

## 폐석탄광 주변 지구화학적 환경의 중금속 오염 평가 - 강릉탄전 임곡천 일대를 중심으로 -

전효택\* · 김주용\*\* · 최시영\*\*

### Evaluation of Heavy Metal Contamination in Geochemical Environment around the Abandoned Coal Mine - With special reference to geochemical environment around the Imgok Creek in the Gangreung Coal Field -

Hyo-Taek Chon, Ju-Yong Kim and Si-Young Choi

**ABSTRACT :** The Imgok Creek is located in the Gangreung coal field, which has been known that sulfides are more abundant than other coal fields in Korea, and it has been severely contaminated by acid mine drainage (AMD) discharging from the abandoned coal mines, such as the Youngdong, the Dongduk and the Waryong coal mines. The purposes of this study are to synthetically assess the contamination of natural water, stream sediment and cultivated soils, and to provide the basic data for AMD treatment. Geochemical samples were collected in December, 1996 (dry season) and April, 1997 (after three day's rainfall). TDS of the Youngdong mine water was remarkably higher than those of other mine waters. In the Imgok Creek, concentrations of most elements, except Fe decreased with distance by dilution caused by the inflow of uncontaminated tributaries. From the results of MAMDI and  $I_{geo}$  calculation, the Youngdong coal mine was the main contamination source of the study area. Groundwater pollution was not yet confirmed in this study and the paddy and farm land soils were also not yet contaminated by mining activity based on the pollution index ranging from 0.27 to 0.47.

### 서 론

국내 석탄광은 수십 년 이상 가행되어 왔고, 탄광의 가행에 따른 갱내수와 폐광 후의 침출수가 방류되어 탄광 지역의 토양과 수계는 지속적으로 오염되어 왔다. 특히 지하 석탄광과 폐탄 더미로부터 나오는 산성광산배수(Acid Mine Drainage, AMD) 문제는 최근 상당히 심각하게 대두되기 시작하였다. 산성광산배수는 대기중에 노출된 황화광물이 산소 및 물과 반응하여 산화되면서 형성되며, pH가 낮고,  $SO_4$ 를 비롯한 Fe, Al, Mn 등 금속 함량이 높은 것이 특징이다(Sengupta, 1993). 산성광산

배수는 낮은 pH로 인해 독성 중금속의 이동도가 높아 주변 지하수와 지표수를 오염시켜 수중 생태계를 파괴할 뿐만 아니라 인간 활동에도 악영향을 주고 있다. 또한 오염되지 않은 지표수와 섞여 희석되면서 하천바닥에 적갈색 또는 백색의 침전물을 다량 발생시켜 미관을 해친다(Kelly, 1988). 최근의 조사 결과에 따르면 국내의 경우 152개의 탄광에서 하루에 4만 8천여 톤의 광산 폐수가 배출되고 있으며(배봉구, 1996), 광산폐수에 의한 주변 하천의 오염 실태가 종종 보고되고 있다(지상우 등, 1997; 허봉, 유재영, 1998). 따라서 폐탄광에서 유출되는 갱내 산성배수로 인한 오염을 사전에 방지하기 위해 효율적이고 종합적인 대처방안의 수립이 시급히 요청되고 있다.

본 연구에서는 영동탄광, 동덕탄광, 영진탄광, 와룡태우탄광 등의 폐탄광이 인근에 존재하는 강원도 강릉시 강동면 임곡리 임곡천 주변의 자연수, 하상퇴적물 및 토양에서의 중금속 오염 양상을 지수 도입을 통해 평가하였으

\* 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 (School of Civil, Urban, and Geosystem Engineering, College of Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea), E-mail: chon@plaza.snu.ac.kr

\*\* 서울대학교 대학원 자원공학과 (Department of Mineral & Petroleum Engineering, College of Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

며, 폐탄광으로 인한 오염 방지 및 처리를 위한 기초 자료로 활용하고자 하였다.

천을 중심으로 하는 북위 37°38' 80", 동경 128°56' 30"에서 북위 37°43' 80", 동경 129°00' 00"의 일대이다. 연구대상지역 남단의 큰골에서 시작되는 임곡천은 영동탄광 및 영진탄광에서 발생하는 갯내수 및 폐석침출수가 유입되는 영동지류, 동덕탄광의 갯내수 및 폐석침출수가 유입되는 동덕지류, 와룡태우광산 갯내수, 그외 소규모의

