

도시지역 도로먼지의 중금속 오염 특성: 토지이용 특성에 따른 비교

정혜령^{1,2} · 최진영¹ · 나공태^{1,2†}

¹한국해양과학기술원 해양환경연구센터, ²과학기술연합대학원대학교 해양과학(해양학)

Characteristics of Heavy Metal Pollution in Road Dust from Urban Areas: Comparison by Land Use Types

Hyeryeong Jeong^{1,2}, Jin Young Choi¹, and Kongtae Ra^{1,2†}

¹Marine Environmental Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology (KIOST), Busan, 49111, Korea

²Department of Ocean Science (Oceanography), KIOST School, University of Science & Technology (UST), Daejeon 34113, Korea

Received April 13, 2020 / Revised June 11, 2020 / Accepted June 19, 2020

In this study, heavy metals in road dust from 5 different land use types in urban areas were investigated to understand the characteristics and status of metal pollution. Urban roads in mixed commercial/industrial areas (MCIA) showed the highest concentration of heavy metals compared to other areas. According to the pollution load index calculation, the MCIA area was approximately 6 times more polluted than that from the residential area (RA) and traffic area (TA), in the order of MCIA>CA (commercial area)>TA>PA (parking area)>RA. The road dust from most urban areas showed significant levels of pollution in Cu, Zn, Pb, Cd, resulting in contamination by traffic related vehicles such as abrasion of tire and brake wear. However, the MCIA road dust appeared to be extremely high pollution because of the use of metals associated with industrial activity in the area. Our results showed that 270 mg of 8 heavy metals is accumulated per unit area (m²) in the road dust. The road dust contaminated with heavy metals can be dispersed and inhaled by residents of urban areas. It can also be introduced into the surrounding aquatic and coastal environments through drainage systems during rainfall and cause heavy metal pollution in these environments. Additional research on human and environmental impacts is necessary.

Key words: Heavy metals, Road dust, Residential, Traffic, Commercial

1. 서 론

수십년 동안 급속한 도시개발에는 건설, 교통, 산업 및 산업활동을 포함한 다양한 인위적인 활동이 수반되었다.^{1,2} 도시지역에서 중금속은 대기를 통한 습식(dry) 및 건식 침적(wet deposition), 교통활동, 산업활동, 포장면과 빌딩의 부식을 포함하는 자연적 및 인위적인 공급원에 의해 공급된다.³ 인위적인 활동은 도시의 토양과 도로먼지 등에 상당한 양의 중금속을 방출시켰으며, 생태계 및 인간의 건강에 해로운 영향을 미쳐왔다.⁴ 도로먼지(road dust, RD)는 잠재적으로 차량배기 배출, 차량, 도로, 금속과 관련된 건축자재의 마모 등 광범위

한 비점오염에서 발생하는 중금속 오염물질의 독성 매개체이다.^{5,6} 중금속은 독성, 지속성 및 생물축적으로 인해 도로먼지 내 가장 위험한 오염물질 중 하나이다.⁷⁻⁹

도로먼지는 입자크기가 작아질수록 중금속 농도가 급격히 증가하며, 불투수성 지표면은 오염물질을 더 많이 축적하고 있다.¹⁰ 도시면지에서 Cu, Pb, Zn와 같은 금속이 높은 농도를 보이는 것은 자동차 교통활동에 의한 브레이크와 타이어 마모 등과 밀접한 관련이 있다.¹¹⁻¹⁴ 교통량이 많은 지역 근처의 도로변 토양은 금속 농도가 높으며, 도로먼지는 토양보다 더 중금속에 오염된 것으로 보고되고 있다.^{2,11,12,15} 도시의 도로먼지는 대기중으로 방출되거나 주변 토양으로 유출되는 단기

[†]To whom correspondence should be addressed.

Tel: 82-51-664-3184, E-mail: ktra@kiost.ac.kr

적인 오염(short-term contamination)의 한 유형이다. 도로면지 내 중금속 농도에 영향을 미치는 요인은 다른 유형의 토지사용 형태, 입자크기, 교통량, 도로청소 빈도 등 다양하다. 토지이용 특성에 따른 중금속 연구는 오염원 파악에 유용하게 사용되며, 도로면지의 축적량, 입자크기 등은 환경 및 공중 보건 문제에 있어 중요한 요소이다.¹⁶⁻¹⁸⁾ 도로면지는 차량이동 및 바람에 의해 대기 중으로 재비산되며, 흡입 가능한 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 에 대한 노출은 호흡기 질환 등 인간의 건강에 해로운 영향을 미치기 때문에.^{11,19-23)} 도로면지 중금속 오염에 대한 올바른 이해는 도시환경의 질적관리와 인간 건강에 매우 중요하다.²⁴⁾

연구지역인 안산 및 시흥시의 전체 도시면적은 각각 149.4 km²과 131.5 km²로, 주거/상업지역 16%, 공업지역 10%, 녹지지역 71%를 차지하며 전체 면적 중 12%가 도로면적이다.²⁵⁾ 안산 및 시흥시의 산업지역에는 시화, 반월산업단지가 위치하여 산업지역 내 도로면지 내 중금속오염에 대한 연구결과가 제시된 바 있다.^{26,27)} 그러나 주거나 상업지역은 공업지역에 비해 더 많은 면적을 차지하며 많은 거주자가 도로면지에서 기인한 재비산 먼지 등에 노출되어 있음에도 불구하고 이에 대한 연구는 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 도시지역내의 5가지 토지이용 특성(거주, 교통, 주차장, 일반상업, 산업관련상업)차이를 고려하여 채취된 도로면지 내 중금속의 오염도 평가 및 오염원 추적연구를 수행하였으며, 이를 통해 토

지 이용 별 도로에서의 효과적인 중금속 오염 저감 대책 마련을 위한 기초 자료를 제시하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구지역 및 시료채취

2018년 6월 경기도 안산시와 시흥시의 22개 정점(거주지역 5개, 교통지역 6개, 주차장 4개, 일반상업지역 3개, 산업관련상업지역 4개)에서 도로면지를 채취하였다(Fig. 1). 거주지역(residential area, RA)은 주로 아파트 단지가 밀집된 지역을 선정하였으며, 교통지역(traffic area, TA)은 종합버스터미널, 물류터미널, 버스 차고지 등을 선정하였다(Table 1). 주차장(parking area, PA)은 대형마트의 내부 및 외부 주차장과 공영주차장, 일반상업지역(commercial area, CA)은 백화점 및 마트 주변 도로, 산업관련상업지역(mixed commercial/industrial area, MCIA)은 산업활동에 사용되는 공구 등을 판매하는 지역을 선정하였다. 시료는 도로면지 연구분야의 다수의 연구자들이 보고한 건식 진공청소방법을 이용하여 채취되었다.²⁸⁻³¹⁾ 시료채취를 위해서 플라스틱 솔과 미세입자의 유실이 없도록 고안된 진공청소기(Dyson DC35, USA)가 사용되었다. 채취된 도로면지의 입자크기 범위는 62~400 μm 였다. 채취 과정 중 지점별 교차오염과, 입자유실을 최소화하도록 시료채취에 사용되는 부품(플라스틱 솔, 먼지통, 미세먼지 필터)을 지점별로 교체하거나 세척 후 사용하였으며, 청소기의 긴 호



Fig. 1. Map of sampling sites for urban road dusts in Ansan and Shiheung city, Korea (base map from Google Earth).

