

## 서울시 간선도로변 토양의 중금속 분포 특성

폐기물토양팀

서광석 · 김장열 · 하광태 · 최낙경 · 정혜령 · 김길식 · 한규문 · 이민환 · 채영주

# Distribution Characteristics of Heavy Metals in the Soil of Roadside in Seoul

*Waste & Soil Analysis Team*

**Kwang-suk Seo, Jang-youl Kim, Kwang-tae Ha, Nak-gyong Choi,  
Hye-ryeong Jung, Gil-sik Kim, Kyu-mun Han,  
Min-hwan Lee and Young-zoo Chae**

### Abstract

Roadside soils and sediments have been contaminated with various heavy metals, which are generated from car emissions, tire friction and fraying brake pads. It is expected that increasing traffic is correlated with the amount of heavy metals accumulated in the soils. Therefore, this study was conducted to investigate the distribution characteristics of heavy metals accumulated in the soils and sediments, along the highways in Seoul. Specifically, roadside soils and sediments that are along the Gyeongbu, Olympic, Dongbu and Seobu highways were investigated. Roadside soils were collected, at three points, in both directions, along each of the highway, and the sediments were collected at one point in each highway. The samples collected along the roadsides were separated by depth (upperlayer, interlayer and deeplayer), after which, the heavy metals were analyzed based on the leaching concentration and total contents. The degree of contamination, along each highway was assessed, using the pollution index (PI). The results were summarized as follows. The pH of roadside soils and sediments was slightly alkaline, while that of the background soil was  $6.3 \pm 0.47$ . The detection of As, Cd, and Hg were not possible, or were below the limit of detection by the leaching test. The concentrations of heavy metals by the leaching test on the Seobu highway were the highest. The total contents of heavy metals on the Olympic highway were the highest, but they did not exceed the standard of soil pollution (3rd region). The pollution index occurred in the following order: Olympic > Dongbu > Seobu > Gyeongbu. The concentrations of Cu and Zn, by the leaching test, tended to decrease with soil depth, while those of Pb, Cr, Ni, Fe and Al tended to increase. The total contents of the heavy metals except for Fe and Al were the highest in the upper layer, and tended to decrease as the soil depth increased.

**Key words** : highway, roadside soil, sediment, heavy metal, Pollution.Index(PI)

## 서 론

토양은 물 및 대기와 더불어 생명체의 주요 터전으로서 환경의 매우 중요한 요소이다. 토양오염의 피해는 물과 대기에 비해 즉각적으로 나타나지 않고 오랜 시간을 두고 지속적으로 나타나며, 일단 심하게 오염되어 자생기능을 상실하게 되면 회복이 불가능하고 엄청난 비용과 노력이 필요하게 된다(1). 이러한 토양오염의 원인이 되는 물질로는 유해 중금속류와 같은 무기오염물질과 농약, 비료, 유류 등으로부터 유발되는 유기오염물질로 분류할 수 있는데 이 중 유기오염물질이나 무기염류는 기후, 광선, 미생물 등 여러 요인에 의해 분해, 흡착, 용해되어 감소한다. 그러나 중금속류는 자연적인 용해나 분해가 어렵고 축적되어 장기간에 걸쳐 토양에 잔류하게 된다(2). 또한 토양은 물과 공기와는 달리 유동성이 적어 토양 내 중금속은 표토층에 집적되어 있다고 알려져 있다. 대부분의 토양 내 중금속오염에 대한 조사는 시료채취의 여건상 토양의 표토 부분에만 한정되어 있어 토양오염의 수직 단면적 추세를 파악하기 쉽지 않다(3).

자동차 등록대수의 지속적인 증가는 도로변 토양 및 퇴적물의 오염도를 증가시킬 것으로 예상된다. 도로변 토양은 배기가스 함유 입자, 연료유, 윤활유, 부동액, 밧데리 등에서 배출되는 각종 중금속류와 도로 포장면과 타이어의 마찰, 브레이크패드 마모 등에서 발생하는 오염물질 등 토양오염을 유발시키는 다양한 원인 물질에 노출되어 있으며, 건기 중 바람 등에 의해 주변 토양에 축적되거나 우기 중 빗물에 씻겨 배수로를 통해 수계 및 배수로 주변 퇴적물을 오염시킬 수 있다(4). 주요 중금속 항목 중 아연(Zn)오염의 주요 원인은 타이어 제작과정의 경화과정에서 사용되는 산화아연( $ZnO$ : 약 1.3% 첨가)이 미세하게 마모된 타이어 입자에 포함되어 있기 때문인 것으로 알려져 있다. 카드뮴(Cd)은 자연 상태에서 Zn과 함께 밀접하게 수반되고 있어 도로변에서 발생하는 Cd은 타이어에 함유된 Zn의 불순물이며, 구리(Cu)의 오염은 자동차 브레이크에 기인되지만 Cu 이외에 크롬(Cr), 니켈(Ni) 등도 포함되어 있다(5).

도로변 토양 및 퇴적물에 축적된 중금속은 일반

적으로 이동속도가 느리기 때문에 오염도가 증가될 우려가 있다(4). 중금속으로 인한 토양오염은 인간에게 직접적인 위해를 끼치지는 않지만, 토양생물의 증식에 직접적인 영향을 주거나 농작물 등 식물의 생육을 저해시키고, 오염된 농작물을 섭취하는 인간에게 위해를 끼치는 간접오염이라는 점과 한 번 오염된 토양은 자연적으로 제거가 어려워 점차 가중되는 특징이 있다(4, 6).

환경부에서는 토양오염으로 인한 국민건강 및 환경상의 위해를 예방하고 토양을 적정하게 관리, 보전하기 위해 토양환경보전법으로 유해 중금속 항목에 대한 법적 규제를 실시하고 있으며, 국토해양부와 합동으로 “환경친화적 도로유지관리 잠정지침”을 마련하여 종합적인 관리대책을 수립하고 있는 실정이다(4). 외국의 경우 도로변 토양의 중금속 오염에 대한 장기적인 조사가 이루어져 도로주변 토양의 중금속 오염 추이에 대한 연구가 이루어지고 있으나 국내에서는 주로 도로주변에 대한 단기적인 조사와 연구만이 이루어지고 있어 도로주변 토양의 중금속 축적에 대한 예측이 어려운 실정이다(4, 7, 8, 9).

