

연구논문

## 강원지역 주요 고랭지 밭 유역의 미세플라스틱 오염 현황

임채휘 · 주성현 · 김유림 · 윤여준<sup>†</sup>

연세대학교 환경에너지공학과

## Microplastic Pollution Status of Major Highland Agricultural Watersheds in Gangwon

Chaehwi lim, Seonghyeon Ju, Yurim Kim, and Yejoon Yoon<sup>†</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental and Energy Engineering, Yonsei University, Wonju, 26493, Republic of Korea

Received February 25, 2025 / Revised March 18, 2025 / Accepted April 09, 2025

In South Korea, various local governments, including Seoul, Incheon, Gyeonggi, Gyeong sang, and Joella, are proactively assessing the extent of microplastic pollution in freshwater. In contrast, microplastic pollution research in Gangwon Special Self-Governing Province is lacking. To address this, in this study, sampling was undertaken in Hongcheon and Jeongseon, along with in highland agricultural watersheds, which are major sources of non-point source pollution. Microplastic analysis of the samples was conducted using a micro-Raman spectrometer. During non-rainy periods, microplastic concentrations in river samples were approximately 13-438 particles/L and 40-452 particles/L in Hongcheon and Jeongseon, respectively. During rainy periods, the concentrations were approximately 67-313 particles/L and 98-103 particles/L in Hongcheon and Jeongseon, respectively. The types of microplastics detected in the samples included polyethylene, polypropylene, polystyrene, polyvinyl chloride, and polyethylene terephthalate, with polyethylene and polypropylene being the most prevalent. From this study, a database on microplastic pollution levels and types present in the highland farming watersheds of Gangwon was established.

**Key words:** Microplastics, Freshwater, Highland agricultural watersheds, Raman, Gangwon

### 1. 서 론

플라스틱은 1950년대부터 대량 생산이 이뤄지면서 인간의 실생활에서 필수적인 소재로 자리 잡았다. 경제성, 견고함, 안정성, 편의성, 경량성 등의 장점으로 인해 다양한 분야에 활용되면서 플라스틱 생산과 소비는 급격히 증가하고 있다.<sup>1)</sup> 전 세계 플라스틱 생산량은 2020년대까지 3억 6,700만 톤에 달하며, 플라스틱 폐기물량 또한 플라스틱 사용량 증가에 비례하여 지속적으로 증가하는 추세이다.<sup>2)</sup> 특히, COVID-19 팬데믹으로 인한 마스크, 장갑, 배달서비스 이용이 증가하면서 일회용 플라스틱 사용량이 더욱 급격히 늘어났다.<sup>3)</sup> 플라스틱 폐기물이 적절히 관

리되지 않으면 대기, 해양, 담수, 지하수, 토양 등 다양한 환경으로 배출되며, 이 폐기물들은 물리적·화학적·생물학적 요인에 의해 점차적으로 분해되어 미세플라스틱을 생성하고 환경오염을 유발한다.<sup>4,5)</sup> 미세플라스틱은 일반적으로 1  $\mu\text{m}$ 에서 5 mm의 크기를 가진 플라스틱을 의미한다. 미세플라스틱은 생성 방식에 따라 두 가지로 구분된다. 인위적으로 작은 크기로 제조한 1차 미세플라스틱과 자외선, 파도 등 물리·화학적인 환경요인에 의해 생성된 것을 2차 미세플라스틱이라 한다. 미세플라스틱은 크기가 작아질수록 표면적이 증가하여 중금속, 난분해성물질, 염료 등의 오염물질들과 상호작용하여 표면에 흡착된다.<sup>6)</sup> 이러한 특성으로 인해 인간 및 동식물이 미

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

Tel: 82-033-760-2461, E-mail: yajoon@yonsei.ac.kr

세플라스틱을 섭취 시 중추신경계, 소화계, 호르몬계 등에 악영향을 미칠 수 있다. 환경 내 미세플라스틱의 존재가 확인되면서 미국, 유럽 등 여러 국가에서 이에 대한 관심이 증가하였고, 다양한 환경에 배출된 미세플라스틱 추적하기 위한 모니터링 및 오염 현황 조사 등의 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>7,8)</sup>

국내에서는 해수, 담수, 토양, 대기 등 다양한 환경매체에서 미세플라스틱에 대한 연구가 수행되고 있다. 특히 담수 환경에서는 서울특별시, 경기도, 인천광역시, 경상도, 전라도 등 여러 광역자치단체에서 하천 내 미세플라스틱 오염 현황을 파악하기 위한 연구가 진행되고 있다.<sup>9-15)</sup> 경기도에 위치한 경안천에서는 1.8~9.9 particles/L, 오산천에서는 0.5~6.6 particles/L의 미세플라스틱이 검출되었다. 한강수계인 팔당호에서는 1,383~7,560 particles/m<sup>3</sup>, 경상도의 낙동강에서는 8~11 particles/L의 미세플라스틱이 발견되었다. 검출된 플라스틱의 종류는 PE(polyethylene), PP(polypropylene), PET(polyethylene terephthalate), PS(polystyrene), PVC(polyvinylchloride) 등 다양한 종류의 플라스틱이 발견되었다. 한편, 청정지역으로 여겨지는 강원특별자치도의 경우 타 지역에 비해 미세플라스틱에 대한 연구가 미비한 상황이며, 이에 대한 경각심을 가지고 추가적인 연구와 모니터링이 필요하다. 강원특별자치도는 한강의 발원지가 위치한 지역으로, 인구 절반 이상이 한강 유역에 거주하고 있다. 이에 따라 한강수계 제2단계(2021~2030년) 수질오염총량관리 기본계획이 시행되고 있으며, 기존에 모니터링되고 있는 수질오염물질 외에도 신중오염물질에 대한 신속한 대처 및 관리가 필요하다.<sup>16)</sup>

강원특별자치도 내 하천은 강우시 유입되는 비점오염물질로 인해 수질과 수생태계에 악영향을 미쳐 많은 문제가 발생하고 있다. 기존의 도시, 도로, 사업장 등에서 배출되는 비점오염물질 뿐만 아니라 객토 작업, 토석 채취, 고랭지 농업 등의 농업 활동으로 인한 비점오염물질의 유출 또한 하천 환경에 큰 영향을 미치고 있다. 특히 농지에서 유출된 비점오염물질은 흙탕물의 존재로 하천 내 탁도와 SS가 과도하게 증가시키는 주요 원인 중 하나로 작용하고 있다.<sup>17)</sup> 이에 따라 강원지역 내 지자체는 비점오염원의 유출을 줄이기 위해 완충식생대 조성, 비점오염저감사업 등을 추진하면서 비점오염원의 유출을 방지하고 하천 환경을 보호하기 위한 적극적인 대응이 이루어지고 있다.

