼기계바이오공학과

Environmental Break-Even Points of Reusable Tumblers under Different Washing Methods: A Life-Cycle GHG Comparison with Single-Use Paper and PET Cups

Taegyeong Han, Wonjae Choi*

Division of Mechanical and Biomedical Engineering, Ewha Womans University, Seoul, Korea

ABSTRACT

Reusable tumblers are widely perceived as an environmentally friendly alternative to disposable cups; however, their actual environmental benefits may be overestimated if the initial impacts from manufacturing and the burdens associated with repeated washing are not adequately considered. This study evaluated the life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions of 12 oz (355 mL) PE-coated paper cups, PET cups, and stainless-steel tumblers, and analyzed the environmental break-even points of reusable tumblers under different washing methods. All products were assessed within a cradle-to-grave system boundary covering production, transportation, use, and end-of-life. Life-cycle inventories were developed using ecoinvent and Korea-specific data on supply chains, electricity, water, and waste treatment. For the tumbler use phase, manual washing with cold or hot water, foaming detergent washing, household dishwasher use, and a dedicated tumbler cleaner were compared. The results showed that GHG emissions per use were 42.8 g-CO₂-eq. for the paper cup and 77.8 g-CO₂-eq. for the PET cup, with material production being the largest contributor for both cup types. The initial GHG emissions of the tumbler were 923.4 g-CO₂-eq. per unit, and the environmental break-even point varied substantially depending on the washing method. Manual cold-water washing resulted in the lowest washing burden, whereas the dedicated tumbler cleaner did not reach a break-even point under the analyzed conditions because of its relatively high electricity consumption. These results demonstrate that the environmental benefit of reusable tumblers depends not simply on reuse itself, but on a sufficient number of cumulative uses and low-energy washing conditions.

Key words: Life cycle assessment, Disposable cup, Tumbler, Washing, Environmental break-even point

요약

다회용 텀블러는 일회용 컵을 대체하는 친환경 제품으로 인식되고 있으나, 제조 단계의 초기 환경부하와 반복 세척에 따른 부담을 충분히 고려하지 않을 경우 실제 환경적 이점이 과대평가될 수 있다. 본 연구에서는 12온스(355 mL) PE 코팅 종이컵, PET 컵 및 스테인리스 텀블러를 대상으로 전과정 온실가스 배출량과 세척 방식에 따른 환경적 손익분기점을 분석하였다. 모든 제품은 생산, 운송, 사용 및 수명 종료를 포함하는 cradle-to-grave 범위로 평가하였으며, ecoinvent와 국내 공급망·전력·용수·폐기 조건을 반영하여 전과정 목록을 구축하였다. 텀블러 사용 단계에서는 수동 냉·온수 세척, 발포 세정제 세척, 가정용 식기세척

Date Received: Aug. 11, 2026, Date Revised: Aug. 18, 2026, Date Accepted: Aug. 18, 2026

* Corresponding author : Wonjae Choi, Tel: +82-3277-3539, E-mail: wj_choi@ewha.ac.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.

기 및 전용 세척기를 비교하였다. 분석 결과, 1회 사용 기준 온실가스 배출량은 종이컵 42.8 g-CO₂-eq., PET 컵 77.8 g-CO₂-eq.로 나타났으며, PET 컵은 소재 생산의 기여가 상대적으로 크게 나타났다. 텀블러의 초기 배출량은 923.4 g-CO₂-eq./개였으며, 세척 방식에 따라 손익분기점이 크게 달라졌다. 수동 냉수 세척은 가장 낮은 세척 부하를 보인 반면, 전용 세척기는 높은 전력 소비로 인해 분석 조건에서 손익분기점이 형성되지 않았다. 본 연구는 텀블러의 환경적 이점이 단순한 재사용 여부가 아니라 충분한 누적 사용 횟수와 저에너지 세척 조건에 의해 결정됨을 보여준다.

주제어: 전과정평가, 일회용 컵, 텀블러, 세척, 환경적 손익분기점

1. 서 론

일회용 컵의 사용 증가는 폐기물 발생과 온실가스 배출 측면에서 지속적인 환경부담을 초래하고 있으며, 이에 대한 대안으로 다회용 텀블러의 사용이 확산하고 있다. 그러나 텀블러는 스테인리스강 및 플라스틱 부품의 제조와 반복 세척 과정에서 환경부하가 발생하므로, 반복 사용이 가능하다는 이유만으로 항상 환경적으로 우수하다고 볼 수 없다. 따라서 일회용 컵과 텀블러의 환경성을 비교하기 위해서는 생산, 사용 및 폐기 단계를 함께 고려할 필요가 있다.

종이컵은 PE 코팅으로 인해 재활용이 어렵고 실제 재활용률도 약 13% 수준이며[1], PET 컵 역시 인쇄, 오염 및 선별 경제성 등의 이유로 재활용에 제약이 있다[2]. 이에 따라 일회용 컵은 원료 생산과 제조뿐 아니라 사용 후 처리에서도 환경부하가 발생한다. Potting and van der Harst는 기존 일회용 음료컵 LCA 연구를 비교한 결과, 컵의 소재 및 질량, 생산과정 모델링, 에너지 공급원 및 폐기처리 조건의 차이가 연구 간 환경영향 결과의 변동을 유발할 수 있음을 제시하였다[3].

다회용 컵의 경우 생산 단계의 초기 환경부하뿐 아니라 재사용 및 세척 조건이 주요 변수로 보고되어 왔다. Cottafava et al.은 다양한 일회용 및 다회용 컵을 대상으로 세척 및 폐기 조건에 따른 환경적 손익분기점을 분석하였으며[4], Lee et al.은 국내 조건에서 다회용 컵과 텀블러의 환경성을 평가하여 재사용률이 결과에 중요한 영향을 미치고, 세척 과정에서 추가적인 환경부하가 발생할 수 있음을 제시하였다[5].

또한 Caspers et al.은 기존 takeaway food and beverage packaging LCA를 검토한 결과, 재사용률과 사용 후 처리 등 소비자 행동과 관련된 요소가 연구마다 서로 다른 수준으로 반영되어 있으며, 이러한 요소를 종합적으로 고려한 연구가 부족하다고 지적하였다[6]. 스테인리스 텀블러를 대상으로 다양한 세척 방식과 물 사용량 조건을 함께 고려하여 세척 조건별 환경적 손익분기점을 정량적으로 비교한 연구는 제한적이다.

