

중금속의 토양 오염: 한국중부지역의 농경지를 중심으로

김기현* · 김세현** · 최영천**

The Concentration of Heavy Metals in Some Agricultural Soils of Central Korea

Ki-Hyun Kim*, Se-Hyun Kim** and Young-Cheon Choi**

ABSTRACT : To assess soil distribution patterns of heavy metals in agricultural environments, we have measured the concentrations of six metals from surficial soils of three different groups divided on the basis of the surrounding environment: (1) soil group I-cultivated soils within the purely agricultural regions, (2) soil group II-both cultivated and uncultivated soils near various livelihood facilities, and (3) soil group III-mainly cultivated soils near major polluting sources. The mean concentrations for the three soil groups were found in the range as follows: 0.12~0.15 (Cd), 4.94~6.08 (Pb), 0.05~0.11 (Hg), 2.82~3.50 (Cu), 4.69~7.82 (Zn), and 0.36~0.78 (As) ppm. Examination of data distribution trends indicates that the concentrations determined from the relatively unpolluted soil environs (groups I and II) were comparable not only between each other but also with those reported previously in background soil environs of Korea. The concentration data for the soil group III were however found to be much higher than the rest two groups. Unlike the direct comparison of the magnitudes of concentrations, results of a regression analysis exhibited much different patterns: it was seen that the correlation patterns for soil group I were rather analogous to those of soil group III. The similarities in correlation patterns between groups I and III along with the lack of correlations in soil group II suggest that soil characteristics such as whether being cultivated or not are important factors affecting soil distributions of heavy metals.

서 론

주변 환경의 오염상태가 심하거나 또는 약한 정도에 상관없이, 중금속은 지구상의 모든 토양환경에 산재된 채로 또는 응축된 채로 존재한다. 비록 토양이나 암석과 같은 자연적인 성인에 의해 존재하는 중금속도 중요하지만, 인위적인 오염원으로부터 자연환경계로 유출되는 부분도 무시할 수 없으리 만치 증가해 왔다. 만약 어떤 환경계 내에 이러한 중금속이 대량으로 유입된다면, 주변 생태계에 심각한 영향이 야기될 수 있다는 것은 잘 알려진 사실이다 (Bergmann, Hosius, 1996). 그러나 이와 같이 중금속과 관련된 환경폐해는 중금속과 생태계간에 일어나는 교감작용의 복잡한 특성 때문에 그러한 폐해의 평가를 정량화하

는 것이 대단히 어려운 문제에 속한다고 할 수 있다.

농경지와 같은 토양시스템에 산재하는 중금속류의 분포 특성에 대한 정보는 이들 토양으로부터 재배된 곡·식물을 사람이나 가축이 섭취·이용한다는 점 때문에 대단히 민감한 환경문제로 자리잡아 가고 있다. 농경지의 중금속오염은 관계용수, 유기성분뇨, 무기성비료 등의 유입과 정 등과 같이 여러 유형의 직접적인 경로를 통해 일어날 수 있다 (Ross, 1994). 이에 덧붙여 건조침적 또는 습윤침적과 같이 대기를 통해 간접적으로 유입되는 현상 또한 양적으로 대단히 중요한 부분을 차지하고 있다는 것이 밝혀지고 있다 (Nriagu, Pacyna, 1988; Slemr, Langer 1992). 실제로 미국의 걸프만지역의 해수상에 발견되는 질소·인 성분의 대부분이 대기를 통해 유입된다는 것은 잘 알려진 사실이다 (Fu, Winchester, 1994). 중금속류와 같은 오염물질은 황사현상 등과 같이 가시적인 규모의 현상뿐만 아니라 일상적인 기상조건에서도 미세분진 등에 흡착된 형태로 수 십에서 수 백 킬로미터의 거리를 이동

* 상지대학교 환경과학연구소 (Institute of Environmental Science, Sangji University, Wonju 220-702, Korea)

** 상지대학교 자원공학과 (Dept. of Mineral and Mining Engineering, Sangji University, Wonju 220-702, Korea)

하기 때문에, 이런 경로를 통해 토양환경계로 유입되는 중금속류의 총량은 한반도지역에서 조차 실로 막대한 규모에 달하는 것으로 추정되고 있다 (Arimoto *et al.*, 1996). 수은 등의 예에서 볼 수 있는 것과 같이 일부 중금속의 경우, 물 또는 토양과 같은 지표환경과 대기면을 통해 일어나는 교환현상은 이들 중금속이 여러 종류의 다양한 환경계들을 이동하는데 있어 가장 중요한 경로로 작용하는 것으로 드러나고 있다 (Kim, Kim, 1996).

