

삼광 금-은광산 일대의 하상퇴적물과 토양내 함유된 환경적 독성원소의 지구화학적 부화와 이동

이찬희* · 이현구* · 유봉철* · 조애란*

Geochemical Enrichment and Migration of Environmental Toxic Elements in Stream Sediments and Soils from the Samkwang Au-Ag Mine Area, Korea

Chan Hee Lee*, Hyun Koo Lee*, Bong-Cheal Yoo* and Aeran Cho*

ABSTRACT : Dispersion, migration and enrichment of environmental toxic elements from the Samkwang Au-Ag mine area were investigated based upon major, minor and rare earth element geochemistry. The Samkwang mine area composed mainly of Precambrian granitic gneiss. The mine had been mined for gold and silver, but closed in 1996. According to the X-ray powder diffraction, mineral composition of stream sediments and soils were partly variable mineralogy, which are composed of quartz, orthoclase, plagioclase, amphibole, muscovite, biotite and chlorite, respectively. Major element variations of the host granitic gneiss, stream sediments and soils of mining and non-mining drainage, indicate that those compositions are decrease Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , TiO_2 , P_2O_5 and LOI with increasing SiO_2 , respectively. Average compositional ranges (ppm) of minor and/or environmental toxic elements within those samples are revealed as $As < 2-4500$, $Cd < 1-24$, $Cu = 6-117$, $Sb = 1-29$, $Pb = 17-1377$ and $Zn = 32-938$, which are extremely high concentrations of sediments from the mining drainage ($As = 2006$, $Cd = 11$, $Cu = 71$, $Pb = 587$ and $Zn = 481$ ppm, respectively) than concentrations of the other samples and host granitic gneiss. Major elements (average enrichment index=6.53) in all samples are mostly enriched, excepting SiO_2 , Na_2O and K_2O , normalized by composition of host granitic gneiss. Rare earth element (average enrichment index=2.34) are enriched with the sediments from the mining drainage. Minor and/or environmental toxic elements within all samples on the basis of host rock were strongly enriched of all elements (especially As, Br, Cu, Pb and Zn), excepting Ba, Cr, Rb and Sr. Average enrichment index of trace elements in all samples is 15.55 (sediments of mining drainage=37.33). Potentially toxic elements (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn) of the samples revealed that average enrichment index is 46.10 (sediments of mining drainage=80.20, sediments of non-mining drainage=5.35, sediments of confluent drainage=20.22, subsurface soils of mining drainage=7.97 and subsurface soils of non-mining drainage=4.15). Sediments and soils of highly concentrated toxic elements are contained some pyrite, arsenopyrite, sphalerite, galena and goethite.

서 언

삼광광산은 선캄브리아기의 화강편마암내에 발달된 열극을 충진한 석영맥상의 금-은광산으로서, 행정구역상 충청남도 청양군 운곡면 신대리 (동경 126°54', 북위 36°31')에 위치한다. 이 광산은 1928년에 광권이 설정되었고 미쯔비시에 의하여 개발되기 시작하였다. 1943년에는 조

선광업으로 이전되었고, 이 후 간헐적인 개발이 있었다. 1980년부터는 일신산업에서 탐광과 함께 금과 은을 생산하기도 하였으나, 1994년에는 영화기업사에서 운영하였다. 1996년 2월에 휴광신고를 내기까지, 상반맥을 중심으로 8개 수준에서 총 7,300 m 정도를 연맥굴진하였다.

이 광산 부근에는 구봉 및 대봉 금-은광산과 청양중석광산, 활석 및 사문석 광산들이 밀집 분포하여 소규모의 광상구를 이루고 있다. 이 지역의 지질과 금-은광산 및 금속광산에 대하여는 엄상호, 이민성 (1963), 전찬규, 오민수 (1970), 김규환 (1977), 이현구 등 (1992), So *et al.*

* 충남대학교 지질학과 (Department of Geology, Chungnam National University, Taejon 305-764, Korea)

(1993)의 연구가 있다. 삼광광상의 지질 및 지질구조, 금-은 광화작용의 구조규제, 광상의 물리화학적 생성조건 등에 대하여는 문건주 (1986), So *et al.* (1988), Lee *et al.* (1995), 이현구 등 (1996)의 연구가 있다.

최근 금속광산의 휴폐광과 이에 따른 광산주변의 환경계에 미치는 중금속 오염이 심각한 사회문제를 야기하고 있다 (Axtmann, Luoma, 1991; Fuge *et al.*, 1989; Boulton *et al.*, 1994). 한편 지구화학적 환경에서 중금속 원소들의 분산과 거동 및 부하는 암석과 광석으로 부터 퇴적물, 토양 및 순환수를 따라 이동하며, 각각의 환경계가 자정능력을 초과할 때 유해한 물질이 부화되어 생태계에 영향을 미칠 수 있다 (Davies, Ballinger, 1990; Schuiling, 1990). 원소들의 부화와 결핍은 풍화와 퇴적작용에 따라 다양한 특성이 있으나 As, Cd, Cu, Pb 및 Zn 등 중금속 원소의 분산, 이동 및 부하는 인간의 생활권에도 큰 영향을 준다 (Levy *et al.*, 1992; Merrington, Alloway, 1994).

광폐석과 폐수는 자연의 황폐화, 유실에 의한 수로와 도로의 차단, 사태, 농경지 및 가옥파괴의 원인을 제공하고 중금속 오염, 산도와 탁도의 증가, 구조물의 노화를 유발한다. 또한 이들의 대부분은 방치된 채 상수원 또는 하천으

로 유입되어 생태계의 오염을 야기한다. 삼광광산에는 월 6,000톤 처리 규모의 선광장이 있었으며, 광산부근에도 상당량의 광폐석과 광미가 방치되어 있다 (Fig. 1). 폐광도에서 유출되는 갭내수는 아무런 여과없이 하천을 따라 그대로 상수원 및 농경지로 유입되고 있는 실정이다.

이 연구는 삼광광산의 광업활동에 따른 주변수계의 환경유해원소에 관한 지구화학적 특성을 규명한 것이다. 따라서 광산부근에 발달하는 수계를 광산수계 (광상, 선광장 및 광미야적장이 분포하는 수계)와 비광산수계 (광화작용 및 광산활동이 없는 수계)로 나누어 모암, 하상퇴적물, 토양 및 하천수의 시료를 채취하여 분석하였다. 이를 광업활동 (채광 및 선광)과 폐광 (광폐석, 광미 및 갭내수)에 따른 환경적 독성원소들의 오염상태와 지구화학적 분산, 이동 및 부화를 고찰하였다.

지질 및 광상

삼광광산의 주변에는 선캄브리아기 변성암복합체가 넓게 분포되어 있다. 엄상호, 이민성 (1963) 및 So *et al.* (1988) 등은 이 변성암복합체를 상부 주라기의 화강편마암으로 설정하고 유구화강편마암으로 명명하였으나, 강필중, 임주환 (1974), 김서운 등 (1976), 우영균 등 (1991) 및 윤상필 등 (1994)은 선캄브리아기의 호상편마암으로 보고하였다. Kim, Kim (1997)은 이를 화강편마암, 각섬석편마암, 흑운모 편암 및 각섬석 편암으로 세분하였다.

광산부근의 편마암은 엽리구조를 보이는 호상편마암, 안구상편마암 및 선구조가 관찰되지 않는 화강편마암으로 분류되나 상호 점이적이다. 엽리의 일반적인 주향과 경사는 N50-80°E, 45-70°SE 이고, 조암광물은 석영, 장석, 흑운모, 백운모, 견운모, 녹니석 및 소량의 각섬석으로서 각섬암상 정도의 광역변성을 받았다. 이 연구지역의 기반암이며, 삼광광산의 모암을 이루는 것은 주로 화강편마암이다.

삼광광산의 주요 광체를 이루고 있는 맥은 본맥과 국성맥 및 상반맥으로서, 본맥의 국사봉광체와 상반맥을 가행 대상으로 하였다. 본맥의 부광대는 갭구에서 동측으로 약 2 km 이상 연장되는 구조대내에 단속적으로 배태된 렌즈상 광체로서 N60-80°E의 주향과 40-75°SE의 경사를 갖는다. 이는 부광대의 위치에 따라 통동광체, 분항광체, 국사봉광체로 구분하여 개발하였다. 광맥의 폭은 0.5~1.5 m 이나, 2~12 m에 달하는 곳도 있다.

상반맥은 본맥에서 역단층에 의해 분리된 것으로 EW의 주향과 30-40°S의 경사를 갖는다. 맥폭은 0.3~12 m로 팽축이 심하며 연장은 320 m 이다. 국성맥은 N30°W의

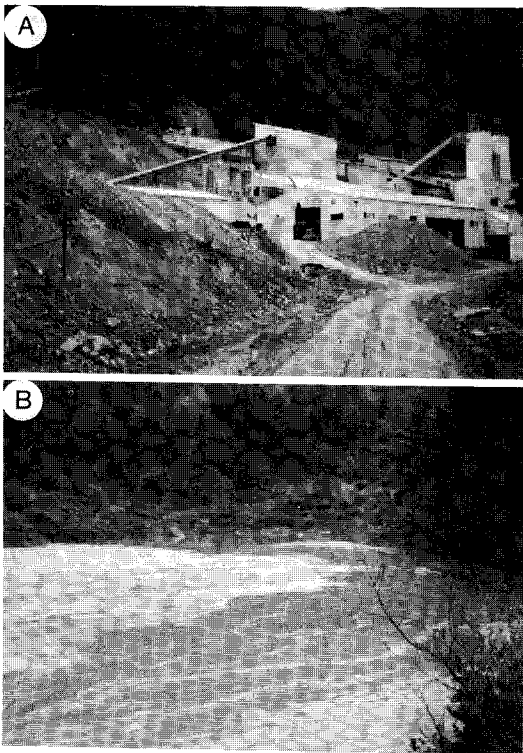


Fig. 1. Dressing plant (A) and tailing dam (B) of the Samkwang mine.

