

연구논문

광주광역시 토양의 지화학적 거동 특성과 오염

신상은 · 김주용 · 오강호*

전남대학교 지구환경과학부, 전남대학교 과학교육학부*
(2005년 10월 6일 접수, 2005년 12월 13일 승인)

Geochemical Behavior and Pollution of Soils in Gwangju City

Sang-Eun Shin · Joo-Yong Kim · Kang-Ho Oh*

Department of Earth systems and Environmental Science, Chonnam National University
Department of Science Education, Chonnam National University*
(Manuscript received 6 October 2005; accepted 13 December 2005)

Abstract

To examine the geochemical behavior and pollution of soils in Gwangju City, an analysis was carried out for pH, on the contents of metals, and organic carbon. Soil samples were taken from environs areas, industrial areas and downtown areas. The major factor controlling the behavior of metallic elements in the soil was chemical weathering of clay mineral in the environs areas, industrialization, and urbanization. Heavy metals including Cu, Pb and Zn were highly enriched for the samples from central part of downtown area. This indicated that the urbanization and the industrialization affected soil pollution. The results show that soil pollution in a metropolitan city which is caused by harmful heavy metals is severest in the center of the city. In consequence, it is inevitable that practical measures should be taken to prevent soil pollution expansion.

Key Words : geochemical behavior, pollution, industrialization, urbanization, enrichment

1. 서론

토양은 생태계에 있어서 가장 중요한 지지체 역할을 하고 있으며, 인류생활에 없어서는 안 될 중요한

삶의 터전이자 생존 기반이다. 하지만 급속한 인구증가에 따른 산업화, 도시화로 인해 다양한 형태의 오염 물질들이 인위적으로 생성·배출되고 있으며, 이들 물질들은 물, 대기 등의 유체를 통해서 토양을 포함한

암석권, 대기권, 수권의 전지구적 환경으로 분산되고 있다(Thornton, 1983). 특히 이들 오염물 중 중금속은 공업단지나 폐광산 등의 고정오염원과 자동차 등의 이동오염원에서 배출될 수 있는 무기성 오염물질로 자연계에 배출되면 쉽게 분해되지 않고 침적되어 생체축적(bioaccumulation) 등을 통한 인간생활에 직·간접적인 영향을 주기도 한다(Azimi et al., 2003; Buchman et al., 2001; Golomb et al., 1997).

1960년대 이후 우리나라의 공업화는 경제발전의 고도성장을 가져왔지만, 이에 수반된 여러 가지 환경오염을 유발하여 왔다. 이에 따른 환경오염문제를 최소화하거나 방지하기 위해서 최근에는 수질오염총량관리, 교토의정서 발효 등을 통해 수질 및 대기 환경보존을 위해 구체적이고 다양한 오염대책을 수립하고 실천하고 있다. 그러나 토양에 대한 환경학적 보존 대책은 1995년에 토양오염보존법을 제정하여 오염물 배출을 규제하고 있을 뿐이다. 우리나라의 토양오염 조사는 1987년 1,250개 지점의 토양측정망을 설치하여 Pb, Cd, Cu, As, Zn, Hg, Cr, Ni 등에 대한 오염도 조사를 농경지 중심으로 시행해 왔으며(임수길, 김정규, 1996), 2005년까지 대도시 지역의 토

양과 농작물에 대한 오염도 조사를 위해 7,000개 지점으로 확대할 계획에 있지만(환경부, 1997), 대도시 지역의 토양오염에 대한 평가 및 보존방안의 대책은 시작단계라 할 수 있다.

국내에서 토양오염 연구는 농경지 토양(류순호 등, 1995; 박동식 등, 2004; 함진관 등, 2001), 광산지역 토양(박맹언, 김근수, 1998; 박천영 등, 1995; 옥용식 등, 2003) 및 공업단지 주변 토양(유정환 등, 1995; 이병규, 고일하, 2003; 김옥배 등, 1997)을 대상으로 활발히 진행되고 있으나, 인간이 밀집하여 생활하며 그 피해를 직접 받을 수 있는 대도시를 대상으로 한 연구는 상대적으로 적은 실정이다(김권래 등, 2002; 우영국, 조은하, 2001; 조규성, 2003). 특히, 대도시는 인위적으로 발생된 대기오염 물질 및 생활 폐기물 등의 직접적인 영향을 받고 있으며 공단 및 농경지와는 다른 지리적, 지형적 특징을 가짐으로 오염물질 거동 및 특성이 다를 수 있기에 이에 대한 조사가 필요하다.

본 연구는 광주광역시 토양을 대상으로 중금속들의 지화학적 거동과 오염의 정도를 파악하기 위하여 도시 전역을 조사대상지로 선정하여 분석을 시도하였다. 특히 이들 토양은 광주시의 지리적 특성에 따

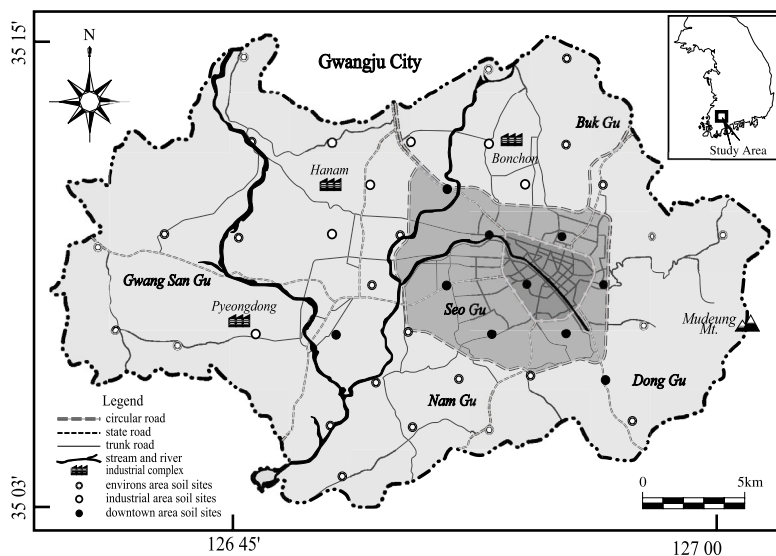


Figure 1. Map showing the study area and sampling sites.

