

서울시 우수관에서 채취한 도로변 퇴적물의 중금속오염의 공간적 변화

이평구^{1*} · 유연희² · 윤성택³ · 신성천¹

¹한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

²전북대학교, 지구환경과학과

³고려대학교 지구환경과학과

Spatial variability of heavy metal contamination of urban roadside sediments collected from gully pots in Seoul City

Pyeong-koo Lee^{1*} · Youn-hee Yu² · Sung-taek Yun³ · Seong-cheon Shin¹

¹Geological and Environmental Hazards Department, KIGAM

²Dept. of Earth and Environmental Sciences, Chonbuk National Univ.

³Dept. of Earth and Environmental Sciences, Korea Univ.

ABSTRACT

In order to investigate the spatial and seasonal variations of heavy metal pollution in heavily industrialized urban area, urban roadside sediments were collected for five years from gully pots in Seoul City. A series of studies have been carried out concerning the physicochemical characteristics of the sediments in order to evaluate the contamination of heavy metals such as Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn. Roadside sediments and uncontaminated stream sediments were analyzed for total metal concentrations using acid extraction. The roadside sediments are characterized by very high concentrations of Zn ($2,665.0 \pm 1,815.0 \mu\text{g/g}$), Cu ($445.6 \pm 708.0 \mu\text{g/g}$), Pb ($214.3 \pm 147.9 \mu\text{g/g}$) and Cr ($182.1 \pm 268.8 \mu\text{g/g}$), indicating an artificial accumulation of these metals to the sediment chemistry. Comparing with average contents of uncontaminated stream sediments, roadside sediments were shown zinc 14 times (up to 64.4), copper 9 times (up to 181.7), lead 6 times (up to 63.7), cobalt 6 times (up to 168.7), nickel 4 times (up to 98.4), cadmium 2 times (up to 12.8) and chrome 2 times (up to 40.2) high content. The relative degree of heavy metal pollution for roadside sediments collected from each district in Seoul City is evaluated using the "geoaccumulation index". As a result, heavy-metal contamination is highest centering the oldest residential district and industry area, and contamination level decreases as go to outer block of the city. The factor analysis results indicate that the levels of Cu, Ni, Fe and Cr are strongly related to numbers of factories, whereas the concentrations of Cr, Zn and Cd dependant on pollution index, indicating artificial contamination due to site-specific traffic density.

Key words : roadside sediments, land use, heavy metals, pollution, urban area

요 약 문

Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, 및 Zn 등의 중금속 오염을 평가하기 위해, 서울특별시에서 633개 도로변 퇴적물을 채취하였다. 도로변 퇴적물의 Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb 및 Zn의 오염을 평가하기 위하여 물리화학적 특성에 관한 연구가 수행되었다. 도로변 퇴적물과 오염되지 않은 표사시료는 산분해방법을 이용하여 총 중금속 함량을 분석하였다. 도로변 퇴적물은 특징적으로 Zn(평균 $2,665.0 \pm 1,815.0 \mu\text{g/g}$), Cu(평균 $445.6 \pm 708.0 \mu\text{g/g}$), Pb(평균 $214.3 \pm 147.9 \mu\text{g/g}$) 및 Cr(평균 $182.1 \pm 268.8 \mu\text{g/g}$) 함량이 매우 높았으며, 인위적인 집적에 의한 것임을 지시한다. 오염되지 않은 수계퇴적물의 평균함량과 비교하면, 도로변 퇴적물은 평균적으로 Zn 14배, Cu 9배, Pb 6배, Co 6배, Ni 4배, Cd 2배 및 Cr 2배 높은 함량을 보이며, 각각 최대 64.4배, 181.7배, 63.7배, 168.7배, 98.4배, 12.8배 및 40.2배 이었다. 서울시의 각 구별로 채취된 퇴적물의 상대적인 중금속 오염정도는 "geoaccumulation" index를 이용하여 평가되었다. 그 결

*Corresponding author : pkleee@kigam.re.kr

원고접수일 : 2003. 4. 30 게재승인일 : 2003. 6. 02

질의 및 토의 : 2003. 9. 30 까지

과, 가장 오래된 거주지역과 산업지역을 중심으로 해서 중금속 오염이 가장 심하게 진행되었으며, 도시외곽으로 갈수록 오염정도가 감소하는 경향이 관찰되었다. 요인분석 결과, Cu, Ni, Fe 및 Cr은 산업시설 수와 상관성이 높으며, Cr, Zn 및 Cd는 자동차 통행과 관련되었을 것으로 보이는 오염지수와 상관관계가 좋은 것으로 해석되었다.

주제어 : 도로변 퇴적물, 토지이용, 중금속, 오염, 도시지역

1. 서 론

대도시 지역에서 도로변에 퇴적된 먼지와 토양을 비롯한 퇴적물은 중금속 원소들에 의해 오염되어 있다. 이러한 오염된 먼지와 퇴적물은 빠르게 지나가는 자동차에 의해 공기중으로 부유되어 도로변 혹은 주거지역의 공기를 오염시키므로 미세먼지에 의한 대기오염의 중요한 원인이 될 수 있으며, 이로 인해 통행자와 도로주변에 거주하는 주민의 건강을 위협하는 문제가 발생할 수 있다. 도로변 대기중에 포함된 분진에는 Cu, Pb, Zn가 토양의 평균함량을 넘어서는 주요 중금속 오염원소로 나타났다¹⁾. 또한, 도시지역의 도로에 흐르는 빗물에 오염된 중금속 원소 중에서도 일반적으로 가장 높은 함량을 보이는 것은 Zn, Pb 및 Cu인 것으로 알려져 있다²⁻⁵⁾. 이는 빗물과 도로에 퇴적된 먼지와 퇴적물과의 화학적으로 반응하여 중금속과 유기오염물질이 용해되었기 때문인 것으로 알려져 있다⁶⁾. 오염된 퇴적물은 빗물에 의해 이동되어 우수관을 통해 한강과 같은 주요 하천으로 유입되므로, 직접적으로 하천수 질에 영향을 미치고, 하천바닥에 침전되어 퇴적물을 오염시키게 되므로 생태계에 직접적으로 영향을 미치게 될 것이다. 그러므로, 도시지역에서는 비점오염원에 의한 지표수의 중금속과 유기물질 오염 문제가 최근 민감한 환경문제로 대두되고 있으며, 오염된 빗물로부터 야기될 수 있는 중금속오염으로부터 지표수와 지하수를 보전하기 위해, 빗물에 대한 관리 및 처리 방법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다⁷⁻⁹⁾.

대도시 도로변의 오염된 먼지와 퇴적물에 포함된 중금속 원소의 종류를 파악하고, 각 중금속원소의 함량을 측정하는 것은 대도시 환경에서의 비점오염원을 관리하는데 있어 중요한 자료가 된다. 또한, 오염된 도로변 먼지와 퇴적물내 중금속 원소의 공간적 및 시간적인 변화 양상을 장기적으로 관찰하여, 중금속 원소의 분포양상을 나타내는 원인을 규명하는 것도 중요하다고 할 수 있다. 서울은 북위 37°30'~37°45', 동경 127°~127°45'에 위치하며, 동서로 36.8 km, 남북으로 30.3 km이고 면적은 605.5 km²이다. 인구는 대략 천만명 정도이며, 인구밀도는 17,000명/km²로 매우 높다. 교통량이 가장 높은 지역은 양천구로 하루 150,428대이며, 100,000대/일을 초과하는 지역은 성동구,

광진구, 마포구, 영등포구, 동작구, 서초구 및 강남구 등이다. 쓰레기 배출량이 가장 많은 지역은 강서구로 2,714톤/일이었으며, 1,500톤/일 이상 배출되는 지역은 용산구, 도봉구, 마포구, 서초구, 강남구 등이고 1,000톤/일 이하인 지역은 종로구, 광진구, 서대문구, 구로구, 금천구 및 강동구 등이다¹⁰⁾.

이 연구의 목적은 서울시 각 행정구역별로 자동차 통행량, 토지이용, 쓰레기 발생량 등의 차이에 따른 도로변의 우수관으로 유입되는 퇴적물내의 중금속 함량을 분석하여 중금속 오염의 공간적 및 시간적 변화양상을 파악하는 것이다. 그리고, 오염된 도로변 퇴적물과 오염되지 않은 하천퇴적물을 비교한 geoaccumulation index¹¹⁾ 및 요인분석을 이용하여 중금속오염의 정량적인 평가와 주요 중금속 오염원을 규명하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 시료채취

도로변에 퇴적된 퇴적물의 중금속오염을 평가하기 위해 1998년 4월부터 2002년 4월까지 약 4년 동안 서울시 25개 구를 대상으로, 년도별로 지역을 선정하여 도로변 퇴적물 시료를 채취하였다. 또한 퇴적물에 함유된 중금속 함량의 시기적인 변화를 조사하기 위해 구로구, 도봉구, 여의도 및 중구 지역을 대상으로 4년 간 지속적으로 시료를 채취하였다(Fig. 1). 시료는 구로구, 도봉구, 여의도 및 중구 등에서 채취된 337개 시료를 포함하여, 서울시 전 지역에서 4년 동안 10회에 걸쳐 모두 633개의 시료를 채취하였다(Table 1). 퇴적물은 모종삽을 이용하여 채취하였으며, 채취된 퇴적물은 미리 산용액으로 세척한 고밀도 폴리에틸렌 시료병에 담아 아이스박스에 보관하였다. 채취된 퇴적물은 2 mm체로 여과한 뒤 100 mesh 체로 여과하여 50°C에서 2일 동안 건조하였으며, 100mesh(<150 μm) 체를 통과 한 시료에 대하여 구성광물 및 중금속과 유기물질 함량을 분석하였다. 한편, 도로변 퇴적물의 중금속 오염정도를 비교하기 위하여, 서울시를 흐르는 안양천, 탄천 및 중랑천을 대상으로 각 유역별로 1-2차 수계에서 오염되지 않은 하천퇴적물 시료를 각각 50개, 13개 및 41개를 채취하였으며, 채취 방법은 100mesh 체를 통과한

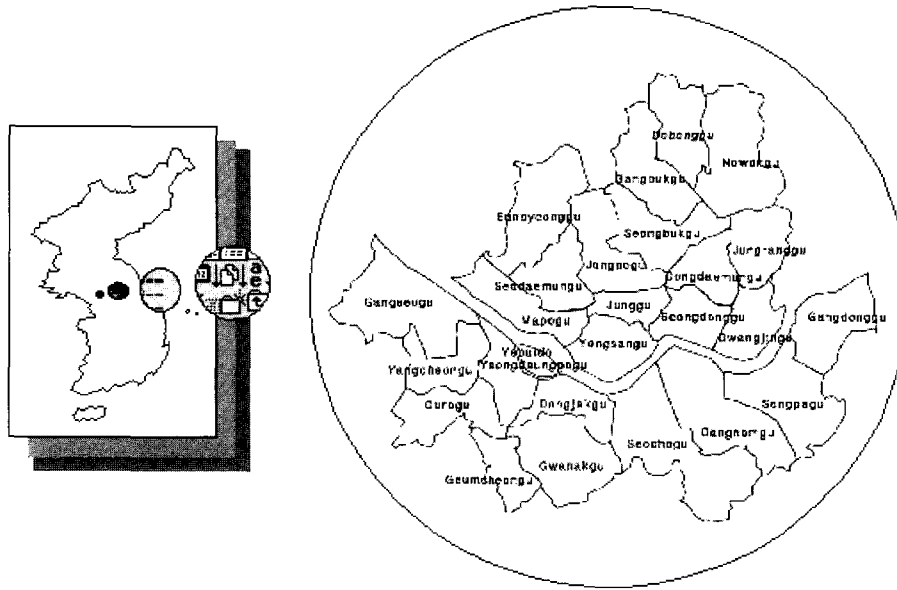


Fig. 1. Location of the 25 districts in Seoul City.

