

금강수계 담수와 어류체내 잔류미세플라스틱 연구

김남신 · 윤주덕^{1,*} · 이승은 · 박영준 · 우승현

국립생태원, ¹국립생태원 멸종위기종복원센터

A Study on the Residual Microplastics in Freshwater and Fishes in the Geum River Watershed. Nam-Shin Kim (0000-0003-1471-3151), Ju-Duk Yoon^{1,*} (0000-0003-1667-327X), Seung-Eun Lee (0000-0001-5120-6429), Young-Joon Park (0000-0003-0723-4136) and Seung-Hyun Woo (0000-0002-8156-4005) (National Institute of Ecology, 1210, Geumgang-ro, Maseo-myeon, Seocheon-gun, Chungcheongnam-do 33657, Republic of Korea; ¹Endangered Species Restoration Center, National Institute of Ecology, Yeongyang 36531, Republic of Korea)

Abstract This study was conducted to elucidate microplastics detection of freshwater ecosystems in Geum river. Samples are collected at 6 points in freshwater, 5 points in fishes. Freshwater was sampled 100 L per each points and fish species were *Opsariichthys uncirostris amurensis*, *Hemibarbus labeo*, *Pseudogobio esocinus*, *Zacco platypus*, *Micropterus salmoides* and *Cyprinus carpio*. FTIR analysis was adopted to identify microplastic types. Extracted microplastics were PES (polyester), PE (polyethylene), PP (polypropylene), PET (polyethylene terephthalate), PVC (Polyvinyl chloride) in freshwater, and PES, PE, PP, PET, PVC in fishes. Our results were expected to be used basic research information for further study in microplastics of freshwater ecosystems.

Key words: microplastics, freshwater ecosystem, FTIR analysis, microplastic types

서 론

인간 생활의 편의를 위해 개발된 합성 중합체 (polymer) 플라스틱은 의류, 생활용품, 자동차, 컴퓨터 등의 소재로 현대인의 생활필수품이 되었다. 지난 100년간의 플라스틱 역사는 인간생활의 편의를 가져왔지만 생태계에 심각한 문제를 유발시키고 있다. 플라스틱은 지구의 수용력 (susceptibility)과 자정능력 (self-purification capacity)을 벗어나 인간과 자연생태계에 영향을 미치고 있는 실정이다 (Tricard and KiewietdeJonge, 1992).

플라스틱은 초경량 및 강한 내구성을 갖기 때문에, 국내 플라스틱 생산량은 2016년 기준 21백만 톤이며, 수출량을

제외한 국내 수요량은 11백만 톤이다 (KPIA, 2017). 2016년 기준 플라스틱 폐기물 발생량은 10.1백만 톤으로 생활 폐기물 중 플라스틱 폐기물의 양이 50%를 차지하고 나머진 사업장 폐기물이다 (NIER, 2016; MOE, 2017).

이렇듯 매년 지속적으로 증가하고 있는 막대한 양의 플라스틱 폐기물이 다양한 경로로 바다에 흘러들어 가고 있다. Jambeck *et al.* (2015)의 연구에 의하면 전세계 192개의 해안가 주거지역에서 발행하는 플라스틱 폐기물의 양이 99.5백만 톤이며, 이 중 4.8~12.7백만 톤이 해양으로 유입되고 있다고 추정하고 있다. 세계 10개의 큰 강을 대상으로 강에서 해양으로 유입되는 플라스틱 폐기물의 양을 추정하였는데, 중국의 양자강의 경우 해양으로 연간 유입되는 폐기물의 양이 약 1.5백만 톤으로 나타났다 (Schmidt *et al.*, 2017; Eo *et al.*, 2018). 우리나라의 해안폐기물 모니터링 결과 플라스틱류가 56%를 차지하고, 항목별로 보면 페트병과 비닐봉투, 마개, 밧줄, 스티로폼 부표 등 비율이 높

Manuscript received 29 January 2019, revised 19 February 2019, revision accepted 21 February 2019
* Corresponding author: Tel: +82-54-680-7310, Fax: +82-54-680-7329, E-mail: grandblue@nie.re.kr

은 것으로 나타났다(MOE, 2017).

자연계로 유입된 폐기 플라스틱은 이동과정, 자외선 등 장기간 노출되어 5 mm 이하의 작은 단위로 분해 상태로 존재하거나 상업적 목적(세정제, 화장품, 세제, 섬유유연제 등)으로 입자 단위의 마이크로비즈(microbeads)를 제작한다. μm ($1,000^{-1}$ mm)~5 mm 이하인 미세플라스틱은 자연계에서 다시 분해되어 Nano ($1,000,000^{-1}$ mm) 입자로 쪼개진다. 미세플라스틱은 생물과 인간의 장기, 조직, 생식기관에까지 침투하여 각종 문제를 일으켜 전세계적인 이슈가 되고 있다(GESAMP, 2016; UNEP, 2016; Barboza *et al.*, 2018; Carbery *et al.*, 2018).

담수생태계의 경우 주요 발생 미세플라스틱 배출원은 도시, 농경지, 하수처리시설 등으로 하수처리시설의 방류수에 미세플라스틱이 상당수 포함되어 배출되고 있다고 알려져 있다(Murphy *et al.*, 2016; Talvitie *et al.*, 2017; Jeong *et al.*, 2018). 또한 최근 들어 미세플라스틱이 수생생물에 미치는 영향에 대한 다양한 연구들이 수행되고 있으며, 특히, 어류와 저서성대형무척추 동물에 대한 연구에서 미세플라스틱의 부정적인 영향이 확인되고 있다(Carlos *et al.*, 2018; Foley *et al.*, 2018; McNeish *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2019). 이들 연구는 미세플라스틱 대상을 PP, PES로 제한하여 분석한 실험연구로 야외환경 미세플라스틱 축적에 대한 연구는 전반적으로 미흡한 상황이다.

