KOREAN JOURNAL OF PACKAGING SCIENCE & TECHNOLOGY
Vol. 30, No. 1 73~83 (2024)
https://doi.org/10.20909/kopast.2024.30.1.73

종이 기반과 플라스틱 기반 보건마스크 패키징의 환경영향 비교

강동호[1] · 고유진[1] · 오상훈[2] · 추고현[2] · 장지수[3] · 이준혁[1] · 심진기[1*]

[1]한국생산기술연구원 패키징기술센터
[2]한솔제지주식회사
[3]한솔제지주식회사 중앙연구소

Comparison of Environmental Evaluation for Paper and Plastic Based Mask Packaging

Dongho Kang[1], Youjin Go[1], Sanghoon Oh[2], Gohyun Choo[2], Jisoo Jang[3], Junhyuk Lee[1], and Jinkie Shim[1*]

[1]Korea Institute of Industrial Technology, Korea Packaging Center
[2]Hansol Paper Co., Ltd
[3]Hansol Paper Co., Ltd. R&D Center

Abstract In this study, environmental evaluation of high barrier coated paper (coating layer/paper) packaging is conducted in comparison with conventional aluminum laminated (PET/VMPET/LLDPE) plastic packaging. The target product for this packaging is a KF94 mask, which requires a high barrier of water and oxygen to maintain the filtration ability of the mask filter. The functional unit of this study is 10,000 mask packaging materials based on a material capable of blocking oxygen (<1 g/m^{2}day) and moisture (<3 g/m^{2}day) for the preservation of KF94 masks. In order to understand the results easily, paper-based mask packaging system divided into 6 stages (pulp, pulping & paper making, calendaring & coating, printing, packing and waste management), while plastic-based mask packaging consists of 5 stages (material production, processing, printing, packing, waste management) In case of paper-based mask packaging, most contributing stage is calendaring & coating, resulting from heat and electricity production. On the other hand, plastic-based mask packaging is contributed more than 30% by material production, specifically due to linear low density polyethylene and purified terephthalic acid production. The comparison results show that global warming potential of paper-based mask packaging has 32% lower than that of plastic-based mask packaging. Most of other impact indicators revealed in similar trend.

Keywords High barrier coated paper packaging, life cycle assessment, mask packaging

서 론

전 세계 패키징 판매량은 2020년 기준 9천6백7십억 달러 (약 1,200조원)에 달하며 2021~2026년까지 연평균 3.9%의 꾸준한 성장세를 보일 것으로 예측되고 있다. 지역별로는 아시아 (42.9%), 북미 (22.9%), 서유럽 (18.7%), 동유럽 (5.6%)로 나타났으며 한국은 전세계 패키징 시장 중 7위로 그 규모는 31억 달러에 이르는 것으로 나타났다.

Table 1에서도 보이듯이 사용 분야 별로도 패키징 판매량은 2026년까지 꾸준히 상승할 것으로 나타나고 있다.

이러한 패키징 산업 성장에 따른 패키징 폐기물, 특히 플라스틱 폐기물은 현재 추세로 증가가 지속될 경우 2030년 약 6,475천 톤/연이 발생할 것으로 예상하고 있다. 특히, COVID-19 팬데믹 기간 중 위생 방역을 위해 발생한 일회용 장갑, 마스크, 생수병, 일회용 물티슈, 손 소독제 및 청소제와 같은 플라스틱 제품의 폭발적인 사용이 전 세계적으로 발생하였다[2,3]. 또한, 국제 유가 하락에 따른 신재 플라스틱 가격 하락과 E-commerce의 성장, 1인 소비 문화 확산으로 일회용 패키징에서 기인한 폐기물이 급격하게 증가하였다.

이 중에서도 기존에 공기 중 미세먼지가 인체 건강에 악영향을 줄 정도로 대기 오염 수준이 심각해지면서 마스크 착용이 권장되어왔지만 팬데믹 이후로 마스크 사용량이 폭

*Corresponding Author:
IT 301-203, Bucheon Techno Park, Ssangyong 3 Cha, 397, Seokcheon-ro, Bucheon-si, Gyeonggi-do, 14449, Korea
Tel: +82-32-624-4758
E-mail: jkshim@kitech.re.kr

Table 1. Global packaging sales by end-use market[1)]

Packaging end-use type ($ million)				
	2020	2021	2026	CAGR(%) 21’-26’
Food	283,626	297,703	366,194	4.2
Drink	134,320	141,719	168,970	3.6
Healthcare	37,650	39,904	52,249	5.5
Cosmetics	30,754	33,411	41,341	4.4
Other consumer	78,356	82,679	102,228	4.3
Industrial/transit	402,932	419,881	498,636	3.5

발적으로 증가하였다[4)]. 국내 마스크 소비량은 2021년 기준으로 하루 2천만 개, 한 해 73억 개에 달하고 있으며 이러한 적극적인 마스크 착용으로 인해 성공적인 방역을 했다고 보고 있다. 시중에서 판매되는 마스크는 목적이나 성능 등에 따라 보건용 마스크, 방한대, 방진 마스크 등으로 분류할 수 있으며 이 중 보건용 마스크가 황사나 미세먼지, 입자성 미세물질, 감염원으로부터 호흡기를 보호하는 것을 목적으로 사용되는 제품을 말하며 입자 차단 성능에 따라 KF80 (0.6 um 크기 미세입자 80% 이상), KF94, KF99 (0.4 um크기 미세입자를 각각 94%, 99%)로 분류된다[5,6)].

이러한 보건용 마스크는 미세 입자 차단 성능을 부여하기 위해 주로 열가소성 고분자인 폴리프로필렌과 정전기 첨가제를 혼합하여 용융 방사 후 정전기적 인력 효과 (Electrostatic Effect) 구현을 위한 정전기 차징 기술 (Electro, Hydro, Corona, Plasma 등)을 활용 마스크 필터에 정전기를 부여하여 직접 여과 효과를 증대시키고 있다[7)]. 하지만 이러한 정전기적 인력효과를 유지하고 유통기한을 늘리기 위해선 외부 수분에 대한 차단이 필수적이며 이로 인해 보건용 마스크 포장재는 재활용이 불리한 알루미늄이 증착된 고차단 플라스틱 연포장재가 주로 사용되고 있다.