Table 1. Number of samples in studied areas

	1998			1999.9-2000.8				2000.9-2001.8			2001.9-2002.8				Total
	4	11	Total	1999. 12	2000. 2	2000. 6	Total	2000. 11	2001.3	Total	2001.1 2	2002.2	2002.4	Total	
Gangnamgu	-	-	-	-	5	5	10	-	-	-	-	-	-	-	10
Gangdonggu	-	-	-	-	5	5	10	-	-	-	-	-	-	-	10
Gangbukgu	-	-	-	-	5	5	10	-	-	-	-	-	-	-	10
Ganseogu	-	-	-	-	5	5	10	-	-	-	-	-	-	-	10
Gwangjingu	-	-	-	-	5	5	10	-	-	-	-	-	-	-	10
Gurogu	16	8	24	9	10	10	29	5	10	15	10	10	10	30	98
Nowongu	-	-	-	-	5	5	10	-	-	-	-	-	-	-	10
Dobonggu	6	-	6	5	5	4	14	5	5	10	5	5	5	15	45
Dongdaemungu	-	-	-	8	8	8	24	-	-	-	-	-	-	-	24
Songpagu	-	-	-	-	5	4	9	-	-	-	-	-	-	-	9
Yeouido	9	-	9	5	5	4	14	5	5	10	5	5	5	15	48
Junggu	28	12	40	15	15	11	41	10	11	21	15	15	14	44	146
Jungranggu	-	-	-	-	5	5	10	-	-	-	-	-	-	-	10
Dongjakgu	-	-	-	-	-	-	-	5	5	10	-	-	-	-	10
Eunpyeonggu	-	-	-	-	-	-	-	5	5	10	-	-	-	-	10
Gwanakgu	-	-	-	-	-	-	-	5	5	10	-	-	-	-	10
Geumcheongu	-	-	-	-	-	-	-	5	5	10	-	-	-	-	10
Mapogu	-	-	-	-	-	-	-	5	5	10	-	-	-	-	10
Seodaemungu	-	-	-	-	-	-	-	5	5	10	-	-	-	-	10
Yangcheongu	-	-	-	-	-	-	-	5	5	10	-	-	-	-	10
Yeongdeungpogu	-	-	-	-	-	-	-	5	5	10	-	-	-	-	10
Seochogu	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	10	10	30	30
Seongdonggu	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	5	5	15	15
Seongbukgu	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	8	8	24	24
Yongsangu	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	6	6	18	18
Jongnogu	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9	9	8	26	26
Total	59	20	79	42	83	76	201	65	71	136	73	73	71	217	633

퇴적물을 채취하였다. 이들 시료를 대상으로 동일한 원소에 대한 화학분석을 실시하여 오염되지 않은 하천퇴적물의 중금속 함량을 결정하였다(Fig. 2).

2.2 화학분석

전함량분석 방법은 도로변 우수관내의 퇴적물에 함유되어 있는 총 중금속 함량을 측정하기 위해 실시되었다. 전

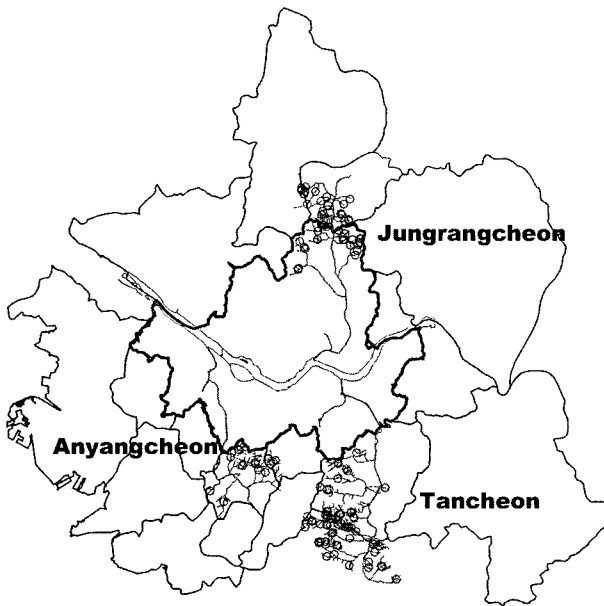


Fig. 2. Sampling Locations of uncontaminated

함량분석을 위해 실시하는 전처리 방법은 불산(HF)를 사용하여 완전분해하는 경우도 많지만, 이 경우에는 환경오염에 의한 중금속 함량뿐만 아니라 광물이 형성될 때 함유하고 있는 중금속의 함량까지 분해되기 때문에 광물 형성 이후 오염된 중금속의 함량보다 큰 것으로 알려져 있다¹²⁾. 이번 연구에서 완전분해 방법으로 사용된 산분해 방법은 다음과 같다. 시료 1g에 질산(HNO₃) 5 ml를 넣은 뒤 온도 110°C에서 완전히 증발시킨 후, 과염소산(HClO₄)과 질산(1:5 비율)의 혼합산을 10 ml를 넣고 흰색의 연기가 완전히 없어질 때까지 증발시킨다. 이후, 6N HCl을 10 ml를 넣고 30분간 끓이며, 실온까지 냉각시킨 후, 0.45 μm로 여과하여 ICP로 분석하였다. HF를 사용하지 않은 이와같은 전처리 방법은 석영/장석과 같은 규산염광물과 점토광물은 용해되지 않으나 탄산염광물, 비정질 철·망간산화광물 및 유기물 등은 분해된다.

2.3 조성광물 및 탄소함량 분석

용출실험시 pH에 대한 완충역할을 하는 광물의 형태와 광물학적 조성차이를 규명하기 위해 용출실험 반응전과 반응후의 시료에 대해 X-선 회절분석을 실시하였다. X-선 회절분석은 PHILLIPS XPERT MPD Diffractometer(Cu Kα; 40 KV, 25 mA)를 이용하였고, Cu target을 사용하여 3°-45°까지 2°/분의 속도와 0.01의 간격으로 하였다. 퇴적물과 토양의 총 탄소함량과 유기탄소함량은 LECO CS225를 이용하여 분석하였으며, 유기탄소함량은 시료를 묽은

염산으로 처리하여 탄산염광물을 제거한 뒤 분석하였다.

2.4 실험기기

중금속 함량의 분석은 ICP-AES(Perkins-Elmer Optima 3000XL)를 이용하였으며, 분석조건은 RF Power 1300watt, Plasma Flow 15 L/min, Coolant Flow 0.5 L/min, Nebulizer Flow 0.8 L/min이었다. 사용된 시약은 analytical grade (Prolabo 또는 Merck) 였고, ICP 분석시 사용된 Pb, Zn, Cd, Fe, Mn의 standard metal solution은 1,000 ppm stock solution(Merck)을 희석하여 사용하였다. 전 분석과정에 이용된 탈이온수를 얻기 위해 Milli-Q Millipore system을 사용하였다.

3. 결 과

3.1 서울시 주변 지질 및 주요 하천퇴적물의 중금속 함량

3.1.1 지질

서울지역에는 크게 서울 북동 방향으로 주라기 대보화강암이, 그 외 지역에는 선캠브리아기 경기 편마암 복합체가 주로 분포하며, 섬록암과 화강암이 편마암 복합체 내에 국부적으로 분포하고 있다. 한강 주위에는 <20 m 두께의 사질 충적층이 분포한다.

3.1.2 주요 하천퇴적물의 중금속 함량

도로변 퇴적물의 중금속 오염정도를 비교평가하기 위해서, 안양천, 탄천 및 중랑천을 대상으로 오염되지 않은 하천퇴적물 시료를 채취하여 오염되지 않은 하천퇴적물의 중금속 배경함량을 결정하였다(Table 2). 그 결과, 서울시 주변 주요 하천의 오염되지 않은 하천퇴적물의 평균 중금속 함량은 Cd 2.0 μg/g, Co 11.3 μg/g, Cr 82.4 μg/g, Cu 49.6 μg/g, Ni 24.3 μg/g, Pb 33.5 μg/g 및 Zn 192.9 μg/g 이었다. 이 배경함량은 서울시 지역에 주로 분포하는 편마암 분포지역에서 채취한 하천퇴적물의 평균 중금속 함량(Cd 1.5 μg/g, Co 15.9 μg/g, Cr 82 μg/g, Cu 53 μg/g, Ni 40 μg/g, Pb 34 μg/g 및 Zn 136 μg/g)과 화강암의 평균 중금속함량(Cd 1.4 μg/g, Co 6.3 μg/g, Cr 51 μg/g, Cu 38 μg/g, Ni 14 μg/g, Pb 40 μg/g 및 Zn 138 μg/g)과 유사한 함량을 보이고 있다¹³⁾. 탄천, 안양천 및 중랑천의 1-2차 수계로부터 채취한 하천퇴적물의 중금속 함량을 비교하여 보면, Co, Cr, Ni, Cu의 경우는 탄천의 1-2차 수계에서 채취한 하천퇴적물의 중금속 함량이 다른 2개 하천의 1-2차 수계로부터 채취한 하천퇴적물보다 1.2~2.3배까지 높은 함량을 나타내었다. 그러나 Cd와 Zn의 경우는 안양천의 1-2차 수계로부터 채취한 하천퇴적물에서

Table 2. Mean concentrations of heavy metals in uncontaminated stream sediments collected from 1st and 2nd order streams in Anyangcheon, Tancheon and Jungrangcheon catchment areas (unit : $\mu\text{g/g}$)

		Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Total(104)*	mean	2.00	11.28	82.37	49.56	24.30	33.52	192.9
	median	1.80	11.20	83.00	39.27	23.39	33.15	144.0
	std	1.96	6.32	40.92	30.09	12.88	7.40	204.1
	min	1.00	1.88	23.10	14.30	7.78	10.00	51.50
	max	20.20	28.90	171.0	145.0	63.10	55.00	1890.0
Anyangcheon (13)*	mean	3.49	8.66	51.18	29.87	14.57	22.62	255.1
	median	1.60	4.24	35.10	24.40	9.59	25.00	93.4
	std	5.08	6.82	28.90	17.72	6.81	7.71	495.3
	min	1.30	1.88	23.10	14.30	7.78	10.00	63.0
	max	20.20	20.00	99.50	73.40	25.50	39.00	1890.0
Tancheon (50)*	mean	2.30	16.40	117.35	57.44	34.18	33.30	196.6
	median	2.25	16.25	114.00	39.75	30.45	31.00	136.5
	std	0.52	3.64	22.94	37.84	10.88	7.22	150.7
	min	1.00	10.30	59.90	21.80	20.80	25.00	51.5
	max	3.40	28.90	171.00	145.00	64.10	55.00	852.0
Jungrangcheon (41)*	mean	1.17	5.73	48.77	46.20	15.33	37.25	168.2
	median	1.00	5.35	45.75	40.53	14.10	37.74	156.0
	std	0.58	2.45	20.25	16.37	5.73	2.52	54.3
	min	1.00	2.96	24.10	26.18	7.88	31.82	85.8
	max	4.20	18.70	151.0	88.90	40.20	43.66	309.0

* : number of stream sediment samples

1.3~1.5배 높은 함량을 나타내었다.

3.2 도로변 퇴적물의 중금속오염

서울시 25개 행정구역에서 채취한 633개 도로변 퇴적물의 중금속 오염을 평가하기 위해, 완전분해를 실시한 후 Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb 및 Zn 등을 대상으로 화학분석을 실시하였다(Table 3).

