

석유계 플라스틱 기반과 목질계 셀룰로오스 기반의 일회용 마스크 전과정평가 비교 연구

이호원¹, 최경훈², 장용철^{1,2*}, 이청희¹, 조해인², Shella Angelina Herlintama¹, 이승욱³, 이정현³, 정관승³¹충남대학교 환경IT융합공학과, ²충남대학교 환경공학과, ³㈜뉴라이즌

Comparative Life Cycle Assessment of Petroleum-based Plastics and Cellulose-based Single-Use Masks

Howon Lee¹, Kyunghoon Choi², Yong-Chul Jang^{1,2*}, Chonghee Lee¹, Haein Cho²,
Shella Angelina Herlintama¹, Seunguk Lee³, Jeonghyeon Lee³, Gwanseung Jeong³¹Department of Environmental & IT Engineering, Chungnam National University, Korea²Department of Environmental Engineering, Chungnam National University, Korea³Newrizon Inc., Korea

ABSTRACT

The COVID-19 pandemic significantly increased the consumption of single-use masks globally, resulting in a surge in plastic waste and its associated environmental issues. This study conducts a comparative life cycle assessment(LCA) of single-use masks made of petroleum-based polypropylene(PP) and wood-based cellulose materials to evaluate their environmental impacts by life cycle. The results showed that cellulose-based masks found to be approximately 15.6% lower CO₂ eq emission and 38.1% reduced resource depletion than PP-based masks, highlighting their potential as an eco-friendly alternative. However, cellulose-based masks also exhibit higher environmental burdens in human health(33.8%) and ecosystem quality(109.8%), mainly due to increased energy use and by-products during production and disposal processes. The study identifies areas for improvement, including optimizing cellulose-based production processes and establishing specialized waste management systems. It concludes that while cellulose-based materials show promise as sustainable substitutes, further technical advancements in material and process optimization are needed to enhance their overall environmental performance. This research provides useful data for the development of alternative mask materials and sustainable waste management strategies.

Key words: life cycle assessment(LCA), single-use masks, petroleum-based polypropylene, cellulose-based materials, environmental impact

요약

COVID-19 팬데믹은 전 세계적으로 일회용 마스크 사용을 급증시켜 플라스틱 폐기물과 이에 따른 환경 문제를 심화시켰다. 본 연구는 석유계 폴리프로필렌(PP)과 목질계 셀룰로오스 소재를 사용한 일회용 마스크의 전과정평가(LCA)를 수행하여 제조, 운송, 폐기 단계에서의 환경영향을 비교하였다. 연구 결과, 셀룰로오스 기반 마스크는 지구온난화 영향범주에서 약 15.6%, 자원 고갈 범주에서 약 38.1% 낮은 결과를 나타내며 친환경 대체재로서의 가능성을 보여주었다. 그러나 셀룰로오스 기반 마스크는 생산 및 폐기 과정에서의 에너지 사용과 부산물로 인해 인체 건강(33.8%)과 생태계 질(109.8%) 범주에서 더 높은 환경영향을 보였다. 본 연구는 셀룰로오스 기반 생산 공정의 최적화와 전용 폐기물 관리 시스템 도입 등의 개선 방향을 제시하며, 셀룰로오스 소재가 지속 가능한 대체재로 자리잡기 위해 추가적인 개선이 필요함을 강조하였다. 이 연구는 대체 마스크 소재 개발 및 지속 가능한 폐기물 관리 전략 수립을 위한 기초 데이터를 제공할 수 있다.

주제어: 전과정평가, 일회용 마스크, 석유계 폴리프로필렌, 목질계 셀룰로오스 소재, 환경영향

Date Received: Dec. 3, 2024 , Date Revised: Dec. 22, 2024 , Date Accepted: Dec. 26, 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.

1. 서 론

COVID-19 팬데믹은 전 세계적으로 일회용 마스크 사용을 대폭 증가시켰다. WHO에 따르면, 팬데믹이 본격적으로 시작된 2020년 한 해 동안 전 세계에서 약 3,789억 개의 일회용 마스크가 생산되었으며, 이는 팬데믹 이전인 2019년 약 125억 개에 비해 약 30배 이상 증가하였다[1]. Benson et al.[2]은 COVID-19 팬데믹으로 전 세계적으로 하루 약 1.6백만 톤의 일회용 개인보호장비 폐기물이 발생하며, 그중 일회용 페마스크가 하루 약 33.6억 개에 달한다고 보고했다[2]. 이러한 일회용 마스크의 사용량 증가는 단순히 의료폐기물의 양적 증가뿐만 아니라 환경에 미치는 심각한 영향을 초래하고 있다[3].

일회용 마스크는 필터, 코편 지지대, 귀고리 등 크게 3가지 부분으로 구성된다. 이 중, 일회용 마스크 필터는 주로 폴리프로필렌(PP, polypropylene) 재질의 스펀 본드 부직포(spunbonded fabric)로 제작된다[4]. PP는 가볍고 저렴하며 우수한 여과 성능을 제공하지만, 탄소배출계수는 약 1.47 kg CO₂ eq/kg으로[5] 제조 및 소각 단계에서 온실가스를 다량 배출하고, 폐기물로 배출된 후에는 플라스틱 폐기물 처리 과정에서 환경 오염을 가중시킬 수 있다. 이러한 문제는 COVID-19 이후 더욱 심각하게 부각되었으며, 전 세계적으로 일회용 마스크 폐기에 따른 미세플라스틱 생성으로 해양 생태계와 대기 오염에 미치는 영향에 대한 우려가 증가하고 있다[6].

전 세계적인 플라스틱 사용과 폐기물 문제를 해결하기 위해 최근 생분해성 소재가 플라스틱 대체재로 주목받고 있다. 생분해성 소재는 자연에서 분해되며, 재활용이 어려운 기존 플라스틱 폐기물 문제를 완화할 수 있는 잠재력을 가지고 있다[3]. 이 중 셀룰로오스 기반 소재는 생물학적 분해가 가능하며, 플라스틱 대체재로서 연구되고 있는 대표적인 재료 중 하나이다. 셀룰로오스는 식물에서 얻을 수 있는 천연 고분자 물질로 자연 분해가 빠르고 플라스틱에 비해 환경에 미치는 영향이 적다는 장점이 있다[7].

최근 일회용 마스크의 전과정평가(LCA: life cycle assessment)를 통해 마스크가 환경에 미치는 영향을 평가한 연구들이 다수 발표되었다. 대표적으로 Straten et al.[8]은 전과정평가를 통해 플라스틱 기반 일회용 마스크를 1회 사용했을 때와 증기멸균 후 재사용했을 때의 환경적 영향을 비교하였다. 그 결과, 마스크를 최소 5회 재사용할 경우, 기후변화에 미치는 영향이 약 50% 이상 줄어들며 경제적 이점도 크다는 결론을 도출하였다[8]. Rodriguez et al.[9]은 전과정평가를 통해 COVID-19 팬데믹 기간 동안 다양한 일회용 마스크의 환경영향을 분석하였으며, 친환경적 설계를 위한 가이드라인을 개발

하였다. 연구 결과에 따르면, 생분해성 소재는 플라스틱 기반 마스크에 비해 온실가스 배출량을 최대 30%까지 줄일 수 있는 것으로 나타났다[9]. 이러한 연구는 생분해성 소재가 일회용 마스크의 대체재로 활용 가능성이 높으며, 플라스틱 기반 마스크의 환경적 영향을 줄이는 효과적인 대안이 될 수 있음을 시사한다. Ajaj et al.[3]은 일회용 페마스크의 환경적 부담을 줄이기 위해 생분해성 소재를 포함한 다양한 대체재를 평가하였으며, 플라스틱 대신 천연 소재를 사용한 마스크가 장기적으로 환경 보호에 기여할 수 있다는 가능성을 강조하였다[3]. Turkmen[4]의 연구는 전과정평가를 활용하여 일회용 의료용 마스크의 제조부터 폐기까지 환경영향을 분석한 연구로, 플라스틱 마스크 1개당 지구온난화 영향이 약 0.021 kg CO₂ eq로 나타났다. 특히 원자재 공급 단계에서 전체 환경영향의 약 40.5%가 집중되는 것으로 밝혀졌다[4]. 이는 플라스틱 기반 일회용 마스크의 주요 환경영향이 원료 생산 과정에서 발생함을 보여준다.

