

폐탄광 배수에 의해 오염된 하천의 화학적 특성과 미생물 활성

조경숙 · 류희욱* · 장용근**

이화여자대학교 환경공학과, 숭실대학교 화학공학과*,
한국과학기술원 화학공학과 및 생물공정연구센터**

Chemical Characteristics and Microbial Activity of Streams Contaminated by the Abandoned Coal Mine Drainage

Cho, Kyoung-Suk, Hee Wook Ryu* and Young Keun Chang**

Department of Environmental Engineering, Ewha Womans University,

Department of Chemical Engineering, Soong Sil University,*

*Department of Chemical Engineering and BioProcess Engineering Research Center, KAIST***

ABSTRACT

A survey was carried out to investigate the contamination of streams by the acid mine drainage originated from the abandoned coal mines and coal refuse piles. The physico-chemical characteristics such as pH, sulfate and elements concentrations in the water and sediment in streams were analyzed. Microbial activity in the sediment was evaluated by measuring dehydrogenase activities. At sites contaminated by acid mine drainage, the pH of the water and sediment declined to acidic range from neutral due to the accumulation of sulfate. The dehydrogenase activity ranged from 12 to 170 $\mu\text{g-TPF} \cdot \text{g-dry soil}^{-1} \cdot 24\text{h}^{-1}$ at the contaminated sites, whereas uncontaminated sites had activities of 1,176~4,259 $\mu\text{g-TPF} \cdot \text{g-dry soil}^{-1} \cdot 24\text{h}^{-1}$. The dehydrogenase activity was significantly affected by low pH of the sediment, indicating that high concentration of sulfate inhibited microbial activity. The concentrations of heavy metals such as Pb and Fe in contaminated sediment (37~46 ppm Pb; 46,000~464,000 ppm Fe) were much higher than those in the uncontaminated sediment. The concentration of Al in the contaminated water acidified by coal mine drainage was in the range of 11 to 42 ppm. Compared with those in the uncontaminated sediment, the concentrations of Mn, Mg and Ca in contaminated sediment were low because of the leaching from soil to water by the acidified stream water.

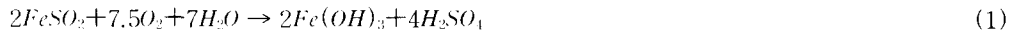
Key words: Abandoned coal mines, Acid mine drainage, Coal refuse piles, Dehydrogenase activity, Heavy metals, Sulfate

서 론

정부의 석탄산업의 합리화정책에 의해 대부분의 탄광들이 폐광되었다. 광산을 폐광할 경우 폐

광에 따른 주변 환경의 오염을 방지하기 위하여 광산으로부터 유출되는 배출수의 처리시설과 광산 주변에 버려진 석탄이나 폐광석 더미 (coal refuse)의 복토와 토지정리가 필요하다. 그러나, 우리나라의 폐광들의 경우 대부분이 영세 광산이었기 때문에 후처리를 하지 않고 그대로 방치해 둔 곳이 많다. 이로 인해 탄광촌의 가장 대표적인 환경오염 문제인 “yellow boy”라 불리는 적갈색의 침전물을 함유한 산성 광산배수가 폐광산과 폐광석 더미로부터 하천으로 대량 유입되어 하천과 주변 토양의 심각한 오염을 유발한다.

폐탄광의 오염은 석탄의 성분과 밀접한 관련이 있다. 석탄은 환원적 환경하에서 오랜 기간 밀폐되어 형성된 탄화수소화합물로 황철광 (FeS_2)을 포함하고 있다. 채광활동에 의하여 FeS_2 가 공기중에 노출되면 자가산화반응과 철-황산화미생물의 산화작용에 의해 많은 양의 황산이 생성되는 것으로 알려져 있다. FeS_2 의 산화기구는 복잡한데, 중성의 pH에서는 공기중 또는 수중의 산소에 의해 자연적인 산화반응이 일어나지만, pH가 4.5 이하에서는 자가산화반응이 억제된다. pH 4.5 - 3.5 범위에서는 철세균인 *Metallogenium*에 의해 FeS_2 의 산화반응이 진행되고, pH가 더 낮아져 3.5 이하로 저하되면 호산성 철세균인 *Thiobacillus ferrooxidans*에 의해 FeS_2 가 산화된다 (Atlas and Bartha 1987). FeS_2 의 전체적인 산화반응은 다음과 같이 요약될 수 있다.