**연구대상지역의 지형 및 지질**

연구대상지역은 강원도 강릉시 강동면 임곡리의 임곡

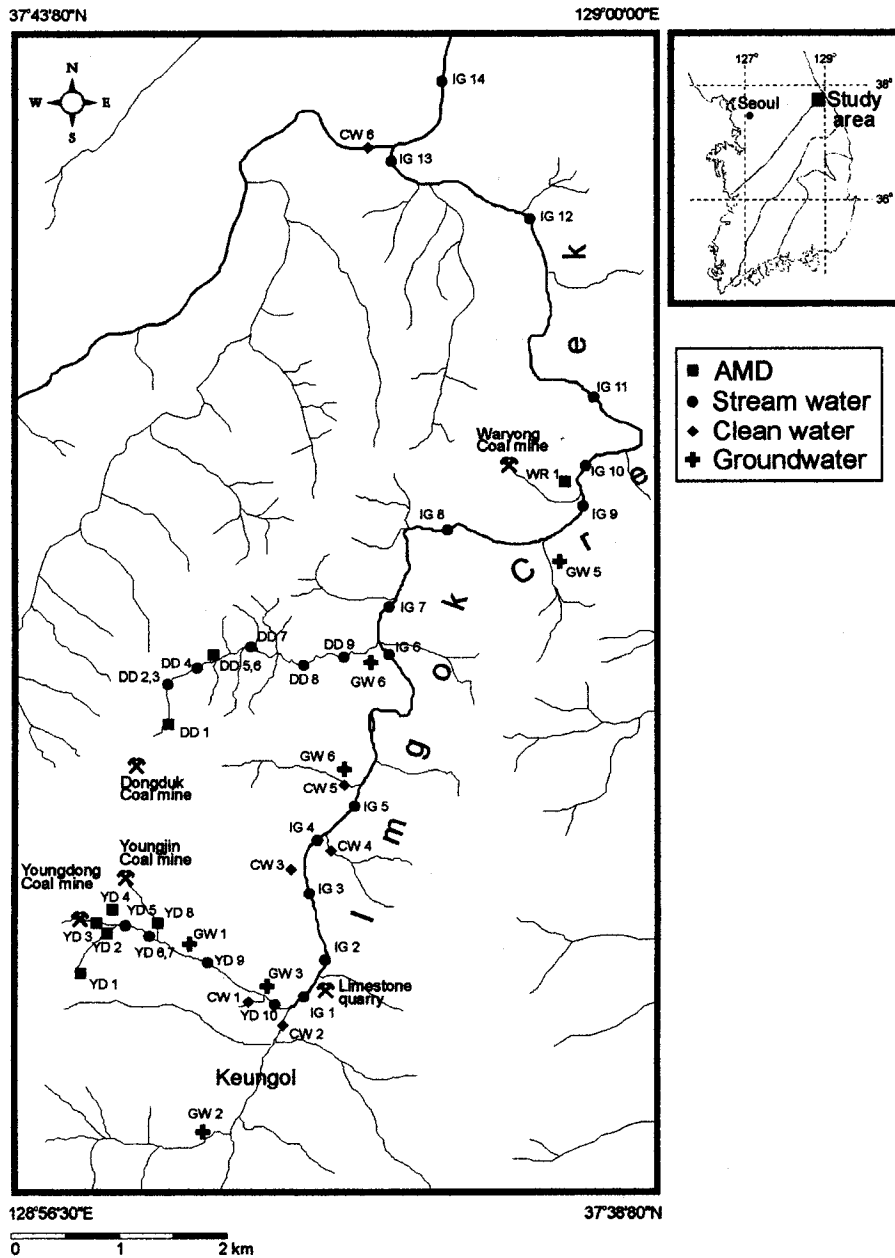


Fig. 1. Location map of water samples in the study area.

깨끗한 지류가 합류되면서 흐르다가 군선강과 만나 동해로 유입된다. 또한 영동지류와 큰골지류가 합류되는 임곡천 시작 지점의 직하부 동쪽에 석회석 채석장이 존재하며 미분쇄된 석회석더미를 거쳐 나오는 침출수가 천공을 통해 소량으로 유입되고 있다. 영동지류의 최상부에 서부터 군선강과 만나기까지 임곡천의 길이는 약 12 km이며, 전 수계에 걸쳐 하천 바닥에 yellow boy가 형성되어 있다.

성되어 있다.

연구지역의 지질은 하부에 선캄브리아기의 태백산 변성암체와 이를 부정합으로 피복한 고생대 조선계층이 있고, 다시 그 위로 평안계층이 위치하며 이들을 관입한 화강암체가 자리한다. 고생대층은 장덕통과 대석회암통으로 이루어져 있는데 연구지역 주변에는 대석회암통의 석빙산 석회암층이 분포하고 있다. 이를 부정합으로 덮고 있

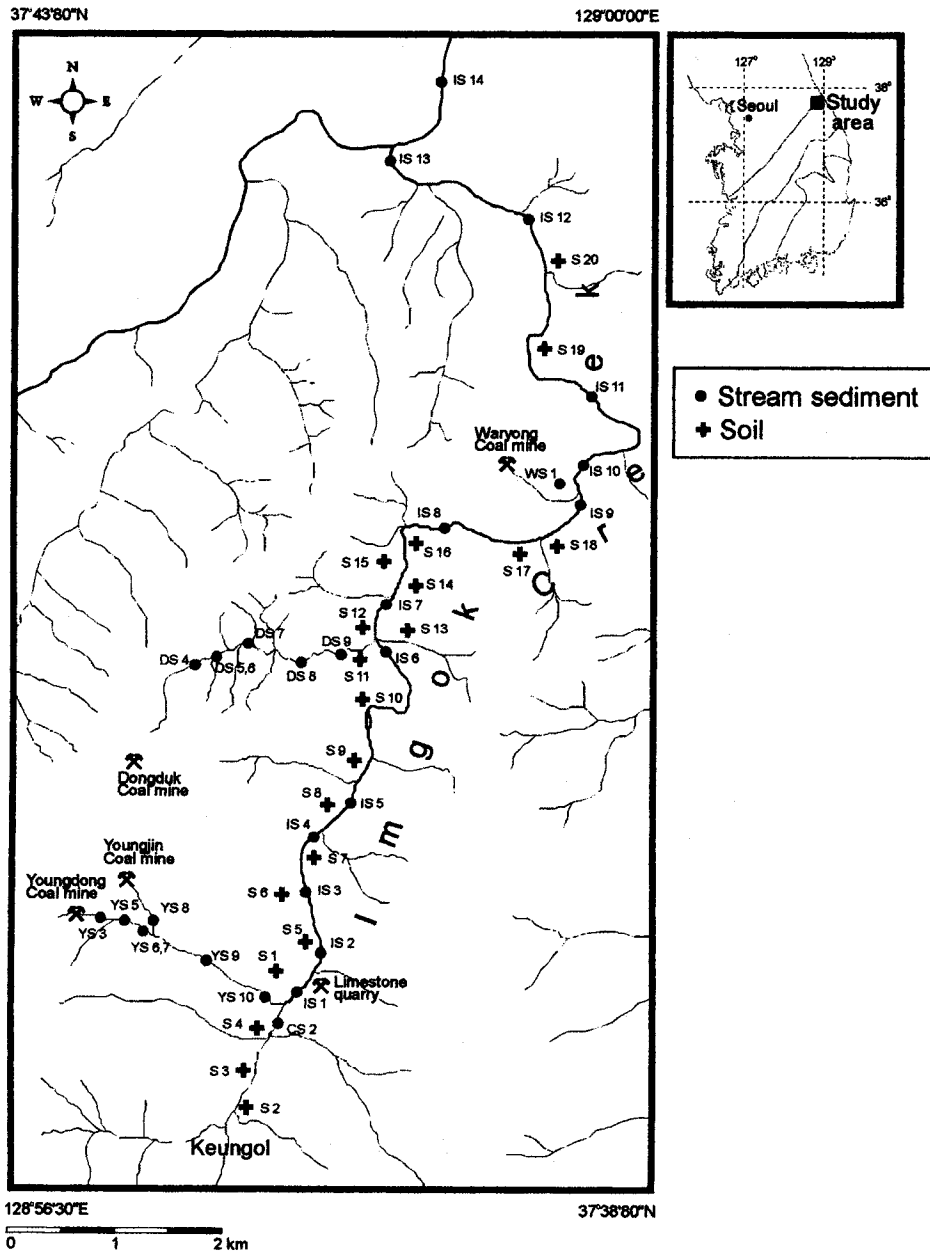


Fig. 2. Location map of soil and stream sediments samples in the study area.

