

## 황강리 광화대에 분포하는 일부 폐금속 광산수계의 수리지구화학적 특성 : 예비연구

# Hydrogeochemistry of Some Abandoned Metal Mine Creeks in the Hwanggangri Mining District, Korea : A Preliminary Study

이현구(Hyun Koo Lee) · 이찬희(Chan Hee Lee) · 이종창(Jong Chang Lee)

요 약 : 1998년 2월에 황강리 광화대의 일부 폐금속광산(상곡, 금실, 장풍 및 삼덕) 수계에서 채취한 지표수를 대상으로 수리지구화학적 특성과 환경동위원소의 거동을 고찰하였다. 연구지역에 분포하는 일반적인 지표수는  $Ca^{2+}$ , 알칼리 원소,  $NO_3^-$  및  $Cl^-$ 이 풍부하나, 광산부근의 지표수로 가면서 상대적으로  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ , 중금속 원소,  $HCO_3^-$  및  $SO_4^{2-}$ 가 부화되어 있다. 또한 광산수계의 지표수에서 pH는 낮고 EC와 TDS는 아주 높다. 이 지표수들의  $\delta D$ 와  $\delta^{18}O$ (SMOW) 값은 각각 -65.0~-71.2‰ 및 -9.1~-10.2‰의 범위를 보이며,  $d(\delta D-8\delta^{18}O)$  값은 7.3~10.9 이다. 이  $\delta D$ 와  $\delta^{18}O$  비는 비광산 지역의 지표수에서 광산지역의 물로 갈수록 무거운 값을 갖는다. 이 동위원소의 조성과 TDS,  $HCO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$  및  $Ca^{2+}$ 의 함량은 양의 상관도를 보여준다. WATEQ4F를 이용하여 포화지수를 계산해 볼 때, 광산부근의 지표수에서 사장석, 방해석, 돌로마이트 및 점토광물들은 대부분 용해성 조건을 가지나, 하류로 가면서 비광산 지역의 지표수가 유입됨에 따라 점진적으로 평형상태로 변한다. 그러나 비광산 지역의 지표수에서는 거의 모든 광물종이 포화상태 또는 침전조건을 나타낸다. 지구화학적 모델링을 통하여 규명된 잠재적 독성원소들은 광산수계에서 황산염( $MSO_4^{2-}$ ) 또는 단독 양이온( $M^{2+}$ )으로 존재하나, 비광산 수계에서는 탄산염( $CO_3^{2-}$ ) 또는 수산화물( $OH^-$ ) 형태의 복합 음이온으로 존재하는 것으로 밝혀졌다. 한편 조선누층군의 석회암질암이 모암을 이루는 상곡 및 금실광산 부근의 물이 육천누층군에 속하는 변성퇴적암과 주라기의 화강암류가 분포하는 장풍 및 삼덕광산 수계의 물보다 pH가 높고  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  및  $HCO_3^-$ 의 함량이 많으며  $\delta D$ 와  $\delta^{18}O$ 의 조성 또한 무거운 특징이 있다. 그러나 이들은 광산폐수의 오염에 의하여 거의 동일한 수리지구화학적 진화경향을 보인다.

Abstract : Hydrogeochemical variation and environmental isotope at the some abandoned metal mine (Sangok, Keumsil, Jangpung and Samdeok) creeks of the Hwanggangri mining district were carried out based upon the physicochemical properties for surface water collected of February in 1998. Hydrogeochemical composition of the all water samples are characterized by the relatively significant enrichment of  $Ca^{2+}$ , alkaline ions,  $NO_3^-$  and  $Cl^-$  in normal surface water, whereas the surface waters near the mining area are relatively enriched in  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ , heavy metals,  $HCO_3^-$  and  $SO_4^{2-}$ . Surface waters of the mining creek have low pH, high EC and extremely high concentrations of TDS compared with surface water of the non-mining creeks. The range of  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  values (SMOW) in the waters are shown in -65.0 to -71.2‰ and -9.1 to -10.2‰. The  $d(\delta D-8\delta^{18}O)$  value with those of water samples ranged from 7.3 to 10.9. These  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  of the acid mine water are more heavy values than those of surface water. The values have revealed the positive correlation between isotopic compositions and major elements, because those  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  values increase with increasing TDS,  $HCO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$  and  $Ca^{2+}$  concentration. Using WATEQ4F, saturation index of albite, calcite, dolomite and mostly clay minerals in water of the mining area show undersaturated and progressively evolved toward the equilibrium condition due to fresh water mixing, however, surface waters of the non-mining area are nearly saturated and/or supersaturated. Geochemical modeling showed that mostly toxic heavy metals within water in the mining creek may exist largely in the form of metal-sulfate ( $MSO_4^{2-}$ ), free metal ( $M^{2+}$ ),  $CO_3^{2-}$  and/or  $OH^-$  complex ions. Based on the geology, water chemistry and environmental isotopic data, the water compositions from the Sangok and Keumsil mine creek (consist mainly of Cambro-Ordovician carbonate rocks of the Choseon Supergroup) show higher pH,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $HCO_3^-$  and more heavy  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  value; than those from the Jangpung and Samdeok mine creek (consist of age-unknown metasedimentary rocks of the Ogcheon Supergroup and/or Jurassic granitoids), but each of these waters represents a similar hydrogeochemical evolution path by the mine water mixing.

### 서 언

지표수는 지구구성물질의 풍화, 침식, 운반 및 퇴적작용과 같은 지구의 외부환경을 지배하는 중요한 요소일 뿐 아니라 각종 용수 및 식수의 공급원으로 21세기 최고의 자원이기도 하

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

다. 최근까지의 연구에 의하면 지표수의 물리화학적 특성은 주로 기반암 및 기후조건에 영향을 받는 것으로 알려져 있다 (Stauffer and Wittichen, 1991; 유재영 등, 1994). 지표수의 대부분은 강수에서 비롯된 것으로서 지구의 순환과정에 따라 끊임없이 진화하며 배기가스, 분진, 농경, 축산, 광공업 및 가정 폐수 등의 인간활동에 의한 이차적인 오염원에 의하여 물리화학적 진화경향을 달리한다(Gorham *et al.*, 1986; Nriagu and

Pacyna, 1988; Pacheco and Weijden, 1996).

국내에서도 음용수의 수질에 관한 관심이 높아지면서 지표수 및 지하수의 환경수리지구화학적 연구가 활발하다. 또한 폐탄광 수계의 수질오염, 온천지역의 지열수와 지하수, 심부 지하수 및 지표수와 기반암의 물-암석 반응, 산업 및 상업 시설과 관련된 지하수 등이 많이 연구되고 있다(Jeong *et al.*, 1995; Yu, 1996; 윤성택 등, 1998; Koh *et al.*, 1998; 성익환 등, 1998). 그러나 중금속 오염물질을 대량생산하는 금속광산 주변의 광산수 및 지표수의 지구화학적 환경에 관하여는 아직도 많은 연구가 필요할 것으로 보인다.

황강리 지역은 한반도의 대표적인 광화대 중 하나로서 약 60여 개소에 크고 작은 각종 금속 및 비금속 광산이 밀집 분포한다. 이 지역의 지질, 지질구조, 지질시대 및 광화작용은 아직도 해결되지 않은 많은 문제점이 있으나, 일부는 수몰되어 있고 대부분의 광산은 폐광된 채 방치되어 있는 것이 현실이다. 이 연구는 캄브로-오르도비스기의 조선누층군에 대비되는 석회암질암을 모암으로 하는 대표적인 연-아연광상(상곡 및 금실광상)과 옥천누층군에 속하는 변성퇴적암류 또는 쥬라기의 화강암질암이 기반암을 이루는 지역의 금속광상(장풍 및 삼덕광상)을 선택하여 폐광에 따른 수계의 수리지구화학적 특성 및 안정동위원소의 변화와 거동특성을 검토한 것이다.

### 지질환경 및 연구방법

#### 환경지질학적 배경

이 연구에서 선택된 광산들은 한때 상당한 생산실적이 있던

것이나 현재는 모두 폐광상태로서, 대규모의 갱도(수갱, 수평갱)가 개설되어 있으며 선광장 및 광폐석 야적장도 있었다. 각 광산의 선광장 주변에는 광미를 폐기한 적치장이 있다. 광미적치장의 곳곳에서는 침출수가 유출되어 이차수계로 유입되고 있어 시각적 혐오와 함께 중금속의 용출이 진행되고 있음을 보여준다. 이 수계에는 적화 또는 백화현상이 뚜렷하며 회백색 및 적갈색의 침전물들이 많이 관찰된다. 또한 광산시설물들은 아무런 대책 없이 방치되어 있고 폐갱도에서 유출되는 광산수는 상수원 및 농경지로 유입되고 있는 실정이다. 각 광산부근의 지질과 광산의 위치는 Figure 1과 같으며, 광상지질학적 특징을 요약하면 아래와 같다.

상곡광산(삼보연철 또는 광신광산)은 황강리 광화대 동북단의 충북 단양군 적성면 상원곡리에 위치하며 연-아연, 철 및 금-은을 채광한 광산이다. 광상은 삼태산층의 석회암층을 모암으로 한 열수맥상 광상이나 일부는 교대형을 보이기도 한다. 광체는 N50°W 주향에 80°SW로 경사하며, 부광부는 맥상 또는 침니(chimney)의 형태를 이룬다. 노두에서는 고산(gossan)으로 산출되며 섬아연석, 방연석, 황동석, 황철석, 자류철석, 유비철석, 방해석, 석영 및 능망간석이 관찰된다. 광화대의 폭은 2-15 m로서, 확인된 광체는 원통상으로 거의 수직에 가까운 경사를 갖는다. 이 광상은 Choi *et al.*(1997)에 의하여 지질 및 광상학적인 상세한 연구가 있고, 이현구와 이찬희(1998)는 광산부근에 분포하는 토양과 퇴적물을 대상으로 환경지구화학적 연구를 수행한 바 있다.

