

금왕 금·은광산 주변 지구화학적 환경에서의 중금속 원소들의 분산

박종진* · 김명균** · 전효택***

Dispersion of Heavy Metals in the Geochemical Environment around the Geumwang Gold-Silver Mine

Jong-Jin Park*, Myeong-Kyun Kim** and Hyo-Taek Chon***

ABSTRACT : Soil, tailings, stream sediment and surface water samples collected in the vicinity of the Geumwang Au-Ag mine were analyzed in order to investigate the pollution level of heavy metals and to determine the dispersion patterns. Although the maximum concentrations of soils collected at the flotation plant and tailings dam were 9,270 ppm As, 17 ppm Cd, 1,480 ppm Cu, 10,080 ppm Pb and 18,400 ppm Zn, dispersion of heavy metals were limited in the vicinity of the flotation plant and tailings dam. This may be due to high pH values (>8.0) of the soils by flotation solution for mineral processing. The pH values of water samples near the flotation plant and tailings dam were over 8.0 and Cd, Cu and Zn concentrations were not detected. The waters in the vicinity of Geumwang mine generally belong to a $\text{Ca}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}$ (HCO_3^-) type.

서 론

광물 자원은 인간생활에 필수 불가결한 것이지만 자원 개발의 부산물인 광미나 폐석등은 다양한 형태의 중금속들을 분진이나 폐수 등을 통해 배출시켜 주변 토양이나 지표수 및 지하수의 수질에 영향을 미친다.

외국의 경우, 광산 개발과 제련활동으로 인한 유독성 원소들의 분산 거동 및 토양의 오염과 이에 따른 주변 환경의 영향 등에 관한 연구가 활발하게 이루어져 왔다 (Thornton, 1983; Sengupta, 1992). 국내에서도 광산개발과 관련되어 최근에 발표된 환경 오염 연구로는 삼보연-아연-중정석 광산 주변 토양에서의 중금속 오염 연구 (김상현, 전효택, 1993), 강원도 상동지역 옥동천의 광산 산성수 및 하상퇴적물의 중금속 오염 (정영욱, Thornton, 1994), 신예미 Pb-Zn-Fe광산과 거도 Cu-Fe광산 주

변 토양·하상퇴적물 및 하천수의 중금속 오염 (전동진 등, 1995), 금속폐광산주변의 토양, 식물 및 하천의 중금속 오염에 대한 지화학적 연구 (이재영 등, 1996) 등이 있다. 연구결과, 이들 광산주변 지역은 그 정도에 차이가 있지만, 경작지 토양, 지표수 및 하상퇴적물이 Cd, Cu, Pb, Zn 등의 중금속원소들에 의해 자연함량 이상으로 오염되어 있는 것으로 나타났으며, 주요한 오염원은 무분별하게 방치된 광미와 폐석더미인 것으로 밝혀졌다. 또한 중금속 분산양상은 주변 지형과 주요 풍향, 광산으로부터의 거리 등에 의해 규제되어졌다.

현재까지 우리나라에 등록되어 있는 금·은광의 광구 수는 4000여개에 달하고 있으며, 1930년대 말에는 300여 개의 광산이 가행된 적도 있으나 현재는 대부분의 광산이 폐광, 휴광 또는 소규모로 작업을 하고 있는 실정이다 (대한광업진흥공사, 1987).

국내 금·은 광상에 대한 연구들은 주로 광물학적 특성 및 광화작용에 관한 연구들이며, 금·은광상을 대상으로 중금속 오염에 관한 환경지구화학적 연구로는 유구-광천 금·은광화대 지역에서의 토양 및 농작물의 중금속 오염 (김경용 등, 1995), 모악 금·은광산에 방치된 폐석이 주변 수계 및 생태계에 미치는 환경적 영향 (나춘기, 전서

* (주) 지암 엔지니어링 지질부

** 청주대학교 자원공학과 (Department of Mineral and Mining Engineering, Chongju University, Chongju 360-764, Korea)

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

령, 1995), 동진 금 · 은 · 동 광산 주변에 방치된 폐석의 환경적 영향 (이무성 등, 1996) 등이 있다.

본 연구에서는 과거 오랜 기간 동안 채광을 해오다 최근에 폐광한 충북 음성군의 금왕 금 · 은광산 주변을 대상으로 발토양, 논토양, 산토양, 선광장 토양, 광미 그리고 수계를 따라 하상퇴적물과 지표수를 채취 · 분석한 후, 중금속의 오염 실태 및 분산 특성을 규명하고자 하였다.

지질 및 광상

금왕광산은 충북 음성군 금왕면 봉곡리 (동경 127°34' 57", 북위 36°57'27")에 소재하며, 남한 최대의 금광산인 무극광산으로부터 약 2 km 남쪽에 위치하고 있다 (Fig. 1). 금왕광산은 무극광산의 일개 광구였으나, 1979년부터 무극광산에서 분리되어 재개발되었다가 1995년에 폐광이 된 상태이다.

광산부근의 지질을 보면 흑운모화강암과 우백질화강암이 N30°E 구조선 서측에 넓게 발달하고 있으며, 이 구조선 동측에는 경상계층군에 대비되는 역암, 사암, 셰일 등으로 구성된 백야리층이 분포한다 (정창희 등, 1976). 광상은 흑운모화강암과 우백질화강암중의 열극을 충전하여 형성된 열수기원의 함금은석영맥으로서, 광석광물은 석영맥내에 대상 또는 정동석영내에 산점상으로 분포하며, 황철석, 유비철석, 섬아연석, 방연석 외에도 다량의 함은황화광물들이 산출된다. 석영맥 주변부를 따라 모암인 화강암은 광범위한 열수변질을 받고 있다. 즉, 흑운모화강암의

흑운모는 녹니석화되어 있고, 광맥의 접촉부에서는 견운모화 및 점토화가 되어 있다 (최선규 등, 1988).