라 도심지역, 주변지역, 산업지역으로 구분하여 도시화 및 산업화에 따른 유해 중금속들의 오염실태와 그 오염원인에 대하여 해석을 시도하였다.

II. 재료 및 방법

본 연구는 광주광역시를 대상으로 1:25,000의 지형도를 참고하여 총 42개의 토양을 채취하였다(Figure 1). 토양시료 채취는 표면의 잡초, 유기물 등의 이물질층을 제거한 후 5cm 이내의 표토층에서 이루어졌으며, 채취정점 선정은 인구밀도, 도심 발달 등에 따라 외곽순환도로를 경계로 도심과 주변 지역으로 나누었으며, 도심 주변지역에서는 3km 간격, 인구밀집 지역인 도심에서는 1~2km 내외로 정하였다. 특히 시료의 채취방법은 지구화학적 분석에 따른 금속기기에 의한 오염을 최소화하기 위해, 플라스틱 삽을 이용하였으며, 조사대상지역의 대표성을 유지하기 위해 조사대상 지역의 중심부 1개 지점과 주변 4방위의 약 5~10m 위치에 있는 4개 지점을 선정하여 균질하게 채취한 후, 이들 부분시료를 합하여 하나의 완전시료로 사용하였다.

현장에서 채취한 토양 시료는 휘발물질, 이물질 등의 유입에 따른 인위적 영향을 줄이기 위하여 자연 건조시켰으며, 건조된 시료는 표준체(2mm)를 이용하여 세트를 선별한 후, 200 mesh 이하의 크기로 분말화 하였다. 지화학분석은 서울대학교 기초과학고육공동기기에 의뢰하였으며, 분석기기는 유도결합플라즈마방출분광기(ICP-OES, OPTIMA 4300DV, Perkin-Elmer)를 이용하였다. ICP를 분석을 위한 시료 전처리에는 토양시료 약 0.1g을 취하여 HNO₃:HF:HClO₄의 혼합비를 2:1:1로 한 혼합산을 첨가하여 반응시킨 후, HNO₃+HClO₄(1:1)로 추가 반응하여 완전 용액화 시킨 후 20g으로 평량하여 측정하였다. 분석결과, 자료의 신뢰도를 검증하기 위한 표준시료와 동일시료에 대한 중복분석 결과는 정확도 -7%~13%, 정밀도 ±5% 이내로 나타났다.

한편, 토양의 pH는 토양오염시험방법(환경

부, 1999)에 따라 풍건토 5g을 증류수와 1:5의 비율로 섞어 진탕하여 1시간 정도 방치한 후 pH meter (Model: Isted 725P)를 이용하여 적정하였다. 유기탄소 분석은 약 0.1g의 분말시료에 일정량의 중크롬산칼륨(K₂Cr₂O₇)과 황산을 혼합한 산화제 용액을 과량으로 넣어 시료 중의 유기탄소를 산화시키고 남은 양을 황산암모늄제 II 철(Fe(NH₄)₂(SO₄)₂)로 정량하는 역적정으로 분석하였다(Strickland & Parsons, 1972). 이 때 매 회 실험마다 동일시료 및 공시료에 대한 중복분석을 실시하였으며, 중복분석을 통한 신뢰도 표준편차 ±10% 이내의 값만을 취하였다.

III. 결과 및 토의

1. 지화학적 성분들의 분포특성

연구지역 토양 시료를 대상으로 분석한 주성분 원소, 미량성분 원소, pH, 유기탄소의 함량은 Table 1과 같이 나타났으며, Mason and Moore(1982)에 의해 제시된 지각의 평균함량과 비교하였다. 주성분원소들의 함량 분포가 지각평균함량과 비교할 때 높게 나타나는 원소는 Al이 도심 주변지역 토양에서 9.05%(지각평균 8.13%), K가 산업지역 2.79%, 도심지역 2.66%(2.59%)으로 나타났으며, 대부분의 토양에서 Ca, Fe, Na, P는 지각평균함량보다 낮은 함량을 보였다(Figure 2). 시료간 주성분 원소의 함량변화(σ_x/\bar{x})는 Al 11~14%, Ca 17~46%, Fe 21~27%, K 6~13%, Na 17~34%, P 36~60%로, P를 제외한 대부분 주성분 원소들의 함량변화의 범위가 작은 것으로 나타났다.