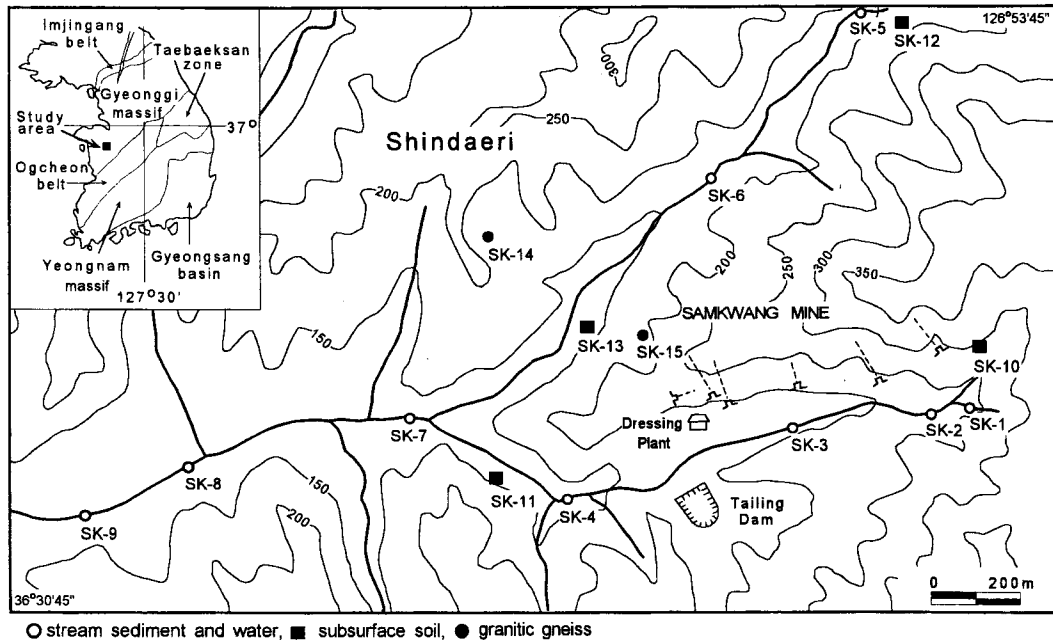


Fig. 2. Sample locations of stream sediments, subsurface soils and granitic gneiss at the Samkwang mine area.

주향과 65~70°SW의 경사를 갖는다. 맥폭은 0.5~1.5 m 이고 연장은 320 m 이다. 이 광산의 주요 광석광물은 유비철석, 황철석, 섬아연석, 황동석, 방연석, 자류철석, 백철석, 에렉트럼 (39.98~66.82 Au atom %) 및 휘은석 등이다. 맥석광물은 석영, K-장석, 방해석이며 모암은 규화, 황철석화, 건운모화, 녹니석화, 탄산염화 작용을 받았다 (이현구 등, 1996).

광석광물중에는 유비철석의 산출빈도와 산출량이 가장 많고, 모든 광맥과 광체에서 산출되나 국성맥에서 가장 특징적이다. 유비철석의 As 함량 (atom %)은 29.21~32.24 로서, As와 Fe의 함량이 낮고 S가 약간 높다. 섬아연석은 부광대에서 산출빈도가 높고 상반맥에서는 산출량이 가장 많다. 섬아연석의 FeS와 CdS의 mole %는 각각 6.45~13.82 및 0.19~2.34 로서, Cd의 함량이 높다. 석영에서 관찰되는 유체포유물의 균일화온도와 NaCl 상당 염농도는 172~441°C 및 0.2~10.5 wt.% 이다. 황화광물과 석영에서 분석된 황과 산소의 안정동위원소 조성은 $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ 와 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 로 할 때 각각 1.8~4.9% 및 -1.0~10.9%의 범위이다 (이현구, 유봉철, 1997).

시료 및 분석

이 연구에서는 삼광광산의 수계를 광산수계와 비광산수계로 나누어 광산의 모암이자 기반암 (화강편마암), 하

상퇴적물, 토양 시료를 대상으로 주원소, 미량원소 및 희토류원소를 분석하였다. 하상퇴적물은 광산수계에서 4 시료, 비광산수계에서 2 시료, 양자가 합류하는 수계에서 3 시료를 채취하였다. 기반암과 토양시료는 각각에서 2 시료씩을 채취하였다 (Fig. 2).

토양시료는 오거를 이용하여, 1 m 간격의 격자상으로 9 지점에서 채취하고 이를 합하여 하나의 완전한 시료로 하였다. 하상퇴적물은 물의 흐름이 없는 곳에서 표면의 부유물과 유기물을 제거한 후에 1~10 cm 깊이로 채취하였다. 이 시료들은 실내에서 자연건조하여 80 mesh 미만의 입도로 체질한 것을 대상으로 분말화하여 분석하였다. SK-1 (퇴적물)과 SK-10 (토양)은 광산수계에서 채취된 시료이나, 광산보다 상류에 위치하는 관계로 오염에 노출된 시료는 아니다.

하상퇴적물과 토양의 광물조성을 밝히고자 일부 시료에 대하여 X-선 회절분석을 하였다. 분석기기는 Rigaku 제 D/Max-II B였고, X-선은 $\text{CuK}\alpha$ 에 조건은 30 kV와 15 mA 였다. 화학분석은 캐나다의 ACTLABS에 의뢰하여 유도분극 아르곤 플라즈마 질량분광분석기 (ICP, ICP-MS)와 중성자 활성분석기 (INNA)를 이용하여 51원소를 정량화 하였다. 또한 중금속의 함량이 높은 시료를 선택하여 중광물들을 비중분리하고, 이를 연마편으로 제작하여 반사현미경으로 관찰하였다.

하천수의 pH는 현장에서 시료채취와 동시에 측정하였

다. 그러나 하상퇴적물과 토양의 pH 측정은 채취된 시료를 실내에서 건조시킨 다음 Rump, Krist (1988)의 방법을 따랐다. 이는 10 mesh 미만의 입도를 갖는 시료 20g을 증류수 (pH=6.29) 50 ml에 혼탕하여 자력교반기로 한 시간 정도 교반시킨 후에, 20 여분 안정시킨 것을 완충용액 (pH=4, 7, 10)으로 보정하여 Orion SA-720 pH 측정기로 측정하였다.

분석결과

광물조성

삼광광산의 모암인 화강편마암은 주로 석영, 정장석, 사장석, 각섬석, 백운모와 소량의 흑운모, 견운모, 녹니석, 저어콘 (zircon), 스피넬 (sphene) 및 불투명 광물로 구성되어 있다. 한편 삼광광산에서 산출되는 광석 및 맥석광물은 유비철석, 황철석, 섬아연석, 황동석, 방연석, 자류철석, 백철석, 에렉트럼, 휘은석, 석영, 정장석, 백운모, 견운모, 녹니석 및 탄산염 광물 등이다. 따라서 연구지역의 토양과 하상퇴적물에는 위에 열거한 광물들이 포함되어 있을 것은 자명한 일이나, 어떤 광물들이 오염원으로 작용할 수 있는지를 밝히는 것이 중요하다.

따라서 중금속 원소의 함량이 높은 하상퇴적물 (SK-3, SK-7) 및 토양 (SK-11, SK-12) 시료를 선택하여 X-선 회절분석을 실시하였다. 이들은 화학분석한 시료를 분말화한 것이다. 이 결과 Fig. 3에서 보는 바와 같이, 구성광물의 함량비는 다소 차이가 있으나 모든 시료에서 동일한 광물조성 (석영, 정장석, 사장석, 운모, 녹니석 및 각섬석 등)을 갖는 것으로 보인다. 다만 SK-7의 퇴적물과 SK-

11의 토양에서는 각섬석의 함량이 다소 높을 뿐이며, 중금속의 오염원이 될 수 있는 중광물은 검출되지 않았다.

주성분 및 회토류원소

이 연구에서는 시료의 종류에 따라 광산수계, 비광산수계 및 합류수계의 하상퇴적물, 광산 및 비광산수계의 토양, 기반암 등의 6가지로 세분하고 (Table 1), 각각의 조성과 평균치를 구하였다 (Table 2). 주성분원소의 함량 (wt.%)과 조성변화는 다음과 같이, SiO₂=52.04~77.23, Al₂O₃=8.36~17.42, Fe₂O₃=1.86~7.33, MnO=0.01~0.13, MgO=0.57~3.55, CaO=0.49~2.59, Na₂O=0.52~2.59, K₂O=2.11~5.49, TiO₂=0.23~0.96, P₂O₅=0.07~0.96, LOI (작열감량, loss on ignition)=0.98~16.67 이다.

이를 SiO₂의 함량에 따라 변화경향을 검토한 결과 (Fig. 4), SiO₂의 함량이 증가함에 따라 Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, TiO₂, P₂O₅, LOI는 부의 상관관계를 갖는다. 그러나 SiO₂의 함량변화와 CaO, Na₂O 및 K₂O는 특별한 경향을 갖지 않았다. 한편 SiO₂의 함량은 토양에서 특히 낮고, Fe₂O₃, Al₂O₃, P₂O₅는 퇴적물에서 낮으나 MnO, Na₂O, K₂O는 양자의 차이가 없다. LOI는 토양에서 특히 높고 MgO, CaO 및 TiO₂는 비광산수계의 퇴적물 및 토양에서 높다.

회토류원소의 조성은 Table 3과 같다. 분석치의 평균값과 표준편차를 가지고 Haskin *et al.* (1968)이 제시한 운석 (chondrite) 값으로 표준화한 회토류원소의 변화는 일반적인 화강암류와 거의 비슷한 경향을 보였다 (Fig. 5). 이를 Al₂O₃의 함량과 일부 회토류원소의 상관관계로

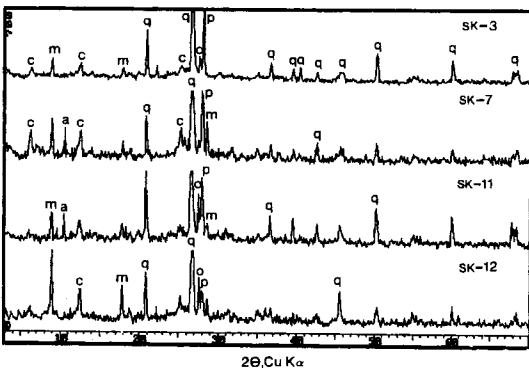


Fig. 3. X-ray diffraction pattern of representative sediments and soils from the Samkwang mine area. c; chlorite, m; mica (muscovite and/or biotite), q; quartz, o; orthoclase, p; plagioclase, a; amphibole. Sample numbers are the same as those of Table 1 and Fig. 2.

