

백운 폐광산의 방치된 폐석으로 인한 주변 수계의 환경적 영향

전서령* · 정재일 · 김대현

전북대학교 지구환경과학과

Environmental effects from Natural Waters Contaminated with Acid Mine Drainage in the Abandoned Backun Mine Area

Seo-Ryeong Jeon, Jae-Il Chung and Dae-Hyun Kim

Dept. of Earth and Environmental Sciences, Chonbuk National University, Korea

We examined the contamination of stream water and stream sediments by heavy metal elements with respect to distance from the abandoned Backun Au-Ag-Cu mine. High contents of heavy metals (Pb, Zn, Cu, Cd, Mn, and Fe) and aluminum in the waters connected with mining and associated deposits (dumps, tailings) reduce water quality. In the mining area, Ca and SO₄ are predominant cation and anion. The mining water is Ca-SO₄ type and is enriched in heavy metals resulted from the weathering of sulfide minerals. This mine drainage water is weakly acid or neutral (pH; 6.5~7.1) because of neutralizing effect by other alkali and alkaline earth elements. The effluent from the mine adit is also weakly acid or neutral, and contains elevated concentrations of most elements due to reactions with ore and gangue minerals in the deposit. The concentration of ions in the Backun mining water is high in the mine adit drainage water and steeply decreased award to down stream. Buffering process can be reasonably considered as a partial natural control of pollution, since the ion concentration becomes lower and the pH value becomes neutralized. In order to evaluate mobility and bioavailability of metals, sequential extraction was used for stream sediments into five operationally defined groups: exchangeable, bound to carbonates, bound to Fe-Mn oxide, bound to organic matter, and residual. The residual fraction was the most abundant pool for Cu(21~92%), Zn(28~89%) and Pb(23~94%). Almost sediments are low concentrated with Cd(2.7~52.8 mg/kg) than any other elements. But Cd dominate with non stable fraction (68~97%). Upper stream sediments are contaminated with Pb, and down area sediments are enriched with Zn. It is indicate high mobility of Zn and Cd.

Key words : acid mine drainage, stream water, stream sediments, heavy metals, sequential extraction

백운 폐광산 주변에 방치된 폐석으로 인한 하천수 및 하상퇴적물의 중금속오염정도를 알아보고자 하였다. 광산활동과 관련되어 발생하는 주변 하천수의 Al 및 Pb, Zn, Cu, Cd, Mn, Fe 등의 중금속 및 기타 이온의 부화현상은 하천수의 TDS를 높이며 또한, 수질을 악화시키는 요인이 된다. 백운광산 주변의 하천수는 Ca와 SO₄가 주를 이루는 Ca-SO₄형을 보이며, 부분적으로 황화광물의 화학적 풍화로 인한 중금속부화현상을 보인다. 광산을 경유해서 흐르는 하천수는 알카리 및 알카리 토류원소에 의한 중화작용의 영향으로 pH는 6.5~7.1의 약산성내지 중성을 띤다. 폐갱구로부터 흘러나오는 갭내수 또한 약산성 내지 중성을 띠며, 광산내의 광석과 맥석광물과의 화학적 풍화로 인해 높은 원소 함량을 보인다. 백운 폐광산 주변의 하천수는 갭내수가 유입되는 지역에서 높은 농도를 보이다 하류로 갈수록 농도가 급격히 낮아진다. 이온농도가 낮아지고 pH가 중성을 띠는 것은 자연적으로 오염을 조정해주는 희석 및 침전, 흡착 등으로 인한 완충작용의 결과이다. 토양내에서 중금속의 이동성이나 생물학적 이용능력을 알아보기 위하여 단계별 추출법을 이용하여 하상퇴적물에서 Cd, Cu, Zn, Pb의 존재형태를 5가지 단계로 분류하였다: 이온교환형태, 탄산염형태, 철-망간 산화물형태, 유기물형태, 잔류상형태. 대부분의 퇴적물에서 Cu(21~92%) 및 Zn(28~89%), Pb(23~94%)는 잔류상형태가 우세하였으며, Cd는 퇴적물에서 다른 원소에 비해 낮은 농도(2.7~52.8 mg/kg)를 보여주었으나 대부분 불안정한 형태(68~97%)가 우세하였다. 상류 퇴적물에서는 폐석으로 인해 Pb의 농도가 높게 나타나며, 하류 퇴적물은 Zn이 높은 농도를 보여, Zn과 불안정한 형태가 우세한 Cd이 이동성이 높은 원소임을 알 수 있었다.

주요어 : 광산폐석, 하천수, 하상퇴적물, 중금속 오염, 단계별 추출법

*Corresponding author: srjeon@hanmail.net

1. 서 론

석탄이나 금속광산주변의 방치된 폐석으로 인한 하천 수 및 지하수, 토양의 산성화나 중금속 오염은 세계적으로 주된 환경문제로 대두되고 있다. 최근 AMD(Acid mine drainage)라 불리는 산성광산배수로 인한 환경적 영향에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 이러한 산성광산배수는 황철석의 산화로 인해 Fe과 SO₄을 다량 함유하고 있는 것이 특징이다(Cravotta III and Trahan, 1999; Cidu *et al.*, 1997). SO₄에 비해 용해도가 낮은 Fe은 쉽게 철산화물(Fe(OH)₃)를 형성하며 침전을 일으켜 하천의 적회현상의 원인이 되기도 한다(Chon *et al.*, 1999). 이들 철산화물은 콜로이드상태의 부유물질로 하천을 따라 이동하며 동시에 다량의 중금속을 원거리까지 이동시킬 가능성이 높은 것으로 알려져 있다(Kimball *et al.*, 1995).

폐광의 주변에 방치된 폐광석이나 광미는 기계적 및 화학적 풍화작용에 노출되어 바람이나 강우의 작용으로 농경지나 하천수계로 직접 유입되어 원거리를 이동하여 오염의 확산이나 2차적 오염원으로 작용할 가능성도 있다(나춘기와 전서령, 1995; 이무성 등, 1996). 이러한 산성화된 환경은 주변의 유화 광물은 물론 일반 조암광물들을 강하게 분해하여 각종 원소를 이온화시킴으로서 하천수의 TDS(total dissolved solids)를 높이거나 토양오염에 주요한 역할을 한다(김경용, 1997; 김상현과 전효택, 1993; 이재영 등, 1993). 특히 토양이나 하상퇴적물 내에 존재하는 중금속원소들은 어떤 형태로 존재하느냐에 따라 독성의 영향도 크게 달라질 수 있어 그 존재형태에 대한 연구가 또한 중요하다(Ma and Rao, 1997).

광산들은 광해에 대한 아무런 조치와 대책 없이 장기간 방치되어 왔으며, 광산지역은 그 지역 기반암내에 광석광물이 존재하고 있어 잠재적인 오염원으로서 그 지역의 여러 지질매개체의 원소분포에 영향을 미칠 수 있다(정명채, 1994; Plant and Raiswell, 1983). 본 연구는 오래 전 폐광된 백운광산을 대상으로 주변 하천의 산성화나 중금속 오염의 가능성을 알아보기 위하여 광산으로부터 거리에 따른 하천수와 하상퇴적물의 중금속 함량과 계절에 따른 하천수의 지화학적 변화를 조사하여 하천수의 오염 평가를 위한 조사가 있어서 계절적 차이를 고려해야 할 필요성에 대해 알아보고자 하였다. 이 결과를 토대로 본 광산 주변 하천의 중금속 오염 분포 특성을 체계화하였으며, 이를 통해 오염을 제어하기 위한 대책의 기초 자료로 활용될 수 있기를 기대한다.

2. 주변 지질

백운광산은 전주에서 동남쪽으로 약 50 km 떨어진 곳에 위치하며 행정구역상 전북 진안군 백운면 신암리에 속한다.

본 연구지역은 변성퇴적암류 및 화강편마암, 엽리상 화강섬록암으로 이루어져 있으며, 정확한 생성 연대는 불확실하나 선캠브리아기에서 주라기 사이의 암층으로 알려져 있다(김규봉 등, 1984). 연구지역의 북서부에 분포하고 있는 변성퇴적암류는 운모편암, 견운모석영편암, 규암등으로 이루어져 있으며, 주구성광물은 석영, 흑운모이고 부성분 광물로는 백운모, 저어콘, 녹니석, 사장석, 녹염석등을 함유하고 있는 것으로 보고되어 있으나 연구지역의 수계에는 영향을 미치지 못한다. 화강편마암은 중립질 내지 조립질의 편마상조각이 발달되어 있으며, 주 구성 광물로는 석영, 사장석, 흑운모, 부성분 광물은 미사장석, 저어콘, 녹염석, 인회석, 철질 물질을 수반한다. 엽리상화강섬록암은 연구지역 내에서 많은 부분을 점유하고 있으며, 중립질내지 조립질의 괴상암체로 암상은 대체로 균질하다. 장석이나 각섬석의 반정을 보이는 녹회색의 각섬암이 미약한 엽리를 보이며 발달되어 있기도 한다. 주구성 광물로는 사장석, 석영, 흑운모, 부성분 광물은 미사장석, 정장석, 각섬석, 견운모, 녹염석, 녹니석등이 산출된다. 이외에 미량의 스피넬, 인회석, 저어콘 및 철질물이 수반된다.

