

도로변 퇴적물 특성 및 유해물질 거동조사

백인찬*, 박은영, 김인희, 한지은, 김오목, 최상인, 권문주
인천보건환경연구원 물환경연구부 토양환경과

The study on characteristics of roadside sediments and behavior of harmful substances

In-chan Baek*, Eun-young Park, In-hee Kim, Ji-eun Han, O-mok Kim, Sang-in Choi, Mun-ju Kwon

Division of soil Environment, Incheon Research Institute of Public Health and Environment

Abstract

In this study, roadside sediment surveys were conducted on eight main roads in Incheon. As a result, the point of investigation with the highest fine-grained soil content were Namdong main road (industrial complex) and Cheongneung main road. It was 19.6% and 24.9% in the first half, 22.8% and 20.6% in the second half respectively. Iron (Fe) showed the highest concentration at all points. In the pollution level assessment using the pollution coefficient, all points showed high levels of zinc (Zn) contamination. In the pollution level assessment using the pollution load index (PLI), Namdong main road (industrial complex) showed the highest level with a PLI of 3.7. Benzo(a)pyrene was detected at all points, and total petroleum hydrocarbons (TPH) exceeded the standard in Cheongneung and Namdong (City Hall) main road. Microplastics were most abundant in Bongo main road at 990 particles/g. When classified by size, microplastics with a size of 500 μ m or less accounted for 90%. Additionally, polyethylene (PE) and acrylate accounted for the largest proportion of microplastics. The results of the correlation analysis of resuspended dust concentration showed significant associations with the amount of sediment less than 25 μ m per unit area of the road surface.

Key words: Heavy metal, Microplastic, Bezo(a)pyrene, TPH, Roadside sediment

I. 서 론

도로변 퇴적물은 도로에서 발생하는 먼지, 모래, 자동차 배출가스, 제설제 등이 도로면에 축적된 것으로 중금속, 유기오염물질, 미세플라스틱 등 다양한 오염물질이 함유되어 있다(Gadd et al., 2000; Cho et al., 2003; Zhao et al., 2010; Calvillo et al., 2015).

중금속은 자동차, 도로, 건축물 자재 등에서 발생하며 대표적으로 도로변 퇴적물에 포함된 성분은 Pb(납), Cu(구리), Zn(아연), Fe(철), Ni(니켈), Cr(크롬) 등이다. 중금속 등 일부는 사람, 동·식물에게 필요한 요소이지만 임계치 이상에 노출될 경우에는 건강상 장애를 일으키는 것으로 알려져 있다(김민영 외 1987; E. B. Cullbard et al., 1988; S. Leharne et al., 1992; Nagajyoti et al. 2010; Singh et al. 2011; E. Apeayei et al., 2011)

신경계에 장애를 일으키고 자동차 축전지, 연료 등에 포함된 것으로 알려져 있는 Pb과 자동차 타이어 및 부품에 사용되는 Cu 및 Zn 중금속은 자동차 운행 시 도로변 퇴적물에 축적되는 것으로 보고되고 있다(Schauer et al. 2006; Hjortenkrans et al. 2007). 기타 중금속(Cd, Ni, Fe 등)도 오일누출, 아스팔트 노면 풍화, 중앙분리대 등 복합적인 작용으로 주변을 오염시키는 것으로 보고되고 있다(Bowen 1986; Youm et al. 2005).

도로변 퇴적물의 대표적인 유기오염물질은 벤조(a)피렌과 TPH가 있다.

다환방향족탄화수소류(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)에 속하는 물질인 벤조(a)피렌은 공장, 자동차 배기가스, 담배 등에서 발생한다고 알려져 있으며 내분비계 장애물질로 1급 발암물질로 분류된다(Ho et al. 1988; Miller M.P. 1983; Pierre et al. 1985; IARC 1989).

벤조피렌은 휘발성이 낮아 잔류성이 있으며 먼지, 모래 등에 흡착되어 입자상 물질로 잔류

하는 경향이 있다(김상조 외 2000).

TPH는 토양의 유류 오염여부를 판단할 때 사용하는 물질로 자동차연료(휘발유, 경유 등)에서 기원하며 알칸, 알켄, 사이클로알칸, BTEX(벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌) 등이 혼합된 형태로 존재하며 도로변 퇴적물 및 토양 오염원인으로 꾸준히 보고되고 있다(A. B. Khan and S. Kathi 2014; Analy Quinonez-Plaza et al. 2017).

요즘 많은 관심을 받는 오염물질은 미세플라스틱이다. 미세플라스틱은 통상 1 μ m~5mm 크기를 갖는 플라스틱을 통칭한다(MSFD 2013).

미세플라스틱은 대형 플라스틱보다 비표면적이 크고 표면이 거칠어 더 많은 오염물질을 흡착할 수 있다고 보고되고 있으며(Fotopoulou and Karapanagioti, 2012; Ye and Andrady, 1991) 많은 오염물질을 흡착한 미세플라스틱은 사람과 동물에게 건강상의 문제를 야기할 수 있다. 또한 플라스틱에 함유된 가소제(프탈레이트류)는 신경계에 장애를 일으키고 암을 유발할 수 있다고 보고되고 있다(Bornehag et al., 2005).

사람의 건강에 유해를 일으킬 수 있는 미세플라스틱은 버려진 의류, 비닐, 일회용품 그리고 타이어 등에서 유래된다. 도로변 퇴적물에 경우 타이어 마모 등으로 타이어 분진 및 미세플라스틱이 발생된다고 보고되고 있다(Anna Wik 2009).

이처럼 도로변 퇴적물은 중금속, 벤조(a)피렌, TPH, 미세플라스틱 오염이 발생하고 있다. 특히, 인천은 매립지, 항구, 공항, 공단이 있어 교통량이 많고 주변환경 요인들로 인하여 도로변 퇴적물 오염이 발생할 수 있다.

