

전과정평가를 통한 프탈레이트계 PVC 가소제의 환경성 비교 연구

A Comparative Study on the Environmental Performance of Phthalate
PVC Plasticizers throughout Life Cycle Assessment (LCA)

김동현, 김형석, 허탁
건국대학교 융합신소재공학과

Dong Hyeon Kim, Hyoung Seok Kim, Tak Hur
Dept. of Chemical and Biological Engineering, Konkuk University

사단법인 한국전과정평가학회
The Korean Society for Life Cycle Assessment

전과정평가를 통한 프탈레이트계 PVC 가소제의 환경성 비교 연구

김동현, 김형석, 허탁*
건국대학교 융합신소재공학과

A Comparative Study on the Environmental Performance of Phthalate PVC Plasticizers throughout Life Cycle Assessment (LCA)

Dong Hyeon Kim, Hyoung Seok Kim, Tak Hur*
Dept. of Chemical and Biological Engineering, Konkuk University, Seoul, Korea

Abstract

A comparative life cycle assessment (LCA) on two types of phthalate plasticizer, DOP (Di-Octyl Phthalate or DEHP (Di-Ethyl Phthalate)) and DINP (Di-Isononyl Phthalate), is conducted in this study. The reference flow is defined as DOP(0.346 kg) and DINP(0.360 kg), the amount of required to produce PVC 1kg, respectively.

The life cycle impact assessment is carried out for 6 impact categories such as POCP (Photochemical Oxidant Cretion Potential), ADP (Aboitic resource Depletion Potential), AP (Acidification Potential), EP (Eutrophication Potential), GWP (Global Warming Potential) and ODP (Ozone Depletion Potential). Then, the characterization results (indicator profile) are normalized by using the normalization references developed by the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE). The normalization results show that both DOP and DINP have relatively significant effect of ADP and GWP when the normalized value of DINP are slightly larger than these of DOP. On the other hand, DOP shows larger impacts than DINP for POCP, EP and ODP by 176.9%, 109.9%, 219.4%, respectively.

Keywords: LCA (Life cycle assessment), Plasticizer, DOP, DEHP, DINP

1. 서론

가소제는 비닐, 벽지, 바닥재, 인조가죽, 전선 등 PVC와 같은 플라스틱에 유연성을 부여하여 가공성을 향상시키거나 내열성, 내한성, 절연성 등 물리적 특성을 강화시키는 역할을 한다. 가소제의 사용 범위는 매우 광범위하여 우리 생활에 밀접하게 연관되어 있는 기초 화학물질이다. 가소제는 생산 원료의 유형에 따라 phthal산 ester계, tri-merit산 ester계, 지방족 2 염기산계, epoxy계 등 다양하지만 가장 많이 사용되는 가소제의 종류는 phthal산 ester계로 DOP (Di-Ethyl Phthalate(또

* 교신저자: 허탁 교수, (05029) 서울시 광진구 능동로 120 건국대학교 공과대학 1204호, Tel: 02-450-3503, Fax: 02-453-6710, Email: takhur@konkuk.ac.kr

는 DEHP, Di-Ethyl Phthalate), DINP (Di-Isononyl Phthalate), DIDP (Di-Isodecyl phthalate) 등이 있다.

그 중 DOP는 가장 보편적으로 사용되고 있는 프탈레이트계 가소제로, 전체 가소제 수요 중 50% 이상을 차지하고 있다. 하지만 환경 호르몬과 관련되어, DOP의 인체 및 생태 독성 논란으로 인해 PVC 바닥재, 유아용품, 완구, 의료 기기 등을 시작으로 제품에 대한 DOP의 함량 규제가 강화되었다. 특히, 식품의약품안전처는 2007년부터 DOP의 식품용기 및 포장에 대한 사용을 전면 금지하고 있으며, 유아용품 중 입에 넣어 사용하는 제품은 어린이제품 안전특별법에 의거하여 DOP의 사용이 금지되고 있다. 이러한 추세에서 프탈레이트 함유가 적은 가소제인 DINP는 그 범용성 때문에 DOP를 대체하여 다양한 제품에 활용되고 있다.

현재 가소제 시장은 인체 및 생태 독성이라는 이슈에 의해 저함량 프탈레이트계 및 非프탈레이트계 가소제의 점유가 예상되며, DOP의 경우 DINP 등 여러 대체재 시장의 성장으로 인하여 시장 규모가 축소할 것이라는 전망도 존재한다. 이처럼 DINP와 DOP의 독성에 대해서는 다방면으로 고려가 되고 있지만, 가소제를 대체함으로 발생할 수 있는 환경영향 변화에 대한 연구는 부족한 상황이다.

이에 PVC의 물성을 향상시키기 위해 범용으로 사용되고 있는 DOP와 DINP에 대한 전과정평가를 통해 두 가소제의 환경성을 평가 및 비교하고자 한다.

2. 전과정평가 수행

2.1 목적 정의

본 연구의 목적은 비닐, 벽지, 바닥재, 인조가죽, 전선 등 플라스틱의 가소제로 활용되고 있는 DOP와 DINP에 대한 전과정평가를 수행하고, 대체재 관계에 있는 두 가소제의 환경영향을 비교분석 하는 것이다.

2.2 범위 정의

2.2.1 기능, 기능단위 및 기준흐름 정의

DOP와 DINP의 용도는 가소성을 포함한 물리적 특성을 향상시키는 것이다. 두 가소제를 PVC에 사용할 때, 종류에 따라 투입량에 차이가 존재한다. 투입량의 차이는 사용하는 가소제의 효율에 의해 달라지며, PVC의 가소제로서 사용될 때 가소제의 효율은 PVC의 경도를 만족시키기 위해 필요한 양을 측정함으로써 정량화될 수 있다.

두 가소제 간 가소제 효율을 비교하기 위해 PVC Handbook(2005)의 문헌 데이터를 이용하였으며, 경도 80을 만족하는 PVC 생산을 위해 DOP는 52.9 phr (parts per hundred rubber)의 조성을, DINP는 56.2 phr의 조성을 차지한다. 이는 PVC를 100으로 보았을 때 필요한 가소제의 양을 의미한다. 경도 80을 만족하는 1kg의 PVC를 생산할 때 필요한 DOP 및 DINP의 비율은 각각 34.6wt%, 36.0wt%이다.

