

## 동명 금-은 광산 주변의 중금속 오염

이광춘<sup>1</sup> · 김세현<sup>1</sup> · 이승호<sup>2</sup> · 서용찬<sup>3</sup>

<sup>1</sup>상지대학교 자원공학과, <sup>2</sup>상지대학교 토목공학과, <sup>3</sup>상지대학교 환경공학과

## Contamination of Heavy Metals from Dongmyeong Au-Ag Mine Area

Kwang Choon Lee<sup>1</sup>, Sehyun Kim<sup>1\*</sup>, Seong Ho Lee<sup>2</sup> and Yongchan Seo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Minerals and Mining Engineering, Sangji University, Wonju 220-702, Korea

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, Sangji University, Wonju 220-702, Korea

<sup>3</sup>Department of Environmental Engineering, Sangji University, Wonju 220-702, Korea

Researches were carried out to investigate the characteristics and concentration of heavy metal elements of stream water through Dongmyeong abandoned metal mine and soil adjacent to the mine. The pH range of water was 5.9~7.1 that implies the water environment was acidic to neutral. The contents and distribution aspects of heavy metals in water samples varied with geochemical characteristics of element, but the concentration of heavy metals has the tendency of increase closer to the mine in general. The results of soil analysis show that total heavy metal concentration of agricultural soil near mine was far lower than those of ore tailing and dumping site. Therefore, the effects of the abandoned mine on stream water and agricultural products were supposed to be insignificant, particularly because the portion of adsorbed carbonates and reducible fractions among total heavy metal concentration was relatively lower than the other. Since, however, total heavy metal concentrations of mining site were relatively higher than those of adjacent region, there is a possibility of heavy metal diffusion when the chemical environment of the site changes due to migration of surface and underground water. It is suggested that the preventive measures for water and soil pollution by the heavy metals would be considered around the region.

**Key word** : Dongmyeong mine, heavy metal, fraction, tailing, contamination

동명광산을 경유하는 수계의 pH는 5.9~7.1의 변화를 보여 약산성 내지는 중성의 환경을 보인다. 하천수 중 중금속 원소함량의 분포는 각 원소의 지구화학적 특성에 따라 다양한 분포 양상을 보이나 전반적으로 폐광산 주변에서 증가하는 경향을 보인다. 동명광산 지역의 광미, 폐석적치장토양, 농경지토양에 대한 성분분석 결과 농경지토양에는 중금속의 총 농도가 광미나 폐석적치장의 토양보다 훨씬 낮았을 뿐 아니라 총 중금속 농도 중 adsorbed, carbonate, reducible fraction들이 차지하는 비율이 낮아 이들이 농작물이나 주변 수계에 큰 영향을 미치지 못할 것으로 생각된다. 그러나 하천수 중 중금속 원소함량 분포가 전반적으로 광산지역에서 증가하는 경향을 보이며, 광미나 폐석적치장 토양에서도 중금속의 총 농도가 매우 높았을 뿐 아니라 adsorbed, carbonate, reducible fractions들이 차지하는 비율이 농경지 보다 상대적으로 높았기 때문에 이들이 유실되거나 또는 산성우, 산성인 광산폐수의 유입 등으로 인해 화학적 환경변화가 발생할 경우 중금속 오염의 확산이 우려되므로 이에 대한 오염방지대책이 필요하다고 생각된다.

**주요어** : 동명광산, 중금속, 분화, 광미, 오염

### 1. 서 언

강원도 정선군 일대에는 금-은 광산이 밀집 분포하고 있어 정선 금-은 광상구(김옥준 등, 1970)라 명명되

고 있다. 이 중 정선군 임계면 송계 5리에 위치한 동명광업소의 갱구들은 장창돌 계곡의 상류에 산재해 있으며, 하류부근에도 과거 일제시대 때 개발되었던 갱구들이 분포하고 있다(Fig. 1). 이러한 폐광산의 존재는

\*Corresponding author: shkim@mail.sangji.ac.kr

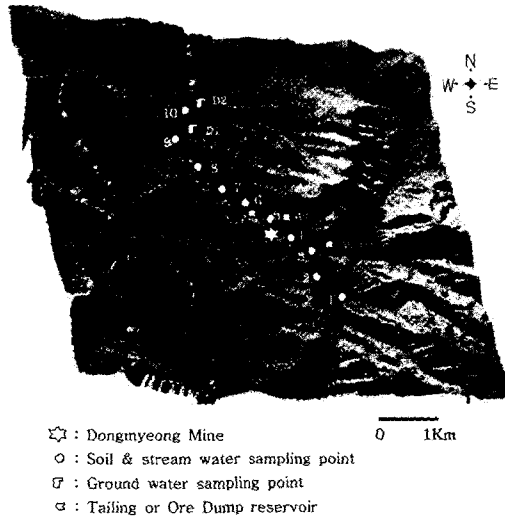


Fig. 1. Map showing hydrologic system and sampling points around the Dongmyeong Au-Ag mine area.

선광 부산물인 광미나 폐석등에 의해 다양한 형태의 중금속들이 분진이나 폐수 등을 통해 배출되어 주변 토양이나 지표수 및 지하수의 수질에 영향을 미쳐 하천수를 산성화시킬 뿐 아니라 주변의 황화광물은 물론 일반 조압광물의 분해를 촉진하여 다량의 유해 중금속 원소를 이온화 시킴으로서 광상에 관련된 주변 수계의 오염에 주요한 역할을 한다(김상현과 전효택, 1993; 이재영 등, 1993).

본 연구의 대상이 되는 동명 금-은 광산은 1982년부터 1996년까지 14년간 금, 은, 동, 연, 아연등을 대상으로 채광 및 휴광을 반복하였으나 현재는 광업권이 소멸되어 폐광 상태이다(김연기, 1997).

