

## 다덕광산 주변지역에서의 독성원소들의 환경오염 및 인체흡수도

이진수\* · Ben A Klinck\*\* · Yvette Moore\*\* · 전효택\*

### Environmental Contamination and Bioavailability of Toxic Elements around the Daduk Mine Area, Korea

Jin-Soo Lee\*, Ben Klinck\*\*, Yvette Moore\*\* and Hyo-Taek Chon\*

**ABSTRACT:** In order to investigate the extent and degree of arsenic and heavy metal contamination and the bioavailability of toxic elements around the abandoned mine in Korea, an environmental geochemical survey was undertaken in the Daduk mine. After appropriate preparation, tailings, soil, stream sediment, crop plant and fingernail samples were analysed for As, Cd, Cu, Pb and Zn by ICP-AES and ICP-MS. Elevated levels of 8,782 mg/kg As, 8.3 mg/kg Cd, 489 mg/kg Cu, 3,638 mg/kg Pb and 919 mg/kg Zn were found in tailings from the Daduk mine. These significant concentrations can impact on soils and sediments around the tailing ponds. Mean concentrations of As, Cd, Pb, Cu and Zn in soils are significantly higher than those in world average soil, especially for As and Pb. Element concentrations in sediments decrease with distance from the tailing ponds due to a dilution effect by the mixing of uncontaminated sediments. Arsenic and Cd are elevated in rice grains and stalks, and Cu and Zn concentrations in chinese cabbage, sesame and bean leaves are higher than the upper limit values for normal plant. Arsenic concentration in fingernails of farmers are higher than the normal level with a maximum value of 1.5 mg/kg. The post-ingestion bioavailability of toxic heavy metals in some paddy and farmland soils has been also investigated using the SBET (simple bioavailability extract test) method. The method utilises synthetic leaching fluids closely analogous to those of the human stomach. The quantities of As, Cd, Cu, Pb and Zn extracted from paddy soils after 1 hour indicated 15.9, 65.4, 46.2, 39.4 and 29.4% bioavailability, respectively and for farmland soils, 12.4, 26.0, 31.2, 29.3 and 19.4% bioavailability, respectively. The results of the SBET indicate that regular ingestion of soils by the local population could pose a potential health threat due to long-term toxic element exposure.

### 서 론

산업이 발달하고 도시화가 진행됨에 따라 다양한 형태의 독성 중금속들이 인위적으로 생성, 배출된다. 이들은 불, 대기, 토양 등의 이동매체를 통하여 대기권, 수권, 토양권을 포함하는 지구화학적 환경으로 분산됨에 따라 잠재적으로 인간을 비롯한 유기생명체에 치명적인 피해를 입힐 수 있다. 현재까지 알려진 독성 원

소들의 주요 오염원은 광산 활동에서 배출되는 갱내폐수, 광미 및 폐석으로서 광산 주변 상수원, 토양 및 농작물을 오염시키고 있다 (Adriano, 1986, Nriagu and Pacyna, 1988). 이러한 과거 광산활동으로 인해 독성 원소들이 주변환경, 특히 토양, 하상퇴적물, 지표수 및 지하수로 방출되는 과정 및 이동경로를 규명하여 주변지역의 농업활동과 주민 건강에 미치는 환경오염의 수준을 조사하는 환경지구화학적 연구가 필요하게 되었다.

국내에는 현재 총 1,870개소의 크고 작은 광산들이 있으며, 이들 중에서 약 80%가 휴광 또는 폐광된 광산으로서 적절한 환경복원시설이 설치되지 않아 주변 생태계가 위협받고 있다 (박용하, 1994). 특히 폐금속 광산에서는 과거 채광이나 선광·제련과정 등의 광산

\* 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 (School of Civil, Urban and Geosystem Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea) E-mail: jssoolee@snu.ac.kr, chon@plaza.snu.ac.kr

\*\* 영국지질조사소 (British Geological Survey, Keyworth, Nottingham, NG12 5GG, U.K.)

활동으로 인하여 배출된 광산폐기물들 (폐석, 광미, 광석, 광산폐수 등)이 그대로 방치되어 있어 집중 강우나 강풍에 의해 하부로 분산되어 광산하부의 농경지와 수계의 환경오염을 계속적으로 일으키고 있다 (Thornton, 1983; Alloway, 1990; Jung, 1995). 이렇게 오염된 토양이나 하천수는 농작물의 성장에도 영향을 미쳐 궁극적으로는 이를 섭취하는 인간의 건강에 심각한 문제를 야기한다.

국외의 경우 광산활동에 의해 야기된 환경오염에 대한 많은 연구가 수행되어 왔으며, 최근에는 광산활동으로 인해 오염된 토양, 지하수 및 농작물내 독성 원소들이 주변 지역 주민의 건강에 미치는 악영향을 직접적으로 평가하기 위한 기법의 개발과 연구가 활발하게 진행되고 있다 (Imber, 1993; Ruby *et al.*, 1993, 1996; Medlin, 1997; Williams *et al.*, 1998). 그러나 국내의 경우 폐금속광산에서의 환경오염에 대한 연구가 1980년대 후반부터 시작되었고, 1990년대에 들어 많은 연구가 진행되고 있으나 아직은 충분한 자료가 축적되지 않았다. 특히 폐금속광산 주변 오염물질이 인간의 건강에 미치는 악영향을 평가하는 실험 및 연구는 전무한 상태로 국내에서도 다양한 오염원에 대한 체계적이고 종합적인 환경오염 평가기술 개발이 시급한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 폐금속광산인 다덕광산을 대상으로 광산지역 주변 광미, 토양, 하상퇴적물, 농작물 및 지역주민들의 손톱 시료를 채취하여 비소 및 독성 중금속들의 오염수준을 파악하고, 이들 원소들의 분산 및 분포 특성을 규명하고자 한다. 또한 지역주민들의 손톱시료에 대한 화학분석결과와 토양에 대해 SBET (Simple Bioavailability Extraction Test) 분석을 실시하여 독성 원소들의 인체흡수도 평가를 통해 비소 및 독성 중금속들이 인간의 건강에 미친 영향을 종합적으로 고찰하였다.