기존 연구들은 플라스틱 기반 마스크의 전과정평가를 통해 제조, 유통, 폐기 과정에서의 환경영향을 분석하고, 온실가스 배출 및 미세플라스틱 발생의 문제를 제기하였다. 그러나 대부분의 연구는 플라스틱 기반 마스크에 초점이 맞춰져 있으며, 생분해성 소재를 활용한 마스크의 환경적 이점과 잠재력을 비교한 연구는 아직까지 매우 제한적이다. 또한, 국내에서는 COVID-19 팬데믹 동안 폭증한 일회용 마스크의 환경영향을 체계적으로 분석한 연구가 거의 없는 실정이다. 대한민국은 국토 면적이 상대적으로 좁아 폐기물 관리와 관련된 효율적인 대책 마련이 필요하지만, 대부분의 선행연구는 해외에서 이루어져 국내 실정에 맞는 연구 데이터가 부족하다. 이는 생분해성 소재를 활용한 대체재 개발과 관련 정책 수립에 있어 국내의 구체적인 여건을 반영하기 어렵게 한다. 이와 같은 연구 공백은 플라스틱 기반 마스크의 대체재로 생분해성 소재가 실제로 적합한지 평가하기 위한 정량적이고 실증적인 데이터의 부족으로 이어진다. 이를 보완하기 위해 생분해성 소재 마스크의 환경적 이점을 구체적으로 분석할 필요성이 제기되고 있다.

본 연구의 목적은 석유계 플라스틱 기반 필터를 사용하는 일회용 마스크와 생분해성 셀룰로오스 기반 필터를 사용하는 일회용 마스크의 환경영향을 전과정평가(LCA)를 통해 비교하는 것이다. 이를 통해 두 제품의 제조, 운송, 폐기 단계에서 발생하는 환경영향을 산정하고, 생분해성 소재의 사용이 플라스틱 기반 제품의 대안이 될 수 있는지 평가하였다. 특히, 본 연구는 국내외 일회용 마스크 소비량 증가에 따른 환경적 부담을 경감할 수 있는 방안을 모색하는데 기여할 것으로 기대된다. 그리고 향후 COVID-19 팬데믹과 같은 대규모 감염병 발

생 시 필수적으로 사용되는 마스크의 지속 가능한 생산과 폐기 방안을 마련하는데 기여할 수 있을 것이다. 본 연구 결과는 국내 일회용 마스크 대체재 개발과 잠재적 환경영향 저감 대책 수립에 중요한 기초자료로 활용될 수 있다.

2. 연구 방법

2.1. 일회용 마스크의 기초 자료 수집

본 연구에서 석유계 플라스틱 필터 기반 일회용 마스크와 목질계 셀룰로오스 필터 기반 일회용 마스크의 전과정평가를 위해 국내외 일회용 마스크 전과정평가 관련 문헌자료와 논문에 나타난 데이터를 활용하였다. 그리고 각 단위공정의 LCI (life cycle inventory) 데이터베이스는 Ecoinvent 3.8과 USLCI를 활용하였으며, 데이터는 주로 투입물(input) 중심으로 구성되었다. 산출물(output) 데이터는 각 공정에서 발생하는 배출물이나 부산물을 명시적으로 포함하지 않았는데, 이는 제조공정이 동일하다는 가정하에 두 제품군의 환경영향 비교에서 상대적인 차이를 분석하는 데 초점을 맞췄기 때문이다.

석유계 플라스틱 기반 일회용 마스크의 제조 전단계 데이터는 Franklin Associates, Cradle-to-Gate life cycle analysis of polypropylene(PP) resin[10] 보고서를 참고하였으며, 제조단계의 데이터는 Turkmen[4]의 연구를 참고하여 반영하였다. 목질계 셀룰로오스 기반 일회용 마스크의 제조전단계 데이터는 Chen[11], Krexner et al.[12], Corcelli et al.[13]의 연구를 참고하여 반영하였다. 제조단계의 데이터는 플라스틱 기반 일회용 마스크와 동일하게 Turkmen[4]의 연구를 참고하였다.

각 일회용 마스크의 운송단계 데이터 중, 운송 거리는 국내 여건을 고려하여 가정하였으며, 운송수단에 관한 데이터는 Turkmen[4]의 연구를 참고하였다. 각 일회용 마스크 폐기단계에서의 처리 비율은 환경부의 2020년 기준 ‘전국 폐기물 발생 및 처리 현황[14]’과 ‘국민권익위원회의 일회용 마스크에 관한 설문조사 결과[15]’의 자료와 Lee et al.[16]의 연구를 참고하여 소각, 매립, 환경 유실의 비율을 반영하였다. 각 일회용 마스크 자체 및 마스크의 부품별(필터, 귀고리, 코 지지대 등) 중량은 국내 KF-94 일회용 마스크를 직접 측정한 데이터를 활용하였으며, 목질계 셀룰로오스 기반 일회용 마스크의 필터는 70%의 셀룰로오스 섬유와 30%의 폴리프로필렌 부직포로 구성된다고 가정하였다. 그리고 셀룰로오스 추출 수율은 자체적인 예비 실험 결과를 참고하였고, 일회용 마스크의 포장에 관한 데이터는 제외하여 가정하였다. Table 1에 석유계 플라스틱 기반 일회용 마스크와 목질계 셀룰로오스 기반 일회용 마스크의 전과정평가 수행을 위해 활용된 기초자료와 참고문헌 등을 요약하여 나타내었다.

2.2. 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 국제 표준에 따라 수행되었다. 전과정평가에 관한 본 연구의 목적, 기능단위, 시스템경계, 영향평가 방법론은 목적 및 범위 정의

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

Life cycle	Contents	References
	Pre-production stages of plastic-based single-use masks	Franklin Associates report [10]
Pre-production stages	Pre-production stages of cellulose-based single-use masks	Chen [11] Krexner et al. [12] Corcelli et al. [13]
	Production stages of plastic-based and cellulose-based single-use masks	Turkmen [4]
Transportation stages	Transportation means of plastic-based and cellulose-based single-use masks	Turkmen [4]
Disposal stages	Status of waste generation and disposal	Korea Ministry of Environment: 2020 Status of waste generation and disposal [14]
		Anti-Corruption and Civil Rights Commission of Korea: Single-use face masks waste disposal plan [15]

단계에서 가정하였다[17].