이렇게 생성된 황산에 의해 광산배수는 강한 산성을 띠게 되며, 불용성의 수산화철화합물과 jarosite ($MFe_3(SO_4)_2(OH)_6$, M: mineral salts)의 갈색침전물 (yellow boy)을 함유한다. 이러한 강산성의 폐광배수가 폐광 주위의 하천에 유입되어 하천수와 하천 퇴적물의 오염을 유발한다. 산성 광산배수에 의한 환경오염 문제를 억제하기 위해서는 지하광산을 완전히 밀폐시키거나, 버려진 석탄이나 폐광석 더미를 복토해서 황철광의 산화에 필요한 산소 공급을 차단하는 방법이 있으나, 완전한 차단은 현실적으로 불가능하다.

본 연구는 폐광되어 노천에 그대로 방치되어 있는 폐탄광과 폐광석 더미에서 유출되는 산성배수의 유입으로 인한 주변 하천의 오염 상태에 대하여 조사하였다. 하천의 오염도를 측정하기 위해 하천수와 하상퇴적물의 pH, 황산염이온 농도 및 부기원소 농도 등 물리화학적 성상을 조사하였고, 하상퇴적물에 서식하는 미생물의 탈수소효소활성을 측정하여 생물체에 미치는 영향을 조사 연구하였다.

조사지 개황

강원도 태백시를 흐르는 황지천을 중심으로 폐탄광이 산재되어 있는 주변의 지천을 조사대상으로 하였다 (Fig. 1). 황지천 주변에는 많은 폐탄광들과 폐광석들이 산재해 있는 곳으로 정부의 석탄 산업합리화 정책에 의해 1992년 폐광되어 방치되어 있는 곳이다. 폐탄광과 폐광석 더미로부터 방출되는 산성 폐수가 유입되는 황지천의 오염상태를 약 4km에 걸쳐 M1, M2, M3의 세 지점에서 조사하였다. M1 지역은 황지천 주변의 폐탄광에 의해 직접적인 영향을 받지 않는 곳이며, M2와 M3 지역은 주변 지천으로 흘러 들어온 폐탄광 배수에 의해 영향을 받는 곳이다. 화전동의 A1, A2, A3 지역은 한 폐탄광과 폐광석 처리장의 산성폐수가 방출되는 지천 (이하 화전동 지천)이다. 특히 A3지점은 폐광석 더미의 침출수가 폐광배수와 함유된 후 황지천으로 흘러들어가는 곳이다. 황지천의 지천중 하나인 혈암골 계곡은 여러 폐탄광과 폐광석 더미가 널려 있는

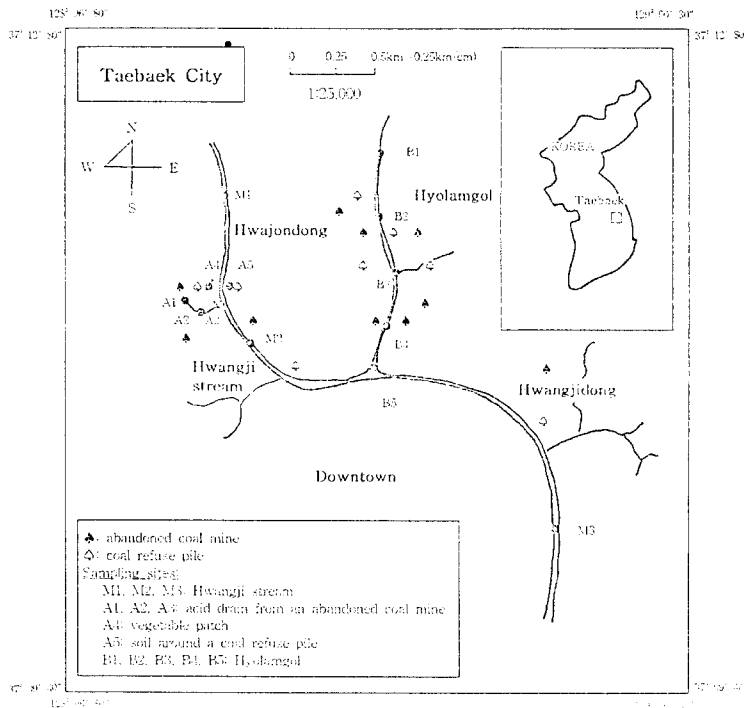


Fig. 1. Map showing the abandoned coal mines field site near Taebaek city.