여러 유형으로 진행되는 중금속의 환경계 유입현상에 대해 직간접적으로 영향을 미치는 요인들이 주변 환경에 따라 다르게 나타난다는 점을 감안하면, 중금속의 분포형태와 주변 환경과의 관계를 바르게 파악하는 것은 중금속의 환경지화학적 특성을 이해하는데 있어 대단히 중요한 사안이 아닐 수 없다. 환경부의 연례분석업무의 일환으로 원주지방환경관리청에서 실시한 토양중금속분석자료를 이용하여 강원도 일대의 폐광지역에 인접한 여러 농경지 토양의 중금속 분포특성을 보고한 바 있다 (Kim, Kim, 1996). 본 연구에서는 이러한 연구를 연장하고자 하는 노력의 일환으로 강원도 원주지역을 중심으로 인접 경기도 및 충청북도 일부지역을 포함하는 광역적인 규모에 존재하는 다양한 영농환경지역의 토양오염실태를 1994~1995년의 2년 기간동안 관측한 분석결과를 다루고자 한다. 일차적으로 이러한 연구목적에 따라 채집분석한 260개의 관측시료 데이터를 시료가 채집된 농경지나 일반토양이 위치해 있는 주변환경의 유형별로 크게는 3개의 대집단 그리고 작게는 14개의 소집단으로 분류하였다. 편의상 3개의 대집단을 I, II, III으로 분류하면, I집단은 일반적인 농경지역 내에서 채집된 시료를, II집단은 생활근린시설 주변의 농경지 및 일반 토양을 대표하고, III집단은 뚜렷한 오염원이 주변에 인접해 있는 농경지를 대표한다. 따라서 본 연구에서는 3대 집단으로 분류된 토양내의 6대 중금속들 (Cd, Pb, Hg, Cu, Zn, As)의 함량자료를 이용하여 이들 중금속의 절대적 및 상대적 분포특성에 대한 비교분석 결과를 제시하고자 하였다.

연구방법

본 연구의 분석대상지역을 Fig. 1에 도시하였다. 분석지역에 대한 보다 더 구체적인 정보를 행정구역과 토지이용형태를 중심으로 Table 1에 분류하였다. Table에서 볼 수 있는 것처럼 전체 52개의 지역으로부터 각각 5개의 유사 시료가 개별지역의 좁은 반경 내에서 채집되었다 (총 시료수, N = 260). 광역적인 규모로 볼 때, 축정지역의 절대다수인 36개 (69%)는 강원도에 그리고 그외의 지역은 인접한 경기도 (19%) 및 충청도 (12%)에 위치하고 있

다. 토양의 사용방식으로 보면 대부분의 시료채집은 밭지역에서 그리고 일부는 논지역에서 이루어졌다. 참고로 우리의 연구가 밭지역에 밀집된 이유로는 시료채집이 가장 중점적으로 이루어진 생활폐기물매립지에 인접한 농경지들이 주로 밭지역에 위치한 따름이다. 전체적으로 볼 때, 채집이 이루어진 총 52개의 연구지역중 45개는 전답토양 그리고 7개는 생활근린시설이 인접한 지역의 일반토양으

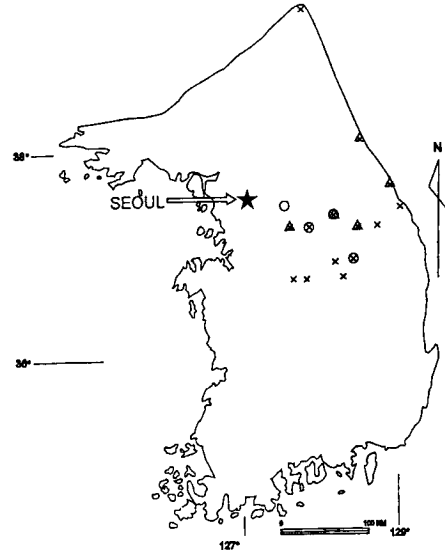


Fig. 1. The plot of sampling localities. Some spots represent several localities for sampling at once. O; soil group I, Δ; soil group II, X; soil group III.

Table 1. Classification of individual sampling localities.

Soil Group	I	II	III
A. By administrative district			
Won Ju	2	5	5
Pyung Chang	3	1	1
Young Wall	2		1
Kang Reung		2	1
Sok Cho		1	2
Jae Chun			3
Yeo Ju	5		1
I Chon	1	2	2
Eum Sung	1		3
Etc.	1		7
B. By land-use type			
Paddy Soils	5	3	0
Upland Soils	9	4	20
Paddy+Upland	1	0	3
Uncultivated	0	4	3
Total N	15	11	26

Table 2. A summary of heavy-metal concentration data for three major soil groups (in mg kg⁻¹ or in ppm).

