

일회용 마스크의 물질흐름분석과 전과정평가 연구

이호원, 장용철*, 이청희, 송하균, 최경훈

충남대학교 환경공학과

Material Flow Analysis and Life Cycle Assessment Study of Single-Use Face Masks

Howon Lee, Yong-Chul Jang*, Chonghee Lee, Hakyun Song, Kyunghoon Choi

Department of Environmental Engineering, Chungnam National University, Korea

ABSTRACT

This study was conducted to assess the potential environmental impacts of single-use face masks in South Korea during COVID-19 pandemic. In 2021, about 35,382 tons of medical waste was generated in Korea due to the COVID-19 pandemic, an increase of about 21 times compared to about 1,647 tons during the 2015 MERS outbreak. In particular, the mandatory wearing of masks resulted in a significant increase in the usage of single-use face masks, with approximately 378.9 billion masks produced in 2020, representing an increase of about 30 times compared to 2019. This study analyzed the material flows of single-use face masks in South Korea in 2018, 2020, and 2022. We also conducted Life Cycle Assessment (LCA) of the masks in 2020 to determine potential environmental impacts. The functional unit was set to 6.7 billion single-use face masks per year worn by South Koreans with a KF-94 rating that blocks at least 94% of particles averaging 0.4 μm in size, and the reference flow was set to 6.7 billion KF-94 single-use face masks. The material flow study indicated that the annual consumption of disposable face masks was approximately 12,194 tons in 2018, 31,423 tons in 2020, and 18,291 tons in 2022. The LCA results revealed that the global warming impact of disposable face masks in South Korea in 2020 amounted to a total of 128,000 tons CO₂eq, with 88.8% from the manufacturing stage, 5.3% from the transportation stage, and 5.9% from the disposal stage. The global warming potential environmental impact by unit process was found to be the highest in the nonwoven fabric manufacturing process of polypropylene at about 50%. The results can be used for developing relevant policies and proper management strategies to reduce the impacts associated with face masks by life cycle.

Key words: life cycle assessment, material flow analysis, single-use face mask, COVID-19, environmental impacts

요약

본 연구는 COVID-19 팬데믹에 따른 국내 일회용 마스크의 환경영향을 평가하고자 수행되었다. 2021년 COVID-19 팬데믹으로 인해 국내에서 발생한 격리료폐기물은 약 35,382톤으로, 2015년 메르스 발생 시기의 약 1,647톤 대비 약 21배 증가하였다. 특히, 마스크 착용이 의무화되면서 일회용 마스크의 사용량이 급증하였으며, 이는 2019년 대비 2020년 약 30배 증가한 약 3,789억 개의 마스크가 생산되었음을 나타낸다. 본 연구는 COVID-19 이전(2018년), COVID-19 기간(2020년, 2022년)을 기준으로 국내 일회용 마스크의 물질흐름을 분석하고, 2020년을 기준으로 일회용 마스크의 전과정평가를 수행하였다. 기능단위는 대한민국 국민이 연간 67억 개의 평균 0.4 μm 크기의 미세입자를 94% 이상 차단하는 KF-94 등급의 일회용 마스크를 착용한다고 설정하였으며, 기준흐름은 67억 개의 KF-94 일회용 마스크로 설정하였다. 물질흐름분석 결과, 일회

Date Received: Jul. 8, 2024, Date Revised: Aug. 20, 2024, Date Accepted: Aug. 23, 2024

* Corresponding author: Yong-Chul Jang, Tel: +82-42-821-6674, E-mail: gogator@cnu.ac.kr

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

용 마스크 연간 소비량은 2018년 약 12,194톤, 2020년 약 31,423톤, 2022년 약 18,291톤으로 나타났다. 전과정평가 결과, 2020년 국내 일회용 마스크로 인한 지구온난화 영향은 약 128,000 ton CO₂eq로, 제조단계에서 약 88.8%, 운송단계에서 약 5.3%, 폐기단계에서 약 5.9%의 비율을 차지하였다. 단위공정별 지구온난화 환경영향은 폴리프로필렌 성분의 부직포 제조 공정에서 약 50%로 가장 높게 나타났음을 확인하였다. 본 연구는 일회용 마스크 전과정의 환경영향 감소를 위한 정책 및 관리 전략 수립에 기초자료로 활용될 수 있다.

주제어: 전과정평가, 물질흐름분석, 일회용 마스크, 코로나 19, 환경영향

1. 서론

2020년 3월 세계보건기구(WHO)는 COVID-19 확산 현상에 대해 전 세계적 대유행을 뜻하는 팬데믹(Pandemic)을 선언했다. COVID-19 팬데믹으로 인해 감염된 환자와 환자 치료와 관리 의료진과 관련 시설로부터 발생하는 의료폐기물이 증가하였다. 2021년 기준 국내에서 발생한 의료폐기물은 약 215,792톤으로 나타났으며, 이중 약 35,382톤은 격리의료폐기물로 나타났다. 이는 COVID-19 발생 이전의 2015년에 유행한 메르스 관련 격리의료폐기물의 양(약 1,647톤) 대비 약 21배에 해당한다[1]. 특히 COVID-19 감염 예방을 위해 국내를 비롯한 전 세계 대부분 국가에서 마스크 착용을 의무화하면서 일회용 마스크의 수요량이 급증했다. 최근 통계는 COVID-19가 확산되기 시작한 2020년 기준 전 세계 일회용 마스크 생산량은 약 3,789억 개로 2019년 생산량(약 125억 개) 대비 약 30배 이상 급증하였다[2]. Benson et al.[3]의 연구에 의하면, COVID-19 팬데믹으로 인해 전 세계적으로 마스크, 장갑 등의 일회용 개인보호장비 관련 의료폐기물이 하루 약 1.6백만 톤이 배출됐으며, 일회용 페마스크의 경우 하루 약 33.6억 개가 발생했다고 보고했다.