본 연구는 인구나 교통량이 많은 서울시의 간선 도로를 중심으로 도로변 토양 및 도로퇴적물 등에 축적된 중금속 오염도의 분포 특성을 용출과 함량 분석을 통해 깊이별로 조사하고 비교·평가함으로써 도로변 토양오염에 대한 관리방안의 수립을 위한 기초자료로 사용하고자 한다.

## 연구 방법

본 연구는 교통량이 많은 서울시 주요 간선도로를 대상으로 도로변 토양 및 도로퇴적물의 중금속 농도 분포 특성을 조사하였다. 각 도로별 상하행선 3지점을 대상으로 도로변 토양을 깊이별(상층부, 중층부, 심층부)로 구분하여 중금속의 용출 및 함량분석을 실시하였다.

각 도로별 도로퇴적물을 병행하여 조사하였으며, 경부고속도로는 방음벽 화단의 토양을, 동부간선도로와 서부간선도로는 배수구가 설치된 도로변 토양을 추가하여 조사하였다. 토양 내 중금속의

용출과 함량을 분석하였고, 용출비율을 조사하였다. 또한 각 도로별 오염도를 오염지수(Pollution Index)를 이용하여 비교 평가하였고, 도로 교통량과 토양의 중금속 오염의 상관성을 조사하였다.

시료채취 지점은 경부고속도로의 경우 상하행선 각 3지점의 도로변 토양과 도로퇴적물 1지점 그리고 방음벽 화단 토양(지상 90 cm) 1지점이며, 올림픽도로는 동서행선 각 3지점의 도로변 토양과 도로퇴적물 1지점이다. 동부간선도로는 상하행선 각 3지점의 도로변 토양과 도로퇴적물 1지점 그리고 배수로(Dike)가 설치된 1지점의 토양이며, 서부간선도로는 상하행선 각 2지점과 도로퇴적물 1지점 그리고 배수로(Dike)가 설치된 2지점의 토양이다. 배경토는 우면산 1지점과 청계산 1지점의 토양을 채취하였다. 시료채취 지점은 그림 1과 같다.

시료는 2010년 가을철에 걸쳐 2회 채취하였다. 도로변 토양은 도로변에서 1 m 이내 지점을 깊이 별로 상층부(0~5 cm), 중층부(5~15 cm), 심층부

(15~30 cm)로 구분하여 1 kg 이상을 채취하였고, 도로퇴적물은 도로변에 쌓여 있는 퇴적토를 모종 삼으로 500 g 이상 채취하였다. 배수로(Dike)가 설치되어 있는 지점은 배수로에서 1 m 이내의 근접 토양을 도로변 토양과 같이 깊이별로 구분하여 채취하였고, 방음벽 화단은 상층부(0~5 cm) 토양을 채취하였다.

채취된 시료는 폴리에틸렌 봉투에 담아 채취날짜, 지점, 깊이 및 시료내역 등을 기재하고, 0~4 °C의 냉장상태로 보관하였다. 지점별 시료채취 사진을 그림 2에 나타냈다.

각각의 채취지점에서 채취한 토양시료는 범람체 또는 폴리에틸렌 바트(vat) 위에 균일한 두께로 하여 직사광선이 닿지 않는 장소에서 통풍이 잘 되도록 펼쳐 놓고 풍건시킨 다음, 나무망치 등으로 분쇄하여 분석대상 물질에 따라 수소이온농도는 눈금간격 2 mm의 표준체(10 메쉬), 중금속 전함량 분석대상 물질은 눈금간격 0.15 mm의 표준체



Fig. 1. Sampling sites of the roadside soils and sediments in Seoul.



**Fig. 2.** Soils and sediments sampling methods in roadside.

(100 메쉬)로 체걸음 한 시료를 각각 균등량(약 200 g)씩 취하여 사분법 등에 의해 균일하게 혼합하여 분석용 시료로 하였다. 체걸음 한 시료 3 g을 취하여 왕수(염산 : 질산=3 : 1)로 분해하고, 반응액을 Whatman No.40 또는 이와 동등한 여과지로 100 mL 부피플라스크에 여과한 후 0.5 M 질산으로 표선까지 채워 시료용액으로 사용하였다(11).

용출시험 전처리하는 시료 100 g 이상을 pH 5.8 ~ 6.3의 용매에 1 : 10 (W : V)의 비로 혼합한 후 상온, 상압에서 진탕회수가 매 분당 약 200회, 진폭이 4~5 cm의 진탕기를 사용하여 6시간 연속 진탕한 다음 1.0  $\mu$ m의 유리섬유 여과지로 여과하였다. 여과한 시료용액 45 mL를 취하고 질산 5 mL를 첨가한 다음 마이크로파(Microwave)에 의해 유기물을 분해한 후 시료용액으로 하였다(12).

