

나림광산 수계에 분포하는 순환수의 수문지구화학 및 오염

이찬희* · 이현구* · 이종창* · 고용권**

Hydrogeochemistry and Contamination of Meteoric Water at the Narim Mine Creek, Korea

Chan Hee Lee*, Hyun Koo Lee*, Jong Chang Lee* and Yong-Kwon Koh**

ABSTRACT: The Narim gold mine is located approximately 200 km southeast of Seoul within the Muju mineralized district of the Sobaegsan gneiss complex, Korea. Environmental geochemistry were undertaken for various kinds of water (surface, ground and mine water) collected of April, September and November in 1998 from the Narim mine creek. Hydrogeochemical compositions of water samples are characterized by the relatively significant enrichment of Na+K, alkali ions, HCO_3 , NO_3 , Cl and F in groundwater, whereas the mine and surface waters are relatively enriched in Ca+Mg, heavy metals and SO_4 . Therefore, the groundwaters belong to the (Na+Ca)- HCO_3 type, and the peripheral water of the mining and ore dump area have the characteristics of the (Ca+Mg)-(HCO_3 + SO_4) type, respectively. The pH and EC values of the non-mining creek surface waters are relatively lower compared with those of the surface water of the mine and ore dump area. The d values (δD - $8\delta^{18}\text{O}$) of all kinds of water from the Narim mine creek are 5.8 to 13.1. The range of δD and $\delta^{18}\text{O}$ values (relative to SMOW) are shown in distinct two groups as follows: for the April waters of -64.8 to -67.8‰ and -9.6 to -10.0‰ (d value=10.1 to 13.1), and for the November waters of -65.9 to -70.2‰ and -9.3 to -9.6‰ (d value=5.8 to 7.9), respectively. This range variation indicates that two group water were composed of distinct waters with seasonal difference. Geochemical modeling showed that mostly toxic metals (As, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn) may exist largely in the form of metal (M^{2+}) and metal-sulfate (MSO_4^{2-}), and SO_4^{2-} concentration influenced the speciation of heavy metals in the meteoric water. These metals in the groundwater could be formed of CO_3 and $(\text{OH})_3$ complex ions. Using computer program, saturation index of albite, calcite, dolomite in meteoric water show undersaturated and progressively evolved toward the saturation state, however, ground and mine water are nearly saturated. The gibbsite, kaolinite and smectite are supersaturated in the surface, mine and ground water, respectively. Calculated water-mineral reaction and stabilities suggest that the weathering of silicate minerals may be stable kaolinite, illite and Na-smectite. The clay minerals will be transformed to more stable kaolinite owing to the continuous reaction.

서 언

폐광산에서 유출되는 갯내수는 생태계의 점오염원으로서 상당한 시간동안 수계를 따라 이동하며 지각 구성물질 또는 인공구조물을 파괴하고, 이들과 반응하여 유해중금속을 부화시킨다. 이들의 오염문제는 각국의

많은 전문가에 의하여 다각적으로 심도 있는 연구가 수행되고 있다. 국내에서도 지표수, 지하수 및 지열수의 환경수리지구화학적 연구가 활발하여 폐탄광수계의 수질오염 (Yu, 1996; 허봉, 유재영, 1998; 전효택 등, 1998), 온천지역의 지열수와 지하수 (Koh *et al.*, 1994; 김규한, 최현정, 1998; Yun *et al.*, 1998), 심부 지하수 및 지표수와 기반암의 물-암석 반응 (유재영 등, 1994; Jeong *et al.*, 1995), 산업 및 상업 시설과 관련된 지하수 (이종운 등, 1996; 이두호, 전효택, 1997; 전효택 등, 1997; 정찬호 등, 1998) 등이 많이 연구되고 있다. 금속광산 주변에 분포하는 지표수와 지하수

* 충남대학교 지질학과 (Department of Geology, Chungnam National University, Taejon 305-764, Korea), E-mail: chanlee@hanbat.chungnam.ac.kr

** 한국원자력연구소 (Korea Atomic Energy Research Institute, Taejon 305-606, Korea)

의 수문지구화학적 환경 (Woo, Choi, 1998)에 관하여도 보고된 바 있으나 앞으로도 많은 연구가 필요할 것으로 보인다.

나립광산은 충북 영동군 용화면과 전북 무주군 설천면의 접경에 위치하며, 이 지역은 소규모의 금-은 광산이 밀집 분포하여 하나의 광상구 (무주 또는 설천 금-은 광상구)를 이루고 있다. 광상들은 선캄브리아기의 편마암류를 관입한 백악기의 반상화강암체를 중심으로, 화강암체내에는 용화광산과 월전광산이, 화강암체의 주변부에는 월성광산, 나립광산 및 길영광산이 위치한다. 광상 부근의 지질, 반상화강암의 암석학적 특성, 광상과 광석의 산출상태 및 생성환경에 대하여는 윤석규, 박병권 (1968), 윤석태, 박희인 (1991; 1993; 1995; 1997), So *et al.* (1994)의 연구가 있다. 이찬희 등 (1998)은 이 광산의 수계에 분포하는 토양과 퇴적물을 대상으로 중금속원소의 분산, 부화 및 기원을 연구한 바 있다.

이 광산은 한때 우인광산 또는 수왕광산으로도 불리던 곳으로서, 광산부근에는 소규모의 선광장과 광폐석 및 광미가 방치되어 있다. 폐갱도에서 유출되는 갱내수는 아무런 여과없이 하천을 따라 상수원 및 농경지로 유입되고 있는 실정이다. 광산의 수계에는 회백색 또는 황갈색의 침전물들이 있어 시각적으로도 중금속의 오염이 진행되고 있음을 보여준다. 이 연구에서는 나립광산 부근에 발달하는 수계를 광산수계 (광상, 선광장, 광석 및 광미 야적장이 분포하는 수계)와 비광산수계 (광화작용 및 광산활동이 없는 수계)로 나누어 지표수, 갱내수 및 지하수를 채취하여 분석하였고, 광업활동과 폐광에 따른 환경적 독성원소들의 오염상태와 이들의 환경지구화학적 특성을 고찰하였다.

지질환경 및 연구방법

환경지질학적 배경

광상부근의 지질은 선캄브리아기의 소백산 편마암 복합체와 각섬암, 운모편암 및 이를 관입한 백악기의 반상화강암, 염기성 및 중성-산성의 맥암류로 구성되어 있다 (이찬희 등, 1998; Fig. 1. 참조). 이 지역의 소백산 편마암 복합체는 우백질 편마암, 혼성편마암 및 화강편마암으로 구성되며 운모편암, 규암 및 각섬암이 협재한다. 설천 및 무주도폭 (윤석규, 박병권, 1968; 홍승호 등, 1980)에서는 이 편마암 복합체를 호상 혹은 모편마암 또는 주입편마암으로 기재하였으나, 송용선

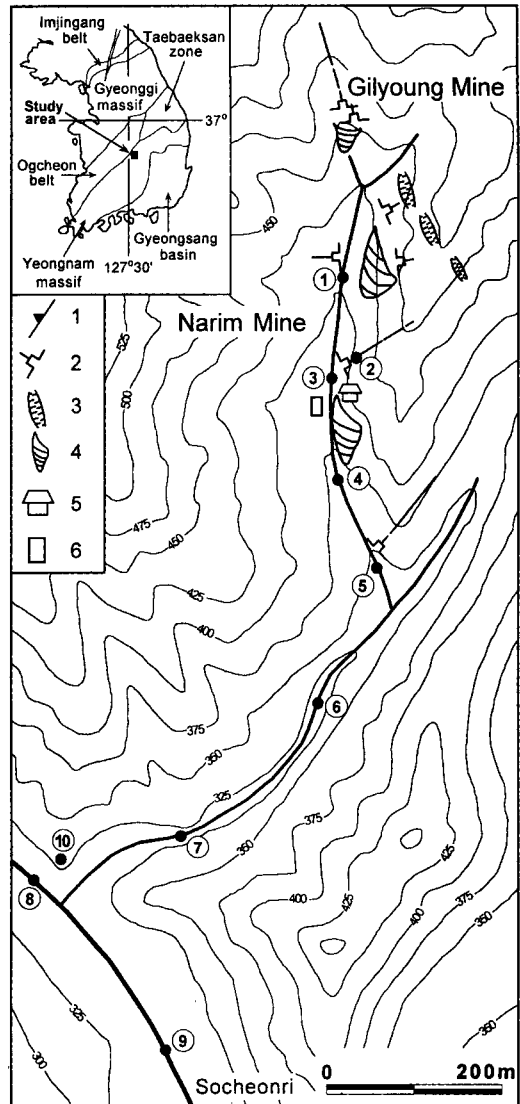


Fig. 1. Sample location map of the Narim mine area, Korea. 1; foliation, 2; adit, 3; trench, 4; ore dump, 5; dressing plant, 6; mine office.

(1987)은 사질기원 준편마암으로 설명하였다. 반상화강암은 나립광산의 서쪽에 분포하며 동서로 1.5 km, 남북으로 2 km 정도의 타원형을 보이나, 광상부근에서는 암맥상으로 산출된다. 이 화강암체의 K-Ar 연령은 98.7 ± 3.60 Ma 이다 (윤석태, 박희인, 1991).

