

## 광산배수 수용하천의 중금속이온 평형에 관한 연구

김진범\* · 전상호\*\* · 김휘중\*\*

### A Study of Heavy Metal Equilibria in Acid Mine Drainage Receiving Stream

Jin-Beom Kim\*, Sang-Ho Jun\*\* and Hee-Jong Kim\*\*

**ABSTRACT** : Heavy metal equilibria in the Dongnam stream which receives the wastewater from mining activities are investigated to provide some basic data for the management of small stream with acid mine drainage. Saturation, undersaturation, and supersaturation of some heavy metal ions with respect to some mineral phases are evaluated by saturation index (logIAP/Ksp). The  $Al^{3+}$  activities showed equilibrium with  $Al(OH)_3$  solid phase below a pH of 6.0. The  $Fe^{3+}$  activities appeared to be controlled by  $Fe(OH)_3$  (amorphous) solid phase below a pH of 4.0.  $Zn^{2+}$  activities appeared to be regulated by  $ZnCO_3$  solid phase above a pH of 6.8. Some heavy metal activities appeared to be depended upon the pH.

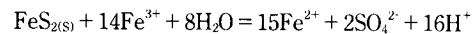
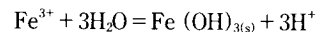
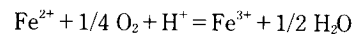
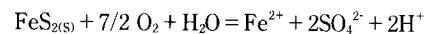
#### 서 론

강원도 태백지역에는 소규모의 광산이 여러 곳에서 개발되고 있는데, 특히 황지, 장성, 정선지역에는 석탄광과 납·아연광이 집중되어 있어서 이들에 의한 하천오염이 심화되고 있다. 광산개발에 의한 오염원으로는 광석을 채굴하는 과정에서 발생하는 광산배수, 선탄폐수, 맥석광물 등이 있다. 이들 중에서 지하수 오염원으로는 광산배수가 대표적이다.

우리나라의 여러 석탄광상은 많은 양의 유화광물을 포함하고 있어서 이들이 박테리아의 활동이나 화학적 반응을 통하여 중금속과 황화물을 함유하는 광산배수를 생성한다 (Ehrlieh, 1990; Jean, Lueking, 1990; Lasse, Tuovinen, 1989). 유화광물을 분해하는 박테리아로는 *Thiobacillus thiooxidans*와 *Thiobacillus ferrooxidans*가 대표적인데, 이들은 pH 2~5의 강산성수에서 성장하며, 고농도의 중금속을 함유한 물에서도 생존 가능하다 (Förstner, Wittmann, 1979).

Fe, Al, Zn, Mn, Mg, Ca, Ni, Pb 등의 용존 중금속을

함유하는 광산배수가 지하로 스며들거나 하천으로 유입되면 광산지역 주민들의 식수에 피해를 주거나 상수원이 되는 하천이나 호수의 수질에 영향을 준다. 이외에도 광산 주변에는 경제성이 없는 맥석광물들이 방치되어 자연 경관을 훼손시킬 뿐만 아니라 이들에 포함되어 있는 다량의 유화광물이 산소와 물과 반응하여 중금속이 녹아 나와 토양오염을 일으키는 원인이 된다 (Pichtel, Dick, 1991). 대부분의 석탄광은 황철석 (Pyrite)을 함유하고 있어서 아래와 같은 반응을 통하여 하천수의 pH를 낮춘다 (Sullivan *et al.*, 1986).



즉, 황철석을 함유하는 석탄 폐기물이 땅속에 묻히기 전에 지표면에 노출되면 황철석은 대기중의 산소, 용존산소 및 용존 철이온에 의해 산화되어 철유화물과 자로사이트 (Jarosite) 및 수산화철과 산소를 포함하는 2차 철광물을 형성하게 되는데, 이들이 하천에 유입되면 하천수의 pH가 낮아지고 하천 생태계가 파괴된다. 광산배수의 유입으로 인한 하천수의 화학조성 변화는 저서 무척추동물의 성장과 번식에 큰 영향을 주게 된다. 광산배수가 수생태계에 주는 직접적인 영향으로는 고농도의 용존 중금속을 함유

\* Division of Environmental and Biological Engineering, Kangwon National University, Chunchon 192-1, Korea

\*\* Dept. of Environmental Science, Kangwon National University, Chunchon 192-1, Korea

한 광산배수의 독성, 하천 바닥에 침전된 금속 침전물에 의한 바닥의 불안정성에 의한다 (Diane, Feder, 1984).

