

해양생태계 보호 기반의 해양 미세플라스틱 위해성평가 전략

정지현^{1,2*} · 심원준^{1,2} · 김문구^{1,2}

¹한국해양과학기술원 위해성분석연구센터

²과학기술연합대학원대학교

Governance Strategy for Marine Microplastic Risk Assessment based on Ecosystem Protection

Jee-Hyun Jung^{1,2*}, Won Joon Shim^{1,2}, Moonkoo Kim^{1,2}

¹Risk Assessment Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Geoje 53201, Korea

²Department of Marine Environmental Science, Korea University of Science and Technology, Daejeon 34113, Korea

Corresponding Author

Jee-Hyun Jung

Risk Assessment Research Center, Korea

Institute of Ocean Science and

Technology, Geoje 53201, Korea

E-mail : jungjh@kiost.ac.kr

Received : March 27, 2023

Revised : March 29, 2023

Accepted : May 24, 2023

미세플라스틱 입자는 환경 내 어디에나 존재하며 크기, 모양 또는 유형의 표준화된 입자가 아니다. 따라서 독성자료를 바탕으로 해수, 퇴적물 등 해양환경의 다차원을 정확하게 평가하고 관리하는 위험평가 프레임워크를 구축하는 것은 매우 어렵다. 본 연구에서는 해양환경 미세플라스틱의 특징과 영향을 조사하였고, 해양환경 미세플라스틱의 분포와 생물영향에 따른 위해도 평가 프레임워크(초안)를 제안하고 있다. 환경 미세플라스틱의 특성은 매우 다양하지만 대부분의 독성 데이터는 독특한 형태와 유형에 집중되어 있으며, 실험실 노출 생물과 관리해야 하는 생물 종도 다르다. 실제적으로, 지금까지의 수집된 연구결과는 위해성평가에 활용하기에 독성 데이터 품질에 있어 불확실성이 높기도 하며, 전통적인 위해성평가 프레임워크를 적용하는 데 있어 고려할 부분이 많이 존재한다. 그러나, 현재 미세플라스틱 관리에 대한 국제사회의 움직임이 점차 강화되고 있고, 해양환경의 미세플라스틱 오염도가 높아지고 있는 점을 고려하면, 해양환경의 미세 플라스틱 특성에 기초한 위해성평가 기법 구축에 대한 추가 연구가 제안되어야 할 것이다.

Microplastic particles are ubiquitous in the environment and not standardized particles of size, shape, or type. Therefore, it is very limited to establish a risk assessment framework that accurately evaluated and manage the multi-dimension of marine environment including seawater and sediment based on toxic data. In the study, we review the characteristics and effects of marine environmental microplastic and suggest risk assessment framework (draft) based on the distribution and impact of marine environmental microplastics. Although, the characteristics of environmental microplastic are very widely but the most abundant toxic data are concentrated on unique shape and type, and there are also large gaps of test organism between laboratory-exposed organisms and resident species. Great limitations with respect to toxicity data quality also exist for traditional effect assessment methods, which in reliability of the resulting risk characterizations. However, considering the fact that the international community's movement on microplastics management is gradually strengthening and the pollution level of microplastics in marine environment is increasing, further research on environmental relevant risk assessment technique should be proposed based on the characteristics of microplastics in the marine environment.

Keywords: Microplastic(미세플라스틱), Risk assessment(위해성평가), Marine(해양), Ecosystem(생태계), Protection(보존)

