한국환경과학회지 제9권(제6호), 495~503, 2000
J. of the Korean Environmental Sciences Society

전주시내 중고등학교 실내·외 환경의 중금속 오염에 대한 연구

조 규 성
전북대학교 과학교육학부
(2000년 9월 21일 접수)

Heavy Metal Contamination of Indoor, Outdoor and Playground in Middle and High School in the Jeonju-City, Korea

Kyu-Seong Cho
Division of Science Education, Chonbuk National University
(Manuscript received 21 September, 2000)

Dust samples were collected from 17 middle and high schools in the Jeonju-city. Heavy metal concentrations were determined for the dry-deposited dusts from indoor and outdoor of classroom and playground of each sampling site. Concentrations of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn in indoor's dusts were highly concentrated. Also heavy metal concentrations in outdoor's dusts were similar to that of indoor's dusts. Concentrations of Cd, Cu and Zn in the dusts were much higher than the world average contents in soil and environmental orientation value. These levels are similar to those of the dust samples at middle schools located at Kangseo-gu and Yangchon-gu, Seoul. Playground dusts in 6 schools exhibited the enhanced heavy metal pollution with a pollution index (by Kloke) greater than 1.0. Most indoor and outdoor dusts exhibited the enhanced heavy metal pollution with a pollution index (by Culbard et al.) greater than 1.0.

Key words: dust, school, heavy metal concentration, pollution index

1. 서 론

문명의 발달과 인간의 무분별한 이기주의는 필연적으로 환경오염문제를 낳았고, 이제 어느 나라 어느 지역할 것 없이 인간 모두에게 고민과 염려를 안겨 주고 말았다. 우리의 장래를 짊어지고 나갈 후손들을 가르치는 교육의 장인 학교 환경도 예외는 될 수 없을 것이다. 물론 교육의 중요성을 깨닫고 학교의 하드웨어적, 소프트웨어적 교육환경을 개선하고자 하는 노력은 꾸준히 시도되고 있으나, 날로 산업화, 도시화 되가는 추세 속에서 도시 속에 있는 학교들의 환경을 실질적으로 점검해 보는 일은 우리의 미래를 대비하는 기본적인 작업일 것이다. 인간의 산업활동과 교통량의 증가 등 다양한 오염원에 의해 도시 환경은 중금속 오염에 쉽게 노출되어 있으면서도 이에 대한 주의나 대비가 부족한 것도 우리의 현실인 점을 감안할 때 학교 환경, 특히 학생들이 하루종일 대부분의 시간을 보내는 교실 내·외의 중금속 오염정도를 조사하는 일은 시급하고도 중요한 일이다.

중금속은 소량으로도 인체에 치명적인 영향을 주기 때문에 중금속의 오염정도와 그의 영향 및 오염원을 찾는 연구가 많이 이루어지고 있다. 오염양상을 총체적으로 파악하기 위해 하천으로 유입된 오염물질의 혼적이 집적되어진 퇴적물의 연구는 Salomons and Eysink,[1] Yeats and Bewers,[2] Prusty et al.,[3] Calmano and F'o rstner,[4] Lee,[5] 최만식 등,[6] 조영길과 김주용[7] 등에 의해 연구되고 있으며, 폐 광산 주변 환경오염에 대한 연구는 이진국 등,[8] 김상현과 전효택,[9] 이재영 등,[10] 나춘기와 전서령,[11] 오대균 등,[12] 조규성과 정덕호[13] 등에 의해 연구된바 있다.

도시화 및 산업화로 인해 그 지역에서 나타나는 인위적인 오염원에 의한 토양과 분진의 중금속 오염과 분산양상에 관한 연구는 외국에서 Thornton et al.,[14] Fergasson et al.,[15] Culbard et al.,[16] Thornton[17] 등에 의해 이루어 졌으며, 국내에서는 도로변 인접 토양 중의 Pb, Cd, Cu 및 Zn의 함량분포 특성,[18] 서울시내 고정 배출원의 중금속 배출량 조사연구,[19] 대기 중 부유 분진의 성분에 관한 조사 연구,[20] 서울시 일원의 토양 중금속 오염도 조사,[21] 도시 대기 중의 중금속에 대한 연구,[22] 도시 및 산업 환경 분진과 토양 중의 중금속 오염에 관한 환경 지구화학적 연구,[23] 서울 지역의 토양과 분진 중의 중금속 오염[24]등의 연구가 있으며, 그밖에 해당 지역의 지질학적 정보 및 지리적 특성과 관련하여 유독성 중금속 원소들의 분포 경향이나 분산특성, 그리고 도시환경

에서의 토양과 분진 중에 존재하는 전형적인 금속원소의 종류와 분포에 대한 연구가 수행된바 있다.[25][26][27][28]

우리 나라의 학교는 청소년이 하루의 대부분의 시간을 보내는 장소이며, 가정보다도 많이 생활하고 활동하며, 접하는 장소이다. 따라서 일상 생활의 거의 모든 활동이 학교에서 이루어진다. 그러므로 학교 주변의 분진이나 운동장 토양은 학생들에게 노출되어 있어 호흡기나 음식물을 통해 또는 직접접촉을 통해 인체 내에 유입되므로 청소년의 건강에 나쁜 영향을 미칠 가능성이 크다. 그러나 학교환경에 대한 중금속의 분석 연구는 변희옥 등[26]에 의한 연구가 일부 있을 뿐이고, 이들 연구는 대부분 서울 등 수도권에 집중되어 있고 전주 지역에 대한 연구는 아직 이루어진 바 없다. 또한 그 동안의 연구들이 대부분 도시의 정원 토양이나 도로 주변 분진 등의 실외 시료들에 집중되고 있고, 실내 시료에 대한 연구 자료는 배윤진 등[29]에 의한 연구가 일부 있을 뿐 자료가 부족한 실정이다.

