

Research Paper

## 유리병 물질흐름 분석과 재활용에 따른 온실가스 감축 영향 분석

정석원\*\*\* · 장용철\*\*

한국수력원자력(주) 중앙연구원\*, 충남대학교 환경공학과\*\*

### Material Flow Analysis and Impact of Greenhouse Gas Reduction by Glass Bottle Recycling

SukWon Jung\*\*\* · Yong-Chul Jang\*\*

Korea Hydro & Nuclear Power Co. LTD. Central Research Institute\*  
Department of Environmental Engineering, Chungnam National University\*\*

**요약:** 온실가스 배출은 지구 온난화와 기후 변화의 주요 원인이며, 현재 전 세계적으로 심각한 환경 문제로 대두되고 있다. 그 중에서 유리병은 자연적으로 분해되지 않으며, 생산과 처리 과정에서 많은 자원과 에너지가 투입되기 때문에, 유리병의 재활용은 자원 보존과 환경 오염 최소화, 온실가스 저감 측면에서 중요하다. 이에, 본 연구에서는 국내 유리병 생산량과 처리량 등의 관련 통계자료를 활용하여 유리병 물질흐름도를 작성하였다. 또한 US EPA WARM 모델, Prognos 산정방법 및 Christensen's 산정방법을 활용하여 유리병의 온실가스 감축량을 산정하였다. 연구 결과, 생활폐기물로 배출된 약 49만톤의 폐유리병 중, 약 30만톤(61.2%)이 재활용되었고, 나머지는 소각(22.1%) 및 매립(17.3%) 되었다. 2022년 기준 US EPA WARM 모델 적용 시 약 73,399 ton CO<sub>2</sub>eq/yr, Prognos 산정방법 적용 시 약 52,847 ton CO<sub>2</sub>eq/yr, Christensen's 산정방법 적용 시 약 135,201 tonCO<sub>2</sub>eq/yr 감축되는 것으로 평가되었다. 향후 국내 유리병 재활용에 따른 온실가스 감축계수와 산정 방법론을 개발 및 적용하여 불확실성을 최소화해야 할 것이다.

**주요어:** 유리병, 유리병 재활용, 온실가스, 물질흐름분석

**Abstract:** Greenhouse gas (GHG) emissions are a major cause of global warming and climate change, and are currently emerging as serious environmental problems worldwide. Among them, glass bottles do not decompose naturally, and a lot of resources and energy are input into the production and processing processes, so recycling of glass bottles is important in terms of resource conservation, minimizing environmental pollution, and reducing GHG. Therefore, this study created a material flow diagram of glass bottles using related statistical data such as domestic glass bottle production and processing volume. In addition, the US EPA WARM model, Germany Prognos calculation method, and Denmark Christensen's calculation method were used to estimate the greenhouse gas reduction amount of glass bottles. As a result of the study, out of about 490,000 tons of waste glass bottles

discharged as municipal waste, about 300,000 tons (61.2%) were recycled, and the rest were incinerated (22.1%) and landfilled (17.3%). As of 2022, it is estimated that approximately 73,399 tons CO<sub>2</sub>eq/yr will be reduced when applying the US EPA WARM model, approximately 52,847 tons CO<sub>2</sub>eq/yr when applying the Prgonos calculation method, and approximately 135,201 tons CO<sub>2</sub>eq/yr when applying the Christensen's calculation method. Further research is warranted that the methodology and GHG saving emission factors by reflecting glass recycling conditions and processes in Korea should be developed to reduce uncertainty of the results.

**Keywords:** Glass Bottle, Glass recycling, Greenhouse gas, MFA (material flow analysis)

## I. 서론

온실가스 배출은 지구 온난화와 기후 변화의 주요 원인이며, 현재 전 세계적으로 심각한 환경 문제로 대두되고 있다. 이에 따라 국제사회는 온실가스 배출을 줄이기 위해 다양한 정책 수립을 모색하고 있으며, 이러한 노력의 일환으로 폐기물 재활용은 온실가스 감축에 중요한 역할을 하고 있다. 현대 사회에서 발생하는 폐기물의 종류는 다양하며, 그 중에서 유리병은 밀봉하기 쉽고, 투명하여 내용물의 상태를 외부에서 관찰하기 쉬운 물리적 특성 때문에 식품, 의약품 및 화학 산업의 주요 포장 용기로 활용되고 있다. 특히, 화학적으로는 액체와 반응하지 않아 다양한 음료의 포장 재료로 널리 사용되고 있으며, 소독과 살균이 용이하기 때문에 이미 사용된 빈 유리병은 보다 쉽게 재활용이 가능하다. 특히, 유리병을 재활용함으로써 신규 유리병 생산 시 필요한 천연원료의 소모량을 줄이고, 이로 인한 에너지 절감이 가능하다. 즉, 폐기물 발생량을 줄이고, 이를 통해 온실가스 배출을 효과적으로 감소시킬 수 있다. 하지만 유리병 재활용이 온실가스 감축에 기여하는 정도를 정확히 평가하는 것은 복잡한 작업으로, 재활용 과정에서의 에너지 절약, 원료 사용 감소, 그리고 최종 제품의 환경적 영향을 종합적으로 고려할 필요가 있다.

