한국지하수토양환경학회 춘계학술발표회
2006년 4월 14일 동국대학교

동위원소를 이용한 폐금속광산 지역 오염원 추적 연구

염승준 · 이평구 · 이인경 · 이욱종

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부
sjyoum@kigam.re.kr

요 약 문

Using sulfur isotope analysis of dissolved sulfate in surface water, we have investigated the source of sulfate in order to identify the abandoned metallic mines, which have the potential of heavy metal contamination within watershed. The range of the sulfur isotope values for dissolved sulfate in stream waters (DD-1 and 2) are similar to those of sulfides from the Dunjun mine, which suggests that oxidation of sulfides is the principal source of SO_4^{2-} in these stream waters. Also, heavier sulfur isotopes in waters near Baekjun and Hamchang mines imply the possibility of contamination in waters by these metallic mines.

key word : Sulfur isotope, source, abandoned metallic mine, watershed, stream water

1. 서론

폐금속광산이 밀집되어 있는 집수분지에서 황화광물의 산화작용에 기인한 중금속재해를 경제적이고 효율적으로 복원하기 위해서는, 그의 자연적 기원 또는 광산 기원을 구분하여 복원대상 광산(또는 소규모 집수분지)의 우선순위를 결정하는 것이 필요하다. 용존 황산염의 황 및 산소 동위원소 조성은 지하수내 황산염의 기원을 규명하는 데 가장 많이 이용되어져 왔으며, 최근에는 대기 중 물질의 유입 및 광산배수 내 황산염의 기원을 구분하는 데 이용되고 있다. 본 연구의 목적은 폐금속광산이 밀집되어 분포하고 있는 정선지역의 집수분지를 대상으로 하천수 내 황산염의 황 및 산소-수소 동위원소를 이용하여, 하천에 영향을 미칠 수 있는 광산을 구분하여, 복원을 위한 우선순위를 결정하는 것이다.

2. 본론

강원도 정선군 동면에 위치하는 본 집수분지에는 많은 폐금속광산(둔전, 백전, 동원, 화표, 함창광산 등)들이 집수분지 전역에 분포하고 있으며, 주요 수계인 동대천에는 광산지역을 지나는 많은 지류들이 유입되고 있다. 지질은 조선누층군에 속하는 지층과 후기에 이를 관입한 화강암류 및 맥암류로 구성되어 있으며, 대부분 풍촌석회암, 화절층, 두무동층, 막동석회암 등 석회암으로 구성되어 있다(박희인, 박영록, 1990).

2005년 5월초에 하천수(DD) 16개와 함창광산 광미침출수(HC) 4개를 채취하였다(Fig. 1). 하천수는 광산의 영향을 받았을 것으로 판단되는 지점과, 지류와 동대천이 합류되는 지점에서 채취하였다. 한편 침출수는 건천 상태인 광산 지류에 고여 있는 물을 채취하였다. 본 집수유역은 평균 고도가 높고 강수량은 적은 시기이므로, 동대천 및 지류의 유량은 적은 편이며, 하천수는 DD-4지점에서 지하로 사라졌다가 DD-5 지점에서 다시 나타난다.

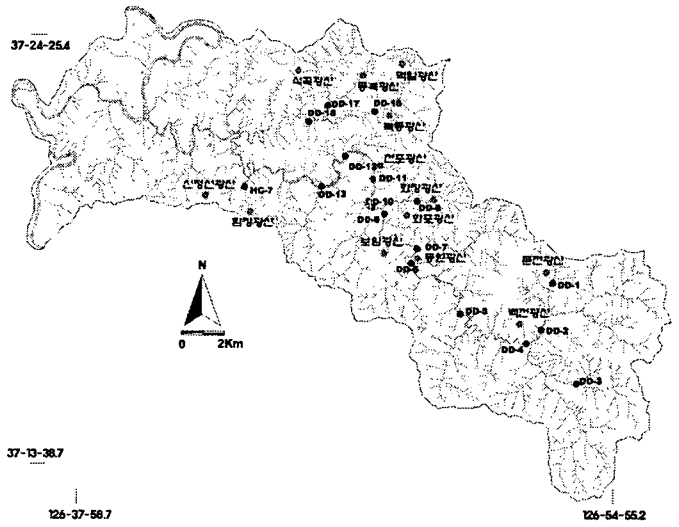

Fig. 1. Watershed showing major tributaries to the Dongdae Creek and sample location.

