

잔류성·생물축적성 물질 피해저감을 위한 미세플라스틱(Microplastic) 관리방안

박정규*·간순영**

Microplastic Management for Preventing Risk of
Persistent/Bioaccumulative Substance

Jeong-Gue PARK*·Sun-Yeong GAN**

한국환경정책·평가연구원(Korea Environment Institute)

제출: 2013년 3월 21일 수정: 2014년 6월 10일 승인: 2014년 6월 18일

국문 요약

해양환경의 플라스틱은 풍화작용에 의해 매우 작은 크기로 부서지는데, 이를 미세플라스틱이라고 한다. 해수에 오염된 잔류성이 크거나 생물축적성이 있는 유기물질은 미세플라스틱에 잘 흡착되며, 이들 물질이 흡착된 미세플라스틱을 해양생물이 섭취하면 먹이사슬을 통해 점차 생물축적된다. 이는 결국 해양생태계의 건강성을 파괴하고 사람을 포함한 상위포식자에게 피해를 끼친다. 해양 오염물질의 흡착체로서의 역할뿐 아니라, 미세플라스틱 그 자체에서 내분비계 교란물질이 용출되어 해양생물에 피해를 입히기도 한다.

우리나라는 잔류성이나 생물축적성이 큰 물질에 대해서는 화학물질 측면에서 규제하고 있으나, 이는 육상에서의 관리에 국한되어 있다. 만약 이들 물질이 해양생태계로 유입되면, 결국 미세플라스틱 흡착 여부에 의해 그 피해가 증가하게 된다. 이에 해양생태계 내에서의 잔류성·생물축적성 물질의 피해를 저감하기 위해서는 우선 미세플라스틱의 관리가 엄격해야 할 것이다. 이에 미세플라스틱 자체를 유해물질로 지정하여 엄격히 관리하거나, 생분해성 플라스틱 이용 확대, 재활용 및 재사용 촉구, clean-up 프로그램의 확대 등을 통해 해양생태계 내로의 플라스틱 유입을 저감하는 노력이 요구된다.

【주제어】 미세플라스틱, 잔류성 유기오염물질, PBTs 물질, 생물축적, 해양오염

Abstract

Plastics of the marine environment are broken gradually down into smaller particles by chemical weathering, called "microplastic". Microplastics absorb organic pollutants that are persistent·bioaccumulative substances. If marine animals ingested microplastic added to contaminant, it will lead to a bioaccumulation through the food web. It eventually destroy health of marine environment and is harmful to marine top predators including humans. Also, Microplastics can impact marine animals by leaching the endocrine disruptor in microplastic itself as well as playing an adsorbent role of organic pollutants.

Persistent and bioaccumulative substances in Korea have been regulated in terms of chemical risk

* 제1저자: jgpark@kei.re.kr

** 교신저자: sygan@kei.re.kr

but existing regulations largely have been limited in land-based source management of microplastic. Thus, the harmful impact will be increased whether the microplastics absorbed contaminants. To prevent risk of persistent · bioaccumulative substances, this study suggests the following: (1) the strict management of microplastic by designating the hazardous substances, (2) expand the use of biodegradable plastic, (3) the effort for reuse and recycle, (4) the expand of microplastic clean-up programs.

▣ **Keywords** ▣ Microplastic, POPs, PBTs, Bioaccumulation, Marine Pollution

I. 연구의 배경

해양생태계는 육상생태계에 비하여 먹이사슬의 영양단계(Trophic level)가 복잡하고 먹이사슬의 최상위까지 전달되는 단계가 길어, 먹이사슬을 통해 오염물질이 축적되는 생물축적(Bioaccumulation)¹⁾ 현상이 쉽게 발생한다. 특히 분해가 쉽게 이루어지지 않아 환경에 오래 잔류하는 물질의 경우, 해양생태계 내의 여러 먹이사슬 단계를 거칠 때마다 축적되는 오염물질의 농도가 점점 커져, 상위단계의 생물에서는 원래 해수에서의 농도보다 수십에서 수백만 배에 달할 정도로 축적된다(Gold et al., 2013). 이는 해양생태계의 건강성을 악화시키며, 나아가 오염된 해양생물을 인간이 섭취했을 경우에는 암 발생, 면역체계 교란, 중추신경계 손상 등 건강상의 피해가 발생할 수 있다.

최근의 연구에 따르면 해양의 플라스틱은 바닷물로부터 소수성 물질인 PCB, DDE 및 노닐페놀 등을 다량으로 흡수할 수 있음이 확인되었다(Mato et al., 2001; Ogata et al., 2009). 이러한 화학물질은 우리에게 POPs²⁾나 PBTs³⁾ 물질로 알려진 잔류성이 높거나 생물축적성이 큰 물질들이며 생물축적을 통해 생식질환, 호르몬 이상과 같은 질병 위험을 증가시키고 심하면 사망까지 초래할 수 있다(Mato et al., 2001). POPs 물질은 '잔류성 유기오염물질에 관한 스톡홀름협약'을 통해 관리되고 있으며, PBTs 물질은 EU의 'REACH⁴⁾'나 우리나라의 '화평법⁵⁾' 등을 통해 엄격히 규제되고 있다.

1) 생물농축(Bioconcentration)은 물 등 환경 중에 오염물질의 농도보다 생물체에 오염물질의 농도가 높게 나타나는 현상을 의미하며, 생물축적(Bioaccumulation)은 이를 포함하여 먹이사슬을 따라 상위 생물에 오염물질의 농도가 높게 축적되는 현상을 의미함. 따라서 본 연구에서는 생물축적이라는 용어를 사용하였음.

2) 잔류성 유기오염물질(Persistent Organic Pollutants)

3) 잔류성, 생물축적성, 독성이 강한 물질(Persistent, bioaccumulative and toxic)

4) Registration Evaluation and Authorization of Chemicals

5) 화학물질의 등록 및 평가 등에 관한 법률

그럼에도 여전히 일부 국가들은 산업화 과정에서 다량의 잔류성 물질을 환경, 특히 대기 중으로 많이 배출하고 있으며, 대기로 배출된 물질은 환경에서 분해되지 않고 오래 잔류되는 특성(잔류성, Persistent)으로 인해 기류를 타고 이동하다가 해양에 침적되기도 한다. 해양생태계로 유입된 잔류성 물질은 그 자체로 생물에 축적되기도 하지만 플라스틱 조각 등에 쉽게 흡착되어 생물로 전이되기도 한다(Gold et al., 2013). 다시 말해서, POPs나 PBTs와 같이 잔류성이 높고 생물축적성이 큰 물질은 물에 잘 용해되지 않고 지방에 축적되는 특성으로 인해 플라스틱에 쉽게 흡착되며, 지방을 많이 함유한 대부분의 해양생물이 오염물질이 흡착된 플라스틱을 섭취하게 되면, 높은 농도로 축적되어 먹이사슬을 통해 상위 단계로 전달된다(Gold et al., 2013). 이렇듯 POPs나 PBTs와 같이 잔류성이나 생물축적성이 큰 물질은 비록 해양환경 중에 미량으로 존재 하더라도, 그 피해는 결국 먹이사슬의 최종단계에 있는 인간에게까지 미칠 수 있기 때문에 이는 해양생태계 보호에 대한 문제뿐만 아니라 국민건강과 직결되는 문제이기도 하다(Ilyina and Tatjana, 2006; Moore et al., 2002).

따라서 이제까지는 POPs나 PBTs와 같은 유해물질의 육상생태계 내 피해를 예방 및 저감하기 위한 규제정책이 시행되었다면, 앞으로는 해양생태계의 보호와 함께 어류 섭취를 통한 사람의 건강피해에까지 확대시켜 관심을 가져야 할 것이다. 특히 해양생태계로의 유입을 막기 위해서는 육상에서의 배출을 저감하는 노력이 반드시 필요한데, 이는 이미 기존의 관련법규나 국제적 협약으로 관리하고 있다. 그 외에 추가적으로 노력해야 할 사항은 이미 해양생태계로 유입된 오염물질이 생물에 축적되지 않도록 하기 위해, 그 흡착 수단으로 작용하는 해양플라스틱, 그 중에서도 크기가 작아 유기물질이 쉽게 흡착되는 미세플라스틱을 관리하는 것이다.

해양 플라스틱은 전 지구가 직면한 가장 중요하고 심각한 문제 중 하나이다. 현대 사회에서 플라스틱은 낮은 가격, 우수한 내구성, 가벼움, 부식 방지 등의 특성으로 인해 생산과 소비가 급속히 증가하고 있다. 플라스틱이 광범위하게 사용됨에 따라 버려지거나 폐기되는 플라스틱 제품은 그만큼 많아졌으며 이 과정에서 강우에 의한 유출, 어업활동으로 인한 폐그물 및 어구 분실, 불법 투기 등으로 많은 플라스틱이 해양환경으로 유입되었다. 한번 해양환경으로 유입되면 플라스틱의 지속성(persistence), 소수성(hydrophobic), 부유성(floating)으로 인해 자연적인 분해가 어렵고 장거리를 이동할 수 있다(Engler, 2012). 해양환경에 유입되는 플라스틱에 대한 정확한 통계는 없으나 연간 640만 톤으로 추정하고 있다(IFREMER, 2010).

해양 플라스틱은 작게 부서져 해양생물, 어업활동, 인간 등 생태계 전반에 영향을 주는데, 작게 부서진 플라스틱 조각을 미세플라스틱(또는 마이크로플라스틱)이라고 한다. 미세플라스틱은 작게 만들어진 플라스틱이나, 큰 플라스틱이 풍화작용에 의해 작아진 333 μ m~5mm 크기의 플라스틱 조각을 말한다(Arthur et al., 2009). 미세플라스틱이 더욱 문제가 되는 것은 수거가 불가능하여 해양의 심미적 가치가 저하되고 그 크기가 작아 플랑크톤부터 큰 생물까지 섭취할 수 있기 때문에 피해가 광범위해지며, 표면적이 넓어져 플라스틱 첨가제의 용출률과 함께 잔류성 유기오염물질의 흡착이 증가되는 이유에서다. 이로 인해 질식사, 소화장애 등의 물리적 영향뿐만 아니라 오염물질을 흡착한 경우 먹이사슬을 통한 생물축적 등의 화학적 영향도 발생하게 된다. 해양환경 내에서 미세플라스틱은 물과 상호작용하면서 분해되지 않고, 해수면과 퇴적물 사이를 침강과 재부유를 통해 오가면서 오염물질의 주요한 매개체 역할을 한다(동아시아바다공동체오션, 2011).

이러한 이유로 2010년 GESAMP⁶⁾ 국제 워크숍에서는 미세플라스틱을 관심물질(Emerging issue)로 지정하였고, 2012년 리우+20 유엔지속가능발전회의(2012 UN Conference on Sustainable Development)에서도 미세플라스틱 관리의 중요성을 천명한 바 있다(홍선욱, 2013a; 한국환경산업기술원, 2014). 2011년 개최된 동아시아바다공동체오션에서는 특히 미세플라스틱이 잔류성 유기오염물질을 흡착하여 생물축적을 통해 그 피해가 인간에게까지 미칠 수 있다는 것에 주목하고, 그 관리방안을 모색하는 노력을 촉구하였다(동아시아바다공동체오션, 2011).