는 평안계층에는 하부로부터 홍점통, 사동통, 고방산통이 자리하고 있다 (대한광업진흥공사, 1990). 본 지역의 주 탄층은 사동통에 협재되어 나타난다.

### 시료채취 및 분석

계절적 변화 양상을 고려하여 1996년 12월과 1997년 4월 두차례에 걸쳐 시료채취가 이루어졌다. 건기인 1996년 12월에 이루어진 1차 시료채취에서는 갯내수 및 폐석침출수를 포함하는 하천수 29개와 지하수 5개 등 총 34개의 자연수를 채취하였으며, 하천수를 채취한 동일지점에서 24개의 하상퇴적물을 채취하였다. 또한 임곡천 주변에 형성된 논/밭의 경작지에서 11개의 토양을 채취하였다. 사흘간의 강우로 우기의 특성을 보이는 1997년 4월에 이루어진 2차 시료채취에서는 지하수 6개를 포함한 47개의 자연수, 30개의 하상퇴적물, 20개의 토양을 채취하였다.

시료수가 많은 2차 시료채취 시기를 토대로 한 시료채취 위치를 Fig. 1과 2에 나타내었다. 영동지류에서 채취한 하천수 및 퇴적물을 각각 YD와 YS로, 동덕지류의 경우 DD와 DS로, 와룡태우광산의 갯내수와 퇴적물을 WR과 WS로 표기하였으며, 영동지류가 큰골지류 (CW 2)와 합류되는 직후부터를 임곡천으로 간주하여 하천수와 퇴적물을 각각 IG와 IS로 표기하였다. 광산폐수의 유입이 없는 깨끗한 지류에서는 임곡천과 유입되기 직전의 한 지점에서 하천수와 퇴적물을 채취하였으며 CW 및 CS로 표기하였다. 지하수는 GW로, 토양은 S로 표기하였다.

자연수는 수동펌프를 이용, 동일 압력하에서 pore size 0.45  $\mu\text{m}$  cellulose nitrate membrane filter에 통과시켜 부유물질을 제거한 후 양이온 분석용과 음이온 분석용으로 나누어 보관하였다. 시간 경과에 따라 시료용기 벽면에 양이온이 흡착되는 것을 방지하기 위하여 양이온 분석용 시료에는 농질산을 가해 pH를 2 이하로 조정하였다. 시료채수 이후 분석까지 모든 운반 및 저장은 아이스박스 와 냉장고를 이용하여 저온상태를 유지하였다. 하상퇴적물 시료는 하천수 채취시 동일지점에서 하천을 가로지르면서 9군데에서 부시료를 채취하여 하나의 완전시료로 하였으며 500 ml의 용기에 담아 밀봉하여 저온상태로 보관하였다. 토양 시료는 모종삽을 이용하여 10 cm 이내의 상부토양을 채취하였으며 20개의 부시료를 하나의 완전시료로 하였다. 하상퇴적물 및 토양 시료는 공기중에서 자연건조시켜 막자와 유발을 이용하여 분리시킨 후 화학분석을 위해 -80 mesh의 입도로 체질하였다.

자연수 시료의 경우 수소이온농도 (이하 pH), 산화환원전위 (이하 Eh), 온도, 전기전도도 등의 물리적 성분은 현

장에서 채수 즉시 Orion사의 SA720 pH/Ion meter와 portable 290A pH meter 및 Conductivity/TDS meter Model 124를 이용하여 측정하였다. 화학 성분중 양이온의 정량 분석은 ICP-AES, ICP-MS 및 AAS로, 음이온 분석은 IC와 적정법을 이용하여 분석하였다. 이상의 시료 채수에서 분석까지의 실험 과정은 Minear and Keith (1982), Greenberg *et al.* (1992)과 Jackson (1993)이 제시한 표준방법에 충실히 따랐다.

하상퇴적물 및 토양 시료내의 중금속 함량을 알아내기 위해 화학분석을 실시하여 AAS로 Fe, Mn, Cu, Pb, Zn, Cd, Ni, Cr 및 Co의 함량을 측정하였다. 모든 화학분석 과정에서 reference materials, duplicates, blank를 첨가하여 quality control을 실시하였다.

### 결과 및 고찰

#### 자연수의 지구화학

##### 갯내수 및 폐석침출수

각 폐탄광에서 발생하는 갯내수 및 폐석침출수에 대한 pH, Eh, TDS 및 주요 용존이온들의 함량을 Table 1에 나타내었다. TDS (Total Dissolved Solids, 총용존물질)는 분석된 모든 원소의 함량을 더한 값이다. 이 지역의 폐탄광에서 발생하는 갯내수 및 폐석침출수는 YD 1, 2, 4 (영동탄광 폐석침출수), YD 3 (영동탄광 갯내수), YD 8 (영진탄광 배출수), DD 1, 6 (동덕탄광 폐석침출수), DD 5 (동덕탄광 갯내수), WR 1 (와룡태우광산 갯내수) 등이다.

1997년 4월에 채수한 영동탄광 갯내수 (pH 4.22)를 제외한 폐탄광의 갯내수 및 폐석침출수가 자연적인 환경에서 발견하기 힘든 pH 4 이하의 강산성을 보이며, Fe 및  $\text{SO}_4$ 의 함량이 높아 황철석 등 황화광물의 산화에서 비롯된 전형적인 산성광산배수의 특성을 보인다. pH와 TDS의 시기별 특성을 살펴 보면 대부분의 시료가 1997년 4월에서 강우에 의한 희석효과로 pH가 증가하고 TDS는 감소하는 특성을 보이나 폐석침출수 (YD 4)의 경우 오히려 강우 후 pH가 감소하고 TDS는 크게 증가하는 특성을 보인다. 이는 폐석과 증류수의 반응실험 결과 (미발표) 시간에 따른 TDS의 상승률이 낮음을 고려할 때 폐석 사이의 수분 증발시 폐석 표면에 형성된 침전물 (현장관찰)이 강우시 쉽게 용해된 결과로 판단된다. Fe, Al, Mn의 경우 다른 탄광에 비해 영동탄광의 갯내수와 폐석침출수에서 특히 높은 값들이 나타나며, 갯내수는 강우에 의한 희석으로 함량이 크게 감소하는 반면 폐석침출수는 강우 후 함량이 증가하는 특성을 보인다.

**Table 1.** The physical and chemical constituents of mine drainage discharging from the abandoned coal mines in the study area.

