


미세플라스틱의 개념과 해양에서의 발생, 이동, 생물영향 및 관리대책

한선기† 

한국방송통신대학교 보건환경학과

The Concept of Microplastics and their Occurrence, Transport, Biological Effects, and Management Methods in the Ocean

Sun-Kee Han†

Department of Environmental Health, Korea National Open University

ABSTRACT

Objectives: This study aims to investigate the concept of microplastics and their occurrence, transport, biological effects, and management methods in the ocean.

Methods: I reviewed articles on microplastics in the ocean by using the Google Scholar database.

Results: Plastic litter has been reported as a ubiquitous pollutant in the ocean due to the extensive consumption of plastics and the mismanagement of plastic wastes. Microplastics are generally defined as synthetic polymer particles <5 mm in size. Microplastics generated from the degradation of plastic litter are currently a serious global concern since they spread easily all over the ocean, transfer to different tissues inside contaminated animals, and even across different trophic levels inside the food web. An additional concern is the ability of microplastics to adsorb organic and inorganic pollutants and subsequently release them into the ocean. Thus, alternatives to reduce microplastics in the ocean are discussed.

Conclusions: This paper summarizes the concept of microplastics and their behavior in the ocean and suggests management methods for microplastics in support of a cleaner ocean.

Key words: Microplastics, ocean, concept, behavior, management methods

I. 서 론

플라스틱(plastic)이라는 말은 그리스어 ‘plastikos (생각한 그대로 만들다)’에서 유래되었다.¹⁾ 국제 순수 및 응용 화학 연합(the International Union of Pure and Applied Chemistry, IUPAC)에 따르면, 플라스틱은 ‘성능의 향상 및(또는) 비용의 절감을 위해서 다른 물질을 함유할 수도 있는 고분자 물질’이다.²⁾ 최초의 현대적 합성 플라스틱은 1907년 베이클랜드(Leo Henrik Baekeland)가 페놀-포름알데히드 반응기술을 향상시켜 만든 상업용 제품인 베이클라

이트(Bakelite)다. 그 이후 20세기 중반 관련기술의 발전으로 다양한 플라스틱 물질의 대량 생산이 가능해졌다.³⁾

1950년대 합성 플라스틱이 대규모로 시장에 나온 이후, 플라스틱의 전 세계 생산량은 1950년 약 150만톤에서 2018년 약 3억5,900만톤으로 급격하게 증가했다. 플라스틱은 가볍고, 내구성이 좋으며, 인장강도가 클 뿐만 아니라 부식저항성 및 전기절연성도 좋아서, 포장재(39.9%), 건설업(19.8%), 자동차부품(9.9%), 전기·전자제품(6.2%), 생활, 여가 및 스포츠용품(4.1%), 농자재(3.4%), 기타(16.7%) 등으로 사회

†Corresponding author: Department of Environmental Health, Korea National Open University, Seoul 110-791, Korea, Tel: +82-2-3668-4740, Fax: +82-2-741-4701, E-mail: skhan003@knou.ac.kr

Received: 9 September 2020, Revised: 29 September 2020, Accepted: 5 October 2020

에서 폭넓게 사용되어 왔다.⁴⁾ 1950년 이후로 지금까지 생산된 총 누적 합성 플라스틱의 양은 약 83억 톤 이상이며,⁵⁾ 향후 2050년까지 약 330억톤에 이를 것으로 예측되고 있다.⁶⁾

우리는 플라스틱이 제공하는 편리함을 누리며 살아왔지만 그 관리는 소홀히 하였다. 플라스틱의 대부분(71%)이 처리되지 않고 환경에 버려지고 있으며, 그 나머지는 에너지 회수(12%), 재활용(9%) 및 매립(8%)이 되고 있다.⁷⁾ 음료수 용기, 포장재, 장난감, 어업용 그물, 건축자재 및 산업용품과 같은 다양한 플라스틱을 무절제하게 사용하고, 이후 부적절하게 투기함으로써 육지에서 해양까지 전 지구적으로 플라스틱이 발견되고 있다. 대부분 육지에서 기인한 플라스틱의 최종적인 종착역은 해양이다.^{8,9)} 약 1분마다 트럭 1대분의 플라스틱이 해양으로 흘러들어 가는데,¹⁾ 특히 해양에서 플라스틱 오염은 대양의 환류대(gyre)와 해안선 및 해저 퇴적물에서 집중적으로 발견되었다.^{10,11)} 최근 국제연합 환경계획(the United Nations Environment Programme, UNEP)에 의하면 2050년에는 중량기준으로 물고기 보다 많은 플라스틱 쓰레기가 바다에 존재할 것으로 예측되었고,¹²⁾ 또한 2060년에는 한 해에 잘못 관리된 플라스틱 쓰레기의 양이 약 1억5,500만~2억6,500만톤에 이를 것으로 예측되었다.¹³⁾

플라스틱은 크기에 따라 Table 1과 같이 분류될 수 있다. Table 1은 미국 국립해양대기청(the National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)의 미세플라스틱에 대한 정의와 UN 해양환경보호의 과학적 측면에 관한 공동전문가그룹(the Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection, GESAMP)의 플라스틱 분류를 결합시켜 만든 것이다.^{14,15)} 크기가 1 m를 초과하면 메가플라스틱(megaplastics), 크기가 2.5 cm 이상이고 1 m 미만이면 매크로플라스틱

(macroplastics), 크기가 5 mm 이상이고 2.5 cm 미만이면 메조플라스틱(mesoplastics), 그리고 크기가 5 mm 미만이면 미세플라스틱(microplastics)이라고 한다.

지금까지의 미세플라스틱 관련연구를 살펴보면, 1972년 해양에서 작은 플라스틱 조각이 발견된다는 논문이 처음으로 발표되었다.¹⁶⁾ 이후에도 몇 편의 후속연구가 있었지만,¹⁷⁻¹⁹⁾ 큰 관심을 받지 못했다. 그 후, 2004년에 미세플라스틱이라는 용어가 처음으로 사용된 논문이 발표되면서²⁰⁾ 미세플라스틱 분야에 대한 연구가 전 세계적으로 활발해지기 시작하였고, 2014년을 기점으로 폭발적으로 증가하기 시작했다.²¹⁾

이에 UNEP에서는 2014년 미세플라스틱 오염을 전 세계 10대 환경문제 중 하나로 발표하였다.²²⁾ 이러한 상황에서 샌프란시스코는 2014년 일회용 플라스틱 물병의 판매와 유통을 금지하는 법안을 만장일치로 통과시켰다. 또한 캘리포니아 주는 2015년부터 대형식료품점의, 그리고 2016년부터 중소기업인 주류, 편의점 등의 일회용 비닐봉지 사용을 금지하였다. 미국은 2015년 세안용 제품에, 그리고 캐나다는 2016년 각질제거 및 세안용 제품에 마이크로비즈(microbeads)의 사용을 금지하도록 법안을 개정하였으며, 프랑스는 2020년까지 모든 플라스틱의 사용을 금지하였다.²³⁾ 유럽은 2018년에 플라스틱 전략을 발표하여 플라스틱 제품의 시장출시 금지, 사용량 감축, 생산자 책임 확대 등과 같은 다방면의 규제전략을 내세웠으며, 2021년까지 일회용 플라스틱 제품을 퇴출하고, 2030년까지 포장재에 쓰이는 플라스틱을 재활용 가능물질로 전환한다는 목표를 세웠다.¹⁾

역사적으로 미세플라스틱 연구는 육상 및 담수 보다는 해양의 미세플라스틱 오염을 중심으로 이루어져 왔다. 초기연구는 해양에서 미세플라스틱 오염의 현황을 조사하는 것이었으며, 그 후 미세플라스틱이 해양에서 어떻게 발생하는지, 발생 후 이동은 어떻게 이루어지는지, 나아가 해양생물에 대한 영향은 어떠한지에 대하여 연구가 진행되었다. 이에 본 논문에서는 미세플라스틱의 개념과 해양환경에서의 거동 및 생물영향 등을 자세하게 살펴보고, 이를 바탕으로 미세플라스틱의 관리대책을 제시하고자 한다.

II. 연구 방법

2020년 5월에 ‘Google Scholar database (<https://>

Table 1. Classification of plastics by size^{14,15)}

Classification	Size range
Megaplastics	Larger than 1 m
Macroplastics	2.5 cm~1 m
Mesoplastics	5 mm~2.5 cm
Microplastics	Smaller than 5 mm

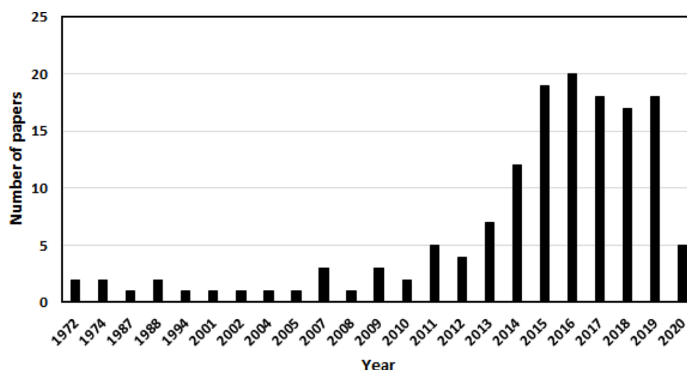


Fig. 1. The number of microplastic-related papers per year included in this paper

scholar.google.com/)를 이용하여 해양에서의 미세플라스틱 관련 문헌을 검색하였다. ‘Microplastic’이라는 단어를 ‘ocean’, ‘marine’, ‘sea’, ‘water’ 또는 ‘nanoplastic’이라는 단어와 함께 검색하였다. 리뷰논문도 연구주제와 관련이 있는 경우에 분석대상으로 삼았다. 그리고 검색된 논문의 참고문헌도 확인하여 필요하다고 판단될 때에는 검색하였다. 이를 통해 1972년 3월부터 2020년 4월까지의 총 146개 문헌을 선정하여 분석하였다(Fig. 1).

