

환경 중 노출되는 나노플라스틱의 현황 및 관리실태

박하늘^{1,2}, 박정규², 김영훈^{1*}

¹광운대학교 화학공학과

01897 서울시 노원구 광운로 20

²한국환경연구원 지속가능전략연구본부 환경보건연구실

30147 세종시 시청대로 370

(2024년 1월 8일 투고; 2024년 2월 23일 수정본 접수; 2024년 2월 23일 채택)

Current Status and Management of Nanoplastics Exposed in Environment

Ha-neul Park^{1,2}, Jeongue Park², and Younghun Kim^{1*}

¹Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University

20 Kwangwoon-ro, Nowon-gu, Seoul 01897, Korea

²Division for Environmental Health, Sustainability Strategy Research Group, Korea Environment Institute

370 Sicheong-daero, Sejong 30147, Korea

(Received for review January 8, 2024; Revision received February 23, 2024; Accepted February 23, 2024)

요 약

나노플라스틱(NP)은 마이크로플라스틱(MP)에 비해 뚜렷한 물질적 특성을 나타내므로 별도의 관리 인식이 필요하다. NP에 관한 연구 결과와 정책 문서를 검토한 결과, 대부분의 정책 프레임워크는 MP를 NP와 구별하지 않고 주로 5 mm 이하 크기의 고체 합성 고분자 물질로 정의하고 있다. 그러나 최근 EU REACH 규정 개정에 따르면, MP를 5 mm ~ 100 nm로 정의함으로써 100 nm 보다 작은 크기를 NP로 구분하여 인식하고 있음이 나타난다. NP에 대한 연구는 종종 환경 거동 및 생물체 영향 연구에서 구형 폴리스티렌 기반 NP를 사용하는 고농도 실험 조건에 중점을 두고 수계를 중심으로 한 실험 조사에 치우쳐져 있다. 특히, NP 연구에서 환경 거동 특성은 NP 유형에 따라 영향의 차이를 보여 현장 모사가 필요하다. 이러한 경향은 국내 MP 연구와 환경 정책 모두에서 MP와는 다른 NP 개념을 재정의할 필요를 뒷받침한다. 이에 본 연구는 국내외 NP 관리 현황을 평가하고, NP에 대한 기존 대응의 문제점과 정책 고려 사항을 조명하는 것을 목표로 하였다. 포괄적인 검토를 통해 MP에 대한 국제 합의에 도달하는 것은 방법론적 한계에 직면하고 잠재적으로 NP 규모를 정확하게 정의하려는 노력에 부담이 된다는 것이 분명해졌다. 따라서 국내 정책 영역에서는 EU의 최근 규제 개정을 참고하는 것이 중요하며, NP를 포함한 MP의 정의에 관한 구체적인 조정이 필요하며, 산업계 및 학계의 노력을 통해 정책적 수용이 이루어지도록 해야 할 것이다.

주제어 : 나노플라스틱, 미세플라스틱, 환경 노출, 환경 거동

Abstract : Nanoplastics (NP) exhibit distinct material properties compared to microplastics (MP), necessitating their separate recognition. Review of research outcomes and policy documents on NP reveals that most policy frameworks predominantly define MPs as solid synthetic polymer materials measuring 5 mm or less, but do not distinguish them from NP. However, recent revisions in regulations by the EU classify NPs as particles that range in size from 1 to 1,000 nm, as confirmed by some academic studies. Research on NPs often relies on experimental investigations centered around water systems, with a focus on high-concentration experimental conditions using spherical polystyrene-based NPs in behavior and impact studies. Notably, the environmental behavior characteristics of NP show differences in influence depending on the NP type, emphasizing the need for field simulation research. These challenges are mirrored in Korean society, so it is necessary to redefine NP to be distinct from MP in both research and policy. This study aimed to assess the current state of NP management globally and domestically and highlight policy considerations and issues in the existing response to NP. Upon comprehensive review, it becomes apparent that reaching an international agreement on NP faces methodological limitations, which could potentially burden efforts to precisely define NP size. Therefore, referencing the EU's recent regulatory revisions is crucial in domestic policy. Specific adjustments should commence from the MP concept through insights from the domestic industry, guidance from the academic community, and thorough discussions to ensure social acceptance.

Keywords : Nanoplastics, Microplastics, Environmental exposure, Environmental fate

*To whom correspondence should be addressed.

E-mail: korea1@kw.ac.kr, Tel: +82-2-940-5768

doi: 10.7464/ksct.2024.30.1.1 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

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.

1. 서 론

나노플라스틱(nanoplastic, NP)은 국제단위계에서 10억분의 1을 나타내는 ‘나노(nano-)’라는 접두어와 인공 합성 고분자 재료의 범용어인 ‘플라스틱(plastic)’의 합성어이다[1]. NP는 환경으로 배출 및 노출되는 미세플라스틱(microplastic, MP) 보다 작은 크기로부터 유발되어 환경 중 MP와는 차별적인 거동 특성과 위해성을 설명하기 위해 선택된 용어이다. 환경 중에서 MP를 공식적으로 보고한 것은 해양 내 잔존하는 플라스틱 폐기물 오염 조사를 수행한 1972년의 Carpenter and Smith의 연구이다[2]. 이들은 육안으로 쉽게 식별되지 않는 작은 크기로 존재하는 플라스틱 조각을 확인하면서, 그 조각의 출처가 주변에 존재하는 플라스틱 폐기물로부터 기인했을 것이라고 짐작했다. 이후 다수의 연구를 통해 플라스틱 조각이 해양 내 흔하게 존재하고 있음이 보고되었고, 그 분포 범위가 육상 담수에서 토양, 대기에 이르는 환경 매트릭스 전반이라는 사실이 확인되고 있다.

환경 중 분포하는 육안 식별이 어려운 작은 크기의 플라스틱 입자를 2004년 처음 MP로 명명한 이후 20여년이 지났지만, 실험분석과 연관된 기술적 한계로 인하여 아직까지 MP의 크기 범주에 대한 공식적 합의는 부재하다[3,4]. 그럼에도 불구하고, 국제 사회와 정책 현장에서는 MP 크기의 상한선을 ‘5 mm’로 인식하는 것이 주류이다. 화장품류 등 일부 제품군에서의 1차 MP 사용 금지를 처음 입법 제정한 미국은 2015년 ‘Microbeads Free Water Act’를 통해 “크기가 5 mm 미만으로, 인체 또는 그 일부를 바리 또는 세척하는데 사용되는 모든 고체 플라스틱 입자”로 MP를 정의하였다[5]. 국제 사회적 환경 이슈의 논의를 주도하는 UNEP (UN Environment Programme) 역시 MP를 “5 mm 보다 작은 크기의 플라스틱 입자”로 정의하고 있다[6]. 최근 화학물질에 관한 규정(Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals, REACH)을 개정한 유럽연합(European Union, EU)을 제외하고, 미국의 입법 이후 1차 MP의 사용 금지 정책을 시행하는 국가 대부분도 “5 mm 보다 작은 크기”로 MP를 정의한다[7]. 이처럼 정책 현장을 중심으로 MP의 상한 크기는 5 mm로 인식하는 것이 보편적이다.

그러나 문제는 그 하한 크기의 설정에 있다. 이것은 곧 NP를 MP와 구분하는 인식을 보여주며 직간접적인 NP 개념 정의와 연결된다. 대부분의 환경 정책에서 채택하고 있는 정의는 NP를 포괄하여 MP 개념을 정의하고 있다. 반면, 국제해양전문가 그룹(Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection, GESAMP)은 환경 중 페플라스틱의 크기와 특성을 분류하면서, 해양 쓰레기 관리 차원에서 다루어야 하는 플라스틱 범주로 ‘메가(mega, 1 m 보다 큰 것)’, ‘매크로(macro, 1 m 보다 작은 것)’, ‘메조(meso, 2.5 cm 이하)’를 구분하였고, ‘작은 크기의 플라스틱’으로 해양 쓰레기와는 다른

접근이 필요한 입자형 물질로 MP와 NP를 구분한 바 있다[3]. EU의 화학물질관리 실무 기관인 ECHA (European Chemical Agency, 이하 ECHA)는 1차 MP 규제를 위한 REACH 규정 개정을 담은 제안서의 첫 번째 버전에서 MP를 1 nm에서 5 mm 크기의 폴리머로 정의하였다. 해당 규제 제안서에 대한 공공의견 수렴 과정에서 많은 이해 관계자들은 현재 수준에서 1 nm 보다 작은 폴리머를 검출하고 정량화하는 적절한 분석 방법이 없기 때문에, 대안적으로 100 nm의 크기를 관리를 위한 하한 범주로 지정할 것으로 제안하였다[8]. 또한 현재 시행 중인 EU에서의 1차 MP 사용 제한에 대한 REACH 규정 개정에서는 이러한 논의 결과를 반영하여 100 nm까지를 MP 관리 범위로 확정하였다[9]. 이들의 정의는 NP를 별도로 정의한 것이 아니라 MP의 하한 크기 범주를 규정함으로써, 그 보다 작은 크기의 고분자 입자로서 잠재적 NP를 설명하고 간접적으로 정의한 사례이다. 반면, 학술 연구에서는 직접적으로 NP를 정의하고 있다. Monikh 외 연구자들은 입자 흡수에 중요한 역할을 하며 입자 반응성과 위험 가능성에 영향을 미치는 요인으로서 100 nm를 중요한 기준으로 보고, 이를 NP 개념 정의에 반영하고 NP를 ‘나노 물질’로 분류하는 것은 논리적이라고 주장하였다[10]. 보다 앞선 연구에서는 NP는 작은 크기로 인하여 MP와는 다른 물성을 가진 물질로 NP를 규정하고 1,000 nm 보다 작은 플라스틱 입자로 정의한 바 있다[11,12].