Table 1. Description of analytical samples from the Samkwang mine area.

Sample No.	descriptions
SK-1 (960807-3)	sediments of mining drainage
SK-2 (960807-4)	sediments of mining drainage
SK-3 (960807-6)	sediments of mining drainage
SK-4 (951202-5)	sediments of mining drainage
SK-5 (960807-8)	sediments of non-mining drainage
SK-6 (960807-15)	sediments of non-mining drainage
SK-7 (951202-3)	sediments of confluent drainage
SK-8 (951202-2)	sediments of confluent drainage
SK-9 (951202-1)	sediments of confluent drainage
SK-10 (960807-2)	subsurface soils of mining area
SK-11 (960807-22)	subsurface soils of mining area
SK-12 (960807-9)	subsurface soils of non-mining area
SK-13 (960807-18)	subsurface soils of non-mining area
SK-14 (831114-10)	granitic gneiss of host rock
SK-15 (8)	granitic gneiss of host rock

Table 2. Contents and averages (wt.%) of major elements in sediments, soils and granitic gneiss from the Samkwang mine area.

No.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI	Total
<i>Sediments of mining drainage</i>												
SK-1	63.97	14.54	5.11	0.06	1.53	0.70	1.71	2.39	0.60	0.12	9.08	99.80
SK-2	60.60	15.18	6.65	0.07	2.27	1.09	1.20	3.19	0.68	0.17	7.57	98.64
SK-3	76.37	8.36	4.27	0.06	1.91	1.09	0.53	2.11	0.38	0.13	3.64	98.85
SK-4	77.23	9.22	3.76	0.11	2.03	1.10	0.52	2.31	0.38	0.11	3.84	100.61
mean	69.54	11.84	4.95	0.08	1.94	1.00	0.99	2.50	0.51	0.13	6.03	99.51
<i>Sediments of non-mining drainage</i>												
SK-5	64.04	13.68	6.26	0.08	3.55	1.93	1.48	2.52	0.81	0.17	5.16	99.66
SK-6	64.33	13.77	6.13	0.08	3.54	2.59	1.44	2.54	0.81	0.19	5.17	100.57
mean	64.19	13.73	6.20	0.08	3.55	2.26	1.46	2.53	0.81	0.18	5.17	100.16
<i>Sediments of confluent drainage</i>												
SK-7	70.69	10.65	4.65	0.08	2.63	1.62	0.85	2.45	0.58	0.14	4.28	98.62
SK-8	69.59	12.38	4.94	0.06	2.43	1.30	1.37	2.66	0.60	0.13	4.35	99.76
SK-9	70.40	11.67	5.01	0.06	2.49	1.47	1.11	2.57	0.61	0.14	4.20	99.73
mean	70.23	11.57	4.87	0.07	2.52	1.46	1.11	2.56	0.60	0.14	4.28	99.41
<i>Subsurface soils of mining area</i>												
SK-10	52.04	17.42	6.33	0.13	1.42	0.47	1.27	2.94	0.77	0.20	16.67	99.65
SK-11	66.65	13.30	4.99	0.05	1.74	0.76	1.09	2.60	0.67	0.55	8.91	100.29
mean	59.35	15.36	5.66	0.09	1.58	0.62	1.18	2.77	0.72	0.38	12.79	100.50
<i>Subsurface soils of non-mining area</i>												
SK-12	58.74	15.35	7.33	0.08	3.55	1.75	1.21	2.59	0.96	0.22	7.56	99.35
SK-13	57.33	16.20	6.45	0.09	2.52	1.00	1.26	2.78	0.92	0.31	10.77	99.61
mean	58.04	15.78	6.89	0.09	3.04	1.38	1.24	2.69	0.94	0.27	9.17	99.53
<i>Granitic gneiss of host rock</i>												
SK-14	74.60	13.90	1.86	0.01	0.57	0.49	2.59	5.49	0.23	0.11	0.98	100.83
SK-15	76.83	11.05	4.53	0.03	1.47	0.54	1.33	3.34	0.44	0.07	1.36	101.00
mean	75.72	12.48	3.20	0.02	1.02	0.52	1.96	4.42	0.34	0.09	1.17	100.94

Sample numbers are the same as those of Table 1 and Fig. 2.

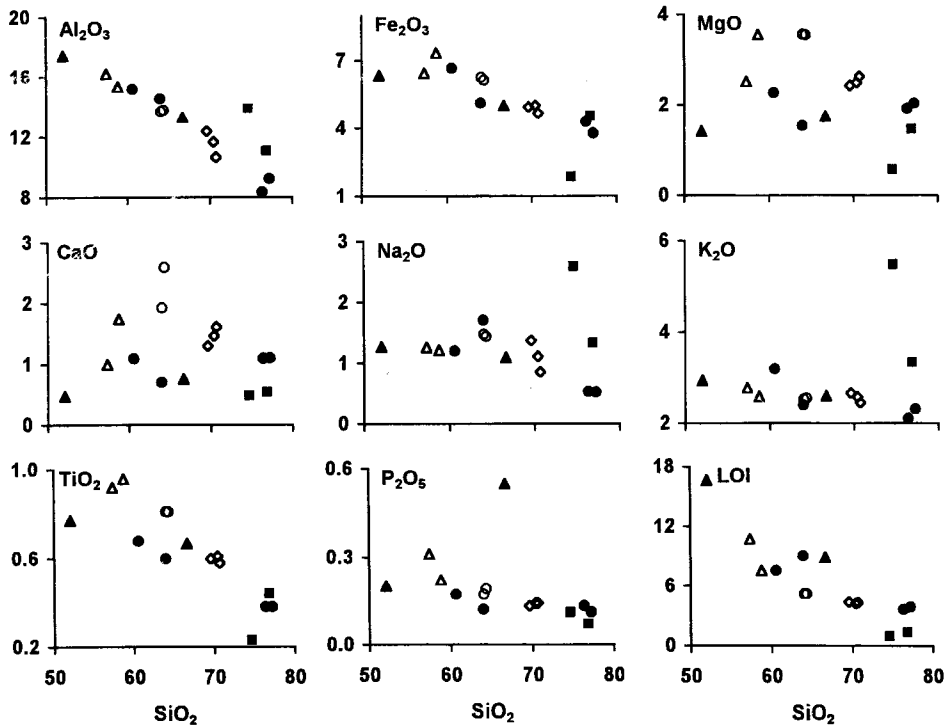


Fig. 4. Variation diagrams of major elements against SiO₂ (wt.%) in sediments, soils and granitic gneiss from the Samkwang mine area. full circles; sediment of mining drainage, open circles; sediment of non-mining drainage, open diamonds; sediment of confluent drainage, full triangles; subsurface soil of mining drainage, open triangles; subsurface soil of non-mining drainage, full squares; host granitic gneiss.

Table 3. Contents and averages (ppm) of rare earth elements in sediments, soils and granitic gneiss from the Samkwang mine area.

No.	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu
<i>Sediments of mining drainage</i>								
SK-1	225	408	162	29	2.1	3.0	4.0	0.56
SK-2	103	185	76	14	1.9	1.6	3.4	0.49
SK-3	76	131	47	10	1.1	1.3	1.9	0.31
SK-4	33	58	25	5	0.9	0.6	1.2	0.15
mean	109	196	78	15	1.5	1.6	2.6	0.41
<i>Sediments of non-mining drainage</i>								
SK-5	111	204	84	14	1.8	<0.5	2.5	0.39
SK-6	107	197	82	14	1.7	<0.5	3.3	0.49
mean	109	201	83	14	1.8	<0.5	2.9	0.44
<i>Sediments of confluent drainage</i>								
SK-7	89	162	65	12	1.4	1.3	2.3	0.30
SK-8	56	103	42	7	1.2	0.9	1.4	0.20
SK-9	88	161	62	12	1.4	1.0	2.4	0.36
mean	78	142	56	10	1.3	1.1	2.0	0.29
<i>Subsurface soils of mining area</i>								
SK-10	86	159	62	11	1.9	<0.5	2.8	0.45
SK-11	70	130	51	9	1.3	1.4	2.0	0.32
mean	78	145	57	10	1.6	1.0	2.4	0.39
<i>Subsurface soils of non-mining area</i>								
SK-12	171	303	127	21	2.1	2.1	3.6	0.56
SK-13	79	144	56	10	1.5	<0.5	2.5	0.35
mean	125	224	92	16	1.8	1.3	3.1	0.46
<i>Granitic gneiss of host rock</i>								
SK-14	51	115	43	8	1.0	<0.5	0.7	0.07
SK-15	46	81	37	6	1.0	<0.5	0.7	0.12
mean	49	98	40	7	1.0	0.5	0.7	0.10

Sample numbers are the same as those of Table 1 and Fig. 2.

도시하여 본 결과, 거의 모든 원소들은 Al₂O₃의 함량이 증가함에 따라 미약한 증가경향을 갖는다. 그러나 일부 시료에서는 이들 원소의 함량이 상당히 높아 전체적으로 불균질하며, 특히 LREE에서 불균질한 경우가 많다.

미량 및 독성원소

이 연구에서 분석된 시료들의 주요 미량원소 함량은 Table 4와 같다. 특히 환경적으로 높은 독성을 갖고 있는 것으로 알려진 원소들 (Goyer, Mehlman, 1977; Thornton, 1983; Fuge *et al.*, 1989; Davies, Ballinger, 1990; Merrington, Alloway, 1994)과, 각각의 함량 (ppm)범위는 As=<2-4500, Cd=<1-24, Cu=6-117, Sb=1-29, Pb=17-1377 및 Zn=32-938으로서 넓은 조성범위와 아주 높은 함량을 갖는다.