토양 중 Hg을 제외한 중금속(Cd, Cu, As, Pb, Zn, Ni, Cr, Fe, Al)의 용출 및 함량분석은 각각 전처리한 시료용액을 유도결합플라즈마(Inductively Coupled Plasma)-원자발광분광법으로 하였으며, Hg은 가열기화아말감법, 그리고 pH는 유리전극법으로 분석하였다.

pH는 시료 5 g을 50 mL 비이커에 취하고 증류수 25 mL를 넣어 유리막대로 저어주면서 1시간 방치한 다음 pH meter(Orion 3-star, Thermo, US)로 측정하였고, Hg은 수은분석기(JP/SP-3D,

NIC, Japan), 중금속류는 ICP-AES(Spectrociros CCD, SPECTRO, Germany)를 사용하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 수소이온농도(pH)

도로변 토양과 퇴적물, 배수로 설치지점 토양, 그리고 방음벽 화단 토양의 pH는 표 1과 같이 모두 약알칼리성으로 나타났다. 환경부에서 실시한 2000년도 전국토양오염 측정망 오염도 조사결과에서 도로의 pH는 6.4로 나타났다고 하였다. 또한 이의상(2004)(8)은 고속도로변 퇴적물의 pH가 중성수준인 6.6~7.0 범위를 나타낸다고 하였으며, 이주광 등(2001)(6)은 고속도로변 토양의 pH가 6.6~7.1 범위를 나타낸다고 하여 본 연구결과와 다소 차이가 있었다. 그러나 손창인 등(2007)(10)은 목포지역 도로변 퇴적물의 pH가 7.3~8.3 범위로 약알칼리성을 나타낸다고 하였고, 최상민 등(2006)(5)은 서울 강남, 양재, 동대문 주변지역 도로변 우수관 퇴적물의 pH가 6.9~7.7 범위를 나타낸다고 하여 본 연구와 유사한 결과를 보였다. 배경토의 pH는  $6.3 \pm 0.47$ 로 나타났으며, 이주광 등(2001)(6)은  $5.7 \pm 0.58$ 로 보고하였다.

## 2. 간선도로변 토양 및 퇴적물의 용출분석

간선도로변 토양의 중금속 용출시험 결과는 표 2와 같다. 서부간선도로는 Ni을 제외한 전 항목에서 용출농도가 가장 높았으며, As, Cd, Hg는 모든 지점에서 불검출이거나 검출한계 이하로 나타나 표 2에는 나타내지 않았다.

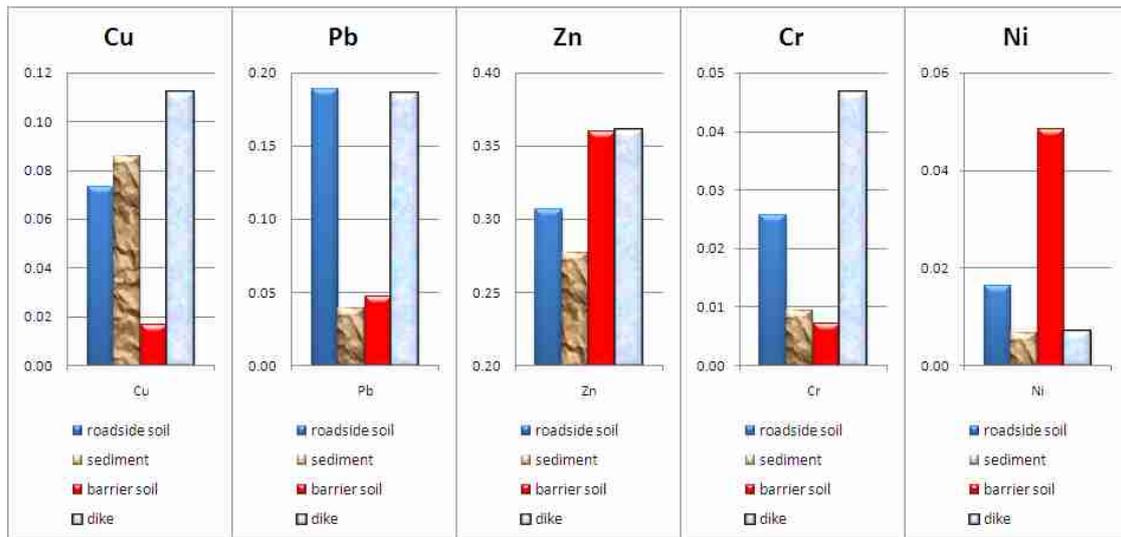
간선도로의 시료채취 지점 형태별 용출시험 결과는 그림 3에서 보는 바와 같이 Cu는 배수로 설치지점 토양(이하 Dike) > 도로퇴적물(이하 퇴적물) > 도로변 토양(이하 도로토양) > 방음벽 화단 토양(이하 방음벽) 순으로 높게 나타났으며, Pb는 도로토양 > Dike > 방음벽 > 퇴적물 순으로 나타났다. Zn은 Dike > 방음벽 > 도로토양 > 퇴적물

**Table 1.** The pH values of the roadside soils and sediments

	Gyeongbu	Olympic	Dongbu	Seobu	Mean
roadside soils	7.75 ± 0.23	7.75 ± 0.27	7.43 ± 0.28	7.35 ± 0.27	7.59 ± 0.31
sediments	7.84 ± 0.05	7.81 ± 0.49	7.69 ± 0.06	7.78 ± 0.37	7.78 ± 0.24
dike point soils	-	-	7.58 ± 0.15	7.47 ± 0.18	7.53 ± 0.18
barrier soil	7.69 ± 0.23	-	-	-	7.69 ± 0.23

**Table 2.** The concentration of heavy metals in roadside soils by leaching test

	Concentration [mg/L]						
	Cu	Pb	Zn	Fe	Al	Cr	Ni
Gyeongbu	0.025	0.186	0.226	17.928	16.546	0.020	0.057
Olympic	0.044	0.143	0.291	13.467	13.689	0.015	0.031
Dongbu	0.082	0.139	0.351	16.013	25.709	0.032	0.028
Seobu	0.143	0.288	0.359	25.070	26.608	0.037	0.014
Back-ground	0.044	0.033	0.110	0	0.133	0.002	0.029



**Fig. 3.** The results of heavy metals in roadside soils and sediments by leaching test.

순으로 나타났고, Cr은 Dike > 도로토양 > 퇴적물 > 방음벽 순으로, 그리고 Ni은 방음벽 > 도로토양 > Dike > 퇴적물 순으로 조사되었다. Fe과 Al은 Dike > 도로토양 > 방음벽 순으로 나타났으며, 퇴적물에서는 용출이 거의 없었다. Cu를 제외한 대부분의 항목에서 도로 퇴적물의 용출이 다른 지점 형태의 토양에 비해 낮게 나타났다.

