

영월, 정선 및 평창지역 폐 석탄광 산성광산배수의 환경오염 평가

정명채*

세명대학교 자원환경공학과

Environmental Assessment for Acid Mine Drainage by Past Coal Mining Activities in the Youngwol, Jungseon and Pyungchang areas, Korea

Myung Chae Jung*

Department of Earth Resources and Environmental Geotechnics Engineering, Semyung University, Jecheon, Choongbuk, 390-711, Korea

The objective of this study is to investigate the physical and chemical properties for environmental assessment of water system affected by acid mine drainage (AMD) from coal mining activities in the Youngwol, Jungseon and Pyungchang areas in Korea. During November 2000 to July 2002, 6 times of water samples were collected seasonally from acid mine drainage and nearby streams at 13 coal mines in the study area. The physical and chemical properties including pH, Eh, TDS, salinity, bicarbonates and DO were measured in the field. Eighteen cations including Al, Ca, Fe, Mg, Mn and Zn, and 6 anions including nitrates and sulfates were also analyzed by ICP-AES and IC, respectively. Acid water from the Jungam coal mine has typical characteristics of AMD with very low pH(3~4) and high TDS(1,000~5,000 mg/l). Relatively high concentrations(mg/kg) of heavy metals, especially for Al(380), Fe(80), Mn(44) and Zn(8), were found in water samples from the Jungam coal mine area. Water samples from the Seojin, Sebang and Sungjin coal mines also contained over 50 mg/l of Al, >100 mg/l of Fe and >10 mg/l of Mn. In addition to anions, over 1,000 mg/l of sulfate was found in several water samples. Seasonally, the concentrations of metals and sulfates varied; wet season samples were relatively higher in metals and sulfates than dry season samples. It is needed to establish the proper remediation and environmental monitoring of the AMD continuously.

Key words : Abandoned coal mine, Youngwol, Jungseon, Pyungchang, Acid mine drainage, Environmental assessment

이 연구의 목적은 영월, 정선 및 평창지역에 분포하는 13개 석탄광에서 배출되는 산성광산배수의 물리화학적 특성 파악을 통하여 주변 수계에 미치는 영향을 조사하는 것이다. 2000년 11월부터 2002년 7월까지 총 6회의 시료를 채취하여, pH, Eh, TDS, salinity, DO 등의 물리화학적 특성은 물론 Al, Ca, Fe, Mg, Mn, Zn 등을 포함한 총 18개의 양이온, 질산염과 황산염을 포함한 6개의 음이온의 함량을 각각 ICP-AES와 IC를 이용하여 분석하였다. 조사대상 지역이 광역적이고 수계가 서로 다르기 때문에 총 4개의 수계로 구분하여 조사한 결과, '수계 1'에 해당하는 삼척탄좌 정암광업소에서 유출되는 물이 가장 전형적인 산성광산배수의 특징인 낮은 pH (3~4)와 높은 TDS (1,000~5,000 mg/l) 값을 보이고 있었으며, 이들에 의해 주변 수계가 상당한 영향을 받고 있었다. 양이온 분석결과, 일부 광산에서는 비오염지역의 수계에서 검출되는 중금속에 비해 수십에서 수백 배 높은 함량이 검출되었다. 특히, Al, Fe, Mn 및 Zn 등은 상당히 부화되어, 정암광업소에서 유출되는 산성수에서는 각각 350 mg/l의 Al, 80 mg/l의 Fe, 44 mg/l의 Mn 및 8 mg/l의 Zn이 검출되었다. 서진광산, 세방광산 및 성진광산 등에서도 50 mg/l 이상의 Al과 100 mg/l 이상의 Fe 및 10 mg/l 이상의 Mn 등이 검출되어 이들에 의한 수계 오염 가능성이 확인되었다. 음이온의 분석 결과에 의하면, 대부분의 조사대상광산에서 200 mg/l 이상의 황산염이 검출되었으며 일부 광산 유출수에서는 1,000 mg/l 이상의 황산염이 검출되었다. 또한 산성광산배수의 계절적인 변화를 고찰하기 위해 계절별로 시료를 채취하여 조사한 결과, 건기에 비해 우기에 일부 금속과 황산염의 농도가 증가되는 경향을 보였다. 결과적으로, 조사대상지역의 수계는 석탄광 개발

*Corresponding author: jmc65@semyung.ac.kr

로 인해 발생한 산성광산배수에 의해 중금속 및 일부 음이온으로 오염되어 있으며, 따라서 이를 위한 적절한 처리 시설의 설치와 관리가 요구된다.

주요어 : 폐 석탄광, 영월, 정선, 평창, 산성광산배수, 환경오염 평가

1. 서 론

국내에는 금속광산(906개), 석탄광산(379개) 및 비금속광산(1,173개)을 포함하여 총 2,500개소의 크고 작은 광산들이 개발되었는데, 이들 중에서 약 80%가 적절한 환경복원시설이 설치되지 않은 채 휴광 또는 폐광된 상태로 방치되어 있어 주변 생태계가 위협받고 있다. 특히 폐석탄광산에서는 폐갱구들 또는 주변 폐석더미로부터 지속적으로 유출되는 다량의 산성광산배수(AMD, acid mine drainage)로 인해 주변 지하수와 지표수가 오염되어 수중 생태계의 파괴뿐만 아니라 인간 생활에도 악영향을 주고 있다. 전국의 폐탄광들 중 갱내수가 유출되고 있는 곳은 152개 탄광, 206개 갱구로써, 하루 10만톤 이상이 유출되고 있으며, 이로 인한 하상오염 구간은 약 152 km에 이르는 것으로 조사된 바 있다(석탄산업합리화사업단, 1995). 이러한 석탄광의 환경문제를 해결하기 위하여, 1986년에 석탄산업법이 제정 공포되었으며, 1987년 4월에는 석탄산업합리화사업단이 발족되어 대부분의 석탄광에 대한 합리화사업과 폐광 이후의 육성사업이 실시되었다. 이러한 과정에서 표출된 지반침하 문제, 산성광산배수(AMD) 문제, 산림복구 문제, 폐공가 및 폐시설물 문제, 기타 수질 개선문제를 포함한 광해복구 및 환경개선사업에 소요된 경비만도 2000년 현재 1,200억원 이상으로써, 2000년 이후 완전 복구 사업을 포함하면 지난 15여년간 총 1,845억원이 투자되었다(석탄산업합리화사업단 홈페이지). 하지만 여전히 많은 지역의 폐 석탄광이 사업 종료 이후, 적절한 환경시설의 설치와 관리 없이 그대로 방치되어 있을 뿐만 아니라, 수억 원을 투자하여 광해복구사업을 실시한 광산에서도 이후의 관리체계가 수립되지 않아 주변의 수질 및 토양환경의 주요 점오염원으로 존재하고 있는 실정이다.