Ag, Mo 및 W의 함량은 검출한계 (1 ppm) 미만의 것이 대부분이었으나, 광산수계의 퇴적물에서는 각각 Ag=2-

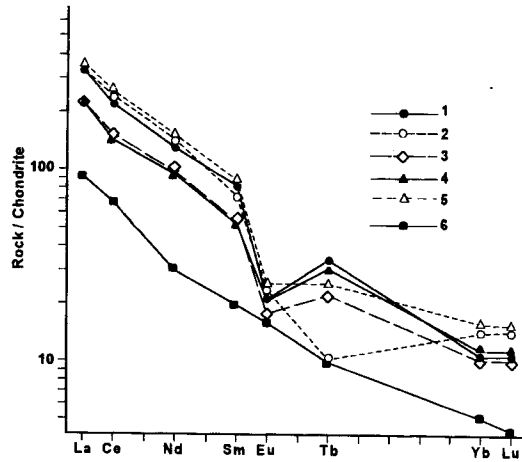


Fig. 5. Representative normalizing pattern showing mean value of rare earth elements in sediments, soils and granitic gneiss from the Samkwang mine area. Symbols (numbers of 1 to 6) are the same as those of Fig. 4.

6, Cd=7-29, W=5-29 ppm 정도가 검출되었다. 한편 Ba (327-942), Br (<1-18), Co (4-20), Cr (49-360), Cs (2-7), Hf (3-34), Ni (30-72), Rb (100-172), Sc (3-15), Sr (85-182), Th (13-92), U (3-14), V (16-108), Y (13-54) 및 Zr (138-1482) 들도 비교적 조성 (ppm)의 변화폭이 크다. 그러나 Be, Bi, Hg, Ir, Sb 및 Ta는 모든 시료에서 검출한계 미만이었다.

미량원소의 함량을 SiO₂를 기준으로 변화경향을 검토하여 보면, SiO₂가 증가함에 따라 함께 증가하는 경향을 갖는 원소는 없다. 그러나 SiO₂가 증가함에 따라 Ba, Co, Ni, Rb, Sc, U, V, Y 및 Zr은 감소하는 경향이 뚜렷하나, As, Cu, Pb, Sr, Th, Zn은 일정한 관계를 갖지 않는다 (Fig. 6). 일반적으로 중금속 오염지역의 지질시료는 Cu의 함량변화에 따른 오염원소 (As, Cd, Ni, Pb 및 Zn)의 함량변화가 동일한 거동특성을 갖는 것으로 알려져 있다. 따라서 이 오염원소들을 각각의 시료에 따라 평균조성을 구하여 비교한 결과 (Fig. 7), Ni를 제외하고는 공통적으로 오염수계의 하상퇴적물에서 아주 높은 함량을 가지며, 거의 동일한 거동특성을 갖는 것으로 보인다.

이를 수계에 따라 나누어 보면, 광산수계 하상퇴적물의 평균함량 (ppm)은 As=2006, Cd=11, Cu=71, Ni=55, Pb=587 및 Zn=481 으로서, 미국 EPA (U.S. Environmental Protection Agency)의 퇴적물 독성분류 기준 (Baudo, Muntau, 1990)을 수집에서 수백배까지 초과하는 아주 높은 값을 갖는다. 그러나 비교지역으로 선택된 비광산수계 퇴적물의 평균값은 As=94, Cd=1, Cu=33, Ni=65, Pb=57, Zn=123 ppm 이었다. 양자가 함유하

Table 4. Contents and averages (ppm) of minor elements in sediments, soils and granitic gneiss from the Samkwang mine area.

No.	As	Ba	Br	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Hf	Ni	Pb	Rb	Sc	Sr	Th	U	V	Y	Zn	Zr	
<i>Sediments of mining drainage</i>																					
SK-1	25	517	18	<1	14	94	4	28	34	48	41	121	10	127	92	14	66	54	90	1482	
SK-2	2400	563	9	6	18	120	5	65	14	68	462	167	11	118	41	8	79	54	318	598	
SK-3	4500	327	2	24	13	110	3	117	10	55	1377	100	7	85	30	6	44	51	938	433	
SK-4	1100	374	2	13	10	97	4	73	3	55	466	112	7	87	13	3	51	19	576	138	
mean	2006	448	8	11	14	105	4	71	15	57	587	125	9	104	44	11	60	45	481	663	
<i>Sediments of non-mining drainage</i>																					
SK-5	110	606	3	1	19	200	4	31	16	72	52	153	15	167	45	6	90	31	118	639	
SK-6	78	611	4	<1	19	170	5	35	15	58	62	153	15	174	42	6	95	49	127	623	
mean	94	609	4	1	19	185	5	33	16	65	57	153	15	171	44	6	93	40	123	631	
<i>Sediments of confluent drainage</i>																					
SK-7	810	467	4	7	13	130	4	59	11	60	290	128	10	119	37	6	66	32	357	433	
SK-8	240	613	3	2	14	130	4	36	6	48	116	130	11	165	21	3	70	17	188	233	
SK-9	350	556	4	4	13	130	4	43	9	47	178	129	11	136	38	6	71	24	231	287	
mean	467	545	4	4	13	130	4	46	9	52	195	129	11	140	32	5	69	24	259	318	
<i>Subsurface soils of mining area</i>																					
SK-10	44	653	15	1	20	98	6	42	12	51	69	192	12	101	36	7	82	46	120	368	
SK-11	270	530	5	1	12	93	5	49	12	37	175	139	10	94	29	6	70	27	173	451	
mean	157	592	10	1	16	96	6	46	12	44	122	166	10	98	33	7	76	37	147	410	
<i>Subsurface soils of non-mining area</i>																					
SK-12	87	661	4	<1	19	170	6	36	32	69	65	135	15	153	70	9	108	44	137	1152	
SK-13	28	657	7	<1	19	140	7	39	12	58	53	168	14	125	29	6	100	29	135	451	
mean	58	659	6	1	19	155	7	38	22	64	59	152	15	139	50	8	104	37	136	802	
<i>Granitic gneiss of host rock</i>																					
SK-14	<2	942	<1	<1	4	49	2	6	5	30	41	172	3	182	43	4	16	13	32	167	
SK-15	3	644	<1	<1	11	360	3	15	6	34	17	137	7	137	18	3	59	13	68	206	
mean	3	793	1	1	8	205	3	11	6	32	29	155	5	160	31	4	38	13	50	187	

Sample numbers are the same as those of Table 1 and Fig. 2.

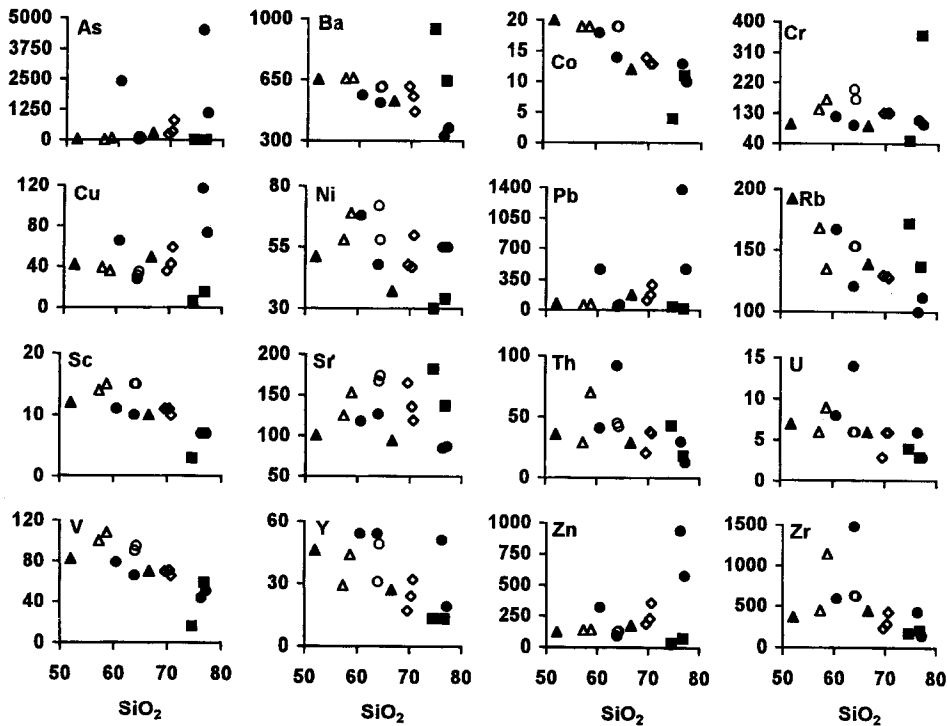


Fig. 6. Selected variation diagrams of minor elements (ppm) against SiO₂ (wt.%) in sediments, soils and granitic gneiss from the Samkwang mine area. Symbols are the same as those of Fig. 4.

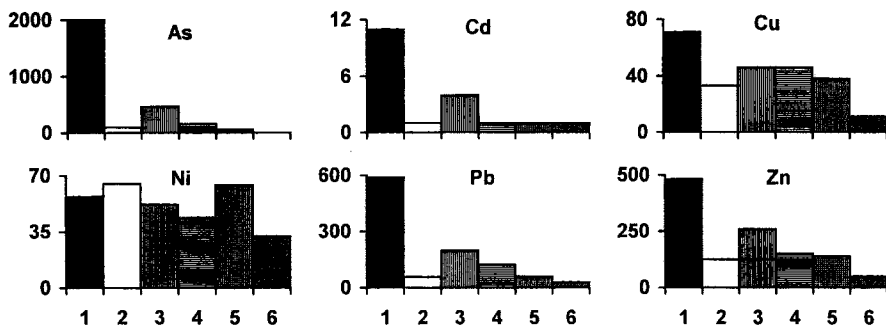


Fig. 7. Comparison histograms of environmental toxic elements (mean value of ppm) in sediments, soils and granitic gneiss from the Samkwang mine area. Numbers are the same as those of Fig. 5.