1960년 일본의 Toyama Jintsu강 유역의 주민들에게 발생했던 이타이이타이병은 상류지역의 아연광산에서 고농도의 Cd를 함유한 광산배수가 쌀 생산지역에 유입되어 일어난 사건이다 (Förstner, 1989). 국내의 경우 남, 아연 광과 석탄광이 집중되어 있는 태백산맥 일대의 하천바닥은 산화철에 의해 적갈색을 띠고 있으며, 태백시 황지, 장성 지역과 정선군 고한, 사북, 증산 일대의 하천에는 물고기가 발견되지 않는다. 또한 이 지역은 낙동강과 남한강의 상류에 위치하고 있어서 고농도의 중금속을 함유한 퇴적물이 하류로 이동함에 따라 장기적으로는 대도시의 상수원인 안동호와 충주호의 수질오염에 기여할 것으로 보인다. 특히 광산배수는 강산성이기 때문에 하천에 유입될 경우 퇴적물 속에 안정하게 존재하고 있는 중금속이 수층으로 용출되게 하는 중요한 요인으로 작용하게 된다. 광산개발에 의해 발생하는 오염원은 다른 산업활동과 관련된 수질오염과 달리 개발하던 광산을 폐쇄한다고 해서 단기간에 오염을 줄이거나 없애기 어려우며, 폐쇄된 광산에 의해 더 심한 오염이 유발되는 일이 많다.

따라서 아직까지 환경오염의 관심사에서 제외되었던 광산지역의 오염문제를 검토하고 강산성을 띤 광산배수와 광산 주변에 버려진 맥석광물들의 적절한 관리방안에 대한 연구가 필요한 것으로 사료된다. 본 연구에서는 광산개발로 인해 발생하는 광산배수가 수질에 미치는 정도를 밝히기 위해 이들이 하천으로 유입되었을 때 용존상태의 중금속 오염물질들이 어떤 형태의 2차광물과 평형을 이루면서 안정한 상태로 존재하는지를 알아보고자 한다.

## 재료 및 방법

### 조사지 개요

강원도 정선군에 위치한 동남천은 유로 47 km의 하천으로 태백산맥을 기점으로 하여 서북쪽으로 흘러 한강 상류인 조양강과 합류한다.

동남천에는 현재 가동 중인 삼척탄좌, 동원탄좌, 정동탄광에서 발생하는 광산배수, 선탄폐수 및 채석장에서부터의 맥석광물들이 하천으로 유입됨으로써 수질오염이 심각하다. 또한 폐쇄된 세원탄광, 인동탄광, 사북탄광에서 나오는 강산성의 광산배수도 동남천으로 유입된다. 현재 가동 중인 삼척탄좌와 동원탄좌에서는 세립질 석탄이 많이 함유된 갱내수를 침전시켜 방류하고 있어서 이들에 의한 하천수의 탁도가 예전보다는 덜 심각하지만 갱내수에 다량으로 함유

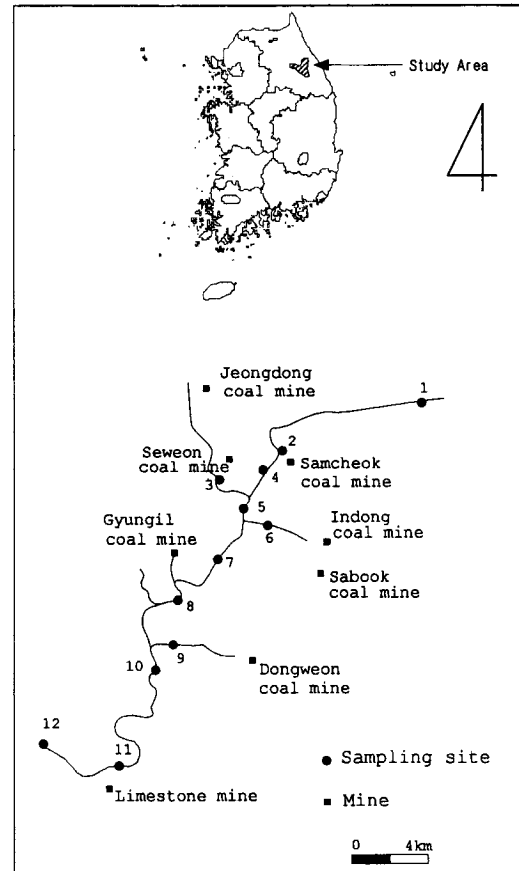


Fig. 1. Map showing the sampling sites Dongnam stream.