국내의 경우 미세플라스틱에 대한 연구와 이슈는 주로 해양분야가 주도하고 있다. 반면에 담수생태계에서의 연구는 수돗물, 실내 실험실 생체연구 등 제한적인 수준이다. 담수, 수생생물(담수어류, 미세조류, 저서성 대형무척추동물 등), 퇴적물 등 자연계에 산재하는 미세플라스틱에 대한 축적, 분포, 기능, 영향, 발생원과 경로 등의 다양한 부분에 대한 연구가 부족하며, 이에 따라 연구의 방향정립이 필요한 시점이다(NIER, 2016; Zeng, 2018). 이에 본 연구는 금강수계 담수 내 미세플라스틱 분포와 담수어류 체내 장기의 미세플라스틱 검출 현황 분석을 실시하여 연구 가능성을 검토하고 후속연구를 위한 제안을 하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 조사지점 선정

담수 내 미세플라스틱 검출 분석을 위해 현장조사는 금강 수계를 선정하였다. 금강 수계는 금강 본류와 대청호를 포함하여 미호천, 갑천, 논산천 등의 지천으로 구성되어 서해로 유입되며, 대전광역시, 공주시, 부여군, 세종시, 청주

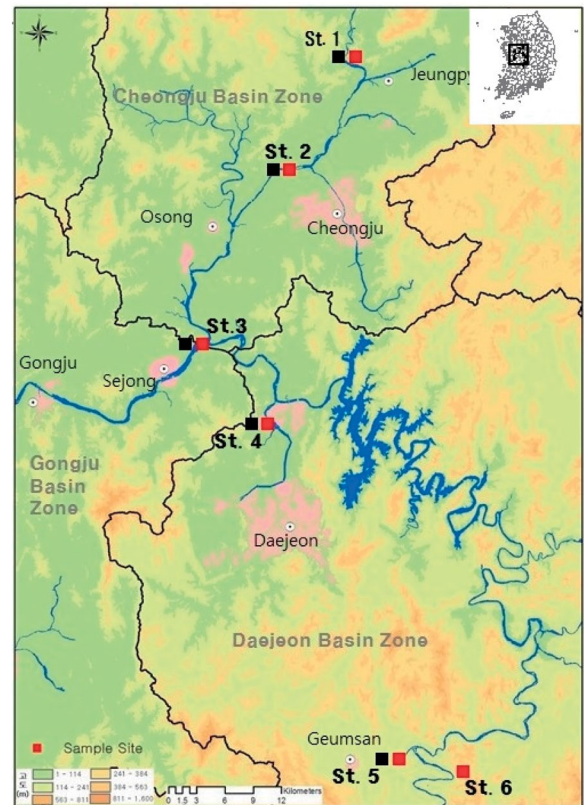


Fig. 1. Study area and sampling sites (Red: water sampling sites, Black: fish sampling sites).

시, 논산시 등의 도시지역이 인접하여 위치하고 있다.

조사지점의 선정은 하천의 위치(상류·중류·하류)와 금강 수계 유역분지, 미세플라스틱 배출원(도시지역, 공장 밀집지역, 농경지역)에 따른 미세플라스틱의 출현 유무를 고려하였고, 어류 위장 내 미세플라스틱 존재 여부를 위한 조사도 동일한 위치에서 수행하였다.

미세플라스틱 분석을 위한 채수지점과 어류 채집은 기본적으로 동일 지점에서 담수(6지점), 어류(5지점)를 샘플링 하였으나 St. 6 지점 어류 조사는 조사 수행 당시 발생한 강우로 인한 유량 및 수위 증가로 수행이 불가능하였다.

미세플라스틱의 분포를 확인하기 위한 조사지점은 미호천 2지점(St. 1, 2), 금강 본류 2지점(St. 3, 6), 갑천 1지점(St. 4), 봉황천 1지점(St. 5)에서 수행되었다(Fig. 1). 미호천 본류 2지점 중 미호천 1(여암교) 지점은 청주시 오창읍 여천리에 위치하며 금강 본류로부터 약 40 km 상류에 위치하고 주변은 대부분 농경지로 구성되어 있다. 미호천 2(중부고속) 지점은 금강 본류로부터 약 27 km 상류에 위치하고 주변은 농경지와 더불어 청주시가 위치하고 있어 다양한 배출원이 있는 지역이다.

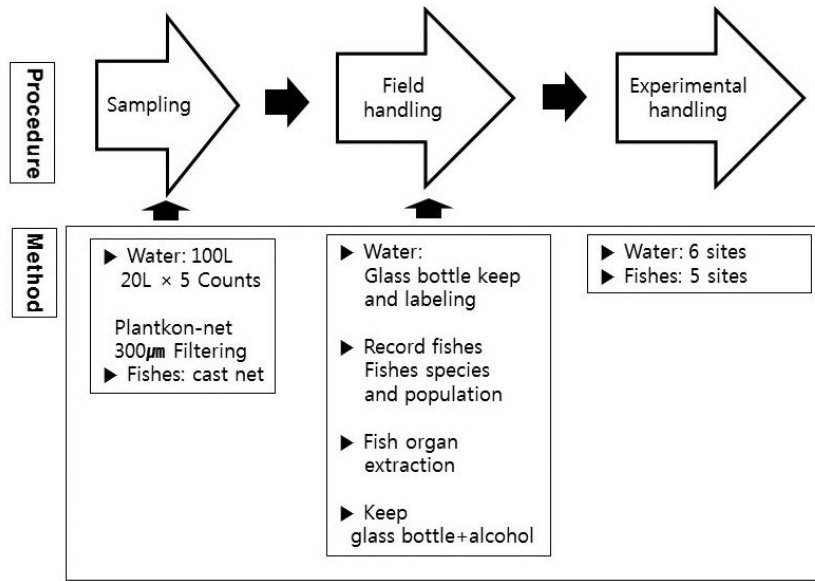


Fig. 2. Sample procedure and methods.

금강 본류 지역은 미호천과 금강이 합류하는 지역(3)에서 약 2 km 정도 하류에 위치하고 있는 지역으로 주변은 대부분 세종시 개발지역이다. 금강 본류 2지점 중 금강상류(천내습지) 지점(6)은 금산군 제원면 천내리에 위치하고 있는 금강 중·상류 지점으로 대청댐 상류에 위치하고 있으며 수변구역으로 지정되어 관리되고 있는 지역이다. 갑천(불무교) 지점 또한 하천 하류 지역으로 금강 합류점으로부터 약 2 km 정도 상류에 위치하고 있으며, 상류지역과 조사지역 주변은 대규모 도시지역과 공장지역으로 구성되어 있다.

봉황천 지점은 하천 하류 지역으로 금강상류(천내습지) 지역과 약 2.5 km 정도 떨어져 있었으며, 상류에 금산군이 위치하고 주변 토지 이용은 대부분 농경지이다.

