

도곡(Au-Ag-Cu)광산 주변지역의 중금속 원소들의 환경오염특성 및 생체흡수도 평가

이성은¹ · 이진수^{1*} · 전효택¹

¹서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부

Environmental Contamination and Bioavailability Assessment of Heavy Metals in the Vicinity of the Dogok Au-Ag-Cu Mine

Sung-Eun Lee¹, Jin-soo Lee^{1*} and Hyo-Taek Chon¹

¹School of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

In order to investigate the contamination level and seasonal variation of heavy metals and evaluate the bioavailability of toxic elements, environmental geochemical survey was undertaken at the Dogok Au-Ag-Cu mine area. The main pollution sources in the area were suggested as tailings, mine waste materials and mine water. Elevated levels of 140 mg/kg As, 107 mg/kg Cd, 3017 mg/kg Cu, 12926 mg/kg Pb, 9094 mg/kg Zn(before rainy season) were found in mine tailings. Concentrations of heavy metals in farmland soils exceeded normal level in nature soil (Bowen, 1979). The highest level of heavy metals was found in water samples near the mine tailing dumps regarded as a main pollution source of toxic elements in the area. These concentrations decreased to downstream due to the effect of dilution. From the results of sequential extraction analyses for tailings and soils, non-residual forms of heavy metals were found, which indicate the contamination to be progressing by continuing weathering and oxidation. Cadmium and Zn would be of the highest mobility in all samples. The bioavailability of Cd, Cu, Zn and As using SBET analysis from paddy soils was 53.3%, 46.5%, 41.0% and 37.0%, respectively. The farmland soil sample(S3) showed the highest total concentration and bioavailability of heavy metals.

Key words : Dogok mine, As, Heavy metals, Sequential extraction, SBET

도곡광산 주변지역 중금속 원소들의 오염 특성을 알아보고, 이들 원소들의 생체흡수도를 평가하기 위해서 본 연구를 수행하였다. 연구 대상 지역의 주요염원은 광미 및 폐석더미 그리고 갭내수 등으로 추정된다. 광미 내에는 As이 140 mg/kg, Cd이 107 mg/kg, Cu가 3017 mg/kg, Pb가 12926 mg/kg, Zn는 9094 mg/kg(우기 전 시료)로 높은 함량을 나타내고 있다. 밭토양 내의 중금속 원소들 함량은 자연토양 내의 평균함량(Bowen, 1979)보다 높게 나타났으나, 광미적치장의 광미에 비해서 낮은 함량을 나타낸다. 수계내 중금속 함량은 독성 원소들의 주요염원으로 생각되는 본 갭의 광미적치장 주변 하천수 시료에서 가장 높은 수준을 나타내었고, 하류로 가면서 희석 효과에 의해서 그 함량이 점차 감소하는 경향을 나타내고 있다. 광미와 토양을 대상으로 연속추출분석을 한 결과, 비잔류상 형태의 존재비율이 높게 나타났는데 이는 지속적인 풍화와 산화에 의한 오염을 지시한다. 그리고 Cd과 Zn는 대상 지역 대부분에서 높은 이동도를 나타내고 있다. 밭토양을 대상으로 SBET 분석에 의한 중금속 원소들의 생체흡수도 평가 결과, Cd(53.3%), Cu(46.5%), Zn(41.0%), As(37.0%)로 나타났다. 밭토양(S3) 시료는 중금속 원소들의 총 함량과 생체흡수도 모두 가장 높은 함량을 나타내었다.

주요어 : 도곡광산, 비소, 중금속 원소, 연속추출분석, SBET

*Corresponding author: jsoolee@snu.ac.kr

1. 서 론

대부분의 휴·폐광산 지역의 광산폐기물들(폐석, 광미, 광산폐수 등)은 적절한 오염방지시설이 갖추어지지 않은 채 광산주변에 그대로 방치되어 있어 집중강우나 강풍에 의해 하부로 분산되어 광산하부의 농경지와 수계의 유독성 중금속오염을 계속적으로 일으키게 된다(김상현과 전효택, 1993; 민정식 등, 1997; 안주성, 2000). 이러한 휴·폐금속광산 지역의 중금속 오염은 진행초기에는 자각하기 어려우나, 오염이 장기적으로 진행되었을 때 그 정화 및 복원에는 많은 노력과 막대한 경비가 소요된다. 우리나라는 1990년대 후반부터 광산주변 지역의 환경오염에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔지만, 대부분이 오염 실태 파악에 국한되어 있으며, 지역주민들에 대한 유독성 원소들의 노출로 인한 생체흡수도 평가 등의 연구는 미비한 실정이다. 현재 우리나라의 휴·폐금속광산의 수는 약 900여개로 집계되고 있다. 휴·폐광의 원인을 규명하여 보면 광량의 소진, 경영의 악화, 채산성의 악화 등으로 분석되지만, 대부분이 채산성의 악화로 인해 폐광되기 때문에 채광현장, 광미 및 폐석 적치장, 광산 시설물들이 그대로 방치되어, 이들이 주변 토양과 하천의 주 오염원으로 작용하게 된다(수자원공사, 2002).