본 연구의 대상 제품의 기능, 기능단위 및 기준흐름을 Table 1에 정의하였다.

Table 1. 가소제(DOP, DINP)의 기능, 기능단위 및 기준흐름

구분 \ 제품명	DOP	DINP
기능	PVC 가공용이성 및 물리적 특성을 향상	
기능단위	경도 80의 PVC 1kg을 생산하는데 투입되는 프탈레이트계 가소제의 생산	
기준흐름	$\frac{52.9}{(100 + 52.9)} = 0.346 \text{ kg DOP}$	$\frac{56.2}{(100 + 56.2)} = 0.360 \text{ kg DINP}$

2.2.2 시스템 경계 정의

본 연구에서 DOP 및 DINP의 생산 시스템 경계는 원료 채취부터 가소제 생산까지 Cradle to Gate로 정의하였다. DOP 및 DINP 생산에 대한 시스템 경계를 Figure 1에 나타내었다.



Figure 1. DOP 및 DINP의 생산 시스템 경계

2.2.3 데이터 품질

본 연구에서는 해당 제품 생산단계의 현장 데이터와 상·하위흐름의 일반 데이터를 수집 및 사용하여 연구를 수행하였으며, 현장 데이터의 시간적 범위, 지역적 범위 및 기술적 범위에 대한 데이터 품질요건은 Table 2와 같다.

Table 2. DOP 및 DINP 생산시스템의 현장 데이터 품질요건

구분	DOP	DINP
시간적 범위	2015년	2015년
지역적 범위	대한민국	대한민국
기술적 범위	업체에서 사용하고 있는 기술	업체에서 사용하고 있는 기술

2.2.4 가정 및 제한사항

본 연구 수행에 대한 가정 및 제한사항은 Table 3과 같다.

Table 3. DOP 및 DINP의 전과정평가에 대한 가정 및 제한사항

가정 및 제한사항
<ul style="list-style-type: none"> • 가소제 생산 공정의 설비 및 기반시설에 대한 영향은 제외 • 해외 DB를 사용함으로써 발생할 수 있는 결과의 왜곡을 최소화하고, 연구의 지역적 범위를 고려하여 상·하위 흐름 연결은 다음과 같은 우선순위를 고려 <ul style="list-style-type: none"> ① 동일한 공정의 국가 LCI 데이터베이스 ② 유사한 공정의 국가 LCI 데이터베이스 ③ 동일한 공정의 해외 LCI 데이터베이스 ④ 유사한 공정의 해외 LCI 데이터베이스 • 연료 연소 등 가소제 생산 공정에서 발생하는 대기배출물은 측정데이터를 우선 적용하였으며, 관리되지 않는 대기배출물의 경우에는 'IPCC(1996)' 및 '국가 대기오염물질배출량 산정방법 편람(III)(2013)'의 배출계수를 적용하여 계산치를 산출 • 투입되는 N₂가스는 공정 중 불활성화를 위하여 투입되고, 전량 배출되는 것으로 가정 • 투입되는 공정수의 경우 공장이 위치한 지역의 공업용수를 활용 • 공정의 고형폐기물의 경우 국가 DB가 부재하여, 해외 DB(disposal, municipal solid waste, 22.9% water, to sanitary landfill, Ecoinvent)를 활용 • 공정에서 처리된 공정수는 폐수처리 공정을 거쳐 방류되는 것으로 가정 • LNG의 연소에 의한 대기 배출물의 배출량을 계산하기 위해 에너지 기본법 시행규칙 별표에서 제시하는 순발열량 39.4MJ/Nm³을 사용 • 폐수의 밀도를 계산하기 위하여 국립환경과학원의 '폐수배출시설 세분류 및 오염부하 원단위(2006)'의 기타 기초유기화합물 제조시설의 오염물질 농도(3.96E+03.mg/L(BOD+COD+SS))를 활용하였으며, 발생하는 폐수의 밀도는 1kg/L로 가정. (1kg 폐수 = 3.96E-03kg 오염부하량)

2.2.5 할당

가소제 생산 시 제품(DOP 및 DINP) 이외에 별도의 부산물이 생산되지 않으므로 할당을 수행하지 않았다.

2.2.6 영향평가 방법론과 영향의 종류

본 연구에서는 목록분석을 통해 주요 에너지자원 소모과 대기배출물 배출을 분석하였다. 본 연구의 특성화 및 정규화는 산업통상자원부의 방법론 및 인자를 적용하였으며, 영향범주는 광화학산화물 생성(POCP, Photochemical Oxidant Creation Potential), 자원소모(ADP, Abiotic resource Depletion Potential), 산성화(AP, Acidification Potential), 부영양화(EP, Eutrophication Potential), 지구온난화(GWP, Global Warming Potential), 오존층파괴(ODP, Ozone Depletion Potential)의 영향범주를 포함하였다.

2.3 전과정 목록분석

2.3.1 가소제 생산 공정

DOP와 DINP의 생산 공정은 크게 용해, 반응, 중화/정제 공정으로 구분할 수 있다. 용해 공정은 원료물질을 반응시켜 모노에스테르로 합성하는 공정이다. 반응 공정은 천연가스와 스팀으로 공정

온도를 반응 온도까지 승온시켜 제품을 합성하는 공정이다. 이 때, 반응 촉진을 위해 잔류 알코올을 진공으로 회수한다. 중화/정제 공정에서는 잔여산을 중화하고 제품을 세척하여 불순물을 제거하고, 탈수를 통해 제품 내 수분을 제거한다.

2.3.2 가소제 생산 공정흐름도

DOP와 DINP의 공정흐름도는 각각 Figure 2, Figure 3과 같다.

