

휴/폐광 금은광산 주변의 토양오염조사와 복구시스템 연구

정 명 채*

Investigation on Soil Contamination and Its Remediation System in the Vicinity of Abandoned Au-Ag Mine in Korea

Myung Chae Jung*

ABSTRACT: The objectives of this study are to investigate soil contamination in the vicinity of abandoned Au-Ag mine and to apply a remediation technique of liming to tailings. In the study area of the Imcheon Au-Ag mine, soils were sampled in and around the mine and analyzed by Atomic Absorption Spectrometry (AAS) extracted by both 0.1N HCl and aqua regia. Elevated levels of Cd, Cu, Pb and Zn concentrations extracted by 0.1N HCl were found in soils taken from tailings site. These high contents directly influenced metal concentrations in soils taken in the vicinity of the site. This is mainly due to clastic movement by wind and effluent of mine waste water. In addition, relatively enriched concentrations of the metals were found in soils extracted by aqua regia due to strong decomposition of the samples compared with 0.1N HCl extraction. According to the statistical approach, metal concentrations in soils by 0.1N HCl had a positive correlation with those by aqua regia extraction. Mine waste waters and stream waters were also sampled around the mine in spring and summer and analyzed by AAS for Cd, Cu, Pb and Zn, and by Ion Chromatography for anions. Like soils developed over tailings, significant levels of metals and sulphates were found in the mine waste waters ranging of 0.2~0.3, 0.5~2.0, 0.2~2.8, 30~50 and 1,240~4,700 mg/l of Cd, Cu, Pb, Zn and SO_4^{2-} , respectively. These elevated levels influenced in the stream waters in the vicinity of the tailings site. In seasonal variation of metal and anion contents, relatively high levels were found in waters sampled on summer due to leaching the metals and anions from tailings by rain. This study also examined the possibility of lime treatment for remediation of acid mine tailings and assumed to be 46 tones of pulverized lime for neutralization of the tailings.

서 론

20세기로 들어서면서, 산업이 급속히 발달함에 따라 다양한 종류의 유독성 물질들의 배출량이 증가되어 대기, 수질, 토양을 포함하는 생태계의 오염이 더욱 심각해지고 있다. 이들 오염물질중에서도 지질학적 물질의 풍화, 광산 및 제련활동, 산업활동, 농업활동 등에 의해 발생하는 독성 중금속의 배출은 기하급수적으로 증가되고 있는 추세이다 (Nriagu, Pacyna, 1988). 특히 중금속의 대표적인 오염원은 광산활동으로서 휴/폐광산의 갱내폐수, 광미, 폐석 등에 의해 주변의 상수원, 토양 그리고 농작물이 오염되고 있다 (Adriano, 1986). 외국뿐만 아니라 국내에서도 토양

환경의 중요성을 인식하고 1996년 1월에 '토양환경보전법'을 제정하고, 토양내의 중금속류들 (As, Cd, Cr^{+6} , Cu, Hg, Pb)에 대한 환경기준값을 설정하여 토양환경보전을 위한 대책을 마련하고 있다. 그러나 국내에 산재되어 있는 1,000 여개 이상의 휴/폐광산의 토양오염 실태조사와 환경영향평가는 아직도 부족한 실정이다. 그 동안 토양오염이 조사된 대표적인 금속광산들은 시흥광산 (황호승, 전효택, 1995), 달성광산 (이재영 등, 1989; 정명채, 1996), 삼브광산 (김상현, 전효택, 1993; Jung, Thornton, 1996, 1997), 광양광산 (박천영 등, 1995) 등이 있지만, 아직도 많은 지역에 대한 오염연구가 부족하다. 특히 높은 함량의 비소, 시안 및 중금속을 함유한 광미가 적재된 금은광산 주변의 토양오염연구는 몇몇 광산에 국한되어 이루어졌다. 그동안 유구-광천 금은광화대 (김경웅 등, 1995), 모악광산 (나춘기, 전서령, 1995), 동진광산 (이무성 등, 1996), 삼광, 구봉, 금왕광산 (전효택 등, 1997) 등에 대한 토양

* 세명대학교 자원환경공학과 (Department of Earth Resources and Environmental Geotechnics Engineering, Seonyung University, Jecheon, Choongbuk, 390-711, Korea), E-mail: jmc65@chollian.net

및 수계오염연구가 진행되었지만 아직도 많은 금은광산에 대한 토양오염조사와 오염처리법의 연구가 필요하다.

그러므로 이 연구에서는 휴광 또는 폐광된 금은광산중에서 현재까지 정밀한 환경연구가 진행되지는 않았지만 비교적 오염이 심각하다고 판단되는 임천 금은광산을 연구지역으로 선정하여, 광미야적장에 의한 토양과 수계의 중금속 (Cd, Cu, Pb, Zn) 오염을 조사하고자 한다. 그리고 고함량의 중금속을 함유한 광미를 석회석을 이용한 중화법으로 처리할 수 있는 가능성에 대해 살펴보고자 한다. 이 연구의 결과는 휴/폐광산 토양오염의 분포와 분산 특성, 산출상태, 오염수준을 평가하여 오염토양을 복구하기 위한 적정기술의 선정에 활용될 수 있을 것이다.

연구지역

충남 부여군 장암면 지토리에 있는 임천금은광산 (1:50,000 한산도폭)은 1916년 일본인에 의해 개광된 이래, 동갱, 서갱, 매갱 및 노동갱 등 4개의 합금은석영맥을 따라 연간 약 12천톤의 금을 생산하였으며, 1978년에 휴광 (1988년 광구권 소멸)되었다 (광업진흥공사, 1979). 광상 부근의 지질은 시대미상의 흑운모편마암과 이를 후기에 관입한 흑운모화강암으로 구성되어 있다. 흑운모편마암은 광산의 남서리 지구에 광범위하게 분포되어 있으며 백색~회백색을 띠고 중립 또는 조립질이다. 흑운모화강암은 매갱부근을 경계로 동쪽에 광범위하게 분포되며 우백질 화강암의 양상을 보이기도 하지만 대부분 흑운모를 다량 함유한 화강암이다. 광상은 흑운모편마암과 화강암내에 열극을 충진하여 형성된 합금은석영맥으로써 주로 N10~70W의 주향과 35~60NE의 경사로 300~500 m 연장되어 있다. 석영맥은 소량의 황철석과 방연석을 수반하며, 금은의 품위는 유화광물의 함량과 비례하지만 황철석의 결정이 크면 품위가 낮아지는 특징을 갖는다 (광업진흥공사, 1984).

