

## 수계 내 미세플라스틱의 종과 크기를 분석하기 위한 시스템 개발

전수정<sup>1</sup> · 이준석<sup>1</sup> · 박보람<sup>1</sup> · 백경훈<sup>1,+</sup>

### Development of a System for Analyzing the Types and Sizes of Microplastics in an Aquatic Environment

Su-jeong Jeon<sup>1</sup>, Joon-seok Lee<sup>1</sup>, Bo-ram Park<sup>1</sup>, and Kyung-hoon Beak<sup>1,+</sup>

#### Abstract

Every year, approximately 350 million tons of plastic waste are generated worldwide. This waste, can degrade into microplastics, owing to factors such as temperature changes and UV exposure. These smaller plastic particles are increasingly entering the food chain through marine life, thereby raising concerns about their impact on human health. Consequently, there is an increasing need to measure microplastics. Common methods involve direct collection by using a manta trawl equipped with a 330  $\mu\text{m}$  mesh net or performing spectroscopic and thermal analyses on collected samples. However, these methods require complex pre-processing, which risk sample destruction. In this study, we developed a system to directly sample microplastics in aquatic environments by using laser-induced fluorescence spectroscopy. Through an analysis of the fluorescence spectra as well as, the with gradient and integration at specific points, we successfully distinguished microplastics of 100, 200, 300, and 500  $\mu\text{m}$  in size, and we also differentiated between polyethylene (PE) and polystyrene (PS) types.

**Keywords:** Microplastic, Fluorescence, Analysis system, Aquatic environments

#### 1. 서 론

19세기 중반 인간에 의해 처음 발명된 플라스틱은 21세기 현대 사회에서 필수적인 소재로 자리매김하고 있다. 플라스틱은 포장재부터 건축, 자동차 산업까지 다양한 산업 분야에서 사용되고 있으며 지금 이 순간에도 그 활용은 광범위하게 발전해 나가고 있다. 그러나 전 세계에서 매년 약 3억 5천만 톤의 플라스틱 폐기물이 발생하고 있으며[1], 1972년 처음으로 해양에서 플라스틱 입자가 발견된 후[2], 현재까지 해양 환경 뿐만 아니라 육상 환경, 심지어 인간이 거의 거주하지 않는 지역까지도 미세플라스틱이 운반되고 있다는 보고가 나오고 있다[3]. 이는 플라스틱 폐기물이 여러 생태계 오염 문제를 야기하고 있음을 시사한다.

플라스틱은 특정 조건(온도 변화, 자외선 노출 등)에 의해 분해 및 조각화 되어 작은 플라스틱이 되는데, 5 mm 이하의 플라스틱 입자를 미세플라스틱이라 하며[4], 이보다 더 작은 100  $\mu\text{m}$  이하 또는 1  $\mu\text{m}$  이하의 입자를 나노플라스틱이라 한다[5,6]. 이처럼 크기가 작아진 플라스틱은 특히 해양 생물을 통해 인간을 포함한 동물의 먹이 사슬에 유입될 가능성이 높아져, 미세플라스틱이 인간의 건강에 미치는 영향에 대해 많은 우려의 목소리가 나오고 있다. 실제로 일상 생활에 흔히 사용되는 수세미, 종이컵 등 심지어 호흡하는 공기 중에서도 미세플라스틱이 검출되고 있으며, 최근에는 인체 장기, 혈액 속에서 미세플라스틱이 검출되고[7] 태반에서까지 미세플라스틱이 발견되면서 태아의 신체 발달 및 인체 건강에 큰 영향을 미칠 수 있다는 충격적인 소식이 전해지기도 했다[8].

미세플라스틱의 위해성과 동시에 해양 내 미세플라스틱 오염도에 관한 연구도 활발하게 진행되고 있다. 대서양 전체를 북쪽에서 남쪽으로 수심 200 m까지 샘플링하여 분석한 결과 모든 위치에서 플라스틱이 발견되었는데, 그중 폴리에틸렌(Polyethylene, PE) 및 폴리스티렌(Polystyrene, PS) 등의 플라스틱 입자가 전세계 플라스틱 폐기물의 약 56%를 차지한다[9]. 국내의 경우 비교적 최근인 2023년 조사 결과에 따라 경기 바다에서 검출된 미세플라스틱은 폴리에틸렌(PE)과 폴리스티렌(PS) 등 총 8종이