이에 본 연구에서는 인천지역 8개 주요도로에 대한 중금속, 벤조(a)피렌, TPH 및 미세플라스틱 특성을 조사하였다. 또한 재비산먼지 농도와 인자(교통량, 노면 단위면적당 퇴적물량, 입자크기)간의 상관관계를 파악하여 향후 도로청소 정책 수립을 위한 기초자료로 제시하여 시민들의 안전한 환경조성을 위해 노력하고자 한다.

II. 연구대상 및 방법

2.1. 연구조사지점 및 시료채취

연구조사지점은 인천 4개구(연수구, 남동구, 부평구, 계양구)의 차량통행량이 많은 주요도로(Table 1.)를 2곳씩 선정하였다.

시료채취는 도로연석과 접한 도로변을 50cm X 50cm 크기로 구역을 나눈 뒤, 건식 진공청소방법을 이용하여 채취하였다. 채취 과정 중에 지점별로 교차오염과 입자유실을 최소화하도록 시료채취에 사용되는 부품(먼지통, 필터 등)을 지점별로 교체하거나 세척을 진행한 후 사용하였다.

시료채취 횟수는 3월부터 10월까지 총 8회 진행되었다.

Table 1. Sampling sites

Sample name	Sampling site
Yeonsu1	Gyeongwon (Woninjae station)
Yeonsu2	Cheongneung (Yeonsu district office)
Namdong1	Namdong (Industrial complex)
Namdong2	Namdong (City hall)
Bupyeong1	Gyeongwon (bupyeong library)
Bupyeong2	Gilju (Bupyeong district office)
Gyeyang1	Bongo (Jakjeon station)
Gyeyang2	Gyeongmyeong (Gyesan station)

2.2. 입도분석

입도분석 시료의 경우 전기오븐에서 105±5℃의 온도로 24시간 건조 후 진행하였으며 체가름 분석을 이용하였다. 지점별 건조된 시료 100g을 체 5.00, 2.00, 1.00, 0.50, 0.25, 0.15, 0.075, 0.053, 0.025mm을 이용하여 입자크기별 비율을 구한 후, 통일분류법(Unified Soil Classification System, USCS)에 따라 퇴적물을 분류하였다. 통일분류법은 #200(0.075 mm)체

통과율에 따라 50%이하는 조립토, 50%를 초과하면 세립토로 분류한다. 조립토의 자갈, 모래를 분류하는 기준은 #4(4.76 mm) 통과율이 50%를 초과하면 모래, 50%이하의 자갈로 분류한다.

2.3. 유해물질 분석

중금속은 10개 항목(비소, 카드뮴, 납, 구리, 니켈, 아연, 크롬, 철, 망간, 수은)을 분석했으며 토양시료를 직사광선이 닿지 않고 통풍이 잘되는 장소에서 건조시킨 다음, 나무망치로 분쇄하여 눈금간격 150µm 표준체를 통과한 시료를 표준시료로 사용하였다. 입자크기에 따른 중금속 농도를 비교하기 위해 25µm 표준체를 통과한 시료를 사용하여 분석하였다.

벤조(a)피렌, TPH(석유계총탄화수소)는 채취된 시료를 그대로 사용하여 분석하였다.

모든 시료는 토양오염공정시험기준에 의거하여 전처리하고 아래 표에 따라 분석하였다(Table 2).

Table 2.. Method and analytical instrument of items

Analytical instrument	Item	Method
ICP-OES* (Agilent)	Pb, Cd, Cu, Ni, Zn, As, Mn, Fe, Cr	ES 07400.2c
AMA* (NIC)	Hg	ES 07405.2a
GC-FID* (Agilent)	TPH	ES 07552.1c
GC/MS* (Agilent)	Benzo(a)pyrene	ES 07551.1c
FT-IR* (Thermo Fisher)	Microplastics*	-

ICP-OES	Inductively Coupled plasma Optical Emission
AMA	Automatic Mercury Analyzer
GC-FID	Gas Chromatography Flame Ionization Detector
GC-MS	Gas Chromatography Mass Spectrometer
FT-IR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
Microplastics	PE, PP, Polyester, PET, PU, PS, Nylon, Polyamide, Alkyd, PVC, PMMA, Acrylate, Acrylic, Olefin, Epoxy, Urea, etc

2.4 미세플라스틱 정량/정성 분석

미세플라스틱 분석을 위해 크기 2가지 전처리 과정을 진행하였다.

밀도차를 이용한 분리과정으로 먼저 시료를 전기오븐에서 50°C의 온도로 48시간 동안 건조시켰다. 건조된 시료를 5mm 체로 걸러 주고, 체를 통과한 시료 1g을 500mL 분별깔때기에 담고 ZnCl₂(1.6g/cm³)용액 300mL를 넣어 줬다. 분별깔때기를 강하게 흔들어서 교반시켜 준 후, ZnCl₂를 추가적으로 넣어주고 24시간 이상 정치하였다. 정치된 시료의 아랫부분을 버리고 밀도가 높은 물질을 더 분리하기 위해 위 과정을 3번 이상 반복하였다. 용액 윗부분에 남아 있는 시료는 20µm 체에 걸러주고 ZnCl₂ 용액을 제거하기 위해 증류수로 충분히 세척하였다.

유기물 분해과정으로 증류수로 충분히 세척한 시료를 500mL 삼각플라스크에 옮기고 30% H₂O₂를 200mL 첨가하여 상온에서 7일 동안 정치하였다. 7일 동안 정치할 때 30% H₂O₂를 중간에 새로 넣어주었으며, 유기물 분해가 잘 이뤄지지 않을 경우 0.05M FeSO₄·7H₂O 용액을 10mL 첨가하여 반응시켜주었다. 정치가 끝난 시료는 20µm 체를 이용하여 걸러주고 증류수로 충분히 세척한 후, 격자 눈금이 그려진 여과지를 이용하여 감압 여과하였다(여과시 미세플라스틱, 타이어 분진 등 너무 많아 6배 희석하여 여과). 여과지에 거른 시료는 데시케이터에서 완전히 건조시켰다.

