

## 슈베르트마나이트-침철석 전이 및 이와 관련된 중금속의 거동

### Transformation of Schwertmannite to Goethite and Related Behavior of Heavy Metals

김 현 정(Heon-Jung Kim) · 김 영 규(Yeongkyoo Kim)\*

경북대학교 자연과학대학 지질학과  
(Department of Geology, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea)

**요약** : 슈베르트마나이트로부터 침철석으로의 전이 시 일어나는 광물학적 변화 및 이와 연관된 중금속의 거동을 알아보기 위하여 달성광산의 광산배수 정화시설 소택지에 침전된 침전물을 대상으로 광물학적 연구와 지구화학적 연구를 수행하였다. XRD 연구결과 초기에 광산배수로부터 침전된 슈베르트마나이트는 대부분 침철석으로 전이되어 상부 일부에서만 슈베르트마나이트가 관찰되었다. SEM으로 광물 전이에 따른 외부형태 변화를 관찰한 결과 눈에 띄는 변화가 없는 것으로 보아 광물전이는 용해-침전의 과정보다는 고체상에서의 전이가 있었음을 알 수 있었다. 슈베르트마나이트와 침철석에 흡착 또는 공침된 중금속들 중 Pb와 Cu의 경우 광산배수의 중금속 농도에 비교하여 상대적으로 높은 농도를 보였으며 나머지 중금속들은 상대적 양에 있어서 비슷한 값을 보였다. 상부 슈베르트마나이트에서 하부의 침철석으로 전이가 일어나면서 광물 내 함유된 중금속의 함량은 일부 시료를 제외하고 전체적으로 눈에 띄는 변화를 보이지 않았으며 이는 슈베르트마나이트에서 침철석으로 전이되는 과정에서 고체 상태에서 전이가 일어나면서 추가적인 중금속의 용출이나 흡착이 없었음을 지시한다.

**주요어** : 슈베르트마나이트, 침철석, 광물 전이, 중금속

**ABSTRACT**: The mineral phases precipitated in the swamp built for the treatment of the mine drainage of the Dalsung Mine were investigated to reveal the mineralogical changes from schwertmannite to goethite and related behavior of heavy metals. Our XRD results show that most schwertmannite were transformed to goethite except the small portions of the samples in the uppermost part. No significant morphological changes were observed in the samples during mineral transformation by SEM, indicating that this transformation process occurred not from dissolution-precipitation process, but in solid state. Among heavy metals sorbed or coprecipitated in the mineral phases, Pb and Cu concentrations were relatively higher compared with their concentrations in the mine drainage. The relative concentrations of other heavy metals show similar values. The heavy metal concentration in the minerals do not show noticeable differences from uppermost schwertmannite to lower goethite samples, indicating the transformation process without any leaching or additional sorption of heavy metals in the solid state.

**Key words** : Schwertmannite, goethite, mineral transformation, heavy metal

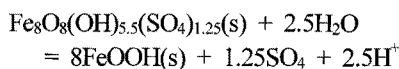
\*교신저자: ygkim@knu.ac.kr

## 서 론

산성광산배수에 용해된 철은 산화환경을 거치면서 다양한 산화철 광물로 침전된다. 대표적인 침전 광물로는 슈베르트마나이트 또는 페리하이드라이트를 들 수 있고 이외에 자로사이트, 침철석 등도 산성광산배수에서 주로 발견되고 있다(Cornell and Schwertman, 1996; Kim *et al.*, 2002; Regenspurg *et al.*, 2004; Jönsson *et al.*, 2005; Lee and Kim, 2008). 페리하이드라이트는 결정도가 낮은 철산화물로서 pH가 6.4 이상인 경우에 주로 형성이 되며 침철석은 비교적 결정도가 높은 산화수산화물로서 넓은 범위의 pH 범위 내에서 형성된다. 이 광물의 경우 비교적 안정된 광물로서 산성광산배수에서 형성되는 거의 마지막 단계의 광물이다. 자로사이트의 경우 pH 값이 3 이하에서 주로 형성되며 일반적으로 SO<sub>4</sub>양이 많은 곳에서 형성된다.

슈베르트마나이트의 경우 많은 산성광산 배수에서 발견되는 비교적 흔한 광물임에도 불구하고 결정도가 낮아 그 특성 파악이 어려웠던 관계로 1994년에서야 국제적으로 슈베르트마나이트라는 이름으로 처음 명명되었다(Bigham *et al.*, 1994). 이 광물의 경우 pH 2.8과 4.5 사이에서 주로 침전되며 구조 안에 SO<sub>4</sub>이온을 함유하고 있다. Bigham *et al.* (1996)은 이 광물의 화학성분이 다양하며 대략 Fe<sub>8</sub>O<sub>8</sub>(OH)<sub>8-2x</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>x</sub> (1 ≤ x ≤ 1.75)의 화학식을 갖고 있는 것으로 발표하였으며 실제 다양한 화학식이 보고되어 있다. 따라서 슈베르트마나이트는 광물학적으로도 그 구조에 있어서 아직 많은 논란이 있으며, 이의 생성환경 및 다른 광물과의 연관성에 대하여도 좀 더 연구되어야 할 바가 많다. 광물의 구조적인 면에 있어서도 Janney *et al.* (2000)의 경우 슈베르트마나이트가 페리하이드라이트의 구조와 유사성이 있다고 보고하였으나 추후 Loan *et al.* (2004)의 경우 합성된 슈베르트마나이트에 대한 여러 광물학적인 연구를 통하여 이 광물이 아카가나이트 구조의 변형된 형태에 더 가깝다고 주장하였다.