된 용존 중금속, 특히 황철광의 산화에 의해 발생된 철이온들이 하천으로 유입되어 철수산화물의 형태로 침전되어 하천 바닥을 황갈색으로 만들고 있다. 또한 채석장에 쌓아둔 맥석광물들은 홍수기 때 강우에 의해 하천으로 유입되어 수질오염을 가중시키고 있다. 동남천은 유역이 좁고 유속이 빨라 상류에서는 바닥에 퇴적물이 거의 쌓이지 않고 기반암이 노출되어 있는 경우가 많다. 광산지역의 단위면적당 폐수배출량은 약  $5800 \text{ m}^3/\text{km}^2 \cdot \text{day}$  내외이며, 비광산지역을 포함한 유역 면적당 배출량은 약  $1,500 \sim 2,300 \text{ m}^3/\text{km}^2 \cdot \text{day}$  (이찬기, 1984)로 하천 유량 중 광산배수의 비율이 높다. 동남천 수질을 오염시키는 예상 오염원을 고려하여 선정된 시료 채취지점은 Fig. 1에 나타내었다.

## 연구방법

### 시료채취

1992년 6월 26일 동남천 상류에서 하류로 이동하면서

12 지점 (Fig. 1)으로부터 표층수를 채취하였다. 수온, pH, 탁도는 현장에서 직접 측정하였다. 표층수는 산처리된 폴리에틸렌플라스틱병을 이용하여 퇴적물의 유입과 대기와의 접촉을 최소화 하도록 주의하여 담았다. 각 지점에서 채취한 시료중의 1개는 양이온 분석을 위해 6N HCl로 pH<2로 처리하였으며, 다른 하나는 음이온 분석을 위해 전처리 없이 실험실로 옮겼다. 모든 시료는 현장에서 여과한 후 실험실에 도착시까지 냉장하였고 실험실에서 분석시까지 4°C에서 저장하였다.

**화학분석**

산처리된 시료로부터 양이온의 농도는 Standard method (APHA, 1989)에 의하여 처리한 후 AAS (atomic absorption spectrometry using a Varian Techtron AA-6 instrument with an air-acetylene)로 측정하였다. 황산이온 (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)은 Turbidimetric method (APHA, 1989)에 의하여 분석하였다. 염소이온 (Cl<sup>-</sup>)은 Argentometric method (APHA, 1989)에 의하여 분석하였다. 중탄산이온 (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)과 탄산이온 (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)은 acid titration, 총 용존 무기인 (Total dissolved phosphate)은 ammonium persulfate로 분해시킨 후 Ascorbic acid법으로 측정하였다. 표층수의 pH는 combination electrode로 측정하고 온도는 유리온도계로 측정하였다. 표층수의 탁도는 Nephelometric method에 의하여 측정하였다.

**Table 1.** Constants for solubility equilibria.

Solubility equilibrium	Equilibrium constant logK
*H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> =H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> +H <sup>+</sup>	-2.10
*H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> =HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> +H <sup>+</sup>	-7.20
*HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> =PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> +H <sup>+</sup>	-12.40
H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> =H <sup>+</sup> +HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-6.35
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> =H <sup>+</sup> +CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	-10.33
*Al <sup>3+</sup> +H <sub>2</sub> O=AlOH <sup>2+</sup> +H <sup>+</sup>	-4.99
*Al <sup>3+</sup> +2H <sub>2</sub> O=Al(OH) <sub>2</sub> <sup>+</sup> +2H <sup>+</sup>	-10.13
*AlOHSO <sub>4</sub> (jurbanite)+H <sup>+</sup> =Al <sup>3+</sup> +SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> +H <sub>2</sub> O	-3.23
*Fe <sup>3+</sup> +H <sub>2</sub> O=FeOH <sup>2+</sup> +H <sup>+</sup>	-2.19
*Fe <sup>3+</sup> +2H <sub>2</sub> O=Fe(OH) <sub>2</sub> <sup>+</sup> +2H <sup>+</sup>	-5.69
*Fe(OH) <sub>3</sub> (amorphous)+3H <sup>+</sup> =Fe <sup>3+</sup> +3H <sub>2</sub> O	-3.54
**Fe(OH) <sub>3</sub> (amorphous)=Fe <sup>3+</sup> +3OH <sup>-</sup>	-37.11
*ZnCO <sub>3</sub> =Zn <sup>2+</sup> +CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	-10.00
Zn <sup>2+</sup> +H <sub>2</sub> O=ZnOH <sup>+</sup> +H <sup>+</sup>	-9.40
Zn <sup>2+</sup> +3H <sub>2</sub> O=Zn(OH) <sub>3</sub> <sup>-</sup> +3H <sup>+</sup>	-28.20
Zn <sup>2+</sup> +4H <sub>2</sub> O=Zn(OH) <sub>4</sub> <sup>2-</sup> +4H <sup>+</sup>	-40.50