## 연구지역의 지질 및 광상

다덕광산은 경상북도 봉화군 법전면 풍정리 일대에 위치하고 있으며, 연구 대상지역은 북위 36°54'12", 동경 128°49'30"에서 북위 36°54'54", 동경 128°50'48" 범위에 해당된다. 본 광산은 1915년 광업권 등록이 된 이후 1930년부터 개발되어 주로 금, 은, 동, 연, 아연 등을 생산하였고, 1950년대에 가장 활발한 조업을 했으나, 그 이후 1984년까지 소규모로 금과 은을 생산한 기록이 있다 (대한광업진흥공사, 1990).

다덕광산의 주변 지질은 영주 화강암체의 북동부에 속하며 대부분 주라기 각섬석화강암과 이를 후기에 관입한 춘양화강암 및 페그마타이트 암맥 등으로 구성되어 있다 (손치무, 김수진, 1963; 박희인 등, 1988), 각섬석화강암은 광구 지역에 넓게 분포되어 있으며 조립질 입상조직을 가지며, 주로 석영, 사장석, 정장석, 미사장석, 각섬석 및 흑운모 등으로 구성되어 있다. 춘양화강암은 각섬석화강암을 관입하여 일부 지역에 각섬석화강암의 포획암을 갖기도 하며, 주구성광물은 석영, 사장석, 미사장석, 정장석, 흑운모 및 백운모 등이다 (박희인 등, 1988).

광상의 형태는 각섬석화강암의 열극을 충전한 합금 은석영맥으로서, NS 방향으로 약 6 km, EW 방향으로 1.5~1.8 km의 범위내에 맥폭 0.2~1 m 정도인 거의 평행한 15개 광맥이 발달되어 있다 (박희인 등, 1988). 이 광산에서는 1941~1945년 사이에 216,000톤의 광석 (Pb: 1.9%, Zn: 5.75%, Cu: 0.58%, Au: 2.2 g/t, Ag: 243.8 g/t)이 채광된 기록이 있으나, 그 후 대부분 폐광되었고, 1976년에는 풍정리에서 250톤의 광석 (Au: 5 g/t, Ag: 800 g/t)이 일시 채굴된 바 있다 (박희인 등 1988). 산출되는 주요광석광물은 석아연석, 방연석, 황철석, 황동석, 유비철석 등이다 (손치무, 김수진, 1963).

다덕광산 주변에는 채굴적, 폐선광장 등의 광산 시설물이 방치되어 있는데, 이 선광장은 주변에 있었던 붓든, 풍정, 양곡광산 등의 금은광석을 모아 함께 처리한 곳으로 대규모의 광미가 광미장에 방치되어 있다. 광미장 일부는 매립되어 밭으로 이용되고 있으며, 광미덤 하부지역은 주로 벼를 재배하는 논과 고추, 깨, 콩 등을 재배하는 밭으로 이루어져 있다. 더욱이 광미장 상류로 유입된 물이 광미장을 거치면서 다량의 중금속원소들을 함유한 산성광산배수가 생성되고 있다. 이 산성광산배수는 농수로 방류되어 주변 농경지를 오염시키고 있을 뿐만 아니라 인접 하천의 약 800 m 구간에는 철수산화물로 알려져 있는 황갈색 침전물 (yellow boy)이 형성되어 주변 경관을 해치고 있다.

## 시료채취 및 분석방법

다덕광산 주변에서의 시료채취는 1998년 8월과 9월에 실시되었으며, 비교적 큰 규모의 광미적지장과 선광장이 존재하고 있어 폐광후 광산폐기물에 의한 환경오염의 영향이 나타날 수 있는 주변지역에서 중점적으

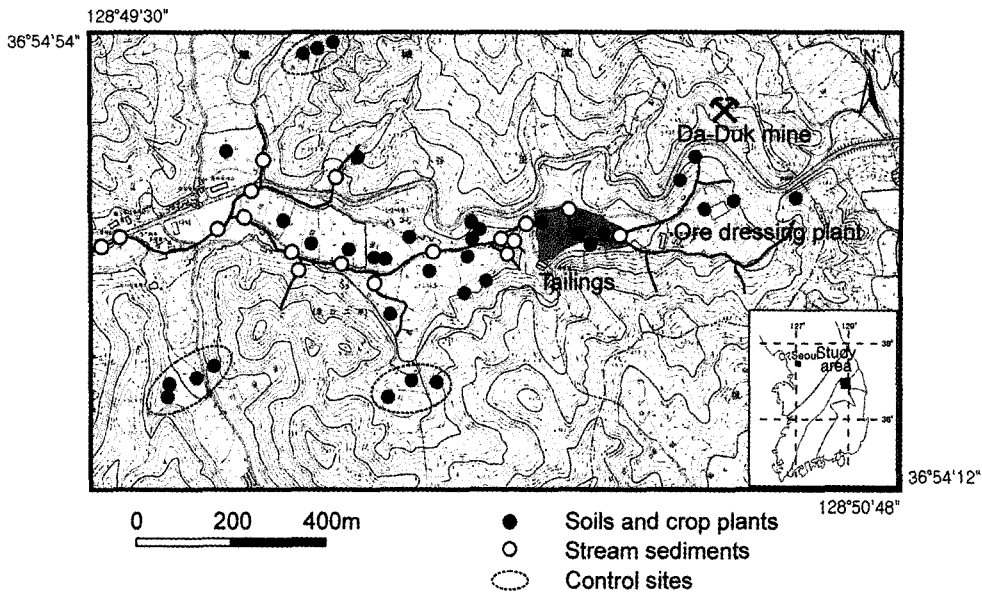


Fig. 1. Sampling location map of the Daduk mine area.

로 채취하였다. 시료는 지형적 요인과 오염원의 위치를 고려하여 광미, 토양, 하상퇴적물, 농작물 및 지역 주민들의 손톱 등을 채취하였다 (Fig. 1). 광미시료는 광미적지장내에서, 토양시료는 토지이용의 용도에 따라 산토양 및 농경지토양 (논토양과 밭토양)으로 구분하여 채취하였으며, 모든 광미 및 토양시료는 모종삽을 이용하여 20여개의 부분시료를 하나의 완전시료로 구성하는 방법으로 이루어졌다.