그 동안 국내 석탄광에서 배출되는 산성광산배수의 환경문제에 대해 다양한 연구자들이 조사한 바 있다. 이들 연구는 대부분 특정 휴/폐광 석탄광에서 발생하는 산성광산배수의 지구화학적 특성을 규명하는 연구로서, 산성수의 pH, Eh, 총용존고형물량(TDS, total dissolved solids), 전기전도도(EC, electric conductivity), 염도(salinity), 용존산소량(DO, dissolved oxygen) 등을 측

정하고, 이들 산성 폐수에 함유된 As 및 중금속류(Cd, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn 등)의 함량과 음이온(SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , HCO_3^- , F^- , Br^- 등)의 함량을 분석하고, 그 결과를 활용하여 산성 광산수의 환경 영향을 고찰하였다(정명채, 2001; 정영욱 등, 1999; 황춘길 등, 1999; 전효택 등, 1998a, 1998b; 송석환 등, 1997; 지상우 등, 1997; 지상우와 김선준, 1997; 유재영, 1995; 오대균 등, 1995; 석탄산업합리화사업단, 1995, 1997; 정영욱과 Thornton, 1994). 대표적인 연구 결과에 의하면, 국내의 18개 석탄폐석 침출수의 평균 pH는 3.4로 산성수에 해당되며, 황산염(3,400 mg/l), Fe(190 mg/l), Al(198 mg/l), Mn(11.9 mg/l) 등이 다량 함유된 것으로 조사되었다(정영욱 등, 1999). 외국의 경우, 석탄광의 지구화학적 연구의 대표적인 논문으로는 독일의 'Ruhr Valley' 지역에서 황철석을 다량 함유한 석탄폐석의 환경오염 조사(Schuring *et al.*, 1997), 미국 Ohio주 'Silver Creek Metro-park' 지역의 석탄폐수에 의한 산성광산배수의 지구화학적 모델링 연구(Foos, 1997), 남아프리카공화국 'Witbank' 지역 석탄광의 환경오염 조사와 평가(Bullock and Bell, 1997), 산성광산배수에 의해 형성된 철수산화물의 광물학과 미량원소 수반성 연구(McCarty *et al.*, 1998) 및 이들 산성광산수의 물리화학적 특성조사(Gray, 1996, 1997; Salomons, 1995) 등이 있다. 이들 연구에서는 주로 현재 또는 과거의 석탄광 개발에 의해 발생한 산성광산배수의 물리화학적 특성을 규명하고 이들에 함유된 유해성 중금속의 함량을 조사하고 오염물질의 분산에 대한 지구화학적 특성을 규명하였다.

이 연구는 우리 나라의 대표적인 탄전인 영월, 정선 및 평창지역에 산재되어 있는 석탄광에서 배출되는 산성광산배수의 환경오염을 평가하기 위하여 2000년에서 2002년까지 조사된 결과를 요약한 것이다. 연구의 결과는 석탄산업합리화사업의 재조명과 광해복구사업을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 시료채취와 화학분석

우리 나라의 석탄광은 대부분 고생대 후기에서 중생대 초기에 해당되는 평안계 지층에서 발견되고 있으

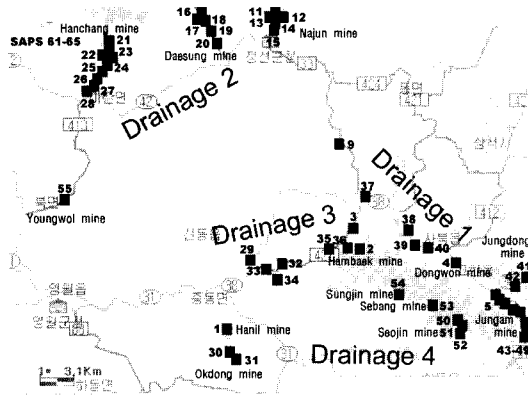


Fig. 1. Sampling locations of study area.

며, 이들은 일정 지역에 밀집되어 분포하는 경향을 보인다. 이러한 이유로 국내에 분포하는 석탄광은 분포 지역별로 경기탄전, 강릉탄전, 삼척탄전, 정선-평창탄전, 영월탄전, 단양탄전, 충남탄전, 호남탄전 등으로 구분되고 있다. 이러한 국내의 탄전 중에서 이 연구는 주로 영월, 정선 및 평창지역에 산재되어 있는 석탄광을 중심으로 이루어졌다. 즉, 정선-평창탄전지역에 분포하는 나전, 대성, 함백, 삼탄, 정동 및 한창탄광과 영월탄전에 분포하는 서진, (동우)세방, (동우)정진, 한일, 옥동 및 영월광업 등 총 13개 광산을 대상으로 총 55지점을 선정하였다(Fig. 1). 이들 지점에서 계절적인 변화를 고찰하고 주기적인 모니터링을 위해 2002년도 11월, 2001년 5월, 7월, 10월, 2002년도 3월과 7월 등 총 6회에 걸쳐 시료를 채취하였다.

시료채취에서는 일반적인 물시료 채취 및 처리 방법

이 적용되었으며, 현장에서 물리화학적 특성인 온도, pH, TDS, EC, 용존산소량, 염도, HCO_3^- 등을 측정하고, 0.45 μm membrane filter를 활용하여 여과하였다. 양이온 분석용은 질산으로 pH를 2이하로 유지하고, 음이온 분석용은 기포를 최소화하였으며, 두 시료 모두 4°C 이하로 냉장 보관하였다. 화학분석은 유도분광플라즈마방출분광광도계(ICP-AES)를 활용하여 As, Cd, Cu, Pb, Zn 등 총 18개 원소를 분석하고, 이온크로마토그래피(IC)를 활용하여 F^- , Cl^- , Br^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} 등을 분석하였다. 또한 조사자료의 효율적 관리와 수계에 따른 오염도를 조사하기 위하여 수계의 방향과 위치에 따라 수계 1, 2, 3 및 4로 구분하였다. '수계 1'은 삼척탄좌와 그 하부로서 시료번호 4, 5, 9, 37~49 등이며, '수계 2'는 조양강 수계인 나전과 지장천 하부로서 시료번호 11~27, 55, 61~65 등이다. '수계 3'은 함백탄광과 동원탄좌 주변 수계로서 시료번호 2, 3, 29, 32~36 등이며, '수계 4'는 옥동천 수계로서 시료번호 1, 30, 31, 50~54 등이 속한다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 물리화학적 특성

산성광산배수의 중요한 물리화학적 특성으로는 pH, 총용존고형물량(TDS), Eh, 용존산소량(DO), 염도(salinity) 등이며, 이들에 대한 결과는 다음과 같다.

pH의 변화 : 6회에 걸쳐 채취된 시료의 pH 변화를 Fig. 2에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 광산에 따라 그 값이 상이한 양상을 보인다. 우선 전형적으로 산성광산수의 특성을 보이는 시료는 주로 삼척탄좌 정