이와 달리, 연구지역 토양에서 미량원소들은 시료간 함량변화가 크게 나타났으며, 지역에 따른 평균함량도 많은 차이를 보였다. 미량원소들의 함량분포는 Ni을 제외한 Co, Cu, Pb, S, Zn 등이 지각평균함량보다 최고 7배 이상 높게 나타났으며, 시료간 함량변화도 Co 25~30%, Cu 41~49%, Ni 27~53%, Pb 16~45%, S 28~56%, Zn 41~72%로 주성분 원소와

Table 1. Geochemical elements, organic carbon contents and CIA of soils in the study area. (unit : %, 2mg/kg)

	Al ¹	Ca ¹	Fe ¹	K ¹	Na ¹	P ¹	Co ²	Cu ²	Ni ²	Pb ²	S ²	Zn ²	As ²	Cd ²	pH	C-org ¹	CIA ¹
<i>environs area soils (n=25)</i>																	
Min.	6.47	0.14	1.94	1.84	0.33	0.01	9	8	3	24	28	53	nd	nd	4.10	0.18	64.07
Max.	11.64	1.28	5.64	3.04	1.54	0.11	33	43	41	91	691	251	nd	nd	8.92	1.03	86.88
Aver.	9.05	0.63	3.76	2.49	0.95	0.04	20	23	22	51	263	101	-	-	6.83	0.56	76.50
SD	1.27	0.29	1.02	0.34	0.32	0.03	6	11	12	23	165	41	-	-	1.35	0.22	6.33
<i>industrial area soils (n=7)</i>																	
Min.	6.21	0.59	1.93	2.48	0.63	0.02	24	51	42	65	318	208	nd	nd	6.52	0.35	65.19
Max.	9.02	1.13	3.77	3.09	1.31	0.12	68	157	84	112	709	1327	nd	nd	8.09	1.02	84.11
Aver.	7.55	0.89	2.86	2.79	0.94	0.06	45	88	54	92	482	536	-	-	7.25	0.70	72.35
SD	0.97	0.19	0.76	0.21	0.21	0.04	14	36	14	15	137	387	-	-	0.63	0.27	5.71
<i>downtown area soils (n=10)</i>																	
Min.	5.52	1.02	1.87	2.40	1.01	0.03	21	49	34	76	394	184	nd	nd	7.13	0.37	56.83
Max.	7.64	2.05	3.53	2.93	1.79	0.13	60	195	75	179	1801	490	nd	nd	8.30	0.83	71.22
Aver.	6.68	1.67	2.58	2.66	1.35	0.08	44	108	48	114	732	316	-	-	7.77	0.56	63.05
SD	0.74	0.29	0.54	0.17	0.23	0.03	11	52	13	36	408	102	-	-	0.44	0.17	4.25
<i>Mean crust value(modified after, Mason and Moore, 1982)</i>																	
MCV	8.13	3.63	5.00	2.59	2.83	0.11	25	55	75	13	260	70	1.8	0.2	-	-	-

(C-org : Organic carbon, CIA : chemical index of alteration, MCV : mean crust value)

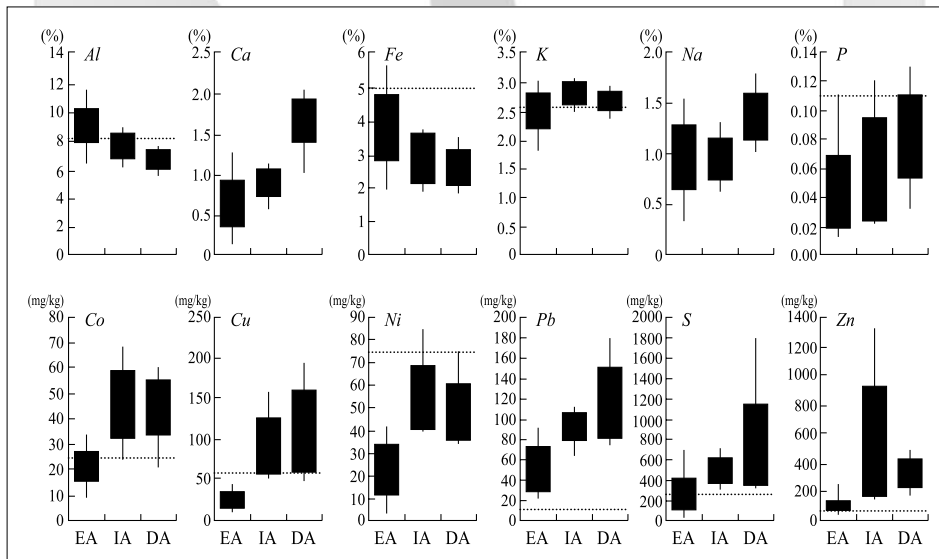


Figure 2. Variations of metal contents in the study area.

비교할 때 2~3배의 함량변화 차이를 보였다. Table 2는 이러한 금속원소 함량분포의 유의미한 차이를 살펴보기 위하여 지역간 시료들의 T-검정(유의수준 0.05)을 실시한 결과로, 도심 주변 지역의 토양에 비

해 산업지역, 도심지역 토양에서 Co, Cu, Ni, Pb, S, Zn의 미량원소들이 유의미하게 높게 나타났다.

