

## 삼산제일 · 삼봉 동광산 주변 수계의 중금속 오염도 평가

### Evaluation of Heavy Metal Contamination in Streams within Samsanjeil and Sambong Cu Mining Area

김 순 오 (Soon-Oh Kim), 정 영 일 (Young-Il Jung), 조 현 구 (Hyen Goo Cho)\*

경상대학교 자연과학대학 지구환경과학과 및 기초과학연구소

(Department of Earth and Environmental Sciences and Research Institute of Natural Science, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea)

**요약** : 경상남도 고성군에 위치한 삼산제일 · 삼봉 동광산 주변지역의 중금속 오염현황을 조사하기 위하여 하천수와 하상퇴적물을 채취하여 화학적 분석을 수행하였다. 이와 더불어, 중금속 오염도와 환경위해성을 평가하기 위하여 왕수분해법과 연속추출법을 이용하여 분석된 하상퇴적물 내 중금속의 총 농도와 화학적 존재형태에 따른 농도를 바탕으로 한 오염지수와 위험지수를 산정하였다. 삼봉광산 지역보다는 삼산제일광산 지역에서 중금속 오염도도 높게 나타났을 뿐만 아니라 그 환경위해성도 훨씬 심각한 것으로 밝혀졌다. 이렇게 두 지역에서 오염현황, 오염도, 환경위해성 등이 다르게 나타나는 이유는 갯내수와 같은 광산 오염원의 존재여부와 지질학적 특성에 기인하는 것으로 사료된다. 삼산제일광산 지역의 경우 산성광산배수가 지속적으로 유출되어 하류 수계로 유입되고 있기 때문에 갯내수가 존재하지 않은 삼봉광산지역보다는 하류 수계에 대한 중금속 오염이 보다 더 악화되어 나타나는 것으로 보인다. 또한, 삼산제일광산 지역 주변 지질은 주로 안산암질 암류로 이루어져 있는데, 이들 안산암질 암류 내에는 산성광산배수를 중화시킬 수 있는 pH 완충력이 큰 탄산염 광물 등의 함량이 크지 않기 때문에 수계에서 중금속 오염이 자연적으로 정화되는 정도가 상대적으로 낮은 것으로 보인다. 이에 비해, 삼봉광산 지역의 지질은 방해석과 같은 탄산염 광물을 다량 함유한 화산쇄설성 퇴적암층인 고성층으로 이루어져 있어서, 이들 탄산염 광물들에 기인한 높은 pH 완충력에 의하여 중금속 오염이 하류 수계 방향으로 확산되지 못하는 것으로 판단된다.

**주요어** : 동 광산지역, 중금속 오염, 하천수, 하상퇴적물, 오염지수, 위험지수

**ABSTRACT** : The status of heavy metal contamination was investigated using chemical analyses of stream waters and sediments obtained from Samsanjeil and Sambong Cu mining area in Goseong-gun, Gyeongsangnam-do. In addition, the degree and the environmental risk of heavy metal contamination in stream sediments was assessed through pollution index (PI) and danger index (DI) based on total digestion by aqua regia and fractionation of heavy metal contaminants by sequential extraction, respectively. Not only the degree of heavy metal contamination was significantly higher in Samsanjeil area than in Sambong area, but its environmental risk was also revealed much more serious in Samsanjeil area than in Sambong area. The differences in status and level of contamination and envi-

\*교신저자: hgcho@gsnu.ac.kr

ronmental risk between both two mining areas may be attributed to existence of contamination source and geology. Acid mine drainage is continuously discharged and flows into the stream in Samsanjeil mining area, and it makes the heavy metal contamination in the stream more deteriorated than in Sambong mining area in which acid mine drainage is not produced. In addition, the geology of Samsanjeil mining area is mainly comprised of andesitic rocks including a small amount of calcite and having lower pH buffering capacity for acid mine drainage, and it is likely that the heavy metal contamination cannot be naturally attenuated in streams. On the contrary, the main geology of Sambong mining area consists of pyroclastic sedimentary Goseong formation containing a high content of carbonates, particularly calcite, and it seems that these carbonates of high pH buffering capacity prevent the heavy metal contamination from proceeding downstream in stream within that area.

**Key words** : Cu mining area, heavy metal contamination, stream water, stream sediment, pollution index (PI), danger index (DI)

## 서 론

국내에는 약 1,500개의 휴폐 금속 광산이 적절한 사후 처리 없이 산재되어 주위 환경을 오염시키는 중요한 잠재 오염원으로 작용하고 있다. 세립으로 분쇄되어 존재하는 광미와 폐광석은 다양한 종류의 유해 미량원소를 다량으로 함유하여 지표수나 지하수에 의해 쉽게 반응함으로써 유해 미량원소가 주변 농경지나 수계로 유입된다. 특히, 과거 광산 활동이 진행되었던 지역에서는 종종 산성광산폐수(AMD)가 생성되어 여러 환경 문제를 야기하고 있다. 산성광산폐수는 폐석 내 황철석이 지표환경으로 노출됨으로써 물과 산소에 의한 산화반응이 가속화되어 생성되고 미생물이 간여하면 그 반응속도는 훨씬 더 증가하는 것으로 알려져 있다. 이러한 산성광산폐수는 대부분 강한 산성과 높은 유해 미량원소 함량을 나타내며, 수계를 따라 하류로 흘러가면서 침전, 흡착, 공침, 희석 등의 다양한 지구화학적 변화과정을 겪게 된다. 하지만, 다양한 지구화학적 반응으로부터 기인한 자연적인 저감과정에도 불구하고 유해 미량원소와 같은 오염물질은 주변 농경지나 수계 등으로 점진적으로 확산되어 생태계에서 최종 소비자인 인간의 건강을 해칠 수 있다. 따라서 잠재적인 오염원인 휴폐 금속 광산에 대한 처리 및 복원이 시급한 문제이며, 이를 위해서는 오염물질의 종류, 함량, 거동특성, 확산정도 및 범위 등과 같은 오염현황조사 및 오염도평가가 필수적으로 선행되어야 할 것이다. 이러한 이유에서 지금까지 광산주변지역의 환경오염 평가에 대한 많은 연구들이 수행되어 왔다. 광산 주변지역 이차 생성광물에 대한 광물학적, 환경지구화

학적인 연구들이 수행되었으며(정기영 외, 2000; 주창오 외, 2004), 최선규 외(2004)는 광산 주변 환경오염 특성을 좌우하는 다양한 영향인자들에 대하여 연구하였는데, 광산 주변의 수질 및 토양 오염은 광산의 개발규모 및 수반금속, 주변암상과 관련된 부존특성과 함께 열수변질작용과 연관된 광물조합, 광석-맥석 광물의 조직, 유형 및 양적관계, 풍화의 진행단계와 관련된 이차-삼차 광물의 존재형태 등의 광물-지화학적 특성에 좌우된다고 보고하였다. 광산 주변지역 독성원소들의 인체흡수도 및 인체위해성에 대한 연구도 진행되어 왔다(이진수 외, 2000; 이진수와 전효택, 2004). 또한 광산 주변 지역의 주변 수계와 토양 오염의 특성 및 광산 폐기물 내 존재하는 유해 중금속의 거동양상 및 존재 형태에 대한 연구들이 다양하게 이루어져 왔다(박영석과 김진, 2000; 김휘중 외, 2003, 2005; 강민주와 이평구, 2005; 이인경 외, 2005; 강민주 외, 2006a; 2006b).

본 연구지역인 경상남도 고성군 삼산면 병산리에 위치하는 삼산제일광산 지역은 수년 전에 카드뮴 중독에 의한 이타이이타이병 의심 환자가 알려지면서 주변지역에 대한 환경조사 및 주민건강조사 등으로 환경적으로 많은 관심이 모아졌던 지역이다. 하지만 삼산제일광산에 인접해 있는 삼봉광산은 광상의 유형이나 채광 광종 등이 유사함에도 불구하고 이러한 오염에 대한 피해가 보고되지 않아서 본 연구에서 이 두 광산지역의 주변 환경 오염현황을 비교하여 고찰하였다. 본 연구지역에 대한 환경적인 연구는 연규훈 외(2005)에 의해 선행되었으며, 삼산제일광산에 방치되어 유실 가능성이 높은 광산폐기물 내 유해 미량원소 함량과 존재형태, 이동특성 등을 규명

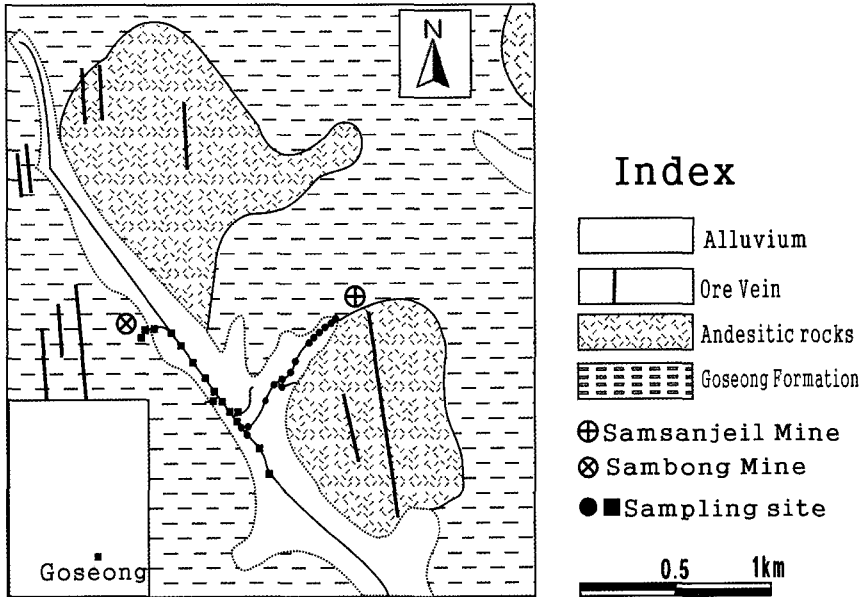


Fig. 1. Geologic map of the study area (modified from Park *et al.*, 1983) and sampling points.