유리병은 소각이나 매립에 의해 분해되지 않으며, 에너지 회수도 불가능하기 때문에 재활용하는 것이 가장 선호되는 처리 방법이다(Larsen et al. 2009). 유리병 재활용은 신규 유리병 생산과정에서 필요한 천연자원의 소비 감축과 유리병 소각을 위한 별도의 고온 용융 과정을 거치지 않아 불필요한 에너지 소비를 줄이고 온

실가스 감축에 기여할 수 있다. 또한, 매립처리로 인해 발생될 환경 오염과 경제적 손실을 줄일 수 있어 유리병을 재활용하는 것이 훨씬 효율적인 방법이라고 판단된다.

세계 유리병 시장의 규모는 2023년 기준 약 274억 8,000만 달러로 평가되었으며, 2024년에는 약 288억 7,000만 달러, 2030년에는 약 391억 7,000만 달러에 이를 것으로 예측되었다(<https://www.giiresearch.com/report/ires1465204-glass-bottles-market-by-appearance>). 반면, 유리병 시장의 규모가 커지는 만큼 유리병 재활용 시장 역시 확장될 것으로 예상된다. 2018년 기준 미국의 도시 고형폐기물(MSW; Municipal Solid Waste) 중 유리제품의 총 발생량은 12,250 천톤이며, 이 중 맥주 및 청량음료 등의 유리병은 4,650 천톤이다. 여기에는 탄산음료 및 비탄산수, 차, 향이 첨가된 음료, 즉석 음료 알코올 및 칵테일 등이 포함된다. 재활용되는 유리병은 1,840 천톤으로 총 발생량의 39.6%이며, 소각은 550 천톤, 매립은 2,260 천톤이다(U.S. Environmental Protection Agency 2020). EU의 경우, 유리병 생산량은 2022년 기준 총 2,370 만톤, 844 억병으로 2016년 대비 생산량 기준 약 11%, 병 단위 기준 9% 증가한 수치이며, 2021년 대비 생산량 기준 0.9%, 병 단위 기준 1.3% 증가한 수치이다. 2021년 기준 EU의 유리병 수거율은 80.1%이며, 2030년까지 90%까지 높이기 위한 계획을 가지고 있으며, 유럽유리병협회(FEVE) 등을 통해 홍보활동을 활발히 진행하고 있다(Close the Glass Loop 2023, Korea Packaging Recycling Cooperative 2015) 또한 일본은 전국 지자체에서 종류 및 색깔별로 유리병 현황을 파악하고 있으며(Japan Glass Bottle 3R Promotion Council 2015), 체계적으로 자원순환 체계를 구축하

여 관리하고 있다(National Institute for Environmental Studies 2015). 그러나 국내에서는 해외 대비 유리병 재활용과 관련된 통계자료 및 상세한 정보 부족으로 신뢰도 있는 물질흐름분석(Material Flow Analysis) 관련 연구에 미흡하고 재활용 실적만 집계하여 공개하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 유리병의 출고량, 폐기물 발생부터 처리 및 재활용까지의 정량적인 물질흐름도를 분석하고자 하였다.

최근 폐기물 재활용에 따른 온실가스 산정방법론 및 온실가스 감축량을 정량적으로 보여주는 연구가 국외에서 활발하게 진행되고 있다. 미국 환경보호청(US Environmental Protection Agency)이 개발한 WARM (Waste Reduction Model)의 경우, 다양한 물질과 에너지 및 자원 소비에 따른 환경 영향 평가 방법론이 널리 사용되고 있다. 온실가스 산정 방식은 유리병 재활용 재료로 신규 유리를 대체 제조 시 발생하는 배출량과 천연재료로 동일한 유리병 제조 시 발생하는 배출량을 비교하여 재활용 유리의 온실가스 계수의 이득 (Benefits or Savings)을 계산하는 방식을 사용한다(US Environmental Protection Agency 2015). 또한, 독일 Prognos 산정방법에서는 네 가지 서로 다른 시나리오를 바탕으로 온실가스를 분석하는 방식을 사용하며, 법률 및 지침, 기술적 조건 등에 많은 영향을 받는다(Prognos 2008). 이 연구는 재료의 수집, 분류, 추가 처리 등을 포함한 시스템 경계를 설정하여 미국의 WARM

모델과는 차별화된다. 덴마크 Christensen's 산정방법에서는 다양한 산업, 에너지 소비, 그리고 기타 활동과 관련된 데이터를 기반으로 온실가스 배출계수를 산정한다(Larsen et al. 2009). 국내에서는 온실가스 계산 시, 기후 변화에 관한 정부간 협의체IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 지침을 준수하고 있으나, 아직까지 폐기물 재활용에 따른 온실가스 배출 및 감축 산정 방법론은 개발되어 있지 않다. 따라서, 본 연구에서는 위의 세 가지 방법론을 활용하여 유리병 재활용에 따른 온실가스 감축량 산정방법론을 비교 분석하였다. 본 연구의 결과는 향후 국내 폐기물 재활용과 온실가스 감축 산정방법론 개발을 위한 기초자료로써 활용이 가능할 것으로 판단된다.

## II. 연구방법

본 연구에서는 2022년 국내 유리병 물질 흐름 분석을 수행함으로써, 유리병 생산부터 공공·자가·위탁처리 후 재활용된 유리병의 흐름도를 규명하고자 하였다. 이러한 물질흐름 자료와 온실가스 감축량의 상관관계를 확인하기 위해 US EPA WARM 모델, 독일 Prognos 산정방법, 덴마크 Christensen's 산정방법 등을 활용하여 유리병 재활용에 따른 온실가스 감축 잠재량을 산정하였다.