한편, 토양의 pH는 도심 주변지역 4.10~8.92%(평균 6.83%), 산업지역 6.52~8.09%(7.25%), 도심지역

Table 2. Independent samples t-test of minor elements in the study area.

	environs area vs industrial area					environs area vs downtown area					industrial area vs downtown area					
	Levene's Test for Equality of Variances		T-test Equality of Means			Levene's Test for Equality of Variances		T-test Equality of Means			Levene's Test for Equality of Variances		T-test Equality of Means			
	F	Sig.	t	df	Sig.	F	Sig.	t	df	Sig.	F	Sig.	t	df	Sig.	
Co	EVA	4.52	0.04	-7.01	30.00	0.00	2.27	0.14	-8.09	33.00	0.00	0.21	0.66	0.16	15.00	0.88
	EVNA			-4.64	6.69	0.00			-6.35	11.26	0.00			0.15	11.25	0.88
Cu	EVA	14.99	0.00	-8.15	30.00	0.00	39.32	0.00	-7.98	33.00	0.00	1.77	0.20	-0.86	15.00	0.40
	EVNA			-4.79	6.33	0.00			-5.18	9.34	0.00			-0.92	15.00	0.37
Ni	EVA	0.32	0.58	-6.12	30.00	0.00	0.02	0.89	-5.66	33.00	0.00	0.08	0.78	0.97	15.00	0.35
	EVNA			-5.48	8.43	0.00			-5.40	15.16	0.00			0.95	12.32	0.36
Pb	EVA	3.80	0.06	-4.52	30.00	0.00	7.23	0.01	-6.31	33.00	0.00	10.86	0.00	-1.54	15.00	0.14
	EVNA			-5.66	14.51	0.00			-5.18	11.94	0.00			-1.76	12.85	0.10
S	EVA	0.62	0.44	-3.21	30.00	0.00	3.60	0.07	-4.91	33.00	0.00	1.68	0.21	-1.55	15.00	0.14
	EVNA			-3.57	11.40	0.00			-3.52	10.20	0.01			-1.80	11.68	0.10
Zn	EVA	26.17	0.00	-5.75	30.00	0.00	22.37	0.00	-8.98	33.00	0.00	5.73	0.03	1.73	15.00	0.10
	EVNA			-2.97	6.04	0.02			-6.44	10.19	0.00			1.47	6.59	0.19

(EVA: equal variances assumed, EVNA: equal variances not assumed)

7.13~8.30%(7.77%)으로, 도심 주변지역에서는 평균적으로 약산성의 특성을, 산업지역과 도심지역에서 약알칼리성 특성을 반영하였다. 유기탄소 함량은 도심 주변지역 0.18~1.03%(평균 0.56%), 산업지역 0.35~1.02%(0.70%), 도심지역 0.37~0.83%(0.56%)으로 토양 특성에 따라 시료간 함량변화가 비교적 크게 나타났다. 주성분원소들의 풍화에 의한 원소들의 부화와 결핍정도를 간접적으로 지시하는 화학적 풍화지수(CIA: chemical index of alteration)는 도심 주변지역 64.07~86.88%, 산업지역 65.19~84.11%, 도심지역 56.83~71.22%로 매우 높은 화학적 풍화도를 보였다(Nesbitt and Young, 1982). 화학적 풍화지수는 암석의 구성물질 중 주성분 원소의 함량비를 이용하여 나타내는 것으로 풍화가 진행될수록 점토 광물의 함량이 증가하는 것으로 알려져 있다.

$$CIA = Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O) \times 100$$

2. 금속원소 지화학적 거동 요인

토양 및 퇴적물 내의 금속원소 함량 변화는 근원물질, 입도, 유기물, 산화물 등의 영향에 민감한 것으로

알려져 있다(Horowitz, 1991; Förstner and Wittmann, 1981; Salomons and Förstner, 1984). 연구지역에서 토양에서 금속원소들의 함량변화를 보면, 도심 주변지역의 경우, Co, Cu, Ni, Pb, S, Zn, 유기탄소 등이 토양의 화학적 풍화지수와 $r=0.5(p<0.01)$ 이상의 높은 상관성을 보이며, 점토광물 함량이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다(Table 3). 이들 금속원소들은 주로 점토광물 원소 및 입도와 밀접한 관련성을 보여 암석 및 토양의 풍화에 따른 알루미늄-규산염 광물의 영향이 일부 작용하고 있음을 시사한다(Krauskopf, 1982).

산업지역 토양의 금속원소 함량변화는 Cu, Zn, Pb 등의 중금속원소들이 원소간 $r=0.85(p<0.01)$ 이상의 높은 상관성을 보였다. 이들 원소들은 주로 산업화에 따른 오염의 영향을 받는 금속원소들로 각종 철판이나 구조물의 주조, 자동차 제조 등과 같은 산업활동 지역에서 높게 나타나는 것으로 보고된 바 있다(김옥배 등, 1997; 이병규, 고일하, 2003). 1990년 이후 급속하게 진행된 산업화에 따라 연구지역에는 현재 하남공단, 평동공단, 본촌공단, 소촌공단, 첨단

Table 3. Correlation matrixes of minor elements, pH, organic carbon and CIA of the soils.

