

통기성 필름 제조 공정의 전과정 평가

안중우*

성신여자대학교 청정융합과학과
서울특별시 강북구 도봉로76가길 55 (미아동)

(2017년 3월 8일 접수; 2017년 7월 24일 수정본 접수; 2017년 7월 24일 채택)

Life Cycle Assessment on Process of Breathable Film Production

Joong Woo Ahn*

Department of Interdisciplinary Eco Science, Sungshin Women's University
55 Dobong-ro 76ga-gil, Gangbuk-gu, Seoul, 142-732, Korea

(Received for review March 8, 2017; Revision received July 24, 2017; Accepted July 24, 2017)

요 약

본 연구에서는 통기성 필름의 제조 공정에 대한 환경영향 특성을 분석하기 위해 전과정평가를 수행하였다. 특성화와 정규화 결과, 영향범주 별 환경영향은 지구온난화가 약 97%, 인간독성 2%의 기여도를 나타냈다. 주요 기여도는 투입물인 고밀도 폴리에틸렌(HDPE)과 폴리프로필렌(PP) 그리고 에너지인 전력으로 나타났다. 세부 공정에서는 혼합단계(Mixing)가 57%, 부착단계(Lamination) 29% 압출단계(Extruder) 10% 순으로 높은 환경영향 기여도를 보였다. 환경 영향을 개선하기 위해서는 전력 사용량을 감소시키거나 원재료인 HDPE나 PP를 제외한 수율 향상을 고려한 새로운 공정 시스템 설계가 필요하다.

주제어 : 통기성 필름, 전과정평가, 환경영향

Abstract : In this study, a quantitative environmental impact assessment for the production process of breathable film was conducted employing Life Cycle Assessment (LCA) methodology. Among the various categories, Global Warming (GW) accounted for the highest impact (97%) followed by Human Toxicity (HT). And the key substances of various impact categories included HDPE, PP, and electricity. In the production process, the high impact resulted from mixing process (57%), lamination process (29%), and extruder process (10%). To improve environmental impact, it is necessary to design a new process system that reduces the amount of electricity used and that increases production yields, if raw materials such as HDPE and PP owe excluded.

Keywords : Breathable film, Life cycle assessment, Environmental impact

1. 서 론

통기성 필름은 기체 및 수증기는 투과하나 액체 등은 투과할 수 없는 연속된 기공이 필름 내부에 분포되어 있는 구조를 가지고 있는 기능성 필름으로 유아용 기저귀, 일회용 방한, 방수 등의 위생용품에 사용되고 있다. 이러한 통기성 필름의 제조 방법 중 연신법 Choi [1]을 이용한 통기성 필름은 폴리에틸렌과 무기물이 균일하게 혼합되어 만들어진 펠렛(pellet)을 압출과 연신 등의 공정으로 내부의 기공이 연속적이며 균일하게 형성 된다. 후속 공정인 라미네이팅(Laminating) 공정

Kim and Kim [2]은 통기성 필름과 다른 소재를 복합하는 공정으로 기저귀의 경우 통기성 필름과 부직포를 복합한 제품이 개발되고 있다. 이러한 공정으로 제조되는 통기성 필름의 투입 원료 및 에너지와 배출되는 물질을 분석하여 기술적 환경 가치를 파악하는 것은 확대되고 있는 통기성 필름 시장에서 고려해야 될 사항이다. 본 연구는 통기성 필름 제조 공정의 전과정 평가(Life Cycle Assessment)를 통한 환경성 평가를 세부 공정 단계로 구별하여 주요 공정과 기여물질을 규명하고 한다.

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jwahn@sungshin.ac.kr; Tel: +82-2-920-7897; Fax: +82-2-920-2786

doi: 10.7464/kscet.2017.23.4.388 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

2. 통기성 필름의 전과정평가

2.1. 목적 정의

통기성 필름의 제조 공정 각 단계에서 발생하는 환경부하를 분석하여 정량적인 환경영향을 평가하며, 영향범주 별 주요 영향물질과 공정을 규명하여 보다 환경 친화적 제품 생산을 위한 개선 방안을 찾고자 한다.

2.2. 범위 정의

2.2.1. 기능 및 기능단위, 기준흐름

통기성 필름의 기능은 공기 통풍성과 방수 기능을 요구하는 일회용 위생제품의 소재로, 기능단위와 기준흐름은 Table 1과 같이 동일하게 정의하였다.

