

해양 플라스틱 폐기물 발생 및 처리방법에 따른 탄소배출량 비교 분석

Comparative Analysis of Carbon Emissions According to Marine Plastic Waste Generation and Treatment Methods

권순길* · 장윤성** · 최환호***

Soon Gil Kwon · Yoon Seong Chang · Hwan Ho Choi

요약: 최근 해양으로 다양한 폐기물이 배출되어 해양오염이 더욱 더 심각해지고 있다. 국내에서는 관련 규제를 강화시켰음에도 불구하고, 세부계획 수립 및 대안이 제시되지 않아 해당 문제가 쉽게 해결되지 않고 있다. 국가 모니터링 자료에 따르면 7년간 평균 전체 폐기물 발생량 중에 플라스틱 폐기물이 53.5% 이상으로 가장 비율이 높고, 이는 다양한 환경오염을 일으키는 주범이 되고 있다. 이에 본 연구에서는 해양 플라스틱 폐기물에 대해 발생량을 예측하여 탄소배출량 연구를 진행하였다. 국가 해안쓰레기 모니터링 통계를 기반으로 물질별 비율을 산출하고, 실제 수거된 해양 폐기물과 매칭시켰다. 이후 추세선을 활용하여 향후 5년간의 플라스틱 폐기물량을 예측하고, LCA를 통해 재활용과 소각시 각각 탄소배출량을 산출하였다. 연구결과, 2023년부터 향후 5년간의 해양 플라스틱 폐기물 수거량은 총 461,156 ton으로 예측되었다. 각 물질별로 탄소배출량 산정 후 재활용과 소각을 비교하였을 때, 연간 약 3.35E+05 ton/CO₂까지 감축이 가능하였다. 해당 수치는 30년생 소나무가 연간 서울시의 1/2 면적 및 여의도 면적에 약 36.6배 정도의 탄소를 흡수하는 양과 같다. 본 연구를 시작으로 해양폐기물 수거이후 재활용의 중요성과 탄소중립에 대한 해양정책수립 기초 자료 및 지표가 될 것으로 사료된다.
핵심주제어: 해양 폐기물, 해안쓰레기 모니터링, 플라스틱 폐기물, 재활용, 전과정평가

Abstract: Increasingly significant amounts of waste are being dumped into the sea, with marine pollution becoming an ever more serious global issue. However, despite the strengthening of related laws in Korea, the problem is proving difficult to resolve, with detailed plans and alternatives yet to be proposed. According to national monitoring data, on average plastic waste accounts for more than 53.5% of all Korea's environmental pollution over the past seven years. Accordingly, we conducted a study on current levels of marine plastic waste to predict how much it would increase over the next five years. Based on national coastal waste monitoring statistics, the ratio of each material was calculated and compared with real levels of collected coastal waste. Afterward, the trend line was used to predict the amount of plastic waste for the next five years, with carbon emission levels from recycling and incineration calculated through LCA. As a result of the study, the total amount of marine plastic waste collected over the five years beginning from 2023 was predicted to be 461,156 tons. After calculating the carbon emissions for each material and comparing those of recycling and incineration, it was deemed possible to reduce emissions by about 3.35E+05 tons/CO₂ per year. This figure is equivalent to the amount of carbon that could be absorbed by an area of pine trees half the size of Seoul and about 36.6 times the size of Yeouido in one year. This study is expected to serve as basic data and an indicator for establishing policies on recycling marine waste and carbon neutrality.

Key Words: Marine Waste, Coastal Waste Monitoring, Plastic Waste, Recycling, LCA(Life Cycle Assessment)

* 주저자, 국립산림과학원 산림경영연구과, 박사연구원

** 교신저자, 국립산림과학원 산림경영연구과, 임업연구사

*** 공동저자, (주)범한엔지니어링, 선임연구원

I. 서론

1. 연구 목적

최근 여름철 집중호우 등으로 인하여 해양에 다양한 폐기물이 유입되고 있으며, 이로 인하여 해양오염이 날로 심각해지고 있다(김용진 등, 2016). 해양으로 배출된 폐기물을 감소시키고자 해도 배출원을 특정하기 어려우며, 어디서, 언제 버려졌는지 알 수 없는 경우가 대부분이다(Hao et al., 2023). 이러한 폐기물은 바다 속에 생물 감소 및 생물 서식지 등 바다의 생태계를 파괴하며, 수질 오염을 높이고, 해류를 따라 떠돌면서 전 세계 다양한 환경오염을 일으키는 주범이 되고 있다(안기수 등, 2023). 또한, 온실가스를 유발시켜 기후변화까지 영향을 주고 있다. 해양폐기물의 지속적인 증가 추세에 맞춰 해당 문제를 해결하기 위하여 폐기물 회수사업도 활발하게 이루어지고 있고, 이에 따른 수거 이후 단계에서 진행되는 재활용에 대한 관심이 증가하고 있다(이경제 등, 2020). 하지만 국내·외에서 폐기물 관련 규제를 강화시켜 왔음에도 불구하고, 구체적인 계획 수립 및 대안이 제시되지 않아 문제가 쉽게 해결이 되지 않고 있다(박광하 등, 2013). 또한, 폐기물의 수거 이후부터 재활용 방안에 대한 연구도 부족한 실정이다(윤소라, 2022). 이에 해양환경측정망에서 물질별로 관련 통계들을 구축하여 운영되고 있지만, 세부적인 정보까지 구축되어 있지 않다(김병엽 등, 2021). 현재 조사된 국가 해안쓰레기 모니터링 자료에 따르면 2016년부터 2022년까지 총 7년간 수거된 해양폐기물 비율 중 플라스틱이 53.5% 이상으로 대부분을 차지하고 있다(남미경, 2018). 이에 플라스틱 폐기물에 대한 탄소중립과 기후변화 대책에 대응하여 해양폐기물 처리방법에 따른 탄소배출량에 대한 비교 분석이 필요한 시점이다. 이에 본 연구는 국가 해안쓰레기 모니터링 통계를 통해 수거된 최근 10년간 물질별 비율을 실제 수거한 폐기물(해안 및 전체 쓰레기)과 접목시켰다. 이후 추세선을 이용하여 향후 5년간(2023년~2027년)의 플라스틱 폐기물을 예측하였다. 예측된 플라스틱 폐기물 발생량을 기초로 전과정평가(LCA)를 활용하여 탄소 발생량을 정량적으로 산출하고 소각, 재활용 등 처리방법에 따라 감축량을

분석하였다.

2. 선행 연구

2010년부터 2021년까지 11년간 플라스틱 폐기물 발생량은 2.5배 이상 증가하였다. 최근인 2017년과 2021년의 발생량만을 비교해도 생활계 및 산업계의 경우 약 1.5배 증가했고, 앞으로도 지속적으로 증가할 것으로 전망된다(Greenpeace East Asia, 2019). 만약 플라스틱 생산량이 매년 4%씩 늘어나게 되면 2050년 온실가스 배출량은 6.78 Gton/CO₂-eq.으로 예상되며, 이는 석탄발전소 1,700개에서 배출되는 온실가스량과 유사한 수준이다. 화석연료는 플라스틱 등 원자재를 사용하는데 70%, 전기를 생산하는데 30%가 사용된다. 2050년까지 전력망을 모두 신재생에너지로 전환한다고 해도 플라스틱 등 원자재 생산에 따른 화석연료 탄소배출량은 5.13 Gton/CO₂-eq.에 이를 것으로 전망된다. 이는 플라스틱 생산에 따른 탄소배출량만큼 해양 폐기물 처리에 따른 탄소배출량도 매년 늘어날 것으로 예상된다.