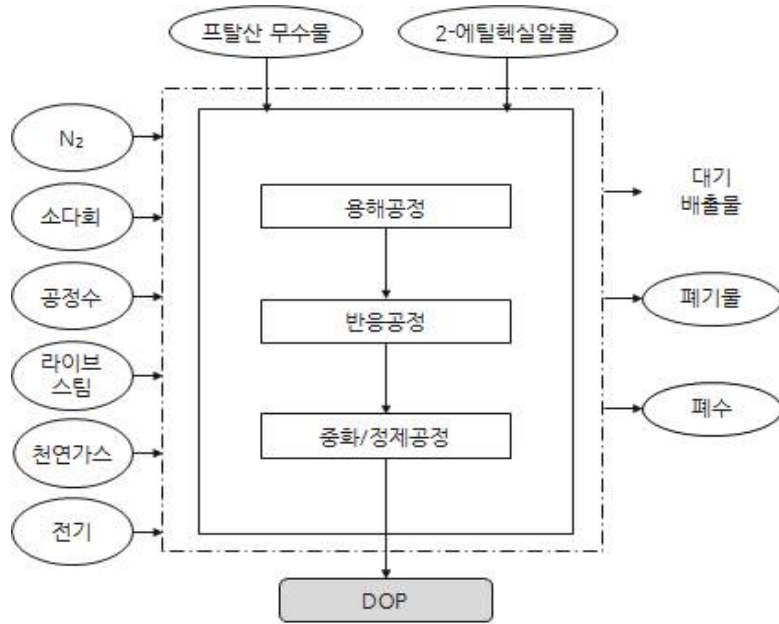


Figure 2. DOP 생산 공정흐름도

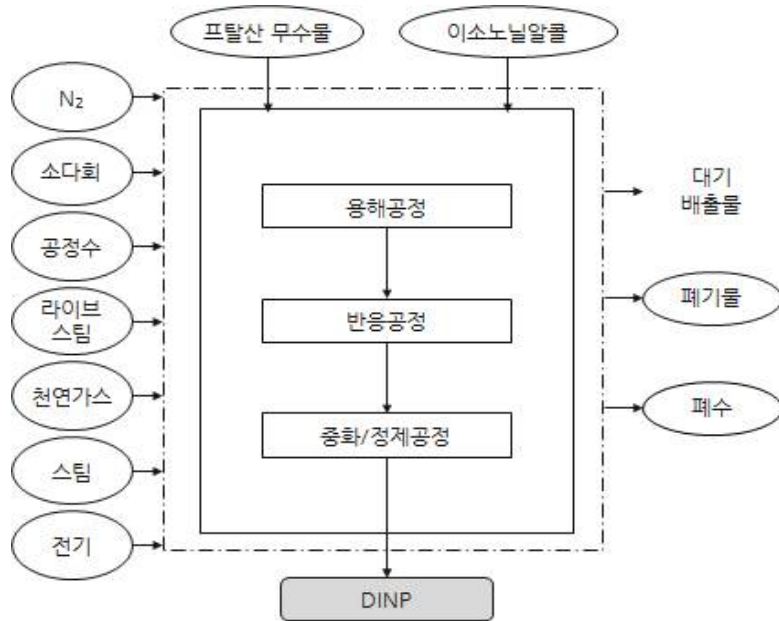


Figure 3. DINP 생산 공정흐름도

2.3.3 데이터 수집 및 계산

2.3.3.1 데이터 범주

본 연구에서는 투입물 및 산출물을 원료물질, 보조물질, 에너지, 제품, 대기 배출물, 수계 배출물 및 폐기물로 데이터 범주로 구분하였고, 그 목록은 Table 4와 같다.

Table 4. 가소제 공정 데이터 범주

구분		DOP	DINP
투입물	원료물질	프탈산 무수물, 2-에틸헥실알콜(옥탄올)	프탈산 무수물, 이소노닐알콜
	보조물질	N ₂ , 소다회, 공업용수, Utility air, Unspecified chemical	N ₂ , 소다회, 공업용수, Utility air, 라이브 스팀, Unspecified chemical
	에너지	천연가스, 전기	천연가스, 스팀, 전기
산출물	제품	DOP	DINP
	대기 배출물	증기, CH ₄ , N ₂ O, NO _x , CO, NMVOC, CO ₂ , SO _x , TSP, PM-10, VOC, NH ₃	증기, CH ₄ , N ₂ O, NO _x , CO, NMVOC, CO ₂ , SO _x , TSP, PM-10, VOC, NH ₃
	수계 배출물	폐수	폐수
	폐기물	지정폐기물, 고형폐기물	지정폐기물, 고형폐기물

2.3.3.2 데이터 수집

데이터 수집은 국내 DOP 및 DINP 생산업체를 대상으로 수행되었다. 상·하위 흐름 연결을 위해 환경부와 산업통상자원부에서 구축한 국가 LCI 데이터베이스와 해외 데이터베이스를 활용하였다. 데이터베이스가 존재하지 않는 경우에는 문헌 데이터를 수집·활용하였다. DOP와 DINP의 투입물 및 산출물에 대한 데이터 및 출처는 Table 5, Table 6과 같다.

2.3.3.3 데이터 계산 및 검증

데이터 수집 및 물질수지 검증을 통해 대상 시스템의 투입물 및 산출물을 포함한 공정 목록을 도출하였으며, 단위공정 및 기능단위 환산과 연결 과정을 거쳐 최종 GtG (Gate to Gate) 데이터를 산정하였다. 최종적으로 GtG 데이터와 LCI 데이터베이스를 연결하고, Simapro 7.1을 활용하여 전과정 목록분석을 수행하였다.

Table 5. DOP 생산 데이터 출처

단계	구분	물질명	데이터 출처			LCI 데이터베이스		
			실측	계산	추정	데이터베이스명	출처	
생산	원료 물질	프탈산 무수물	V			phthalic anhydride, at plant	Ecoinvent	
		2-에틸헥실알콜 (옥탄올)	V			옥탄올	산업통상자원부	
	보조 물질	N ₂	V			질소	환경부	
		소다회	V			소다회	환경부	
		공업용수	V			공업용수	환경부	
		Utility air	V			기본흐름	-	
		라이브 스팀	V			스팀	산업통상자원부	
		Unspecified chemical	V			-	-	
	에너지	천연가스	V			천연가스	환경부	
		전기	V			전기	산업통상자원부	
	배출물	증기	증기		V		-	-
			폐수	V			국가산단폐수	환경부
			고형 폐기물	V			Disposal, municipal solid waste, 22.9% water, to sanitary landfill	Ecoinvent
			지정 폐기물	V			지정폐기물 소각	환경부
		배출물	CH ₄		V		기본흐름	-
			N ₂ O		V		기본흐름	-
			NO _x		V		기본흐름	-
			CO		V		기본흐름	-
			NMVOc		V		기본흐름	-
			CO ₂		V		기본흐름	-
SO _x				V		기본흐름	-	
TSP				V		기본흐름	-	
PM-10				V		기본흐름	-	
VOC				V		기본흐름	-	
NH ₃		V		기본흐름	-			
수송	원료 물질	프탈산 무수물	V			탱크로리	환경부	
		2-에틸헥실알콜	V			탱크로리	환경부	