서울시 도로변에 퇴적된 퇴적물에서 가장 오염이 심한 원소는 Zn인 것으로 밝혀졌으며, 함량은 1.1-12,435.1 $\mu\text{g/g}$, 평균 $2,665.0 \pm 1,815.0 \mu\text{g/g}$ 이었다. Zn 다음으로 오염이 심한 원소는 Cu였으며, 함량은 0.2-8,966.0 $\mu\text{g/g}$ (평균 $445.6 \pm 708.0 \mu\text{g/g}$)이었다. 도로변 퇴적물에 오염된 Pb의 평균함량은 $214.3 \pm 147.9 \mu\text{g/g}$ (0.0-2,132.5 $\mu\text{g/g}$)이고, Cr은 평균 $182.1 \pm 268.8 \mu\text{g/g}$ (0.1-3,311.2 $\mu\text{g/g}$)이다. 도로변 퇴적물에 함유된 Ni과 Co의 평균함량은 각각 $89.6 \pm 206.4 \mu\text{g/g}$ (0.0-2,390.7 $\mu\text{g/g}$)와 $68.9 \pm 126.2 \mu\text{g/g}$ (0.0-1,906.4 $\mu\text{g/g}$)

이다. 한편, Cd의 함량은 최소 0.0 $\mu\text{g/g}$ 부터 최대 25.7 $\mu\text{g/g}$ 이며, 평균함량은 $4.3 \pm 3.3 \mu\text{g/g}$ 이다(Table 3). 오염되지 않은 하천퇴적물의 평균함량과 비교하면, 도로변 퇴적물은 Zn 13.8배(<1~64.4배), Cu 9.0배(<1~181.7배), Pb 6.4배(<1~63.7배), Co 6.1배(<1~168.7배), Ni 3.7배(<1~98.4배), Cd 2.2배(<1~12.8배) 및 Cr 2.2배(<1~40.2배) 높은 함량을 보였다. 도로변 퇴적물에서 검출된 평균 중금속 함량을 기준으로 함량이 높은 순서는 $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{Co} > \text{Cd}$ 이다(Table 3).

한편, 서울시에서 채취한 도로변 퇴적물의 중금속함량은 같은 행정구역에서도 시료채취 위치에 따라 차이가 현저하며, 특히 Ni, Cu, Cr 및 Co 등의 미량원소는 평균값보다 표준편차 값이 더 크게 나타났다(Table 3). 중금속 함량의 불균질한 특징은 시료채취 지역의 산업 활동에 따른 오염되는 중금속의 종류와 오염정도에 차이가 있기 때문으로 추정된다. 또한 중금속 함량의 불균질성은 지역적

Table 3. Mean concentrations of heavy metals in roadside sediments collected from gully pots in Seoul City (unit : $\mu\text{g/g}$)

	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
mean	4.3	68.9	182.1	445.6	89.6	214.3	2665.0
median	2.9	11.1	99.8	263.7	41.1	186.6	2209.3
std	3.3	126.2	268.8	708.0	206.4	147.9	1815.0
min	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	1.1
max	25.7	1906.4	3311.2	8996.0	2390.7	2132.5	12435.1
uncontaminated sediments	2.00	11.28	82.37	49.56	24.30	33.52	192.9

Table 4. Range and mean concentrations of heavy metals in roadside sediments collected from gully pots in Seoul City (unit : $\mu\text{g/g}$)

	No. of sample	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Gangnamgu	10	2.2±10.47 1.53-2.93	10.19±2.03 7.78-14.80	103.9±15.6 85.9-134.9	318.7±106.7 159.4-508.6	39.37±4.91 31.67-49.33	201.3±79.1 108.5-370.1	2491.9±1137.9 850.4-4403.7
Gangdonggu	10	1.89±0.45 1.23-2.66	9.91±2.68 6.79-16.13	81.4±13.7 62.3-106.9	172.7±54.1 119.2-304.9	35.41±7.18 28.96-49.31	114.3±40.0 60.7-184.0	2277.3±1624.2 673.2-5507.4
Gangbukgu	10	1.64±0.39 1.05-2.20	5.20±1.01 4.12-6.70	72.9±25.9 33.1-114.1	217.3±98.2 86.6-392.1	32.51±10.27 18.12-49.37	124.3±30.4 83.8-186.6	1413.1±615.5 841.7-2519.9
Gangseogu	10	1.90±0.43 1.46-2.95	10.69±2.69 7.94-16.88	78.6±19.4 53.8-112.4	200.6±83.0 101.5-337.6	37.24±6.83 30.93-49.78	117.2±52.7 62.8-240.4	2516.1±2583.4 817.4-9737.9
Gwangjingu	10	1.96±0.35 1.44-2.50	10.10±1.83 7.65-14.36	135.7±122.4 69.7-473.9	252.5±87.4 119.3-449.0	66.4±76.41 27.0-277.2	141.8±45.4 69.1-210.0	2375.2±1957.8 569.8-7577.5
Nowongu	10	1.74±0.28 1.28-2.21	9.66±9.38 5.00-36.17	64.8±17.3 35.5-90.1	186.5±47.6 113.2-263.7	25.00±4.40 19.37-31.33	187.3±51.2 118.4-274.9	3286.3±1960.6 1049.9-6985.0
Dongdaemungu	24	2.83±1.27 1.41-6.77	11.66±6.78 6.04-27.35	345.5±456.4 48.6-1496.5	564.8±422.6 128.7-1369.9	177.0±229.8 21.4-774.8	200.1±98.8 114.5-619.0	1609.0±469.1 718.4-2829.8
Songpagu	9	2.15±0.36 1.78-2.97	10.37±2.36 7.01-15.08	81.9±19.7 50.8-113.2	237.0±118.1 83.6-425.6	36.98±12.03 20.93-59.31	158.2±65.0 55.6-280.5	2026.7±1417.1 614.4-4876.2
Jungranggu	10	2.00±0.49 1.44-2.78	7.10±1.37 5.34-9.21	84.0±33.6 51.2-153.9	203.1±32.3 142.4-250.5	39.64±20.75 24.31-88.02	144.0±37.1 77.4-222.1	2118.2±1278.8 600.1-4183.3
Gwanakgu	10	2.22±0.33 1.69-2.65	11.48±1.67 8.15-14.25	93.4±17.7 72.6-125.5	244.7±73.6 147.8-350.0	49.55±12.53 30.95-69.67	210.2±155.8 117.0-640.4	2389.5±1076.2 993.9-5095.6
Geumcheongu	10	2.49±0.54 1.85-3.60	11.19±1.38 9.87-14.09	100.4±24.9 78.3-158.3	307.9±53.5 247.0-390.5	54.75±16.23 41.84-90.25	159.8±34.0 115.8-224.5	2401.6±696.5 1443.1-3568.5
Dongjakgu	10	2.53±1.35 1.24-6.08	11.37±2.28 9.21-16.87	74.1±14.3 51.3-89.9	208.1±93.3 113.7-416.8	39.95±5.24 29.34-47.50	360.0±624.8 109.7-2132.5	2126.3±1167.1 686.6-4719.7
Mapogu	10	2.45±0.69 1.71-3.87	8.94±1.89 6.62-12.62	94.0±30.6 63.0-170.1	254.9±62.4 175.4-377.1	52.20±17.24 37.05-93.68	230.8±162.6 123.6-665.0	2395.7±1050.8 880.5-4026.2
Seodaemungu	10	2.39±0.48 1.85-3.27	10.58±1.99 8.76-13.92	90.6±36.9 64.2-188.9	235.7±80.0 141.1-384.1	48.28±24.55 34.36-117.09	172.4±59.0 98.2-274.9	2488.7±951.4 1283.5-4022.4
Yangcheongu	10	3.10±2.16 1.80-9.09	12.20±2.43 8.27-17.18	95.1±25.5 69.6-160.1	280.5±62.5 160.9-383.7	53.65±17.80 35.76-98.21	172.4±40.21 110.3-222.0	2573.1±1699.9 1443.1-7224.6
Yeongdeung-pogu	10	3.00±1.19 2.01-6.06	14.58±6.34 9.32-30.64	157.8±64.0 91.4-305.1	421.5±119.6 328.7-679.1	100.37±53.65 53.30-210.69	207.3±50.8 131.0-331.6	3758.1±1651.0 1574.5-6426.4
Eunpyeonggu	10	2.20±3.27 1.03-3.27	8.99±3.59 2.81-17.32	85.3±43.0 40.0-174.1	221.3±64.5 139.6-334.2	52.85±28.70 30.80-113.00	142.2±25.4 84.5-169.7	2709.4±991.2 1469.6-4275.7
Seochogu	30	4.75±2.34 (1.39-8.45)	175.2±120.9 (8.0-318.8)	176.4±120.7 (60.6-513.6)	186.3±60.2 (75.2-378.1)	31.2±5.5 (22.8-49.6)	153.1±32.2 (88.3-242.6)	2665.1±1549 (755.8-7472)
Seongdonggu	15	4.94±2.39 (1.36-8.57)	178.0±127.1 (6.8-336.5)	230.5±110.3 (88.4-455.1)	480.2±184.1 (270.6-882.1)	93.2±63.9 (36.3-212.4)	177.6±50.6 (113.9-274.4)	3206.0±1652.3 (1208.4-6709)
Seongbukgu	24	4.47±2.08 (1.13-7.62)	148.0±104.9 (4.7-275.0)	220.0±155.2 (56.0-537.3)	194.9±58.3 (91.6-308.5)	27.8±6.3 (14.2-40.6)	173.3±38.9 (104.7-245.6)	3444.2±2335.2 (951.3-8657)
Yongsangu	18	4.82±2.23 (1.59-9.29)	165.2±115.3 (7.2-288.9)	186.7±118.1 (42.7-454.9)	246.0±88.0 (87.4-416.7)	41.6±9.6 (28.5-66.8)	174.9±54.8 (77.3-290.4)	2798.4±1683.7 (443.4-6246.8)
Jongnogu	26	5.57±1.79 (3.02-10.41)	156.5±109.3 (6.3-296.7)	211.1±175.0 (61.1-850.5)	314.7±123.1 (158.9-817.5)	40.6±17.2 (21.1-102.7)	264.4±113.1 (151.4-730.3)	2685.2±2061.8 (914.3-10720)
Junggu	146	6.16±4.43 (0-25.70)	80.6±192.9 (0-1906.4)	292.8±459.1 (10.5-3311.2)	859.7±1145.1 (2.6-8996)	215.1±419.3 (0-2390.7)	302.2±239.7 (1.9-1549.6)	3377.6±2171.4 (102.9-12435)
Yeouido	48	4.43±3.27 (0-13.30)	35.3±71.1 (0.0-258.5)	93.7±58.6 (0.1-404.6)	233.8±77.6 (0.2-371.4)	43.8±19.7 (0.0-125.2)	188.8±71.8 (0.0-361.9)	3171.7±2205.7 (1.1-10017)
Gurogu	98	4.75±4.00 (0-17.60)	26.1±50.0 (0-429.2)	178.94±182.8 (6.17-1254.38)	633.15±981 (1.55-7750)	108.6±118.4 (0-610.8)	201.78±78.1 (3.1-389.3)	1816.5±1080.5 (68.4-4763.5)
Dobonggu	45	3.47±2.24 (1.17-13.50)	30.7±67.14 (4.2-245.9)	114.1±120.0 (29.5-535.0)	210.1±75.6 (102.1-536.1)	29.3±11.4 (17.4-78.9)	203.9±63.7 (65.8-349.8)	2774.3±1751.9 (433.1-8219)
uncontaminated sediments	104	2.00	11.28	82.37	49.56	24.30	33.52	192.9

으로 도로포장울과 도로주변의 생활환경(인쇄소, 공장, 주택가, 농경지, 자연녹지 등)에 따라 도로변 퇴적물에 석영, 장석 등과 같이 중금속의 함량이 매우 낮은 조립질 모래의 구성성분비 차이가 큰 것으로 나타났으며, 이에 의한 희석효과도 시료의 중금속 함량에 영향을 미치고 있다.