2014년부터 현재까지 발표된 MP와 NP의 학술논문의 발표 수는 매년 증가하고 있다(Figure 1). 단순 수치만을 비교하면, 급증하는 MP 연구에 비교하여 NP에 대한 연구는 상대적으로 부족하다. 매년 MP에 관한 결과가 수천편 이상 발표되고 있지만, 여전히 MP에 대한 개념 정의에서부터 실험 분석 및 노출-위해성 평가 방법론, 거동 및 생태·인체·환경 매체에서의 영향에 이르기까지 명확하게 정의되거나 규명하는 과학적 정보는 부족한 실정이다. 즉, MP에 대한 이론적이고 기초적인 정보가 제한적인 상황에서, 상대적으로 연구가 진행되지 못한 NP를

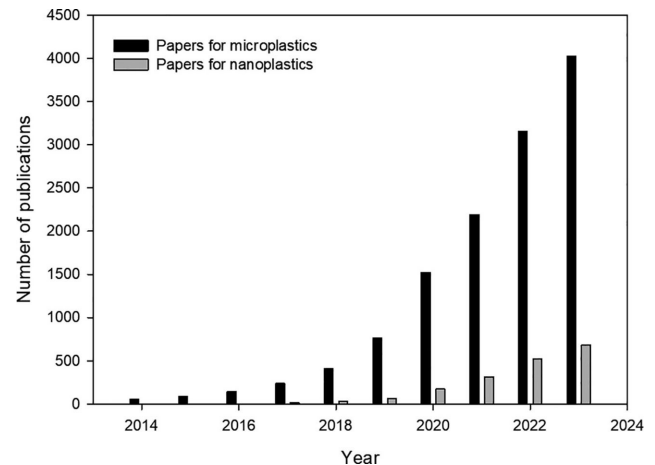


Figure 1. Annual publications relative to nanoplastic or microplastic during 2014 ~ 2023 from the Scopus.

명확히 이해하기는 더욱 쉽지 않은 일이다.

환경 중 분포하는 MP는 최종 산물이 아니며, 미세화(fragmentation)를 통해 그 보다 작은 크기의 입자로 분해될 가능성이 높다. 나노 크기의 입는 동일한 조성으로 구성된 마이크로미터 이상 크기의 벌크(bulk)형 물질과는 다른 물리적·화학적 특성을 보인다[13]. 그렇기 때문에 나노 크기의 플라스틱 입자의 발생으로 인한 환경 문제와 영향을 규명하고 영향을 저감하기 위해서는 MP와는 다른 인식을 바탕으로 NP를 연구하고 관리 정책을 수립하는 것이 필요하다. 이와 같이 MP와 NP를 구분하여 개념을 정의하고 관리할 필요성이 높아지는 가운데[14], MP 연구 맥락에서 NP는 어떻게 논의되고 있고, 또 그와 관련된 문제점은 무엇인지 살펴볼 필요가 있다. 이에, 본 연구에서는 NP와 관련하여 개념 정의에서부터 환경 중 거동과 영향 등을 다루는 주요 학술 연구 결과를 요약하고, NP에 관련된 한계점을 정리한다. 또한, NP에 대한 국내외 정책 동향을 통해 관리 실태 파악을 통하여 NP에 대한 현재 수준에서의 대응에 대한 문제점과 정책적으로 고려해야 하는 점을 되짚어 보았다.

2. 나노플라스틱의 거동과 영향

2.1 나노플라스틱의 수계내 거동

분산계에 분포하는 물질들은 중력의 영향을 받는 운동을 하지만, 입자는 그 크기가 감소할수록 브라운 운동과 콜로이드 운동으로 전환된다[15]. 환경 중 분포하는 NP는 다른 입자 또는 분자에 흡수될 가능성이 있으며, NP에 다른 물질이 흡착되어 그 크기가 다시 증가하게 되면 원래대로 중력에 의한 운동을 한다. 크기 상태 변화에 따른 운동 변화와 콜로이드 안정성이 거동 특성에 대한 주요 요인이 될 수 있다[15]. NP의 거동을 다루는 연구는 모사된 환경을 대상으로 하는 실험 연구가 대부분이며 연구의 상당수가 수계 시스템, 그 중에서도 해양을 대상으로 한다. 일부 연구에서 토양 내 거동에 대한 연구가 시도되었으며 대기를 대상으로 한 연구는 매우 제한적이다[15,16].

NP와 관련하여 환경 중 거동은 수환경 특히 해양을 대상으로 한 모델링과 실험 연구가 대부분으로, 대기와 토양에 비하여 환경 중 노출 경로와 역학적 움직임의 특성 등이 잘 알려져 있다. 그동안의 연구 사례를 종합해 볼 때, NP의 수환경 중 거동은 흡수·흡착(sorption)과 응집(aggregation), 노화(aging)와 분해(degradation), 이동(migration)과 침전(deposition)을 구분하여 설명할 수 있다[16].

표면 특성은 NP의 물리적, 화학적, 생물학적 상호 작용을 지배하며 NP의 환경 내 거동을 결정한다[15,16]. 특히 표면 특성은 주변 매트릭스 내 존재하는 물질들과 환경 조건에 따라 흡수·흡착 및 응집과 같은 입자와 물질 간 상호작용에 영향을 미칠 수 있다. 응집은 플라스틱 입자의 겉보기 크기를 변화시켜

이동성, 생체이용률 및 생태독성에 영향을 미칠 수 있다[17]. 수계 시스템에서 NP의 응집은 pH, 전해질 농도, 염도의 영향에 따라 그 양상이 달라진다[16]. Lins 외 연구진은 NP 거동은 본질적으로 환경 내 질량 농도와 연관이 있으며, 입자 농도가 증가할수록 입자 간 충돌 가능성이 증가한다고 보고하였다. 즉, 입자 농도의 증가는 주로 이종응집으로 이어진다[18]. 응집 후 플라스틱 응집체는 해수로 인하여 해안 퇴적물 또는 부유 자연 콜로이드 및 콜로이드 응집체와 접촉할 수 있으며, 이 경우 플라스틱 입자는 실리카 입자와 상호 작용하여 더 큰 이종응집체가 형성될 수도 있다[17]. 입자의 응집 역학을 정량적으로 평가하기 위해 입자-입자 부착 효율과 임계 응고 농도가 고려되기도 한다[17]. 임계농도에 대한 매개변수는 콜로이드 안전성에 관한 상호작용으로 제어되는 것으로 알려져 있다[17]. 담수에서의 응집 역학을 살펴본 일부 연구는 해양과 달리 육상의 담수는 임계응고농도가 이온강도 보다 상당히 높게 형성되며, 이러한 특성으로 인하여 담수 환경에서는 동종응집의 가능성은 낮다는 추정도 있다[19,20]. 한편, NP를 포함한 NP에 유기화합물 물질이나 중금속 등의 흡착이나 흡수는 표면의 주름이나 기공과 작용기(-OH, -COO, -NH₂ 그룹 등), 이온, 면적 등과 같은 표면 특성으로부터 발현되는 것으로, NP나 MP에서의 중금속 흡착은 일련의 복잡한 메커니즘을 통해 이루어지는 것으로 추정된다[21]. NP는 MP 보다 유기화합물을 흡착하는 능력이 훨씬 더 크게 나타난다[18]. 동일한 질량 농도 조건에서 모델링한 결과에 따르면, 10 nm NP가 200 nm MP 보다 9 ~ 30배 더 많이 유기화합물을 흡착하여 운반하는 것을 관찰되는데, 이는 NP의 넓은 비표면적에 기인하는 것으로 추정된다[18].

수계에서 NP의 침전은 콜로이드 특성, 브라운 운동 및 부력에 의해 결정되는 경향이 있고, 응집으로 인한 콜로이드 불안정성은 NP의 이동 속도를 감소시키면서 유효 침전율을 증가시킨다[16]. NP 자체의 크기 역시 침전에 영향을 미치는데, 비교적 입자의 크기가 큰 NP는 질량 농도나 염도의 영향과는 무관하게 침전 현상이 지배적으로 나타난다[18]. 염도와 관계없이 한번 침전된 NP 입자는 이종응집을 우세하게 보이며, 담수에서 모델링된 NP에서 이종응집 현상이 보다 두드러지는데, 이종응집은 침전을 위한 사전 매커니즘이라고 볼 수 있다[18].

