

Microplastics in the Marine Environment and Their Impacts on Human Health

Jia Bak, Hyun Bon Kang and Yun-Sik Choi*

Department of Pharmacy, Kyungsung University, Nam-Gu, Busan 48434, Korea

Received April 6, 2021 / Revised April 21, 2021 / Accepted April 21, 2021

Microplastics are fragments of any type of plastic with a size less than 5 mm. Ocean pollution by microplastics is now a worldwide concern in relation to marine ecosystems and human health. The widespread contamination by microplastics means that they can be ingested by and accumulated in diverse species of wildlife, such as fish, mussels, oysters, clams, and scallops. Once ingested, the microplastics can be observed in the intestines, liver, and kidney, and even in the brain. Seafood is one of the major sources of protein intake in humans; therefore, seafood consumption could be pathway for human microplastics exposure. Accumulating evidence indicates that repeated oral exposure to microplastics induces pathologic and functional changes in the reproductive, cardiac, gastrointestinal, endocrine, and even nervous systems of rodents. Maternal exposure to microplastics during gestation and lactation alters metabolic homeostasis in the offspring. Given that seafood provides more than 20% of the total protein intake by over 310 million people worldwide, a reasonable assumption is that microplastics could be substantially accumulated in the human body and impair physiological function. In this review, we have summarized the current status of microplastics contamination in the ocean, their accumulation and toxicities in marine animals and rodents, their exposure to humans, and their potential impacts on human health.

Key words : Human health, microplastics, ocean, seafood, toxicity

서론

약 100여년 전인 1907년에 최초의 인공 플라스틱인 베이클라이트(Bakelite)가 합성된 이후로 다양한 플라스틱 제형이 개발되어 인류의 삶은 혁명적으로 바뀌게 되었다[27]. 플라스틱이 상업적으로 이용되기 시작한 것은 1930~1940년대이나 1950년대 들어 대량생산에 이르게 되었고 이후 플라스틱의 생산은 급속히 증가하였다[6]. Geyer 등[31]에 의하면 1950년부터 2015년까지 약 83억 톤의 플라스틱이 생산되었고, 그 이후로 약 63억 톤이 생산된 것으로 추정되었다. 이 중 재사용된 플라스틱은 약 9%에 불과하였고, 12%는 소각되었으며 나머지 79%는 매립되거나 자연환경으로 유출되었다[31].

연간 생산되는 플라스틱의 약 10%는 해양 환경으로 유출되는 것으로 추정된다[57]. 해양으로 유출되는 플라스틱은 포장용 플라스틱, 그물, 자동차 타이어 등 다양하며 광분해, 파도와 모래에 의한 마모, 동물 또는 물과의 직접적 접촉에 의해 절단되어 크기에 따라 나노플라스틱(nanoplastic: 직경 0.1 μm 이하), 미세플라스틱(microplastic: 직경 0.1 μm ~5 mm) 또는 대

형플라스틱(macroplastic: 직경 5 mm 이상)을 생성한다[21]. 해양을 비롯하여 자연환경으로 유출된 플라스틱은 약 100년간 남아 있는 것으로 알려져 있어 플라스틱에 의한 환경 오염은 인간뿐 만 아니라 지구에 사는 모든 생명체에 큰 위협이 되고 있다[13]. 특히 최근 들어 해양의 나노플라스틱과 미세플라스틱이 어류는 물론, 조개, 해조류, 두족류 등 거의 모든 해양 생명체에 영향을 끼치는 것으로 보고되고 있다. 따라서, 본 총설에서는 미세플라스틱의 해양 생명체에 미치는 영향에 관한 최근의 연구 동향과 인간에게의 노출 가능성 및 질병과의 관련성에 대해 논하고자 한다.

본론

플라스틱의 정의 및 특성

플라스틱의 정의는 매우 다양하나, 일반적으로 인공적으로 합성된 유기 폴리머(organic polymer)를 일컫는다. 플라스틱은 열적특성에 따라 열가소성 수지(thermoplastic resin)와 열경화성 수지(thermosetting resin)로 분류한다. 열가소성 수지는 열을 가할 때 쉽게 변형이 일어나는 플라스틱을 말하고 열경화성 수지는 열에 비교적 강한 성질을 갖고 있다. 특수 목적 이외에 일상 생활에서 주로 사용되고 있는 플라스틱은 polyethylene (PE), polyethylene terephthalate (PET), polypropylene (PP), polystyrene (PS), 그리고 polyvinyl chloride (PVC)가 있다[25]. 플라스틱은 단순한 폴리머 구조를 갖고 있으나 변성이 쉽고 비교적 가벼움에도 불구하고 높은 강도를

*Corresponding author

Tel : +82-51-633-4890, Fax : +82-51-663-4809

E-mail : tiana@ks.ac.kr

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

갖고 있다. 또한, 잘 부식되지 않고 투명하게 만들 수 있으며 내구성이 좋은 특징을 갖고 있다.

플라스틱의 해양 유출

현대사회에서 플라스틱은 포장재, 건축자재, 음료용기 등 일상생활에서 흔히 사용되는 가장 중요한 산업제품 중 하나이다. 2018년 기준으로 전 세계 플라스틱 생산량은 3억 5,900만 톤에 이르렀고 이 중 중국이 약 25%를 생산하였으며 유럽은 6,200만 톤을 생산하였다[59]. 미국에서는 생산량이 1960년 39만 톤에서 2018년에는 3,568만 톤으로 약 91.5배 증가하였다. 이 중 75.6%는 매립되었고 재사용한 비율은 약 8.7%에 불과하였다[62]. 전 세계적으로 해양으로 유출되는 플라스틱의 양을 정확히 알기는 어려우나 연간 약 800만 톤의 플라스틱이 해양으로 유출되는 것으로 알려져 있다[29]. 또한 지금의 추세로 판단할 때 2025년에는 해양의 플라스틱 양은 약 2배가 되어 2억 5,000만 톤에 이를 것으로 추정하고 있다[43]. 해양의 플라스틱은 75~90%가 육지에서 유래하며 그물, 양식장 등 해양 유래 플라스틱은 상대적으로 적어 약 10~25%로 추정되었다[19, 29]. 육지-기원의 플라스틱 유출은 주로 강을 통해 일어난다. 최근의 연구에 따르면 전 세계에서 연간 115만 톤에서 241만 톤의 플라스틱이 강을 통해 유출된다. 주목할 만한 점은 전 세계에서 플라스틱 유출이 심각한 상위 20개 강 중 67%가 아시아 지역에 위치하고 있고 이 중 6개가 중국에 위치하고 있다[50]. 또한 아시아 지역의 강을 통한 플라스틱 유출이 전 세계 강을 통한 플라스틱 유출의 약 86%를 차지하고 있다. 이러한 현상은 아시아 강 유역의 인구 밀도가 높고, 플라스틱 제품 생산이 많으며 강수량이 많아 강을 통한 유출이 용이하기 때문으로 분석된다[50]. 따라서 플라스틱 오염으로 인한 피해를 줄이기 위해서는 육지에서 유래하는 플라스틱 배출을 획기적으로 줄이는 것이 무엇보다도 중요하다.