따라서 본 연구에서는 도곡 Au-Ag-Cu 광산 주변지역의 하천수, 토양, 광미 등을 대상으로 중금속 원소들의 오염 범위와 정도 및 화학적 형태를 규명하고자 하였다. 또한 이 광산으로 인해 주변 토양으로 유입되는 중금속 원소들의 오염특성을 토대로 하여 지역 주민들의 위에서 흡수되는 독성 중금속들의 생체흡수도를 평가하여 인체 위해성 평가를 위한 기초 자료로 제공하고자 하였다.

2. 연구지역의 지질 및 특성

연구대상 지역인 도곡광산은 경북 영덕군 축산면 축산리 산 185-6에 소재하는 광산으로, 금, 은, 동이 주 개발대상이며 1936년 금, 은, 동, 연, 아연 등 5개 광종으로 광업권이 설정, 등록되었고 1989년 광업권이 소멸되어 현재는 폐광 상태이다(대한광업진흥공사, 1968). 도곡광산은 과거 일제시대때 봉화산 서쪽 사면에 여러 개의 갱도를 개설하여 개발하였으나 80년대에 있었던 도로개설 등의 각종 공사로 인하여 대부분의 갱도가 함몰, 붕괴되었으며, 유실방지시설이 설치되지 않아 광미 및 폐석 더미 등이 그대로 유실되고 있고,

골짜기를 통해서 흐르는 하천을 따라 주변 농경지로 유입되기도 한다.

도곡광산의 주변지질은 백악기초 오천동층 중의 퇴적암과 불국사동의 석영반암으로 구성되어 있다(대한광업진흥공사, 1968). 광산은 오천동층 역암내에 열극을 충진한 열극충진광상으로 맥의 주향은 북으로 연장되고 경사는 서측으로 완경한다. 광맥은 사암과 역암내에 각력화작용이 있는 후 석영, 방해석, 황동석, 황철석, 섬아연석 및 방연석들이 광염 또는 응집된 것이다(대한광업진흥공사, 1968).

이 광산의 주요 오염원으로 가능한 것은 상부갱 앞 폐석과 본갱, 갱내수 등으로 파악되며, 본갱 하류 400 m 지점에 과거에는 선광장이 있었으나 현재는 사찰(양명사)이 자리잡고 있다.

3. 시료채취 및 처리

토양, 광미 및 하천수시료는 도곡광산 주변의 하천을 따라서 1차(2002년 10월), 2차(2003년 5월)로 나누어서 채취하였다. 도곡광산의 폐석 적치 더미에서 광미를 채취하였고, 오염가능성이 높을 것으로 예상되는 그 주변의 산토양과 수계를 따라 일부 발토양을 채취하였다. 하천수 시료는 폐갱구 내의 갱내수와 함께 수계를 따라 1차 시료 채취시 6개, 2차 시료 채취시 8개를 채취하였다(Fig. 1).

광미 및 토양 시료는 자연 건조하여 -80 mesh 입도로 체질한 후, 왕수로 분해하여 ICP-AES, ICP-MS를 이용하여 As, Cd, Cu, Pb, 및 Zn의 함량을 측정하였다. 이들 1차 시료 중 일부를 대상으로 토양내 원소들의 존재형태를 고찰하기 위해서 BCR (Whalley and Grant, 1994)에서 제안한 방법으로 연속추출분석을 실시하였고, 화학분석은 ICP-AES로 분석하였다. 또한 토양 내 유독성 중금속들이 폐금속광산 지역에 거주하는 주민들의 인체로 유입되었을 때 인체의 위에서 흡수되는 정도를 정량적으로 측정하기 위해서 SBET (Simple Bioavailability Extraction Test) 분석을 실시하였다. 이 분석방법은 Ruby *et al.*(1993, 1996, 1999)에 의해 제시되고 발달된 PBET (Physiologically Based Extraction Test) 분석방법을 영국지질조사소에서 단순화하여 개발한 분석 방법으로써 구체적인 SBET 분석절차는 이진수와 전효택(2004)의 방법을 따랐다.

자연수 시료는 시료채취 후 현장에서 수소이온농도(pH), 산화환원전위(Eh), 온도, 전기전도도, 탁도, 용존산소(DO)를 측정하였다. 화학성분 분석을 위하여 채취

된 자연수 시료는 수동펌프를 이용하여 동일 압력 하에서 0.45 μm membrane filter로 여과하여 부유물질을 제거한 후 양이온 분석용과 음이온 분석용으로 나누어 보관하였다. 양이온 분석용 시료는 시간의 경과에 따라 시료용기 벽면에 양이온이 흡착되는 것을 방지하기 위하여 농질산을 가해 pH를 2이하로 조정하였다. 양이온 정량분석은 AAS, ICP-AES 및 ICP-MS 등을 이용하였고, 음이온 정량분석은 IC를 이용하여 분석하였으며, HCO₃⁻는 적정법으로 측정하였다.