Table 6. DINP 생산 데이터 출처

단계	구분	물질명	데이터 출처			LCI 데이터베이스	
			실측	계산	추정	데이터베이스명	출처
생산	원료 물질	프탈산 무수물	V			phthalic anhydride, at plant	Ecoinvent
		이소노닐알콜	V			Isononyl alcohol	IHS Markit
	보조 물질	N ₂	V			질소	환경부
		소다회	V			소다회	환경부
		공업용수	V			공업용수	환경부
		Utility air	V			기본흐름	-
		라이브 스팀	V			스팀	산업통상자원부
		Unspecified chemical	V			-	-
	에너지	스팀	V			스팀	산업통상자원부
		천연가스	V			천연가스	환경부
		전기	V			전기	산업통상자원부
	배출물	증기		V		-	-
		폐수	V			국가산단폐수	환경부
		고형 폐기물	V			Disposal, municipal solid waste, 22.9% water, to sanitary landfill	Ecoinvent
		지정 폐기물	V			지정폐기물 소각	환경부
		CH ₄		V		기본흐름	-
		N ₂ O		V		기본흐름	-
		NO _x		V		기본흐름	-
		CO		V		기본흐름	-
		NMVOC		V		기본흐름	-
		CO ₂		V		기본흐름	-
		SO _x		V		기본흐름	-
		TSP		V		기본흐름	-
PM-10			V		기본흐름	-	
VOC			V		기본흐름	-	
NH ₃		V		기본흐름	-		
수송	원료 물질	프탈산 무수물	V			탱크로리	환경부
		이소노닐알콜	V			외항_벌크선	환경부

2.3.4 목록분석 결과

2.3.4.1 주요 에너지자원 소모

본 연구에서는 DOP와 DINP를 생산하는데 사용되는 석탄, 석유, 천연가스, 우라늄으로 구성된 주요 에너지자원 소모량을 에너지 관점에서 분석하였다. 그 결과는 Figure 4와 같으며, DOP를 생산하는데 사용되는 에너지의 총량($3.15E+01$ MJ/F.U.)은 DINP($3.30E+01$ MJ/F.U.) 보다 4.5%의 낮은 것으로 나타났다. DOP는 석유(56.0%), 우라늄(21.0%), 천연가스(18.3%), 석탄(4.6%) 순으로 에너지 소모량이 많았고, DINP는 석유(44.2%), 천연가스(34.5%), 우라늄(16.9%), 석탄(4.3%) 순으로 에너지 소모량이 많은 것으로 분석되었다.

우라늄의 경우 DOP가 $6.62E+00$ MJ/F.U.을 소비하였고, DINP는 $5.60E+00$ MJ/F.U.을 소비하는 것으로 나타났다. DOP에서 프탈산 무수물 생산이 전체 우라늄 자원 소모량의 35.2%, 2-에틸헥실알콜 생산은 55.5%를 차지하였다. DINP에서는 프탈산 무수물 생산이 40.7%를 차지하였고 이소노닐알콜 생산이 차지하는 비율은 48.2%였다.

석유 자원의 경우 DOP는 $1.76E+01$ MJ/F.U.을 소비하였고, DINP는 $1.46E+01$ MJ/F.U.을 소비하는 것으로 나타났다. 석유 자원 소모량의 경우 DOP에서 프탈산 무수물 생산이 26.3%, 2-에틸헥실알콜 생산이 73.4%를 차지하였다. DINP에서는 프탈산 무수물 생산이 31.1%, 이소노닐알콜이 68.4%를 차지하였다.

천연가스는 DINP가 DOP 보다 많이 소비하는 에너지자원으로 DOP가 $5.77E+00$ MJ/F.U.를 소비하였고 DINP가 $1.14E+01$ MJ/F.U.만큼 소비하였다. DOP에서 천연가스 자원 소모량은 DOP에서 프탈산 무수물 생산이 70.8%, 2-에틸헥실알콜 생산이 15.7%를 차지하였다. DINP에서는 프탈산 무수물 생산이 35.1%, 이소노닐알콜 생산이 61.3%를 차지한 것으로 분석되었다.

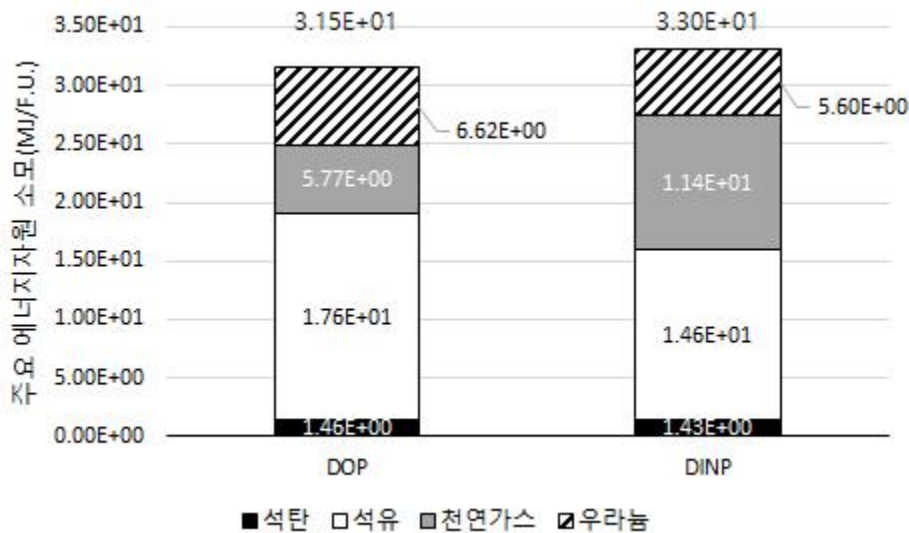


Figure 4. DOP 및 DINP의 주요 에너지자원 소모(MJ 기준)

2.3.4.2 주요 대기배출물 배출

본 연구에서는 주요 대기배출물인 CO, NO_x, SO_x, Dust, VOC, NH₃에 대해 목록분석을 수행하였다. 6가지 주요 대기배출물 중 CO 배출의 차이가 가장 크게 나타났으며, DOP가 $1.78E-02$ kg/F.U.의 CO 배출을 DINP가 $7.05E-03$ kg/F.U.의 CO를 배출한 것으로 나타났다. 두 가소제 사

이에 배출량의 차이가 있는 원인은 각 가소제를 생산하기 위해 투입되는 원료 물질에서 배출량 차이가 크게 발생했기 때문이다. DOP는 원료물질(프탈산 무수물 및 2-에틸헥실알콜)의 CO 배출량이 1.71E-02 kg/F.U.으로 나타났으며, DINP는 원료물질(프탈산 무수물 및 이소노닐알콜)의 배출량이 1.87E-03 kg/F.U.으로 나타났다. DINP는 NOx, SOx, VOC, NH₃ 배출에서 DOP 보다 최소 10.5%에서 최대 29.0% 더 낮은 배출량을 나타내고 있다.

