

## 폐광산 배수와 퇴적물의 중금속 오염과 생물독성 평가

이현준 · 김효진 · 오현주 · 조기종 · 김정규 · 정진호<sup>†</sup>

고려대학교 환경생태공학부

### Assessment of Heavy Metal Contamination and Biological Toxicity of Mine Drainages and Sediments from Abandoned Mines

Hyun-Joon Lee · Hyo-Jin Kim · Hyun-Ju Oh · Kijong Cho · Jeong-Gyu Kim · Jinho Jung<sup>†</sup>

Division of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University

(Received 13 November 2006, Accepted 8 March 2007)

#### Abstract

Heavy metal contamination and biological toxicity of mine drainages and sediments in abandoned mines were studied. Mine drainages had pH at a range of 2.94~7.86, and contained heavy metals at a toxic level. For coal mines, toxicity of mine drainage to *Daphnia magna* was attributable to acidic pH. In addition to the low pH, suspended heavy metals such as Zn and Cu contributed to toxicity of mine drainages at abandoned metalliferous mines. All mine sediments studied in this work showed biological toxicity to *Chironomus riparius*, having mortality at a range of 15~60%. However, its relationship with physicochemical properties including heavy metal content of the sediments was not statistically explained. Exceptionally clay (< 2  $\mu\text{m}$  particle) content was negatively correlated with the biological toxicity for sediment samples collected at the same abandoned mines.

**keywords** : Abandoned mine, Biological toxicity, Heavy metal, Mine drainage, Sediment

## 1. 서론

국내에는 약 2000여개의 크고 작은 광산이 산재해있으며 1980년대 이후 경제성이 맞지 않아 90% 이상이 적절한 처리시설 없이 폐광되었다(박, 1994). 이로 인하여 폐광산에서 유출되는 광산배수는 낮은 pH를 가지고 있으며, As, Cd, Cu, Zn, Pb와 같은 독성이 높은 중금속을 다량 함유하고 있다(정 등, 1997). 이러한 광산배수들은 하천에 유입되어 수 생태계 전반에 악영향을 미칠 뿐만 아니라, 생물농축의 단계를 거쳐 최종적으로 인간의 건강을 해치게 된다. 그리고 광산배수의 중금속들은 공침 또는 침전되어 퇴적물로 쌓이거나(Carpenter et al., 1980; Bowell et al., 1995), 유입 하천 퇴적물에 흡착되어 수습 배에서 수천 배까지 농축되기도 한다(전, 1999). 특히 이렇게 농축된 중금속들은 수중 저서생물에 지속적인 독성을 미치고 있으며, 퇴적물 중금속 용출로 인한 대형 수질오염 사고를 유발하기도 한다(박 등, 2002).

현재 광산배수에 대한 수질기준이 설정되어 있지 않은 상황이며, 수질환경보전법에 명시된 배출허용기준 항목에서 적용 가능한 pH, Fe, Mn, Pb, Cu, Zn, Cd, As, Hg, Cr, F의 11개 항목을 잠정적으로 적용하고 있다(오 등, 2003).

그러나 일반적으로 산업폐수가 기존의 배출허용기준에 맞게 처리되어 방류되더라도 수생태계에서 유해한 영향을 줄 수 있다고 알려져 있기 때문에, 물리화학적 지표와 더불어 생물을 이용한 통합독성 평가가 적극 검토되고 있다(김 등, 2006; 이 등, 2005). 생물독성평가는 광산배수의 유해성을 통합적으로 평가할 수 있는 유용한 기법으로, pH나 중금속 농도 같은 물리화학적 지표만으로는 파악할 수 없는 오염 물질간의 상호작용, 생물학적 영향, 생물 유효도 등을 포함하는 총괄적 영향을 평가할 수 있다(김 등, 2005a; 나 등, 2005; Hernando et al., 2005). 광산배수와 마찬가지로 퇴적물도 물리화학적 분석만으로 설명할 수 없는 생물에 대한 유해성을 통합적으로 평가를 할 수 있는 생물독성평가가 요구되고 있다.