해양 플라스틱 폐기물은 타 폐기물에 비해 환경적·경제적인 측면에서 심각성이 날로 커지고 있어 이를 해결하기 위하여 국내 뿐만 아니라 국외에서도 다양한 연구가 진행 중이다(Li et al., 2016). 최근에 국내를 포함한 중국, 일본은 각 나라의 특성에 맞는 문제 해결을 촉진하기 위해 구속력 있는 법적 규범 및 정책 수립의 타당성에 대해 논의하고 공동 대응에 관한 협정을 체결하고 있다(이경제 등, 2020). 영국에서는 플라스틱 폐기물의 꾸준한 관리를 진행해 오고 있으며, 플라스틱의 소비와 생산을 줄이기 위한 변화를 주기 위하여 단일 제품 세금 및 폐기 품목에 대한 부과금을 넘어 대중의 인식 제고 및 교육에 대하여 관련 책임을 보다 명확하게 정의하였다(McNicholas et al., 2019). 이는 폐기물 책임을 대중의 무관심과 저항하는 소매 환경에 직면하여 소비자의 습관과 지속 불가능한 관행을 바꾸기 위한 노력을 진행 중이다(Mihardja et al., 2021). 또한, 재활용하기 위하여 수거된 플라스틱의 소재를 분석하여 다양한 실험을 통해 타 소재로 물질적 기계적 성질의 분석을 통해 품질 및 기술 변화에 대한 연구도 이루어지고 있다(Ronkay et al., 2021). 플

라스틱 유래의 폐기물에 대한 생분해 가능성 검토, 미세(나노)플라스틱의 해양생물에 대한 영향검토, 플라스틱 오염에 대한 가능한 해결책으로서 해양 미생물 및 효소의 이용 가능성 등의 연구는 플라스틱 분해에 대한 생명 공학 분야의 연구가 활발히 진행중에 있다(Ganesh Kumar et al. 2020). 이는 해양생물에 대한 마이크로 및 나노 플라스틱의 독성, 플라스틱의 생분해 및 해양 환경의 플라스틱 오염 문제를 해결하기 위한 연구 필요성이 날로 강조되고 있다고 판단된다(박기연 등, 2023). 더불어 해양 플라스틱 폐기물의 위험성에 대한 대중 인식을 높이는 등 보다 포괄적인 접근 방식으로 정부와 기업이 주도적으로 지원해야 하는 필요성과 동시에 문제의 심각성을 보여주고 있다(김태훈 등, 2021). 이에 해양 플라스틱 폐기물의 발생량이 증가함에 따라 수거하였을 때 요구되는 재활용 관련 기술 등의 개발이 요구되고 있다(Irianto et al., 2022). 이처럼 국내·외적으로 기술개발을 포함하여 국제적 대응방안이나 무역규제, 재활용 등에 관한 다양한 분야에서 연구가 진행되고 있다. 하지만 미래 플라스틱 폐기물 발생량을 예측하여 생산부터 폐기까지 전과정에 걸친 탄소배출량을 산정하고 이를 저감했을 때 환경적 효과를 정략적으로 평가한 연구는 거의 수행되고 있지 않다. 이에 국내 해양 플라스틱 폐기물에 대한 탄소발생량 정량화를 통해 수거 이후 처리방법에 따른 온실가스 배출량 저감 대응 방안에 관한 연구가 필요한 시점이다.

II. 연구방법

1. 연구 자료

본 연구에서는 해양폐기물 중 플라스틱 폐기물의 총 수거량을 파악하기 위해 해양환경정보에서 제공하는 해양폐기물 수거 조사와 해양환경공단 해양폐기물 관리센터의 공시자료를 활용하였다. 해양환경정보는 『해양환경관리법』 제11조(해양환경정보망), 제76조의2(폐기물 인계·인수 내용 등의 전산 처리), 제84조(해역이용협의)에서 95조(해양환경영향조사 등), 『해양생태

계의 보전 및 관리에 관한 법률』제7조(해양생태계정보체계의 구축·운영) 등에 따라 해양환경, 폐기물해양배출, 해역이용영향평가, 해양생태, 해양폐기물 등으로 관련 정보를 제공하고 있다(해양수산부, 2023).

여기서 해양폐기물의 총 수거량은 육지에서 바다로 유입되는 폐기물과 바닷가로 버려진 폐기물 등 모든 폐기물로 정의된다.¹⁾ 이런 폐기물의 분류는 공간적 구분을 기준으로 분류할 수 있다. 해당 폐기물의 종류로 바다에 가라앉아 침적된 폐기물을 침적쓰레기, 해수면 가까이에 떠다니는 쓰레기를 부유쓰레기, 육지나 가시거리에 있는 쓰레기를 해안쓰레기로 분류된다.

해양환경정보의 10년 단위로 공시되는 최근 침적, 부유, 해안쓰레기의 수거량 통계(2013년~2022년)는 <표 1>과 같다. 수거된 해양폐기물은 총 937,568 ton(침적폐기물 232,540 ton, 부유폐기물 56,829 ton, 해안쓰레기 648,199 ton)으로 확인되었다(한국해양환경관리공단, 2023). 최근 10년 동안 해안 폐기물의 양이 가장 많았고, 이 중 2020년에 가장 많은 양을 수거하였다. 연도별로 증감 추이는 있었지만, 시간이 지날수록 전반적으로 증가하는 경향을 보였다. 해당 자료는 전체 수거량에 대한 통계이며, 폐기물의 물질별에 대한 각 비율까지는 확인되지 않았다. 이에 최근 수거량 통계에서 해안 폐기물과 전체 폐기물을 본 연구범위로 설정하였다.

<표 1> 해양 폐기물 최근 수거량 (최근 10년)

(단위: 톤)

구분	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	합계
침적 폐기물	16,384	19,353	16,252	24,146	29,662	41,501	25,799	18,212	18,944	22,287	232,540
부유 폐기물	4,213	4,454	4,330	4,697	4,460	5,666	7,713	8,558	6,067	6,671	56,829
해안 폐기물	28,483	53,129	48,547	41,997	48,053	48,464	75,132	111,592	95,725	97,077	648,199
전체 폐기물	49,080	76,936	69,129	70,840	82,175	95,631	108,644	138,362	120,736	126,035	937,568

출처: 한국해양환경관리공단, 2023

1) 해안 모니터링 통계를 통한 물질별 비율 분석

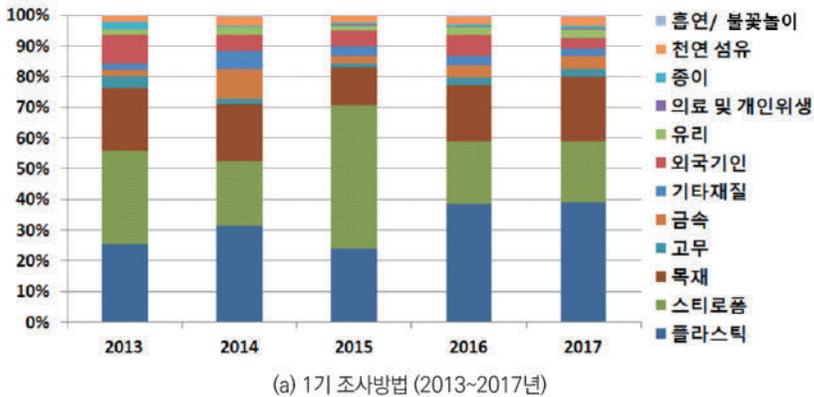
국가 해안쓰레기 모니터링은 해양수산부에서 총괄하며, 해양환경공단에서

1) 『해양폐기물 및 해양오염퇴적 관리법』 제2조(정의)에 따라 “해양폐기물”이란 해양 및 바닷가에 유입·투기·방치된 폐기물을 말한다.