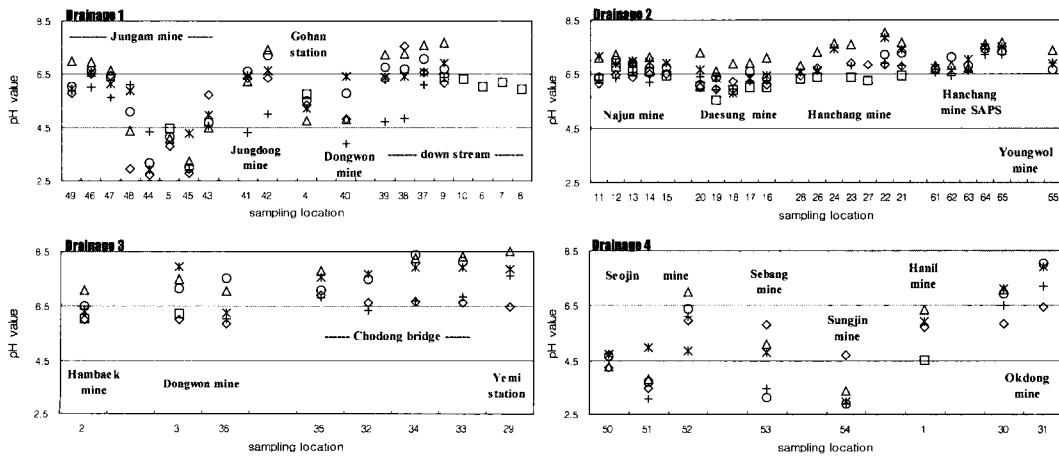


Fig. 2. Diagrams showing pH values in water samples.(sampling dates : □ = 00-11-16, ◇ = 01-05-16, △ = 01-07-30, * = 01-10-06, ○ = 02-03-30, + = 02-07-24)

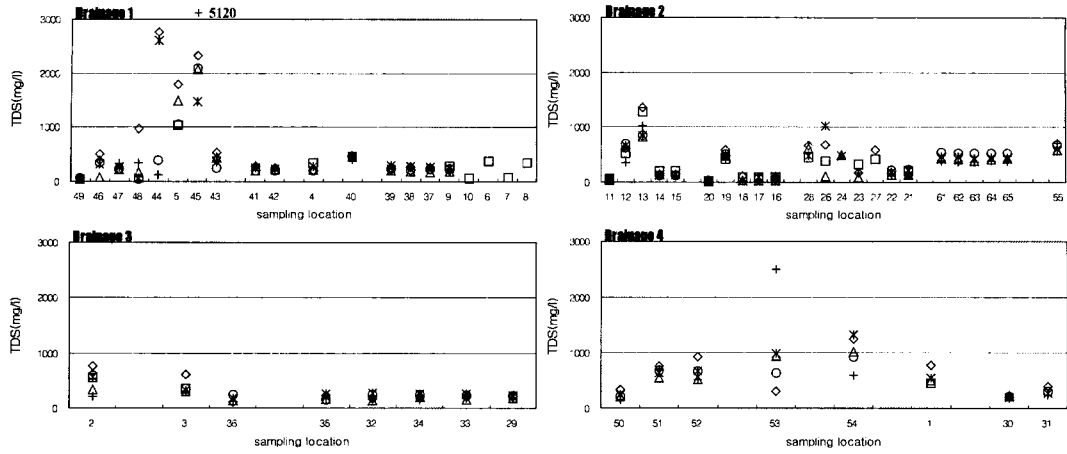


Fig. 3. Diagrams showing TDS (total dissolved solids) values in water samples(See Fig. 2 for sampling locations and explanation of symbols).

암광업소의 유출수로서 이들의 pH값은 3~4 정도로 매우 낮다. 이들에 의해 주변의 하천수 역시 낮은 pH 값을 보이고 있다. ‘수계 1’에서 pH값이 5 이하의 낮은 값을 보이는 시료는 정동광업의 일부 유출수와 그 하부의 대부분의 수계에서 관찰되고 있다. 이는 삼척탄좌의 정암광업소에서 유출되는 강한 산성수에 직접적으로 영향을 받기 때문으로 판단된다. ‘수계 2’에서는 대부분 중성에 가까운 pH값을 보이고 있다. 이 지역의 경우 모양이 주로 탄산염암으로 구성되어 있어 이들의 완충작용에 의해 pH가 비교적 중성을 띠고 있는 것으로 판단된다. 특히 일부 시료에서는 8.0 이상의 pH값을 보여 석회석의 용해가 산성광산배수의 중화에 큰 역할을 하고 있음을 보이고 있다.

‘수계 3’의 경우도 대부분 중성에 가까운 pH값을 보이고 있으며 하부로 가면서 그 값이 증가되는 양상을 보인다. 이 변화 역시 주변의 모양에 큰 영향을 받는 것으로 판단된다. 하지만 ‘수계 4’의 경우, 주변의 모양이 탄산염암임에도 불구하고 대부분의 광산 유출수는 낮은 pH값을 보이고 있는데 이들 지역은 모양의 완충능력 이상의 산성수가 유출되는 결과로 해석된다. 특히 서진광산, 성진광산 등에서 배출되는 산성수는 하부의 옥동천으로 유입되고 있어 이들에 의한 옥동천의 환경분제가 발생할 수 있다. 이외에도 옥동광업의 모운갱에서도 낮은 pH값을 갖는 시료들이 관찰되어 옥동천 수계에 직접 영향을 주고 있다.

TDS의 변화 : TDS는 물 속에 함유된 양이온 및 음이온들의 총합으로써, 산성광산배수에서는 이들의 값이 큰 경우 주로 황산염의 함량이 높은 것으로 알려져 있다. 채취된 시료의 TDS값을 Fig. 3에 도시하였다.

우선 ‘수계 1’의 TDS 변화를 살펴보면, 삼척탄좌의 정암광업소 유출수는 대부분 1,000 mg/l 이상의 TDS를 함유하고 있어 오염을 시사하고 있다. 특히 정암광업소에서 채취한 물은 5,000 mg/l 이상의 TDS값을 보이고 있다. 정암광업소에서 높은 값을 보인 TDS는 하부 수계로 가면서 점차 감소되는 경향을 보인다. ‘수계 2’에서는 석공 나전광업소에서 유출되는 갯내수에서 1,000 mg/l 이상이 측정되었다. 이외에도 하부의 다양한 수계도 주변의 광산수에 의해 높은 용존물질량을 보이고 있다. ‘수계 3’에서는 동원탄좌의 유출수에서 800 mg/l에 가까운 TDS를 보이고 있지만 하부로 가면서 회석에 의해 낮아지는 경향을 보이고 있다. ‘수계 4’에서는 세방광산의 유출수에서 높은 TDS값을 보이고 있으며, 대부분의 시료에서 1,000 mg/l 이상의 높은 TDS를 보여주어, 이 지역의 오염도가 심각함을 예상할 수 있다.

