한국환경한림원
KAES Korean Academy of Environmental Science

2025 전문학술보고서

미세·나노플라스틱의 인체 건강영향

(사)한국환경한림원 보건분과

발 간 사

(사)한국환경한림원은 창립 이후 우리 사회가 직면한 다양한 환경 이슈에 대해 전문성과 공익성을 바탕으로 균형 잡힌 조언을 제공하며 환경정책 발전에 기여해 왔습니다. 기후 위기, 탄소중립, 생태계 변화, 환경보건 등 복합적 현안이 심화되는 오늘, 환경한림원이 감당해야 할 사회적 책무는 더욱 무거워지고 있습니다. 환경 전 분야에서 요구되는 대응의 수준과 속도가 높아지는 가운데, 정책 선택과 판단이 우리의 안전과 삶의 질에 직결된다는 사실은 더욱 분명해지고 있습니다.

이에 정책에 대한 통찰력 있는 조언, 과학적 근거에 기반한 제안, 정책 당국 및 이해관계 기관들과의 긴밀한 소통을 통해 사회적 역할을 보다 충실히 수행하고자 합니다. 특히 향후 10년을 준비하는 이 시점에서, 비전과 목표를 재정립하고, 내실화와 소통을 강화하며, 미래 환경정책의 방향을 제시하는 역할이 그 어느 때보다 중요합니다.

이러한 노력의 하나로 올해부터 보건분과가 추진하는 전문학술보고서 발간은 매우 뜻깊은 출발입니다. 우리나라는 세계적으로 드물게 환경보건법을 별도로 제정하여 국민 건강을 사전에 보호하는 제도적 기반을 마련해 왔으며, 가습기살균제 사건을 계기로 환경보건의 중요성은 더욱 크게 부각되었습니다. 이러한 흐름 속에서 전문학술보고서는 정책과 연구현장에서 신뢰할 수 있는 참고자료이자 미래 대응 전략을 마련하는 중요한 기반이 될 것입니다.

이번 첫 번째 보고서는 전 지구적 환경보건 이슈로서 과학적 불확실성과 사회적 관심이 동시에 높은 미세·나노플라스틱을 주제로 다루었습니다.

보고서에 담긴 분석과 제언은 우리나라가 향후 국제 기준 마련과 글로벌 협력에서 보다 주도적인 역할을 수행하는 데 의미 있는 방향성을 제시할 것입니다.

환경한림원은 앞으로도 전문학술보고서가 매년 축적되어 지속적으로 발전하는 지식 자산으로 자리매김할 수 있도록 적극적으로 지원하겠습니다. 더 많은 전문가가 참여하고, 보다 다양한 환경보건 이슈가 심층적으로 다루어져 국내외 정책과 학계에서 신뢰받는 대표 보고서로 성장하기를 기대합니다.

회원 여러분의 지혜와 협력을 부탁드리며, 전문학술보고서가 한림원의 위상을 높이고 사회적 책임을 강화하는 중요한 플랫폼으로 발전하기를 바랍니다. 끝으로 보고서 발간을 위해 헌신해 주신 집필진, 감수진, 토론자 여러분께 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

2025년 12월 3일
한국환경한림원 **허 탁 회장**

간 행 사

(사)한국환경한림원 보건분과는 환경보건 분야의 주요 현안을 심층적으로 분석하고 향후 대응 방향을 제시하기 위해 올해부터 전문학술보고서를 발간합니다. 우리나라는 2008년 「환경보건법」 제정을 통해 환경유해인자의 건강영향을 조사·감시·평가할 제도적 기반을 마련하였으며, 이를 계기로 환경정책의 패러다임을 사후 대응에서 사전 예방 중심으로 전환해 왔습니다.

본 보고서는 매년 환경보건의 핵심 이슈를 선정하여 최신 연구 동향과 과학적 근거를 정리하고, 정책적 시사점과 향후 과제를 제시하는 데 목적이 있습니다. 이를 위해 주요 학술데이터베이스와 총설논문을 활용하여 신뢰성 높은 근거를 도출하고, 포괄적 문헌고찰을 바탕으로 체계적인 분석을 수행했습니다.

올해 선정한 주제는 '미세·나노플라스틱의 인체 건강영향'입니다. 미세·나노플라스틱은 다양한 경로를 통해 인체에 유입될 수 있으며, 과학적 불확실성과 사회적 관심이 동시에 높은 전 지구적 환경보건 이슈로 부상하고 있습니다. 특히 국내 연구진은 나노플라스틱 독성 기전 규명, 국제적으로 높은 인용도를 기록한 리뷰 논문, 고도화된 분석기술 기반의 환경·연안 연구 등에서 세계적 수준의 성과를 거두고 있습니다. 이는 우리나라가 핵심 과학적 논의를 선도할 역량을 갖추고 있으며, 향후 국제 기준 마련과 글로벌 협력 과정에서도 보다 적극적이고 주도적인 역할을 수행할 수 있음을 보여주는 중요한 바탕입니다.

본 보고서는 지금까지 축적된 연구 근거를 바탕으로 노출 경로, 생체 내 분포·축적, 독성 기전, 위해성평가, 역학적 건강영향 등을 종합적으로 검토하였습니다. 독성학, 역학, 위해성평가 분야 전문가들이 초안을 집필하였으며, 보건분과 위원과 외부 전문가의 심도 있는 검토를 통해 내용을 보완하였습니다. 특히 김용화·심원준·정해관 박사님께서는 비회원임에도 전문적 식견을 바탕으로 적극적으로 참여해 주셔서 깊이 감사드립니다.

또한 2025년 11월 13일 환경독성보건학회와 공동으로 개최한 원탁토론회 "미세·나노플라스틱: 무엇이 문제인가, 어떻게 할 것인가?"에서 제시된 발제와 다양한 전문가들의 토론 의견을 반영하여 보고서의 완성도를 한층 높였습니다.

이번 전문학술보고서가 미세·나노플라스틱 문제에 대한 과학적 이해를 심화하고, 효과적인 정책·사회 대응 체계를 구축하는 데 기여하기를 기대합니다. 아울러 보고서 발간을 위해 헌신적으로 참여해 주신 모든 분들께 깊이 감사드립니다.

2025년 12월 3일

(사)한국환경한림원 보건분과

참여 전문가

Ⅰ. 집필진

정규혁 총괄 / 독성학 (경성대학교 석좌교수, 보건분과 위원장)
하미나 역학 (단국대학교 교수, 학술위원회 위원)
김용화 위해성평가 (전 국가독성과학연구소 책임연구원)

Ⅱ. 감수진
(가나다 순)

보건분과
권호장 단국대학교 교수
김창수 연세대학교 교수
박광식 동덕여자대학교 교수
신윤용 이화여자대학교 명예교수
신용승 서경대학교 겸임교수
정현미 전 국립환경과학원 환경건강연구부 부장
최진희 서울시립대학교 교수

외부 전문가
심원준 한국해양한림원 석학회원
정해관 성균관대학교 명예교수

Ⅲ. 자문단
(가나다 순)

원탁토론회 발제자
권정환 고려대학교
현영민 연세대학교

원탁토론회 토론자
강찬수 에너지경제신문
곽진일 부경대학교
김수진 국립환경과학원
박정규 한국환경연구원
안윤주 건국대학교
이규홍 국가독성과학연구소
이동욱 인하대학교
이상현 고려대학교 대학원

목 차

CONTENTS

요약문 ---------- 10

제1장 • 들어가며 ---------- 12

1.목적

2.문헌 검색 및 선별 기준

3.문헌 고찰 절차

제2장 • 미세·나노플라스틱의 정의와 현황 ---------- 16

1.정의 및 분류

2.국제 기준 및 분류 체계

3.미세·나노플라스틱의 환경 중 현황

참고문헌

제3장 • 미세·나노플라스틱의 인체 노출 ---------- 22

1.주요 노출경로

2.노출평가 및 노출량

3.향후 연구 및 대응 방향

4.결론

참고문헌

제4장 • 미세·나노플라스틱의 인체 독성 ---------- 34

1.체내 이동 및 독성동태

2.주요 독성작용

3.독성 유발 작용기전

4.향후 연구 및 대응 방향

5.결론

참고문헌

제5장 • 미세·나노플라스틱의 건강영향 및 인과관계 ---------- 51

1.인체 침투와 분포

2.건강영향 범주

3.결과 해석의 공통점과 새로운 발견

4.연구 설계 및 한계점

5.향후 연구 및 대응 방향

6.결론

참고문헌

제6장 • 미세·나노플라스틱의 인체 위해성평가 ---------- 61

1.인체 위해성평가 수행 현황

2.인체노출 분석자료 (음용수 및 식품 중 함량 분석)

3.동물독성시험 자료(경구)

4.인체 위해도 결정

5.기존 연구의 제한점 및 개선점

6.결론

참고문헌

제7장 • 국내외 정책 및 연구 동향과 향후 방향 ---------- 74

1.국제 정책 및 연구 동향

2.국내 정책 및 연구 동향

3.향후 과제 및 바람직한 대응 방향

맺음말 ---------- 79

미세 · 나노플라스틱의 인체영향 : 과학적 근거와 미래 과제

(Micro-nanoplastics and Human Health: Current Evidence and Future Challenges)

요약문

플라스틱은 현대 생활에 필수적인 소재로 자리 잡았지만, 자연 분해가 어렵고 장기간 환경에 잔류한다는 점에서 심각한 환경·보건 문제를 야기하고 있다. 플라스틱이 사용·마모·분해되는 과정에서 생성되는 미세플라스틱(5 mm 이하)과 나노플라스틱(1 μm 이하)은 해양, 토양, 대기뿐 아니라 식수와 식품 속에서도 광범위하게 검출되고 있으며, 최근 연구에서는 사람의 혈액, 간, 신장, 폐, 뇌, 태반 등 인체 조직에서도 발견되었다는 보고가 제기되었다. 이는 인류가 이미 일상적으로 미세·나노플라스틱(Micro and Nanoplastics, MNPs)에 노출되고 있음을 의미한다.

실험실 기반 연구에서는 미세·나노플라스틱이 세포막 교란, 과도한 활성산소종(ROS) 생성, 염증반응, DNA 손상, 면역·내분비 기능 교란, 미토콘드리아 기능 저하, 인지 기능 변화 등 다양한 생물학적 반응을 유도하는 것으로 확인되었다. 특히 표면 전하·기능기, 입자 크기, 노출 조건 등에 따라 독성 양상이 크게 달라지며, 입자 자체의 독성뿐 아니라 플라스틱 첨가제, 중금속, 내분비계 교란물질 등이 함께 체내에 침투하여 독성을 증폭시키는 복합독성(carrier effect) 가능성도 제기되고 있다. 다만, 이러한 결과는 대부분 세포·동물·오가노이드 기반의 단기 연구에 한정되어 있어, 인체 장기 노출에 따른 실제 질병 발생과의 인과관계는 현 단계에서 명확히 규명되지 않았다.

현재까지의 과학적 근거를 종합하면, 일반적인 식품·음용수 등을 통한 일상적 노출 수준에서 미세·나노플라스틱이 인체 건강에 직접적이고 중대한 위해를 초래한다는 확정적 증거는 부족하다. 그러나 불확실성이 크다는 사실 자체가 선제적 관리의 필요성을 높이고 있다. 국제기구들은 사전예방원칙에 기반한 대응을 권고하고 있으며, 유럽연합(EU)은 의도적 미세플라스틱 첨가 금지, 타이어·섬유 등 비의도적 방출원 규제, 제품 전주기 관리 등을 포함한 세계 최고 수준의 강력한 규제를 시행하고 있다. 세계보건기구(WHO) 역시 식수·식품·공기 등 다양한 경로에 대한 노출평가와 인체 기반 장기 코호트 연구, 신뢰성 있는 생체지표 개발을 우선 과제로 제시하고 있다.

우리나라 또한 국제적 흐름에 맞추어 대응체계를 강화할 필요가 있다. 국내 연구진은 특히 나노플라스틱의 인체 독성 기전 규명, 고인용 리뷰 논문, 고도 분석기술 기반의 정밀 환경 연구 등 질적으로 높은 연구 성과를 축적하며 학계에서 세계적 수준의 경쟁력을 확보하고 있다. 이러한 연구 기반을 바탕으로 ▲장기 노출 및 저농도 영향 연구 확대 ▲표준화된 분석기술·인체 바이오모니터링 체계 구축 ▲의료기기·의약품 등 직접 노출 가능 분야의 안전기준 강화 ▲부처 간 통합적 위해성평가 시스템 마련이 시급한 과제로 제시된다.

궁극적으로 미세·나노플라스틱 문제는 과학적 연구와 사회적 실천이 함께 작동해야 해결될 수 있다. 정확한 정보 제공, 시민의 플라스틱 사용 저감과 재활용 실천, 산업계의 전주기 관리 전환, 정부의 제도적 대응이 유기적으로 결합될 때 지속가능하고 효과적인 대응체계가 구축될 수 있을 것이다.

제1장 들어가며

미세플라스틱(Microplastics, MPs)은 플라스틱 폐기물이 환경에서 물리적·화학적 요인에 의해 분해되면서 생성되는 지름 5 mm 이하의 입자를 의미한다. 이 중에서도 크기가 1 μm 이하인 극미세 입자는 일부 연구에서 초미세플라스틱(Ultrafine Plastics)으로 불리기도 하지만, 국제적으로는 나노플라스틱(Nanoplastics, NPs)이라는 용어가 더 널리 사용되고 있다. 다만, 나노플라스틱의 크기 기준(100 nm 이하 vs. 1 μm 이하)은 학계와 기관별로 다소 차이가 있다. 나노플라스틱은 육안으로 식별할 수 없을 만큼 작아 환경 중 확산성이 높고, 생체 내 침투 가능성이 큰 입자군으로 알려져 있다.

본 보고서에서는 이러한 국제적 용어 사용 관행을 반영하여, 초미세플라스틱 대신 나노플라스틱이라는 용어를 채택하였다. 따라서 미세플라스틱과 나노플라스틱을 합쳐 “미세·나노플라스틱(Micro and Nanoplastics, MNPs)”으로 통칭하여 서술하였다.

최근 연구들은 식품, 식수, 대기, 실내 먼지, 해양 생물 등 다양한 경로를 통해 인체가 미세·나노세플라스틱에 노출될 수 있음을 보여주고 있으며, 실제로 대변, 간, 신장, 폐, 태반, 뇌 등 여러 인체 조직에서 이들 입자가 검출되고 있다. 이는 미세·나노플라스틱이 단순한 환경 잔류 오염물질을 넘어 인체 내 흡수·분포·축적될 수 있음을 시사하며, 이에 따른 염증 반응, 면역계 교란, 내분비계 및 신경계 이상 등 잠재적 건강영향에 대한 우려를 높이고 있다.

그러나 현재까지의 연구는 주로 세포 및 동물실험 수준에 머물러 있으며, 인체를 대상으로 한 정량적 노출평가, 조직별 축적 경로 규명, 건강영향과의 인과관계 분석은 여전히 부족하다. 또한 미세·나노세플라스틱이 중금속, 환경호르몬 등 다른 오염물질과 함께 존재할 경우 나타날 수 있는 복합노출 및 상호작용 효과도 주목받고 있으나, 이에 대한 체계적 검토는 제한적이다.

따라서 인체 건강 위해성에 대한 과학적 근거의 신뢰성을 높이고, 정책적 대응을 위한 기초 자료를 확보하기 위해서는 분야별로 축적된 연구를 상위 수준에서 통합·평가하는 노력이 필요하다. 이에 본 보고서는 환경보건학, 환경노출학, 독성학, 환경역학 등 관련 분야 전문가들의 협력을 통해, 미세·나노세플라스틱의 인체 위해성에 관한 국내외 문헌을 포괄적으로 종합·분석하였다. 특히, 주요 체계적 문헌고찰(Systematic Review) 과 메타분석(Meta-analysis)을 재평가하는 포괄적 문헌분석(Umbrella Review) 방법을 중심으로 근거 수준을 정리하고, 향후 과학적 연구 방향과 정책적 대응의 필요성을 제시하고자 한다.

1. 목적

본 보고서는 미세·나노플라스틱의 인체 건강영향에 대한 최신 과학적 근거를 종합적으로 검토하기 위해 포괄적 문헌분석 접근법을 적용하였다. 이 접근법은 개별 연구 수준을 넘어, 이미 수행된 체계적 문헌고찰 및 메타분석을 통합·평가함으로써 현재까지 축적된 과학적 증거의 전반적 수준과 일관성을 파악하는 데 목적이 있다.

본 분석은 미세·나노플라스틱의 인체 노출 경로, 생체 내 축적 및 분포, 세포·조직 수준의 독성기전, 그리고 역학적 건강영향에 관한 현재까지의 과학적 근거를 망라하였다. 이를 통해 미세·나노플라스틱이 인체 건강에 미칠 잠재적 위험을 종합적으로 평가하고, 향후 연구 및 정책적 대응의 과학적 토대를 제시하였다.

2. 문헌 검색 및 선별 기준

1) 문헌 검색

검색어로 “microplastic”, “microsize”, “nanoplastic”, “nano-size”, “plastic”, “human exposure”, “toxicokinetic”, “toxic effects”,

"health effects", "epidemiology", "risk assessment" 등을 조합하여, PubMed, Scopus, Web of Science, Google Scholar, Embase 등 주요 국제 학술 데이터베이스를 대상으로 2015년 1월부터 2025년 10월까지 발표된 영어 및 한국어 논문을 검색하였다.

2) 포함 기준

- 인체 또는 포유동물 대상 연구 결과를 포함한 문헌
- 노출 경로 또는 조직 축적 정보가 명시된 연구
- 체계적 고찰 또는 메타분석 구조를 갖추었거나 PRISMA 지침을 준수한 고찰논문
- 노출, 독성, 건강영향 등에 관한 새로운 연구성과를 보고한 저명 학술지 원저논문

3) 배제 기준

- 비학술 자료(언론기사, 회의록, 보고서 등)
- 실험설계 또는 결과가 불분명하거나 핵심 변수(노출량, 축적지표 등)가 누락된 연구
- 중복 출판 또는 동일 데이터 기반의 중복 보고

4) 최종 선정

문헌 검색 및 선별 기준에 따라 추출된 문헌을 대상으로, 환경보건학, 독성학, 환경역학, 환경노출학, 위해성평가 등 관련 분야의 다학제 전문가로 구성된 학술전문보고서 편집위원회가 포괄적 문헌분석의 적합성을 심의하여 최종 선정하였다.

3. 문헌 고찰 절차

1) 체계적 문헌 고찰

전문학술보고서 편집위원회에서 최종 선정된 문헌을 대상으로 인체 노출 경로, 체내 거동(흡수·분포·축적), 독성영향, 건강영향, 위해성평가 결과를 체계적으로 고찰하였다. 이를 통해 노출, 독성, 역학, 인체 위해성에 대한 과학적 근거를 종합 정리하여 보고서에 수록하였다.

2) 연구 간 일관성 및 근거 수준 평가

각 연구의 결과 간 일관성 및 상충 여부, 연구설계의 질과 근거 수준을 종합적으로 분석하고, 이를 토대로 현재까지의 과학적 결론과 정책적 대응 필요성을 도출하였다.

3) 전문가 검토

미세·나노플라스틱의 주요 쟁점에 대해 한국환경한림원 보건분과의 검토와 의견을 수렴하고, 이를 통해 문헌 평가의 객관성과 결과 해석의 학술적 신뢰성을 제고하였다.

제2장 미세 · 나노플라스틱의 정의와 현황

1. 정의 및 분류

플라스틱은 석유·가스에서 유래한 단량체(monomer)가 중합(polymerization) 과정을 통해 형성된 합성 고분자 물질로, 현재 전 세계적으로 약 45종 이상의 플라스틱이 식품 포장재, 의류 섬유, 건축자재, 전자제품 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 대표적인 합성 고분자로는 폴리에틸렌(PE), 폴리에틸렌테레프탈레이트(PET), 고밀도 폴리에틸렌(HDPE), 폴리염화비닐(PVC), 폴리프로필렌(PP), 폴리스티렌(PS), 폴리우레탄(PU) 등이 있다.