Lee et al.[4]에 따르면, 국내 일회용 마스크는 의료기관 종사자, 환자가 사용 후 의료폐기물로 배출하거나 일반 시민들이 개인 위생용품으로 사용 후 생활폐기물 형태로 배출되었다. 일회용 마스크는 크게 3가지(필터, 코편 지지대, 귀고리) 부분으로 구성된다. 이 중에서 일회용 마스크의 필터는 주로 폴리프로필렌(PP, polypropylene) 재질의 스펀 본드 부직포(spun-bonded fabric)로 제작된다[5]. 마스크의 주요 부분인 필터를 구성하는 폴리프로필렌은 플라스틱 재료로 탄소배출계수는 약 1.47 kg CO₂ eq/kg이며[6], 일회용 마스크의 생산 및 폐기에 따른 온실가스 배출 및 미세플라스틱 발생 등의 환경오염 문제를 유발할 수 있다.

국내의 경우, 국토 면적이 좁아 토지의 효율적인 이용 측면에서 폐기물의 매립보다 소각 처리를 더 선호하고 있다. 2030년 폐기물의 직매립 금지 시행을 앞두고 있어, 매립처리는 계

속 줄어들고, 소각 처리 비율은 더욱 증가할 것으로 예상된다. 특히 일회용 페마스크가 종량제 봉투 폐기물로 배출 시 생활 폐기물은 주로 소각 처리되기 때문에 안전 처리의 장점이 있지만, 소각 과정에서 대기로 온실가스를 발생시킨다.

COVID-19 팬데믹의 영향으로 다량 발생된 페마스크의 처리와 그에 따른 환경영향에 대한 선행연구가 제한적으로 수행되었다. Straten et al.[7]는 전과정평가를 통해 일회용 마스크를 1회 사용했을 때보다 이를 증기멸균 후 5회 이상 재사용할 때, 경제적인 것 뿐 아니라 기후변화 환경영향이 적음을 보고하였다. Rodriguez et al.[8]은 팬데믹 기간의 일회용 마스크가 환경에 미치는 부정적인 영향을 줄이기 위한 목적으로 새로운 일회용 마스크 제품 개발자에게 도움이 되는 친환경설계행동 가이드(eco-design actions guide)를 개발하기 일회용 마스크 종류별로 전과정평가를 수행한 바 있다. Ajaj et al.[9]의 연구에 따르면 일회용 페마스크의 유해한 영향에 대한 인식을 높이고, 정책 입안자의 지속가능성을 위한 결정에 도움을 줄 수 있는 효과적인 관리 전략을 고안하기 위해 일회용 마스크에 전과정평가 방법을 적용하였다. Turkmen[5]의 연구는 전과정평가를 활용하여 일회용 의료용 마스크 1개에 대한 제조에서 폐기 단계까지의 환경영향을 산정하였다. 연구결과에 따르면, 일회용 의료용 마스크 1개에 대한 지구온난화 영향은 약 0.021 kg CO₂ eq로 나타났으며, 전체 단계 중, 원자재 공급 단계에서의 환경영향이 약 40.5%로 가장 높았다. Lee et al.[10]의 연구에 따르면 일회용 수술용 마스크 1개에 대한 기후변화 영향은 약 0.58 kg CO₂ eq로 나타났으며, 전체 공정 중, 스펀 본드 PP 부직포 생산 과정에서 환경영향이 전체의 약 40%로 가장 높게 나타났다. 반면, 해외 선행연구와는 달리 국내에서는 일회용 마스크의 전과정평가에 대한 연구가 거의 전무한 실정이다. 또한, 감염병 예방 및 위생 문제 해결을 위해 일회용 페마스크의 적절한 처리 방안 및 대책 등이 최근 사회적 관심으로 주목받고 있다[11]. COVID-19뿐만 아니라, 다양한 감염병 발생의 반복이 전망되므로, 향후 발생할 팬데믹의 영향으로 인한 탄소배출량 부하를 감소하기 위해 국내 일회용 마스크의 전과정평가 연구가 필요하다.

본 연구의 목적은 COVID-19 이전(2018년)과 COVID-19 기간(2020, 2022년)의 국내 일회용 마스크 물질흐름분석을 수행하였고, 국내 일회용 마스크의 전과정평가 수행을 통해 잠재적 환경영향을 산정하였다. 본 연구의 결과는 국내 일회용 마스크의 잠재적 환경영향 저감과 대책을 위한 기초자료로 활용 가능하다.

2. 연구 방법

2.1. 일회용 마스크의 기초 통계 자료 수집

본 연구에서는 COVID-19 이전과 팬데믹 기간 중 국내 일회용 마스크의 생산량, 폐기량, 물질 흐름 파악을 위해 국내외 일회용 마스크 관련 논문의 데이터, 국내 산업 통계, 폐기물 관련 통계 자료를 활용하였다. 시간적 범위로는 2018, 2020, 2022년 3개년의 통계 자료를 확보하였다. 국내 일회용 마스크의 생산량을 산정하기 위해서 ‘식품의약품안전처’ 및 ‘한국바이오의약품협회’에서 공개한 보도 자료[12,13]를 참고하였다. 일회용 마스크 폐기물의 처리 비율 산정을 위해 환경부에서 매년 발간되는 ‘전국 폐기물 발생 및 처리 현황’[14]을 참고하였다. 전과정평가를 위한 국내 일회용 마스크의 구성 부분과 구성 부분별 중량은 Lee et al.[4]의 연구 자료를 활용하였으며, 일회용 마스크 제조공정 인벤토리 데이터는 Turkmen [5]의 연구 데이터를 활용하여 산정하였다. Table 1에 국내 일회용 마스크의 물질흐름분석과 전과정평가 수행을 위해 활용된 기초자료와 논문, 통계 자료 등을 요약하여 나타내었다.