NOx, SOx, Dust, VOC의 경우 CO와 동일하게 원료물질의 영향이 높은 것으로 분석되었다. 이에 비해 NH₃의 경우에는 가소제 생산 공정에서의 대기배출의 배출 기여도가 다른 대기배출물에 비해 높게 나타났다. 가소제 생산 공정에서 배출되는 NH₃의 배출량은 DOP가 9.07E-07 kg/F.U. (전체 NH₃ 배출량의 24%), DINP가 4.64E-07 kg/F.U.(전체 NH₃ 배출량의 16%)로 나타났다.

6가지 주요 대기배출물 중 dust를 제외한 나머지 대기배출물은 DOP를 생산할 때, DINP 보다 더 많이 배출하는 것으로 나타났다. dust의 경우 DOP가 2.78E-04 kg/F.U., DINP가 3.43E-04 kg/F.U.의 배출량을 보이고 있다. DOP에서 프탈산 무수물의 dust 배출량은 2.22E-04 kg/F.U., 2-에틸헥실알콜의 배출량은 3.44E-04 kg/F.U.으로 나타났으며, DINP에서는 프탈산 무수물의 dust 배출량은 2.17E-04 kg/F.U., 이소노닐알콜의 dust 배출량은 1.22E-04 kg/F.U.로 나타났다.

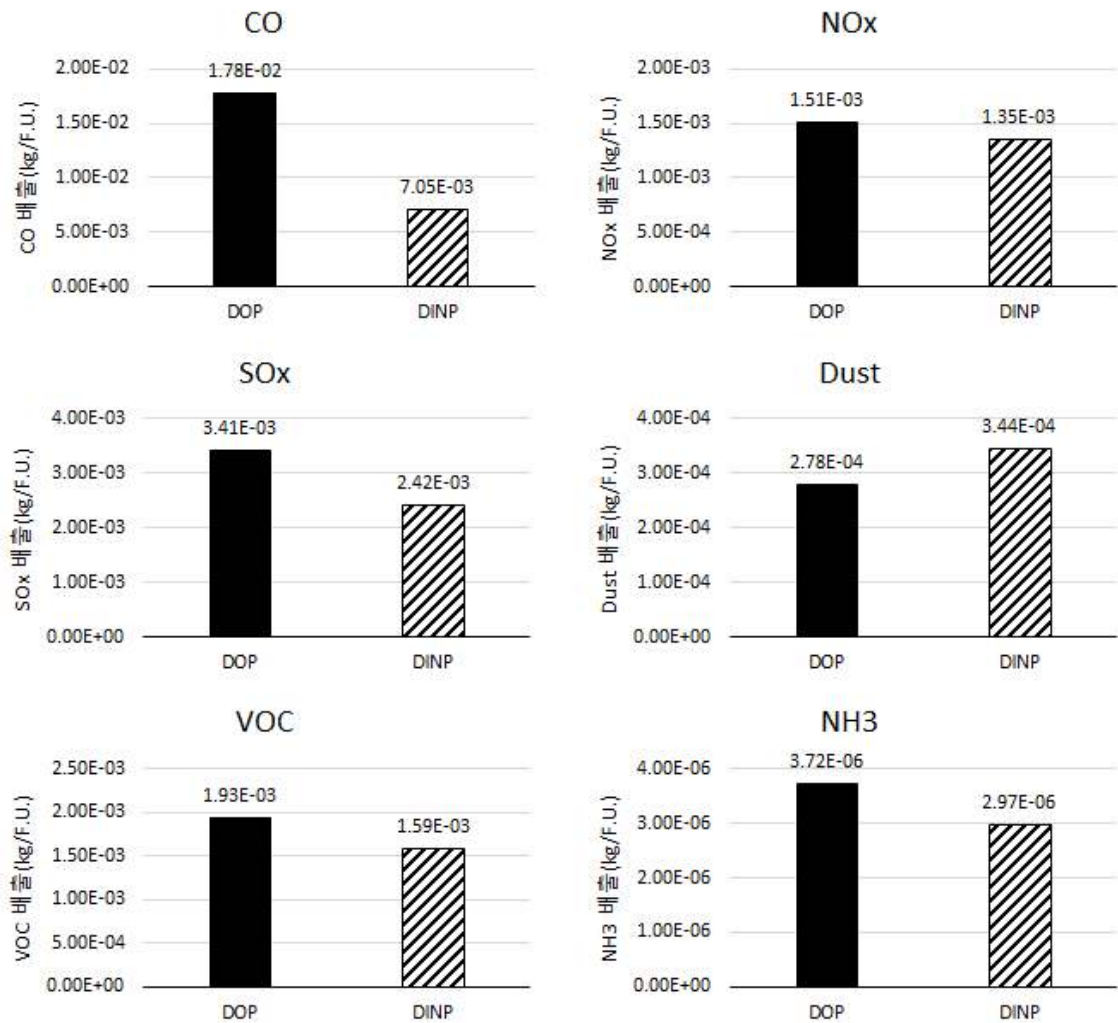


Figure 5. DOP 및 DINP의 주요 대기배출물 비교

2.4 전과정 영향평가

2.4.1 특성화

DOP와 DINP의 특성화 결과 값은 Table 7과 같으며, DOP를 기준으로 DINP의 영향을 비교한 결과는 Figure 6와 같다. 그 결과, DINP는 POCP, EP, ODP 영향범주에서 더 낮은 영향을 보이나, ADP, AP, GWP 영향범주에서는 DOP가 더 낮은 영향을 나타냈다. 특히 DOP와 비교했을 때, POCP와 ODP 영향범주에서 DINP의 영향이 다른 영향범주들에 비해 낮게 분석되었다. POCP 영향범주에서 다른 영향범주에 비해 차이 큰 이유는 DOP의 원료물질인 2-에틸헥실알콜의 영향(4.68E-04 kg C₂H₄ eq./F.U., DOP 전체의 79.2%)가 DINP의 원료물질인 이소노닐알콜의 영향(9.41E-05 kg C₂H₄ eq./F.U., DINP 전체의 27.4%) 보다 크기 때문이다.