해양에서 미세플라스틱의 생성

미세플라스틱에는 세정, 화장품 등 산업용으로 사용하기 위해 생산되는 1차 미세플라스틱(primary microplastics)과 해양이나 지표면에서 보다 큰 크기의 플라스틱이 물리적 절단(physical breakdown), 광분해(photodegradation), 화학적 퇴적(chemical deposition), 생물학적 분해(biological degradation) 등을 통해 생성되는 2차 미세플라스틱(secondary microplastics)이 있다[22, 67]. 해양에서 물리적 절단에 의한 2차 미세플라스틱의 생성은 포말대(swash zone)에서 가장 활발하다. 포말대는 해안가에서 파도가 육지와 만나며 처오름과 처내림이 발생하는 영역으로 육상에서 배출된 플라스틱이 많이 관찰되고 파도에 따라 육지와 충돌과 마찰이 발생하는 영역이다. 특히 해양에 가장 많이 노출되어 있는 polystyrene이 포말대에서와 같은 물리적 조건에서 쉽게 절단되어 미세플라스틱을 형성하는 것으로 밝혀졌다[20]. 해양에서 2차 미세플라스틱의 생성은 생성원인이 중복될 때 촉진된다. 예를 들어, 물의 흐름에 따른 기계적 자극과 함께 자외선을 조사하면 거대 플라스틱의 절단에 따른 미세플라스틱의 생성이 2.3-3배 증가하는 것으로 보고되었다[36].

해양의 미세 플라스틱 오염 실태

해양의 미세 플라스틱 오염은 인간에 의해 사용 후 해양으로 유입된 1차 미세 플라스틱과 해양으로 유출된 큰 플라스틱의 물리적, 화학적 절단에 의해 생성되는 2차 미세 플라스틱의 합으로써 전 세계의 모든 바다에서 관찰된다(Table 1). 먼저 프랑스, 벨기에 그리고 독일 북부 약 80 km 해안에서 2011년에 채취된 샘플에서 미세 플라스틱(<1 mm)의 농도는 해수에서는 0.4 ± 0.3 particles/L (range: 0.0-0.8 particles/L), 침전물(sediment)에서는 6.0 ± 5.7 particles/kg dry (range: 1.5-23.4 particles/L)를 기록하였다[70]. 미국 샌프란시스코 만에서 채취된 해수에서는 평균 700,000 particles/km² (range: 15,000-2,000,000 particles/km²)의 미세플라스틱이 발견되었고 이러한 수치는 Great Lakes, Chesapeake Bay, Salish Sea 등 유사한 시기에 다른 북미 지역에서 보고된 미세플라스틱 농도보다 높다[70]. 남미의 브라질 연안에서도 미세 플라스틱 오염이 심각하다. 2016년에 브라질 수도 리오데자네이로 Guanabara Bay에서 채취된 표층수의 미세플라스틱 농도는 $1.40\text{--}21.3$ particles/m³를 기록하였다. 또한 미세 플라스틱의 종류를 분석한 결과 81.7%가 polyethylene이었고 16.20%는 polypropylene로 나타났다[28]. Polyethylene과 polypropylene은 각각 전 세계 플라스틱 생산의 38%와 24%를 차지한다[3]. 비교적 청정 해안으로 생각되는 호주 연안에서도 미세 플라스틱 농도가 측정된 바 있다. 2013년에 보고된 논문에서 호주 연안의 표층에는 $4,256.4$ particles/km²의 플라스틱이 관찰되었으며 이 중 약 98.5%는 polyethylene, polypropylene이었다[66]. 그러나 해당 연구 보고에서 분석된 플라스틱이 주로 미세 플라스틱으로 제시 되었으나 정확한 비중은 제시되지 않았다. 최근 남아프리카 공화국에서 진행된 연구에서도 연안 150 km에서 채취한 샘플에서 미세 플라스틱의 농도는 평균 139 particles/m³ (range: 114-164 particles/m³)를 기록하였다[58]. 이러한 보고는 해양 미세플라스틱 오염이 주로 북미, 유럽, 아시아에서 보고되었으나 아프리카 대륙의 해안도 이미 미세 플라스틱 오염이 심각한 수준에 이르렀음을 의미한다.

2017년 통계를 기준으로 전 세계 플라스틱 생산량은 약 3억 4,800만 톤에 이르렀으며 이 중 아시아가 전체의 약 50.1%, 유럽이 18.5% 그리고 NAFTA에서 17.7%를 생산하였다. 아시아권에서는 중국이 전 세계 생산량의 약 29.4%를 생산하였고 일본이 3.9%로 그 뒤를 이었다[60]. 중국은 전 세계 플라스틱의 주요 생산국이며 주요 소비국이다. 2012년을 기준으로 중국은 약 4,800만 톤을 생산하였고 플라스틱 소비는 거의 6,600만 톤에 이르렀다[46]. 따라서 중국의 해변 및 연안에도 많은

Table 1. Summary of published studies providing data on microplastic contents in global major location and Korea

Location	Year sample collected	Microplastic contents	Reference
<i>Worldwide</i>			
French, Belgian and Dutch North Sea Coast	2011	Seawater: average 0.4 ± 0.3 particles/L Sediment: average 6.0 ± 5.7 particles/kg dry	[72]
San Francisco Bay	2015	$700,000 \pm 600,000$ particles/km ²	[61]
Guanabara Bay, Rio de Janeiro, Brazil	2016	$1.40\text{--}21.3$ particles/m ³	[28]
South Africa	2016, 2017	$114\text{--}164$ particles/m ³	[58]
Australia		$4,256.4$ particles/km ²	[66]
China	2014	$251\text{--}436$ particles/50 g dry	[64]
China	2018	Bohai Sea: $2.0\text{--}17.0$ items/50g dry Northern Yellow Sea: $4.0\text{--}14.0$ items/50 g dry Southern Yellow Sea: $2.0\text{--}7.0$ items/50 g dry	[76]
<i>Korea</i>			
Southern coast	2015	$1.12\text{--}1.64$ particles/m ³	[48]
Western coast	2016	$1.70\text{--}2.79$ particles/m ³	
Korea, Coast of Incheon		SML: $148,209$ item/m ³ ($53,706\text{--}294,937$ item/m ³) SSW: $1,600$ item/m ³ ($10\text{--}4,227$ item/m ³)	[10]
Near- and offshore environment of Geoje Island	2012	SML: $210,722$ item/m ³ SSW: $1,339$ item/m ³	[70]

미세 플라스틱이 축적되어 있을 것으로 추측되는데 중국 연안에서의 미세 플라스틱 오염도는 2014년에 이르러서야 보고가 시작되었다. 중국의 5개 해변(Shapawan, Haikou, Wanning, Sanya, Beihai)에서 2014년에 채취된 침전물에서 미세 플라스틱의 농도를 측정된 결과 침전물 50 g 당 최소 251개에서 최대 436개의 미세 플라스틱이 검출되었다[64]. 2018년도에는 보하이 해(Bohai Sea) 등 중국 연안의 72개 지점에서 침전물을 채취하여 분석한 결과가 보고되었다. 그 결과 보하이 해, 북부 황해 그리고 남부 황해에서 평균 미세 플라스틱의 양은 각각 171.8, 123.6 그리고 72.0 items/kg dry가 발견되었다[75]. 타입 별로 보면 전체의 93.88%가 섬유질이었고 약 71.06%는 지금 1 mm 미만의 입자였다.

우리나라 연안의 미세 플라스틱 오염 실태

우리나라도 최근 들어 해양 미세 플라스틱에 관한 관심이 증가하고 있다. 특히 전 세계에서 미세 플라스틱 배출 상위 20개 강(river) 중 6개가 중국의 강으로 조사된 바에서 알 수 있듯이 해양 미세 플라스틱 오염도가 낮지 않을 것으로 보고 있다. 2015-2016년에 각각 남부 해안과 서부 해안에서 조사된 결과에 따르면 남부 해안은 $1.12\text{--}1.64$ particles/m³, 서부 해안은 $1.70\text{--}2.79$ particles/m³를 기록하였다[48]. 미세 플라스틱의 크기는 주로 0.33-0.5 mm로 나타났다[48]. Chae 등[10]은 인천 연안에서 미세 플라스틱의 농도를 측정하여 발표하였다. 이 연구에서 표면해수층(표층 1 mm)은 평균값 $148,209$ item/m³와 $53,706\text{--}294,937$ item/m³의 범위값을 얻었다. 또한 해수층에서 hand net을 이용하여 채취한 결과 평균값 $1,600$ item/m³와 $10\text{--}4,227$ item/m³의 범위값을 얻었다. 또한 같은 해에 Song

등[70]은 거제 동부 연안에서 조사한 결과 총 미세플라스틱 농도가 표면 해수층은 $210,722$ item/m³, 해수층은 $1,339$ item/m³의 결과값을 얻었다(Table 1). 이러한 결과로 볼 때 우리나라도 1회용품 사용과 플라스틱 배출을 줄이고 재활용을 늘이는 등 많은 노력을 하고 있으나 이미 우리나라 연안의 미세 플라스틱 오염은 광범위하게 진행 되었음을 알 수 있다.

