ISSN. 2465-8456

2019 March | Vol. 5

03

융합연구리뷰

Convergence Research Review

권순박 ((주)디에이피 대표이사)

빅데이터 기반 지능형 미세먼지 관리기술

안윤주 (건국대학교 환경보건과학과 교수)

미세플라스틱, Emerging Pollutants

융합연구정책센터
Convergence Research Policy Center

CONTENTS

01 편집자 주

03 빅데이터 기반 지능형 미세먼지 관리기술

21 미세플라스틱, Emerging Pollutants

융합연구정책센터
Convergence Research Policy Center

융합연구리뷰 | Convergence Research Review
2019 March vol.5 no.3

발행일 2019년 3월 4일

발행인 김주선

편집인 최수영·권영만

발행처 한국과학기술연구원 융합연구정책센터
02792 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5
Tel. 02-958-4980 | http://crpc.kist.re.kr

펴낸곳 주식회사 동진문화사 Tel. 02-2269-4783

빅데이터 기반 지능형 미세먼지 관리기술

매년 봄, 황사와 함께 찾아오던 미세먼지는 어느 순간 국민생활에 매우 큰 영향을 미치는 환경문제가 되었다. 외출 전 미세먼지 농도를 확인하는 것은 이미 일상생활이 되었으며, 길거리에서 미세먼지 마스크를 착용한 사람을 마주치는 일이 더 이상 낯설지 않게 되었다. 미세먼지는 점차 농도가 짙어지고 발생주기는 짧아지고 있으며, 이제는 봄뿐만 아닌 사계절 내내 일상 속에서 미세먼지를 걱정해야하는 상황이 되었다.

이에, 본 호 1부에서는 미세먼지 저감 기술과 더불어 그 중요성이 대두되는 미세먼지 관리 기술에 대해 알아보고, 특히 4차 산업혁명 시대의 핵심인 빅데이터를 활용한 미세먼지 관리 방안에 대해 알아보았다. 미세먼지 빅데이터는 미세먼지 측정값과 기상정보를 위주로 구축하기보다 미세먼지와 유관되는 직간접 요인을 함께 모니터링 하여 데이터베이스(DB)화 하는 것이 적절하며, 이를 통해 미세먼지 정책의 효과에 대한 근거를 구축할 수 있을 것으로 기대된다.

본 호를 통해 미세먼지를 일상생활 속에서 관리하는 사례로 우리가 자주 이용하는 지하철 및 역사 내 미세먼지 관리 방안에 대해 살펴보고자 하였다. 이러한 연구를 통해 외부 공기질 뿐만 아닌 지하시설 및 내부 공공이용시설의 미세먼지 빅데이터 수집을 통해 스마트한 대응으로 보다 쾌적한 이용이 가능해질 것으로 기대된다.

미세플라스틱, Emerging Pollutants

실생활 속 눈길 닿는 곳마다 플라스틱이 사용된 제품을 마주하는 것이 어렵지 않은 플라스틱 시대(plastic age)가 도래한지 수십 년이 지났다. 생활 속 많은 곳에서 편리함을 제공하던 플라스틱이 이제는 사람들의 삶과 환경에 불편함을 유발하는 신종 오염물질(emerging pollutants)이 되어 돌아오고 있다. 작년 11월 인도네시아 해안에서 발견된 향유고래의 사체에서는 약 6킬로그램의 플라스틱 쓰레기가 가득했고, 태국에서 발견된 죽은 거북이의 뱃속에서도 플라스틱이 발견되어 전 세계 많은 사람들의 경각심을 일으켰다.

이에, 본 호 2부에서는 언젠가 우리의 식탁으로, 체내로 들어올 수도 있는 미세플라스틱에 대해 알아보고, 국내외 미세플라스틱 연구동향과 환경 중 분포현황에 대해 살펴봄으로써 신종 오염물질에 대한 이해도를 높이고자 하였다. 또한 미세플라스틱의 생태계 영향을 분석하여 미세플라스틱 또는 나노플라스틱이 수생태계 생물종에 미치는 영향 및 수서생태계 먹이망 전이, 토양생태계 영향에 대하여 고찰하였다.

본 호를 통해 눈에 보이지는 않지만 실생활에 큰 영향을 주는 미세오염원, 그 중 체내유입 가능성이 미세먼지만큼이나 커 관심을 가져야할 미세플라스틱에 대해 살펴보았다. 또한 이러한 연구를 통한 과학적 증거(scientific evidence)의 축적과 도출되고 있는 연구결과들을 잘 활용하여 미세플라스틱을 환경 중에서 어떻게 관리할 것인지 실현가능한 관리방안 수립이 이루어지길 기대해본다.

융합연구리뷰

Convergence Research Review 2019 March vol.5 no.3

01

빅데이터 기반 지능형 미세먼지 관리기술

권순박 ((주)디에이피 대표이사)

I 서론

1.1 미세먼지 문제

우리나라의 미세먼지 문제는 여러 전문가들의 지적과 마찬가지로 최근 갑자기 악화되었다고 볼 수는 없으며 오히려 점차 개선되는 추세라고 볼 수 있다. 그러나 황사와 중국에서 유입되는 오염물질 등 외부에 의해 야기되는 미세먼지 문제는 그 정도의 차이는 있으나 부인할 수 없는 주요한 원인이 되고 있다. 전문가를 포함한 대다수 국민이 미세먼지에 대해 불안해하는 이유는 미세먼지 농도가 유해한 수준이고 국민의 안전하고 쾌적한 삶에 대한 기대 수준이 과거에 비해 높아졌기 때문이다(김용표, 2018). 미세먼지 문제에 대한 국민 불안을 해소하려면 정부는 국민에게 미세먼지를 해결할 수 있다는 희망을 보여줘야 하며, 단기적 대책과 함께 장기적 로드맵을 제시해야 한다.

본 기고문에서는 미세먼지 문제를 데이터 중심으로 기술하고자 한다. 여기서 데이터는 미세먼지와 미세먼지를 유발하는 다양한 요소에 대한 실측데이터를 의미하며, 장기적이고 체계적으로 수집되는 빅데이터(Big-data)라고 생각할 수 있다. 구체적으로 저자가 관여하고 있는 지하철 미세먼지 관리 사례와 동네별 미세먼지 정보 활용 방안 및 이를 통해 제공할 수 있는 서비스 내용을 중심으로 글을 풀어가고자 한다.

1.1.1 미세먼지란?

데이터 기반 미세먼지 관리방안에 대해 언급하기 전, 우선 미세먼지가 무엇인지 정확히 이해할 필요가 있다. 미세먼지는 공기 중에 부유하는 크기(직경)가 10㎛(마이크로미터, 1/1,000,000m)보다 작은 액체상 또는 고체상 물질(Particulate Matter less than 10㎛; PM10)로 정의된다. 따라서 PM2.5란 직경 2.5㎛이하의 모든 공기 중 부유입자를 말하는 것이다. 우리는 이를 미세먼지(PM10)와 구분하여 초미세먼지(PM2.5)라고 칭한다.

10㎛ 보다 큰 먼지는 우리의 호흡기에 깊숙이 침투하기 전 입안의 점액, 코털, 상기도에서 충분히 걸러지지만, 10㎛ 이하의 입자는 폐까지 도달할 수 있다. 미세먼지가 기관지에 쌓이면 가래가 생기고 기침이 잦아

지며, 기관지 점막이 건조해지면서 세균이 쉽게 침투하고, 만성 폐질환이 있는 사람은 감염성 질환에 더욱 취약해진다. 특히, 초미세먼지는 폐포를 통해 혈관에 침투해 염증을 일으킬 수 있는데, 이 과정에서 혈관이 손상되면서 협심증, 뇌졸중 등 심혈관질환의 원인이 되기도 하며, 미세먼지가 쌓이면 산소 교환을 어렵게 만들어 질환 악화의 원인이 된다. 미세먼지가 뇌로 침투하면 뇌 안에서 중금속이 산화하면서 염증을 유발하게 되어 뇌혈관을 딱딱하게 만들어서 뇌졸중 위험도가 높아지고, 뇌 부위를 파괴해 치매나 파킨슨병을 일으킬 수도 있다. 최근 발표된 연구결과에 따르면 초미세먼지로 인한 사망 인구는 1999년 350만 명에서 2015년 420만 명으로 증가한 것으로 추정되는 결과가 나타났다(Cohen et al., 2017). 이러한 미세먼지의 크기에 대한 연구와 인체 유해성 연구가 활발해지면서 학계에서는 폐의 더 깊은 부분(허파꽈리)까지 먼지가 침투하여 오랜 기간 침적되어 암을 유발하거나, 혈액과 산소 교환 시 인체에 침투하여 해를 가하는 결정적 크기를 2.5㎛ 보다 작은 크기로 한정하면서 이후 초미세먼지로 한정하였고, 대부분의 국가에서 초미세먼지를 규제대상 물질로 정의하게 되었다.

1.1.2 미세먼지 빅데이터

이제 미세먼지 빅데이터에 대해 이야기해 보고자 한다. 빅데이터는 수집된 데이터의 종류나 크기만으로 결정되는 것이 아니라 시간이나 공간상으로 변화하는 측정값들이 체계적으로 데이터베이스(database)화 되어 있으며, 지속적으로 수집되어 확장될 수 있는 경우로 생각하기로 한다. 또한, 상관성이 거의 없는 단순한 현상에서 마구 수집된 데이터의 집합체가 아니라 데이터 상호간에는 적어도 그 상관성을 추론할 수 있거나 당장은 정확히 알 수 없지만, 그 상호작용으로 영향을 받을 수 있을 것으로 예상되는 데이터로 구성되어야 한다. 만일 미세먼지와 관련된 빅데이터를 구성한다면 저자는 기본적으로 미세먼지 농도 데이터에 주목하겠지만, 그 외 대기오염 데이터, 기상정보 데이터, 지리/지형정보 데이터, 미세먼지 오염원 데이터(발전소 운영 데이터, 교통량 데이터, 전력소비량 데이터 등) 등을 함께 선택하여 구성할 것이다. 더 자세한 미세먼지 빅데이터는 본론에서 언급하기로 하고, 여기서는 미세먼지 농도 데이터에 관해 조금 더 언급하기로 한다.

