

인천지역 도로변 퇴적물 특성 조사

백인찬*, 박은영, 김영주, 김기문, 강희규, 성지홍
인천보건환경연구원 물환경연구부 토양환경과

Characteristics of roadside sediments in Incheon area

In-chan Baek*, Eun-young Park, Young-joo Kim, Gi-moon Kim, Hee-gyu Gang, Ji-hong Seong

Incheon Research Institute of Public Health and Environment

Abstract

In this study, the characteristics of roadside sediments on six main roads and collected roads in Incheon were investigated. As a result of particle size analysis, the content of fine soil(less than 0.075mm) was the highest in main road of harbor area(Harbor_M) at 16.9 %. Main road of landfill(Land_M) had the highest content of PM10 at 0.95 % and the highest concentration of road resuspended particles(May 174 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, August: 360 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Our results showed that Fe was the highest in both main and collected roads(Fe: 26,362 ~ 54,346 mg/kg) and the whole area was contaminated by Zn when compared to background concentrations. The Pollution Load Index(PLI) was the highest at 3.7 in a collected road of residential area near industrial area(Resi_Indu_M). In the case of organic contaminants, TPH(Total Petroleum Hydrocarbon) showed that Harbor_M exceeded soil criterial of 3 region and benzo(a)pyrene was detected in the whole area. Microplastics were found in the whole area. Since sediments containing many contaminants can cause health risk so careful management is required.

Key words: Heavy metal, Microplastic, Roadside sediment, Particle size distribution, Organic contaminants

I. 서 론

도로변 퇴적물은 주로 인근의 암석, 토양 등의 자연적인 요소와 교통 및 산업활동 등의 인위적인 요소들로부터 발생한다. 특히, 인위적인 요소들로부터 발생된 퇴적물은 무·유기오염물질을 함유하고 있을

수있어, 특별한 관리가 필요하다.

무기오염물질에 대해 살펴보면, 차량, 산업시설 등으로 인하여 Pb, Fe, Cd, Cu, As Ni 등 다수의 중금속 오염이 나타난다. 특히 차량활동 및 산업활동이 활발한 항만지역, 산업지역 등은 건축자재 마모, 자동차 등을 통해 중금속의 오염이 많이 발

생하는 것으로 보고되고 있다(정혜령 등, 2020). 유기오염물질에 경우에도 자동차 배기가스, 공장 굴뚝에서 발생하는 TPH, 벤조(a)피렌 등에 의한 오염이 발생하는 것으로 보고되고 있다(유은희 등, 2010). 무·유기오염물질 외에도 타이어 등에서 발생하는 미세플라스틱도 도로변 퇴적물에 오염을 발생시키는 요인으로 보고되고 있다(Anna Wik 등, 2009).

오염된 도로변 퇴적물은 차량이동 및 바람에 의해 대기 중으로 재비산되며, 호흡기로 흡입되어 건강에 해로운 영향을 미칠 수 있다. 각 지자체에서는 도로변 재비산먼지를 관리하고 있으며, 관리방법으로는 사람이 직접 처리하는 방법과 도로청소차를 이용하는 방법이 많이 이용되고 있다. 특히 도로청소차는 전국에서 가장 일반적으로 사용하는 방법이다. 도로청소차는 습식 진공 청소차와 건식 진공차로 구분할 수 있다. 습식 진공차는 5~30%의 비점오염물질 저감시키고 영양염류를 0~15% 정도 저감시킨다. 건식 진공청소차는 비점오염물질 35% ~ 80%와 영양염류 15% ~ 40%를 저감시키는 것으로 보고되고 있다(강희만 등, 2019)(강희만 등, 2021). 좋은 효율을 갖는 도로청소차의 경우에도 작은 입자크기를 갖는 퇴적물에 대한 제거효율이 다소 낮은 것으로 보고되고 있다(강희만 등, 2019)(강희만 등, 2021). 또한 도로청소차가 잘 이동할 수 없는 보조도로(집산도로)에 경우에는 도로변 퇴적물들이 수거가 잘 이뤄지지 않아 향후 문제가 발생할 수 있다.

이에 본 연구에서는 인천지역의 항만, 산업, 매립지 지역과 각 지역인근의 주거지역에 대한 유·무기오염물질 및 미세플라스틱 특성

을 조사하였으며, 도로청소차가 이동하기 어려운 보조도로(집산도로)에 대한 도로변 퇴적물도 특성을 조사하였다. 또한 퇴적물 입도 특성과 재비산농도 간의 상관관계를 파악하고자 하며, 향후 도로청소 정책 수립을 위한 기초 자료를 제시하고 자한다.

II. 연구대상 및 방법

2.1. 연구조사지점 및 시료채취

인천지역 도로변 퇴적물 특성 조사를 위해 도시의 특성을 고려하여 항만지역(Harbor area → Harbor), 산업지역(Industril area → Indu), 매립지(Landfill → Land) 및 주거지역(Residential area → Resi)의 주요도로(Main road → M)를 주요 연구조사지점으로 선정하였고, 주거지역은 항만(Resi_Harbor)/산업(Resi_Indu)/매립지(Resi_Land)에 각각 인접한 주요도로를 연구조사지점으로 선정하였다. 또한 각 지역의 주요도로와 연결된 보조도로(Collected road → C, 집산도로)에 대해서도 연구조사지점을 선정하여 도로청소가 잘 이뤄지지 않은 도로에 대한 퇴적물 특성 조사도 진행되었다.

시료채취는 도로연석에 접한 지점의 1m 내 지역을 건식 진공청소방법을 이용하여 채취하였다. 채취 과정 중에 지점별로 교차오염과 입자유실을 최소화 하기위해 시료채취에 사용되는 부품(먼지통, 필터 등)을 지점별로 교체하거나 세척을 진행한 후 사용하였다.

시료채취 진행횟수는 6 개 주요도로에 경우 2월부터 10월까지 총 9회 진행되었고, 보조도로(집산도로)는 분기별 총 4회 진행하였다.

