

미세플라스틱의 해양 생태계에 대한 영향과 향후 연구 방향

김강희^{1,2}, 황정혜¹, 최진수¹, 허윤위¹, 박준우^{1,2,*}

¹안전성평가연구소 경남환경독성본부 환경생물연구그룹, ²과학기술연합대학원대학교 인체및환경독성학

The effects of microplastics on marine ecosystem and future research directions

Kanghee Kim^{1,2}, Junghye Hwang¹, Jin Soo Choi¹, Yunwi Heo¹ and June-Woo Park^{1,2,*}

¹Gyeongnam Department of Environmental Toxicology and Chemistry, Korea Institute of Toxicology, Jinju 52384, Republic of Korea

²Human and Environmental Toxicology Program, Korea University of Science and Technology (UST), Daejeon 34114, Republic of Korea

*Corresponding author

June-Woo Park
Tel. 055-750-3833
E-mail. jwpark@kitox.re.kr

Received: 24 September 2019

First Revised: 31 October 2019

Second Revised: 27 November 2019

Revision accepted: 28 November 2019

Abstract: Microplastics are one of the substances threatening the marine ecosystem. Here, we summarize the status of research on the effect of microplastics on marine life and suggest future research directions. Microplastics are synthetic polymeric compounds smaller than 5 mm and these materials released into the environment are not only physically small but do not decompose over time. Thus, they accumulate extensively on land, from the coast to the sea, and from the surface to the deep sea. Microplastic can be ingested and accumulated in marine life. Furthermore, the elution of chemicals added to plastic represents another risk. Microplastics accumulated in the ocean affect the growth, development, behavior, reproduction, and death of marine life. However, the properties of microplastics vary widely in size, material, shape, and other aspects and toxicity tests conducted on several properties of microplastics cannot represent the hazards of all other microplastics. It is necessary to evaluate the risks according to the types of microplastic, but due to their variety and the lack of uniformity in research results, it is difficult to compare and analyze the results of previous studies. Therefore, it is necessary to derive a standard test method to estimate the biological risk from different types of microplastics. In addition, while most of the previous studies were conducted mostly on spheres for the convenience of the experiments, they do not properly reflect the reality that fibers and fragments are the main forms of microplastics in the marine environment and in fish and shellfish. Furthermore, studies have been conducted on additives and POPs (persistent organic pollutants) in plastics, but little is known about their toxic effects on the body. The effects of microplastics on the marine ecosystems and humans could be identified in more detail if standard testing methods are developed, microplastics in the form of fibers and fragments rather than spheres are tested, and additives and POPs are analyzed. These investigations will allow us to identify the impact of microplastics on marine ecosystems and humans in more detail.

Keywords: microplastic, marine ecosystem, toxicity, biohazards

서 론

플라스틱은 생산 비용이 낮고 가소성이 높아 산업적 활용도가 무한에 가까우며, 자연적으로 분해가 잘 되지 않는다는 점이 가장 큰 특징이다. 시간이 지날수록 물리적인 마모나 풍화, UV, 온도 변화 등에 의해 눈에 보이지 않는 작은 조각으로 분해된다(Andrady 2011). 2004년, 영국의 Thompson 박사는 해양 환경에서 현미경으로만 관찰이 가능한 플라스틱 조각이 증가하고 있음을 보고했으며(Thompson *et al.* 2004), 이 보고를 기점으로 “미세플라스틱”이 주목을 받기 시작했다(Arthur *et al.* 2009). 또한 미세플라스틱보다 더 작은 초미세플라스틱(나노플라스틱)도 환경에 존재한다. 다만 초미세플라스틱에 대한 정의를 1,000 nm 이하와 100 nm 이하 중 어떤 것을 선택할 것인가에 대해 여전히 논쟁 중이다(Cole and Galloway 2015; Koelmans *et al.* 2015; da Costa *et al.* 2016; Crawford and Quinn 2017; Didier *et al.* 2017).

미세플라스틱은 크기가 작아 수중의 금속, 폴리염화비페닐, 기타 유독 물질과 화학적 친화도가 높다(Talsness *et al.* 2009). 미세플라스틱을 해양 생물이 먹이로 오인하여 섭취함으로써 먹이사슬을 통해 최종적으로 사람에게 도달할 수 있기 때문에 이에 대한 관심이 높아졌다(Li *et al.* 2018). 해산물은 인류 단백질 공급의 약 5분의 1을 차지하는 중요한 식량 자원으로(World Wildlife Fund: “Unsustainable fishing”, 2010), 해산물을 통해 전달된 미세플라스틱이 인간의 건강에 얼마나 영향을 끼치는지는 명확하지 않다(Bouwmeester *et al.* 2015). 이와 같은 이유로 미세플라스틱이 신규 해양 오염물질로 급 부상하고 있다.

미세플라스틱 고유의 물리화학적 특성으로 인한 생물학적 유해성을 규명하려는 연구가 많다. 미세플라스틱은 크기가 작아 큰 플라스틱과 물리화학적 성질이 다를 수 있기 때문이다. 더욱이 현재 인류가 생산하는 플라스틱의 종류 또한 다양한 만큼, 미세플라스틱 역시 크기, 형태, 재질 등이 천차만별이다(Lusher *et al.* 2013; Yu *et al.* 2016; Waite *et al.* 2018). 그러나 이들 물질이 생물 내부로 들어갔을 때 어떠한 독성 영향을 나타내는지 아직 완전히 밝혀지지 않았다.

본 논문을 통해 미세플라스틱에 대한 정의, 해양의 분포, 해양생물에 대한 유해성 등의 연구 현황을 분석하여 그 결과를 보고하고, 향후 연구 방향에 대하여 제안하고자 한다.

미세플라스틱의 분류와 분포

미세플라스틱은 5 mm 이하의 작은 플라스틱 입자를 가리키며(Thompson *et al.* 2004), 기존의 플라스틱 쓰레기와 더불어 해양 환경과 생태계를 위협하고 있는 물질이다. 생성 과정에 따라 1차 미세플라스틱(primary microplastics)과 2차 미세플라스틱(secondary microplastics)으로 분류한다. 1차 미세플라스틱은 치약, 세안제, 스크럽뿐만 아니라 공업용 연마제 등의 상품을 위해 처음부터 만들어진 것으로(Friot and Boucher 2017), 작은 크기로 인해 환경으로 유입될 가능성이 있지만 하수처리장의 입자성 물질 여과로 대부분이 제거된다(Carr *et al.* 2016; Murphy *et al.* 2016; Talvitie *et al.* 2017).

날로 증가했던 1차 미세플라스틱을 이용한 제품의 생산과 공급은 최근 감소세로 바뀌었다. 미세플라스틱 사용량 감축을 위한 각국의 노력 때문이다. 영국은 2018년 1월부터 미세플라스틱이 포함된 화장품 및 퍼스널케어 제품의 제조금지를 시행했으며, 미국은 2015년 12월 ‘The Microbead-Free Water Act’ 법안을 제정하였다(Kaufman 2016). 우리나라의 식품의약품안전처 또한 2017년에 「의약외품 품목허가·신고·심사 규정」 일부를 개정하여 의약외품 중 ‘구충청량제; ‘치약제; ‘치아미백제’ 등 세정 목적의 제품에 첨가제로써 미세플라스틱의 사용을 제한하였다.

2차 미세플라스틱은 환경에서 큰 플라스틱 제품이나 이들의 파편에서 유래된 작은 알갱이를 지칭한다(Cole *et al.* 2011). 환경에서 플라스틱의 단편화에 기여하는 기작들은 미생물에 의한 생분해, 야외에서 햇빛에 의한 광분해, 일반적인 온도에서 느린 열산화분해, 고온의 환경에서 열분해, 물에 의한 가수분해 등이 있으며(Andrady 2011), 이와 같은 다양한 물리화학적 풍화 요인과 생물학적 영향은 플라스틱 고유의 조직적 완전성을 떨어뜨린다(Cole *et al.* 2011; Browne 2015). 특히 환경에서 발견되는 미세섬유의 상당 부분은 앞서 열거한 요인을 비롯하여 가정의 의류 세탁 과정에서 생성된 것들이 하수도를 통해 유출되고 있는 것으로 추정된다(Browne *et al.* 2011).

실제 자연환경에서 발견되는 미세플라스틱의 대부분은 2차 미세플라스틱이며, 특히 섬유가 가장 많은 비중을 차지하고 있다(Cole *et al.* 2014; Plastics Europe 2017; Wu *et al.* 2017). 영국해협에서 발견된 미세플라스틱은 2차 미세플라스틱인 섬유가 61%이고 파편은 36%였으며, 1차 미세플라

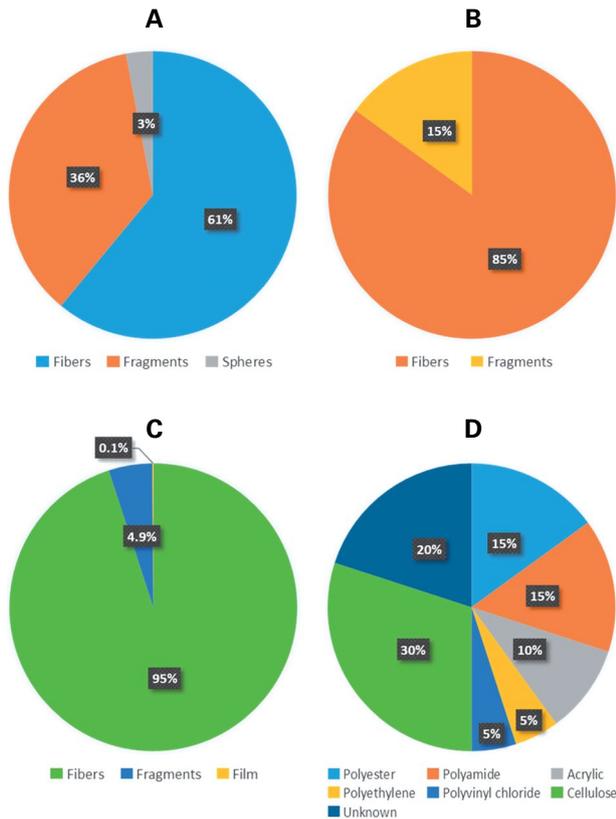


Fig. 1. Polymer types and plastic shapes of microplastics detected in (A) the English Channel, (B) the Irish continental shelf sediment, and (C and D) the Arctic Ocean (Cole *et al.* 2014; Lusher *et al.* 2015, 2017).