1. 서론

다양한 해양환경 매질에 잔류하는 플라스틱은 지난 수십 년간 전 세계 해양생태계의 안전성을 위협하는 주요 인자로 인식되어 오고 있다(European Marine Strategy Framework Directive 2008/56/EC). 플라스틱의 생산량은 대량생산시기인 1950년대 이후부터 매년 10%씩 증가하여 2050년까지 330억 톤에 이를 것으로 추정되며, Geyer et al. (2017)은 과거 65년간 생산된 플라스틱(82억 톤 가량)의 59%가 폐기물로 매립되었거나, 환경으로 배출된 것으로 추정하고 있다. Jambeck et al. (2015)은 2010년 연안 192개국에서 2억 7500만 톤의 플라스틱 폐기물이 발생했으며, 480~1,270만 톤이 바다로 유입된 것으로 보고하고 있으며, 국가 간 해양으로 유입되는 플라스틱 폐기물을 관리하는 시스템이 마련되지 않으면 육지에서 바다로 진입할 수 있는 플라스틱 폐기물의 누적수량이 지속적으로 증가할 것으로 경고하고 있다. 미세플라스틱은 투기, 강, 하수처리장 배출수, 슬러지 등 육상기인과 해상자체 발생 경로로 해양생태계에 유입되며 시간이 지날수록 자연적 풍화과정을 통하여 점차 잘게 쪼개져서 크기가 마이크로에서 나노 수준으로 미세화 된다. 섬, 대양, 극지방 등 지구 전반의 매체에서 해양 미세플라스틱이 검출된다는 보고가 이어짐에 따라, 전 지구적 환경 이슈로 자리 잡게 되었다. 해수보다 밀도가 작은 경우에는 부유성 미세플라스틱은 대기를 통해 장거리 이동하여 남태평양 및 극지방에서도 관측되기도 한다(Andrady, 2011). 해수의 밀도보다 큰 미세플라스틱은 해수층에 잔류하면서 환경에 존재하는 유기물, 생체물질과의 결합(생물학적 오염, Biofouling)에 의해 해양 아래로 가라앉아 퇴적물을 오염시킨다고 보고되고 있다(Zhu et al., 2019). 따라서 해양환경에 한번 유입된 미세플라스틱은 해양 및 기타 환경에서 수년 동안 유지되며(Strungaru et al., 2018; Barboza et al., 2015), 해양생태계의 건강도 뿐 아니라, 수산물 섭취를 통해 인체의 건강까지 위협하고 있는 상황에 이르렀다. 따라서 유엔환경계획(UNEP)은 2014년의 국제환경 문제를 갱신하면서 유엔 지속가능발전목표(SDG) 14-1에 미세플라스틱을 포함하는 '플라스틱 해양 쓰레기'를 포함시켰고, 2025년까지 해양(미세)플라스틱 쓰레기를 포함한 육상기인 해양오염의 예방과 현저한 저감을 목표로 제시할 것을 권고하고 있으며, 유엔 환경총회(UNEA)는 2014년 개최된 제1차 총회부터 '19년의 제4차까지 매회 미세플라스틱을 포함한 해양플라스틱 쓰레기에 대해 결의안을 채택하였고, 회원국에 해양(미세)플라스틱 쓰레기 오염에 대응하는 연구개발을 권고하였다. 2022년 개최된 제5차 총회에서는 해양 쓰레기 및 플라스틱 오염을 규제하기 위한 구속력 있는 국제협약 진행에 대한 논의가 진행되는 등, 미세플라스틱의 오염 및 관리에 대한 국제사회의 움직임이 점차 강화되고 있는 실정이다.

해양환경으로부터 생체 내로 유입된 미세플라스틱이 수생생물에 미치는 잠재적 영향은 물리적, 화학적 영향이 지속적으로 보고되고 있으며, 특히, 플라스틱 제품 제조 중에 포함된 첨가물, 또