Table 1. Data Collection and Sources of Glass Bottles

Category		Data Source	
Division	Data	Statistical Survey	Literature Survey
Korea	Glass bottles generation		○
	Processing volume		○
	Recycling obligation (white, green, brown)		○
	Recycling capacity (white, green, brown)		○
Other countries	Recycling performance (Czech Republic)	○	
	Recycling performance (Netherlands)	○	
	Recycling performance (Belgium)	○	
	Recycling performance (Austria)	○	
	Recycling performance (Germany)	○	
	Generation and recycling volume (USA)	○	○
	Production and collection rate (EU)		○
	Greenhouse gas reduction factor		○

### 1. 국내 유리병 기초자료 조사

본 연구에서 유리병을 활용한 제품의 국내 발생량, 회수 및 처리량, 재활용량 등은 환경부와 한국환경공단 등에서 도출한 자료를 활용하였으며, 통계 확보가 어려운 데이터는 공개되어있는 통계자료 등을 참고하여 수행하였다. 또한, 국내 유리병 물질 흐름 분석 및 온실가스 감축 계수 연구를 위한 데이터의 수집 경로는 Table 1에 제시하였다.

### 2. 국내 유리병 물질흐름분석

본 연구에서는 자원순환마루(자원순환정보시스템)에서 자원순환 단계별 제도 및 시스템 현황(<https://www.recycling-info.or.kr/rrs/main.do>)을 확인하고, 2022년을 기준으로 국내 유리병의 물질 흐름을 파악하였다. 국내 유리병 발생량은 환경부와 한국환경공단의 2022년 전국 폐기물 발생 및 처리현황(Korea Ministry of Environment 2023)과 2022년 재활용지정사업자 재활용실적(Korea Environmental Corporation 2023) 자료를 사용하였고, 전체 유리병 발생량은 종량제 배출 등의 혼합배출 값과 재활용 가능자원 분리 등에 의한 배출값의 합계로 계산하였다.

### 3. 유리병 재활용에 따른 온실가스 감축 산정방법

본 연구는 유리병 재활용에 따른 온실가스 감축량 산정방법론으로 미국의 환경보호청(US EPA)의 WARM (Waste Reduction Model) 산정방법, 독일 Prognos 산정방법을 적용하여 상호 비교하였으며, 또한 덴마크

Christensen's 산정방법에서 제시한 감축계수를 이용하여 온실가스 감축량을 산정하였다. 위의 3가지 산정방법에 대한 세부내용은 다음과 같다.

#### 1) 미국 EPA WARM 산정방법

미국 EPA WARM에서는 폐기물의 특성에 따른 온실가스 배출 인자를 이용하여 다양한 폐기물 처리 방법들에 대한 기후 변화 요소들을 전 과정평가 기법(Life Cycle Assessment)으로 적용하고 있다. EPA WARM 산정방법에서 적용되는 유리의 종류는 청량음료병, 와인 및 주류병, 음식 및 기타 병 등으로서 유리로 만든 용기나 포장재는 포함하지만 가전제품, 가구, 액자나 거울/창문 같은 평판 유리나 기타 유형의 유리는 미포함되어있다(Japan Glass Bottle 3R Promotion Council 2015). 또한, 재활용에 의한 온실가스 감축량 산정을 위해 시스템 경계를 설정하고, 유리 폐기물들은 대부분 닫힌 루프 상태에서 재활용되는 것으로 가정하였다. EPA WARM 산정방법은 유리 폐기물로부터 2차 제품을 생산하는데 발생하는 배출량을 천연자원(1차 원료)에서 제품을 생산하는 배출량과 비교하였으며, 폐유리의 재활용에서 발생하는 온실가스 배출원과 감소원을 Table 2와 같이 구분하고 있다. 폐유리 재활용에 의한 온실가스 감소원은 재활용에 의한 2차 원료의 사용으로 1차 원료 및 제품 이송의 생략, 1차 원료로부터 제품을 제조하는 공정의 에너지 및 비에너지 부문에 의한 배출을 제외한 제외에 있다. 또한, 폐유리를 재활용하는 과정에서 온실가스 배출원은 크게 에너지 부문과 비 에너지 부문에 의한 배출로 구분하였으며, 에너지 사용에 의한

Table 2. Glass GHG Sources and Sinks from Relevant Materials Management of EPA WARM (U.S. Environmental Protection Agency 2015)

Materials Management Strategies for Glass	GHG Sources and Sinks Relevant to Glass		
	Raw Materials Acquisition and Manufacturing	Changes in Forest or Soil Carbon Storage	End of Life
Recycling	Emissions <ul style="list-style-type: none"> <li>• Transport of recycled materials</li> <li>• Recycled manufacture process energy</li> <li>• Recycled manufacture process non-energy</li> </ul> Offsets <ul style="list-style-type: none"> <li>• Transport of raw materials and products</li> <li>• Virgin manufacture process energy</li> <li>• Virgin manufacture process non-energy</li> </ul>	N/A	Emissions <ul style="list-style-type: none"> <li>• Collection and transportation to recycling center</li> <li>• Sorting and processing energy</li> </ul>

Table 3. Recycling Emission Factor for Glass of EPA WARM (kg CO<sub>2</sub>eq/Ton) (U.S. Environmental Protection Agency 2015)

(a) Material	(b) Recycled Input Credit <sup>a</sup> Process Energy	(c) Recycled Input Credit <sup>a</sup> Transportation Energy	(d) Recycled Input Credit <sup>a</sup> Process Non-Energy	(e) Forest Carbon Storage	(f) Net Emissions (Post-Consumer) (f=b+c+d+e)
glass	-109	-18	-127	-	-253

Table 4. GHG emission factors of Glass recycling 1 ton by Prognos Study (Prognos 2008)

Material Waste Stream	Item	CO <sub>2</sub> emissions	Benefit (+) Burden (-)
		kg CO <sub>2</sub> equivalent	kg CO <sub>2</sub> equivalent
glass	Provision of waste glass	20	180
	Savings by the substitution of 1 of primary glass through secondary glass at a calculation point of 75% secondary glass share	200	

배출은 다시 제품 제조에 필요한 에너지 사용과 이송에 필요한 에너지 사용으로 구분하고 있다.