환경에서는 특히 PE와 PP가 가장 흔하게 검출되며, PET와 PVC가 그 뒤를 잇는다. 해양에서는 PE, PP, PS, 발포 폴리스티렌(EPS) 등이 해안 및 해저 퇴적물에서 자주 발견된다.

플라스틱은 크기에 따라 일반적으로 다음과 같이 분류된다.

- 거대플라스틱(Macroplastics): 〉 25 mm
- 중간플라스틱(Mesoplastics): 5–25 mm
- 미세플라스틱(Microplastics, MPs): 1 μm–5 mm
- 나노플라스틱(Nanoplastics, NPs): 〈 1 μm

ISO 및 주요 기관들은 미세플라스틱을 고체 상태의 고분자 입자로 정의하므로, 젤·용액·용해 중의 폴리머는 포함되지 않는다는 점을 명확히 할 필요가 있다.

또한, 플라스틱은 가열 시 반응 특성에 따라서도 다음과 같이 구분된다.

- 열가소성 플라스틱(thermoplastics): 가열 시 녹아 재성형 가능
- 열경화성 플라스틱(thermosets): 가교결합 구조로 인해 재성형 불가

1) 미세플라스틱(Microplastics, MPs)

미세플라스틱은 일반적으로 크기 5 mm 이하의 고체 플라스틱 입자로 정의되며, 기원에 따라 다음 두 유형으로 분류된다.

- 1차 미세플라스틱(Primary MPs)
  의도적으로 제조된 소형 플라스틱 입자
  (예: 화장품·세정제용 마이크로비즈, 산업용 펠릿, 플라스틱 파우더)
- 2차 미세플라스틱(Secondary MPs)
  대형 플라스틱 제품이 자외선, 마찰, 산화, 풍화 등의 환경 스트레스를 받아 파편화되며 생성된 입자

2) 나노플라스틱(Nanoplastics, NPs)

나노플라스틱은 일반적으로 1 nm ~ 1 μm 이하의 크기를 가지는 고체 플라스틱 입자로, 미세플라스틱이 추가적인 물리·화학적 풍화를 거쳐 더 작은 크기로 분절되며 형성된다. 특히 반결정성 고분자(PE, PET 등)는 결정질–비결정질 영역의 구조적 차이로 인해 비결정질 영역이 먼저 분해되고, 이 과정에서 발생하는 계면 응력 집중이 나노스케일 입자 분리의 동력이 된다.

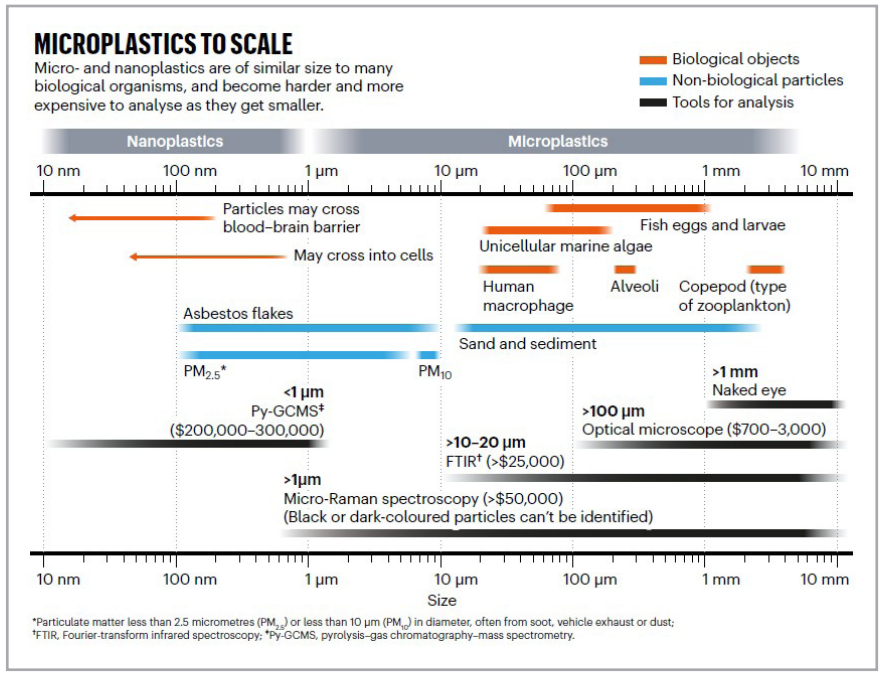
최근 연구에서는 이러한 반결정성 고분자가 열역학적으로 안정한 '휴지성 나노플라스틱(quiescent nanoplastics)'을 형성할 수 있음을 제시하고 있으며, 이는 나노플라스틱이 환경에서 장기간 잔류할 수 있음을 시사한다.

2. 국제 기준 및 분류 체계

미세·나노플라스틱의 크기 정의는 연구 결과 비교와 위해성 평가의 정확성을 위해 국제적 통일이 요구되나, 아직 완전한 합의는 이루어지지 않았다.

- ISO 및 일부 국제 규제 논의에서는 나노플라스틱을 1 μm 이하로 규정하는 경향
- 독성학 연구 분야에서는 세포 투과성이 높은 100 nm 이하 입자에 주목
- 일부 문헌에서는 100 nm 이하만을 나노플라스틱으로 정의

특히 입자 크기 정의 차이는 독성 해석, 노출평가, 정책 기준 설정에 직접적 영향을 미친다. 예를 들어, 100 nm 이하에서는 혈액-뇌 장벽(BBB) 통과 가능성이 증가하고 1 μm 수준에서는 식세포작용(phagocytosis) 중심의 독성 경로를 보인다. 따라서 향후 정책 및 연구에서는 국제적으로 합의된 기준 마련이 핵심 과제로 남아 있다.



미세플라스틱의 규모 (Nature. 2021 May;593. doi: 10.1038/d41586-021-01143-3)

3. 미세 · 나노플라스틱의 환경 중 현황

1) 전 세계 플라스틱 생산 및 유출 현황

전 세계 플라스틱 생산량은 1950년대 이후 급격한 증가세를 보이며, 2019년 기준 약 4억 6천만 톤에 도달하였다. 이러한 증가 추세가 지속될 경우, 생산량은 2050년경 현재의 두 배 수준에 이를 것으로 전망된다. 그러나 생산량 증가에 비해 폐기물 관리 체계는 매우 미흡하여 전 세계 플라스틱 폐기물의 재활용률은 약 9%에 불과한 실정이다. 이로 인해 매년 약 1,900만~2,300만 톤의 플라스틱이 강, 호수, 해양 등 다양한 수생 생태계로 유입되는 것으로 추정된다. 환경으로 유입된 플라스틱은 자외선, 마찰, 산화, 생물학적 분해 등 풍화 과정을 거치면서 미세플라스틱과 나노플라스틱 형태로 재분해되고, 이는 지속적인 2차 오염원을 형성하여 전 지구적 오염을 더욱 심화시키고 있다.

2) 미세 및 나노플라스틱의 주요 환경 유입원

미세플라스틱의 환경 유입원은 크게 1차 미세플라스틱과 2차 미세플라스틱으로 구분된다. 1차 미세플라스틱은 제조 과정에서부터 소형 입자로 생산되어 바로 환경 중으로 배출될 수 있는 입자들로, 그 기여 비중이 높다. 대표적으로 합성 섬유 의류를 세탁하는 과정에서 발생하는 미세 섬유는 해양 미세플라스틱의 약 35%를 차지하는 최대 오염원으로 알려져 있다. 또한 차량 운행 시 발생하는 타이어 마모 입자는 약 28%의 비중을 차지하며, 이 외에도 도시 먼지, 도로 표지 도료, 선박 코팅제, 화장품·세정제에 사용되는 마이크로비즈, 산업용 펠릿 등이 주요 1차 오염원으로 작용한다.

한편, 2차 미세플라스틱은 페트병, 비닐, 어구 등 대형 플라스틱 폐기물이 환경 노출에 의해 풍화되면서 점차 작은 조각으로 분해되는 과정에서 생성된다. 이러한 대형 폐기물은 장기간에 걸쳐 지속적으로 미세·나노플라스틱을 공급하는 주요 원천으로 기능하며, 관리되지 않은 폐기물이 집중된 지역

일수록 분해 속도와 발생량이 증가한다.

3) 환경 매체별 오염 수준 및 실태

미세·나노플라스틱은 현재 해양, 담수, 토양, 대기 등 모든 환경 매체에서 광범위하게 검출되고 있으며, 그 확산 범위는 대륙·해양·극지방을 아우를 만큼 지리적 한계를 벗어난 상태이다. 해양 환경에서는 약 15조에서 51조 개에 달하는 미세플라스틱 입자가 부유하고 있으며, 이는 약 9만 3천 톤에서 23만 6천 톤의 질량에 해당하는 것으로 추정된다. 이러한 오염은 해수면뿐 아니라 심해 퇴적물에서도 확인되고 있으며, 심지어 극지방의 만년설에서도 검출되고 있어 전 지구적 순환 경로를 통해 먼 지역까지 이동하고 있음을 보여준다.

대기 중 미세플라스틱은 해양 비말, 도시 먼지, 산업 활동 등을 통해 생성된 입자가 대기 순환을 따라 장거리 이동하며 확산된다. 알프스 산맥과 북극권 등 인적이 드문 원격 지역에서도 미세플라스틱이 확인된 바 있으며, 이는 대기 중 이동이 오염 확산의 주요 경로임을 시사한다. 또한 육상 환경에서는 하수 슬러지의 농경지 살포, 농업용 플라스틱 필름의 분해 등 다양한 경로를 통해 농경지 토양에 미세플라스틱이 대량 축적되고 있다.

특히 나노플라스틱의 경우, 기존 분석 기술의 한계로 인해 오염 수준이 오랫동안 과소평가되어 왔다. 그러나 최근 고해상 분석기술을 활용한 연구에서는 1 μm 이하의 초미세 입자를 포함할 경우 환경 중 전체 플라스틱 오염량을 기존보다 훨씬 높게 산정해야 할 가능성이 제기되고 있다. 이는 나노플라스틱이 상대적으로 작은 크기에도 불구하고 총 오염량과 인체·생태계 위해성에서 중요한 비중을 차지할 수 있음을 시사한다.

참고문헌

Boucher J, Friot D. Primary Microplastics in the Oceans: A Global Evaluation of Sources. IUCN (International Union for Conservation of Nature). 2017.

Geyer R, Jambeck JR, Law KL. Production, use, and fate of all plastics ever made. Science Advances. 2017;3(7):e1700782. doi:10.1126/sciadv.1700782

Hale RC, Seeley ME, La Guardia MJ, et al. A Global Perspective on Microplastics and Nanoplastics: A Call for Research on the Emerging Contaminants of the 21st Century. Environmental Science & Technology. 2020;54(16):9630-9635. doi:10.1021/acs.est.0c03698

Jambeck JR, Geyer R, Wilcox C, et al. Plastic waste inputs from land into the ocean. Science. 2015;347(6223):768-771. doi:10.1126/science.1260352

Koelmans AA, Kooi M, Kukulka T, et al. The contemporary quantification of global marine microplastic masses requires attention to the sizes of plastic items. Environmental Science & Technology. 2019;53(24):14550-14558. doi:10.1021/acs.est.9b05727

Mendez NF, Sharma V, Valsecchi M, et al. Mechanism of quiescent nanoplastic formation from semicrystalline polymers. Nat Commun. 2025;16:3051. doi:10.1038/s41467-025-58233-3

Wright SL, Kelly FJ. Plastic and human health: a micro issue? Environ Sci Technol. 2017;51(12):6634-6647. doi:10.1021/acs.est.7b00423

Yong CQY, Valiyaveettil S, Tang BL. Toxicity of microplastics and nanoplastics in mammalian systems. Int J Environ Res Public Health. 2020;17(5):1509. doi:10.3390/ijerph17051509

Zarus GM, Muianga C, Hunter CM, Pappas RS. A review of data for quantifying human exposures to micro and nanoplastics and potential health risks. Sci Total Environ. 2021;756:144010. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.144010

제3장 미세 · 나노플라스틱의 인체 노출

미세·나노플라스틱은 환경 전반에 걸쳐 분포하며, 인간은 일상생활 속에서 다양한 경로를 통해 지속적으로 노출되고 있다. 식수와 식품을 통한 섭취, 대기 및 실내 공기를 통한 흡입, 생활용품이나 화장품을 통한 직접적 접촉 등 다중 경로가 확인되고 있으며, 이러한 특성은 노출의 불가피성을 보여준다. 특히 최근 연구에서는 소화기, 호흡기뿐 아니라 의료기기를 통한 혈류 직접 노출까지 제기되고 있어 노출 경로의 범위는 더욱 확장되고 있다.

현재까지의 연구는 대체로 환경 매체 내 농도 조사와 인체 섭취량 추정에 집중되어 있으며, 개별 식품군이나 대기 환경을 대상으로 한 정량적 노출 평가가 활발히 이루어지고 있다. 그러나 인체가 실제로 어느 정도 수준의 미세·나노플라스틱에 장기간 노출되는지, 나이, 성별, 지역, 생활양식에 따른 차이가 어떻게 나타나는지에 대해서는 여전히 불확실성이 크다.

1. 주요 노출경로

1) 경구 노출

식품과 식수는 미세·나노플라스틱이 인체로 유입되는 주요 경로로, 최근 다양한 식품군에서 검출되고 있다. 해양 식품(조개류, 갑각류, 어류, 해조류), 곡류(쌀), 채소, 과일, 육류, 유제품, 음료, 식염, 생수 등이 대표적 노출원이다. 다만, 보고된 농도는 분석 기법의 최소 검출 크기에 따라 수천~수만 배까지 차이가 날 수 있으므로, 결과 해석 시 반드시 분석법과 검출 크기를 고려해야 한다.

(1) 해산물

조개류(홍합, 굴 등)는 수질 내 입자를 여과·축적하기 때문에 중요한 노출원으로 지목되며, 조직당 평균 0.2~0.3개/g이 일반적이다. 새우류는 한 마리당 평균 10개/g으로 어류보다 수십 배 높은 농도를 보인다. 해조류는 마른 김에서 0.9~3.0개/g, 양식 홍조류·녹조류에서는 0.165~1.817개/g(습윤 기준)이 보고되어, 한국인의 연간 해조류 섭취량(약 25kg)을 고려하면 수천~수만 개 수준의 입자가 유입될 수 있으며, 식염(해수염 기준)을 통해서도 연간 약 155개 수준의 입자가 산출된다.

(2) 곡류, 채소·과일 및 육류·유제품

아시아 지역의 경구 노출 비교 리뷰에서는 어패류 다음으로 쌀(2위)의 노출 기여도가 높게 나타났다. 특히 즉석밥은 가공 과정에서 오염이 추가되어 일반 쌀 대비 약 3~4배 높은 농도가 보고되었다. 채소와 과일은 토양·관개수·비료·대기 침착 등을 통해 미세·나노플라스틱이 유입되며, 특히 대기 중 미세·나노플라스틱이 식물 잎의 기공을 통해 직접 유입되는 경로가 제시되었다. 육류와 유제품(우유, 치즈 등)에서도 검출 사례가 보고되나, 현재까지는 표본 수가 적고 대부분 광학·FTIR 기반 수십 μm 이상 분석이어서 과소추정될 가능성이 높다.

(3) 음료 및 플라스틱 용기

가공 음료에서도 수백~수천 개/L의 미세·나노플라스틱이 보고된다. 특히 생수의 경우 최신 나노입자 분석 기법을 적용한 연구에서는 평균 240,000개/L(수백 nm 크기 포함)가 검출되었으나, 기존 광학법(수십 μm 이상 기준)에서는 0.05개/L에 불과했다.

추가적으로, 플라스틱 용기 및 제품을 통한 노출이 매우 심각한 기여 경로로 지목된다. 일회용 차 티백은 한 번 우려낼 때 최대 최대 116억 개의 미세플라스틱과 31억 개의 나노플라스틱을 방출할 수 있으며, 영유아용 PP 젖병은 고온 소독 시 1L당 최대 5.5×10^{7}개가 검출되어, 하루 분유 섭취량 기준으로 수백만 개 이상이 노출될 수 있다.

2) 흡입노출

대기 중 부유하는 미세·나노플라스틱과 실내 환경에서 발생하는 합성섬유 탈락은 대표적인 호흡기 노출 경로로 지목된다. 의류의 마찰, 타이어 마모, 플라스틱 제품의 손상 등으로 발생한 입자는 공기를 통해 장거리로 확산되며, 사람은 실외뿐 아니라 실내 공간을 통해서도 상시적으로 흡입하게 된다.

실내는 특히 중요한 노출 공간으로, 카펫·가구·합성 의류·의류 건조기 등에서 방출되는 섬유형 미세플라스틱이 쉽게 축적된다. 서울시 조사에서는 실내 공기 중 MNPs 농도가 실외보다 약 1.5 배 높았으며, 평균 약 2.5개/m^3가 검출되었다. 검출 입자의 48~96%는 20~100 μm 크기 범위였고, 그중 PE와 PP가 전체의 약 67%를 차지하였다.

해외 연구에서는 성인의 경우 호흡을 통해 하루 평균 210~330개의 미세플라스틱을 흡입할 수 있다는 추정이 제시되었다. 흡입된 1 μm 이하의 나노플라스틱은 폐포를 통과해 전신 순환계로 이행할 가능성이 있어 중장기적 건강영향에 대한 우려가 크다.

흡입 노출의 수준은 환경 조건과 생활습관에 따라 크게 달라질 수 있다. 환기가 불충분한 밀폐된 실내나 플라스틱 가구·제품이 많은 공간에서는 농도가 상승하며, 섬유 산업이나 플라스틱 가공·재활용 시설 근로자는 일반인보다 높은 고위험 집단으로 분류된다. 또한 합성섬유 의류 착용 빈도, 건조기 사용, 청소 방식 등 개인적 생활습관에 따라서도 흡입량 차이가 크게 나타날 수 있다.

3) 피부 노출

일상생활에서 사용하는 화장품, 섬유제품, 생활용품, 위생·의약외품 등은 미세·나노플라스틱의 피부 접촉 노출 경로로 지목된다. 과거 세안제, 치약, 스크럽 제품에는 1차 미세플라스틱(마이크로비즈)이 의도적으로 첨가되었으며, 사용 즉시 피부에 직접 닿은 뒤 배수와 함께 환경으로 유입되었다. 현재 일부 국가에서는 이를 금지하거나 제한하고 있으나, 기존 재고나 규제 사각지대 제품으로 인한 노출 가능성은 여전히 존재한다.

섬유제품 역시 피부 접촉과 간접 노출의 원인이 된다. 합성섬유 의류는 마찰·세탁·건조 과정에서 섬유형 미세·나노플라스틱을 방출하며, 이 입자는 피부에 직접 부착되거나 실내 공기 중에 부유해 다른 노출 경로로 이어질 수 있다. 국내 연구에서는 향기 캡슐이 포함된 세탁세제 사용 후 세탁수에서 다양한 형태의 미세·나노플라스틱이 검출되었고, 세탁기 종류에 따라 방출량 차이가 확인되었다. 이는 세탁·의류 사용 과정이 단순히 환경 배출뿐 아니라 피부 접촉, 간접 흡입·섭취 노출에도 기여할 수 있음을 시사한다.

또한 일부 화장품·위생·의약외품(패치, 마스크팩, 의료 포장재 등)에서도 미세·나노플라스틱 잔류 가능성이 제기되고 있으며, 장시간 피부 접촉 시 일부가 피부 표면에 부착될 수 있다.

그러나 현재까지의 과학적 근거를 종합하면, 피부 장벽을 통한 미세플라스틱의 경피 흡수는 극히 제한적으로 평가된다. 피부 각질층의 구조적 특성과 입자의 크기·형태 때문에 체내 직접 흡수 가능성은 낮으며, 더 큰 문제는 피부 접촉 중 발생한 입자가 공기 중에 부유하거나 생활환경에 잔류해 간접적으로 흡입·섭취되는 경로로 이어지는 점이다. 따라서 피부 노출 문제는 2차 오염 및 간접 흡입·섭취 노출로 이어지는 관리 측면에서 접근해야 한다.