<sup>1</sup> 마하테크 부설연구소 (Research Institute, MachTech Co.,Ltd.)  
333, Cheomdangwagi-ro, Buk-gu, Gwangju 61008, Korea

<sup>+</sup>Corresponding author: lawseed0518@naver.com

(Received: May. 28, 2024, Revised: Jun. 18, 2024, Accepted: Jun. 26, 2024)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

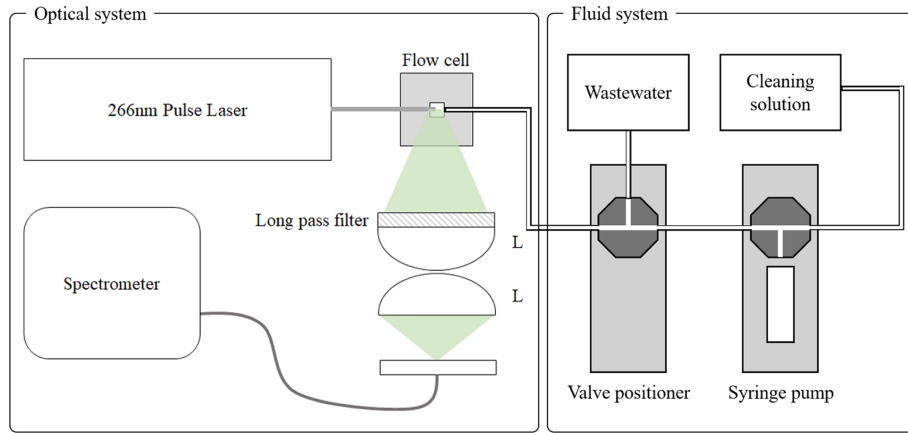


Fig. 1. Microplastic analysis system (L : Convex Lens).

었으며, 이중 스티로폼에 사용되는 폴리스티렌(PS)과 종이컵이나 비닐봉투의 재료가 되는 폴리에틸렌(PE)의 비율이 전체 미세플라스틱의 70%에 육박하였다[10]. 이처럼 해양 생태계부터 인간의 건강까지 파괴하는 미세플라스틱은 그 문제를 파악하기 위한 분석이 필히 요구된다.

미세플라스틱 측정을 위한 채수 방법으로 흔히 사용되는 manta trawl (manta net)은 대형 직사각형 프레임에 330  $\mu\text{m}$  크기의 미세 mesh 그물이 부착된 시스템으로, 바다 표면을 위를 떠다니며 해수를 채취한다[11]. 사용하는 mesh의 크기(일반적으로 300  $\mu\text{m}$ )에 의해 수집할 수 있는 미세플라스틱 크기 하한이 결정되므로 이보다 작은 크기의 시료를 채취하는 것이 불가능하다. 채집된 미세플라스틱 시료 연구에는 크게 분광 분석법(spectroscopic methods)과 열 분석법(thermal methods)이 적용되고 있으나, 분광 분석법의 경우 복잡한 시료 전처리 과정과 측정 가능한 시료의 크기가 한정되며, 열 분석법은 미세플라스틱 입자를 열적으로 분해하기 때문에 시료가 파괴된다는 단점이 있다[12]. 또한 앞서 언급했듯 채수 과정에서 분석할 수 있는 미세플라스틱의 크기가 한정되어, 현재까지 manta trawl로 채수된 플라스틱을 대상으로 한 정성 및 정량 분석에 관한 연구 결과가 과소 평가되었을 가능성도 제기된다[13].

이와 같이 미세플라스틱으로 인한 생태계 파괴 및 인간의 건강에 대한 우려가 나날이 확산됨에 따라, 본 연구에서는 수계 내 미세플라스틱을 직접 흡입하여 측정할 수 있는 미세플라스틱 분석 시스템을 개발하고, 측정된 스펙트럼을 바탕으로 미세플라스틱의 종과 크기를 구분하여 향후 미세플라스틱 오염도 분석 방법에 기여하고자 한다.