본 연구에서는 강원특별자치도 내 비점오염원의 유출이 많은 고랭지밭 유역의 하천을 대상으로 미세플라스틱 오염현황을 조사하였다. 기존에 강원특별자치도 하천 내

미세플라스틱 오염에 대한 데이터가 부족하기 때문에, 이에 대한 데이터베이스(D/B)를 구축하고, 비강우 하천시료와 강우 하천시료로 구분하여 비교 분석하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 시료 채취 지점 선정

강원특별자치도 내 조사지점은 홍천군과 정선군에서 시료 채취를 진행하였다. Table 1을 참고하면 홍천군과 정선군의 경지면적은 각각 11,010 ha, 7,694 ha로 강원지역 내 경지면적이 넓은 지점인 것을 확인할 수 있다. 두 지점 모두 농촌 및 산간지역에 위치하며 비점오염 측정망이 설치되어 수질 모니터링이 이루어지고 있는 홍천군 자운천과 정선군 골지천을 시료 채취 지점으로 선정하여 미세플라스틱 오염 여부를 확인하였다(Fig. 1). 북한강 지류로 속해 있는 자운천과 남한강 지류인 골지천은 한강에 직접적인 영향을 미칠 가능성이 있어 연구목적에 부합하는 지점으로 판단하여 연구를 수행하였다. Table 2에 제시된 2023년 국립환경과학원의 전국 오염원 조사자료에 따르면, 홍천군 내면과 정선군 임계면의 토지 이용 현황에서 임야가 전체 면적의 약 80%, 전·답은 약 11~12%를 차지하는 것으로 나타났다. 따라서 하천 수질 오염원은 임야 및 전·답에서 큰 영향을 받는 것으로 판단된다. 시료 채취 지점인 홍천 자운천, 정선 골지천 인접 지역은 고랭지 농업이 발달한 지역으로, 농업활동에 사용되는 플라스틱 제품의 영향 또한 클 것으로 예상된다.

### 2.2. 실험 방법

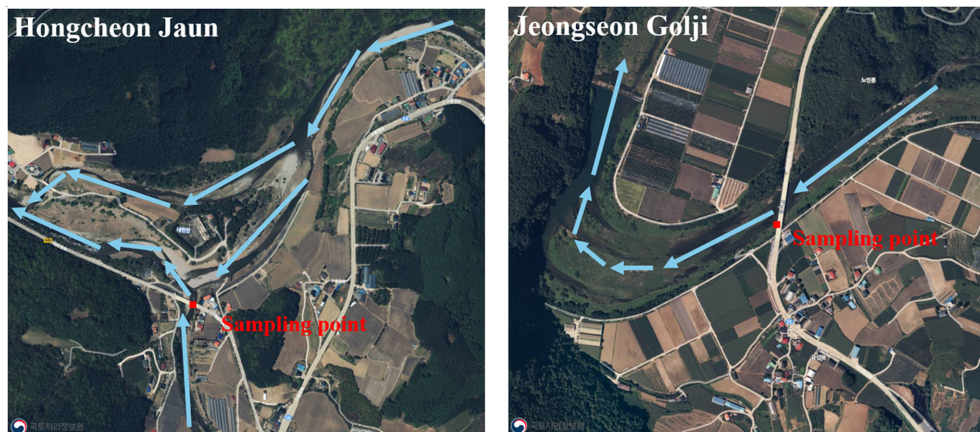
#### 2.2.1. 시료 채취 조건

수질오염공정시험기준의 하천수 시료 채취기준에 따라 Fig. 2와 같이 수면폭을 좌우로 2 등분하여 3 개 지점에서 시료를 채취하여 모두 혼합하여 대시료로 제조하여 연구를 수행하였다. 하천수 시료 채취는 두 지점 모두 교량 위에서 스테인리스강으로 제작된 시료 채취 장치를 이용하여 진행하였다. 자운천과 골지천의 수심은 깊지 않아 하천 표층에서 시료를 채취하였으며, 채취량은 10 L로 설정하였다. 현장에서 시료 내 존재하는 부유물질을 제거하기 위해 50  $\mu$ m 공극의 스테인리스강 거름망으로 여과 후 실험실로 운송하였다. 본 연구에서는 5-50  $\mu$ m 크기의 미세플라스틱을 대상으로 오염 현황 조사를 실시하였다.

시료 채취는 강수의 영향을 최소화하기 위해 선행무강우일수 최소 3 일 이상인 조건에서 4월부터 8월까지 매월 1 회씩 진행하였다.(비강우 하천시료) 그리고 우기에

**Table 1.** Changes in land use types by city and county in Gangwon<sup>18)</sup>

	2012			2022		
	Total (ha)	Paddy (ha)	Upland (ha)	Total (ha)	Paddy (ha)	Upland (ha)
Total	112,007	41,325	70,682	101,104	31,092	70,012
Chuncheon	7,053	2,174	4,879	5,745	1,291	4,454
Wonju	9,056	4,201	4,855	7,718	3,231	4,487
Gangneung	8,035	3,226	4,809	7,018	2,577	4,441
Donghae	996	280	716	774	115	659
Taebaek	1,027	3	1,024	1,211	0	1,211
Sokcho	619	428	191	552	249	303
Samcheok	4,688	1,080	3,608	4,051	609	3,442
Hongcheon	12,581	3,973	8,609	11,010	2,467	8,542
Hoengseong	10,226	3,566	6,660	9,440	2,383	7,057
Yeongwol	6,749	797	5,952	5,814	480	5,335
Pyeongchang	9,873	658	9,214	9,882	465	9,417
Jeongseon	7,515	245	7,270	7,694	247	7,447
Cheorwon	13,606	10,935	2,671	12,216	9,808	2,408
Hwacheon	3,275	1,046	2,229	2,770	490	2,281
Yanggu	4,975	2,051	2,924	4,653	1,299	3,354
Inje	4,323	1,064	3,260	3,577	708	2,870
Goseong	4,070	3,388	682	4,058	3,028	1,029
Yangyang	3,339	2,210	1,129	2,922	1,646	1,275