2.2. 일회용 마스크 물질흐름분석 방법

일회용 마스크의 물질흐름분석은 국내 기준으로 COVID-

19 이전(2018년)과 COVID-19 기간(2020, 2022년)를 대상으로 수행하였다. 일회용 마스크의 소비량은 ‘식품의약품안전처’ 및 ‘한국바이오의약품협회’의 보도자료를 포함한 국내 통계 자료를 활용하여 각 연도에 대한 일회용 마스크의 연간 매출액을 당시 마스크 1개의 가격으로 나누어 산정하였으며, COVID-19 기간인 2020년의 일회용 마스크 소비량은 Lee et al.[4]의 연구를 참고하여 반영하였다. 각 연도별 일회용 마스크의 폐기물 처리 비율은 환경부의 ‘전국 폐기물 발생 및 처리 현황(2018, 2020, 2022년)’ 처리 비율 통계자료를 활용하여 산정하였다[14]. 본 연구에서는 생산 및 폐기 단계에 대해 Sankey 다이어그램을 활용하여 물질흐름분석을 요약 제시하였다.

2.3. 일회용 마스크의 전과정평가 방법

본 연구에서는 일회용 마스크가 환경에 미치는 영향을 정량화하기 위해 전과정평가(LCA, Life Cycle Assessment) 방법을 활용하였다. 전과정평가는 KS I ISO 14040 및 KS I ISO 14044, 평가하고자 하는 영향범주 중, 탄소배출량과 관련된 지구온난화 범주를 중점적으로 보고자 KS I ISO 14067의 국제표준에 따라 수행되었다. 전과정평가에 관한 본 연구의 목적, 기능단위, 시스템경계, 영향평가 방법론은 목적 및 범위 정의 단계에서 가정하였다[16].

2.3.1. 목적 및 범위 정의

본 연구의 목적은 국내 기준 COVID-19 기간 일회용 마스크의 전과정 단계별 잠재적 환경영향을 평가하여 기여 요인과 환경부하 단계를 파악하는 것이다. 전과정평가를 위한 일회용

Table 1. Data source and acquisition related to single-use face masks life cycle in this study

Life cycle	Contents	References
Production and consumption	Monthly single-use face masks production	· Ministry of Food and Drug Safety, 2018, 2022 [12] · Korea Biomedicine Industry Association, 2018 [13]
	Process of single-use face masks textile	Turkmen, 2021 [5]
	Estimated single-use face masks discarded by country	Benson et al., 2021 [3]
Disposal	Incineration of polypropylene	Korea Environmental Industry and Technology Institute: Environmental report label, 2019 [6]
	Status of waste single-use masks in COVID-19	Lee et al., 2020 [4]
	Status of waste generation and disposal	· Korea Ministry of Environment: Status of waste generation and disposal, 2018, 2020, 2022 [14] · Ministry of Economy and Finance: Waste Resources Management and Utilization Policies of Korea, 2016 [15]

마스크는 국내 KF-94 일회용 마스크 제품을 대상으로 하였다. KF-94 일회용 마스크의 기능은 평균 0.4 μm 크기의 미세입자를 94% 이상 차단하는 것이다. 기능단위는 대한민국 국민이 연간 67억 개의 평균 0.4 μm 크기의 미세입자를 94% 이상 차단하는 KF-94 등급의 일회용 마스크를 착용한다고 설정하였다. 기준흐름은 67억 개의 KF-94 일회용 마스크로 설정하였다. LCA 소프트웨어는 SimaPro v.9.4.0.2를 활용하여 수행하였고, 데이터베이스로는 Ecoinvent 3.8을 활용하였다. 일회용 마스크 전과정평가 방법론으로 IMPACT 2002+를 활용하여 중간점 수준에서 지구온난화를 포함한 15개의 환경영향범주를 평가하였다. 전과정평가 방법론으로 IMPACT 2002+를 선택한 이유는 실제 적용 사례가 많고, 환경영향을 정량화하기 위한 데이터베이스가 잘 구축되어 있어 현실적인 분석이 가능하기 때문이다. 시스템경계는 일회용 마스크의 제조, 유통, 사용, 폐기단계를 포함한 ‘Cradle to Grave’의 범위로 설정하였고, 이 중, 일회용 마스크의 포장단계는 정확한 데이터 수집이 어렵고, 일회용 마스크 제품마다 포장재가 상이하므로 제외하여 산정하였다(Fig. 1). 시간적 범위는 2020년 기준을 대상으로 수행하였다.

2.3.2. 전과정 목록분석

2.3.2.1. 제조단계 데이터 수집

KF-94 일회용 마스크는 필터(filter), 귀고리(ear straps), 코편 지지대(nose guard) 3부분으로 이루어진다[4,5]. 일회용 마스크 제조에 관한 국내 데이터는 공개된 자료를 찾기가 어려운 관계로 국외 선행 연구 데이터를 참고하여[5], 일회용 마스크의 필터는 폴리프로필렌 스펀 본드 부직포로 생산된다고 가

정하였다. Ear straps 생산을 위한 원료로 폴리우레탄(PUR, Polyurethane), Nose guard 생산을 위한 원료로 알루미늄이 사용된다고 가정하였다. Table 2에 KF-94 일회용 마스크의 전과정평가를 위한 일회용 마스크 1개 기준(단, 기준흐름은 67억 개)의 인벤토리 데이터를 나타내었다.

2.3.2.2. 운송단계 데이터 수집

일회용 마스크 운송수단 및 거리는 국내 상황에 적절한 규격으로 상업용 1톤 규모 트럭의 데이터로 가정하였다. 일회용 마스크의 각 부품에 대한 원료 공급은 모두 인천광역시에서 이루어지며, 일회용 마스크 제조 및 생산 공장은 경기권, 일회용 마스크 판매처는 대전에 위치한다고 가정하였다. 본 연구에서 일회용 마스크 운송단계는 원료 공급처에서 제조공장, 제조공장에서 판매처까지 2가지 유통 방법을 고려하였다. 따라서 원료 공급처인 인천으로부터 경기권의 제조공장까지의 운송거리를 고려하여 약 50 km로 가정하였다. 경기권의 제조공장에서 대전에 위치한 판매처까지의 운송거리를 고려하여 약 200 km로 가정하였다. Table 2의 일회용 마스크 제조단계에서의 인벤토리 데이터 분석을 활용하여 마스크 1개당 약 4.68 g의 중량으로 설정 후(기준흐름 67억 개), 2가지의 유통 방법에 대한 운송단위는 kgkm로 계산하였다.