어가는 곳이다. 황지천의 지천중 하나인 혈암골 계곡은 여러 폐탄광과 폐광석 더미가 널려 있는 곳으로 약 1.5km에 걸쳐 5곳 (B1~B5)에서 하천의 오염실태를 조사하였다. B1 주변은 폐광이나 폐광석 더미의 배수에 의해 오염되지 않은 농경지이고, B3와 B4 지점은 폐광 배수가 직접 유입되는 곳이다. B5는 혈암골 하천수가 황지천에 합류되는 지점이다. 또한, 화전동의 폐광석 더미 주변 채소밭 (A4)과 주변 토양 (A5)도 조사하였다.

연구 방법

시료채취

하천의 오염도를 측정하기 위한 시료 채취는 각 채취 지점에서 하상퇴적물(표토층, 0~10cm)과 하천수를 각각 3회 반복 채취하였다.

pH 및 황산염농도 측정

퇴적물의 pH는 퇴적물과 증류수를 1:5 w/v의 비율로 섞어 180 rpm에서 30분간 잘 혼합한 후 현탁액의 pH를 측정하였다. 황산염의 농도는 토양현탁액을 시료로 하여 BaCl₂법으로 측정하였다 (Karr 1978).

말수소효소활성 측정

CaCO₃ 0.03g을 넣고 멸균한 18ml의 test tube에 입자크기 2mm 이하의 하상퇴적물 3g을 무균

적으로 넣었다. 이 tube에 3% 2,3,5-triphenyltetrazolium chloride (TTC) 용액 1ml와 멸균수 2ml를 넣은 후 잘 혼합한 다음 37°C에서 24시간 배양기에서 배양하였다. 배양한 시료를 methanol 100ml로 추출하고, 추출용액의 흡광도를 485nm에서 측정하였다 (Stevenson 1973). 표준 용액으로 0.1% triphenylformazan 용액을 사용하여 검량선을 구하였다. 탈수소효소활성 (dehydrogenase activity, DHA)은 TTC가 환원되어 생성된 triphenylformazan (TPF)의 양으로 표시하였다 ($\mu\text{g TPF} \cdot \text{g-dry soil}^{-1} \cdot 24\text{h}^{-1}$).

원소분석

하상퇴적물을 자연 건조시킨 후, 2mm의 체로 쳐서 크기가 굵은 자갈이나 모래를 제거한 후 분석 시료로 사용하였다. 시료에 함유된 유기물을 제거하기 위하여, PFA (Teflon perfluoroalkoxy) 용기에 0.5 g의 시료를 넣고 37% 염산 12ml와 65% 질산 4ml를 첨가한 후, microwave (CEM MDS 2000)에서 digestion시켰다 (Nieuwenhuize *et al.* 1991). Digestion 시킨 용액중의 염산과 질산을 hot plate에서 휘발 증발시킨 후, 증류수로 희석하여 유도결합 플라즈마 원자 방사분광기 (ICP, inductively coupled plasma atomic emission spectrophotometer, Plasma 40, Perkin Elmer)를 이용하여 중금속을 포함한 여러 가지 무기원소의 농도를 측정하였다. 하천수는 증류수로 적당히 희석한 후 ICP를 이용하여 원소를 분석하였다.