하였다. 그리고 본 연구와 더불어 하천에서 채취된 침전물에 대한 광물학적 연구도 수행되었다(조현구 외, 2006)

본 연구에서는 삼산제일광산과 삼봉광산 하류 수계의 하천수와 하상퇴적물 내의 중금속 오염현황을 비교 조사하였고, 오염원으로부터의 오염 확산범위 및 오염가능성을 평가하기 위하여 하상퇴적물 내 중금속의 분포특성과 오염정도를 연구하였다.

### 연구지역 개관

본 연구 대상 지역은 고성군 삼산면 병산리에 위치한 삼산제일광산과 삼산면 미룡리에 위치한 삼봉광산 일대이다(그림 1). 삼산제일광산은 등록번호 2827, 12584호로 등록광종은 금, 은, 동, 연, 아연이었지만 주로 동(평균품위 2.25%)이 채광되었다(대한광업진흥공사, 2003, 2005). 본 광산은 경상광화대 최남단에 위치하여 부근에는 군소 동광들이 개발 또는 미개발상태에 있다. 1916년에 최초로 개발을 시작하였다가 그 뒤 1967년부터 개발에 착수한 곳으로 1970년경부터 본격적으로 개발이 이루어져서 1972년에 120톤/일, 1973년에 동 정광 2,558톤/년을 처리한 대규모 광산이었다가 1992년에 광업권이 소멸된 후 현

재는 폐광산이다(낙동강 환경관리청, 2001; 연구훈 외, 2005). 삼봉광산은 1966년에 출원등록하여 등록번호 제 37407, 37408호로 등록광종이 금, 은, 동, 연이었으나 삼산제일광산과 유사하게 주로 동(평균품위 1.89%)이 채굴되다가 1991년에 광업권이 소멸된 후 현재는 폐광된 광산이다(대한광업진흥공사, 2003; 2005; 한국지질자원연구원, 2003).

삼산제일광산 부근의 지질은 주로 경상누층군 유천층군의 안산암질 암류가 분포하며 국부적으로 셰일이 협재된다(그림 1). 이들 안산암질 암류는 주로 안산암과 응회암으로 구성되어 있으며 소량의 방해석과 철산화물을 함유한다(박희인 외, 1983; Choi *et al.*, 1994). 광상은 이들 안산암질 암류 내 소규모 단층이나 열극을 충전한 함동석 영맥으로 황동석, 황철석과 소량의 방연석을 수반하며 대체적인 주향과 경사는 N10°E~N10°W와 70~80°E이다(대한광업진흥공사, 1981). 삼봉광산의 지질은 경상누층군 유천층군의 고성층과 후기에 관입한 안산암으로 구성되어 있고(그림 1), 안산암은 심한 변질작용을 받았으며 암록색을 띠고 부분적으로 녹니석화작용을 받았다. 고성층은 화산쇄설성 퇴적암층으로 주로 자색 응회질셰일, 녹색응회질사암, 응회질연암, 응회암으로 구성되어 있으며, 세립질의 백운모, 방해석 등의

기질로 이루어져 있다(박희인 외, 1983; Choi *et al.*, 1994). 광상은 삼산제일광산의 광상유형과 동일한 열극충진형으로 산출되는 주요 광석광물로는 유비철석, 황동석, 황철석, 섬아연석 등이고, 맥의 주향과 경사는 N10°E~N10°W와 70°E~70°W이다(대한광업진흥공사, 1981).

주요한 광산지역 오염원으로는 폐광석, 광미, 갱내수를 들 수 있는데 본 연구지역에 위치한 삼산제일광산과 삼봉광산의 경우 광미는 이미 복원되어 존재하지 않았지만, 1972년 선광장(80톤/일) 정도를 처리하였던 대규모 광산으로 황동석(Cu 15% 내외)을 약 200톤/월을 생산하였고, 1973년에도 동(Cu 16%) 정광이 2,558톤/년을 생산한 실적이 보고되어 있어서 과거에 다량의 광미장이 존재했을 것으로 보인다(대한광업진흥공사, 1973, 1974, 1976; 연구훈 외, 2005). 갱내수의 경우에는 삼산제일광산의 갱구로부터만 유출되고 있었으나 삼봉광산에는 존재하지 않았다. 하지만, 삼봉광산에는 백색침전물과 같은 갱내수가 유출된 흔적을 찾을 수 있어 본 연구팀이 시료를 채취한 건기에는 갱내수가 유출되고 있지 않았지만 우기 때는 유출가능성이 높은 것으로 판단되었는데, 과거 현장조사 결과 삼봉광산에서 갱내수가 유출되고 있는 것으로 보고하였다(한국자원연구소, 1996). 폐광석은 두 광산지역 모두에서 선광시설에 방치되어 있었다. 이러한 지질적인 특징과 광산 오염원에 대한 자료로부터 본 연구지역의 두 광산에서는 주변 환경오염이 다르게 나타날 것이라는 것을 예상할 수 있다.

## 연구방법

### 시료 채취

시료는 하천수와 하상 퇴적물로 나눌 수 있으며 두 광산으로부터 하류 수계방향으로 이동하면서 채취하였다(그림 1). 먼저 하천수를 채취하고 그 지점에서 하상 퇴적물 상층부를 모종삽을 이용하여 채취하였다. 그러나 하천수와 하상 퇴적물 모두를 채취하기가 불가능한 몇 지점에서는 둘 중 한 시료만 채취하였다. 시료 채취는 2004년 11월부터 2005년 1월에 걸쳐 하천수 시료와 하상퇴적물 시료를 각각 15개씩 채취하였다. 광미 시료를 채취하려고 노력하였지만 앞서 언급한 바와 같이 두 광산지역 모두에서 폐광석만 선광

장에 방치되어 있을 뿐 광미는 존재하지 않았다. 물론 이미 복원에 의해서 광미가 존재하지 않을 수도 있지만, 본 광산지역에 대한 선행 연구자들의 현장조사에 의하면 광미가 본 연구지역 하천으로 멀리 떨어져 존재하는 것으로 보인다. 따라서 본 연구에서는 수계의 오염현황을 평가하는 것이 주목적이었으므로 수계로부터 멀리 떨어진 광미를 채취하지는 않았다. 뿐만 아니라, 시료가 채취되어진 시기는 건기로 삼산제일광산의 갱내수 유출수의 양도 매우 적었고 삼봉광산의 경우에는 갱내수 유출이 없어서 갱구에서 가장 인접한 하천 지점으로부터 시료를 채취하였다.

하천수 시료를 채취할 때는 현장에서 pH, 온도, 전기전도도(EC), 알칼리도(0.02 N 황산을 이용한 적정) 등을 측정하였다. 또한, 하천수 시료는 현장에서 0.45  $\mu\text{m}$  필터로 여과한 후 양이온 분석용 시료는 소량의 농질산을 첨가하여 즉시 밀봉하였고, 음이온 분석용 시료는 여과한 후 즉시 밀봉하여 실험실로 운반하여 분석 시까지 냉장 보관하였다.

### 분석방법

하천수 시료의 양이온(K, Na, Mg, Ca)과 중금속 농도는 유도결합플라즈마분광계(ICP spectrometer, OPTIMA 4300D, Perkin elmer)를 이용하여 측정하였고, 음이온은 이온크로마토그래프(IC, ICS-2000 IC, Dionex Corp.)를 이용하여 분석하였다.

하상퇴적물 내 중금속의 농도와 화학적 분포형태를 분석하기 위해 하상 퇴적물을 풍건시킨 후 10번째로 전처리하였으며 왕수분석법(HCl/HNO<sub>3</sub>)과 연속추출법(sequential extraction)을 이용하여 분석대상 중금속을 추출하였다. 분석대상 중금속으로는 국내 폐금속 광산에서 출현빈도수가 큰 카드뮴(Cd), 구리(Cu), 납(Pb), 아연(Zn) 등을 선정하였다. 먼저 왕수분석법을 통해 두 지역 내 각각 15개 지점에서 채취된 하상 퇴적물에서 중금속 함량이 높은 5개 지점을 선정한 후 하상 퇴적물 내 중금속의 화학적 분포형태를 파악하여 상대적인 환경 위해성을 평가하기 위해 연속추출법을 이용하였다. 본 연구에서 사용한 연속추출법은 Tessier *et al.* (1979)가 최초로 제안한 후 Li *et al.* (1995)가 유도결합플라즈마를 이용한 분석이 가능하도록 수정 보완한 방법이다(표 1).