2.2.2. 시스템 경계

본 연구의 시스템 경계는 원료인 폴리에틸렌과 탄산칼슘을 혼합하여 고분자 압출기를 통해 성형된 필름에 통기성을 형성 후 완제품까지의 공정 단계로 Gate to Gate로 정의하였다.

2.2.3. 데이터 범주

데이터 범주는 원료물질, 보조물질, 용수, 에너지, 제품, 부산물, 대기 및 수계 배출물, 고형 폐기물로 구분하였다.

2.2.4. 데이터 품질요건

본 연구의 데이터는 현장 데이터와 국가 및 해외 LCI 데이터로 구분되며, 시간적 경계는 지난 1년 공정별로 수집한 업체의 현장 데이터이며, 상위 및 하위공정의 연결은 국가 및 해외 LCI 데이터를 사용하였다. 지역적 경계는 수송 공정의 제외로 해당 지역 데이터를 국내 LCI 데이터와 동일하게 설정하였다(Table 2).

2.2.5. 가정 및 제한사항

투입 물질 중 PE수지(polyethylene), 포장지(wrapping paper),

Table 1. Scope definition

Function	Breathable films used in the manufacture of disposable sanitary products
Functional unit	Amount of breathable film 1 kg
Reference flow	1 kg of breathable film

Table 2. Data quality

Group	Up/Down stream	Transport stage	Production stage
Temporal scope	Most recent data	-	2015 Annual data
Regional scope	Local data	-	Local data
Technological scope	-	-	Technologies of the target company

랩(wrap)은 고밀도 폴리에틸렌(HDPE), 부직포(non-woven fabrics)와 라벨(label)은 폴리프로필렌(PP), 잉크(ink)와 용매(solvent)는 유기화학 물질(chemicals organic), 폐유기 용제(organic solvents)와 휘발성 유기물(volatile organic compounds)은 유해 폐기물(hazardous waste)의 LCI DB를 적용하였다.

2.3. 전과정 목록분석

2.3.1. 공정 흐름도

폴리에틸렌(PE)과 탄산칼슘(CaCO₃)을 원료로 하는 통기성 필름의 제조 공정은 Figure 1과 같다. 제조공정 별 환경부하 값과 원인 규명을 위해 실제 제조 단계에 맞춰 총 8개의 단위 공정인 혼합(Mixing), 압출(Extruding), 냉각(Cooling), 연신(Extender), 프린팅(Printing Dry), 부착(Lamination), 절취(Slitting), 포장(Wrapping)으로 구별하였다. 혼합 단계에서는 폴리에틸렌(HDPE)과 탄산칼슘(CaCO₃)을 교반기를 통해 혼합하는 공정이며 압출 단계에서 다이스를 통해 필름으로 성형 후 냉각 단계에서 성형된 필름을 결정시키게 된다. 연신 단계에서는 통기성을 형성하며 프린팅 단계에서는 프린팅 후 잉크를 필름에 정착시키게 된다. 부착 단계는 통기성 필름과 부직포에 열을 가하여 접착시킨 후 절단 단계에서 제품을 절취한 후 포장 단계를 거쳐 통기성 필름이 제조된다.

2.3.2. 데이터 수집 및 계산

데이터 수집은 업체의 현장 데이터를 공정 별로 수집하였으며, 상위 및 하위흐름의 연결은 환경부와 산업통상자원부에서 구축한 국내 LCI 데이터베이스[3]를 적용하였다. 해외 LCI 데이터베이스는 Ecoinvent Kim et al. [4]에서 구축한 데이터 베이스를 사용하였다(Table 3).

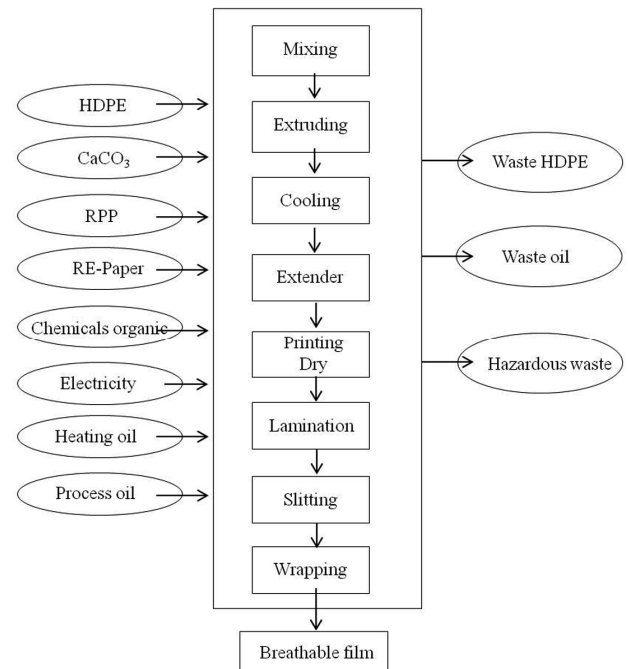


Figure 1. Process flow diagram for breathable film.