3.3 도로변 퇴적물내 중금속 원소별 지역오염 현황

3.3.1 Zn 및 Cd

채취된 도로변 퇴적물에서 오염이 가장 심한 원소는 Zn이며, 구별로 비교하면 영등포구(평균 $3,758.1 \pm 1,651.0 \mu\text{g/g}$)에서 채취한 도로변 퇴적물의 Zn함량이 가장 높으며, 도로변에 금속공구를 제작하는 공장이 없는 여의도에서 채취한 시료의 평균 Zn함량이 $3,171.6 \pm 2,205.7 \mu\text{g/g}$ 로 나타나 영등포구에서 발생하는 Zn오염의 영향을 받고 있는 것으로 추정된다. 평균 Zn함량이 3,000-4,000 $\mu\text{g/g}$ 인 지역은 서울시 전체 행정구역의 약 20%이며, 2,500-3,000 $\mu\text{g/g}$ 사이인 지역은 7개 지역으로 서울시 행정구역 중에서 약 28%가 이에 해당된다. 평균 Zn함량이 2,000-2,500 $\mu\text{g/g}$ 인 지역은 10개 지역이며, 전체 행정구역 중에서 약 40%가 이에 해당된다. 평균 Zn함량이 1,000-2,000 $\mu\text{g/g}$ 인 지역은 3개 지역이다(Table 4).

Cd 함량이 가장 높은 지역은 중구로, 평균 함량이 $6.16 \pm 4.43 \mu\text{g/g}$ (0.0-25.7 $\mu\text{g/g}$)이다. 종로구에서 채취한 도로변 퇴적물의 Cd 평균함량은 $5.57 \pm 1.79 \mu\text{g/g}$ 로 중구 다음으로 오염이 높은 지역이다. 한편, Cd의 평균함량이 3-5 $\mu\text{g/g}$ 인 지역은 7개 지역이다(Table 4).

3.3.2 Cu

Cu의 평균함량이 가장 높은 지역은 중구이며, 146개 시료의 평균함량은 $859.7 \pm 1,145.1 \mu\text{g/g}$ 이다. 퇴적물에 함유되어 있는 Cu 함량이 500 $\mu\text{g/g}$ 을 초과한 곳은 구로구($633.1 \pm 981.0 \mu\text{g/g}$)와 동대문구($564.8 \pm 422.6 \mu\text{g/g}$)인 것으로 조사되어 25개 행정구역 중에서 2개 지역이며, 300-500 $\mu\text{g/g}$ 인 지역은 25개 행정구역 중 6개 지역이다. 200-300 $\mu\text{g/g}$ 인 지역은 13개 지역이다. 한편, Cu함량이 100-200 $\mu\text{g/g}$ 인 지역은 성북구, 서초구, 강동구와 노원구 등이다(Table 4). 여의도에서 채취한 도로변 퇴적물은 평균 함량이 $233.8 \pm 77.6 \mu\text{g/g}$ 로, 영등포구로부터 오염이 확산된 것으로 추정된다.

3.3.3 Pb

Pb 평균함량이 가장 높은 지역은 동작구이며, 평균 함량은 $360.0 \pm 624.8 \mu\text{g/g}$ 이다. 평균 함량이 300 $\mu\text{g/g}$ 을 초과한 곳은 중구로 평균 $302.9 \pm 239.7 \mu\text{g/g}$ 이며, 평균함량이 200-300 $\mu\text{g/g}$ 인 지역은 25개 행정구역 중에서 8개 지

역이다. 이 중에서, 서울시 전체 평균 함량보다 더 높은 함량을 나타내는 지역은 동작구, 중구, 종로구, 마포구이다. Pb 함량이 100-200 $\mu\text{g/g}$ 인 곳은 25개 행정구역 중에서 15개 지역이다. 조사된 서울시 행정구역 중에서 채취된 도로변 퇴적물의 Pb함량 중에서 가장 Pb오염이 미약한 것으로 판단되는 지역은 강동구(114.3 $\mu\text{g/g}$)와 강서구(117.2 $\mu\text{g/g}$)이다(Table 4).

3.3.4 Cr, Ni 및 Co

이번 조사에서 분석한 Cr 함량은 총 Cr함량이다. 평균 Cr함량이 가장 높은 지역은 동대문구로 평균 함량이 $345.5 \pm 456.4 \mu\text{g/g}$ 이다. 평균함량이 200-300 $\mu\text{g/g}$ 을 보이는 지역은 25개 행정구역 중 4개 지역이다. 평균 함량이 100-200 $\mu\text{g/g}$ 인 지역은 8개 지역이며, 100 $\mu\text{g/g}$ 이하인 지역은 12개 행정구역이었다. 이러한 총 Cr함량은 서울시 부근에서 채취한 오염되지 않은 하천퇴적물의 총 Cr 함량(50.2 $\mu\text{g/g}$)보다 모두 높다(Table 4).

평균 Ni함량을 비교한 결과, 조사된 25개 구역 중에서 200 $\mu\text{g/g}$ 을 초과한 지역은 중구로 평균 $215.1 \pm 419.3 \mu\text{g/g}$ 이다. 그 외, 평균 함량이 100-200 $\mu\text{g/g}$ 인 지역은 3개 지역이다. 평균 함량이 50-100 $\mu\text{g/g}$ 인 지역은 광진구 등 25개 지역 중에서 6개 지역이다. 그 외의 지역에서 채취한 평균 Ni함량은 50 $\mu\text{g/g}$ 이하를 기록하였다(Table 4).

평균 Co함량이 가장 높은 지역은 성동구로 $178.0 \pm 127.1 \mu\text{g/g}$ (6.8-336.5 $\mu\text{g/g}$)이며, 그 외 3개 지역도 100 $\mu\text{g/g}$ 을 초과하였다. 강북구와 도봉구의 경우, 오염되지 않은 하천퇴적물의 Co함량(평균 5.8 $\mu\text{g/g}$)과 매우 유사한 값을 나타내고 있어 대체로 서울시 지역의 도로변 먼지 혹은 퇴적물은 Co의 오염이 우려되지 않는 것으로 해석된다(Table 4).

3.4 공간적 중금속 오염 특성

서울시에서 각 행정구역별로 채취한 도로변 퇴적물의 평균 Zn, Pb, Cu, Cd, Cr, Co 및 Ni 함량을 크게 3-4 단계로 구분하여, 서울시 전 행정구역을 대상으로 오염정도를 색으로 구분하여 Fig. 3에 나타내었다.

Zn의 경우, 중구 지역을 중심으로, 공장 및 산업 활동이 상대적으로 활발한 지역(영등포구, 성동구 등)과 인구가 밀집된 지역(노원구 등)에서 Zn함량이 높은 것을 지시하고 있다. 공간적으로 보면, 서울시의 강남구보다 강북구에 Zn 오염이 더 진행되어 있다. Pb의 경우에는 중구와 동작구 지역을 중심으로 가장 오염이 심한 것으로 나타났고, 공장 및 산업 활동이 상대적으로 활발한 지역(구로구, 영등포구 등)도 Pb 오염이 심한 것으로 나타났다. Cd는 서울시의 중심부가 가장 함량이 높았으며, 외곽으로 갈수

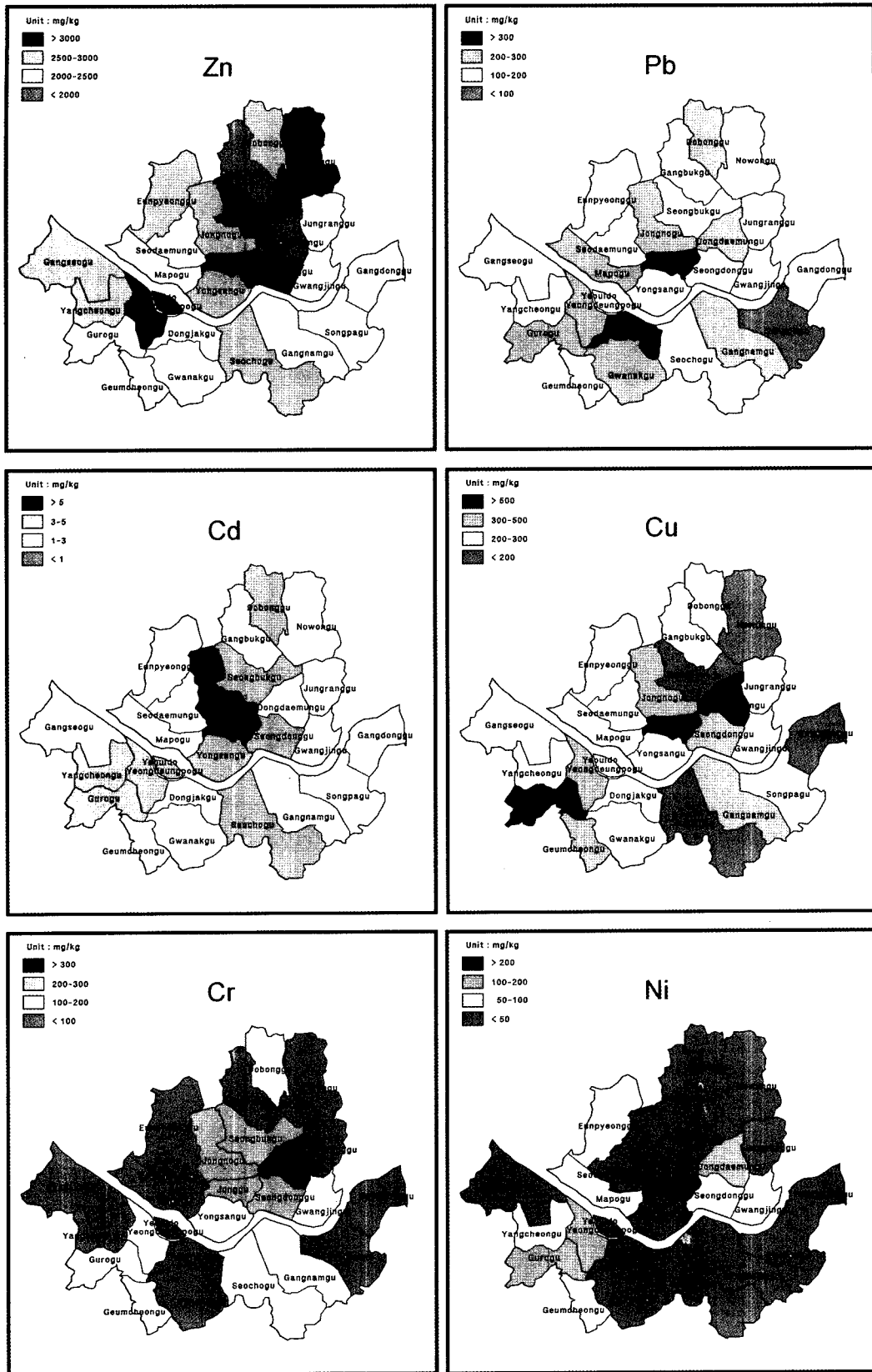


Fig. 3. Spatial variability of heavy metal concentrations in Seoul city.

