

## 도로변 우수관 퇴적물의 중금속오염 (I) : 서울시 동부지역

이 평구·김성환\*·윤성택\*

한국지질자원연구원 환경지질연구부, \*고려대학교 지구환경과학과

## The heavy metal contaminations of sediments from some gully-pots : eastern part of Seoul, Korea

Pyeong-koo Lee · Sung-hwan Kim\* · Sung-tae Yun\*

*Dept. of Environmental Geology, KIGAM*

*\*Dept. of Earth and Environmental Sciences, Korea Univ.*

## ABSTRACT

In order to investigate the degree of heavy metal pollution, 280 urban gully-pot sediments were collected from 13 localities in eastern part of Seoul. The uncontaminated stream sediments were also studied for comparison. A series of studies have carried out concerning the physicochemical characteristics of the sediments and the distribution of Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn. Total metal concentrations of gully-pot sediments and uncontaminated stream sediments were analyzed using acid extraction. After predigestion with  $\text{HNO}_3$ , the sample was digested with mixed acid( $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ ). The gully-pot sediments were characterized by very high concentrations of Zn, Cu, Pb and Cr, indicating an anthropogenic contribution of these metals to the sediment chemistry. Heavy metal concentrations in the gully-pot sediments were 1-329 times higher than the mean content of metals in the uncontaminated stream sediments, depending on the metals. In particular, the highest mean concentrations of Zn, Cu, Pb and Cr were noticed in the gully-pot sediments from Yeouido, Junggu, Junggu, and Dongdaemungu, respectively. The mean value of total Zn concentration in the business and commercial areas is 2-3.5 times higher than that in industrial areas. This suggests that Zn is mainly derived from automobiles(rubber of automobile tires). The mean concentrations of Cu and Cr are significantly high in the commercial and industrial areas, indicating that industrial activities may cause the

accumulation of Cu and Cr in the sediments. The Pb level in gully-pot sediments is comparatively low, due to the use of unleaded gasoline in automobiles since 1987.

**Key Words :** Heavy metals, pollution, gully-pots sediments, land use

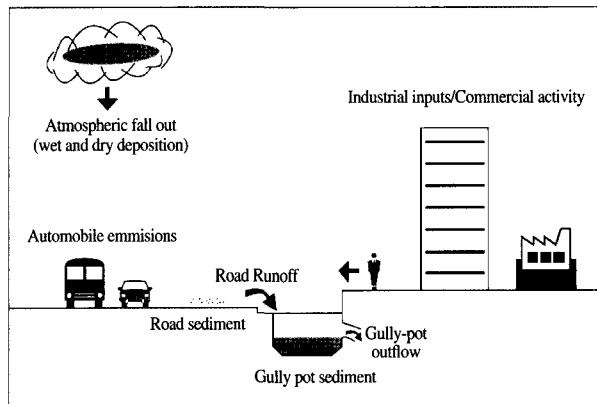
## 요약문

중금속오염 정도를 조사하기 위해, 서울시 동부의 13개 구에서 280개 우수관퇴적물을 채취하였다. 오염되지 않은 하천 표사시료도 비교하기 위해 연구되었다. 퇴적물의 물리화학적 특성과 Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, 및 Zn 분포에 관한 연구가 수행되었다. 우수관퇴적물과 오염되지 않은 표사시료의 총 중금속 함량은 산분해방법을 이용하여 분석하였다. 먼저 질산으로 분해한 뒤, 다시 질산과 과염소산의 혼합산으로 산분해하였다. 우수관퇴적물은 특징적으로 Zn, Cu, Pb 및 Cr 함량이 매우 높았으며, 이는 우수관퇴적물이 이들 원소에 의해 인위적으로 오염된 것을 지시하고 있다. 우수관퇴적물에 포함된 중금속 함량은 오염되지 않은 하천 표사시료의 평균 중금속 함량에 비해 원소에 따라 약 1-329배 높게 나타났다. 특히, 가장 높은 Zn, Cu, Pb 및 Cr 평균값을 나타낸 지역은 각각 여의도, 중구, 중구 및 동대문구에서 채취한 우수관퇴적물이었다. 비즈니스 지역과 상업지역에서의 평균 Zn 함량은 산업공단지역의 Zn 함량보다 2-305배 높다. 이것은 Zn이 주로 자동차 교통량(자동차 타이어)에서 기인된 것을 지시한다. 평균 Cu와 Cr의 함량은 상업지역과 산업공단지역에서 높게 나타났으며, 이는 산업활동이 우수관퇴적물에 Cu와 Cr 축적을 야기시키고 있다는 것을 지시하고 있다. 우수관퇴적물의 Pb 함량은 비교적 낮았으며, 이는 1987년 이후 무연휘발유를 사용하는 것에 기인하였다.

**주제어 :** 중금속, 오염, 우수관퇴적물, 토지이용

## 1. 서 론

도시지역의 도로에서 발생되는 빗물은 대기애 비산된 먼지와 도로에 퇴적되어 있는 퇴적물을 썻어내기 때문에 최근 환경문제로 관심을 끌고 있다<sup>1,2,3,4,5,6</sup>. 오염된 퇴적물은 빗물과 함께 이동되어 우수관을 통해 한강과 같은 주요 하천으로 유입되므로 직접적으로 하천 수질에 영향을 미치는 한편, 하천바닥에 퇴적되어 퇴적물을 오염시키기도 한다(Fig. 1). 중금속 원소와 유기 독성물질에 오염된 대기의 미세한 분진은 인근 공업단지에서 발생되는 배출가스와 자동차에서 배출되는 매연이 가장 중요한 원인이 되지만, 일부는 중국으로부터 이동되는 미세분진에 의한 오염도 상당한 것으로 알려지고 있다<sup>7</sup>. 대기로부터 퇴적되는 오염물질 외에도 도로에서 자동차에 의해서 발생되는 오염물질의 양



**Fig. 1. Schematic representation of gully-pot, with indication of major sources of heavy metal contamination.**

도 중요한 원인인 것으로 밝혀지고 있다<sup>6,8</sup>. 자동차에 의해 오염되는 중금속 원소는 납, 아연, 카드뮴, 구리, 크롬, 코발트, 니켈 및 비소 등이다. 납(Pb) 오염의 원인은 휘발유에 함유되어 있는 tetramethyl-lead 혹은 tetraethyl-lead로 첨가되는 산화제에 기인되며<sup>9,10</sup>, 아연(Zn) 오염의 주요 원인은 자동차타이어의 제작과정의 경화과정(vulcanization)에서 사용된 산화아연(ZnO : 약 1.3%를 첨가)이 미세하게 마모된 자동차 타이어 입자에 포함되어 있기 때문인 것으로 알려져 있다<sup>6,8,11</sup>. 카드뮴(Cd)은 자연상태에서 아연과 함께 밀접하게 수반되고 있어 도로변에서 발생되는 카드뮴은 타이어에 함유된 아연의 불순물에 기인된 것이다. 구리(Cu)의 오염은 자동차 브레이크에 기인되고 있다. 자동차 브레이크에는 구리외에도 크롬(Cr), 코발트(Co), 비소(As)와 니켈(Ni) 등도 포함되어 있다<sup>10,12</sup>.

서울과 같은 대도시 지역에는 인구와 경제활동의 증가와 함께 1990년 대 이후 교통량과 휘발유의 소비량이 급격하게 증가되고 있는 실정이며, 이로 인하여 대도시의 대기와 토양오염은 더욱 악화되고 있다<sup>13</sup>. 그러나, 도로환경의 우수관퇴적물의 중금속 및 독성 유기물질의 오염 실태는 자세히 조사되지 않은 실정이다. 서울시 지역의 우수관은 일반적으로 하수관과 연결된 합류식(combined sewer system)이므로, 도로에 흐르는 빗물은 우수관과 하수관을 통해 탄천, 중랑, 난지, 가양종말처리장으로 유입되고, 그 곳에서 오염물질이 제거된 후 한강으로 유입되고 있다. 그러나, 여름철에 집중적으로 비가 내릴 경우, 하수종말처리장에 유입된 빗물의 량은 처리용량이 초과되어 제대로 처리되지 않고 방류되거나 혹은 오히려 침수될 경우 기능의 일시적인 상실로 인하여 오염된 퇴적물이 직접 한강으로 유입된다. 한편, 빗물은 먼지 혹은 퇴적물에 오염된 중금속과 화학반응을 하여 중금속 등의 오염물질을 용해시키게 되는데, 이때 빗물과 반응하여 용해되는 중금속의 함량은 퇴적물과 먼지에 오염된 중금속의 존재형태에 따라 크게 차이가 있다<sup>6,14,15</sup>.

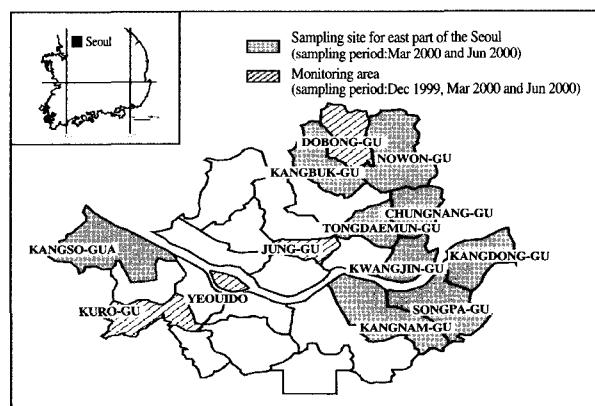
이 연구의 목적은 서울시 동부지역을 중심으로 도로변에 설치된 빗물받이로 유입되는 퇴적물에 오염된 중

금속의 함량을 조사하고 도로주변의 산업활동과 관련된 지역적인 중금속 오염특성을 연구하였다.