2. 시료채취

1) 담수 시료 채수

본 연구에서 대상으로 한 미세플라스틱 크기는 300 µm~1 mm로 이를 위해 특수 제작된 Plankton-net (mesh size: 300 µm)를 이용하여 강 가장자리 표층수를 채취하였다 (Fig. 2). 미세플라스틱 크기는 장거리이동, 장기간 자외선에 노출되어 해양에서 Nano 단위까지 쪼개지는 미세플라스틱과 달리 선행연구들은 배출원에서 이동거리가 비교적 짧은 특성을 고려해 배출원을 분석하여 대상 크기를 300 µm~5 mm 범위에서 연구하고 있다(Zeng, 2018). 본 연구는 보편적으로 적용하는 300 µm~1 mm를 분석의 범위로

정하였다. 담수는 20리터 채수통을 사용하여 총 100리터를 무작위로 채수, 필터하였다. 필터한 시료는 300 mL 광구병에 조사지점과 일시를 기록하여 실험실로 이송하여 분석하였다(Kim and Kim, 2015).

채수 시 이전 지점 샘플로 인한 오염(contamination)을 방지하기 플랑크톤 네트를 제외한 조사도구들은 매 지점별로 새로운 도구를 사용하였으며, 플랑크톤 네트는 현장수 및 증류수를 활용하여 최대한 세척하여 사용하였다.

2) 담수 어류 채집 및 분석 시료

어류의 포획은 다수 어종을 채집하여 지점별 공통어종을 선정하기 위해 투망(망목 7×7 mm)을 사용하여 수행하였다. 채집된 종들 중 선정기준에 적합한 종 및 개체들은 현장에서 위 내용물 분석을 위한 내장을 적출하였다. 적출한 내장은 300 mL 광구병에 알콜(99%)을 사용, 고정하여 실험실로 이송 후 분석에 활용하였다. 분석을 위해 사용한 수술도구(메스, 수술용 가위 등)는 이전 지점 샘플로 인한 오염(contamination)을 방지하기 위해 사용 시마다 알콜과 증류수를 이용하여 세척 후 사용하였다.

분석에 사용된 종의 선정은 조사지점에서 다수 발견되는 종과 잡식성이며 저층성 먹이를 섭식하는 종을 주요 대상으로 하였다. 각 지점별로 공통으로 출현한 종 꼬리를 선택하여 각 지점별로 분석하였다. 그 외에 잡식이며 저서성 먹이를 선호하는 누치, 모래무지, 잉어 등은 종별, 개체별로 구분하지 않고 지점별 출현한 어종개체 전체를 통합하여 한 번에 분석하였다(Table 1, Appendix 1).

Table 1. Fish species and number of individuals used for stomach analysis.

Site	<i>Opsariichthys uncirostris amurensis</i>	<i>Zacco platypus</i>	<i>Micropterus salmoides</i>	<i>Hemibarbus labeo</i>	<i>Pseudogobio esocinus</i>	<i>Cyprinus carpio</i>
St. 1	5	3		5	2	1
St. 2	1	1		6	1	
St. 3	8	3		9	1	
St. 4	4	6		2	6	
St. 5	8	6	2			

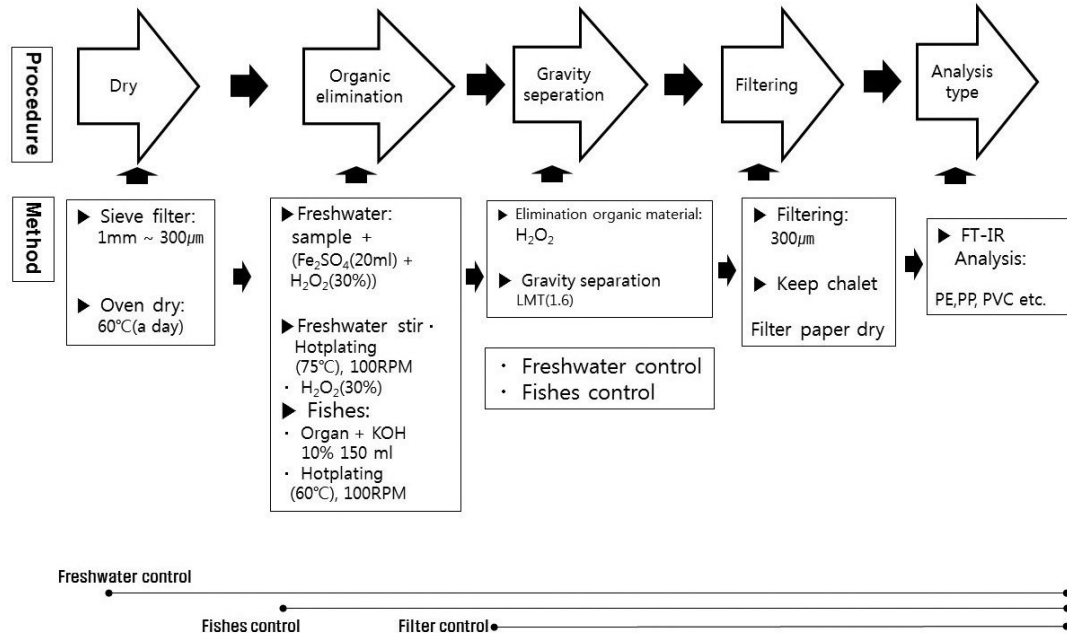


Fig. 3. Microplastic extraction and analysis procedure.

3. 시료분석

미세플라스틱 분석 시 오염으로 인한 분석 오류가 빈번하게 발생하기 때문에 분석 시 오염에 대한 확인이 필요하며 이를 위해 대조군(control)을 설정하여 실험을 수행하였다. 총 3개의 대조군을 선정하였으며, 담수와 어류 시료의 대조군은 증류수를 이용하여 선정하였고, 필터 오염을 확인하기 위해 사용한 필터도 대조군으로 선정하였다. 이를 포함한 미세플라스틱 추출 과정 및 방법은 Fig. 3과 같다.

시료건조 단계에서는 준비된 시료를 모두 시브(300 µm sieve)에 부어 미세플라스틱을 걸러낸 후 뚜껑과 병에 묻어 있을 수 있는 시료를 물로 잘 닦아 모두 시브를 통과시켰다. 시브에 걸러진 시료를 물로 한쪽으로 모아주고 행군 뒤 세척된 비커에 옮긴 후, 비커의 호일을 반 정도 열어서, 60°C에서 약 하루 드라이오븐에 넣어 물을 증발시켰다.