\*data from Krauskopt(1979)  
 \*data from Karathanis *et al.*(1988)  
 \*\*data from Sullivan *et al.*(1988)  
 data from Stumm and Morgan(1981)

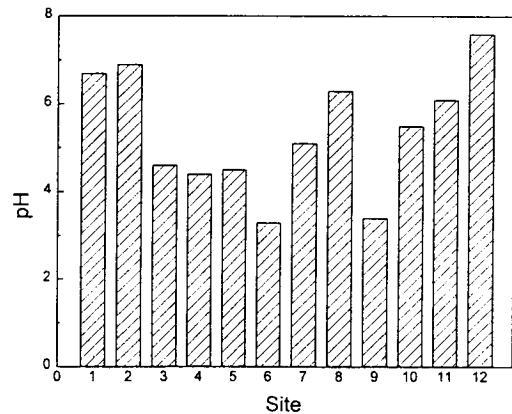
**포화지수**

동남천 표층수에 함유된 중금속 오염물질의 포화정도를 알아보기 위해, 각 원소들의 활동도는 Devye-Hückel 방정식을 사용하여 계산하였다. 특정 광물에 대한 Al<sup>3+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Zn<sup>2+</sup> 이온의 포화정도를 나타내기 위해 log (IAP/Ksp)를 사용하였는데, log (IAP/Ksp)는 Saturation Index (SI)로 사용되고 있다. 즉 SI=0 이면 포화상태를, SI>0 이면 과포화상태를, SI<0 이면 불포화상태를 나타낸다 (Reddy *et al.*, 1988). 본 실험에서 SI는 용존 중금속과 그를 포함하고 있는 수종의 광물 간의 포화정도를 비교하기 위한 것이며, 사용된 열역학 상수는 Table 1에 나타내었다 (25°C, 1기압 기준).

**결과 및 토의**

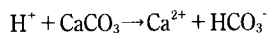
**pH**

동남천 표층수의 pH는 3.3~7.6으로 나타났다 (Fig. 2). 현재 광산활동이 진행 중인 삼척탄좌의 갯내수인 정점 2는 중성에 가까운 pH 6.9를 나타내었고, 3년 전에 폐광된 인동광산과 사북광산 갯내수가 유입되는 정점 6에서 가장 낮은 pH 3.3을 나타내었다. 폐광산배수와 현재 가동 중인 광산배수의 영향을 받는 지점에서 pH가 낮은 것은 석탄광에서 맥석광물로 존재하는 황철석이 산화되어 다량의 수소이온을 수계로 방출하기 때문이다. 그 외의 정점에서는 하류로 이동함에 따라 pH가 증가하는 현상을 나타내는데, 이는 고도일 지역과 범바위 지역에서 유입되는 유입수에 의한 희석과 본 하천 유역의 지질이 석회암 지대이기 때문에 아래와 같은 화학적 반응에 의해 pH가



**Fig. 2.** pH values in Dongnam stream water.

증가된 것으로 보인다.



하류로 이동함에 따라 하천수의 수소이온에 의해 탄산칼슘이 용해되어 생성된 칼슘이온과 중탄산이온은 하천수의 알카리도와 칼슘이온의 농도를 증가시킨다 (Zaihua *et. al.*, 1991).