이러한 복합소재가 사용된 연포장재의 경우 재활용이 어려운 관계로 폐기시 고형연료로 제작되어 소각되거나 저품질 재활용 또는 매립으로 처리되어진다. 국내 생활계 폐기물 중 2022년 기준 비닐류 폐기물은 258만톤이며 이 중 재활용 30%, 소각 51%, 매립 19%로 처리되었다[8)]. 이러한 문제점을 해결하기 위한 대체제로 종이 기반의 패키징 소재를 많이 활용해왔으며 실제 환경에 미치는 영향을 비교 분석하기 위한 연구가 많이 수행되었다. 전과정평가를 통한 종이와 플라스틱 패키징의 환경 영향 비교는 일회용 쇼핑백[9-12)], 음료용기[13,14)], 컵[15)], 식품 패키징[16)]과 같은 품목군에서 수행되었으나 상기 품목군들은 상품을 담는 패키징 고유의 성능이외 차단성과 같은 기능성이 부여된 소재의 환경 부하 량 을 비교하진 않았다.

본 연구에서는 KF94보건용 마스크에 사용되는 알루미늄 증착 고 차단 플라스틱 연포장재를 대체하기 위해 개발한 고차단성 종이기반 포장재 간의 환경부하 저 감량을 분석하고 개발 시스템의 환경 개선점을 도출하기 위해 전과정 평가를 활용하였다.

연구방법

본 연구에선 ISO 14040[17)]에 준하는 전과정평가를 활용하여 분석하였다. 전과정평가는 1. 목적 및 범위 정의 (Goal and scope definition), 2. 전 과정 목록분석 (Life cycle inventory analysis), 3. 전 과정 영향평가 (Life cycle impact assessment), 4. 결과 해석 (Interpretation)으로 구성 되어있다.

1. 목적 및 범위 정의

전과정평가를 수행하고자 하는 제품 또는 시스템 선정 및 평가 범위, 기능단위 (제품 및 시스템이 제공하는 기능을 정량화 하는 작업)를 설정하는 단계이다. 본 연구의 분석 제품은 KF 94 마스크 포장재 용 기존 알루미늄 증착 연포장재 (Plastic-base mask packaging)와 고차단성 종이 기반 포장재 (Paper-based mask packaging)으로 설정하였다.

1.1 기능단위

본 연구의 기능단위는 KF 94 보건용 마스크를 보존하기 위해 필요한 산소 (<1 g/m^{2}day) 및 수분 (<3 g/m^{2}day) 차

Table 2. Functional unit of paper-based vs plastic-based mask packaging

Paper-based (10,000 pouch)			Plastic-based (10,000 pouch)			
Material	Grammage (g/m^2)	Weight (kg)	Material	Density (g/cm^3)	Thickness (um)	Weight (kg)
Pulp	60.8	33.44	PET	1.38	12	10.01
Coating	~11	8.59	VMPET	1.38	12	10.01
			Al	2.7	0.13	0.21
			LLDPE	0.93	50	23.03

단이 가능한 소재 기반의 마스크 포장재 10,000개를 기능 유닛으로 설정하고 소비자가 소비하기 위해 필요한 모든 투입/산출물을 기준 흐름으로 설정하였다. Paper-based mask packaging은 펄프, 내첨제, 사이징제 및 코팅제가 주요 구성 원료이며 Plastic-based mask packaging은 PET (Polyethylene terephthalate), VMPET (Vacuum-metallized PET), Al (Aluminum), LLDPE (Linear low density polyethylene)이 주요 구성 원료이다 (Table 2).

1.2. 시스템 범위

본 연구의 시스템 분석 범위는 원료 생산에서부터 사용, 폐기 후 재활용까지 (Cradle to cradle)로 설정하였다. 분석을 용이하게 하기 위해 각 분석 시스템 별로 단계 설정을 진행하였다. Paper-based mask packaging은 1. Pulp production, 2. Pulping & Paper making, 3. Coating, 4. Packing, 5. Printing, 6. Waste management 단계로 나누었다 (Figure 1).

Plastic-based mask packaging은 1. Material production, 2. Processing, 3. Printing, 4. Packing, 5. Waste management로 나누었다. 1단계인 Material production에서는 PET 와 LLDPE 원료 생산 단계가 포함되었으며 2단계인 Processing 단계는 필름 압출, 합지, 알루미늄 증착 공정이 포함되었다.

1.3. 가정 및 한계

전과정평가를 수행함에 있어서 부족한 데이터베이스와 현실 간의 간격을 줄이고자 기존에 구축되어있는 데이터 베이스 (Secondary database)와 동료 평가를 거친 논문을 중심으로 분석 시스템의 가정을 설정하였다 (Table 3,4).

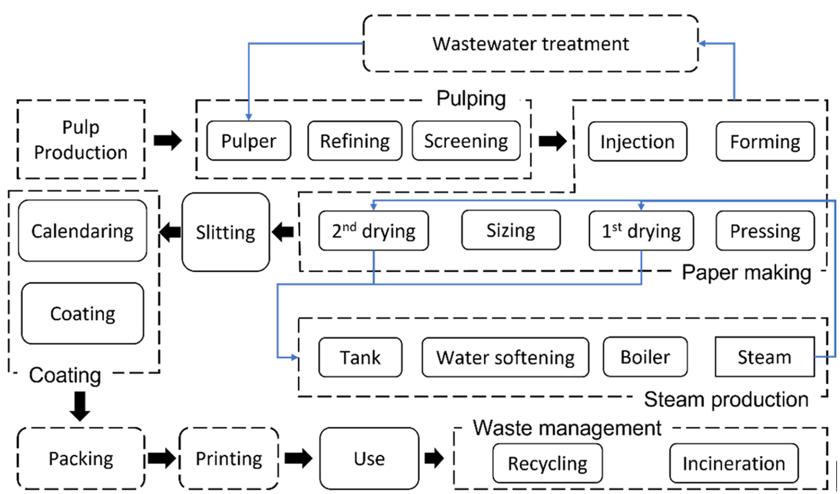

Fig. 1. System boundary of paper-based mask packaging.