미세플라스틱은 푸리에 변환 적외선 분광분석기(FT-IR, Thermo Fisher)를 이용하여 정량/정성 분석을 하였다(Table 2).

2.5. 중금속 오염도 평가

도로변 퇴적물의 중금속 오염도 평가는 오염계수(Contamination factor, CF)와 오염부하지수(pollution load index; PLI)를 이용하여 평가하였다.

오염계수는 단일 중금속에 대한 오염도 평가로 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 ≤ CF < 3: moderate contamination, 3 ≤ CF < 6: considerable 그리고 CF ≥ 6: very high contamination. 총 4등급으로 평가한다.

오염부하지수는 전체 중금속에 대한 종합적인 오염도를 평가하는 지수로 계산식은 다음과 같다.

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

n은 계산에 쓰인 중금속의 개수를 의미하며 PLI 계산에 사용된 배경농도는 Rudnick and Gao(2003)의 지각 평균배경농도를 사용하였다. 계산된 PLI에 따라 PLI=0 이면 background level, 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 총 7등급으로 퇴적물의 오염도를 평가한다.

2.6 통계분석

도로 재비산먼지농도와 발생인자 간에 상관분석을 실시하였다. 발생인자로는 교통량, 노면 단위면적당 전체 퇴적물량, 노면 단위면적당 75µm이하 퇴적물량, 노면 단위면적당 25µm이하 퇴적물량을 이용하였다. 도로 재비산먼

지농도는 한국환경공단의 공개자료(도로 재비산먼지 관리시스템), 교통량은 인천시 교통통계자료를 이용하였다. 노면 단위면적당 퇴적물량은 시료채취 시 50cm X 50cm 구역을 나눠 시료를 채취하여 퇴적물량을 측정하였으며 노면의 단위면적당 75, 25 μ m 이하 퇴적물량은 2.2. 입도분석결과를 이용하여 산정하였다. 자료의 통계분석방법은 피어슨 상관분석방법을 사용하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1 입도분포 분석결과

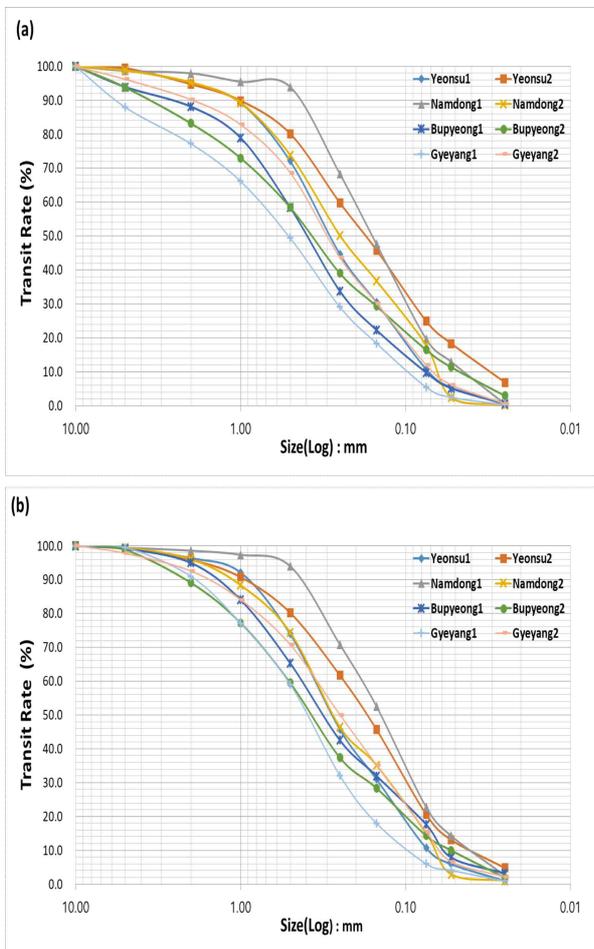


Fig. 1. Size distribution of main roadside sediments. (a: first half, b: second half)

상/하반기 도로변 퇴적물 입도분포는 Fig. 1.에 나타났다. 상반기 도로변 퇴적물의 #200(0.075 mm)체

통과율은 24.9, 19.6, 17.8, 16.5, 11.9, 10.8, 9.8, 5.5%로 연수2, 남동1, 남동2, 부평2, 계양2, 연수1, 부평1, 계양1 순으로 나타났다. 또한 모든 조사지점의 #4(4.76 mm)체 통과율은 50%를 초과하므로 퇴적물이 모래로 구성된 것으로 조사되었다. 하반기 도로변 퇴적물의 #200(0.075 mm)체 통과율은 22.8, 20.6, 17.6, 15.4, 15.0, 14.3, 10.7, 6.0%로 남동1, 연수2, 부평1, 계양2, 남동2, 부평2, 연수1, 계양1 순으로 나타났으며, 모래(#4체 통과율 50%초과)로 구성된 것으로 조사되었다.

세립토 함량이 높은 연수2와 남동1에 경우 주변 공단의 대형차량 등의 영향을 받아 다른 도로에 비해 상대적으로 함량이 높은 것으로 판단된다.