### 3. 간선도로변 토양 및 퇴적물의 함량분석

간선도로변 토양 및 퇴적물의 차량통행에 따른 중금속 오염분포를 조사하기 위해 배경토의 중금속 함량을 조사하였다. 표 3에 배경토의 중금속 함량 분석 결과와 Bowen(13)이 지금까지 다수의 자료에서 조사하였던 토양 중에 존재하는 원소의

조성과 평균농도 및 그 농도범위를 함께 나타내었다. 배경토 중 Cd을 제외한 다른 중금속의 농도는 Bowen의 농도범위에 포함되어 있어 배경토로서 적합하다고 판단되었다.

간선도로변 토양의 중금속 함량시험 결과는 표 4와 같다. 차량통행에 따른 주된 중금속 오염원인 Cu, Pb, Cd, Zn, Cr, Ni의 경우 올림픽도로가 가장 높았으나, 토양오염우려기준(3지역 : 도로용지)(14)을 초과하지는 않는 것으로 나타났다.

간선도로의 시료채취 지점 형태별 함량시험 결과는 그림 4에서 보는 바와 같이 Cu는 퇴적물 > 도로토양 > Dike > 방음벽 순으로 높게 나타났으며, Pb은 퇴적물 > 도로토양 > Dike > 방음벽 순으로 나타났다. Zn은 퇴적물 > 방음벽 > 도로토양

**Table 3.** The concentrations of heavy metals in background soil

	Cu	Pb	As	Cd	Zn
Background soil	21.15 (18.25 ~ 24.05)	21.33 (19.79 ~ 22.87)	18.99 (8.55 ~ 29.43)	1.07 (0.63 ~ 1.50)	82.49 (80.04 ~ 84.93)
Bowen	20 (2 ~ 100)	10 (2 ~ 200)	6 (0.1 ~ 40)	0.06 (0.01 ~ 0.7)	50 (10 ~ 300)
	Fe	Al	Cr	Hg	Ni
Background soil	41972 (41833 ~ 42111)	31777 (29255 ~ 34299)	52.62 (51.17 ~ 54.07)	0.03 (0.029 ~ 0.03)	26.27 (26.17 ~ 26.37)
Bowen	38000 (7000 ~ 55000)	71000 (10000 ~ 300000)	100 (5 ~ 3000)	0.03 (0.01 ~ 3)	40 (10 ~ 1000)

**Table 4.** The concentration and standard of heavy metals in roadside soils

road	S t d.	Concentration [mg/kg]									
		Cu	Pb	As	Cd	Zn	Fe	Al	Cr	Hg	Ni
		2000	700	200	60	2000	-	-	40*	20	500
Gyeongbu		91.61	70.50	7.66	1.179	383.60	33655	16585	54.11	0.050	27.23
Olympic		189.53	85.02	6.50	1.493	984.54	31349	8833	84.91	0.054	32.80
Dongbu		86.68	35.84	6.24	1.047	890.72	42805	19826	71.96	0.054	27.46
Seobu		89.18	61.73	7.92	0.971	278.81	28940	15164	70.67	0.081	25.12

\* Cr의 토양오염우려기준은 6가 크롬으로의 기준임

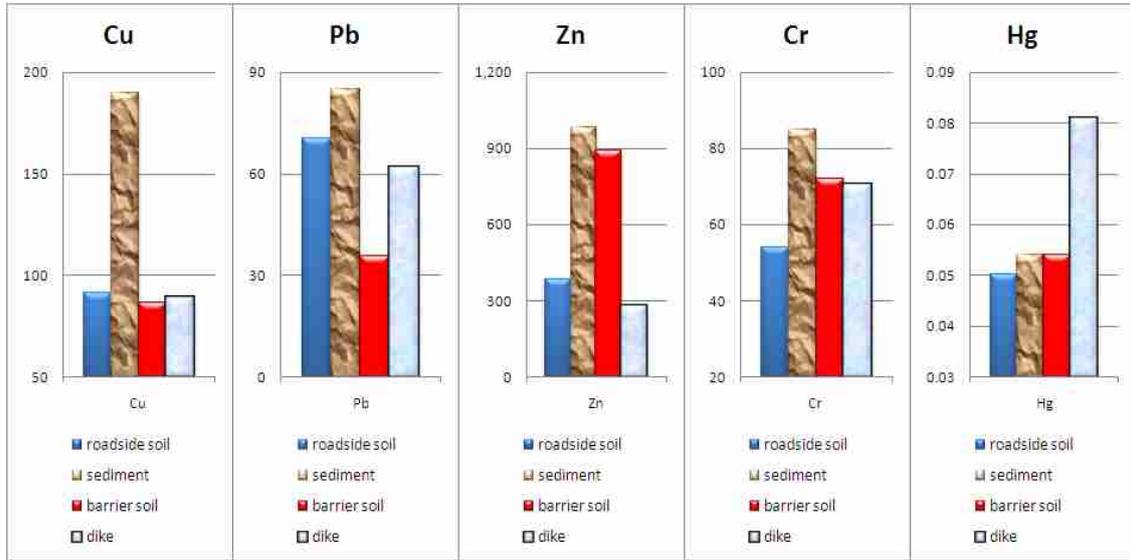


Fig. 4. The concentrations of heavy metals in roadside soils and sediments.

〉 Dike 순으로 나타났고, Cr은 퇴적물 〉 방음벽 〉 Dike 〉 도로토양 순으로, 그리고 Hg은 Dike 〉 퇴적물 〉 방음벽 〉 도로토양 순으로 조사되었다. Ni은 배경토와 유사한 함량을 보였고, Fe과 Al은 대부분 배경토 보다 낮은 농도를 나타내었다.

Fe과 Al의 함량이 배경토 보다 낮다는 것은 Fe과 Al이 차량통행에 따른 중금속 오염의 원인물질이 되지 못한다는 점을 보여준다고 사료된다.

