

광주광역시 도로변 분진에 대한 유해원소의 오염특성

이장준¹ · 박영석^{2*} · 김종균² · 한민수¹

¹국립문화재 연구소, ²조선대학교 자원공학과

Pollution Characteristics of Hazardous Elements for Roadside Dust in Gwangju City, Korea

Jang Jon Lee¹, Young Seog Park^{2*}, Jong Kyun Kim² and Min Su Han¹

¹National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon 305-380, Korea

²Dept. of Resource Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

The purpose of this study was to show the pollution characteristics of hazardous elements from roadside dust in the Gwangju city. We collected 47 samples from November to December in 2004 and separated four groups such as residential area, industrialized area, downtown area and heavy traffic area for characteristics comparison on hazardous elements. Roadside dust mostly consisted of quartz, albite, microcline, muscovite in XRD analysis. Content of hazardous elements varied: As 3.4~11.9 ppm, Cd 0.2~28.2 ppm, Co 32~526 ppm, Cr 25~526 ppm, Cu 11~375 ppm, Ni 14~247 ppm, Pb 13~413 ppm and Zn 101~972 ppm. Average contents of hazardous elements of Zn>Cu>Pb>Cr>Co>Ni>Cd. Content of hazardous elements was low in residential area, whereas that of heavy metal was much the same in both in heavy traffic area. Content of hazardous elements such as Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn was found to be particularly high in industrialized area. According to these results it was possible to presume that industrialized area was affected by industry activity such as machinery, petrochemical, automobile and electronics industry. The SEM analysis, detected Pb, Cr, Ni, and Fe particles in samples of industrialized area contaminated by industry activity. The correlation coefficient table resulted from the samples of roadside dust showed that there was same direction increase of content between elements. In other words, when the content of Cd increase, Cr and Ni increase, as Cr increase, Cu and Ni increase, as Cu increase Ni increase and Pb increase Zn increase. Based on these results it was possible to predict and interpret similar contamination patterns in this study.

Key words : Roadside dust, Hazardous elements, Gwangju city, XRD & SEM analysis, Industry activity

이 연구에서는 광주광역시 도로변 분진에 대한 유해원소의 오염특성을 규명하기 위해 2004년 11월과 12월에 걸쳐 47개의 시료를 채취 하였다. 시료는 도시화의 특성에 따라 주거지역, 산업지역, 도심지역, 교통밀집지역 등 4개의 지역으로 세분하였다. 도로변 분진의 XRD 분석결과 구성광물은 석영, 조장석, 미사장석, 백운모가 대부분 차지하고 있었다. 유해원소 함량은 비소 3.4~11.9 ppm, 카드뮴 0.2~28.2 ppm, 코발트 32~526 ppm, 크롬 25~526 ppm, 구리 11~375 ppm, 니켈 14~247 ppm, 납 13~413 ppm, 아연 101~972 ppm이었다. 연구지역에서 검출된 유해원소의 평균 함량이 높은 순서는 아연>구리>납>크롬>코발트>니켈>카드뮴 이다. 유해원소의 함량은 대체로 주거지역에서 낮았으며, 도심지역과 교통밀집지역의 중금속 함량은 비슷하였다. 유해원소는 전반적으로 산업지역에서 카드뮴, 코발트, 크롬, 구리, 니켈, 납, 아연이 높게 나왔다. 이는 산업지역인 광주광역시 하남 산업단지에 기계, 석유화학, 자동차, 전자 관련 업체가 많이 입주해 있는 것과 관련이 있는 것으로 추정된다. 전자 현미경 분석결과 산업지역에서 납을 함유한 입자가 관찰되어 납의 오염현상을 반영했고, 또한 크롬과 니켈, 철을 함유한 입자를 확인할 수 있어, 산업 활동의 기원으로 추론된다. 광주광역시 도로변 분진의 유해원소별 상관계수 값을 보면 카드뮴이 증가함에 따라 크롬, 니켈은 정(+)의 상관관계를 나타내고 크롬은 구리와 니켈, 구리는 니켈, 납은 아연과 정(+)의 상관관계를 양상을 띠고 있어 같은 패턴의 오염의 양상을 예측할 수 있었다.

주요어 : 도로변 분진, 유해원소, 광주광역시, XRD & SEM분석, 산업 활동

*Corresponding author: yspark@chosun.ac.kr

1. 서 론

사회가 급속히 도시화되고 산업사회로 진행됨에 따라 인체에 위해한 다양한 형태의 원소들이 인위적으로 생성되고 운반되어지며 여러 매체로 배출되어 진다. 도로변 분진 내 위해 원소의 주 오염원은 대부분 산업단지에서 발생하는 물질, 자동차로부터 배출되는 물질, 그리고 외부에서 유입되는 모래나 흙에서 기인되고, 이외에도 도로의 차선 및 구조물의 도로, 산업폐기물 및 광산폐기물을 이용한 도로포장, 도로 주변 제초제 사용 및 자동차 사고 등에 의해 기인된다(Harrison *et al.*, 1981; Hewitt and Rashed, 1990; Lee *et al.*, 1997; Lee and Touray, 1998).

자동차 배기가스, 마모에 의해 발생하는 미세한 타이어 및 브레이크 물질들은 도로 환경에서 자연 상태 또는 자동차 통행에 의해 발생된 바람에 의해 다시 공기 중으로 비산되며, 이로 인해 인근 주택가와 상가지역을 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, 이러한 입자들은 미세할수록 입자가 큰 입자보다 중금속과 유기물질의 함량이 수배 정도 높은 것으로 알려져 있다(Lee and Touray, 1998).

그동안 국외에서는 Culbard *et al.*, 1988; Fakayode and Olu-Owolabi, 2003; Fergusson *et al.*, 1986; Thornton, 1990; Thornton *et al.*, 1985 등에 의해서, 국내에서는 Kim and Chon, 1993; Kim *et al.*, 1989; Park *et al.*, 1985; Byun *et al.*, 1996; Bae *et al.*, 1998; Sohn *et al.*, 1998; Lee *et al.*, 1999, 2001; Ahn and Chon, 1996; Chon and Choi, 1992; Cho, 2000 등에 의한 도시지역의 도로변 분진과 토양오염과 관련되어 수행된 연구를 통해 서울·경기지역 일부지역에 대한 중금속 오염평가, 거동특성에 및 기원규명기술 등이 보고된 바 있으나, 광주광역시 도로변 분진의 유해원소에 대한 연구는 아직 없는 상태이다.

본 연구에서는 광주광역시의 도로변 분진을 채취하여 주거지역, 산업지역, 도심지역, 교통밀집지역으로 집단을 나누고, 유해원소의 지역적 특성과 오염특성을 파악하고자 하였다. 이러한 연구를 통해 유해원소들의 오염특성을 규명하고, 궁극적으로는 광주광역시 일대의 도시환경보전정책의 기초 자료로 제공하고자 한다.

2. 광주광역시의 지질 및 도시화 특성

2.1. 광주광역시의 지질 특성

광주광역시는 50,000분지 1 광주지질도폭 전체와 송정지질도폭의 아랫부분에 해당하며, 선캠브리아기 화강편마암, 시대미상의 변성퇴적암류, 쥐라기 화강암류, 그리고 백악기 퇴적암류, 화산암류 및 심성관입암류 등으로 구분되어진다(Kim *et al.*, 1990; Hong and Yun, 1986).