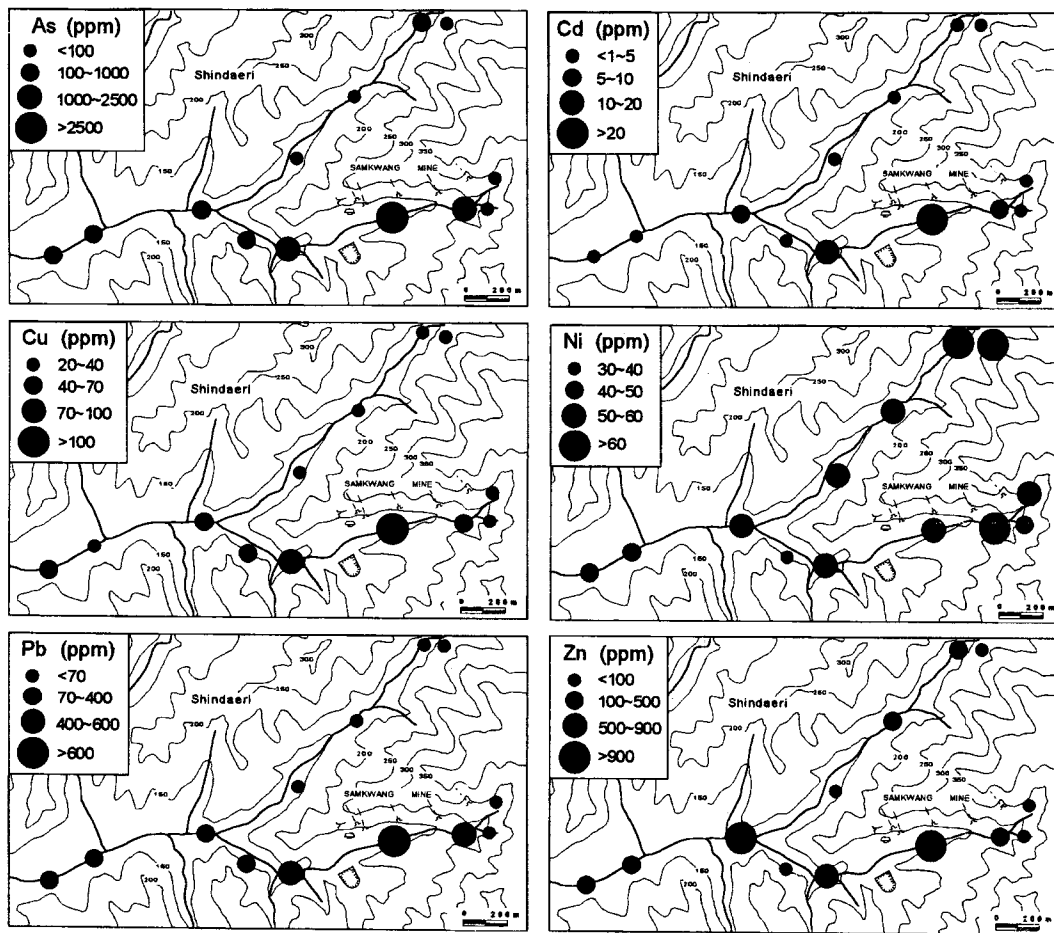


Fig. 8. Concentration maps showing environmental toxic elements in sediments and soils from the Samkwang mine area.

는 수계에서는 As=467, Cd=1, Cu=46, Ni=52, Pb=195, Zn=259 ppm로 다시 상당히 높아진 것으로 보아, 이 독성 원소들은 적어도 수 km 하류까지 영향을 미쳤을 것으로 보인다.

또한 광산수계 토양의 평균 조성은 각각 As=157, Cd=1, Cu=46, Ni=44, Pb=122, Zn=147 ppm으로서 비광산 수계의 값 (As=58, Cd=1, Cu=38, Ni=64, Pb=59, Zn=136 ppm) 보다 아주 높다. 이들을 각각의 수계와 시료에

따라 점시하면 Fig. 8과 같다. 이 결과는 김경웅 등 (1995)이 보고한 동일지역의 하상퇴적물이 갖는 값 (Cd=7.6, Cu=66, Pb=243, Zn=276 pm)과 비교할 때, 모두 약 1.5~2.5 배를 초과하는 것이다. 그러나 토양 (Cd=5.1, Cu=44, Pb=118, Zn=141 ppm)의 값은 양자 모두 비슷한 결과를 보였다.

전효택 등 (1997)은 삼광광산 주변의 토양, 하상퇴적물 및 하천수에 관하여 잠재적 독성원소의 환경오염 특성을 분석하였다. 이 결과 토양 (광미 야적장 부근, 선광장 부근, 산토양, 발토양)에는 각각 As=341, 820, 21, 779 ppm, Cd=50, 68, 1.5, 5.2 ppm, Cu=113, 226, 40, 71 ppm, Pb=840, 5410, 56, 361 ppm 및 Zn=2350, 2370, 93, 274 ppm이, 하상퇴적물에서는 As=970, Cd=23, Cu=106, Pb=2000 및 Zn=963 ppm이 검출되는 것으로 보아, 이 지역의 광업활동이 환경의 점오염원으로 작용함을 보고하였다. 광산수계의 하천수도 Cd=0.012, Cu=0.003, Pb=0.032 및 Zn=0.040 mg/l가 포함되어 있어 농업용수의 수질기준을 초과한다. 이 중금속들의 화학적 형태는 주로 산화형태를 가지며 풍화 및 산화작용이 진행되면서 지속적인 중금속의 용출이 예상된다. 특히 Cd가 가장 용출되기 쉬운 상태인 것으로 보고하였다 (전효택 등, 1997).

고 찰

분산과 이동

지표환경에 노출된 암석, 토양 및 퇴적물을 구성하는 주성분, 일부 미량원소 및 희토류원소들은 아직까지도 환경적 유해여부가 불분명한 것이 있다. 그러나 미량원소중

에 특히 중금속 원소 (As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, Se, Zn)들은, 잠재적으로 강한 독성을 가지고 있어 생태계에 미치는 영향이 아주 중요하다. 이 연구에서는 분석 대상시료 (퇴적물과 토양)에 함유된 As, Cd, Cu, Ni, Pb 및 Zn에 관하여, 연구지역 기반암의 평균함량 및 국제적인 환경기준치를 적용하여 고찰하고자 한다. 인체에 대한 원소의 유해여부는 최석원, 김억수 (1996)의 자료를 참고하였다.

As는 일반적인 환경하에서도 쉽게 용해되며 강한 독성을 가지고 있기 때문에, 과다노출될 경우 인간의 신진대사와 신경계통에 영향을 끼친다. 연구지역의 기반암에 포함되어 있는 As의 평균함량 (3 ppm)은 비교적 낮다. 그러나 토양과 퇴적물에는 Rose *et al.* (1979), Levinson (1974) 및 Kabata-Pendias, Pendias (1984)가 제시한 토양 및 퇴적물의 환경기준치보다는 월등히 높다. 특히 광산수계의 퇴적물에서는 기반암에 비하여 최고 1500배 이상의 As가 농집되어 있고, 비광산 수계의 퇴적물과 토양에는 기반암보다 각각 31배와 19배가 농집되어 있다. 오염수계에서도 토양보다는 퇴적물에서 농집도가 월등히 높으며, 이 As는 Cu와 동일한 거동특성을 보인다 (Fig. 9).

Cd의 과잉섭취는 심장, 간장 및 위장의 장애를 야기하며, 이에 중독 되었을 때는 일본에서 발발한적이 있는 이따이 이따이 병과 같이 폐, 신장 및 골격에도 심각한 타격을 준다 (Fleisher *et al.*, 1974; Nogawa, 1981). 삼광광산에서 산출되는 첨아연석에는 다량의 카드뮴 (CdS mole %; 0.19~2.34)이 함유되어 있으며, 인근의 대봉광산에서도 거의 동일한 경향을 갖는 것으로 보아, 이 지역은 Cd의 이상치가 있는 곳이다. 그러나 이 연구에서 분석된 기반암 및 비광산 수계의 퇴적물과 토양시료에서 모두 검출한계 (<1 ppm) 미만이었다. 광산수계의 퇴적물에는 6~24

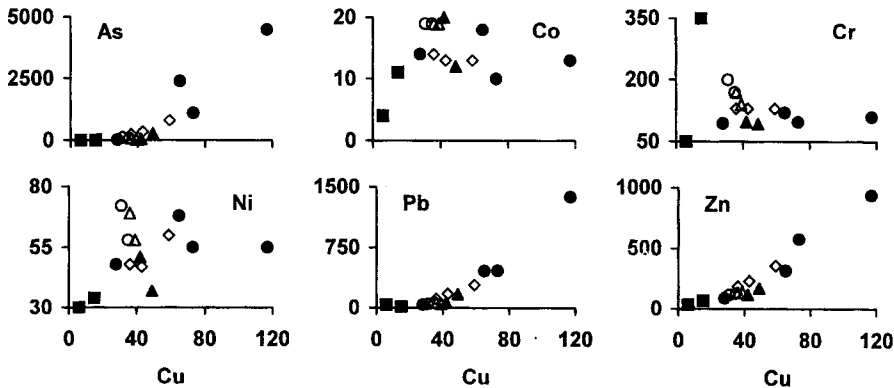


Fig. 9. Selected variation diagrams of environmental toxic elements against Cu (ppm) in sediments, soils and granitic gneiss from the Samkwang mine area. Symbols are the same as those of Fig. 4.

ppm이나 농집되어 있고, 합류수계의 퇴적물에서도 2~7 ppm이 검출된 것으로 보아 Cd는 광업활동에 따른 오염 인 것이 확실하다.

Cu는 인체의 필수원소이나 기관내에 축적되면 빈혈, 구토 및 설사 등을 야기한다. 일반적으로 토양 및 퇴적물의 기준치는 25 ppm이나 (Anon, 1977), 연구지역 기반암의 평균함량 (11 ppm)은 이보다 다소 낮다. 그러나 광산수계의 퇴적물중에는 기반암에 비하여 최대 11배가 농집되어 있고, 대부분 토양보다는 퇴적물에 높은 농집도를 갖는다. 비광산 수계의 토양과 퇴적물은 거의 동일한 함량을 가지나 기반암의 3배 이상이 농집되어 있어, 이 지역에는 Cu도 상당히 부화되어 있음을 보인다. 또한 Cu가 증가함에 따라 As, Co, Cr, Ni, Pb 및 Zn의 함량도 증가하는 경향을 보인다 (Fig. 9).

Ni에 중독되었을 경우는 만성적 중추신경 장애와 폐 및 장질환을 유발할 수 있는 것으로 알려져 있다. Ni에 관한 토양 및 퇴적물의 환경오염 기준치는 20 ppm이나 (Anon, 1977), 연구지역 기반암의 평균함량은 이 보다 높은 32 ppm 이다. 또한 삼광광산 부근의 토양과 퇴적물에 함유된 Ni의 함량은 기반암에 비하여 1.5~2.4배 이상이나, 오히려 비광산 수계의 퇴적물과 토양에서 더 높은 함량을 갖는다. 이 Ni는 광산활동에 따른 오염원소는 아닌 것으로 보이거나 상당량이 부화되어 있다.