현재 동명광산 주변은 폐광재 유실 방지시설이 설치되어 있지 않아 과거 개발 부산물인 폐광재가 그대로 유실되고 있을 뿐 아니라 골짜기를 통하여 흐르는 하천을 따라 주변 농경지로 유입되기도 한다. 따라서 본 연구는 동명광산의 수계를 따라 하천수 및 토양시료를 대상으로 중금속의 오염정도 및 오염원의 확산경로를 파악함을 목적으로 하였다. 또한 과거 대구지방환경관리청의 폐금속광산 오염실태 정밀조사(1997)를 통하여 얻은 자료와 현재 수계환경에서의 중금속 원소들의 존재상태를 대비 고찰함으로써 시간에 따른 중금속의 오염정도 및 분산에 따른 중금속 분배의 변화유형을 파악하여 폐광산에 의한 수계 및 주변 농경지 토양으로 유입되는 중금속 오염의 시공간적 특성을 규명하고 그 방제를 위한 대책 수립에 기초자료를 제공하고자 하였다.

## 2. 지질 및 광상

연구지역은 태백산광화대 북부지역으로서 지질은 선캄브리아대 변성퇴적암류와 중봉산화강암, 캄브리아기의 조선누층군, 시대미상의 각섬석으로 구성되어 있다. 변성퇴적암류는 연구지역 남부에 분포하며, 사질암과 니질암이 호층으로 구성되나 사질암이 우세하다(황정과 박희인, 1996). 중봉산화강암은 연구지역 북부에 분포하며, 변성퇴적암류를 관입한 화강암체 주변에는 거정질의 전기석을 많이 포함하기도하며 이 지역에 동명광산이 위치한다. 연구지역 서부에 주로 분포하는 조선누층군은 변성퇴적암류와 중봉산화강암을 부정합으로 피복하며, 기저의 장산규암층으로 부터 상부의 풍촌석회암까지 발달한다. 각섬석은 낙천리에서 골지리사이에 주로 분포하며 풍촌석회암을 제외한 상기 암층의 경계부를 따라 판상 또는 암맥상으로 관입하였다. 연구지역의 지질을 규제하는 대표적인 지질구조는 중봉산 Dome 구조와 남북방향의 단층 및 동서방향의 Thrust 들이다. 이 지역내에 발달하는 단층들은 Thrust 판들의 차별운동에 의해 생성되었거나, 기존의 약선대가 재활성되어 생성된 주향이동단층이다(김정환과 기원서, 1991). 광상은 이 지역 주요 지질구조선인 남북방향 단층의 연변에 발달하는 열극을 충진한 맥상광상으로써 주향이 EW계와 N30°W계인 광맥군들로 구성된다. 동명광산은 금-은광물을 주 채광대상으로 하며 수반광물은 황화광물로 자유철석, 유비철석, 황철석, 백철석, 섬아연석, 방연석, 황동석이며, 은광물로는 합은 휘동석, 휘은석, 농홍은석 등이고 원소광물은 자연비스무스, 자연은, 에렉트럼이 산출된다(황정과 박희인, 1996). 맥석광물로는 석영과 능망간석이다.

연구지역의 수계는 광산 상부 골짜기를 따라 흐르는 하천의 폭은 약 25 m, 유량은 약 500 m<sup>3</sup>/h로 오염 영향권내 유로의 연장은 약 1,500 m에 이르고 있다(Fig. 1). 유로의 경사는 매우 완만하며 하상은 화강암으로 이루어져 있으며 수계 주변은 농경지로서 우기에 하천의 범람으로 인해 발생하는 폐광재의 유실에 노출되어 있다. 또한 이 하천에서 이용되는 농업용수의 사용면적은 18,000 m<sup>2</sup>로 대부분 이 밭 경작용수로 사용되고 있다(정선군 통계연보, 1997).

## 3. 시료채취 및 처리

토양 및 하천수시료는 동명광산 주변의 하천을 따라 10개 지점에서 일정한 간격(약100~200m)을 두고, 진기

(1999년 4월)와 우기(1999년 8월)로 나누어 채취하였으며 광상 하류지역 2개 지점에서 지하수를 채취하였다.

하천수는 각 시료마다 양이온 분석용, 음이온 분석용을 구분하여 채취하였으며, 양이온 분석용 시료에는 질산을 가하여 pH를 2이하로 조정하였으며 모든 시료는 0.45 μm의 Nitrocellulose Membrane Filter를 이용하여 부유물질을 제거하였다. 수소이온농도(pH), 산화-환원 전위(Eh), 온도와 전기전도도는 현장에서 측정하였다. 하천수의 양이온 중 Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe(total), Mn, Pb, Se, Zn를 ICP-MS로 분석하였으며, Cl-, F-, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>은 이온크로마토그래피로 분석하였다.

토양시료는 토양의 윗 부분을 건어내고 30 cm 내의 깊이에서 고루 채취한 시료를 실내에서 자연건조한 후 막자와 유발을 이용해 멩쳐진 부분을 분리시킨 후 80 mesh 미판으로 체질한 것을 대상으로 분말화 하여 분석하였다.

토양시료는 건조시킨 뒤 80mesh 입도의 시료 250 mg에 4 ml의 용액과 1 ml의 용액을 넣어 분쇄시킨 후 시약이 모두 증발하도록 24시간(50°C에서 3시간, 150°C에서 3시간, 180°C에서 18시간)동안 건조하였다. 여기에 5 M 2 ml를 넣어 용탈시킨 후 탈이온수 8 ml를 가해 총 10 ml로 정량화 시켰다. 이 용액으로는 Cr, Cd, Pb, Cu, CN, Mn, Zn를 ICP-AES로 분석하였다.