해양 생물 체내의 미세 플라스틱 노출 및 축적

미세 플라스틱은 이미 해양에 광범위하게 분포하며 다양한 생명체에 영향을 주고 있다. 특히 해양에서 생존하는 생선, 조개류, 갑각류, 연체동물 등 해산물들은 인간이 음식으로 사용하고 있는 주요 식자재로 이들 해양 생명자원에 노출된 미세 플라스틱은 인간에게 간접적으로 전이될 수 있는데 이는 뒤에서 논의하고자 한다.

미세 플라스틱이 건강에 미치는 영향은 크게 플라스틱의 주성분인 폴리머에 의한 영향, 플라스틱 제품을 생산할 때 첨가되는 첨가제(additives)에 의한 영향, 그리고 미세 플라스틱이 환경에 노출된 이후 흡착되는 화학적 오염물(chemical contaminants)에 의한 영향으로 구분할 수 있다[16, 34, 35, 77]. 따라서 해양 미세 플라스틱은 인간의 건강에 일차적인 위해 요인일 뿐 만 아니라 첨가제나 오염물에 의한 위해 경로를 제공할 수도 있어 과학계를 중심으로 많은 우려가 제기되고 있다[16]. 이에 따라 최근 수산물의 미세플라스틱 오염 현황에 대한 연구가 매우 활발하다. 특히 전 세계적으로 소비가 많은 갑각류, 조개, 담치 등에 대한 현황 연구가 주를 이루고 있다.

먼저 갑각류를 대상으로 진행된 연구를 살펴보면 Fan 등[23]은 베링해의 대게에서 평균 0.14 ± 0.08 particles/g의 미세

플라스틱이 발견되었다. 노르웨이의 새우(*Crangon allmanni*)는 미세플라스틱의 농도는 제시되지 않았으나 평균 65%의 개체에서 미세플라스틱이 발견되었다[9]. 반면 중국의 황해, 방글라데시 연안은 비교적 높은 미세 플라스틱 농도를 보였다. 예를 들어, 방글라데시 연안의 새우(*Metapenaeus Monoceros*)에서는 3.87 ± 1.05 particles/g의 미세 플라스틱이 발견되었고, 중국 황해 산 새우(*Crangon affinis*)에서는 무려 8.6 ± 2.6 particles/g의 미세 플라스틱이 검출되었다[38, 74]. 조개류에서는 중국 연안의 호두조개(*Acila mirabilis*)에서 평균 6.9 particles/g의 미세 플라스틱이 발견되었고, 2014년에 중국 상해 수산시장에서 구입한 9 종의 조개류에서는 미세 플라스틱 농도가 2.1-10.5 items/g의 범위로 발견되었다[51, 73]. 반면 미국 오레곤 주변 15개 해안에서 채집한 굴(*Crassostrea gigas*)과 조개(*Siliqua patula*)에서는 각각 0.35 ± 0.04 pieces/g, 0.16 ± 0.02 pieces/g의 미세 플라스틱이 발견되어 중국 연안과는 큰 차이를 나타냈다[7]. 프랑스 Pays de la Loire 마켓에서 구입 또는 2015년에 프랑스 서부 지역에서 채취한 담치(*Mytilus edulis*)에서는 미세 플라스틱을 분석한 결과 0.23 ± 0.09 particles/g의 농도를 보였다[63]. 또한 2015년 유럽의 Channel coast에서 채취된 담치에서는 46%가 미세 플라스틱을 함유하고 있었으며 농도는 0.15 ± 0.06 에서 0.25 ± 0.16 particles/g을 기록하여 Phuong 등[63]의 연구 결과와 유사한 수치를 나타냈다[37].

우리나라에서 주로 소비되는 조개류 중 굴(*Crassostrea gigas*), 담치(*Mytilus edulis*), 바지락(*Tapes philippinarum*), 그리고 가리비(*Patinopecten yessoensis*)에서의 미세 플라스틱 함유 조사 결과가 최근에 보고되었다(Table 2). 서울, 부산 그리고 광주 주요 어시장에서 구입하여 분석한 결과 바지락이 0.34 ± 0.31 particles/g (0.03 - 1.08 particles/g)으로 가장 높았고 그 다음으로 담치(0.12 ± 0.11 particles/g, 0 - 0.35 particles/g), 가리비(0.08 ± 0.08 particles/g, 0.01 - 0.17 particles/g), 굴(0.07 ± 0.06 particles/g, 0 - 0.19 particles/g)의 순이었다. 발견된 플라스틱은 총 14 종류로 polyethylene, polystyrene, polyester가 80% 이상을 차지하였다[12]. 우리나라 국민은 1인 당 평균적으로 바지락, 담치, 가리비, 굴을 일 평균 약 3.01 g을 섭취하는 것으로 알려져 있다. 이렇게 볼 때 우리나라 국민은

연간 이들 4개 조개류를 통해 약 212개의 미세 플라스틱을 섭취하는 것으로 추정된다[12].

또 다른 연구로 2019년 부산 지역의 시장에서 구입한 대합(*Meretrix lusoria*), 피조개(*Scapharca broughtonii*), 미더덕(*Styela clava*)의 미세 플라스틱 농도를 분석한 결과 모든 생물 종에서 미세 플라스틱이 검출되었다. 이를 농도별로 보면 대합은 0.08 particles/g, 피조개 0.05 particles/g, 미더덕은 0.12 particles/g을 기록하였다[8]. 다만 검출된 플라스틱은 100 μ m 범위까지 분석하였고, 크기가 100-300 μ m가 43%, 1,000-3,000 μ m 37%, 1-5 mm 16% 순으로 나타났으며 100 μ m 이하의 미세 플라스틱에 대한 오염도 있을 것으로 판단된다[8].

미세 플라스틱의 독성 및 미세 플라스틱 크기와의 상관성

2016년 UN 보고서에 따르면 약 800 종의 동물이 섭취나 얽힘(entanglement)에 의해 미세 플라스틱에 오염되어 있는데 이는 1977년에 비해 약 69%가 증가한 수치이다. 이 중 약 220 종은 미세 플라스틱 조각을 자연스럽게 섭취한다[69]. 미세 플라스틱에 의한 독성은 1차와 2차 미세 플라스틱 사이에 차이를 보인다. 예를 들어, 세 종류의 물벼룩(*Daphnia magna*, *Daphnia pulex*, *Ceriodaphnia dubia*)을 이용한 생식독성 연구에서 일차 미세플라스틱과 이차 미세플라스틱은 용량 의존적으로 생식 기능을 감퇴시켰으며 일차 미세플라스틱이 이차 미세플라스틱보다 독성이 보다 강한 것으로 보고되었다[44].