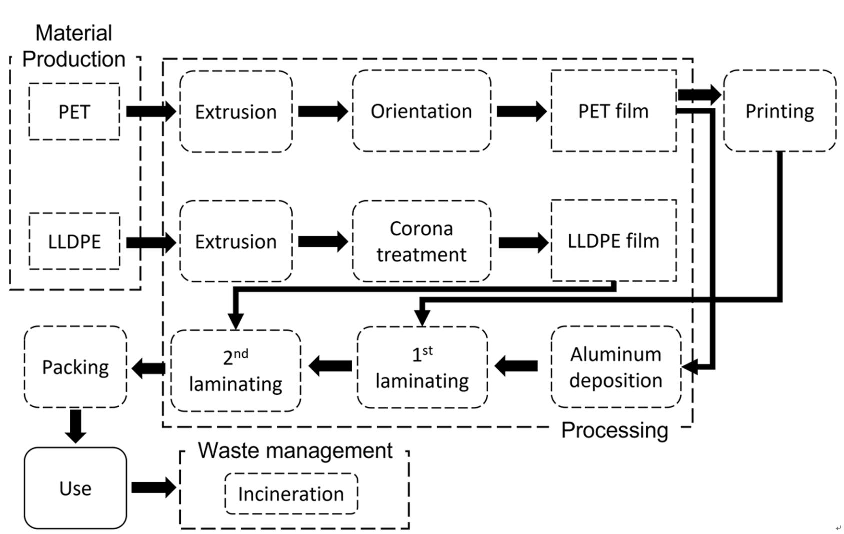

Fig. 2. System boundary of plastic-based mask packaging.

Table 3. Assumptions and limitations of paper-based mask packaging

Stage	Assumptions and limitations
1. Pulp production	- Secondary data was used for pulp (bleached sulfate pulp) and plastic (PET, PE) production - 10% of recycled paper was included
2. Pulping & Paper making	- Pulping and paper making was considered in one step due to inseparable of electricity, water and steam usage - Regarding water usage in the pulping and papermaking stages, 99% of the water discharged during the dehydration process is recycled, and 0.03 tons is evaporated during the drying process. Of the 0.76 tons of recycled water, 0.37 tons are reused, and 0.01 tons are ultimately discharged as wastewater - Due to lack of data, the filtration process was excluded and only the database of the amount of recycled water was considered - In case of steam reuse, there was no data for this product, so that the steam recycling rate (15.1%) of similar paper product was employed
3. Coating	- In the case of water usage in the coating stage, 0.03 tons of water evaporates during the coating process, the remaining 0.08 tons go through the recycling process, 0.05 tons are recycled, and ultimately 0.03 tons are discharged as wastewater - Due to lack of data, the filtration process was excluded and only the database of the amount of recycled water was considered - In case of steam reuse, there was no data for this product, so that the steam recycling rate (15.1%) of similar paper product was employed
4. Printing	- Since there is no field data at the printing state, the amount of ink used, and the amount of electricity used in the gravure printing process were calculated and used as an area ratio from the data in reference[18]
5. Packing	- This stage includes secondary packaging production, packing, aging and slitting processes
6. Waste management	- The wasted paper used in the paper recycling process is a combination of paper-based mask packaging and secondary packaging materials (kraft, corrugated cardboard) - Recycled paper was considered to be used as white cardboard - Assuming that 100% of materials other than pulp (internal additives, surface treatment agents, coating liquids, films) are incinerated, the energy generated during incineration was calculated based on the average solid fuel heat content (30.03MJ/kg)[19)]

Table 4. Assumptions and limitations of plastic-based mask packaging

Stage	Assumptions and limitations
1. Material production	- Secondary data was used for PET, LLDPE and Aluminum production
2. Pulping & Paper making	- This stage includes PET extrusion, LLDPE extrusion, aluminum deposition and film lamination - For electricity used in the aluminum deposition process, refer to literature[20] - When depositing aluminum, the average thickness is assumed to be 0.13 um
3. Printing and packing	- Same assumption made for paper-based packaging was applied
4. Waste management	- In the disposal scenario, it was assumed that 100% of paper was recycled and 100% of plastic film and aluminum were incinerated - The energy generated during incineration was calculated based on the average solid fuel heat content (30.03 MJ/kg) as same as paper-based packaging

Table 5. Database for paper-based mask packaging

Phase	Input-output	Database name
Pulp production	Pulp	Sulfate pulp [RoW]| production, totally chlorine free bleached | APOS, U
Pulping & Paper making	Electricity	Electricity, high voltage [KR]| electricity production, hard coal | APOS, U
	Water usage	Tap water [RoW]| market for | APOS, U
	Water recycling	Tap water [RoW]| market for | APOS, U
	Steam usage	Steam, in chemical industry [RoW]| production | APOS, U
	Wastewater treatment	Wastewater from soft fibreboard production [RoW]| treatment of, capacity 5E9l/year | APOS, U
	Wastewater generation	Wastewater, unpolluted [RoW]| market for wastewater, unpolluted | APOS, U
	Sizing & Additives	Rosin size, for paper production [RoW]| production | APOS, U
		Maize starch [RoW]| production | APOS, U
		Glyoxal [RoW]| production | APOS, U
		Ethylene vinyl acetate copolymer [RoW]| production | APOS, U
	Steam recycling	Steam, in chemical industry [RoW]| production | APOS, U

Table 5. Continued.