미세먼지 농도는 단위부피의 공기($1m^3$)에 포함되어 있는 미세먼지(PM10)의 총 질량으로 표현된다. 즉, $1m^3$의 공기에 10㎛ 이하의 미세먼지가 몇 g(그램)이나 포함되어 있는가를 나타낸 값이다. 국내의 대기환경 24시간 미세먼지 기준이 100㎍/m^3 이하(환경부)인데 이는 부피가 $1m^3$인 공기 중 부유하는 미세먼지의 총 질량이 50㎍ 보다 작아야 됨을 의미한다. 따라서 미세먼지 관리에 있어 미세먼지의 질량 또는 질량농도를 측정하는 일은 매우 기본적이며 중요한 의미를 가지게 된다. 그러나 실제 미세먼지의 질량 또는 질량농도를

측정하는 일은 간단하지 않다. 아래 그림(그림 1)에 미세먼지를 측정할 수 있는 측정방법과 장치를 제시하였다. 질량농도를 측정하는 표준이 되는 방식은 공기를 흡입하면서 공기 중 먼지를 필터로 걸러내고, 필터에 포집된 먼지의 질량을 저울로 측정하는 방식으로 미세먼지 질량농도는 포집된 먼지량을 흡입된 공기의 부피로 나누어주면 된다(중량법). 통상 중량법으로 미세먼지 질량농도 데이터를 얻기 위해서는 짧게는 6시간 길게는 24시간 동안 공기를 흡입하여야 하는데 이러한 데이터는 실시간으로 변화하는 미세먼지 정보를 제공할 수 없는 단점이 있다. 이를 보완하는 방법으로 베타선 흡수법이 사용되고 있는데, 필터에 포집된 먼지를 저울로 측정하는 대신 포집된 먼지의 질량에 따라 통과한 베타선의 감쇄정도를 측정하여 보다 빠른 시간에 농도 데이터를 제공할 수 있는 방식이다. 현재 이 방법의 측정 장비가 우리나라 대기오염측정망에 적용되고 있으며 1시간 단위로 미세먼지 데이터를 제공하고 있다(AirKorea). 중량법과 베타선 흡수법을 제외한 다른 측정방식으로 대표적 측정기는 광산란(light scattering)을 측정하는 방식으로 미세먼지에 조사된 빛(레이저)이 미세먼지에 의해 산란(scattering)되는 원리를 이용한 방식이다. 그러나 이러한 빛을 이용하는 방식은 입자의 존재여부나 그 형상(크기)을 추정할 수는 있지만, 질량과 직접적으로 연관되는 입자의 밀도(density) 정보를 제공해주지 못한다. 즉, 광산란 방식의 측정기를 통해 얻어지는 데이터는 질량농도로 바로 환산할 수 없는 한계를 가지게 된다. 만일 우리가 측정하는 먼지가 모두 동일한 성분이며 그 밀도가 알려져 있다면, 광산란 방식으로 측정된 크기와 개수 정보로 부피를 구하고 밀도를 곱해 질량으로 환산할 수 있지만, 통상 다양한 종류의 먼지가 엉켜 있는 공간에서는 개별입자의 밀도를 알고 이를 반영할 수 있는 것은 매우 힘든 일이다.

그림 1 미세먼지 측정기기의 분류

(산업기술연구소 세미나(권순박) 2016)

최근에는 미세먼지 측정에 간이센서 방식이 사용되면서 소형화되고 IoT와 결합된 공기질 측정기 보급이 증가하고 있는 추세이다. 이러한 간이측정 방식은 소형 광산란 측정방식을 적용하기도 하지만 아무래도 개별 입자의 특성을 정확히 파악할 수 있는 신뢰도를 가지지 못한다. 더구나, 앞선 광산란 방식의 측정기와 마찬가지로 측정값을 질량으로 환산하는 것은 더욱 어려운 일이다. 다만, 다수의 간이측정기로 구축된 빅데이터는 미세먼지의 변화추이를 살펴보는데 유용한 정보를 제공할 수 있다.

그림 2 기존 IoT기반 미세먼지 센서와 대기오염 측정망 형식승인 장비인 베타선 흡수법 측정기

II 본 론

2.1 데이터 기반 미세먼지 관리

미세먼지와 관련된 빅데이터를 구축하고자 한다면 기본적으로 신뢰할 수 있는 미세먼지 농도데이터(혹은 크기나 개수 데이터) 확보와 미세먼지의 확산과 이동에 영향을 주는 기상요소(풍속, 풍향, 온도, 습도, 강우, 강설 등) 및 대상공간의 특성, 오염원 발생원에 대한 정보데이터 등으로 구성되어야 한다. KT는 보유 ICT망을 활용하여 현재 수도권 등 2,000여개 지점에 미세먼지 간이센서 측정망을 구축하여 미세먼지 정보서비스를 제공하고 있다(Air Map Korea 프로젝트). 향후, 서울 및 6대 광역시에 공기질 측정망을 보다 촘촘하게 구축하여 공기질 빅데이터를 구축하는 사업으로, 이를 통해 미세먼지 저감 정책을 지원하는 계획을 가지고 있다. 세부적인 활용방안으로 정부 및 지자체의 살수청소차 운행, 천연 미세먼지 저감대책으로 활용 중인 이끼 설치장소 선정, 미세먼지 확산 예측 알림 서비스를 제공한다고 한다. 이러한 빅데이터 시스템 구축이 실질적으로 성공하기 위해서는 미세먼지 측정값이 정확해야하는 전제가 필요하다. 센서기반 간이측정법의 경우 저비용으로 실시간 미세먼지 정보를 수집할 수 있는 IoT시스템 구성에 최적방식이라고 할 수 있다. 다만, 측정값에 대한 신뢰성이 낮아 환경부에서는 2019년 시행되고 있는 미세먼지 특별법에 간이센서 성능인증 방안을 포함하여 실행하고 있으며, 올 하반기부터는 측정데이터를 공개적으로 활용할 경우 일정 성능이상을 입증하여야 한다(환경부, 2019). 일례로 많은 지자체와 공공기관이 앞 다투어 센서기반 측정망 구축을 시도했으나, 측정값을 활용한 서비스에 대한 구체적 콘텐츠 부재와 측정값 신뢰성 문제로 어려움을 겪고 있는 실정이다(JTBC 2018, 뉴스핌 2018).

앞서 언급한 바와 같이 미세먼지 빅데이터를 미세먼지 측정값과 기상정보를 위주로 구축하기 보다는 미세먼지와 유관되는 직간접 요인을 함께 모니터링하여 데이터베이스(DB)화 하는 것이 적절하다. 일례로, 특정지역 미세먼지 빅데이터를 수집하고자 한다면, 아래와 같이 획득 가능한 다양한 미세먼지 유관 데이터를 포함시킬 수 있다. 단순히 빅데이터를 수집하는 것이 목적이 아니라, 빅데이터를 활용해 제공할 수 있는 서비스를 동시에 고민하여야 한다. 빅데이터 서비스는 수집된 데이터에 대한 전처리, 가공, 저장, 분석(예측)

과정으로 도출된 결과를 서비스를 제공받는 수요자 입장에서 도출하여야 한다. 일례로, 우리 동네 혹은 우리 집 근처의 미세먼지 농도정보를 제공하거나 내일 야외활동을 할 수 있는지에 대한 사전 정보를 제공하는 것이다. 또한, 정부에서는 살수차를 언제 어떠한 경로로 운영하는 것이 효율적인지 판단하고, 차량2부제를 실시할 경우 미세먼지 저감효과가 얼마나 있는 것인지 등 다양한 미세먼지 정책의 효과에 대한 근거(의사결정체계)를 제공하는 서비스가 요구된다.

그림 3 미세먼지 빅데이터를 활용한 미세먼지 스마트 서비스 체계

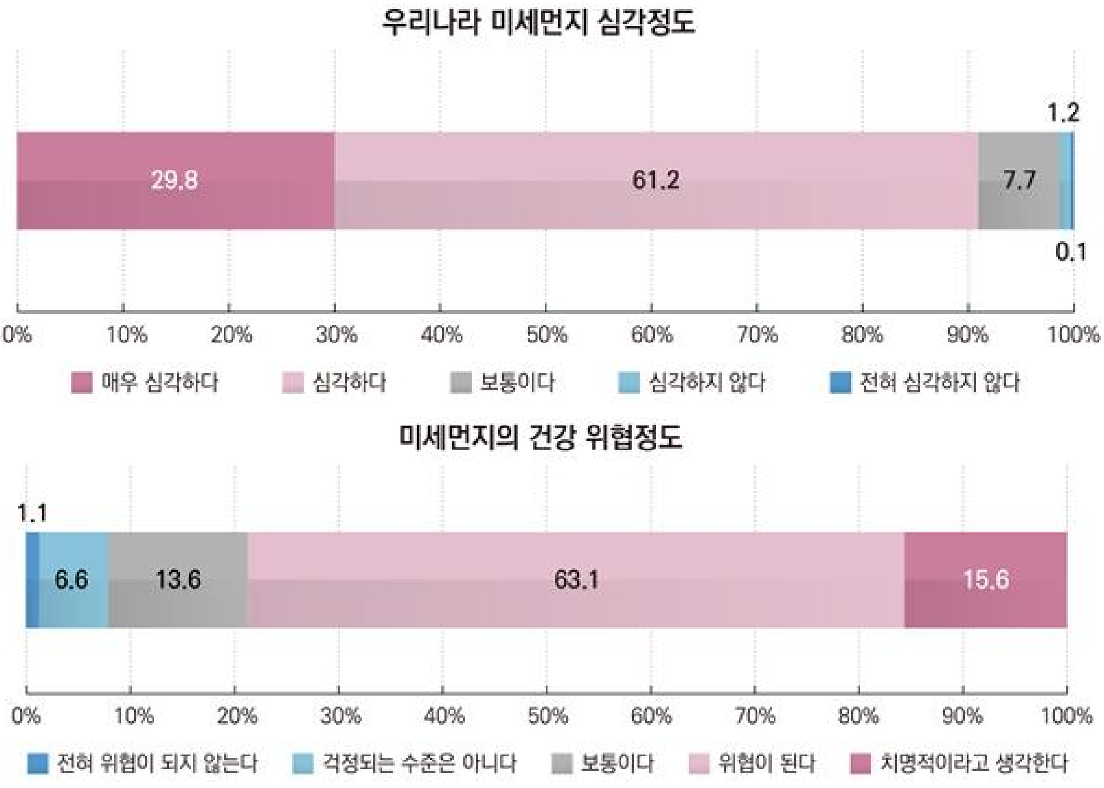
(부천시 2019)

2.1.1 빅데이터 활용 서비스

1) 미세먼지 문제 인식

미세먼지 문제발생이 단기간에 갑자기 일어난 것이 아니듯, 미세먼지 문제해결도 단기간에 이루어지기 어렵다. 미세먼지 문제해결을 위해 정부는 단기적 대책과 장기적 대책을 병행하여 추진해야 하며 모든 대책은 피해 당사자인 국민이 공감할 수 있어야 한다. 그림 4는 미세먼지 문제에 대한 시민의견을 보여주고 있다(환경부 보도자료 '18.10.10). 국민 천여 명을 대상으로 미세먼지에 대한 인식을 조사한 결과, 응답자 대다수가 미세먼지 오염도가 심각(91%)하고, 건강에 위협이 된다(78.7%)고 인식하는 것으로 나타났다. 미세먼지 오염도가 심각하다고 생각하는 경우, 건강 위협으로 인식하는 비율도 높게 나타났다.