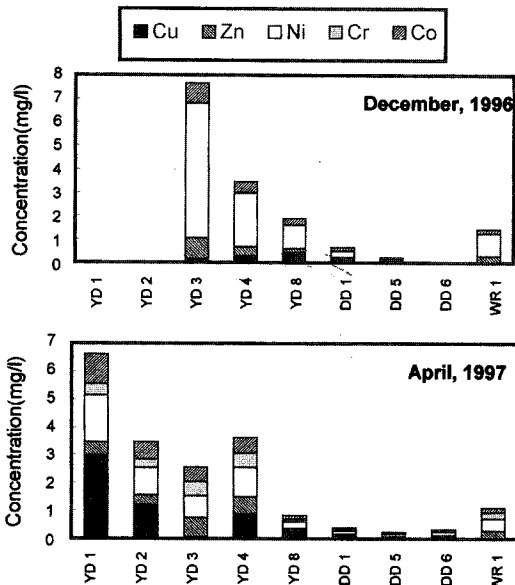
Period	Sample	pH	Eh (mv)	TDS (mg/l)	Fe (mg/l)	Al (mg/l)	Mn (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	SO <sub>4</sub> (mg/l)
Dec., 1996	YD 3	3.49	183	5045	1033.0	103.1	20.6	289.0	262.0	3938.5
	YD 4	2.51	587	2053	216.6	76.3	10.7	41.6	82.0	1612.5
	YD 8	2.73	554	1306	71.8	103.0	1.0	0.5	9.8	1108.7
	DD 1	2.73	517	572	11.3	0.0	0.4	2.4	14.2	533.4
	DD 5	3.66	370	336	0.6	0.3	0.9	38.1	16.1	300.6
	WR 1	3.28	305	1463	169.4	63.0	2.7	14.0	28.7	1167.9
Apr., 1997	YD 1	2.60	580	5820	311.1	337.6	4.8	23.7	27.7	5046.9
	YD 2	2.75	517	2711	147.3	189.8	4.2	30.5	24.0	2276.9
	YD 3	4.22	230	3642	322.3	83.9	14.9	233.5	111.3	2851.4
	YD 4	2.43	585	4161	239.4	148.5	7.0	108.2	62.3	3539.0
	YD 8	3.13	517	777	24.6	42.6	0.0	15.5	7.5	670.0
	DD 1	2.82	453	391	17.5	13.3	0.0	6.3	4.0	334.5
	DD 5	4.07	351	389	0.0	9.5	0.9	66.1	17.7	278.7
	DD 6	3.45	480	426	3.0	17.1	0.0	38.1	11.2	337.6
	WR 1	3.88	261	1369	144.1	53.4	1.8	63.2	32.5	1046.0

자연적으로 산성광산배수를 중화시키는 대표적인 광물로 탄산염 광물을 들 수 있다 (Hutchison and Ellison, 1992). 영동탄광 갯내수 (YD 3)의 경우 다른 갯내수 및 폐석침출수에 비해 pH가 높고, 특히 Ca 및 Mg의 함량이 높아 탄산염 광물의 용해에 의한 수소산도의 완충작용이 더 크게 일어나고 있음을 알 수 있다.

갯내수 및 폐석침출수 내의 미량 중금속 원소들의 함량을 Fig. 3에 나타내었다. 건기인 1996년 12월에는 영동탄

광 갯내수에서 함량이 높으며, 강우 후 갯내수에서의 함량은 감소하고 폐석침출수에서는 증가하는 주용존양이온과 유사한 특성을 보인다.

이상의 결과로부터 영동탄광에서 발생하는 갯내수 및 폐석침출수가 연구지역의 주요염원임을 예상할 수 있다. 반면 동덕탄광의 경우 SO<sub>4</sub>를 비롯한 용존 양이온들의 함량이 특히 낮아 산화될 수 있는 황화광물이 매우 적은 것으로 판단된다.



**Fig. 3.** Toxic heavy metal concentrations of the mine drainage in different seasons.

**하천수**

영동탄광의 갯내수 및 폐석침출수가 하나로 합쳐진 YD 5 지점부터 하천수에서의 거리에 따른 pH, TDS 및 용존이온들의 거동 특성을 Fig. 4와 5에 도시하였다.

pH의 변화를 살펴 보면 1996년 12월의 경우 깨끗한 지류의 유입이 없는 영동지류에서 거의 일정한 값을 보이다가 임곡천이 시작되는 지점 (IG 1) 직하부의 석회석 채석장에서 유출되는 pH 10 이상의 강알칼리성 배출수가 유입되면서 급격히 상승하며 하류로 갈수록 상승 폭이 줄어든다. 1997년 4월의 경우도 비슷한 양상을 보이나 임곡천 시작 지점 이후의 pH 상승은 1996년 12월에는 건천이었던 큰골지류 (CW 2)에서 pH 7.8의 계곡수가 다량 유입되었기 때문이며, 시료 채취시 석회석 채석장의 배출수 유입은 극소량으로 확인되었다. 전반적으로 강우에 의해 깨끗한 지류의 유입이 많았던 1997년 4월에 pH 상승 폭이 더 컸으며, 하천의 기저에 석빙산 석회암층이 분포한다는 점을 고려할 때 기저유출에 의한 pH 상승효과 (Filipek *et al.*, 1987)도 예상할 수 있다.

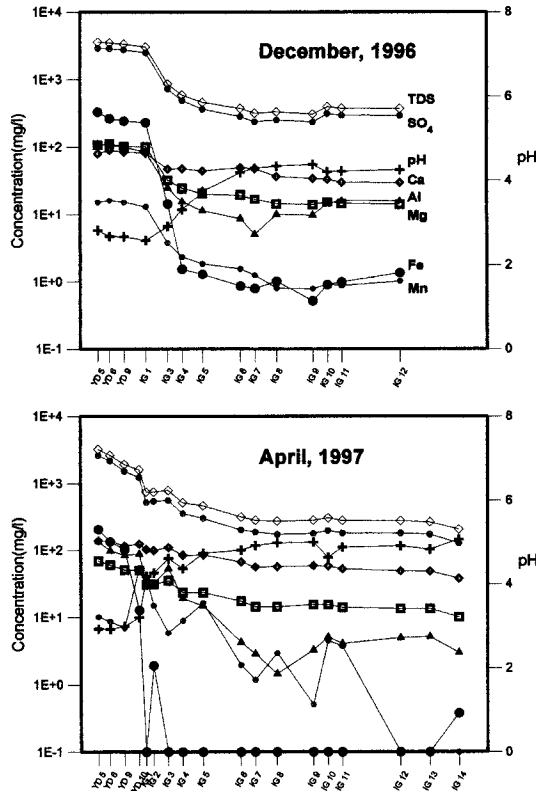


Fig. 4. Variations of pH, TDS and major ion concentrations in the Imgok stream waters against distance.