	pH	Cd	Pb	Hg	Cu	Zn	As
Soil group I*							
Mean	5.75	0.12	5.25	0.05	2.98	4.78	0.782
1 SD		0.08	3.13	0.03	2.12	2.78	1.416
CV (%)		70	60	68	71	58	181
Range	5.10~8.50	0.00~0.41	0.15~12.68	0.001~0.16	0.04~7.86	0.15~13.45	0.08~11.12
N	75	69	75	66	74	75	75
Soil group II**							
Mean	6.05	0.14	4.94	0.05	2.82	4.69	0.355
1 SD		0.11	3.86	0.11	2.19	2.83	0.228
CV (%)		82	78	238	77	60	64
Range	5.10~9.00	0.99~0.59	0.38~20.63	0.00~0.70	0.32~8.82	0.31~13.76	0.06~1.63
N	55	36	55	43	55	55	55
Soil group III***							
Mean	5.87	0.15	6.08	0.11	3.50	7.82	0.698
1 SD		0.11	4.39	0.30	2.52	10.72	1.125
CV (%)		76	72	268	72	137	161
Range	4.90~8.90	0.00~0.663	0.02~30.0	0.00~2.57	0.06~15.12	0.02~67.3	0.14~8.53
N	130	120	130	123	129	127	130

*Agricultural soils in various agricultural regions, **agricultural soils in the proximity of various living facilities, ***Agricultural soils in the proximity of major contaminating sources

로 대분할 수 있다. (독자는 전체연구지역들이 편의상 중 농경지로 호칭된 경우가 있음에 유의하기 바람)

현장시료채집은 1994년부터 1995년의 춘기 동안 이루어졌는데, 표면에서 대략 15 cm 깊이이내의 유기성물질의 함량이 높은 표면토로부터 이루어졌다. 시료는 상온에서 통풍건조한 뒤 유리물타르로 분쇄하여 100메쉬 크기만을 분리 사용하였다. As를 제외한 5가지의 중금속에 대한 분석은 다음의 방식으로 이루어졌다: (1) 10 g의 토양을 100 ml크기의 플라스크에 넣은 다음 0.1N HCl용액을 섞어주었다. (2) 한 시간 동안 30°C에서 ultrasonication을 행한 후, 이 용액은 원자흡광분석기에 의해 중금속 농도의 결정이 이루어졌다. 이에 비해 비소의 분석은 중금속분리를 위해 1.0N의 HCl용액이 사용되었다는 점 및 AA분석 이전에 0.5% DDTC-Ag용액의 사용과 같은 점에서 특이하다. 본 연구에 사용된 시약은 분석용급 이상이 사용되었고, 모든 분석용기는 사용전후에 강산용액으로 세정하였다.

결과 및 토론

3대 대그룹으로 분류된 개개 토양군의 pH 및 6대 중금속 농도치에 대한 요약 결과가 Table 2에 나와 있다. 주변 환경조건에 따라 3대그룹으로 분류된 토양시료들은 Table 3의 요약과 같이 다시 14개의 소그룹으로 분류할

수 있다. 이를 자세히 보면, 일반농경지류의 토양을 대표하는 토양그룹 I은 다음의 4개 세부 그룹으로 구성되어 있다: (1) 일반농경지, (2) 대형용수시설, (3) 특수관계시설, (4) 하천고수부지. 토양그룹 II의 채집은 생활근린시설이 인접한 지역의 5대 개별 세부 그룹으로부터 채집하였다. 생활시설물들 주변에서 시료를 채집하였기 때문에, 그룹 II의 경우 비농지대 농지의 비가 타그룹에 비해 훨씬 높게 나타난다. 이 그룹의 개별 구성요소로는 다음과 같은 일반적인 주거시설물에 인접해 있다: 어린이놀이터, 유휴지/공원지역, 건강설비지역, 골프장. 그리고 그룹II의 다른 구성인자와 약간 다르긴 하지만, 도로변의 농경지 등도 포함되어 있다. (도로변의 농경지의 경우, 중금속농도의 절대적 및 상대적 분포가 그룹II에 가장 근접하게 나왔기 때문에 그룹 II로 분류되었다) 상대적으로 오염의 정도가 미미한 위의 두 그룹에 비해 그룹III의 경우 뚜렷한 오염원에 인접해 있는 농경지 토양을 대표한다. 대체로 오염시설물들이 높은 지형대에 존재한 고로, 이들 토양은 절대 다수가 논보다는 밭 지역에 위치하고 있다. 이 들 주요 오염시설물로는생활폐기물 처리장, 가축분뇨처리장, 공단하류지역 등이 포함된다. 참고로 3대그룹의 개개 구성성분들에 대한 상세한 분석결과가 Table 3에 제시되었다.

각 토양군의 중금속분포특성을 비교분석하는데 있어, 개개 소그룹별로 자료를 분석하는 것이 곤란하여, 3대그룹에 대한 절대적·상대적 분포특성을 비교하는 방식이

Table 3. A summary of heavy-metal concentration data for the 14 types of agricultural soil classified in terms of land-use types of surrounding environs (in mg kg⁻¹ or in ppm).