	Co	Cu	Ni	Pb	S	Zn	pH	Oc	CIA
Co	1.00								
Cu	0.77	1.00							
Ni	0.63	0.73	1.00						
Pb	0.43	0.68	0.38	1.00					
S	0.42	0.77	0.50	0.82	1.00				
Zn	0.32	0.60	0.45	0.46	0.64	1.00			
pH	0.06	0.20	0.15	0.27	0.19	0.18	1.00		
C-org	0.46	0.71	0.52	0.60	0.72	0.83	0.35	1.00	
CIA	0.71	0.89	0.80	0.54	0.62	0.55	0.28	0.70	1.00
environs area									
Co	1.00								
Cu	0.59	1.00							
Ni	0.31	0.90	1.00						
Pb	-0.12	0.34	0.30	1.00					
S	-0.16	0.07	-0.01	0.85	1.00				
Zn	0.58	0.97	0.94	0.21	-0.07	1.00			
pH	0.81	0.81	0.70	-0.18	-0.33	0.84	1.00		
C-org	0.73	0.52	0.29	-0.17	-0.37	0.45	0.75	1.00	
CIA	0.49	-0.13	-0.43	0.02	0.38	-0.25	0.08	0.27	1.00
industrial area									
Co	1.00								
Cu	0.47	1.00							
Ni	0.46	-0.13	1.00						
Pb	0.27	-0.07	0.81	1.00					
S	0.40	0.07	0.84	0.83	1.00				
Zn	0.47	0.94	-0.13	0.01	0.04	1.00			
pH	-0.71	-0.44	-0.26	0.08	-0.34	-0.30	1.00		
C-org	0.55	0.92	0.16	0.12	0.28	0.81	-0.51	1.00	
CIA	0.05	0.33	-0.57	-0.59	-0.31	0.31	-0.07	0.10	1.00
downtown area									

(correlation is significant at the 0.01 level; 2-tailed)

단지 등이 가동 또는 조성 중에 있다. 즉 각종 철판이나 구조물의 주조, 구조물의 절단, 용접, 가공 및 도장작업 등에서 높은 농도를 보이는 중금속들이 바람, 기류, 지표수 등에 의해 이동되어 산업지역 인근 토양에 축적되어 영향을 미친 것으로 판단된다.

도심지역에서 금속원소 함량변화는 산업지역에서 높은 상관성을 보인 Cu, Zn, Pb를 포함하여 S, 유기탄소와 관련된 중금속들이 $r=0.80(p<0.01)$ 이상의 높은 상관성을 보였다. S는 석탄, 석유 등 황 함유 화석연료를 연소할 때 아황산가스(SO_2)로 주로 발생하며, 제련소, 정유소, 제지공장 및 자동차의 매연 등이

주요 배출원으로 알려져 있다(민경덕, 2001). Pb는 건축산업에 이용되는 연관, 전기산업의 땀납, 석탄 연소에 따른 다양한 배출원이 있는 것으로 알려져 있으나, S와 같이 도심 지역에서의 주요 배출원은 자동차 연료 및 석탄 연소가 주요 배출원으로 보고되어 있다(김권래 등, 2002). 1993년부터 유연회발유 공급이 중단되면서 대기 중의 Pb 농도가 일부 감소한 것으로 알려져 있으나, 토양에서 높은 농도를 보이는 것은 강하분진에 의하여 토양에 침적된 후 긴 잔류시간(residence time)에 의해 축적된 결과로 판단된다. 한편, 유기탄소는 Cu, Zn과 $r=0.8(p<0.01)$ 이상의

Table 4. R-mode factor analysis of variables and factor score for soils in the study area.

	environs area			industrial area			downtown area		
	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Co	0.19	0.87	-0.05	0.44	0.84	-0.13	0.24	0.37	0.78
Cu	0.58	0.76	0.06	0.95	0.24	0.16	-0.13	0.96	0.23
Ni	0.26	0.84	0.08	0.98	-0.11	0.08	0.90	-0.09	0.35
Pb	0.77	0.27	0.12	0.25	-0.13	0.92	0.97	0.10	-0.06
S	0.87	0.31	0.02	-0.10	0.03	0.99	0.83	0.10	0.34
Zn	0.81	0.21	0.06	0.98	0.15	0.02	-0.09	0.96	0.11
pH	0.15	0.06	0.98	0.78	0.53	-0.29	0.00	-0.22	-0.92
C-org	0.80	0.36	0.25	0.42	0.70	-0.32	0.12	0.88	0.32
CIA	0.43	0.82	0.20	-0.40	0.85	0.30	-0.71	0.24	0.16
Eigenvalue	3.31	3.06	1.09	4.02	2.30	2.15	3.04	2.89	1.90
% of variance	36.73	33.95	12.16	44.66	25.57	23.88	33.73	32.10	21.12
Cum. % of var.	36.73	70.68	82.84	44.66	70.23	94.11	33.73	65.82	86.94

높은 상관성을 보였다. 이들 중금속은 유기물에 흡착되는 특성을 보이는 원소들로(오강호 등, 2003; Irving and William, 1948), 도시에서 발생하는 음식물 쓰레기를 포함한 생활 폐기물 등의 영향이 일부 작용하고 있음을 보여준다.

Table 4는 토양 내의 중금속원소 거동에 영향을 주는 요인들을 종합적으로 살펴보기 위하여 주성분 분석법(PCA : Principal components analysis)을 이용한 요인분석(Factor analysis)의 결과로, Kaiser 정규화가 된 베리맥스법(varimax)으로 요인 행렬을 회전시킨 후 요인을 구하였다. 도심 주변지역에서 요인 1은 전체 자료 분산에 대한 36.73% 기여율로 유기탄소, Pb, S, Zn 등이 높은 적재량을 보였다. 유기탄소, Pb, Zn 변수들은 유기물과 친화력이 비교적 높은 원소들로 Pb, S 등의 대기오염물질에 의한 영향이 함께 작용한 것으로 판단된다. 요인 2는 기여율 33.95%로 Co, Cu, Ni, CIA 등이 높은 적재량을 보였다. 이들 변수들은 토양의 화학적 풍화에 따른 쇄설성 점토광물과 관련있는 원소들로, 연구지역의 주변 암석에서 풍화되어 공급된 세립질 점토광물의 영향이 작용하고 있음을 반영하였다.