채광당시에 배출된 광미는 도로가 접한 광미장 (150 m×100 m×3 m)에 야적되어 있으며, 그 주변에는 선광장, 변전소, 자재창고 등의 폐건축물이 방치되어 있다. 또한 광미장에서 약 200 m 떨어진 산능선에는 5 m×5 m×60 m의 함몰대가 형성되어 있다. 특히 광미야적장에는 미립의 광미와 함께 선광에 사용했던 시안화합물이 다량 방치되어 있으며, 광미야적장에서 소량의 침출수가 유출되어 인근 하천에서는 황갈색의 철수산화물이 관찰된다. 또한 광미가 함유되어 있거나 침출수가 유입되는 농경지도 확인되었으며, 인근 마을의 바다에서도 철수산화물, 시안물질과 함께 광미가 흩어져 있다.

시료채취 및 화학분석

광산 주변의 토양오염을 조사하기 위하여 1998년 3월 28일에 0~15 cm 심도의 상부토양 (광미, 논토양, 밭토양, 산토양, 마을토양)을 부삽으로 채취하였으며 (27개), 광산활동과 비교적 관련이 적은 비교지역에서도 7개를 채취하였다 (Fig. 1). 각 시료는 대표성을 갖기 위하여 9개 이상의 부시료를 한 개의 혼합시료로 설정하였다. 채취된 시료는 실험실에서 자연건조한 후, -10메시 표준망체를 이용하여 체질한 후, 4분하여 -80메시로 다시 체질하여 공정시험법과 왕수로 분해하였다. 공정시험법은 건조토양 10 g에 0.1N HCl 50 ml를 가하여 1시간 동안 진탕한 부유액을 원자흡광광도계 (AAS)를 이용하여 Cd, Cu, Pb, Zn 등을 분석하였다 (환경부, 1996). 그리고 왕수를 이용한 추출은 0.5 g의 건조토양에 염산 1.8 ml와 질산 0.6 ml를 넣어 70°C에서 1시간 용출하고 증류수로 채워 10 ml로 만든 용액을 공정시험법과 같이 원자흡광광도계로 분석하였다 (Ure, 1990). 또한 토양의 산도를 측정하기 위하여 -10메시 토양과 이온순수를 2:1의 비율로 섞어 'paste pH'를 측정하였으며, 광미와 같은 산성오염물질을 중화하는데 필요한 석회석의 양을 결정하기 위하여 석회시용량 (lime requirement) 실험을 실시하였다 (Sobek *et al.*, 1978).

광미야적장에서 배출되는 침출수와 주변 소하천의 하천수는 계절적 변화를 고려하기 위하여 1998년 3월 29일과 7월 24일 등 2회에 걸쳐 동일한 위치에서 채수하였으며 (Fig. 1), 현장에서 Orion사의 수질측정장비를 이용하여 pH, 총용존고형물량, 전기전도도, 염도, 용존산소량, 온도

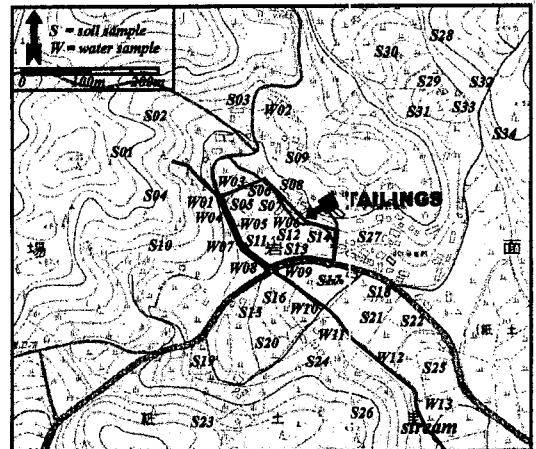


Fig. 1. Sampling locations of soils and waters in the vicinity of the Imcheon Au-Ag mine.

등을 측정하였다. 그리고 화학분석을 위해 0.45 μm membrane filter를 이용하여 여과한 후, 양이온 분석용은 질산을 첨가하여 pH를 2 이하로 낮추었으며, 음이온 분석용은 공기와의 접촉을 막기 위해 완전 밀봉하여 4°C 이하로 보관하였다. 양이온은 전처리 없이 원자흡광광도계를 이용하여 Cd, Cu, Pb 및 Zn의 함량을 측정하였으며, 음이온은 이온크로마토그래피를 이용하여 F⁻, Cl⁻, Br⁻, NO₂⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻, SO₄²⁻ 등의 함량을 측정하였으며, HCO₃⁻ 함량은 적정법으로 측정하였다. 그리고 토양시료의 화학분석에 대한 정확도와 정밀도를 측정하기 위하여 공시료 (reagent blanks), 중복시료 (duplicate samples) 및 함량을 알고 있는 참고시료 (reference materials; HRM1과 HRM2)를 이

용하였으며, 물시료는 동일한 시료를 2회 분석하여 그 결과를 평균하였다.

결과 및 토론

공정시험법에 의한 토양의 중금속 함량

공정시험법으로 분석한 상부토양의 Cd, Cu, Pb 및 Zn 함량을 Table 1에 정리하였다. 표에서 보는 바와 같이, 광미장에서 채취한 일부 시료에서 최대 1.35 mg/kg Cd, 26.4 mg/kg Cu, 70.3 mg/kg Pb 및 410 mg/kg Zn이 검출되었다. 그리고 이들 오염물질은 비에 의해 하부로 이

Table 1. The paste pH, lime requirement and Cd, Cu, Pb and Zn concentrations (mg/kg) in surface soils.