록 함량이 낮아지는 경향이 있다. 즉, 종로구와 중구 지역을 중심으로 Cd 함량이 높게 나타났으며, 공단과 산업 활동이 활발한 지역도 높은 경향이 있다. Cu의 경우, 상업 활동이 활발한 중구와 공단지역인 구로구와 같은 지역을 중심으로 오염정도가 심하며, 외곽으로 가면서 오염이 미약하다. 특히, 공간적으로는 서울의 동부 지역보다는 서부 지역이 더 Cu에 오염되어 있다(Fig. 3). Cr은 상대적으로 오염이 가장 심한 지역인 동대문구를 중심으로 서울시 중앙지역과 공단지역인 금천구와 구로구가 Cr함량이 높은 것으로 밝혀졌으며, 그 외 서울시 서부와 동부지역은 100 µg/g이하인 것으로 나타났다. 한편, Ni은 중구와 구로구와 영등포구를 중심으로 일부 인접지역이 오염이 심한 것으로 나타났으며, 그 외, 서울시 동부지역과 북부지역은 모두 50 µg/g이하인 지역으로 나타나, 비교적 일부 국한된 지역만 오염되어 있다.

3.5 토지용도에 따른 중금속오염의 특성

서울시 각 행정구역별 토지용도의 차이에 따라 임야/대지, 대지/도로, 대지/임야, 대지/공장 및 대지/농경지 등으로 구분하였다. 임야/대지의 토지이용이 우세한 지역은 강

북구, 도봉구, 노원구, 은평구, 관악구, 종로구 등으로 구분하였고, 대지/도로가 우세한 지역은 광진구, 동대문구, 중구, 양천구, 동작구, 강남구, 송파구, 용산구 및 마포구로 구분하였다. 대지/임야가 우세한 지역은 중랑구, 성북구, 서대문구 등이 속하는 것으로 구분하였고, 대지/공장이 우세한 지역은 성동구, 구로구, 금천구 및 영등포구 등이 속하는 것으로 구분하였다. 대지/농경지가 우세한 지역은 강동구, 강서구 및 서초구로 구분하였다¹⁴⁾. 이러한 토지이용의 차이를 기준으로 각 행정구역에서 채취한 도로변 퇴적물의 평균 중금속 함량을 정리하였다(Table 5).

그 결과, 토지이용이 주로 대지/도로인 지역에서 채취한 도로변 퇴적물의 Pb, Ni, Cu, Cr 및 Cd 함량이 가장 높았던 것으로 나타났다. Zn의 경우만을 제외하면, 평균 중금속 함량이 높은 토지이용의 유형은 대지/도로 및 대지/공장의 유형인 것으로 나타나, 서울시 도로변 퇴적물의 중금속 오염의 주요 원인은 도로와 공장지역인 것으로 분석될 수 있다. 특히, Cu, Pb, Ni 및 Cr은 대지/도로의 토지이용이 우세한 지역에서 가장 높은 함량을 보여, 도로변 환경에서의 경제·산업활동에 따른 영향인 것으로 해석될 수 있다.

Table 5. The comparison of heavy metal concentrations with land use (unit:/g)

		Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Fe	Mn
Forest/ residential (141)*	mean	3.23	48.7	119.6	234.0	37.9	201.7	2633.8	25035.4	413.4
	median	2.51	8.0	82.2	225.9	32.4	175.3	2307.4	22616.9	388.4
	stdev	1.95	84.6	112.6	91.1	18.1	94.7	1541.9	8664.5	117.1
	min	1.03	2.8	29.5	86.6	17.4	65.8	433.1	13193.4	245.2
	max	13.50	296.7	850.5	817.5	113.0	730.3	10720.0	50166.0	1131.0
residential /Road (247)*	mean	4.84	63.3	243.6	642.8	148.1	261.4	2904.5	34273.8	457.4
	median	3.00	10.7	107.4	336.6	47.5	208.4	2374.4	33381.8	429.4
	stdev	3.90	157.3	391.4	931.4	319.5	208.6	1956.0	15026.2	142.8
	min	0.00	0.0	10.5	2.6	0.0	1.9	102.9	78.7	0.0
	max	25.70	1906.4	3311.2	8996.0	2390.7	2132.5	12435.1	101987.0	1154.4
residential /Forest (44)*	mean	3.44	84.7	159.7	206.0	35.2	166.4	2925.7	23616.8	391.8
	median	2.68	9.6	82.7	198.7	30.7	157.7	2408.9	22261.8	380.3
	stdev	1.94	103.9	133.7	60.5	17.7	44.5	1948.0	7236.5	57.8
	min	1.13	4.7	51.2	91.6	14.2	77.4	600.1	12457.4	270.4
	max	7.62	275.0	537.3	384.1	117.1	274.9	8656.5	40939.1	515.8
residential /Factory (133)*	mean	4.67	71.9	166.6	509.1	95.1	193.1	2101.6	34696.0	473.2
	median	3.20	16.1	118.1	308.1	61.0	181.9	1836.8	32929.0	432.1
	stdev	3.36	100.6	152.4	771.4	99.9	72.3	1329.3	17394.5	167.3
	min	0.00	0.0	6.2	1.6	0.0	3.1	68.4	16.2	0.0
	max	17.60	429.2	1254.4	7750.4	610.8	389.3	6709.0	100548.0	1403.4
Farmland /residential (50)*	mean	3.61	109.2	137.8	186.5	33.3	138.2	2557.8	28287.5	437.7
	median	2.14	13.0	88.1	176.2	32.1	142.6	2045.4	28131.4	440.9
	stdev	2.31	123.8	104.9	63.5	6.5	42.0	1776.1	10072.3	70.1
	min	1.23	6.8	53.8	75.2	22.8	60.7	673.3	15953.0	310.2
	max	8.45	318.8	513.6	378.1	49.8	242.6	9737.9	60457.9	729.5

*number of samples, Forest/residential : Gangbukgu, Dobonggu, Nowongu, Eunpyeonggu, Gwanakgu, Jongnogu; esidential/Road : Gwangjingu, Dongdaemungu, Junggu, Yangcheongu, Dongjakgu, Gangnamgu, Songpagu, Yongsangu, Mapogu; residential/Forest : Jungnanggu, Seongbukgu, Seodaemungu; residential/Factory : Seongdonggu, Gurogu, Geumcheongu, Yeongdeungpogu; Farmland/residential: Gangdonggu, Gangseogu, Seochoгу.

Table 6. Summary of indices of geoaccumulation (I_{geo}) and pollution index of trace metals in roadside sediments from gully pots in Seoul City

	No. of sample	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	Pollution Index
Gangnamgu	10	-0.3-0.6 (0.2)	0.2-0.8 (0.5)	0.8-2.5 (1.7)	0.6-2.3 (1.4)	1.8-4.2 (3.2)	1.2-3.5 (2.3)
Gangdonggu	10	-0.6-0.5 (-0.1)	-0.3-0.5 (0.1)	0.4-1.7 (0.8)	-0.3-1.3 (0.5)	1.5-4.5 (2.9)	0.9-3.4 (1.8)
Gangbukgu	10	-0.9-0.2 (-0.3)	-1.2-0.6 (-0.1)	-0.1-2.1 (1.1)	0.2-1.3 (0.7)	1.8-3.4 (2.5)	0.9-2.2 (1.4)
Ghanseogu	10	-0.4-0.6 (-0.1)	-0.5-0.6 (0.0)	0.1-1.9 (1.0)	-0.2-1.7 (0.6)	1.8-5.4 (3.0)	0.9-5.7 (1.9)
Gwangjingu	10	-0.4-0.4 (0.0)	-0.1-2.6 (0.6)	0.4-2.3 (1.4)	-0.1-1.5 (0.9)	1.3-5.0 (3.0)	0.8-4.6 (2.1)
Nowongu	10	-0.6-0.2 (-0.1)	-1.1-0.3 (-0.3)	0.3-1.5 (0.9)	0.7-1.9 (1.3)	2.1-4.9 (3.6)	0.9-3.9 (2.3)
Dongdaemungu	24	-0.4-1.8 (0.4)	-0.6-4.3 (1.2)	0.5-3.9 (2.3)	0.6-3.1 (1.3)	1.6-3.6 (2.7)	0.9-6.7 (2.8)
Songpagu	9	-0.1-0.6 (0.1)	-0.6-0.6 (0.1)	-0.1-2.2 (1.2)	-0.4-1.9 (0.9)	1.4-4.4 (2.8)	0.8-3.2 (1.8)
Jungranggu	10	-0.4-0.5 (0.0)	-0.6-1.0 (0.1)	0.6-1.4 (1.1)	0.1-1.6 (0.9)	1.3-4.1 (2.9)	0.8-2.7 (1.8)
Gwanakgu	10	-0.2-0.5 (0.2)	-0.0-0.7 (0.3)	0.7-1.9 (1.3)	0.7-3.1 (1.3)	2.1-4.4 (3.2)	1.1-3.6 (2.1)
Geumcheongu	10	-0.1-0.9 (0.3)	0.1-1.1 (0.4)	1.4-2.1 (1.7)	0.6-1.6 (1.1)	2.6-3.9 (3.3)	1.5-2.7 (2.2)
Dongjakgu	10	-0.6-1.6 (0.4)	-0.5-0.3 (-0.1)	0.3-2.2 (1.1)	0.6-4.8 (1.5)	1.5-4.3 (3.0)	1.3-4.2 (2.1)
Mapogu	10	-0.2-1.0 (0.3)	-0.3-1.2 (0.3)	0.9-2.0 (1.4)	0.7-3.2 (1.4)	1.9-4.1 (3.2)	1.2-3.5 (2.2)
Seodaemungu	10	-0.1-0.7 (0.3)	-0.2-1.3 (0.2)	0.6-2.1 (1.3)	0.4-1.9 (1.2)	2.4-4.1 (3.3)	1.2-2.7 (2.1)
Yangcheongu	10	-0.1-2.2 (0.5)	-0.1-1.1 (0.3)	0.8-2.1 (1.6)	0.6-1.6 (1.2)	2.6-4.9 (3.3)	1.8-4.1 (2.3)
Yeongdeungpogu	10	0.1-1.6 (0.6)	0.3-2.0 (0.9)	1.8-2.9 (2.1)	0.8-2.2 (1.5)	2.7-4.7 (3.8)	2.1-4.9 (3.2)
Eunpyeonggu	10	-0.9-0.7 (0.1)	-0.9-1.2 (0.0)	0.6-1.9 (1.2)	0.2-1.2 (0.9)	2.6-4.2 (3.4)	1.2-3.0 (2.1)
Seochogu	30	-0.5-2.1 (1.0)	-0.3-2.8 (0.9)	-0.3-2.0 (0.9)	0.3-1.7 (1.0)	1.7-4.9 (3.3)	1.7-4.9 (2.8)
Seongdonggu	15	-0.5-2.1 (1.1)	0.2-2.6 (1.4)	1.5-3.3 (2.3)	0.6-1.9 (1.2)	2.3-4.8 (3.6)	2.4-5.3 (3.7)
Seonbukgu	24	-0.8-1.9 (1.0)	-0.4-2.8 (1.2)	0.0-1.7 (1.0)	0.5-1.7 (1.2)	2.0-5.2 (3.5)	1.4-5.9 (3.2)
Yongsangu	18	-0.3-2.3 (1.1)	-0.8-2.6 (0.9)	-0.1-2.2 (1.3)	0.1-1.9 (1.2)	0.9-4.7 (3.2)	1.4-4.6 (2.8)
Jongnogu	26	0.6-2.4 (1.4)	-0.3-3.5 (1.1)	0.8-3.1 (1.7)	1.0-3.3 (1.8)	1.9-5.5 (3.2)	2.0-7.4 (3.1)
Junggu	146	-0.8-3.7 (1.3)	-2.8-5.5 (1.2)	-5.1-6.6 (2.5)	-5.3-4.4 (1.8)	-1.2-5.7 (3.5)	0.12-0.9 (4.4)
Yeouido	48	-0.9-2.8 (0.9)	-10.2-2.4 (0.0)	-8.8-2.0 (1.0)	-15.9-2.3 (0.8)	-7.7-5.4 (3.1)	0.0-5.9 (2.6)
Gurogu	98	-0.9-3.2 (1.0)	-3.6-4.0 (0.7)	-5.9-6.4 (1.8)	-4.6-2.4 (1.3)	-1.8-4.3 (2.6)	0.11-3.0 (2.7)
Dobonggu	45	-0.7-2.8 (0.7)	-1.3-2.8 (0.3)	0.1-2.5 (1.1)	-0.2-2.2 (1.4)	0.9-5.1 (3.2)	0.8-5.3 (2.4)

Zn가 가장 높은 토지이용의 유형은 대지/입야인 지역인 것으로 나타났고, 토지이용이 대지/도로인 경우도 이와 유사한 값을 보이고 있다. 그러나, Zn의 경우 모든 토지이용의 유형과 상관없이 2,101 µg/g 이상의 평균함량을 나타내고 있으며, 최대 평균함량은 2,925.7 µg/g을 기록하였다. Zn는 토지이용에 크게 상관하지 않고 서울시 도로환경에서 전반적으로 진행되고 있는 것을 지시하고 있다. Co 함량이 가장 높은 토지이용의 형태는 대지/농경지의 유형으로 평균함량이 109.2 µg/g이었으며, 이는 대지/농경지의 토지이용이 Co 오염의 주요 원인이 될 수 있는 것으로 추정할 수 있다.

