

화순 폐탄광지역 광산배수와 침전 및 증발잔류광물에 대한 지구화학적 및 광물학적 연구

박천영* · 정연중* · 강지성*

Geochemistry and Mineralogy of Mine Drainage Water Precipitate and Evaporite Minerals in the Hwasoon Area

Cheon-Young Park, Youn-Joong Jeong and Ji-Seong Kang

ABSTRACT: This study investigated the geochemical characteristics of mine drainage discharged from an abandoned coal mine in the Hwasoon area. Surface water samples were collected from 23 locations along the Hancheon creek. The concentration of Zn and Cu in stream waters was highest at low pH (3.53), whereas the content of TDS and TDI was highest at high pH (7.78) due to the concentration of Ca, HCO_3 and SO_4 . At the upstream site, the Ba, Fe, Mn, Zn, and SO_4 contents were relatively high but decreased significantly with the distance from the coal mine. On the contrary, the Na and NO_3 contents were low at the upstream site but increased downstream. Yellow precipitate material collected in the Hancheon consisted mainly of iron and LOI. This yellow precipitate was heated from 100 to 900°C for 1 hour. With increasing temperature, the intensity of hematite peaks were sharply produced in X-ray pattern and the absorption band Fe-O of hematite increased in IR due to dehydration and melting. The yellow to brown precipitate and evaporite materials were collected by a air-dry from the acid mine water at the laboratory. After drying, the concentration of ions in the acid water samples increased progressively in oversaturation with respect to either gypsum, ferroxahydrate or quenstedetite. The X-ray powder diffraction studies identified that the precipitated and evaporated materials after drying were well crystallized gypsum, ferroxahydrate and quenstedetite. Diagnostic peaks used for identification of gypsum were the 7.65, 4.28, 3.03, 2.87 and 2.48Å peaks and those for ferroxahydrate were the 5.46, 5.12, 4.89, 4.44, 4.05, 3.62, 3.46, 3.40, 3.20, 3.03, 2.94, 2.53, 2.28, 2.07, 1.88 and 1.86Å peaks. The IR spectra with OH-stretching, deformation of H_2O and SO_4^{2-} -stretching vibration include the existence of gypsum, ferroxahydrate and quenstedetite in the precipitated and evaporite materials. In the SEM and EDS analysis for the evaporite material, gypsum with well-crystallized, acicular, and columnar form was distinctly observed.

Key words : mine drainage discharge, precipitated and evaporite material, gypsum

주요어 : 광산배출수, 침전 및 증발광물, 석고

서 론

전남 화순군 한천면에 위치하는 호남탄광, 태백탄광과 이양면의 삼정탄광으로부터 배출되는 산성광산배수와 황갈색 침전물인 철수산화물 그리고 비정질의 백색

침전물이 주변경관과 수계를 오염시키고 있다. 이들 폐탄광에서 배출되는 산성광산배수는 인근 농경지의 농업 용수로 이용되고 있어 농작물의 중금속 오염이 예상되고 산성광산배수에 의하여 생성되는 2차광물들이 농경지의 토양층에 형성될 수 있다.

일반적으로 폐탄광에서 배출되는 산성광산배수는 식물체의 탄화과정에서 생성된 황철석이 대기 중에 노출되어 산화작용이 일어나 황산염, 2가 철과 3가 철 이온 및 수소 이온을 생성시킨다. 2가 철은 산화작용에

* 조선대학교 자원공학과 (Department of Resource Engineering, The Chosun University, Kwangju, 501-759, Korea), E-mail: cybpark@mail.chosun.ac.kr

의하여 3가 철로 되고 역시 철수산화물을 형성하기 때문이다. 산성광산배수 지역은 pH와 철이온의 농도에 의하여 다양한 종류의 2차 광물이 형성 될 수 있다. pH가 비교적 높은 6.5 환경에서 페리하이드라이트 (ferrihydrite, $\text{Fe}_5\text{HO}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)와 침철석 (goethite, $\alpha\text{-FeOOH}$)이 혼합되어 나타나고, pH가 2.8에서 4.5인 환경에서는 슈워트마나이트 (schwertmannite, $\text{Fe}_8\text{O}_8(\text{OH})_6\text{SO}_4$)가 그리고 pH가 4.5에서 6.5의 환경에서는 페리하이드라이트와 슈워트마나이트가 나타난다 (Bigham *et al.*, 1996). 또한 산성광산배수가 건조되면 용해돼 있던 2가 철과 황산염 이온에 의하여 멜란테라이트 (melanterite, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)가 형성되고 건조가 더 진행되면 이 멜란테라이트는 탈수되어 로젠나이트 (rozenite, $\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)를 형성한다.

Whittig 등 (1982)과 Timpson 등 (1986)은 토양층 표면에 형성되는 증발잔류광물 (evaporite mineral)은 용해성 광물이 건조되어 펜타하이드라이트 (pentahydrate, $\text{MgSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), 케사라이트 (kieserite, $\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) 및 로웨이트 (loewite, $\text{Na}_{12}\text{Mg}_7(\text{SO}_4)_{13} \cdot 15\text{H}_2\text{O}$) 등이 만들어진다고 발표하바 있다. 산성광산배수에 의해서 형성되는 2차광물들은 불용성 수산화물과 용해성 철황산염 수산화물로 구분되는데, 용해성이 강한 2차 광물은 증발작용이 크게 일어나는 건조기후 지역에서 흔히 산출된다 (Nordstrom, 1982a). 한편 Al은 pH가 낮은 환경에서 용출되어 나와 Al^{3+} 로 존재하다가 pH가 높은 환경에서 황철석으로부터 유래된 SO_4^{2-} 와 결합하여 AlOHSO_4 로 침전되거나 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 로 침전된다 (Sullivan *et al.*, 1988). Nordstrom (1982a)에 의하면 pH가 4에서 6으로 증가하는 산성광산배수에서 황산염과 알루미늄 함량은 현저하게 감소되고, 이때 하상에는 Al, Fe, SO_4^{2-} 로 구성된 비정질의 백색침전물이 형성되며, 이 백색침전물은 $\text{Al}_4(\text{OH})_{10}\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 의 구조식과 유사한 배사알루미나이트 (basaluminite, $\text{Al}_4(\text{OH})_{10}\text{SO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)가 산출된다고 하였다.

연구지역의 지질은 시대미상의 편암암류, 고생대의 변성퇴적암층과 이를 부정합으로 피복 하는 퇴적암 (천운산층, 우산리층) 및 이들을 관입하는 화성암류와 소규모의 용암류와 응회암으로 대별된다. 화순탄전은 하부로부터 용암산층, 우산리층, 천운산층으로 구분되며 함탄층은 우산리층으로 고생대 평안계로 대비된다 (연세대학교 지질학과 동문회, 1982). 함탄층을 형성하는 우산리층은 함탄대, 석영편암대, 운모편암대로 구분되며 북서방향을 달리는 용암산배수구조를 형성한다. 연구지역의 수계는 노인봉에서 발원하는 하천수가 북쪽으로

흐르다가 동서로 흐르는 한천천과 합류되고 있다. 연구지역의 한천천은 폐탄광으로부터 배출된 산성광산배수가 유입되고 오음리 주변의 농경지에 농업용수로 이용되고 금전저수지에 저유되어 영산강으로 유출된다. 한천천의 하상에 산성광산배수에 의하여 형성된 황갈색의 침전물과 백색침전물이 피복되어 있어 수서생물의 흔적을 발견할 수 없을 정도로 황폐화되어 있다.

화순 지역의 폐탄광에 대한 연구로는 김통권 등 (1999)에 의한 화순 동양탄광 산성배수의 중화처리조건 연구, 민정식 등 (1996)에 의한 광역적인 광산지역 광해조사 및 대책연구에서 화순지역의 광해실태조사를 수행한 사례가 있을 뿐이다. 전용원 등 (1984)은 화순 지역에서 산출되는 석탄의 암석광물과 지구화학적 특성을 연구한 바가 있을 뿐 산성광산배수에 대한 지구화학적 연구는 아직 미흡한 실정이다. 산성광산배수와 관련하여 형성되는 2차광물에서 자로사이트 (jarosite)와 코오피아파이트 (copiapite)의 생성에 관한 연구 (박상준 등, 1999)와 산성광산배수를 증발시켜 얻은 석고 (gypsum)와 코오피아파이트에 대한 지구화학적 연구 (박천영 등, 2000)가 있다.

이들 2차 광물들은 용해성이 높아 우기의 강우에 용해되어 농경지의 농업용수로 유입될 가능성이 있어 농작물에 영향을 줄 수 있다. 따라서 산성광산배수에 의하여 형성될 수 있는 2차광물들에 대한 광물학적 및 지구화학적 연구가 필요할 것이다. 본 연구의 목적은 화순폐탄광지역에서 형성되는 산성광산배수에 대한 수질특성 및 거리에 따른 함량변화를 지구화학적으로 해석하고 산성광산배수에 의하여 2차로 형성된 황갈색의 철수산화물과 증발잔류광물에 대하여 광물학적 특성을 고찰한 것이다.

