

덕음광산 선광광미와 주변토양의 중금속에 대한 수평·수직적인 분산에 관한 연구

박영석* · 김진*

A study on the Horizontal and Vertical Distribution of Heavy Metal Elements in Slime Dump from Dukum Mines, Korea

Young Seog Park* and Jin Kim*

ABSTRACT: It has been more than ten years since Dukum mine was abandoned. Tailings of waste deposits and slime dumps in the abandoned Dukum mine have been left to be deserted for fifty years. The results of fifty years of neglecting are nothing short of major environmental problems. Slime dumps have been exposed to air and water in the mine over ten years and then soil profile has been formed well. Soil in the upper layer (A horizon) is the light gray color due to the leaching of cations. Soil in the lower layer (A2 horizon, 0.2~0.3 m) is tinted with reddish brown and yellowish brown color due to the development of iron oxides and iron hydroxides. Soil in the lower part of B horizon (1.0~3.0 m) with the growth of copper and zinc oxides exposes to the bluish green, light blue, and dark gray. Ranging from 3 m to 8 m in depth, 85 samples were taken from 22 sampling sites with 50 m intervals located on the slime dump area with hand auger and trench (open cut). As tailings was distributed, heavy metal elements extracted by the process of surface water and ground water move and disperse in to the hydrosphere. Waste dumps were distributed in and around the mine and water draining from those dumps be a potential source of contamination. Soils, thus, can be dispersed into downslope and downstream through wind and water by clastic movement. These materials may be deposited in another horizon if the water is withdrawn, or if the materials are precipitated as a result of differences in pH, or other conditions in deeper horizons. These were primarily associated with acid mine drainage. The characteristics and rate of release of acid mine drainage are influenced by various chemical and biological reactions at the source of acid generation. Prolonged extraction of heavy metal elements has a detrimental effect on the agricultural land and residential area. Twenty soil samples were collected from the agricultural land in the area (0~30 cm). Seventeen samples were also taken from the sediment in the stream running alongside the dumps. The dispersion patterns of heavy metal elements are as follows : The content of As ranged 2~6 ppm in A horizon, 20~125 ppm in B horizon with large amount of clay mineral is concentrated and the content of Cd ranged 1~2 ppm in A horizon, 4~22 ppm in B horizon. Like Cd, the content of As, Cu, Zn, Pb in B horizon is higher than that in A horizon (approximately 5~100 times). When soil formation proceeds in stages, it is necessary to investigate the B horizon with the concentration of heavy metal and preventive measures will have to be established.

서 론

국내의 많은 휴·폐광 광산에 있어서, 다량의 중금속을 함유하고 있는 광미더미가 강수에 의해 중금속들

이 침출되어 지하수로 유입되는 과정에 토양 및 암반층을 투과하면서 다양한 화학적 반응을 일으키게 되고, 갱내와 폐석 및 광미에서 유출되는 중금속들은 자연수 순환경로를 따라 하상퇴적물과 주변 환경을 오염시켜 주변의 수계로 이동 분산되어진다. 특히 농경지의 오염은 식물의 성장에 큰 영향을 미쳐 오염된 농경지에서 자란 농작물을 섭취하는 인간은 치명적인 피해를

*Department of Resource Engineering, Chosun University,
375 Seosuk-Dong, Dong-Ku, Kwangju, 501-759, Korea,
E-mail: yspark@chosun.ac.kr

입게 된다. 특히 폐광에서 발생하는 환경 오염의 문제는 다양한 형태로 발생되고 있으나 이중 가장 심각한 것은 광산주변의 산성폐수의 지속적인 유출 그리고 유출로 인한 주변의 수계를 오염시키는 것이다. 이는 수계의 점오염원으로 순환수와 황화광물의 산화작용에 의해 발생된다. 특히 대부분의 금속광산의 폐석과 광미더미의 부산물은 황화물을 함유하고 있어 광산주변의 산성광산배수 (Acid Mine Drainage)라는 문제점을 발생하며 용출된 중금속 원소들은 점진적으로 수계를 오염시키게 된다 (Chon *et al.*, 1995; Thornton, 1983).

이러한 심각성 때문에 광산지역의 주변 수계 및 토양으로의 유독성 원소들의 오염경로 및 분산형태를 규명하는 연구들이 활발하게 진행되고 있는데, 광산활동과 관계되는 연구로는 삼보 연·아연·중정석 광산 주변 토양, 하상퇴적물에서의 중금속 오염 연구 (김상현, 전효택 1993), 신예미 Pb-Zn-Fe광산과 거도 Cu-Fe광산 주변토양, 하상퇴적물 및 하천수의 중금속 오염 (전동진 등 1995), 달성 Cu-W광산 주변수계의 하상퇴적물과 자연수의 Cd, Cu, Pb, 및 Zn오염 (정명채 1996), 대전지역 하천수 및 하상퇴적물에서의 중금속 오염 (김경웅, 이현구 1996) 등이 있다. 그리고, 덕음광산 주변 토양에서의 중금속 함량에 관한 연구 (이창신 등, 1997)에서는 덕음광산 지역 일원의 광범위한 지역에 대한 중금속원소의 분산특성에 대해 연구한 바 있다.

덕음광산은 1960년부터 1973년까지에는 연평균 53 kg의 금과 921 kg의 은을 생산하였으나 그후에는 간헐적으로 소규모로 채광되다가, 현재는 폐광상태이며, 덕음부락 서편에 쌓여 있는 선광광미더미 (200,000 m³)는 청화법에 의한 금 제련공정에서 남은 광미를 오랜 기간동안 그대로 방치되어 있어 이로 인한 자연수 용출의 결과, 선광광미더미 바로 옆에 있는 농업용수 집수지와 하천부근에는 짙은 청색의 침전물들이 많이 쌓여 있어 중금속의 용출이 진행되고 있음을 보여주고 있다. 또한 선광 부산물인 광미나 폐석더미가 휴광 후로도 10여년 동안 방치되어 있어서 성숙된 토양단면이 잘 발달되어 있음을 알 수 있다. 즉, 상부 (2~4 m, A층)토양층은 이온들이 용탈되어 유백 담회색을 띠며, 그 하부층 (0.2~0.3 m, A2층)은 산화철과 수산화철의 발달에 의해 적갈색이나 황갈색을 띠는 층준이 발달되어 있고, 그 아래층 (1.0~3.0 m, B층)은 산화동과 산화아연 등의 발달에 따라 청녹색, 담청색 등의 색을 띠는 층준과 아래쪽으로 흑회색을 띠는 층준이 발달되어 있다.

