

동해탄광 일대 산성광산배수의 지화학적 특성 및 증발잔류물에 대한 광물학적 연구

김정진^{1*} · 김수진¹ · 김윤영²

¹서울대학교 지구환경과학부, ²중앙대학교 산업경영연구소

Mineralogy of Evaporation Residues and Geochemistry of Acid Mine Drainage in the Donghae Mine Area

Jeong-Jin Kim^{1*}, Soo-Jin Kim¹ and Yoon-Young Kim²

¹School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

²Institute of Industrial Management, Chung-Ang University, Ansong-city, Kyunggi-do, 456-756, Korea

The mineralogy of material left after evaporation of acid mine drainage water is generally dependent on the chemical composition of the source water. The residues formed by the evaporation of acid mine water in the Donghae coal mine area consists mainly of gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) with minor amounts of alunogen ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 17\text{H}_2\text{O}$) and hexahydrate ($\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Gypsum was identified from both of the bottom precipitates and the evaporation residues of acid mine water. Alunogen, an aluminum sulfate hydrate, was also formed by evaporation and occurred as needle-like crystals. Aluminum is derived from chemical dissolution of aluminosilicate mineral such as pyrophyllite, illite and chlorite in wasted rocks. Hexahydrate in evaporation residues occurred as needle-like, fibrous, and acicular crystals and was associated with gypsum and alunogen.

Key word : acid mine drainage, evaporation residues, gypsum, alunogen, hexahydrate

동해탄광 지역의 산성광산배수에는 Ca, SO₄, Mg, Al의 함량이 높게 나타난다. 이 일대의 산성광산배수를 증발시켰을 때 생성된 증발잔류물에서는 주로 석고($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)가 생성되었으며 그 외에 소량의 알루노겐($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 17\text{H}_2\text{O}$)과 헥사하이드라이트($\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)가 형성되었다. 석고를 형성하는 Ca는 주변의 모암속에 포함된 방해석에서, SO₄는 폐석에 포함된 황철석에서 기원한 것으로 생각된다. 함수 알루미늄황산염광물인 알루노겐은 침상의 결정으로 나타난다. 하천수의 Al은 모암이나 폐석에 포함된 엽납석, 일라이트, 녹니석과 같은 층상규산염광물의 화학적 용해작용에 의해 부과된 것으로 추정된다. 함수 마그네슘황산염광물인 헥사하이드라이트는 침상이나 섬유상의 결정으로 생성되었으며 Mg의 기원은 모암내의 돌로마이트와 광산폐석의 주 구성광물인 녹니석으로 판단된다.

주요어 : 산성광산배수, 증발잔류물, 석고, 알루노겐, 헥사하이드라이트

1. 서 언

산성광산배수 (Acid Mine Drainage: AMD)는 채광 지역의 갱내 혹은 폐석더미로부터 나오는 침출수로서 황화광물의 산화작용에 의해 생성되며, 낮은 pH, 다량의 금속이온과 황산이온을 포함하고 있는 것이 특징이다(Chapman *et al.*, 1983; Sengupta, 1993; Herr

and Gray, 1995). 산성광산배수 지역에는 적갈색, 황갈색, 흰색의 침전물과 부유물을 생성시켜 미관을 해칠 뿐만 아니라 수질 악화, 하천수와 지하수의 이용 제한, 수서 생태계의 파괴 등에 영향을 준다(Kelly, 1988; Ferris *et al.*, 1989; Bigham, 1994; Howell and Bruce, 1995; Michaud, 1995; Schwertmann *et al.*, 1995).

*Corresponding author: kjjkjj@plaza.snu.ac.kr

연구지역은 강원도 태백시 소도동 일대(지리적 좌표 : 북위 36°06'~37°06', 동경 128°54'~128°58')로서 동해탄광은 1989년부터 1992년까지 석탄산업합리화사업의 시행으로 광산들이 모두 폐광되면서 갱입구가 폐쇄되었으며 채광시 버려진 폐석들은 정지작업만 한 채 산사면에 그대로 방치된 상태로 있다. 이들 폐석에는 다량의 황철석과 석영, 녹니석이 포함되어 있다(Kim, 2002). 갱내에서 유출되는 갱내수와 폐석더미를 통과해 온 침출수는 모암내의 황철석과 반응하여 강한 산성을 나타낼 뿐만 아니라 다량의 중금속을 포함하고 있다. 산성광산배수가 흐르는 하천 일대의 모암은 석회암, 사암 및 셰일 등으로 이루어져 있다. 하천수에는 주변 모암과 폐석으로부터 부과된 Al, Ca, SO₄, Si 등의 성분이 아주 높게 나타난다(김정진과 김수진, 2002). 하천수에 용해된 Fe, Al, SO₄는 하천을 따라 내려가면서 하천의 지구화학적 환경의 변화에 따라 서로 반응하여 갈색(brownish yellow), 적갈색(reddish brown) 또는 흰색(white)의 침전물을 형성시킨다(Kim, 2002).