전주시는 전라북도의 도청소재지로서 인구의 유입이 계속되고 있고, 지속적인 도시화, 산업화가 진행되고 있다. 신시가지가 조성되고 있고 도시 공단이 추가되고 있으며, 인구증가와 편리한 생활의 추구로 인해 교통량이 계속 늘어나고 있다. 이에 따라 전주시의 달라진 대기환경 속에서 학교 환경이 어떻게 변해가고 있으며, 그 수준은 어느 정도이고 이러한 원인은 무엇이고 대책은 없는가에 대한 종합적 논의를 위한 기초자료가 필요하다. 따라서 본 연구는 전주시에 소재한 17개 학교를 선정해 교실 내·외의 먼지와 운동장의 먼지시료를 채취해 Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Mn 등의 중금속 함량을 측정함으로써 오염정도를 파악하고 학교 실내·외 환경과 지역별 분산 특성을 규명하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1. 시료 채취

전주 시내에 소재한 중학교 28개 학교 중 9개 학교와 고등학교 27개 학교 중 8개 학교를 합쳐 총 17개 학교를 지역별로 고르게 선정했다. 선정된 학교에서 교실 내 먼지시료 56개, 교실 외 먼지 시료 57개, 운동장 먼지 시료 17개 등 총 130개의 시료를 1999년 4월중에 채취하였다. 교실 내 먼지 시료는 여러 개의 교실에서 칠판 위, 전등 반사판 위, 게시판 턱위, 물품장 위에 쌓인 분진을 채취해 각 층별로 하나의 시료를 얻었다. 교실 외 먼지 시료는 교실 내 먼지 시료와 마찬가지로 건물 외부의 문턱과 창틀에 쌓인 분진을 채취하여 각 층별로 하나의 시료를 얻었다. 한편 운동장 먼지 시료는 운동장의 먼지를 고루 채취해 대표성을 높이기 위해 10m 간격으로 격자점을 정하고 붓과 종이를 이용해 채취하여 학교별로 하나의 시료를 만들었다.

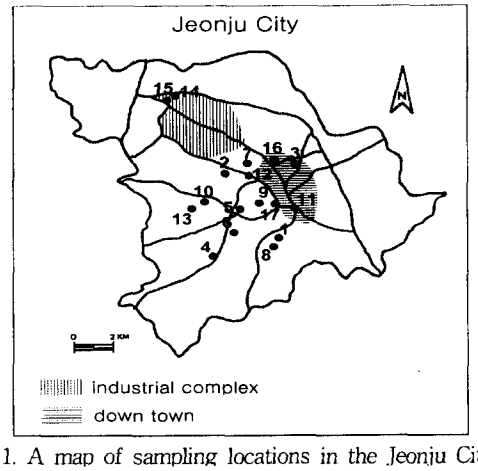

Fig. 1. A map of sampling locations in the Jeonju City

2.2. 화학처리 및 분석

채취한 먼지 시료를 -100mesh 입도로 체질해 얻은 후 Thompson and Wood의 방법으로 화학처리 하였다.[30] 즉, 먼지시료 0.25g에 HNO_3 4㎖와 $HClO_4$ 1㎖의 혼합산을 넣어 분해하였으며 시약이 모두 증발하도록 24시간 동안 건조시키고 여기에 5M HCl 2㎖를 넣어 용탈시킨 후 탈이온수를 가해 10㎖의 분석 용액을 얻었다. 이와 같은 방법은 국내의 선행 연구에서도 대부분 사용되었다. 이렇게 만들어진 용액 시료를 원자흡수분광기를 이용하여 Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Mn 등 8개의 원소를 정량 분석했다. 분석 결과를 바탕으로 세 학교에서 중금속 함량이 상대적으로 많은 9개 시료에 대해 선택적 연속 추출법[31]을 이용하여 중금속의 산출상태를 조사하였다.

3. 분석 결과 및 논의

3.1. 중금속 원소의 함량

시료의 화학분석 결과를 17개 학교 모두 합쳐 교실 내, 교실 외, 운동장 시료로 구분해 Table 1에 나타냈다. 실내 시료 56개, 실외 시료 57개, 그리고 운동장 시료는 17개로 총 130개에 대한 종합 자료이다.

Table 1. Metal concentrations in the dust from the 17 schools in the Jeonju City (unit in ppm).

		Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Mn
Indoors (n = 56)	Mean	6.3	22	107	715	71	268	866	231
	S.D	3.0	7	38	617	45	210	480	83
	Max.	22.4	51	254	2966	248	1052	2447	538
	Min.	0.5	10	47	114	18	55	160	107
Outdoors (n = 57)	Mean	5.1	21	115	765	58	223	926	265
	S.D	1.7	7	44	741	21	122	550	76
	Max.	10.4	61	241	3989	116	778	3095	524
	Min.	2.0	9	21	36	18	86	6	88
Playground (n = 17)	Mean	3.0	16	94	87	42	107	364	245
	S.D	2.1	8	148	106	71	151	448	120
	Max.	10.0	32	658	441	309	653	1498	454
	Min.	1.2	4	23	8	4	14	46	64

n = No. of samples
S.D = Standard Deviation

교실 내 먼지 시료 56개를 평균한 원소별 함량은 Cd 6.3ppm, Co 22ppm, Cr 107ppm, Cu 715ppm, Ni 71ppm, Pb

268ppm, Zn 866ppm, Mn 231ppm 이다. 이는 Pendias[32]가 밝힌 캐나다, 영국, 일본 미국의 평균 지표 토양(various soil)중에 있는 중금속의 함량과 비교해 볼 때 분석한 8개 원소 중 Mn을 제외하고 7개 원소가 함량을 초과하고 있다. Cd, Cu, Pb, Zn은 10배 이상, Co, Cr, Ni은 2배 이상이다. 그 밖의 국내외의 자료와 비교하기 위해 각 나라별 토양에 대한 환경 오염 기준을 Table 2에 정리해 보았다.[33] 영국의 기준은 가정 정원과 소규모 경작지의 잠정적인 유인 농도이고, 미국은 뉴저지주의 주거지역 표토의 오염 토양 복원 기준(cleanup standards)이다. 독일의 자료는 어린이 놀이터의 토양 중 유해한 물질의 지향 기준(orientation values)이고, 네덜란드는 토양의 최근 제안된 기준(intervention values)이다. 스위스의 자료는 공기 건조된 토양에 포함된 오염 물질의 최근 허용 오염 농도(maximum allowable pollution contents)이고, 캐나다는 거주지와 공원 지역의 오염 토양의 잠정적인 복원 기준이다. 한편 우리 나라는 환경부에서 1999년에 토양환경보전법에 토양오염 우려기준(규칙 제 19조)과 토양오염 대책기준(규칙 제 21조)을 발표했는데, 표에 제시된 자료는 토양 오염 대책기준으로서 분석한 원소 중에서는 Cd, Cu, Pb만 제시되어 있어서 이들 자료를 나타냈다.

Table 2. Average contents and environmental intervention values of heavy metals in soils of different countries (unit in ppm)

		Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Mn
Average contents[1]	Canada	0.56	12.4	50	22	20	20	57	325
	Britain	1.00	17.7	69	23	23	29	80	1055
	Japan	0.44	10	50	34	28	35	86	-
	U.S.	0.41 ~0.57	10.5	-	26	18.5	26	73.5	490
Environmental intervention values	Britain[2]	3.0	-	-	130	70	500	300	-
	U.S[3]	1.0	-	-	-	250	100	1500	-
	Germany[4]	2.0	100	50	50	40	200	300	-
	Holland[5]	0.8	20	100	36	35	85	140	-
	Switzerland[6]	0.8	25	75	50	50	50	200	-
	Canada[7]	5.0	50	250	100	100	500	500	-
	Korea[8]	4.0	-	-	125	-	300	-	-

[1]Metal contents surface various soils (Pendias, 1984). [2]Guidance concentration of garden in Britain. [3]New Jersey cleanup standards of residential surface soil. [4]Orientation value of soil at playground for children in Germany. [5]Intervention values of soil in Holland. [6]Maximum allowable pollution contents of soil in Switzerland. [7]Interim Canadian environmental quality criteria for contaminated sites in residential soil (NIER, 2000). [8]Countermeasure criterion of contaminated soil for park and school area in Korea (Ministry of Environment, 1999).