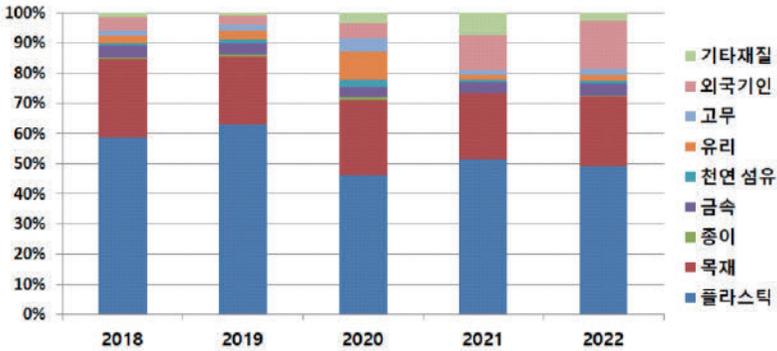
서 주관기관으로 운영중이다. 본 모니터링은 해안쓰레기에 대한 기초조사 프로그램으로 국내 인근 연안에 2008년에서 2017년까지는 1기 조사방법론²⁾으로 40곳,³⁾ 2018년부터는 2기 조사방법론⁴⁾으로 확대된 60곳⁵⁾까지 선정하여 2개월에 1번씩 정기적인 조사가 이루어지고 있다. 이는 매년 해안폐기물의 발생량 증가와 그로 인한 피해가 점점 심각해지면서 확대 운영되는 추세임을 알 수 있다. 해안에서 수거된 폐기물을 유형별 무게(kg)를 기준으로 각 물질별 비율을 산정하여 <그림 1>와 같이 정리하였다.

<그림 1> 국가 해안쓰레기 모니터링 통계를 통한 물질별 비율 분석 (최근 10년)

(단위: kg)



- 2) 길이 100m 구간 전체 조사 (12개 재질 100개 항목으로 분류하여 조사).
- 3) 강화여차리, 안산말부흥, 태안백리포, 보령석대도, 부안변산, 신안임자도, 진도하조도, 해남목동리, 고흥신흥, 여수반월, 사천아두도, 통영망일봉, 마산봉암, 부산해양대, 울산대왕암, 포항칠포, 울진후정, 강릉송정, 속초청초, 인천백령도, 인천영종도, 인천영흥도, 태안안면도, 서천다사항, 고창동호, 영광백바위, 신안고장, 해남예락, 해남송평, 제주김녕리, 완도신지도, 여수백야도, 고흥염포, 남해유구, 거제도모, 울주나사리, 동해노봉, 영덕고래불, 포항구룡포, 제주사계리 (이상 40곳).
- 4) m단위의 20개 구간 중 랜던 4개 구간을 선택하여 조사(7개 재질+원인(외국기인 제외) 50개 항목으로 분류하여 조사).
- 5) 고성하일, 군산선유도, 당진석문, 보령삼시도, 부산가덕도, 부산일광, 시흥정왕, 신안압해도, 신안우이도, 신안흑산도, 여수거문도, 여수안도, 완도보길도, 완도평일도, 울릉현포, 울산주전, 제주위미, 진도가사도, 통영육지도, 화성서신 (이상 추가 20곳).



(b) 2기 조사방법 (2018~2022년)

출처: 해양환경정보포털, 2023 (저자 재구성)

최근 10년(2013~2022년)간 해안에서 수거한 폐기물은 총 77,492 kg 이다. 이 중 무게 기준으로 비율을 보았을 때에, 1기는 플라스틱 30.98% (18,027 kg), 스티로폼 29.77% (17,323 kg), 종이 17.39% (10,120 kg), 외국 기인 5.98% (3,478 kg), 금속 4.19% (2,436 kg) 등의 비율로 수거되었다. 2기는 플라스틱 53.6% (10,335 kg), 목재 23.6% (4,545 kg), 외국 기인 9.0% (1,738 kg), 금속 3.7% (723 kg), 기타 재질 3.6% (693 kg), 유리 2.9% (550 kg), 고무 2.1% (411 kg), 천연섬유 1.1% (216 kg), 종이 0.4% (84 kg)순으로 나타났다. 분석 결과, 1, 2기 모두 플라스틱과 목재의 비율이 전체 대비 77% 이상으로 대부분을 차지하였다.

2) 해양 폐기물 수거량 및 국가 해안 모니터링 물질별 비율 매칭

앞서 언급한 바와 같이 해양에서 실제 수거하는 해안, 침적, 부유폐기물은 물질별로 구분되지 않고, 무게(kg) 및 개수(EA)로 공시되고 있다. 이에 본 연구에서 국내 해안폐기물과 전체폐기물의 수거량에 대해 무게 단위를 kg에서 ton으로 통일시켜 각 년마다 물질별 비율로 매칭하였다. 해당 결과는 <표 2>와 같다.

〈표 2〉 해안 폐기물 및 전체 폐기물의 물질별 비율 매칭

(단위: 톤)

1기 조사방법 (2008-2017년)										
구분	2013		2014		2015		2016		2017	
	해안	전체	해안	전체	해안	전체	해안	전체	해안	전체
고무	1,126	1,941	1,021	1,478	587	836	1,070	1,805	1,201	2,053
금속	528	910	5,109	7,399	1,217	1,733	1,660	2,799	2,132	3,647
기타재질	594	1,023	3,142	4,549	1,524	2,170	1,281	2,161	1,146	1,959
목재	5,806	10,004	9,824	14,226	5,948	8,470	7,669	12,936	10,040	17,170
스티로폼	8,676	14,949	11,174	16,180	22,755	32,403	8,540	14,405	9,526	16,291
외국기인	2,670	4,601	2,780	4,026	2,528	3,600	2,896	4,885	1,610	2,754
유리	510	878	1,240	1,796	842	1,198	1,040	1,755	1,429	2,444
의료 및 개인위생	33	57	86	124	55	78	74	124	70	119
종이	683	1,176	318	461	328	467	257	434	451	772
천연 섬유	523	901	1,478	2,141	1,008	1,435	1,036	1,747	1,402	2,397
플라스틱	7,236	12,470	16,717	24,207	11,591	16,505	16,231	27,379	18,819	32,183
흡연/불꽃놀이	98	170	241	349	165	235	243	409	225	385
합계	28,483	49,080	53,129	76,936	48,547	69,129	41,997	70,840	48,053	82,175
2기 조사방법 (2018년 이후)										
구분	2018		2019		2020		2021		2022	
	해안	전체	해안	전체	해안	전체	해안	전체	해안	전체
플라스틱	28,493	56,224	47,294	68,390	51,314	63,624	49,089	61,915	47,798	62,056
종이	263	520	295	427	860	1,066	224	282	430	558
목재	12,568	24,801	17,090	24,713	28,147	34,899	20,923	26,390	22,330	28,991
금속	1,986	3,919	2,804	4,054	3,726	4,620	3,276	4,132	3,906	5,071
천연 섬유	281	555	1,058	1,530	2,912	3,611	1,002	1,264	855	1,109
유리	1,121	2,212	2,172	3,140	10,092	12,513	1,548	1,952	1,774	2,303
고무	947	1,868	1,431	2,069	5,304	6,576	1,346	1,698	1,989	2,582
외국기인	2,097	4,139	2,431	3,515	5,354	6,639	11,261	14,203	15,426	20,028
기타재질	707	1,394	557	805	3,883	4,815	7,056	8,900	2,569	3,337
합계	48,464	95,631	75,132	108,644	111,592	138,362	95,725	120,736	97,077	126,035

