

달성 Cu-W 광산 주변 수계의 하상퇴적물과 자연수의 Cd, Cu, Pb 및 Zn 오염

정 명 채*

Cadmium, Cu, Pb and Zn Contamination of Stream Sediments and Waters in a Stream Around the Dalsung Cu-W Mine, Korea

Myung Chae Jung*

ABSTRACT : In order to investigate the extent and degree of Cd, Cu, Pb and Zn contamination affected by mining activities of the Dalsung Cu-W mine, sampling of stream sediments and waters has been undertaken up to 1.5 km downstream from the mine at 50~150 meter intervals. Analysis of the samples was carried out using ICP-AES for Cd, Cu, Pb and Zn. Physical and chemical properties of sediments (pH, organic matter contents, cation exchange capacity) and waters (pH, Eh and temperature) were also measured. The properties of the sediment samples were characterized by low pH (3.0~5.5), low organic matter contents (2~5%) and a moderate degree of cation exchange capacity (7~15 meq/100 g) with a high proportion of sand fraction. The pH values of water samples ranged from 3.0 to 5.0 and the Eh levels were in the range of 350~530 mV. Concentrations of Cd, Cu, Pb and Zn in the sediments averaged 3.2 mg/kg, 1,390 mg/kg, 451 mg/kg and 262 mg/kg with the range of 0.6~11.4 mg/kg, 15~3,800 mg/kg, 14~1,330 mg/kg and 63~1,060 mg/kg, respectively. Significant levels of the heavy metals were also found in the water samples with the range of 10~170 $\mu\text{gCd/l}$, 300~41,600 $\mu\text{gCu/l}$, 10~80 $\mu\text{gPb/l}$ and 700~15,400 $\mu\text{gZn/l}$. These elevated concentrations in the sediments and waters may be caused by the weathering of mine waste materials and their high solubilities under acidic and/or oxidizing conditions. Although metal concentrations in the samples decrease with the distance from the mine, heavy metal contamination of sediments and waters were also found at the 1.5 km downstream due to the mobile conditions of the heavy metals, with particular reference to Cd and Zn in stream waters.

서 론

국내에는 약 2,000여개의 크고 작은 금속광산이 있으며 이들의 대부분은 휴광 또는 폐광된 상태이다. 그러나 다량의 유독성 중금속을 함유하고 있는 광산폐석과 광미더미들이 광산 주변에 산재되어 있어 여름철의 집중호우에 의해 하부로 흘러가거나 지하수로 유입되며, 겨울철의 강풍으로 비산된 미립자들이 이동 분산되어 광산하부의 농경지 와 주거지의 환경오염을 일으키고 있다 (Jung, 1995). 특

히 휴광 또는 폐광된 지역에서 자라는 농작물들은 오염되지 않은 토양에서 자란 농작물에 비해 수배에서 수십배 이상의 중금속을 함유하고 있어 이들을 계속하여 섭취하는 지역주민의 건강에 영향을 주기도 한다 (Thornton, 1983; Alloway, 1990; Jung, 1995). 토양과 식물의 중금속 오염뿐만 아니라 광석더미에서 유출된 중금속들은 주변의 수계로 이동 분산되어 지표수와 지하수의 오염을 유발시키고 있다. 특히 대부분의 금속광산의 폐석더미와 석탄광의 부산물은 황화물을 다량 포함하고 있어 광산주변의 산성광산배수 (acid mine drainage) 문제를 일으키며, 용출된 중금속 등 유독성 원소들은 계속적으로 수계를 오염시키고 있다 (Cheong, Thornton, 1994; Filipek *et al.*, 1987;

* 서울대학교 자원공학과 (Department of Mineral and Petroleum Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

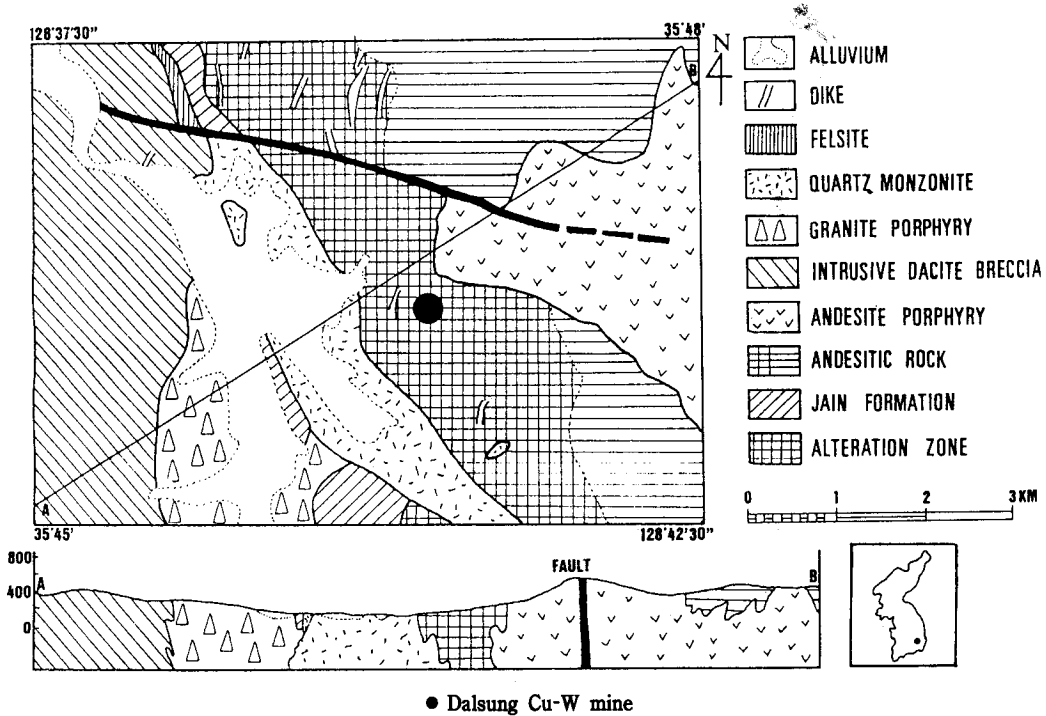


Fig. 1. Geological map of the Dalsung Cu-W mine area.