토양시료중의 As의 분석을 위해 Pyrex 비이커에 시료 250 ml과 saturated magnesium nitrate 1 ml, 70% 1 ml를 넣은 뒤 고온로에서 450°C로 6시간동안 가열하였다. 상온으로 냉각한 뒤 5 ml를 첨가하고 짐작필름으로 비이커를 봉하여 rocking machine에서 over night시켰다. 그 다음 0.2% 5 ml를 첨가로 적정하여 hydride generator가 설치된 ICP-MS를 이용하여 분석하였다.

토양시료중에 함유된 원소들의 존재형태를 고찰하기 위해 Tessier *et al.* (1979)이 제시한 연속추출법을 사용하였다. ① adsorbed form는 건조 분쇄된 시료를 1M MgCl<sub>2</sub> 8 μl를 첨가하여 1시간 진탕 후 여액을 측정하였고, ② carbonate form은 pH를 5.0으로 조절한 1M NaOAc 8 μl 5시간 동안 진탕한 후 여액을, ③ reducible form은 암모니아수로 6시간 진탕 후 여액을, ④ organic form는 silicate lattice의 간섭을 방지하기 위해 과산화수소와 차아염소산으로 분해 후 진탕한 여액을 시료로 측정하였다. ⑤ residual form는 염산, 과염소산, 불산으로 분해 후 여액을 시료로 하여 측정하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1. 갯내수 중의 중금속

동명광산 지역에서 발견한 갯구는 모두 붕괴되어 직접 갯내수를 채취하지 못하였으나 갯 입구 부분에는 갯내로부터 유출된 것으로 보이는 침출수가 고여 있어 이들을 채취하여 침출수로 분석하였다. 이들이 하천으로 유입되는 것을 확인할 수 없었으며 대부분 지하로 스며드는 것으로 생각된다.

갯내로부터의 침출수를 분석한 결과 각각의 원소함량은 Table 1과 같다.

침출수의 pH는 5.7에서 7.3으로 중성내지 약산성을 띠고 있었으며 광미적치장이 있는 갯구에서 건기에 3.8로 산성광산폐수의 특징을 나타낸다. 또한 갯내 침출수중 중금속의 양은 Cr, Hg, Pb는 ND~27.5 μg/L의 양호한 수질을 보이고 있었으나, As, Cd는 2.7~197.2 μg/L로 대부분의 지점에서 하천수 수질오염 기준값을 상회하고 있었다. Cd은 0.04~79.91 μg/L의 분포를 나타내고 있어 기준치의 8배를 초과하는 지역도 있었다. 또한 Fe, Mn, Zn은 최고 5.96 mg/L로 다소 높은 경향을 보여주고 있으나 동명광산의 수계의 하천 유량이 약 10 m<sup>3</sup>/min으로 침출수가 유입되더라도 충분한 완충능력을 지니고 있어 갯내수가 하천에 미치는 영향은 매우 적은 것으로 생각된다.

Table 1. pH and element content in Dongmyeong mine drainage water.

	MD3	MD3*	MD5*	MD6	MD6*
Al (μg/l)	82.0	39.1	218.7	591.1	50.6
As (μg/l)	180.8	20.5	104.4	197.7	2.7
Cd (μg/l)	7.9	0.0	48.2	79.9	19.8
Cr (μg/l)	1.5	1.2	1.8	1.7	0.2
Cu (μg/l)	15.7	3.7	432.1	385.5	29.0
Fe (μg/l)	197.4	45.0	1377.1	2452.7	50.1
Mn (μg/l)	385.9	2.1	930.1	1606.4	1150.3
Pb (μg/l)	8.3	1.2	4.1	27.5	1.9
Se (μg/l)	<1.239	1.5	17.0	<1.239	<1.239
Zn (μg/l)	1483.4	21.8	3882.5	5957.4	1789.6
Hg (μg/l)	<0.006	<0.006	<0.006	0.3	<0.006
pH	7.3	7.0	5.7	6.8	5.6
Cond. (μS/cm)	185.7	119.0	135.0	254.0	375.0

\*: rainy season.

**Table 2.** pH and element content in ground water from Dongmyeong mine area.

	D1	D1*	D2	D2*
Al ( $\mu\text{g/l}$ )	14.9	17.6	7.9	3.5
As ( $\mu\text{g/l}$ )	6.6	1.0	0.8	7.9
Cd ( $\mu\text{g/l}$ )	0.3	0.0	0.4	0.5
Cr ( $\mu\text{g/l}$ )	0.5	0.7	0.9	1.1
Cu ( $\mu\text{g/l}$ )	105.6	14.0	48.1	130.5
Fe ( $\mu\text{g/l}$ )	39.2	38.1	86.9	66.9
Mn ( $\mu\text{g/l}$ )	7.4	1.0	24.0	3.0
Pb ( $\mu\text{g/l}$ )	2.1	0.4	2.2	1.5
Se ( $\mu\text{g/l}$ )	<1.239	<1.239	<1.239	<1.239
Zn ( $\mu\text{g/l}$ )	939.4	102.6	829.4	266.4
Hg ( $\mu\text{g/l}$ )	<0.006	<0.006	<0.006	<0.006
pH	5.9	5.5	5.8	5.3
Cond. ( $\mu\text{S/cm}$ )	64.0	37.1	94.1	158.0

\*: rainy season.

**4.2. 지하수 중의 중금속**

동명광산 주변지역에서 채취한 지하수의 분석 결과는 Table 2에서 보여주고 있다.