폐광산 지역의 배수나 퇴적물에 대한 생물독성 연구는 제한적으로 진행되고 있는데, 산성광산배수의 pH 변화가 생물독성에 미치는 영향 평가(Gerhardt et al., 2004)나 광산배수의 생물독성에 미치는 경도의 영향 평가(Yim et al., 2006) 정도가 수행된 바 있다. 따라서 본 연구에서는 국내 10개의 폐광산을 대상으로 광산배수와 퇴적물의 중금속 오염을 조사하였으며, 이와 더불어 물벼룩(*Daphnia magna*)과 깔따구(*Chironomus riparius*)를 이용하여 생물독성을 평가하였다. 그리고 물리화학적 인자와 생물독성간의 상관관계를 분석하여 독성의 원인을 규명하고 중금속 오염을 저감할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
jjung@korea.ac.kr

## 2. 실험방법

### 2.1. 시료채취

한강수계에 위치한 총 10개의 폐탄광과 폐금속광(Table 1)에서 2005년 11월 초에 물과 퇴적물 시료를 채취하였다. 폐탄광은 강원도 정선군 고한읍에 위치한 진덕광산과 삼탄광산, 강원도 정선군 정선읍에 위치한 나전광산, 강원도 영월군 하동면에 위치한 옥동광산, 강원도 평창군 미탄면에 위치한 성보광산을 조사하였다. 폐금속광은 강원도 정선군 임계면에 위치한 낙천광산과 동명광산, 강원도 영월군 구래면의 상동광산, 경기도 광명시 학운동의 가학광산, 경기도 포천시 창수면 운산리에 위치한 용석광산을 조사하였다. 광산배수는 갭구에서 배출되는 갭내수를 각 2점씩 2 L 무균 채수병을 사용하여 수중에서 임의채취(grab sampling)를 실시하였다. 하나는 중금속 분석용으로서 현장에서 진한 질산을 가하여 pH 2 이하로 처리하였다. 다른 하나는 생물독성 평가용으로 채수 즉시 아이스박스로 옮겨 4°C 이하에서 보존하였다. 그리고 퇴적물은 광산배수와 동일한 지점에서 표층(0~5 cm)을 혐잡물 등이 유입되지 않도록 모종삼을 이용하여 채취하였다. 낙천광산과 용석광산에서는 광산배수 채수지점으로부터 하류방향으로 일정한 거리간격에 따라 퇴적물을 채취하였으며 자연 상태에서 풍건하여 보존하였다.

### 2.2. 물리화학적 특성 분석

광산배수의 pH, 염도, 용존산소량, 온도 및 탁도는 현장에서 수질 다항측정기(Horiba, U-10)를 이용하여 측정하였다. 부유물질은 환경부 제정 수질오염공정시험법에 준하여 실험하였다(환경부, 2004). 광산배수의 총 중금속(total heavy metal) 농도를 측정하기 위하여 시료 200 mL를 분해관에 넣고 질산 5 mL를 가한 후 block digester에서 약 120°C에서 1시간 정도 저온탄화시켰다. 이후 시료를 고온에서 가열하여 20 mL로 농축하여 유도결합플라즈마 분광기(ICP-AES, Jobin Yvon, 138 Utrace)를 이용하여 측정하였다. 그리고 용존태 중금속(dissolved heavy metal) 농도는 0.45 µm GF/C(Advantec MFS, USA)를 이용하여 광산배수를 여과한 후 ICP-AES로 측정하였다. 부유태 중금속(suspended heavy metal) 농도는 총 중금속과 용존태 중금속 농도 차이를 이용하여 구하였다.

퇴적물의 물리화학적 특성은 한국 농촌진흥청의 토양화학분석법에 준하여 분석하였다(NIAST, 2000). 시료의 pH는 1:5법으로 증류수를 가하고 1시간동안 진탕한 뒤 추출한 후 pH 측정기(Orion, 720A)를 이용하여 측정하였고, 추출한 현탁액을 여과지(Whatman, UK)로 거른 후 상징액의 전기전도도를 전기전도도 측정기(Suntex, sc-170)를 이용하여 측정하였다. 유효인산은 묽은 염산과 NH<sub>4</sub>F로 침출한 후 아스코르빈산을 이용하여 발색시킨 후 흡광광도계(Varian, Cary 50 probe)로 측정하였다. 유기물은 Tyurin법을 이용하여 측정하였고 전질소(total Kjeldahl nitrogen) 함량은 황산분해법으로 측정하였으며 입도분석은 피펫방법을 이용하였다. 퇴적물의 중금속은 유효태(available)와 총(total) 함량으로 나누어 측정하였다. 유효태 중금속은 0.11 M 아세트산을 가하고 16시간 동안 진탕시킨 후 여과하여 상징액을 추출하였다. 총 중금속은 왕수(aqua regia)를 가하여 분해한 후 여과시켜 상징액을 추출하였다. 추출한 상징액의 중금속 농도는 ICP-AES를 이용하여 측정하였다.