시료채취 및 화학분석

금왕광산의 채광 활동으로 인한 중금속 원소들의 분산 특성과 오염 수준을 조사하기 위해 1995년 11월에 광산 주변을 발토양 (52개), 논토양 (22개), 산토양 (12개), 하상퇴적물 (31개), 광미 (5개) 및 선광장 토양 (5개)으로 나누어 채취하였으며, 1차 분석후 1996년 7월에 선광장과 광미담 주변을 중심으로 정밀조사를 위해 28개의 시료를 보충하여 채취, 총 123개 지점에서 155개의 시료를 채취하였다 (Fig. 2). 모든 시료는 대표성을 높이기 위하여 2×2의 격자위에서 9개의 부시료를 채취한 후, 총 1 kg 이상의 복합 시료를 만들어 1개의 주시료로 하였다. 또한 심도별로 중금속 원소의 함량 변화를 조사하기 위해 123개 채취 지점 중 31개 지점을 택한 후, 토양, 광미 및 하상퇴적물에 대해 상부 시료 (심도 : 0~15 cm)와 하부 시료 (심도 : 15~30 cm)로 나누어 채취하였다

지표수의 경우 주변에 나타난 수계를 따라서 총 8개 지점에서 채취하였는데 (Fig. 5), 채취시기는 지역의 특성상 비가 많이 내리는 1996년 7월이었다.

채취한 토양, 광미 및 하상퇴적물 시료들은 대기중에서 자연 건조시킨 후, 막자와 유발을 이용해 멍쳐진 부분을 -10 mesh 입도로 분쇄하였으며, 이 중 약 25~30 g을 축분하여 다시 -80 mesh로 체질하였다. -10 mesh의 시료를

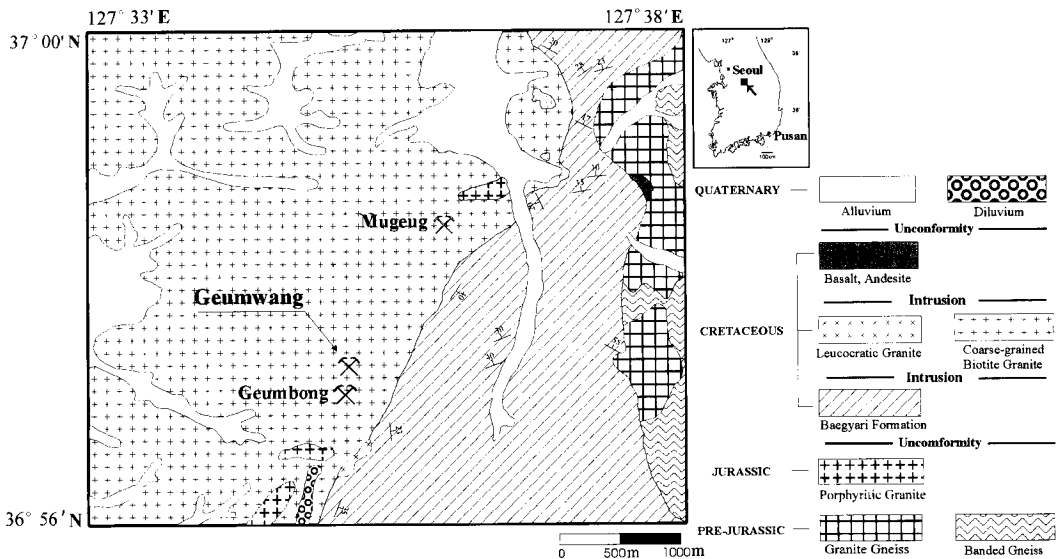


Fig. 1. Geological map in the vicinity of the Geumwang mine (Chung et al., 1976).

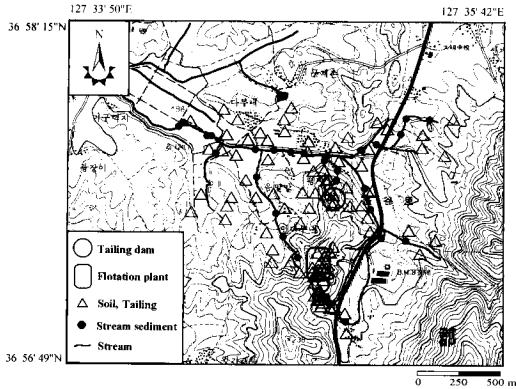


Fig. 2. Map showing sample locations in the vicinity of Geumwang mine.

이용하여 토양 및 하상퇴적물의 pH를 측정하였으며, -80 mesh 시료는 화학분석에 이용하였다 (Fig. 3).

토양, 광미 및 하상퇴적물의 pH 측정방법은 Rump, Krist (1988)가 제시한 방법에 따랐다. 즉 -10 mesh의 시료 20 g을 증류수 50 ml에 혼탕한 후, 30분간 자동교반기로 교반시킨 다음, 20분간 방치한 후, pH를 측정하였다. 이때 pH측정기 (Model : Corning 220)는 pH 4, 7, 10의 값을 갖는 완충용액으로 보정하였다.

토양, 광미 및 하상퇴적물내의 중금속 총합량 분석을 위해 80 mesh의 시료 250 mg에 4 ml의 HNO₃ 용액과 1 ml의 HClO₄ 용액을 넣은 후, 시약이 모두 증발하도록 24시간 (50°C에서 3시간, 150°C에서 3시간, 180°C에서 18시간) 건조시켰다. 여기에 5M HCl 2 ml를 넣어 용탈시킨 후, 70°C로 1시간 정도 가열한 다음, 탈이온수 8 ml를 가해 총 10 ml로 정량화시켰으며 (Ure, 1995), Cd, Co,

Cr, Cu, Ni, Pb 및 Zn 등 7개 원소를 AAS (Model : Perkin Elmer 3100)로 분석하였다. 또한 As 분석은 분석비용을 고려하여 중금속 함량이 높게 나타난 지역과 그렇지 않은 지역을 포함할 수 있도록 30개의 시료를 선별하여 대한광업진흥공사에 의뢰, 1N 염산을 이용한 전처리과정을 거쳐 (환경부, 1996) 유도분극플라즈마분광분석 (ICP-AES)으로 이루어졌다.