플라스틱에 의한 독성은 크기에도 상관성이 있는 것으로 보고되고 있다. 예를 들어, 평균 지름이 1 μ m 크기인 미세플라스틱과 1 mm 크기인 대형 플라스틱을 이용하여 해조류인 코스타툼 골편돌말(*Skeletonema costatum*)에서의 독성을 연구한 결과 대형 플라스틱에서는 성장을 억제하지 않았으나 미세 플라스틱은 독성이 강하여 성장이 최대 39.7% 억제되었다[79]. 이러한 크기와의 상관성은 동물세포에서도 관찰된다. 사람 세포를 이용한 실험에서 10~100 μ m 크기의 polystyrene 플라스틱은 유의한 독성을 나타내지 않았으나 460 nm 이하의 작은 polystyrene 미세플라스틱은 용혈작용을 일으키는 것으로 확인되었다[41]. 또한 미세플라스틱은 노출 24시간 이내에 사람 피부 섬유아세포와 단핵구의 세포질에서 발견되어 세포

Table 2. Summary of published studies providing data on microplastic contamination in seafood samples collected from market in Korea

Sample phylum/class	Sample species	Sampling location	Mean MP	Range	Composition	Reference
Oyster Mussel	<i>Crassostrea gigas</i>	Fishery market	0.07 ± 0.06 n/g	0-0.19 n/g	Polyethylene 24%	[12]
	<i>Mytilus edulis</i>	Fishery market	0.12 ± 0.11 n/g	0-0.35 n/g	Polypolypropylene 23%	
		Fishery market	0.34 ± 0.31 n/g	0.03-1.08 n/g	Polystyrene 22%	
		Fishery market	0.08 ± 0.08 n/g	0.01-0.17 n/g		
Clam	<i>Meretrix lusoria</i>	Fishery market	0.08 n/g			[8]
Blood arkshell	<i>Scapharca broughtonii</i>	Fishery market	0.05 n/g			
Warty sea squirt	<i>Wryela clava</i>	Fishery market	0.12 n/g			

내로 유입될 수 있는 것으로 보고되었다[41]. 미세 플라스틱의 세포 내 유입 기전은 아직까지 정확히 밝혀지지 않았으나 일반적으로 입자의 세포 내 유입은 크기와 표면 전하에 따라 다르며 이전의 연구들에서 700 nm 이하의 입자는 수용체 매개 엔도시토시스(endocytosis)에 의해 유입되고 이보다 큰 입자는 식작용에 의해 유입됨이 보고되었다[1, 32]. 따라서 미세 플라스틱의 경우에도 이와 유사한 기전으로 유입될 것으로 예상되나 추가적인 연구가 필요하다.

설치류에서 미세 플라스틱에 의한 독성

사람은 해산물 음식 섭취나 호흡에 의해 장기간 미세 플라스틱에 노출되므로 이와 유사한 조건의 동물 실험을 통해 미세 플라스틱의 위해성을 평가해야 한다. 그러나 설치류를 이용한 미세 플라스틱의 중기-장기 노출에 의한 독성 연구는 약 3-4년 전부터 진행되기 시작하였기 때문에 아직까지 연구 결과가 많지 않다. 특이한 점으로는 대부분 0.5-10 μm 크기의 polystyrene 입자를 이용하여 연구를 진행하였으며 투여 기간은 짧게는 4주에서 길게는 90일까지 설정하였다[4, 39, 41, 47, 53]. 독성 연구의 대상 기관은 생식기관, 심장기관, 소화기관, 신경계 등 다양하였다.

먼저 가장 많은 연구가 진행된 기관은 생식기관이다. Wistar rats를 이용한 연구에서 0.015, 0.15 또는 1.5 mg/kg의 미세 플라스틱을 90일간 투여했을 때 난소 과립층 세포(granulosa cells)가 pyroptosis 또는 apoptosis를 통해 사멸하는 것이 발견되었다[40]. 또한 여포세포의 감소, 과립층 세포의 산화적 인산화도 관찰되었다[4]. 수컷 생쥐에서는 0.5 μm 크기의 미세 플라스틱을 4주 또는 5주간 경구로 투입했을 때 부고환에서 정자 수의 감소와 testosterone의 감소가 관찰되었다[39, 47]. Wei 등[75]은 흰쥐에서 미세 플라스틱을 90일 간 투여한 후 심장 조직을 연구하였다. 그 결과 고농도 투여군에서 심장 모세혈관의 울혈(congestion), 미토콘드리아 cristae의 소실 등이 관찰되었다. 또한 심장 조직에서 미세 플라스틱 농도 의존적으로 산화적 손상이 증가하였다. 소화기에서는 미세 플라스틱을 5-6주간 투여 후 장내 세균의 수와 다양성에 변화가 발견되었다(Table 3) [53].

미세 플라스틱의 잠재적 위험성으로 임신부에 의한 태아의 간접 노출이다. 이와 관련하여 설치류를 이용한 3건의 연구결과가 보고되었다. Fournier 등[26]은 임신한 흰쥐에 호흡기를 통해 미세 플라스틱을 흡입하도록 한 후 태아 조직 내 미세 플라스틱의 분포를 조사하였다. 그 결과 미세 플라스틱은 태

Table 3. Summary of published studies providing data on toxicities of microplastics in rodents

Species	System/organ	Microplastics	Dose	Results	Reference
Wistar rats, 6 weeks old, female	Reproductive	Polystyrene, 0.5 μm size	0.015, 0.15, and 1.5 mg/kg/d, oral for 90 days	Pyroptosis and apoptosis of ovarian granulosa cells	[40]
Wistar rats, 6 weeks old, female	Reproductive	Polystyrene, 0.5 μm size	0.015, 0.15, and 1.5 mg/kg/d, oral for 90 days	Reduced number of growing follicles, oxidative stress and apoptosis of granulosa cells	[4]
ICR mice, 4-5 weeks, male	Reproductive	Polystyrene, 0.5 μm size	0.6-0.7 $\mu\text{g/day}$, 6-7 $\mu\text{g/day}$, 60-70 $\mu\text{g/day}$ for 35 days	Significantly reduced viable sperm in epididymis	[39]
BALB/C mice, 6 weeks, male	Reproductive	Polystyrene, 0.5, 4, 10 μm size	Oral gavage for 28 days	Sperm quality and testosterone level was declined	[47]
Wistar rats, 6 weeks old	Cardiac	Polystyrene, 0.5 μm size	0.5, 5, and 50 mg/l in drinking water for 90 days	damaged cardiac structure and impaired mitochondria integrity	[75]
Pregnant rats (Sprague Dawley)	various	20 nm rhodamine-labeled polystyrene	Intratracheal instillation of 300 μl (2.64×10^{14} particles)	Polystyrene nanoparticles were observed in the placenta, fetal liver, lungs, heart, kidney and brain	[26]
ICR mice, 5 weeks old	Gastrointestinal	Polystyrene, 0.5 and 50 μm size	100 or 1,000 $\mu\text{g/l}$, in drinking water for 5 weeks	Change in the richness and diversity of the gut microbiota	[53]
Wistar rats, 6-8 weeks old, male	Nervous	Polystyrene, 25 and 50 nm size	1, 3, 6 and 10 mg/kg for 5 weeks	No significant change in behavior	[65]

반은 물론 태아의 간, 폐, 심장, 신장 및 뇌에서도 관찰되었다. 또한 임신기 또는 수유기에 모체에 미세 플라스틱을 노출시켰을 때 새끼 쥐에서 대사 질환을 유발하거나 대사 질환의 위험도를 증가시켰다[54, 55].