국내에서 산성광산배수(Acid Mine Drainage: AMD)에 대한 연구는 광산산성배수의 지구화학적특성(Yu, 1996; 허봉과 유재영, 1998; Chon, *et al.*, 1999), 환경오염(오대균 등, 1995; 유재영, 1995; 김진범 등, 1996; Kim and Chon, 2001), 광물학적 특성(Kim *et al.*, 2002), 증발잔류물(박천영 등, 2000)에 대한 연구가 수행된 바 있다.

산성광산배수가 배출되는 하천에서 초기 침출수에는 다량의 Fe를 포함하지만 쉽게 철산화/수산화물 혹은 황산염광물로 하천바닥에 침전되어 붉은색이나 노란색의 침전물을 형성시킨다. 또한 하천수 내에 포함된 Al 성분은 하천의 하류로 내려갈수록 pH가 증가하면서 SO₄와 결합하여 하천바닥에 흰색의 침전물을 형성시킨다. 그러나, Ca, Mg 성분을 포함한 침전물은 거의 형성되지 않으며, 이들은 하천수를 증발시켰을 때 증발잔류물로 석고와 헥사하이드라이트가 형성된다. pH가 낮은 하천수에는 Al의 함량이 높게 나타나는데 이 하천수의 증발잔류물에는 알루노젠이 형성된다. Whittig *et al.*(1982)와 Timpson *et al.*(1986)에 의하면 토양층 표면에서 형성되는 증발잔류물에는 펜타하이드라이트(pentahydrate, MgSO₄ · 5H₂O), 케사라이트(kieserite, MgSO₄ · 4H₂O), 로ワイト(loewite, Na₁₂Mg₇(SO₄)₁₃ · 15H₂O) 등이 있다.

이 연구의 목적은 연구지역의 산성광산배수에 대한 화학적 특성을 개괄하고 하천수를 증발시켰을 때 생성되는 증발잔류물에 대한 광물학적 특성을 밝히는 것이

다.

2. 연구방법

2.1. 하천수의 시료 채취

하천수의 시료는 하천바닥에 갈색(W612), 붉은색(W639), 흰색(W602)의 침전물이 형성되는 곳에서 채취를 하였다. 채수하기 전에 현장에서 pH, 온도, 전기전도도(EC) 등을 휴대용 Orion1230으로 측정하였다. 분석용 시료는 현장에서 0.45 μm membrane filter를 이용해서 부유물질을 제거하였다. 물시료는 2000 ml를 채수하여 멸균 처리된 채수병에 담았다. 양이온 분석용 시료는 125 ml 폴리에틸렌병에 채수하여 HNO₃을 첨가하여 pH 1~2정도로 낮추었다. 채수한 모든 시료는 아이스박스에 얼음을 채운 후 보관하여 실험실로 운반하였다. 운반한 하천수 시료는 분석 할 때까지 4°C로 냉장 보관하였다.

2.2. 실험 방법 및 기기분석

하천수의 화학적 특성을 알아보기 위하여 양이온은 Perkin-Elmer Optima 3000 XL 유도쌍극자플라즈마분광분석(ICP-AES), 음이온은 Dionex 4000 i 이온크로마토그래피(IC)를 이용하여 분석하였다.

산성광산배수가 흐르는 하천수를 실험실에서 자연 증발시킨 후 생성된 증발잔류물에 대한 구성광물 감정을 하기 위하여 Rigaku Geigerflex RAD3-C를 이용하여 X선 회절 분석을 실시하였다. 분석조건은 CuKα선을 이용하여 1°/min(연속)로 측정하였다. 또한, 증발잔류물을 구성하는 광물들의 형태를 조사하기 위하여 쌍안실체현미경 관찰을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 산성광산배수의 지화학적 특성

Table 1은 연구지역 하천수에 대한 야외측정 및 화학분석값을 나타낸 것이다. 하천수의 화학적 특성변화는 주변으로부터의 오염되지 않은 하천수의 유입 및 모암과 산성광산배수의 반응에 영향을 받는다(Yu and Heo, 2001; 김정진과 김수진, 2002).