III. 결과 및 고찰

1. 미세플라스틱의 개념

2004년에 미세플라스틱이라는 용어가 처음으로 사용된 이후 수많은 연구가 있었지만, 미세플라스틱의 정의에 대한 국제적인 합의는 없었다. 그러다가 미국 NOAA가 2008년 미국 워싱턴 주에서 주최한 제 1차 국제 미세플라스틱 워크숍에서, 미세플라스틱은 크기 5 mm 미만의 플라스틱 쓰레기를 모두 포함해야 한다는 데에 학자들의 합의가 이루어졌다.²⁴⁾ 이어서 유럽연합(the European Union, EU)의 해양전략 프레임워크 지침(the Marine Strategy Framework Directive, MSFD)은 NOAA의 정의를 채택하고 5 mm를 미세플라스틱의 상한으로 설정하였다.²⁵⁾ 그리고 2015년과 2016년에 UN GESAMP는 미세플라스틱의 정의를 크기 5 mm 미만의 플라스틱으로 채택하였다.^{14,15)}

따라서 학계에서 일반적으로 통용되는 미세플라스틱의 정의는 크기가 5 mm 미만인 플라스틱이다. 이 정의는 상한은 있지만 하한은 없다. 그러다보니 이

것과 관련해서 미세플라스틱보다 더 작은 플라스틱, 즉 나노플라스틱(nanoplastics)의 정의에 대한 논쟁이 있어왔다. 현재 많은 학자들이 따르고 있는 나노플라스틱의 정의는 직경이 1 nm 이상이며 100 nm 미만인 플라스틱이다.²⁶⁻³⁰⁾ 이것은 EU에서 제한한 것으로 공학적으로 이용되는 나노물질의 관점에서 정의한 것이다.³¹⁾ 결론적으로 현재 많은 학자들이 따르는 하한까지 포함하는 미세플라스틱의 정의는 크기가 100 nm 이상이며 5 mm 미만인 플라스틱이다.^{20,30,32-34)}

미세플라스틱은 발생원에 따라 일차(primary) 및 이차(secondary) 미세플라스틱으로 나눌 수 있다(Table 2). 일차 미세플라스틱은 제조 당시부터 의도적으로 그 크기가 5 mm 미만으로 만들어진 것이다. 치약, 샴푸, 화장품, 세안제, 각질 제거제, 청소용품 등에 첨가제로 사용되는 마이크로비즈와 다양한 플라스틱 제품을 생산하기 위해서 산업용 원료로 사용되는 레진 펠릿(resin pellet) 등이 있다.^{8,35,36-38)} 그리고 이차 미세플라스틱은 제조 당시에는 크게 만들어졌으나 그 이후에 자연적으로 또는 인위적으로 그 크기가 5 mm 미만으로 작아진 것이다. 음료수 용기, 포장재, 장난감, 합성섬유 의류와 같은 소비자 용품, 그물, 밧줄, 부표와 같은 어업·양식업 용품, 비닐필름과 같은 농업 용품, 그리고 연마제와 같은 산업 용품 등이 시간이 경과함에 따라 자연적으로 또는 인위적으로 마모나 산화, 분해가 되어 생성이 된다. 이차 미세플라스틱의 발생비율이 일차 미세플라스틱보다 훨씬 높기 때문에, 기본적으로 플라스틱의 사용을 억제하는 것이 중요하다.^{21,34,39,40)}

Table 2. Classification of microplastics^{21,34-37)}

Classification	Primary microplastics	Secondary microplastics
Definition	Intentionally manufactured microplastics for particular applications	Microplastics made by fragmentation and degradation of general plastics
Examples	<ul style="list-style-type: none"> - Microbeads used as additives in toothpaste, shampoo, cosmetics, cleansers, exfoliants, and cleaning supplies - Resin pellets used as raw materials for industrial use to produce various plastic products 	<ul style="list-style-type: none"> - Consumer goods such as beverage containers, food containers, plastic bags, packaging materials, toys, and synthetic fiber clothing - Fishing and aquaculture products such as nets, ropes, and buoys - Agricultural products such as vinyl films - Industrial products such as abrasives

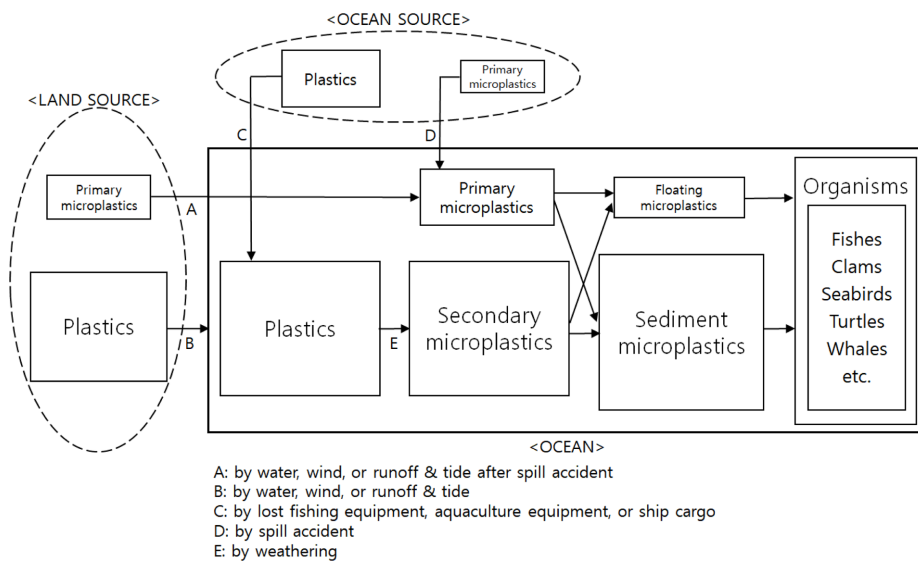


Fig. 2. Fate of microplastics in the ocean

2. 해양에서 미세플라스틱의 발생

해양에서 미세플라스틱은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 발생한다.

인간의 활동이 육지에 기반을 두고 있기 때문에, 해양 플라스틱 쓰레기의 약 80%는 육지에서 유입이 된다.^{15,41,42)} 첫 번째, 보통의 플라스틱 쓰레기는 물의 밀도보다 작거나 비슷하기 때문에 강물을 통해서 많은 부분이 해양에 유입될 수 있다.⁴³⁾ 두 번째, 폭풍이나 태풍 등을 통해 플라스틱 쓰레기가 해양에 유입될 수 있다.⁴⁴⁾ 그리고 세 번째, 해안선 인근의 토양에 사용된 농업용 비닐필름, 살충제 용기 및 비료 포장재 등은 강우유출과 조류에 따라 해양으로 유입될 수 있다.⁴⁵⁾ 이러한 작용을 통해 육지로부터 해양으로 유입되는 플라스틱 쓰레기는 그 후 장기적

인 자연적이거나 인위적인 마모, 산화, 및 분해 등의 과정을 통해 이차 미세플라스틱으로 변화한다. 하수처리장에서 배출되는 마이크로비즈를 함유한 유출수, 산업체에서 종종 발생하는 레진 펠릿의 누출사고 등을 통해 일차 미세플라스틱이 육지에서 해양으로 유입되기도 한다.^{36,46)} 그리고 해양 플라스틱 쓰레기의 나머지(약 20%)는 해양 자체에서 발생이 되는데, 잃어버린 어업 장비, 양식업 장비 및 선박 화물 등이 장기적인 마모, 산화 및 분해 등을 통해 이차 미세플라스틱으로 변화한다.^{11,36,47)} 마이크로비즈나 레진 펠릿의 해양수송 중 가끔 사고로 인해 일차 미세플라스틱이 해양에서 직접 유출되기도 한다. 미세플라스틱의 발생비율을 비교해보면, 육지 및 해양 모두에서 이차 미세플라스틱의 비율이 훨씬 높다.

전 세계에서 부적절하게 관리된 플라스틱 쓰레기의 양은 연간 6,000만~9,000만톤에 이르며,¹³⁾ 그 중에서 연간 800만톤의 플라스틱 쓰레기가 해양에 유입된다.²⁸⁾ 또한 해양으로 유입되는 미세플라스틱은 연간 150만톤으로, 1차 미세플라스틱이 약 2.3%인 3만4,500톤을 차지하며 2차 미세플라스틱이 약 97.7%인 146만5,500톤을 차지한다.⁴⁸⁾ 단 3일 동안 2개의 강을 통해 캘리포니아 해안으로 유입된 미세플라스틱의 조각은 약 20억개였으며,⁴⁹⁾ 다뉴브 강을 통해서 흑해로 유입되는 플라스틱 쓰레기는 연평균 약 1,553톤에 달했다.⁵⁰⁾ 2025년까지 해양에 축적될 플라스틱의 양은 약 2억5천만톤으로 추산된다.⁵¹⁾ 이러한 플라스틱 쓰레기가 오랜 시간에 걸쳐 파도, 바람, 자외선, 미생물 등으로 인해 미세플라스틱으로 변화한다.⁵²⁾ 그리고 EU 환경집행위원회의 보고서에 따르면, 화장품에 사용된 마이크로비즈가 매년 최대 약 8,762톤씩 유럽의 바다로 유입된다.⁵³⁾ 미국에서도 매일 약 8조개의 마이크로비즈가 해양으로 방출되고 있는데, 이는 매일 약 300개 이상의 테니스 코트를 채우기에 충분한 양이다.⁵⁴⁾ 해양에서 채취한 플라스틱 시료 중 미세플라스틱의 비율은 북동 대서양에서 약 94%, 태평양에서 약 96%, 그리고 지중해에서는 약 100%였다.⁵⁵⁻⁵⁷⁾ 그리고 북서태평양의 표층수는 미세플라스틱에 의해 광범위하게 오염되어 있는데, 해류에 따라 그 농도는 약 640~42,000개/km² 범위였다.⁵⁸⁾ 아라비아 만의 표층수는 미세플라스틱 농도가 약 43,800~1,460,000개/km² 범위였고,⁵⁹⁾ 일본 주변 동아시아 해역의 미세플라스틱 농도는 약 1,720,000개/km²로 세계 해양의 평균값보다 약 27배나 높았다.⁶⁰⁾ 전 세계 표층수에서 가장 많이 발견되는 플라스틱 쓰레기의 종류는 폴리에틸렌(polyethylene, PE)과 폴

리프로필렌(polypropylene, PP)이다.^{57,61)} 중국의 보하이 해에서 이루어진 연구에서도 표층수의 주된 미세플라스틱은 PE 및 PP였다.⁶²⁾ 이탈리아의 연구에서는 퇴적물을 대상으로 이루어졌는데 가장 많이 발견된 미세플라스틱은 역시 PE(48%) 및 PP(38%)였다.⁶³⁾ 이 결과는 전 세계적으로 가장 많이 생산되는 플라스틱의 종류별 순서(PE>PP>폴리염화비닐(polyvinyl chloride, PVC)>폴리에틸렌 테레프탈레이트(polyethylene terephthalate, PET)>폴리스티렌(polystyrene, PS))와 일치한다.⁶⁴⁾

채취된 대부분의 미세플라스틱 조각은 풍화작용을 거친 것들이었다. 자외선 조사, 화학적 산화, 열 조사, 기계적 마모, 생분해 등을 포함하는 풍화작용은 해양에서 플라스틱 쓰레기의 거동에 큰 영향을 끼칠 수 있다. 그 중에서도 주된 작용은 자외선 조사에 의한 분해이다.⁶⁵⁾ 풍화작용은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 조각화 및 균열의 발생, 기계적 성질의 변화, 결정의 변화, 사슬결합의 분리 등과 같은 다양한 현상들을 미세플라스틱에게 가져온다.⁶⁵⁾ 이것은 대부분의 미세플라스틱이 해양에 존재하는 동안 자연적이거나 인위적인 마모, 산화, 및 분해 등의 과정을 통해 생성된 이차 미세플라스틱이라는 것을 나타낸다.⁶⁶⁾