Pb는 Hg 및 Cd와 더불어 인체의 모든 분야에 매우 유해한 원소로 알려져 있다 (Goyer, Mehlman, 1977). 토양 중의 평균 Pb 함량은 17 ppm 이나 (Rose *et al.*, 1979), 퇴적물의 평균치는 40 ppm 이다 (Anon, 1977). 연구지역 기반암의 평균함량은 29 ppm 이다. 그러나 광산수계 퇴적물의 최대함량은 기반암에 비하여 47배를 보이는 것이 있으며, 비광산 수계의 퇴적물과 토양에도 기반암 보다 2배 정도의 Pb가 농집되어 있다. 특히 합류수계의 퇴적물에서도 평균 195 ppm이 농집되어 있어 비광산 수계의 퇴적물 보다 3.4배나 높다. 따라서 이 지역은 전반적으로 Pb의 높은 이상치를 갖는다.

Zn은 인체의 필수원소중 하나이나 과다농축될 경우에는 미각, 후각 및 시각 장애를 유발하는 것으로 알려져 있다. Zn의 환경오염치는 90 ppm 이나 (Anon, 1977), 연구지역 기반암의 평균함량은 50 ppm 이다. 광산수계의 퇴적물에서는 기반암의 Zn 함량보다 19배 이상 농집된 것이 있으며, 합류수계의 퇴적물에서는 평균 함량이 259 ppm으로서 비광산 수계의 평균값 보다 거의 2배 이상 높게 검출된다. 토양에서의 함량은 광산수계와 비광산 수계의 큰 차이가 없으나 보통 기반암의 2.5배 정도가 농집되어 있어, 이 지역은 전반적으로 높은 Zn의 이상치를 갖는다.

중금속 원소의 대부분은 넓은 산화-환원 전위를 갖고 있고 자연수에 쉽게 용해되어 수용액상태로 존재할 수 있기 때문에 (Davies, Ballinger, 1990; Fuge *et al.*, 1989; Levy *et al.*, 1992; Thornton, 1983), 이동거리도 길고 오염의 확산효과도 탁월할 것이다. 삼광광산은 최근까지 가행중이었고 대규모의 선광장이 설비되어 있었다. 또한 분석시료중에 중금속 원소의 농집도는 광산활동이 활발하였던 곳 (갱도, 광석 및 광미 야적장, 선광장 부근; 시료번호 SK-2,3)의 퇴적물에서 특히 높다. 그러나 아직까지 광산수계의 백화현상이나 황화광물의 산화에 의한 직접적인 영향은 관찰되지 않는다.

pH 및 오염원의 산출상태

연구지역의 하상퇴적물과 하천수의 pH를 측정된 결과는 Table 5와 같다. 하천수의 pH는 수계에 따라 다소 차이는 있으나 6.30~8.00 (평균 7.33)의 범위로서 거의 중성에 가깝다. 하상퇴적물과 토양의 pH는 5.20~7.58 (평

Table 5. The pH and enrichment index of sediments and soils from the Samkwang mine area.

No.	Sediment & Soil	Stream Water	Enrichment Index by Host Rocks			
	pH	pH	Major	Minor	REE	Toxic
<i>Sediments of mining drainage</i>						
SK-1	6.58	6.30	1.97	3.42	4.54	2.28
SK-2	7.15	6.41	2.15	43.32	2.18	93.39
SK-3	7.58	7.54	1.49	81.12	1.88	178.54
SK-4	7.36	7.19	1.72	21.47	2.60	46.59
mean	7.17	6.86	1.83	37.33	2.80	80.20
<i>Sediments of non-mining drainage</i>						
SK-5	7.14	6.93	2.28	3.71	2.06	5.91
SK-6	7.37	7.60	2.41	3.32	2.57	4.78
mean	7.26	7.27	2.35	3.52	2.32	5.35
<i>Sediments of confluent drainage</i>						
SK-7	6.81	8.36	1.89	16.21	2.14	34.29
SK-8	6.54	7.77	1.78	5.64	1.41	10.99
SK-9	6.55	7.86	1.67	7.83	1.92	15.79
mean	6.63	8.00	1.84	9.93	1.89	20.22
<i>Subsurface soils of mining area</i>						
SK-10	6.06	-	2.99	3.18	2.24	3.59
SK-11	5.20	-	2.37	6.48	1.93	12.33
mean	5.63	-	2.68	4.84	2.11	7.97
<i>Subsurface soils of non-mining area</i>						
SK-12	5.36	-	2.55	3.90	3.29	5.32
SK-13	5.24	-	2.69	2.50	1.61	2.97
mean	5.30	-	2.62	3.20	2.45	4.15
<i>Average</i>	6.53	7.33	2.15	15.55	2.34	35.03

Sample numbers are the same as those of Table 1 and Fig. 2.

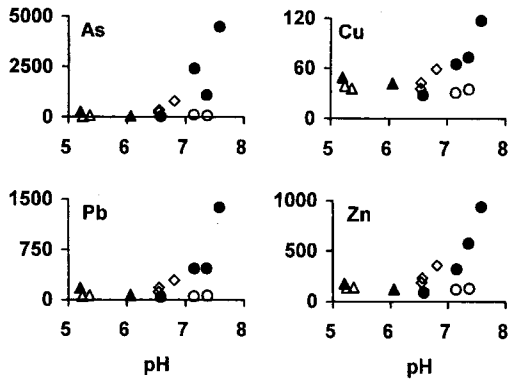


Fig. 10. Selected variation diagrams of As, Cu, Pb and Zn (ppm) against pH in sediments and soils from the Samkwang mine area. Symbols are the same as those of Fig. 4.

균 6.53)이나, 중금속의 오염도가 심한 퇴적물에서는 알카리성을 갖는 특징이 있다. 원소에 따라 차이는 있으나 중금속의 부화 및 오염지수 (pollution index)가 높을수록 pH는 낮아지는 것으로 알려져 있다 (Nimick, Moore, 1991; Xian, Shokohifard, 1989; Alloway *et al.*, 1989).

그러나 연구지역의 pH와 중금속 원소 (As, Cu, Pb 및 Zn)의 관계는 오히려 pH가 높을수록 이들의 함량이 높은 것으로 나타났다 (Fig. 10). 이점은 앞으로도 충분한 검토가 있어야 할 것이다.

연구지역의 토양과 하상퇴적물에 포함되어 있는 중금속 원소의 오염원이 광물상태로 존재하는지를 검토하였다. 앞에서 기술한 바와 같이 X-선 회절분석으로는 검출되지 않기 때문에, 동일시료에 대하여 비중분리하고 이를 연마편으로 제작하고 반사현미경하에서 관찰하였다. 이 결과, 중금속 원소의 함량이 높은 하상퇴적물 (SK-3과 SK-7)에서는 약 100~200 μm 정도의 크기를 갖는 광석광물들이 관찰되었다. 대부분은 황철석 (Fig. 11A)이나, 일부 시료에서는 유비철석 (Fig. 11C, D), 섬아연석 (Fig. 11E), 방연석 (Fig. 11F)의 타형 입자들이 관찰된다. 황화광물의 산화에 의하여 광물명이 불확실한 것들이 많이 있으며, 완전히 산화되어 침철석화 된 것도 있다 (Fig. 11B). 또한 광물명을 알 수 없는 Fe 화합물도 관찰된다 (Fig. 11G).

따라서 연구지역의 하상퇴적물과 토양에서 검출된 위 원소들의 오염원은 기반암 보다는 선광장, 광미 및 광폐

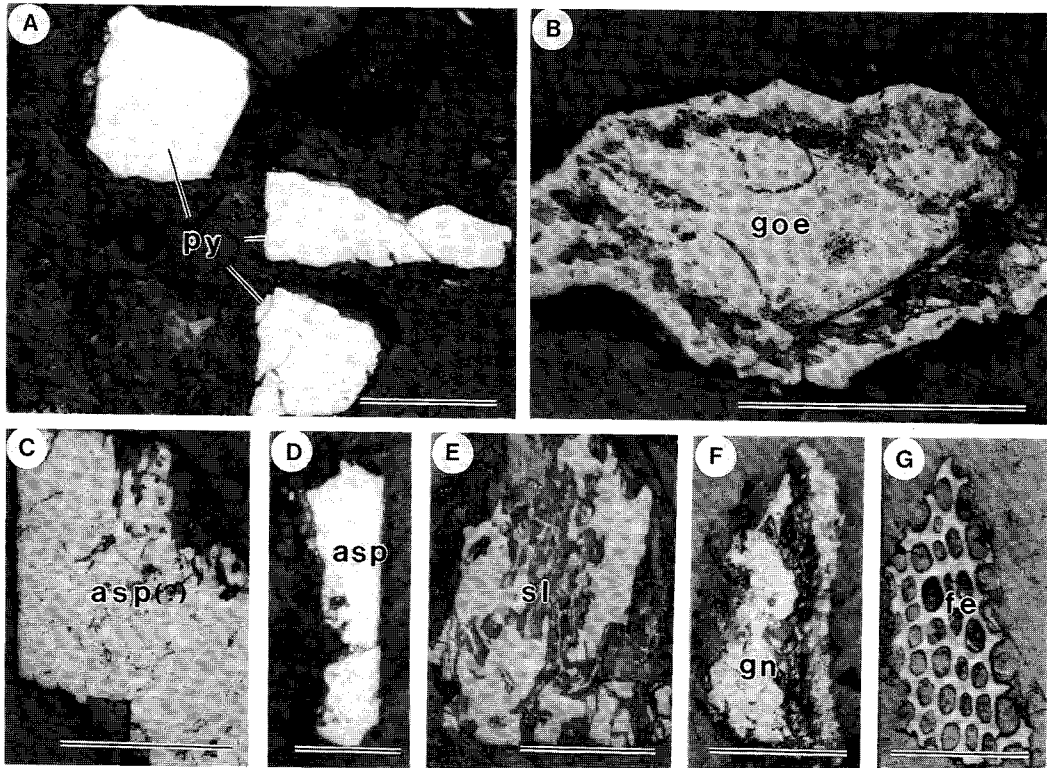


Fig. 11. Microphotographs of ore minerals in highly contaminated sediments from the Samkwang mine area. A; pyrite (py), B; goethite (goe), C; partly oxidized arsenopyrite (asp ?), D; arsenopyrite (asp), E; sphaerite (sl), F; galena (gn) and G; uncertain Fe compound (fe). Bar scales are 100 μm .