스틱인 구형은 3%에 불과하였다(Cole *et al.* 2014) (Fig. 1a). 아일랜드 대륙붕 퇴적물에서 확인된 미세플라스틱 역시 섬유가 85%, 파편이 15%였으며(Lusher *et al.* 2017) (Fig. 1b), 북극해 역시 다르지 않았다(Lusher *et al.* 2015) (Fig. 1c).

폐기된 플라스틱의 풍화로 생성되는 2차 미세플라스틱의 성분은 주로 polyethylene (PE), polypropylene (PP), polyvinylchloride (PVC), polystyrene (PS), polyethylene terephthalate (PET) 등이다(Plastics Europe 2017; Wu *et al.* 2017). 이들은 지역에 따라 구성 성분에 차이가 있는데, 북극해에서 발견된 플라스틱의 성분은 PET가 15%, polyamide (PA)가 15%, PE가 5%, acrylic이 10%, polyvinyl chloride가 5%, cellulose가 30%였고, 미상의 물질이 20%였다(Lusher *et al.* 2015) (Fig. 1d). 이에 비해 영국해협에서 검출되는 미세플라스틱의 성분은 PA와 PP가 대부분이다(Cole *et al.* 2014).

해양에서 미세플라스틱은 해류를 통해 광범위하게 확산되는데, 육지에서 가까울수록 미세플라스틱이 유입될 가능

성이 높다(Disgorges *et al.* 2014; Law and Thompson 2014). 북반구 대도시의 해안가와 폐쇄 해역에서 이들의 축적도가 매우 높으며 북대서양해안에서는 km 당 500~2,000개의 플라스틱이 검출되는데, 이는 지중해의 미세플라스틱 분포 밀도의 6배가 넘는 값이다(Barnes *et al.* 2009). 북극해의 해수면에서는 0~1.31개 m^{-3} (0.34 ± 0.31)의 미세플라스틱 입자가 발견되었고 해수면 아래에서는 이보다 많은 0~11.5개 m^{-3} (2.68 ± 2.95)의 미세플라스틱 입자가 있다(Lusher *et al.* 2015). 심지어 대서양과 지중해의 수심 1,100~5,000m의 심해의 퇴적물에는 200~400개 m^{-2} 의 미세플라스틱이 존재한다(Cauwenberghe *et al.* 2013).

1950년부터 2015년까지 65년간 생산된 플라스틱은 약 83억 톤이며 폐기량은 63억 톤으로 추정되는데, 이들 폐 플라스틱의 발생량은 시간에 따라 증가하고 있고, 이 추세가 지속될 경우 2050년까지 누적될 플라스틱 쓰레기는 330억 톤에 달할 것으로 예상된다(Geyer *et al.* 2017). 현재 바다로 유입되는 미세플라스틱은 연간 8,762톤으로 추정되며(Sherrington *et al.* 2016), 버려지는 플라스틱의 증가 추세를 고려하면 해양으로 유입되는 미세플라스틱의 양도 점점 증가할 것으로 예상된다.

미세플라스틱의 유해성

1. 물리적 측면

생물이 미세플라스틱을 먹이로 오인하여 섭식하는 과정에서 위장관 조직의 찢과상과 세포의 괴사가 일어날 가능성이 있다(Wright *et al.* 2013). 연구가 거듭됨에 따라 점점 더 작은 미세플라스틱이 검출되고 있는데, 2015년에 해양에서 확인된 가장 작은 미세플라스틱 섬유와 파편은 7 μm 와 13 μm 였으며(Enders *et al.* 2015), 2017년에 남중국해에서 서식하는 동물플랑크톤에서 발견된 가장 작은 플라스틱 조각은 4 μm 였다(Sun *et al.* 2017). 아직 미세플라스틱보다 더 작은 초미세플라스틱이 환경에서 검출된 보고는 없지만 이들 역시 생물과 생태계에 미치는 영향의 크기를 예측하기 어렵다(Bouwmeester *et al.* 2015; Jong *et al.* 2016; Ma *et al.* 2016; Chae and An 2017). 다만 미세플라스틱의 잠재적 위험성이 해양의 생태계 먹이사슬을 통해 1차 소비자부터 최종소비자까지 전달될 수 있다(Thompson and Olse 2004; Cole *et al.* 2013; Akpan 2014).

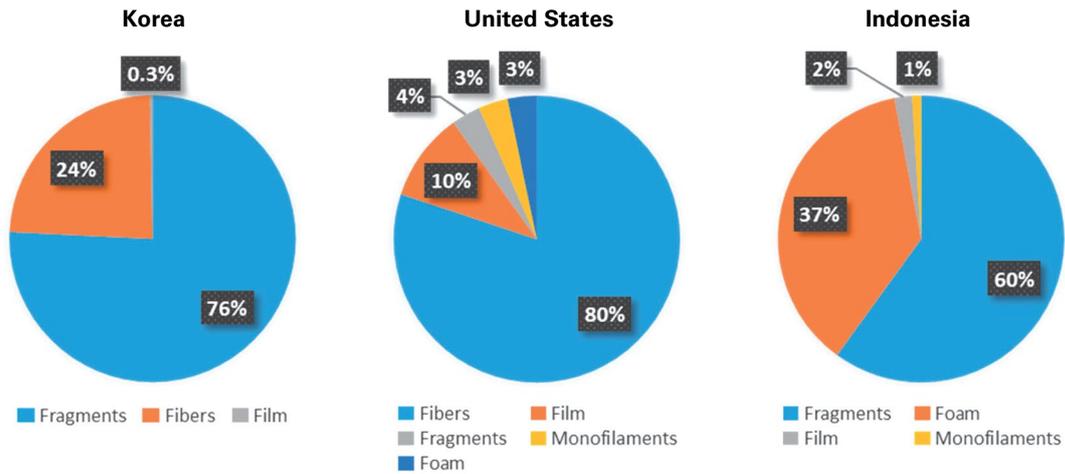


Fig. 2. Types of microplastics found in shellfish sold in Korea and fish sold in the United States and Indonesia (Rochman *et al.* 2015; Cho *et al.* 2019).

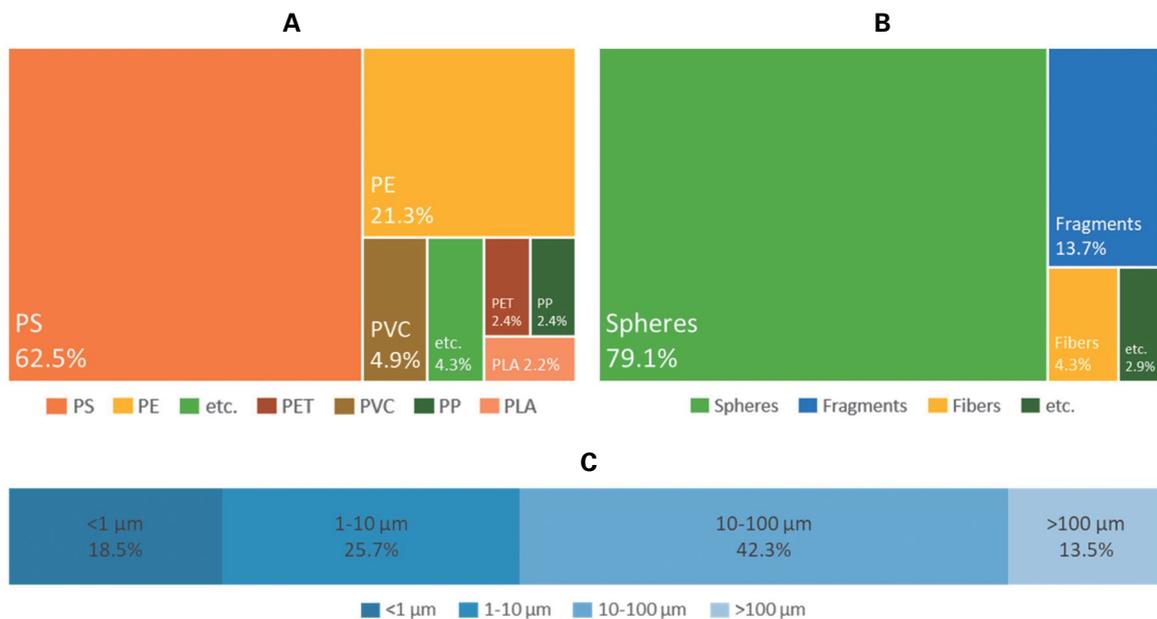


Fig. 3. Percentage of toxicity data by (A) material, (B) shape and (C) size of microplastics.