금실광산은 충북 충주시 수산면 울지리에 위치하며 금풍광산으로도 불리던 것으로서 주로 연-아연을 생산하였으나, 부산

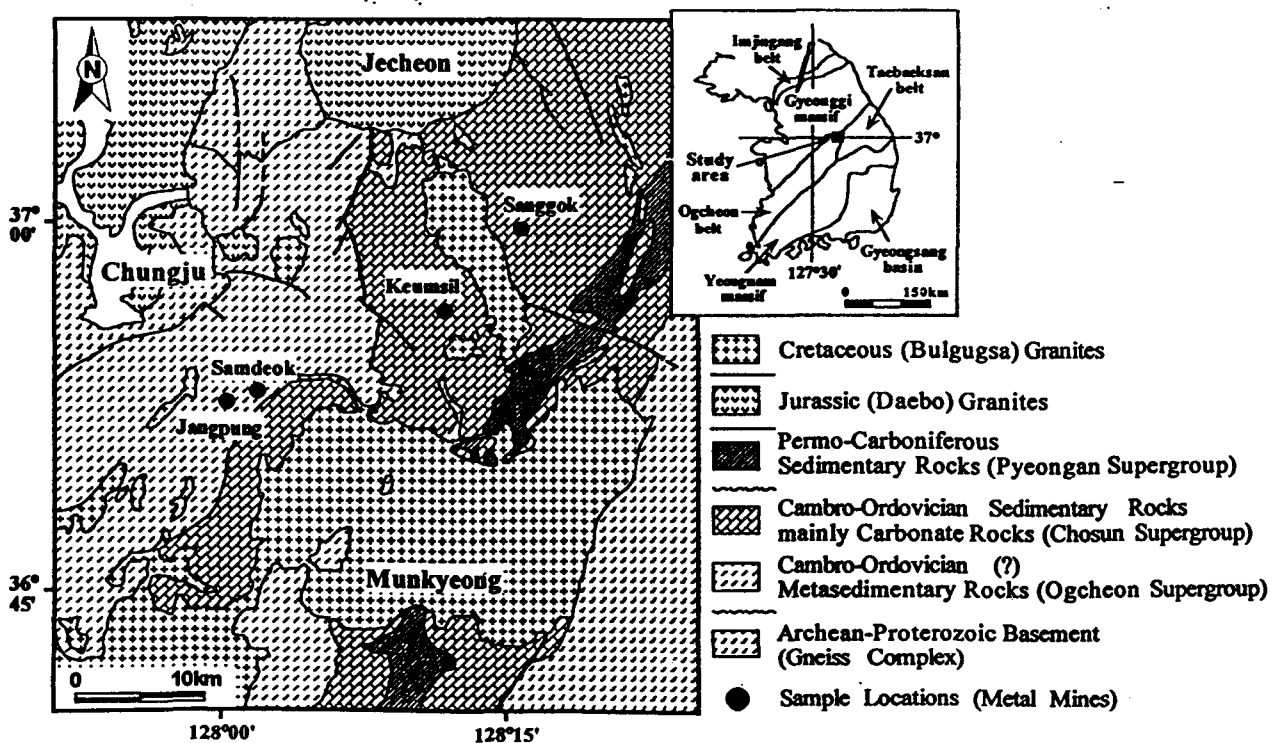


Figure 1. Geology and sample locations of studied area in the Hwanggangri mining district, Korea.

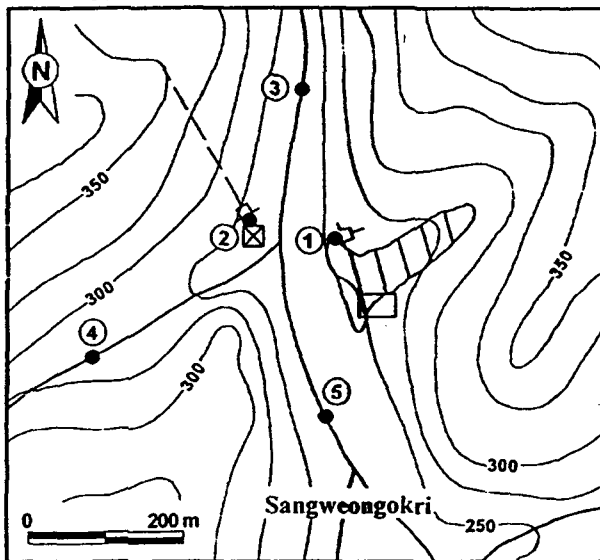
물로 통과 미량의 금-은이 산출된다. 광상부근의 지질은 조선누층군에 속하는 석회암, 석회규산암, 돌로마이트, 편암 및 이를 관입한 화성암류로 구성된다. 광산의 북쪽에는 쥬라기의 계천화강암이 분포하며 남부와 중앙에는 백악기의 무암사 및 수산화강암체가 관입되어 있다. 이 광상은 열극을 충진한 석영-탄산염의 맥상광상이다. 금실광상은 3개의 거의 평행한 맥으로 구성되어 있고, 맥의 주향은 N20~30°E이며 55~75°NW로 경사한다. 맥폭은 0.2~3.0 m, 수평연장 500 m, 심부연장 200 m 정도로 추정되며 3개 수준의 수평갱도가 개설되어 있다. 이 광상은 So and Yun(1992)에 의하여 상세히 연구된 바 있다.

장풍광산은 충북 괴산군 연풍면 오가리에 위치하며 미량의 금-은을 수반하는 동, 연아연광상이다. 광산부근의 지질은 옥천누층군에 속하는 서창리층, 화천리층과 구룡산층의 암석 및 이를

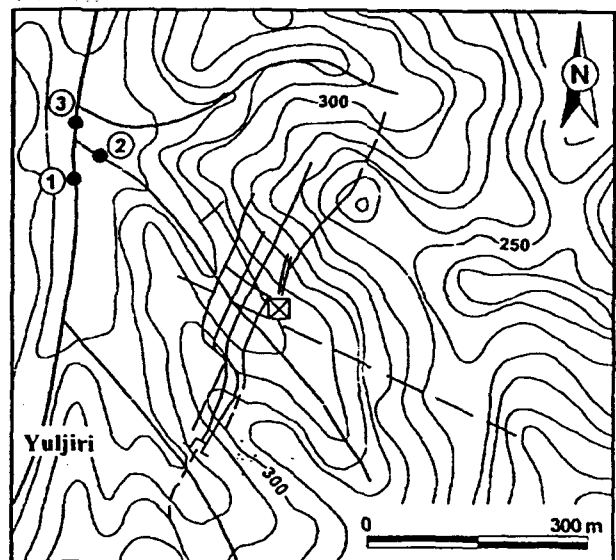
관입한 쥬라기의 우백질 반상화강암이 분포한다. 광상은 반상화강암 내에 발달한 NS~N10°E의 열극을 충진한 석영맥상 열수광상이다. 광석광물은 황동석, 방연석, 섬아연석, 황철석, 유비철석 등이 산출되며 공작석 또는 침철석 등도 관찰된다. 광맥은 2조가 발달하며, 맥폭은 10~100 cm 정도이고 단속적으로 약 250 m가 연장된다(대한광업진흥공사, 1977). 광산부근의 폐색은 모두 산화되어 적갈색을 보이며, 폐갱도에서 유출되는 침출수는 완벽한 산성배수 상태로서 수계에는 황갈색 침전물이 산재한다.

삼덕광산은 충북 충주시 상모면 수안보 온천의 남부에 위치하는 휘수연광산이다. 광상은 옥천누층군에 속하는 고운리층과 서창리층의 천매암질암에 배태된 열수광상으로서, 광석은 석영맥에 수반되는 휘수연석, 철망간중석, 황동석, 황철석이 주류를 이룬다. 광석을 수반하는 석영맥은 NS 방향으로 3조가 발달하

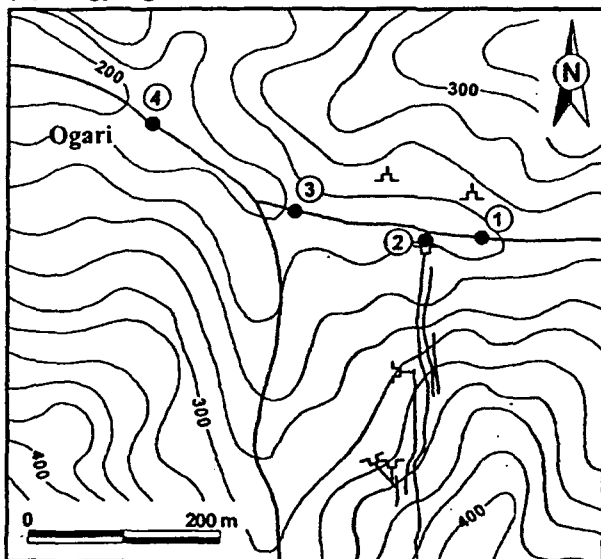
(A) Sanggok mine area



(B) Keumsil mine area



(C) Jangpung mine area



(D) Samdeok mine area

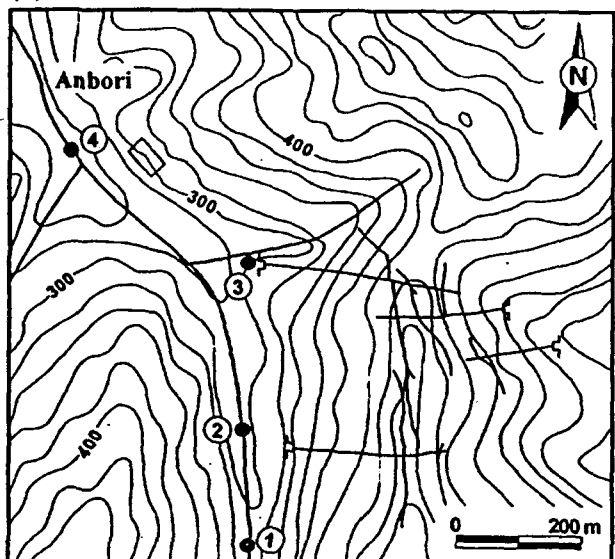


Figure 2. Sample localities showing studied area in the Hwanggangri mining district.

며, 맥폭은 10-20 cm 정도이고 연장은 300 m 정도이다(대한광업진흥공사, 1979). 이 광산은 일제시대부터 1970년대 중반까지 활발한 탐광과 채광이 있었으나 현재는 갱도, 폐석장, 선광장 등의 흔적만 남아 있고 일부에서는 복구공사가 실시되기도 하였다.

**시료채취 및 분석**

이 연구에서는 광산 및 광폐석장 부근에 분포하며 갱폐수의 직접적인 영향을 받은 지표수와 비광산 수계에 분포하는 지표수를 대상으로 하였다(Figure 2). 각각의 광산수계에서는 동일수계를 대상으로 먼저 광산활동 또는 오염과는 관계없는 지점에서 지표수를 채취하였다. 또한 광업활동과 폐광산의 직접적인 영향을 받은 지점과 이 보다 하류에서 양자가 합류한 수계의 지표수를 채취하여 각각의 물리화학적 특성을 검토하였다.

이들의 온도(°C), 수소이온농도(pH), 산화-환원전위(Eh; mV)와 전기전도도(EC, electrical conductivity;  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )는 시료채취와 동시에 측정하였다. 측정은 완충용액(pH = 4, 7, 10)으로 보정하여, HANNA 사의 pH-Eh 및 EC 측정기를 이용하였다. 모든 시료들은 0.45  $\mu\text{m}$  공극의 질산염 섬유소 여과지(cellulose nitrate filter)를 이용한 수동펌프로 부유물을 완전히 제거하고 음이온 및 양이온 측정시료로 나누어 채수하였다. 양이온 측정시료는 용기에 금속이온이 흡착되는 것을 방지하기 위하여 6N 질산( $\text{HNO}_3$ )을 1 ml 투여하여 산도를 유지하였다. 화학분석에 필요한 시료는 합성수지(polypropylene) 병에 담아 분석까지 냉장 보관하였다.