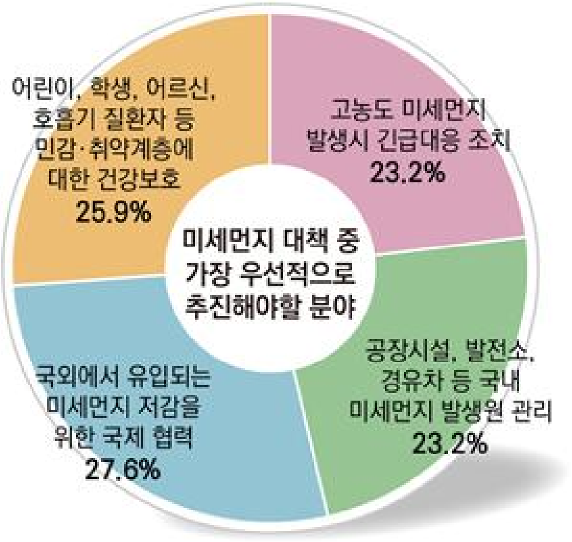
그림 4 미세먼지 인식조사 설문결과 - 심각성과 건강위협 정도



(환경부 2018)

미세먼지 문제에 대한 심각성과 건강 위협정도에 대한 설문결과를 바탕으로 미세먼지 대책 중 가장 우선적으로 추진해야 할 분야로는 국외유입 미세먼지 저감을 위한 국제협력(27.6%), 민감 취약계층에 대한 건강보호(25%), 국내 오염원 관리(23.2%), 고농도시 긴급대응조치(23.2%)가 모두 유사한 수준으로 높게 나타났다(그림 5).

그림 5 미세먼지 인식조사 설문결과 – 우선추진 분야

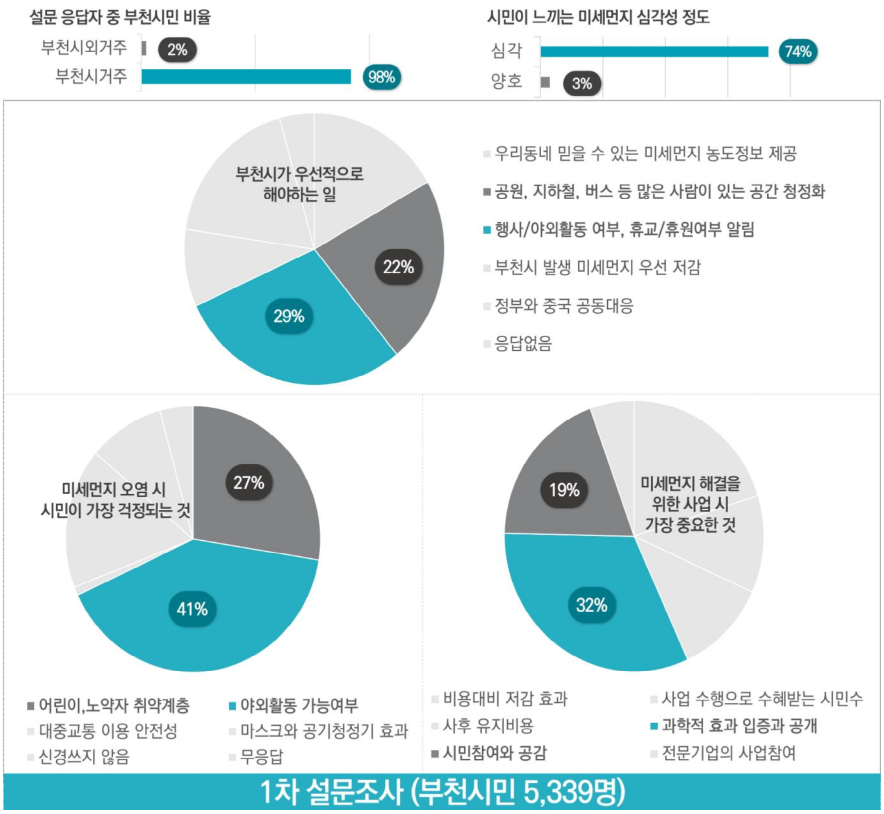


(환경부 2018)

2) 빅데이터 활용 서비스 제공방향

미세먼지 문제에 대한 다른 설문조사 결과(그림 6)를 살펴보면, 정부가 우선적으로 추진해야 하는 일과 사업 분야로 신뢰할 수 있는 미세먼지 농도정보 제공과 야외활동 가능여부 정보를 원하고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 요구에 적절하게 대응하는 빅데이터 활용 서비스를 제공하는 것이 중요하다.

그림 6 미세먼지 설문조사 결과 – 정책 및 사업우선순위



(부천시 2019)

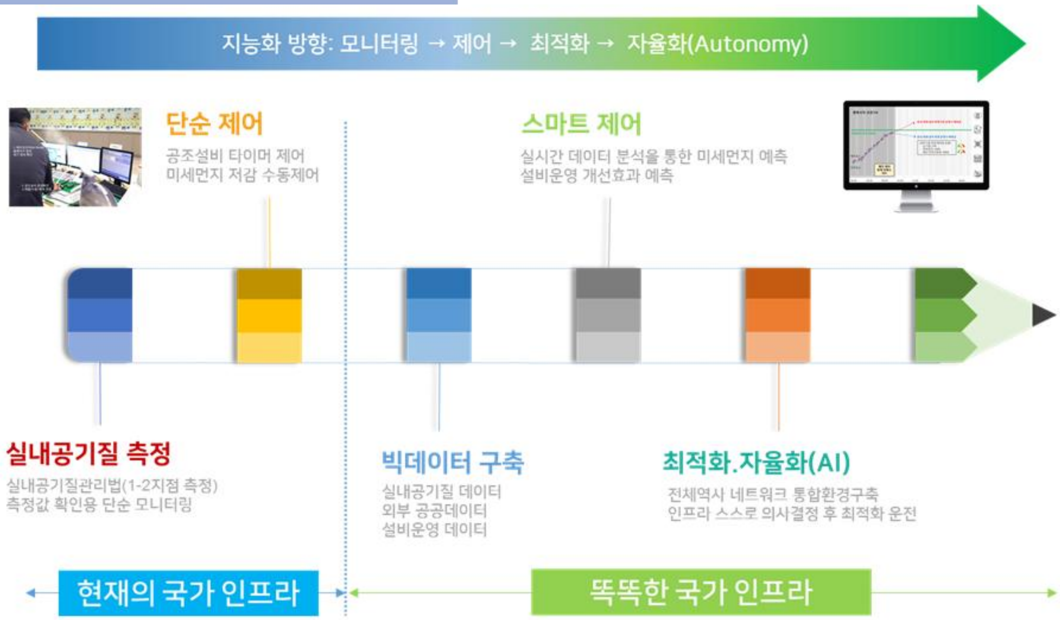
2.1.2 지하철 미세먼지 관리

1) 스마트한 대응필요

서울 지하철의 경우 1970년대에 집중 건설되어 현재 빠르게 노후화가 진행되고 있다. 노후화된 지하역사 인프라는 공조 설비의 경우 타이머에 기반한 단순 가동으로 제어되고 있으며, 실내 공기질 관리 또한 설비제어에 활용되지 못하며 단순하게 측정되고 있다. 현재 대표적 공공시설물인 서울 지하철 및 대심도 터널 지하역사 평균 미세먼지농도는 환경기준 초과사례가 심화되고 있으며, 환기만으로 해결하기 어려운 실정이다.

또한, 노후화된 환기구와 출입구를 통해서 언제든지 도로 오염물질이 지하로 유입될 가능성이 높으며, 승강장 등 시설물의 노후화와 관리의 어려움이 지하철 공기질 저하로 이어지고 있다. 지하철 노후화 시설 교체 및 개보수는 비용 상승으로 진행에 어려움이 있다. 이에 지하철 미세먼지 문제를 해결할 수 있는 스마트 기술에 대해 설명하고자 한다. 그림 7은 기존 지하철 역사 미세먼지 문제를 해결하기 위한 지능화방안을 보여주고 있다. 미세먼지 관련 지하철 빅데이터 체계 구축을 통해 가용할 수 있는 기존 설비자원을 최대한 활용하고, 미세먼지를 직접적으로 저감시킬 수 있는 장치 등을 추가로 설치하여 효율적 운영이 가능한 방식이며 궁극적으로는 축적된 데이터를 통해 자율적으로 관리되는 시스템을 지향한다.