## 2. 시료채취 및 실험

### 2.1 시료채취

도로에 축적된 퇴적물의 중금속오염을 평가하기 위해 서울시 강남구, 강동구, 강북구, 강서구, 광진구, 구로구, 노원구, 도봉구, 동대문구, 송파구, 여의도, 중구, 중랑구 등 동부지역을 대상으로 도로변에 설치된 빗물받이에 퇴적된 퇴적물을 채취하였다(Fig. 2). 퇴적물은 모종삽을 이용하여 채취하였으며, 1998년 4월, 1998년 11월, 1999년 12월, 2000년 2월 및 2000년 6월 등 5번에 걸쳐 280개 시료를 채취하였다(Table 1). 조사지역 중에서 강서구는 서울시 동부지역이 아니지만 논과 밭 등 경작면적이 다른 행정구역보다 넓은 지역이므로 비교하기 위해 포함시켰으며, 구로구, 중구, 여의도 및 도봉구 지역은 3년간 오염현황을 장기적으로 연구하는 지역으로 선정하여 연구대상으로 포함시켰다. 채취된 퇴적물은 미리 산용액으로 세척한 고밀도 포리에칠렌 시료병에 담아 아이스박스에 보관하였다. 채취된 퇴적물은 2mm 체로 여과한 뒤 100mesh 체로 여과하여 50°C에서 2일 동안 건조하였으며 100mesh 체를 통과 한 시료에 대하여 구성 광물 및 중금속과 유기물질 함량을 분석하였다.



**Fig. 2 Localization of studied area in Seoul, Korea.**

**Table 1.** Number of samples in studied areas

	1998			1999.9-2000.8			
	4월	11월	Total	1999.12	2000.2	2000.6	Total
Kangnamgu	-	-	-	-	5	5	10
Kangdonggu	-	-	-	-	5	5	10
Kangbukgu	-	-	-	-	5	5	10
Kangseogu	-	-	-	-	5	5	10
Koangjingu	-	-	-	-	5	5	10
Gurogu	16	8	24	9	10	10	29
Noweongu	-	-	-	-	5	5	10
Dobonggu	6	-	6	5	5	4	14
Dongdaemungu	-	-	-	8	8	8	24
Songpagu	-	-	-	-	5	4	9
Yeouido	9	-	9	5	5	4	14
Junggu	28	12	40	15	15	11	41
Jungranggu	-	-	-	-	5	5	10
Total	59	20	79	42	83	76	201

## 2.2 화학분석

### 2.2.1 전함량분석(total concentration of heavy metals)

전함량분석 방법은 도로변 우수관에 퇴적된 퇴적물에 함유되어 있는 총 중금속 함량을 측정하기 위해 실시되었다. 전함량분석을 위해 실시하는 전처리 방법은 HF를 사용하여 완전분해하는 경우도 많지만, 이 경우에는 환경오염에 의한 중금속 함량뿐만 아니라 광물이 형성될 때 함유하고 있는 중금속의 함량까지 분해되기 때문에, 이번 연구에서는 HF를 사용하지 않은 산분해 방법을 선택하여 석영/장석과 같은 규산염광물과 점토광물을 제외한 2차광물(탄산염광물 및 철망간 산화광물)과 유기물을 분해하였다<sup>19</sup>. 전처리 방법으로 사용된 산분해 방법은 시료 1g에 HNO<sub>3</sub> 5ml를 넣은 뒤 온도 110°C에서 완전히 증발시킨 후, HClO<sub>4</sub>와 HNO<sub>3</sub>(1:5 비율)의 혼합산을 10ml를 넣고 흰색의 연기가 완전히 없어질 때까지 증발시킨다. 마지막으로 6N HCl를 10ml를 넣고 30분간 끓인다. 이후, 0.45 μm 필터로 여과하여 ICP-AES로 분석하였다.

### 2.2.2 실험기기

중금속 함량의 분석은 ICP-AES(Perkins-Elmer Optima 3000XL)를 이용하였으며, 분석조건은 RF Power 1300watt, Plasma Flow 15L/min, Coolant Flow 0.5L/min, Nebulizer Flow 0.8L/min 이었다. 사용된 시약은 analytical grade (Prolabo 또는 Merck) 였고, ICP 분석시 사용된 Pb, Zn, Cd, Fe, Mn의 standard metal solution은 1,000ppm stock solution (Merck)을 회석하여 사용하였다. 전 분석과정에 이용된 탈이온수를 얻기 위해 Milli-Q Millipore system을 사용하였다. 퇴적물의 총 탄소함량과 유기탄소함량은 LECO CS225를 이용하여 분석하였으며, 유기탄소함량은 시료를 끓은 염산으로 처리하여 탄산염광물을 제거한 뒤 분석하였다.

## 2.3 광물학적 연구

시료의 광물학적 조성을 분석하기 위해서는 PHILIPS X'PERT MPD Diffractometer (Cu K α; 40KV, 25mA)를 이용하였다. Cu target을 사용하여 3° - 70° 까지 2°/1분의 속도와 0.01의 간격으로 분석하였다.

### 3. 결 과

#### 3.1 광물조성

도로변에서 채취한 오염된 하수슬러지와 도로변토양의 주 구성광물은 석영, 장석류 및 점토광물(Kaolinite, Montmorillonite)로 구성되어 있으며, 부성분광물로 탄산염광물(방해석, 백운석)과 백운모등이 산출된다. 이외 소량으로 녹니석과 각섬석이 관찰된다. 산화광물은 X-선 회절분석에서 관찰되지 않았지만 화학 전처리시 산화철의 존재가 확인되었다. 이는 이들 광물의 양이 매우 적거나 비정질의 상태로 존재하기 때문인 것으로 보인다. 서울시 중구, 구로구 및 도봉구에서 채취된 하수슬러지는 silty sand로 분류되었다.

#### 3.2 탄소 함량

서울시 중구, 구로구, 여의도 및 도봉구에서 채취한 하수슬러지와 도로변 토양시료의 총탄소 함량은 평균 8.48%이다. 서울시 중구 주요도로(청계천, 을지로, 퇴계로 및 남산 1,3호 터널)변에서 채취된 시료의 총탄소함량(Total carbon)은 2.77-19.79%(평균 9.98%)로 연구 조사된 서울시 행정구역 중에서 가장 높은 총 탄소함량을 나타냈다. 구로구에서 채취된 시

료의 총 탄소함량은 2.54-13.84%(평균 7.04%)이였으며, 영등포구 여의도에서 채취된 시료는 2.46-10.60%(평균 7.64%)의 범위를 보였다. 도봉구의 경우는 2.32-5.39%(평균 3.87%)로 조사된 행정구역 중 가장 낮은 값을 나타냈다(Table, 2).

#### 3.3 오염되지 않은 수계퇴적물과 우수관 퇴적물의 중금속함량 비교

우수관퇴적물의 중금속함량의 평균값, 표준편차, 최소 및 최대값을 구별로 정리하였으며, 우수관퇴적물의 중금속 오염정도를 파악하기 위해 서울시 외곽의 오염되지 않은 수계 퇴적물의 중금속원소 함량과 비교하여 정리하였다(Table 3). 오염되지 않은 수계퇴적물의 함량과 비교하면, 우수관에서 채취한 퇴적물의 Zn, Cu, Cr과 Pb 오염이 매우 심각한 것으로 평가되며, Cd, As와 Ni의 오염정도는 비교적 낮은 것으로 평가된다. 우수관 퇴적물의 Cd 함량은 1~20배, Co 함량은 1~329배, Cr 함량은 1~30배, Cu 함량은 1~126배, Pb 함량은 1~32배, Zn 함량은 1.6~79배 높은 함량을 보였다.

Table 3에서 시료의 중금속함량이 불균질한 특징을 보이는 것은 시료채취 지역의 산업활동에 따른 오염되는 중금속의 종류와 오염정도의 차이가 있기 때문인 것으로 추정되며, 특히, 지역적으로 도로포장율과 도

**Table 2. Total carbon (TC), Total organic carbon (TOC) and Total inorganic carbon (TIC) content of sewage sludges and roadside soil from Seoul**

	TC (%)	TOC (%)	TIC (%)	carbonates (%)
Total range & mean values	2.32-19.79 (8.48)**	1.66-16.35 (6.82)*	0.35-3.44 (1.66)**	2.87-28.67 (13.87)**
Junggu (40)*	2.77-19.79 (9.98)**	2.42-16.35 (8.10)**	0.35-3.44 (1.88)**	2.87-28.67 (15.63)**
Gurugu (24)*	2.54-13.84 (7.04)**	1.84-10.96 (5.58)**	0.70-2.88 (1.46)**	5.80-24.00 (12.13)**
Yeouido (9)*	2.46-10.60 (7.64)**	1.87-8.74 (6.17)**	0.59-1.90 (1.47)**	4.92-15.86 (12.26)**
Dobonggu (6)*	2.32-5.39 (3.87)**	1.66-4.00 (2.80)**	0.66-1.63 (1.08)**	5.52-13.61 (8.97)**

\* : number of sample, \*\* : mean concentration

**Table 3. Range and Mean concentrations of heavy metals in sediments collected from gully pots in eastern part of Seoul City(μg/g).**