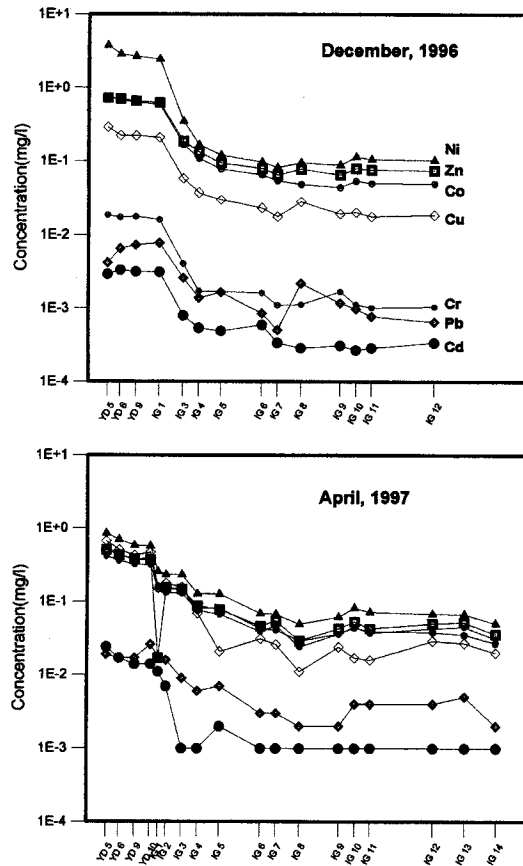


Fig. 5. Variations of toxic heavy metal concentrations in the Imgok stream waters against distance.

일반적으로  $SO_4$  이온의 경우 침전 및 흡착반응에는 극소량만 관여하며 대부분 회석에 의해 그 함량이 감소하는 보편적인 거동을 보이는 것으로 알려져 있다 (Nordstrom and Munoz, 1986; Bencala *et al.*, 1987). Fe를 제외한 용존 양이온들은  $SO_4$  이온과 동일한 변화양상을 보이며 회석에 의해 그 함량이 감소하는 거동 특성을 보인다. 반면 Fe의 경우 pH의 상승이 일어나는 임곡천 상류에서 침전되면서 함량이 급격히 감소하는 거동 특성을 보인다 (Fig. 4). 현장조사에서 관찰된 갈색침전물이 이를 뒷받침한다. 산성광산배수에서 철 및 알루미늄 침전물에 흡착 또는 공침전되는 특성을 보인다 (McKnight *et al.*, 1988)고 알려진 미량 중금속 원소의 경우 변화양상이 Fe 보다는  $SO_4$  이온과 유사해 (Fig. 5) 흡착에 의한 효과와 회석에 의한 효과를 구분하기 어렵다.

**지하수**

식수용으로 사용하는 하천 주변 인가에서 채수한 지하수의 분석 결과를 국내 먹는샘물 수질 기준과 비교하여 Table 2에 제시하였다. 모든 지하수에 대해 분석된 함량

Table 2. Comparison of groundwater quality and drinking-water standard.

Item	Ranges in ground water		Drinking-water standards
	December, 1996 (5) <sup>a)</sup>	April, 1997 (6) <sup>a)</sup>	
pH	6.5-6.7	6.1-7.2	5.8-8.5
Fe (mg/l)	0.11-0.24	n.d.	≤0.3
Al (mg/l)	n.d.-0.01	n.d.-0.01	≤0.2
Mn (mg/l)	n.d.-0.02	n.d.	≤0.3
Cu (mg/l)	0.003-0.006	0.003-0.008	≤1.0
Pb (mg/l)	n.d.-0.003	0.001-0.006	≤0.05
Zn (mg/l)	0.007-0.038	n.d.-0.042	≤1.0
Cd (mg/l)	n.d. <sup>b)</sup>	n.d.	≤0.01
Cr <sup>6+</sup> (mg/l)	0.001-0.002(T <sup>c)</sup> )	0.002-0.032(T <sup>c)</sup> )	≤0.5
As (mg/l)	n.d.	n.d.	≤0.05
Se (mg/l)	n.d.	n.d.-0.006	≤0.01
F <sup>-</sup> (mg/l)	n.d.	n.d.-0.198	≤2.0
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	3.47-17.67	4.08-8.72	≤150
NO <sub>3</sub> -N (mg/l)	n.d.-8.24	1.12-3.86	≤10
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	1.3-33.9	1.4-32.5	≤200

<sup>a)</sup> number of samples, <sup>b)</sup> not determined, <sup>c)</sup> total

범위가 먹는샘물 수질 기준치를 초과하는 것이 없어 산성 광산배수나 오염된 하천의 지하수로의 유입은 없는 것으로 판단된다.

**자연수의 오염 평가**

갱내수 및 폐석침출수 등 산성광산배수에 의한 연구지역 수계의 오염을 정량적으로 평가하기 위해 최우진(1997)에 의해 제안된 AMDI (Acid Mine Drainage Index)를 보완한 지수를 도입하였다. 최우진에 의해 제안된 AMDI의 경우 서로 다른 산성광산배수끼리의 상대적인 비교는 가능하지만 각각의 광산배수가 어느 정도 오염되었는지에 대한 절대적인 정보는 제공하지 못하기 때문에 본 연구에서는 적절한 기준을 선정하여 산성광산배수 및 그로 인해 오염된 지표수의 오염수준을 평가하고자 했다. 이를 위해 각 시료의 AMDI를 구한 후 오염기준을 투입하여 구한 표준 AMDI로 나누어 MAMDI (Modified Acid Mine Drainage Index)를 구하였다. pH, Fe, Mn, Cu, Zn의 경우 광산갱수 및 침출수별 수질과 "오염물질 배출허용기준 (가지역)" (pH 5.8, Fe 10 mg/l, Mn 10 mg/l, Cu 3 mg/l, Zn 5 mg/l)을, Al은 석탄산업합리화사업단에서 소택지의 폐수정화목표수질 (5 mg/l)을, SO<sub>4</sub>의 경우 먹는샘물기준 (200 mg/l)을 각각 오염기준이 되는 표준 AMDI의 자료로 사용하였다. 따라서 MAMDI가 1보다 큰 값을 나타내는 시료는 시급한 처리가 요망되는 것으로 판단할 수 있다. 각 자연수 시료의 AMDI와 MAMDI를 계산하는 과정은 아래 식과 같다.

$$AMDI_i = \frac{[\sum \text{water quality ratings}]^2}{100}$$

$$MAMDI_i = AMDI_{std} / AMDI_i$$

where, MAMDI<sub>i</sub> = the MAMDI of the i th water sample

AMDI<sub>i</sub> = the AMDI of the i th water sample

AMDI<sub>std</sub> = the AMDI of the calculated standard

연구지역에서의 계산된 MAMDI를 Fig. 6과 7에 나타내었다. 전체적으로 1996년 12월의 MAMDI가 1997년 4월 때보다 더 높은 값을 보이고 있어 강우에 의한 희석 효과를 다시 확인할 수 있으며 1997년 4월의 경우만 비교하면 영동지류에서의 MAMDI가 1.95~2.84로 동덕지류의 0.72~1.30, 영진광업소의 1.37, 와룡태우광산의 1.55보다 높은값을 보여 영동탄광의 산성광산배수가 임곡천의 주된 오염원임을 알 수 있다.