### 2.3. 생물독성평가

광산배수의 생물독성은 OECD Guideline 202(OECD, 2004)에 준하여 물벼룩(*Daphnia magna*)을 이용한 48시간 급성독성시험으로 평가하였다. 독성시험은 태어난 지 24시간 이내의 물벼룩을 이용하여 5개의 희석농도와 대조구를 사용하여 실시하였다. 각 농도별로 4회 반복하였으며, 각 반복 시험마다 10 mL의 시료와 5마리의 개체를 사용하였다. 광주기는 16 h : 8 h (light : dark)의 비율로 조절하였으며, 온도는 20±1°C를 유지하였다. EC<sub>50</sub>(median effective concentration)은 부동(immobilization)의 유형에 따라 Graphical, Trimmed Spearman-Kärber, Probit method를 사용하여 산정하였다. EC<sub>50</sub>값 산정 후 이 값을 독성단위(TU = 100%/EC<sub>50</sub>)로 환산하여 광산배수의 독성을 평가하였다. 물벼룩 급성독성이 검출된 광산배수의 경우, pH가 생물독성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 광산배수의 pH를 7.0±0.2 범위로 조정 후 독성시험을 다시 수행하였다.

퇴적물의 생물독성은 OECD Guideline 218(OECD, 2001)에 준하여 깔따구(*Chironomus riparius*)를 이용하여 평가하였다. 깨끗한 모래를 대조구로 두었고 비커에 10 g의 퇴적물 시료를 넣고 40 mL의 M4용액을 첨가하였다. 노출시간

Table 1. Geological locations of abandoned mines studied in this work

	Mine name	Gradient	Latitude
Abandoned coal mine	Jinduk	37° 12' 15.54"	128° 51' 14.19"
	Samtan	37° 14' 56.46"	128° 49' 20.25"
	Okdong	37° 08' 08.69"	128° 37' 05.06"
	Sungbo	37° 18' 57.35"	128° 28' 11.04"
	Najcon	37° 27' 39.73"	128° 39' 39.43"
Abandoned metal mine	Nakcheon	37° 28' 13.49"	128° 51' 24.57"
	Dongmyung	37° 24' 14.94"	128° 52' 11.74"
	Gahak	37° 25' 36.06"	126° 51' 55.70"
	Yongsuk	38° 02' 42.39"	127° 13' 01.36"
	Sangdong	37° 08' 57.62"	128° 50' 14.79"

은 10일로 하였고 치사율(mortality)을 측정하는 급성독성시험을 실시하였다. 실험 중 광주기 조건은 16 h : 8 h (light : dark)의 비율로 조절하였으며, 온도는 20±1°C를 유지하였다. 갈따구는 독성 시험 2시간 전에 충분히 먹이를 주었으며, 시험 동안에는 3일 간격으로 먹이를 공급하였다. 각 시료 당 갈따구 3령충을 10마리씩 넣고 퇴적물에 10일간 노출시킨 후 치사율을 계산하였다. 갈따구 급성독성시험은 2회 반복 실시하여 평균값을 구하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 광산배수의 중금속 오염과 생물독성

한강수계에 위치한 10개의 폐광산에서 배출되는 광산배수의 중금속 오염과 생물독성은 Table 2에 나타나 있다. 광산배수의 pH는 2.94~7.86으로 넓은 범위로 존재하였는데, 진덕광산과 낙천광산의 배수만이 산성을 띠고 있었다. 일반적으로 광산배수의 pH가 낮은 원인은 황철석(pyrite)이 대기 중의 물과 산소와 반응하여 수소이온을 내놓기 때문이

다(Winkels et al., 1998). 광산배수의 중금속을 분석한 결과, Zn이 가장 높은 농도로 존재하고 있었으며, 낙천광산의 경우 Zn은 3 ppm 이상으로 독성에 영향을 미칠 정도로 존재하였다(Table 3). 각 중금속의 함량을 형태별로 정량한 결과, 모든 중금속에서 총 중금속의 80% 이상이 크기가 0.45 µm 이상인 부유태로 존재하였는데 Ni의 경우 가장 낮은 83%, Cd의 경우 가장 높은 95%가 부유태로 나타났다.

광산배수의 물벼룩 급성독성 측정 결과(Table 2), 폐탄광 중에서는 진덕, 삼탄과 낙천광산에서 독성이 검출되었고, 폐금속광 중에서는 낙천광산에서만 독성이 검출되었다. 진덕과 삼탄광산에서 생물독성이 검출되는 이유는 물벼룩이 생존 가능한 pH 범위인 6.5~8.5를 벗어났기 때문이다. 낙천광산의 경우, pH와 중금속은 독성을 일으킬 정도로 문제가 되지 않았으나, 염도가 0.6‰이고 전기전도도가 1.43 mS/cm인 것으로 보아 중금속 이외의 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>와 같은 다른 용존 이온들이 독성을 일으킨 것으로 추정된다(Davies, 2007; Nelson, 2006). 그리고 폐금속광 중에서 낙천광산의 배수가 가장 높은 독성을 보였는데(48 hr TU = 14.64), 이는 물벼