결과 및 고찰

pH와 황산염 농도

폐탄광과 폐광석 더미에서 유출되는 배수가 유입되는 두 지천과 황지천의 하천수와 하상퇴적물의 pH와 황산염 농도를 Table 1에 정리하였다. 화전동 지천과 혈암골의 B3과 B4 지점은 폐탄광과 폐광석 더미로부터 유입된 적갈색의 배수가 흐르는 지역이다. 화전동 지천의 하상퇴적물과 하천수의 pH는 청정지역인 B1에 비해 현저하게 낮았다. 특히, 폐광석 더미의 침출수가 직접 유입되는 지점인 A3에서 하천수의 pH는 2.68로 강한 산성이었다. 혈암골의 경우도 폐탄광과 폐광석 더미의 배수가 유입됨에 따라 하상퇴적물과 하천수의 pH가 중성에서 산성으로 감소하였다. 그러나 본천의 경우 하천수의 pH는 거의 변화가 없었고, 하상퇴적물의 pH만 다소 감소하였다. 지천과 비교하여 황지천에서의 pH 변화가 적은 이유는 하천수의 유량이 많아 완충작용을 하기 때문으로 사료된다. 황산염의 농도 변화는 pH 변화와 거의 유사한 경향을 보였다. 하천수에서 황산염 농도가 증가하면 pH가 저하되었는데, 이는 pH 저하의 원인이 황산염임을 알 수 있다. 화전동 지천과 혈암골의 하상퇴적물에서 폐광배수의 유입과 관계없이 황산염 농도가 낮은 것은 폐탄광 배수와 폐광석 더미 침출수에 함유된 황산염은 대부분 황산과 같은 가용성 화합물임을 의미한다.

미생물 활성

하상퇴적물 중의 미생물은 하천에서의 물질순환계에서 중요한 역할을 담당한다. 하천 생태계에 미생물은 최종 분해자로서 축적된 유기화합물을 분해하여 이산화탄소의 형태로 공기 중으로 방출하여 순환시키는 하천의 자정작용을 한다. 본 연구에서는 폐광배수로 오염된 하천에서의 미생물 활성을 탈수소효소의 활성을 측정함으로써 평가하였다.

Table 1과 같이 황지천과 혈암골의 하상퇴적물에서 DHA는 폐광 배수가 유입되기 전까지는

Table 1. pH, sulfate concentrations and dehydrogenase activities (DHA) in sediments and stream waters

Site	Sediment			Water	
	pH (-)	Sulfate ^a	DHA ^b	pH (-)	Sulfate (mg SO ₄ ²⁻ /l)
Hwajondong					
A-1	6.3	0.4±0.1	124± 31	6.2	223±43
A-2	6.2	0.8±0.0	169± 32	5.7	213± 2
A-3	2.8	6.8±0.7	61± 7	2.7	861±77
Hyalamgol					
B-1*	6.9	0.3±0.0	1,869±128	7.7	37± 1
B-2	7.2	0.1±0.0	1,176± 98	6.8	57± 8
B-3	6.9	0.1±0.0	22± 5	5.5	52± 1
B-4	3.0	0.9±0.1	13± 2	4.1	59± 5
B-5	4.8	6.8±0.7	12± 2	4.1	67± 6
Hwangji stream					
M-1	7.6	0.2±0.0	1,567± 11	6.9	52± 6
M-2	7.1	1.4±0.5	4,259±400	6.9	78±14
M-3	6.7	0.1±0.0	23± 3	6.8	26± 1
Vegetable patch	7.5	2.4±0.5	1,528±101	-	-
Soil around a coal refuse pile*	4.4	4.3±0.6	14± 2	-	-

^a : mg SO₄²⁻ /g dry soil

^b : μg TPF · g dry soil⁻¹ · day⁻¹

* : Uncontaminated site

약 1,176~4259 μg·TPF · g-dry soil⁻¹ · 24h⁻¹이었다. M2지점의 DHA가 타 지점보다 약 2~3.5 배 이상 높은 이유는 이 지점에는 낙엽과 같은 식물잔재물이 많이 포함되어 유기물의 함유량이 높기 때문으로 사료된다. 그러나, 화전동 지천의 경우, DHA는 126-61 μg·TPF · g-dry soil⁻¹ · 24h⁻¹로 혈암골의 청정지역 (B1)에 비하여 상당히 낮았다. 또한 혈암골에서도 폐탄광 배수와 폐광석 더미 침출수가 유입된 후에는 DHA가 급격히 감소하였다. 이는 높은 황산염 농도로 인한 퇴적물과 하천수의 pH 저하에 의해 미생물의 활성이 저해를 받았기 때문으로 사료되었다. 한편 폐광석 더미 바로 밑 (A5)의 토양의 황산염 농도가 높아 pH는 산성이었고, 미생물 활성도 상당히 낮았다. 그러나 폐광석 더미 주변의 채소밭 토양 (A4)의 pH는 중성이었으며, 미생물 활성도 청정지역과 유사한 값을 보였다. 이는 폐광석 더미의 침출수에 의해 경작지가 오염되지 않았음을 의미한다. 본 연구 결과로부터, DHA는 광산배수에 의한 주변 토양이나 하천의 오염도를 측정하는 유용한 지표로 활용 가능한 것을 알 수 있었다.