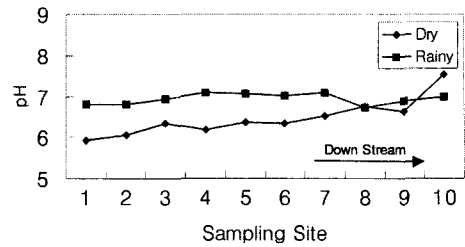
지하수의 pH는 5.3~6.1로 약산성을 띠고 있었으며 As, Cd는 0.8~53.6  $\mu\text{g/L}$ , Cu는 5.8~130.5  $\mu\text{g/L}$ , Zn은 42.2~939.4  $\mu\text{g/L}$ 로 먹는 물 수질기준과 비교할 때 대부분이 기준값 이하였다. 그러나 마을이 밀집한 지역의 지하수에서 질산성질소( $\text{NO}_3\text{-N}$ )가 9.1  $\text{mg/L}$ 으로 먹는 물 수질기준인 10  $\text{mg/L}$ 에 육박하고 있을 뿐 아니라 우기에 Cu와 Zn의 양이 급격히 증가하는 경향을 보인다. 이는 이 지역에서 사용하는 지하수는 대부분 천층 지하수이기 때문에 주변 농가로부터의 생활하수 또는 가축분뇨등에 의한 오수가 유입된 것으로 생각된다. 따라서 음용수로 사용하기에는 주의가 요구된다.

**4.3. 하천수 중의 중금속**

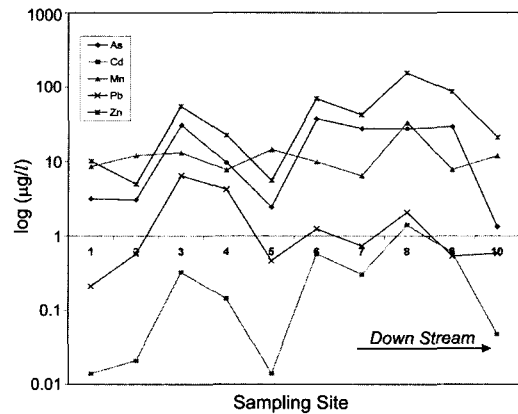
현장에서 측정한 하천수의 pH 및 하천수 시료에 대한 분석결과에 대한 원소함량은 Table 3과 같다.

동명광산을 경유하는 수계에서 pH의 변화는 5.92~7.09의 범위를 보여 약산성 내지는 중성의 환경을 보이며 특히 동명광산 광미적치장 주변에서는 5.92로 보다 산성환경이 형성되어 있음을 보이며, 우기보다 건기에 좀더 약산성을 보여준다(Fig 2).

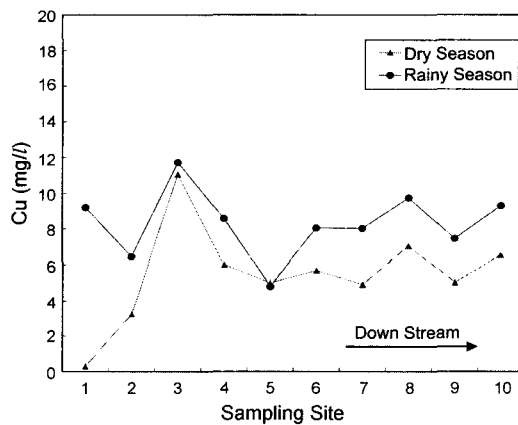
원소함량 분포는 각 원소의 지구화학량 특성에 따라 다양한 분포양상을 보이나 전반적으로 광산지대에서 증가하는 경향을 보인다. 각 원소별 함량변화는 광산 상



**Fig. 2.** Variation of pH by seasons in stream waters.



**Fig. 3.** Dispersion patterns of each element in stream water.



**Fig. 4.** Variation of copper by seasons in stream water.

부 비오염 하천수에 비해 갠구로부터 발생되는 침출수와 함유하는 지점의 하천수는 As가 3.18  $\mu\text{g/L}$ 에서 31.12  $\mu\text{g/L}$ 으로, Cd이 측정한계값 이하에서 0.33  $\mu\text{g/L}$ 으로, Mn이 8.61  $\mu\text{g/L}$ 에서 13.2  $\mu\text{g/L}$ 으로, Cu가 0.29  $\mu\text{g/L}$ 에서 11.05  $\mu\text{g/L}$ 으로, Pb가 0.21  $\mu\text{g/L}$ 에서 6.50  $\mu\text{g/L}$ 으로, Zn은 5.0  $\mu\text{g/L}$ 에서 55.67  $\mu\text{g/L}$ 으로 대