2.2.1. 목적 및 범위 정의

본 연구의 목적은 기존의 석유계 플라스틱 기반 필터를 사용하는 일회용 마스크와 목질계 셀룰로오스 기반 필터를 사용하는 일회용 마스크의 전과정평가를 통해 환경영향을 비교하는 것이다. 전과정평가를 위한 일회용 마스크의 기능은 공기투과도가 $120 \text{ cm}^2/\text{cm}^3/\text{sec}$ 이상이고, 필터 차압이 1 mmAq 이하의 성능을 보이는 것이다. 석유계와 목질계 일회용 마스크 모두 동일한 제품 중량(4.68 g)과 기능(공기투과도, 필터 차압)을 가지는 것으로 가정하였다. 이러한 설정은 제품의 공정 및 소재의 차이 외에 다른 변수로 인한 영향을 최소화하기 위함이다. 또한, 일회용 마스크 1개의 중량(4.68 g)은 실제 한국에서 사용되는 KF-94 일회용 마스크 여러 개를 무작위로 선정

하여 측정된 평균값을 기준으로 설정하였다. 기능단위는 1 ton 중량의 공기투과도가 $120 \text{ cm}^2/\text{cm}^3/\text{sec}$ 이상, 필터 차압이 1 mmAq 이하의 성능을 보유한 일회용 마스크로 설정하였으며, 기준흐름은 1 ton 중량의 일회용 마스크로 설정하였다.

LCA 소프트웨어는 SimaPro v.9.4.0.2를 활용하여 수행하였고, 영향평가 방법론으로 IMPACT 2002+를 활용하여 종말점 수준에서 지구온난화를 포함한 15개의 영향범주를 평가하였다. IMPACT 2002+ 방법론은 실제 적용 사례가 많고, 환경영향을 정량화하기 위한 데이터베이스가 잘 구축되어 있어 현실적인 분석이 가능한 장점이 있어서 채택하여 수행하였다. 시스템경계는 플라스틱 기반과 셀룰로오스 기반 일회용 마스크 모두 제조전단계, 제조단계, 운송단계, 폐기단계를 포함한 'Cradle to Grave'의 범위로 설정하였다. Fig. 1과 Fig. 2에 각각 석유계 플라스틱 기반 일회용 마스크와 목질계 셀룰로오스

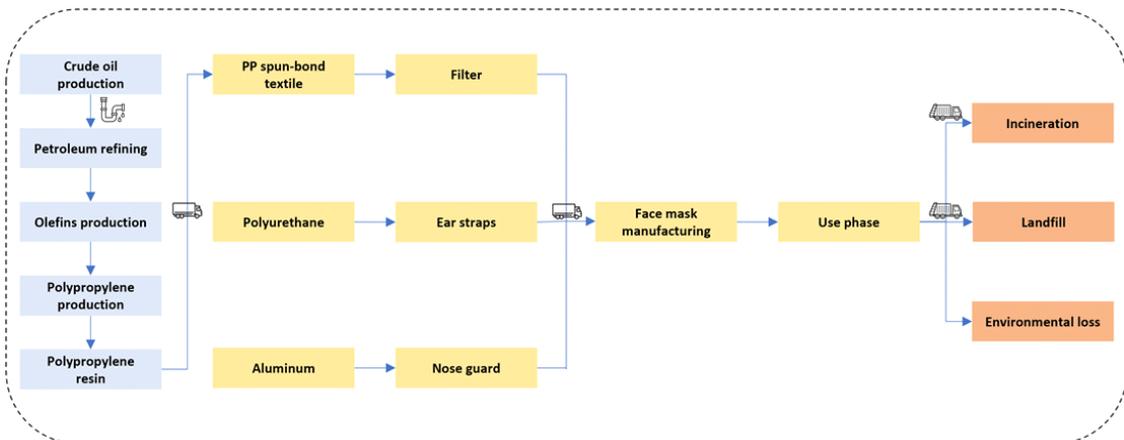


Fig. 1. System boundary of plastic-based single-use masks for life cycle assessment.

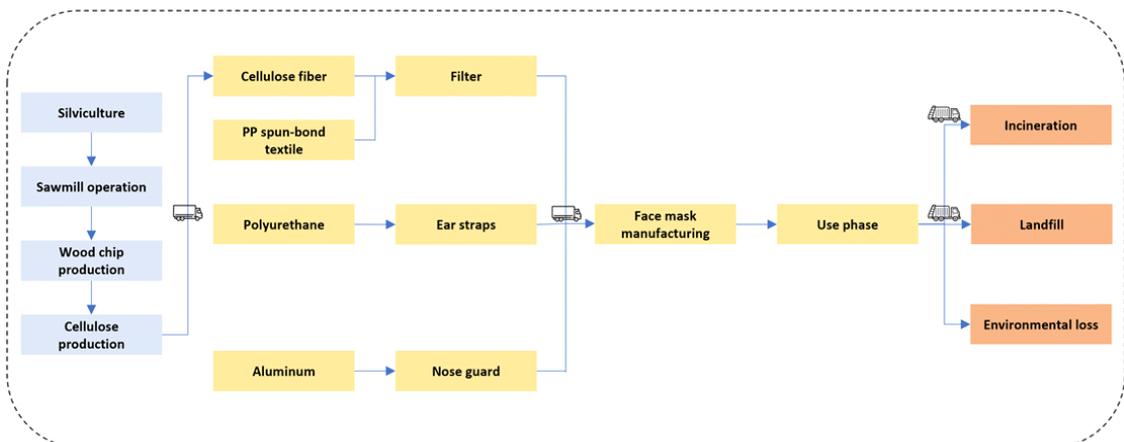


Fig. 2. System boundary of cellulose-based single-use masks for life cycle assessment.

기반 일회용 마스크의 시스템경계를 나타내었다.

석유계 플라스틱 기반 일회용 마스크의 시스템경계 중, 제조전단계는 원유 추출, 석유 정제, 올레핀 제조, 폴리프로필렌 제조의 과정을 거쳐 최종적으로 폴리프로필렌 레진 제조까지를 고려하였다. 그리고 제조단계는 앞서 제조전단계에서 최종 생산된 폴리프로필렌 레진을 통해 일회용 마스크의 필터 재료로 사용될 스펀 본드 방식의 폴리프로필렌 부직포, 일회용 마스크의 귀고리 부분 재료로 사용될 폴리우레탄, 코편 지지대 부분 재료로 사용될 알루미늄 재료들을 조립하여 최종적으로 완성된 형태의 플라스틱 기반 일회용 마스크 생산까지를 고려하였다. 완성 형태로 제조된 플라스틱 기반 일회용 마스크는 운반을 통해 판매되고 사용되어서 최종적으로 생활폐기물 수거 및 처리 공정을 통해 일회용 폐마스크는 재활용되지 않고, 대부분 소각과 매립 처리되고, 일부 적은 비율이 무단 투기되는 것으로 설정하였다.

목질계 셀룰로오스 기반 일회용 마스크의 시스템경계 중, 제조전단계는 식림, 제재, 목재칩 생산 과정을 거쳐 최종적으로 목재칩으로부터 셀룰로오스 추출 과정까지를 고려하였다. 제조단계는 앞서 제조전단계에서 최종 생산된 셀룰로오스를 통해 셀룰로오스 섬유 70%와 나머지 30%의 폴리프로필렌 부직포로 일회용 마스크의 필터 재료를 구성한다고 설정하였다. 이때, 30%의 폴리프로필렌 제조전단계 데이터 역시 포함되었으며, 셀룰로오스 제조전단계와 동일한 방식으로 각 소재의 비율에 따라 환경영향을 산정하였다.

