

<Review>

지하수 내 미세플라스틱에 대한 국내외 연구동향 및 전망

이진용^{1,*} · 차지혜¹ · Rogers Wainkwa Chia^{1,2}

¹강원대학교 지질학과

²강원대학교 지구자원연구소

Current status of researches on microplastics in groundwater and perspectives

Jin-Yong Lee^{1,*} · Jihye Cha¹ · Rogers Wainkwa Chia^{1,2}

¹Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea

²Research Institute for Earth Resources, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea

요 약

플라스틱은 인간 생활의 전반에 광범위하게 이용되고 있으며 내구성, 경량성, 경제성으로 생산량과 사용량이 크게 증가하고 있다. 그러나 사용 후 재활용률은 낮으며 많은 부분이 육상과 해양환경으로 폐기되고 있어 환경 문제로 대두된다. 최근 인위적으로 제조된 혹은 자연환경에서 잘게 부서진 5 mm 이하의 미세플라스틱이 새로운 오염물질로 대두되어 자연생태계는 물론 인간의 건강을 위협하는 요인으로 작용하고 있다. 이런 미세플라스틱에 대한 우려와 연구는 해양에서 하천수, 호소수 등 육지환경으로 확대되었으나 아직 우리나라는 물론 전세계적으로 지하수에 대한 조사는 미미하다. 이에 본 리뷰에서는 우리나라와 세계 각국의 지하수 내 미세플라스틱 관련 연구 현황과 실태를 살펴보고 관련 문제점을 진단하였으며 향후 효과적이고 조사 및 관리를 위한 생산적 발전 방향을 제시하였다.

주요어: 미세플라스틱, 지하수, 표준절차, 시료채취, 수리지질

ABSTRACT: Plastics are widely used in our daily life and their production and consumption are increasing due to their durability, lightness, and low cost. However, their reuse rate is still low and most of them are disposed into oceans and inland environments, which cause severe environmental problems. At the same time, artificially manufactured and naturally broken plastics, known as microplastics smaller than 5 mm in size, are emerging as a new contaminant, posing a threat to natural ecosystems and human health. Concerns and research interest in microplastics has extended from oceans to inland environments such as stream water and lakes, but little research and investigation has been done in groundwater systems in Korea and other countries. This paper reviews the current status and related problems of the investigation and research on microplastics in the groundwater systems domestically and worldwide, and then suggest constructive comments for effective investigation and management of microplastics in groundwater.

Key words: microplastics, groundwater, standard procedure, sampling, hydrogeology

1. 서론

플라스틱은 석유에서 분리한 원료를 결합하여 만든 고분자화합물(polymer)의 일종으로 고무, 송진 등의 천연수지와 대비되어 합성수지라고도 불리며

인간의 생활에 혁명적인 변화를 가지고 온 물질이다. 이런 플라스틱은 내산성이 매우 강하며 온도를 가하면 탄력성이 있어 그 모양을 마음대로 성형할 수 있고 한번 세팅하면 원래의 모양으로 돌아가지 않는 소성(plastic)의 특성이 있다. 또한, 가볍고 가

*Corresponding author: +82-33-250-8551, E-mail: hydrolec@kangwon.ac.kr

격이 비교적 저렴하여 금속과 유리를 대체하여 각종 가구, 자동차, 전자제품, 포장지, 생활용품, 건물 내부 및 외부, 의복 등 우리 삶의 전 분야에서 활용되고 있다.

Tiseo (2020)의 통계에 의하면 1950년 전 세계 연간 플라스틱 생산량은 1.5백만톤에 불과하였으나, 60년이 지난 2010년은 2.70억 톤, 그리고 2020년은 연간 생산량이 3.67억 톤으로 245배나 증가하였으며 연평균 348%의 증가율을 보였다(그림 1). 그러나 플라스틱을 사용한 후 재활용하는 경우는 극히 제한적이며 대부분이 여러 경로를 통해 폐기된다. 2016년 기준 전 세계에서 강, 호수 및 해양으로 배출되는 플라스틱 쓰레기는 연간 9백만에서 2천3백만 톤에 이르며, 육상환경으로도 1천3백만에서 2천5백만 톤의 플라스틱 쓰레기 배출된다(Lau *et al.*, 2020; Macleod *et al.*, 2021).

그런데 이런 플라스틱은 시간이 경과함에 따라 소성이 감소하고 작은 크기로 잘게 쪼개지지만, 일반적인 자연환경(해양, 토양, 지하수, 호수 등)에서는 거의 분해되지 않고 매우 장기간 잔류하는 특성을 보인다(Macleod *et al.*, 2021). 이런 난분해성 특성으로 인하여 해양과 육지에 폐플라스틱이 지속적으로 축적되고 이로 인한 환경오염이 전세계적으로 중요한 환경문제의 하나로 대두되었다(Haward, 2018; Kasavan *et al.*, 2021). 특히 해양환경으로 유입된

크고 작은 크기의 플라스틱으로 인해 고래와 같은 대형 포유류, 바다새, 거북 등은 물론 작은 크기의 물고기, 조개와 같은 저서생물 및 산호 등과 이들의 서식지도 치명적인 위협에 직면하고 있다(Li *et al.*, 2016; Senko *et al.*, 2020; Roman *et al.*, 2021). 이러한 해양환경에서의 플라스틱 오염에 대한 우려와 관심은 육지환경까지 확대되었고 강과 하천, 호(소)수 등에서 플라스틱의 오염에 대한 조사와 연구가 상당히 진행되고 있다(Rochman, 2018; Koelmans *et al.*, 2019; Guimarães *et al.*, 2021; Roebroek *et al.*, 2021).