그림 7 지하철 공기질 관리 지능화 단계



2) 스마트 미세먼지 관리시스템

지하역사 실내공기질의 지능화 관리를 위한 스마트 미세먼지 관리시스템은 공기질 모니터링, 대기환경/교통정보, 미세먼지 집진장치, 환기량 제어 요소에 대한 지능형 제어를 기반으로 하며 지하역사 미세먼지를 실질적으로 저감할 수 있는 기술로 구성되어 있다. 공기질 관련 정보는 환기구, 대합실, 승강장 등에 각각

설치된 공기질 측정기를 통해 실시간으로 수집되며, 지하철역 인근 대기 및 도로변 국가측정망 데이터 및 도로 교통량 정보를 Open API 형태로 수집하게 된다. 더불어 지하철역 공조 설비의 운영정보 데이터를 함께 수집하여 지하철 미세먼지 빅데이터로 구축되게 된다. 수집된 미세먼지 빅데이터를 통해 외부와 지하철역 실내의 공기질 상관관계를 분석하고, 열차운행 및 승객 수에 따른 미세먼지 발생특성, 저감장치 운영효과, 환기장치 가동여부 결정 등 주요한 원인분석과 설비 운영을 위한 의사결정을 지원하게 된다.

지하철역에 설치되어 운영되는 미세먼지 저감장치는 지하철 미세먼지 발생특성 분석결과에 따라 주로 승강장 터널에서 발생하여 승강장안전문(PSD)을 통해 실내로 유입되고, 다시 확산되어 대합실까지 이동하기 때문에 승강장에서 터널발생 먼지를 저감하는 것이 효과적이다(남궁형규 등, 2016; Kwon et al., 2015; Kwon et al., 2016). 또한 보행자에게 불편을 유발하지 않는 벽면형 집진장치와 승강장 계단하부 유휴공간에 설치 가능한 바닥집진배기 장치를 적용하여 승객불편을 최소화 할 필요가 있다(남궁형규 등, 2017).

지하철 공기질 빅데이터를 통해 획득된 정보는 인공지능 해석을 통해 미세먼지 농도를 사전에 예측(Park et al., 2018)하여, 저감장치를 가동하거나 환기량을 자동으로 설정하여 가동시킬 수 있는 인공지능 임베디드(Artificial Intelligence embedded) 제어장치가 적용된다. 스마트 미세먼지 관리시스템은 이용자에게는 신뢰성 있는 미세먼지 정보를 제공하며, 운영자에게는 설비제어를 위한 미세먼지 정보를 제공하게 된다.

그림 8 지하철 스마트 공기질 관리시스템 구성

스마트 공기질 관리시스템의 핵심은 다양한 공기질 데이터와 설비운영 데이터를 기반으로 지하역사 미세먼지 농도예측, 설비운영 시 저감효과를 통해 최적의 운영조건을 제시하는 머신러닝(machine learning) 알고리즘 소프트웨어이다. 실증역사인 강남역에 스마트 공기질 측정기와 저감장치, 제어기가 구축되었으며, 스마트 공기질 측정기의 측정값이 기록되는 데이터베이스가 구축되어 있다. 구축된 데이터베이스에 쌓이는 데이터(INPUT)를 활용하여 1시간 뒤 미세먼지 예측값(OUTPUT)을 도출할 수 있는 알고리즘 개발을 목표로 하고 있다. 미세먼지 예측모델은 순환신경망(Recurrent Neural Network: RNN) 형태를 가진 심층구조 인공신경망을 미세먼지 예측모델의 은닉층으로 구성하였으며, RNN의 경우 gradient의 지속적인 곱으로 인한 vanishing의 문제를 해결하기 위하여 LSTM(Long Short-Term Memory) cell을 활용하여 예측모델의 은닉층을 구성하였다. 미세먼지 예측률 80% 이상의 예측모델 개발을 위하여 현재도 데이터베이스에 학습데이터를 쌓고 있으며, 샘플데이터를 토대로 예측모델 알고리즘 및 실시간 입출력 알고리즘을 적용하였다(권순박, 2018). 한국정보화진흥원(NIA)의 스마트 SOC 실증사업으로 수행되었으며, 현재 서울교통공사 2호선 강남역에 스마트 미세먼지 관리시스템이 구축되어 운영되고 있다(그림 9).

그림 9 스마트 공기질 관리시스템 – 서울교통공사 2호선 강남역

2호선 강남역
열차운행시간표
Line 2 Gangnam Train Timetable

222 강 남
Gangnam
江南 カンナム
역삼
교 대
MUSICAL
임태경 | 정성화 | 카 이
2018.12.1 ~ 2019.2.17 충무아트센터

III 결 론

미세먼지 문제는 국민의 건강에 직접적인 영향을 미치는 문제이지만, 단기간에 해결될 수 없는 상황이기 때문에 단기적인 대책과 장기적인 대책이 함께 병행되어야 해결할 수 있다. 동시에, 일반 국민의 노출피해를 최소화하고 민감계층군의 건강피해를 줄일 수 있는 과학적 대책이 수반되어야 한다. 미세먼지는 다양한 환경조건 및 기상조건과 산업 활동 등 복잡한 변수에 의하여 영향을 받기 때문에 현상 이해와 미세먼지 예측을 위한 데이터 기반 의사결정체계가 특히 요구되는 상황이다. 게다가 미세먼지 농도의 정확한 측정은 그 자체로도 매우 어렵거나 부정확하기 때문에 더더욱 빅데이터를 통한 보정 및 보완이 필요하다. 미세먼지 빅데이터를 구축할 경우에는 빅데이터가 제공할 수 있는 서비스를 먼저 고려하여야 한다. 설문조사 등을 통해 필요한 서비스를 제공할 때에 빅데이터 활용이 의미가 있는 것이다. 빅데이터를 활용한 여러 가지 분석은 결국 미래 상황을 예측하기 위함이다. 특히 당장의 미세먼지 농도를 처리하여 낮추기는 어렵지만 앞으로의 미세먼지 농도를 알게 된다면 오염원에서 사전 저감하거나 그 피해를 낮출 수 있는 방안을 사전에 제공할 수 있기 때문이다. 미세먼지 오염원 자체에 대한 근본적인 저감기술이 1차적으로 필요하며, 대기 중으로 확산된 후에는 지속적인 저감노력과 민감계층군의 피해를 우선적으로 줄이는 노력이 병행되어야 하며 빅데이터 기반 미세먼지 관리기술은 지속적으로 확대될 것으로 판단된다.

저자 _ 권순박 (Soon-Bark Kwon)

• **학 력**

광주과학기술원 환경공학 박사
광주과학기술원 환경공학 석사
인하대학교 기계공학 학사

• **경 력**

現) (주)디에이피 대표이사
現) 한국철도기술연구원 교통환경연구팀 책임연구원
現) 성균관대학교 기계공학과 겸임교수
現) 한국과학기술연합대학원(UST) 미래첨단교통시스템 공학과 겸임교수
前) 한국철도기술연구원 교통환경연구팀 선임연구원
前) 서울대학교 정밀기계설계공동연구소 선임연구원

참고문헌

1) 남궁형규 등, 2016. 지상과 지하역사의 실내공기질 특성과 외기영향 평가. 한국산업기술학회지 17(5), 17-25.

2) 남궁형규 등, 2017. 수치해석을 활용한 승강장 바닥배기 시스템 최적화 연구. 한국산업기술학회지 18(2), 443-449.

3) Cohen, Aaron J., et al. "Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015." The Lancet 389.10082 (2017): 1907-1918

4) Kwon et al., 2016. Transient variation of aerosol size distribution in an underground subway station. Environmental Monitoring and Assessment 188, 362-372

5) Kwon et al., 2015. A multivariate study for characterizing particulate matter (PM10, PM2.5, and PM1) in Seoul metropolitan subway stations, Korea. Journal of Hazardous Materials 297, 295-303.

6) Park et al., 2018. Predicting PM10 concentration in Seoul metropolitan subway stations using artificial neural network (ANN). Journal of Hazardous Materials 341, 75-82

7) 권순박, 카카오AI리포트 2018. 지하철 내 미세먼지와의 싸움, 그리고 AI https://brunch.co.kr/@kakao-it/219

8) 김용표, 2018. [시론] 비과학적 정부 정책이 미세먼지 불안감 부추긴다. 김용표 중앙일보 2018.05.07. https://news.joins.com/article/22600410

9) 뉴스핌, 2018. "미세먼지 측정기 신뢰도 낮아"...내년부터 성능인증제 도입 http://www.newspim.com/news/view/20180412000115

10) 부천시, 2019. www.bucheon.go.kr

11) 환경부, 2019. 미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법

12) 환경부 대기환경기준 http://www.me.go.kr/mamo/web/index.do?menuId=586

13) 환경부 에어코리아(AirKorea) http://www.airkorea.or.kr/web

14) JTBC, 2018. 학교 책임자도 못 믿어...'깡통'초등학교 미세먼지 측정기 https://news.naver.com/main/read.nhn?mode=LPOD&mid=tvh&oid=437&aid=0000183028

15) KT에어맵코리아 프로젝트(Air Map Korea) http://blog.kt.com

02

미세플라스틱, Emerging Pollutants

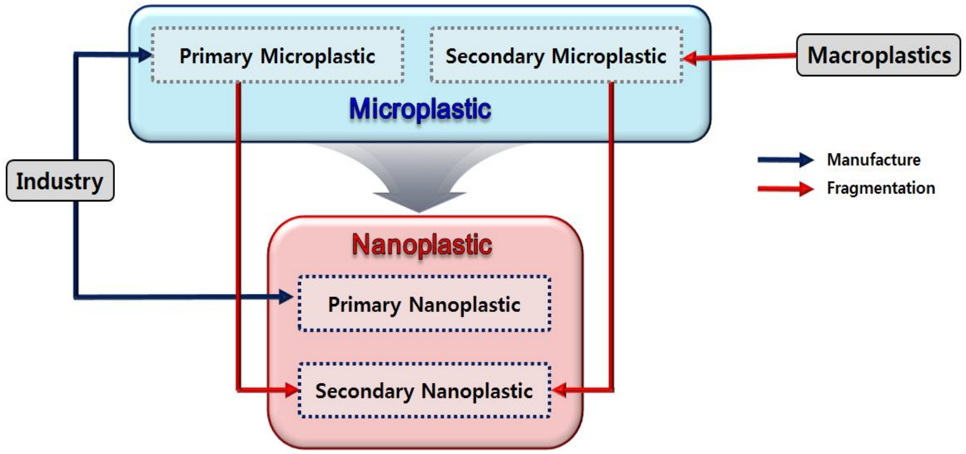
안윤주 (건국대학교 환경보건과학과 교수)

I 서론

최근 미세플라스틱(마이크로플라스틱, microplastics)은 emerging pollutants로 부상하였다. 플라스틱 시대가 도래한지는 이미 오래전이지만 미세플라스틱이라는 용어의 등장은 이에 비해 길지 않으며 환경적 핫이슈가 된 것도 플라스틱 시대(Plastic age) 역사에 비해 최근의 일이다.