**Table 2.** Heavy metal concentrations and acute toxicity of mine drainage to *Daphnia magna*

Mine name	Species	Heavy metals (mg/L)								pH	48 hr TU*
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn		
Jin duk	total	n.d.	n.d.	n.d.	0.031	n.d.	0.153	0.040	0.333	3.79	3.24
	dissolved	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.010	n.d.	0.020		
	suspended	n.d.	n.d.	n.d.	0.031	n.d.	0.143	0.040	0.313		
Sam tan	total	0.002	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.082	0.014	0.142	6.84	<1.00
	dissolved	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.020	n.d.	0.040		
	suspended	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.062	0.014	0.102		
Ok dong	total	0.003	n.d.	0.001	0.004	0.140	0.037	n.d.	n.d.	7.49	<1.00
	dissolved	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.010	n.d.	n.d.		
	suspended	0.003	n.d.	0.001	0.004	0.140	0.027	n.d.	n.d.		
Sung bo	total	0.002	n.d.	n.d.	0.003	0.034	0.035	0.018	0.062	6.62	<1.00
	dissolved	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.010	0.010	n.d.	0.020		
	suspended	0.002	n.d.	n.d.	0.003	0.024	0.025	0.018	0.042		
Na jeon	total	0.003	n.d.	0.002	n.d.	n.d.	0.017	0.015	0.027	7.57	1.22
	dissolved	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.010	n.d.	0.010		
	suspended	0.003	n.d.	0.002	n.d.	n.d.	0.007	0.015	0.017		
Nak chon	total	0.051	0.207	n.d.	1.359	n.d.	0.036	0.194	3.529	2.94	14.64
	dissolved	n.d.	0.010	n.d.	0.090	n.d.	n.d.	0.010	0.240		
	suspended	0.051	0.197	n.d.	1.269	n.d.	0.036	0.184	3.289		
Dong myung	total	0.135	n.d.	0.001	0.001	n.d.	0.012	0.025	0.415	7.86	<1.00
	dissolved	0.010	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.030		
	suspended	0.125	n.d.	0.001	0.001	n.d.	0.012	0.025	0.385		
Ga hak	total	0.003	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.014	0.002	0.004	7.73	<1.00
	dissolved	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
	suspended	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.014	0.002	0.004		
Yong suk	total	0.006	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.025	0.010	0.022	7.73	<1.00
	dissolved	0.006	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.006	0.002	0.014		
	suspended	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.019	0.008	0.008		
Sang dong	total	0.042	n.d.	0.345	0.008	n.d.	0.032	0.027	0.049	7.62	<1.00
	dissolved	0.006	n.d.	0.009	n.d.	n.d.	0.010	0.010	0.010		
	suspended	0.032	n.d.	0.336	0.008	n.d.	0.022	0.017	0.039		

\*toxic unit 100:EC<sub>50</sub>, n.d. not detected

**Table 3.** 48 hr EC<sub>50</sub> values of heavy metals to *Daphnia magna*

Heavy metal	EC <sub>50</sub> (mg/L) <sup>a</sup>	Reference
As	3.800 (3.300-4.300)	Mount et al., 1984
Cd	0.118 (0.089-0.155)	Mount et al., 1984
Cr	0.050 (0.039-0.065)	Mount et al., 1984
Ni	1.000	Haley et al., 1993
Pb	4.400 (3.600-5.300)	Mount et al., 1984
Zn	1.590	Kazlauskiene et al., 1994
Cu	0.146	Mount et al., 1984
Hg	0.017	Sorvari et al., 1996

<sup>a</sup>50% effective concentration with 95% confidence limits

록이 생존하기 어려운 낮은 pH(2.94)와 물벼룩 급성독성을 유발하기에 충분한 농도의 Zn(3.529 mg/L), Cu(1.359 mg/L)와 Cd(0.207 mg/L) 때문이다(Table 3).

생물독성에 미치는 pH의 영향을 배제하기 위하여 pH가 6.5~8.5를 범위를 벗어나는 광산배수의 pH를 7.0±0.2로 조정 한 후에 물벼룩 독성실험을 수행하였으며, 그 결과는 Table 4에 나타나 있다. 폐탄광의 배수는 pH 조절 후에 생물독성이 검출되지 않은 반면, 폐금속광의 배수에서는 여전히 독성이 검출되었다. 폐탄광의 경우, 광산배수의 중금속

이 독성을 일으킬만한 농도로 존재하지 않기 때문에 pH 조절 후 생물독성이 나타나지 않은 것으로 생각된다. 따라서 폐탄광의 배수 처리 시에는 Ca(OH)<sub>2</sub>, NaOH 등을 이용한 중화처리가 요구된다.