한편 플라스틱 오염에 대한 우려는 비교적 크기가 큰 것은 물론 상당히 작은 미세플라스틱(microplastic)에 대한 관심으로 옮겨가고 있다. 흔히 미세플라스틱이란 크기가 5 mm 이하인 플라스틱을 말하는데 그 생성원인에 따라 1차(primary) 미세플라스틱과 2차(secondary) 미세플라스틱으로 구분한다(Kim *et al.*, 2019; Chia *et al.*, 2021). 1차 미세플라스틱은 처음부터 인위적으로 매우 작은 크기로 생산된 것이며 주로 세안제, 화장품, 치약, 공업용 연마제 등에 사용된다(Lee and Kim, 2017a). 최근에는 이런 1차 미세플라스틱에 대한 각국의 사용규제가 증가하고 있다. 2차 미세플라스틱은 크기가 비교적 큰 플라스틱이 다양한 기계적, 화학적, 생물학적 분해 및 풍화 작용을 받아 잘게 부서져서 만들어진 것이다.

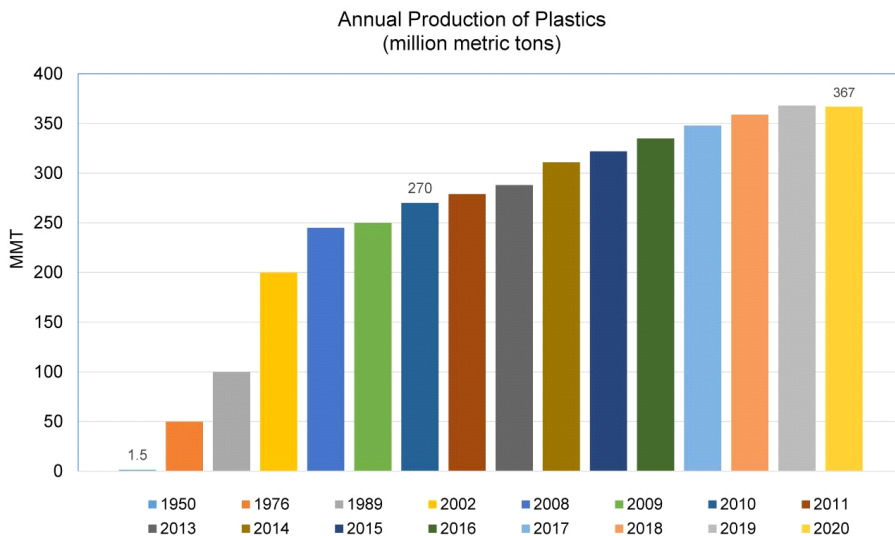


Fig. 1. Worldwide annual plastic production from 1950 to 2020. Data are from Tiseo (2022).

그런데 이런 미세플라스틱이 문제가 되는 것은 플라스틱 자체의 독성이나 위해성 보다는 플라스틱 제조에 사용된 첨가제, 예를 들어 프탈레이트(phthalate), 비스페놀A (bisphenol A) 등이 가지는 내분비계 교란 영향(유전독성, 성기능 장애) 때문이다(Cole *et al.*, 2011). 또한 미세플라스틱은 비표면적이 크고 흡착성이 강해 중금속, 내분비계 교란물질과 난분해성 유기오염물질 등을 이동 및 확산시키는 전달자 역할을 한다(Lee and Kim, 2017b; Kim *et al.*, 2019). 최근에는 미세플라스틱 자체의 위해성에 대한 연구도 상당한 진전을 보이고 있는데 토양의 동물과 식물상 그리고 인체에도 직간접적 악영향을 주는 것으로 보고된다(Chia *et al.*, 2021; Xiang *et al.*, 2022). 인체 위해성에 대한 우려는 사람들이 직접 음용하는 먹는 물과 먹는샘물(생수)에서 상당한 미세플라스틱이 있는 것으로 보고되면서 증폭되고 있는 실정이다(Oßmann *et al.*, 2018; Eerkes-Medrano *et al.*, 2019; Kim and Lee, 2020; Jung *et al.*, 2022).

미세플라스틱의 동정과 정량화에는 흔히 μ -FTIR, Raman Spectroscopy를 사용한다. 전자는 주로 20 μm 이상 크기의 미세플라스틱 분석에 사용하고 라만 경우 1 μm 크기까지 가능하다. 두 기기는 개수 농도의 정량화에 주로 사용되고 있으나 그보다 작은 크기는 질량농도로 분석하며 주로 py-GCMS와 FED-GCMS를 이용한다(Choi *et al.*, 2020; Viaroli *et al.*, 2022). 최근에는 크기와 모양에 기반하여 개수 농도를 질량농도도 환산하는 연구도 수행중이다(Anger *et al.*, 2018). 그러나 아직 농도 표시방법, 분석방법 및 분석기기에 대한 국제적 표준은 마련되지 않은 상황이다.

한편 미세플라스틱은 플라스틱 중합체의 화학조성에 따라 폴리에틸렌(PE), 폴리프로필렌(PP), 폴리스티렌(PS), 폴리염화비닐(PVC), 페트(PET), 폴리우레탄(PUR) 등이 있다. 이들은 종류에 따라 밀도, 녹는점 등의 물리화학적 특성이 다르며 상기 중에서 사용빈도와 사용량에 따라 비례하여 자연환경 중에서 폴리에틸렌(PE)과 폴리프로필렌(PP)이 가장 흔히 발견된다(Koelmans *et al.*, 2019). 그런데 미세플라스틱의 모양(shape)의 경우 일반적으로 2차 미세플라스틱에 해당하는 부정형의 파편(fragment)이 흔하고 장단축비가 3:1 이상인 섬유상(fiber)도 많으며 구상으로 나타나기도 한다.