백운광산은 금, 은, 동, 연을 주 채광 대상으로 한 광산으로, 채광량은 84년까지 월 400만톤을 선광하였던 것으로 보고되어 있다(대한광업진흥공사, 1990). 폐광시기에 대한 명확한 기록은 알 수 없으며, 광산은 각섬석~흑운모 화강편마암을 기반암으로 하여 후기에 이를 관입한 염기성 암맥에 의해 형성된 열극충진형 암맥상 광상이다. 산출되는 광석광물은 방연석, 섬아연석, 황동석, 자철석, 자류철석 등이 주를 이룬다. 해방전후에도 채광 및 선광의 흔적이 인근 상류부분에 남아 있으나 그에 대한 기록은 찾을 수 없었으며, 현재 발견되는 지형도상에 팔공광산으로 명기되어 있는 것으로 보아 백운광산 개발이전 또 다른 광업권자에 의해 개발되었던 것으로 보이나 이에 대한 기록도 찾을 수 없었다.

3. 지형적 특성

연구 지역에서 지형상 가장 높은 팔공산(1151 m)이 동남부에 위치하고 있으며, 백운광산은 해발 700 m 부근에 위치하고 있다(Fig. 1). 상부에는 보다 오래 전

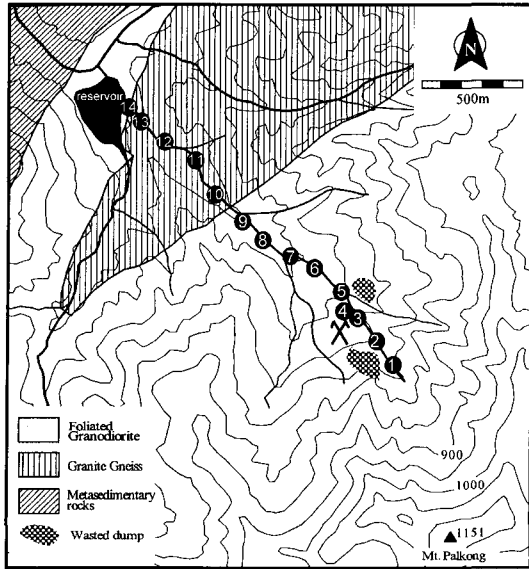


Fig. 1. Geologic, hydrography map and sampling points in the watershed of the Backun abandoned mine area.

에 광산이 개발된 후 폐광된 흔적이 남아 있으나 이에 대한 정보가 불충분하여 해방 전 개발된 것으로 추측되는 정도이다. 선광 후 광미와 폐석이 폐광 주변에 방치되어 하천의 산성화 및 중금속 오염 가능성이 높으며, 쌓여진 광미 및 폐석은 불안정하여 사태발생의 위험도 내재되어 있다. 그러나 폐석이 하천수와 직접적인 접촉이 어려운 위치에 쌓여져 있어, 폐석으로 인한 오염여부와 정도가 주목된다.

백운광산을 기준으로 상부의 지형은 가파르고, 하부로 갈수록 완만하다. 수계는 팔공산 상부에서부터 하천이 시작하고 있으며, 폐광산을 경유하여 하부로 이동하면서 여러 개의 지류가 합류하여 화암제(花岩堤)에 집유되어 저수되며, 인근마을에서 이 물을 농업용수로 이용하고 있다. 본 하천은 건기에도 꾸준한 흐름을 보이며, 유량이 많고 육안 상으로 깨끗해 보여 여름철에는 피서지로 이용되고 있다.

현재 입실~장수간 도로건설로 지형 및 수계는 변형되고, 하천수는 공사의 영향으로 복잡한 화학적 특성을 보일 것으로 예상되며, 폐석장의 일부도 도로 개설 과정에서 일부 처리되거나 피복되어 폐석장의 면적 및 폐석의 양이 상대적으로 축소되어 있다.

4. 연구 방법

본 연구를 위한 시료의 채취는 광산을 경유하여 흐

르는 단일 수계를 대상으로 약 100~200 m간격으로 비오염 하천수에 해당하는 최상류의 1번 지점을 비롯한 총 14개 지점에서 하류에서 상류로 이동하면서 하천수와 하상퇴적물을 채취하였다(Fig. 1). 하천수는 계절변화 및 건기와 우기의 수질 변화를 관찰할 목적으로 2000년 11월(가을), 2001년 2월(겨울), 4월(봄) 그리고 7월(여름, 우기)과 8월(여름, 건기) 5차례에 걸쳐 채취하였으며, 하상퇴적물은 2001년 4월에 채취하였다. 겨울에는 하천이 부분적으로 동결상태인 관계로 물시료의 채취가 구간별로 불가능하였으며, 하천수와 비교하기 위하여 눈 시료를 채취하였다. 또한, 백운폐광산의 폐갱구에서 흘러나오는 갱내수(site 4), 화암제에 저수된 물(site 14)과, 인근 마을에서 식수로 이용하고 있는 음용수(D.W; drink water)를 채취하여 비교하고자 하였다(Fig. 1).

모든 시료는 각 채취시기마다 동일 지점에서 채취되었으며, 각 채취지점을 대표할 수 있도록 1 m²정도의 면적 이내에서 소량씩 채취하여 혼합한 것을 한 채취지점의 시료로 하였다. 하천수 시료는 현장에서 온도 및 pH, EC를 측정하고 부유물질을 0.45 μm의 멤브레인 필터로 여과하여 제거한 후 폴리에틸렌병에 넣어서 보관 운반하였다. 양이온 분석을 위한 시료는 약 100 ml를 산화 및 침전과 흡착을 방지하기 위하여 농질산을 가해 pH2 이하로 산성화하여 따로 보관하였으며, 모든 시료는 분석 전까지 냉장 보관하였다.

하상퇴적물은 부상을 이용하여 가능한 표층부 시료만을 약 500 g정도 채취하였으며 이를 밀폐용 비닐용기에 담아 실험실로 운반하여, 실험실에서 4주간 자연 건조하고 약 80°C의 온풍 건조기에서 하루 동안 완전 건조한 후 80 mesh이하의 입도로 채질한 시료를 분석용 시료로 하였다. 퇴적물 시료의 전처리 방법은 Tessier *et al.*(1979)의 단계별 추출법을 수정 보완한 정명채(1994)의 연속추출방법을 이용하였다. 연속추출은 시료 1.0 g을 출발시료로 하여 stepI; 이온교환형태, stepII; 탄산염형태, stepIII; 철·망간 산화물형태, stepIV; 유기물형태, stepV; 잔류상형태의 5가지 단계로 나누어 연속 추출하여 각 단계별로 분석용 시료를 제작하였다.

하천수 시료의 Alkalinity 분석은 황산과 Methyl Red-Bromocresol Green 혼합용액을 사용한 적정법을 이용하여 분석하였으며, 음이온 및 양이온 분석은 전북대 지구환경과학과의 IC(Ion Chromatography; DX 500)와 ICP-AES(Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrophotometer; SPECTRO)를 이용하

Table 1 Chemical and physical properties of stream water in the Baekun mining area.