이에 본 연구에서는 덕음광산지역 선광폐기물인 선광광미가 지난 수십년동안 농경지 인근에 그대로 방치되어 환경오염의 근원이 되고 있으므로 그 방지대책을 세우기 위해 중금속의 오염형태에 대한 정확한 파악과 각 토양에서의 수평·수직적인 중금속함량의 상관성을 조사함으로써 유독성 원소의 분산양상을 규명한 것으로, 수평적인 분산을 조사하기 위해 선광광미장, 논토양 그리고 하상퇴적층에서, 그리고 수직적인 분산을 조사하기 위해 성숙된 토양단면을 형성한 선광광미토양에서 시료를 채취하여 분석을 실시하여, 이들의 지구화학적 분산, 이동 및 부화를 수평·수직적으로 고찰하였다.

연구지역의 지질 및 지형

본 연구 대상인 덕음광산은 전라남도 나주시 공산면 신평리에 위치하고 있으며, 이 지역은 중생대 백악기 말 불국사통에 속하는 것으로 생각되는 유문암과 이를 관입한 석영반암 및 화강암등의 화성암류로 구성되어 있다. 덕음광산은 유문암 및 흑운모화강암내에 발달된 열극을 충진하거나 광염시킨 열수광상이며, 10개의 맥이 발달되어 있는 광산이다. 덕음광산의 지질과 부근의 지질에 대한 연구는 이윤종 외 (1971), 윤정한 등 (1988), 윤정한, 전용원 (1989)의 연구가 있다.

덕음광산에서 산출되는 광석광물은 황철석, 황동석, 유비철석, 방연석, 섬아연석, electrum, 자연은 및 휘은석 등이며 electrum은 황철석, 섬아연석 및 방연석과 밀접히 수반되어 산출된다고 보고되어 있다 (윤정한 등, 1988).

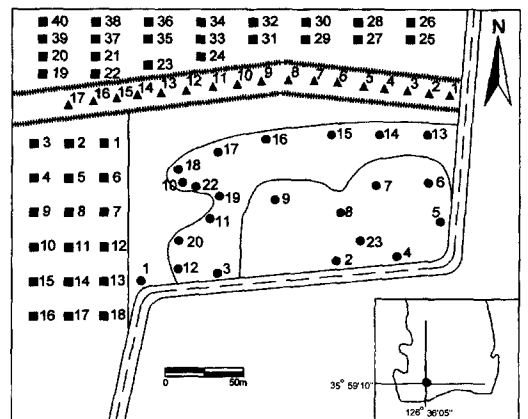


Fig. 1. Map showing sampling sites in the vicinity of the Dukum mine area. (●; mine dump soils, ■; paddy soils, ▲; stream sediments)

연구방법

시료채취는 갈수기를 선택하여 1996년 2월과 3월에 실시하였으며, 덕음광산 개발에 수반된 광미더미 및 그 주변 농경지와 인접한 하상퇴적물들을 대상으로 실시하였다. 광미더미에서의 시료채취는 수평적으로 50미터 간격으로 22개지점에서 격자상으로 채취하였고 수직적으로 50미터 간격으로 15개 지점에서 층준이 변할 때마다 30~300 cm 심도별로 hand auger에 의한 시추작업으로 129개의 시료를 선광광미더미에서 채취하였다. 광산폐수, 폐석더미 및 선광광미더미에서 표층수나 지하수의 작용에 의해 중금속 원소들이 분산되었을 것으로 보이는 하류지역 농경지에서 표층의 경작토 (0~30 cm) 토양들을 채취하여 시료의 대표성을 높이기 위해 여러 군데의 부분시료를 정방형 격자 (격자점간 간격 1 m) 의 각 격자점에서 채취하여 총 1 kg 이상의 하나의 복합시료를 확보하여 총 40개의 시료를 채취하였다.

하상퇴적물은 광산이 위치하고 있는 지역의 수계에서 부삽을 이용하여 상층수가 존재하는 곳에서 0~30 cm의 표층 퇴적물을 채취하였고, 시료를 채취하는 위치의 대표성을 높이기 위하여 한 지점에서 50 cm 간격으로 여러 곳의 부분시료를 취하여 하나의 시료로 만들어 총 17개를 채취하였다.

채취한 토양시료는 실내에서 완전히 건조시킨 후 알루미나제품의 유발과 막자를 이용하여 멩쳐진 부분을 분

리하고, -10 mesh입도로 체질하였다. 이 시료들을 축분하고 다시 체질하여 -80 mesh입도로 분리하였다. -10 mesh는 보통 토양에서 규정되는 입도로서 토양의 pH측정과 작열감량 (L.O.I)의 측정에 이용되었으며, 토양의 pH값 변화를 알아보기위해 Rump and Krist (1988)가 제시한 방법에 따라 -10 mesh 입도의 토양시료 10 g과 25 ml의 2차 증류수를 섞어 1시간 동안 수평 항온 진탕기에서 교란시켜 평행반응을 유도한 후 30분간 방치한 다음 pH 4, 7의 값을 갖는 표준용액에 보정한 corning pH meter 220으로 측정하였다. 전체186개의 시료중 122개의 시료를 캐나다의 ACTLABS에 의뢰하여 ICP와 INAA를 이용하여 Ag, Au, As, Bi, Cd, Cu, Ga, Hg, Mo, Pb, Sb, Se, Te Tl, Zn원소들을 분석하였다.

결과 및 고찰

토양의 pH 및 작열감량 (L.O.I)측정

특정한 pH의 범위에서 원소들은 안정한 광물상으로 존재하거나 활발한 이온상태로 존재하게 된다. 대부분의 금속원소들은 산화환경에서는 이동성이 크고, 알카리성이나 환원환경에서는 이동성이 제한되어 광물상태로 침전되거나 음이온들과 착물을 형성하여 침전시킨다 (Fortescue, 1980). 또한 pH가 증가할수록 금속원소들은 토양중의 점토광물질이나 유기물에 흡착이 잘

Table 1. Chemical composition, L.O.I (wt%), and pH value in the study area.