슈베르트마나이트는 열역학적으로 불안정하여 쉽게 침철석으로 전이되는 과정을 겪는다(Burton *et al.*, 2008). 이러한 과정은 수주 또는 여러 달에 걸쳐서 일어나는 반응이다. 이러한 변환식은 다음과 같이 나타낼 수 있다(Bigham *et al.*, 1996).



기존의 여러 실험 연구들에 의하면 합성된 슈베르트마나이트가 침철석으로 전이 되는 과정은 다양한 지구화학적 요인의 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 우선 SO<sub>4</sub>의 농도가 높을수록 전이 속도는 느려지며 또한 낮은 pH와 낮은 온도에서도 느려지는 것으로 보고되어 있다(Jönsson *et al.*, 2005). 이와 더불어 공존하는 이온 중에 As의 농도가 높을 경우 As가 AsO<sub>4</sub><sup>3-</sup>의 형태로 흡착되어 침철석으로 전이가 늦어지거나 일어나지 않는 것으로도 알려져 있다(Fukushi *et al.*, 2003, 2004; Regenspurg *et al.*, 2004). 이러한 침철석으로의 전이는 실험실뿐만 아니라 야외에서도 보고되기도 하였다(Galiano *et al.*, 2004). 야외에서는 주로 산성광산배수를 정화하기 위한 소택지의 침전물에서 시간이 지나면서 상전이 가 일어나 쌓여진 침전물의 아래쪽으로 내려가면서 침철석이 증가하는 것으로 보고되고 있다(Jönsson *et al.*, 2005; Schroth and Pamell., 2005; Acero *et al.*, 2006). 슈베르트마나이트의 침철석으로의 전환되는 과정 중 철, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, H<sup>+</sup>의 일부 이온들이 용액 속으로 방출되며, 이로 인해서 슈베르트마나이트가 풍부하게 포함된 퇴적물의 경우 산성화되어 그 지역의 pH는 약 3정도로 산성화됨을 볼 수 있다. 이는 상전이의 완충효과로 인해 기인한 것으로 사료된다(Peine *et al.*, 2000; Blodau, 2004; Kuesel, 2003). 슈베르트마나이트는 넓은 비표면적으로 인하여 중금속을 효과적으로 흡착하며 특히 산화음이온으로 존재하는 As와도 강하게 결합하여 효과적인 중금속 원소의 저장소 역할을 한다(금교진 외, 2010). 그리고 이러한 중금속들은 다른 광물로의 전이되는 과정 중에 고체상태로 남아있을 수도 있고 용액으로 방출될 수도 있으며 고체상으로 보존되더라도 어떻게 고체상 내에 보존되는지에 대해서는 여전히 불확실하게 남아있다(Schroth and Pamell, 2005; Acero *et al.*, 2006; Burton *et al.*, 2008). 따라서 슈베르트마나이트가 산성광산배수에서 중금속의 저장소 역할을 계속적으로 진행할지에 대한 여부는 중요한 연구과제로 남아 있으며 이는 밝히기 위해서는 야외에서 실제 형성되어 침철석으로 전이됨에 따라서 나타나는 여러 가지 변화에 대한 체계적인 연구가 필수적이다(Achterberg *et al.*, 2003; Sidenko and Sherriff, 2005; Burton *et al.*, 2008).

야외에서 슈베르트마나이트의 침철석으로의 전이과정에 대한 연구는 국내에서 수행된 적이 없으며 외국의 경우도 일부 연구가 수행되었을 뿐이다. 대구 인근의 달성광산의 산성광산배수 처리시설의

경우 약 1 m 정도의 두께로 침전물이 쌓여 있으며 예비 연구결과 침전된지 오래된 하부의 침전물은 대부분 침철석화되어 있고 가장 상부의 침전물은 침전된지 얼마 되지 않은 슈베르트마나이트로 구성되어 있어 본 연구를 수행하기 위한 최적의 대상지이다. 따라서 본 연구는 달성광산의 산성광산배수 처리시설의 소택지에서 침전물 시료를 채취하여 이의 광물학적 연구와 지구화학적 연구를 수행하여 슈베르트마나이트의 침철석으로의 전이과정과 이에 수반된 광물의 특징 변화와 중금속의 거동 변화를 밝히고자 수행되었다.

## 연구방법

### 시료채취

시료채취는 대구인근에 위치하고 있는 달성광산에서 수행되었다. 달성광산의 경우 배출되는 갭내수를 정화시키기 위하여 5개의 소택지를 설치하여 운영하고 있다(이지은 외, 2003; Lee and Kim, 2008). 그 중에서 가장 첫 번째 소택지에 황토색에서 갈색의 침전물들이 쌓여져 있다. 본 연구를 위하여 첫 번째 소택지의 갭내수 유입부, 중간부분, 그리고 소택지의 처리수 배출부분(각각 P1, P2, P3 시료채취 지점) 3개의 장소에서 시료를 채취하였다. 시료 채취는 오거를 사용하였다. 사전 예비 연구결과 침전물은 대략 1 m 정도의 두께로 쌓여있으며 주 광물의 전이는 상부에서 일어나고 하부는 석영, 장석, 운모 등 쇄설성 퇴적물을 포함한 것으로 나타났다. 따라서 상부의 15 cm 정도의 시료에 대하여 약 1 cm 정도의 간격으로 시료를 분리하여 동결건조 시킨 후 냉장 보관하여 추후 분석에 사용하였다. P1, P2, P3 지점에서 추가로 물시료를 채취하여 추후 광산배수 내의 중금속 분석에 사용하였다.