시료채취 및 분석

이 연구에서는 화순탄전에 분포하는 호남탄광, 태백탄광 그리고 삼정탄광지역을 대상으로 광산배출수 총 28개를 채취하였다. 산성광산배수의 시료 채취 시기는 강수의 영향이 적은 2000년 1월 15일과 16일에 실시하였다. 또한 한천천 상류 지점인 JS-3에서 하천에 침전되어 있는 황갈색 침전물을 채취하였다. 화순 호남폐탄광과 태백폐탄광수계를 이루고 있는 한천천에서 수계를 따라 23개의 하천수, 한천면 오음리 주민들의 상수원 (JS-24), 석탄합리화사업단의 호남탄광 수질검사 지점 (JS-25)과 정화시설 배출수 (JS-27), 화순 동면 냉굴집 (JS-26) 그리고 화순군 이양면 삼정탄광 배출수 (JS-28)를 채취하

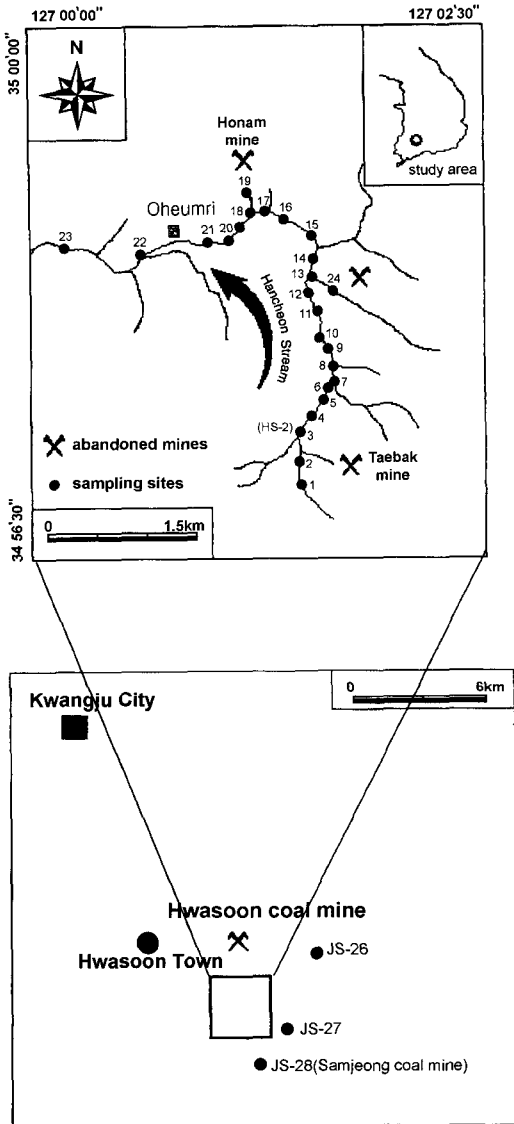


Fig. 1. Sampling sites of the mine drainage in the Hwasoon area.

였다 (Fig. 1). 배출수 시료는 현장에서 수소이온농도 (pH), 산화환원전위 (Eh), 온도, 용존산소량 (DO), 전기 전도도 (EC), 총용존물질 (TDS), NaCl %등의 특성을 pH 측정기 (TOA HM14P), ORP 측정기 (TOA RM-12p), 전기전도도 측정기 (HACH COS50), EC 측정기 (TOA CM-14P), TDS 측정기 (ORION115) 및 DO 측정기 (YSI95)를 이용하여 측정하였다.

물 시료는 현장에서 수동진공펌프를 이용하여 0.45 μm 공극의 질산염섬유소 여과지에 통과시켜 부유물질

을 제거하고 진한 질산을 가해 pH 2 이하가 되도록 하였으며 분석 전 까지 4°C이하로 냉장 보관하였다. 음이온 분석 시료는 여과한 후 채수병의 마개를 테이프로 밀봉하여 대기와의 접촉을 피하였다. 양이온 중에 Fe의 분석은 기초과학지원연구센터의 GFAAS (GF90PLUS)를 이용하고, K는 AAS (UNICAM989)를, Na, Mg, 및 Ca는 ICP-AES (ICP1000-III)를, 그리고 Al, Zn, Cr, Cu, Mn, Cd, Pb, Hg, As, Se, Th 및 U등은 ICP-MS (PQ3STE, FISONS)로 분석하였다.

음이온 중에 F, Cl, Br, NO₂, NO₃, PO₄, 및 SO₄ 등의 함량은 서울대학교 IC (Dionex500)를 이용하여 분석하였으며, HCO₃는 현장에서 페놀프탈레인 (phenolphthalein)용액과 메틸레드브롬크레졸그린 (methylred-bromocresol-green) 혼합용액을 사용하여 적정하였다. 한편 일부 산성광산배수 (JS-19, JS-25 및 JS-26)를 실험실에서 자연 건조시켜 증발잔류광물을 채취하였다. 하상침전 및 증발잔류광물에 대하여 XRD (Rigaku Geigerflex), IR (Nicolet 520P), SEM 및 EDS (JEOL, JSM-840A)분석을 실시하였고, 기초과학지원센터 (광주분소)의 DTA (TA instrument)를 이용하여 열적특성을 측정하였다.

하상침전물에 대한 주성분원소의 화학분석은 XRF (Philips, PW2400, 기초과학지원센터, 부산분소)로 분석하였다. 황갈색 침전물에 대한 열적변이 특성을 알아보기 위하여 100°C에서부터 900°C 까지 각각 1 시간 동안 전기로에서 가열한 후 이들 시료를 XRD분석과 IR분석을 실시하였다. XRD분석 조건은 Cu-K α 선을 이용하여 가속전압 35 KV, 전류 15 mA, 주사속도 2°/min.으로 5~80°의 2 θ 구간을 분석하였다. IR분석은 자연 건조된 시료를 KBr

분말과 혼합한 후 압축하여 디스크를 만들어 4,000 cm⁻¹~400 cm⁻¹의 파장을 분석하였으며, 해상도는 4 cm⁻¹이고 주사수는 32이다. 증발잔류광물에 대한 시료는 양면테이프에 고착시킨 후 gold 코팅하여 SEM 및 EDS분석을 실시하였으며, 100%의 Co 표준시료로 영점조정하여 정량분석하였다. DTA분석은 질소분위기에서 0~10,000°C 구간을 상승온도 10°C/분으로 하고 표준물질은 Al₂O₃를 이용하였다.

결과 및 고찰

산성광산배수에 대한 물리화학적 특성

연구시료에 대한 물리화학적 분석자료는 Table 1과

Table 1. Chemical compositions for surface stream waters in the Hwasoon coal mine area.

NO.	pH	T (°C)	TDS (mg/l)	TDI (meq/l)	Eh (mV)	EC (mS/m)	ER (m)	DO (mg/l)	F (mg/l)	Cl (mg/l)	NO ₂ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	Br (mg/l)	PO ₄ (mg/l)
JS-1	5.64	4.8	88	38.16	142	21.2	47.10	11.16	1.1	7.0	-	2037.0	116.3	31.73	-	-
JS-2	6.46	14.4	487	110.27	-14	107.4	9.32	9.06	0.6	6.1	-	4671.2	784.2	451.53	-	-
JS-3	6.87	12.9	401	75.09	0	103.1	9.70	9.61	0.6	5.4	4.5	2742.6	764.2	244.07	-	-
JS-4	6.73	10.8	447	62.47	8	95.0	10.52	9.66	0.9	5.7	-	2030.2	775.7	164.56	-	-
JS-5	5.06	7.1	250	70.01	119	70.0	14.28	10.93	0.1	11.7	2.1	3150.4	540.8	6.10	-	-
JS-6	4.95	7.0	309	58.90	14.3	69.5	14.38	11.56	-	7.3	1.2	2478.1	532.0	12.20	-	-
JS-7	5.01	6.9	305	72.36	154	68.5	14.59	11.49	0.1	5.4	4.6	3336.4	524.3	8.54	-	-
JS-8	4.84	6.6	305	73.93	170	68.1	14.70	11.82	0.1	5.4	5.4	3448.4	522.1	7.32	-	-
JS-9	4.98	6.2	303	75.88	174	68.2	14.66	12.13	0.1	4.3	-	3568.6	520.1	7.32	-	-
JS-10	4.98	5.6	293	81.89	172	66.2	15.12	12.25	0.1	5.3	-	3982.7	499.7	7.32	-	-
JS-11	4.85	5.3	292	83.68	176	64.7	15.45	12.11	-	4.5	4.1	3501.9	961.9	9.76	-	-
JS-12	5.07	4.9	278	86.88	193	63.1	15.84	12.61	0.7	3.9	4.2	3771.7	924.6	6.10	-	-
JS-13	5.92	5.0	274	82.71	159	62.1	16.10	12.50	-	3.9	-	3795.8	710.5	18.31	-	-
JS-14	6.43	5.0	248	110.36	125	56.1	17.82	12.22	0.2	4.5	-	5423.9	755.5	76.88	-	-
JS-15	6.71	4.9	240	89.95	83	54.4	18.38	12.74	0.1	4.9	-	4223.4	724.0	67.12	-	-
JS-16	6.69	4.8	240	117.29	66	54.2	18.45	12.85	0.3	4.2	-	5922.4	724.6	62.25	-	-
JS-17	7.67	6.2	304	109.15	-18	69.3	14.43	12.08	0.3	4.6	-	4944.8	875.7	201.36	-	-
JS-18	7.78	16.2	656	142.48	-61	151.5	6.60	9.36	0.5	-	-	3933.1	1859.4	1220.36	-	-
JS-19	6.6	17.7	646	127.42	-69	153.1	6.52	1.48	0.3	-	-	3916.0	1196.6	1171.55	-	-
JS-20	7.73	3.0	317	102.30	84	74.6	13.40	13.29	0.3	4.3	-	4358.6	930.4	247.73	-	-
JS-21	6.82	3.0	304	124.47	43	71.0	14.08	13.22	0.4	4.3	-	5844.0	880.8	226.99	-	-
JS-22	7.14	3.0	312	133.96	46	72.9	13.71	13.56	0.5	4.4	-	6341.9	928.4	244.07	-	-
JS-23	7.25	3.2	261	131.43	64	60.0	16.66	14.93	0.4	5.2	-	6581.8	740.1	187.94	-	-
JS-24	6.97	3.8	18	83.90	73	4.27	233	12.73	-	5.0	-	5164	2.9	244.07	-	-
JS-25	6.8	14.3	484	118.70	-87	112.7	8.87	1.16	0.8	-	-	4664	1402.9	695.61	-	-
JS-26	3.53	7.1	247	22.85	404	53.4	18.76	11.87	0.2	3.4	-	55.81	730.6	-	-	-
JS-27	6.46	14.6	188	10.11	0	45.7	21.8	0.4	-	6.1	-	-	212.9	78.10	-	-
JS-28	4.27	8.3	147	9.97	224	33.4	29.9	9.49	-	5.3	-	-	253.4	-	-	-

- : not detected., TDS : total dissolved solid, TDI : total dissolved ions, < : under the detection limit, ER : electrical resistivity, EC : electrical conductivity

Table 2. Chemical compositions for surface stream waters in the Hwasoon coal mine area.