선캠브리아기 화강편마암은 동남부와 북서부에 분포되어 있으며, 쥐라기 화강암류의 관입 등 대보조산운동과 관련된 화강암화작용에 의해 대부분 화강편마암으로 변한 것이다(Kim *et al.*, 1990). 쥐라기 화강암류는 중앙부에 걸쳐서 넓게 분포되고 남동부에는 소규모로 분포하며(Park *et al.*, 1995), 백악기의 대규모 화산암류와 소량의 퇴적암류 및 심성관입암류는 주로 능주분지의 중간 서변부에 분포한다. 안산암은 연구지역에 넓게 분포하며, 대체로 하부에 안산암질응회암이, 그리고 안산암질 라바가 놓이고, 일부지역에서는 안산암 관입체를 형성하는 하나의 분출운회를 지닌다. 또한 이들은 장동층에 해당되는 얇은 퇴적층이 협재되어 있다(Kim *et al.*, 1990; Hong and Yun, 1986).

2.2. 광주광역시의 도시화 특성

광주광역시는 동경 126°38'35"~127°00'34"와 북위 35°03'13"~35°15'22"에 위치하며 동서간 34.3 km, 남북간 23.1 km이다. 2004년 12월 말 현재 행정조직은 동·서·남·북·광산구 등 5개 구 90개 동으로 이루어져 있으며, 501.34 km²의 면적(도시지역: 478.35 km², 관리지역: 19.44 km², 농림지역: 3.55 km²)에 인구는 140만명이다(A statistical annual report of Gwangju City, 2004).

광주 하남산업단지는 1981년 1차 조성기간을 시작으로, 1986년 2차, 1989년 3차에 걸쳐 총면적 5,967 km²에 사업시설구역이 4,474 km², 지원시설구역 237 km², 공공시설구역 955 km², 녹지구역 261 km²을 조성하였다. 산업단지 입주 현황은 섬유·의복 1업체, 석유화학 113업체, 비금속 9업체, 기계 343업체, 기타 151업체이다(Hanam Industrial Complex, 2003).

3. 시료채취 및 분석

3.1. 시료채취

광주광역시 도로변 분진시료는 2004년 11월부터 12

Table 1. Classification of roadside dust samples in Gwangju city.

classification	sample ID
residential area(9)	12, 13, 14, 19, 33, 39, 40, 48, 49
industrialized area(10)	23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32
downtown area(6)	42, 42, 44, 45, 46, 47
heavy traffic area(22)	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 15, 16, 17, 18, 20, 34, 35, 36, 38, 40

*number of samples in parenthesis

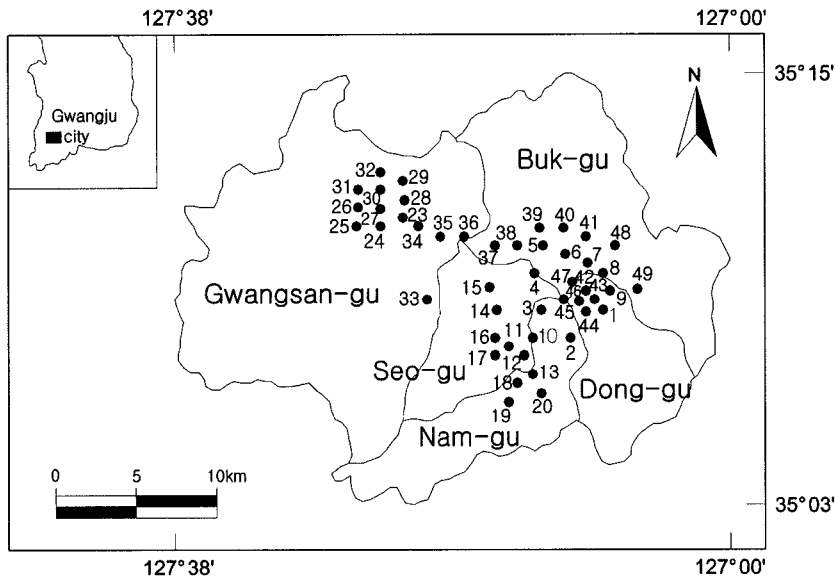


Fig. 1. Sampling site map of the Gwangju city.

월까지 총 6차례에 걸쳐 야외조사와 함께 시료를 채취하였다. 채취된 시료는 도시화 특성에 따른 유해원소의 오염 특성을 규명하기 위하여 주거지역(residential area), 산업지역(industrialized area), 도심지역(downtown area), 교통밀집지역(heavy traffic area)으로 세분하였다(Table 1).

주거지역은 큰 도로나 공단 지역과 인접하지 않는 아파트 단지 주차장에 있는 퇴적물에서 9개 시료를, 산업지역은 광주광역시에서 금속, 기계, 석유화학, 전기 및 전자, 자동차 관련 산업이 가장 밀집해 있는 하남산업단지에서 10개 시료를 채취했다. 도심지역은 광주광역시에서 가장 중심부에 위치한 충장로, 금남로에서 6개 시료를, 교통밀집지역은 산업단지를 제외한 지역 중 6차선 이상의 큰 도로에 인접한 지역에서 22개 시료를 채취하여 총 47개의 시료를 채취하였다(Fig. 1).

3.2. 시료처리

채취한 도로변 분진은 실험실에서 3일간 자연건조시킨 후, 100mesh의 표준체를 이용하여 체질 하였다.

체질 중에 시료가 오염 되는 것을 완전히 배제하기 위하여 stainless로 제작된 표준체를 이용하였다. X선 회절 분석용 시료는 원심 분리기에 74 µm(-200mesh)의 시료 0.5 mg와 1 ml의 증류수를 넣고 30분간 원심 분리를 한 후, cover glass(1.5×1.5mm) 위에 1ml를 취한 다음 자연건조시켜 분석시료를 만들었다. 화학 분석용 시료는 100mesh의 표준체를 통과한 150 µm이하의 퇴적물을 전체가 균질하게 되도록 잘 섞은 다음 20 g 정도를 골고루 나눠 취하고 알루미늄 몰탈을 이용하여 74 µm(-200mesh) 정도가 될 때까지 연마하여 만들었다.

3.3. 시료분석

도로변 분진시료에 대한 광물학적 특성을 알아보기 위해 X선 회절분석을 실시하였다. X선 회절분석은 조선대학교 공동실험실습관 X선분석실에서 실시하였으며, X선회절분석기는 PANalytical社의 X'Pert PRO MPD를 이용하였다. 사용된 조건은 Cu target, 40 kv, 30 mA, 2theta 범위는 5°~70°, scan speed는 1sec/

step, step size는 0.03 이었다. 화학분석을 위한 ICP-AES분석은 영국 Royal Holloway University of London에서 실시하였다. ICP-AES 는 미국 Perkin-Elmer Optima사의 3300RL를 이용하였으며, 분석 조건은 RF power 1300 watt, plasma flow 15 L/min, coolant flow 0.5 L/min, nebulizer flow 0.8 L/min 이었다. 화학분석 자료를 바탕으로 중금속 함량이 높게 나타난 시료를 대상으로 하여 전자현미경(scanning electron microscope)분석을 실시하였다. 전자현미경은 JEOL社의 JSM 5910LV를 이용하였고, 이차전자상

(secondary electron image)과 반사전자상(backscattered electron image)으로 유해원소를 함유한 입자를 관찰하였다. 이때 관찰 조건은 15 kV, 74, spo-tsize 43이었다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 광주광역시 도로변 분진의 X-선 회절분석 결과

광주광역시 도로변 분진의 X-선 회절분석결과, 대부분의 도로변 퇴적물에서, 석영, 미사장석, 조장석, 백운모, 방해석 등이 관찰되었다. 지역에 따라 비교해 보면,