휴·폐광된 석탄광과 금속광에 대한 광범위한 지구화

학적 연구가 수행되어 석탄광과 금속광별 산성광산배수의 오염지수 (MADI)에 투입할 변수의 선정과 가중치의 부여, 엄밀한 기준의 선정이 정확히 수행되면 정량적인 기준이 도입됨으로써 수 천개 이상으로 추정되는 폐석탄광과 금속광에서 유출되는 산성광산배수의 처리기준을 선정하는데 있어 도움이 되리라 판단된다.

**하상퇴적물의 오염평가**

하상퇴적물에서의 중금속 오염을 평가하기 위해 "축적지수 (Index of Geoaccumulation, I<sub>geo</sub>)"를 계산하였다. 일반적으로 토양의 경우에서 여러 중금속에 의한 복합적인 오염양상을 평가하기 위해 이용되는 오염지수의 개념을 본 연구지역에 도입할 경우 퇴적물내의 Fe 함량이 너무 높아 다른 중금속들의 오염양상이 가리워질 것으로 판단되어 각 원소별 오염정도를 평가하는 축적지수를 도입하였다. 축적지수의 계산은 다음과 같다 (Müller, 1979).

$$I_{geo} = \text{Log}_2\{C_n / (1.5 \times B_n)\}$$

여기서 C<sub>n</sub>은 측정된 원소 n의 함량을 의미하며, B<sub>n</sub>은 퇴적물에서의 각 원소의 배경값, 즉 오염되지 않은 퇴적물내의 함량 (Fe 17,000; Mn 300; Cu 25; Pb 90; Zn 90; Cd 2; Ni 20; Cr 25; Co 20 (mg/kg))을 의미한다. 1.5는 배경값에 대해 지질학적 영향을 고려한 변수이다. 축적지수가 1~2의 범위이면 'moderately polluted'수준이며 그 값이 커질수록 오염강도는 심해진다. 시기간의 차이가 거의 없어 시료수가 많은 1997년 4월에 채취한 하상퇴적물에 대한 축적지수 계산 결과를 Table 3에 제시하였다. Fe의 경우 모든 수계에서 오염되어 있으며 특히 영동지류와 임곡천 상류가 축적지수 3이상으로 심하게 오염되어 있는 것으로 나타났다. Fe 다음으로 오염이 심한 원소는 Cu, Ni 순이다. Cu의 경우 영동지류를 제외한 임곡천 및 동덕지류가 'unpolluted to moderate pollution' 내지 'moderately polluted' 수준으로 오염되어 있다. Ni의 경우 주로 임곡천과 동덕지류의 일부가 Cu와 비슷한 수준으로 오염되어 있다.

**토양의 오염평가**

토양에서 분석된 중금속 원소들의 복합적인 오염양상을 평가하기 위해 오염지수 (Pollution Index, P.I.)를 구하였다. 오염지수의 계산에 도입한 기준값은 Kloke (1979)가 계산을 통해 FAO/WHO에서 지정하는 음식물중의 중금속의 허용한도치를 넘지 않을 토양의 문턱값 (Cu 100 mg/

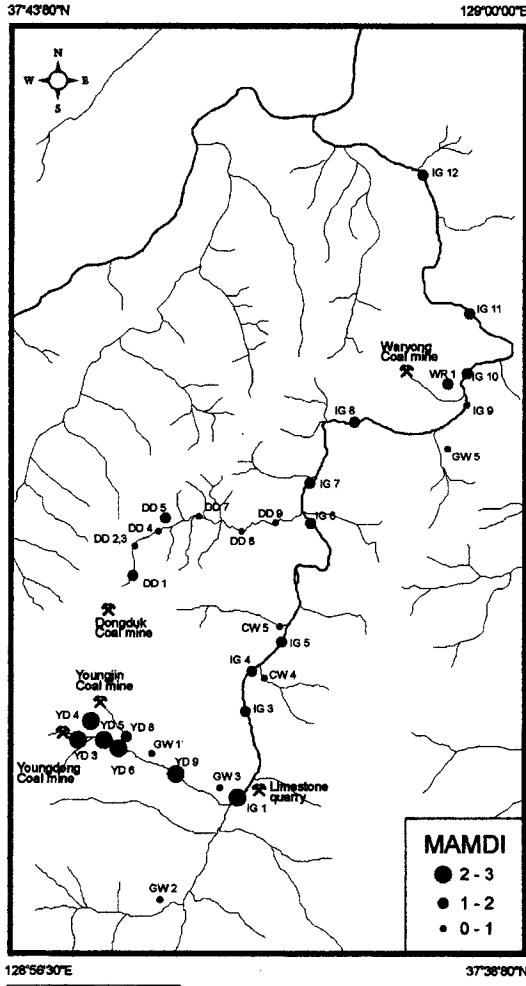


Fig. 6. MAMDI map of waters in the study area in December, 1996.