하천 바닥에 흰색침전물이 생성되는 지역의 하천수 시료(W602)는 NO₃(6.11 mg/l), SO₄(364.80 mg/l), Mg(21.41 mg/l), Ca(75.89 mg/l)의 값이 높게 나타나며, 황갈색 침전물이 형성되는 하천수 시료(W612)는 SO₄(651.80 mg/l), Mg(27.26 mg/l), Al(22.66 mg/l), Ca

Table 1. Field measurement data and chemical compositions of the acid mine water and after evaporation of stream water collected from the study area

Sample No. volum(ml)	pH	EC ($\mu\text{S/cm}$)	F ⁻ ($\mu\text{S/cm}$)	Cl ⁻ ($\mu\text{S/cm}$)	NO ₃ ⁻ ($\mu\text{S/cm}$)	SO ₄ ²⁻ ($\mu\text{S/cm}$)	Na (mg/l)	Mg (mg/l)	Al (mg/l)
W602									
1000	4.88	574.00	ND	1.63	6.11	364.80	1.88	21.41	3.39
500	4.82	1007.96	ND	3.51	11.66	452.23	4.00	39.99	4.01
300	4.72	1538.21	0.81	8.34	25.03	786.55	6.51	62.43	4.21
W612									
1000	3.82	835.00	ND	0.37	3.04	651.80	1.89	27.26	22.66
500	4.24	1374.70	ND	1.85	5.92	770.19	3.71	48.34	43.46
300	4.15	1899.76	0.63	5.18	8.99	1408.28	5.87	73.07	74.12
W639									
1000	7.34	475.00	ND	0.30	N.D	116.70	1.39	14.68	0.03
500	7.99	589.56	ND	1.87	0.71	226.24	3.39	27.10	0.15
300	8.04	762.77	ND	5.66	1.02	398.50	5.72	42.82	0.23
Sample No. volum(ml)	pH	Si (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Mn (mg/l)	Fe (mg/L)	Co (mg/l)	Cu (mg/l)	Zn (mg/l)
W602									
1000	4.88	4.30	2.29	75.89	1.46	0.00	0.01	0.07	0.16
500	4.82	8.84	2.45	156.01	2.91	0.00	0.06	0.09	0.52
300	4.72	12.99	2.75	232.37	4.80	0.00	0.09	0.12	1.16
W612									
1000	3.82	6.48	3.55	85.93	3.10	1.46	0.05	0.04	0.29
500	4.24	12.77	3.95	162.53	5.95	0.19	0.11	0.05	0.69
300	4.15	16.58	4.47	243.62	9.62	0.17	0.20	0.05	1.27
W639									
1000	7.34	2.83	0.23	69.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
500	7.99	4.96	1.09	91.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
300	8.04	5.58	1.34	104.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

(85.93 mg/l), Mn(3.10 mg/l)이 높게 나타난다. 한편, 하천 바닥에 붉은색 침전물이 형성되는 하천수 시료(W639)는 pH값이 상당히 높게(pH>7) 나타났으며 SO₄(116.78 mg/l), Mg(14.68 mg/l), Ca(69.91 mg/l)가 다른 성분에 비해 높은 값을 나타내었다.

3.2. 증발 실험

초기 하천수 시료 1000 ml를 증발접시에서 자연 증발시켜 남은 액체의 용량이 각각 500 ml와 300 ml가 되었을 때 각각 화학분석을 실시하였다(Table 1). 증발 잔류물은 하천수가 거의 모두 증발했을 때 생성되었다.

성분별 농도 변화를 살펴보면, 하천수를 증발시킴에 따라 증발량에 비례하여 증가하는 경우도 있지만 증발량과 큰 관련성이 없는 성분도 있었다. 하천수를 증발