**Fig. 1.** Sampling sites: Jaun watershed in Hongcheon and Golji watershed in Jeongseon<sup>20)</sup>**Table 2.** 2023 Land survey data for Nae-myeon in Hongcheon-gun and Imgae-myeon in Jeongseon-gun<sup>19)</sup>

	Land use type and percentage of the total land use					
	Land fields	Orchards	Pastures	Forests	Land	Factories
Hongcheon	11.15	0.02	1.59	82.98	0.34	0.00
Nae-myeon	School	Warehouses	Roads	Levees	Streams	Others
	0.02	0.78	0.77	0.00	0.22	2.11
Jeongseon	Land fields	Orchards	Pastures	Forests	Land	Factories
Imgye-myeon	12.13	0.01	0.08	79.93	0.08	0.04
	School	Warehouses	Roads	Levees	Streams	Others
	0.00	0.89	0.89	0.24	3.91	1.21

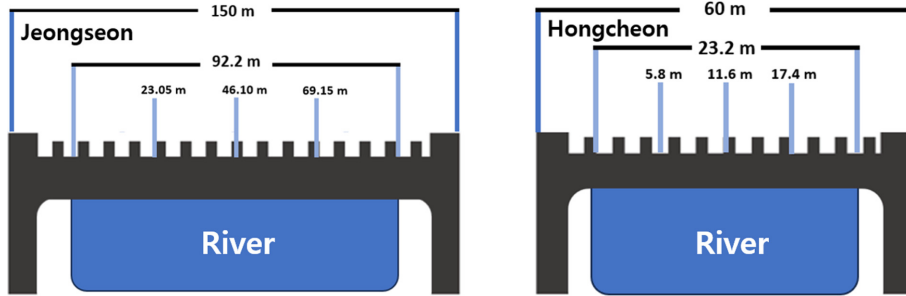


Fig. 2. Sampling points in Golji watershed in Jeongseon and Jaun watershed in Hongcheon.

발생하는 많은 강수에 의한 비점오염원의 하천 유입에 의한 미세플라스틱 오염 영향을 확인하기 위해 일강수량 25 mm 이상의 조건에서 6 월과 7 월에 매월 1 회씩 추가로 시료를 채취하였다.(강우 하천시료)<sup>21)</sup>

### 2.2.2. 전처리 과정

하천시료 내 미세플라스틱을 용이하게 분석하기 위해서는 전처리 과정이 필요하다. 현재 국내에는 미세플라스틱 공정시험기준이 아직 제정되지 않았으므로, 선행연구에서 제시된 전처리법을 참고하여 하천 시료의 전처리를 수행하였다. 하천시료의 전처리 과정은 유기물 산화 - 밀도 분리 - 시료 액상화의 순서로 이루어졌다. 또한, 전처리에 사용된 기구는 분석에 영향을 미치지 않도록 플라스틱류 재질을 배제한 유리나 스테인리스강 등으로 구성된 재질을 선택하였다. 시료 내 유기물을 제거하기 위해 35% 과산화수소수( $H_2O_2$ )를 시료가 담긴 용기에 주입한 뒤 70°C 오븐에서 3 시간 동안 반응시켜 유기물을 분해하였다. 유기물 산화가 완료된 시료는 잔여해 있는 불순물을 제거하기 위해 밀도 분리 과정을 진행한다. 밀도 분리용액은 염화아연( $ZnCl_2$ )을 사용하였으며, 평균 1.546 ( $\pm 0.002$ )  $g/cm^3$  (20°C, 1 기압)의 밀도 값을 갖도록 972  $g/L$ 의 농도로 제조하였다. 밀도분리장치에 시료와 염화아연을 투입하여 1 시간 동안 방치하여 밀도차에 의한 입자상을 분리하였다. 밀도분리 후 전처리가 끝난 시료는 STS필터(5  $\mu m$ )로 여과한 후 에탄올과 증류수로 세척하였다. 이후 40 mL 증류수에 분산하여 액상화한 시료를 유리 바이알에 담아 밀봉한 뒤 보관하였다.<sup>22)</sup> 전처리 과정에서 발생할 수 있는 외부 유입을 고려하기 위해 증류수를 사용하여 배경 시료를 제작하고, 동일한 전처리 과정을 거친 후 라만 분석을 수행하여 신뢰성을 향상시켰다.

### 2.2.3. 미세플라스틱 분석 방법

환경 내 존재하는 미세플라스틱을 식별하고 정량화하

기 위해 다양한 미세플라스틱 분석법에 대한 연구가 진행되고 있지만, 주로 분광분석법과 열중량분석법이 적용되고 있다. 분광분석법은 주로 라만분광법(Raman)과 푸리에 변환 적외선분광법(FTIR)이 미세플라스틱 분석에 많이 사용되고 있다. 푸리에 변환 적외선분광법은 20  $\mu m$ 까지의 크기를 가진 미세플라스틱을 분석할 수 있으며, 라만분광법은 1  $\mu m$  크기까지 분석이 가능하다. 연구 결과에 따르면, 미세플라스틱의 크기가 작을수록 더 큰 위험을 초래할 가능성이 높아, 더욱 작은 크기의 미세플라스틱에 대한 시료 채취와 분석이 필요하다. 최근 2024년에 국제표준화기구(ISO)는 라만분광기를 이용한 미세플라스틱 표준 분석법인 ‘Plastics-Plastics identification using Raman spectrometric method’(ISO 6775)을 발표하였다.<sup>23)</sup> 이에 본 연구에서는 마이크로-라만분광기( $\mu$ -Raman)를 이용하여 스펙트럼을 측정하여 미세플라스틱을 식별하였다. 전처리가 완료된 시료 40 mL로 라만 분석을 진행하면 다양한 입자의 존재로 인해 라만 분석 소프트웨어에 과부하가 발생하고 전수조사가 어려워진다. 분석을 원활하게 수행하기 위해 40 mL 중 3 mL를 취하여 5  $\mu m$  공극의 실리콘 필터에 여과한 후, 필터 위의 3지점을 분석하여 리터당 미세플라스틱 개수로 환산하였다. 전처리 과정의 배경시료를 분석한 결과, 0-112 particles/L의 미세플라스틱을 확인하여 라만 분석 결과에 반영하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 하천 내 미세플라스틱 분석 결과