물 시료는 현장에서 pH, EC 및 알카리도 등을 측정하였다. 음이온(SO_4^{2-}) 분석은 IC(Dionex series 500DX)를 이용하여 분석하였다. 황 동위원소 분석을 위해 물 시료를 4L를 채취하여 묽은 염산을 사용하여 pH를 4.5이하로 낮추고 $BaCl_2$를 사용하여 $BaSO_4$로 침전시킨 후 원심분리기를 이용하여 회수하였다. 황 동위원소 분석은 한국기초과학지원연구원 대전 본원의 안정동위원소 질량분석기(PRISM II/영국 VG Isotech사)를 사용하였고, 분석정밀도는 ±0.1‰이다. 황 동위원소의 표준시료로는 CDT(Canyon Diablo Troilite)를 사용하였고 분석정밀도는 ±0.2‰이다. δD 및 $\delta^{18}O$ 분석은 한국지질자원연구원에 설치된 가스질량분석기(Finnigan MAT-252)를 이용하였으며, 측정 오차는 수소는 ±2‰이고, 산소는 ±0.07‰ 이다.

동대천의 산소 및 수소 동위원소 값($\delta^{18}O$=-10.3 ~ -10.9‰, δD = -70 ~ -76‰)은 국내 하천수(한강, 금강, 섬진강) 보다 낮은 동위원소 조성을 보이며, 이는 국내 하천수의 산소 및 수소 동위원소 조성이 강수의 위도효과 및 고도효과를 함께 반영하는 것과 잘 일치한다(이광식, 이창복, 1999). 또한 비슷한 위도에 위치하는 한강보다도 낮은 동위원소 조성을 보이는 데, 이는 본 집수분지의 평균고도가 높기 때문인 것으로 판단된다. 한편 산소-수소 동위원소 조성이 Craig(1961)의 지구순환선(GMWL)에 부근에 밀집하여 분포하고 있는 것은 본 집수분지의 하천수가 강수 기원임을 지시하고 있으며, 또한 우리나라 여름 강수의 순환수선(LMWL)에 가까이 도시되는 것은 강수량이 집중되는 여름 강수의 많은 부분이 지하수로 함양되었다가 건기에 하천수로 유입되는 것을 지시해준다. 일부 시료는 우리나라 봄 강수 순환수선 방향으로 편중되는 경향을 보이는 데, 이는 본 집수분지의 규모가 작기 때문에 봄 강수의 영향을 받는 것으로 해석된다. 한편 함창광산의 광미 침출수는 하천수보다 무거운 산소-수소 동위원소 조성을 보이고 있는 데, 이는 증발작용에 기인하는 것으로 추정된다. 따라서 본 집수분지의 하천수는 대부분 강수 기원이며, 주로 여름 강수가 지하에 함양되어 있다가 하천에 유입되는 것을 알 수 있다.

화학분석 결과, 동대천에서는 중금속이 검출되지 않거나, 검출되어도 매우 소량만이 확인된다. 하지만 집수분지 전역에 걸쳐 둔전, 백전, 함창광산 등 비교적 많은 폐금속광산이 분포하고 있어, 이들 광산들에 의한 수계의 오염 가능성이 있다. 특히 함창광산의 지류의 바닥에 고여 있는 광미 침출수(HC-7)는 pH가 1.9 ~ 3.0으로 매우 낮으며, 비소(최고 349 mg/l), 아연(139 ~

465 mg/l) 및 황산염(5,145 ~ 11,032 mg/l)의 농도가 매우 높다.

