

## 동진 금·은·동 광산 주변에 방치된 폐석의 환경적 영향

이무성\* · 전서령\* · 나춘기\*\* · 정재일\*

### Environmental Impacts of the Waste Rump in the Dongjin Gold-Silver-Copper Mine

Mu-Seong Lee\*, Seo-Ryeong Jeon\* , Choon-Ki Na\*\* and Jae-Il Chung\*

**ABSTRACT :** Although the Dongjin Au-Ag-Cu mine had been abandoned since about forty years ago, the results of this study on the dispersion patterns and contamination level of heavy metals in the hydrologic system flowing via the waste rump show that the environmental impacts from the mine wastes are still significant. The stream water in the vicinity of the waste rump is severely acidified (pH 3.8 to 4.4) and highly enriched in various dissolved heavy metals. The heavy metal contents of the stream water and stream sediments are systematically attenuated with increasing distance from the mine area. However, it is worth to note that continuous attenuation of heavy metal contents in both media were reenriched in downstream area more than 800 m apart from the mine because it can be acted as a secondary source of heavy metal pollution. The heavy metals, especially Cd, Cu and Zn of polluted downstream sediments mainly occur in Fe-Mn oxides and organic materials, which indicates that these elements are the main pollutants from the waste rump of the Dongjin mine. The heavy metal contents of crops, such as sesame, perilla, red pepper and brown rice, collected from the polluted farm land in the downstream area are lower than those of land plants from stream sides, but significantly higher in Cd, Cr, Cu and Zn than those from the unpolluted farm land. Especially, almost all of the crops in polluted farm land have been severely contaminated by Cd (>0.4 ppm). On the other hand, the heavy metal contents of the crops collected from refreshed farm land by means of a soil addition method shows significantly lowered level comparing with those of polluted area, which indicates that a soil addition method was effective for the refreshment of polluted farm land by toxic metallic pollutants. Wormwoods from this area showed very high contents in all the heavy metals even in unpolluted area (Cd > 1 ppm, Cr > 1 ppm, Cu > 11 ppm, Pb > 4 ppm, Zn > 55 ppm), indicating that a special caution must be payed when one takes ingest them.

### 서 론

우리 나라의 곳곳에 산재해 있는 금속, 비금속 광산의 대부분은 1980년대 이후 국제 경쟁력을 상실함에 따라 휴광 또는 폐광된 상태로 방치되고 있는 실정이다. 최근

환경에 대한 인식이 고양됨에 따라 이들 휴, 폐광상태의 광산 잔재가 주변수계 및 하부 농경지에 미치는 환경적 영향에 대한 연구가 활발하게 진행되면서, 방치된 구광도와 폐석 및 광미 등이 하천수를 산성으로 오염시키고 수중에 각종 유해금속의 농도를 증가시키며, 이로 인해 주변토양 및 농작물에까지 심각한 중금속 오염을 유발시키고 있음이 밝혀지고 있다 (조운승 등, 1983; 유순호 등, 1985; Xian, 1989; Thornton, 1990; 정기채 등, 1993; 김상현, 전효택, 1993; 이재영 외, 1993; 나춘기, 전서령,

\* 전북대학교 자연대학 지질학과 (Dept. of Geology, Chonbuk National Univ., Chonjum 560-756, Korea)

\*\* 목포대학교 공과대학 환경공학과 (Dept. of Environmental Eng., Mokpo Univ., Chonnam, 534-729, Korea)

1995). 특히 금속광산의 폐석은 인체에 유해한 As, Cd, Pb 등을 다량 함유하고 있을 뿐만 아니라 대부분 다량의 유화물을 함유하고 있어 이들이 풍화될 경우 주변을 강하게 산성화시키며 각종 유해 중금속의 이온화를 촉진시킴으로써 주변 중금속 오염원으로 작용한다. 이온화된 중금속

속 원소들은 자연수를 매개로 이동하여 하상퇴적물 및 주변 토양에 가용성 염으로 농축되거나 혹은 하천 하부에 위치한 농경지로 유입되어 직, 간접적으로 농작물을 포함하는 주변 생물계에 영향을 미침에 따라 궁극적으로 이들의 먹이사슬에 속한 인간에게까지 심각한 환경적 피해를 일으킨다. 또한 가용성의 중금속으로 농축된 하상퇴적물은 수류에 의해 이동되어 가며 이차적 오염원으로 작용할 수도 있다. 따라서 광산에 의한 중금속 오염에 대처하기 위해서는 이들 다원계에서 일어나는 중금속의 분산거동 및 상호 영향력에 대한 자료의 축적이 이루어져야 할 것으로 판단되며 이를 바탕으로 가장 효율적이며 경제적인 복구방안이 수립되어야 한다.

이러한 취지를 바탕으로 본 연구는 환경 오염원으로서 광산 주변 하천에 방치되어 있는 폐광석의 영향력을 파악하고 향후 대책을 수립하기 위한 기초자료를 얻기 위함에 그 목적을 두고 있다. 이를 위해 다량의 폐석이 방치되어 있는 산사면의 하천을 따라 자연수, 하상퇴적물, 식물시료 및 하부 농경지에서 재배된 농작물을 대상으로 원소들의 분포 상태와 중금속의 오염 정도를 알아내고 분산에 따른 중금속 분배의 변화 유형 및 생물체에의 농축 현상을 고찰하였다. 본 연구의 대상지로 선정된 동진광산은 과거 개발이 활발했던 금·은·동광산으로 폐광된지 30년이 지났으나 개발 당시 부산물인 폐광석이 하천의 상부 계곡을 광범위하게 덮고 있고 풍화의 정도가 심해 주변환경의 산성화 및 그에 수반되는 중금속 오염 등을 유발시키는 환

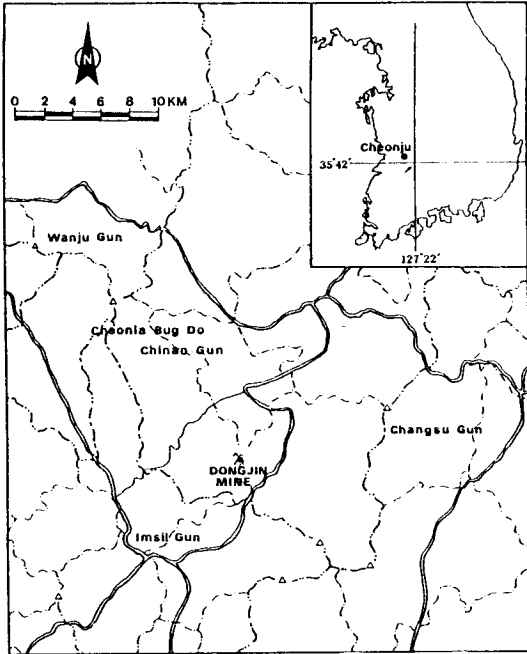


Fig. 1. Location map of the Dongjin-mine area.