본 연구에서 광미, 토양, 자연수 시료에 대한 화학분석 결과는 분석과정에 필수적인 Quality control system을 이용하여 평가되어졌으며(Ramsey *et al.*, 1987), 중복시료와 참고시료를 이용하여 평가한 정밀도와 정확도는 8.7%로 10% 미만이므로 수용할만한 결과

라 생각된다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 광미와 토양에서의 중금속들의 오염 특성

도곡광산의 상부갱과 본갱 주변의 광미적치장의 광미를 대상으로 왕수분해를 한 결과, 평균함량이 1차(우기후), 2차(우기전)에서 각각 As이 254 mg/kg, 140 mg/kg, Cd이 98 mg/kg, 107 mg/kg, Cu가 2553 mg/kg, 3017 mg/kg, Pb가 4199 mg/kg, 12926 mg/kg, Zn가 18024 mg/kg, 9094 mg/kg로 분석되었다(Table 1). 그리고 광미 적치장으로부터 떨어진 위치에 밭으로 사용되고 있는 밭토양의 중금속 원소 함량을 1차, 2차의 시료채취 시기별로 비교하여 도시하였다(Fig. 2). 각각의 원소를 오염되지 않은 토양 내 평균 함량(Bowen, 1979)과 비교했을때, As, Cd은 모든 토양에서 이 기준을 초과하여 나타났고, Cu, Pb, Zn는 일부 토양에서 초과하여 나타났다. 또한 공통적으로 S2 시료는 모두 이 기준보다 낮은 함량을 나타내고 있고, 인접 도로와 가장 가까운 S3의 토양은 대부분의 중금속 함량에서 가장 높은 값을 나타냈다. 전체적으로 1차와 2차 시료들은 유사한 함량을 나타내고 있어, 단기간 내의 계절적 변화에 따른 토양 내 중금속 함량의 변화는 거의 없는 것으로 확인되었다. 또한 이들 토양 내의 중금속 원소들의 함량을 Kloke(1979)가 제시한 토양의 최대 허용한계치의와 비교하면, S3 토양만이 Cd에서 허용한계치(3.0 mg/kg)를 초과하여 4.4 mg/kg, 4.6 mg/kg으로 나타났다. 그리고 Cd의 경우는 S1이 허용한계치(3.0 mg/kg)와 근사한 2.8 mg/kg을 나타내었고, Zn는 S3에서 허용한계치(300 mg/kg)와 근사한 296 mg/kg를 나타내었다. 따라서 이들 지역에서 Cd, Zn에 대한 식물내의 함량과 토양 내 중금속 함량의 존재형태에 대한 구체적인 조사가 필요함을 알 수 있다. 전반적으로 밭토양 내 중금속 원소들의 함량 분포는 인접 도로와 가장 가까운 S3에서 가장 높게 나타났고, S2에서는 가장 낮은 자연토양 범위 이하의 함량을 나타내었다.

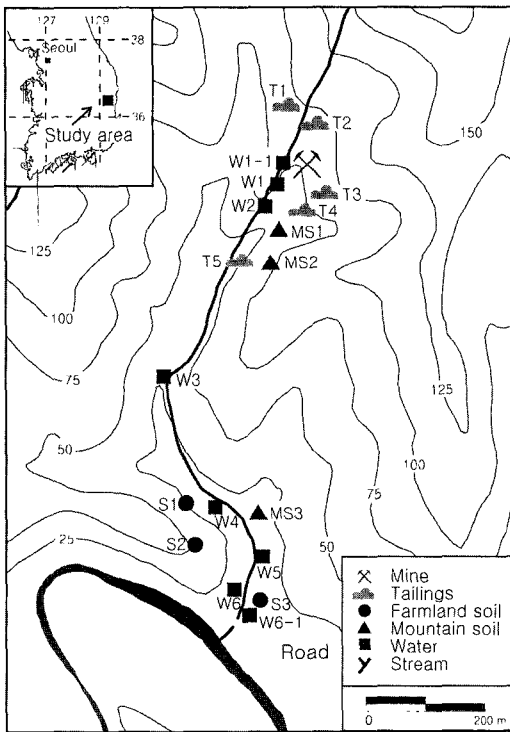


Fig. 1. Sampling location map in the Dogok Au-Ag-Cu mine area.

Table 1. Ranges and mean concentrations of heavy metals in tailings by aqua regia digestion from the Dogok mine area(unit in mg/kg).

Sampling period		As	Cd	Cu	Pb	Zn
October 2002	range	37.0-996.4	4.4-192.0	168-4224	1168-10240	1140-38000
(After rainy season)	mean	254	98	2553	4199	18024
May 2003	range	6.0-514.9	11.9-214.4	368-4720	370-31264	1708-14360
(Before rainy season)	mean	140	107	3017	12926	9094