Table 1. Characteristics of particle sizes (μm) and mass per unit area (g/m^2) for urban road dust from three different area by land use types in Ansan and Shiheung City, Korea.

Land use types	Particle size (μm)			Mass per unit g/m^2	Site descriptions
	d(0.1)	d(0.5)	d(0.9)		
RA	10	89	505	54	R1~5; Apartment
TA	23	198	768	126	T1~6; Bus terminal, bus garage
PA	24	273	830	44	P1~4; Parking inside and outside the building
CA	16	146	647	50	C1~3; Department stores
MCIA	21	132	628	111	MCIA1~4; Industrial products and machinery complex

스는 사용하지 않았다. 각 정점마다 도로의 연석에 70 cm 격자(면적 0.49 m^2)를 사용하여 2~4회 걸쳐 채취하여 정점에 대한 대표성을 확보하였다. 채취된 도로먼지 시료는 플라스틱 지퍼백에 담아 오븐(40°C)건조 후 무게를 측정하여 단위면적당 도로먼지 축적량을 산정하였다.

2.2. 중금속 및 입도 분석

채취한 도로먼지 시료를 시료의 무손실 분쇄가 가능한 자동분쇄기(Pulverisette 6, Fritsch Co., Germany)로 분쇄 및 균질화시켰다. 균질화된 시료 약 0.1 g을 테프론재질의 산분해용기에 넣고 supra급 이상의 고순도 혼합산(불산, 과염소산, 질산)을 이용하여 완전분해-증발건고-재용해 후 금속원소에 따라 적절히 희석하였다. 아르곤 플라즈마로 원소를 이온화시키고 질량분석기로 이온을 분리하여 시료 중의 원소를 분석하는 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS; iCAP Q, Thermo Scientific Co., USA)로 8개 금속원소 (Li, Cr, Cu, Zn, As, Cd, Pb)를 분석하였다. 수은(Hg)은 미국 환경청서 제시한 분석방법인 열분해와 금아말감법(US EPA Method 7473)을 이용한 자동수은분석기(Hydra-C, Teledyne Leeman Labs., USA)로 분석하였다. 분석된 중금속 정확도 검증을 위하여, 2가지 농도수준에 대한 인증값이 제시되어 있는 퇴적물 인증물질(MESS-4, PACS-3)을 시료와 동일한 방법으로 분석하였으며, MESS-4($n=5$)와 PACS-3($n=5$)의 평균 회수율은 각각 98.9%와 97.5%로 매우 좋은 회수율을 나타냈다. 도로먼지의 입도 분석은 무기탄소와 유기물을 각각 1N 염산과 과산화수소로 제거한 후 입도분석기(Mastersizer 2000, Malvern Instrument, UK)를 이용하였다.

2.3. 중금속 오염도 평가

도로먼지의 원소별 중금속 오염도 평가를 위해 농축계수(Enrichment factor; EF)를 사용하였으며, 다음과

같이 계산한다.³²⁾

$$EF = \frac{(Metal/Li)_{sample}}{(Metal/Li)_{background}}$$

여기서, $(Metal/Li)_{sample}$ 은 시료의 금속 농도이며, $(Metal/Li)_{background}$ 는 배경농도로는 지각의 평균농도를 사용하였다.³³⁾ 농축계수는 2이하 deficiency to minimal enrichment, 2-5 moderately enrichment, 5-20 significantly enrichment, 20-40은 very high enrichment, 40이상 extremely high enrichment의 총 5개 등급으로 구분된다.

본 연구에서 분석된 8개 금속원소에 대한 종합적인 오염도를 평가하기 위하여 오염부하지수(PLI; pollution load index)를 아래의 식에 의하여 계산하였다.³⁴⁾

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \dots \times CF_n}$$

CF는 각 금속원소의 농도와 배경농도의 비를 나타낸다. 오염부하지수는 $0 < PLI \leq 1$ 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 polluted의 총 6개 등급으로 구분된다.³⁵⁾

3. 결과 및 고찰

3.1. 토지이용 특성에 따른 중금속 오염 특성

토지이용방법 별로 구분하여 채취된 도로먼지의 입도 측정결과 평균입도 ($D_v0.5$)는 $PA(273 \pm 102 \mu\text{m}) > TA(198 \pm 74 \mu\text{m}) > CA(146 \pm 108 \mu\text{m}) > MCIA(132 \pm 51 \mu\text{m}) > RA(89 \pm 27 \mu\text{m})$ 순이었으며, 거주지역(RA) 도로먼지의 평균 입자크기가 가장 작고, 주차장(PA) 도로먼지의 평균 입도가 가장 큰 것으로 나타났다(Fig. 2). 상대적으로 주차장의 평균 입도가 큰 이유는 차량의 출발과 정지에 아스팔트 등 포장재로부터 차량의 바퀴와의 마찰

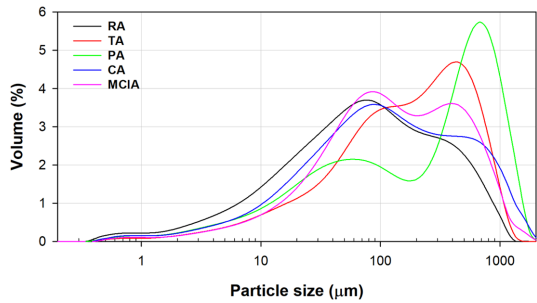


Fig. 2. Particle size distribution in road dust from impervious urban areas in this study.

로 인해 상대적으로 큰 입자들이 떨어져 나오기 쉽기 때문인 것으로 판단된다. 입자의 오염도 및 이동성은 입자의 크기와 큰 관계가 있으므로, 다양한 도로먼지의 연구에서 입도와 오염도의 관계가 연구되어왔다.^{30,36-38)}

도시의 거리먼지는 도로에서의 체류시간이 증가할수록, 차량운행, 가속, 롤링 등 물리적 작용에 의해 미세 입자의 축적율이 높아진다.^{39,40)} 도시지역 도로먼지 중 250 μm 이하의 미세입자는 교통량(average daily traffic, ADT)과 관련이 있으며,⁴¹⁾ 도로먼지의 입자크기가 미세할수록 중금속 등 오염물질의 축적량, 부하량과 대기나 수권으로의 이동성이 높아진다.⁴²⁻⁴⁴⁾ 이를 방지하기 위한 노력으로 지자체와 국가들은 도로청소에 많은 노력을 기울이고 있다.^{26,45)} 그러나 일반적인 도로청소의 경우 주로 150-250 μm 보다 큰 입자의 제거에만 효과가 있다고 보고되고 있다.²⁶⁾ 안산시는 기본도로에 대해 1일 1회 청소차 운영을 기본 운영방식으로 하고 있다.³⁰⁾ 단위 면적당 도로먼지 축적량은 교통지역(TA)이 126 g/m²으로 가장 많았으며, 산업관련 상업지(MCIA)>거주지역(RA)>일반상업지역(CA)>주차장(PA) 순으로 나타

Table 2. Heavy metal concentrations (mg/kg) in urban road dust from residential (RA), traffic (TA), commercial (CA) and mixed commercial/industrial (MCIA) areas of this study and other literature values.