미세플라스틱은 풍화작용에 의해 작아질수록 비표면적이 더 커지기 때문에 식물 플랑크톤, 유기물, 점토 및 다른 입자들과 상호작용을 촉진할 수 있고, 그 결과 밀도가 증가할 수 있다.⁶⁷⁾ 북대서양 아열대 환류대에서 약 0.5~1.0 mm의 크기를 갖는 미세플라스틱은 표층수보다 바로 그 아래에 위치한 아표층수(subsurface water)에서 더 많았다.⁶⁸⁾ 노르웨이 스발바르 제도의 남부 및 남서부에 위치한 북극해의 표층수와 아표층수의 미세플라스틱도 각각 약 0~1.31

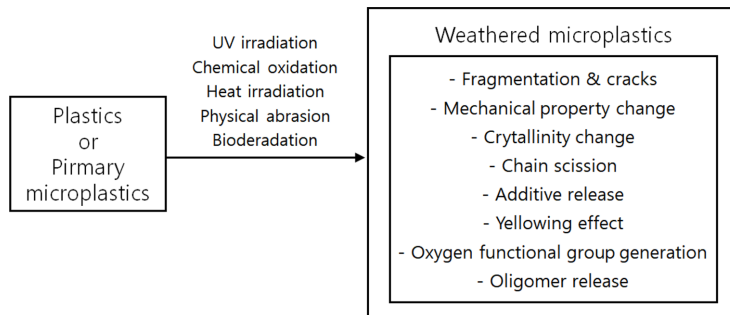


Fig. 3. Weathering of microplastics in the ocean⁶⁵⁾

개/m³와 약 0~11.5개/m³로 아표층수에서 더 많다.^{69,70)}

그리고 해양의 심부에서 가장 많이 발견되는 미세플라스틱 쓰레기의 형태는 미세섬유이다.^{64,71)} 아일랜드 대륙붕에서 채취한 심층수와 퇴적물에서도 미세섬유는 주된 미세플라스틱의 형태였으며,⁷¹⁾ 북극의 한대수역 심해에서 채취한 시료에서도 미세플라스틱의 대부분(약 95%)은 미세섬유였다.⁶⁹⁾ 이것은 합성섬유 의류제품의 세탁 시, 배출되어지는 미세섬유가 해양으로 유입되기 때문이다.⁶⁹⁾ 합성섬유로 만든 한벌의 의류제품을 세탁할 때마다 약 1,900개 이상의 섬유를 방출할 수 있으며, 그 중 일부는 세탁기에서 여과되기에 너무 작아 배수구로 배출된다.³⁵⁾

3. 해양에서 미세플라스틱의 이동

수많은 미세플라스틱은 최종적으로 해양에 모이게 되는데,⁷²⁾ 해양에서 미세플라스틱의 이동에 영향을 주는 요소는 Table 3과 같다. 첫 번째, 플라스틱의 물리화학적 특성으로 화학적 조성, 표면 전하, 소수성, 밀도, 크기, 형상 등이 있다. 두 번째, 해양의 동적 조건으로 해류, 바람, 파도, 소용돌이, 조류 등이 있다. 세 번째, 해양의 기하학적 구조로 지형, 경사 등이 있다. 네 번째, 해안선의 특성으로 자갈, 암반, 해안 식생 등이 있다. 다섯 번째, 생물들의 상호작용으로 생물부착, 동물에 의한 섭취 등이 있다. 여섯 번째, 인간의 활동으로 어업, 도시개발, 관광 등이 있다.^{46,52,73,74)}

해양에서 미세플라스틱은 다음과 같이 이동한다. 첫 번째, 해수보다 밀도가 큰 미세플라스틱 중 일부는 중력에 의해 가라앉아 퇴적물에 축적된다. 두 번째, 해수보다 밀도가 큰 미세플라스틱 중 일부는 중력에 의해 가라앉은 후 기저 해류에 의해서 이동된다. 세 번째, 해수보다 밀도가 작은 미세플라스틱 중

일부는 해수 표면에 부유해서 파도에 따라 이동한다. 네 번째, 해수보다 밀도가 작은 미세플라스틱 중 일부는 해수 표면에 부유하다가 유·무기 입자 및 미생물과의 응집으로 인해 크기와 밀도가 증가하여 중력에 의해 가라앉아 퇴적물에 축적된다. 다섯 번째, 해수보다 밀도가 작은 미세플라스틱 중 일부는 해수 표면에 부유하다가 유·무기 입자 및 미생물과의 응집으로 인해 크기와 밀도가 증가하여 중력에 의해 가라앉은 후 기저 해류에 의해서 이동된다.^{38,75)}

수 환경에서 물의 표면적 및 깊이, 표층수의 흐름, 바람의 변화, 그리고 입자의 밀도는 미세플라스틱의 이동거리를 결정하는 중요한 요소들이다.^{76,77)} 대부분 미세플라스틱의 밀도는 물의 밀도보다 작거나 비슷하기 때문에,⁸⁾ 미세플라스틱은 물의 표면에 부유해서 강을 따라 해양으로 이동된다. 담수에서 100 nm ~10 mm 크기인 구형 플라스틱의 이동을 계산한 결과, 99% 확률의 체류거리가 각각 약 200 km 및 900 km 이상이었다.⁷⁸⁾

해양에 유입된 미세플라스틱은 해류와 바람으로 인해 환류대로 모이게 되는데, 이로 인해 미세플라스틱으로 심하게 오염된 지역을 형성한다.⁷⁹⁾ 해양에 부유하는 미세플라스틱 군집은 적도의 남북으로 분포하는 5개의 아열대 환류대(북태평양 아열대 환류대, 남태평양 아열대 환류대, 북대서양 아열대 환류대, 남대서양 아열대 환류대 및 인도양 아열대 환류대)에 모이는데, km²당 kg 수준의 높은 미세플라스틱 농도를 나타내었다.^{11,80)} 특히, 북태평양 아열대 환류대에는 ‘the Great Pacific Garbage Patch (GPGP)’라는 엄청난 크기의 플라스틱 쓰레기 섬이 만들어졌는데, 그 크기가 약 160만 km²이며 적어도 약 7만 9천톤의 플라스틱 쓰레기가 존재하고 약 1조8천억개의 미세플라스틱이 부유하고 있는 것으로 예측되었다.⁸¹⁾

해안지역의 경우, 미세플라스틱은 다양한 값을 보

Table 3. Factors affecting the movement of microplastics in the ocean^{46,52,73,74)}

Classification	Contents
Physicochemical properties of plastics	Chemical composition, surface charge, hydrophobicity, density, size, shape, etc.
Dynamic conditions of the ocean	Currents, winds, waves, swirls, tides, etc.
Geometric structure of the ocean	Topography, slope, etc.
Characteristics of shoreline	Gravel, bedrock, coastal vegetation, etc.
Interaction of living things	Biofouling, ingestion by animals, etc.
Human activities	Fishing, urban development, tourism, etc.

여주었는데, 발견되지 않은 것에서부터 약 1,400~62,800개/m²까지 다양했다. 유명한 해변의 높은 미세플라스틱 농도는 많은 관광객들에 기인한다.⁸²⁾ 대만의 해변에서는 약 40~5,320개/m²를 기록하였고,⁸³⁾ 홍콩의 해변에서는 약 0.58~2,116개/kg을 기록하였다.⁸⁴⁾ 말레이시아 반도에서는 총 6개의 해변에서 약 265.3 g/m²의 값을 나타내었으며,⁸⁵⁾ 태평양 연안에서는 약 8~9,200개/m³의 범위를 나타내었다.⁸⁶⁾

많은 미세플라스틱이 특정한 곳으로 이동하여 축적이 되는 경우에는 조각화, 침전, 재부상 및 바람의 변화와 같은 물리적 작용이 상대적으로 중요하다.⁸⁷⁾ 그리고 물 환경에서 유기성 미립자, 퇴적물, 부유 퇴적물이 고농도로 존재하는 점을 감안할 때, 응집 및 생물부착 그리고 후속 침전이 미세플라스틱의 거동과 이동을 좌우할 수 있다.^{46,78)} 응집 및 생물부착은 미세플라스틱의 밀도증가와 부력감소를 가져올 수 있는데,⁸⁸⁾ 미세플라스틱이 더 작을수록 더 빠르게 침전속도에 도달하는 경향이 있다.⁸⁹⁾ 또한 입자의 형태도 침전속도에 큰 영향을 미친다.⁹⁰⁾

해양 환경에서 미세플라스틱은 최종적으로 퇴적물에 정착하게 된다.⁹¹⁾ 지중해 퇴적물의 미세플라스틱 농도는 약 1,140개/m³였고,²⁰⁾ 남아프리카 퇴적물의 미세플라스틱 농도는 약 340.7~4,757개/m²로 다양했다.⁹²⁾ 전 세계 퇴적물의 미세플라스틱 농도는 거의 없음에서부터 약 18,600개/m³까지 매우 다양하다.⁹³⁾ 해수의 유량, 바닥까지의 깊이, 해안선으로부터의 거리는 퇴적물의 미세플라스틱 농도에 영향을 미치는 주요 요인이다. 남황해에서 채취된 퇴적물의 미세플라스틱 평균 농도는 시료채취 깊이와 비례관계가 있는 것으로 나타났다. 최근 연구에서 깊이가 20, 20~40, 40~60, 60~80 m인 퇴적물의 미세플라스틱 농도는 각각 1,765, 2,135, 2,346.7, 2,771.3개/kg dry weight로 깊이가 깊어질수록 축적되는 퇴적물의 양이 증가하는 것으로 나타났다.⁹⁴⁾

한편, 미세플라스틱은 독성 중금속 및 잔류성 유기오염물질(persistent organic pollutants, POPs)의 이동 매개체가 될 수 있다.^{95,96)} 어떠한 물질들은 미세플라스틱의 제조과정에서 첨가되며, 어떠한 물질들은 자연환경에서 미세플라스틱 표면에 흡착된다. 따라서 생물체에 의해서 섭취된 미세플라스틱이 생물체 조직에 남아 있는 경우에는 미세플라스틱 뿐만 아니라 여기에 함유된 독성 물질이 먹이사슬을 통해

상위포식자로 이동 및 축적될 수 있다.