DO의 변화 : 물에서 생명체가 살아가기 위해서 매우 중요한 것이 용존산소의 양이다. 이 값은 수온이 낮아지면 증가하고 수온이 높아지면서 감소되며, 대부분 8~15 mg/l의 범위를 나타낸다. 연구 지역에서 채취한 물의 경우, 대부분 50~80% 정도의 포화도를 갖는 DO값이 측정되었다. 즉, 7~9 mg/l 정도의 용존산소를 함유하고 있다. 하지만 일부 시료는 낮은 용존산소량을 보이며, 이들은 주로 갯내에서 직접 유출되는 시료에서 나타났다(Fig. 4).

3.2. 양이온 함량

산성광산수와 주변 하천수의 양이온 함량은 ICP-AES로 총 18개 원소를 분석하였다. 이들 중에서 비교

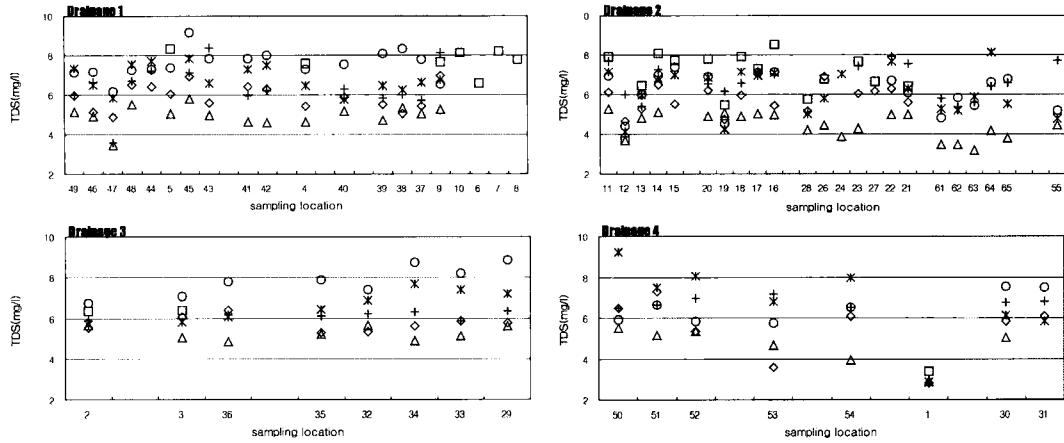


Fig. 4. Diagrams showing DO (dissolved oxygen) values in water samples(See Fig. 2 for sampling locations and explanation of symbols).

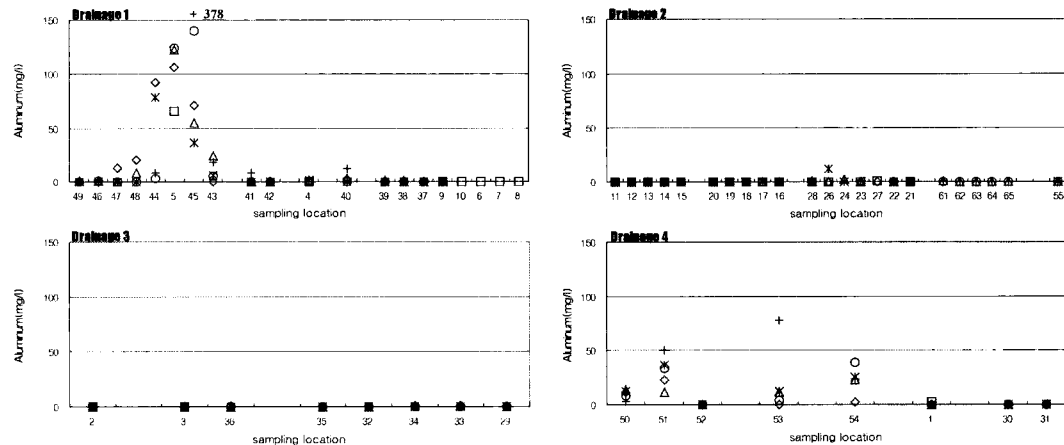


Fig. 5. Diagrams showing concentrations of Al in water samples(See Fig. 2 for sampling locations and explanation of symbols).

적 산성배수와 밀접한 관계를 갖거나 중요한 양이온에 대한 조사 결과를 중심으로 기술하고자 한다.

알루미늄 : 알루미늄은 석탄광의 폐석에 함유되어 있는 원소로서 이들이 산성광산수에 용해되어 있다가 pH가 증가하면 알루미늄수산화물로 침전되어 대부분 비정질의 백색침전물을 형성한다. 산성수에서 Al이 다량 함유된 수계의 경우 하부에는 이들의 수산화물이 자주 관찰된다. 연구지역의 수계 중에서 Al의 함량이 가장 높은 곳은 ‘수계 1’로서 이 지역은 정암광업소의 유출수에 직접적인 영향을 받은 것으로 판단된다(Fig. 5). 특히 정암광업소의 시료에서는 350 mg/l 이상의 Al이 검출되어 알루미늄의 오염을 시사해 주고 있다. ‘수계 4’ 지역에서도 다량의 Al이 검출되었다. 특히 서진광산, 세방광산에서는 50 mg/l 이상의 Al이 검출되

었다. 하지만 ‘수계 2’와 ‘수계 3’ 시료에서는 일부 시료를 제외하고는 비교적 낮은 Al함량을 보이고 있다.

칼슘 : 칼슘은 수계에서 주요 성분으로 존재하는 원소로서 대부분의 물시료에는 수 십 mg/l 정도 함유되어 있다. 그러나 모암이 탄산염암인 경우 수 백 mg/l 정도의 칼슘을 함유하기도 한다. 연구 지역의 수계에서도 대부분 수십 mg/l의 칼슘이 검출되었다. 특히 조사 광산 대부분이 석회암을 모암으로 하고 있는 지질적 환경에 의해 대부분 높은 칼슘 이온 함량을 보이고 있다. 조사광산 중에서도 ‘수계 2’와 ‘수계 4’의 칼슘 함량이 다소 높은 경향을 보이고 있다(Fig. 6).

철 : 산성광산배수에서 철의 함량은 가장 중요한 문제로 대두되고 있다. 황철석이 물과 산소와 결합하여 생성되는 반응 결과 황산염이 발생되어 산성광산배수

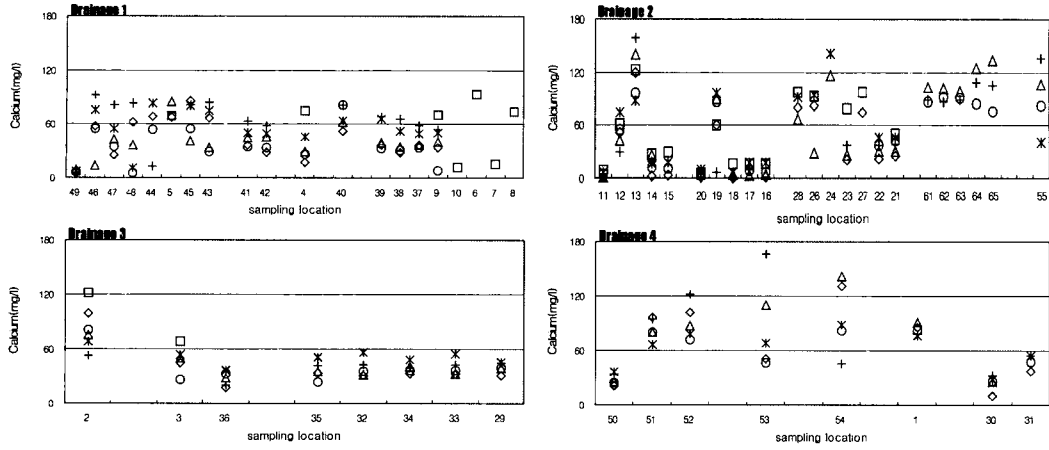


Fig. 6. Diagrams showing concentrations of Ca in water samples(See Fig. 2 for sampling locations and explanation of symbols).