4) 직업적 노출

플라스틱 제조·가공, 합성섬유 및 의류 산업, 페인트 제조·제거, 건설·해체, 재활용 공정 등 특정 산업 환경에서는 일반 생활환경보다 훨씬 높은 수준의 미세·나노플라스틱에 노출될 수 있다. 특히 고온, 마찰, 절단, 파쇄가 수반되는 공정에서는 플라스틱의 물리·화학적 분해가 촉진되어 공기 중 농도가 급격히 증가한다.

대표적인 사례로 합성섬유 플로킹(flocking) 공정에서는 공기 중 미세플라스틱 농도가 최대 540 mg/m^3에 달했으며, 근로자 143명의 흉부 X-ray 검사에서 모두 이상 소견이 확인되었다. 많은 근로자가 폐렴, 천식 등 호흡

기 질환을 호소했고, 일부는 'flocking worker's lung'으로 불리는 염증성 폐 섬유화 진단을 받는 등 심각한 직업병 사례가 보고되었다.

이외에도 PVC(폴리염화비닐) 생산 근로자에서 폐암과 간암 발병률이 일반인보다 높다는 연구가 있으며, 플라스틱 재활용·분쇄 작업장과 섬유가공 공장에서도 고농도 노출 사례가 반복적으로 보고되고 있다. 최근에는 3D 프린팅, 건설 해체, 도로 아스팔트 시공 및 도장 작업, 합성고무(타이어) 가공 등 신흥 산업 영역에서도 직업적 노출 위험이 지적되고 있다. 실제로 아스팔트 도로포장 근로자에서 호흡기계 염증, 타이어 제조 근로자에서 폐 기능 저하가 보고된 바 있다.

5) 의료기기를 통한 노출

최근 연구들은 의료 환경이 미세·나노플라스틱의 새로운 인체 노출 경로가 될 수 있음을 보여주고 있다. 의료기기를 통한 노출은 경구나 흡입 노출과 달리 인체의 방어 장벽을 우회하여 혈류로 직접 유입될 수 있는 경로를 제공하므로, 기존 환경적 노출보다 훨씬 직접적이고 잠재적 위해성이 높은 노출 형태로 평가된다.

최근 일부 국가에서 시판 중인 정맥주사용 수액을 분석한 결과, 대부분의 시료에서 미세플라스틱이 검출되었다. 유리 용기에 담긴 수액에서는 9~20개/L 수준이었지만, 플라스틱 백에 담긴 수액에서는 166~299개/L로 나타나 용기 재질에 따라 최대 30배 이상의 차이를 보였다. 검출된 입자의 60% 이상은 100 μm 이하였으며, 형태는 파편형(63%)과 섬유형(37%)이 대부분이었다. 주요 구성 물질은 폴리아미드(PA), 폴리에틸렌테레프탈레이트(PET), 폴리염화비닐(PVC) 등으로, 수액이 단순한 약제 용매가 아니라 미세플라스틱의 실제 유입 경로로 작용할 가능성을 시사한다.

수액튜브, 혈액채취용 주사바늘 등 일회용 의료기기 자체에서도 마찰, 압력, 온도 상승 등 물리적 요인에 의해 미세·나노플라스틱이 용액에 섞여 방출되는 현상이 확인되었다. 대부분의 입자는 10~30μm 크기였다. 수액튜브에서는 폴리아미드, 폴리염화비닐, 폴리에틸렌테레프탈레이트가 주로 검출되었고, 1mL당 약 12~16개의 입자가 방출되었다. 혈액채취용 바늘에서는 폴리우레탄(PU)과 PET이 주요 성분이었으며, 방출량은 약 82~84개/mL로 수액튜브보다 약 5배 높았다. 이러한 결과는 의료기기 사용 시 마찰, 압력, 온도 상승, 액체의 흐름 등 물리적 요인이 미세플라스틱 방출을 촉진할 수 있음을 보여준다.

이처럼 의료기기를 통한 노출은 단순히 수액이나 주사 한 번으로 끝나지 않는다. 투석, 항암제 투여 등 장시간 반복되는 의료 행위에서는 미세·나노플라스틱이 지속적으로 혈류에 직접 유입될 가능성이 높으며, 이는 혈관 내 피세포 손상, 염증반응, 면역계 교란 등을 유발할 수 있어 임상적 안전성 관리의 새로운 과제로 인식되어야 한다.

2. 노출평가 및 노출량

1) 인체 총 노출량 추정 및 위해성평가 단위 노출량 산출

미세·나노플라스틱에 대한 인체의 노출은 복합적인 경로를 통해 이루어지며, 노출량 추정치 간의 비교를 통해 총 노출 수준을 파악하는 것이 필요하다. 해산물, 쌀과 같은 일반적인 식품을 통한 일상적 경구 노출만으로도 연간 수천에서 수십만 개의 미세·나노플라스틱이 인체에 유입될 수 있다. 그러나 노출 경로는 식품 자체를 넘어 확장된다. 특히 플라스틱 젖병이나 일회용 티백 사용과 같은 특정 생활 습관과 관련된 노출은 연간 수천만 개 이상의 입자에 노출될 수 있는 훨씬 큰 기여 경로로 확인되고 있다.

이러한 다양한 경로의 기여도를 합산하여 총 노출량을 추정할 때, 일부 연구에서는 사람이 경구 노출(식품 및 용기 사용)을 통해 매년 신용카드 한 장에 해당하는 약 5 g을 섭취할 수 있다고 경고하였다. 현재까지의 연구 결과들을 종합할 때, 경구 노출(식품 및 용기를 통한 섭취)이 인체 총 노출량에서 가장 큰 비중을 차지하는 것으로 평가된다.

노출량 측정 시 입자 수, 질량, 표면적 등 다양한 단위가 혼용되고 있어 결과 간 비교와 통합적인 위해성 평가에 큰 제약이 따른다. 특히 미세·나노플라스틱은 입자 수가 극도로 많아질 뿐만 아니라 표면적 대 부피 비율이 매우 높아, 입자의 크기가 작아질수록 독성 메커니즘에 중요한 영향을 미친다. 따라서 위해성 평가의 과학적 신뢰도를 확보하기 위해, 노출량 측정 단위를 생물학적 활성을 더 잘 반영하는 표면적이나 질량으로 통합하려는 국제적 논의가 활발히 진행되고 있으며, 이러한 단위의 표준화는 미세·나노플라스틱 연구의 시급한 과제로 지적된다.

2) 체내 잔류성과 복합독성의 고려

미세·나노플라스틱의 인체 노출은 단순한 존재 여부를 넘어, 노출된 입자가 체내에서 어떻게 거동하며 독성을 유발하는지에 대한 과학적 메커니즘 규명이 필수적이다.

섭취 또는 흡입된 미세·나노플라스틱은 소화기 점막이나 폐포를 통과하여 혈류로 이행되는 것으로 확인되었다. 이후 이들은 주로 간, 비장, 신장, 뇌 등 다양한 타겟 장기에 분포될 수 있다. 대부분의 미세플라스틱은 소화기관을 거쳐 대변을 통해 배출되지만, 나노플라스틱은 세포 및 조직 장벽을 통과할 가능성이 높으며, 이로 인해 장기간 체내에 축적될 가능성에 대한 우려가 크게 제기되고 있다.

미세·나노플라스틱은 단순히 고분자 자체의 물리적 또는 화학적 독성만 유발하는 것이 아니다. 이들은 환경 중의 잔류성 유기 오염 물질(POPs), 중금속, 환경 호르몬과 같은 유해 독성물질을 표면에 고농도로 흡착하는 특성을 갖는다. 미세·나노플라스틱이 인체에 유입될 경우, 흡착된 독성물질을 체내로 운반하여 방출함으로써 노출되는 독성 물질의 양을 증폭시키는데, 이를 트로이의 목마 효과라고 부른다. 이 복합 독성 메커니즘은 미세·나노플라스틱 노출의 총체적인 위해성을 증폭시키는 핵심 요인으로 평가된다.

3. 향후 연구 및 대응 방향

미세·나노플라스틱의 인체 노출 평가는 아직 초기 단계에 머물러 있으며, 표준화된 분석 방법의 부재와 인체 내 실제 노출량에 대한 데이터 부족이 여전히 큰 한계로 지적된다. 이러한 노출 문제는 환경오염을 넘어 의료·산업·생활환경이 복합적으로 얽힌 총체적인 노출 이슈로 확장되고 있으므로, 이에 대한 대응은 다학제적 연구 협력과 제도적 정립이 필수적이다. 향후 연구는 분석 기술의 표준화, 인체 노출 데이터의 축적, 장기 모니터링 체계 확립, 그리고 노출 경로별 기여도 분석을 중심으로 진행되어야 한다.

1) 표준화된 분석 기술의 확립 및 데이터 확보

가장 시급한 과제는 시료의 종류와 조건에 상관없이 재현성 있게 미세·나노플라스틱을 검출할 수 있는 표준 분석 프로토콜을 마련하는 것이다. 현재 μFTIR, Raman, Laser Direct Infrared(LDIR) 등 고해상 분광법이 주로 활용되나, 기법마다 검출 한계와 데이터 처리 방식이 달라 연구 간 비교가 어렵다. 앞으로는 인체 시료뿐 아니라 공기, 물, 식품 등 다양한 환경 매체에서 1 μm 이하의 나노 수준까지 크기, 형태, 화학적 조성을 동시에 정량 분석할 수 있는 다중분석 통합 플랫폼이 개발되어야 한다. 이러한 기술을 국제 표준화(ISO, OECD, WHO 등)와 연계한 검증 체계를 구축하여, 연구 간 비교 가능성과 국제적 데이터 호환성을 높여야 한다.

2) 인체 노출량 바이오모니터링 체계 구축

현재 대부분의 연구는 환경 시료에 한정되어 있어 실제 인체 내 노출 수준은 거의 알려져 있지 않다. 향후에는 혈액, 태반, 대변, 모유 등 생체 시료 기반의 바이오모니터링 연구를 확대해야 한다. 특히 영유아, 임산부, 노인, 만성질환자 등 취약계층과 플라스틱 제조·재활용 근로자, 의료종사자 등 고노출 직업군을 포함한 정밀 조사가 필요하다. 이를 통해 섭취, 흡입, 피부

접촉, 그리고 의료기기를 통한 직접 주입 경로 등 다양한 노출 형태를 종합적으로 비교하고, 입자의 특성(크기, 폴리머 종류, 농도)을 반영한 정량적 인체 노출 모델을 구축해야 한다.

3) 통합 노출 경로별 기여도 평가 및 위해성 관리 전략 수립

현재 연구는 특정 노출원에 집중되어 있으나, 인체 총 노출은 훨씬 복합적이다. 향후에는 식품, 생활용품, 직업 환경, 그리고 의료기기 및 약품 시스템 등을 포함한 통합적 연구를 통해 인체 총 노출량에서 각 경로가 차지하는 상대적 기여도를 산정해야 한다.

- 위해성 우선순위: 특히 의료기기에서 발생하는 노출은 환경 노출과 달리 혈류를 통한 즉각적이고 불가역적인 생체 영향을 일으킬 가능성이 높아 위해 우선순위가 높게 설정되어야 한다.
- 제도적 대응: 이러한 연구 결과를 바탕으로 국가 차원의 장기 노출감시 시스템을 구축하고, 과학적 근거에 기반한 위해성 평가 및 정책 결정 체계를 정립해야 한다.

4) 정책 및 제도적 대응의 강화

궁극적으로는 과학적 연구 기반 위에서 실질적이고 실행 가능한 정책 체계를 마련해야 한다.

- 의료 및 의약품 분야: 약전 및 의료기기 안전기준에 미세·나노플라스틱 시험 항목과 허용기준을 제도적으로 도입하고, 의료기관에서는 저마찰·저방출 소재 사용 및 프탈레이트 등 가소제 저감 정책을 포함한 관리지침을 마련해야 한다.
- 소비제품 분야: WHO, UNEP 등 국제 기구의 모니터링 표준화 및 위해성 평가 가이드라인 논의 동향을 반영하여 소비제품 및 생활용품 규제를 강화해야 한다.

이러한 다학제적 연구 협력과 제도적 대응은 미세·나노플라스틱의 노출 특성 및 생물학적 영향에 대한 이해를 심화시키고, 공공보건 향상을 위한 필수적인 대응이 될 것이다.

4. 결론

미세·나노플라스틱의 인체 노출은 일상환경, 소비제품, 직업환경, 의료체계 등 다양한 영역에서 동시다발적으로 발생하며, 현대인은 본질적으로 다중 경로 노출을 피하기 어려운 상황에 놓여 있다. 현재까지의 연구는 식품·식수·대기 등을 중심으로 한 개별 매체 기반 노출 평가가 주를 이루어 왔으나, 실제 인체가 경험하는 총 노출량은 이보다 훨씬 복합적이며, 의료기기를 통한 혈류 직접 노출과 같은 새로운 경로가 확인되면서 노출 문제의 범위는 기존 환경보건 영역을 넘어 임상·산업 안전관리 영역으로 확장되고 있다.

현 시점에서 인체가 어느 정도 수준의 미세·나노플라스틱에 장기적으로 노출되는지에 대한 정량적 근거는 충분하지 않지만, 다양한 연구에서 식품·식수 섭취를 통한 노출이 가장 큰 비중을 차지하며, 흡입·피부 접촉·직업적 노출·의료기기 노출이 이를 보완하는 양상을 띠고 있음이 드러나고 있다. 특히 나노플라스틱은 입자의 크기와 표면적 특성으로 인해 조직 장벽을 통과할 가능성이 높아, 노출 수준이 동일하더라도 생체 영향은 상대적으로 더 클 수 있다. 또한 미세·나노플라스틱이 환경오염물질이나 의료·생활제품의 첨가제를 운반하여 복합독성을 유발하는 경향은 노출 평가의 복잡성을 더욱 증가시키고 있다.

노출평가 체계의 가장 큰 한계는 일반 환경 시료 중심의 연구에 머물러 있다는 점이며, 인체 내 실제 축적 및 잔류 여부를 확인할 수 있는 바이오모니터링 데이터가 매우 부족하다는 데 있다. 특히 취약계층(영유아, 임산부), 고위험 직업군, 반복적 의료 시술을 받는 환자군 등에서의 정밀한 노출 실태 조사와 체내 축적·대사·배출 경로 분석이 시급하다.

결론적으로, 미세·나노플라스틱의 인체 노출은 이미 현실화된 환경보건 문

제이며, 노출 경로는 갈수록 다각화되고 있다. 기존의 환경 기반 노출 평가만으로는 실제 인체 노출 특성을 충분히 설명할 수 없으며, 이를 극복하기 위해서는 분석 기술의 표준화, 장기적 노출 모니터링 체계 구축, 생체 시료 기반의 정밀 바이오모니터링, 그리고 의료·산업 환경에 대한 새로운 규제 전략 마련이 필수적이다. 이러한 노력을 통해서만 미세·나노플라스틱이 인체 건강에 미치는 위험을 체계적으로 규명하고, 향후 위해성 관리 및 정책 수립의 과학적 기반을 확립할 수 있을 것이다.

참고문헌

Casella C, Cornelli U, Zanoni G, Moncayo P, Ramos-Guerrero L. Health Risks from Microplastics in Intravenous Infusions: Evidence from Italy, Spain, and Ecuador. Toxics. 2025 Jul 16;13(7):597. doi: 10.3390/toxics13070597. PMID: 40711041; PMCID: PMC12298248.

Cox, K. D., Covernton, G. A., Davies, T. R., Dower, J. F., Francis, B., & Dudas, S. E. (2019). Human consumption of microplastics. Environmental Science & Technology, 53(12), 7068-7074.

Jenner, L. C., Rotchell, J. M., Bennett, P., Winkler, A., & Sadofsky, L. R. (2022). Detection of microplastics in human lung tissue using μFTIR spectroscopy. Science of The Total Environment, 831, 154942.

Koelmans, S. A., Mohamed Nor, N. H., Hermsen, E., Kooi, M., Mintenig, S. M., & De Haan, W. P. (2019). Microplastics in freshwater ecosystems: what we know and what we need to know. Environmental Toxicology and Chemistry, 38(10), 2028-2041.

Leslie, H. A., van Velzen, L. P., Brandsma, S. H., Vethaak, A. D., Garcia-Vallejo, J. J., & Reijnen, L. (2022). Discovery and quantification of plastic particles in human blood. Environment International, 163, 107199.

Lim, X. J., Loh, J. H., Goh, X. X., Tan, J. Y., Li, S. F. Y., & Leong, S. Y. (2020). Occurrence and characteristics of microplastics in various brands of tea bags. Environmental Science and Pollution Research, 27, 30876-30883.

Prata, J. C., Silva, A. L. P., da Costa, J. P., Mouneyrac, C., Walker, T. R., Duarte, A. C., & Rocha-Santos, T. (2020). Solutions and integrated strategies for the control and mitigation of plastic pollution. Environmental Pollution, 257, 113426.

Ragusa, A., Svelato, A., Santacroce, C., Catalano, P., Notarstefano, A., Civitelli, F., ... & Giorgini, E. (2021). Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. Environment International, 146, 106427.

Schwabl, P., Köppel, S., Königshofer, P., Bucsics, T., Trauner, M., Reiberger, A., & Liebmann, B. (2019). Detection of various microplastics in human stool: a prospective study. Annals of Internal Medicine, 171(7), 453-457.

Wang, J., Peng, J., Wang, S., & Li, C. (2021). A review on human exposure to microplastics: Routes, levels, and health risks. Science of The Total Environment, 776, 145952.

제4장 미세 · 나노플라스틱의 인체 독성

미세·나노플라스틱에 대한 인체 독성 연구는 최근 10여 년 동안 급격히 확대되며, 환경보건 분야의 핵심 주제로 부상하고 있다. 초기 연구는 주로 해양 생태계에 미치는 영향을 중심으로 이루어졌으나, 이후 포유류 동물실험, 세포, 오가노이드 기반 연구로 확장되면서 점차 인체 적용 가능성과 건강 영향 평가로 초점이 이동하고 있다. 특히 2018년 이후에는 단순한 독성 지표 관찰을 넘어, 분자·세포 수준의 기전독성학적 경로를 규명하려는 연구가 크게 증가하는 추세이다.

최근 다수의 총설 논문들은 미세·나노플라스틱이 소화기를 주요 흡수 경로로 하여 체내에 유입되고, 전신 분포와 표적 장기 손상으로 이어진다는 독성동태(toxicokinetics)의 특성을 정리하고 있다. 동시에, 다양한 세포 및 동물 모델에서 반복적으로 관찰된 산화스트레스, 염증, 대사 교란과 같은 공통된 독성 작용기전이 종합적으로 제시되고 있다. 더불어, 미세·나노플라스틱 자체의 입자 독성뿐 아니라 제조 과정에서 사용된 첨가제나 환경 중에서 표면에 흡착된 오염물질을 함께 운반함으로써 복합독성을 증폭시킬 수 있다는 점이 강조되고 있다.

현재까지 인체를 직접 대상으로 한 역학적 근거는 제한적이지만, 양적·질적으로 고도화되고 있는 독성평가 및 기전 규명 연구들은 미세·나노플라스틱이 인체 건강 위해성의 중요한 매개체로 작용할 수 있음을 시사한다. 이러한 연구 결과는 향후 정책적 대응과 규제 수립을 위한 과학적 근거로서 중요한 역할을 할 것으로 보인다.

1. 체내 이동 및 독성동태

미세·나노플라스틱의 인체 내 독성동태는 일반적인 화학물질과 마찬가지로 흡수(Absorption)–분포(Distribution)–대사(Metabolism)–배설(Excretion)의 연속 과정으로 이해할 수 있다. 최근 연구들은 이들 입자가 어떤 경로를 통해 체내에 유입되고, 어떠한 장기에 분포·축적되며, 어느 정도 기간 동안 잔류하는지를 규명하는 데 초점을 맞추고 있다. 주요 노출 경로는 경구 섭취와 흡입이며, 피부를 통한 흡수는 상대적으로 제한적인 것으로 평가된다. 일반적으로 입자 크기가 작고 표면적이 클수록 체내 흡수와 조직 투과성이 증가하는 경향을 보인다.