### 시료 분석

광물종의 변화를 파악하기 위하여 동결건조된 시료에 대하여 기초과학지원연구원 대구센터에서 X-선회절분석기(X'perts PRO MRD, Philips)를 사용하여 분석을 실시하였다. 조건은 Cu- $\alpha$  타겟을 이용하였으며 10~60° 2 $\theta$  범위에서 0.03° 간격으로 2초씩 스캔하였다. 광물 전이과정에서 일어나는 형태적 변화를 관찰하기 위하여 기초과학지원연구원 대구센터의 주사전자현미경(HITACHI S-4200)을

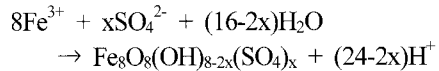
이용하여 각 시료의 광물들의 형태적 특징을 분석하였다.

각 시료의 중금속 함량을 분석하기 위하여 시료에 HNO<sub>3</sub>, HCl, HClO<sub>4</sub>를 4:4:1의 비율로 산을 만들어 첨가한 후 용해시켜 As, Cr, Zn, Co, Ni, Cu, Cd, Pb 8개의 시료를 분석하였다. 시료의 분석은 기초과학지원연구원 서울센터에서 ICP-MS (Elan 6100/Perkins Elmer)와 ICP-AES (JY, Ultima2C, Jobin Yvon)를 이용하였다.

## 결과 및 토의

### 광산 배수의 지구화학적 특성

광물 시료를 채취한 장소에서 측정된 pH와 EC 값은 크게 차이가 없었다. P1, P2, P3에서 측정된 pH 값은 각각 3.61, 3.36, 3.24로서 배수의 하류 부분으로 갈수록 약간은 pH 값이 낮아지는 경향을 보였다. 이는 광산배수 내에서 슈베르트마나이트와 같은 광물이 침전되면서 다음과 같은 반응식에 의하여 H<sup>+</sup> 이온을 방출하여 생긴 결과로 생각된다.



또한 서론에서 언급한 것과 같이 슈베르트마나이트가 침철석으로 전이되면서 방출되는 H<sup>+</sup> 이온도 pH를 낮추는 데 공헌하였으리라 생각된다. EC의 경우 P1, P2, P3의 장소에서 측정된 값이 2,190, 2,350, 2,370  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 으로 아주 미세하게 증가하는 것을 보이기는 하나 크게 눈에 띄는 변화는 없었다. 이러한 미세한 증가는 느린 물의 속도를 고려하였을 때 증발에 의하여 일부 일어났을 것이라 생각된다(이지은 외, 2003).

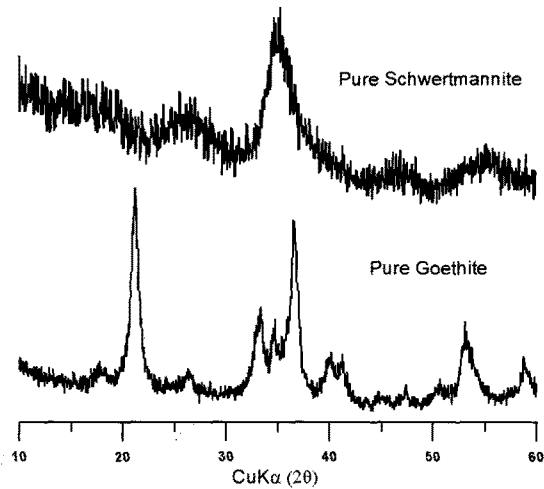
시료채취 지점 3곳에서 채취한 물 시료에 대한 중금속의 함량은 표 1에 제시되어 있다. 표에서 볼 수 있듯이 전체적으로 높은 농도의 중금속 농도를 보여 갭내수에서 유출된 광산 배수가 중금속에 오염되어 있음을 보여주고 있다. 광산 배수 내의 중금속의 농도는 Zn > Cu > Co > As > Cd > Ni > Pb > Cr의 순서였다.