세계 여러 나라의 해산물에서 미세플라스틱이 발견되고 있는데, 뉴욕 주립대는 조사한 18종의 어류 모두에서 미세플라스틱을 검출하였으며 (Akpan and Nsikan 2014; Grossman and Elizabeth 2015), 한국과 미국, 인도네시아 시장의 어패류에서 확인되는 미세플라스틱은 주로 섬유와 파편형이 발견되고 있는 것으로 보고되고 있다 (Fig. 2) (Rochman *et al.* 2015; Cho *et al.* 2019). 다만 현재까지 미세플라스틱이 생물에 미치는 영향을 평가하기 위한 연구의 대부분은 구형으로 수행되었는데 (Fig. 3B), 미세플라스틱은 입자성 물

질이기에 때문에 형태에 따라 거동이 다를 수밖에 없어 기존에 수행된 연구를 통해 환경에 미칠 잠재적 유해성을 추정하기 어려운 실정이다 (Wang *et al.* 2008; Ispas *et al.* 2009; Tarantola *et al.* 2011; Cole *et al.* 2014).

2. 화학적 측면

미세플라스틱에 포함된 화학물질이 생물에 유해할 수 있다. 플라스틱은 제조과정에서 필요에 따라 다양한 화학물

질이 혼합되는데, 플라스틱 첨가제는 기능성 첨가제(안정제, 대전방지제, 난연제, 가소제, 윤활제, 슬립제, 경화제, 발포제, 살생물제 등), 착색제(안료, 가용성 아조염료 등), 충전제(mica, talc, kaolin, clay, 탄산 칼슘, 황산 바륨), 보강제(유리 섬유, 탄소 섬유)의 4가지 범주로 나눌 수 있다(Hansen et al. 2013; Hahladakis et al. 2018). 반응성 유기 첨가제를 제외한 거의 대부분의 첨가제는 플라스틱 중합체에 화학적으로 결합되지 않고(Hahladakis et al. 2018), 플라스틱 제품이 사용되거나 분해되는 과정에서 환경으로 용출될 가능성이 있다(Rochman et al. 2013). 프탈레이트(phthalates)와 비스페놀 A(bisphenol A)는 수생 및 육상 환경동물, 연체 동물, 갑각류, 곤충, 물고기 및 양서류에서 생식에 영향을 주며, 갑각류와 양서류의 발달을 저해하고 유전적 이상을 초래한다(Oehlmann et al. 2009). 이들 물질에 노출된 실험동물에게 축적, 성장 및 생식력의 저하, 성호르몬 교란 등의 다양한 생리적 영향이 발견되어 다양한 플라스틱 첨가제들이 사람에게 잠재적인 위험물질임이 증명되었다(Talsness et al. 2009). 따라서 플라스틱 첨가제에 대한 규제 강화를 비롯하여 대체물질의 연구 개발이 활발하게 이루어지고 있다.

미세플라스틱이 해수에 있는 유해물질을 생물체 내부로 운반하는 매개체의 역할을 할 가능성이 있다. 플라스틱은 잔류성 유기 오염물질(POPs; persistent organic pollutants)을 흡수하는 능력 또는 경향이 있으나, 이러한 작용이 어느 정도까지 일어날 수 있는지는 아직 명확하지 않다(Hahladakis et al. 2018). 다만, PP 재질의 플라스틱 입자는 주변 해수보다 10만 배에서 100만 배가량 높은 농도로 PCB(polychlorinated biphenyls) 및 DDE(dichloro-diphenyl-dichloroethylene)를 축적할 수 있는 것으로 밝혀졌으며(Mato et al. 2001), 이와 같은 이유로 인해 미세플라스틱이 PCB, DDE, bisphenol A(BPA), dichloro-diphenyl-trichloroethane(DDT), nonylphenols(NP) 등의 잔류성 유기 오염 물질을 생물에게 운반하는 매개체로 주목받고 있다(Mato et al. 2001; Teuten et al. 2009; Koelmans et al. 2013). *Arenicola marina*에게 오염 물질(nonylphenol 및 phenanthrene)과 첨가제(Triclosan 및 PBDE-47)가 포함된 미세플라스틱을 노출시켰을 때 병원성 박테리아 저항성과 침전물 처리 능력이 감소하고 사망률과 산화 스트레스가 증가했다는 연구가 있지만(Browne et al. 2013), 아직까지 실제 자연환경에서는 이에 대한 영향이 증명된 바가 없어 회의적인 시각을 가진 학자도 있다. 생물체 내에 농축된 화학물질이 미세플라스틱에 흡착된 화학물질보다 농도가 높아서 오히려 미세플라스

틱이 생물에 축적된 독성물질을 제거하는 역할을 할 수 있다는 주장도 있다(Koelmans et al. 2016).

3. 생물 유해성

미세플라스틱의 생태독성영향을 평가하기 위한 유해성 평가 방법은 매우 다양한데, 시험 대상 해양 생물로는 플랑크톤, 연체동물을 비롯한 무척추동물, 어류 등이 사용되고 있다. 지금까지 해양생물을 대상으로 수행된 독성평가 연구들을 시험 조건에 따라 급성 212건과 만성 103건, 총 315건으로 분류해 분석했다. 생물 유해성 평가에서 재질은 PS와 PE에 대하여 주로 수행되었으며(Fig. 3A), 형태는 대부분 구형(sphere) 미세플라스틱을 이용하였다(Fig. 3B). 미세플라스틱의 크기는 10 μm 에서 100 μm 사이가 가장 많은 편이었다(Fig. 3C).

미세플라스틱의 생물 독성은 크기가 작아질수록 강하게 나타났다. 10, 30, 90 μm 지름의 구형 PS 입자를 *Mytilus edulis*와 *A. marina*에게 노출시켰을 때, *M. edulis*는 10 μm 크기의 입자만이 축적되었으며 *A. marina*는 10과 30 μm 크기의 입자가 축적되었다(Van Cauwenberghe et al. 2015). 또한 *Brachionus koreanus*에게 0.05, 0.5, 6 μm 의 구형 PS 입자를 섭취시켰을 때, 성장을 감소, 생식력 감소, 수명 단축 및 생식 기간 연장의 영향이 크기 의존적으로 나타났으며, 6 μm 입자는 24시간 후에 배출되었으나 0.05 및 0.5 μm 입자는 48시간까지도 잔존해 있었다(Jeong et al. 2016).

미세플라스틱의 독성 영향은 급성보다 만성 시험에서 많이 나타났다. 급성 시험에서 많이 보는 치사율에서는 영향이 나타난 경우가 거의 없었던 반면, 만성시험에서는 생물 종에 따라 다양한 독성 영향이 나타난다. *Crassostrea gigas*에게 구형 PS 입자를 노출시켰을 때, 급성 시험에서는 먹이 활동과 성장에 대한 영향이 없었으나(Cole et al. 2015), 만성 시험에서 조류의 소비 및 흡수 효율의 증가, 난모세포 수(-38%), 직경(-5%), 정자 속도(-23%)의 현저한 감소를 나타냈으며, 2세대의 D형-유생 생산과 유생 발달은 대조구에 비해 각각 41%, 18%로 줄어들었다(Sussarellu et al. 2016). *D. japonicus*에게 0.05, 0.5, 6 μm 의 구형 PS 입자를 노출시킨 경우, 96시간의 급성 시험에서 치사율의 유의한 차이가 없었던 반면에 2세대 만성 독성 시험에서 번식력의 상당한 감소를 보였다(Lee et al. 2013). 평가종말점의 경우 급성은 사망률, 생화학, 섭식 및 축적이 가장 많았지만, 만성 시험에서는 생식과 조직학적 변화에 대한 종말점이 많

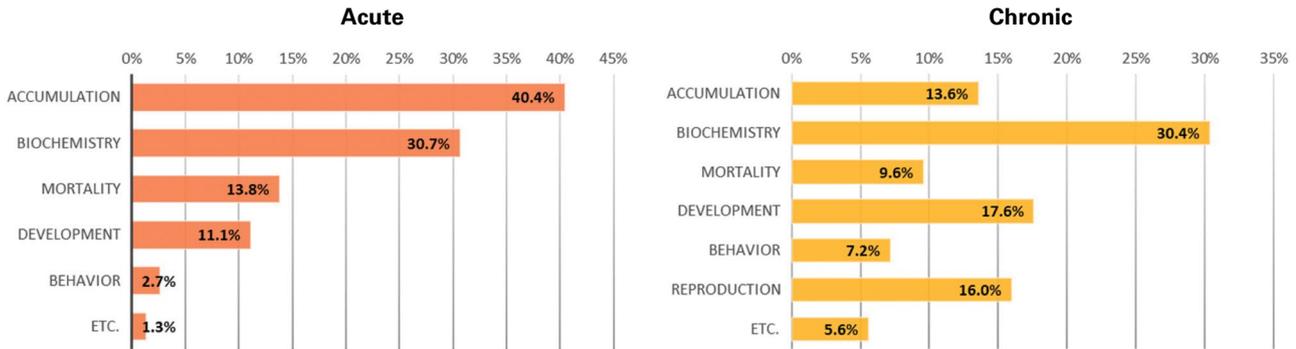


Fig. 4. Type of endpoint in acute and chronic toxicity data.

이 이용되었다(Fig. 4). 해양 생물은 미세플라스틱에 만성적으로 노출되는 현실을 감안하면 앞으로 급성보다는 만성 시험에 더 많은 관심이 필요하다.