상기한 여러 매체에서의 미세플라스틱 관련 연구에도 불구하고 현재까지 지하수 내의 미세플라스틱의 존재 및 발현(occurrence), 거동(transport) 등에 대한 조사와 연구는 전 세계적으로도 매우 미미한 수준이다(Lee *et al.*, 2020). 2019년 세계에서 처음으로 카르스트지역 지하수에서 미세플라스틱의 존재가 국제학술지(Groundwater)에 공식적으로 보고되었다(Panno *et al.*, 2019). 그러나 가장 최근에 발간된 저명 학술지(Science of the Total Environment, IF=)의 지하수 미세플라스틱 리뷰 논문(Viaroli *et al.*, 2022)에서조차 전 세계적으로 단 5건의 미세플라스틱 현장 연구결과 보고가 있을 뿐이라고 언급할 정도이다. 2022년 현재 미국의 몇몇 주정부, 중국과 인도 등의 공공기관 및 대학에서 지하수 미세플라스틱 조사가 진행 중인 것으로 알려져 있지만 품질보증 및 관리(QA/QC) 등에 있어서 신뢰할 만한 연구 보고들은 미미하다.

본 리뷰에서는 지하수 내 미세플라스틱에 대한 국내외 연구 동향을 검토하고 조사와 연구에 있어 어떤 어려움과 문제점이 있는지 살펴보고 향후 관련 연구가 지향해야 할 방향에 대하여 논의하였다. 이를 위해 주로 구글 학술검색(google scholar) 도구를 통해 관련 연구와 논문을 검색하고 또한 관련 저명 학술지에 대한 개별 검색도 병행하였다.

2. 국내 연구동향

국내에서 지하수 내 미세플라스틱에 대한 조사와 연구는 극히 미미하다. 저자의 연구그룹이 수행하는 연구가 거의 대부분이다(Jeong *et al.*, 2020, 2021; Kim *et al.*, 2020; Lee *et al.*, 2020; Myeong and Kwon, 2020; Ryu *et al.*, 2020; Cha *et al.*, 2021). 다만 Kim *et al.* (2019)이 선제적으로 지중환경(토양과 지하수)에서 미세플라스틱의 발현과 이동성에 대한 의미있는 리뷰논문을 발간한 것은 평가할 만하다. 최근에 와서 한국지질자원연구원, 한국수자원공사 등 몇몇 기관에서 지하수 미세플라스틱에 대한 관심을 가지고 조사연구를 수행중인 것으로 알려진다.

한편 상기한 저자의 연구그룹은 국내 지하수에 대한 미세플라스틱의 발현, 거동 그리고 위해성에 대한 연구를 수행하고 있다. 국내에서 환경부(한국환경산업기술원)의 지원을 받아 공식적으로 수행하

Table 1. Summary of investigations of microplastics (MPs) in groundwater conducted until March 2022.

Studies	No. of samples	Sample volume	Analytic technique	MP conc. No./L	MP type	MP shape	MP size μm	Blanks
Panno <i>et al.</i> (2019)	17 (14 springs, 3 wells)	2 L	Microscope, py-GCMS	0.0~15.2 No./L	PE	all Fiber	>0.45 μm	Done
Manikanda <i>et al.</i> (2021)	20	1 L	ATR-FTIR	2~80 items/L	PE, PVC, Nylons	Fragment, Fiber, Foam, Pellet	-	-
Selvam <i>et al.</i> (2021)	24 (19 wells, 5 bores)	~20 L	μ -FTIR	0.0~4.3 No./L	PA, PE, Polyester	Fiber, Foam, Pellet, Film, Fragment	0.11~12.5 mm	3.11 \pm 1.35 particles
Shi <i>et al.</i> (2022)	81 (wells)	1 L (3 samples)	μ -FTIR	4~72 n/L	PP, PE, PA, PS, PVC	Fragment, Fiber	0~2,500 μm	4~8 n/L
Samandra <i>et al.</i> (2022)	7 (bores)	1 L	LDIR	16~97 MPs/L	PE, PP, PS, PVC, PET, PC, PMMA, PA, PU	Fragment, Fiber	18~491 μm	0~8 MPs/L
Wan <i>et al.</i> (2022)	3 (borehole, well)	4 L	Raman, μ -FTIR	11~17 items/L	PP, PA, PU, EVA, PTFE, PE chlorinated, Rubber, Polyacetal	-	-	0~4 items/sample

는 최초의 그리고 유일한 지하수에 집중한 미세플라스틱 조사 및 연구사업으로 지난 3년간 농업지역, 카르스트 지역 그리고 투수성 현무암지역의 지하수에서 미세플라스틱의 존재, 농도 그리고 종류, 모양 등을 분석하고 있다(Lee *et al.*, 2020). 그런데 국내는 물론 세계적으로도 미세플라스틱 분석용 지하수 시료를 채취할 때 시료의 양, 전처리, 채취도구 등 채취방법에 대한 표준절차가 마련되어 있지 않아 연구자들마다 각기 다른 방법을 적용하고 있어 분석결과에 대한 신뢰 및 비교가 어려운 상황이다(Koelmans *et al.*, 2019).

이런 이유로 국내에서도 상기 연구그룹에서 현장에서 지하수 시료를 채취하는 방법(사전준비, 전처리, 채취장비 및 절차 등)을 정립하고 정도 관리하는 방법을 개발하는데 많은 노력을 기울이고 있다. 이런 인식하에 소수이지만 저명학술지에 나온 지하수 내 미세플라스틱 분석연구와 그 결과에 대하여 지속적으로 문제점을 지적하고 개선을 요구하고 있다(Lee *et al.*, 2021; Cha *et al.*, 2022; Chia *et al.*, 2022a, 2022b; Jeong and Lee, 2022). 현장에서 잘 통제되고 제대로 된 절차를 준수하지 않은 시료채취로 분석한 결과는 신뢰하기 어렵고 그에 기반한 후속연구

는 의미가 없다. 2022년 연초에 환경부 산하 국립환경과학원에서 토양·지하수 미세플라스틱 분석을 위한 표준화된 전처리 및 분석방법 도출 그리고 적용성 평가와 시범조사를 통한 실태조사를 위한 기반구축 사업을 시작한다고 천명한 것은 의미 있는 진전이라고 할 수 있다.