4. 고 찰

4.1. Geoaccumulation Index를 이용한 중금속 오염 평가

서울시 도로변 우수관에서 채취한 퇴적물의 중금속함량을 서울시 부근의 하천에서 채취한 하천퇴적물의 평균 중금속 함량과 비교하여 geoaccumulation index를 계산하였으며, 이를 근거로 오염정도를 정량화하였다. Geoaccumulation index(I_{geo})은 Muller(1979)에 의해 제시된 것으로 해안퇴적물의 오염정도를 평가하기 위해 이용되었다^{9,15-17}).

계산된 I_{geo} 값은 Table 6에 정리하였다. 가장 오염정도가 심한 원소는 Zn이며, 각 행정구역별 I_{geo}의 평균값은 2.4(강북구)-3.8(영등포구)으로 class 3(moderately to strongly polluted)에서 class 4(strongly polluted)로 평가되었다. Zn의 I_{geo} 평균값이 class 4로 평가된 곳은 25개 행정구역 중 19개 지역으로 전체 조사지역의 약 76%에 해당된다. 그 외 지역은 Zn오염이 class 3으로 평가되었으며, Zn의 오염은 서울시 전역에서 심각하게 이미 진행되어 있음을 지시하고 있다(Fig. 4).

Cu의 I_{geo} 평균값은 0.85(강동구)-2.49(중구)로 class 1(practically unpolluted to moderately polluted)에서 class 3으로 평가되었다(Table 6). 서울시의 조사된 행정구역 중에서 가장 Cu 오염이 심한 곳은 중구이었으며, 성동구, 동대문구 및 영등포구의 I_{geo}의 평균값이 class 3으로 평가되었다. Cu의 I_{geo} 평균값이 class 2(moderately polluted)로 평가된 곳은 18개 지역으로 전체 조사지역의 72%를 차지하였다. 평균 I_{geo} 값이 1이하인 곳은 유일하게 강동구와 노원구, 서초구이었다. Cu오염은 서울시의 중앙부분에서부터 외곽지역으로 진행되고 있으며, 서울시 동부지역보다는 서부지역에 더 오염이 진행되었음을 나타내고 있다(Fig. 4).

Pb의 I_{geo} 평균값은 0.5(class 1)-1.8(class 2)인 것으로

평가되었다. Pb의 평균 I_{geo} 값이 class 2로 구분된 곳은 18개 지역이었으며, 전체 조사지역 중에서 72%를 차지하였다. 이외, class 1로 구분된 곳은 7개 지역이었으며, 전체 조사지역 중에서 28%를 차지하였다(Table 6). 서울시 일부 외곽지역을 제외하고 중앙부분은 모두 class 2에 해당되어 비교적 오염이 적게 진행되어 있음을 지시한다(Fig. 4).

Total Cr의 I_{geo} 평균값은 최소 -0.2(class 0)에서 최대 1.4(class 2)인 것으로 평가되었으며, 각각 노원구와 성동구였던 것으로 밝혀졌다(Table 6). Cr의 오염정도가 class 2로 구분된 곳은 5개 지역뿐이었으며, 전체 조사지역 중에서 20%를 차지하였다. I_{geo} 평균값이 1이하(class 1)인 곳은 전체 조사지역 중에서 17개 지역이었으며, 전체 조사지역의 68%이었다. 전체 조사지역 중에서 강북구, 노원구, 동작구 등 3개 지역은 I_{geo} 평균값이 0이하로 class 0 (practically unpolluted)로 평가되었다(Fig. 4).

Cd의 I_{geo} 평균값은 -0.2-1.4로 class 0~class 2로 평가되었다. class 2로 평가되는 곳은 전체의 28%를 차지하였다. 대부분의 조사지역은 I_{geo} 평균값이 1이하인 class 1으로 구분된 곳으로, 오염의 우려가 적은 곳이 전체 조사지역 중에서 14개 지역으로 56%를 차지하였다. 이외, I_{geo} 평균값이 0이하인 class 0으로 평가되어 오염이 진행되지 않은 지역은 강동구, 강북구, 강서구, 노원구 등 4개 지역이었다(Table 6). 서울시의 중앙부분에 해당되는 지역과 구로구만이 class 2에 해당되어 이들 지역에서는 Cd오염이 진행되고 있음을 알 수 있으며, 서울시 외곽지역의 일부 지역은 class 0에 해당되어 Cd오염이 미약한 것을 지시하고 있다(Fig. 4).

한편, 7개 원소(Zn, Cu, Pb, Cr, Ni, Co, Cd)를 이용하여 오염지수(pollution index)를 구하여, 서울시 25개 행정구역의 오염도를 상대적으로 비교하였다(Table 6).

Pollution Index =

$$\left(\frac{Cu}{100} + \frac{Pb}{100} + \frac{Zn}{300} + \frac{Cd}{3} + \frac{Ni}{100} + \frac{Cr}{100} + \frac{Co}{50} \right) \div 7$$

위의 수식에서 각 원소는 시료 내 해당원소의 함량을 나타낸다.

서울시에서 조사된 행정구역 중에서 가장 오염지수 값이 높은 곳은 중구 지역으로 4.4이었으며, 그 다음으로는 성동구, 영등포구, 성북구, 종로구 4개 지역도 오염지수가 3이상인 지역이었다. 오염지수 값이 2-3인 지역은 강남구 등 15개 지역으로 전체의 60%를 차지한다. 오염지수 값이 가장 낮은 지역은 강북구(1.40)로 서울시에서 조사된

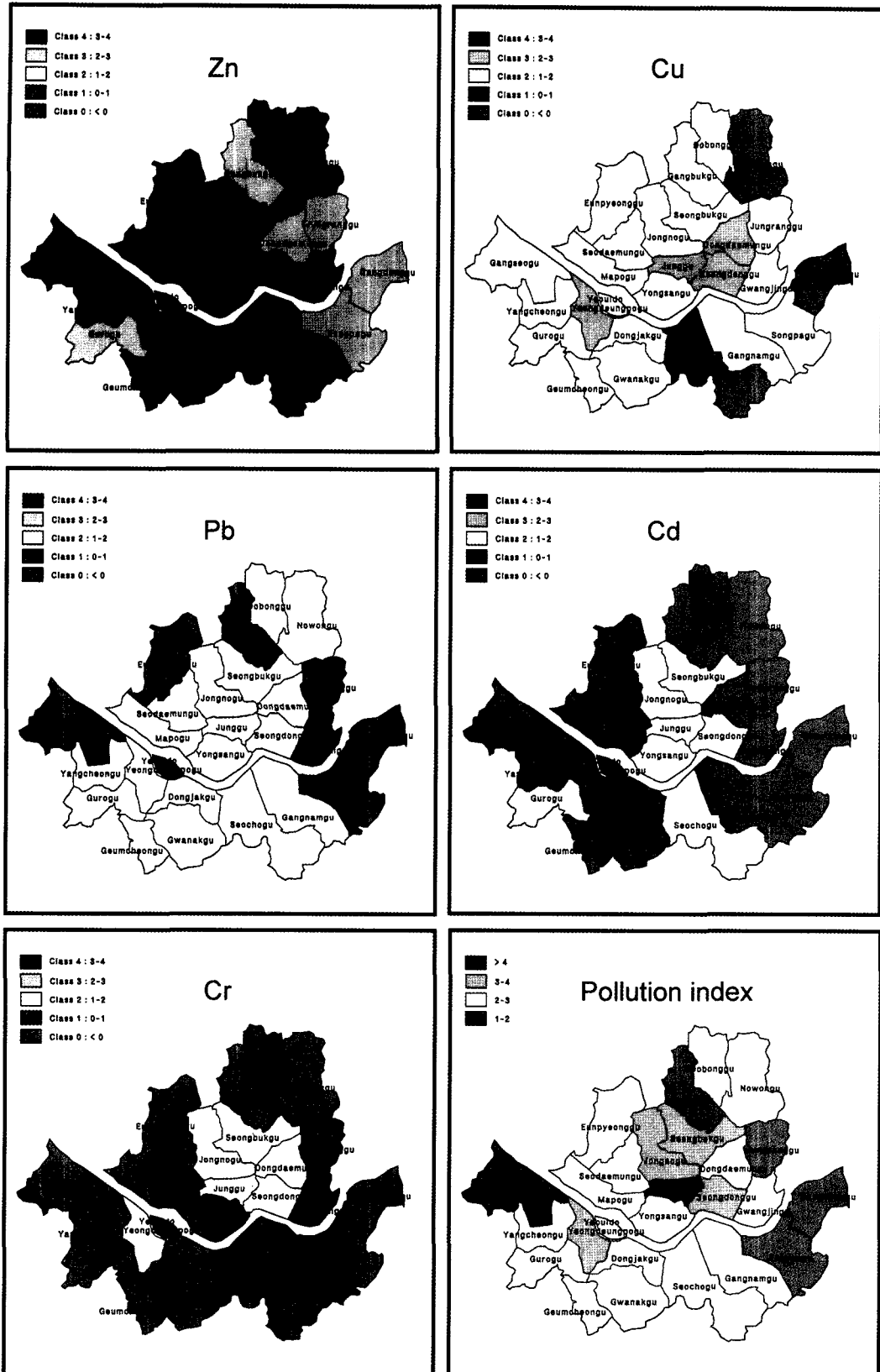


Fig. 4. Spatial variation of geoaccumulation indices and pollution index in Seoul City.

25개 행정구역 중에서 가장 중금속오염의 우려가 적은 지역으로 나타났다. 전반적으로 서울시 도로변 환경의 퇴적물 중에서 가장 오염이 심한 지역은 중구 지역이며, 이외, 공장 및 산업 활동이 활발한 지역 등의 순서로 오염이 진행되고 있는 것으로 나타났다. 특히, 중구 지역을 중심으로 오염지수가 가장 높았고, 서울시 외곽으로 갈수록 오염정도가 감소하는 경향이 관찰되었다(Fig. 4).

4.2 도로변 퇴적물의 중금속 오염원

중금속 원소에 오염된 대기의 미세한 먼지와 퇴적물은 인근 공업단지에서 발생하는 배출가스와 자동차에서 배출되는 매연이 가장 중요한 원인이 되며, 대표적인 중금속 원소는 Zn, Cd, Cu, Cr, Co, Ni 및 As 등이다^{2, 6, 9, 18-20}.