No.	pH	Tem. (°C)	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Concentration (mg/l)										Concentration ($\mu\text{g}/\text{l}$)									
				HCO ₃	Cl	NO ₃	SO ₄	Na	Ca	Mg	K	Sr	Al	Mn	Fe	Cu	Zn	Cd	Pb				
1	6.96	6.5	24	4.88	1.94	4.02	2.60	1.87	2.46	0.50	0.70	23.0	30.1	0.8	61.2	0.9	12.5	0.1	0.5				
2	7.17	7.6	28	4.88	1.94	3.94	2.73	1.93	2.58	0.53	0.70	23.0	25.3	1.1	52.5	3.5	149.5	1.4	11.9				
3	6.87	7.9	33	5.88	1.62	3.78	4.56	1.71	2.84	0.55	0.70	22.8	26.2	2.7	53.2	6.5	472.3	4.2	3.9				
4	7.39	8.5	160	16.71	1.72	0.76	53.99	3.29	25.99	2.03	0.70	63.4	163.4	850.6	231.6	54.4	4539.2	16.5	15.2				
5	6.94	7.9	69	12.20	1.56	3.12	18.94	2.18	9.78	1.00	0.70	34.6	126.7	127.6	178.9	29.4	1074.8	7.8	14.3				
6	7.14	7.8	78	11.39	1.51	2.99	19.05	2.22	10.17	1.12	0.69	43.8	61.0	25.8	110.5	4.9	668.1	6.1	1.6				
7	7.35	13.3	95	13.83	1.71	3.44	21.63	2.28	10.64	1.12	0.69	47.1	117.9	18.4	138.5	4.4	530.5	5.6	1.6				
Spring	7.05	12.7	83	13.56	1.82	3.83	16.53	2.46	9.28	1.12	0.69	47.0	119.6	14.6	122.0	3.8	305.8	3.4	0.9				
9	7.00	11.4	65	12.15	1.72	3.42	9.90	2.56	7.26	0.96	0.69	43.8	119.3	16.5	117.4	2.0	132.5	1.5	0.7				
10	7.21	12.1	61	5.69	1.77	3.47	9.75	2.59	7.28	0.99	0.69	42.8	155.0	13.9	133.0	2.5	114.5	1.3	0.8				
11	7.10	11.6	62	13.83	1.68	3.14	8.89	2.58	6.92	0.94	0.69	39.9	116.8	9.7	103.5	3.1	97.4	1.2	1.2				
12	7.30	11.1	60	10.23	1.68	3.02	8.65	2.59	6.66	0.95	0.69	39.2	62.2	7.3	74.5	2.9	112.2	1.1	0.8				
13	6.92	11.4	60	9.76	1.77	3.09	8.95	2.61	6.60	0.95	0.69	38.7	86.2	7.4	91.4	2.9	102.9	1.1	0.9				
14	7.06	14.9	52	9.76	2.07	5.01	5.24	2.46	4.84	0.10	0.69	28.6	93.2	8.4	95.6	5.4	99.2	0.5	1.1				
D.W.	6.80	11.6	26	4.88	5.62	3.33	2.00	4.08	2.64	0.65	0.70	29.3	36.6	1.7	59.8	3.3	36.2	0.0	0.4				
1	6.02	12.7	27	5.49	1.20	3.11	2.99	1.52	2.38	0.50	0.72	19.2	36.6	1.4	37.4	2.6	89.2	0.9	0.7				
2	6.41	13.1	30	5.15	1.13	2.96	3.79	1.47	2.56	0.49	0.72	19.5	34.1	2.7	36.7	3.2	199.4	1.8	8.7				
3	6.75	13.5	31	6.20	1.06	2.60	6.15	1.51	3.15	0.58	0.72	22.2	146.6	44.9	41.0	18.1	670.4	5.7	5.3				
4	6.91	10.6	141	15.46	1.37	1.00	41.41	2.76	17.60	1.52	0.72	40.6	86.0	645.7	107.9	70.0	5257.1	23.9	11.9				
5	6.43	13.2	39	3.81	1.14	2.56	8.55	1.60	4.16	0.67	0.72	23.2	132.0	66.6	48.7	23.3	824.6	6.9	6.4				
6	7.05	14.8	128	7.64	1.08	2.92	10.63	1.68	6.62	0.74	0.71	26.5	88.8	58.4	66.9	7.7	339.2	3.2	1.4				
Summer (raining)	6.89	15.9	118	9.00	1.21	3.50	8.18	1.86	5.38	0.75	0.71	27.0	110.0	41.7	79.0	3.8	124.2	1.4	0.6				
8	7.10	16.0	120	9.76	1.20	3.57	8.27	1.98	5.71	0.79	0.71	28.7	119.2	41.1	87.7	4.8	147.2	1.6	0.9				
9	6.60	15.8	61	7.81	1.11	3.33	6.06	1.90	4.54	0.65	0.71	24.8	88.6	53.1	68.0	3.2	82.8	0.9	0.7				
10	6.51	15.9	54	8.85	1.18	3.48	6.24	1.93	4.41	0.65	0.71	24.7	91.4	51.1	64.7	2.7	77.5	0.8	0.6				
11	6.54	19.7	43	8.54	1.13	3.40	5.79	1.94	4.12	0.64	0.71	22.2	101.8	45.5	68.6	2.4	53.2	0.6	0.5				
12	6.53	15.6	40	8.54	1.13	3.44	5.66	1.93	4.13	0.64	0.71	21.8	107.5	39.3	89.5	2.9	73.8	0.7	0.7				
13	6.50	15.7	36	8.54	1.11	3.11	4.93	1.97	4.07	0.64	0.70	20.3	76.1	47.3	63.5	2.6	63.5	0.6	0.6				
14	6.21	15.7	40	7.67	1.16	3.31	5.63	1.97	4.05	0.66	0.70	21.2	83.6	49.6	68.1	2.8	74.4	0.7	0.7				

D.W.; drinking water

Table 1 Continued.

No.	pH	Tem. (°C)	EC (µS/cm)	Concentration (mg/l)										Concentration (µg/l)									
				HCO ₃	Cl	NO ₃	SO ₄	Na	Ca	Mg	K	Sr	Al	Mn	Fe	Cu	Zn	Cd	Pb				
1	6.20	14.6	22.2	7.20	1.32	3.21	2.82	1.73	2.56	0.51	0.74	25.1	29.9	0.4	43.4	1.3	62.9	0.7	0.7				
2	6.03	15.9	21	5.16	1.18	2.95	3.53	1.69	2.56	0.51	0.74	23.6	30.3	1.0	47.5	3.8	236.7	2.3	18.6				
3	6.25	16.4	30.0	9.18	1.29	2.85	7.07	1.70	3.38	0.60	0.74	27.3	143.9	30.0	60.9	16.4	772.7	6.7	19.2				
4	6.78	10.5	95	16.85	1.26	0.99	42.80	2.87	19.86	1.64	0.73	53.6	110.5	756.5	138.2	65.9	5204.0	19.0	16.4				
5	6.50	15.8	40	8.00	1.29	2.71	11.66	1.92	5.75	0.77	0.77	31.1	97.0	80.8	64.7	22.6	1037.9	8.3	9.6				
6	7.01	17.7	59	11.77	1.32	3.08	15.84	2.01	8.42	0.90	0.73	42.0	115.4	23.5	98.4	4.6	302.4	3.3	2.0				
7	6.89	20.5	59	13.28	1.22	2.30	10.90	2.22	7.62	0.91	0.73	44.9	144.5	38.0	94.8	2.8	92.1	1.4	0.4				
8	6.86	21.0	61	15.25	1.49	2.77	11.94	2.31	7.82	0.95	0.73	47.8	214.5	41.7	142.3	2.9	105.2	1.4	0.5				
9	7.26	20.0	49	16.01	1.23	2.40	7.64	2.38	6.08	0.86	0.73	42.4	161.1	50.2	103.7	2.0	38.3	0.5	0.6				
10	7.16	20.3	47	13.28	1.25	2.39	6.69	2.52	5.88	0.83	0.73	38.9	112.7	31.6	76.0	2.3	100.2	0.6	0.3				
11	7.43	20.6	47	12.64	1.16	2.11	7.01	2.49	6.05	0.82	0.72	40.3	121.9	31.2	73.0	2.5	90.0	0.6	0.4				
12	7.40	20.6	47	15.53	1.20	1.57	7.18	2.44	5.67	0.79	0.72	39.1	121.6	27.6	73.6	2.1	48.2	0.6	0.3				
13	7.43	20.7	46	14.05	1.32	2.27	6.91	2.57	5.77	0.82	0.72	39.5	128.5	28.1	76.5	3.1	131.9	0.6	0.4				
14	7.42	20.7	47	16.27	1.34	2.24	7.10	2.44	5.78	0.78	0.72	39.0	116.3	25.0	73.5	3.0	36.1	0.6	0.5				
1	6.85	6.0	25	4.27	1.81	5.31	2.05	1.66	2.65	0.57	0.30	7.0	12.0	12.0	12.0	15.0	20.0						
2	6.51	6.4	26	9.97	1.77	5.32	2.75	1.62	2.77	0.56	0.29	15.0	12.0	12.0	9.0	108.0	22.0						
3	7.28	5.6	29	6.10	2.11	5.37	5.86	1.68	3.57	0.64	0.35	14.0	13.0	13.0	13.0	363.0	26.0						
4	7.11	8.3	128	34.00	1.64	0.38	49.23	3.14	23.15	1.91	0.90	20.0	151.0	9.0	23.0	991.0	27.0						
5	6.94	6.3	51	11.44	1.74	3.88	14.94	2.01	8.03	0.92	0.50	14.0	35.0	8.0	16.0	494.0	26.0						
7	6.96	6.0	54	11.33	1.73	3.92	16.22	1.88	7.85	0.88	0.48	16.0	24.0	9.0	19.0	508.0	25.0						
13	7.31	7.4	54	16.02	1.92	3.15	9.29	2.54	7.55	1.07	1.05	24.4	24.0	18.0	11.0	6.0	22.0						
3	6.34	1.3	29	21.52	1.54	4.97	5.16	1.55	3.26	0.62	0.34	70.0	11.0	11.0	12.0	402.0	23.0						
4	7.50	5.5	140	35.59	1.49	0.30	48.47	3.48	26.41	2.14	0.96	16.0	220.0	12.0	786.0	25.0							
5	7.44	4.4	92	13.60	1.41	1.78	28.61	2.69	16.25	1.48	0.68	12.0	85.0	12.0	587.0	26.0							
7	7.00	1.5	82	18.22	1.55	2.28	31.36	2.69	16.25	1.45	0.68	75.0	13.0	30.0	10.0	14.0	622.0	27.0					
9	6.66	0.8	53	12.20	2.23	4.14	16.48	2.35	10.59	1.31	0.68	79.0	14.0	19.0	10.0	219.0	24.0						
11	6.71	0.8	47	14.96	2.13	3.75	9.63	2.64	7.20	1.13	0.68	72.0	11.0	17.0	10.0	84.0	21.0						
13	6.65	0.7	31	12.20	1.88	3.50	8.75	2.56	15.96	1.05	0.68	69.0	19.0	15.0	9.0	74.0	22.0						
snow	6.56			2.71	0.53	0.72	0.95	2.28	1.19	0.45	0.76	4.2	37.9	20.7	48.9	1.4	22.6	0.2	0.7				