**Table 1.** Chemicals used in sequential extraction scheme

Fractions	Chemical extractants
Exchangeable	0.5M MgCl <sub>2</sub> + NH <sub>4</sub> OH/HOAc (pH=7)
Bound to carbonate or specially adsorbed	1M NaOAc + NH <sub>4</sub> OH/HOAc (pH=5)
Bound to Fe and Mn oxides	0.04M NH <sub>2</sub> OH HCl in 25% HOAc
Bound to organics and sulfides	0.02M HNO <sub>3</sub> + 30% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + 3.2M NH <sub>2</sub> OAc in 20% HNO <sub>3</sub> (pH=2)
Residual	HF/HClO <sub>4</sub> /HNO <sub>3</sub> (4:2:15)

**Table 2.** Physicochemical parameters, and major and trace element composition of stream water samples within Samsanjeil mine area

Sample no.	Distance from mine (m)	Temp (°C)	pH	EC (μS/cm)	Alkalinity (CaCO <sub>3</sub> mg/L)	Major elements						Trace elements				
						Na	K	Ca	Mg	Cl	NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Cd	Cu	Pb	Zn
												mg/L				
SJW1	0	11.4	5.76	384	7	5.10	0.93	63.19	4.56	4.84	1.02	194.3	ND	5.59	ND	3.19
SJW2	5	10.8	5.27	393	7	5.39	0.94	210.7	4.90	7.46	1.04	194.4	ND	5.92	ND	3.38
SJW3	25	12.5	6.01	384	6	5.07	0.87	117.3	4.51	7.66	1.00	183.5	ND	4.96	ND	3.06
SJW4	50	14.9	5.54	517	4	4.77	0.81	136.7	4.25	15.41	0.95	247.6	ND	3.22	ND	ND
SJW5	60	15.6	5.78	460	5	4.91	0.87	71.79	4.55	9.50	0.68	214.5	ND	3.89	ND	36.45
SJW6	70	15.9	5.50	444	4	5.27	0.92	66.34	4.72	5.67	0.95	217.7	ND	3.93	ND	29.31
SJW7	300	15.7	6.43	296	12	6.06	0.52	13.55	3.71	7.16	0.78	105.6	ND	0.18	0.03	1.00
SJW8	400	13.0	6.45	725	43	5.08	1.96	135.3	12.47	12.50	0.49	307.8	ND	ND	0.02	0.35
SJW9	460	13.3	6.64	741	47	4.72	1.90	148.8	9.78	10.38	0.34	392.5	ND	ND	ND	0.26
SJW9*	465	14.0	7.17	1,108	81	3.78	7.80	120.4	5.73	10.48	0.32	542.9	ND	ND	ND	ND
SJW9 <sup>+</sup>	470	13.6	6.80	936	61	4.64	5.65	133.4	6.93	5.57	0.00	425.0	ND	ND	ND	0.11
SJW10	600	13.4	7.11	788	52	4.75	3.24	171.7	11.25	5.71	0.00	420.7	ND	ND	0.03	0.30
SJW11	900	11.3	6.82	684	34	5.95	2.60	133.4	9.23	13.00	0.13	287.5	ND	ND	ND	0.12
SJW11*	905	11.5	7.36	77	5	4.48	0.74	17.38	1.11	5.39	0.34	20.83	ND	0.02	ND	ND
SJW11 <sup>+</sup>	910	11.8	6.76	113	9	4.59	0.90	17.22	1.56	6.64	0.44	34.30	ND	ND	ND	ND

\*: tributary; +: confluence; ND: not detected

## 결과 및 토의

### 하천수

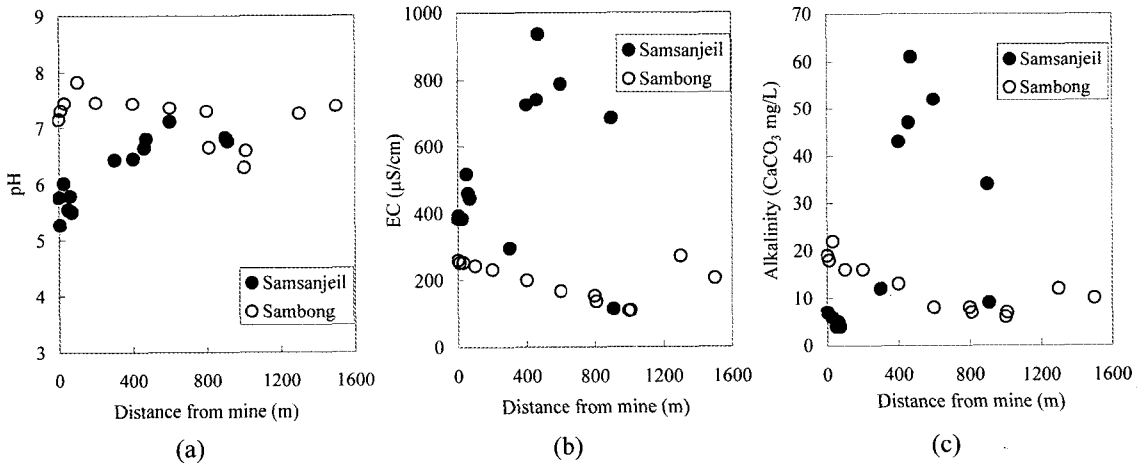
하천수 수질 분석 결과를 표 2와 3 그리고 그림 2와 3에 정리하였다. 본 연구지역 내의 하천수는 다른 금속광산 지역보다는 양호한 수질을 보이고 있는데 이는 광상형성과 관련된 열수변질 작용 시 생성되는 광물조합과 주변암상에 기인한 것으로 판단된다. 금속광산에서 발생하는 환경문제는 지질-광상학적 부존특성과 밀접한 연관성을 보이는데, 특히 산성광산배수의 발생유무는 광상형성 시 생성되는 광물조합 중 산-발생 광물(예, 황철석, 황동석, 방연석 등과 같은 황화광물)과

산-소모 광물(방해석, 백운석, 석영, 칼슘 규산염 광물)의 존재유무 및 함량, 주변 모암 및 열수변질대의 유형 등에 의하여 좌우된다고 알려져 있다(최선규 외, 2004). 본 연구지역의 광화작용은 크게 3기로 나눌 수 있는데, 광화작용 1, 2기에 산출된 광석광물들로는 1기에 유비철석과 황철석, 2기에 황동석, 방연석, 섬아연석, 황철석 등을 들 수 있고, 맥석광물들로는 1기에 석영, 녹염석, 녹니석, 2기에 석영, 녹니석, 방해석 등이었고, 광화작용 3기에는 barren 방해석맥 만이 생성되었다(박희인 외, 1983; Choi *et al.*, 1994). 따라서 본 지역의 광상형성 시 일어난 광화작용 결과, 산성배수의 발생원인인 황화광물들과 같은 산-발생 광물들과 더불어 규산 알루미늄 광물, 방해석과 같은 산-소모 광물들도 다량 수반되었기 때문

**Table 3.** Physicochemical parameters, and major and trace element composition of stream water samples within Sambong mine area

Sample no.	Distance		pH	EC ( $\mu\text{S/cm}$ )	Alkalinity ( $\text{CaCO}_3$ mg/L)	Major elements						Trace elements				
	from mine (m)	Temp ( $^\circ\text{C}$ )				Na	K	Ca	Mg	Cl	$\text{NO}_3$	$\text{SO}_4$	Cd	Cu	Pb	Zn
SBW1	0	5.5	7.15	260	19	5.90	0.73	41.07	3.52	6.05	0.36	80.34	ND	0.37	ND	0.07
SBW2	10	5.2	7.31	253	18	5.50	0.66	40.41	3.38	4.49	0.39	80.19	ND	0.37	ND	0.06
SBW3	30	4.4	7.45	253	22	5.85	0.69	44.29	3.04	4.32	0.26	74.72	ND	0.29	ND	0.26
SBW4	100	2.8	7.83	243	16	5.72	0.59	38.69	3.44	5.17	0.35	76.24	ND	0.14	ND	0.03
SBW5	200	3.6	7.46	231	16	5.92	0.61	39.61	3.50	5.52	0.39	68.64	ND	ND	ND	0.00
SBW6	400	5.1	7.44	199	13	6.45	0.50	36.15	3.34	6.02	0.52	56.16	ND	ND	ND	ND
SBW7	600	7.8	7.36	167	8	6.88	0.63	20.72	2.54	6.16	0.59	49.30	ND	ND	ND	ND
SBW8	800	4.7	7.30	153	8	6.59	0.75	17.67	2.31	6.18	0.76	42.461	ND	ND	0.03	ND
SBW8*	805	2.5	6.97	260	4	6.67	0.70	35.45	4.15	4.98	0.45	02.92	ND	ND	ND	5.47
SBW8+	810	4.0	6.65	136	7	6.22	0.56	40.39	2.13	6.02	0.81	41.13	ND	ND	0.01	0.14
SBW9	1,000	7.8	6.29	108	6	5.23	1.01	10.52	1.76	6.39	0.78	25.49	ND	ND	ND	ND
SBW9*	1,005	3.5	7.19	229	27	ND	4.25	26.15	4.23	20.96	4.15	15.58	ND	ND	0.01	ND
SBW9+	1,010	6.9	6.59	109	7	4.61	1.21	18.42	1.51	7.09	1.02	21.84	ND	ND	ND	ND
SBW10	1,300	3.9	7.25	272	12	5.27	1.37	10.05	3.97	7.92	0.88	87.33	ND	0.02	ND	0.00
SBW11	1,500	3.9	7.39	205	10	5.81	1.16	32.20	3.47	7.63	0.86	60.31	ND	ND	0.01	0.05

\*: tributary; +: confluence; ND: not detected



**Fig. 2.** General chemistry of stream water samples. (a) pH, (b) EC, (c) alkalinity.

에 본 지역의 하천수 수질이 타 광산지역보다는 양호한 것으로 판단된다. 이러한 광화작용 시 형성된 광물조합의 특성뿐만 아니라, 앞서 언급했듯이 본 연구지역에 주로 분포하고 있는 안산암질 암류와 고성층에는 방해석과 같은 탄산염 광물이 함유되어 있어 본 연구지역의 하천수 수질이 타 금속광산 지역보다 양호한 것으로 보인다.

먼저 두 광산지역 하천수 온도를 비교하였을 때, 두 하천수간 온도차가 매우 크게 나는 것을

알 수 있다. 이러한 온도차는 시료채취 시기가 상이하였기 때문인 것으로 판단되는데 삼산제일광산 지역의 하천수 채취 시기는 11월에서 12월 초까지이지만 삼봉광산 지역의 하천수 시료는 12월 말부터 1월까지 채취되어져 삼산제일광산 하천수 수온이 삼봉광산 지역 수온보다 높게 나타났다.