3. 해외 연구동향

앞서 언급한 바와 같이 세계적으로도 지하수 내의 미세플라스틱에 대한 조사 및 연구 자료는 극히 미미하다. 국내는 물론 세계 각국에서 수행하는 다수의 조사연구가 있다하더라도 적절한 동료평가와 발간경로(학술논문, 학술발표 자료 등)를 거치지 않은 경우는 파악도 어렵고 신뢰도가 낮다. 표 1은 구글 학술검색과 개별 저널검색을 통해 찾은 지하수 내 미세플라스틱에 대한 연구논문(리뷰 등을 제외하고 실제로 조사한 결과)을 보여준다.

국제적으로 최초로 지하수 내 미세플라스틱의 조사사례를 보고한 것은 Panno *et al.* (2019)이다. 이들은 일리노이주 남서 및 북서 카르스트 지역에서 2017년 11월 각각 8개의 샘(spring)과 3개의 관정

(<65 m) 그리고 6개의 샘플에서 미세플라스틱 분석을 위한 지하수 시료를 채취하였다. 지하수 시료는 한 지역에서는 라텍스 장갑을 끼고 2 L의 HDPE 병에 채취하였고 다른 지역에서는 1L 유리병에 담았다. 현장에서 수온, pH, 전기전도도(EC), 용존산소(DO) 그리고 산화환원전위(ORP)를 측정하였다. 채취한 지하수 시료는 0.45 µm 필터로 필터링을 하였고 분석은 현미경과 py-GCMS로 하였다. 분석결과 샘플의 미세플라스틱의 농도는 0.00~15.2개/L이며 지하수 관정은 0.86~4.35개/L이다.

확인된 미세플라스틱의 모양은 모두 섬유상(fiber)으로 파악되었고 이 지역의 미세플라스틱의 오염원은 인위적인 쓰레기와 개인 정화조의 폐수로 추정하였다. 이 논문에서 아쉬운 점은 지하수위 측정과 유동해석 등의 수리지질학적 조사가 없었고 채취한 지하수량이 적어 미세플라스틱의 농도가 왜곡될 우려가 있다는 것이다(Koelmans *et al.*, 2019). 또한 시료채취에 플라스틱 재질의 HDPE 시료병을 사용한 것은 바람직하지 않다. 그리고 관정에서 어떤 도구를 이용하여 시료를 채취한 것인지 설명이 없으며 단 한차례의 시료 채취만으로 어떤 해석을 한 것은 성급하다고 할 수 있다. 다만 이 논문이 세계 최초로 지하수 내 미세플라스틱의 존재를 보고하였다는 점은 평가할 만하다.

Manikanda *et al.* (2021)은 인도 첸나이 지역 두 곳의 도시쓰레기 매립장 인근 지하수의 미세플라스틱 존재를 조사하였다. 지하수 심도 3~30.48 m의 20개 관정에서 각각 1 L의 지하수를 유리병에 채수하였다. 현장에서 필터링 없이 채수 즉시 뚜껑을 닫고 실내 분석까지 4°C 냉장 보관하였으며 분석은 현미경, SEM, EDS와 ATR-FTIR로 하였다. 분석결과 지하수 내 미세플라스틱의 농도는 2~80개/L로 나타났으며 색깔은 주로 백색과 흑색을 보였다. 이 논문은 플라스틱의 종류(type)와 모양(shape)을 잘못 기술하고 있어 본 저자들로부터 지적을 받은 바 있으며 특히 미세플라스틱의 근원을 설명함에 있어 지하수 유동방향 등 기초적인 수리지질학적 분석이 없는 것이 약점으로 평가된다(Lee *et al.*, 2021).

한편 Selvam *et al.* (2021)은 인도 타밀나두 해안 지역의 지하수에 대한 미세플라스틱을 조사하였다. 총 44개의 물시료 중에서 24개가 지하수 시료였으며 약 20 L (지하수 2~5 m 깊이)를 테프론 펌프로

양수하였고 50 µm의 철재 필터를 통과시켰다. 각 시료마다 이중시료를 채취하였다. 미세플라스틱은 올림포스 현미경으로 확인하고 화학조성과 종류는 µ-FTIR로 분석하였다. 증류수 20 L를 이용하여 블랭크(blank)를 제조하여 분석한 결과 평균 3.11개의 미세플라스틱이 검출되었다. 지하수에서 검출된 미세플라스틱의 농도는 0~4.3개/L로 나타났으나 이 논문 또한 농도계산 및 분류 오류 등이 지적되었다(Jeong and Lee, 2022).

Shi *et al.* (2022)은 지하수 미세플라스틱과 항생제의 상관관계를 연구하였다. 조사지역은 북중국 평원의 520 km²의 한 도시로 2020년 9월 지하수관측 정에서 81개의 지하수 시료를 채취하였다. 미세플라스틱의 검출을 위해 한 관정 당 1 L의 시료를 3개 수집하였다. 여기서 단순히 시료채취 절차와 방법에 대하여 일반적인 가이드라인을 따랐다고 기술되어 있을 뿐 상세한 사항이 없어 적절한 시료채취인지는 평가는 하기 어렵다. 미세플라스틱의 동정과 정량화는 광학현미경과 µ-FTIR을 이용하였다. 분석결과 모든 지하수 관정에서 미세플라스틱이 검출되어있으며 농도는 4~72개/L (평균 29개/L)로 나타났다.