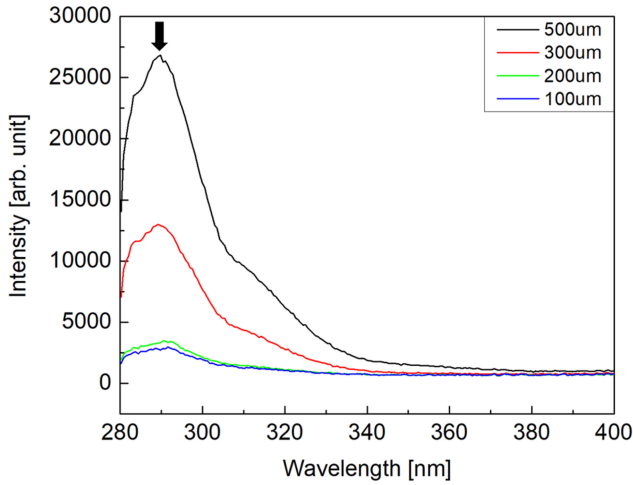
## 2. 미세플라스틱 측정 방법

본 연구에서는 미세플라스틱 표준 시료(polystyrene &

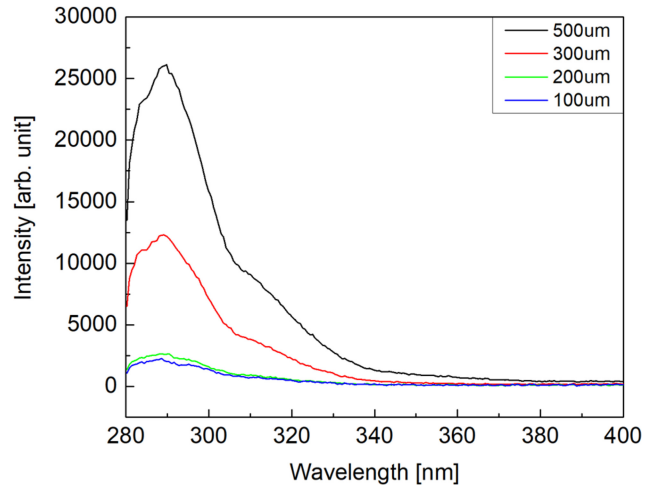
polyethylene microspheres, Lab 261)와 증류수(W0003, 삼진 화학) 100 mL를 혼합하여 제작한 100, 200, 300, 500  $\mu\text{m}$  크기 별 시료를 syringe pump (PSD/4, Hamilton)와 valve positioner (MVP/4, Hamilton)로 구성된 fluid system으로 흡입하여 UV 펄스 레이저(FQSS266-Q4-1KHZ, CryLas)를 Flow cell (FCTN23, icuvets)의 내부를 통과하는 시료에 직접 조사하고 방출되는 형광을 Lens pair와 분광기(AvaSpec-ULS2048CL-RS-EVO, Avantes)로 구성된 optical system으로 측정 및 분석하기 위한 미세플라스틱 분석 시스템을 개발하였으며, 이를 Fig. 1에 나타내었다.

Fig. 1의 optical system에서 UV 펄스 레이저는 중심 파장이 266 nm, peak power가 1.2 kW인 펄스광을 방출하여 Flow cell로 조사된다. Fluid system 중 syringe pump에서 유속을 200  $\mu\text{l/s}$ 로 설정한 후 증류수와 혼합된 표준 시료를 흡입하면 내경 600  $\times$  600  $\mu\text{m}$  크기의 Flow cell 내부를 통과하게 되고 레이저에서 출력된 광에 표준 시료가 노출되면 표준 시료에서 형광이 발현된다. 이후 표준 시료를 포함하는 흡입된 용액은 valve positioner를 지나 syringe pump 직전까지 흡입되며, valve positioner에서 valve 변경을 통해 폐수(wastewater)로 빠져나간다. 표준 시료에서 발현된 형광은 Lens pair에 의해 집광 되는데, Lens pair는 경통(SM1L15, Thorlabs) 내부에 2개의 볼록렌즈(ASL2520-UV, Thorlabs)와 약 280 nm 보다 장파장의 광만 투과할 수 있도록 별도의 Long Pass Filter (FF01-272/LP-25, Semrock)가 함께 구성된다. 이후 집광된 광이 광섬유(FC-UVIR400-1, Avantes)를 통해 집속된 후 설정한 노출 시간(integration time) 100 ms 마다 활성화되어 분광기로 도달 및 가시광선 영역에서 형광 스펙트럼으로 분광 되어 형광 스펙트럼 데이터를 획득한다. 측정이 완료되면 증류수로 된 세척액(cleaning solution)을 사용하여 fluid system 및 flow cell 내부를 세척한다.