나립광산은 우백질 편마암, 화강편마암 및 중성-산성 맥암내에 발달한 N10°W의 주향과 58°SW의 경사를 갖는 제1맥과, N25°W의 주향과 76°NE의 경사를 갖는 제2맥으로 구성되어 있으며, 이를 개발하기 위하여 개

설한 제1 및 2갱이 있다. 제1갱은 일제시대부터 개발된 갱도로 알려져 있으나 입갱이 불가능하다. 제2갱의 광맥은 보통 30~100 cm의 폭을 가지나 부광부는 3 m에 달하며 연장은 150 m 정도이다. 이 광상에서는 자철석, 적철석 및 금홍석 등의 산화광물과 황철석, 유비철석, 자류철석, 백철석, 황동석, 섬아연석, 방연석 등의 황화광물이 산출된다. 또한 에렉트럼 (electrum), 자연은, 휘은석, 농홍은석 및 Ag-Sb 계열의 황염광물도 많이 산출된다.

맥석광물로는 석영, 옥수질 석영, 방해석, 능철석, 앵커라이트 (ankerite) 및 중정석이 관찰된다. 광맥과 접하는 화강편마암 및 염기성 맥암의 열수변질대에는 견운모화, 녹니석화 및 점토광물화 되어 있으며, 부분적으로 녹색을 띠는 크롭 견운모 (이현구, 이찬희, 1997)가 광석과 함께 농집되어 있다. 이 견운모의 K-Ar 연령은 97.1 ± 3.60 Ma 로서, 광화작용은 반상화강암과 시공간적으로 밀접한 관계를 갖는 것으로 보인다. 광상에서 산출되는 광석과 맥석광물, 안정동위원소 및 유체포유물 등에 관하여는 상세히 연구된 바 있다 (윤석태, 박희인, 1997).

시료채취 및 분석

나립광산 하류에 발달하는 수계에서 지표수, 갱내수 및 지하수를 채취하였다. 지하수는 광산활동의 영향권 내에 분포하며 인근 주민의 식수로 이용되고 있는 시료를 선택하였으며, 비교를 위하여 광화작용 또는 광산활동이 전혀 없었던 수계에서 지표수를 채취하였다 (Fig. 1). 또한 이들의 계절적 변화를 규명하기 위하여 동일위치에서 3회 (1998년 4월, 9월, 11월)에 걸쳐 시료를 채취하였다. 이 시료들에 대하여 수문지구화학적 특성을 규명할 수 있는 물리적 특성, 음이온, 양이온 및 환경동위원소를 분석하였다. 이 결과는 분석과정에서 필수적인 신뢰도 측정을 이용하여 평가되었다. 중복시료와 참고시료를 이용하여 평가한 정확도와 정밀도는 10 % 미만으로 분석되었다.

순환수의 온도 (°C), 수소이온농도 (pH), 산화-환원 전위 (Eh; mV)와 전기전도도 (EC, electric conductivity; $\mu\text{S}/\text{cm}$)는 시료채취와 동시에 측정하였다. 측정은 완충용액 (pH=4, 7, 10)으로 보정하여, HANNA instruments의 potable pH-Eh 및 EC 측정기를 이용하였다. 분석한 모든 시료들은 0.45 μm 공극의 셀룰로오스 나이트레이트 필터 (cellulose nitrate filter)를 이용한 수동펌프로 부유물질을 완전히 제거하고, 음이온

및 양이온 측정시료로 나누어 각각 폴리프로필렌 (polypropylene) 병에 담아 분석시까지 냉장 보관하였다. 양이온 측정시료는 용기에 금속이온이 흡착되는 것을 방지하기 위하여 6N 질산 (HNO_3)을 투여하여 pH를 2 이하로 유지하였다. 시료채취, 현장분석 및 전처리 방법 등의 상세한 내용은 Greenberg *et al.* (1992)를 참고하였다.

지하수의 음이온 및 양이온 분석은 고려대학교 전략광물자원연구센터와 충남대학교 공동실험실습관의 이온 크로마토그래피 (IC; Model Dionex 120), 유도결합 아르곤 플라즈마 방출 분광분석기 및 질량분석기 (ICP-AES; Model Perkin-Elmer Optima 3000XL 및 ICP-MS; Model Perkin-Elmer Elan 6000)를 이용하였다. 음이온중 HCO_3^- 는 0.05 mole의 HCl로 적정된 것이며, 용존고형물 (TDS; total dissolved solids)의 총량은 분석된 이온을 합산한 것이다.

지하수의 환경동위원소 ($\delta^{18}\text{O}$ 및 δD) 분석은 한국원자력연구소의 안정동위원소 질량분석기 (Gas/Isotope Ratio Mass Spectrometry; Model VG Isotec Prism II)를 이용하였다. 산소동위원소비는 시료와 동위원소 교환반응을 거친 CO_2 가스를, 수소동위원소비는 아연 촉매제를 사용한 환원상태의 수소 가스를 추출하여 분석하였다. 분석절차는 Coleman *et al.* (1982) 및 Kendall, Coplen (1985)의 방법을 적용하였다. 이 연구에서 분석된 $\delta^{18}\text{O}$ 와 δD 는 모두 SMOW로 표시하였으며 표준편차는 각각 ± 0.1 및 ± 0.5 ‰ 이다.

결과 및 토의

물리화학적 특성

연구지역의 순환수에 관한 현장측정 (온도, pH, Eh, EC) 결과는 Table 1과 같다. 측정된 모든 순환수의 pH는 6.20~8.39의 범위이며, Eh는 -94~16 mV로서 일반적인 자연수의 범위와 비슷하다. 그러나 비광산 지역의 계곡수에서 광산부근의 지표수로 갈수록 pH는 증가하고 Eh는 감소한다. 계절 (4월; 6.63, -7 mV, 9월; 7.49, -45 mV, 11월; 7.25, -17 mV)에 따라서도 차이가 있어, 일부 지표수 및 갱내수는 오염에 의한 환원 환경에 노출되어 있기도 하다.

지표수와 갱내수의 평균 온도는 4월 시료가 7.3°C, 9월 시료 19.7°C, 11월 시료는 5.5°C로서 계절적 차이가 심하나, 지하수의 온도 (평균 11.4°C)는 계절에 따라 큰 편차를 갖지 않았다. 지하수와 비광산 지역 지

Table 1. Selected physicochemical properties and anion compositions of meteoric water from the Narim mine creek.

No.	sample descriptions	sampling date	pH	T (°C)	Eh (mV)	EC (µS/cm)	HCO ₃ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	PO ₄ (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	F (mg/l)	TDS* (mg/l)	δ D (‰)	δ ¹⁸ O (‰)	d(δD-8 δ ¹⁸ O)
NR-1	surface water near the open pit and ore dump	980402	6.61	7.6	-4	197	10.071	3.146	nd	62.075	0.046	117.192	-65.3	-9.8	13.1
		980926	6.87	21.4	-11	151	21.357	0.623	nd	48.420	0.086	102.818	na	na	na
		981120	7.05	6.3	-7	815	56.444	0.860	nd	74.061	0.096	187.016	-68.1	-9.5	7.9
NR-2	mine water from the main adit	980402	7.02	8.6	-26	208	10.682	4.329	nd	67.846	0.034	138.241	-66.2	-9.8	12.2
		980926	8.09	16.4	-78	489	175.433	0.956	nd	127.905	0.819	409.523	na	na	na
		981120	8.39	3.7	-67	1340	186.111	1.071	nd	101.641	0.812	392.759	-65.9	-9.2	7.7
NR-3	mine water of retention pond near the main adit	980402	7.28	6.9	-39	318	111.075	1.276	nd	63.281	0.584	250.205	-66.7	-9.6	10.1
		980926	7.67	20.1	-56	439	154.076	0.741	nd	107.931	0.673	356.299	na	na	na
		981120	7.75	5.5	-39	1415	169.941	1.018	nd	104.092	0.739	372.704	na	na	na
NR-4	surface water near the ore dump	980402	6.71	6.6	-9	221	21.064	3.441	nd	69.111	0.112	146.301	-65.9	-9.7	11.7
		980926	7.51	18.0	-47	332	82.377	6.703	nd	95.906	0.257	253.841	na	na	na
		981120	7.60	8.9	-32	1080	106.785	1.147	nd	91.021	0.334	272.575	na	na	na
NR-5	surface water of the mining creek	980402	6.69	7.7	-10	187	18.317	5.083	nd	53.332	0.090	126.831	-65.6	-9.7	12.0
		980926	7.59	18.0	-50	193	50.342	4.442	nd	43.245	0.154	141.243	na	na	na
		981120	7.38	6.4	-24	289	82.377	6.542	nd	71.018	0.229	224.315	-68.5	-9.3	5.9
NR-6	surface water of the mining creek	980402	6.26	8.1	13	92	12.201	3.574	nd	17.098	0.048	58.447	-64.8	-9.7	12.8
		980926	7.27	18.3	-33	169	40.273	4.186	nd	39.119	0.134	123.128	na	na	na
		981120	6.93	5.4	-3	155	41.189	4.166	nd	33.508	0.128	115.968	na	na	na
NR-7	surface water of the mining creek	980402	6.44	7.2	-2	91	11.902	4.829	nd	15.445	0.054	67.085	na	na	na
		980926	7.06	23.3	-21	142	36.612	0.811	nd	37.197	0.077	108.896	na	na	na
		981120	6.70	4.8	5	143	36.612	4.269	nd	31.360	0.108	107.115	na	na	na
NR-8	surface water of the confluent creek	980402	6.20	6.6	16	86	10.075	6.870	nd	11.825	0.037	53.713	-65.1	-9.6	11.7
		980926	7.35	21.5	-37	93	27.459	9.933	nd	9.016	0.068	71.270	na	na	na
		981120	7.08	4.7	-9	83	22.883	5.894	nd	7.470	0.060	58.728	-69.8	-9.6	7.0
NR-9	surface water of the non-mining creek	980402	6.30	6.5	10	70	7.934	5.312	nd	4.482	0.038	54.855	-67.8	-10.0	12.2
		980926	7.08	20.3	-23	93	27.764	4.961	nd	7.628	0.078	65.348	na	na	na
		981120	6.63	4.1	8	87	15.765	4.269	nd	6.970	0.067	48.698	-69.7	-9.6	7.1
NR-10	groundwater (75 m deep) of the mining creek	980402	6.78	10.5	-14	283	94.583	22.333	nd	22.600	1.898	229.549	-67.6	na	na
		980926	8.39	14.9	-94	383	183.060	10.184	nd	16.581	5.343	310.673	na	na	na
		981120	6.99	8.7	-5	294	117.464	17.648	nd	25.298	2.087	240.680	-70.2	-9.5	5.8