음이온 및 양이온 분석은 고려대학교 전략광물자원연구센터와 충남대학교 공동실험실습관의 이온 크로마토그래피(IC; Model Dionex 120), 유도결합 아르곤 플라즈마 방출 분광분석기와 질량분석기(ICP-AES; Model Perkin-Elmer, Optima 3000 XL 및 ICP-MS; Model Perkin-Elmer, Elan 6000)를 이용하였다.  $\text{HCO}_3^-$ 는 0.05 M의 HCl로 적정한 것이며, 용존 고형물(TDS; total dissolved solids)의 총량은 분석된 이온을 합산한 것이다(Wetzel and Likens, 1991). 각각의 분석에는 표준시료, 공시료 및 중복시료를 이용하여 분석치의 신뢰도와 재현성을 검증한 것이다.

환경동위원소( $\delta^{18}\text{O}$  및  $\delta\text{D}$ ) 분석은 고려대학교 전략광물자원 연구센터에 설치된 가스/동위원소 비 질량분석기(Gas/Isotope Ratio Mass Spectrometry; Model Finnigan MAT 252)를 이용하였다. 이 기기에는 분석의 신뢰도와 재현성이 높은 신장비인 H/Device(Finnigan Co.)가 장착되어 있다(박성숙 등, 1998; Yun et al., 1998). 분석절차는 Coleman et al.(1982) 및 Kendall and Coplen(1985)의 방법을 적용하였다. 이 연구에서 분석된  $\delta^{18}\text{O}$ 와  $\delta\text{D}$ 는 모두 SMOW로 표시하였으며 표준편차는 각각  $\pm 0.1$  및  $\pm 1\%$ 이다.

**결과 및 토의**

**물리화학적 특성**

연구지역에서 채수한 시료의 현장측정(T, pH, Eh, EC) 결과는 Table 1과 같다. 측정된 모든 지표수의 자료를 검토한 결과,

**Table 1.** Selected physical and chemical constituents of surface water from some abandoned metal mine creeks, Hwanggangri mining district

No.	pH	T (°C)	Eh (mV)	EC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\text{HCO}_3^-$ (mg/l)	$\text{Br}^-$ (mg/l)	$\text{Cl}^-$ (mg/l)	F <sup>-</sup> (mg/l)	$\text{NO}_2^-$ (mg/l)	$\text{NO}_3^-$ (mg/l)	$\text{PO}_4^{3-}$ (mg/l)	$\text{SO}_4^{2-}$ (mg/l)	$\text{SiO}_2$ (mg/l)	TDS* (mg/l)	$\delta\text{D}$ (%)	$\delta^{18}\text{O}$ (%)	d**
surface water of the Sanggok mine area collected in February 23, 1998																	
SG-1	7.84	6.3	-48	1060	171.472	nd	0.015	0.050	nd	0.621	nd	409.160	10.747	856.260	-65.0	-9.2	8.6
SG-2	7.91	9.6	-49	472	146.580	nd	1.495	0.051	nd	2.280	nd	84.324	5.628	349.822	-66.4	-9.3	8.0
SG-3	8.16	7.3	-85	369	274.592	nd	4.235	0.049	nd	9.470	nd	14.220	3.792	374.955	-67.2	-9.4	8.0
SG-4	8.61	7.2	-81	324	149.479	nd	11.651	0.034	nd	11.651	nd	11.295	3.792	258.525	-66.1	-9.5	9.9
SG-5	8.72	7.5	-86	372	177.333	nd	3.719	0.028	nd	9.106	nd	19.426	7.802	280.539	-65.1	-9.4	10.1
mean	8.25	7.6	-70	519	183.391	nd	4.223	0.042	nd	6.626	nd	107.685	6.352	531.712	-66.0	-9.4	8.9
surface water of the Keumsil mine area collected in February 24, 1998																	
KS-1	8.57	9.3	-81	413	177.333	nd	6.396	0.049	nd	21.772	nd	11.672	7.077	328.465	-65.5	-9.1	7.3
KS-2	8.48	6.8	-75	682	209.535	nd	12.072	0.290	nd	14.691	nd	122.125	8.691	533.259	-65.5	-9.4	9.7
KS-3	8.44	9.0	-74	445	200.775	nd	7.962	0.141	nd	16.481	nd	52.100	7.154	409.254	-66.1	-9.3	8.3
mean	8.50	8.4	-77	513	195.881	nd	8.810	0.160	nd	17.648	nd	61.966	7.641	423.659	-65.7	-9.3	8.4
surface water of the Jangpung mine area collected in February 24, 1998																	
JP-1	8.40	8.8	-64	59	18.321	nd	2.439	0.058	nd	6.038	nd	6.087	10.058	46.039	-71.2	-10.2	10.4
JP-2	3.37	10.6	167	495	nd	nd	1.039	3.527	nd	1.204	nd	206.301	22.241	308.533	-65.4	-9.2	8.2
JP-3	5.07	5.2	82	70	7.393	nd	2.486	0.161	nd	6.146	nd	14.746	10.664	48.506	-70.9	-10.2	10.7
JP-4	5.58	4.8	61	70	1.260	nd	2.276	0.118	nd	6.718	nd	13.751	10.587	40.488	-70.2	-10.1	9.8
mean	5.61	7.4	62	174	6.744	nd	2.060	0.966	nd	5.027	nd	60.221	13.388	110.892	-69.4	-9.9	9.8
surface water of the Samdeok mine area collected in February 25, 1998																	
SD-1	6.74	4.8	4	50	25.320	nd	2.188	0.015	nd	6.276	nd	4.156	9.838	50.251	-70.9	-10.0	9.1
SD-2	6.85	5.5	-17	118	27.854	nd	3.054	0.060	nd	6.913	nd	10.306	13.563	76.526	-67.5	-9.8	10.9
SD-3	7.45	9.4	-27	362	41.781	nd	1.894	0.551	nd	3.670	nd	108.373	15.524	231.412	-67.9	-9.7	9.7
SD-4	7.88	6.3	-23	148	24.199	nd	0.029	0.136	nd	12.069	nd	21.550	12.881	90.558	-69.3	-9.7	8.3
mean	7.23	6.5	-16	170	29.789	nd	1.791	0.191	nd	7.232	nd	36.096	12.952	112.187	-68.9	-9.8	9.5

nd; not detected, \*TDS; total dissolved solids, \*\*d =  $\delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O}$ , Sample numbers are the same as those of Figure 2.

석회질암을 모암으로 하는 상곡 및 금실광산 수계의 물이 변성퇴적암 또는 화강암질암을 모암으로 하고 있는 수계에 비하여 pH와 EC가 높고 Eh는 낮은 값을 갖는다. 양자 모두 광폐수의 직접적인 영향을 받은 지표수에서 낮은 pH(최소 3.37; 장풍광산)와 높은 EC(최대 1060  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; 상곡광산)를 보이나, 하류로 가면서 비광산 지역의 지표수가 유입됨에 따라 점진적으로 변화함을 보여준다.

지표수의 온도(평균 7.4°C)는 지역에 따라 큰 차이는 없으나 광산부근의 물에서 다소 높은 특징이 있다. Eh와 pH는 명확한 부의 상관도를 가지나(Figure 3), 온도 및 EC는 특별한 상관도를 보여주지 않았다. 이는 각각의 수계를 이루고 있는 모암과 유량의 차이를 반영하는 것으로 추정되며 또한 수계의 침전물과도 관계가 있을 것으로 보인다. 상곡, 금실 및 장풍광산의 갱내수는 이미 산성배수의 형태로 배출되며 수계에는 황갈색, 적갈색 또는 회백색의 침전물이 생성되어 있다.

용존 음이온의 평균함량을 보면, 상곡 및 금실광산 수계의 지표수( $\text{HCO}_3^- = 183.391, 195.881, \text{Cl}^- = 4.223, 8.810, \text{F}^- = 0.042, 0.160, \text{NO}_3^- = 6.626, 17.648$  및  $\text{SO}_4^{2-} = 107.685, 61.966 \text{ mg/l}$ )가 장풍 및 삼덕광산 수계의 지표수( $\text{HCO}_3^- = 6.477, 29.789, \text{Cl}^- = 2.060, 1.791, \text{F}^- = 0.966, 0.191, \text{NO}_3^- = 5.027, 7.232$  및  $\text{SO}_4^{2-} = 60.221, 36.096 \text{ mg/l}$ )에 비하여 F를 제외한 모든 원소가 아주 높고, 양자는 서로 다른 화학적 성질을 가진다(Table 1).

주성분 양이온의 평균함량은 상곡 및 금실 광산부근의 지표수( $\text{Ca}^{2+} = 103.265, 114.315, \text{K}^+ = 1.484, 3.961, \text{Mg}^{2+} = 11.488, 8.389, \text{Na}^+ = 2.489, 7.602, \text{SiO}_2 = 6.352, 7.641 \text{ mg/l}$ )가 장풍 및 삼덕 광산수계의 지표수( $\text{Ca}^{2+} = 19.961, 19.968, \text{K}^+ = 0.736, 1.186, \text{Mg}^{2+} = 2.461, 6.290, \text{Na}^+ = 3.672, 3.520, \text{SiO}_2 = 13.388, 12.952 \text{ mg/l}$ )에 비하여 Si를 제외한 모든 원소가 아주 높은 함량을 갖는다. 또한 각각의 수계에서 광산수 부근으로 가며 모든 양이온이 급격히 증가한다(Table 2).

이들을 수계에 따라 광폐수에 직접적인 영향을 받은 물과 비광산 수계의 지표수로 나누어 음이온과 양이온의 상대적인 함량을 검토하여 보았다. 이 결과 석회암을 모암으로 한 상곡 및 금실광산 수계의 것에서 변성퇴적암을 모암으로 한 장풍 및 삼덕광산 수계에 비하여  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  및  $\text{Mg}^{2+}$ 의 함량이 월등히 높으며  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  및 Si의 함량은 낮았다. 광폐수의 영향을 받은 물에서는 모암의 차이와 관계없이  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  및  $\text{Mg}^{2+}$ 의 양이 다른 이온에 비하여 아주 높으며 지표수의 조성과는 다른 화학적 특성을 보인다. 이는 수계를 이루고 있는 모암의 차이를 반영하는 것이다. 그러나 수계의 하류로 가면서 이들 모두가 급격히 낮아지는 경향이 있다.

한편 장풍광산 갱내수의  $\text{HCO}_3^-$ 는 산도가 낮아 걱정을 할 수 없는 수준이었으며, 모든 시료에서  $\text{Br}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  및  $\text{PO}_4^{3-}$ 는 검출되지 않았다. 또한 갱도에서 배출되는 광산수에는 아주 높은 함량(mg/l)의 Al(3.331), Fe(2.104) 및 Mn(2.595) 등이 포함되어 있으며, 이외에도 미량(mg/l)의 As(0.173), Cd(0.005), Co(0.019), Cr(0.001), Cu(1.274), Li(0.004), Ni(0.247), Pb(0.009), Se(0.100) 및 Zn(0.693)이 검출된다(Table 2). 따라서 연구지역의 광산수계에 분포하는 지표수는 음용수의 수질 기준과 비교할 때 이미 상당한 정도의 중금속 오염이 진행되고 있음을 보여준다.