이에 본 연구에서는 약 355 mL 용량의 종이컵, PET 컵 및 스테인리스 텀블러를 대상으로 전과정 온실가스 배출량을 산

정하였다. 또한 수동 냉수·온수 세척, 발포 세정제, 가정용 식기세척기 및 텀블러 전용 세척기 조건을 비교하고, 세척 방식별 환경적 손익분기 사용 횟수를 산정하였다.

2. 방법론

2.1 전과정평가 방법론 및 연구 범위

본 연구는 ISO 14040 및 ISO 14044에서 제시하는 전과정평가(life cycle assessment, LCA)의 기본 원칙과 절차에 따라 수행하였다. 전과정 목록 구축에는 국내 통계 및 제품별 공개 자료와 함께 ecoinvent database version 3.12의 Allocation, cut-off by classification 시스템 모델을 활용하였다[7]. 기후변화 영향은 IPCC AR6의 100년 기준 지구온난화지수(GWP100)를 적용하여 CO₂-equivalent로 평가하였다.

국내 전력 및 연료 공급에 따른 온실가스 배출계수는 한국의 에너지 공급 특성을 반영한 Korean GREET 기반 자료를 활용하였다. GREET(greenhouse gases, regulated emissions, and energy use in technologies)는 미국 Argonne National Laboratory에서 개발한 전과정 에너지 및 온실가스 분석 모델이며, Korean GREET는 이를 국내 연료 수입, 수송 및 에너지 공급 구조에 맞게 수정·확장한 모델이다. Choi and Song은 국내로 수입되는 천연가스의 생산, 액화, 해상운송, 저장 및 기화 등의 공급경로를 반영하여 천연가스의 well-to-wheel(WTW) 온실가스 배출량과 에너지 사용량을 분석하였다[8]. Jang and Song은 이러한 국내 WTW 분석 체계를 휘발유와 경유 등 석유계 연료로 확장하여 국내 연료 공급경로에 따른 온실가스 배출량과 에너지 사용량을 분석하였다[9]. Choi and Song은 이후 해상운송을 통해 연료를 수입하는 국내 에너지 공급 특성과 전력생산 구조를 반영하여 전기자동차의 WTW 온실가스 배출량을 평가하였다[10]. Choi et al.은 국내 에너지 정책 및 전력·연료 공급구조를 반영하여 기존 및 대체 차량의 온실가스 배출량을 분석함으로써 Korean GREET 기반 국내 WTW 분석체계를 확장하였다[11].

본 연구에서는 Microsoft Excel 기반의 Korean GREET 모

델을 계산에 활용하였다. 전력의 경우 2024년 한국전력통계의 발전원별 발전량과 Korean GREET에 구축된 발전연료 공급 단계 배출계수를 적용하였다[12]. 천연가스 배출계수는 LNG 생산, 액화, 해상운송, 저장 및 기화 등 국내 공급경로를 직접적으로 분석한 Choi and Song의 연구를 기반으로 적용하였다[8].

본 연구의 목적은 12온스(약 355 mL) 일회용 종이컵, PET 컵 및 스테인리스 텀블러의 전과정 온실가스 배출량을 비교하고, 텀블러의 반복 사용 및 세척 조건에 따른 환경적 손익분기점을 분석하는 데 있다. 기능단위는 약 355 mL의 음료를 1회 제공하기 위한 컵의 사용으로 정의하였다. 모든 제품은 원료 생산, 제조, 운송 및 사용 후 처리를 포함하는 cradle-to-grave 범위로 평가하였으며, 텀블러는 반복 세척에 따른 사용 단계 부하를 추가로 고려하였다(Fig. 1). 모든 제품은 서울에서 최종 사용되는 것으로 가정하였다.

2.2 전과정 목록분석

2.2.1 종이컵

종이컵의 전과정 목록은 12온스(약 355 mL) 컵 본체와 폴리프로필렌(polypropylene, PP) 뚜껑을 기준으로 구축하였다. 본체와 뚜껑의 질량은 제조사 사양을 적용하였으며[13, 14],

본체는 펄프 원지와 내부 폴리에틸렌(polyethylene, PE) 코팅층으로 구성하였다. 식품 접촉용 종이재 용기의 관련 기준[15]과 자료 가용성을 고려하여 종이 원료는 전량 천연 펄프(virgin pulp)로 가정하였으며, PE 코팅 질량은 선행 연구의 0.1–0.5 g/개 범위 중간값인 0.3 g/개를 적용하였다[16].

국내 펄프 사용량의 88.2%가 수입되는 점을 반영하여 해외 조달 88.2%, 국내 조달 11.8%로 설정하였다[17]. 해당 비율은 한국제지연합회의 국내 펄프 수급 통계를 기준으로 적용하였다. 국내 생산분은 국내 유일 천연 펄프 생산업체인 울산 무림 P&P에서 공급되는 것으로 가정하였다. 수입 펄프는 2025년 4월 기준 주요 9개 수입국을 대상으로 하였으며[18], Sea-Distances.org를 이용해 산정한 국가별 수입 비중 가중평균 해상운송 거리는 15,104 km였다[19]. 해외 현지 내륙 운송은 자료 불확실성을 고려하여 제외하였다.

종이컵은 원지 제조, PE 라미네이팅, 인쇄, 절단 및 성형을 거쳐 생산되는 것으로 설정하였다. 성형 공정은 직접적인 전과정 목록자료가 부족하여 JW-55 성형기의 정격전력 10 kW와 생산 속도 55 cups/min을 이용해 컵당 전력 사용량을 산정하였다[20]. 해당 값은 정격 소비전력으로 연속 가동하는 조건을 가정하였다.