Elements	Sludge Soils				Paddy Soils				Stream Sediments			
	Mean	St.D	Max.	Min.	Mean	St.D.	Max.	Min.	Mean	St. D	Max.	Min.
Ag(ppb)	16719.34	23492.45	944.00	179752.00	4528.45	5039.68	618.00	20130.00	19259.35	21149.83	694.00	68922.00
Au(ppb)	326.09	422.18	19.10	2765.00	200.63	258.49	24.30	1139.00	357.81	433.56	26.10	1526.00
As(ppm)	19.34	21.30	2.50	126.00	10.87	4.00	8.00	25.80	29.57	27.66	5.30	104.00
Bi(ppm)	0.27	0.44	0.09	3.29	0.36	0.04	0.30	0.43	0.44	0.22	0.24	1.09
Cd(ppm)	4.63	5.14	0.86	37.40	2.85	1.02	1.41	6.02	15.05	21.66	0.58	91.10
Cu(ppm)	41.57	68.40	5.52	414.00	27.49	17.20	11.10	75.40	110.40	143.65	8.75	532.00
Ga(ppm)	0.84	0.66	0.10	3.40	3.47	0.63	2.50	5.10	2.35	0.91	1.20	4.80
Hg(ppm)	0.25	0.50	0.03	3.15	0.26	0.24	0.06	1.02	0.33	0.35	0.03	1.13
Mo(ppm)	9.96	11.36	0.84	78.70	1.74	1.60	0.74	7.57	4.18	4.22	0.77	15.90
Pb(ppm)	450.34	604.31	46.00	2490.00	162.50	135.35	66.10	666.00	773.90	833.88	82.30	2483.00
Sb(ppm)	0.94	0.67	-0.05	4.51	0.56	0.17	0.39	1.11	0.87	0.53	0.34	2.01
Se(ppm)	-0.12	0.22	-0.30	0.70	-0.10	0.21	-0.20	0.30	0.02	0.28	-0.20	0.40
Te(ppm)	0.11	0.22	-0.05	2.07	0.10	0.02	0.07	0.14	0.03	0.07	-0.05	0.13
Tl(ppm)	-0.42	0.30	-0.60	0.80	-0.50	0.00	-0.50	-0.50	-0.50	0.00	-0.50	-0.50
Zn(ppm)	529.54	545.30	103.00	3030.00	295.15	91.22	171.00	474.00	1501.05	1645.62	72.90	6481.00
L.O.I	0.15	0.16	0.02	0.68	0.87	0.18	0.60	1.23	0.59	0.34	0.25	1.60
pH	5.73	1.25	2.04	7.20	5.23	0.23	4.77	5.55	4.68	0.48	3.68	5.60

St.D: Standard Deviation, Max.: Maximum, Min.: Minimum,

되며 식물로 이동하는 비율도 줄어드나 산성일때는 이동도가 증가하여 식물로 이동하는 가능성이 커진다. 일반적으로 이동도가 좋은 원소는 암석 주변의 토양에 넓게 분산되며, 이동성이 불량인 원소는 암석 주변의 토양에 정체되거나 이차산화물에 흡착되어 부분적으로 이동된다 (Rose *et al.*, 1979). 토양은 보통 4~8.5의 pH값을 가지며 식물의 성장에는 일반토양에서는 6.5, 이탄질 토양에서는 5.5로 나타난다 (Alloway, 1990).

본 연구지역인 덕읍광산 주변의 선광광미터미에서 85개, 논토양에서 40개, 17개의 하상퇴적물 시료에 대한 pH측정 결과와 각 토양별 평균 및 범위를 Table 1에 나타내었다.

전체적으로 pH평균값을 보면 5.21이며, 2.04~7.2로 넓은 범위를 보여주고 있다. 지역적으로 보면 선광광미토양의 경우 평균값은 5.73이고 2.04~7.2의 범위를 보이고 있다. 그리고 pH2-4의 범위인 강산성을 보여주는 지역은 표층시료에 대한 측정 결과로서 중금속이온들이 이온상태로 존재하여 이동성이 커서 식물로의 이동이 용이한 반면에 대부분의 sludge토양에서는 중성에 가까운 값을 보여 중금속이온들이 광물상태로 침전되거나 음이온들과 착물을 형성하여 침전되어 있을 것

으로 사료된다. 논토양의 평균값은 5.23이며, 4.77~5.55의 범위를 보여 약산성임을 보여주고 있으며 Fig. 2(A)에서 보여주는 것처럼 농경지토양의 경우에는 선광광미토양이 있는 곳에서 멀어질수록 pH값이 높음을 알 수 있다. 하상퇴적물에서는 4.68의 평균값을 가지며, 3.68~5.6의 범위를 보이며 Fig. 2(B)에서 보는 바와 같이 거의 유사한 값들을 보여주고 있으며, 각 토양별로 pH와 중금속원소들과의 상관관계는 Fig. 3에 도시하였다. 선광광미토양의 경우 As, Cd, Cu, Pb 및 Zn과 pH의 결정계수 (r^2)는 0.17~0.58의 범위를 보여 원소들이 pH의 값에 영향을 받지 않는 것으로 보인다. 각 토양에서 Cd과 Zn은 비슷한 결정계수 값을 보이고 있다 (Fig. 3).

토양의 유기물함량은 토양에 따라 그 차이가 심하다. 토양생성작용에 따라 큰 차이가 생기는 것은 자연적인 현상이며 농작물의 재배 방식에 따라서도 토양의 유기물함량은 크게 변화한다. 일반적으로 토양의 유기물함량은 3-8%정도가 식물의 성장에 가장 적당하며 농작물의 잔재나 가축의 폐기물을 이용해서 토양의 유기물함량을 증진시켜 주는 것이 바람직하다. 토양 중의 유기물함량은 경작지에서는 10%이내, 일반토양에서는 5%이내이며 대부분 상부토양에 국한되어 있으며 심부로 갈수록 그 양은 줄어들고 기후, 토양의 무기성분, 지형 등에 의해 많은 영향을 받는다 (Alloway, 1990).

토양내에 유기물함량이 많아지면 중금속의 흡착으로 인한 중금속원소들의 이동도를 감소시켜 식물로 이동되는 중금속원소 함량을 감소시켜 농작물에서의 중금속 함량 (Cd, Cu, Zn)을 감소시키는 결과를 가져온다 (Haldar and Mandal, 1979).