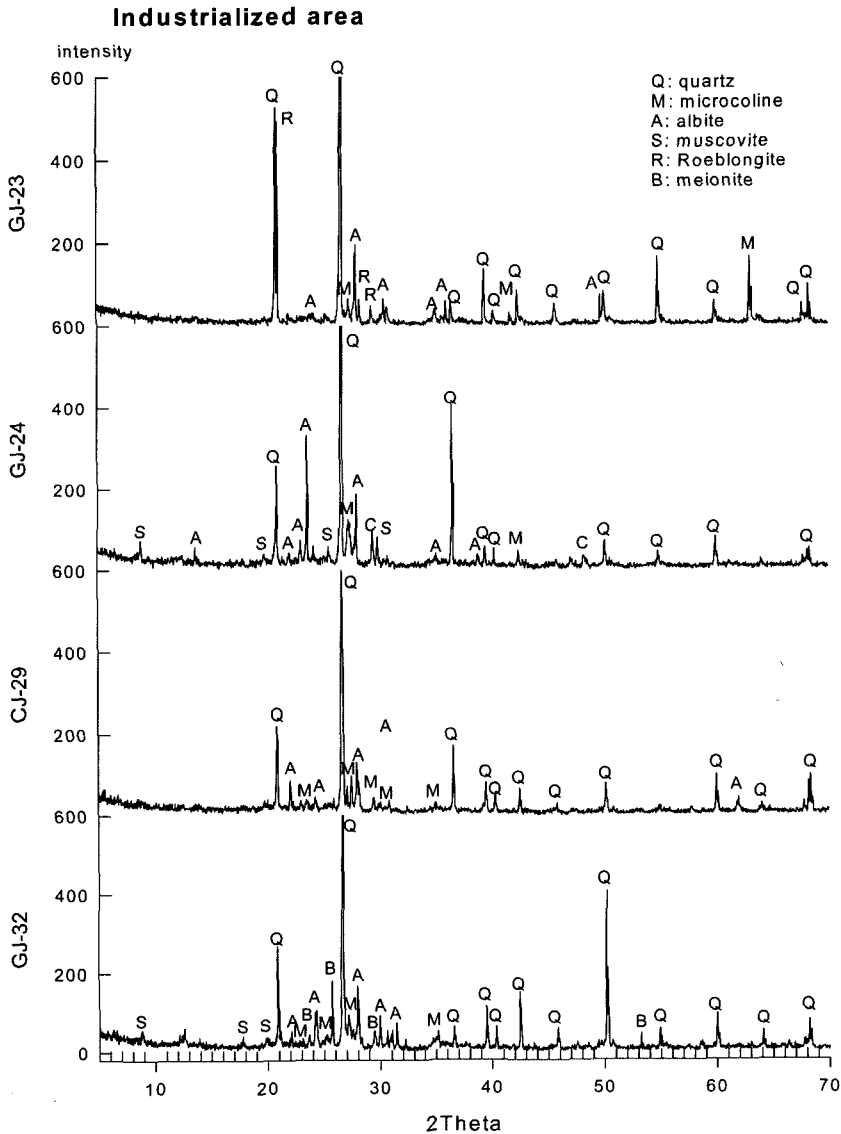


Fig. 2. X-ray diffraction patterns of representative bulk samples in industrialized area in the Gwangju city.

Table 2. Contents(ppm) of heavy metals in dust and sediments in Korea.

		Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Seoul	I	2.2	10.2	103.9	318.7	39.4	201.3	2491.9
	II	2.2	11.5	93.4	244.7	49.6	247.8	3601.0
	III	5.9	30.3	224.0	766.6	123.5	306.4	3407.0
	IV	3.00	10.82	69.22	101.2	27.43	77.9	335.5
Uijeongbu	V	1.2	9	41	124	29	534	334
Koyang	VI	1.8	16	43	83	39	86	265
Jeonju	VII	2.6	8.6	60.3	117.1	39.6	115.5	459.6
	VIII	1.7	14.6	54.2	96.8	38.7	108.0	428.9
Gwangju	IX	-	11.7	63	26	21	21	104
	X	0.6	64	100	137	31	103	526

Sediments collected from gully post in Kangnam-gu (I), Kwanak-gu (II) and Jung-gu (III) area (Yun *et al.*, 2000; Lee *et al.*, 2001). Soil in Seoul(IV) area (Choo *et al.*, 2005). Dusts from the Uijeongbu (V) and Koyang city(VI) (Chon and Ahn, 1996). Roadside sediments summer (VII) and winter (VIII) in Jeonju city (Cho, 2003). Stream sediments in Gwangju city (IX) (Kim, 2005). Roadside dust in Gwangju city (X) (This Study).

Table 3. Contents(ppm) of heavy metal elements for classified group of roadside dust in the Gwangju city.

		Min	Max	Mean	S.D.	G.M.	Median
As	I	3.4	7.0	5.1	1.3	4.9	4.8
	II	3.6	5.2	4.4	0.6	4.3	4.2
	III	5.7	9.0	7.4	1.1	7.4	7.5
	IV	4.4	11.9	6.6	1.8	6.4	6.3
Cd	I	0.2	1.1	0.4	0.3	0.4	0.3
	II	0.4	28.8	4.7	8.6	1.9	1.8
	III	0.4	0.9	0.6	0.2	0.6	0.5
	IV	0.3	1.3	0.6	0.3	0.6	0.5
Co	I	32	153	67	36	60	64
	II	49	108	78	21	75	78
	III	45	90	60	16	59	56
	IV	35	526	98	108	76	58
Cr	I	25	95	67	25	62	67
	II	101	526	193	128	168	144
	III	91	138	112	18	111	111
	IV	73	272	107	43	101	96
Cu	I	11	143	73	51	54	66
	II	107	375	206	89	190	176
	III	102	190	155	33	152	162
	IV	81	333	147	62	137	135
Ni	I	14	39	24	8	23	25
	II	42	247	81	61	69	60
	III	29	64	40	13	38	36
	IV	19	52	31	8	30	30
Pb	I	13	145	73	48	56	69
	II	72	413	159	100	139	142
	III	63	150	101	33	96	98
	IV	67	254	117	48	110	102
Zn	I	101	408	284	125	253	344
	II	316	962	685	214	651	702
	III	309	924	575	223	54	540
	IV	380	972	552	147	536	532

I: residential area II: industrialized area
 III: downtown area IV: heavy traffic area
 S.D. : standard deviation G.M. : geometric mean

도심지역, 주거지역, 교통밀집지역 에서는 주로 석영, 미사장석, 조장석 등이 관찰되었으며, 지역구분에 따른 특별히 차이점은 발견되지 않았다. 산업지역에 해당하는 시료번호 32번에서는 Scapolite 그룹(주석류)에 해

당하는 Meionite($(Ca, Na)_2(SiAl)_6O_{12}(CO_3)_{0.5}$)가 관찰되었고, 시료번호 23번에서는 납을 포함하고 있는 흰색광물인 Roebingite($Pb_2Ca_7Si_6O_{14}(OH)_{10}(SO_4)_2$)가 관찰되어 다른 지역과는 다른 특성도 나타났다(Fig. 2).