는 환경 내 잔류하면서 2차적으로 흡수된 오염물질(Teuten et al., 2009; Frias et al., 2010) 등에 대한 유해성도 우려되고 있는 실정이다. 특히 갑각류, 연체동물, 어류와 같은 몇몇 실험 종에 대한 노출실험을 통해 유전독성, 산화 스트레스, 행동변화, 생식장애, 사망률, 개체 수 감소, 전이 효과 등을 포함한 물리, 화학적 독성을 유발할 수 있다고 보고하고 있으며(Avio et al., 2015; Fonte et al., 2016; Gambardella et al., 2017; Guilhermino et al., 2018; Zhu et al., 2019), 해양생태계 상위포식자인 어류에서는 실험실 조건에서 신경독성의 영향이 확인되기도 하였다(Oliveira et al., 2013). 미세플라스틱은 신경독성 외에도 세포 산화 스트레스를 증가시킨다고 알려져 있는데, 플라스틱 노출은 항산화반응을 유발시키며, 결과적으로 세포막의 지질 과산화(LPO)로 이어지며(Alomar et al., 2017; Barboza et al., 2020), 일부는 신경독성과도 연관성을 가진다고 알려져 있다. 독성연구가 점차 증가하고 있음에도 불구하고, 이러한 연구결과를 가지고 해양에서 플라스틱의 관리수준을 결정하는 것에는 한계점 가지고 있다(Shim and Thompson, 2015). 즉, 많은 미세플라스틱 유해영향에 대한 자료들 가운데 해양환경에 실제 영향을 미치고 있는 환경유익적 미세플라스틱의 종류에 대한 과학적 자료는 여전히 매우 제한적인 상황이다. Ziajahromi et al. (2017)은 섬유형 및 구형 미세플라스틱의 독성을 비교한 결과, 섬유형 미세플라스틱의 독성영향이 크게 나타났다고 보고하였다. 또한 Gray and Weinstein (2017)은 새우류(grass shrimp)에서 크기별 플라스틱 독성을 비교하였을 때 동일한 농도(500,000 n/l)의 미세플라스틱에 노출되었을 때, 50 µm보다 큰 미세플라스틱이 작은 미세플라스틱보다 독성이 더 높다고 보고하는 등 미세플라스틱의 크기와 형태별, 생물별 미세플라스틱 영향은 차이가 나는 것으로 보고되고 있다. Savoca et al. (2021) 등은 문헌조사를 통해 10년간의 미세플라스틱의 오염빈도를 분석한 결과, 386종의 어류 중 210종이 Plastic debris를 섭취한 것을 확인하여 26%에 이르는 섭식빈도를 확인하였고, 모형 적용을 통해 해마다 2.4%씩 발견빈도가 증가하는 추세를 확인하였다. 또한, 영양단계가 높을수록, 연안 서식어류가 대양에 서식하는 종보다 플라스틱 섭취율이 높았다고 보고하고 있다. 물론 각각의 결과의 분석수준(장비종류 등)과 모델의 한계성을 고려한다 하더라도, 미세플라스틱의 해양생물오염의 증가추세가 시사하는 바는 우선은 현재 해양생태계에 미치는 유해성에 대한 체계적이고 정확한 평가가 이루어져야 하며, 이는 향후 해양환경을 관리하는 데 중요한 기준이 될 수 있다는 것이다. 미세플라스틱은 플랑크톤, 무척추동물, 척추동물(어류) 등의 생물축적을 통해 최종적으로 인체에 유해물질로써 작용할 수 있기 때문에, 해양생물만이 아니라, 생태계에 광범위한 문제를 야기할 수 있다. 따라서 지난 20년간 진행된 연구데이터를 기반으로 국내 연안의 생물이나 환경을 충분히 고려하여 미세플라스틱 오염으로부터 해양생태계를 보호하고 관리하기 위한 체계적이고 과학적인 연구가 기반이 된 관리기법이 필요한 실정이다. 또한 해양 미세플라스틱의 오염을 관리하기 위하여 실제 국내 연안환

경기반, 생태계영향기반, 현장 오염플라스틱 특성기반의 과학적 관리수준이 제시되어야 하며 본 연구에서는 실제 국내 해양생태계의 플라스틱 오염에 대한 위해성을 평가하기 위해 고려되어야 할 다양한 요인들을 제시하고 해양생태계 보호기반의 미세플라스틱 위해성기법을 제안함으로써, 미세플라스틱 오염으로부터 해양생태계를 보호하고 관리하기 위한 과학적 정책수립에 도움이 되고자 한다.

2. 본론

해양환경은 미세플라스틱만의 영향을 예측하고 평가하기에 매우 어렵고 복잡 다양한 요인의 작용이 혼재하는 곳이다. 특히 해양오염 미세플라스틱은 그 크기와 형태와 재질이 매우 다양한 입자이며, 표준화나 정형화되어 있지 않으므로 제한된 환경(실험실)에서 모사된 실험을 통해 기인한 미세플라스틱의 위해성여부를 정확히 이해하기에는 큰 한계를 가질 수 밖에 없다. 따라서 미세플라스틱은 생태계 영향기반의 생물서식 매질에 따라 체계적이고 신중한 접근이 필요하다 할 수 있다. 본 연구에서는 국내 해양환경오염 미세플라스틱으로부터 연안생태계를 보호하기 위한 기준을 마련하기 위하여 다음의 3가지 고려사항을 제안하고, 해양생태계 보호기준을 시범도출 하는 기법을 소개하고자 한다. 사실, 미세플라스틱은 환경 중에 존재하는 화학오염물질과 매우 다른 특성(비균질성/입자/비정형화 등)을 가지고 있으므로 전통적인 위해성평가 방법으로 정확하게 보호기준을 마련할 수 있을지에 대한 불확실성은 여전히 존재한다. 그러나, 다음의 사항들을 고려하고 개선하였을 때 과학적 연구결과 기반의 생태계보호기준을 제시할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