작열감량은 전기로의 가열온도와 가열시간에 따라 차이가 생겨 가열온도가 450°C이상이 되면 점토수의 손실이 일어나므로 정확한 측정은 어렵다. 그래서 본 실험에서는 Ball (1964)이 제안한 방법에 따라 실시하였다. -10 mesh 토양시료 10 g을 사기도가니에 넣고 105°C에서 건조시킨 후 이 시료를 다시 24시간 동안 전기로에서 약375°C로 가열한 후, 데시케이터에서 냉각시킨 후 감량을 측정하였다. L.O.I.측정은 건조기에서 건조시켜 측정된 무게와 전기로에서 가열 후 냉각해서 측정된 무게를 아래의 식에 대입하여 계산해낸 값이다.

$$L.O.I. (\%) = \frac{(\text{Mass of oven-dried soil}) - (\text{Mass of ignited soil})}{(\text{Mass of oven-dried soil})} \times 100$$

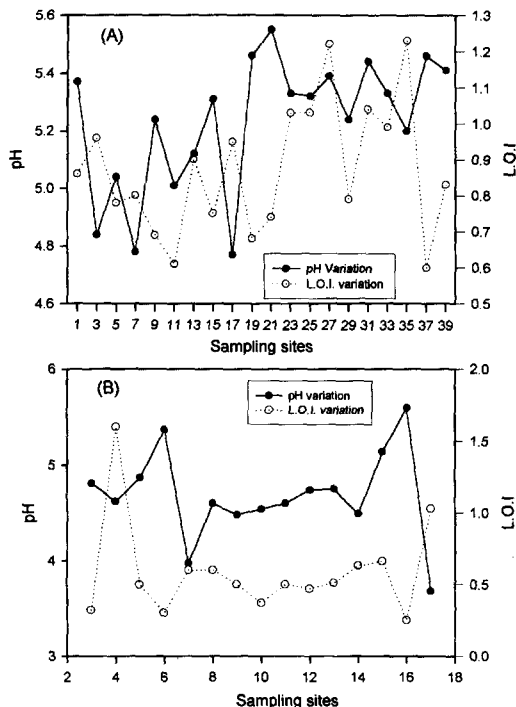


Fig. 2. pH and L.O.I. value of soils collected the paddy soils(A) and stream sediments(B) of the Dukum area.

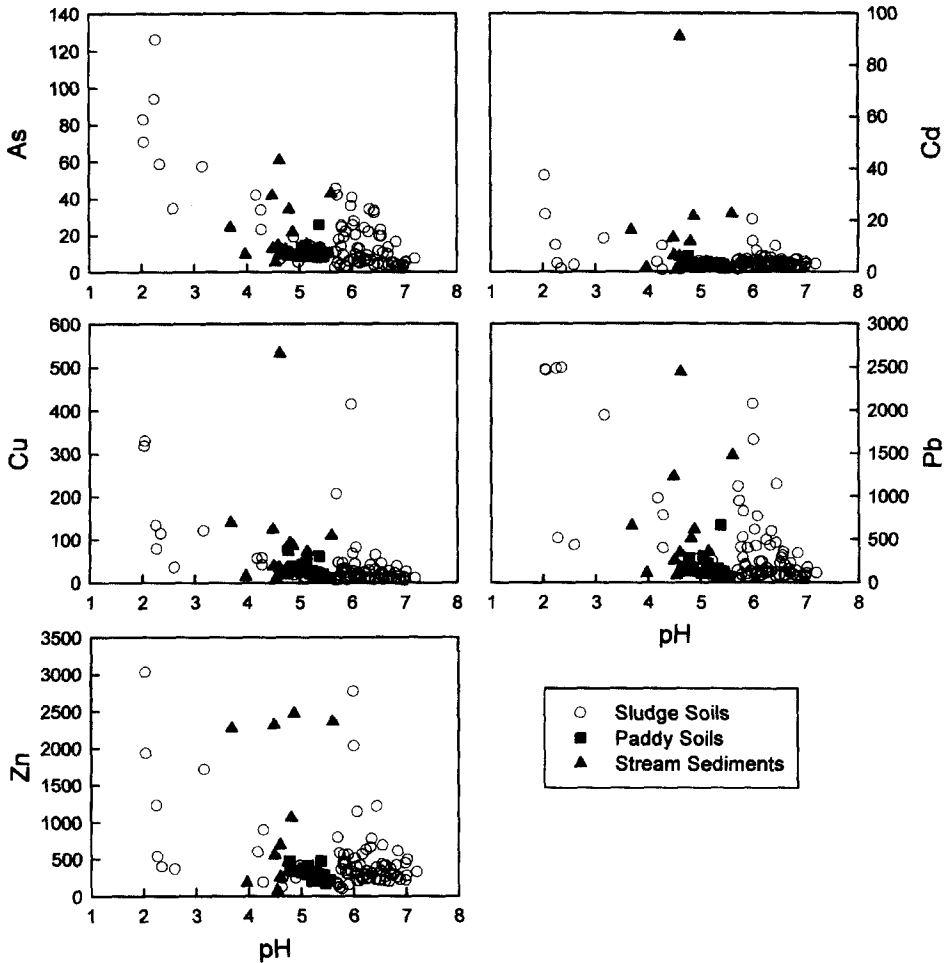


Fig. 3. The relationship between pH and heavy metal concentration (ppm) of sludge soils, paddy soils and stream sediments collected from the Dukum area.

본 연구지역에 대한 작열감량을 측정된 결과, 각 토양에서의 평균값은 Table 1에 그리고 각 범위에 대해서는 Fig. 2에 나타나 있다.

연구지역의 선광광미토양에서의 작열감량은 평균 0.15%(0.01~0.68%)으로 논토양의 평균값인 0.87%(0.6~1.23%)와 하상퇴적물에서의 0.59%(0.25~1.6%)의 값보다도 대단히 낮은 값을 보여주고 있다. 연구지역의 각 토양별 원소들과 작열감량과의 상관관계는 Fig. 4에서 보여주며 선광광미토양에서 As, Cd, Cu, Pb, Zn의 결정계수는 0.21~0.34의 범위를 보이며, As가 결정계수 0.34로 가장 높은 값을 나타내며, 농경지토양에서는 0.01~5.52로 나타나고, 하상퇴적물에서는 0.24~0.70의 범위를 보여 모두 유기물함량에는 크게 영향을 받지 않는 것으로 보인다. 그리고 각각의 토양

에서의 pH와 L.O.I.의 상관관계를 Fig. 5에 도시하였으며, 거의 음의 상관관계를 보여줌을 알 수 있다. 이들 각 토양의 결정계수는 0.00032~0.5의 범위를 보여주고 있다.