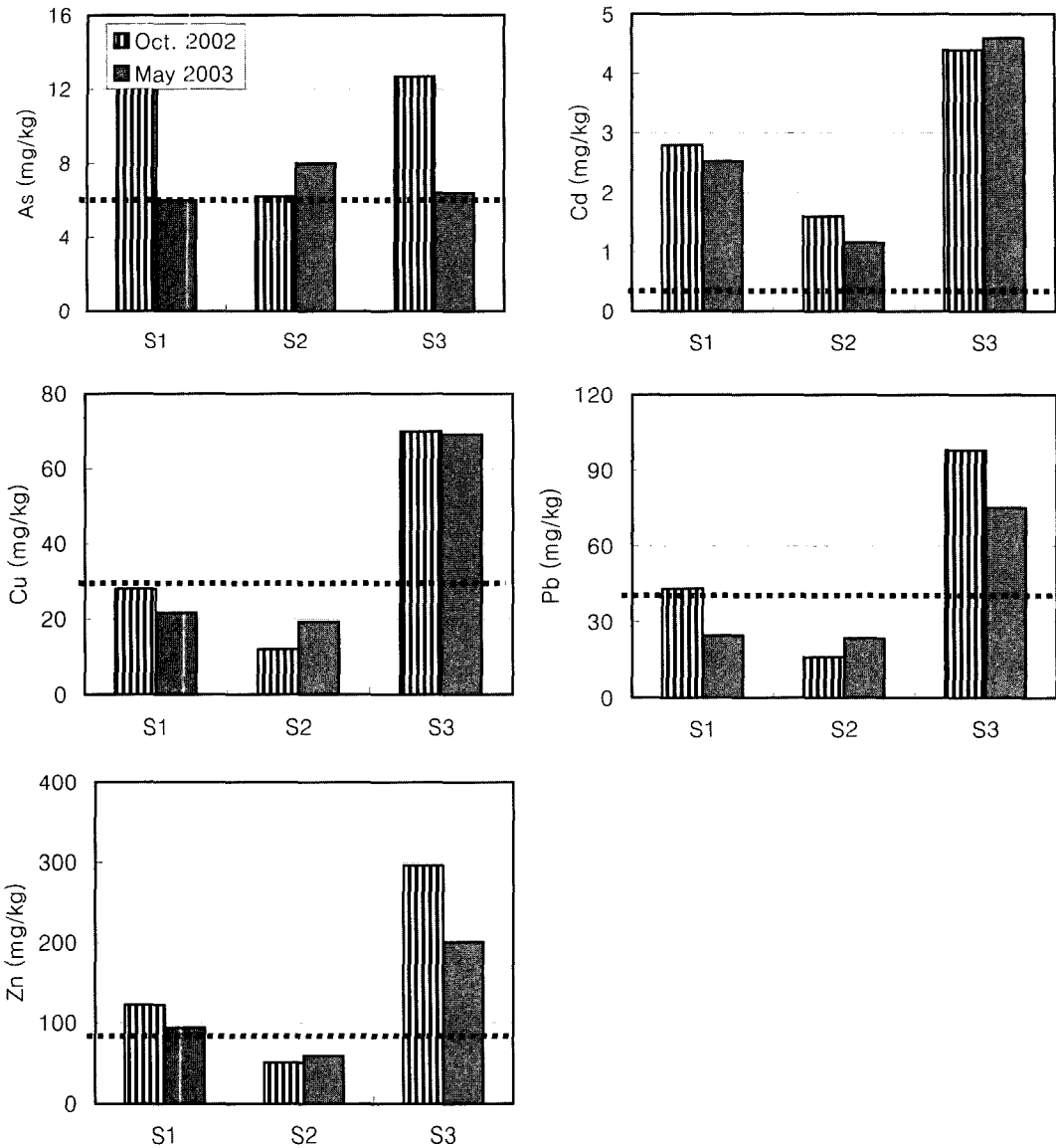


Fig. 2. Variations of heavy metals in soils with sampling season. Dotted line indicates the world's average soil reported by Bowen(1979). S1, S2, S3: farmland soil sample.

4.2. 수계에서의 유독성 원소들의 오염 특성

본계 입구를 시작으로 하류방향을 따라서 갯내수, 하천수, 식수로 사용되고 있는 지하수 시료를 채취하여 현장에서 측정된 물리적 특성과 함께 용존 이온들의 함량을 Table 2에 나타내었다. 우기전에 채취한 1차 시료와 우기후에 채취한 2차 물시료들의 평균 pH는 7.4이고 그 범위는 6.6-8.0였으나 우기후보다는 우기전의 pH가 약간 더 낮다.

2차(우기전) 시료를 대상으로 중금속들의 함량을 도시 해 본 결과, 중금속들은 주요오염원으로 생각되는 본계주변의 시료 W1에서 가장 높은 함량을 나타냈고 하류로 가면서 그 함량이 점차 감소하는 경향을 나타내고 있다 (Fig. 3). 즉 전반적인 흐름은 갯내수인 W1에서 가장 높고, 갯내수와 합류전인 하천수(W1-1)와 합류후인 하천수(W2)가 만나면서 점차 감소하는 경향을 나타내고 있어 폐갱구의 갯내수 내 원소함량이 하류로 가면서 희석

Table 2. Physical properties and element contents of water samples from the Dogok mine area(unit in mg/L except As(ppb)).