서울시의 도로변에서 채취한 도로변 퇴적물의 Zn (2665.0 µg/g)와 Cd(4.3 µg/g)의 평균 함량은 프랑스 고속도로변 퇴적물과 파리의 도로변 aerosols의 Zn(각각 평균 2861 µg/g과 2330 µg/g)와 Cd(각각 평균 2.72 µg/g와 26.6 µg/g)의 함량과 유사한 반면에, Pb 함량(214.3 µg/g)은 프랑스 고속도로 퇴적물(1456 µg/g)과 파리의 도로변 aerosols (4800 µg/g)에 비교하여 매우 낮은 함량을 보인다^{9, 21, 22}. 프랑스의 도로변 퇴적물과 aerosols의 Pb 함량이 높은 것은 유연휘발유에 옥탄가를 높이기 위해 산화제로 첨가되었던 tetraethyl-lead 혹은 tetramethyl-lead가 연소되어 브롬화합물 형태로 배출되기 때문이다. 브롬화합물의 형태로 배출된 Pb는 대기에 있는 SO_x와 물과 화학적으로 반응하여 PbSO₄로 침전되는 것으로 알려져 있으며, 이 화합물은 물분자 혹은 먼지와 응집되어 지상으로 퇴적되어 토양과 수계를 오염시키게 되는 것으로 알려져 있다^{2, 18-20}. 우리나라에서 무연휘발유를 사용함으로써 대도시환경에서의 도로변 퇴적물과 먼지의 Pb 오염을 크게 경감시키고 있는 것으로 판단된다. 그러므로, 자동차 배기가스에 의해 배출된 매연에 함유되어 있는 Pb이 도로변 먼지, 퇴적물과 도로변 퇴적물의 Pb오염의 직접적인 원인이라기보다는 도로변에서의 산업활동으로 인한 오염이 중요하다고 할 수 있다.

Chon *et al.*(1995)와 Yun *et al.*(2000)에 의해 조사된, 서울시 도로변 먼지와 퇴적물의 Zn 평균함량은 각각 271-296 µg/g과 532 µg/g으로, 이번에 채취한 도로변 퇴적물의 평균함량보다 3.9배 정도의 적다^{23, 24}. 이는 자동차타이어로부터 마모되어 도로에 퇴적된 미세한 조각이 공기중으로 비산되지 못하고 도로표면에 퇴적되어 있다가 비가 오면 빗물에 씻겨 우수관으로 이동하여 퇴적된 것으로 판단된다. 자동차타이어에는 Zn함량이 약 1.3%정도 함유

되어 있는 데, 이는 타이어의 경화작용(vulcanization) 과정에서 ZnO 혹은 Zn-diethyl 혹은 -dimethyl carbamate를 사용하고 있기 때문이다^{6, 25, 26}. 강남구, 강서구, 강동구 등 비교적 금속가공업체의 수가 적고, 상업 혹은 주거지로 개발된 지역에서도 퇴적물의 Zn함량이 2,000-3,000 µg/g의 함량을 보이고 있는 것은 이런 설명을 가능하게 하여 준다.

여의도에서 채취한 시료의 Cd 평균함량은 4.43±3.27 µg/g이며, 서울시 외곽의 하천에서 채취한 하천퇴적물의 평균 Cd함량(1.29 µg/g)에 비해 약 3.5배 높은 것으로 나타났다. 도로변 퇴적물에서 검출되는 Cd은 타이어에 함유되어 있는 Zn에 불순물로 존재하고 있던 것으로 생각되며, 자연상태에서 Cd의 주요 산출상태가 Zn광물(섬아연석: ZnS)의 결정격자를 치환한 형태로 산출되는 것과 밀접하게 관련된 것이다.

Cu오염이 현저한 도로변 퇴적물은 일반적으로 Pb, Total Cr 및 Ni 함량도 같이 높게 나타났으며, 이는 이들 원소들의 오염원이 유사하였을 것으로 추정된다. 이러한 지역은 중구, 구로구, 동대문구, 영등포구, 금천구 등으로 모두 공단이 발달된 지역이거나 금속물질을 가공하는 업체가 밀집되어 있는 지역으로, 서울시의 도로변 퇴적물에 오염된 Cu, Pb, Cr 및 Ni 은 산업활동과 밀접하게 관련되어 있는 것으로 해석된다. 여의도에서 채취한 도로변 퇴적물은 평균 함량이 188.8±71.8 µg/g(0.0-361.9 µg/g)으로 영등포구(207.3±50.8 µg/g)와 매우 유사한 값을 보이며, 이 지역의 Cu오염이 인접한 영등포구로부터 확산되는 것으로 추정된다.

4.3 요인분석 결과

서울시 도로변 퇴적물의 중금속 함량에 영향을 미치는 요인(factor)을 살펴보기 위해 다변량 통계분석인 요인분석을 실시하였다. 원본자료는 서울시의 각 구청별 도로변 퇴적물의 평균 중금속 함량, 토지이용 자료, 산업체, 인구 밀도, 폐기물배출량, 자동차등록대수 및 오염지수를 사용하였다¹⁴. 여기서 중금속 함량을 평균값으로 사용하였기 때문에 ANOVA 분석은 실시하지 않았다. 통계분석은 모든 자료들이 정규분포를 하고 있다는 가정 하에 실시되므로, 요인분석을 실시하기 전에 정규분포를 검증하기 위해 95% 신뢰도 내에서 Kolmogorov-Smirnov test를 실시하였으며, 유의수준(significance)값이 0.05를 넘지 않는 Co와 공정수는 정규분포를 하지 않아 요인분석에서 제외하였다(Table 7). 추출된 요인들이 전체 분산을 설명하는 기여도를 정량화하기 위하여 initial eigenvalue를 계산하였으며, 값이 1이상이 되는 4개의 요인은 전체의 74.33%를

Table 7. The result of Kolmogorov-Smirnov Test

	Asymp. Sig. (2-tailed)		Asymp. Sig. (2-tailed)
As	0.93	Mn	0.99
Cd	0.16	Pollution index	0.37
Log Co	0.01	Population density	0.99
Cr	0.12	waste amount	0.52
Cu	0.05	traffic discharge	0.52
LogNi	0.22	Industrial facilities number	0.19
Pb	0.35	agricultural area	0.10
Zn	0.80	Log industrial area	0.00
Fe	0.74	forest area	0.12

Extraction method : Principal component analysis, Rotation method: Varimax with Kaiser normalization. a Rotation converged in 11 iterations

설명하고 있다(Table 8). 각 요인들의 loading 값은 kaiser normalization과 varimax rotation 방식으로 계산하였다 (Table 8).

Table 9서 0.5 이상인 값을 보면, 요인 1은 대부분 산업시설수와 Cu, Ni, Fe 및 Cr이 주 요인으로, 이들 중금속 원소들은 산업시설수와 관련된 것으로 보이며, 산림지역은 이들과 반대의 경향을 보여주고 있어 산림지역이 우세한 지역은 이들 원소의 오염이 적을 것으로 보인다. 요인 2에서는 오염지수(pollution index)와 Cr, Zn 및 Cd이 상관관계가 좋은 것으로 보이므로, 이 세 중금속 원소가 오염지수에 가장 영향을 주고 있는 것으로 해석되었다. 요인 3은 토지이용도로 볼 때 농업지역과 교통량 및 폐기물 배출량이 좋은 관계를 보이고 있으나 중금속 원소들과는

Table 8. Total variance explained

component	Initial Eigenvalues			Extraction sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
1	4.59627094	28.73	28.73	4.60	28.73	28.73
2	3.58089675	22.38	51.11	3.58	22.38	51.11
3	2.20644195	13.79	64.90	2.21	13.79	64.90
4	1.50930429	9.43	74.33	1.51	9.43	74.33
5	0.99578675	6.22	80.55			
6	0.77538512	4.85	85.40			
7	0.60326136	3.77	89.17			
8	0.48620482	3.04	92.21			
9	0.41469721	2.59	94.80			
10	0.31119905	1.94	96.75			
11	0.19014046	1.19	97.93			
12	0.15252940	0.95	98.89			
13	0.08241855	0.52	99.40			
14	0.06738934	0.42	99.82			
15	0.02529736	0.16	99.98			
16	0.00277666	0.01735413	100			

Extraction method : Principal component analysis, Rotation method: Varimax with Kaiser normalization. a Rotation converged in 11 iterations

Table 9. Rotated component matrix

	Component 1	Component 2	Component 3	Component 4
log Ni	0.92	0.09	-0.16	0.17
Cu	0.86	0.27	-0.11	0.13
Fe	0.74	-0.44	0.24	0.35
Industrial facilities number	0.66	0.20	-0.25	-0.45
forest area	-0.65	0.11	0.11	-0.05
Population density	0.46	-0.46	-0.43	0.07
Pollution index	0.30	0.93	-0.08	0.04
Cd	0.12	0.87	-0.09	-0.06
Cr	0.59	0.66	-0.07	-0.13
Zn	-0.24	0.63	0.08	0.08
agricultural area	-0.10	-0.11	0.90	-0.03
traffic discharge	-0.12	-0.24	0.69	0.32
waste amount	-0.11	0.37	0.68	-0.14
As	0.19	-0.50	0.04	0.69
Mn	0.49	0.17	0.21	0.69
Pb	-0.05	0.31	-0.46	0.65

거의 관계가 없어 도로변 퇴적물의 중금속 함량에 영향을 끼치지 않는 것으로 보인다. 요인 4에서는 Mn과 Pb가 좋은 상관관계를 보이고 있으나, 다른 요인들과는 거의 관계가 없는 것으로 보아 이들 원소의 거동에 다른 요인이 작용하고 있을 가능성을 지시하고 있다.

4.4 도로변 퇴적물의 관리방안

자동차 배기가스, 마모에 의해 발생하는 미세한 타이어 및 브레이크물질들은 도로환경에서 자연상태 또는 자동차 통행에 의해 발생한 바람에 의해 다시 공기 중으로 비산되며, 이로 인해 인근 주택가와 상가지역을 크게 오염시키고, 도로를 통행하는 보행자와 도로변에서 생활하는 사람들의 호흡을 통해 인체에 흡입될 수 있다. 특히, 공기 중으로 부유되는 미세한 입자의 퇴적물은 중금속과 유기물질의 함량이 높은 것으로 알려져 있다⁶⁾.

도로변 퇴적물은 빗물에 의해 씻겨 하수관 혹은 우수관을 통해 이동되기 때문에 일시적으로 도로변 퇴적물의 양이 줄어드는 효과가 기대될 수 있다. 그러나, 우리나라는 여름과 일정 기간에 일시적으로 많은 양의 비가 내리는 특징이 있으므로 비가 내리지 않는 건조기후가 지속되는 봄, 가을 혹은 겨울과 같은 계절일수록 도로변의 퇴적물의 양이 크게 증가되는 것을 관찰할 수 있었다.