nd=not detected, na=not analyzed, *=total dissolved solids

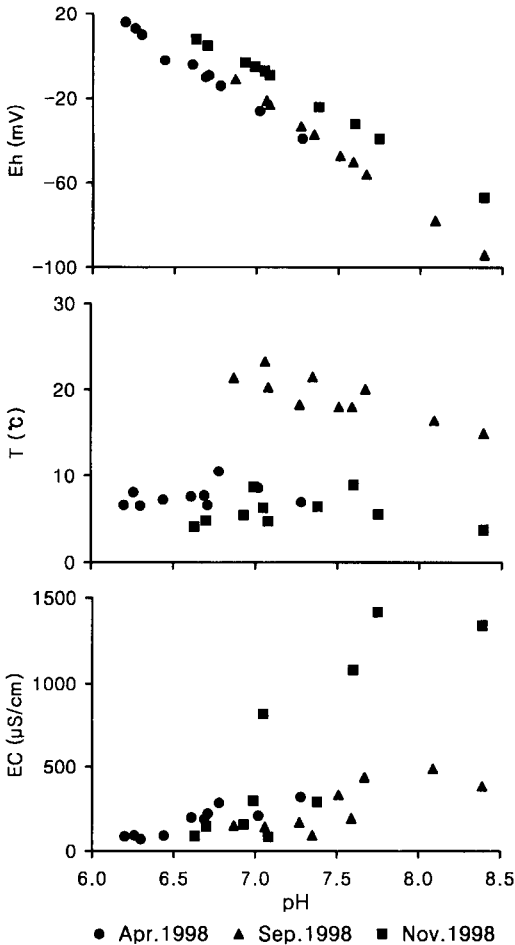


Fig. 2. Plot of correlation between Eh, T and EC versus pH for meteoric water from the Narim mine creek.

표수의 전기전도도 (EC)는 평균 320 및 83 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로서 계절적 차이가 미약하나, 지하수에서 월등히 높다. 광산부근 지표수 및 갭내수의 EC는 최대 1415 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로서 높은 값을 갖는다. 이는 계절적 차이도 심하여 시간이 경과될수록 급격히 증가하고, 하류로 가면서 낮아지는 특성을 보인다 (Fig. 2).

지하수에 함유되어 있는 용존 음이온의 평균함량은 $\text{HCO}_3=131.70$, $\text{Cl}=7.89$, $\text{F}=3.11$, $\text{NO}_3=16.72$ 및 $\text{SO}_4=21.49 \text{ mg/l}$ 로서, 비광산 지역의 지표수 ($\text{HCO}_3=17.15$, $\text{Cl}=4.40$, $\text{F}=0.06$, $\text{NO}_3=4.85$ 및 $\text{SO}_4=6.63 \text{ mg/l}$)와는 전혀 다른 화학적 성질을 가지나, 계절에 따른 차이는 크지 않다 (Table 1). 광산지역의 지표수 또는 갭내수의 HCO_3 와 SO_4 의 최대함량은 각각 186.11 및 127.91 mg/l 으로서 비광산 수계의 지표수에

비하여 아주 높은 함량을 갖는다. 또한 4월 시료에 비하여 9월과 11월 시료가 높은 함량을 가지며, 수계의 하류로 갈수록 급격히 낮아지는 경향을 보인다. 그러나 Cl , F 및 NO_3 의 함량은 갭내수 보다 지하수에서 높고, 모든 시료에서 Br 과 NO_2 및 PO_4 는 검출되지 않았다.

주성분 양이온의 평균함량은 지표수 ($\text{Ca}=7.10$, $\text{K}=1.43$, $\text{Mg}=2.06$, $\text{Na}=3.66$, $\text{Si}=4.42 \text{ mg/l}$)에 비하여 지하수 ($\text{Ca}=20.03$, $\text{K}=2.78$, $\text{Mg}=4.69$, $\text{Na}=42.98$, $\text{Si}=7.48 \text{ mg/l}$)가 월등히 높다. 모든 양이온의 함량은 광산지역의 갭내수 (최대함량; $\text{Ca}=52.54$, $\text{K}=2.95$, $\text{Mg}=25.55$, $\text{Na}=9.93$, $\text{Si}=9.58 \text{ mg/l}$)로 가면서 급격히 증가하며, Zn 의 함량은 최대 4.05 mg/l 가 검출되기도 하였다. 이들의 함량도 계절적 차이가 있었으며 Zn 을 제외한 대부분의 양이온은 시간이 경과하면서 9월 및 11월 시료에서 많이 용출되었으나 Co , Cr , Mo , Sb , Se 및 V 는 대부분 검출한계 미만이고, 일부 시료에서만 극미량 검출되었다 (Table 2).

수문지구화학적 특성

순환수의 유형과 진화경향을 알아보기 위하여 특징적인 양이온과 음이온을 선택하여 Piper (1944)의 삼각도에 표시하였다 (Fig. 3). 지하수의 양이온 특성은 $\text{Na}+\text{K}$ 형에 속하나, 광산지역의 지표수와 갭내수로 가며 $\text{Ca}+\text{Mg}$ 형으로 변하는 것을 볼 수 있다. 계절에 따른 차이는 미약하나 9월 및 11월 시료에서 상대적으로 Ca 가 결핍되고 Mg 가 부화되어 있다. 지하수의 음이온은 HCO_3 형에 걸쳐 분포하나, 광산지역의 지표수와 갭내수로 가면서 HCO_3+Cl 형에서 HCO_3+SO_4 및 SO_4 형으로 변한다. 또한 계절에 따른 차이도 심하여 4월 시료에서 상대적으로 $\text{Cl}+\text{SO}_4$ 의 함량이 높았다. 따라서 연구지역의 지하수는 ($\text{Na}+\text{K}$)- HCO_3 형에 속하나, 광업활동이 있었던 부근의 지표수로 가며 ($\text{Ca}+\text{Mg}$)-(HCO_3+SO_4) 형으로 진화하고 있음을 알 수 있다.

연구지역 순환수의 특성을 반영하는 물리적 성질, 불-암석 반응으로 용해되기 쉬운 대표적인 이온 및 오염의 지표로 사용할 수 있는 분석치를 선택하여 수문지구화학적 특성을 검토하였다. Table 3에서 보는 바와 같이 4월과 9월 시료는 Cl 과 Ba 를 제외한 모든 물리화학적 특성들이 상호 명확한 비례 또는 반비례 관계를 보이고 있으며, 11월 시료에서는 거의 모든 원소가 명확한 대비를 보인다. pH가 증가함에 따라 온도는 증

Table 2. Selected cation compositions (mg/l) of meteoric water from the Narim mine creek.