Cd은 7개 나라에서 제시한 토양 오염 물질의 최대 허용 오염 농도나 오염 토양 복원 기준 등을 모두 초과하고 있어서 교실 내에서 Cd의 농축이 심해지고 있음을 알 수 있다. Co는 독일과 캐나다의 복원 기준에 다다르지는 않았지만 네덜란드의 최근 제안된 기준을 초과하고 있어 주의가 요망된다. Cr은 캐나다의 기준에는 못 미치고 있지만 독일, 네덜란드, 스위스 등의 기준을 넘어서고 있다. Cu는 영국, 독일, 네덜란드, 스위스, 캐나다 등의 환경 기준 보다 6~20배 초과했고 우리 나라의 토양오염 대책기준보다 6배, 토양오염 우려기준 50ppm 보다는 14배 이상 초과했다. Ni은 미국과 캐나다의 환경 기준에는 미치지 않았지만 독일, 네덜란드, 스위스 등의 환경 기준을 초과했고 영국의 가정 정원에 대한 잠정적 유인 농도를 약간 넘어섰다. Pb은 영국과 캐나다 환경 기준을 초과하지 않았지만 미국, 독일, 네덜란드, 스위스 등의 환경 기준을 초과했고 우리 나라의 토양오염 대책기준보다는 낮지만 토양오염 우려기준 100ppm 보다는 2.6배 높다. Zn은 미국의 오염토양 복원환경 기준보다는 2~6배 높다. 이와 같이 교실 내 먼지 중에는 Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn 등의 중금속이 많이 농축되어 있음을 알 수 있으며 특히 Cd, Cu, Zn이 심하다.

교실 외 먼지 시료 57개를 평균한 값은 Cd 5.1ppm, Co 21ppm, Cr 115ppm, Cu 765ppm, Ni 58ppm, Pb 223 ppm, Zn 926ppm, Mn 265ppm이다. Pendias가 제시한 캐나다, 영국, 일본, 미국의 평균 지표 토양의 함량[32]과 비교해 보면 7개 원소가 각 나라의 평균 토양 중의 함량을 넘어섰다. 이들 토양 중의 함량보다 1.2배(Co)에서부터 34배(Cu)까지 많이 농축되어 있다. 특히 Cd, Cu, Zn 등은 영국, 미국, 독일, 네덜란드, 스위스, 캐나다의 환경 기준을 모두 초과해 농축이 아주 심함을 알 수 있고, Cr, Ni, Pb 등의 원소도 7개 나라 중 3~4개 나라의 환경 기준을 초과했다.

운동장 먼지 시료 17개를 평균한 값은 Cd 3.0ppm, Co 16ppm, Cr 94ppm, Cu 87ppm, Ni 42ppm, Pb 107ppm, Zn 364ppm, Mn 245ppm이다. Pendias의 자료와 비교할 때, 영국의 평균 토양 중 Co의 함량과 캐나다, 영국, 미국의 평균 토양 중 Mn의 함량보다는 낮은 값이지만 그 밖의 원소들은 각 나라의 평균토양 중 함량을 모두 초과했다. 각 나라의 환경기준과 비교했을 때 Cd, Cu, Zn 등의 원소가 각 나라의 환경 기준을 대부분 초과했으며, Cr, Ni, Pb도 2~3개 나라의 기준을 초과해 주목의 대상이 된다.

국내 선행 연구와 비교하기 위해 서울의 분진 및 토양에 대한 중금속 함량,[23] 의정부시와 고양시의 토양과 분진의 중금속 농도,[27] 서울시 영등포구와 구로구에 소재한 중학교 운동장의 토양과 옥외 분진 중의 중금속 농도,[36] 서울시 강서구와 양천구에 소재한 중학교의 실내외 분진 중 중금속 농도[29]를 Table 3에 제시했다. 표에서 A, B, C, D는 각각 서울의 운동장 토양, 운동장 먼지, 주거도로 먼지, 주도로 먼지 자료이고, E, F는 각각 의정부시의 토양과 먼지 자료이며, G, H는 각각 고양시의 토양과 먼지 자료이다. 한편, I, J는 각각 서울시 영등포구

와 구로구에 소재한 중학교의 실외 먼지와 운동장 토양이고, K, L은 각각 서울시 강서구와 양천구에 소재한 중학교의 실내 먼지와 실외 먼지에 대한 자료이다.

Table 3. Concentrations of heavy metals in soils and dusts in Korea (unit in ppm)

		Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Mn
Seoul	A	0.2			18		28	80	
	B	0.2			21		31	82	
	C	0.8			216		133	518	
	D	1.0			581		271	727	
Uigeongbu	E	1.4	10	27	41	23	65	204	
	F	1.2	9	41	124	29	534	334	
Koyang	G	2.1	24	47	59	47	88	238	
	H	1.8	16	43	83	39	86	265	
Youngdungpo-gu and Kuro-gu	I	2.5			172		173	465	
	J	0.5			22		26	83	
Kangseo-gu and Yangchon-gu	K	3.0	16	69	640	75	252	1269	344
	L	2.4	15	93	292	73	273	1282	483

Playground soil(A), playground dust(B), residential road dust(C) and main road dust(D) in Seoul (Chon and Choi, 1992). Soils(E) and dusts(F) from the Uijeongbu city (Chon and Ahn, 1996). Soils(G) and dusts(H) from the Koyang city (Chon and Ahn, 1996). Outdoor dusts(I) and playground soils(J) in the middle schools of the Youngdungpo-gu and Kuro-gu in Seoul (Byun et al., 1996). Indoor dust samples(K) and outdoor dust samples(L) collected from classroom in middle schools in the Kangseo-gu and Yangchon-gu, Seoul (Bae et al., 1998).

전주지역 중·고등학교 운동장 먼지 시료 중에 함유된 중금속 원소는 1992년에 조사된 서울 지역 운동장 먼지와 토양 시료 중의 중금속 함유량보다 3(Pb) ~ 15배(Cd) 이상 높았으나 교통량이 많은 주거도로나 주도로변에 있는 먼지 중의 중금속(Cu, Pb, Zn)보다는 낮았다. 또한 영등포구와 구로구의 운동장 토양 중의 중금속(Cd, Cu, Pb, Zn) 함량보다 높으나, 실외 먼지와의 비교에서는 Cu, Pb, Zn 등의 원소가 낮게 함유되어 있고 Cd은 비슷하게 함유되어 있다.