필터 재료 제작 공정은 두 소재의 조합을 고려하여 동일한 제조 방식으로 처리된다고 가정하였다. 또한, 플라스틱 기반 일회용 마스크의 제조단계와 마찬가지로, 일회용 마스크의 귀고리 부분과 코편 지지대 부분 재료들을 조립하여 최종적으로 완성된 형태의 셀룰로오스 기반 일회용 마스크 생산까지를 고려하였다. 나머지 판매되고 사용되어 폐기단계까지 도달하는 과정은 플라스틱 기반 일회용 마스크의 과정과 동일하게 설정하였다.

2.2.2. 전과정 목록분석

2.2.2.1. 석유계 플라스틱 기반 일회용 마스크의 전과정 목록분석

플라스틱 기반 일회용 마스크의 제조전단계 목록은 일회용 마스크 제조를 위한 원료들의 추출 및 생산에 관한 데이터로 구성하였다. Table 1에 제시된 선행연구를 참고하여 제조전단계 목록에 관한 투입물질, 배출물질 데이터를 입력하였으며, 투입물, 배출물의 양적인 값에 관한 데이터는 본 연구의 기능

단위인 1 ton 중량의 일회용 마스크 제작 규모에 맞춰 환산하여 적용하였다.

제조단계 목록은 일회용 마스크의 구성 부품과 조립에 관한 데이터로 구성하였다. 조립되는 부품과 조립 전력량의 양적인 값에 관한 데이터는 본 연구의 기능단위인 1 ton 중량의 일회용 마스크 제작 규모에 맞게 환산하여 산정하였다.

운송단계 목록은 제조전단계의 원유 추출지로부터 원료생산 공장, 원료생산 공장으로부터 제조공장, 제조공장으로부터 판매처, 수거 및 분류지점으로부터 소각장, 매립장까지의 운송을 고려하였다. 운송수단에 관한 데이터 중, 폐기물 운송수단 데이터로 생활계폐기물 수거 덤프트럭 데이터를 적용하였으며, 나머지 원료 및 제품 운송수단에 관한 데이터는 3.5~7.5톤 중량 규모의 화물 운송 트럭 데이터를 적용하여 산정하였다. 운송 거리에 관한 데이터는 대한민국의 지리적 여건과 산업 활동 패턴을 고려하여 임의로 설정하였다. 원료 수급 단계에서는 인천(항구 및 물류 중심지)에서 경기도 지역(산업단지 밀집 지역)으로의 이동 거리를 적용하였고, 판매를 위한 제품 이동 단계에서는 경기도에서 대전(국내 유통 거점)으로의 거리를 반영하였다.

폐기단계 목록은 생활계폐기물의 소각 및 매립 처리량과 의료폐기물로 배출되는 일회용 마스크 폐기물의 소각량, 무단 투기 등으로 인해 환경 유실되는 일회용 마스크의 양을 고려하였다. 이러한 비율은 이송현 외(2021)의 연구[16]에서 보고된 2020년 대한민국 기준 폐기 비율(소각 64%, 매립 31%, 환경 유실 5%)을 참고하여 적용되었다. 최종적으로 일회용 마스크의 폐기 방법별 중량을 합산한 후 해당 비율에 따라 산정하였다. 플라스틱 기반 일회용 마스크의 각 단계별 목록은 Table 2~Table 5에 나타내었다.

2.2.2.2. 목질계 셀룰로오스 기반 일회용 마스크의 전과정 목록분석

셀룰로오스 기반 일회용 마스크의 제조전단계 목록은 목질계 셀룰로오스 기반 일회용 마스크 필터의 주재료로 사용될 셀룰로오스 추출까지의 과정을 고려하였다. 제조전단계의 과정 및 순서, 투입물질, 배출물질에 관한 데이터는 Table 1에 제시된 선행연구의 데이터베이스를 활용하였다. 식림 과정을 통해 원목을 확보 후, 원목을 제재하여 제재부산물을 통해 목재칩 생산이 이루어지며, 생산된 목재칩에서 셀룰로오스 추출을 하는 것으로 고려하였다. 투입물, 배출물의 양적인 값에 관한 데이터는 본 연구의 기능단위인 1 ton 중량의 일회용 마스크 제작 규모에 맞게 환산하여 산정하였다.

Table 2. Inventory data of plastic-based single-use masks at pre-manufacturing stage (based on 1 ton)

	Category	Material	Amount	Unit
Input	Raw materials	Propylene	834.2	kg
	Auxiliary materials	Nitrogen	52.7	kg
	Auxiliary materials	Electricity	246.8	kWh
	Auxiliary materials	Natural gas	28.0	m ³
	Auxiliary materials	Water for processing	2,468.0	kg
Output	Product	PP resin	822.7	kg
	Air emissions	CO ₂ , NMVOC, particulates etc.	8.4	kg
	Waterborne emissions	BOD, COD, Zn etc.	0.03	kg

Table 3. Inventory data of plastic-based single-use masks at production stage (based on 1 ton)

Category	Material	Amount	Unit
Filter	PP non-woven textile	822.7	kg
Ear straps	Polyurethane	83.3	kg
Noseguard	Aluminum	94.0	kg
Energy for assembly	Electricity	534.2	kWh

제조단계 목록에서 필터 부품에 관한 데이터 중, 70%는 제조전단계로부터 추출된 셀룰로오스 데이터를 적용하였으며, 나머지 30%는 기존 폴리프로필렌 부직포 데이터를 적용하였다. 그 외의 적용 방식은 플라스틱 기반 일회용 마스크의 목록과 동일하게 수행하였다.

운송단계는 폐기물 운송수단 데이터로 생활폐기물 수거덤프트럭 데이터를 적용하였으며, 원료 운송 중 임지로부터 제조소까지 운송되는 원료의 운송수단에 관한 데이터로 7.5~16톤 중량 규모의 화물 운송 트럭 데이터를 적용하였다. 나머지 원료 및 제품 운송수단에 관한 데이터는 3.5~7.5톤 중량 규모

Table 4. Inventory data of plastic-based single-use masks at transportation stage (based on 1 ton)

Category	Transportation means	Distance
Raw material transport 1 (crude oil-raw material supplier)	Pipeline for crude oil transport	30 km
Raw material transport 2 (raw material supplier-manufacturing plant)	3.5-7.5 metric ton freight lorry	50 km
Product transport (manufacturing plant-sales location)	3.5-7.5 metric ton freight lorry	200 km
Waste transport (collection/sorting site-incineration facility)	Municipal waste collection lorry	20 km
Waste transport (collection/sorting site-landfill)	Municipal waste collection lorry	20 km

Table 5. Proportions of disposal methods for single-use masks

Category	Ratio (%)
Incineration	64
Landfill	31
Environmental loss	5

의 화물 운송 데이터를 적용하여 산정하였다.

폐기단계 목록은 플라스틱 기반 일회용 마스크의 폐기단계와 동일하게 Table 5에 나타난 비율에 따라 적용하였다. 셀룰로오스 기반 일회용 마스크의 각 단계별 목록은 Table 6~Table 8에 나타내었다.