미세플라스틱은 크기가 1~5mm 이하인 플라스틱 조각을 통칭한다. 미세플라스틱은 생성원인에 따라 1차 미세플라스틱(primary microplastics)과 2차 미세플라스틱(secondary microplastics)으로 분류될 수 있다. 1차 미세플라스틱이란 애초부터 인위적으로 제조된 것을 의미하는데 화장품, 바디워시, 치약과 같은 개인생활용품(personal care products), 산업용 연마제, 레진펠렛(resin pellet) 등에 포함된 플라스틱조각이 이에 속한다. 한편 2차 미세플라스틱은 기존 플라스틱 제품이 사용되거나 비의도적으로 폐기되는 과정에서 연마, 풍화, 광분해 등에 의해 잘게 쪼개진 플라스틱으로, 예를 들면 스티로폼 등으로부터 유래된 플라스틱 입자, 농업용 멀칭비닐(mulching vinyl)에서 유래된 미세파이버(micro-fiber) 입자 등이 이에 포함된다(그림 1 참고).

그림 1 1차, 2차 플라스틱 미세입자 및 나노입자의 생성 관련 연계성



(Produced by J. Kwak in Zerotox Laboratory)

최근에는 미세플라스틱보다 더 작은 입자, 즉 나노플라스틱(플라스틱 나노입자, Nanoplastics, plastic nanoparticles)이라는 용어도 많이 사용되고 있다. 직경이 100nm(나노미터) 이하로 미세플라스틱보다 작은 직경을 가진 플라스틱 물질을 나노플라스틱으로 명명하기 시작하였고, 나노플라스틱(〈100nm)은 미세플라스틱(〈5mm)보다 크기가 작기 때문에 생물체에 흡착, 축적, 거동 등에서 미세플라스틱과는 다른 양상을 나타낼 수 있다. 나노플라스틱 역시 1차와 2차로 구분가능하며, 1차 나노플라스틱은 수성페인트, 접착제, 코팅제, redispersible lattices, 생의약제품, 약물전달, 의료진단, 전자공학, 자기학 및 광전자공학에 사용되어 환경 중으로 유출가능하다. 2차 나노플라스틱의 경우 미세플라스틱이 물리적 마모 및 풍화 등에 의하여 더 작은 나노크기의 입자로 파편화(fragmentation)되어 생성되는 한편, 미세플라스틱 표면으로부터 밀가루처럼 부서져 나오기도 한다.

II 연구동향

필자는 정부기관 및 국제기관 보고서, 연구논문 등을 통해 파악한 연구동향을 정리해 보았다. 2010년 유네스코 정부간해양위원회(UNESCO-Intergovernmental Oceanographic Commission: UNESCO-IOC)에서는 미세플라스틱을 해양생태계의 건강보호 분야에 주요문제 중 하나로 제시하였다(GESAMP 2010). 유럽연합(European Union: EU)은 2013년 'Green paper on a European strategy on plastic waste in the environment(EC 2013)' 보고서에서 미세플라스틱을 '환경오염우려물질'로 인지하고 있었으며, 'Guidance on monitoring of marine litter in European seas(EC JRC 2013)'보고서를 통해 해양에서의 미세플라스틱 모니터링 방법을 제안하였다. 유엔환경계획(United Nations Environment Programme: UNEP)은 2014년 발표한 연감에서 미세플라스틱을 국제환경 문제에 포함시킨 바 있으며(UNEP, 2014), 미세플라스틱의 해양환경 및 인체 악영향이 대두됨에 따라 그 다음해인 2015년에는 화장품 내 미세플라스틱 규제 방안을 권고하였다(UNEP 2015).

미국의 경우 미 환경부의 '북태평양의 해양쓰레기(US EPA 2011)' 보고서에 미세플라스틱 연구가 제시되었고, 2015년 'Microbead-Free Waters Act of 2015'를 통해 2017년 7월까지 화장품 내 미세플라스틱 사용금지 법안을 제정한 바 있다(Authenticated U.S. government information 2015). 한편 캐나다 하원은 2015년 3월, 제조된 미세플라스틱인 마이크로비즈(microbeads)를 독성물질 목록에 추가하는 것으로 합의하였으며, 이에 따라 캐나다 환경보호법에 근거하여 2018년부터 단계적으로 미세플라스틱이 포함된 개인생활용품의 생산, 수출, 판매를 금지하는 관리방안을 마련하였다(Environment and Climate Change Canada 2016).

유럽 국가들의 경우, 네덜란드, 오스트리아, 룩셈부르크, 벨기에 및 스웨덴은 해양생태보호를 위해 개인생활용품 내 미세플라스틱 사용 금지를 요구하였고(UNEP 2015), 독일 환경청과 노르웨이 환경청에서도 각각 'Sources of microplastics relevant to marine protection in Germany(UBA 2015)와 'Source of microplastic pollution to the marine environment(Norwegian Environment Agency 2014)'를 발간하는 등 생태계보호를 위한 미세플라스틱 규제를 위해 과학적 근거 마련을 위한 연구들을 수행하였고, 미세플라스틱의 관리를 위해 제도적 장치 마련을 위한 노력을 하고 있다.

국외 기관 보고서 조사를 종합한 결과, UN과 같은 국제연합기구 뿐만 아니라 개별 정부기관에서도 미세플라스틱의 위해성에 대해 우려하고 있으며, 특히 해양오염 및 화장품과 같은 개인용품 내 미세플라스틱에 대한 연구 및 규제가 주로 진행된 것으로 확인되었다. 다만, 아직까지는 국외 전반적으로 나노플라스틱보다는 미세플라스틱에 대한 연구 및 규제가 주로 진행되었고, 나노플라스틱에 대한 규제 및 정부기관 연구발표는 현재 미비한 것으로 보인다.

현재 미세플라스틱에 대한 연구들은 주로 해양 생태계를 대상으로 연구들이 집중되어 있으며, 해양 매체에서 발견되는 플라스틱 잔해들에 대한 연구와 해양에 서식하는 생물들 내에서 발견되는 플라스틱 잔해들에 대한 연구, 그리고 미세플라스틱의 거동과 정량법에 관한 연구들, 미세플라스틱과 여타 오염물질들의 결합 및 복합작용에 대한 연구들, 미세플라스틱 정성 및 정량법, 미세 플라스틱의 잠재적인 위해성에 관한 연구 등이 주를 이루고 있다.

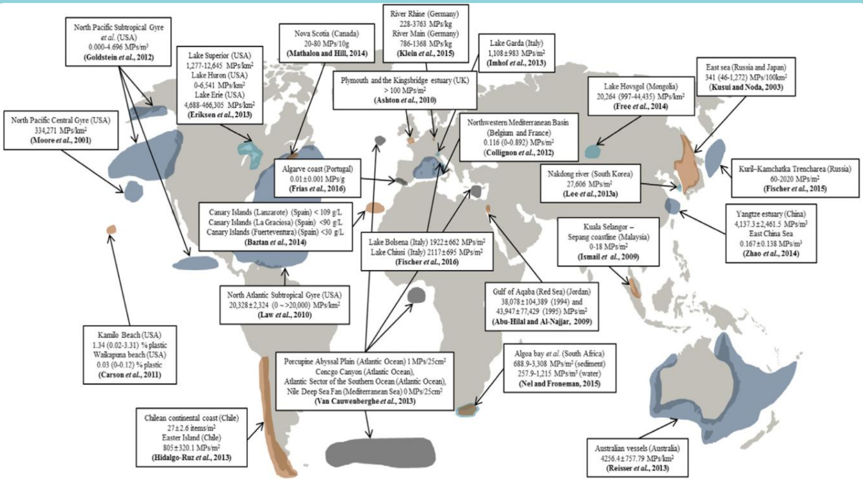
현재까지 미세플라스틱과 나노플라스틱의 토양환경으로의 유출과 거동에 대한 연구는 제한적이며 특히 토양 내에서 이들의 농도를 검출한 연구는 거의 부재한 것으로 나타났다. 상대적으로 나노플라스틱보다는 미세플라스틱이, 그리고 토양보다는 수환경에서의 거동 연구가 더 진행된 것으로 확인되었다. 1차 미세플라스틱이 2차 미세플라스틱이 되는 기작은 2차 나노플라스틱 보다 상대적으로 많이 보고가 되어있다. 토양환경의 경우, 지표면에서 자외선에 의해 마모 되거나, 지하에서 마모되어 2차 미세플라스틱이 생성되어 노출 가능하며, 세탁기에 의해 생성된 2차 미세플라스틱이 하·폐수 처리공정을 거쳐 슬러지에 집적 후 토양으로 노출이 가능한 것으로 알려져 있다(Environ. Sci. Technol. 2012; Environ. Sci. Technol. 2011; Trends in analytical chemistry 2015). 한편 수환경에서의 2차 미세플라스틱의 생성 기작 또한 자외선 및 물리적 마모와 관련이 있는 것으로 보고되었다(PNAS 2014). 또한 현재의 하·폐수 처리 시설은 미세플라스틱 및 나노플라스틱 제거를 위해 설계되지 않았기 때문에, 유출수에 의한 수생태계 뿐만 아니라 슬러지 매립 등에 따른 토양생태계 위해성이 우려되는 상황이다. 한편 나노 플라스틱에 대한 연구는 2010년 이후부터 본격적으로 시작되어 현재 각국의 연구자들이 다양한 연구들을 진행하고 있다.