#### 3.1.1 4~8월 하천 미세플라스틱 정량분석 결과

하천 시료 채취는 2024년 4월부터 8월까지 홍천과 정선에서 월 1 회 진행되었다. 라만분광기를 이용한 미세플라스틱 분석 결과, 홍천에서는 4 월 76.04 particles/L, 5 월 214.70 particles/L, 6 월 102.88 particles/L, 7 월 438.35 particles/L, 8 월 13.42 particles/L의 미세플라스

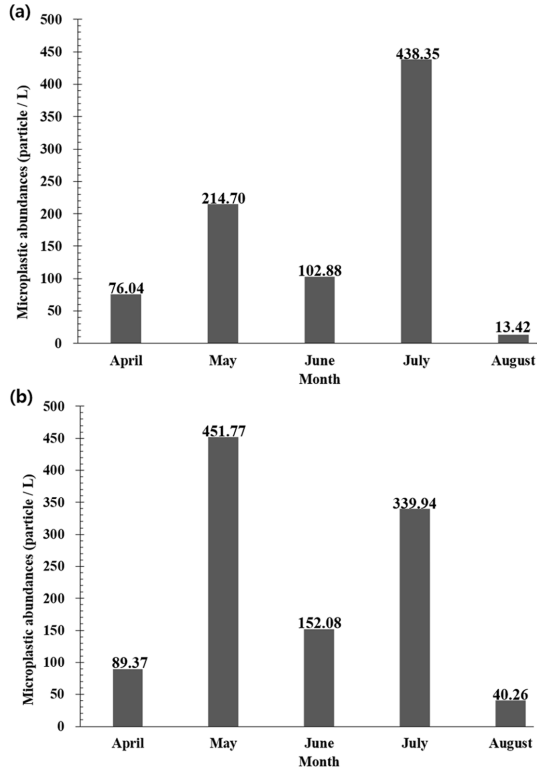


Fig. 3. Raman analysis results of microplastics in (a) Hongcheon and, (b) Jeongseon samples from April to August.

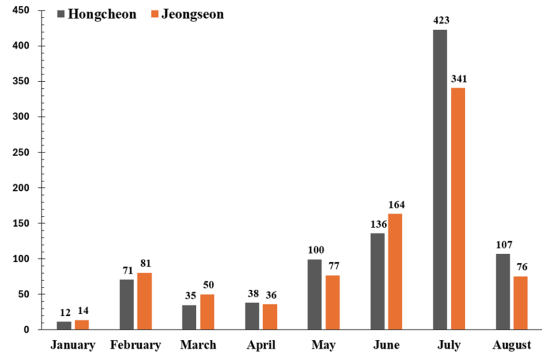


Fig. 4. Monthly rainfall data for Hongcheon and Jeongseon from January to August 2024<sup>24)</sup>.

틱이 검출되었으며, 정선은 4 월 89.37 particles/L, 5 월 451.77 particles/L, 6 월 152.08 particles/L, 7 월 339.94 particles/L, 8 월 40.26 particles/L이 검출되었다. 홍천과 정선 모두 미세플라스틱 오염 정도가 높은 것으로 확인 되었으며, 두 지역 모두 4월에는 미세플라스틱 농도가 비교적 낮았으나 5월부터 7월까지 급격히 증가한 것을 확인할 수 있다. Table 2는 선행무강우일수, 시료 채취 전 강우사상, 월강수량, 탁도 및 SS를 제시하였다. 선행무강우일수는 정선 8 월을 제외하고 4-7 일의 범위로 나타나며, 유사한 양상을 보여 강우에 의한 영향을 최소화하였다. 탁도와 SS를 비교했을 때, 홍천에서는 5 월 탁도가

Table 3. Sample collection and water quality in the study area from April to August

Sampling point	Date	Antecedent dry days (days)	Rainfall event before sampling (mm)	Monthly rainfall (mm/month)	Turbidity (NTU)	SS (mg/L)
Hongcheon	April	5	9.9	38.3	1.65	1.3
	May	7	36.5	99.5	7.23	3.1
	June	4	32.7	135.9	1.53	2.0
	July	5	16.3	423.2	5.89	3.0
	August	3	11.0	106.9	1.44	2.3
Jeongseon	April	5	8.9	35.9	1.10	0.8
	May	7	17.5	77.0	8.21	3.7
	June	6	3.1	163.5	0.71	1.4
	July	5	68.3	341.0	3.74	2.8
	August	15	33.2	75.7	2.04	1.6

SS, suspended solids

Table 4. Sample collection and water quality during the rainy period (June and July)

Sampling point	Date	Daily rainfall (mm/day)	Monthly rainfall (mm/month)	Turbidity (NTU)	SS (mg/L)
Hongcheon	June	62.5	135.9	74.2	62.5
	July	29.3	423.2	22.0	29.3
Jeongseon	June	56.6	163.5	9.9	56.6
	July	18.3	341.0	117.1	18.3

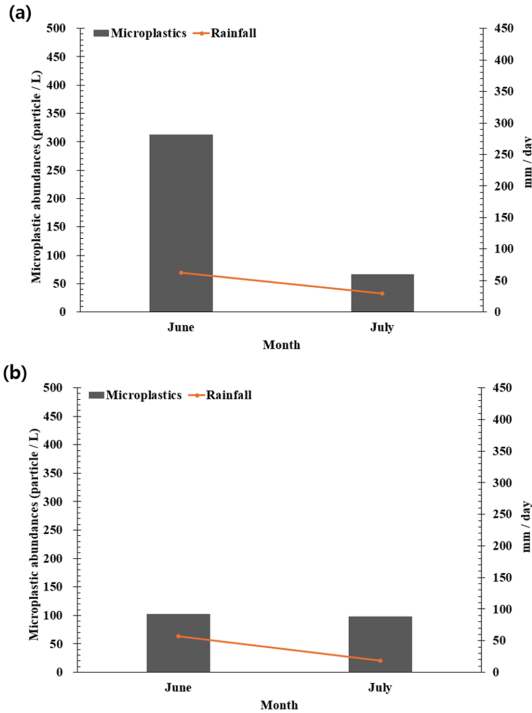


Fig. 5. Raman analysis results of (a) Hongcheon, (b) Jeongseon rainy period samples from June to July.