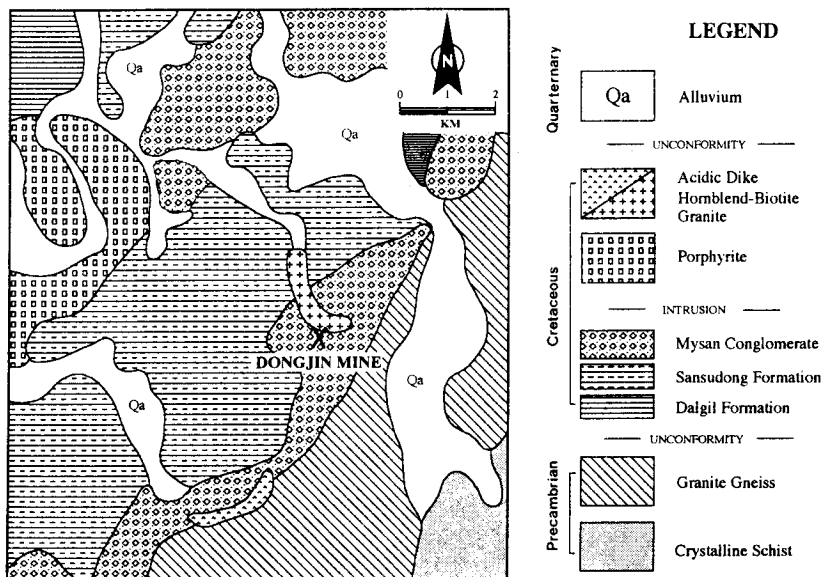


Fig. 2. Geological map of the Dongjin-mine area (after Shimamura, 1925).

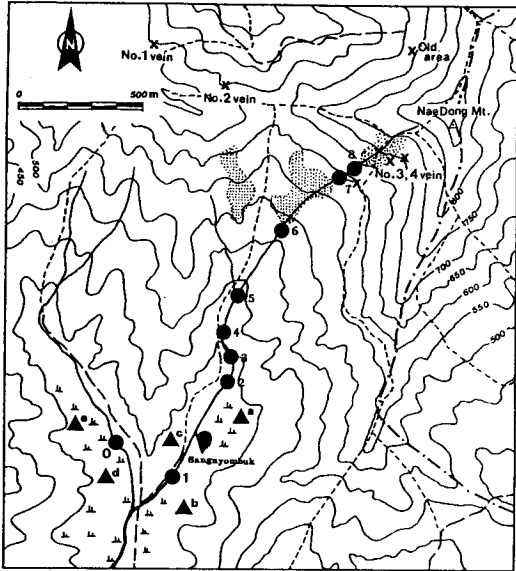


Fig. 3. Sampling points of the Dongjin-mine area (● : samplign points of stream water, sediments and land plants, ▲ : sampling points of crops and wormwoodm X : mine, dotted area : mine waster rump).

경 오염원으로서 작용하고 있다.

### 환경지질학적 배경

동진광산은 전주로부터 동남쪽으로 약 50 Km 떨어진 지역에 위치한 전북 진안군 성수면 내동산의 정상부근 (고도 887 m)에 위치하고 있으며, 도토리 증평마을 쪽으로 연결된 북쪽사면과 구신리 염북마을에서 연결되는 남쪽사면으로 나눌수 있다 (Figs. 1, 3).

### 주변지질

지질은 선캠브리아기 결정편암과 화강편마암을 기저로 하여 진안분지를 채운 백악기 퇴적층과 후기에 이를 관입한 화산암류로 크게 분류된다 (Fig. 2). 이 분지퇴적층은 진안층군과 이를 덮은 마이산 역암으로 구분된다. 진안층군은 만덕산층, 달길층, 산수동층으로 나누어지며, 산수동층은 사암, 회색 및 흑색 셰일로 구성된 층후 약 600 m, 달길층은 응회암, 흑색 셰일 및 응회암질 셰일로 구성된 층후 약 1,000 m, 만덕산층은 역암, 사암, 암회색에서 흑색 셰일, 안산암, 응회암질 셰일, 응회암 및 이회암 (marlstone)으로 구성되며 층후 약 800 m의 암층으로 이루어졌다 (島村新兵衛; 1925; 이영엽, 1992; 홍만섭의, 1966; Reedman *et al.*, 1975).

### 광산현황

동진광산은 진안층군중 산수동층과 마이산 역암층을 관입한 각섬석 흑운모 화강암 내에 발달한 열극을 충전한 맥상의 금 은 동 광상으로, 마이산 역암층이 현저하게 발달한 내동산의 정상부근에 위치한다. 내동산의 하부에서는 산수동층의 흑색, 회색의 세일층이 역암층과 호층을 이루고 나타나고 내동산의 정상부근에서는 화강암류인 각섬석 흑운모 화강암이 놓여있다. 광산은 이 화강암류의 분출이후 열수에 의한 금은광화작용에 의해서 형성된 것으로 생각된다.

본 광산은 금·은·동을 주 채광 대상으로 하는 광산으로 초기 개발 연대는 불확실하나, 해방전 내동산의 북쪽사면이 활발하게 개발되었던 것으로 보이며, 남쪽사면은 1953년경부터 재개발이 시작되어 1965년경까지 개발한 이후로 현재는 폐광 상태이다.

광맥들은 일반적으로 10~50 cm정도의 석영세맥이 아래쪽을 향해 주향 N80°E 방향으로 경사를 이루어 상당히 좋은 연장을 보이는 것으로 보고되어있다 (Koo *et al.*, 1965). 과거 1965년경의 조사보고서에 의하면 4개 맥 8개 level에서 수직거리 약 250 m구간이 착맥된 것으로 알려졌다. 당시 약 1,000 mt의 광석이 채광되었다고 기술하고 있다. 주로 산출되는 광석광물로는 황철석, 황동석, 섬아연석, 휘수연석 등이 주를 이루고 그의 소량의 유비철석, 방연석, 자류철석, 휘동석, 백철석 등과 함금·은 광물로 소량의 electrum, tetrahedrite 계의 광물등이 산출된다.

1호 맥의 경우는 해방 전에 개발되었으며 그 후 휴광중인 것을 해방 후 재개발로 2, 3, 4호 맥이 개발되었다. 해방 전 개발된 것중 내동산의 북쪽사면을 따라 개발된 것이 본 광산의 개발의 시작이었으며, 북쪽사면의 경우는 방치된 폐석의 양이 적어 오염의 정도가 약하고 오랜시간이 경과한 후라 많은 부분이 자연정화된 것으로 생각되나 남쪽사면의 경우는 폐광이후 방치된 폐석의 영향으로 하천이 상당히 산성화되어 있으며 하상퇴적물중에 생물이 전혀 서식하지 않는 등 아직도 폐석에 의한 오염이 심각한 것으로 판단된다.