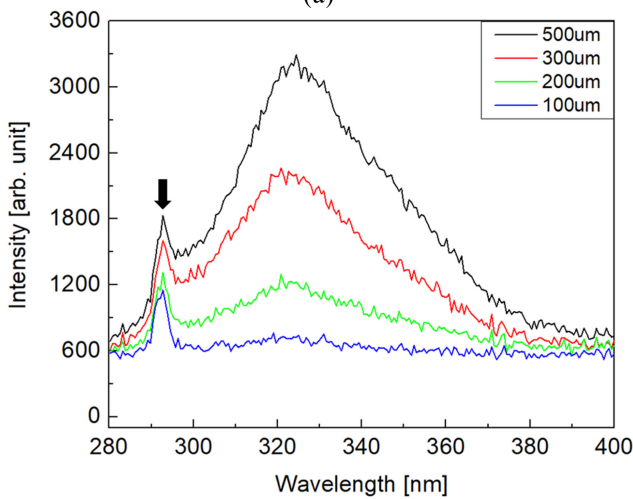
개발한 미세플라스틱 측정 시스템으로 폴리에틸렌(PE)과 폴리스티렌(PS) 2종류의 100, 200, 300, 500  $\mu\text{m}$  크기 별 총



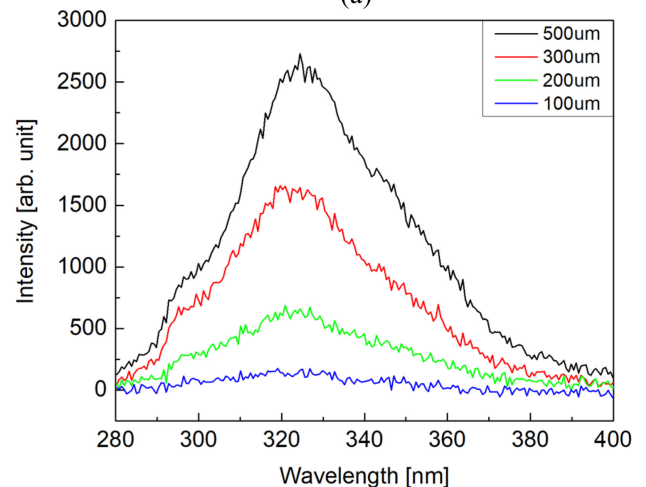
(a)



(a)



(b)



(b)

**Fig. 2.** Spectrum according to sample size ; (a) Polyethylene, (b) Polystyrene.

**Fig. 3.** Spectrum with the water spectrum removed in Fig. 2. ; (a) Polyethylene, (b) Polystyrene.

8개 표준 시료의 형광 스펙트럼을 각 시료 별로 20회씩 측정하였다.

### 3. 미세플라스틱 분석 결과

미세플라스틱 분석 시스템으로 측정된 2종류의 표준 시료에 대한 데이터를 Fig. 2에서 확인할 수 있으며, Fig. 2 (a)는 폴리에틸렌(PE), (b)는 폴리스티렌(PS)을 나타낸다.

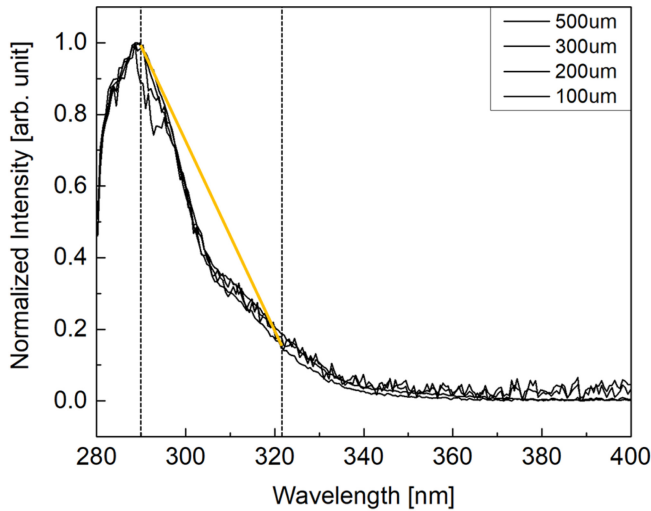
Fig. 2의 측정 데이터에서 화살표로 표시된 부분은 여기 광원보다 낮은 에너지에서 광원의 중심 파장에 대해 3400~3600 cm<sup>-1</sup>의 스펙트럼 폭(spectrum width)만큼 이동한 물의 라만 신호(water raman spectrum)가 발생하여 두 종류의 샘플에서 발견되는 형광신호보다 높게 측정된 것이다[14]. 해당 신호를 포함하는 280~400 nm 특정 구간에서 시료에 의해 발견된 형광 스펙트럼이 분포함을 확인할 수 있었다.