지상우 등(2003)은 본 집수분지에서 북서방향 15 km 지점(한창탄광)에서 채취한 식수를 강수로 제시하였으며, 강수의 황 동위원소 값과 농도는 각각 4.6‰ 및 4.16 mg/l이다. 하천수 내 용존 황산염의 황 동위원소 값은 0.42 ~ 5.25‰의 범위를 보이며, 황산염의 농도는 10.3 ~ 20.7 mg/l 범위의 값을 갖는다. 따라서 하천수 내 용존 황산염은 강수 기원이 아니며, 지질 및 황화광물의 산화작용에 영향을 받는 것으로 판단된다. 동대천으로 유입되는 많은 지류 중에서 폐금속광산이 분포하지 않은 지류에서 채취한 하천수(DD-3)의 황산염의 황 동위원소 값 및 농도는 각각 2.36‰ 및 11.4 mg/l로서, 이는 집수분지 대부분의 지질을 차지하는 석회암의 영향을 받은 것으로 추정되며, 이를 본 집수분지의 배경값으로 설정하였다. 동대천 및 지류의 대부분 물 시료의 황 동위원소 값은 2.58 ~ 3.74‰(평균 3.17‰)이며, 황산염의 농도는 10.3 ~ 14.1 mg/l(평균 12.8 mg/l)의 범위로 배경값과 근접한 값을 보여주고 있어, 광산의 영향을 받지 않은 것으로 판단된다(Fig. 2).

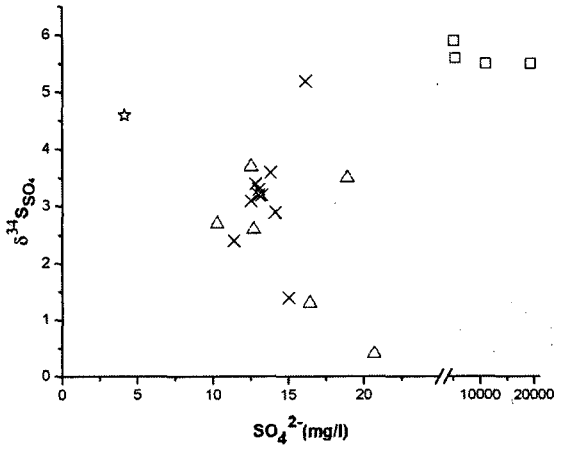

Fig. 2. $\delta^{34}S_{SO4}$ versus SO4 concentration for precipitation(☆), Tributary(△), Stream(×) and Leachate(□) within watershed.

하지만 둔전광산에 인접한 지류(DD-1)는 배경값에 비해 낮은 동위원소 값($\delta^{34}S_{SO4}$ = 0.42‰) 및 높은 황산염의 농도(20.7 mg/l)를 갖는다. 이와 같은 결과는 DD-1 지점이 둔전광산의 광미장에 인접한 지역으로, 광미장 내 황화광물의 산화작용에 의한 것으로 해석된다. 둔전광산에서 산출되는 황화광물의 황 동위원소 값은 0.0 ~ 3.1‰의 범위를 보이며(이찬희 등, 1994), 하천수의 황 동위원소 값이 둔전광산 황철석의 황 동위원소 값 범위 내에 포함된다. 이는 하천수 내 황의 기원이 광산에 의한 것이라는 것을 지시해주며, 이는 광미 내 황화광물의 풍화작용으로 발생된 중금속이 하천수로 유입될 가능성을 제시하고 있다. 한편 이 지점(DD-1)의 하류 지점(DD-2) 및 동대천과 합류하는 지점(DD-4)의 물 시료의 $\delta^{34}S_{SO4}$ 값은 각각 1.30과 1.39‰로서 미약하게 증가하고 있으며, 황산염의 농도도 함께 감소하고 있다. 황산염의 농도와 황 동위원소 값과의 상관관계에서 보면, 둔전광산 광미장 하부 지점의 하천수(DD-1)와 배경값 하천수(DD-3) 사이에 DD-2와 DD-4가 도시되어, 광산의 영향을 받은 하천수와 자연적인 하천수의 혼합(mixing)을 나타내고 있다(Fig. 2). 따라서 동대천 상류에 위치하는 둔전광산의 광미장으로부터 중금속 등 오염물질이 용존 상태로 이동될 수 있음을 지시해주고 있다. 한편 백전광산의 하류에 위치하는 하천수(DD-5)의 황 동위원소 값은 5.25‰로 높은 값을 보여주고 있다. 백전광산에서 산출되는 황철석의 $\delta^{34}S$ 값은