Table 3. Data sources for LCI

Group	Material	Data category	Data source			Remark
			Survey	Calculation	Estimation	
Input	HDPE (High-Density Polyethylene)	Main material	V			It replaced the polyethylene, wrapping paper, wrap
	CaCO ₃	Main material	V			-
	RPP (Random Polypropylene)	Sub-materials	V			It replaced the non-woven fabrics, label
	Recycled paper	Sub-materials	V			It replaced the paper core, pad
	Chemicals organic	Sub-materials	V			It replaced the ink, solvent
Energy	Electricity	-		V		-
	Heating oil	-	V			-
	Process oil	-	V			-
Output	Breathable film	Product	V			-
	Waste HDPE	Recycling	V			-
	Waste oil	Recycling	V			-
	Hazardous waste	Incineration	V V			It replaced the organic solvents, nolatile organic compounds

2.4. 전과정 영향평가

전과정 영향평가는 산업통상자원부(구 지식경제부)의 영향평가 방법론과 특성화(Characterization) 및 정규화(Normalization) 인자를 적용하여 Phae et al. [5] 분류화, 특성화, 정규화 단계로 수행하였으며, 영향범주는 오존층파괴(Ozone Layer depletion, OD), 산성화(Acidification, AD), 자원고갈(Abiotic resource depletion, ARD), 지구온난화(Global warming, GW), 부영양화(Eutrophication, EUT), 광화학산화물생성(Photochemical oxidation creation, POC), 인간독성(Human toxicity, HT), 생태독성(Ecotoxicity, ET) 총 8개 범주를 고려하였다.

2.4.1. 특성화 결과

통기성 필름 1 kg 제조를 기준으로 계산된 특성화 값은 Figure 2 및 Table 4와 같다. 영향범주 주요 물질은 오존층 파

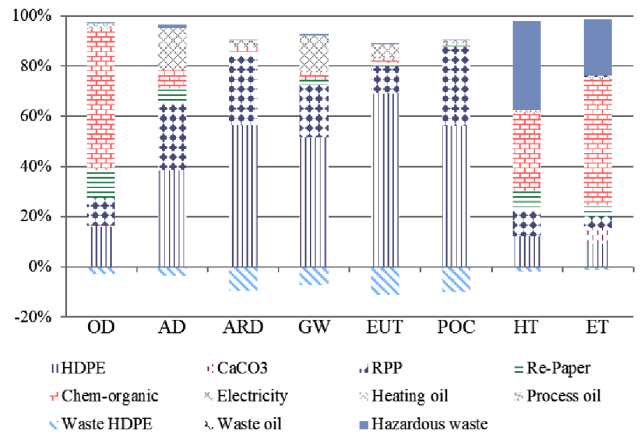


Figure 2. Environmental impact of materials in process of breathable film production.

Table 4. Results of characterization

Impact category		OD	AD	ARD	GW	EUT	POC	HT	ET
Unit		kg CFC11	kg SO ₂	l/yr	kg CO ₂	kg PO ₄ ³⁻	kg C ₂ H ₄	kg 1,4 DCB	kg 1,4 DCB
Input	HDPE	1.64.E-08	1.18.E-03	2.11.E-02	1.09.E+00	1.26.E-03	1.33.E-03	1.90.E-02	1.77.E+00
	CaCO ₃	2.70.E-10	1.32.E-05	1.73.E-05	4.27.E-03	2.17.E-06	2.11.E-07	3.63.E-04	1.24.E+00
	RPP	1.15.E-08	8.20.E-04	1.06.E-02	4.39.E-01	1.93.E-04	7.44.E-04	1.59.E-02	8.47.E-01
	Re-Paper	1.12.E-08	1.77.E-04	3.19.E-04	4.87.E-02	2.96.E-05	5.41.E-06	1.17.E-02	8.81.E-01
	Chem-organic	5.79.E-08	2.22.E-04	6.57.E-04	6.60.E-02	3.46.E-05	2.50.E-05	4.89.E-02	9.74.E+00
Output	Waste HDPE	-2.84.E-09	-1.07.E-04	-3.55.E-03	-1.54.E-01	-2.01.E-04	-2.32.E-04	-3.11.E-03	-2.70.E-01
	Waste oil	1.56.E-14	1.86.E-07	1.08.E-06	1.63.E-04	1.35.E-08	3.29.E-09	7.98.E-07	8.55.E-03
	Hazardous waste	5.50.E-11	4.30.E-05	3.65.E-05	1.09.E-02	5.33.E-06	9.80.E-08	5.55.E-02	4.39.E+00
Energy	Electricity	2.14.E-10	5.19.E-04	1.07.E-03	3.08.E-01	9.68.E-05	2.29.E-05	9.64.E-04	1.39.E-01
	Heating oil	1.93.E-09	6.51.E-07	1.24.E-05	2.40.E-04	1.67.E-07	8.24.E-08	1.90.E-04	1.03.E-01
	Process oil	4.10.E-11	1.50.E-07	1.13.E-06	1.40.E-05	1.45.E-08	6.25.E-09	5.82.E-05	1.67.E-03