Table 1. Analytical instrument of items

Analytical instrument	Item	
ICP-OES (Agilent)	Pb, Cd, Cu, Ni, Zn, As, Mn, Fe, Cr	
GC	ECD (Scion)	PCB*
	NPD (Scion)	OPs*
	FID (Agilent)	TPH*, Phenol
GC/MS (Agilent)	BTEX*, EDC*, TCE*, PCE*, Benzo(a)pyrene	
UV (Shimadzu)	F, CN, Cr ⁶⁺	
AMA* (NIC)	Hg	
PSA* (Microtrac)	Particle size	
FT-IR (ThermoFisher)	Microplastics*	
pH meter (ThermoFisher)	pH	

PCB*: Poly Chlorinated Biphenyls

OPs*: Organophosphorus compounds,

TPH*: Total Petroleum Hydrocarbon

BTEX*: Benzene, Toluene, Ethyl benzene, Xylene

EDC*: 1,2-dichloroethane,

TCE*: Trichloroethene, PCE*: Tetrachloroethene,

AMA*: Automatic Mercury Analyzer

PSA*: Particle Size Analyzer

Microplastics* PE, PP, polyester, PET, PU, PS, Nylon, Polyamide, Alkyd, PVC, PMMA, Acrylate, Arylic, Olefin, Epoxy, PV

2.2. 입도분석

입도분석 시료는 전기오븐에서 105 °C ± 5 °C 의 온도로 24시간 건조 후 진행하였다. 입도분석은 체가름 분석을 이용하였으며, 지점별 건조된 시료 200 g을 체 5.00, 2.00, 1.00, 0.50, 0.25, 0.15, 0.075, 0.053, 0.025 mm를 이용하여 분리하였다.

0.025 mm를 통과한 시료에 대해서는 입도 분석기(Microtrac S3500, Microtrac, USA)를 이용하여 분석하였다.

2.3. 무기오염물질 분석

무기오염물질 분석 항목은 총 13개 항목으로 비소, 카드뮴, 납, 구리, 니켈, 아연, 철, 망간, 크롬, 6가크롬, 수은, 불소, 시안이다.

시안과 6가크롬은 채취된 시료를 그대로 분석에 사용하였으며, 그 외에 항목은 채취지점에서 채취한 토양시료를 직사광선이 닿지 않고 통풍이 잘되는 장소에서 풍건시킨 다음, 나무망치로 분쇄하여 눈금 간격 0.2 mm 표준체를 통과한 시료를 표준시료로 사용하였다. 불소를 분석하는 시료는 눈금간격 0.075 mm 표준체를 통과한 시료를 표준시료로 사용하였다. 입자크기에 따른 중금속(6가크롬 제외) 농도를 비교하기 위해 0.053, 0.025 mm 표준체를 통과한 시료를 사용하였다. 또한 퇴적물 pH를 측정하여 참고자료로 사용하였다.

모든 시료는 『토양오염공정시험기준』에 의거하여 전처리하고 분석하였다.

2.4. 유기오염물질 분석

유기오염물질 항목은 총 12개 항목으로 페놀, TPH(석유계총탄화수소), TCE(트리클로로에틸렌), PCE(테트라클로로에틸렌), BTEX(벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌), PCBs(폴리염화비페닐), EDC(1,2-디클로로에탄), 벤조(a)피렌, OPs(유기인화합물)이다.

모든 시료는 『토양오염공정시험기준』에 의거하여 전처리하고 분석하였다.

2.5. 미세플라스틱 정량/정성 분석

미세플라스틱 분석 시료는 전기오븐에서 50 °C 의 온도로 48시간 동안 건조하였다. 건조된 시료를 5 mm 체로 걸러 주고, 체를 통과한 시료 3 g을 500 mL 삼각플라스크에 담고 ZnCl_2 (1.6 g/cm^3) 250 mL를 첨가한 후, 교반기를 이용하여 300 rpm, 5분 간 교반하였다. 추가적인 ZnCl_2 를 넣어준 뒤 24시간 이상 정치하였다. 정치된 시료에 상층부를 비커에 옮겨주고, 위 과정은 3번 이상 반복하고, 비커로 옮겨진 시료는 ZnCl_2 를 제거하기 위해 증류수로 충분히 세척하였다. 유기물 분해를 위해 30 % H_2O_2 를 첨가하여 7일 상온에 정치하였다. 7일 동안 정치할 때 30 % H_2O_2 를 중간에 새로 넣어주었다. 유기물 분해가 잘 이뤄지지 않을 경우 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 용액을 첨가하여 반응 시켜주었다. 정치가 끝난 시료는 20 μm 체에 통과시키고 증류수로 충분히 세척한 후, 격자 눈금이 그려진 여과지를 이용하여 감압 여과하였다(여과 시 미세플라스틱, 타이어 분진 등 너무 많은 경우 회석하여 여과함). 여과지에 거른 시료는 데시게이터에서 보관하였다.

미세플라스틱은 (Table 1.) 제시된 종류의 플라스틱을 FT-IR을 이용하여 정량/정성 분석하였다.

2.6. 중금속 오염도 평가

도로변 퇴적물의 오염계수(Contamination factor, CF)를 이용하여 중금속 오염도 평가를 진행하였다. 계산식은 아래와 같다.

$$CF = \frac{Metal_{sample}}{Metal_{background}}$$

여기서, $Metal_{sample}$ 은 시료의 중금속농도, $Metal_{background}$ 는 (Rudnick and Gao, 2003)의 지각 평균배경농도이다. 오염도는 오염계수에 따라 $CF < 1$: low contamination, $1 \leq CF < 3$: moderate contamination, $3 \leq CF < 6$: considerable 그리고 $CF \geq 6$: very high contamination. 총 4등급 평가한다.

또한 도로변 퇴적물 내 존재하는 전체 중금속에 대한 종합적인 오염도 평가를 위하여 오염부하지수(pollution load index; PLI)를 이용하였으며, 계산식은 다음과 같다.

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times \dots \times CF_n}$$

n은 계산에 쓰인 중금속의 개수를 의미한다. PLI 계산에 사용된 배경농도 역시 (Rudnick and Gao, 2003)의 지각 평균배경농도를 사용하였다. 계산된 PLI에 따라 $PLI=0$ 이면 background level, $0 < PLI \leq 1$ unpolluted, $1 < PLI \leq 2$ unpolluted to moderately polluted, $2 < PLI \leq 3$ moderately polluted, $3 < PLI \leq 4$ moderately to highly polluted, $4 < PLI \leq 5$ highly polluted, $PLI > 5$ very highly polluted 총 7등급으로 퇴적물의 오염도를 평가한다.