**중금속 오염물질의 평형**

본 연구에서는 동남천 표층수에 함유된 중금속 오염물질의 평형상태를 알아보기 위해 포화지수를 사용였다. Devye-Hückel 방정식에 의한 각 이온의 활동도는 Table 2와 같다.

**용존 알루미늄**

동남천 표층수에 함유된 용존 알루미늄의 총농도는 0.08 mg/l~2.98 mg/l로 나타났다 (Fig. 3). 용존 알루미늄은 폐광산배수가 유입되는 정점 6과 현재 광산활동이 진행 중인 동원탄좌의 광산배수가 유입되는 정점 9에서 가장 높은 2.98 mg/l를, 비오염지대인 정점 1에서 0.08 mg/l로 가장 낮은 함량을 나타내었다. 용존 알루미늄은 pH가 낮은 산성 환경에서 높은 함량을 나타내었는데, 이는 K-사장석, 흑운모, 백운모 등의 알루미늄을 함유하고 있는 광물과 물의 상호작용으로 다량의 알루미늄 이온이 하천으로 유입된 것으로 보인다.

Al<sup>3+</sup> 이온의 활동도를 제한하는 Al-광물상에 대한 평형관계는 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에 나타낸 실선은 AlOHSO<sub>4(s)</sub>의 평형상수 10<sup>-3.23</sup>이다 (Table 1). AlOHSO<sub>4(s)</sub>

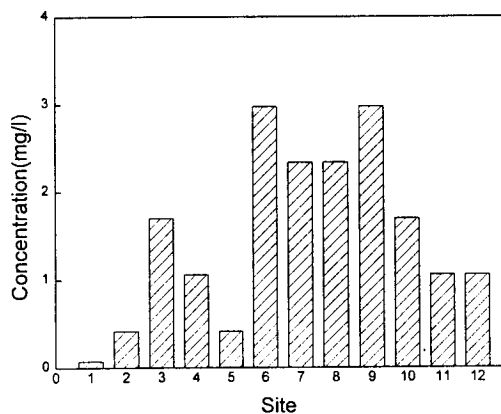
**Table 2.** Activity of some ions present in Dongnam stream water.

Sampling site	pH	Log Activity				
		Al <sup>3+</sup>	Fe <sup>3+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
S-1	6.7	-9.46	-10.07	-6.10	-5.95	-3.77
S-2	6.9	-9.01	-9.13	-5.25	-5.71	-4.07
S-3	4.6	-4.83	-6.85	-4.89	-9.08	-2.97
S-4	4.4	-4.97	-6.84	-5.03	-11.19	-2.89
S-5	4.5	-5.40	-6.78	-4.99	-9.25	-3.05
S-6	3.3	-4.38	-5.49	-4.71	-14.29	-2.90
S-7	5.1	-5.03	-7.43	-5.10	-8.49	-3.25
S-8	6.3	-7.15	-8.72	-5.21	-6.28	-3.45
S-9	3.4	-4.43	-5.31	-4.84	-11.37	-2.78
S-10	5.5	-5.76	-7.88	-5.22	-7.61	-3.09
S-11	6.1	-7.05	-8.50	-5.22	-6.84	-3.06
S-12	7.6	-10.09	-10.33	-5.59	-4.91	-3.43

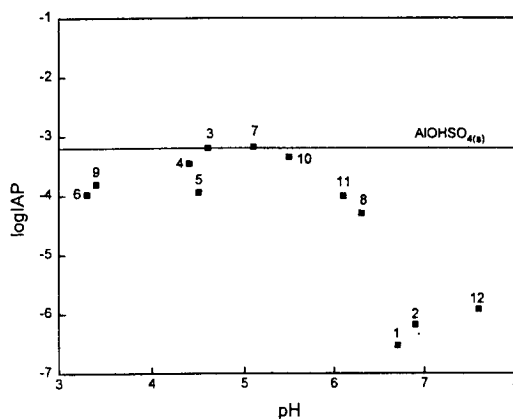
에 대한 Al<sup>3+</sup> 이온의 활동도는 pH<6인 전 영역에서 거의 포화상태를, pH>6에서 불포화상태를 나타내었다 (Fig. 4). 여기서, log (IAP/Ksp)값이 0~1 사이에 있으면 포화상태에 있는 것으로 보았다 (Bohn, Bohn, 1987). Al<sup>3+</sup> 이온의 활동도는 pH<6인 환경에서 대부분 AlOHSO<sub>4(s)</sub>에 의해 제한되는 것으로 나타났는데, 이는 이전의 연구 결과와 일치한다 (Sullivan *et al.*, 1988).