7.23 NTU, SS가 3.1 mg/L, 7 월 탁도가 5.8 NTU, SS가 3.0 mg/L로 나타났으며, 정선에서는 5 월 탁도가 8.21 NTU, SS가 3.7 mg/L, 7 월 탁도가 3.74 NTU, SS가 2.8 mg/L로 4 월, 6 월, 8 월보다 비교적 높은 값을 보였다. 비교 분석 결과, 탁도와 SS가 높은 시기인 5 월과 7 월에 미세플라스틱의 농도가 높게 나타났으며, 이는 Table 2에서 시료 채취 지점의 토지 면적 대부분이 임야와 전답으로 구성되어 있어, 탁도 및 SS증가의 주요 원인은 강수에 의한 비점오염원 유입의 영향으로 판단된다. 5 월에는 6 월과 7 월보다 월강수량이 많지 않지만, 5 월 이전의 적은 강수량으로 인해 축적된 비점오염원 및 오염물질이 유출되어 하천으로 유입되어 미세플라스틱 농도가 급격히 증가한 것으로 판단된다. 7 월에는 홍천과 정선의 월강수량이 각각 423.2 mm, 341.0 mm로 급격히 증가하면서, 도로변 먼지와 흙탕물 등에 의한 비점오염원의 하천 유입의 영향 및 하천 유량의 증가로 하천 바닥에 침전되어 있던 미세플라스틱이 부유하면서 미세플라스틱 농도가 증가한 것으로 판단된다.

3.1.2. 6~7 월 강우시 하천 미세플라스틱 정량분석 결과 하천 강우시료는 6 월과 7 월에 월 1 회씩 채취하여 분

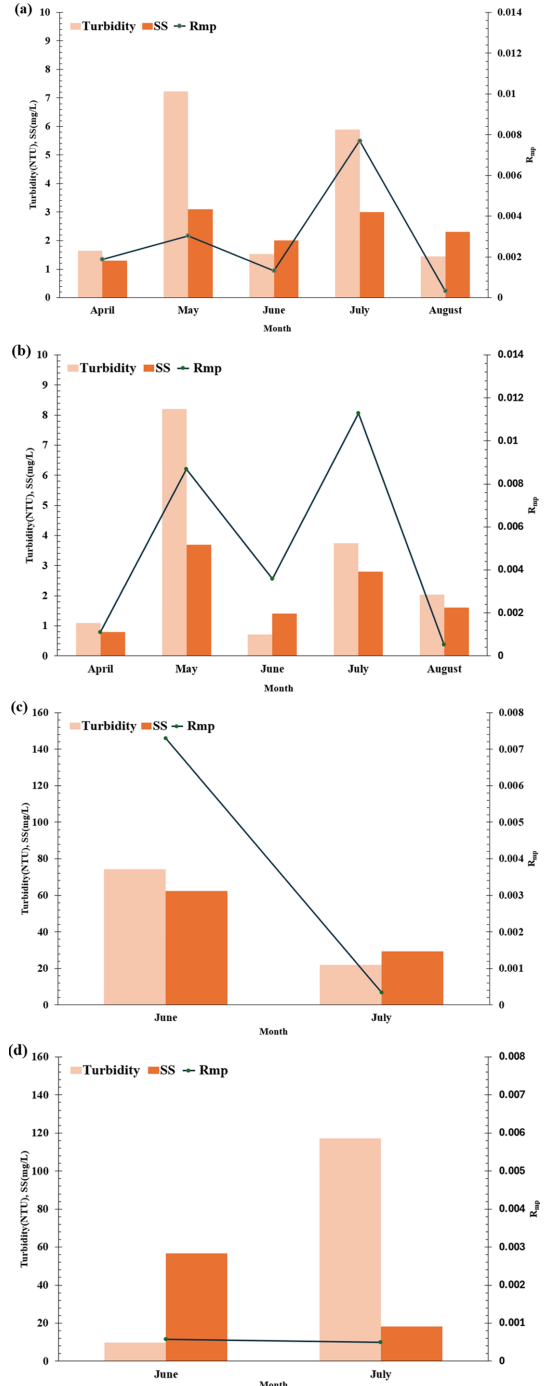


Fig. 6. Comparison of turbidity, suspended solids(SS), and Rmp from April to August samples in (a) Hongcheon and, (b) Jeongseon, and June to July rainy period samples in (c) Hongcheon and, (d) Jeongseon

석을 진행하였다. 분석결과, 홍천에서는 7 월 313.11 particles/L, 8 월 67.09 particles/L의 미세플라스틱이 검

**Table 5.** Monthly TP, MP, and  $R_{mp}$  from April to August in Hongcheon and Jeongseon

Sampling point	Date	TP	MP	$R_{mp}$
Hongcheon	April	40,529	76.04	0.00188
	May	70,704	214.70	0.00304
	June	78,173	102.88	0.00132
	July	56,954	438.35	0.00770
	August	40,391	13.42	0.00033
Jeongseon	April	81,935	89.37	0.00109
	May	51,993	451.77	0.00869
	June	42,506	152.08	0.00358
	July	30,098	339.94	0.01129
	August	79,077	40.26	0.00051

TP, total particles

MP, microplastics particles

 $R_{mp}$ , ratio of microplastics particles to total particles analyzed Raman microscope