폐금속광인 낙천광산은 폐탄광과는 달리, 중금속 함량이 낮은 낙천 2(mine drainage 2) 시료를 제외하고 pH 조절 후에도 모두 물벼룩 급성독성을 보여주었다. Table 5에 나타난 바와 같이 독성이 검출된 광산배수들의 Zn 농도는 3 ppm 이상으로 독성을 유발하기에 충분한 농도이다. 특히 낙천 1(mine drainage 1) 시료는 Zn 뿐만 아니라 Cu와 Cd도 독성을 일으키기에 충분한 농도로 포함하고 있기 때문에 다른 광산배수와 비교하여 매우 높은 독성을 보여주었다(48 hr TU = 7.98). 이러한 이유로 폐금속광의 배수 처리시에는 중화처리뿐만 아니라 이온교환이나 투수성반응벽체 등을 이용한 중금속 제거가 요구된다.

### 3.2. 퇴적물의 중금속 오염과 생물독성

광산배수를 채수한 지점에서 채취한 퇴적물의 물리화학적 특성은 Table 6에, 이들 물리화학적 특성간의 상관관계를 분석한 결과는 Table 7에 나타나 있다. 전질소(TKN)와

**Table 4.** Toxicity change of acid mine drainage after pH adjustment

	Sample	pH	48 hr TU <sup>a</sup> before pH adjustment	48 hr TU after pH adjustment
Abandoned coal mine	Jinduk 1 (mine drainage)	3.79	3.24	< 1.00
	Jinduk 2 (250 m downstream)	3.87	2.93	< 1.00
	Jinduk 3 (500 m downstream)	4.84	1.62	< 1.00
	Samtan (mine drainage)	4.94	1.62	< 1.00
Abandoned metal mine	Nakcheon 1 (mine drainage 1)	2.94	14.64	7.98
	Nakcheon 2 (mine drainage 2)	4.84	2.00	< 1.00
	Nakcheon 3 (mine drainage 1+2)	4.07	2.93	2.71
	Nakcheon 4 (250 m downstream)	6.25	2.73	2.77

<sup>a</sup>toxic unit = 100/EC<sub>50</sub>

**Table 5.** Heavy metal concentrations of mine drainages from abandoned metalliferous mines

Mine drainage	Species	Heavy metals (mg/L)							
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Nakcheon 1 (mine drainage 1)	total	0.051	0.207	n.d.	1.359	n.d.	0.036	0.194	3.529
	dissolved	n.d.	0.010	n.d.	0.090	n.d.	n.d.	0.010	0.240
	suspended	0.051	0.197	n.d.	1.269	n.d.	0.036	0.184	3.289
Nakcheon 3 (mine drainage 1+2)	total	0.035	0.042	n.d.	0.216	n.d.	0.015	0.075	3.521
	dissolved	n.d.	n.d.	n.d.	0.010	n.d.	n.d.	0.010	0.230
	suspended	0.035	0.042	n.d.	0.206	n.d.	0.015	0.065	3.291
Nakcheon 4 (250 m downstream)	total	0.065	0.038	n.d.	0.035	n.d.	0.094	0.168	3.640
	dissolved	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.010	0.010	0.240
	suspended	0.065	0.038	n.d.	0.035	n.d.	0.084	0.158	3.400

n.d. not detected

**Table 6.** Physicochemical characteristics of abandoned mine sediments

Mine name	pH	EC <sup>a</sup> ( $\mu$ S/cm)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/kg)	TKN <sup>**</sup> (%)	OM <sup>***</sup> (%)	< 2 $\mu$ m particle (%)	2 ~ 50 $\mu$ m particle (%)	50 $\mu$ m ~ 2 mm particle (%)
Jinduk	4.120	1050	26.56	0.1183	2.07	33.18	37.57	29.25
Samtan	7.263	224	11.44	0.1911	4.34	7.57	26.17	66.26
Sungbo	8.450	80.4	20.02	0.0679	1.86	10.17	15.76	74.07
Najeon	7.789	100.1	7.88	0.0480	3.52	39.84	11.10	49.06
Nakcheon	6.238	389	28.90	0.1236	2.48	11.23	40.38	48.39
Dongmyung	6.988	93.2	16.08	0.1470	2.69	18.38	32.94	48.68
Gahak	7.964	52.8	24.76	0.0266	2.79	3.71	21.87	74.42
Yongsuk	7.008	28.5	28.47	0.0466	2.28	1.13	13.51	85.36
Sangdong	7.020	19.7	11.07	0.5257	6.21	16.70	58.53	24.77

<sup>a</sup> electrical conductivity, <sup>\*\*</sup> total Kjeldahl nitrogen, <sup>\*\*\*</sup> organic material