지표수의 경우, 현장에서 수소이온농도 (pH), 산화-환원 전위 (Eh), 온도, 전기전도도 (EC) 및 총용존물질 함량 (TDS) 등을 측정하였다. 그리고 0.45 μm의 Nitrocellulose Membrane Filter를 이용하여 부유물질을 제거한 후, 양이온 분석용, 음이온 분석용으로 구분하여 채취하였는데, 시간의 경과에 따라 시료내의 양이온들이 시료병 벽면에 흡착되는 것을 방지하기 위하여 스포이드로 질산을 가하여 pH를 2이하로 조정한 후, 냉장고 안에 넣어 4°C로 유지시켰다. 양이온의 경우, Al, B, Ba, Ca, Cd, Cu, Fe, Mg, Mn, Pb, Si, Sr, Zn 등의 13개 원소는 ICP-AES (Model : Shimadzu ICPQ-1000)를 이용하여 분석하였으며, Na, K는 AAS로 분석하였다. 음이온의 경우, Br⁻, Cl⁻, F⁻, NO₂⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻, SO₄²⁻ 등은 IC (Model : 2Dionex DX500)로 분석하였으며, HCO₃⁻는 메틸레드-브롬크레졸 그린 혼합시약을 지시약으로 중화 적정하여 구하였다.

분석 결과

토양, 광미 및 하상퇴적물

토양별 중금속 원소의 함량

토양별 중금속 함량의 평균 및 분포범위는 Table 1과

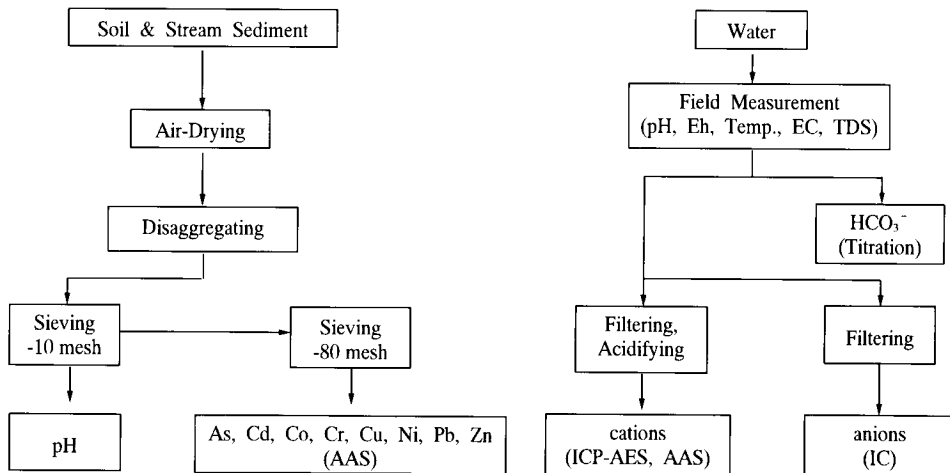


Fig. 3. The procedure for sample preparation and chemical analysis.

Table 1. Metal concentrations in soils, tailings and stream sediments (unit in ppm)

Type of soil		As	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Farmland soil (53)*	M**	3.9	0.7	7.5	6.5	11.4	13.9	19.0	58.0
	R***	0.1~11.3	0.2~1.4	3.3~11.3	2.2~21.4	3~35	8.0~26.0	1~38	28~81
Paddy soil (23)	M	2.0	0.9	8.5	9.1	13.3	16.8	21.1	62.8
	R	0.2~7.0	0.4~1.2	5.7~12.9	3.0~17.0	5~29	10.0~25.6	5~37	41~93
Forest soil (15)	M	15.4	0.8	8.4	5.2	9.0	14.9	19.7	59.7
	R	0.02~61.1	0.4~1.3	5.7~11.7	1.2~11.0	5~26	8.8~25.2	7~30	44~81
Stream sediment (36)	M	10.4	0.5	5.4	3.5	7.8	9.9	19.2	52.2
	R	0.02~51.8	0.1~1.1	1.7~10.5	0~11.0	3~45	5.2~18.8	5~52	24~151
Tailings (10)	M	40.9	0.8	5.2	2.5	21.0	11.9	58.3	83.5
	R	0.4~71.9	0.4~1.4	4.1~6.9	0~6.0	7~60	6.3~18.7	14~195	35~202
Flotation plant soil (18)	M	1,070.1	2.3	11.3	12.5	182.8	15.6	1,151	2,041.4
	R	0.1~9,629.1	0.6~17.1	6.1~20.1	1.2~50.4	9~1,479	7.7~33.1	21~10,078	39~18,396
total tolerable level (Kloke, 1979)		20	3	50	100	100	100	100	300

* Number of samples, ** Mean, *** Range.

같다. 선광장 토양의 중금속 함량은 평균 1,070 ppm As, 2.3 ppm Cd, 11.3 ppm Co, 12.5 ppm Cr, 183 ppm Cu, 15.6 ppm Ni, 1,151 ppm Pb, 2,041 ppm Zn으로서, 특히 As, Cu, Pb 및 Zn 등은 기타 산토양, 논토양, 밭토양, 하상 퇴적물 및 광미에 비해 매우 높은 함량을 보이며, Kloke (1979)가 제시한 총합량 오염허용한계값을 초과하고 있다. 또한, Cd도 선광장 토양이 기타 토양 및 하상퇴적물에 비해 높게 나타나며, 최고 17 ppm을 보이고 있어 오염허용한계값인 3 ppm을 초과하고 있다. 따라서 선광장 토양은 As, Cd, Cu, Pb 및 Zn 등의 중금속에 의해 매우 오염되어 있음을 알 수 있다. 그러나 선광장 토양의 Co, Cr 및 Ni의 함량은 오염허용한계값을 초과하지 않으나, 기타 토양 및 하상퇴적물에 비해서는 다소 높게 나타나고 있다.