물질별 비율 매칭 후 플라스틱 폐기물을 해안(전체) 수거량으로 봤을 때, 1기 조사방법인 2013년부터 2017년까지 5년 동안의 총 수거량은 131,266 ton (206,972 ton)이었고, 2기 조사방법인 2018년부터 2022년까지 5년 동안 수거량은 223,988 ton (312,208 ton)으로 나타났다. 위의 분석은 본 연구대

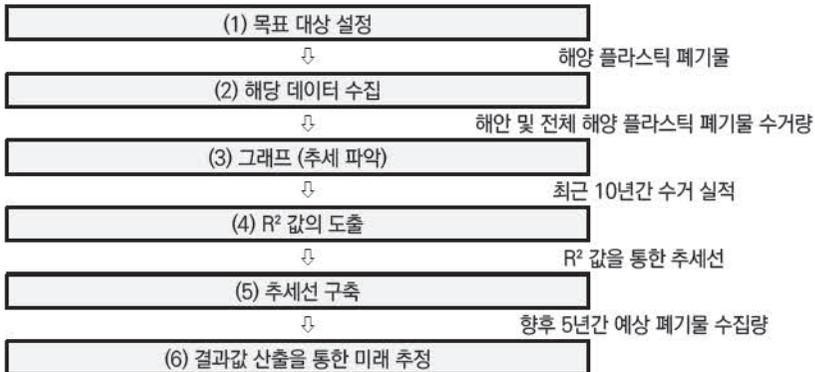
상 물질인 해양 플라스틱 폐기물의 비율이 가장 높게 차지하고 있으며, 수거 이후 사후 처리에 대한 중요성이 다시 한번 강조되는 수치임을 시사했다.

3) 추세선을 통한 국내 해양 폐기물 예측

본 연구에서는 국내 해양 플라스틱 폐기물의 향후 발생량을 예측하기 위해 통계처리 기법인 선형회귀(Linear Regression)법을 사용하여 추세선을 구하였다(김용진 등, 2016). 해당 분석은 해양 폐기물 수거량을 시간축으로 놓고 봤을 때, 수거량의 결과값이 장기적으로 어떤 식으로 변하는지 분석한 것으로 해당 특징은 특정 데이터에서 해당 값이 증가나 감소로 보여준다. 이러한 데이터의 추세는 데이터를 확인하는 것만으로도 장기측면에서 볼 때 보다 정확하게 예측이 가능하다.

해당 작업 순서는 ① 목표 대상 설정 - 해양 플라스틱 폐기물, ② 해당 데이터 수집 - 해안 및 전체 해양 플라스틱 폐기물 수거량, ③ 그래프 (추세 파악) - 최근 10년간 수거 실적, ④ R² 값의 도출 - R² 값을 통한 추세선, ⑤ 추세선 구축 - 향후 5년간 예상 폐기물 수집량, ⑥ 결과값 산출을 통한 미래 추정 순으로 <그림 2>와 같다.

〈그림 2〉 추세선을 통한 미래 추정 흐름도



추세선을 분산차트로 분석 시 도출된 해당 수식과 R제곱을 표시하게 된다.

선형추세선을 추가하게 되면 기울기로 증감이 되고 있다는 것을 확인할 수 있으며, 관련된 기본식은 (1)과 같다.

$$y = a + bx \quad (1)$$

여기서 \hat{Y} 는 Y 의 평균 값이고, \hat{Y} 는 모형으로 예측된 값이다. 비율의 분자는 실제 Y 값과 예측값(추세선)의 차이 제곱 총합이며, 분모는 Y 값과 평균 간 차이 제곱 총합이다. 이는 실제 값과 추세선이 근접하면 크기가 비슷해지게 되고 1에 수렴하게 된다. 만일 차이가 크다면 분모가 훨씬 커져서 작은 숫자가 된다. 해당 관련 식은 (2)로 나타냈다.

$$\frac{\sum_i (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_i (Y_i - \bar{Y})^2} = r^2 \quad R^2 = 1 - \frac{SS_{RES}}{SS_{tot}} = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

$$R^2 = SSE/SST = 1 - SSR/SST.$$

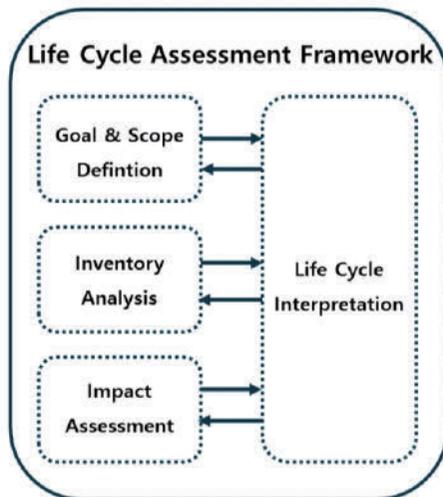
변수 사이의 관계를 분석하는 수단의 하나인 회귀분석은 회귀모형을 설정한 후 실제로 관측된 표본을 대상으로 회귀모형의 계수를 추정하여 변수 사이의 관계를 나타내주는 선형회귀식을 도출하는 과정을 거친다. 결정계수는 표본관측으로 추정된 회귀선이 실제로 관측된 표본을 어떤 방식으로 설명해 주고 있는가에 있다. 즉, 회귀선이 실제관측치를 어느 정도 대표하여 그 적합성을 보여주고 있는가를 측정하는 계수로 나타낸 것으로 해당 값은 0과 1사이의 값을 가진다. 이러한 결정계수는 두 변수 사이의 상관관계의 정도를 나타내는 상관계수를 제공한 것과 같다. 따라서 R(R Squared)로 표시하면 R=1일 경우, 모든 표본 관측치가 추정된 회귀선 상에만 있다는 것을 의미하며 추정된 회귀선이 변수 사이의 관계로 정의된다. 여기서 결정력이라고도 불리는 결정계수인 R2(R-Squared)는 회귀분석의 성능 평가 척도를 가지며 상관계수를 제공한 값이다. 0과 1사이 값을 가지고 상관계수가 높을수록 1에 가까워지고 이는 모델의 설명력이 높다고 볼 수 있다.

이에 위에서 언급한 방식을 최신 10년간(2013~2022년)의 데이터를 토대로 장기적인 변화 추이를 보기 위해 추세를 통한 향후 5년(2023~2027년)의 해양 플라스틱 폐기물의 발생량을 예측하였다. 연구데이터 기간 범위 설정은 해양 관련 법 등 개정 및 향후 폐기물 수거사업 등의 확장 추세 등 현실적인 단위 연도를 감안하여 고려하였다.

4) 전과정평가(LCA)

전과정평가(Life Cycle Assessment, 이하 LCA)는 제품 및 서비스에 대하여 원료, 획득, 제조, 사용 및 폐기에 이르기까지 전과정에 걸쳐 투입물과 배출물을 파악한다(이종갑 등, 2006). 최종적으로 잠재적인 환경영향을 수치로 정량화하여 취약한 부분을 도출하고 개선하는 평가방법이다. 이러한 전과정 평가는 다양한 분야에서 탄소배출량 산정에 관한 연구가 이루어지고 있으며, 해당 프레임워크는 목적 및 범위 설정(Goal & Scope Definition), 목록분석(Inventory Analysis), 영향평가 및 해석(Life Cycle Interpretation)으로 전체 4단계로 <그림 3>와 같이 구성된다(이영설 등, 2020).