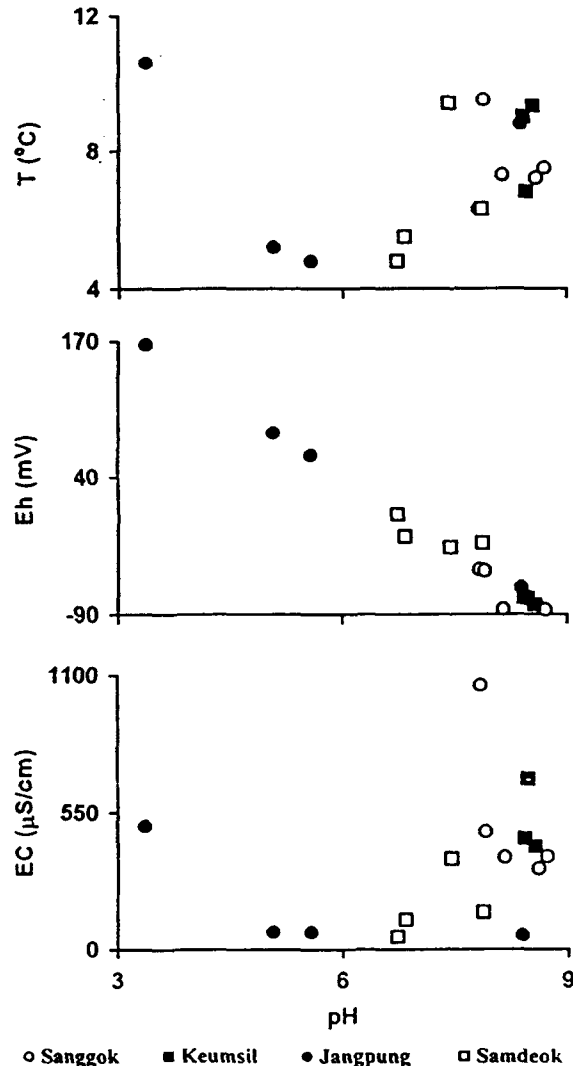


Figure 3. Plot of correlation between T, Eh and EC versus pH for surface water.

수리지구화학적 성질

대표적인 양이온과 음이온을 선택하여, 연구지역에 분포하는 지표수의 화학적 유형과 진화경향을 알아보려고 Piper(1944)의 삼각도에 표시하였다(Figure 4). 연구지역의 일반적인 지표수들의 양이온 특성은  $\text{Ca}^{2+} + \text{Na}^+$  형에 속하나, 광산지역의 지표수로 가며  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 의 함량이 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 장풍 및 삼덕광산 부근의 시료에서 상대적으로  $\text{Ca}^{2+}$ 와  $\text{Mg}^{2+}$ 가 결핍되어 있다. 음이온은  $\text{HCO}_3^- - \text{Cl}^-$  및  $\text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-}$  형에 걸쳐 분포하나, 광산지역의 지표수로 가면서  $\text{SO}_4^{2-}$  형으로 변한다. 따라서 연구지역의 지표수는  $(\text{Ca}^{2+} - (\text{Na}^+ + \text{K}^+)) - (\text{HCO}_3^- + \text{Cl}^-)$  형에 속하나, 광업활동이 있었던 부근의 지표수로 가며  $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - \text{SO}_4^{2-}$  형으로 진화하고 있음을 보여준다.

물-암석 반응으로 용해되기 쉬운 대표적인 이온( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  및  $\text{HCO}_3^-$ )을 지표로 수리지구화학적 특성을 검토하였다. 일반적으로 이들이 증가함에 따라 이온의 총량도 증가하며 비광산 지역의 지표수에서 광산지역의 지표수로 가며 모든 이온의 함

Table 2. Selected cation concentrations (mg/l) of surface water from some abandoned metal mine creeks, Hwanggangri mining district

No.	Al	As	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	K	Li	Mg	Mn	Na	Ni	Pb	Se	U	Zn	
surface water of the Sanggok mine area collected in February 23, 1998																			
SG-1	0.001	nd	236.176	0.001	0.001	nd	0.011	0.007	2.200	0.002	26.510	0.049	4.846	0.005	nd	0.100	nd	0.013	
SG-2	0.003	nd	102.335	0.001	nd	nd	0.004	0.101	0.953	0.001	6.622	0.027	2.183	0.004	nd	0.024	nd	0.205	
SG-3	0.010	nd	56.137	0.001	0.001	0.001	0.003	0.013	1.061	0.001	11.486	0.004	1.831	0.004	nd	0.044	nd	0.021	
SG-4	0.004	nd	58.953	0.001	nd	nd	0.001	0.008	1.025	0.001	10.761	0.004	1.829	0.005	nd	0.040	nd	0.012	
SG-5	0.007	nd	62.725	0.001	nd	0.001	0.003	0.006	0.695	nd	2.062	0.002	1.757	0.005	0.001	0.006	nd	0.010	
mean	0.005	nd	103.265	0.001	nd	nd	0.004	0.027	1.484	0.001	11.488	0.017	2.489	0.005	nd	0.043	nd	0.150	
surface water of the Keumgil mine area collected in February 24, 1998																			
KS-1	0.010	0.004	98.760	nd	nd	0.001	0.006	0.007	2.946	0.001	4.104	0.002	2.050	0.006	nd	0.013	nd	0.027	
KS-2	0.013	0.173	134.224	0.005	0.009	0.001	1.273	0.019	5.487	0.003	13.550	0.364	14.413	0.247	0.009	0.005	nd	0.693	
KS-3	0.025	0.017	109.962	0.002	0.004	0.001	0.486	0.014	3.451	0.002	7.514	0.146	6.344	0.100	nd	0.028	nd	0.267	
mean	0.016	0.065	114.315	0.002	0.004	0.001	0.588	0.013	3.961	0.002	8.389	0.171	7.602	0.118	0.003	0.009	nd	0.329	
surface water of the Jangpung mine area collected in February 24, 1998																			
JP-1	0.020	0.005	4.109	0.001	nd	nd	0.002	0.006	0.486	nd	1.264	0.003	2.488	0.005	nd	nd	nd	0.007	
JP-2	3.331	0.016	62.745	0.007	0.019	0.001	1.242	2.104	1.319	0.004	5.517	2.595	6.686	0.006	0.003	0.018	nd	0.460	
JP-3	0.453	nd	6.652	0.001	0.002	0.001	0.124	0.035	0.611	0.002	1.609	0.110	2.921	0.006	0.003	0.005	nd	0.051	
JP-4	0.278	0.001	6.337	0.001	0.001	0.001	0.082	0.018	0.529	0.002	1.455	0.076	2.591	0.006	0.002	0.002	nd	0.038	
mean	1.021	0.006	19.961	0.003	0.006	0.001	0.363	0.541	0.736	0.002	2.461	0.696	3.672	0.006	0.002	0.006	nd	0.139	
surface water of the Samdeok mine area collected in February 25, 1998																			
SD-1	0.010	nd	3.651	nd	nd	nd	0.003	0.009	0.388	0.001	1.458	0.003	2.163	0.006	nd	0.004	nd	0.004	
SD-2	0.028	nd	14.372	0.001	nd	nd	0.006	0.021	1.425	0.001	3.213	0.001	2.885	0.006	nd	0.010	nd	0.033	
SD-3	0.016	nd	44.872	0.001	nd	0.001	0.003	0.001	1.675	0.001	15.689	0.001	5.555	0.008	nd	0.058	nd	0.009	
SD-4	0.009	nd	16.977	0.001	nd	0.001	0.005	0.003	1.256	0.001	4.798	0.001	3.476	0.007	nd	0.015	nd	0.007	
mean	0.016	nd	19.968	0.001	nd	nd	0.004	0.009	1.186	0.001	6.290	0.002	3.520	0.007	nd	0.019	nd	0.013	

nd; not detected, Sample numbers are the same as those of Figure 2.

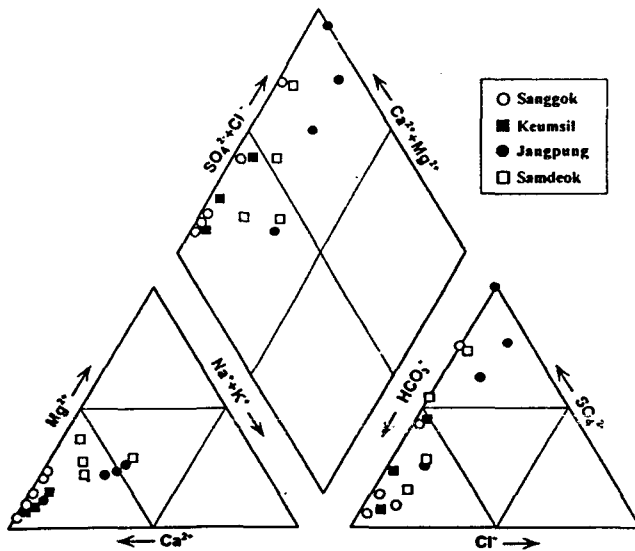


Figure 4. Trilinear diagram showing some major chemical compositions of surface water.

량이 증가하는 경향을 보였다. 주성분 원소들과 pH는 특별한 상관도를 갖지 않았으나, 각각의 수계로 나누어보면 양의 상관도를 보이는 것과 음의 관계를 보이는 것이 있다. 일반적인 자연수는 이차적인 오염에 의하여 pH는 낮아지고, EC와 TDS는 높아지는 것으로 알려져 있다. 연구지역의 지표수에서도 TDS와 EC는 거의 비례관계를 가지며(Figure 5), 모든 수계에서 NO<sub>3</sub>

와 Cl<sup>-</sup>을 제외한 대부분의 주성분원소가 증가함에 따라 EC도 증가하는 정의 상관도를 보여준다. 위와 같은 수질특성은 오염에 따른 수질의 화학적 변이를 반영하는 것으로 추정된다.

한편 pH와 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>/음이온 총량 및 TDS와 K<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup>는 양의 상관도를 보여주며, EC와 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>/SiO<sub>2</sub> 및 TDS와 Na<sup>+</sup>/(Na<sup>+</sup>+Ca<sup>2+</sup>)는 명확한 부의 관계를 갖는다(Figure 6). 따라서 연구지역의 지표수는 광폐수에 의하여 꾸준한 오염이 진행되고 있으며 기반암과 충분한 교환반응을 갖지 못하고 단속적으로 공급되는 강수에 의하여 희석되고 있음을 보여준다(Gibbs, 1970). 특히 EC와 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>/SiO<sub>2</sub>의 거동특성은 기반암의 차이도 반영하고 있는 것으로서, 석회암 지역의 물이 변성퇴적암 또는 화강암지역의 물보다 높은 pH, EC 및 TDS를 갖기 때문으로 보인다.