광미의 중금속 함량은 평균 40.9 ppm As, 0.8 ppm Cd, 5.2 ppm Co, 2.5 ppm Cr, 21 ppm Cu, 11.9 ppm Ni, 58.3 ppm Pb, 83.5 ppm Zn으로서, As는 오염허용한계값을 초과한다. 그리고 Cu, Pb, Zn 등은 산토양, 논토양, 밭토양 및 하상퇴적물에 비해 다소 높은 함량을 나타내나, 선

광장 토양에 비해서는 매우 낮은 함량을 보이고 있으며, Cd, Co, Cr 및 Ni는 산토양, 밭토양, 논토양 및 하상퇴적물과 유사한 함량 수준을 보인다.

그 밖의 밭토양, 논토양, 산토양 및 하상퇴적물에서의 중금속 함량은 자연배경값 수준 (Bowen, 1979)에서 크게 벗어나지 않고 있다.

주오염원으로 추정되었던 선광장 토양과 광미간에 As, Cd, Cu, Pb 및 Zn의 함량 차이가 매우 크게 나타나는 원인을 규명하기 위하여 선광장 토양 및 광미시료 중 일부 시료에 대해 X-선 회절분석을 실시한 결과, 얻어진 반정량적 광물조성은 Table 2와 같다. 선광장 토양에는 황비철석, 황철석, 섬아연석, Tetrahedrite, Tennantite, 방연석 및 농홍은석 등의 황화광물들이 다량 함유되어 있으나, 광미시료에는 이러한 황화광물의 함량이 소량인 반면 석영, 녹니석, 방해석, 장석, 백운모, 흑운모 등의 맥석광물의 함량이 높게 나타난다. 즉, 부선택처리시 광석으로부터 황화광물이 대부분 제거되었기 때문에 광미의 황화광물 함량이 낮은 것으로 생각된다. 따라서 이러한 황화광물의

Table 2. Mineralogical composition of tailings and flotation plant soils

Sample	Qz	Chl	Cal	Kspar	Musc	Bio	Ars	Py	Sphal	Td	Tn	Cp	Gal	Pg
Flotation plant soil	G-104	■	□	□	□	□	■	■	■	■	■	□	■	□
	G-5	■	■	□	■	□	■	■	□	●	■	□	■	□
	G-121	■	■	□	■	□	□	●	●	●	□	●	□	●
Tailings	G-110b	■	■	■	●	■	■	■	■	●	●	□	■	■
	G-110a	■	■	■	■	■	□	●	■	■	●	□	●	■
	G-115	■	■	■	■	■	□	□	●	●	●	●	□	■
	G-98	■	□	●	■	■	■	●	■	●	●	□	●	■

Ars; Arsenopyrite, Bio; Biotite, Cal; Calcite, Chl; Chlorite, Cp; Chalcopyrite, Kspar; Feldspar, Gal; Galena, Musc; Muscovite, Pg; Pyrrargyrite, Py; Pyrite, Sphal; Sphalerite, Qz; Quartz, Td; Tetrahedrite, Tn; Tennantite, ■; abundant, □; less abundant, ●; rare.

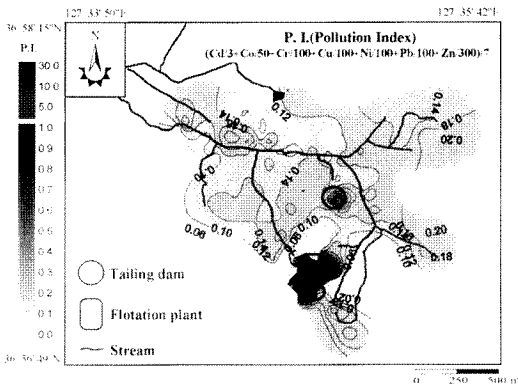


Fig. 4. Contour map of pH of soils, tailings and stream sediments.

함량 차이 때문에 광미의 중금속 함량은 선광장 토양에 비해 매우 낮게 나타나는 것으로 판단된다.

pH

금왕광산 주변 토양, 광미 및 하상퇴적물의 pH값은 시료채취 시기별로 차이를 보이지 않았으며, 평균 5.3~8.4의 범위를 보이고 있다. 토양별 평균 pH값은 밭토양 5.3, 논토양 5.3, 산토양 5.8, 하상퇴적물 7.4, 광미 8.4, 선광장 토양은 7.8로 광미 > 선광장 토양 > 하상퇴적물 > 산토양 > 밭토양 및 논토양 순으로 pH값이 낮아지고 있다. 즉, 밭토양과 논토양의 pH값은 대체적으로 약산성을 나타내고 있으나, 선광장 토양과 광미의 pH는 약알칼리성의 값을 보이고 있어, 일반적으로 폐광된 금속광산의 선광장 토양 및 광미의 pH가 약산성내지 산성을 나타내고 있는 것과는 매우 대조적인 결과를 보여주고 있다.

연구지역내 시료들의 전반적인 pH 상황을 알아보기 위하여 토양, 광미 및 하상퇴적물의 pH분포도 (Fig. 4)를 작성하였으며, 선광장 지역의 토양 및 광미의 pH는 약알칼리성을 나타내며, 또한 선광장 및 광미담 주변 지역, 그리고 광미담으로부터 유래하는 수계에 인접하는 지역의 토양 및 하상퇴적물의 pH도 약알칼리성을 띠고 있다. 이러한 현상이 나타나는 것은 금왕광산이 최근인 1995년 10월까지 조업시 사용하였던 금부선용액이 광미담에서 인근 주변 지역의 토양 및 하상퇴적물로 침투된 영향 때문인 것으로 추론된다.

지표수

하천수 및 광미담에 고인 물의 pH, Eh, 온도, EC, TDS를 현장에서 측정한 결과는 Table 3과 같다. 지표수의 pH는 6.6~8.5로 중성 내지 약알칼리의 값을 나타내

Table 3. Physicochemical properties of surface water samples.