**Table 3.** pH and element content in stream water from Dongmyeong mine area.

	DW1	DW1*	DW2	DW2*	DW3	DW3*	DW4	DW4*	DW5	DW5*	DW6	DW6*	DW7	DW7*	DW8	DW8*	DW9	DW9*	DW10	DW10*
Al (μg/l)	19.6	54.2	39.6	61.3	41.1	45.9	34.5	20.1	26.0	33.8	25.6	42.2	21.7	41.3	23.8	31.0	17.5	36.0	62.1	241.1
As (μg/l)	3.2	0.4	3.1	1.0	31.1	2.6	9.6	10.2	2.4	0.5	37.6	12.7	27.8	9.9	27.8	13.2	29.3	13.2	1.3	0.3
Cd (μg/l)	<0.014	<0.014	0.0	<0.014	0.3	0.0	0.1	0.5	<0.014	<0.014	0.6	0.3	0.3	0.2	1.4	0.3	0.6	0.3	0.0	<0.014
Cr (μg/l)	0.8	0.4	0.6	0.4	0.9	0.5	0.7	0.5	0.7	0.4	0.5	0.4	0.7	0.4	0.3	0.5	0.8	0.5	1.0	1.1
Cu (μg/l)	0.3	9.2	3.3	6.5	11.1	11.7	6.0	8.6	5.0	4.8	5.7	8.1	4.9	8.0	7.1	9.7	5.0	7.5	6.6	9.3
Fe (μg/l)	16.7	30.1	19.8	48.6	47.8	35.6	12.3	20.2	11.4	30.1	8.9	30.0	8.8	33.7	14.0	41.5	10.4	48.6	67.8	172.5
Mn (μg/l)	8.6	3.5	12.1	1.6	13.2	2.0	7.7	8.9	14.5	1.6	9.9	3.0	6.4	5.7	33.6	3.1	7.8	16.9	11.9	4.3
Pb (μg/l)	0.2	0.2	0.6	0.1	6.5	0.2	4.2	0.4	0.5	0.1	1.3	0.2	0.7	0.2	2.1	0.3	0.5	0.4	0.6	0.3
Se (μg/l)	<1.239	<1.239	<1.239	<1.239	<1.239	1.9	<1.239	1.6	<1.239	<1.239	<1.239	<1.239	<1.239	1.7	<1.239	1.6	<1.239	1.2	<1.239	1.4
Zn (μg/l)	10.1	8.9	5.0	8.1	55.7	16.4	22.5	69.3	5.6	8.8	70.2	49.9	42.5	34.8	156.3	97.0	86.6	75.7	21.1	12.6
Hg (μg/l)	<0.006	<0.006	<0.006	<0.006	<0.006	<0.006	<0.006	<0.006	<0.006	<0.006	<0.006	<0.006	<0.006	<0.006	0.0	<0.006	<0.006	<0.006	<0.006	<0.006
CN <sup>-</sup> (μg/l)	<0.029	<0.029	<0.029	<0.029	<0.029	<0.029	<0.029	<0.029	<0.029	<0.029	<0.029	<0.029	<0.029	<0.029	<0.029	<0.029	<0.029	<0.029	<0.029	<0.029
F <sup>-</sup> (μg/l)	0.4	0.2	0.4	0.5	0.4	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5	0.4	0.2	1.0	0.3
Cl <sup>-</sup> (μg/l)	2.2	1.1	3.6	2.8	2.5	2.0	2.5	1.6	2.9	1.7	2.8	1.8	2.9	1.9	3.0	1.1	3.2	1.8	7.4	4.4
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (μg/l)	<0.006	<0.006	<0.006	0.3	<0.006	<0.006	<0.006	0.3	<0.006	<0.006	<0.006	<0.006	<0.006	<0.006	<0.006	<0.006	<0.006	<0.006	<0.006	<0.006
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (μg/l)	3.6	0.7	28.6	8.7	14.9	3.3	15.9	3.2	2.9	0.7	10.6	2.8	7.7	1.9	8.2	2.6	10.5	3.1	61.2	14.7
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (μg/l)	<0.103	<0.103	<0.103	0.8	<0.103	<0.103	<0.103	0.6	<0.103	0.8	<0.103	<0.103	<0.103	0.8	<0.103	<0.103	<0.103	<0.103	<0.103	<0.103
SO <sub>4</sub> (μg/l)	2.0	1.7	4.3	4.0	5.2	4.5	3.9	5.4	3.4	3.0	5.3	4.2	5.2	4.1	10.0	6.0	9.7	5.2	10.4	8.3
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (μg/l)	<0.009	<0.009	<0.009	<0.009	<0.009	<0.009	<0.009	<0.009	<0.009	<0.009	<0.009	<0.009	<0.009	<0.009	<0.009	<0.009	<0.009	<0.009	<0.009	<0.009
COD (μg/l)	2.8	1.2	1.2	1.8	6.4	5.8	0.2	2.0	1.2	3.0	1.6	2.6	1.2	3.0	1.6	2.4	1.4	2.6	0.2	3.8
pH	5.9	6.8	6.1	6.8	6.3	6.9	6.2	7.1	6.4	7.1	6.4	7.0	6.5	7.1	6.8	6.7	6.6	6.9	7.5	7.0
Cond. (μS/cm)	15.2	37.0	26.6	65.0	21.6	52.0	19.4	55.0	20.0	44.0	20.2	53.0	22.7	51.0	30.5	67.0	318.0	68.0	69.0	161.0

\*: rainy season.

약 5~10배 정도의 높은 함량을 보여주는 것으로 보아 폐갱구의 침출수가 수질오염원으로 작용하고 있음을 보여준다. 그러나 Cu와 Pb의 경우 농경지가 시작되는 지점에서 높은 함량(11.05  $\mu\text{g/L}$ , 6.50  $\mu\text{g/L}$ )을 보여 농경지로부터 상당량의 영향을 받고 있음을 보여 주고 있다(Fig. 3). 한편 하천수의 중금속 함량은 계절변화에 따른 유량변화에 따라 그 변화가 뚜렷하게 나타나고 있는데 유량이 많은 우기 보다는 유량이 적은 건기에 더 많은 양의 중금속이 하천수에 용존하고 있다. 다만 Cu의 경우 건기(0.29  $\mu\text{g/L}$ ) 보다 우기(9.3  $\mu\text{g/L}$ )에 더 많은 함량을 보여 주고 있는데 이는 우기에 농경지로부터 하천으로 많은 양의 토사가 밀려드는 현상과 밀접한 관련이 있는 것으로 사료된다(Fig. 4). 특히 Pb를 제외한 모든 원소의 함량이 광미적치장을 지나면서 급격히 증가하는데 이는 광미적치장 및 폐석더미에 유입된 하천수가 폐석 및 광미와의 반응에서 상당량의 중금속이 용탈 이동시킴에 따라 전반적으로 오염이 진행되고 있음을 보인다. Pb의 경우 전 수계에서 자연수의 평균값(3  $\mu\text{g/L}$ )에 유사한 함량분포를 보이고 있는데 (Rose *et al.*, 1979) 이는 하천수가 직접적으로 광미나 폐석과 반응함으로써 공급되는 양은 상대적으로 적음을 알 수 있다.