2.7. 도로변 재비산먼지 평가

도로재비산먼지 측정 자동차를 이용하였으며, 상·하반기 1회 측정하였고, 퇴적물의 입자 크기와 재비산먼지 농도 간의 상관관계를 평가하였다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

3.1 입도분포 분석결과

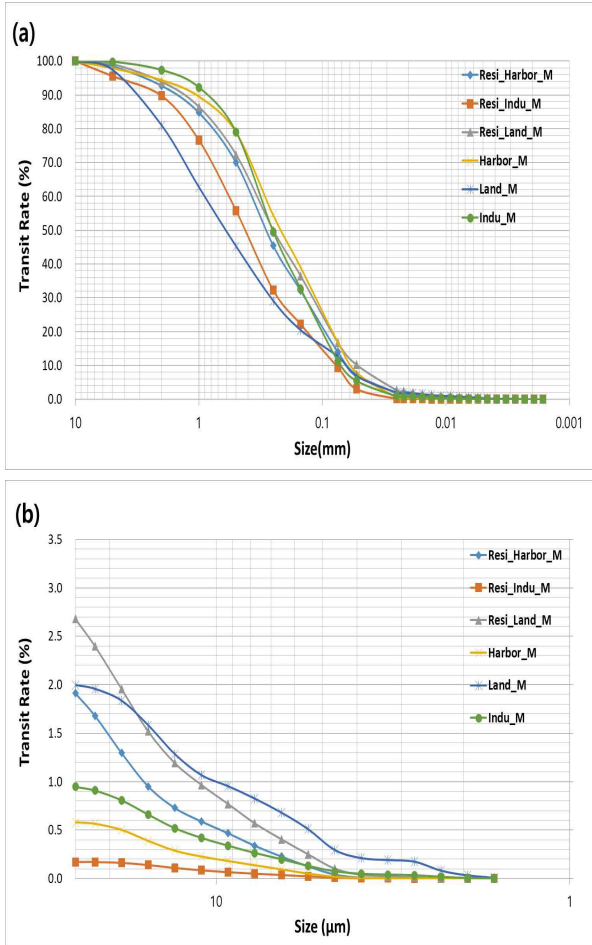


Fig. 1. Size distribution of main roadside sediments. (a: all graph , b: < 0.025mm)

입도분포 결과를 통일분류법(Unified Soil Classification System, USCS)을 이용하여 구분하였다. 주요도로에서 채취한 시료의 입도분석 결과는 (Fig. 1.)에 나타났다. #200(0.075 mm)체 통과율은 9.4, 11.3, 12.7, 14.0, 16.8, 16.9 %로 주거(산업), 산업, 매립지, 주거(항만), 주거(매립지), 항만 순으로 세립토 함량이 나타났으며, 대부분 모래로 구성된 것으로 조사되었다. 차량에 의해 재비산율이 높은 세립토(0.025 mm

이하) 함량은 0.2, 0.6, 0.9, 1.9, 2.0, 2.7 %로 주거(산업), 항만, 산업, 주거(항만), 매립지, 주거(매립지) 순으로 나타났다. PM₁₀의 비율은 0.07 % ~ 0.95 %로 주거(산업)지역이 가장 낮게 나타났고, 매립지가 가장 높게 나타났다. PM_{2.5}는 매립지에서 0.082 %로 가장 높게 나타났다.

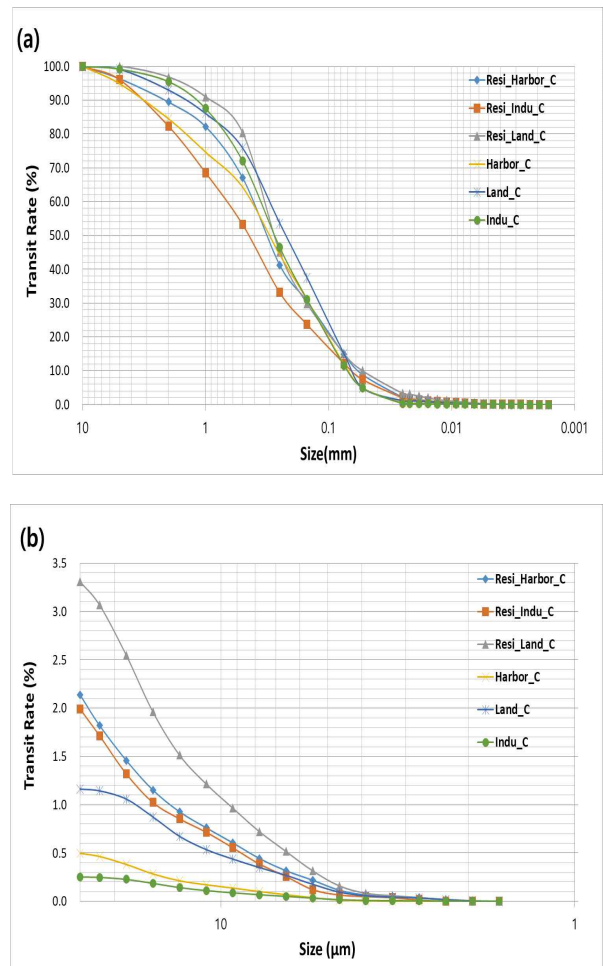


Fig. 2. Size distribution of collected roadside sediments. (a: all graph , b: < 0.025mm)

보조도로(집산도로)에서 채취한 시료의 입도분석 결과는 (Fig. 2.)에 나타났다. 보조도로(집산도로) #200(0.075 mm)체 통과율은 11.5, 11.9, 12.2, 14.9, 15.0, 15.0 %로 산업보조, 항만보조, 주거(산업)보조, 주거

Table 2. Mean concentration of inorganic contaminants by regions

(Unit: mg/kg)

Element	Criteria (3region)	Resi_Harbor_M	Resi_Indu_M	Resi_Land_M	Harbor_M	Indu_M	Land_M	Resi_Harbor_C	Resi_Indu_C	Resi_Land_C	Harbor_C	Indu_C	Land_C
Pb	700	41.70	56.30	42.08	73.81	69.97	47.97	47.91	71.01	36.75	44.54	33.05	50.34
Cu	2,000	133.91	216.22	132.74	144.16	212.84	128.04	127.50	151.83	95.86	88.48	117.76	167.93
Zn	2,000	600.13	699.68	430.17	1,436.90	1,348.20	335.06	594.05	1,651.35	350.34	443.62	423.72	346.78
Ni	500	26.86	54.67	30.79	29.67	61.88	31.57	25.45	49.17	26.52	17.30	37.21	39.09
As	200	4.31	4.97	5.14	4.60	5.14	4.62	3.57	5.03	5.49	4.50	2.88	5.12
Cd	60	0.47	0.68	0.50	1.27	0.73	0.53	0.69	1.08	0.41	1.01	0.37	0.50
Hg	20	0.04	0.38	0.03	0.04	0.10	0.07	0.04	0.20	0.04	0.03	0.04	0.04
Cr	-	77.37	103.53	71.61	80.11	126.18	57.29	80.04	116.89	56.83	58.46	88.06	79.00
Cr ⁶⁺	40	0.16	0.16	0.18	0.20	0.24	0.22	0.23	0.22	0.23	0.21	0.20	0.37
Fe/100	-	330.90	352.05	298.90	444.05	543.48	263.62	287.14	426.60	306.40	325.73	342.79	364.01
Mn	-	605.52	543.46	392.44	1,680.16	1,739.93	427.42	505.27	1,231.80	426.23	1,489.99	1,101.18	529.84
CN	120	0	0.06	0.05	0.02	0.10	0.14	0.06	0.07	0.06	0	0.22	0.06
F	800	369	386	375	383	389	369	341	333	250	331	345	361
pH	-	8.0	8.3	8.4	8.0	9.1	9.1	8.4	8.1	8.6	8.7	8.9	9.4

(항만)보조, 매립지보조, 주거(매립지)보조 순으로 세립토가 구성된 것으로 나타났다. 차량에 의해 재비산율이 높은 세립토(0.025 mm 이하) 함량은 0.3, 0.5, 1.2, 2.0, 2.1, 3.3 %로 산업보조, 항만보조, 매립지보조, 주거(산업)보조, 주거(항만)보조, 주거(매립지)보조 순으로 나타났다.