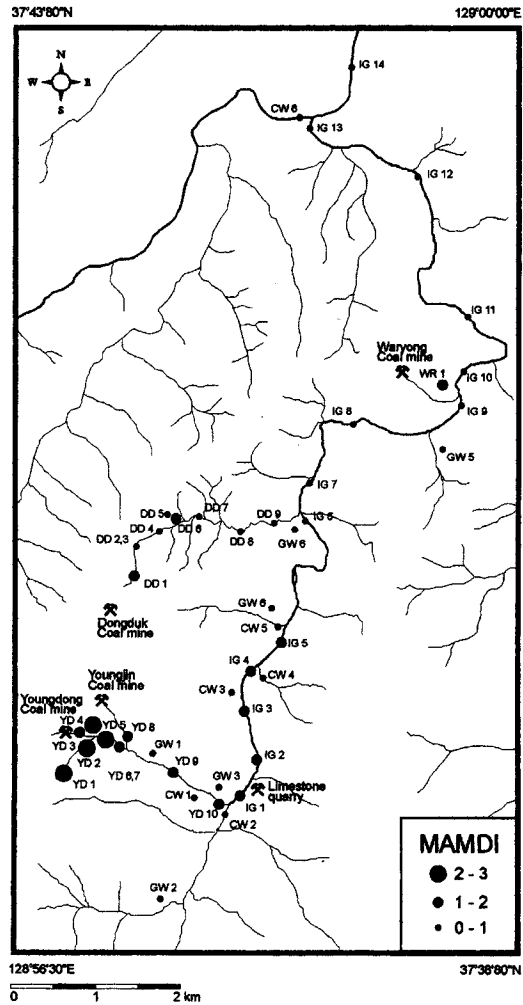


Fig. 7. MAMDI map of waters in the study area in April, 1997.

kg, Pb 100 mg/kg, Zn 300 mg/kg, Cd 3 mg/kg, Ni 100 mg/kg, Cr 100 mg/kg, Co 50 mg/kg)을 제시한 바 있어 본 연구에서는 이 값을 택했다. Fe 및 Mn의 경우 제시된 문턱값이 없어 계산에서 제외하였다. 7개 원소의 토양에서의 실제 함량을 각 원소의 오염문턱값으로 나눈 값들을 합한 뒤 원소의 갯수인 7로 나눈 값이 오염지수가 되며, 오염지수가 1 이상인 지역이 오염이 된 지역이다. 오염지수를 구하는 방법을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$P.I. = \frac{(Cu/100 + Pb/100 + Zn/300 + Cd/3 + Ni/100 + Cr/100 + Co/50)}{7}$$

연구지역 토양에서의 Fe, Mn 함량과 오염지수를 Table 4에 나타내었다. 오염지수는 0.27~0.47의 범위를

나타내 이 지역 토양이 광산활동에 의해 오염되지 않았음을 알 수 있다. 하지만 대부분의 토양이 오염지수 0.4 이하의 값을 갖는데 비해 1997년 4월 시료채취시 임곡천 하천수를 농업용수로 사용하고 있던 논토양 (S 10, 14, 16, 17)의 경우 Fe의 함량이 특히 높으며 오염지수가 0.39~0.47로 비교적 높아 임곡천의 관개수로의 사용이 농작물 성장에 악영향을 미칠 수 있는 가능성을 배제할 수는 없다. 실제로 이 지역 논은 소출저하로 밭으로 용도변경하는 사례가 더러 있다.

### 결론

폐탄광에서 비롯되는 산성광산배수와 이에 영향을 받



**Table 3.** Index of Geoaccumulation ( $I_{geo}$ ) of stream sediment collected in April, 1997.

Samples	Fe	Mn	Cu	Pb	Zn	Cd	Ni	Cr	Co
YS 3	3.22	-2.20	-0.18	-2.84	-2.91	-1.98	-1.27	-0.09	-1.71
YS 5	3.95	-4.07	0.18	-3.88	-3.44	-2.23	-1.02	-1.60	-1.37
YS 6	3.86	-4.07	-1.80	-3.59	-4.01	-3.42	-1.14	-1.69	-1.58
YS 7	3.79	-2.98	-1.55	-3.31	-3.54	-0.94	-0.53	-1.55	-0.98
YS 8	3.66	-2.98	-1.16	-4.01	-3.40	-1.98	-1.23	-0.97	-1.84
YS 9	3.60	-2.00	-0.38	-2.52	-3.01	-1.84	-0.84	-1.27	-1.58
YS 10	3.54	-0.26	-0.69	-2.73	-2.88	-1.58	-0.77	-1.16	-1.32
CS 2	1.09	0.14	0.05	-2.02	-1.09	-1.47	0.51	-0.46	-0.58
IS 1	2.82	-0.10	1.08	-2.04	-0.60	-0.80	1.24	-0.21	0.09
IS 2	3.91	-3.55	-1.46	-3.23	-3.54	-1.14	-0.56	-1.85	-1.23
IS 3	3.24	-1.94	0.60	-3.19	-1.77	-2.14	-0.71	-1.38	-1.47
IS 4	2.73	1.35	0.66	-2.35	-0.70	-1.42	1.39	-0.91	0.75
IS 5	2.32	-0.10	0.50	-2.35	-1.21	-0.98	0.68	-0.74	-0.27
IS 6	2.06	2.01	1.60	-2.38	0.19	-0.87	2.05	-0.44	1.87
IS 7	2.50	1.19	1.87	-2.17	0.53	-1.10	2.02	-0.19	1.45
IS 8	2.61	0.77	1.47	-2.08	-0.35	-1.02	1.53	-0.01	0.73
IS 9	2.16	-0.69	0.99	-2.58	-1.05	-1.87	0.30	-0.20	-0.60
WS 1	3.96	-5.49	-1.64	-4.31	-3.49	-2.06	-0.71	-1.19	-1.53
IS 10	2.07	-0.98	0.19	-2.70	-1.24	-1.84	0.00	-0.23	-0.56
IS 11	2.85	-2.22	-0.21	-3.27	-2.38	-1.14	-0.61	-0.77	-1.37
IS 12	2.34	-0.81	0.92	-1.81	-0.46	-0.58	0.29	-0.30	-0.58
IS 13	2.33	-1.65	1.00	-2.42	-0.99	-1.14	0.16	-0.23	-0.74
IS 14	2.69	-2.55	1.70	-2.21	-1.04	-0.87	-0.64	-0.64	-1.18
DS 4	0.59	-1.49	0.54	-2.54	-1.55	-1.53	-0.32	-0.53	-0.74
DS 5	3.45	-1.35	1.12	-2.25	-1.88	-1.91	-0.58	-0.36	-1.27
DS 6	3.13	1.17	1.52	-2.47	-0.97	-1.98	0.90	-0.01	1.37
DS 7	0.98	-0.68	0.43	-2.33	-1.67	-2.53	-0.53	-0.25	-0.84
DS 8	1.19	2.57	1.40	-1.80	-0.26	-1.27	1.70	-0.21	1.49
DS 9	0.43	-1.56	1.27	-2.13	-0.81	-2.14	0.32	-0.21	-0.49