였으며, 중금속 및 미량원소는 충남대학교 공동실험실 습관의 ICP-MS(Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrophotometer; PE SCIEX Elan 6000)를 이용하여 분석하였다. 분석 대상 원소는 NO_3 , SO_4 , Cl, Ca, Na, Mg, K, Sr, Al, Mn, Fe, Cu, Zn, Cd, Pb 등 주원소 및 미량원소, 중금속 원소 등을 분석하였다.

5. 결과 및 토의

5.1. 하천수의 물리화학적 특성

하천수의 물리화학적 특성을 계절별로 Table 1에 나타내었다. 측정된 하천수의 pH는 6.5~7.1로 약산성내지 중성을 띠며, 음용수의 pH 기준치(pH: 5.8~8.5)에도 적합한 일반적인 하천수의 pH범위를 보여준다. 특히 폐갱구에서 유출되고 있는 갭내수(site 4)의 경우도 일반 하천수와 비슷한 pH범위를 보이는 것을 볼 수 있으며, 갭내수의 계절에 따른 온도 변화가 적어 갭내수의 기원이 지하수에 있음을 짐작할 수 있다.

Cl, NO_3 , SO_4 도 국내 수질 기준치보다 현저히 낮은 값을 보이며, 중금속 및 미량원소 중 Al 및 Fe, Cu, Mn, Zn의 경우도 음용수 기준치보다 전체적으로 낮은 농도를 보이나 폐갱구에서 흘러나오는 갭내수의 경우(site 4)는 대부분의 원소가 기준치보다 2배 이상 높은 농도를 보인다. Cd의 경우는 갭내수 이외에도 그 상류인 3번과 하류인 5번, 7번 지역에서도 기준치보다 높은 농도로 나타났다. 인근 마을에서 식수로 이용하는 물(D.W)의 분석결과도 음용수 기준에 적합한 것으로 나타났다. 하천수의 수질이 예상보다 좋은 결과를 보인 것은 방치된 폐석이 하천수와 직접적인 접촉이 어려운 위치에 놓여있어서 충분한 화학적 풍화가 진행되지 않은 것으로 생각된다.

전체 하천수의 양이온 함량은 $\text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{K}$ 의 순서로, 음이온 함량은 $\text{HCO}_3 > \text{NO}_3$, $\text{SO}_4 > \text{Cl}$ 의 형태를 보여 일반 하천수의 화학적 특성(Jeon, 2000; Faure, 1991)과 유사하며, Ca- HCO_3 나 Ca- SO_4 형태의 하천수임을 알 수 있다. 하천수의 화학적 특성을 좀더 알기 쉽게 파이퍼 다이어그램(Piper trilinear diagram)을 이용하여 각 계절별로 나누어 도시하였다(Fig. 2). 파이퍼 다이어그램은 수질의 특성을 알아보기 쉽도록 Piper(1944)에 의해서 제시된 것으로, 주요 양이온 Mg, Ca, Na, K과 SO_4 , HCO_3 , Cl의 음이온을 이용하여 그래프에 나타내는 방법이다. 파이퍼 다이어그램의 마름모꼴 안의 I형은 Ca(HCO_3); 하천수나 저층지하수, II형은 Na HCO_3 ; 담수성 피압지하수, III형은

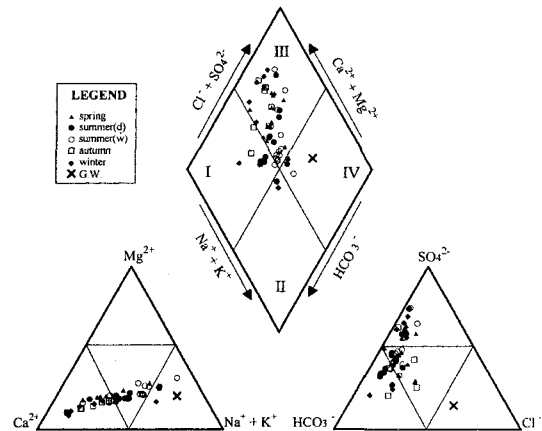


Fig. 2. Trilinear diagram used to classify water on the basis of chemical composition (Piper, 1944).

Ca SO_4 , CaCl $_2$ 형, IV형은 Na $_2\text{SO}_4$, NaCl 형; 해수, 화석염수, 온천수 및 갭내수 등의 수질을 나타낸다(山本, 1986). 본 연구의 분석결과를 파이퍼 다이어그램에 도시해 본 결과 양이온의 경우는 Ca함량이 높고, 음이온의 경우 SO_4 함량이 높아, 마름모꼴 그래프에는 III형에 주로 도시되며 일부는 I, II, IV형의 경계부근에 각각 부분적으로 도시되나 전체적으로 I형이 우세하다. 이는 하천수의 일부가 광산폐석으로 인해 Ca(HCO_3)인 I형에서 Ca SO_4 인 III형으로 전이되었음을 짐작할 수 있다. 또한 건기에 해당하는 겨울과 가을에 Ca함량이 높게 나타나며, 여름의 우기에는 Na, K의 함량이 약간 높게 나타나는 것은 우수의 영향으로 생각되나, Cl의 함량이 건기에 해당하는 가을이나 봄에 높게 나타나며, 특히 마을에서 식수로 사용하는 물에서 Cl의 함량이 높은 것은 Cl에 대한 인위적 오염의 가능성도 생각할 수 있다. 여름의 건기는 가을, 겨울에 비해 유량이 풍부한 편이어서 그래프에서도 장마철인 여름의 우기와 건기인 가을, 겨울의 중간부분에 도시된다. Faure (1991)에 의하면 건기중의 하천수가 보다 명확한 지화학적 특성을 나타내고 있음을 시사한바 있어 건기인 가을, 겨울이 본 연구 지역의 지화학적 특성이나 폐광석으로 인한 오염의 영향을 보다 잘 나타내고 있을 것으로 생각된다.

Table 2는 하천수의 분석결과를 이용하여 통계분석 방법을 이용하여 pH, EC 및 각 원소들간의 상관관계를 나타낸 것이다. 먼저 pH에 크게 영향을 미치는 이온은 없으나 Na, Ca, Mg은 0.43 이상의 양의 상관관계를 보여 SO_4 의 함량이 높은 수질(갭내수; site 4)에서도 pH가 중성을 보이는 것은 이들 이온에 의한 중

Table 2. Correlation index table of physical and chemical constituents in stream waters.