No.	sampling	Al	As	Ba	Ca	Cd	Cu	Fe	K	Li	Mg	Mn	Na	Ni	Pb	Si	Sr	U	Zn
NR-1	980402	0.368	0.020	0.259	20.514	0.010	0.012	0.026	0.928	na	10.005	0.037	3.610	0.017	0.017	6.056	na	na	1.912
	980926	0.009	0.003	0.024	10.554	0.004	nd	nd	0.726	nd	6.575	nd	4.121	0.011	0.005	6.886	0.056	nd	1.119
	981120	0.005	0.001	0.045	23.782	0.002	nd	0.085	1.321	0.002	12.212	0.092	5.298	0.008	nd	8.360	0.176	0.006	1.019
NR-2	980402	0.181	0.003	0.154	26.946	0.009	0.004	0.039	1.194	na	11.104	0.014	3.296	0.018	0.019	5.828	na	na	3.762
	980926	nd	0.022	0.061	52.539	0.002	nd	0.026	2.919	0.017	25.546	0.087	9.913	0.035	nd	9.324	0.235	0.012	0.725
	981120	0.012	0.022	0.061	52.113	nd	nd	nd	2.950	0.017	24.699	0.043	9.927	0.028	nd	9.433	0.229	0.008	0.545
NR-3	980402	0.239	0.013	0.175	33.287	0.012	0.005	0.033	1.661	na	15.342	0.222	7.859	0.059	0.008	9.581	na	na	2.452
	980926	0.007	0.010	0.057	45.935	nd	nd	nd	2.595	0.012	22.965	0.170	8.635	0.019	nd	8.819	0.205	0.018	0.389
	981120	0.009	0.015	0.058	48.916	nd	nd	nd	2.725	0.015	23.511	0.024	8.970	0.023	nd	8.820	0.218	0.022	0.577
NR-4	980402	0.310	0.034	0.244	25.542	0.008	0.014	0.037	1.291	na	10.943	0.063	3.973	0.022	0.007	6.037	na	na	1.499
	980926	nd	0.001	0.043	31.907	0.001	nd	nd	1.598	0.001	15.992	nd	7.161	0.004	nd	7.745	0.172	0.004	0.166
	981120	0.012	0.002	0.039	35.481	nd	nd	nd	1.691	0.002	18.618	nd	7.061	0.007	nd	7.074	0.165	nd	0.404
NR-5	980402	0.361	0.023	0.252	23.427	0.005	0.005	0.052	1.159	na	8.899	0.046	3.502	0.015	0.057	6.196	na	na	3.150
	980926	nd	0.002	0.022	16.743	nd	nd	nd	1.280	nd	8.023	nd	5.889	nd	nd	7.544	0.093	nd	nd
	981120	nd	0.001	0.037	29.974	0.001	nd	nd	1.375	0.001	14.953	nd	6.666	0.003	nd	7.140	0.159	0.011	0.182
NR-6	980402	0.199	0.024	0.150	7.921	0.002	0.007	0.044	0.875	na	3.565	0.012	3.449	0.003	0.004	6.068	na	na	0.405
	980926	0.008	0.001	0.023	14.860	nd	nd	nd	1.178	nd	6.921	nd	5.809	nd	nd	7.086	0.084	0.003	nd
	981120	nd	0.001	0.017	14.064	nd	nd	nd	0.897	nd	6.762	nd	5.147	nd	nd	6.746	0.078	0.008	0.004
NR-7	980402	0.348	0.022	0.259	13.167	0.001	0.004	0.050	0.950	na	3.564	0.011	3.423	0.003	0.043	6.145	na	na	4.052
	980926	0.004	0.002	0.027	10.614	nd	nd	0.028	0.657	0.001	5.522	nd	5.490	0.001	nd	8.594	0.080	nd	0.124
	981120	nd	0.001	0.018	12.791	nd	nd	nd	0.975	nd	6.107	nd	5.048	nd	nd	6.428	0.072	0.003	0.021
NR-8	980402	0.288	0.022	0.227	12.632	nd	0.005	0.043	1.046	na	3.051	0.051	3.416	0.002	nd	5.733	na	na	0.277
	980926	0.010	0.002	0.012	7.930	nd	nd	0.028	1.732	nd	2.351	nd	4.365	nd	nd	4.396	0.054	0.004	nd
	981120	nd	0.002	0.009	6.584	nd	nd	nd	1.213	nd	2.027	nd	3.759	nd	nd	4.258	0.045	0.002	0.060
NR-9	980402	0.325	0.023	0.250	7.431	nd	0.005	0.051	1.337	na	2.157	0.172	3.171	0.001	0.046	4.995	na	na	nd
	980926	0.010	0.001	0.012	7.552	nd	nd	0.031	1.742	nd	2.156	nd	4.175	nd	nd	4.203	0.053	nd	nd
	981120	nd	nd	0.009	6.304	nd	nd	0.006	1.207	nd	1.860	nd	3.623	nd	nd	4.095	0.046	0.007	nd
NR-10	980402	0.312	0.014	0.198	27.806	nd	0.006	0.037	2.802	na	5.828	0.003	27.817	0.001	0.040	9.460	na	na	0.025
	980926	0.013	0.002	0.008	11.909	nd	nd	nd	2.462	0.034	2.912	nd	67.793	nd	nd	5.933	0.298	0.006	nd
	981120	nd	0.006	0.024	20.371	nd	nd	0.055	3.088	0.015	5.316	nd	33.331	0.002	nd	7.049	0.263	0.007	0.791

Sample numbers and descriptions are the same as those of Table 1. nd=not detected, na=not analyzed

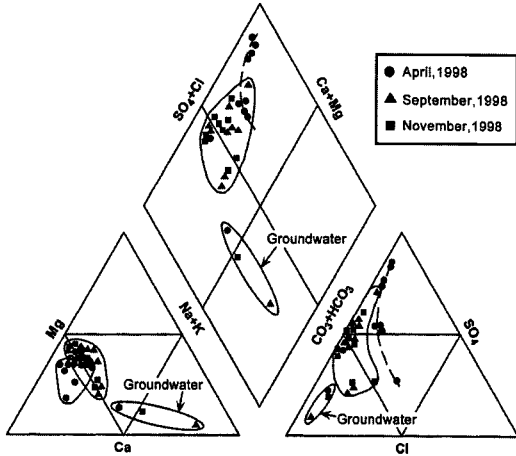


Fig. 3. Trilinear diagram for chemical compositions of meteoric water from the Narim mine creek.

가하는 경향이 있고 Eh는 감소하는 경향을 보이나 상관도는 낮다. 그러나 TDS와 EC의 관계는 거의 비례 관계를 가지며 특히 비광산 지역의 지표수에서 폐석장 및 갯도부근의 지표수로 가며 급격히 증가한다. 오염도를 지시하는 Ca, Mg, SO₄ 및 HCO₃를 기준으로 대표적인 음이온과 양이온의 상관관계를 보면, 이들이 증가함에 따라 모든 이온의 함량도 증가하며 비광산 지역의 지표수에서 폐석장 및 갯도부근의 지표수로 가며 양자 모두 급격히 증가하는 것을 알 수 있다.

한편 pH가 증가함에 따라 SO₄+HCO₃ 및 Ca+Mg는 명확한 양의 관계를 보였다. 그러나 NO₃+Cl은 지하수보다 지표수에서 월등히 낮았으며 지표수에서는 pH가 높아지면서 감소하는 경향이 뚜렷하였고, 중금속 함량 (As+Fe+Mn+Zn)은 4월 시료에서만 양의 관계를 보였다 (Fig. 4). 또한 pH와 HCO₃음이온 총량의

Table 3. Correlation matrices among physical and chemical constituents of meteoric water from the Narim mine creek.

(A) Water samples of April 2, 1998

	pH	EC	HCO ₃	NO ₃	SO ₄	Cl	TDS	Ba	Ca	K	Mg	Na	Si
pH	1.0000												
EC	.9385	1.0000											
HCO ₃	.7212	.7409	1.0000										
NO ₃	-.7027	-.7656	-.7134	1.0000									
SO ₄	.8363	.9029	.3828	-.6142	1.0000								
Cl	-.3503	-.3946	-.0304	.3637	-.5564	1.0000							
TDS	.9568	.9940	.7487	-.7478	.8885	-.3914	1.0000						
Ba	.0702	.1899	-.1406	-.1269	.3487	-.4619	.1889	1.0000					
Ca	.7542	.8698	.8892	-.7022	.6224	-.2147	.8676	.2524	1.0000				
K	.5738	.6188	.9438	-.5913	.2345	.1911	.6377	-.1364	.8497	1.0000			
Mg	.8481	.9375	.9026	-.8132	.7122	-.2358	.9292	.1448	.9702	.8234	1.0000		
Na	.7865	.7851	.9865	-.7378	.4543	-.0616	.7886	-.1894	.8639	.8989	.9081	1.0000	
Si	.8617	.8246	.8952	-.7338	.5825	-.3209	.8246	-.0982	.8029	.7050	.8693	.9341	1.0000

(B) Water samples of September 26, 1998

	pH	EC	HCO ₃	NO ₃	SO ₄	Cl	TDS	Ba	Ca	K	Mg	Na	Si
pH	1.0000												
EC	.8243	1.0000											
HCO ₃	.8545	.9748	1.0000										
NO ₃	-.4118	-.4842	-.6077	1.0000									
SO ₄	.7390	.9798	.9172	-.4110	1.0000								
Cl	-.0515	-.4328	-.3349	.3451	-.5508	1.0000							
TDS	.8312	.9979	.9851	-.5203	.9711	-.4160	1.0000						
Ba	-.1936	-.0174	-.1531	.2845	.0051	-.4288	-.0966	1.0000					
Ca	.8914	.9684	.9532	-.4749	.9295	-.3907	.9657	-.1463	1.0000				
K	.8323	.7773	.8663	-.4297	.6492	.1190	.7985	-.2172	.7769	1.0000			
Mg	.7979	.9985	.9713	-.4920	.9825	-.4669	.9963	-.0555	.9621	.7618	1.0000		
Na	.8461	.9649	.9739	-.6103	.9282	-.3799	.9752	-.2505	.9595	.7800	.9611	1.0000	
Si	.4614	.7321	.6653	-.6099	.7955	-.7992	.7240	-.0639	.7167	.2099	.7464	.7552	1.0000

Table 3. Continued.