반면에 미세플라스틱의 형태에 따른 전체적인 독성 반응의 경향성은 찾기가 어렵다. 대부분의 연구가 구형 미세플라스틱에 대하여 수행되어 구형 이외의 다른 형태의 플라스틱에 대한 자료가 충분하지 못하며, 연구간 상이한 재질과 크기, 생물을 이용하였기 때문에 서로 비교하기 힘들다. *Cyprinodon variegatus*에 구형과 파편 형태의 PE 입자를 노출시켰을 때, 파편에 노출된 *C. variegatus*는 유영 행동(총 이동 거리 및 최대 속도)이 저하되었다(Choi et al. 2018). 두 형태의 미세플라스틱 모두 활성산소종(Reactive Oxygen Species; ROS)을 발생시켰지만, 분자수준에서 ROS관련 전사체 유전자 변화 및 세포내 효소활성도의 상대적 발현량에 있어서는 서로 달라 어느 형태가 더 치명적이라고 확인할 수 없었다(Choi et al. 2018). 다만, *Danio rerio*에서 3가지 형상(구형, 파편 및 섬유 형태)의 미세플라스틱을 노출시켰을 때 섬유(8.0 µg mg⁻¹) > 파편(1.7 µg mg⁻¹) > 구형(0.5 µg mg⁻¹)의 순서로 장내 축적이 관찰되었다(Qiao et al. 2019). 축적된 미세플라스틱은 장에서 점막 손상을 비롯하여 투과성, 염증 및 대사 장애를 야기시켰으며, 섬유 형태의 미세플라스틱은 파편 및 구형보다 더 심각한 장 독성을 초래하였다(Qiao et al. 2019). 그러나 미세플라스틱 형태에 따른 독성 반응의 경향성을 확립하기 위해서는 다른 생물에 대한 연구가 더 있어야 한다.

또한, 미세플라스틱의 재질에 따른 독성 영향의 차이도 명확하지 않다. *Ostrea edulis*에게 polylactic acid (PLA)와 high density polyethylene (HDPE) 미세입자를 노출시켰을 때 재질에 따른 유의한 차이는 없었으며(Green et al. 2016),

*Mytilus galloprovincialis*에 대한 PE 및 PS 노출에서도 마찬가지였다(Avio et al. 2015). 다만 미세플라스틱의 재질이 매우 다양하기 때문에 재질에 따른 차이를 예단할 수 없으며, 같은 모양과 크기에 재질만 다른 미세플라스틱을 같은 생물 종에 동일한 조건과 종말점으로 수행한 연구는 거의 없는 실정이다. 연구마다 생물종, 시험 조건 및 사용된 플라스틱을 구성하고 있는 성분과 첨가제, 흡착된 물질, 크기, 모양 등의 특성이 상이하기 때문에(Table 1), 이러한 특성이 독성에 어떻게 영향을 미치는지 비교하는 것이 힘들다. 이는 여러 재질과 형태, 크기의 미세플라스틱이 다양한 생물 종에 대한 영향의 유무를 우선 알아보려는 시험 목적 때문일 것이다. 미세플라스틱의 종류에 따른 독성의 차이를 알아내기 위해서는, 동일한 생물 종과 평가종말점에 대하여 다양한 미세플라스틱의 형태와 재질, 크기에 따른 독성 시험의 표준화가 절실하다.

독성시험 결과의 비교 분석에서 시험 조건의 동일성은 매우 중요하다. 현재의 시험 조건을 요약하면 미세플라스틱은 입자성 물질이기 때문에 농도를 나타낼 때 질량(mg L⁻¹)이나 입자 수(particles L⁻¹)를 사용하는데(Table 1), 논문에 따라 어느 한 쪽만 기재한 경우가 많을 뿐만 아니라, 플라스틱의 비중이나 섬유의 지름 같은 정보를 기재하지 않은 문헌도 있다. 플라스틱의 비중과 섬유의 지름은 제조사마다 공정이 서로 달라 범위가 넓다. 미세플라스틱의 위해성평가를 위하여 종민감도분포(SSD; species sensitivity distribution)를 분석하려는 경우 여러 연구 결과를 취합할 필요가 있는데, 자료에서 농도가 질량이나 입자수 어느 한 값으로만 기재되어 있다면 환산 작업이 필요하다. 그러나 미세플라스틱 특성의 다양성으로 인해 변환할 때 임의로 일반적인 값을 사용한다면 큰 오차를 가져올 수 있다.

Table 1. Research data on the toxic effects of microplastics

Test	Polymer type	Plastic shape	Plastic size (μm)	Species	Taxon (Phylum)	Exposure duration	Exposure concentration	Effect	Reference
Acute	PE, PS	Spheres	<100	<i>Mytilus galloprovincialis</i>	Mollusca	6 d	0.5, 5, 50 $\mu\text{g L}^{-1}$	Mortality	Avio <i>et al.</i> 2015
Chronic	PS	Spheres	400–1300	<i>Arenicola marina</i>	Annelida	28 d	0.074, 0.74, 7.4% (w/w, dry weight)	Mortality, ingestion and egestion	Besseling <i>et al.</i> 2013
Acute	PS	Spheres	2, 3, 9.6, 4–16	<i>Mytilus edulis</i>	Mollusca	12 h, 3 d	0.51 g L^{-1} , 42.86 particles mL^{-1}	Ingestion, accumulation	Browne <i>et al.</i> 2008
Acute	PE (black, red, white)	Spheres	420–500	<i>Pomatoschistus microps</i>	Chordata	96 h	100 particles L^{-1}	Mortality, growth, MP ingestion and confusion with real prey	Carlos de Sá <i>et al.</i> 2015
Acute	PS	Spheres	10, 30	<i>Mytilus edulis</i>	Mollusca	–	86500, 310000 particles mL^{-1}	Ingestion	Claessens <i>et al.</i> 2013
				<i>Acartia clausi</i> , <i>Bradyura</i> , <i>Calanus helgolandicus</i> , <i>Caridea</i> , <i>Centropages typicus</i> , <i>Euphausiidae</i> , <i>Paguridae</i> , <i>Porcellanidae</i> , <i>Temora longicornis</i>	Arthropoda				
Acute	PS	Spheres	0.4, 1.7, 3.8, 7.3, 20.6, 30.6	<i>Parasagittia</i> sp.	Chaetognatha	1, 24 h	635, 2240, 3000, 4000, 7000, 11000, 25000, 40000, 380000, 1000000 particles mL^{-1}	Ingestion, accumulation	Cole <i>et al.</i> 2013
				<i>Doliolidae</i>	Chordata				
				<i>Obelia</i> sp., <i>Siphonophorae</i>	Cnidaria				
				<i>Bivalvia</i>	Mollusca				
				<i>Oxyrrhis marina</i>	Myzozoa				
Acute	PS	Spheres	0.07–20, 20	<i>Calanus helgolandicus</i> , <i>Crassostrea gigas</i>	Arthropoda, Mollusca	24 h, 8 d	75, <100 particles mL^{-1}	Ingestion, growth	Cole <i>et al.</i> 2015
Acute	PS-COOH, PS-NH2	Spheres	0.04, 0.05	<i>Paracentrotus lividus</i>	Echinodermata	24, 48 h	1, 2.5, 3, 5, 10, 25, 50 $\mu\text{g mL}^{-1}$	Development	Della <i>et al.</i> 2014
Acute	PS	Spheres	0.5	<i>Mytilus edulis</i>	Mollusca	1 h	685000 particles mL^{-1}	Ingestion, trophic transfer to <i>Carcinus maenas</i>	Farrell and Neilson 2013
Acute	PE	Spheres	1–5	<i>Pomatoschistus microps</i>	Chordata	96 h	0.184 mg L^{-1}	PRED, AChE, GST, EROD, LPO	Ferreira <i>et al.</i> 2016
Acute	PE	Spheres	1–5	<i>Pomatoschistus microps</i>	Chordata	96 h	0.184 mg L^{-1}	Mortality, AChE, LPO, PEPP at 20°C, 25°C	Fonte <i>et al.</i> 2016
Acute	PS	Spheres	0.1	<i>Amphibalanus amphitrite</i>	Arthropoda	24, 48	0.001, 0.01, 0.1, 1, 10 mg L^{-1}	Mortality, swimming speed	Gambardella <i>et al.</i> 2017
Acute	PP	pellets	N/A	<i>Perna perna</i>	Mollusca	48 h	0.5, 1, 2 mL in 8 mL tube and 10 mL beaker	Mortality, development	Silva <i>et al.</i> 2016
Chronic	PE, PLA, PVC	N/A	N/A	<i>Arenicola marina</i>	Annelida	31 d	0.02, 0.2, 2% (w/w, wet weight)	Health and biological activity, nitrogen cycling and primary productivity of the sediment	Green <i>et al.</i> 2016