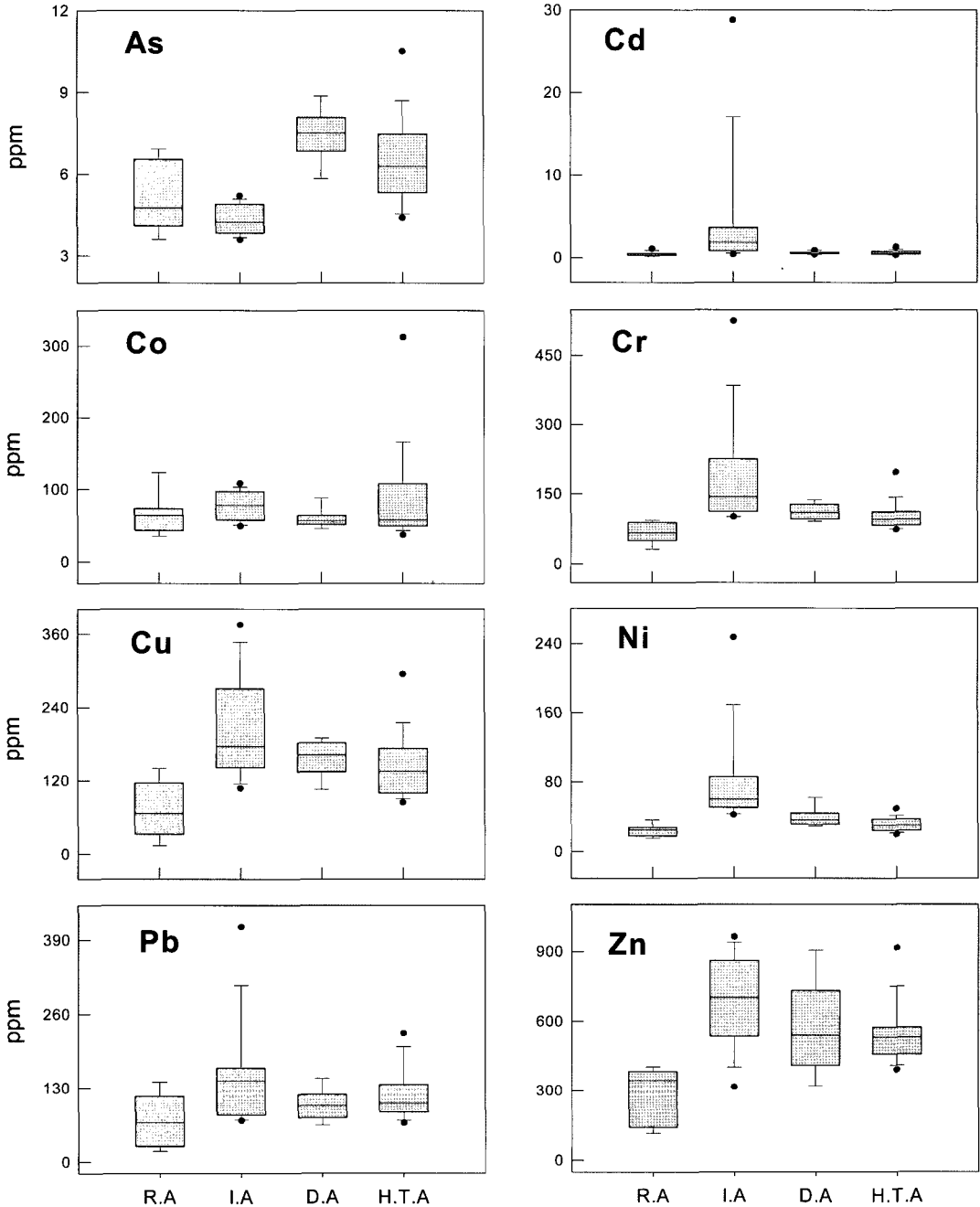


Fig. 3. Comparison diagram of hazard element contents for classified group of roadside dust in the Gwangju city. R.A residential area. I.A: industrialized area. D.A: downtown area. H.T.A: heavy traffic area.

4.2. 광주광역시 도로변 분진의 유해원소 특성

지구시스템에서 증금속과 같은 유해원소의 이동, 분산, 부화는 암석과 광석으로부터 퇴적물, 토양 그리고 순환수를 따라 이동하며, 각각의 환경계가 자정능력을 초과할 때 유해한 물질이 부화되어 생태계에 좋지 않은 영향을 미칠 수 있다(Davies and Ballinger, 1990).

광주광역시 도로변 분진의 유해원소 함량은 비소 3.4~11.9 ppm, 카드뮴 0.2~28.2 ppm, 코발트 32~526 ppm, 크롬 25~526 ppm, 구리 11~375 ppm, 니켈 14~247 ppm, 납 13~413 ppm, 아연 101~972 ppm이다. 유해원소의 평균함량을 기준으로 함량이 높은 순서는 아연>구리>납>크롬>코발트>니켈>카드뮴 이다. 이는 Ahn and Chon(1996)이 경기도 의정부 분진에서 제시한 납>아연>구리>크롬>니켈>코발트>카드뮴 함량 순서와는 약간 차이를 보인다(Table 2).

유해원소 함량은 주거지역에서 비소 3.4~7.0 ppm, 카드뮴 0.2~1.1 ppm, 코발트 32~153 ppm, 크롬 25~95 ppm, 구리 11~143 ppm, 니켈 14~39 ppm, 납 13~145 ppm, 아연 101~408 ppm, 산업지역에서 비소 3.6~5.2 ppm, 카드뮴 0.4~28.8 ppm, 코발트 49~108 ppm, 크롬 101~526 ppm, 구리 107~375 ppm, 니켈 42~247 ppm, 납 72~413 ppm, 아연 316~962 ppm, 도심지역에서 비소 5.7~9.0 ppm, 카드뮴 0.4~0.9 ppm, 코발트 45~90 ppm, 크롬 91~138 ppm, 구리 102~190 ppm, 니켈 29~64 ppm, 납 63~150 ppm, 아연 309~924 ppm, 교통밀집지역에서 비소 4.4~11.9 ppm, 카드뮴 0.3~1.3 ppm, 코발트 35~526 ppm, 크롬 73~272 ppm, 구리 81~333 ppm, 니켈 19~52 ppm, 납 67~254 ppm, 아연 380~972 ppm의 범위를 보였다(Table 3).

카드뮴, 코발트, 크롬, 구리, 니켈, 납, 아연 함량의 증양값은 산업지역에서 다른 지역보다 높고, 비소는 도심지역에서 높았다. 하남 산업단지는 금속과 자동차, 전자 관련 업체가 많이 입주해 있어 이들 업체의 산업 활동이 유해원소의 오염과 밀접한 관련이 있다고 추정된다(Fig. 3, Fig. 4).

4.3. 도시화 특성에 따른 유해원소의 오염원

4.3.1. 비소(As)와 카드뮴(Cd)

비소화합물 대부분은 독성이 높기 때문에 살균제, 제초제, 살충제 등의 여러 가지 농약에 사용하는 경우가 많다. 무기형태의 비소를 포함하는 약제는 이미 농약에는 사용되고 있지 않으나 과거에 대량으로 사용된 지역에서의 잔류효과에 대해서는 아직 상당한 관심을 가지고 있다.

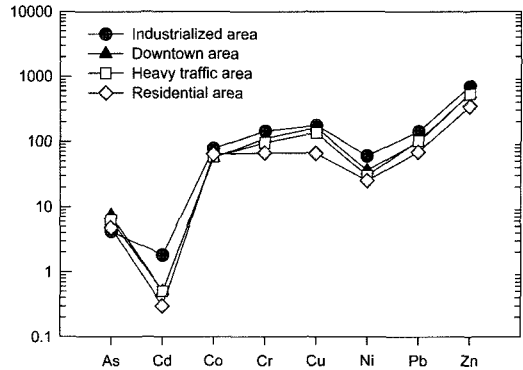


Fig. 4. Comparison diagrams of hazardous elements contents for classified group of roadside dust in the Gwangju city. (unit: ppm)

광주광역시 도로변 분진에서 비소의 함량 증양값은 5.5 ppm이고, 시료번호 GJ-37(동림동 상무대학직업전문학교)에서 11.9 ppm으로 가장 높은 함량을 보였다. 이 지역은 광주광역시 도로변 분진 시료 중에서 유일하게 도로 주위에 농경지가 발달한 지역으로 자동차 배출물질 이외의 농경지에서 사용되는 제초제 등이 잔류되어 기인된 것으로 추정된다.

광주광역시 도로변 분진에서 카드뮴의 함량 증양값은 0.6 ppm이고, 시료번호 GJ-23(하남 산단)에서 8 ppm으로 가장 높은 함량을 보였다. 이곳은 카드뮴뿐만 아니라 크롬 526 ppm, 구리 375 ppm, 니켈 375 ppm으로 모두 높게 나타나 카드뮴이 크롬-구리-니켈의 오염원의 배출과 관련이 있는 것으로 추정된다. 이곳은 하남 산업단지 공단 1번로 입구로서 산업 활동으로 인한 오염원이 배출 되었다고 사료 되며, 카드뮴은 소량으로도 인체에 많은 피해를 주기 때문에 특히 주의와 관찰이 요망된다.