PM₁₀은 비율은 0.14 ~ 0.97 %로 항만보조지역이 가장 낮게 나타났고, 주거(항만)보조가 가장 높게 나타났다. PM_{2.5}는 매립지보조에서 0.018 %로 가장 높게 나타났다.

종합적으로 매립지와 관련된 주요도로 및 보조도로(집산도로)에서 높은 PM₁₀ 비율이 나타났다. 매립지와 관련된 도로는

화물차량들의 교통량이 많아 상대적으로 PM₁₀ 함량이 높은 것으로 판단된다.

3.2 무기오염물질 함유 특성

3.2.1. 중금속 함유 특성

(Table 2.)에 토양공정시험기준에 의거하여 분석된 도로변 퇴적물 중금속류 농도를 나타냈다. 주요도로 중금속 평균농도는 Fe(26,362 mg/kg ~ 54,348 mg/kg)으로 가장 높았으며, Zn, Mn > Cu > Cr > Pb > Ni > As > Cd > Cr⁶⁺, Hg 순으로 나타났다. 중금속(Pb, Cd, Cu, As, Zn, Ni, Hg, Cr⁶⁺)성분은 토양오염우려기준에 적합(3지역)한 것으로

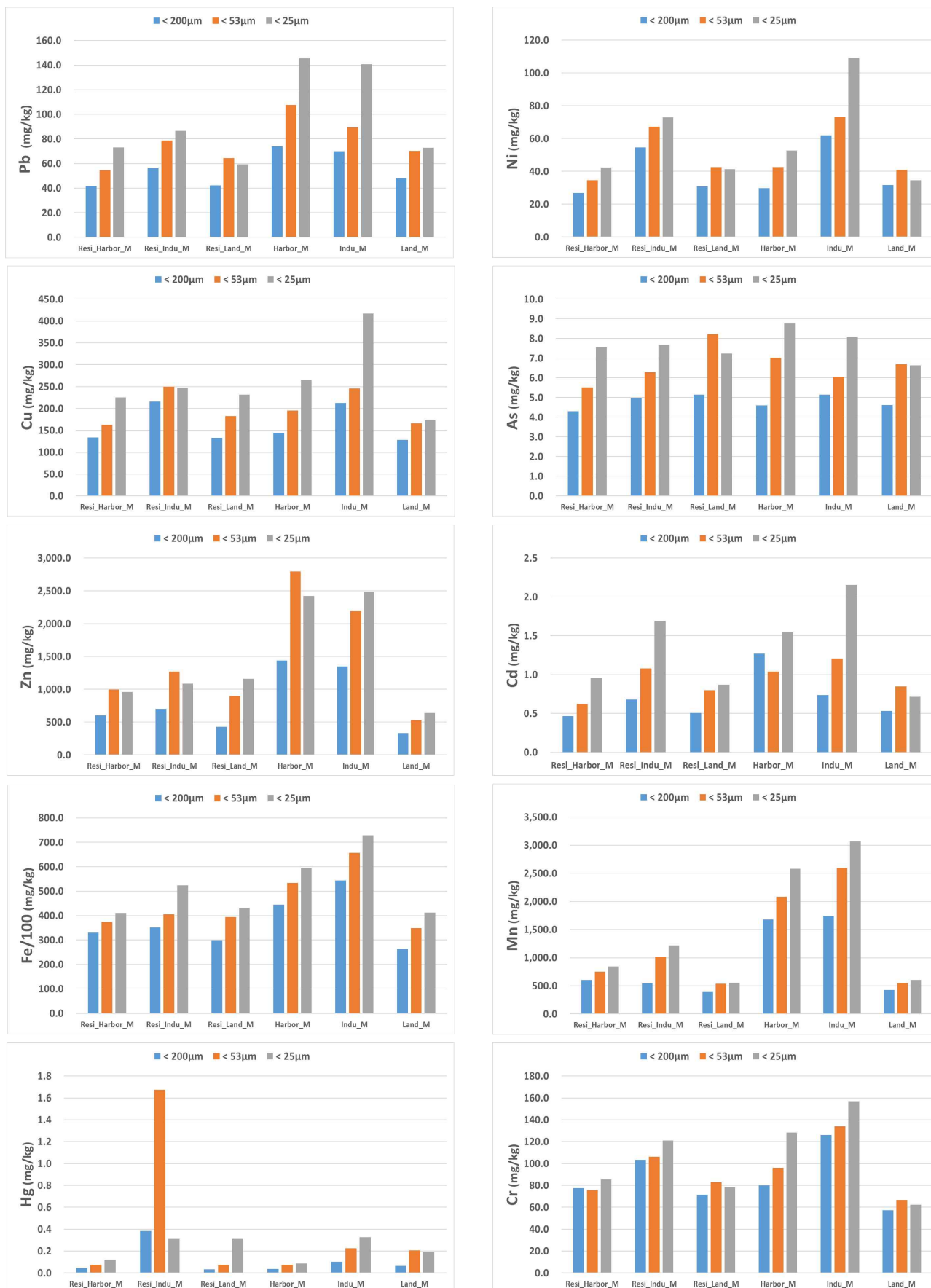


Fig. 3. Comparison of metal mean concentration from different particle size.