		pH	Cd	Pb	Hg	Cu	Zn	As
Soil Group I. Cultivated Soils in Various Agricultural Regions								
Large-scale agricultural area	Mean	5.40	0.06	1.81	0.03	0.99	3.00	0.48
	1 SD		0.02	0.78	0.02	0.45	1.49	0.25
	N	10	9	10	5	10	10	10
Large-scale water reservoir	Mean	5.71	0.11	6.07	0.03	4.02	4.53	0.50
	1 SD		0.09	1.81	0.02	1.93	1.68	0.22
	N	35	30	35	31	35	35	35
Irrigation-water supply system	Mean	5.56	0.06	8.89	0.04	4.58	6.44	0.10
	1 SD		0.04	1.68	0.01	1.47	2.53	0.02
	N	5	5	5	5	5	5	5
Terrace land on the river	Mean	6.18	0.16	4.76	0.07	1.95	5.49	1.43
	1 SD		0.08	4.00	0.03	1.79	3.93	2.33
	N	25	25	25	25	24	25	25
Soil Group II. Both Cultivated and Uncultivated Soils in the Proximity of Various Livelihood Facilities								
Health facility area	Mean	6.19	0.05	2.33	0.05	1.50	1.97	0.26
	1 SD		0.13	5.38	0.32	2.72	5.06	1.43
	N*	10	5	10	10	10	10	10
Resort area	Mean	6.01	0.14	4.60	0.03	3.45	7.50	0.29
	1 SD		0.03	0.79	0.01	2.75	4.47	0.03
	N	5	5	5	5	5	5	5
Golf ground	Mean	6.45	0.12	2.49	0.02	3.30	4.55	0.37
	1 SD		0.05	2.05	0.01	3.14	3.05	0.08
	N	10	5	10	6	10	10	10
Roadside	Mean	5.78	0.18	5.54	0.06	3.92	5.79	0.45
	1 SD		0.15	2.05	0.17	1.69	2.25	0.35
	N	20	16	20	16	20	20	20
Playground	Mean	7.23	0.10	8.95	0.03	1.17	3.96	0.29
	1 SD		0.02	6.44	0.02	0.57	1.62	0.10
	N	10	5	10	6	10	10	10
Soil Group III. Cultivated Soils in the Proximity of Major Polluting Sources								
Reclamation area of livelihood wastes	Mean	5.80	0.14	4.61	0.08	2.83	5.13	0.48
	1 SD		0.09	2.70	0.09	2.12	4.18	0.29
	N	75	70	75	68	75	72	75
Livestock-waste treatment area	Mean	6.15	0.09	7.11	0.28	3.12	26.72	0.44
	1 SD		0.14	4.68	0.63	1.99	28.85	0.27
	N	10	9	10	10	10	10	10
Reclamation area of industrial wastes	Mean	5.67	0.10	7.68	0.11	3.86	5.70	0.69
	1 SD		0.06	1.37	0.05	2.66	4.35	0.53
	N	10	10	10	10	10	10	10
Downstream of industrial discharge	Mean	5.60	0.20	8.40	0.07	6.08	8.39	0.47
	1 SD		0.08	3.43	0.02	1.38	2.25	0.27
	N	10	9	10	10	10	10	10
Streamwaters of severe contamination	Mean	6.66	0.20	8.52	0.16	4.53	8.62	1.54
	1 SD		0.15	7.15	0.50	3.20	7.54	2.34
	N	25	22	25	25	24	25	25

이용되었다. Table 2에 제시된 결과에 의하면, 몇 가지 특이한 분포특성을 발견할 수 있다. 그룹 I, II와 같이 비교적 깨끗한 토양군의 경우 대부분의 중금속들이 유사한 평균치를 나타낸다는 것을 확인할 수 있다. 예를 들어, Cd (0.12 vs. 0.14 ppm), Pb (5.25 vs. 4.94 ppm), Hg (0.05

vs. 0.05 ppm), Cu (2.98 vs. 2.82 ppm), Zn (4.78 vs. 4.69 ppm). 그러나 As의 경우 이렇게 근접하는 추세와는 달리 그룹 I의 값이 II보다 약 2배 이상에 달하는 차이를 보여주었다. 위에 언급한 비교적 깨끗한 지역들에 비해, 그룹III의 경우 각 농도치들이 구조적인 차이를 내재하고

Table 4. Results of Z-statistics test to examine differences in data distribution trends.

	Cd	Pb	Hg	Cu	Zn	As
Between Soil Groups I and II						
Z	-0.9782	0.4983	0.0000	0.4063	0.1623	2.5666
P	0.3280	0.6183	1.0000	0.6845	0.8711	0.0103
Between Soil Groups II and III						
Z	0.3251	1.7595	2.0883	1.8372	3.0486	3.3189
P	0.7451	0.0785	0.0368	0.662	0.0023	0.0009
Between Soil Groups III and I						
Z	1.9676	1.5591	2.4205	1.5748	3.0321	-0.4399
P	0.0491	0.0119	0.0155	0.1153	0.0024	0.6600

있다는 것을 쉽게 확인할 수 있었다. 이들 지역으로부터 구한 농도값들은 대개 농경지로 사용되고 있음에도 불구하고, 수 배 높은 값을 띄었다. 실제 Z-statistics를 통해 각 그룹별 농도분포 양상간의 차이를 비교했을 때, 그룹 I과 II의 차이는 통계적으로 구분하기가 어렵지만, 그룹 III과 이들 두 그룹과의 차이는 모두 확연하게 나타났다 (Table 4 참조). 그룹간의 금속농도분포의 차이를 감안할 때, 그룹III의 수치에 인접 또는 초월하는 그룹 I의 As자료나 그룹 II의 Cd자료는 동그룹에 포함된 다른 금속원소에 비해 상당히 예외적인 분포란 것을 짐작할 수 있을 것이다.