3.2 유해물질 분석 및 오염도 평가

3.2.1. 중금속 분석

중금속 평균 농도는 Table 3.에 나타났다. 평균농도는 Fe (27,399 ~ 128,682 mg/kg)이 가장 높았으며, 지역에 따라 차이는 있지만 Zn > Mn > Cu > Cr > Pb > Ni > As > Cd > Hg (남동1에서는 Cu가 2번째로 높은 농도를 보임)순으로 나타났다. 7개 도로의 퇴적물은 토양오염우려기준(3지역)에 적합한 것으로 나타났으며, 남동1은 Cu가 토양오염우려기준(3지역)을 초과하는 것으로 나타났다. 남동1에 경우는 조사지점 주변에 공장(기계금속업 등)들이 위치하고 있어 중금속 농도가 높은 것으로 판단된다. 또한 공단지역에 대형차량의 교통량이 많은 점도 높은 이유로 판단된다. 입자크기별 중금속 농도는 입자크기(25 μ m이하)가 작을수록 중금속 농도가 높은 것으로 나타났다. 25 μ m 이하의 중금속 평균 농도는 Fe(42,507 ~ 153,736mg/kg)이 가장 높았으며, Zn > Mn >

Cu > Cr > Pb > Ni > As > Cd > Hg 순으로 150 μ m(토양오염공정시험기준 입자크기)와 동일한 양상을 보였다.

Table 3. Mean concentration of inorganic contaminants by regions

(Unit: mg/kg)

Element	Pb	Cu	Zn	Ni	As	Cd	Fe/100	Mn	Hg	Cr
	700	2,000	2,000	500	200	60	-	-	20	-
Yeonsu1	42.44 (87.04)	193.77 (367.63)	646.54 (1734.27)	40.56 (67.66)	3.79 (7.16)	0.42 (0.93)	337.71 (487.02)	605.88 (907.26)	0.04 (0.08)	129.90 (148.60)
Yeonsu2	58.89 (101.29)	171.22 (301.28)	1014.82 (1700.81)	43.50 (72.99)	4.48 (7.97)	0.52 (0.90)	320.25 (473.50)	549.83 (812.16)	0.06 (0.10)	85.70 (111.28)
Namdong1	38.81 (86.76)	2060.80 (4673.04)	511.76 (1505.13)	251.11 (460.78)	4.61 (9.05)	0.25 (0.80)	1286.82 (1537.36)	1264.83 (1669.93)	0.03 (0.10)	238.36 (328.62)
Namdong2	40.22 (80.80)	120.34 (379.24)	519.86 (1459.86)	26.12 (58.93)	4.20 (7.38)	0.50 (0.91)	273.99 (463.02)	502.58 (972.65)	0.05 (0.09)	76.06 (114.10)
Bupyeong1	42.28 (73.82)	152.53 (236.93)	811.40 (1147.66)	34.39 (42.93)	4.23 (7.15)	0.46 (0.87)	309.84 (425.07)	636.46 (929.86)	0.03 (0.06)	98.51 (115.38)
Bupyeong2	44.85 (82.98)	174.67 (306.73)	677.30 (1641.62)	30.96 (46.87)	3.82 (7.21)	0.65 (1.05)	288.94 (469.04)	491.12 (799.81)	0.04 (0.08)	99.68 (129.37)
Gyeyang1	45.56 (82.80)	130.21 (265.99)	589.11 (1589.93)	33.11 (49.75)	4.11 (9.06)	0.62 (1.33)	551.02 (443.21)	525.47 (872.73)	0.03 (0.10)	96.65 (124.32)
Gyeyang2	43.66 (80.90)	164.09 (312.53)	559.82 (1902.68)	35.81 (48.22)	4.46 (7.29)	0.44 (1.13)	283.51 (437.46)	515.82 (847.48)	0.04 (0.11)	109.49 (121.51)

※ 0: Average concentraion of heavy metals with particle size of 25 μ m or less

Table 4. CF and PLI value for heavy metals

	Pb	Cu	Zn	Ni	As	Cd	Hg	Cr	PLI
Yeonsu1	2.5	6.9	9.6	0.9	0.8	4.7	0.8	1.4	2.2
Yeonsu2	3.5	6.1	15.1	0.9	0.9	5.8	1.2	0.9	2.6
Namdong1	2.3	73.6	7.6	5.3	1.0	2.8	0.7	2.6	3.7
Namdong2	2.4	4.3	7.8	0.6	0.9	5.5	0.9	0.8	1.9
Bupyeong1	2.5	5.4	12.1	0.7	0.9	5.1	0.6	1.1	2.1
Bupyeong2	2.6	6.2	10.1	0.7	0.8	7.2	0.7	1.1	2.2
Gyeyang1	2.7	4.7	8.8	0.7	0.9	6.9	0.6	1.1	2.0
Gyeyang2	2.6	5.9	8.4	0.8	0.9	4.9	0.8	1.2	2.1

※ Average concentraion of heavy metals with particle size of 150 μ m or less

□ CF < 1 : Low contamination

0<PLI≤1 unpolluted

■ CF = 1~3 : Moderate contamination

1<PLI≤2 unpolluted to moderately polluted

■ CF = 3~6 : Considerable contamination

2<PLI≤3 moderately polluted

■ CF > 6 : High contamination

3<PLI≤4 moderately to highly polluted

4<PLI≤5 highly polluted

PLI>5 very highly polluted

입자크기가 작을수록 입자의 부피당 표면적이 커지고, 오염물질의 함량이 높아져서 중금속 농도가 높은 것으로 판단된다.

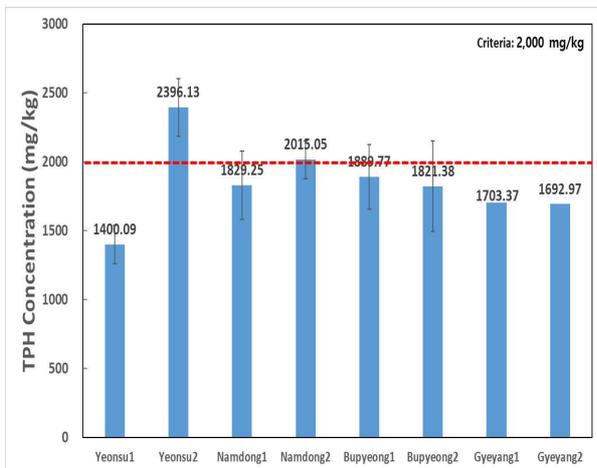
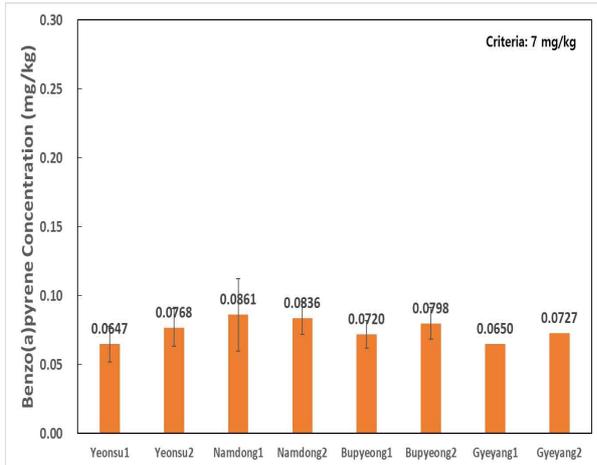