건조된 시료는 유기물 제거 과정이 필요하며, 담수시료 유기물 제거 순서는 후드 안에서 시료가 들어있는 비커에 교반자석을 넣고 이가철(F(II)) 수용액 20 mL와 과산화수소(30%) 20 mL를 주입 후, 반응이 일어나 끓어오르는 것을 지켜본 후 반응이 가라앉으면 호일을 덮고, 전열교반기(75°C)에서 100 rpm으로 30분 정도 방치한다. 30분 후 과산화수소 20 mL를 추가하고 추가 시 반응이 일어나 끓어오르므로 잠시 전열교반기에서 내려 열을 식혀준 후 다시 전열교반기에 올려 실험을 진행하고 최종적으로 무게와 시간을 기록하며, 유기물 양에 따라 본 과정을 3~4회 반복하였다. 어류 시료의 유기물 제거는 후드 안에서 시료가 들어있는 비커에 교반자석을 넣고 KOH(10%) 150 mL를 넣어, 전열교반기(60°C)에서 80~100 rpm으로 12시간 이상 유기물이 제거될 때까지 방치(KOH 추가 가능) 후 최종 산물의 무게와 시간을 기록하며, 유기물 양에 따라 본 과정을 반복하였다. 유기물이 제거된 샘플은 LMT(Lithum metatung-

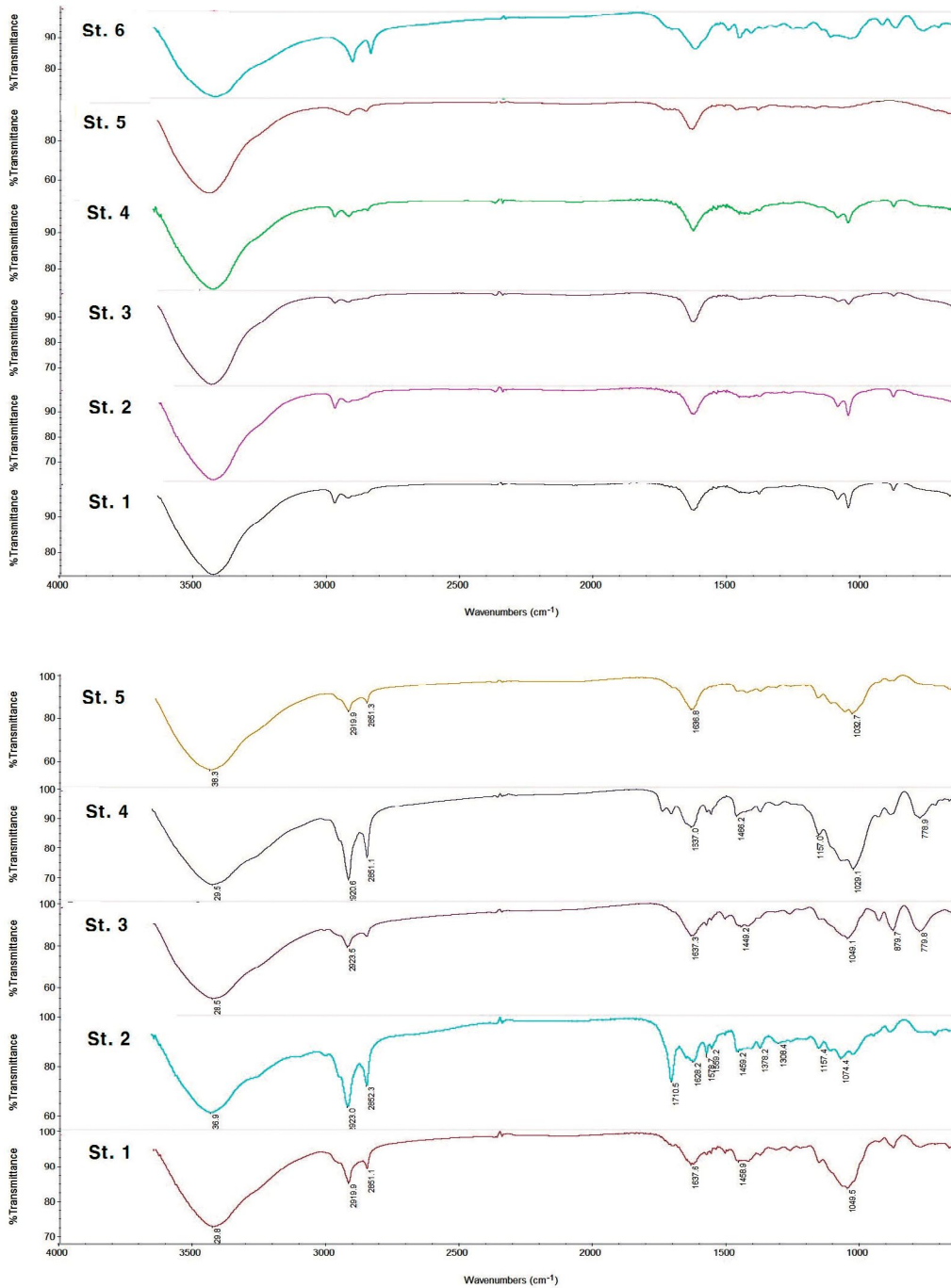


Fig. 4. Spectrums of water (top) and fish (bottom) per each samples.

state)를 이용하여 비중분리를 수행하고 필터링과 건조 후 종류 분석을 수행하였다.

본 과정을 통해 추출된 미세플라스틱의 종류분석은 FT-IR 푸리에 변환 적외선 분광광도계(Jasco 6300 series FT/IR Spectrometer, Japan)로 분석을 실시하여 검출 대상 미세

플라스틱 7종류로 PES (polyester), PP (polypropylene), PE (polyethylene), PS (polystyrene), PET (polyethylene terephthalate), PVC (Polyvinyl chloride), PC (polycarbonate)가 갖고 있는 그래프 패턴과 분광값을 대조하여 확정하였다 (Appendix 2).

결과 및 고찰

1. 대조군 분석 결과

미세플라스틱 분석 시 오염 여부 파악을 위한 대조군 분석 결과, 미세플라스틱 종류별 고유파장과 일치하는 파장이 확인되지 않았다. 이에 따라 실험실 분석 시 외부요인에 의한 미세플라스틱 오염은 발생하지 않는 것으로 확인되었다(Appendix 3).

2. 금강유역 미세플라스틱 분포현황

1) 담수와 어류 시료 분광 분석

담수시료의 분광분석결과는 조사지점별로 유사한 것으로 확인되었다(Fig. 4; Appendix 3). 3,400대 파장에서 가장 큰 피크를 나타냈고 2,950, 1,600, 1,050대 파장에서 피크를 보였다.

어류통합 시료의 분광분석결과도 조사지점별로 유사한 형태를 보이고 있었으나 낮은 파장대에서는 지점별로 차이를 보이고 있었다(Fig. 4). 담수시료와 유사하게 3,400대 파장에서 가장 높은 피크를 보였으며, 2,900, 2,800대 피크를 확인할 수 있었다(Chae *et al.*, 2014; Appendix 4).