Sample	pH	Eh (mV)	EC (μs/cm)	TDS (ppm)
Geum-1	8.2	201.0	234	166
Geum-2	8.5	221.8	327	228
Geum-3	7.2	238.7	512	365
Geum-4	6.9	242.8	456	322
Geum-5	6.6	251.0	251	176
Geum-6	8.2	194.4	755	530
Geum-7	8.0	241.8	206	143
Geum-8	6.7	195.4	280	197

고 있다. 특히 광미담에 고인 물과 광미담 인근 수계의 하천수의 pH는 8.0이상의 약알칼리성을 보이는데 (Fig. 5), 이러한 현상도 전기한 토양 및 하상퇴적물의 경우와 같이 부선용액이 광미담에서 인근 토양 및 수계로 침투된 영향 때문에 나타나는 것으로 판단된다. Eh는 194~250 mV의 범위를 나타내어 일반적인 하천이 갖는 500 mV보다는 낮은 값을 보인다. 또한 총용존이온의 지표가 되는 전기전도도는 206~755 μs/cm로서 Geum-6에서 가장 높은 755 μs/cm를 나타내고 있는데, 이는 인위적인 활동에 기인한 용존물질의 증가 때문인 것으로 판단된다.

금왕광산 주변 지표수의 양이온 및 음이온의 함량을 Table 4에 나타내었다. 지표수에서 유독성 중금속 원소인 Zn, Cu, Cd는 검출되지 않은데 비해, Pb는 평균 0.11 mg/l로서 환경처 (1977)에서 제시한 하천수 수질환경기준인 0.1 mg/l을 넘어서고 있다.

지표수 시료의 지화학적 특성을 알아보기 위해 Piper's diagram에 도시한 결과 (Fig. 6), 금왕광산 주변 지표수는 양이온 영역에서는 Ca²⁺가, 음이온 영역에서는 SO₄²⁻가 HCO₃⁻에 비해 다소 부화되는 Ca²⁺-SO₄²⁻

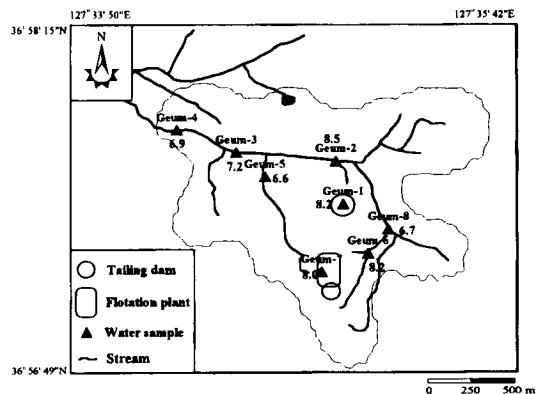


Fig. 5. Map showing pH of surface water samples.

Table 4. Means and ranges of metal concentrations of surface water samples (unit in mg/l).

Element	Max.	Min.	Mean
Al	6.69	1.67	3.14
B	0.07	n.d.	0.01
Ba	0.03	n.d.	0.01
Ca	76.96	19.44	36.19
Cd	n.d.	n.d.	n.d.
Cu	n.d.	n.d.	n.d.
Fe	0.01	n.d.	0.001
K	11.2	2.70	5.70
Mg	15.22	1.40	5.94
Mn	0.32	n.d.	0.07
Na	31.30	6.00	16.50
Pb	0.19	0.05	0.11
SiO ₂	16.50	0.64	10.12
Sr	1.36	0.07	0.42
Zn	n.d.	n.d.	n.d.
Br	n.d.	n.d.	n.d.
Cl	16.75	1.40	10.78
F	1.69	0.21	0.72
HCO ₃	97.63	19.53	57.36
NO ₂	1.36	n.d.	0.42
NO ₃	19.55	n.d.	7.41
SO ₄	240.41	31.72	74.37
PO ₄	2.21	n.d.	0.27

n.d.; not determined

(HCO₃)₃ 유형에 속한다.

중금속 원소들의 분산

원소별 분산 특성

토양, 광미 및 하상퇴적물의 As, Cd, Cu, Pb 및 Zn의 함량분포도 (Fig. 7)를 보면, As는 선광장 및 인접지역, 그리고 광미댐의 토양에서만 Kloke (1979)가 제시한 오염허용한계값인 20 ppm을 초과하고 있으며, 그 중에서도 특히 선광장 지역의 토양이 매우 심하게 오염된 양상을 보이고 있다. 기타지역의 토양 및 하상퇴적물에서는 대부분 10 ppm미만의 낮은 As 함량을 보이고 있어 As로 오염된 지역은 선광장 및 인접지역, 그리고 광미댐으로만 국한됨을 알 수 있다.

Cd는 선광장 지역의 토양에서만 오염허용한계값인 3 ppm을 넘어설 뿐, 기타 지역의 토양에서는 1 ppm 미만의 낮은 함량을 보이고 있다. 따라서 Cd로 오염된 지역은 선광장 지역뿐으로서 그 분산 범위가 As, Cu, Pb, Zn 등에 비해 매우 작게 나타난다.

Cu, Pb 및 Zn은 선광장 및 인접지역에서만 각각 오염

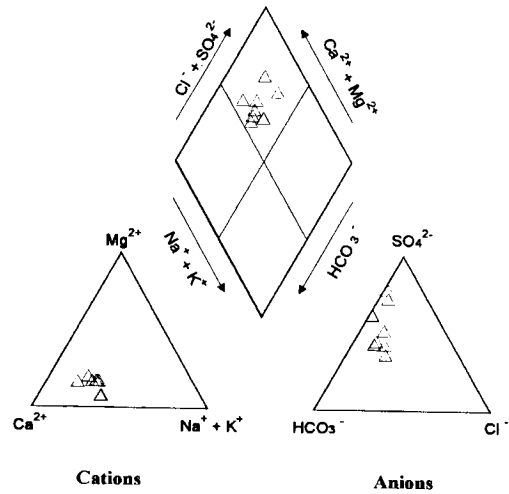


Fig. 6. Chemical analysis of surface water samples represented as percentages of total equivalents per liter plotted on the Piper's diagram (Piper, 1944).

허용한계값인 100 ppm, 100 ppm, 300 ppm보다 높게 나타나고 있어 이 지역만이 Cu, Pb, Zn 등에 의해 오염된 특징을 보이고 있다. Cu, Pb, Zn의 분산 범위가 Cd에 비해서 크며, 그 중 Pb와 Zn의 분산 범위가 Cu보다 다소 큰 특징을 나타내고 있다. 기타 지역은 오염허용한계값에 훨씬 못미치고 있는 함량 수준이나, 광미댐 지역에서는 Cu, Pb, Zn 함량이 다소 높게 나타나는 분포 특징을 보이고 있다.