<그림 3> 전과정평가 프레임워크



(1) 목적 및 범위설정

목적 및 범위설정 단계에서는 연구의 목적, 범위, 기능 단위 등 연구의 범위 및 정도를 정의한다. 전과정평가는 사용 목적에 따라 수집하는 자료, 분석 방법, 결과가 다르기 때문에 우선 어떠한 목적으로 사용할 것인가를 명확히 해야 한다.

본 연구목적은 해양 플라스틱 폐기물의 폐기 방식에 따른 탄소배출량을 분석하는 것이며, 범위로는 원료취득 및 생산단계 포함한 폐기단계이다. 폐기 방식은 소각과 재활용으로 설정하고, 재활용 방식은 회피효과인 신재 대체 효과를 적용하였다. 또한, 폐기물 처리방법의 기준단위당 환경영향을 수치화된 값을 활용하기 위하여 기능 단위를 플라스틱 폐기물 1kg로 설정하였다. 이에 목적, 범위, 기능 단위의 정리내용은 <표 3>과 같다.

〈표 3〉 전과정평가 목적, 범위 및 기능 단위

구분	기준 범주
목적	해양 플라스틱 폐기물의 폐기 방식에 따른 온실가스 발생량 비교 분석(소각, 재활용)
범위	폐기 단계 (원료취득 및 생산 단계)
기능 단위	해양 플라스틱 폐기물 1 kg

(2) 시스템 경계 설정

시스템 경계 설정은 해양 플라스틱 폐기물 예측량을 토대로 폐기물 수거부터 재활용 및 소각까지 설정하였다. 이는 지자체 해양쓰레기 관리 일반 현황 통계 자료(2015년~2019년)에 따르면 소각이 80.3%로 가장 많은 비율을 차지하며, 재활용은 18.5%, 매립은 1.2%에 불과하다. 통계의 현실성을 반영하여 매립부문을 제외한 재활용부문과 소각부문까지 본 연구의 경계로 <그림 4>과 같이 설정하였다.

〈그림 4〉 해양 플라스틱 폐기물의 시스템 경계



(3) 데이터 수집

본 연구에서 고려하고자 하는 해양 폐플라스틱의 폐기물 1kg 처리 기준으로 폐기 방식에 따른 탄소 배출량을 산정하기 위해서 주요 플라스틱 성분에 대해 평가계수를 <표 4>와 같이 구분하였다. 플라스틱 종류별에 따른 배출량 계산을 위해 환경성적표지의 각 성분별로 탄소배출량 산정을 하였다. 이때 환경성적표지 평가계수는 폐기물 처리방법의 기준단위당 환경영향을 수치화한 값이다.

원료취득단계에서는 발포 폴리스티렌 (Foamed Polystyrene, FS), 폴리프로필렌 (Poly Propylene, PP), 폴리에틸렌 테레프탈레이트 (Poly Ethylene Terephthalate, PETP), 고밀도 폴리에틸렌 (High Density Polyethylene, HDPE), Etc.까지 총 5개 성분으로 구분하였고, 폐기단계에서는 체계적인 분류 시스템이 없는 현실성을 반영하여 회피단계를 적용한 혼합 폐플라스틱 재활용과 혼합 폐플라스틱 소각으로 나눠 해당 LCI DB 목록으로 구분하였다.

〈표 4〉 환경성적표지의 폐플라스틱 처리방법 LCI 데이터 출처

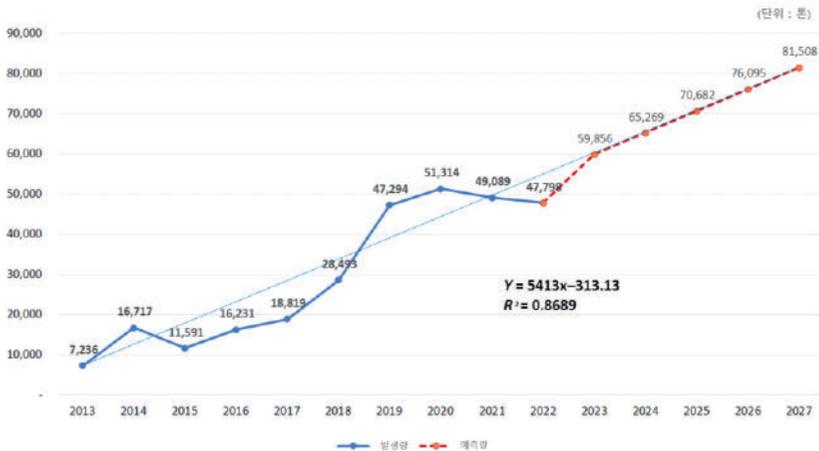
구분	LCI DB 자료명	단위	단계	LCI DB 출처
발포 폴리스티렌	Foamed Polystyrene, FS	kg CO ₂ -eq.	원료취득 단계	Ministry of Environment
폴리프로필렌	Poly Propylene, PP			
폴리에틸렌 테레프탈레이트	Poly Ethylene Tere Phthalate, PETP			
고밀도 폴리에틸렌	High density polyethylene, HDPE			
기타	Etc.			
혼합폐플라스틱 재활용	Recycle of Waste Plastic		폐기단계	
혼합폐플라스틱 소각	Incineration of Waste Plastic			

Ⅲ. 결과 및 고찰

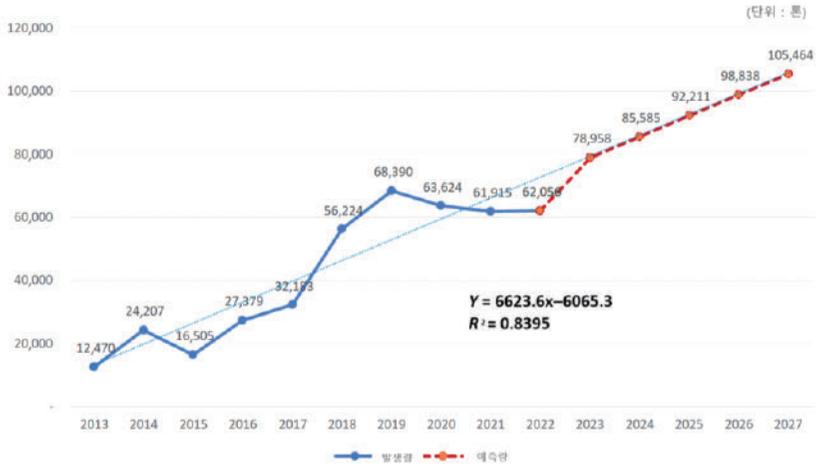
1. 해양 플라스틱 폐기물 예측 결과

최근 10년간(2013~2022년) 기 구축된 데이터를 통해 추세선을 적용하여 향후 플라스틱 폐기물의 수거량에 대한 결과값을 <그림 5>와 같이 예측하였다. 먼저 해안 플라스틱 폐기물의 발생량을 예측하였을 때, 2023년 59,856 ton, 2024년 65,269 ton, 2025년 70,682 ton, 2026년 76,095 ton, 2027년 81,508 ton으로 총 353,410 ton의 결과가 나왔다. 전체 플라스틱 폐기물의 경우, 2023년 78,958 ton, 2024년 85,585 ton, 2025년 92,211 ton, 2026년 98,838 ton, 2027년 105,464 ton으로 총 461,056 ton의 결과값이 산출되었다.