각 원소별 분산특성을 살펴보면 일반적으로 광산지대로부터 유입된 원소들의 거리별 함량감소는 각 원소의 지구화학적 특성에 따라 주변지류의 혼입에 의한 희석작용에 의해 지배되거나 화학적인 환경변화에 의해 지배되는 것으로 대별될 수 있다(김옥배와 나춘기, 1987). 본 수계는 갱구로부터의 갱내수와 침출수를 제외하고는 주변지류의 유입이 거의 없는 단일수계를 이루고 있으므로 침출수 및 갱내수의 유입에 의한 원소

들의 함량증가로 판단되며 이는 측정된 원소함량의 대부분이 광미적치장을 복류한 하천이나 갱구의 침출수와 합류하는 지점에서만 높은 함량을 보이며 거리에 따라 급격히 함량이 감소하는 경향을 보이는 것으로 확인할 수 있다.

따라서 본 수계의 하천수에 용존된 중금속의 거리별 분산특성을 지배하는 요소는 하천수의 화학적 환경변화이며, 결과적으로 폐석이나 광미로부터 용탈되어 하천수에 유입된 중금속이온들은 그 이동성이 크게 제한될 것이며 대부분 수 km 이내에서 하천수로부터 제거될 것이다. 또한 수계 하부에 위치하는 마을의 우물에서 채취한 지하수의 중금속 함량이 모두 음용수 기준치 이하를 보여 오염원의 영향을 전혀 받지 않고 있음을 고려할 때 하천수에 의한 중금속원소의 이동은 매우 제한적임을 알 수 있다.

#### 4.4. 주변 토양 중의 중금속

동명광산 주변의 수계를 따라 채취한 토양의 분석을 통하여 토양 중에 포함된 중금속의 함량에 대하여 토양의 종류별로 분류하여 비교하였다. 토양의 종류로는 농경지토양, 광미적치장 토양(광미) 및 폐석적치장 토양으로 분류하여 비교하였고, 토양환경보전법(환경부, 1996)의 우려기준과 대책기준을 근거로 오염도를 평가하였다.

동명광산 주변의 토양의 pH는 3.2~8.0으로 나타나 강산성에서 약알칼리성의 분포를 보여 주고 있으며 특히 광폐재가 산재해 있는 토양에서는 pH가 3.2~4.0의 범위였고 이 지역으로부터 멀리 떨어져 밖으로 사용되는 일반 농경지 토양에서는 pH가 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이는 이 지역 토양의 산성화가 광업활동

**Table 4.** pH and element content in ore dump soil and tailing from Dongmyeong mine area.

	pH	EC (mS/cm)	Zn (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Cu (mg/kg)	CN (mg/kg)	As (mg/kg)	Hg (mg/kg)
DG 1	3.5	164.8	4.3	0.3	0.1	1082.5	1.7	0.0	2317.5	0.5
DG 2	4.4	26.3	1.6	0.8	0.0	0.5	0.4	0.2	1061.5	0.1
DG 3	3.5	137.1	1.6	0.1	0.0	9.1	0.6	0.2	647.3	0.5
DG 4	3.7	124.5	48.2	2.0	1.8	60.7	4.4	0.1	32381.0	0.7
DG 5	4.0	190.0	390.1	4.2	7.1	60.4	29.9	0.0	16366.5	16.9
DG 6	4.1	67.0	40.8	2.3	1.7	153.0	15.1	0.0	36109.8	0.0
DG 7	4.2	41.0	4.6	2.5	1.5	296.4	3.9	0.1	46390.8	0.4
DG 8	3.2	282.1	7.9	0.3	0.2	2203.4	1.2	13.3	47235.5	0.4
DG 9	3.4	301.0	152.2	2.0	2.6	2287.6	15.0	0.0	55667.0	1.8
DG 10	8.0	48.0	187.2	3.0	2.8	236.4	7.3	0.3	68.7	0.2

**Table 5.** pH and element content in agricultural soil from Dongmyeong mine area.

	pH	EC (mS/cm)	Zn (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Cu (mg/kg)	CN (mg/kg)	As (mg/kg)	Hg (mg/kg)
DS 1	4.9	79.5	0.9	0.1	ND	5.3	0.4	ND	1.6	0.2
DS 2	5.2	12.6	0.6	ND	ND	3.2	ND	0.1	7.6	0.1
DS 31	5.1	21.5	3.5	ND	ND	1.8	ND	0.5	6.2	0.1
DS 32	5.3	113.2	10.2	0.2	ND	4.3	0.8	1.2	28.8	0.2
DS 4	5.8	25.3	8.9	ND	ND	3.3	0.3	0.2	17.1	0.0
DS 5	5.7	13.5	20.0	1.5	1.4	18.1	3.9	0.1	15.1	0.5
DS 6	4.9	56.9	19.0	2.0	1.6	23.4	4.1	0.1	42.5	0.7
DS 7	5.7	46.5	17.0	1.6	1.5	6.1	4.5	0.1	44.3	0.5

**Table 6.** Element content in granite from Dongmyeong mine area.

	Zn (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Cu (mg/kg)	As (mg/kg)	Hg (mg/kg)
G 1	360.4	542.6	56.3	2689.3	6796.4	202.9	ND	444.4
G 2	4002.2	506.5	291.9	2851.8	7767.5	913.9	1156	1552.3

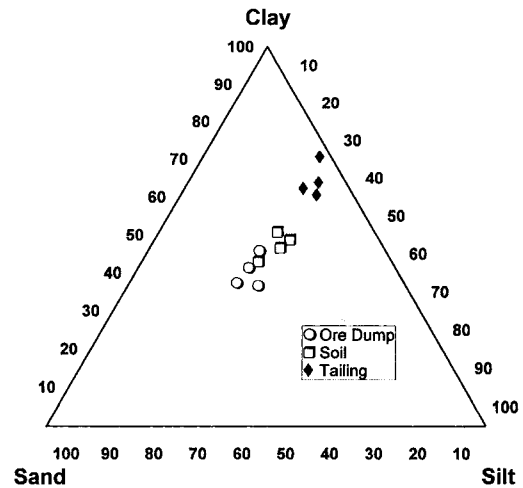
에 의한 영향을 받은 것으로 생각된다.