	No. of sample	As	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Kangnam gu	10	<b>6.64</b> 2.71-10.73	<b>2.21</b> 1.53-2.93	<b>10.19</b> 7.78-14.80	<b>103.9</b> 85.9-134.9	<b>318.7</b> 159.4-508.6	<b>39.37</b> 31.67-49.33	<b>201.3</b> 108.5-370.1	<b>2491.9</b> 850.4-4403.7
Kangdong gu	10	<b>5.20</b> 0.00-8.71	<b>1.89</b> 1.23-2.66	<b>9.91</b> 6.79-16.13	<b>81.4</b> 62.3-106.9	<b>172.7</b> 119.2-304.9	<b>35.41</b> 28.96-49.31	<b>114.3</b> 60.7-184.0	<b>2277.3</b> 673.2-5507.4
Kangbuk gu	10	<b>3.75</b> 1.56-7.96	<b>1.64</b> 1.05-2.20	<b>5.20</b> 4.12-6.70	<b>72.9</b> 33.1-114.1	<b>217.3</b> 86.6-392.1	<b>32.51</b> 18.12-49.37	<b>124.3</b> 83.8-186.6	<b>1413.1</b> 841.7-2519.9
Kangseo gu	10	<b>6.24</b> 2.68-9.99	<b>1.90</b> 1.46-2.95	<b>10.69</b> 7.94-16.88	<b>78.6</b> 53.8-112.4	<b>200.6</b> 101.5-337.6	<b>37.24</b> 30.93-49.78	<b>117.2</b> 62.8-240.4	<b>2516.1</b> 817.4-9737.9
Koangjin gu	10	<b>5.83</b> 2.92-9.56	<b>1.96</b> 1.44-2.50	<b>10.10</b> 7.65-14.36	<b>135.7</b> 69.7-473.9	<b>252.5</b> 119.3-449.0	<b>66.4</b> 27.0-277.2	<b>141.8</b> 69.1-210.0	<b>2375.2</b> 569.8-7577.5
Noweongu	10	<b>3.88</b> 1.14-6.05	<b>1.74</b> 1.28-2.21	<b>9.66</b> 5.00-36.17	<b>64.8</b> 35.5-90.1	<b>186.5</b> 113.2-263.7	<b>25.00</b> 19.37-31.33	<b>187.3</b> 118.4-274.9	<b>3286.3</b> 1049.9-6985.0
Dongdaemungu	24	<b>5.64</b> 2.99-8.64	<b>2.837</b> 1.41-6.77	<b>11.66</b> 6.04-27.35	<b>345.5</b> 48.6-1496.5	<b>564.8</b> 128.7-1369.9	<b>177.0</b> 21.4-774.8	<b>200.1</b> 114.5-619.0	<b>1609.0</b> 718.4-2829.8
Songpagu	9	<b>8.38</b> 2.12-29.43	<b>2.15</b> 1.78-2.97	<b>10.37</b> 7.01-15.08	<b>81.9</b> 50.8-113.2	<b>237.0</b> 83.6-425.6	<b>36.98</b> 20.93-59.31	<b>158.2</b> 55.6-280.5	<b>2026.7</b> 614.4-4876.2
Jungranggu	10	<b>4.23</b> 2.09-6.49	<b>2.00</b> 1.44-2.78	<b>7.10</b> 5.34-9.21	<b>84.0</b> 51.2-153.9	<b>203.1</b> 142.4-250.5	<b>39.64</b> 24.31-88.02	<b>144.0</b> 77.4-222.1	<b>2118.2</b> 600.1-4183.3
Junggu	41	<b>7.86</b> 1.39-16.63	<b>6.67</b> 1.15-25.70	<b>35.14</b> 5.20-1906.4	<b>200.2</b> 25.4-1423.9	<b>801.2</b> 79.4-4431.8	<b>94.67</b> 23.05-522.9	<b>298.2</b> 84.2-1549.6	<b>3375.0</b> 259.8-12435.1
Gurogu	30	<b>7.23</b> 2.36-11.60	<b>5.94</b> 1.07-17.60	<b>30.73</b> 5.80-429.16	<b>196.5</b> 53.3-1254.3	<b>773.3</b> 106.8-7750.4	<b>131.6</b> 29.3-610.8	<b>190.2</b> 63.0-389.2	<b>1508.8</b> 367.0-4391.7
Yeouido	14	<b>6.06</b> 2.73-9.43	<b>5.41</b> 1.28-13.30	<b>10.25</b> 6.16-33.10	<b>82.3</b> 33.6-126.7	<b>202.3</b> 21.2-336.2	<b>71.14</b> 28.00-201.15	<b>196.0</b> 57.7-361.9	<b>3471.3</b> 460.2-10017.5
Dobonggu	15	<b>3.68</b> 0.70-5.89	<b>3.65</b> 1.17-13.50	<b>5.71</b> 4.18-7.29	<b>67.5</b> 29.4-106.5	<b>224.9</b> 114.9-536.1	<b>27.98</b> 17.43-46.24	<b>183.0</b> 65.8-317.2	<b>1975.9</b> 433.1-4809.1
uncontaminated sediments				<b>1.29</b>	<b>5.8</b>	<b>50.2</b>	<b>61.4</b>	<b>48.9</b>	<b>158.2</b>

로 주변의 환경(인쇄소, 공장, 주택가, 농경지, 자연녹지 등)에 따라 우수관퇴적물에 석영과 장석 등과 같이 중금속의 함량이 매우 낮은 조립질 모래의 구성성분비의 차이가 커, 이에 의한 희석효과도 시료의 중금속 함량에 영향을 미치고 있다고 추정된다. 각종 금속공구를 취급하는 도매상, 인쇄소가 밀집되어 있는 중구 지역과 공단지역으로 산업활동이 활발한 구로구 및 차량통행이 많은 여의도 지역에서 채취한 우수관퇴적물

이 다른 지역에서 채취한 우수관퇴적물에 비해 중금속 오염이 더 심각한 것으로 조사되었다.

### 3.4 우수관퇴적물의 원소별 오염현황

#### 3.4.1 아연(Zn) :

채취된 우수관퇴적물에서 오염이 가장 심한 원소는 Zn이며, 조사지역별로는 여의도 지역에서 채취한 우

수관퇴적물의 Zn 함량이 가장 높아 평균  $3471.3\mu\text{g/g}$  이었으며, 중구(평균  $3375.0\mu\text{g/g}$ )와 노원구(평균  $3286.3\mu\text{g/g}$ )에서 채취한 우수관퇴적물도 모두  $3000\mu\text{g/g}$ 을 초과하였다. 여의도, 중구 및 노원구에서 아연 함량이 높은 것은 자동차 통행량이 다른 조사지역보다 높은 것과 밀접하게 관련된 것으로 판단된다. 평균 Zn 함량이  $2,000\mu\text{g/g}$ 을 초과하는 지역은 강서구( $2516.1\mu\text{g/g}$ ), 강남구( $2491.9\mu\text{g/g}$ ), 광진구( $2375.2\mu\text{g/g}$ ), 강동구( $2277.3\mu\text{g/g}$ ), 중랑구( $2118.2\mu\text{g/g}$ ), 송파구( $2026.7\mu\text{g/g}$ ) 등이다. 평균 Zn 함량이  $2,000\mu\text{g/g}$ 을 이하인 지역은 조사지역 13개 지역 중에서 4개 지역으로 도봉구( $1975.9\mu\text{g/g}$ ), 동대문구( $1609.0\mu\text{g/g}$ ), 구로구( $1508.8\mu\text{g/g}$ )와 강북구이었다. 서울시에서 채취한 시료에서 Zn 함량이 가장 낮은 지역은 강북구에서 채취한 것으로 평균  $1413.1\mu\text{g/g}$ 이었으며, 서울시 외곽에서 채취한 오염되지 않은 하천퇴적물의 Zn 함량(평균  $158.2\mu\text{g/g}$ )에 비교하면 약 9.9배 높다(Table 3).

서울시 우수관퇴적물의 Zn 함량이 다른 중금속 원소에 비하여 높은 함량을 보이는 원인은 다음과 같은 원인에 기인할 것으로 추정된다. 첫째, 자동차타이어의 마모에 의해 발생된 미세립질 타이어 조각이 도로에 퇴적된 이후 빗물에 의해 씻겨 빗물과 함께 우수관으로 유입되는 경우이다. 예를 들어, 여의도에서 채취한 시료의 Zn 평균함량이 구로구에 비하여 약 2.5배 정도 높은 것으로 나타났으며, 자동차 통행량의 비교 결과와 대체로 일치한다<sup>17)</sup>. 둘째, 도로변의 건물과 주위 상가에서 발생한 부식먼지의 퇴적에 의한 Zn 오염이 있을 수 있다<sup>8)</sup>.

### 3.2.2 구리(Cu) :

우수관퇴적물의 Cu 함량을 분석한 결과, Cu 평균 함량이  $500\mu\text{g/g}$ 을 초과한 곳은 중구(평균  $801.2\mu\text{g/g}$ ), 구로구(평균  $773.3\mu\text{g/g}$ )와 동대문구(평균  $564.8\mu\text{g/g}$ )인 것으로 조사되었으며, 하천 수계의 Cu 함량과 비교하면 약 9-13배 높았다. 이외, 강남구(평균  $318.7\mu\text{g/g}$ ), 광진구(평균  $252.5\mu\text{g/g}$ ), 송파구(평균  $237.0\mu\text{g/g}$ ), 도봉구(평균  $224.9\mu\text{g/g}$ ), 강북구(평균  $217.3\mu\text{g/g}$ ), 중랑구( $203.1\mu\text{g/g}$ ), 여의도(평균  $202.3\mu\text{g/g}$ )와 강서구(평균  $200.6\mu\text{g/g}$ )에서 채취한 시료의 평균 Cu 함량은  $200\mu\text{g/g}$ 을 초과하여, 오염되지 않은 하천수계 퇴적물에 비해 3배 이상 높은 함량을 보이고 있다. 우수관에서 채취한 퇴적물의 Cu 함량이  $200\mu\text{g/g}$  이하를 나타내는 지역은 강동구(평균  $172.7\mu\text{g/g}$ )와 노원구(평균  $186.5\mu\text{g/g}$ )이었으나, 오염되지 않은 수계 퇴적물과 비교하면 약 3배정도 높은 함량을 보이고 있다(Table 3). 서울시 지역에서, 우수관퇴적물의 Cu 오염의 원인은 첫째, 자동차브레이크의 마모된 미세한 입자 둘째, 도로주변의 산업활동 등일 것으로 추정된다<sup>8)</sup>.