Boult *et al.*, 1994). Nriagu, Pacyna (1988)는 1983년을 기준으로 1년간 수계로 방출된 중금속들중에서 광산활동의 부산물에 의한 것이 Cd는 100~300톤, Cu는 100~9,000톤, Pb는 250~2,500톤, Zn는 20~6,000톤 정도로 전체량의 1~5%에 달하고 있다고 보고하였다.

광산활동에 의한 중금속의 수계오염에 대한 연구는 국내외에서 활발하게 진행되었다. 국내에서 연구된 하상퇴적물 및 자연수의 중금속오염 조사는 상동지역 옥동천의 광산 산성수 및 하상퇴적물의 중금속 오염 (Cheong, Thornton, 1994), 삼보 연-아연-중정석 광산 주변 하상퇴적물에서의 중금속 오염 연구 (김상현, 전효택, 1993), 신에미 Pb-Zn-Fe 광산과 거도 Cu-Fe 광산 주변 토양, 하상퇴적물 및 하천수의 중금속 오염 (전동진 등, 1995), 시흥 Cu-Pb-Zn 광산 주변에서의 중금속원소들의 분산 및 존재 형태와 흡착처리 (황호승, 전효택, 1995) 등이 있다. 또한 연구대상지역인 달성 Cu-W 광산 주변 수계의 중금속 오염 연구는 이진국 등 (1989)에 의해 수행된 바 있으며, 최근에는 이지역에 대한 공해방지시설 설치 방안 조사 연구 (대구광역시 달성군청, 1995)가 이루어졌다. 국외에서는 하상퇴적물의 중금속오염에 대한 종합적인 보고 (Warren, 1981), 영국의 수계오염에 대한 보고 (Bryan, Langston, 1992)가 발표되었으며, 광산이 밀집된 영국 북

부 Wales 지역 (Fuge *et al.*, 1989)과 Cornwall 지역 (Aston, Thornton, 1977)의 하상퇴적물과 자연수의 오염 연구 등이 이루어졌으며, Fergusson (1990)과 Jung (1995)은 그동안 여러 국가에서 조사된 결과를 종합하여 정리한 바 있다.

이 연구에서는 달성 Cu-W 광산을 대상으로 하상퇴적물과 자연수를 채취하여 이들의 물리, 화학적 분석을 실시하여 광산활동에 의한 Cd, Cu, Pb 및 Zn 등의 중금속 오염정도를 고찰하고 이러한 오염물질들이 수계를 통해 이동 분산되는 형태를 조사하고자 하였다. 이러한 연구 결과는 국내에 산재되어 있는 휴광 또는 폐광지역에서 발생하는 하천의 중금속 오염에 대한 오염특성과 대책을 수립하기 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

연구지역의 지질

행정구역상으로 대구광역시 달성군 가창면 상원리에 소재하는 달성 Cu-W 광산 (북위 35° 47' 31", 동경 128° 38' 08")은 1934년에 탐사되어 1938년 소정광업소가 금, 은, 동, 황화철광으로 광구를 등록하여 (등록번호 제 16644호, 순정석의 2인) 개발을 시작하였으며 1954년에 대한중석광업소가 광업권을 인수한 이후 1975년 휴광되

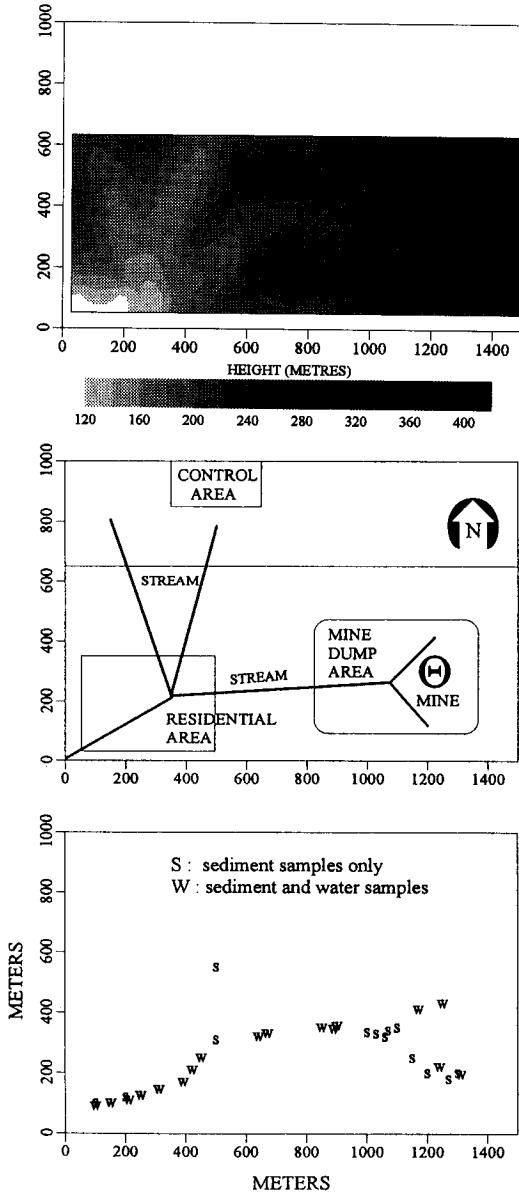


Fig. 2. Topography, site description and locations of sediment and water samples taken in the study area.