하상퇴적물은 광미장을 통과해서 광미땀 하부 계곡을 따라 흐르는 하천을 중심으로 광미장으로부터 거리별로 시료를 채취하였으며, 농작물은 농경지토양을 채취한 동일 지점에서 논토양에서는 벼를, 밭토양에서는 밭작물 (콩잎, 깻잎, 배추, 무잎, 고추 등)을 채취하였다. 또한 광산폐기물에 의한 환경오염이 지역주민의 건강에 미친 직접적인 영향을 평가하기 위해 손톱을 채취하였다. 모든 유형별 시료는 다덕광산의 영향을 받지 않은 비교지역에서도 같은 방법으로 채취하였다.

광미, 토양 및 하상퇴적물 시료는 대기중에서 자연 건조시킨 후 막자와 유발을 이용해 멍쳐진 부분을 분리시킨 다음 -10 mesh (<2 mm)로 체질한 후 축분법을 이용하여 4분의 1을 취한 시료를 다시 -80 mesh (<180 m) 입도로 체질하였다. 이들 시료들은 영국지질조사소 (BGS, British Geological Survey)의 ICP-AES를 이용하여 As, Cd, Cu, Pb 및 Zn를 분석하였다. 식물시료의 경우 3-4회 이상 증류수로 깨끗이

세척한 후 실내에서 자연건조 시킨 후 식물분쇄기를 이용하여 미분쇄하여 분말시료를 제작하였다. 손톱시료의 경우 손톱에 부착된 이물질을 순수한 석영 조각을 이용하여 긁어서 제거한 후, 아세톤과 Neutracon에 담가 세척한 다음 건조기에서 건조시켰다. 미분쇄한 식물시료와 손톱시료는 질산과 과산화수소수로 분해하여 영국지질조사소의 ICP-MS를 이용하여 As, Cd, Cu, Pb 및 Zn를 분석하였다. 모든 화학분석 과정에서 표준시료 (MESS2, BCSS1, SO1, PACS1, GBW07602, GBW07604, GBW08505, Butte montana), 중복시료 및 공시료를 첨가하여 신뢰성 평가를 실시하였으며, 평가한 정밀도와 정확도는 10% 미만으로 수용할 만한 결과를 얻었다 (Ramsey *et al.*, 1987).

**SBET (simple bioavailability extraction test) 분석 방법**

다덕광산 지역에 거주하는 주민들의 위에서 흡수되는 독성 원소들의 흡수비를 평가하기 위해 SBET 분석을 실시하였다. 이 SBET 분석방법은 Ruby *et al.* (1996)에 의해 제시되고 발달된 PBET (Physiologically Based Extraction Test) 분석방법을 영국지질조사소에서 단순화하여 개발한 분석방법으로서 인체의 위와 매우 유사한 인공위산 (추출용액)을 제작하여 독성원소들이 인체로 유입되었을 때 인체의 위에서 흡수되는 양

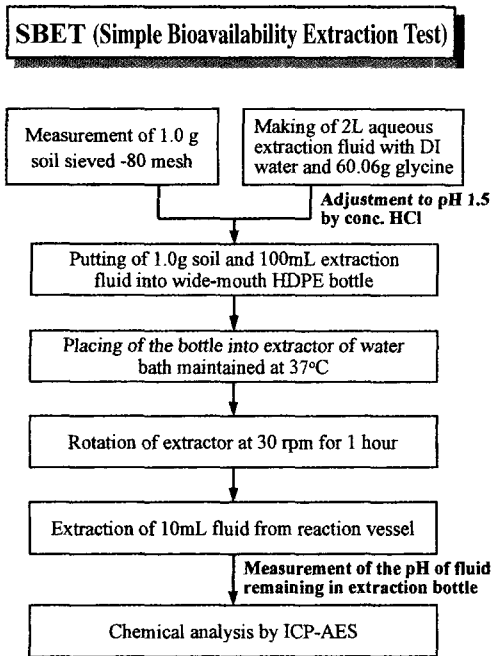


Fig. 2. Flowchart showing the procedure of the SBET analysis for soils.

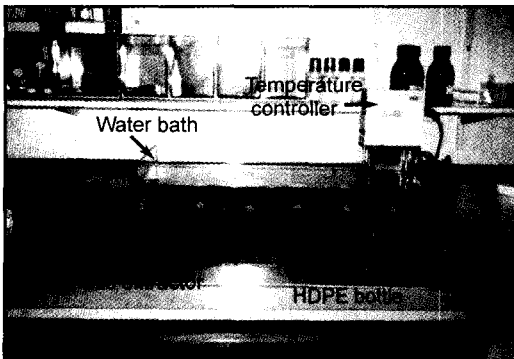


Fig. 3. Equipment of the SBET analysis.

을 측정하는 것이다. 본 연구에서 이용한 구체적인 SBET 분석절차는 다음과 같으며, 이를 나타내는 모식도는 Fig. 2와 같다. 또한 SBET 분석장치는 Fig. 3에 제시되어 있다.

① 인공위산 (synthetic stomach solution)을 제작하기 위하여 글리신 (glycine) 60.06 g에 증류수를 넣어 2L의 추출용액을 만든다.

② 제작된 인공위산은 인체의 위의 pH와 맞추기 위해 37°C로 유지되고 있는 수저안에서 염산 (HCl)를 사용하여 pH 1.5에 맞춘다.

③ HDPE 시료용기에 -80 mesh로 체질한 토양시

료 1.0 g과 pH 1.5로 맞춘 인공위산, 즉 추출용액을 100 ml을 넣는다.

④ HDPE 시료용기의 뚜껑은 새지 않게 꼭 닫은 후 (폐쇄계 상태), 수저내 회전반응기에 고정시켜서 인체의 온도와 같은 37°C가 유지되는 수저안에 완전히 잠기도록 한다.

⑤ 수저내 회전반응기는 1시간동안 30 rpm으로 회전시켜 반응이 일어나도록 한다.