$\mu\text{g/g}$ 와 강서구(평균  $200.6\mu\text{g/g}$ )에서 채취한 시료의 평균 Cu 함량은  $200\mu\text{g/g}$ 을 초과하여, 오염되지 않은 하천수계 퇴적물에 비해 3배 이상 높은 함량을 보이고 있다. 우수관에서 채취한 퇴적물의 Cu 함량이  $200\mu\text{g/g}$  이하를 나타내는 지역은 강동구(평균  $172.7\mu\text{g/g}$ )와 노원구(평균  $186.5\mu\text{g/g}$ )이었으나, 오염되지 않은 수계 퇴적물과 비교하면 약 3배정도 높은 함량을 보이고 있다(Table 3). 서울시 지역에서, 우수관퇴적물의 Cu 오염의 원인은 첫째, 자동차브레이크의 마모된 미세한 입자 둘째, 도로주변의 산업활동 등일 것으로 추정된다<sup>8)</sup>.

### 3.4.3 납(Pb) :

서울시 동부지역 우수관퇴적물의 Pb 함량을 조사한 결과, 평균 Pb 함량은 최소  $114.3\mu\text{g/g}$ (강동구)에서 최대  $298.2\mu\text{g/g}$ (중구)를 나타내어 약 2.6배의 차이를 보이고 있었으며, 서울시 외곽에서 채취한 하천퇴적물의 평균 함량( $48.9\mu\text{g/g}$ )에 비교하면 약 2-6배 높았다. 우수관퇴적물의 Pb 함량이  $200\mu\text{g/g}$ 을 초과하는 곳은 강남구(평균  $201.3\mu\text{g/g}$ )와 동대문구(평균  $200.1\mu\text{g/g}$ )이었으며, 오염되지 않은 하천퇴적물보다 약 4배 높은 함량을 나타내었다.  $200\mu\text{g/g}$  이하의 평균 함량을 나타내는 곳은 여의도(평균  $196.0\mu\text{g/g}$ ), 구로구(평균  $190.2\mu\text{g/g}$ ), 노원구(평균  $187.3\mu\text{g/g}$ ), 도봉구(평균  $183.0\mu\text{g/g}$ ), 송파구(평균  $158.2\mu\text{g/g}$ ), 중랑구(평균  $144.0\mu\text{g/g}$ ), 광진구(평균  $141.8\mu\text{g/g}$ ), 강북구(평균  $124.3\mu\text{g/g}$ )와 강서구(평균  $117.2\mu\text{g/g}$ )이었다(Table 3).

### 3.2.4 크롬(Cr) :

이번 연구에서 분석된 Cr 함량은 총 크롬함량을 분석한 결과이다. 우수관퇴적물의 Cr 함량이  $300\mu\text{g/g}$ 을 초과한 지역은 동대문구(평균  $345.5\mu\text{g/g}$ )이었으며, 오염되지 않은 서울시 외곽 하천퇴적물의 Cr 함량( $50.2\mu\text{g/g}$ )보다 약 7배 정도 높았고, Cr 오염이 가장 낮은 노원구에서 채취한 시료의 Cr 함량보다는 약 5배 정도 높은 결과를 나타내고 있다. 이외 중구(평균  $200.2\mu\text{g/g}$ ), 구로구(평균  $196.5\mu\text{g/g}$ ), 광진구(평균  $135.7\mu\text{g/g}$ )

/g)와 강남구(평균 103.9 $\mu\text{g}/\text{g}$ )에서 채취한 시료의 Cr 함량도 100 $\mu\text{g}/\text{g}$ 을 초과하였다. Cr 함량이 100 $\mu\text{g}/\text{g}$  이하인 곳은 중랑구(평균 84.0 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 여의도(평균 82.3 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 송파구(평균 81.9 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 강동구(평균 81.4 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 강서구(평균 78.6 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 강북구(평균 72.9 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 도봉구(평균 67.5 $\mu\text{g}/\text{g}$ )와 노원구(평균 64.8 $\mu\text{g}/\text{g}$ ) 등 조사지역 13개 지역 중에서 8개 지역이었다(Table 3).

#### 3.4.5 니켈(Ni) :

우수관퇴적물의 Ni 함량을 분석 한 결과, 조사된 13개 구 중에서 100 $\mu\text{g}/\text{g}$ 을 초과한 지역은 동대문구(평균 177.0 $\mu\text{g}/\text{g}$ )과 구로구(평균 131.6 $\mu\text{g}/\text{g}$ ) 등 2개 지역이었다. 이외, 평균 Ni 함량이 감소하는 순서로 조사지역을 나열하면, 중구(평균 94.6 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 여의도(평균 71.1 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 광진구(평균 66.4 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 중랑구(평균 39.6 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 강남구(평균 39.3 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 강서구(평균 37.2 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 송파구(평균 36.9 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 강동구(평균 35.4 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 강북구(평균 32.5 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 도봉구(평균 27.9 $\mu\text{g}/\text{g}$ )와 노원구(평균 25.0 $\mu\text{g}/\text{g}$ )의 순서이었다. 동대문구에서 채취한 시료의 Ni 함량은 가장 Ni 함량이 낮은 노원구의 시료의 Ni 함량에 비해 약 5배 정도 높았다(Table 3).

#### 3.4.6 코발트(Co) :

우수관퇴적물의 평균 Co 함량은 최소 5.20 $\mu\text{g}/\text{g}$ (강북구)에서 최대 35.14 $\mu\text{g}/\text{g}$ (중구)로, 분석된 다른 원소에 비교하여 함량이 비교적 낮은 중금속 원소인 것으로 나타났다. 중구에서 채취한 시료의 Co 함량은 강북구의 Co 함량보다 약 7배 정도 높았으며, 오염되지 않은 하천퇴적물의 Co 함량(평균 5.8 $\mu\text{g}/\text{g}$ )에 비교하면 약 6배 높았다. 서울시의 강북구와 도봉구(평균 5.71 $\mu\text{g}/\text{g}$ )에서 채취한 시료의 Co 함량은 오염되지 않은 하천퇴적물의 평균 Co 함량보다 약간 낮아, 이 지역의 Co 오염은 없는 것으로 판단된다. 구로구에서 채취한 우수관퇴적물의 Co 평균함량은 30.73 $\mu\text{g}/\text{g}$ 으로 중구와 마찬가지로 30 $\mu\text{g}/\text{g}$ 을 초과하였다. 이외 조사지역의 Co 함량은 동대문구(평균 11.66 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 강서구(평균

10.69 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 송파구(평균 10.37 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 여의도(평균 10.25 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 강남구(평균 10.19 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 광진구(평균 10.10 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 강동구(평균 9.91 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 노원구(평균 9.66 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 중랑구(평균 7.10 $\mu\text{g}/\text{g}$ ) 순으로 감소하였다(Table 3). 이들 지역의 Co 평균함량은 오염되지 않은 하천퇴적물의 Co 함량에 비해 약 1-2배 정도 높은 함량이었다.

#### 3.4.7 비소(As) :

우수관퇴적물의 As 함량을 측정한 결과, 가장 낮은 평균 As 함량을 나타내고 있는 지역은 도봉구(평균 3.68 $\mu\text{g}/\text{g}$ )이었으며, 최대값은 송파구에서 채취한 퇴적물로 평균 8.38 $\mu\text{g}/\text{g}$ 으로 나타났다. 이외 조사지역의 As 함량은 중구(평균 7.86 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 구로구(평균 7.23 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 강남구(평균 6.64 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 강서구(평균 6.24 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 여의도(평균 6.06 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 광진구(평균 5.83 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 동대문구(평균 5.64 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 강동구(평균 5.20 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 중랑구(평균 4.23 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 노원구(평균 3.68 $\mu\text{g}/\text{g}$ ) 등으로 감소하였다(Table 3). 평균 As 함량을 보면, 서울시의 우수관에서 채취한 퇴적물의 As 함량은 지역에 따라 거의 변화가 많지 않은 것으로 나타났으며, 전반적으로 우수관퇴적물의 As 함량이 낮은 특성을 보이고 있다.

#### 3.4.8 카드뮴(Cd) :

서울시 도로변 우수관에서 채취한 퇴적물의 Cd 함량을 분석한 결과, Cd오염은 중구(평균 6.67 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 구로구(평균 5.94 $\mu\text{g}/\text{g}$ )와 여의도(평균 5.41 $\mu\text{g}/\text{g}$ )가 다소 높은 것으로 추정되며, 서울시 외곽의 하천에서 채취한 하천퇴적물의 평균 Cd 함량(1.29 $\mu\text{g}/\text{g}$ )에 비해 약 4-5배 높은 것으로 나타났다. 도봉구의 우수관퇴적물에 함유되어 있는 평균 Cd 함량은 3.65 $\mu\text{g}/\text{g}$ 이었으며, 퇴적물의 평균 Cd 함량이 2 $\mu\text{g}/\text{g}$ 을 넘는 지역은 동대문구(평균 2.83 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 강남구(평균 2.21 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 송파구(평균 2.15 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 중랑구(평균 2.00 $\mu\text{g}/\text{g}$ ) 등이다. 이외, 광진구(평균 1.96 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 강서구(평균 1.90 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 강동구(평균 1.89 $\mu\text{g}/\text{g}$ ), 노원구(평균 1.74 $\mu\text{g}/\text{g}$ )와 강북구(평균 1.64 $\mu\text{g}/\text{g}$ ) 지역에서 채취한 시료의 Cd 평균 함량은 2 $\mu\text{g}/\text{g}$ 이하였으나, 오염되지 않은 하

천퇴적물의 평균함량을 초과한 것으로 나타났다 (Table 3).