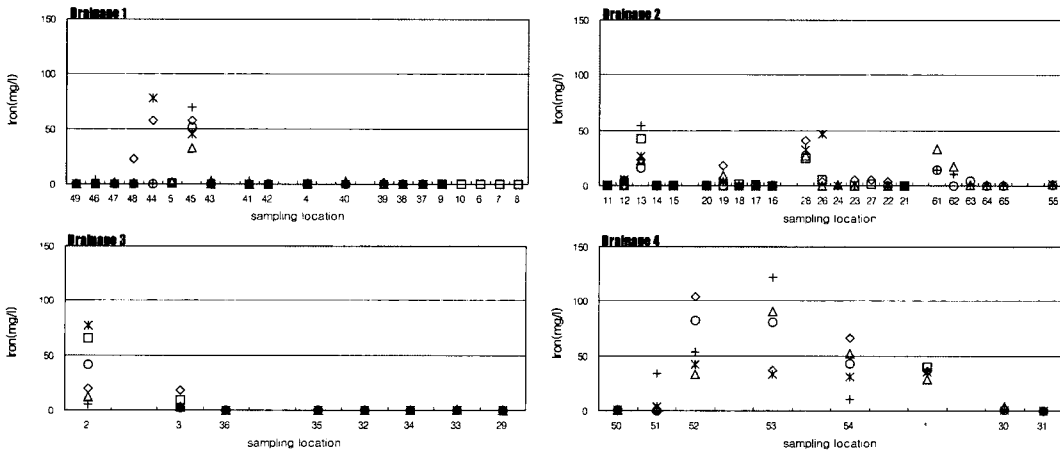


Fig. 7. Diagrams showing concentrations of Fe in water samples(See Fig. 2 for sampling locations and explanation of symbols).

가 형성된다. 그러므로, 철의 함량이 높은 산성배수에서는 이들에 의한 철수산화물의 침전이 가속된다. 연구 지역의 수계 중에서 철의 함량이 가장 높은 곳은 삼척탄좌 정암광업소 유출수이며, 이외에도 석공 나전광업소, 한창탄광, 동원탄좌 유출수, 서진광산 및 세방광산의 유출수에서도 대부분 50 mg/l 이상의 철이 함유되어 있으며, 그 주변의 수계에서도 다량의 철이 함유되어 있다(Fig. 7).

마그네슘 : 마그네슘도 칼슘과 유사한 경향을 보이고 있다. 즉, 주변의 모암이 석회암 계열인 시료에서는 높은 Mg를 함유하고 있다. 특히 석공 나전광업소, 삼척탄좌 정암광업소의 유출수에서는 100 mg/l 이상을 함유하고 있으며, 주변의 수계에서도 이들의 영향으로 높은 마그네슘 함량이 검출되었다(Fig. 8).

망간 : 망간은 산성 광산수에 용존되어 있으며, 철과 알루미늄과는 달리 매우 높은 pH 환경에서 수산화물로 침전되는 경향이 있다. 그러므로, 여러 산성광산 배수의 처리에서 있어 적어도 pH값이 8.0 이상인 경우가 많지 않아 Mn을 제대로 처리하기가 어려운 실정이다. 연구 지역에서의 Mn 함량은 ‘수계 1’과 ‘수계 4’에서 높은 특성을 보인다. 하지만 다른 시료의 경우는 10 mg/l 이하의 Mn을 함유하고 있다(Fig. 9).

아연 : 물시료에 함유된 증금속 중에서 함량이 높고 비교적 위해성이 높은 아연의 경우, 비오염수에서는 1.0 mg/l 이하로 함유되어 있다. 하지만, 인위적인 활동에 의해 그 함량이 증가하는 경향이 있다. 연구 지역에서 높은 아연값을 갖는 물시료로는 삼척탄좌 정암광업소의 유출수와 세방광산의 유출수로서 6 mg/l 전후

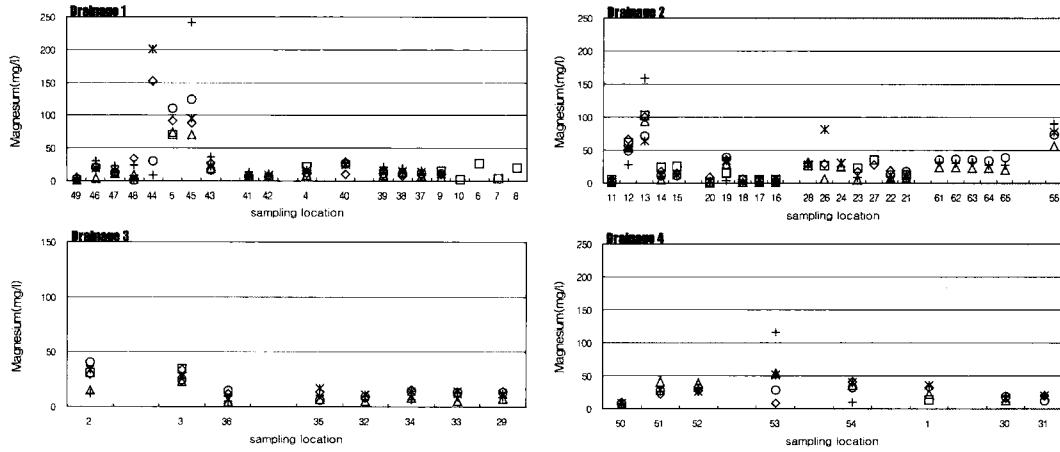


Fig. 8. Diagrams showing concentrations of Mg in water samples(See Fig. 2 for sampling locations and explanation of symbols).