기전까지 약 20년간 중석과 동을 생산하였다 (대구광역시 달성군청, 1995). 특히 1961년에서 1971년까지 10년간은 우리나라 전체 동생산의 약 5~10%를 생산한 바 있으나 지역수준면보다 낮은 상부광도의 붕괴사고 이후 휴광상태에 있다가 1994년 6월 광업권이 소멸 (폐광)되었다. 광산주변은 휴광상태 이후 20년간 특별한 보안조치나 환경오염에 대한 적절한 처리없이 방치된 다량의 광산폐석과 광미더미가 광산 주변에 산재되어 광물질들의 산화와 경

내수의 유출로 인해 유해성 광산폐수가 주변의 토양, 식물 및 수계를 오염시키고 있다.

광산 광산주변의 지질은 신라통에 해당되는 응회암, 집괴암 등의 분출암류와 이들을 후기에 관입한 안산암질암류, 몬조나이트 및 규장암질암맥 등으로 구성되어 있으며 (Fig. 1), 본 광체는 각력화된 변성안산암의 각력을 충진하고 있는 석영맥중에 배태된 파이프상의 각력충진광상으로 모암은 열수변질을 받아 견운모화 및 규화 안산암과 프로필라이트화 안산암으로 변한 열수변질대를 형성하고 있다 (원종관 등, 1971). 광화대에서는 다량의 황동석과 철망간중석 (흑중석)이 확인되며, 소량의 휘창연석, 휘수연석 및 회중석이 수반되며 기타 황철석과 유비철석도 관찰된다.

시료채취와 분석방법

하상퇴적물의 개괄적인 오염정도를 조사하기 위하여 1991년 7월 15일 (4개 시료), 1992년 8월 13일 (10개 시료)에 광산 갱구와 폐석더미 하부의 수계에서 퇴적물을 채취하였다. 그리고 1992년 8월 12일~13일에는 하상퇴적물과 자연수를 광산이 위치하고 있는 지역의 수계에서부터 약 1.5 km 하부까지 50~150 미터간격으로 각각 17개씩 채취하였으며, 연구지역 주변의 지형, 수계 및 시료채취 위치는 Fig. 2에 도시되어 있다. 하상퇴적물은 모종삽을 이용하여 하천바닥에서 0~5 cm의 표층퇴적물을 채취하여 세척된 250 ml 용량의 플라스틱병에 저장하고 충전 테이프를 이용하여 공기와의 접촉을 피했다. 시료를 채취하는 위치의 대표성을 높이기 위하여 주변에서 9개의 부시료를 채취하여 하나의 완전한 시료로 처리하였으며 가능한 유속이 느린곳을 시료채취지점으로 선택하였다. 자연수는 하상퇴적물을 채취한 지점에서 1,000 ml를 채수하여 수동 펌프를 이용하여 직경 4.5 cm의 여과지 (0.45 μm membrane filter paper)를 통과시켰다. 이 시료를 세척된 플라스틱병에 넣고 농염산으로 pH를 1이하로 낮추었다. 또한 현지에서 자연수의 pH, Eh 및 온도를 측정하였으며, 채취된 시료들은 분석전까지 4°C 이하로 냉장보관하였다.

하상퇴적물 시료들은 여과된 공기가 순환되는 건조기에서 30°C를 유지하며 완전건조하여 -10 mesh (< 2 mm)로 체질하였다. 이들의 일부는 pH, 유기물함량과 양이온교환능력(cation exchange capacity)을 측정하는데 사용되었다. 하상퇴적물의 pH는 시료와 2차 증류수를 1 : 2.5의 비율로 혼합하여 1시간동안 자동진동기로 흔들어진 후 측정하였고, 유기물함량은 Ball (1964)이 제안한 작열감량법(loss-on-ignition method)을 이용하였다. 양이온교환능력