재활용에 의한 온실가스 감축량은 1차 원료로부터 제조 시 배출되는 톤당 총 온실가스 배출량과 재활용 유리로부터 제품 제조 시 배출되는 톤당 총 온실가스 배출량의 차이로 정하고, 재활용에 의한 온실가스 감축량 산정을 다음과 같은 세 가지 단계에 따라 실시하였다. 1단계는 1차 원료로부터 유리 생산 시 발생하는 온실 가스량 산정, 2단계는 폐유리를 재활용한 2차 원료로부터 유리 생산 시 발생하는 온실 가스량 산정, 3단계는 1차 원료로부터 유리를 생산하는데 발생하는 온실 가스량과 폐유리를 재활용한 2차 원료로부터 유리를 생산하는데 발생한 온실 가스량의 차이를 산정하였다. 이때, 수거 및 이송 거리는 폐기물 수거 및 이송 거리에 제품의 이송 거리를 포함하는 것으로 가정하였다. Table 3에 제시된 음수 값은 자재 관리로 인한 순 온실가스 배출 감소 또는 탄소 저장을 의미하며, (b), (c), (d)

값은 관리되는 물질의 초기 생산으로 인한 온실가스 배출을 포함하고 있다.

2) 독일 Prognos 산정방법

독일의 Prognos 연구소는 폐기물 재활용에 의한 온실가스 감축량 산정방법을 개발하였으며, Prognos 산정방법에서는 유리의 종류를 유리병이 아닌 유리 전체에 대한 감축계수를 적용하고 있다. Table 4의 폐유리 제공 시 발생하는 온실가스 발생량은 20 kgCO<sub>2</sub>eq이며, 수거 및 이송 거리는 수집 거리 15km, 폐기물 운송 거리 75km로 총 90km로 가정하였다. 또한, 2차 원료에서 폐유리 75%를 사용하여 유리병 생산 시, 천연재료 100% 사용한 1차 원료와 비교하여 200 kgCO<sub>2</sub>eq의 온실가스가 감축되었다. 이에 유리 폐기물 1 ton을 재활용할 때 감축될 수 있는 온실가스량은 (+)180 kg CO<sub>2</sub>eq/ton의 값을 적용하였다.

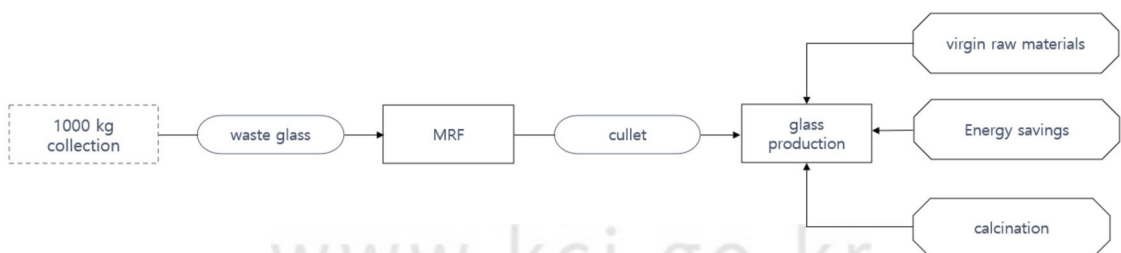


Figure 1. Flow diagram for recycling 1 ton of Glass waste in Christensen's Study (Larsen et al. 2009)



Table 5. Recycling of Glass bottles and Greenhouse gas emissions and reductions in Christensen's Study (Larsen et al. 2009)

Indirect: upstream	Direct: waste management	Indirect: downstream
GWF (kg CO <sub>2</sub> eq/ton): 1-19	GWF (kg CO <sub>2</sub> eq/ton): 0-10	GWF (kg CO <sub>2</sub> eq/ton): -506 to -445

### 3) 덴마크 Christensen's 산정방법

덴마크 Christensen's 산정방법은 미국 EPA WARM과 독일 Prognos 산정방법과는 달리 Figure 1과 같이 유리병 재활용 경로를 분류하고 있다.