동명광산 주변 토양의 전기전도도(EC)는 폐석적치장 토양이 26~301 uS/cm, 일반 농경지토양이 13~80 uS/cm로 작물재배의 한계값 및 염류토양의 기준값인 4 dS/m이하의 값을 보여주고 있다(정영상과 양재의, 1997). 따라서 폐석적치장 토양의 EC값이 일반 농경지 토양의 EC값보다 다소 높은 값을 보여주고 있으나 대체적으로 동명광산 주변의 토양은 광산활동에 의한 염류 피해는 크지 않은 것으로 생각된다(Table 4).

동명광산 주변 토양중 각 원소별 함량은 Table 5에 나타내었다. 이 결과를 요약해 보면 동명광산 지역 토양은 As와 Pb에 의해 가장 많이 오염되었고, 그 다음 Zn에 의한 오염이 높은 편이었다. 이는 동명금-은광산의 백석광물로 산출되는 방연석, 유비철석 및 섬아연석으로부터 유래된 원소로 판단된다. 특히 소철섭 등(1981)에 의해 동명 금-은광산의 모암으로 생각되는 화강암에 대한 분석값과 비교해 볼 때 As가 광미적치장 토양이 모암인 화강암보다 최대 55배 더 농집되어 있는 것으로 나타났다. 이는 우리나라 대부분의 금-은광산에서 금을 추출하는 제련방법으로 청화제련방법을 사용하기 때문인 것으로 나타났다(원주지방환경관리청, 1989). 따라서 동명광산 주변 토양에 대한 As의 오염을 방지하기 위해서는 폐석적치장의 토양이 일반 농경지로 유입되는 것을 차단해야할 것이다.

**4.5. 토양의 중금속 존재형태**

동명광산 주변에서 채취한 시료를 특성에 따라 광



**Fig. 5.** Classification for mode of soil texture.

미, 폐석 및 농경지토양으로 구분하였으며 국제토양학회법(1993)에 의한 soil texture는 광미는 clay loam에, 폐석토양과 농경지토양은 loam에 해당하며 Fig. 5에 표시하였다.

토양중에 존재하는 중금속의 존재형태를 조사하기 위하여 Tessier(1979)의 방법에 의해 fractionation 시험을 수행하였다. 시료는 동명광산 주변의 광미, 폐석 및 농경지토양을 사용하였으며 연속추출법에 의한 동명광산 지역의 광미, 폐석 및 농경지토양에 존재하는 Cd, Cu, Zn, Pb의 존재형태는 Fig. 6에 나타내었다.

각 원소의 존재형태를 보면 Cd이 광미에서 풍화나 산성우 또는 산도가 높은 광산 배출수 등의 영향을 받

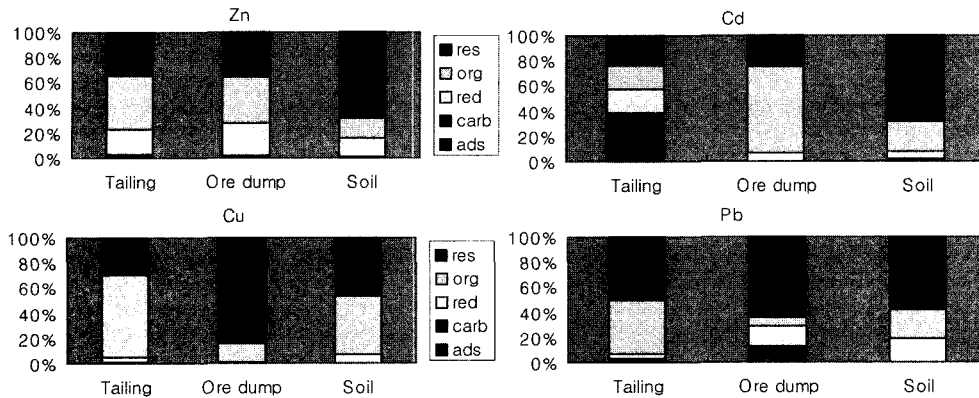


Fig. 6. The mode of occurrences of elements in tailing, ore dump soil and prepared by sequential extraction method.

아 주변 토양이나 하천, 지하수등으로 이동할 수 있는 존재형태는 adsorbed, carbonate, reducible, organic fraction으로 생각되며 이들은 총 농도의 31.6%를 나타내며, 폐석토양의 경우 물리화학적 영향에 의해 토양이나 하천, 지하수등으로 이동할 수 있는 존재형태는 adsorbed, reducible fraction로써 총농도의 39.1% 이동성이 비교적 높은 것으로 나타났다.

반면 농경지토양은 경작에 의해 산성화되고, 또는 산성우, 오염된 지하수 등에 의해 영향을 받게 될 경우 식물체나 하천 등으로 이동할 수 있는 존재형태인 adsorbed, carbonate, reducible fraction이 총농도의 7.6%로 이동성이 비교적 낮다.

Cu의 경우 광미에서 존재형태 중 이동할 수 있는 비율은 16.4%, 폐석토양과 농경지토양에서 각각 4.5%, 7.3%로 이동성이 낮아 토양에 강하게 흡착되어 대부분 잔류상으로 존재하고 있는 것을 보여준다.

Pb의 경우 그 존재형태 중 환경조건의 영향을 받아 주위에 영향을 미칠 수 있는 존재형태는 모든 토양에서 4% 이하로 그 이동성은 매우 낮았으나 타 원소에 비해 높은 함량을 포함하고 있어 이에 대한 관리대책이 강구되어야 할 것으로 생각된다.