2.3.2.3. 폐기단계 데이터 수집

의료폐기물로 배출되는 일회용 마스크를 제외한 생활폐기물로서 배출되는 일회용 마스크의 양은 2020년 국내 기준 약 62억 개로 나타났다[4]. 생활폐기물로 배출되는 일회용 마스크 62억 개 중, 약 38억 개는 종량제 봉투로 배출되어 소각

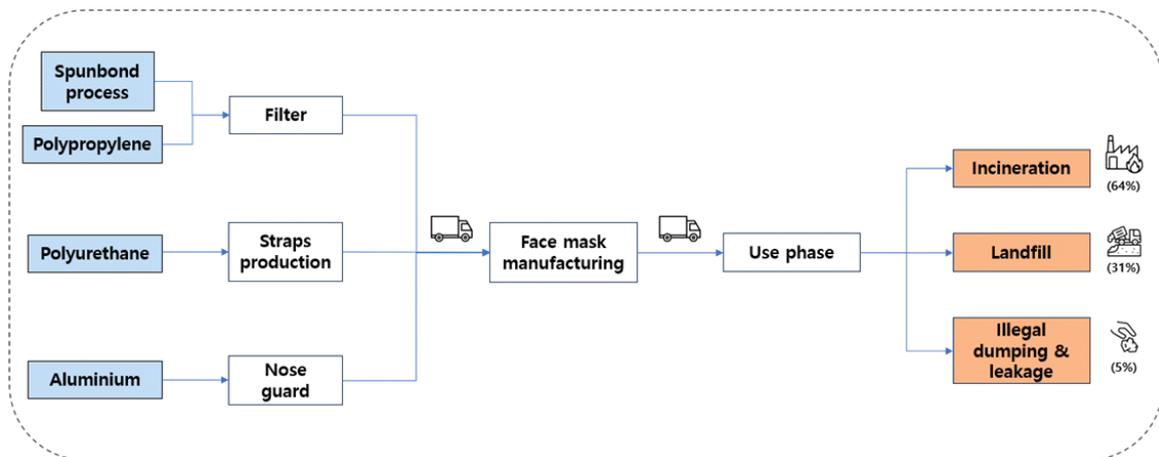


Fig. 1. System boundary of single-use face masks life cycle assessment.

Table 2. The inventory data for the life cycle assessment of KF-94 single-use face mask based on the reference flow

Stage	Category	Amount	Data
Manu- facturing	Filter	3.85 g	Textile, non-woven polypropylene {RoW} textile production, non woven polypropylene, spun bond cut-off, S [5]
	Ear straps	0.39 g	Polyurethane, flexible foam {RoW} market for polyurethane, flexible foam cut-off, S [5]
	Nose guard	0.44 g	Aluminum, wrought alloy {GLO} market for Cut-off, S [5]
Trans- portation	Transportation from raw material supplier to manufacturing factory	0.234 kgkm	Transport, light commercial truck, diesel powered/tkm/RNA
	Transportation from manufacturing factory to market	0.936 kgkm	Transport, light commercial truck, diesel powered/tkm/RNA
Disposal	Incineration	64%	Municipal solid waste (waste scenario) {KR} treatment of municipal solid waste, incineration cut-off, S
	Landfill	31%	Municipal solid waste (waste scenario) {RoW} treatment of municipal solid waste, landfill cut-off, S
	Environmental degradation	5%	Municipal solid waste (waste scenario) {GLO} treatment of municipal solid waste, open dump, wet infiltration class (500 mm) cut-off, S

처리된다. 나머지 중 약 21억 개의 일회용 마스크는 매립 처리된다고 추정하였다. 나머지 약 3억 개의 일회용 마스크 폐기물은 불법 투기 등으로 인한 환경 유출로 가정하였다. 본 연구는 일회용 마스크 폐기물을 처리 방법에 따라 크게 소각, 매립, 환경 유실로 구분하여 폐기단계를 고려하였다. 일회용 마스크 폐기단계 중, 소각은 의료폐기물 및 생활폐기물로 소각 처리되는 양을 합산한 결과, 약 38억 개로 전체의 약 64%로 나타났다[4]. 매립은 생활폐기물 중, 매립 처리되는 양 약 21억 개로 전체의 약 31%로 나타났다. 나머지 환경 유출되는 양인 약 3억 개의 일회용 마스크 폐기물은 전체의 약 5%로 나타났다.

2.3.3. 민감도 분석

폐기물 직매립 정책 추진에 따라 국내 생활폐기물의 매립 처리 비율은 감소하는 반면, 소각 비율은 점차 증가하는 추세이다[17]. 이에 따라 2020년 국내 기준으로 기존 소각 처리 비율인 64%를 70%, 기존 매립 처리 비율인 31%를 25%로 감소시켜 민감도 분석을 실행하였다. 민감도 분석의 목적은 전과정 목록분석과 영향평가 단계에서 수행한 분석 결과의 민감도 불확실성을 평가하기 위함이다. 민감도 분석을 통해 규명된 주요 인자를 포함한 전과정평가 결과의 신뢰 수준을 산정할 수 있다. 일반적으로 입력변수의 변화에 따른 결과값의 민감성을 파악하여 결과의 신뢰도를 높일 수 있다[18].

3. 연구 결과 및 토의

3.1. 국내 일회용 마스크 물질흐름분석 결과

COVID-19 이전인 2018년 국내 기준 일회용 마스크 연간 소비량은 약 26억 개로 산정되었다. 그 중, 생활계 흐름을 통해 배출되는 일회용 마스크의 양은 약 24억 개로 나타났으며, 의료폐기물로 처리되는 양은 약 2억 개로 나타났다. 소각 처리되는 일회용 마스크의 양은 의료폐기물 약 2억 개와 생활폐기물 중 약 16억 개를 합친 약 18억 개로 나타났으며, 매립 처리되는 양은 생활폐기물 중 약 7억 개로 나타났다. 나머지 약 1억 개의 일회용 마스크는 무단 투기 등으로 인한 환경유출로 가정하여 산정하였다.