Phase	Input-output	Database name
Calendaring & Coating	Electricity	Electricity, high voltage [KR]| market for | APOS, U
	Water usage	Tap water [RoW]| market for | APOS, U
	Water recycling	Tap water [RoW]| market for | APOS, U
	Steam usage	Steam, in chemical industry [RoW]| production | APOS, U
	Coating material	Polyvinylidenchloride, granulate [RoW]| production | APOS, U
	Wastewater treatment	Wastewater from soft fibreboard production [RoW]| treatment of, capacity 5E9l/year | APOS, U
	Wastewater generation	Wastewater, unpolluted [RoW]| market for wastewater, unpolluted | APOS, U
	Water recycling	Tap water [RoW]| market for | APOS, U
	Steam recycling	Steam, in chemical industry [RoW]| production | APOS, U
Printing	Ink	Printing ink, rotogravure, without solvent, in 55% toluene solution state [RoW]| printing ink production, rotogravure, product in 55% toluene solution state | APOS, U
	Gravure printing	Electricity, high voltage [KR]| market for | APOS, U
Packing	PE	Polyethylene, low density, granulate [RoW]| production | APOS, U
	Film Extrusion	Extrusion, plastic film [RoW]| production | APOS, U
	Kraft paper	Kraft paper, unbleached [RoW]| production | APOS, U
	Corrugated board	Corrugated board box [RoW]| production | APOS, U
	Slitting	Electricity, high voltage [KR]| market for | APOS, U
Waste management	Paper recycling	Waste paper, unsorted [RoW]| treatment of waste paper to pulp, wet lap, totally chlorine free bleached | APOS, U
	Solid waste incineration	Municipal solid waste [KR]| treatment of, incineration | APOS, U
	Pulp recycling	Deinked pulp, wet lap [RoW]| treatment of waste paper to pulp, wet lap, totally chlorine free bleached | APOS, U
	Energy recovery	Heat, for reuse in municipal waste incineration only [RoW]| treatment of waste plastic, consumer electronics, municipal incineration | APOS, U
Material production	PET	Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous [RoW]| production | APOS, U
	LLDPE	Polyethylene, linear low density, granulate [RoW]| production | APOS, U
	Aluminum ingot	Aluminum ingot, production mix, at plant/US
Processing	Extrusion	Extrusion, plastic film [RoW]| production | APOS, U
	Aluminum deposition	Metalization_Material processed[20]
	Lamination	Laminating service, foil, with acrylic binder [KR]| processing | APOS, U
Printing	Ink	Printing ink, rotogravure, without solvent, in 55% toluene solution state [RoW]| printing ink production, rotogravure, product in 55% toluene solution state | APOS, U
	Gravure printing	Electricity, high voltage [KR]| market for | APOS, U
Phase	Input-output	Database name
Packing	PE	Polyethylene, low density, granulate [RoW]| production | APOS, U
	Film Extrusion	Extrusion, plastic film [RoW]| production | APOS, U
	Kraft paper	Kraft paper, unbleached [RoW]| production | APOS, U
	Corrugated board	Corrugated board box [RoW]| production | APOS, U
	Slitting	Electricity, high voltage [KR]| market for | APOS, U
Waste management	Paper recycling	Waste paper, unsorted [RoW]| treatment of waste paper to pulp, wet lap, totally chlorine free bleached | APOS, U
	PE incineration	Waste polyethylene [RoW]| treatment of waste polyethylene, municipal incineration | APOS, U
	PET incineration	Waste polyethylene terephtalate [RoW]| treatment of waste polyethylene terephtalate, municipal incineration | APOS, U
	Landfill	Waste aluminium [RoW]| treatment of, sanitary landfill | APOS, U
	Recycled pulp	Sulfate pulp [RoW]| production, totally chlorine free bleached | APOS, U
	Energy recovery	Heat, for reuse in municipal waste incineration only [RoW]| treatment of waste plastic, consumer electronics, municipal incineration | APOS, U

2. 전과정목록분석

전과정평가에서 목록분석은 시스템 내에서 투입물과 산출물의 데이터를 정성적, 정량적으로 정리하는 단계이다. 직접 수집한 데이터 (1차데이터)는 제품 생산을 위한 원재료의 사용량, 원재료의 종류, 제품 생산 중 발생하는 폐기물의 양 등이 되었으며 기존 데이터 베이스 (2차데이터)를 활용하여 원료 생산 공정 중 사용하는 전력, 직접적인 생산 공정 등을 활용하였다. 2차데이터로 주로 활용한 데이터베이스는 Ecoinvent 사의 Ecoinvent V3.8을 사용하였다 (Table 5).

결 과

1. 전과정 영향평가

전과정 영향평가는 전과정 목록분석에서 산출된 전과정 목록의 투입/산출물 데이터를 각 환경 영향 범주에 분류하는 과정으로 각 영향 범주 별 정해진 등가계수를 사용하여 정량화나는 단계이다. 다양한 전과정영향평가 방법론이 있으며 본 연구에서는 ReCiPe 2016 방법론을 사용하였다 (Table 6).

1.1. Paper-based mask packaging의 환경 영향 평가

Paper-based mask packaging 10,000개 생산 시 총 224 kgCO2eq의 지구 온난화 지수가 발생하는 것으로 분석되었다. 10,000매를 기준으로 계산하여 캘린더링 및 코팅 단계(39%)에서는 스팀 사용량이 많아, 가장 높은 지구온난화 영향이 발생하였으며 다음으로 지료 조성 및 초지 단계(29%), 인쇄(14%), 펄프 공급(8%), 폐기 처리(7%), 그리고 포장(3%) 순으로 탄소배출량에 기여하였다. 초지와 코팅 과정에서 사용되는 스팀을 15.1% 재활용함으로써 지료 조성 및 초지 단계의 탄소배출량은 4 kgCO2eq, 캘린더링 및 코팅 단계는 8 kgCO2eq 감소하여 총 12 kgCO2eq를 절감하였으며 펄프 공급 단계의 경우, 펄프를 수입하는 선박 운송을 추가하면 10.5 kgCO2eq 증가하게 되면서 총 지구온난화 지수가 235 kgCO2eq로 증가하였다 (Figure 3, Table 7).