이에 본 연구에서는 잔류성이 크거나 생물축적성이 있는 유해물질로부터 해양생태계를 보호하고 나아가 어류섭취를 통한 인간의 건강피해를 예방하는 수단으로써 미세플라스틱의 관리방안을 모색해보고자 한다.

6) the Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection

II. 잔류성·생물축적성 물질의 관리현황

1. 특성⁷⁾

POPs 물질이나 PBTs 물질은 유해물질 중 독성이 강하면서 자연적인 분해가 느려 생태계에 오랜 기간 잔류하며 장거리를 이동하기도 한다. 또한 지방에 잘 용해되는 특성을 가지고 있어 주로 지방조직에 축적되는데, 체내에서 거의 분해되지 않아 먹이사슬을 통해 생물축적을 일으켜 인간을 포함한 생태계에 큰 피해를 입힌다. 이처럼 POPs 물질이나 PBTs 물질은 환경 중에서 독성(Toxicity), 잔류성(Persistence), 생물축적성(Bioaccumulation), 장거리 이동성(Long-range transport)의 특성을 갖는다.

POPs와 PBTs 물질이 체내에 축적되면 동물의 면역력을 감소시키고, 알이 정상적으로 부화되지 않거나 이상행동을 일으키는 등 생식기능을 약화시킨다. 그리고 인간에게는 호흡기 계통의 암, 유방암, 고환암 등 각종 암을 비롯하여 생식기 발달의 저하, 성장 지연 등을 유발하는 등 동물이나 인간 모두에게 위협이 되고 있다.

2. 관리현황

1) 잔류성 유기오염물질

환경과 인간에 영향을 미치는 POPs 물질의 유해성 및 특성으로 인해, UNEP에서는 2001년 5월 23일 POPs 물질을 규제하기 위한 스톡홀름 협약을 채택하였다(환경부, 2003). 이 협약에서는 독성, 잔류성, 생물축적성, 장거리 이동성을 기준으로 <표 1>과 같이 현재 총 22종을 규제물질로 정하였다. 스톡홀름 협약 물질은 전 세계적으로 생산과 사용을 금지·제한하고 있으며, 소각 시 부산물로 배출되는 등 비의도적으로 생성되는 물질에 대해서는 배출을 최소화하도록 하고 있다. 또한 당사국 총회에서는 지속적으로 새로운 관심대상물질을 검토하여 스톡홀름 협약의 POPs 지정물질로 추가하고 있다.

7) 박정규(2000); 환경부(2003); 김병훈 외(2010)를 참고하여 작성함.

표 1 스톡홀름 협약 물질

구분	물질명
Annex A (금지)	Aldrin(●), Chlordane(●), Chlordecone(●), Dieldrin(●), Endrin(●), Heptachlor(●), Hexabromobiphenyl(▲), Hexabromodiphenyl ether and heptabromodiphenyl ether(▲), Hexachlorobenzene(HCB) (● ▲), Alpha HCH(●), Beta HCH(●), Lindane(●), Mirex(●), Pentachlorobenzene (● ▲), Polychlorinated biphenyls(PCB) (▲), Technical endosulfan and its related isomers(●), Tetrabromodiphenyl ether and pentabromodiphenyl ether(▲), Toxaphene(●)
Annex B (제한)	DDT(●), Perfluorooctane sulfonic acid, its salts and perfluorooctane sulfonyl fluoride(▲)
Annex C (비의도적 생성물)	Polychlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDD), Polychlorinated dibenzofurans (PCDF), Hexachlorobenzene (HCB), Pentachlorobenzene, Polychlorinated biphenyls (PCB)

자료: Stockholm Convention(2014.3.6, <http://chm.pops.int/>)

주: (●) 농약류; (▲) 산업용 화학물질

우리나라도 스톡홀름 협약에 가입하여 POPs 물질을 규제하고 있다. 이를 위해 2007년 「잔류성 유기오염물질 관리법」을 제정하여 시행 중이며, 협약의 원활한 이행을 위해 2009년 4월 국가이행계획서를 작성하여 당사국 총회에 제출하였다(김병훈 외, 2010). 또한 환경부에서는 국내 POPs의 체계적 관리를 위한 ‘제1차 잔류성 유기오염물질 관리 기본계획(2012~2016)’을 수립하여 추진 중이다.

2) 생물축적성 물질

EU에서는 2007년부터 REACH 제도를 통해 PBTs 물질을 규제하고 있다. REACH는 EU 내에 연간 1톤 이상으로 제조 및 수입되는 모든 화학물질의 위해성을 평가하여 등록, 평가, 허가, 제한을 목적으로 하는 제도이다.⁸⁾ 기존화학물질 등록과정에서 PBTs 및 vPvB⁹⁾ 물질을 고우려물질로 간주하여 우선적으로 등록, 평가하도록 하고 있으며 이를 통해 환경과 인간에게 가해지는 영향을 사전에 예방할 수 있도록 하고 있다(박정규, 2010). EU의 REACH 제도는 화학물질에 대한 관리를 대폭 강화한 정책이며, 이에 따라 다른 국가에서도 화학물질 관리를 강화하고 있는 추세이다.

우리나라에서도 국민의 건강과 환경을 보호하고자 2015년부터 「화평법」을 통해 PBTs와 vPvB 물질을 규제할 전망이다. 「화평법」도 EU의 REACH 제도와 유사하며,

8) 환경부 REACH 도움센터(2014.3.6, <http://www.reach.me.go.kr/>)

9) 고잔류성과 고생물축적성(very persistent and very bioaccumulative)

화학물질의 위해성을 평가하여 허가 및 제한을 받도록 하는 방식을 취하고 있다. 다만 REACH에서는 모든 기존화학물질이 등록 대상인 반면, 「화평법」에서는 기존화학물질 중 등록대상물질 목록을 작성하여 이에 해당되는 화학물질만 등록하여 평가받도록 하고 있다. 등록대상물질을 선정하는 과정에서 환경과 인체에 심각한 영향을 미치는 PBTs 물질을 우선적으로 선정하도록 하고 있다.

III. 미세플라스틱의 발생 및 오염 현황

1. 미세플라스틱의 정의

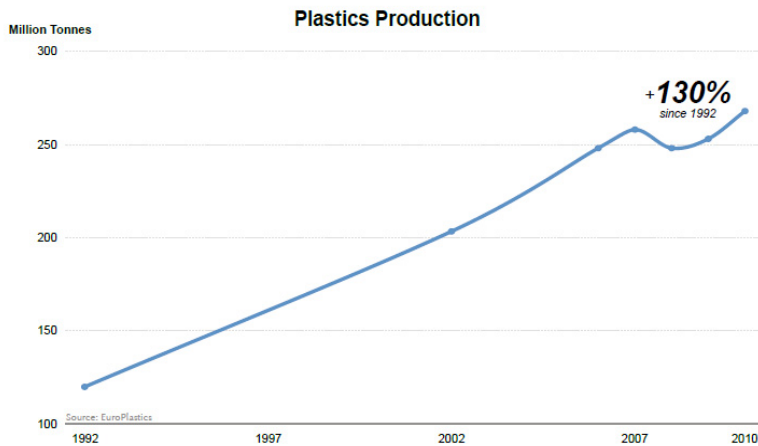
최근 전 세계 해양환경의 중요한 문제로 떠오르는 것이 바로 플라스틱 조각이다. 해양으로 유입된 대부분의 플라스틱은 자연적으로 분해되지 않고 해류와 바람에 의해 화학적 변형을 일으켜 점차 작은 조각으로 부서진다. 이를 2차 미세플라스틱(Secondary microplastic)이라고 하며(Ryan et al., 2009), 처음부터 작게 만들어져 해양으로 유입된 플라스틱은 1차 미세플라스틱(Primary microplastic)이라고 한다. 1차 미세플라스틱보다는 대형 플라스틱이 부서져서 작아지는 비율이 훨씬 높다. 1차 미세플라스틱은 일반적으로 산업폐수 처리, 선박, 마이크로비즈를 포함한 화장품과 페이스스크럽 제품, 의류 등에서 발생되며 해양이나 해변 등의 환경에서 많이 발견되고 있다(Gold et al., 2013).

작은 플라스틱 조각에 대한 위험이 인식된 이래로 “미세플라스틱(Microplastic)”이라는 용어가 사용되기 시작하였으나, 미세플라스틱이란 용어와 크기에 대해서는 학자마다 다르게 정의되고 있다. Gregory and Andrady(2003)는 0.06~0.5mm의 크기를 microlitter로 보았고 이보다 큰 것을 mesolitter로 정의하였다. 다른 학자들(Fendall and Sewell, 2009; Betts, 2008; Moore, 2008) 및 최근 미국 국립대기해양국의 주최로 개최된 미세플라스틱에 관한 국제회의에 참석한 학자들은 미세플라스틱을 333 μ m~5mm 크기의 플라스틱 조각이나 파편으로 정의하였다(Arthur et al., 2009).

2. 해양생태계 내 오염현황

플라스틱은 1940년대부터 대량 생산되었으며 이후 플라스틱의 생산량은 연평균 약 15%씩 꾸준히 증가하여, 전 세계적으로 1992년 약 1억 1,600만 톤에서 2010년 약 2억 6,500만 톤으로 급속히 증가하였다(그림 1 참조; UNEP, 2011). 이에 따라 플라스틱의 사용량도 급증하였고 폐기되거나 버려지는 플라스틱의 양도 그만큼 많아졌다. 해양플라스틱은 플라스틱(폴리스티렌, 폴리에틸렌, 폴리에스터 등) 제품이 해양환경으로 유입된 것으로, 일반적으로 석유계 화합물로 만들어진 모든 해양쓰레기를 포함한다(Gold et al., 2013). 이러한 해양플라스틱은 해류에 의해 빠르게 이동되며 분해되지 않고 침적되면 육안으로 관찰이 불가능하기 때문에, 최근 들어 세계 해양 환경이 직면한 중요한 문제로 부각되기 시작하였다.

그림 1 플라스틱 생산량



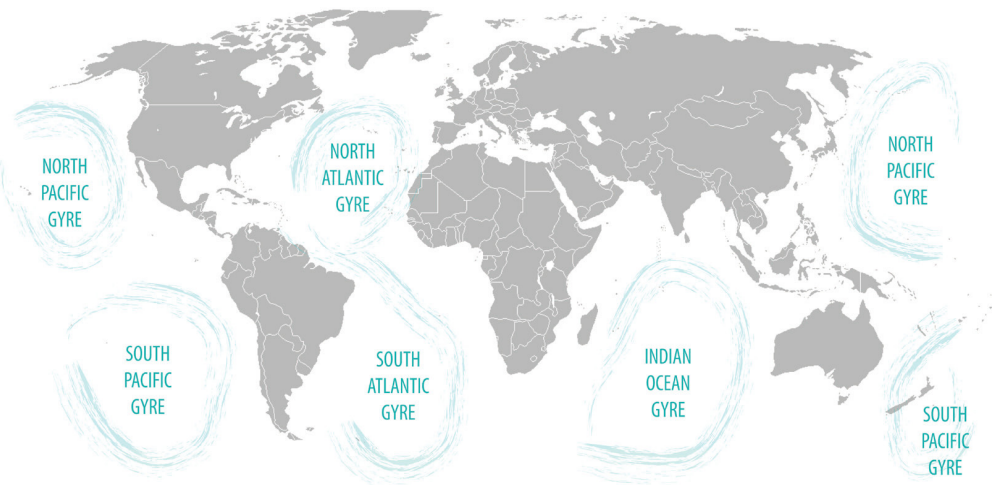
자료: UNEP(2011).