Table 7. DOP 및 DINP의 특성화 결과

영향범주	단위	DOP	DINP
POCP	kg C ₂ H ₄ eq./F.U.	5.91E-04	3.44E-04
ADP	1/yr · F.U.	1.13E-02	1.15E-02
AP	kg SO ₂ eq./F.U.	2.90E-03	3.31E-03
EP	kg PO ₄ ³⁻ eq./F.U.	2.48E-04	2.25E-04
GWP	kg CO ₂ eq./F.U.	7.71E-01	7.86E-01
ODP	kg CFC11 eq./F.U.	1.15E-07	5.24E-08

ODP 영향범주의 특성화 결과, 발생하는 Bromotrifluoromethane(Halon 1301, CBrF₃, 오존과 파괴지수: 10.0)이 오존층과 파괴에 가장 큰 기여를 보이고 있고, DOP와 DINP에서 해당 물질의 발생량 차이가 존재하기 때문에(DOP: 7.32E-08 kg CFC11 eq./F.U., DINP: 4.03E-09 kg CFC11 eq./F.U.), ODP의 영향에 차이가 있는 것으로 분석되었다. 특히, DOP의 원료물질인 2-에틸헥실알콜의 영향(7.04E-08 kg CFC11 eq./F.U., DOP 전체의 61.3%)이 DINP의 원료물질인 이소노닐알콜의 영향(7.97E-09 kg CFC11 eq./F.U., DINP 전체의 15.2%) 보다 크기 때문에, DINP의 환경개선효과가 나타났다.

AP 영향범주의 경우는 POCP와 ODP 영향범주와는 반대로 이소노닐알콜의 영향(1.61E-03 kg PO₄³⁻ eq./F.U.)이 2-에틸헥실알콜의 영향(1.32E-03 kg PO₄³⁻ eq./F.U.)이 더 크기 때문에, DINP의 전체 AP 영향이 높게 분석되었다. ADP(2-에틸헥실알콜: 8.03E-03/yr · F.U., 이소노닐알콜: 8.32E-03/yr · F.U.)와 GWP(2-에틸헥실알콜: 3.90E-01 kg CO₂ eq./F.U., 이소노닐알콜: 4.24E-01 kg CO₂ eq./F.U.) 영향범주 역시 두 가소제의 원료물질인 2-에틸헥실알콜과 이소노닐알콜의 영향 기여도 차이에서 발생하였다.

6대 영향범주 모두에서 DOP 및 DINP 모두 원료물질인 프탈산 무수물, 2-에틸헥실알콜, 이소노닐알콜의 영향이 대부분을 차지(DOP 원료물질 영향 기여도: 84.9%(EP)~99.7%(ODP), DINP 원료물질 영향 기여도: 5616%(POCP)~98.0%(ODP))하였다. 그 기여도는 Figure 7, Figure 8과 같다. POCP의 경우, DINP는 라이브 스팀과 스팀이 상당부분을 차지한 것으로 분석되었는데, 이는 이소노닐알콜의 영향이 상대적으로 작다는 점과 DINP 생산 공정에 사용되는 스팀량이 DOP 생산 공정 보다 상대적으로 많다는 점에서 기인하였다. EP의 경우에는 폐수에서 발생하는 영향이 DOP는 전체의 5.8%, DINP는 전체의 6.8%를 차지하고 있어, 다른 영향범주에 비해 폐수의 영향이 상대적으로 높게 나타났다.

DINP는 ADP, AP, GWP 영향범주에서 DOP 보다 높은 영향을 높게 나타내지만, POCP, EP, ODP 영향범주에서 낮은 영향을 나타내고 있기 때문에, 환경 영향의 전이(shift) 현상이 발생하는 것으로 분석되었다.