Table 7에서는 각 단계별 세부 단위 공정의 지구온난화 지수에 대한 기여도를 평가하였다. Pulp 생산 단계에서는 펄프 생산에 필요한 전기를 생산(34%)하는 과정에서 탄소배출이 가장 많이 발생하며, 차례로 sulfate pulp 생산(18%), 열 생산(13%), 그리고 펄프의 원료를 수입하는 화물 운송(11%)이 환경 영향에 기여하는 것으로 나타났으며 지료 조성 및 초지 단계에서는 조성과 초지에 필요한 전기를 생산(55%)할 때 탄소배출량이 가장 많으며, 열 생산(38%), 사

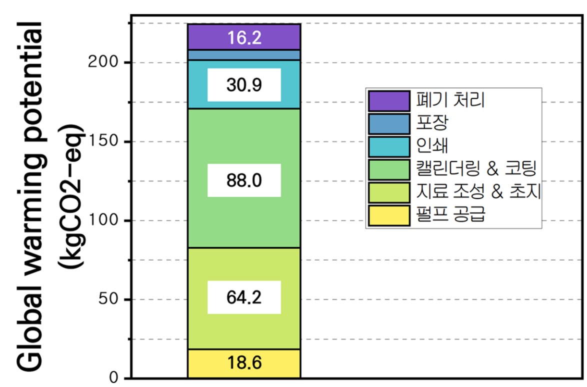

Fig. 3. Global Warming Potential of paper-based mask packaging at each stage.

Table 6. Life cycle impact methodology used in this study

Impact indicator	Unit	Description
Global warming potential	kg CO_2 eq	Infrared radiative forcing increase
Ozone depletion	kg CFC11 eq	Stratospheric ozone decrease
Ionising radiation	kBq Co-60 eq	Absorbed dose increase
Oxidant formation_human health	kg NOx eq	Tropospheric ozone population intake increase
Fine particulate matter formation	kg $PM_{2.5}$ eq	$PM_{2.5}$ population intake increase
Oxidant formation_ecosystems	kg NOx eq	Tropospheric ozone increase
Terrestrial acidification	kg SO_2 eq	Proton increase in natural soils
Freshwater eutrophication	kg P eq	Phosphorus increase in fresh water
Marine eutrophication	kg N eq	Nitrogen increase in marine water
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	Hazard-weighted increase in natural soils
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	Hazard-weighted increase in freshwaters
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	Hazard-weighted increase in marine water
Human toxicity: cancer	kg 1,4-DCB	Risk increase of cancer disease incidence
Human toxicity: non-cancer	kg 1,4-DCB	Risk increase of non-cancer disease incidence
Land use	m2a crop eq	Occupation and time integrated land transformation
Fossil resource scarcity	kg oil eq	Upper heating value

Table 7. Global Warming Potential of paper-based mask packaging at each stage

Stage	Pulp	Pulping & Paper making	Calendaring & Coating	Printing	Packing	Waste management	Total
GWP (Kg CO2 eq)	18.56	64.24	87.98	30.90	6.49	16.16	224.33
(%)	8.3%	28.6%	39.2%	13.8%	2.9%	7.2%	100.0%

Table 8. Contribution analysis of paper-based mask packaging by specific process

Stage	Specific processes	Contribution
Pulp	Electricity production	34%
	Pulp	18%
	Heat production	13%
	Transportation	11%
Pulping & Paper making	Electricity production	55%
	Heat production	38%
	Sizing agent production	3%
Calendaring & Coating	Heat production	51%
	Coating material production	40%
	Electricity production	9%
Printing	Alkyd production	60%
	Electricity production	21%
Packing	Electricity production	98%
	Kraft paper production	2%
	LDPE granulate production	0.3%
Waste management	Paper recycling	113%
	Incineration	28%
	Recycled paper	–16%
	Energy recovery	–24%

이즈제 생산(3%) 순으로 영향을 미치는 것으로 나타났다. 캘린더링 및 코팅 단계에서는 코팅 액 원료인 PVDC를 생산(50%)하는 과정에서 배출된 탄소가 가장 높은 비율을 차지하고, 코팅 시 사용되는 열 생산(39%), 그리고 전기 생산(10%) 순으로 환경에 큰 영향을 미쳤으며 인쇄 단계에서는 잉크의 원료 중 하나인 Alkyd 수지를 생산하는 과정(60%)에서 가장 큰 환경부하가 발생하고, 전기 생산(21%)이 다음으로 기여하는 것으로 나타났다. 포장 단계에서는 packing, aging, slitting 과정에서 사용되는 전기를 생산(98%)할 때 가장 많이 발생하며, 크래프트 박스 생산(2%), LDPE granulate 생산(0.3%) 순으로 큰 영향을 미쳤으며 폐기 단계에서는 종이를 재활용하는 공정(113%)과 고형 폐기물 소각(28%) 순으로 탄소배출에 기여하고, 재활용으로 발생하는 종이 재생원료 획득(–16%)과 소각에서 얻는 열 이득(–24%)이 환경 이득으로 기여하였다.

탄소 배출, 즉 지구온난화 영향 범주 이외에 다른 환경 영향 범주 결과 값은 부록 1에 서술하였다 (Table S-1).

1.2. Plastic-based mask packaging의 환경 영향 평가

알루미늄을 증착 한 Plastic-based mask packaging 10,000매 생산 시 발생하는 지구온난화지수는 330 kgCO2eq이며, Paper-based mask packaging보다 약 106 kgCO2eq 더 크게 나오는 것으로 나타났다. 단계별로 원료 생산(37%)의 경우, 플라스틱과 알루미늄 ingot 생산 과정 많은 에너지가 소모되므로 탄소배출량이 가장 크게 나타났으며 폐기 처리(32%)가 두 번째로 지구온난화 지수에 큰 기여를 하는데, 플라스틱 소각 과정에서 탄소가 많이 배출되기 때문인 것

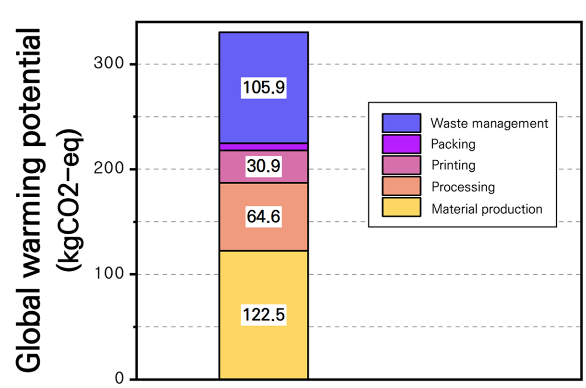

Fig. 4. Global Warming Potential of plastic-based mask packaging at each stage.