<그림 5> 해양 플라스틱 폐기물의 향후 5년간 추세선



(a) 해안 플라스틱 폐기물의 발생량 및 예측



(b) 전체 플라스틱 폐기물의 발생량 및 예측

이러한 플라스틱 특성상 타 폐기물 대비 상당히 다양한 성분이 존재하지만, 관련 연구가 부족한 실정이다. 2019년 해양수산부와 해양환경공단에서 연구된 국가 해안쓰레기 모니터링 조사용역 결과에 대한 플라스틱 성분 비율로 매칭하였다. 성분별 비율로는 스티로폼 파편 (Foamed Polystyrene, FS) 15.3%, 섬유형 밧줄 (Poly Propylene, PP) 13.5%, 그 다음으로는 음료수병과 각종 뚜껑 (Poly Ethylene Terephthalate, PETP) 11.8%가 나타났다. 그 외에 플라스틱 파편 (Etc.) 10.0%, 스티로폼 부표 (Foamed Polystyrene, FS) 7.5%, 비닐봉지 (High Density Polyethylene, HDPE) 5.7%, 라면 봉지 및 과자봉지 (Poly Propylene, PP) 5.4%, 기타 플라스틱 (Etc.) 3.4%, 일회용 접시 및 빨대 등 (Poly Ethylene Terephthalate, PETP) 2.9%, 노끈 및 포장용 끈 (Poly Propylene, PP) 2.4%, 그 외 플라스틱 (Etc.) 22.1% 순이었다. 각 성분별로 실제 수거되었던 비율로 매칭하여 향후 5년간의 예측 수거량을 <표 5>와 같다.

〈표 5〉 해양 플라스틱 폐기물의 5년간 성분별 예상 수거량

(단위: 톤)

해양 폐기물								
구분	성분	비율	2023	2024	2025	2026	2027	합계
스티로폼 조각	FS	15.3%	9,158	9,986	10,814	11,643	12,471	54,900
로프	PP	13.5%	8,081	8,811	9,542	10,273	11,004	48,441
음료수병, 각종뚜껑	PETP	11.8%	7,063	7,702	8,340	8,979	9,618	42,341
파장	Etc.	10.0%	5,986	6,527	7,068	7,610	8,151	35,883
스티로폼 부표	FS	7.5%	4,489	4,895	5,301	5,707	6,113	26,911
비닐 봉투	HDPE	5.7%	3,412	3,720	4,029	4,337	4,646	20,452
라면봉지, 스낵백	PP	5.4%	3,232	3,525	3,817	4,109	4,401	19,377
기타 플라스틱	Etc.	3.4%	2,035	2,219	2,403	2,587	2,771	12,199
일회용 접시, 빨대 등	PETP	2.9%	1,736	1,893	2,050	2,207	2,364	10,407
포장용 끈	PP	2.4%	1,437	1,566	1,696	1,826	1,956	8,611
기타	Etc.	22.1%	13,228	14,424	15,621	16,817	18,013	79,300
총계		100.0%	59,856	65,269	70,682	76,095	81,508	353,410
전체 폐기물								
구분	성분	비율	2023	2024	2025	2026	2027	합계
스티로폼 조각	FS	15.3%	12,081	13,095	14,108	15,122	16,136	70,542
로프	PP	13.5%	10,659	11,554	12,448	13,343	14,238	62,243
음료수병, 각종뚜껑	PETP	11.8%	9,317	10,099	10,881	11,663	12,445	54,405
파장	Etc.	10.0%	7,896	8,559	9,221	9,884	10,546	46,106
스티로폼 부표	FS	7.5%	5,922	6,419	6,916	7,413	7,910	34,579
비닐 봉투	HDPE	5.7%	4,501	4,878	5,256	5,634	6,011	26,280
라면봉지, 스낵백	PP	5.4%	4,264	4,622	4,979	5,337	5,695	24,897
기타 플라스틱	Etc.	3.4%	2,685	2,910	3,135	3,360	3,586	15,676
일회용 접시, 빨대 등	PETP	2.9%	2,290	2,482	2,674	2,866	3,058	13,371
포장용 끈	PP	2.4%	1,895	2,054	2,213	2,372	2,531	11,065
기타	Etc.	22.1%	17,450	18,914	20,379	21,843	23,308	101,893
총계		100.0%	78,958	85,585	92,211	98,838	105,464	461,056

2. 해양 플라스틱 폐기물의 성분별 탄소배출량 산정

해양 폐기물에 대해 성분별로 탄소배출량 산정을 위해 위에서 분류한 환경 성적표지의 공시데이터를 이용하여 각 연도별로 성분별에 따른 탄소배출량을 산정된다. 원료취득단계에서는 FS(Foamed Polystyrene), PP(Poly Propylene),

PETP(Poly Ethylene Tere Phthalate), HDPE(High Density PE), Etc.까지 주요 5개 성분으로 구분하였다. 이때 Etc.의 경우, 앞선 4개의 성분을 동일한 비율로 가정하였다. 폐기 단계의 경우, 혼합폐플라스틱 재활용과 혼합폐플라스틱 소각으로 <표 6>와 같이 정리하였다. 이때, 플라스틱 폐기물 단계별 탄소배출량 및 LCI 데이터 등 기존 kg/CO₂-eq. 단위를 전체 탄소배출량 산정을 위해 단위를 ton/CO₂-eq.로 일괄적으로 통일하였다.

<표 6> 플라스틱 폐기물에 대한 단계별 탄소배출량

구분	LCI DB 자료명	단위	탄소배출량
원료취득 단계	발포 폴리스티렌 (Foamed Polystyrene, FS)	kg CO ₂ -eq.	1.96E+00
	폴리프로필렌 (Poly Propylene, PP)		1.47E+00
	폴리에틸렌 테레프탈레이트 (Poly Ethylene Tere Phthalate, PETP)		2.37E+00
	고밀도 폴리에틸렌 (High Density Polyethylene, HDPE)		2.03E+00
	기타 (Etc.)		1.81E+00
폐기 단계	혼합폐플라스틱 재활용		1.86E-02
	혼합폐플라스틱 소각		3.41E+00

2023년 기준에서 해양 플라스틱 폐기물 예상 수거량 기준으로 분석하였을 때, 원료취득단계에서의 해안(전체) 탄소배출량은 1.43E+04 ton/CO₂-eq. (1.89E+04 ton/CO₂-eq.)을 적용하였다. 폐기단계에서 소각은 2.04E+05 ton/CO₂-eq. (2.69E+05 ton/CO₂-eq.), 재활용은 1.11E+03 ton/CO₂-eq. (1.47E+03 ton/CO₂-eq.)으로 나타났다. 소각은 폐열 이동 등 반영된 수치이며 재활용의 경우, 탄소감축 및 회피효과(신재 대체 효과)는 1.43E+04 ton/CO₂-eq. (1.89E+04 ton/CO₂-eq.)로 반영하였다. 이에 폐기물 탄소배출량을 총 산출량 계산시 소각은 2.19+05 ton/CO₂-eq. (2.88E+05 ton/CO₂-eq.), 재활용은 1.11+03 ton/CO₂-eq. (1.47E+03 ton/CO₂-eq.)의 결과값이 나왔다. 각 산출과정은 <표 7>과 같다.

〈표 7〉 2023년 해양 플라스틱 탄소배출량 산출 (소각, 재활용)
(단위: ton / CO₂-eq.)