### 하천수계의 특징

동진광산 주변에 방치된 폐석더미를 경유하며 흐르는 하천수의 발원은 계곡 상부에서 스며나오는 소규모의 지하수이며 이는 상부에 방치된 폐석더미로 스며들어 약 180여m 건천을 이룬 후 폐석더미 하부에서 스며나와

(Site 8) 구항도로부터 유출되는 항내수(지하수)와 합류된다(Site 7; Fig. 3). 이들 발원수는 다시 하부에 방치된 폐석 더미로 유입되어 표층수로서 흐르다 하부에서 다시 복류되어 약 100 m정도 건천을 이룬후 채침출(Site 6) 되어 하천수를 이루나 Site 5까지는 곳곳에서 부분적으로 건천을 형성하고 있는 단일 하천으로 발달하고 있다. 주변에서 유입되는 지류는 거의 없으며 하상의 상태로 미루어 볼때 수량의 변화가 매우 극심한 하천임을 알 수 있다. 지형적으로 깊은 골짜기를 이루고 있으며 경사는 하류에서는 완만하나(5~10°) 상류에서는 상당히 급경사(10~20°)를 이루고 있고 상류의 수량은 매우 적을뿐만 아니라 복류를 이루는 지점이 많아 일부 구간에서 시료 채취 조차 어려울 정도이다. 하천 주변의 토양은 하류에서는 대체로 잘 발달되어 있고 무성한 산림의 영향으로 두터운 유기물이 집적되어 있는 반면 상류는 하천 주변이 대부분 역암으로 구성된 암반상으로 토양의 발달이 미약하며 급경사를 이루는 부근에서는 유속이 빠르고 퇴적물이 거의 존재하지 않아 퇴적물의 시료채취가 어렵다.

### 시료채취 및 처리

시료채취는 광산을 경유하여 흐르는 남쪽 사면의 하천을 따라 약 0.1~0.4 Km 간격으로 8개 지점에서 1995년 4~5월에 하천수, 하상퇴적물 및 하천 양변에 성장하는 식물(양치류)을 수집하였다. 이 시기는 건기로 하천의 수량은 매우 적었으며 상류의 곳곳에서 건천이 형성되어 있었다. 모든 대상시료는 각 채취점별로 동일 지점에서 채취되었으며, 각 채취점을 대표할 수 있도록 1 m<sup>2</sup> 정도의 면적 이내에서 소량씩 채취 혼합한 것을 한 채취점의 시료로 하였다(Fig. 3). 또한 하부 농경지에서 재배된 농작물에 대한 폐광석의 영향을 평가하기 위해서 광산쪽 사면 및 광산의 영향이 없을 것으로 판단되는 반대쪽 사면에 위치한 농경지에서 산출된 참깨, 들깨, 고추, 벼 및 그 지역에 성장하는 썩을 각각 채집하였다. 이와 함께 오염 농경지의 복구대책에 대한 자료를 얻기위해 광산쪽에 위치한 농경지중 최근 객토를 실시한 농경지에서 산출된 동종의 농작물도 함께 채집하였다.

하천수 시료는 현지에서 pH를 측정하고 부유물질을 0.45 μm의 여과지로 여과하여 제거한 후 산처리된 polyethylene 병에 넣어 산화 및 침전과 흡착을 방지하기 위해 순수 질산을 가해 pH2~3정도로 산성화 시킨 것을 약 500 ml 채취하였다. 분석시료로는 가능한 원액을 이용하였으나 경우에 따라서는 10배 내지 20배로 저온 증발농축한 것을 이용하였다.

**Table 1. pH and selected heavy metal composition of the stream water samples from Dongjin Mine area.**  
(Zn in mg/L, the others are μg/L)

	pH	Zn*	Cd	Cr	Pb	Cu
SW-0	7.24	0.02	1.16	0.27	3.74	2.87
SW-1	6.87	0.31	3.46	0.45	4.53	5.31
SW-2	5.97	0.21	1.63	0.58	5.24	5.65
SW-3	5.67	0.14	1.57	0.35	4.07	3.78
SW-4	5.43	0.17	1.82	0.23	3.99	5.95
SW-5	5.02	0.33	2.90	0.28	4.48	9.24
SW-6	4.39	0.47	6.77	1.09	13.23	21.92
SW-7	5.52	0.48	4.16	0.23	3.87	8.45
SW-8	3.86	0.77	6.44	0.27	4.48	28.56

하상퇴적물은 대나무로 제작한 채취삽을 이용하여 가능한 표층부 시료만을 약 100 g정도 채취하였으며 이를 비닐봉지에 담아 실험실로 운반하였다. 실험실에서 4주간 자연건조하고 건조기를 이용하여 완전건조한후 180 mesh 이하의 입도로 체질한 시료를 대상으로 혼합산(HNO<sub>3</sub> + HF + HClO<sub>4</sub>)에 의한 완전용해법과 Tessier *et al.* (1979)이 제안한 다양한 시약에 의한 연속 추출법을 이용하여 처리하였다.

식물시료는 하천의 양변에서 성장하고 있는 고사리류와 농경지 연변의 썩은 직접 현장에서 채집하였으나 기타 농작물시료는 1994년 가을에 산출되어 보관중인 것을 채집하였다. 식물 및 농작물시료는 시료의 표면에 부착되어 있는 분진이나 불순물을 제거하기 위하여 증류수로 수회 세척한 다음 전기 건조기를 이용 완전 건조시켰다. 건조된 시료는 잘게 분쇄한후 정량을 자기 증발접시에 취하여 이를 전기로에 넣어 약 400°C정도에서 6시간 정도 회화시켰다. 회화된 회분은 혼합산으로 처리하여 용해시킨후 여과하여 시료용액을 제조하였다.

위와 같은 방법으로 처리한 시료 용액은 ICP-AES, Graphite furnace-AAS, AAS를 이용하여 Cd, Cr, Cu, Pb, Zn 등의 중금속을 분석하였다.

### 결과 및 고찰

#### 하천수

하천수 시료에 대한 pH 및 중금속 원소의 분석 결과를 Table 1에, 광산으로부터 거리별 원소함량의 변화 양상을 Fig. 4에 각각 나타냈다.

동진광산을 경유하여 흐르는 하천수의 pH는 3.9~6.9의 범위를 보였으며, 특히 광산 주변에서는 pH 3.9~4.4로 하천수가 강하게 산성화되어 있음을 알 수 있다. 중

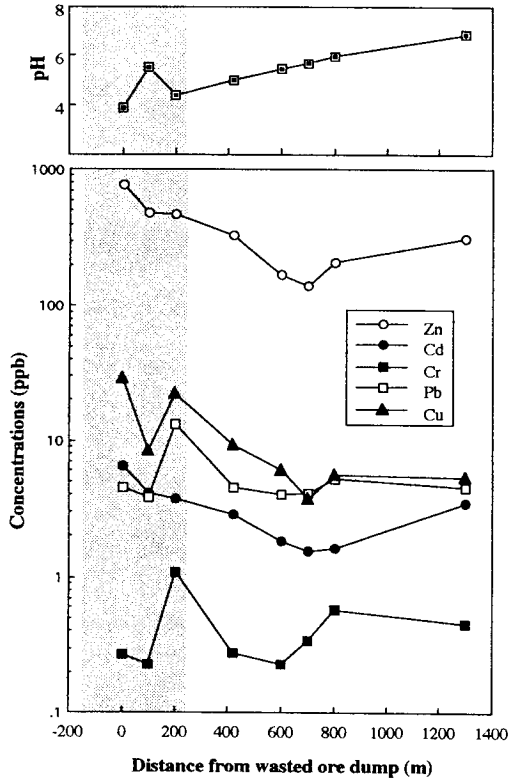


Fig. 4. Variation in pH and selected heavy metal contents of the stream waters as a function of the distance from the mine. Shaded area indicates the province of the waste ore dump around the Ddongjin-mine.