1) 흡수

미세·나노플라스틱의 흡수 경로는 주로 경구 섭취와 흡입을 통해 이루어진다. 식품, 식수, 조리과정에서 발생하는 입자, 공기 중 에어로졸 등에 포함된 입자가 소화관·호흡기를 통해 체내로 유입될 수 있다. 피부를 통한 흡수는 현재까지의 근거로 볼 때 제한적인 수준으로 평가된다.

세포 수준에서의 흡수 양상은 입자 크기와 표면 특성에 따라 달라진다. 일부 연구에서는 약 50 nm 크기의 나노입자가 clathrin 매개 및 caveolin 매개 엔도사이토시스를 통해 세포 내로 유입되는 반면, 수백 nm(예: 500 nm) 수준의 입자는 주로 대식작용(macropinocytosis) 또는 식세포작용(phagocytosis)에 의해 흡수되는 것으로 보고하였다. 이러한 결과는 입자 크기와 표면 전하가 흡수 경로와 효율을 규정하는 핵심 요인임을 시사한다.

2) 분포

흡수된 미세·나노플라스틱은 혈류와 림프계 순환을 따라 전신으로 분포할 수 있다. 동물실험 결과에 따르면 간, 신장, 폐, 비장, 심장, 뇌, 생식기관, 태반 등 다양한 장기에서 입자가 검출되며, 특히 나노 크기 입자는 조직 장벽을 비교적 쉽게 통과하는 것으로 보고된다.

일부 동물실험에서는 약 200~300 nm 크기의 폴리스티렌(PS) 입자가 특정 조건에서 혈액–뇌 장벽(BBB)을 통과하여 뇌 조직에서 검출된 사례가 보고되었다. 이러한 결과는 나노플라스틱이 신경계에 대한 잠재적 독성을 일

으키고, 태반 장벽을 통과하여 태아 발달에 영향을 줄 수 있는 가능성을 뒷받침한다. 다만, 이러한 분포 양상과 장벽 투과성은 입자의 크기, 표면 전하, 코팅 여부, 노출 농도 및 기간 등 다양한 요인에 의해 달라질 수 있어, 사람에서의 실제 분포 양상은 추가적인 연구가 필요하다.

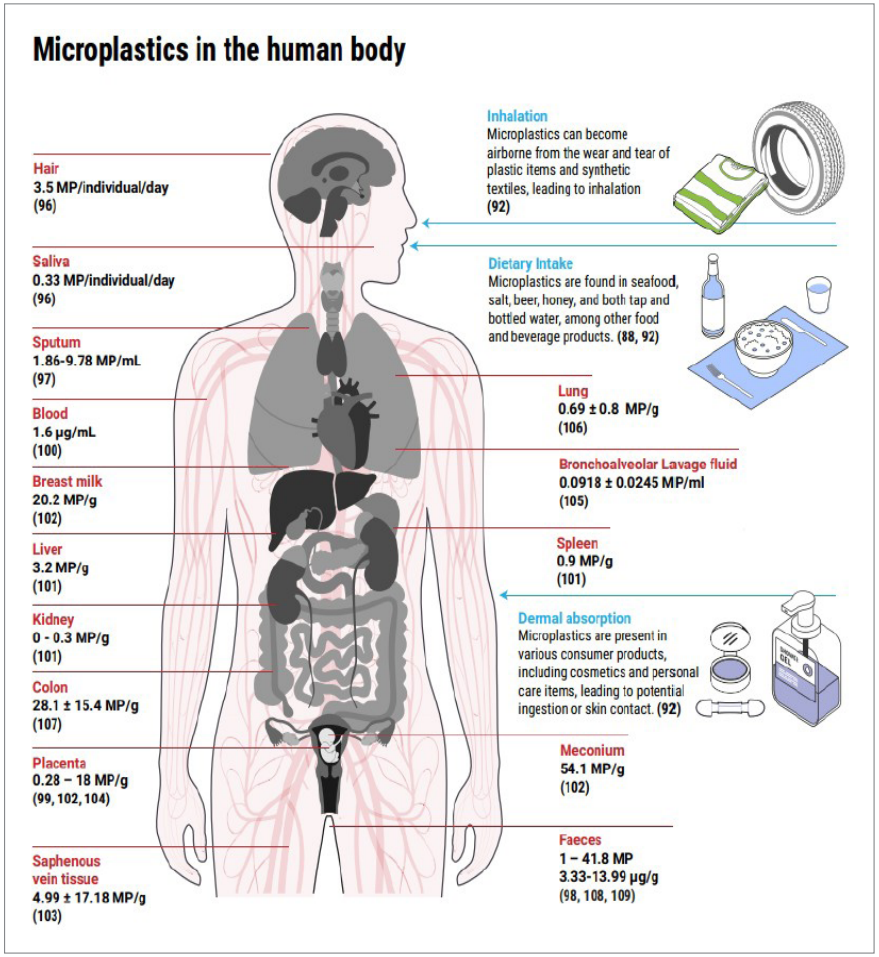
3) 대사 및 배설

플라스틱 고분자는 인체 내에서 일반적인 효소 대사 경로를 통해 쉽게 분해되지 않으며, 대부분의 미세·나노플라스틱은 화학적 구조가 변화되지 않은 상태로 존재한다. 그러나 입자 표면에는 혈장 단백질, 지질, 당류 등이 결합하여 바이오코로나(biocorona 또는 protein corona)를 형성하며, 이 바이오코로나의 조성은 세포·조직에 의한 인식, 면역반응, 체내 분포 및 독성 강도를 결정하는 중요한 요인으로 작용한다.

배설은 주로 대변과 소변을 통해 이루어진다. 일부 동물실험에서는 비교적 큰 미세플라스틱 입자가 대변으로 빠르게 배설되는 결과가 보고되었으나, 나노플라스틱의 경우에는 간, 신장, 뇌, 태반 등 특정 조직에 장기간 잔류하거나 축적될 수 있다는 결과도 제시되고 있다. 이러한 상반된 결과는 입자의 크기, 표면 전하, 소수성·친수성, 첨가제와 흡착 오염물질의 존재 여부 등 물리·화학적 특성 차이에 따라 독성동태가 크게 달라질 수 있음을 의미한다. 따라서 미세·나노플라스틱의 ADME 특성을 정량적으로 규명하는 연구가 향후 인체 위해성 평가의 핵심 과제가 될 것이다.

2. 주요 독성작용

미세·나노플라스틱의 독성은 단순히 입자의 존재 여부만으로 결정되지 않고, 연령, 노출 기간, 입자 특성(크기, 형태, 표면 전하), 플라스틱 종류 및 첨가제, 그리고 환경적 요인(노화, 흡착) 등 다양한 요인의 복합적 작용으로 나타난다. 특히 나노 수준의 입자는 세포 내로 쉽게 침투하여 산화스트레스



인체 내에서 미세플라스틱이 검출된 부위
(Journal of Bio-X Research, 386(6720), 2024. Available at: 10.1126/science.adl2746)

반응을 강하게 일으키며, 양전하를 띤 입자가 조직 손상을 더 심각하게 유발하는 경향이 관찰되었다.

1) 주요 기관별 독성 작용

(1) 소화기계 독성

소화기는 미세·나노플라스틱의 주요 노출 및 흡수 경로이다. 세포 및 동물실험에 따르면, 이들 입자는 활성산소종(ROS)의 과잉 생성을 유도하고, tight junction 단백질(ZO-1, occludin 등)을 손상시켜 장 상피 장벽의 무결성을 약화시킨다. 그 결과 장 점막 투과성이 증가하고, 염증성 사이토카인(IL-6, TNF-α 등) 분비가 촉진되며, 장내 미생물총의 불균형이 유발되는 것으로 보고된다. 일부 연구에서는 지질 소화율과 흡수율이 감소하는 결과도 관찰되어, 에너지 대사 교란과 비만·대사질환과의 잠재적 연관 가능성이 제기되고 있다.

(2) 간 독성

간은 전신 순환을 통해 유입된 미세·나노플라스틱이 우선적으로 축적되는 장기 중 하나이다. 축적된 입자는 ROS 과잉 생성, Kupffer 세포 활성화, 염증성 사이토카인 분비 증가를 통해 간세포 손상과 지방 축적을 유발하며, 비알코올성 지방간질환(MAFLD) 유사 병태를 초래할 수 있다는 결과가 보고되고 있다. 특히 유기인계 난연제(OPFRs) 등 난분해성 유기오염물질과 동시 노출 시, 단독 노출보다 더 강한 간 독성이 나타나는 사례가 보고되어, 복합독성의 중요성을 시사한다.

(3) 폐 독성

폐는 흡입을 통한 미세·나노플라스틱 노출의 주요 표적 장기이다. 공기 중 에어로졸이나 PM2.5에 부착된 형태로 존재하는 입자는 상기도를 거쳐 폐포까지 도달할 수 있다. 이 과정에서 입자는 상피세포 및 대식세포와 상호작용하며 산화스트레스와 염증 반응을 유발한다. 동물 및 직업환경 연구에서는 염증세포 침윤, 염증성 사이토카인 증가, 폐포 및 기관지 상피 손상, 섬유화 소견 등이 보고되었고, 기존의 천식이나 과민성 폐질환을 악화시킬 수 있는 가능성도 제기되고 있다. 특히 섬유형 입자나 불규칙한 형태의 입자는 침착 양상과 제거 속도에서 차이를 보여, 장기적인 폐 손상에 미치는 영향이 더 클 수 있다.

(4) 신경 독성

나노크기 입자가 혈액–뇌 장벽을 통과하여 뇌 조직에 축적되는 현상이 일부 동물실험과 in vitro BBB 모델에서 관찰되었다. 이들 입자는 아세틸콜린에스터레이스(AChE) 활성 억제, 미세아교세포 활성화를 통한 신경염증 유도, BBB 투과성 증가, 신경전달물질 불균형 등 다양한 경로를 통해 신경독성을 일으킬 수 있다. 행동학적 평가에서는 학습·기억 기능 저하, 불안 행동 증가 등 신경행동학적 이상이 보고되었으며, 이는 장기적인 신경발달 및 퇴행성 질환과의 잠재적 연관성을 시사한다.

(5) 생식 및 발달 독성

일부 동물실험에서는 미세·나노플라스틱이 혈액–고환 장벽과 태반 장벽을 통과하여 생식기관 및 태아 조직에 도달하는 결과가 보고되었다. 이 과정에서 ROS 생성, 호르몬 분비 교란, 염증 반응 등을 통해 정자 수와 운동성 감소, 난포 발달 저해, 태아 체중 감소 및 기형률 증가 등 생식·발달 독성이 관찰되었다. 이러한 결과는 미세·나노플라스틱이 세대 간 영향을 포함한 장기적인 생식 건강 문제에 기여할 가능성이 있음을 시사하며, 향후 인체 연구를 통한 검증이 필요하다.

2) 면역 및 기타 독성

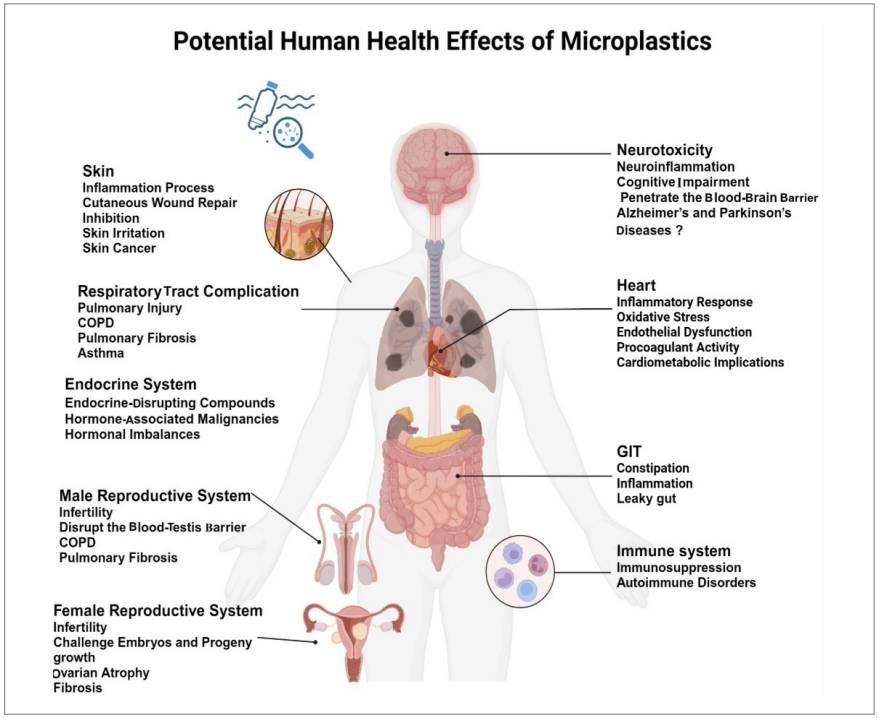
(1) 면역 독성

미세·나노플라스틱은 대식세포 등 면역세포에 의해 포식된 후 림프계와 혈

류를 통해 비장, 림프절 등 주요 면역기관에 축적될 수 있다. 이 과정에서 염증성 사이토카인의 과발현, T 세포 아형 비율 변화, Th1/Th2 균형 교란 등이 관찰되어 면역 항상성이 붕괴되고 전신적 염증 반응이 강화될 수 있다는 결과들이 보고되고 있다. 또한 양전하를 띤 입자는 대식세포의 포식 능력을 저해하거나 과도한 염증 반응을 유발하는 등 면역 기능을 비정상적으로 조절하는 경향을 보인다.

(2) 기타 장기 독성

신장에서는 ROS 증가와 염증 경로 활성화에 따른 사구체 및 세뇨관 손상이 관찰되었으며, 일부 연구에서는 신장 기능 지표의 변화도 보고되었다. 심혈관계에서는 산화스트레스와 염증 반응을 통해 심근세포 손상, 심장 구조 변화, 혈관 기능 이상 가능성이 제기되고 있다. 이러한 결과는 미세·나노플라스틱이 특정 장기에 국한되지 않고 전신적인 독성 영향을 미칠 수 있음을 보여준다.



미세플라스틱 노출이 인체 각 기관 시스템에 미치는 잠재적 건강영향
(Microplastics 2025, https://doi.org/10.3390/microplastics4020023)

3. 독성 유발 작용기전

1) 기전독성학적 탐구

미세·나노플라스틱의 독성 기전은 입자의 물리·화학적 특성, 노출 농도와 시간, 환경 조건 등에 따라 복합적으로 나타나며, 세포·오가노이드·동물 기반 실험을 통해 그 기전적 특성이 점차 명확히 규명되고 있다. 세포 수준의 연구 결과, 입자 크기와 표면 전하, 표면 기능기, 첨가제 존재 여부는 독성의 강도와 양상을 결정하는 핵심 요인으로 작용하는 것으로 확인되었다. 공통적으로 활성산소종(ROS)의 과도한 생성과 세포막 안정성의 교란이 관찰

되었으며, 이는 DNA 손상, 세포사멸, 괴사 등 세포 단위의 손상 반응을 유발하는 초기 독성 경로로 제시된다.

특히 표면 전하의 차이는 독성 강도를 결정하는 중요한 요인이다. 양전하를 띤 아미노기 개질 폴리스티렌($PS–NH_2$)은 대식세포의 포식 기능을 억제하고 염증 반응을 과도하게 활성화하여 면역계의 항상성을 교란시키는 반면, 음전하를 띤 PS–COOH는 상대적으로 낮은 독성을 보이는 것으로 보고되었다. 이는 표면 기능기와 전하가 세포 독성의 강도뿐 아니라 독성 경로의 발현 양상 자체를 규정할 수 있음을 시사한다.

(1) AOP 기반 기전 구조

미세·나노플라스틱의 독성은 독성발현경로(AOP, Adverse Outcome Pathway) 개념을 통해 체계적으로 설명할 수 있다. AOP는 분자 수준의 초기 사건으로부터 세포·조직 단계를 거쳐 최종적인 건강 유해결과(adverse outcomes, AO)에 이르는 연쇄적 과정을 구조화하여 제시한다.

① 초기 분자개시사건(MIE)

미세·나노플라스틱의 독성은 다음과 같은 분자 수준의 초기 반응에서 출발한다.

- 입자–세포막 상호작용에 따른 세포막 구조·유동성 교란
- 과도한 활성산소종(ROS) 생성과 항산화 방어체계의 부담 증가
- 리소좀 막 손상 및 내용물 누출(lysosomal leakage)
- 입자 표면에 흡착된 첨가제·환경오염물질의 방출 및 세포 내 유입

이들은 세포 대사 균형을 무너뜨리고 이어지는 독성 연쇄 반응의 출발점이 된다.

② 핵심사건(KE): 세포 수준

세포 수준에서는 다음과 같은 핵심 독성 반응이 반복적으로 확인된다.

- 산화스트레스 증가 및 항산화 방어체계(Nrf2 경로 등) 붕괴
- NF-κB 및 MAPK 경로 활성화
- IL-6, TNF-α, IL-1β 등 염증성 사이토카인 증가
- 미토콘드리아 기능 저하 및 에너지 대사 장애
- 자가포식(autophagy) 교란
- 세포사멸(apoptosis) 및 괴사(necrosis)의 유도

이러한 반응은 세포 기능 저하, 염증 확산, 대사 교란 등 다양한 형태의 세포 독성으로 이어진다.

③ 핵심사건(KE): 조직·장기 수준

세포 독성은 조직·장기 수준에서 다음과 같은 손상 양상으로 확장된다.

- 급성 및 만성 염증의 지속적 활성화
- 장 상피·폐포 상피 등 생체 장벽 구조의 파괴 및 투과성 증가
- 섬유화 및 조직 리모델링의 진행
- 지방·탄수화물·아미노산 대사 이상
- 장내 미생물총 교란 및 염증성 장질환 관련 기전 활성화

특히 장에서는 지질·아미노산 대사 이상과 미생물총 교란이 함께 관찰되며, 이는 전신 대사질환과 연결될 가능성을 뒷받침한다.

④ 최종 유해결과(Adverse Outcomes)

이러한 AOP 기반 연쇄 사건들은 다음과 같은 잠재적 건강 유해결과로 이어질 가능성을 제시한다.

- 만성 염증성 질환
- 폐섬유화 등 호흡기 질환
- 간 기능 및 장 기능 저하
- 생식·발달 독성
- 전신 대사질환
- 면역계 기능 교란

현재 인체를 대상으로 한 직접적 인과관계는 제한적이지만, 세포·동물·오

가노이드 연구에서의 일관된 기전적 근거는 미세·나노플라스틱이 인체 건강에 위해가 될 수 있는 의미 있는 위험요인임을 분명히 시사한다.

(2) 오가노이드 기반 최신 기전 연구

최근 연구는 인체와의 관련성을 높이기 위해 인체 유래 오가노이드 모델을 적극 활용하고 있다. 소장, 간, 기도, 전뇌 등 다양한 장기 오가노이드에서 미세·나노플라스틱 노출 후 장벽 기능 저하, 점액층 변화, 담즙 분비 이상, 신경세포 네트워크 교란 등 장기 특이적 기능 장애가 확인되었다. 특히 간 오가노이드 연구에서는 폴리스티렌 입자와 비스페놀 A(BPA) 동시 노출 시 간독성이 상가적으로 증가하는 현상이 보고되었으며, 이 과정에서 ERα와 HNF4A가 잠재적 독성 바이오마커로 제시되었다. 이는 미세·나노플라스틱이 화학물질의 운반체(carrier)로 작용하여 복합독성을 강화할 수 있음을 실험적으로 확인한 중요한 근거이다.