산업지역에서 요인 1은 44.66% 기여율로 Cu, Ni, Zn, pH 등이 높은 적재량을 보여 산업화에 따른 오염 영향을 반영하는 것으로 나타났으며, 요인 2는

Co, 유기탄소, CIA 등이 25.57%, 요인 3은 Pb, S가 23.88%의 적재량을 보이며 화학적 풍화, 유기물 영향 및 대기오염의 등에 따른 영향이 있음을 시사하였다. Cu, Ni, Zn 등은 각종 철판이나 구조물의 주조, 자동차 제조 등의 산업활동 분산물로(김옥배 등, 1997; 이병규, 고일하, 2003), 연구지역에는 1990년대 산업단지로 조성된 하남공단, 평동공단, 본촌공단, 소촌공단, 첨단단지 등에서 각종 철판이나 구조물의 주조, 구조물의 절단, 용접, 가공 및 도장 등의 작업이 이루어지고 있다(광주광역시, 2002). 산업지역에서 이들 중금속들이 높은 농도를 보이는 이유는 바람, 기류, 지표수 등에 의해 이동되어 인근 토양에 축적된 영향으로 판단된다.

도심지역에서는 요인 1이 33.73% 기여율로 Pb, S, Ni 등이, 요인 2는 32.10% 기여율로 Cu, Zn, 유기탄소 등이 높은 적재량을 보여 대기오염 및 생활폐기물 등의 영향을 크게 반영하는 것으로 나타났다. 광주광역시의 교통관련 기초조사(2004)와 통계연보(2004)에 의하면 도심 주변지역에 비해 도심에서 교통량은 약 1.8배, 생활폐기물 발생량은 최고 5배까지 많이 배출하는 것으로 나타났다. 도심지역의 경우 산업시설의 직접적인 영향이 비교적 적음에도 불구하고 대기오염물질에 관련된 중금속과 유기물에 관련된 중금속이 높게 나타나는 것은 도시화에 따른 자동

Table 5. Enrichment factors(EF) for metals in the study area.

		Ca	Fe	K	Na	P	Co	Cu	Ni	Pb	S	Zn
environs area	Min.	0.03	0.42	0.55	0.08	0.13	0.39	0.16	0.05	1.46	0.12	0.76
	Max.	0.44	0.87	1.28	0.68	0.94	1.06	0.61	0.43	6.02	2.08	2.81
	Aver.	0.17	0.67	0.89	0.32	0.36	0.72	0.35	0.25	3.44	0.88	1.28
industrial area	Min.	0.15	0.43	0.99	0.26	0.22	1.26	1.03	0.64	4.79	1.17	3.29
	Max.	0.35	0.86	1.56	0.44	1.27	2.45	2.96	1.16	11.28	3.57	19.69
	Aver.	0.27	0.62	1.18	0.36	0.63	1.90	1.72	0.78	7.77	2.05	8.03
downtown area	Min.	0.30	0.50	1.02	0.39	0.41	1.11	1.19	0.48	6.69	1.93	3.48
	Max.	0.77	0.94	1.48	0.87	1.39	2.92	3.78	1.32	18.25	9.18	7.58
	Aver.	0.57	0.63	1.27	0.59	0.95	2.15	2.35	0.80	11.00	3.52	5.45

차 매연 및 생활폐기물의 영향으로 판단된다.

상기한 바와 같이, 토양 내의 중금속 원소의 함량변화는 자연적 현상인 점토광물의 화학적 풍화, 산업화 및 도시화에 따른 여러 요인들이 복합적으로 작용함으로써 다양한 함량변화를 가져온다. 이 중, 연구지역 토양에서 중금속 함량변화의 가장 큰 요인은 도심 주변지역의 경우 토양의 화학적 풍화의 영향을, 산업지역은 산업화에 따른 영향을, 도심지역은 도시화에 따른 영향을 가장 많이 반영하는 것으로 판단된다.

3. 중금속원소의 오염

토양 내 중금속의 오염 또는 인위적인 영향 등을 파악하기 위한 방법으로는 Bruland et al.(1974)에 의한 부화지수(Enrichment Factor; EF)와 Müller (1979)에 의한 농집지수(index of geoaccumulation; Igeo) 등이 있다. 부화지수는 토양이나 퇴적물 내 점토광물의 구성비율과 중금속의 상대적인 함량변화를 이용하여 금속원소 농축평가에 사용되며(오강호 등, 2003), 농집지수는 중금속 함량을 오염되지 않은 지역의 중금속 함량과 비교하여 정량하는 방법으로 상대적인 오염 정도를 평가하는데 사용된다(이평구와 이재영, 1997). 본 연구에서 지각의 절대함량 값을 이용한 부화지수를 이용하여 토양 내에 들어있는 중금속 오염을 평가하였다. 보존성원소로는 그 기원이 대부분 지각물질로 알려져 있고, 연구지역에서 상대적으로 함량 변화와 편차가 작은 Al을 사용하였으며, 지각 평균 값은 Mason and Moore(1982)에 의해 제시된 클라크

농도(clark of concentration)를 사용하였다.

$$EF = \frac{\text{Metal}(\text{sediment}) / \text{Metal}(\text{crust})}{\text{Al}(\text{sediment}) / \text{Al}(\text{crust})}$$