NP는 의도적인 목적을 가지고 나노 크기로 만들어진 1차 NP가 사용 과정에서 환경으로 직접 배출되기도 하며, 플라스틱 폐기물 또는 MP로부터 미세화되어 2차 NP로 배출된다. 미세화는 노화와 분해를 원인으로 하는 2차 NP의 생성 과정으로, MP는 다양한 환경 조건의 영향을 받아 미세화 과정을 거칠 수 있으며, 1차 NP의 미세화를 통해서도 더 작은 NP가 생성될 수 있다[22]. 분해는 폴리머 내 탄소-탄소 백본 사슬이 절단되는 것으로, UV 방사선과 산소 등의 비생물적 요인과 생물에 의한 생분해 등 외부 요인으로부터 발생된다[20,21]. 비생물적 분해는 광산화 분해, 열 및 오존에 의한 분해, 기계적 화학적 분해 및 촉매 분해에 이어 생분해에 선행하는 것으로 알

려져 있다[25]. 수생 환경에서 MP나 NP의 노화는 광산화, 기계적 스트레스, AOP (advanced oxidation processes) 및 생분해 등이 원인으로[21], 광산화의 경우 표면의 광흡수 작용으로 에너지가 흡수되어 자유라디칼이 생성될 때 구조적 산화로 나타나는 경우가 많다[21,23]. 광반응에 의한 노화의 일반적 과정은 자유라디칼의 반응을 수반하는 것으로, 표면 특성의 변형, 플라스틱의 화학구조상 사슬 분해, 거칠어진 표면의 균열에 따른 표면의 전하, 친수성 및 극성을 포함한 고분자 화학 구조 변형이 일련의 과정으로 추정된다[23]. 물리적 외압은 NP와 MP의 잔류 응력을 증첩시켜 노후화를 유발하고, AOP는 표면을 산화시키는 자유 라디칼을 생성에 기여할 수 있다[21].

이상의 수계 거동에 관한 연구를 종합해 보면, 대부분의 NP 거동에 관한 연구는 MP 연구를 통해 확인된 결과를 바탕으로 한 추정을 다루며, 최근의 연구에서 NP 거동을 다루는 주요 연구들은 실험 분석을 기반으로 한 모델링 연구가 대부분이다. 기존 연구는 비현실적으로 높은 플라스틱 농도에서 실험하기 때문에 환경 중 거동 특성을 충분히 설명하기에는 아직 한계가 있다. 환경 중 플라스틱 입자는 다양한 크기로 분포하지만, 응집체에 대한 크기의 역할에 대한 조사는 부족하고, 서로 다른 입자 조성은 서로 다른 Hamaker 상수를 갖기 때문에, 다른 유형의 나노 입자에서 얻은 결론이 반드시 플라스틱 입자와 관련이 있는 것은 아니라는 점에서 NP 거동 특성을 보다 명확히 이해하기 위해서는 현장 연구가 필요하다[17].

2.2 나노플라스틱의 토양내 거동

토양으로 MP와 NP의 유입은 대기로부터의 침전물, 폐수 등의 유출수, 버려진 플라스틱 등이며[24-26], 특히 농업 활동은 생분해성 멀칭 비닐의 이용, 바이오 고형물, 재활용 퇴비 및 폴리머 코팅된 비료와 살충제 등을 토양으로 유입시키는 대표적인 발생원으로 손꼽히고 있다[27-30]. 다른 환경 매트릭스와 달리 토양은 다양한 크기와 성질을 가진 토양 입자가 분포하고 다공성, 다양한 유기물 함량, pH, 침투 용량 및 수분함유율 등의 변이가 존재하는 매트릭스인 데다가, 수계나 대기와 달리 인간을 포함한 생물군과의 직간접적 상호작용이 발생할 수 있는 매트릭스이기 때문에 MP 보다 NP의 이동성이 더욱 높고 그로 인한 영향이 발현될 수 있는 특징을 지닌다[27].

토양에 잔존하는 NP는 지하수로 전이 가능성이 크며[24], 지하수로 이동한 경우 유기물이나 산화철, 점토질 등과 같은 자연 기반의 토양 입자에 부착된 NP 보다 이동성이 높아 지하수에 잠재적인 위험을 초래할 수 있다. 특히, NP는 평균적인 토양 입자 크기보다도 작으므로 식물 뿌리를 통한 흡착의 가능성이 크고 먹이사슬의 상위 계층까지 이동하면서[29], 생체 이용률을 높일 수 있다[27]. NP를 대상으로 한 연구 중, 농업용 덮기 필름을 기반으로 한 토양에서의 NP 응집과 이동 특성에 대한 조사에 따르면, 50 nm NP가 크기 감소 또는 자가응집 및 토양 내 질석과 같은 다른 물질과의 응집 없이 물에 분산된

상태로 남아 있지만, 300 ~ 1,000 nm의 NP는 자가응집체 및 이종응집체를 형성하고, 질석과 같은 토양 성분에 상당히 잘 붙어있음이 확인되었다[30]. 이는 작은 크기의 NP일수록 물에 분산된 상태로 남아 지하수를 거쳐 수계로의 전이 가능성이 크다는 추정을 가능하게 하는 것으로 지하수 및 수계 전반으로의 전이 가능성을 높인다는 기존 연구의 추정을 뒷받침해 주는 결과라고 볼 수 있다.

그러나 토양 내 NP의 거동을 다루는 연구 대부분은 주로 농경지 등을 대상으로 한 MP 연구에서 얻은 논의를 기반으로 하며 NP에 초점을 맞춘 현장 기반의 연구 사례는 부족하다. 특히 지하수와 연계한 거동 연구는 더욱 미흡하기 때문에 이에 관한 연구 사례의 축적이 필요하다.

2.3 나노플라스틱의 대기 중 거동

현재의 분리 및 분석 기술의 한계로 인해 다른 환경 매질보다 대기 중 NP의 존재를 정량적으로 결정하는 것은 더욱 어렵다[16]. MP에 관한 일부 선행연구에서 대기를 통한 MP의 확산 가능성이 추정되기는 했지만, 특정 지역 내 존재하는 NP가 대기 이동에 의한 것인지, 현장에서 발생한 것인지를 증명할 수 있는 방법론적 근거는 아직 없다.

지금까지 대기를 대상으로 한 MP 연구 대부분은 실내 먼지나[31], 실외 공기질[32], 대기 중 낙진 샘플[33,34] 등을 대상으로 하거나 도로변 먼지 샘플에서의 고분자 입자를 확인하는 연구가 대부분으로[35-42], 확인된 고분자 입자의 발생원이나 노출 경로를 추정할 수 있는 연구는 부족하다[16]. 현재 수준에서 논의되는 대기 중 거동은 대기 과학과 물질 이론에 근거하여 합리적이고 상식적인 수준에서 추론한 결과일 뿐이며, 향후 이를 입증할 수 있는 연구 사례의 축적이 절실하다. 이상의 내용을 토대로 NP의 환경 중 거동은 다음의 Figure 2와 같이 정리될 수 있다.

2.4 나노플라스틱의 환경 영향

플라스틱 사용으로 인한 환경 문제는 1960년대부터 해양 오염 문제의 맥락에서 고려됐고, 1970 ~ 2000년대의 연구를 통하여 해양 생물에서 얽힘, 섭취 등으로 인한 생태학적 영향이 수많은 문헌과 보도 자료를 통하여 보고되었다. MP 연구의 증가는 해양 척추동물과 무척추동물 등 생물체에서의 플라스틱 입자 섭취와 흡입에 관한 상당한 연구 사례의 축적으로 이어졌고, NP 연구로 확장되어 논의되는 추세이다. 최근에는 주로 폴리스티렌 입자를 활용한 노출 연구를 통해 해양 어류종을 포함하여 갑각류, 연체동물, 동물성 및 식물성 플랑크톤 등의 생체 내 NP의 영향을 추정하는 연구사례가 늘고 있다. 이러한 연구결과들을 통하여 먹이사슬망에서 MP를 포함한 NP의 생체 축적(bioaccumulation)과 생물 농축(biomagnification) 등이 예상된다[43]. 또한, NP를 포함한 MP의 분포 대상으로 인체에 관한 연구가 진행되면서, 인체에 MP 및 NP가 유입되는 주