ID	Type	Paste pH	Lime req. (ton)	Extracted by 0.1N HCl				Extracted by aqua regia			
				Cd	Cu	Pb	Zn	Cd	Cu	Pb	Zn
S01	M	4.6	0.59	0.05	3.3	9.3	5.6	0.8	16.2	36	54
S02	M	4.7	0.46	0.05	1.4	9.1	1.4	0.4	5.4	30	24
S03	M	5.4	0.35	0.05	3.9	11.8	5.5	0.4	18.0	39	47
S04	M	4.3	0.69	0.05	2.5	6.4	2.5	0.2	25.2	41	59
S05	T	2.2	0.99	0.40	22.5	50.3	55.7	5.4	102	5,040	1,160
S06	T	1.9	1.29	1.35	26.4	70.3	410	9.4	229	6,160	1,640
S07	T	7.4	0.02	0.45	24.4	65.9	45.3	2.2	117	331	381
S08	M	5.8	0.26	0.10	5.1	29.6	13.1	0.6	29.0	392	169
S09	V	4.7	0.56	0.05	1.1	23.9	1.4	0.4	23.0	100	104
S10	M	6.0	0.21	0.10	4.7	6.7	10.3	1.0	22.2	48	101
S11	T	2.4	0.83	0.15	12.2	54.4	319	0.6	95.2	5,340	1,280
S12	T	7.0	0.03	0.55	16.0	25.1	67.1	3.4	41.8	8,500	536
S13	T	6.7	0.12	0.30	12.7	14.8	33.4	2.0	26.6	142	283
S14	V	6.9	0.10	0.10	3.4	8.4	15.2	0.8	21.4	54	94
S15	P	4.9	0.50	0.55	16.0	13.6	32.3	1.6	57.2	51	222
S16	P	7.4	0.00	0.85	5.7	14.8	132	2.6	19.4	132	465
S17	P	7.8	0.00	0.60	5.7	43.8	61.7	2.4	23.0	225	322
S18	P	5.8	0.20	0.25	7.7	47.3	23.1	1.4	30.8	166	299
S19	P	4.1	0.73	0.05	6.1	9.1	5.3	0.6	27.8	32	31
S20	F	5.2	0.50	0.05	1.5	2.7	2.6	0.6	17.8	22	71
S21	P	5.0	0.31	0.25	5.4	65.6	25.7	1.0	17.0	158	153
S22	P	5.9	0.20	0.35	6.4	20.9	28.2	1.2	19.6	87	181
S23	M	4.1	0.84	0.05	1.7	10.3	1.5	0.4	10.2	37	41
S24	P	5.4	0.24	0.10	3.7	28.6	12.8	0.8	12.8	79	116
S25	P	7.3	0.03	0.45	7.0	44.6	38.2	1.6	25.2	164	215
S26	P	5.5	0.29	0.05	2.0	11.4	5.1	0.4	9.2	51	68
S27	V	7.0	0.08	0.05	2.5	8.7	2.2	0.2	9.8	20	20
S28	M	4.5	0.72	0.10	1.9	15.7	2.3	0.2	19.4	51	43
S29	P	4.8	0.44	0.05	2.4	6.1	6.3	0.6	7.0	29	39
S30	P	4.7	0.41	0.05	2.9	13.1	8.0	0.4	9.0	36	47
S31	M	5.9	0.10	0.05	5.1	2.4	6.9	0.4	8.2	26	108
S32	M	5.3	0.43	0.10	1.7	5.7	7.1	0.8	33.4	44	96
S33	P	4.7	0.46	0.15	3.6	20.4	1.7	0.8	12.0	50	90
S34	M	4.6	0.78	0.05	1.5	8.2	4.0	0.4	14.0	30	51

F; farmland soils, M; mountainous soils, P; paddy soils, T; tailings and V; village soils
lime req.; amount (tones) of pluverized limestone per 1,000 tones of waste materials.

동되거나 바람에 의해 비산되어 광미야적장 직하부의 농경지에서 0.5 mg/kg 이상의 Cd, 5 mg/kg 이상의 Cu, 40 mg/kg 이상의 Pb 그리고 50 mg/kg 이상의 Zn이 검출되었다. 민정식 등 (1997)에 의하면, 공정시험법으로 추출한 광미시료에서 69 mg/kg As, 1.0 mg/kg Cd, 15.7 mg/kg Cu, 107 mg/kg Pb, 173 mg/kg 시안이 검출되었으며, As는 토양환경오염의 대책기준을 초과하는 수준의 오염이 확인되었다. 물론 이 연구의 결과에 의하면, 토양환경보전법에 제시된 토양오염 우려기준을 초과하는 중금속은 없었지만 광미에서는 다량의 중금속이 검출되어 토양이 오염되었음을 확인할 수 있었다. 그러나 광산의 영향을 비교적 받지 않은 비교지역에서 채취한 산토양과 논토양 (S28-S34)에서는 상대적으로 낮은 중금속이 검출되었다.

왕수로 추출한 토양의 중금속 함량

왕수로 추출한 토양의 Cd, Cu, Pb 및 Zn의 함량 (Table 1)은 공정시험법에 의한 추출결과에 비해 상대적으로 높았다. 이는 왕수로 처리한 시료는 혼합산으로 분해한 전함량의 70~90%를 추출할 수 있으므로 (Ure, 1990), 0.1N HCl에 의한 약산추출법에 비해 중금속의 함량이 높은 것은 당연한 결과로 판단된다.

왕수로 추출한 토양시료의 Cd, Cu, Pb 및 Zn함량에 대해 살펴보면 다음과 같다. 일반적으로 비오염지역 토양에서는 0.35 mg/kg의 Cd이 검출되지만 (Bowen, 1979), 연구지역의 광미장에서 채취한 시료와 주변의 농경지에서는 대부분 1.0 mg/kg 이상의 Cd이 검출되었다. Alloway (1990)에 의하면, 비오염지역의 토양은 보통 1 mg/kg 이하의 Cd을 함유한다. 그러므로 연구지역은 오염된 양상을 보이며, 특히 광미에서는 최고 9.4 mg/kg의 Cd이 검출되어, 합금은석영맥 광산인 충남 청양군의 삼광광산 (광미장에서 평균 49.6 mg/kg)과 구봉광산 (광미장에서 평균 49.0 mg/kg)에 비해서는 상대적으로 낮지만 충북 음성군의 금왕광산 (광미장에서 평균 0.8 mg/kg)보다는 높은 함량이 검출되었다 (전효택 등, 1997). 비오염토양에서 채취한 토양의 Cu함량은 30 mg/kg으로 알려져 있다 (Bowen, 1979). 그러나 연구지역의 광미에 함유된 Cu의 함량은 대부분 100 mg/kg 이상으로써 삼광광산, 구봉광산의 결과와 유사하고, 금왕광산에 비해 5배 이상 부화되어 있다 (전효택 등, 1997). 그러나 Cu는 지구화학적 환경에서 비교적 이동도가 낮아 수계에 의한 주변의 농경지료의 이동이 제한되어 주변의 논토양에서는 30~50 mg/kg 정도로 비오염지역에서 검출되는 수준 (20~30 mg/

kg)에 비해 약간 높았다.

일반적으로 광화작용을 받지 않은 지역의 토양에서는 평균 35 mg/kg의 Pb가 함유되어 있지만 (Bowen, 1979), 연구지역의 광미야적장의 토양에서는 5,000 mg/kg 이상이 검출되었다. 이들은 삼광, 구봉 및 금왕광산의 광미에 함유된 Pb에 비해 2~10배 이상이며, 그 원인은 이 광산의 주채 광맥인 석영맥에 함유된 방연석 (PbS)과 일부 황철석의 영향으로 판단된다. 이러한 고함량의 Pb가 검출되었음에도 불구하고 광미장 직하부의 일부 시료에서 비교적 높은 함량 (100~300 mg/kg)이 검출된 것을 제외하면 대부분의 시료에서 100 mg/kg 이하 비교적 낮은 Pb 함량이 검출되었다. 이는 Pb의 지구화학적 이동도가 낮은 특성 때문으로 판단되며 (Alloway, 1990), 삼보광산에서도 유사한 결과를 얻은 바 있다 (정명채, 전효택, 1998). 한편, 비교지역에서 채취한 토양에서는 자연배경값과 유사한 30~50 mg/kg의 Pb가 검출되어 광산에 의한 오염과 관련 없는 것으로 확인되었다. 비오염지역의 토양에서는 평균 90 mg/kg의 Zn이 검출되지만 (Bowen, 1979), 연구지역의 광미야적장의 토양시료에서는 300 mg/kg 이상이 검출되었다. 특히 일부 광미시료는 삼광광산과 구봉광산에서 조사된 결과와 유사한 1,000 mg/kg 이상이 검출되었다 (전효택 등, 1997). 그리고 Zn은 Cu와 Pb에 비해 지구화학적 이동도가 높기 때문에 광산 직하부에서 수백 mg/kg 이상의 Zn이 검출되었다. 그러나 다른 원소들과 같이, 비교지역의 토양에서는 자연배경값과 유사한 함량이 검출되었다.