금속 함량의 변화는 각각의 지구화학적 특징에 따라 다양하나, 전체적으로 광산지대에서 높은 함량을 보이고 거리에 따라 점차 감소하는 경향을 보였다. 이렇게 광산지역 주변에서 pH값이 낮고 원소함량이 높은 것은 폐석에 함유된 황화광물들의 산화작용과 그로인해 방출된 수소이온이 주변 암석 및 폐석의 광물과 활발히 반응한 결과이다 (Stumm, Morgan, 1970).

광산이 존재하지 않는 사면의 하천수 (Site 0)에 용존된 Zn, Cd, Cr, Pb, Cu의 함량이 각각 0.02 mg/l, 1.16 µg/l, 0.27 µg/l, 3.74 µg/l, 2.87 µg/l인데 비해, 폐석을 경유하는 수계의 하천수 (Site 1)중에는 각각 0.31 mg/l, 3.46 µg/l, 0.45 µg/l, 4.53 µg/l, 5.31 µg/l로 적게는 1.2배에서 크게는 15배 이상의 높은 함량을 보였다. 특히, 향내수가 유입되는 채취점 (Site 7)은 pH 5.52로 그 상, 하부 채취점 (Site 6, 8)의 pH (3.86과 4.39)보다 높은 pH값을 보이고 중금속 함량도 낮은 점으로 미루어 보아 (Fig. 4) 향내수에 의한 오염이라기 보다는 주변에 방치된 폐석이

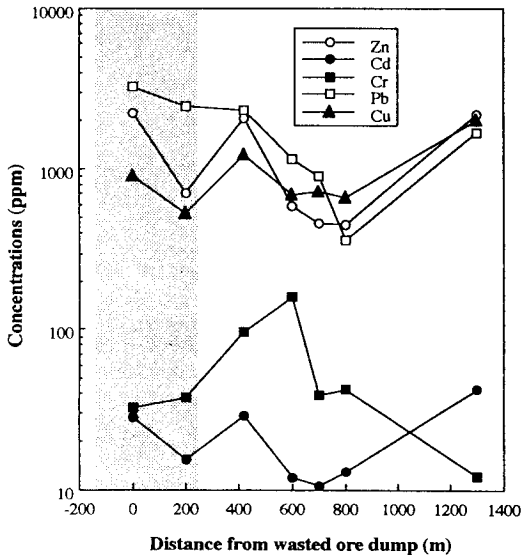
주된 수질 오염원으로 작용하고 있음을 보여준다.

각 중금속의 거리에 따른 함량은 다양한 감소율을 보이나, 전반적으로 광산으로부터 멀어질 수록 감소하는 경향을 보인다 (Fig. 4). 일반적으로, 오염원으로부터 유입된 원소들의 거리별 함량감소는 각 원소의 지구화학적 특성에 따라 주변지류의 혼입에 의한 희석작용에 의해 지배되거나 화학적인 환경변화 (pH, Eh 및 온도 등)에 의해 지배된다 (김옥배, 나춘기, 1987; 나춘기, 전서령, 1995). 연구지역의 수계가 주변 지류의 유입이 거의 없는 단일 하천으로 구성되었음을 고려할때, 이 수계의 하천수에 용존된 중금속 원소의 거리별 분산특성을 지배하는 주된 요소는 지구화학적 환경 변화에 따른 각 원소의 이동성의 변화와 철-망간산화물 또는 유기물과의 흡착제거율 등이 복합적으로 작용한 결과로 볼 수 있다. 따라서 이러한 화학적 환경변화에 의한 함량 감소 기구는 자연수중에 유입된 용존 오염원소들의 이동성을 효과적으로 제한할 수 있어 대부분의 오염 중금속 원소들은 특별한 환경변화가 초래되지 않는 한 수km 이내에서 하천수로부터 제거되어질 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 자연수와 폐석의 반응은 하천수가 흐르는 유로내에 국한되지 않고 폐석더미 전체에서 일어나고 있으며 이들은 장기간에 걸쳐 주변에 많은 양의 가용성 중금속을 유리시켜 농집될 수 있다. 이렇게 폐석전체에 걸쳐 농집된 가용성 중금속이 강수에 의해 일소될 경우 다량의 중금속을 일시에 하천에 흘려 보낼수도 있다. 이러한 상태의 하천수는 오염원으로부터 하류 마을까지 흐르는 동안 흡착이나 공침 등에 의해 오염 중금속의 농도를 감소시키는 자연정화의 능력을 초과하는 다량의 중금속을 함유한채로 하부의 농경지 및 생활용수에 유입됨으로써 심각한 중금속 오염을 유발할 수 있으므로 이에 대한 방비대책이 하천수에 의한 직접적인 중금속 오염을 제어하는데 있어 가장 중요한 요소라고 판단된다.

또한 마을 주변의 하천수 (Site 1, 2)에서 대부분의 중금속 함량이 높아지는 경향을 보이고 있음이 본 하천수계의 특징이다 (Fig. 4 및 Table 1). 이는 채취점 1과 2가 농경지대 마을앞에 위치하고 있어 농경활동 및 생활 오·폐수에 의한 오염으로도 판단할 수 있으나, 광산지대를 경유하지 않는 하천에서 채취한 하천수 (Site 0; Fig. 3) 역시 농경지에 위치하고 있음에도 불구하고 채취점 1과 2에 비해 낮은 원소함량 (Zn=0.02 ppm, Cd=1.16 ppb, Cr=0.27 ppb, Pb=3.74 ppb, Cu=2.87 ppb)을 보이고 있다는 점으로 미루어 볼때 그 오염원이 또 다른 데에 있음을 시사한다. 즉 채취점 1과 2에서 중금속 함량이 높아지는 경향은 폐석으로부터 용출된 중금속 이온에 의해 오염된 퇴

**Table 2.** The selected heavy metal compositions of the stream sediments, determined by hot extraction method (Unit in ppm).

	Fe	Zn	Cd	Cr	Pb	Cu
SD-1	20106	2173	42.2	12.3	1670	1987
SD-2	10427	456	12.9	42.4	364	670
SD-3	15896	459	10.6	38.8	897	725
SD-4	19650	593	12.0	160.1	1134	686
SD-5	36366	2065	28.9	96.7	2297	1223
SD-6	38539	712	15.7	37.5	2449	531
SD-8	34285	2203	28.3	32.6	3254	893



**Fig. 5.** Variation in pH and selected heavy metal contents of the stream sediments prepared by hot extraction method.

적물이 쇄설성 이동에 의해 하류까지 이동되어 이차적 부화현상과 그를 오염원으로 하는 재용출 현상에 의한 것으로 판단된다.