**Table 4.** Concentration (mg/kg) of Fe, Mn and pollution index in soils.

Perid	Samples	Fe	Mn	P.I.	Perid	Samples	Fe	Mn	P.I.
Dec. 1996	S 1	34960	616	0.32	Apr. 1997	S 6	47440	484	0.37
	S 2	52200	868	0.36		S 7	38560	240	0.39
	S 3	45400	968	0.35		S 8	47280	436	0.36
	S 4	35920	796	0.35		S 9	38120	204	0.37
	S 6	33520	564	0.33		S 10	75080	240	0.45
	S 7	47120	420	0.33		S 11	31520	166	0.40
	S 10	30600	1000	0.36		S 12	31840	156	0.40
	S 11	34800	944	0.38		S 13	33000	116	0.31
	S 15	32440	196	0.27		S 14	79960	123	0.39
	S 17	27800	592	0.28		S 15	32600	236	0.39
Apr. 1997	S 20	47320	160	0.32	S 16	55960	288	0.45	
	S 1	35960	652	0.36	S 17	63080	480	0.47	
	S 2	38200	884	0.32	S 18	35000	158	0.39	
	S 3	48120	1288	0.39	S 19	41080	142	0.32	
	S 4	48560	804	0.36	S 20	38640	181	0.28	
	S 5	34680	636	0.30					

는 수계의 지구화학적 특성을 규명하고, 주변 지구화학적 환경의 중금속 오염을 평가하기 위해 강릉탄전에 위치한 임곡천을 대상으로 전기인 1996년 12월과 사흘간의 강우

로 우기의 특성을 보이는 1997년 4월 두차례에 걸쳐 자연 수, 하상퇴적물 및 토양을 채취하여 화학분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1. 영동탄광 갱내수 및 폐석침출수의 경우 강산성의 낮은 pH, 높은 TDS로 황화광물의 산화가 활발히 진행중인 반면 동덕탄광 배수의 수질은 영동탄광 수질보다 오염도가 덜하며 이는 산화될 수 있는 황화광물이 매우 적은 때문으로 판단된다. 영동탄광 폐석침출수는 건기보다 우기에 더 낮은 pH, 더 높은 TDS를 보인다.

2. 하천수의 경우 하류로 갈수록, 그리고 건기에 비해 우기에 pH는 증가하며 이에 따라 TDS는 급격히 감소한다. SO<sub>4</sub>를 비롯한 대부분의 용존이온은 하류로 갈수록 희석에 의해 함량이 감소하는 반면, Fe는 임곡천 상류에서 강알칼리성의 석회석광산 배출수나 깨끗한 지류의 유입으로 급격하게 침전된다.

3. 연구지역 지하수는 산성광산배수나 오염된 하천수의 유입이 없는 것으로 나타났다.

4. 자연수에 대한 종합적인 오염 평가를 위해 MAMDI를 구한 결과 건기가 우기 때보다 높아 강우에 의한 오염의 희석효과를 확인할 수 있으며, 영동지류에서의 MAMDI가 1.95~2.84로 가장 높은 값을 보여 영동탄광의 산성배수가 연구지역의 주된 오염원임을 알 수 있다.

5. 하상퇴적물의 오염을 평가하기 위해 축적지수를 구한 결과 Fe에 의해 모든 수계가 오염되어 있으며 특히 영동지류와 임곡천 상류가 심하게 오염되어 있다.

6. 연구지역 토양의 경우 오염지수가 0.27~0.47의 범위를 나타내 광산활동에 의한 오염가능성이 낮음을 알 수 있다.

## 사 사

이 연구는 학술진흥재단 1996년도 자유공모과제인 "폐석탄광 주변 지구화학적 환경의 중금속 오염 평가"의 일부이며, 분석에 협조하여준 과학재단지정 전략광물자원연구센터에 감사드린다.

## 참고문헌

대한석탄공사 (1990) 한국의 석탄광 (上). 410p.  
 배봉구 (1996) 석탄합리화사업단의 광해복구 및 환경개선 사

업활동. 대한자원환경지질학회 추계학술대회 논문집 : 폐탄광 일대의 지질환경오염과 광해복구, 대한자원환경지질학회, p.2-15.

지상우, 김선준, 이종배 (1997) 영동탄광 부근 수계에서의 중금속 존재형태와 흡착. 한국자원공학회지, v.34, p.326-335.

최우진 (1997) 산성폐수에 의해 오염된 지표수의 오염도 평가에 관한 연구. 한국자원공학회, 제68회 학술발표회 논문집, p.11-17.

허 봉, 유재영 (1998) 강원도 강릉시 강동면에 분포하는 폐탄광으로부터의 배수에 의한 임곡천 및 동해의 오염. 지하수환경, v.5, p.44-55.

Bencala, K.E., McKnight, D.M. and Zellweger, G.W. (1987) Evaluation of natural tracers in an acidic and metal-rich stream. Water Resour.Res., v.23, p.827-836.

Fillpek, L.H., Nordstrom, D.K., Ficklin, W.H. (1987) Interaction of acid mine drainage with waters and sediments of West Squaw creek in the West Shasts Mining District, California. Environ. Sci. Technol., v.21, p.368-396.

Greenberg, A.E., Clesceri, L.S. and Eaton, A.D., ed. (1992) Standard methods for examination of water and wastewater 18th ed.: American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) and Water Environment Federation (WEF), Washington DC, 1010p.

Hutchison, P.G. and Ellison, R.D. (1992) Mine waste management. Lewis Publishers, 654p.

Jackson, G.B. (1993) Applied water and spentwater chemistry: Laboratory manual. Van Nostrand Reinhold, New York, 688p.

Kelly, M. (1988) Mining and the freshwater environment. Elsevier Applied Science, 231p.

Kloke, A. (1979) Content of arsenic, cadmium, chromium, fluorine, lead, mercury, nickel in plants grown on contaminated soil: UN-ECE Symp.

McKnight, D.M., Kimball, B.A. and Bencala, K.E. (1988) Iron photoreduction and oxidation in an acidic mountain stream. Science, v.240, p.637-640.

Minear, R.A. and Keith, L.H. (1982) Water analysis I, II, III. Academic Press, 287p., 405p., and 406p.

Müller, G. (1979) Schwermetalle in den sedimenten des Rheines-Veränderungen seit 1971. Umschau Wiss. Technik v.79, p.778-783.

Nordstrom, D.K. and Munoz, J.L. (1986) Geochemical thermodynamics. Blackwell Sci. Pub., 477p.

Sengupta, M. (1993) Environmental impacts of mining: Monitoring, Restoration, and Control. Lewis publishers, 494p.

1998년 7월 24일 원고접수, 9월 14일 게재승인.