과 범주에서는 프린팅 단계에 투입되는 잉크와 용제(Chemicals organic)가 57%, 주원료인 고밀도 폴리에틸렌(HDPE) 16%, 부직포와 라벨(RPP)이 11%, 폐이퍼 코어와 패드에 사용된 Recycled paper가 11%로 나타났다. 산성화 범주에서는 HDPE 38%, RPP 27%, 전력이 17%로 나타났으며 지구온난화 범주도 HDPE 51%, RPP 21%, 전력이 15%의 기여도를 보였다. 자원 고갈의 경우 HDPE 56%, RPP 28%, 전력 3%와 부영양화 범주에서 HDPE 69%, RPP 11%, 전력 5%, 광화학산화물생성 범주에서 HDPE 56%, RPP 32%, 전력 1%로 산성화와 지구온난화 범주에 비해 전력의 기여도가 낮았다. 그 밖에 인간 독성 범주에서는 소각되는 유기용제와 휘발성 유기 화합물(hazardous waste)이 36%, 잉크 및 용제 31%, HDPE 12%, 생태독성 범주에서도 유기용제와 휘발성 유기 화합물이 50%, 잉크 및 용제 23%, HDPE가 9%의 기여도를 보였다.

2.4.2. 정규화 결과

통기성 필름 1 kg 제조 공정에 대한 정규화 결과는 Table 5와 같으며, 전체 공정에 대한 영향범주 별 기여도는 지구온난화가 97%로 주요 영향범주로 나타났으며 다음으로 인간독성이 2%로 나타났다. 단위 공정 별 기여도는 Figure 3과 같이 원료 혼합단계(Mixing)가 57%, 통기성 필름을 맞붙이는 부착단계(Lamination)가 29%, 필름에 통기성을 형성하는 압출단

계(Extruder)가 10%, 잉크를 필름에 정착시키는 프린팅 단계(Printing Dry)가 5%의 순으로 나타났다. 각 공정의 물질별 기여도는 혼합단계에서는 원료인 HDPE가 70%, 부착단계에서는 부직포로 사용된 폴리프로필렌(RPP)이 81%, 압출단계에서는 전력이 99%, 프린팅 단계에서는 잉크와 용제가 69%으로 나타났다. 다시 재활용 되는 합성수지와 포장지는 압출 단계와 부착단계에서 미미한 환경부하 삭감효과(Avoided Impact)를 보였으나 절취단계(Slitting)에서 환경부하 삭감효과가 음(-)의 값으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 통기성 필름 제조 공정의 환경부하량을 전과정평가를 적용하여 정량화했으며 8가지 영향 범주에 대하여 분석하였다. 특정 영향범주에 대한 투입물 및 배출물의 상대적 기여도를 보기 위해 특성화 단계를 실시했으며, 산성화, 지구온난화, 자원고갈, 부영양화, 광화학산화물생성 범주에서 고밀도 폴리에틸렌(HDPE)와 폴리프로필렌(PP) 그리고 전력 순서로 높은 기여도를 보였다. 인간 독성과 생태독성 범주에서는 유기용제와 휘발성 유기화합물과 잉크 및 용제가 주요 물질로 나타났으며 오존층 파괴 범주에서는 잉크와 용제 및 HDPE로 규명되었다. 정규화를 통해 영향 범주 별로 비교한 결과, 지구온난화가 97%로 주요 영향범주로 나타났으며 단위 공정별 기여도는 혼합단계(Mixing)가 57%, 부착단계(Lamination) 29%, 압출단계(Extruder) 10%, 프린팅 단계(Printing Dry)가 5%로 나타났다. 통기성 필름의 제조 공정에서 환경 부하 감소를 고려한다면 환경 영향력이 큰 주요 물질의 함량을 줄이거나 환경영향이 적은 물질로 대체할 수 있는 방법을 도출하는 것이 이상적인 방법 Lim [6]이지만 폴리에틸렌이나 폴리프로필렌 처럼 투입되는 원재료에 의한 환경 부하가 월등히 높은 경우 그 다음 환경영향 인자로 규명된 전력량의 감소와 통기성 필름의 공정별 수율을 향상시킬 수 있는 공정시스템 설계가 환경영향을 저감하는 방안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