NO.	Na (mg/l)	Mg (mg/l)	Al (mg/l)	Si (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mn (mg/l)	Fe (mg/l)	Sr (mg/l)	Hg (μg/l)	Th (μg/l)	Ba (μg/l)	Cd (μg/l)	Pb (μg/l)	U (μg/l)	Cu (μg/l)	Zn (μg/l)	As (μg/l)	Se (μg/l)	Sb (μg/l)
JS-1	3.19	8.72	0.40	3.51	0.42	22.50	0.40	<0.01	0.08	<0.01	<0.01	17.2	0.28	0.24	0.40	6.20	31.10	<0.01	2.92	<0.01
JS-2	3.70	70.00	0.34	6.71	0.49	93.70	5.82	74.6	0.60	<0.01	0.3	22.5	0.17	0.26	2.85	3.89	158.00	19.80	2.80	<0.01
JS-3	3.64	68.00	0.18	6.82	1.21	92.40	5.67	69.3	0.60	<0.01	<0.01	22.8	0.18	0.77	2.28	3.93	149.00	12.60	3.13	<0.01
JS-4	3.54	67.60	0.12	6.18	1.20	91.80	5.60	54.8	0.60	<0.01	<0.01	21.5	0.18	0.19	1.92	2.32	134.00	7.11	2.84	<0.01
JS-5	4.28	40.30	3.76	6.51	0.79	67.00	2.71	11.3	0.33	<0.01	<0.01	23.7	0.28	0.37	1.83	10.20	127.00	1.48	3.19	<0.01
JS-6	4.29	40.00	3.74	6.52	0.79	66.30	2.65	11.1	0.32	<0.01	<0.01	23.7	0.28	0.24	1.81	16.30	123.00	1.30	3.47	<0.01
JS-7	4.41	39.30	3.65	6.41	0.78	65.50	2.62	10.2	0.32	<0.01	<0.01	25.3	0.29	2.51	1.80	10.90	124.00	1.24	3.14	<0.01
JS-8	4.32	38.10	3.55	6.34	0.77	64.30	2.56	9.77	0.31	<0.01	<0.01	25.0	0.26	0.27	1.75	9.58	120.00	1.07	2.65	<0.01
JS-9	4.34	38.20	3.90	6.36	0.78	65.10	2.56	9.29	0.31	<0.01	<0.01	25.5	0.25	0.40	1.85	10.0	123.00	1.23	3.24	<0.01
JS-10	4.29	36.90	3.33	6.08	0.77	63.30	2.39	7.93	0.30	<0.01	<0.01	25.5	0.29	1.60	1.67	10.2	118.00	0.94	3.20	<0.01
JS-11	4.43	36.20	3.34	6.12	0.79	62.40	2.33	7.11	0.30	<0.01	<0.01	25.1	0.26	1.09	1.63	10.4	115.00	0.87	3.39	<0.01
JS-12	4.50	34.10	3.19	6.06	0.79	59.40	2.20	5.87	0.29	<0.01	<0.01	25.9	0.25	3.05	1.50	8.70	109.00	0.92	3.98	<0.01
JS-13	4.52	35.70	0.37	5.57	1.02	58.20	1.82	4.87	0.31	<0.01	<0.01	26.3	0.20	0.26	0.84	5.97	91.70	0.65	2.65	<0.01
JS-14	4.54	34.60	0.10	4.56	0.86	50.90	1.13	2.92	0.24	<0.01	<0.01	24.7	0.15	<0.01	0.11	2.65	54.70	0.63	3.33	<0.01
JS-15	4.57	33.00	0.12	4.40	0.87	49.00	1.05	2.52	0.23	<0.01	<0.01	23.6	0.14	<0.01	0.10	2.99	50.20	0.47	2.54	<0.01
JS-16	4.61	33.10	0.14	4.37	0.87	48.90	1.03	2.24	0.23	<0.01	<0.01	24.3	0.13	<0.01	0.11	2.20	48.60	0.52	3.03	<0.01
JS-17	4.62	44.10	0.11	4.26	1.03	74.50	1.26	1.71	0.36	<0.01	<0.01	26.3	<0.01	<0.01	1.60	1.24	30.10	26.10	3.27	<0.01
JS-18	4.65	101.00	0.22	5.01	2.16	230.00	3.34	2.06	1.17	<0.01	<0.01	31.7	<0.01	<0.01	14.7	1.69	4.30	217.00	2.81	<0.01
JS-19	4.65	101.00	0.23	5.30	2.16	226.00	3.63	7.52	1.20	<0.01	<0.01	34.9	<0.01	<0.01	15.3	1.51	3.92	365.00	3.28	<0.01
JS-20	4.84	47.70	0.11	4.29	1.08	82.60	1.22	0.88	0.42	<0.01	<0.01	26.2	<0.01	<0.01	2.24	1.17	18.60	21.70	3.59	<0.01
JS-21	4.79	45.30	0.10	4.09	1.06	78.60	1.00	0.45	0.39	<0.01	<0.01	27.9	<0.01	<0.01	1.91	0.93	17.30	13.90	3.15	<0.01
JS-22	5.46	44.60	0.08	3.76	1.16	82.90	0.70	0.08	0.51	<0.01	<0.01	32.2	<0.01	<0.01	2.05	1.46	14.10	6.54	3.14	<0.01
JS-23	5.39	34.70	0.09	3.50	1.17	68.30	0.18	<0.01	0.39	<0.01	<0.01	33.1	<0.01	<0.01	1.30	0.94	4.32	2.61	3.38	<0.01
JS-24	3.37	0.88	<0.02	3.22	0.21	2.24	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	8.39	<0.01	<0.01	0.01	0.11	1.12	0.38	2.45	<0.01
JS-25	4.21	96.9	0.12	3.29	1.33	117.00	1.70	13.7	1.00	<0.01	<0.01	52.9	<0.01	0.47	2.92	1.00	5.75	287.00	2.78	<0.01
JS-26	3.38	27.5	10.08	7.70	0.81	25.30	2.11	2.22	0.09	<0.01	0.53	24.5	0.98	1.84	1.55	51.00	268.00	3.19	2.75	<0.01
JS-27	2.85	17.9	<0.01	5.38	0.90	67.30	0.82	1.32	0.26	<0.01	<0.01	20.4	<0.01	<0.01	<0.01	12.60	6.03	26.30	<0.02	<0.01
JS-28	4.06	15.6	9.38	3.83	0.54	18.70	2.00	0.06	0.09	<0.01	<0.01	15.5	0.78	0.44	<0.01	29.10	231.00	3.64	<0.02	<0.01

- : not detected., TDS : total dissolved solid, TDI : total dissolved ions, < : under the detection limit, ER : electrical resistivity, EC : electrical conductivity

Table 2에 각각 정리하였다. 화순지역 폐탄광 배출수에 대한 수질 특성을 보면 pH가 3.53으로 나타나는 화순 동면에 위치한 냉굴집 (JS-26)의 배출수에서 Zn (268 $\mu\text{g/l}$)와 Cu (51 $\mu\text{g/l}$)가 최대치로 나타난다. pH가 가장 높은 지점은 한천천의 JS-18지점으로서 pH가 7.78로서 특이하게도 TDS (656 mg/l)와 TDI (142.48 meq/l)가 최대치로 나타난다. pH가 높은 지점에서 TDS와 TDI 값이 높은 이유는 Ca (230 mg/l), HCO_3^- (1,220.36 mg/l)와 SO_4^{2-} (1,859.4 mg/l)등이 높기 때문이다. pH (6.6)가 비교적 높은 호남폐탄광 폐석더미의 산성광산배수 (JS-19)는 As (365 $\mu\text{g/l}$)와 Mg (101 mg/l)가 최대치로 나타나며 Fe (7.52 mg/l)가 비교적 낮게 검출된다. 산성광산배수 중에서 Fe 함량이 최대값 (74.6 mg/l)으로 나타나는 한천천의 상류지역에 해당되는 JS-2는 황갈색의 철수산화물이 다량으로 관찰되는 지점이다. 이와 같이 산성광산배수 중에 Fe 함량이 높은 원인은 상대적으로 많이 퇴적되어 있는 철수산화물의 영향인 것으로 생각된다.

화순폐탄광 배출수의 pH가 강원도 폐탄광 배출수보다 비교적 높게 나타나는 이유는 화순지역 석탄 속에 함유된 황철석의 양이 강원도지역보다 적게 함유된 원인으로 해석된다. 전용원 등 (1984)에 의하면 강원도 지역에서 산출되는 석탄에 비해 화순지역의 석탄에는 소량의 황철석이 함유되어 나타난다고 한다. 시료 위치에 따른 pH와 Al 함량을 함께 도시한 Fig. 2를 보면 pH와 Al의 함량변화가 상반되게 나타나고 있다. 폐탄광 배출수의 pH가 5.64~6.87로 나타나는 JS-1와 JS-4 지점에서는 Al의 함량이 0.12~0.4 ppm로 비교적 낮게 나타나고 pH가 4.85~5.01 범위로 감소되어 나타나는 JS-5번과 JS-12번 사이에서의 Al 함량은 3.19~3.74 ppm로 비교적 높게 검출된다. pH가 5.92로 증가되는 JS-13번과 JS-23번 사이의 Al 함량은 0.08~0.37

ppm로 매우 낮게 나타나고 있다. 이와 같이 pH가 높은 지점에서 Al 함량은 비교적 낮게 나타나고 pH가 낮은 지점에서는 Al 함량이 높은 이유는 배출수에 용해되어 있던 Al 이온이 pH 5.6 이상에서 과포화상태가 되어 하상에 백색침전물로 침전되기 때문이다.