4.3.2. 코발트(Co)와 크롬(Cr)

광주광역시 도로변 분진에서 코발트의 함량 증양값은 64 ppm이고, 시료번호 GJ-2(봉선동 한일병원 입구)에서는 526 ppm으로 증양값보다 무려 8배나 높게 나타났다. 이 지역은 교통량이 많고, 급경사 도로, 카센터 등이 있어 자동차 브레이크 물질과 주변의 자동차 카센터에서 나오는 물질에 의한 영향으로 오염에 상당히 노출되어 있음을 설명해 준다. 도시화 특성에 따라 산업지역이 코발트 함량 범위는 49~108 ppm, 증양값이 78 ppm으로 가장 높았으며, 주거지역, 도심지역, 교통밀집지역들은 별다른 차이를 보이지 않았다.

광주광역시 도로변 분진에서 크롬의 함량 증양값은

100 ppm이고, 도시화 특성에 따라 산업지역이 101~526 ppm, 중앙값 144 ppm으로 주거지역에 비해 2배정도 높았다. 시료번호 GJ-23(하남 산업단지)에서는 526 ppm으로 중앙값보다 5배나 높게 나왔으며, 카드뮴, 구리, 니켈도 비슷한 특성을 보여 산업 활동으로 인한 오염으로 추정된다.

4.3.3. 구리(Cu)와 니켈(Ni)

광주광역시 도로변 분진에서 구리의 함량 중앙값은 137 ppm이고, 시료번호 GJ-23(하남 산업단지)에서 375 ppm으로 2.7배 정도 높은 함량을 보였다. 구리오염이 현저한 도로변 퇴적물은 일반적으로 납, 크롬, 니켈 함량도 높게 나타났으며, 이는 이들 원소들의 오염원이 유사한 것으로 추정된다. 도시화의 특성에 따라 산업단지에서 구리의 함량범위는 107 ppm~375 ppm, 중앙값이 176 ppm으로 주거지역보다 2.6배정도 높게 나왔다. 이러한 결과는 Youm *et al.*(2005)이 연구한 부산광역시의 결과와 같이 광주광역시의 도로변 분진에서 구리의 오염원은 교통량이 원인이라기보다는 산업 활동으로 인한 오염이 더 크다는 것을 알 수 있었다.

광주광역시 도로변 분진에서 니켈의 함량 중앙값은 31 ppm이고, 시료번호 GJ-23(하남 산업단지)에서 247 ppm으로 가장 높은 함량을 보였다. 도시화 특성에 따라 산업지역에서 니켈함량 범위는 42~247 ppm, 중앙값이 60 ppm으로 주거지역보다 2.4배 정도 높았으며, 도심지역과 교통밀집보다는 2배정도 높았다. 하남산업단지는 석유화학과 금속, 기계, 자동차, 전자 관련 업체가 입주해 있어, 니켈의 오염원은 구리와 마찬가지로 산업 활동으로 인한 오염원이 배출되어 오염된 것으로 추정된다.

4.3.4. 납(Pb)과 아연(Zn)

광주광역시 도로변 분진에서 납의 함량 중앙값은 103 ppm이고, 시료번호 GJ-30(하남 산업단지)에서 413 ppm으로 가장 높은 함량을 보였다. 도시화 특성에 따라 산업지역이 72~413 ppm, 중앙값 142 ppm으로 주거지역보다 2배정도 높았다. 납 함량이 높은 것은 유연회발유에 옥탄가를 높이기 위해 산화제로 첨가되었던 tetramethyl-lead 또는 tetraethyl-lead가 연소되어 브롬화합물 형태로 배출되기 때문이다. 브롬화합물의 형태로 배출된 납은 대기에 있는 SOx와 물과 화학적으로 반응하여 PbSO₄로 침전되는 것으로 알려져 있으며, 이 화합물은 물 분자 혹은 먼지와 응집되어 지상으로 퇴적되어 토양과 수계를 오염시키게 되는 것으로

알려져 있다(Elisand Revitt, 1982; Harrison *et al.*, 1981; Harrison and Wilson, 1985; Lee *et al.*, 1997). 하지만 우리나라에서는 1980년대 후반부터 유연회발유의 사용을 금지하여 왔고, 청정연료의 보급과 무연회발유를 사용하기 때문에 광주광역시 도로변 분진에서 납의 오염은 자동차 배출물질이 아닌 산업 활동에서 기인되었을 가능성이 더 많다. 산업지역에서 납의 중앙값이 교통밀집지역보다 높게 나온 것은 지역적인 특성에 따라 산업지역에서 납 성분을 포함하고 있는 금속제조업 활동이 활발하여 영향을 준 것이라 볼 수 있다.

광주광역시 도로변 분진에서 아연의 함량 중앙값은 526 ppm이고, 시료번호 GJ-4(광천동 광주 신세계백화점)에서 972 ppm으로 높은 함량을 보인다. 자동차 타이어에는 경화작용으로 사용되는 산화아연(ZnO)이 약 1.3% 포함되어 있는데, GJ-4 시료는 주위에 백화점과 터미널에 인접해 있어 교통량 증가에 따른 타이어의 마모에 기인하여 아연 함량이 높은 것으로 보인다(Friedlander, 1973). 아연은 산업활동에 의한 배출, 자동차의 타이어가 마모로 발생한 tire tread particle, 도로표지판에 사용되는 페인트에 함유되어 있는 ZnO(Sohn *et al.*, 1998)등이 도로변에 퇴적되어 아연의 축적에 중요한 역할을 한 것으로 판단된다.

4.4. 중금속원소의 상관 관계

도로변 분진의 유해원소는 함량의 변화 양상이 특정 원소와 상관성을 가지고 분산 거동하므로 그 상관성을 알아보기 위하여 원소간의 상관 분석을 실시하였다. 상관 분석은 SPSS 10.0 프로그램을 이용하였다.

광주광역시 도로변 분진의 유해원소별 상관관계는 카드뮴이 증가함에 따라 크롬과 니켈은 정(+)의 상관관계를 나타내고, 크롬은 구리와 니켈, 구리는 니켈과, 납은 아연과 정(+)의 상관관계를 양상을 띠고 있다(Fig. 5). 이들은 모두 0.6이상으로 $p < 0.05$ 에서 유의한 상관성을 보였으며, 카드뮴-크롬($r=0.805$), 카드뮴-니켈($r=0.898$), 크롬-구리($r=0.664$), 크롬-니켈($r=0.904$), 구리-니켈($r=0.652$), 납-아연($r=0.635$)간의 상관계수는 0.6이상으로 상대적으로 높은 상관관계를 나타냈지만 다른 원소들에 대해서는 좋은 상관성을 가지지 못했다(Table 4).

이는 Choo and Kim(2005)등이 서울지역 가로수 토양의 연구 결과인 크롬-니켈, 구리-니켈, 납-아연과 유사함을 보였으나 광주광역시 도로변 분진에서는 카드뮴-코발트, 구리-아연과는 낮은 상관관계를 보여 상이한 결과를 나타내었다.

Table 4. Correlation coefficients of each hazard element in the Gwangju city.