3. 연구 결과 및 고찰

3.1. 전과정 영향평가

3.1.1. 석유계 플라스틱 기반 일회용 마스크(1 ton 기준) 전과정평가 결과

Table 9에서는 1 ton 중량의 석유계 플라스틱 기반 일회용

Table 6. Inventory data of cellulose-based single-use masks at pre-manufacturing stage (Based on 1 ton)

Category	Material	Amount	Unit	
Silviculture	Forested area	0.002	ha	
	Input	Electricity	0.1	kWh
		Diesel	3	kg
		CO ₂ , SO ₂ , NOX etc.	10.6	kg
	Output	Roundwood	12.1	m ³
Sawmill operation	Roundwood	12.1	m ³	
	Input	Electricity	39	MJ
		Steam(Heat pump)	82	MJ
		CO ₂ , SO ₂ , NOX etc.	371	g
	Output	Sawdust	5.4	m ³
Wood chip production	Sawdust	5.4	m ³	
	Input	Electricity	137	MJ
		Diesel	0.042	kg
		CO ₂ , SO ₂ , NOX etc.	482	g
	Output	Wood chip	822.7	kg
Cellulose extraction	Wood chip	822.7	kg	
	Input	Water for processing	40,370	kg
		Electricity	265.6	kWh
		Output	Cellulose fiber	575.9

Table 7. Inventory data of cellulose-based single-use masks at production stage (Based on 1 ton)

Category	Material	Amount	Unit
Filter	PP non-woven textile	246.8	kg
	Cellulose fiber	575.9	
Ear straps	Polyurethane	83.3	kg
Noseguard	Aluminum	94.0	kg
Energy for assembly	Electricity	534.2	kWh

마스크에 대한 전과정 영향평가 결과를 중간점 수준으로 분석하여 그 결과를 제시하였다. 15개의 중간점 수준 영향범주 중 지구온난화 영향범주(global warming)에서 잠재적 환경영향은 약 7.18 ton CO₂ eq로 나타났다. 이 중 제조단계가 약 74.5%를 차지하며, 이는 폴리프로필렌 제조 시, 화석연료 사용과 온실가스 배출이 주요 원인으로 작용하였다. 운송단계와 폐기단계는 각각 2.5%와 23%의 기여도를 보였다. 플라스틱

기반 일회용 마스크의 단계별 환경영향 기여도 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 광물 자원 추출(mineral extraction)은 약 248 MJ surplus로 나타났으며, 이는 알루미늄 코 지지대와 폴리우레탄 귀고리 제조에서 기인했다. Turkmen[4]의 연구에서도 알루미늄과 폴리우레탄이 광물 자원 고갈의 주요 요인으로 언급된 바 있다.

1 ton 중량의 석유계 플라스틱 기반 일회용 마스크에 대한

Table 8. Inventory data of the transportation stage for cellulose-based single-use masks (Based on 1 ton)

Category	Transportation means	Distance
Raw material transport 1 (forest land-sawmill)	7.5-16 metric ton freight lorry	50 km
Raw material transport 2 (sawmill-wood chip factory)	3.5-7.5 metric ton freight lorry	50 km
Raw material transport 3 (wood chip factory-cellulose extraction plant)	3.5-7.5 metric ton freight lorry	50 km
Raw material transport 4 (cellulose extraction plant-mask manufacturing plant)	3.5-7.5 metric ton freight lorry	50 km
Product transport (mask manufacturing plant-sales location)	3.5-7.5 metric ton freight lorry	200 km
Waste transport (collection/sorting site-incineration facility)	Municipal waste collection lorry	20 km
Waste transport (collection/sorting site-landfill)	Municipal waste collection lorry	20 km

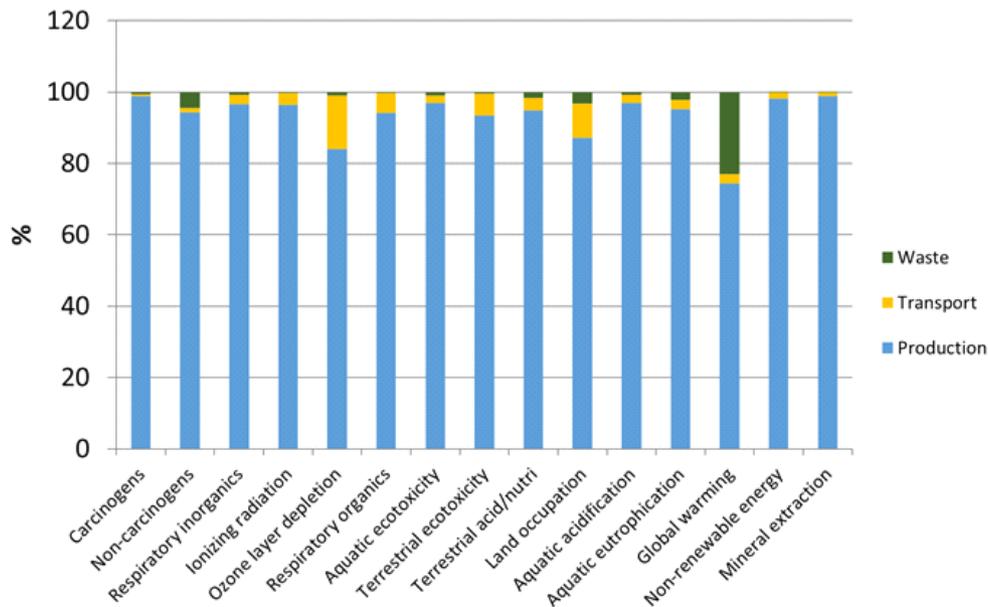


Fig. 3. Environmental impact contributions of plastic-based single-use masks by life cycle.

종말점 수준의 전과정 피해범주 결과는 Table 10에 나타난 바와 같이 다음과 같은 결과를 보였다. 인체 건강 범주(human health)에서 약 5.49E-03 DALY의 영향을 나타냈다. 생태계 질 범주(ecosystem quality)에서 약 1,220 PDF*m2*yr로 산정되었으며, 이는 코편 지지대 제조를 위한 알루미늄 소모가 주된 요인으로 분석된다. 기후변화 범주(climate change)에서 약 7.18 ton CO₂ eq로 나타났으며, 이는 지구온난화 영향범주와 유사하게 제조단계의 폴리프로필렌 가공이 가장 높은 기여를 한 것으로 추측된다. 자원고갈 범주(resources)에서 약 1.68E+05 MJ primary로 나타났으며, 이 중 알루미늄 생산 및 폴리프로필렌 가공 공장에서 에너지 소모가 가장 큰 영향을 미친 것으로 나타났다.

3.1.2. 목질계 셀룰로오스 기반 일회용 마스크의 전과정평가 결과

본 연구에서는 1 ton 중량의 목질계 셀룰로오스 기반 일회용 마스크에 대한 전과정 영향평가 결과를 중간점 수준으로 Table 11에 나타내었다. 그리고 셀룰로오스 기반 일회용 마스크의 단계별 환경영향 기여도 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 목질계 셀룰로오스 기반 일회용 마스크는 지구온난화 영향범주에서 약 6.06 ton CO₂ eq로 플라스틱 기반 일회용 마스크보다 약 15.6% 낮은 결과를 보였다. 이는 생분해성 소재가 화석연료 기반 소재에 비해 온실가스 배출을 줄이는 데 기여한 것으로 판단된다. 제조단계에서의 환경영향 결과가 크게 나타난 다른 나머지 14개의 영향범주에서의 단계별 환경영향 기여도 결

Table 9. Life cycle impact assessment results of plastic-based single-use masks (Based on 1 ton)