Table 3. CF and PLI value for heavy metals

	Pb	Cu	Zn	Ni	As	Cd	Hg	Cr	PLI
Resi_Harbor_M	2.5	4.8	9.0	0.6	0.9	5.2	0.8	0.8	1.9
Resi_Indu_M	3.3	7.7	10.4	1.2	1.0	7.6	7.6	1.1	3.5
Resi_Land_M	2.5	4.7	6.4	0.7	1.1	5.6	0.6	0.8	1.8
Harbor_M	4.3	5.1	21.4	0.6	1.0	14.1	0.8	0.9	2.7
Indu_M	4.1	7.6	20.1	1.3	1.1	8.1	2.0	1.4	3.4
Land_M	2.8	4.6	5.0	0.7	1.0	5.9	1.4	0.6	2.0
Resi_Harbor_C	2.8	4.6	8.9	0.5	0.7	7.7	0.8	0.9	2.0
Resi_Indu_C	4.2	5.4	24.6	1.0	1.0	12.0	4.0	1.3	3.7
Resi_Land_C	2.2	3.4	5.2	0.6	1.1	4.6	0.8	0.6	1.7
Harbor_C	2.6	3.2	6.6	0.4	0.9	11.2	0.6	0.6	1.7
Indu_C	1.9	4.2	6.3	0.8	0.6	4.1	0.8	1.0	1.7
Land_C	3.0	6.0	5.2	0.8	1.1	5.6	0.8	0.9	2.0

□ CF < 1 : Low contamination

■ CF = 1~3 : Moderate contamination

■ CF = 3~6 : Considerable contamination

■ CF > 6 : High contamination

0<PLI≤1 unpolluted

1<PLI≤2 unpolluted to moderately polluted

2<PLI≤3 moderately polluted

3<PLI≤4 moderately to highly polluted

4<PLI≤5 highly polluted

PLI>5 very highly polluted

나타났으며, 주거지역보다 항만/산업지역이 더 높은 것으로 나타났다(Table 2.). 그 이유는 항만/산업지역에 화물차량 등 대형 차량 교통량이 많은 점이 높은 이유로 판단된다. 매립지의 경우는 다른 지역에 비해 인천시에서 실시하는 도로청소 횟수(매립지: 5 회/일, 그 외 지역: 2 회/일)가 많아 농도가 낮은 것으로 판단된다.

보조도로 중금속 평균농도는 Fe(28,714 mg/kg ~ 42,660 mg/kg)으로 가장 높으며, Mn > Zn > Cu > Pb > Ni > As > Cd > Cr⁶⁺, Hg 순으로 나타났다. 중금속(Pb, Cd, Cu, As, Zn, Ni, Hg, Cr⁶⁺)성분은 토양오염우려기준에 적합(3지역)한 것으로 나타났다.

입자크기별 중금속 농도 결과는 (Fig. 3.)에 나타났다. (Jeong 등, 2020)에서 보고되었듯이 입자크기가 작아 질수록 중금속

농도는 높아지는 것으로 나타났다. 작은 입자의 퇴적물은 재비산될 확률이 높으며 도로청소차로 제거할 경우 제거효율이 떨어진다고 보고되고 있다.(강희만 등, 2019) 또한 전체 조사지점 퇴적물의 pH(수소이온농도)가 약알칼리성(8.0 ~ 9.4)를 나타냈다(Table 2.). 알칼리 환경에서는 중금속은 이동성이 급격히 제한되어 광물상태 또는 음이온과 착물을 형성하여 침전하는데, 침전될 경우 도로변 퇴적물에 농축될 우려가 있다.

입자크기가 작은 퇴적물은 중금속 농도와 재비산율이 높고, 도로청소차로 제거가 잘 이뤄지지 않기 때문에 도로변 퇴적물을 관리할 때 세심한 관리가 필요하다고 판단된다.

3.2.2. 그 외 무기성분 함유 특성

불소는 250 mg/kg ~ 389 mg/kg을 나타냈으며, 모든 지역의 퇴적물이 토양오염우려기준(3지역)에 적합하게 나타났다(Table 2.). 도로변 퇴적물의 불소는 국내 불소 토양 배경농도인 평균 204.5 mg/kg (15.3 mg/kg ~ 504.8 mg/kg)와 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다(Ga-Hee Lim 등, 2018).

시안은 0 ~ 0.22 mg/kg으로 토양오염우려기준(3지역)에 적합한 것으로 나타났다(Table 2.).

3.3. 중금속 오염도 평가

모든 지역의 도로변 퇴적물에서 Zn는 높은 오염도(High contamination)를 보였으며, Cu, Cd는 높은 또는 상당한 오염도(High or Considerable contamination)를 나

타냈다(Table 3.). 또한 Pb도 적당한 또는 상당한 오염도(Moderate or Considerable contamination)를 나타냈다. 이렇게 높은 CF 값이 나타난 이유는 차량에서 유래하는 중금속들이 퇴적물에 농축되어 높게 나타나는 것으로 판단된다.

PLI로 본 지역별 오염평가 결과는 주거(산업)보조지역(3.7)이 Moderately to highly polluted로 가장 오염된 것으로 나타났다. 이 지역은 Zn, Cd이 심각하게 오염된 것으로 나타났으며, 모든 중금속 항목에서 오염이 진행됐다. 그 외에 주거(산업)지역(3.5), 산업지역(3.4)도 Moderately to highly polluted로 오염된 것으로 나타났다(Table 3.). 산업지역에 제철소 및 다수의 공장들이 밀집되어 있어 중금속 오염이 높은 것으로 판단된다.

Table4. Mean concentration of contaminants by regions

(Unit: mg/kg)

Element	Criteria (3region)	Resi_Harbor_M	Resi_Indu_M	Resi_Land_M	Harbor_M	Indu_M	Land_M	Resi_Harbor_C	Resi_Indu_C	Resi_Land_C	Harbor_C	Indu_C	Land_C
CN	120	N.D.	0.06	0.05	0.02	0.10	0.14	0.06	0.07	0.06	N.D.	0.22	0.06
Phenol	20	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Bezene	3	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Toluene	60	0.07	0.03	0.05	0.03	0.08	0.04	N.D.	0.03	N.D.	N.D.	N.D.	0.07
Ethyl bezene	340	0.05	0.08	0.16	N.D.	N.D.	0.07	0.37	0.04	N.D.	N.D.	N.D.	0.03
Xylene	45	0.23	0.23	0.66	0.18	0.20	0.20	0.40	N.D.	0.16	0.09	0.04	0.12
TCE*	40	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
PCE*	25	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
OPs*	30	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
EDC*	70	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
PCBs*	12	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