연구지역의 지표수에서 침전광물 및 용존이온의 안정도와 물-암석 반응을 알아보기 위하여 WATEQ4F(Ball and Nordstrom, 1992)를 이용하여 열역학적 함수들을 도출하였다(Drever, 1988; Nordstrom and Munoz, 1986). 일반적으로 순환수의 물-암석 반응으로 생성되기 쉬운 광물조합은 깁사이트(gibbsite), 스멕타이트(smectite), 일라이트(illite), 고령석 및 방해석이다. 각각의 자료에서 계산된 함수를 CaO, K<sub>2</sub>O, MgO 및 Na<sub>2</sub>O와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O 계의 열역학적 안정영역(Helgeson, 1969; Nesbitt, 1977; 이종운 등, 1996)에, 연구지역 순환수가 갖는 안정범위를 도시하여 보았다.

장풍 및 금실광산 수계의 물들은 일반적인 지표수와 비슷한 고령석(kaolinite)의 안정영역에 포함되었다(Tardy, 1971; 유재영 등, 1994; Jeong et al., 1995). 이는 기반암의 광물조성과도 비슷한 것이나, 장풍광산의 갭내수는 Ca<sup>2+</sup>/H<sup>2+</sup>를 제외한 Mg<sup>2+</sup>/

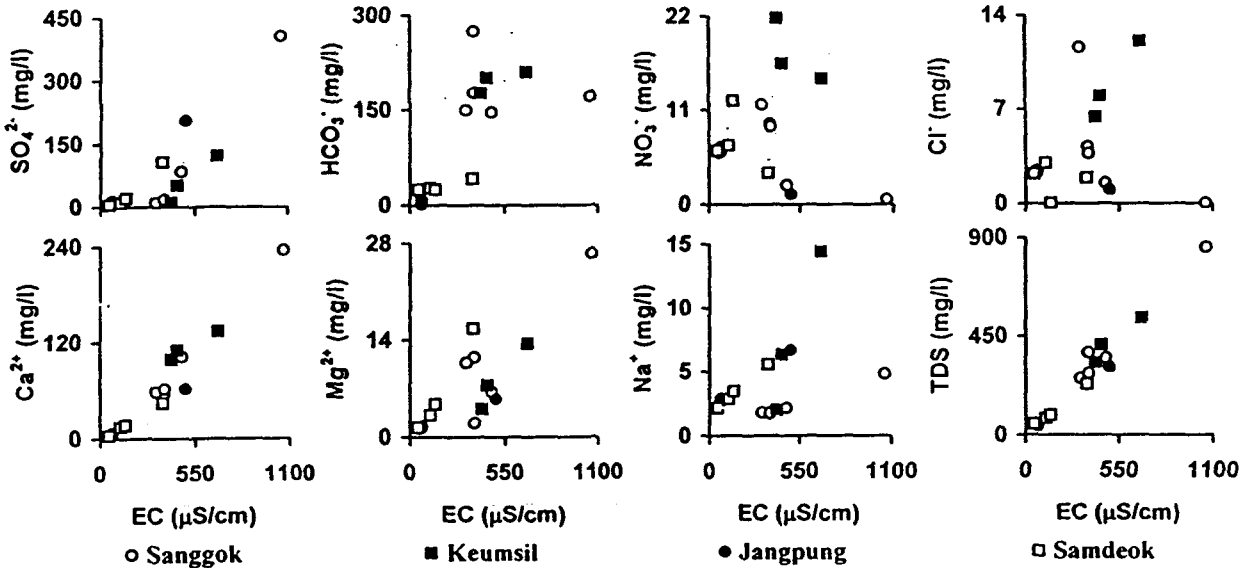


Figure 5. Plot of correlation between contents of some major elements versus EC for surface water.

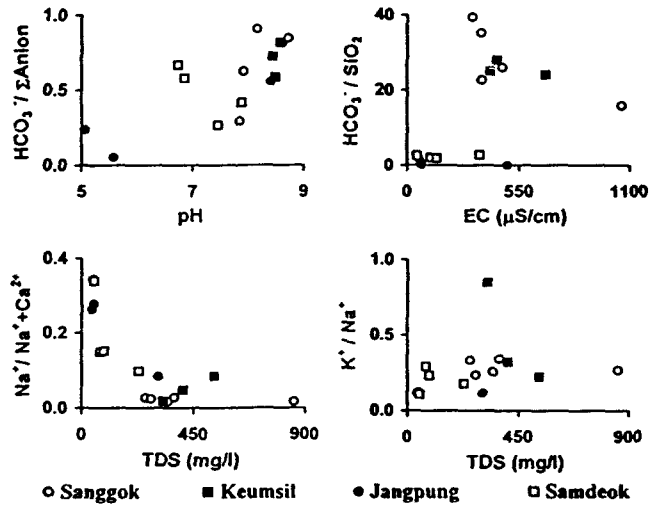


Figure 6. Plot of correlation between some ratios of major elements versus pH, EC and TDS for surface water.

$H^+$ ,  $K^+/H^+$  및  $Na^+/H^+$ 의 활동비가 모두 음의 값을 나타낼 정도로 심각한 비조화 용출조건을 갖는다. 이들은 삼덕광산 수계와 마찬가지로 유입되는 비광산 지역의 지표수와 희석되면서 점진적으로 평형상태를 찾아가는 진화경로를 갖는다(Figure 7).

그러나 상곡 및 금실광산 수계의 지표수들은 석영과 불포화 상태를 보이며 김사이트와 평형을 이룬다(Figure 7). 이 양이온들의 활동비는 비광산 지역의 지표수와 큰 차이가 없으나 계속적으로 공급될 것으로 보이는 규산용액( $H_4SiO_4$ )과의 반응에 의하여 고령석의 안정범위로 이동한다. 또한  $K^+/H^+$ 를 제외한 모든 원소들의 활동도가 낮은 것으로 보아 pH의 변화에 따라 대부분의 양이온은 앞으로 계속적인 용출이 일어날 것으로 보인다. 따라서 이 지역의 지표수와 기반암은 거의 교환반응이 없었으며 일반적인 지표수에 비하여 광산수계의 지표수가 더욱 낮은 반응정도를 지시한다.

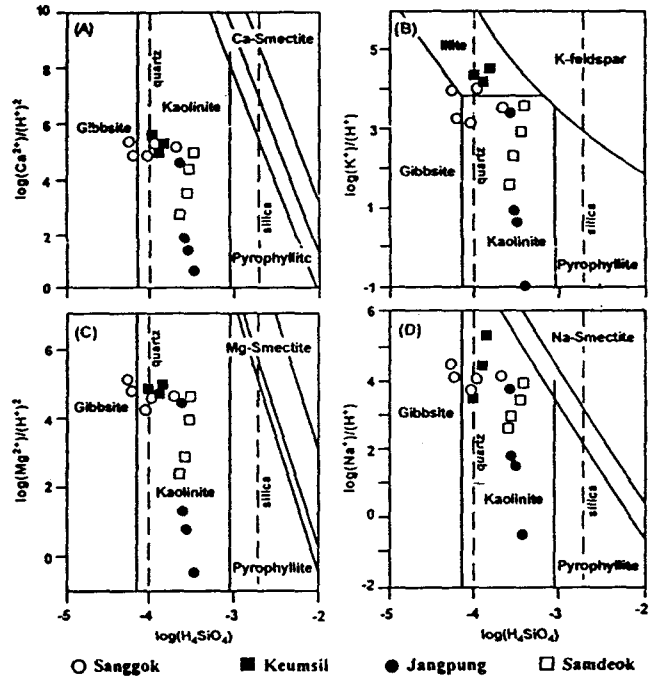


Figure 7. Diagrams showing stability fields in the Ca (A), K (B), Mg (C) and Na (D) systems for surface water. The boundaries between kaolinite, smectite, quartz and amorphous silica saturation lines are from Helgeson (1969), Nesbitt (1977) and Lee et al. (1996).

환경동위원소

이 지역의 순환수가 갖는  $\delta^{18}O$  및  $\delta D$  값은 각각 -9.1~10.2‰과 -65.0~71.2‰로서  $d(\delta D - 8\delta^{18}O)$  값(7.3 10.9)의 편차는 크지 않았다. 그러나 비광산 수계의 지표수에 비하여 광폐수의 직접적인 영향을 받은 물에서 더욱 무거운 동위원소비를 갖는다(Table 1). 이 자료는 모두 전 세계의 순환수 평균치( $\delta D = 8$

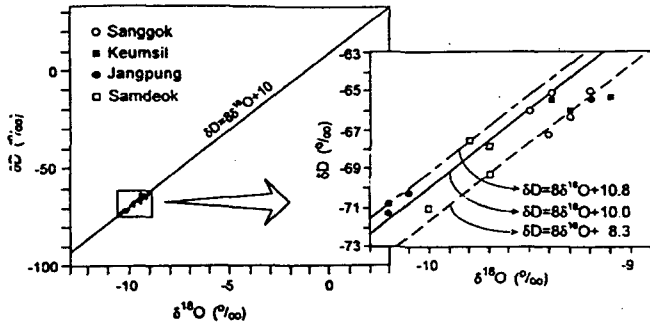


Figure 8. Plot of  $\delta D$  versus  $\delta^{18}O$  for surface water.

$\delta^{18}O+10$ ; Craig, 1961)에 근접하여 도시되나, 다소 상향 이동하여  $\delta D=8\delta^{18}O+10.8$ 과 평행한 것과, 하향 이동하여  $\delta D=8\delta^{18}O+8.3$ 에 평행한 부류가 있다(Figure 8).

지표수의 산소 및 수소 동위원소 조성변화는 지역적 또는 기후적 특성을 반영한다. 한편 물과 암석간의 동위원소 교환반응 정도는 분별계수를 좌우하는 시간, 속도, 온도, 용적비 및 동위원소의 조성차이에 따라 달라진다(Taylor, 1974; Truesdell and Hulston, 1980). 그러나 이를 정량적으로 규명하기란 대단히 어려운 일이다. 김규한과 Nakai(1988)는 국내 강우의 경우에 고도가 100 m 상승함에 따라 산소 및 수소 동위원소 비가 각각 0.19‰ 및 1.18‰의 비율로 감소한다고 보고하였다. 또한 정찬호 등(1998)은 공주시 유구읍 명곡리 지역의 계곡수에서 산소와 수소 동위원소 비가 각각 -1.1‰ 및 -4.0‰ 정도의 뚜렷한 고도효과가 있다고 하였다.

연구지역의 지표수는 광산수로 갈수록  $\delta^{18}O$ 와  $\delta D$  값이 무

거워지며, pH도 낮아지는 경향을 갖는다. 이는 석회질암이 모암을 이루는 상곡 및 금실광산 수계보다는 쇄설성 변성퇴적암 및 화강암질암이 기반암을 이루는 장풍 및 삼덕광산에서 더욱 뚜렷한 경향을 보였다. 장풍광산의 갱내수는 광산부근에 분포하는 비광산 수계의 계곡수에 비하여  $\delta^{18}O$ 와  $\delta D$  값이 각각 1.0‰과 5.8‰이 증가하였다. 또한 삼덕광산 수계의 지표수는 각각 0.3‰ 및 3.4‰이 증가하여 산소에 비하여 수소의 편이현상이 더욱 강함을 지시하였다. 이는 시료채취 지역의 고도차이가 있음에도 불구하고 명확한 증가를 보여주었다(Table 1).