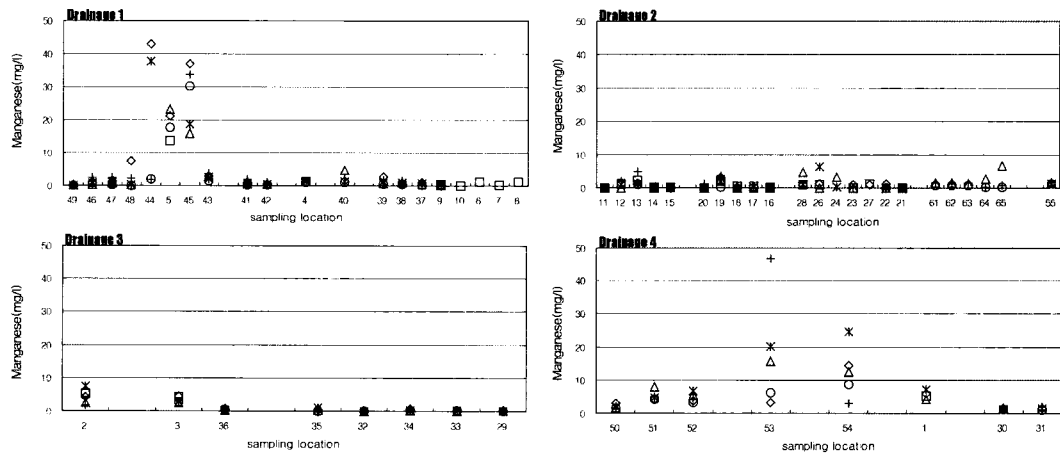


Fig. 9. Diagrams showing concentrations of Mn in water samples(See Fig. 2 for sampling locations and explanation of symbols).

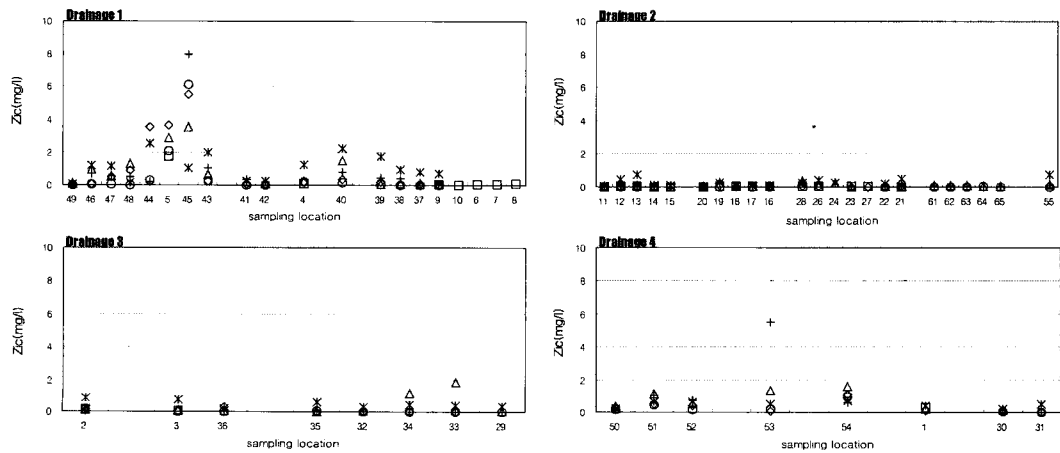


Fig. 10. Diagrams showing concentrations of Zn in water samples(See Fig. 2 for sampling locations and explanation of symbols).

의 아연을 함유하고 있지만, 다른 시료에서는 대부분 1.0 mg/l로 검출되었다. 결국, 일부 광산에서 유출된 아연은 주변 하천으로 이동되어 하부로 가면서 그 함량이 감소되는 경향을 보이고 있다(Fig. 10).

3.3. 음이온 함량

중탄산염 : 물속에 존재하는 탄산염 계열의 이온으로 중탄산염과 탄산염이 중요하다. 이들 이온의 함량은 자연수의 pH에 의해 달라지며, 통상 4.3~8.3 정도의 pH에서는 중탄산염이 주종을 이루고 있다. 이들의 함량은 주변의 모암에 따라 용출되는 양이 다르다. 연구 지역의 수계에서도 탄산염의 용출에 의해 칼슘과 마그네슘 등의 함량이 높게 나타나는 시료에서 역시 중탄산염의 농도가 높게 나타난다(Fig. 11). 다만 삼척

탄좌의 정암광업소의 유출수는 pH가 4.3이하로써 이 경우는 주로 $H_2CO_3(aq)$ 로 존재하므로 중탄산염을 측정하지 않았다.

질산염 : 질산염은 주로 인위적 오염원으로 배출되는 이온으로서 유아에게 청색증을 유발하며 질산성질소 농도로 10 mg/l를 음용수 수질기준으로 설정하고 있다. 연구지역의 질산염의 농도 변화를 보면, 광산지역의 유출수에서 낮지만 하부로 가면서 인간의 활동에 의해 그 함량이 증가되는 경향을 보인다(Fig. 12). 특히 일부 지역에서는 15 mg/l 정도의 질산염이 검출되기도 하였다.

황산염 : 황산염이온은 산성광산배수에서 가장 중요한 이온이며, 환경에 가장 큰 영향을 미치고 있다. 연구 지역에서 황산염의 함량은 TDS와 가장 유사한

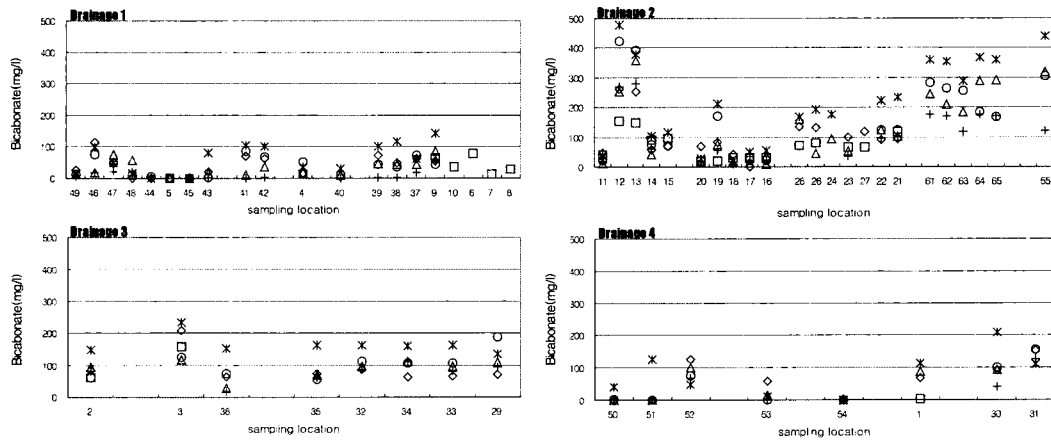


Fig. 11. Diagrams showing concentrations of bicarbonate in water samples(See Fig. 2 for sampling locations and explanation of symbols).