(C) Water samples of November 20, 1998

	pH	EC	HCO ₃	NO ₃	SO ₄	Cl	TDS	Ba	Ca	K	Mg	Na	Si
pH	1.0000												
EC	.8436	1.0000											
HCO ₃	.9434	.9180	1.0000										
NO ₃	-.5284	-.8630	-.6389	1.0000									
SO ₄	.8336	.9219	.9046	-.7158	1.0000								
Cl	-.5506	-.7306	-.6605	.7337	-.8348	1.0000							
TDS	.9233	.9350	.9859	-.6714	.9627	-.7391	1.0000						
Ba	.3557	.6503	.5177	-.5378	.7639	-.6524	.6265	1.0000					
Ca	.9248	.9303	.9857	-.6596	.9608	-.7252	.9995	.6229	1.0000				
K	.9128	.8882	.9560	-.6174	.7848	-.4543	.9102	.3917	.9127	1.0000			
Mg	.9103	.9289	.9704	-.6718	.9784	-.7685	.9965	.6539	.9965	.8782	1.0000		
Na	.9281	.8818	.9891	-.6006	.9182	-.7178	.9857	.5240	.9851	.9091	.9767	1.0000	
Si	.7330	.8256	.8253	-.7098	.9133	-.8603	.8794	.6798	.8716	.6944	.8851	.8622	1.0000

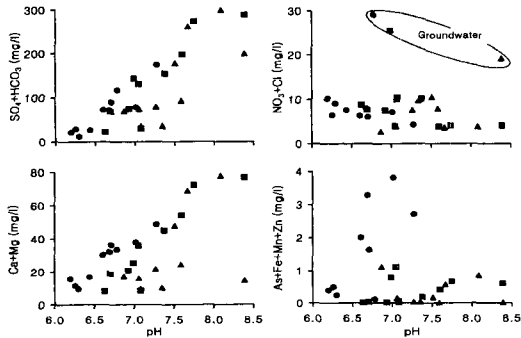


Fig. 4. Plot of correlation between contents of some major elements versus pH for meteoric water from the Narim mine creek. Symbols are the same as those of Fig. 3.

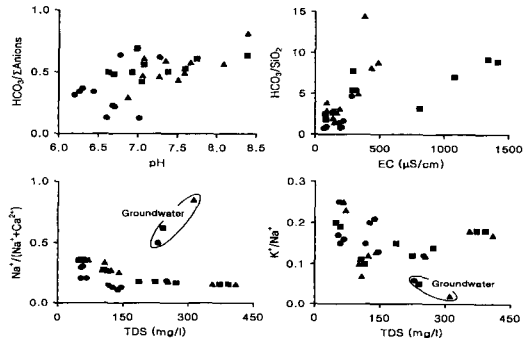


Fig. 5. Plot of correlation between some ratios of major elements versus pH, EC and TDS for meteoric water from the Narim mine creek. Symbols are the same as those of Fig. 3.

관계 및 EC와 HCO₃/SiO₂는 명확한 양의 관계를, TDS와 Na/(Na+Ca) 및 K/Na는 음의 관계를 갖는다 (Fig. 5), 따라서 연구지역의 순환수는 꾸준한 오염이 진행되고 있으며, 기반암과 충분한 교환반응을 갖지 못하고 단속적으로 공급되는 강수에 의하여 희석되고 있음을 보여주는 것으로 해석할 수 있다 (Gibbs, 1970).

이 지역의 순환수 환경에서 침전광물 및 용존이온의 안정도와 물-암석 반응을 알아보려고 WATEQ4F (Ball, Nordstrom, 1992)를 이용하여 열역학적 함수 (용존이온의 활동도, 평형상수, 용해도 상수 및 계수, 포화지수)들을 도출하였다 (Nordstrom, Munoz, 1986; Drever, 1988). 일반적으로 규산염광물의 물-암석 반응으로 생성되기 쉬운 광물조합은 깃사이트 (gibbsite), 스멕타이트 (smectite), 고령석 및 방해석이다. 이들은 보통 포화지수가 높을수록 pH는 낮아지는 역비례 관계를 갖는다. 각각의 자료에서 계산된 함수를 CaO,

K₂O, MgO 및 Na₂O와 Al₂O₃-SiO₂-H₂O 계의 열역학적 안정영역 (Helgeson, 1969; Nesbitt, 1977; 이종운 등, 1996)에, 연구지역의 순환수가 갖는 안정범위를 추정하여 보았다.

이 결과 연구지역의 순환수는 일반적으로 편마암류가 분포하는 지역의 순환수와 거의 유사하게 고령석, 일라이트 (illite), Na-스멕타이트 (smectite)가 안정함을 보여주었다 (유재영 등, 1994; Jeong et al., 1995). 이는 기반암 및 토양의 광물조성과도 동일한 것이나, 스멕타이트의 안정영역은 상대적으로 좁아 반응이 진행될수록 보다 안정한 고령석으로 변할 것이다. 또한 Al³⁺는 수용액 상태에서 이동도가 낮아 물과 반응하는 기반암의 규산염광물내 Al³⁺와 함께 깃사이트를 형성하여 거의 고체상태로 존재하게 된다 (Bricker, Garrels, 1967). 따라서 연구지역의 순환수-암석 반응으로 실제 깃사이트가 침전될 가능성은 거의 없고, 계절에 따른

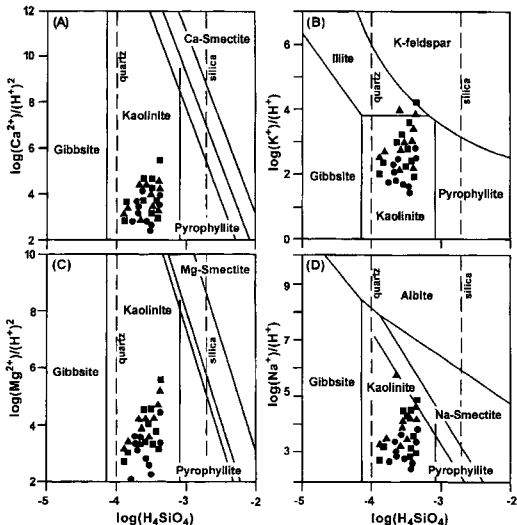


Fig. 6. Diagrams showing stability fields in the Ca- (A), K- (B), Mg- (C) and Na- (D) systems for meteoric water from the Narim mine creek. The boundaries between kaolinite, smectite, quartz and amorphous silica saturation lines are from Helgeson (1969), Nesbitt (1977) and Lee *et al.* (1996). Symbols are the same as those of Fig. 3.

차이점도 없을 것으로 보이며, 점토광물 중에 고령석이 안정하게 정출할 것으로 추정된다 (Fig. 6).

환경동위원소

이 지역의 순환수가 갖는 $\delta^{18}\text{O}$ 및 δD 값은 각각 $-9.3\sim-10.0\text{‰}$ 과 $-64.8\sim-70.2\text{‰}$ 로서 $d(\delta\text{D}-8\delta^{18}\text{O})$ 값 (5.8~13.1)의 편차가 크다 (Table 1). 이 자료는 모두 전 세계의 순환수가 갖는 평균치 ($\delta\text{D}=8\delta^{18}\text{O}+10$; Craig, 1961)에 근접하여 도시되는 것으로 보아 (Fig. 7), 강수기원으로서 암석과의 동위원소 교환반응이 거의 없었던 것으로 보인다. 그러나 계절적 차이가 심하여 4월 순환수의 δD 및 $\delta^{18}\text{O}$ 값은 각각 $-64.8\sim-67.8\text{‰}$ 과 $-9.6\sim-10.0\text{‰}$ 이며, d 값은 10.1~13.1이다. 11월 시료는 각각 $-65.9\sim-70.2\text{‰}$ 과 $-9.3\sim-9.6\text{‰}$ 이며 d 값은 5.8~7.9로서 4월의 순환수에 비하여 δD 는 결핍되고 $\delta^{18}\text{O}$ 는 부화되었다. 이는 동위원소 교환반응의 계절에 따른 온도효과로 해석할 수 있을 것이다.

물과 암석간의 동위원소 교환반응 정도는 분별계수를 좌우하는 시간, 속도, 온도, 용적비 및 동위원소의 조성차이에 따라 달라진다 (Taylor, 1974; Truesdell, Hulston, 1980). 그러나 이를 정량적으로 규명하기란 대단히 어려운 일이다. 한편 Mayo, Klauk (1991)와

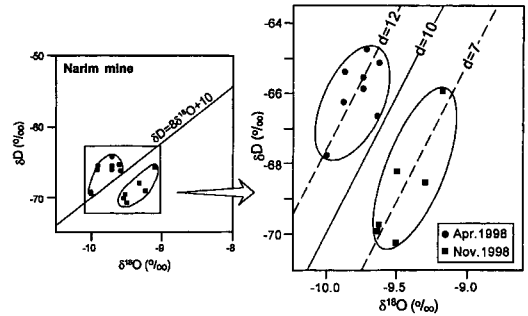


Fig. 7. Plot of δD versus $\delta^{18}\text{O}$ for meteoric water from the Narim mine creek.