추출방법에 따른 비교

토양의 중금속 함량을 측정하기 위한 시료분해방법은 약산추출, 강산추출, 혼합산추출법이 이용된다. 이 연구에서는 왕수와 공정시험법을 이용하여 중금속함량을 측정하였으며, 이들의 상호관계를 조사하였다 (Fig. 2). 그 결과, 정명채와 전효택 (1998)의 삼보 연-이연광산 주변의 토양에 대한 추출방법의 차이연구에 확인된 바와 같이 상호한 양의 상관관계를 얻었다. 이들의 상호관계를 통계학적으로 접근하기 위해 선형회귀분석을 이용하였다. Table 1에 제시된 자료에서 Cd, Cu 및 Zn의 함량은 모두 사용하였으며, Pb의 경우에는 왕수로 추출한 일부 시료의 함량이 매우 높아 전체의 회귀식에 많은 영향을 주므로 5,000 mg/kg 이상의 Pb를 함유한 4개의 광미시료들 (S05, S06, S11, S12번 시료)을 제외하고 계산하였다. 선형회귀분석 결과, 공정시험법과 왕수로 추출한 시료들의 중금속함량 사이에는 통계적으로 유의한 결과를 나타냈으며, 그 회귀식은 다음과 같다.

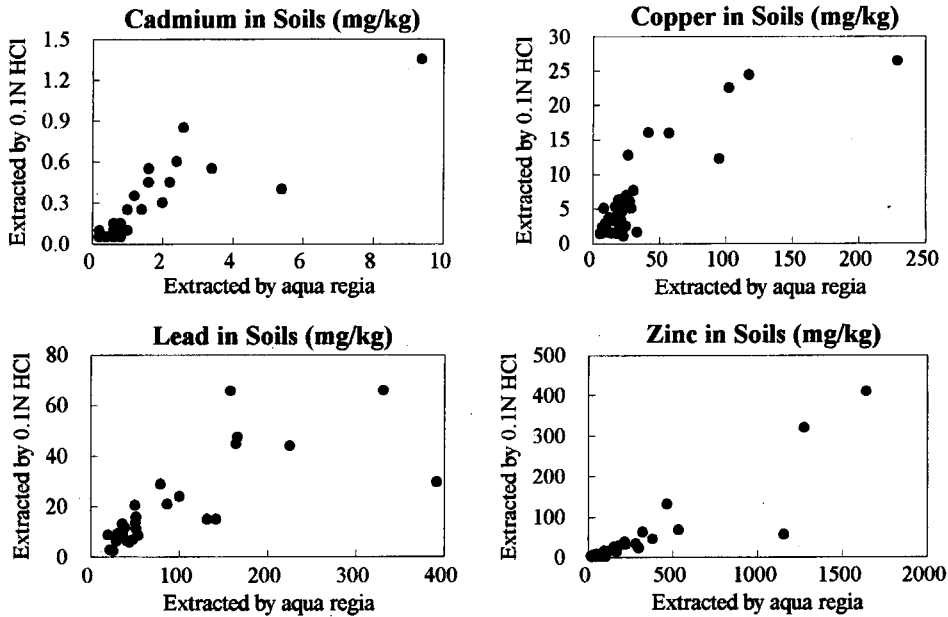


Fig. 2. Relationships between 0.1N HCl extraction and aqua regia extraction of Cd, Cu, Pb and Zn in soils.

Cadmium $Y=0.0438+0.1404 X$
 $R^2=0.77, p<0.001, n=34$

Copper $Y=2.1467+0.1352 X$
 $R^2=0.74, p<0.001, n=34$

Lead $Y=6.3528+0.1432 X$
 $R^2=0.56, p<0.001, n=30$

Zinc $Y=-11.87+0.2087 X$
 $R^2=0.81, p<0.001, n=34$

여기서 Y는 0.1N HCl로 추출한 원소의 함량 (mg/

kg)이며, X는 왕수로 추출한 원소의 함량 (mg/kg)이다. 식에서 보는 바와 같이 각 원소의 상관 관계가 통계적으로 유의한 수준으로 확인되었다. 한편, 0.1N HCl로 추출한 원소의 함량 (Y)과 왕수로 추출한 원소의 함량 (X)을 이용하여 추출율 ($Y \div X \times 100\%$)을 조사한 결과 (Table 1 참조), 원소에 따라 다소 차이는 있지만 약 10~30%로 나타나 삼보광산 (5~20%)에 비해 다소 높았다. 이는 삼보광산 주변의 토양에 비해 임천광산 주변 토양내의 중금속이 상대적으로 쉽게 용출될 수 있음을 시사해 준다.

Table 2. Physical and chemical characteristics and cation and anion concentrations in stream water sampled in spring.

ID	Temp. (°C)	pH	TDS (mg/l)	EC (µS/cm)	Cd (mg/l)	Cu (mg/l)	Pb (mg/l)	Zn (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	F ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)
W01	18.9	5.7	80	165	nd	0.01	nd	0.19	12.2	nd	18.7	13.2	22.3
W02	17.5	7.4	128	272	0.01	0.02	nd	0.09	130	0.33	6.6	nd	9.5
W03	20.5	6.3	39	83	nd	0.02	0.04	0.09	7.3	nd	4.2	nd	23.2
W04	18.0	6.0	58	121	0.02	0.01	0.04	0.12	9.8	nd	10.3	6.1	23.0
W05	21.1	2.6	982	2,080	0.23	0.54	0.20	29.2	0.0	0.44	5.6	9.4	1,240
W06	11.3	7.4	113	239	0.01	0.02	0.02	0.22	36.6	0.25	2.6	2.4	83.8
W07	14.0	6.1	85	179	nd	0.02	nd	0.13	9.8	nd	10.8	3.9	53.6
W08	11.8	6.5	250	531	nd	0.02	nd	0.28	26.9	0.03	12.9	nd	216
W09	16.5	6.8	247	524	nd	0.02	nd	0.32	44.0	0.03	17.6	nd	217
W10	12.0	7.1	255	540	nd	0.02	nd	0.11	63.5	0.06	19.2	0.6	212
W11	12.1	7.1	188	399	nd	0.02	0.10	0.29	46.4	0.05	20.2	nd	150
W12	14.0	7.7	213	449	nd	0.02	nd	0.11	75.7	0.08	21.9	nd	141
W13	14.9	8.2	225	476	0.01	0.02	nd	0.06	68.4	0.29	20.1	0.05	163

nd; not detected (lower instrumental detection limit).