출되었으며, 정선에서는 7 월 102.88 particles/L, 8 월 98.40 particles/L가 검출된 것을 확인하였다. 탁도와 SS 는 홍천에서는 6 월 각각 74.2 NTU, 62.5 mg/L, 7 월 22.0 NTU, 29.3 mg/L로 나타났고, 정선에서는 6 월 9.9 NTU, 56.6 mg/L, 7 월 117.1 NTU, 18.3 mg/L로 하천 비강우시료 보다 비교적 높은 값을 보였다. 비강우 하천 시료와 비교했을 때, 6 월과 7 월의 많은 강수량으로 인해 탁도와 SS가 증가하여 강우시료에서 미세플라스틱 농도가 더 높을 것으로 예상되었다. 일반적으로 많은 강우는 하천 내의 중금속, 유기물, 토양 입자 등의 오염물질 농도가 증가하는 경향을 보인다. 그러나 본 연구의 강우 하천시료는 오히려 미세플라스틱 농도가 더 낮은 경향을 보였다. 이러한 결과는 하천 내 미세플라스틱 농도가 비점오염원의 유입 뿐만 아니라 하천의 유량, 유속 등 다양한 요인의 영향을 받기 때문으로 해석할 수 있다. 강우로 인해 하천 유량이 증가하면 미세플라스틱이 희석되어 농도가 낮아질 수 있으며, 반대로 유속이 증가하면 하천 바닥에 침전된 퇴적물이 부유하면서 미세플라스틱 농도가 증가할 수 있다.<sup>9)</sup> 본 연구에서 진행된 강우시료 분석결과, 하천 유량의 증가에 따른 희석 영향이 더 크게 작용하여 미세플라스틱 농도가 낮은 것으로 판단된다. 즉, 강우로 인해 유량이 크게 증가하면서 미세플라스틱이 넓게

분산되어 상대적으로 농도가 낮아지는 경향을 보이는 것으로 확인된다.

### 3.1.3 하천시료 탁도, SS, $R_{mp}$ 비교 분석 결과

라만분광기로 분석한 시료의 총 입자 대비 미세플라스틱 입자 비율을 나타내는 식은 다음과 같이 정의된다.

$$R_{mp} = \frac{\text{Microplastics particles}}{\text{Total particles}} \quad (1)$$

STS필터 위에 분포한 전처리가 끝난 시료의 총 입자수를 분석한 결과, 비강우 하천시료에서는 홍천군 40,391~78,173 particles, 정선군 30,098~81,935 particles가 분포하는 것으로 나타났다. 강우 하천시료에서는 홍천군 42,878~196,107 particles, 정선군 176,609~202,785 particles 이 존재하는 것을 확인하였다. 이를 통해 강우 하천시료의 총 입자수가 비강우 하천시료보다 월등히 높음을 확인할 수 있었으며, 탁도와 SS 또한 이에 비례하는 경향을 보였다. 비강우 하천시료의  $R_{mp}$ 는 탁도와 SS가 높은 5 월과 7 월에 상대적으로 높은 값을 보였다. 반면에, 강우 하천시료에서는 탁도와 SS가 높음에도 불구하고  $R_{mp}$ 가 낮게 나타났다. 비강우 하천시료의 경우, 월강수량이 증가하는 5 월과 7 월에 외부 오염물질 및 비점오염원의 유입으로 인해 검출되는 미세플라스틱의 수가 증가하는 것으로 판단할 수 있다. 반면, 강우 하천시료에서는 탁도와 SS가 높아 총 입자수가 많음에도 불구하고 검출된 미세플라스틱의 수가 상대적으로 적어 단순한 농도 변화 이상의 추가적인 해석이 필요하다. 시료 수가 적어 강우 시 채취한 하천시료의 특성을 일반화하기는 어렵지만, 시료 채취 지점의 인근의 임야 및 전답에서 강우에 의해 유출

**Table 6.** Monthly TP, MP, and  $R_{mp}$  from during the rainy period

Sampling point	Date	TP	MP	$R_{mp}$
Hongcheon	June	42,878	313.11	0.00730
	July	196,107	67.09	0.00034
Jeongseon	June	176,609	102.88	0.00058
	July	202,785	98.40	0.00049

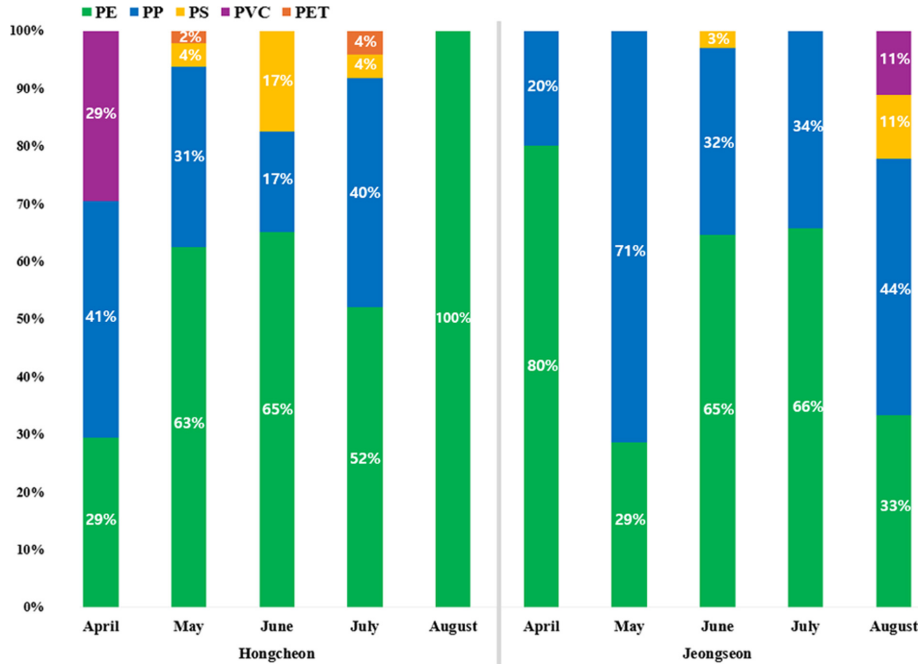


Fig. 7. Types of microplastics and their contribution to microplastic pollution in freshwater samples in Hongcheon and Jeongseon. PE, polyethylene, PP, polypropylene, PS, polystyrene, PVC, polyvinyl chloride, PET, polyethylene terephthalate.