원소농도 분포

화전동 지천과 혈암골 및 황지천에서 하상퇴적물과 하천수 중의 중금속을 비롯한 여러 원소 (Cr, Zn, Cd, Pb, Mn, Fe, Mg, Cu, Ca, Al, Ba, Si)들을 분석한 결과를 Table 2, 3, 4 및 5에 정리하였다. pH가 낮은 화전동 지천의 A3 지점에서, 하천수 중의 Fe와 Al의 농도가 혈암골의 청정지역(B1)에 비하여 매우 높았고, Zn과 Cu의 농도도 높았다 (Table 2). 마찬가지로 혈암골

Table 2. Element concentrations in a branch stream of Hwajondong

Elements	Sediment (ppm)						Water (ppm)		
	A1		A2		A3		A1	A2	A3
Cr	<0.1		<0.1		<0.1		<0.1	<0.1	<0.1
Zn	131.4±	0.7	87.6±	1.1	192.6±	2.5	<0.5	<0.5	0.8±0.1
Cd	<0.5		<0.5		<0.5		<0.5	<0.5	<0.5
Pb	45.6±	1.0	44.4±	1.4	44.4±	1.4	<0.5	<0.5	<0.5
Mn	436.8±	3.4	509.4±	1.7	80.4±	1.1	4.2±0.3	3.8±0.2	9.3±0.2
Fe	464,100.0±2,171.0		395,300.0±4,902.0		169,500.0±5,405.0		<0.1	0.2±0.1	53.1±2.8
Mg	403.8±	4.3	670.2±	5.0	1,153.0±	6.8	50.4±1.4	42.9±0.1	67.9±2.6
Cu	28.8±	0.1	24.6±	0.4	21.0±	0.4	<0.1	<0.1	0.1±0.0
Ca	2,423.0±	30.7	3,448.0±	5.9	2,036.0±	48.1	134.7±0.0	136.2±0.8	135.7±1.9
Al	2,584.0±	11.0	3,473.0±	46.5	9,812.0±	71.3	<1.0	<1.0	41.6±3.0
Ba	29.4±	0.2	38.4±	0.7	49.2±	0.7	<0.5	<0.5	<0.5
Si	1,229.0±	62.2	595.2±	4.0	1,492.0±	6.7	2.5±0.0	2.4±0.0	11.6±0.1

에서 pH가 낮은 B4와 B5지역에서도 하천수 중의 Al의 농도가 매우 높고, Cu의 농도도 다소 높았다 (Table 3). 또한 두 지점의 하천수 중의 Mg, Mn, Ca, Si 등의 농도가 혈암골 B1과 비교해서 탄광배수 유입에 따라 현저하게 증가하였다.

혈암골의 하상퇴적물 중의 중금속 Fe와 Pb의 농도는 B1과 비교하여 폐탄광 배수가 유입되는 B3과 B4 지점에서 훨씬 높았다 (Table 3). Fe의 경우 청정지역에서는 30,760 ppm으로 Bowen (1966)에 의해 보고된 오염되지 않은 토양에서의 농도 (38,000 ppm)와 유사한 반면, B3과 B4 지점에서는 46,000~50,000 ppm 정도로 Fe 농도가 높았다. 또한, 청정지역에서 Pb가 거의 검출되지 않았으나 B3과 B4 지역에서는 Pb의 농도가 약 37~40 ppm으로 매우 높았다. 화전동 지천에서도 혈암골과 유사한 결과를 관찰할 수 있었다 (Table 2). 화전동 지천에서는 Fe농도 (170,000~464,000 ppm)가 청정지역보다 무려 5~15배나 높았다. Pb의 농도는 약 45 ppm으로 매우 높았다. 이는 폐탄광 배수로부터 주로 Fe와 Pb가 하천에 유입됨을 의미한다.