Table 5에 제시된 지구온난화지수(GWF; Global Warming Factor)는 배출원에서 발생하는 온실가스가 지구 온난화에 미치는 영향으로, 본 연구에서는 온실가스(GHG)와 같다고 가정하였으며, 유리병 재활용에 따른 온실가스 감축량은 온실가스 배출량과 감축량의 범위를 모두 합한 총 범위 평균의 절대값을 온실가스 감축 계수로 이용하여 산정하였다. Table 5에 제시된 간접 upstream 범주에서는 유리병의 생애 주기 초기에 발생하는 원료채굴, 생산, 가공, 운송 등 제품이 최종 사용자에게 도달하기 전의 과정에서 발생하는 온실가스 배출이 포함되며, 직접 폐기물 범주에서는 분류 시설에서 폐기물을 운반하는데 사용되는 트럭이나 기계차 등에서 연소로 인해 발생하는 온실가스 배출이 포함

된다. 또한, 간접 downstream 범주에서는 사용한 유리병을 재활용한 후 발생하는 간접적인 온실가스 감축량이 포함되며, 에너지 절약으로 115에서 176 kg CO<sub>2</sub>eq/ton, 하소(Calcination) 절약으로 200 kg CO<sub>2</sub>eq/ton, 원자재 공급 절약으로 130 kg CO<sub>2</sub>eq/ton을 포함한다(Larsen et al. 2009).

## III. 결과 및 고찰

### 1. 유리병의 물질흐름분석 결과

#### 1) 유리병 재활용 실적 분석

국내 생산자책임재활용제도(Extended Producer Responsibility) 대상 포장재 제품군 품목은 폐지, 폐골판지, 폐유리용기, 철스크랩 총 4개의 품목으로 구성되어 있다. 이 품목과 관련된 재활용의무생산자는 직접 수거 및 재활용하거나 재활용 실적이 정부에서 정해놓은 연간 재활용 의무량에 못 미치는 경우, 미달된 재활

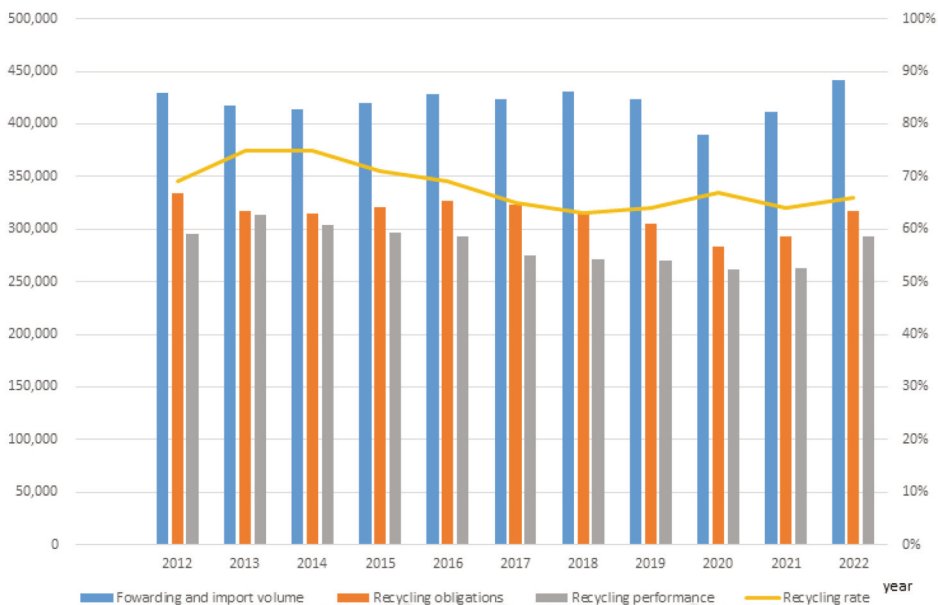


Figure 2. Recycling trends of Glass bottles between 2012 and 2022 in Korea (Korea Resource Circulation Service Agency 2022)

용량에 상응하는 재활용 소요비용이 부과된다. 국내 조사에 따르면, 2022년에 가장 높은 재활용 의무률은 철캔이 83.1%이고, 가장 낮은 것은 종이팩으로 22.8%이며, 그 중 유리병은 색깔별로 재활용 의무률이 유리병 중에는 백색 유리병이 70.0%, 녹색 유리병이 78.0%, 갈색 유리병이 67.0%로 갈색 유리병이 가장 낮은 재활용 의무률을 보였다(<https://www.recycling-info.or.kr/rrs/main.do>). 2022년 유리병의 재활용은 환경부 고시 이용 목표율 대비 녹색병과 갈색병은 각각 29.4% 및 17.8%를 초과하였으나, 백색병은 1.2% 미달하였다. 2012년부터 2022년까지 국내 유리병 출고 및 수입량, 재활용 의무량, 재활용 실적, 국내 소비량 대비 재활용률을 비교하여 Figure 2에 제시하였다(Korea Resource Circulation Service Agency 2022, Korea Packaging Recycling Cooperative 2018).

국내 유리병의 출고 및 수입량은 2003년 461,708 톤에서 2022년 442,179 톤으로 약 400 천 톤을 대체로 유지하고 있으며, 유리병 재활용률은 2011년에 최고점(79%)을 기점으로 현재는 60%대를 유지하고 있다. 이는 미국의 유리병 재활용률 39.6%보다는 훨씬 높은 수치이지만, EU 회원국과 비교 시 다소 낮은 수치를 보이고 있다. EU 회원국과 국내 재활용 실적을 비교하여 Figure 3에 제시하였고, 이 중 벨기에의 100%에 가까운 유리병 재활용 이행률을 보이고 있어 향후 국내 유리

병 재활용률 제고를 위해 벨기에의 정책 등을 벤치마킹할 필요가 있다. 또한, 우리나라 역시 유리병 재활용률을 상승시키기 위해 자구책 마련 및 국내 환경정책 수립의 개선이 필요할 시기라고 판단된다.