시켰을 때의 농도 변화가 증발량에 비례하여 증가하는 것은 침전이 거의 일어나지 않는 것을 의미하며, 반면에 증발시켜도 그 값이 거의 증가하지 않거나 일정하게 유지되는 성분은 거의 포화 상태에 도달하여 있어 증발과 함께 그 성분이 고상으로 침전된다는 것을 의미한다. 이런 변화는 하천수의 pH와도 밀접한 관련이 있는 것 같다. pH가 낮은(pH 3.82~4.24) 시료 W612에서는 Al의 함량은 높으면서 증발량이 증가할수록 비례하여 증가하였지만, 시료 W0602(pH 4.72~4.88)와 W0639(pH 7.34~8.04)에서는 Al의 함량이 낮으면서 증발량이 증가하여도 비례적으로 증가하지 않았다. 따라서, pH가 높은(pH>4.72) 환경 하에서는 Al은 증발량이 증가함에 따라 쉽게 고상으로 침전되어 하천수로부터 제거되는 것으로 판단된다. 반면, pH가

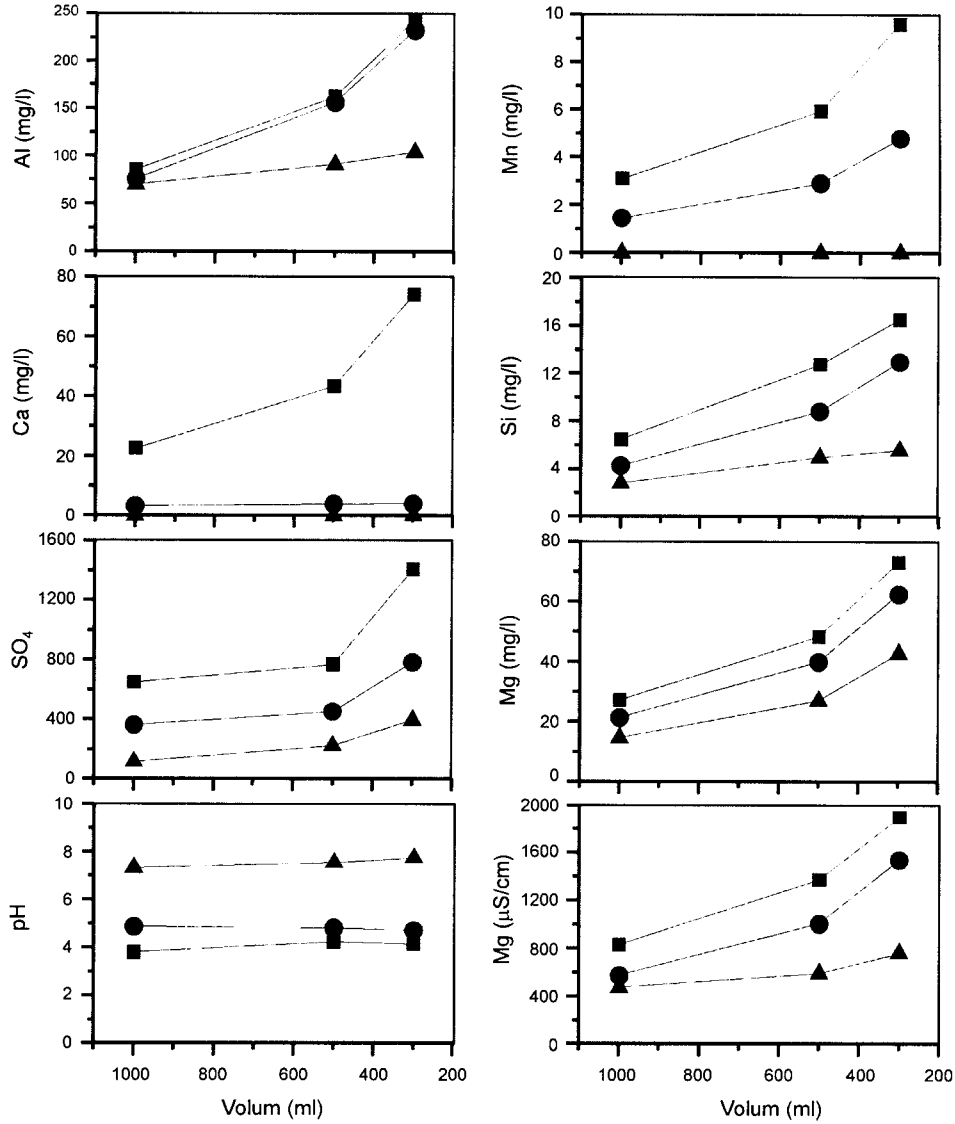


Fig. 1. Variations of chemical compositions of the acid mine water after evaporation. (● W602 ■ W612 ▲ W639)

낮은(pH<4.72) 환경 하에서는 하천수가 증발하여도 쉽게 고상으로 침전되지 않는다는 것을 의미한다.