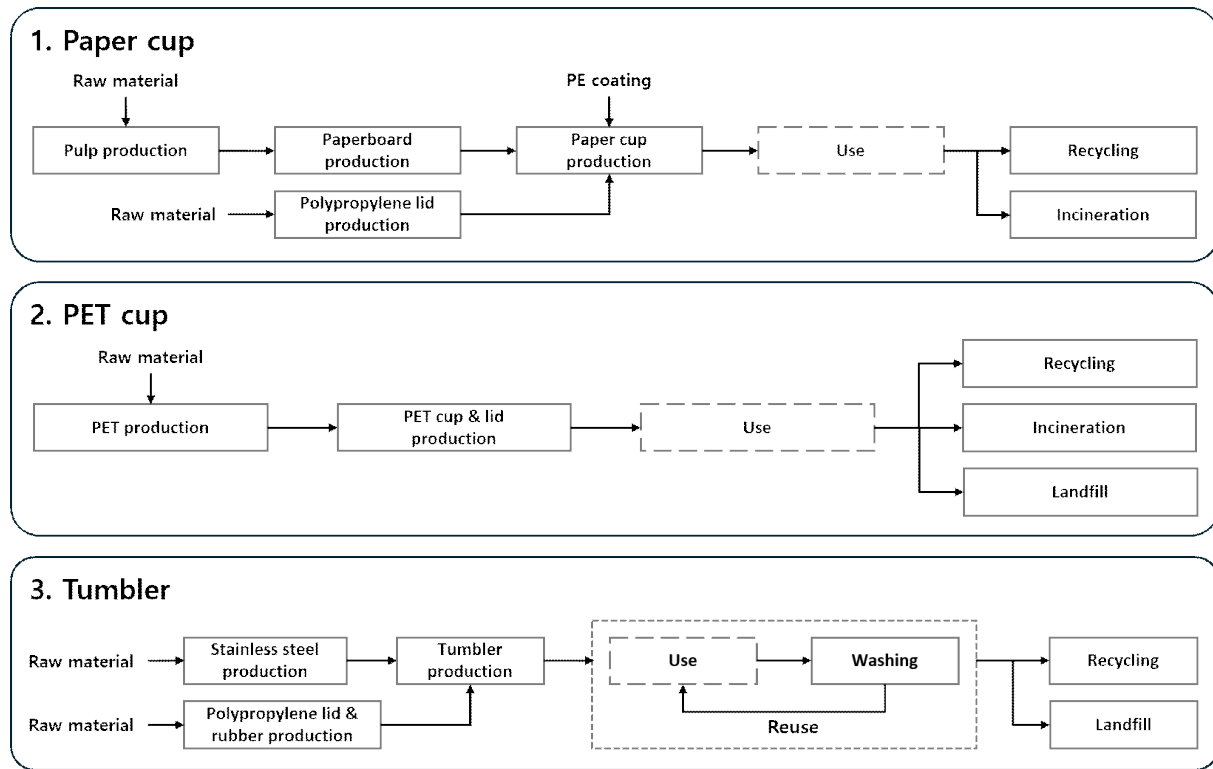


Fig. 1. Life cycle system boundaries of the paper cup, PET cup, and reusable tumbler systems.

국내 육상운송은 부산 또는 울산에서 경기도 화성의 성형시설을 거쳐 서울로 이동하는 경로로 설정하여 총 410 km를 적용하였으며, 운송수단은 EURO 6 화물트럭으로 가정하였다.

종이컵의 수명 종료(end-of-life, EoL)는 국내 폐기 현황을 반영하여 재활용 13%, 소각 87%로 설정하였다[1]. 종량제봉투 배출분은 소각되는 것으로 가정하였으며, 종이 섬유, PE 코팅층 및 PP 뚜껑에 동일한 처리 비율을 적용하였다. 재활용 물량에는 cut-off 방식을 적용하여 회수 이후의 재활용 공정과 대체효과를 후속 제품 시스템에 귀속하였다.

2.2.2 PET 컵

PET 컵의 전과정 목록은 12온스(약 355 mL) 규격의 PET 컵 본체와 동일 재질의 평면형 뚜껑을 기준으로 구축하였다. 컵 본체와 뚜껑의 질량은 제조사 사양을 적용하였으며[21,

22], 원료 생산, PET 수지 제조, 컵 성형, 국제·국내 운송 및 사용 후 처리 단계를 시스템 경계에 포함하였다.

국내 재생 원료 사용 확대 정책과 PET 제품의 재생 원료 적용 가능성을 고려하여, 신재 PET 70%와 재생 PET 30%의 혼합 시나리오를 적용하고 3.85 kg-CO₂-eq./kg-PET의 배출계수를 사용하였다[23]. 이는 2030년까지 PET 제품의 재생 원료 사용 확대를 추진하는 국내 순환 경제 정책 방향을 반영한 것이다. 참조 데이터에는 PET병의 blow molding 공정이 포함되어 있으나, 실제 PET 컵은 thermoforming 방식으로 생산되므로 성형 공정 차이에 따른 불확실성이 존재한다.

참조 논문에는 단위 공정 간 운송 및 해외 원료 수입에 따른 환경영향이 포함되어 있지 않아, 본 연구에서는 PET 원료의 국제 해상운송에 2024년 국내 원유 수입 비중 상위 7개국을 반영하였다[24]. 국가별 대표 수출항에서 부산항까지의 해

Table 1. Life cycle inventory and activity data for the paper cup system

Material	Value	Unit	References
Paper cup body mass	10.6	g	[13]
PP lid mass	3.5	g	[14]
PE coating mass	0.3	g	[16]
Paper cup converting	0.29	kWh/kg	[20]
Korean grid electricity	0.493	kg-CO ₂ -eq./kWh	[11], [12]
Import-share-weighted average maritime transport distance	15,104	km	[17], [18], [19]
Domestic road transport distance	410	km	Assumption
Recycling rate	13	%	[1]
Incineration rate	87	%	Assumption based on [1]

Hischier, R., sulfite pulp production, bleached, RoW, allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.12

Anagnostou, E., market for polypropylene, granulate, Asia without China, allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.12

Ioannou, I., polyethylene production, low density, granulate, KR, allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.12

Reinhard, J., thermoforming of plastic sheets, RoW, allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.12

Ecoinvent, market for transport, freight, sea, container ship, heavy fuel oil, GLO, Allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.12

Levova, T., transport, freight, lorry, all sizes, EURO 6 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified, RoW, allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.12

Clementi, M., treatment of waste paperboard, municipal incineration, GLO, allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.12

Clementi, M., treatment of waste polyethylene, municipal incineration, GLO, allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.12

Clementi, M., treatment of waste polypropylene, municipal incineration, GLO, allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.12

상거리와 수입 비중을 적용한 가중평균 해상 운송거리는 12,555 km였으며, 해외 생산지에서 선적항까지의 내륙 운송과 기타 원료 공급경로는 제외하였다.

국내 운송은 울산의 PET 수지 생산시설-수도권 성형시설-서울의 대표 경로를 설정하고 일반 화물트럭(lorry)을 적용하였다. PET 뚜껑은 컵 본체와 동일한 수지 생산, 열성형, 운송 및 사용 후 처리 시나리오를 적용하였다.

PET 컵의 수명 종료(end-of-life, EoL)는 국내 폐기 현황을 반영하여 재활용, 소각 및 매립을 포함하였다. 국내 일회용 플라스틱 컵의 실질 재활용률은 약 5% 미만으로 보고되며[2], 2022년 기준 전체 배출량의 54.1%가 중량재봉투를 통해 폐기되는 것으로 보고되었다[25]. 이에 따라 EoL 처리비율을 재활용 5.0%, 소각 54.1%, 매립 40.9%로 설정하였다. 소각에는 PET 연소에 따른 직접 온실가스 배출을, 매립에는 폐플라스틱 매립공정의 에너지 및 물질 투입을 반영하였다. 재활용되는 5.0%에는 앞서 설명한 cut-off 방식을 동일하게 적용하여, 회수 이후의 재활용 공정과 대체효과는 후속 제품 시스템에 귀속하였다.