다른 지역과 달리 이렇게 많은 수의 지하수 미세플라스틱이 나온 것은 하수처리장과 매립지의 영향으로 분석하고 있다. 미세플라스틱의 크기는 주로 0~50 µm이며 종류는 주로 폴리아미드(PA), 폴리에틸렌(PE), 폴리프로필렌(PP), PVC 및 폴리스티렌(PS)으로 나타났다. 본 연구에서는 미세플라스틱의 크기가 항생제의 농도에 영향을 준다고 결론을 맺고 있다. 이 연구는 다른 연구와 비교적 지하수 시료의 개수가 많으며 품질관리를 위해 세심한 주의를 한 것이 돋보이지만 지하수 관정, 대수층에 대한 기술 및 지하수 유동분석 등 수리지질학적 조사는 매우 미흡하다.

한편 Samandra *et al.* (2022)은 호주 빅토리아주의 비피압 대수층의 지하수에서 미세플라스틱을 조사하였다. 7개의 상부 덮개가 있는 지하수 관정이 대상이며 지하수 심도(1.81~14.8 m), 스크린 구간(2~29 m), 전기전도도, pH 등의 정보가 제시되었다. 지하수 시료는 7개 관정에 대하여 1 L 유리병에 각각 3개의 시료를 채취하였다(총 21개). 흥미로운 것은 본 연구에서는 미세플라스틱은 균등하게 용존되어 있는 오염물질과 달리 퍼징을 하면 초기에 제거되어 과소평가되므로 양수를 하지 않았다고 설명하고 있다.

지하수 미세플라스틱 분석결과 크기는 18~491 μm (평균 89 μm)를 보였으며 개수는 16~97개/L (평균 38개/L)로 나타났다. 플라스틱의 종류는 주로 PE, PP, PS, PVC이며 모양은 94%가 파편상(fragment)이며 나머지 6%만이 섬유상을 보였다. 품질관리를 위해 현장배경 및 실내 블랭크를 각각 3개 준비하였으므로 0~8개로 상당히 적은 미세플라스틱이 검출되었다. 본 연구는 비교적 관리가 잘된 지하수에 대한 미세플라스틱 연구이며 품질관리를 위한 노력도 상당하다는 가치가 있어 보인다. 하지만 다른 연구와 마찬가지로 여전히 지하수 내 미세플라스틱의 이동과 확산 그리고 분포에 상당한 영향을 미치는 수리지질학적 조사나 분석은 없다는 것이 약점이다.

지하수 미세플라스틱으로 찾은 마지막 최신 논문은 Wan *et al.* (2022)이다. 이들은 중국 광둥지역의 도시고형물쓰레기 매립장의 상류 및 하류 총 3지점의 관정(2.3~3.7 m)에서 지하수를 채취하여 분석하였다. 4 L의 지하수 시료를 채취하였고 광학현미경과 $\mu\text{-FTIR}$ 로 분석하였다. 실내분석에서 있어 단계마다 알루미늄 호일로 밀봉하고 면재질의 실험복을 착용하였고 블랭크는 0~4개 정도의 미세플라스틱만이 검출되었다. 분석결과 지하수에서는 11~17개/L의 미세플라스틱이 검출되었으며 종류는 PU, PA, PP, PE, PS, PET 등 다양하게 나타났다. 크기는 대체로 20~150 μm 를 보였다. 이 논문은 지하수 시료를 다루기는 하지만 관정 개수가 적고 간이 관측정을 이용한 한계를 보였으며 수리지질학적 접근이 없었다.

위에서 살펴본 바와 같이 외국이라고 하여도 관정의 지하수 미세플라스틱을 분석한 연구는 극히 드물며 있다고 하여도 단순히 미세플라스틱의 존재 여부 및 개수 파악정도에 머물러 있으며, 깊이 있는 수리지질학적 조사와 해석 그리고 계절적 변화, 동반되는 오염물질과의 관계 규명 등은 매우 요원해 보인다.

4. 해결과제와 전망

4.1 시료채취 방법

지하수 미세플라스틱의 조사 및 연구에 있어 기초적인 걸림돌은 현장 시료채취 방법에 대한 표준적인 혹은 공통적으로 적용되는 절차 및 방법이 아직 없다는 것이다(Koelmans *et al.*, 2019; Jeong and Lee, 2022). 실험실에서 시료 채취전에 사용하는 모

든 도구에 대한 세척작업이 선행되어야 하며, 세척하는 증류수에 대한 미세플라스틱 존재유무도 평가해야 한다. 또한 모든 도구는 이동하는 동안 환경 및 공기 중으로부터 오염을 막기 위한 조치와 블랭크 시료도 준비해야 한다. 아울러 시료를 채취하는 도구는 플라스틱 재질로 된 것은 가능한 피하는 것이 좋다. 현장 조사자가 착용하는 옷, 신발 등은 물론 사용하는 핀셋, 필터, 연결호스 등도 플라스틱 제품은 바람직하지 않다.

현장에서 지하수 시료를 채취하기 위해 사용하는 각종 베일러는 대부분 플라스틱 재질이어서 옳지 않으며 지상펌프와 수중펌프 그리고 연결호스 및 노끈 등에도 플라스틱 재질이 있음을 유의해야 한다(Lee *et al.*, 2021). 한편 앞서 언급한 바와 같이 일반 지하수 시료를 채취할 경우 수행하는 관정 부피의 3~5배의 퍼징을 할 것인지도 문제가 될 수 있다. Samandra *et al.* (2022)의 지적처럼 퍼징을 하면 관정 지하수 내 미세플라스틱의 제거는 명약관화한데 이것을 어떻게 해석하고 표준화할 것인지도 해결과제 중 하나이다.