Ca의 경우, 초기 함량은 세계의 시료에서 비슷한 값(W602: 75.89 mg/l, W612: 85.93 mg/l, W639: 69.91 mg/l)을 나타내었지만 pH값이 높은 시료(W639)에서는 증발이 진행되어도 그 함량이 크게 증가하지 않았다. 이것은 Al과 마찬가지로 Ca도 pH값이 높을 경우 증발이 진행됨에 따라 쉽게 침전하면서 하천수로부터 제거된다는 것을 의미한다. 하천수의 증발이 진행됨에 따라 pH 값은 큰 변화를 나타내지 않았지만, EC값은

증발량에 비례하여 전반적으로 증가하였다(Fig. 1).

3.3. 증발잔류물의 광물학적 특성

산성광산배수가 유입되는 하천수를 자연상태에서 증발시킬 때 생성되는 증발잔류물은 하천수의 지구화학적 특성에 따라 약간의 차이가 나타난다. 하천수에 포함된 성분들의 함량에 따라 대략 어떤 성분을 포함하는 광물이 형성될 것인가를 추정할 수 있다. 연구지역 산성광산배수에 영향을 받은 하천수에 다량으로 포함된 성분은 SO₄, Mg, Ca, Al 등이므로 이들이 증발잔

류물의 구성 광물이 될 것이라는 것을 쉽게 추정할 수 있다. 또한, 망간광물(W612), 질산염광물(W602)이 생성될 가능성이 있지만 X-선회절분석 결과 그 광물의 회절선은 나타나지 않았다. 본 실험에서 생성된 증발잔류물에는 대부분 석고($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)를 포함하고 있으며 그외 헥사하이드라이트(hexahydrate: $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)와 알루노겐(alunogen: $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 17\text{H}_2\text{O}$)이 포함되었다. 이 결과는 국내 화순 폐탄광 지역의 증발잔류물에서 석고, 페로헥사하이드라이트(ferrohexahydrate: $\text{FeSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), 퀴스테타이트(quenstedtite: $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) 및 동정되지 않은 회절선(13.48\AA)이 나타난 것(박천영 등, 2000)과는 약간의 차이가 있다.

3.3.1. 석고

석고는 하천수에 다량으로 포함된 Ca와 SO_4 가 결합하여 생성되며 산성광산배수 하천수를 증발시켰을 때 형성되는 모든 증발잔류물에 포함되어있다. 하천수에 포함된 Ca 성분은 주변모암에 포함된 방해석으로부터 유래된 것으로 추정되며, SO_4 는 황철석의 산화작용에 의해 부가된 것이다. X-선 회절분석결과 모든 시료에서 석고가 나타났으며, 증발잔류물을 구성하는 광물 중 양적으로 가장 많았다(Fig. 2). 쌍안실체현미경 관찰 결과 증발잔류물에 포함된 석고는 0.5~1 mm 정도의 침상 또는 방사상 결정으로 나타났다(Fig. 3a, b).

3.3.2. 헥사하이드라이트 (hexahydrate: $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)

헥사하이드라이트는 Mg의 함량이 높은 하천수 시료의 증발잔류물에서 주로 석고와 같이 나타났다. Mg는 모암에 포함된 돌로마이트나 폐석의 주구성광물인 녹니석의 용해에 의해 하천으로 부가된 것으로 판단된다. X-선 회절분석 결과, 헥사하이드라이트의 회절선은 6.06, 5.45, 5.09, 4.87, 4.56, 4.39, 4.16, 4.04 \AA 등이다(Fig. 2). 헥사하이드라이트는 0.1~0.2 mm 정도의 침상 혹은 섬유상으로 나타났다(Fig. 3c).

3.3.3. 알루노겐(alunogen: $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 17(\text{H}_2\text{O})$)

산성광산배수에서 하천 바닥에 침전되는 Al 광물은 주로 거의 비정질에 가까운 흰색의 알루미늄황산염(Al-sulfate)광물이 생성되지만, 증발잔류물에는 결정도가 높은 0.2-0.5 mm 정도의 주상의 알루노겐이 형성되었다(Fig. 3d). X-선회절분석 결과, 알루노겐은 석고, 헥사하이드라이트와 함께 나타나며(Fig. 2), 회절선은 13.46,