2.2.3 텀블러 생산

텀블러의 전과정 목록은 약 355 mL 용량의 스테인리스 텀블러를 기준으로 구축하였다. 분석 대상은 스텐리 355 mL 제품과 써모스 350 mL 제품으로 설정하고, 각 제품의 질량, 재질 구성 및 제조국 정보를 반영하였다[26, 27]. 스텐리는 재생 스테인리스강(recycled stainless steel), 써모스는 일반 스테인리스강을 사용하는 제품으로 구분하였으며, 텀블러는 스텐

리스강 본체, 폴리프로필렌(polypropylene, PP) 뚜껑 및 고무 실링재로 구성하였다. 또한 반복 사용 제품의 특성을 반영하여 생산-운송에 따른 초기 환경부하와 사용 단계의 세척 부하를 구분하여 분석하였다.

일반 스테인리스강 본체에는 ecoinvent의 세계 평균(GLO) 생산 인벤토리를 적용하였으며, 18/8 재생 스테인리스강에는 재활용에 따른 온실가스 저감효과를 반영하였다. Johnson et al. [28]은 스테인리스강 재활용을 통해 신재 원료 기반 생산 대비 약 32%의 CO₂ 배출 저감이 가능하다고 보고하였으며, 이를 바탕으로 본 연구에서는 재생 스테인리스강의 소재 생산 배출계수를 일반 스테인리스강의 68%로 가정하였다.

뚜껑과 실링재에는 각각 PP 및 고무 생산 인벤토리를 적용하였다. 제품별 질량과 재질 구성을 바탕으로 본체, 뚜껑 및 실링재의 질량을 배분하고, 소재 생산 및 가공에 따른 환경부하를 합산하여 텀블러 1개 생산 인벤토리를 구축하였다. 철, 크롬 및 니켈 등 개별 원료의 국가별 조달 구조는 구분하지 않고 ecoinvent의 대표 데이터셋을 적용하였다.

텀블러 본체는 스테인리스강 성형, 용접·조립, 진공 처리 및 표면 마감 공정을 거쳐 생산되는 것으로 설정하였다. 텀블러 제조에 특화된 전과정 목록자료가 제한적이므로, 성형·용접·조립·표면처리에는 ecoinvent의 일반 금속가공 인벤토리를 적용하여 제조공정을 단순화하였다.

국제 운송은 제품 라벨에 기재된 제조국을 기준으로 설정하였다. 스텐리는 중국 선전-부산, 써모스는 필리핀 마닐라-부산 경로를 적용하였으며, 제조시설에서 수출항까지의 현지 육상 운송과 부산항까지의 컨테이너선 해상운송을 포함하였다. 국

Table 2. Life cycle inventory and activity data for the PET cup system

Material	Value	Unit	References
PET cup body mass	11	g	[21]
PET cup lid mass	3.9	g	[22]
PET, 70% virgin and 30% recycled	3.85	kg-CO ₂ -eq./kg	[23]
Import-share-weighted average maritime transport distance	12,555	km	[19], [24]
Domestic road transport distance	410	km	Assumption
Recycling rate	5.0	%	[2]
Incineration rate	54.1	%	[25]
Landfill rate	40.9	%	Calculated from [2], [25]

Clementi, M., treatment of waste polyethylene terephthalate, municipal incineration, GLO, allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.12

Stoikou, N., treatment of waste polyethylene terephthalate, sanitary landfill, RoW, allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.12

Table 3. Life cycle inventory and activity data for the reusable tumbler production system

Material	Value	Unit	References
Stanley product mass	210	g	[26]
Thermos product mass	170	g	[27]
18/8 recycled stainless steel			EI 3.12, [28]
Ecoinvent, market for steel, chromium steel 18/8, GLO, allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.12			
Hischier, R., synthetic rubber production, RoW, allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.12			
Steiner, R., deep drawing, steel, 3500 kN press, automode, RoW, allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.12			
Hischier, R., injection moulding, RoW, allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.12			

내에서는 부산항에서 서울까지 EURO 6 디젤 화물트럭으로 운송되는 것으로 가정하였다.

2.2.4 텀블러 세척 및 폐기 시나리오

텀블러의 반복 사용 단계에서는 수도 냉수-온수 세척, 발포 세정제 세척, 가정용 식기세척기 및 텀블러 전용 세척기의 다섯 가지 시나리오를 설정하였다. 각 시나리오에는 상수도 공급, 세정제 생산, 물 가열 또는 장비 전력 소비와 사용 후 하수 처리를 포함하였으며, 세부 인벤토리는 Table 4에 제시하였다.

상수도 공급은 서울 아리수 자료[29], 하수 처리는 국내 하수도 시스템의 탄소집약도 자료[30], 세정제 생산은 ecoinvent 인벤토리를 적용하였다. 수도 세척에는 액상 세제 2 g/회를 적용하고, 물 사용량 1, 3 및 5 L/회에 대한 민감도 분석을 수

행하였다. 온수 세척은 초기 수온 15°C의 물을 40°C까지 가열하는 조건으로 설정하고, 보일러 효율은 90%를 적용하였다 [31].

발포 세정제 세척은 제품 사용방법을 기준으로 설정하였으며[32], 가정용 식기세척기와 텀블러 전용 세척기는 각각 LG DIOS와 LG myCup의 공개 자료를 이용하였다[33, 34]. 식기 세척기는 14인용 용량을 기준으로 텀블러 1개에 7.14%를 할당하였다. 다만 14인용 용량은 실제 텀블러의 용적 점유율을 직접 반영한 값이 아니므로, 1/14 할당은 텀블러 1개당 물 및 에너지 사용량을 과대평가할 가능성이 있다. 따라서 식기세척기 세척 시나리오의 온실가스 배출량은 보수적으로 산정되었을 수 있다.