된 비점오염원이 하천으로 유입되면서 탁도와 SS가 급증하고, 이로 인해 시료 내 존재하는 입자수가 증가했을 것으로 판단된다. 유기물산화, 밀도분리의 전처리 과정을 거친 후에도 5 μm~50 μm 크기의 플라스틱이 아닌 미세입자들이 남아 라만 분석 시 간섭을 유발하여, 그 결과 미세플라스틱 검출량이 감소했을 것으로 판단된다. 실제로 국내 토양 시료에서 미세플라스틱을 분석한 연구에서도 동일한 전처리과정을 거친 후 미세크기의 토양 입자가 잔존하여 라만 분석의 방해물질로 작용한 사례가 보고된 바 있으며, 강우에 의해 탁도가 높은 하천시료에도 동일한 작용이 발생한 것으로 판단된다.<sup>22)</sup> 이러한 분석 간섭 요인들을 최소화하기 위해, 시료 채취 시 상대적으로 적은 양의 시료를 활용하여 외부 오염의 영향을 줄이는 방안이 하나의 대안이 될 수 있다.

### 3.2. 하천 내 미세플라스틱 종류

#### 3.2.1. 하천 내 미세플라스틱 정성분석 결과

비강우 하천시료의 미세플라스틱 종류를 분석한 결과, 홍천에서는 PE, PP, PS, PVC, PET가 검출되었으며, 정선에서는 PE, PP, PS, PVC의 미세플라스틱이 존재하는 것을 확인하였다. 강우 하천시료에서는 홍천과 정선 모두 PE, PP, PS, PVC가 검출된 것으로 확인되었다. 비교적 밀

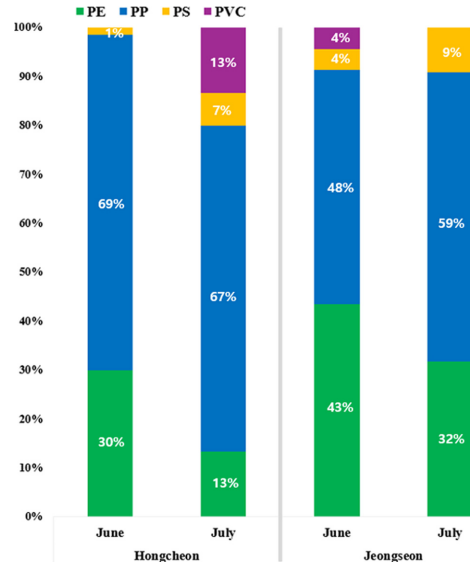


Fig. 8. Types of microplastics and their contribution of microplastic pollution in freshwater samples from Hongcheon and Jeongseon during the rainy period (June to July). PE, polyethylene, PP, polypropylene, PS, polystyrene, PVC, polyvinyl chloride

도가 큰 PS(1.04-1.1 g/cm<sup>3</sup>), PVC(1.38 g/cm<sup>3</sup>), PET(1.37-1.45 g/cm<sup>3</sup>)는 적은 비율로 검출된 반면, 상대적으로 밀

도가 낮은 PP(0.9-0.91 g/cm<sup>3</sup>)와 PE(0.92-0.97 g/cm<sup>3</sup>)는 최소 70%에서 최대 100%까지의 비율을 차지하는 것으로 나타났다. 밀도가 높은 미세플라스틱은 상대적으로 침전될 가능성이 높아 하천 바닥에 쌓이거나 짧게 부유할 수 있고, 반면 PP와 PE 같이 밀도가 낮은 미세플라스틱은 상대적으로 긴 시간동안 수중에서 부유하면서 하천을 따라 이동할 가능성이 크다.<sup>25)</sup> 비강우 하천시료에서는 PP보다 PE의 비율이 더 높게 나타났지만, 강우 하천시료에서는 PP의 비율이 더 높은 경향을 보였다. 이는 강우로 인해 발생하는 다양한 요인들이 미세플라스틱의 분포에 영향을 미친 것으로 판단된다. 국내 선행연구에서도 대부분 PP와 PE가 높은 비율로 존재하는 것으로 보고된 바 있다.<sup>9-12)</sup> PP와 PE는 일회용품, 주방용품, 식품 포장재 등 다양한 용도로 사용된다. 본 연구에서 시료 채취 지점이 농업지역과 인접해 있다는 점을 고려할 때, 농업 활동에서 발생하는 플라스틱이 미세플라스틱 분포에 영향을 미쳤을 가능성이 크다. 대표적으로 비료 포대(PP, PE), 멀칭 비닐(PE, PVC), PP마대 등 농업에 사용되는 플라스틱이 풍화, 마모, 파쇄 등의 과정을 거쳐 미세플라스틱을 생성하여 하천으로 유입할 수 있다. 특히, 강원지역에서 문제되고 있는 비점오염원에 대한 집중적인 관심이 필요하다. 강우시 농지에서 토양 및 흙탕물이 하천으로 유입됨에 따라 미세플라스틱 농도 변화에 미치는 비점오염원의 영향을 보다 명확히 확인할 필요가 있다.