#### 4. 간선도로변 토양 및 퇴적물의 용출비율

모든 지점에서 불검출이거나 검출한계 이하로 나타난 As, Cd, Hg를 제외한 다른 중금속들의 용출비율은 그림 5와 같이 도로변 토양이 도로퇴적물에 비해 높게 나타났다. 각 도로변 토양 대표지점의 시료에 대한 입도분석 결과를 표 5에 나타내었는데 pH가 비슷한 환경에서 도로변 토양이 퇴적물에 비해 용출비율이 높은 이유는 입도차이가

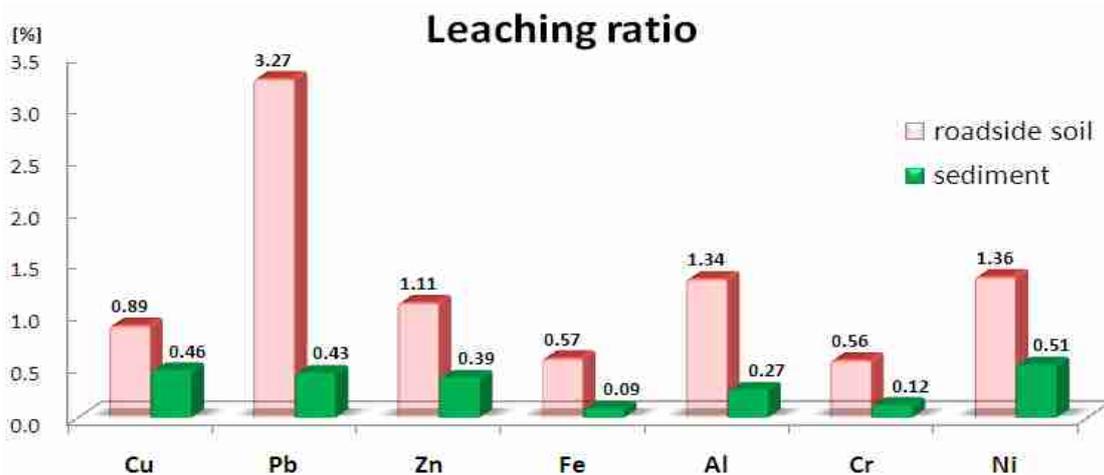


Fig. 5. The rates of Leaching with heavy metals in roadside soils and sediments.

**Table 5.** The weight percentage with particle size distribution of roadside soils

Road	Sign	Sand(%)	Silt(%)	Clay(%)	Soil Texture
Gyeongbu	up-1	78.97	9.59	11.44	sandy loam
	down-1	69.00	17.50	13.50	sandy loam
	sediment	86.87	3.09	10.04	loamy sand
Olympic	east-1	80.34	7.82	11.84	sandy loam
	west-1	83.03	5.42	11.55	loamy sand
	sediment	79.51	8.89	11.60	sandy loam
Dongbu	up-1	71.56	14.76	13.68	sandy loam
	down-1	78.99	10.4	10.61	sandy loam
	sediment	81.81	6.79	10.61	loamy sand
Seobu	up-2	70.90	21.08	8.02	sandy loam
	down-2	61.26	24.81	13.93	sandy loam

원인이라고 판단된다. 조미영(1999)(15)은 토양 입자의 크기가 작은 점토질 일수록 중금속의 흡착은 증가하는 경향을 보인다고 하였다. 또한 각 도로변 토양의 입경이 75  $\mu\text{m}$  이하인 미사(silt)와 점토(clay)를 합한 비율과 중금속의 용출비율 간의 상관계수를 분석해 보면 각각 Cu(0.54), Pb(0.61), Zn(0.74), Fe(0.76), Al(0.56), Cr(0.48), Ni(-0.46)로 Ni를 제외한 중금속들은 양의 상관관계를 갖고 있음을 보였다.

### 5. 오염지수(PI)

토양오염에 관련된 환경인자들은 오염정도를 평가하기가 매우 어렵고, 심지어는 전문가들도 토양오염인자를 동시에 나열하였을 때 오염의 정도를 제대로 평가하기 곤란한 경우가 있다. 특히 토양오염 인자별로 경시적인 자료의 변화가 상이하고 동일한 항목에 대한 토양환경기준도 여러 개 존재하여서, 토양오염 상태가 기준치를 초과한 것인지, 오염이 개선되는지 또는 심화되는지를 단순하게

평가하기에는 어려움이 있다. 따라서 토양오염 기준치를 기초로 하여 기존의 환경질에 대한 오염점수를 산정하고 평가함으로써, 여러 토양오염 인자들에 의한 기존의 오염도를 오염지수(Pollution Index)라는 하나의 통합된 수치로 제시하였다(16).

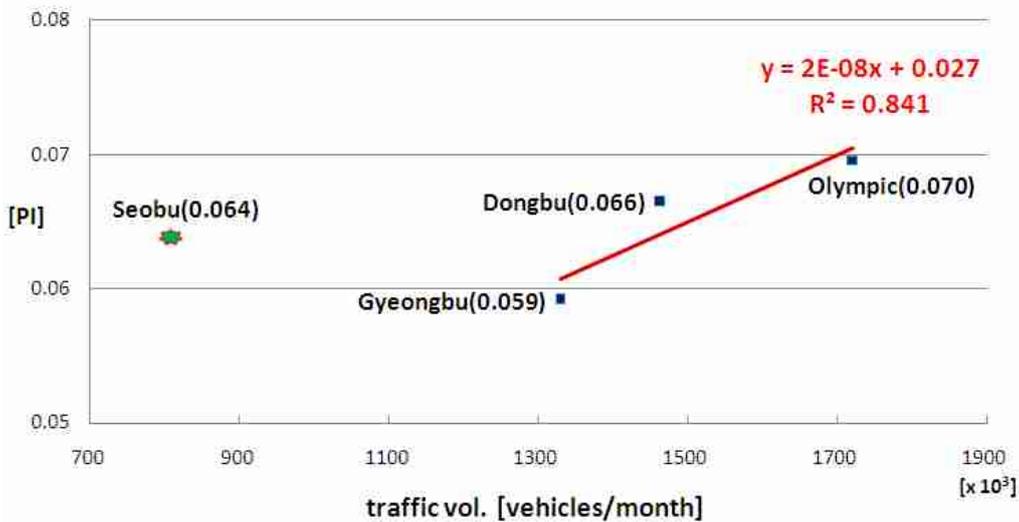
간선도로변 토양에 함유된 유해 중금속 성분의 오염정도를 평가하기 위해 토양오염우려기준(3지역 : 도로용지)을 적용한 오염지수를 아래와 같은 식(17)으로 계산하였으며, 그 결과는 그림 6과 같다.