1) MP 독성평가데이터의 양적과 질적 수준 검토

위해성 평가의 정확도(불확실성)는 입력된 데이터의 품질에 크게 좌우된다. 실제 해양환경 중 오염빈도와 동떨어진 오염원을 가지고 전혀 해양에 존재하지 않은 생물로 독성평가를 시행한 후 생산된 데이터를 가지고 해양환경 관리기준을 선정한다면, 분명히 판단의 기준에 한계성이나 오류가 생길 수 있는 것은 당연한 일이다. 독성학 측면에서, 생물 종간에는 독성민감도 차이가 존재하며, 특히 수생생물의 경우에도 담수 종과 해산 종간의 민감도의 차이가 크므로 목적에 따라 수집데이터를 기준을 갖고 체계적으로 필터링하는 작업은 매우 중요하다. 물론, 환경에 유의적인 실험 연구결과는 매우 제한적이어서 신뢰도 높은 독성평가 자료 양을 충족할 수 없는 상황이 대부분이므로, 수집된 데이터를 잘 사전검토하고, 때로는 필요한 자료를 연구자가 직접 생산하는 작업이 필요하다. 이때 위해성평가 결정에 기초할 수 있는 신뢰할 수 있는 추정치를 공급할 수 있는 데이터베이스의 활용이 중요하므로 Isobe et al., 2019는 ECETOC (European Centre for Econdoxology

Table 1. Data criteria for risk assessment for SSD

	Minimum number of required species
US EPA	More 8 species
Netherlands	More 5 species
OECD	More 8 species
Australia, New Zealand	More 8 species within 4 taxa
EU TGD	More 10 or 15 species
Korea, Ministry of Environment	More 5 species within 4 taxa

and Toxicology of Chemicals) 등 독성 데이터베이스를 통해 수집할 것을 권장하고 있다. 수집된 데이터는 급/만성 여부와 생물 종의 검토, 평가된 플라스틱의 형태와 재질에 따라 결과 분류하고 필터링하여, 위해성평가를 위한 데이터의 양적 질적 수준을 맞추 것을 제안한다. 비록, 유해화학물질의 기준의 예시이기는 하나, 위해성평가를 위해 준비해야 하는 독성 데이터 양과 질적 기준은 Table 1과 같으며 이를 참고하여 생물 종을 구성하고 데이터를 도출하는 것이 중요하다. 따라서 어떠한 데이터를 모형에 적용할 것인가를 선정하는 작업은 산출된 최종값의 활용 목적에 맞게 구성되는 것이 핵심이다 생각된다.

2) 미세플라스틱의 위해 요인의 선별 및 독성자료 구축

지금까지 보고된 해양 미세플라스틱 자체의 유해 요인을 나누어 보면 4가지 정도로 예상해 볼 수 있다. 첫째 플라스틱 파편의 물리적인 자극을 통해 일으키는 위해성을 들 수 있다. 해양생물의 경우 섭식 또는 해수를 통해 운반된 플라스틱이 위장관/아가미 등 조직과 접촉하면서 직접적으로 다양한 물리적 영향을 미칠 것으로 알려져 있으며, 둘째, 탄화수소 기반의 고분자 화합물인 플라스틱의 소수성의 특성으로 인하여 환경에 존재하는 소수성 강한 잔류성 유기오염물질(persistent organic pollutants, POPs)의 흡착으로 인한 오염물질의 농축을 들 수 있다. 셋째는 플라스틱 제조과정 중에 가공 용이성과 기능성을 향상시키기 위해 혼합된 다양한 가소제, 난연제, 열·자외선 안정제, 산화방지제 등의 화학물질로 인한 위해성을 들 수 있다. 플라스틱이 분해되는 과정에서 이러한 첨가제는 해양매질에 유출된 후 생물확장, 세대전이 등을 통해 해양생물에 치명적 독성물질로서 작용할 수 있다. 넷째로는 플라스틱이 해양환경 중에 다양한 병원성 생물의 부착기질로서의 유해성을 들 수 있다. 비록 크기가 클수록 잠재적 영향이 클 것으로 생각되고 있으나, 작은 크기의 플라스틱도 미세한 크기의 병원성 생물의 운반체로 작용하여 생태계 내 유해성을 증가시킬 수