해양으로 유입되는 쓰레기의 종류는 매우 다양하지만 플라스틱류가 주를 이루고 있으며, 9개의 북동 대서양 나라의 해안에 버려진 쓰레기를 수집하여 조사한 결과, 수집된 쓰레기의 약 75%가 플라스틱류로 조사되었다(OSPAR Commission, 2007). 해양플라스틱은 플라스틱 가방, 음식 포장지, 컵, 병, 풍선 등과 같은 소비자제품과 산업 관련 부품, 어업 또는 양식과 관련된 제품 등을 포함한다(Gold et al., 2013). 전 세계적으로

해양 플라스틱 발생량에 대한 정확한 통계는 없으며, 얼마나 많은 양의 플라스틱이 해양환경으로 유입되는지에 대한 통계도 없다. IFREMER(2010)에 따르면, 현재의 해양생태계 내에 존재하는 플라스틱은 2억 6천만 톤이 넘을 것으로 추정하였으며, 매년 640만 톤의 플라스틱이 해양으로 유입되고 있는 것으로 평가하고 있다.

플라스틱이 한번 해양으로 유입되면, 해류와 바람에 의해 장거리를 이동하여 해류와 바람이 약해지는 5개의 특정 지역(gyre)에 집중된다(그림 1 참조). 특히 북태평양에 쓰레기로 뒤덮인 지역의 면적은 약 140만km²로 보고되고 있다.¹⁰⁾ 놀라운 것은 플라스틱은 해양 표면뿐만 아니라 해저 퇴적물과 해변 모래사장 등 해양 전체에 분포할 수 있다는 것이다(표 2 참조). 플라스틱은 다양한 밀도로 제조되기 때문에 물보다 밀도가 작은 플라스틱은 표면에 부유하고, 물보다 밀도가 큰 플라스틱은 가라앉는다. 부유성 해양폐기물 중에는 부유성, 광범위한 사용, 대량생산으로 인해 주로 폴리에틸렌(polyethylene; 플라스틱 쇼핑백, 음료수 걸이)과 폴리프로필렌(polypropylene; 요거트 용기, 음료수 병)이 우세하다. 밀도가 큰 플라스틱은 가라앉아 플라스틱에 미생물이 부착되기도 하는 등 플라스틱이 sink로도 작용할 수 있다(Engler, 2012).

그림 2 해류와 바람에 의해 형성된 해양플라스틱 집중 지역



자료: Gold et al.(2013).

10) 연합뉴스(2014.2.27, <http://news.naver.com/main/read.nhn?mode=LSD&mid=sec&sid1=102&oid=001&aid=0003023570>).

표 2 플라스틱의 종류와 밀도¹⁾

폴리머 종류	밀도(g/mL)	비고
polyolefins		
polypropylene (PP)	0.90	부유성 해양폐기물의 80-90%
polyethylene (LDPE, HDPE)	0.92-0.96	부유성 해양폐기물의 5-15%
polystyrene (PS)	≤ 1.05	폼(foam)의 형태로 확장(예, 스티로폼)
acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS)	1.07	
nylon	1.09	
polycarbonate	1.36	
cellulose acetate	1.42	
poly(vinyl chloride) (PVC)	1.4	
polyethylene terephthalate (PET)	1.55	음료수 병

주: 1) 플라스틱의 밀도는 가공조건에 따라 달라질 수 있음

2) 물의 밀도: 온도와 염도에 따라 보통 약 1.02-1.03g/mL

자료: Engler(2012).

우리나라는 해양플라스틱뿐만 아니라 해양쓰레기 발생량에 대한 조사 연구가 매우 미흡한 실정이다. 해양수산부(2012)에 의하면 우리나라 해양쓰레기 발생량은 연간 142,800톤으로 추정하고 있으며 2011년 20개 조사지역에서 해양쓰레기를 수거하여 분류한 결과, 플라스틱류와 스티로폼이 높은 빈도를 보이고 있다(표 3 참조). 플라스틱류와 스티로폼은 개수, 무게, 부피 면에서 많은 양을 차지하고 있다. 특히 스티로폼은 전체 부피의 32%를 차지하고 있는 것을 볼 수 있다.

표 3 분류기준별 해양쓰레기 조사 결과(2012.1~2012.11/총 6회)

대분류	개수(개)		무게(kg)		부피(L)	
	개수	비율	무게	비율	부피	비율
플라스틱류	28,545	54.3%	2,789.1	28.5%	15,030.1	28.8%
종이	1,132	2.2%	242.0	2.5%	368.9	0.7%
스티로폼	7,989	15.2%	2,015.7	20.5%	16,860.8	32.3%
나무	2,451	4.7%	1,976.7	20.1%	6,217.1	11.9%
금속	1,293	2.5%	1,167.2	11.9%	6,319.8	12.1%
의류 및 천	1,151	2.2%	470.3	4.8%	912.3	1.7%
유리	4,817	9.2%	358.0	3.6%	2,529.7	4.9%
고무	255	0.5%	109.3	1.1%	439.3	0.8%

대분류	개수(개)		무게(kg)		부피(L)	
	개수	비율	무게	비율	부피	비율
의료 및 개인위생	294	0.6%	18.9	0.2%	40.2	0.1%
흡연/불꽃놀이	2,621	5.0%	137.8	1.4%	140.4	0.3%
외국기인	1,677	3.2%	226.6	2.3%	2,248.7	4.3%
기타	336	0.6%	303.1	3.1%	1,029.0	2.0%
합계	52,561	100.2%	9,823.5	100.0%	52,136.2	99.9%

자료: 해양수산부(2012).

IV. 미세플라스틱에 대한 연구 동향

Carpenter와 Smith(1972)가 북대서양의 플라스틱 펠릿이 생태학적으로 위협이 될 수 있다는 연구결과를 발표한 이래 이 분야에 대한 연구가 시작되었다. 해양플라스틱에 관한 연구는 1970년대부터 진행되어 왔으나, 최근에 들어서야 활발한 논의가 이루어지고 있다.

Juliana et al.(2014)은 미세플라스틱에 관한 기존의 논문 101건을 분석하여 주제에 따라 <표 4>와 같이 5개로 분류하였다. 전체 문헌 중 60%는 5년 이내에 발표되었고 80%는 15년 이내에 발표된 것으로 나타났다. 논문에 대한 주제는 연구 초기의 경우 동물이 플라스틱을 섭취하거나 바다에 버려진 그물에 걸려 질식사하는 등의 플라스틱의 물리적 영향에 대한 것이었다면, 최근 연구 경향은 플라스틱과 화학물질 사이의 상관관계나 메커니즘을 분석하는 것에 초점이 맞춰져 있다. 이에 본 장에서는 <표 4>의 각 연구주제별 주요 연구결과를 정리하였다.

표 4 미세플라스틱에 대한 연구 주제 분류

주제	논문 수	주요 저널
플랑크톤 샘플 내의 미세플라스틱	25	Marine Pollution Bulletin
퇴적물에서의 미세플라스틱	22	Marine Pollution Bulletin
무척추동물의 미세플라스틱 섭취	11	Environmental Science and Technology
척추동물의 미세플라스틱 섭취	26	Marine Pollution Bulletin
오염물질과 미세플라스틱의 상관성	17	Marine Pollution Bulletin

자료: Juliana et al.(2014).

1. 플랑크톤 샘플 내의 미세플라스틱

해양의 부유성 플라스틱의 양과 존재를 진단하기 위하여 해양 표면에서 채취된 플랑크톤 샘플을 분석하였다. 1970년대 초기 북대서양의 해양 표면에서 채취한 모자반 군집 샘플에서 많은 양의 폴리스티렌 플라스틱 펠릿(1~2mm)이 발견되었다. 이는 1970년대 이전부터 해양에 플라스틱이 존재하고 있었다는 것으로 볼 수 있으며, 플랑크톤 샘플에서 채취된 플라스틱 펠릿의 양은 점차 증가하고 있는 것으로 나타났다.

플랑크톤 샘플에서의 미세플라스틱에 관한 연구에서는 플라스틱의 양과 크기가 해양에 따라 다르게 나타났다. Law et al.(2010)은 북대서양 서부와 카리브해에서 플라스틱의 양과 특성을 분석하였다. 북위 22~38°에서는 수렴대가 존재하고 있어 해양플라스틱이 대량으로 모이게 되는데, 이곳에서는 10mm 이하의 작은 플라스틱이 88%를 차지하는 것으로 나타났다. 적도 근처의 대서양에서는 암초어류(reef fish)와 십각류 유충뿐만 아니라 해저 근처에서도 플라스틱(n=71, 5mm 이하의 플라스틱 85%)이 발견되었다(Ivar do Sul et al., 2013). Shaw와 Day(1994)에 따르면, 1980년대에 수행된 연구에서 태평양에 많은 양의 각양각색의 플라스틱이 존재하고 있음을 보고하였다.

일반적으로 플라스틱은 부유성으로 인해 많은 양이 해양 표면에 분포하고 있지만 바람과 같은 기상조건에 의해서 분포 특성이 달라질 수 있다. Lattin et al.(2004)은 캘리포니아 산타모니카 해변에서 폭풍 전과 후의 플라스틱을 채취하여 분석한 결과를 보고하였다. 폭풍 전에는 표면에서 가장 높은 밀도를 보였으나 폭풍 후 가장 높은 밀도를 나타낸 곳은 해안과 가까운 곳이었는데, 이는 폭풍으로 인해 육지에서 많은 양의 플라스틱이 유출되고 재부유되었기 때문인 것으로 나타났다.

2. 해변(모래사장)과 퇴적물에서의 미세플라스틱

미세플라스틱은 세계 각지의 해변뿐만 아니라 갯벌과 퇴적물에서도 발견되고 있는 것으로 보고되고 있다(Juliana et al., 2014). 오만의 걸프만과 아라비아만의 해변에서도 플라스틱이 나타나고 있으며, 아라비아만 해변에서 발견된 미세플라스틱의 경우 운송 중인 선박이 좌초되어 유출된 것으로 조사되었다(Juliana et al., 2014). Fotopoulou와 Karapanagioti(2012)는 선박이 좌초되어 유출된 플라스틱의 표면을 분석한 결과를 발표하였다. 버진 펠릿(virgin pellet)과 좌초되어 유출된 플라스틱의 특성이 다르게 나타났는데, 버진 펠릿(virgin pellet)의 표면은 균일하지만 좌초되어 유출된 플라스틱의 표

면은 거칠고 균일하지 않은 것으로 나타났다.

Thompson et al.(2004)은 영국의 18개 해변에서 퇴적물을 분석한 결과 섬유 형태의 폴리머들이 발견되었다고 보고하였으며, Browne et al.(2010) 또한 영국 타마 해안의 퇴적물에서 1mm 이하의 미세플라스틱이 존재하고 있음을 보고하였다.