### 하상퇴적물

완전 용해법에 의해 처리된 퇴적물 시료에 대한 원소분석 결과와 광산을 중심으로 각 원소의 거리별 함량 분포를 Table 2와 Fig. 5에 각각 나타냈다. 동진광산 전체 하천의 하상 퇴적물중에 함유된 중금속 함량은 Cd=10.6~42.2 ppm, Cu=531~1897 ppm, Pb=364~3254 ppm, Zn=712~2203 ppm, Cr=12.3~160.1 ppm, Fe=1.1~3.8%로 Anon (1977)이나 Persaud *et al.* (1980)이 제시한 퇴적물의 오염정도 판별 기준치 (Cd=1 ppm, Cu=25 ppm, Pb=31~40ppm, Zn=90~100 ppm, Fe=1.7~3.0%)와 대비해

볼 때 매우 오염된 퇴적물의 수준을 보여 전반적으로 오염이 강하게 진행되어 있음을 알 수 있다. 하상 퇴적물에서의 중금속 원소의 집적은 풍화된 폐광석의 쇄설성 이동에 의한 유입과 폐석과 자연수의 반응에서 용탈된 원소들이 pH 등 지구화학적 환경이 변화함에 따라 금속의 수화물태 침전 또는 유기물 등과의 흡착·공침에 의해 일어난다. 고농도의 원소함량을 갖는 하상 퇴적물은 수류에 의한 이차 분산작용과 하천 주변으로부터 침식되어 유입되는 비오염 퇴적물의 혼입에 의해 재분배와 희석작용을 받게 될 것이며, 그 과정에서 오염원의 계속적인 공급이 없다면 시간에 따라 오염의 정도는 점차 감소하게 될 것이다. 그러나 연구지역 하천 하류의 하상 퇴적물은 상기와 같은 작용에 의해 하류로 확산되어감에 따라 점점 감소하는 경향을 보이지만 전반적으로 높은 원소함량이 유지되고 있어 광산 폐석에 의해 지속적으로 광범위하게 오염이 진행되고 있음을 시사한다.

특히 중금속으로 오염된 하상 퇴적물의 이차적 분산은 자연수와는 달리 주로 수류 등 물리적인 조건에 의해 일어나므로 제한되지 않는 특징을 갖고 있으며 이동된 오염 퇴적물은 지구화학적 환경의 변화에 수반하여 하천수중에 중금속 원소들을 재용출시킬 수 있는 이차적 오염원으로 작용할 수 있다. 따라서 이들 오염 퇴적물들의 이차적 분산을 제어하는 것은 오염원의 확장을 제어하는 측면에서 매우 중요하다. 또한 이들 오염 퇴적물의 존재상이 화학적으로 안정한 쇄설성 이동물인가 자연수중에 용존된 이온상 원소들이 퇴적물 표면에 흡착되거나 공침 또는 침전된 불안정상인가에 따라 이차적 오염원으로서 그 영향력은 달라질 것이다. 즉 불안정상의 존재비가 클수록 이차 오염원으로서 그 위험성은 증가하게 될 것이다. 이를 파악하기 위해 Tessier *et al.* (1979)이 제시한 연속 추출법에 의해 제조된 시료의 분석치를 토대로 각 원소의 존재 형태별 비율을 계산하여 Table 3에 나타냈다. Fe과 Pb는 안정상인 잔류형태 (Step V)가 우세하여 (>80%) 이들 원소의 이차적 분산상은 대부분 쇄설성 이동에 의해 지배되고 있음을 보인다. 반면 Cd, Cu, Zn의 존재형태는 상당히 높은 불안정상 (Step I~IV)을 보여 (30%) 폐석으로부터 용출된 상태로 용출, 운반된 이온상의 원소에 의해 상대적으로 많은 영향을 받았음을 보인다. 따라서 하상 퇴적물에 함유된 이들 원소들은 재용출의 가능성을 내포하고 있으며 본 광산의 개발로 인해 야기되는 주된 환경 오염 원소임을 시사한다.

### 식물 및 농작물 시료

광산 폐석으로부터 용출되어 주변 하천에 유입되는 중

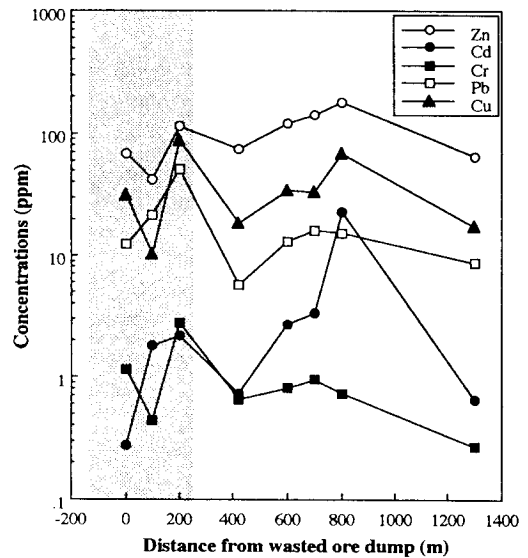
**Table 3.** Each fraction (%) of the selected heavy metals in the stream sediments, prepared by sequential extraction method (Tessier *et al.*, 1970). Step I : exchangeable fraction, Step II : bound to carbonate or specially adsorbed fraction, Step III : bound to Fe and Mn oxides fraction, Step IV : bound to organic and sulphides fraction, Step V : residual fraction.

Step. I	Fe	Zn	Cd	Cu	Pb
SD-1	0.008	4.105	6.055	1.044	0.964
SD-2	0.010	5.775	3.531	1.376	0.501
SD-3	0.013	3.485	2.879	1.197	1.839
SD-4	0.006	1.768	0.698	1.382	1.274
SD-5	0.002	0.707	0.373	0.639	0.661
SD-6	0.005	2.275	1.234	1.029	0.605
SD-8	0.007	1.675	1.675	0.993	0.488
Step II	Fe	Zn	Cd	Cu	Pb
SD-1	0.238	11.347	7.129	9.461	0.716
SD-2	0.457	14.318	11.779	13.332	1.016
SD-3	0.595	10.057	15.509	9.686	3.711
SD-4	0.510	11.843	12.849	6.969	0.483
SD-5	0.845	1.740	18.448	5.471	2.215
SD-6	0.396	10.896	15.068	7.573	0.140
SD-8	0.724	1.181	6.237	2.818	0.276
Step III	Fe	Zn	Cd	Cu	Pb
SD-1	3.406	18.505	4.100	12.609	1.516
SD-2	13.953	40.666	10.602	30.574	1.259
SD-3	19.079	27.936	16.325	13.021	8.880
SD-4	14.882	17.303	14.018	7.762	7.137
SD-5	11.183	5.230	7.723	3.370	4.657
SD-6	1.383	10.960	3.408	12.837	0.134
SD-8	15.035	5.522	6.733	4.644	0.683
Step IV	Fe	Zn	Cd	Cu	Pb
SD-1	0.666	4.472	0.840	10.485	0.597
SD-2	1.227	8.736	2.591	26.569	0.268
SD-3	2.446	8.289	4.081	35.044	2.188
SD-4	3.017	16.842	5.484	23.406	1.466
SD-5	3.908	27.957	11.229	31.616	1.737
SD-6	8.311	8.613	9.553	4.071	0.340
SD-8	4.684	85.552	35.998	56.319	0.810
Step V	Fe	Zn	Cd	Cu	Pb
SD-1	95.683	61.572	81.870	66.400	96.208
SD-2	84.354	30.505	71.497	28.148	96.955
SD-3	77.866	50.233	61.205	41.052	83.383
SD-4	81.585	52.244	66.951	60.481	89.640
SD-5	84.061	64.366	62.226	58.903	90.821
SD-6	89.905	67.255	70.737	74.490	98.782
SD-8	79.550	6.070	49.358	35.226	97.743