LG myCup의 전력사용량은 제품 사양에 제시된 소비전력

Table 4. Life cycle inventory and activity data for reusable tumbler washing and end-of-life scenarios

Process	Material	Value	Unit	References
Manual cold/ hot-water washing	Detergent use	2	g	Assumption
Foaming detergent washing	Water use	1	L	[32]
	Effervescent cleaner mass	3.5	g	
Dishwasher	Water use	14.5	L/use	[33]
	Electricity consumption	1.0	kWh/use	
	Detergent use	20	g/use	
	Allocation ratio per tumbler	7.14	%	
Tumbler cleaner	Water use	1.04	L/use	Assumption
	Electricity consumption	0.197	kWh/use	[34]
	Detergent use	6	ml/use	
End-of-life	Recycling rate	95.0	%	[35]
	Landfill rate	5	%	
Emission factors	Tap water supply	0.240	kg-CO ₂ -eq./m ³	[29]
	Zah, R., soap production, RoW, allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.12			
	Wastewater treatment	0.58	kg-CO ₂ -eq./m ³	[30]
	Natural gas supply, Korea	0.2538	kg-CO ₂ -eq./kWh	[8], [11]
	Korean grid electricity	0.493	kg-CO ₂ -eq./kWh	[11], [12]
	Doka, G., treatment of waste steel, inert material landfill, RoW, allocation, cut-off by classification, ecoinvent database version 3.12			

2.95 kW와 1회 운전시간 4분을 적용하여 0.197 kWh/use로 산정하였다[34]. 회당 물 사용량에 대한 공개자료는 확인되지 않아 기본 시나리오에서는 식기세척기의 할당량과 동일하게 1.0 L/use를 가정하였다. 또한 물 사용량 가정에 따른 결과의 영향을 확인하기 위해 1.0 및 3.0 L/use 조건에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 또한 전용 세척기의 환경적 손익분기점이 형성될 수 있는 조건을 확인하기 위해, 다른 입력조건을 고정 한 상태에서 세척 1회당 온실가스 배출량이 대표 일회용 컵의 평균 배출량과 같아지는 임계 소비전력을 산정하였다.

텀블러의 EoL 단계에서는 앞서 설명한 cut-off approach를 동일하게 적용하였다. 스테인리스강 본체의 회수율을 95%로 적용하고, 나머지 5%는 매립하는 것으로 설정하였다[35]. PP 뚜껑은 PET 컵과 동일한 처리경로를 적용하였으며, 고무 실링재는 재활용되지 않고 소각되는 것으로 가정하였다.

2.3 환경적 손익분기점 산정

본 연구에서 환경적 손익분기 사용 횟수(environmental break-even number of uses)는 텀블러의 누적 온실가스 배출량이 동일한 횟수만큼 사용한 일회용 컵의 누적 온실가스 배출량보다 낮아지는 최소 사용 횟수로 정의하였다. 텀블러의 누적 배출량은 제품 생산, 운송 및 사용 후 처리에서 발생하는 제품 단위 고정 배출량과 매회 발생하는 세척 배출량의 합으로 산정하였다.

텀블러의 누적 사용 횟수를 N , 텀블러 생산, 운송 및 폐기 배출량을 E_t , 세척 1회 배출량을 E_w , 일회용 컵의 1회 사용 배출량을 E_d 라 할 때, $E_t + NE_w < NE_d$ 를 처음으로 만족하는 최소 정수 N 으로 산정하였다. 세척 1회 배출량이 일회용 컵 1회 사용 배출량 이상이면 사용 횟수와 관계없이 손익분기점이 형성되지 않는 것으로 판단하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 일회용 컵의 전과정 온실가스 배출량

12온스 컵 1회 사용을 기준으로 전과정 온실가스 배출량을 산정한 결과, 종이컵은 42.8 g-CO₂-eq., PET 컵은 77.8 g-CO₂-eq.로 나타났다(Fig. 2). PET 컵의 배출량은 종이컵보다 약 81.8% 높았다.

두 제품 모두 원료 생산 단계가 가장 큰 비중을 차지하였으며, 사용 후 처리(end-of-life, EoL) 단계도 전체 배출량에서 상당한 비중을 나타냈다. PET 컵은 신재 PET 70%와 재생 PET 30%의 혼합 시나리오를 적용하였음에도 PET 소재 생산

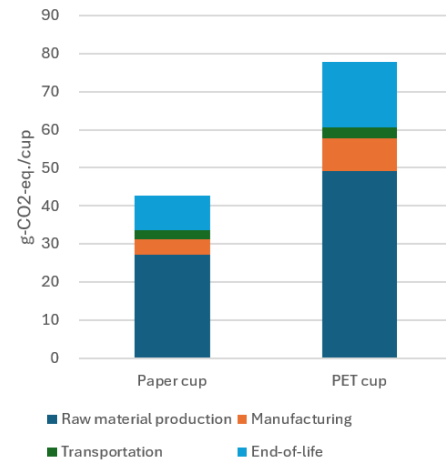


Fig. 2. Greenhouse gas emissions of paper and PET cups by life-cycle stage.

의 환경부하가 높아 종이컵보다 높은 전과정 배출량을 나타냈다. 종이컵의 소각 단계에서는 종이 섬유의 생물 기원 CO₂를 제외하고, PE 코팅층 및 PP 뚜껑 등의 화석 기원 배출을 반영하였다.

제조 및 운송 단계의 기여도는 상대적으로 작게 나타났으며, 두 제품의 배출량 차이는 주로 원료 생산과 사용 후 처리 단계에서 발생하였다. 따라서 일회용 컵의 환경성은 재질 자체 뿐 아니라 생산 및 폐기 조건을 함께 고려한 전과정 관점에서 평가할 필요가 있다.

3.2 텀블러의 생산 및 세척 단계 온실가스 배출량

제품별 생산, 운송 및 사용 후 처리에 따른 온실가스 배출량은 Stanley 텀블러가 988.4 g-CO₂-eq./개, Thermos 텀블러가 858.4 g-CO₂-eq./개로 산정되었으며, 평균은 923.4 g-CO₂-eq./개였다. Stanley 텀블러는 재생 스테인리스강을 사용하였으나 본체 질량이 더 커 Thermos보다 높은 배출량을 나타냈다. 공정별로는 스테인리스강 소재 생산과 본체 성형의 기여도가 가장 컸으며, 뚜껑·실링재 생산, 운송 및 사용 후 처리의 기여도는 상대적으로 작았다(Fig. 3).

텀블러 1회 세척의 온실가스 배출량은 세척 방식에 따라 크게 달랐다(Fig. 4). 수동 냉수 세척(3 L)은 7.3 g-CO₂-eq./회로 가장 낮았으며, 발포 세정제 세척은 17.4 g-CO₂-eq./회, 수동 온수 세척은 31.9 g-CO₂-eq./회, 가정용 식기세척기는 39.4 g-CO₂-eq./회로 산정되었다. 텀블러 전용 세척기의 배출량은 111.7 g-CO₂-eq./회로 가장 높게 나타났다.