Costa et al.(2010)은 Boa Viagem Beach의 경우 지역의 관광지에서 버려진 플라스틱으로 인해 1차와 2차 플라스틱이 발생하고 있으며, 해양으로 유입되는 플라스틱의 양을 줄이는 것이 미세플라스틱 문제를 해결하는 최선의 방법이라고 제시하였다.

3. 해양 무척추동물의 미세플라스틱 섭취

무척추동물의 미세플라스틱 섭취에 관한 연구는 주로 통제된 실험실에서 실험하고 분석한 결과를 제시하였다. Thompson et al.(2004)은 해양 무척추동물이 미세플라스틱을 섭취하는지에 대한 여부를 조사하기 위해 단각류, 갯지렁이와 따개비를 노출시킨 결과, 미세플라스틱이 섭취되는 것을 볼 수 있었다. 이 외에도 홍합(*Mytilus edulis*)은 미세플라스틱 섭취와 관련한 연구에서 가장 일반적으로 활용되는 생물이다. Browne et al.(2008)은 홍합 조직이 미세플라스틱(1mm 이하)을 12시간 이내에 섭취하고 축적하는 것으로 보고하였다. 또 다른 생물은 해삼류(*Holothuria*)이다. 퇴적물이나 부유물에서 먹이를 얻는 해삼은 퇴적물에서 선택적으로 나일론과 PVC 조각(0.25~15mm)을 섭취하였다. 또한 연구지역에서 수집된 플라스틱에 유기오염물질이 흡착되었기 때문에 인간이 플라스틱을 직접 먹지 않더라도 해삼을 섭취함으로써 인간에게까지 유기오염물질이 도달할 수 있는 새로운 경로가 될 수 있다고 하였다.

4. 해양 척추동물의 미세플라스틱 섭취

경골어류에 의한 미세플라스틱 섭취가 발견된 이후 유충과 치어에서도 미세플라스틱이 발견되는 등 미세플라스틱과 해양생물 사이의 상호작용에 대한 연구가 시작되었다. Boerger et al.(2010)에 따르면 최근 NPCG¹¹⁾에 서식하는 플랑크톤 섭식 어류(planktivorous fish) 35%의 위장에서 미세플라스틱이 발견되면서 척추동물의 미세플라스틱 섭취에 대한 우려가 심해지고 있다고 보고하였다.

11) North Pacific Central Gyre

바닷새(Seabird)는 지난 40여 년 동안 플라스틱 섭취량과 구성성분을 조사하기 위해 이용된 생물로 잘 알려져 있다. 섭취된 플라스틱은 대부분 육안으로 확인이 가능하고 macroplastic(5mm 이상)과 미세플라스틱이 함께 존재하고 있는 것으로 나타났다.

척추동물에 의한 미세플라스틱 섭취가 더욱 문제가 되는 것은 동물이 플라스틱을 섭취함으로써 플라스틱에 흡착된 유기오염물질이 동물의 몸속으로 전이될 수 있기 때문이다. 실제로 Teuten et al.(2009)과 Tanaka et al.(2013)의 연구에 따르면, 습새(Calonectris leucomelas)와 쇠부리습새(Puffinus tenuirostris)에서 유기오염물질이 검출되었다고 제시하였다.

5. 오염물질과 미세플라스틱의 상관성

최근에는 미세플라스틱의 오염물질 흡착과 관련한 연구가 진행되고 있다. 일본의 해안에서 채취한 PP¹²⁾ 레진에는 바닷물로부터 흡수한 PCBs,¹³⁾ DDE¹⁴⁾ 및 노닐페놀(nonlyphenol) 등이 다량으로 함유되어 있는 것으로 나타났다(Mato et al., 2001; Ogata et al., 2009). 또한 NPCG와 캘리포니아 해변 근처에서도 플라스틱이 PCBs, PAHs¹⁵⁾ 및 DDT¹⁶⁾에 오염되어 있다는 연구결과가 보고되었다(Rios et al., 2007). Gouin et al.(2011)은 플라스틱이 소수성 유기오염물질을 흡수한 것이라고 밝힌 바 있다.

플라스틱 종류별 유기오염물질의 흡수량을 파악하기 위한 연구도 진행되었는데, Rochman et al.(2013)은 HDPE,¹⁷⁾ LDPE¹⁸⁾ 및 PP가 PET¹⁹⁾와 PVC²⁰⁾보다 PAHs와 PCBs를 더 많이 흡수한다고 하였다. 이로 인해 HDPE, LDPE 및 PP를 포함한 제품은 PET와 PVC를 포함한 제품보다 해양 동물에 더 큰 피해를 줄 수 있다고 하였다.

12) Polypropylene

13) Polychlorinated biphenyls

14) Dichlorodiphenyldichloroethylene

15) Polycyclic aromatic hydrocarbons

16) Dichlorodiphenyltrichloroethane

17) High-density polyethylene

18) Low-density polyethylene

19) Polyethylene terephthalate

20) Poly(vinyl chloride)

6. 해양환경에서의 플라스틱 분해²¹⁾

플라스틱은 해양환경에서 자연적으로 분해되기가 어렵다. 분해란 고분자(polymer) 물질의 평균 분자량을 줄이는 화학적 변화이다. 플라스틱은 일반적으로 고분자 물질이므로 분해가 진행되면 마모되면서 약해진다. 오랜 시간 동안 분해가 진행된 플라스틱은 손으로 건드리면 가루처럼 부서진다. 이렇게 부서진 플라스틱은 육안으로 확인이 불가능하지만 이후에도 분해과정이 추가적으로 진행될 수 있는데, 이때의 분해는 미생물을 매개로 한 생물학적인 분해이다. 이러한 과정이 모두 완료되면 플라스틱 고분자 내의 유기탄소가 모두 이산화탄소로 전환되는데, 이를 완전한 무기물화라고 한다(Andrady, 1994; 1998; Eubeler et al., 2009). 분해는 일반적으로 매개자의 종류에 따라 다음과 같이 분류한다.

- (1) 생물분해 : 미생물에 의한 분해
- (2) 광분해 : 태양빛에 의한 분해
- (3) 열산화분해 : 일반 온도에서 산소에 의한 분해
- (4) 열분해 : 높은 열에 의한 분해(해양환경에서의 분해 메커니즘은 아님)
- (5) 가수분해 : 물에 의한 분해

LDPE, HDPE, PP 및 나일론(nylons)과 같은 고분자 물질이 해양환경에 노출되면 주로 자외선(UV-B)에 의한 광분해 과정에 의해 분해된다. 일단 광분해가 일어나면, 이후 UV가 없더라도 일정기간 동안에는 산소로 인해 열산화분해가 일어날 수 있다. 이로 인해 분자량은 줄어들고 산소를 함유한 작용기(functional group)가 고분자 물질에 생성된다. 이 외에 다른 분해는 자외선 광분해 속도에 비해 매우 느리다. 가수분해의 경우 보통 해양에서는 중요한 메커니즘이 아니며, 플라스틱을 포함한 생체적합물질(biomaterial)은 생물분해가 일어날 수 있으나 광분해에 비해 그 속도가 느리다.

또한 광분해 속도가 다른 분해에 비하여 빠르다 할지라도 공기에 노출되어 있는지, 물에 떠 있는지에 따라 분해되는 속도는 차이가 있는 것으로 나타났다. 해양환경은 수온이 낮으며, 물에 떠 있는 플라스틱에는 미생물이 부착될 수 있어 공기에 노출되지 못하기 때문에 물에 떠 있는 플라스틱보다 공기에 노출되어 있는 플라스틱의 분해가 빠른 것으로 나타났다. 따라서 해양환경에 존재하는 플라스틱의 분해는 생각보다 더

21) Anthony and Andrady(2011)를 참고하여 작성함.

어려운 것으로 보이며, 환경과 조건에 따라서도 달라질 수 있음을 확인하였다.

7. 환경 및 인간에 대한 미세플라스틱의 영향

1) 물리적 영향

플라스틱 조각은 해양환경에 살고 있는 동물에 큰 위협이 된다(그림 3 참조). 가장 눈에 띄는 영향은 플라스틱 섭취와 얽힘으로 인한 죽음이며, 어업활동으로 인해 버리거나 태풍 등으로 유실된 폐그물이나 폐통발에 의해 해양생물이 걸리거나 갇혀 죽게 되는데 이를 유령어업(ghost fishing)이라고 한다. 작은 해양생물부터 고래까지 모든 생물에게서 플라스틱 섭취가 관찰되고 있고 이로 인해 질식, 기아 및 식욕감퇴, 소화불량, 내부 장기 손상 등과 같은 기타 영향이 나타날 수 있다. 매년 수백만 마리의 바닷새, 바다거북, 어류, 해양 포유류들이 플라스틱 조각을 섭취하여 소화 장애로 죽어가고 있고 매년 3만 마리의 북방 바다표범이 그물에 걸려 질식사하고 있다. 어류뿐만 아니라 모든 바다거북 종의 86%, 모든 바닷새 종의 44%, 모든 해양포유류의 43%를 포함하여, 적어도 267종의 해양생물이 플라스틱에 의해 영향을 받고 있는 것으로 나타났다(Laist, 1997). 미세플라스틱은 더 많은 생물이 많은 양을 섭취할 수 있기 때문에 해양환경에 더 큰 잠재적 위협요인으로 작용하고 있다. 최근 연구에서는 NPSG²²⁾에서 단일 어류종이 약 12,000~24,000톤의 플라스틱을 소비하고 있는 것으로 평가되었다. 이렇게 피해를 받고 있는 종의 수는 예측하기 어려우며, 과소평가되고 있다.

그림 3 미세플라스틱으로 인한 해양생물의 피해사례



자료: 해양쓰레기대응센터(2014.3.4, <http://info.malic.or.kr/main.do>)

22) North Pacific Subtropical Gyre

2) 화학적 영향²³⁾

미세플라스틱으로 인한 영향은 물리적인 것뿐만 아니라 화학적인 측면으로도 나타나고 있는데 다음과 같다.

첫째, 미세플라스틱은 화학물질을 흡수할 수 있으며 먹이사슬을 통하여 농도가 상위 단계로 전달될 수 있다는 것이다. 미세플라스틱은 산업, 농업, 살충제 등 광범위하게 사용되는 PCBs, DDT, 중금속 등의 소수성 물질을 흡착할 수 있는 특성이 있다(Mato et al., 2001). Betts(2008)의 연구결과에 따르면, 미세플라스틱의 PCBs 농도는 주변 물에 포함된 PCBs에 비하여 약 100만 배 이상 높은 농도를 나타낸다고 보고하였다. 또한 오래된 플라스틱이 새 플라스틱보다 오염물질을 더 많이 흡착할 수 있다(Engler, 2012). PCBs, DDT 및 노닐페놀과 같은 POPs 물질은 환경에서 오래 잔류하고 생물축적, 소수성, 반휘발성 등의 특징으로 인해 환경 중에 장기간 동안 남아있으며, 쉽게 이동할 수 있는 독성물질이다. 특히 POPs 물질의 가장 중요한 특징 중 하나는 생물축적을 할 수 있다는 점이며, 먹이사슬을 통해 상위 단계로 전달되면서 그 농도가 점점 증가한다. 이러한 과정을 생물축적이라고 한다. 이는 영양단계 안에서 오염물질이 전달되어 점차 축적되기 때문에 환경에서 적은 농도가 검출되더라도 그것이 잠재적 오염원으로 작용할 수 있다는 것을 시사한다(Ilyina and Tatjana, 2006; Moore et al., 2002). 하위 단계의 해양생물이 POPs 물질이 흡착된 미세플라스틱을 섭취하면 상위 단계로 갈수록 고농도로 축적되며, 상위 단계의 해양생물의 경우에는 그림 4에서 볼 수 있듯이 밀도가 낮아 표면에 부유하는 미세플라스틱을 직접 섭취할 수도 있다. 이로 인해 생식질환이나 사망을 초래하고 질병 위험을 증가시키고 호르몬 이상에 영향을 주며, 인간에게까지 영향이 미칠 수 있다(Ryan et al., 1988; Lee et al., 2001).