있다. 그러나 앞서 언급한 직간접적 플라스틱 위해 사례에 대한 해양생물의 영향을 규명한 연구결과는 일부 사례에만 집중되거나, 실험의 용의성에 크게 의존적인 결과만 누적되는 실정으므로, 최종 목적에 맞는 결과를 도출하기 위하여는 대상과 물질을 선별하고 문헌을 충분히 검토한 이후 체계적으로 데이터를 구축하는 연구가 필요하다 하겠다. 실제, 모든 미세플라스틱의 특성에 대한 독성자료도 미흡하며, 더욱이 위해성평가 사례는 거의 없는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 해양생태계 오염빈도가 높은 미세플라스틱의 특성(크기, 모양, 재질)을 조사하고 이를 바탕으로 카테고리 별로 나누어 독성자료를 구축하는 것을 제안한다.

3) 미세플라스틱의 무영향에측농도의 도출

미세플라스틱의 위해성평가에 대한 연구결과는 전세계적으로 매우 드물게 보고되고 있다(Burns and Boxall, 2018; Everaert et al., 2018; Besseling et al., 2019; Jung et al., 2021). 대부분 미세플라스틱 입자의 해양 및 담수생물에 대한 독성자료를 모두 수집 후 종민감도분포(species sensitivity distribution; SSD) 분석을 통해 미세플라스틱 입자에 대한 5% hazardous concentration (HC₅)이나 무영향에측농도(predicted no effect concentration; PNEC)를 도출하는 방식을 선택하였다. 실제 미세플라스틱의 무영향에측농도를 산출한 결과를 보면, 6.65 particles/l (Everaert et al., 2018; 크기, 형태 모두), 121 particles/l (Everaert et al., 2018; > 1 µm, 형태 모두), 12 particles/l (Jung et al., 2021; 20~300 µm, 구형 및 비구형)로 제시하고 있어 몇 안 되는 연구결과들간의 절대적인 비교도 힘들고, 오염자료를 가지고 직접적으로 위해도를 적용하여 해석하기에 어려움이 있다. 앞서 언급한 바와 같이, 미세플라스틱 입자의 경우 동일한 농도라도 크기나 형태에 따라 독성영향에 차이가 있다고 보고(Gray and Weinstein, 2017; Ziajahromi et al., 2017)되고 있으므로 환경 유의적인 플라스틱에 대하여 위해성평가를 수행하여야 보다 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다. Jung et al. (2021)은 국내 최초로 미세플라스틱의 해수와 퇴적물의 PNEC(해수: 12 particles/l, 퇴적물: 116,000 particles/kg)를 도출하여 보고하였다. 그러나 저자는 도출된 자료에서 각 해양매질에 서식하는 종의 독성자료의 양적·질적 한계성을 지적하고 있다. 특히 퇴적물의 경우 가용할 수 있는 자료가 전세계적으로 1개, 저자가 생산한 자료 1개 등 총 2개의 자료밖에 존재하지 않아 매우 불확실성이 높았다고 설명하고 있다. 따라서, 환경유익적인 미세플라스틱의 독성자료의 질적 수준은 위해성 평가값의 불확실성을 좌우하는 매우 중요한 요인임을 알 수 있다. 또한, 실제 해양환경에서 주로 검출되는 미세플라스틱은 크기가 20~300 µm인 섬유형(fiber) 혹은 파편형(fragment) 입자이므로, PNEC 도출 시에도 환경 중 검출되는 것과 동일한 크기와 형태의 미세플라스틱에 대한 독성자료를 활용하여 위해성평가를 수행하는 것이 바람직하다. 미세플라스틱 유해인자 중 하나인 매개 화학물질에 대한 위해성평가의 경우 식

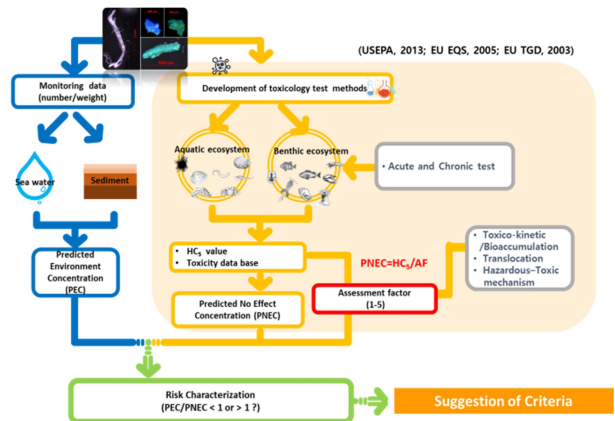


Fig. 1. Framework for Risk Assessment for marine environmental microplastic.