⑥ 1시간후에 시료용기를 수저에서 꺼내어 다시 pH를 측정하고, 반응이 완료된 시료용기로부터 분석하기 위한 용액을 주사기로 채취하고 필터를 사용하여 분석용 시험관으로 옮긴다. 단, 이때 반응이 완료된 후의 시료용기내 용액의 pH가 초기에 측정된 인공위산 (추출용액)의 pH의  $\pm 0.5$ 안의 범위에 있어야만 한다. 만약 이 범위에 있지 않다면 이 실험은 다시 행해져야 한다.

⑦ ICP-AES을 이용하여 추출된 용액으로부터 As, Cd, Cu, Pb 및 Zn 등을 분석한다.

## 지구화학적 특성 및 오염평가

### 토 양

다덕광산의 광미 및 토양 시료에 대한 화학분석결과를 Table 1에 나타내었다. 광미중의 평균 원소함량은 8,782 mg/kg As, 8.3 mg/kg Cd, 489 mg/kg Cu, 3,638 mg/kg Pb, 919 mg/kg Zn으로 매우 높은 값을 갖는다. 이는 방연석, 섬아연석, 황동석, 유비철석, 황철석 등과 같은 황화광물에 기인하는 것으로 사료된다. 특히 As과 Pb의 최대 함량이 각각 4%와 1% 이상으로 나타나 이러한 광미가 바람이나 유수에 의해 광미 댐 하부에 있는 농경지나 하천으로 유입되어 주변 환경을 오염시킬 가능성이 크다. 이들 함량을 오염 (광해) 방지사업이 완료된 구봉광산의 광미중 평균원소함량 (5,040 mg/kg As, 54 mg/kg Cd, 184 mg/kg Cu, 2,800 mg/kg Pb, 1,560 mg/kg Zn)과 비교하면 (안주성 등, 1999), 다덕광산의 광미중 As과 Pb는 구봉광산에서보다 더 부화되어 있다.

다덕광산 주변지역에서 채취한 토양내 원소들의 함량을 Bowen (1979)이 제시한 자연토양내 평균원소함량 (world average level)과 비교하면 As, Cd, Pb, Zn의 함량은 자연배경값보다 매우 높게 나타났으나, Cu의 함량은 약간 높다 (Fig. 4). 또한 비교지역의 토양내 원소함량보다도 모든 원소들이 부화되어 있으며,

**Table 1.** Ranges and means of element concentrations in tailings and soils from the Daduk mine area (unit in mg/kg).

	As	Cd	Cu	Pb	Zn
<i>Contaminated site</i>					
Paddy soil (19)*	110 13-642	1.9 0.4-4.5	50 5-156	171 61-402	461 65-1175
Farmland soil (6)*	104 16-444	1.1 0.7-1.6	29 13-49	153 67-454	182 129-257
Mountain soil (7)*	156 13-684	1.0 0.6-2.4	41 4-124	122 51-315	208 77-379
Tailings (9)*	8782 1283-41887	8.3 1.6-36.0	489 188-1560	3638 1614-11458	919 351-2077
<i>Control site</i>					
Paddy soil (2)*	23 13-32	0.9 0.8-1.0	14 12-16	97 77-117	149 116-182
Farmland soil (8)*	15 13-19	0.9 0.8-1.0	24 8-53	85 55-165	136 76-245
Mountain soil (2)*	13 13-13	0.9 0.8-1.0	13 13-14	77 72-82	108 88-128
World average <sup>a</sup>	6	0.35	30	35	90
Tolerable level <sup>b</sup>	20	3.0	100	100	300

\*Number of samples, <sup>a</sup> Bowen (1979), <sup>b</sup> Kloke (1979)

특히 As이 비교지역에 비해 5배에서 10배 정도 부화 된 것으로 나타났다. As과 Pb의 함량은 논토양, 밭토양, 산토양에서 각각 110, 104, 156 mg/kg As과 171, 153, 122 mg/kg Pb로 Kloke (1979)에 의해 제시된 농작물에 독성을 줄 수 있는 토양중의 잠재적 독성원소들의 최대 허용한계값보다도 매우 높다. 따라서 이 토양들은 광미의 영향을 크게 받은 것으로 사료된다.

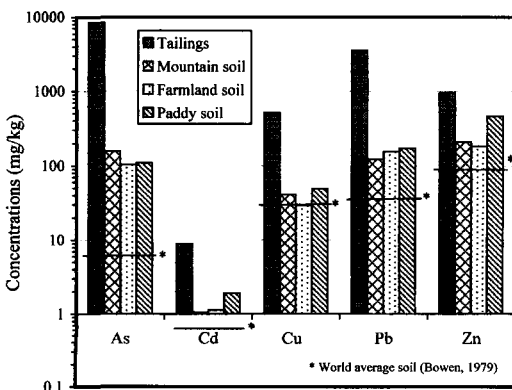
토양 용도별 원소함량의 변화를 살펴보면, 논토양의 경우 원소들의 평균함량이 110 mg/kg As, 1.9 mg/kg Cd, 50 mg/kg Cu, 171 mg/kg Pb, 461 mg/kg

Zn으로 대부분의 중금속 함량이 밭토양과 산토양에서 보다 높게 나타나고 있으나, 밭토양내 원소함량과의 차이는 크지 않다 (Fig. 4). 따라서 이들 농경지에서 재배되는 농작물내 독성 원소들의 영향이 우려된다. 또한 광미처리장 인접 산토양에서 As 함량이 높은 이유는 기반암에 의한 영향이라기보다는 광미의 비산에 의한 영향으로 판단된다.

**하상퇴적물**

다덕광산 주변 수계에서 채취한 하상퇴적물에 대한 화학분석결과를 Table 2에 나타내었다. 퇴적물내 평균 함량은 1,578 mg/kg As, 9.0 mg/kg Cd, 161 mg/kg Cu, 714 mg/kg Pb, 1,730 mg/kg Zn으로 비교지역의 퇴적물내 원소함량보다도 수십배 이상으로 매우 높다. 특히 As과 Pb의 함량은 미국환경청 (Anon, 1977)에서 제시한 심하게 오염된 퇴적물로 규정한 기준값보다도 상당히 높은 것이다. 이는 강우시 광미입자가 수계를 따라 직접 유입되어 하천바닥에 퇴적된 결과로 판단된다.