## 2) 국내 유리병 물질흐름 분석결과

환경부 및 한국환경공단의 자료 등을 참조하여 2022년 기준 국내 유리병의 발생부터 처리 후 재활용까지의 과정을 Sanky Diagram을 사용하여 물질흐름도를 제시하였다(Westbroek et al. 2021). 국내 유리병 발생량(Glass bottle generation)은 약 512 천톤으로, 국내 생활계 폐기물과 비 생활계 폐기물(Glass bottle waste generated from households and non-households)로 구분된다. Figure 4에서는 국내 생활계 폐기물 발생량 중 유리병은 약 490,000 ton/yr이며, 종량제 배출 등 혼합배출 중 불연성 폐유리류(Incombustible glass)와 재활용 가능 자원(Recyclable glass bottles)로 구분되어 발생되고 있다. 유리병 재활용을 위한 전처리 과정은 공공처리(Public treatment facility), 자가처리 및 위탁처리(Consignment processing facility) 등 세 종류의 처리 방법이 있으나 환경부 자료 조사결과 자가처리는 없는 것으로 확인되어, Figure 4에서는 제외하였다. 지자체 공공처리 및 위탁처리 시, 유리병은 재활용(Recycling), 소각(Incineration), 매립(Landfill) 및 기타(Others)로 구분된다. 국내 생활

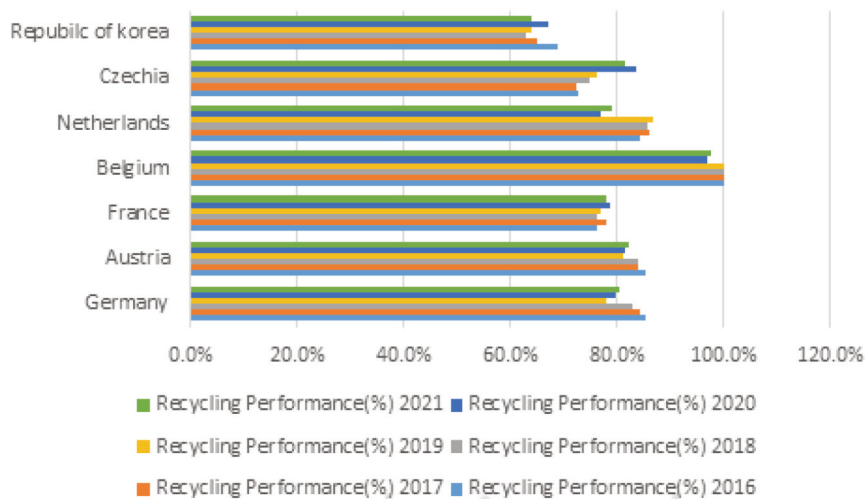


Figure 3. Comparison of Glass bottle recycling rates by country (2016-2021) ([https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei\\_wm020/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_wm020/default/table?lang=en))

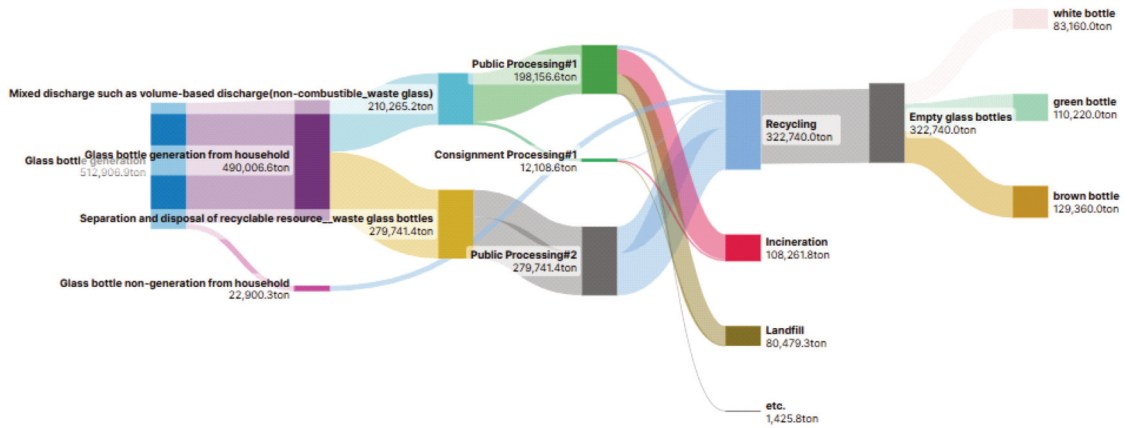


Figure 4. Result of material flow analysis for Glass bottles in Korea (2022)

계 폐기물의 약 299.8 천톤의 유리병이 백색, 녹색, 갈색 병으로 재활용되며, 비 생활계 폐기물에서 약 22,900 ton/yr이 재활용으로 발생된다고 가정하여 약 322.7 천톤의 유리병이 재활용된다(Figure 4).