Mayo *et al.* (1992)은 동일기원의 순환수와 하여도 암석과의 반응, 증발, 온도 및 염농도에 따라 산소편이 현상이 발생하는 것이 일반적이고, 비오염 지역에서 오염지역으로 갈수록 pH는 낮아지고 수소 및 산소의 동위원소 비는 무거워 진다고 하였다.

연구지역의 순환수는 비오염 지역에서 광산부근의 순환수로 갈수록 $\delta^{18}\text{O}$ 와 δD 값이 무거워 지나, pH는 오히려 증가하는 경향을 갖는다. 또한 4월 및 11월 시료에서 모두 나타나는 공통적인 특징이다. 이는 미세한 차이기는 하나 양자 모두 천이된 특징이 있는 것으로 보아 제한적인 범위내에서 순환수와 암석간의 동위원소의 교환반응이 있었음을 지시하는 것이거나 (Taylor, 1974), 아니면 단순한 고도효과 차이일 것으로 해석된다.

오염도 평가

오염원에 노출된 독성원소의 종분포를 확인하고자 WATEQ4F (Ball, Nordstrom, 1992)를 이용하여 As, Fe, Mn, Ni, Pb 및 Zn의 용존상태를 규명하였다. 광산부근의 지표수 및 갭내수에서는 모두 금속이온 단독 (M^{+2})으로 존재하는 것이 우세하며, 일부는 황산염과 결합된 경우 (MSO_4^{2-})가 있는 것으로 계산되었다. 또한 pH가 높고 SO_4^{2-} 의 함량이 높은 시료 및 상대적으로 11월 시료에서 MSO_4^{2-} 가 우세한 것으로 보아, SO_4^{2-} 의 농도가 순환수에 금속이온 중의 존재형태를 지배하고 있을 것으로 예측되었다. 비광산 수계의 지표수에서는 M^{2+} 가 주종을 이루고 있을 것으로 나타났으나, 지하수에서는 계절에 따른 차이가 없이 모두 CO_3 및 $(\text{OH})_2$ 의 착이온 (complex ion)을 형성하는 것이 우세한 것으로 계산되었다. 이와 같이 지하수암석 반응계에서 중금속들이 탄산 및 수산기와 착이온을 형성하는 것은 이들

Table 4. Selected saturation indices for mineral species of meteoric water from the Narim mine creek.

No.	sampling	adularia	albite	alunite	barite	calcite	diaspore	dolomite	fluorite	gibbsite	gypsum	halloysite	illite	kaolinite	quartz	smectite	zeolite
NR-1	980402	0.965	-0.996	5.848	1.066	-2.751	4.629	-6.361	-4.051	3.483	-2.155	3.624	6.003	8.897	0.591	7.965	3.977
	980926	-1.270	-2.886	-2.311	-0.380	-2.207	2.551	-4.886	-3.668	1.337	-2.530	-0.770	1.098	4.335	0.425	2.753	0.142
	981120	0.439	-1.532	0.145	0.420	-1.528	3.046	-3.926	-3.156	1.908	-2.041	0.769	3.489	6.059	0.751	4.996	2.304
NR-2	980402	0.990	-1.120	3.517	0.818	-2.197	4.228	-5.302	-3.177	3.077	-2.024	2.748	5.495	8.008	0.551	7.052	3.999
	980926	nd	nd	nd	0.378	0.420	nd	0.171	-1.255	nd	-1.619	nd	nd	nd	0.626	nd	nd
	981120	1.239	-0.860	-6.524	0.587	0.549	1.936	0.774	-1.043	0.811	-1.668	-1.300	2.924	4.024	0.836	3.169	3.243
NR-3	980402	2.064	0.1588	2.748	0.874	-0.865	4.179	-2.633	-1.542	3.037	-1.997	3.132	6.613	8.414	0.797	7.915	5.387
	980926	-0.262	-2.142	-5.679	0.266	-0.036	1.857	-0.660	-1.459	0.649	-1.732	-1.924	1.231	3.196	0.547	1.922	1.331
	981120	0.958	-1.116	-3.124	0.559	-0.108	2.475	-1.133	-1.209	1.341	-1.681	-0.316	3.282	4.984	0.782	4.043	2.910
NR-4	980402	1.225	-0.864	5.742	1.078	-2.257	4.595	-5.454	-3.730	3.454	-2.030	3.582	6.173	8.868	0.608	7.978	4.204
	980926	nd	nd	nd	0.133	-0.625	nd	-1.875	-2.282	nd	-1.880	nd	nd	nd	0.524	nd	nd
	981120	0.195	-1.730	-3.224	0.293	-0.518	2.456	-1.833	-1.857	1.303	-1.844	-0.629	2.488	4.628	0.633	3.437	2.052
NR-5	980402	1.197	-0.900	5.920	0.988	-2.348	4.639	-5.662	-3.795	3.493	-2.163	3.655	6.198	8.927	0.596	8.046	4.244
	980926	nd	nd	nd	-0.387	-0.980	nd	-2.606	-2.838	nd	-2.404	nd	nd	nd	0.512	nd	nd
	981120	nd	nd	nd	0.285	-0.941	nd	-2.763	-2.113	nd	-1.982	nd	nd	nd	0.675	nd	nd
NR-6	980402	-0.062	-2.029	3.857	0.395	-3.349	3.959	-7.578	-4.737	2.811	-3.022	2.272	3.967	7.538	0.583	6.207	1.571
	980926	-0.714	-2.452	-3.930	-0.419	-1.431	2.338	-3.517	-3.482	1.139	-2.481	-1.100	1.341	4.041	0.484	2.588	0.741
	981120	nd	nd	nd	-0.200	-1.979	nd	-4.879	-2.704	nd	-2.533	nd	nd	nd	0.666	nd	nd
NR-7	980402	0.739	-1.299	4.934	0.588	-2.988	4.505	-7.099	-4.582	3.362	-2.866	3.387	5.478	8.665	0.595	7.614	3.274
	980926	-1.096	-2.562	-3.927	-0.331	-1.748	2.314	-4.014	-3.681	1.091	-2.634	-1.102	1.006	3.981	0.491	2.527	0.410
	981120	nd	nd	nd	-0.203	-2.307	nd	-5.555	-3.331	nd	-2.592	nd	nd	nd	0.657	nd	nd
NR-8	980402	0.079	-2.009	4.349	0.452	-3.314	4.113	-7.811	-5.022	2.973	-2.984	2.557	4.237	7.842	0.577	6.534	1.853
	980926	-1.420	-3.390	-6.032	-1.308	-1.696	2.127	-4.171	-3.735	0.912	-3.313	-2.018	0.089	3.085	0.226	1.176	-0.627
	981120	nd	nd	nd	-1.029	-2.376	nd	-5.894	-3.562	nd	-3.427	nd	nd	nd	0.486	nd	nd
NR-9	980402	0.308	-1.880	3.996	0.116	-3.353	4.334	-8.175	-5.129	3.194	-3.596	2.887	4.671	8.174	0.521	6.839	2.052
	980926	1.401	-3.407	-4.381	-1.354	-1.992	2.430	-4.804	-3.733	1.221	-3.397	-1.419	.459	3.698	0.226	1.776	-0.635
	981120	nd	nd	nd	-1.037	-3.013	nd	-7.185	-3.567	nd	-3.468	nd	nd	nd	-0.938	nd	nd
NR-10	980402	0.472	-1.056	-0.135	0.471	-1.417	3.005	-3.998	-0.839	1.844	-2.478	0.682	3.252	5.918	0.734	4.830	1.937
	980926	1.134	0.067	-5.883	-0.748	0.144	2.880	-0.711	-0.110	1.698	-2.997	-0.115	3.725	5.067	0.445	4.011	3.601
	981120	nd	nd	nd	-0.436	-1.278	nd	-3.667	-0.586	nd	-2.553	nd	nd	nd	0.632	nd	nd

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

의 침전과 흡착반응이 지표수보다는 온도가 높은 지하수에서 유리하기 때문에 해석할 수 있다.

순환수-광물의 역학적 평형관계를 WATEQ4F로 계산한 결과 (Table 4), TDS가 증가하면서 방해석과 돌로마이트 (dolomite)의 포화지수는 양의 관계를 보였으며, 깁사이트 (gibbsite), 고령석 및 스멕타이트는 음의 관계를 보였다. 또한 Na, Ca 및 Mg를 공급할 것으로 보이는 알바이트 (albite), 방해석, 돌로마이트 등은 대부분 용해성 환경에 있는 것으로 나타났으나 갯내수, 광산지역의 지표수 및 지하수는 모두 평형상태를 유지하고 있는 것으로 나타났다. 그러나 깁사이트, 고령석 및 스멕타이트는 모두 침전이 가능한 물질로 계산되었다 (Fig. 8). 이는 앞에서 설명한 해석과 일치하는 결과이다.