실외 먼지 시료 중에 함유된 중금속 원소는 1992년에 조사된 서울시의 주거 도로변 먼지 중의 중금속(Cd, Cu, Pb, Zn) 함량보다 높았고, 1996년 조사된 의정부시 도로변에서 채취한 먼지와는 Pb만이 낮은 함량이었고 나머지 Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Zn 등은 높은 함량을 보였다. 또한 1998년에 조사된 서울 강서구와 양천구에 소재한 중학교 교실 외 먼지 시료와 비교해 보면 Cd, Co, Cr, Cu 등은 더 많이 함유되어 있거나 비슷하고 Ni, Pb, Zn, Mn 등은 더 적게 함유되어 있거나 비슷하다. 따라서 막연히 서울의 환경 보다 나을 것으로 생각되는 전주 지역의 중·고등학교의 환경도 서울의 학교 환경과 크게 다르지 않다고 할 수 있다. 도시화가 이미 진행된 곳은 요소별로 차이가 있겠지만 지역과 관계없이 중금속의 오염이 상당히 진행된 것으로 보인다. 단 선행 연구에서 교통량과 밀접한 관련이 있는 것으로 밝혀진 Pb, Zn의 함량이 서울 강서구와 양천구 소재 중학교에서보다는 낮다는 것은 전주 지역이 자동차 배기가스로 인한 오염이 서울 보다 적다고 볼 수 있다.

또한 실내 먼지 시료 중에 함유된 중금속 원소는 서울 강서구와 양천구에 소재한 중학교의 교실 내 먼지 시료와 비교할 때, Cd, Co, Cr, Cu, Pb 등의 함량이 높으나 큰 차이가 없고, Ni, Zn, Mn 등의 함량이 낮거나 유사해 전체적으로 서울 소재 학교의 실내에 쌓인 먼지처럼 전주시 소재 중·고등학교의 교실에서도 중금속으로 오염된 먼지가 쌓여있다고 볼 수 있다.

3.2. 지역별 분포 상태

도시화의 진행 정도에 따른 지역별 차이를 알아보기 위해 각 원소의 함량을 시료 채취한 학교의 위치에 원의 크기로 구분해 그림을 그렸다. Fig. 2는 교실 내 먼지 시

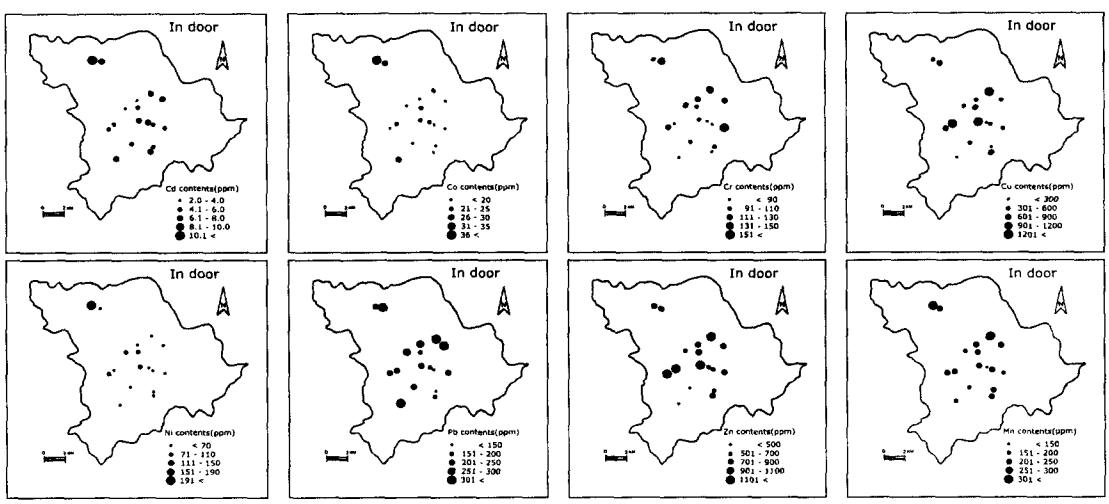

Fig. 2. A map of distribution of the analyzed elements in dust samples from indoor of the 17 schools in Jeonju City.

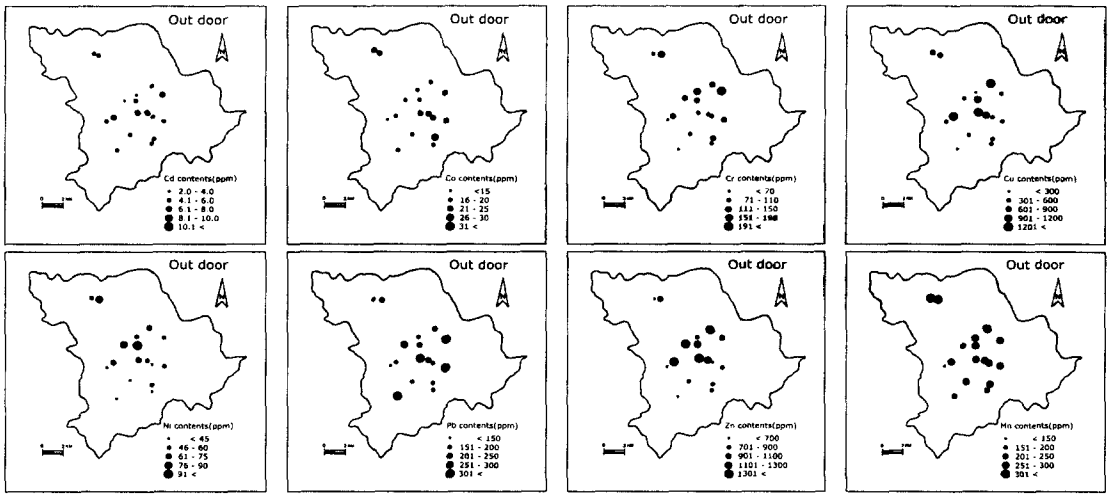

Fig. 3. A map of distribution of the analyzed elements in dust samples from outdoor of the 17 schools in Jeonju City.

료에 대한 것이고 Fig. 3은 교실 외 먼지시료, Fig. 4는 운동장 먼지시료에 대한 분포도이다. 그림에서 원의 크기는 최저 값과 최고 값 사이를 다섯 단계로 나누어 구분한 것이다. 따라서 이 그림은 원소별로 지역에 따른 상대적 함량의 차이를 보여준다.