COVID-19 기간인 2020년 국내 기준 일회용 마스크 연간 소비량은 약 67억 개로 산정되었다. 2020년 일회용 마스크 연간 소비량은 2018년 일회용 마스크 연간 소비량인 약 26억 개 대비 약 2.5배 증가하였다. 생활계 흐름을 통해 배출되는 일회용 마스크의 양은 약 62억 개, 의료폐기물로 처리되는 양은 약 5억 개로 나타났다. 소각 처리되는 일회용 마스크의 양은 의료폐기물 약 5억 개와 생활폐기물 중 약 38억 개를 합친 약 43억 개로 나타났으며, 매립 처리되는 양은 생활폐기물 중 21억 개로 나타났다. 나머지 약 3억 개의 일회용 마스크는 환경유출로 나타났으며, 이는 전체 일회용 마스크 폐기량 중 약 5%를

차지하는 것으로 나타났다.

COVID-19 기간 중 2022년 기준 국내 기준 일회용 마스크 연간 소비량은 약 39억 개로 산정되었다. 2022년 일회용 마스크 연간 소비량은 COVID-19 시작 기간이었던 2020년 일회용 마스크 연간 소비량 대비 약 28억 개 감소하였으나, COVID-19 이전인 2018년 일회용 마스크 연간 소비량보다 약 13억 개 증가한 수준이었던 것으로 나타났다. 생활계 흐름을 통해 배출되는 일회용 마스크의 양은 약 36억 개로 나타났으며, 의료폐기물로 처리되는 양은 약 3억 개로 나타났다. 소각 처리되는 일회용 마스크의 양은 의료폐기물 약 3억 개와 생활폐기물 중, 약 22억 개를 합친 약 25억 개로 나타났으며, 매립 처리되는 양은 생활폐기물 중, 약 12억 개로 나타났다. 환경유출되는 일회용 마스크의 양은 약 2억 개로 전체 폐기되는 양 중 약 5%를 차지하는 것으로 나타났다.

일회용 마스크의 1개당 중량이 약 4.68 g이라고 가정할 때 [4], 연간 소비량은 중량 기준 2018년에 약 12,194톤, 2020년에 약 31,423톤, 2022년에 약 18,291톤으로 나타났다. 2018, 2020년과 2022년 국내 기준 일회용 마스크의 물질흐름도를 Fig. 2에 나타내었다.

COVID-19 이전과 기간 중 국내 일회용 마스크 물질흐름분석을 통해 기간별 일회용 마스크 처리 비율은 소각 약 64-69%, 매립 약 26-31%, 환경유출 약 5%로 나타났다. 또한, COVID-19 기간 2022년의 일회용 마스크 연간 소비량은 약 18,291톤으로 2020년 기준 연간 소비량 약 31,423톤 대비 약 40% 감소한 것으로 나타났다. 그러나 이는 COVID-19 이전인 2018년도의 일회용 마스크 연간 소비량인 약 12,194톤에

비해 약 1.5배 증가한 수치다. 이러한 결과는 COVID-19의 영향이 어느 정도 완화된 시점에도 불구하고, 시민들이 여전히 COVID-19에 대한 우려로 인해 일회용 마스크 사용은 지속되고 있음을 시사한다.

3.2. 국내 일회용 마스크의 환경영향 결과

본 연구에서는 2020년 기준 국내의 일회용 마스크 전과정 평가를 수행결과, 지구온난화 영향범주를 포함한 15개의 환경영향범주의 잠재적 환경영향의 결과를 Table 3에 나타내었다. 67억 개의 일회용 마스크의 전과정평가 결과, 15개의 환경영향범주 중, 지구온난화 영향범주에서 잠재적 환경영향은 총 128,000 ton CO₂eq로 나타났다. 이 중, 제조단계에서 약 113,000 ton CO₂eq, 운송단계에서 약 6,800 ton CO₂eq, 폐기단계에서 약 7,500 ton CO₂eq로 나타났다. 최근 연구에서는 2020년 전 세계에서 생산된 총 520억 개의 일회용 마스크의 지구온난화 영향범주 산정 결과, 약 1.1백만 ton CO₂eq로 나타났다[5]. 이는 국내 연간 소비량인 67억 개의 일회용 마스크로 인한 128,000 ton CO₂eq와 비교했을 때, 약 8.6배에 해당한다. 총 생산된 일회용 마스크 개수가 약 7.7배 차이 난다는 점을 고려할 때, 이 결과는 대체로 유사한 범위를 나타낸다고 볼 수 있다. 지구온난화 환경영향의 결과값이 약간 더 큰 이유는 대상으로 설정한 일회용 마스크의 중량 차이 때문으로 판단된다.

2020년 국내 기준 일회용 마스크 단계별 환경영향 기여도는 지구온난화를 포함한 15개의 모든 영향범주에서 제조단계가 전과정 단계에서 약 64-99% 범위의 가장 높은 비율을 차