Impact category	Unit	Total	Production	Transport	Disposal
Carcinogens	kg C ₂ H ₃ Cl eq	2.16E+02	2.13E+02	1.32E+00	1.17E+00
Non-carcinogens	kg C ₂ H ₃ Cl eq	2.18E+02	2.05E+02	2.93E+00	9.60E+00
Respiratory inorganics	kg PM2.5 eq	6.09E+00	5.88E+00	1.61E-01	4.55E-02
Ionizing radiation	Bq C-14 eq	3.62E+04	3.49E+04	1.21E+03	6.91E+01
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	2.01E-04	1.69E-04	3.03E-05	1.98E-06
Respiratory organics	kg C ₂ H ₄ eq	2.80E+00	2.63E+00	1.56E-01	7.36E-03
Aquatic ecotoxicity	kg TEGwater	7.91E+05	7.68E+05	1.57E+04	7.55E+03
Terrestrial ecotoxicity	kg TEGsoil	1.32E+05	1.23E+05	8.04E+03	5.08E+02
Terrestrial acid	kg SO ₂ eq	9.30E+01	8.83E+01	3.16E+00	1.57E+00
Land occupation	m ₂ org.arable	4.03E+01	3.51E+01	3.93E+00	1.29E+00
Aquatic acidification	kg SO ₂ eq	2.87E+01	2.79E+01	6.41E-01	2.43E-01
Aquatic eutrophication	kg PO4P-lim	6.25E-01	5.95E-01	1.64E-02	1.38E-02
Global warming	kg CO ₂ eq	7.18E+03	5.34E+03	1.82E+02	1.65E+03
Non-renewable energy	MJ primary	1.68E+05	1.65E+05	2.80E+03	2.54E+02
Mineral extraction	MJ surplus	2.48E+02	2.45E+02	2.29E+00	3.72E-01

Table 10. Life cycle damage assessment results of plastic-based single-use masks (Based on 1 ton)

Damage category	Unit	Total	Production	Transport	Disposal
Human health	DALY	5.49E-03	5.30E-03	1.25E-04	6.21E-05
Ecosystem quality	PDF*m ² *yr	1.22E+03	1.14E+03	7.20E+01	7.44E+00
Climate change	kg CO ₂ eq	7.18E+03	5.34E+03	1.82E+02	1.65E+03
Resources	MJ primary	1.68E+05	1.65E+05	2.80E+03	2.55E+02

과와 달리, 비발암물질 영향범주(Non-carcinogens)는 폐기단계에서 약 393 kg C₂H₃Cl eq로 제조단계인 195 kg C₂H₃Cl eq보다 약 101.5% 높은 결과를 보였다. 이는 생분해성 소재의 소각 및 매립 과정에서 방출되는 특정 화학물질(예: 염화비닐 화합물)이 주요 원인으로 추정된다. 특히, 비생분해성 잔여물의 분해 과정에서 염소 화합물과 같은 비발암성 물질이 생성될 가능성이 있다[9]. 또한, 오존층 고갈 영향범주(ozone layer depletion)는 약 3.92E-04 kg CFC-11 eq로 오히려 플라스틱 기반 일회용 마스크보다 약 95% 더 높은 값을 보였으며, 이는 셀룰로오스 추출 및 목재 가공 과정에서의 에너지 소모와 화학물질 사용으로 인한 것으로 판단된다.

석유계 플라스틱 기반 일회용 마스크는 제조단계에서 높은

온실가스 배출을 보였으나, 상대적으로 자원 고갈 및 토양·수계 생태계 독성(terrestrial and aquatic ecotoxicity)에서의 영향을 낮게 유지했다. 반면, 목질계 셀룰로오스 기반 일회용 마스크는 지구온난화 범주에서 낮은 환경영향을 보였지만, 토양 생태계 독성에서는 더 높은 환경영향 결과를 나타냈다. 토양 생태계 독성은 플라스틱 기반 일회용 마스크가 약 1.32E+05 kg TEGsoil, 셀룰로오스 기반 일회용 마스크가 약 2.07E+05 kg TEGsoil로 약 57% 더 높은 수치를 보였다. 이는 제조공정의 복잡성과 높은 에너지 소모에서 기인한 것으로 판단된다.

1 ton 중량의 목질계 셀룰로오스 기반 일회용 마스크에 대한 전과정 피해범주 결과는 Table 12에 나타난 바와 같이 다음과 같은 결과를 보였다. 인체 건강 범주와 생태계 질 범주는

Table 11. Life cycle impact assessment results of cellulose-based single-use masks (Based on 1 ton)

Impact category	Unit	Total	Production	Transport	Disposal
Carcinogens	kg C ₂ H ₃ Cl eq	1.93E+02	1.38E+02	1.88E+00	5.26E+01
Non-carcinogens	kg C ₂ H ₃ Cl eq	5.92E+02	1.95E+02	4.25E+00	3.93E+02
Respiratory inorganics	kg PM2.5 eq	7.34E+00	5.56E+00	2.05E-01	1.58E+00
Ionizing radiation	Bq C-14 eq	4.29E+04	3.74E+04	1.64E+03	3.89E+03
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	3.92E-04	2.54E-04	4.07E-05	9.68E-05
Respiratory organics	kg C ₂ H ₄ eq	2.07E+00	1.54E+00	1.85E-01	3.48E-01
Aquatic ecotoxicity	kg TEGwater	1.53E+06	1.30E+06	2.23E+04	2.11E+05
Terrestrial ecotoxicity	kg TEGsoil	2.07E+05	1.74E+05	1.17E+04	2.08E+04
Terrestrial acid	kg SO ₂ eq	1.34E+02	8.64E+01	3.87E+00	4.42E+01
Land occupation	m ² org.arable	6.52E+02	5.80E+02	5.79E+00	6.59E+01
Aquatic acidification	kg SO ₂ eq	3.33E+01	2.48E+01	8.21E-01	7.75E+00
Aquatic eutrophication	kg PO ₄ P-lim	1.45E+00	9.73E-01	2.26E-02	4.55E-01
Global warming	kg CO ₂ eq	6.06E+03	4.40E+03	2.46E+02	1.41E+03
Non-renewable energy	MJ primary	1.04E+05	8.92E+04	3.80E+03	1.05E+04
Mineral extraction	MJ surplus	2.63E+02	2.43E+02	3.29E+00	1.65E+01

각각 약 7.35E-03 DALY, 2,560 PDF*m²*yr로 오히려 석유계 플라스틱 기반 일회용 마스크보다 33.8%, 109.8% 더 높은 영향을 보였다. 이는 생분해성 소재의 제조과정에서 발생하는

부산물과 폐기단계에서의 잔류물로 인한 생태계 독성이 주요 원인으로 추정된다. 기후변화 범주와 자원고갈 범주는 각각 약 6.06 ton CO₂ eq, 1.04E+05 MJ primary로 석유계 플라스틱