량농업기구(FAO)에서 미세플라스틱 매개 화학물질 노출(패류 섭취 경로)로 인한 인체위해성 우려는 없다고 보고하고 있으나(Lusher et al., 2017), 미세플라스틱 기원 화학물질의 환경위해성평가가 이루어진 사례는 매우 부족하며, Koelmans et al. (2017)은 미세플라스틱에 흡착된 소수성 유해물질(예: 다환방향족탄화수소 등)의 위해성은 미세플라스틱을 매개로 해서 유의하게 증가하지는 않는다고 보고하고 있다. 그러나, 실제 미세플라스틱에 첨가제로 사용되는 화학물질(브롬계 난연제, 프탈레이트, bisphenol A, 노닐페놀, 산화방지제 등)의 경우, 화학물질과 플라스틱 간 결합이 약하기 때문에 이러한 화학물질이 미세플라스틱으로부터 쉽게 용출되어 해양생물에 노출 및 축적될 수 있으므로 이를 고려하여 위해성을 해석하는 것이 중요하다(Hermabessiere et al., 2017). 특히 미세플라스틱의 노출평가 자료에 대한 자료가 미진한 실정을 감안할 때 앞서 제시한 결과들에 대한 활용은 신중하게 고려되어야 할 것이다.

3. 결론

해양환경 중 분포하고 있는 미세플라스틱은 크기와 형태, 재질이 다양하므로 독성영향이 다르게 나타나며, 수행된 각 시험 조건도 연구자별, 생물별로 표준화 되어있지 않아 수집된 자료의 취합 및 분류에 많은 어려움이 있다. 미세플라스틱은 크기가 작아 질수록, 급성 노출보다 만성 노출에서 독성영향이 증가하는 기존의 연구결과를 보이고 있다. 그러나 형태와 재질에 따른 독성영향에 대한 경향성은 생물 종과 평가 종말점, 미세플라스틱 특성이 자료마다 서로 달라 절대치로 비교할 수 없으므로 실제로 단언하기 어려우며(Kim et al., 2019), 향후 보다 많은 연구데이터가 생산되어 위해성평가의 정확도를 향상시켜야 할 것이다. 따라서 기존의 데이터베이스로부터 자료의 평가 및 분류가 위해성평가를 위

하여 얼마나 중요한 항목인지를 가능할 수 있다. Fig. 1에서는 본 연구에서 제시하는 미세플라스틱 환경기준 도출 프로세스이다. 먼저 위해성을 평가하고자 하는 해양매질에 서식 종에 대한 환경 유의적인 미세플라스틱에 대한 평가를 기반으로 독성평가 자료의 데이터를 수집한다. 가용한 데이터의 수와 질에 따라 위해성평가 결과의 신뢰도가 증가하며, 불확실성이 감소된다. 이때 앞서 논의한 데이터의 질적 양적 수준을 고려하고 필터 하여 종 분포도(SSD)를 통해 95%의 생물이 보호받을 수 있는 기준 HC₅ 값을 독성자료 질 검증을 통해 보정한 후 PNEC를 도출한다. 이렇게 도출된 PNEC 값은 실제 해양의 오염모니터링 자료를 통해 산출된 해양예측농도(PEC) 값을 산정하여 해역별 생태 위해도(risk characterization)를 제시할 수 있다. 이때 산출된 위해도가 1을 기준으로 관리지역으로 고려될 수 있다.

위해성평가 결과는 과학자 그룹과 환경을 관리하는 주체인 이해당사자(국가/지자체 등) 간의 소통을 통해 정책에 반영될 수 있다. 이해당사자는 전문가 그룹으로부터 도출된 과학적 근거를 통해 문제를 인식하고 평가, 조치, 결정 등을 거쳐 사실을 평가하는 과정을 거쳐 위해도 수준에 맞는 조치와 결정을 수행한다. 미세플라스틱 오염으로부터 생태계를 보호할 수 있는 과학적 기준을 마련하기 위하여 얼마만큼의 노출이 생물에 영향을 미치는지를 판단하는 위해성평가(risk assessment)가 선행되어야 한다. 그러나 본 연구에서 제시된 무영향농도(12 particles/l)를 참고하고 예측된 플라스틱 오염 증가율을 고려하면, 2066년에는 연안의 10% (Isobe et al., 2019), 2100년에는 외해 22%, 연안 82%가 무영향예측농도를 초과(Everaert et al., 2018)하는 것으로 확인되었다. 따라서 누적되고 있는 미세플라스틱의 오염도를 고려할 때, 지금 이 시점이 보다 적극적인 해양환경 관리에 대한 고민이 필요한 시점이라 사료된다.