Table 1. Continued

Test	Polymer type	Plastic shape	Plastic size (µm)	Species	Taxon (Phylum)	Exposure duration	Exposure concentration	Effect	Reference
Chronic	HDPE, PLA	Fragments	102.6 (0.48-316), 65.6 (0.6-363)	<i>Arenicola marina</i> , macro- and microalgae, <i>Ostrea edulis</i> , <i>Scrobicularia plana</i>	Annelida, Cerozoa, Mollusca	60 d	0.8, 80 µg L ⁻¹	Dry weight, respiration, filtration rates, growth, number of taxa, Shannon-Wiener diversity, etc.	Green, 2016
Acute	PS+pyrene	Spheres	97	<i>Lates calcarifer</i>	Chordata	24 h	100 particles L ⁻¹	Predatory performance, Foraging activity	Guvén <i>et al.</i> 2018
Chronic	PET	Fragments	<11	<i>Parvocalanus crassirostris</i>	Arthropoda	24 d	1000, 20000, 40000, 80000 particles mL ⁻¹	Reproductive output, relative population size	Heindler <i>et al.</i> 2017
Acute, Chronic	PS	Spheres	0.05, 0.5, 6	<i>Brachionus koreanus</i>	Rotifera	24+48 h, 12 d	0.1, 1, 10, 20 µg mL ⁻¹	Ingestion and egestion, fecundity, lifespan, reproduction time, ROS, ROS+NAC, p-JNK, p-p38, p-ERK, GSH, SOD, GR, GPx, GST	Jeong <i>et al.</i> 2016
Acute	PE	Spheres	10-45	<i>Tripneustes gratilla</i>	Echinodermata	15+420 min, 5, 6, 9 d	1, 10, 100, 300, 500 particles mL ⁻¹	Mortality, ingestion, body width, POA, food availability, biological conditioning, retention	Kaposi <i>et al.</i> 2014
Acute	PE	Fibers	N/A	<i>Mytilus edulis</i>	Mollusca	48 h	2000 microfiber L ⁻¹	Accumulation, retention	Kolandhasamy <i>et al.</i> 2018
Acute, Chronic	PS	Spheres	0.05, 0.5, 6	<i>Tigriopus japonicus</i>	Arthropoda	24, 96 h, 14 d	250000, 525000, 9.1×10 ⁵ , 9.1×10 ⁶ particles mL ⁻¹ , 0.125, 1.25, 6, 12.5, 13, 25, 31, 63, 187, 250, 313 µg mL ⁻¹	Mobility, Ingestion, development time, fecundity	Lee <i>et al.</i> 2013
Chronic	PS	Spheres	8-12, 32-38	<i>Perinereis albobitensis</i>	Annelida	28 d	100, 1000 particles mL ⁻¹	Mortality, regeneration	Leung and Chang 2018
Chronic	PS	Spheres	2-2.4	<i>Crepidula onyx</i>	Mollusca	14, 95 d	10000, 6.0×10 ⁷ , 1.4×10 ⁸ particles L ⁻¹	Mortality, growth, settlement	Lo and Chan 2018
Acute	PE	Spheres	1-5	<i>Pomatoschistus microps</i>	Chordata	96 h	0.216 mg L ⁻¹	Mortality, PEPP, AChE, EROD, GST, LPO, TBARS	Luis <i>et al.</i> 2015
Acute	PS, HDPE	Spheres, fibers	6, <80	<i>Paracentrotus lividus</i>	Echinodermata	48 h	10 ³ , 10 ⁴ , 10 ⁵ particles mL ⁻¹ , 0.005, 0.5, 5g L ⁻¹	Fertilization, development	Martinez-Gomez <i>et al.</i> 2017
Chronic	PE	Spheres	10-45	<i>Dicentrarchus labrax</i>	Chordata	7-43 d	0, 10 ⁴ , 10 ⁶ particles g ⁻¹	Mortality, ingestion, retention, growth, gene expression (IL-1β, cyp11a1)	Mazurais <i>et al.</i> 2015

Table 1. Continued

Test	Polymer type	Plastic shape	Plastic size (μm)	Species	Taxon (Phylum)	Exposure duration	Exposure concentration	Effect	Reference
Acute	PS	Spheres	10	<i>Ciona robusta</i> , <i>Paracentrotus lividus</i>	Chordata, Echinodermata	18, 24, 48, 72 h, 4, 8 d	0.125, 1.25, 12.5, 25 $\mu\text{g mL}^{-1}$	Mortality, development, metamorphosis, feeding behaviour and ingestion rates, body and arm length	Messinetti et al. 2018
Chronic	PS	Spheres	2, 6	<i>Mytilus edulis</i> , <i>Mytilus galloprovincialis</i>	Mollusca	14 (7+7) d	18.35 ng mL^{-1}	Histology	Paul-Pont et al. 2016
Chronic	PVC	Fragments	300 (MPI, MPV)	<i>Dicentrarchus labrax</i>	Chordata	30, 60, 90 d	1.4% of body weight in 2 meals	Intestinal responses	Pedà et al. 2016
Chronic	PS	Spheres	20	<i>Scrobicularia plana</i>	Mollusca	14+7 d	1 mg L^{-1}	Accumulation, condition index, SOD, CAT, GPx, GST, AChE, DNA and oxidative damage	Ribeiro et al. 2017
Chronic	PVC	N/A	1–50	<i>Perna viridis</i>	Mollusca	91 d	0, 216, 216, 2160 mg L^{-1}	Mortality, clearance rate, expiration rate, byssus production	Rist et al. 2016
Acute	PS	Spheres	10	<i>Acartia</i> spp.	Arthropoda	3, 12 h	1000, 2000, 10000 particles mL^{-1}	Ingestion	Setälä et al. 2014
				<i>Marenzelleria</i> spp.	Annelida				
				<i>Bosmina coregoni</i> , <i>Eurytemora affinis</i> , <i>Evadne nordmanni</i> , <i>Limnocalanus macrurus</i> , <i>Mysis mixta</i> , <i>Mysis relicta</i> , <i>Neomysis integer</i>	Arthropoda				
				<i>Tintinnopsis lobiancoi</i>	Ciliophora				
				<i>Synchaeta</i> spp.	Rotifera				
Acute	PS	Spheres	0.05, 0.5, 6	<i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Dunaliella tertiolecta</i>	Chlorophyta	72 h	25, 250 mg L^{-1}	Photosynthesis, growth	Spoljema et al. 2015
				<i>Thalassiosira pseudonana</i>	Bacillariophyta				
Chronic	PS	Spheres	2, 6	<i>Crassostrea gigas</i>	Mollusca	2 month	0.023 mg L^{-1} (2062 \pm 170, 118 \pm 15 beads mL^{-1})	Ingestion, Algal Consumption, absorption Efficiency, growth, hemocyte Counts, oocyte number reduction, diameter reduction, sperm velocity reduction, D-larval yield decrease, offspring larval development decrease	Sussarellu et al. 2016
Acute	PS	Spheres	10, 30, 90	<i>Arenicola marina</i> , <i>Mytilus edulis</i>	Annelida, Mollusca	14 d	50+50+10 particles mL^{-1}	Accumulation, greater accumulation of smaller particles, proteins, carbohydrates, lipids, energy consumption, CEA	van Cauwenberghe et al. 2015

Table 1. Continued

Test	Polymer type	Plastic shape	Plastic size (µm)	Species	Taxon (Phylum)	Exposure duration	Exposure concentration	Effect	Reference
Acute	HDPE	Fibers	< 80	<i>Mytilus edulis</i>	Mollusca	3, 6, 12, 24, 48, 96h	2.5 g L ⁻¹	Ingestion, granulocytoma formation, lysosomal membrane stability, oxyradical damage (lipofuscin accumulation), disturbance in lipid metabolism (neutral lipid content), condition index	von Moos et al. 2012
Acute, Chronic	PS	Spheres, fragments	15, 30, < 30	<i>Acartia longiremis</i> , <i>Calanus finmarchicus</i> , <i>Pseudocalanus</i> spp.	Arthropoda	4, 24h, 11 d	28, 50, 100, 200, 224, 500 particles mL ⁻¹	Mortality, ingestion	Vroom et al. 2017
Acute	PS	Spheres	5	<i>Neomysis japonica</i>	Arthropoda	24, 48, 72 h	50, 500, 1000 µg L ⁻¹	Mortality	Wang et al. 2017
Acute	PS	Spheres	0.1, 10	<i>Crassostrea virginica</i> , <i>Mytilus edulis</i>	Mollusca	45 min	1000, 13000 particles mL ⁻¹	Ingestion	Ward and Kach 2009
Acute	PS	Spheres	10	<i>Mytilus edulis</i>	Mollusca	30 min	20000 particles mL ⁻¹	Ingestion	Ward and Targett 1989
Acute	PS	Spheres	10	<i>Crassostrea gigas</i> , <i>Crassostrea virginica</i> , <i>Mytilus edulis</i> , <i>Mytilus trossulus</i>	Mollusca	0.5-1.5 h	1-2×10 ³ , 1-2×10 ⁴ , 1-2×10 ⁵ particles mL ⁻¹	Particle transport velocities	Ward et al. 2003
Acute	PS	Spheres	8	<i>Carcinus maenas</i>	Arthropoda	1, 6, 24 h	10 ⁶ , 10 ⁷ particles L ⁻¹	Ingestion, oxygen consumption, Plasma Na ⁺ and Ca ²⁺ ion concentration	Watts et al. 2016
Acute	PVC	Spheres, block	1, 1000	<i>Skeletonema costatum</i>	Odnophyta	1, 24, 48, 72, 96	1, 5, 10, 50, 500, 1000, 2000 mg L ⁻¹	Algal growth inhibition, algal photosynthesis (chlorophyll, φPSII)	Zhang et al. 2017

고찰

원양과 저서 생태계 내 모든 해양생물군이 미세플라스틱을 섭식할 가능성이 있다(Betts 2008; Thompson *et al.* 2009). 이들 생물들이 미세플라스틱을 실제로 섭식하는 과정을 현장에서 직접 관찰하는 것은 매우 어려우며(Browne *et al.* 2008), 동물플랑크톤의 경우 미세플라스틱보다는 수온, 염분, 탁도, Chl-a 농도와 더 밀접한 상관성을 나타내는 등(Kang *et al.* 2018), 미세플라스틱의 생태계에 대한 영향은 아직까지 확실하지 않다. 때문에 해양 생태계에 대한 미세플라스틱의 잠재적 유해성 파악을 위하여 다양한 연구가 수행되고 있다.