석의 야적장이 될 것이다. 이 중금속 원소들은 미립 또는 극미립의 광물입자내에 광물의 구성원소나 치환원소로 존재할 것으로 보이며, 광산수계의 백화 또는 적화현상이 없는 것으로 보아 아직까지 수용액 또는 원소상태로 거동하기는 어려울 것이 예상된다. 그러나 이들과 갭내수의 유출이 장기간 방치된다면 계속되는 풍화와 침전에 의하여 광산의 하류는 상당한 중금속 오염이 야기될 것이다. 현지점에서 각 원소의 이동에 관한 암석과 토양, 암석과 퇴적물, 토양과 퇴적물 사이의 상호관계는 불분명하다.

부화계수 및 지수

중금속의 오염지역에 대한 특정원소의 부화경향이나 독성의 기준치는 세계적인 평균조성을 기준으로 비교하는 것도 방법중의 하나이나, 가능한 한 특정지역의 모암 또는 기반암을 기준으로 부화정도를 고찰하는 것이 더욱 좋은 방법일 수 있다. 또한 기반암의 구성원소에 대한 부화는 단일원소에 의한 오염현상이기 보다는, 여러 원소들이 복합적으로 일어나는 것이기 때문에 주성분, 미량, 희토류원소 및 환경적 독성원소에 관하여 종합적인 평가가 이루어져야 한다.

연구지역의 하상퇴적물과 토양의 주성분, 미량 및 희토류원소의 자료를 이 지역의 기반암인 화강편마암의 평균 조성으로 나누어, 각각의 부화계수 (enrichment factor; EF)를 구하였다. 부화지수 (enrichment index; EI)는 다변수 자료를 단순화시키기 위한 방법 (Nimick, Moore, 1991)으로 각 시료의 분석치를 주원소, 미량원소, 환경유해원소, 희토류원소로 표준화하여 산술평균치로 하였다 (Table 5). 따라서 1 이상인 경우는 부화지역으로, 1 이하는 비부화지역으로 나눌 수 있다. 그러나 채취시료의 위치에 따라 기계적 및 화학적 풍화의 정도와 퇴적물의 침전속도가 다르기 때문에 광물조성과 화학조성에는 다소의 편

차가 있을 것이다.

삼광광산 수계의 하상퇴적물과 토양의 주원소에서는 기반암에 비하여 거의 모든 원소 (Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO, TiO₂와 LOI)가 부화되어 있고, SiO₂, Na₂O 및 K₂O 만이 결핍되어 있다. 특히 Na₂O가 결핍되어 있으며, LOI는 상당히 부화되어 있다 (Fig. 12). 이 부화계수의 다양성은 오염수계와 비오염수계를 구분하기에는 명확한 차이를 발견하기 어렵다. 주원소의 부화지수는 평균 6.53 (광산수계 퇴적물=7.17, 비광산수계 퇴적물=7.26, 합류수계 퇴적물=6.63, 광산수계 토양=5.63, 비광산수계 토양=5.30)로서 높은 이상치를 갖는다 (Table 5). 여기에서도 오염의 정도를 판단할 수 있는 근거는 없으며, 토양에 비하여 퇴적물의 부화지수가 월등히 높음을 보여줄 뿐이다.

기반암의 평균조성으로 각 시료의 희토류원소 조성을 표준화한 것은 Fig. 13과 같다. 모든 시료에서 모든 원소가 상당히 부화되어 있다. 부화지수는 평균 2.34 (광산수계 퇴적물=2.80, 비광산수계 퇴적물=2.32, 합류수계 퇴적물=1.89, 광산수계 토양=2.11, 비광산수계 토양=2.45)로서, 오염수계의 퇴적물에서 가장 높은 부화지수를 갖는다. 그러나 오염의 정도를 판단할 수 있는 근거는 없어 희토류원소의 함량변화와 표준화된 부화계수 및 지수는 환경오염의 지표로 이용하기는 어려울 것으로 보인다.

연구지역의 퇴적물과 토양에 함유된 미량 및 독성원소의 평균조성을 기반암의 평균치로 표준화한 결과 (Fig. 14), 각각의 시료에 관계없이 Ba, Cr, Rb 및 Sr을 제외한 모든 원소가 부화되어 있고 특히 As, Br, Cu, Pb 및 Zn은 수십내지 수백배의 부화계수를 갖는다. 이들의 부화지수는 평균 15.55 (광산수계 퇴적물=37.33, 비광산수계 퇴적물=3.52, 합류수계 퇴적물=9.93, 광산수계 토양=4.84, 비광산수계 토양=3.20)로서, 오염수계의 퇴적물에서 높

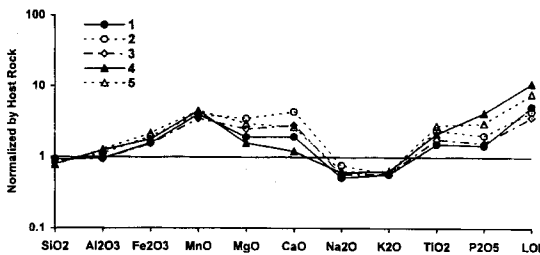


Fig. 12. Diagrams showing enrichment factor of major elements (mean value) in sediments and soils normalizing composition of host granitic gneiss from the Samkwang mine area. Numbers are the same as those of Fig. 5.

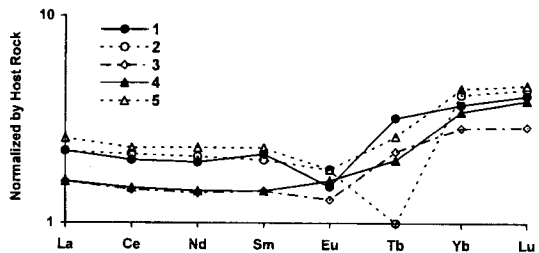


Fig. 13. Diagrams showing enrichment factor of rare earth elements (mean value) in sediments and soils normalizing composition of host granitic gneiss from the Samkwang mine area. Numbers are the same as those of Fig. 5.

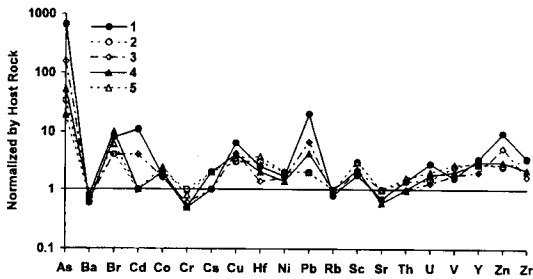


Fig. 14. Diagrams showing enrichment factor of minor and/or toxic elements (mean value) in sediments and soils normalizing composition of host granitic gneiss from the Samkwang mine area. Numbers are the same as those of Fig. 5.

은 값을 갖는다. 따라서 미량원소의 부화지수는 수계의 오염도를 판단할 수 있는 중요한 근거로 이용될 수 있을 것이다.

환경적으로 치명적인 영향을 주는 독성원소 (As, Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Zn)를 선별하여, 각각의 시료를 기반암의 평균값으로 표준화하여 부화계수를 산출하였다. 이를 평균 부화지수로 환산하면 35.03 이고, 시료의 특성에 따라 세분하면 광산수계 퇴적물=80.20, 비광산수계 퇴적물=5.35, 합류수계 퇴적물=20.22, 광산수계 토양=7.97, 비광산수계 토양=4.15로서 미량원소와는 동일한 거동특성을 가지나, 조성분 및 희토류원소와 서로 다른 경향을 갖는다 (Fig. 15).

이와 같이 삼광광산의 수계를 따라 유입되는 하천은 심각한 수준의 중금속 오염이 있다. 특히 선광장 및 광미야적장 부근의 부화지수는 179에 달하여, 비오염수계의

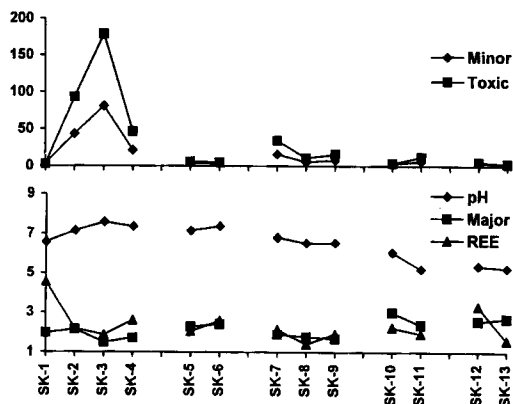


Fig. 15. Diagrams showing pH and enrichment index of major, minor, rare earth and toxic elements in sediments and soils normalizing composition of host granitic gneiss from the Samkwang mine area. Sample numbers are the same as those of Table 1 and Fig. 2.

30배 이상이다. 비오염수계와 오염수계의 하천수가 합류된 곳에서 하류로 약 1.5 km 내에도 평균 20 정도의 부화지수를 갖는다. 오염수계의 토양도 비오염수계의 토양보다 높은 부화지수를 가지나, Ni와 같이 오히려 오염지역의 것이 낮은 경우도 있었다. 그러나 각각의 수계에서 하천수 및 지하수에 관한 유해원소의 특성과 거동이 연구되지 않았기 때문에, 이 오염원소들이 광석 및 기반암에서 출발하여 자정작용을 거친후에 인간의 생활권에 어느 정도의 영향을 주었는지는 불분명하다. 이 문제와 오염확산 및 개선방안에 관하여는 지속적인 연구가 있어야 할 것이다.

결 언

1. 삼광광산은 선캄브리아기의 화강편마암내에 발달된 열극을 충진한 석영맥상 광산이다. 이 광산 부근에는 상당량의 광폐석과 광미가 방치되어 있으며, 폐갱도에서 유출되는 갱내수는 여과없이 하천을 따라 상수원 및 농경지로 유입되고 있다.