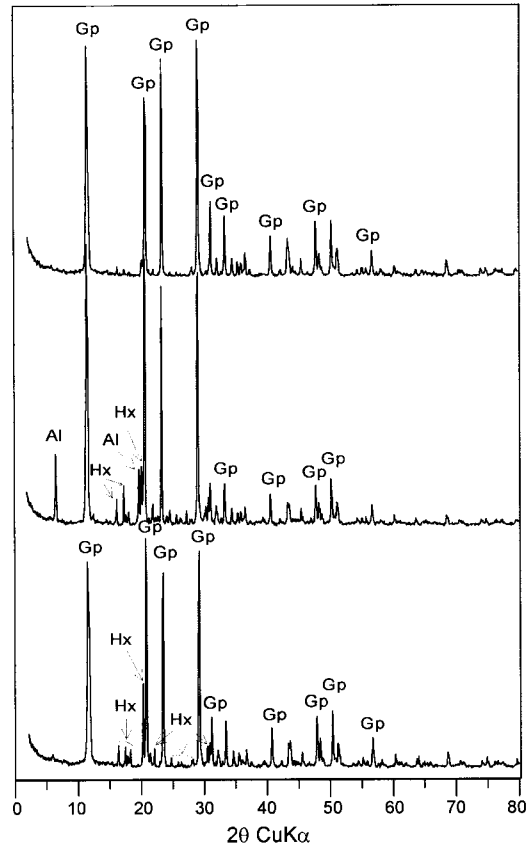


Fig. 2. X-ray powder diffraction patterns of evaporation residues formed from acid mine water in Donghae mine area. (Al: alunogen, Gp: gypsum, Hx: hexahydrate)

6.75, 4.49, 3.37 \AA 등이다(Fig. 4).

본 산성광산배수 지역에서 Al의 기원은 주변 모암과 폐석에 포함된 다량의 엽납석, 일라이트, 녹니석 등의 점토광물로부터 유래된 것이다(김정진과 김수진, 2002). 한편, 연구지역 하천수 내의 용존 Al의 농도는 pH가 증가함에 따라 급격히 감소하는 경향을 보여주는 데 이것은 알루미늄황산염(Al-sulfate)광물과 같은 비정질의 흰색침전물을 형성하기 때문이다(Kim, 2002). 산성광산배수 지역에서 pH가 낮은 환경에서 암석으로부터 용출된 Al은 Al^{3+} 로 존재하며 pH가 증가하면 AlOH SO_4 나 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 등과 같은 Al-황산염이나 수산화광물로 하천의 바닥에 침전된다(Sullivan *et al.*, 1988). pH가 매우 낮은 경우에는 용존 Al의 농도가 높더라도 하천 바닥에 침전물을 형성하지 않고 용해된 상태로 존재하다가 용액이 모두 증발하면 결정질의 알루노겐을 형성하게 된다. 반면 pH가 높은 산성배수는 이미 하천바닥에 Al 광물의 침전으로 인하여 용존 Al의 함량이 낮을