Table 3. Physical and chemical characteristics and cation and anion concentrations in stream water samp.ed on summer.

ID	Temp. (°C)	pH	TDS (mg/l)	EC (µS/cm)	Cd (mg/l)	Cr (mg/l)	Pb (mg/l)	Zn (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	F ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)
W01	24.7	6.7	66	135	0.034	0.02	nd	0.11	19.5	0.02	12.4	10.7	22.8
W02	28.1	7.5	133	270	0.030	0.12	nd	0.43	149	0.11	6.0	0.2	10.3
W03	28.0	6.4	34	69.7	0.028	0.03	nd	0.05	14.6	0.03	3.9	0.8	13.9
W04	27.3	6.0	47	96.3	0.025	0.02	nd	0.03	22.0	0.03	5.0	4.4	15.6
W05	33.3	2.2	1,845	3,820	0.270	1.90	2.80	53.4	0.0	1.20	12.5	4.4	4,700
W06	33.6	2.7	850	1,768	0.170	0.40	0.30	33.2	0.0	2.40	4.6	3.9	1,246
W07	23.9	5.3	116	235	0.026	0.03	nd	0.93	7.3	0.04	5.4	2.5	125
W08	24.9	4.4	154	311	0.025	0.04	nd	1.07	7.3	0.04	5.6	2.1	180
W09	24.5	5.9	257	518	0.032	0.02	nd	0.95	34.2	0.05	6.6	1.7	329
W10	25.0	6.3	274	553	0.027	0.02	nd	0.56	48.8	0.10	6.6	2.5	336
W11	24.7	6.2	142	287	0.025	0.02	nd	0.12	43.9	0.10	9.6	3.8	117
W13	24.7	6.6	144	284	0.025	0.02	nd	0.10	41.5	0.01	9.0	3.7	115

nd; not detected (lower instrumental detection limit).

하천수의 물리화학적 특성

이 지역에 대한 민정식 등 (1997)의 연구에 의하면, 광미야적장에서 유출되는 침출수는 pH=2.2, Eh=467 mV, TDS=3,230 mg/l, EC=19,300 µS/cm, 염도=11‰로 측정되어 전형적인 산성광산폐수의 특징을 보였다. 연구지역에서 봄과 여름에 채취한 침출수와 하천수의 온도, pH, 총용존고형물량 (TDS), 전기전도도 (EC), 및 양이온과 음이온 함량을 Table 2와 Table 3에 각각 정리하였다 (여름철에는 12번 시료를 채수할 수 없어 제외되었다). 표에서 보는 바와 같이, 온도는 계절에 의한 기온차에 의해 봄에는 12~21°C정도, 여름철에는 25~34°C의 범위를 보이고 있다. pH값은 대부분 6~8정도의 중성수이지만 광미야의 고인물에서는 광미야에 함유된 황철석, 방연석 등의 황화물에서 용출된 물질들에 의해 2~3의 낮은 값을 보였다. 대부분의 하천수에서는 총용존고형물량이 300 mg/l 이하로 측정되었지만, 광미야에서 채수된 시료에서는 1,000~2,000 mg/l 정도의 높은 값이 측정되었다. 이러한 결과는 이들 폐수에 다량의 이온들이 포함되어 있음을 알 수 있으며, 높은 전기전도도 (2,000~4,000 µS/cm)로도 확인할 수 있었다. 그리고 광미야의 고인 물을 제외한 대부분의 시료에서는 측정 한계 이하의 염도 (≤0.1‰)를 보였지만 광미야의 고인 물에서는 1~2‰의 염도가 측정되었다. 그러나 용존산소량은 침출수와 하천수 모두 4~5 mg/l의 범위였다.

하천수의 중금속 함량

일반적으로 오염되지 않은 하천수에 함유된 중금속의 농도는 0.01~3.0 µg/l Cd, 0.2~30 µg/l Cu, 0.06~120 µg/l

Pb 및 0.02~100 µg/l Zn 등의 범위를 가지며, 평균적으로 0.1, 3.0, 3.0 및 15 µg/l의 Cd, Cu, Pb 및 Zn을 함유하고 있다 (Bowen, 1979). 그러나 오염된 지역의 하천수에서는 이들 자연수에 비해 수심에서 수천배 이상의 중금속을 함유하고 있으며, 수질특성과 원소의 이동도에 따라 변화된 양상을 보인다 (Alloway, 1990; Jung, 1995). 연구지역에 대한 기존의 연구에 의하면, 광미야에서 용출된 침출수에서 4.2 mg/l As, 0.93 mg/l Cd, 0.03 mg/l Cr⁶⁺, 2.96 mg/l Cu, 2,640 mg/l Fe, 9.2 mg/l Mn, 0.23 mg/l Pb, 155 mg/l Zn 등이 검출되어 수질환경보전법의 방류수 수질기준을 초과하였다 (민정식 등, 1997). 이 연구에서도 광미야의 고인물에서는 0.2~0.3 mg/l Cd, 0.5~2.0 mg/l Cu, 0.2~2.8 mg/l Pb 및 30~50 mg/l Zn이 검출되었다 (Table 2와 Table 3 참조). 그리고 광미야 주변의 하천수는 침출수에 직접 영향을 받아 비교적 높은 함량을 보이지만 점차 하부로 가면서 그 함량이 감소되는 경향을 보였다.

하천수의 음이온 함량

Table 2 (봄)와 Table 3 (여름)에서 보는 바와 같이 마을의 공동 수도 (2번 시료)에서 130~150 mg/l HCO₃⁻ 함량을 보이지만 대부분 시료에서 100 mg/l 이하로 측정되었다. F⁻는 일부 광미야의 침출수에서 1.0 mg/l 이상을 함유하고 있지만 그 외의 하천수는 비교적 낮았다. 또한 광산에 의한 오염보다는 생활하수에 영향을 받는 Cl⁻와 NO₃⁻ 등은 시료에 따른 변화가 미약하였다. 그러나 광미야에 함유된 황화물의 용해에 의해 1,000 mg/l 이상의 SO₄²⁻이 검출되어, 민정식 등 (1997)이 측정 한 침출수의 7,422 mg/l SO₄²⁻ 보다는 낮지만 매우 높은 함량이다. 한

편, 광미장에서 채수한 시료에서 1.2 mg/l의 Br⁻이 검출된 것을 제외하고 모든 시료에서 Br⁻, NO₂⁻, PO₄³⁻ 등은 검출되지 않았다.