미세플라스틱은 크기와 형태, 재질이 다양하기 때문에 독성 영향 또한 다르게 나타나며, 연구 또한 시험 조건이 천차만별이다. 미세플라스틱의 크기가 작아질수록, 급성 노출보다 만성 노출에서 독성 영향이 증가하는 경향은 기존의 연구를 통해 유추할 수 있다. 그러나 형태와 재질에 따른 독성 영향에 대한 경향성은 생물종과 평가종말점, 미세플라스틱 특성이 자료마다 서로 달라 직접 비교할 수 없어 확실하게 단언하기 어렵다.

따라서 미세플라스틱의 특징과 생물종, 종말점을 통일하여 다른 연구라도 비교 분석할 수 있도록 표준시험법의 개발이 필요하다. 독성평가에서 많이 이용되는 담수종인 *D. rerio*나 *Daphnia magna*처럼, *T. japonicus*나 *Cyprinodon variegatus*, *M. edulis*를 비롯한 해수종을 선정하여 시험기간, 노출 시작 단계(시험생물 연령), 노출방법, 용액분석항목, 첨가되는 분산제의 농도, 종말점 등을 표준화하여 미세플라스틱의 특성에 대한 시험을 수행해야한다. 표준시험법의 개발을 통해 시험 조건의 동일성이 확보되면 미세플라스틱의 특성에 따른 독성 영향의 차이를 알아낼 수 있을 것이다. 그리고 시험 물질에 대한 제원을 상세하게 기재할 필요가 있다. 입자성 물질의 농도를 나타내는 기준인 질량과 농도, 섬유 길이와 지름, 비중과 같은 정보가 빠짐 없이 있어야 서로 다른 조건으로 시험한 문헌 사이의 비교가 수월하기 때문이다.

또한, 해양환경에서 발견되는 미세플라스틱의 형태인 섬유 및 파편에 대한 독성 영향 연구에 보다 집중해야한다. 미세플라스틱의 생물 유해성에 대한 많은 연구가 있으나, 실험의 편의에 의해 대부분 구형을 대상으로 이루어지고 있다. 이는 해양에서 발견되는 미세플라스틱의 대부분이 섬유나 파편 형태이며(Cole *et al.* 2014; Plastics Europe 2017;

Wu *et al.* 2017), 시장의 어패류에서 검출되는 미세플라스틱 역시 다르지 않다는 현실(Rochman *et al.* 2015; Cho *et al.* 2019)을 기존 연구가 반영하고 있지 못하다는 의미이다. *D. rerio*에서 섬유>파편>구형 순으로 독성이 강하게 나타난 결과를 보았을 때, 구형 미세플라스틱에 대하여 수행된 자료의 신뢰성을 의심할 수 밖에 없다.

더불어 미세플라스틱 첨가제 및 흡착 유해물질로 인한 독성 영향의 여부에 대한 규명이 필요하다. 플라스틱에 들어있는 첨가제와 흡착 가능한 유해 물질에 대한 연구는 있으나, 미세플라스틱의 형태로 생물의 체내로 들어갔을 때 이들 물질이 용출되는 지에 대하여 알려진 바가 거의 없다. 플라스틱은 잔류성 유기 오염물질을 흡수하는 능력 또는 경향이 있으며(Hahladakis *et al.* 2018), PP 재질의 플라스틱 입자는 주변 해수보다 10만 배에서 100만 배가량 높은 농도로 PCB와 및 DDE를 축적할 수 있지만(Mato *et al.* 2001), 이러한 미세플라스틱이 생물에 노출되었을 때 축적된 화학물질이 체내에서 용출되는지는 밝혀지지 않았다. 오히려 생물에 축적되어있던 독성물질을 미세플라스틱이 흡수한 후 같이 배출되어, 결국 체내의 독성물질을 청소하는 역할을 할 수 있다는 주장도 있는 만큼(Koelmans *et al.* 2016), 보다 면밀한 연구가 요구된다.

표준시험법의 개발, 구형보다 섬유와 파편 형태의 미세플라스틱에 대하여, 그리고 첨가제와 흡착 유해물질에 대한 연구가 진행된다면 해양 생태계 및 인간에 대한 미세플라스틱의 영향을 보다 상세히 파악할 수 있을 것이다.

적요

오늘날 해양 생태계를 위협하는 물질의 하나로 주목받고 있는 미세플라스틱에 대하여 해양생물에 대한 유해성 등의 연구 현황을 종합하고 향후 연구 방향에 대하여 제안하고자 한다. 미세플라스틱은 5mm 이하의 합성 고분자화합물로, 환경으로 배출된 이들 물질은 물리적으로 크기가 작을 뿐만 아니라 시간이 지남에 분해되지 않아 육지와 해양의 연안부터 원양까지, 표층과 심해에도 광범위하게 축적된다. 미세플라스틱은 해양 생물에게 섭식 및 축적될 수 있으며, 플라스틱에 첨가된 화학물질의 용출로 인한 위험성도 존재한다. 해양에 축적된 미세플라스틱은 해양 생물의 성장과 발달, 행동, 번식 및 사망 등에 영향을 끼친다. 다만 미세플라스틱의 특성은 크기, 재질, 모양 등 매우 다양하

며, 몇가지 특성의 미세플라스틱으로 수행된 독성 시험이 다른 모든 미세플라스틱의 위해성을 대표할 수 없다. 때문에 미세플라스틱의 유형에 따른 위해성의 경향을 확인할 필요가 있으나, 미세플라스틱의 다양성으로 인해 여러 연구 결과에 통일성이 없어 비교 및 분석이 어렵다. 따라서 미세플라스틱의 유형에 따른 생물학적 위험을 추정하기 위해 표준시험법의 도출이 필요하다. 또한, 기존 연구의 대부분은 실험의 편의에 의해 대부분 구형을 대상으로 이루어지고 있으나, 해양환경과 어패류에서 발견되는 미세플라스틱의 형태는 섬유 및 파편이 주류인 현실을 제대로 반영하고 있지 못하다. 더불어 플라스틱에 들어있는 첨가제 및 흡착 유해물질에 대한 연구는 있으나, 미세플라스틱의 형태로 생물의 체내로 들어갔을 때의 독성영향에 대하여 알려진 바는 거의 없다. 표준시험법의 개발, 구형보다 섬유와 파편 형태의 미세플라스틱에 대하여, 그리고 첨가제와 흡착 유해물질에 대한 연구가 진행된다면 해양 생태계 및 인간에 대한 미세플라스틱의 영향을 보다 상세히 파악할 수 있을 것이다.

사 사

본 논문은 해양수산부 해양수산환경기술개발사업의 “해양미세플라스틱에 의한 환경위해성연구(과제번호: 2015 0248)”의 지원으로 수행되었다.

REFERENCES

- Apkan N. 2014. Earth & Environment: Microplastics lodge in crab gills, guts: Creatures absorb particles through food and via respiration. *Sci. News* 186:9.
- Andrady AL. 2011. Microplastics in the marine environment. *Mar. Pollut. Bull.* 62:1596-1605.
- Arthur C, J Baker and H Bamford. 2009. Proceedings of the International Research Workshop on the Occurrence, Effects, and Fate of Microplastic Marine Debris. NOAA Tech. Rep. NMFS.
- Avio CG, S Gorbì, M Milan, M Benedetti, D Fattorini, G d'Errico, M Pauletto, L Bargelloni and F Regoli. 2015. Pollutants bioavailability and toxicological risk from microplastics to marine mussels. *Environ. Pollut.* 198:211-222.
- Barnes DKA, F Galgani, RC Thompson and M Barlaz. 2009. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Phil. Trans. R. Soc. B* 364:1985-1998.
- Besseling E, A Wegner, EM Foekema, MJ van den Heuvel-Greve and AA Koelmans. 2013. Effects of microplastic on fitness and PCB bioaccumulation by the Lugworm *Arenicola marina* (L.). *Environ. Sci. Technol.* 47:593-600.
- Betts K. 2008. Why small plastic particles may pose a big problem in the oceans. *Environ. Sci. Technol.* 42:8995.
- Boucher J and D Friot. 2017. Primary microplastics in the oceans: a global evaluation of sources. IUCN. Gland, Switzerland.
- Bouwmeester H, PC Hollman and RJ Peters. 2015. Potential health impact of environmentally released micro- and nanoplastics in the human food production chain: experiences from nanotoxicology. *Environ. Sci. Technol.* 49:8932-8947.
- Brennecke D, B Duarte, F Paiva, I Caçador and J Canning-Clode. 2016. Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment. *Estuar. Coast. Shelf. Sci.* 178: 189-195.
- Browne MA, A Dissanayake, TS Galloway, DM Lowe and RC Thompson. 2008. Ingested microscopic plastic translocates to the circulatory system of the mussel, *Mytilus edulis* (L.). *Environ. Sci. Technol.* 42:5026-5031.
- Browne MA. 2015. Sources and pathways of microplastics to habitats. pp. 229-244. In *Marine Anthropogenic Litter*. Springer, Cham.
- Carlos de Sá L, LG Luís and L Guilhermino. 2015. Effects of microplastics on juveniles of the common goby (*Pomatoschistus microps*): confusion with prey, reduction of the predatory performance and efficiency, and possible influence of developmental conditions. *Environ. Pollut.* 196:359-362.
- Carr SA, J Liu and AG Tesoro. 2016. Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants. *Water Res.* 91:174-182.
- Chae Y and YJ An. 2017. Effects of micro- and nanoplastics on aquatic ecosystems: Current research trends and perspectives. *Mar. Pollut. Bull.* 124:624-632.
- Cho Y, WJ Shim, M Jang, GM Han and SH Hong. 2019. Abundance and characteristics of microplastics in market bivalves from South Korea. *Environ. Pollut.* 245:1107-1116.
- Choi JS, YJ Jung, NH Hong, SH Hong and JW Park. 2018. Toxicological effects of irregularly shaped and spherical microplastics in a marine teleost, the sheepshead minnow (*Cyprinodon variegatus*). *Mar. Pollut. Bull.* 129:231-240.
- Claessens M, L van Cauwenbe, MB Vandeghechuchte and CR Janssen. 2013. New techniques for the detection of microplastics in sediments and field collected organisms. *Mar. Pollut. Bull.* 70:227-233.
- Cole M and TS Galloway. 2015. Ingestion of nanoplastics and microplastics by Pacific oyster larvae. *Environ. Sci. Technol.* 49: 14625-14632.