설치류를 대상으로 진행된 이상의 실험 결과를 종합하면 설치류에게 4주 이상 미세 플라스틱을 노출시킬 때 생식기관, 심장기관, 소화기관, 중추 신경계 등 전신적으로 장애를 유발할 수 있으며 특히 혈관-태반 관문(blood placental barrier)을 통과하여 태아에까지 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

사람에서 미세 플라스틱 노출 실태

세계 식량농업기구(Food and Agriculture Organization of the United Nations)의 보고에 따르면 1960년 약 10 kg에 불과하던 세계 1인당 해산물 섭취량이 1914년에는 20 kg을 넘었었다[24, 33]. 특히 2013년 기준으로 해산물은 전 세계 31억 명 이상의 사람들에게 연간 단백질 섭취량의 20% 이상을 공급하였다[24, 33]. 따라서 해산물 섭취에 따른 미세 플라스틱 섭취는 피할 수 없는 현상으로 보이며 음식물에 의한 미세 플라스틱의 체내 축적 가능성에 대한 연구가 시급하다. 최근 올챙이와 물고기, 그리고 생쥐로 이어지는 먹이 사슬 실험 모델에서 올챙이에 투여한 미세 플라스틱이 물고기를 거쳐 최 상위 포식자인 생쥐의 간에서 고농도(57.07 particles/g)로 발견되었다[15]. 또한 대조군 대비 미세 플라스틱에 간접적으로 노출된 생쥐들은 위험 평가 행동 능력이 감소한 것으로 나타났다[15]. 이러한 결과는 음식으로 섭취한 미세 플라스틱이 인간에서도 축적된 미세 플라스틱의 양에 따라 영향을 미칠 수 있을 가능성을 보여준다.

그러면, 실제 사람은 미세 플라스틱에 얼마나 노출되고 있을까? 현재 이에 대한 정확한 연구 결과는 없으며, 해산물 음식에 대한 선호도, 대기 오염도를 비롯한 생활 환경에 따라 미세 플라스틱 노출도 차이가 있을 것이므로 개인간, 사회 집단 간 편차도 클 것으로 보인다. 그러나 최근 이에 대한 메타 분석 결과들이 보고되어 그 실태를 추정할 수 있다. 먼저 Danopoulos 등[16]은 지금까지 발표된 주요 해산물의 평균 미세 플라스틱 함유량과 전 세계 인구의 각 해산물 평균 섭취량에 기반하여 해산물을 통한 미세 플라스틱 노출량을 추정하였다. 이에 따르면 1인 당 연간 조개류, 담치, 굴, 가리비를 통해 각각 평균적으로 3,312개, 1,881개, 1,113개 그리고 1,272개의 미세 플라스틱을 섭취하는 것으로 추정하였다. 여기에 생선을 통해서도 연간 2,067개를 섭취하는 것으로 추정하였다. 그러나 해산물 섭취에 대한 개인적 선호도 차이로 인해 해양 무척추 생물의 연간 섭취량 범위는 206-45,541개로 차이가 매우 큼을 알 수 있다[16].

미세 플라스틱의 섭취는 해산물이 유일한 경로가 아니다. Cox 등[14]은 음식뿐만 아니라 대기 오염과 플라스틱 음료 용기에 의한 미세 플라스틱 섭취까지 포함하여 추정하였다. 그

결과 미국인들은 나이와 성별에 따라 연간 39,000-52,000개의 미세 플라스틱을 섭취한다. 이는 대기 중 미세플라스틱의 호흡을 통한 섭취를 포함할 때 74,000-121,000개까지 증가한다. 또한 플라스틱 용기에 들어있는 음료만을 섭취한다고 할 때 연간 90,000개의 미세 플라스틱이 추가된다. 이러한 결과로 볼 때 인간은 이미 매우 많은 미세 플라스틱에 노출되어 왔으며 환경과 생활 습관을 개선하지 않는 한 섭취하는 미세 플라스틱의 양은 계속해서 증가할 수 있다.

미세 플라스틱이 인간의 건강에 미치는 영향

바다는 우리가 버린 플라스틱이 결국 모이는 곳으로 물리적, 화학적, 생물학적 분해와 절단을 통해 미세 플라스틱으로 변화된다. 미세 플라스틱은 해양 생물자원에 축적되고 해양 생물자원은 인간의 주요 식품 원료이므로 미세 플라스틱은 결국 인간에게로 돌아온다[45]. 보고된 자료에 따르면 섭취한 미세 플라스틱은 소화관 내에만 머무르지 않고 전신 순환계로 흡수되어 간, 신장을 비롯하여 여러 조직 내에서 발견된다[17, 51, 72, 73]. 설치류를 이용한 연구에서는 경구로 투여한 20 μm 크기의 미세 플라스틱도 전신의 모든 조직으로 분포되고 간 조직에서 ATP 감소와 lactate dehydrogenase 분비 증가, 혈중 총 콜레스테롤과 중성지방의 감소, 그리고 항산화 효소인 glutathione peroxidase와 superoxide dismutase가 증가하는 것을 발견하였다[17]. 또 다른 연구들에서는 미세 플라스틱이 acetylcholinesterase의 활성을 억제시키는 것을 보여준다. Acetylcholinesterase의 활성 억제는 신경독성 가능성을 제시하며 활성이 30% 이상 억제될 때 신경계 기능이 장애를 일으킬 수 있다[2, 52, 57]. 일부 연구에서는 농도에 따라 미세 플라스틱이 acetylcholinesterase의 활성을 30% 이상 감소시킨 것으로 나타나 미세 플라스틱에 의한 신경 독성에 관한 연구가 추가적으로 진행될 필요가 있다[5, 11, 18].

미세 플라스틱 섭취에 따른 해양 생물의 영향에 관한 연구는 많이 진행되고 있는 반면 해산물 섭취에 따른 플라스틱의 간접적 노출과 인간의 건강에 미치는 영향에 관한 연구는 이제 시작 단계이다. 최근에 Ibrahim 등[42]은 말레이시아 반도 북동부에 거주하는 11명(대장암 환자 9명, 정상인 2명)을 대상으로 대장절제술을 실시하여 미세 플라스틱 함유 여부를 분석하였다. 그 결과 11명 모두에서 미세 플라스틱이 발견되었으며 평균 함유량은 검체 1g 당 28.1 ± 15.4 개에 달하였다. 해당 연구의 피험자들은 해산물과 어류를 주식으로 하는 해안 지역에 장기간 거주한 사람들로서 실험 결과는 미세 플라스틱에 오염된 해산물과 어류를 장기간 섭취하여 간접적으로 노출된 것으로 추측된다[42].

결론

해양으로 유출된 플라스틱은 이미 오래전에 시작되어 매우

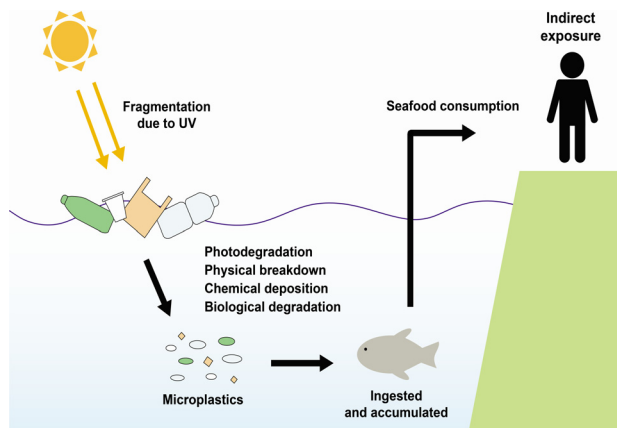


Fig. 1. Indirect exposure of microplastics to human. Plastics delivered into ocean are degraded to microplastics by UV light, physical, chemical and biological degradation. Microplastics are accumulated in marine wild lives and exposed to human by seafood consumption.