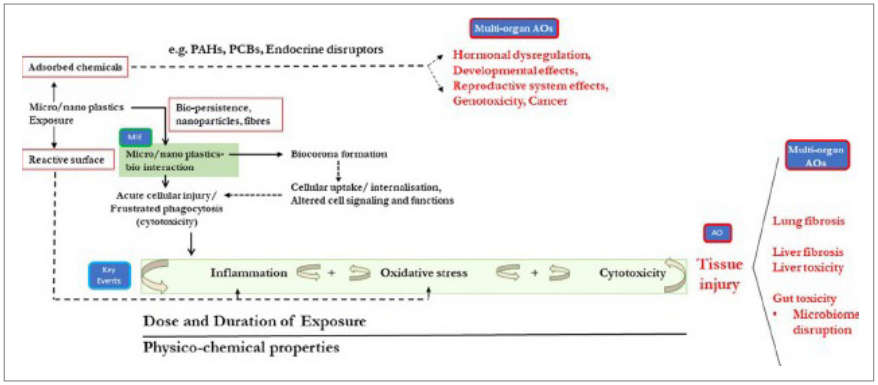
세포·동물·오가노이드 연구에서 나타난 이러한 일관된 기전적 결과는 미세·나노플라스틱이 인체 건강에 실질적인 위해를 초래할 수 있음을 뒷받침하며, 특히 저농도·장기 노출, 세대 간 영향 가능성을 정밀하게 평가하기 위한 체계적 연구의 필요성을 강조한다.

2) 복합독성(Mixture/Carrier Effect)의 중요성

미세·나노플라스틱은 입자 자체의 물리·화학적 특성으로 인한 독성뿐 아니라, 다양한 화학물질과의 동시 노출로 인해 복합독성을 유발할 수 있다는 점에서 중요한 관심의 대상이다. 제조 공정에서 사용되는 가소제(프탈레이트), 난연제, 안정제뿐 아니라, 환경 중에서 입자 표면에 흡착되는 중금속, 잔류성 유기오염물질(POPs), 다환방향족탄화수소(PAHs), 내분비계교란물질(EDCs) 등이 함께 체내에 유입될 수 있기 때문이다.

이러한 물질들은 세포막 투과성을 증가시키거나, 수용체 신호전달, 내분비계·면역계 기능을 교란하여 독성을 상가(additive) 또는 상승(synergistic) 작용으로 증폭시킬 수 있다. 실제 동물실험에서도 미세·나노플라스틱과 중금속 또는 EDCs에 동시 노출될 경우 간·신장·생식계에서 단독 노출 대비 훨씬 강한 독성 반응이 보고되었다.

종합하면, 미세·나노플라스틱의 독성 기전은 세포막 교란과 ROS 생성이라는 초기 사건에서 출발하여 산화스트레스, 염증 반응, 세포사멸, 자가포식 교란, 대사 이상 등 핵심 사건을 거쳐 다양한 장기 독성과 잠재적 발암 가능성으로 이어지는 다층적·복합적 경로를 따른다. 인체 연구의 한계로 아직 확정적 결론에 이르지는 못했지만, 현 시점의 실험·기전 기반 근거는 미세·나노플라스틱이 인체 건강에 의미 있는 위해를 초래할 수 있음을 강하게 시사하며, 장기적 영향 평가와 복합노출 연구의 중요성을 부각시키고 있다.



[그림] 미세플라스틱의 유해영향에 대한 Mini-AOP
(Journal of Bio-X Research, 386(6720), 2024. Available at: 10.1126/science.adl2746)

4. 향후 연구 및 대응 방향

미세·나노플라스틱의 인체 독성에 대한 현재의 근거는 빠르게 축적되고 있으나, 여전히 해결해야 할 과제가 많다. 향후 연구 및 독성평가는 다음과 같은 방향으로 진행될 필요가 있다.

1) 유전독성 및 발암 가능성 규명

최근 일부 연구에서는 나노 크기의 플라스틱 입자가 세포질을 넘어 핵 내로 침투하여 DNA 손상, 염색체 불안정성, 유전자 발현 이상을 유발할 수 있다는 가능성을 제기하고 있다. 이러한 결과는 미세·나노플라스틱의 유전독성과 발암 잠재성에 대한 직접적인 관련성을 시사하므로, 장기간 노출을 반영한 동물실험, 세대 간 영향 연구, 분자 수준의 정밀 분석(예: 오믹스 기반 분석)을 통해 인과관계를 규명할 필요가 있다.

2) 면역기능 교란과 프로테인 코로나 연구

미세·나노플라스틱은 면역세포 내 식균작용을 저해하거나 과도한 염증을 유도함으로써 면역 균형을 붕괴시킬 수 있다. 특히 입자 표면에 형성되는 바이오 코로나는 세포 인식, 체내 분포, 면역반응 강도 및 독성 양상을 결정하는 중요한 요인으로 지목되고 있다. 향후 연구에서는 바이오 코로나의 조성 변화를 체계적으로 규명하고, 이에 따른 면역독성 및 전신 염증 반응과의 인과 관계를 밝히는 것이 중요하다.

3) 복합오염물질과의 독성 상가 및 상승작용 평가

현실적인 노출 시나리오에서는 미세·나노플라스틱이 단독으로 존재하기보다 첨가제 및 환경오염물질과 함께 존재하는 경우가 많다. 동물실험 결과, 중금속, POPs, EDCs 등과 동시 노출 시 간·신장·생식계 등에서 단독 노출보다 강한 독성이 관찰되어 상가 및 상승작용 가능성을 뒷받침하고 있다. 따라서 향후 위해성 평가는 단일 물질 중심의 접근을 넘어, 다양한 화학물질과의 동시 노출 시나리오를 고려한 복합독성 평가로 확장되어야 한다.

4) 장내 환경 변화와 전신 영향 규명

미세·나노플라스틱은 장 점막 손상과 장내 미생물총 불균형을 유발하여 장 투과성을 증가시키고, 이로 인해 전신성 염증 및 면역 교란으로 이어질 수 있다. 장–간 축(gut–liver axis), 장–뇌 축(gut–brain axis), 장–폐 축(gut–lung axis) 등 장과 주요 장기 간 상호연결 경로를 고려하여, 장내 환경 교란이 대사질환, 면역질환, 신경질환 등 전신 독성에 미치는 영향을 통합적으로 규명하는 연구가 요구된다.

5) 통합적 독성 기전 접근

지금까지 보고된 미세·나노플라스틱의 독성 기전은 산화스트레스, 염증반응, 세포사멸, 소기관(미토콘드리아, 리소좀 등) 교란, 면역 이상, 내분비계 교란, 장내 환경 변화, 유전독성, 복합오염물질과의 독성 상가 및 상승작용 등 매우 다양하다. 향후 연구는 개별 기전의 나열을 넘어, 이러한 경로들이 서로 어떻게 연결되고, 어떤 조건에서 우세하게 작동하는지를 규명하는 통합적 접근이 필요하다. 이를 위해 AOP 기반 네트워크 분석, 시스템 독성학, 다중오믹스 자료의 통합 분석 등이 활용될 수 있으며, 이러한 통합적 기전 이해는 현실적이고 신뢰성 있는 인체 위해성 평가와 규제 기준 설정의 핵심 기반이 될 것이다.

5. 결론

현재까지의 연구에 따르면, 미세·나노플라스틱은 소화기와 호흡기를 통해 체내로 유입되어 간, 장, 폐, 뇌, 생식기관 등 다양한 장기에 분포·축적될 수 있는 잠재적 능력을 가진다. 세포·동물·오가노이드 연구에서는 산화스트레스, 염증, 세포사멸, 장내 미생물총 변화 등 공통된 독성 반응이 반복적으로 확인되었으며, 이로 인해 소화기 기능장애, 간손상, 신경염증, 폐조직 손상, 생식·발달 이상 등 장기 특이적 손상이 보고되고 있다.

특히 나노 크기의 입자는 혈액–뇌 장벽과 태반 장벽 등 주요 조직 장벽을 통과할 가능성이 상대적으로 높아, 신경계 및 생식·발달 단계에 영향을 미칠 수 있는 잠재성이 더욱 부각된다. 또한 미세·나노플라스틱은 첨가제나

환경오염물질을 표면에 흡착·운반함으로써 단독 노출보다 더 강한 복합독성을 유발할 수 있다는 점에서도 주목된다.

아직 사람을 대상으로 한 연구에서 이러한 기전들이 직접적으로 질병으로 연결되는 인과관계가 완전히 규명된 것은 아니지만, 세포·동물·오가노이드 연구에서 관찰되는 일관된 결과는 미세·나노플라스틱이 인체 건강에 의미 있는 수준의 위해를 초래할 수 있는 잠재적 요인임을 강하게 시사한다. 다만, 여러 불확실성이 존재하므로 향후에는 개별 독성 경로에 대한 연구를 넘어, 복합 노출 상황과 다중 장기·다중 기전이 동시에 작동하는 현실적 시나리오를 반영한 통합 AOP 네트워크 구축이 필요하며, 보다 정밀한 독성 연구와 선제적 대응이 요구되는 독성학적 이슈로 판단된다.

참고문헌

Campanale, C., Massarelli, M., Savino, I., Locaputo, A. D., & Uricchio, V. F. (2020). A state of the art on microplastics: Environmental distribution, exposure, and impacts. Environmental Pollution, 258, 113545.

Cedervall, T., Lynch, I., Lindman, S., Berggård, T., Thulin, E., Nilsson, H., ... & Dawson, K. A. (2007). Understanding the nanoparticle-protein corona formation in physiological fluids. Proceedings of the National Academy of Sciences, 104(43), 2050-2055.

Deng, Y., Zhang, Y., Lemos, B., & Hu, R. (2017). Tissue accumulation of microplastics in mice and the potential for inducing oxidative stress. Environmental Pollution, 225, 71-77.

Domenech, J., & de Almeida, I. P. F. (2024). Microplastics in the human brain: a systematic review of the literature. Environmental Science: Advances, 3(2), 162-171.

Gallo, N. D., Miller, K. M., & Johnson, D. R. (2020). Human health and microplastic exposure: a state-of-the-science review. Environmental Health Perspectives, 128(7), 075001.

Jeong J, Im J, Choi J. Integrating aggregate exposure pathway and adverse outcome pathway for micro/nanoplastics: A review on exposure, toxicokinetics, and toxicity studies. Ecotoxicol Environ Saf. 2024 Mar 1:272:116022. doi: 10.1016/j.ecoenv.2024.116022. Epub 2024 Feb 2. PMID: 38309230.

Jenner, L. C., Rotchell, J. M., Bennett, P., Winkler, A., & Sadofsky, L. R. (2022). Detection of microplastics in human lung tissue using μFTIR spectroscopy. Science of The Total Environment, 831, 154942.

Jin, Y., Xia, J., Pan, Z., Yang, Y., Tai, J., Li, Y., & Ni, X. (2021). The effects of microplastics on gut microbiota and intestinal health: a review. Science of The Total Environment, 780, 146633.

Jones, L. R., Wright, S. J., & Gant, T. W. (2023). A critical review of microplastics toxicity and potential adverse outcome pathway in human gastrointestinal tract following oral exposure. Toxicology Letters, 385, 51–60. https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2023.08.011

Li, S., Huang, C., Wu, Y., Liu, X., Liu, C., & Zhang, Y. (2020). Bisphenol A and polystyrene microplastics affect gut microbiota and induce hepatotoxicity in mice. Environmental Pollution, 266(Pt 1), 115220.

Lu, S., Ding, C., Zhong, Y., Liu, D., & Li, Y. (2023). Polystyrene microplastics induce neurotoxicity through disturbing neurotransmitter metabolism and increasing oxidative stress in the brain of mice. Ecotoxicology and Environmental Safety, 264, 115409.

Maharjan, S., Wang, K., Zhao, F., Yang, C., Geng, J., Xu, B., ... & Ma, C. (2022). Protein corona formation of microplastics and nanoplastics: Implications for their environmental fate, transport and toxicity. Environmental Pollution, 297, 118809.

Mattsson, K., Hansson, L. A., & Cedervall, T. (2020). Nano- and microplastics in the environment and possible human health implications. Environmental International, 137, 105592.

Mazzitelli, C., Di Paolo, C., Giudici, G., Marabini, L., Filon, F. L., Massimiliani, P., ... & Coccini, T. (2023). Effects of microplastics on the central nervous system: A systematic review. NeuroToxicology, 97, 30-41.

Park, J. H., Kim, M. K., Kim, Y. H., Kim, S. Y., Lee, J. S., Han, B. S., ... & Choi, J. W. (2020). Repeated dose 90-day oral toxicity study of polyethylene microplastics in male and female Sprague-Dawley rats. Environmental Toxicology and Pharmacology, 79, 103444.

Popa RP, Tabaran AF. A Systematic Review of the Toxicokinetics of Micro- and Nanoplastics in Mammals Following Digestive Exposure. Applied Sciences. 2025; 15(11):6135. https://doi.org/10.3390/app15116135

Qian, Y., Zhang, S., Li, D., Liu, Y., & Ji, X. (2020). Polystyrene microplastics induce intestinal toxicity, oxidative stress, and lipid metabolism disturbance in adult mice. Science of The Total Environment, 707, 135650.

Ragusa, A., Svelato, A., Santacroce, C., Catalano, P., Notarstefano, A., Civitelli, F., ... & Giorgini, E. (2021). Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. Environment International, 146, 106427.

Schinwald, A. (2014). The size and shape of nanoparticles: A crucial aspect in their interaction with the immune system. Nano Today, 9(3), 253-255.

Smith, J. A., & Williams, K. B. (2024). Emerging insights into microplastic translocation and accumulation in human tissues. Journal of Bio-X Research, 386(6720). doi:10.1126/science.adl2746

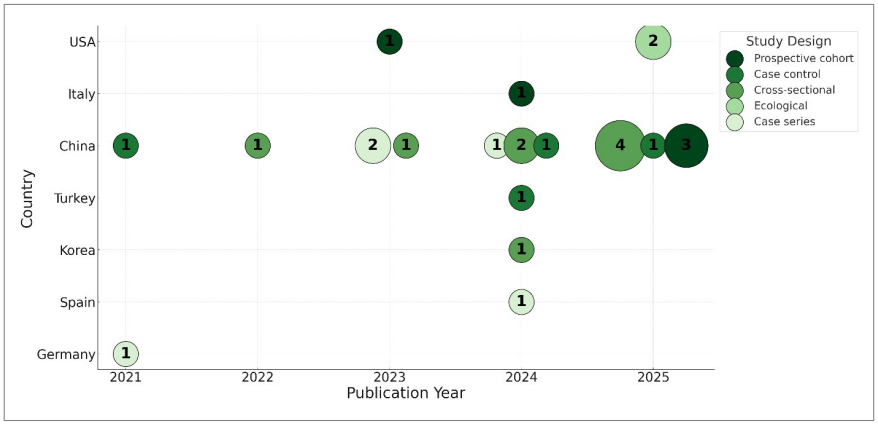
Thompson, R. C., Courtene-Jones, W., Boucher, J., Pahl, S., Raubenheimer, K., & Koelmans, A. A. (2024). Twenty years of microplastic pollution research—what have we learned? Science, 386(6720), eadl2746.

Wright, S. L., & Kelly, F. J. (2017). Plastic and Human Health: A Systematic Review. Environmental Science & Technology, 51(12), 6346-6362.

Xu, M., He, S., Li, D., Wang, Y., Tang, J., Yu, H., ... & Dai, J. (2021). The small-sized microplastics can cross the placental barrier in pregnant rats. Journal of Hazardous Materials, 416, 125950.

제5장 미세 · 나노플라스틱의 건강영향 및 인과관계

인체 건강영향에 대한 역학연구는 환경 중 노출이나 측정방법과 관련한 연구에 비하면 상대적으로 드물어, 본 고에서는 원저를 중심으로 역학연구의 동향을 살피고자 하였다. 역학연구 원저의 검색은 PubMed와 SCOPUS에서 micro·nanoplastics와 health의 조합으로 2015년이후부터 최근까지 발표된 리뷰 논문과 원저 논문을 검색하고, 이중 최근의 리뷰논문의 참고문헌 등을 살피는 것과 아울러(snowballing), 검색된 논문의 제목과 초록을 검토하여 분석대상 논문을 추려, 최종적으로 선택하였다. 분석대상 역학연구 원저는 25편이며, 연구설계로는 단면연구 등 기술적 연구가, 국가별로는 중국에서 많은 연구가 발표되었다(그림 1).



[그림 1] 미세·나노플라스틱 노출의 인체 건강영향에 관한 역학연구 원저의 연구설계별 현황, 2021-2025. (*버블내 숫자는 논문의 수)

1. 인체 침투와 분포

최근 연구들은 인체 여러 조직과 체액에서 미세·나노플라스틱이 검출됨을 일관되게 보여준다. 특히 혈액, 태반, 태변, 폐, 대변, 뇌척수액, 심장조직 등

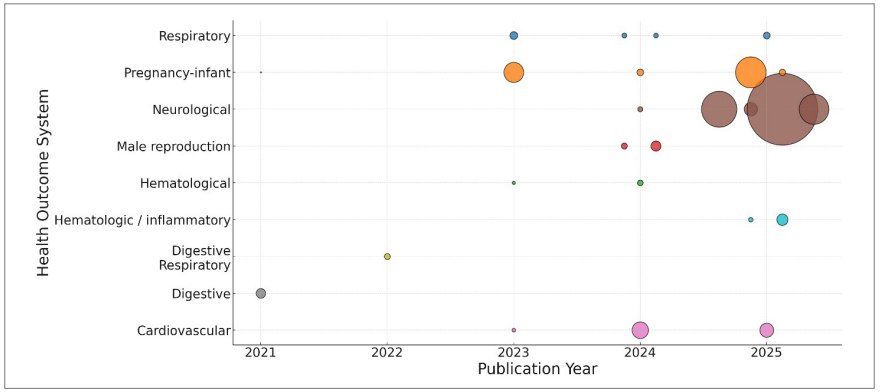
외부와 격리된 내부 환경에서도 미세·나노플라스틱의 존재가 확인되었다. 이는 호흡, 섭취 등 경로로 유입된 미세플라스틱이 전신 순환계를 통해 각 장기에 분포할 수 있음을 시사한다. 예를 들어, 태반과 신생아 태변에서 미세플라스틱을 검출, 심장수술 환자 심근조직에서 다종류의 미세·나노플라스틱을 발견, 뇌척수액에서 미세·나노플라스틱 확인, 정액에서 미세·나노플라스틱 검출 등은 호흡기나 소화기뿐 아니라 인체 내 밀폐장기에도 미세·나노플라스틱이 침착됨을 보여주었다. 즉 인체 어느 부위이든 미세·나노플라스틱이 존재할 수 있다는 가설에 대한 근거가 축적되고 있는 추세다(표 1).

[표 1] 미세 · 나노플라스틱 노출 측정 부위에 따른 연구 동향

MP노출 측정	주요 내용	연구 수
태반/ 제대혈/태변	태반에서 다양한 미세·나노플라스틱검출 → 태아 간효소 상승, 염증소견 등과 연관 가능성	3편 (Braun 2021, Wang 2025, Yun 2024)
혈액	혈액에서 미세·나노플라스틱 검출 → 응고지표, 염증표지 변화/중요심장사건의 발생위험	4편 (Lee 2024, Yang 2023, Wu 2025, Zhang 2025)
대변	미세·나노플라스틱 농도↑가 과민성 장 증후군 중증도 및 장내 미생물 군집 변화와 관련	2편 (Yan 2021, Zhang 2022)
소변	소변 내 미세·나노플라스틱 → 정액질 저하 및 아동 행동, 인지기능과 연관	3편 (Zhang 2024, Zheng 2025, Dong 2025)
기관지/폐	기관지폐포세척액, 유도객담, 폐조직에서 미세·나노플라스틱 검출 → 호흡기 염증, 지역사회획득감염 중증도와 연관	4편 이상 (Bayo 2024, Ozgen 2024, Liu 2025, Chen 2023, Wang 2023)
정액	정자 운동성 등 정액질과 음의 연관성	2편 (Li 2024, Zhang 2024)
심장조직/ 죽상판	조직 내 미세·나노플라스틱이 심혈관 사건 위험과 연관	2편 (Yang 2023, Marfella 2024)
해양 환경노출	생태학적 수준의 해양 미세·나노플라스틱과 신경·심혈관 질환 유병률 관련성	2편 (Makwana 2025, a,b)
뇌척수액	뇌척수액 내 미세·나노플라스틱을 확인, 혈뇌장벽 손상 시 미세·나노플라스틱 입자가 중추신경계로 유입됨	1편 (Xie 2024)

2. 건강 영향 범주

연구들이 다루는 건강 영향은 소화기, 대사·심혈관, 정신신경, 생식 등 다양하다. 소화기계와 호흡기계에 대한 초기 연구로부터 최근에는 정신 신경계, 태아 및 생식건강 관련 영역으로 연구가 확장되고 있다(그림 2).