금속 원소들이 식물에 미치는 영향을 조사하기 위해, 하천 가장자리에 성장하는 양치류 (고사리류)를 타 시료와 동일한 지점에서 채취하여 중금속 함량을 분석하였다 (Table 4). Fig. 6에는 이들 식물내의 중금속 원소 함량의

**Table 4.** Heavy metal contents in Land Plants collected from the banks of the stream (Unit in ppm).

	Zn	Cd	Cr	Pb	Cu
LP-1	66.6	0.66	0.27	8.8	17.4
LP-2	181.9	22.66	0.72	15.2	68.6
LP-3	141.1	3.37	0.96	16.2	33.6
LP-4	122.0	2.71	0.81	13.2	34.7
LP-5	75.1	0.72	0.66	5.7	18.6
LP-6	115.1	2.18	2.79	51.4	87.2
LP-7	42.5	1.78	0.44	21.8	10.3
LP-8	68.4	0.28	1.13	7.6	31.7



**Fig. 6.** Variation in pH and selected heavy metal contents of the land plants collected from the banks of the stream.

거리에 따른 변화를 나타냈다. 대부분의 원소들은 불규칙한 변화를 보이면서도 거리에 따른 감소율이 타 시료에 비해 적으며 Zn과 Cd의 경우 하류 지역에서 보다 농축되는 경향을 보이고 있음이 특징이다.

본 하천 양변에 성장하는 양치류에 농축된 중금속 원소의 함량은 Cd이 0.28~22.66 ppm, Cu가 10.3~87.2 ppm, Pb가 4.9~61.7 ppm, Zn이 42.5~181.9 ppm의 범위를 보여 전 하천에 걸쳐 모든 원소가 매우 농축되어 있음을 보인다. 각 원소의 평균적 함량은 Zn > Cu > Pb > Cd로 자연환경에서 이동성이 높은 원소일수록 고품량으로 농축되는 경향을 보여 이재영 등 (1993)의 결과와도 잘 일치한다.

본 하천수계의 상부에 방치된 광산 폐석이 하류 지역 농경지에 미치는 환경적 영향을 파악하기 위해 광산쪽 사

**Table 5.** Heavy metal contents in crops and wormwood from the downstream area of the Dongjin-mine (Unit in ppm).

	Sample location	Zn	Cd	Cr	Pb	Cu
Seame-1	a: Polluted area	41.08	0.637	0.055	1.07	7.50
Seame-2	b: polluted area	61.19	0.606	0.057	0.82	4.74
Seame-3	c: refreshed area	47.90	0.182	0.076	1.20	4.30
Seame-4	d: unpolluted area	29.09	0.183	0.143	1.58	2.37
Seame-5	e: unpolluted area	29.83	0.168	0.099	0.93	1.59
Perilla-1	a: polluted area	36.78	0.385	0.469	1.17	10.30
Perilla-2	b: polluted area	57.01	0.070	0.104	4.67	9.01
Perilla-3	c: refreshed area	26.21	0.098	0.091	0.76	7.43
Perilla-4	d: unpolluted area	34.41	0.035	0.096	3.01	9.10
Perilla-5	e: unpolluted area	26.94	0.035	0.111	1.01	8.82
Red pepper-1	a: polluted area	21.72	0.059	0.062	1.72	3.27
Red pepper-2	b: polluted area	9.21	0.261	0.061	0.44	1.79
Red pepper-3	c: refreshed area	12.39	0.023	0.094	1.03	6.88
Red pepper-4	d: unpolluted area	14.98	0.036	0.049	0.87	1.19
Red pepper-5	e: unpolluted area	12.88	0.059	0.068	1.05	2.97
Brown rice-1	a: polluted area	19.33	0.160	0.429	1.21	4.53
Brown rice-2	b: polluted area	21.69	0.402	0.119	0.72	5.91
Brown rice-3	c: refreshed area	15.22	0.041	0.039	1.21	3.13
Brown rice-4	d: unpolluted area	17.77	0.024	0.049	1.00	2.68
Brown rice-5	e: unpolluted area	25.10	0.034	0.050	1.09	2.79
Wormwood-1	a: polluted area	425.06	10.362	1.654	6.43	21.84
Wormwood-2	b: polluted area	211.63	3.391	0.527	6.54	15.10
Wormwood-3	d: unpolluted area	73.76	1.019	0.943	4.37	14.12
Wormwood-4	e: unpolluted area	55.36	0.998	2.825	7.66	11.35

면과 광산의 영향이 없는 쪽 사면의 농경지에서 산출된 농작물 및 그 주변에 성장하는 쑥, 그리고 객토에 의한 오염된 농경지의 복구 가능성과 그 효율성을 검토하기 위해서 광산쪽 사면 농경지 중 객토된 농경지에서 생산된 동종의 농작물을 채취하여 (Fig. 3) 각 시료의 중금속 함량 분석치와 종류 및 채취 지역에 따른 중금속 함량을 대비시켜 Table 5와 Fig. 7에 각각 나타냈다.

농작물중의 중금속 함량은 농작물의 종류 및 원소에 따라 다양한 농축비를 보이며 전반적으로 광산지역의 하천에 연하여 위치하는 농경지의 산출물이 비광산 지역의 것에 비해 보다 농축된 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 특히 Cd에서 뚜렷하여 본 지역에 유입되는 Cd이 대부분 광산 폐석으로부터 유래된 것임을 시사하고 있다. 이 Cd은 유해 중금속중 하나로 현미의 함량 허용 기준치는 0.4 ppm이다 (松井, 岡崎, 1994). 본 지역의 농작물중 Cd의 최대함량은 참깨로서 0.637 ppm을 보여 기준치를 초과하고 있다. 또한 들깨 (0.385 ppm)와 현미 (0.402 ppm)도 기준치에 가깝거나 약간 초과되는 함량을 보여 전반적으로 Cd의 오염이 심각하게 진행되어 있음을 보인다. 반면 Pb는 대부분의 농작물에서 허용기준치인 2 ppm이하를

보이고 있어 Pb에 대한 오염은 그다지 진행되지 않았음을 보인다.