Fig. 2. Concentration of benzo(a)pyrene and TPH in roadside sediments.

3.2.2. 중금속 오염도 평가

모든 조사지점의 도로변 퇴적물에서 Zn은

높은 오염도(High contamination)를 보였으며, Cu는 높은 또는 상당한 오염도(High or Considerable contamination)를 보였다. 높은 CF값을 보이는 이유는 자동차에서 유래하는 중금속들이 퇴적물에 농축되어 높게 나타나는 것으로 판단되며, 남동1에 경우는 수은을 제외하고 중금속에 대한 오염도가 나타났는데 공단이라는 주변환경 요인이 영향을 미친 것으로 판단된다. PLI로 본 오염평가 결과는 남동1이 Moderately to highly polluted (3.7)로 가장 오염된 것으로 나타났으며, 나머지 조사지점은 PLI값이 2.0 내외로 비슷한 오염도를 보였다.

3.2.3. TPH 및 벤조(a)피렌 분석

벤조(a)피렌과 TPH의 분석결과는 Fig. 2에 나타냈다.

벤조(a)피렌은 모든 조사지점에서 정량한계 (0.005mg/kg) 이상의 농도로 검출되었다. 부평 1 시료를 대상으로 25 μ m이하의 퇴적물의 벤조(a)피렌을 분석한 결과, 2배이상(0.1968mg/kg)이 검출되었다.

TPH(석유계총탄화수소)는 연수2, 남동2에서 평균농도가 토양오염우려기준(3지역)을 초과한 것으로 나타났다. 연수2 시료를 대상으로 25 μ m이하의 퇴적물의 TPH를 분석한 결과, 2배 이상(5763.85mg/kg)이 검출되었다.

중금속의 경우와 마찬가지로 작은 입자크기의 퇴적물은 부피가 작고 표면적이 커져 오염물질(벤조(a)피렌, TPH)의 함량이 높아져 농도가 높게 나타나는 것으로 판단된다.

Table 5. Abundance of microplastics in main roadside sediment.

(Unit: particles/g)

	Yeonsu1	Yeonsu2	Namdong1	Namdong2	Bupyeong1	Bupyeong2	Gyeongang1	Gyeongang2
Microplastics	765	873	603	756	635	828	990	954

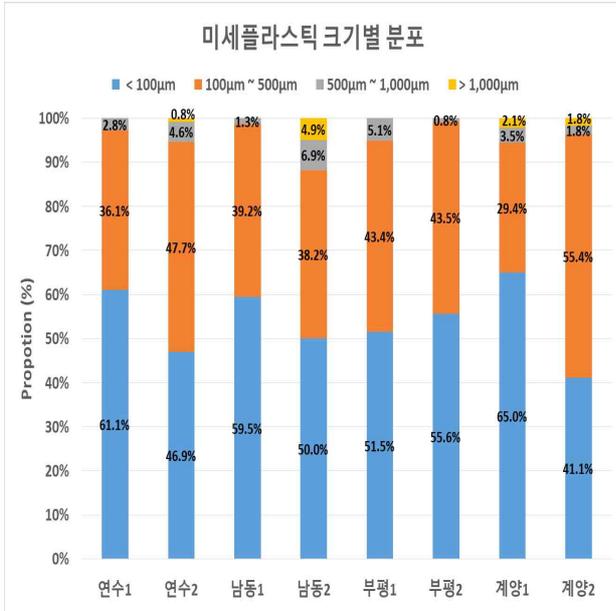


Fig. 3. The size distribution of microplastics in roadside sediments.

3.3 미세플라스틱 분석

도로변 퇴적물 중 미세플라스틱 분포량을 살펴본 결과는 Table 5.과 같다. 퇴적물 중 미세플라스틱이 가장 많이 존재하는 곳은 계양1 (봉오대로)로 평균 990개/g가 존재했으며 계양2 > 연수2 > 부평2 > 연수1 > 남동2 > 부평1 > 남동1 순으로 미세플라스틱이 존재하였다.

퇴적물에서 발견된 미세플라스틱을 크기별로 분석한 결과는 Fig. 3.와 같다. 100µm 이하 미세플라스틱이 41.1~65.0%를 차지했고 100~500µm 미세플라스틱은 29.4~55.4%를 차지했다. 500µm 이하의 크기를 갖는 미세플라스틱이 약 90%이상 존재하는 것으로 나타났다. 미세플라스틱이 작은 크기로 존재하는 이유는 물리적 마찰, 태양의 자외선과 온도변화와 같은 요인으로 잘게 쪼개져 상대적으로 작은 미세플라스틱이 퇴적물 중에 존재하는 것으로 판단된다(Andrady 2011; Kim et al. 2017; Horton et al. 2018; Townsend et al. 2019).