- Cole M, P Lindeque, E Fileman, C Halsband, R Goodhead, J Moger and TS Galloway. 2013. Microplastic ingestion by zooplankton. *Environ. Sci. Technol.* 47:6646–6655.
- Cole M, P Lindeque, C Halsband and TS Galloway. 2011. Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Mar. Pollut. Bull.* 62:2588–2597.
- Cole M, H Webb, PK Lindeque, ES Fileman, C Halsband and TS Galloway. 2014. Isolation of microplastics in biota-rich seawater samples and marine organisms. *Sci. Rep.* 4:4528.
- Cózar A, F Echevarría, JI González-Gordillo, X Irigoien, B Úbeda, S Hernández-León, ÁT Palma, S Navarro, J García-de-Lomas, A Ruiz, ML Fernández-de-Puelles and CM Duarte. 2014. Plastic debris in the open ocean. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 111:10239–10244.
- Crawford CB and B Quinn. 2017. *Microplastic Pollutants*, 1st Edition. Elsevier Science.
- Da Costa JP, PSM Santos, AC Duarte and T Rocha-Santos. 2016. (Nano)plastics in the environment - Sources, fates and effects. *Sci. Total Environ.* 566:15–26.
- Della Torre C, E Bergami, A Salvati, C Faleri, P Cirino, KA Dawson and I Corsi. 2014. Accumulation and embryotoxicity of polystyrene nanoparticles at early stage of development of sea urchin embryos *Paracentrotus lividus*. *Environ. Sci. Technol.* 48:12302–12311.
- Derraik JGB. 2002. The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. *Mar. Pollut. Bull.* 44:842–852.
- Desforges JPW, M Galbraith, N Dangerfield and PS Ross. 2014. Widespread distribution of microplastics in subsurface seawater in the NE Pacific Ocean. *Mar. Pollut. Bull.* 79:94–99.
- Didier D, M Anne and TH Alexandra. 2017. Plastics in the North Atlantic garbage patch: A boat-microbe for hitchhikers and plastic degraders. *Sci. Total Environ.* 599:1222–1232.
- Enders K, R Lenz, CA Stedmon and TG Nielsen. 2015. Abundance, size and polymer composition of marine microplastics $\geq 10 \mu\text{m}$ in the Atlantic Ocean and their modelled vertical distribution. *Mar. Pollut. Bull.* 100:70–81.
- Farrell P and K Nelson. 2013. Trophic level transfer of microplastic: *Mytilus edulis* (L.) to *Carcinus maenas* (L.). *Environ. Pollut.* 177:1–3.
- Ferreira P, E Fonte, ME Soares, F Carvalho and L Guilhermino. 2016. Effects of multi-stressors on juveniles of the marine fish *Pomatoschistus microps*: Gold nanoparticles, microplastics and temperature. *Aquat. Toxicol.* 170:89–103.
- Fonte E, P Ferreira and L Guilhermino. 2016. Temperature rise and microplastics interact with the toxicity of the antibiotic cefalexin to juveniles of the common goby (*Pomatoschistus microps*): Post-exposure predatory behaviour, acetylcholinesterase activity and lipid peroxidation. *Aquat. Toxicol.* 180:173–185.
- Gambardella C, S Morgana, S Ferrando, M Bramini, V Piazza, E Costa, F Garaventa and M Faimali. 2017. Effects of polystyrene microbeads in marine planktonic crustaceans. *Ecotox. Environ. Safe.* 145:250–257.
- Gandara E Silva PP, CR Nobre, P Resaffe, CDS Pereira and F Gusmão. 2016. Leachate from microplastics impairs larval development in brown mussels. *Water Res.* 106:364–370.
- Geyer R, JR Jambeck and KL Law. 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci. Adv.* 3:e1700782.
- Gray AD and JE Weinstein. 2017. Size- and shape-dependent effects of microplastic particles on adult daggerblade grass shrimp (*Palaemonetes pugio*). *Environ. Toxicol. Chem.* 36:3074–3080.
- Green DS, B Boots, J Sigwart, S Jiang and C Rocha. 2016. Effects of conventional and biodegradable microplastics on a marine ecosystem engineer (*Arenicola marina*) and sediment nutrient cycling. *Environ. Pollut.* 208:426–434.
- Green DS. 2016. Effects of microplastics on European flat oysters, *Ostrea edulis* and their associated benthic communities. *Environ. Pollut.* 216:95–103.
- Guyen O, L Bach, P Munk, KV Dinh, P Mariani and TG Nielsen. 2018. Microplastic does not magnify the acute effect of PAH pyrene on predatory performance of a tropical fish (*Lates calcarifer*). *Aquat. Toxicol.* 198:287–293.
- Hahladakis JH, CA Velis, R Weber, E Iacovidou and P Purnell. 2018. An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *J. Hazard. Mater.* 344:179–199.
- Hansen E, N Nillson, D Lithner and D Lassen. 2013. *Hazardous Substances in Plastic Materials*. COWI in cooperation with Danish Technological Institute.
- Heindler FM, F Alajmi, R Huerlimann, C Zeng, SJ Newman, G Vamvounis and L van Herwerden. 2017. Toxic effects of polyethylene terephthalate microparticles and Di(2-ethylhexyl) phthalate on the calanoid copepod, *Parvocalanus crassirostris*. *Ecotox. Environ. Safe.* 141:298–305.
- Jeong CB, EJ Won, HM Kang, MC Lee, DS Hwang, UK Hwang, B Zhou, S Souissi, SJ Lee and JS Lee. 2016. Microplastic size-dependent toxicity, oxidative stress induction, and p-JNK and p-p38 activation in the monogonont rotifer (*Brachionus koreanus*). *Environ. Sci. Technol.* 50:8849–8857.
- Kang HS, MH Seo, YS Yang, EO Park, YH Yoon, DJ Kim, HG Jeong and HY Soh. 2018. Zooplankton and neustonic microplastics in the surface layer of Yeosu coastal areas. *Korean J. Environ. Biol.* 36:11–20.
- Kaposi KL, B Mos, BP Kelaher and SA Dworjanyn. 2014. Ingestion of microplastic has limited impact on a marine larva. *Environ. Sci. Technol.* 48:1638–1645.
- Kaufman AC. 2016. Obama's Ban On Plastic Microbeads Failed In One Huge Way. *The Huffington Post*.