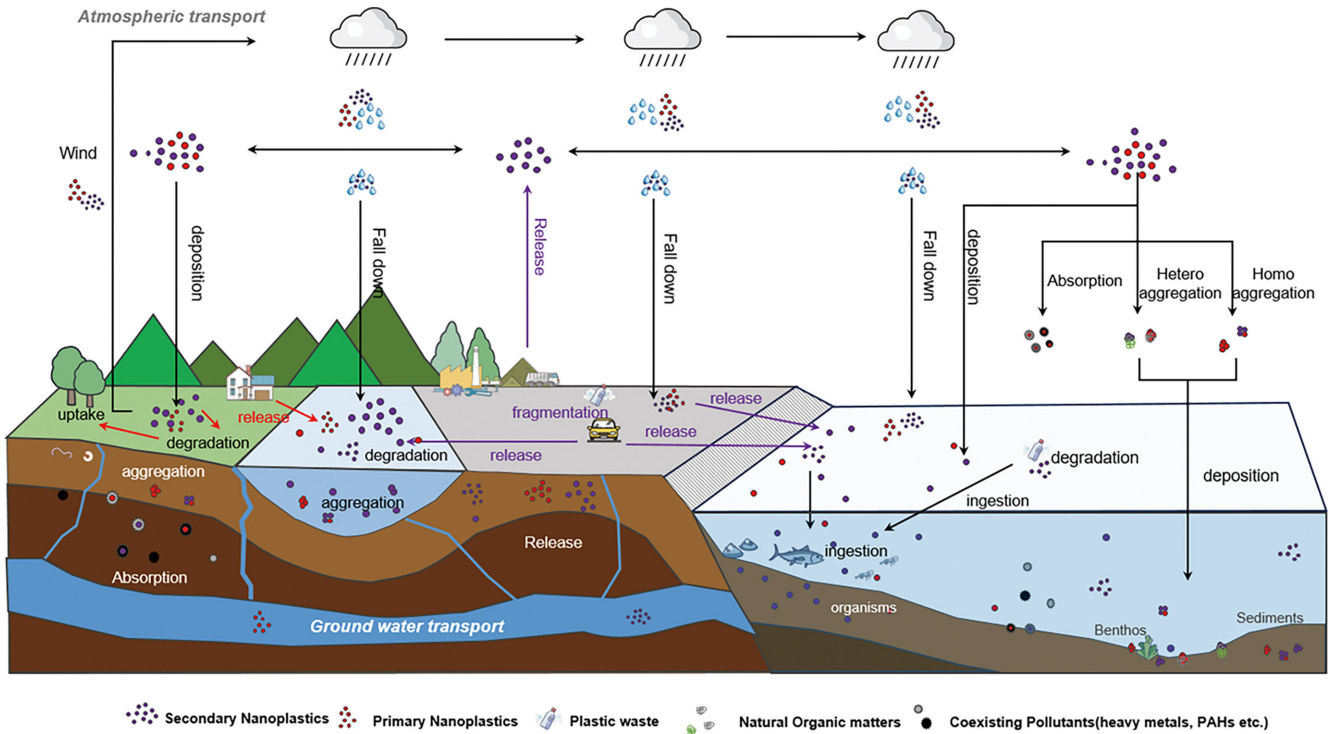


Figure 2. Nanoplastics generation and exposure pathways in the environmental media.

요 경로로 흡입(inhalation), 섭취(ingestion), 피부접촉(dermal contact) 등이 거론되고 있다[44-46].

생체를 대상으로 한 노출 연구를 통해, NP가 생체 내 염증 작용, 산화 스트레스, 성장 억제 등의 생체 영향과 독성을 야기할 수 있다는 추정이 있지만, 환경 농도가 고려되지 않고 고농도의 실험 결과를 기반으로 한 논의이고, 주로 MP를 대상으로 한 연구 결과라는 점에서 NP로 인한 영향으로 단정하기에는 한계가 있다[46]. 그럼에도 불구하고, 일부 연구에서는 NP가 MP에 비하여 지질 이중층에 대한 더 높은 친화력으로 세포에 쉽게 흡수될 수 있다는 점이 강조되는 것을 고려할 때[22], NP를 대상으로 한 생체 내 연구가 활발히 진행될 필요가 있다. NP 영향에 관련된 연구 중 추가적으로 지적되는 문제점으로는 보고된 연구의 대부분이 폴리스티렌 나노입자 모델을 사용한 실험을 기반으로 하고 있고, 주로 해양을 대상으로 한 결과만을 다룬다는 점인데[45], 이는 방법론적 발전을 전제로 한 현장 기반의 연구 사례가 축적되면서 해결될 수 있을 것으로 예상된다.

4. 나노플라스틱의 관리 실태

4.1 1차 미세플라스틱 관리 현황

NP는 나노 크기의 물질이 환경과 생체에 미칠 수 있는 위해성 문제와 큰 차이가 없어서, 물질의 크기 문제에 한정해서 볼 때는 나노물질과 큰 차이가 없다. 또한, NP는 MP의 하위 범주에 포함되는 고분자 물질이자 작은 크기의 입자성 물질이기

때문에 NP의 정책적 관리는 MP 정책과 맥락을 같이 한다. 1차 MP에 대한 관리는 일반적으로 그것을 의도적으로 사용하는 제품군인 발생원에서의 사용을 제한하는 규제 정책 위주로 설계된다. 그 대표적인 사례는 2019년 ECHA가 제안한 REACH 지침 개정으로, 이 규정은 2023년 9월 27일 유럽연합 집행위원회(European Commission, EC)에 의하여 공식 발효되었다. EC는 REACH 규정 내 사용 제한 물질 목록(Annex XVIII)에 1차 MP인 ‘합성 고분자 MP’를 포함하고, 특정 제품군에서의 사용을 단계적으로 금지함으로써 EU 시장 내 MP의 퇴출(Phase-out)을 유도하려고 한다[9]. 이 규정은 2018년 기초 조사 연구를 포함하여 약 5년여간의 논의 과정을 거쳐 마련되었다.

REACH 규정 Annex XVIII 제1항에 따르면, 의도적으로 제품에 사용되는 MP란, “해당 입자의 중량 중 최소 1%에 해당되는 입자가 연속적인 표면 코팅을 형성하는 폴리머로, 그 크기가 5 mm 이하인 입자형 물질 또는 길이가 15 mm 이하이면서 길이 대 직경 비율이 3보다 큰 섬유형 물질”로 정의된다. 규정에서 정의한 폴리머 입자의 구체적 식별에 대하여, 입자형은(치수가 5 mm 이하인 경우) 모든 치수에 대해 0.1 μm 이상을, 섬유형은(길이가 15 mm 이하이고 길이 대 직경비가 3보다 큰 MP) 모든 치수에 대해 0.3 μm 이상을 규제 범위로 한정하고 있다[9]. 즉, EU에서 관리하는 MP는 입자형을 기준으로, 100 nm ~ 5 mm 크기의 폴리머를 의미하며, NP는 100 nm 보다 작은 입자로 간주된다[9]. 크기 단위만을 고려해서 볼 때, EU는 나노 크기를 가진 폴리머 즉 NP 중 일부를 MP와 동등한 수준으로 관리하고 있다고 볼 수 있다. 이는 현재 수준에서의

Table 1. Restriction lists by the EU REACH Annex XVIII of primary microplastics

Categories	Product groups	In force
Encapsulation	Encapsulation of fragrances	Oct. 2029
Cosmetic products	Rinse-off products as defined in point (1)(a) of the Preamble to Annexes II to VI to Regulation (EC) No 1223/2009 unless such products are covered by point (a) of this paragraph or contain synthetic polymer microparticles for use as an abrasive, i.e. namely to exfoliate, polish or clean (“microbeads”)	Oct. 2027
	Lip products as defined in point (1)(e) of the Preamble to Annexes II to VI to Regulation (EC) No 1223/2009, nail products as defined in point (1)(g) of the Preamble to Annexes II to VI to that Regulation, and make-up products within the scope of that Regulation, unless such products are covered by points (a) or (b) of this paragraph or contain microbeads	Oct. 2035
	Leave-on products, as defined in point (1)(b) of the Preamble to Annexes II to VI to Regulation (EC) No 1223/2009, unless such products are covered by points (a) or (c) of this paragraph	Oct. 2029
Detergents	Detergents, as defined in Article 2(1) of Regulation (EC) No 648/2004, waxes, polishes and air care products, unless those products are covered by point (a) of this paragraph or contain microbeads	Oct. 2028
Devices	Devices, within the scope of Regulation (EU) 2017/745 of the European Parliament and of the Council, unless those devices contain microbeads	Oct. 2029
Agriculture products	Fertilising products, as defined in Article 2, point (1), of Regulation (EU) 2019/1009, which do not fall within the scope of that Regulation	Oct. 2028
Granular infill	Plant protection products within the meaning of Article 2(1) of Regulation (EC) No 1107/2009 of the European Parliament and of the Council and seeds treated with those products, and biocidal products as defined in Article 3(1), point (a), of Regulation (EU) No 528/2012 of the European Parliament and of the Council	Oct. 2031
	Products for agricultural and horticultural uses not covered by points (g) or (h)	Oct. 2028
Granular infill	Granular infill for use on synthetic sports surfaces	Oct. 2031

Table 2. Korea’s regulations on product management restrict the use of primary microplastics

Categories	Cosmetics	Personal Care & Sanitary Product ¹⁾	Detergent ³⁾
Target items	Cosmetics	Quasi-drugs ²⁾	Daily use consumer chemical product
Parent law	Cosmetics Act	Pharmaceutical Affairs Act	Consumer Chemical Products And Biocides Safety Control Act
Administrative agency	The Ministry of Food and Drug Safety	The Ministry of Food and Drug Safety	Ministry of Environment
Subordinate legislation	Regulations on safety standards for cosmetics	Regulations on Approval·Notification·Evaluation of Quasi-Drug Products	Designation Of, And Safety And Labeling Standards For, Consumer Chemical Products Subject To Safety Verification
Regulated entities/subject	Products which can be washed off with water are among the cosmetics used for cleansing and exfoliation purposes.	Sanitary aids (gargle, toothpaste, and teeth whitening)	Detergent product group (Cleaners, remover), Laundry product group (Laundry detergents, Bleaching agents, Fabric softeners)
MP definition	Microplastics are defined as solid plastic under 5 mm, contained in rinse-off, scrub, and other products		Solid plastics in the size of 5 mm or less that are used for cleaning, polishing, and peeling on purpose and are not soluble in water
Enforcement	Jul. 2017	Jul. 2017	Jan. 2022

¹⁾According to international scholarly literature and legislation, personal care and sanitary products are commonly referred to as personal care or hygiene products.