## 2. 온실가스 배출량 산정결과

### 1) 유리병 재활용에 따른 온실가스 산정결과

Table 3의 EPA WARM의 유리 재활용 배출계수를 활용하여 국내 유리병 재활용에 따른 온실가스 감축량을 산정한 결과, 2022년 기준 WARM 모델에서는 73,399

tonCO<sub>2</sub>eq/yr, Prgnos 모델은 52,847 tonCO<sub>2</sub>eq/yr의 결과를 도출하였다. 따라서 두 모델의 온실가스 감축량 차이는 20,552 tonCO<sub>2</sub>eq/yr이며, 이러한 차이는 두 산정방법 간의 시스템 경계와 유리병 종류 구분의 차이에서 기인한 것으로 판단된다. 또한, Christensen's 산정방법은 135,201 tonCO<sub>2</sub>eq/yr의 온실가스량이 감축되는 것으로 나타났다. 이 값은 WARM 산정방법과는 61,802 tonCO<sub>2</sub>eq/yr, Prognos 산정방법과는 82,354 tonCO<sub>2</sub>eq/yr의 차이를 보였으며, 이러한 차이는 온실가스 산출 방법이 서로 다른 온실가스 배출계수를 적용했기

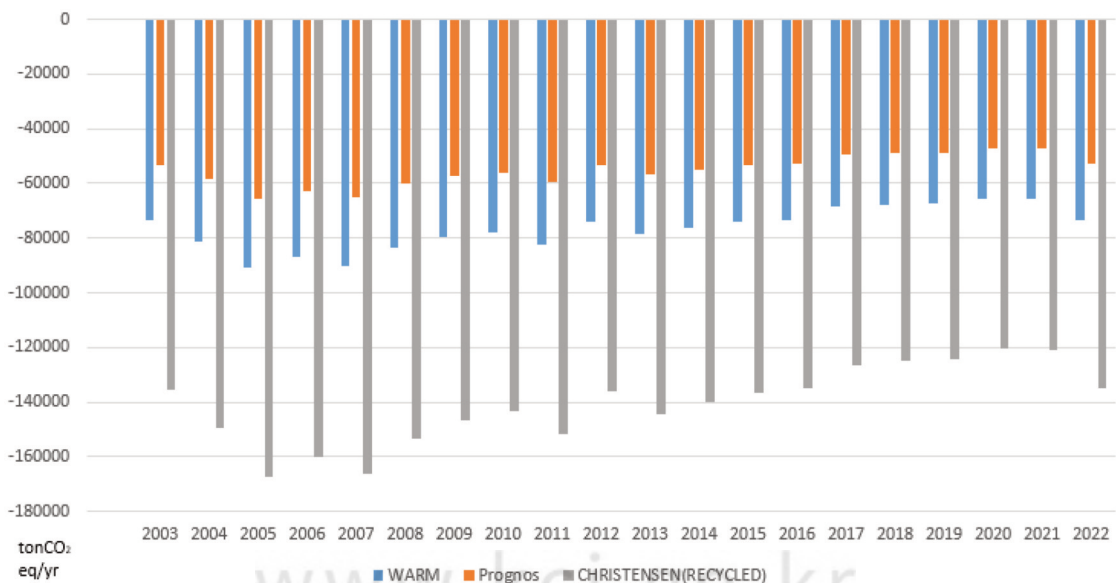


Figure 5. GHG reduction potentials by glass bottle recycling in Korea using different models



때문인 것으로 판단된다. Figure 5에 제시된 각 온실가스 감축 산정방법별 계산 결과는 미국 WARM 산정방법과 독일 Prognos 산정방법의 결과값은 유사한 반면, 덴마크 Christensen's 산정방법의 결과값은 다른 두 모델보다 약 2배 높은 온실가스 감축 결과를 보였다. 이는 시스템 경계와 유리병 종류의 구분 차이에서 기인하는 것으로 판단된다. 미국 WARM 모델의 시스템 경계는 유리 폐기물의 발생부터 수집, 이송, 선별, 폐기물 처리 및 최종 제품 제조까지를 포함한다. 독일 Prognos 산정방법에서는 폐기물 발생부터 수집, 선별 및 처리를 통한 2차 원료 제조까지를 포함한다. 이에 비해 덴마크 Christensen's 산정방법에서는 간접 downstream 값의 범위를 넓게 설정하여 더 높은 온실가스 감축량을 도출하였다. 특히, Christensen's 산정방법에서는 유리병 재활용 과정에서 하소(Calcination) 절약이 간접 downstream에서 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 여기서 하소는 고체를 가열하여 열분해나 상전이를 일으키거나 휘발성 성분을 제거하는 열처리 과정을 의미하며, Christensen's 산정방법에서는 하소 절약으로 200 kg CO<sub>2</sub>eq/ton의 감축을 가정하였다. 앞서 세 가지 온실가스 산정방법론을 분석한 결과, 미국 WARM 모델이 유리 폐기물의 발생부터 최종 제품 제조까지의 모든 단계를 포괄적으로 포함하고, 다양한 단계에서의 온실가스 감축을 효과적으로 평가할 수 있는 시스템 경계의 제공이 가능하므로 국내 온실가스 감축량 산정에 있어 WARM 모델이 보다 적합할 것으로 판단된다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 유리병의 발생부터 재활용까지의 물질흐름분석을 수행하였다. 또한, 미국 EPA WARM 모델 및 유리병 온실가스 감축 계수와 국내 재활용 실적 등을 참고하여 유리병 재활용에 따른 온실가스 감축량을 산정하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다. 첫째, 국내 2022년 유리병 물질흐름분석 결과, 국내 제조와 수입으로 생활계 유리병 약 512 천톤이 폐유리로 발생하였다. 자가처리를 제외한 공공처리, 위탁처리 등의 적정한 처리과정을 거쳐 299.8 천톤을 재활용되었고, 비생활계 유리병 약 22.9 천톤이 재활용된다고