4. 해양에서 미세플라스틱의 생물영향

미세플라스틱의 생물영향에 대한 연구는 1980년대 중반부터 이루어졌다. 바다새의 내장이 플라스틱 잔해로 오염되었음이 보고되었고,⁹⁷⁾ 플라스틱의 화학물질이 용출되어 야생생물에게 영향을 미칠 수 있다는 초기 우려가 제기되었다.⁹⁸⁾ 그리고 2000년대 초에는 야생동물이 미세플라스틱 오염에 연루되었다는 발표가 나왔다.⁹⁹⁾

해양에서 생물체가 받는 대표적 물리적 피해는 얽힘(entanglement)과 섭취(ingestion)이다. 2016년 UN 보고서는 얽힘 또는 섭취를 통해 플라스틱에 오염된 동물이 무려 800종에 이를 것이라고 경고했다.¹⁰⁰⁾ 무척추동물, 물고기, 바다새, 바다거북 및 고래 등은 플라스틱 섬유, 플라스틱 고리 또는 타이어 등에 의해서 몸이 묶이거나 끼이는 얽힘을 당하기 쉽다. 얽힘은 생물체의 이동성을 저하시키고 먹이섭취를 감소시키며, 이 후 지속적인 고통을 주다가 보통 익사 및 질식사로 이어지게 한다.¹⁰¹⁾ 그리고 플랑크톤 포식자는 정상적인 먹이 활동 중 미세플라스틱을 수동적으로 삼키거나 실제 먹이로 착각해 능동적으로 삼키는 섭취를 할 수 있다.^{102,103)} 또한 먹이그물을 통한 영양 전달의 결과로서 미세플라스틱을 간접적으로 섭취할 수도 있다.¹⁰⁴⁾ 미세플라스틱을 직·간접적으로 섭취하는 수생생물은 단각류(amphipods), 요각류(copepods), 갯지렁이, 따개비, 홍합, 십각류(decapods), 바다새, 물고기, 거북이 등을 포함하여 매우 다양하다.¹⁰⁵⁾ 섭취 후 미세플라스틱의 대부분이 배설된다고 할지라도 일부는 체내에 남게 된다.¹⁰⁶⁾ 대합조개(*Scrobicularia plana*)는 섭취한 미세플라스틱이 소화관에까지 전달되었다.¹⁰⁷⁾ 홍합(*Mytilus edulis*)은 미세플라스틱의 입자가 작을수록 조직에 더 많이 축적되는 경향이 있었으며, 3일 이내에 내장에서 순환계통으로 이동하여 48일 이상 잔류할 수 있었다.¹⁰⁸⁾ 홍합에서 미세플라스틱은 특정한 장기, 즉 내장 조직에 약 50%가 축적되었다.¹⁰⁹⁾ 제브라피쉬(*Danio rerio*)의 경우, 20 μm PS 미세플라스틱은 아가미와 내장에만 분포한 반면, 5 μm PS 미세플라스틱은 아가미와 내장, 그리고 간에도 축적이 되었다.¹¹⁰⁾ 미세플라스틱을 섭취하는 굴 유충의 수와 소비량은 미세플라스틱의 크기가 감소함에 따라 증가하였다.¹¹¹⁾ 크

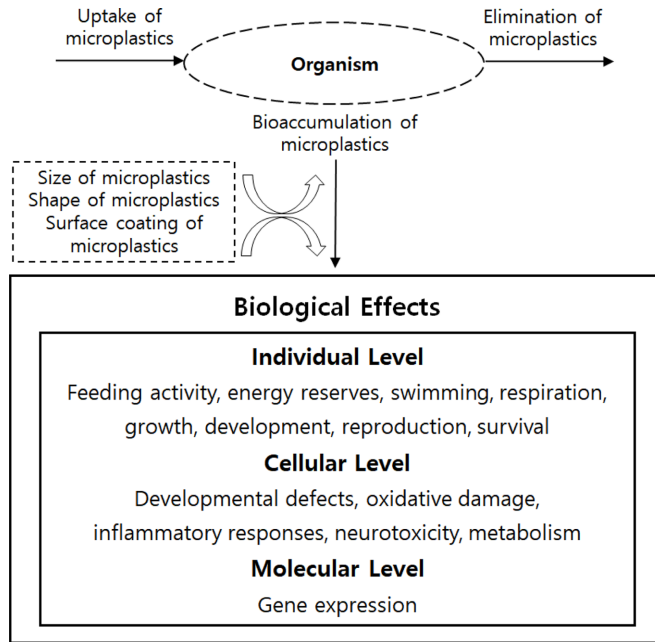


Fig. 4. Bioaccumulation and biological effects of microplastics¹¹³⁾

기뿐만 아니라 미세플라스틱의 형태도 섭취에 영향을 미친다. 풀 새우(*Palaemonetes pugio*)는 구와 섬유 모양보다 조각 모양의 미세플라스틱이 더 많이 축적되었다.¹¹²⁾

Fig. 4에서 보는 바와 같이 플라스틱의 섭취는 다양한 생물학적 효과를 나타내게 된다.¹¹³⁾ 플라스틱의 섭취는 유기체의 소화관에 자극과 부상을 초래할 뿐만 아니라, 음식물의 흐름을 막아 굶주림을 증가시켰다. 또한 먹이섭취의 잠재력과 소화 작용을 약화시키기 때문에, 소화관에서 질병 발생률과 사망률을 증가시켰다.¹¹⁴⁾ 미세플라스틱은 장에서 다른 신체 조직으로 이동할 수 있고 염증의 증가와 리소좀막 안정성의 저하를 유발하였다.¹¹⁵⁾ 그리고 미세플라스틱은 체내의 다양한 조직과 장기를 공격하여 잠재적으로 세포 및 분자 수준에서 독성효과를 나타낼 수 있었다.^{116,117)}

자연적인 풍화작용으로 인해 미세플라스틱은 크기, 색상, 형태, 결정 및 밀도 등에서 변화가 이루어진다.⁴⁰⁾ 그 결과 미세플라스틱에 포함된 첨가제와 미세플라스틱 표면에 흡착된 오염물질이 배출되어 화학적 피해를 줄 수 있다.⁵¹⁾ 화학적 피해는 독성과 관련이 있기 때문에 물리적 손상과 비교하여 더 심각

할 수 있다.⁹⁶⁾

미세플라스틱은 색소, 착색제, 항산화제, 가소제, 난연제 등의 첨가제를 다량 함유하여 플라스틱의 원래 특성을 유지한다.^{118,119)} 이러한 첨가제는 오랜 시간에 걸쳐 환경으로 용출될 수 있다. 부피 대비 표면적의 비가 클수록, 즉 미세플라스틱의 크기가 더 작아질수록 오염물질의 배출은 더 증가한다. 짧은 꼬리 습새(*Pupinus tenuirostris*)가 섭취한 미세플라스틱에서 폴리브롬화 디페닐 에테르(polybromated diphenyl ether, PBDE)가 발견되었다.¹²⁰⁾ 홍합, 물벼룩(*Daphnia magna*), 제브라피쉬 및 붉은 틸라피아(tilapia)는 미세플라스틱으로 인해 체내에 비스페놀 A (bisphenol A, BPA)의 농도가 더 증가하였다.¹²¹⁾ BPA와 디에틸헥실프탈레이트(di-2-ethylhexyl phthalate, DEHP)는 편모조류(*Alexandrium pacificum*)의 바이오매스를 감소시키고 광합성 활동을 교란시켰다.¹²²⁾ 그리고 프탈레이트는 동물의 번식에 영향을 주고, 갑각류 및 단각류의 발달을 손상시키며, 유전자 이상을 유도하였다.¹²³⁾ Table 4에서 보는 바와 같이 BPA는 태아 및 영유아의 성장과 발달에 유해하며, DEHP는 발암성, 변이독성 및 재생독성이 있고, PBDE는 갑상선 기능에 문제를 유발할 수 있다.¹²⁴⁾

Table 4. Chemicals related to microplastics¹²⁴⁾

Chemicals	Function	Impact
Bisphenol A (BPA)	- Used as a raw material for the production of polycarbonate plastics and epoxy resin.	- Acts as an endocrine disruptor. - Especially harmful to the growth and development of fetuses and infants.
Phthalate - Di-2-ethylhexyl phthalate (DEHP) - Dibutyl phthalate (DBP)	- Used as a plasticizer and softener to make plastics (especially polyvinyl chloride) flexible. - Used to maintain the aroma of perfumes and cosmetics.	- Acts as an endocrine disruptor. - In particular, DEHP and DBP are carcinogenic, mutagenic, and regenerative toxic substances.
Polybromated diphenyl ether (PBDE)	- Used as a flame retardant for plastics, foam rubber, fibers, etc. - Used as an additive to plastic products. - Adsorbed on the surface of plastics while remaining in the environment.	- Acts as an endocrine disruptor. - Causes problems especially with thyroid function. - Harmful to nerve development and behavior, immune system, liver, etc.
Polychlorinated biphenyls (PCBs)	- Used as an insulator for transformers, and a flame retardant & a plasticizer of some plastics.	- Toxic to the immune system, reproductive capacity, and nervous system of various animals. - Damage the liver and cause cancer.
Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)	- Produced during incomplete combustion of fossil fuels. - Also present in oil and coal tar.	- Accumulated in the body once absorbed. - Some cause cancer & mutations and impair reproductive ability.

미세플라스틱은 표면에 폴리염화비페닐(polychlorinated biphenyls, PCBs), 다환방향족탄화수소(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)와 같은 POPs를 흡착할 수 있으며, 나아가 농축과 이동이 이루어진다. POPs와 같은 소수성 유기 오염물질은 미세플라스틱의 소수성 표면에 친화력이 더 높으며 주변 해수보다 최대 6배나 높게 농축될 수 있었다.^{39,125)} 해양의 펠렛에서 POPs의 농도는 전 세계적으로 약 1~10,000 ng/g이었으며,¹²⁵⁾ PCBs의 농도는 전 세계적으로 약 4~980 ng/g이었다.¹²⁶⁾ 플라스틱 종류별로 보면, 고밀도 폴리에틸렌(high density polyethylene, HDPE), 저밀도 폴리에틸렌(low density polyethylene, LDPE), PP가 PET, PVC보다 PAHs, PCBs를 더 많이 흡수하였다.⁹⁶⁾ 일본 송사리(*Oryzias latipes*)가 PAHs를 흡착한 미세플라스틱을 섭취하면 이들 오염물질은 간에 독성을 나타내며 전이와 기타 이상을 일으켰다.⁹⁶⁾ 생물학적 독성분석을 실시한 결과는 미세플라스틱의 노출로 인한 잠재적 독성이 산화 스트레스뿐만 아니라 에너지 및 지질 대사의 교란도 유발할 수 있다는 것을 보여주었다.¹²⁷⁾ Table 4에서 보는 바와 같이 PCBs는 여러 동물의 면역체계, 생식능력, 및 신경계에 독성을 초래하고, 간에 손상을 줄 수 있으며, 암을 유발할 수 있다. 또한 PAHs는 한번 흡수되면 체

내에 축적되고, 암과 돌연변이를 유발하고, 생식능력을 저해한다.