[그림 2]. 미세·나노플라스틱의 인체 건강영향에 관한 역학연구 원저 발표 현황, 2021-2025.

*버블은 개별 연구를 의미, 버블의 크기는 참여자수를 반영(최소 2명 ~ 최대 5,670명).

연구의 주요 결과는 다음과 같다(표 2).

건강 영역	주요 내용	관련 연구
호흡기계	- 유도객담·기관지폐포세척액·폐조직에서 미세·나노플라스틱 검출 → 염증, 폐기능 저하, 지역사회획득폐렴 중증도와 관련 - 도시 어린이 기관지폐포세척액 내 미세·나노플라스틱 농도 높음	Bayo 2024 , Ozgen 2024, Liu 2024, Chen 2023, Zhang 2022
심혈관계	- 죽상판 미세·나노플라스틱 검출자에서 심혈관 사건 위험 4.5배 높음 - 해양 미세·나노플라스틱 오염지역에서 심질환 유병률 높음 - 관상혈액내 PVC농도가 높을수록 심근경색 후 주요 부정적 심장 사건 발생 위험 증가 - 어린이 심장폐우회수술 후 혈중 미세·나노 플라스틱증가와 백혈구, 중성구 증가 동반	Marfella 2024, Makwana-EJN 2025, Lee 2024 Zhang 2025, Wu 2025

건강 영역	주요 내용	관련 연구
소화기계/ 장내 미생물총	- 대변 내 미세·나노플라스틱 농도가 높으면 과민성장증후군의 위중도가 높고 장내 미생물총 이상과 연관	Yan 2021, Zhang 2022
생식 건강	- 정자내 미세·나노플라스틱 농도 높을수록 정자 운동성 등 질 감소	Li 2024, Zhang 2024
정신건강/ 신경계	- 미세·나노플라스틱 노출 증가 시 우울증 위험 증가, 인지기능 감소하고 신경학적 장애 유병률 증가 - 뇌척수액 내 미세·나노플라스틱 축적 확인, 혈뇌장벽에 손상이 있으면 투과력 증가 - 소변내 미세·나노플라스틱 농도가 높을수록 초등학생의 감정 및 행동문제지표가 유의하게 증가	Luo 2025, Makwana-EJN 2025, Xie 2024, Zheng 2025, Dong 2025
태아 발달/ 임신부 건강	- 태반 조직내 미세·나노플라스틱 농도 높을수록 제대혈내 태아 간효소, 태반 염증 연관성, 임신성 고혈압 위험 증가	Wang 2025, Yun 2024, Zhang 2025
영유아 성장/ 미생물총	- 젖병 통한 미세·나노플라스틱 노출이 12개월 영아의 장내 미생물 다양성에 미세한 영향	Tilves 2023

건강영향 측면에서 최근 연구들이 보여주는 특징적 내용은 다음과 같다.

첫째, 최근에 염증 및 대사표지 변화와 미세 · 나노플라스틱 노출의 관련성이 부각되는 점이다. 대변 미세 · 나노플라스틱 농도와 과민성대장증후군(IBD) 중증도(장염증 활성) 간 양의 상관성이나, 혈중 미세 · 나노플라스틱 농도가 높을수록 aPTT 지연, 염증표지(CRP) 상승, 폐조직 미세 · 나노플라스틱 농도와 혈소판 증가, 섬유소원 증가 등 혈액응고계 변화와 연관성 등의 보고가 그것이다. 이러한 결과들은 미세 · 나노플라스틱이 체내에서 미약하지만 염증반응이나 혈액응고계 교란 등을 유발하는 스트레스 인자로 작용할 수 있음을 시사한다.

둘째, 생식계 및 발달영역 영향에 대한 근거도 축적되고 있다. 정액에서 미세 · 나노플라스틱 검출과 정자운동성 감소의 연관성, 태변내 미세 · 나노플라스틱의 검출, 태반에서 다양한 고분자 검출과 태반염증 연관 가능성, 태반내 미세 · 나노플라스틱과 제대혈에서 측정한 신생아 간효소 상승의 관련성 등의 연구결과는 생식세포 및 태아발달에도 미세 · 나노플라스틱 노출이 악영향을 미칠 가능성을 보여준다.

셋째, 최근 연구에서 미세 · 나노플라스틱 노출과 우울증 또는 신경학적 장애의 관련성, 그리고 뇌척수액 내에 축적된 미세 · 나노플라스틱이 뇌혈관장벽(BBB)의 손상이 있을 경우 투과력이 증가할 위험성이 제기된 것은, 미세 · 나노플라스틱 노출의 신경계 악영향의 가능성을 나타낸다.

종합하면, 미세 · 나노플라스틱 노출 영향은 국소장기에 국한되지 않고, 전신적으로 면역·대사·신경·생식 등 폭넓은 영역에 걸쳐 연구가 확장되고 있다.

3. 결과 해석의 공통점과 새로운 발견

대부분 연구는 상관관계 관찰이라는 점을 강조하며 결과를 신중히 해석한다. 공통적으로 미세 · 나노플라스틱 노출이 건강지표 변화에 기여할 가능성을 제시하지만, 모든 연구가 인과 추론에 조심스러우며, 미세 · 나노플라스틱 노출이 질병을 유발할 수 있다는 가능성과 동시에 대체 설명(역인과성 포함)을 함께 논의하고 있다.

다른 한편, 몇몇 연구는 의료행위에 의한 미세 · 나노플라스틱 노출 등 새로운 통찰을 제공한다. 수술 중 사용된 재료에서 미세 · 나노플라스틱이 유입되었을 가능성 등 의료환경 또한 중요한 노출원임을 지적하고 있다. 또한 BBB의 선택적 필터 역할을 확인하여, 미세 · 나노플라스틱의 고분자 종류에 따른 체내 거동 차이가 제시되었다.

4. 연구 설계 및 한계점

대부분 연구가 단면적 관찰연구 또는 소규모 파일럿으로, 표본 수는 일부 수천명에 이르는 것도 있으나 대부분 충분하지 않고, 교란 변수 통제에 한

계가 있으며, 미세 · 나노플라스틱 측정 시료의 오염 가능성 등을 한계로 언급한다. 또, 응답자 설문 기반 노출평가(예: 생수병 사용량 등)의 부정확성, 생태학적 연구에서 지역 단위의 결과를 개인 건강에 적용할 수 없다는 생태학적 오류 가능성이 지적된다. 대부분의 역학연구들은 인과관계 부재로 결론 지으며 연구설계적 한계를 기술하고 있다. 이는 관련 역학연구가 아직 초기 탐색 단계이며, 정교한 코호트나 개입연구가 부족하다는 점을 말한다.

5. 향후 연구 및 대응 방향

모든 연구에서 추가 연구가 시급하다는 점을 강조하고 있다. 향후 필요한 연구는 다음과 같은 방향으로 제시할 수 있다.

(a) 대규모 코호트 연구 – 미세 · 나노플라스틱 노출과 건강영향의 인과성 규명 목적
(b) 정밀 노출 측정 기법 개발 – Raman, FTIR, Py-GC/MS 등의 비교 및 오염통제 절차가 강화된 표준화된 미세 · 나노플라스틱 측정법의 필요성
(c) 기전 규명 연구 병행 – 세포·동물실험을 통해 미세 · 나노플라스틱이 염증, 면역교란, 호르몬 작용, 장기내 세균총, 장 누수 등에 어떻게 영향을 미치는지 규명
(d) 감수성 높은 집단에 대한 연구 – 태아, 영유아, 임신부, 고령자, 만성질환자 등을 대상으로 미세 · 나노플라스틱 노출의 건강영향 규명
(e) 노출원별 비교 연구 – 대기, 식이, 의료환경, 생활용품 등 각 경로의 상대적 기여도 파악
(f) 예방 및 관리 정책의 근거 마련 – 식품 포장, 의료 소모품 등 주요 노출원을 규제하기 위한 근거 구축 등

6. 결론

현재까지 축적된 인체 대상 연구를 중심으로 미세·나노플라스틱의 건강영향 가능성을 종합적으로 검토하였다. 여러 연구에서 인체 다양한 조직에서 검출되고 각종 생체 지표(염증, 산화스트레스, 대사지표 등)와의 연관성이 반복적으로 보고된다는 사실은, 미세플라스틱이 더 이상 환경 중에만 존재하는 오염원이 아니라 인체 건강을 위협할 수 있는 잠재적 노출요인임을 분명하게 보여준다. 이는 장기적인 건강영향 연구의 필요성을 지지하는 중요한 출발점이 된다.

그러나 현 단계의 연구는 대부분 단면적 관찰연구 또는 소규모 파일럿 형태로 수행되어 상관성 수준에 머물러 있으며, 노출평가의 부정확성, 오염 가능성, 비표준화된 분석법, 입자 특성의 다양성 등 여러 한계로 인해 인과관계를 확정하기에는 근거가 충분하지 않다. 이러한 방법론적 제약은 현재의 역학적 근거 해석에 상당한 불확실성을 남기며, 미세·나노플라스틱의 인체 영향에 대한 확정적 결론을 내리기 어려운 상황임을 의미한다.

그럼에도 불구하고, 실험적 연구에서 일관되게 보고되는 산화스트레스, 염증, 장벽 기능 저하 등 기전적 근거는 인체 건강영향 가능성을 뒷받침하며, 특히 태아·영유아·고령자 등 감수성 높은 집단에서 잠재적 영향이 우려된다. 또한 의료기기나 직업환경을 통한 고농도·직접적 노출 가능성은 향후 공중보건적 관점에서 주목해야 할 중요한 문제이다.

따라서 향후에는 표준화된 분석법을 기반으로 한 정량적 노출조사, 장기 코호트 연구, 인체 바이오모니터링 강화, 그리고 첨가제·흡착오염물질을 포함한 복합독성 평가가 병행되어야 한다. 이러한 연구 기반이 마련될 때 비로소 미세·나노플라스틱의 인체 위해성에 대한 과학적 결론을 보다 명확하게 도출할 수 있을 것이다.

참고문헌

Bayo, J., Baeza-Martínez, C., Doval, M., González-Pleiter, M., García-Pachón, E., 2024. Impact of airborne microplastics on induced sputum of urban dwellers: The role of environmental and occupational factors. WIT Transactions on Ecology and the Environment. https://doi.org/10.2495/sdp240641

Braun, T., Ehrlich, L., Henrich, W., Koeppel, S., Lomako, I., Schwabl, P., Liebmann, B., 2021. Detection of Microplastic in Human Placenta and Meconium in a Clinical Setting. Pharmaceutics 13, 921. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13070921

Chen, C., Liu, F., Quan, S., Chen, L., Shen, A., Jiao, A., Qi, H., Yu, G., 2023. Microplastics in the Bronchoalveolar Lavage Fluid of Chinese Children: Associations with Age, City Development, and Disease Features. Environ. Sci. Technol. 57, 12594–12601. https://doi.org/10.1021/acs.est.3c01771

Dong, L., Li, X., Zhang, Y., Liu, B., Zhang, X., Yang, L., 2025. Urinary microplastic contaminants in primary school children: Associations with behavioral development. Ecotoxicol. Environ. Saf. 295, 118097. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118097

Lee, D.-W., Jung, J., Park, S., Lee, Y., Kim, J., Han, C., Kim, H.-C., Lee, J.H., Hong, Y.-C., 2024. Microplastic particles in human blood and their association with coagulation markers. Sci Rep 14, 30419. https://doi.org/10.1038/s41598-024-81931-9

Li, N., Yang, H., Dong, Y., Wei, B., Liang, L., Yun, X., Tian, J., Zheng, Y., Duan, S., Zhang, L., 2024. Prevalence and implications of microplastic contaminants in general human seminal fluid: A Raman spectroscopic study. The Science of the total environment. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173522

Liu, S., Zheng, J., Lan, W., Yang, Z., Li, M., Li, J., Yu, J., Yang, S., Du, J., Dong, R., Lin, Y., 2025. Microplastics exposed by respiratory tract and exacerbation of community-acquired pneumonia: The potential influences of respiratory microbiota and inflammatory factors. Environment International 199, 109485. https://doi.org/10.1016/j.envint.2025.109485

Luo, J., Lin, S., 2025. Association between microplastics exposure and depressive symptoms in college students. Ecotoxicology and Environmental Safety 295, 118142. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118142

Makwana, B., Desai, B., Srinivasan, J., Apetauerova, D., Dani, S.S., Sehgal, S., Yerstein, O., Khadke, S., Kumar, A., Nasir, K., Wadhera, R., Kong, Y., Navas-Acien, A., Adamkiewicz, G., Rajagopalan, S., Al-Kindi, S., Moffatt-Bruce, S., Ganatra, S., 2025a. Impact of Marine Microplastics on Neurologic and Functional Disabilities: A Population-Level Study. European Journal of Neurology 32, e70144. https://doi.org/10.1111/ene.70144

Makwana, B., Khadke, S., Kumar, A., Nasir, K., Wadhera, R., Shah, R., Sheth, S., Kong, Y., Navas · Acien, A., Adamkiewicz, G., Rajagopalan, S., A · Kindi, S., Dani, S.S., Moffatt · Bruce, S., Ganatra, S., 2025b. Marine Microplastic Levels and the Prevalence of Cardiometabolic Diseases in US Coastline Counties. Journal of the American Heart Association 14, e039891. https://doi.org/10.1161/JAHA.124.039891

Marfella, R., Prattichizzo, F., Sardu, C., Fulgenzi, G., Graciotti, L., Spadoni, T., D'Onofrio, N., Scisciola, L., Grotta, R.L., Frigé, C., Pellegrini, V., Municinò, M., Siniscalchi, M., Spinetti, F., Vigliotti, G., Vecchione, C., Carrizzo, A., Accarino, G., Squillante, A., Spaziano, G., Mirra, D., Esposito, R., Altieri, S., Falco, G., Fenti, A., Galoppo, S., Canzano, S., Sasso, F.C., Matacchione, G., Olivieri, F., Ferraraccio, F., Panarese, I., Paolisso, P., Barbato, E., Lubritto, C., Balestrieri, M.L., Mauro, C., Caballero, A.E., Rajagopalan, S., Ceriello, A., D'Agostino, B., Iovino, P., Paolisso, G., 2024. Microplastics and Nanoplastics in Atheromas and Cardiovascular Events. New England Journal of Medicine 390, 900–910. https://doi.org/10.1056/NEJMoa2309822

Özgen Alpaydin, A., Uçan, E.S., Köktürk, M., Atamanalp, M., Kalyoncu, Ç., Yiğit, S., Uçar, A., Şimşek, G.Ö., Tertemiz, K.C., Karaçam, V., Ulukuş, E.Ç., Gürel, D., Alak, G., 2024. Microplastics, as a risk factor in the development of interstitial lung disease- a preliminary study. Environ Pollut 363, 125054. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125054

Tilves, C., Zhao, H.J., Differding, M.K., Zhang, M., Liu, T., Hoyo, C., Østbye, T., Benjamin-Neelon, S.E., Mueller, N.T., 2023. Associations of Plastic Bottle Exposure with Infant Growth, Fecal Microbiota, and Short-Chain Fatty Acids. Microorganisms 11, 2924. https://doi.org/10.3390/microorganisms11122924

Wang, C., Chang, H., Wang, H., Li, H., Ding, S., Ren, F., 2025. Exposure to microplastics during pregnancy and fetal liver function. Ecotoxicology and Environmental Safety 294, 118099. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118099

Wang, S., Lu, W., Cao, Q., Tu, C., Zhong, C., Qiu, Lan, Li, S., Zhang, H., Lan, M., Qiu, Liqiu, Li, X., Liu, Y., Zhou, Y., Liu, J., 2023. Microplastics in the Lung Tissues Associated with Blood Test Index. Toxics 11, 759. https://doi.org/10.3390/toxics11090759

Xie, J., ji, J., Sun, Y., Ma, Y., Wu, D., Zhang, Z., 2024. Blood-brain barrier damage accelerates the accumulation of micro- and nanoplastics in the human central nervous system. Journal of Hazardous Materials 480, 136028. https://doi.

org/10.1016/j.jhazmat.2024.136028

Yan, Z., Liu, Y., Zhang, T., Zhang, F., Ren, H., Zhang, Y., 2021. Analysis of Microplastics in Human Feces Reveals a Correlation between Fecal Microplastics and Inflammatory Bowel Disease Status. Environmental science & technology. https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03924

Yang, Y., Xie, E., Du, Z., Peng, Z., Han, Z., Li, L., Zhao, R., Qin, Y., Xue, M., Li, F., Hua, K., Yang, X., 2023. Detection of Various Microplastics in Patients Undergoing Cardiac Surgery. Environ. Sci. Technol. 57, 10911–10918. https://doi.org/10.1021/acs.est.2c07179

Yun, X., Liang, L., Tian, J., Li, N., Chen, Z., Zheng, Y., Duan, S., Zhang, L., 2024. Raman-guided exploration of placental microplastic exposure: Unraveling the polymeric tapestry and assessing developmental implications. Journal of Hazardous Materials 477, 135271. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135271

Zhang, C., Zhang, G., Sun, K., Ren, J., Zhou, J., Liu, X., Lin, F., Yang, H., Cao, Jinhu, Nie, L., Zhang, P., Zhang, L., Wang, Z., Guo, H., Lin, X., Duan, S., Cao, Jia, Huang, H., 2024. Association of mixed exposure to microplastics with sperm dysfunction: a multi-site study in China. eBioMedicine 108. https://doi.org/10.1016/j.ebiom.2024.105369

Zhang, M., Zhang, Y., Liu, T., An, C., Sun, Y., 2025. Microplastic exposure in daily life and the risk of pregnancy-induced hypertension: A study on the association between environmental pollutants and maternal-fetal health outcomes. J Hazard Mater 494, 138654. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.138654

Zhang, X., Wang, H., Peng, S., Kang, J., Xie, Z., Tang, R., Xing, Y., He, Y., Yuan, H., Xie, C., Liu, Y., 2022. Effect of microplastics on nasal and intestinal microbiota of the high-exposure population. Frontiers in Public Health 10. https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1005535

Zheng, D., Wang, D., Zhang, S., Liu, Y., Xi, Q., Weng, Y., 2025. Impact of urinary microplastic exposure on cognitive function in primary school children. Ecotoxicology and Environmental Safety 302, 118532. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118532

Wu, Y., Chen, Y., He, R., Zhao, T., Chen, Z., 2025. Micronanoplastic exposure due to cardiopulmonary bypass in children: A prospective observational study. J. Hazard Mater. 489, 137732. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.137732

Zhang, Y., Gao, Q., Gao, Q., Xu, M., Fang, N., Mu, L., Han, X., Yu, H., Zhang, S., Li, Y., Gong, Y., 2025. Microplastics and nanoplastics increase major adverse cardiac events in patients with myocardial infarction. J. Hazard Mater. 489, 137624. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.137624

제6장 미세 · 나노플라스틱의 인체 위해성평가

미세·나노플라스틱은 최근 환경보건 분야에서 가장 주목받는 신흥 위해요인으로 부상하고 있으며, 연구 증가와 함께 사회적 관심 또한 빠르게 확산되고 있다. 현재까지 축적된 학술 연구의 대부분은 미세플라스틱이 검출되는 환경 매체(수계, 토양, 대기 등)의 농도 조사, 생태계 생물에 대한 독성 영향, 그리고 식품 오염 실태와 같은 환경·생태 중심의 자료에 집중되어 왔다. 이러한 연구를 기반으로 일부 국가와 국제기구에서는 이미 생태 위해성 평가 결과를 토대로 규제 기준과 관리방안 마련에 착수하고 있다.

반면, 인체 건강영향과 위해성에 관한 연구는 상대적으로 초기 단계에 있으며, 특히 나노플라스틱에 대한 인체 기반 자료는 매우 제한적이다. 현재 존재하는 인체 연구와 위해성평가 관련 문헌은 대부분 미세플라스틱(대개 수십~수백 μm 수준)을 중심으로 이루어져 있어, 실제 위해성평가에 활용 가능한 자료 또한 미세플라스틱 기반 결과가 절대적 비중을 차지한다. 따라서 본 장에서는 현존 자료의 범위와 한계를 고려하여, “미세플라스틱을 중심으로 인체 위해성평가를 수행한다”는 분석 방향을 명확히 한다.