	As	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
As	1.000							
Cd	-	1.000						
Co	-	-0.020	1.000					
Cr	-	0.805**	-0.007	1.000				
Cu	-	0.488**	0.125	0.664**	1.000			
Ni	-	0.898**	0.021	0.904**	0.652**	1.000		
Pb	-	0.085	-0.032	0.305*	0.418**	0.268	1.000	
Zn	-	0.074	-0.086	0.377**	0.475**	0.298*	0.635**	1.000

**Significant at p=0.01 *Significant at p=0.05

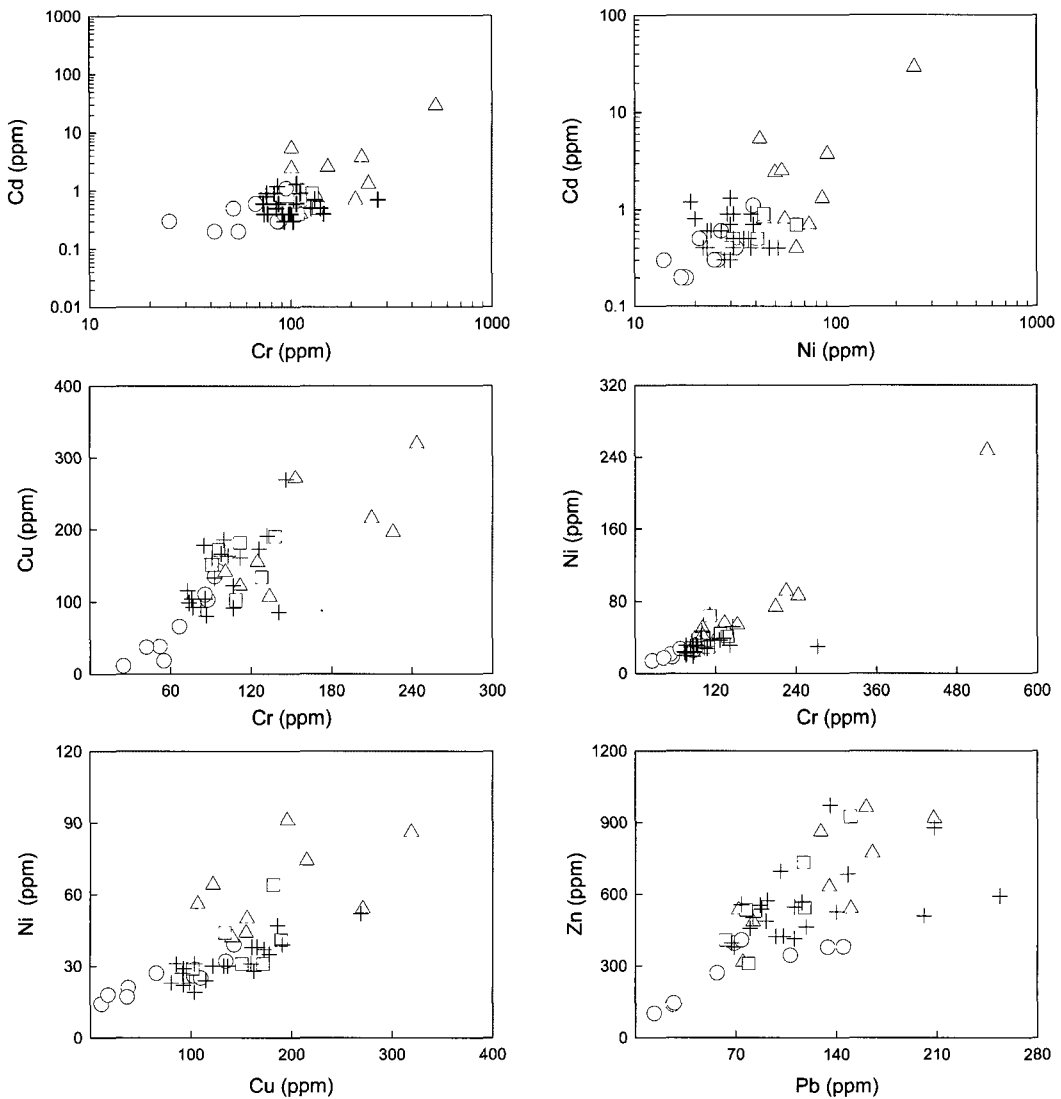


Fig. 5. Scatter diagram showing the correlation elements couples of roadside sediment in the Gwangju city.

○ : residential area △ : industrialized area
 □ : downtown area + : heavy traffic area

이런 유해원소의 상관계수 결과로 광주광역시 도로변 분진은 카드뮴은 크롬과 니켈의 배출원과 유사하며, 크롬은 구리와 니켈이 유사하고, 아연은 납의 배출원과 유사함을 보였다.

5. 유해원소 입자의 전자현미경분석

전자현미경분석은 유해원소를 함유한 입자를 확인하고, 그 형태를 조사하며 오염원을 규명하는데 유용한 방

법이다. 특히 반사전자상(BEI, backscattered electron image)은 원자번호가 높을수록 밝게 보이고, 낮을수록 어둡게 보이는 특징이 있어 다양한 성분의 광물로 이루어진 도로변 분진을 관찰하는데 좋은 효과를 가지고 있다.

Fig. 6은 광주광역시 도로변 분진중 하남 산업단지에서 채취한 시료번호 GJ-23번에 해당하며, 이 지역은 기계와 금속 및 화학석유 등이 밀집된 공단 지역으로 산업 활동으로 인한 오염이 예상되는 지역의 시료이다.

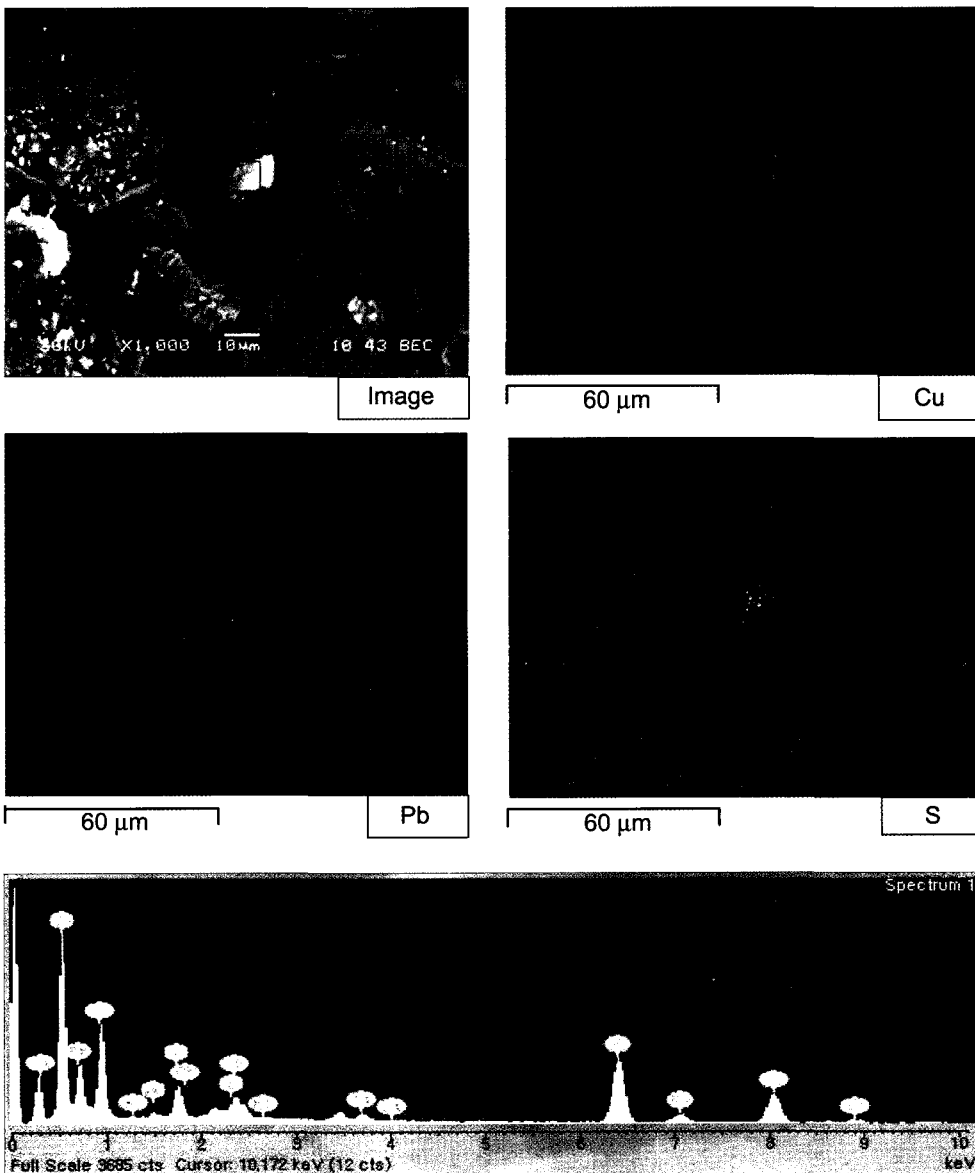


Fig. 6. The result of SEM and EDS analysis for GJ-23.