미세플라스틱의 정성분석은 FT-IR을 통해 분석하였다. 평균 정성분석 결과는 Fig. 4.에 나타났다. PE(29.4%), Acrylate(27.5%)가 가장 높은 비율을 차지했으며, PP(17.2%) > 기타

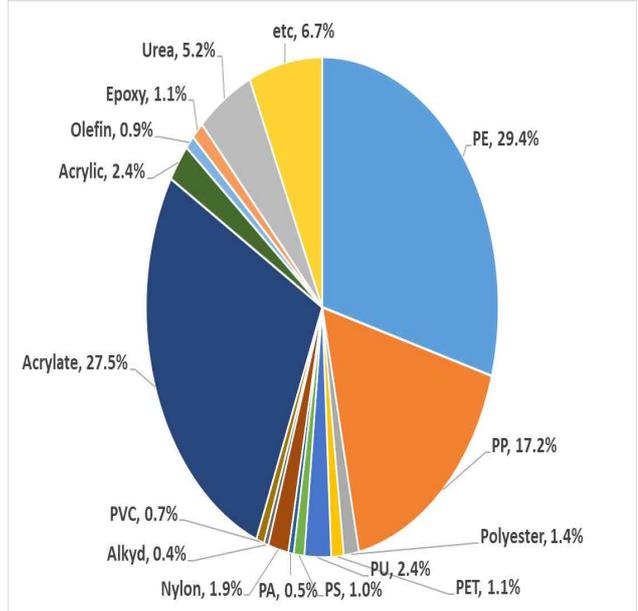


Fig. 4. The total distribution of microplastics according to polymer type.

(6.7%) > Urea(5.2%) > PU, Acrylic(2.4%) > Nylon(1.9%) > Polyester(1.4%) > Epoxy, PET(1.1%) > PS(1.0%) > Olefin(0.9%) > PVC(0.7%) > PA(0.5%) > Alkyd(0.4%) 순으로 나타났다. 조사지점별 정성분석 결과는 Fig. 5.에 나타냈으며, 전체 분석결과와 같이 PE와 Acrylate가 가장 높은 비율을 차지했다.

도로변 퇴적물과 비슷하게 PP와 PE의 일반 토양에서도 높은 비율로 발견된다(최유리 2020). PE와 PP는 범용적으로 사용되어 토양, 수질 등을 오염시키는 것으로 판단된다. Acrylate계열의 플라스틱은 가소제로 사용되며 타이어에서 유래한 것으로 판단된다.

3.4 재비산먼지농도와 인자간 상관분석

재비산먼지농도와 교통량, 퇴적물량, 입자크기별 퇴적물량 간에 상관분석을 실시하였다. 입자크기별 퇴적물량은 3.1 상/하반기 입도분포결과의 평균값을 이용하여 구했고 피어슨 상관분석방법을 이용하였다.

상관분석결과 재비산먼지농도는 노면 단위면적당 25µm이하 퇴적물량과 상관관계가 있음을 확인하였다(Table 6.).