두 광산지역 하천수 pH를 비교했을 때 전체적으로 삼산제일광산 지역이 삼봉광산 지역보다 낮

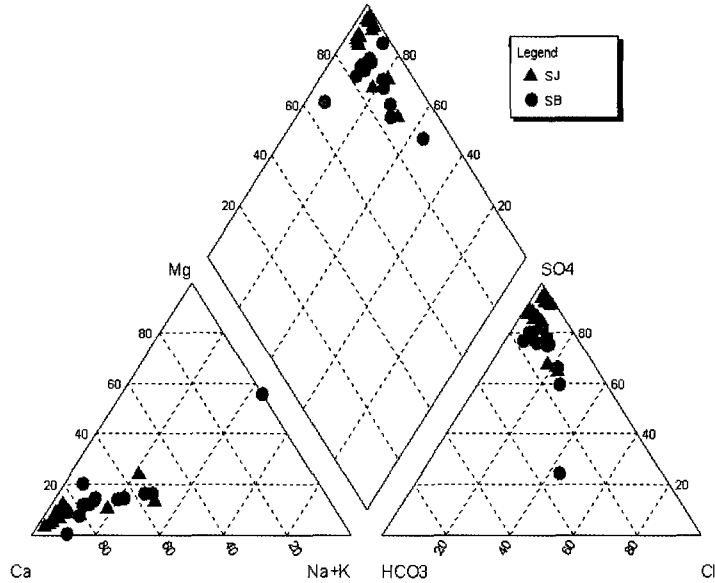


Fig. 3. Piper diagram showing composition of major constituents in stream water samples (SJ: Samsanjeil area, SB: Sambong area).

게 나타났다(표 2와 3, 그림 2a). 특히 광산으로부터 가까운 지역에서 그 차이가 뚜렷하게 나타났는데 삼산제일광산의 경우에는 광산으로부터 300 m 이전까지는 하천수의 평균 pH가 5.6으로 7.0 이상을 나타내는 삼봉광산지역과 큰 차이를 보였다. 이는 삼산제일광산에 유출되는 갯내수가 하류 수계 하천수에 영향을 미친 것으로 판단된다. 뿐만 아니라, 하천수가 본 지역의 수계를 유하하면서 광미와 폐석 등의 유입으로 광산의 직접적인 영향을 받은 하상퇴적물에서 일어나는 물-암석 반응(water-rock interaction)에 의한 것으로 생각된다. 그리고 삼산제일광산 지역 하천수의 pH는 하류수계로 갈수록 증가하는 양상을 보인 반면 삼봉광산지역에서는 이러한 pH 변화양상을 관찰할 수 없었다. 이러한 두 지역 간의 하천수 pH와 변화양상이 다르게 나타나는 이유는 위에서 언급한 갯내수 유출 여부가 다르기 때문이기도 하겠지만 두 지역의 지질과 하상퇴적물 구성 물질이 상이하기 때문인 것으로 생각된다. 앞에서 언급하였듯이, 삼산제일광산 부근의 지질은 주로 안산암질 암류로 이루어진 반면, 삼봉광산 지역은 고성층이 주로 분포하고 있다. 따라서 삼봉광산 지역에 분포하는 고성층에는 pH 완충력이 큰 탄산염 등을 다량 함유하고 있어 하천수의 pH가 높게 나타나는 것으로 생각되며, 이에 비해

삼산제일광산의 경우에는 상대적으로 소량의 탄산염 광물을 함유한 안산암질 암류로 이루어져 있어 하천수의 pH에 대한 완충력이 떨어지는 것으로 사료된다. 이러한 두 지역 간의 지질적인 상이성은 하천수의 pH에 영향을 미칠 뿐만 아니라 결국에는 오염물질의 이동도를 좌우하여 광산 지역 부근의 오염물질 확산범위 등을 결정하게 된다. 뿐만 아니라, 삼산제일광산에서 삼봉광산에서보다 과거에 동 정광이 더 대규모로 이루어졌으며 이에 의한 광미나 폐석의 규모와 더불어 이들의 하천수로의 직접적인 유입 여부 등도 두 지역 간의 상이한 오염특성에 영향을 준 것으로 판단된다.

하천수의 전기전도도를 측정 한 결과, 광산으로부터 가까운 지점들에서 삼산제일광산 지역이 삼봉광산 지역보다 전체적으로 높게 나타났다(표 2와 3, 그림 2b). 이는 삼산제일광산 지역 내 하천수의 용존 이온 농도가 더 높다는 것을 의미하며 삼산제일광산 지역의 하천수가 광산에 의한 오염 가능성이 크다는 것을 간접적으로 지시한다고 할 수 있다.

알칼리도는 삼산제일광산의 경우 광산에서 가까운 지점들에서는 갯내수의 영향으로 알칼리도가 낮게 나타났으며 거리가 증가할수록 알칼리도도 증가하는 양상을 보인 반면, 삼봉광산의 경우

**Table 4.** Total metal concentrations of stream sediment samples analyzed by aqua regia digestion

Sample no.	Distance from mine (m)	Cd	Cu	Pb	Zn
Samsanjeil mine area					
SJS1	0	8.15	33,510	473.9	1,399
SJS2	25	0.82	5,912	123.9	290.3
SJS3	50	2.33	22,320	367.3	1,300
SJS4	60	2.55	6,300	395.0	1,354
SJS5	70	2.72	37,020	338.7	1,458
SJS6	80	3.32	38,690	506.6	1,229
SJS7	300	10.00	10,660	3,057	278.3
SJS8	400	1.90	2,752	46.42	652.3
SJS9	460	1.87	4,233	187.8	707.4
SJS9*	465	4.07	1,231	71.89	770.9
SJS9 <sup>+</sup>	470	2.21	2,474	46.06	726.9
SJS10	600	2.40	2,979	58.95	647.3
SJS11	900	1.56	1,427	40.96	726.3
SJS11*	905	0.93	247.2	56.99	527.6
SJS11 <sup>+</sup>	910	1.44	783.4	153.9	464.0
Sambong mine area					
SBS1	0	0.44	3,849	332.8	265.9
SBS2	10	1.01	1,318	201.3	294.3
SBS3	30	1.62	2,715	283.0	317.0
SBS4	100	1.84	4,969	243.9	401.8
SBS5	200	0.41	1,158	60.84	32.60
SBS6	400	0.16	557.0	55.39	269.1
SBS7	600	0.15	402.3	58.40	265.1
SBS8	800	0.15	487.9	53.14	288.8
SBS8*	805	4.64	1,869	93.65	1,786
SBS8 <sup>+</sup>	810	1.43	672.1	76.54	638.0
SBS9	1,000	0.58	97.50	54.23	426.7
SBS9*	1,005	0.10	49.54	44.40	332.9
SBS9 <sup>+</sup>	1,010	0.62	89.18	54.61	418.1
SBS10	1,300	1.30	480.6	49.20	488.7
SBS11	1,500	1.15	496.7	47.62	609.0

\*: tributary; +: confluence

에는 전 지역에서 유사한 값들을 나타내었다(표 2와 3, 그림 2c). 특히 삼산제일광산의 경우, 광산으로부터 300 m 지점으로부터 하류수계 방향으로 EC와 알칼리도 값들이 급격히 증가하는 것을 관찰할 수 있는데(표 2, 그림 2b와 2c), 이는 70 m 지점부터 300 m 지점까지 수계가 지하로 형성되어 수암 반응(water-rock interaction)에 의해서 용존 이온 농도와 알칼리도가 급격하게 증가한 것으로 판단된다.

주 양이온 원소(Na, K, Ca, Mg)와 주 음이온 원소(Cl, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>, CO<sub>3</sub>) 분석결과를 바탕으로

하여 본 연구지역 하천수의 수리화확상(hydrochemical facies)을 나타내기 위하여 삼각도표(piper diagram)에 도시하였다(그림 3). 삼각도표에서 보는 바와 같이 본 연구지역 하천수의 수리화확적 유형은 Ca-SO<sub>4</sub>이었다. 이는 지표환경에서 나타나는 유형으로 특히 황산염 이온의 농도가 높은 것은 광산의 영향으로 판단된다. 삼산제일광산과 삼봉광산의 수리화확상을 비교하면 삼산제일광산에서 극단적으로 Ca와 SO<sub>4</sub>에 치우쳐 있음을 알 수 있는데 이는 광산 갱내수의 영향을 받아 생성된 SO<sub>4</sub>를 다량 함유한 수계에 의한 Ca의



**Table 5.** Concentrations of each fraction of heavy metals in stream sediment samples analyzed by sequential extraction method

Sample no.	Samsanjeil					Sambong				
	SJS1	SJS5	SJS7	SJS9	SJS10	SBS1	SBS4	SBS7	SBS8	SBS10
Distance from mine (m)	0	70	300	460	600	0	100	600	800	1,300
	mg/kg									
Cu	F1	29	67	162	1	0	0	0	0	0
	F2	21,600	22,020	106	761	659	1,768	1,244	65	135
	F3	11,593	11,460	646	154	726	1,443	410	215	372
	F4	1,479	991	1,621	1,350	849	489	1,970	34	45
	F5	1,423	225	3,845	331	183	169	2,783	56	59
	Sum	36,124	34,462	6,380	2,597	2,417	3,870	6,407	369	612
Pb	F1	0.54	0.16	5.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
	F2	149.2	5.20	2.1	4.14	0.65	3.99	1.39	0.58	0.79
	F3	286.8	188.8	85.4	92.18	50.50	181.8	122.4	50.26	64.60
	F4	1.53	20.34	0.0	4.70	2.64	10.24	8.00	0.16	2.18
	F5	67.35	34.45	2,167	16.80	14.43	54.72	56.25	33.68	34.18
	Sum	505.5	248.9	2,260	117.8	68.22	251.7	188.0	84.68	101.7
Zn	F1	31	139	12.43	0.87	0.96	0.00	0.00	0.00	3.75
	F2	635	601	0.00	181.2	158.5	2.34	5.99	1.55	8.40
	F3	772	378	0.42	64.30	298.3	104.8	136.5	96.26	303.0
	F4	5	14	8.32	16.74	15.80	3.97	5.72	1.30	8.96
	F5	136	86	107.4	101.1	122.1	138.0	142.4	139.4	170.1
	Sum	1,578	1,217	128.6	374.2	595.6	249.1	290.5	238.8	494.1

F1: exchangeable; F2: carbonates; F3: Fe/Mn oxides; F4: organic/sulfide; F5: residual

용출로부터 기인하는 것으로 판단될 뿐만 아니라 앞에서도 언급하였듯이 하상퇴적물 내 황화광물을 포함한 암석과 물의 반응에 의한 것으로 생각된다.