연구지역 토양을 대상으로 한 주성분 원소의 부화지수는, Ca, Fe, Na가 전 지역에 걸쳐 부화되지 않은 것으로 나타났으며, 일부 정점에서만 P와 K가 부화되는 것으로 나타났다(Table 5). 그러나 미량성분원소인 Cu, Pb, S, Zn 등의 중금속들은 주성분 원소와 달리 많은 지역에서 부화되는 특징을 반영하였다. Cu, S, Zn은 주변지역 일부를 제외하고 부화되는데 Cu는 산업지역 1.03~2.96(평균 1.72), 도심지역 1.19~3.78(2.35), S는 산업지역 1.17~3.57(2.05), 도심지역 1.93~9.18(3.52), Zn은 산업지역 3.29~19.69(8.03), 도심지역 3.48~7.58(5.45)로 나타났다. 특히 Pb은 모든 지역에서 부화되는 특징을 보여 주변지역 1.46~6.02(3.44), 산업지역 4.79~11.28(7.77), 도심지역 6.69~18.25(11.00)의 부화지수를 보였다.

Figure 3은 부화지수가 높은 Cu, Pb, Zn 중금속들과 S의 농도를 효과적으로 파악하기 위해 작성한 공간적 오염분포도이다. 연구지역에서 나타난 Cu의 공간적 함량분포는 도심지역을 중심으로 하남공단 부근에서 일부 높은 수치를 보이는 것을 알 수 있다. Zn은 하남공단과 본촌공단이 위치하는 곳에서 높은 함량분포를 보이며 도심에서도 일부 높은 함량을 나타내었고, Pb는 도심 지역을 중심으로 전 지역에 걸쳐 높은 분포를, S는 도심을 중심으로 높은 분포를 보였다. 도심지역과 산업지역에서의 높은 함량분포는

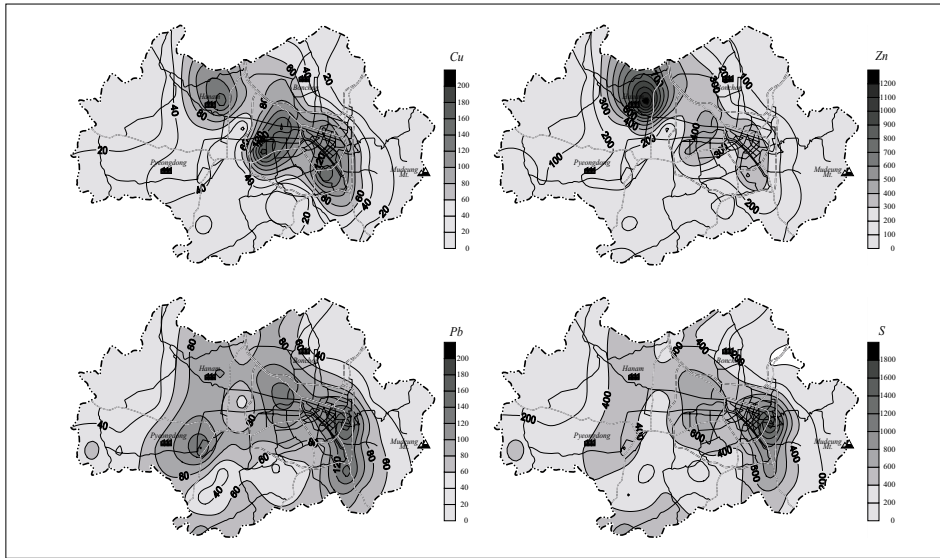


Figure 3. Spatial distributions of Cu, Zn Pb and S in the study area.

도시화 및 산업화에 따른 영향을 가장 크게 반영하는 것으로 특정원소들에 의한 대도시의 토양 오염이 강하게 진행되고 있음을 시사하기에 오염 확산 및 방지를 위한 필요한 조치를 취해야 할 것으로 판단된다.

양오염이 특정 오염원, 특정 활동 등에 의해 심화될 수 있음을 의미하기에, 토양오염방지를 위한 대책이 요구되며, 이를 위해 배출원에 따른 정량적 연구 등의 추가적인 연구가 이루어져야 할 것으로 생각한다.

IV. 결론

광주광역시 토양을 대상으로 지화학적 거동과 오염의 정도를 파악하기 위하여 조사한 결과, 토양 내의 중금속 원소의 거동은 토지이용변화, 주변의 오염 부하량 증가 및 토양의 특성 등을 반영하여, 도심 주변 지역에서는 점토광물의 화학적 풍화 영향이, 산업지역에서는 공장 가동 등에 의한 산업화의 영향이, 도심 지역에서는 도시화에 따른 자동차 매연 및 생활 폐기물의 영향이 가장 큰 요인들로 나타났다. 또한 유해 중금속에 해당하는 Cu, Pb, Zn와 S 등의 부화는 일부 주변지역을 제외하고 도심지역을 중심으로 도시 전역에 걸쳐 높은 농도를 보였다. 특히, Pb와 S, Cu와 Zn의 상관관계는 모든 지역에서 유의미한 상관계수를 보이며, 각각 도심지역과 산업지역에서 높게 부화되는 것으로 보아 유사한 배출원에 의한 지화학적 거동을 시사하기도 하였다. 이러한 결과는 대도시에서 토

사 사

이 논문은 2004년도 전남대학교특별연구사업비 지원에 의하여 연구되었으며, 논문의 미진한 부분을 세심하게 살펴주시고 많은 도움이 될 조언을 해 주신 두 분 심사위원들께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