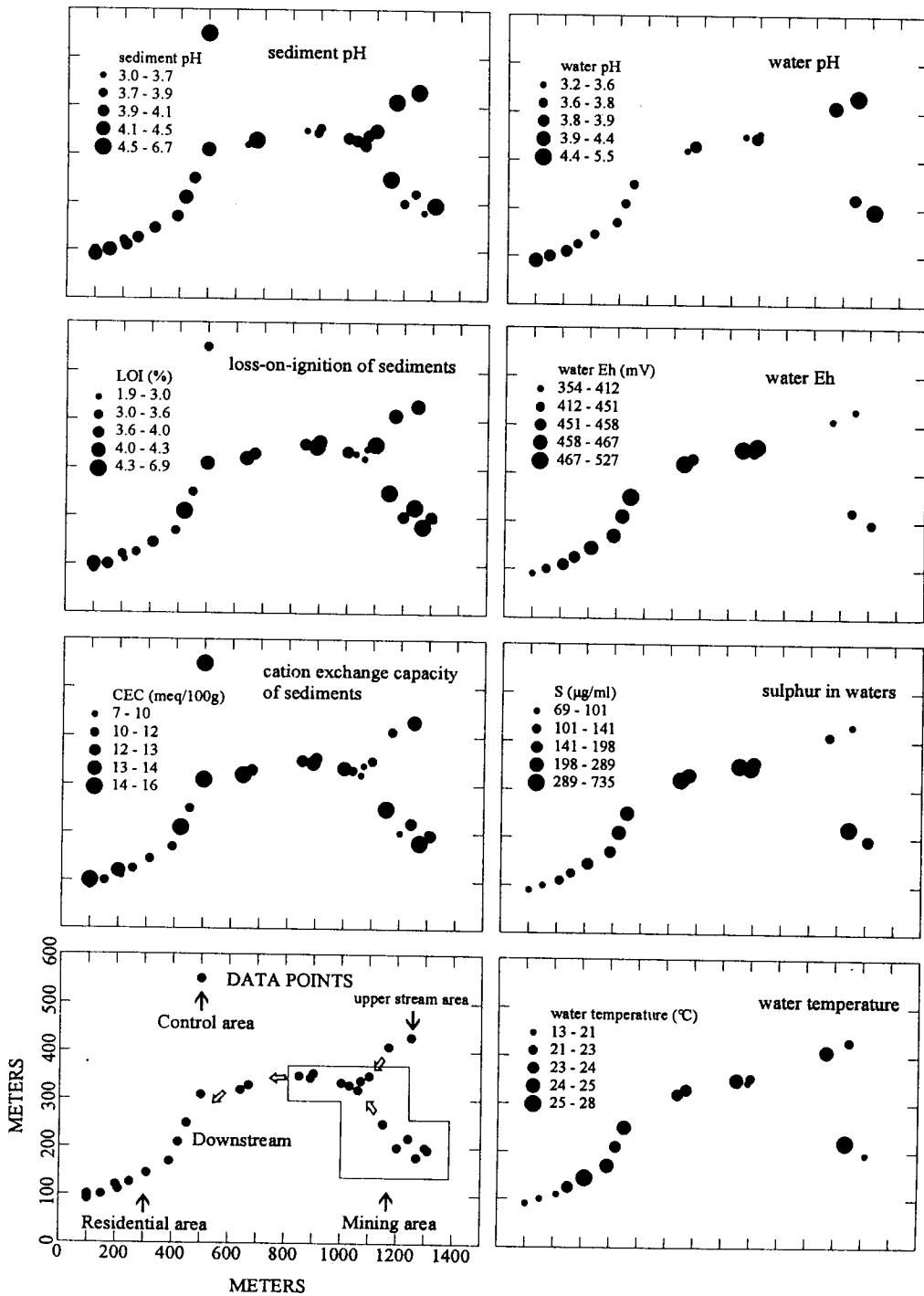


Fig. 3. Scatter diagrams for the physical and chemical properties of sediment and water samples taken in the study area.

Table 1. Physical and chemical properties of stream sediments and waters in the vicinity of the Dalsung Cu-W mine.

	N	Mean	Median	Range	Std.	25%	75%
Stream sediments							
pH	31	4.1	4.0	3.0~6.7	0.7	3.7	4.2
LOI(%)	31	3.7	3.8	1.9~6.9	0.9	3.1	4.1
CEC(meq/100 g)	31	11.8	12.0	6.9~16.0	2.1	10.0	13.0
Stream waters							
pH	17	3.8	3.8	3.2~5.5	0.5	3.7	3.9
Eh(mV)	17	451	455	354~527	41	430	467
Temp.(°C)	17	22	23	13~28	3	20	24

N=numbers of sample
 Mean=arithmetic mean value
 Std.=standard deviation
 25%=a quarter in ascending order of all the data measured
 75%=three-quarters in ascending order of all the data measured
 LOI=loss-on-ignition
 CEC=cation exchange capacity

은 Hesse (1971)가 제시한 방법으로 측정하였다(또한 2 mm 이하로 체질한 시료중에서 축분하여 1/4 정도를 자동 분쇄기를 이용하여 입도가 180 μm 이하가 되도록 미분쇄 하여 화학분석에 사용하였다). 0.25 g의 미분쇄된 시료에 농 질산 4 ml와 과염소산 1 ml를 넣고 24시간 (50°C에서 3시간, 150°C에서 3시간, 190°C에서 18시간) 가열하여 완전분해한 후, 5 M 염산 2 ml를 넣고 70°C에서 1시간 동안 용탈 시킨 용액에 8 ml의 2차 증류수를 넣어 최종용액이 10 ml가 되도록 하였다. 이 용액을 다원소용 유도분극 플라즈마 원자 방출 분광분석기 (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry)로 Cd, Cu, Pb 및 Zn 등을 분석하였다 (Thompson, Walsh, 1988). 자연수는 10 ml를 취하여 다원소용 유도분극 플라즈마 원자 방출 분광 분석기를 이용하여 직접 Cd, Cu, Pb 및 Zn 함량을 측정하였다.

분석과정에서 중복시료 (duplicate samples), 공시료 (reagent blank) 그리고 원소의 함량이 알려져 있는 국제적으로 공인된 표준시료를 이용하여 화학분석과정에서 발생할 수 있는 오류와 분석의 정밀도 및 정확도를 검증한 신뢰할 수 있는 분석결과를 얻었다 (Ramsey *et al.*, 1987).

분석결과와 고찰

하상퇴적물의 물리, 화학적 특성

연구대상지역에서 채취한 31개 하상퇴적물시료들의 물리, 화학적 특성을 Table 1에 제시하였다. 비교지역에서

채취된 시료 (pH=6.7)를 제외한 대부분의 시료들은 낮은 pH값 (3.0~5.5)을 나타내며, 이는 다량의 황화물을 함유한 폐석이나 광미들이 이동, 분산된 것으로 판단된다. 시료채취지역에 따른 변화를 고찰하기 위하여 도시한 Fig. 3에서 보는 바와 같이 광산 폐석더미 상부 (그림에서 오른쪽 상부)에서 채취한 2개 시료의 pH는 상대적으로 높지만 (4.6과 5.7) 폐석더미를 통과한 지역 (그림의 중간)에서 채취한 시료들은 매우 낮은 pH값 (<4.0)을 보이며, 광산에서 약 1.5 km 하부에 위치하는 주거지역 주변까지 4~5 정도의 낮은 pH값을 보이고 있다. 이러한 결과는 이진국 등 (1989)이 측정된 pH값 (3.41)과 유사하다.