Co, Cr 및 Ni는 전 조사지역이 각각 오염허용한계값인 50 ppm, 100 ppm, 100 ppm에 훨씬 못 미치는 서로 유사한 함량 수준을 보이는데, 그 중 선광장 지역에서는 다소 높게 나타나고 있다.

심도별 중금속 원소의 함량 변화

31개 지점에서 채취한 토양, 광미 및 하상퇴적물의 상부 및 하부 시료의 중금속 함량을 시료별로 구분하여 Table 5에 나타내었다. 밭토양, 논토양, 산토양, 하상퇴적물 및 광미의 심도별 중금속 함량은 유사한 수준을 보이고 있다. 그러나 선광장 토양에서는 Zn 함량이 표토에서 371 ppm, 심토에서 72 ppm으로서 큰 차이를 나타내며, Cu 및 Pb 함량도 표토와 심토간에 상당한 차이를 보이고 있다. 그런데, 선광장 심토의 Zn과 Cu 함량은 기타 심토와 비슷한 함량 수준을 보이고 있으나, Pb 함량은 기타 심토보다 3~4배 정도 높게 나타나고 있다. 따라서 선광장 토양의 경우, 심부로의 Pb오염이 진행되고 있는 것으로 판단된다.

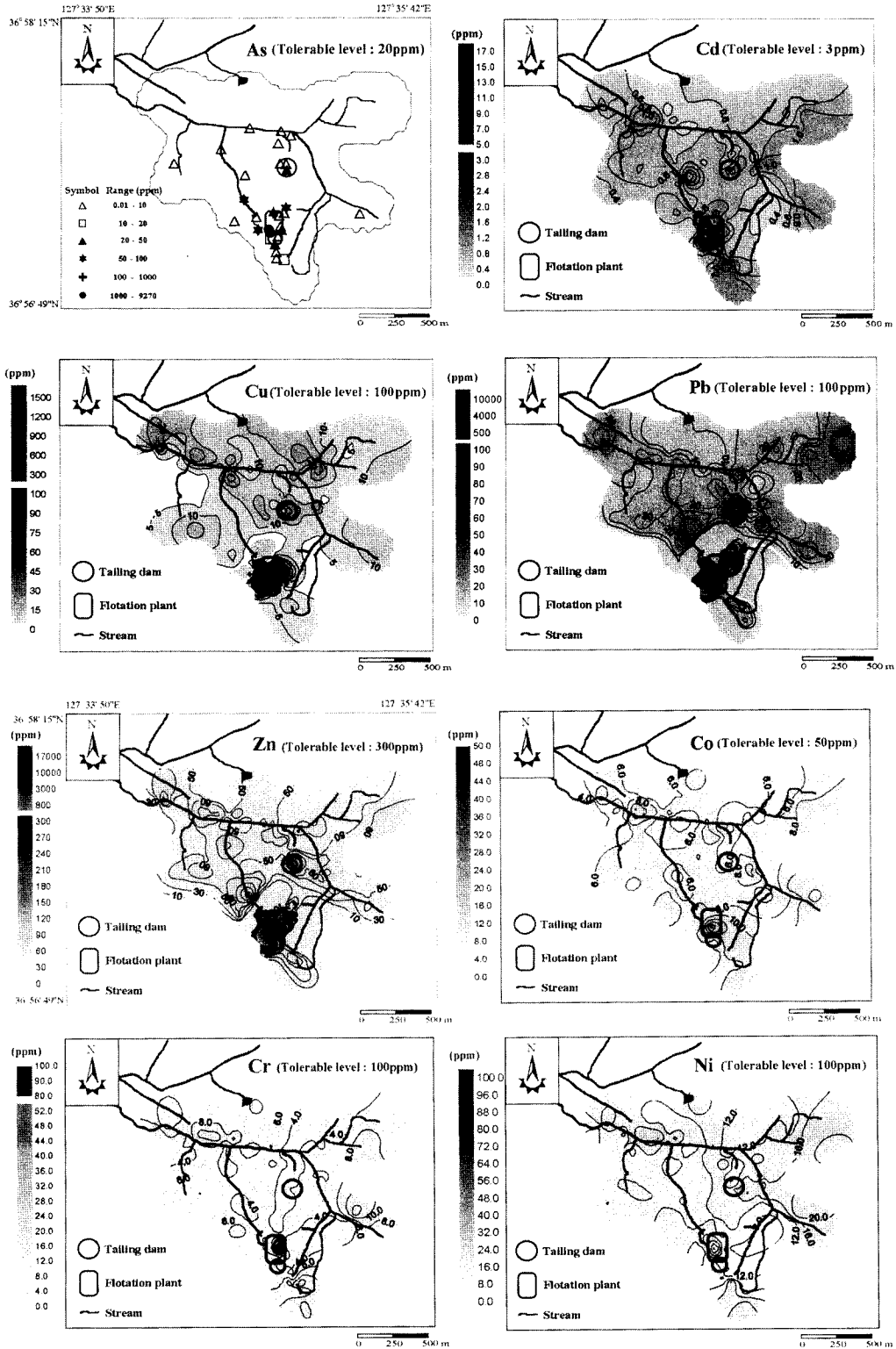


Fig. 7. Concentrations of elements in soils, tailings and stream sediments.

Table 5. Means of metal concentrations in surface samples (depth : 0~15 cm) and subsurface samples (depth : 15~30 cm).