미세플라스틱은 Ni, Ti, Pb, Zn, Cd, Cu 등과 같은 중금속을 흡착할 수 있으며, 이것은 유기오염물질에 비해 독성이 더 강할 수 있다.¹²⁸⁾ 전하를 띤 광물질은 미세플라스틱에 흡착된 후, 미세플라스틱의 표면 전하를 증가시켜 미세플라스틱과 금속 이온 간의 상호작용을 강화시킬 수 있다.^{129,130)} 생물막은 질량당 표면적의 증가로 인해 미세플라스틱에 대한 Cs와 Sr의 흡착을 증가시켰다. 그리고 풍화된 미세플라스틱은 표면의 극성 및 전하의 증가로 인해 원래의 미세플라스틱 보다 Cr, Co, Ni, Zn, Cd, Pb, Cs 및 Sr에 대한 흡착도가 더 높았다.^{131,132)} 또한 풍화된 미세플라스틱은 표면에 형성된 생물막에 침전물이 달라붙는 경우에 원래의 미세플라스틱보다 약 1.5~25배 더 높은 Cr, Pb, Cd 및 Co에 대한 흡착능력을 보여주었다.¹²⁹⁾ PS 및 PVC는 플라스틱에 흡착되는 금속의 농도를 주변 바닷물에 비해 최대 800배까지 높게 축적하였다.⁹⁵⁾ 0.1 μm 와 20 μm 의 PS 미세플라스틱은 모두 제브라피쉬에게 Cu 성분을 축적시켰는데, 0.1 μm 의 경우가 20 μm 의 경우보다 내장과 간에서 약 1.5~2.1배 높은 Cu 성분을 축적시켰다.¹³³⁾ 동물성 플랑크톤과 홍합이 미세플라스틱을 많이

섭취한다는 사실은 여과 섭식자(filter feeder)가 부유 미세플라스틱의 노출에 가장 취약하다는 것을 나타낸다.^{134,135)} 동물성 플랑크톤, 무척추동물과 같은 낮은 영양생물은 미세플라스틱을 섭취하고, 먹이그물에서 미세플라스틱의 전달과 축적을 실현한다. 바닷게(*Carcinus maenas*)는 홍합을 섭취함으로써 홍합의 미세플라스틱이 게의 조직으로 전달되었다.^{136,137)} 소화관 안에 미세플라스틱이 축적되는 것 이외에도, 미세플라스틱이 바닷게의 아가미와 내장에서, 제브라피쉬의 간과 내장에서, 그리고 바닷새, 거대 물고기 및 고래의 위장과 같은 특정한 조직과 세포에도 축적될 수 있었다.^{137,138)}

미세플라스틱을 섭취한 물고기와 조개류를 인간이 섭취함으로써, 마침내 미세플라스틱이 먹이사슬을 통해 인간에게 도달된다.^{139,140)} 문제는 먹이사슬과 먹이그물을 통해 미세플라스틱의 농도가 크게 증폭된다는 것이다. 사람이 섭취하는 어류에 미세플라스틱이 존재하는지를 평가한 결과 조사한 전체 어종의 약 55~67%에서 미세플라스틱이 검출되었다.⁵⁴⁾ 멸치에서는 마리 당 평균 2개 정도의 미세플라스틱이 검출됐고, 멸치를 섭취한 인간도 미세플라스틱에 노출된 사실이 확인됐다.¹⁴¹⁾ 평균적으로 어른 한명이 일주일간 섭취하는 미세플라스틱의 양은 약 5g으로 신용카드 1장 정도에 해당하였다.¹⁴²⁾ 인분에서 채취한 미세플라스틱의 종류는 PP (62.8%), PET (17.0%), PS (11.2%), PE (4.8%)의 순서였다.¹⁴³⁾ 또한 유럽에서 조개류를 선호하는 소비자가 연간 섭취하는 미세플라스틱의 수는 통계적으로 약 11,000개로 계산되었다.¹⁴⁴⁾ 인체 내 미세플라스틱과 이것에서 용출된 화학물질의 생체축적으로 인한 건강 영향에는 피부 자극, 호흡기 문제, 심혈관 질환, 소화기 문제 및 생식 저해효과가 포함된다.¹³⁹⁾ 최근 인간의 뇌와 상피세포에 대한 연구는 40 nm~10 μm 미세플라스틱의 잠재적인 세포 독성효과를 보여주었다.¹⁴⁵⁾ 아주 크기가 작은 미세플라스틱 입자는 세포막, 태반, 혈액-뇌 장벽(blood-brain barrier)을 침투할 수 있으며, 산화 스트레스, 세포 손상, 염증 등을 일으킬 수 있다.^{139,146)}

5. 해양에서 미세플라스틱의 관리대책

우리는 아직까지 전세계 해양에서 정확한 미세플라스틱의 데이터를 가지고 있지 못하며, 이에 대한 연구도 초기단계에 머물고 있는 상황이다. 이에 미

세플라스틱의 관리대책을 살펴봄으로써, 향후 미세플라스틱의 발생, 이동 및 피해를 최소화하고자 한다.

첫 번째, 적극적인 홍보 및 교육을 통하여 사람들의 미세플라스틱에 대한 인식을 제고해야 한다. 학교, 관공서, 언론매체 및 공익광고 등을 통하여 미세플라스틱의 개념과 미세플라스틱이 생물에 미치는 영향 및 피해에 대해 지속적으로 홍보하고 교육할 필요가 있다. 그리고 이를 바탕으로 자연스럽게 일상생활에서 플라스틱 이용 안하기 운동에 동참할 수 있도록 유도하며, 마이크로비즈가 들어간 제품을 국민들이 알 수 있도록 하여 해당제품의 구매를 피하도록 한다. 특히, 어업 및 양식업 종사자들에 대한 적극적인 홍보 및 교육을 실시하여, 발생하는 플라스틱 장비 및 쓰레기가 해양에 유입되지 않도록 적절히 관리하게 한다. 또한 육상 및 해변에서 플라스틱 쓰레기를 포함하는 쓰레기 줍기 운동을 주기적으로 실시한다.

두 번째, 플라스틱을 발생원에서 감량할 수 있도록 하며, 그 이후 발생된 플라스틱은 최대한 재활용을 해야 한다. 또한 일회용 플라스틱 제품과 플라스틱 용기 및 포장재의 사용을 최소화하는 정부 차원의 적극적인 정책이 필요하다. 그리고 기본적으로 플라스틱 생산업체에게 플라스틱 쓰레기의 회수 및 재활용 비율을 할당하고 그 비율을 점차 확대하며, 재활용 플라스틱의 사용도 확대 유도해야 한다. 그 밖에 화장품 제조업체에 대해서는 마이크로비즈의 사용을, 의류 제조업체에 대해서는 합성섬유의 사용을, 음료매장에 대해서는 플라스틱 용기의 사용을, 그리고 유통업체에 대해서는 플라스틱 포장재의 사용을 규제하는 것이 필요하다. 중장기적으로는 외국의 사례처럼 포장재에 쓰이는 플라스틱을 재활용 가능물질로 전환하고, 일회용 플라스틱 제품의 퇴출을 포함하는 모든 플라스틱의 사용금지를 검토할 필요가 있다. 동시에 플라스틱을 사용할 수밖에 없는 분야의 업체를 위해서 100% 생분해 플라스틱의 보급도 필요하다.

세 번째, 플라스틱 쓰레기가 해양으로 유입되는 것을 억제해야 한다. 우선 해양 플라스틱 쓰레기에 대한 체계적인 모니터링 시스템을 구축하고, 그 시스템을 통하여 기본적인 데이터를 확보해야 한다. 그리고 이를 바탕으로 플라스틱 쓰레기가 유입되는 경로별로 알맞은 관리시스템을 갖춰야 한다. 한편, 어

구와 부표의 해양투기를 강력하게 규제해야 하며, 동시에 빈병 환불제도처럼 어구와 부표에 대해서도 반환보증금제도를 도입하는 것이 효과적이다. 특히, 어구, 부표 등의 생산업체로 하여금 플라스틱 쓰레기의 회수 및 재활용 비율을 할당하며 그 비율을 점차 확대하는 것도 필요하다.

네 번째, 해양으로 유입된 플라스틱 쓰레기의 효율적인 처리 및 관리가 이루어져야 한다. 연근해의 플라스틱 쓰레기는 해당 국가가 수거하여 육상에서 처리를 해야 한다. 이 때 해양 플라스틱 쓰레기의 많은 부분이 개도국에서 배출됨으로 선진국에서 기술과 자금을 지원하는 방안도 필요하다. 또한 공해상 플라스틱 쓰레기는 서로 도와 관련 국가들이 함께 해양 플라스틱 쓰레기의 거동을 파악한 후, 이를 바탕으로 그 쓰레기를 수거 및 처리까지 할 수 있도록 유도해야 한다. 그리고 부유하는 플라스틱 쓰레기뿐만 아니라 퇴적물에 있는 플라스틱 쓰레기도 수거하여 육상에서 처리하는 것이 필요하다.

다섯 번째, 정부의 관리체계를 통합하고 시스템화하는 것이 필요하다. 해양 플라스틱 쓰레기와 관련이 있는 정부 부처의 환경관리체계를 통합하여 효율적인 시스템을 만들어야 한다. 그리고 민간단체, 학계, 기업 및 연구소 등의 전문가들과 폭넓은 의사소통을 함으로써 신속하고 적극적인 대응을 하는 것도 중요하다. 해양에서 미세플라스틱의 오염현황 및 거동에 대한 정부차원의 연구가 확대시행이 되어야 하며, 미세플라스틱의 생물영양 및 인체유해성에 대한 폭넓은 연구를 통해 미세플라스틱의 위험성에 대한 명확한 가이드라인을 공표해야 한다.