수평적 분포 특성

As는 오염된 토양, 물 그리고 공기를 통하여 음식에 농집할 수 있는 미량원소이다. 지역에 따라 농도의 차이는 있으나 모든 물 속에 존재하는 중금속이다. As는 Mo, U, Bi, O, F 및 Au와 지구화학적 수반관계가 좋으며 특히 Au광상의 대표적인 지시원소로 이용되고, 점토물질, 수산화물 및 유기물에 강하게 흡착되는 특성을 가지고 있으며, 산성환경에서 철산화물에 의해 흡

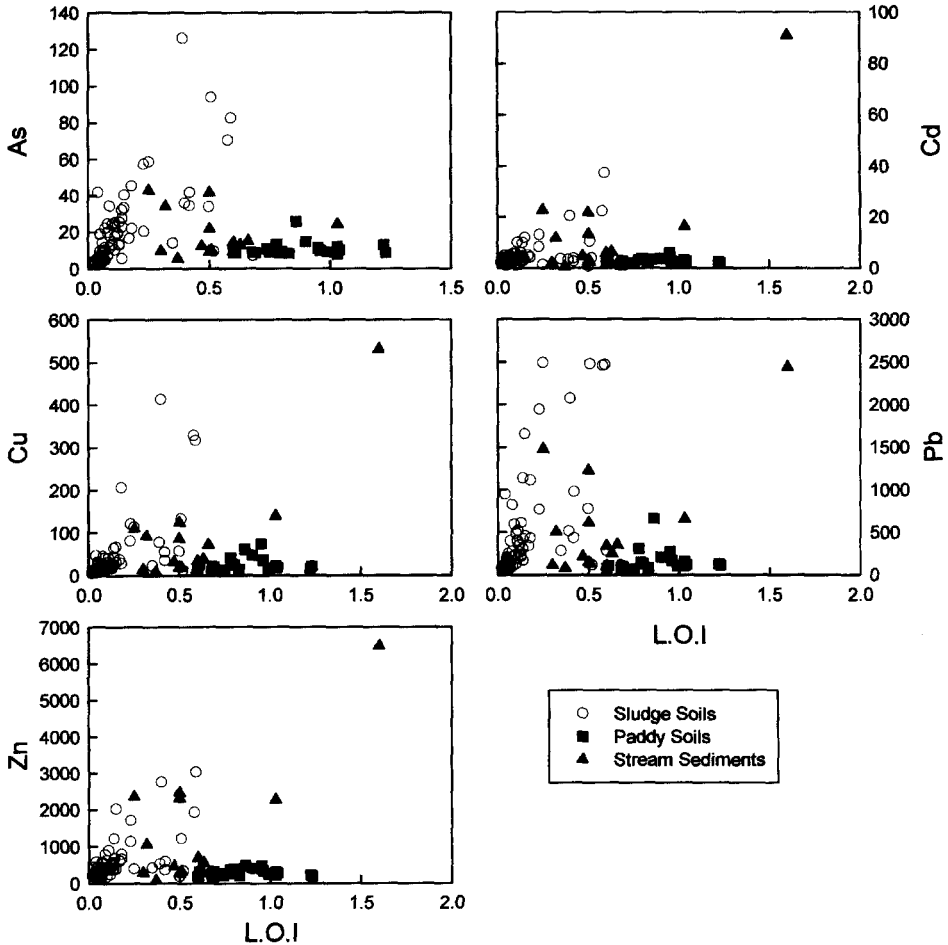


Fig. 4. The relationship between L.O.I and heavy metal concentration of sludge soils, paddy soils and stream sediments collected from Dukum area.

착되어 이동성이 적으나, 환원환경이나 철성분이 없는 환경하에서는 이동도가 증가된다. 본 연구지역에서 As 분포를 보면 농경지토양에서 8.0~25.8 ppm으로 Levison (1974)과 Rose *et al* (1979)이 제시한 토양 중 평균함량보다 3에서 7배 이상 높은 값을 보여주고 있다 (Fig. 6). 하상퇴적물의 경우엔 5.3~104 ppm의 범위를 보이며, 선광광미 토양의 경우 2.5~82.6 ppm으로 표층시료의 분석값들 중 2.5~7.5 ppm미만의 값을 보이는 시료들을 감안한다면 다년간 용탈작용에 의한 것으로 볼 수 있으며, 일부 아주 높은 수치를 보이는 것들은 골재채취작업을 하면서 점토층을 한쪽으로 제쳐 쌓아둔 부분들이 있기 때문이다.

Cd의 지구화학적 특징으로는 Zn ore, Pb-Zn, Pb-Cu-Zn ore에 수반관계가 좋으며 특히 1:100에서

1:1000 비율로 필수 불가결하게 Zn과 수반하며 (Bowen, 1979), 풍화과정에서 쉽게 용해되어 분산되고, 암석에서 토양으로 통과되면서 Zn/Cd의 비율이 감소하게 되어 Cd는 상대적으로 암석보다 토양에서 부화되는 경향을 보인다 (홍영국등, 1993). 본 연구지역 농경지토양에서 Cd함량은 1.41~6.02 ppm (평균함량 2.85 ppm)으로 전반적으로 높은 함량을 보이며, 하상퇴적물은 0.58~91.9 ppm (평균함량 15.05 ppm)으로 대부분 아주높은 함량을 보인다. 그리고 선광광미 토양의 경우 0.86~37.4 ppm (평균함량 5.14 ppm)으로 아주 높은 함량을 보여 (Fig. 6), 전효택 최완주 등 (1992)의 온산지역 정원토양 최고치인 22.7 ppm보다 더 높은 값을 보여주고 있다.

토양에 있어 Cu는 보통 1차광물과 2차광물의 결정

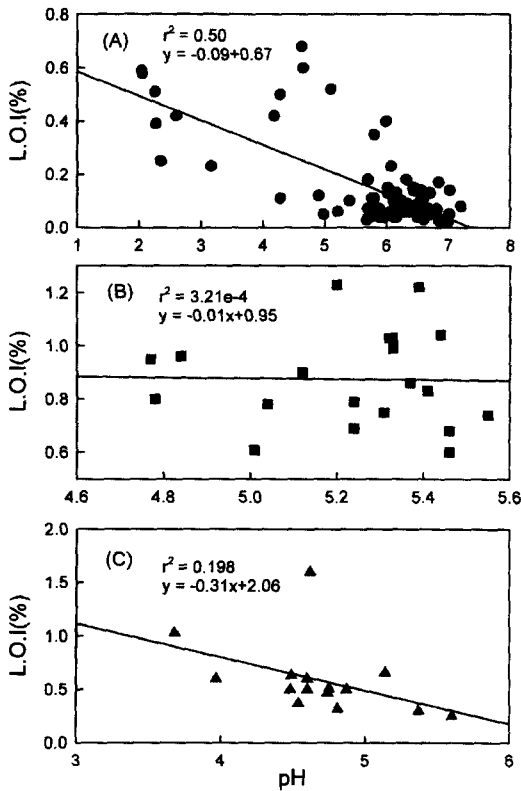


Fig. 5. The relationship between pH and L.O.I. of soils collected from the sludges soils(A), paddy soils(B), and stream sediments(C) in the study area.