²⁾In Korea, toothpaste, mouthwash, and teeth whitening products are managed as non-pharmaceuticals.

³⁾Non-medical cleansing agents in Korea are classified as “daily use consumer chemical products,” while dishwasher cleansing agents are classified as hygiene products and managed by the Ministry of Food and Drug Safety, and solid soap is managed by the Ministry of Trade, Industry, and Energy.

실험 및 측정법을 고려한 실용적이고 선택적인 정의이자 관리 범주를 선택한 사례라고 볼 수 있다. REACH에 따라 MP의 사용이 제한될 발생원은 크게 6개 제품 범위로 Table 1과 같은 일정에 따라 5 mm ~ 100 nm 크기의 인공합성 고분자 사용이 단계적으로 제한될 예정이다[9].

REACH 규정에서는 사용 제한 정책 외에도 라벨링이나 보고 등에 관한 부수적인 정책 옵션을 부여하여 MP를 관리하고 있다. 예컨대, 사용 제한의 예외 대상에 해당되는 고분자 물질에 대해서는 환경으로 배출되지 않도록 사용과 폐기에 대한 지침을 제공하는 라벨링 의무 규정이 있다. 산업 현장에서 사용하기 위한 고분자 입자는 사용 및 폐기 지침과 함께 사용된 고분자 양을 표시하는 라벨링 의무 규정이 적용된다. 12년간의 유통기간을 둔 후 사용이 금지되는 립제품, 손톱관리제품, 메이크업제품 등은 규제 시행 8년이 되는 시점부터 제품 외관에 ‘미세플라스틱 함유 여부를 표시하고 있음’을 표시한 라벨링 의무가 부여될 예정이다[9].

우리나라 역시 특정 발생원을 대상으로 1차 MP 사용을 금지하는 정책이 시행 중이다. 우리나라는 현재 Table 2와 같이 3개 제품에서 1차 MP의 사용을 금지하고 있다[47-49]. 가장 먼저 사용이 금지된 제품군은 화장품류이다. 2015년부터 식품의약품안전처는 『화장품안전기준등에 관한 규정』에 따라 세정, 각질제거 등을 목적으로 하는 물로 씻어내는 화장품류 일부에서 5 mm 보다 작은 고체형 플라스틱 입자의 사용을 제한하는 규정 개정을 하였고, 해당 규정은 2017년부터 시행되고 있다[47]. 이어서 식품의약품안전처는 화장품류와 동일한 개념으로 MP를 정의하며, 2017년 『의약외품 품목허가·신고·심사규정』 개정을 통해 구중청량제, 치약제, 치아미백제등 의약외품 일부에서의 MP 사용을 금지하였다[48].

국내 환경정책을 총괄하는 환경부는 2020년 『안전확인대상 생활화학제품 지정 및 안전표시 기준』을 개정하여 세정제 및

세탁세제 중 세정제, 제거제, 세탁세제, 섬유유연제, 세척제 5종의 제품군에서 ‘5 mm 이하 고체형 MP’의 사용을 금지하고 있다[49]. 2021년부터 시행된 이 규정은 대체물질 개발에 어려움이 있다고 알려진 향기캡슐은 제외된 것으로, 앞서 살펴본 EU REACH 규정 개정에 따라 2029년부터는 EU 시장 내 진입이 어려울 것으로 예상된다. 국내 정책에서도 EU REACH 규정에 상응하는 추가적인 조치가 있을 것으로 예측된다.

4.2 2차 미세플라스틱 관리 현황

의도적으로 MP 및 NP를 사용하는 1차 발생원의 경우, 제품에서의 사용을 금지하는 직접적인 정책이 시행되지만, 2차 미세플라스틱의 경우 발생원을 특정해서 한정하기에는 관리해야 하는 제품 범위가 지나치게 넓어서 주로 플라스틱과 페플라라스틱에 관한 자원순환정책 차원에서 그 사용량 감축을 유도하기 위한 간접적 정책을 시행하는 경우가 많다. EU는 Table 3과 같이 2018년부터 선순환경제 및 플라스틱 전략에 따라 2차 MP 배출을 저감하기 위한 간접적인 정책이 시행 중이며[50], 최근에는 2차 MP를 배출하는 대표 배출원에 대한 구체적인 정책을 제안하고 있다. EU는 비의도적으로 배출되는 2차 MP 배출원에 대한 정책 이니셔티브를 통해[51], 펠릿 손실 저감을 위한 규제제안서를 발표하였고[52], 현재는 이에 대한 공공의견 수렴을 진행 중이다. 아직 구체적인 배출 기준이 설정된 것은 아니지만, 유로7에 의한 타이어 마모율 관리 방안 역시 대표 배출원에 대한 2차 MP 관리 정책을 마련한 사례라고 볼 수 있다[53].

2차 MP에 대한 국내 정책은 플라스틱 감축과 페플라라스틱의 자원순환 개선을 위한 정책 등 간접적인 MP 관리에 초점을 맞추고 있다. 국내 MP 관리는 육상환경 중 페플라라스틱 및 자원순환 정책과 국가 플라스틱 감축 정책은 환경부가, 해양환경 중 분포하는 해양쓰레기 관리는 해양수산부가 주관하는 상황

Table 3. Key policies implemented by the European Union to manage secondary MPs

Plastic & Plastic waste	Secondary MP Sources
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Setting the goals to reduce microplastic releases by 30% by 2030 <ul style="list-style-type: none"> • reducing plastic pollution (as these degrade into microplastics) • restricting the use of intentionally added microplastics to products • reducing unintentional microplastic releases ▪ The Plastic Bags Directive (Directive (EU) 2015/720): lightweight plastic carrier bags specific Guidelines for reporting, requires Member States to take measures, such as national reduction targets and/or economic instruments (e.g. fees, taxes) and marketing restrictions (bans) ▪ Packaging and packaging waste: <ul style="list-style-type: none"> • By end of 2024, EU countries should ensure that producer responsibility schemes are established for all packaging. The Directive also sets the following specific targets for recycling, ex)The plastic recycling rate aims to reach 50% by 2025 and 55% by 2030. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Single use plastics & fishing gear: implementation of new EU-wide rules to target the 10 single-use plastic products most often found on Europe’s beaches and seas, as well as lost and abandoned fishing gear. ▪ Initiatives of unintentionally released microplastics: Driving initiatives to address the problem of microplastics being unintentionally released into the environment. Currently working on a committee with the goal of a policy proposal in 2024. ▪ Plastic pellet: Proposal for a Regulation on preventing pellet losses to reduce microplastic pollution ▪ Euro 7 Standard proposal: Proposed new standard to regulate the smallest of ultrafine particles (down to 10 nanometres), particles from brakes and battery durability.

Table 4. The management system for secondary microplastics in Korea

Oversight Region	Secondary Microplastics from terrestrial sources	Secondary Microplastics from Marine Sources
Overseen Ministry	Ministry of Environment	Ministry of Oceans and Fisheries
National Laws	<ul style="list-style-type: none"> • Framework Act On Resources Circulation • Act On The Promotion Of Saving And Recycling Of Resources 	<ul style="list-style-type: none"> • Marine Environment Management Act • Management Act on Marine Debris and Pollutants
National Strategies and Action Plans	<ul style="list-style-type: none"> • National Comprehensive Plan for the Management of Recycling Waste • Plan to Reduce Plastic Waste in Household Waste (2020.12) • K-Circular Economy Implementation Plan (2021.12.30) • Life-cycle plastic-free strategy (2022.10.20) 	<ul style="list-style-type: none"> • The Framework on Marine Debris Management (2021 ~ 2023) • The Master Plan for Ocean and Fisheries Development (2021 ~ 2030) • The Comprehensive Management Plan on Marine Litter Reduction (2019) • The First Master Plan on Marine Spatial Management (2019 ~ 2028)

으로 공간적으로 이원화된 정책 특성을 보이며, Table 4와 같은 법률 체계와 행정계획을 기반으로 세부 정책이 추진되고 있다. 육상환경에 대한 폐플라스틱 및 자원순환 정책은 환경부가 주도하고 있으며, 플라스틱 제품에 대한 관리는 이중 및 과대포장 제한을 위한 각종 정책 가이드라인 제정, 비닐봉투 규격 및 재질 표준화 작업 등 포장재에 대한 관리 정책과 투명페트병 생산 의무화, 다회용 배달용기에 대한 회수세척 위생기준 가이드라인 발표, 일회용품보증금제도의 시범 시행 등이 있다. 자원순환 정책은 생산자 책임 재활용 제도의 단계적 확장, 제품과 포장재별 장기 재활용 목표율 수립, 재활용 관련 평가제도 재정비 투명페트병 분리배출 의무화 등의 정책이 대표적이다. 육상 정책은 EU를 비롯한 전 세계적인 추세, 즉 일회용품 사용 감축과 폐플라스틱의 재사용 및 재활용을 높이려는 국제 정세와도 같은 흐름을 보인다. 해양 공간을 대상으로 한 해양수산부의 정책은 페어구와 폐부표에 대한 정책과 해양 모니터링 정책이 대표적이다. 국내에서의 사용량이 많은 폐부표와 관련한 친환경 부표 교체보급 사업부터 페어구와 폐부표에 대한 전자실명제 확대 시행과 수거 사업 시행 등은 페어구를 대상으로 한 정책 확장 사례이다. 해양쓰레기 모니터링 사업의 일환으로 진행 중인 50개 해안 지역내 MP 오염도 현황 조사는 해안 지역에 한정된 조사라는 점에서 아직 한계가 있지만 국가차원에서 MP 관련 기초 현황 정보를 확보하려는 움직임이라는 점에서 의의가 있다. 아직 국내에서는 특정 배출원을 대상으로 하는 MP 배출 저감을 위한 구체적 정책은 설계된 사례가 없으며, 1차 MP 사용을 제한하는 규정을 제외하고는 MP 및 NP의 관리를 고려하는 정책이 부족한 현실이다.