중금속의 평균농도는 그룹간에 다소 차이를 나타내지만, 그러한 변폭이 금속들마다 상당한 차이를 띄고 있다는 것은 흥미로운 사실이다. 특히 Hg, Zn, As의 경우 그룹 III과 나머지 그룹간의 차이가 크게 나타나는 반면, Cd, Pb, Cu 등은 그러한 차이가 대단히 미미하다는 것을 쉽게 구별할 수 있다. 더욱이 변이계수 (CV: coefficient of variation) 값을 비교해 보면 위에서 언급한 금속들간의 상대적인 변이성이 뚜렷한 추세를 자리잡고 있다는 것을 알 수 있다. 그룹 II나 III의 Hg, 그룹 III의 Zn, 그룹 I과 III의 As자료에서 보듯이, 후자 그룹의 경우 데이터의 분포가 상당히 산발적인 것을 알 수 있다 (CV값이 대략 130~270%). 그러나 이에 반해, 전자그룹의 경우 CV값이 대개 60~80% 범위로 산포성이 훨씬 약하다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 여러 유형의 농경지를 중심으로 토양시료 내의 강용출성 중금속들에 대한 상대적 분포특성의 비교를 꾀하였다. 따라서 본 연구에서는 분석된 중금속의 농도는 As와 같은 특별한 경우를 제외하고는 대부분 전체 농도로서의 의미가 아니라 약산 (0.1N HCl)에 용출된 부분, 즉 농경지에 재배되는 농작물들의 발육·성장단계에서 흡수. 이

Table 5. The background soil concentrations of six heavy metal (in mg kg⁻¹ or in ppm).

	Cd	Pb	Hg	Cu	Zn	As
Crustal ¹⁾	0.2	13	0.08	55	70	1.8
Korean Agri. Soil ²⁾	0.13	5.03	0.02	4.08	4.16	0.56

¹⁾ Taylor *et al.*(1964) and ²⁾ Kim, Kim (1996).

용이 용이한 부분들을 대표한다. 그러므로, 구미대륙의 대학 및 연구기관 등에서 발표하는 것과 같은 일반적인 의미의 총중금속농도와는 큰 차이가 있다. 아쉬운 일이지는 하지만, 아직도 일본이나 한국 등지에서는 약산에 의해 용출되는 중금속의 함량으로 농경지의 토양오염상태를 진단하고 있다. 약산 처리된 중금속의 농도가 토양 중에 내재된 금속의 총량과는 큰 차이를 띠지만, 이런 자료는 생물 생장에 직접적으로 간여하는 강용출성 중금속의 함량에 대한 간접적인 판단 자료로서 그 가치가 인정될 수 있을 것이다. (그러나 차후의 연구에 있어서는 이러한 문제점을 인식하여, 중금속의 총량과 강용출성 농도를 동시에 파악하여 비교 분석하고자 준비중에 있다.) 단순히 강용출성성분에 대한 분석 결과이기는 하나, 이런 비교 분석을 통해 우리의 연구구역 내에 산재한 농경토양의 중금속들이 어떤 형식으로 분포하는지의 여부를 대체적으로 파악할 수 있었다. Z-statistics의 결과가 보여주었듯이 그룹 I과 II의 결과는 거의 구분하기가 어려웠지만, III과 나머지 그룹들간의 차이는 확연히 드러났다. 이런 비교가 오염상태의 상대적 순위를 파악하는데 있어 유용한 수단으로 활용될 수 있겠지만, 어떤 금속이 배경농도에 비해 상대적으로 과잉상태인지 또는 결핍 상태인지를 확인하는 부화계수 (enrichment factor : EF)의 결정은 오염상태의 절대성을 비교하는데 유용하게 활용될 수 있다. 따라서 과거에 본 연구진이 폐광 인접 농경지의 중금속분포분석에 사용한 방식과 같이 국내 농경지에서 발견되는 중금속들의 배경농도치를 이용해 EF값을 계산해 보았다 (Korean ATC, 1982; Korean ERC, 1988). Fig. 2에 나타난 결과는 다른 금속들에 비해 EF값이 2.3에서 5.5에 달하는 수은의 오염이 상대적으로 심각하다는 것을 시사한다. 수은을 제외하면 EF값이 1을 초과하는 경우는 Zn나 As 등에서도 드물게 볼 수 있다. 그러나 몇몇의 경우를 제외하고는 대체로 EF 값이 1에 인접하거나 또는 이하인데, 이러한 결과는 대체로 본 연구의 분석대상인 농경지나 비농경지 토양들에서 발견할 수 있는 중금속의 함량이 주변 환경의 오염부하시설의 존재유무에 크게 상관없이 다른 지역에서 흔히 발견하는 수준에 가깝다는 것을 시사한다.

