

Research Article

Open Access

삼보광산 수계 하천수질 및 퇴적토의 오염도 평가

정구복*, 권순익, 홍성창, 김민경, 채미진, 김원일, 이종식, 강기경

농촌진흥청 국립농업과학원

Contamination Assessment of Water Quality and Stream Sediments Affected by Mine Drainage in the Sambo Mine Creek

Goo-Bok Jung*, Soon-Ik Kwon, Sung-Chang Hong, Min-Kyeong Kim, Mi-Jin Chae, Won-Il Kim, Jong-Sik Lee and Kee-Kyung Kang (National Academy of Agricultural Science(NAAS), RDA, 150 Suin-ro, Suwon 441-707, Republic of Korea)

Received: 13 June 2012 / Accepted: 25 June 2012

© 2012 The Korean Society of Environmental Agriculture

Abstract

BACKGROUND: Mine drainage from metal mining districts is a well-recognized source of environmental contamination. Oxidation of metal sulfides in mines, mine dumps and tailing impoundments produces acidic, metal-rich waters that can contaminate the local surface water and soil. **METHODS AND RESULTS:** This experiment was carried out to investigate the pollution assessment of heavy metal on the water quality of mine drainage, paddy soils and sediment in lower watershed affected by mine drainage of the Sambo mine. The average concentrations of dissolved Cd (0.018 ~ 0.035 mg/L) in mine drainage discharged from the main waste rock dumps(WRD) was higher than the water quality standards (0.01 mg/L) for agricultural water in Korea. Also, the average concentrations of dissolved Zn, Fe and Mn were higher than those of recommended maximum concentrations (Zn 2.0, Fe 5.0, Mn 0.2 mg/L) of trace metal in irrigation water proposed by FAO (1994). The average contents of Pb and Zn in paddy soils was higher than those of standard level for soil contamination (Pb 200, Zn 300 mg/kg) in agricultural soil by Soil Environmental Conservation Act in Korea. Also, the concentrations of Cd, Pb and Zn in sediment were higher than those of standard level for soil contamination (Cd 10, Pb 400, Zn 600 mg/L)

in waterway soil by Soil Environmental Conservation Act in Korea. The enrichment factor (EF_c) of heavy metals in stream sediments were in the order as Cd>Pb>Zn>As>Cu>Cr>Ni. Also, the geoaccumulation index (I_{geo}) of heavy metals in stream sediments were in the order as Zn>Cd>Pb>Cu>As>Cr>Ni, specially, the geoaccumulation index (I_{geo}) of Zn (I_{geo} 3.1 ~ 6.2) were relatively higher than that of other metals in sediment.

CONCLUSION(s): The results indicate that stream water and sediment were affected by mine drainage discharged from the Sambo mine at least to a distance of 1 km downstream (SN-1, SN-2) of the mine water discharge point.

Key Words: Heavy metal, Paddy soil, Sambo mine, Sediment, Watershed

서론

우리나라 금속광산은 전국에 1,000여개가 산재되어 있으며, 1980년대 이후 품위저하와 채산성 악화로 인하여 대부분이 폐광된 상태이다(Jung *et al.*, 2004; Jung *et al.*, 2005). 폐광산 지역의 환경오염 정화 대책은 인근 농경지의 중금속 오염이 사회적 문제로 제기되기 시작한 1990년대부터 본격적으로 추진되었다고 볼 수 있다. 그럼에도 불구하고, 최근 보고에 의하면 다수의 폐광산에서 오염원에 대한 적절한 광해방지 시설 없이 침출수 및 갭내수에 의한 광해가 발생되어 광산하류 수계 및 토양오염을 초래할 가능성이 있다고 하였다(Choi *et al.* 2004; Jung and Chon, 1998; Jung *et al.*, 2008).

광산 폐기물은 광산 활동, 광물자원 회수 및 금속 추출시

*교신저자(Corresponding author) :
Tel: +82-31-290-0202 Fax: +82-31-290-0206
E-mail: gbjung@korea.kr