4.3 나노플라스틱 관리의 문제점

이상의 NP 선행연구의 리뷰를 통해 확인된 NP 관련 현황과 문제점은 다음과 같이 정리된다. 첫째, 정책 현장에서 NP를 MP와 차별성 없이 인식하고 있고, 개념적으로 MP 보다 모호하게 정의되고 있다는 점이다. NP는 MP와 마찬가지로 개념을 정의하는 데 있어 크기 범주가 구체적으로 결정된 바 없

고, 제조된 나노물질을 포함해서 정의하는 것에 대한 사용자 간 견해의 차이가 있어 용어 정의와 개념 인식이 어렵다는 문제가 있다. 또한, 그동안 많은 학술 연구와 정책 현장에서 NP를 MP와 구분하지 않고 정의함으로써 나노 크기로 인해 발생할 수 있는 문제가 간과된 경향이 있다. NP를 비롯한 나노 크기의 물질은 작은 크기, 표면 특성, 형태, 분산 및 응집 안전성, 원소 조성과 결정 조성 등으로 인하여 발현되는 물질 특성이 달라지는 것으로 알려져 있으며, 일반적으로 크기의 영향을 받는 물질 특성으로는 촉매 활성도 증가, 용해도 향상, 광학적 특성, 흡착/응집 등과 같은 역학적 움직임 등이 있다. MP와 비교할 때 작은 크기로 인해 발생하는 물질 특성의 차이가 분명히 있는 만큼, 이 둘을 구분하여 인식하고 그 특성에 맞는 정책적 고려가 필요하다. 따라서 현재 대부분의 입법 규제 국가에서 정의하고 있는 방식인, NP를 구분하지 않고 MP를 5 mm 보다 작은 크기로 정의하는 개념 정의는 지양될 필요가 있다. 둘째, NP 연구 역시 MP와 마찬가지로 수계를 중심으로 한 실험 조사 결과에 의존하고 있다는 점이다. NP 연구는 MP 보다 미미하며, NP 거동과 영향에 관한 특성은 MP 연구를 기반으로 하는 경우가 많다. 최근에 NP 연구가 다소 진전되고 있지만, 연구 대부분이 자연을 모사한 실험실 분석을 기반으로 한 연구가 주류를 이루고 있다. 특히, 영향에 관한 연구 대부분은 환경 현장에서의 MP 및 NP 농도와는 비교하기 어려운 수준으로 고농도의 NP를 이용한 실험이 이뤄지고 있어서 연구를 통해 확인된 독성 등의 영향에 대하여 단정적인 기술을 하는 데 한계가 있다. 즉, 현장 농도를 고려한 실험 연구 결과의 도출이 필요하다. 또한, 화학적 조성을 포함하여 표면 형태에 대하여 현장 중 분포하는 NP 입자 특성이 충분히 반영되지 않고 있다. 대부분의 거동과 영향에 관한 NP 연구에서 구체형의 폴리스티렌 입자를 이용하고 있다. 환경 중 거동 특성에 관여되는 여러 요인 중에는 NP의 형태에 따른 영향의 차이도 확인되고 있는 만큼 현장 모사를 높이는 연구 수행이 필요하다. 셋째, EC는 가장 최근의 다면적 정책 설계와 제안, 하위 정책 시행 등의 행위를 통하여 부분적으로나마 NP 배출량을 줄이려고 노력

하고 있다. EC는 나노물질에 대한 재정의 작업과 REACH 규정 개정을 통하여 100 nm 이상의 NP를 특정 제품군에서 사용을 제한한다거나, NP가 사용되었음을 소비자에게 알리는 라벨링 의무 정책 등을 시행하여 NP를 합리적이고 실용적 수준에서 관리 범주에 포함시키고 있다. ECHA의 위해성평가위원회를 비롯하여 환경부서, 시민단체 등은 여전히 EU에서 추진하는 플라스틱 입자에 대한 정책들이 나노 크기에 대한 고려가 부족하다는 비판이 있다. 그러나 EU는 NP를 MP와는 다르게 관리할 필요성을 인지한 듯이, MP 개념 정의에 있어 하한 크기를 규정하고 있다. 이것은 MP 문제와 별개로 NP를 식별하려는 노력을 반영한다고 볼 수 있으며, EU의 역동적인 정책 추진 행보를 참고할 때 향후 NP 관리를 위한 정책의 외연 확장이 충분히 가능할 것이라는 기대를 하게 한다. 대외적으로 UNEP를 통한 플라스틱 국제협약의 준비 작업이 진행되고 있는 가운데, 2023년 6월 국내에서는 MP의 통합 관리를 위한 특별법 발의가 있었다. 대외적 동향과 플라스틱 오염 문제를 해결하고자 하는 정책 의지를 반영한 사례라는 점에서는 의의가 있다. 그러나, 입법 발의안에 대한 다각적이고 장기적 측면에서의 검토와 사회적 논의가 충분히 진행되지 못했다는 점과 여전히 5 mm 보다 작은 크기를 규제 대상으로 고려함으로써 MP 관리 문제를 단순화하고 NP에 대한 위해성 관리 수준의 차별성을 충분히 고려하지 못했다는 아쉬움이 있다.

이상과 같은 NP 관련 국내의 연구와 정책 동향을 종합적으로 고려할 때, 국내 정책에서 검토해야 할 사안이 있다. 현재 국내에서 1차 MP를 규제하는 규정에서는 크기 정의에 대하여 '5 mm 이하'의 크기를 기술하고 있다. NP가 MP와 환경으로의 배출 이후 거동과 노출에 따른 영향에 있어 분명한 차이가 있다는 논의가 점차 확장되고 있는 만큼 NP와 MP를 차별적으로 인식하는 신호로서 MP 규제 대상 범주에 대한 기존 개념을 조정하는 작업이 필요하다. 그러나 방법론적 한계, 국제적 합의 수준에 대한 인정 범위 등을 결정하는 어려움 등을 고려할 때, 정책 현장에서 NP 크기를 특정하여 정의하는 것에 대한 부담이 있을 수 있다. 이러한 측면에서 최근 개정을 마쳐 시행하고 있는 EU의 REACH 규정에 따른 관리 대상 고분자 입자 크기 범주를 참고할 수 있다. EU는 1차 MP 사용제한을 위한 REACH 규정에서 5 mm 이하의 인공합성 고분자 물질 중, 입자형 고분자 물질의 경우 100 nm까지, 섬유형의 경우 300 nm까지를 세부 규정에서 제시한 제품군에서 사용을 금지할 것을 결정하였다. 이것은 제한적인 수준에서 NP를 관리 범주를 포함했다는 점에서 의의가 있으며, 일반적으로 입자 크기의 100 nm를 나노 물질로 보는 EU의 인식을 반영하는 동시에 정책 현장에서 MP와 NP를 분명히 구분하려는 첫 사례라는 데서 의의가 있다. 또한 REACH 규정에서의 개념 정의는 의도적 사용에 대한 통제를 통해 환경으로의 배출과 노출을 저감하려는 정책적 의지를 반영하여 제조된 NP를 관리 범주로 포함시켰다는 점에서도 의의가 있다. 이것은 Monikh 외 연구진들이 NP가

화학물질과 나노 물질의 모든 기준을 충족하므로 기존 규정에서 이를 고려한 정책 설계가 필요하며 특히, 의도적으로 생산된 NP는 상대적으로 적은 배출원이지만 현재 수준의 정책 프레임워크를 적용하는 것만으로도 충분히 그것을 통제할 수 있다는 점을 강조한 맥락과 동일하다고 볼 수 있다. 다만 EU는 규제 대상 범주에 대한 단위를 표기하는데 있어 μm 로 기술하고 있다. 직관적으로 MP와 식별될 수 있기 위해서는 NP를 지시하는 범주에 대해서는 nm로 표기하는 것이 보다 바람직하다. MP를 포함하여 NP 개념에 대한 재정의 작업은 향후 점진적으로 확대될 유럽 시장에서 특정 제품군에 대한 1차 MP의 사용제한 정책 시행에 대응하는 국가적 조치와 연계하여 진행될 필요가 있다. MP와 NP를 구분하는 크기 기준을 어떻게 할 것이냐에 대한 문제(EU의 선행 사례를 따를 것인지, 국내 사정에 맞게 NP를 구분할 수 있는 또 다른 기준을 설정한 것인지 등)는 국내 산업계 및 학술회계의 조언과 충분한 논의를 거쳐 사회적 수용성을 확보하며 재정의 되어야 할 것이다. 또한, 이러한 과정을 거쳐 확립되는 NP 개념은 화평법을 기반으로 하고 있는 나노물질 및 고분자 물질에 대한 국내 화학물질 정책에도 통일성 있게 반영되는 것이 필요하다.