8.5 ~ 11.9‰이고, 스티브나이트는 6.3‰(이찬희 등, 1996)이다. DD-5 지점의 하천수가 백전광산의 황화광물 보다 다소 낮은 황 동위원소 값을 보이나, 박테리아 등에 의한 산화작용의 결과로 형성된 황산염의 황 동위원소 값이 황화광물의 값보다 낮은 경향이 있다는 점으로 볼 때, 이 지점에서의 높은 황 동위원소 값은 백전광산의 영향을 지시하고 있다. 하지만 DD-5 지점은 백전광산으로부터 약 3km 이상 떨어져 있으며, 두 지점 사이에서 하천수가 지하로 사라졌다가 다시 나타나는 점 등으로 볼 때, 하천 바닥의 환원상태에서 박테리아에 의한 황산염 환원반응에 의해 황 동위원소의 값이 증가한 것으로도 해석될 수 있다. 한편 함창광산의 지류에 고여 있는 하천수는 높은 황 동위원소 값($\delta^{34}S_{SO4}$ = 5.50 ~ 5.91‰) 을 보여주고 있다. 함창광산의 광석 시료의 황 동위원소는 알지 못하나, 광미장이 하천에 바로 인접하여 위치하고 있으며, 배경값보다 높은 황동위원소의 값, 일정한 동위원소의 조성 및 높은 황산염과 중금속 농도로 볼 때 광미의 침출수로 판단되며, 따라서 함창광산 지역의 지류는 광산의 영향을 받은 것으로 판단된다. DD-17 지점은 상부에 석곡 및 동북광산이 위치하고 있다. 하천수의 황동위원소 값은 배경값(3.48‰)과 유사하나, 황산염의 농도(18.9 mg/l)가 비교적 높은 편이며, 미량이지만 비소(0.33 mg/l)와 아연(0.23 mg/l)이 검출되어, 상부에 위치하는 광산의 영향을 배제할 수 없다.

3. 결론

집수분지 내 중금속 오염원으로 영향을 미칠 수 있는 폐금속광산을 구분하기 위하여, 하천수 내 용존 황산염의 황 동위원소 조성을 이용하여 황산염의 기원을 조사하였다. 둔전광산 하부에 위치하는 하천수(DD-1 및 2)의 용존 황산염의 황 동위원소 조성은 황화광물의 동위원소 조성 범위 내에 포함되어, 황화광물의 산화작용에 의해 형성된 황산염이 하천수 내 용존 황산염의 주요한 오염원이라는 것을 지시한다. 또한 함창 및 백전광산은 배경값보다 높은 황 동위원소 조성을 보여주고 있어, 광산에 의한 하천수의 오염이 우려된다.

4. 참고문헌

1. 박희인, 박영록, 동원광산의 금-은 광화작용, 광산지질 23권 2호, p. 183-199, 1990.
2. 이광식, 이창복, 남한 강수와 하천수의 산소와 수소 동위원소 조성, 지질학회지 35권 1호, p. 73-84, 1999.
3. 이찬희, 박희인, 삼조광산의 금광화작용과 생성환경, 지질학회지, 30권 4호 p. 395-409, 1994.
4. 이찬희, 박희인, 탄산염암 층준교대형 백전광상의 천열수 금-은 광화작용와 생성환경, 자원환경지질, 29권 2호 p. 105-117, 1996
5. 지상우, 김효범, 이지은, 유상희, 전용원, 김선준, 동위원소를 이용한 지하수 오염원 추적에 관한 연구, 2003년 한국지하수토양환경학회 추계학술발표회, p. 501-504, 2003.