### 광물 변화

그림 1은 순수한 슈베르트마나이트와 침철석의

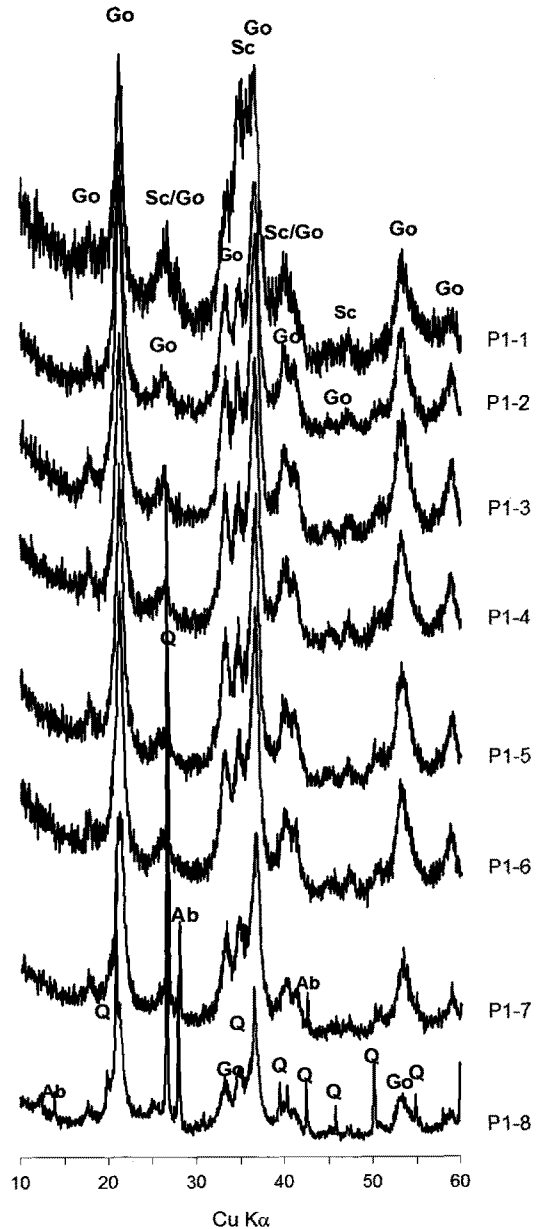
**Table 1.** The concentrations of heavy metals in the mine drainage samples collected at the same locations as the solid samples (ppb)

	As	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
P1	419	173	866	13.9	5,890	120	42.8	12,520
P2	437	189	944	18.6	5,960	119	46.9	12,360
P3	418	187	921	13.4	5,910	112	44.2	12,480



**Fig. 1.** X-ray diffraction patterns of pure schwertmannite and goethite.

XRD 패턴으로서 XRD 패턴으로 두 개의 광물이 쉽게 구별될 수 있음을 보여준다. 그림 2~4는 본 연구지역의 시료 채취 장소 P1, P2, P3 상부로부터 하부까지 시료들에 대한 X선 회절분석 결과이다. 여기서 P1부터 P8은 각각 상부로부터 1 cm 이내, 1~2, 2~3, 4~5, 5~6, 6~7, 8~9, 10~11 cm 사이의 시료를 각각 지시한다. P1 시료의 경우 최상부 시료는 슈베르트마나이트에 가까웠고 두 번째 시료부터는 대부분이 침철석으로 전이된 모습을 보이고 있으며 하부로 갈수록 좀 더 결정도가 좋은 침철석이 나타남을 보여주어 슈베르트마나이트가 열역학적으로 불안정하여 쉽게 침철석으로 전이되었음을 보여주고 있다(Jönsson *et al.*, 2005; Schroth and Parnell, 2005; Acero *et al.*, 2006). 아래 부분의 시료에서는 일부 석영과 알마이트 장석과 같은 채설성 기원의 광물도 일부 동정되며 석고의 피크들이 관찰되기도 한다. P2의 최상부 시료는 역시 슈베르트마나이트와 침철석이 어느 정도 섞여있지만 침철석의 양이 슈베르트마나이트 보다 상대적으로 더 많이 나타남을 보여주며 아래 두 번째 시료부터



**Fig. 2.** X-ray diffraction patterns of P1 samples (Sc: schwertmannite, Go: goethite, Ab: albite, Q: quartz).

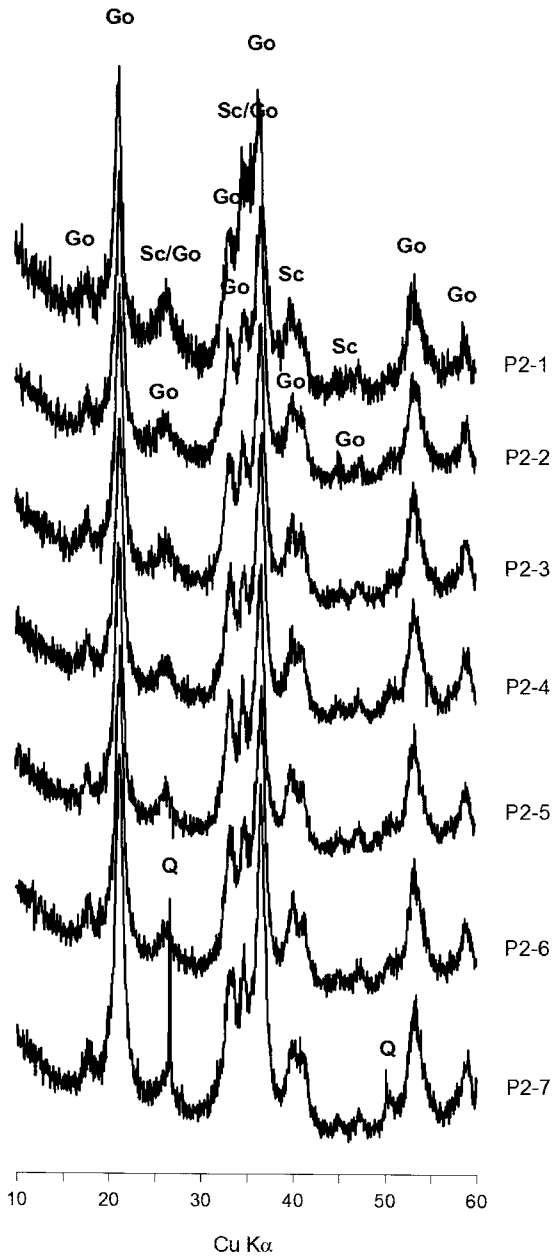


Fig. 3. X-ray diffraction patterns of P2 samples (Sc: schwertmannite, Go: goethite, Ab: albite, Q: quartz).