다덕광산의 광미로부터 배출되는 침출수가 주변 수계에 미치는 영향을 평가하기 위해 퇴적물내 원소들의 함량을 광미처리장으로부터 거리별로 Fig. 5에 도시하였다. As과 Pb는 광미덮의 직상부와 직하부의 퇴적물

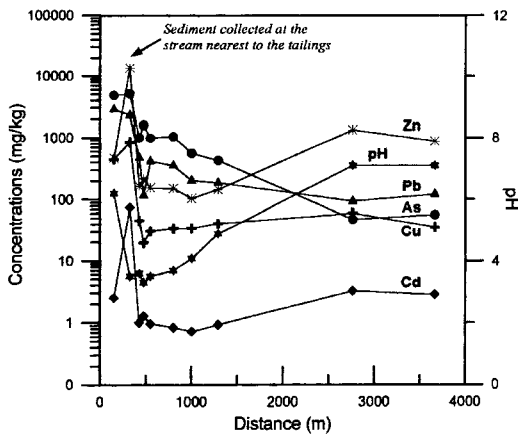


**Fig. 4.** Arsenic and heavy metal concentrations in tailings and soils from the Daduk mine area.

**Table 2.** Ranges and means of element concentrations in stream sediments from the Daduk mine area (unit in mg/kg).

	As	Cd	Cu	Pb	Zn
Contaminated site (8)*	1578 48-5150	9.0 0.7-75.6	161 20-855	714 94-2861	1730 104-13658
Control site (5)*	28 13-83	0.5 0.3-0.6	9 4-13	70 50-110	93 50-148
US-EPA guideline <sup>a</sup>	50	6.0	50	60	200
Tolerable level <sup>b</sup>	-	10.0	114	250	800

\*Number of samples, <sup>a</sup> Anon *et al.* (1977), <sup>b</sup> Persaud *et al.* (1989)



**Fig. 5.** Variations of element concentrations and pH of stream sediments with distance downstream from the Daduk mine.

에서 상당히 부화되어 있으며, 광미댐으로부터 거리가 멀어짐에 따라 그 함량이 점점 감소하고 있으나, 광미댐으로부터 약 1.5 km 까지도 이들 원소들의 오염 현상이 나타나고 있다. 그러나 Cd, Cu, Zn의 함량은 광

미댐으로부터 거리가 멀어짐에 따라 그 함량이 급격히 감소하고 있다.

**농작물**

다덕광산의 주변 농경지에서 채취한 벼, 고추, 깻잎, 콩잎, 무잎, 배추 등의 농작물에 대한 화학분석결과를 건조무게 기준으로 Table 3에 나타내었다. 벼이삭내 평균원소함량은 0.4 mg/kg As, 0.08 mg/kg Cd, 3.5 mg/kg Cu, 0.2 mg/kg Pb, 15.1 mg/kg Zn으로 나타났다. 이들 함량을 유흥일 등 (1988)이 제시한 한국의 오염되지 않은 지역에서의 벼이삭내 자연함유량과 비교하면, As는 4배 정도, Cd와 Cu는 다소 부화되어 있으며, Pb와 Zn은 비슷한 수준을 보인다 (Fig. 6). 또한 벼줄기내 As과 Cd의 평균함량이 각각 8.4와 0.52 mg/kg으로 매우 높아 이 지역의 배내 독성원소인 As과 Cd의 축적이 진행되고 있음을 알 수 있다. 그러나 밭작물중 깻잎과 콩잎내 Zn의 평균함량이 Kabata-Pendias and Pendias (1984)가 제시한 식물내 자연배경값의 상한값인 150 mg/kg Zn를 각각 초과하고 있

**Table 3.** Ranges and means of element concentrations in crop plants from the Daduk mine area (unit in mg/kg, dry weight).

	As	Cd	Cu	Pb	Zn
Rice grains (5)*	0.4 0.3-0.6	0.08 0.04-0.16	3.5 2.6-4.5	0.2 0.1-0.3	15.1 12.1-18.5
Rice stalks (11)*	8.4 3.8-15.1	0.52 0.10-2.29	7.9 2.0-24.8	2.2 0.4-7.7	58.2 17.8-217.8
Red pepper (2)*	1.2	0.67	7.8	0.9	43.5
Sesame leaves (1)*	0.6	0.44	15.2	2.9	166.8
Bean leaves (1)*	0.3	0.50	9.2	1.5	192.6
Radish leaves (1)*	0.5	0.19	2.6	0.6	38.8
Chinese cabbage (2)*	0.7	0.80	4.2	0.1	17.1
Normal rice grain <sup>a</sup>	0.09	0.06	2.3	0.44	16.6
Normal rice grain <sup>b</sup>	0.1-0.2	0.05	2.8	0.19	23.0
Normal plant <sup>c</sup>	1.0-1.7	0.05-0.2	5-30	5-10	27-150

\*Number of samples

<sup>a</sup> Rhu *et al.* (1988), <sup>b</sup> Kitagishi and Yamane (1987), <sup>c</sup> Kabata-Pendias and Pendias (1984)

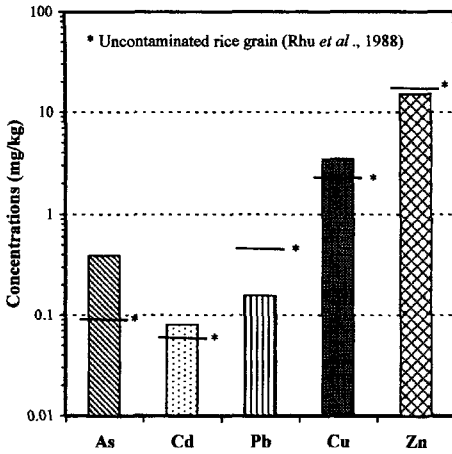


Fig. 6. Arsenic and heavy metal concentrations in rice grains from the Daduk mine area.