Table 9. Global Warming Potential of plastic-based mask packaging at each stage

Stage	Material production	Processing	Printing	Packing	Waste management	Total
GWP (Kg CO_2 eq)	122.53	64.57	30.90	6.49	105.92	330.41
(%)	37.08	19.54	9.35	1.96	32.06	100.00

Table 10. Contribution analysis of plastic-based mask packaging by specific process

Stage	Specific processes	Contribution
Material production	LLDPE granulate	46%
	Purified terephthalic acid	30%
	Heat production	12%
	Ethylene glycol	11%
Processing	Electricity production	71%
	Heat production	14%
Printing	Alkyd production	60%
	Electricity production	21%
Packing	Electricity production	98%
	Kraft paper production	2%
	LDPE granulate	0.3%
Waste management	PE incineration	80%
	PET incineration	39%
	Energy recovery	-19%

으로 분석되었다. 다음으로 필름 생산(20%), 인쇄(9%), 포장(2%) 순으로 환경에 영향을 미쳤으며 전체적으로 플라스틱 원료 생산과 플라스틱 필름 소각 시 발생하는 환경 부하가 AL 증착 필름 파우치 시스템에 큰 영향을 기여하는 것으로 나타났다 (Figure 4, Table 9).

Table 10에서는 plastic-based mask packaging각 단계별 세부 단위 공정의 지구온난화 지수에 대한 기여도를 평가하였다. 원료 생산단계에서는 LLDPE 필름의 원료인 LLDPE granulate를 생산(46%)하는 과정이 환경영향에 가장 큰 기여를 하며, PET 레진 생산에 필요한 TPA, EG 생산이 각각 30%, 11% 기여하고 열 생산(12%)이 다음으로 영향을 미치는 것으로 나타났으며 가공 단계에서는 필름 압출과 합지에 사용되는 전기를 생산(71%)할 때 가장 큰 기여를 하며, 열 생산(14%)이 그 다음으로 큰 기여를 하는 것으로 나타났다. 인쇄 단계에서는 Plastic-based mask packaging 과 동일하게 잉크의 원료 중 하나인 Alkyd 수지를 생산하는 과정(60%)에서 가장 큰 환경부하가 발생하고, 전기 생산(21%)이 다음으로 영향을 미쳤으며 포장 단계 또한 packing, aging, slitting 과정에서 사용되는 전기를 생산(98%)할 때 가장 많이 발생하며, 크래프트 박스 생산(2%), LDPE granulate 생산(0.3%) 순으로 큰 영향을 미쳤다. 폐기 처리 단계에서는 PE와 PET를 소각하는 과정에서 탄소배출에 각각 80%, 39% 기여하였으나, 플라스틱 소각으로 얻는 열 이득으로 인해 –19%의 환경 이득이 발생하였다.

탄소 배출, 즉 지구온난화 영향 범주 이외에 다른 환경 영향 범주 결과 값은 부록 2에 서술하였다 (Table S-2).

1.3. Paper vs Plastic-based mask packaging 환경 영향 비교 분석

Paper와 Plastic 기반 마스크 포장재의 비교 분석을 용이하게 하기 위해 앞서 설정한 각 시스템의 단계를 다시 3단계로 재조정하였다. 즉, 1단계인 원료 생산 단계 (Material), 2단계인 파우치 생산 단계 (Processing), 3단계인 폐기처리 단계 (Waste management) 로 단계를 통일하여 각 단계별

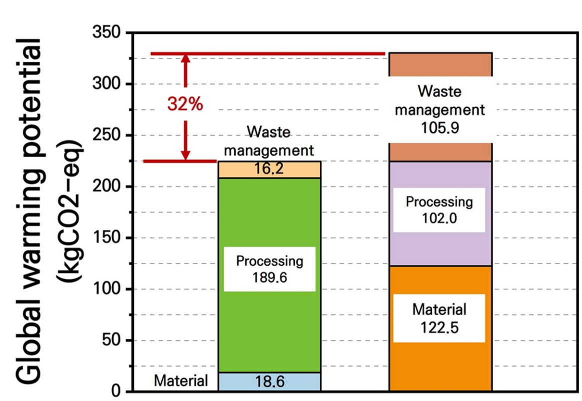

Fig. 5. Global Warming Potential comparison of paper (left) vs plastic (right)-based packaging

Table 11. Global Warming Potential comparison of paper vs plastic-based packaging

Paper-based packaging ($kgCO_2eq$)				Plastic-based packaging ($kgCO_2eq$)			
Material	Processing	Waste management	Total	Material	Processing	Waste management	Total
18.56	189.61	16.16	224.33	122.53	101.96	105.92	330.41
8.3%	84.5%	7.2%	100%	37.1%	30.9%	32.1%	100%

Table 12. Contribution analysis of paper vs plastic based mask packaging for each stage

Stage	Paper-based mask packaging		Plastic-based mask packaging	
	Specific process	GWP (kg CO_2 eq)	Specific process	GWP (kg CO_2 eq)
Material	Pulp	18.56	PET	65.31
			LLDPE	56.23
			AL ingot	0.99
Processing	Pulping & paper making	60.78	PET film extrusion	14.06
	Calendaring & coating	69.57	Metallization	1.96
			LLDPE film extrusion	19.70
	Printing	30.90	Lamination	28.85
	Packing	6.49	Printing	30.90
			Packing	6.49
Waste management	Paper recycling	18.27	Incineration	126.21
	MSW incineration	4.48		
	Recycled paper	−2.64	Energy recovery from incineration	−20.34
	Energy recovery from incineration	−3.95		
Total	202.46		330.41	

비교 분석이 용이하도록 재설정하였다.

Figure 5에서 보듯이 paper-based mask packaging 이 plastic-based mask packaging 대비 지구온난화 지수에서 32% 낮은 것으로 분석되었다. Table 11에서 나타났듯 단계별로 보면 원료 생산과 폐기 처리 단계의 경우, plastic-based mask packaging이 높으며 파우치 생산 단계는 paper-based mask packaging가 환경에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히 원료 생산 단계에서는 plastic-based mask packaging 이 paper-based mask packaging 대비해서 6.6배 더 높게 나왔으며 폐기 처리 단계에서도 필름 소각 시 발생하는 환경부하량이 높아 약 39% 높게 나타났다. Table 12에선 시스템의 각 Stage 별로 가장 기여도가 높은 세부 단위 공정들을 순서대로 나타내었다.