2) 지점별 미세플라스틱 검출 결과

분광분석 시 검출이 가능한 총 7종의 미세플라스틱 중 PS와 PC를 제외하고 나머지 5종류의 플라스틱이 담수 및 어류 시료에서 검출되었다(Fig. 5).

담수에서 검출된 미세플라스틱은 St. 4 지점(대전 갑천)에서 5종류로 가장 많았으며, 모든 지점에서 검출된 미세플라스틱은 PES, PE 2종류였다. St. 3 지점(금강본류)에서 2(PES, PE) 종류로 PP가 검출되지 않았다. 상류 지점들에서는 PP가 검출되었음에도 불구하고 검출되지 않은 이유는 이동과정에서 분해나 하상에 침전되었거나 해당시료에서만 미 검출된 것으로 추정할 수 있다. 추후 보완연구에서 밝힐 수 있겠지만 이동과정의 문제라면 금강 중·하류로 갈수록 PP가 담수에 존재할 가능성이 낮다고 사료된다.

끄리 시료에서 검출된 미세플라스틱은 St. 1 지점(미호천 여암교)에서 3종류(PES, PE, PP)로 가장 많았으며, 다른 지점에서는 모두 2종류(PES, PP)의 미세플라스틱만 검출되었다. St. 1 지점에서만 PE가 추가로 검출되었다. 하지만 타 어종을 포함하고 있는 어류통합 시료에서는 더 많은 미세플라스틱이 검출된 것으로 보아 육식을 하는 끄리의 섭식 특성상 일부 미세플라스틱이 검출되지 않은 것으로 판단된다.

어류통합 시료에서 검출된 미세플라스틱은 St. 4(대전갑

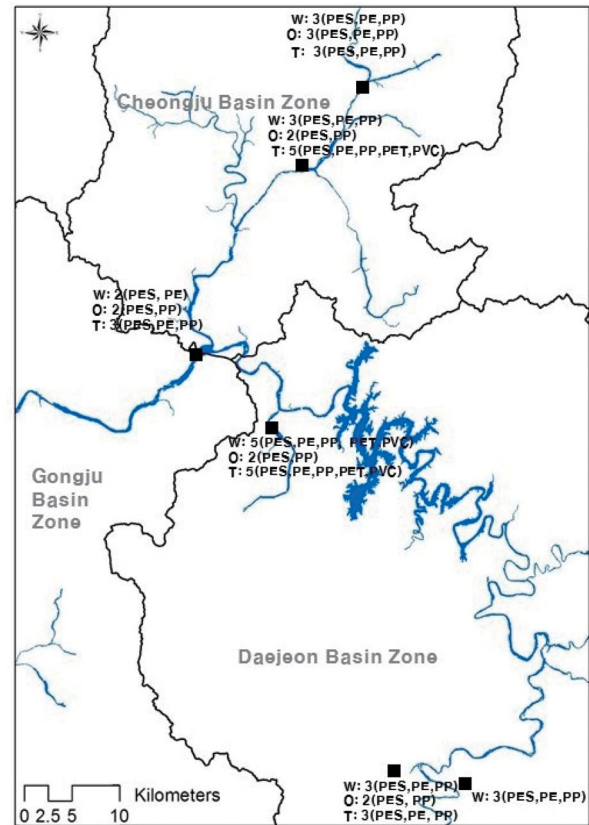


Fig. 5. Microplastic distribution map (W: water; O: *Opsariichthys uncirostris amurensis*; T: Fish total).

천)와 St. 1(금강본류) 지점에서 5종류(PES, PE, PP, PET, PVC)로 가장 많이 검출되었고, 나머지 지점들에서는 PES, PE, PP 3종류의 미세플라스틱이 검출되었다.

담수시료와 생물시료에서 검출된 미세플라스틱 결과를 토대로 담수생태계 내 미세플라스틱의 분포 유추 시 금강 상류에서 하루까지 전반적으로 최소 3종류(PES, PE, PP) 이상의 미세플라스틱이 잔존하고 있을 것으로 사료되었다.

본 결과에서 끄리를 제외한 다른 어류들은 한꺼번에 합쳐서 하나의 시료로 분석을 하여 종별 차이를 확인하기는 어려웠으나 일부 결과를 바탕으로 유추 시, 어류의 2종류의 미세플라스틱만 검출된 육식성 끄리에 비해 잡식·저서성 어류가 포함된 통합시료에서 더 많은 종류의 미세플라스틱이 검출되어 이들 종이 미세플라스틱을 섭식할 확률이 높은 것으로 판단되었으며, 이는 McNeish *et al.* (2018) 연구의 결과와 유사하였다. 육식성 어류인 끄리는 직접적으로 미세플라스틱을 섭식하기보다는 먹이그물상 하위에 있는 먹이에서 기원했을 가능성이 높은 것으로 사료되었다. 따라서 향후 연구에서는 개체의 크기별, 먹이단계별로 다양한 시료를 확보하여 미세플라스틱의 먹이그물에 따른 이

등을 파악할 필요가 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 시범연구로 금강생태계에서의 미세플라스틱 검출 유무에 목표를 두었다. 따라서 본 연구는 정성적 측면에서 수행되었으며, 정량적인 부분 및 종별 검출량 및 배출요인과의 상관성 문제는 향후 추가적인 논의를 통하여 세부 연구계획을 수립하여 수행하여야 할 것으로 판단된다. 또한 본 연구는 담수생태계 어류와 담수시료를 대상으로 미세플라스틱의 분포를 확인한 최초의 연구로 연구 미세플라스틱 추출 독자적 방법 확립, 샘플링 대상(하상퇴적물 및 무척추동물 제외), 실내분석 과정에서의 오염 문제, 배출오염원에 대한 분석 등 수행 시 많은 시행착오와 한계점이 확인되었다. 따라서 한계점을 명확히 제시하고 추후 연구 수행 시 개선방안을 제시할 필요가 있을 것으로 판단된다.

플라스틱은 인간의 100년 역사를 함께 하고 있으며, 미세플라스틱은 인간의 건강에도 영향을 미칠 수 있다. 최근 발표된 일부 연구들에서는 미세플라스틱으로 인한 잔류성유기오염물질(POPs)이 어류에서 검출되기도 했다(e.g. Grigorakis, 2018). 하지만 국내에서는 담수생태계 미세플라스틱에 대한 실태조차 파악된 바가 없다. 미세플라스틱의 영향을 파악하기 위해서는 육상, 담수, 해양 등 모든 연결된 생태계에 대한 조사를 총체적인 관점에서 수행하여야 한다. 이와 같은 연구가 수행되어야 미흡하게나마 미세플라스틱의 관리 및 저감 방안 등을 마련할 수 있을 것으로 사료된다. 미세플라스틱과 관련된 연구는 일시적인 사회적 이슈로 판단하여 진행하면 큰 오류를 범할 수 있다. 미세플라스틱은 국가적 차원에서 관리해야 될 부분으로, 체계적인 연구 수행을 위한 정부차원의 정책지원이 필요하다.