Fig. 3은 정확한 분석을 위해 Fig. 2의 데이터에서 flow cell 내부에 샘플 없이 물만 측정된 물 신호(water raman spectrum)를 제거하는 전처리 과정을 거친 데이터로 Fig. 3 (a)는 폴리에틸렌(PE), (b)는 폴리스티렌(PS)이며, 전처리 과정 수행 후 약 295 nm 부근의 물에 의한 신호가 제거된 것을 확인할 수 있었다.

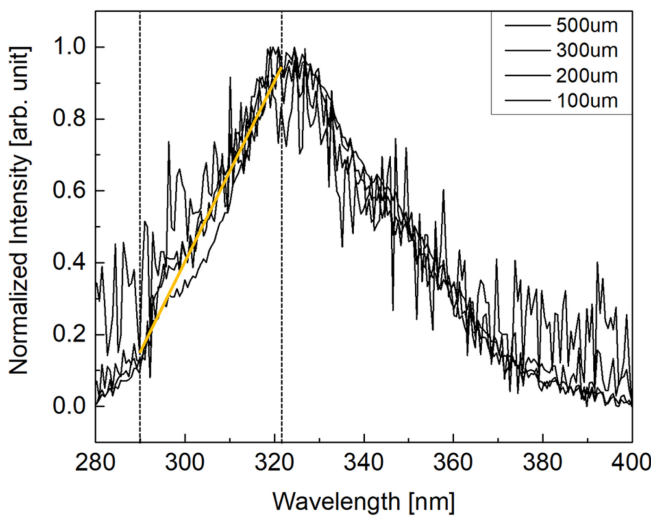
Fig. 4는 Fig. 3의 전처리 데이터를 최대값으로 나누어 규격화 한 정규화 데이터(normalized spectrum)이며, Fig. 4 (a)는 폴리에틸렌(PE), (b)는 폴리스티렌(PS)을 나타낸다. 각 시료의 스펙트럼 개형이 크기 별로 동일함을 확인할 수 있었다.

$$G = \frac{MI_2 - MI_1}{MW_2 - MW_1} \quad (1)$$

수식(1)은 폴리에틸렌(PE)과 폴리스티렌(PS)의 종류를 구분하기 위한 기울기 값 G (gradient)를 계산하는 것으로, 해당 수식에서 MI<sub>1</sub> 및 MI<sub>2</sub>는 세기 평균(mean intensity), MW<sub>1</sub> 및



(a)



(b)

**Fig. 4.** Normalized Spectrum and Gradient of Fig. 3.  
(Dotted Line : Average Calculation Section, Yellow Line :  
(a) Polyethylene, (b) Polystyrene.

$MW_2$ 는 파장 평균(mean wavelength)를 의미한다. 각 아래 첨자는 산출할 평균 구간을 나타내는데 첫번째 구간(1<sup>st</sup>)은 290.992~293.383 nm, 두번째 구간(2<sup>nd</sup>)은 322.64~325.025 nm를 의미하며 Fig. 4에 해당 구간을 점선으로, 산출된 기울기 값을 노란색 실선으로 표시하였다. 이때  $MI_1$  및  $MI_2$ 는  $MW_1$  및  $MW_2$ 와 동일한 파장 구간에서 측정된 세기 값에 해당한다.

이후 두 종류의 시료를 100, 200, 300, 500  $\mu\text{m}$  각 크기별로 구분하기 위해 물 데이터를 제거한 후 규격화 되지 않은 Fig. 3 그래프의 280.255~400.411 nm 구간에서 적분(integration)하여 면적(area)을 계산한다.