선광, 제련과정에서 산출되는 폐석(Mine waste)과 광미(Tailing) 등으로 구분된다. 폐광산의 갱내수 및 침출수에서 유래되는 각종 광산배수는 주변지역의 영구적인 오염원으로 알려져 있다(Jung *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2004). 폐광산 주변의 수계오염은 주로 광산배수(AMD : Acid Mine Drainage, ARD : Acid Rock Drainage)의 지속적인 유출에서 비롯되는데, 이러한 광산배수는 자연수 및 강우의 순환과정에서 폐석 및 광미에 포함된 황화광물과의 산화반응에 의하여 발생된다(Lin *et al.*, 2007; Moncur *et al.*, 2006; Olias *et al.*, 2004). 특히 강우 등으로 유출된 광산배수는 다량의 중금속 및 황화물 등을 함유한 상태로 하류 장거리까지 분산, 이동되면서 주변 농경지 및 수계를 심각하게 오염시킬수 있다(Dinelli *et al.*, 2001; Jeon *et al.*, 2001; Kim *et al.*, 2005). 더욱이 황 이온이 다량 함유된 광산배수의 유입은 pH 값을 낮추는 결과를 가져와 수계 내 용존 오염물질의 증가와 주변 토양의 중금속 농도 등을 높일수 있다(Kang *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2001). 그러나 광산배수의 특성이 물리 화학적으로 매우 복잡하여 수계내 수질 및 토양 오염에 대한 정확한 비교 평가에는 한계가 있는 것으로 알려져 있다(Jung *et al.*, 2004; Jung *et al.*, 2008). 따라서 광산배수에서 유래된 하류 수계의 수질 및 토양에 대한 환경영향 평가 및 그에 따른 정화처리 대책이 절실히 필요할 것이다. 다른 한편으로 토양 내 중금속의 상대적인 오염상태를 밝히기 위하여 최근에 여러 연구자들이 중금속 허용한계치 및 배경함량을 근거로 중금속별 오염지수(Pollution Index, PI), 부화계수(Enrichment Factor, EFc) 및 지화학적 농축계수(Index of geoaccumulation, Igeo) 등을 산출하여 평가하는 방법을 적용하고 있다(Kim *et al.*, 2005; Loska *et al.*, 2004; Muller, 1979; Varol, 2011). 이러한 상대적인 지수값들은 중금속 오염의 동·식물의 영향, 독성 및 오염등급을 간접적으로 설명하는데 유용한 자료가 될 수 있다(Loska *et al.*, 2004).

본 연구에서는 폐광산 유출 광산배수에 의한 하류 수계의 오염 확산을 평가하고자 경기도 화성에 위치한 삼보광산 광미댐에서 유출되는 침출수 및 하류 하천수를 2006년(8월, 12월) 및 2007년(4월)에 4개월 주기 총 3회 채수하여 수질오염 정도를 평가하였다. 또한 광산 침출수에 의한 토양오염의 영향 정도를 파악하기 위하여 수계 주변의 논토양은 2006년 10월, 하천 퇴적토를 2006년(8월, 12월)부터 2007년(4월)에 채취하여 분석·평가하였다.

재료 및 방법

연구지역

삼보광산은 1956년 등록된 광산으로 경기도 화성시 봉담읍에 위치하고 있다. 주광종은 납, 아연으로 개광된 이래 광산활동이 활발히 진행 중일 때는 연화광산, 장군광산과 함께 국내에서 대표적인 납, 아연 광산이었으나, 경제성과 품위 저하에 따라 1991년에 광산활동이 중단된 후 폐광되었다(Jung and Chon, 1998; Jung *et al.*, 2004). 삼보광산의 광상은 선

캠브리아기의 경기편마암복합체인 원생대 암석사이를 열수가 충진한 대표적인 열수변질형이다. 광산 주변은 주로 변성암인 충상 흑운모, 백운모 편암 및 흑운모 편암으로 구성되어 있다. 주요 광석광물로는 섬아연석, 방연석 및 증정석이며, 미량으로 산출되는 광물로는 황동석과 황철석이 있다. 삼보광산의 주 오염원인은 내리에 위치한 높이 150m, 길이 300m 규모의 주 광미댐에 적치된 광산폐기물은 유실을 방지하기 위하여 복토가 이루어져 있다. 또한 상리에는 주 광미댐에 비해 소규모로 선광장의 하류쪽에 광미 적치지역이 존재한다. 폐광 이후 갱내수와 더불어 광미댐으로부터 침출수가 유출되었고, 철수산화물[Fe(OH)₃]의 침전으로 yellow boy현상이 심하게 관찰되었다.