	W1	W1*	W2	W2*	W3	W3*	W4	W4*	W5	W5*	W6	W6*
As(ppb)	9.0	0.3	2.0	0.3	0.2	0.3	1.0	0.5	1.0	1.2	1.0	0.5
Al	0.017	0.017	0.037	0.015	0.018	0.007	0.013	0.015	0.008	0.036	0.010	0.011
Ca	56.0	58.5	54.7	51.1	51.6	51.5	46.2	31.7	49.8	27.9	40.8	36.4
Cd	0.261	0.418	0.268	0.333	0.234	0.340	0.048	0.136	0.178	0.098	0.075	0.032
Cu	0.075	0.059	0.069	0.041	0.016	0.034	0.038	0.016	0.010	0.012	0.005	0.005
K	1.346	1.150	1.325	1.060	1.307	1.050	1.162	0.700	1.180	0.630	2.260	0.750
Mg	1.439	7.880	19.816	7.270	18.854	7.260	6.211	4.910	8.780	4.500	1.343	4.610
Mn	0.007	0.043	0.007	0.030	0.003	0.030	0.132	0.005	0.009	0.004	0.018	0.057
Na	14.2	12.5	13.0	11.6	13.2	11.4	12.0	9.9	13.4	10.0	15.7	10.1
Pb	0.038	0.032	0.034	0.024	0.013	0.021	0.002	0.008	0.005	0.005	0.001	0.002
Si	4.6	6.4	4.6	5.9	4.5	5.8	7.9	5.2	4.7	5.1	5.2	5.0
Sr	0.187	0.145	0.189	0.123	0.166	0.126	0.126	0.072	0.156	0.063	0.117	0.076
Zn	6.347	3.734	5.955	5.035	4.316	5.047	0.614	3.201	3.018	2.378	0.196	0.438
F	0.129	n.d.	0.123	0.064	0.156	n.d.	0.099	n.d.	0.104	n.d.	1.396	0.184
Cl	13.66	10.00	13.43	13.10	13.86	10.04	14.27	11.51	14.28	12.20	13.87	12.67
NO ₃ ⁻	1.182	n.d.	1.194	1.231	1.083	n.d.	0.533	1.919	0.834	1.182	n.d.	1.254
SO ₄ ²⁻	99.0	48.4	95.2	86.4	85.0	66.1	41.5	33.1	73.3	25.5	36.3	17.0
HCO ₃ ⁻	107.7	97.6	106.9	288.0	100.6	85.4	119.2	65.3	99.8	61.0	101.7	101.9
pH	8.0	7.4	7.9	7.2	8.0	7.4	6.9	6.9	8.0	7.0	6.6	7.0
EC(μS/cm)	395	321	398	289	369	290	305	191	420	252	329	189

n.d. : not detected, * : water samples collected after rainy season.

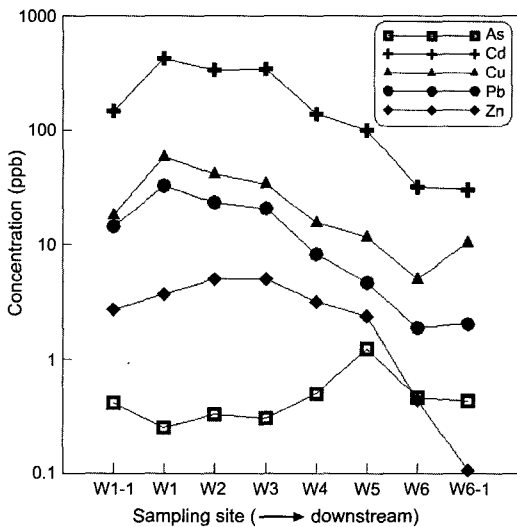


Fig. 3. Variations of heavy metal concentration in water samples from Dogok mine area. W1-1~W6-1: stream water sample.

효과에 의해서 감소함을 알 수 있다. 또한 폐갱구의 갱내수가 수질오염원으로 작용하고 있음을 알 수 있다.

갱내수(W1)중 중금속의 함량은 수질환경보전법에 명시된 ‘광산갱수 및 침출수별 수질과 오염물질 배출허

용기준(‘가’지역)과 비교시 Cd만이 0.264, 0.418 mg/L로 기준치를 초과하여 나타났다. 이는 기준치(0.1 mg/L)에 비해 최대 4배를 초과하는 값이다.

하천수(W2-W5)의 원소함량분포는 주요오염원으로 판단되는 폐갱구로부터 하류로 가면서 중금속 함량이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 즉, Cd, Cu, Pb 및 Zn의 함량은 유사한 변화 경향성을 가지고 하류로 흐르면서 그 함량이 감소되는 거동 특성을 보이고 있다. 한편 계절적 변화에 따른 하천수 내 중금속 함량의 변화는 뚜렷하게 나타나지 않았다.

또한 음용수로 사용되고 있는 지하수(W6, W6-1)를 분석한 결과, As은 0.4-1.0 μg/L, Cu는 0.005-0.01 mg/L, Pb는 0.001-0.002 mg/L, Mn은 0.001-0.057mg/L, Zn는 0.106-0.438 mg/L로 음용수 수질 기준과 비교할 때, 대부분이 기준값 이하를 나타냈다. 그러나 Cd은 0.030-0.075mg/L로 음용수 수질기준을 초과한 것으로 나타났다(Table 3). 이는 지하수 인근 토양(S3)에서의 높은 Cd 함량 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

4.3. 토양과 광미의 중금속 존재형태

시료는 도곡광산 주변의 전체 시료를 중에서 비교적 그 함량이 높은 광미(2개)와 산토양(2개), 발토양(2개)

Table 3. Heavy metal concentrations in ground water used for drinking water from Dogok mine area(unit in mg/L except As(ppb)).