둘째, 미세플라스틱의 첨가제가 용출되는 것이다. 플라스틱은 제조될 때 플라스틱의 특성을 살리기 위해 비스페놀 A, 가소제(프탈레이트), 브롬화난연제(PBDEs²⁴⁾) 등이 첨가된다. 이러한 물질은 해양환경에서 플라스틱으로부터 분리될 수 있으며 해양생물이 이러한 물질을 섭취하였을 때 내분비계 교란물질로 작용하여 그림 4와 같이 먹이사슬을 통해 생물축적이 된다. 섭취된 내분비계 교란물질이 먹이사슬을 통해 각 단계에서 흡수되는 정도(농도)와 전이되는 효율성에 대한 메커니즘은 아직까지 알려지지 않았고, 현재까지 이들이 해양생태계에 미치는 잠재적인 피해에 대해서도 정량화된 적이

23) Gold et al.(2013)을 참고하여 작성함.

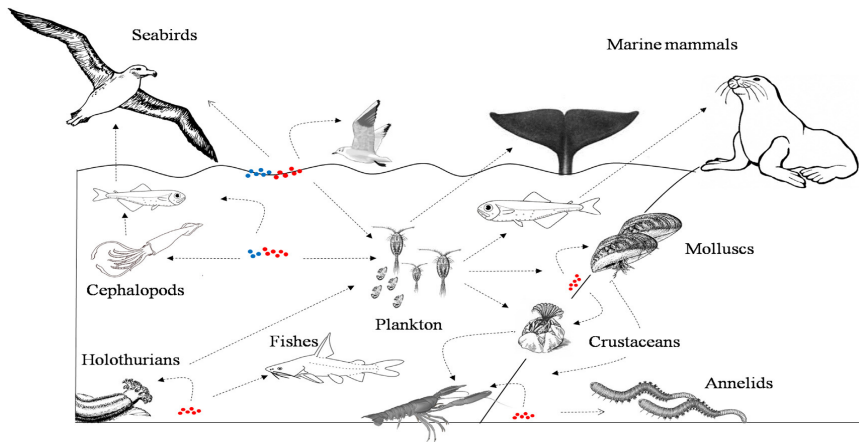
24) Polybrominated diphenyl ethers

없어, 이 부분에 대해서는 추후 연구가 필요할 것이다(Gold et al., 2013).

셋째, 미세플라스틱은 미관상으로도 매우 불쾌하며, 외래종이나 이물질이 유입됨으로써 해양생물의 서식지가 저하될 수 있다. 예를 들어, 폐그물에 작은 무척추동물이나 산호초가 들어가 살 수 있다. 이렇게 생물이 적재된 플라스틱이 이동하면 본래의 서식지 및 주변의 해양환경과 다른 생물이 유입되어 군집을 이루는 Plastisphere를 형성하게 되어 본래의 서식지가 훼손될 수 있다.

마지막으로 미세플라스틱은 외래침입종이나 녹조의 포자와 같은 기타 해로운 종의 잠재적인 매개체가 될 수 있다.

그림 4 먹이사슬을 통한 미세플라스틱의 개념모형



자료: Juliana et al.(2014).

주: 파란색: 해수보다 밀도가 낮은 폴리머(PE, PP 등), 붉은색: 해수보다 밀도가 높은 폴리머(PVC). 화살표는 가정된 미세플라스틱 전달을 나타냄

V. 미세플라스틱의 관리현황

1. 국외 관리현황

플라스틱은 발생원이 광범위하고 해류나 바람을 타고 장거리 이동이 가능하기 때문에 기본적으로 다차원(지구적, 지역적, 국가적)에서 다루어져야 한다(Gold et al., 2013). 정부간해양위원회(IOC)에서는 미세플라스틱을 2010년 중기전략의 한 분야로

선정하였으며, 2012년에 개최된 GPA(Global Programme of Action for the Protection of the Marine Environment from Land-based Activities) 정부 간 회의에서도 해양쓰레기에 대한 현안 사항 중 하나로 미세플라스틱에 대한 대책 마련 및 저감 이행에 대하여 논의된 바 있다(해양수산부, 2012).

1) 국제협약

플라스틱 발생량 감소와 관련된 국제적 협약으로는 선박기인 오염방지 국제 협약(International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 이하 MARPOL), 유엔해양법 협약(UN Convention on the Law of the Sea, 이하 UNCLOS), 런던협약(London Dumping Convention)이 있다(표 5 참조).

첫째, MARPOL은 선박에서 발생하는 오염물질을 직접적으로 규제하는 협약이며, 해양쓰레기와 플라스틱의 해양배출을 금지하는 내용은 부속서 V에 포함되어 있다(홍선욱, 2013a). 부속서 V에서는 일반해역과 특별해역으로 구분하여 폐기물의 종류에 따라 규정하고 있으며, 특별해역에서의 기준이 더 엄격하다(김선화, 2007). 또한 특별해역 내에서는 모든 항구에 육상에 폐기물을 처리할 수 있는 시설을 설치하도록 하고 있다(김선화, 2007). MARPOL에 명시된 규정을 위반할 경우 기국이 벌금을 부과하도록 하고 있다.

둘째, 1975년에 발표된 UNCLOS는 해양쓰레기에 대하여 국가 간 오염물질의 이동을 규제하는 다자간 협약이다. 선박에 적재된 육상폐기물의 배출을 금지하고 있으며, 2005년 제60차 총회에서는 해양쓰레기 문제에 대한 관련 결의가 채택되었다(홍선욱, 2013a). 해양쓰레기에 대한 인식 제고와 폐기물 관리 정책을 개선하도록 하며, 이 문제에 대한 대책 마련 및 저감 방안 등을 명시하였다.

마지막으로 1972년 채택된 런던협약은 폐기물의 해양투기를 방지하는 국제협약이며 부속서 I에서 플라스틱의 투기를 금지하고 있다(IMO, 1996; 홍선욱, 2013a).

2) 지역 차원의 협약

해양 플라스틱의 규제를 위한 지역적 차원의 협약으로는 바르셀로나 협약(Barcelona Convention), 카르타헤나 협약(Cartagena Convention), 유럽해양전략지침(European Marine Strategy Framework Directive), 북동대서양 해양환경보호 협약(Convention

for the Protection of the Marine Environment of the North East Atlantic, 이하 OSPAR), 헬싱키 협약(Helsinki Convention)이 있다(표 5 참조).

첫째, 최초의 지역해 프로그램인 바르셀로나 협약은 지중해 지역이 오염에 취약하다는 것에 의견을 모아 1976년 지중해 지역에 대한 오염을 방지하기 위해 채택된 협약이다(김선화, 2007). 지중해 지역에 플라스틱을 포함한 폐기물 투기, 유출, 배출을 규제하고 있다.

둘째, 카르타헤나 협약은 카리브해의 해양환경을 보호하기 위해 채택된 조치이며, 선박으로부터 폐기물을 투기하는 것과 육지 기인의 폐기물이 해양의 오염 요인이 된다는 것에 근거하여 육지 기인의 오염원도 함께 규제하고 있다(김선화, 2007).

셋째, 유럽해양전략지침에서 EU 회원국은 2020년까지 해양환경의 좋은 상태를 달성하기 위해 2016년까지 비용 효과적인 프로그램을 실행해야 한다고 명시하고 있다.

넷째, OSPAR 역시 지역해의 해양환경 문제에 대응하기 위해 유럽 선박에서의 폐기물 투기, 어업활동으로 인한 손실 및 폐기, 해변이나 강변으로부터의 육지폐기물 유입, 레크리에이션으로 발생한 폐기물 오염의 방지를 규정하고 있다.

다섯째, 헬싱키 협약은 발트해 지역의 모든 오염원(육지, 선박, 해저개발 및 탐사, 소각 및 투기)으로부터 해양환경을 보호하기 위한 협약이다.²⁵⁾ 당사국은 이에 대한 법적, 행정적, 기타 관련 조치를 마련하였으며, 이를 개별적 또는 공동으로 합의하였다.²⁶⁾

3) 호놀룰루 통합전략

이와 같이 국제적, 지역적인 다양한 협약에 의해 해양환경을 보호하기 위한 노력이 진행되고 있으나, 지금까지의 플라스틱 관리는 개별법하에서 부분적으로 진행되어 온 것으로 판단된다. 또한 육상 기인의 플라스틱이 높은 비중을 차지하고 있는 것으로 나타났다음에도 불구하고 기존의 협약은 해양기인의 오염원에만 초점이 맞춰져 있으며, 집행기준 및 수단은 강제력이 없거나 미비한 것으로 나타났다(Gold et al., 2013).

이에 2011년 UNEP과 NOAA²⁷⁾는 제5차 해양쓰레기 국제학술회의를 개최하여 해양쓰레기 관리와 방향에 대한 전 지구적이고 통합적인 체계인 호놀룰루 전략을 마련하였

25) Wikipedia(2014.2.27, http://en.wikipedia.org/wiki/Helsinki_Convention_on_the_Protection_of_the_Marine_Environment_of_the_Baltic_Sea_Area).

26) ibid.

27) National Oceanic and Atmospheric Administration

다. 호놀룰루 전략은 육상오염원과 해양오염원에서 기인하는 모든 해양생태계에 현존하는 해양쓰레기의 양과 영향의 저감을 목표로 해양쓰레기 문제를 해결하는 데 필요한 다방면적이고 통합적인 대응방안을 소개하고 이러한 대응방안의 이행에 촉매제 역할 및 다양한 차원(지구적, 지역적, 국가적)의 해양쓰레기 대응 전략 이행에 관한 모니터링과 평가 방향을 제시하고자 하였다(NOAA and UNEP, 2011; 홍선욱, 2013a). 이후 호놀룰루 전략을 중심으로 해양환경을 보호하고 예방하기 위한 국제적 대응이 이루어지고 있으며, 플라스틱과 해양환경의 특성을 고려하여 다양한 차원의 관리 체제가 형성되어야 할 필요가 있을 것으로 사료된다.