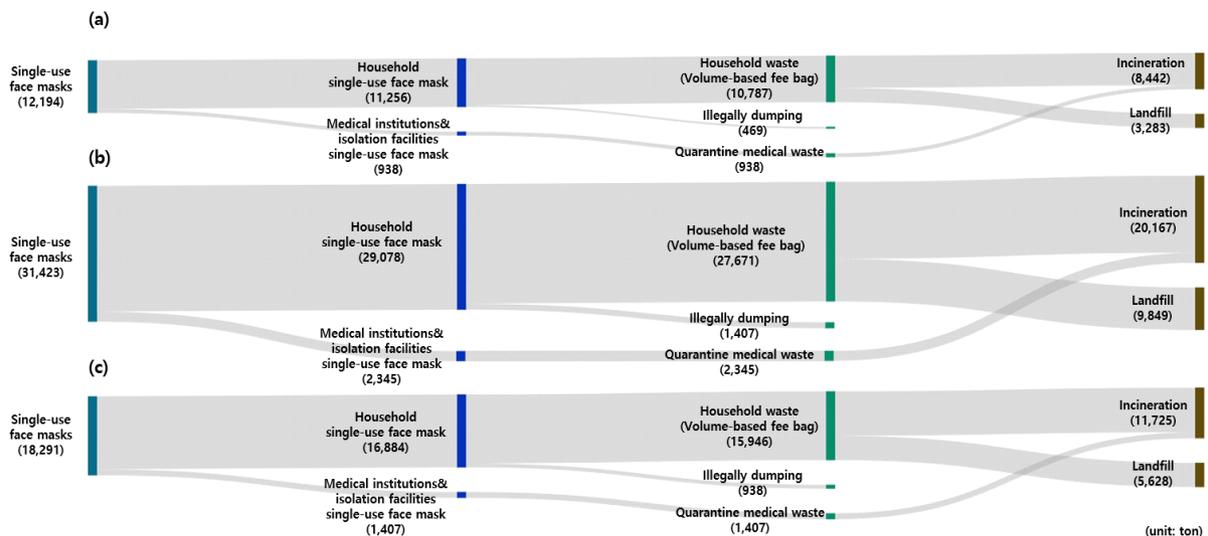


Fig. 2. Material flows of single-use face masks (a) 2018, (b) 2020, (c) 2022.

Table 3. Environmental impacts of single-use face masks by LCA

Impact category	Unit	Total	Production	Transport	Disposal
Carcinogens	kgC ₂ H ₃ Cl _{eq}	6.09E+06	5.85E+06	2.43E+03	2.38E+05
Non-carcinogens	kgC ₂ H ₃ Cl _{eq}	6.74E+06	5.09E+06	4.89E+05	1.17E+06
Respiratory inorganics	kgPM _{2.5} eq	1.48E+05	1.24E+05	1.68E+04	7.07E+03
Ionizing radiation	BqC-14eq	6.50E+08	6.45E+08	0.00E+00	4.70E+06
Ozone layer depletion	kgCFC-11eq	3.83E+00	3.65E+00	2.86E-04	1.80E-01
Respiratory organics	kgC ₂ H ₄ eq	6.51E+04	5.97E+04	4.49E+03	9.29E+02
Aquatic ecotoxicity	kgTEGwater	2.36E+10	1.52E+10	3.26E+09	5.13E+09
Terrestrial ecotoxicity	kgTEGsoil	3.65E+09	3.63E+09	3.75E+05	2.36E+07
Terrestrial acid	kgSO ₂ eq	2.73E+06	1.89E+06	5.55E+05	2.88E+05
Land occupation	m ² org.arable	1.01E+06	9.71E+05	0.00E+00	3.77E+04
Aquatic acidification	kgSO ₂ eq	6.82E+05	5.63E+05	7.95E+04	3.94E+04
Aquatic eutrophication	kgPO ₄ P-lim	1.48E+04	1.42E+04	5.98E+01	5.03E+02
Global warming	kgCO ₂ eq	1.28E+08	1.13E+08	6.77E+06	7.50E+06
Non-renewable energy	MJ primary	3.09E+09	2.97E+09	1.04E+08	1.39E+07
Mineral extraction	MJ surplus	7.66E+06	7.64E+06	0.00E+00	1.93E+04

지하였다. 지구온난화 영향범주의 경우, 제조단계에서 약 88.8%, 운송단계에서 약 5.3%, 폐기단계에서 약 5.9%의 환경영향 기여도를 보였다. 2020년 국내 기준 일회용 마스크 단계별 잠재적 환경영향 기여도 결과는 Fig. 3에 나타내었다.

2020년 국내 기준 일회용 마스크 환경영향범주 중, 지구온난화 영향범주에 대한 일회용 마스크 단위공정별 환경영향 기여도를 산정한 결과, PP 부직포에 관한 환경영향이 전체 중, 50%로 가장 높게 나타났다. PP 부직포 단위공정 외에 알루미늄

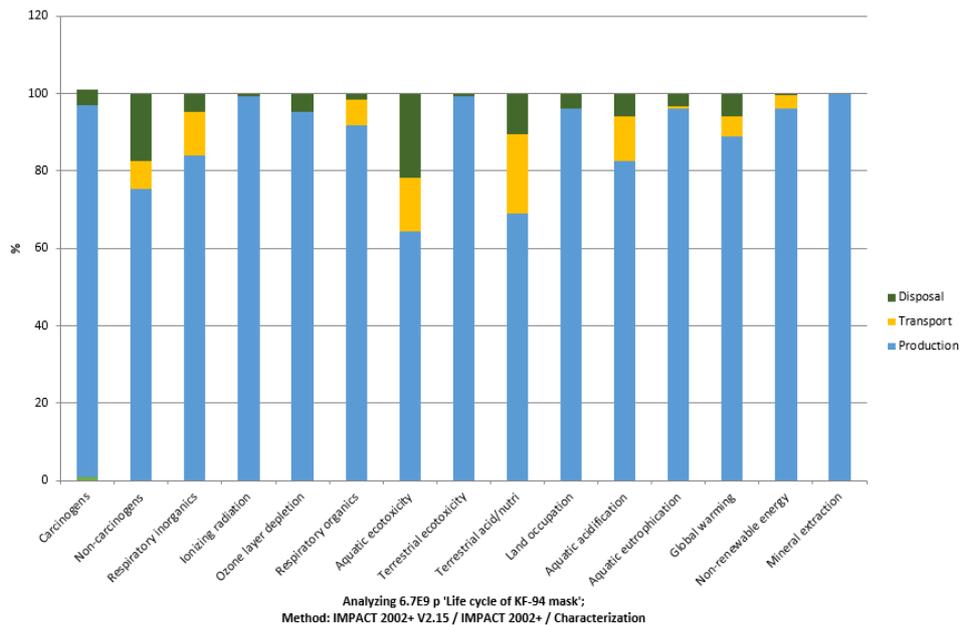


Fig. 3. Environmental impact contribution of single-use face masks by life cycle.