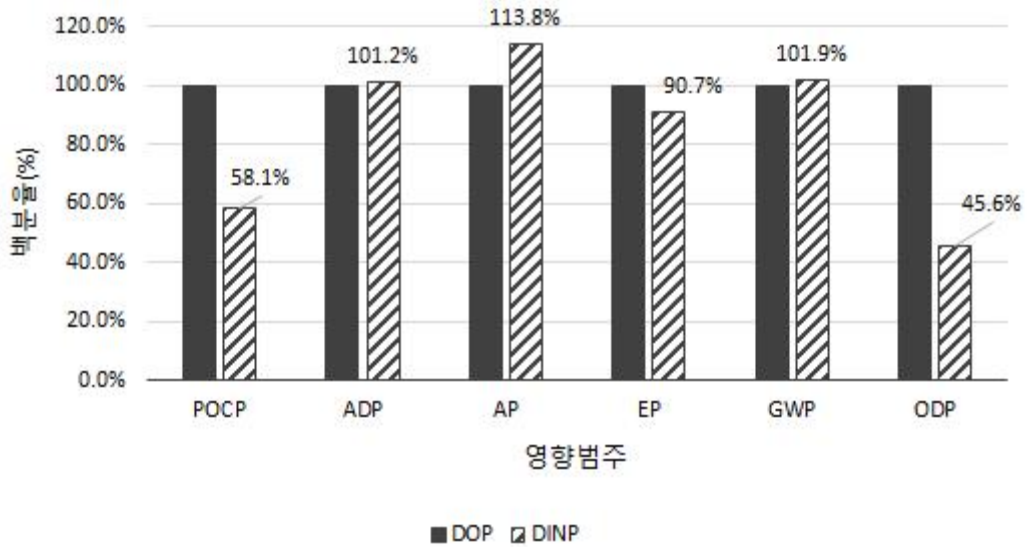


Figure 6. DOP 및 DINP의 특성화 결과 비교

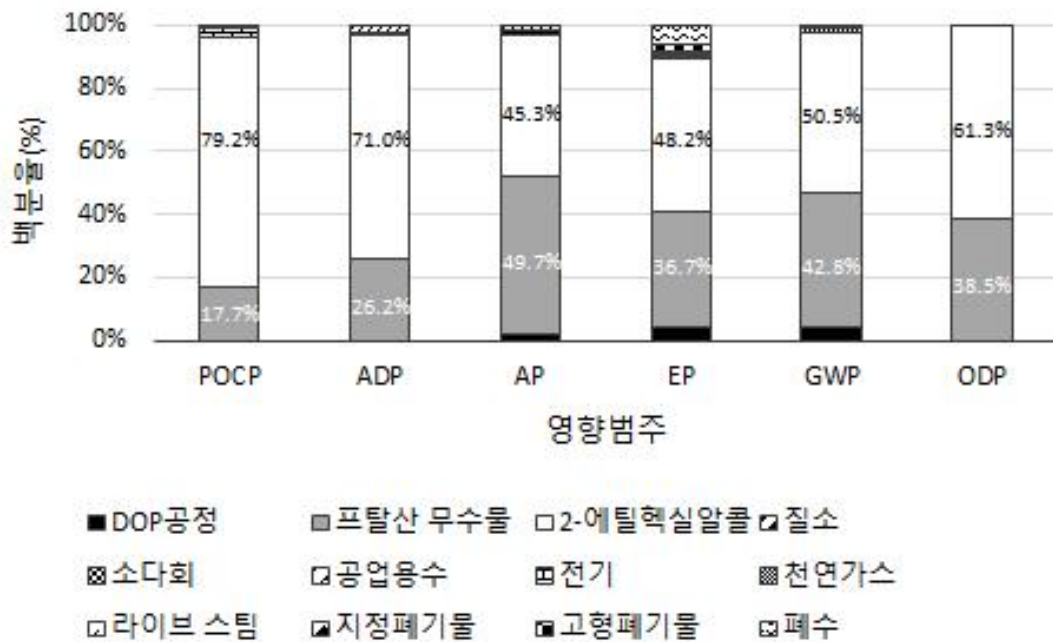


Figure 7. DOP의 특성화 결과

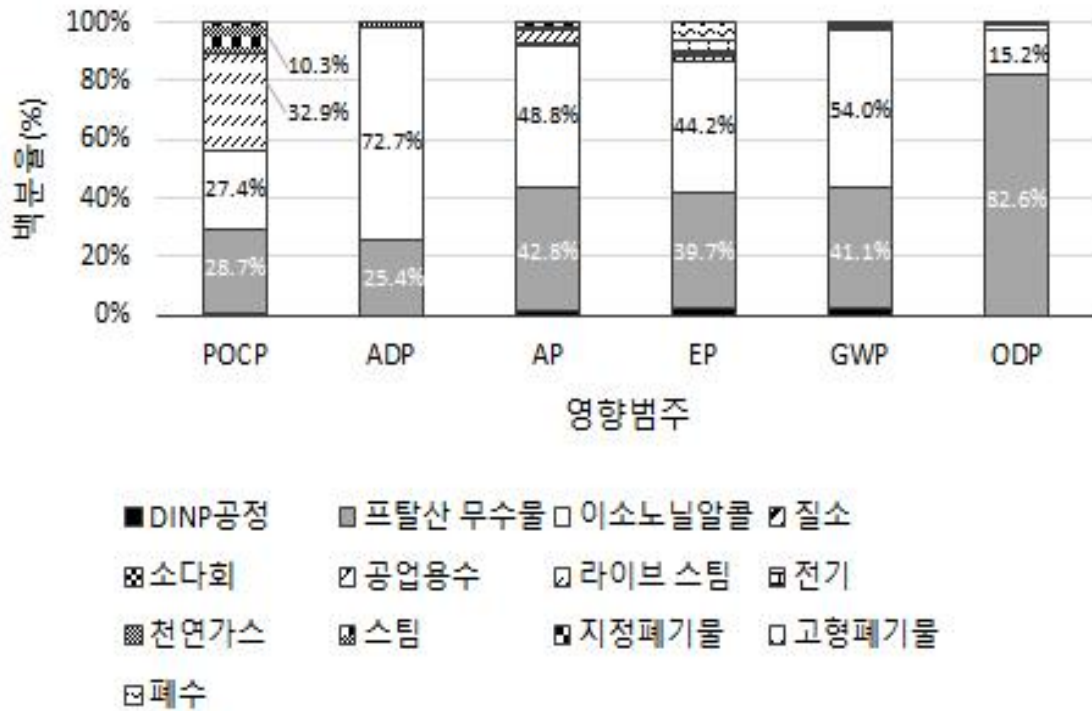


Figure 8. DINP의 특성화 결과

2.4.2 정규화

두 가소제 사이에서 발생하는 환경영향 간의 상보효과(trade-off)를 고려하여, 전체적인 환경영향을 비교하기 위해 정규화를 수행하였다. ADP, GWP, ODP 영향범주는 국제적 범위를, POCP, AP, EP 영향범주는 국가적 범위에 해당하는 것을 고려하여, 기준 인구를 적용하였다. 정규화 과정에는 산업통상자원부의 기준을 적용하였으며, 각 영향범주 별 기준은 Table 8과 같다.

Table 8. 영향범주 별 정규화 기준

영향범주	정규화 기준값	단위
POCP	1.03E+01	kg C ₂ H ₄ eq./person-yr
ADP	2.49E+01	kg/person-yr ²
AP	3.98E+01	kg SO ₂ eq./person-yr
EP	1.31E+01	kg PO ₄ ³⁻ eq./person-yr
GWP	5.12E+02	kg CO ₂ eq./person-yr
ODP	4.07E-02	kg CFC11 eq./person-yr

특성화결과는 정규화 기준에 의해, 가소제 생산 시스템의 시·공간적 특성을 고려한 지표 결과로 도출된다. 그 계산 과정과 결과는 Table 9, Table 10과 같다.