### 3.5 토지이용에 따른 중금속오염의 특성

토지이용에 따른 우수관퇴적물의 중금속오염 특성을 규명하고자 중구, 여의도, 구로구 및 도봉구를 대상으로 각각 상업지역 (commercial area), 비즈니스 지역 (business area), 산업지역 (industrial area) 및 거주지역 (residential area) 등으로 구분하였다 (Table 4). 상업지역, 비즈니스 지역, 산업지역 및 거주지역의 우수관퇴적물의 중금속 함량을 분석하기 위해 채취된 시료는 각각 81개, 23개, 53개 및 20개 등 모두 177개 시료이었다. 채취시기는 1차 1998.4, 2차 1998.11, 3차 1999.12, 4차 2000.2, 5차 2000.6 등 약 2년간의 자료를 수집하여 정리하였다 (Table 1).

중구 지역은 서울시의 대표적인 상업활동 지역이며, 청계천, 을지로 및 퇴계로를 중심으로 국내 최대의 각종 금속 및 비금속 공구제조업, 조립금속, 출판인쇄업, 각종제조업, 섬유제품제조업, 전기기계업 등이 밀집되어 있고, 이들 업체로부터 배출되는 먼지, 금속가루 및 유기용매 등에 의한 대기, 토양 및 수계 등이 오염되고 있다. 중구지역에 등록된 사업체 수는 1995년 2983개 사업체, 1996년 2874개 사업체, 1997년 2765개 사업체 등 대체적으로 감소하는 추세에 있으나, 자동차의 통행량은 증가되고 있는 교통혼잡 지역이다. 구로구 지역은 한국에서 가장 오래되고 규모가 큰 공단산업지역으로, 각종 금속, 비금속 및 의류 제조업체

가 집중된 지역이다. 등록된 사업체 수는 1995년 1046개 사업체, 1996년 1688개 사업체, 1997년 884개 사업체 등 중구와 마찬가지로 대체적으로 감소하는 추세에 있다. 여의도 지역은 한강에 의해 고립된 지역으로 금속 및 비금속 등의 제조업체가 없는 지역이나 은행, 증권, 기업체 등의 사무실이 밀집되어 있어 교통량이 높으므로 비즈니스지역으로 구분하였다. 도봉구지역의 조사지역은 아파트가 밀집되어 있는 지역을 중심으로 선택하였다.<sup>18,19,20</sup>

상업지역에서 채취한 우수관퇴적물의 평균 Zn함량은  $3375\mu\text{g/g}$  ( $259.8\text{--}12435\mu\text{g/g}$ )으로, 비즈니스지역으로 분류된 여의도 지역에서 채취한 퇴적물의 Zn함량 (평균  $3471\mu\text{g/g}$ )보다 약간 낮은 함량을 보이고 있으나, 거주지역과 산업지역으로 구분된 도봉구와 구로구에서 채취한 우수관퇴적물의 Zn 평균함량보다 약 2배 이상 높은 함량을 나타내었다 (Table 5). 가장 Zn오염이 심할 것으로 예측하였던 산업지역 ( $1508\mu\text{g/g}$ )보다 비즈니스 지역 ( $3471\mu\text{g/g}$ )과 상업지역의 우수관 퇴적물의 Zn오염이 높은 것으로 나타났다. 상업지역에는 금속제조업체가 많이 있는 곳이므로 Zn을 비롯한 금속오염이 예상되었던 지역이었으나, 비즈니스지역으로 분류한 여의도 지역은 금속제조업체가 거의 없는 사무실 밀집지역이었기 때문에 거주지역과 유사한 오염특성을 보일 것으로 판단하였지만, 산업공단지역으로 분류한 구로공단지역보다 약 2.5배 높았다.

비즈니스지역의 도로변 우수관퇴적물의 Zn 오염이 공단산업지역보다 2배 이상 높은 원인은 2가지로 유추하여 볼 수 있다. 첫째, 비즈니스지역과 인접한 산업

**Table 4. Summary of studied site characteristics.**

	Dobong-gu	Jung-gu	Yeouido	Guro-gu
Land use	Residential area : High density residence	Commercial area : High commercial & industrial activities	Business area : Low density residence with high commercial activity	Industrial area : Industrial complex & High density residence
Sewer system	Combined	Combined	Combined	Combined
Population	381,602	125,050	32,149	382,094
Daily average traffic (cars)	60,650	92,700	113,150	58,170

**Table 5. Range and average concentrations of heavy metals in sediments collected from commercial, business, industry and residential areas(μg/g).**

	As	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
commercial area(Jung-gu)	<b>7.86</b> (1.39-16.63)	<b>6.67</b> (1.15-25.70)	<b>35.1</b> (5.2-1906.4)	<b>200.3</b> (25.4-1423.9)	<b>801.2</b> (79.4-4431.9)	<b>94.7</b> (23.0-523.0)	<b>298.2</b> (84.2-1549.6)	<b>3375</b> (259.8-12435)
business area(Yeouido)	<b>6.06</b> (2.73-9.43)	<b>5.41</b> (1.28-13.30)	<b>10.2</b> (6.2-33.1)	<b>82.3</b> (33.6-126.8)	<b>202.4</b> (21.2-336.2)	<b>71.1</b> (28.0-201.2)	<b>196.0</b> (57.7-361.9)	<b>3471</b> (460.2-10017)
industrial area(Guro-gu)	<b>7.23</b> (2.36-11.60)	<b>5.94</b> (1.07-17.60)	<b>30.7</b> (5.8-429.2)	<b>196.5</b> (53.3-1254.4)	<b>773.3</b> (106.8-7750)	<b>131.7</b> (29.3-610.8)	<b>190.3</b> (63.0-389.3)	<b>1508</b> (367.0-4391.7)
residential area(Dobong-gu)	<b>3.68</b> (0.70-5.89)	<b>3.65</b> (1.17-13.50)	<b>5.7</b> (4.2-7.3)	<b>67.5</b> (29.5-106.5)	<b>224.9</b> (114.9-536.1)	<b>28.0</b> (17.4-46.2)	<b>183.1</b> (65.8-317.2)	<b>1975</b> (433.1-4809)

공단지역으로부터 배출된 오염된 먼지가 바람에 의해 이동하여 퇴적된 경우를 가정할 수 있다. 그러나, 이 지역에서 채취한 퇴적물의 Zn 함량이 산업지역에서 채취한 퇴적물보다 2배 이상 높아 직접적인 원인이 될 수 없을 것으로 판단되며, 서울에서의 바람의 방향도 일반적으로 편서풍의 영향으로 서쪽에서 동쪽으로 향하는 특징이 있기 때문에 산업지역의 북동쪽으로 위치한 비즈니스지역에 크게 영향을 주었다고 하기 어렵다. 둘째, 자동차타이어의 마모에 의해 타이어에 함유되어 있는 Zn가 주요 오염원인인 경우이다. 타이어의 경화과정에 ZnO, Zinc diethyl 혹은 dimethyl carbamate를 사용하는 것은 잘 알려진 사실이다<sup>8,11</sup>. 따라서, 자동차의 주행과 제동에 따른 타이어 마모로 인해 발생한 타이어의 미세한 입자가 도로에 퇴적되어 도로변 토양과 먼지를 오염시키게 된다. 비즈니스지역(여의도)에서 Zn 오염이 조사되었던 13개 지역에서 가장 높게 나타난 반면에 산업공단지역(구로공단)에서 채취된 퇴적물의 Zn 함량이 13개 조사지역에서 가장 낮게 나타난 것(Table 3)은 Zn 오염이 산업공단에서 배출된 것이라기보다는 자동차의 타이어 마모에 의해 퇴적된 타이어의 미세한 조각이 도로변 환경에서의 Zn 오염의 주요 원인일 가능성이 많은 것을 지시하고 있다(Table 4).

상업지역의 평균 Pb함량(298μg/g)이 4개의 토지이용분류 지역에서 가장 높게 나타났다(Table 4). 만일, Pb 오염이 자동차통행에 기인되었다면 자동차 통행량이 거주지역과 산업지역에 비해 2배정도 많은 비즈니

스지역에서 채취한 우수관퇴적물의 Pb 함량이 가장 높아야 한다. 그러나, 비즈니스 지역, 산업지역 및 거주지역에서 채취한 우수관퇴적물의 Pb 평균함량은 각각 196μg/g, 190μg/g, 183μg/g으로 매우 유사한 함량을 보이고 있으나, 상업지역으로 분류한 중구지역의 우수관퇴적물의 Pb 평균함량이 다른 지역보다 100μg/g이상 높게 나타났다. 그러므로, 상업지역의 Pb 평균 함량이 다른 조사지역보다 높은 것은 이 지역에서 납성분을 포함하고 있는 금속제조업 활동에 기인한다고 할 수 있다. 서울시의 다른 지역에서 채취한 우수관퇴적물의 Pb 평균함량도 대체로 최소 114μg/g에서 200μg/g 사이인 것을 감안하면(Table 3), 중구 지역만이 유일하게 높게 나타났다. 이 결과는 중구 지역만을 제외하면, 자동차 통행량과 관계없이 서울시의 동반구 지역의 평균 Pb 함량이 거의 유사하다는 것을 시시한다. 그러나, 이 결과는 Pb오염의 주요 원인이 자동차의 배기가스인 것으로 보고된 기존의 연구결과와 다르다. 즉, Yun et al.<sup>22</sup>의 연구결과에서는, 서울시 도로의 먼지와 토양의 중금속 오염의 원인을 ANOVA test와 R-mode factor analysis를 이용한 통계적인 방법을 이용하여 해석한 결과, Pb와 Cr은 자동차의 통행량과 밀접한 관련을 갖는 데 비해, Cu, Cd 및 Zn은 금속제조업의 업체수 등과 밀접한 관계를 갖는다고 하였다. 또한, Chon et al.<sup>21</sup>의 연구결과에서도 Cu와 Zn 함량이 토지이용(특히, 금속제조업체 수)에 따라 크게 변화한다고 하였다.