위 식으로부터 계산된 오염지수가 1.0 이하인 값을 나타내면 중금속으로부터 오염되지 않은 지역으로, 그리고 1.0 초과인 값을 나타내면 중금속으로부터 오염된 지역으로 간주하였다(17).

간선도로변 토양의 오염지수는 모두 1.0에 크게 못 미치는 것으로 나타나 중금속 오염도는 매우 적은 것으로 판단되나, 각 도로별 오염지수를 평가해보면 올림픽 > 동부 > 서부 > 경부 순으로 높은 것으로 나타났다.

$$\text{오염지수(P.I.)} = \frac{\text{Cd농도}}{\text{Cd기준}} + \frac{\text{Cu농도}}{\text{Cu기준}} + \frac{\text{As농도}}{\text{As기준}} + \frac{\text{Hg농도}}{\text{Hg기준}} + \frac{\text{Pb농도}}{\text{Pb기준}} + \frac{\text{Zn농도}}{\text{Zn기준}} + \frac{\text{☐농도}}{\text{☐기준}}$$

7



**Fig. 6.** Pollution indexes of roadside soils and those according to traffic volume.

2010년 가을철 3개월 동안의 간선도로별 편도 통행량은 서부(802,422대), 경부(1,329,235대), 동부(1,463,020대), 올림픽도로(1,720,817대) 순으로 높아 서부간선도로를 제외하면 차량 통행량과 오염지수가 유의한 상관성을 보여, 도로변 토양에서 중금속 함유량은 교통량에 비례한다(Warren, 1962)는 연구 및 Zn, Ni, Cu와 연평균 누적 교통량과의 선형관계를 표현하는 결정계수가 각각 0.969, 0.994, 0.962라고 한 이주광 등(2007)(4)과 유사한 결과를 보였다. 그러나 서부간선도로의 오염지수가 교통량이 가장 적음에도 경부고속도로의 오염지수보다 큰 원인은 평균속도(40 km/hr)가 경부(68 km/hr), 동부(74 km/hr), 올림픽도로(80 km/hr)보다 낮아 차량 정체에 따른 오염물질 배출의 증가가 원인인 것으로 사료된다.

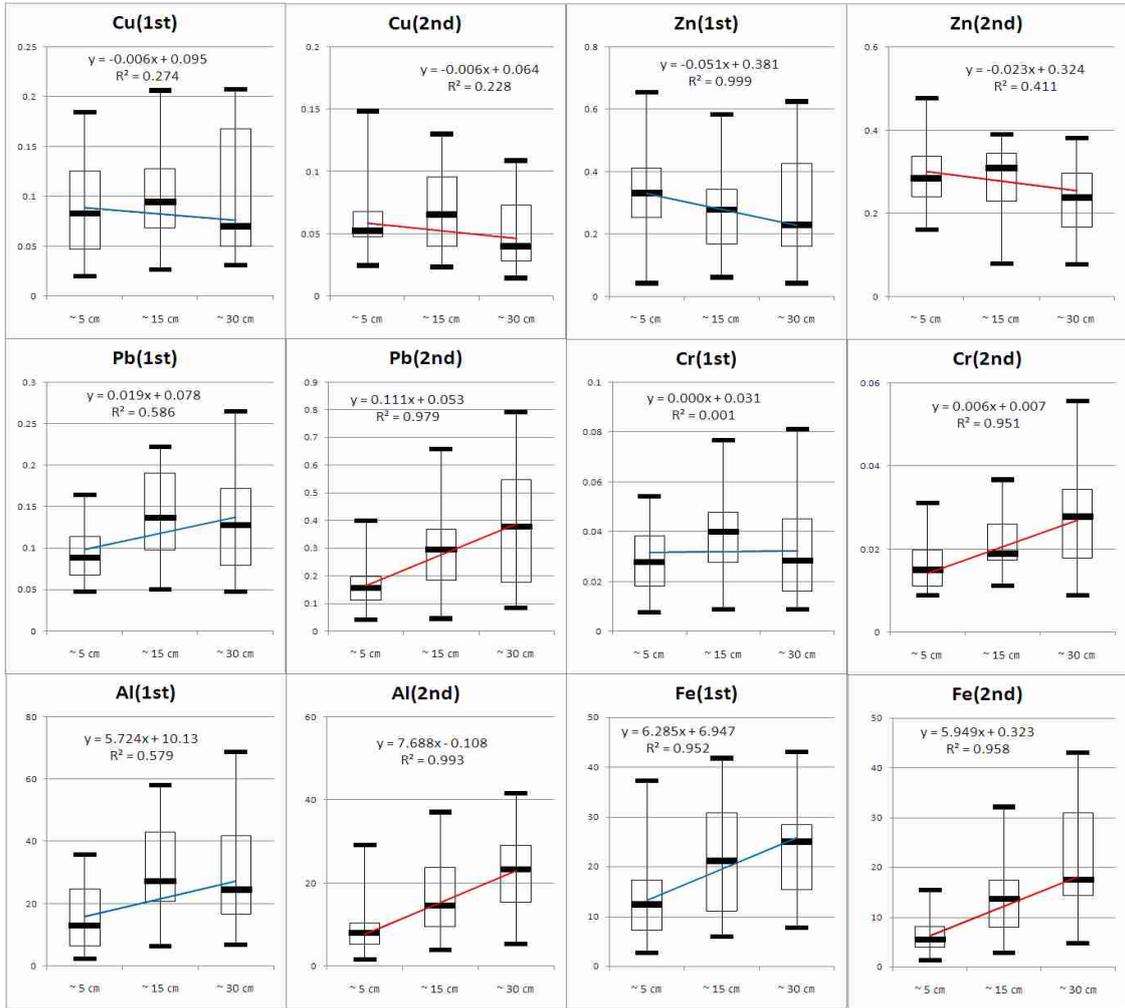
### 6. 토양 깊이별 중금속 분포

차량 통행에 따라 발생된 오염물질들이 도로변 토양으로 유입되면 흡착, 이온교환의 반응을 일으키거나, 강우가 스며들어 물리·화학적 환경변화에 따라 탈착, 침전, 용출되기도 한다. 따라서 깊이에 따른 중금속의 농도를 파악하기 위해 도로변 토양을 상층부(0~5 cm), 중층부(5~15 cm), 심층