실제 현장의 상류지역에서 백색침전물이 퇴적되어 있는 모습이 잘 관찰되는데 이들 지점에서 pH는 비교적 높은 수치로 나타나고 있다. Nordstrom (1982b)에 의하면 pH가 4에서 6으로 증가하는 지점에서의 산성광산배수는 황산염과 Al 이온의 함량은 뚜렷하게 감소하고 하상에 Al, Fe 및 황산염으로 구성된 비정질의 백색침전물이 침전된다고 하였다. Nordstrom and Ball (1986)에 의하면 pH 4.5 이하의 자연수는 깎사이트나 고령석에 대하여 불포화상태가 되고 Al 이온의 농도는 명반석 ($\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$), 주바나이트 ($\text{Al}(\text{SO}_4)\text{OH} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 및 배사알루미나이트와 같은 광물의 용해도에 관계가 있으며, pH가 4.6 이상에서는 중화가 진행되어 Al의 농도가 급격히 감소하고 깎사이트나 비정질의 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 가 형성될 수 있다고 발표한다. 명반석과 깎사이트가 화순폐탄광 수계에서 침전될 가능성을 시사해주는 자료는 WATEQ4F (Hounslow, 1995)에서 산출된 명반석과 깎사이트에 대한 포화지수와 pH의 관계에서 알 수 있다 (Fig. 3). Fig. 3는 명반석, 깎사이트, 석고 및 경석고에 대한 포화지수와 pH의 관계를 도시한 것으로서 4.5와 6.6 사이의 pH 범위에서 명반석은 과포화영역에 도시되고 pH 4 이하와 pH 6.6 이상에서는 불포화영역에 도시되고 있다. 깎사이트는 pH 5 이상에서 과포화영역에 도시되고 있지만 석고와 경석고는 pH의 모든 영역에서 불포화영역에 도시되고 있다. 현장의 하천에서 관찰되는 백색침전물은 주로 pH의 영향에 의해서 침전되는 명반석 혹은 깎사이트일 것으로 판단된다.

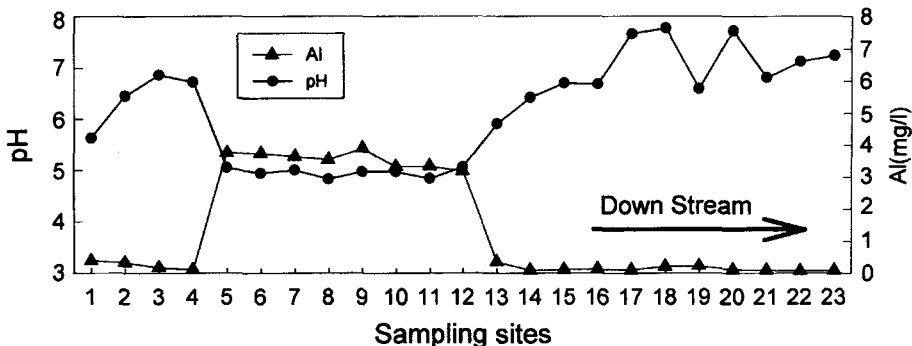


Fig. 2. Variation patterns showing pH and Al concentrations of the mine drainage waters in the Hwasoon area.

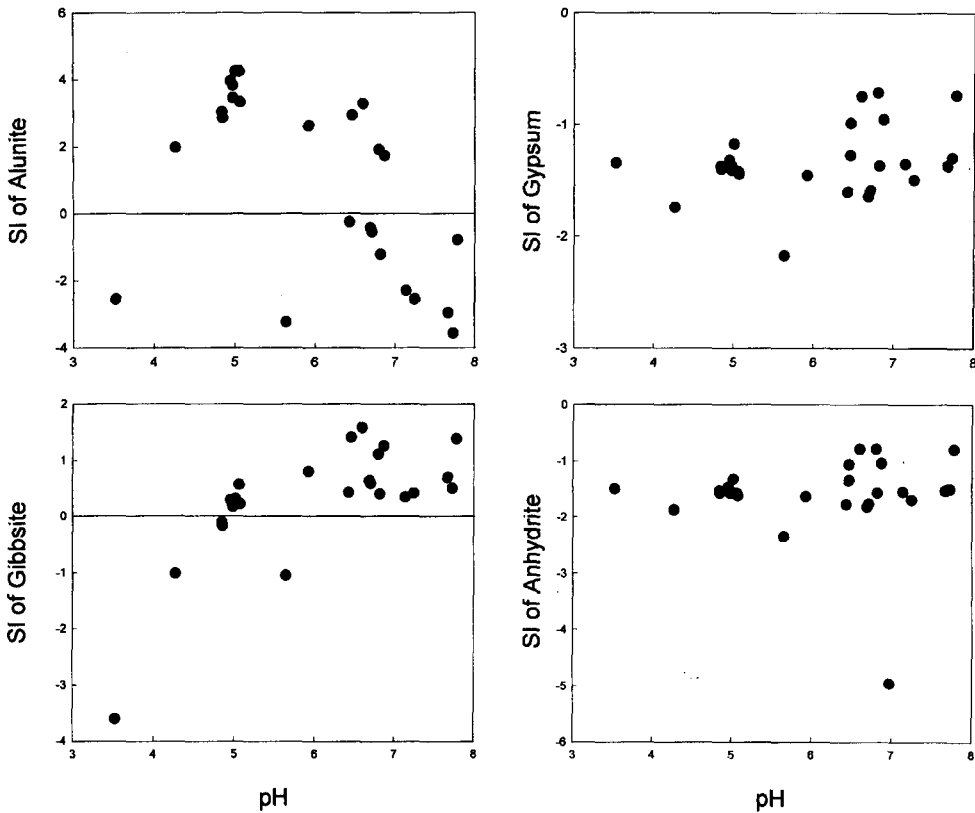


Fig. 3. Saturation index(SI) showing alunite, gypsum, gibbsite and anhydrite of th mine drainage waters in the Hwasoon area.

한편 거리에 따른 Fe, Na 및 NO₃의 함량변화를 보면 Fe는 상류지역에서 높은 함량을 보이다가 하류로 갈수록 감소한다. 그러나 Na와 NO₃의 함량은 상류에서 낮은 함량을 갖다가 하류로 갈수록 증가한다 (Fig. 4). 이는 주변 농경지의 비료와 퇴비의 영향으로 생각된다. 특히 NO₃의 경우 지류가 합류되는 JS-14와 JS-16 지점에서 NO₃의 함량이 뚜렷이 증가하는 현상은 주변 농경지에서 사용된 퇴비의 영향을 반영하는 것으로 보인다.

본 연구지역의 하천수에서 NO₂의 함량이 1.2에서 5.4 ppm 범위로 검출되는 것으로 보아 퇴비의 영향을 뒷받침해주고 있다. 일반적으로 생물학적 질소고정 또는 비료나 퇴비에 함유된 유기질 질소와 NH₄은 탈질 화학작용으로 NO₂가 생성되고 더 나아가 NO₃가 형성되는 것과 일치하는 것이다 (Hallberg and Keeney, 1993). 화순폐탄광 배출수에 함유되어 있는 Zn의 함량은 1.12 µg/l에서 최대 268 µg/l로 나타나며 하류보다 상류에서 높은 함량으로 나타난다. Cu와 As의 이온함

량은 최대 51 µg/l 그리고 287 µg/l로 각각 검출되고 있으며 상류에서 하류로 갈수록 그 함량이 감소하여 나타난다 (Table 1, 2). 화순 폐탄광에서 배출되는 산성광산배수의 수질 특성을 알아보기 위하여 Piper 삼각도에 도시하였다 (Fig. 5). 전체적인 수질유형은 양이온에서 Ca와 Mg가 우세하고 음이온에서는 SO₄가 지배적으로 우세한 수질특성을 보인다. 양이온과 음이온이 투영된 영역은 SO₄+Cl과 Ca+Mg가 증가하는 비탄염 우세 유형에 해당된다. 그러나 한천면 오음리 주민들의 상수원인 JS-24 시료는 Na+K와 HCO₃가 우세한 수질특성으로서 Cl+SO₄보다 HCO₃가 지배적인 탄산염 우세 유형에 도시되고 있다.

하상침전물의 화학조성과 광물학적 특징

폐탄광지역 수계의 황갈색 침전물은 Fe₂O₃ (80.77 wt.%)와 LOI (11.87 wt.%)로 구성되어 있고 SiO₂ (4.61 wt.%), CaO (0.11 wt.%), MnO (0.04 wt.%),

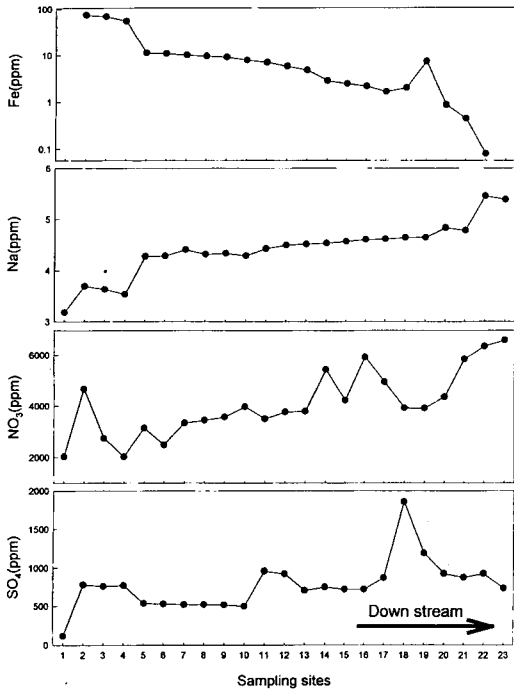


Fig. 4. Variation patterns showing Fe, Na, NO₃ and SO₄ concentrations of the mine drainage waters in the Hwasoon area.