TCE*: Trichloroethene, PCE*: Tetrachloroethene, OPs*: Organophosphorus compound,

EDC*: 1,2-dichloroethane, PCBs*: Poly Chlorinated Biphenyls

3.4 유기오염물질 함유 특성

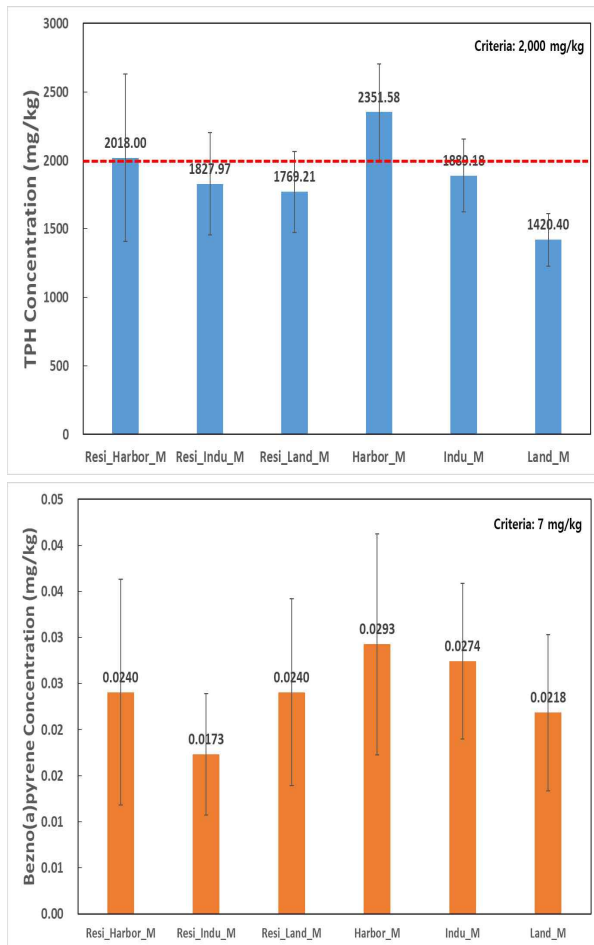


Fig. 4. Concentration of TPH and bezo(a)pyrene in main roadside sediments.

유기오염물질 분석결과, TPH(석유계총 탄화수소)는 주요도로에 경우 전 지역에서 토양오염우려기준(3지역)을 초과한 경우가 발생하였고, 항만지역과 주거(항만)지역의 경우 평균농도도 초과하는 것으로 나타났다. TPH는 휘발유, 경유 등에서 기원하며 BTEX 등 다양한 성분을 포함하는 물질로 항만/산업지역에 교통량이 많아 높게 나타난 것으로 판단되며, 주거(항만) 및 주거(산업)에 경우 항만/산업지역에 영향으로 인한 것으로 판단된다. 벤조(a)피렌은 자동차 연료(특히 경유)에서 발생하는 배기가스, 아스팔트 등에서 유래되며 자동차

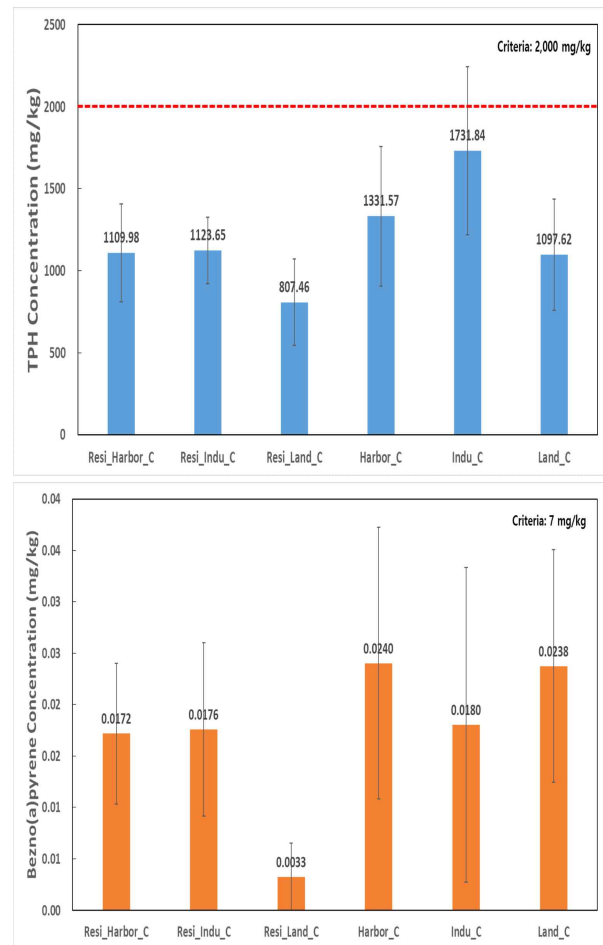


Fig. 5. Concentration of TPH and bezo(a)pyrene in collected roadside sediments.

재비산먼지를 통해 호흡기로 흡입이 되어 암을 발생시킬 수 있는 오염물질이다.

본 연구에서는 벤조(a)피렌이 정량한계 (0.005 mg/kg) 이상의 농도로 전 지역 모두 검출되었으며, 저농도로 검출되기는 했지만 인체에 피해를 줄 수 있는 물질로써 향후 각별한 관리 필요할 것으로 판단된다. 보조도로(집산도로)의 경우 TPH, 벤조(a)피렌이 주요도로에 비해 평균농도가 낮게 나타났다. 오염물질 농도가 낮게 나타난 이유는 주요도로에 비해 보조도로(집산도로)가 오염물질의 발생 매개체인 차량(특히 대형차량) 교통량이 적어서 그런 것으로 판단된다.

Table 5. Abundance of microplastics in main roadside sediment.

(particles/g)

	Resi_Harbor_M	Resi_Indu_M	Resi_Land_M	Harbor_M	Indu_M	Land_M
Microplastics	1,966	2,400	2,483	2,000	1,116	1,883

그 외에 크실렌, 에틸벤젠, 톨루엔이 미량 검출되었고, TCE, PCE, 벤젠, 페놀 유기인화합물, 1,2-디클로로에탄, PCBs는 검출되지 않았다(Table 4.).

3.5. 미세플라스틱 분포 특성

도로변 퇴적물 중 미세플라스틱 분포량을 알아보기 위하여 6개 주요도로 지점의 퇴적물 미세플라스틱 분포량을 조사하였다. 조사과정에서 타이어분진 등 다량의 미세플라스틱이 존재하여 시료를 50배 희석하였고, 타이어분진(검은색가루)을 제외한 미세플라스틱에 대해 분석을 진행하였다. 도로변 퇴적물 중 미세플라스틱 분포를 조사한 결과는 (Table 5.)과 같았다. 모든 도로변 퇴적물에서 미세플라스틱이 검출되었고, 주거(매립) > 주거(산업) > 항만 > 주거(항만) > 매립 > 산업 순으로 나타났다. 미세플라스틱은 자동차, 교통안전시설물, 쓰레기 등으로부터 발생하여 퇴적물에 잔류한 것으로 판단된다.

퇴적물에서 발견된 미세플라스틱을 크기별로 분석하였다. 1mm보다 큰 미세플라스틱과 1mm보다 작은 미세플라스틱으로 나누어 크기별 분포 비율을 알아보았다(Fig. 7.). 1mm보다 작은 미세플라스틱은 92.5 % ~ 100.0 %로 나타났으며, 주거(산업)지역의 경우에는 모두 1mm보다 작은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 크기가 큰 플라스틱들이 퇴적물들과 잔류하면서 물리적인 마찰에 의해 잘게 쪼개져 상

대적으로 작은 크기의 미세플라스틱이 더 많이 존재하는 것으로 판단된다.