광범위하고 부유물은 물론 침전물 형태로 존재하여 제거가 불가능하다. 전 인류의 노력으로 1차 미세 플라스틱의 사용과 배출을 억제하여 해양 미세 플라스틱 유출을 감소시키는 데 기여할 수 있으나 해양 플라스틱의 물리적, 화학적, 생물학적 분해에 의해 생성되는 2차 미세 플라스틱의 증가는 억제가 불가능하다. 이에 따라 해양으로 유출되는 플라스틱의 양이 지금 당장 0이 된다 하더라도 지름 0.5 cm 이상의 대형 플라스틱(macropastics)의 양은 서서히 감소하게 되나 해양 미세 플라스틱의 양은 수십년 동안 지속적으로 증가하게 된다[67]. 따라서 해양 미세 플라스틱은 앞으로도 지속적으로 인간에게 노출되어 인간의 건강과 삶의 질을 위협할 것으로 보이나 이에 대한 연구는 아직 초보 단계이다(Fig. 1). 주목할 만한 점은 조개류, 어류 및 설치류에서 미세 플라스틱 섭취로 인해 소화관을 비롯하여 인체 조직에서 미세 플라스틱이 검출되었고 이로 인해 각 장기에서 조직학적, 생화학적, 기능적 이상이 보고된 반면, 인간에서는 이제 소화관에서 미세 플라스틱이 검출되는 수준에 도달하였다. 따라서 조개류, 어류 및 설치류의 연구 경과와 그 결과들을 고려할 때 인간에서도 노출 농도에 따라 조직학적, 생화학적, 기능적 이상이 나타날 가능성이 있다. 앞으로 해양 미세 플라스틱의 오염 실태와 위해 요인에 대한 깊이 있는 연구, 인간에서 미세 플라스틱 노출과 질병과의 상관성에 관한 많은 연구가 필요하며, 이러한 연구 결과를 바탕으로 미세 플라스틱의 오염 방지 및 관리를 통해 인간의 건강을 지켜 나가야 한다.

감사의 글

이 논문은 2021학년도 경성대학교 학술연구비지원(2021-038)에 의하여 연구되었음.

The Conflict of Interest Statement

The authors declare that they have no conflicts of interest with the contents of this article.

References

1. Aderem, A. and Underhill, D. M. 1999. Mechanisms of phagocytosis in macrophages. *Annu. Rev. Immunol.* **17**, 593-623.
2. Almeida, J. R., Oliveira, C., Gravato, C. and Guilhermino, L. 2010. Linking behavioural alterations with biomarkers responses in the european seabass *dicentrarchus labrax* l. exposed to the organophosphate pesticide fenitrothion. *Ecotoxicology* **19**, 1369-13813.
3. Andrady, A. L. 2011. Microplastics in the marine environment. *Mar. Pollut. Bull.* **62**, 1596-1605.
4. An, R., Wang, X., Yang, L., Zhang, J., Wang, N., Xu, F., Hou, Y., Zhang, H. and Zhang, L. 2021. Polystyrene microplastics cause granulosa cells apoptosis and fibrosis in ovary through oxidative stress in rats. *Toxicology* **449**, 152665.
5. Barboza, L. G. A., Vieira, L. R., Branco, V., Figueiredo, N., Carvalho, F., Carvalho, C. and Guilhermino, L. 2018. Microplastics cause neurotoxicity, oxidative damage and energy-related changes and interact with the bioaccumulation of mercury in the European seabass, *Dicentrarchus labrax* (Linnaeus, 1758). *Aquat. Toxicol.* **195**, 49-57.
6. Barnes, S. J. 2019. Understanding plastics pollution: The role of economic development and technological research. *Environ. Pollut.* **249**, 812-821.
7. Baechler, B. R., Granek, E. F., Hunter, M. V. and Conn, K. E. 2020. Microplastic concentrations in two Oregon bivalve species: spatial, temporal, and species variability. *Limnol. Oceanogr. Lett.* **5**, 54-65.
8. Borkar, S., Nandanwar, S., Kim, Y. L., Kim, D., Shim, H. K. and Kim, H. J. 2020. Investigation of microplastics from three marine organisms. *Kor. J. Fish Aquat. Sci.* **53**, 244-250.
9. Bour, A., Avio, C. G., Gorbi, S., Regoli, F. and Hylland, K. 2018. Presence of microplastics in benthic and epibenthic organisms: influence of habitat, feeding mode and trophic level. *Environ. Pollut.* **243**, 1217-1225.
10. Chae, D. H., Kim, I. S., Song, Y. K., Kim, S. and Kim, S. K. 2014. Development of analytical method for microplastics in seawater. *The Sea* **19**, 88-98.
11. Chen, Q., Yin, D., Jia, Y., Schiwy, S., Legradi, J., Yang, S. and Hollert, H. 2017. Enhanced uptake of BPA in the presence of nanoplastics can lead to neurotoxic effects in adult zebrafish. *Sci. Total Environ.* **609**, 1312-1321.
12. Cho, Y., Shim, W. J., Jang, M., Han, G. M. and Hong, S. H. 2019. Abundance and characteristics of microplastics in market bivalves from South Korea. *Environ. Pollut.* **245**, 1107-1116.
13. Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C. and Galloway, T. S. 2011. Microplastics as contaminants in the marine environment: a review. *Mar. Pollut. Bull.* **62**, 2588-2597.