는 대부분이 침철석화되어 있는 것을 보여준다. 하부시료에서는 쇄설성 기원의 석영의 피크도 관찰된다. 마지막 P3의 경우 최상부의 시료의 경우 슈베르트마나이트에서 보여지는 피크의 특성은 거의 관찰할 수 없었고 최상부부터 대부분이 침철석으로 전이되어 있음을 보여준다. 중간 부분의 일부 시료

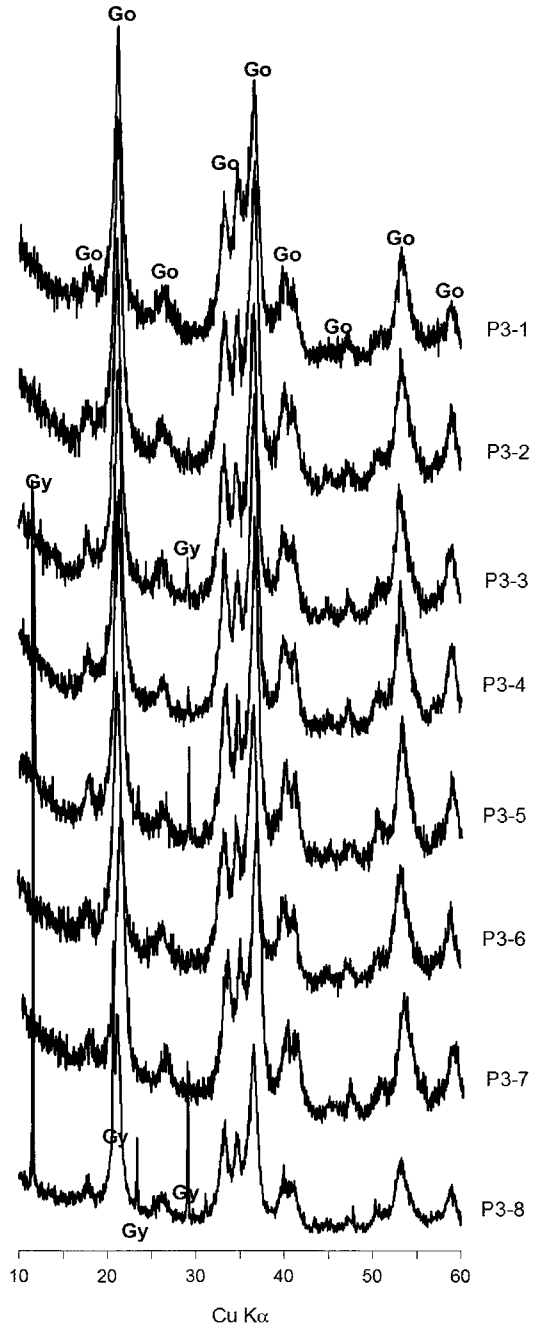
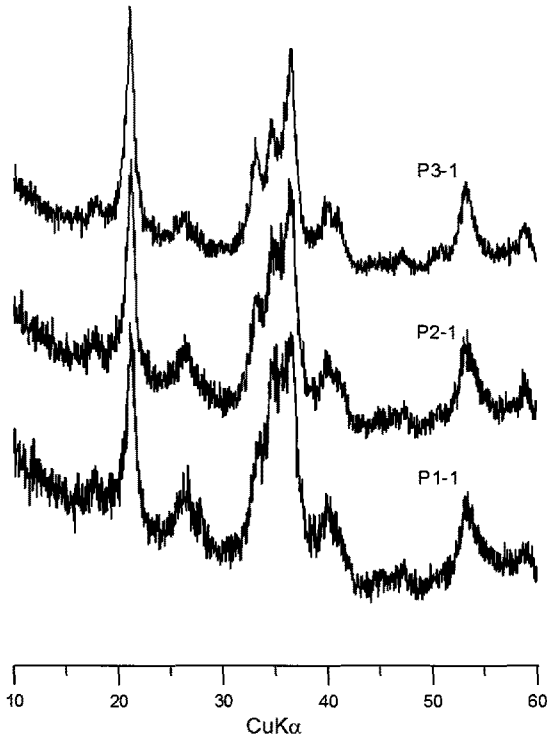


Fig. 4. X-ray diffraction patterns of P3 samples (Sc: schwertmannite, Go: goethite, Ab: albite, Q: quartz, Gy: gypsum).