5. 결 론

NP 및 MP에 관련된 기존 연구 및 정책에 관한 검토결과를 정리하자면, 과학 및 규제 영역 모두에서 주의가 필요한 몇 가지 중요한 문제를 강조할 수 있다. 무엇보다도 정책 프레임워크에서 NP와 MP 사이에 명확한 구분이 부족하다. NP 정의는 개념적으로 모호하고 종종 MP의 정의와 중복되고 있다. NP의 고유한 특성을 고려하지 않고 오로지 크기(일반적으로 5 mm 이하)만을 기준으로 MP를 정의하는 현재 추세는 나노물질과 관련된 잠재적 위험을 해결하기 위한 기존 정책의 적절성에 대한 우려를 불러일으킬 수 있다. 또한 NP 연구에서 주로 수환경에서 수행된 연구에 의존하고 대부분이 MP 연구의 일부로 다루어지고 있다는 문제점이 있다. 최근에 연구적 성장에도 불구하고 NP 연구 대부분은 여전히 실험실 기반의 연구가 대부분인 상황으로, 환경 농도 및 분포 패턴에 대한 현실적인 고려가 부족한 실정이다. 또한 폴리스티렌과 같은 특정 유형의 입자를 사용하는 데 중점을 두는 것은 실제 시나리오에 존재하는 NP 입자의 다양한 특성을 충분히 반영하기 어렵다는 문제점이 있다. 따라서 환경적 요인과 화학적 조성, 표면 형태 등 NP의 다양한 특성을 고려한 보다 현장 지향적인 연구가 필요하다. 이에 다음과 같은 NP에 관한 연구 및 환경 정책을 제안하고자 한다.

(1) 크기 정의 재평가 : MP와 비교하여 NP의 뚜렷한 특성을 고려할 때 규제 프레임워크에 사용되는 크기 정의를 재검토하고 개선할 필요가 있다. 최대 100 nm의 입자를 NP로 간주하는 EU의 REACH 규정을 참고하여 NP의 고유한 특성을 고려한

포괄적이고 국제적으로 인정되는 정의가 개발되어야 한다.

(2) 현실적인 연구 접근 방식 강화 : NP에 대한 향후 연구에서는 실제 환경 조건을 반영하는 현실적인 실험 설계를 우선 시하고 NP 행동에 영향을 미치는 다양한 요인을 고려해야 할 것이다. 여기에는 실제 환경 중 NP 농도를 반영한 NP 크기, 표면 특성 및 화학 조성의 영향에 대한 연구가 포함된다.

(3) 학제간 협력 촉진 : 정책 입안자, 과학자, 산업계 이해관계자는 과학 연구와 정책 개발 간의 격차를 해소하기 위해 협력적인 노력에 참여해야 할 것이다. 학제간 협력체를 구축하면 NP 관련 문제에 대한 보다 포괄적인 이해를 촉진하고 효과적인 규정 수립을 촉진할 수 있을 것이다.

(4) 대중의 인식 제고 : 잠재적인 환경 및 건강 영향과 함께 NP와 MP의 차이에 대한 대중의 인식을 높이는 것이 필수적이다. 여기에는 소비자가 정보에 입각한 선택을 할 수 있도록 플라스틱 제품에서 사용된 물질 정보를 제공하는 것이 포함될 수 있다.

(5) 정기적인 정책 검토 : 과학적 이해와 기술 발전의 역동적인 특성을 고려할 때 규제 정책은 정기적인 검토 및 업데이트를 거쳐야 한다. 새로운 지식을 수용하기 위해 정책을 유연하게 적용하면 규제의 효과성과 관련성을 유지할 수 있다.

결론적으로, NP와 관련된 과제를 해결하려면 과학적 발전, 규제 개선, 다양한 이해관계자 간의 협력을 포함하는 다각적인 접근이 필요하다. NP 크기 분류와 개념 재정의, 연구 방법론 개선, 개념 및 방법론적 국제 표준화, 다양한 이해관계자간의 협업 활성화, 대중 인식 제고, 적용 가능한 규제 프레임워크 유지를 위한 국가 정책이 필요하며, 이것이 실현될 때 NP로 인한 잠재적 위험완화와 효율적 관리가 가능해질 것이다.

감 사

본 논문은 국가과학기술연구회의 창의형 융합연구사업(과제번호: CAP20023-000)의 지원을 받아 한국환경연구원이 수행한 “2차 미세플라스틱 환경오염 문제해결을 위한 융합 솔루션 개발[2022-106(R)]” 사업의 연구결과로 작성되었습니다.

References

1. <https://stdict.korean.go.kr/search/searchResult.do>.
2. Carpenter, E. J. and Smith, K. L., “Plastics on the Sargasso Sea Surface,” *Science*, **175**, 1240-1241 (1972).
3. GESAMP, “Sources, Fate and Effects of Microplastics in the Marine Environment: A Global Assessment,” *Journal Series GESAMP Reports and Studies* 90 (2015).
4. Frias, J. P. G. L. and Nash, R., “Microplastics: Finding a Consensus on the Definition,” *Marine Pollution Bulletin*, **138**, 145-147 (2019).
5. USA Law, “Microbead-Free Waters Act of 2015”.
6. UNEP, “Marine Plastic Debris and Microplastics: Global Lessons and Research to Inspire Action and Guide Policy Change,” (2016).
7. Park, J., Seo, Y., Ju, M., Park, H., and Han, S., “A Study on Risk Management of Microplastics III,” (2021).
8. ECHA, “Background Document to the Opinion on the Annex XV Report Proposing Restrictions on Intentionally Added Microplastics,” (2020).
9. European Commission Regulation, “Commission Regulation (EU) 2023/2055 of 25 September 2023 amending Annex XVII to Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council Concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH) as Regards Synthetic Polymer Microparticles (Text with EEA Relevance),” <http://data.europa.eu/eli/reg/2023/2055/oj>.
10. Monikh, F. A., Hansen, S. F., Vijver, M. G., Kentin, E., Nielsen, M. B., Baun, A., Syberg, K., Lynch, I., Valsami-Jones, E., and Peijnenburg, W. J. G. M., “Can Current Regulations Account for Intentionally Produced Nanoplastics?,” *Environmental Science & Technology*, **56**(7), 3836-3839 (2022).
11. Cole, M. and Galloway, T. S., “Ingestion of Nanoplastics and Microplastics by Pacific Oyster Larvae,” *Environmental Science & Technology*, **49**, 1130-1137 (2015).
12. da Costa, J. P., Santos, P. S. M., Duarte, A. C., and Rocha-Santos, T., “(Nano)Plastics in the Environment- Source, Fates, and Effects,” *Science of the Total Environment*, **566-567**, 15-26 (2016).
13. Kim, B., Kim, J., Nam, J., Ryu, J., Moon, H., Park, S., Shin, H., Oh, J., Woo, H., Yoon, H., Lee, K., Lee, J., Lim, D., Jeong, K., and Joo, S., “Nanomaterials Chemistry,” *Science Plus*, 63 (2023).
14. Allen, S., Allen, D., Karbalaei, S., Vittorio, M., and Walker, T. R., “Micro(nano)plastics Sources, Fate, and Effects: What We Know after Ten Years of Research,” *Journal of Hazardous Materials Advances*, **6**, 1-12 (2022).
15. Kim, M. S., Choi, K., Kim, Y., and Yi, J., “Risk Assessment for Health and Environmental Hazards of Nanomaterials,” *Clean Technology*, **13**, 161-172 (2007).
16. Yu, Q., Chunang, C. A., Jiang, Y., Zhong, H., Cundy, A., Kwong, R. W. M., Min, C., Zhu, X., and Ji, R., “Exploring Environmental Nanoplastics Research: Networks and Evolutionary Trends,” *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, **261**(12), 1-27 (2023).
17. Alimi, O. S., Farner, J. M., Roweczyk, L., Petosa, A. R., Claveau-Mallet, D., Hernandez, L. M., Wilkinson, K. J., and Tufenkji, N., “Mechanistic Understanding of the Aggregation Kinetics of Nanoplastics in Marine Environments: Comparing Synthetic and Natural Water Matrices,” *Journal of Hazardous Materials Advances*, **7**, 100115 (2022).
18. Lins, T. F., O'Brien, A. M., Zargartalebi, M., and Sinton, D.,