#### 4. 결 론

본 연구를 통해 청정지역으로 인식되는 강원특별자치도의 고랭지밭 유역 또한 미세플라스틱 오염으로부터 안전하지 않음을 확인할 수 있었다. 라만 분광기 분석결과, 비강우시 하천시료에서는 홍천에서 약 13~438 particles/L, 정선에서 약 40~452 particles/L의 미세플라스틱이 검출되었으며, 강우시 하천시료에서는 홍천에서 약 67~313 particles/L, 정선에서 약 98~103 particles/L가 검출되어 강우 여부와 관계없이 하천이 미세플라스틱에 오염되어 있음을 확인하였다. 특히, 강우시 미세플라스틱의 종류 비율이 달라지고, 탁도와 SS 증가에 따라 미세플라스틱의 농도 변화가 발생하는 경향을 확인할 수 있었다. 따라서, 강우 시 하천 내 미세플라스틱 거동을 보다 명확히 분석하기 위해서 강우량과 하천 유량의 증가에 따른 미세플라스틱 농도 변화를 보다 체계적으로 분석하고, 하천 내 미세플라스틱 거동을 확인하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다. 이번 연구를 통해 강원특별자치도 고랭지밭

유역 내 미세플라스틱 오염 수준과 분포하고 있는 미세플라스틱의 종류에 대한 데이터베이스를 구축함으로써 향후 미세플라스틱 연구 및 정책 수립에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

이 연구는 이 논문은 2024년도 강원녹색환경지원센터 연구개발사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다.(KWGEC-2024)

#### 참고문헌

1. C. Ostle, R. C. Thompson, D. Broughton, L. Gregory, M. Wootton, and D. G. Johns, "The rise in ocean plastics evidenced from a 60-year time series", *Nature Communications*, **2019**, 10(1), 1622.
2. Plastics-The Facts 2021, "An analysis of European plastics production, demand and waste data", *Plastics Europe*. 2021. Available online: <https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/12/Plastics-the-Facts-2021-web-final.pdf>
3. A. L. P. Silva, J. C. Prata, T. R. Walker, A. C. Duarte, W. Ouyang, D. Barcelo, and T. R. Santos, "Increased plastic pollution due to COVID-19 pandemic: Challenges and recommendations", *Chemical Engineering Journal*, **2021**, 405, 126683.
4. C. I. Idumah and I. C. Nwuzor, "Novel trends in plastics waste management", *SN Applied Sciences*, **2019**, 1, 1-14.
5. K. Bexeitova, A. Baimenov, E. A. Varol, K. Kudaibergenov, U. Zhantikejev, Y. Sailaukhanuly, K. Toshtay, Z. Tauanov, S. Azat, and R. Berndtsson, "Microplastics in freshwater systems: A review of classification, sources, and environmental impacts", *Chemical Engineering Journal Advances*, **2024**, 20, 100649.
6. C. Lim, N. Kim, J. Lee, and Y. Yoon, "Potential of adsorption of diverse environmental contaminants onto microplastics", *Water*, **2022**, 14(24), 4086.
7. Y. Li, L. Tao, Q. Wang, F. Wang, G. Li, and M. Song, "Potential health impact of microplastics: A review of environmental distribution, human exposure, and toxic effects", *Environment & Health*, **2023**, 1(4), 249-257.
8. C. G. Eze, C. E. Nwankwo, S. Dey, S. Sundaramurthy, and E. S. Okeke, "Food chain microplastics contamination and impact on human health: a review", *Environmental Chemistry Letters*, **2024**, 22(4), 1889-1927.
9. 정승규, 김현, 김희영, 김현자, 이경희, 조현진, 정주용,

- “경기도 내 하천의 미세플라스틱 오염 특성 연구”, *환경분석과 독성보건*, **2023**, 26(2), 37-44.
10. 모경, 박철, 김도균, “안산시 수계에서의 미세플라스틱 영향 조사 연구”, *안산녹색환경지원센터*, **2021**.
  11. 최예진, 이효영, 문혜미, 김재우, 박선구, “한강 수계에서의 미세플라스틱의 분포 특성 연구”, *환경분석과 독성보건*, **2024**, 27(2), 96-111.
  12. 정지현, 최영균, 양혜지, 최유리, 안수민, “대전광역시 주요 하천 미세플라스틱 오염 현황 및 오염원 조사 연구”, *중앙녹색환경지원센터*, **2020**.
  13. T. Park, S. Lee, M. Lee, J. Lee, J. Park, and K. Zoh, “Distributions of microplastics in surface water, fish, and sediment in the vicinity of a sewage treatment plant”, *WATER*, **2020**, 12(12), 3333.
  14. S. Eo, S. Hong, Y. Song, G. Han, and W. Shim, “Spatiotemporal distribution and annual load of microplastics in the Nakdong River, South Korea”, *Water Research*, **2019**, 160, 228-237.
  15. 김남신, 윤주덕, 이승은, 박영준, 우승현, “금강수계 담수와 어류체내 잔류미세플라스틱 연구”, *한국환경생태학회지*, **2019**, 52(1), 28-39.
  16. 서울특별시 물순환안전 자료실, <https://news.seoul.go.kr/env/archives/516142>, 2023년 11월.
  17. 양혜근, “강우시 비점오염물질의 유출특성에 관한 연구-곡성천 상하류를 대상으로”, *대한지리학회지*, **2006**, 41(4), 418-434.
  18. 강원지방통계지청, [https://sri.kostat.go.kr/board.es?mid=a80301010100&bid=12000&act=view&list\\_no=425720&tag=&nPage=1&ref\\_bid=11996,11997,11998,12000](https://sri.kostat.go.kr/board.es?mid=a80301010100&bid=12000&act=view&list_no=425720&tag=&nPage=1&ref_bid=11996,11997,11998,12000), 2023년 5월.
  19. 환경부국립환경과학원, <https://www.data.go.kr/data/3045217/fileData.do>, 2025년 1월.
  20. 국토교통부 국토지리정보원, <https://map.ngii.go.kr/mn/mainPage.do>
  21. 최용훈, 원철희, 서지연, 신민환, 양희정, 임경재, 최중대, “평지밭과 고랭지밭의 비점오염에 대한 분석과 비교”, *Journal of Korean Society on Water Quality*, **2009**, 25(5), 682-688.
  22. 윤여준, “환경 내 미세플라스틱 측정을 위한 매체별 시료채취/전처리 통합 표준 기술개발”, *한국환경산업기술원*, **2022**.
  23. 국제표준화기구(ISO), <https://www.iso.org/standard/82370.html>, 2024년 5월.
  24. 기상청 기상자료개방포털, <https://data.kma.go.kr/stcs/grnd/grndRnList.do>
  25. R. Kumar, P. Sharma, A. Verma, P. K. Jha, P. Singh, P. K. Gupta, R. Chandra, and P. V. V. Prasad, “Effect of Physical Characteristics and Hydrodynamic Conditions on Transport and Deposition of Microplastics in Riverine Ecosystem”, *WATER*, **2021**, 13(19), 2710.