본 연구에서 분석한 결과들을 배경토양의 농도와 비교

하는 것도 의미 있는 일이지만, 반대로 과거 폐광 유역의 중금속 함량이 높은 농경지의 자료들 (Kim, Kim, 1996) 과 비교해 보는 것도 흥미로운 일이다. 현재의 일반 농경지 및 오염원 주변 농경지의 결과들이 공통적으로 수은 오염의 심각성을 시사하는 것은 과거의 폐광유역연구에서도 뚜렷하게 드러난 현상이다. 이런 상대적 특성이 동

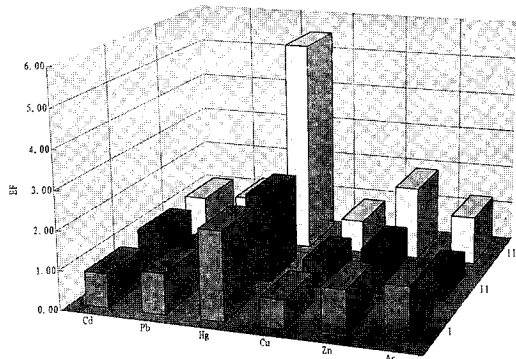


Fig. 2. The plot of EF values for six metals relative to their respective background agricultural soil concentrations.

일하게 나타나는 경향이 있지만, 중금속의 절대함량을 보면 현재의 연구에서 발견한 최고의 농도치들의 경우도 폐광 유역 농경지의 금속함량에 비해 수 배 낮다는 것을 알 수 있다. 이런 비교는 본 연구에서 조사대상이 되었던 일반적인 오염원과 같은 경우 주변 환경에 대한 폐해가 아주 심각한 영향을 미치기는 어렵다는 것을 시사하는 듯하다. 또는 반대로 폐광과 같은 특수한 오염원은 주변환경에 대한 영향력이 상대적으로 크다는 것을 확인할 수 있다고도 할 수 있겠다.

표면 토양의 중금속분포를 조절하는 인자들에 대한 지화학적 특성을 이해하는 방편으로 금속과 금속간의 유기적인 관계의 존재 유무를 파악하는 것도 중요한 방편이라 할 수 있다. 이를 위해, 3대 토양 그룹의 자료를 이용하여 개별 그룹간에 존재하는 금속들간의 상관관계를 파악해 보았다. Table 6에 그 결과가 나와 있다. 비록 농도치의 절대값을 비교할 때, 그룹 I과 II 간의 농도치가 구분이 어려우리만치 유사했지만, 상관관계분석의 결과에 따르면 그룹 I과 III는 유사하지만 II의 경우는 타 그룹과 완전히 동떨어진 양상을 보여주고 있다. 금속과 금속이 대응을

Table 6. Results of correlation analysis between different heavy metals for each soil group.

	pH	Cd	Pb	Hg	Cu	Zn	As
Soil Group I							
pH	(75)*	0.3403	-0.33	0.3100 ^{a)}	-0.3622	-0.1833	0.6136 ^{a)}
Cd		(69)	0.0786	0.0737	-0.0164	0.2237	0.1723 ^{a)}
Pb			(76)	-0.3036	0.5249**	0.4660**	-0.6362 ^{a)} **
Hg				(66)	-0.1005	0.1453	0.557**
Cu					(74)	0.5063**	-0.6164 ^{a)} **
Zn						(75)	-0.5457 ^{a)} **
As							(75)
Soil Group II							
pH	(55)	-0.2283	0.0749	0.8176 ^{b)} **	-0.3795	-0.3135	-0.2691
Cd		(36)	0.1039	0.2895	0.3493	0.4285	0.4999
Pb			(55)	-0.1217	0.0628	0.2352	0.0704
Hg				(43)	-0.0291 ^{a)}	-0.0480 ^{a)}	0.1217 ^{a)}
Cu					(55)	0.3995	0.375
Zn						(55)	0.0526
As							(55)
Soil Group III							
pH	(130)	0.2934	-0.1858 ^{b)}	0.3036 ^{c)} **	0.0349	0.4102**	0.1654
Cd		(120)	0.1658	0.1526 ^{c)}	0.2988	0.4828 ^{d)} **	0.5061**
Pb			(130)	0.1136 ^{c)}	0.5937**		0.1445
Hg				(123)	0.2	0.2223	0.4599 ^{d)} **
Cu					(129)	0.2435	0.4815 ^{b)} **
Zn						0.5723 ^{c)} **	0.0539
As						(127)	(130)

*and **denote the number of measured data and the cases with the significance of correlation > 99%.

The superscripts ^{a, b, c}) and ^d) denote the cases where we obtained the best correlation coefficients by removing one through four outliers, respectively. Underlined Y values represent the cases where the best correlations were derived in log-to-log scale.