주 원소들을 제외한 하천수 내에 함유된 4종의 중금속(Cd, Cu, Pb, Zn) 농도를 분석한 결과, 삼산제일광산 지역에서 광산으로부터 가까운 지점들에서 Cu와 Zn이 높게 나타났다(표 2). 그 외 대부분 지점들에서는 중금속 중들의 농도가 검출 한계 이하로 분석되었다. 삼봉광산의 경우에는 대부분의 지점에서 모든 중금속 중들이 검출되지 않았다(표 3). 이러한 하천수 내 중금속 농도의 분포는 삼산제일광산 지역 내 수계가 삼봉광산 지역에서보다 광산의 영향을 더 받았다는 것을 지지한다. 삼산제일광산 지역에서 300 m 지점

로부터 하류 수계에서는 Cu와 Zn의 농도가 검출 한계 이하로 급격히 감소하는 것으로 나타나는데(표 2), 이는 앞서 언급한 바와 같이 70 m 지점으로부터 300 m 지점까지 수계가 지하로 형성되면서 회석이나 침전(공침), 환원, 흡착과 같은 지구화학 반응에 의해서 발생하는 자연저감에 의한 것으로 판단된다.

#### 하상 퇴적물

하천수 시료와 동일한 지점으로부터 채취한 하상퇴적물 내 함유된 중금속의 총 농도를 왕수분해법으로 분석한 결과를 표 4, 그림 4와 5에 정리하였다. 하상퇴적물 내 중금속의 총 농도는 삼산제일광산 지역이 삼봉광산 지역보다는 훨씬 더

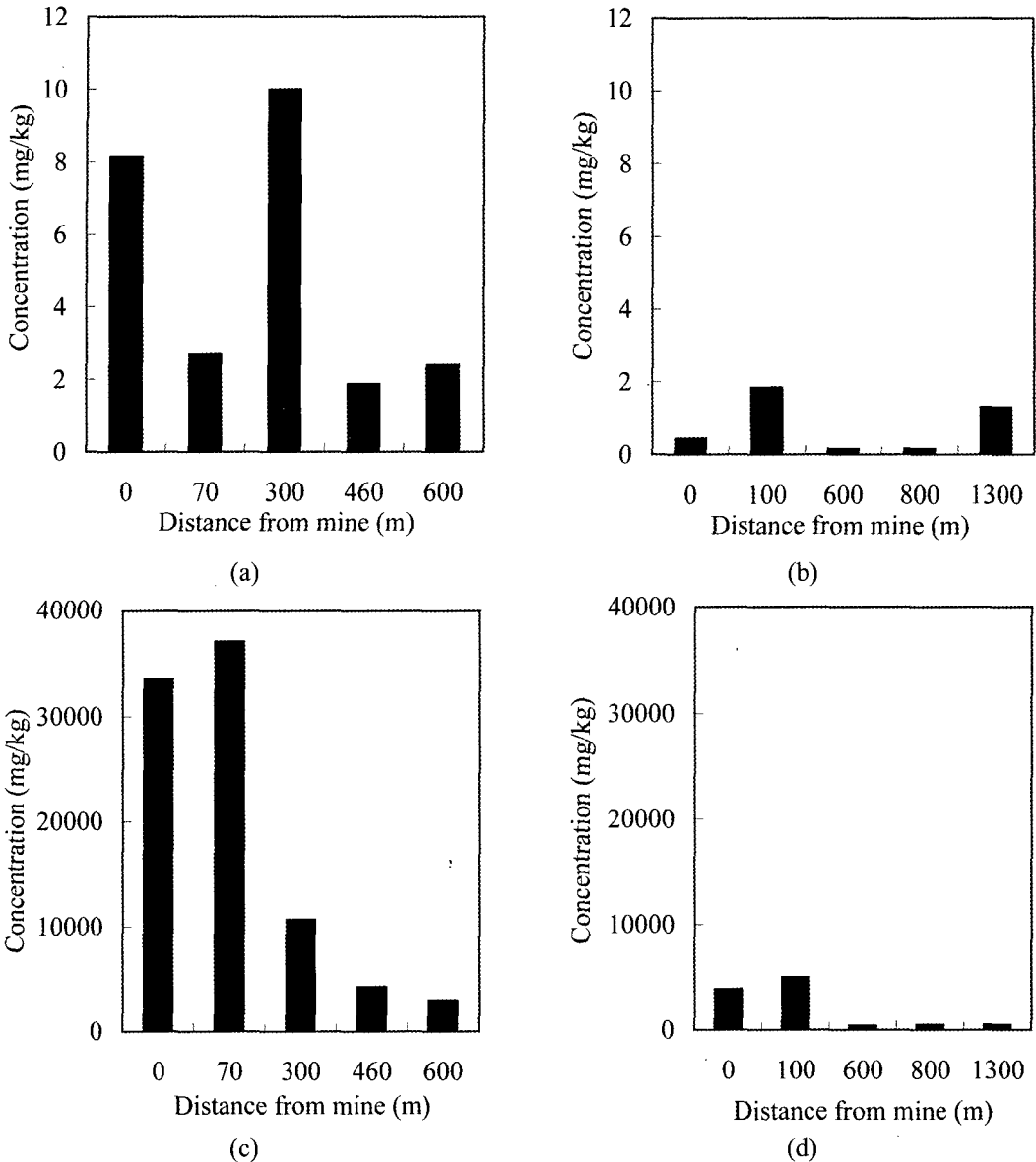
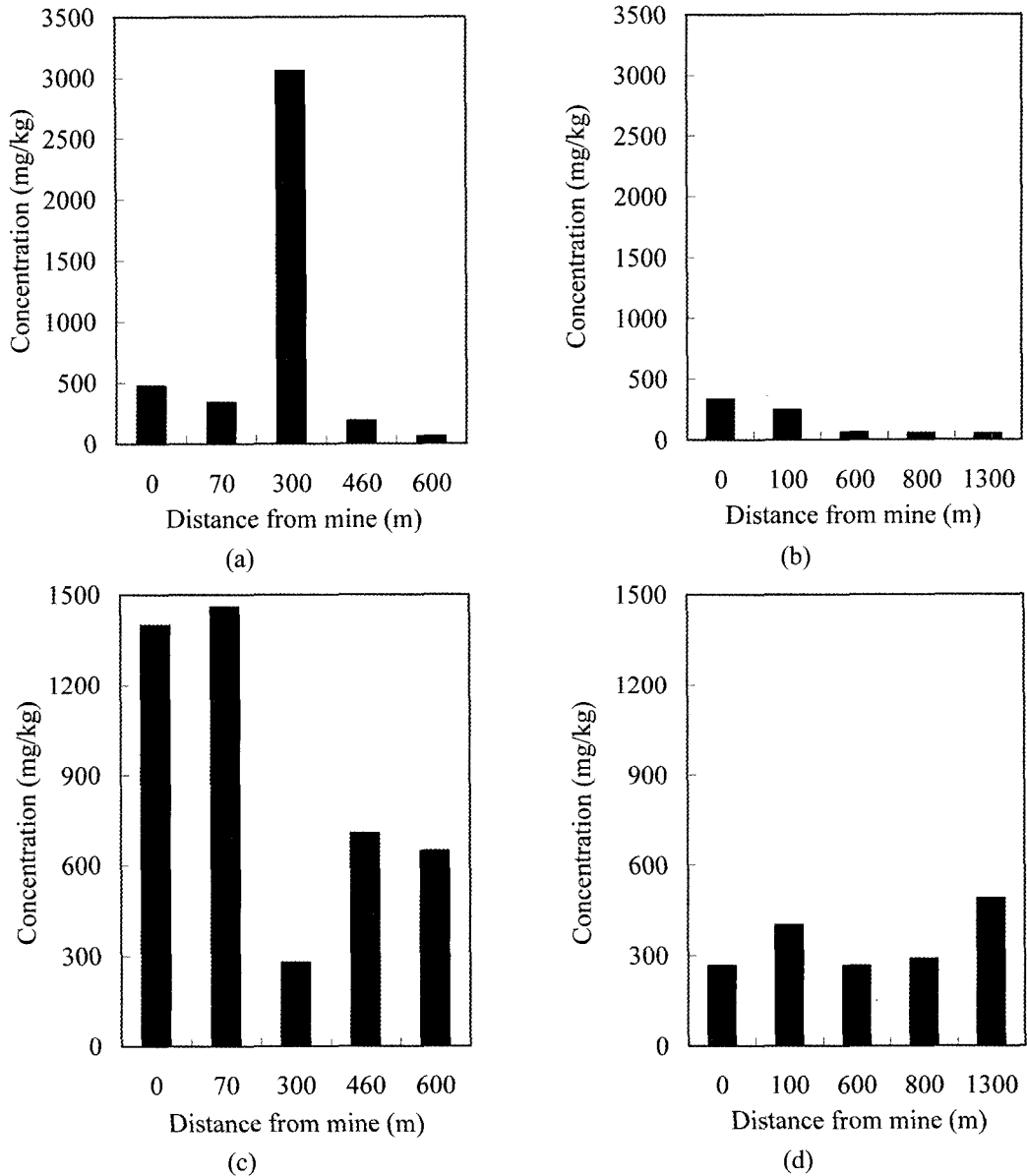


Fig. 4. Total metal concentrations in stream sediments analyzed by aqua regia digestion. (a) Cd in Samsanjeil area, (b) Cd in Sambong area, (c) Cu in Samsanjeil area, (d) Cu in Sambong area.