으며, 배추에서는 Cd의 함량이 다른 발작물에 비해 높게 나타나고 있어 이들 지역의 발작물내 Cd과 Zn의 축적이 다소 진행되고 있음을 알 수 있다 (Fig. 7).

손 톱

As은 인체의 다른 기관에 비해 머리카락이나 손톱에 주로 축적되는 것으로 알려져 있다 (Mahler et al., 1970; Herber and Stoepler, 1994). 따라서 머리카락이나 손톱내 As 함량은 인체의 As 독성노출에 대한 좋은 지시가 된다 (Smith, 1964; Valentine et al., 1979). 본 연구에서는 다덕광산에 거주하는 주민들의 As 및 중금속들의 인체 축적정도를 파악하기 위해 손톱시료에 대한 화학분석을 실시하였고, 그 결과를 Table 4에 나타내었다. 손톱내 원소들의 평균함량은 0.55 mg/kg As, 0.05 mg/kg Cd, 6.2 mg/kg Cu, 0.42 mg/kg Pb, 94.7 mg/kg

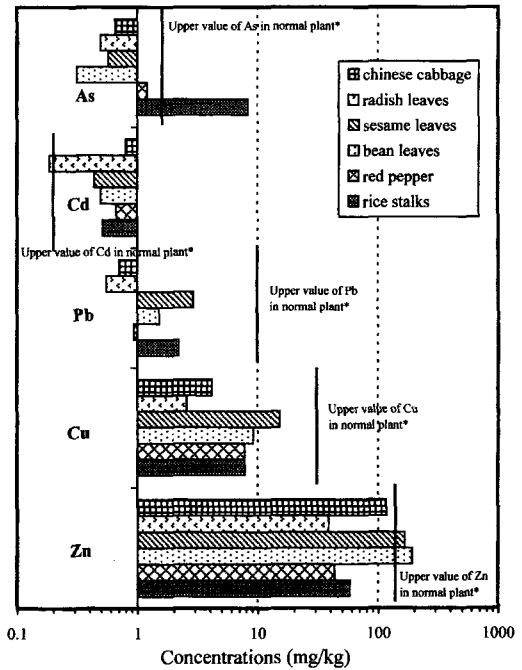


Fig. 7. Arsenic and heavy metal concentration in crop plants from the Daduk mine area (\*: Upper values based on Kabata-Pendias and Pendias, 1984).

Zn으로 나타났다. 이들 함량을 Liebscher and Smith (1968)과 Gordus (1973)가 제시한 손톱과 머리카락내 원소들의 자연함량과 비교하면, As만이 다소 높게 나타나고 있다.

또한 비교지역으로 도시에 거주하는 주민과 다덕광산 지역주민의 손톱내 평균원소함량의 차이에 대한 통계적 신뢰도를 조사하기 위해 T-test를 실시하였다 (Table 4). 이 결과 As의 T-value가 0.042로 통계적으로 유의한 차이를 보여 ( $p < 0.005$ ), As이 다덕광산 주변지역에 거주하는 주민의 건강에 영향을 미칠 수 있는 잠재적 독성원소로 판단된다.

Table 4. Ranges and means of element concentrations in fingernails of farmers from the Daduk mine area (unit in mg/kg).

	As	Cd	Cu	Pb	Zn
Farmer group (12)*	0.55	0.05	6.2	0.42	94.7
	0.20-1.48	0.01-0.13	1.5-15.4	0.16-1.05	62.4-149.8
Control group (9)*	0.33	0.04	5.0	0.46	98.6
	0.02-0.63	0.02-0.06	1.8-10.1	0.11-0.90	83.1-138.2
Normal level	Fingernail <sup>a</sup>	-	14.9	-	139.0
	Hair <sup>b</sup>	0.47	15-17	4.10	150-190
T-value <sup>c</sup>	0.042	0.136	0.206	0.290	0.335

\*Number of samples, <sup>a</sup>Liebscher and Smith (1968), <sup>b</sup>Gordus (1973), <sup>c</sup>Statistical significant at  $p < 0.05$  (When t value is less than 0.05, there are statistical differences in average concentrations between each group.)

**Table 5.** Arsenic and heavy metal concentrations leached from soils during *in vitro* simulation through the human stomach.

Soil type	As		Cd		Cu		Pb		Zn		
	Extracted Content (mg/kg)	% Bioavailability	Extracted Content (mg/kg)	% Bioavailability	Extracted Content (mg/kg)	% Bioavailability	Extracted Content (mg/kg)	% Bioavailability	Extracted Content (mg/kg)	% Bioavailability	
Paddy soil	8115	14.9	14.0	2.1	70.6	48.9	46.7	143.5	50.8	242.8	30.1
	8204	9.5	14.2	1.2	61.2	26.1	50.2	94.3	42.5	147.3	32.0
	8208	17.9	21.8	n.d.	n.d.	27.6	49.7	58.4	37.0	113.3	20.0
	8209	15.8	14.9	3.2	76.2	21.4	47.2	61.2	25.7	496.3	53.0
	8304	12.1	22.2	1.0	64.1	29.9	68.7	97.1	52.1	134.3	36.8
	8308	4.9	5.5	n.d.	n.d.	1.2	10.2	28.4	26.4	10.0	6.4
	8309	8.6	18.8	0.9	54.9	15.8	50.6	48.2	41.7	107.3	27.5
	Avg.	11.9	15.9	1.7	65.4	24.4	46.2	75.9	39.4	178.8	29.4
Farmland soil	RP	9.2	14.3	0.2	12.2	12.3	25.2	54.3	37.8	41.1	21.6
	BL	2.3	12.0	0.3	31.3	8.4	30.3	17.8	22.8	35.6	20.4
	SL	2.2	13.9	n.d.	n.d.	3.7	29.0	13.1	19.5	28.3	22.0
	CC	1.7	9.6	0.2	31.1	3.3	40.6	13.1	36.9	18.1	13.5
	Avg.	3.8	12.4	0.2	26.0	6.9	31.2	24.6	29.3	30.8	19.4