이찬희 등 (1998)은 나립광산의 수계를 따라 유입되는 하천부근의 토양과 퇴적물은 중금속이 오염되어 있고 주성분, 미량성분, 독성 및 희토류 원소의 부화지수에 차이가 있음을 보고하였다. 특히 EPA의 기준치로 표준화된 선광장 및 광미야적장 부근의 독성원소 부화지수는 24에 달하여 비오염 수계의 48배 이

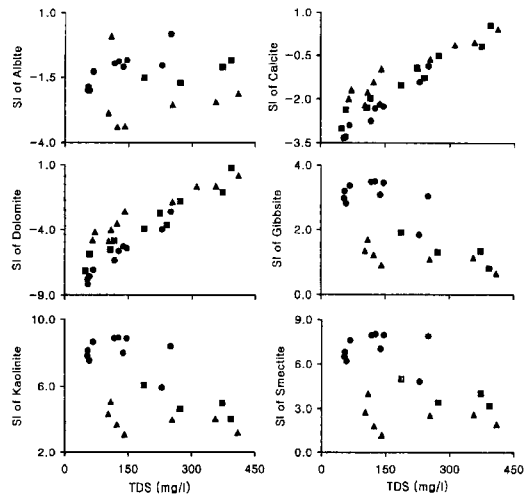


Fig. 8. Plot of calculated saturation indices of some mineral species versus TDS for meteoric water from the Narim mine creek. Symbols are the same as those of Fig. 3.

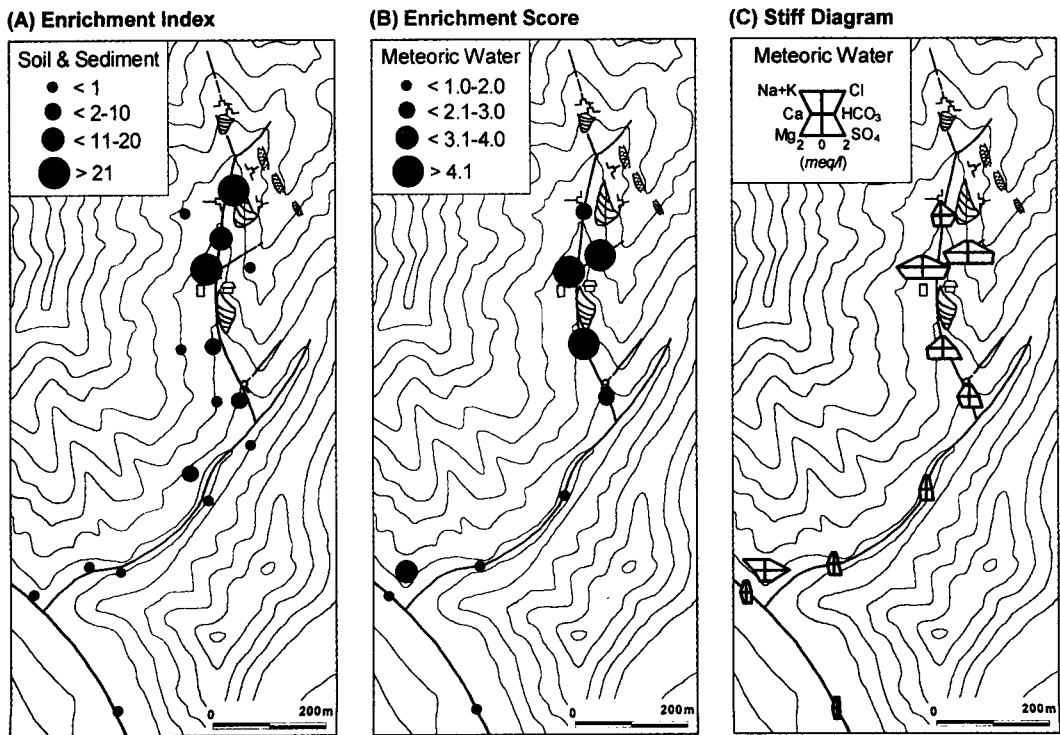


Fig. 9. Maps showing enrichment indices of soil and sediment normalizing by composition of basement rock (A), enrichment score of meteoric water normalizing by composition of surface water from the non-mining creek (B) and Stiff's patterns of major chemical compositions (C) for meteoric water from the Narim mine creek.

상인 곳도 있고, 비오염 수계와 오염수계의 하천수가 합류된 곳에서 하류로 약 1.5 km 내에도 평균 1.84 정도의 부화지수를 갖는다고 하였다 (Fig. 9A). 한편 비오염 수계 하천수의 음이온과 양이온 함량으로 각각의 시료가 갖는 함량을 표준화한 부화등급으로 볼 때, 광산부근의 지표수와 지하수에는 이미 오염이 진행되고 있음을 잘 보여준다 (Fig. 9B). 이를 Stiff 도표에 표시하면 광산부근의 순환수에서는 Ca+Mg 및 HCO₃+SO₄가 부화되어 있고, 지하수에는 Na+K와 HCO₃가 부화되어 있음을 알 수 있다 (Fig. 9C). 그러나 지하수의 화학조성은 광산활동의 영향을 받지 않을 것으로 보인다.

비광산 지역의 지표수에서 갯내수 및 폐석장 부근의

지표수로 갈수록 pH 및 EC가 높아지고 Eh가 낮아지는 것은 광산수계가 이차적인 오염에 노출된 것으로 판단할 수 있다 (Fig. 10). 대부분의 광산폐수는 EC가 증가하면서 pH는 산성화되는 것이 일반적이다. 이 연구지역의 갯내수 및 폐석장 주변의 지표수는 EC가 증가하면서 pH는 약알칼리성으로 변하는 것으로 볼 때, 이 지역 지표수의 pH에는 광산개발에 사용하였던 갯내의 목재 시설물 및 알칼리성의 화공약품이 영향을 미친 것으로 해석된다 (Nimick, Moore, 1991; Xian, Shokohifard, 1989). 그러나 이들의 증가와 함께 HCO₃도 부화되어 있다. 이는 앞으로 해결해야 할 과제중의 하나이다.

순환수를 구성하는 이온의 대부분은 오염원에 노출될 때 상대적인 함량이 증가하며, 특히 총 음이온(SO₄, NO₃, Cl, F, Br) 함량과 알칼리 원소를 제외한 대부분의 양이온 (Al, Ba, Ca, Cd, Fe, Mg, Mn, Ni, Zn) 들이 오염에 민감한 것으로 알려져 있다 (Pacheco, Weijden, 1996). 연구지역의 갯내수 및 광산수계의 지표수에는 SO₄와 HCO₃의 함량이 최대 127.9 및 186.1 mg/l 이나, 하류로 가면서 급격히 감소한다. 한편 지하수에는 비교적 많은 HCO₃가 포함되어 있으나 SO₄의 함량은 낮다 (Fig. 10). 그러나 NO₃, Cl 및 F의 함량은 지하수에서 높다.

일반적으로 순환수에 포함된 NO₃ 및 Cl의 함량은 농경폐수 (축산, 분뇨, 비료, 농약)의 영향으로 알려져 있다. 그러나 F는 기반암의 조암광물 (운모류 및 각섬석류)을 이루는 수산화기를 치환한 F가 풍화작용과 함께 용탈된 것으로 해석하는 것이 타당할 것이다 (Savage et al., 1987). 양이온의 총 함량도 갯내수 및 광산수계의 지표수에서 하류로 갈수록 급격히 감소하고, 지하수에서는 광산부근의 지표수와 비슷한 함량을 갖는다 (Fig. 10). 이 지역의 순환수는 음용수의 수질 기준을 초과하지는 않으나, 광산부근의 지표수와 갯내수에서는 최대 4.05 mg/l의 Zn이 검출되었으며, 수계의 하류에는 백화 또는 적화현상이 있는 것으로 보아 오염원수들은 이미 수화물, 수용액 또는 원소상태로 거동하고 있을 것으로 해석된다.

결 언

1. 연구지역의 지하수 및 지표수는 (Ca+Na)-HCO₃ 형에 속하나 광산부근의 지표수 및 갯내수로 가며 (Ca+Mg)-(HCO₃+SO₄) 형으로 변한다. 이 순환수의 d(δD-8 δ¹⁸O) 값은 4월 시료가 10.1~13.1이나 11월 시료는 5.8~7.9의 범위로서 계절적 차이가 심하고, 온도

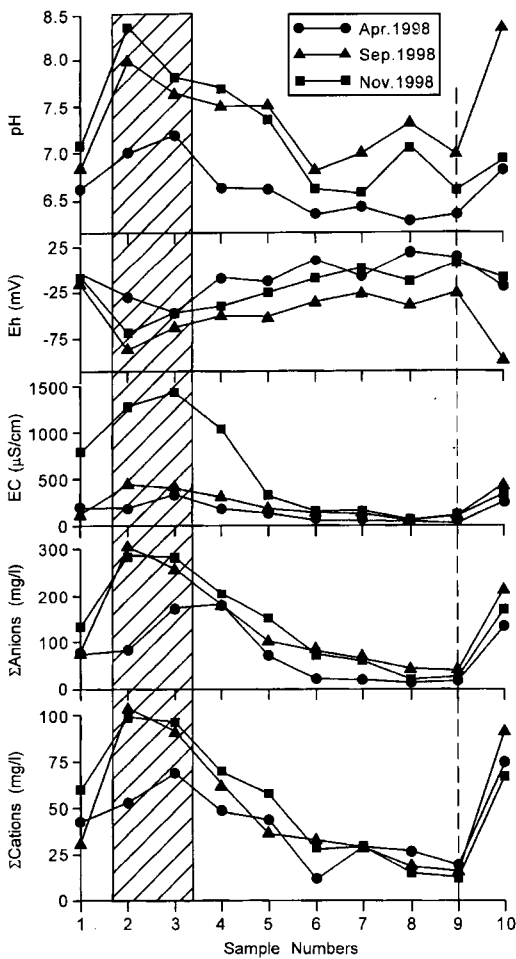


Fig. 10. Diagrams showing variation of physical properties, total contents of anion and cation against sample locations for meteoric water from the Narim mine creek.