혈암골의 청정지역인 B1의 하상퇴적층에서 Mn, Mg, Ca 등의 농도는 각각 4,352, 3,087, 4,077 ppm 등이었다. 이 값과 비교하여서 폐탄광 배수에 의해 영향을 받는 화전동 지천과 혈암골의 하상퇴적층 (A1, A2, A3, B3, B4, B5)에서 이 세 원소의 농도는 급격히 감소하였다. 하상퇴적층과 하천수에서의 각종 원소들의 증감현상 (특히, 하천수 중의 중금속과 Mn, Mg, Ca 등의 농도 증가)은 폐탄광 배수와 폐광석 더미 침출수의 유입에 의해 하천의 pH가 낮아지기 때문에 탄광지역과 하천의 퇴적물로부터 이들 원소들이 용탈되었기 때문으로 사료된다.

폐광배수가 다량 유입되는 황지천 M2 지점의 하천수와 하상퇴적층에서 황산염의 농도 (Table 1), 중금속 (Zn, Pb, Fe, Cu)과 Mn, Mg, Ca 등의 농도가 황지천의 다른 지역에 비하여 매우 높았다 (Table 4). 이는 황지천의 pH가 중성이므로 용탈된 원소들이 불용성 물질로 하천바닥에 침전되기 때문으로 사료된다. 이러한 현상은 수용액 중의 중금속 제거기술들의 기본 원리로부터 설명이 가능하다. 일반적으로 수용액 중의 중금속 제거 기술로는 FeSO₄, SO₂ gas 및 sodium bisulfate와 같은 환원제를 첨가하여 수산화물과 황화물로 침전시키거나, K, Mg, Mn, Ba 및 Ca 등을 금속과 수산화물로 공침시키는 방법들이 사용된다 (Argo and Culp 1972). 즉, 황지천 M2에서 많은 양의 sulfate가 유입되고, 탄광배수의 낮은 pH에 의해 용탈된 중금속들과 Mn, Mg, Ca 등이 중성의 하천수에 유입되어 불용성의 수산화물과 황화물로 공침되는 현상이 일어

Table 3. Element concentrations(ppm) in Hyolamgol

Elements	B1*		B2		B3		B4		B5	
Sediment	27.6±	0.4	33.6±	0.6	22.8±	0.2	661.0±	13.3	15.6±	0.8
Cr	164.4±	3.2	180.0±	1.8	250.8±	1.0	77.4±	0.8	76.8±	1.0
Zn	<0.5		<0.5		<0.5		<0.5		<0.5	
Cd	<0.5		<0.5		39.6±	1.1	36.6±	0.8	<0.5	
Pb	4,352.0±	53.9	1,447.0±	7.0	1,169.0±	3.2	261.6±	6.5	217.2±	1.0
Mn	30,760.0±	142.4	38,330.0±	1,160.0	46,840.0±	365.6	50,170.0±	733.2	38,620.0±	707.0
Fe	3,087.0±	43.3	2,849.0±	29.9	2,149.0±	35.0	1,563.0±	24.8	1,661.0±	4.1
Mg	39.0±	0.5	36.6±	0.4	183.0±	2.9	46.6±	0.2	39.6±	0.3
Cu	4,077.0±	36.4	2,447.0±	37.4	1,777.0±	16.9	617.4±	8.2	1,741.0±	9.4
Ca	33,250.0±	391.7	39,640.0±	125.4	23,840.0±	114.4	36,110.0±	471.7	32,860.0±	214.9
Al	155.4±	0.5	174.0±	3.2	64.8±	0.4	192.2±	4.6	172.8±	1.1
Ba	770.4±	67.9	382.2±	14.2	252.6±	20.9	2,477.0±	12.8	2,409.0±	18.1
Si										
Water	<0.1		<0.1		<0.1		<0.1		<0.1	
Cr	<0.5		<0.5		<0.5		<0.5		<0.5	
Zn	<0.5		<0.5		<0.5		<0.5		<0.5	
Cd	<0.5		<0.5		<0.5		<0.5		<0.5	
Pb	<0.5		<0.5		1.8±	0.0	2.8±	0.0	2.8±	0.0
Mn	<0.1		<0.1		<0.1		<0.1		<0.1	
Fe	5.9±	0.4	13.8±	0.0	19.9±	0.2	26.2±	0.3	26.7±	0.2
Mg	<0.1		<0.1		<0.1		0.1±	0.0	0.1±	0.0
Cu	33.9±	0.1	42.5±	0.0	48.4±	0.2	56.6±	0.7	52.5±	0.3
Ca	<1.0		<1.0		<1.0		11.1±	0.2	15.1±	0.1
Al	<0.5		<0.5		<0.5		<0.5		<0.5	
Ba	2.1±	0.0	2.7±	0.1	3.0±	0.0	4.6±	0.1	5.9±	0.1
Si										