가정하였다. 최종 약 322.7 천톤의 유리병이 백색, 녹색, 갈색병으로 재활용 되었다. 국내 유리병 재활용 실적은 EU와 비교시 다소 낮은 수치를 보였으며, 유리병 재활용률을 높이기 위한 정부 정책 개선 등이 필요하다. 둘째, 미국 WARM 모델을 이용한 온실가스 감축량 산정 결과, 2005년 및 2007년에 약 90 천톤 CO<sub>2</sub>eq 감축을 제외하고 2003년부터 2022까지 약 76.5 천톤 CO<sub>2</sub>eq 전후를 유지하고 있다. 또한, 독일 Prognos 산정방법에 따른 온실가스 감축량은 약 55.1 천톤 CO<sub>2</sub>eq/yr, 덴마크 Christensen's 산정방법 적용 시 141 천톤 CO<sub>2</sub>eq/yr의 온실가스량이 감축되는 결과를 도출하였다. 이 같은 차이는, 시스템 경계 조건의 차이로 이런 결과가 나타났다.

본 연구의 한계점으로는 유리병 재활용과 재사용에 대한 차이와 구체적인 흐름도 규명이 존재하였다. 물질흐름도 작성 시 국내 유리병 중 재활용 병을 대상으로 수행하였으며, 향후 재사용 병을 포함하여 전체적인 유리병의 재활용 및 재사용 물질흐름도 규명이 필요하다. 또한, 국외 유리병 재활용에 따른 온실가스 감축 계수를 활용한 연구 결과의 불확실성이 존재한다. 따라서 유리병 재활용에 따른 온실가스 감축 잠재량 산정 시 국내 재활용 공정과 여건을 활용한 온실가스 감축 계수 개발이 향후 필요하다. 만약, 국내에서 개발된 유리병 재활용 감축 계수 활용 시 결과의 신뢰도 향상과 함께 국외 배출계수와 비교 분석이 가능하다. 향후 연구에서는 이러한 한계점 해결을 위해 우선, 재사용 유리병의 회수 및 처리공정을 통합 관리하고, 관련 데이터를 체계적으로 수집하여 유리병 재사용의 물질흐름도 규명이 필요하다. 또한, 국내 유리병 재활용에 따른 온실가스 감축 계수의 신뢰도 제고를 위해 국내 유리병의 원자재 생산부터 폐기까지의 모든 과정에서 생성되는 전과정목록(life cycle inventory) 기반 전과정평가(Life Cycle Assessments) 수행이 필요하다. 본 연구의 결과는 향후 유리병 순환경제 구축을 통한 탄소중립 정책 기초 자료로 활용이 가능하다.

#### 사사

This study is supported by Chungnam National University.

## References

- Close the Glass Loop. 2023. The performance of packaging glass recycling in Europe: Insights from a Close the Glass Loop survey. [Internet] Available from: <https://closetheglassloop.eu/the-performance-of-packaging-glass-recycling-in-europe/>
- Eurostat Data Browser. [Internet] Available from: [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei\\_wm020/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_wm020/default/table?lang=en)
- Glass Bottles Market by Appearance (Colored, Colorless), Grade (Type I, Type II, Type III), Nature, Capacity, Neck Finish, End-Use – Global Forecast 2024-2030. [Internet] Available from: <https://www.giiresearch.com/report/ires146520-4-glass-bottles-market-by-appearance-colored.html>
- Japan Glass Bottle 3R Promotion Council. 2015. 2017 Survey Results Report by Japanese Local Governments. National Institute for Environmental Studies.
- Korea Resource Circulation Service Agency (KORA). 2022. Recycling Obligation Fulfillment Performance.
- Korea Environmental Corporation. 2023. 2022 Recycling Performance of Financial Business Operators.
- Korea Ministry of Environment. 2023. 2022 National Waste Generation and Treatment Status.
- Korea Packaging Recycling Cooperative. 2015. Domestic and International Glass Bottle Recycling Systems.
- Korea Packaging Recycling Cooperative. 2018. Understanding and Practice of the EPR System.
- Larsen AW, Merrild H, Christensen, TH. 2009. Recycling of glass: accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Journal for a Sustainable Circular Economy*, 27(8): 657-666.
- National Institute for Environmental Studies (NIES). 2015. Resource recycling law system and 3R trends in Japan. Report No. NIER-GP2015-295.
- Prognos. 2008. Resource savings and CO<sub>2</sub> reduction potential in waste management in Europe and the possible contribution to the CO<sub>2</sub> reduction target in 2020.
- Resource Recycling Information System. Resource Recycling Information System. [Internet] Available from: <https://www.recycling-info.or.kr/rrs/main.do>
- Study on greenhouse gas reduction due to waste recycling in Cheongju City. 2020. In Proceedings of the 2020 Spring Conference of the Korea Society of Waste Management (pp. 269, 3-14). [Korean Literature]
- U.S. Environmental Protection Agency. 2015. Documentation for Greenhouse Gas Emission and Energy Factor Used in the Waste Reduction Model (WARM). U.S. EPA.
- U.S. Environmental Protection Agency. 2020. Advancing sustainable materials management: 2018 tables and figures: Assessing trends in materials generation and management in the United States. U.S. EPA.
- Westbroek CD, Bitting J, Craglia M, Azevedo JC, Cullen, JM. 2021. Global material flow analysis of glass: From raw materials to end of life. *Journal of Industrial Ecology*, 25(2): 333-343. <https://doi.org/10.1111/jiec.13052>