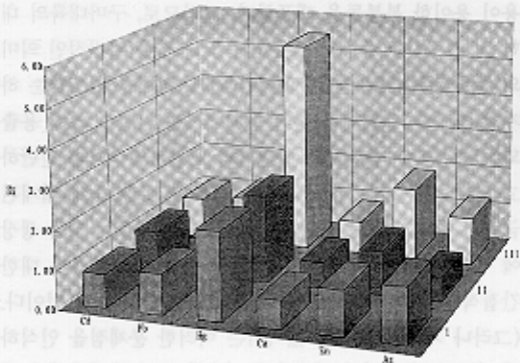


Fig. 2. The plot of EF values for six metals relative to their respective background agricultural soil concentrations.

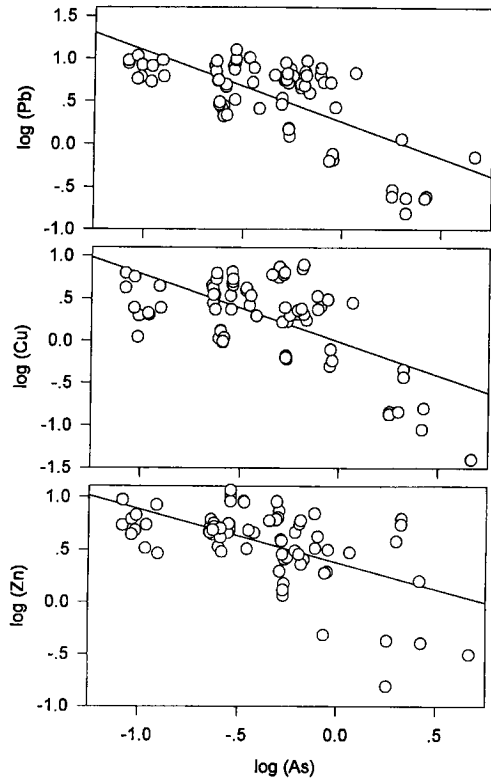


Fig. 3. log-log correlations between As and some metals.

일으키는 모든 부분에 대해, 상관관계의 세기가 강한 경우만을 따로 분리해 보았을 때 (예를 들어 상관성이 있을 확률이 99.99% 이상인 혹은 $p < 0.001$ 인 경우 만을 선별해 보았을 때), 그룹 I과 III은 모두 8개의 경우가 확인되었다. 두 그룹내에 존재하는 금속들의 상관성의 특징은 영양소성분의 금속들간에 존재하는 강한 상관성(예를 들어 Cu나 Zn) 및 금속 As과 다른 금속들간에 빈번하게 높은 상관관계가 발견된다는 점 등에서 강한 유사성을 띄고 있다고 볼 수 있겠다. 그러한 유사성에도 불구하고, 두 그룹은 몇 가지 차이점을 또한 보여주고 있다고 할 수 있다. 그 대표적인 차이점으로 비록 그룹 III의 As와 타금속간의 상관관계가 1차함수적인 관계를 형성하는데 반해, 그룹 I의 경우 특이하게도 log-lgo형의 상관관계를 나타내고 있다는 점을 들 수 있겠다 (Fig. 3). 실제 본 연구사 토양 금속함량의 파악에만 국한되어, 주변토양환경변수에 대한 자료가 부재한 상황이다. 따라서 여러 가지 상황에 대한 체계적인 진단이 어렵긴 하지만, As과 타 금속간의 특수한 분포유형은 As이 농경토양의 특성을 파악하는데 유용한 변수로 활용될 수 있음을 시사하는 듯 하다 (Nakadaira et al., 1995).

토양그룹 I과 III이 여러 가지 공통적인 특성을 나타내는데 반해, 토양그룹 II는 강한 상관관계의 형성이 절대적으로 빈곤하다. 그룹 II의 이러한 특성은 그 자체가 이질적인 요소로 구성되었다는 점에서 해석해 볼 수 있겠다. Table 1에서 보았다시피, 다른 토양군과 달리 그룹 II는 경작되지 않은 토양들이 상대적으로 타군에 비해 많이 존재한다. 그러므로 II그룹의 상관관계 분석 결과가 타그룹과 상이한 양태는 경작되지 않은 토양내에 존재하는 중금속의 분포들이 오염상태의 강약에 크게 관계없이 토양의 경작 유무에 더 영향을 받을 수 있다는 것을 시사한다고 할 수 있다. 또한 다른 각도로 보면, 경작된 토양은 오염원에 어떤 강도로 영향을 받든 간에, 금속들간의 상관관계가 비경작토양에 비해 약하게 영향을 받으리라는 추정이 가능하다.