* : Uncontaminated site

Table 4. Element concentrations in Hwangji stream

Elements	Sediment (ppm)						Water (ppm)		
	M1		M2		M3		M1	M2	M3
Cr	21.6±	0.1	9.0±	0.9	9.0±	0.4	<0.1	<0.1	<0.1
Zn	183.0±	2.1	391.2±	3.3	155.4±	1.1	<0.5	<0.5	<0.5
Cd	<0.5		<0.5		<0.5		<0.5	<0.5	<0.5
Pb	<0.5		33.6±	2.9	<0.5		<0.5	<0.5	<0.5
Mn	960.0±	46.0	1,990.0±	6.7	372.6±	3.2	0.7±0.1	0.7±0.1	<0.5
Fe	28,770.0±	573.7	48,190.0±	422.4	33,860.0±	196.0	<0.1	<0.1	<0.1
Mg	3,177.0±	43.6	3,394.0±	22.1	2,194.0±	3.2	15.3±0.4	16.9±0.1	5.0±0.1
Cu	32.4±	0.5	71.4±	0.9	45.6±	0.8	<0.1	<0.1	<0.1
Ca	5,405.0±	75.7	7,690.0±	21.2	2,243.0±	20.3	52.4±0.2	55.5±0.5	19.4±0.3
Al	37,660.0±	296.0	34,000.0±	602.0	19,070.0±	218.0	<1.0	<1.0	<1.0
Ba	205.2±	3.7	132.0±	0.5	74.4±	0.2	<0.5	<0.5	<0.5
Si	1,249.0±	12.4	1,590.0±	45.1	843.4±	12.7	1.5±0.0	1.8±0.0	2.0±0.0

Table 5. Element concentrations in a vegetable patch and a soil around a coal refuse pile of Hwajondong

Elements	Vegetable patch (ppm)	Soil around a coal refuse pile (ppm)
Cr	27.6± 0.9	<0.1
Zn	70.2± 1.9	65.4± 0.4
Cd	<0.5	<0.5
Pb	<0.5	48.0± 4.4
Mn	521.4± 24.6	125.0± 1.0
Fe	24,090.0±170.0	31,650.0±273.8
Mg	3,499.0± 27.1	1,060.0± 6.2
Cu	25.8± 0.3	21.6± 0.7
Ca	3,020.0± 24.0	2,196.0± 13.9
Al	23,500.0±337.8	27,290.0±462.4
Ba	142.8± 2.3	219.6± 4.1
Si	1,522.0± 75.5	1,405.0± 20.6

오염되어 있었고, 채소밭은 청정지역과 유사한 경향을 보여 산성 광산 배수에 의한 오염은 관찰되지 않았다 (Table 5).