**Table 7.** Correlation matrix on physiochemical characteristics of mine sediments

	pH	EC	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TKN	OM	< 2 $\mu$ m	2 ~ 50 $\mu$ m	50 $\mu$ m ~ 2 mm
pH	-	-0.7631 <sup>*</sup>	-0.1910	-0.0772	0.0245	-0.3474	-0.3441	0.5057
EC	-	-	-0.0926	0.0303	-0.2474	0.3026	0.3851	-0.5087
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	-	-0.3577	-0.0984	0.0253	-0.2498	0.1829
TKN	-	-	-	-	0.6312 <sup>*</sup>	-0.0537	0.8449 <sup>*</sup>	-0.6400 <sup>*</sup>
OM	-	-	-	-	-	0.1039	0.3966	-0.3860
< 2 $\mu$ m	-	-	-	-	-	-	-0.0750	-0.6035 <sup>*</sup>
2 ~ 50 $\mu$ m	-	-	-	-	-	-	-	-0.7499 <sup>*</sup>
50 $\mu$ m ~ 2 mm	-	-	-	-	-	-	-	-

<sup>\*</sup> significant level < 0.05

유기물(OM)은 높은 양의 상관관계를 가지고 있었는데, 이것은 폐광산 퇴적물에서 질소는 대부분 유기태로 존재하기 때문이다. 또한 전질소는 2 ~ 50  $\mu$ m 크기의 입자 함량과 높은 양의 상관관계를 가지고 있었다. 이것으로부터 퇴적물 내 질소 대부분이 이 크기의 입자에 흡착되어 있다는 것을 추측할 수 있다. 그리고 pH와 전기전도도(EC)가 음의 상관

성을 나타내고 있는데, 이것은 pH가 낮을수록 퇴적물 내의 이온들이 유리 상태로 존재하여 전기전도도가 증가하기 때문이다.

폐광산 퇴적물의 중금속 농도와 생물독성은 Table 8에 나타나 있다. 광산배수와 마찬가지로 중금속 중에서 Zn의 농도가 가장 높게 검출되었다. 각 중금속의 유효태 농도는

**Table 8.** Heavy metal concentrations and acute toxicity of mine sediment to *Chironomus riparius*

Mine name	Species	Heavy metals (mg/kg)								Mortality (%)
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	
Jinduk	available	0.48	n.d.	n.d.	5.08	n.d.	2.48	18.88	37.84	50
	total	6.00	3.28	n.d.	71.40	n.d.	820.48	78.40	132.28	
Samtan	available	0.56	0.36	n.d.	17.68	n.d.	60.52	9.68	563.52	35
	total	1.52	0.36	8.80	67.76	n.d.	1626.76	274.64	1069.28	
Sungbo	available	0.68	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	2.04	0.56	26.24	45
	total	9.32	n.d.	7.68	9.32	n.d.	760.16	1.20	183.44	
Najeon	available	0.84	n.d.	n.d.	4.00	n.d.	18.72	4.16	73.56	40
	total	4.20	n.d.	21.28	17.08	n.d.	1594.80	25.48	166.88	
Nakcheon	available	2.56	9.44	n.d.	19.24	n.d.	6.04	13.40	677.28	60
	total	181.08	17.44	27.12	120.00	20.24	1907.52	233.28	1663.04	
Dongmyung	available	16.88	18.68	n.d.	33.96	n.d.	5.80	13.32	1440.64	45
	total	3992.08	41.76	11.60	200.00	n.d.	2127.08	688.16	4453.68	
Gahak	available	0.92	7.6	n.d.	61.56	n.d.	2.24	587.24	520.92	15
	total	6.20	14.24	40.16	240.20	n.d.	2222.78	688.16	4453.68	
Yongsuk	available	0.76	n.d.	n.d.	1.76	n.d.	1.00	0.92	46.60	45
	total	13.92	n.d.	11.36	15.76	n.d.	568.84	46.36	231.72	
Sangdong	available	8.96	4.08	n.d.	3.40	n.d.	9.76	1.68	130.28	30
	total	252.00	6.16	39.08	72.08	n.d.	212.36	23.60	405.84	