상업지역에서 채취된 우수관퇴적물의 Cu 평균함량

이  $801.2\mu\text{g/g}$ ( $79.4\text{-}4431\mu\text{g/g}$ )로 가장 높게 나타났으며, 산업지역의 평균함량과 유사한 결과를 보이는 반면에 거주지역과 비즈니스 지역보다는 약 4배 높았다. 거주지역과 비즈니스 지역은 자동차통행량 등과 같은 요인의 차이가 현격함에도 불구하고 두 지역의 평균 Cu 함량의 차이가 거의 관찰되지 않았으며, 각각  $224.9\mu\text{g/g}$ 과  $202.4\mu\text{g/g}$ 이었다(Table 5). 즉, 우수관 퇴적물의 Cu 오염의 주요 원인은 자동차통행량보다는 상업 및 산업 지역의 금속제조업체의 특성과 밀접한 관련이 있는 것으로 추정된다. 그러나, 기존 연구결과에서는 도로에서 발생하는 Cu의 오염의 중요한 기원이 자동차 브레이크에서 마모된 입자인 것으로 알려져 있기도 하다<sup>10)</sup>. 그러므로, 서울시 전체에 대한 연구가 종료되는 시점에서 Cu 오염의 주요원인을 규명하기 위해 통계적인 방법을 이용하여 검토를 할 필요가 있는 것으로 판단된다.

우수관퇴적물의 Cr 오염을 평가는 총 Cr 함량으로 분석하여 검토하였다. Cr의 평균함량도 Cu의 오염과 유사한 오염 특성을 보이고 있으며, 상업지역에서 채취한 퇴적물의 Cr평균 함량( $200\mu\text{g/g}$ )이 가장 높게 나타났다. 상업지역과 산업지역의 Cr 오염정도는 서로 거의 유사하며, 비즈니스 지역과 거주지역의 Cr 평균 함량이 서로 유사하다(Table 5). 토지이용에 따른 상업지역, 산업지역, 비즈니스지역 및 거주지역의 우수관퇴적물의 Co 평균함량도 토지이용별 Cu와 Cr의 특성과 유사한 결과를 나타내고 있다. 즉, 상업지역과 산업지역의 Co 평균함량은 각각  $35.1\mu\text{g/g}$ 과  $30.7\mu\text{g/g}$ 으로 서로 유사하며, 비즈니스지역과 거주지역의 평균 함량도 각각  $10.2\mu\text{g/g}$ 과  $5.7\mu\text{g/g}$ 으로 서로 유사한 특징이 있다. 이런 결과는 Cu, Cr 및 Co의 오염원이 유사하다는 것을 지시한다고 할 수 있다. 즉, 상업과 산업지역의 각 원소의 평균함량이 유사하고, 거주지역과 비즈니스 지역보다 약 3-7배 높은 함량을 보이고 있다는 것은 자동차의 통행과 관계되었다기보다는 금속제조업체 등과 같은 사업체의 수와 종류 등과 같은 특성과 밀접한 관련이 있을 것으로 추정된다. 각 토지이용별 조사지역의 퇴적물 중의 Ni의 평균 함량을 검토한 결과, 대체로 산업지역에서 가장 높은 특성을 보이고 있

으며(평균  $131.7\mu\text{g/g}$ ), 상업지역에서 평균  $94.7\mu\text{g/g}$ 를 나타내 조사지역 중에서 두 번째로 높게 나타났다. 한편, 비즈니스지역과 거주지역의 평균 함량은 각각  $71.1\mu\text{g/g}$ 과  $28.0\mu\text{g/g}$ 를 나타내 산업 및 상업지역의 평균함량보다는 다소 낮았다.

토지이용별 특성에 따른 As과 Cd의 오염특성은 Cu, Cr, Co 및 Ni의 오염특성과 Zn와 Pb의 오염특성과도 다르다. As과 Cd의 토지이용별 특성은 상업지역, 산업지역 및 비즈니스 지역의 평균 함량이 유사한 반면에 거주지역의 As와 Cd 평균 함량은 매우 낮았다. 그러나, 이 두 원소의 함량이 다른 원소에 비해 비교적 낮아 분석상의 문제가 있을 수 있다.

결론적으로, 대도시지역에서 발생하는 토지이용의 특성에 따른 우수관퇴적물의 중금속 오염특성은 크게 3가지 유형으로 구분할 수 있다: Zn 오염형, Pb, Cu, Cr, Co, (Ni) 오염형, As, Cd 오염형. 지금까지의 조사 결과, 가장 중요한 Zn 오염원인은 자동차타이어의 마모에 크게 기인할 것으로 판단되며, Pb, Cu, Cr, Co 및 Ni의 오염원인은 자동차의 배기ガ스 혹은 브레이크 마모에 의한 원인보다는 금속제조업체 등 산업활동에 기인한 오염이 더 중요할 것이라고 판단된다. 특히, 원소별 상관관계를 검토한 결과, Ni과 Cr 함량은 밀접하게 서로 수반되는 것으로 나타났으

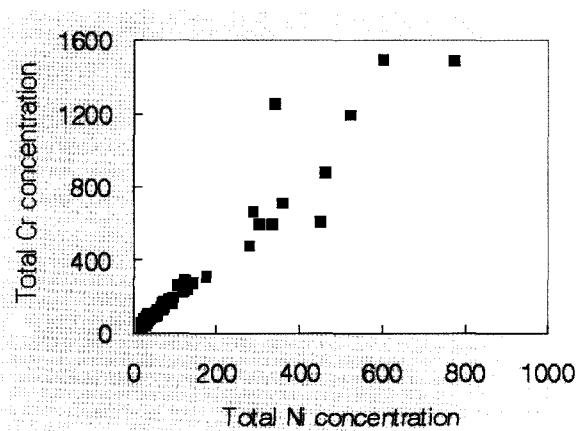


Fig. 3 Correlation between Ni and Cr concentrations after acid extraction with  $\text{HNO}_3$  and  $\text{HClO}_4$ .

며, 이 결과는 이들 원소의 오염원이 유사할 가능성을 지시하고 있다(Fig. 3). 한편, As와 Cd은 오염정도가 대체로 미약한 원소로 일부지역에서만 높게 나타나 오염원인을 판단하기 어렵다.

### 3.6 시료채취시기에 따른 중금속 함량의 변화

토지이용에 따른 중금속 오염의 계절적인 변화를 조사하기 위해 상업지역, 비즈니스지역, 산업지역 및 거주지역으로 구분하여 각각 중구, 여의도, 구로구 및 도봉구를 대상으로 조사하였다(Fig. 4). Pb 함량의 시간적인 변화는 비즈니스지역과 주거지역에서는 일정하게 나타났으며, 상업지역에서는 크게 감소하는 경향이 관찰되었고, 산업지역에서는 1998년 4월부터 2000년 2월까지 감소하는 경향이 관찰되다가 2000년 6월 시료에서 조금 증가하였다.

시료채취시기에 따른 상업지역, 비즈니스지역 및 산업지역에서의 Zn 함량의 변화는 1998년 4월부터 2000년 2월까지 감소하는 경향이 관찰되었으며, 주거지역의 경우는 지속적으로 증가하는 추세에 있다. Cu의 경우, 비즈니스지역과 주거지역에서는 시료채취시기에 따라 Cu 함량의 변화가 관찰되지 않고 일정한 특징이 있으나, 상업지역과 산업지역은 1998년부터 4월부터 2000년 2월까지 증가하다가 2000년 6월에서는 감소하였다. As와 Cd의 함량은 상업지역, 비즈니스지역, 산업지역 및 주거지역 등 모든 지역에서 1998년 4월 이후 2000년 6월까지 지속적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. Co과 Cr은 상업지역, 비즈니스지역 및 주거지역의 경우, 계절적인 변화가 관찰되지 않고 함량이 일정하게 나타났으나, 산업지역은 2000년 6월에

채취한 시료에서 Co와 Cr 함량이 갑자기 증가하였다. Ni 함량의 경우, 비즈니스지역과 산업지역에서 2000년 6월까지 함량이 증가하는 추세에 있으나, 상업지역과 주거지역은 반대로 감소하는 추세에 있다.