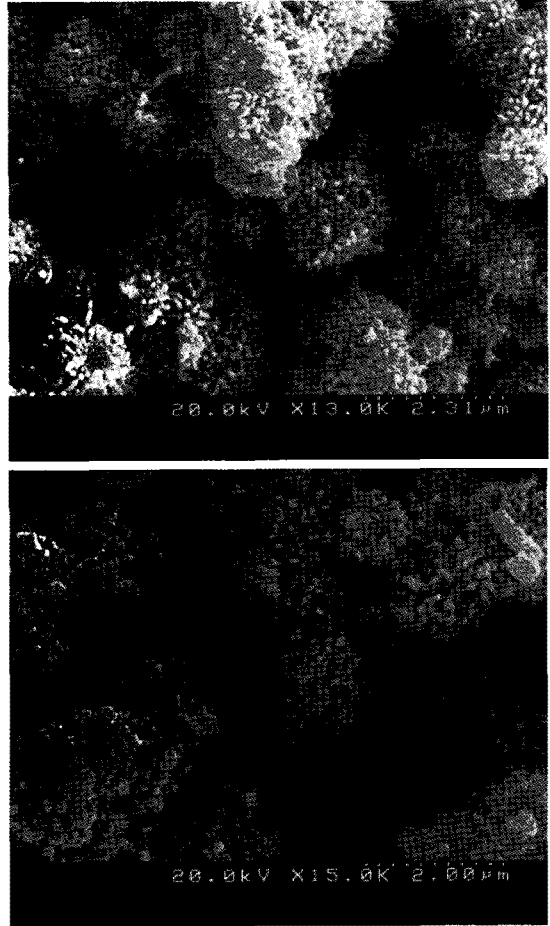
와 하부의 시료에서 석고의 피크나 관찰되기도 한다. 세 채취 장소에서 상부 15 cm를 대상으로 분석



**Fig. 5.** X-ray diffraction patterns of top samples from P1, P2, and P3.

하였지만 대부분의 광물들이 벌써 어느 정도는 침철석으로 전이되어 있는 것을 보여준다.

X선 회절 분석 결과에서 볼 수 있듯이 외국에서 보고된 소택지의 경우보다는 상대적으로 상부 쪽에서 슈베르트마나이트의 함량이 상대적으로 적은 것으로 나온다(Gagliano *et al.*, 2004). 이는 본 연구지역에서의 시료채취는 6월 장마기간 중에 이루어졌고 강우량의 증가에 의하여 희석된 광산배수가 슈베르트마나이트에 충분히 포화되지 못했기 때문이라 생각된다. 가장 최상부의 시료의 경우 P1에서 P3로 바뀌면서 상대적으로 침철석의 함량이 상대적으로 증가하고 P3의 경우는 슈베르트마나이트의 특징을 찾아볼 수 없고 거의 침철석으로만 구성된 X선 회절 패턴을 보여준다(그림 5). 이러한 현상도 희석된 광산배수와 관련이 깊어 광산배수가 슈베르트마나이트에 약간 과포화된 상태로 소택지에 유입하여 일부 슈베르트마나이트를 침전시키고 P3에 도달해서는 슈베르트마나이트에 포화 또는 불포화상태로 변해버려 더 이상의 슈베르트마나이트의 침전을 일으키지 않았으리라 생각된다.

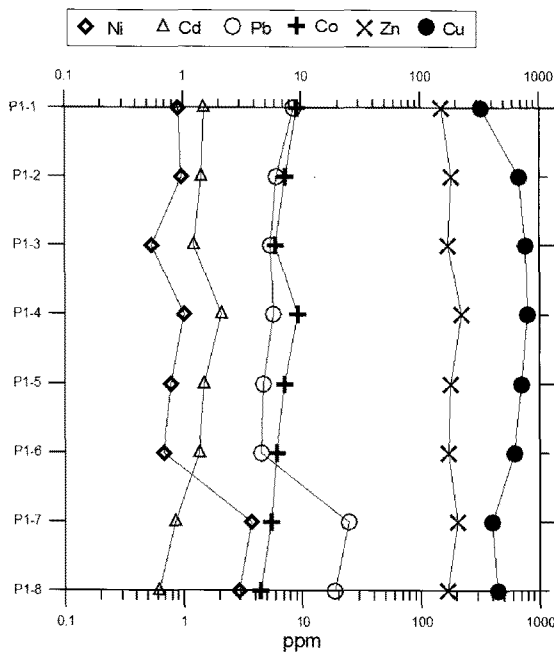


**Fig. 6.** SEM images of schwertmannite (top: P1-1) and goethite (bottom: P1-7).

슈베르트마나이트에서 침철석으로 전이되면서 광물집합체의 형태적 변화를 알아보기 위하여 주사전자현미경 분석을 실시하였다(그림 6). 가장 대표적으로 P1의 최상위 시료와 아래 부분(P1-7)의 침철석 시료에 대한 분석이 실시되었다. 그림 6에서 보는 바와 같이 초기 침전된 슈베르트마나이트의 경우 성게 또는 밤송이 모양의 슈베르트마나이트의 전형적인 모습을 보여준다(Resenspurg *et al.*, 2004). 슈베르트마나이트가 기원인 P1-7 시료 침철석의 전자현미경사진의 경우 침상의 길이가 약간 짧아지는 것을 포함하여 기본적인 특징은 남아있는 것을 보여준다. 실제 합성 등 수용액에서 침전된 침철석의 경우 이와는 다른 모양을 나타내기 때문에 이러한 전자현미경적 특징으로 미루어 보아 슈베르트마나이트에서 침철석으로의 전이는 용해와 침전의 과정

**Table 2.** The concentrations of heavy metals in the P1 samples (ppm)

Sample	Depth (cm)	Co	Cu	Cd	Ni	Pb	Zn	As	Cr
P1-1	< 1	8.97	320.5	1.47	0.90	8.46	150	<10	<1
P1-2	1-2	7.24	673.7	1.40	0.97	6.03	181	<10	<1
P1-3	2-3	5.96	769.0	1.23	0.54	5.37	169	<10	<1
P1-4	4-5	9.19	789.8	2.08	1.01	5.70	219	<10	7.86
P1-5	5-6	7.06	706.7	1.48	0.78	4.70	177	10.4	<1
P1-6	6-7	6.02	605.0	1.35	0.67	4.47	169	<10	<1
P1-7	8-9	5.42	394.2	0.84	3.69	24.34	201	38.2	10.76
P1-8	10-11	4.37	444.6	0.62	2.92	18.63	167	31.5	8.36



**Fig. 7.** Changes of heavy metal concentrations for the P1 samples (ppm).

을 거치지 않고 고체 상태에서 열역학적으로 안정한 침철석으로의 전이가 이루어졌음을 지시한다.