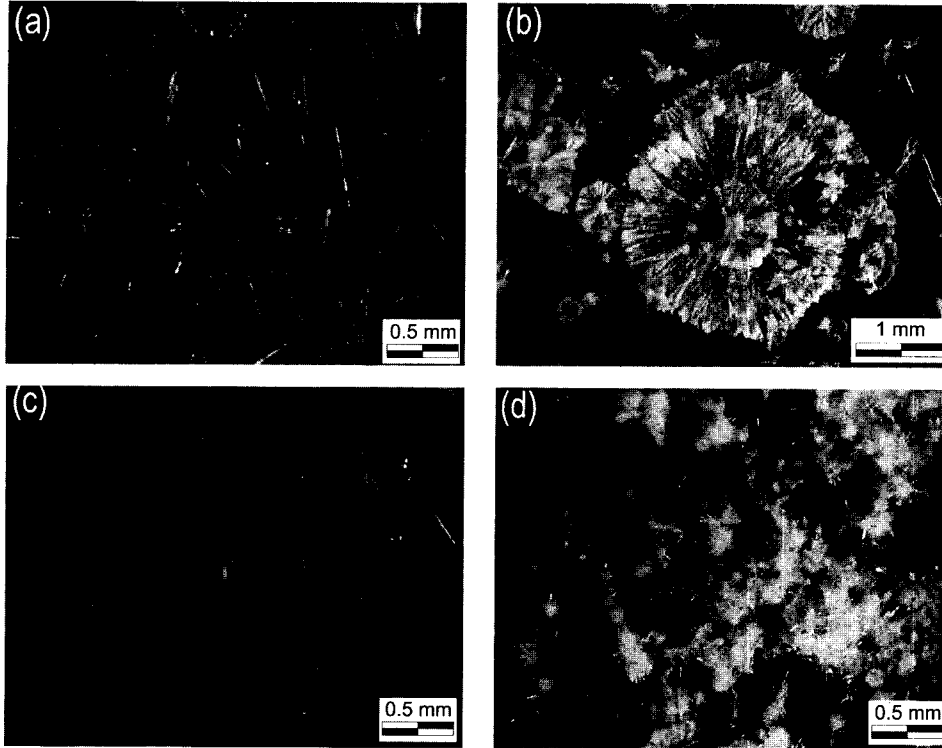


Fig. 3. Evaporation residues formed from acid mine water from the study area. (a) and (b) gypsum, (c) hexahydrate, (d) alunogen.

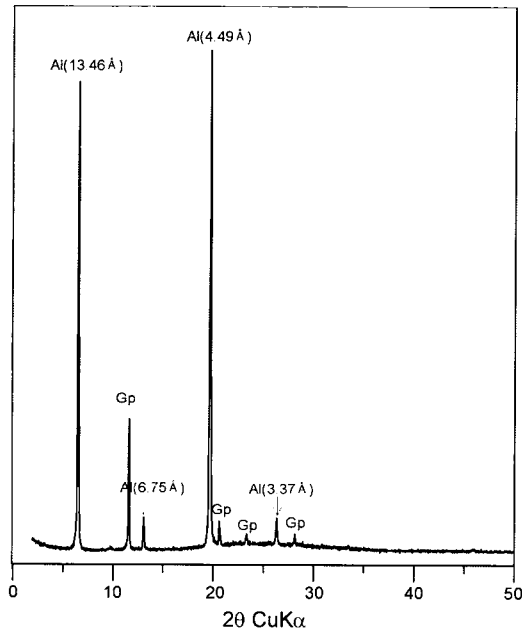


Fig. 4. X-ray powder diffraction patterns of alunogen and gypsum in evaporation residues from acid mine water. (Al: alunogen, Gp: gypsum)

뿐만 아니라, 증발잔류물에서는 알루노젠이 거의 형성되지 않는다.

4. 결 언

태백지역 동해 탄광일대의 산성광산배수가 유입되는 하천수에 대하여 야외조사와 화학분석을 하였으며, 증발잔류물에 대한 X-선회절분석과 쌍안실체현미경 관찰을 수행하였다. 산성광산배수가 유입되는 하천수를 증발시켰을 때 생성된 증발잔류물에서는 하천수의 화학적 특성에 따라 다른 광물이 형성되었다. 하천수를 증발시킬 때 pH 값은 거의 변화하지 않았으나, EC와 대부분의 이온 함량은 크게 증가하였다. 그러나, pH가 비교적 높은 하천수의 경우에 Al과 Ca 값은 증발이 진행됨에 따라 큰 변화를 나타내지 않았는데 이는 이들이 쉽게 고상으로 침전된다는 것을 의미한다.

하천수에서 높은 함량을 나타내는 성분은 Ca, SO₄, Mg, Al 등이며, 따라서 증발잔류물에서는 주로 이들 성분이 결합하여 침상이나 주상으로 결정으로 성장한다. 증발잔류물 시료에는 대부분 석고(CaSO₄·2H₂O)를 포

함하고 있으며 그의 헥사하이드라이트(hexahydrite: $MgSO_4 \cdot 6H_2O$)와 알루노겐(alunogen: $Al_2(SO_4)_3 \cdot 17(H_2O)$)이 형성되었다. 석고는 하천수의 pH와 관계없이 생성되었다. pH값이 비교적 높은 환경 하에서는 Al은 알루미늄황산염광물이나 알루미늄수산화물 형태로 하천바닥에 침전되면서 이미 하천수로부터 대부분 제거되었기 때문에 용존 Al 값은 아주 낮아지게 되며, 따라서 하천수의 pH값이 높은 경우에는 증발잔류물에는 알루노겐이 형성되지 않았다. 반면, 하천수의 pH값이 낮은 경우에는 용존 Al의 함량이 대체로 높으며, 따라서 이러한 하천수를 증발시키면 쉽게 알루노겐이 형성되었다.