RP : Red pepper, BL : Bean leaves, SL : Sesame leaves, CC : Chinese cabbage

**독성원소들의 인체흡수도**

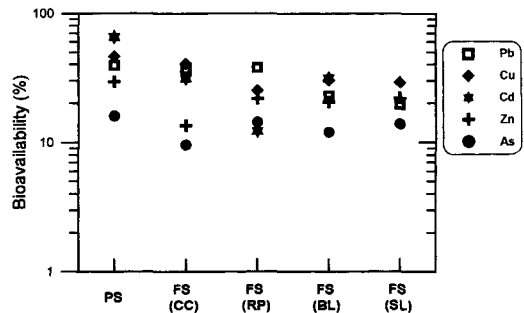
최근 많은 연구자들에 의해 조사된 인체의 위와 같은 조건하에서 토양으로부터 용출되는 독성 원소들의 분율을 측정하는 실험이 개발되어 연구되고 있다 (Imber, 1993; Ruby *et al.*, 1993, 1996; Medlin, 1997; Williams *et al.*, 1998). 본 연구에서는 Ruby *et al.* (1996)에 의해 제시된 PBET 분석방법을 단순화한 SBET 분석을 적용하여 토양내 독성 원소들이 다덕광산 지역에 거주하는 주민들의 건강에 미친 악영향을 평가하고자 하였다. 즉, 농사를 짓는 농부들은 잘 씻지 않은 더러운 손이나 채소 또는 호흡을 통해 무의식적으로 토양을 섭취하게 되는데, 오염된 토양은 일단 손을 통해 입으로 섭취하게 되고 인체의 위에 머무르게 된다. 위의 강산환경하에서 토양내 독성원소들은 빠르게 용출되어 인체로 흡수되고, 결국 인체내 축적되어 건강상의 문제점을 야기시키게 된다.

SBET 분석은 글리신을 이용하여 인공위산 (추출용액)을 제작하여 폐쇄계에서 1시간동안 토양과 반응시킨후 이로부터 추출된 독성원소들의 양을 측정하는 실험이며, 그 결과는 다음과 같은 식에 의해 백분율 (%)로 인체흡수도 (Bioavailability)를 산출할 수 있다. 또한 SBET 분석결과는 인위적으로 오염된 지역에서 독성원소들에 대한 인체위해성 평가 모델링 (Human

Risk Assessment Modelling)에 있어서 투입 자료로 사용되므로 그 가치가 중요하다고 할 수 있다 (Williams *et al.*, 1998).

$$\text{인체흡수도 (\%)} = \frac{\text{SBET 실험에 의해 추출된 토양내 원소의 함량}}{\text{혼합산에 의해 분해되어 측정된 토양내 원소의 총함량}} \times 100$$

다덕광산 주변지역의 일부 농경지토양에 대한 SBET 분석결과를 Table 5에 나타내었다. 인공위산과 1시간 동안 반응하여 추출된 논토양내 As, Cd, Cu, Pb, Zn



**Fig. 8.** Bioavailability of As and heavy metal extracted from soils, determined by the SBET method (PS : Paddy soil, FS : Farmland soil growing chinese cabbage (CC), red pepper (RP), bean leaves (BL) or sesame leaves (SL)).



의 인체흡수도는 각각 15.9, 65.4, 46.2, 39.4, 29.4%이고, 밭토양에서는 각각 12.4, 26.0, 31.2, 29.3, 19.4%으로 나타났다. 논토양에서 모든 원소들의 인체흡수도가 더 높게 나타난 것은 논토양이 관개수에 의해 물에 잠겨 있는 기간이 길어 상대적으로 원소들이 추출이 용이한 형태로 존재하기 때문으로 사료된다 (Fig. 8). 한편, 토양내 As의 인체흡수도가 다른 중금속들보다 낮게 나타났는데 이는 다른 중금속들은 낮은 pH에서 용해성이 좋으나, As은 높은 pH 환경에서 용해성 또는 인체흡수도 및 생물유효도가 좋기 때문이다. 그러나 다덕광산의 경우처럼 As에 의한 토양오염이 심화되어 있는 지역에서는 토양내 As 함량이 매우 높아 위에서 10~20%가 추출되는 As 함량도 높게 나타나므로 As이 인체에 미치는 독성은 크다고 할 수 있다. 따라서 이러한 SBET 분석결과는 다덕광산에 거주하는 주민들이 장기간 독성원소들에 노출된다면 잠재적으로 건강상의 장애가 유발될 수 있음을 지시한다.

## 결 론

1. 다덕광산 주변에 폐기된 광미중의 원소함량은 8,782 mg/kg As, 8.3 mg/kg Cd, 489 mg/kg Cu, 3,638 mg/kg Pb, 919 mg/kg Zn으로 매우 높게 나타났다. 특히 As과 Pb의 최대함량이 각각 4%와 1% 이상으로 나타나 이러한 광미가 바람이나 유수에 의해 광미뎀 하부에 있는 농경지나 하천으로 유입되어 주변 환경을 오염시킬 가능성이 크다.

2. 토양에서는 As, Cd, Pb, Zn의 함량이 자연배경값보다 매우 높다. 특히, As과 Pb의 함량이 토양중의 최대 허용한계값보다도 높게 나타나고 있는데, 이는 이 지역의 토양이 광미의 영향을 크게 받아 As과 Pb에 의해 상당히 오염되어 있는 것으로 판단된다.

3. 하상퇴적물내 원소함량은 1,578 mg/kg As, 9.0 mg/kg Cd, 161 mg/kg Cu, 714 mg/kg Pb, 1,730 mg/kg Zn으로 비교지역의 퇴적물보다도 수십배 이상으로 매우 높은 함량을 보였다. 광미적지장으로부터 거리가 멀어짐에 따라 As과 Pb의 함량이 점점 감소하고 있으며, 광미뎀으로부터 약 1.5 km까지도 이들 원소들이 분산되어 있다.