늄 30%, 폴리우레탄(PUR) 9%, 운송 5%, 폴리우레탄 폐기 3%의 순서로 나타났다. 지구온난화 영향범주에 대한 일회용 마스크 단위공정별 환경영향 기여도 결과는 Fig. 4에 제시하였다. 선행연구에서는 일회용 마스크의 환경영향과 재사용 가능한 마스크의 환경영향을 비교하여 수행하였다[19]. 선행 연구에서는 본 연구의 결과와 유사하게 제조단계의 환경적 영향이 전체의 약 60-90%를 차지하는 것으로 나타났으며, 일회용 마스크의 환경영향이 30번 재사용 가능한 마스크의 환경영향 대비 약 5배 높은 것으로 나타났다. 하지만, 선행연구에서는 일회용 마스크의 매립 처리에 대해서만 고려하였기 때문에 본 연구의 결과와 직접적 비교에는 한계점이 존재한다.

3.3. 민감도 분석 결과

일회용 마스크 폐기단계에서 기존의 2020년에 대한 소각 및 매립 비율인 64%, 31%를 각각 소각 70%, 매립 25%의 비율로 변경하여 민감도 분석을 실행하였다. 소각·매립 비율 변경에 대한 일회용 마스크 민감도 분석 결과는 Fig. 5에 나타내었다. 민감도 분석 결과, 15개 모든 환경영향범주에서 잠재적 환경영향의 결과값 변화율이 약 4% 이내로 $\pm 10\%$ 이상의 큰 변화율을 보이지 않았다. 이를 통해 일회용 마스크의 폐기물 처리 비율 변화는 환경영향 결과값에 큰 영향을 미치지 않음

을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구는 국내 일회용 마스크에 대한 COVID-19 이전과 기간 중 물질흐름분석과 전과정평가를 수행하였으며, 아래와 같이 그 결과를 요약할 수 있다.

국내 일회용 마스크 소비량은 2018년 기준 총 약 26억 개, 2020년 기준 총 약 67억 개, 2022년 기준 총 약 39억 개로 산정되었다. 이를 중량으로 환산하면, 2018, 2020, 2022년의 일회용 마스크 연간 소비량은 각각 약 12,194, 31,423, 18,291 톤으로 나타났다. COVID-19 이전인 2018년 국내 일회용 마스크 소각 처리량은 약 18억 개(69%), 매립 처리량은 약 7억 개(26%), 환경유출량은 약 1억 개(5%)로 산정되었다. COVID-19 기간인 2020년 국내 일회용 마스크 소각 처리량은 약 43억 개(64%), 매립 처리량은 약 21억 개(31%), 환경유출량은 약 3억 개(5%)로 나타났다. COVID-19 기간인 2022년 국내 일회용 마스크 소각 처리량은 약 25억 개, 매립 처리량은 약 12억 개, 환경유출량은 약 2억 개(5%)로 나타났으며, 대부분 소각 처리되고 일부는 매립 처리되었다.

COVID-19 기간인 2020년 국내 연간 일회용 마스크의 전

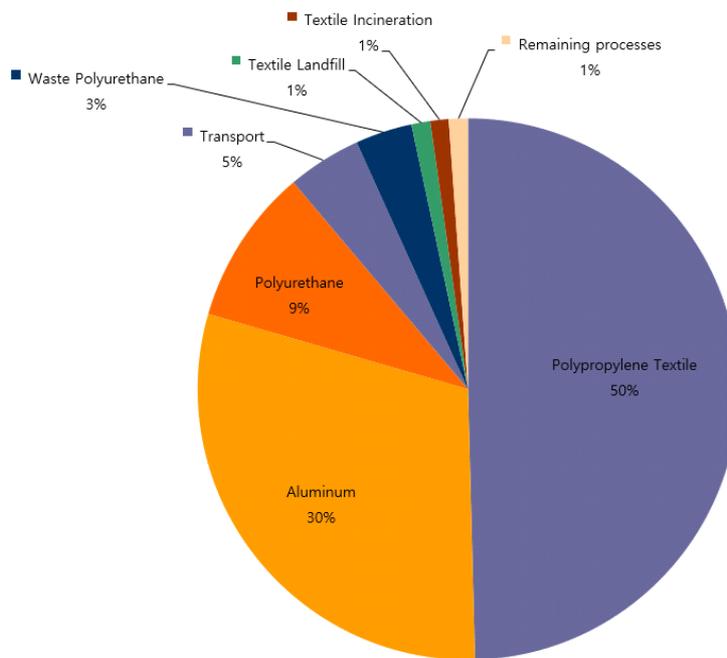


Fig. 4. Environmental impact contributions of unit process of single-use face masks in global warming impact category.

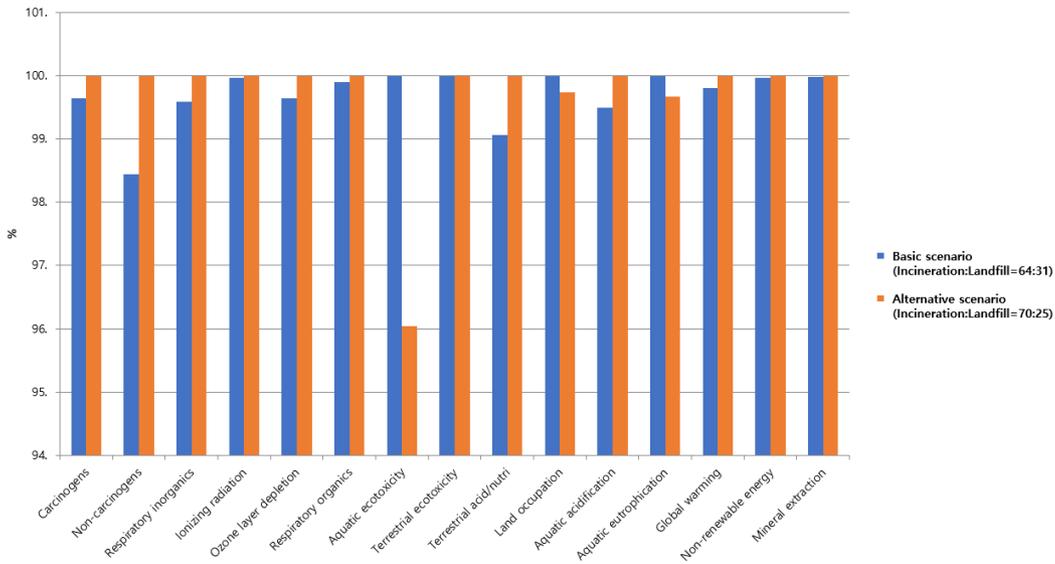


Fig. 5. Sensitivity analysis results of single-use masks with changes of incineration and landfill rates.