저자기여도 개념설정: 김남신 & 윤주덕, 방법론: 김남신 & 윤주덕, 분석: 이승은, 자료제공: 박영준 & 우승현, 자료관리: 이승은 & 우승현, 원고 초안작성: 김남신 & 윤주덕, 원고 교정: 김남신 & 윤주덕, 원고 편집: 박영준 & 우승현, 과제관리: 이승은. 모든 저자는 논문의 결과에 동의하였고, 출판될 최종본을 검토하고 동의하였습니다.

이해관계 The authors declare no conflict of interest. The sponsors had no role in the design, execution, interpretation, or writing of the study.

연구비 본 연구는 2018년 국립생태원 자유공모과제 “담수생태계 잔류 미세플라스틱(microplastics) 검출에 관한 시험연구(NIE-기반연구-2018-23)”의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Barboza, L.G.A., A.D. Vethaak, B.R.B.O. Lavorante, A.K. Lundebyef and L. Guilhermino. 2018. Marine microplastic debris: An emerging issue for food security, food safety and human health. *Marine Pollution Bulletin* **133**: 336-348.
- Carbery, M., W. O'Connor and P. Thavamani. 2018. Trophic transfer of microplastics and mixed contaminants in the marine food web and implications for human health. *Environment International* **115**: 400-409.
- Carlos de Sá, L., M. Oliveira, F. Ribeiro, T.L. Rocha and M.N. Futter. 2018. Studies of the effects of microplastics on aquatic organisms: What do we know and where should we focus our efforts in the future? *Science of the Total Environment* **645**: 1029-1039.
- Chae, D.H., I.S. Kim, Y.K. Song, S.W. Kim and S.K. Kim. 2014. Development of analytical method for microplastics in seawater. *Journal of the Korean Society of Oceanography* **19**(1): 88-98. (in Korean)
- Christian, S., K. Tabias and W. Stephan. 2017. Export of plastic debris by rivers into the Sea. *Environmental Science and Technology* **51**: 12246-12253.
- Eo, S.E., S.H. Hong, Y.K. Song, J.S. Lee, J.M. Lee and W.J. Kim. 2018. Abundance, composition, and distribution of microplastics larger than 20 mm in sand beaches of South Korea. *Environmental Pollution* **238**: 894-902.
- Foley, C.J., Z.S. Feiner, T.D. Malinich and T.O. Höök. 2018. A meta-analysis of the effects of exposure to microplastics on fish and aquatic invertebrates. *Science of the Total Environment* **631-632**: 550-559.
- GESAMP. 2016. Sources, Fate and Effects of Microplastics in the Marine Environment; part tow of a Global Assessment. International Maritime Organization, London.
- Jambeck, J.R., A. Andrady, R. Geyer, R. Narayan, M. Perryman, T. Siegler, C. Wilcox and L.K. Lavender. 2015. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science* **347**: 768-771.
- Jeong, D.H., B.K. Ju, W.S. Lee, H.M. Chung, J.W. Park and C.S. Kim. 2018. A mini-review on discharge characteristics and management of microplastics in sewage treatment plants. *Journal of Korean Society of Water and Wastewater* **32**(4): 337-348. (in Korean)
- Kim, I.S. and S.K. Kim. 2015. Seasonal distribution characteristics of microplastics in the sand beach of the Daebu island, Gyeonggi-do. *Journal of the Korean Society for Environmental Analysis* **18**(4): 221-231. (in Korean)
- Korea Petrochemical Industry Association. 2017. <http://www.kpia.or.kr/index.php>.
- McNeish, R.E., L.H. Kim, H.A. Barrett, S.A. Mason, J.J. Kelly and T.J. Hoellein. 2018. Microplastic in riverine fish is connected to species traits. *Scientific Reports* **8**: 11639.

- MOE (Ministry of Environment). 2017. Nationwide Status of Waste Generation and Treatment (2016). K-eco (2017)-PE10-26. Ministry of Environment, Sejong.
- Murphy, F., C. Ewins, F. Carbonnier and B. Quinn. 2016. Wastewater treatment works (WwTW) as a source of microplastics in the aquatic environment. *Environmental Science & Technology* **50**: 5800-5808.
- NIER (National Institute of Environmental Research). 2016. Studies on the Investigation Method of Microplastic in the Freshwater. National Institute of Environmental Research, Incheon. (in Korean)
- Talvitie, J., A. Mikola, O. Setälä, M. Heinonen and A. Koistinen. 2017. How well is microlitter purified from wastewater?: A detailed study on the stepwise removal of microlitter in a tertiary level wastewater treatment plant. *Water Research* **109**: 1-172.
- Tricart, J. and C. KiewietdeJonge. 1992. *Ecogeography and Rural Management: a Contribution to the International Geosphere-biosphere Program*. Longman Group, Harlow.
- UNEP. 2016. *Marine Plastic Debris and Microplastics: Global Lessons and Research to Inspire Action and Guide Policy Change*. United Nations Environment Programme, Nairobi.
- Zeng, E.Y. 2018. *Microplastic Contamination in Aquatic Environments: an Emerging Matter of Environmental Urgency*. Elsevier, Amsterdam.
- Zhang, S., J. Ding, R.M. Razanajatovo, H. Jiang, H. Zou and W. Zhu. 2019. Interactive effects of polystyrene microplastics and roxithromycin on bioaccumulation and biochemical status in the freshwater fish red tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Science of the Total Environment* **648**: 1431-1439.

APPENDIX

Appendix 1. Collected samples per each sites.