구분	해안 폐기물 탄소배출량		전체 폐기물 탄소배출량	
	소각	재활용	소각	재활용
원료취득단계	1.43E+04		1.89E+04	
폐기단계	2.04E+05	1.11E+03	2.69E+05	1.47E+03
회피효과	0.00.E+00	1.43E+04	0.00.E+00	1.89E+04
합계	2.19E+05	1.11E+03	2.88E+05	1.47E+03

위와 동일한 방법으로 향후 5년간 처리 방법에 따른 탄소배출 감축량을 계산하였다. 2023년 해안 (전체) 감축량은 2.17E+05 ton/CO₂-eq. (2.87E+05 ton/CO₂-eq.), 2024년 해안 (전체) 감축량은 2.37E+05 ton/CO₂-eq. (3.11E+05 ton/CO₂-eq.), 2025년 해안 (전체) 감축량은 2.57E+05 ton/CO₂-eq. (3.35E+05 ton/CO₂-eq.), 2026년 해안 (전체) 감축량은 2.76E+05 ton/CO₂-eq. (3.59E+05 ton/CO₂-eq.), 2027년 해안 (전체) 감축량은 2.96E+05 ton/CO₂-eq. (3.85E+05 ton/CO₂-eq.)으로 산출되었다.

총 5년간 소각처리하는 1.29E+06 ton/CO₂-eq. (1.68E+06 ton/CO₂-eq.)으로 매년 2.58E+05 ton/CO₂-eq. (3.37E+05 ton/CO₂-eq.)으로 환산된다. 재활용의 경우, 총 6.57E+03 ton/CO₂-eq. (8.58E+03 ton/CO₂-eq.)으로 매년 1.28E+06 ton/CO₂-eq. (1.68E+06 ton/CO₂-eq.)로 해당 결과는 〈표 8〉과 같이 정리하였다.

〈표 8〉 5년간 소각 및 재활용의 탄소배출량 비교 (2023~2027년)
(단위: ton / CO₂-eq.)

구분	2023	2024	2025	2026	2027	총계	
해안폐기물	소각	2.19E+05	2.38E+05	2.58E+05	2.78E+05	2.98E+05	1.29E+06
	재활용	1.11E+03	1.21E+03	1.31E+03	1.42E+03	1.52E+03	6.57E+03
처리방법에 따른 감축량	2.17E+05	2.37E+05	2.57E+05	2.76E+05	2.96E+05	1.28E+06	
전체폐기물	소각	2.88E+05	3.13E+05	3.37E+05	3.61E+05	3.85E+05	1.68E+06
	재활용	1.47E+03	1.59E+03	1.72E+03	1.84E+03	1.96E+03	8.58E+03
처리방법에 따른 감축량	2.87E+05	3.11E+05	3.35E+05	3.59E+05	3.83E+05	1.68E+06	

5년간 산출된 탄소배출량을 토대로 처리방법에 따른 탄소감축량을 정량적

으로 비교하였다. 최종적인 감축량은 해안 플라스틱 폐기물은 연간 2.57E+05 ton/CO₂-eq.부터 전체 플라스틱 폐기물까지 최대 3.35E+05 ton/CO₂-eq.까지 감축이 가능하다는 결과가 나온다. 해당 수치는 30년생 소나무 31,109 ha 가 1년간 흡수하는 이산화탄소량과 동일하다. 해당 면적은 서울시의 약 1/2 정도이며, 여의도 면적에 약 36.6배에 달한다. 본 결과로 비추어 봤을 때, 해양 플라스틱 폐기물 처리는 탄소중립 실천에 있어서 상당히 중요한 역할을 수치적으로 확인할 수 있었다.

현재 해양 폐기물 통계는 연안해역 위주에서 수집한 정보가 대부분이라 해안폐기물이 가장 많지만, 수집된 통계 이외에도 더 많은 쓰레기가 해안으로 버려지고, 수거되고 있다. 현재에도 세계적으로 연간 플라스틱은 생산되고 소비되어 폐기되는 양은 매년 꾸준히 증가하고 있다. WWF⁶⁾의 보고서에 따르면 플라스틱 쓰레기는 깊은 바다에서부터 수 천 km 떨어진 무인도 해변까지 지구의 모든 지역에서 발견되고 있다. 특히 매년 9백만 톤 이상의 플라스틱이 바다로 유입되고 있으며, 현 추세로라면 2050년에는 바다에 물고기보다 플라스틱이 더 많을 것으로 예측하고 있다. 현재에도 매년 생산된 플라스틱의 상당 부분은 일시적인 목적으로 사용되고 바다를 포함한 자연환경에 버려지며, 빠르게 폐기물로 전환되고 있다.

하지만 국내에서 해양 플라스틱 폐기물 연구는 시작단계라 볼 수 있다. 국내에서는 수거이후 일부는 재활용이 되고 있으나, 대부분은 소각되어지면서 다양한 산업군에서 수많은 소각전문업체들은 각자 역할에서 탄소를 줄이는 역할을 하고 있지만 근본적인 해결 원인은 되지 않는다. 폐기물을 소각하면 대기를 오염시키는 유해물질이 탄소로 배출되어 추가 오염까지 이어지고 있어 환경오염은 날로 심해지고 있다. 또한, 플라스틱은 생산 시 에너지가 가장 많이 소모되는 물질 중의 하나이며 플라스틱 생산과 소각으로 인한 탄소 배출은 2050년까지 총 56기가 톤에 달할 것으로 예측되고 있으며, 온실가스를 유발시켜 기후변화까지 영향을 주고 있다.⁷⁾

6) 세계자연기금(WORLD WIDE FUND FOR NATURE), https://www.wwfkorea.or.kr/intro_agency.php

7) 국제환경법센터(Center for International Environmental Law), <https://www.ciel.org/>

앞서 언급한 바와 같이 생산과 사용단계를 포함하여 다양한 측면에서 이를 지원하고 후속연구를 위한 데이터 통합관리체계가 선행되어야 할 것이다. 플라스틱은 워낙 다양한 종류가 있기 때문에 보다 많은 축적된 데이터를 바탕으로 인과관계를 분석하여 향후 발생량 예측과 탄소중립, 기후변화 등 다각적인 접근을 통해 시스템 구축이 필요하다. 이제는 해양 폐기물에 대하여 업사이클링을 하는 것을 목표로 해양쓰레기 관리 방안이 필요한 시점이기도 하다. 그러기 위해서는 해양쓰레기 관리 기본계획을 수립하고, 폐기물에 대해 우선적으로 처리할 정책 확보가 선행되어야 하겠다. 탄소중립 실현은 폐기물에 대한 관리 및 운영부터 반드시 해결해야 할 과제이며, 중요한 시기는 분명하다. 본 연구를 시작으로 추후 발생될 해양 폐기물 폐기물의 효율적인 처리를 위한 참고할 수 있는 기초로써 활용될 것으로 사료된다.

IV. 결론

본 연구에서는 해양 폐기물 중 국가 모니터링 자료를 통해 수거된 폐기물을 물질별로 분류하였다. 이 중에서 가장 높은 비율은 플라스틱 폐기물이었으며, 최근 10년간 추이를 토대로 추세선을 통해 향후 5년간의 폐기물량을 예측하였다. 예측된 결과값으로 전과정평가 기법을 활용하여 플라스틱 성분별로 탄소배출량을 매칭 및 정량화하여 재활용과 소각 처리를 비교함으로써 저감량을 분석하였다. 최대 저감 수치는 30년생 소나무가 연간 서울시의 1/2 면적 및 여의도 약 36.6배에 달하는 면적의 탄소를 흡수하는 양과 동일하여 상당히 높은 수치임을 확인했다.