이상의 결과를 종합해볼 때, 탄광배수의 하천 유입에 의한 수질과 토양오염에 대한 영향은 탄광배수가 직접 유입되는 지천에서 매우 심각한 것을 알 수 있다. 반면, 오염된 지천의 하천수가 본천에 유입되었을 때 유입 지점으로부터 수 km 이내에서 하천의 중화작용에 의해 대부분의 오염물질들이 불용성 물질로 침전되어 제거되므로 폐광 배수에 의한 하천의 오염은 국지적인 것으로 평가된다. 하천에서의 자연적인 물리화학적 정화작용이 진행되긴 하지만, 오염지역에서의 심각한 생태계 파괴가 우려된다. 탄광배수가 유입되는 지천에 하천수의 중화시설을 갖춘다면 중금속에 의한 하천의 오염을 극복할 수 있으리라 사료된다.

적 요

강원도 태백시 황지의 폐탄광과 폐광석 더미에서 유출되는 산성 광산배수의 유입으로 인한 주변 하천의 오염 실태에 대하여 조사하였다. 하천의 오염도를 알기 위해 하천수와 하상퇴적물의 pH, 황산염이온 농도 및 무기원소 농도를 측정하였으며 하상퇴적물에 서식하는 미생물의 활성을 탈수소효소활성 (DHA)으로 측정하였다. 폐탄광과 폐광석 더미의 배수가 직접 유입되는 지천에서는 산성 배수의 유입으로 인해 하천수와 하상퇴적물의 pH가 중성에서 산성으로 감소하였다. 또한 산성 광산배수가 유입되지 않은 청정지역에서 하상퇴적물의 DHA는 $1,176 \sim 4,259 \text{ g-TPF} \cdot \text{g-dry soil}^{-1} \cdot 24\text{h}^{-1}$ 이었으나, 유입되는 지천은 $12 \sim 170 \text{ g-TPF} \cdot \text{g-dry soil}^{-1} \cdot 24\text{h}^{-1}$ 로 매우 낮았다. 청정지역과 비교하여 오염된 지역의 하상퇴적물 중에서 Pb와 Fe의 농도는 각각 37~46 ppm과 40,600~464,000 ppm으로 매우 높았다. 폐탄광 배수의 유입으로 산성화된 하천수에서는 11~42 ppm의 높은 농도의 Al이 검출되었다. 또한 오염된 지역에서 하상퇴적물 중의 Mn, Mg 및 Ca의 농도가 청정지역과 비교해서 현저하게 낮았고, 반면에 하천수 중의 농도는 높았다.

난다는 것을 의미한다. M3 지역에서 중금속들과 Mn, Mg, Ca 등의 농도가 상류 지역인 M1과 M2 지역 보다 오히려 낮게 검출되었다 (Table 4). 이는 상류 M1의 하천수에 의해 유입된 Mn, Mg, Ca 등과 화전동 지천과 혈암골부터 유입된 중금속들과 Mn, Mg, Ca 등이 M3지역에 도달하기 전에 거의 침전되었음을 시사한다.

한편 폐탄광 배수에 의해 영향을 직접 받는 화전동 지천과 혈암골의 pH가 낮은 하천수 (A3, B4, B5)에서 치매의 원인물질로 알려져 있는 Al이 약 11~42 ppm이 검출되었다 (Table 2와 3). 이는 산성의 하천수에 의해 토양으로부터 Al이 용탈되었기 때문으로 사료된다.

채소밭과 폐광석 더미 주변 토양의 원소 분석 결과, 중금속인 Pb의 농도가 48 ppm으로 심하게

인용문헌

- Argo, D.G. and G.L. Culp. 1972. Heavy metals removal in waste water treatment processes: Part 1. *Water and Sewage Works* 119: 62-70.
- Atlas, R.M. and R. Bartha. 1987. *Microbial ecology*. The Benjamin /Cummings Publishing Co., Inc. pp. 429-430.
- Bowen, H.J.M. 1966. *Trace elements in biochemistry*. Academic Press, NY. 241p.
- Karr, C. 1987. Analytical method for coal and coal product. Academic Press, NY. pp. 228-301.
- Nieuwenhuize, J., C.H. Poley-Vos, A.H. van den Akker and W. van Delft. 1991. Comparison of microwave and conventional extraction techniques for the determination of metals in soil, sediment and sludge samples by atomic spectrometry. *Analyst* 116:227.
- Stevenson, I.L. 1959. Dehydrogenase activity in soils. *Can. J. Microbiol.* 5:229-235.

(1996년 7월 4일 접수)