수동 온수 및 장비 세척은 물 가열 또는 전력 소비로 인해 냉수 세척보다 높은 배출량을 나타냈다. 특히 텀블러 전용 세

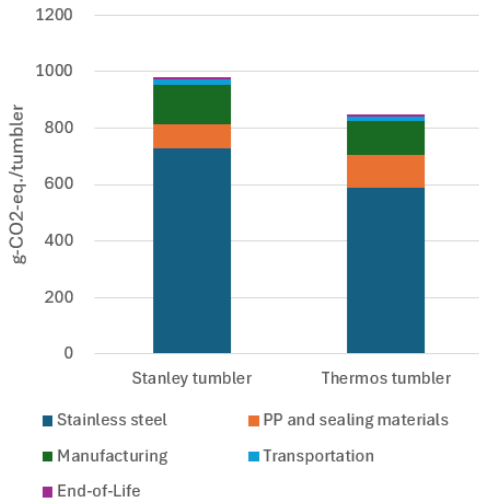


Fig. 3. Greenhouse gas emissions of reusable tumblers by life-cycle stage.

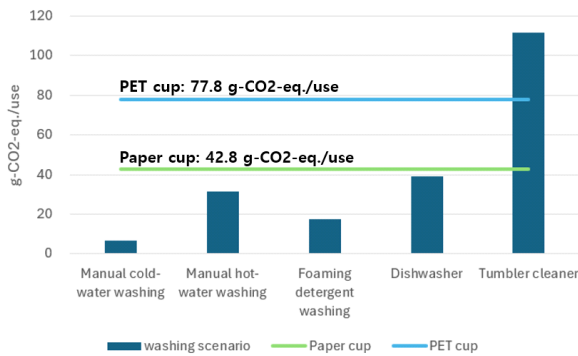


Fig. 4. Greenhouse gas emissions per washing cycle for different reusable tumbler washing methods.

척기는 1회 세척 배출량이 종이컵과 PET 컵의 1회 사용 배출량보다 높았다. 다만 해당 결과는 본 연구에서 적용한 전용 세척기의 물 및 전력 사용조건에 따른 결과이므로 실제 운전조건에 따라 달라질 수 있다.

3.3 수동 세척 물 사용량에 따른 민감도 분석

수동 세척 시 물 사용량이 텀블러의 환경부하에 미치는 영향을 평가하기 위해 물 사용량을 1, 3 및 5 L/회로 변화시켜 민감도 분석을 수행하였다. Fig. 5와 같이 냉수 세척에서는 물 사용량 증가에 따른 온실가스 배출량 변화가 제한적이었으나, 온수 세척에서는 물 가열에 필요한 에너지로 인해 배출량이 크게 증가하였다.

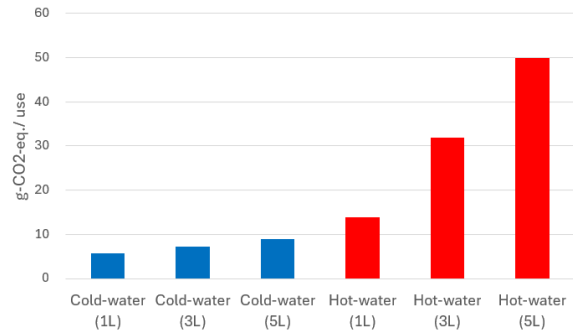


Fig. 5. Sensitivity of greenhouse gas emissions to water use in manual tumbler washing.

수동 냉수 세척의 온실가스 배출량은 물 사용량 1, 3 및 5 L에서 각각 5.7, 7.3 및 9.0 g-CO₂-eq./회로 산정되었다. 냉수 세척에서는 물 가열 에너지가 사용되지 않아 물 사용량 증가에 따라 상수도 공급과 하수 처리 부하만 증가하므로 배출량 변화가 상대적으로 적게 나타났다.

수동 온수 세척에서는 동일한 물 사용량 조건에서 각각 13.9, 31.9 및 50.0 g-CO₂-eq./회로 증가하였다. 이는 물 사용량 증가에 따라 상수도 및 하수 처리뿐 아니라 15°C에서 40°C까지의 물 가열에 필요한 에너지 소비가 함께 증가하기 때문이다.

이러한 결과는 기후변화 영향범주에서 세척수 사용량 자체보다 물의 가열 여부가 세척에 따른 온실가스 배출량에 더 큰 영향을 미침을 보여준다. 다만 냉수 세척에서 배출량 변화가 적다는 결과가 물 사용에 따른 환경영향 자체가 낮음을 의미하지는 않는다. 물 사용 관련 영향범주를 적용할 경우 시나리오 간 차이가 달라질 수 있으므로, 세척 방식의 환경성을 평가할 때는 가열 에너지와 세척수 사용량을 함께 고려할 필요가 있다.

3.4 세척 방식별 환경적 손익분기점

종이컵과 PET 컵의 평균 배출량인 60.3 g-CO₂-eq./회를 대표 일회용 컵의 비교 기준으로 적용하였다. Fig. 6과 같이 수동 냉수 세척에서는 물 사용량 1, 3 및 5 L/회 조건에서 각각 17, 18 및 19회 사용 후 환경적 손익분기점에 도달하였다. 냉수 세척에서는 물 사용량에 따른 세척 배출량 차이가 작아 손익분기점의 변화도 제한적으로 나타났다.

수동 온수 세척에서는 물 사용량 1, 3 및 5 L/회에서 각각 20, 33 및 90회로 손익분기 사용 횟수가 증가하였다. 이는 물 사용량 증가에 따라 물 가열에 필요한 에너지 소비가 증가하기 때문이다. 발포 세정제 세척에서는 22회, 가정용 식기세척

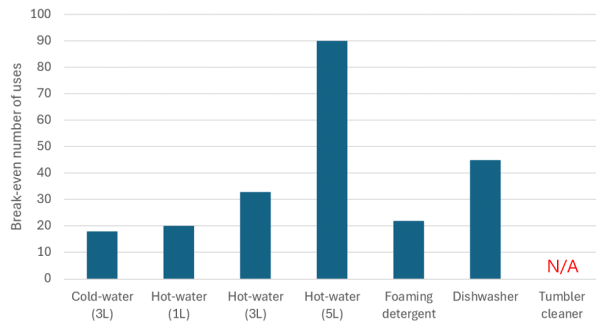


Fig. 6. Environmental break-even number of uses for reusable tumblers under different washing methods.

기에서는 45회 사용 후 손익분기점이 형성되었다.