시료채취 및 분석방법

삼보광산의 광미댐 침출수는 상리와 내리에 위치한 2개 지역에서 유출되며, Fig. 1에서 보면 주 광미댐(WRD-2)과 선광장 하류 광미댐(WRD-1)에서 유래된다. 삼보광산 주변 하류 하천수의 채취는 상리와 내리에 위치한 침출수의 하류 하천 영향정도를 보기 위하여 2006년(8월, 12월)부터 2007년(4월) 사이에 4개월 주기로 총 3회에 걸쳐 침출수 영향 지점과 자연수 개념의 계곡수를 각각 채수하였다. Fig. 1과 같이 상리의 경우 침출수(S-1)와 계곡수(S-3), 그리고 하류 하천수(S-2, S-4, S-5) 지점을, 내리는 침출수(N-1)와 계곡수(N-3), 그리고 하류 하천수(N-2, N-4, N-5) 지점을 선정하여 채수하였다. 또한 상리와 내리 하천이 합류 후 수질상태를 비교하기 위하여 하류 1km 이상지점을 대상으로 두 하천의 합류 후 지점(SN-1, SN-2)을 채취하였다.

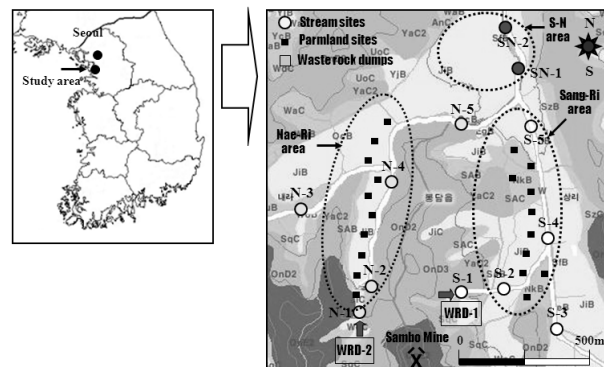


Fig. 1. Study area and sampling locations of the Sambo mine creek.

삼보광산 수계 인근 토양의 중금속 오염도를 평가하기 위하여 광산 하류의 논토양은 2006년 10월에, 하천 퇴적토를 2006년(8월, 12월)부터 2007년(4월) 사이에 4개월 주기 총 3회 채취하였다. 논토양은 삼보광산 하류 하천 주변의 거리별로 상리 및 내리에서 각각 10점씩 총 20점을 채취하였고, 하천 퇴적토는 삼보광산 하류에 위치한 상리 및 내리에서 침출수 및 하천수 지점과 동일한 지점에서 채취하였다. 즉 상리 지역은 침출수(S-1)와 계곡수(S-3), 그리고 하류 하천수(S-2,

S-4, S-5) 지점, 내리는 침출수(N-1)와 계곡수(N-3), 그리고 하류 하천수(N-2, N-4, N-5) 지점의 퇴적토를 채취하였다. 또한 상리와 내리 하천이 합류된 지점을 평가하기 위하여 두 하천의 합류 후 지점(SN-1, SN-2)을 채취하였다.

삼보광산 침출수 및 하류에 위치한 하천수 분석은 수질오염공정시험법(환경부, 2004)과 Standard Method(APHA, 1992)에 준하여 분석하였다. 중금속 및 미량성분 분석은 ICP-OES (GBC Integra XMP, Australia)와 ICP-MS(HP, Agilent 7500cs, USA)를 이용하여 정량하였고, 음이온인 황산이온(SO₄²⁻) 분석은 이온크로마토그래피(DX-320, Dionex)를 이용하여 분석하였다. 농토양 및 퇴적토는 자연건조 후 전기오븐(105 °C)에서 하루 이상 건조시킨 후 2 mm 입도로 체질하여 1차 통과분만을 선별한 다음 마노 유발을 이용하여 150 mesh 이하로 분쇄하여 중금속 분석용 시료로 사용하였다(환경부, 2010). 토양의 중금속 전함량 분석은 마이크로웨이브 전처리 장비(Mars-X, CEM)를 이용하여 시료 0.5 g을 마이크로웨이브 vessel에 취하여 분해액인 왕수(HNO₃:HCl=1:3) 12 mL를 각각 가한 다음 미국 EPA-method 3051a법(1996)에 근거한 분해조건으로 분해하였고, 분해된 시료는 초순수를 가하여 50 mL로 채워 분석용시료로 사용하였다. 본 연구에서 전처리된 토양의 중금속 분석은 ICP-OES(GBC Integra-XMP) 및 ICP-MS(HP, Agilent 7500cs)를 이용하여 정량하였다.