**용존 철**

동남천 표층수에 함유된 용존 철의 총농도는 0.7 mg/l~13.59 mg/l로 나타났다 (Fig. 5). 용존 철은 동원탄좌의 광산배수가 유입되는 정점 9에서 가장 높고 비오염지대인 정점 1에서 가장 낮은 함량을 나타내었다. 용존 철은 현재 가동 중인 광산으로부터 나오는 광산배수나 폐광산배수



**Fig. 3.** Concentration of total dissolved Al in Dongnam stream water.



**Fig. 4.** Distribution of log IAP and Ksp of AlOHSO<sub>4(s)</sub> with respect to pH in Dongnam stream water.

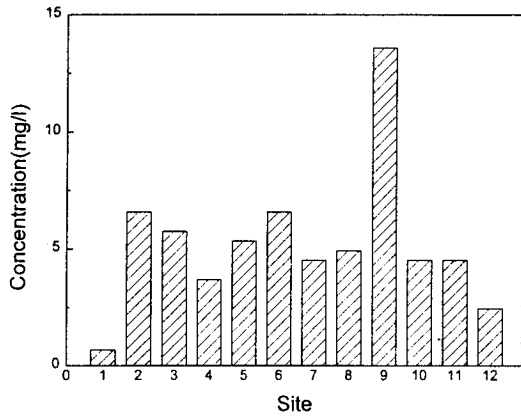


Fig. 5. Concentration of total dissolved Fe in Dongnam stream water.

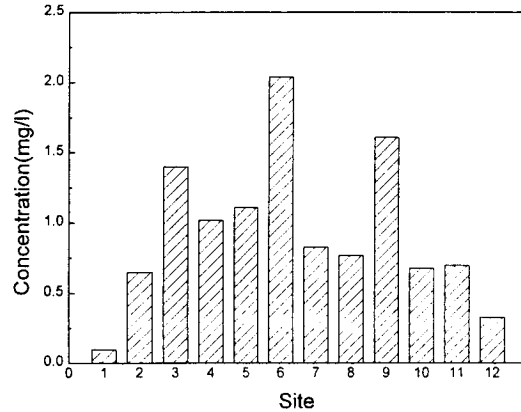


Fig. 7. Concentration of total dissolved Zn in Dongnam stream water.

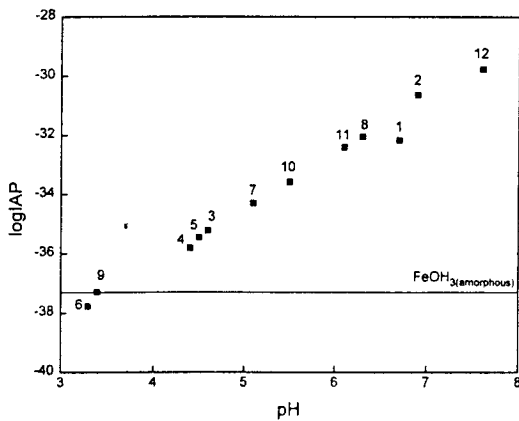


Fig. 6. Distribution of log IAP and Ksp of  $Fe(OH)_3(amorphous)$  with respect to pH in Dongnam stream water.

가 유입되는 지류에서 매우 높은 함량을 보여준다. 즉, 삼척탄좌의 갯내수인 정점 2, 폐광된 사북탄광과 인동광산에서 배출되는 광산배수가 유입되는 정점 6, 동원탄좌의 광산배수가 유입되는 정점 9에서 각각 6.59 mg/l, 6.59 mg/l, 13.59 mg/l로 높게 나타난 반면에 하류로 이동함에 따라 지류에서 유입되는 유입수에 의한 희석이나 pH 변화에 따른 침전 등에 의해 용존 철의 농도가 감소하는 경향을 보인다. 용존 철이 광산활동의 영향을 직접 받는 지점에서 높은 함량을 나타내는 것은 광산지역 주변에 분포한 갈철석, 적철석, 흑운모, 황철석 등 철을 포함하는 광물들이 산성 환경에서 풍화작용을 받아 철 이온이 수계로 유입된 것으로 보인다. 특히 대부분의 석탄광에서 맥석광물로 존재하는 황철석은 대기중의 산소와 물과의 접촉으로 쉽게 산화되어 다량의 수소이온과 철이온을 수계로 유출시켜 하천수 산성화의 원인이 된다 (Sullivan *et al.*,