표 5 해양플라스틱과 관련한 국제 협약

협약	규제 범위	집행 및 분쟁 해결
International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL)	선박의 부주의나 사고로 인한 오염과 투기 방지	기국(선박이 소속된 국가)이 벌금 부과
MARPOL Annex V	플라스틱 해양 배출 불가, 육상수용시설에 조치가 이루어져야 함	
UN Convention on the Law of the Sea (UNCLOS)	선박에 적재된 육상폐기물의 투기 방지, 국가 간 오염물질 이동 방지	회원국은 모든 분쟁을 평화적 수단에 의해 해결해야 함. 합의가 이루어지지 않으면 (1) 국제재판소, (2)국제사법재판소, (3)중재재판소를 이용할 수 있음
London Dumping Convention	폐기물의 해양 투기 방지	각 회원국은 자국의 선박에서 배출되는 폐기물을 규제함
Barcelona Convention	지중해 지역에 폐기물(플라스틱 포함) 투기, 유출, 배출 방지	협상으로 해결하는 것이 좋지만, 협의되지 않으면 UN 사무총장에 의해 임명되거나 회원국에서 선출된 3명으로 구성된 중재재판소가 결정을 내림
The Cartagena Convention	카리브해 지역의 선박 오염, 해양 투기 및 육지오염원의 관리	UN이 사무국으로서 제한과 기한을 결정하고, 폐기물 관리 인프라에 대한 모니터링함
European Marine Strategy Framework Directive	EU 지역 해양에서 발견되는 모든 쓰레기	회원국은 2020년까지 해양환경의 좋은 상태를 달성하기 위해 2016년까지 비용효과적인 프로그램을 실행해야 함
Global Programme of Action for the Protection of the Marine Environment from Land-Based Activities (GPA)	강, 하구, 빗물 배수관을 통한 육지기반의 오염	강제력이 없는 지침만 제공
Convention for the Protection of the Marine Environment of	유럽 선박에서의 폐기, 어업활동으로 인한 손실 및 폐기, 해변이	협상으로 해결하는 것이 좋지만, 협의되지 않으면 UN 사무총장에 의해 임명되거나 회

협약	규제 범위	집행 및 분쟁 해결
the North East Atlantic(OSPAR)	나 강변으로부터 육지폐기를 처리, 레크리에이션으로 발생한 폐기물 오염 방지	원국에서 선출된 3명으로 구성된 중재재판소가 결정을 내림
Helsinki Convention	모든 오염원으로 인한 해양환경 오염	회원국은 해양의 오염 예방 및 저감을 위해 입법해야 함. 분쟁은 중재재판소나 국제사법재판소에 제출

자료: Gold et al.(2013).

2. 국내 관리현황

우리나라는 미세플라스틱만을 단독으로 규제하는 법이나 정책은 없다. 다만 2008년에 제1차 해양쓰레기 관리 기본계획(2009~2013)을 수립하여 이 테두리 안에서 플라스틱이 함께 관리되고 있다. 2008년 제1차 해양쓰레기 관리 기본계획은 「해양환경관리법」 제5조 및 제24조 제1항에 근거하여 해양쓰레기의 효율적 관리를 위한 국가계획으로 쾌적한 해양환경 조성 및 해양생태계 보호, 해상교통 안전 확보 및 해양관광 활성화와 해양쓰레기 관리를 위한 관계기관 간 협력체계 구축을 목적으로 한다.²⁸⁾ 주요내용으로는 해양쓰레기 관리기반 구축, 해양쓰레기 수거, 처리능력 강화, 해양쓰레기 발생 최소화 및 홍보 강화가 포함되어 있다. 앞서 표 3에 제시된 바와 같이 우리나라의 해양에 유입되는 쓰레기는 플라스틱류와 스티로폼이 많은 부분을 차지하고 있다. 제1차 해양쓰레기 관리 기본계획에서는 해양의 스티로폼 관리를 위해 고밀도 부자보급 지원사업과 어업용 폐스티로폼 감용기 보급 사업을 추진하고 있으나, 실질적으로 문제를 해결하기에는 무리가 있는 것으로 나타났다(장용창 외, 2013).

한편 해양쓰레기 문제의 종합적이고 과학적인 대응을 위해 국토해양부에서 수립한 제1차 해양쓰레기 관리 기본계획에 따라 2011년 11월 해양환경관리공단 해양쓰레기 대응센터(Marine Litter Management Center, MALI Center)가 출범하였으며, 시군 및 관련 단체가 직접 입력하는 방식으로 통계를 구축하고 있다(이정임, 2013). 주요 업무는 해양쓰레기 분포 및 실태조사, 국내외 기인 해양쓰레기 모니터링, 해양쓰레기의 발생 및 처리에 관한 시스템 구축 및 관리, 어업종사자 및 국민 대상 교육·홍보, 해양쓰레기 관련기관 및 전문가를 대상으로 한 국제워크숍 및 학술포럼 개최, 범지구적 공동협력사업 추진 등이다.²⁹⁾

28) 국토교통부(2014.2.25, http://www.mltm.go.kr/USR/policyData/m_34681/dtl.jsp?id=482).

우리나라는 해양쓰레기의 국제적 문제에 대응하기 위하여 유엔환경계획(UNEP) 산하의 국제기구인 'NOWPAP(North West Pacific Action Program; 북서태평양 해양보전 실천계획)'에 가입하였다. '지역해 해양쓰레기 사업계획'을 통해 해양쓰레기 저감 등 해양쓰레기 관리 정책을 적극적으로 추진하고 있다(국토해양부 보도자료, 2011). 또한 The Ocean Conservancy에 의해 조직된 국제연안 정화의 날 행사(International Coastal Cleanup, ICC)를 2001년부터 매년 개최하고 있다. 이 행사는 매년 9월 셋째 주 토요일 해변의 쓰레기를 치우는 행사인데, 기본적으로 민간단체 간 교류와 협력에 기초하여 국민에 대한 홍보와 교육을 강화하는 노력을 하고 있다. 우리나라의 해양쓰레기에 대한 대응 노력은 주로 수거와 처리에 중점을 두고 있는데, 이는 외국에 비하면 아직까지 초기 수준에 머무르고 있는 실정이다.

VI. 미세플라스틱 관리 방안

이상에서 살펴본 바와 같이 국제적으로 해양에 오염된 미세플라스틱은 그 자체로도 유해하며, 나아가 잔류성이 있거나 생물축적성이 큰 유해물질의 흡착제로 작용하여 해양생물에 축적되어 생태계에 피해를 입힌다. 이에 미세플라스틱에 대한 국제적인 관심이 증가하고 있는데, 아직 우리나라에서는 미세플라스틱에 대한 인식이 매우 낮다.

삼면이 바다로 둘러싸인 우리나라로서는 해양생태계가 매우 중요한 환경자산이다. 또한 세계 7위의 화학물질 교역국으로 매년 화학물질의 제조 및 사용량이 증가하고 있어, 유해화학물질이 육상생태계뿐 아니라 해양으로 유입될 가능성도 매우 높은 국가이다. 더욱이 산업화에 따라 우리나라의 2010년 플라스틱 생산량이 1,224만 2,000톤으로 세계 5위에 자리매김하고 있는 현 시점에서 미세플라스틱으로부터 해양생태계와 국민의 건강을 지키기 위해서는 미세플라스틱의 관리방안 마련이 시급하다.

그러나 미세플라스틱에 대한 오염현황조차 모르며, 관련연구가 거의 수행되고 있지 않는 우리나라에서 구체적인 관리정책이 바로 마련되기에는 현실적으로 어렵다. 이에 지금의 국내 실정에서 미세플라스틱으로 인한 피해를 최소화할 수 있는 방안을 다음과 같이 제안하고자 하며, 향후 조사 및 연구가 진행된다면 좀 더 구체적이고 효과적인 관리정책이 마련될 수 있을 것으로 사료된다.

29) 해양쓰레기대응센터(2014.3.4, <http://info.malic.or.kr/main.do>).

1. 유해성 측면에서의 관리방안

우선 미세플라스틱에 대한 국내 연구는 아주 기초적인 수준이다. 앞으로 국가 차원에서 미세플라스틱의 발생원과 오염현황 조사, 해양생태계 내로 유입된 미세플라스틱의 생물축적 정도와 영향, 미세플라스틱 자체의 유해성 확인, 잔류성이 큰 물질과의 흡착 정도 등 과학적 근거 마련을 위한 다양한 연구가 우선적으로 수행되어야 할 것이다. 이를 통해 미세플라스틱에 대한 좀 더 현실적인 관리방안 마련이 될 수 있을 것이다.

미세플라스틱을 생물이 섭취하면 체내에서 내분비계 교란물질로 작용하기 때문에 일각에서는 플라스틱 그 자체를 유해물질로 지정하여 관리하자는 움직임도 있다.³⁰⁾ 이 연구에 따르면, 재활용이 어렵고 잠재적 독성이 높은 물질(PVC, 폴리스티렌, 폴리우레탄, 폴리카보네이트)을 중심으로 유해물질을 지정할 필요가 있음을 주장하였다.³¹⁾

따라서 미세플라스틱 자체 또는 잔류성·생물축적성 물질의 생물축적을 돕는 수단으로써의 역할 모두를 관리 대상으로 하여 추가적인 과학적·정책적 연구가 반드시 필요하며, 이를 통해 좀 더 체계적인 관리방안을 마련해야 할 것이다.

2. 기술적 측면에서의 관리방안

1) 생분해성 플라스틱의 이용³²⁾

<표 6>과 같이 플라스틱류(낚시줄, 플라스틱 음료수 병 등) 및 스티로폼(부표, 컵 등)의 해양에서의 분해속도는 상당한 시간이 소요되는 것으로 나타났다. 플라스틱이 한번 해양으로 유입되면 몇백 년 동안은 거의 분해되지 않을뿐더러 작게 부서지더라도 생물에 의해 완전히 분해되기는 어렵다.

생분해성 플라스틱이란 기능면에서는 일반 플라스틱과 동일하지만, 사용 후에는 자연계에 서식하는 미생물의 작용으로 분해가 가능하여 최종적으로는 이산화탄소와 물로 완전한 무기물화가 되는 것을 말한다(이치웅, 2007). 기존의 일반 플라스틱이 해양에 유입되면 완전분해가 어렵고 오래 걸린다는 점을 고려할 때, 미생물의 분해기능을 이용한 생분해성 플라스틱은 플라스틱 제품 사용 후의 처리 관점에서 매우 유용하다(이치웅, 2007). 따라서 생분해성 플라스틱 생산을 장려하여 일반 플라스틱을 대체할

30) Rochman(2013); 홍선욱(2013b) pp.13-14.

31) ibid.

32) Engler(2012)를 참고로 작성함

수 있도록 필요한 기술과 시설을 확충함으로써 일반 플라스틱의 발생을 억제하고 최소화하도록 해야 한다. 이를 통해 생분해성 플라스틱의 사용을 증가시켜 플라스틱 분해를 도와 중금속이나 POPs 물질이 플라스틱에 흡착할 수 있는 양을 줄이면 이로 인한 문제를 방지할 수 있다.

또 다른 방법은 플라스틱의 생분해성을 증가시키는 첨가제를 사용하는 것이다. Engler(2012)에 따르면, 기존의 일반 플라스틱에는 비스페놀 A, 프탈레이트와 같은 첨가제가 사용되어 플라스틱으로부터 이 물질들이 분리될 경우 내분비계 교란물질로 작용하여 해양 생물에게 악영향을 미칠 수 있다. 이러한 유해물질 대신에 환경미생물에 의해 분해가 가능한 첨가제를 사용한다면, 첨가제 자체의 독성도 줄이고 또 플라스틱의 생분해도 도와 결국 환경에 대한 해양생물에 대한 피해가 감소될 것으로 예상된다.