부(15~30 cm)로 구분하여 용출과 함량분석을 하였고, 용출분석의 결과를 그림 7에 나타내었다. 차량 통행에 따른 주요염원 중 Cu와 Zn은 1차 분석과 2차 분석에서 모두 깊이가 깊어짐에 따라 용출 농도가 낮아지는 추이를 보였으며, 반대로 Pb와 Cr은 깊이가 깊어질수록 용출농도가 높아지는 경향을 보였다. 또한 Fe과 Al도 깊이가 깊어질수록 용출 농도는 증가하였다.

도로변 토양의 깊이별 함량분석 결과는 그림 8와 같다. 차량 통행에 따른 주요염원인 Cu, Zn, Pb, Cr, Cd 그리고 Hg 모두 깊이가 깊어짐에 따라 농도가 낮아지는 추이를 보여, 고속도로변 토양 중의 모든 중금속(Cu, Pb, Zn) 함량이 표층토 > 심층토 > 배경토 순이라는 이주광(2001)(5)의 보고와 유사한 결과를 나타내었다. As는 깊이에 따른 농도변화가 1차 분석과 2차 분석이 달라 추이를 판단하기 어려웠으며, Fe과 Al은 용출 분포와 같이 깊이가 깊어질수록 함량이 증가하는 경향을 보였다.

토양 내 중금속은 pH와 입도분포, 유기물의 함량, 중금속 이온의 형태, 양이온교환용량 등 다양한 물리화학적 조건에 영향을 받기 때문에 용출과 함량 분포의 차이가 있다고 판단된다.



**Fig. 7.** The results of heavy metals by leaching test according to depth.

## 결론

서울시 간선도로를 중심으로 도로변 토양과 도로 퇴적물 등에 축적된 중금속 오염의 분포특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 서울시 간선도로변 토양과 퇴적물 등의 pH는 모두 약알칼리성을 조사되었고, 배경토는  $6.3 \pm 0.47$ 로 나타났다. 선행 연구자들의 결과와 비교하여 불 때 도로변 토양의 pH를 한 방향으로 단정하기에는 무리가 있다고 판단된다.
2. 도로변 토양의 중금속 용출시험 결과 As, Cd,
3. 차량통행에 따른 주된 오염원인 Cu, Pb, Cd, Zn, Cr, Ni의 함량시험 결과 용출시험과는 달리 올림픽도로가 가장 높았으나 토양오염우려 기준(3지역)을 초과하지는 않았다. 배경토 내 중금속 함량은 차량통행에 따른 오염원을 판단하기에 적합하였으며, 도로변 토양 및 퇴적물

등의 Fe과 Al의 함량이 배경토 보다 낮아 차량 통행에 따른 중금속 오염의 원인이 되지 못한 다는 점을 알 수 있었다.

4. 중금속의 용출비율은 도로변 토양이 도로퇴적

물에 비해 높게 나타났으며, 입도분석 결과 토 양입자의 크기가 작은 점토와 미사의 비율이 높을수록 용출비율이 증가하고, 중금속별 용출 비율과 유의한 상관관계가 있는 것으로 나타났다.