III 미세플라스틱의 환경 중 분포현황

미세/나노플라스틱은 다양한 경로에 의해 생태계로 유출되거나 생태계에서 생성되고 있다. 이렇게 생태계에 존재하는 미세플라스틱은 매우 작은 크기로 인해 생물체내로 유입될 가능성이 있을 뿐 아니라, 플라스틱이 가지는 소수성(hydrophobicity)으로 인해 잔류성 유기오염물질(persistent organic pollutants: POPs)을 흡착하여 이차오염을 유발하는 pollutant carrier의 역할을 할 수 있다는 문제점이 존재한다. 미세/나노플라스틱은 생태계 내에서 그 자체로 생물종들에게 잠재적인 위해성을 가지고 있을 뿐 아니라, 중금속, 농약, 내분비계 장애물질 등과 같은 환경매체 내 오염물질들과 결합된 형태로 발견되기도 한다.

미세/나노플라스틱은 1990년대 말부터 문제가 제기되기 시작하여 2000년대 초반부터 본격적으로 이에 대한 문제점과 위해성이 본격적으로 연구되기 시작하였다. 국내외적으로 대부분의 연구는 플라스틱의 풍화 및 마모가 빈번한 해수환경(marine environment)에 대한 생태영향을 관찰하는 연구가 대부분을 차지하고 있으며, 해양표층수, 해변, 해양심층수 등에서 발견되는 미세플라스틱 모니터링 자료들이 보고되고 있다(그림 2).

그림 2 미세플라스틱의 해양표층수(navy), 해변(brown), 해양심층수(dark gray), 호소수(light blue) 전세계 분포현황

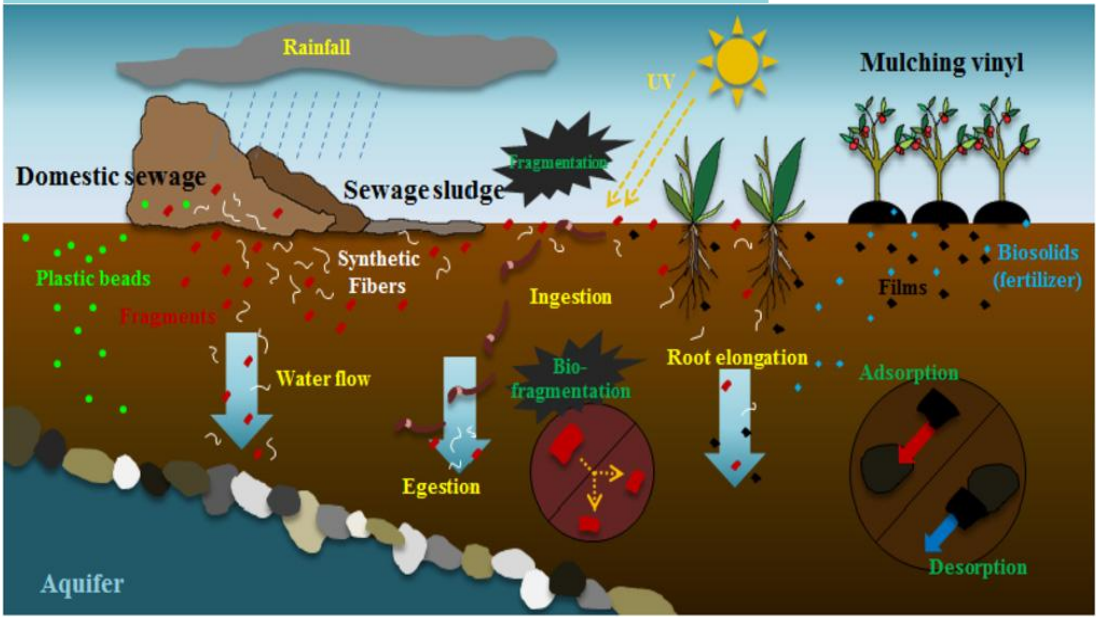


(Chae and An 2017)

그러나 최근 연구에 의하면 미세플라스틱은 담수 환경에서도 다양한 형태로 발견되고 있으며 토양생태계로의 유출이 우려되고 있는 실정이다. 미세플라스틱은 심지어 합성섬유로 만든 의류 등을 세탁하는 과정에서도 섬유조직 형태로 발생하기도 하며, 하수처리과정에서 걸러지지 않고 강이나 하천으로 흘러들어가기도 한다. 최근 국립환경과학원의 용역연구에 의하면 한강에서도 다양한 형태의 미세플라스틱이 검출된 바 있다.

토양환경에서의 미세플라스틱 문제는 최근 대두되기 시작하였다. 미세플라스틱은 하수처리과정을 통해 슬러지에 농축될 가능성이 농후하며, 토양복토 등을 통한 슬러지 토양적용과정을 통해 토양생태계로 유출될 수 있다. 또한 농업에서 활용되는 농업용 멀칭비닐이 회수되지 않고 남아서 잘게 쪼개지면서 토양표면에서 미세/나노플라스틱이 생성되기도 한다. 환경에서의 2차 미세/나노플라스틱 생성기작에 근거하여 예상한다면, 토양환경에서도 물리적 마모, 자외선 및 풍화작용에 의해 2차 나노플라스틱이 생성되어 토양에 노출될 개연성이 매우 높다(그림 3).

그림 3 미세/나노플라스틱의 토양생태계 유출경로 및 환경중 거동/분포



(Chae and An 2018)

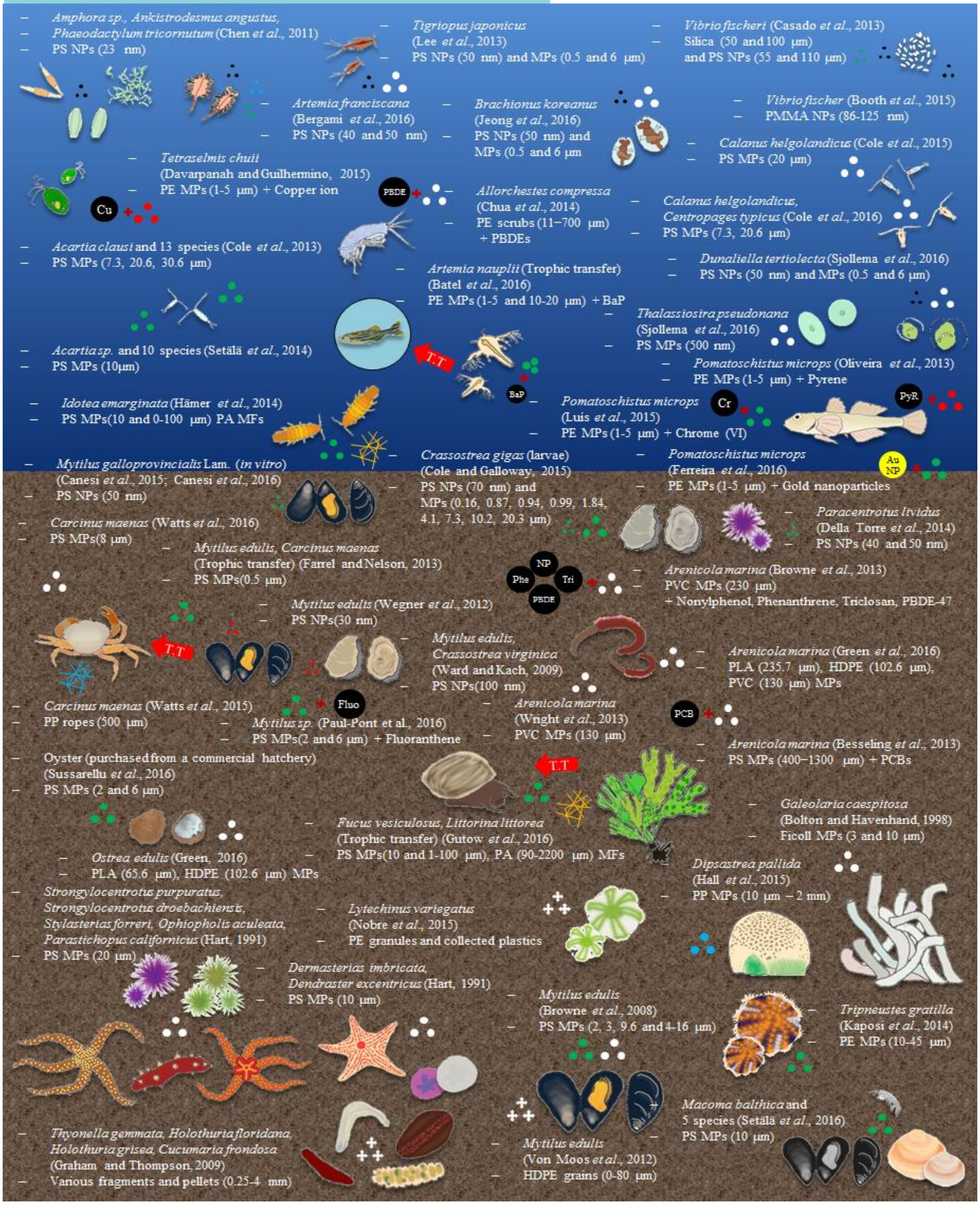
IV 미세플라스틱의 생태계 영향

4.1 수생태계 영향

현재 폐플라스틱 및 이에 기인한 미세플라스틱에 의한 해양생태계 및 담수생태계 오염은 매우 심각한 수준이며 오염범위 또한 전 세계적이다. 본고에서는 필자의 연구팀에서 발표한 미세플라스틱 또는 나노플라스틱이 수생태계 생물종에 미치는 영향 및 수서생태계 먹이망 전이에 관한 논문들을 간략하게 정리하여 제시하였다.