Region	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg	Reference
RA	119	29.5	101	549	11.7	0.85	126	0.03	This study
	149	36.4	192	284	-	2.65	121	-	India ⁴⁶⁾
	95	-	105	240	-	-	38	-	USA ¹¹⁾
	72	-	57	253	-	-	-	-	Sri Lanka ⁴⁷⁾
	196	46.6	98	289	-	0.98	73	-	China ⁴⁸⁾
	15	7.9	131	297	-	0.51	32	-	Australia ⁴⁹⁾
	20	-	40	159	-	-	51	-	Malaysia ⁵⁰⁾
	-	-	90	519	-	21.3	129	-	Thailand ⁵¹⁾
	-	18.2	119	136	-	1.41	82	-	Ulsan, Korea ⁵²⁾
	48	38.2	101	346	15.7	5.31	100	-	Saudi Arabia ⁵³⁾
TA	179	61.1	190	653	13.2	0.74	181	0.03	This study
	232	46.5	101	345	-	0.87	111	-	China ⁴⁸⁾
	50	-	170	403	-	-	164	-	Malaysia ⁵⁰⁾
	-	16.9	148	130	-	1.48	118	-	Ulsan, Korea ⁵²⁾
	122	30.8	99	335	15.3	1.72	59	-	Turkey ⁵⁴⁾
	132	41.0	91	496	-	1.86	155	0.29	China ⁵⁵⁾
	-	-	99	450	-	-	94	-	China ⁵⁶⁾
	85	65.3	181	635	27.7	9.71	184	-	Saudi Arabia ⁵⁷⁾
22	30.3	87	192	-	1.42	202	-	Bosnia ⁵⁸⁾	
PA	161	44.5	93	530	13.3	0.69	140	0.04	This study
	71	55	152	535	23.3	8.2	154	-	Saudi Arabia ⁵⁷⁾
	28	51.8	52	171	-	1.34	86	-	Bosnia ⁵⁸⁾
CA	302	115	404	866	10.2	1.09	182	0.08	This study
	67	-	107	349	-	-	20	-	Sri Lanka ⁴⁷⁾
	3.2	4.5	71	90	-	0.54	38	-	Australia ⁴⁹⁾
	28	-	98	230	-	-	70	-	Malaysia ⁵⁰⁾
MCIA	3410	1382	2109	2550	214	3.16	551	0.09	This study

났다(Table 1). 본 연구에서의 교통지역(TA)과 주차장 (PA)은 차량의 집합 지역이고, 산업관련 상업지역 (MCIA), 거주지역(RA), 일반상업지역(CA)은 일반 도로 였기 때문에 직접적인 비교가 가능하지 않지만, 선행 연구들로 미루어 볼 때 조사된 도로먼지의 입도와 단위면적당 축적량은 도로나 노면청소와 관련이 있을 것으로 판단된다.

도로먼지 내 중금속 농도는 산업관련 상업지역 (MCIA)에서 모든 금속원소가 최대농도를 보였다(Table

2, Fig. 3). 거주지역(RA)에서는 Cr, Ni, Pb, Hg가 가장 낮은 농도로 나타났다. 대부분의 금속원소가 국내·외 다른 지역과 유사한 농도를 보였으나, Zn는 태국을 제외한 다른 나라에 비해 약 2배 농도가 높은 특징을 보였다. 교통지역(TA)은 거주지역에 비해 Cr, Ni, Cu, Zn, As, Pb의 농도가 1.1~2.1배 높았으며, 다른 나라와 비교하면 Cu, Zn의 농도가 높은 수준으로 나타났다 (Table 2). 주차장(PA) 내 도로먼지는 다른 도시들과 유사한 농도를 보였으나, Cr이 다른 나라에 비해 2.3~5.7