해양폐기물 수거사업시 물질별 통계를 바탕으로 비율별로 매칭 후 가장 많이 배출되는 해양 플라스틱 폐기물에 대해 분석하였고, 해당 물질을 집중적으로 수거한다면 예상보다 더 많은 수거가 가능할 것으로 사료된다. 하지만 수행한 연구에 해양폐기물 수거 지점 및 횟수 등 통계가 적어서 모든 해역을 적용하기 힘들게 현 시점이다. 공시데이터에만 의존할 것이 아니라 이를

통해 보다 효과적으로 개선하여 활용하기 위해서는 해양폐기물 수거사업시 종류별, 물질별로 성분 등 세부 분류가 필요하며, 정기적으로 조사가 이루어져야 할 것이다.

현재도 다양한 수거사업을 수행한 결과 자료를 가공한 정보에 대한 연구가 진행되고 있지만, 앞서 언급한 것처럼 해양쓰레기 대응 정책과 방안 마련에는 무엇보다 국가차원의 적극적인 지원과 체계 개선이 필요한 때이다. 본 연구는 수행과정에 있어서 공시데이터를 활용 및 응용하여 수행된 점에서 한계점은 존재한다. 이는 매년 늘어가는 해양 플라스틱 폐기물을 대상으로 수거 이후 처리 방향의 중요성과 탄소감축의 방향성에 대해 본 연구 결과물들이 향후 재활용 정책 및 연구개발에 관한 후속 연구가 이어질 수 있는 중요한 지표가 될 것으로 판단된다.

■ 참고문헌 ■

- 김병엽·주혜민·이창현·김광일, 2021, “제주 북서해역 선박기인 해양폐기물 발생량 분석,” 『해양환경안전학회지』, 27(1), pp.81-87.
- 김용진·정승미, 2016, “해양쓰레기 현존량에 대한 고찰,” 『한국폐기물자원순환학회지』, 33(6), pp.598-605.
- 남미경, 2018, “해양폐기물 활용 친환경디자인제품 연구,” 『한국디자인문화학회』, 24(1), pp.205-213.
- 박광하·권영두·김종성, 2013, “우리나라 해양오염 및 해양폐기물관리 개선에 관한 연구,” 『유기물자원화』, 21(4), pp.33-43.
- 박기연·이종수·김도완·박순호·배재근, 2023, “기상특보 발령과 해양폐기물 처리량의 연관성 분석을 통한 해양폐기물처리량의 추정,” 『환경정책』, 31(1), pp.31-45.
- 안기수·김연태, 2023, “환경법상 (폐기물)의 발생원인이 된 행위를 한 자”의 법적 의미 - 「해양폐기물 및 해양오염퇴적물 관리법」을 중심으로 -, 『한국비교공법학회』, pp.3-22.
- 윤소라, 2022, “한국 해양폐기물 관리 법제 개선연구 - 미국 해양쓰레기 관련 법률의 발전과정 검토를 중심으로,” 『홍익법학』, 23(1), pp.167-199.
- 이경제·임채현, 2020, “해양폐기물의 자원순환에 관한 일고찰,” 『해사법연구』, 32(2), pp.35-60.
- 이경화·박형기·신영만, 2016, “Excel의 추세선을 이용한 표준곡선 검증,” 『핵의학기술』,

20(2), pp.69-74.

- 이영설·박광호·위대형·서병륜·김덕열, 2020, "LCA기법을 이용한 플라스틱 파렛트 풀링시스템에 대한 환경성 평가," 『전과정평가학회지』, 21(1), pp.1-7.
- 이종갑·이인규, 2006, "선박 전과정 평가(LCA)와 재활용(Recycling)," 『대한조선학회』, 43(1), pp.17-21.
- Ganesh Kumar, A., Anjana, K., Hinduja, M., Sujitha. K and Dharani, G., 2020, "Review on plastic wastes in marine environment - Biodegradation and biotechnological solutions," *Mar Pollut Bull*, 150, 110733.
- Greenpeace East Asia Seoul office, 2019, "플라스틱 대한민국: 일회용의 유혹," Available at: https://www.greenpeace.org/static/planet4-korea-stateless/2019/12/f360eebd-%ED%94%8C%EB%9D%BC%EC%8A%A4%ED%8B%B1%EB%B3%B4%EA%B3%A0%EC%84%9C_final.pdf
- Hao, Huijuan., Jiang, Chenfan, 2023, "The path of transboundary marine plastic waste management in China, Japan, and South Korea from the perspective of the blue economy," *Front Mar Sci*, 9, 1075667.
- Irianto, O., Mizuno, K., Burhanuddin, S. and Triaswati. N., 2022, "Formulating an Excise Duty on Plastic: A Strategy to Manage Marine Plastic Waste in Indonesia," *Sustainability*, 14(23), 16287.
- Li, W. C., TSE, H. F. and FOK, L., 2016, "Plasticwaste in the marine environment, A reviewof sources, occurrence," *Sci Total Environ*, 566-567, pp.333-349.
- McNicholas, G., Cotto, M., 2019, "Stakeholder perceptions of marine plastic waste management in the United Kingdom," *Ecol Econ*, 163, pp.77-87.
- Mihardja, E. J., Komsiah, S. and Harmaningsih, D., 2021, "Campaign "BOTAK"(bogor without plastic bags) as an environmental communication model for reducing plastic waste in marine environment," *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, 674, 012101. doi:10.1088/1755-1315/674/1/012101
- Ronkay, F., Molnar, B., Gere, D. and Czigany, T., 2021, "Plastic waste from marine environment: Demonstration of possible routes for recycling by different manufacturing technologies," *Waste Manag*, 119, pp.101-110.
- Korea Marine Environment Management Corporation: Marine Environment Monitoring, 2023, "Marine Waste," Retrieved from <https://www.koem.or.kr/site/koem/main.do>.
- Ministry of Oceans and Fisheries, Marine Environment Information Portal, 2023, "Plastic Waste," Retrieved from <https://www.meis.go.kr/portal/main.do>.

권순길: 인하대학교 환경공학 박사학위를 수여 후 프랑스 트루아공과대학 환경정보기술학과와 환경 및 지속가능연구센터에서 전문연구원으로 겸직을 하였다. 현재는 국립산림과학원 산림경영연구과에서 박사연구원으로 재직중이다. 주요 관심분야는 탄소흡수 및 감축, 순환경제환경, 온실가스 발생량 산정이다. 논문으로는 A Study on Assessment of Carbon Absorption Footprint(CAF) and Forestation in Local Governments(2023)가 있다(ksg1115@korea.kr).

장윤성: 서울대학교 산림과학부 환경재료과학 전공에서 박사학위를 수여받았으며, 현재 국립산림과학원 미래산림전략연구부 산림경영연구과에서 임업연구사로 재직중이다. 주요 관심분야는 산림탄소정책, 산림·목재분야 전과정평가, 산림바이오경제이다. 논문으로는 Analysis of National Promotion Strategies and Awareness Survey for Establishing Foundation of Forest-based Bioeconomy(2023)가 있다(jang646@korea.kr).

최환호: 미국 플로리다 대학교 토목공학과 학사학위를 수여받았으며, 인하대학교 순환경제환경시스템 전공 석사학위를 수여받았다. 현재, (주)범한엔지니어링에서 건설분야 온실가스 발생량 산정 방법론 연구를 수행하고 있다. 주요 관심분야는 환경정책, 물질흐름분석, 전과정평가이다. 논문으로는 Material flow and domestic demand analysis for nickel in South Korea (2024)이 있다(hwanho1207@gmail.com).

투 고 일: 2024년 03월 28일
심 사 일: 2024년 04월 26일
게재확정일: 2024년 09월 20일