Table 1은 수식(1)을 적용하여 각 시료의 기울기 값과 평균 및 표준편차를 산출하였으며, 이를 Fig. 5에 나타내었다. 계산된 모든 값을 네모 점으로 표기하고, 평균값은 하얀색 네모, 표준편차는 오차 막대로 표시하였다. 기울기 0을 기준으로 음수일 경

**Table 1.** Gradient value of PE

NO	PE			
	100	200	300	500
1	-0.015	-0.023	-0.024	-0.025
2	-0.011	-0.022	-0.025	-0.025
3	-0.014	-0.022	-0.024	-0.025
4	-0.011	-0.020	-0.025	-0.024
5	-0.013	-0.020	-0.025	-0.024
6	-0.012	-0.019	-0.025	-0.025
7	-0.013	-0.022	-0.025	-0.025
8	-0.018	-0.022	-0.025	-0.025
9	-0.017	-0.025	-0.024	-0.024
10	-0.005	-0.023	-0.024	-0.025
11	-0.012	-0.024	-0.024	-0.025
12	-0.010	-0.021	-0.024	-0.025
13	-0.009	-0.021	-0.024	-0.025
14	-0.013	-0.023	-0.024	-0.025
15	-0.014	-0.020	-0.025	-0.025
16	-0.019	-0.024	-0.025	-0.025
17	-0.015	-0.021	-0.025	-0.024
18	-0.011	-0.024	-0.025	-0.025
19	-0.015	-0.020	-0.025	-0.025
20	-0.011	-0.023	-0.025	-0.025
Mean	-0.013	-0.022	-0.024	-0.025
STDV.	0.0033	0.0017	0.0002	0.0002

**Table 2.** Gradient value of PS

NO	PS			
	100	200	300	500
1	0.015	0.023	0.025	0.025
2	0.015	0.023	0.023	0.025
3	0.014	0.024	0.023	0.024
4	0.014	0.024	0.024	0.026
5	0.013	0.021	0.024	0.025
6	0.020	0.021	0.024	0.025
7	0.014	0.021	0.024	0.025
8	0.015	0.022	0.024	0.026
9	0.015	0.022	0.025	0.024
10	0.012	0.020	0.024	0.025
11	0.009	0.023	0.025	0.024
12	0.016	0.022	0.025	0.025
13	0.014	0.022	0.023	0.024
14	0.015	0.021	0.024	0.024
15	0.011	0.022	0.024	0.026
16	0.013	0.022	0.023	0.025
17	0.010	0.023	0.025	0.025
18	0.016	0.020	0.023	0.024
19	0.015	0.023	0.024	0.026
20	0.015	0.019	0.024	0.024
Mean	0.014	0.022	0.024	0.025
STDV.	0.0023	0.0013	0.0007	0.0007

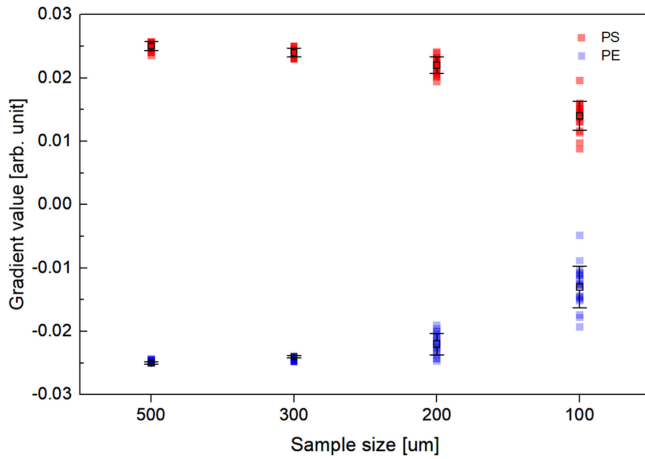


Fig. 5. Gradient value for sample size

Table 3. Integral value of PE

NO	PE			
	100	200	300	500
1	15606	76706	339374	770612
2	15391	70534	340375	802898
3	14411	72988	327039	782332
4	14148	65268	325560	800338
5	15039	71663	323094	792510
6	10069	72322	326283	766100
7	14051	68341	321023	743714
8	11644	60589	315590	737166
9	10342	70419	344041	797161
10	18878	66453	325126	776081
11	13778	70763	343782	725697
12	13038	71292	340922	718327
13	14880	74175	324358	726459
14	14060	73780	327381	710142
15	14712	78077	321095	717785
16	13511	72244	315320	697971
17	14743	63559	321504	704905
18	17112	72498	339916	683446
19	15261	64582	336772	729636
20	14996	68160	309575	689707
Mean	14284	70221	328407	743649
STDV.	2022	4428	10311	39179