전 세계적으로 지하수 미세플라스틱을 연구하는 소수의 학자들 사이에 문제가 되는 것 중의 하나는 지하수 시료량에 대한 것이다. 일반적으로 미세플라스틱을 위한 지하수 시료는 분석에 필요한 수량만큼 바로 용기에 담은 방식(grab sampling)과 현장에서 필터링을 하여 부피를 줄이는 방식(volumed reduced sampling)으로 구분할 수 있다. 전자는 시료량이 작을 경우 가능한 방식이고 후자는 시료량이 많을 경우 유용하다. 지하수 미세플라스틱 조사 사례와 같이 카르스트 지역, 매립지, 하수처리장 근처의 지하수가 아닌 경우 일반적인 지하수 관정에서는 적은 수의 미세플라스틱의 존재가 예상된다. 이런 이유로 음용수나 지하수의 경우 상당히 많은 양(예를 들어 500 L)의 지하수 시료의 채취를 권고하고 있다(Koelmans *et al.*, 2019; Jeong and Lee, 2022).

많은 양의 지하수를 채취하지 않을 경우 미세플라스틱을 발견하지 못하거나 저평가될 우려가 있다. 현재는 어떤 방법과 시료량이 적정하냐에 대한 연구가 진행 중이며 최근 국제표준기구(ISO) 수질분석 위킹 그룹에서 이에 대한 초안을 마련 중이며 시료량에 있어서는 500 L 기준으로 의견이 모아지는 것으로 전해진다. 이 경우에도 여전히 문제가 남는데 오염지역의 경우 그와 같은 다량의 시료는 불필요하며 또한 필터

링 시간이 매우 길어진다는 현실적인 제약이 있다.

4.2 분석기기

현재로서 어떤 방법으로 분석하여야 한다는 기준은 없지만 미세플라스틱을 분석하는 방법에는 여러 가지가 있다. 가장 대표적인 방법이 μ -FTIR, 라만(Raman) 분광법 그리고 열적방법으로 py-GCMS를 들 수 있다(Kim *et al.*, 2019). 두 방법은 현미경으로 미세플라스틱을 찾아 카운팅하며 화학조성(종류)을 구분하는 방법이다. 매우 노동집약적인 방법으로 전자는 보통 20 μm , 후자는 1 μm 까지 분석이 가능하다. 그러나 미세플라스틱은 크기가 작아질수록 그 개수는 기하급수적으로 늘어나며 카운팅의 정확성과 기술적 어려움이 급증한다.

2022년 현재 보통 μ -FTIR로 분석하여 20 μm 이상만을 정성 및 정량 분석한다. 그러나 개수나 위해성 측면에서 그보다 매우 작은 크기의 미세플라스틱 정량화의 필요성이 대두되고 있어 라만분광법이 적용되나 현실적인 한계가 있다. 이런 이유로 질량기준의 정량화를 위한 py-GCMS 혹은 FED-GCMS 연구도 활발하다(Anger *et al.*, 2018). 상기한 분석에 있어 머신러닝(machine learning) 기법의 적용을 통한 자동화 기술의 발전이 경주되고 있어 분석비용과 분석기간 등에 대한 기술적 어려움은 차츰 완화될 것으로 기대한다. 다만 μ -FTIR 기기의 기본단가가 2억원을 넘고 있어 일반연구자가 구입하여 연구하기에 어려움이 있으며 우리나라에서 미세플라스틱에 대한 전문적인 분석서비스를 제공하는 기관이 늘어나고 있는 추세이다.

4.3 거동예측 및 위해성

미세플라스틱에서 도전적 분야 중에 하나로 지하수 대수층에서 이들의 거동을 규명하고 예측하는 것이다. 미세플라스틱을 일반적인 용존 오염물질로 보고 그 거동을 모사하는 것이 가장 쉬운 접근법이기도 하나 최근의 연구를 통해 콜로이드 혹은 나노입자의 관점에서 거동을 모의하고 해석하는 시도 등도 있어 왔다(Alimi *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2019; Ryu *et al.*, 2021).

미세플라스틱의 거동 분석에서 어려운 점은 이들의 크기와 모양이 매우 다양하여 그것에 따라 거동양상이 달라질 수 있다는 점과 화학조성에 있어서도

지하수와 반응 그리고 주변 물질과의 물리적, 화학적 반응이 다양할 수 있다는 점이다. 그러므로 다양한 종류와 크기의 미세플라스틱에 대하여 실내 및 현장실험 및 이론연구를 통해 이들의 거동을 지배하는 방정식을 구성하고 예측하는 연구가 시급히 필요하다(Kim and Lee, 2020).

그런데 앞서 언급한 바와 미세플라스틱이 최근에 환경적 문제로 대두되었지만 이것이 실제로 생태계와 인간의 건강에 어떤 직접적인 악영향을 주는지에 대한 연구는 미흡하다. 최근에 건강한 성인들의 혈액에서 PP, PS, PE, PET 등 미세플라스틱(0.0007 mm)을 발견하고 이런 미세플라스틱이 인체에 만성염증을 유발한다는 보고가 있다(Leslie *et al.*, 2022). 인체 내 미세플라스틱의 경로로는 대기 중 호흡, 음식과 의복 등을 통해서 가능하다. 그러나 지하수 사용(음용, 샤워, 농산물 관개 등) 등을 통한 미세플라스틱의 노출이 얼마나 되며 위해성이 있는지 부분도 연구가 필요한 부분이다(e.g., Wan *et al.*, 2022).

5. 결론

본 리뷰에서 최근 신규 환경오염물질로 관심 받고 있는 지하수 내 미세플라스틱에 대하여 국내외 연구동향을 살펴보았다. 주지한 바와 같이 전세계적으로 지하수 내 미세플라스틱에 대한 조사 및 연구 논문은 손에 꼽을 정도도 미미하다. 이는 현장에서 지하수 시료를 채취하는 방법 또 실내분석 하는 방법 등에 대한 표준절차 및 기준이 아직 확립되어 있지 않은 것과 무관치 않다. 또한 아직은 미세플라스틱을 분석하는데 많은 시간과 노력이 소모되어 분석단가도 매우 높은 실정이다. 다만 최근 기계학습 등을 통한 분석의 자동화 등 기술발전이 이루어지고 있어 미세플라스틱 연구에 상당한 탄력을 받을 것으로 기대된다. 미세플라스틱의 인체 위해성에 대한 우려들이 고조되는 가운데 우리나라에서도 이와 관련한 조사 및 연구가 탄력을 받을 수 있기를 기대한다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 미세플라스틱 측정 및 위해성평가 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2020003110010).