	Tem.	pH	EC	HCO ₃	Cl	NO ₃	SO ₄	Na	Ca	Mg	K	Sr	Al	Mn	Fe	Cu	Zn	Cd	Pb
Tem.	1.00																		
pH	0.00	1.00																	
EC	-0.07	0.48	1.00																
HCO ₃	-0.17	0.40	0.64	1.00															
Cl	-0.35	0.14	-0.13	0.01	1.00														
NO ₃	-0.25	-0.25	-0.58	-0.50	0.29	1.00													
SO ₄	-0.30	0.38	0.81	0.77	-0.02	-0.63	1.00												
Na	-0.12	0.54	0.48	0.55	0.52	-0.52	0.57	1.00											
Ca	-0.34	0.43	0.78	0.78	0.01	-0.61	0.96	0.65	1.00										
Mg	-0.35	0.46	0.76	0.76	0.05	-0.61	0.93	0.67	0.95	1.00									
K	0.31	0.15	0.33	0.20	-0.13	-0.66	0.28	0.40	0.31	0.32	1.00								
Sr	-0.50	0.39	0.34	0.54	0.24	-0.08	0.58	0.55	0.74	0.79	-0.43	1.00							
Al	0.70	0.16	0.20	0.16	-0.28	-0.24	0.01	0.04	-0.02	-0.01	0.21	0.01	1.00						
Mn	-0.09	0.15	0.62	0.65	-0.07	-0.54	0.76	0.40	0.68	0.62	0.14	0.27	0.21	1.00					
Fe	0.21	0.33	0.46	0.46	0.01	-0.16	0.37	0.31	0.34	0.36	-0.05	0.37	0.71	0.51	1.00				
Cu	-0.27	0.04	0.49	0.46	-0.03	-0.40	0.71	0.25	0.60	0.55	0.00	0.28	0.07	0.89	0.31	1.00			
Zn	-0.15	0.08	0.56	0.51	-0.06	-0.48	0.73	0.31	0.63	0.57	0.07	0.26	0.16	0.96	0.44	0.95	1.00		
Cd	-0.77	0.13	0.26	0.39	0.15	-0.02	0.56	0.19	0.57	0.57	-0.28	0.73	-0.54	0.32	-0.24	0.53	0.37	1.00	
Pb	-0.34	-0.25	0.12	0.26	-0.07	-0.31	0.48	-0.06	0.38	0.30	0.24	0.09	-0.02	0.54	0.21	0.67	0.62	0.67	1.00

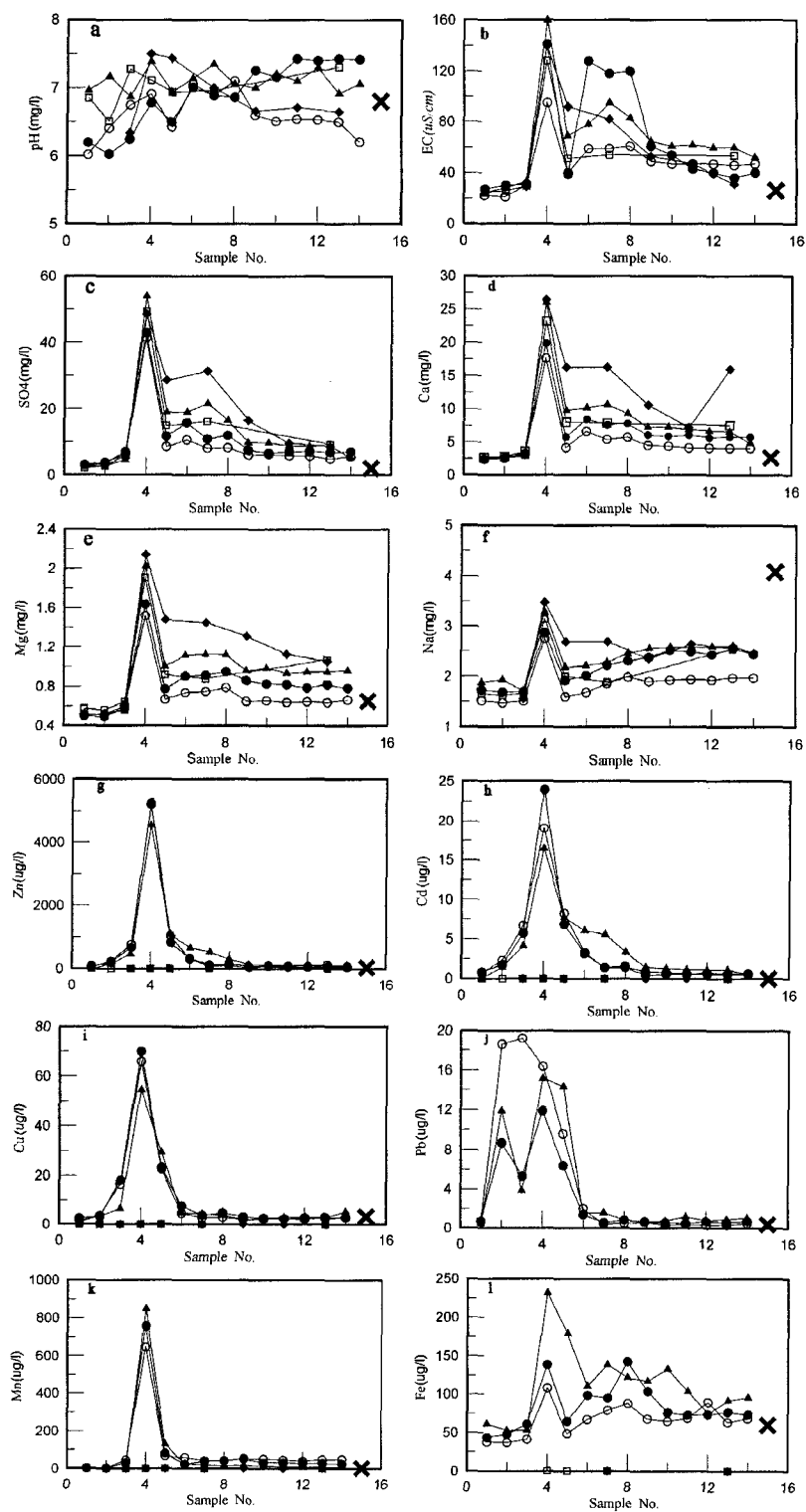


Fig. 3. Variation of pH, EC and ion concentrations in stream waters in accordance with distance from the mine adit. Symbols are the same as in Fig. 2.

화작용의 영향으로 짐작할 수 있다.

EC와 각 음이온과의 상관관계를 살펴보면 SO_4 , HCO_3 과 EC가 양호한 양의 상관관계(각각 0.81, 0.64)를 보이나, Cl (-0.13)와 NO_3 (-0.58)은 그렇지 못하다. 오히려 NO_3 은 음의 상관관계를 보여주고 있다. 이것은 SO_4 과 HCO_3 이 하천수의 수질에 영향을 미치는 원소이며, Cl 와 NO_3 은 무관하다고 볼 수 있다. 특히 SO_4 는 EC와 높은 상관관계(0.81)를 보여 폐광석의 화학적 풍화로 인해 SO_4 에 의한 하천수의 오염이 진행되어 있음을 시사해 준다. EC와 NO_3 가 양호한 음의 상관관계를 보이는 것은 갯내수가 유출되는 지역(site 4)에서 질산의 함량이 낮고 EC가 높게 나타나는 것에 기인하는 것으로 보이며, 이는 갯내수의 기원이 지하수에 있으며 지하수는 NO_3 에 의한 오염이 상대적으로 적어 낮은 함량을 보이는 것으로 생각된다.

EC와 양이온들 간의 상관관계를 살펴보면, Ca과 Mg은 각각 0.78, 0.76, Na, K은 각각 0.48, 0.33으로 양이온 중 Ca, Mg이 Na이나 K보다 기반암의 화학적 풍화에 약하며, 이로 인해 하천수의 수질에 보다 큰 영향을 미치는 원소로 생각된다. Mn, Fe, Cu, Zn은 각각 0.62, 0.46, 0.49, 0.56의 값을 보여 이들 원소들이 Cd(0.26)이나 Pb(0.12)보다는 하천수의 수질에 영향을 미치는 주요 중금속 원소임을 짐작할 수 있다.