높게 나타났다. 이는 앞서 언급했듯이 삼산제일 광산 지역에서 광산에 의한 오염이 더 진행된 것을 의미한다. 특히 삼산제일광산 지역에서 광산에 인접한 지점들에서는 Cu에 의한 오염이 심각한 것으로 조사되었다. 그리고 삼산제일광산 지역에서 전체적인 중금속들의 분포 양상을 보면, 하류 수계 방향으로 갈수록 중금속의 농도가 감소하는 경향으로 나타나는데, 광산으로부터 300

m 떨어진 지점에서 Cd와 Pb의 농도가 급격히 증가한다. 이러한 이유는 그 지점에서 약 20 m 정도로 인접한 지점에 선광장이 위치하고 있으며 이로부터 유실된 광폐석 등이 하천으로 유입되어 현재에도 그 영향이 하상퇴적물에 반영되어 나타나는 것으로 생각된다.

하상퇴적물 내 중금속 종들의 화학적 존재형태 별 농도를 파악하여 각 중금속 종들의 상대적인

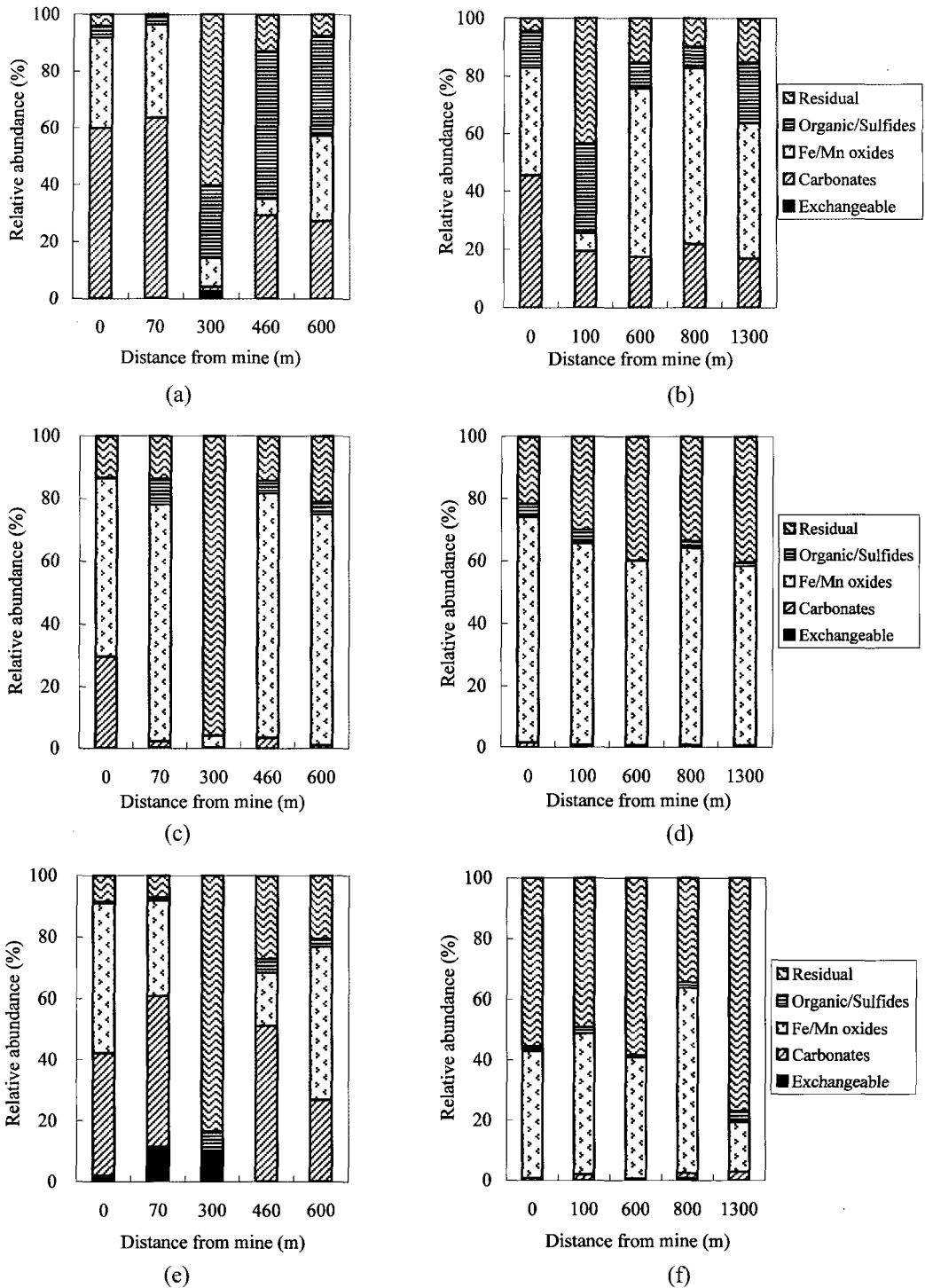


**Fig. 5.** Total metal concentrations in stream sediments analyzed by aqua regia digestion. (a) Pb in Samsanjeil area, (b) Pb in Sambong area, (c) Zn in Samsanjeil area, (d) Zn in Sambong area.

환경위해성을 평가하기 위하여 왕수분해법에 의해서 얻어진 총 농도가 높은 지점을 두 지역에서 각각 5지점 선정하여 연속추출법을 이용한 분석을 수행하였다. 연속추출법에 의한 분석은 4종의 연구 대상 중금속 종들 중 총 농도가 낮아서 연속추출법에 의해서 검출이 불가능한 Cd을 제외한 3종의 중금속들(Cu, Pb, Zn)을 대상으로 실시

하였다. 연속추출법에 의해서 분석된 존재형태별 실제 농도는 표 5에 정리하였고, 각 존재형태별 상대적인 함량비는 그림 6에 도시하였다.

삼산제일광산 지역에서 Cu의 존재형태를 살펴보면, 광산에 가까운 70 m 지점까지는 비교적 이동성이 큰 탄산염 형태와 철/산화물 형태가 각각 60% 이상과 30% 이상으로 이루어져 전체적으로



**Fig. 6.** Fractionation of three heavy metals in stream sediments analyzed by sequential extraction. (a) Cu in Samsanjeil area, (b) Cu in Sambong area, (c) Pb in Samsanjeil area, (d) Pb in Sambong area, (e) Zn in Samsanjeil area, (f) Zn in Sambong area.

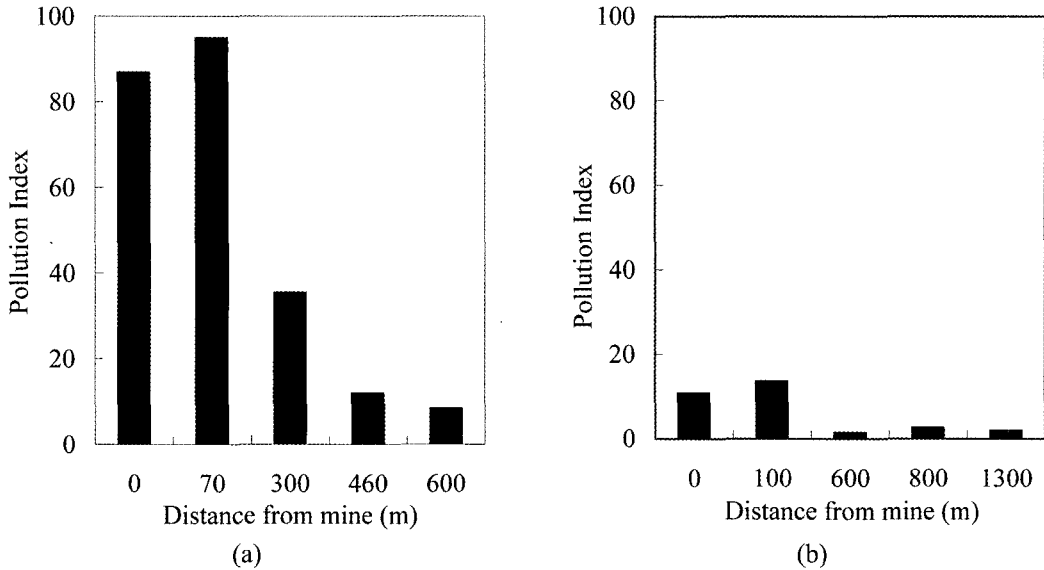


Fig. 7. Pollution index (PI) calculated by total concentrations of heavy metals and threshold levels proposed by Kloke (1979). (a) Samsanjeil area, (b) Sambong area.