일반적으로 하상퇴적물의 유기물함량은 유속이 느린 하천에서 미립자로 구성된 경우를 제외하고는 대부분 매우 낮으며 보통 1~5% 내외이다 (Jung, 1995). 연구지역에서 작열감량법으로 측정된 퇴적물의 유기물 함량은 평균 3.7%로 비교적 낮다 (Table 1). 이는 이지역에서 채취한 하상퇴적물이 비교적 입도가 큰 물질로 이루어져 있고 산성환경에서 수계의 미생물이 서식하기 어려운 이들의 시체들이 적어 유기물이 퇴적물에 축적되지 못했기 때문으로 판단된다. 이러한 연구 결과는 국내의 삼보 연-아연 광산 주변의 하상퇴적물에서도 확인된 바 있다 (Jung, 1995). 상대적으로 다소 높은 (5~7%) 유기물을 함유하고 있는 지역 (광산에서 약 400미터 하부)은 완만한 경사를 보이는 지역으로 유속이 비교적 느려서 이 주변에서는 소량의 유기물이 이동 농축된 결과로 해석할 수 있으며, 이 지점에서 하부로 이동되면서 작열감량은 감소되고 있다 (Fig. 3). 하상퇴적물의 양이온교환능력은 평균 11.8

Table 2. Concentrations of Cd, Cu, Pb and Zn in stream sediments and waters in the vicinity of the Dalsung Cu-W mine.

	N	Mean	Median	Range	Std.	25%	75%
Stream sediments (mg/kg, dry weight)							
Cadmium	31	3.2	2.6	0.6~11.4	2.1	2.0	4.0
Copper	31	1,390	1,250	15~3,800	886	960	1,580
Lead	31	451	420	14~1,330	258	359	539
Zinc	31	262	203	63~1,060	196	170	234
Stream waters ($\mu\text{g/l}$)							
Cadmium	17	60	50	10~170	40	40	70
Copper	17	12,700	10,800	300~41,600	10,200	6,700	15,500
Lead	17	40	30	10~80	20	20	50
Zinc	17	4,890	3,900	700~15,400	3,590	2,550	5,600

See Table 1 for explanation of abbreviation

meq/100 g 정도로 측정되었다 (Table 1). 이러한 결과는 이지역의 폐석더미에서 채취한 상부토양 (0~15 cm심도)의 양이온교환능력을 측정한 Jung (1995)의 결과 (평균 11.5 meq/100 g, 범위 3~18 meq/100 g)와 유사한 것으로 보아 광산직하부의 하상퇴적물은 광산폐석이 하부의 수계로 이동된 것으로 판단된다.

종합적으로 연구지역에서 채취한 하상퇴적물은 비교적 입도가 큰 물질들로 구성되어 있으며 상부지역 (광산에서 400미터 하부까지)은 광산폐석에서 이동된 것으로 판단되며, 특히 황화물을 다량 함유하고 있는 광미더미의 영향으로 낮은 pH값을 보이며, 낮은 유기물함량과 중간 정도의 양이온교환능력을 가진다.

자연수의 물리, 화학적 특성

시료채취 당시에 현장에서 측정된 자연수 시료들의 pH, Eh 및 온도를 Table 1에 제시하였다. 광산직상부의 소하천에서 측정된 자연수의 pH는 4.0~5.0 정도였지만 폐석더미를 지난 자연수의 pH는 3.0~4.0으로 낮아진다 (Fig. 3). 이는 하상퇴적물의 결과와 일치하며 황화물의 영향으로 판단된다. 비교적 완만한 지형인 광산으로부터 400미터 하부를 지난 자연수의 pH는 하부로 가면서 다소 증가하지만 1.5 km 하부지점에서도 여전히 낮은 4.5 전후의 pH값을 보여 이지역의 수계가 광산의 폐석더미에 의해 영향을 계속 받고 있음을 보여준다. 이러한 결과는 이진국 등 (1989)의 연구 결과와 일치한다.

채취한 자연수의 Eh값은 평균 451 mV이며, 광산상부에서 상대적으로 낮고 (350~400 mV), 폐석더미를 지난 후 급격히 증가하여 이진국 등 (1989)이 측정된 510 mV와 유사한 450~500 mV를 보이다가 거리에 따라 감소한

다 (Fig. 3). 자연수의 온도는 광산 갱구에서 채취한 시료 (13°C)를 제외한 시료들에서 21~28°C로 측정되었으며 이는 시료채취 시기인 여름의 대기온도에 영향을 받은 듯하다.

채취한 자연수 시료들의 황 (S) 함량을 도시한 결과를 보면 (Fig. 3), 광산폐석을 지나지 않은 시료들 (그림의 오른쪽 상부)은 상대적으로 낮은 황함량 (70~100 $\mu\text{g/l}$)을 보이는 반면, 광산의 갱도 주변 (그림의 오른쪽 하부)과 폐석의 영향을 받은 400미터 하부에서 높은 (300~700 $\mu\text{g/l}$) 함량을 보이며 하부로 갈수록 그 함량이 점차 감소되고 있다. 이러한 결과는 전술한 바와 같이 폐석더미에서 발생된 황화물이 주변의 수계에 영향을 미치고 있음을 확인해준다.