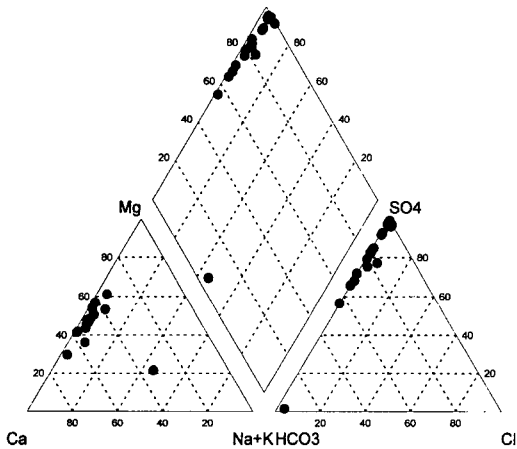


Fig. 5. Piper diagram of the mine drainage waters in the Hwasoon area.

MgO (0.03 wt.%), Na₂O (0.03 wt.%), 및 K₂O (0.01 wt.%) 함량은 매우 적게 나타난다. 황갈색 침전물은 Fe 성분이 높은 철수산화물임을 알 수 있다. 박천영 등 (1999)에 의하면 폐탄광 수계에 형성되어 있는 철수산화물은 주로 Fe로 구성되어 있음을 발표한 바 있고,

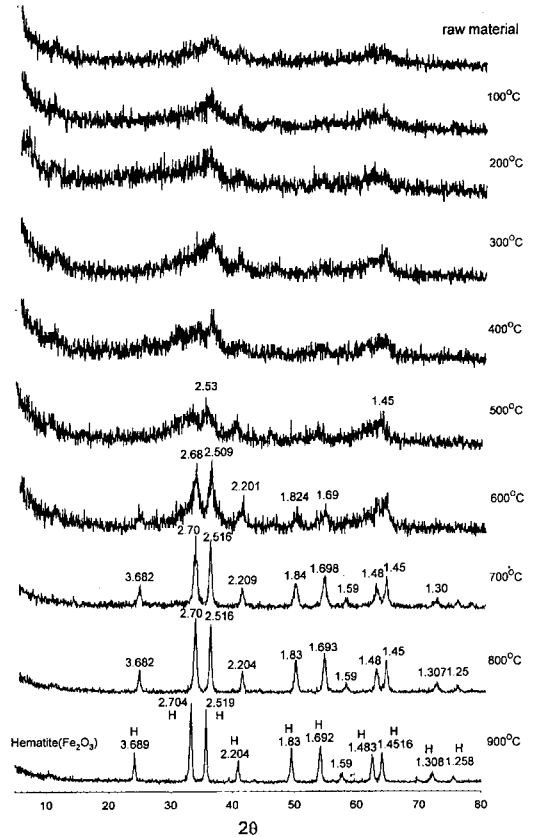


Fig. 6. Diffractometer patterns of precipitated materials from the mine drainage waters in the Hwasoon area. Diffractometer patterns of hematite were produced by heating yellowish precipitated materials from 100 to 900°C for 1 hours. H indicate the peaks of hematite.

Henmi 등 (1980)은 결정도가 미약한 철수산화물은 Fe₂O₃ 함량이 42.36~78.71 wt.%이며 LOI가 8.58~12.85 wt.% 범위임을 보고하였다.

황갈색 침전물에 대한 열적 특성을 알아보기 위하여 100°C에서부터 900°C 까지 각각 1 시간 동안 전기로에서 가열하고 이들을 XRD분석과 IR분석을 실시하였다 (Fig. 6와 Fig. 7).

자연상태의 황갈색 침전물은 XRD분석에서 비정질로 나타났던 시료가 100°C에서 400°C까지는 뚜렷한 회절선이 나타나지 않지만 500°C에서는 2.53Å과 1.45 Å 회절선이 미약하게 관찰된다. 그러나 600°C에서는 2.68Å, 250Å, 2.201Å, 1.82Å 및 1.45Å 회절선이 뚜렷하게 나타난다. 그러나 700°C로 가열된 황갈색 침전물은 적철석에 해당되는 완전한 회절선이 나타났다. 침철석은 300°C의 탈수작용에 의하여 적철석으로 전이

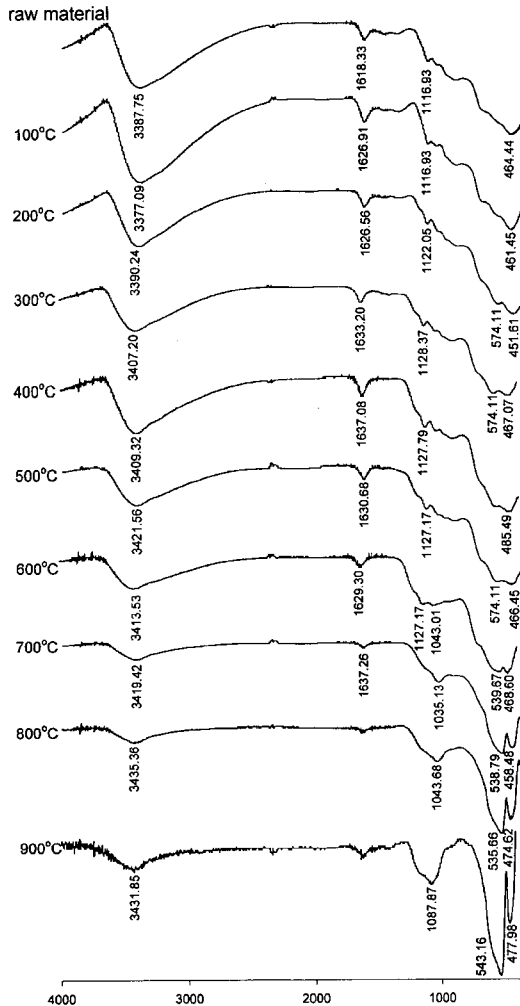


Fig. 7. Infrared spectra of precipitated materials from the mine drainage waters in the Hwasoon area. Yellowish precipitated materials were heated from 100 to 900°C for 1 hour.

될 수 있고, 페리하이드라이트는 약 600°C에서 그리고 마그헤마이트 (maghemite)는 600~800°C에서 적철석으로 전이된다고 하였다. Childs 등 (1982)에 의하면 순수한 철수산화물은 250~300°C 온도에서 적철석으로 전이된다고 하였지만, 본 연구의 철수산화물에 대한 300°C 산물에서 적철석에 해당되는 회절선은 발견할 수 없고, 가열온도 600°C에서 전형적인 적철석 회절선이 나타난다. 높은 온도에서 적철석 회절선이 나타나는데 이는 철수산화물이 비교적 낮은 온도 (약 300°C)의 탈수작용에 의해서 적철석으로 전이되기보다는 600°C의 용융에 의하여 적철석으로 전이됨을 보여준다.

황갈색 침전물을 100°C에서 900°C까지 각각 1 시간동안 가열한 후 각 시료에 대하여 400 cm⁻¹에서 4000 cm⁻¹ 구간에서 IR분석을 실시하였다 (Fig. 7). 이 침전물에서 온도를 가열하지 않은 시료는 3387.75 cm⁻¹, 1618.33 cm⁻¹, 1116.93 cm⁻¹ 및 464.44 cm⁻¹에서 흡수밴드가 나타났다. 3387.75 cm⁻¹의 흡수밴드는 OH기에 의한 흡수밴드, 1618.33 cm⁻¹에 해당되는 흡수밴드는 H₂O의 변형 흡수밴드, shoulder로 나타나는 1116.93 cm⁻¹의 흡수밴드는 SO₄²⁻기에 의한 흡수밴드 그리고 464.44 cm⁻¹의 흡수밴드는 O-Fe stretching (Bigham *et al.*, 1990)에 의한 흡수로 해석된다 (Lazaroff, *et al.*, 1982).

황갈색침전물에 대한 가열온도가 증가하면 OH기 (3387.75 cm⁻¹)에 의한 흡수밴드와 H₂O의 변형 (1618.33 cm⁻¹)에 해당되는 흡수밴드의 강도는 점점 감소하였다. 이들 흡수밴드의 강도가 온도의 증가와 함께 감소하여 나타나는 것은 가열온도가 높을 수록 탈수작용의 효과가 커져 황갈색 침전물에 화학적으로 결합되어 있던 OH기와 H₂O기가 제거되기 때문인 것으로 해석된다. 한편 shoulder로 나타나는 SO₄²⁻기에 의한 1116.93 cm⁻¹ 흡수밴드는 온도가 증가함에 따라 1122.05 cm⁻¹, 1127.17 cm⁻¹로 편기되어 나타나다가 700°C에 이르러서는 소멸되어 버린다. O-Fe stretching (Bigham *et al.*, 1990)에 해당되는 464.44 cm⁻¹ 흡수밴드는 200°C에서 미약하게 574.11 cm⁻¹과 451.61 cm⁻¹에서 흡수밴드가 나타나다가 900°C에서 543.16 cm⁻¹과 477.98 cm⁻¹에서 뚜렷한 흡수밴드로 나타난다. Russell and Fraser (1994)에 의하면 532~562 cm⁻¹와 450~480 cm⁻¹에서 전형적인 적철석에 해당되는 흡수밴드가 나타난다고 하였다. 본 연구에서 온도가 높은 황갈색 침전물의 IR분석에서 540과 450 cm⁻¹ 부근에서 강한 흡수밴드가 나타나는 것은 비정질의 철수산화물이 적철석으로 전이되기 때문인 것으로 생각된다.