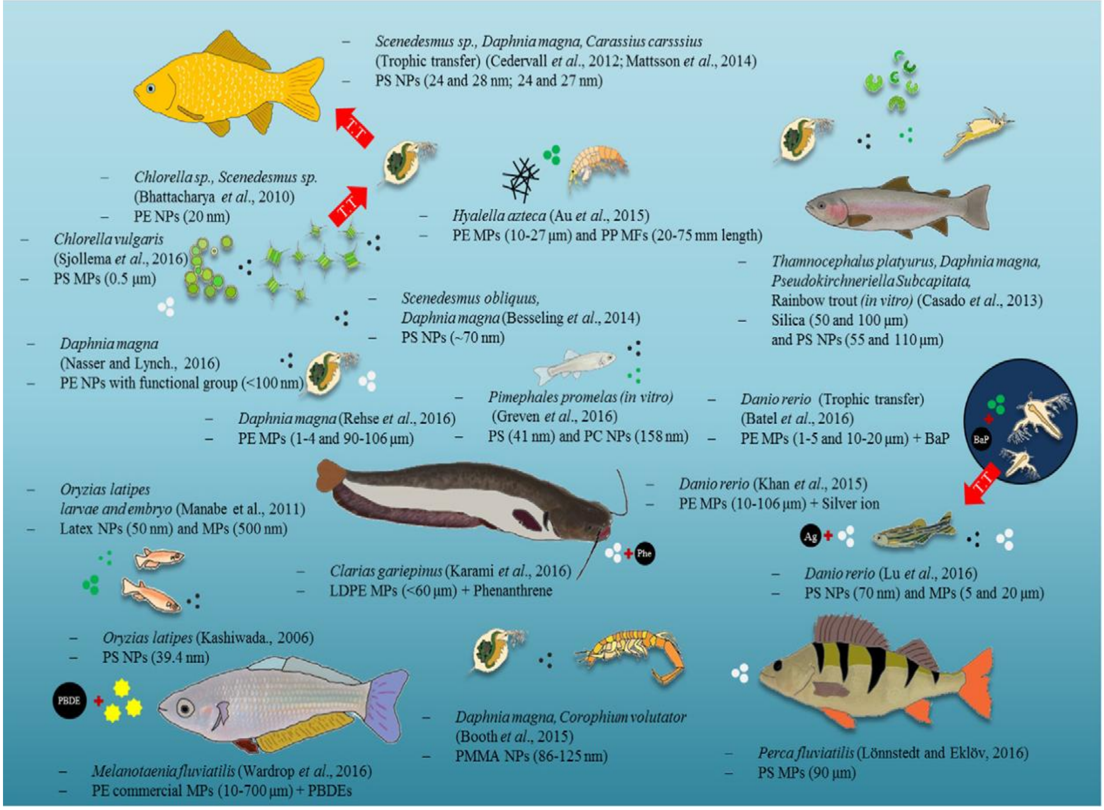
Chae and An(2017)은 2016년 8월까지 출간된 해양 및 수서 생태종을 대상으로 미세 및 나노플라스틱의 영향을 연구한 83개의 연구논문을 조사 및 분석한 결과, 미세 및 나노플라스틱이 수서 생태종들의 성장, 발달, 동태, 생식 및 심지어 치사에 영향을 미치는 것을 확인하였다(그림 4, 그림 5).

그림 4 미세/나노플라스틱의 해양생태계 영향 연구동향



(Chae and An 2017)

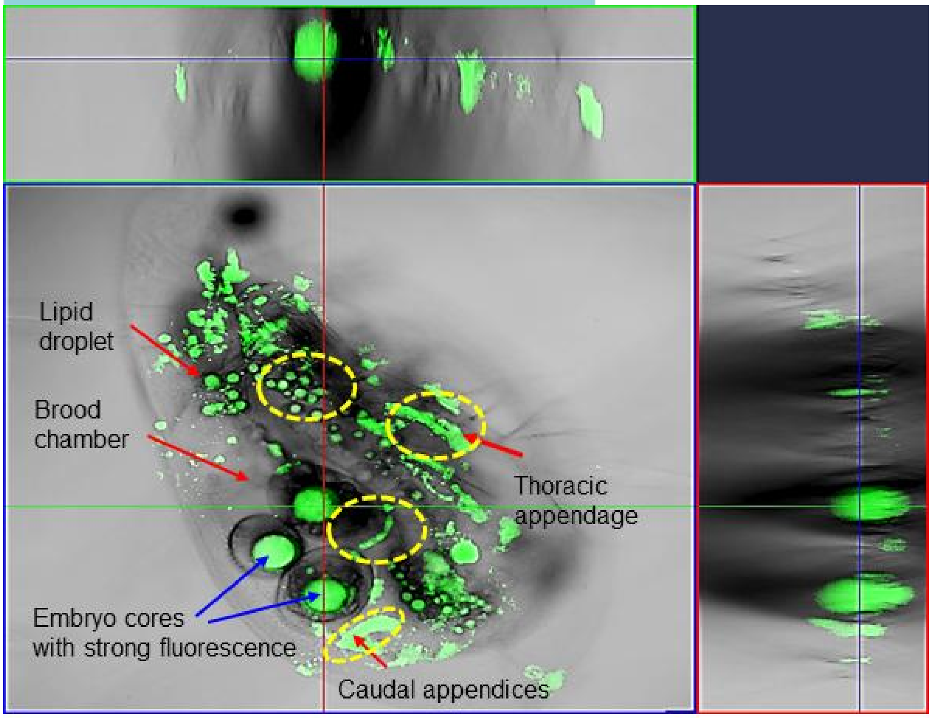
그림 5 미세/나노플라스틱의 담수생태계 영향 연구동향



(Chae and An 2017)

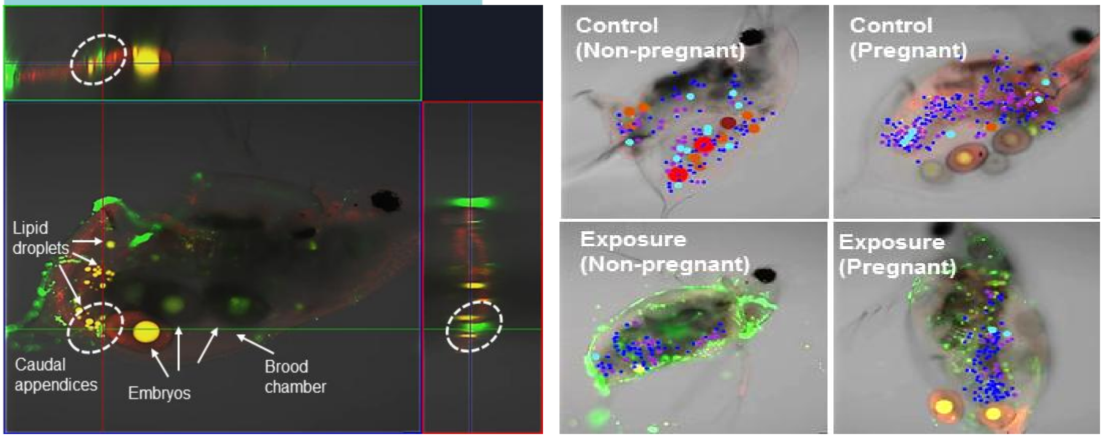
Cui et al(2017)은 우리나라 수계에 흔하게 서식하는 국내서식종인 유리물벼룩(Daphnia galeata)을 대상으로 폴리스티렌(polystyrene) 미세플라스틱의 후세대영향을 확인하기 위하여, 어미개체가 미세플라스틱에 직접 노출되었을 때 어미개체, 배아 및 배아에서 발달한 F1에 대한 미세플라스틱의 영향 및 전이여부를 확인하였다. 그 결과, 노출군과 대조군에서 물벼룩 알주머니내의 배아 수는 차이가 거의 없었다. 그러나 배아를 추출하여 수정란발달 단계를 분석한 결과, 노출군에서 83%의 치사율을 보였다. 미세플라스틱은 유리물벼룩의 소화기관, 생식기관, 알주머니에 침투하였으며(그림 6 참고), 미세플라스틱에 노출된 유리물벼룩의 지방소립(lipid droplet)의 수와 크기가 감소하는 것이 관찰되었다(그림 7). 지방소립은 생물체내 지방저장을 조절하는 기능을 수행하는데, 생식에 필요한 에너지원을 제공한다. 따라서 이에 대한 변화가 생기면 생식 대사 작용을 저해할 수 있다.

그림 6 유리물벼룩 체내의 미세플라스틱(초록색) 축적



(Cui et al. 2017)

그림 7 유리물벼룩 체내의 지방소립 관찰

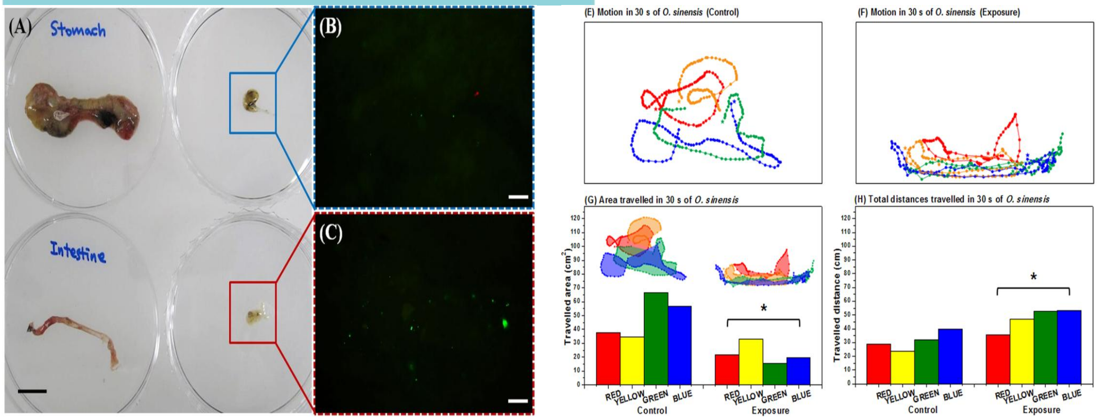


(Cui et al. 2017)
(좌) 미세플라스틱에 노출된 유리물벼룩의 지방소립을 관찰함. (우) 미세플라스틱에 노출되지 않은 대조군 (위)에 비해, 미세플라스틱 노출군 (아래)에서의 지방소립의 크기와 수가 감소함.