반면 텀블러 전용 세척기는 1회 세척 배출량이 111.7 g-CO₂-eq.로 대표 일회용 컵의 60.3 g-CO₂-eq./회보다 높아, 분석 조건에서는 사용 횟수와 관계없이 환경적 손익분기점이 형성되지 않았다. 전용 세척기의 물 사용량에 대한 공개자료가 제한적인 점을 고려하여, 물 사용량을 1 및 3 L/회로 변화시켜 추가적인 민감도 분석을 수행하였다. 그 결과 세척 1회당 온실가스 배출량은 두 조건 모두 약 111.66 g-CO₂-eq./회로 나타났으며, 조건 간 차이는 0.002 g-CO₂-eq./회 미만이었다. 이는 본 연구의 기후변화 영향범주에서는 전용 세척기의 물 사용량보다 전력 소비에 따른 온실가스 배출의 기여가 지배적이기 때문이다. 다만 이러한 결과는 물 사용에 따른 환경영향 자체가 중요하지 않음을 의미하지 않으며, 본 연구에서 수자원 소비 또는 물 부족과 관련된 영향범주를 평가하지 않았다는 점을 고려할 필요가 있다.

이에 전용 세척기의 환경적 손익분기점 형성 여부에 영향을 미치는 전력 소비의 임계값을 추가로 산정하였다. 물 사용량 등 다른 세척조건과 4분의 운전시간을 동일하게 유지할 경우, 전용 세척기의 소비전력이 약 1.39 kW 미만일 때 세척 1회당 온실가스 배출량이 대표 일회용 컵의 평균 배출량인 60.3 g-CO₂-eq./회보다 낮아져 환경적 손익분기점이 형성될 수 있는 것으로 나타났다. 이는 본 연구에서 적용한 소비전력 2.95 kW 대비 약 53% 낮은 수준이다. 따라서 전용 세척기의 손익분기점 미형성 결과는 모든 전용 세척기에 일반화하기보다, 본 연구에서 적용한 장비의 전력 소비조건에 따른 결과로 해석할 필요가 있다.

전체적으로 세척 방식에 따라 손익분기점은 17회에서 90회까지 크게 변화하였으며, 특히 온수 사용량과 장비 전력 소비가 증가할수록 텀블러의 환경적 이점을 확보하기 위해 더 많은 반복 사용이 필요한 것으로 나타났다.

3.5 선행 연구와의 비교 및 시사점

본 연구에서 PET 컵과 종이컵 모두 원료 생산 단계의 기여도가 가장 크게 나타났으며, 사용 후 처리(EoL) 단계 역시 다음으로 높은 비중을 차지하였다. 이는 일회용 컵의 환경영향이 원료 생산뿐 아니라 EoL 조건에도 크게 영향을 받을 수 있음을 의미한다. Häkkinen and Vares는 carton-based cup과 PET cup을 대상으로 한 LCA에서 소재 선택과 EoL 시나리오가 환경영향 결과에 중요한 영향을 미침을 보고하였으며 [36], 본 연구 결과도 이러한 경향과 부합하였다.

다회용 컵의 환경성은 재사용 횟수와 세척 조건에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 본 연구의 환경적 손익분기점은 세척 조건에 따라 17~90회로 변화하였으며, 이는 세척 및 폐기조건에 따라 다회용 컵의 손익분기점이 달라질 수 있다고 보고한 Cottafava et al.의 결과와 일치한다[4]. 국내 연구에서도 다회용 컵과 텀블러의 재사용률과 세척 과정이 환경영향의 주요 변수로 제시된 바 있다[5]. 또한 Anand et al.은 paper cup을 기준으로 reusable PP 및 steel cup의 기후변화 영향 손익분기점이 약 54회라고 보고하였으며, 식기세척기 사용 시 환경영향이 증가하고 냉수 손세척 시 감소하는 것으로 나타났다[37]. 이러한 결과는 본 연구에서 세척 방식에 따라 손익분기점이 17~90회로 크게 달라진 결과와 유사하며, 특히 기존 연구의 54회가 본 연구의 산정 범위 내에 위치한다는 점에서 재사용 횟수뿐 아니라 세척 조건이 다회용 컵의 환경성을 결정하는 중요한 요인임을 보여준다. 다만 연구 간 손익분기점 횟수의 차이는 제품 소재와 질량, 세척조건, 전력믹스 및 EoL 처리조건 등의 차이에서 기인할 수 있으므로 직접적인 수치 비교에는 주의가 필요하다.

이러한 결과는 다회용 컵의 환경적 이점을 확보하기 위해 단순한 보급 확대뿐 아니라 충분한 반복 사용과 저에너지 세척 방식이 함께 고려되어야 함을 시사한다. 특히 본 연구에서는 냉수 세척보다 온수 및 장비 세척에서 에너지 소비 증가에 따라 손익분기점이 크게 증가하였으며, 전용 세척기의 경우에도 회당 전력 소비가 손익분기점 형성 여부를 결정하는 중요한 요인으로 나타났다. 따라서 다회용 컵 관련 정책 및 소비자 이용지침에서는 보급률이나 회수율뿐 아니라 실제 재사용 횟수와 세척 과정의 물·에너지 소비를 함께 고려할 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 12온스(약 355 mL) 일회용 종이컵, PET 컵 및 스테인리스 텀블러의 전과정 온실가스 배출량을 비교하고, 텀블러의 세척 방식에 따른 환경적 손익분기점을 분석하였다.

분석 결과, 1회 사용 기준 배출량은 종이컵 42.8 g-CO₂-eq., PET 컵 77.8 g-CO₂-eq.로 산정되었으며, 두 제품 모두 원료 생산 단계의 기여도가 가장 크게 나타났다.

텀블러의 생산, 운송 및 사용 후 처리에 따른 평균 초기 배출량은 923.4 g-CO₂-eq./개였으나, 반복 사용에 따라 초기 환경부하를 분산할 수 있었다. 종이컵과 PET 컵의 평균 배출량인 60.3 g-CO₂-eq./회를 기준으로 한 환경적 손익분기 사용 횟수는 수동 냉수 세척 17-19회, 발포 세정제 세척 22회, 수동 온수 세척 20-90회, 가정용 식기세척기 45회로 나타났다. 반면 텀블러 전용 세척기는 1회 세척 배출량이 111.7 g-CO₂-eq.로 기준값보다 높아 분석 조건에서는 손익분기점이 형성되지 않았으나, 추가 분석 결과 다른 조건이 동일할 경우 소비전력이 약 1.39 kW 미만으로 감소하면 환경적 손익분기점이 형성될 수 있는 것으로 나타났다.