하상퇴적물과 자연수의 중금속 함량과 분산형태

오염원이 없는 지역에서 채취한 하상퇴적물의 중금속 함량은 지역에 따라 다소 차이는 있지만 그동안 보고된 결과들을 종합해 보면 0.1~0.5 mgCd/kg의 Cd, 10~70 mgCu/kg의 Cu, 10~50 mgPb/kg의 Pb 및 50~100 mgZn/kg의 Zn을 함유하고 있으며, 오염되지 않은 자연수에서는 0.01~0.50 $\mu\text{gCd/l}$, 1.0~10 $\mu\text{gCu/l}$, 0.1~5.0 $\mu\text{gPb/l}$ 및 1.0~20 $\mu\text{gZn/l}$ 정도가 일반적이다 (Jung, 1995). 그러나 다양한 오염원에 의해 영향을 받은 하천과 해안에서는 이러한 자연배경값에 비해 수십에서 수백배 이상의 중금속이 함유되어 있으며, 특히 광화지역, 광산 및 제련활동이 활발한 지역의 수계에서 채취한 퇴적물과 자연수에서는 수천배 이상의 중금속이 검출되고 있다 (Aston, Thornton, 1977; Fergusson, 1990).

연구대상지역에서 채취한 하상퇴적물과 자연수 시료

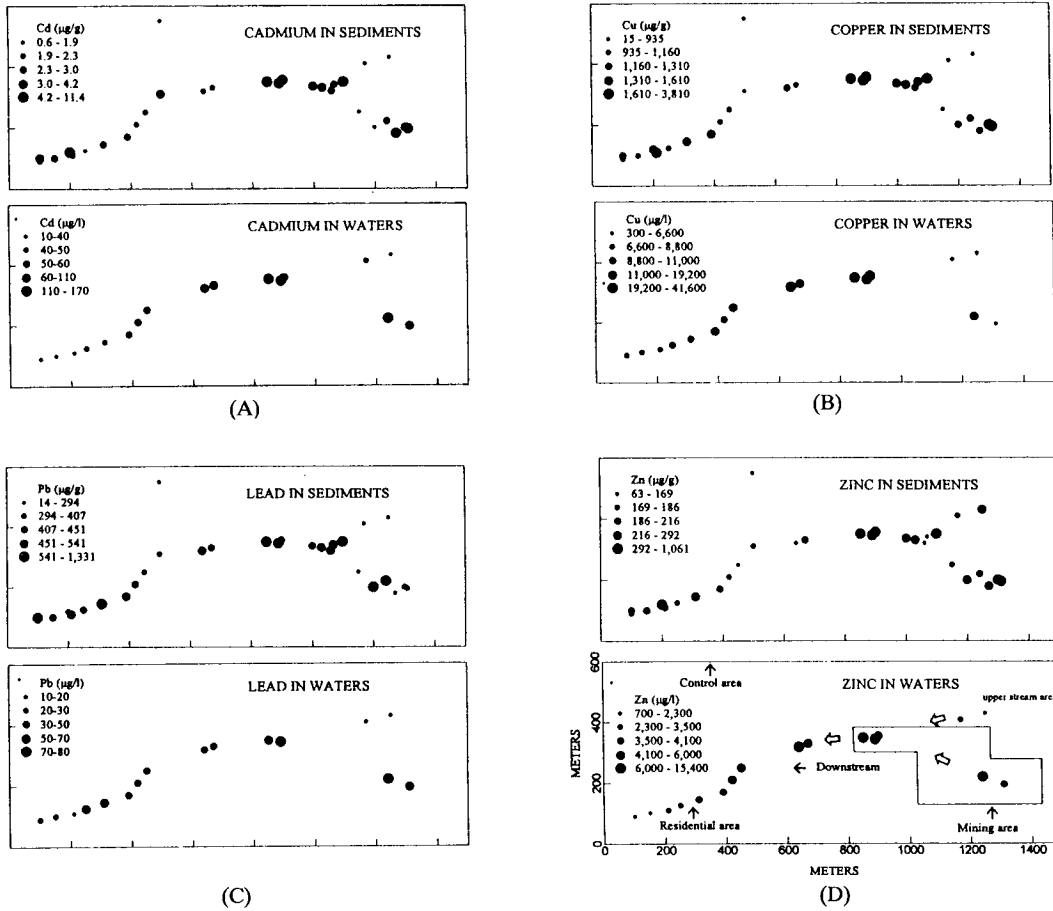


Fig. 4. Classified diagrams for Cd, Cu, Pb and Zn concentrations in sediments and waters sampled in the study area. (A) Cadmium, (B) Copper, (C) Lead and (D) Zinc.

들의 Cd, Cu, Pb 및 Zn 함량을 Table 2에 정리하였다. 하상퇴적물 시료들의 중금속 함량은 비교적 넓은 범위를 보이며, 건조무게를 기준으로한 평균함량은 3.2 mgCd/kg, 1,390 mgCu/kg, 451 mgPb/kg 그리고 262 mgZn/kg으로 비오염지역의 자연배경값에 비해 수배에서 수십 배에 이르고 있다. 특히 달성광산의 주 채광 광물인 황동석에서 유래된 Cu는 50배 이상의 함량을 보이고 있어 이 지역의 대표적인 오염원소임을 시사해준다. 그리고 채취된 자연수내의 평균 중금속 함량은 60 µgCd/l, 12,700 µgCu/l의 40 µgPb/l와 4,890 µgZn/l를 함유하고 있어 자연배경값에 비해 수백에서 수천배 이상 부화되어 있다. 연구대상지역의 자연수 시료들의 중금속 오염이 하상퇴적물 시료들의 오염 양상에 비해 높은 결과는 이 지역의 수계가 매우 낮은 pH값을 갖는 산성환경으로 하상퇴적물에 존재하는 대부분의 중금속들이 이러한 용해도

가 높은 환경에서 용출된 결과로 해석할 수 있다. 이러한 연구 결과는 원소의 용해도와 pH의 상호관계를 규명하는 중요한 자료중의 하나이며, 그동안 이루어진 연구들과도 일치한다 (Alloway, 1990). 또한 달성광산 주변의 폐석터미에서 채취한 토양시료를 연속추출한 결과, 이 지역의 토양은 용해가 쉽고 식물이 쉽게 흡수할 수 있는 화학결합 형태인 'exchangeable fraction'의 중금속이 5~10%정도 존재하는 것으로 확인된 바 있다 (정명채, 1994). 이러한 결과들을 종합해 볼 때 연구지역의 수계는 광산폐석과 광미터미에서 용출된 중금속들이 계속해서 광산 하부로 이동 분산될 수 있음을 시사해주고 있다.