하천수의 계절적인 변화

하천수의 물리화학적 특성과 이온의 함유량은 채수 당시의 특성에 따라 변화하므로 계절에 따른 수질을 조사하기 위하여 봄과 여름에 동일한 지점에서 시료를 채취하였다. 연구대상지역에서 1998년 3월에는 강우가 없는 건조기였으며, 7월에는 여러 차례 비가 내렸다. 그러므로 이 연구에서는 봄을 건조기로, 여름을 우기로 구분하여 계절적 특성을 살펴보았다. 1998년 3월과 7월에 채수한 시료의 물리화학적 성질의 계절적 변화를 Fig. 3에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 하천수의 pH값은 봄보다 여름에 낮은 경향을 보였다. 이러한 결과는, 건기인 봄에는 광미와 반응하여 산성을 띠는 침출수의 유출량이 작지만, 우기인 여름에는 비에 의해 용출된 산성이온들이 주변의 하천으로 유입되는 양이 많아 상대적으로 낮은 pH값을 보이는 것으로 판단된다. 그리고 총용존고형물량과 전기전도도는 뚜렷한 계절변화를 보이지는 않지만 여름철에 광미에서 용출된 물질의 증가로 인해 상대적으로 높은 경향을 보인다. 그러나 용존산소량은 계절적인 변화를 보이지 않았다. 양이온 함량의 계절적인 변화를 고찰한 결과 (Fig. 4), 광미장의 고인물에서는 우기에 채수한 시료에서 수배 이상의 중금속 함량이 검출되었으며, 주변의 하천수에서도 높은 비율은

아니지만 우기에 어느 정도 증가된 양상을 보인다. 이러한 경향은 다량의 중금속을 함유한 광미로부터 용출된 것으로 판단된다. 음이온은 계절적 변화가 뚜렷하게 나타나지는 않지만 (Fig. 5), 건기에는 유량이 작아 주변의 인가에서 용출된 것으로 판단되는 염소이온이 상대적으로 높았다. 그리고 양이온과 같이 우기에 광미에서 용출된 황산염이온이 상대적으로 높은 경향을 보였다.

계절적인 변화를 종합하면, 봄에 채수한 시료에 비해 여름에 채수한 물의 pH가 감소되고, TDS와 EC가 약간씩 증가되면서 양이온의 함량도 증가되었다. 특히 광미장에서 채수한 시료의 경우, 광미에 함유된 황화광물이 산화되고 여름철 강우와 반응하여 황산염이온의 형성이 관찰되었다. 일반적인 하천수의 계절적인 변화 형태는 원소들의 회석과 농축작용에 의해 우기에 비해 건기에 원소들의 농축에 의해 상대적으로 높은 이온 함량을 보이지만 (Adriano, 1986; Jung, 1995), 이 연구에서는 반대되는 결과를 보였다. 이는 오염원으로 판단되는 광미장의 광미에서는 다량의 이온들이 함유되어 있지만, 건기에는 이들이 용출될 수 있는 충분한 비가 내리지 않아 광미에 의한 오염의 영향이 적은 반면, 우기에는 비에 의해 많은 양의 양이온과 음이온이 용출되어 상대적으로 오염된 양상을 보이는 것으로 판단된다.

석회석을 이용한 광미의 중화

그동안 오염토양을 처리하기 위하여 다양한 방법이 제

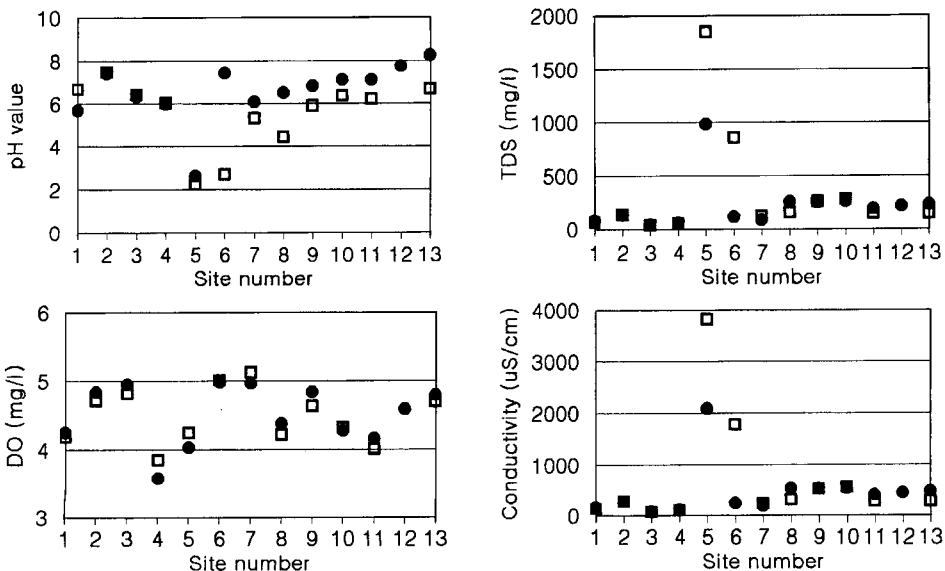


Fig. 3. Seasonal variation of physical and chemical properties for mine waste waters and stream waters (●; spring, □; summer).

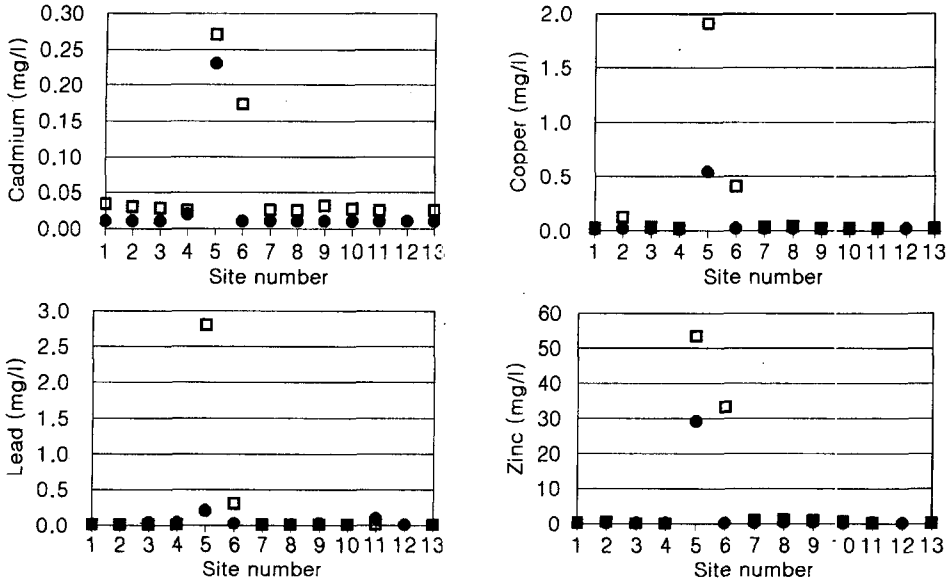


Fig. 4. Seasonal variation of metal concentrations in mine waste waters and stream waters (●; spring, □; summer).