Mayo and Klauk(1991)와 Mayo *et al.*(1992)은 동일기원의 순환수와 하여도 암석과의 반응, 증발, 온도 및 염농도에 따라 산소의 편이현상이 발생하는 것이 일반적이고, 비오염 지역에서 오염지역으로 갈수록 pH는 낮아지고 수소 및 산소의 동위원소 비는 무거워 진다고 하였다. 이는 미세한 차이기는 하나 양자 모두 친이된 특징이 있는 것으로 보아 제한적인 범위에서 순환수와 암석간의 동위원소의 교환반응이 있었을 가능성을 암시한다(Taylor, 1974).

연구지역의 동위원소 조성을 각각의 화학적 특성과 비교하여 보면(Figure 9),  $\delta^{18}O$ 와  $\delta D$ 가 모두 무거워질 수록 총용존고형물(TDS), 대표적인 용존 음이온( $HCO_3^-$ ) 및 양이온( $Ca^{2+}$ )의 함량도 증가하는 양의 상관도를 보여주었다. 또한 석회암을 모암으로 하고 있는 상곡 및 금실 광산수계의 시료에서 더욱 무거운 동위원소비를 가지며 용존성분들도 풍부함을 나타내었다. 따라서 폐광산에서 유출되는 오염요소들은 수계의 환경동위원소 교환반응에 영향을 줄 수 있을 것으로 해석된다. 그러나 순환과정이 다른 지하수의 유입에 의한 현상일 가능성도 있다. 이에 관하여는 앞으로도 계속적인 연구가 수행될 예정이다.

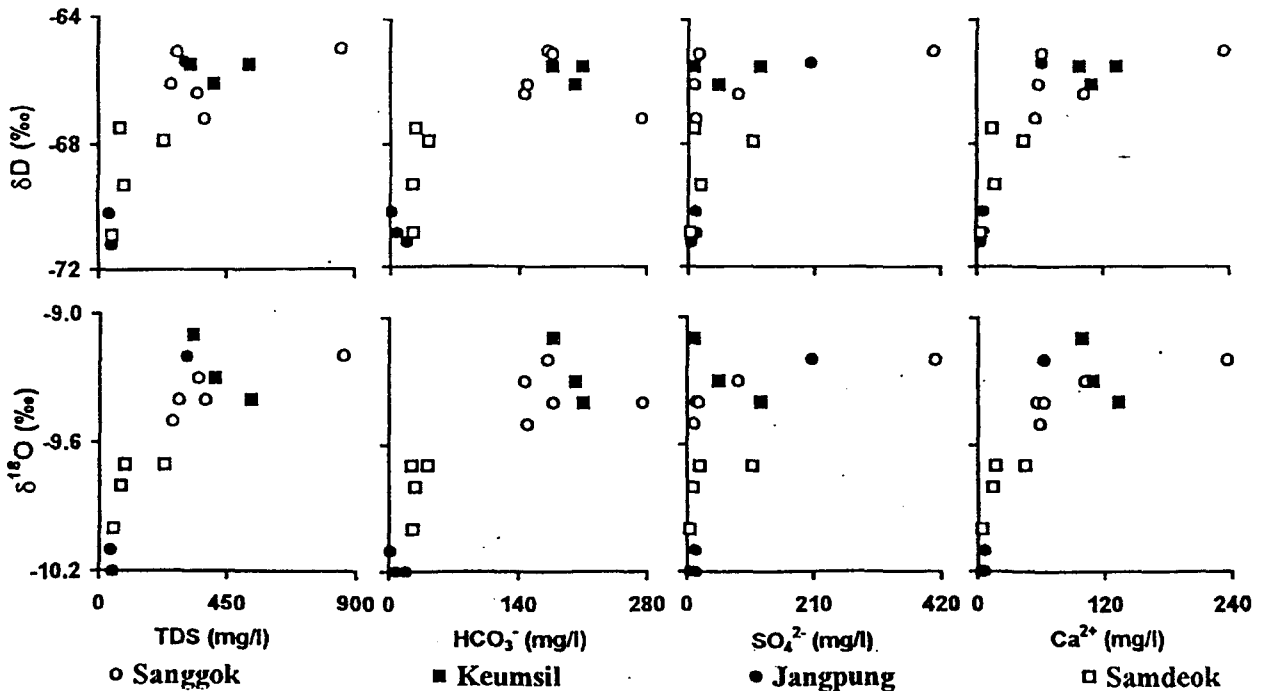


Figure 9. Plot of correlation between some compositional variations of major elements versus isotopic compositions for surface water.



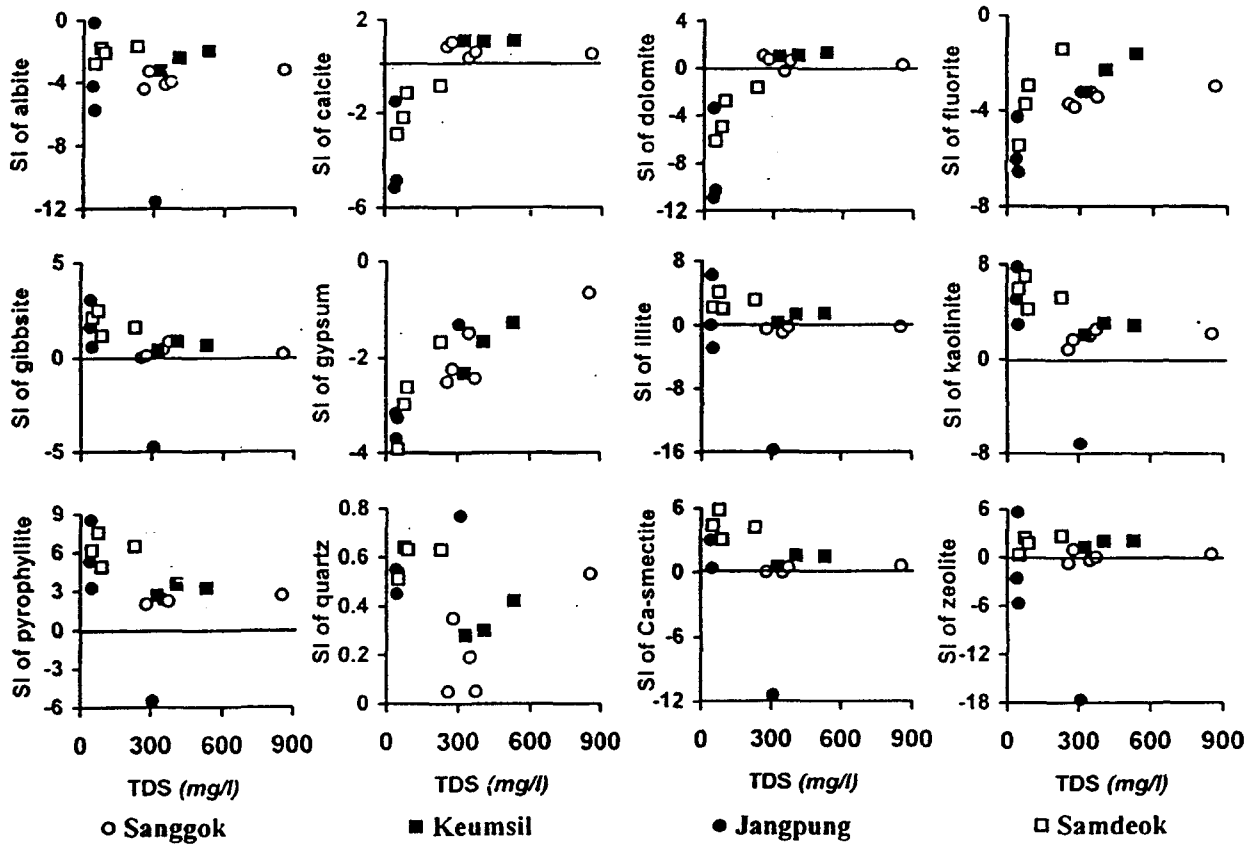


Figure 10. Plot of calculated saturation indices of some minerals species versus TDS for surface water.

Table 3. Selected saturation indices of mineral species of surface water from some abandoned metal mine creek, Hwanggangri mining district

No.	albite	calcite	dolomite	fluorite	gibbsite	gypsum	illite	kaolinite	pyrophyllite	quartz	Ca-smectite	zeolite
surface water of the Sanggok mine area collected in February 23, 1998												
SG-1	-3.200	0.541	0.193	-2.989	0.191	-0.655	-0.210	2.177	2.658	0.527	0.575	0.394
SG-2	-4.116	0.373	-0.326	-3.215	0.435	-1.485	-0.973	2.004	2.378	0.189	-0.022	-0.355
SG-3	-3.938	0.587	0.554	-3.438	0.841	-2.443	-0.245	2.535	2.242	0.053	0.406	0.029
SG-4	-4.427	0.828	0.988	-3.721	0.001	-2.511	-	0.841	-	0.046	-	-0.757
SG-5	-3.293	1.032	0.661	-3.862	0.119	-2.244	-0.507	1.686	2.022	0.350	0.012	0.956
mean	-3.795	0.672	0.414	-3.445	0.317	-1.868	-0.387	1.849	1.860	0.232	0.194	0.053
surface water of the Keumsil mine area collected in February 24, 1998												
KS-1	-3.246	1.091	0.913	-3.234	0.398	-2.331	0.238	2.118	2.627	0.282	0.447	1.251
KS-2	-1.924	1.104	1.277	-1.595	0.652	-1.275	1.382	2.883	3.232	0.417	1.446	2.026
KS-3	-2.397	1.038	1.017	-2.298	0.860	-1.674	1.292	3.066	3.551	0.296	1.525	1.972
mean	-2.522	1.078	1.069	-2.376	0.637	-1.760	0.971	2.689	3.137	0.332	1.139	1.750
surface water of the Jangpung mine area collected in February 24, 1998												
JP-1	-0.163	-1.518	-3.428	-4.281	3.063	-3.701	6.194	7.776	8.530	0.448	6.986	5.608
JP-2	-11.563	-	-	-3.220	-4.742	-1.311	-15.738	-7.177	-5.468	0.772	-11.453	-17.628
JP-3	-5.760	-4.863	-10.315	-6.561	0.568	-3.271	-2.929	2.956	3.274	0.542	0.343	-5.719
JP-4	-4.254	-5.147	-10.913	-6.036	1.617	-3.173	-0.002	5.060	5.314	0.546	2.954	-2.633
mean	-5.435	-2.882	-6.164	-5.025	0.127	-2.864	-3.119	2.154	2.913	0.577	-0.293	-5.093
surface water of the Samdeok mine area collected in February 25, 1998												
SD-1	-2.785	-2.914	-6.209	-5.473	2.100	-3.915	2.195	5.962	6.152	0.513	4.306	0.293
SD-2	-1.785	-2.199	-5.016	-3.752	2.473	-2.991	4.048	6.966	7.535	0.641	5.792	2.367
SD-3	-1.669	-0.851	-1.732	-1.406	1.607	-1.610	3.123	5.238	6.483	0.633	4.150	2.623
SD-4	-2.086	-1.155	-2.808	-2.954	1.142	-2.630	2.031	4.231	4.865	0.603	2.927	1.746
mean	-2.082	-1.780	-3.941	-3.396	1.801	-2.787	2.849	5.599	6.259	0.598	4.294	1.757

-; not calculated, Sample numbers are the same as those of Figure 2.