각 시료들의 Cd, Cu, Pb 및 Zn 함량을 채취위치에 따라 도식한 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 대부분 광산에서 멀어질수록 그 함량이 감소되는 경향을 보이며 원소별로 하상퇴적물과 자연수 시료들의 분산형태는 다음과 같다.

Cadmium

광산폐석을 통과하지 않은 시료들 (그림의 오른쪽 상부)의 하상퇴적물은 1 mg/kg 내외, 자연수는 10 µg/l 정도의 Cd를 함유하고 있으며, 광산의 갱도 입구 (그림의 오른쪽 하부)에서 채취한 하상퇴적물과 지표수에서는 비교적 높은 Cd함량을 보인다. 그리고 광산폐석더미를 통과한 지역 (그림에서 중간 부분)은 비교적 완만한 경사를 이루고 있어 이곳에서 최대의 Cd 함량을 나타내고 있으며, 자연수에서는 최고 170 µg/l를 함유하고 있다. 이곳을 지나면 거리에 따라 Cd의 함량이 감소되고 있으며, 이러한 분산형태는 자연수 시료들에서 잘 나타나고 있다. 또한 하상퇴적물의 오염에 비해 자연수에서 Cd의 함량이 높은 현상은 낮은 pH에 의한 용해도의 증가에 따른 것으로 판단된다.

Copper

Cd의 분산상과 매우 유사한 경향을 보이고 있으며, 비교적 지역과 몇 개의 시료를 제외하고 대부분의 하상퇴적물에서 1,000 mg/kg 이상의 Cu를 함유하고 있다. 지구화학적 환경에서 Cu는 Cd와 Zn에 비해 용해도가 낮지만 연구 지역에서는 자연수의 Cu함량이 매우 높음 (> 6,000 µg/l) 이는 동광화작용과 관련된 주 오염원으로 광산폐석에서 용출된 것으로 판단되며, 특히 황화물에 의한 산성 환경이 영향을 준 것으로 설명될 수 있다.

Lead

광산의 상부지역과 갱도 입구의 퇴적물에서는 상대적으로 저함량의 Pb (10~400 mg/kg)가 검출되었지만 광산 폐석더미와 이들 하부에서는 비교적 높은 Pb (400~1,000 mg/kg)를 함유하고 있다. 특히 광산에서 400미터 하부에서 채취한 시료에서는 1,330 mg/kg의 Pb가 검출되었다. 또한 광산에서 멀어지면서 그 함량이 감소하는 경향을 보이지만 몇 개 지점에서 500 mg/kg 이상의 Pb를 함유한 퇴적물이 있는데 이는 광산폐석이 이동 분산된 결과로 판단된다. 자연수에서는 채취위치에 따라 차이는 있지만 광산 주변에서는 50~80 µg/l, 그 하부 지역에서는 10~50 µg/l 정도의 Pb를 함유하고 있으며 거리에 따라 뚜렷한 감소 경향을 보이고 있다. 일반적으로 Pb는 자연 환경에서 용해도가 매우 낮기 때문에 조사지역이 원소의 용해도가 높은 산성환경임에도 불구하고 Cd와 Zn에 비해 자연수내의 Pb 함량이 비교적 낮은 경향을 보이고 있다.

Zinc

채취된 하상퇴적물의 Zn의 함량 분포는 다른 원소들과 유사하며, 최고 함량 (1,060 mg/kg) 역시 폐석더미 하부에서 검출되었다. 산성환경에서 용해도가 높기 때문에 하상퇴적물에서는 자연배경값인 50~100 mg/kg에 비해 10배 정도 높지만 대부분의 자연수 시료들은 자연배경값인 1.0~20 µg/l 보다 수백배 이상인 2,000 µg/l 이상 검출되었다. 이러한 경향은 지구화학적 거동이 유사한 Cd에서도 확인되었다.

결 론

과거 활발한 광산활동 이후 폐광된 달성 Cu-W 광산 주변의 수계에 대한 중금속 오염 정도와 분산특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 광산 주변의 수계는 낮은 pH (3~5)와 높은 Eh값 (350~530 mV)을 갖는 산성 산화환경으로 광산에서 1.5 km 떨어진 하부 수계에서도 이러한 환경이 지속되고 있으며, 하상퇴적물은 낮은 유기물 함량 (2~7%), 중간정도의 양이온교환능력 (7~16 meq/100 g)을 갖고 비교적 입도가 큰 물질로 구성되어 있으며, 특히 광산의 직하부에서 400미터까지 광산폐석이 이동, 분산되어 있다.
2. 광산 주변에서 채취한 하상퇴적물내의 중금속 함량은 평균 3.2 mgCd/kg, 1,390 mgCu/kg, 451 mgPb/kg와 262 mgZn/kg으로 조사되었으며, 광산폐석을 통과한 지점에서 최고의 중금속이 검출되었다. 자연수 시료들의 중금속 함량은 평균 60 µgCd/l, 12,700 µgCu/l, 40 µgCd/l와 4,890 µgZn/l으로 조사되었으며 하상퇴적물과 같이 최고 함량은 광산에서 400미터 하부의 완만한 경사 지역에서 채취한 시료에서 검출되었다.
3. 조사대상 중금속인 Cd, Cu, Pb, Zn의 거리별 분산상은 매우 유사하였으며, 광산폐석더미를 지나기 전의 하상퇴적물과 자연수에서는 상대적으로 낮은 함량을 보이는 반면, 폐석더미를 지난 지점에서 그 함량들이 급격히 증가하고 그 이후는 광산에서 멀어지면서 감소되는 분산형태를 보이고 있다. 그러나 몇 개 지점에서 채취한 하상퇴적물 시료에서 비교적 높은 함량의 중금속이 검출되었으며, 이는 폐석더미의 입자들이 이동 분산된 것으로 판단된다. 자연수 시료들의 분산 형태도 퇴적물과 유사하게 분포하고 있으며, 거리에 따른 감소현상이 훨씬 더 명확하게 관찰되었다.
4. 연구지역의 주 오염원인 광산폐석에 존재하는 Cu에 의해 영향을 받은 퇴적물과 자연수에서는 그 함량이 자연