FT-IR을 통해 미세플라스틱을 정성분석한 결과는 (Fig. 8.)에 나타내었다. PE(43.4 % ~ 58.5 %)가 가장 높은 비율을 차지하였고, PP(7.0 % ~ 32.1 %)가 두 번째로 높은 비율을 차지하였다. 그 외에는 지점마다 다소 차이가 있는 것을 확인할 수 있다.

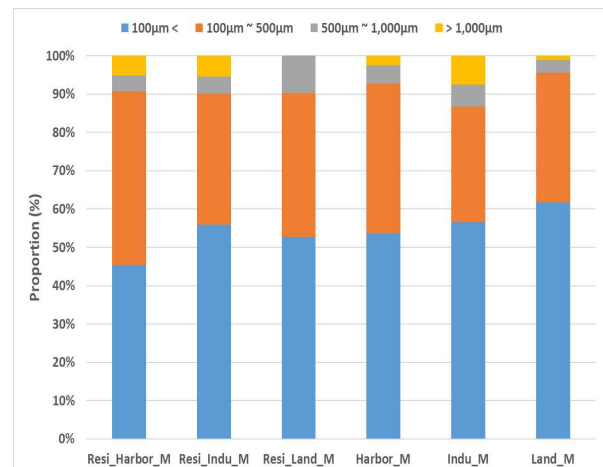


Fig. 7. The size distribution of microplastics in main roadside sediments.

3.6 도로변 재비산 농도 평가

도로재비산먼지 측정 자동차를 이용하여 연구조사지점별 재비산먼지농도(PM₁₀)를 측정을 하였다. 5, 8월에 총 2회 측정하였으며, 매립지의 재비산먼지농도가 5월에는 174 µg/m³, 8월에는 360 µg/m³로 가장 높게 측정되었다. 매립지 주요도로에서 재비산먼지 농도가 가장 높은 이유는 폐기물 운송 차량에 의한 요인과 도로변 퇴적물에서 PM₁₀ 비율(Fig. 1.)이 다른 주요도로보다

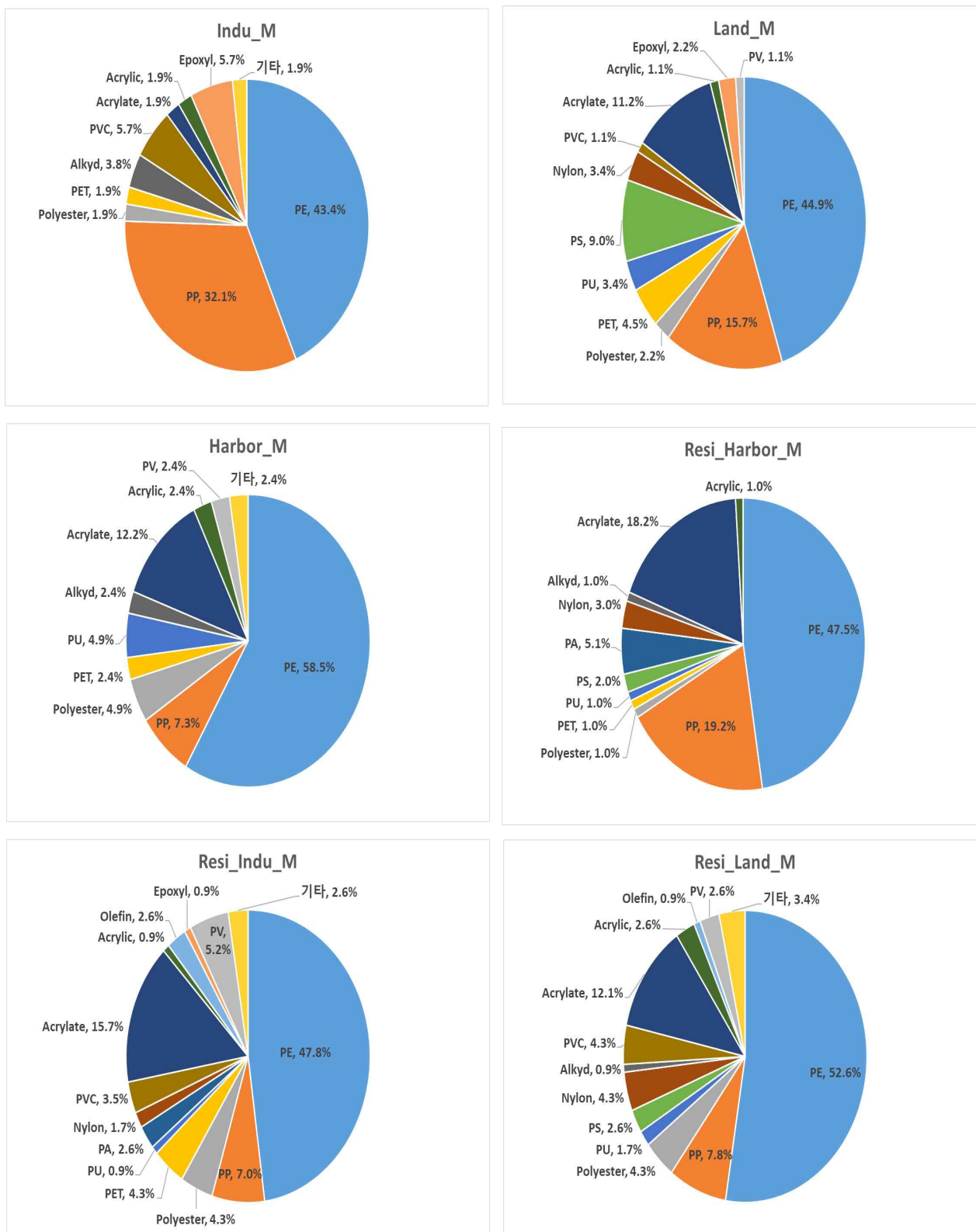


Fig. 8. The distribution of microplastics according to polymer type.

PE: Polyethylene, PP: Polypropylene, PET: Polyethyleneterephthalate, PU: Polyurethane, PS: Polystyrene, PA: Polyamide, PVC: Polyvinylchloride, PMMA: Polymethylmethacrylate, PV: Polyvinyl

Table 6. Concentraion of road resuspended partices

	May		August	
	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Temperature (Humidity)	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Temperature (Humidity)
Resi_Harbor_M	14	22 °C (64 %)	11	30 °C (46 %)
Harbor_M	15		10	
Resi_Indu_M	44	23 °C (63 %)	19	31 °C (43 %)
Indu_M	39		15	
Resi_Land_M	32	22 °C (68 %)	32	31 °C (44 %)
Land_M	174		360	

높아서 재비산이 많이 일어나는 것으로 판단된다. 그 외에 지역은 10 ~ 44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다.