이러한 면에서 계절에 따른 강수량, 풍속 등 기상자료는 도로변 퇴적물을 관리하는 데 있어 중요하다. 본 연구가 시작된 시점인 1997년부터 최근 5년간 서울에서 측정된 년 평균 강수량은 1,146.8-2,349.1 mm이었으며, 겨울철이 가장 낮게 기록되었고(2월 15.6 mm), 가장 높은 기록은 8월로 약 529.5 mm인 것으로 분석되었다. 월별 평균 강수량이 100 mm을 상회하는 경우는 5월부터 9월까지이며, 7월과 8월에 집중적으로 비가 내리는 것으로 분석되었다. 평균풍속은 1.9-2.3 m/s, 최대풍속은 1997년 10.1 m/s이었다. 월별 평균 풍속은 거의 유사한 것으로 나타났으며, 최대 풍속은 8.3-10.7 m/s이었고, 3월과 4월에 가장 바람이 세게 분 것으로 나타났다¹⁰⁾. 그러므로, 5월부터 9월까지에는 도로환경이 상대적으로 깨끗해지므로, 도로변 대기환경은 비가 내리는 기간동안 일시적으로 개선될 것으로 생각된다. 그러나, 비가 적게 내리는 건조한 시기에는 오염된 퇴적물이 도로변에 쌓여 도로변 대기환경을 크게 악화시킬 것으로 추정된다. 또한, 월별 평균풍속은 거의 일정하지만, 최대풍속은 계절적인 영향으로 인해 3월과 4월에 가장 높으므로, 이 기간동안 도로변 주거환경을 더욱 악화시킬 수 있을 것으로 생각된다. 선진외국에서 도로변의 오염된 퇴적물을 관리하는 방안으로 가장 일반적

으로 쓰이는 것이 주기적인 청소와 세척이다. 이번 연구로 오염이 심하다고 판단되는 지역은 물을 이용하여 도로를 정기적으로 세척하여야 한다. 특히, 계절적으로 비가 적게 내리는 시기에는 보다 자주 도로변을 세척하여야 할 것이다.

그러나, 도로변의 퇴적물은 중금속과 유기오염물질의 함량이 높으므로 우수관을 통해 한강과 같은 하천으로 유입될 경우, 하천의 수질을 크게 오염시키게 되고, 퇴적물로 인하여 하천바닥에 서식하는 동식물 등의 생태계를 오염시키게 될 것이다. 그러므로, 오염된 도로변 퇴적물이 그대로 하천에 유입되지 말아야 한다. 우수관이 합류식(combined sewer system)인 경우 빗물과 함께 우수관으로 유입된 퇴적물은 하수종말처리장에서 침전과정을 통해 오염된 퇴적물이 제거된 뒤 한강으로 방류되므로 오염된 도로변 퇴적물에 의한 환경오염 확산 문제가 크지 않을 것이다. 합류식이 아닌 지역에서는 환경친화적인 우수지를 건설하여 우수관을 우수지로 연결하고, 우수지에서 오염된 퇴적물을 침전시켜 제거한 뒤 한강으로 방류하는 것이 바람직하다.

한편, 서울시에 측정된 빗물의 강우산도는 pH 4.8-5.7 사이인 것으로 기록되었고, 최대강우산도는 pH 3.5인 것으로 기록되었다¹⁰⁾. 2000년 월 평균강우산도는 대체적으로 가을과 겨울에 상대적으로 더 낮은 것으로 기록되었으며, 12월과 1월에 가장 낮았다. 강우산도는 도로변에 퇴적된 퇴적물에 오염된 중금속의 용해반응 및 침전반응을 조절하는 중요한 물리화학적 조건이며, 강우산도가 5.0이하에서는 오염된 중금속의 존재형태 중에서 탄산염광물로 존재하는 중금속 및 흡착된 형태로 존재하는 중금속을 용해시키고 탈착시킬 수 있기 때문에 매우 중요한 변수이다. 특히, 겨울철에는 눈을 녹이기 위해 제설제로 살포하는 염화칼슘(CaCl₂)와 염화나트륨(NaCl)에 의해서도 중금속의 용해반응이 발생할 수 있으므로, 이 기간동안 강우산도가 낮음으로서 발생하는 중금속의 용해반응을 더욱 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

1. 서울시 도로변 우수관에서 채취한 633개 퇴적물 내 오염된 중금속의 평균함량은 Zn 2,665±1,815 µg/g, Cu 445.6±708.0 µg/g, Pb 214.3±147.9 µg/g, Cr 182.1±268.8 µg/g, Ni 89.6±206.4 µg/g, Co 68.9±126.2 µg/g 및 Cd 4.3±3.3 µg/g이다. 서울시 외곽의 1-2차 수계에서 채취한 오염되지 않은 하천퇴적물의 함량과 비교하면, Zn, Cu,

Co, Cr과 Pb에 의한 오염이 매우 심하다.

2. Zn 함량이 가장 높은 토지이용의 유형은 대지/임야 및 대지/도로이었으며, Co는 대지/농경지의 유형이었다. Cu, Pb, Ni 및 Cr은 대지/도로 및 대지/공장의 유형이 우세한 지역에서 가장 높은 함량을 보여, 도로변 환경에서의 경제·산업활동에 따른 영향도 중요한 것으로 해석된다.

3. I_{geo} 값을 계산한 결과, 가장 오염정도가 심한 원소는 Zn이며, class 4로 분류된 곳은 서울시 전체 구청의 약 76%이었다. Cu는 중구, 성동구 등에서 class 3로 평가되었고, class 2는 전체의 구청의 72%를 차지하였다. Pb도 class 2로 분류된 곳이 전체 구청의 약 72%이었다. Cr과 Cd는 상대적으로 오염정도가 낮은 것으로 나타났다.

4. 서울시에서 조사된 행정구역 중에서 가장 오염지수 값이 높은 곳은 중구 지역이며, 가장 낮은 지역은 강북구이고, 공장 및 산업활동이 활발한 지역 등의 순서로 오염이 진행되고 있는 것으로 나타났다. 가장 오래된 거주지역과 산업지역을 중심으로 해서 오염이 가장 심하게 진행되었으며, 도시외곽으로 갈수록 오염정도가 감소하는 경향이 관찰되었다.

5. 요인분석 결과, Cu, Ni, Fe 및 Cr은 산업시설 수와 유의성이 높은 것으로 보이며, 산림지역은 이들과 반대의 경향을 보여주고 있다. 오염지수와 Cr, Zn 및 Cd이 상관관계가 좋은 것으로 보이므로, 이 세 중금속 원소가 오염지수에 가장 영향을 주고 있는 것으로 해석되었다. Mn과 Pb가 좋은 상관관계를 보이고 있으나, 다른 요인들과는 거의 관계가 없어 다른 요인이 작용하고 있을 가능성이 있다.

6. 오염된 도로변 퇴적물을 제거하기 위해서는 물을 이용한 정기적인 세척을 실시하는 것이 바람직하다. 합류식이 아닌 우수관인 경우, 우수관을 유수지로 연결하여 오염된 퇴적물이 직접적으로 한강에 유입되는 것을 막아야 하며, 유수지는 정기적으로 준설하여 주는 것이 바람직하다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(1999-2-131-001-3)지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 전효택, 안주성, "수도권 위성도시의 토양과 분진의 중금속 오염에 대한 연구", *자원환경지질*, **29**(1), pp. 87-100 (1996).
- Ellis J. B. and Revitt D. M., "Incidence of Heavy Metals in Street Surface Sediments : Solubility and Grain Size Studies", *Water, Air, and Soil Pollution*, **17**, pp87-100 (1982).
- Oberts, G. L., "Magnitude and problems of non-point pollution from urban and urbanizing areas", *In : V. Novotny (Ed.), Non-point pollution abatement symposium, Marquette University, USA*, pp KIII-1-KIII-19 (1985).
- Hoffman, E. J., Latimer, J. S., Hunt, C. D., Mills, G. L. and Quinn, J. C., "Stormwater runoff from highways", *Water Air Soil Pollut.*, **25**, pp. 349-364 (1985).
- Dempsey, B. A., Tai, Y. L. and Harrison, S. G., "Mobilization and removal of contaminants associated with urban dust and dirt", *Water Science and Technology*, **28**, pp. 225-230 (1993).
- Lee, P. K. and Touray, J. C., "Characteristics of polluted artificial soil localized on a motorway border and effects of acidification on the leaching behavior of heavy metals (Pb, Zn, Cd)", *Water Research*, **32**, pp. 3425-3435 (1998).
- Verbanck, M., "Sewer sediment and its relation with the quality characteristics of combined sewer flows", *Wat. Sci. Tech.*, **22**, pp. 247-257 (1990).
- Benoist, A. P. and Lijklema, L., "Distribution of sedimentation rates of suspended solids and heavy metals in combined sewer overflows", *Wat. Sci. tech.*, **22**, pp. 61-68 (1990).
- Lee, P. K., Baillif, P., Touray, J. C. and Ildefonse, J. P., "Heavy Metal Contamination of Settling Particles in a Retention Pond along the A-71 Motorway in Sologne, France", *The Science of the Total Environment*, **201**, pp 1-15 (1997).
- 통계청, 서울시 통계연보(1990).
- Muller G., "Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins-Verderungen seit", *Umschau*, **79**, pp 778-783 (1979).
- Al-Shukry R., Serpaud B., Matejka G. and Caillet C., "Sepeciation des Metaux Lourds dans les Sediments d'un Cours d'Eau en aval d'un Rejet Industriel", *Environmental Technology*, **13**, pp. 129-140 (1992).
- 신성천, 이평구, 진명식, 홍영국, 박성원, 지세정, 이진수, 염승준, 환경지화학도 작성, 과학기술부, pp. 272(2000).
- 이평구, 윤성택, 이대하, 서울시 무기환경시스템의 환경지구화학 및 수리지질학적 연구, 한국과학재단, pp. 176(2002).
- Kemp A. L. W., Thomas R. L., Dell C. I. and Jaquet J. M., "Cultural Impact on the Geochemistry of sediment in Lake Erie", *J. Fish. Res. Board Can.*, **33**, pp. 440-462 (1976).
- Kindler F. M. and Sevin H. E., "Heavy metals in sediment of Turkish river systems. Natural background and anthropogenic effects", *In Broekaert J.A.C. (ed), Metal Speciation in the Environment*, Springer-Verlag, pp. 601-611 (1990).
- 이평구, 이재영 "프랑스 A-71고속도로변 Retention pond의 기능 평가", *한국토양환경학회지*, **2**, pp. 73-81 (1997).
- Harrison, R. M., Laxen, D. P. and Wilson, S. J., "Chemical Associations of Lead, Cadmium, Copper, and Zinc in Street Dusts and Roadside Soils", *Environmental Science and Technology*, **15**, pp. 1378-1383 (1981).
- Harrison R. M. and Wilson S. J., "The Chemical Composi-

- tion of Highway Drainage water: II. Chemical Associations of Metals in the Suspended Sediment”, *The Science of Total Environment*, **43**, pp 79-87 (1985).
20. Hewitt C. N. and Rashed M. B., “An Integrated Budget for Selected Pollutants for a Major Rural Highway”, *The Science of Total Environment*, **93**, pp. 375-384 (1990).
 21. Lebreton L. and Thevenot D., “Pollution metallique relargable par les aerosols d'origine autoroutiere”, *Environmental Technology*, **13**, pp 35-44 (1992).
 22. Colandini, V., Legret M., Brosseaud Y. and Balades J. D., “Metallic pollution in clogging materials of urban porous pavements”, *Wat. Sci. Tech.*, **32**, pp 57-62 (1995).
 23. Chon, H. T., Kim, K. W. and Kim, J. Y., “Metal contamination of soils and dusts in Seoul metropolitan city, Korea”, *Environmental Geochemistry and Health*, **17**, pp. 139-146 (1995).
 24. Yun, S. T., Choi, B. Y. and Lee, P. K., “Distribution of Heavy Metals (Cr, Cu, Zn, Pb, Cd, As) in Roadside Sediments, Seoul Metropolitan City, Korea”, *Environmental Technology*, **21**, pp. 989-1000 (2000).
 25. Pierson, W. R., Brachaczek, W. W., “Particulate matter associated with vehicles on the road. II”, *Aerosol Science and Technology*, **2**, pp. 1-40 (1983).
 26. Lee, P. K., Baillif, P. and Touray, J. C., “Geochemical behavior and relative mobility of metals (Mn, Cd, Zn and Pb) in recent sediments of a retention pond along the A-71 Motorway in Sologne, France”, *Environmental Geology*, **32**, pp. 142-152 (1997).