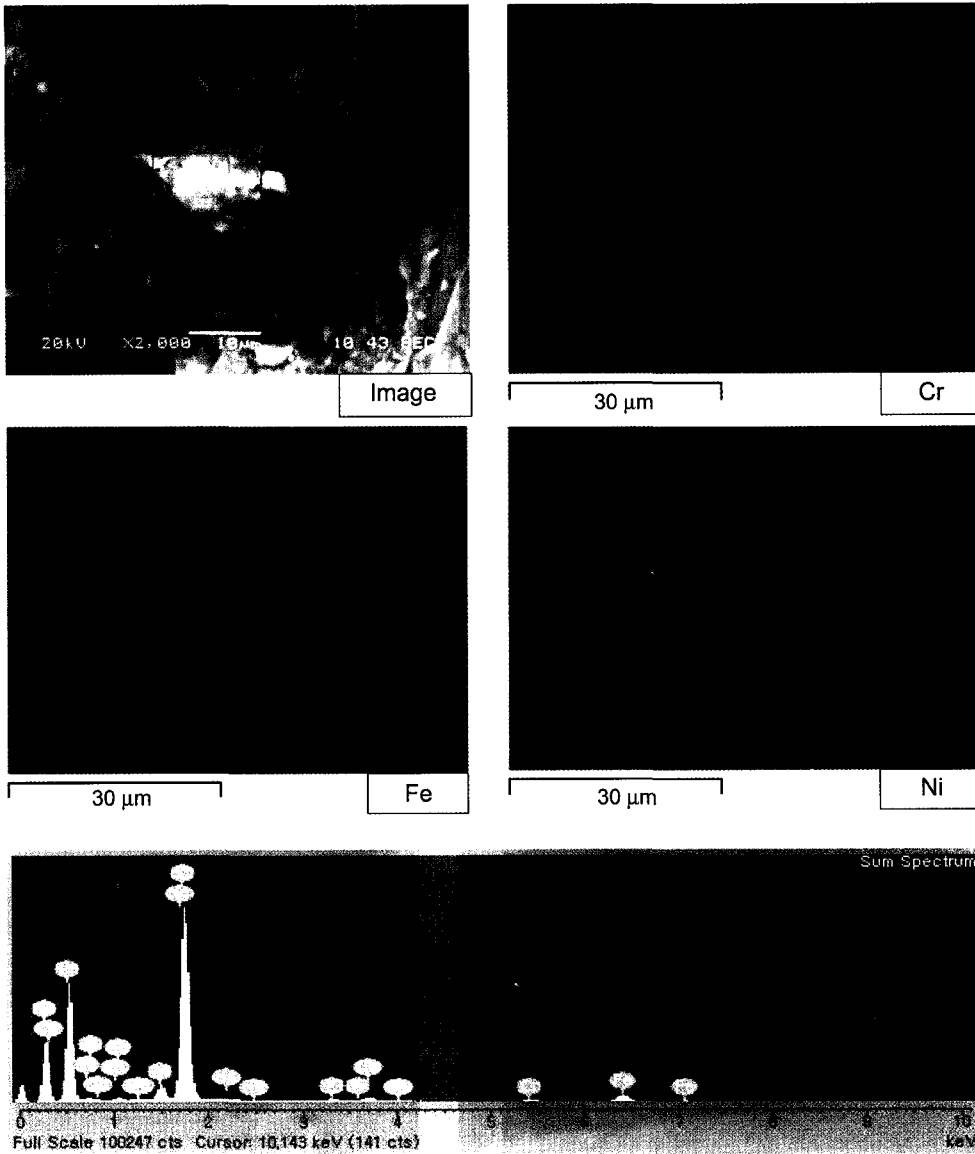


Fig. 7. The result of SEM and EDS analysis for GJ-30.

분석결과 밝게 나타나는 광물은 철산화물인 침철석 (goethite)이나 지어콘(zircon) 광물이며, SEM image에서 A부분의 EDS 분석결과 구리, 납, 황이 검출되었다. Fig. 7은 광주광역시 도로변 분진중 하남 산업단지에서 채취한 시료번호 GJ-30번을 분석한 것으로 이 입자에서 크롬, 니켈 철이 함께 분포하고 있다. 또한 침철석의 조성을 가지며 침전상으로 나타난 입자에서도 크롬이 관찰된다. 이는 산업 활동으로 인하여 산업지역 내 분진에 일부 크롬의 유입이 일어나 철산화물에 흡착 또는 공침전된 결과로 추정된다.

6. 결 론

1. 광주광역시 도로변 분진에 대한 X선 회절 분석 결과, 도심지역, 주거지역, 교통밀집지역에서는 주로 석영, 미사장석, 조장석 등이 관찰되었으며, 지역구분에 따른 특별히 차이점은 발견되지 않았다. 산업지역에 해당하는 시료번호 32번에서는 Scapolite 그룹(주석류)에 해당하는 Meionite($(Ca, Na)_2(SiAl)_6O_{12}(CO_3)_{0.5}$)가 관찰되었고, 시료번호 23번(산업지역)에서는 납을 포함하고 있는 흰색광물인 Roebblingite($Pb_2Ca_7Si_6O_{14}(OH)_{10}$)

(SO₄)₂)가 관찰되었다.

2. 광주광역시 도로변 분진에서 검출된 중금속원소 함량은 비소 3.4~11.9 ppm, 카드뮴 0.2~28.2 ppm, 코발트 32~526 ppm, 크롬 25~526 ppm, 구리 11~375 ppm, 니켈 14~247 ppm, 납 13~413 ppm, 아연 101~972 ppm이다.

3. 광주광역시 도로변 분진에서 검출된 평균 중금속 원소 함량을 기준으로 함량이 높은 순서는 아연>구리>납>크롬>코발트>니켈>카드뮴이다. 광주광역시를 도시화 특성에 따라 주거지역, 산업지역, 도심지역, 교통밀집지역으로 구분해 분석한 결과 산업지역에서 카드뮴, 코발트, 크롬, 구리, 니켈, 납, 아연 등 대부분이 높았으며, 비소는 도심지역이 높았다. 광주광역시 하남 산업단지는 금속과 자동차, 전자 관련 업체가 입주해 있어, 산업 활동이 중금속 오염과 밀접한 관련이 있다고 추정된다.

4. 광주광역시 도로변 분진의 유해원소별 상관계수 값을 보면 카드뮴이 증가함에 따라 크롬, 니켈은 정(+)의 상관관계를 나타내고 크롬은 구리, 니켈과 구리는 니켈, 납은 아연 또한 정(+)의 상관관계를 양상을 띠고 있다. 이들은 모두 0.6이상으로 $p < 0.01$ 에서 유의한 상관성을 보였으며, 카드뮴-크롬($r=0.805$), 카드뮴-니켈($r=0.898$), 크롬-구리($r=0.664$), 크롬-니켈($r=0.904$), 구리-니켈($r=0.652$), 납-아연($r=0.635$)간의 상관계수는 0.6이상으로 상대적으로 높은 상관성을 나타냈다.