우 PE(폴리에틸렌), 양수일 경우 PS(폴리스티렌)로 두 시료의 종류가 구분되는 것을 볼 수 있다. Table 2는 각 시료의 적분 값과 평균 및 표준편차를 산출하였으며, 이를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 5와 동일한 방법으로 데이터를 표시하였으며, 각 시료의 크기에 따라 적분 값의 차이가 명확하여 4가지의 크기로 구

Table 4. Integral value of PS

NO	PS			
	100	200	300	500
1	5022	32824	79911	144094
2	5773	32906	79332	136667
3	5751	35895	82268	135077
4	3764	33919	78502	120525
5	4967	33109	83083	127584
6	3701	36517	88269	135007
7	4099	34945	84523	114934
8	3749	31594	80121	140368
9	5657	36585	82970	121859
10	3699	31343	78806	118109
11	6550	32079	85616	140154
12	3447	36609	85616	137696
13	7538	33137	82268	136040
14	9251	36328	77112	126418
15	7836	36645	85529	122535
16	7964	38313	79664	126154
17	5452	38730	79911	132815
18	8820	37630	79332	125847
19	6626	31958	83196	132300
20	9528	39819	85707	133162
Mean	5960	35044	82087	130367
STDV.	1981	2593	3077	8116

분이 가능한 것을 볼 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 시료에 별도의 전처리 과정을 거치지 않고 수계 내 미세플라스틱의 종류와 크기 분석이 가능한 미세플라스틱 분석 시스템을 개발하였다. 미세플라스틱의 종류를 구분하기 위해 polyethylene과 polystyrene의 표준 시료를 사용하였으며, 크기를 구분하기 위하여 100, 200, 300, 500 μm 직경의 샘플을 증류수에 섞은 시료를 사용하였다. 이 시스템을 사용하여 각 시료의 스펙트럼을 측정하고, 측정된 스펙트럼 데이터를 사용하여 특정된 두 지점의 기울기를 구하여 종을 구분할 수 있었으며, 특정 구간의 적분을 통해 면적을 계산하여 시료의 크기에 따라 구분되어지는 것을 확인할 수 있었다. 기존 미세플라스틱 시료 분석의 경우 물기를 제거하는 건조 과정이 필요로 요구되며, 분석 과정에서 시료의 열변형 혹은 파괴되는 문제가 발생할 수 있다. 그러나 해당 시스템에서는 별도의 건조 과정을 거치지 않고 수계 내부의 샘플을 그대로 흡입하여 분석이 가능하다는 점에서 기존 방식에 비해 더 간편하고 신속한 측정이 가능하다는 이