반면 Zn의 경우 각각의 토양에서 이동할 수 있는 존재형태의 비율은 광미가 64.5%, 폐석토양이 20.6%, 경작지토양이 16.3%로 분석 원소 중 가장 높은 이동성을 보여준다. 따라서 Zn의 확산 방지대책을 강구해야 할 것으로 생각된다.

이와 같이 토양에 선택성이 높아서 비교적 강하게 결합되는 Cu와 Pb의 분획물은 총농도 중 organic 및 residual fraction이 차지하는 비율이 높았고, adsorbed, carbonate, reducible fractions들이 차지하는 비율이 상

대적으로 낮았다. 한편 토양입자에 의한 선택성이 낮아 약하게 결합되는 Cd, Zn은 총중금속 농도 중 adsorbed, carbonate, reducible fractions들이 차지하는 비율이 Cu, Pb 보다 높았으며, 이들 금속들도 역시 organic, residual 형태가 주를 이루고 있었다.

따라서 동명광산 지역의 광미, 폐석토양, 농경지토양을 분석한 결과 농경지토양에는 중금속의 총 농도가 광미나 폐석적치장의 토양보다 훨씬 낮았을 뿐 아니라 총 중금속 농도 중 adsorbed, carbonate, reducible fractions들이 차지하는 비율이 낮기 때문에 이들이 농장물이나 수계에 큰 영향을 미치지 못할 것으로 생각된다.

그러나 광미나 폐석적치장 토양에는 중금속의 총 농도가 매우 높았을 뿐 아니라 adsorbed, carbonate, reducible fractions들이 차지하는 비율이 농경지 보다 상대적으로 높았기 때문에 이들이 유실되거나 또는 산성우, 산성인 광산폐수의 유입 등으로 인해 화학적 환경변화가 발생할 경우 중금속 오염의 확산이 우려되므로 이에 대한 오염방지대책이 필요하다고 생각된다.

## 5. 종합 및 결론

동명 금-은광산을 경유하여 흐르는 단일 수계의 하천수 및 하천주변의 토양에서 보여주는 중금속 원소의 함량 및 존재형태를 고찰한 결과를 요약하면 다음과 같다.

동명광산을 경유하는 수계에서 pH의 변화는 5.92~7.09의 범위를 보여 약산성 내지는 중성의 환경을 보이며 특히 동명광산 광미적치장 주변에서는 5.92로 보다 산성환경이 형성되어 있음을 보인다. 하천수



중 중금속 원소함량 분포는 각 원소의 지구화학적 특징에 따라 다양한 분포양상을 보이나 전반적으로 광상 지대에서 증가하는 경향을 보인다.

동명광산 지역의 광미, 폐석토양, 농경지토양을 분석한 결과 농경지토양에는 중금속의 총 농도가 광미나 폐석적치장의 토양보다 훨씬 낮았을 뿐 아니라 총 중금속 농도 중 adsorbed, carbonate, reducible fractions들이 차지하는 비율이 낮기 때문에 이들이 농장물이나 수계에 큰 영향을 미치지 못할 것으로 생각된다.

그러나 광미나 폐석적치장 토양에서도 중금속의 총 농도가 매우 높았을 뿐 아니라 adsorbed, carbonate, reducible fractions들이 차지하는 비율이 농경지 보다 상대적으로 높기 때문에 이들이 유실되거나 또는 산성우, 산성인 광산폐수의 유입 등으로 인해 화학적 환경변화가 발생할 경우 중금속 오염의 확산이 우려되므로 이에 대한 오염방지대책이 필요하다고 생각된다.

사 사

이 논문은 2000년도 상지대학교 교내 연구비의 지원을 받아 이루어졌다.

참고문헌

김상현, 진효택 (1993) 삼보 연·아연-중정석 광산 주변 하상퇴적물에서의 중금속 오염연구. 광산지질, 26권, p.

217-226.  
 김연기 (1997) 임계 정선지역의 표사 광역 지화학 조사. 자원개발연구소, p. 179-202.  
 김옥배, 나춘기 (1987) 금속광상의 탐사를 위한 자연수지구화학탐사법의 개발에 관한 연구. 광산학회지, 24권, p. 255-266.  
 김옥준 (1970) 한국의 자원과 지질. p. 253-254.  
 김정환, 기원서 (1991) 강원도 임계지역의 지질구조. 광산지질, 24권, p. 43-55.  
 대구지방환경관리청 (1997) 폐금속광산 오염실태 정밀조사. 540p.  
 소철섭, 김연기, 지세정, 박맹언 (1981) 임계지역에 분포하는 각섬석질암의 성인. 광산지질, 14권, p. 183-191.  
 정선군 통계연보 (1997) 정선군의 일반현황. p. 87-96.  
 정영삼, 양재의 (1997) 한국의 농업용수 수질기준 현황과 확산성 오염문제 및 개선대책. 97농업환경 심포지엄, p. 65-74.  
 원주지방환경관리청 (1989) 광산지역 환경오염 저감대책 수립 방지대책 연구.  
 이재영, 김중근, 이인호, 이진국 (1993) 경북지역 폐금속광산이 환경에 미치는 영향. 광산지질, 26권, p. 465-472.  
 환경부(1996) 토양환경보전법 및 동 시행규칙 1조 및 20조, 별표 3과 별표 7.  
 황정, 박희인 (1996) 은차광산의 성인에 관한 연구, 자원환경지질, 29권, p. 159-169.  
 Rose, A.W., Hawkes, H.E. and Webb, J.S. (1979) Geochemistry in minerals exploration, 2nd(ed.), Academic press.  
 Tessier, A., Campbell, P.G.C. and Bisson, M. (1979) Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. Analytical chemistry, v. 51, p. 844-851.

2002년 10월 14일 원고접수, 2003년 2월 18일 게재승인.