1986).

pH에 따른  $Fe^{3+}$ 의 활동도를 제한하는 Fe-광물상에 대한 평형관계는 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에 나타낸 실선은  $Fe(OH)_3(amorphous)$ 의 평형상수  $10^{-37.11}$ 이다 (Table 1).  $Fe(OH)_3(amorphous)$ 에 대한  $Fe^{3+}$  이온의 활동도는 pH<4인 강산성 환경에서 포화상태를, pH>4인 환경에서 과포화상태를 나타내었다.  $Fe^{3+}$  이온의 활동도는 pH<4인 강산성 환경에서  $Fe(OH)_3(amorphous)$ 에 의해 제한되며, pH가 증가함에 따라 포화상태에서 과포화 상태를 이루는 경향을 보인다.

### 용존 아연

동남천 표층수에 함유된 용존 아연의 총농도는 0.1 mg/l ~ 2.04 mg/l로 나타났다 (Fig. 7). 용존 아연은 폐광된 사북탄광과 인동광산의 광산배수가 유입되는 정점 6에서 가장 높고 광산배수의 영향을 받지 않는 정점 1에서 가장 낮은 함량을 나타내었다. 용존 아연의 함량 분포는 pH에 따라 현저한 차이를 나타낸다. pH<5.0인 정점 3, 4, 5, 6, 9에서 각각 1.4 mg/l, 1.02 mg/l, 1.11 mg/l, 2.04 mg/l, 1.61 mg/l로 높은 함량을 나타낸 반면에 pH>5.0인 정점 2, 7, 8, 10, 11, 12에서 각각 0.65 mg/l, 0.83 mg/l, 0.77 mg/l, 0.68 mg/l, 0.70 mg/l, 0.33 mg/l로 상대적으로 낮은 함량 분포를 나타낸다. 특히 폐광산배수가 유입되는 정점 6에서 가장 높은 2.04 mg/l를 나타낸 것은 광산활동이 중단된 후에도 강산성 환경에서 물과 아연을 함유한 광물과의 화학적 반응이나 미생물 활동에 의해 이온으로 용해되어 하천으로 유입된 것으로 보인다.

$Zn^{2+}$  이온의 활동도를 제한하는 Zn-광물상에 대한 평

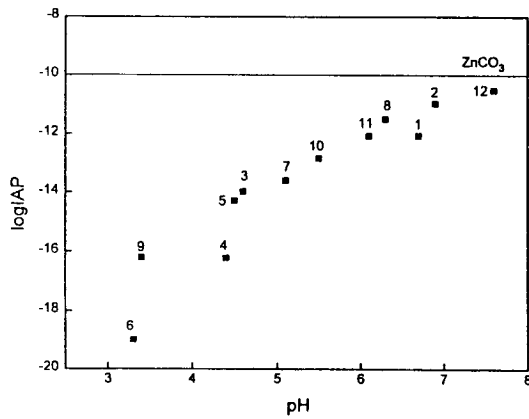


Fig. 8. Distribution of log IAP and Ksp of  $ZnCO_3$  with respect of pH in Dongnam stream water.

형관계는 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에 나타낸 실선은  $ZnCO_3$ 의 평형상수  $10^{-10.00}$ 이다 (Table 1).  $ZnCO_3$ 에 대한  $Zn^{2+}$  이온의 활동도는 pH가 중성에 가까운 정점 2와 정점 12에서 포화상태를, 그 외의 정점에서 불포화상태를 나타내었다.  $Zn^{2+}$  이온의 활동도는 중성 환경에서 대부분  $ZnCO_3$ 에 의해 제한되는 것으로 보이며, pH가 증가함에 따라 불포화상태에서 포화상태를 이루는 경향을 보인다.