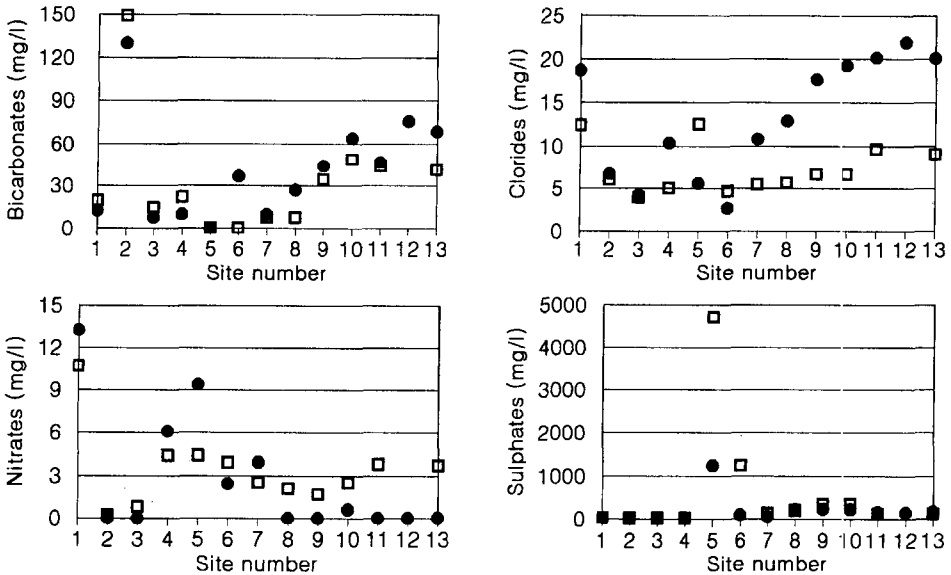


Fig. 5. Seasonal variation of anion concentrations in mine waste waters and stream waters (●; spring, □; summer).

안되었으며 (최우진, 1995; Sengupta, 1993), 대표적으로 토양세척법, 고형화법, 중화법 등이 있다. 이 연구에서는 유럽과 미국에서 많이 이용되고 있는 중화법을 적용하기 위한 기초실험을 실시하였다. 이 방법은 산성을 띠는 광산지역의 토양을 중화하기 위해 석회석을 이용하는 방법으로써, 황화물에 의해 낮은 pH를 보이는 토양에서는 다량의 중금속이 용출되므로 석회석을 이용하여 pH를 증가시켜 중금속의 이동도 또는 용해도를 줄이는 것이다. 물

론 이러한 방법으로 처리할 경우, pH가 높은 환경에서 이동도가 좋은 As, Se, Mo 산화물의 처리에는 적용하기 어렵다. 그러나 이 연구에서는 중금속의 중화에 중점을 두고 석회석 처리법을 적용하였다.

석회석 처리법 (lime treatment)에서 중요한 것은 경제성을 고려하여 적정량의 석회석을 산정하는 것이며, 보통 석회석사용량 (lime requirement) 측정법을 이용한다. 석회석사용량의 측정법은 연구자에 따라 다르지만 보통은 Ca

(OH)₂ 적정법, Woodruff 완충용액 이용법, S.M.P. 완충용액 이용법 등이 사용된다 (Sobek *et al.*, 1978; MAFF, 1986; Brady and Weil, 1996). Ca(OH)₂ 적정법은 오염된 산성토양에 pH가 6.5~7.0이 되도록 첨가된 Ca(OH)₂의 양으로 결정하는 방법으로써, 1,000톤의 오염물질에 대해 1톤의 분쇄된 석회암으로 중화시키는 양 (pH=6.5)은 0.04N Ca(OH)₂ 5 ml에 해당된다. 이 방법은 4일간 평형을 유지시켜서 측정하기 때문에 시료를 5분간 끓여서 측정하기도 한다. 한편, 완충용액을 이용하는 방법은 80 g의 p-nitrophenol(NO₂C₆H₄OH), 400 g의 calcium acetate (Ca(CH₃COO)₂ · 2H₂O), 6.2 g의 MgO를 넣고 증류수를 채워 10,000 ml로 만든 Woodruff 완충용액을 이용하는 방법과 1.8 g의 p-nitrophenol, 2.5 ml의 triethanolamine (C₆H₁₅NO₃), 3.0 g의 potassium chromate (K₂CrO₄), 2.0 g의 calcium acetate, 53.1 g의 calcium chloride (CaCl₂ · 2H₂O)를 넣고 증류수로 채워 1,000 ml로 만든 S.M.P. 완충용액을 이용하여 측정하는 방법이 있다.

이 연구에서는 Woodruff 완충용액을 이용하여 연구지역의 토양을 중화하는데 필요한 석회석의 양을 결정하였으며, 그 결과는 Table 1에 정리되어 있다. 표에서 보는 바와 같이 석회시용량은 토양의 pH와 직접적인 관계를 보이고 있으며, 높은 pH를 갖는 광미는 1,000톤당 0.1톤 이하의 석회석으로 중화할 수 있지만 낮은 pH를 갖는 광미는 1,000톤당 1.29톤의 분쇄된 석회석이 필요하다. 그러므로 연구지역의 광미장을 중화시키기 위해 필요한 석회석의 양을 결정하기 위해 몇가지 가정을 하였다. 우선, 광미장의 부피는 현장에서 측정한 면적 (150 m×100 m)에 평균 심도를 3 m로 가정하였다. 이는 민정식 등 (1997)의 연구에서 광미장의 심도를 3 m로 측정한 결과를 이용하였다. 두번째는 대부분의 광미가 석영으로 구성되어 있어 광미의 진비중을 석영의 비중인 2,650 kg/m³로 가정하였다. 그리고 광미의 입도는 일부 점토질을 포함하는 실트질이므로 실트질로 구성된 경우의 공극률인 30%를 가정하였다. 이러한 가정의 결과, 광미장의 부피는 45,000 m³ (150 m×100 m×3 m), 광미의 용적비중은 1,855 kg/m³ (2,650 kg/m³×0.7)이므로 전체의 광미량은 약 83,500톤으로 추정된다. 그리고 6개의 광미시료들에 대한 석회시용량을 측정한 결과의 평균은 광미 1,000톤당 0.55톤이므로 연구지역에 적재된 광미를 중화하기 위해서는 총 46톤의 분쇄된 석회석이 필요한 것으로 계산되었다.

결 론

임천금은광산의 토양오염과 수계오염을 조사한 결과를

요약하면 다음과 같다.

1. 광산지역의 토양오염원은 광산활동 동안에 적재된 광미장 (150 m×100 m×3 m)의 광미들이며, 토양오염 우려기준을 초과하는 시료는 없지만 비교적 높은 중금속이 검출되었다. 그리고 이들 오염물질이 비에 의해 용출되거나 바람에 의해 비산되어 주변의 수계와 토양이 오염되고 있다.