Kim et al(2017)은 카르복실기 작용기를 가진 미세플라스틱과 작용기가 없는 미세플라스틱을 이용하여 니켈과의 흡착으로 인한 물벼룩 급성복합독성을 관찰, 비교하였다. 생물종은 큰물벼룩(Daphnia magna)을 이용하여 니켈과 2종의 플라스틱의 급성 복합독성실험을 각각 진행하였다. 또한 니켈과 2종의 플라스틱의 급성독성실험을 개별적으로 진행하였다. 그 결과 니켈과 미세플라스틱의 급성 복합독성실험과 니켈 개별 급성독성실험을 비교한 결과, 니켈 농도 3, 4 mg/L 노출군의 경우 대조군에 비하여 확연한 치사율의 증가가 관찰되었고 미세플라스틱-COOH 노출군에서는 니켈 개별 독성실험에 비해 치사율이 증가하는 현상이 관찰된 바 있다.

Chae et al(2018)은 미세플라스틱이 미세조류, 물벼룩, 작은 물고기, 마지막 영양단계로는 국내 수계에 서식하는 갈겨니의 먹이사슬을 따라 전이됨을 보고하였다. 이는 먹거리가 되는 어류까지 도달함을 의미하여 최종적으로 인체전이를 시사한다(그림 8)

그림 8 수생태계 먹이사슬을 통한 나노플라스틱 전이



(Chae et al. 2019)
(좌) 먹이 사슬로 노출된 나노플라스틱의 갈겨니 소화기간 분포 (우) 나노플라스틱에 노출된 대륙송사리의 운동능 저하.

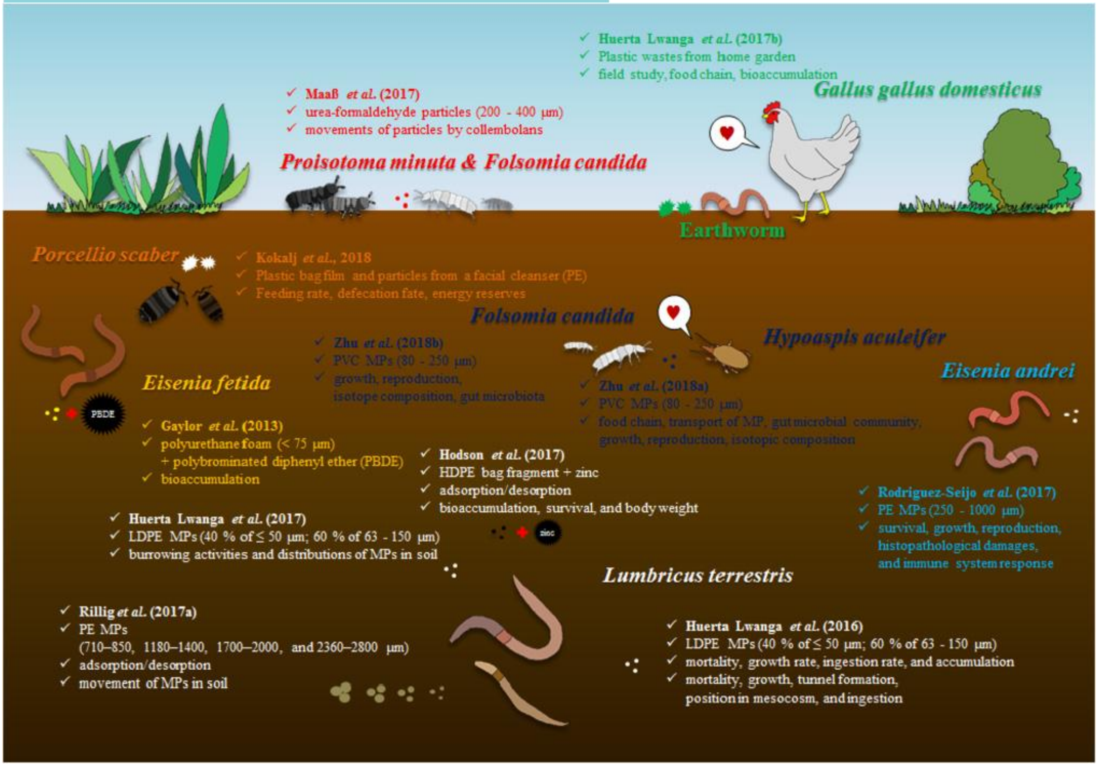
4.2 토양생태계 영향

수생태계에 비하여 미세플라스틱 또는 나노플라스틱의 토양생태독성 연구동향은 상대적으로 매우 부족한 편이나, 이를 정리하면 다음과 같다. 미세플라스틱 및 나노플라스틱은 크기가 작기 때문에 개별 생물에 의해 충분히 섭취가능하며 먹이망을 통해 전이될 가능성이 있을 뿐만 아니라, 다른 오염물질 표면에 흡착하여

독성을 야기할 수 있다. 그러나, nanoplastic(나노플라스틱), microplastic(미세플라스틱), soil(토양), terrestrial(육생), microorganism(미생물), bacteria(박테리아), sludge(슬러지)를 키워드로 설정하여 googlescholar, ACS, sciencedirect, springer를 검색하여 기존연구 동향 조사결과, 나노플라스틱 뿐만 아니라 미세플라스틱 모두 국내·외에서 토양생태독성연구가 제한적으로 진행된 것으로 조사되었다.

네덜란드 연구팀의 의하면 폴리에틸렌(polyethylene) 소재의 미세플라스틱을 대상으로 60일간 지렁이를 노출한 결과, 치사증가 및 생장저해가 나타났으며, 지렁이 분변토에 농축되어 다른 토양생물종으로의 노출 가능성이 확인되었다. 미국 연구팀은 Polybrominated diphenyl ether(PBDE)-containing polyurethane foam microparticles을 대상으로 지렁이 내 농축 실험을 수행하여, PBDE에 미세플라스틱이 포함될 경우 PBDEs가 지렁이 체내에 농축될 가능성을 확인한 바 있다(그림 9).

그림 9 미세/나노플라스틱의 토양생태계 영향 연구동향



(Chae and An, 2018)

V 결 언

미세플라스틱이 'Emerging Pollutant'인 것은 이제 자명한 사실이다. 지금부터 폐플라스틱의 배출을 설령 완전 차단한다고 해도, 이미 해양, 담수, 토양생태계에 널리 분포된 폐플라스틱은 지속적으로 미세플라스틱과 나노플라스틱을 생산해낼 것이다. 본 리뷰에서는 미세플라스틱의 국내외 연구현황, 생태계 내에서의 분포현황, 그리고 필자의 연구팀 결과를 토대로 미세 및 나노플라스틱의 수생태계 영향 및 토양생태계 영향에 대하여 고찰하였다. 미세플라스틱 연구는 최근 폭발적으로 증가하고 있으며, 이제 연구 자료들이 축적되고 가고 있는 상황이다. 앞으로 중요한 것은 도출되고 있는 연구결과들을 잘 활용하여 미세플라스틱을 환경 중에서 어떻게 관리할 것인지 실현가능한 관리방안을 수립하는 것이다.

필자는 '과학과 기술(2018년 7월호)'에서 미세플라스틱 문제는 국민의식 변화, 제품 및 제도 개선, 과학기술적 해법, 정책적 해법이 유기적으로 협동해야 한다고 집필한 바 있으며, 학계에서는 미세플라스틱의 생태계 및 인체건강에 대한 영향을 알기 위해 연구를 통한 과학적 증거(scientific evidence)를 축적해야 한다고 강조하였다. 이에 첨언한다면 미세플라스틱 문제는 그야말로 총체적 난제이다. 학계, 산업체, 정부의 합동작전으로 차근차근 대응해야 할 시기이다.

저자 _ 안윤주 (Youn-Joo An)

• 학 력

Texas A&M University Civil Engineering 박사
서울대학교 환경대학원 석사
이화여자대학교 생물학 학사

• 경 력

現) 건국대학교 환경보건과학과 교수
前) University of California, Santa Barbara Visiting Professor
前) 미국 환경청(U.S EPA) 국립위해성관리연구원 연구원

참고문헌

1. Y. Chae, Y.-J. An. (2018). Current research trends on plastic pollution in soil ecosystem and its ecological effect on soil organisms: A review. Environmental Pollution 240, 387-395.
2. Y. Chae, D. Kim, S. W. Kim and Y.-J. An. (2018). Trophic transfer and individual impact of nano-sized polystyrene in a four-species freshwater food chain. Scientific Reports 8, 284.
3. D. Kim, Y. Chae and Y.-J. An. (2017). Mixture toxicity of nickel and microplastics with different functional groups on Daphnia magna. Environmental Science & Technology 51, 12852-12858.
4. Y. Chae and Y.-J. An. (2017). Effects of micro- and nano-plastics on aquatic ecosystems: Current research trends and perspectives. Marine Pollution Bulletin 124, 624-632.
5. R Cui, SW Kim, Y-J An. (2017). Polystyrene nanoplastics inhibit reproduction and induce abnormal embryonic development in the freshwater crustacean Daphnia galeata. Scientific Reports 7, 12095.
6. Environment and Climate Change Canada. (2016). Proposed regulations for microbeads in personal xare products used to exfoliate or cleanse. https://www.ec.gc.ca/lcpe-cepa/default.asp?lang=En&n=3A8EA7D7-1&printfullpage=true
7. European Commission(EC). (2013). Green paper on a european strategy on plastic waste in the environment.
8. European Commission Joint Research Centre(EU JRC). (2013). JRC Scientific and policy reports. Guidance on monitoring of marine litter in European seas.
9. United Nations Environment Programme(UNEP). (2015). Plastic in cosmetics.
10. Umweltbundesamt(UBA). (2015). Sources of microplastics relevant to marine protection in Germany.
11. United Nations Environment Programme. (2014). UNEP Year Book: emerging issues in our global environment.
12. United States Environmental Protection Agency(US EPA). (2011). Marine debris in the North Pacific. A Summary of Existing Information and Identification of Data Gaps.
13. GESAMP(Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Pollution). (2010). Proceedings of the GESAMP International Workshop on microplastic particles as a vector in transporting persistent, bio-accumulating and toxic substances in the oceans. International Oceanographic Commission of UNESCO.

융합연구리뷰

Convergence Research Review 2019 March vol.5 no.3

융합연구정책센터
Convergence Research Policy Center
02792 서울특별시 성북구 화랑로 14길 5
TEL. 02.958.4980