## 결론

하천수의 pH는 광산활동의 영향을 직접 받는 지점에서 낮고 하류로 이동함에 따라 높게 나타났는데, 하천수의 산성화를 막기 위해서는 광산배수 및 맥석광물에 대한 적절한 관리가 필요한 것으로 판단된다. 중금속 오염물질 농도는 현재 가동 중인 광산배수의 영향을 받는 지점보다 폐광산배수가 유입되는 지점에서 높게 나타났는데, 이는 수 년간 물과 주변 암석 사이의 화학적 반응이나 미생물 활동에 의해 다량의 중금속이 수계로 유출된 것으로서 이들에 의한 하천 오염을 방지하기 위해서는 폐광산에서 배출되는 광산배수에 대해서도 적절한 방지시설 및 관리가 필요한 것으로 판단된다.  $Al^{3+}$  이온의 활동도는  $pH < 6$ 인 환경에서 대부분  $AlOHSO_4(s)$ 와 포화상태를 이루고 있어서  $AlOHSO_4(s)$ 에 의해 제한될 가능성이 있는 것으로 판단된다.  $Fe^{3+}$  이온의 활동도는  $pH < 4$ 에서  $Fe(OH)_3(amorphous)$ 와 포화상태를 이루고 있어 강산성 환경에서는  $Fe(OH)_3(amorphous)$ 에 의해 제한될 가능성이 큰 것으로 판단된다.  $Zn^{2+}$  이온의 활동도는  $ZnCO_3$ 에 대해  $pH < 6.8$ 인 조건에서

대부분 불포화상태를,  $pH > 6.8$ 인 환경에서 포화상태를 나타내고 있어 중성에 가까운 환경에서는 대부분  $ZnCO_3$ 에 의해 제한될 가능성이 있는 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- 이찬기 (1984) 남한강 최상류 지장천의 수질분석 및 석탄폐수처리에 관한 연구. 강원대학교 부설환경연구소, p. 54-78.
- APHA (1989) Standard methods for examination of water and wastewater. 17th (ed.), APHA, New York, 1083p.
- Bohn, H.L. and Bohn, R.K. (1987) Solid activities of trace elements in soil. *Soil Sci.*, v. 143, p. 398-403.
- Diane, M.M. and Feder, G.L. (1984) The ecological effect of acidic conditions and precipitation of hydrous metal oxides in a Rocky Mountain stream. *Hydrobiologia*, v. 119, p. 129-138.
- Förstner, U. (1988) Lecture notes in earth sciences. Springer-Verlag, New York, v. 21, 157p.
- Förstner, U. and Wittmann, G.T.W. (1979) Metal pollution in the aquatic environment. Springer-Verlag, New York, 486p.
- Jean, L.B. and Lueking, D.R. (1990) Growth and maintenance of theobacillus cells. *Applied and Environ. Microbiology*, p. 2801-2806.
- Karathanasis, A.D., Evangelou, V.P. and Thompson, Y.L. (1988) Aluminum and iron equilibria in soil solutions and surface waters of acid mine watersheds. *J. Environ. Qual.*, v. 17, p. 534-543.
- Krauskopf, K.B. (1979) Introduction to geochemistry. 2nd (ed.), Tokyo, 617p.
- Lasse, A. and Tuovinen, O.H. (1989) Microbiological oxidation of ferrous iron at low temperatures. *Applied and Environment Microbiology*, p. 312-316.
- Ehrlich, H.L. (1990) Geomicrobiology. 2nd (ed.), Marcel-Dekker Inc., New York, 646p.
- Pichtel, J.B. and Dick, W.A. (1991) Sulfur, iron and solid phase transformations during the biological oxidation of pyritic mine spoil. *Soil Biol. Biochem.*, v. 23, p. 101-107.
- Reddy, K.J., Sullivan, P.J. and Yelton, J.L. (1988) Solubility relationships of zinc associated with acid mine drainage. *J. Environ. Qual.*, v. 17, p. 712-714.
- Sullivan, P.J., Mattigod, S.V. and Sobek, A.A. (1986) Dissolution of iron sulfates from pyritic coal wastes. *Environmental Science Technology*, v. 20, p. 1013-1016.
- 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.
- Stumm, W. and Morgan, J.J. (1981) Aquatic chemistry. Wiley-Interscience, New York, 780p.
- Zaihua, L., Yuan, D. and Zhaoli, S. (1991) Effect of coal mine waters of variable pH on springwater quality: a case study. *Environ. Geol. Water Sci.*, v. 17, p. 219-225.