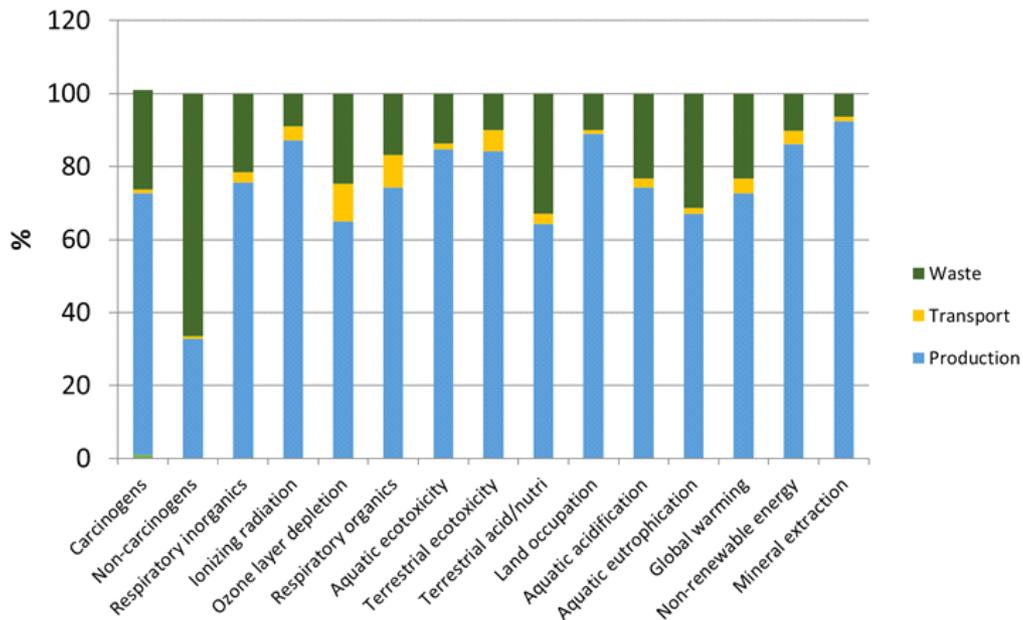


Fig. 4. Environmental impact contributions of cellulose-based single-use masks by life cycle.

Table 12. Life cycle damage assessment results of cellulose-based single-use masks (based on 1 ton)

Damage category	Unit	Total	Production	Transport	Disposal
Human health	DALY	7.35E-03	4.83E-03	1.62E-04	2.35E-03
Ecosystem quality	PDF*m ² *yr	2.56E+03	2.17E+03	1.04E+02	2.93E+02
Climate change	kg CO ₂ eq	6.06E+03	4.40E+03	2.46E+02	1.41E+03
Resources	MJ primary	1.04E+05	8.94E+04	3.80E+03	1.06E+04

기반 일회용 마스크보다 15.6%, 38.1% 낮은 결과를 나타냈다. 이는 생분해성 소재가 화석연료 기반 소재보다 탄소배출을 상대적으로 더 적게 하였으며, 목질계 소재의 자원 추출에서 상대적으로 적은 에너지를 소모했기 때문으로 판단된다.

3.2. 전과정 해석

3.2.1. 석유계 플라스틱 기반 일회용 마스크의 단위공정별 기여도 분석

지구온난화 영향범주에 대한 플라스틱 기반 일회용 마스크의 단위공정별 환경영향 기여도를 산정한 결과, 폴리프로필렌 부직포에 관한 환경영향이 전체 단위공정의 약 28%로 가장 높게 나타났다. 이는 폴리프로필렌 제조 시, 높은 에너지 소비와 화석연료 의존도가 주요 원인으로 분석된다. 다른 주요 기여 요인으로는 폴리우레탄 귀고리(8%), 알루미늄 코편 지지대(17%), 전기 사용(6%) 등이 있다. 이는 제조단계의 자원 집약적 공정을 반영하며, 폐기단계에서도 폴리프로필렌의 폐기가

주요 온실가스 배출원으로 작용했다. 지구온난화 영향범주에 대한 플라스틱 기반 일회용 마스크 단위공정별 환경영향 기여도 결과는 Fig. 5에 제시하였다.

3.2.2. 목질계 셀룰로오스 기반 일회용 마스크의 단위공정별 기여도 분석

지구온난화 영향범주에 대한 셀룰로오스 기반 일회용 마스크의 단위공정별 환경영향 기여도를 산정한 결과, 알루미늄에 관한 환경영향이 전체 단위공정 중 21%로 가장 높게 나타났다. 이는 알루미늄 생산 과정에서 높은 에너지 소모와 온실가스 배출이 주요 원인으로 나타났다. 그 외에도 바이오 폐기물 소각(14%), 전기 사용(12%), 폴리프로필렌 부직포(10%)가 주요 기여 요인으로 분석되었다. 전기 사용은 목재칩 가공과 셀룰로오스 추출 과정에서 집중적으로 소비되었으며, 이러한 요인으로 제조단계에서의 에너지 소비가 증가한 것으로 추측된다. 지구온난화 영향범주에 대한 셀룰로오스 기반 일회용 마스크

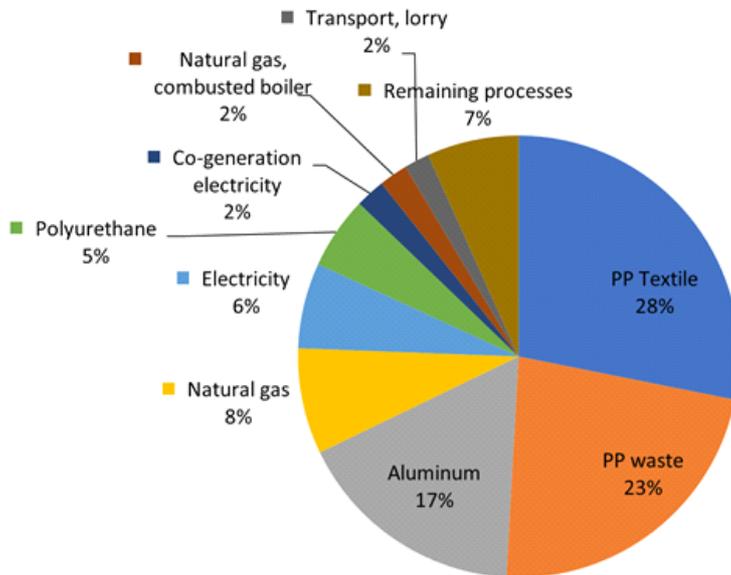


Fig. 5. Environmental impact contributions of unit process of plastic-based single-use masks in global warming.

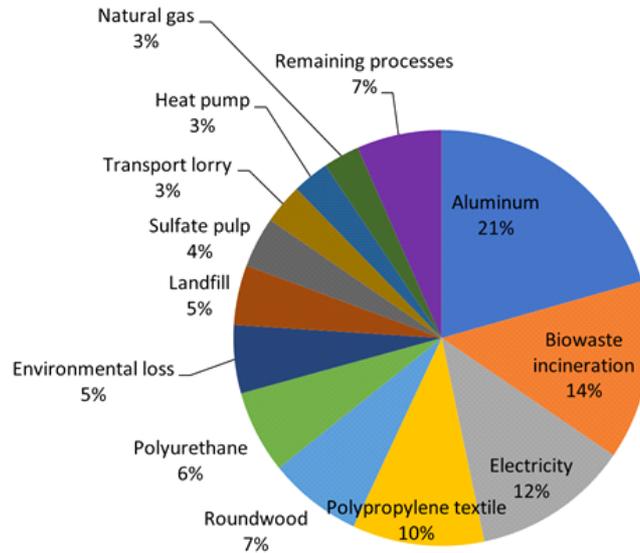


Fig. 6. Environmental impact contributions of unit process of cellulose-based single-use masks in global warming.

크 단위공정별 환경영향 기여도 결과는 Fig. 6에 제시하였다.

4. 결론

본 연구는 석유계 플라스틱 기반 일회용 마스크와 목질계 셀룰로오스 기반 일회용 마스크의 전과정평가(LCA)를 수행하여 두 소재가 환경에 미치는 영향을 비교하였다. 본 연구 결과, 석유계와 목질계 일회용 마스크는 서로 상반된 환경적 특성을 가지며, 각각의 장점과 단점을 동시에 지니고 있었다.