4. 비이삭내 As과 Cd의 함량은 각각 0.39, 0.08 mg/kg이며, 벼줄기내에서는 각각 8.35, 0.52 mg/kg으로 매우 높게 나타나 이 지역의 벼에는 As과 Cd의 축적이 진행되고 있음을 알 수 있다. 발작물의 종류에 따른 독성원소의 함량변화를 보면, 콩잎, 깻잎, 배추 등

의 잎과식물에 중금속의 농축이 두드러지게 나타나고 있다.

5. 인체의 손톱내 원소함량은 0.55 mg/kg As, 0.05 mg/kg Cd, 6.2 mg/kg Cu, 0.42 mg/kg Pb, 94.7 mg/kg Zn으로 As만이 손톱의 자연함량보다 높게 나타나고 있다.

6. SBET 분석결과에 의하면, 논토양내 As, Cd, Cu, Pb, Zn의 인체흡수도는 각각 15.9, 65.4, 46.2, 39.4, 29.4%이고, 밭토양에서는 각각 12.4, 26.0, 31.2, 29.3, 19.4%으로 모든 원소들의 인체흡수도가 밭토양에서보다 더 높게 나타났다. SBET 분석에 의해 토양으로부터 추출된 원소들의 함량은 다덕광산에 거주하는 주민들이 장기간 독성원소들에 계속적으로 노출된다면 잠재적으로 건강상의 장애가 유발될 수 있음을 지시한다.

## 사 사

본 연구는 한국과학재단 1998년도 후반기 해외 Post-Doc의 연구비와 BK-21 서울대·한양대 사회기반 및 건설기술 인력양성사업단 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또한 시료채취 및 자료정보에 많은 도움을 주신 대한석유협회의 이철규 박사님께 감사드립니다.

## 참고문헌

- 대한광업진흥공사 (1990) 한국의 광상 제12호 금속편.  
 박용하 (1994) 휴·폐광된 금속광산 지역의 오염 관리 대책. 한국환경기술개발원.  
 박희인, 최석원, 이상선 (1988) 다덕광산 풍정맥의 금은광화작용. 광산지질, 21권, p. 269-276.  
 손치무, 김수진 (1963) 한국지질도출양도폭. 국립지질조사소.  
 안주성, 전효택, 손아정, 김경웅 (1999) 구봉 금은광산 주변지역의 비소 및 중금속에 의한 환경오염과 비작물의 흡수특성. 한국자원공학회지, 36권, p. 159-169.  
 유흥일, 서운수, 전성환, 이민호, 윤순주, 허성남, 김수연 (1988) 우리나라 논토양 및 현미중 중금속 자연함량에 관한 조사연구. 국립환경연구원보, 10권, p. 155-163.  
 Adriano, D.C. (1986) Trace elements in the terrestrial environment. Springer-Verlag, New York, 533p.  
 Alloway, B.J. (1990) Heavy Metals in Soils. Blackie and Son Ltd.  
 Anon, J. (1977) Ecological evaluation of proposed discharge of dredged or fill material into material into navigable water, Interim guideline for implementation of section. Vicksburg, MS : 1-EZ.  
 Bowen, H.J.M. (1979) Environmental chemistry of the elements. Academic Press, 333p.

- Gordus, A. (1973) *J. Radionucl. Chem.*, v. 15, p. 229.
- Herber, R.F.M. and Stoeppler, M. (1994) *Trace Element Analysis in Biological Specimens*. Elsevier Amsterdam-London-New York-Tokyo.
- Imber, B.D. (1993) Development of a physiologically relevant extraction procedure. Prepared for BC Ministry of Environment, Lands and Parks, Environmental Protection Division, Victoria, BC. CB Research International Corporation, Sidney, BC.
- Jung, M.C. (1995) Environmental contamination of heavy metals in soils, plants, waters and sediments in the vicinity of metalliferous mine in Korea. unpublished PhD thesis, Univ. of London.
- Kabata-Pendias, A. and Pendias H. (1984) *Trace elements in soils and plants*. CRC Press, Boca Raton, 315p.
- Kitagishi, K. and Yamane, I. (1981) *Heavy metal pollution in soils of Japan*. Japan Scientific Societies Press, Tokyo.
- Kloke, A. (1979) Content of arsenic, cadmium, chromium, fluorine, lead, mercury, and nickel in plants grown on contaminated soil. paper presented at United Nations-ECE Symp.
- Liebscher, K. and Smith, H. (1968) Essential and non-essential trace elements. *Arch. Environ. Health*, v.17, p.881-890.
- Mahler, D.T., Scott, A.S., Walsh, J.R. and Haynic, G. (1970) A study of trace metals in finger nails and hair using neutron activation analysis. *J. Nucl. Med.*, v. 11, p. 739-742.
- Medlin, E.A. (1997) An in vitro method for estimating the relative bioavailability of lead in humans. Master thesis. Department of Geological Sciences, University of Colorado, Boulder.
- Nriagu, J.O. and Pacyna, J.M. (1988) Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. *Nature*, v. 333, p. 134-139.
- Persaud, D., Jaagumagi, R. and Hayton, A. (1989) Development of provincial sediment quality guideline. Ontario Ministry of the Environment, Water Resources Branch, Aquatic Biology Section, Toronto, Ontario, Canada.
- Ramsey, M.H., Thompson, M. and Banerjee, E.K. (1987) Realistic assessment of analytical data quality from inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. *Anal. Proc.*, 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. *Environ. Sci. Technol.*, 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. *Environ. Sci. Technol.*, v. 30, p. 422-430.
- Smith, H. (1964) The interpretation of the arsenic content of human hair. *Forensic Sci. Soc.*, v. 4, p. 192-199.
- Thornton, I. (1983) *Applied Environmental Geochemistry*, Academic Press, London, 501p.
- Valentine, J.L., Kang, H.K. and Spivey, G. (1979) Arsenic levels in human blood, urine and hair in response to exposure via drinking water. *Environmental Research*, v. 20, p. 24-32.
- Williams, T.M., Rawlins, B.G., Smith, B. and Breward, N. (1998) In-vitro determination of arsenic bioavailability in contaminated soil and mineral beneficiation waste from Ron Phibun, southern Thailand: A basis for improved human risk assessment. *Environ. Geochem. Health*, v. 20, p. 169-177.