광주광역시, 2002, (제42회) 광주통계연보.
 광주광역시, 2004, 2004 교통관련 기초조사용역 결과보고서.
 김권래, 이현행, 정창욱, 강지영, 박순남, 김계훈, 2002, 서울시 주요 도로변 토양오염 조사 II, 강동구, 광진구, 노원구, 서대문구, 성동구 내 주요 도로변 토양, 한국응용생명화학

- 회지, 45, 92-96.
- 김옥배, 이무성, 박희열, 박정용, 나춘기, 1997, 공업단지 주변 토양의 중금속 오염에 관한 환경 지화학적 연구-여천과 전주 공업단지를 대상으로-, 한국자원공학회지, 34, 1-10.
- 류순호, 이종렬, 김계훈, 1995, 중금속 오염지 농토양의 Cd, Zn, Cu, Pb의 연속 침출 방법 비교와 연차적 오염도 변화, 한국토양비료학회지, 28, 207-217.
- 민경덕, 2001, 대기환경과학, 서울, 시그마프레스.
- 박동식, 김태한, 김성수, 이상민, 김성문, 허장연, 2004, 강원도 고랭지 배추경작지의 토양 및 수질 중 농약 오염 실태, 한국농약과학회지, 8, 189-197.
- 박맹언, 김근수, 1998, 납석광산에서 발생하는 토양 및 수질오염 실태 : 부산광역시 회동수원지 상류지역, 한국환경과학회지, 7, 149-155.
- 박천영, 박영석, 정연중, 1995, 광양광산 주변 토양의 중금속 오염에 관한 연구, 한국자원공학회지, 32, 163-174.
- 오강호, 김주용, 고영구, 윤석태, 신상은, 박배영, 문병찬, 김해경, 2003, 광주광역시 하천의 표층퇴적물에 대한 지구화학적 특성과 오염, 한국지구과학회지, 24, 346-360.
- 옥용식, 김시현, 김대연, 이한나, 임수길, 김정규, 2003, 광산 인근 토양의 중금속 오염에 따른 식물정화기술의 적용성 탐색, 한국토양비료학회지, 36, 323-332.
- 우영국, 조은하, 2001, 대구시 지역의 토양오염 특성조사 연구, 환경관리학회지, 7, 307-311.
- 유정환, 가강현, 박현, 1995, 여천공단의 대기오염이 토양의 화학적 특성, 지의류, 탈질균 및 황산환원균에 미치는 영향, 한국임학회지, 84, 178-185.
- 이병규, 고일하, 2003, 울산지역 토양 중의 중금속 오염도 분석연구, 대한환경공학회지, 25, 1436-1447.
- 이평구, 이재영, 1997, 프랑스 A-71 고속도로변 Retention pond의 기능평가, 한국토양환경학회지, 2, 73-81.
- 임수길, 김정규, 1996, 우리나라 토양관리의 역사, 한국토양환경학회 추계학술발표회 논문집, 한국토양환경학회.
- 조규성, 2003, 전주시 도로변 퇴적물의 중금속 오염 특성, 한국지구과학회지, 24, 711-720.
- 함진관, 홍순관, 윤경민, 2001, 관개수질과 농토양 오염이 쌀 안정성 및 품질에 미치는 영향, 강원대학교 농업과학연구소 논문집 12, 62-76.
- 환경부, 1997, 환경백서.
- 환경부, 1999, 토양오염공정시험방법.
- Azimi, S., Ludwig, A., Thevenot, D. R. and Colin, J. L., 2003, Trace metal determination in total atmospheric deposition in rural and urban areas, *The Science of The Total Environment*, 308, 247-256.
- Bruland, K. W., Bertine, K., Koide, M. and Goldberg, E. D., 1974, History of metal pollution in southern California coastal zone, *Environmental Science and Technology*, 8, 425-432.
- Buchman, A. L., Neely, M., Grossie(Jr), V. B., Truong, L., Lykissa, E. and Ahn, C., 2001, Organ heavy-metal accumulation during parenteral nutrition is associated with pathologic abnormalities in rats, *Nutrition*, 17, 600-606.
- Förstner, U. and Wittmann, G. T. W., 1981, *Metal Pollution in the Aquatic Environment*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Golomb, D., Ryan D., Eby N., Underhill J. and Zemba S., 1997, Atmospheric deposition of toxics onto Massachusetts Bay?I. Metals, *Atmospheric Environment*, 31,

- 1349-1359.
- Horowitz, A. J., 1991, A Primer on Sediment-Trace Element Chemistry, Lewis Publishers, Chelsea(MI).
- Irving, H. and Williams, R., 1948, Order of stability of metal complexes, Nature, 162, 746-747.
- Krauskopf, K. B., 1982, Introduction to Geochemistry, McGraw-Hill, New York.
- Mason, B. and Moore, C. B., 1982, Principles of Geochemistry, John Wiley & Sons Inc, New York.
- Müller, G., 1979, Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins-Verderungen seit. Umschau, 79, 778-783.
- Nesbitt, H. W. and Young, G. M., 1982, Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites, Nature, 299, 715-717.
- Salomons, W. and Förstner, U., 1984, Metals in the Hydrocycle, Springer-Verlag, Berlin.
- Strickland, J. D. H. and Parsons, T. R., 1972, A Practical Handbook of Seawater Analysis, Fishery Research Board of Canada, Ottawa, 207-211.
- Thornton, I., 1983, Applied Environmental Geochemistry, Academic Press, London.

최종원고채택 05. 12. 15