Engler(2012)에 의하면 플라스틱이 혐기성 조건에서 분해되면 메탄과 같은 천연가스를 배출하게 되는데, 이는 기후변화에 영향을 줄 수 있다고 하였다. 그러나 이와 같은 문제도 천연가스를 재활용한다거나 회수하여 영향을 최소화할 수 있을 것이다. 중요한 것은 생분해성플라스틱 및 첨가제를 사용하는 것이 만병통치약은 아님을 인지해야 할 것이다. 오늘날 생분해성 플라스틱이 많이 개발되고는 있으나, 일반 플라스틱을 대체할 수 있는 것도 있고 아닌 것도 있다. 따라서 플라스틱을 사용하는 제조자는 플라스틱이 어떻게 사용될 것인지와 폐기 시 어떤 문제가 일어날지에 대하여 주의 깊게 고려해야 한다.

표 6 해양쓰레기 분해속도

종류	분해속도	종류	분해속도
유리병	백만 년	나일론 섬유	30~40년
낙식줄	600년	플라스틱 필름통	20~30년
플라스틱 음료수 병	450년	비닐 봉투	10~20년
일회용 기저귀	450년	담배 필터	1~5년
알루미늄캔	80~200년	울 양말	1~5년
스티로폼 부표	80년	베니어판	1~3년
고무신발 바닥	50~80년	우유팩	3개월
스티로폼 컵	50년	사과 심	2개월
주석 캔	50년	신문	6주
가죽	50년	오렌지나 바나나 껍질	2~5주

자료: 홍선욱 외(2011); 이정임(2013)에서 재인용.

2) 재활용 및 재사용 촉구³³⁾

미세플라스틱을 저감할 수 있는 방안으로 Engler(2012)는 플라스틱에 대한 발생량을 감소시키는 것과 함께 플라스틱 제품을 재활용하고 사용된 플라스틱 제품을 재사용하는 것이 가장 최선의 방안이라고 하였다. 예를 들어, 생분해성 플라스틱으로 만들어진 일회용 쇼핑백을 사용하는 것보다 재사용이 가능한 쇼핑백을 사용하는 것이 훨씬 낫다는 것이다. 이는 필요한 플라스틱 원료의 양을 근본적으로 감소시킴으로써 플라스틱을 만드는 데 필요한 에너지와 원료를 아낄 수 있다. 일부 학자는 재활용률이 75% 이상이 되지 않는 업체에 대해서는 시장출시를 금지하는 등 생산과 처리 과정에 대해서도 엄격히 규제해야 한다고 주장하기도 한다(Gold et al., 2013).

또한 확대생산자책임제(extended producer responsibility, EPR)³⁴⁾를 확대하도록 한다. 이는 재활용 및 재사용 비율을 높임으로써 플라스틱 폐기물의 양을 최소화하고 플라스틱이 해양에 유입되는 것을 방지하는 데 중요한 역할을 할 것이다(Gold et al., 2013).

Terracycle은 사탕(과자) 포장지, 음료수 팩을 포함한 플라스틱 포장재 즉 쓰레기를 수집하여 플라스틱 제품(가방, 연 등)으로 다시 만들어 파는 소규모 기업이다. Terracycle은 플라스틱 포장재를 모아서 보내준 사람들에게 개당 가격을 지불하는 획기적인 방식을 이용하여 플라스틱 재활용 사업에서 성공한 사례로 꼽힌다. 이처럼 단순 재활용에서 고부가가치 산업으로 발전시키는 것이 중요하며, 이를 장려하는 차원에서 인센티브를 제공하는 등의 방안이 필요할 것으로 생각된다.

3) 플라스틱에 대한 새로운 기술 개발

미세플라스틱의 가장 큰 문제점은 작은 조각이기 때문에 큰 생물에서 작은 생물까지 모든 생물이 이용하기가 쉬워 피해가 광범위해진다는 것이다. 또한 작은 조각으로 부서지게 되면 표면적이 넓어져 유기오염물질의 흡착률이 증가된다.

우리나라에서는 전체 해양쓰레기 부피 중 양식업에 사용되는 스티로폼 부자가 가장 많이 차지하고 있지만(표 3 참조), 재활용 의무율은 다른 제품군에 비하여 높지 않다(표 7 참조). 이는 스티로폼 부자가 작게 부서지면 스티로폼의 부유성과 해류와 바람으

33) Engler(2012) 참고.

34) 제품 생산자나 포장재를 이용한 제품의 생산자에게 그 제품이나 포장재의 폐기물에 대하여 일정량의 재활용 의무를 부여하여 재활용하게 하고 이를 이행하지 않을 경우 재활용에 소요되는 비용 이상의 재활용 부과금을 생산자에게 부과하는 제도이다(한국환경공단, (사)한국플라스틱자원순환협회, 2010).

로 인한 이동성으로 인해 회수가 어려워 재활용 가능성 자체가 크지 않다는 것을 의미한다. Lee et al.(2013)은 2012년 거제 인근 6개 해변에서 플라스틱 조각을 조사한 결과 1m²의 모래해변에 1~5mm 크기의 플라스틱 조각 27,606개가 발견되었고 이 중 대부분이 스티로폼으로 분석되었다고 한다. 보통 수산업 양식장에서 사용되는 스티로폼 부자가 60ℓ 짜리인데 이 부자 1개당 약 730만 개의 조각이 발생할 수 있으며, 연간 2백만 개가 새로 사용된다고 가정할 때 연간 약 15조 개의 조각이 발생하는 것으로 추정하였다(동아시아바다공동체오션, 2011). 이를 저감하기 위해서는 스티로폼 부자가 작게 부서지지 않는 기술의 개발과 양식방법 개선, 해양환경의 특성을 이용하여 불법으로 스티로폼 부자를 투기하는 어업활동 종사자들의 의식 개선 등이 필요하다.³⁵⁾

표 7 2014년 제품·포장재별 재활용 의무율(안)

품목		2014년도 재활용 의무율		
금속캔	철캔	0.797		
	알루미늄캔	0.791		
	유리병	0.760		
	종이팩	0.346		
합성수지 포장재	폴리에틸렌테레프탈레이트병	단일 재질	무색	0.812
		유색	0.812	
		복합재질	0.812	
	발포합성수지(폴리스티렌페이퍼 제외)		0.790	
	단일재질 폴리스티렌페이퍼		0.423	
	단일복합재질 폴리비닐클로라이드		0.690	
	기타 합성수지	용기류·트레이 단일재질	0.806	
		복합재질 및 필름·시트형 단일·복합재질	0.603	
	유탄유용기	0.794		
	유탄유	0.726		
	타이어	0.765		
	형광등	0.355		
	수산물 양식용 부자	0.280		
전지류	수은전지	0.600		
	산화은전지	0.560		
	리튬전지	0.650		
	니켈-카드뮴전지	0.400		
	망간전자알칼리망간전지	0.216		
	니켈수소	0.203		

주: 이 고시는 2014년 1월 1일부터 시행한다.

이 고시는 2014년 12월 31일까지 효력을 가진다.

자료: 환경부고시 제2013-190호, 2013.12.31, 일부개정 2014년 1.1 시행

35) 장용창 외(2013); 한산신문(2014.2.26, <http://www.hansannews.com/news/articleView.html?idxno=31657>).

3. 대국민 홍보를 통한 관리방안

1) 대국민 홍보 및 교육 강화

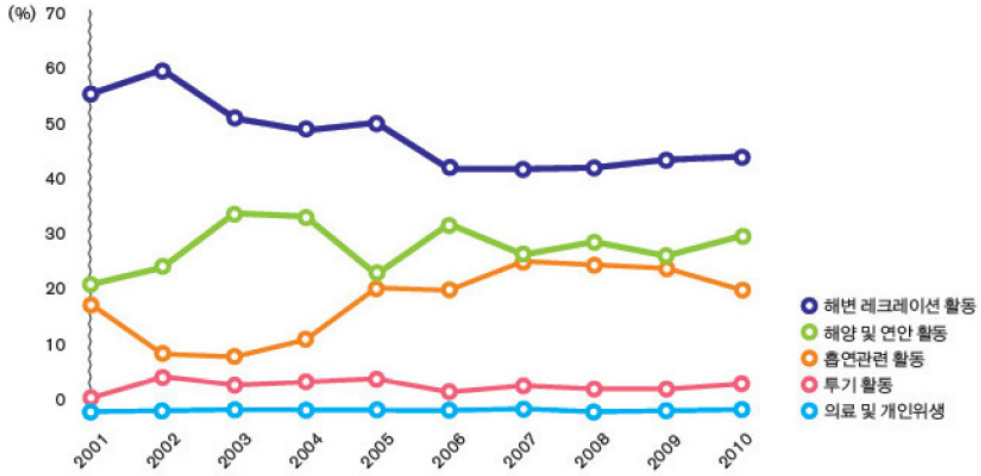
해양에 유입된 쓰레기 중 60~80%가 육상에서 유입되는 쓰레기이며, 이는 해양환경 보전에 대한 대국민 홍보와 교육을 통하여 개선될 수 있다(해양수산부, 2012). 아직까지 일반 국민들에게 미세플라스틱으로 인한 환경피해는 알려지지 않았으며, 미세플라스틱이라는 용어조차 생소할 것으로 판단된다. 이에 미세플라스틱에 대한 일반 국민, 어업종사자 등 대상자별 설명회를 통해 환경피해의 심각성을 알려야 한다. 이를 통해 사전예방의 중요성을 부각시켜 미세플라스틱의 관리에 자발적으로 참여할 수 있도록 해야 할 것이다.

2) Clean-up 프로그램의 확대

일상생활 및 해변 레크리에이션에서 비롯된 해양쓰레기는 전 세계 어디에서나 가장 높은 비중을 차지하며, 우리나라에서 실시된 국제연안정화의 날 행사를 통해 나타난 발생원인에서도 해변 레크리에이션, 해양 및 연안 활동이 주요 원인으로 나타났다(그림 5 참조). 따라서 해변에 떨어진 쓰레기를 줍는 것만으로도, 플라스틱에 의한 해양오염을 막는 데 어느 정도 큰 효과를 볼 수 있을 것으로 판단된다.

우리나라는 NOWPAP의 회원국으로서 '지역해 해양쓰레기 사업계획'을 추진하고 있으며, 국제연안정화의 날 행사를 개최하여 해양쓰레기를 저감하는 등 적극적으로 노력하고 있다. 이러한 clean up 프로그램은 해변뿐만 아니라 심해까지 확대되어야 하며, 많은 사람들이 이 프로그램에 참여하여 해양플라스틱에 대한 인식을 제고할 수 있도록 하는 노력이 동시에 이루어져야 할 것이다.

그림 5 국제연안정화 조사 결과에서 나타난 우리나라 해양쓰레기 발생원인



자료: 동아시아바다공동체오션(2011).