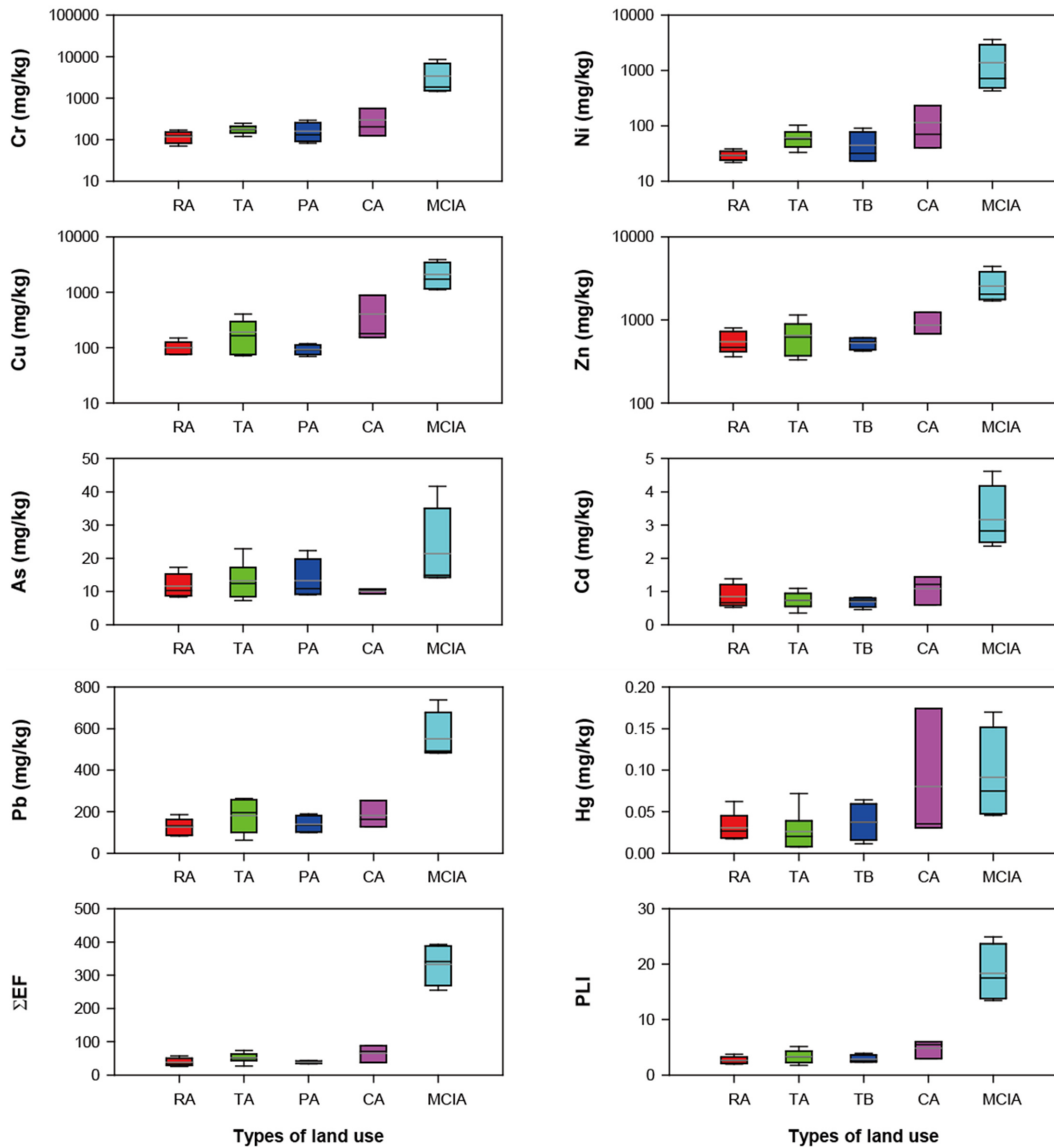


Fig. 3. Comparison of metal concentrations, sum of enrichment factor (ΣEF) and pollution load index (PLI) values from different types of land use of this study.

배 높았고, 교통지역의 평균농도와 유사한 농도수준이었다. 자동차에는 휠, 휠 커버, 장식을 위한 크롬몰딩 등 크롬도금 제품을 많이 사용하고 있으며 산성비, 겨울철 제설용 소금인 제설염에 의해 부식에 의한 영향도 있는 것으로 판단된다.

일반상업지역(CA)은 As를 제외한 모든 금속원소가 주거, 교통, 주차장보다 농도가 높았으며, 다른 도시들이 상업지역에 비해 모든 금속의 농도가 높았다. 산업관련 상업지역(MCIA)의 도로먼지는 다른 지역에 비해 금속농도가 매우 높았으며, Cr>Zn>Cu>Ni>Pb>As>Cd>Hg의 농도순으로 나타났다. 주거, 교통, 상업 지역은 Zn의 농도가 가장 높았으나, 산업관련 상업지역에는 공구상가와 산업관련 유통상가들이 위치하고 있었으며 Cr의 농도가 Zn 보다 높은 결과를 보였다. Cr은 주로 스테인리스 스틸과 크롬 도금에 주요하게 사용되고 있으며 산업관련 상업지역에서는 다양한 종류의 스테인리스 스틸을 절삭, 가공하여 판매하기 때문으로 판단된다. 또한 연구지역 주변 산업단지인 반월/시화 산업단지 내 총부유분진(total suspended particles, TSP)의 Cr 농도가 국내 산업단지들에 비해 가장 높았으며 이를 도금산업에서 기인한 것으로 보고된 바 있다.⁵⁹⁾

도시지역 도로먼지내 Zn와 Cu는 타이어와 브레이크 패드 마모 등 교통활동과 밀접하게 관련되어 있는 주요한 금속이다. 도로먼지 내 Zn/Cu의 농도비를 통해 차량기원과 인위적인 산업기원 등을 구분하기도 한다.⁶⁰⁾ 본 연구에서 Zn/Cu의 농도비는 거주지역 5.5, 교통지역 4.7, 주차장 5.8, 일반상업지역 4.0으로 대부분이 금속오염은 다른 연구에서 보고된 도로의 Zn/Cu의 농도비와 유사하였다. 그러나 산업관련 상업지역에서의 Zn/Cu 농도비는 1.3으로 다른 지역에 비해 낮은 특징을 보여 Cu의 다른 도로에 비해 Cu의 기여율이 높은 것으로 나타났다. Cu는 가공하기 쉽기 때문에 전기, 전자제품, 공업용 기계류, 장비 등에 널리 이용되며, 황동 및 청동 등의 합금으로도 사용된다. 따라서 산업관련 상업지역에는 Cr과 마찬가지로 Cu가 다량으로 함유된 금속원

자재의 가공 판매 과정에서 노면에 축적되어 있던 금속입자들이 물품 운반을 위한 트럭 등을 통해 주변도로로 유출된 것으로 판단된다.

3.2. 도로먼지 내 중금속 오염도 평가

도로먼지 내 Cd, Cu, Zn, Pb는 주로 타이어, 브레이크, 화석연료의 연소에 의한 배기구 배출, 기타 자동차 부품의 부식과 마모에 영향을 받는 것으로 널리 알려져 있다.^{11,61-63)} 산화아연이 타이어의 가황가공의 촉매제로 첨가되는데, 이 때문에 도로먼지의 Zn은 주로 타이어 마모에 기인한다.⁶⁴⁾ Cu는 브레이크 패드 마모에서 주요하게 유출되며,¹¹⁾ 자동차 타이어, 차체의 부식, 윤활류 및 차량의 아연도금 부품의 마모가 주요한 Cd 오염원으로 보고되었다.⁶⁵⁾ Pb는 타이어납(벨런스 웨이트), 배기관, 브레이크의 마모와 납 휘발유가 주요한 오염원이다.^{66,67)}

본 연구에서 채취한 도로먼지 내 중금속의 EF 계산 결과는 Table 3에 나타났다. 주거, 교통, 주차장, 일반상업지역에서는 Cu, Zn, Cd, Pb 등이 significant enrichment에 해당되는 오염상태를 보였다. 이들 지역에서 As는 moderately enrichment의 오염상태를 보였으나 Hg은 오염되지 않은 결과를 보여 도로먼지 내 중금속의 주요한 오염은 차량활동에 기인한 것임을 알 수 있었다. 교통혼잡(traffic congestion)은 도로먼지 내 금속오염수준을 증가시키는 원인이기도 하다.⁶⁸⁾ 토지이용 특성에 따른 도로먼지 내 As를 제외한 금속원소의 EF 값은 상업지역이 거주지역에 비해 높은 결과를 보여, 상업지역의 교통량 증가 및 교통혼잡에 따른 브레이크, 타이어 마모 등이 증가한 영향으로 판단된다.