- “Nanoplastic State and Fate in Aquatic Environments: Multiscale Modeling,” *Environmental Science & Technology*, **56**(7), 3831-4690 (2022).
19. Dong, S., Cai, W., Xia, J., Sheng, L., Wang, W., and Liu, H., “Aggregation Kinetics of Fragmental PET Nanoplastics in Aqueous Environment: Complex Roles of Electrolytes, pH and Humic Acid,” *Environmental Pollution*, **268**, 115828 (2021).
 20. Mao, Y., Li, H., Huangfu, X., Liu, Y., and He, Q., “Nanoplastics Display Strong Stability in Aqueous Environments: Insights from Aggregation Behaviour and Theoretical Calculations,” *Environmental Pollution*, **258**, 113760 (2020).
 21. Li, C., Jiang, B., Guo, J., Sun, C., Shi, C., Huang, S., Liu, W., Wu, C., and Zhang, Y., “Aging Process of Microplastics in the Aquatic Environments: Aging Pathway, Characteristic Change, Compound Effect, and Environmentally Persistent Free Radicals Formation,” *Water*, **14**, 1-29 (2022).
 22. Mateos-Cárdenas, A., van Pelt, F. N. A. M., O’Halloran, J., and Jansen, M. A. K., “Adsorption, Uptake and Toxicity of Micro- and Nanoplastics: Effects on Terrestrial Plants and Aquatic Macrophytes,” *Environmental Pollution*, **284**, 117183 (2021).
 23. Mao, R., Lang, M., Yu, X., Wu, R., Yang, X., and Guo, X., “Aging Mechanism of Microplastics with UV Irradiation and Its Effects on the Adsorption of Heavy Metals,” *Journal of Hazardous Materials*, **393**, 122515 (2020).
 24. Bläsing, M. and Amulung, W., “Plastics in Soil: Analytical Methods and Possible Sources,” *Science of the Total Environment*, **612**, 422-435 (2018).
 25. He, D., Luo, Y., Lu, S., Liu, M., Song, Y., and Lei, L., “Microplastics in Soil: Analytical Methods, Pollution Characteristics and Ecological Risks,” *Trends in Analytical Chemistry*, **109**, 163-172 (2018).
 26. Rezaei, M., Abbasi, S., Pourmahmood, H., Oleszczuk, P., Ritsema, C., and Turner, A., “Microplastics in Agricultural Soils from a Semi-arid Region and Their Transport by Wind Erosion,” *Environmental Research*, **212**, 113213 (2022).
 27. Pérez-Reverón, R., Álvarez-Méndez, S. J., González-Sálamo, J. C., Socas-Hernández, C., Díaz-Peña, F. J., Hernández-Sánchez, C., and Hernández-Borges, J., “Nanoplastics in the Soil Environment: Analytical Methods, Occurrence, Fate and Ecological Implications,” *Environmental Pollution*, **317**, 120788 (2023).
 28. Katsumi, N., Kusube, T., Nagao, S., and Okochi, H., “The Input-output Balance of Microplastics Derived from Coated Fertilizer in Paddy Fields and the Timing of Their Discharge during the Irrigation Season,” *Chemosphere*, **279**, 130574 (2021).
 29. Zhou, Y., Kumar, M., Sarsaiya, S., Sirohi, R., Awasthi, S. K., Sindhu, R., Binod, P., Pandey, A., Bolan, N., Zhang, Z., Singh, L., Kumar, S., and Awasthi, M. K., “Challenges and Opportunities in Bioremediation of Micro-nano Plastics: A Review,” *Science of the Total Environment*, **802**, 149823 (2022).
 30. Astner, A. F., Hayes, D. G., Pingali, S. V., O’Neill, H. M., Litrell, K. C., Evans, B. R., and Urban, V. S., “Effects of Soil Particles and Convective Transport on Dispersion and Aggregation of Nanoplastics via Small-angle Neutron Scattering (SANS) and Ultra SANS (USANS),” *Plos One*, **15**(7), e0235893 (2020).
 31. Dris, R., Gasperi, J., Mirande, C., Mandin, C., Guerrouache, M., Langlois, V., and Tassin, B., “A First Overview of Textile Fibers, Including Microplastics, in Indoor and Outdoor Environments,” *Environmental Pollution*, **221**, 453-458 (2017).
 32. Abbasi, S., Keshavarzi, B., Moore, F., Turner, A., Kelly, F. J., Dominguez, A. O., and Jaafarzadeh, N., “Distribution and Potential Health Impacts of Microplastics and Microrubbers in Air and Street Dusts from Asaluyeh County, Iran,” *Environmental Pollution*, **244**, 153-164 (2019).
 33. Dris, R., Gasperi, J., Saad, M., Mirande, C., and Tassin, B., “Synthetic Fibers in Atmospheric Fallout: A Source of Microplastics in the Environment?,” *Marine Pollution Bulletin*, **104**, 290-293 (2016).
 34. Cai, L., Wang, J., Peng, J., Tan, Z., Zhan, Z., Tan, X., and Chen, Q., “Characteristic of Microplastics in the Atmospheric Fallout from Dongguan City, China: Preliminary Research and First Evidence,” *Environmental Science and Pollution Research*, **24**, 24928-24935 (2017).
 35. Dehghani, S., Moore F., and Akhbarizadeh, R., “Microplastic Pollution in Deposited Urban Dust, Tehran Metropolis, Iran,” *Environmental Science and Pollution Research*, **24**(25), 20360-20371 (2017).
 36. Abbasi, S., Keshavarzi, B., Moore, F., Delshab, H., Soltani, N., and Sorooshian, A., “Investigation of Microrubbers, Microplastics and Heavy Metals in Street Dusts: A Study In Bushehr City, Iran,” *Environmental Earth Sciences*, **76**(798), 1-19 (2017).
 37. Klein, M. and Fischer, E. K., “Microplastic Abundance in Atmospheric Deposition within the Metropolitan Area of Hamburg, Germany,” *Science of the Total Environment*, **685**, 96-103 (2019).
 38. Yukioka, S., Tanaka, S., Nabetani, Y., Suzuki, Y., Ushijima, T., Funjill, S., Takana, H., Tran, Q. V., and Singh, S., “Occurrence and Characteristics of Microplastics in Surface Road Dust in Kusatsu (Japan), Da Nang (Vietnam), and Kathmandu (Nepal),” *Environment Pollution*, **256**, 113447 (2020).
 39. Kitahara, K. and Nakata, H., “Plastic Additives as Tracers of Microplastic Sources in Japanese Road Dusts,” *Science of the Total Environment*, **736**, 139694 (2020).
 40. Su, L., Sharp, S. M., Pettigrove, V. J., Craig, N. J., Nan, B., Du, F., and Shi, H., “Superimposed Microplastic Pollution in a Coastal Metropolis,” *Water Research*, **168**, 115140 (2020).
 41. O’Brien, S., Okoffo, E. D., Rauer, C., O’Brien, J. W., Ribeiro, F., Burrows, S. D., Toapanta, T., Wang, X., and Thomas, K. V.,

- “Quantification of Selected Microplastics in Australian Urban Road Dust,” *Journal of Hazardous Materials*, **416**, 125811 (2021).
42. Patchaiyappan, A., Dawarah, K., Ahmed, S. Z., Prabakaran, M., Jayakumar, S., Thirunavukkarasu, C., and Devipriya, S. P., “Prevalence and Characteristics of Microplastics Present in the Street Dust Collected from Chennai Metropolitan City, India,” *Chemosphere*, **269**, 128757 (2021).
 43. Zaki, M. R. M. and Aris, A. Z., “An Overview of the Effects of Nanoplastics on Marine Organism,” *Water Research*, **168**, 115140 (2020).
 44. Prata, J. C., da Costa, J. P., Lopes, I., Durarte, A. C., and Rocha-Santos, T., “Environmental Exposure to Microplastics: An Overview on Possible Human Health Effects,” *Science of the Total Environment*, **702**, 134455 (2020).
 45. Yee, M. S., Hii, L., Looi, C. K., Lim, W., Wong., S., Kok, Y. K., Tan, B., Wong, C., and Leong, C., “Impact of Microplastics and Nanoplastics on Human Health,” *Nanomaterials*, **11**(496), 1-22 (2021).
 46. Lee, Y., Cho, S., Park, K., Kim, T., Kim, J., Ryu, D., and Hong, J., “Potential Lifetime Effects Caused by Cellular Uptake of Nanoplastics: A Review,” *Environmental Pollution*, **239**(15), 121668 (2023).
 47. Ministry of Food and Drug Safety Act No. 2020-12, “Regulations on Cosmetic Safety Standards, etc.”.
 48. Ministry of Food and Drug Safety Act No. 2017-40, “Quasi-drug product approval, reporting, and review regulations”.
 49. Ministry of Environment Act No. 2023-163, “Designation of Household Chemical Products Subject to Safety Confirmation and Safety and Labeling Standards”.
 50. https://environment.ec.europa.eu/topics/plastics_en.
 51. https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12823-Microplastics-pollution-measures-to-reduce-its-impact-on-the-environment_en.
 52. https://environment.ec.europa.eu/publications/proposal-regulation-preventing-pellet-losses_en.
 53. European Commission Proposal, “Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on type-approval of motor vehicles and engines and of systems, components and separate technical units intended for such vehicles, with respect to their emissions and battery durability (Euro 7) and repealing Regulations (EC) No 715/2007 and (EC) No 595/2009,” <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52022PC0586>.