객토된 농경지에서 산출된 농작물들의 중금속 함량 역시 농작물별, 원소별로 매우 다양한 농축비를 보이지만 전반적으로 오염 농경지의 것에 비해 낮고 비오염 농경지의 것보다는 높거나 비슷한 수준의 중금속 함량을 보였다. 이는 중금속으로 오염된 농경지의 복구 수단으로써 객토가 효율적임을 시사하고 있으나 원소의 이동성, 객토에 이용된 토양, 객토의 두께, 객토 후 경과된 시간 등에 따라 농작물에 대한 오염 중금속 원소들의 영향이 다양하게 달라질 수 있을 것이다. 따라서 중금속으로 오염된 농경지에 대한 효율적이고 경제적인 복구계획을 수립하기 위해서는 상기 요인들에 대한 구체적이고 체계적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

쑥의 경우 오염 농경지 주변에 성장하는 것은 비오염 농경지의 것에 비해 뚜렷히 중금속이 농축되는 경향을 보였다. 특히 Zn과 Cd에서 뚜렷하여 오염 농경지쪽 (Cd=3.4~10.4 ppm, Zn=211~425 ppm)이 비오염 농경지쪽 (Cd=1 ppm, Zn=55~74 ppm)에 비해 3배 이상 농축되어 있음을 보인다. 이러한 차이는 쑥이 다른 농작물과 달리



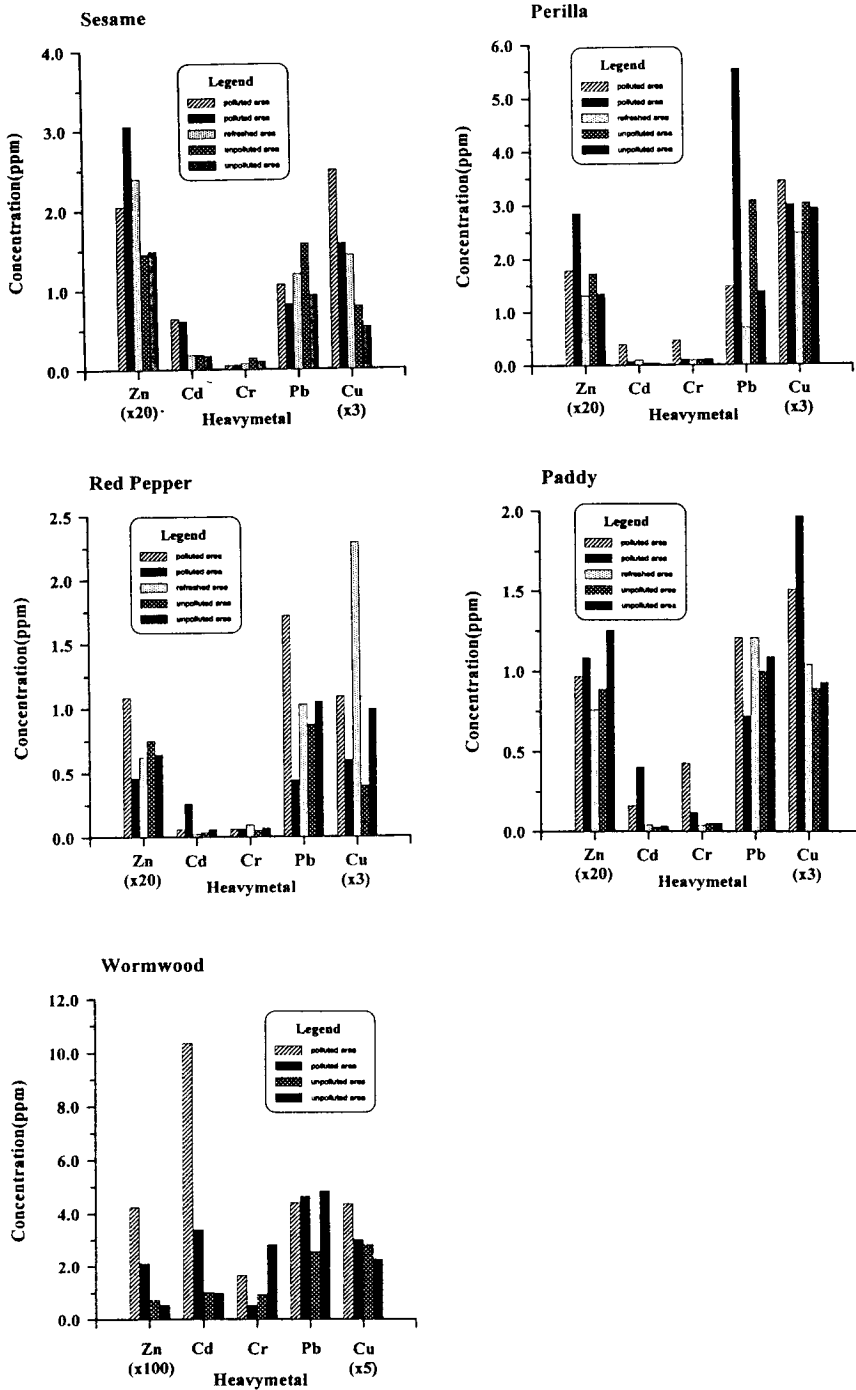


Fig. 7. Comparative histograms of each heavy metal content in crops and wormwood collected from polluted, re-freshed and unpolluted formland of downstream area.

다년생으로 장기간에 걸쳐 오염원의 영향을 받았기 때문으로 판단된다. 오염 농경지쪽은 물론 비오염 농경지쪽의

축도 전반적으로 고함량의 중금속 함량을 보여 타 식물에 비해 중금속 농축능력이 매우 높음을 보인다. 모든 지역

의 쪽에 함유된 중금속 함량은 허용기준치에 비해 10배 이상 농축되어 있어 이를 다량 섭취할 경우 체내에 다량의 중금속이 농축될 위험성이 매우 높아 중금속 중독증을 유발할 가능성이 있다.

각 식물별 원소의 농축률은 Zn과 Cd에서는 쪽 > 참깨 > 들깨 > 나락 > 고추 순이며, Cu와 Pb에서는 쪽 > 들깨 > 참깨 > 나락 > 고추 순으로 참깨와 들깨가 서로 순서가 바뀌는 경향을 보인다.

## 결 론

동진광산 주변에 방치된 폐광석이 주변 환경에 미치는 영향을 고찰하기 위해서 이를 경유하여 흐르는 단일수계의 하천수, 하상퇴적물, 하천 주변의 육상식물 및 하부 농경지에서 생산된 참깨, 들깨, 나락, 고추 그리고 쪽에서 보여지는 중금속 원소의 함량 및 분산특성을 고찰한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 동진광산의 폐석을 경유하여 흐르는 하천수의 pH는 광산 가까이에서는 3.86~4.39로 매우 산성화 되어 있으며 광산에서 멀어질수록 5.02~6.87로 점차 증가되는 경향을 보였다.