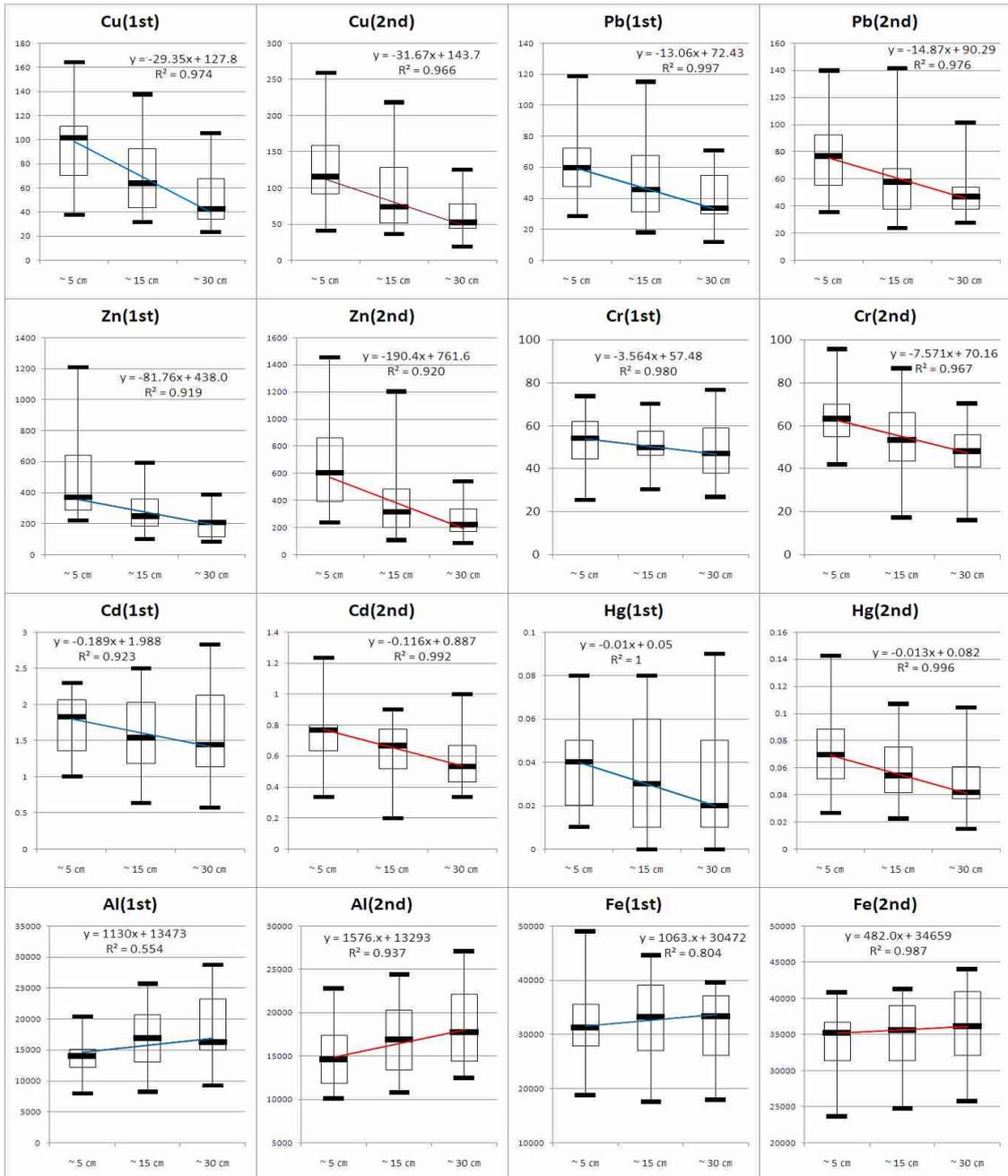


Fig. 8. The concentrations of heavy metals in roadside soils according to depth.

5. 유해 중금속의 오염정도를 평가하기 위한 오염지수(PI) 적용 결과 올림픽 > 동부 > 서부 > 경부 순으로 나타났고, 교통량과 오염지수는 서부간선도로를 제외할 경우 매우 높은 상관성을 보였는데, 서부간선도로의 교통량이 가장 적음에도 오염지수가 큰 원인은 평균속도가 낮아 차량 정체에 따른 오염물질 배출이 증가하였기 때문으로 사료된다.
6. 토양 깊이별 중금속 분포는 용출시험 결과 Cu와 Zn는 깊이가 깊어질수록 용출 농도가 낮아지는 추이를 보였으며, Pb, Cr, Ni, Fe, Al은 깊이가 깊어질수록 농도가 증가하는 경향을 보였다. 함량시험 결과 Cu, Zn, Pb, Cr, Cd, Hg, Ni은 표층토의 농도가 가장 높았고 깊이가 깊어짐에 따라 농도가 낮아졌으며, Fe과 Al은 용출분포와 같이 깊이가 깊어질수록 함량이 증가하는 경향을 보였다.

이상의 연구결과로 보아 토양 내 중금속은 흡착, 이온교환의 반응을 일으키거나 토양의 pH와 토양 입자의 크기, 유기물 함량, 중금속 이온의 형태, 양이온교환용량 등에 영향을 받기 때문에 용출과 함량 분포가 다른 원인을 밝히기 위해서는 위의 조건들과 토양 내 중금속의 다양한 기작을 함께 조사하여야 할 필요가 있을 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. 정강섭, 최병인, 김상연, 송덕영, 김건환, 성학제 : 토양 중 무기오염물질의 용출 특성, *Analytical Science & Technology*, 12(1): 53~60, 1999.
2. 안열 : 토양오염 현황과 처리대책, *한국농공학회지*, 40(2):13~17, 1998.
3. 민성은 : 인천광역시 토지용도별 토양 깊이에 따른 오염도 평가, 석사학위논문, 인하대학교, 2002.
4. 이주광, 이의상 : 고속도로변 토양과 퇴적물의 중금속 장기오염 특성, *한국산학기술학회논문지*, 8(2):385~394, 2007.
5. 최상민, 임종권, 신미연, 최경호, 조경덕 : 화학 분석 및 생물검정 방법을 이용한 서울시 도로변 우수관퇴적물의 생태독성 평가, *대한상하수도학회지*, p1056~1064, 2006.
6. 이주광, 강혜진, 권혁 : 고속도로 주변 대기 및 토양 환경 현황조사, *한국도로공사연구보고서*, p1~87, 2001.
7. 염승준 : 부산시 회동저수지 집수분지 내 주요도로변 퇴적물의 중금속 오염 평가, *자원환경지질*, 38(3):247~260, 2005.
8. 이의상 : 고속도로변 퇴적물의 중금속 오염에 관한 연구, *서울도시연구*, 5(4):61~72, 2004.
9. 조규성 : 전주시 도로변 퇴적물의 중금속 오염 특성, *Journal of Korean Earth Science Society*, 24(8):711~720, 2003.
10. 손창인, 나춘기 : 목포지역 도로변 퇴적물의 중금속 함유 특성과 위해성 평가, *한국폐기물학회지*, 24(5):428~440, 2007.
11. 환경부 : 토양오염공정시험기준(환경부고시 제 2009-255호), 2009.
12. 환경부 : 폐기물공정시험기준(환경부고시 제2010- 106호), 2010.
13. Bowen HJM : Trace elements in biochemistry, Academic Press, 1986.
14. 환경부 : 토양환경보전법, 2009.
15. 조미영, 현재혁, 김원석 : Sequential Extraction을 이용한 중금속(납·구리)과 토양 결합 기작 연구, *한국토양환경학회지*, 4(3):77~84, 1999.
16. Min DK and Jang MB : A Study on the Integrated Soil Pollution Assessment, *J. Korea Society of Environmental Administration*, 6:9~15, 2000.
17. Song HB and Lee EY : Trace Elements and Source Assessment of Street Dust in Daegu, Korea, *대한환경공학학회지*, p793~800, 2007.