더욱이 미세·나노플라스틱을 둘러싼 사회적 논의는 과학적 근거보다 정보 불균형과 단편적 보도에 의해 영향받는 경우가 많아, 과장된 위험 인식이나 불필요한 불안을 초래하기도 한다. 이는 인체 위해성 평가에 필수적인 정량적 노출자료와 표준화된 독성정보가 아직 충분히 확보되지 않은 상황에서 조기 결론을 시도하려는 과정에서 비롯된 측면이 크다.

따라서 본 장의 목적은 현재까지 축적된 과학적 문헌 중 인체 위해성평가에 직접 활용 가능한 미세플라스틱 노출자료와 독성자료를 선별·검토하고, 그 근거의 강도와 한계를 분석하여 현 단계에서 도출 가능한 인체 위해성평가 결과를 제시하는 데 있다. 이러한 접근은 향후 나노플라스틱 기반 연구가 충분히 축적되기 전까지, 과학적 판단의 기준점을 명확히 하고 정책·사회적 논의를 안정적으로 이끌기 위한 필수적 절차라 할 수 있다.

일반 화학물질의 위해성 평가는 다음과 같은 기본식으로 표현된다.

$$RCR = \frac{PEC}{PNEC}$$

여기서 RCR(Risk Characterization Ratio)은 위해성비, PEC(Predicted Exposure Concentration)은 예측노출농도, PNEC(Predicted No Effect Concentration)은 무영향예측농도를 의미한다. RCR이 1보다 크면 '관심 수준(Level of Concern)', 1보다 작으면 '관심 이하(Less Concern)'로 분류된다. 의약품이나 농약과 달리, 미세플라스틱과 같은 일반 환경오염물질의 경우 장기독성시험 자료가 충분하지 않아 단기시험 결과에 안전계수(Safety Factor, SF)나 불확실성 계수(Uncertainty Factor, UF)를 적용해 예측값으로 대체하는 것이 일반적이다.

이러한 원리에 따라 미세플라스틱의 위해성을 정량적으로 평가하기 위해서는 장기간(예: 인생주기 70년) 동안의 평균 노출농도(PEC)와 생체 내 무영향농도(PNEC)를 확보해야 한다. 그러나 현재까지의 연구는 인체 위해성 평가를 목적으로 통합적으로 수행되지 못하고, 노출 평가와 독성 평가가 분리되어 이루어져 왔다. 이로 인해 노출 단위와 시험조건의 불일치로 RCR 산출이 불가능하거나, 연구자 간 평가결과의 불일치가 발생하고 있다. 이는 곧 미세플라스틱 인체 위해성평가를 총괄할 통합적 연구 거버넌스의 부재를 의미한다.

따라서 본 연구에서는 미세플라스틱의 인체 위해성평가를 위한 과학적 근거를 종합적으로 검토하고, 현재까지의 노출 및 독성 자료를 바탕으로 정량적 평가의 가능성과 한계를 분석하고자 한다. 이를 통해 향후 환경보건 및 독성학 분야에서 보완되어야 할 핵심 과제와 연구 방향을 제시함으로써, 미세플라스틱의 인체 위해성평가 체계 확립에 기여하고자 한다.

1. 인체 위해성평가 수행 현황

2025년 이전까지의 미세플라스틱에 대한 인체 위해성평가는 주로 국제기구와 각국 정부기관을 중심으로 이루어져 왔다. 이는 새로운 화학물질의 허가, 기존 물질의 재등록, 환경 기준 설정 등 화학물질 관리에 있어 신뢰성 있는 위해성평가 결과가 규제의 근거가 되기 때문이다. 따라서 학계와 각국 정부에서는 이미 표준화된 평가방법론을 확립한 상태이다. 그러나 이러한 평가체계가 마련되어 있음에도 불구하고, 평가 대상물질의 노출량과 독성자료가 미흡한 경우에는 평가를 수행할 수 없으며, 자료가 확보될 때까지 결론이 유보될 수밖에 없다.

미세플라스틱의 인체 위해성평가을 검토한 2016년의 유럽식품안전청(European Food Safety Authority, EFSA) 보고서에서는 시험자료의 절대적 부족으로 인해 경구 노출에 대한 위해성을 평가하기 어렵다는 결론을 내렸다. 이후 2019년 유럽과학자문기구(Science Advice for Policy by European Academies, SAPEA)는 미세플라스틱의 생태 및 인체 위해성에 대한 논의를 시도하였으나, 인체 위해성에 대한 정량적인 결론을 도출하지는 못하였다. 같은 해 세계보건기구(World Health Organization, WHO) 보고서에는 Merski 등(2008)의 PE/PET 장기독성시험(90일 랫드 시험) 결과를 인용하여 무영향농도(NOAEL)가 2500 mg/kg bw/day 이상임을 제시하였고, Deng 등(2017)의 polystyrene 미세플라스틱 28일 마우스 경구투여시험 결과를 언급하였으나, 미세플라스틱 자체에 대한 정량적 위해성 평가는 시도하지 않았다. 이어 2022년에 발표된 WHO의 후속 보고서는 미세플라스틱을 운반체(carrier)로 하여 체내로 유입되는 오염물질의 위해성을 평가하였으며, 당시의 노출 및 섭취 수준에서는 인체 위해성의 문제가 없다고 보고하였다,

국가 차원에서도 노르웨이, 캐나다, 미국(특히 캘리포니아 주) 등 개별 국가 차원에서 미세플라스틱 인체 위해성에 대한 결론을 내리고자 시도하였

으나, 노출 및 독성자료가 미흡하여 명확히 판단할 수 없다고 보고하였다.

최근 인도의 Priya와 Tanushree 연구팀이 2025년에 발표한 논문에서는 수계 환경에 존재하는 미세플라스틱의 정량적 인체 위해성평가를 체계적으로 종합하였다. 이 연구는 제한된 동물실험 자료를 기반으로 하였으며, 미세플라스틱 자체의 독성보다는 첨가제 및 미세플라스틱 표면에 흡착되어 체내에서 방출될 수 있는 오염물질의 간접 위해성에 초점을 맞추었다.

이에 본 보고서에서는 기존 연구 한계를 극복하기 위해 미세플라스틱 자체의 인체 위해성에만 집중하여 최신 자료를 재검토하고 평가를 수행했다. 특히 2020년 이후 국내 연구진이 생산한 다수의 동물 독성시험 자료가 Priya 연구팀이 미처 다루지 못한 부분까지 보완해주었으며, 이를 통해 보다 구체적이고 정량적인 위해성 평가가 가능해졌음을 본 보고서에서 제시한다.

2. 인체노출 분석자료 (음용수 및 식품 중 함량 분석)

본 문헌조사는 Senathirajah 등(2021)에 수록된 총 45편의 미세플라스틱(Microplastics, MPs) 함량 분석 논문을 종합하여, 음용수 및 식품 내 미세플라스틱의 존재 수준을 검토하였다. 이들 문헌을 분석한 결과, 전체 논문 중 40편(약 89%)에서 분석 대상 입자의 크기가 50 μm 이상으로 보고되었다. 그러나 동물 독성시험 결과에서 실제 독성이 발현되는 입자 크기가 주로 5–50 μm 범위임을 고려할 때, 이러한 분석 자료는 인체 위해성평가에 직접적으로 활용하기에는 한계가 있다. 즉, 대부분의 기존 분석자료는 위해영향이 나타나는 입자 크기보다 큰 입자를 대상으로 하고 있어, 정량적 위해평가 자료로서의 적합성이 낮은 것으로 판단된다.

이에 따라 위해성평가에 활용 가능한 분석자료를 선별하여 표 1에 제시하였다. 표 1에 나타난 바와 같이, 일부 연구에서는 음용수 및 식품 중 위해 관련 크기(5–50 μm)의 미세플라스틱 농도를 분석하였으나, 입자의 모양(morphology), 화학조성(chemical composition), 표면 특성 등 독성에 직접적으로 영향을 미치는 요소에 대한 정보가 충분히 제공되지 않았다. 이러한 제한점에도 불구하고, Pivokonsky 등(2018)이 수행한 연구는 정수처리된 수도수 내 미세플라스틱 농도를 체계적으로 측정하였다는 점에서 비교적 신뢰도가 높은 자료로 평가된다. 따라서 이 자료를 활용하여 음용수 섭취에 따른 인체 위해성평가를 시도하였다.

또한, 국내 식품과 음용수를 분석하고 국외 자료를 종합하여 노출량을 산정한 Pham 등(2023)의 연구자료를 활용하여 위해성평가를 시도하였다. Pham 등이 정리한 대부분의 분석자료에서 미세플라스틱의 평균 입자 크기가 100 μm 내외이므로, 계산된 노출량이 다소 과장되어 실제보다 위해도가 크게 산출될 수 있음을 감안해야 한다.

표 1. 노출량 자료 - 음용수 및 식품 중 미세플라스틱의 정량 결과
(Senithirajah et al. (2021)에 사용된 문헌 중 입자 크기가 50 μm 이하인 자료)

문헌 저자 (년도)	세부 항목	정량치		모양	입자 크기	화학성분
		µg/kg	particle/L		µm	
Ossman et al. (2018)	병수		2649±2857		〈 5	PET, PE, PP
Schymanski et al. (2018)	병수		118 , 14 , 11, 50		5 - 50	PEST, PE, PP
Pivokonsky et al. (2018)	음용 원수		1473 -3605 av	Fragments	1 - 10	PET, PP, PE
	처리된 음용수		338 - 628 av.	Fragments	1 - 10	PET, PP, PE
Liebezeit and Liebezeit (2013)	꿀	0.016	9	Fragments	10 - 20	
	설탕	0.056	32	Fragments	10 - 20	
van Cauwenberghe and Janssen (2014)	홍합 (독일산)		0.36 ± 0.87 particles/ g w.w.		5 - 25	
	굴 (프랑스산)		0.47 ± 0.16 p/g w.w.		5 - 25	

3. 동물독성시험 자료(경구)

미세플라스틱의 경구 독성에 관한 동물실험 자료는 주로 2020년 이후 국내 연구진을 중심으로 축적되기 시작하였다. 특히 한국의 독성학자들에 의해 수행된 일련의 연구들은 설치류를 이용한 경구 투여 시험을 중심으로 이루어졌으며, 이 중 일부는 OECD 시험지침에 부합하는 형태로 수행되어 국제적으로 비교 가능한 독성자료로 평가된다. 현재까지 확보된 시험 중에서는 아급성(28일) 이상 기간의 반복투여시험 결과가 포함되어 있어, 인체 위해성평가의 기초자료로 활용 가능한 수준에 도달한 것으로 판단된다(표 2).

이러한 자료의 축적은 아직 완전한 위해성평가 체계를 충족하기에는 부족하더라도, 유럽화학물질청(European Chemicals Agency, ECHA)에서 신규 또는 기존 화학물질의 등록·재심사 시 요구하는 최소한의 독성자료 요건을 충족한다는 점에서 의미가 크다. 즉, 미세플라스틱이 명시적으로 규제대상 물질로 분류되지 않았음에도 불구하고, 국내 연구진이 국제 표준 수준의 실험자료를 생산·확보하였다는 점은 향후 정량적 인체 위해성평가 수행의 중요한 기반이 된다.

표 2에서 제시된 바와 같이, 현재까지 표준화된 시험법(OECD TG 407 등)에 따라 수행된 경구 독성시험 자료는 총 6건으로, 환경 중 주요 구성 성분인 폴리에틸렌 테레프탈레이트(Polyethylene terephthalate, PET), 폴리에틸렌(Polyethylene, PE), 폴리프로필렌(Polypropylene, PP)에 대한 결과가 포함되어 있다. 그러나 폴리스티렌(Polystyrene, PS)에 대해서는 현재 OECD 표준법에 따른 독성자료가 보고되어 있지 않으므로 유사한 방법으로 Yang 등(2019)이 수행한 약동학/약력학(TK/TD) 기반 비표준 시험자료를 위해성평가에 활용하였다.

표 2. 동물독성시험 자료

시험법	문헌 저자	시험 물질	NOAEL (mg/kg \bw/day)	입자 크기	동물 종	기간	투여 경로
〈표준법〉							
OECD	Kim, D. et al. (2025)	PET	1.75(male), 7 (female)	10 μ (av. 5.64)	mice (ICR) 10 m, 10 f	4주	경구
OECD	Lee, S. et al. (2022)	PE	〈1,000 =(male), 〈500(female)	10 - 50 μ (av. 27)	mice (ICR) 10 m, 10 f	28일	경구
OECD	Lee, S. et al. (2022)	PTFE	〉 2000	5, 5-10 μ	mice (ICR)	4주	경구
OECD	Kim, J. et al. (2021)	w-PP	〉 25 (dispersibility max.)	〈 150 μ (97.5%) av. 85.2 μ	rat (SD)	4주	경구
OECD	Park, E. et al. (2020)	PE	〈 60 (general tox.), 〈 15 (repro. Develop.)	16.8 μ		90일	경구
OECD	Merski et al. (2018)	PE/PET	〉 2,500 (2.5 %) or 〉 5,000 (5%)		rat (SD) 10 m, 10 f	90일	경구 (식이)
〈비표준법〉							
	Yang et al. (2019)	PS	8	5 μ	mice	4주	경구
			0.71	20 μ	mice	4주	경구
	Deng et al. (2018)	PS	3.3	5 μ	mice	4주	경구
			0.33	20 μ	mice	4주	경구

4. 인체 위해도 결정

미세플라스틱의 인체 위해성 평가는 개별 입자의 화학적 구성성분에 따라 수행되어야 하며, 이는 신규 또는 기존 화학물질의 위해성을 평가하는 절차와 동일한 과학적 원칙을 적용한다. 즉, 폴리에틸렌(PE), 폴리프로필렌(PP), 폴리에틸렌테레프탈레이트(PET), 폴리스티렌(PS) 등 주요 구성 고분자별로

노출량과 독성시험 결과를 각각 검토하고, 인체에 대한 잠재적 위해수준을 정량적으로 평가하였다.

본 평가에서는 앞서 정리한 미세플라스틱 노출자료(음용수 및 식품)와 동물 독성시험 자료를 통합하여 인체 노출량(PEC, Predicted Exposure Concentration)과 무영향예측농도(PNEC, Predicted No Effect Concentration)를 산출하였다. 이를 바탕으로 위해성비(Risk Characterization Ratio, RCR = PEC/PNEC)를 계산하였으며, 세부 결과는 표 3에 제시하였다.

분석 결과, 비교적 신뢰성이 확보된 노출자료(Pivokonsky et al., 2018; Pham et al., 2023)와 OECD 시험지침에 부합하는 동물실험자료를 이용하여 산출한 RCR 값은 모든 평가대상 고분자(PE, PP, PET, PS)에서 1 미만으로 나타났다. 이는 국제적으로 통용되는 위해성평가 기준에 따라 '관심수준(Level of Concern) 미만'으로 평가되었으며, 현 단계의 과학적 근거를 고려할 때 식품이나 음용수를 통해 노출되는 수준의 미세플라스틱이 인체 위해성을 유발한다는 명확한 근거는 확인되지 않았다.

다만, 본 결과는 현재 이용 가능한 제한된 데이터—특히 입자 크기, 형태, 화학조성에 따른 독성 차이—에 근거한 예비적 평가 결과로 해석되어야 한다. 향후 장기 노출자료, 체내 동태(흡수·분포·대사·배설, ADME) 연구, 그리고 직경 1 μm 이하의 나노단위 입자에 대한 독성자료가 추가로 확보될 경우, 보다 정밀한 재평가가 필요하다.

화학 성분	무독성농도 (mg/kg bw/day)	평가계수	무영향량 (ug/kg bw/day)	노출량 (ug/kg bw/day)	위해도
PE	〈15 (Park 2020)	3,150 (ECHA)	4.76	0.117 (Pham 2023)	0.02458
			4.76	0.0012 (Pivokonsky 2018)	0.00025
PP	〉25 (Kim, J. 2021)	600 (ECHA)	41.6	0.112 (Pham 2023)	
			41.6	0.0024 (Pivokonsky 2018)	0.00269
PET	1.75 (Kim, D. 2025)	1050 (ECHA)	1.67	0.008 (Pham 2023)	0.00479
			1.67	0.004 (Pivokonsky 2018)	0.00240
PS	8 (Yang 2019)	1050 (ECHA)	7.6	0.02 (Pham 2023)	0.00263
	0.71 (Yang 2019)	1050 (ECHA)	0.68	0.02 (Pham 2023)	0.029

5. 기존 연구의 제한점 및 개선점

가) 노출 연구

본 조사연구를 통해 확인된 가장 뚜렷한 사실은, 위해성평가에 활용 가능한 미세플라스틱 노출량 자료가 매우 제한적이라는 점이다. 대부분의 분석 연구에서는 검출된 입자의 크기가 동물실험에서 독성이 발현되는 크기 범위(약 5–50 μm)보다 현저히 커, 위해성평가의 정량적 근거로 활용되기 어려웠다. 따라서 향후 노출량 분석 연구에서는 분석 목적을 명확히 구분하고, 위해성평가용 자료를 생산하는 경우에는 독성시험에서 유의한 생물학적 반응을 유발하는 입자 크기 범위와 일치하는 분석기법 및 장비의 선택이 필수적이다. 그리고 동물 독성시험에서 생산되는 자료는 인체의 평생 노출을 가정하여 시험이 수행되므로 노출량도 1년 이상의 평균 노출량을 대표하는 자료를 축적하여야 할 것이다.

또한 Cox 등(2019)이 제시한 인체 노출량 추정치는 입자 크기의 차이에 따라 위해도가 과대 혹은 과소평가될 가능성이 있으므로, 동일한 과학적 기준에서 재해석이 필요하다. 본 조사연구에서 위해성평가에 적합하다고 판단된 노출자료는 소수에 불과했으며, 분석 방법론에 대한 학계 내 이견이 존재하는 일부 연구(예: Zuccarello et al., 2018)는 향후 표준화된 검증 절차를 거쳐 재평가할 필요가 있다.

나) 동물독성시험

현재까지 보고된 미세플라스틱 동물독성시험은 주로 폴리에틸렌(PE), 폴리에틸렌테레프탈레이트(PET), 폴리프로필렌(PP), 폴리스티렌(PS) 등 주요 고분자에 한정되어 있으며, 대부분 아급성(28일) 또는 아만성 수준의 단기시험에 머물러 있다. 향후 연구에서는 1) 장기독성시험(chronic toxicity test)에 의한 자료가 확보되어야 하고, 2) 여타 화학성분에 대한 자료도 확보되어야 하며, 3) 입자 형태(shape)별(예 섬유형) 추가 시험자료도 확보되어야 하고, 4) 시험물질의 품질관리를 강화하여 정확성을 기하기 위해 물질제조 전문기관에서 생산·정량된 표준시료(Reference MP)를 이용한 시험을 수행해야 한다.

다) 위해성평가

본 조사연구의 위해성평가는 경구노출 경로를 중심으로 수행되었으나, 미세플라스틱은 경피 및 흡입경로를 통한 노출 가능성도 존재한다. 따라서 향후 연구에서는 경구뿐만 아니라 경피·흡입 노출에 대한 노출량 분석과 동물시험을 병행하여, 총체적인 인체 노출량과 건강영향을 통합적으로 평가해야 한다.

또한 본 연구에서 수행된 위해성평가는 현시점의 노출자료에 근거하여 이루어진 정적 평가이므로, 미세플라스틱의 체내 축적 속도 및 배출 동태(ADME 특성)에 따라 장기적으로 위해도 수준이 달라질 가능성이 있다. 이에 따라 인체 내 축적 가능성 및 시간적 변동성을 고려한 지속적 모니터링 체계 구축이 필요하다. 특히, 위해성평가의 정확도를 높이기 위해서는 다양한 식품군(해산물, 가공식품 등)에 포함된 미세플라스틱의 정량적 분석자료가 축적되어야 한다. 또한 현재까지의 평가는 미세플라스틱 자체에 초점을 맞추었으나, 첨가제, 잔류 모노머, 흡착 오염물질이 기여하는 위해성을 포함한 총체적 평가가 필요하다

6. 결론

본 조사연구는 현재까지 축적된 과학적 근거를 바탕으로 미세플라스틱의 인체 위해성을 종합적으로 검토한 결과, 현 단계에서는 일반적 노출 수준에서 미세플라스틱이 인체 건강에 중대한 위해를 초래한다는 명확한 근거는 확인되지 않았다는 잠정적 결론에 도달하였다.