산업관련 상업지역 도로먼지는 Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb가 extremely high enrichment의 오염상태로 다른 토지이용 특성에 비해 오염도가 가장 심각한 수준으로 나타났다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 산업활동에 필요한 금속재료 등의 절단, 가공, 취급, 운송 등의 과정에서 상업시설 내 도로노면에 축적된 금속입자가 주변

Table 3. Results for calculation of enrichment factor values of heavy metals in the present study

Region	EF<2	2<EF<5	5<EF<20	20<EF<40	EF>40
	Deficiency	Moderately enrichment	Significant enrichment	Very high enrichment	Extremely high enrichment
RA	Cr, Ni, Hg	Cu, As	Zn, Pb, Cd		
TA	Ni, Hg	Cr, As	Cu, Zn, Cd, Pb		
PA	Ni, Hg	Cr, Cu, As	Zn, Pb, Cd, As		
CA	Hg	Cr, Hi, As	Cu, Zn, Cd, Pb		
MCIA		Hg	As		Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb

도로로 이동되었기 때문으로 판단된다.

PLI는 산업관련 상업지역이 평균 18.3으로 very highly polluted의 오염등급에 해당되며, PLI가 가장 낮은 거주지역(2.6)에 비해 7배 오염도가 높았다(Fig. 3). 토지이용 특성에 따른 평균 PLI는 MCIA>CA>TA>PA>RA의 순이었으며, 상업지역과 교통지역은 각각 highly polluted와 moderately to highly polluted의 오염등급에 해당되는 것으로 나타났다.

3.3. 도로먼지 내 중금속의 잠재적인 환경 및 인체 위해성

도시지역 도로먼지 내 단위면적당 축적되어 있는 금속량(mg/m²)은 Table 4에 나타났다. 토지이용 특성에 따라 차이는 있으나 Zn, Cu, Cr, Pb의 축적량이 92%를 차지하고 있었다. 거주지역과 주차장에서의 단위면적당 총 8개 금속 축적량은 45.0 mg/m²과 43.6 mg/m²으로 낮았으며, 상업지역과 교통지역은 거주지역 비해 각각 2배와 3배 더 금속 축적량이 높은 것으로 나타났다. 산업관련 상업지역에서의 8개 금속 축적량이 1,054 mg/m²로 주거지역보다 23배 높았고, 산업단지 도로먼지의 축적량(1,642 mg/m²)²⁶⁾의 64% 수준이었다. 산업관련 상업지역 내 Cr, Ni의 단위면적당 축적량은 산업단지보다 높은 것으로 나타났다.

도로먼지는 바람이나 차량이동에 따라 재부유되어 입자성 대기 오염의 주요한 요인으로 알려져 있다.^{69,70)} 국내에서도 도로에 의한 재비산 먼지가 미세먼지의 약 60% 이상 기여하며, 입자크기가 작아질수록 금속 농도가 높아 이들 미세한 입자는 인간의 호흡기로 흡입되어 유해한 영향을 미칠 수 있다고 보고된 바 있다.^{71,72)} 본 연구지역에서 채취한 도로먼지의 입도분석결과를 통해 전체 도로먼지 중 10 μm 미만(PM₁₀)과 2.5 μm 미만(PM_{2.5})이 차지하는 비율은 각각 7.0%(4.5 g/m²)과 1.8%(1.2 g/m²)로 나타났다. 또한 주거지역과 교통지역에서 이들 미세입자의 단위면적당 축적량이 상대적으로 높았다. 2020년의 연구지역인 시흥시와 안산시의 자동차 등록대수는 약 540,000대이며, 포장도로의 총 길이는

1,499 km이다.²⁵⁾ 따라서 도시유역 전체에 퇴적되어 있는 도로먼지의 양과 총 도로길이 등을 고려하면 상당한 양의 총 도로먼지와 PM₁₀, PM_{2.5}의 미세입자가 도로 등 불투수층위에 퇴적되어 있을 것으로 판단된다. 폴란드 시내 도로먼지의 미세입자에 포함된 Ca, Ni, Pb 및 As의 수준이 소아의 발암위험이 있는 것으로 보고된 바 있다.⁷³⁾ 도시 내 차량이 혼잡하고 출발 및 주정차가 이루어지는 지역 근처의 도로먼지는 중금속 농축이 심화되어 있으며,^{74,75)} 도로나 자동차의 마모에 의해 배출된 도로먼지의 입자는 최대 50%까지 재비산이 가능하다.^{76,77)} 이러한 선행연구 결과들을 고려하면 연구지역 내, 특히 산업관련 상업지역(MCIA)의 도로먼지는 도로 이용자의 건강에 유해한 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다.

도로먼지를 제거하기 위한 가장 효율적인 방법으로 흡입식 진공청소차를 이용하고 있으며, 안산시는 포장도로 뿐만 아니라 보도에도 운영가능한 소형 청소차 도입 등 여러가지 저감대책을 실시하고 있다. 또한 이전의 연구에서 도로청소의 주요 목적이 비산먼지를 줄여 미세먼지로부터 시민의 건강을 보호하는 것이라면 교통량 뿐만 아니라 유동인구, 토지이용 특성, 주거밀도 등을 고려해 도로의 등급을 매기고 도로청소 빈도를 차등 적용할 필요가 있다고 제안한 바 있다.⁷⁸⁾ 도시지역의 도로먼지는 강우유출수의 주요 오염원이며, 강우 시 노면에 쌓여 있는 도로먼지는 강우유출수를 통해 주변 하천 및 해양환경으로 처리과정없이 직접 유출되어 중금속 오염을 유발시킬 수 있다.⁷⁹⁾ 따라서 미국 유럽 등 선진국과, 국내에서 강우시 도로 및 도시 노면으로부터의 비점오염물질 유출 저감방안(저영향개발, Low Impact Development, LID)에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 다양한 관련 기술도 개발되고 있다.⁸⁰⁻⁸²⁾ 그러나 아직 N, P, TSS의 관점에서 접근하고 있으며, 중금속 분야에서는 이에 관한 연구가 많이 이루어지고 있지 않다.⁸³⁾ 다양한 산업의 발전과 고도화로 인해 인위적으로 환경으로 유출되는 금속의 종류가 다양해지고 인위적 농축이 심화되고 있으므로, 도로먼지

Table 4. Mass of heavy metals per unit area (mg/m²) in urban road dust in this study

Region	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg	Total
RA	5.7	1.5	4.8	26.6	0.6	0.038	5.8	0.002	45.0
TA	21.2	7.6	16.0	72.4	1.7	0.103	23.5	0.002	142.5
PA	7.3	2.3	4.0	22.6	0.7	0.032	6.7	0.001	43.6
CA	17.0	6.5	22.9	45.4	0.5	0.060	9.7	0.005	102.1
MCIA	332	135	237	286	2.4	0.358	61.7	0.011	1054