IV. 결 론

해양 플라스틱 쓰레기의 대부분(약 80%)은 육지로부터 유입이 되며 나머지(약 20%)는 해양 자체에서 발생이 되는데, 그 후 장기적인 자연적이거나 인위적인 마모, 산화 및 분해 등을 통해 미세플라스틱으로 변화한다. 육지 및 해양 모두에서 미세플라스틱의 대부분은 이차 미세플라스틱이다. 해양에 유입된 미세플라스틱은 해류와 바람으로 인해 환류대로 모이게 되고, 최종적으로 퇴적물에 정착하게 된다. 미세플라스틱은 해양 생물체에게 섭취와 같은 물리적 피해뿐만 아니라 중금속 및 POPs와 같은

독성물질로 인한 피해를 유발한다. 그리고 동물성 플랑크톤, 무척추동물과 같은 낮은 영양생물은 미세플라스틱을 섭취하고, 먹이그물에서 미세플라스틱의 전달과 축적을 실현한다. 이에 미세플라스틱에 대한 여러 가지 관리대책을 잘 준비하고 실행함으로써, 향후 미세플라스틱의 발생, 이동 및 피해를 최소화해야만 한다. 나아가 다음과 같은 연구들이 진행되어야 할 것이다. 우선 가장 기본적인 자료인 미세플라스틱의 사용량과 환경 중 배출량 정보가 매우 부족하여 이에 대한 연구가 시급하다. 그리고 미세플라스틱의 표준화된 정량적 및 정성적 측정방법이 존재하지 않아 이에 대한 프로토콜을 하루빨리 만들어야 한다. 또한 현재 기술로는 해양으로 방출된 미세플라스틱을 완전히 제거하는 것이 거의 불가능하기 때문에, 미세플라스틱의 발생을 근본적으로 억제하기 위해서 생분해성 플라스틱의 개발이 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2019학년도 한국방송통신대학교 국외연수비 지원을 받아 작성된 것입니다. 이에 감사드립니다.

References

1. Greenpeace. Plastic Korea: temptation of disposables. 2019. Available: https://storage.googleapis.com/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 [accessed 27 August 2020].
2. Vert M, Hellwich K-H, Hess M, Hodge P, Kubisa P, Rinaudo M, et al. Terminology for biorelated polymers and applications (IUPAC Recommendations 2012). *Pure Appl Chem.* 2012; 84: 377-410.
3. Alimba CG, Faggio C. Microplastics in the marine environment: Current trends in environmental pollution and mechanisms of toxicological profile. *Environ Toxicol Pharmacol.* 2019; 68: 61-74.
4. PlasticsEurope. Plastics - the Facts 2019: an analysis of European plastics production, demand and waste data. 2019. Available: https://www.plasticseurope.org/application/files/9715/7129/9584/FINAL_web_version_Plastics_the_facts2019_14102019.pdf [accessed 27 August 2020].
5. Geyer R, Jambeck JR, Law KL. There are 8.3 billion tons of plastic in the world. *Sci Adv.* 2017;

- 3(7): 1700782.
6. Rochman CM, Browne MA, Halpern BS, Hentschel BT, Hoh E, Karapanagioti HK, et al. Classify plastic waste as hazardous. *Nature*. 2013; 494(7436): 169-171.
 7. Foerster KH. Plastics Europe's Views on a Strategy on Plastics: Plastics-Increasing Circularity and Resource Efficiency (Updated September 2017). 2017. Available: https://www.plasticseurope.org/application/files/4515/1700/9733/20170907_final_views_on_a_strategy_on_plastics_updated_sept.pdf [accessed 27 August 2020].
 8. Andrady AL. Microplastics in the marine environment. *Mar Pollut Bull*. 2011; 62(8): 1596-1605.
 9. Dixon S, Horton A, Hackney C. The "Plastic Cycle": how ecohydromorphological processes drive the spread of microplastic pollution through rivers to the ocean. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*. 2018; 20: 16121.
 10. Eriksen M, Mason S, Wilson S, Box C, Zellera A, Edwards W, et al. Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian Great lakes. *Mar Pollut Bull*. 2013; 77: 177-182.
 11. Law KL, Thompson RC. Microplastics in the seas. *Science*. 2014; 345: 144-145.
 12. Rocha-Santos TAP. Editorial overview: micro and nano-plastics. *Curr Opin Environ Sci Health*. 2018; 1: 52-54.
 13. Lebreton L, Andrady A. Future scenarios of global plastic waste generation and disposal. *Palgrave Commun*. 2019; 5: 6.
 14. GESAMP. Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment (Kershaw PJ. editor). (IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection). Rep. Stud. GESAMP No. 90; 2015. p.96.
 15. GESAMP. Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment (Kershaw PJ, Rochman CM. editors). (IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection). Rep. Stud. GESAMP No. 93; 2016. p.220.
 16. Carpenter E, Smith K. Plastics on the Sargasso Sea surface. *Science*. 1972; 175: 1240-1241.
 17. Carpenter EJ, Anderson SJ, Harvey GR, Miklas HP, Peck BB. Polystyrene spherules in coastal waters. *Science*. 1972; 178: 749-750.
 18. Colton JB, Knapp FD, Burns BR. Plastic particles in surface waters of the Northwestern Atlantic. *Science*. 1974; 185: 491-497.
 19. Wong CS, Green DR, Cretney WJ. Quantitative tar and plastic waste distributions in the Pacific Ocean. *Nature*. 1974; 247(5435): 30-32.
 20. Thompson RC, Olsen Y, Mitchell RP, Davis A, Rowland SJ, John AWG, et al. Lost at sea: where is all the plastic? *Science*. 2004; 304(5672): 838.
 21. Galafassi S, Nizzetto L, Volta P. Plastic sources: A survey across scientific and grey literature for their inventory and relative contribution to microplastics pollution in natural environments, with an emphasis on surface water. *Sci Total Environ*. 2019; 693: 133499.
 22. United Nations Environment Programme. UNEP Year Book 2014: Emerging Issues in Our Global Environment. 2014. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.11822/9240> [accessed 27 August 2020].
 23. Laskar N, Kumar U. Plastics and microplastics: A threat to environment. *Environ. Technol. Innov*. 2019; 14: 100352.
 24. Arthur C, Baker J, Bamford H. Proceedings of the International Research Workshop on the Occurrence, Effects and Fate of Microplastic Marine Debris. NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-30. 2009.
 25. Galgani F, Hanke G, Maes T. Global distribution, composition and abundance of marine litter. In: Bergmann M, Gutow L, Klages M. editors. *Marine Anthropogenic Litter*. Cham: Springer International Publishing; 2015. p. 29-56.
 26. Ferreira I, Venâncio C, Lopes I, Oliveira M. Nanoplastics and marine organisms: What has been studied? *Environ Toxicol Pharmacol*. 2019; 67: 1-7.
 27. Gigault J, Halle AT, Baudrimont M, Pascal P-Y, Gauffre F, Phi T-L, et al. Current opinion: what is a nanoplastic? *Environ Pollut*. 2018; 235: 1030-1034.
 28. Jambeck JR, Geyer R, Wilcox C, Siegler TR, Perryman M, Andrady A, et al. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*. 2015; 347: 768-771.
 29. Koelmans AA, Besseling E, Shim WJ. Nanoplastics in the Aquatic Environment. Critical review. In: Bergmann M, Gutow L, Klages M. editors. *Marine Anthropogenic Litter*. Cham: Springer International Publishing; 2015. p.325-340.
 30. Mendoza LMR, Balcer M. Microplastics in freshwater environments: a review of quantification assessment. *TrAC-Trends Analyt Chem*. 2019; 113:

- 402-408.
31. EUCommission. Commission Recommendation of 18 October 2011 on the Definition of Nanomaterial (2011/696/EU), Off J Eur Union L275. 2011. Available: https://ec.europa.eu/research/industrial_technologies/pdf/policy/commission-recommendation-on-the-definition-of-nanomater-18102011_en.pdf [accessed 27 August 2020].
 32. Masura J, Baker JE, Foster GD, Arthur C, Her-ring C. Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recom-mendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments. 2015. Available: [https:// repository.library.noaa.gov/view/noaa/10296](https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/10296) [accessed 27 August 2020].
 33. Naik RK, Naik MM, D'Costa PM, Shaikh F. Microplastics in ballast water as an emerging source and vector for harmful chemicals, antibiotics, metals, bacterial pathogens and HAB species: A potential risk to the marine environment and human health. *Mar Pollut Bull.* 2019; 149: 110525.
 34. Zhang Y, Kang S, Allen S, Allen D, Gao T, Sil-lanpää M. Atmospheric microplastics: A review on current status and perspectives. *Earth Sci Rev.* 2020; 203: 103118.
 35. Browne MA, Crump P, Niven SJ, Teuten E, Tonkin A, Galloway T, Thompson R. Accumula-tion of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks. *Environ Sci Technol.* 2011; 45(21): 9175-9179.
 36. Cole M, Lindeque P, Halsband C, Galloway TS. Microplastics as contaminants in the marine envi-ronment: a review. *Mar Pollut Bull.* 2011; 62: 2588-2597.
 37. Fackelmann G, Sommer S. Microplastics and the gut microbiome: how chronically exposed species may suffer from gut dysbiosis. *Mar Pollut Bull.* 2019; 143: 193-203.
 38. Wang J, Tan Z, Peng J, Qiu Q, Li M. The behav-iors of microplastics in the marine environment. *Mar Environ Res.* 2016; 113: 7-17.
 39. Browne MA, Galloway T, Thompson R. Micro-plastic-an emerging contaminant of potential con-cern? *Integr Environ Assess Manag.* 2007; 3: 559-561.
 40. Guo X, Wang J. The chemical behaviors of micro-plastics in marine environments: a review. *Mar Poll Bull.* 2019; 142: 1-14.
 41. Faris J, Hart K. Seas of debris: a summary of the third international conference on marine debris. Alaska Fisheries Science Center. 1994.
 42. Mani T, Hauk A, Walter U, Burkhardt-Holm P. Microplastics profile along the Rhine River. *Sci Rep.* 2015; 5: 17988.
 43. Wagner M, Scherer C, Alvarez-Muñoz D, Brenn-holt N, Bourrain X, Buchinger S, et al. Microplas-tics in freshwater ecosystems: what we know and what we need to know. *Environ Sci Eur.* 2014; 26(1): 1-9.
 44. Thompson RC. Microplastics in the marine envi-ronment: sources, consequences and solutions. In: Bergmann M, Gutow L, Klages M. editors. *Marine Anthropogenic Litter.* Cham: Springer International Publishing; 2015. p. 185-200.
 45. Ng EL, Lwanga EH, Eldridge SM, Johnston P, Hu HW, Geissen V, Chen D. An overview of micro-plastic and nanoplastic pollution in agroecosys-tems. *Sci Total Environ.* 2018; 627: 1377-1388.
 46. Zhang H. Transport of microplastics in coastal seas. *Estuar Coast Shelf Sci.* 2017; 199: 74-86.
 47. Bell JD, Watson RA, Ye Y. Global fishing capac-ity and fishing effort from 1950 to 2012. *Fish.* 2017; 18: 489-505.
 48. Boucher J, Friot D. Primary Microplastics in the Oceans: a Global Evaluation of Sources. Gland, Switzerland: IUCN (International Union for Con-servation of Nature); 2017. p. 20-21.
 49. Moore CJ, Lattin GL, Zellers AF. Working our way upstream: a snapshot of landbased contribu-tions of plastic and other trash to coastalwaters and beaches of Southern California. Proc. the Plastic Debris Rivers to Sea Conference, Long Beach, California, USA, 2005.
 50. Lechner A, Keckeis H, Lumesberger-Loisl F, Zens B, Krusch R, Tritthart M, et al. The Danube so colourful: a potpourri of plastic litter outnumbers fish larvae in Europe's second largest river. *Envi-ron Pollut.* 2014; 188: 177-181.
 51. Wright SL, Kelly FJ. Plastic and human health: a micro issue? *Environ Sci Technol.* 2017; 51: 6634-6647.
 52. Alimi OS, Farner BJ, Hernandez LM, Tufenkji N. Microplastics and nanoplastics in aquatic environ-ments: aggregation, deposition, and enhanced con-taminant transport. *Environ Sci Technol.* 2018; 52: 1704-1724.
 53. Sherrington C, Darrah C, Hann S, Cole G, Corbin M. Study to support the development of measures to combat a range of marine litter sources. Report for European Commission DG Environment. 2016. Available: <https://www.ccb.se/documents/>