5.2. 광산으로부터 거리에 따른 하천수의 수질 변화

폐석과 폐갱구앞을 지나는 하천수의 수질변화양상을 상류에서 하류에 걸쳐 살펴보았다(Fig. 3). 상류에서 하류에 걸쳐 pH는 거의 변화를 보이지 않으며(Fig. 3a), 갯내수가 유입되는 지점에서 오히려 pH가 약간 상승한다. EC의 경우는 계절에 따른 변화가 다소 불규칙하며 갯내수가 유입되는 지점에서 높고 하류로 갈수록 점차 감소하나 하류의 EC도 상류의 비오염 지역(site 1)에 비해 높게 나타난다(Fig. 3b). 방치된 폐갱구에서 심각한 산성화 현상은 발견되지 않으나 국지적으로 하천바닥의 적화현상이 관찰되며 하천수의 TDS를 높이거나 수질에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

SO_4 , Ca, Mg, Na와 같은 원소는 비오염 지역(site 1)인 상류에서는 낮은 농도를 보이나 갯내수가 유입되는 지점(site 4)에서 농도가 높아지며 하류로 갈수록 점차 감소한다(Fig. 3c~f). SO_4 은 방치된 폐석보다는 갯내수가 주 오염원으로 작용하고 있으며, 방치된 폐석은 오랫동안의 기계적 및 화학적 풍화를 받아 상당 부분 평형화되어 하천 수질에 심각한 영향을 미치지 못하는 것으로 보인다. 갯내수에서 Ca, Na, Mg과 같

은 알카리성 양이온이 높은 함량을 보이고 있어, 갯내수 내의 SO_4 의 농도가 높음에도 불구하고 갯내수가 중성을 띠는 것은 이들 알카리성 이온들에 의한 중화작용이 주된 원인이라고 생각된다.

Zn, Cd, Cu, Pb, Mn, Fe 같은 중금속 원소도 비슷한 양상을 보여주나 이들 원소 중 특히 Pb은 상류에서(site 2, 3)도 높은 농도를 보인다(Fig. 3g~j). 이는 상류에 해방 전부터 개발되었던 광산의 흔적이 남아 있으며 그 주변에 방치된 광미의 영향이 Pb에 대해서 강하게 나타나는 것으로 보인다. 특히 Pb에 대해서만 이런 특징을 보이는 것은 광미내에 함유된 광석 광물의 종류가 폐갱구 주변에 방치된 폐석과는 다른 성분을 가진 탓으로 생각된다. 또한 이들 중금속 원소의 경우에도 하류에서는 비오염 지역의 하천수와 비슷한 농도를 보여 폐석이나 노출된 갯내수에 의해 일어나는 중금속의 부화현상은 근거리에만 한정된다. 이는 하천수가 중성을 띠고 있어서 중금속이 이온화 상태로 존재하기 힘들고, 대부분 주변에서 유입되는 비오염수에 의한 희석작용이나 지화학적 환경변화로 인해서 이온들의 흡착, 침전 등으로 자연스럽게 하천수로부터 제거되는 것으로 보인다.

Sr이나 Al과 같은 미량 원소들도 갯내수에서 현저히 높은 농도를 보이며 하류로 갈수록 점차 감소하는데, 특히 Al의 경우는 상류에서 낮은 농도를 보이나 갯내수가 유입되는 부근에서 농도가 높아지고 하류로 갈수록 그 농도가 꾸준히 유지되거나, 계절에 따라 불규칙한 양상을 보이고 있는 것은 현재 진행중인 도로 공사로 인한 영향이 클 것으로 보인다(Table 1).

5.3. 연속추출에 의한 하상퇴적물 중의 중금속

하상퇴적물내에 존재하는 중금속의 존재 여부와 존재 상태를 알아보기로 단계별 추출법을 이용한 전처리 과정에서 얻어진 시료를 분석한 결과를 Table 3에 나타내었다. 최상부인 site 1번 지점의 경우는 하상이 암반으로 퇴적물을 채취하기 불가능하였으며, site 2번 지점 부근에 방치된 광미(dump)를 채취하여 단계별 추출법을 적용하여 함께 분석하였으며, 주요 중금속에 해당하는 Cu, Zn, Cd, Pb에 대한 단계별 분석결과를 나타내었다.

우리나라의 토양 오염 우려기준치 및 토양오염 대책 기준치와의 비교에는 분석방법에 다소 차이는 있지만, 1단계에서 4단계의 분석값의 합만으로 비교하면, Pb(400, 1000 (mg/kg))이나 Cu(200, 500 (mg/kg))는 폐광부근의 하상퇴적물이 우려기준이나 대책기준을 수

Table 3. Heavy metal contents in the stream sediments prepared by sequential extraction method. (unit; mg/kg)

	Step	Dump	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Cu	I	26.5	6.2	5.4	7.7	12.6	1.8	2.2	2.4	2.0	1.8	2.5	2.0	0.4	1.8
	II	0.3	0.2	0.3	8.6	170.0	2.4	4.4	2.5	1.0	1.7	2.5	3.4	3.0	3.0
	III	0.5	0.4	0.7	9.2	57.8	9.2	8.9	4.4	1.9	2.9	3.3	5.3	4.1	2.0
	IV	12.0	27.3	15.8	240.0	730.3	21.6	43.1	16.1	5.7	10.3	23.4	13.5	10.6	9.0
	V	462.6	241.0	99.8	4247.9	251.4	13.5	15.7	12.8	8.4	13.8	16.1	14.5	12.2	11.1
Zn	I	287.6	159.6	92.4	150.4	195.0	3.7	10.2	13.7	4.3	11.0	11.7	17.8	10.3	4.2
	II	8.7	19.8	15.7	255.0	892.7	11.7	43.2	43.4	10.1	28.7	29.5	27.0	25.2	8.9
	III	31.6	53.8	38.0	654.5	947.5	98.5	150.0	138.7	40.2	106.1	63.9	154.1	167.2	16.4
	IV	27.4	39.2	13.4	98.5	520.8	63.4	97.4	62.3	18.7	42.3	47.0	46.9	42.1	24.3
	V	1246.1	803.8	1287.8	4686.1	1001.8	324.6	382.0	377.3	298.1	356.7	445.4	412.0	345.4	274.0
Cd	I	3.9	7.7	9.0	10.7	13.3	0.5	1.3	2.2	0.9	2.0	2.5	2.5	1.4	0.8
	II	0.5	1.5	0.9	3.6	11.3	0.5	1.1	1.3	0.4	1.0	1.2	1.0	0.9	0.3
	III	1.2	1.0	1.3	6.4	7.3	1.4	1.7	1.3	0.8	1.3	1.0	1.4	1.5	0.7
	IV	0.8	1.0	0.6	1.5	4.5	2.4	1.1	0.8	0.5	0.7	0.6	0.9	1.0	0.8
	V	3.0	1.5	1.3	30.5	1.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.2	0.1	0.2
Pb	I	469.0	298.2	5.4	5.7	30.8	2.8	4.1	1.9	1.2	1.5	2.4	4.2	1.3	1.8
	II	24.2	147.5	9.1	113.4	873.9	45.0	80.0	27.5	4.8	14.5	34.5	24.0	13.8	10.3
	III	64.1	189.7	15.8	690.6	899.8	112.8	101.2	26.5	2.0	16.3	27.5	29.0	20.6	5.5
	IV	6.0	64.3	3.2	107.2	317.3	13.4	15.7	5.4	0.2	1.0	9.2	1.8	1.5	0.2
	V	5593.5	3644.0	517.4	2137.5	1236.3	73.1	59.6	33.9	18.1	37.4	40.6	28.8	26.5	19.1

*I; Exchangeable, II; Bound to carbonates, III; Bound to Fe-Mn oxide, IV; Bound to organic matter, V; Residual

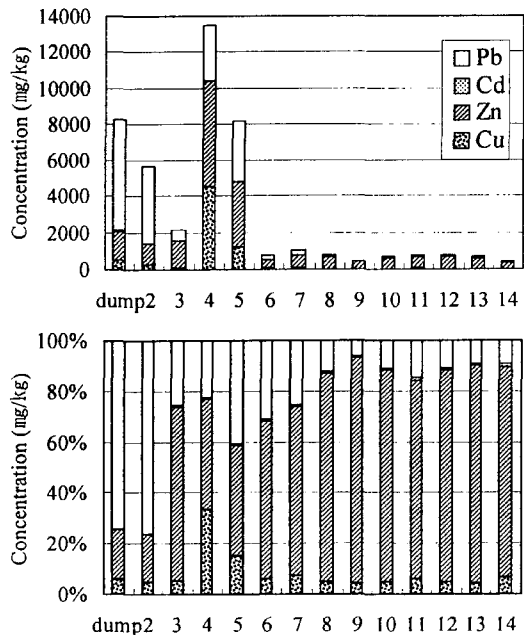


Fig. 4. A diagram of total metal concentrations in the mine dump and stream sediments from the Backun mine area.