에서의 이러한 물질들의 분포 현황과 인체 및 수생태계에 미치는 독성 및 위해성 평가 등 연구가 필요한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 도시의 다양한 토지이용 특성에 따른 도로먼지의 중금속 분포 특성을 파악 및 오염원을 추적할 수행하였다. 거주, 교통, 주차장, 일반상업, 산업관련상업지역의 도로먼지 내 중금속 농도는 공통적으로 대표적인 교통활동 관련 중금속인 Zn, Cu, Pb이 가장 높은 것으로 나타났으며, EF 계산 결과 Zn, Pb, Cd의 인위적 농축이 가장 높은 것으로 나타났다. PLI를 이용한 오염평가를 이용하여 토지이용 특성에 따른 차이를 비교한 결과, 도로먼지의 중금속 오염은 산업관련 상업>일반상업>교통>주차장>거주 순으로 나타났다. 모든 중금속의 농도는 산업관련 상업지역에서 가장 높게 나타났으며, Cr, Cu, Zn, Cd, Pb의 EF값이 40이상으로 심각한 농축수준(extremely high enrichment)으로 평가되었다. 이 결과는 산업관련 상업지역의 도로먼지가 교통활동 이외에도 인근 산업과 관련된 금속재료의 운반, 가공 등의 영향을 받는 것을 나타낸다. 연구지역의 평균 도로먼지의 축적량과 안산시와 시흥시의 도로연장 길이를 고려하면 도로먼지로 인해 환경으로 유입될 수 있는 중금속의 양이 매우 많을 것으로 판단된다. 연구지역 도로먼지 전체 입자 중 PM₁₀과 PM_{2.5}의 입자의 비율은 각각 평균 5.1 g/m²과 1.4 g/m²이었다. 고농도의 중금속을 포함한 미세한 도로먼지 입자의 인체노출은 잠재적 건강위험을 발생시킬 가능성이 있다. 그러므로 도로먼지의 환경유입으로 인한 인체 및 환경 위해성 평가와 관련된 후속 연구가 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국해양과학기술원 연구비 지원(PE99812)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. B. J. Alloway, "Heavy metals in Soil", B. J. Alloway (Ed.), Heavy metals in Soil, Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability, **2013**, Springer, Dordrecht, pp, 11-50.

2. X. Li, C. S. Poon, and P. S. Liu, "Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong", *Applied Geochemistry*, **2001**, 16, 1361-1368.
3. D. G. Svensson and P. A. Malmqvist, "Vad innehåller dagvattnet?", *VAV-NYTT* 4/95. **1995**, 14-15.
4. G. Li, G. X. Sun, Y. Ren, X. S. Luo, and Y. G. Zhu, "Urban soil and human health: a review", *European Journal of Soil Science*, **2018**, 69, 196-215.
5. J. Y. Kim and J. J. Sansalone, "Event-based size distributions of particulate matter transported during urban rainfall events", *Water Research*, **2008**, 42, 2756-2768.
6. M. B. Yunker, R. W. Macdonald, R. Vingarzan, R. H. Mitchell, D. Goyette, and S. Sylvestre, "PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition", *Organic Geochemistry*, **2002**, 33, 489-515.
7. S. Kong, B. Lu, Y. Ji, X. Zhao, L. Chen, Z. Li, B. Han, and Z. Bai, "Levels, risk assessment and sources of PM10 fraction heavy metals in four types dust from a coal-based city", *Microchemical Journal*, **2011**, 98, 280-290.
8. B. Wei and L. Yang, "A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China", *Microchemical Journal*, **2010**, 94, 99-107.
9. P. B. Tchounwou, C. G. Yedjou, A. K. Patlolla, and D. J. Sutton, "Heavy metals toxicity and the environment", *National Institute of Health*, **2012**, 101, 133-164.
10. M. Jartun, R. T. Ottesen, E. Steinnes, and T. Volden, "Runoff of particle bound pollutants from urban impervious surfaces studied by analysis of sediments from stormwater traps", *Science of the Total Environment*, **2008**, 396, 147-163.
11. E. Apeyeyi, M. S. Bank, and J. D. Spengler, "Distribution of heavy metals in road dust along an urban-rural gradient in Massachusetts", *Atmospheric Environment*, **2011**, 45, 2310-2323.
12. E. B. Cullbard, I. Thornton, J. Watt, M. Wheatley, S. Moorcroft, and M. Thompson, "Metal contamination in British urban dusts and soils", *Journal of Environmental Quality*, **1988**, 17, 226-234.
13. S. Leharne, D. Charlesworth, and B. Chowdhry, "A survey of metal levels in street dusts in an inner London neighbourhood", *Environmental International*, **1992**, 18, 263-270.
14. J. W. C. Wong, and N. K. Mak, "Heavy metal pollution in children playgrounds in Hong KONG and its health implications", *Environmental Technology*, **1997**, 18, 109-115.
15. T. B. Chen, J. W. C. Wong, H. Y. Zhou, and M. H. Wong,