## 4. 토 의

### 4.1 우수관퇴적물과 도로변 먼지와의 중금속 함량 비교

이번에 분석된 우수관퇴적물의 Pb, Zn와 Cd의 평균함량을 Chon et al. (1995)와 Yun et al. (2000)의 결과와 교통량이 비슷한 유럽의 파리와 런던의 도로변 먼지 및 퇴적물의 함량과 비교하였다(Table 6). 서울시의 도로변 우수관퇴적물의 Zn와 Cd 평균 함량은 각각 2558.4 $\mu\text{g/g}$ 과 7.8 $\mu\text{g/g}$ 로 프랑스 파리의 도로변 먼지와 aerosols의 Zn과 Cd의 함량과 유사한 반면에, 우수관퇴적물의 Pb 함량은 프랑스<sup>8,14,15)</sup>와 영국의 도로변 토양과 먼지의 Pb 함량과 비교할 때 매우 특징적으로 낮은 특징을 보였다. 파리와 런던에서 채취한 에어졸과 먼지의 중금속 함량이 우리나라보다 5-20배 정도 높은 현상은 1987년 이후 국내에서는 무연휘발유가 사용되고 있는 반면에 프랑스와 영국 등 유럽에서는 지금까지 유연휘발유를 사용하는 자동차가 많기 때문인 것으로 해석된다. 유연휘발유를 사용하는 자동차 배기가스에서 배출되는 매연에는 옥탄가를 높이기 위해 산화제로 첨가되었던 tetraethyl-lead 혹은 tetramethyl-lead(150 $\mu\text{g/g}$  이하 첨가)가 연소과정에서 분해되어 브롬화합물의 형태로 배출된다. 브롬화합물의 형태로 대기중에 배출된 Pb는 대기중에 있는

**Table 6. Metal concentrations (mean values) in sediments compared to those in street dust and soils of other studies.**

	Sediments from gully pot, Seoul	Street dust & Roadside soil, Seoul <sup>21)</sup>	Roadside sediments, Seoul <sup>22)</sup>	Aerosols, Paris <sup>14)</sup>	Roadside soils, A71 Highway, France <sup>8)</sup>	Street Dust England <sup>9)</sup>
Pb( $\mu\text{g/g}$ )	254.9	240-245	144	4800	1456	1620-1710
Zn( $\mu\text{g/g}$ )	2558.4	271-296	532	2330	2861	975-2050
Cd( $\mu\text{g/g}$ )	7.8	3.0-3.1	6.0	26.6	2.72	4.6-8.1

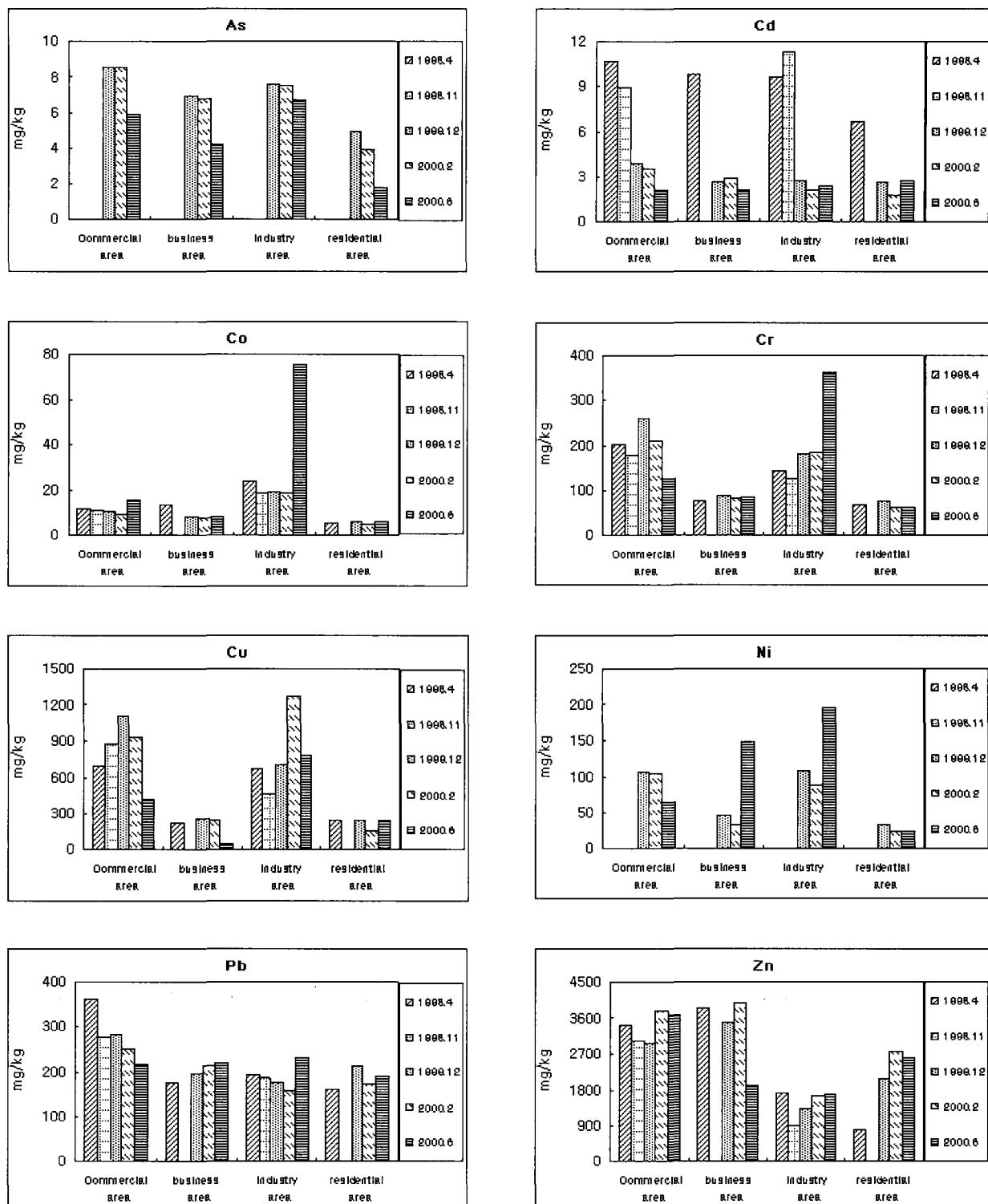


Fig. 4. Seasonal variation of heavy metal concentrations in sediments from commercial, business, industry and residential areas.

$\text{SO}_x$ 와 물과 화학적으로 반응하여  $\text{PbSO}_4$ 가 형성되는 것으로 알려져 있으며, 이 화합물은 대기중의 물분자 혹은 먼지와 응집되어 지상으로 퇴적되어 토양과 수계를 오염시키는 것으로 알려져 있다<sup>9,10</sup>. 그러므로, 무연 휘발유의 사용은 서울과 같은 대도시환경의 대기중의 납오염을 크게 경감시키고 있는 것으로 평가된다.

공기중의 미세한 먼지는 비가 내리게 되면 빗물에 흡착되어 지상으로 퇴적되며, 건조기간에 도로에 퇴적되어 있는 조립질 먼지도 빗물에 씻겨 도로변 우수관으로 모이게 될 것이다. 그러므로, 대기중의 먼지와 도로변에 퇴적되어 있는 퇴적물의 중금속 함량은 유사하여야 한다. 그러나, 서울시 도로변 토양 및 먼지<sup>21)</sup>와 도로변 퇴적물<sup>22)</sup>의 Pb 함량과 이번에 조사된 우수관퇴적물의 평균 Pb함량이 서로 유사한 특징을 보이고 있는 반면에, 서울시 도로변 토양 및 먼지<sup>23)</sup>와 도로변 퇴적물<sup>22)</sup>의 평균 Zn 함량은 각각 271-296  $\mu\text{g/g}$ 과 532  $\mu\text{g/g}$ 으로, 이번에 채취한 우수관퇴적물의 평균 Zn 함량(2558.4  $\mu\text{g/g}$ )보다 4-10배 정도의 적은 것으로 조사되었다(Table 6). 이 결과는 Pb함량에서 보이는 특징과는 크게 다른 것으로, 대도시 도로환경에서 발생하는 Pb 오염의 원인과 Zn 오염의 원인이 서로 다르기 때문인 것으로 추정할 수 있으며, 도로변 먼지와 토양에 비해 우수관퇴적물의 Zn 함량이 크게 높은 것은 자동차타이어 경화작용(vulcanization) 과정에  $\text{ZnO}$  혹은  $\text{Zn-diethyl}$  혹은  $\text{-dimethyl carbamate}$ 를 약 1.3% 첨가하기 때문인 것으로 판단할 수 있다<sup>6,8,11)</sup>. 또한, Lee et al., (1997)의 자동차주행에 따른 타이어의 마모율 연구결과에 의하면, 승용차의 타이어는 40,000km 주행시 650g이 마모되어 한 대당 0.13mg/km의 Zn이 도로에 미세한 입자형태로 퇴적되고 있으며, 화물자동차의 타이어는 한 대당 0.28mg/km의 Zn를 도로에 오염시키고 있는 것으로 알려졌다. 자동차타이어로부터 마모되어 도로에 퇴적된 미세한 입자의 타이어조각이 도로표면에 퇴적되어 있다가 비가 오면 빗물에 씻겨 우수관으로 이동하여 퇴적된 것으로 판단된다.