참고문헌

〈국내 자료〉

- 국토해양부 보도자료. 2011. 「해양쓰레기의 6.7% 외국에서 온다」.
- 김병훈, 이지윤. 2010. 「국내 잔류성 유기오염물질(POPs)의 정책 및 관리 방향」. 공업화학 전망 제13권 제5호.
- 김선화. 2007. “해양쓰레기의 규제를 위한 국제적 노력의 동향”. 「한국해사법학회」 19(1): 263-300.
- 박정규. 2000. 「잔류성 유기오염물질(POPs)의 관리현황과 대응방향 -부산물을 중심으로-」. 한국환경정책·평가연구원.
- _____. 2010. 「세대간 생체전이성 화학물질 현황 및 관리방향」. 한국환경정책·평가연구원.
- 동아시아바다공동체오션. 2011. “스티로폼 해양쓰레기 재활용 활성화를 위한 워크숍 결과 보고서”. 「스티로폼 해양쓰레기 재활용 활성화를 위한 워크숍」. 통영. available at www.osean.net.
- 이정임. 2013. 「경기도 연안의 해양쓰레기 관리 방안」. 경기개발연구원.
- 이치웅. 2007. 「생분해성 플라스틱과 바이오매스 플라스틱의 응용」. 81(3): 213-218. available at http://www.reseat.re.kr/tech/artView.st?C_OBJECT_INDEX=23606&sel=C_OSUBJECT.
- 장용창 외. 2013. “스티로폼 부자 해양쓰레기 대응 정책 개발과 우선순위 평가”. 「한국해양환경·에너지학회지」. 16(3): 171-180.
- 한국환경공단, (사)한국플라스틱자원순환협회. 2010. 「생산자책임재활용제도」.
- 한국환경산업기술원. 2014. 「유럽 플라스틱 폐기물 환경 전략에 관한 유럽집행위 녹색(GREEN PAPER On a European Strategy on Plastic Waste in the Environment)」. 해외환경산업 정책보고서 114호.
- 해양수산부. 2012. 「2012년 국가 해양쓰레기 모니터링 결과 보고서」.
- 환경부. 2003. 「계속되는 위협 잔류성 유기오염물질 POPs」.
- 환경부고시 제2013-190호. 2013.12.31 일부개정 2014년 1.1 시행.
- 홍선욱 외. 2011. 「국제 연안정화 전국 바다대청소 행사 안내서」.
- 홍선욱 외. 2013a. “호놀룰루 전략과 우리나라 해양쓰레기 관리를 위한 시사점”. 「한국해양환경·에너지학회지」. 16(2): 143-150.
- 홍선욱(편집). 2013b. 오늘의 해양쓰레기: (사)동아시아바다공동체오션 월간 뉴스레터. 통권36호. 2013년 3월.

<국외 자료>

- Andrady, A.L. 1994. "Assessment of environmental biodegradation of synthetic polymers, a review". *J. Macromol. Sci. R.M.C.*, 34(1): 25-75.
- _____. 1998. "Biodegradation of plastics". G. Pritchard (Ed.), *Plastics Additives*, London, Chapman Hall (1998).
- Anthony L. and Andrady. 2011. "Microplastics in the marine environment". *Marine Pollution Bulletin*, 62(8): 1596-1605.
- Arthur, C.A., Baker, J., Bamford H. (eds.). 2009. "Proceedings of the International Research Workshop on the Occurrence, Effects, and Fate of Microplastic Marine Debris". NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-30.
- Betts, K. 2008. "Why small plastic particles may pose a big problem in the oceans". *Environ. Sci. Technol.*, 42(24): 8995-8995.
- Boerger, C.M., G.L. Lattin, S.L. Moore, C.J. Moore. 2010. "Plastic ingestion by planktivorous fishes in the North Pacific Central Gyre". *Mar. Pollut. Bull.*, 60: 2275-2278.
- Browne, M.A., et al. 2008. "Ingested microscopic plastic translocates to the circulatory system of the mussel, *Mytilus edulis* (L)". *Environ. Sci. Technol.*, 42(13): 5026-5031.
- Browne, M.A., T.S. Galloway, R.C. and Thompson. 2010. "Spatial patterns of plastic debris along estuarine shorelines". *Environ. Sci. Technol.*, 44(9): 3404-3409.
- Carpenter, E.J. and K.L. Smith. 1972. "Plastics on the Sargasso Sea surface". *Science*, 175: 1240-1241.
- Costa, M.F. et al. 2010. "On the importance of size of plastic fragments and pellets on the strandline: a snapshot of a Brazilian beach". *Environ. Monit. Assess.*, 168: 299-304.
- Eubeler, J.P. et al. 2009. "Environmental biodegradation of synthetic polymers I. Test methodologies and procedures". *Trend. Anal. Chem.*, 28(9): 1057-1072.
- Engler, R.E. 2012. "The Complex Interaction between Marine Debris and Toxic Chemicals in the Ocean". *Environ. Sci. Technol.*, 46: 12302-12315.
- Fendall, L.S. and M.A. Sewell. 2009. "Contributing to marine pollution by washing your face: Microplastics in facial cleansers". *Mar. Pollut. Bull.*, 58(8): 1225-1228.

- Fotopoulou, K.N. and H.K. Karapanagioti, 2012. "Surface properties of beached plastic pellets". *Mar. Environ. Res.*, 81: 70–77.
- Gold, M. et al. 2013. *Stemming the Tide of Plastic Marine Litter: A Global Action Agenda*. Pritzker Environmental Law and Policy Briefs NO. 5.
- Gouin, T. et al. 2011. "A thermodynamic approach for assessing the environmental exposure of chemicals absorbed to microplastic". *Environ. Sci. Technol.*, 45: 1466–1472.
- Gregory, M.R. and A.L. Andrady. 2003. "Plastics in the Marine Environment". In *Plastics and the Environment*; Andrady, A.L., Ed. Wiley: New York.
- IFREMER. 2010.9.8. "Distribution and effects of marine litter along the european coasts". *Workshop on marine litter Brussels*.
- Ilyina and P. Tatjana. 2006. *The fate of persistent organic pollutants in the North Sea, Multiple Year Modal Simulations of γ -HCH, α -HCH an PCB 153*. *Hamburg Studies on Maritime Affairs*, vol.7.
- IMO(International Maritime Organization). 1996. *Protocol to the Convention on Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter*. 1972 and Resolutions Adopted by the Special Meeting, International Maritime Organization, London, UK.
- Ivar do Sul et al. 2013. "Presence of pelagic microplastics around an Archipelago of the Equatorial Atlantic". *Mar. Pollut. Bull.*, 75: 305–309.
- Juliana, A., Ivar do Sul, M.F. Costa. 2014. "The present and future of microplastic pollution in the marine environment". *Environmental Pollution*, 185(2014): 352–364.
- Laist, D.W. 1997. "Impacts of marine debris: entanglement of marine life in marine debris including a comprehensive list of species with entanglement and ingestion records". in: Coe, J. m., Rogers, D. B., (eds.), "Marine debris - sources, impacts and solutions", Springer-Verlag, New York, pp.99–139.
- Lattin, G.L. et al. 2004. "A comparison of neustonic plastic and zooplankton at different depths near the southern California shore". *Mar. Pollut. Bull.*, 49: 291–294.
- Law, K.L. et al. 2010. "Plastic accumulation in the North Atlantic subtropical gyre". *Science*, 329: 1185–1188.
- Lee, K., S. Tanabe, and C. Koh. 2001. "Contamination of polychlorinated biphenyls (PCBs) in sediments from Kyeonggi Bay and nearby areas, Korea". *Marine Pollution*

- Bulletin*, 42: 273–279.
- Mato, Y. et al. 2001. “Plastic resin pellets as a transport medium for toxic chemicals in the marine environment”. *Environ. Sci. Technol*, 35: 318–324.
- Moore, C. J. 2008. “Synthetic polymers in the marine environment: A rapidly increasing, long-term threat”. *Environ. Res*, 108(2): 131–139.
- Moore, M.R. et al. 2002. “Trace organic compounds in marine environment”. *Marine Pollution Bulletin*, 45: 62–68.
- NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration) and UNEP (United Nations Environment Programme). 2011. *Honolulu Strategy*. p.50.
- Ogata, Y. et al. 2009. “International Pellet Watch: global monitoring of persistent organic pollutants (POPs) in coastal waters. 1. Initial phase data on PCBs, DDTs, and HCHs”. *Mar. Pollut. Bull*, 58(10): 1437–1446.
- OSPAR Commission. 2007. *OSPAR Pilot Project on Monitoring Marine Beach Litter: Monitoring of Marine Litter in the OSPAR Region*. available at http://qsr2010.ospar.org/media/assessments/p00306_Litter_Report.pdf.
- Rios, L.M., C. Moore, P.R. Jones. 2007. “Persistent organic pollutants carried by synthetic polymers in the ocean environment”. *Mar. Pollut. Bull*, 54: 1230–1237.
- Rochman, C.M. et al. 2013. “Policy: Classify plastic waste as hazardous”. *Nature*, 494: 169–171.
- Rodríguez, A., B. Rodríguez, M.N. Carrasco. 2012. “High prevalence of parental delivery of plastic debris in Cory’s shearwaters (*Calonectris diomedea*)”. *Mar. Pollut. Bull*, 64: 2219–2223.
- Ryan, P.G. 1988. “Intraspecific variation in plastic ingestion by seabirds and the flux of plastic through seabird populations”. *The condor*, 90(2): 446–452.
- Ryan, P.G. et al. 2009. “Monitoring the abundance of plastic debris in the marine environment”. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526): 1999–2012.
- Shaw, D.G. and R.H. Day. 1994. “Colour- and form-dependent loss of plastic microdebris from the North Pacific Ocean”. *Mar. Pollut. Bull*, 28: 39–43.

- Tanaka, K. et al. 2013. "Accumulation of plastic-derived chemicals in tissues of seabirds ingesting marine plastics". *Mar. Pollut. Bull.*, 69: 219-222.
- Teuten, E.L. et al. 2009. "Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife". *Phil. Trans. R. Soc. B.* 364: 2027-2045.
- Thompson, R.C. et al. 2004. "Lost at sea: where is all the plastic?". *Science*, 304(5672): 838.
- UNEP. 2011. *Keeping Track of Our Changing Environment: From Rio to Rio+20 (1992-2012)*.

〈온라인 자료〉

국토교통부. 「해양쓰레기 관리 국가기본계획」.

http://www.mltm.go.kr/USR/policyData/m_34681/dtl.jsp?id=482 [2014.2.25].

연합뉴스. 2009.12.14. "호주인, '쓰레기섬' 경유 태평양 횡단 도전"

<http://news.naver.com/main/read.nhn?mode=LSD&mid=sec&sid1=102&oid=001&aid=0003023570> [2014.2.27].

한산신문. 2011.11.4. "스티로폼 해양쓰레기 절감대책 고민하다"

<http://www.hansannews.com/news/articleView.html?idxno=31657> [2014.2.26].

해양쓰레기대응센터. 「미세플라스틱으로 인한 해양생물의 피해사례」.

<http://info.malic.or.kr/main.do> [2014.3.4].

환경부 REACH 도움센터. 「REACH 개요」. <http://www.reach.me.go.kr/> [2014.3.6].

Stockholm Convention. *Listing of POPs*. <http://chm.pops.int/> [2014.3.6].

Wikipedia. *Helsinki Convention on the Protection of the Marine Environment of the Baltic Sea Area*.

http://en.wikipedia.org/wiki/Helsinki_Convention_on_the_Protection_of_the_Marine_Environment_of_the_Baltic_Sea_Area [2014.2.27].