증발잔류광물에 대한 광물학적 및 화학적 특성

광산지역에서 배출되는 JS-19, JS-25 및 JS-26 하천수 시료를 채취하여 실험실에서 자연상태에서 건조시킨 결과 증발잔류광물이 얻을 수 있었다. 이는 박천영 등 (1999, 2000)에 의하여 보고된 바 있다. 따라서 광산산성배수를 자연 건조시키면 이온농도의 함량에 따라 다양한 종류의 증발잔류광물이 형성될 수 있을 것이라는 가정 하에 실험실에서 산성광산배수를 자연 건조시켰다. 이 시료를 건조시켜 얻은 증발잔류광물에 대

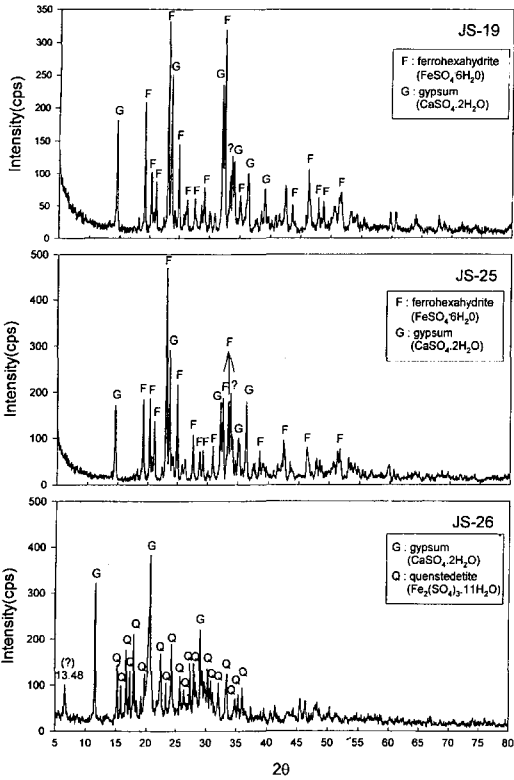


Fig. 8. Diffractometer patterns of precipitated and evaporated materials from the mine drainage waters in the Hwasoon area. The precipitated and evaporated materials prepared from the JS-19, JS-25 and JS-26 sites by air-drying in the laboratory.

하여 X-ray분석을 실시하였다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 페로헥사하이드라이트 (ferroxahydrate) 석고 및 퀴스테이트 (quenstedite)가 관찰된다. JS-19와 JS-25 시료에 대한 X-ray 회절선은 5.46, 5.12, 4.89, 4.44, 4.05, 3.62, 3.46, 3.40, 3.20, 3.03, 2.94, 2.53, 2.28, 2.07, 1.88 및 1.86Å으로 나타나는데 이는 JCPDS의 15-393와 완벽하게 일치되고 있다. JS-19, JS-25 및 JS-26 시료의 회절선이 모두 7.65, 4.28, 3.03, 2.87, 2.68 및 2.48Å에서 관찰되는데 이는 석고 (JCPDS, 33-311) 결정으로 판단된다. JS-26 시료에서 동정이 않 된 회절선 13.48Å을 제외하고 석고와 스테 데라이트 (JCPDS, 17-160, 28-496)에 잘 일치한다.

한편 증발잔류광물에 대한 IR분석결과를 Fig. 9에 나타냈다. 이 결과에서 OH stretching에 해당되는 흡수 밴드가 3410~3420 cm⁻¹ 구간에서 넓게 나타나고, 851~887 cm⁻¹ 구간에서는shoulder로 나타나고 있다. 1017 cm⁻¹ 구간에서만 나타나는 OH stretching 흡수

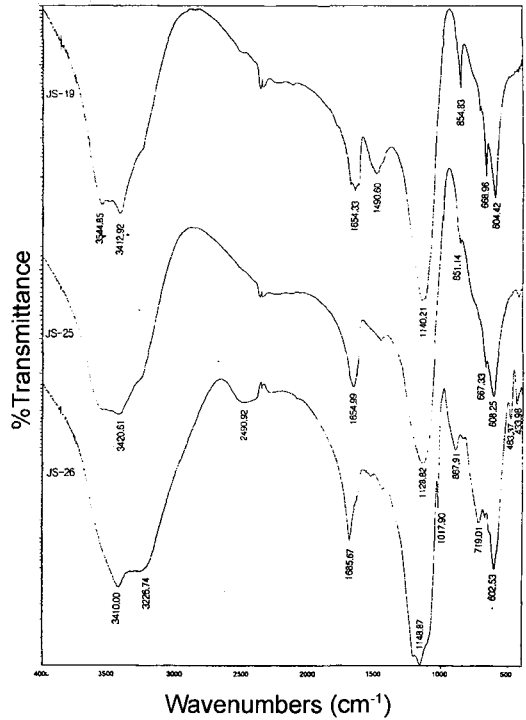


Fig. 9. Infrared spectra of precipitated and evaporated materials from th mine drainage waters in the Hwasoon area.

밴드는 JS-26 시료에서만 shoulder로 나타나고 있다. H₂O의 변형에 해당되는 흡수밴드는 모든 시료의 1654~1685 cm⁻¹ 구간과 667~719 cm⁻¹ 구간에서 잘 나타나고 있다. SO₄에 의한 흡수밴드는 모든 시료의 1128~1148 cm⁻¹ 구간에서 그리고 602~608 cm⁻¹ 구간에서 뚜렷하게 나타난다. JS-26 시료에서 483 cm⁻¹ 과 433 cm⁻¹ 흡수밴드가 shoulder로 관찰되는데 이는 Fe-O stretch로 생각된다. Carlson and Schwertmann (1980)에 의하면 페로헥사이트 (feroxyhite)에 대한 IR 분석에서 430 cm⁻¹ 흡수밴드는 Fe-O 밴드에 의한 흡수밴드로 해석한 바 있고, Brady *et al* (1986)은 430~470 cm⁻¹ 구간의 흡수밴드를 FeO₆에 기인된 흡수밴드로 해석하였다. 이상의 IR분석결과에서 증발잔류광물은 OH, H₂O, SO₄ 및 Fe-O가 화학적으로 결합되어 있는 광물임을 확인할 수 있다.

증발잔류광물에 대한 열적 특성을 알아보기 위하여 DTA분석을 실시하였다 (Fig. 10). 104.58, 107 및 99.08°C의 흡열반응 선이 대체로 100°C 부근에서 나타났다. 150°C 부근의 흡열반응 선이 152.55, 155.86 및 154.54°C에서 나타나고 있다. 100°C와 150°C 부

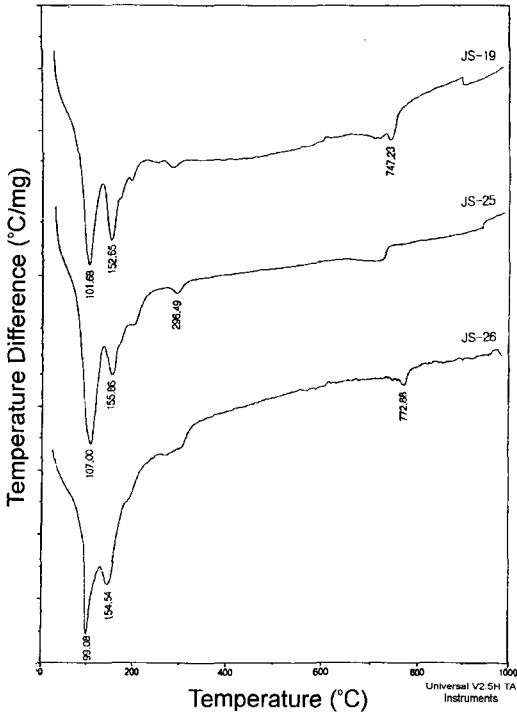


Fig. 10. DTA patterns of precipitated and evaporated materials from the mine drainage waters in the Hwasoon area.

근에서 일어나는 흡열반응은 석고에 결합되어 있는 H₂O의 손실에 의한 것으로 판단된다 (Doner and Lynn, 1989). 일반적으로 물질에 존재하는 흡착수나 결합수의 탈수작용에 의해서 일어나는 흡열반응은 비교적 낮은 온도에서 발생하며, 구조의 파괴나 용융에 의해서 일어나는 흡열반응은 비교적 고온에서 발생한다. 100°C와 150°C 부근에서 일어나는 비교적 낮은 온도의 흡열반응은 석고 (CaSO₄ · 2H₂O), 페로헥사하이드라이트 (FeSO₄ · 6H₂O) 및 켄스테테타이트 (Fe₂(SO₄)₃ · 11H₂O)에 결합되어 있는 H₂O의 탈수에 의한 반응으로 해석되며, 비교적 고온도인 747.23°C와 772.88°C에서 일어나는 흡열반응은 석고, 페로헥사하이드라이트 및 켄스테테타이트에 화학적으로 결합되어 있는 황산염의 분해반응으로 해석된다. Doner and Lynn (1989)에 의하면 차로사이트에 대한 연구에서 400°C와 500°C에서는 Fe³⁺-OH에 의한 흡열과 발열반응이 일어나고 고온도인 800°C 부근에서는 황산염의 분해가 흡열반응으로 나타난다고 하였다. 석고는 낮은 온도인 140°C 부근에서 탈수작용이 일어나 CaSO₄ · 2H₂O가 CaSO₄ · 1/2H₂O로 변화하며 150°C에서 CaSO₄ · 1/

2H₂O가 용해성인 CaSO₄로 변화하며, 비교적 고온도인 약 350°C에서 용해성의 CaSO₄가 불용성의 CaSO₄로 변이 하는데 이때는 발열반응이 나타나는 것으로 알려져 있다 (Cowan and Weintritt, 1976).