결 론

이번 연구에서는 전과정평가를 통해 알루미늄 증착 연포장재 (PET/VMPET/LLDPE)와 종이 기반 고차단성 연포장재 (Barrier coating/Paper)의 환경 부하량을 비교 분석하였다. 각 포장재의 기능 유닛은 KF 94 보건용 마스크를 보존하기 위해 필요한 산소 (<1 g/m^2day) 및 수분 (<3 g/m^2day) 차단이 가능한 소재 기반의 마스크 포장재 10,000개로 설정하였다. 분석 결과 종이 기반 고차단성 연포장재의 총 탄소배출량은 224.33 kgCO2eq로 나타났으며 종이 제조 공정 중 캘린더링 및 코팅에서 코팅제 생산 및 스팀, 전력 소비에 따라 가장 큰 기여를 하는 단계로 나타났다. 플라스틱 기반 알루미늄 증착 연포장재는 총 탄소배출량 330 kgCO2eq로 종이 기반 고차단성 연포장재 대비 32% 더 높게 나왔으며 주로 원료 생산 단계에서 플라스틱과 알루미늄 ingot 생산 과정 많은 에너지가 소모되어 탄소배출량이 더 높게 나오는 것으로 분석되었다. 전제척으로 두 포장재의 환경부하량 차이는 폐기물 관리 차원에서 종이 기반 고차단성 연포장재의 재활용 용이성에 따른 환경 이득에서 나타났다.

2021년 코로나 팬데믹 기간 동안 국내 마스크 소비량은 2021년 기준 73억개에 달한다고 보고하고 있다[4]. 전세계적으론 팬데믹 기간 동안 매년 대략 150,000 억개의 마스크가 소비되었다는 보고가 있다[21]. 이를 기반으로 종이 기반 고차단성 연포장재를 적용하였을 경우 국내 기준 77.38 billion kg CO2 eq, 전 세계 기준 1,590 trillion kg CO2 eq에 해당하며 이는 나무 한 그루가 연간 8kg의 지구온난화 가스 흡수를 한다는 기준으로 각각 967억, 200조 그루의 나무를 절감하는 효과를 볼 수 있는 것이다. 물론 이는 단순 산술적인 계산으로 시스템에 영향을 미칠 수 있는 외부 경제, 사회적 요인들을 배제한 결과이다. 향후 결과론적 전과정평가 (Consequential LCA)를 적용하여 거시적인 시스템의 환경 영향 분석을 수행할 예정이다.

참고문헌

1. Platt, D., *The Future of Global Packaging to 2026*. 2021: Smithers.
2. Syam, N., *Is the pandemic triggering a spike in plastic pollution*. 2020.
3. Nzediegwu, C. and S.X. Chang, *Improper solid waste management increases potential for COVID-19 spread in developing countries.* Resources, conservation, and recycling, 2020. **161**: p. 104947.
4. 황나원 and 이광우, *COVID-19 의 확산으로 인한 국내 소비자의 마스크 사용현황과 만족도 조사.* 한국의류산업학회지 pISSN, 2022. **24**(4).
5. Korea Consumer Agency, *Mask safety survey.* 2018.
6. Ministry of Food & Drug Safety, *Provision of information on 'Health mask' against yellow dust and fine dust*, M.o.F.D. Safety, Editor. 2018.
7. Zhang, X., et al., *Multi-layered, corona charged melt blown nonwovens as high performance PM0. 3 air filters.* Polymers, 2021. **13**(4): p. 485.
8. 한국환경공단, *전국 폐기물 발생 및 처리현황(2022년)*. 2022.
9. Anwar, T., D. Palekhow, and M. Schmidt, *Comparative Study of Environmental Performance between Low Density Polyethylene (LDPE) Grocery Bags and Unbleached Paper Grocery Bags via Life Cycle Assessment using openLCA*. 2020, Brandenburg University of Technology Cottbus.
10. Bisinella, V., et al., *Life Cycle Assessment of grocery carrier bags.* 2018.
11. Civancik-Uslu, D., et al., *Life cycle assessment of carrier bags and development of a littering indicator.* Science of the Total Environment, 2019. **685**: p. 621-630.
12. Muthu, S.S., et al., *Carbon footprint of shopping (grocery) bags in China, Hong Kong and India.* Atmospheric environment, 2011. **45**(2): p. 469-475.
13. Ferrara, C. and G. De Feo, *Comparative life cycle assessment of alternative systems for wine packaging in Italy.* Journal of Cleaner Production, 2020. **259**: p. 120888.
14. Giroux, L.L., *A life cycle assessment case study of milk packaging in Nova Scotia*. 2001: National Library of Canada= Bibliothèque nationale du Canada, Ottawa.
15. Ligthart, T. and A. Ansems, *Single use cups or reusable (coffee) drinking systems: an environmental comparison.* TNO, Apeldoorn, 2007.
16. Belley, C., et al., *Comparative Life Cycle Assessment Report of Food Packaging Products.* Report of CIRAIG (Interuniversity Research Centre for the Life Cycle of Products, Processes and Services), Montreal (Canada), 2011: p. 47.
17. International Standard Organization, *ISO 14040:2006 Life cycle assessment-Principles and framework*, in *Environmental management*. 2022.
18. Lee, Y., *Comparative life cycle assessment of traditional instant noodle packaging with newly developed packaging in Korea*, in *Department of Food Bioscience and Technology*. 2022, Korea University.
19. Kim, S.-K., et al., *Estimated CO2 emissions and analysis of solid recovered fuel (SRF) as an alternative fuel.* Asian Journal of Atmospheric Environment, 2013. **7**(1): p. 48-55.
20. Bayus, J., C. Ge, and B. Thorn, *A preliminary environmental assessment of foil and metallized film centered laminates.* Resources, Conservation and Recycling, 2016. **115**: p. 31-41.
21. Wang, L., et al., *Global face mask pollution: threats to the environment and wildlife, and potential solutions.* Science of The Total Environment, 2023: p. 164055.