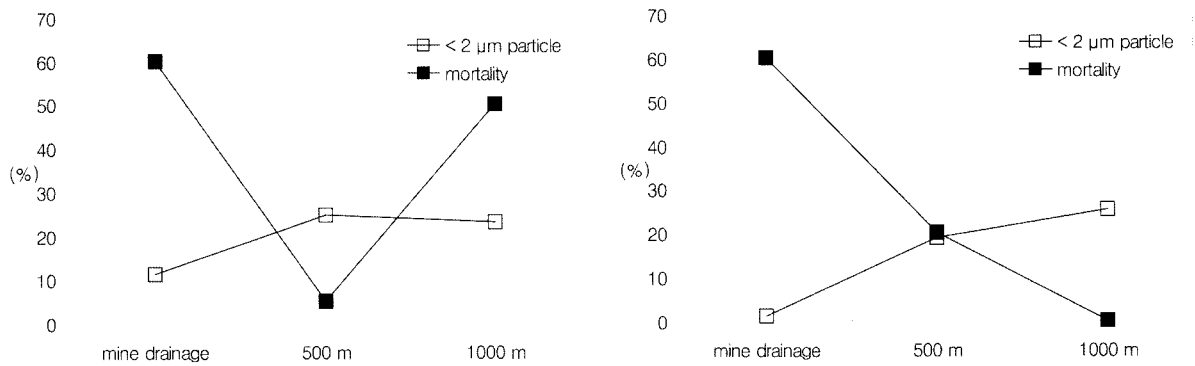


Fig. 1. Correlation between clay (< 2 μm particle) content and mortality for Nakcheon (a) and Yongsuk (b) mine sediments

총 중금속의 0~50% 이었으며, 깔따구를 이용한 급성독성 평가 결과, 퇴적물의 치사율은 15~60%로 나타났다. 그러나 퇴적물의 물리화학적 특성은 물론 중금속 농도도 치사율과 뚜렷한 상관성을 보이지 않았다.

한편 낙천과 용석광산에서는 하류방향 일정 거리별로 퇴적물을 채취하였는데, Fig. 1에 나타난 바와 같이 깔따구의 치사율은 2 μm 이하 크기의 입자 함량과 높은 음의 상관관계를 보여주었다( $r = -0.7042$ ). 이것은 퇴적물 입자가 작을수록 비표면적이 넓어 독성의 원인이 되는 중금속이 더 많이 흡착되어 생물 유효도(bioavailability)가 떨어지기 때문이다(김 등, 2005b). 즉, 크기가 가장 작은 2 μm이하의 입자 함량이 증가할수록 중금속을 더 많이 흡착하게 되고, 이것은 생물독성이 큰 유리 중금속 농도 이온의 농도를 감소시키게 된다. 따라서 퇴적물의 화학적 조성이 유사할 경우, 구성 입자의 크기가 생물독성 유발에 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 10 개의 폐광산에서 채취한 광산배수 및 퇴적물의 중금속 오염과 생물독성을 연구하였다. 폐탄광 광산배수 물벼룩 독성의 주요원인은 낮은 pH이었으며, 폐금속광의 경우는 광산배수의 낮은 pH와 함께 높은 부유태 중금속 함량이었다. 따라서 광산배수의 생물독성 저감을 위하여, 폐탄광의 광산배수는 중화처리가 요구되며 폐금속광의 경우는 중화처리뿐만 아니라 중금속 제거를 위한 처리도 필요하다는 것을 알 수 있었다.

깔따구에 대한 폐광산 퇴적물의 생물독성은 퇴적물의 물리화학적 특성이나 중금속 농도와 특별한 상관성이 없는 것으로 나타났다. 그러나 같은 광산에서 거리에 따라 채취한 퇴적물의 생물독성은 2 μm 이하의 입자 함량과 높은 음의 상관관계를 보여주었다. 그러나 본 연구 결과만으로는 퇴적물의 생물독성에 영향을 주는 인자들을 명확하게 해석하기 어렵다고 생각한다. 따라서 퇴적물 중금속의 생물 유효도는 물론 독성 시험 생물의 습식 특성까지 고려한 깊이 있는 연구가 진행되어야 할 것이다.

#### 사 사

본 연구는 한강수계관리위원회에서 시행한 2005년도 환경기초조사사업과 환경부 차세대핵심환경기술개발사업(토착식물을 이용한 중금속 오염지역의 자연형 장기복원기술 개발)의 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