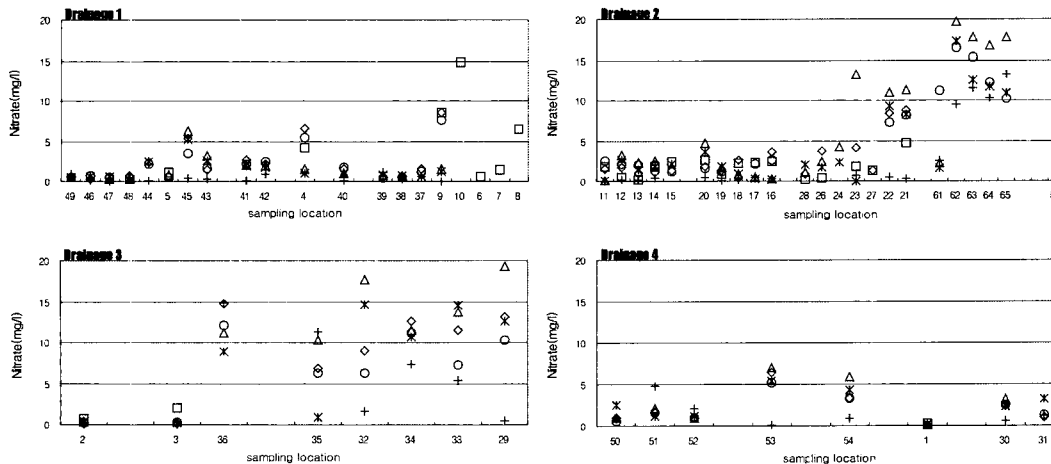


Fig. 12. Diagrams showing concentrations of nitrate in water samples(See Fig. 2 for sampling locations and explanation of symbols).

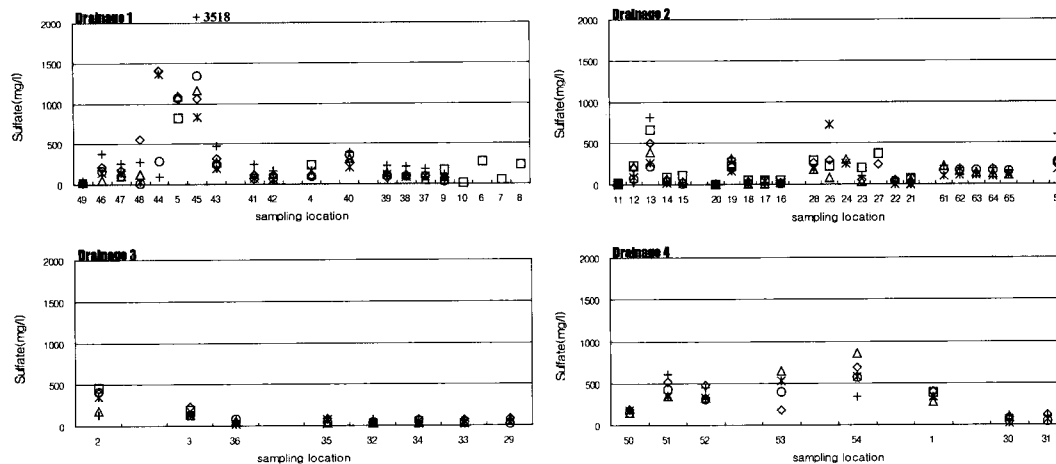


Fig. 13. Diagrams showing concentrations of sulfate in water samples(See Fig. 2 for sampling locations and explanation of symbols).

경향을 보이고 있으며, 주로 낮은 pH를 갖는 시료에서 다량의 황산염 함량을 보이고 있다(Fig. 13). 연구 지역 중에서 삼척탄좌의 정암광업소에서는 최고 3,500 mg/l 이상이 검출되었다. 더불어 주변의 광산에서도 다량의 황산염 이온이 검출되었다. 또한 세방광산의 유출수에서도 2,000 mg/l 이상의 황산염 이온이 검출되었다.

3.4. 계절적인 변화

석탄광의 산성광산배수는 백석광물로 존재하는 황철석과 같은 황화광물이 지표에 노출되어 형성된다. 이러한 황화광물이 지표에 노출되면, 비와 반응하고 대기 중의 산소에 의해 반응이 가속되면서 일부 박테리아의 활동 등에 의해 산성수를 만든다. 즉, 이러한 과정은 물과 암석과의 반응에 기인하므로, 산성배수의 물리화학적 특성, 유해물질의 함유량 및 오염량은 비의 양과 계절에 영향을 받게 된다.

총 6회에 걸쳐 채수된 시료의 계절적인 변화를 고찰하면 다음과 같다. 산성수의 pH는 근원적으로 광산에 따라 다르지만, 계절적으로는 비의 양이 비교적 많은 우기에 상대적으로 물-암석 반응이 가속되면서 보다 낮은 pH값을 보여주었다. 이러한 경향은 가을까지 이어지고 있어 상대적으로 낮은 pH를 유지하였지만 겨울과 같은 건기에는 반응성이 낮아지면서 상대적으로 높은 pH를 보이고 있다. 이러한 경향은 TDS 변화에도 나타나고 있다. 즉, 우기에 상대적으로 높은 TDS 값을 보여 주었는데 이때는 비에 의해 황화광물과의 반응성이 높기 때문으로 해석되며, 그 영향은 가을까지 이어

지고 있다. 즉, 여름의 우기에 용출된 일부 물질과 이후 시간적인 차이에 의해 서서히 용출된 물질들에 의해 TDS가 상대적으로 높아지면서 가을에도 TDS가 높은 유출수가 형성되는 것으로 판단된다. 양이온의 함량도 이러한 이유 때문에 우기 전후에 상대적으로 높은 경향을 보이고 있으며, 음이온 역시 이러한 경향을 반영하고 있다. 대표적인 음이온인 황산염의 농도는 TDS와 직접적인 관계를 보이고 있으며, 따라서 TDS를 측정하면 황산염의 함량과 그 경향을 예측할 수 있을음을 시사해 준다. 계절적인 수질의 변화를 요약하면, 대체적으로 우기가 건기에 비해 AMD의 특성이 더욱 강하다고 요약할 수 있다.

3.5. 주변 수계에 미치는 영향

상류에 있는 석탄광에서 배출되는 유출수의 물리화학적 특성과 양/음이온 농도는 직접적으로 그 하부의 수계에 영향을 미치게 된다. 물론 오염된 산성수의 유출량과 오염 정도에 따라 주변 수계에 미치는 영향이 다를 수 있다. 연구 지역에서 가장 오염도가 높은 삼척탄좌 정암광업소의 상부는 열목어 서식지인 정암사 계곡수로서 이 지역에서 유입되는 물은 음용이 가능한 정도이지만 직하부의 정암광업소에서 유출되는 광산배수와 섞이면서 pH는 낮아지고 다량의 유해성 중금속과 황산염 등의 함량이 증가된다. 이후, 하부로 가면서 이들 물은 점차 자연수에 가까운 물로 변화되는 경향을 보이지만 정암사에서 수 km 떨어진 지점까지 영향을 미치고 있다. 결국 물의 자정능력은 있지만 그 오염도가 높아 상대적으로 먼 곳에 이르러서야 비오염수

가 될 수 있는 것이다. 이러한 경향은 다른 수계에서도 유사한 결과를 보이고 있다. 수계 4의 경우 유출량이 작기는 하지만 광산에서 배출된 산성수는 영월군 상동읍을 지나는 옥동천으로 유입되어 수질에 영향을 미치고 있다. 또한 '수계 1'과 '수계 2'의 물은 남한강 수계의 상류에 속하는 지장천으로 유입되어 영향을 주고 있다.