Fig. 2를 보면 교실 내 먼지 중의 중금속 함량은 도심과 외곽에 따라 뚜렷한 차이를 보여주지 않으며, 원소별로 차이가 있지만 위치에 관계없이 중금속이 먼지 중에 농축되어 간다. 다만 원소별로 약간의 특징을 찾아볼 수 있는데, 교통량과 밀접한 관련이 있는 Pb은 도심과 외곽의 학교 간 큰 차이가 없고 4번, 14번 학교는 외곽에 위치하지만 큰 도로와 인접하고 있어 오히려 높은 함량을 보이고 있다. 반면 9번 학교는 도심에 위치해 있지만 대로로부터 떨어져 있어 낮은 함량을 보인다. 또한 14, 15번 학교는 외곽에 속하지만 산업 지역에 가깝게 위치해 있어서 Cd, Co, Cr, Ni 등의 중금속이 높게 함유되어 있다. 교실 외 먼지 시료에 대한 원소별 함량 분포도 Fig. 3에서 보는 것처럼 교실 내 먼지 시료에서 볼 수 있었던 특징을 보여주고 있다. 다만 도심 학교에 비교적 다량 함유되어 있는 원소는 Cr, Cu, Zn 등이다. 또한 운동장 먼지 시료는 바람의 영향으로 유동성이 크기 때문에 일관성을 찾기 어려우나 Fig. 4에서 보는 것처럼 대로에 둘러 쌓여 있는 5, 11, 14, 16번 학교는 Cr, Cu, Pb, Zn 등의 원소가 다량 함유되어 있다.

3.3. 중금속 원소 간 상관성

토양이나 분진 중에 함유된 중금속은 자연적으로 유입되기도 하지만 일반적으로 인간 활동에 기인해 오염된다. 따라서 원소들간의 상관성을 살펴봄으로써 원소들의 배출원에 대한 정보를 얻을 수 있는데 상관성이 높은 것

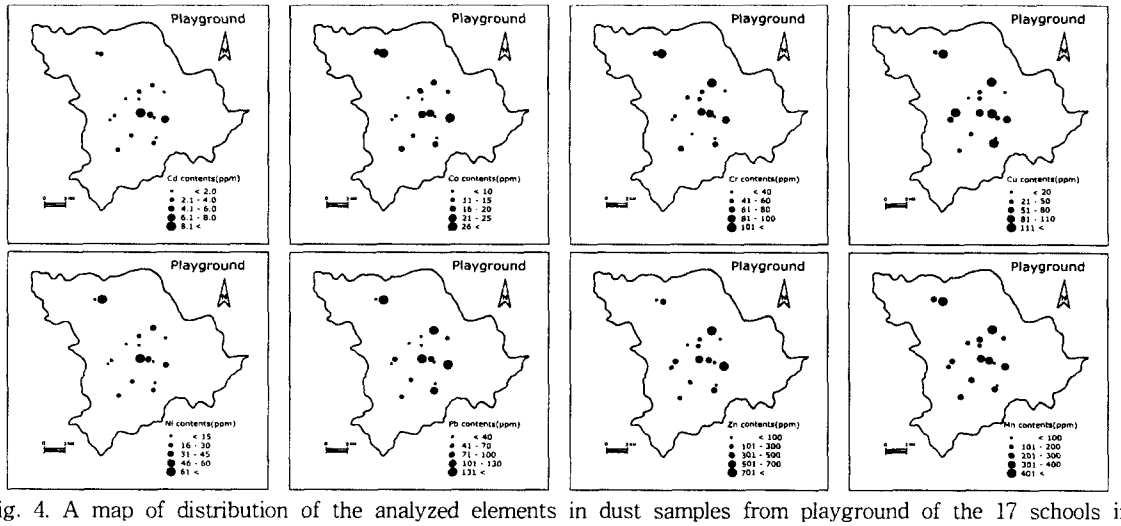

Fig. 4. A map of distribution of the analyzed elements in dust samples from playground of the 17 schools in Jeonju City.

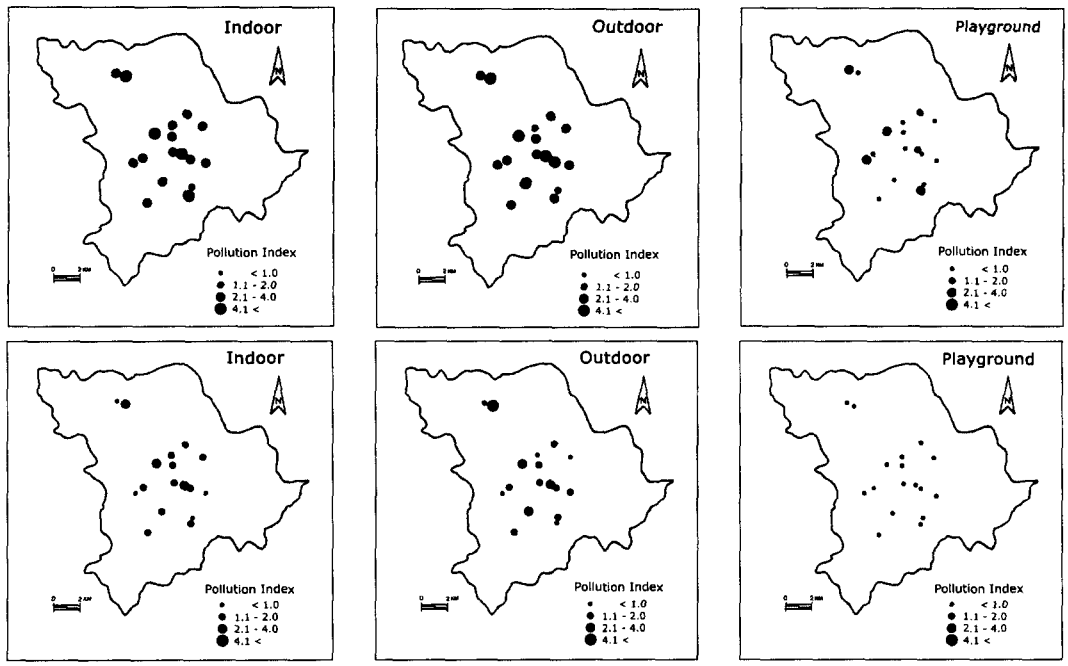

Fig. 5. A map of pollution index using dust-bound metal concentrations from the school in the Jeonju City. A(by Kloke, 1979), B(by Calbard et al., 1988)

은 두 원소들 간의 배출원이 유사한 것을 의미한다. Table 4에 교실 내 먼지 시료와 교실 외 먼지 시료에 대한 원소간 상관계수를 함께 나타냈다. 표에서 보면 Cu와 Zn의 상관 관계(0.96, 0.92)와 Cd와 Co의 상관관계(0.89, 0.72)가 높다.