	As(ppb)	Cd	Cu	Pb	Mn	Zn
W6 (After rainy season)	1.000	0.075	0.005	0.001	0.018	0.196
W6 (Before rainy season)	0.466	0.032	0.005	0.002	0.057	0.438
W6-1 (Before rainy season)	0.433	0.030	0.010	0.002	0.001	0.106
Tolerable value of drinking water*	0.05	0.005	1.0	0.05	0.3	1.0

*from Korean Ministry of Environment (www.me.go.kr)

시료를 대상으로 분석을 실시하였고 원소별 백분율 함량을 Fig. 4에 나타내었다.

Cd은 다른 중금속보다는 다양한 화학적 형태로 분포하고 있으며, 다른 중금속에 비해 비잔류상으로 존재하는 비율이 높으며, 생물흡수도와 이동도가 가장 용이한 형태인 교환성 형태가 높게 나타났다(Adriano, 2001). 산토양과 밭토양의 시료는 평균 31%가 교환성 형태로 존재하고 있으며, 광미의 경우 두 개 시료가 매우 큰 차이의 존재비율을 나타내고 있다. 특히 T3 (광미)의 경우는 87%가 교환성 형태로 존재하고 있고 Cd의 총 함량도 100 mg/kg으로 매우 높기 때문에 광미적치장 하부로 Cd이 용탈되어 수계로 유입될 가능성이 높다. 밭토양 시료의 경우(FS3), Cd이 4.4 mg/kg이며 화학종의 존재형태도 모든 형태로 고르게 존재하고 있어 이

토양에서 재배되는 식물로 Cd이 쉽게 이동되어 농축될 수 있는 것으로 사료된다. 따라서 이 토양에서 재배되는 농작물의 지속적인 섭취시 이 지역 주민에게 장기적인 Cd 흡수에 의한 건강상의 문제를 야기시킬 가능성이 있는 것으로 판단된다(Adriano, 2001).

Cu는 38-50%가 잔류상으로 존재하고 있었으나, 토양시료의 경우 다른 원소들에 비해 산화성 형태의 존재비율이 높은 것으로 나타나 Cu가 황화물 형태로 존재하고 있음을 알 수 있다.

Pb는 50% 이상이 잔류상 형태로 존재하는 것으로 나타났고, 일부(T3) 광미시료는 99%로 상당히 많은 부분이 잔류상으로 존재하는 것으로 보아 Pb가 방연석과 같은 광물 격자내에 존재하고 있다고 예측할 수 있다. 토양시료들의 경우, 잔류상 형태 다음으로 환원성 형

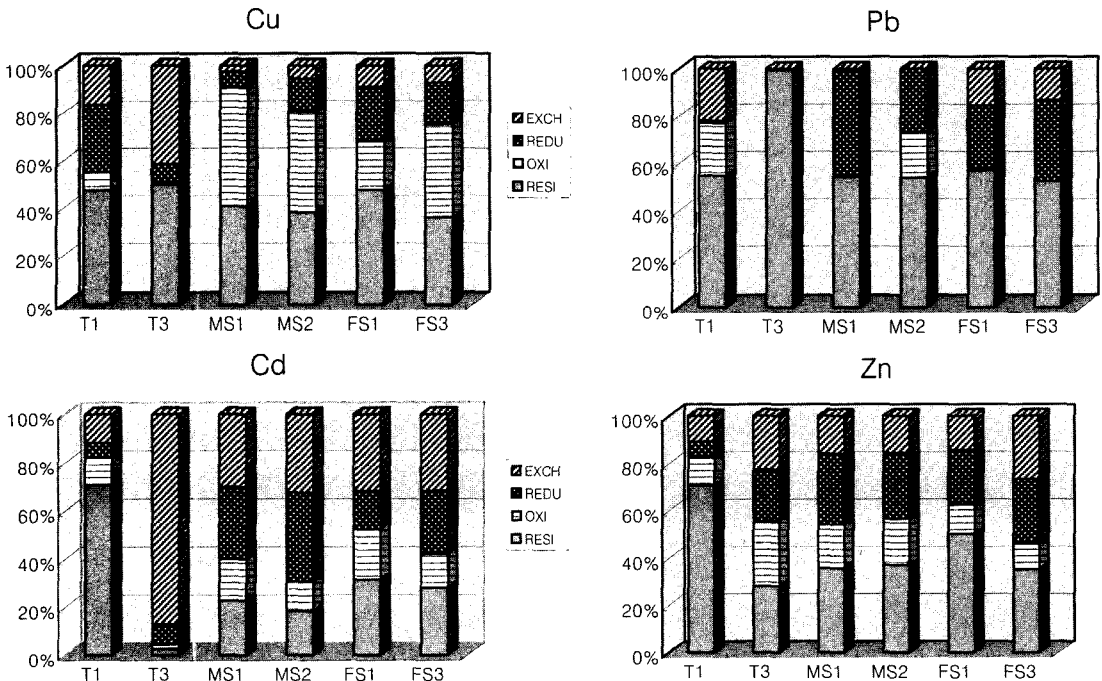


Fig. 4. Partitionings of sequential extracted metal concentrations in tailings and soils from the Dogok mine area. T1, T3: tailing, MS1, MS2: mountain soil, FS1, FS3: farmland soil. EXCH: Exchangeable fraction, REDU: Reducible fraction, OXI: Oxidizable fraction and RESI: Residual fraction.