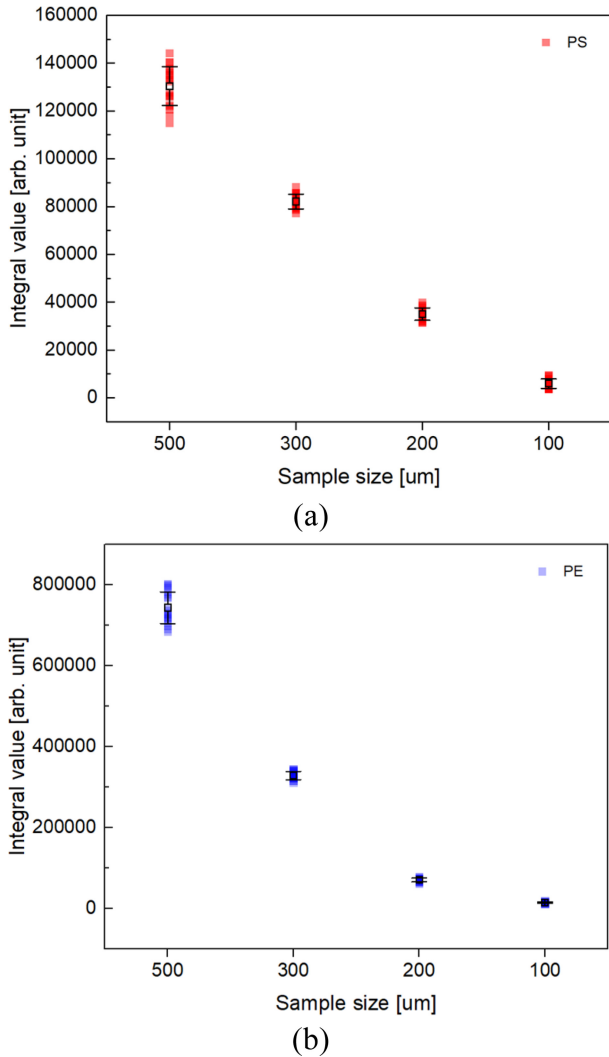


Fig. 6. Integral value for the sample size ; (a) Polyethylene, (b) Polystyrene.

점이 있다. 또한, 개발된 시스템은 종과 크기를 분석하는 것에서 더 나아가 해당 분석 데이터를 바탕으로 미세플라스틱의 개수를 카운팅 할 수 있는 시스템으로도 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

이 연구는 대한민국 정부(산업통상자원부 및 방위사업청) 재원으로 민군협력진흥원에서 수행하는 민군기술협력사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다(22-DC-EL-06).

### REFERENCES

- [1] <https://ourworldindata.org/plastic-pollution> (retrieved on May. 2, 2024)
- [2] E. J. Carpenter and K. L. Smith, "Plastics on the Sargasso Sea Surface", *Science*, Vol. 175, No. 4027, pp. 1240-1241, 1972.
- [3] M. Bergmann, F. Collard, J. Fabres, G. W. Gabrielsen, J. F. Provencher, C. M. Rochman, E. van Sebille, and M. B. Tekman, "Plastic pollution in the Arctic", *Nat. Rev. Earth Environ.*, Vol. 3, pp. 323-337, 2022.
- [4] M. Cole, P. Lindeque, C. Halsband, and T. S. Galloway, "Microplastics as contaminants in the marine environment: A review", *Mar. pollut. bull.*, Vol. 63, No. 12, pp. 2588-2597, 2011.
- [5] A. A. Koelmans, E. Besseling, and W. J. Shim, "Nanoplastics in the Aquatic Environment. Critical Review," in *Marine Anthropogenic Litter*, M. Bergmann, L. Gutow, and M. Klages, Eds. Springer, Berlin, pp. 325-340, 2015.
- [6] J. P. da Costa, P. S. M. Santos, A. C. Duarte, and T. Rocha-Santos, "(Nano) plastics in the environment – Sources, fates and effects", *Sci. Total Environ.*, Vol. 566-577, pp. 15-26, 2016.
- [7] K. D. Cox, G. A. Covernton, H. L. Davies, J. F. Dower, F. Juanes, and S. E. Dudas, "Human consumption of microplastics", *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 53, No. 12, pp. 7068-7074, 2019.
- [8] K. Hunt, A. Davies, A. Fraser, C. Burden, A. Howell, K. Buckley, S. Harding, and D. Bakhbakhi, "Exposure to microplastics and human reproductive outcomes: A systematic review", *BJOG*, Vol. 131, No. 5, pp. 675-683, 2024.
- [9] <https://thescienceplus.com/news/newsview.php?ncode=1065587955244758&dt=m> (retrieved on May. 2, 2024)
- [10] <https://www.hani.co.kr/arti/area/capital/1110925.html> (retrieved on May. 2, 2024)
- [11] S. Oh and D. Lee, "A Review of Research Trends in Microplastic Analysis in an Aquatic System", *Korean Chem. Eng. Res.*, Vol. 59, No.3, pp. 316-325, 2021.
- [12] H.-W. Yu, Y. S. Kim, S. Lee, J. Yoo, and J. Choi, "A Review on Analytical Methods and Occurrences for Microplastics in Freshwater", *Environ. Anal. Health. Toxicol.*, Vol. 23, No. 4, pp. 180-193, 2020.
- [13] M. K. Viršek, A. Palatinus, Š. Koren, M. Peterlin, P. Horvat, and A. Kržan, "Protocol for Microplastics Sampling on the Sea Surface and Sample Analysis" *J. Vis. Exp.*, Vol. 118, p. 55161, 2016.
- [14] A. J. Lawaetz and C. A. Stedmon, "Fluorescence Intensity Calibration Using the Raman Scatter Peak of Water", *Appl. Spectrosc.*, Vol. 63, No. 8, pp. 936-940, 2009.