Table 4. Correlation coefficients between analyzed elements in the dust from studied area

Indoors	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Mn
Cd	1.00							
Co	0.89	1.00						
Cr	-0.13	-0.12	1.00					
Cu	0.12	0.11	0.23	1.00				
Ni	0.66	0.69	0.06	0.09	1.00			
Pb	0.15	0.25	-0.04	-0.11	-0.07	1.00		
Zn	0.14	0.11	0.29	0.96	0.21	-0.19	1.00	
Mn	0.48	0.49	0.26	0.57	0.49	-0.06	0.66	1.00

Outdoor	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Mn
Cd	1.00							
Co	0.69	1.00						
Cr	0.35	0.38	1.00					
Cu	0.33	-0.02	0.11	1.00				
Ni	0.50	0.20	0.51	0.33	1.00			
Pb	0.46	0.24	0.22	0.10	0.34	1.00		
Zn	0.33	0.02	0.36	0.92	0.58	0.19	1.00	
Mn	0.50	0.64	0.58	0.33	0.45	0.16	0.40	1.00

3.4. 중금속 원소의 분산 양상

교실 내외 환경의 차이를 알아보기 위해 교실 내 먼지와 교실 외 먼지 중의 중금속 원소들의 함량 차이를 Table 1에 있는 자료로 살펴보면, 교실 내외 및 운동장 먼지 중의 중금속 원소의 분산양상은 Cd, Co, Ni, Pb 등의 원소가 운동장 < 교실 외 < 교실 내의 순서로 증가하는 경향을 보이고 Cr, Cu, Zn, Mn 등도 교실 내외간 큰 차이가 없어 실내 먼지 중의 중금속 오염은 대부분 실외로부터 기인했음을 보이고 있으며 실내의 폐쇄된 공간에서 이들 원소의 축적이 진행되고 있음을 알 수 있다. 한편 지표면으로부터의 높이에 따라 일관성 있는 변화가 있는지를 알아보기 위해 건물의 1층, 2층 3층 등 층별로 시료를 채취해 분석했으나 층별에 따라 특별한 차이를 발견할 수 없었다.

3.5. 오염지수

교실 내·외 환경의 중금속 원소들의 오염 정도를 종합적으로 알아보기 위해 오염지수를 구해 Fig. 5에 원의 크기로 나타냈다. 중금속원소들의 복합된 오염특성을 알아보기 위해 Cu, Pb, Zn, Cd의 네가지 중금속원소들을 결합시킨 지수를 보통 이용한다. 계산에 사용된 오염의 문턱값은 Kloke[34]가 제시한 FAO/WHO에서 지정하는 음식물 중의 중금속 허용한계를 넘지 않을 토양의 문턱값(Cu 100ppm, Pb 100ppm, Zn 300ppm, Cd 3ppm)과 Culbard et al.[16]이 제시한 영국 도시 환경에서의 실내 분진 평균 함량을 이용하였다. 오염지수는 [(Cu함량/100)+(Pb함량/100)+(Zn함량/300)+(Cd함량/3)] /4로 구

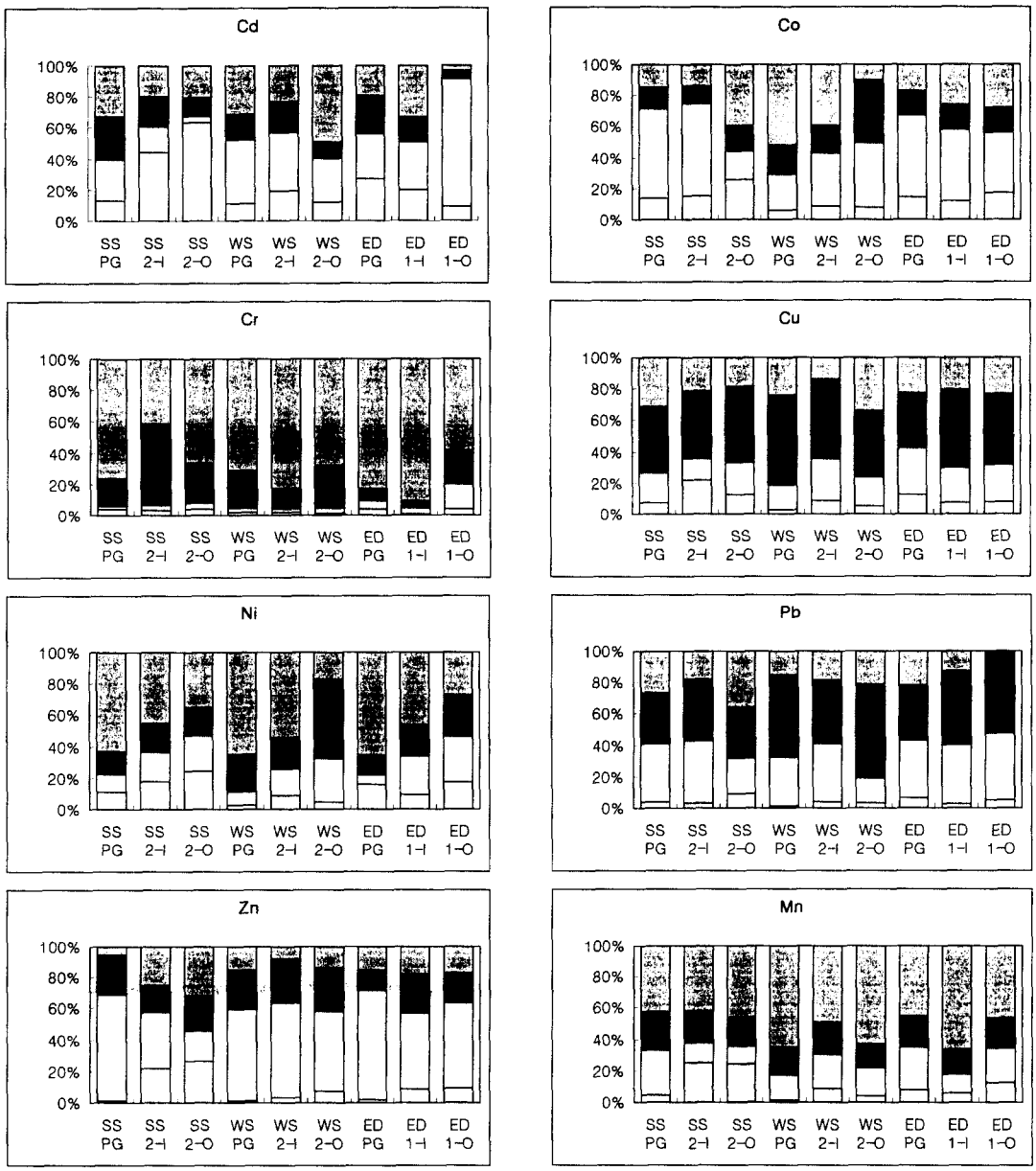

Fig. 6. The variation of existence form in the dusts by sequential extraction method. residuals, organic, Fe & Mn oxides, carbonates, exchangeable.SS, WS, ED are abbreviation of selected schools.