- ML_background/MSFD%2520Measures%2520to%2520Combat%2520Marine%2520Litter.pdf [accessed 27 August 2020].
54. Rochman CM, Kross SM, Armstrong JB, Bogan MT, Darling ES, Green SJ, et al. Scientific evidence supports a ban on microbeads. *Environ Sci Technol.* 2015; 49: 10759-10761.
 55. Lusher AL, Burke A, O'Connor I, Officer R. Microplastic pollution in the Northeast Atlantic Ocean: validated and opportunistic sampling. *Mar Pollut Bull.* 2014; 88: 325-333.
 56. Moore CJ, Moore SL, Leecaster MK, Weisberg SB. A comparison of plastic and plankton in the north Pacific central gyre. *Mar Pollut Bull.* 2001; 42: 1297-1300.
 57. Suaria G, Avio CG, Lattin G, Regoli F, Aliani S. Floating microplastics in the South adriatic sea. In: Baztan J, Jorgensen B, Pahl S, Thompson RC, Vanderlinden J-P. editors. MICRO 2016. Fate and Impact of Microplastics in Marine Ecosystems. Oxford: Elsevier; 2016. p.51.
 58. Pan Z, Guo HG, Chen HZ, Wang S, Sun X, Zou Q, et al. Microplastics in the Northwestern Pacific: abundance, distribution, and characteristics. *Sci Total Environ.* 2019; 650: 1913-1922.
 59. Abayomi OA, Range P, Al-Ghouti MA, Obbard JP, Almeer SH, Ben-Hamadou R. Microplastics in coastal environments of the Arabian Gulf. *Mar Pollut Bull.* 2017; 124(1): 181-188.
 60. Isobe A, Uchida K, Tokai T, Iwasaki S. East Asian Seas: a hot spot for pelagic microplastics. *Mar Pollut Bull.* 2015; 101: 618-623.
 61. Frias JPGL, Otero V, Sobral P. Evidence of microplastics in samples of zooplankton from Portuguese coastal waters. *Mar Environ Res.* 2014; 95: 89-95.
 62. Zhang W, Zhang S, Wang J, Wang Y, Mu J, Wang P, et al. Microplastic pollution in the surface waters of the Bohai Sea, China. *Environ. Pollut.* 2017; 231: 541-548.
 63. Vianello A, Boldrin A, Guerriero P, Moschino V, Rella R, Sturaro A, et al. Microplastic particles in sediments of Lagoon of Venice, Italy: first observations on occurrence, spatial patterns and identification. *Estuar Coast Shelf Sci.* 2013; 130: 54-61.
 64. Frias JPGL, Gago J, Otero V, Sobral P. Microplastics in coastal sediments from Southern Portuguese shelf waters. *Mar Environ Res.* 2016; 114: 24-30.
 65. Liu P, Zhan X, Wu X, Li J, Wang H, Gao S. Effect of weathering on environmental behavior of microplastics: Properties, sorption and potential risks. *Chemosphere.* 2020; 242: 125193.
 66. Morét-Ferguson S, Law KL, Proskurowski G, Murphy EK, Peacock EE, Reddy CM. The size, mass, and composition of plastic debris in the western North Atlantic Ocean. *Mar Pollut Bull.* 2010; 60: 1873-1878.
 67. Claessens M, Van Cauwenberghe L, Vandegehuchte MB, Janssen CR. New techniques for the detection of microplastics in sediments and field collected organisms. *Mar Pollut Bull.* 2013; 70(1-2): 227-233.
 68. Reisser JW, Slat B, Noble KD, Plessis KD, Epp M, Proietti MC, et al. The vertical distribution of buoyant plastics at sea: an observational study in the North Atlantic Gyre. *Biogeosciences.* 2015; 12: 1249-1256.
 69. Lusher AL, Tirelli V, O'Connor I, Officer R. Microplastics in Arctic polar waters: the first reported values of particles in surface and sub-surface samples. *Sci Rep.* 2015; 5: 14947.
 70. Lusher AL, Hamandez-Milian G, O'Brien J, Berrow S, O'Connor I, Officer R. Microplastic and macroplastic ingestion by a deep diving, oceanic cetacean: the True's beaked whale *Mesoplodon mirus*. *Environ Pollut.* 2015; 199: 185-191.
 71. Martin J, Lusher A, Thompson RC, Morley A. The deposition and accumulation of microplastics in marine sediments and bottom water from the Irish continental shelf. *Sci Rep.* 2017; 7: 1-9.
 72. Kane IA, Clare MA. Dispersion, accumulation, and the ultimate fate of microplastics in deep-marine environments: a review and future directions. *Front Earth Sc-Switz.* 2019; 7: 1-27.
 73. Barnes DKA, Francois G, Thompson RC, Barlaz M. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philos Trns R Soc Lond Ser B Biol Sci.* 2009; 364: 1985-1998.
 74. Peng L, Fu D, Qi H, Lan CQ, Yu H, Ge C. Micro-and nano-plastics in marine environment: Source, distribution and threats - A review. *Sci Total Environ.* 2020; 698: 134254.
 75. Vermeiren P, Munoz CC, Ikejima K. Sources and sinks of plastic debris in estuaries: a conceptual model integrating biological, physical and chemical distribution mechanisms. *Mar Pollut Bull.* 2016; 113: 7-16.
 76. Fischer EK, Paglialonga L, Czech E, Tamminga M. Microplastic pollution in lakes and lake shoreline sediments-a case study on Lake Bolsena and Lake Chiusi (central Italy). *Environ Pollut.* 2016;

- 213: 648-657.
77. Free CM, Jensen OP, Mason SA, Eriksen M, Williamson NJ, Boldgiv B. High-levels of microplastic pollution in a large, remote, mountain lake. *Mar Pollut Bull.* 2014; 85: 156-163.
78. Besseling E, Quik JTK, Sun M, Koelmans AA. Fate of nano-and microplastic in freshwater systems: a modeling study. *Environ Pollut.* 2017; 220: 540-548.
79. Bakir A, Rowland SJ, Thompson RC. Transport of persistent organic pollutants by microplastics in estuarine conditions. *Estuar Coast Shelf Sci.* 2014a; 140: 14-21.
80. Goldstein MC, Rosenberg M, Cheng L. Increased oceanic microplastic debris enhances oviposition in an endemic pelagic insect. *Biol Lett.* 2012; 8: 817-820.
81. Lebreton L, Slat B, Ferrari F, Sainte-Rose B, Aitken J, Marthouse R, et al. Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Sci Rep.* 2018; 8(1): 1-15.
82. Eo S, Hong SH, Song YK, Lee J, Lee J, Shim WJ. Abundance, composition, and distribution of microplastics larger than 20 μm in sand beaches of South Korea. *Environ Pollut.* 2018; 238: 894-902.
83. Kunz A, Walther BA, Löwemark L, Lee YC. Distribution and quantity of microplastic on sandy beaches along the northern coast of Taiwan. *Mar Pollut Bull.* 2016; 111: 126-135.
84. Lo HS, Xu X, Wong CY, Cheung SG. Comparisons of microplastic pollution between mudflats and sandy beaches in Hong Kong. *Environ Pollut.* 2018; 236: 208-217.
85. Fauziah SH, Liyana IA, Agamuthu P. Plastic debris in the coastal environment: The invincible threat? Abundance of buried plastic debris on Malaysian beaches. *Waste Manage Res.* 2015; 33(9): 812-821.
86. Desforges JPW, Galbraith M, Ross PS. Ingestion of microplastics by zooplankton in the Northeast Pacific Ocean. *Arch Environ Contam Toxicol.* 2015; 69(3): 320-330.
87. Critchell K, Lambrechts J. Modelling accumulation of marine plastics in the coastal zone; what are the dominant physical processes? *Estuar Coast Shelf Sci.* 2016; 171: 111-122.
88. Lagarde F, Olivier O, Zanella M, Daniel P, Hiard S, Caruso A. Microplastic interactions with freshwater microalgae: heteroaggregation and changes in plastic density appear strongly dependent on polymer type. *Environ Pollut.* 2016; 215: 331-339.
89. Chubarenko I, Bagaev A, Zobkov M, Esiukova E. On some physical and dynamical properties of microplastic particles in marine environment. *Mar Pollut Bull.* 2016; 108: 105-112.
90. Kowalski N, Reichardt AM, Waniek JJ. Sinking rates of microplastics and potential implications of their alteration by physical, biological, and chemical factors. *Mar Pollut Bull.* 2016; 109(1): 310-319.
91. Woodall LC, Sanchez-Vidal A, Canals M, Paterson GLJ, Coppock R, Sleight V, et al. The deep sea is a major sink for microplastic debris. *R Soc Open Sci.* 2014; 1(4): 140317.
92. Nel HA, Froneman PW. A quantitative analysis of microplastic pollution along the South-Eastern coastline of South Africa. *Mar Pollut Bull.* 2015; 101: 274-275.
93. Kanhai LDK, Johansson C, Frias JPGL, Gardfeldt K, Thompson RC, O'Connor I. Deep sea sediments of the Arctic Central Basin: a potential sink for microplastics. *Deep Sea Res Part I Oceanogr.* Res. Pap. 2019; 145: 137-142.
94. Wang J, Wang M, Ru S, Liu X. High levels of microplastic pollution in the sediments and benthic organisms of the South Yellow Sea, China. *Sci Total Environ.* 2019; 651: 1661-1669.
95. Brennecke D, Duarte B, Paiva F, Caçador I, Canning-Clode J. Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment. *Estuar Coast Shelf Sci.* 2016; 178: 189-195.
96. Rochman CM, Hoh E, Kurobe T, Teh SJ. Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic stress. *Sci Rep.* 2013; 3: 3263.
97. Laist DW. Overview of the biological effects of lost and discarded plastic debris in the marine environment. *Mar Pollut Bull.* 1987; 18(6): 319-326.
98. Ryan PG, Connell AD, Gardner BD. Plastic ingestion and PCBs in seabirds: is there a relationship? *Mar Pollut Bull.* 1988; 19(4): 174-176.
99. Derraik JG. The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. *Mar Pollut Bull.* 2002; 44: 842-852.
100. United Nations Environment Programme. UNEP Frontiers 2016 Report: Emerging Issues of Environmental Concern. 2016. Available: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7664/Frontiers_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y [accessed 27 August 2020].
101. Li WC, Tse HF, Fok L. Plastic waste in the