사 사

저자의 논문을 심사하면서 많은 조언과 건설적인 비평을 해주신 고려대학교 윤성택 교수님과 세명대학교 정명채 교수님께 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

김정진, 김수진 (2002) 태백 동해광산일대의 물-광물의 반응에 의한 산성광산배수의 지구화학적 특성변화. *자원환경지질*, 35권, p. 55-66.
 김진범, 전상호, 김희중 (1996) 광산배수 수용하천의 중금속이온 농도에 관한 연구. *자원환경지질*, 29권, p. 733-738.
 박천영, 정연중, 강지성 (2000) 화산 폐탄광지역 광산배수와 침전 및 증발잔류광물에 대한 지구화학적 및 광물학적 연구. *자원환경지질*, 33권, p. 391-404.
 오대균, 김정엽, 전효택 (1995) 동해탄광 주변 산성광산배수와 하상퇴적물의 지구화학. *자원환경지질*, 28권, p. 213-220.
 유재영 (1995) 광산 배수의 산성화 및 그에 따른 환경문제. *대한지질학회 및 대한자원환경지질학회 제11회 공동학술경연발표논문집*, p. 32-55.
 허봉, 유재영 (1998) 강원도 강릉시 강동면에 분포하는 폐탄광으로부터의 배수에 의한 임곡천 및 동해의 오염. *지하수환경학회지*, 5권, p. 44-55.
 Bigham, J.M. (1994) Mineralogy of ochre deposits formed by sulfide oxidation. In Jambor, J.L., Blowes, D.W. (eds), *Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Wastes*. Mineralogical Association of Canada, Short Course Handbook, n. 22, p. 103-132.
 Bowell, R.J. and Bruce, I. (1995) Geochemistry of iron ochres and mine waters from Levant Mine, Cornwall. *Appl. Geochem.*, v. 10, p. 237-250.
 Chapman, B.M., Jones, D.R. and Jung, R.F. (1983) Processes controlling metal ion attenuation in acid mine drainage streams. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 47, p. 1957-1973.

Chon, H.T., Kim, J.Y. and Choi, S.Y. (1999) Hydrogeochemical characteristics of acid mine drainage around the abandoned Youngdong coal mine in Korea. *Resource Geol.*, v. 49, p. 113-120.
 Ferris, F.G., Tazaki, K. and Fyfe, W.S. (1989) Iron oxides in acid mine drainage environments and their association with bacteria. *Chem. Geol.*, v. 74, p. 321-330.
 Herr, C. and Gray, N.F. (1995) Environmental impact of acid mine drainage on the Avoca River: Metal fluxes in water and sediment. Part II. Metal contamination of riverine sediments. Dublin: Technical Report 14, Water Technology Research, Trinity College, University of Dublin, p. 36.
 Kelly, M. (1988). *Mining and the freshwater environment*. Elsevier Applied Science, London and New York. 231p.
 Kim, J.J., Kim, S.J. and Tazaki, K. (2002) Mineralogical characterization of microbial ferrihydrite and schwertmannite, and non-biogenic Al-sulfate precipitates from acid mine drainage in the Donghae mine area, Korea. *Environ. Geol.* v. 42, p. 19-31.
 Kim, J.J. (2002) Mineralogical and geochemical characterization of precipitates from the acid mine drainage in Taebaeg. PhD Thesis, Seoul National University, Seoul. 162p.
 Kim, J.Y. and Chon, H.T. (2001) Pollution of a water course impacted by acid mine drainage in the Imgok creek of the Gangreung coal field, Korea. *Appl. Geochem.*, v. 16, p. 1387-1396.
 Michaud, L.H. (1995) Recent technology related to the treatment of acid drainage. *Earth Miner. Sci.*, v. 63, p. 53-55.
 Schwertmann, U., Bigham, J.M. and Murad, E. (1995) The first occurrence of schwertmannite in a natural stream environment. *European Jour. Miner.* v. 7, p. 547-552.
 Sengupta, M. (1993) *Environmental impacts of mining: monitoring, restoration, and control*. Lewis Publishers, London. 494p.
 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.L., 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.
 Yu, J.Y. (1996) Precipitation of Fe and Al compounds from the acid mine waters in the Dogyae area, Korea: A qualitative measure of equilibrium modeling applicability and neutralization capacity. *Aquatic Geochem.*, v. 1, p. 81-105.
 Yu, J.Y. and Heo, B. (2001) Dilution and removal of dissolved metals from acid mine drainage along Imgok creek, Korea. *Applied Geochem.*, v. 16, p. 1041-1053.