Type of soil		Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Farmland soil	S.R*	0.7	7.3	5.8	11.7	13.8	19.5	60.0
	S.B**	0.7	7.7	5.4	8.7	13.6	17.9	57.7
Paddy soil	S.R	0.9	8.9	10.1	18.7	18.4	18.8	71.3
	S.B	0.9	8.6	9.6	15.1	17.4	24.4	68.4
Forest soil	S.R	0.9	9.3	5.7	6.6	17.5	17.9	65.4
	S.B	1.0	10.0	7.1	6.1	18.9	21.5	66.9
Stream sediment	S.R	0.5	4.9	3.0	6.2	8.1	24.6	75.5
	S.B	0.6	5.2	3.1	7.9	9.6	21.5	65.1
Tailings	S.R	0.6	4.5	3.4	7.0	13.6	14.0	43.0
	S.B	0.6	6.9	2.6	8.0	12.0	17.0	43.0
Flotation plant soil	S.R	1.0	8.5	10.4	23.0	19.0	100	371.4
	S.B	0.9	9.7	9.4	13.4	18.4	68.6	72.4

* Surface soil, ** Subsurface soil

오염지수

토양 오염은 단일 중금속 원소에 의한 오염보다는 여러 중금속 원소들이 복합된 오염일 가능성이 있으므로 종합적인 환경 오염 여부를 조사하기 위하여 오염지수 (Pollution Index : PI)를 이용한다. 토양의 오염지수란 각 원소의 함량을 오염허용한계값로 나누어준 후, 이들을 합한 값을 지수에 투입된 원소의 수로 나눈 값으로서, 지수가 1이상은 오염지역, 1이하는 비오염지역으로 구분된다.

토양별 오염지수를 보면, 선광장 토양의 경우 평균 3.4, 최고 30의 오염지수를 나타내고 있어 매우 오염된 양상을 보이고 있다. 반면에 밭토양, 논토양, 산토양, 광미 및 하상 퇴적물 등의 오염지수의 평균값은 각각 0.16, 0.18, 0.16, 0.24, 0.12이다. 토양, 광미 및 하상퇴적물의 오염지수분포도 (Fig. 8)에서, 선광장 및 인접 지역에서만 오염지수가 1이상으로 나타나, 매우 오염되어 있음을 알 수 있다. 그러나 기타 지역은 오염지수가 매우 낮게 나타나고 있으며,

그 중 광미담 지역에서는 다소 높은 오염지수를 보인다.

고 찰

전기한 금광광산 주변 토양, 광미 및 하상퇴적물의 중금속 원소들의 분산 특성을 종합 정리하여 보면, 다음과 같다.

주오염원인 선광장과 그 인접 지역은 As, Cd, Cu, Pb 및 Zn 등에 의해 매우 오염된 특징을 나타내며, 오염 분산 범위는 Pb 와 Zn이 상호 유사하게 가장 크며 Cu, Cd 순으로 작아지고 있다. 그러나 Ni, Co 및 Cr은 오염허용한계값에 훨씬 못미치는 함량 수준이나, 기타 지역의 토양에 비해 다소 높게 나타난다. 광미담은 As에 의해서만 오염된 양상을 보이고 있으며, 기타 원소들은 오염허용한계값에 훨씬 못미치는 함량 수준이나, 그 중 Cu, Pb, Zn 등은 다소 부화되는 특징을 보인다. 이러한 현상은 전기한 바와 같이 부선처리시 광석으로부터 대부분의 황화광물이 제거되어 광미가 주로 석영, 녹니석, 방해석, 장석, 백운모, 흑운모 등의 맥석광물로 구성되었기 때문에 나타나는 것으로 판단된다. 선광장 및 인접 지역, 그리고 광미담을 제외한 기타 지역은 분석 원소들의 함량이 오염허용한계값보다 매우 낮은 비오염지역으로 나타났다.

이상과 같이 As, Cd, Cu, Pb 및 Zn 등의 분산이 선광장 및 인접지역, 그리고 일부는 광미담으로만 국한되는 것은 금광광산이 최근인 1995년 10월까지 조업시 사용하였던 부선용액의 영향 때문인 것으로 판단된다. 즉, 금광광산이 사용한 부선용액은 약알칼리성을 가지는데 이러한 부선용액이 광미담에서 인접 선광장과 광미담 주변 지역의 토양 및 수계를 따라 최근까지 침투되었기 때문에, 전기한 바와 같이 선광장 및 광미담과 그 인접지역, 그리고 광미담으로부터 유래하는 수계에 인접하는 지역의 토양, 하상

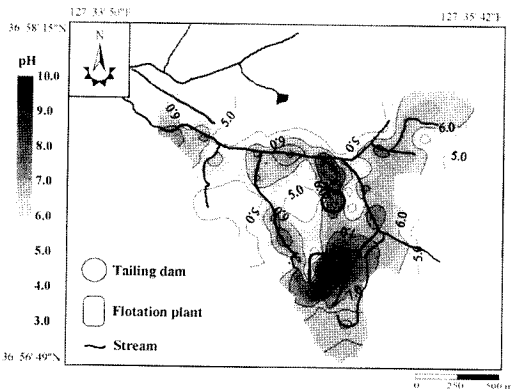


Fig. 8. Pollution index map of soils, tailings and stream sediments.

퇴적물 및 지표수의 pH가 약알칼리성을 나타내는 것으로 추론한다 (Fig. 4 및 Fig. 5). 그런데, 대부분의 중금속원소들은 산성 산화환경에서는 이동성이 양호하나, 알칼리의 환원환경에서는 이동성 및 용해도가 떨어지며 점토광물이나 유기물에 잘 흡착된다 (Fortescue, 1980). 본 연구의 분석원소인 As, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb 및 Zn 등은 중성 내지 알칼리 환경에서 상대적 이동성이 느리다 (Thornton, 1983). 따라서, 약알칼리성을 가지는 부선용액의 주변 토양 및 수계 침투 영향때문에 As, Cd, Cu, Pb 및 Zn 등의 분산이 주요오염원인 선광장과 인접 지역, 그리고 일부는 광미뎀으로만 국한되는 것으로 판단된다. 그러나 시간이 지나면서 부선용액의 영향이 감소함에 따라 토양, 하상퇴적물 및 지표수의 pH가 산성으로 변하게 되면, 중금속 원소들의 분산이 지금보다 진전되어 중금속 오염지역이 확대될 것으로 예상된다.