2. 하천수 및 하상퇴적물에 함유된 중금속 원소들은 광산지대에서 높은 함량을 보여 오염이 진행중임을 보이고 오염원인 폐석으로부터 멀어질수록 감소되는 경향을 보였다.

3. 거리에 따른 중금속원소의 분산상은 하천수와 하상퇴적물이 서로 유사하게 거동하나 하천수에 비해 하상퇴적물이 보다 하류 지역까지 확장되어 있으며 함량 감소율도 적었다. 단일하천수계임을 고려할때 하천수중의 중금속 함량 감소기구는 화학적 환경변화에 의해 주로 지배되는 반면 하상퇴적물은 쇄설성 이동에 의해 이차적으로 분산된 결과로 판단된다.

4. 하상퇴적물에 함유된 중금속 원소의 존재형태는 Fe와 Pb가 대부분 잔류상으로 존재하는 반면 Cd, Cu, Zn은 불안정상인 철-망간 산화물 및 유기물과의 결합형태가 상대적으로 우세한 경향을 보여 동진광산의 개발로 인한 주된 오염원소라고 판단된다. 또한 하상퇴적물은 이들 오염원소에 대해 이차적 오염원으로 작용할 가능성이 높다.

5. 농작물 시료중에 함유된 중금속 원소는 광산쪽 사면의 농경지의 것이 광산이 없는 사면쪽 농경지의 것에 비해 더 농축된 경향을 보여 광산폐석에 의한 중금속 오염이 하부 농경지까지 영향을 미치고 있음을 보인다. 농축정도는 원소별로는 Zn > Cu > Pb > Cd 순이었으며, 작

물별로는 참깨 > 들깨 > 나락 > 고추 순이었다.

6. 대부분 농작물에서 Cd이 허용기준치 (0.4 ppm)를 초과하거나 이에 근접하는 함량을 보이나 Pb는 모두 허용기준치 (2 ppm)이하를 보였다.

7. 객토 농경지에서 산출된 농작물의 중금속 함량은 모든 작물에서 오염 농경지에 비해 낮았으나, 비오염 농경지보다는 높은 것이 많아 이를 효율적으로 수행하기 위해서는 오염원소의 이동성 및 오염정도에 따라 객토의 방법 및 두께 등을 달리할 필요가 있으며 이를 체계화할 수 있는 정량적 근거가 마련되어야 할 것으로 판단된다.

8. 농경지 주변에 성장하는 쪽은 타 식물에 비해 모든 중금속 원소가 다량 농축되어 있으며 그 농축정도는 광산 쪽이 비광산쪽에 비해 월등하게 높아 오염원의 존재유무를 판별하는데 유효한 매개체로 이용될 수 있을 것으로 사료된다. 이와같이 높은 중금속 농축능력을 갖는 쪽의 다량 섭취는 인체에 다량의 중금속을 농축시킬 수 있어 중금속 중독증의 유발이 우려된다.

## 사 사

이 연구는 1995년 전략광물연구센터 연구비와 1994년도 한국학술진흥재단의 지방대 중점연구과제 (02D0275) 연구비에 의하여 연구된 것임을 밝히며 이에 감사한다.

## 참고문헌

- 김규봉, 최위찬, 황개하, 김정환 (1984) 한국지질도 (1:50,000), 오수도폭 및 설명서. 한국동력자원연구소
- 김상현, 전효택 (1993) 삼보 연-아연-중성석 광산 주변 하상퇴적물에서의 중금속 오염 연구. 광산지질 26권 2호, p. 217-226.
- 김옥배, 나춘기 (1987) 금속광상의 탐사를 위한 자연수 지구화학 탐사법의 개발에 관한 연구. 광산학회지, 24권 4호, p. 255-266.
- 나춘기, 전서령 (1995) 모악 금·은 광산에 방치된 폐석이 주변 수계 및 생태계에 미치는 환경적 영향. 자원 환경 지질학회지, 28권 3호.
- 鳥村新兵衛 (1925) 조선지질도 (1대 5만), 진안.전주도폭 및 설명서. 조선총독부 지질조사소.
- 松井健, 岡崎正規 (1994) 環境土壤學-人間の環境としての土壤學. 朝倉書店, p. 140.
- 유순호, 김계훈, 현해남 (1985) 아연광산 주변 토양중 Cd, Pb, Cu 및 Zn의 화학적 형태별 함량. 한국환경농학회지, 3권, p. 71-77.
- 이영업 (1992) 백악기 진안분지의 층서, 퇴적환경 및 진화에 관한 연구. 서울대학교 대학원 박사학위논문.
- 이재영, 김종근, 이인호, 이진국 (1993) 경북지역 폐금속광산이 환경에 미치는 영향. 광산지질 26권 4호, p. 465-472.
- 정기채, 김복진, 한상국 (1993) 아연광산 야생식물종의 중금속 함량조사. 한국환경농학회지 12권 2호, p. 105-111.

- 조윤승, 박재규, 정성용, 신동영, 이우석, 김형석 (1983) 광산 지대 주민의 중금속 축적에 관한 연구. 국립환경연구소보 5권, p. 215-223.
- 홍만섭, 윤석, 길영준 (1966) 한국지질도 (1:50,000), 갈담도 폭 및 설명서. 국립지질조사소.
- Anon, J. (1977) Ecological evaluation of proposed discharge of dredged and fill material into navigable water. Interim Guidance for Implementation of Section 404 (b) of Public Law 92-500.
- Koo, M. O, Bruce E. Russell (1965) Report of investigation Tongjin gold-silver-copper mine.
- Persaud, D., Jaagumagi, R. and Hayton, A. (1989) Development of provincial sediment quality guidelines. Ontario Ministry of the Environment, Water Resources Branch, Aquatic Biology Section, Tronto, Ontario, Canada.
- Reedman A. J. and S. H. Um (1975) The geology of Korea. Korea Institute of Energy and Resources.
- Sahu, K. C., Prusty, B. G. and Geeta Godgul (1994) Metal contamination due to mining and milling activities at the Zawar zinc mine, Rajasthan, India. *Chemical Geology*, v. 112, p. 293-307.
- Stumm, W. and Morgan, J.J. (1981) *Aquatic chemistry*, 2nd ed., Wiley & Sons.
- Tessier, A., Campbell, and Blsson., (1979) Sequential Extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *analytical chemistry*. Vol. 51, No. 7, p. 844-851.
- Thronton, I. (1990) Soil contamination in urban areas. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleocology*, v. 82, p. 121-140.
- Xian, X. (1989) Effect of pH on chemical forms and plant availability of Cd, Zn and Pb in polluted soils. *water, air and soil pollution*, v. 45, p. 265-273.

---

1995년 10월 18일 원고접수