한다. 따라서 오염 지수가 1.0 이상이면 토양 오염의 한계나 영국 도시 환경의 실내보다 오염정도가 높다는 것을 의미한다. Fig. 5에서 A는 Kloke의 기준에 의해 계산한 값이고 B는 Culbard et al.의 기준에 의해 계산된 값이다. 토양 오염의 정도를 나타내는 기준으로 많이 사용되고 있는 Kloke가 제시한 기준으로 계산된 오염지수는 교실 내 먼지와 교실 외 먼지 모두 17개 학교에서 1.0 이상이며 운동장 먼지의 경우, 6개 학교(35%)에서 1.0이상이었다. 또한 이들 6개 학교는 지역에 편재되지 않고 전주시 전역에 고루 분포하고 있다.

한편 영국 도시 환경에서의 실내 분진 평균함량을 기준으로 계산된 오염지수는 교실 내 먼지 시료의 경우 17개교 중 13개교(77%)가 1.0 이상, 교실 외 먼지 시료는 12개교(71%)가 1.0 이상으로서 영국 도시 환경의 실내 분진 평균 함량보다 높았다. 또한 1.0 이하로 나타난 학교도 1.0에 거의 육박한 값을 보이고 있어 전주 지역의

중 고등학교 교실 내외 먼지가 영국 도시 환경에서의 실내 분진 평균 함량을 대부분 초과하고 있음을 알 수 있다.

3.6. 중금속 원소의 존재 형태

중금속 원소의 함량이 비교적 많은 3개 학교(SS, WS, ED)를 선정해 각각 운동장, 교실 내, 교실 외 먼지시료 9개에 대해 Davidson 등[31]이 제시한 방법을 실험실 여건에 맞게 응용해 연속추출 분석했다. 이와 같은 방법은 국내 선행 연구에서도 그대로 이용되고 있다.[13][26][27][29] 연속 추출 분석 결과를 각 단계가 차지하는 비율로 나타낸 것이 Fig. 6이다. 그림을 보면, 대부분의 시료에서 중금속이 잔류상을 제외한 형태가 월등히 많이 차지하는 양상을 띠고 있어 도시 환경에서 인위적인 오염원에 의해 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 이는 전효택과 안주성[27]의 선행 연구와도 일치한다.

지구화학적 환경에서 상대적으로 이동성이 높은 원소로 알려진 Cd은 이 연구에서도 타 원소보다 교환성 형태가 많이 차지하고 있는 특징을 보여주고 있다. Cu의 경우 모든 형태가 비슷하게 존재하는데 특히 다른 원소에 비해 유기물과 결합한 형태로 많이 산출되는 특징을 보여 토양이나 퇴적물에서 주로 유기물과 결합된 먼지가 유입된 것으로 생각된다. Pb은 철-망간 산화물에 결합된 형태로 존재하는 부분이 가장 많았는데 이는 변희옥 등,[26] 배윤진 등[29]의 연구와도 부합된다. 또한 Pb과 Zn 등은 탄산염 결합 형태가 우세하게 나타남으로써 선행 연구에서와 마찬가지로 분진 내 탄산염 구성물질과 주로 결합하는 특징을 보여주는데 이는 분필가루와도 관계 있는 것으로 여겨진다.

4. 결 론

전주 시내 17개 중 고등학교에서 채취한 교실 내 먼지와 교실 외 먼지 및 운동장 먼지시료 중에 포함된 중금속 원소 분석 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 전주시 소재 17개 중 고등학교에서 채취한 교실 내 먼지 시료의 중금속 평균 함량은 Cd 6.3ppm, Co 22 ppm, Cr 107ppm, Cu 715ppm, Ni 71ppm, Pb 268ppm, Zn 866ppm, Mn 231ppm이고, 교실 외 먼지 시료의 중금속 평균 함량은 Cd 5.1ppm, Co 21ppm, Cr 115ppm, Cu 765ppm, Ni 58ppm, Pb 223ppm, Zn 926ppm, Mn 265 ppm이며, 운동장 먼지 시료의 중금속 평균 함량은 Cd 3.0ppm, Co 16ppm, Cr 94ppm, Cu 87ppm, Ni 42ppm, Pb 107ppm, Zn 364ppm, Mn 245ppm이다.

2. 교실 내 먼지 중의 중금속 평균 함량은 캐나다, 영국, 일본, 미국의 평균 지표토양 중에 있는 중금속 함량과 비교할 때, Cd, Cu, Pb, Zn은 10배 이상, Co, Cr, Ni은 2배 이상 초과했다. 서울 강서구와 양천구에 소재한 중학교의 교실 내 먼지 시료와 비교할 때 Cd, Co, Cr, Cu, Pb 등의 함량이 높고, Ni, Zn, Mn 등의 함량이 낮아 서울의 교실내 환경과 큰 차이가 없었다. 교실 외 먼지 중의 중금속 평균 함량은 캐나다, 영국, 일본, 미국의 평균 토양 중에 있는 중금속 함량보다 1.2배(Co)에서부터 34배(Cu)까지 보였다. 특히 Cd, Cu, Zn 등은 영국, 미국, 독일, 네덜란드, 스위스, 캐나다의 토양환경 기준을 모두 초과하고 있다. 서울 강서구와 양천구에 소재한 중학교 교실 외 먼지 시료와 비교할 때 Cd, Co, Cr, Cu 등은 더 많이 함유되거나 비슷하고 Ni, Pb, Zn, Mn 등은 더 적게 함유되거나 비슷하다. 운동장 먼지 시료 중의 중금속 평균 함량은 Co, Mn을 제외하고 캐나다, 영국, 미국의 평균 토양 중에 있는 중금속 함량을 초과했다. Cd, Cu, Zn 등은 각 나라의 환경 기준을 대부분 초과했으며 서울 지역 운동장 먼지와 토양 시료 중의 중금속 함량보다 3배(Pb) ~ 15배(Cd) 이상 높았으나 교통량이 많은 주거 도로와 주도로 변에 있는 먼지 중의 Cu, Pb, Zn 함량보다는 낮았다.

3. 도심과 외곽 구분 없이 중금속이 농축되어 가고 있다. 비교적 먼지의 유동이 심한 운동장이나 교실 외 환경보다는 오염 먼지의 농축이 쉬운 폐쇄된 실내 환경이 지역에 따른 오염 정도의 차이를 적게 보이므로 실내 환경에 대한 주의가 요망된다.