**중금속 분포**

슈베르트마나이트가 침철석으로 전이되면서 흡착하고 있던 중금속들의 거동에 영향을 줄 수 있다. 이때 이들의 변화는 침철석의 전이 과정에 따라 달라질 수 있다. 즉 용해-침전 반응인지 아니면 고체 상태에서의 반응인지가 중요한 요소가 될 수 있다.

이러한 슈베르트마나이트의 침철석으로의 전이 시 각 광물에 흡착 또는 공침되어 함유되어 있는 중금속의 양의 변화를 보기 위하여 ICP-AES와 ICP-MS를 이용하여 P1 시료에 대하여 최 상부 시료에서부터 하부 시료 8개에 대하여 총 중금속의 양을 분석하였다(표 2, 그림 7). P1 시료에서 전체적으로 시료 내의 중금속 포함량은 검출한계 이하인 As와 Cr을 제외하고 Cu > Zn > Co > Pb > Cd > Ni의 순서를 보이고 있다. P1, P2, P3 시료 채취 지점에서 추가로 채취한 광산배수 시료중금속 함량은 Zn > Cu > Co > As > Cd > Ni > Pb > Cr의 순을 보이고 있는데(표 1) 이러한 순서는 광물 내의 중금속 함량과는 다소 차이가 있고 특히 Cu와 Pb가 상대적으로 슈베르트마나이트를 포함한 광물 내 상대적으로 더 많이 농집되어 있음을 보여주고 있다. 슈베르트마나이트를 함유하고 있는 최상부 시료의 경우 광물내농도(ppm)/광산배수내농도(ppm)의 경우 다른 중금속들은 대략 10 내외의 값을 보이는데 비하여 Cu의 경우 약 54, Pb의 경우 약 198의 값을 보여서 상대적으로 이 두 금속이 슈베르트마나이트와 침철석에 흡착이 잘 일어나고 있음을 보여준다.

슈베르트마나이트를 포함하는 상부시료에서 하부시료로의 전이에 따른 중금속 함량의 변화는 그림 7에서 보여지듯이 뚜렷한 경향을 보이지 않고 있다. Ni와 Pb의 경우 하부시료(P1-7, P1-8)에서 증가하는 것을 보여주고 있지만 다른 시료에서는 이런 경향이 관찰되지 않는다. 이외에 Cd와 Cu는 하부로 가면서 중금속 함량이 증가하다 다시 감소하는 경향을 보여주나 역시 모든 시료에 보여지는 특성은 아니다. 전반적으로 이 분석 결과로만 판단할 때 슈베르트마나이트에서 침철석으로 전이가 일어나면서 광물 내 또는 표면에 흡착된 중금속의 함량은 뚜렷한 차이를 보여주지 않는 것으로 판단된다.

따라서 SEM 관찰결과에서 볼 수 있듯이 광물의 외관 모습이 슈베르트마나이트에서 침철석으로 전이되면서 고체 상태로 상전이 과정을 거치고 중금속의 경우는 이러한 전이 과정에서 큰 영향 없이 잔류하고 있음을 보여주고 있다. 이러한 결과는 기존에 수행된 연구와 어느 정도 일치하는 실험 결과를 보여준다(Acero *et al.*, 2006; Schroth and Parnell, 2005). Acero *et al.* (2006)의 연구에 의하면 단계별로 물 속의 중금속들이 증감이 있으나 결국에는 많은 중금속들이 광물안에 남아 있음을 보였다. 그러나 이 연구는 실험실에서 수행된 연구결과이고 또한 Schroth *et al.* (2005)는 한 장소에서 다른 광물로 전이되는 과정 중의 시료가 아니라 상류에서 하류로 가면서 일어나는 광물변화와 연계된 연구를 수행하였다. 따라서 본 연구는 실제 같은 장소에서 슈베르트마나이트에서 침철석으로 전이가 일어나는 과정 중 중금속의 거동을 밝혔다는 점에서는 큰 의의가 있다고 할 수 있다.