14. Cox, K. D., Covernton, G. A., Davies, H. L., Dower, J. F., Juanes, F. and Dudas, S. E. 2019. Human consumption of microplastics. *Environ. Sci. Technol.* **53**, 7068-7074.
15. Costa Araújo, A. P. and Malafaia, G. 2021. Microplastic ingestion induces behavioral disorders in mice: A preliminary study on the trophic transfer effects via tadpoles and fish. *J. Hazard. Mater.* **401**, 123263.
16. Danopoulos, E., Jenner, L. C., Twiddy, M. and Rotchell, J. M. 2020. Microplastic contamination of seafood intended for human consumption: a systematic review and meta-analysis. *Environ. Health Perspect.* **128**, 126002.
17. Deng, Y., Zhang, Y., Lemos, B. and Ren, H. 2017. Tissue accumulation of microplastics in mice and biomarker responses suggest widespread health risks of exposure. *Sci. Rep.* **7**, 46687.
18. Ding, J., Zhang, S., Razanajatovo, R. M., Zou, H. and Zhu, W. 2018. Accumulation, tissue distribution, and biochemical effects of polystyrene microplastics in the freshwater fish red tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Environ. Pollut.* **238**, 1-9.
19. Duis, K. and Coors, A. 2016. Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects. *Environ. Sci. Eur.* **28**, 2.
20. Efimova, I., Bagaeva, M., Bagaev, A., Kilesa, A. and Chubarenko, I. P. 2018. Secondary microplastics generation in the Sea Swash Zone with coarse bottom sediments: laboratory experiments. *Fron. Mar. Sci.* **5**, 313.
21. Eriksen, M., Lebreton, L. C. M., Carson, H. S., Thiel, M., Moore, C. J., Borerro, J. C., Galgani, F., Ryan, P. G. and Reisser, J. 2014. Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea. *PLoS One* **9**, e111913.
22. Estahbanati, S. and Fahrenfeld, N. L. 2016. Influence of wastewater treatment plant discharges on microplastic concentrations in surface water. *Chemosphere* **162**, 277-284.
23. Fang, C., Zheng, R., Zhang, Y., Hong, F., Mu, J., Chen, M., Song, P., Lin, L., Lin, H., Le, F. and Bo, J. 2018. Microplastic contamination in benthic organisms from the arctic and sub-arctic regions. *Chemosphere* **209**, 298-306.
24. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2016b. The State of World Fisheries and Aquaculture 2016. Contributing to food security and nutrition for all. FAO, Rome. pp. 200.
25. Felderman, D. 2008. Polymer history. *Des. Monomers. Polym.* **11**, 1-15.
26. Fournier, S. B., D'Errico, J. N., Adler, D. S., Kollontzi, S., Goedken, M. J., Fabris, L., Yurkow, E. J. and Stapleton, P. A. 2020. Nanopolystyrene translocation and fetal deposition after acute lung exposure during late-stage pregnancy. *Part. Fibre. Toxicol.* **17**, 55.
27. Frias, J. P. G. L. and Nash, R. 2019. Microplastics: Finding a consensus on the definition. *Mar. Pollut. Bull.* **138**, 145-147.
28. Glaucia, P. O., Maria, C. T. M., Cassiana, C. M., Theodore, B. H. and Renato, S. C. 2019. Microplastic contamination in surface waters in guanabara bay, Rio de Janeiro, Brazil. *Mar. Pollut. Bull.* **139**, 157-162.
29. Gallo, F., Fossi, C., Weber, R., Santillo, D., Sousa, J., Ingram, I., Nadal, A. and Romano, D. 2018. Marine litter plastics and microplastics and their toxic chemicals components: the need for urgent preventive measures. *Environ. Sci. Eur.* **30**, 13.
30. Garcés-Ordóñez, O., Espinosa, L. F., Cardoso, R. P., Issa Cardozo, B. B. and Meigikos Dos Anjos, R. 2020. Plastic litter pollution along sandy beaches in the Caribbean and Pacific coast of Colombia. *Environ. Pollut.* **267**, 115495.
31. Geyer, R., Jambeck, J. R. and Law, K. L. 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci. Adv.* **3**, e1700782.
32. Goldstein, J. L., Anderson, R. G. and Brown, M. S. 1979. Coated pits, coated vesicles, and receptor-mediated endocytosis. *Nature* **279**, 679-685.
33. Guillen, J., Natale, F., Carvalho, N., Casey, J., Hofherr, J., Druon, J. N., Fiore, G., Gibin, M., Zanzi, A. and Martinsohn, J. T. 2019. Global seafood consumption footprint. *Ambio* **48**, 111-122.
34. Hartmann, N. B., Hüffer, T., Thompson, R. C., Hassellöv, M., Verschoor, A., Dagaard, A. E., Rist, S., Karlsson, T., Brennholt, N., Cole, M., Herrling, M. P., Hess, M. C., Ivleva, N. P., Lusher, A. L. and Wagner, M. 2019. Are we speaking the same language? Recommendations for a definition and categorization framework for plastic debris. *Environ. Sci. Technol.* **53**, 1039-1047.
35. Hartmann, N. B., Rist, S., Bodin, J., Jensen, L. H., Schmidt, S. N., Mayer, P., Meibom, A. and Baun, A. 2017. Microplastics as vectors for environmental contaminants: exploring sorption, desorption, and transfer to biota. *Integr. Environ. Assess. Manag.* **13**, 488-493.
36. Hebner, T. S. and Maurer-Jones, M. A. 2020. Characterizing microplastic size and morphology of photodegraded polymers placed in simulated moving water conditions. *Environ. Sci. Process. Impacts* **22**, 398-407.
37. Hermabessiere, L., Paul-Pont, I., Cassone, A. L., Himber, C., Receveur, J., Jezequel, R., Rakwe, M. E., Rinnert, E., Riviere, G., Lambert, C., Huvel, A., Dehaut, A., Duflos, G. and Soufant, P. 2019. Microplastic contamination and pollutant levels in mussels and cockles collected along the channel coasts. *Environ. Pollut.* **250**, 807-819.
38. Hossain, M. S., Rahman, M. S., Uddin, M. N., Sharifuzzaman, S. M., Chowdhury, S. R., Sarker, S. and Chowdhury, M. S. N. 2020. Microplastic contamination in Penaeid shrimp from the Northern Bay of Bengal. *Chemosphere* **238**, 124688.
39. Hou, B., Wang, F., Liu, T. and Wang, Z. 2021. Reproductive toxicity of polystyrene microplastics: In vivo experimental study on testicular toxicity in mice. *J. Hazard Mater.* **405**, 124028.
40. Hou, J., Lei, Z., Cui, L., Hou, Y., Yang, L., An, R., Wang, Q., Li, S., Zhang, H. and Zhang, L. 2021. Polystyrene microplastics lead to pyroptosis and apoptosis of ovarian granulosa cells via NLRP3/Caspase-1 signaling pathway in rats. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* **212**, 112012.
41. Hwang, J., Choi, D., Han, S., Jung, S. Y., Choi, J. and Hong, J. 2020. Potential toxicity of polystyrene microplastic particles. *Sci. Rep.* **10**, 7391.