Table 9. DOP 정규화 결과

영향범주	DOP		
	특성화 결과 (a)	정규화 기준값 (b)	정규화 결과 [person-yr] (c=a/b)
POCP	5.91E-04 kg C ₂ H ₄ eq./F.U.	1.03E+01 kg C ₂ H ₄ eq./person-yr	5.74E-05
ADP	1.13E-02/yr · F.U.	2.49E+01 kg/person-yr ²	4.55E-04
AP	2.90E-03 kg SO ₂ eq./F.U.	3.98E+01 kg SO ₂ eq./person-yr	7.29E-05
EP	2.48E-04 kg PO ₄ ³⁻ eq./F.U.	1.31E+01 kg PO ₄ ³⁻ eq./person-yr	1.89E-05
GWP	7.71E-01 kg CO ₂ eq./F.U.	5.12E+02 kg CO ₂ eq./person-yr	1.50E-04
ODP	1.15E-07 kg CFC11 eq./F.U.	4.07E-02 kg CFC11 eq./person-yr	2.83E-06

Table 10. DINP 정규화 결과

영향범주	DOP		
	특성화 결과 (a')	정규화 기준값 (b)	정규화 결과 [person-yr] (c=a'/b)
POCP	3.44E-04 kg C ₂ H ₄ eq./F.U.	1.03E+01 kg C ₂ H ₄ eq./person-yr	3.34E-05
ADP	1.15E-02/yr · F.U.	2.49E+01 kg/person-yr ²	4.60E-04
AP	3.31E-03 kg SO ₂ eq./F.U.	3.98E+01 kg SO ₂ eq./person-yr	8.30E-05
EP	2.25E-04 kg PO ₄ ³⁻ eq./F.U.	1.31E+01 kg PO ₄ ³⁻ eq./person-yr	1.72E-05
GWP	7.86E-01 kg CO ₂ eq./F.U.	5.12E+02 kg CO ₂ eq./person-yr	1.53E-04
ODP	5.24E-08 kg CFC11 eq./F.U.	4.07E-02 kg CFC11 eq./person-yr	1.29E-06

본 연구에서의 정규화 결과는 정규화 결과 비교는 Table 11, Figure 9와 같다. 그 결과, POCP, EP, ODP 영향범주에서는 DINP가 더 낮은 영향을 나타냈지만, ADP, AP GWP 영향범주에서는 DOP가 더 낮은 영향을 보였다. GWP와 ADP는 주요 영향범주로 분석되었다.

Table 11. DOP 및 DINP의 정규화 결과 비교

영향범주	DOP [person-yr] (a)	DINP [person-yr] (b)	비교 (a/b X 100)
POCP	5.91E-05	3.34E-05	176.9%
ADP	4.55E-04	4.60E-04	98.9%
AP	7.29E-05	8.30E-05	87.8%
EP	1.89E-05	1.72E-05	109.9%
GWP	1.50E-04	1.53E-04	98.0%
ODP	2.83E-06	1.29E-06	219.4%

3. 결론

본 연구에서는 상용화된 가소제인 DOP와 DINP에 대한 전과정평가를 수행하였다. 특히, DOP와 DINP를 대체하기 위한 목적으로 사용되는 DINP의 환경영향을 정량적으로 규명함으로써, 두 가소제 간 환경성을 비교분석하였다. 두 가소제가 1kg PVC를 생산하기 위해 사용되는 것을 기준으로 가소제 성능을 반영하여 결과를 도출하였다.

총 6개의 영향범주에 대해 비교를 수행하였으며, ADP, AP, GWP 영향범주를 제외한 나머지 영향범주(POCP, EP, ODP)에서 DINP의 환경영향이 더 낮게 나타났다. 정규화 결과에서 두 가소제 모두 ADP와 GWP의 영향이 다른 영향범주에 비해 상대적으로 크게 분석되어, 주요 환경영향을 확인할 수 있었다.

또한, 두 가소제 모두 모든 영향범주에서 원료물질의 기여도가 대부분을 차지하는 것으로 나타났다. 따라서 DOP와 DINP의 hotspot인 원료물질(프탈산 무수물, 2-에틸헥실알콜, 이소노닐알콜)의 개선을 통해 환경 부하를 저감하기 위한 노력이 필요하다. 원료의 환경부하를 저감하기 위하여 석유기반의 원료생산 방식을 벗어나 바이오 소재를 통한 생산도 고려할 수 있는데, 프탈산 무수물의 경우 바이오소재인 퓨란(furan)과 말레산무수물(maleic anhydride)로 합성하는 연구가 진행되고 있다(Eyas Mahmoud, et al., 2014). 이처럼 바이오매스를 활용해 생산된 원료를 사용했을 때, 발생될 수 있는 환경 영향의 변화에 대한 연구도 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

결과적으로, 본 연구는 프탈레이트계 가소제가 대부분 플라스틱 제품에 활용되고 있는 현 상황에서 성능에 기반하여 가소제의 환경영향을 정량적으로 비교하였으며, 저함량 프탈레이트(DINP) 가소제가 위해성 뿐만 아니라 환경성 측면에서도 우수할 수 있을 것이라는 전망을 제시하였다.

본 연구는 프탈레이트계 가소제의 독성을 제외한 나머지 영향범주에 대해서만 결과를 도출하였다. 이 연구에 프탈레이트계 가소제의 사용과 폐기 단계의 인체 및 생태 독성과 관련된 연구 결과를 추가적으로 반영할 수 있다면, 더 합리적인 비교가 가능할 것으로 판단된다.

4. 참고문헌

1. 허탁 외 2명, "환경 전과정평가(LCA)의 이론과 지침", 환경품질환경인증협회(KAB) (1998)
2. International organization for standardization(ISO), "ISO 14040, Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework" (2006)
3. International organization for standardization(ISO), "ISO 14044, Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines" (2006)
4. C. wilkes, J. Summers, C. Daniels, "PVC Handbook" (2005)
5. 김건우, "친환경 가소제 : 환경호르몬 논란 속 DOP 대체 가속화", 화학저널 (2005)
6. 식품의약품안전처. "기구 및 용기·포장의 기준 및 규격" (2016)
6. 산업통상자원부, "개별안전기준이 있는 공급자적합성확인대상 어린이제품의 안전기준" (2016)
7. 에너지관리공단, "-96년 IPCC 개정판- 온실가스 배출량 산출 지침" (1998)
8. 국립환경과학원, "국가 대기오염물질 배출량 산정방법 편람(Ⅲ)" (2013)
9. 국립환경과학원, "폐수배출시설 세분류 및 오염부하 원단위" (2006)
10. IHS Markit, "Process Economics Program Report 21D, Sec 7(TM/VC)" (1999)
11. Eyas Mahmoud, Donald A. Watson, Raul F.Lobo, "Renewable production of phthalic anhydride from biomass-derived furan and maleic anhydride" (2014)