또한 이 논문은 2022년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 임(No.2019R1A6A1A03033167).

REFERENCES

- Alimi, O.S., Budarz, J.F., Hernandez, L.M. and Tufenkji, N.T., 2018, Microplastics and nanoplastics in aquatic environments: Aggregation, deposition, and enhanced contaminant transport. *Environmental Science and Technology*, 52, 1704-1724.
- Anger, P.M., von der Esch, E., Baumann, T., Elsner, M., Niessner, R. and Iveleva, N.P., 2018, Raman microspectroscopy as a tool for microplastic particle analysis. *Trends in Analytical Chemistry*, 109, 214-226.
- Cha, J., Lee, J.Y. and Chia, R.W., 2022, Comment on the paper "Microplastic contamination of an unconfined groundwater aquifer in Victoria, Australia". *Science of the Total Environment*, 820, 153121.
- Cha, J., Lee, J.Y., Jeong, E. and Kim, Y.I., 2021, Occurrence and distribution of microplastic in groundwater in agricultural areas in Yanggu, Gangwon. 2021 Joint Fall Meeting of Korean Geological Societies (Abstracts), Jeju, October 26-28, 441 p (in Korean).
- Chia, R.W., Lee, J.Y. and Cha, J., 2022a, Comment on the paper 'Soil microplastic pollution under different land uses in tropics, southwestern China'. *Chemosphere*, 298, 134289.
- Chia, R.W., Lee, J.Y. and Cha, J., 2022b, Comment paper on 'Seasonal variations and feedback from microplastics and cadmium on soil organisms in agricultural fields'. *Environmental International* (in review).
- Chia, R.W., Lee, J.Y., Kim, H. and Jang, J., 2021, Microplastic pollution in soil and groundwater: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19, 4211-4224.
- Choi, H.-J., An, J. and Choi, S.S., 2020, Research trend on the accumulation routes of microplastics in soil and their analytical methodologies. *Applied Chemistry for Engineering*, 31, 360-367 (in Korean with English abstract).
- Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C. and Galloway, T.S., 2011, Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 62, 2588-2597.
- Eerkes-Medrano, D., Leslie, H.A. and Quinn, B., 2019, Microplastics in drinking water: A review and assessment. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 7, 69-75.
- Guimarães, A.T.B., Charlie-Silva, I. and Malafaia, G., 2021, Toxic effects of naturally-aged microplastics on zebrafish juveniles: A more realistic approach to plastic pollution in freshwater ecosystems. *Journal of Hazardous Materials*, 407, 124833.
- Haward, M., 2018, Plastic pollution of the world's seas and oceans as a contemporary challenge in ocean governance. *Nature Communication*, 9, 667.
- Jeong, E. and Lee, J.Y., 2022, Comment on "Hazardous microplastic characteristics and its role as a vector of heavy metal in groundwater and surface water of coastal south India". *Journal of Hazardous Materials*, 421, 126693.
- Jeong, E., Lee, J.Y. and Kim, H., 2020, Occurrence of microplastics in groundwater in rural area. 2020 Fall Joint Conference of the Geological Sciences (Abstracts), Online, October 27-29, 135 p (in Korean).
- Jeong, E., Lee, J.Y., Kim, Y.I., Park, S. and Jang, J., 2021, Effects of agricultural practices on microplastic contamination in karst aquifer. 2021 Joint Fall Meeting of Korean Geological Societies (Abstracts), Jeju, October 26-28, 425 p (in Korean).
- Jung, J.W., Kim, S., Kim, Y.S., Jeong, S. and Lee, J., 2022, Tracing microplastics from raw water to drinking water treatment plants in Busan, South Korea. *Science of the Total Environment*, 825, 154015.
- Kasavan, S., Yusoff, S., Fakri, M.F.R. and Siron, R., 2021, Plastic pollution in water ecosystems: A bibliometric analysis from 2000 to 2020. *Journal of Cleaner Production*, 313, 127946.
- Kim, H. and Lee, J.Y., 2020, Emerging concerns about microplastic pollution on groundwater in South Korea. *Sustainability*, 12, 5275.
- Kim, H., Ryu, H.S., Lee, J.Y., Kwon, K.D. and An, J., 2020, Modeling of microplastics transport in groundwater environment. 2020 Fall Joint Conference of the Geological Sciences (Abstracts), Online, October 27-29, 154 p (in Korean).
- Kim, Y.T., Han, W.S. and Yoon, H.O., 2019, Mobility of microplastics in subsurface environments: Current knowledge and perspectives. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 24, 1-12 (in Korean with English abstract).
- Koelmans, A.A., Nor, N.H.M., Hermesen, E., Kooi, M., Mintenig, S.M. and De France, J., 2019, Microplastics in freshwaters and drinking water: Critical review and assessment of data quality. *Water Research*, 155, 410-422.
- Lau, W.W.Y., Shiran, Y., Bailey, R.M., Cook, Ed., Stuchtey, M.R., Koskella, J., Velis, C.A., Godfrey, L., Boucher, J., Murphy, M.B., Thompson, R.C., Jankowska, E., Castillo Castillo, A., Pilditch, T.D., Dixon, B., Koerselman, L., Kosior, E., Favoino, E., Gutberlet, J., Baulch, S., Atreya, M.E., Fischer, D., He, K.K., Petit, M.M., Sumaila, U.R., Neil, E., Bernhofen, M.V., Lawrence, K. and Palardy, J.E., 2020, Evaluating scenarios toward zero plastic pollution. *Science*, 369, 1455-1461.
- Lee, H.S. and Kim, Y.J., 2017a, Consideration on quantitative and qualitative analysis for microplastic in various media. *Journal of Korea Society of Waste Management*,