결 론

최근에 폐광된 금왕 금·은광산 주변의 밭토양, 논토양, 산토양, 선광장 토양, 광미, 하상퇴적물 및 지표수를 대상으로 중금속의 오염 실태 및 분산 특성에 관하여 연구한 결과는 다음과 같다.

1. 선광장 토양의 중금속 함량은 평균 1,070 ppm As, 2.3 ppm Cd, 183 ppm Cu, 1,151 ppm Pb, 2,041 ppm Zn으로서 오염허용한계값을 넘어 매우 오염되어 있는 것으로 나타났다. 중금속의 분산범위는 Cd의 경우 선광장 지역에 국한되어 있으나, Cu, Pb, Zn의 경우 그 인접 지역까지 분산된 것으로 나타났으며 Pb 및 Zn의 분산형태가 상호유사하고 상대적으로 Cu의 경우보다 넓게 분산되어 있다. 그리고 Co, Cr 및 Ni 등은 오염허용한계값에 훨씬 못미치는 함량 수준이나 기타 지역의 토양에 비해 다소 부화되는 특징을 나타낸다. 광미뎀은 As의 평균함량이 40.9 ppm으로서 오염허용한계값을 넘어서며, Cu, Pb 및 Zn 등은 기타 지역에 비해 다소 부화되는 특징을 보인다. 그러나 기타 지역의 토양들은 자연배경값 수준으로 오염되지 않은 것으로 나타났다.

2. 오염원으로 추정되었던 광미의 중금속원소 함량이 선광장 토양에 비해 매우 낮게 나타나는 것은 광미의 황화광물 함유량이 매우 적기 때문, 즉 부선처리시 광석으로부터 황화광물들이 대부분 제거되었기 때문인 것으로 판단된다.

3. 선광장 및 광미뎀과 그 인접 지역, 그리고 광미뎀으로부터 유래되는 수계에 인접하는 지역의 토양, 하상퇴적물 및 지표수는 약알칼리성을 나타내고 있는데, 이러한

현상은 최근까지의 조업시 사용되었던 부선용액 (pH: 8.0 이상)의 주변 토양 및 수계 침투 영향 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 이러한 금왕광산 주변의 pH 분포 양상 때문에 오랜 광산활동에도 불구하고 As, Cd, Cu, Pb 및 Zn 등의 분산이 주 오염원인 선광장과 인접지역, 그리고 일부는 광미뎀으로만 국한되어 있는 것으로 판단된다.

4. 선광장 지역 심토의 Pb함량은 기타 지역의 심토에 비해 3~4배 정도 높은 값을 나타내어 하부방향으로의 Pb오염이 진행되고 있는 것으로 판단된다.

5. 금왕광산 주변 수계에서 채취한 지표수에서 Cd, Cu, Zn 등의 중금속 이온들은 검출되지 않으나, Pb는 하천수 수질기준을 넘어서며, Ca²⁺-SO₄²⁻ (HCO₃) 유형에 속한다.

사 사

이 연구는 한국과학재단 지정 전략광물자원연구센터의 연구비 지원으로 수행되었다.

참고문헌

- 김경웅, 백성희, 이현구 (1995) 유구-광천 금·은광화대지역에서의 토양 및 농작물의 중금속오염. *자원환경지질*, 28권, p. 389-394.
- 김상현, 전희택 (1993) 삼보 연-아연-중정석 광산 주변 토양에서의 중금속 오염 연구. *한국자원공학회지*, 30권, p. 228-237.
- 나춘기, 전서령 (1995) 모악 금·은광산에 방치된 폐석이 주변 수계 및 생태계에 미치는 환경적 영향. *자원환경지질*, 28권, p. 221-229.
- 대한광업진흥공사 (1987) 한국의 광상. 제10호 (금·은편), p. 327-328.
- 이무성, 전서령, 나춘기, 정재일 (1996) 동진 금·은 동광산 주변에 방치된 폐석의 환경적 영향. *자원환경지질*, 29권, p. 45-55.
- 이재영, 이인호, 이순영 (1996) 금속폐광산주변의 토양, 식물 및 하천의 중금속오염에 대한 지화학적 연구 (달성 및 경산광산). *자원환경지질*, 29권, p. 597-613.
- 전동진, 전희택, 전용원 (1995) 신예미 Pb-Zn-Fe 광산과 거도 Cu-Fe 광산 주변 토양·하상퇴적물 및 하천수의 중금속 오염. *한국자원공학회지*, 32권, p. 409-423.
- 정영욱, Thornton, I. (1994) 강원도 상동지역 옥동천의 광산 산성수 및 하상퇴적물의 중금속 오염. *자원환경지질*, 27권, p. 101-113.
- 정창희, 박용안, 김항목 (1976) 한국지질도 (1/50,000 음성도폭). *한국개발연구소*, 32p.
- 최선규, 박노영, 홍세선 (1988) 충청도 일원의 금·은 광상에 대한 광물학적 연구. *광산지질*, 21권, p. 223-234.
- 환경부 (1996) 토양환경보전법.
- 환경처 (1977) 환경보전법 시행규칙.
- Bowen, H.J.M. (1979) *Environmental chemistry of the elements*. Academic Press, London, 333p.
- Fortescue, J.A.C. (1980) *Environmental geochemistry*. Springer-Verlag, 347p.
- Kloke, A. (1979) Content of arsenic, cadmium, chormium,

- fluorine, lead, mercury, and nickel in plants grown on contaminated soil. Paper presented at UN-ECE symposium.
- Piper, A.M. (1944) A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Am. Geophys. Union Trans.*, v. 25, p. 914-923.
- Rump, H.H. and Krist, H. (1988) Laboratory manual for the examination of water, waste water, and soil. VCH Verlagsgesellschaft, 190p.
- Sengupta, M. (1992) Environmental impacts of mining monitoring, restoration, and control. Lewis Publishers, 494p.
- Thornton, I. (ed.) (1983) Applied environmental geochemistry. Academic Press, London, 501p.
- Ure, A.M. (1995) Methods of analysis for heavy metals in soils; in Alloway, B.J. (ed.) Heavy metals in soils, 2nd ed. Chapman & Hall, Glasgow, 368p.

1997년 8월 8일 원고접수