- marine environment: a review of sources, occurrence and effects. *Sci Total Environ.* 2016; 566: 333-349.
102. Ory NC, Sobral P, Ferreira JL, Thiel M. Amber-stripe scad *Decapterus muroadsi* (Carangidae) fish ingest blue microplastics resembling their copepod prey along the coast of Rapa Nui (Easter Island) in the South Pacific subtropical gyre. *Sci Total Environ.* 2017; 586: 430-437.
 103. Wright SL, Thompson RC, Galloway TS. The physical impacts of microplastics on marine organisms: a review. *Environ Pollut.* 2013; 178: 483-492.
 104. Nelms SE, Galloway TS, Godley BJ, Jarvis DS, Lindeque PK. Investigating microplastic trophic transfer in marine top predators. *Environ Pollut.* 2018; 238: 999-1007.
 105. Caron AG, Thomas CR, Berry KL, Motti CA, Ariel E, Brodie JE. Ingestion of microplastic debris by green sea turtles (*Chelonia mydas*) in the Great Barrier Reef: validation of a sequential extraction protocol. *Mar Pollut Bull.* 2018; 127: 743-751.
 106. Hans B, Hollman PCH, Peters RJB. Potential health impact of environmentally released micro- and Nanoplastics in the human food production chain: experiences from Nanotoxicology. *Environ Sci Technol.* 2015; 49: 8932-8947.
 107. Ribeiro F, Garcia AR, Pereira BP, Fonseca M, Mestre NC, Fonseca TG, et al. Microplastics effects in *Scrobicularia plana*. *Mar Pollut Bull.* 2017; 122(1-2): 379-391.
 108. Browne MA, Dissanayake A, Galloway TS, Lowe DM, Thompson RC. Ingested microscopic plastic translocates to the circulatory system of the mussel, *Mytilus edulis* (L.). *Environ Sci Technol.* 2008; 42: 5026-5031.
 109. Kolandhasamy P, Su L, Li J, Qu X, Jabeen K, Shi H. Adherence of microplastics to soft tissue of mussels: a novel way to uptake microplastics beyond ingestion. *Sci Total Environ.* 2018; 610: 635-640.
 110. Lu Y, Zhang Y, Deng Y, Jiang W, Zhao Y, Geng J, et al. Uptake and accumulation of polystyrene microplastics in zebrafish (*Danio rerio*) and toxic effects in liver. *Environ Sci Technol.* 2016; 50(7): 4054-4060.
 111. Cole M, Galloway TS. Ingestion of nanoplastics and microplastics by Pacific oyster larvae. *Environ Sci Technol.* 2015; 49(24): 14625-14632.
 112. Gray AD, Weinstein JE. Size- and shape-dependent effects of microplastic particles on adult daggerblade grass shrimp (*Palaemonetes pugio*). *Environ Toxicol Chem.* 2017; 36(11): 3074-3080.
 113. Xu S, Ma J, Ji R, Pan K, Miao AJ. Microplastics in aquatic environments: Occurrence, accumulation, and biological effects. *Sci Total Environ.* 2020; 703: 134699.
 114. Van Franeker JA, Bell PJ. Plastic ingestion by petrels breeding in Antarctica. *Mar Pollut Bull.* 1988; 19(12): 672-674.
 115. Von Moos N, Burkhardt-Holm P, Köhler A. Uptake and effects of microplastics on cells and tissue of the blue mussel *Mytilus edulis* L. after an experimental exposure. *Environ Sci Technol.* 2012; 46(20): 11327-11335.
 116. Galloway TS, Cole M, Lewis C. Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem. *Nat Ecol Evol.* 2017; 1: 116.
 117. Teuten EL, Rowland SJ, Galloway TS, Thompson RC. Potential for plastics to transport hydrophobic contaminants. *Environ Sci Technol.* 2007; 41: 7759-7764.
 118. Eerkes-Medrano D, Thompson RC, Aldridge DC. Microplastics in freshwater systems: a review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs. *Water Res.* 2015; 75: 63-82.
 119. Teuten EL, Saquing JM, Knappe DRU, Barlaz MA, Jonsson S, Björn A, et al. Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci.* 2009; 364: 2027-2045.
 120. Bakir A, Rowland SJ, Thompson RC. Enhanced desorption of persistent organic pollutants from microplastics under simulated physiological conditions. *Environ Pollut.* 2014; 185: 16-23.
 121. Chen Q, Yin D, Jia Y, Schiwiy S, Legradi J, Yang S, et al. Enhanced uptake of BPA in the presence of nanoplastics can lead to neurotoxic effects in adult zebrafish. *Sci Total Environ.* 2017; 609: 1312-1321.
 122. M'Rabet C, Pringault O, Zmerli-Triki H, Gharbia HB, Couet D, Yahia OK-D. Impact of two plastic-derived chemicals, the Bisphenol A and the di-2-ethylhexyl phthalate, exposure on the marine toxic dinoflagellate *Alexandrium pacificum*. *Mar Pollut Bull.* 2018; 126: 241-249.
 123. Halden RU. Plastics and health risks. *Annu Rev Publ Health.* 2010; 31: 179-194.
 124. Greenpeace Scientific Research Team. Plastics in seafood we eat. 2016. Available: <https://way->

- back.archive-it.org/9650/20200501035258/http://p3-raw.greenpeace.org/korea/Global/korea/publications/reports/oceans/2016/20160706-Science-Report-Web-final.pdf [accessed 27 August 2020].
125. Hirai H, Takada H, Ogata Y, Yamashita R, Mizukawa K, Saha M, et al. Organic micropollutants in marine plastics debris from the open ocean and remote and urban beaches. *Mar Pollut Bull.* 2011; 62: 1683-1692.
 126. Rios LM, Moore C, Jones PR. Persistent organic pollutants carried by synthetic polymers in the ocean environment. *Mar Pollut Bull.* 2007; 54: 1230-1237.
 127. Deng Y, Zhang Y, Lemos B, Ren H. Tissue accumulation of microplastics in mice and biomarker responses suggest widespread health risks of exposure. *Sci Rep.* 2017; 7: 46687.
 128. Filella M, Turner A. Observational study unveils the extensive presence of hazardous elements in beached plastics from Lake Geneva. *Front Environ Sci.* 2018; 6: 1.
 129. Holmes LA, Turner A, Thompson RC. Adsorption of trace metals to plastic resin pellets in the marine environment. *Environ Pollut.* 2012; 160: 42-48.
 130. Johansen MP, Prentice E, Cresswell T, Howell N. Initial data on adsorption of Cs and Sr to the surfaces of microplastics with biofilm. *J Environ Radioact.* 2018; 190: 130-133.
 131. Johansen MP, Cresswell T, Davis J, Howard DL, Howell NR, Prentice E. Biofilm-enhanced adsorption of strong and weak cations onto different microplastic sample types: use of spectroscopy, microscopy and radiotracer methods. *Water Res.* 2019; 158: 392-400.
 132. Wang Q, Zhang Y, Wangjin X, Wang Y, Meng G, Chen Y. The adsorption behavior of metals in aqueous solution by microplastics effected by UV radiation. *J Environ Sci.* 2020; 87: 272-280.
 133. Qiao R, Lu K, Deng Y, Ren H, Zhang Y. Combined effects of polystyrenemicroplastics and natural organic matter on the accumulation and toxicity of copper in zebrafish. *Sci Total Environ.* 2019; 682: 128-137.
 134. Setälä O, Norkko J, Lehtiniemi M. Feeding type affects microplastic ingestion in a coastal invertebrate community. *Mar Pollut Bull.* 2016; 102: 95-101.
 135. Scherer C, Brennholt N, Reifferscheid G, Wagner M. Feeding type and development drive the ingestion of microplastics by freshwater invertebrates. *Sci Rep.* 2017; 7: 17006.
 136. Farrell P, Nelson K. Trophic level transfer of microplastic: *Mytilus edulis* (L.) to *Carcinus maenas* (L.). *Environ Pollut.* 2013; 177: 1-3.
 137. Watts AJR, Lewis C, Goodhead RM, Beckett SJ, Moger J, Tyler CR, et al. Uptake and retention of microplastics by the shore crab *Carcinus maenas*. *Environ. Sci. Technol.* 2014; 48: 8823-8830.
 138. Romeo T, Pietro B, Pedà C, Consoli P, Andaloro F, Fossi MC. First evidence of presence of plastic debris in stomach of large pelagic fish in the Mediterranean Sea. *Mar Pollut Bull.* 2015; 95: 358-361.
 139. Carbery M, O'Connor W, Thavamani P. Trophic transfer of microplastics and mixed contaminants in the marine food web and implications for human health. *Environ Int.* 2018; 115: 400-409.
 140. Smith M, Love DC, Rochman CM, Neff RA. Microplastics in seafood and the implications for human health. *Curr Environ Health Rep.* 2018; 5: 375-386.
 141. Takada H, Tanaka K. Microplastic fragments and microbeads in digestive tracts of planktivorous fish from urban coastal waters. *Sci Rep.* 2016; 6: 34351.
 142. Jefferson M. Whither plastics? - Petrochemicals, plastics and sustainability in a garbage-riddled world. *Energy Res Soc Sci.* 2019; 56: 101229.
 143. Liebmann B, Köppel S, Königshofer P, Bucsics T, Reiberger T, Schwabl P. Assessment of microplastic concentrations in human stool final results of a prospective study. Proc. the Conference on Nano and Microplastics in Technical and Freshwater Systems, October 28-31, Ascona, Switzerland, 2018.
 144. Van Cauwenberghe L, Janssen CR. Microplastics in bivalves cultured for human consumption. *Environ Pollut.* 2014; 193: 65-70.
 145. Schirinzi GF, Pérez-Pomeda I, Sanchís J, Rossini C, Farré M, Barceló D. Cytotoxic effects of commonly used nanomaterials and microplastics on cerebral and epithelial human cells. *Environ Res.* 2017; 159: 579-587.
 146. Vethaak AD, Leslie HA. Plastic debris is a human health issue. *Environ Sci Technol.* 2016; 50, 6825-6826.

<저자정보>

한선기(교수)