따라서 텀블러의 환경적 이점을 확보하기 위해서는 충분한 반복 사용과 함께 냉수 세척, 온수 사용 최소화 및 저에너지 세척 방식의 적용이 중요하다. 본 연구는 국내 원료 조달, 운송, 사용 후 처리 및 다양한 세척 시나리오를 반영하여 일회용 컵과 텀블러를 동일한 기능 기준에서 비교했다는 의의가 있다. 다만 평가는 기후변화 영향범주에 한정하였으므로, 물 소비, 자원 사용 및 생태독성 등 다른 환경영향 범주에서는 결과가 달라질 수 있다.

References

1. Ministry of Environment. Measures for the management of disposable products. Ministry of Environment (2023).
2. Korea Federation for Environmental Movements. Finding the “ultimate disposable cup” with high recyclability. Korea Federation for Environmental Movements (2021).
3. Potting, J., van der Harst, E. Facility arrangements and the environmental performance of disposable and reusable cups. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 20, pp. 1143-1154 (2015).
4. Cottafava, D., Costamagna, M., Baricco, M., Corazza, L., Miceli, D., Riccardo, L. E. Assessment of the environmental break-even point for deposit return systems through an LCA analysis of single-use and reusable cups. *Sustainable Production and Consumption* 27, pp. 228-241 (2021).
5. Lee, C., Lee, H., Jang, Y. C., Choi, K. Comparative life cycle GHG emissions of single-use plastic cups and reusable cups for beverages. *Environmental Engineering Research* 30(5), pp. 1-13 (2025).
6. Caspers, J., Süßbauer, E., Coroama, V. C., Finkbeiner, M. Life cycle assessments of takeaway food and beverage packaging: The role of consumer behavior. *Sustainability* 15(5), p. 4315 (2023).
7. Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., Weidema, B. The ecoinvent database version 3 (Part I): Overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21(9), pp. 1218-1230 (2016).
8. Choi, W., Song, H. H. Well-to-wheel analysis on greenhouse gas emission and energy use with natural gas in Korea. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 19, pp. 850-860 (2014).
9. Jang, J. J., Song, H. H. Well-to-wheel analysis on greenhouse gas emission and energy use with petroleum-based fuels in Korea: Gasoline and diesel. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 20, pp. 1102-1116 (2015).
10. Choi, W., Song, H. H. Well-to-wheel greenhouse gas emissions of battery electric vehicles in countries dependent on the import of fuels through maritime transportation: A South Korean case study. *Applied Energy* 230, pp. 135-147 (2018).
11. Choi, W., Yoo, E., Seol, E., Kim, M., Song, H. H. Greenhouse gas emissions of conventional and alternative vehicles: Predictions based on energy policy analysis in South Korea. *Applied Energy* 265, p. 114754 (2020).
12. Korea Electric Power Corporation. Statistics of electric power in Korea, 2024. No. 94. Korea Electric Power Corporation (2025).
13. Moshe Paper & Packaging Ltd. 12 oz white paper hot cup (D02-DDY-HPC12W): Product specifications. Moshe Paper & Packaging Ltd.
14. Moshe Paper & Packaging Ltd. OD90 white plastic coffee cup lid with cap (D02-YY-OD90W): Product specifications. Moshe Paper & Packaging Ltd.
15. Ministry of Food and Drug Safety. Standards and specifications for utensils, containers and packages. Ministry of Food and Drug Safety Notification No.

- 2026-24. National Law Information Center (2026).
16. Martin, S., Bunsen, J., Ciroth, A. Case study: Ceramic cup vs. paper cup (openLCA version 1.7.2). GreenDelta GmbH (2018).
17. Korea Paper Association. Annual supply and demand statistics of the Korean paper industry. Korea Paper Association (2024).
18. Korea Wood Newspaper Editorial Department. Pulp imports by country in April 2025. Korea Wood Newspaper (2025).
19. Sea-Distances.org. Sea distance calculator.
20. Jin Woo Machine Co. Paper cup forming machine, Model JW-55. Jin Woo Machine.
21. Moshe Paper & Packaging Ltd. 12 oz PET cup, 98 mm (D05-OME-PETDY12): Product specifications. Moshe Paper & Packaging Ltd.
22. Moshe Paper & Packaging Ltd. 98 mm clear flip lid for PET cups (D05-OME-PETFL98): Product specifications. Moshe Paper & Packaging Ltd.
23. Kim, B., Jang, Y.-C., Lee, H., Lee, C., Song, H., Choi, K. Life cycle assessment of virgin PET bottles and recycled PET bottles: A comparative study. *Journal of Korea Society of Waste Management* 41(6), pp. 624-635 (2024).
24. Korea National Oil Corporation. Crude oil imports. Petronet (2024).
25. Ministry of Environment. Pilot project for the collection of single-use cups in the Gwanghwamun-Namdaemun area. Ministry of Environment, Resource Circulation Policy Division (2024).
26. Stanley. Transit Twist Flip Mug 355 mL. CNC Mall.
27. Thermos Korea. New Daily One-Touch Tumbler 350 mL, JNL-355K: Product information. Thermos Official Online Store.
28. Johnson, J., Reck, B. K., Wang, T., Graedel, T. E. The energy benefit of stainless steel recycling. *Energy Policy* 36(1), pp. 181-192 (2008).
29. Seoul Arisu Headquarters. Arisu receives Environmental Product Declaration certification, with carbon emissions 639 times lower than commercially sold bottled water. Seoul Arisu Headquarters.
30. Min, K., Lee, G., Kim, H., Hwang, T., Kim, E., Lee, J., Kang, D. Identifying water-energy-carbon links in urban water sectors: A case study of Incheon Metropolitan City, Republic of Korea. *Water* 16, p. 2473 (2024).
31. Kiturami Co., Ltd. Geokkuro NEW Condensing L10 gas boiler: Product specifications. Kiturami.
32. LG Household & Health Care Ltd. SAFE tumbler cleaner, 12 tablets: Product information and directions for use. LG Care Mall.
33. LG Electronics. LG DIOS Objet Collection Dishwasher, Model DUE6BGE. LG Electronics.
34. LG Electronics. LG myCup Tumbler Cleaner, Model CA1MB. LG Electronics.
35. worldstainless. Recycling. worldstainless.
36. Hakkinen, T., Vares, S. Environmental impacts of disposable cups with special focus on the effect of material choices and end of life. *Journal of Cleaner Production* 18(14), pp. 1458-1463 (2010).
37. Anand, K., Martinez Arce, A., Bishop, G., Styles, D., Fitzpatrick, C. A tasty solution to packaging waste? Life cycle assessment of edible coffee cups. *Resources, Conservation and Recycling* 201, p. 107320 (2024).