2. 하상퇴적물과 토양의 X-선 회절분석 결과, 구성광물의 함량비는 다소 차이가 있으나 모든 시료에서 동일한 광물조성 (석영, 정장석, 사장석, 각섬석, 백운모, 흑운모 및 녹니석)을 가지며, 중금속의 오염원이 될 수 있는 중광물은 검출되지 않았다.

3. 광산수계, 비광산수계 및 합류수계의 하상퇴적물, 광산 및 비광산수계의 토양, 기반암의 주성분원소 조성은 SiO₂가 증가함에 따라 Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, TiO₂, P₂O₅ 및 LOI 등은 감소하는 경향을 갖는다.

4. 환경적으로 높은 독성을 갖는 원소들의 함량 (ppm) 범위는 As=<2-4500, Cd=<1-24, Cu=6-117, Sb=1-29, Pb=17-1377 및 Zn=32-938 으로서 아주 높다. 특히 광산수계 하상퇴적물의 평균함량 (ppm)은 As=2006, Cd=11, Cu=71, Pb=587 및 Zn=481 로서비오염수계 퇴적물 및 토양의 조성에 비하여 월등히 높다.

5. 광산수계의 하상퇴적물과 토양의 주원소는 기반암에 비하여 거의 모든 원소 (Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO, TiO₂와 LOI)가 부화되어 있고, 부화지수는 평균 6.53로서 높은 값을 갖는다. 희토류원소 조성은 모든 시료에서 모든 원소가 과부화되어 있고, 부화지수는 평균 2.34로서 오염수계의 퇴적물에서 가장 높다.

6. 하상퇴적물과 토양의 미량 및 독성원소는 기반암에 비하여 거의 모든 원소가 부화되어 있고, 특히 As, Br, Cu, Pb 및 Zn은 수십내지 수백배의 부화계수를 갖는다. 이들의 부화지수는 평균 15.55 로서 오염수계의 퇴적물

(평균 37.33)에서 높은 값을 갖는다.

7. 환경적 독성원소 (As, Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Zn)의 평균 부화지수는 35.03 (광산수계 퇴적물=80.20, 비광산수계 퇴적물=5.35, 합류수계 퇴적물=20.22, 광산수계 토양=7.97, 비광산수계 토양=4.15)로서, 미량원소와는 동일한 거동특성을 가지나 주성분 및 회토류원소와 서로 다른 경향을 갖는다.

8. 중금속 함량이 높은 하상퇴적물을 비중분리하여 반사현미경으로 관찰하면 황철석, 유비철석, 섬아연석, 방연석 및 침철석 입자들이 많이 관찰되는 것으로 보아, 이들이 오염원으로 작용함을 알 수 있다.

사 사

이 연구는 한국학술진흥재단의 1998년도 박사후과정 연수지원 연구비와, 한국학술진흥재단 공모과제 연구비 (과제번호: 01-D-0315)의 지원을 받았음을 명기하며 이에 깊이 감사한다. 야외조사, 시료채취 및 실내연구에 많은 도움을 준 충남대학교 지질학과와 민경남 석사, 이종창, 최경국 및 고재현 학사에게도 감사한다.

참고문헌

- 강필중, 임주환 (1974) 한국지질도 광정도록 (1:50,000) 및 설명서. 국립지질광물연구소, 13p.
- 김경웅, 백성희, 이현구 (1995) 유구-광천 금은광화대 지역에서의 토양 및 농작물의 중금속 오염. *자원환경지질*, 28권, p. 389-394.
- 김규한 (1977) 청양중석광상의 지질과 유체포유물에 의한 온도측정에 관한 연구. *광산지질*, 10권, p. 1-18.
- 김서운, 유환수, 우영균 (1976) 한국지질도 공주도록 (1:50,000) 및 설명서. 자원개발연구소, 29p.
- 문건주 (1986) 삼광금광상의 광화온도 및 근원에 관한 연구. *광산지질*, 19권, p. 19-24.
- 엄상호, 이민성 (1963) 대한민국 지질도 대흥도록 (1:50,000) 및 설명서. 국립지질조사소, 18p.
- 우영균, 최석원, 박기화 (1991) 충남 예산지구 활석광상의 성인에 관한 연구. *광산지질*, 24권, p. 363-378.
- 윤상필, 문희수, 송윤구 (1994) 초염기성암 기원의 평안 및 대흥 활석광상의 성인과 광물화학. *자원환경지질*, 27권, p. 131-149.
- 이현구, 유봉철 (1997) 삼광금-은광상에서 산출되는 광석광물과 광상의 생성환경. *대한자원환경지질학회*, 제30차 학술발표회 발표논문 요약집, p.1.
- 이현구, 유봉철, 김상중 (1992) 충남 대봉 금-은 광상에서 산출되는 광석광물과 광상의 생성환경. *광산지질*, 25권, p. 297-316.
- 이현구, 유봉철, 홍동표, 김경웅 (1996) 삼광광산산 에렉트립의 산출상태와 화학조성. *한국자원공학회*, 제66차 학술발표회 발표논문 요약집, p. 39-47.
- 전찬규, 오민수 (1970) 구봉광산의 지질과 광상. *광산지질*, 3권, p. 169-174.
- 전효택, 안주성, 정명채 (1997) 국내 일부 합금석영맥 광상 주변에서의 잠재적 독성 중금속 원소들의 환경오염특성. *박희인교수 정년퇴임 기념집*, p. 182-188.
- 최석원, 김억수 (1996) 의학환경지구화학. *한국학술진흥재단 번역총서* 201, 도서출판 춘광, 서울, p. 434.
- Alloway, B.J., Thornton, I., Smart, G.A., Sherlock, J.C. and Quinn, M.J. (1988) Metal availability. *Sci. Total Environ.*, v. 75, p. 41-69.
- Anon, J. (1977) Ecological evaluation of proposed discharge of dredged or fill material into navigable water. *Interim Guidance for Implementation of Section 404 (b) of Public Law*, p. 92-500.
- Axtmann, E.V. and Luoma, S.N. (1991) Large-scale distribution of metal contamination in the fine-grained sediments of the Clark Fork River, Montana, U.S.A. *Applied Geochem.*, v. 6, p. 75-88.
- Baudo, R. and Muntau, H. (1990) Lesser known in-place pollutants and diffuse source problems. In Baudo, R. (ed.), *Sediments: chemistry and toxicity of in-place pollutants*. Lewis Pub. Inc., p. 1-14.
- 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.
- Davis, B.D. and Ballinger, R.C. (1990) Heavy metals in soils in north Somerset, England, with special reference to contamination from base metal mining in the Mendips. *Environ. Geochem. Health*, v. 12, p. 291-300.
- Fleisher, M., Sarofion, A.F., Fassett, D.W., Hammond, P., Shacklette, H.T., Nisbet, I.C.T. and Epstein, S. (1974) Environmental impact of cadmium: a review by the panel on hazardous trace substances. *Environ. Health. Perspec.*, p. 253-323.
- 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.
- Goyer, R.A. and Mehlman, M.A. (1977) *Toxicology of trace elements*. John Wiley and Sons, 303p.
- Haskin, L.A., Haskin, M.A., Frey, F.A. and Wildeman, T.T. (1968) Relative and absolute terrestrial abundances of the rare earths. In: Ahrens, L.H. (ed.), *Origin and distribution of the elements*, I. Pergamon, Oxford, p. 889-911.
- Kabata-Pendias, A. and Pendias, H. (1984) *Trace elements in soils and plants*. CRC Press Inc., 315p.
- Kim, G.-Y. and Kim, S.J. (1997) Chemistry of talc ores in relation to the mineral assemblages in the Yesan-Gongju-Cheongyang area, Korea. *Jour. Miner. Soc. Kor.*, v. 10, p. 60-73.
- Lee, H.K., Yoo, B.C., Hong, D.P. and Kim, K.W. (1995) Structural constraints on gold-silver-bearing quartz mineralization in strike-slip fault system, Samkwang mine, Korea. *Econ. Environ. Geol.*, v. 28, p. 570-585.
- Levinson, A.A. (1974) *Introduction to exploration geochemistry*. Applied Pub. Ltd., Maywood, 614p.
- Levy, D.B., Barbarick, K., Siemer, E.G. and Sommers, L. E. (1992) Distribution and partitioning of trace metals in contaminated soils near Leadville, Colorado. *Jour. Environ. Qual.*, v. 21, p. 185-195.
- Merrington, G. and Alloway, B.J. (1994) The transfer and fate of Cd, Cu, Pb and Zn from two historic metalliferous mine sites in the UK. *Applied Geochem.*,

- v. 9, p. 677-687.
- Nimick, D.A. and Moore, J.N. (1991) Prediction of water-soluble metal concentrations in fluviually deposited tailings sediments, Upper Clark Fork Valley, Montana, U. S.A. *Applied Geochem.*, v. 6, p. 635-646.
- Nogawa, K. (1981) Itai-Itai disease and follow up studies. In: Nriagu, J.O., Ed., *Cadmium in the environment. Part II. Health effect*, p. 1-37.
- Rose, A.W., Hawkes, H.E. and Webb, J.S. (1979) *Geochemistry in mineral exploration*. 2nd ed., Academic Press, London, 657p.
- Rump, H.H. and Krist, H. (1988) *Laboratory manual for the examination of water, waste water and soil*. VCH Verlagsgesellschaft, 190p.
- Schuling, R.D. (1990) *Geochemical engineering: some thoughts on a new research field*. *Applied Geochem.*, v. 5, p. 251-262.
- So, C.-S., Shelton, K.L. and Chi, S.J. (1988) Stable isotope and fluid inclusion studies of gold-silver-bearing hydrothermal-vein deposits, Cheonan-Cheongyang-Nonsan mining district, Republic of Korea: Chungyang area. *Jour. Kor. Inst. Mining Geol.*, v. 21, p. 149-164.
- So, C.-S., Yun, S.-T. and Lee, J.-H. (1993) Hydrothermal W-Mo mineralization of the Chungyang mine, Republic of Korea: a fluid inclusion and stable isotope study. *Jour. Japan Miner. Petrol. Econ. Geol.*, v. 88, p. 63-82.
- Xian, X. and Shokohifard, G.I. (1989) Effect of pH chemical forms and plant availability of cadmium, zinc and lead in polluted soils. *Water, Air and Soils Pollution*, v. 45, p. 265-273.

1998년 2월 4일 원고접수

A



B