증발잔류광물에 대하여 SEM 및 EDS 분석을 실시 하였다 (Fig. 11, 12). JS-19와 JS-25 시료의 수질을 보면 pH가 6.6과 6.8, Ca 함량은 236 mg/l과 117 mg/l 그리고 SO₄²⁻은 1196.6 mg/l과 1402.9 mg/l로 검출되고 있다. JS-19 시료의 SEM 및 EDS 분석결과를 보면 결정도가 양호한 주상의 석고결정이 관찰되고 EDS 분석결과에서 Mg (1.61 atom%), S (41.79 atom%), Ca (55.82 atom%) 그리고 Cu (0.78 atom%) 등이 검출된다 (Fig. 11, left). EDS분석에서 Mg, S, Ca 및 Cu등이 검출되는 것은 산성광산배수에 비교적 다량으로 함유된 이온들의 영향으로 해석된다. JS-19 시료의 다른 지점에서 관찰된 SEM 및 EDS 분석결과에서는 비교적 잘 발달된 다수의 주상결정들이 관찰된다 (Fig. 12A, B: left).

주상결정에 대한 EDS분석결과를 보면 Mg (4.29 atom%), S (37.41 atom%), Ca (56.89 atom%), Fe (0.63 atom%) 및 Cu (0.79 atom%)등이 검출된다. JS-26 시료의 증발광물을 보면 결정도가 양호한 주상의 결정이 관찰되며, EDS분석에서 Al (0.82 atom%), S (44.8 atom%) 및 Ca (54.38 atom%)등이 검출된다 (Fig. 11, right). 일반적으로 석고는 Ca가 32.6%. SO₃가 46.5% 그리고 H₂O가 20.9%으로 구성되어 있고, 석고는 변종광물이 별로 없는 광물이라 화학적 변화가 거의 나타나지 않지만 미량의 Ba²⁺와 Sr²⁺가 Ca²⁺를 치환하기도 한다. 석고로 판단되는 증발잔류광물에 대한 EDS분석 결과에서 Ca와 S의 몰 비가 1:1로 나타나지 않고 Mg, Fe, 및 Cu 성분이 검출되는 것은 EDS분석이 반정량적인 방법이라 광물의 정확한 화학비를 구현하기가 어렵기 때문이며, 또한 증발잔류광물이 형성된 광산산성배수에는 Al, Mg, Fe 및 Cu와 같은 이온성분이 다량으로 용해되어 있다가 증발잔류광물이 형성되면서 이들 성분이 표면에 흡착되기 때문이다 (박천영 등, 1999).

JS-26 시료 (pH=3.53, Ca=25.3 mg/l, SO₄²⁻=730.6 mg/l)에 대한 SEM 및 EDS분석결과를 보면 비교적 잘 발달된 주상의 석고 결정들이 관찰되고 (Fig. 12, left), Mg 광물로 생각되는 광물이 관찰된다 (Fig. 12A, B, right). Mg 광물로 판단되는 광물을 확대하여 (Fig. 12B) EDS 면분석을 실시한 결과를 보면 Mg (41.95 atom%), S (57 atom%) 및 Mn (1.05 atom%)

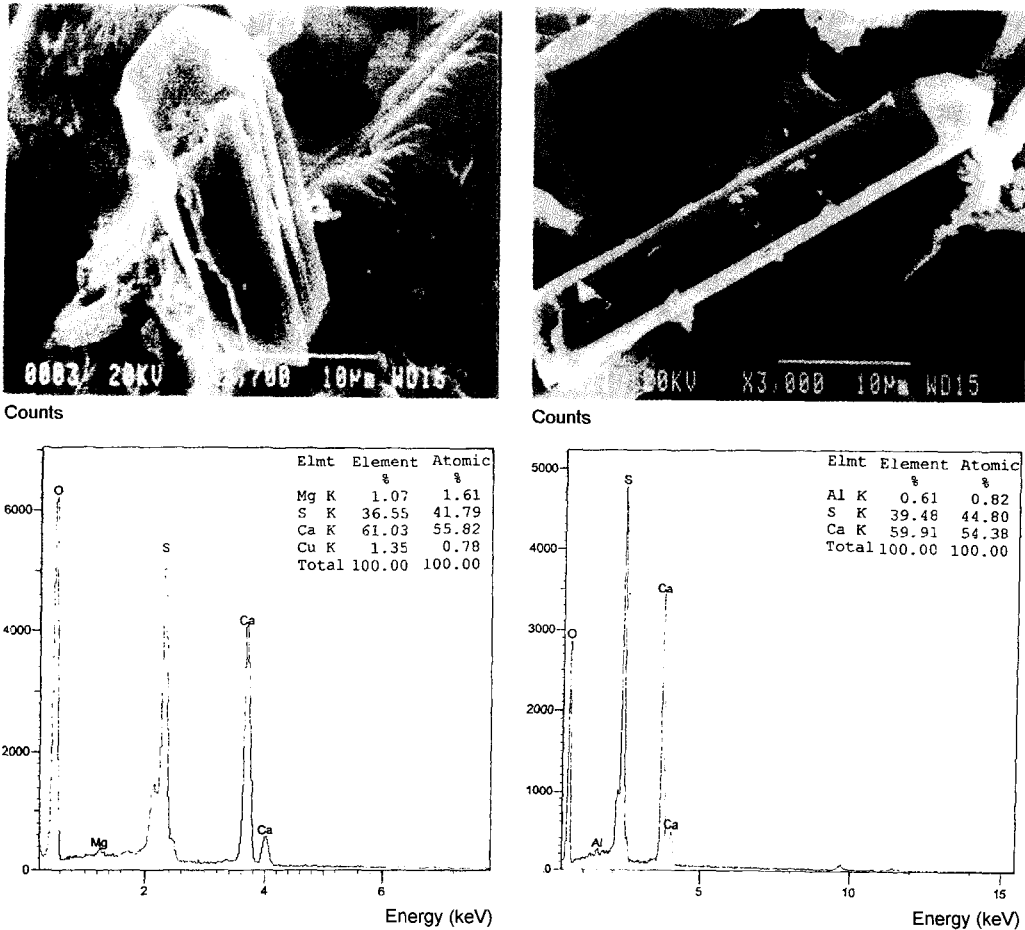


Fig. 11. SEM and EDS analysis of precipitated and evaporated materials (lft: JS-19, right: JS-25) from the mine drainage waters in the Hwasoon area. Note apparent well crystallized rhombic crystals, indicating gypsum.

성분이 검출된다. Mg와 S의 성분이 매우 높은 함량으로 검출되는 것으로 보아 Mg와 SO_4^{2-} 가 화학적으로 결합되어 있는 펜타하이드라이트, 스타카라이트(starkryite) 및 케사라이트(kieserite) 일 가능성도 있으며 (Doner and Lynn, 1989), 엡소마이트(epsomite) 일 가능성도 있다 (Dixon *et al.*, 1982).

결 론

1. 화산탄전의 산성광산배수는 대체로 약산성에서 약알카리 수질특성을 보이며, 하천수에 용해되어 있는 Ba, Fe, Mn, Zn 및 SO_4^{2-} 이온성분들은 상류지역에서 높게 나타나다가 하류지역으로 갈수록 감소하여 나타나지만 Na, NO_3^- 이온은 상류지역보다 하류지역에서 높게 나타난다. 이들 이온들이 하류지역에서 높게 나

타는 원인은 농경지의 경작활동이나 용해성 증발산류광물의 용해에 의한 결과로 판단된다. 산성광산배수의 수질유형은 Ca와 Mg가 우세한 양이온과 SO_4^{2-} 가 우세한 음이온 특성을 보이고, SO_4+Cl 와 Ca+Mg가 증가하는 비탄산염 우세 유형에 해당된다.

2. 산성광산배수에 함유된 Al의 함량은 pH가 5.64~6.87로 나타나는 구간에서 비교적 낮게 나타나고 pH가 4.85~5.01 범위로 나타나는 구간에서는 비교적 높은 수치로 나타난다. 이는 명반석에 대한 포화지수가 4.5와 6.6 사이의 pH 범위에서는 과포화영역에, pH 4 이하와 6.6 이상에서는 불포화영역에 해당되고, 깃사이트는 대체로 과포화영역에 해당되는 것으로 보아 현장에서 관찰되는 백색침전물은 주로 pH의 영향에 의해서 침전되는 명반석 혹은 깃사이트일 것으로 판단된다.