- “Assessment of trace metal distribution and contamination in surface soils of Hong Kong”, *Environmental Pollution*, **1997**, 96, 61-68.
16. A. Aguilera, C. Armendariz, P. Quintana, F. Garcia-Oliva, and F. Bautista, “Influence of land use and road type on the elemental composition of urban dust in a Mexican Metropolitan Area”, *Polish Journal of Environmental Studies*, **2019**, 28, 1535-1547.
 17. S. P. Raj, K. Neena, K. S. B. Singh, S. R. Kaji, W. K. Kumari, and S. Mahesh, “Determination of heavy metals in street dust from different types of land use of Kathmandu valley, Nepal”, *Research Journal of Chemical Sciences*, **2014**, 4, 82-92.
 18. J. M. Trujillo-Gonzalez, M. A. Torres-Mora, S. Keesstra, E. C. Brevik, and R. Jimenez-Ballestra, “Heavy metal accumulation related to population density in road dust samples taken from urban sites under different land uses”, *Science of the Total Environment*, **2016**, 553, 636-642.
 19. C. S. Claiborn, T. Larson, and L. Sheppard, “Testing the metal hypothesis in Spokane, Washington”, *Environmental Health Perspectives*, **2002**, 110, 547-552.
 20. J. M. Hirshon, M. Shardell, S. Alles, J. L. Powell, K. Squibb, J. Ondov, and C. J. Blaisdell, “Elevated ambient air zinc increases pediatric asthma morbidity”, *Environmental Health Perspectives*, **2008**, 116, 826-831.
 21. S. Lin, J. P. Munsie, S. A. Hwang, E. Fitzgerald, and M. R. Cayo, “Childhood asthma hospitalization and residential exposure to state route traffic”, *Environmental Research*, **2002**, 88, 73-81.
 22. F. C. Tsai, M. G. Apte, and J. M. Daisey, “An exploratory analysis of the relationship between mortality and the chemical composition of airborne particulate matter”, *Inhalation Toxicology*, **2000**, 12, 121-135.
 23. A. H. Sinclair and D. D. Tolsma, “Associations and lags between air pollution and acute respiratory visits in an ambulatory care setting: 25-month results from the aerosol research and inhalation epidemiological study”, *Journal of the Air and Waste Management Association*, **2004**, 54, 1212-1218.
 24. B. Bian, C. Lin, and H. Wu, “Contamination and risk assessment of metals in road-deposited sediments in a medium-sized city of China”, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **2015**, 112, 87-95.
 25. 국가통계포털, www.kosis.kr Accessed in June. **2020**.
 26. 정혜령, 이지현, 김경태, 김은수, 나공태, “자성을 이용한 시화호 유역 산업단지 도로먼지 내 중금속 오염원 추적”, *한국해양환경에너지학회지*, **2019**, 22, 18-33.
 27. 이지현, 정혜령, 최진영, 나공태, “시화산업단지 강우유출수 내 중금속 오염도 평가 및 오염원 추적 연구”, *생태와 환경*, **2020**, 53, 91-101.
 28. C. Gunawardana, A. Goonetilleke, and P. Egodawatta, “Adsorption of heavy metals by road deposited solids”, *Water Science and Technology*, **2013**, 67, 2622-2629.
 29. N. Hong, P. Zhu, A. Liu, X. Zhao, and Y. Guan, “Using an innovative flag element ratio approach to tracking potential sources of heavy metals on urban road surfaces”, *Environmental Pollution*, **2018**, 243, 410-417.
 30. 이지현, 정혜령, 나공태, 최진영, “시화산업단지 도로측 적퇴적물의 입도분포 및 중금속 오염영향 평가”, *환경영향평가*, **2020**, 29, 8-25.
 31. P. Mahbub, A. Goonetilleke, G. A. Ayoko, P. Egodawatta, and T. Yigitcanlar, “Analysis of build-up of heavy metals and volatile organics on urban roads in gold coast, Australia”, *Water Science and Technology*, **2011**, 63, 2077-2085.
 32. S. R. Taylor, “Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table”, *Geochimica Cosmochimica Acta*, **1964**, 28, 1273-1285.
 33. R. I. Rudnick and S. Gao, “Composition of the continental crust, In: R. L. Rudnick editor. The crust”, Elsevier, **2003**, pp. 1-64.
 34. D. Tomlinson, J. Wilson, C. Harris, and D. Jeffrey, “Problems in the assessment of heavy metal levels in estuaries and the formation of a pollution index”, *Helgoländer Meeresun*, **1980**, 33, 566-575.
 35. Z. Zhu, J. Xue, Y. Deng, L. Chen, and J. Liu, “Trace metal contamination in surface sediments of intertidal zone from Qinhuangdao, China, revealed by geochemical and magnetic approaches: Distribution, sources, and health risk assessment”, *Marine Pollution Bulletin*, **2016**, 105, 422-429.
 36. B. Bian and W. Zhu, “Particle size distribution and pollutants in road-deposited sediments in different areas of Zhenjiang, China”, *Environmental Geochemistry and Health*, **2009**, 31, 511-520.
 37. H. Khademi, M. Gabarron, A. Abbaspour, S. Martinez-Martinez, A. Faz, and J.A. Acosta, “Environmental impact assessment of industrial activities on heavy metals distribution in street dust and soil”, *Chemosphere*, **2019**, 217, 695-705.
 38. H. Li, A. Shi, and X. Zhang, “Particle size distribution and characteristics of heavy metals in road-deposited sediments from Beijing Olympic Park”, *Journal of Environmental Sciences*, **2015**, 32, 228-237.
 39. H. Zhao, X. Li, X. Wang, and D. Tian, “Grain size distribution of road-deposited sediment and its contribution to heavy metal pollution in urban runoff in Beijing”, *Journal of Hazardous Material*, **2010**, 183, 203-210.
 40. H. Zhao, X. Y. Li, and X. M. Wang, “Heavy metal con-

- tents of road-deposited sediment along the urban-rural gradient around Beijing and its potential contribution to runoff pollution”, *Environmental Science and Technology*, **2011**, 45, 7120-7127.
41. C. Zafra-Mejia, A. Gutierrez-Malaxechebarria, and Y. Hernandez-Pena, “Correlation between vehicular traffic and heavy metal concentrations in road sediments of Bogota, Colombia”, *Revista de la Facultad de Medicina*, **2018**, 67, 193-199.
 42. M. S. Ermolin, P. S. Fedotov, A. I. Ivaneev, V. K. Karandashev, N. N. Fedyunia, and A. A. Burmistrov, “A contribution of nanoscale particles of road-deposited sediments to the pollution of urban runoff by heavy metals”, *Chemosphere*, **2018**, 210, 65-75.
 43. Y. Han, P. Du, J. Cao, and E. S. Posmentier, “Multivariate analysis of heavy metal contamination in urban dusts of Xi’an, Central China”, *Science of the Total Environment*, **2006**, 355, 176-186.
 44. X. Han, X. Lu, Q. Zhang, Wuyuntana, Q. Hai, and H. Pan, “Grain-size distribution and contamination characteristics of heavy metal in street dust of Baotou, China”, *Environmental Earth Science*, **2016**, 75, 1-10.
 45. F. Amato, X. Querol, C. Johansson, C. Nagl, and A. Alastuey, “A review on the effectiveness of street sweeping, washing and dust suppressants as urban PM control methods”, *Science of the Total Environment*, **2010**, 40, 3070-3084.
 46. P. V. Surayawanshi, B. S. Rajaram, A. D. Bhanakar, and C. V. Charapatirao, “Determining heavy metal contamination of road dust in Delhi, India”, *Atmosfera*, **2016**, 29, 221-234.
 47. D. Herath, A. Pitawala, and J. Gunatilake, “Heavy metals in road deposited sediments and road dusts of Colombo Capital, Sri Lanka”, *Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka*, **2016**, 44, 193-202.
 48. J. Yang, Y. Teng, L. Song, and R. Zuo, “Tracing sources and contamination assessments of heavy metals in road and foliar dusts in a typical mining city, China”, *PLOS One*, **2016**, 11, e0168528.
 49. C. Gunawardana, A. Goonetilleke, P. Egodawatta, L. Dawes, and S. Kokot, “Source characterisation of road dust based on chemical and mineralogical composition”, *Chemosphere*, **2012**, 87, 163-170.
 50. I. S. Shabanda, I. B. Koki, K. H. Low, S. M. Zain, S. M. Khor, and N. K. A. Bakar, “Daily exposure to toxic metals through urban road dust from industrial, commercial, heavy traffic and residential areas in Petaling Jaya, Malaysia: a health risk assessment”, *Environmental Science and Pollution Research*, **2019**, 26, 37193-37211.
 51. T. Srithawirat and M. T. Latif, “Concentration of selected heavy metals in the surface dust of residential building in Phitsanulok, Thailand”, *Environmental Earth Science*, **2015**, 74, 2701-2706.
 52. T. T. Duong and B. K. Lee, “Determining contamination level of heavy metals in road dust from busy traffic areas with different characteristics”, *Journal of Environmental Management*, **2011**, 92, 554-562.
 53. I. I. Shabbaj, M. A. Alghmd, M. Shamy, S. K. Hassan, M. M. Alsharif, and M. I. Khoder, “Risk assessment and implication of human exposure to road dust heavy metals in Jeddah, Saudi Arabia”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **2018**, 15, 36-57.
 54. F. Taspinar and Z. Bozkurt, “Heavy metal pollution and health risk assessment of road dust on selected highways in Duzce, Turkey”, *Environmental Forensics*, **2018**, 19, 298-314.
 55. K. Cai and C. Li, “Street dust heavy metal pollution source apportionment and sustainable management in a typical city-Shijiazhuang, China”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **2019**, 16, 2625-2639.
 56. X. Qiao, A. H. Schmidt, Y. Tand, Y. Xu, and C. Zhang, “Demonstrating urban pollution using toxic metals of road dust and roadside soil in Chengdu, southwestern China”, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, **2013**, 28, 911-919.
 57. I. I. Shabbaj, M. A. Alghamdi, M. Shrmay, S. K. Hassan, M. M. Alsharif, and M. I. Khoder, “Risk assessment and implication of human exposure to road dust heavy metals in Jeddah, Saudi Arabia”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **2018**, 15, 36-57.
 58. A. Razanica, J. Huremovic, S. Zero, S. Gojak-Salimovic, and M. Memic, “Heavy metals in street dust in Sarajevo area, Bosnia and Herzegovina”, *Current World Environment*, **2014**, 9, 43-47.
 59. 강병욱, 김민지, 백경민, 서영교, 이학성, 김중호, 한진석, 백성욱, “국내 주요 산업단지 대기 중 중금속농도 분포에 관한 연구”, *한국대기환경학회지*, **2018**, 31, 269-280.
 60. H. M. Hwang, M. J. Fiala, D. Park, and T. L. Wade, “Review of pollutants in urban road dust and stormwater runoff: part 1. Heavy metals released from vehicles”, *International Journal of Urban Sciences*, **2016**, 20, 334-360.
 61. J. P. Day, M. Hart, and M. Robinson, “Lead in urban street dust”, *Nature*, **1975**, 253, 343-345.
 62. J. E. Fergusson, R. W. Hayes, T. S. Young, and S. H. Thief, “Heavy metal pollution by traffic in Christchurch, New Zealand, lead and cadmium content of dust, soil