- 34, 537-545 (in Korean with English abstract).
- Lee, H.S. and Kim, Y.J., 2017b, Estimation of microplastics emission potential in South Korea - For primary source-. The Sea: Journal of Korean Society of Oceanography, 22, 135-149 (in Korean with English abstract).
- Lee, J.Y., Cha, J., Jeong, E. and Kim, Y.I., 2021, Comment on "Spatial distribution of microplastic concentration around landfill sites and its potential risk on groundwater". Chemosphere, 284, 131376.
- Lee, J.Y., Jung, E., Kwon, K.D., Kim, H. and Ah, J., 2020, Study on occurrence, fate and transport of microplastics in groundwater. 2020 Fall Joint Conference of the Geological Sciences (Abstracts), Online, October 27-29, 152 p (in Korean).
- Leslie, H.A., van Velzen, M.J.M., Brandsma, S.H., Vethaak, D., Garcia-Vallejo, J.J. and Lamoree, M.H., 2022, Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. Environmental International, 107199, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107199>.
- Li, W.C., Tse, H.F. and Fok, L., 2016, Plastic waste in the marine environment: A review of sources, occurrence and effects. Science of the Total Environment, 566-567, 333-349.
- Macleod, M., Arp, H.P.H., Tekman, M.B. and Jahnke, A., 2021, The global threat from plastic pollution. Science, 373(6550), 61-65.
- Manikanda, B.L., Usha, N., Vaikunth, R., Kumar, P.R., Ruthra, R. and Srinivasalu, S., 2021, Spatial distribution of microplastic concentration around landfill sites and its potential risk on groundwater. Chemosphere, 277, 130263.
- Myeong, H. and Kwon, K.D., 2020, Transport of micro- and nano-plastics in groundwater: The environmental mineralogy perspective. 2020 Fall Joint Conference of the Geological Sciences (Abstracts), Online, October 27-29, 156 p (in Korean).
- Oßmann, B.E., Sarau, G., Holtmannspotter, H., Pischetsrieder, M., Christiansen, S.H. and Dicke, W., 2018, Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water. Water Research, 141, 307-316.
- Panno, S.V., Kelly, W.R., Scott, J., Zheng, W., McNeish, R.E., Holm, N., Hoellein, T.J. and Baranski, E.L., 2019, Microplastic contamination in karst groundwater systems. Groundwater, 57, 189-196.
- Rochman, C.M., 2018, Microplastics research-from sink to source. Science, 360(6384), 28-29.
- Roebroek, C.T., Harrigan, S., van Emmerik, T.H.M., Baugh, C., Eilander, D., Prudhomme, C. and Pappenberger, F., 2021, Plastic in global rivers: are floodings making it worse?. Environmental Research, 16, 025003.
- Roman, L., Schuyler, Q., Wilcox, C. and Hardesty, B.D., 2021, Plastic pollution is killing marine megafauna, but how do we prioritize policies to reduce mortality?. Conservation Letters, 14, e12781.
- Ryu, H.S., Kim, H. and Lee, J.Y., 2020, Survey research and method of microplastic of surface water and groundwater in Karst area. 2020 Fall Joint Conference of the Geological Sciences (Abstracts), Online, October 27-29, 155 p (in Korean).
- Ryu, H.S., Moon, J., Kim, H. and Lee, J.Y., 2021, Modeling and parametric simulation of microplastic transport in groundwater environments. Applied Sciences, 11, 7189.
- Samandra, S., Johnston, J.M., Jaeger, J.E., Symons, B., Xie, S., Currell, M., Ellis, A.V. and Clarke, B.O., 2022, Microplastic contamination of an unconfined groundwater aquifer in Victoria, Australia. Science of the Total Environment, 802, 149727.
- Selvam, S., Jesuraja, K., Venkatramanan, S., Roy, P.D. and Kumari, V.J., 2021, Hazardous microplastic characteristics and its role as a vector of heavy metal in groundwater and surface water of coastal south India. Journal of Hazardous Materials, 402, 123786.
- Senko, J.F., Nelms, S.E., Reavis, J.L., Witherington, B., Godley, B.J. and Wallace, B.P., 2020, Understanding individual and population-level effects of plastic pollution on marine megafauna. Endangered Species Research, 43, 234-252.
- Shi, J., Dong, Y., Shi, Y., Yin, T., He, W., An, T., Tang, Y., Hou, X., Chong, S., Chen, D., Qin, K. and Lin, H., 2022, Groundwater antibiotics and microplastics in a drinking-water source area, northern China: Occurrence, spatial distribution, risk assessment, and correlation. Environmental Research, 210, 112855.
- Tiseo, I., 2020, Global plastic production 1950-2020. <https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/> (March 20, 2022).
- Viaroli, S., Lancia, M. and Re, V., 2022, Microplastics contamination of groundwater: Current evidence and future perspectives. A review. Science of the Total Environment, 824, 153851.
- Wan, Y., Chen, X., Liu, Q., Hu, H., Wu, C. and Xue, Q., 2022, Informal landfill contributes to the pollution of microplastics in the surrounding environment. Environmental Pollution, 293, 118586.
- Xiang, Y., Jiang, L., Zhou, Y., Luo, Z., Zhi, D., Yang, J. and Lam, S.S., 2022, Microplastics and environmental pollutants: Key interaction and toxicology in aquatic and soil environments. Journal of Hazardous Materials, 422, 126843.

Received : March 26, 2022

Revised : April 19, 2022

Accepted : April 20, 2022