4. 토양 오염의 정도를 나타내는 Kloke의 기준에 의한 오염지수는 교실 내 먼지와 교실 외 먼지 모두 17개 학교에서 1.0 이상이고 운동장 먼지의 경우 6개 학교에서 1.0이상이었다. 또한 영국 도시 환경에서의 실내 분진 평균함량을 기준으로 계산된 오염지수는 교실 내 먼지 시료의 경우 77%, 교실 외 먼지 시료는 71%가 1.0 이상으로서 영국 도시 환경에서의 실내 분진보다 오염의 정도가 심함을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 1999년도 전북대학교의 지원 연구비에 의하여 연구가 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또한 논문의 미흡한 부분을 바로잡아주신 익명의 심사위원께도 감사드립니다.

참 고 문 헌

1) Salomons, W. and W. D. Eysink, 1981, Pathways of mud and particulate trace metals from ricers to the southern North Sea, Int. Assoc. Sediment Spec. Pap., 5, 429~450.
2) Yeats, P. A. and J. M. Bewers, 1982, Discharge of metals from the St. Lawrence river, Can. J. Earth Sci., 19, 982~992.
3) Prusty, B. G., K. C. Sahu and G. Godgul, 1994, Metal contamination due to mining activities at the Zawar zinc mine, Rajasthan, India, 1. Contamination of stream sediments, Chem. Geol., 112, 275~291.
4) Calmano, W. and U. F'örstner, 1996, Sediments and Toxic Substances: Environmental Effects and Ecotoxicity, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 335pp.
5) Lee, C. B., 1985, Sedimentary processes of fine sediments and the behaviour of associated metals in the Keum Estuary, Korea. In:Marine and Estuarine Geochemistry, edited by Sigleo A.C. and A. Hattori, Lewis Publishers, Inc., Chelsea(MI), 209~225.

6) 최만식, 이석훈, 이창복, 조영길, 1996, 금강 퇴적물 중 미량금속의 분포 특성, 한국제4기학회지, 10, 27~52.
7) 조영길, 김주용, 1998, 영산강 하상 퇴적물의 중금속 함량, 한국환경과학회지, 7(3), 281~290.
8) 이진국, 최욱진, 이재영, 1989, 달성 폐광산 하류천의 중금속 오염에 관한 지구화학적 연구, 경북대학교 환경과학연구소 논문집, 3, 71~77.
9) 김상현, 전효택, 1993, 삼보 연·아연·중정석 광산 주변 하상 퇴적물에서의 중금속 오염연구, 대한광산지질학회지, 26(2), 217~226.
10) 이재영, 김종근, 이인호, 이진국, 1993, 경북지역 폐금속광산이 환경에 미치는 영향, 대한광산지질학회지, 26(4), 465~472.
11) 나춘기, 전서령, 1995, 모악 금·은광산에 방치된 폐석이 주변 수계 및 생태계에 미치는 환경적 영향, 자원환경지질학회지, 28(3), 221~229.
12) 오대균, 김정염, 전효택, 1995, 동해탄광 주변 산성광산폐수와 하상퇴적물의 지구화학, 자원환경지질학회지, 28(3), 213~220.
13) 조규성, 정덕호, 1998, 전주 일광산 주변의 환경오염에 관한 연구, 한국환경과학회지, 7(5), 623~631.
14) Thornton, I., E. Culbard, S. Moorcrofts, J. Watt, Wheatly and M. Thompson, 1985, Metals in urban dusts and soils, Environmental Technology Letters, 6, 137~144.
15) Fergusson, J. E., E. A. Forbes, R. J. Schroeder and D. E. Ryan, 1986, The Elemental Composition and Sources of Home Dust and Street Dust. Sci. Total Environ, 50, 217~221.
16) Culbard, E. B., I. Thornton, J. Watt, S. Wheatly, S. Moorcroft and M. Thompson, 1988, Metal contamination in British urban dusts and soils, J. Eviron. qual., 17, 226~234.
17) Thornton, I., 1990, Soil contamination in urban areas, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 82, 121~140.
18) 박청길, 이군자, 유선재, 1985, 도로변 인접 토양 중의 납, 구리, 아연의 함량분포, 대한환경공학회지, 7(1).
19) 이찬수, 정 권, 김진권, 1985, 서울시내 고정 배출원의 중금속 배출량 조사 연구, 연세대학교 산업대학원 석사학위 논문, 36.
20) 이민희, 심웅기, 김양귀, 한의정, 원양수, 신찬기, 정해동, 1985, 대기 중 부유 분진의 성분에 관한 조사연구(Ⅳ), 국립환경연구소보, 7, 165~176.
21) 김홍제, 김연천, 이정자, 성시경, 최한영, 이승주, 박상현, 1986, 서울시 일원의 토양 중금속 오염도 조사, 서울특별시 보건 환경연구소보, 22, 168~173.
22) 정용, 장재연, 주의조, 1987, 도시 대기 중 중금속에 관한 연구, 한국 대기보전학회지, 2(2), 9~18.
23) 전효택, 최완주, 1992, 도시 및 산업환경 분진 및 토양 중의 중금속 원소들의 분산에 관한 연구, 광산지질학회지, 25, 317~336.
24) Chon, H. T., K. W. Kim and J. Y. Kim, 1995, Metal contamination of soils and dusts in Seoul metropolitan city, Korea, Environmental Geochemistry and Health, 17, 139~146.
25) 김주용, 전효택, 1993, 서울지역 토양과 분진중의 Cu, Pb, Zn, Cd의 지구화학적 분산, 한국자원공학회지, 30, 163~176.
26) 변희옥, 김규한, 전효택, 1996, 서울시 영등포구와 구로구에 소재한 중학교 운동장의 토양과 옥외 분진의 중금속 오염, 한국지구과학회지, 17, 129~204.
27) 전효택, 안주성, 1996, 수도권 위성도시의 토양과 분진의 중금속 오염에 대한 연구, 자원환경지질학회지, 29, 87~100.
28) Chon, H. T., J. S. Ahn and M. C. Jung, 1998, Seasonal variations and chemical forms of heavy metals in soils and dusts from the satellite cities of Seoul, Korea, Environmental Geochemistry and Health, 20, 77~86.
29) 배윤진, 김규한, 전효택, 안주성, 1998, 실내·외 환경의 분진 중 중금속 농도에 대한 연구, 한국지구과학회지, 19(5), 449~460.
30) Thompson, M. and S. Wood, 1982, Atomic absorption methods in applied geochemistry; in Cantle, E.J.(ed.), Atomic absorption spectrometry, Elsevier, Amsterdam, 261-284.
31) Davidson, C. M., R. P. Thomas, S. E. Mcvey, R. Perala, D. Littlejohn and A. M. Ure, 1994, Evaluation of sequential extraction procedure for the speciation of heavy metal in sediments, Analytica Chimica Acta, 291, 277-286.
32) Pendias, A. K., 1984, Trace elements in soils and plants, CRC Press, 315.
33) 국립환경연구원, 2000, 선진국과 폐기물·토양기준 비교, 84.
34) Kloke, A., 1979, Content of arsenic cadmium, chromium, fluorine, lead, mercury and nickel in plants