십~수백배 이상 초과하고 있으나 하류의 하상퇴적물에는 그 함량이 우려할 정도는 아니어서 폐석이나 광미가 하상을 통해 하류로 이동한 정도가 미비함을 알 수 있었다. Cd은 우려기준(12 (mg/kg)), 대책기준(30 (mg/kg))을 부분적으로 초과하기는 하나 전체적으로 낮은 함량을 보여 Cd에 대해서는 심각한 오염상태는 아닌 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 광미와 하상퇴적물의 전체 중금속의 절대 농도를 각 채취지점별로 막대그래프로 나타내었다. 광미에 비해 갯내수가 유입되는 지점의 하상 퇴적물의 중금속 함량이 높게 나타나며, Zn의 경우는 하류의 하상퇴적물에까지 상당히 농축되어 있음을 알 수 있다. 이는 Zn이 높은 유동성을 가지고 하류까지 이동되었을 가능성도 생각할 수 있지만, 하류 퇴적물내 잔류상형태가 높은 것으로 보아 폐석의 풍화물이 원거리까지 이동한 것으로 볼 수도 있다. Pb은 폐갱구 부근의 하상 퇴적물보다 광미에서 높은 농도를 보여 Pb에 대해서는 광미나 폐석이 주된 오염원으로 작용할 가능성을 시사한다. Cu의 경우는 광미에서보다 폐갱구 부근의 하상퇴적물에서 높은 농도를 보여 Cu에 대해서는 방치된 폐갱구와 주변의 폐석이 주된 오염원으로 작용하고 있음을 시사한다. 이는 폐갱구를 통해 유출되는 갯

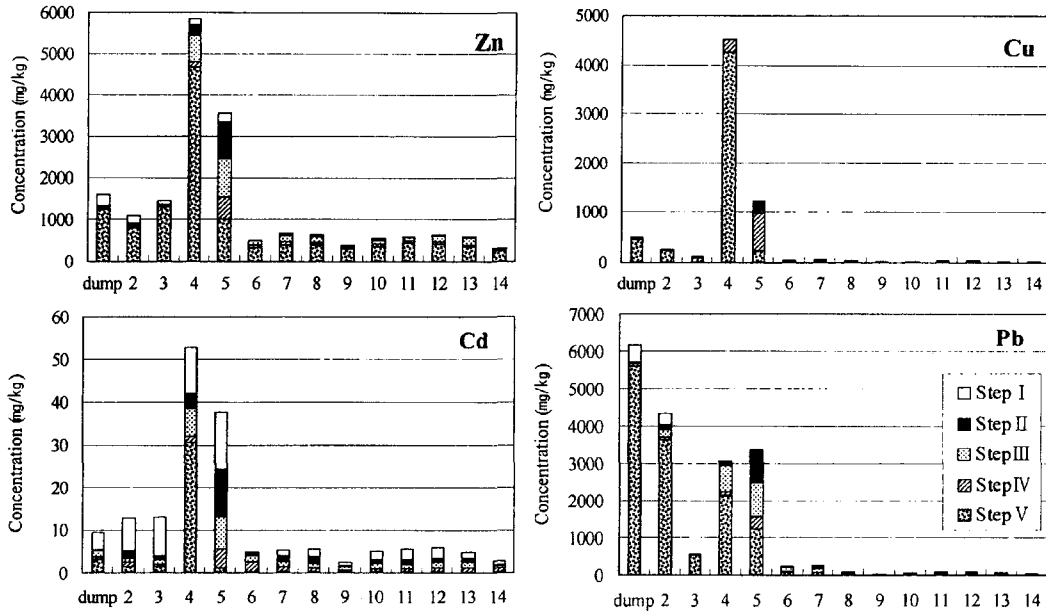


Fig. 5. A diagram of sequentially extracted metal concentrations of mine dump and stream sediments from the Backun mine area.

내수에서도 높은 Cu농도를 보여 갠내수중 Cu가 하상 퇴적물내에 침전이나 흡착되었을 가능성도 생각할 수 있다. 또한 상부(site 2)에 방치된 광미와 폐갱구앞(site 4)에 방치된 폐석내의 광석의 종류에 다소 차이가 있음을 시사해 주기도하나, 이에 대한 보다 자세한 연구가 필요할 것으로 기대된다.

Fig. 5은 각 지역별 하상퇴적물 중 중금속의 절대함량을 단계별 추출법에 의해 분류한 존재형태로 나누어 각 원소별로 막대 그래프로 나타내었다. Zn, Cu, Cd의 경우는 폐갱구 주변의 하상퇴적물 중에 그 함량이 높게 나타나는 것을 볼 수 있으나, Pb의 경우는 폐갱구 주변보다는 상류(site 2)에 방치된 광미 중에 함량이 높게 나타난다. 이는 하천수 수질중 상류에서 Pb의 농도가 높게 나타났던 원인이 상류에 방치된 광미 중에 납의 함량이 우세했던 탓으로 해석할 수 있다. Zn, Pb, Cu의 경우는 안정한 형태인 V단계의 잔류상형태가 우세하나, Cd의 경우는 불안정한 이온교환형태나 탄산염형태의 존재 형태가 높게 나타난다. Zn, Pb, Cd의 경우는 폐갱구 근처의 하상퇴적물에서 III단계의 Fe, Mn 산화물형태의 존재가 비교적 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 각 원소별 존재 형태나 절대 농도로 비교해 보면 Zn, Cu에 대해서는 폐갱구가 심각한 오염원이 되며, Pb에 대해서는 폐갱구보다 방치된 폐석이 오염원이 될 수 있음을 알 수 있다. 갠내수가 중성

을 보여주고 있지만, 높은 pH에서도 철산화물의 침전이 일어나고 있음을 시사한다. 특히 이 산화물은 각종 중금속을 동시에 침전시킴으로서 하천수내의 중금속 함량을 낮추는 역할을 하지만, 지화학적 환경변화에 따라 탈착이나 이온교환이 쉽게 일어날 수 있으며, 철산화물 자체가 2차적 오염원으로 작용할 가능성이 높다 (Benjamin, 1983).

Fig. 6은 각 원소별로 존재 형태의 비율을 살펴보기 위하여 나타낸 그림이다. Zn의 경우는 잔류상 형태가 우세하며, Pb은 광미나 상류 퇴적물의 경우는 잔류상형태가 우세하나 하류의 퇴적물은 2, 3단계의 탄산염형태나 철, 망간 산화물형태가 높게 나타나 지구화학적 환경 변화에 따라 흡착이나 침전된 Pb이 쉽게 용출되어 하천수로 방출될 가능성을 보여준다. Cu도 마찬가지로 상류 퇴적물에서는 잔류상형태의 비율이 높지만 하류 퇴적물의 경우는 2, 3, 4단계 형태의 존재 비율이 높아 불안정한 상태로 존재하는 것을 알 수 있다. Cd은 불안정한 형태의 존재 비율이 높지만, 전체적으로 우려할 만한 농도는 아니다. 잔류상형태의 존재 비율이 높은 경우도 오랜 시간 화학적 풍화에 노출될 경우 계속적인 오염원으로서 작용할 가능성이 높으므로 폐석이나 폐갱구에 대한 사후 처리가 환경 보전을 위해 중요함을 다시 한번 시사해 준다(이무성 등, 1996).

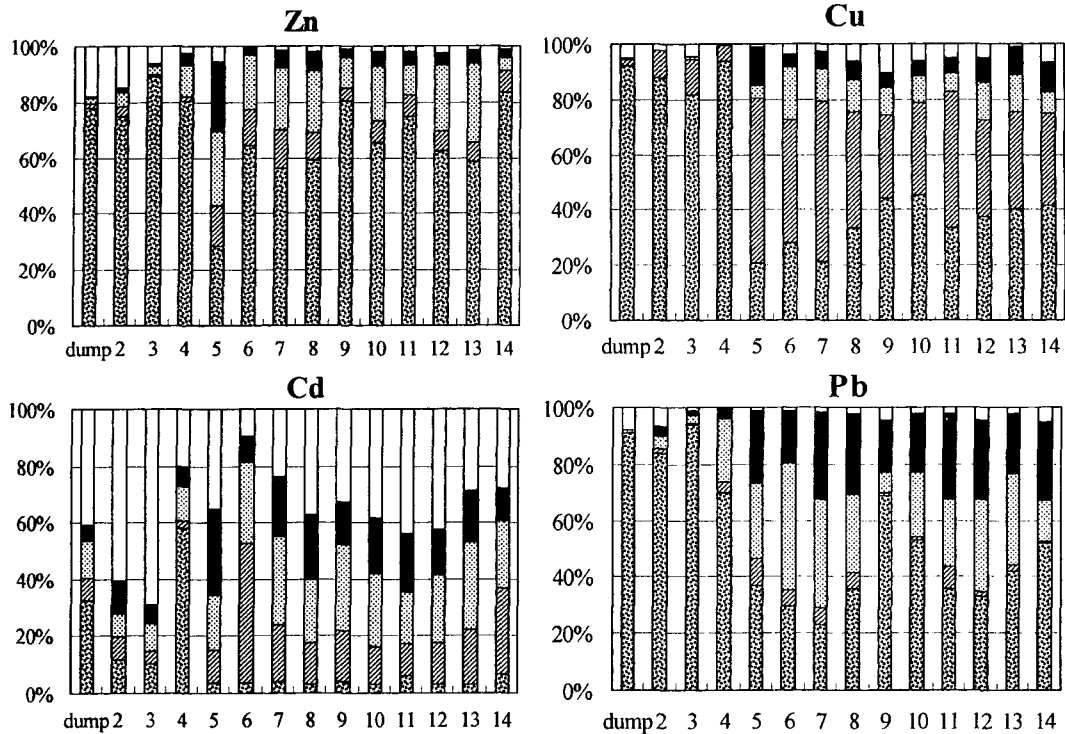


Fig. 6. Partitionings of sequentially extracted metal concentrations of mine dump and stream sediments from the Backun mine area. Symbols are the same as in Fig. 5.