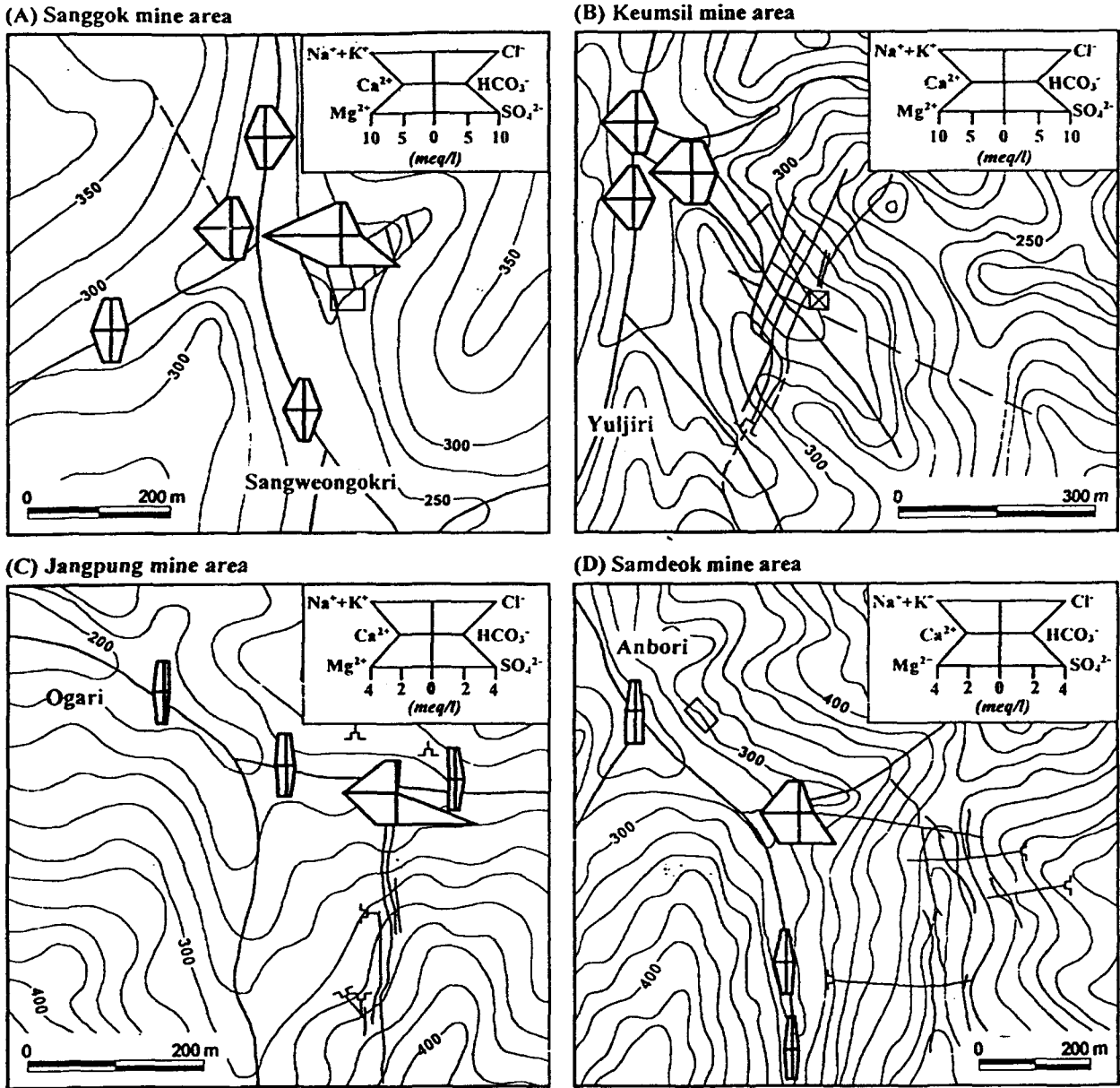


Figure 11. Stiff's patterns showing some major chemical compositions for surface water of studied areas in the Hwanggangri mining district.

**잠재적 독성원소의 거동**

연구지역 순환수에 대한 물리화학적 요소들의 일부는 앞에서 검토한 바와 같이 pH, Eh와 EC는 일반적인 자연수와 동일한 거동특성을 가지며 서로 높은 상관도가 있다. 특히 TDS와 EC는 거의 비례관계를 가지며 비광산 지역의 지표수에서 폐석장 및 갱도부근의 지표수로 가며 급격히 증가한다. 상관분석과 회귀분석을 실시한 결과, 일부 이온( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ , As, Cu)을 제외한 음이온( $\text{F}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ )과 pH, Eh 및 EC는 높은 상관도를 갖는다. 한편 Cu, Si, Zn을 제외한 대부분의 양이온들은  $\text{Ca}^{2+}$ 와 동일한 거동특성을 가지며 상관도도 양호하였다.

오염원에 노출된 독성원소의 종분포를 확인하고자 WATEQ4F (Ball and Nordstrom, 1992)를 이용하여 이들의 용존상태를 추정하였다. 각 수계의 지표수에서는 모두 금속이온 단독( $\text{M}^{2+}$ )으

로 존재하는 것이 대부분이나, 광산부근의 지표수로 가면서 모두 황산염( $\text{MSO}_4^{2-}$ )과 결합된 것이 우세한 것으로 나타났다. 또한 pH가 낮고  $\text{SO}_4^{2-}$ 의 함량이 높은 시료에서  $\text{MSO}_4^{2-}$ 가 우세한 것으로 보아,  $\text{SO}_4^{2-}$ 의 농도가 지표수에 금속이온 종의 존재형태를 지배하고 있을 것으로 예측된다. 그러나 비광산 수계의 지표수에 존재하는 양이온은  $\text{M}^{2+}$ 가 주종을 이루고 있을 것으로 나타났고, 일부 시료에서  $\text{CO}_3^{2-}$  및  $\text{OH}^-$ 기의 착이온(complex ion)을 형성할 수 있을 것으로 계산되었다.

한편 pH와 밀접한 관계가 있는 Al은 비광산 수계 지표수에서는 보통  $\text{Al}(\text{OH})_3$ 과  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ 로 산출되던 것이 광산부근으로 가면서 Al,  $\text{AlF}$ ,  $\text{AlF}_2$ ,  $\text{AlSO}_4$  및  $\text{Al}(\text{SO}_4)_2$ 의 형태를 갖는 것으로 파악되었다. 또한 갱도에서 유출되는 물에 존재하는 As의 대부분은 수용액 상태의  $\text{H}_3\text{AsO}_3$  또는  $\text{H}_2\text{AsO}_4$  상태로 존재할

것으로 예측되었다. 황과 탄산이온은 각각  $\text{HCO}_3^-$ 와  $\text{H}_2\text{CO}_3^*$  및  $\text{SO}_4^{2-}$ 와  $\text{HSO}_4^-$ 가 비슷한 함량으로 존재할 것이 예상되나 pH가 낮고 중금속의 함량이 높을수록  $\text{HCO}_3^-$ 와  $\text{SO}_4^{2-}$ 가 우세하게 나타날 것으로 보인다.

### 오염도 평가

순환수를 구성하는 이온의 대부분은 오염원에 노출될 때 상대적인 함량이 증가하며, 음이온 총량과 알칼리 원소를 제외한 대부분의 양이온들이 인위적인 오염에 민감한 것으로 알려져 있다(Pacheco and Weijden, 1996). 또한 이 지역의 폐광산 수계하류에는 백화 또는 적화현상이 있는 것으로 보아 오염원 소들은 이미 수화물, 수용액 또는 원소상태로 거동하고 있을 것으로 추정된다(Bigham *et al.*, 1996; Nordstrom and Ball, 1986).

연구지역의 일부 갭내수에는  $\text{SO}_4^{2-}$ 의 함량이 최대 409.610 mg/l 이나, 지표수에는 비교적 많은 양의  $\text{NO}_3^-$ 와  $\text{Cl}^-$ (21.772 및 12.072 mg/l)이 포함되어 있기도 하다. 이는 농경폐수의 영향일 것으로 판단된다. 양이온의 총량도 광산부근에서 수계의 하류로 갈수록 급격히 감소하나 연구지역의 모든 순환수는 음용수의 수질기준을 모두 초과하며 높은 함량의 Al, Fe, Mn, Sr 및 중금속도 검출되었다.

순환수광물의 역학적 평형관계를 WATEQ4F로 계산한 결과, 일반적인 지표수와는 달리 광산부근의 지표수는 아주 독특한 환경임을 보여주었다. 보통 TDS가 증가하면서 알바이트, 방해석 및 돌로마이트의 포화지수는 양의 상관도를 지나 갑사이트, 일라이트, 고령석, 납석, 스택타이트 및 불석과 같은 점토 광물들은 대부분 음의 관계를 보였다(Figure 10). 또한 순환수에 주성분 원소를 공급할 것으로 예상되는 알바이트, 방해석, 돌로마이트 등은 대부분 광산수계에서 용해성 환경에 있는 것으로 보이거나 비광산 지역의 지표수가 유입됨에 따라 점진적으로 평형상태로 변한다.

규질물질(석영, 옥수질 석영)들은 거의 모두 평형상태를 유지하고 있는 것으로 나타났다. 점토광물들은 일부 광산부근의 지표수에서 용해성 환경을 지시하나, 대부분의 지표수에서는 모두 침전이 가능한 물질로 계산되었다(Table 3). 그러나 형석, 중정석, 석고 및 경석고 등은 지속적인 용해에 의하여 지표수의 수질에 많은 영향을 줄 것으로 예측되었다.

연구지역의 순환수 조성을 Stiff 도표에 표시하여 보면(Figure 11), 대부분의 지표수는 거의 차이 없이  $\text{Ca}^{2+}$ 와  $\text{HCO}_3^-$ 가 부화된 경향을 갖는다. 그러나 각 이온들의 절대함량은 상곡 및 금실광산 수계의 지표수가 장풍 및 삼덕광산 수계의 지표수에 비하여 압도적으로 높다. 또한 모든 수계에서 광폐수의 직접적인 영향을 받은 지표수가  $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$  및  $\text{SO}_4^{2-}$  이온이 상당히 부화되어 있어 일반적인 자연수의 형태와는 아주 다른 기형적인 모습을 갖는다. 따라서 광산부근의 지표수는 이미 광폐수의 오염에 의하여 환경적으로 잠재적 독성을 갖는 원소들이 부화되어 거동하고 있음을 잘 보여주나, 이 오염에 의한 지하수의 영향은 평가되지 못하였다.