격자에 결합되어 있으며 유기화합물의 형태로도 존재한다. pH값에 따른 Cu용해도는 Cu의 화학종류에 따라 다양한 경향을 보이며 토양의 pH가 8이상일때에는 Cu의 용해도가 급격히 떨어진다 (Alina *et al.*, 1984).

연구지역의 농경지 토양은 11.1~75.4 ppm (평균함량 27.49 ppm)이며, 하상퇴적물의 경우 8.75~532 ppm (평균함량 110.4 ppm)으로 전반적으로 낮은값을 보이며, 선광광미토양의 경우에는 7.15~3504 ppm (평균함량 41.57 ppm)으로 몇 개의 시료에서 높은 값을 보인다.

지구화학적으로 K, Ba, Sr, Ca등과 치환이 가능하며, 가장 낮은 이동도를 가지고 있는 중금속 원소중의 하나이며 주로 점토광물, Mn산화물, Fe-Al수산화물 및 유기물질에 수반되어 나타나는 특성을 갖는 Pb는 최근에 광산활동, 제련소, 자동차 배기가스 등에 의해 Pb가 심각한 오염원으로 대두되고 있다. Pb의 경우, 2~200 ppm (Levinson, 1974), 17 ppm (Rose *et al.*, 1979), 1~88 ppm (Kabota-Pendias and Pendias, 1984) 19.27

ppm (서윤수 등, 1985)등이 토양중 평균함량으로 보고되어 있다. 농경지 토양의 경우 Pb함량은 71.5~666 ppm (평균함량 162.5 ppm)으로 몇 개의 시료에서만, 일반적으로 오염되었다고 판단되는 100 ppm보다도 높은 함량을 보여준다. 하상퇴적물은 Pb 82.3~2441 ppm (평균함량 773.9 ppm)으로 대부분 아주 높은함량을 보여주며, 선광광미토양도 46~2480 ppm (평균함량 450.34 ppm)으로 아주 높은 함량을 보인다 (Fig. 6).

Zn의 경우 연구지역의 농경지토양은 Zn함량이 171~474 ppm (평균함량 295.15 ppm)으로 대부분이 Kabotan-Pendias and Pendias (1984)의 오염기준치에 비해 2~4배 높은 값을 보인다. 하상퇴적물은 72.9~2829 ppm (평균함량 1501.05 ppm)으로 대부분이 아주 높은값을 보이며, 선광광미토양도 126~2137 ppm (평균함량 529.54 ppm)으로 아주 높은 값을 보인다.

Hg의 경우 0.01 ppm (Brooks, 1983), 0.09 ppm (Sposito, 1989)등이 토양의 평균함량으로 보고되어 있으며, Tumbling 등 (1995)은 금광산의 폐석터미지역에서 Hg의 함량이 특히 높게 나타나는 이유를 Hg가 아말감처리에 의하여 금제련에 사용되기 때문이라 하였다.

연구지역의 농경지토양은 Hg함량이 0.06~1.02 ppm으로 대부분이 Kabota-Pendias and Pendias (1984)의 오염기준치에 비해 높은 값을 보인다. 하상퇴적물은 0.03~1.13 ppm으로 대부분이 아주 높은값을 보이며, 선광광미토양도 0.03~3.15 ppm으로 아주 높은 값을 보인다.

수직분포특성

앞서 언급한것처럼 덕음광산은 개발된지 50여년이 지났고, 휴광된지도 8년이 지나, 특히 7~9 m높이로 쌓여있는 선광광미더미 (2000,000 m³)는 성숙된 토양 단면이 발달되어 있음을 골재 (모래)채취를 위해 포크 레인으로 선광광미더미의 한쪽 부분을 파내고있는 단면에서 관찰할 수 있다. 즉, 다년간 강수에 의해 용탈 작용이 일어난 A층은 연한회색을 띠고, 그 아래 점토의 함량이 많은 진한회색 내지 청록색을 띠는 B층 (포크레인 작업이 진행중인곳에서는 물로 포화되어 있음이 관찰됨)이 1~1.5 m두께로 발달되어 있으며, 그 하부로 점토량이 적고 연한회색내지 연한갈색을 띠는 모래층이 발달되어 있음을 볼 수 있다. 이렇게 덕음광산의 요철이 있는 선광광미 토양층의 표면으로부터 2~4 m하부에 점토의 양이 다른 토양층중에 비해 현저히 많고 물로 포화되어 있는 B층이 만들어진 원인은, 성숙