김상훈, 천세억, 신기식, 정동일, 산업폐수의 생물독성 발현에 관한 연구, *한국물환경학회지*, **21**(3), pp. 274-276 (2005a).  
 김석구, 이미경, 안재환, 강성원, 전상호, 퇴적물 내 입도와 유기물 함량이 영양염류 및 중금속 농도에 미치는 영향, *대한환경공학회지*, **27**(9), pp. 923-931 (2005b).  
 김은애, 조훈제, 박은주, 김효진, 김정규, 정진호, 감마선 처리가 섬유와 안료폐수의 생물독성에 미치는 영향, *한국물환경학회지*, **22**(1), pp. 145-149 (2006).  
 나진성, 김기태, 김상돈, 한상국, 장남익, 김용석, 독성 반응 곡선을 이용한 수계 주요 오염물질의 혼합독성평가, *대한환경공학회지*, **27**(1), pp. 67-74 (2005).  
 박용하, *휴폐광 금속광산 지역의 오염 관리방안*, 한국환경기술개발원, 서울, pp. 1-14 (1994).  
 박천영, 정연중, 김성구, 함백폐탄광 지역의 광산배수와 하상퇴적물에 대한 지구화학적 특성, *한국자원공학회지*, **39**(1), pp. 35-50 (2002).  
 오재일, 심연식, 국내 산성광산배수의 수질특성분석, *한국토목학회지*, **23**(6), pp. 587-596 (2003).  
 이성규, 오경택, 김우근, 김수연, 김지원, 이순애, 수질유해물질의 동합독성 관리제도 도입방안 연구(III), 한국화학연구원 부설 안전성평가 연구소, 대전, pp. 22-23 (2005).  
 전상호, 한강 퇴적물에 함유된 오염물질의 존재형태와 용출 가능성에 관한 연구, *한국유수학회지*, **23**(1), pp. 31-42 (1999).  
 정영욱, 민정식, 권광수, 이현주, 광산배수 정화용 소택지의 기질물질 효율성 평가, *한국자원공학회지*, **34**, pp. 142-151 (1997).  
 지상우, 김선우, 남한지역 탄전별 광산배수의 물리화학적 특성에 관한 연구, *한국지구시스템공학회지*, **40**(6), pp. 467-478 (2003).  
 환경부, *수질오염공정시험법* (2004).  
 Bowell, R. J. and Bruce, L., Geochemistry of Iron Ochres and Mine Waters from Levant Mine, *Applied Geochemistry*,

- 10(2), pp. 237-250 (1995).
- Carpenter, R. H. and Hayes, W. B., Annual Accretion of Fe—Mn-Oxides and Certain Associated Metals in a Stream Environment, *Chemical Geology*, **29**, pp. 249-259 (1980).
- Davies, T. D., Sulphate Toxicity to the Aquatic Moss, *Fontinalis antipyretica*, *Chemosphere*, **66**(3), pp. 444-451 (2007).
- Dekker, T., Creve, G. D., Ter Laak, T. L., Biovin, M. E., Veuger, B., Gortzak, G., Dumfries, S., Lückner, S. M. G., Kraak, M. H. S., Admiraal, W. and van der Geest, H. G., Development and Application of a Sediment Toxicity Test Using the Benthic Cladoceran *Chydorus sphaericus*, *Environmental Pollution*, **140**, pp. 231-238 (2006).
- Gerhardt, A., Bisthoven, L. J. and Soares, A. M. V. M., Macroinvertebrate Response to Acid Mine Drainage: Community Metrics and On-Line Behavioral Toxicity Bioassay, *Environmental pollution*, **130**, pp. 263-274 (2004).
- Haley, M. V. and Kurnas, C. W., *Aquatic Toxicity and Fate of Nickel Coated Graphite Fibers, with Comparisons to Iron and Aluminum Coated Glass Fibers*, Edgewood Research Development and Engineering Center (1993).
- Hernando, M. D., Fernandez-Alba, A. R., Tauler, R. and Barcelo, D., Toxicity Assays Applied to Wastewater Treatment, *Talanta*, **65**, pp. 358-366 (2005).
- Kazlauskienė, N., Burba, A. and Svecevičius, G., Acute Toxicity of Five Galvanic Heavy Metals to Hydrobionts, *Ekologija*, **1**, pp. 33-36 (1994).
- Mount, D. I. and Norberg, T. J., A Seven-Day Life-Cycle Cladoceran Toxicity Test, *Environmental Toxicology and Chemistry*, **3**(3), pp. 425-434 (1984).
- Nelson, L., Acute Cyanide Toxicity: Mechanisms and Manifestations, *Journal of Emergency Nursing*, **32**(4), pp. S8-S11 (2006).
- NIASI, *Method of Soil and Plant Analysis*, National Institute of Agriculture Science and Technology, Suwon (2000).
- OECD, *Guideline for Testing of Chemicals No.202*, OECD, Paris (2004).
- OECD, *Sediment-Water Chironomid Toxicity Test Using Spiked Sediment No.218*, OECD, Paris (2001).
- Sorvari, J. and Sillanpää, M., Influence of Metal Complex Formation on Heavy Metal and Free EDTA and DTPA Acute Toxicity Determined by *Daphnia magna*, *Chemosphere*, **33**, pp. 1119-1127 (1996).
- Winkels, H. J., Blom, G., Kroonenberg, S. B. and Lijklema, L., Dilution of Riverine Heavy Metal Input Concentrations by Suspension of Sediments and Algal Growth in the IJsselmeer, *Water Research*, **32**, pp. 2931-2940 (1998).
- Yim, J. H., Kim, K. W. and Kim, S. D., Effect of Hardness on Acute Toxicity of Metal Mixtures Using *Daphnia magna*: Prediction of Acid Mine Drainage Toxicity, *Journal of hazardous materials*, **138**(1), pp. 16-21 (2006).