연구지역의 수질을 국내외에 알려진 음용수의 수질기준으로 표준화 할 때, 이 지역은 이미 수질오염의 위험수위에 도달해

있으나 광산에서 유출되는 폐수는 하류로 가며 급속도로 희석되어 비교적 짧은 거리 내에서 중화될 것으로 보인다. 그러나 대부분의 폐광산 부근에서는 광폐수의 영향권에 분포하는 토양에서도 경작을 하고 있는 실정이며 민가의 음용수에도 영향을 끼치고 있는 것이 현실이다. 또한 충주호의 지표수는 폐광산에서 유출되는 산성폐수 및 중금속의 계속되는 오염에 완전히 노출되어 있다. 따라서 수계 및 지하의 오염문제, 오염확산의 방지 및 환경개선을 위한 감시기술의 개발이 필수적이며, 연간 배출되는 오염원소의 총량을 산출하여 장기적인 대책을 수립할 수 있는 모니터링이 필요할 것이다.

## 결 언

1. 석회질암이 모암을 이루는 상곡 및 금실광산 부근의 지표수가 변성퇴적암류 또는 화강암질암이 분포하는 장풍 및 삼덕광산 수계의 지표수보다 pH가 높고  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  및  $\text{HCO}_3^-$ 의 함량이 많으며  $\delta\text{D}$ 와  $\delta^{18}\text{O}$ 의 조성 또한 무거운 특징이 있다. 그러나 이 지표수들은 광산폐수의 혼합에 의하여 거의 동일한 지구화학적 진화경향을 보인다.
2. 연구지역에 분포하는 대부분의 지표수는  $\text{Ca}^{2+}$ , 알칼리 원소,  $\text{NO}_3^-$  및  $\text{Cl}^-$ 이 풍부하나, 광산부근의 지표수로 갈수록 상대적으로  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , 중금속 원소,  $\text{HCO}_3^-$  및  $\text{SO}_4^{2-}$ 가 부화되어 있다. 또한 비광산 지역의 지표수에 비하여 광산수계의 물에서 pH는 낮고 EC와 TDS는 상당히 높다.
3. 이 물들의  $\delta\text{D}$ 와  $\delta^{18}\text{O}$ (SMOW) 값은 각각 -65.0~-71.2‰ 및 -9.1~-10.2‰의 범위를 보이며, d 값( $\delta\text{D}-8\delta^{18}\text{O}$ )은 7.3~10.9이다. 이  $\delta\text{D}$ 와  $\delta^{18}\text{O}$  비는 비광산 지역의 지표수보다 광산수계의 물에서 무거운 값을 갖는다. 이들의 조성변화는 TDS,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  및  $\text{Ca}^{2+}$ 의 함량과 양의 상관관계를 보여준다.
4. 지구화학적 모델링을 통하여 규명된 잠재적 독성원소들의 대부분은 광산수계의 지표수에서 황산염( $\text{MSO}_4^-$ ) 또는 단독 양이온( $\text{M}^{2+}$ )으로 존재하나, 비광산 지역의 지표수에서는 탄산염( $\text{CO}_3^-$ ) 또는 수산화물( $\text{OH}^-$ ) 상태의 복합 음이온으로 존재할 것으로 나타났다.
5. WATEQ4F를 이용하여 포화지수를 계산해 볼 때, 광산수계에서 사장석, 방해석, 돌로마이트 및 점토광물들은 대부분 용해성 조건을 지나 하류로 가며 비광산 수계의 지표수가 유입됨에 따라 점진적으로 평형상태로 변한다. 그러나 대부분의 지표수에서는 거의 모든 광물종이 포화상태 또는 침전조건을 나타낸다.

## 사 사

이 연구는 한국과학재단 지원의 특정기초연구(과제번호: KOSEF-99-2-221-004-5)에 의하여 완성되었음을 명기한다. 화학분석과 자료의 해석에 많은 도움을 주신 한국원자력연구소의 고용권 박사, 고려대학교 전략광물자원연구센터의 박성숙, 권순화 및 이창환 석사께 감사한다. 또한 원고를 심사하여 주시고 보다 향상된 논문을 위하여 예리한 지적과 건설적인 비평을 하여주신 익명의 심사위원께도 사의를 표한다.

참고문헌

김규한, Nakai, N., 1988, 남한의 지하수 및 강수의 안정동위원소 조성. 지질학회지, 24, p. 37-46.

대한광업진흥공사, 1977, 광상시추조사보고, p. 184-185.

대한광업진흥공사, 1979, 광상시추조사보고, p. 839-840.

박성숙, 윤성택, 소철섭, 1988, 신 H/Device를 이용한 자연수의 수소동위원소비 측정. 자원환경지질, 31, p. 265-271.

성익환, 추창오, 조병욱, 이병대, 김통권, 이인호, 1998, 선캄브리아기 변성암 지역에 분포하는 먹는 샘물 지하수의 수리화학적 특성. 지하수환경, 5, p. 203-209.

유재영, 최인규, 김형수, 1994, 춘천지역의 기반암 종류에 따른 지표수의 지구화학적 특성. 지질학회지, 30, p. 307-324.

윤성택, 채기탁, 고용권, 김상렬, 최병영, 이병호, 김성용, 1998, 풍기 지역 지하수의 수리지구화학 및 환경동위원소 특성 연구. 지하수환경, 5, p. 177-191.

이종운, 김선준, 전용원, 1996, 영천 도수터널 주변 지하수의 수리지구화학. 한국자원공학회지, 33, p. 210-224.

이현구, 이찬희, 1998, 충주호 상류, 상곡광산 수계에 분포하는 토양과 하상퇴적물의 중금속 오염. 지하수환경, 5, p. 10-20.

정찬호, 황 정, 박충화, 1998, 공주시 유구읍 명곡리지역 천부 및 심부지하수의 지화학적 수질특성과 오염. 자원환경지질, 31, p. 485-498.

Ball, J.W. and Nordstrom, D.K., 1992, User manual for WATEQ4F, with revised thermodynamic data base and test cases for calculating speciation of major, trace and redox elements in natural waters. USGS, Open File Report, 91-183, 189p.

Bigham, J.M., Schwertmann, U., Traina, S.J., Winland, R.L. and Wolf, M., 1996, Schwertmannite and the chemical modeling of iron in acid sulfate waters. Geochim. Cosmochim. Acta, 60, p. 2111-2121.

Choi, K.-J., Yun, S.-T. and So, C.-S., 1997, Fluid inclusion and stable isotope studies of the Kwangsin Pb-Zn deposits. Econ. Environ. Geol., 30, p. 505-517.

Coleman, M.L., Shepherd, T.J., Druham, J.J., Rouse, J.E. and Moore, G.R., 1982, Reduction of water with zinc for hydrogen isotope analysis. Anal. Chem., 54, p. 993-995.

Craig, H., 1961, Isotopic variations in meteoric waters. Sci., 133, p. 993-995.

Drever, J.I., 1988, The geochemistry of natural waters. 2nd ed., Prentice-Hall, New Jersey, 438p.

Gibbs, R.J., 1970, Mechanisms controlling world water chemistry. Sci., 170, p. 1088-1090.

Gorham, E., Underwood, J.K., Martin, F.B. and Ogden, A.J.III., 1986, Natural and anthropogenic causes of lake acidification in Nova Scotia. Nature, 324, p. 451-453.

Helgeson, H.C., 1969, Thermodynamics of hydrothermal system at elevated temperatures and pressures. Amer. Jour. Sci., 267, p. 729-804.

Jeong, C.-H., Koh, Y.-K., Kim, S.-J., Kim, C.-S., 1995, Hydrogeochemistry and water-rock interaction in the gneiss of the Samkwang mine area. Jour. Geol. Soc. Kor., 31, p. 91-105.

Kendall, C. and Coplen, T.B., 1985, Multisample conversion of water to hydrogen by zinc for stable isotope determination. Anal. Chem., 57, p. 1438-1440.

Koh, Y.-K., Kim, C.-S., Bae, D.-S. and Yun, S.-T., 1998, Geochemical modeling of groundwater in granitic terrain : the Yeongcheon area. Jour. Kor. Soc. Groundwater Environ., 5, p. 192-202.

Mayo, A.L. and Klauk, R.H., 1991, Contributions to the solute and isotopic groundwater geochemistry, Antelope Island, Great Salt Lake, Utah. Jour. Hydrol., 127, p. 307-335.

Mayo, A.L., Nielsen, P.S., Loucks, M. and Brimhall, W.H., 1992, The use of solutes and isotope chemistry to identify flow patterns and factors which limit acid mine drainage in the Wasatch Range, Utah. Ground Water, 30, p. 243-249.

Nesbitt, H.W., 1977, Estimation of the thermodynamic properties of Na-, Ca-, and Mg-beidellites. Can. Miner., 15, p. 22-30.

Nordstrom, D.K. and Ball, J.W., 1986, The geochemical behavior of aluminium in acidified surface waters. Sci., 232, p. 54-56.

Nordstrom, D.K. and Munoz, J.L., 1986, Geochemical thermodynamics. Blackwell Sci. Pub. Co., 477p.

Nriagu, J.O. and Pacyna, J.M., 1988, Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soil by trace metals. Nature, 333, p. 134-139.

Pacheco, F. and Weijden, C.H., 1996, Contributions of water-rock interactions to the composition of groundwater in areas with a sizable anthropogenic input: a case study of the waters of the Fundao area, central Portugal. Water Resour. Resear., 32, p. 3553-3570.

Piper, A.M., 1944, A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. Trans. Amer. Geophys. Union, 25, p. 914-923.

So, C.-S. and Yun, S.-T., 1992, Geochemistry and genesis of hydrothermal Au-Ag-Pb-Zn deposits in the Hwanggangri mineralized district, Republic of Korea. Econ. Geol., 87, p. 2056-2084.

Stauffer, R.E. and Wittchen, B.D., 1991, Effects of silicate weathering on water chemistry in forested, upland, felsic terrane of the USA. Geochim. Cosmochim. Acta, 55, p. 3253-3271.

Tardy, Y., 1971, Characterization of the principal weathering types by the geochemistry of waters from some European and African crystalline massifs. Chem. Geol., 7, p. 253-271.

Taylor, H.P.Jr., 1974, The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition. Econ. Geol., 69, p. 843-883.

Truesdell, A.H. and Hulston, J.R., 1980, Isotopic evidence on environments of geothermal systems. In Fritz, P. and Fontes, J.Ch. Eds., Handbook of environmental isotope geochemistry, Vol. 1, The terrestrial environment. Elsevier, Amsterdam, p. 179-226.

Wetzel, R.G. and Likens, G.E., 1991, Limnological analysis. 2nd ed., Springer-Verlag, New York, 391p.

Yu, J.-Y., 1996, Pollution of Osheepcheon creek by abandoned coal mine drainage in Dogyae area, eastern part of Samcheok coal field, Kangwon-Do, Korea. Environ. Geol., 27, p. 286-299.

Yun, S.-T., Koh, Y.-K., Kim, C.-S. and So, C.-S., 1998, Geochemistry of geothermal waters in Korea: Environmental isotope and hydrochemical characteristics I. Bugok area. Econ. Environ. Geol., 31, p. 185-199.