및 고도효과와 약간의 동위원소 교환반응이 있었던 것으로 해석된다.

2. 비광산 지역의 지표수에서 광화대의 순환수로 갈수록 pH와 EC가 증가하고, 음이온 (HCO_3 , SO_4) 및 대부분의 양이온 (Al, As, Ca, K, Mg, Mn, Na, Si, Zn) 함량도 급격히 높아진다. 특히 지하수에는 F 및 NO_3 의 함량이, 갯내수 및 지표수는 Zn과 SO_4 의 함량이 아주 높다.

3. 연구지역의 순환수는 고령석, 일라이트, Na-스멕타이트가 안정함을 보여주었으나, 깃사이트가 침전될 가능성은 거의 없다. 또한 계절에 따른 차이점도 없을 것으로 보이며 고령석이 가장 안정하게 정출할 것으로 추정된다

4. 오염에 노출된 독성원소 (As, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn)는 금속이온 단독으로 존재하는 것이 우세하며, 일부는 황산염과 결합된 것으로 계산되었다. 그러나 지하수에서는 모두 CO_3 및 $(\text{OH})_3$ 와 착이온을 형성하고 있을 것으로 추정된다.

5. 순환수 광물의 평형관계로 계산된 포화지수로 볼 때 알바이트, 방해석 및 돌로마이트 등은 대부분 용해성 환경에 있으나, 광산지역의 지표수 및 지하수는 모두 평형 상태를 유지하고 있었다. 그러나 깃사이트, 고령석 및 스멕타이트는 모두 침전이 가능한 물질로 나타났다.

사 사

이 연구는 한국과학재단 후원 전략광물자원연구센터의 지원을 받았음을 명기하며 이에 감사한다. 화학분석에 많은 도움을 주신 충남대학교 농화학과의 정덕영 교수, 고려대학교 윤성택 교수, 전략광물자원연구센터의 권숙화 및 이창환 석사께 감사한다. 또한 원고를 검토하여주시고 건설적인 비평을 가해주신 한양대학교의 김선준교수와 익명의 심사위원께도 감사하며, 시료 채취 및 실내연구에 많은 도움을 준 충남대학교 지질학과의 조애란 석사께도 사의를 표한다.

참고문헌

김규한, 최형정 (1998) 남한의 온천지역의 열수와 지하수의 지구화학적 연구. 한국지구과학회지, 19권, p. 22-34.
 송용선 (1987) 소백산유곡 중앙부의 지질과 변성작용에 관한 연구. 서울대학교 대학원 이학박사학위논문, 122p.
 유재영, 최인규, 김형수 (1994) 춘천지역의 기반암 종류에 따른 지표수의 지구화학적 특성. 지질학회지, 30권, p. 307-324.

윤석규, 박병권 (1968) 한국지질도, 실천도폭 (1:50,000) 및 설명서. 국립지질조사소.
 윤석태, 박희인 (1991) 용화광산의 금은광화작용. 광산지질, 24권, p. 107-129.
 윤석태, 박희인 (1993) 월성광산의 금은광화작용. 한국지구과학회지, 14권, p. 263-273.
 윤석태, 박희인 (1995) 용화-설천지역에 분포하는 백악기 반상화강암의 암석화학 및 유체포유물에 관한 연구. 자원환경지질, 28권, p. 445-454.
 윤석태, 박희인 (1997) 무주-영동지역에 분포하는 금은광상의 안정동위원소 연구. 한국지구과학회지, 18권, p. 60-69.
 이두호, 전효택 (1997) 국내 먹는 샘물 개발지역의 토양오염평가 및 수리지구화학적 특성. 지하수환경, 4권, p. 41-53.
 이종운, 김신준, 전용원 (1996) 영천도수터널 주변 지하수의 수리지구화학. 한국자원공학회지, 33권, p. 211-225.
 이찬희, 이현구, 이종창 (1998) 나립광산 수계의 토양과 퇴적물에 관한 지구화학적 특성: 중금속 원소의 분산, 부화 및 기원. 자원환경지질, 31권, p. 297-310.
 이현구, 이찬희 (1997) 나립 금광상의 열수변질대에서 산출되는 녹색 크롬-결운모의 광물학적 및 지구화학적 특성. 자원환경지질, 30권, p. 279-288.
 전효택, 김주용, 최시영 (1998) 폐석탄광 주변 지구화학적 환경의 중금속 오염 평가-강릉탄전 임곡천 일대를 중심으로-. 자원환경지질, 31권, p. 499-508.
 전효택, 이희근, 이종운, 이대형, 류동우, 오석영 (1997) 동해신탄광 터널굴착공사와 관련된 지표수 및 지하수의 유동변화에 대한 조사연구 (II)-수리지구화학적 고찰. 지하수환경, 4권, p. 27-40.
 정찬호, 황 정, 박충화 (1998) 공주시 유구읍 명곡리지역 천부 및 심부지하수의 지하학적 수질특성과 오염. 자원환경지질, 31권, p. 485-498.
 허 봉, 유재영 (1998) 강원도 강릉시 강동면에 분포하는 폐탄광으로부터의 배수에 의한 임곡천 및 동해의 오염. 지하수환경, 5권, p. 44-55.
 홍승호, 이병주, 김원영 (1980) 한국지질도, 무주도폭 (1:50,000) 및 설명서. 자원개발연구소.
 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.
 Bricker, O.P. and Garrels, R.M. (1967) Mineralogical factors in natural water equilibria. Hutchison Ross Pub. Co., p. 257-276.
 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., v. 54, p. 993-995.
 Craig, H. (1961) Isotopic variations in meteoric waters. Sci., v. 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. Science, v. 170, p. 1088-1090.
 Greenberg, A.E., Clesceri, L.S. and Eaton, A.D. (1992) Standard methods for the examination of water and wastewater. 18th ed., Amer. Public Health Assoc., Washington DC, 1010p.
 Helgeson, H.C. (1969) Thermodynamics of hydrothermal

- system at elevated temperatures and pressures. *Am. Jour. Sci.*, v. 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.*, v. 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.*, v. 57, p. 1438-1440.
- Koh, Y.K., Yun, S.T. and Ahn, J.S. (1994) Environmental isotope and hydrochemical studies of geothermal waters in Korea: Yusung geothermal area. *Jour. Kor. Inst. Miner. Energy Resou. Engineer.*, v. 31, p. 388-399.
- Mayo, A.L. and Klauk, R.H. (1991) Contributions to the solute and isotopic groundwater geochemistry, Antelope Island, Great Salt Lake, Utah. *Jour. Hydrol.*, v. 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*, v. 30, p. 243-249.
- Nesbitt, H.W. (1977) Estimation of the thermodynamic properties of Na-, Ca-, and Mg-beidellites. *Can. Miner.*, v. 15, p. 22-30.
- Nimick, D.A. and Moore, J.N. (1991) Prediction of water soluble metal concentrations in fluvially deposited tailing sediments, Upper Clark Fork Valley, Montana, USA. *Applied Geochem.*, v. 6, p. 635-646.
- Nordstrom, D.K. and Munoz, J.L. (1986) *Geochemical thermodynamics*. Blackwell Sci. Pub. Co., 477p.
- 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. Research*, v. 32, p. 3553-3570.
- Piper, A.M. (1944) A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *Trans. Amer. Geophy. Union*, v. 25, p. 914-923.
- Savage, D., Cave, M.R., Milodowski, A.E. and George, I. (1987) Hydrothermal alteration of granite by meteoric fluid; an example from the Carnmenellis granite, United Kingdom. *Contri. Miner. Petrol.*, v. 96, p. 391-405.
- So, C.S., Yun, S.T., Kim, S.H. and Lee, J.H. (1994) Cre-taceous epithermal Au-Ag mineralization in the Muju-Yeongam district, Republic of Korea: Muju mineralized area. *Jour. Miner. Petro. Econ. Geol.*, v. 89, p. 56-74.
- Taylor, H.P. Jr. (1974) The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition. *Econ. Geol.*, v. 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.
- Woo, N.-C. and Choi, M.-J. (1998) Groundwater quality in the shallow aquifer nearby the Gubong gold mine tailings. *Jour. Kor. Groundwater Environ.*, v. 5, p. 148-154.
- 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 Poll.*, v. 45, p. 265-273.
- 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.*, v. 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.*, v. 31, p. 185-199.

1999년 5월 15일 원고접수, 1999년 6월 2일 게재승인.