감사

“이 논문은 성신여자대학교 2016년도 성신여자대학교 학술 연구조성비 지원에 의하여 연구되었음”

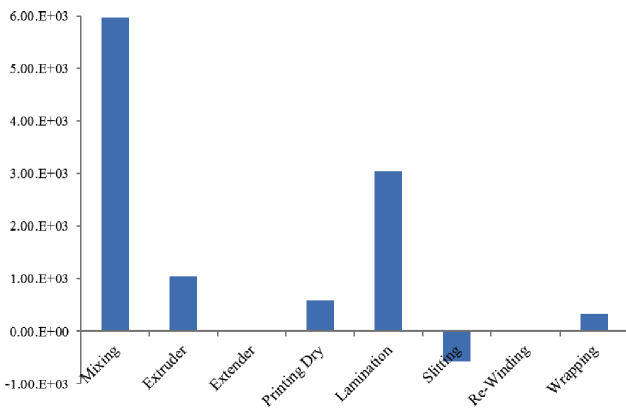


Figure 3. Normalization result of process for breathable film production.

Table 5. Normalization result of process forbreathable film

	Mixing	Extruder	Extender	Printing Dry	Lamination	Slitting	Re-winding	Wrapping
OD	6.69.E-10	4.44.E-12	8.37.E-11	2.36.E-09	5.79.E-10	-1.09.E-10	3.12.E-11	4.26.E-10
AD	4.65.E-02	1.28.E-02	1.09.E-04	1.05.E-02	4.04.E-02	-1.19.E-03	4.82.E-04	6.91.E-03
ARD	5.16.E-01	1.59.E-02	4.33.E-04	1.73.E-02	3.26.E-01	-8.07.E-02	5.45.E-04	1.19.E-02
GW	5.93.E+03	1.05.E+03	4.93.E+00	4.25.E+02	3.01.E+03	-5.77.E+02	1.85.E+01	3.00.E+02
EUT	1.62.E-02	7.64.E-04	6.18.E-06	5.23.E-04	3.17.E-03	-2.34.E-03	2.66.E-05	4.95.E-04
POC	1.34.E-02	1.26.E-04	1.38.E-06	2.59.E-04	9.46.E-03	-2.24.E-03	3.82.E-06	1.71.E-04
HT	2.63.E+01	7.89.E-01	1.18.E+00	1.43.E+02	2.71.E+01	-3.90.E+00	1.10.E+00	1.51.E+01
ET	4.86.E+00	1.36.E-01	2.62.E-01	2.30.E+01	1.71.E+00	-3.88.E-01	9.85.E-02	1.35.E+00

References

1. Choi, M. S., "Influence of Process Parameters on the Breathable Film Strength of Polymer Extrusion," *J. Korean Soc. Manuf. Technol.*, **21**(4), 625-632 (2012).
2. Kim, Y. G., and Kim, S.-W., "Technology and Application of High Performance Films," *Polym. Sci. Technol.*, **14**(2), 163-173 (2003).
3. Environmental Dimension Partnership Life Cycle Assessment Software (TOTAL), (2006).
4. Kim, K. I., Lee, N. R., Lee, S. S., Lee, Y. S., Hong, S. J., Son, Y. K., and Hong, T. W., "Evaluations of Life Cycle Assessment on Indium-Tin-Oxide Electrochemical Recycling Process," *Clean Technol.*, **19**(4), 388-392 (2013).
5. Phae, C. U., Cho, W. T., and Yeon, S. M., "Investigation on Environmental Impact of Poly Ethylene Film using Agricultural by LCA," *J. Korea Soc. Waste Manage.*, **29**(6), 583-594 (2012).
6. Lim, S. R., "Application of Life Cycle Assessment to Enhance the Environmental Performance of Process Systems and Products," *Clean Technol.*, **20**(4), 339-348 (2014).