그러나 노출 및 독성자료의 불균형, 입자 크기·형태의 다양성, 시험물질의 비표준화, 다양한 노출경로 자료의 부족 등은 미세플라스틱 인체 위해성평가의 신뢰성을 저해하여, 현재의 평가 결과에 상당한 불확실성을 남기는 핵심 요인으로 확인되었다. 따라서 향후 연구는 이러한 제한점을 보완하고, 명확한 목적 하에 인체 위해성평가 연구를 체계적으로 추진할 필요가 있다.

즉, 미세플라스틱의 인체 위해성에 대한 결론은 아직 확정되었다고 보기 어려우며, 현 단계의 제한적 근거만으로 위해 가능성을 배제할 수도 없다. 이러한 과학적 불확실성을 해소하기 위해서는 위해성평가 목적에 부합하는 표준화된 분석법 확립, 장기·다경로 기반 독성자료 축적, 체내 축적성과 복합독성 고려, 인체 바이오모니터링 연구의 본격적 확대가 필수적이다.

이와 같은 연구 기반이 체계적으로 구축될 때 비로소 미세플라스틱의 인체 위해성에 대한 종합적이고 신뢰도 높은 최종 과학적 결론이 가능해질 것이며, 이를 토대로 한 국가적 관리·대응체계 또한 보다 정밀하고 효과적으로 마련될 것이다.

참고문헌

Deng, Y., Zhang, Y., Lemos, B., & Hu, R. (2017). Tissue accumulation of microplastics in mice and the potential for inducing oxidative stress. Environmental Pollution, 225, 71–77.

ECHA, Guidance on information requirements and chemical safety assessment. https://echa.europa.eu/guidance-documents/guidance-on-information-requirements-and-chemical-safety-assessment

European Food Safety Authority (EFSA). (2016). Scientific Opinion on the presence of microplastics and nanoplastics in food, drinking water and feed. EFSA Journal, 14(12), e04690.

Kim D, Kim D, Kim HK, Jeon E, Sung M, Sung SE, Choi JH, Lee Y, Kang KK, Lee S, Lee S. Organ-specific accumulation and toxicity analysis of orally administered polyethylene terephthalate microplastics. Sci Rep. 2025 Feb 24;15(1):6616. doi: 10.1038/s41598-025-91170-1. PMID: 39994411; PMCID: PMC11850764.

Kim J, Maruthupandy M, An KS, Lee KH, Jeon S, Kim JS, Cho WS. Acute and subacute repeated oral toxicity study of fragmented microplastics in Sprague-Dawley rats. Ecotoxicol Environ Saf. 2021 Nov 11;228:112964. doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.112964. Epub ahead of print. PMID: 34773844.

Lee, S.; Kang, K.-K.; Sung, S.-E.; Choi, J.-H.; Sung, M.; Seong, K.-Y.; Lee, S.; Yang, S.Y.; Seo, M.-S.; Kim, K. Toxicity Study and Quantitative Evaluation of Polyethylene Microplastics in ICR Mice. Polymers 2022, 14, 402. https:// doi.org/10.3390/polym14030402

Lu, X., Xia, Q., Wang, C., Li, J., Ma, W., & Wei, Z. (2018). Polystyrene nanoplastics induce apoptosis and inflammation in macrophage RAW264.7 cells. Ecotoxicology and Environmental Safety, 150, 336–342.

Luo, T., Zhao, W., Ji, S., & Li, C. (2019). Nanoplastics induce developmental toxicity and intestinal dysfunction in zebrafish larvae. Journal of Hazardous Materials, 378, 120726.

Merski, J. A., Hiles, C. D., Johnson, A. M., & Naud, J. (2008). Ninety-day oral toxicity study of polyethylene terephthalate (PET) in Sprague Dawley rats. Food and Chemical Toxicology, 46(12), 3749–3755.

OECD, Guidelines for the testing of chemicals. https://www.oecd.org/en/topics/sub-issues/testing-of-chemicals/test-guidelines.html

Park EJ, Han JS, Park EJ, Seong E, Lee GH, Kim DW, Son HY, Han HY, Lee BS. Repeated-oral dose toxicity of polyethylene microplastics and the possible implications on reproduction and development of the next generation. Toxicol Lett. 2020 May 15;324:75-85. doi: 10.1016/j.toxlet.2020.01.008. Epub 2020 Jan 16. PMID: 31954868.

Pham DT, Kim J, Lee SH, Kim J, Kim D, Hong S, Jung J, Kwon JH. Analysis of microplastics in various foods and assessment of aggregate human exposure via food consumption in korea. Environ Pollut. 2023 Apr 1;322:121153. doi: 10.1016/j.envpol.2023.121153. Epub 2023 Jan 25. PMID: 36709032.

Pivokonsky M, Cermakova L, Novotna K, Peer P, Cajthaml T, Janda V. Occurrence of microplastics in raw and treated drinking water. Sci Total Environ. 2018 Dec 1;643:1644-1651. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.102. Epub 2018 Aug 8. PMID: 30104017.

Priya, M., & Tanushree, D. (2025). Assessment of Human Health Risks from Microplastics in Aquatic Environments. (Specific journal and page numbers not provided in original text, assumed as a hypothetical or very recent publication).

Science Advice for Policy by European Academies (SAPEA). (2019). A scientific perspective on microplastics in food and health. SAPEA.Senathirajah, K., Attwood, S., Bhagwat, G., Carbery, M., Wilson, S., Palanisami, T., (2021). Estimation of the mass of microplastics ingested – A pivotal first step towards human health risk assessment, Journal of Hazardous Materials, 404, Part B.

World Health Organization (WHO). (2019). Microplastics in drinking-water. WHO.

World Health Organization (WHO). (2022). Microplastics in drinking-water: Update and research needs. WHO.

Yang YF, Chen CY, Lu TH, Liao CM. Toxicity-based toxicokinetic/toxicodynamic assessment for bioaccumulation of polystyrene microplastics in mice. J Hazard Mater. 2019 Mar 15;366:703-713. doi: 10.1016/j.jhazmat.2018.12.048. Epub 2018 Dec 15. PMID: 30583240.

제7장 국내외 정책 동향과 향후 방향

미세·나노플라스틱은 해양과 하천, 토양, 대기뿐 아니라 식수·식품과 인체 조직에서도 검출될 만큼 환경 전반에 걸쳐 확산된 대표적 신흥 위해 요인으로 자리 잡았다. 이러한 오염은 생태계 건강을 위협할 뿐 아니라 인체 노출 가능성을 상시적으로 확대시키고 있어, 주요 국가와 국제기구는 플라스틱의 생산·사용·폐기 전 과정을 포괄하는 규제체계와 과학적 근거 구축을 동시에 강화하고 있다. 반면 국내의 제도적 대응은 아직 초기 단계에 머물러 있어 국제 정책과의 격차를 줄이기 위한 전략적 접근이 요구된다. 본 장은 이러한 국내외 동향을 종합적으로 분석하고, 미세·나노플라스틱 문제에 대응하기 위한 향후 정책 및 연구의 방향을 제시한다.

1. 국제 정책 및 연구 동향

최근 유럽연합, 미국, 캐나다, 영국 등 주요 국가들은 화학물질 규제 체계를 기반으로 미세·나노플라스틱 관리를 고도화하고 있다. 특히 유럽연합(EU)은 REACH 규제의 일환으로 2023년 '의도적 첨가 미세플라스틱'의 사용을 광범위한 제품군에서 제한하는 결정을 승인하였다. 이 조치는 화장품, 의료기기, 체외진단 장비, 세제·유지제품, 왁스·광택제, 비료류, 종자처리제, 살충제, 인조잔디 충전재 등 소비자와 산업 전반에 사용되는 제품을 대상으로 하며, 2031년까지 단계적으로 사용 제한과 보고, 라벨 표시를 의무화한다. 이는 세계적으로 가장 포괄적이고 구속력 있는 1차 미세플라스틱 규제체계이다.

미국은 이미 2015년 「Microbead-Free Waters Act」를 통해 세안제와 치약 등 씻어내는 제품에서 플라스틱 마이크로비드를 전면 금지하였으며, 캘리포니아주 등 일부 지역은 규제 대상을 비(非)세척 제품과 생활용 세제까지 확대한 바 있다. 캐나다와 영국 역시 2018년부터 화장품과 생활제품에서 마이크로비드를 금지하였고, 독일과 대만은 미세플라스틱 표준 분석법과 배출 기준을 마련하며 관리의 기술적 기반을 정비하고 있다.

EU는 1차 미세플라스틱뿐 아니라 2차 미세플라스틱을 포함한 비의도적 방출원 관리에도 정책 중심을 두고 있다. 타이어 마모 입자 규제를 위해 Euro 7 기준을 도입하고, 에코디자인 규정(ESPR)을 통해 저마모·고내구성 타이어 개발을 의무화했으며, 섬유 분야에서는 생산자책임재활용(EPR), 그린워싱 방지, 공급망 실사 강화 등 산업 전반의 환경 책임성을 대폭 확대하고 있다. 이러한 정책들은 생산–사용–폐기 전 과정에서 발생하는 비점오염원의 전주기적 관리라는 EU의 전략적 접근이 반영된 것이다.

국제사회는 플라스틱 오염을 기후변화, 생물다양성 손실과 더불어 인류 생존을 위협하는 '3대 글로벌 리스크'로 규정하며 대응을 강화하고 있다. 2022년 제5차 유엔환경총회(UNEA-5.2)는 법적 구속력을 갖춘 '글로벌 플라스틱 협약(Global Plastics Treaty)' 협상개시를 공식 결정하였고, 이후 정부간 협상위원회(INC)는 플라스틱 생산 감축, 우려 화학물질 및 폴리머 규제, 미세플라스틱 포함 제품 관리, 투명성·추적·라벨링 강화 등을 주요 의제로 논의를 이어왔다. 다만 2024년 부산에서 개최된 INC-5와 2025년 제네바 INC-5.2 회의에서는 핵심 조항에서 국가 간 합의에 이르지 못하면서 협상은 지연되고 있다. 그럼에도 UNEP, OECD, Nordic Council, GRID-Arendal, UNCTAD 등 국제기구들은 대체소재의 정의와 평가 기준을 제시하고, 플라스틱 오염 종식을 위한 과학 기반 정책 로드맵을 지속적으로 발표하고 있다.

세계보건기구(WHO)는 2019년 식수 내 미세플라스틱의 위해성 평가를 시작으로, 2022년에는 공기 흡입과 식·음료 섭취까지 포함한 포괄적 보고서를 발간했다. WHO는 현재까지 축적된 연구 결과를 바탕으로 인체 대상 장기 추적 코호트 연구와 신뢰성 있는 생체지표 개발을 향후 가장 시급한 연구 과제로 제시하고 있다.

또한, 국제 환경독성학 및 보건 분야는 독성동태과 복합 노출평가, 혈액–

뇌 장벽(BBB) 및 태반 장벽 통과 기전 등 보다 정밀한 인체 관련성을 규명하는 연구로 확장되고 있다. 이는 미세·나노플라스틱의 신경 독성 및 발달 독성 가능성을 심층적으로 규명하기 위한 국제 학계의 핵심적인 움직임이다. EU의 '호라이즌 유럽(Horizon Europe)' 등 대규모 연구 프로그램에서도 환경 및 인체 위해성을 통합적으로 평가하는 모델 개발을 중점 연구과제로 채택함에 따라, 정책과 과학을 연결하는 국제적 연구 인프라 구축이 가속화되고 있다.

2. 국내 정책 및 연구 동향

국내에서도 미세·나노플라스틱 문제의 심각성에 대한 공감대가 확대되면서, 일부 법·제도 개선이 이루어지고 있다. 2023년 「플라스틱 자원순환 촉진법」 개정과 생활화학제품 내 마이크로비즈 금지 조치가 시행되었고, 국회에는 「미세플라스틱 저감 및 관리에 관한 특별법안」이 발의되었다. 2024년에는 부처 공동 협의체가 구성되어 미세플라스틱 저감 정책을 논의하기 시작했다.

그러나 국내의 제도적 기반은 여전히 제한적이다. 미세·나노플라스틱의 법적 정의가 마련되어 있지 않으며, 식품·식수·대기 등 매체별 허용기준과 감시 체계도 부재하다. EU가 규제하는 인공잔디 충전재, 종자 코팅제, 산업용 연마제 등 의도적 첨가 미세플라스틱에 대한 국내 기준 또한 마련되지 않았다. 타이어 마모, 합성섬유 세탁 등 2차 미세플라스틱의 주요 발생원 역시 자율 가이드라인 중심으로 관리되고 있어 정책적 공백이 존재한다.

그럼에도 국내 연구진의 학술적 역량은 국제적으로 높은 평가를 받고 있다. 한국은 총 논문 수 기준으로는 중국·미국 등과 비교해 규모 면에서는 다소 뒤처질 수 있으나, 연구의 질적 수준과 독창성 측면에서는 세계 선두 그룹에 속하는 성과를 다수 확보하고 있다. 특히 나노플라스틱의 인체 독성 기전 규명 분야는 한국이 국제적으로 가장 돋보이는 영역이다. 2024년 국내 연구팀은 나노플라스틱이 모유의 지방 조성을 변화시키고, 비만과 연관된 지질대사를 교란한다는 사실을 세계 최초로 규명하였다. 이는 나노플라스틱의 '모체에서 자녀로 이어지는 영향'을 다룬 선도적 연구로, 국제 학계에서도 크게 주목받고 있다. 같은 연구팀이 2021년에 발표한 임신기 나노플라스틱 노출의 뇌 발달 이상 유발 연구는 WHO가 시급한 연구 분야로 강조하는 '발달·신경 독성' 연구의 핵심적인 선행 근거로 활용되고 있다.

또한 국내 연구진이 주도한 미세플라스틱 분야 리뷰 논문은 Google Scholar 기준 인용 횟수 100회를 넘어서며, 학계·산업계·정책 영역에서 폭넓게 참조되는 핵심 문헌으로 자리 잡았다. 연안 해역 연구에서도 한국은 FT-IR 등 고도 분석기술을 활용해 20 μm 수준의 미세플라스틱까지 정밀 식별하고, 해류 모델링과 결합한 고해상도 공간 분석 연구를 수행하는 등 기술적 정밀성과 분석 역량에서 국제적 경쟁력을 갖추고 있다.

이처럼 한국은 제도적 대응은 미흡하지만, 미세·나노플라스틱 연구의 질적 수준은 특정 분야에서 이미 세계적인 수준에 도달하였으며, 향후 정책 기반 구축의 중요한 과학적 자산이 될 수 있다. 이러한 과학적 강점을 정책과 연계하는 것이 국내 대응의 핵심 과제가 된다.

3. 향후 과제 및 대응 방향

향후 미세·나노플라스틱 문제에 대한 대응은 과학, 정책, 산업, 시민사회가 유기적으로 연계된 통합전략을 통해 이루어져야 한다. 과학 기반 측면에서는 국제 표준에 부합하는 분석 기술의 정립, 인체 총노출량 평가 모델의 구축, WHO와 EU가 강조하는 장기 코호트 연구와 바이오마커 개발 등의 기초 인프라 확보가 중요하다. 특히 나노플라스틱이 첨가제·환경오염물질을 흡착하여 복합독성을 일으킬 수 있다는 사실이 지속적으로 확인되고 있어, 첨가제 및 오염물질의 결합에 따른 다중노출 기전 연구는 정책적 위험평가 체계의 핵심 기반이 될 것이다.

정책 측면에서는 EU ECHA 수준의 의도적 첨가 미세플라스틱 규제를 단계적으로 도입하고, 타이어·합성섬유 등 2차 미세플라스틱 주요 발생원에 대한 산업별 맞춤형 관리 기준을 마련해야 한다. 더불어 UNEP 글로벌 플라스틱 협약 논의와 연계하여 생산–유통–사용–폐기 전 과정을 포괄하는 전주기 관리 전략을 구축할 필요가 있다. 이러한 관리 전략은 단순한 '탈플라스틱' 캠페인 중심이 아니라, 플라스틱의 물질 순환 구조 전체를 조정하는 정책적 접근이어야 한다.

사회적 측면에서는 위해소통 체계의 정립과 시민 참여 확대가 중요하다. 미세·나노플라스틱 문제는 사회적으로 불안과 관심이 동시에 높은 영역이므로, 과장된 공포를 지양하고 과학적 사실에 기반한 투명한 정보 제공이 필요하다. 시민과학 프로그램을 통해 지역 단위 모니터링을 강화하고, 학교·지역사회 교육을 통해 환경 리터러시를 높이는 등 국민 참여형 대응 체계를 구축해야 한다.

맺음말

미세·나노플라스틱 문제는 단순한 환경오염을 넘어 인체 건강, 사회경제 시스템, 국제 규범 전반에 영향을 미치는 복합적 도전 과제로 부상하고 있으며, 국제사회는 강력한 규제 도입과 전주기 관리체계 구축을 빠르게 추진하고 있다. EU와 WHO를 중심으로 제품의 전 생애주기 관리, 고도화된 위해성평가 체계 마련, 규제와 인센티브의 병행 등이 핵심 정책 전략으로 추진되고 있으며, 국내에서도 법적 정의 정립, 매체별 허용기준 설정, 환경·인체 기반 위해성평가 체계 구축이 시급한 과제로 제기되고 있다. 이러한 정책적 대응은 과학적 근거의 축적과 긴밀히 연계되어야 실효성을 확보할 수 있다.

현재까지의 연구는 다양한 노출 경로와 체내 축적 가능성을 실험 수준에서 비교적 일관되게 확인하였으나, 인체 기반의 장기 역학연구와 정량적 노출평가 자료는 여전히 제한적이다. 향후에는 인체 노출 실태를 정밀하게 규명하고 건강영향을 장기적 관점에서 평가할 수 있도록 독성동태 연구, 바이오마커 발굴, 대규모 추적연구 등으로 확장될 필요가 있다. 이를 통해 독성 기전과 실제 건강영향 사이의 인과관계를 과학적으로 규명하는 것이 무엇보다 중요하다.

특히 한국은 제도와 정책 기반에서는 아직 미흡한 점이 있으나, 연구 역량 측면에서는 이미 세계적 수준의 질적 성과를 확보하고 있다. 나노플라스틱의 인체 독성 기전을 세계 최초로 규명한 연구, 국제적으로 높은 인용도를 기록한 리뷰 논문, 고도 분석기술을 활용한 정밀 해역 연구 등은 국내 연구진이 미세·나노플라스틱 분야에서 과학적 선도성을 확보하고 있음을 보여준다. 이러한 연구 기반은 향후 국내 정책 설계와 국제 협상 과정에서 중요한 전략적 자산으로 활용될 수 있을 것이다.

궁극적으로 중요한 것은 과학적 사실이 사회적 공감과 실천으로 이어지는 일이다. 국민에게 정확하고 투명한 정보를 제공하고, 막연한 불안이나 과장된 공포를 배제한 근거 기반의 현실적 대응 방안을 제시함으로써 사회 전체의 능동적 참여를 이끌어야 한다. 일회용 플라스틱 사용 저감, 재활용 확대, 생활습관 개선 등 시민의 실천은 정책과 연구의 성과를 뒷받침하는 필수적 요소이다. 지속가능한 미래를 위해서는 과학, 정책, 산업, 시민이 함께 참여하는 통합적 대응체계를 구축해야 하며, 이를 실질적이고 실행력 있는 전략으로 발전시키는 것이 앞으로의 핵심 과제가 될 것이다.

발행처 한국환경한림원
서울특별시 종로구 창덕궁1길 13 원서빌딩 307호
T. 02-3453-7405 F. 02-3453-7407

발행일 2025년 12월 3일

디자인 엘디자인

ⓒ Korea Academy of Environmental Science