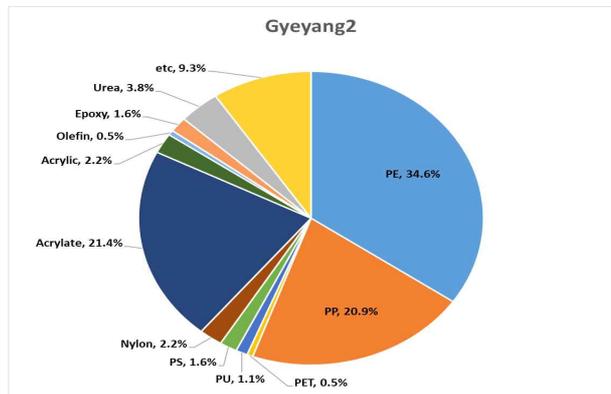
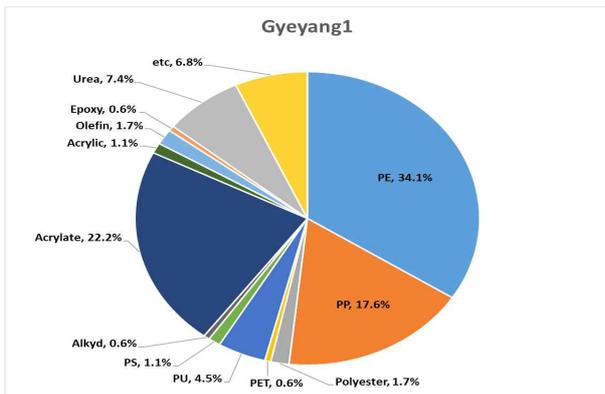
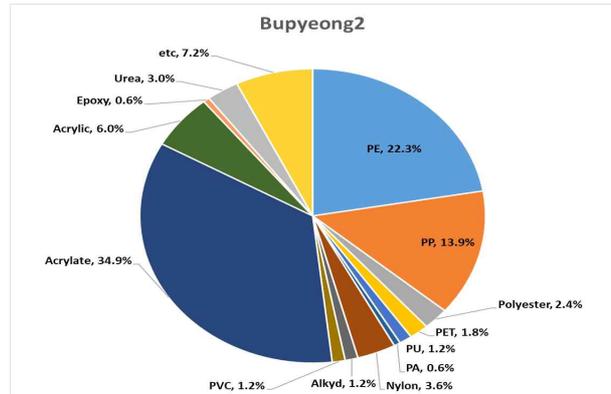
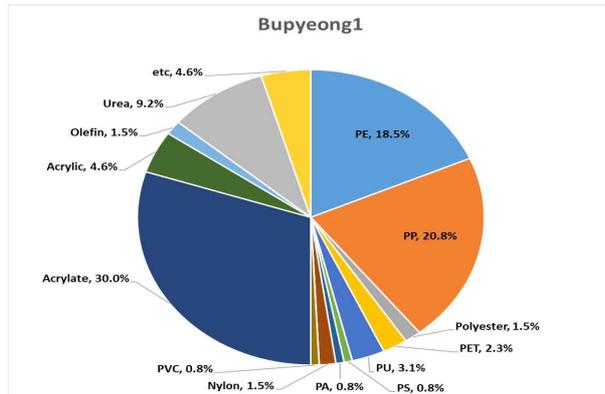
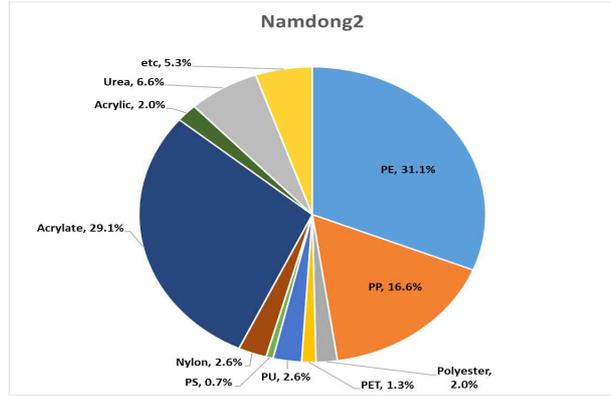
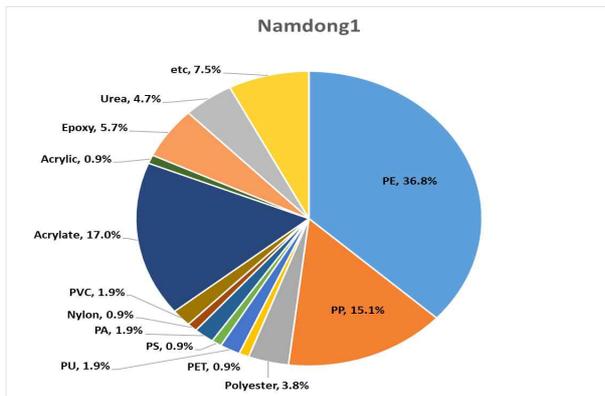
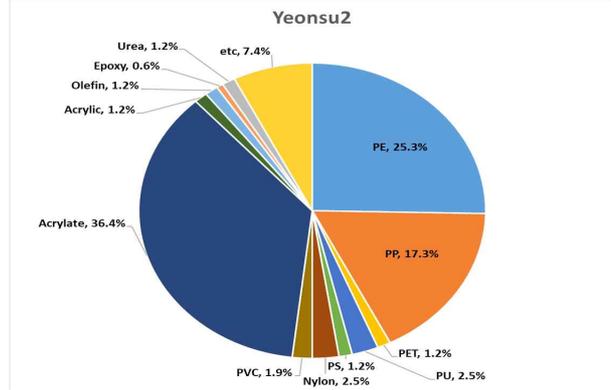
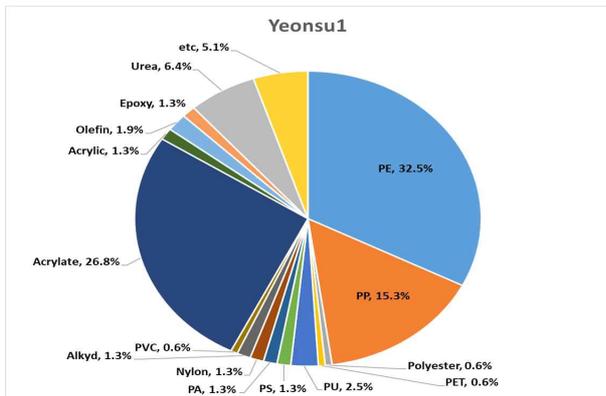


Fig. 5. The distribution of microplastics according to polymer type.

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

Table 6. Pearson's correlation of resuspended dust and other factors

	Resuspended Dust	Traffic	Sediment Amount	< 75 μ m S.A.	< 25 μ m S.A.
Resuspended Dust	1				
Traffic	-0.254 (0.1342)	1			
Sediment Amount(S.A.)	0.124 (0.4699)	0.157 (0.3591)	1		
< 75 μ m S.A.	0.166 (0.3335)	0.226 (0.1856)	0.849 (6*10 ⁻¹¹)	1	
< 25 μ m S.A.	0.552 (0.0005)	-0.016 (0.9251)	0.721 (7*10 ⁻⁷)	0.678 (5*10 ⁻⁶)	1

※ () : p-value

교통량, 노면 전체 단위면적당 퇴적물량, 노면 단위면적당 75 μ m이하 퇴적물량은 유의한 결과가 나오지 않았다. 이를 통해 재비산먼지 농도는 노면 단위면적당 25 μ m이하 퇴적물량과 관계가 있으므로 도로청소 시 25 μ m이하의 작은 입자크기를 갖는 퇴적물을 처리하는데 세심한 관리가 필요할 것으로 판단된다.

IV. 결론

본 연구에서는 인천시 8개 주요도로의 도로변 퇴적물에 대한 특성을 조사하였다.

연수2, 남동1은 세립토 함량이 높은 지역으로 나타났다.

모든 조사지점에서 Fe의 농도가 가장 높게 나타났으며, 남동1에 경우는 Cu가 토양오염우려기준(3지역)을 초과하는 것으로 나타났다. 중금속 오염정도를 확인한 결과, Zn이 높은 오염경향(CF > 6)을 보였으며 오염부하지수(PLI)에 따라 남동1(남동대로, 공단)이 모든 중금속에 대해 가장 높은 오염도(PLI = 3.7)를 보였다. 남동1의 중금속 오염도가 높은 이유는 주변요인(기계금속업 공장 주변)이 영향을 미친 것으로 판단된다.

벤조(a)피렌은 모든 조사지점에서 정량한계 이상으로 검출되었으며, TPH는 연수2, 남동2에서 토양오염우려기준(3지역)을 초과하는 것으로 나타났다.

미세플라스틱은 8개 주요도로에서 모두 검출되었으며, 계양1이 990개/g으로 가장 많이 검출됐으며 미세플라스틱의 88.2 ~ 99.2%가 500 μ m이하의 크기를 갖는 것으로 나타났다. 미세플라스틱 중 가장 많은 비율을 차지하는 플라스틱은 PE, Acrylate였으며, PE는 범용플라스틱, Acrylate는 타이어 구성성분의 영향으로 가장 많은 비율을 차지하는 것으로 판단된다.