4. 요약

본 저자는 미세플라스틱에 대한 해양오염현황 및 생물영향을 간략하게 소개하고 해양환경을 관리보호하기 위한 위해성평가 프로세스 등을 제시 하였다. 위해성평가를 통해 도출된 결과는 과학자 그룹과 환경을 관리하는 주체인 이해당사자(국가/지자체 등) 간의 소통을 통해 정책에 반영될 수 있는 매우 중요한 근거로서, 이해당사자는 전문가 그룹으로부터 도출된 과학적 근거를 통해 문제를 인식하고 평가, 조치, 결정 등을 거쳐 사실을 평가하는 과정을 거쳐 위해도(risk characterization) 수준에 맞는 조치와 결정을 수행할 수 있을 것으로 생각된다. 해양환경으로 유입된 다양한 미세플라스틱은 크기나 특성이 변화되고, 오염매질이나 생물 종/세대 등을 전환하면서 지속적으로 잔존하여 해양환경에 잔류·축적된다. 이 과정에서 부정적 영향을 받은 생물과 생태계는 자연회복(자연회생)이 불가하며, 그 피해는 증폭되어 인간에게까지 영향을 미칠 것으로 예상된다. 즉, 지금의 오염수준을 파악하고 진

단하고 조치하지 않으면 앞으로 더욱더 악화될 것이라는 것이다. 따라서 더 악화되는 것을 막을 수 있는 "골든타임"인 지금 과학적 자료를 기반으로 미세플라스틱의 오염이 관리되어야 할 것이며, 관리의 주체인 이해 당사자들과 전문가들의 협력과 대안마련이 절실하다 하겠다.

사 사

이 논문은 2022년도 정부(해양수산부)의 재원을 해양수산과학기술진흥원-해양생태계 보호기준 마련을 위한 위해성평가 사업 지원을 받아 수행된 연구입니다(KIMST-2022-0383).

참고문헌

- Alomar C, Sureda A, Capo X, Guijarro B, Tejada S, Deudero S. 2017. Microplastic ingestion by *Mullus surmuletus Linnaeus*, 1758 fish and its potential for causing oxidative stress. *Environ Res* 159: 135-142.
- Andrady AL. 2011. Microplastics in the marine environment. *Mar Pollut Bull* 62: 1596-1605.
- Avio CG, Gorbi S, Milan M, Benedetti M, Fattorini D, D'Errico G, Pautetto G, Bargelloni L, Regoli F. 2015. Pollutants bioavailability and toxicological risk from microplastics to marine mussels. *Environ Pollut* 198: 211-222.
- Barboza LGA, Gimenez BCG. 2015. Microplastics in the marine environment: current trends and future perspectives. *Mar Pollut Bull* 97: 5-12.
- Barboza LGA, Lopes C, Oliveira P, Bessa F, Otero V, Henriques B, Raimundo J, Caetano M, Vale C, Guilhermino L. 2020. Microplastics in wild fish from North East Atlantic Ocean and its potential for causing neurotoxic effects, lipid oxidative damage, and human health risks associated with ingestion exposure. *Sci Total Environ* 717: 134625.
- Besseling E, Redondo-Hasselerharm P, Foekema EM, Koelmans AA. 2019. Quantifying ecological risks of aquatic micro- and nanoplastic. *Crit. Rev. Environ Sci Technol* 49: 32-80.
- Burns EE, Boxall AB. 2018. Microplastics in the aquatic environment: Evidence for or against adverse impacts and major knowledge gaps. *Environ Toxicol Chem* 37: 2776-2796.
- Everaert G, Van Cauwenberghe L, De Rijcke M, Koelmans AA, Mees J, Vandegheuchte M, Janssen CR. 2018. Risk assessment of microplastics in the ocean: Modelling approach and first conclusions. *Environ Pollut* 242: 1930-1938.
- Fonte E, Ferreira P, Guilhermino L. 2016. Temperature rise and microplastics interact with the toxicity of the antibiotic cefa-