투고: 2024.04.04 / 심사완료: 2024.04.04 / 게재확정: 2024.04.15

부 록

Table S-1. Life cycle impact assessment of paper-based mask packaging

Impact category	Unit	Total	Pulp	Pulping & paper making	Calendaring & coating	Printing	Packing	Waste management
Global warming	kg CO_2 eq	2.025.E+02	1.856.E+01	6.078.E+01	6.957.E+01	3.090.E+01	6.488.E+00	1.616.E+01
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	4.984.E-04	9.140.E-06	2.812.E-05	3.808.E-04	4.086.E-05	2.306.E-06	3.712.E-05
Ionizing radiation	kBqCo-60 eq	–3.955.E+01	9.177.E-01	4.680.E-01	2.924.E+00	2.044.E+00	2.297.E+00	–4.820.E+01
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	9.779.E-01	9.405.E-02	1.352.E-01	1.200.E-01	5.035.E-02	1.575.E-02	5.626.E-01
Fine particulate matter formation	kg $PM_{2.5}$ eq	2.805.E-01	6.602.E-02	5.393.E-02	9.440.E-02	4.142.E-02	7.854.E-03	1.683.E-02
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq	1.324.E+00	9.551.E-02	1.366.E-01	1.244.E-01	5.309.E-02	1.588.E-02	8.982.E-01
Terrestrial acidification	kg SO_2 eq	6.240.E-01	1.131.E-01	1.522.E-01	2.389.E-01	7.595.E-02	1.467.E-02	2.918.E-02
Freshwater eutrophication	kg P eq	6.923.E-02	6.212.E-03	3.428.E-02	1.190.E-02	8.228.E-03	4.772.E-03	3.831.E-03
Marine eutrophication	kg N eq	2.845.E-02	8.599.E-04	7.399.E-03	7.637.E-04	8.392.E-03	3.436.E-04	1.069.E-02
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	2.741.E+02	5.973.E+01	1.003.E+02	1.021.E+02	4.617.E+01	4.554.E+00	–3.871.E+01
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	4.791.E+00	5.936.E-01	1.122.E+00	7.252.E-01	5.459.E-01	1.470.E-01	1.657.E+00
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	6.510.E+00	8.386.E-01	1.584.E+00	1.048.E+00	6.906.E-01	2.055.E-01	2.143.E+00
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	1.076.E+01	9.030.E-01	2.526.E+00	6.043.E+00	7.229.E-01	3.267.E-01	2.399.E-01
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	1.334.E+02	2.102.E+01	3.306.E+01	2.136.E+01	1.149.E+01	4.268.E+00	4.217.E+01
Land use	m2a crop eq	7.465.E+01	5.329.E+01	3.640.E+00	1.896.E-01	1.694.E+01	2.055.E-01	3.894.E-01
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	–1.234.E-01	4.509.E-02	2.055.E-02	1.915.E-02	4.308.E-02	4.032.E-03	–2.553.E-01
Fossil resource scarcity	kg oil eq	5.136.E+01	4.908.E+00	1.568.E+01	1.896.E+01	7.842.E+00	1.741.E+00	2.232.E+00
Water consumption	m3	–1.149.E-01	9.451.E-01	2.253.E-01	4.549.E-01	1.640.E-01	4.231.E-02	–1.947.E+00

Table S-2. Life cycle impact assessment of plastic-based mask packaging

Impact category	Unit	Total	Material production	Processing	Printing	Packing	Waste management
Global warming	kg CO2 eq	3.304.E+02	1.225.E+02	6.457.E+01	3.090.E+01	6.488.E+00	1.059.E+02
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	9.488.E-05	1.405.E-05	2.211.E-05	4.086.E-05	2.306.E-06	1.557.E-05
Ionizing radiation	kBqCo-60 eq	1.977.E+01	2.786.E+00	1.395.E+01	2.044.E+00	2.297.E+00	-1.309.E+00
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	4.078.E-01	2.175.E-01	1.390.E-01	5.035.E-02	1.575.E-02	-1.483.E-02
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	2.585.E-01	1.349.E-01	1.087.E-01	4.142.E-02	7.854.E-03	-3.444.E-02
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq	4.267.E-01	2.329.E-01	1.408.E-01	5.309.E-02	1.588.E-02	-1.591.E-02
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	5.361.E-01	3.336.E-01	1.871.E-01	7.595.E-02	1.467.E-02	-7.522.E-02
Freshwater eutrophication	kg P eq	5.403.E-02	1.721.E-02	3.506.E-02	8.228.E-03	4.772.E-03	-1.124.E-02
Marine eutrophication	kg N eq	-7.510.E-03	1.125.E-03	2.738.E-03	8.392.E-03	3.436.E-04	-2.011.E-02
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	4.885.E+02	1.686.E+02	6.454.E+01	4.617.E+01	4.554.E+00	2.047.E+02
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	7.946.E+00	1.441.E+00	1.475.E+00	5.459.E-01	1.470.E-01	4.337.E+00
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	1.178.E+01	2.062.E+00	2.044.E+00	6.906.E-01	2.055.E-01	6.782.E+00
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	6.034.E+00	3.066.E+00	2.723.E+00	7.229.E-01	3.267.E-01	-8.044.E-01
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	8.536.E+01	4.351.E+01	3.969.E+01	1.149.E+01	4.268.E+00	-1.360.E+01
Land use	m2a crop eq	2.069.E+01	8.662.E-01	3.404.E+00	1.694.E+01	2.055.E-01	-7.224.E-01
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	9.322.E-02	1.432.E-01	7.349.E-02	4.308.E-02	4.032.E-03	-1.706.E-01
Fossil resource scarcity	kg oil eq	9.758.E+01	7.497.E+01	1.695.E+01	7.842.E+00	1.741.E+00	-3.926.E+00
Water consumption	m3	1.477.E+01	1.345.E+01	1.253.E+00	1.640.E-01	4.231.E-02	-1.398.E-01