상관분석결과 재비산먼지농도는 25 μ m이하 퇴적물량과 유의한 관계가 있음이 나타났다.

결과적으로 25 μ m이하의 퇴적물은 중금속, 벤조(a)피렌, TPH 유해물질의 농축으로 높은 농도가 보였으며 도로변 먼지의 재비산과도 상관관계가 있으므로 시민들의 안전한 환경조성을 위해 세심한 관리가 필요할 것으로 판단된다.

V. 참고문헌

1. E. Apeyeyi et al. (2011), "Distribution of heavy metals in road dust along an urban rural gradient in Massachusetts", *Atmospheric Environment*, 45, 2310-2323.
2. E. B. Cullbard et al. (1988) "Metal contamination in British urban dusts and soils", *Journal of Environmental Quality*, 17, 226-234.
3. S. Lehane et al. (1992) "A survey of metal levels in street dusts in an inner London neighbourhood", *Environmental International*, 18, 263-270.
4. J. W. C. Wong and N. K. Mak (1997), "Heavy metal pollution in children playgrounds in Hong KONG and its health implications", *Environmental Technology*, 18, 109-115.
5. Calvillo, S. J. et al. (2015). "Street dust: Implications for stormwater and air quality, and environmental management through street sweeping", *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 233, 71-128.
6. Cho, K. S. (2003). "Characteristics of heavy metal pollution in contaminated roadside sediments in Jeonju city", *Korea, Journal of Korean Earth Science Society*, 24(8), 711-720.
7. Gadd, J. and Kennedy, P. (2000). "Preliminary examination of organic compounds present in tyres, brake pads and road bitumen in New Zealand", Prepared by Kingett Mitchell Ltd for Ministry of Transport.
8. 김민영, 박성태, 한상훈, 박성배 (1987) "서울지역 은행잎 중 중금속 함량에 관한 연구", *서울시보건 환경연구원보*, 23 353-362.
9. Schauer, J.J. et al. (2006), "Characterization of metals emitted from motor vehicles", *Research Report (Health Effect Institute)*, 133, 1-76: discussion 77-88.
10. Hjortenkrans et al. (2007) "Metal emissions from brake lining and tires: case studies of Stockholm, Sweden 1995/1998 and 2005." *Environ. Sci. Tech*, 41, 5224-5230.
11. Bowen (1986), "HJM : Trace elements in biochemistry", Academic Press
12. Youm, SJ et al. (2005) "Heavy Metal Contamination in Roadside Sediments within the Watershed of the Hoidong Reservoir in Busan City", *Economic and environmental geology*, 38(3), 247~260
13. Ho, Y.B. and Tai, KM (1988), "Elevated levels of lead and other metals in roadside soil and their use to monitor aerial metal deposition in Hong Kong", *Environmental pollution*, 49, 37~51.
14. Miller, MP. and Mcfee, W.W (1983) "distribution of cadmium, zinc, copper, and lead in soils of industrial northwestern Indiana", *Journal of Environmental Quality*, 12, 29-33.
15. Pierre et al. (1985), "Modelling of soil contamination by airborne lead and cadmium around several emission source", *Environmental Pollution*, 10, 97~114.
16. IARC (1989), "IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans." Diesel and Gasoline Engine Exhausts and Some Nitroarenes, *Monographs*, 56, 41~57.
17. 김상조, 정용현, 옥곤 (2000), "창원시 토양 중 다환방향족탄화 수소화합물의 농도수준 및 분포특성", *한국환경분석학회지*, 3(3), 171-175.
18. MSFD. (2013), "Guidance on monitoring of marine litter in European 65 seas." *European Commission. In Joint Research Center. Luxembourg: Institute for Environment and Sustainability* 1-128.
19. A. B. Khan et al. (2014) "Evaluation of heavy metal and total petroleum hydrocarbon contamination of roadside surface soil"

- International Journal of Environmental Science and Technology, 11, 2259-2270
20. Analy Quiñonez-Plaza et al. (2017) "Total petroleum hydrocarbons and heavy metals in road-deposited sediments in Tijuana, Mexico", *J Soils Sediments*, 17, 2873-2886,
 21. Fotopoulou, K.N., and H.K. Karapanagioti. (2012). "Surface properties of beached plastic pellets." *Marine Environmental Research* 81 70-77.
 22. Ye, S., and A.L. Andrady. (1991), "Fouling of floating plastic debris under biscayne bay exposure conditions", *Marine Pollution Bulletin* 22(12) 608-613.
 23. Bornehag (2005), "Phthalates in indoor dust indoor and their association to building characteristics", *Journal of Environmental Health Perspectives* 113(10) 1-6.
 24. Anna Wik and 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
 25. Andrady, A.L. (2011) "Microplastics in the marine environment." *Marine Pollution Bulletin*, 62(8), 1596-1605.
 26. Horton et al. (2018), "The influence of exposure and physiology on microplastic ingestion by the freshwater fish *rutilus rutilus* (roach) in the river thames", *UK. Environmental Pollution*, 236, 188-194.
 27. Kim KJ et al. (2017), "Distribution of microplastics on side of pavement in M city". *Journal of Korean Society of Urban Environment*. 17(4), 419-423.
 28. Townsend et al. (2019). "Associations between microplastic pollution and land use in urban wetland sediments". *Environmental Science and Pollution Research*, 1-11.
 29. R.L. Rundnick, S. Gao (2008), "Composition of the Continental Crust", *Treatise On Geochemistry*, Volume 3, 1-64.
 30. 최유리 (2020), "서울시와 여주시 토양 중 미세 플라스틱 분포 특성" 서울시립대학교 대학원 환경원예학과, 이학석사학위논문