5. 전자현미경 분석결과 산업지역에서 납을 함유한 입자가 관찰되어 납의 오염현상을 반영하였고, 또한 크롬, 니켈, 철을 함유한 입자를 확인 할 수 있어, 이들 원소는 산업 활동에 의한 것으로 추정된다.

6. 광주광역시 도로변 분진 중 인체에 위대한 원소를 포함하고 있는 분진은 여러 매체와 다양한 메커니즘을 통하여 도로를 통행하는 보행자와 도로변 주거지역에서 생활하는 사람들의 호흡을 통해 인체에 흡입되어 주민의 건강에 악영향을 미칠 것으로 예상된다. 이러한 유해원소로부터 주민의 건강을 보호하기 위해서는 물을 이용한 정기적인 청소가 실시되어야 할 것이며, 이 세척한 물이나 빗물이 광주천이나 인근 강에 직접적으로 유입되는 것을 막아야 할 것이다.

사 사

본 논문에 대한 세심한 심사와 유익한 조언을 해주신 익명의 심사위원님께 깊이 감사드립니다. 본 연구

는 한국기초과학지원연구원의 고가특수연구기지원사업(고분해능 X-선회절분석기와 다기능 X-선회절분석기)의 지원을 받아 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- A statistical annual report of Gwangju City (<http://www.gwangju.go.kr>), 2004.
- Bae, Y.J., Kim, K.H., Chon H.T. and Aha J.S. (1998) Heavy Metal Concentrations of Indoor and Outdoor Dusts - In Middle Schools in the Kangseoku and Yangchonku Areas, Seoul. *Journal of the Korean Earth Science Society*, v. 19, p. 449-460.
- Byun, H.O., Kim, K.H. and Chon, H.T. (1996) Heavy metal contamination of the playground soils and dusts in the middle schools of the Youngdungpo-ku and Kuro-ku area, Seoul. *Journal of the Korean Earth Science Society*, v. 17, p. 129-204.
- Cho, K.S. (2000) Heavy Metal Contamination of Indoor, Outdoor and Playground in Middle and High School in the Jeonju-City, Korea., v. 9, p. 495-503.
- Cho, K.S. (2003) Characteristics of Heavy Metal Pollution in Contaminated Roadside Sediments in Jeonju City, Korea. *Journal of the Korean Earth Science Society*, v. 24, p. 711-720.
- Chon, H.T. and Ahn, J.S. (1996) A study on the pollution of heavy metals in soils and dusts in satellite cities of the seoul capital Area. *Econ. Environ. Geol.*, v. 29, p. 87-100.
- Chon, H.T. and Choi, W.J. (1992) A geochemical study on the dispersion of heavy metal elements in dusts and soils in Urban and industrial environments. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 25, p. 317-336.
- Choo, M.K., Kim, K.H., Lee, J.S. and Chon, H.T. (2005) Geochemical dispersion and contamination characteristics of heavy metals in soils and leaves of ginkgo biloba in Seoul area. *Econ. Environ. Geol.*, v. 38, p. 221-236.
- Culbard, E.B. *et al.* (1988) Metal contamination in British urban dusts and soils. *J. Environ. qual.*, v. 17, p. 226-234.
- Davis, B.D. and Ballinger, R.C. (1990) Heavy metals in soils in north Somerset, England, with special reference to contamination from base metal mining in the Mendips. *Environ Geochem. Health*, v. 12, p. 291-300.
- 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*, v. 17, p. 87-100.
- Fakayode, S.O. and Olu-Owolabi, B.I. (2003) Heavy metal contamination of roadside topsoil in Osogbo, Nigeria: its relationship to traffic density and proximity to highways. *Environmental Geology -Berlin-*, v. 44, n. 2, p. 150-157.
- Fergusson, J.E. *et al.* (1986) The Elemental Composition and Sources of Home Dust and Street Dust. *Sci. Total Environ.*, v. 50, p. 217-221.
- Friedlander, S.K. (1973) Chemical element balances and

- identification of pollution sources. *Environment Science and Technology*, v. 7, p. 235-240.
- Hanam Industrial Complex(<http://www.hanamic.or>), 2003.
- Harrison, R.M. and Wilson, S.J. (1985) The Chemical Composition of Highway Drainage water: II. Chemical Associations of Metals in the Suspended Sediment, *The Science of Total Environment*, v. 43, p. 79-87.
- 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. *Environmental Science and Technology*, v. 15, p. 1378-1383.
- Hewitt, C.N. and Rashed, M.B. (1990) An integrated budget for selected pollutants for a major rural highway. *The Science of Total Environment*, v. 93, p. 375-384.
- Hong, S.H. and Yun, U. (1986) Geological report of the Songjung sheet. Korea Institute of Energy Research.
- Kim, H.J. *et al.* (1989) Investigation on the pollution in soils of seoul area. *Kor. J. Environ. Toxicol.*, v. 4, p. 27-34.
- Kim, J.K. and Park, Y.S. (2005) Geochemical Study on Geological Groups of Stream Sediments in the Gwangju Area. *Econ. Environ. Geol.*, v. 38, p. 481-492.
- Kim, J.Y. and Chon H.T. (1993) Geochemical Dispersion of Cu, Pb, Zn and Cd in Soils and Dusts in Seoul Area. *Journal of the Korean Institute of Mineral and Energy Resources Engineers*, v. 30, p. 163-176.
- Kim, K.B. *et al.* (1990) Geological report of the Gwangju sheet. Korea Institute of Energy Research.
- Lee, P.K., Baillif, P., Touray, J.C. and Ildefonse, J.P. (1997) Heavy Metal Contamination of Settling Particles in a Retention Pond along the A-71 Motorway in Sologne, France. *The Science of the Total Environment*, v. 201, p. 1-15.
- Lee, P.K. and Lee, J.H. (1999) Characteristics of roadside soils and effects of pH and time on their leaching behaviors of Pb, Zn, Cd and Mn., *Econ. Environ. Geol.*, v.32, p. 53-62.
- 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, p. 3425-3435.
- Lee, P.K., Kim, S.H. and So, C.S. (2001) Evaluation of heavy metal pollution in contaminated sediments from gully pots in Seoul city and the estimation of heavy metal mobility using sequential extraction method. *Journal of the Geological Society of Korea*. v. 37, n. 4, p. 629-652.
- Park, C.K., Lee, G.J. and You, S.J. (1985) Distributon of lead, cadmium, zinc and copper in the field soil along the road. *korean society of environmental engineers.*, v. 7, p. 37-42.
- Park, Y.S., Noh, Y.B. and Lee, C.S. (1995) Rb-Sr isotopic study of Granitoid Rocks in the Gwangju - Naju area, Korea. *Journal of the Korean Earth Science Society*, v. 16, p. 247-261.
- Sohn, D.H. and Lee, T.S. (1998) Studies on the Content of the heavy Metals in Soils of Seoul. *Chung-Ang journal of pharmlcal sciences*. v. 2, p. 21-31.
- Thornton, I. (1990) Soil contamination in urban areas, *Ploaeogeography, Palaeoclimatology*. v.82, p. 121-140.
- Thornton, I. *et al.* (1985) Metals in urban dusts and soils, *Environmental Technology Letters*. v. 6 p. 137-144.
- Youm, S.J. *et al.* (2005) Heavy Metal Contamination in Roadside Sediments within the Watershed of the Hoidong Reservoir in Busan City. *Econ. Environ. Geol.*, v. 38, p. 247-260.
- 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*, v. 21, p. 989-1000.