배경값에 비해 수백배 이상 검출되었다. 그리고 원소별로 고찰해 보면, 조사지역과 같이 산성 산화환경에서 용해도가 높고 이동이 용이한 Cd와 Zn이 용해도가 낮은 Pb에 비해 자연수에 많이 용해되어 있었다.

사 사

이 논문은 교육부의 국비유학 지원을 받아 영국의 런던 대학교 Imperial College에서 수행한 박사학위 논문 연구의 일부입니다. 지도해주신 I. Thornton교수께 감사드리며, 시료채취에 도움을 주신 서울대학교 공과대학 자원공학과와 전효택 교수와 대학원생들께도 사의를 표합니다. 이 연구는 한국과학재단 지정 전략광물자원연구센터에서 일부 재정지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- 김상현, 전효택 (1993) 삼보 연-아연-중정석 광산 주변 하상 퇴적물에서의 중금속 오염 연구. 광산지질, v. 26, p. 217-226.
- 대구광역시 달성군청 (1995) 달성광산 공해방지시설 설치방안 조사 연구. 대구광역시 달성군청, 191p.
- 원종관, 고중배, 홍승호 (1971) 한국지질도 경산도폭. 국립지질조사소, 20p.
- 이진국, 최옥진, 이재영 (1989) 달성 폐광산 하류천의 중금속 오염에 관한 지화학적 연구. 경북대학교 환경과학연구소 논문집 제3편, p. 13-36.
- 전동진, 전효택, 전용원 (1995) 신에미 Pb-Zn-Fe 광산과 거도 Cu-Fe 광산 주변 토양, 하상퇴적물 및 하천수의 중금속 오염. 한국자원공학회지, v. 32, p. 409-423.
- 정명채 (1994) 토양중의 중금속 연속추출방법과 사례연구. 자원환경지질, v. 27, p. 469-477.
- 황호승, 전효택 (1995) 시흥 Cu-Pb-Zn 광산 주변에서의 중금속원소들의 분산 및 존재형태와 흡착처리. 자원환경지질, v. 28, p. 455-467.
- Alloway, B.J. (1990) Heavy Metals in Soils. Blackie and Son Ltd., 340p.
- Aston, S.R. and Thornton, I. (1977) Regional geochemical data in relation to seasonal variations in water quality. Sci. Tot. Environ., v. 7, p. 247-260.
- Ball, D.F. (1964) Loss-on-ignition as an estimate of organic matter and organic carbon in non-calcareous soil. J. Soil Sci., v. 15, p. 84-92.
- Boult, S., Collins, D.N., White, K.N. and Curtis, C.D. (1994) Metal transport in a stream polluted by acid mine drainage-the Afon Goch, Anglesey, UK. Environ. Pollut., v. 84, p. 279-284.
- Bryan, G.W. and Langston, W.J. (1992) Bioavailability, accumulation and effects of heavy metals in sediments with special reference to United Kingdom estuaries : a review. Environ. Pollut., v. 76, p. 89-131.
- Cheong, Y.W. and Thornton, I. (1994) Acid mine drainage and heavy metal contamination of stream sediments in the Okdong cheon stream, Sangdong area, South Korea. Eco. Environ. Geol., v. 27, p. 101-113.
- Fergusson, J.E. (1990) The Heavy Elements; Chemistry, Environmental Impacts and Health Effects. Pergamon Press, Oxford, 614p.
- Filipek, L.H., Nordstrom, D.K. and Ficklin, W.H. (1987) Interaction of acid mine drainage with waters and sediments of West Squaw Creek in the West Shasta Mining District, California. Environ. Sci. Tech., v. 21, p. 388-396.
- Fuge, R, Paveley, C.F. and Holdham, M.T. (1989) Heavy metal contamination in the Tanat Valley, North Wales. Environ. Geochem. Health, v. 11, p. 127-135.
- Hesse, P.R. (1971) A Textbook of Soil Chemical Analysis. John Murry Ltd., London, 520p.
- Jung (1995) Heavy metal contamination of soils, plants, waters and sediments in the vicinity of metalliferous mines in Korea. unpublished PhD thesis, University of London. 455p.
- 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.
- 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.
- Thompson, M. and Walsh, J.N. (1988) A Handbook of Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry. 2nd edn. Blackie and Son Ltd., London. 273p.
- Thornton, I. (1983) Applied Environmental Geochemistry. Academic Press, London, 501p.
- Warren, L.J. (1981) Contamination of sediments by lead, zinc and cadmium : a review. Environ. Pollut. Series B, v. 2, p. 401-436.