## 결 론

달성광산의 광산배수 정화장치로 설치되어 있는 소택지 내에 침전되어 있는 슈베르트마나이트는 시간이 지남에 따라서 침철석으로 전이되고 있음을 보여주고 있었다. 본 연구에 쓰인 시료의 경우 강우량이 많은 장마기간 중에 채취가 되어 슈베르트마나이트의 포화 정도가 높지 않아 침전물 중 가장 윗부분에서만 슈베르트마나이트가 발견되었다. 슈베르트마나이트에서 침철석으로의 전이과정 중 광물의 형태는 뚜렷한 변화과정을 보여주지 않는 것으로 미루어보아 침철석으로의 전이 중 용해와 침전과정 보다는 고체 상태에서의 광물전이가 일어났음을 지시한다. 슈베르트마나이트와 침철석은 Pb와 Cu의 경우 다른 중금속에 비하여 물 속에 녹아있는 농도에 비하여 더 많은 농도로 광물 내 집적되어 있었으며 이는 이들 두 중금속이 상대적으로 다른 중금속보다 슈베르트마나이트와 침철석에 더 잘 흡착됨을 보여준다. 또한 중금속의 경우 전체적인 분포 경향을 볼 때 상부에서 하부의 시료로 변하면서 시료 내의 농도에 있어서 크게 눈에 띄는 차이를 관찰할 수 없었다. 이는 아마도 고체상태에서 슈베르트마나이트가 침철석으로 전이되는 과정 중 중금속의 용출이 일어나지 않고 또한 추가의 흡착이 일어나지 않았음을 지시한다.

## 사 사

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업임(과제번호 No. 2009-0078249). 또한 본 논문에 대하여 심사를 맡아주신 김강주, 김순오 교수님께 감사드립니다.

## 참고문헌

- 금교진, 정은하, 김영규 (2010) 슈베르트마나이트의 AsO<sub>4</sub>, SeO<sub>3</sub>, CrO<sub>4</sub> 흡착 및 열적 특성. 한국광물학회지, 23, 117-124.
- 이지은, 김영규, 추창오 (2003) 달성 폐광산의 침출수 및 갭내 유출수의 수리지구화학적 특성과 비교. 지질학회지, 39, 519-533.
- Acero, P., Ayora C., Torrentó, C., and Nieto, J.M. (2006) The behavior of trace elements during schwertmannite precipitation and subsequent transformation into goethite and jarosite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 70, 4130-4139.
- Achterberg, E.P., Herzl, V.M.C., Braungardt, C.B., and Millward, G.E. (2003) Metal behavior in an estuary polluted by acid mine drainage: the role of particulate matter. *Environ. Pollut.* 121, 283-292.
- Bigham, J.M., Carlson, L., and Murad, E. (1994) Schwertmannite, a new iron oxyhydroxysulfate from Pyhsalmi, Finland, and other localities. *Mineral. Mag.* 58, 641-648.
- 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, 2111-2121.
- Blodau, C. (2004) Evidence for a hydrologically controlled iron cycle in acidic and iron rich sediments. *Aquat. Sci.*, 66, 47-59
- Burton, E.D., Bush, R.T., Sullicvan, L.A., and Mitchell, D.R.G. (2008) Schwertmannite transformation to goethite via the Fe(II) pathway: Reaction rates and implications for iron-sulfide formation. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 71, 4551-4564.
- Cornell, R.M. and Schwertman, U. (1996) The iron oxides. VCH.
- Fukushi K., Sato, T., and Yanase, N. (2003) Solid-solution reaction in As(V) sorption by schwertmannite. *Environ. Sci. Technol.*, 37, 3581-3586.
- Fukushi K., Sato, T., Yanase, N., Minato, J., and Yamada, H. (2004) Arsenate sorption on schwertmannite. *Am. Miner.*, 89, 1728-1734.
- Gagliano, W.B., Brill, M.R., Bigham, J.M., Jones, F.S.,



- and Traina, S.J., (2004) Chemistry and mineralogy of ochreous sediments in a constructed mine drainage wetland. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 68, 2119-2128.
- Janney, D.E., Colwy, J.M., and Buseck, P.R. (2000) Transmission electron microscopy of synthetic 2- and 6-line ferrihydrite. *Clays Clay Miner.*, 23, 310-317.
- Jönsson, J., Persson, P., Sjöberg, S., and Lövgren, L. (2005) Schwertmannite precipitated from acid mine drainage: phase transformation, sulphate release and surface properties. *Appl. Geochem.*, 20, 179-191.
- 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.*, 42, 19-31.
- Kuesel, K. (2003) Microbial cycling of iron and sulfur in acidic coal mining lake sediments. *Water Air Soil Pollut. Focus*, 3, 67-90.
- Lee, J.E. and Kim, Y. (2008) A quantitative estimation of factors affecting pH changes using simple geochemical data from acid mine drainage. *Environ. Geol.*, 55, 65-75.
- Loan, M. Cowley, J.M., Hart, R., and Parkinson, G.M. (2004) Evidence on the structure of synthetic schwertmannite. *Am. Miner.*, 89, 1735-1742.
- Peine A., Tritschler A., Kusel K., and Peiffer S. (2000) Electron flow in an iron-rich acidic sediment-evidence for an acidity-driven iron cycle. *Limnol. Oceanogr.*, 45, 1077-1087.
- Regenspurg, S., Brand, A., and Peiffer, S. (2004) Formation and stability of schwertmannite in acidic mining lakes. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 68, 1185-1197.
- Schroth, A.W. and Parnell, R.A. (2005) Trace metal retention through the schwertmannite to goethite transformation as observed in a field setting, Alta Mine, MT. *Appl. Geochem.*, 20, 907-917.
- Sidenko, N.V. and Sherriff, B.L. (2005) The attenuation of Ni, Zn and Cu, by secondary Fe phases of different crystallinity from surface and ground water of two sulfide mine tailings in Manitoba, Canada. *Appl. Geochem.*, 20, 1180-1194.

---

접수일(2011년 4월 29일), 수정일(1차 : 2011년 6월 20일),  
게재확정일(2011년 6월 27일)