Table 4. Bioavailabilities of heavy metals by SBET in farmland soils from the Dogok mine area(unit in mg/kg).

Sample No.	As		Cd		Cu		Pb		Zn	
	SBET	% Bio*	SBET	% Bio	SBET	% Bio	SBET	% Bio	SBET	% Bio
S1	3.2	26.4	1.1	38.9	10.0	35.8	13	30.2	33	26.7
S3	6.0	47.5	3.0	67.7	40.0	57.1	34	34.4	134	55.2
mean	4.6	37.0	2.0	53.3	25.0	46.5	23.5	32.3	83.5	41.0

* : % of bioavailability.

태의 존재비율이 27-44%로 높게 나타났다.

Zn도 Cd처럼 다른 원소들에 비해 다양한 화학종의 형태로 존재하고 있다. 특히 교환성 형태의 존재비율이 15-26%로 나타나 Zn의 생물학적 흡수도가 높을 것으로 예상된다. 더욱이 Zn의 총함량이 가장 높은 것으로 나타난 FS3은 교환성 형태의 존재비율이 가장 높은 26%로 나타나, Zn 확산 방지 대책을 강구해야 할 것으로 판단된다.

4.4. SBET 분석을 이용한 중금속들의 생체흡수도

도곡광산의 발토양을 대상으로 중금속 원소들을 분석하여 자연토양 평균함량(Bowen, 1979)과 비교해본 결과, As과 Cd은 모든 토양에서 이 기준을 초과하여 나타났고, Cu, Pb, Zn는 일부 토양에서 초과하여 나타났다. 또한 이들 토양 내의 중금속의 존재형태를 알아본 결과, 이동성 높은 Cd과 Zn에서 교환성 형태의 존재비율이 높은 것으로 나타나 이들 원소들이 식물로 이동 및 인체흡수도가 쉽게 되어 농축될 수 있다고 판단되었다(Adriano, 2001). 따라서 도곡광산 지역에 거주하는 주민들이 농업활동에 의해 무의식적으로 손에서 입을(hand to mouth) 통해 오염된 토양 입자를 섭취하는 경우, 강산성 환경 하의 위에서 흡수되는 중금속들의 흡수도를 평가하기 위해서 SBET (Simple Bioavailability Extraction Test) 분석을 실시하였다. 생체흡수도(Bioavailability)는 글리신을 이용하여 인공위산(추출용액)을 제작하여 폐쇄계에서 1 시간 동안 토양과 반응시킨 후 이로부터 추출된 독성 중금속들의 양을 왕수에 의해 분해하여 측정된 원소의 함량으로 나눈 비를 백분율(%)로 나타낸 것이다.

토양 중에서 주민들의 건강과 직접적으로 관련되는 발토양을 대상으로 SBET 분석을 실시하여 그 결과를 나타내었다(Table 4). Cd의 경우 2개의 발토양 시료에 대한 평균 생체흡수도가 53.3%로 가장 높게 나타났으며, 그 다음으로 Cu(46.5%), Zn(41.0%)로 나타났다. 대부분의 중금속에 대해서 왕수분석에 의한 총함량이 높은 것으로 나타난 S3 시료는 생체흡수도 또한 모든 원소에 대해서 가장 높은 것으로 나타나 인체에 미치

는 독성이 클 것으로 예상된다. 따라서 이 지역에서 재배되는 발작물의 유독성 원소들 함량에 대한 조사와 이들 작물들의 섭취로 인한 인체 내의 독성 원소의 유입에 대한 연구가 필요함을 알 수 있다. 또한 이동성이 낮은 원소로 알려져 있는 Pb는 인체흡수도가 평균 32%로 다른 원소들에 비해서 다소 낮게 나타났다. 이 지역의 발토양에서 비교적 높은 값으로 나타난 Cd과 Zn는 앞서 실험한 연속추출법에서의 높은 교환성 형태의 존재와 일치되는 결과를 나타내고 있다. 따라서 장기적으로 오염이 가속화될 가능성이 있고, 이로 인해 인체 및 작물에 미치는 악영향에 대한 대책이 시급함을 알 수 있다.