과정평가 결과, 지구온난화의 잠재적 환경영향은 약 128,000 ton CO₂eq로 나타났다. 지구온난화 영향범주를 비롯한 총 15 개의 환경영향범주에서 일회용 마스크 제조단계의 환경영향 기여도가 전체의 약 64-99%를 차지하여 가장 크게 나타났다. 일회용 마스크 단위공정 별로 결과를 보았을 때, 폴리프로필렌 부직포 공정에 대한 환경영향이 전체의 50%로 가장 높게 나타났다.

일회용 마스크 소각 처리 비율을 64%에서 70%, 매립 처리 비율을 31%에서 25%로 변화하여 민감도 분석 실행 결과, ±10% 이상의 환경영향 변화는 나타나지 않았다. 그러므로 일회용 마스크 처리 비율에 대한 변화는 연구결과에 미치는 영향이 크지 않음을 알 수 있었다.

본 연구에서는 국내 일회용 마스크 소비량과 처리량 산정을 통해 물질흐름분석을 진행하였고, 전과정에 걸친 잠재적 환경영향을 파악하여 제시하였다. 하지만, 국내 관련 일회용 마스크 제조공정 1차 데이터 수집, 대표성 있는 제조공정과 처리비율 조사 등 연구의 한계점이 존재한다. 특히, 마스크 제조, 폐기 관련 국내 데이터 목록분석과 DB 등 미흡하여 실제 국내 여건을 고려한 전과정평가를 통한 환경적 영향을 파악하기는 어렵다. 또한, 현재의 PP 부직포 단위공정이 지구온난화 영향범주 중 전체 공정의 약 50%에 해당하는 가장 높은 비중을 차지하고 있기 때문에, 향후 부직포 원료를 생분해성 플라스틱 등으로 대체할 경우의 전과정평가 비교 등의 추가 연구가 필요하다고 판단된다. 본 연구의 결과는 향후 COVID-19와 유사한 팬데믹 발생에 대비하여 일회용 마스크 전과정의 각 단

계 중 환경영향이 가장 큰 단계를 개선하기 위한 기초 자료로 활용이 가능하다.

사 사

본 연구는 환경부의 폐자원에너지화 전문인력 양성사업으로 지원되었습니다.

References

1. Cho, M., Jang, Y. Study on the generation and treatment characteristics of quarantine medical waste due to the spread of COVID-19 infectious disease. *Journal of the Korean Society of Waste Management* 40(3), pp. 273-282 (2023).
2. Richter, F. Global mask sales surged 30-fold during the Pandemic [Internet]. Statista. <https://www.statista.com/chart/29100/global-face-mask-sales/> (accessed 21 April 2024).
3. Benson, N., Bassey, D., Palanisami, T. COVID pollution: Impact of COVID-19 pandemic on global plastic waste footprint. *Heliyon* 7(2), p. e06343 (2020).
4. Lee, S., Kim, B., Ji, S., Jang, Y., Lee, Y. Study on the appropriate management measures for disposable masks due to the spread of COVID-19 infectious disease. *Journal of the Korean Society of Waste Management*

- 38(4), pp. 281-293 (2021).
5. Turkmen, B. Life cycle environmental impacts of disposable medical masks. *Environmental Science and Pollution Research* 29, pp. 25496-25506 (2021).
 6. Korea Environmental Industry & Technology Institute. Carbon Emission Coefficients of Environmental Labels (2019).
 7. Straten, B., Ligtelijn, S., Droog, L., Putman, E., Dankelman, J., Weiland, N., Horeman, T. A Life Cycle Assessment of reprocessing face masks during the Covid-19 pandemic. *Scientific Reports* 11, p. 17680 (2021).
 8. Rodriguez, N., Formentini, G., Favi, C., Marconi, M. Engineering design process of face masks based on circularity and life cycle assessment in the constraint of the COVID-19 pandemic. *Sustainability* 13, p. 4948 (2021).
 9. Ajaj, R., Dweik, R., Ali, S., Stietiya, M. Understanding the environmental impacts of facemasks: a review on the facemask industry and existing life cycle assessment studies. *Sustainable Environment Research* 33, p. 20 (2023).
 10. Lee, A., Neo, E., Khoo, Z., Yeo, Z., Tan, Y., Chng, S., Yan, W., Lok, B., Low, J. Life cycle assessment of single-use surgical and embedded filtration layer (EFL) reusable face mask. *Resources, Conservation and Recycling* 170, p. 105580 (2021).
 11. Anti-Corruption & Civil Rights Commission Republic of Korea. Single-use face masks waste disposal plan. National public opinion report (2021).
 12. Ministry of Food and Drug Safety. Mask production etc. supply trends (2018), (2022).
 13. Korea Biomedicine Industry Association. Industry News: 2019 domestic pharmaceutical market size increased by 5.2% compared to the previous year (2020).
 14. Korea Ministry of Environment. 2018, 2020, 2022 Status of waste generation and disposal (2023).
 15. Ministry of Economy and Finance. Waste resources management and utilization policies of Korea (2016).
 16. ISO. ISO 14040 Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework (2006).
 17. Korea Policy Briefing. Comprehensive measures for improving the entire process from waste generation to disposal. <https://www.korea.kr/news/policyNewsView.do?newsId=148878189> (accessed 23 April 2024).
 18. Ministry of Trade, Industry and Energy. Practical guidelines for life cycle assessment ISO 14040 Series (2004).
 19. Marceno, M., Joao, S., Voltolini, D., Zattar, I. Life cycle assessment and circularity evaluation of the non-medical masks in the Covid-19 pandemic: a Brazilian case. *Environment, Development and Sustainability* 25, pp. 8055-8082 (2022).