90% 이상이 하천수 화학성의 변화에 따라서 용출 가능성이 높은 화학적 형태로 존재한 것으로 조사되었다(그림 6a). 300 m 지점에서 잔류형태가 큰 비율로 나타난 것은 앞에서 언급하였듯이 이 지점 부근에 있는 선광장으로부터 유실된 폐광석의 영향인 것으로 생각되며 잔류형태가 많은 것은 폐광석 내 황동석과 같은 일차광석광물에 존재하는 Cu라고 할 수 있다. 그 이하의 하류 수계에서는 좀 더 이동성이 작은 유기물/황화물 형태로 분포하는 것으로 나타났다. 삼봉광산의 경우에는 광산에 인접한 지점에서는 삼산제일광산과 유사하게 이동성이 큰 탄산염과 철/산화물 형태로 Cu가 분포하고 있고, 100 m 지점에서는 삼산제일광산의 300 m 지점과 유사하게 광미가 하상퇴적물에 직접 유입된 것처럼 잔류형태와 유기물/황화물 형태의 비율이 증가되어 나타났다(그림 6b). 그 이하의 하류 수계에서는 삼산제일광산 지역과는 상이하게 오히려 철/산화물 형태가 증가하면서 유기물/황화물 형태와 잔류형태도 동시에 증가하는 양상을 보이고 있다.

납의 경우에는 삼산제일광산과 삼봉광산 지역 모두에서 주로 철/망간 산화물 형태로 존재하는 것을 확인할 수 있었으며, 삼산제일광산 300 m 지점에서는 Cu와 유사하게 광미의 영향으로 인하여 대부분 잔류형태로 부화되어 있다(그림 6c

와 6d). 삼산제일광산 지역에서 광산에 인접한 곳에서는 이동성이 큰 탄산염 형태의 Pb가 다른 지점들보다 많이 함유되어 있었는데 이는 광산으로부터 용출된 Pb가 흡착되거나 공침 되어 생성된 것으로 판단된다. 두 지역 모두에서 광산으로부터 하류 수계 방향으로 멀어질수록 잔류형태의 양이 증가하는 것으로 나타났다.

아연의 경우에는 광미의 영향을 직접 받은 300 m 지점을 제외하고는 삼산제일광산 지역 대부분의 지점에서 탄산염 형태와 철/망간 산화물 형태로 존재하고 있음을 확인할 수 있었다(그림 6e). 특히, 70 m 지점과 300 m 지점에서는 이동도가 가장 큰 이온교환성 형태도 10% 내외로 존재함을 알 수 있었다. 삼봉광산 지역에서 Zn은 Cu와 Pb 보다도 훨씬 높은 비율로 잔류형태가 우세하게 분포하고 있고 다음으로는 주로 철/망간 산화물로 존재하고 있다(그림 6f).

연속추출법을 이용한 존재형태별 중금속 종들의 상대함량분포를 종합해 볼 때 삼산제일광산 지역이 삼봉광산 지역보다 전체적으로 이동성이 높은 형태로 중금속 종들이 존재하고 있었으며, 특히 삼산제일광산 지역에서 Cu의 용출에 의한 오염가능성이 가장 큰 것으로 판단된다.

본 연구에서 조사 대상인 4종의 중금속들을 모두 고려하여 조사지역 주변 수계의 중금속 오염

**Table 6.** Danger index (DI) of each fraction of heavy metals in stream sediments calculated by Adriano threshold level and Korean soil contamination warning standards

Reference value	Mine	Distance from mine (m)	Fraction				
			F1	F2	F3	F4	F5
Adriano threshold level	Samsan- jeil	0	3.1	780.0	1,246	1,295	1,359
		70	11.5	786.0	1,212	1,247	1,264
		300	6.7	10.5	40.4	95.0	442.8
		460	0.1	38.6	57.1	103.6	123.1
		600	0.1	32.7	81.7	111.3	127.0
	Sambong	0	0.0	59.5	132.5	150.0	170.3
		100	0.0	42.0	76.8	143.6	251.4
		600	0.0	2.3	20.8	22.1	36.5
		800	0.3	5.1	44.1	46.4	63.1
		1300	0.0	2.9	16.0	19.5	34.6
Korean soil contamination warning standards	Samsan-jeil	0	0.2	145.4	224.5	234.4	244.3
		70	0.6	148.1	225.5	232.2	233.9
		300	1.1	1.8	6.4	17.3	50.2
		460	0.0	5.3	6.7	15.7	18.1
		600	0.0	4.6	9.9	15.6	17.0
	Sambong	0	0.0	11.8	22.1	25.4	26.9
		100	0.0	8.3	11.6	24.8	43.7
		600	0.0	0.4	2.1	2.4	3.0
		800	0.0	0.9	3.9	4.3	5.0
		1300	0.0	0.5	2.0	2.6	3.3

F1: exchangeable; F2: carbonates; F3: Fe/Mn oxides; F4: organic/sulfide; F5: residual

도를 오염도 지수(Pollution Index, PI)를 이용하여 평가해 보았다. PI가 1.0 이상이면 평균적으로 고려 대상인 중금속 종들의 함량이 허용 기준치 이상임을 지시하고 이는 인위적 또는 자연적 요인에 의하여 어느 정도 오염되었음을 의미한다. 본 연구에서 이용한 PI 계산식은 아래와 같다 (김정대, 2005).

Pollution Index (PI) =

$$\frac{\sum(\text{금속의 총 농도}/\text{해당 중금속의 허용 한계치})}{\text{중금속의 개수}}$$

본 연구에서는 하상퇴적물 내 4종의 중금속 총 농도를 왕수분해법으로 분석하였기 때문에, 위의

식을 이용하여 PI를 계산할 때는 Kloke (1979)가 제안한 왕수분해법에 의한 중금속의 허용한계치 (Cd, 3 mg/kg; Cu, 100 mg/kg; Pb, 100 mg/kg; Zn, 300 mg/kg)를 이용하였다. 두 광산지역에서 구한 PI를 정리하여 그림 7에 도시하였다. 두 지역 모두에서 전 지점에 걸쳐 PI가 1.0보다 초과하여 주변 수계가 오염되었음을 알 수 있었다. 삼산제일광산 지역 하상퇴적물의 PI가 삼봉광산 지역보다 전 지점에서 훨씬 크게 나타나 삼산제일광산 지역의 중금속 오염이 심각하다고 할 있다. 특히 삼산제일광산 지역의 광산 인근의 두 지점의 PI는 각각 87과 95로, 이는 두 지점에서 매우 심각한 중금속 오염이 진행되고 있음을 의미한다. 현장 조사를 수행할 때 이 두 지점에서는 두꺼운 청록색 내지는 연록색 침전물들이 관

찰되어 중금속 오염이 심각함을 시각적으로도 판단할 수 있었다.

위에서 언급한 하상퇴적물 내 중금속의 총 농도를 기준으로 한 오염도지수를 이용한 오염도 평가는 각 중금속의 화학적 존재형태를 고려하지 않은 것으로 실제적인 환경 위해성을 평가하기에는 논란의 여지가 많다. 중금속 총 농도가 높다 하더라도 이동도나 생흡수도(bioavailability)가 떨어지는 강한 결합력을 갖은 화학적 형태로 존재하고 있다면 실제적인 환경 위해성은 그리 크지 않다고 할 수 있다. 따라서 보다 더 정확하고 체계적인 오염도 평가를 위해서는 중금속 존재형태를 고려하여 이들 중금속 종들의 상대적인 용출, 이동, 확산, 분산 가능성 등을 종합적으로 판단할 필요가 있다. 이러한 맥락에서 많은 연구자들은 중금속의 총 농도가 아닌 중금속의 다양한 화학적 존재형태들 중에서 용출가능성, 이동성, 생흡수도가 높은 화학적 형태의 농도를 고려한 위험도지수(Danger Index, DI)를 이용하여 중금속에 의한 환경위해성을 평가해 오고 있다(김종욱 외, 1999; 김정대, 2005). 위험도지수를 구하는 식은 다음과 같다.

Danger Index (DI) =

$$\frac{\sum(\text{원소의 } 1-n \text{ 단계까지의 농도 합/해당 중금속의 허용 한계치})}{\text{중금속의 개수}}$$

본 연구에서는 위의 식과 연속추출법을 이용한 3종의 중금속(Cu, Pb, Zn)의 존재형태별 농도를 이용하여 DI를 구하였다. 이때 허용 기준치로는 Adriano (1986)가 제안한 식물 흡수도를 고려한 값들(Cu, 10 mg/kg; Pb, 3.4 mg/kg; Zn, 5 mg/kg)과 우리나라 토양오염우려기준(Cu, 50 mg/kg; Pb, 100 mg/kg; Zn, 300 mg/kg)이 이용되었다(김정대, 2005). 두 지역의 위험도지수를 비교한 결과, 두 허용 기준치에서 모두 삼산제일광산 지역에서 월등하게 높게 나왔다(표 6). 먼저 Adriano 허용 기준치를 이용하여 구한 DI 값들을 살펴보면, 삼산제일광산 지역 중 광산에 가장 인접한 두 지점에서 용출 가능성이 가장 큰 화학적 존재형태인 이온교환성과 탄산염 형태의 DI 값이 매우 높게 나타나 단기간에 주변 환경으로의 영향이 클 것으로 판단된다. 이러한 양상은 삼봉광산 지역의 상류 두 지점에서도 유사하게 나타난다. 이 지점들을 기준으로 하여 하류 수계에서는