- lexin to juveniles of the common goby (*Pomatoschistus microps*): Post-exposure predatory behaviour, acetylcholinesterase activity and lipid peroxidation. *Aquat Toxicol* 180: 173-185.
- Frias JP, Sobral P, Ferreira AM. 2010. Organic pollutants in microplastics from two beaches of the Portuguese coast. *Mar Pollut Bull* 60: 1988-1992.
- Gambardella C, Morgana S, Ferrando S, Bramini M, Piazza V, Costa E, Garaventa F, Faimali M. 2017. Effects of polystyrene microbeads in marine planktonic crustaceans. *Ecotoxicol Environ Saf* 145: 250-257.
- Geyer R, Jenna R, Jambeck LKL. 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances* 3.7
- Gray AD, Weinstein JE. 2017. Size- and shape-dependent effects of microplastic particles on adult daggerblade grass shrimp (*Palaemonetes pugio*). *Environ Toxicol Chem* 36: 3074-3080.
- Guilhermino L, Vieira LR, Ribeiro D, Tavares S, Cardoso V, Alves A, Almeida JM. 2018. Uptake and effects of the antimicrobial florfenicol, microplastics and their mixtures on freshwater exotic invasive bivalve *Corbicula fluminea*. *Sci Total Environ* 622-623: 1131-1142.
- Hermabessiere L, Dehaut A, Paul-Pont I, Lacroix C, Jezequel R, Soudant P, Duflos G. 2017. Occurrence and effects of plastic additives on marine environments and organisms: A review. *Chemosphere* 182: 781-793.
- Isobe A, Iwasaki S, Uchida K, Tokai T. 2019. Abundance of non-conservative microplastics in the upper ocean from 1957 to 2066. *Nat Comm* 10: 417.
- Jambeck JR, Geyer R, Wilcox C, Siegler TR, Perryman M, Andrady A, Narayan R, Law KL. 2015. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science* 347: 768-771.
- Jung JW, Park JW, Eo S, Choi J, Song YK, Cho Y, Hong, SH, Shim WJ. 2021. Ecological risk assessment of microplastics in coastal, shelf, and deep sea waters with a consideration of environmentally relevant size and shape. *Environ Pollut* 270: 116217.
- Kim K, Hwang J, Choi JS, Heo Y, Park JW. 2019. The effects of microplastics on marine ecosystem and future research directions. *Korean J Environ Biol* 37: 625-639.
- Koelmans AA, Besseling E, Foekema E, Kooi M, Mintenig S, Ossendorp BC, Redondo-Hasselerharm PE, Verschoor A, Van Wezel AP, Scheffer M. 2017. Risks of plastic debris: unravelling fact, opinion, perception, and belief. *Environ Sci Technol* 51: 11513-11519.
- Lusher A, Hollman P, Mendoza-Hill J. 2017. Microplastics in fisheries and aquaculture: status of knowledge on their occurrence and implications for aquatic organisms and food safety. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper* 615.
- Oliveira M, Ribeiro A, Hylland K, Guilhermino L. 2013. Single and combined effects of microplastics and pyrene on juveniles (0+group) of the common goby *Pomatoschistus microps* (Teleostei, Gobiidae). *Ecol Indic* 34: 641-647.
- Savoca MS, McInturf AG, Hazen EL. 2021. Plastic ingestion by marine fish is widespread and increasing. *Glob Change Biol* 27: 2188-2199.
- Shim WJ, Thomposon RC. 2015. Microplastics in the ocean. *Arch Environ Contam Toxicol* 69: 265-268.
- Strungaru SA, Jijie R, Nicoara M, Plavan G, Faggio C. 2018. Micro (nano) plastics in freshwater ecosystems: abundance, toxicological impact and quantification methodology. *Trends Anal Chem* 110: 116-128.
- Teuten EL, et al. 2009. Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife. *Philos Trans R Soc B* 364: 2027-2045.
- Zhu Z, Wang S, Zhao F, Wang S, Liu F, Liu G. 2019. Joint toxicity of microplastics with triclosan to marine microalgae *Skeletonema costatum*. *Environ Pollut* 246: 509-517.
- Ziajahromi S, Kumar A, Neale PA, Leusch FD. 2017. Impact of microplastic beads and fibers on waterflea (*Ceriodaphnia dubia*) survival, growth, and reproduction: implications of single and mixture exposures. *Environ Sci Technol* 51: 13397-13406.