4. 결 론

이 연구는 국내에 산재되어 있는 휴/폐광 석탄광에서 발생하는 제반 환경문제와 이의 적절한 처리를 위한 연구의 일부로 수행되었으며, 영월, 정선 및 평창지역의 석탄광에서 배출되는 산성 유출수, 갯내 유출수 및 주변 하천수를 대상으로 환경오염을 평가하였다. 조사 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

연구지역 물시료의 pH, TDS, DO 등의 현장 자료에 의하면, 삼척탄좌 정암광업소의 유출수가 가장 낮은 pH와 높은 TDS를 함유하고 있다. 이러한 결과는 유출수가 주변의 하천으로 유입되어 환경적인 영향을 주고 있음을 시사한다. 특히 이 광산은 폐광된 이후에 예상되는 유출량이 1일 평균 수천에서 수만 톤 정도이므로, 적절한 환경 처리 시설의 설치가 요구되고 있다. 이외에도 다량의 광산 유출수가 주변의 광산에서 배출되고 있어 지장천, 옥동천 및 동강 등 남한강 상류의 수질에 큰 영향을 주고 있다.

석탄광에서 유출되는 물에 대한 양이온 및 음이온 분석 결과에 의하면, 일부 광산에서는 비오염지역의 수계에서 발생하는 중금속에 비해 수십~수백 배 부화되어 있다. 대표적으로 Al, Fe, Mn 등의 원소의 함량이 매우 높은 수준으로 검출되어 이들에 대한 처리가 절실히 요구되고 있다. 다행히 대부분의 조사대상 광산 지역의 모암이 석회암 계열이므로 불-암석 반응에 의해 어느 정도 중화된 유출수들도 있지만, 일부 유출수에서는 여전히 수천 mg/l의 용존물질이 검출되었으며, 대부분은 황산염 이온이었다. 결국 폐 광산에서 유출되는 다양한 양/음이온은 주변 수계에 직접 또는 간접적으로 환경영향을 미치고 있음을 확인하였다. 또한, 계절에 따라 용출수 및 주변 하천수의 수량 및 수질변화가 다르며, 주로 건기에 비해 우기 직후에 전형적인 산성광산배수의 특성과 함께 다양한 중금속과 황산염의 농도가 증가되는 경향이 있었다. 그러므로 산성광산배수의 환경문제가 발생되고 있는 본 연구지역에 대한 적절한 대처와 지속적인 관리가 요구된다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구의 지역대학우수과학자지원사업(R05-2000-000-00086-0) 지원으로 수행되었습니다. 시료채취에 많은 도움을 준 세명대학교 대학원생과 분석에 도움을 주신 고려대학교 윤성택 교수님과 정현석군에게 감사드립니다.

참고문헌

- 석탄산업합리화사업단 홈페이지, <http://www.cipb.or.kr>
 석탄산업합리화사업단 (1995) 폐광에 따른 광산지역 환경 개선 연구 (폐수, 폐석). 석탄산업합리화사업단, 268p.
 석탄산업합리화사업단 (1997) 사업단 10년사. 석탄산업합리화사업단, 628p.
 송석환, 민일식, 김명희, 이현구 (1997) 금산 대성 탄광지역 산성폐수에 의한 오염. 자원환경지질, 30권, p. 105-116.
 오대균, 김정엽, 전효택 (1995) 동해 탄광 주변 산성광산 폐수와 하상퇴적물의 지구화학. 자원환경지질, 28권, p. 213-220.
 유재영 (1995) 광산배수의 산성화 및 그에 따른 환경문제. 대한지질학회-대한자원환경지질학회 논문집, p. 32-35.
 전효택, 최시영, 김주용 (1998a), 영동 폐석탄광 주변 산성 광산배수의 환경수리지구화학적 특성. 1998년도 공동 학술발표회 발표논문 요약집, p. 134-135.
 전효택, 김주용, 최시영 (1998b) 폐 석탄광 주변 지구화학적 환경의 중금속 오염평가 강릉탄전 임곡천 일대를 중심으로-. 자원환경지질, 31권, p. 499-508.
 정명채 (2001) 영월-정선-평창지역 폐 석탄광 산성광산배수의 환경오염 평가. 2002년도 춘계 한국자원공학회/대한자원환경지질학회 공동학술발표회 논문집, p.92-94.
 정명채, I. Thornton (1994) 강원도 상동지역 옥동천의 광산 산성수 및 하상 퇴적물의 중금속 오염. 자원환경지질, 27권, p. 101-113.
 정명채, 민정식, 권광수, 김옥환, 김인기, 송원경, 이현주, 전효택, 안주성, 오석영 (1999) 광산폐기물 관리기술 개발 연구. 과기부 '98 기관고유사업 연차보고서, 한국자원연구소, 213p.
 지상우, 김선준 (1997) 영동탄광 부근 수계에서의 중금속의 존재형태와 흡착. 한국자원공학회지, 34권, p. 326-335.
 지상우, 김선준, 안지현 (1997) 문경 단봉탄광 폐석장 유출수의 조성변화. 지하수환경, 4권, p. 169-174.
 황춘길, 김경용, 이현구 (1999) 지구 통계학적 방법에 의한 충남 탄전 지역 하상 퇴적물의 오염조사. 자원환경지질, 32권, p. 63-72.
 Bullock, S.E.T. and Bell, F.G. (1997) Cases and solutions: Some problems associated with past mining at a mine in the Witbank coalfield, South Africa. Environmental Geology, v. 33, p. 61-71.
 Foos, A. (1997) Geochemical modeling of coal mine drainage, Summit County, Ohio. Environmental Geology, v. 31, p. 205-210.
 Gray, N.F. (1996) Field assessment of acid mine drainage contamination in surface and ground water. Environmental Geology, v. 27, p. 358-361.
 Gray, N.F. (1997) Environmental impact and remediation

- of acid mine drainage: a management problem. *Environmental Geology*, v. 30, p. 62-71.
- McCarty, D.K. McCarty, J., Moore, N. and Marcus, W.A. (1998) Mineralogy and trace element association in an acid mine drainage iron oxide precipitate; comparison of selective extractions. *Applied Geochemistry*, v. 13, p. 165-176.
- Salomons, A.W. (1995) Environmental impact of metals derived from mining activities: Processes, predictions, prevention. *J. Geochemical Exploration*, v. 52, p. 5-23.
- Schuring, J., Kolling, M. and Schulz, H.D. (1997) The potential formation of acid mine drainage in pyrite-bearing hard-coal tailings under water-saturated conditions: an experimental approach. *Environmental Geology*, v. 31, p. 59-65.
-
- 2003년 2월 28일 원고접수, 2003년 4월 8일 게재승인.