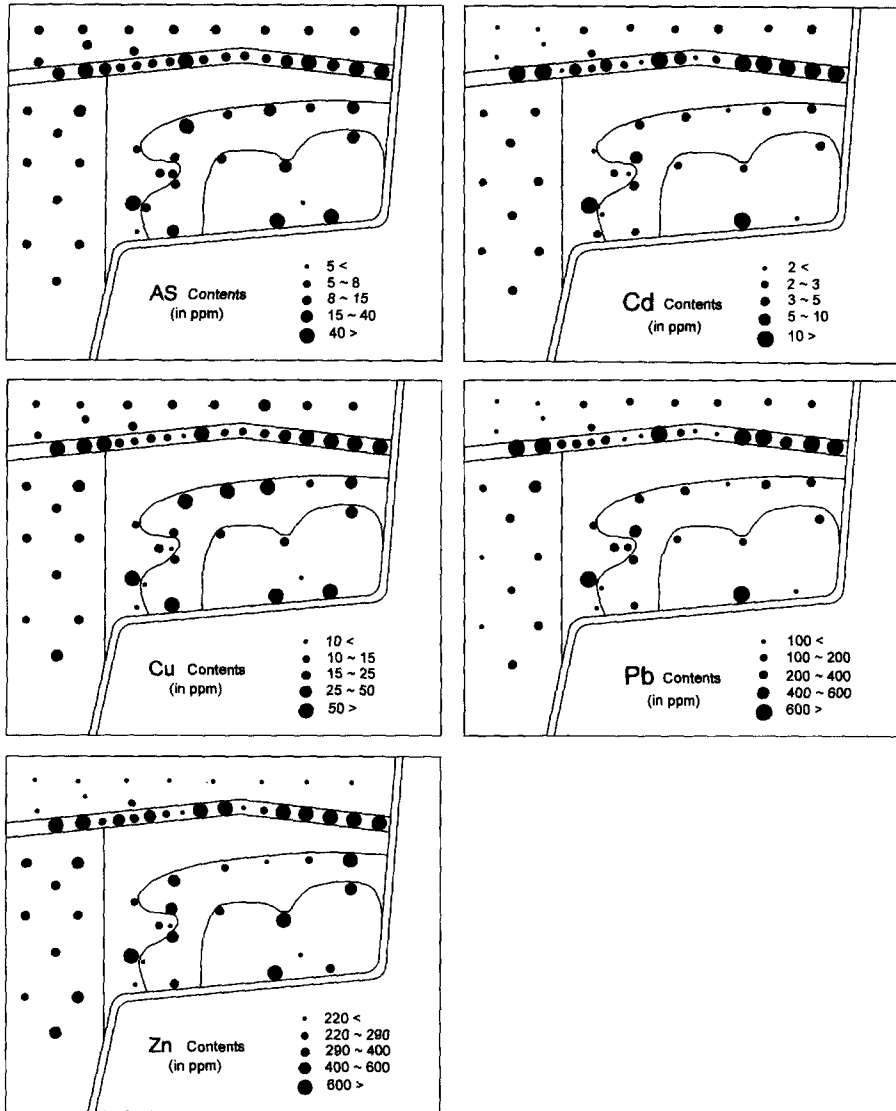


Fig. 6. Horizontal distribution map of heavy metals of sludge soils, paddy soils, and stream sediments in the study area.

된 토양단면이 형성되는 일반적인 경우와 마찬가지로 강수와 지하수의 흐름에 영향을 받아 주 지하수면의 상부면을 따라 점토광물이 집적되어지면서 이루어진 것이다. 이와같이 수년동안 방치된 선광광미 퇴적층은 성숙된 토양단면을 이루게 되고, 중금속원소들의 분산양상도 여기에 영향을 받은 것으로 생각하여, 중금속원소들의 수직분포특성을 파악하였다.

시료번호 10, 11, 12, 18, 19, 20, 22번은 골재 (모래)채취를 위해 선광광미더미의 서쪽부분을 포크레인으로 파내고 있는 신선한 토양단면에서 입도의 크기와

색깔등의 변화따라 심도에 따른 층준별로 시료를 채취한 것이며, 시료번호 3, 6, 7, 8, 9, 13, 14, 15, 16, 17번은 오우거 시추작업에 의해 층준에 따른 심도별로 시료를 채취한 것이다. 채취된 시료129개중 유사하다고 판단된 시료들을 제외하고 85개 시료를 분석한 결과는 Table 1과 같다. 분석된 시료중 오래전의 부분적인 골재채취작업으로 일부 토양층이 교란된 선광광미더미 동쪽부분의 토양층준 시료분석결과를 제외하고, 포크레인 작업으로 신선한 단면이 노출된 시료번호 3, 5, 6, 10, 11, 12, 번과 교란되지않은 시료번호 13번을

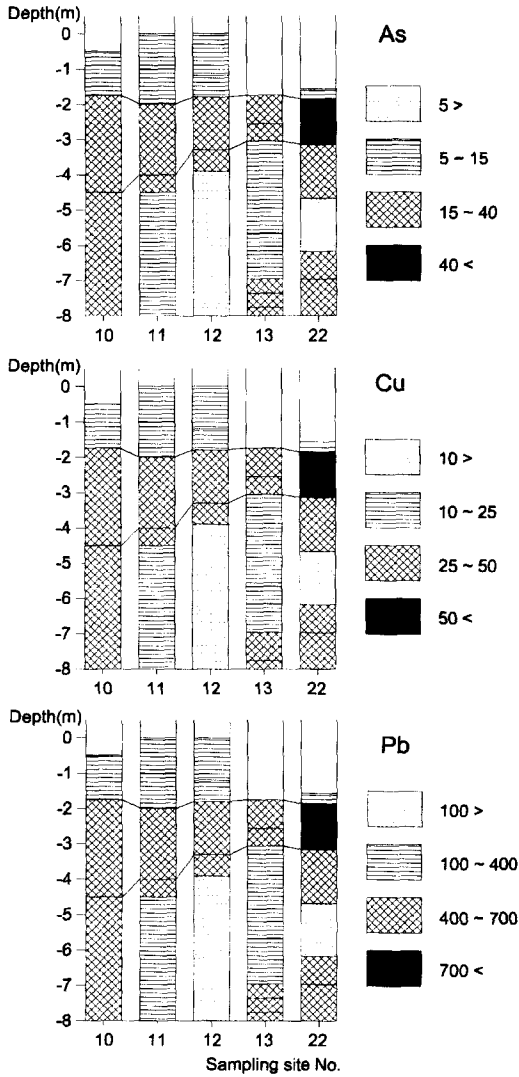


Fig. 7. Vertical distribution column of heavy metals of sluges soils, paddy soils, ans stream sediments in the study area.

오우거에 의한 시료를 채취한 As, Cu, Pb, 원소의 심도별 함량분포특성은 Fig. 7 과 같다.

As는 A층이 5~15 ppm범위인데 비해, 점토광물이 집적된 B층에서는 15~40 ppm범위를 보이며, Cu는 A층에서 10 ppm 이하이고, B층에서는 25~50 ppm범위에 농집되어 있다. 그리고 Pb의 경우도 B층에 400~700 ppm으로 농집되어 있으므로, 특히 폐광산의 선광광미퇴적층이 수년 또는 수십년이 지나 성숙된 토양단면을 형성하였을때에는, 유독유해성 중금속원소들이 점토광물에 농집되어있는 B층을 중점적으로 검토하

여, 그 분산에 대한 방지대책을 세워야 할 것이다.

결론

본 연구에서는 현재 휴광상태인 덕음광산지역에 지난 수십년동안 농경지 인근에 방치되어 환경오염의 근원이 되고있는 선광광미더미와 그에 인접한 하천의 하상퇴적물 및 농경지토양에서의 중금속오염특성을 표층시료 (0~30 cm)의 분석에 의한 수평적인 분산특성과 오우거 시추작업에 의해 각 층별로 심도에 따라 채취한 시료의 분석에 의한 수직적인 분산 특성을 파악하였다.