IV. 결론

본 연구에서는 인천시 다양한 지역에 도로변 퇴적물의 입자크기, 무·유기성분, 미세플라스틱을 조사하였다.

주거(매립지)지역 주요도로의 세립토 함량이 가장 높았으며, 산업지역 주요도로가 가장 낮게 나타났다. 재비산먼지농도와 가장 관련된 PM_{10} 은 매립지가 가장 높게 나타났다으며 주거(산업)지역이 가장 낮게 나타났다. PM_{10} 비율이 가장 높은 매립지는 도로 차량에 의한 재비산먼지 농도도 가장 높게 나타났다.

모든 중금속 함량은 토양오염우려기준(3지역)을 적합한 것으로 나타났으나, 오염계수(CF)로 비교했을 경우, 중금속들 중 Zn이 가장 높은 오염경향을 나타냈으며,

오염부하지수(PLI)에 따라 주거(산업)지역 보조도로가 모든 중금속에 대해 가장 높은 오염도를 나타냈다. 이는 산업지역에 있는 제철소, 공장 등에 의한 영향으로 판단된다.

TPH는 항만지역 주요도로에서 토양오염우려기준(3지역)을 초과가 나타났으며, 벤조(a)피렌은 모든 지역에서 정량한계 이상으로 검출되었다.

미세플라스틱은 6개 주요도로에서 모두 검출되었다. 주거(매립)지역이 2,483 개/g으로 가장 많이 검출됐으며, 1mm 이하의 미세플라스틱이 90 % 이상 차지하는 것으로 나타났다. 또한 다양한 종류의 플라스틱이 검출되었지만, 그 중 PE가 43.4 % ~ 58.5 %로 가장 높은 비율로 확인되었다.

고농도 중금속, TPH, 벤조(a)피렌 및 미세플라스틱을 포함하고 있는 도로변 퇴적물은 호흡기 등을 통한 인체노출 시 유해한 요소로 작용할 가능성이 있다. 그러므로 도로청소를 강화하고 향후 도로변 퇴적물의 재비산에 대한 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다.

V. 참고문헌

1. 강희만, 강혜진 (2019), “고속도로 노면청소를 통한 도로퇴적물 제거효율 평가” 한국도로공사 도로교통연구원, 연구원-2019-44-534.9607호
2. 강희만, 김황희, 전지홍 (2021), “고속도로 노면퇴적물의 특성 및 도로청소에 의한 입도별 제거효율 분석” Journal of Korean Society on Water Environment, Vol.37, No.4, 286-295.
3. 김경준, 이해성, 김용진 (2017), “M시의 포장도로변에서 미세플라스틱 분포” 한국도시환경회, vol17, no4, 419-423.
4. 나유미, 유기영, 김익수 (2007) “서울 도로청소의 환경오염물질 제거 효과 검토” 서울도시연구, 제3호, 제8권, 85~103.
5. 유기영, 나유미 (2006), “도로청소 효과분석 및 청소방법 정립” 서울시정개발연구원, 2006-R-23.
6. 유은희, 최유정, 김미희 (2010), “부산지역 도로변 노면 퇴적입자의 중금속 및 PAHs 오염특성”, The Annual Report of Busan Metropolitan City Institute of Health & Environment, 2010, 20, 178-193.
7. 윤정기, 김동호, 김태승, 박종겸, 정일록, 김종하, 김혁 (2009), “우리나라 토양의 중금속 자연배경농도 평가”, 한국지하수토양환경학회지, Vol. 14(3), 32-39.
8. 이의상 (2004), “고속도로변 퇴적물의 중금속 오염에 관한 연구” 서울도시연구, 제4호, 제5권, 12, 61-72.
9. 이주광, 이의상 (2007), “고속도로변 토양과 퇴적물의 중금속 장기 오염 특성” 한국산학기술학회논문지, Vol. 8, No. 2, 385-394.
10. 임가희, 이흥길, 김형섭, 노희정, 고희욱, 김지인, 조훈제, 김현구 (2018), “토양 중 불소 분포 및 거동 특성 평가” J. Soil Groundwater Environ., Vol. 23(6), 96-109.
11. 정권, 강희만, 고석오 (2011), “도로청소 수거퇴적물의 특성과 비점오염물질 저감 효과” 한국도로학회, 제2호, 제13권, 187-193.
12. 정혜령, 최진영, 나공태 (2020), “도시지역 도로먼지의 중금속 오염 특성: 토지이용 특성에 따른 비교”, 환경분석과 독성보건, 제23권, 제2호, 101-111.
13. 정혜령, 최진영, 나공태 (2020), “시화호 중금속 오염원 연구: 도시지역 도로먼지 중금속 오염 특성과 해양환경 영향 고찰”, 한국해양환경·에너지학회지, 2020, Vol. 23, No. 2, 70-80.
14. 정혜령, 최진영, 나공태 (2020), “대불산업단지 도로먼지 내 중금속류 오염특성: 입도와 자성에 따른 구분”, J.Envion.Impact Assess., 2020, 29(4), 252-271.
15. Anna Wik, Goran Dave (2009), “Occurrence and effects of tire wear particles in the environment - A critical review and an initial risk assessment” Environmental Pollution, 157, 1-11
16. Eugene Pascal Binam Mandeng et al. (2019), “Contamination and risk assessment of heavy metals, and uranium of sediments in two watersheds in Abiete-Toko gold district, Southern Cameroon”, Heliyon,5, e02591.
17. J. Y. Kim and J. J. Sansalone, (2008), “Event-based size distributions of particulate matter transported during urban rainfall events”, Water Research, 42, 2756-2768.
18. J.Q. Yuen et al. (2012), “Accumulation of potentially toxic elements in road deposited sediments in residential and light industrial neighborhoods of Singapore”, Journal of Environmental

Management, 101, 151-163.

19. Jeong et al. (2020), "Heavy metal pollution by road-deposited sediments and its contribution to total suspended solids in rainfall runoff from intensive industrial areas" *Environmental Pollution*, 2020, Vol. 265, Part A, 115028.
20. Johnny Gasperi et al. (2018), "Microplastics in air: Are we breathing it in?", *Environmental Science & Health*, 1, 1-5.
21. M. B. Yunker et al. (2002), "PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition", *Organic Geochemistry*, 33, 489-515.
22. Nicole Nawrot et al. (2020), "The effects of urban vehicle traffic on heavy metal contamination in road sweeping waste and bottom sediments of retention tanks.", *Science of the Total Environment*, 749, 141511
23. R.L. Rundnick, S. Gao (2008), "Composition of the Continental Crust", *Treatise On Geochemistry*, Volume 3, 1-64.
24. S.R.Taylor (1964), "Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table." *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol.28, 1273-1285.