6. 결 론

백운 폐광산 주변에 방치된 폐석이나 폐갱구가 미치는 환경적 영향을 폐광산을 경유해서 흐르는 하천을 대상으로 하천수 및 하상퇴적물을 채취하여 분석해본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

하천수의 pH는 6.5~7.1로 약산성내지 중성을 띠며, 하류지역 하천수는 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 타입을, 폐광산 부근 하천수는 $\text{Ca}(\text{SO}_4)$ 타입을 보여주고 있어, $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 타입이 폐광석으로 인해 $\text{Ca}(\text{SO}_4)$ 타입으로 전이되었음을 알 수 있었다. 하천수의 계절적 변화는 극히 적으나 대체적으로 건기인 가을과 겨울은 하천수의 농축에 의해 전체적으로 높은 농도를 보이며, 여름은 우수에 의한 희석작용으로 농도가 낮아졌다. 우기보다는 건기의 하천이 하천수의 지화학적 특성이나 오염을 잘 반영하고 있어 하천수의 수질조사를 위해서는 건기의 하천을 대상으로 하는 것이 바람직함을 알 수 있었다. 하천수의 수질은 일반하천수의 수질 기준에 적합하나 폐갱구 주변 일부 하천수에서 Mn, Zn, Cd은 음용수기준치를 초과한다. 특히 방치된 폐갱구에서 흘러나오는 갭내수는

지하수를 기원으로 하고 있으며 SO_4 와 중금속에 있어서 기준치보다 2배 이상 높게 나타나고 있어 하천수 오염에 있어 폐석보다 주요오염원으로 작용하고 있음을 알 수 있었다.

하상퇴적물내 Pb, Cu함량은 토양환경기준치를 수십 내지 수백 배 이상 초과하고 있어 심각하게 오염된 상태이다. Zn은 하류의 하상퇴적물까지 농축되어 있으며, Pb은 폐갱구 부근의 하상 퇴적물보다 상부(site 2)에 방치된 광미에서 높은 농도를 보여 Pb에 대해서는 광미나 폐석이 주된 오염원으로 작용하고 있다. Cu는 광미에서보다 폐갱구 부근의 하상퇴적물에서 높은 농도를 보여 방치된 폐갱구가 Cu의 주요오염원이 되고 있다. 단계별추출법에 의한 각 중금속의 단계별 농도는 V단계의 잔류상형태가 가장 높은 농도를 보이나, Zn, Pb, Cd의 경우는 폐갱구 근처의 하상퇴적물에서 III단계의 Fe, Mn 산화물형태가 비교적 높게 나타난다. Cd의 경우 퇴적물 내 절대적 함량은 적지만, 불안정한 형태(I~IV단계)로 존재하고 있어 환경변화에 따라 Cd에 의한 하천수의 중금속 오염 가능성이 높다.

폐석 및 광미 내의 Pb을 포함한 Cu, Zn의 중금속

함량이 높아 폐석 및 광미가 기계적 및 화학적 풍화에 오랫동안 노출될 경우 심각한 오염원으로 작용할 수 있으며 이를 방지하기 위해서는 광산개발 후 폐석 및 광미의 처리가 중요하다. 특히 본 광산의 경우 방치된 폐갱구에서 흘러나오는 갱내수가 중성을 떠나 높은 EC와 Cu함량을 보이고 있어 Cu에 의한 지하수 및 하천수의 중금속 오염이나 TDS를 높일 우려가 있어, 광산개발 후의 폐석의 처리뿐만 아니라 열려진 갱구의 사후처리 또한 중요함을 다시 한번 시사해준다.

사 사

본 연구 수행을 위해 야외조사 및 실내실험에 도움을 준 전북대 지구환경과학과의 김용현, 김지연을 비롯한 학생들의 노고에 감사하며, 분석에 도움을 준 전북대 지구환경과학과의 이지선 및 충남대학교 지질학과의 이현구 교수님과 오희경 님에게 감사의 말을 전합니다. 본 연구는 전북대학교 2000년도 연구기반조성 연구비 지원에 의해 이루어졌음을 알리며 이에 감사한다.

참고문헌

김경웅 (1997) 달성광산 지역 토양의 중금속 함량 분석결과에의 평가. 지하수환경학회, 4권, p. 20-26.
 김규봉, 최위찬, 황재하, 김정환 (1984) 오수도폭 (1:50,000). 한국동력자원연구소.
 김상현, 전효택 (1993) 삼보 연·아연·중정석 광산 주변 하상퇴적물에서의 중금속 오염 연구. 광산지질, 26권, p. 217-226.
 나춘기, 전서령 (1995) 모악 금·은광산에 방치된 폐석이 주변 수계 및 생태계에 미치는 환경적 영향. 자원환경지질, 28권, p. 221-229.
 대한 광업진흥공사 (1990) 한국의 광산. 12호 (금속편)
 이무성, 전서령, 나춘기, 정재일 (1996) 동진 금·은·동광산 주변에 방치된 폐석의 환경적 영향. 자원환경지질, 29권, p. 45-55.
 이재영, 김종근, 이인호, 이진국 (1993) 경북 지역 폐금속광

산이 환경에 미치는 영향. 광산지질, 26권, p. 465-472.
 정명채 (1994) 토양중의 중금속 연속추출방법과 사례연구. 자원환경지질, 27권, p. 469-477.
 山本 莊毅 (1986) 地下水學用語辭典, 古今書院.
 Benjamin, M.M. (1983) Adsorption and surface precipitation of metals on amorphous iron oxyhydroxide. Environ. Sci. Technol., v. 17, p. 686-692.
 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. Japan Reso. Geol., v. 49, p. 113-120.
 Cidu, R., Caboi, R., Fanfani, L. and Frau, F. (1997) Acid drainage from sulfides hosting gold mineralization (Furei, Sardinia). Environ. Geol., v. 30, p. 231-237.
 Cravotta, III C.A. and Trahan, M.K. (1999) Limestone drains to increase pH and remove dissolved metals from acidic mine drainage. Appl. Geochem., v. 14, p. 581-606.
 Faure, G. (1991) Inorganic Geochemistry. Macmillan, Inc., p. 439-472.
 Jeon, S.R. (2000) Environmental Geochemistry of the Abandoned Dongjin Au-Ag-Cu mine area, Korea. Ph.D. Thesis, Tsukuba Uni. Japan.
 Jung, M.C. (2001) Heavy metal contamination of soils and waters in and around the Imcheon Au-Ag mine, Korea. Appl. Geochem., v. 16, p. 1369-1375.
 Kimball, B.A., Callender, E. and Axtmann, E.V. (1995) Effects of colloids on metal transport in a river receiving acid mine drainage, upper Arkansas River, Colorado, U.S.A. Appl. Geochem. v. 10, p. 285-306.
 Ma, Lena Q. and Rao, Gade N. (1997) Chemical fractionation of cadmium, copper, nickel, and zinc in contaminated soils. J. Environ. Quality, v. 26, p. 259-264.
 Piper, A.M. (1944) A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. Trans. Amer. Geophys. Union, v. 25, p. 914-923.
 Plant, J.A. and Raisell, R. (1983) Principles of environmental geochemistry. in "Applied Environmental Geochemistry". Thornton, I. Academic Press, London, p. 1-39.
 Tessier, A., Campbell, P.G.C. and Bisson, M. (1979) Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. Analytical chemistry, v. 51, p. 844-851.

2002년 4월 24일 원고접수, 2002년 5월 13일 게재승인.