결론

한국중부지역 농경지대의 중금속들에 대한 분포양태를 파악하기 위한 수단으로 각종농경지 토양을 중심으로 파악된 주요 중금속 함량자료에 대한 분석을 행하였다. 이를 위해 전체분석자료를 3대 그룹으로 분류한 후 각 토양군에서 발견한 중금속 (Cd, Pb, Hg, Cu, Zn, As)의 분포자료를 상대적 및 절대적인 관점에서 해석하고, 과거에 행해진 유사연구의 결과와 비교해 보았다. 이러한 연구결과에 따르면 주변 환경의 오염상태에 관계없이 연구대상 지역의 농경지들은 중금속에 대한 오염의 정도가 미미한 상태임을 시사하고 있다. Enrichment factor (EF)값의 계산결과에 의하면 Hg, Zn, As 등의 금속들이 배경농도값을 약간 상회하는 반면, 그 외 금속들은 배경농도값에도 미치지 않는다는 것을 보여주었다.

비록 3대 토양군 자료 모두가 유사한 범위에서 발견되었지만, 각각의 데이터그룹은 독특한 분포특성을 나타내었다. 이러한 자료의 비교에 따르면, 큰 범위의 순수 농경지역들에 위치한 토양의 농도치나 주거시설 주변지역의 토양으로부터 검출한 농도치와 거의 유사한 결과를 보여주었다. 그러나 오염원 주변에 위치한 농경지들은 예상과 같이 약간씩, 그러나 체계적으로, 높은 농도치를 보여주었다. 그러나 농도값의 변폭은 각 토양그룹들의 차이보다는 주어진 그룹내의 금속과 금속들 간에서 더 크게 나타났다. 구체적으로 보면, Cd, Pb, Cu와 같은 금속들의 농도는 토양 그룹들간에 미미한 차이를 보인 반면, Hg, Zn, As는 훨씬 큰 폭으로 변화하였다. 이러한 비교 결과와 유사하게도 전자그룹의 금속들은 토양 그룹에 상관없이 낮은 변이계수값을 보여주었고, 후자그룹의 경우 높은 변이계수

를 나타내었다.

금속과 금속들간의 상관관계를 분석한 결과는 금속분포 특성의 또 다른 일면을 보여 주었다. 농도값의 비교 결과와는 달리, 상관관계의 분석결과는 토양그룹 I과 III이 유사한 특성을 지니고 있음을 보여주었다. 토양그룹 I과 III은 금속들은 모두 유사한 형태의 상관관계를 보여주었다. 비록 토양 그룹 I에서 발견한 As과 타 금속들간의 log-log형의 강한 상관관계에 대한 해석이 어렵지만, 토양그룹 II에서 볼 수 있는 상관관계의 결핍현상은 토양그룹 II가 다양한 종류의 토양이 섞인 복합적인 구성요인에 기인하는 것으로 사료된다. 따라서 이런 연구의 결과는 경작의 유무와 같은 농경지와 비농경지간의 차이점들이 금속과 금속간의 분포를 결정짓는 주요 요소로 작용할 수 있다는 점을 시사한다.

사 사

본 연구는 부분적으로 상지대학교의 교내연구비 및 고려대학교 전략광물자원연구센터의 지원으로 가능하였다.

참고문헌

- Arimoto, R., Duce, R.A., Savoie, D.L., Prospero, J.M., Talbot, R., Cullen, J.D., Tomza, U., Lewis, N.F. and Ray, B.J. (1996) Relationships among aerosol constituents from Asia and the North Pacific during PEM-West A. *J. Geophys. Res.*, v. 101, p. 2011-2023.
- Bergmann, F. and Hosius, B. (1996) Effects of heavy-metal polluted soils on the genetic structure of Norway Spruce seedling populations. *Water, Air and Soil Pollut.*, v. 89, p. 363-373.
- Fu, J.-M. and Winchester, J. (1994) Sources of nitrogen in three watersheds of northern Florida, USA: Mainly atmospheric deposition. *Geochim. Cosmochim. Acta* v. 58, p. 1581-1590.
- Kim, K.-H. and Kim, D.-Y. (1996) Heavy metal pollution in agricultural soils: Measurements in the proximity of abandoned mine land sites (AMLS). *J. Environ. Sci. Health A31* v. 4, p. 783-795.
- Korean ATC. (1982) The soil and vegetation concentrations of heavy metals in the background agricultural environments of Korea. In Report of Agricultural Tests and Research, v. 24, p. 51-57.
- Korean ERC. (1988) Measurements of the soil and vegetation concentrations of heavy metals in the background agricultural environments of Korea.
- Nakadaira, H., Yamamoto, M. and Katoh, K. (1995) Arsenic levels in soil of a town polluted 35 years ago (Nakajo, Japan). *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, v. 55, p. 650-657.
- Nriagu, J.O. and Pacyna, J.M. (1988) Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soil by trace metals. *Nature*, v. 333, p. 134-139.
- Ross, S.M. (1994) In *Toxic Metals in Soil-Plant Systems*. Wiley and Sons, p. 469.
- Slemr, F. and Langer, E. (1992) Increase in global atmospheric concentrations of mercury inferred from measurements over the Atlantic Ocean. *Nature*, v. 355, p. 434-437.
- Taylor S.R. (1964) Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 28, p. 1273-1285.

1996년 10월 12일 원고접수