- and plant samples”, *New Zealand Journal of Science and Technology*, **1980**, 23, 293-310.
63. H. Arslan, and A. M. Gizir, “Heavy metal content of road side soil in Mersin, Turkey”, *Fresenius Environmental Bulletin*, **2006**, 15, 15-20.
 64. K. Adachi and T. Yoshiaki, “Characterization of heavy metal particle embedded in tire dust”, *Environmental International*, **2004**, 30, 1009-1017.
 65. S. P. Raj and P. A. Ram, “Determination and contamination assessment of Pb, Cd, and Hg in roadside dust along Kathmandu-Bhaktapur road section of Arniko Highway, Nepal”, *Research Journal of Chemical Sciences*, **2013**, 3, 18-25.
 66. J. Caravanos, A. L. Weiss, M. J. Blaise, and R. J. Jaeger, “A survey of spatially distributed exterior dust lead loadings in New York City”, *Environmental Research*, **2006**, 100, 165-172.
 67. P. Smichowski, D. R. Gomez, C. Frazzoli, and S. Caroli, “Traffic-related elements in airborne particulated matter”, *Applied Spectroscopy Reviews*, **2008**, 43, 23-49.
 68. H. Ghrefat and N. Yusuf, “Assessing Mn, Fe, Cu, Zn and Cd pollution in bottom sediments of Wadi Al-Arab Dam, Jordan”, *Chemosphere*, **2006**, 65, 2144-2121.
 69. C. A. Alves, M. Evtugina, A. M. P. Vicente, E. D. Vicente, T. V. Nunes, P. M. A. Silva, M. A. C. Duarte, C. A. Pio, F. Amato, and X. Querol, “Chemical profiling of PM10 from urban road dust”, *Science of the Total Environment*, **2018**, 634, 41-51.
 70. S. Han, J. S. Youn, and Y. W. Jung, “Characterization of PM10 and PM2.5 source profiles for resuspended road dust collected using mobile sampling methodology”, *Atmospheric Environment*, **2011**, 45, 3343-3351.
 71. 유은철, 도우곤, 조정구, “도로 중 미세먼지 재비산 억제를 위한 기초연구”, *보건환경연구보*, **2009**, 19, 177-186.
 72. 정용원, 한세현, 원경호, 장기원, 홍지형, “포장도로 재비산먼지 배출량산정법의 현황”, *대한환경공학회지*, **2006**, 28, 1126-1132.
 73. E. Adamiec and E. Jarosz-Krzeminska, “Human Health Risk Assessment associated with contaminants in the finest fraction of sidewalk dust collected in proximity to trafficked roads”, *Scientific Reports*, **2019**, 9, 16364.
 74. E. Adamiec, “Road Environments: Impact of Metals on Human Health in Heavily Congested Cities of Poland”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **2017**, 14, 697.
 75. C. Ewen, M. A. Anagnostopoulou, and N.L. Ward, “Monitoring of heavy metal levels in roadside dusts of Thessaloniki, Greece in relation to motor vehicle traffic density and flow”, *Environmental Monitoring Assessment*, **2009**, 157, 483-498.
 76. N. Bukowiecki, R. Gehrig, P. Lienemann, M. Hill, R. Figi, B. Buchmann, M. Furger, A. Richard, C. Mohr, S. Weimer, A. Prevot, and U. Baltensperger, “PM10 emission factors of abrasion particles from road traffic (APART). Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)”, **2009**.
 77. E. Adamiec, “Chemical fractionation and mobility of traffic related elements in road environments”, *Environmental Geochemistry and Health*, **2017**, 188, 1-11.
 78. 최유진, 김영은, “미세먼지 저감 위한 도로청소 개선방안”, 서울연구원 정책과제연구보고서, **2018**, 1-135.
 79. W. Zhu, B. Bian, and B. L. Li, “Heavy metal contamination of road-deposited sediments in a medium size city of China”, *Environmental Monitoring and Assessment*, **2008**, 147, 171-181.
 80. L. H. Kim, “Low impact development (LID) technology for the 21st century eco-friendly construction”, *Magazine of Korea Water Resources Association*, **2008**, 41, 47-57.
 81. 문소연, 홍정선, 최지연, 유기경, 김이형, “비점오염 저감 시설에 적용되는 여재의 흡착 및 탈착 능력 평가”, *한국습지학회*, **2015**, 17, 228-236.
 82. 환경부, “제2차 비점오염관리 종합대책”, **2012**.
 83. K. Eckart, Z. Mcphee, and T. Bolisetti, “Performance and implementation of low impact development - A review”, *Science of the Total Environment*, **2017**, 607-608, 413-432.