#### 4.2 우수관퇴적물의 관리방안

자동차 배기ガ스, 마모에 의해 발생하는 미세한 타이어 및 브레이크물질들은 도로환경에서 자연상태 또는 자동차 통행에 의해 발생된 바람에 의해 다시 공기 중으로 비산되었다가 도로주변으로 퇴적되어, 인근 주택가와 상가지역을 크게 오염시키고, 도로를 통행하는 보행자와 도로변에서 생활하는 사람들의 호흡을 통해 인체에 흡입될 수 있다. 특히, 바람과 자동차에 의해 공기 중으로 부유되는 퇴적물은 매우 미세한 크기의 입자이며, 미세한 입자들일수록 중금속과 유기물질의 함량이 입자가 큰 퇴적물보다 수배 정도 높은 것으로 알려져 있다<sup>6</sup>. 비가 내리게 되면 빗물에 도로변 퇴적물이 씻겨 하수관 혹은 우수관을 통해 제거되기 때문에 일시적으로 도로변 퇴적물의 양이 줄어드는 효과도 기대할 수 있다. 그러나, 우리나라에는 여름과 일정 기간에 일시적으로 많은 양의 비가 내리는 특징이 있으므로 비가 내리지 않는 건조기후가 지속되는 봄과 가을 혹은 겨울과 같은 계절일수록 도로변의 퇴적물의 양이 크게 증가되는 것을 관찰할 수 있으며, 이 결과로 도로에서 대기 중으로 부유되어 분산되는 미세한 먼지 입자의 양도 증가되어 인체에 흡수되는 양도 증가될 것으로 추정된다.

건조기에 도로변 퇴적물을 제거하기 위해서는 도로의 청소와 세척을 실시하여야 한다. 특히, 이번의 연구로 오염이 심하다고 판단되는 지역은 물을 이용하여 도로를 정기적으로 세척하여야 한다. 그러나, 도로변의 퇴적물은 중금속과 유기오염물질의 함량이 높으므로 우수관을 통해 한강과 같은 하천으로 유입될 경우, 하천의 수질을 크게 오염시키게 되고, 오염된 퇴적물이 하천바닥에 퇴적되게 되면 퇴적환경에서 서식하는 동식물 등의 생태계를 오염시키게 될 것이다. 그러므로, 오염된 도로변 퇴적물이 빗물에 씻기거나 혹은 도로세척과정에서 발생된 우수관퇴적물이 그대로 하천에 유입되지 말아야 한다. 우수관이 합류식(combined sewer system)인 경우 빗물과 함께 우수관으로 유입된 퇴적물은 하수종말처리에서 침전과정을 통해 오염된 퇴적물을 제거한 뒤 한강으로 방류되므로 오염된 우수관퇴적물에 의한 환경오염 확산 문제가 크지 않을 것이다. 합류식이 아닌 경우, 우수관을 우수지로 연결

하여 오염된 퇴적물을 침전시켜 제거하는 것이 바람직 하며, 유수지는 정기적으로 준설하여 주는 것이 바람직하다.

## 5. 요약 및 결론

1. 오염되지 않은 수계의 퇴적물의 함량과 비교하면, 우수관에서 채취한 퇴적물은 Zn, Cu, Co, Cr과 Pb에 의한 오염이 매우 심각한 것으로 평가되며, Cd, As와 Ni의 오염정도는 비교적 낮은 것으로 평가된다. 우수관 퇴적물의 Cd 함량은 <1~20배, Co 함량은 <1~329배, Cr 함량은 <1~30배, Cu 함량은 <1~126배, Pb 함량은 1.1~32배, Zn 함량은 1.6~79배 높은 함량을 보였다.
2. 토지이용에 따라 중금속 오염 정도를 비교한 결과, 조사된 지역 중에서 각종 금속공구를 취급하는 상가지역(중구)이 공단지역(구로구)의 하수퇴적물보다 중금속오염이 더 심각한 것으로 조사되었다. 일반적으로 상가와 공단지역으로 분류한 지역에서 채취한 퇴적물의 평균 중금속함량이 사무실이 밀집된 지역(여의도)과 거주지역(도봉구)보다 최대 2~3.5배 높다.
3. 대도시지역에서 발생하는 토지이용의 특성에 따른 우수관퇴적물의 중금속 오염은 크게 3가지 유형으로 구분할 수 있다: Zn 오염형, Pb, Cu, Cr, Co, (Ni) 오염형, As, Cd 오염형. Zn 오염원인은 자동차타이어의 마모에 크게 기인할 것으로 판단되며, Pb, Cu, Cr, Co 및 Ni의 오염원인은 자동차의 배기가스 혹은 브레이크 마모에 의한 원인인 것보다는 금속제조업체 등 산업활동에 기인한 오염이 더 중요할 것이라고 판단된다. 한편, As와 Cd은 오염정도가 대체로 미약한 원소로 일부지역에서만 높게 나타나 오염원인을 판단하기 어렵다.
4. 우수관퇴적물의 Pb, Zn와 Cd의 평균함량을 교통량이 비슷한 유럽의 파리와 런던의 도로변 먼지 및 퇴적물의 함량과 비교한 결과, 서울시의

도로변 우수관퇴적물의 Zn와 Cd 평균 함량은 프랑스 파리의 도로변 먼지와 유사한 반면에, 우수관퇴적물의 Pb 함량은 매우 특징적으로 낮은 함량을 보인다. 이 결과는 1987년 이후 국내에서는 무연 휘발유가 사용되고 있기 때문에 Pb 함량이 크게 줄어든 것으로 평가된다.

5. 도로변 퇴적물을 제거하기 위해서는 도로의 청소와 세척을 실시하여야 하며, 특히, 오염이 심하다고 판단되는 지역은 물을 이용하여 도로를 정기적으로 세척하여야 한다. 우수관이 합류식이 아닌 경우, 우수관을 유수지로 연결하여 오염된 퇴적물을 침전시켜 제거하는 것이 바람직하며, 유수지는 정기적으로 준설하여 주는 것이 바람직하다.

## 사사

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

## 참고문헌

1. Ellis J.B. and Revitt D.M (1982) Incidence of Heavy Metals in Street Surface Sediments : Solubility and Grain Size Studies, Water, Air, and Soil Pollution, 17, pp 87-100.
2. Oberts, G.L. (1985) Magnitude and problems of non-point pollution from urban and urbanizing areas. In : V. Novotny (Ed.), Non-point pollution abatement symposium, Marquette University, USA, p. KIII-1 to KIII-19.
3. Hoffman, E.J., Latimer, J.S., Hunt, C.D., Mills, G.L. and Quinn, J.C. (1985) Stormwater runoff from highways, Water Air Soil Pollut., v. 25, p. 349-364.
4. Dempsey, B.A., Tai, Y.L. and Harrison, S.G. (1993) Mobilization and removal of contaminants associated with urban dust and dirt, Wat. Sci. Tech., v. 28, p. 225-230.

5. Lee, P.K., Baillif, P. and Touray, J.C. (1997b) Geochemical behavior and relative mobility of metals (Mn, Cd, Zn and Pb) in recent sediments of a retention pond along the A-71Motorway in Sologne, France. Environmental Geology, vol. 32/2, 142-152.
6. Lee, P.K. and Touray, J.C. (1998) 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, v. 32, No 11, p. 3425-3435.
7. Kim, K.H., Song, D.W., 1997. The concentrations of lead in urban and nonurban atmospheres of Wonju city, Korea. Water, Air, and Soil Pollution 98, 255-273.
8. Lee, P.K., Baillif, P., Touray, J.C. and Ildefonse, J.P. (1997a) Heavy Metal Contamination of Settling Particles in a Retention Pond along the A-71 Motorway in Sologne, France. Sci. Total Environ., v. 201, p. 1-15.
9. Harrison, R.M., Laxen, D.P. and Wilson, S.J. (1981) Chemical Associations of Lead, Cadmium, Copper, and Zinc in Street Dusts and Roadside Soils. Environ. Sci. Technol., v. 15, p. 1378-1383.
10. Harrison R.M. and Wilson S.J. (1985) The Chemical Composition of Highway Drainage water : II. Chemical Associations of Metals in the Suspended Sediment, Sci. Total Environ., v. 43 p. 79-87.
11. Pierson, W.R., Brachaczek, W.W., 1983. Particulate matter associated with vehicles on the road. II. Aerosol Science and Technology 2, 1-40.
12. Hewitt C.N. and Rashed M.B. (1990) An Integrated Budget for Selected Pollutants for a Major Rural Highway", Sci. Total Environ., 93, pp 375-384.
13. 이평구 (1999) 도로변(서울시 및 일부 고속도로 주변)의 유독 중금속 및 유기물질의 오염평가 연구, 98기초(기반)과제, 과학기술부, pp. 83.
14. Lebreton L. and Th venot D. (1992) Pollution métallique relargable par les a rosols d' origine autoroutière, Environmental Technology, 13, 35-44
15. Colandini V., Legret M., Brosseau Y. and Balad s J.D.(1995) Metallic pollution in clogging materials of urban porous pavements, Wat. Sci. Tech., v. 32, pp. 57-62.
16. Al-Shukry R., Serpaud B., Matejka G. and Caullet C. (1992) Sepeciation des Metaux Lourds dans les Sediments d'un Cours d'Eau en aval d'un Rejet Industriel, Environmental Technology, v. 13, p. 129-140.
17. 이평구, 윤성택, 이대하 (2001) 서울시 무기환경시스템의 환경지구화학 및 수리지질학적 연구, 한국과학재단 특정기초 중간보고서, pp.84.
18. 환경부 (1998) 환경통계연감, pp. 581.
19. 환경부 (1999) 환경통계연감, pp.
20. 환경부 (2000) 환경통계연감, pp.
21. Chon, H.T., Kim, K.W. and Kim, J.Y. (1995) Metal contamination of soils and dusts in Seoul metropolitan city, Korea, Environmental Geochemistry and Health, v. 17, p. 139-146.
22. Yun, S.T., Choi, B.Y. and Lee, P.K. (2000) Distribution of Heavy Metals (Cr, Cu, Zn; Pb, Cd, As) in Roadside Sediments, Seoul Metropolitan City, Korea, Environmental Technology, vol. 21, p. 989-1000.

〈원고접수일 : 2001. 10. 5〉