1. 표층시료에서 As의 경우, 농경지토양은 8.0~25.8 ppm, 하상퇴적물은 5.3~104 ppm, 선광광미토양은 2.5~104 ppm, 선광광미토양은 2.5~82.6 ppm으로 농경지토양과 하상퇴적물에서는 토양평균함량 7.5 ppm 보다 대부분 아주 높은 값을 보이나, 선광광미토양에서는 2.5~7.5 ppm로 값이 낮아 다년간의 강수에 의한 용탈작용에 의한 것으로 사료되며, Cd의 경우, 농경지토양은 1.41~6.02 ppm, 하상퇴적물은 0.58~91.9 ppm, 선광광미토양은 0.86~37.4 ppm으로 대부분이 토양평균함량 1 ppm에 비해 아주 높은 값을 보인다. 그리고 Cu의 경우, 농경지토양은 11.1~75.4 ppm, 하상퇴적물은 8.75~532 ppm, 선광광미토양은 7.15~3504 ppm으로 전반적으로 낮은값을 보이며, Pb의 경우, 농경지토양은 71.5~666 ppm, 하상퇴적물은 82.3~2441 ppm, 선광광미토양은 46~2480 ppm으로, 일반적으로 오염되었다고 판단하는 100 ppm에 비해, 대부분이 아주 높은값을 보인다.

2. 덕음광산 주변에 오염의 근원이 되는 선광광미퇴적층은 휴광후 10여년이 지나는 동안에 토양단면이 잘 형성되고 있음을 볼수 있었고, 7~9 m 높이로 쌓여있는 선광광미더미 (200, 300 m³)는 다년간의 강수에 의한 용탈작용이 일어나 담회색의 A층과 그 아래로 점토의 함량이 많고 물로 포화되어있는 진한 회색내지 담청록색의 B층 (1~1.5 m 두께), 그리고 그 아래로 점토량이 적고, 담황색내지 담갈색을 띠는 모래층이 발달되어 있다. As는 A층에서 2~10 ppm범위인데 비해, 점토광물이 집적된 B층에서는 15~126 ppm범위로, 7~12배정도 B층에 농집되어 있다. Cd는 A층에서 1~

6ppm범위인데 비해 B층에서는 5~37 ppm범위로, 역시 5~6배정도 B층에 농집되어 있었다. 그 외에 Cu, Pb, Zn의 경우에도 마찬가지로 A층 보다는 B층에 5~100배 정도까지 B층에 중금속원소들이 훨씬 많이 농집되어 있다.

특히 일반 폐광산의 선광광미퇴적층은 수년 또는 수십년이 지나 성숙된 토양단면을 형성하였을 때에는 유독유해성 중금속원소들이 점토광물에 농집되어있는 B층을 중점적으로 검토하여, 그 분산에 대한 방지대책을 세워야 할 것이다. 현재 환경부의 "토양측정망운영지침"에 따르면, 토양측정망 관리시에, 토양시료채취를 0~30 cm범위의 표층에서 채취하므로 해서, 덕음광산의 선광광미퇴적층과 같이 성숙된 토양단면의 형성에 의한 중금속원소의 수직분포가 크게 다르고, 이들이 지하수에 의해 농경지같은 주변으로 쉽게 확산될수 있다면, 이를 면밀히 검토해야 하겠다.

사 사

본 연구는 1997년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었으며, 이에 감사드린다.

참고문헌

- 김경웅, 이현구 (1996) 대전지역 하천수 및 하상퇴적물에서의 중금속오염. 한국자원공학회지, v.33, p.266-273.
- 서윤수 (1985) 토양 및 농산물오염. 한국환경농학회지, 4, 2, p.126-138.
- 이윤중, 권영일, 이인기 (1971) 한국지질도 망운도폭. 과학기술처, 국립지질조사서, p.25.
- 윤정환, 전용원, 전효택 (1988) 한국서남부의 덕음과 전주 일금은광상에 대한 암석지구화학적 연구. 광산지질, v. 21, n.4, p.389-400.
- 윤정환, 전용원 (1989) 국내 일부 금은광상의 광화작용에 관한 연구. 한국자원공학회지, 26, p.313-327.
- 정명채 (1996) 달성 Cu-W광산 주변 수계의 하상퇴적물과 자연수의 Cd, Cu, Pb 및 Zn오염. 자원환경지질, 제29권 제3호, p.305-313.
- 전효택, 최완주 (1992) 도시 및 산업환경 분진 및 토양층의 중금속 원소들의 분산에 관한 지구화학적 연구. 한국자원공학회지, 25, 3, p.317-336.
- 홍영국, 박중권, 전효택, 문희정, 김성재, 지세정, 성익환, 김종권, 박희열 (1993) 지질환경에서 유해원소들의 지구화학적 분산 연구 (I). 과학기술처.
- Kabata-Pendias, A. and Pendias, H. (1984) Trace Elements in Soil and Plants, CRC Press, p.315.
- Alloway, B.J. (1990) Soil Processes and the Behaviour of Metals in Heavy Metals in Soil, ed. Alloway, B. J. Blackie and Son Ltd, p.7-28.
- Bowen, H.J.M. (1979) Environmental Chemistry of the Elements, John Wiley and Sons Inc., p.280.
- Boyle, R.W. (1979) The Geochemistry of gold and its deposits, Geological survey Bulletin, p.280.
- Chon, D.J., Chon, H.T. and Jhon, Y.W. (1995) Heavy Metal Contamination in Soils, Stream Sediments and Stream Waters in the Vicinity of the Shinyemi Pb-Zn-Fe and the Gedo Cu-Fe mines. Jour. Korea Inst. Mining Geol., v.32, p.409-423.
- Fortescue, J.A.C.F. Environmental geochemistry. Springer-Verlag, New York, 387p.
- Haldar, M. and Mandal, L.N. (1979) Influence of soil moisture regimes and organic matter application on the extractable Zn and Cu content in rice soil. Plant and Soil, v. 53, p.203-213 (1979).
- Levinson, A.A. (1974) Introduction to Exploration Geochemistry. Applied Publishing Ltd., p.612.
- Rose, A.W., Hawkes, H.E. and Webb, J.S. (1979) Geochemistry in mineral exploration. Academic Press, London, p.657.
- Rump, H.H and Krist, H. (1988) Laboratory Manual for the Examination of water, Waste Water, and Soil. VCH Verlagsgesellschaft, p.190
- Sposito, G. (1989) The Chemistry of Soils. Oxford University Press, p.277.
- Thornton, I. (1983) Applied Environmental Geochemistry. Academic Press, London
- Tumpling, W. von, Wilken, R.-D, and Einax (1995) Mercury contamination in the northern Pantanal region Mato Grosso, Brazil. Journal of Geochemical Exploration, v.52, p.127-134.

2000년 2월 28일 원고접수, 2000년 4월 14일 게재승인.