이온교환성과 탄산염 형태의 DI가 급격히 감소하는 것으로 조사되었다. 이동성이나 생흡수도가 앞에서 언급한 이온교환성이나 탄산염 형태보다 떨어지는 그 외 세 가지 화학적 존재형태들의 DI도 매우 높게 나타나는데 이는 비록 단기간은 아니지만 장기간에 걸쳐서 주위 환경의 오염을 초래할 가능성이 높다는 것을 지시한다. 우리나라 토양오염 우려기준을 허용기준치로 이용하여 계산한 DI값들을 분석해 보면, 앞서 언급한 Adriano 기준치로 구한 값들보다는 작게 나타나지만 전체적으로 1.0을 훨씬 초과한 값들을 보이고 있어 본 연구지역의 중금속 오염에 의한 환경위해성은 크다고 할 수 있다. 광산으로부터 거리와 존재형태에 따른 DI값들의 변화양상은 Adriano 기준치를 적용했을 때와 매우 유사하게 나타나고 있다. 이러한 PI와 DI의 값들로부터 본 연구지역의 오염현황과 오염도를 종합적으로 판단해 보면, 삼산제일광산 지역은 전 수계가 광범위하게 오염되어 있고 현재의 중금속 오염은 환경위해성도 클 뿐만 아니라 중장기적으로도 주변 환경에 악영향을 끼칠 가능성이 큰 것으로 판단된다. 특히 광산에 인접한 두 지점의 오염도와 환경위해성은 매우 심각한 것으로 조사되었다. 삼봉광산 지역의 경우에도 광범위하게 오염이 진행된 것으로 생각되나 삼산광산지역에서처럼 오염도가 심각한 것으로는 보이지 않는다. 하지만, 광산에 인접한 두 지점은 하류 수계 방향의 다른 지점들보다는 월등하게 오염도와 환경위해성이 큰 것으로 판단된다. 이러한 두 지역의 오염도와 환경위해성의 차이는 앞서도 언급하였듯이 광산지역의 주요한 오염원인 갯내수 유출여부와 상이한 주변 지질, 하상퇴적물의 구성 물질 등으로부터 기인한 것으로 생각된다.

## 결 론

경상남도 고성군 내 인접하여 위치하는 삼산제일광산과 삼봉광산 지역의 중금속 오염현황을 파악하고 오염도를 평가하기 위하여 광산 하류 방향으로 채취한 하천수와 하상퇴적물의 화학분석을 이용한 연구결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 본 연구지역의 하천수는 지금까지 보고된 다른 금속광산지역의 오염된 수계의 수질과 비교하면 상대적으로 양호한 수질을 보이는데 이는 본 연구지역 내 존재하는 광산의 광상형성에 관

런된 광화작용 시 수반된 광물조합과 주변 모암에 다량 함유된 석영이나 방해석과 같은 완충력이 큰 광물들에 의한 중화작용으로부터 기인한 것으로 판단된다.

2) 왕수분해법을 이용하여 분석된 하상퇴적물 내 중금속의 총 농도를 바탕으로 한 오염도 지수를 비교한 결과 삼산제일광산 지역이 삼봉광산 지역보다 중금속 오염정도가 매우 심각한 것을 나타냈다.

3) 연속추출법에 의하여 하상퇴적물 내 중금속의 화학적 존재형태별 농도를 분석한 결과와 이동도와 생흡수도를 고려한 중금속 허용 한계치를 이용하여 산정한 위험도 지수를 바탕으로 하여 두 지역 간 중금속 오염의 환경위해성을 비교하였을 때 삼산제일광산 지역이 삼봉광산 지역보다 환경위해성이 훨씬 높은 것으로 평가되었다.

4) 삼산제일광산 지역에서 광산으로부터 100 m 지점까지의 수계에서는 Cu의 오염이 매우 심각한 것으로 조사되었으며, 이러한 오염은 중, 장기적으로 지속적으로 주위 환경에 유해한 영향을 미칠 것으로 판단된다.

5) 중금속 오염도는 삼봉광산 지역보다는 삼산제일광산 지역에서 높게 조사되었는데 이는 두 지역 간의 주변 모암에 분포한 방해석과 같은 탄산염 광물의 함량 차이로부터 기인한 자연저감능이 다르기 때문인 것으로 사료된다.

## 사 사

본 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2005-041-D00447)을 받아 수행된 연구이다. 부족한 본 논문을 심사하여 주시고 유익한 조언을 아끼지 않으신 한국지질자원연구원의 박성원 박사님과 정영욱 박사님께 진심으로 감사드린다.

## 참 고 문 헌

강민주, 이평구 (2005) 폐광산 지역 폐광석 및 광미에서 비소의 고정 메카니즘과 용출특성. *자원환경지질*, 38, 499-512.  
 강민주, 이평구, 김상연 (2006a) 광미-물 상호반응에서 반응시간이 중금속 용출에 미치는 영향. *한국지하수토양환경학회지*, 11, 23-36.  
 강민주, 이평구, 염승준 (2006b) 세창 폐금속광산 수계에서 미량원소의 지구화학적 거동특성 규명. *자원환*

*경지질*, 39, 213-227.  
 김정대 (2005) 강원도 폐금속광산 지역의 광미와 주변 토양의 중금속 오염현황 및 오염도 평가. *대한환경공학회지*, 27, 626-634.  
 김종욱, 문희수, 송윤구, 유장한 (1999) 구룡광산 일대 광미, 하상퇴적물 및 주변토양에서의 중금속 원소의 존재형태. *자원환경지질*, 32, 261-271.  
 김휘중, 양재의, 이재영, 전상호 (2003) 휴폐광산 지역에서 폐쇄 내 중금속의 존재 형태 및 용출특성에 관한 연구. *한국지하수토양환경학회지*, 8, 43-55.  
 김휘중, 양재의, 옥용식, 이재영, 박병길, 공성호, 전상호 (2005) 휴폐광산 지역에서 유출되는 하천수의 오염도 평가. *한국지하수토양환경학회지*, 10, 25-36.  
 낙동강 환경관리청 (2001) 폐금속 광산(구룡광산, 삼산제일광산) 오염실태 정밀조사. p.16- 19.  
 대한광업진흥공사 (1973) 탐광굴진 1호, p. 43- 55.  
 대한광업진흥공사 (1974) 탐광굴진 2호, p. 171- 172.  
 대한광업진흥공사 (1976) 탐광굴진 3호, p. 37- 38.  
 대한광업진흥공사 (1981) 한국의 광상 제 8호(금속편). p. 100-104.  
 대한광업진흥공사 (2003) 광물자원 매장량 현황. p. 50.  
 대한광업진흥공사 (2005) 광물자원 매장량 현황. p. 310.  
 박영석, 김진 (2000) 덕음광산 선광광미와 주변토양의 미량원소에 대한 수평·수직적인 분산에 관한 연구. *자원환경지질*, 33, 91-100.  
 박희인, 최석원, 장호완, 이민성 (1983) 경남고성지역 동광상의 성인에 관한 연구. *광산지질*, 16, 135-147.  
 연규훈, 이평구, 염승준, 최상훈 (2005) 삼산제일광산 광미 내 유해 미량원소의 오염 및 이동도. *자원환경지질*, 38, 451-462.  
 이인경, 이평구, 최상훈, 김지수, 소철섭 (2005) 장풍 폐광산 주변 지질환경에서 중금속의 존재형태. *자원환경지질*, 38, 699-705.  
 이진수, Ben A Klinck, Yvette Moore, 전효택 (2000) 다덕광산 주변지역에서의 독성원소들의 환경오염 및 인체흡수도. *자원환경지질*, 33, 273-282.  
 이진수, 전효택 (2004) 금속광산지역 독성 중금속원소들의 인체 위해성 평가. *자원 환경지질*, 37, 73-86.  
 정기영, 이병윤, 이석훈 (2000) 다덕광산 폐석 내 석아 연석, 능망간석, 함망간 방해석의 화학적 풍화작용과 Zn, Mn, As의 지구화학적 거동. *한국광물학회지*, 13, 73-83.  
 조현구, 장병준, 김순오, 추창오 (2006) 경남 고성군 삼산면 삼산제일광산과 삼봉광산 주변 하천 침전물에 관한 예비 연구. *한국광물학회지*, 19, 129-138.  
 추창오, 이진국, 조현구 (2004) 산화환경에서 명반석, 슈베르트마나이트 형성특징과 환경지구화학적 의미: 달성광산. *한국광물학회지*, 17, 37-47.  
 최선규, 박상준, 이평구, 김창성 (2004) 한반도 광상 선인 유형에 따른 환경 특성. *자원환경지질*, 37, 1-19.



- 한국자원연구소 (1996) 광산지역 광해조사 및 대책연구. p. 293-295.
- 한국지질자원연구원 (2003) 광구등록편람. p. 355.
- Adriano, D.C. (1986) Trace elements in the terrestrial environment. Springer-Verlag, New York, pp. 533.
- Choi, S.H., So, C.S., Kweon, S. H. and Choi, K. J. (1994) The geochemistry of copper-bearing hydrothermal vein deposits in Goseong mining district (Samsan area), Gyeongsang Basin, Korea. *Econ. Environ. Geol.*, 27, 147-160.
- Kloke, A. (1979) Content of arsenic, cadmium, chromium, fluorine, lead, mercury, and nickel in plants grown on contaminated soil. *Proceedings of the United Nation-ECE Symposium*, 156-162.
- Li, X., Coles, B.J., Ramsey, M.H. and Thornton, I. (1995) Sequential extraction of soils for multielement analysis by ICP-AES. *Chem. Geol.*, 124, 109-123.
- Park, H.I., Choi, S.W., Chang, H.W. and Lee, M.S. (1983) Genesis of the copper deposits in Goseong District, Gyeongnam area. *J. Kor. Inst. Mining Geol.*, 16, 135-147.
- Tessier, A., Campbell, P.G. C. and Bisson, M. (1979) Sequential extraction procedure for the speciation of particular trace elements. *Anal. Chem.*, 51, 844-851.
- 
- 2006년 9월 1일 원고접수, 2006년 9월 21일 게재승인.