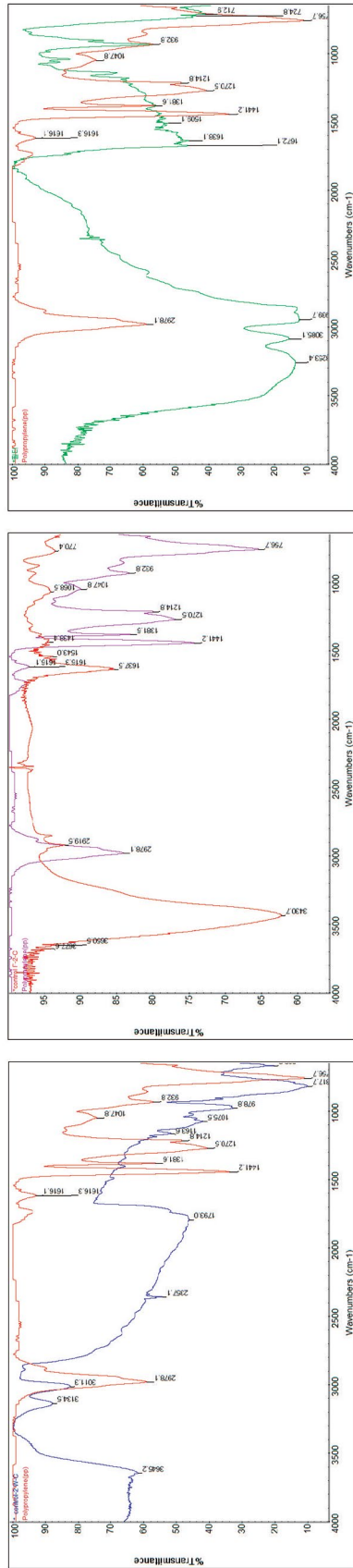
Sites	Types	Scientific name	N. of inds.
St. 1 (Mihocheon Euambridge)	Fishes (5 species)	<i>Opsariichthys uncirostris amurensis</i>	5
		<i>Hemibarbus labeo</i>	5
		<i>Pseudogobio esocinus</i>	2
		<i>Zacco platypus</i>	3
		<i>Cyprinus carpio</i>	1
St. 2 (Jungbu Expressway bridge)	Fishes (4 species)	<i>Opsariichthys uncirostris amurensis</i>	1
		<i>Hemibarbus labeo</i>	6
		<i>Pseudogobio esocinus</i>	1
		<i>Zacco platypus</i>	1
St. 3 (Geumgang main river)	Fishes (4 species)	<i>Opsariichthys uncirostris amurensis</i>	8
		<i>Hemibarbus labeo</i>	9
		<i>Pseudogobio esocinus</i>	1
		<i>Zacco platypus</i>	3
St. 4 (Gapcheon)	Fishes (4 species)	<i>Opsariichthys uncirostris amurensis</i>	4
		<i>Hemibarbus labeo</i>	2
		<i>Pseudogobio esocinus</i>	6
		<i>Zacco platypus</i>	6
St. 5 (Bongwangchon)	Fishes (3 species)	<i>Opsariichthys uncirostris amurensis</i>	8
		<i>Micropterus salmoides</i>	2
		<i>Zacco platypus</i>	6

※Species of common fishes as target species select *Opsariichthys uncirostris amurensis*

Appendix 2. Wave numbers of spectrum of each microplastic.

Polymer	Wave numbers (cm ⁻¹)
PES	3428, 2921-2857, 1732, 1450-1372, 1151-1117
PP	2978, 1441-1381, 1270-1214, 756
PE	2915-2846, 1459, 718
PS	3077-3057, 2921-2848, 1597, 1489-1448 1025, 753, 697
PET	3431, 2966-2905, 1721, 1450-1408, 1342, 1263 1124, 1021, 727
PVC	2915-2852, 1733-1675, 1426, 1254-1197, 966, 699
PC	2967-2871, 1773, 1594, 1502, 1364 1191, 828

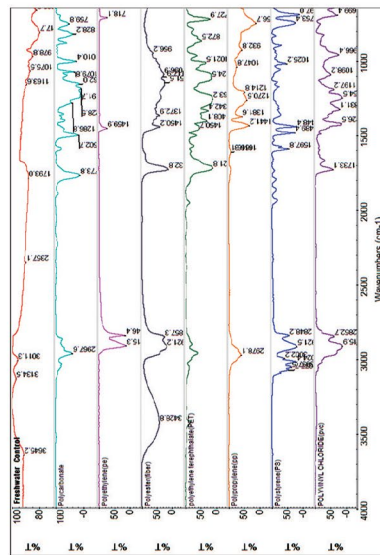
Appendix 3. Spectrum comparison of controls with polymers (Left: freshwater, Middle: fish, Right: filter).



Freshwater (PP & sample)

Fish (PP & sample)

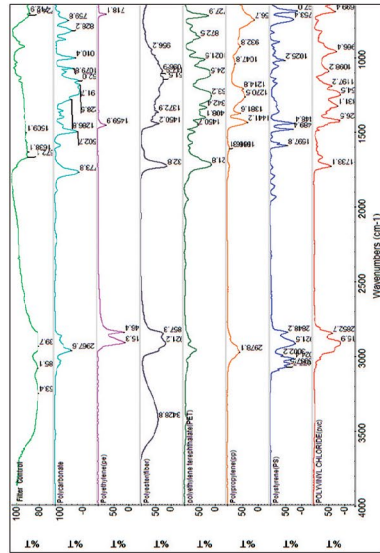
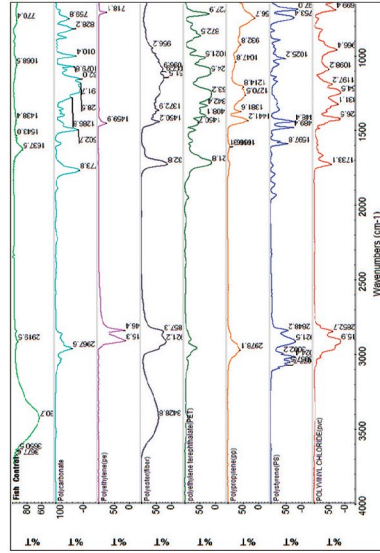
Filter (PP & sample)



Freshwater (total Spectrum)

Fish (total Spectrum)

Filter (total Spectrum)



Appendix 4. Microplastic identification.

1) 대전 갑천의 어류통합 판독

미세플라스틱 종류 판독은 아래 Fig. A1와 A2와 같이 PES분광, PE분광과 어류의 분광을 중첩하고, 그래프의 형태, 패턴, 그리고 PES와 PE가 갖는 고유값이 수직점선에 일치하는지 판단하였다.

대전 갑천 어류통합 시료에서는 미세플라스틱 5종(PES, PP, PE, PET, PVC)이 검출되었다. 이 중 Fig. A2에서는 어류통합 시료의 파장과 PES의 파장이 유사한 것을 확인할 수 있었으며, 이를 통해 어류통합 시료에서 PES가 검출된 것으로 사료된다.