42. Ibrahim, Y. S., Anuar, S. T., Azmi, A. A., Shlik, W. M. A. W. M., Lehata, S., Hamzah, S. R., Ismail, D., Ma, Z. F., Dzulkarnaen, A., Mustaffa, N., Sharif, S. E. T. and Lee, Y. Y. 2021. Detection of microplastics in human colectomy specimens. *JGH Open* **5**, 116-121.
43. Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R. and Law, K. L. 2015. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science* **347**, 768-771.
44. Jaikumar, G., Brun, N. R., Vijver, M. G. and Bosker, T. 2019. Reproductive toxicity of primary and secondary microplastics to three cladocerans during chronic exposure. *Environ. Pollut.* **249**, 638-646.
45. Jiang, B., Kauffman, A. E., Li, L., McFee, W., Cai, B., Weinstein, J., Lead, J. R., Chatterjee, S., Scott, G. I. and Xiao, S. 2020. Health impacts of environmental contamination of micro- and nanoplastics: a review. *Environ. Health Prev. Med.* **25**, 29.
46. Jiangling, X. and Yao, Y. 2013. Development of global plastic industry between 2011 and 2012. *China Plast. Ind.* **41**, 1-29.
47. Jin, H., Ma, T., Sha, X., Liu, Z., Zhou, Y., Meng, X., Chen, Y., Han, X. and Ding, J. 2021. Polystyrene microplastics induced male reproductive toxicity in mice. *J. Hazard Mater.* **401**, 123430.
48. Kang, J. H., Kim, M., Hong, S. H. and Shim, W. J. 2017. Spatial characteristics of microplastics in the surface waters along the coast of Korea. *PICES-2017 Annual Meeting*, pp.130.
49. Korea Centers for Disease Control and Prevention. 2015. The Sixth Korea National Health and Nutrition Examination Survey (KNHANES VI).
50. Lebreton, L. C. M., van der Zwet, J., Damsteeg, J. W., Slat, B., Andrady, A. and Reisser, J. 2017. River plastic emissions to the world's oceans. *Nat. Commun.* **8**, 15611.
51. Li, J., Qu, X., Su, L., Zhang, W., Yang, D., Kolandhasamy, P., Li, D. and Shi, H. 2016. Microplastics in mussels along the coastal waters of China. *Environ. Pollut.* **214**, 177-184.
52. Lionetto, M. G., Caricato, R., Calisi, A., Giordano, M. E. and Schettino, T. 2013. Acetylcholinesterase as a biomarker in environmental and occupational medicine: new insights and future perspectives. *Biomed. Res. Int.* **2013**, 321213.
53. Lu, L., Wan, Z., Luo, T., Fu, Z. and Jin, Y. 2018. Polystyrene microplastics induce gut microbiota dysbiosis and hepatic lipid metabolism disorder in mice. *Sci. Total. Environ.* **631-632**, 449-458.
54. Luo, T., Wang, C., Pan, Z., Jin, C., Fu, Z. and Jin, Y. 2019. Maternal polystyrene microplastic exposure during gestation and lactation altered metabolic homeostasis in the dams and their F1 and F2 offspring. *Environ. Sci. Technol.* **53**, 10978-10992.
55. Luo, T., Zhang, Y., Wang, C., Wang, X., Zhou, J., Shen, M., Zhao, Y., Fu, Z. and Jin, Y. 2019. Maternal exposure to different sizes of polystyrene microplastics during gestation causes metabolic disorders in their offspring. *Environ. Pollut.* **255**, 113122.
56. Nurlatifah, Yamauchi T., Nakajima, R., Tsuchiya, M., Yabuki, A., Kitahashi, T., Nagano, Y., Isobe, N. and Nakata, H. 2021. Plastic additives in deep-sea debris collected from the western North Pacific and estimation for their environmental loads. *Sci. Total Environ.* **10**, 144537.
57. Prüst, M., Meijer, J. and Westerink, R. H. S. 2020. The plastic brain: neurotoxicity of micro- and nanoplastics. *Part. Fibre. Toxicol.* **17**, 24.
58. Pazos, R. S., Bauer, D. E. and Gomez, N. 2018. Microplastics integrating the coastal planktonic community in the inner zone of Río de la Plata estuary (South America) *Environ. Pollut.* **243**, 134-142.
59. Plastics Europe, 2019. Plastics- the Facts 2019. An Analysis of European Plastics Production, Demand and Recovery for 2018. Plastics Europe Association of Plastics Manufacturers. Brussels. Available at: <http://www.plasticseurope.org>.
60. Plastics- the Facts 2018. https://www.plasticseurope.org/application/files/6315/4510/9658/Plastics_the_facts_2018_AF_web.pdf
61. Plastics: Material-Specific Data. United States Environmental Protection Agency <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/plastics-material-specific-data>
62. Plastics: Material-Specific Data. United States Environmental Protection Agency. Website: <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/plastics-material-specific-data>
63. Phuong, N. N., Zalouk-Vergnoux, A., Kamari, A., Mouneyrac, C., Amiard, F., Poirier, L. and Lagarde, F. 2018. Quantification and characterization of microplastics in blue mussels (*Mytilus edulis*): protocol setup and preliminary data on the contamination of the French Atlantic coast. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* **25**, 6135-6144.
64. Qiu, Q., Peng, J., Yu, X., Chen, F., Wang, J. and Dong, F. 2015. Occurrence of microplastics in the coastal marine environment: First observation on sediment of china. *Mar. Pollut. Bull.* **98**, 274-280.
65. Rafiee, M., Dargahi, L., Eslami, A., Beirami, E., Jahangiri-Rad, M., Sabour, S. and Amereh, F. 2018. Neurobehavioral assessment of rats exposed to pristine polystyrene nanoplastics upon oral exposure. *Chemosphere* **193**, 745-753.
66. Reisser, J., Shaw, J., Wilcox, C., Hardesty, B. D., Proietti, M., Thums, M. and Pattiaratchi, C. 2013. Marine Plastic Pollution in Waters around Australia: Characteristics, Concentrations, and Pathways. *PLoS One* **8**, e80466.
67. Rillig, M. C. 2012. Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? *Environ. Sci. Technol.* **46**, 6453-6454.
68. Ritchie, H. Where does plastic accumulate in the ocean and what does that mean for the future? 2019. Our World in Data. <https://ourworldindata.org/where-does-plastic-accumulate>
69. Smith, M., Love, D. C., Rochman, C. M. and Neff, R. A. 2018. Microplastics in Seafood and the Implications for Human Health. *Curr. Environ. Health Rep.* **5**, 375-386.
70. Song, Y. K., Hong, S. H., Jang, M., Kang, J. H., Kwon, O. Y., Han, G. M. and Shim, W. J. 2014. Large accumulation of micro-sized synthetic polymer particles in the sea surface microlayer. *Environ. Sci. Technol.* **48**, 9014-9021.

71. Sutton, R., Mason, S. A., Stanek, S. K., Willis-Norton, E., Wren, I. F. and Box, C. 2016. Microplastics contamination in the San Francisco Bay, California, USA. *Mar. Pollut. Bull.* **109**, 230-235.
72. Van Cauwenberghe, L., Claessens, M., Vandegehuchte, M. B. and Janssen, C. R. 2015. Microplastics are taken up by mussels (*Mytilus edulis*) and lugworms (*Arenicola marina*) living in natural habitats. *Environ. Pollut.* **199**, 10-17.
73. Van Cauwenberghe, L. and Janssen, C. R. 2014. Microplastics in bivalves cultured for human consumption. *Environ. Pollut.* **193**, 65-70.
74. Wang, J., Wang, M., Ru, S. and Liu, X. 2019. High levels of microplastic pollution in the sediments and benthic organisms of the South Yellow Sea, China. *Sci. Total Environ.* **651**, 1661-1669.
75. Wei, J., Wang, X., Liu, Q., Zhou, N., Zhu, S., Li, Z., Li, X., Yao, J. and Zhang, L. 2021. The impact of polystyrene microplastics on cardiomyocytes pyroptosis through NLRP3/Caspase-1 signaling pathway and oxidative stress in Wistar rats. *Environ. Toxicol.* **36**, 935-944.
76. Zhao, J. M., Ran, W., Teng, J., Liu, Y. L., Liu, H., Yin, X. N., Cao, R. W. and Wang, Q. 2018. Microplastic pollution in sediments from the Bohai Sea and the Yellow Sea, China. *Sci. Total Environ.* **640-641**, 637-645.
77. Ziccardi, L. M., Edgington, A., Hentz, K., Kulacki, K. J. and Kane Driscoll, S. 2016. Microplastics as vectors for bioaccumulation of hydrophobic organic chemicals in the marine environment: a state-of-the-science review. *Environ. Toxicol. Chem.* **35**, 1667-1676.
78. Zobkov, M. and Esiukova, E. 2017. Microplastics in Baltic bottom sediments: quantification procedures and first results. *Mar. Pollut. Bull.* **114**, 724-732.
79. Zhang, C., Chen, X., Wang, J. and Tan, L. 2017. Toxic effects of microplastic on marine microalgae *Skeletonema costatum*: Interactions between microplastic and algae. *Environ. Pollut.* **220**, 1282-1288.

초록 : 해양 환경의 미세 플라스틱과 인간의 건강에 미치는 영향

박지아 · 강현본 · 최윤식*

(경성대학교 약학과)

미세 플라스틱은 입자의 크기가 5 mm 이하인 플라스틱 조각을 말하며 미세 플라스틱의 오염은 해양 생태계와 인간의 건강과 관련되어 전 세계적인 관심사이다. 광범위하게 오염되어 있는 관계로, 미세 플라스틱은 물고기, 담치, 굴, 조개, 가리비와 같이 다양한 동물에 섭취되어 체내에 축적된다. 게다가, 섭취된 미세 플라스틱은 소장, 간, 신장 그리고 심지어 뇌에서도 높은 농도로 관찰된다. 해산물은 인간에게 있어 주요 단백질 공급원 중 하나이므로, 해산물의 소비는 인간이 미세 플라스틱에 노출되는 경로가 될 수 있다. 많은 근거들은 설치류에서 미세 플라스틱의 반복적인 경구 투여가 생식, 심장, 소화기, 내분비 그리고 심지어 신경계에서 병리적, 기능적 변화를 유도함을 가리킨다. 더욱이, 임신기와 수유기 동안 모체가 미세 플라스틱에 노출되면 새끼에서 대사의 항상성에 변화가 일어난다. 해산물은 세계적으로 3억 1천만 명 이상의 사람들에게 20% 이상의 단백질 공급원이라는 사실을 고려할 때, 미세 플라스틱은 인간의 몸에 축적되어 생리적 기능에 장애를 유발할 수 있다고 가정하는 것이 타당하다. 본 리뷰에서 우리는 해양에서 미세 플라스틱 오염의 현재 실태와 해양 동물 및 설치류에서 미세 플라스틱의 축적과 독성, 그리고 인간에게의 노출과 인간 건강에 미치는 잠재적인 영향에 대해 요약하였다.