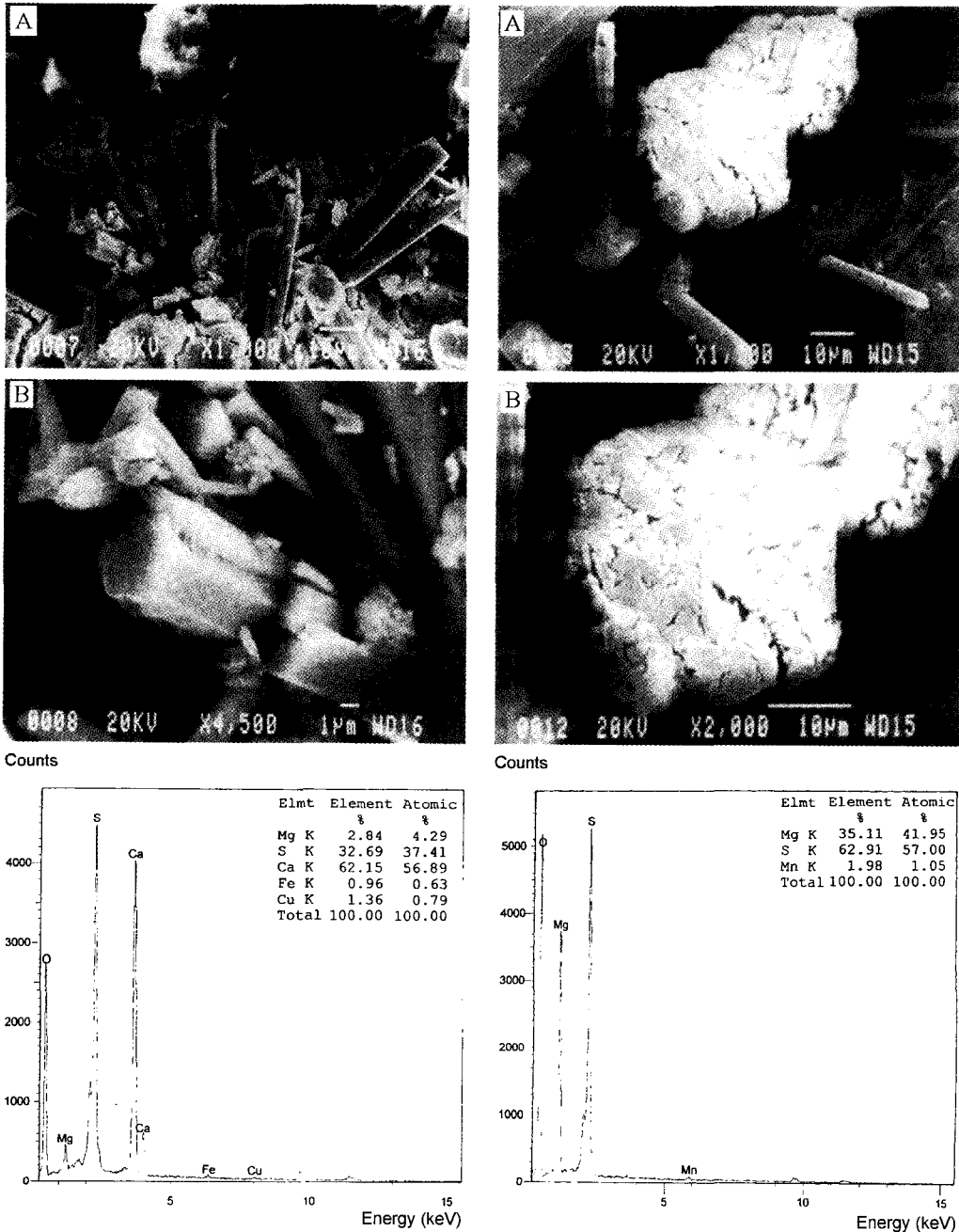


Fig. 12. SEM and EDS analysis of precipitated and evaporated materials (left: JS-16, right: JS=26) from the mine drainage waters in the Hwasoon area. Note apparent well crystallized thin acicular with rhombic crystals, indicating gypsums (JS-16). The aggregated crystal indicating Mg minerals (JS-26). B: Enlargement of the central portion of photo A.

3. 화순폐탄광 수계의 하상에 퇴적되어 있는 황갈색 침전물은 Fe_2O_3 가 80.77 wt.%로 나타나는 철수산화임을 알 수 있고, 이 황갈색 침전물의 가열온도가 증가함에 따라 비정질에서 결정도가 좋은 적철석로 전이되

며, OH, H_2O 에 대한 흡수밴드의 강도는 감소하는 반면 Fe-O 흡수밴드의 강도는 증가한다. 이들 흡수밴드의 강도가 온도의 증가에 따라 감소하거나 증가하는 원인은 가열온도가 높을 수록 탈수작용의 효과가 커서

황갈색 침전물에 화학적으로 결합되어 있던 OH기와 H₂O기가 제거되기 때문이고, 고온에서 비정질의 철수산화물이 적절적으로 전이되면서 Fe-O기가 증가하기 때문인 것으로 해석된다.

4. 페탄광 산성광산배수를 자연건조 시켜 얻은 증발 잔류광물에 대한 XRD분석을 실시한 결과 석고, 페로헥사하이드라이트 및 켈스테테라이트와 같은 광물을 얻을 수 있고, 이들 광물들은 OH, H₂O 및 SO₄²⁻가 화학적으로 결합되어 있음을 IR분석에서 확인된다. SEM 및 EDS분석에서 결정도가 양호한 석고 결정이 관찰되고 Mg와 결합된 광물이 산출되는 것으로 보아 산성광산배수가 유입되는 토양에서는 용해성이 강한 증발잔류 광물이 2차로 형성될 가능성이 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

- 김통권, 정영욱, 김용욱, 유장한, 배위섭 (1999) 지하학모 델링에 의한 산성광산배수 중화처리 조건 연구. 대한 환경지질학회, 한국자원공학회, 한국지구물리탐사학회 공동학술발표회 논문집, 충남대학교, p. 52.
- 민정식, 정영욱, 이현주, 이농남 (1996) 광산지역 광해조사 및 대책연구. 한국자원연구소, KR-96 (C)-41, 374p.
- 박상준, 황지호, 최선규, 오창환 (1999) 임천광산 광미 적 치장 주변 2차 광물들에 대한 생성 환경: 예비발표. 대한환경지질학회, 한국자원공학회 · 한국지구물리탐사 학회공동학술발표회 논문집, 충남대학교, p. 49.
- 박천영, 정연중, 최낙철 (1999) Yellowboye에 대한 지구화학적 연구. 한국자원공학회지, 36권, p. 299-312.
- 박천영, 정연중, 최낙철, 강지성, 박신숙, 김성구 (2000) 상동 페탄광지역 광산산성배수와 증발광물에 대한 지구화학. 한국자원공학회지, 37권, p. 249-261.
- 연세대학교 지질학과 동문회 (1982) 한국의 지질과 광물 자원. 연세대학교 지질학과 동문회, p. 520.
- 전용원, 안재휴, 전효택, 김명균, 이양원 (1984) 우리나라 석탄의 암석광물 및 지구화학적 연구. 대한광산학회지, 21권, p. 23-32.
- Bigham, J. M., Schwertmann, U., Carison, L. and Murad, E. (1990) A poorly crystallized oxyhydroxysulfate of iron formed by bacterial oxidation of Fe (II) in acid mine waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 54, p. 2741-2758.
- Gigham, J. M., Schwertmann, U., Traina, S. J., Winland, R. L. and Wolf, M. (1996) chwertmannite and the chemical modeling of iron in acid sulfate waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 60, p. 2111-2121.
- Brady, K. S., Bigham, J. M., Jaynes, W. F. and Looan, T. J. (1986) Influence of sulfates on Fe-oxide formation: comparisons with a stream receiving acid mine drainage. *Clays Clay Miner.*, v. 34, p. 266-274.
- Carlson, L. and Schwertmann, U. (1980) Natural occurrence of feroxyhite (δ -FeOOH). *Clays Clay Miner.*, v. 28, p. 272-280.
- Childs, C. W., Downes, C. J. and Wells, N. (1982) Hydrous iron oxide minerals with short order deposited in a spring/stream system, Tongariro National Park, New Zealand. *Aust. J. Soil Res.*, 20(2), p. 119-129.
- Cowan, J. C., Weintritt, D. J. (1976) Water-formed scale deposits. Gulf Publishing Company, 596p.
- Dixon, J. B., Hossner, L. R., Senkayi, A. L. and Egashira, K. (1982) Mineralogical properties of lignite overburden as they relate to mine spoil reclamation. In Kittrick, J. A., Fanning, D. S. and Hossner, L. R. (ed.) Acid sulfate weathering. SSSA Special Publication Number 10, p. 169-191.
- Doner, H. E. and Lynn, W. C. (1989) Carbonate, halide, sulfate, and sulfide minerals. In Bigham, J. M., Dixon, J. B., Milford, M. H., Roth, C. B. and Weed, S. B. (ed.) Minerals in Soil Environments, SSSA Book Series: 1, p. 279-330.
- Hallberg, G. R., Keeney, D. R. (1993) Nitrate. In Alley, W. M. (ed.) Regional ground-water quality. VAN NOSTRAND REINHOLD, New York, p. 297-322.
- Henmi, T., Wells, N., Childs, C. W. and Parfit, R. L. (1980) Poorly-ordered iron-rich precipitates from spring and streams on andersitic volcanoes. *Geochim. Cosochim. Acta*, 44, p. 365-372.
- Hunslow, A. W. (1995) Water quality data: analysis and interpretation. CRC Press, Inc. 397p.
- Lazaroff, N., Sigal, W. and Wasserman, A. (1982) Iron oxidation and precipitation of ferric hydroxysulfates by resting *Thiobacillus ferrooxidans* cells. *Appl. Environ. Microbiol. Apr.* p. 924-938.
- Nordstrom, D. K. (1982a) Aqueous pyrite oxidation and the consequent formation of secondary iron minerals. In Kittrick, J. A., Fanning, D. S. and Hossner, L. R. (ed.) Acid sulfate weathering. SSSA Special Publication Number 10, p. 37-56.
- Nordstrom, D. K. (1982b) The effect of sulfate on aluminum concentrations in natural waters: some stability relations in the system Al₂O₃-SO₃-H₂O at 298 K. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 46, p. 681-692.
- Nordstrom, D. K. and Ball, J. W. (1986) The geochemical behavior of aluminum in acidified surface waters. *Science*, v. 232, p. 54-56.
- Russell, J. D., Fraser, A. R. (1994) Infrared methods, In Wilson, M. J. (ed.) Clay mineralogy: spectroscopic and chemical determinative methods, Chapman & Hall, London, p. 11-67.
- Sullivan, P. J., Yelton, J. L. and Reddy, K. J. (1988) Iron sulfide oxidation and the chemistry of acid generation. *Environ. Geol. Water Sci.*, v. 11, p. 289-295.
- Timpson, M. E., Richardson, J. I., Keller, L. P. and McCarthy, G. J. (1986) Evaporite mineralogy associated with saline seeps in southwestern North Dakota. *Soil Sci. Soc. Am. J.* v. 50, p. 490-493.
- Whittig, L. D., Deyo, A. E. and Tanji, K. K. (1982) Evaporite mineral species in Mancos shale and salt efflorescence, Upper Colorado River Basin. *Soil Sci. Soc. Am. J.* v. 46, p. 645-651.