5. 결 론

폐금속광산인 도곡 금-은-동 광산 주변지역의 토양, 물 및 광미를 대상으로 1차(2002년 10월), 2차(2003년 5월)에 걸쳐서 유독성 중금속의 오염도를 조사하고, 오염특성을 토대로 하여 독성 중금속들의 흡수도를 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

도곡광산 주변의 광미적지장 토양(광미), 산토양, 발토양을 분석한 결과, 광미 내의 중금속의 함량은 1차, 2차에서 모두 높은 함량을 나타내었고, 일반 농경지로 사용되고 있는 발토양에서 일부 시료의 경우 Cd, Zn 등의 원소의 함량이 Kloke(1979)가 제시한 토양의 최대 허용한계치를 초과하는 값을 나타내고 있었다. 또한 이들 시료들의 경우, 연속추출분석 결과 비잔류상 형태, 특히 교환성 형태의 존재비율이 높은 것으로 나타나 다른 중금속에 비해서 생물로의 흡수도와 이동도가 높을 것으로 예상된다.

도곡광산 주변 수계의 pH는 6.6-8.0(평균 7.4)이며 하천수 중 중금속 원소들의 함량분포는 오염원으로 추정되는 폐갱구의 갭내수에서 가장 높은 함량을 나타내었고, 하류로 흐르면서 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 음용수로 사용되고 있는 지하수를 분석한 결과, 대부분이 음용수 수질 기준값 이하를 나타내고 있었으나, Cd은 기준을 초과한 것으로 나타났다.

토양 중에서 인체의 위해도와 직접적으로 관련되는 발토양을 대상으로 SBET 분석을 실시한 결과, Cd의 경우 평균 생체흡수도가 53.3%로 가장 높게 나타났고, 그 외의 중금속들도 Cu(46.5%), Zn(41.0%), As (37.0%) 순서로 높게 나타났다. 특히 왕수분석결과, 총합량이 높은 것으로 나타난 S3는 각각의 생체흡수도 또한 높게 나타나, 이로 인해 인체에 미치는 악영향에 대한 오염방지 대책이 필요하다고 생각된다. 따라서 도곡광산의 주변 지역에서 주요 오염 경로로 파악되는 토양-식물-인체에 대한 위해도와 오염방지와 복원에 대한 대책을 마련하기 위해서 식물에 대한 오염도 조사, 오염 토양에 대한 처리대책이 시급한 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 우수여성과학자 도약지원연구과제(과제번호: R04-2002-000-00161-0)의 연구비 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 한국과학재단에 감사드립니다.

참고문헌

- 김상현, 전효택 (1993) 삼보 연·아연·중정석 광산 주변 하상퇴적물에서의 중금속 오염 연구. 광산 지질, 26권 2호, p.217-226.
- 대한광업진흥공사 (1968) 한국의 광상 1호, p. 212-213.
- 민정식, 정영욱, 이현주, 이동남 (1997) 휴폐광산지역 광해 조사 및 대책연구. 한국자원연구소, KR-97(C)-32, 470p.
- 수자원공사 (2002) 화북댐 건설사업 환경영향평가서(폐광산 및 제련소 오염방지대책).
- 안주성 (2000) 금은 광산활동에 의한 비소 및 중금속 환경오염과 광산폐기물 격리저장 처리 기법. 서울대학교 박사학위논문, 171p.
- 이진수, 전효택 (2004) 금속광산지역 독성 중금속원소들의 인체 위해서 평가. 자원환경지질, 37권, p. 73-86.
- Adriano, D.C. (2001) Trace elements in terrestrial environments: Biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals. 2nd edition, Springer, p. 263-314.
- Bowen, H.J.M. (1979) Environmental chemistry of the elements. Academic Press, New York. 333p.
- Kloke, A. (1979) Content of arsenic, cadmium, chromium, flourine, lead, mercury and nickel in plants grown on contaminated soil. Paper presented at United Nations-ECE Symposium. p. 15-17.
- Ramsey, M.H., Thompson, M. and Banerjee, E.K. (1987) Realistic assessment of analytical data quality from induced coupled plasma atomic emission spectrometry. Analytical Proceedings. v. 24, p. 260-265.
- Ruby, M.W., Davis, A., Link, T.E., Schoof, R., Chaney, R.L., Freeman, G.B. and Bergstrom, P. (1993) Development of an in vitro screening test to evaluate the in vitro bioaccessibility of ingested mine-waste lead. Environmental Science & Technology. v. 27, p. 2870-2877.
- Ruby, M.W., Davis, A., Schoof, R., Eberle, S. and Sellstone, C.M. (1996) Estimation of lead and arsenic bioavailability using a physiologically based extraction test. Environmental Science & Technology. v. 30, p. 422-430.
- Ruby, M.V., Schoof, R., Brattin, W., Goldade, M., Post, G., Harnois, M., Mosby, D.E., Casteel, S.W., Berti, W., Carpenter, M., Edwards, D. and Cragin, D. (1999) Advances in evaluating the oral bioavailability of inorganic in soils for use in human health risk assessment, Environmental Science & Technology. v. 33, p. 3697-3705.
- Whalley, C. and Grant, A. (1994) Assessment of the phase selectivity of the European Community Bureau of Reference(BCR) sequential extraction procedure for metals in sediment. Analytica Chimica Acta. v. 291, p. 287-295.

www.me.go.kr

2004년 12월 23일 원고접수, 2005년 3월 28일 게재승인.