먼저, 목질계 셀룰로오스 기반 마스크는 지구온난화와 자원 고갈(resources) 범주에서 플라스틱 기반 마스크보다 낮은 환경영향을 보였다. 지구온난화 범주에서는 약 6.06 ton CO₂ eq로 플라스틱 기반 마스크보다 약 15.6% 낮은 값을 보였으며, 자원 고갈 범주에서도 약 38.1% 더 낮은 에너지 소모를 나타냈다. 이는 목질계 셀룰로오스 소재가 탄소배출과 자원 소모를 줄이는 데 기여할 수 있음을 보여준다. 반면, 인체 건강과 생태계 질 범주에서는 목질계 셀룰로오스 기반 마스크가 더 높은 영향을 나타냈다. 인체 건강 범주에서는 약 33.8% 높은 7.35E-03 DALY로 나타났으며, 생태계 질 범주에서는 약 109.8% 더 높은 2,560 PDF·m²·yr의 결과를 보였다. 이러한 결과는 제조와 폐기 과정에서 사용된 화학물질과 에너지 소비가 주요 원인으로 판단되며, 생태계 독성과 인체 건강 측면에서 개선이 필요하다는 점을 시사한다.

단위공정별 기여도를 분석한 결과, 플라스틱 기반 마스크의 경우 폴리프로필렌 부직포 제조가 약 28%의 기여도로 가장

큰 환경영향을 차지했다. 반면, 목질계 셀룰로오스 기반 마스크에서는 알루미늄 코 지지대가 약 21%로 가장 큰 영향을 미쳤으며, 제조 과정에서의 전기 사용(12%)과 바이오 폐기물 소각(14%)도 중요한 기여 요인으로 나타났다. 이는 두 소재가 제조 및 폐기 단계에서 서로 다른 방식으로 환경에 영향을 미치며, 환경적 개선이 필요한 영역이 각각 다르다는 점을 보여준다.

본 연구는 몇 가지 중요한 시사점을 제시한다. 첫째, 목질계 셀룰로오스 소재는 지구온난화와 자원 고갈 측면에서 플라스틱 기반 소재를 대체할 수 있음을 보여주었다. 이는 기존 플라스틱 소재의 환경적 문제를 완화하기 위한 중요한 대안이 될 수 있다. 그러나 생태계 질과 인체 건강 측면에서 더 높은 영향을 보였기 때문에, 친환경 소재로서의 잠재력을 최대한 발휘하려면 제조공정의 최적화와 폐기 관리 시스템의 개선이 필요하다. 특히, 제조 단계에서의 에너지 소비를 줄이고, 폐기 단계에서 생분해 특성을 효과적으로 활용할 수 있는 기반 시설을 구축하는 것이 중요하다. 또한, 알루미늄과 같은 자원 소모가 큰 부품을 대체할 수 있는 대안을 개발하거나, 기존 부품의 재료를 효율적으로 사용하는 기술적 개선도 필요하다.

한편, 본 연구는 문헌조사를 기반으로 데이터베이스(Ecoinvent 3.8 및 USLCI)를 활용하여 전과정평가를 수행하였으며, 국내의 현실적인 상황을 충분히 반영하지 못한 한계점이 있다. 특히, 국내에서는 신규로 업데이트된 데이터베이스가 국외에 비해 매우 부족한 실정이며, 이는 연구 결과에 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 향후 국내 상황에 맞는 데이터베이스를 개발하

고 관리하는 노력이 필요하다. 또한, 본 연구는 IMPACT 2002+ 방법론을 사용하여 환경적 영향을 평가하였으나, 사회적·경제적 측면의 평가가 포함되지 않았으므로, 향후 연구에서 이러한 부분을 다룰 필요가 있다고 판단된다.

향후 연구에서는 국내 데이터 기반의 연구를 통해 현실성을 높이고, 다양한 대체 소재를 비교하여 최적의 대안을 탐색하는 연구가 필요하다. 또한, 생분해성 마스크 소재의 효과적인 폐기와 처리를 위한 전용 관리 시스템을 개발하고, 이를 통해 장기적인 폐기물 관리 효율성을 확보할 수 있다. 더 나아가, 생분해성 소재의 환경적, 사회적, 경제적 가치를 통합적으로 평가함으로써 지속 가능한 소재 개발을 위한 정책적 기반을 마련할 수 있을 것이다. 본 연구는 석유계 플라스틱 기반 일회용 마스크와 목질계 셀룰로오스 기반 일회용 마스크의 환경적 특성을 비교함으로써 친환경 소재 개발과 활용의 가능성을 제시하였으며, 이는 지속 가능한 소비와 폐기물 관리 전략을 수립하는 데 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 환경부의 “폐자원에너지화 전문인력 양성사업”과 산림청의 “산림과학기술 연구개발사업(Project No. 2023487B31-2325-AA01, 한국임업진흥원 지원)”의 재정적 지원을 받아 수행되었습니다.

References

1. Richter, F. Global Mask Sales Surged 30-Fold During the Pandemic [Internet]. Statista. <https://www.statista.com/chart/29100/global-face-mask-sales/> (accessed 2024.04.21.).
2. Benson, N., Basse, D., Palanisami, T. COVID pollution: impact of COVID-19 pandemic on global plastic waste footprint. *Heliyon* 7(2), e06343 (2020).
3. Ajaj, R., Dweik, R., Ali, S., Stietiya, M. Understanding the environmental impacts of facemasks: a review on the face mask industry and existing life cycle assessment studies. *Sustainable Environment Research* 33, 20 (2023).
4. Turkmen, B. Life cycle environmental impacts of disposable medical masks. *Environmental Science and Pollution Research* 29, 25496-25506 (2021).
5. Korea Environmental Industry & Technology Institute. Carbon Emission Coefficients of Environmental Labels (2019.02.15.).
6. Kokalj, A. J., Dolar, A., Drobne, D., Marinšek, M., Dolenc, M., Škrlep, L., Strmljan, G., Mušič, B., Sever Škapin, A. Environmental hazard of polypropylene microplastics from disposable medical masks: Acute toxicity towards *Daphnia magna* and current knowledge on other polypropylene microplastics. *Microplastics and Nanoplastics* 2, 1 (2022).
7. Aigaje, E., Riofrio, A., Baykara, H. Processing, properties, modifications, and environmental impact of nanocellulose/biopolymer composites: A review. *Polymers* 15, 1219 (2023).
8. 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, 17680 (2021).
9. 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, 4948 (2021).
10. Franklin Associates. Cradle-to-Gate Life Cycle Analysis of Polypropylene (PP) Resin. Final Report for the American Chemistry Council Plastics Division (2021).
11. Chen, S. life cycle assessment of wood pellet. Master's Thesis, Department of Energy and Environment, Division of Environmental System Analysis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden (2009).
12. Krexner, T., Bauer, A., Zollitsch, W., Weiland, K., Bismarck, A., Mautner, A., Medel-Jiménez, F., Gronauer, A., Kral, I. Environmental life cycle assessment of nano-cellulose and biogas production from manure. *Journal of Environmental Management* 314, 115093 (2022).
13. Corcelli, F., Fiorentino, G., Vehmas, J., Ulgiati, S. Energy efficiency and environmental assessment of papermaking from chemical pulp: A Finland case study. *Journal of Cleaner Production* 211, 429-439 (2019).
14. Korea Ministry of Environment. 2020 Status of waste

- generation and disposal (2021).
15. Anti-Corruption & Civil Rights Commission Republic of Korea. Single-use face masks waste disposal plan. National Public Opinion Report (2021).
 16. 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).
 17. ISO. ISO 14040 Environmental Management - Life cycle Assessment - Principles and Framework (2006).