2. 추출방법에 따른 토양의 중금속 함량을 비교한 결과, 공정시험법인 0.1N HCl로 추출한 결과와 왕수로 추출한 중금속함량 사이에는 통계적으로 유의한 양의 상관성을 보였다. 그리고 원소와 시료에 따라 다소 편차는 있지만, 0.1N HCl 추출한 중금속의 함량은 왕수로 추출한 함량의 10~30% 정도로서 비교적 높으며, 이는 토양내의 중금속이 비에 의해 용출될 가능성이 높음을 시사해 준다.

3. 침출수와 하천수의 물리화학적 특성을 고찰한 결과, 대부분 금속광산의 침출수에서 나타나는 경향과 유사했으며, 주로 비에 의해 광미로부터 침출된 시료들은 자연 배경값의 수십에서 수백배 이상의 중금속이 검출되었으며, 이들에 의해 주변의 하천수에서도 다량의 중금속과 음이온이 검출되었다.

4. 침출수와 하천수의 계절변화를 고찰한 결과, 여름철에 채수한 시료에서 광산에 의한 오염 현상이 잘 나타났다. 즉, 우기에 채수한 시료에서 낮은 pH값과 상대적으로 높은 총용존고형물량, 전기전도도, 중금속, 황산이온이 검출되었으며, 이는 우기에 광미중에 함유된 물질이 비에 의해 다량 용출된 것으로 판단된다.

5. 광미에 의한 토양오염을 처리하기 위해 석회석을 이용한 중화법의 적용성을 시험한 결과, 약 83,500톤으로 추정되는 광미를 중화하기 위해서는 총 46톤의 분쇄된 석회석이 필요한 것으로 계산되었다.

결론적으로 임천광산 주변의 토양과 수계는 광미에 의해 오염되어 있으며, 이들의 적절한 처리시설이 요구된다. 앞으로는 이 연구에서 시도된 석회석을 이용한 광미의 중화법의 현장적용, 광미장에 산재되어 있는 시안화합물의 효과적인 처리 및 비소에 대한 환경오염조사가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 1997년 한국학술진흥재단의 신진교수 공모 과제 연구비에 의해 진행되었으며 이에 감사드린다. 그리고 화학분석에 많은 도움을 준 서울대학교 지구환경시스템공학부의 전효택 교수님과 대학원생들께도 감사드린다.

참고문헌

- 광업진흥공사 (1979) 광상시추보고 제 4호. 광업진흥공사.
- 광업진흥공사 (1984) 광상시추보고 제 7호. 광업진흥공사.
- 김경용, 백성희, 이현구 (1995) 유구-광천 금은광화대지역에서의 토양 및 농작물의 중금속오염. 자원환경지질, 28권, p. 389-394.
- 김상현, 전효택 (1993) 삼보 연-아연-중정석 광산 주변 토양에서의 중금속 오염 연구. 한국자원공학회지, 30권, p. 228-237.
- 나춘기, 전서령 (1995) 모암 금·은광산에 방치된 폐석이 주변 수계 및 생태계에 미치는 환경적 영향. 자원환경지질, 28권, p. 221-229.
- 민정식, 정영옥, 이현주, 이동남 (1997) 광산지역 광해조사와 대책연구. 자원연구소 연구보고서 KR-97 (C)-32, 자원연구소, 479p.
- 박천영, 박영석, 정연중 (1995) 광양광산 주변 토양의 중금속 오염에 관한 연구. 한국자원공학회지, 32권, p. 163-174.
- 이무성, 전서령, 나춘기, 정재일 (1996) 동진 금·은·동 광산 주변에 방치된 폐석의 환경적 영향. 자원환경지질, 29권, p. 45-55.
- 이재영, 이인영, 이순영 (1989) 금속폐광산주변의 토양, 식물 및 하천의 중금속오염에 대한 지화학적 연구-달성 및 경산광산-. 자원환경지질, 29권, p. 597-613.
- 전효택, 안주성, 정명채 (1997) 국내 일부 합금석영맥광산주변에서의 잠재적 독성중금속들의 환경오염 특성. 박희인교수 정년퇴임기념논문집, 서울대학교 지질학과, p. 182-188.
- 정명채 (1996) 달성 Cu-W 광산 주변 수계의 하상퇴적물과 자연수의 Cd, Cu, Pb 및 Zn 오염. 자원환경지질, 29권, p. 305-313.
- 정명채, 전효택 (1998) 삼보 연-아연광산 주변 농경지에서의 중금속함량의 계절적 변화와 환경오염. 한국자원공학회지, 35권, p. 19-29.
- 최우진 (1995) 오염토양으로부터 중금속 및 유해물질 제거에 관한 기술개발 현황. 한국자원공학회지, 제32권, p. 97-101.
- 환경부 (1996) 토양환경보전업무편람. 환경부
- 황호승, 전효택 (1995) 사흘 Cu-Pb-Zn 광산 주변에서의 중금속원소들의 분산 및 존재형태와 흡착처리. 자원환경지질, 28권, p. 455-467.
- Adriano, D.C. (1986) Trace Elements in the Terrestrial Environment. Springer-Verlag, New York.
- Alloway, B.J. (1990) Heavy Metals in Soils. Blackie and Son, Glasgow. 350p.
- Bowen, H.J.M. (1979) Environmental Chemistry of the Elements. Academic Press, New York, 333p.
- Brady, N.C. and Weil, R.R. (1996) The Nature and Properties of Soils. (11th ed.), Prentice Hall, New Jersey, 740p.
- Jung, M.C. (1995) Heavy metal contamination of soils, plants, waters and sediments in the vicinity of metaliferous mines in Korea. PhD thesis, University of London, 455p.
- Jung, M.C. and Thornton, I. (1996) Heavy metal contamination of soils and plants in the vicinity of a lead-zinc mine, Korea. Applied Geochemistry, v. 11, p. 53-59.
- Jung, M.C. and Thornton, I. (1997) Environmental contamination and seasonal variation of metals in soils, plants and waters in the paddy fields around a Pb-Zn mine in Korea. Sci. Tot. Environ., v. 198, p. 105-121.
- MAFF (1986) The Analysis of Agricultural Materials, HMSO, London, 248p.
- Nriagu, J.O. and Pacyna, J. M. (1983) Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. Nature, v. 333, p. 134-139.
- Sengupta, M. (1993) Environmental Impacts of Mining, Monitoring, Restoration, and Control. Lewis Pub. Boca Raton, 494p.
- Sobek, A., Schuller, W.A., Freeman, J.R. and Smith, R. M. (1978) Field and Laboratory Methods Applicable to Overburdens and Minesoils. EPA-600/2-78-054, US-EPA, p. 1-98.
- Ure, A.M. (1990) Methods of analysis for heavy metals in soils. In Alloway, B.J. (ed.) Heavy Metals in Soils. Blackie, London, p. 41-80.

1998년 10월 31일 원고접수, 1998년 12월 30일 게재승인.