- Koelmans AA, A Bakir, GA Burton and CR Janssen. 2016. Microplastic as a vector for chemicals in the aquatic environment: critical review and model-supported reinterpretation of empirical studies. *Environ. Sci. Technol.* 50:3315–3326.
- Koelmans AA, E Besseling and WJ Shim. 2015. Nanoplastics in the aquatic environment: critical review. pp. 325–340. In *Marine Anthropogenic Litter*. Springer International Publishing.
- Kolandhasamy P, L Su, J Li, X Qu, K Jabeen and H Shi. 2018. Adherence of microplastics to soft tissue of mussels: A novel way to uptake microplastics beyond ingestion. *Sci. Total Environ.* 610:635–640.
- Law K and RC Thompson. 2014. Microplastics in the seas - Concern is rising about widespread contamination of the marine environment by microplastics. *Science* 345:144–145.
- Lee KW, WJ Shim, OY Kwon and JH Kang. 2013. Size-dependent effects of micro polystyrene particles in the marine copepod *Tigriopus japonicus*. *Environ. Sci. Technol.* 47:11278–11283.
- Leung J and KYK Chan. 2018. Microplastics reduced posterior segment regeneration rate of the polychaete *Perinereis aibuhitensis*. *Mar. Pollut. Bull.* 129:782–786.
- Li J, C Green, A Reynolds, H Shi and JM Rotchell. 2018. Microplastics in mussels sampled from coastal waters and supermarkets in the United Kingdom. *Environ. Pollut.* 241:35–44.
- Lo HKA and KYK Chan. 2018. Negative effects of microplastic exposure on growth and development of *Crepidula onyx*. *Environ. Pollut.* 233:588–595.
- Luis LG, P Ferreira, E Fonte, M Oliveira and L Guilhermino. 2015. Does the presence of microplastics influence the acute toxicity of chromium (VI) to early juveniles of the common goby (*Pomatoschistus microps*)? A study with juveniles from two wild estuarine populations. *Aquat. Toxicol.* 164:163–174.
- Lusher AL, M McHugh and RC Thompson. 2013. Occurrence of microplastics in the gastrointestinal tract of pelagic and demersal fish from the English Channel. *Mar. Pollut. Bull.* 67:94–99.
- Lusher AL, V Tirelli, I O'Connor and R Officer. 2015. Microplastics in Arctic polar waters: The first reported values of particles in surface and sub-surface samples. *Sci. Rep.* 5:14947.
- Lusher AL, NA Welden, P Sobralc and M Cole. 2017. Sampling, isolating and identifying microplastics ingested by fish and invertebrates. *Anal. Methods* 9:1346–1360.
- Ma Y, A Huang, S Cao, F Sun, L Wang, H Guo and R Ji. 2016. Effects of nanoplastics and microplastics on toxicity, bioaccumulation, and environmental fate of phenanthrene in fresh water. *Environ. Pollut.* 219:166–173.
- Mato Y, T Isobe, H Takada, H Kanehiro, C Ohtake and T Kaminuma. 2001. Plastic resin pellets as a transport medium for toxic chemicals in the marine environment. *Environ. Sci. Technol.* 35:318–324.
- Martínez-Gómez C, VM León, S Calles, M Gomáriz-Olcina and AD Vethaak. 2017. The adverse effects of virgin microplastics on the fertilization and larval development of sea urchins. *Mar. Environ. Res.* 130:69–76.
- Mazurais D, B Ernande, P Quazuguel, A Severe, C Huelvan, L Madec, O Mouchel, P Soudant, J Robbins, A Huet and J Zambonino-Infante. 2015. Evaluation of the impact of polyethylene microbeads ingestion in European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) larvae. *Mar. Environ. Res.* 112:78–85.
- Messinetti S, S Mercurio, M Parolini, M Sugni and R Pennati. 2018. Effects of polystyrene microplastics on early stages of two marine invertebrates with different feeding strategies. *Environ. Pollut.* 237:1080–1087.
- Murphy F, C Ewins, F Carbonnier and B Quinn. 2016. Wastewater Treatment Works (WwTW) as a source of microplastics in the aquatic environment. *Environ. Sci. Technol.* 50:5800–5808.
- OECD. 2018. Improving Markets for Recycled Plastics: Trends, Prospects and Policy Responses. OECD Publishing.
- Oehlmann J, U Schulte-Oehlmann, W Kloas, O Jagnytsh, I Lutz, KO Kusk, L Wollenberger, EM Santos, GC Paull, KJ van Look and CR Tyler. 2009. A critical analysis of the biological impacts of plasticizers on wildlife. *Philos. Trans. R. Soc. B* 364:2047–2062.
- Paul-Pont I, C Lacroix, C González Fernández, H Hégaret, C Lambert, N Le Goïc, L Frère, AL Cassone, R Sussarellu, C Fabioux, J Guyomarch, M Albentosa, A Huet and P Soudant. 2016. Exposure of marine mussels *Mytilus* spp. to polystyrene microplastics: Toxicity and influence on fluoranthene bioaccumulation. *Environ. Pollut.* 216:724–737.
- Pedà C, L Caccamo, MC Fossi, F Gai, F Andaloro, L Genovese, A Perdichizzi, T Romeo and G Maricchiolo. 2016. Intestinal alterations in European sea bass *Dicentrarchus labrax* (Linnaeus, 1758) exposed to microplastics: Preliminary results. *Environ. Pollut.* 212:251–256.
- Plastics Europe. 2017. Plastics - The Facts 2017. Plastics Europe, Brussels.
- Qiao R, Y Deng, S Zhang, MB Wolosker, Q Zhu, H Ren and Y Zhang. 2019. Accumulation of different shapes of microplastics initiates intestinal injury and gut microbiota dysbiosis in the gut of zebrafish. *Chemosphere* 236:124334.
- Ribeiro F, AR Garcia, BP Pereira, M Fonseca, NC Mestre, TG Fonseca, LM Ilharco and MJ Bebianno. 2017. Microplastics effects in *Scrobicularia plana*. *Mar. Pollut. Bull.* 122:379–391.
- Rist SE, K Assidqi, NP Zamani, D Appel, M Perschke, M Huhn and M Lenz. 2016. Suspended micro-sized PVC particles impair the performance and decrease survival in the Asian green mussel *Perna viridis*. *Mar. Pollut. Bull.* 111:213–220.
- Rochman CM, E Hoh, T Kurobe and SJ Teh. 2013. Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic

- stress. *Sci. Rep.* 3:3263.
- Rochman CM, JM Parnis, MA Browne, S Serrato, EJ Reiner, M Robson, T Young, ML Diamond and SJ Teh. 2017. Direct and indirect effects of different types of microplastics on freshwater prey (*Corbicula fluminea*) and their predator (*Acipenser transmontanus*). *PLoS One* 12:e0187664.
- Rochman CM, A Tahir, SL Williams, DV Baxa, R Lam, JT Miller, FC Teh, S Werorilangi and SJ Teh. 2015. Anthropogenic debris in seafood: Plastic debris and fibers from textiles in fish and bivalves sold for human consumption. *Sci. Rep.* 5:14340.
- Setälä O, V Fleming-Lehtinen and M Lehtiniemi. 2014. Ingestion and transfer of microplastics in the planktonic food web. *Environ. Pollut.* 185:77–83.
- Sherrington C, C Darrah, S Hann, M Cordle and G Cole. 2016. Study to support the development of measures to combat a range of marine litter sources. Report for European Commission DG Environment.
- Sjollema SB, P Redondo-Hasselerharm, HA Leslie, MHS Kraak and AD Vethaak. 2016. Do plastic particles affect microalgal photosynthesis and growth? *Aquat. Toxicol.* 170:259–261.
- Sun X, Q Li, M Zhu, J Liang, S Zheng and Y Zhao. 2017. Ingestion of microplastics by natural zooplankton groups in the northern South China Sea. *Mar. Pollut. Bull.* 115:217–224.
- Sussarellu R, M Suquet, Y Thomas, C Lambert, C Fabioux, ME Pernet, N Le Goïc, V Quillien, C Mingant, Y Epelboin, C Corporeau, J Guyomarch, J Robbens, I Paul-Pont, P Soudant and A Huet. 2016. Oyster reproduction is affected by exposure to polystyrene microplastics. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 113:2430–2435.
- Talsness CE, AJ Andrade, SN Kuriyama, JA Taylor and FS vom Saal. 2009. Components of plastic: Experimental studies in animals and relevance for human health. *Philos. Trans. R. Soc. B* 364:2079–2096.
- Talvitie J, A Mikola, A Koistinen and O Setälä. 2017. Solutions to microplastic pollution - Removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies. *Water Res.* 123:401–407.
- Ter Halle A, L Ladirat, X Gendre, D Goudouneche, C Pusineri, C Routaboul, C Tenaillon, B Duployer and E Perez. 2016. Understanding the fragmentation pattern of marine plastic debris. *Environ. Sci. Technol.* 50:5668–5675.
- Thompson RC, Y Olsen, RP Mitchell, A Davis, SJ Rowland, AW John, D McGonigle and AE Russell. 2004. Lost at sea: where is all the plastic? *Science* 304:838.
- Van Cauwenberghe L, M Claessens, MB Vandegehuchte and CR Janssen. 2015. Microplastics are taken up by mussels (*Mytilus edulis*) and lugworms (*Arenicola marina*) living in natural habitats. *Environ. Pollut.* 199:10–17.
- Von Moos N, P Burkhardt-Holm and A Koehler. 2012. Uptake and effects of microplastics on cells and tissue of the blue mussel *Mytilus edulis* L. after an experimental exposure. *Environ. Sci. Technol.* 46:11327–11335.
- Vroom RJE, AA Koelmans, E Besseling and C Halsband. 2017. Aging of microplastics promotes their ingestion by marine zooplankton. *Environ Pollut.* 231:987–996.
- Waite HR, MJ Donnelly and LJ Walters. 2018. Quantity and types of microplastics in the organic tissues of the eastern oyster *Crassostrea virginica* and Atlantic mud crab *Panopeus herbstii* from a Florida estuary. *Mar. Pollut. Bull.* 129:179–185.
- Wang M, X Wang, X Luo and H Zheng. 2017. Short-term toxicity of polystyrene microplastics on mysid shrimps *Neomysis japonica*. p. 012136. In IOP Conference Series: Earth and Environment Science. IOP Publishing.
- Wang S, W Lu, O Tovmachenko, US Rai, H Yu and PC Ray. 2008. Challenge in understanding size and shape dependent toxicity of gold nanomaterials in human skin keratinocytes. *Chem. Phys. Lett.* 463:145–149.
- Ward JE and DJ Kach. 2009. Marine aggregates facilitate ingestion of nanoparticles by suspension-feeding bivalves. *Mar. Environ. Res.* 68:137–142.
- Ward JE and NM Targett. 1989. Influence of marine microalgal metabolites on the feeding behavior of the blue mussel *Mytilus edulis*. *Mar. Biol.* 101:313–321.
- Ward JE, JS Levinton and SE Shumway. 2003. Influence of diet on pre-ingestive particle processing in bivalves I: Transport velocities on the ctenidium. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 293:129–149.
- Watts AJ, MA Urbina, R Goodhead, J Moger, C Lewis and TS Galloway. 2016. Effect of microplastic on the gills of the shore crab *Carcinus maenas*. *Environ. Sci. Technol.* 50:5364–5369.
- Wright SL, RC Thompson and TS Galloway. 2013. The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review. *Environ. Pollut.* 178:483–492.
- Wu WM, J Yang and CS Criddle. 2017. Microplastics pollution and reduction strategies. *Front. Env. Sci. Eng.* 11:6.
- Yu X, J Peng, J Wang, K Wang and S Bao. 2016. Occurrence of microplastics in the beach sand of the Chinese inner sea: the Bohai Sea. *Environ. Pollut.* 214:722–730.
- Zhang C, X Chen, J Wang and L Tan. 2017. Toxic effects of microplastic on marine microalgae *Skeletonema costatum*: Interactions between microplastic and algae. *Environ. Pollut.* 220:1282–1288.