PE와의 비교 시 동일한 방법에 따라 미세플라스틱이 검출된 것을 확인할 수 있었다. Fig. A2에서는 어류통합 시료의 파장(파란색)과 PE의 파장(붉은색)의 패턴이 차이가 나는 것을 확인할 수 있었으나 피크가 나타나는 부분의 유사성을 바탕으로 어류통합 시료에서 PE가 검출된 것으로 판단되었다.

2) 대전 갑천의 어류통합 검출결과

대전갑천 지점의 어류통합 시료와 각 미세플라스틱 분광 수치 비교 시 PES, PP, PE, PET, PVC는 검출된 것으로 확인되었으며, PS, PC는 패턴 및 각 피크치가 일치하지 않아 불검출된 것으로 판단되었다(Fig. A3).

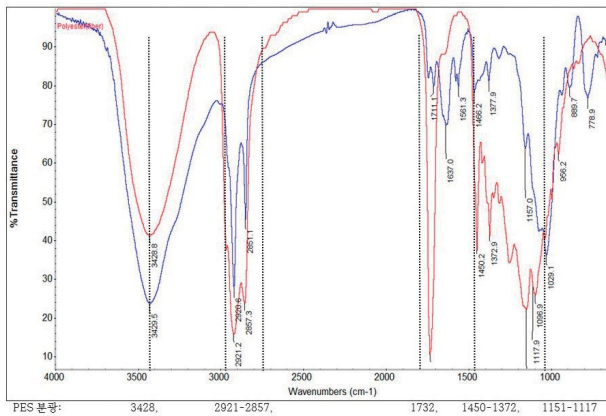


Fig. A1. Spectrum of fish samples at St. 4 (Gapcheon): sample (blue) and PES (red).

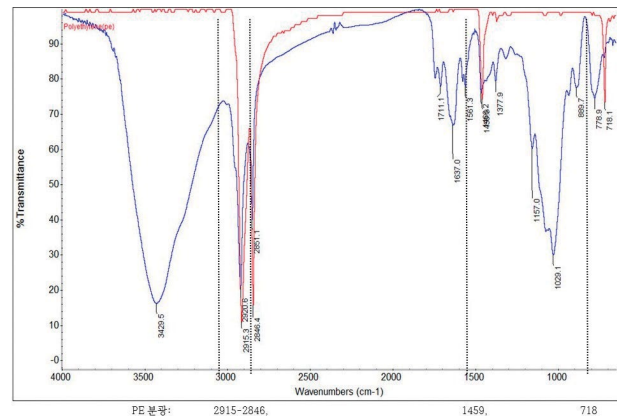


Fig. A2. Spectrum of fish samples at St. 4 (Gapcheon): sample (blue) and PE (red).

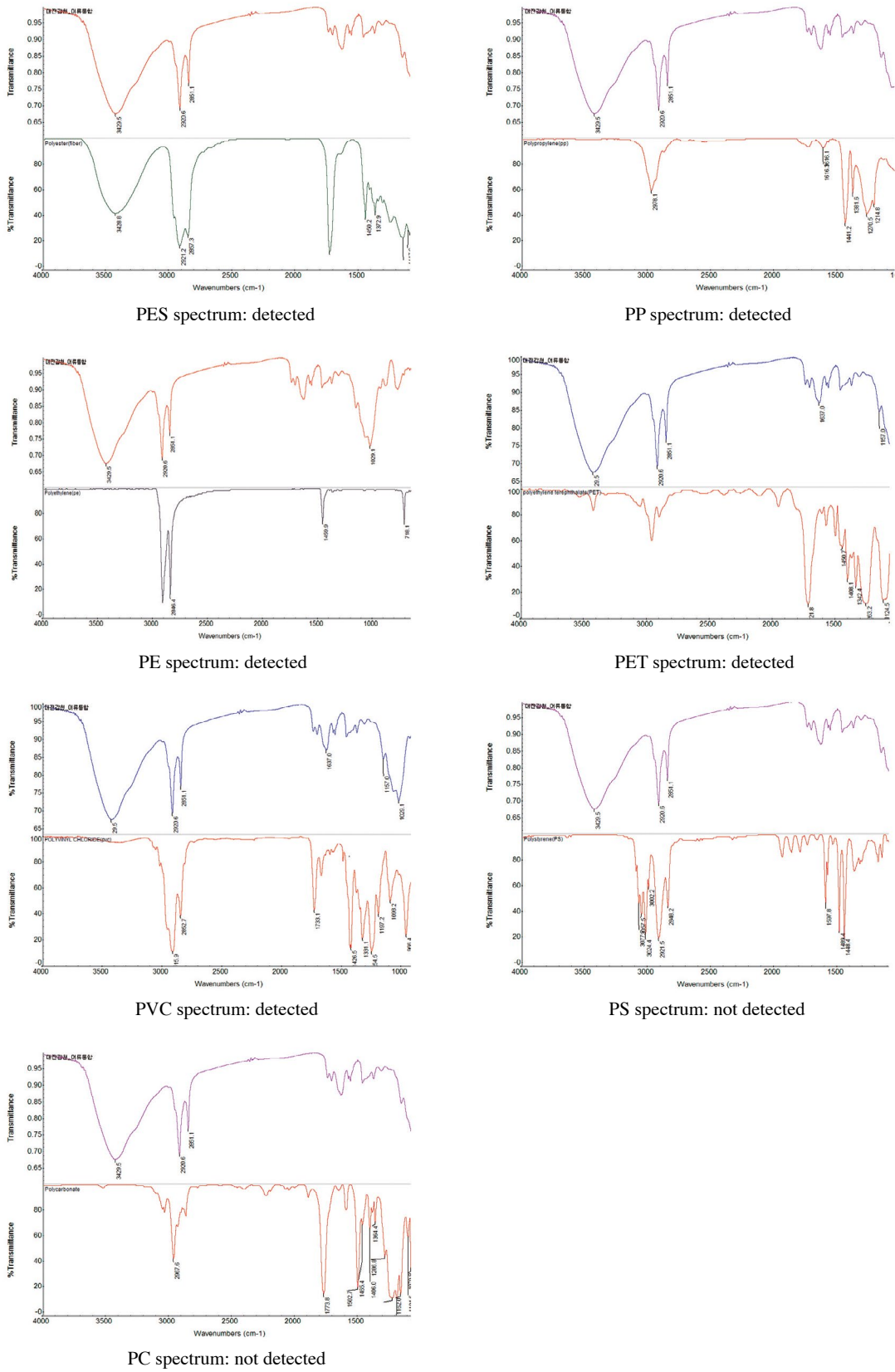


Fig. A3. Comparisons of whole microplastic spectrums with fish sample at St. 4 (Gapcheon).