토양 중금속의 오염도 평가

삼보광산 하류 농토양 및 퇴적토 중의 중금속 오염특성을 비교하기 위하여 중금속별 오염상태의 상대적인 지수로 표현할 수 있는 오염지수(Pollution Index, PI), 부화계수(Enrichment Factor, EF) 및 지화학적 농축계수(Index of geoaccumulation, Igeo)를 산출하였다(Jung *et al.*, 2005; Loska *et al.*, 2004; Muller *et al.*, 1979; Varol, 2011). 오염지수는 토양오염의 정도를 평가하는 방법 중에서 토양에서 농작물 재배시 섭취할 경우 인간과 동물의 건강이나 질병에 영향을 줄 수 있는 중금속의 허용한계치(Tolerance level)를 이용하여 오염정도를 평가하는 방법이다. 본 연구에서는 Kloke(1979)가 제안한 중금속의 허용 한계치를 근거로 하여 오염지수를 평가하였고, 환산식은 다음과 같다.

$$\text{오염지수(PI)} = \left[\frac{\sum(\text{토양의 중금속 농도} / \text{허용한계치})}{\text{중금속 원소의 수}} \right]$$

본 연구에서 적용한 수질 허용한계치는 환경정책기본법의 하천 및 호수의 농업용수 수질기준(Cd 0.01, Pb 0.1 mg/L), 음용수 수질기준(SO₄²⁻ 200 mg/L) 및 FAO 관개용수 중의 최대 권고치(Zn 2, Al 5, Fe 5, Mn 0.2 mg/L)이다(An *et al.*, 2006)

부화계수는 어떤 금속이 배경농도에 대한 상대적인 오염상태의 절대성을 평가하는데 유용하며, 지각과 토양입자의 전형적인 지시원소인 Al 함량을 이용하여 오염정도를 평가하였고, 환산식은 다음과 같다.

$$\text{부화계수(EF)} = \left[\frac{(X / Y_{Al})_{\text{soil}}}{(X / Y_{Al})_{\text{crust}}} \right]$$

여기에서 (X / Y_{Al})_{soil}은 토양 중의 원소(중금속) X 및 Al의 농도비, (X / Y_{Al})_{crust}은 지각(토양)중의 원소(중금속) X 및 Al의 농도비를 각각 나타낸다.

지화학적농축계수는 강, 호수, 해안퇴적물의 중금속 함량을 오염되지 않은 퇴적물과 비교하여 정량화하는 방법이다. 농축계수는 1979년 Muller에 의해 제안된 평가지수로 Table 1과 같이 Igeo 지수 값을 7등급 기준으로 구분 평가하였고, 환산식은 다음과 같다.

$$\text{지화학적 농축계수(Igeo)} = \log_2 \left[\frac{(M)_{\text{sample}}}{1.5(M)_{\text{background}}} \right]$$

환산식에서 (M)_{sample}은 토양의 중금속농도, (M)_{background}는 비오염 토양의 중금속함량, 1.5는 기원물질의 중금속 함량변화를 보정하기 위한 보정상수이다. (M)_{background}는 대조토양(S3 및 N3의 상류 퇴적토 평균치)의 중금속 함량(Cd 0.4, Cu 12.1, Pb 29.0, Ni 58.8, Cr 30.7, As 4.8 mg/kg)으로 산출하였다.

Table 1. Class of index of geoaccumulation

Class	Igeo value	Designation of soil quality
0 Class	Igeo ≤ 0	practically uncontaminated
1 Class	0 < Igeo < 1	uncontaminated to moderately contaminated
2 Class	1 < Igeo < 2	moderately contaminated
3 Class	2 < Igeo < 3	moderately to heavily contaminated
4 Class	3 < Igeo < 4	heavily contaminated
5 Class	4 < Igeo < 5	heavily to extremely contaminated
6 Class	5 < Igeo	extremely contaminated

결과 및 고찰

광산 하류수계 수질오염도 평가

삼보광산 하류 침출수 및 수계 내 하천수의 중금속 및 화학성분 평균 함량은 Table 2와 같다. 광산 침출수(S-1, N-1)의 중금속 및 화학성분 평균 함량은 상리에서 Cd, Pb 및 Fe 성분이 높게 나타났고, 다른 성분은 내리에 위치한 주광미장 침출수에서 높게 나타났다. 또한 이러한 침출수의 성분함량 경향은 거리별 하천수의 오염정도와 유사하였다.

본 조사 결과를 우리나라 농업용수 수질기준(환경부, 2011)과 비교하면, Cd의 경우 두 지역 모두에서 침출수(S-1, N-1) 및 하천수(S-2, N-2)의 Cd 평균 함량이 농업용수수질기준인 0.01 mg/L을 초과하였다. 또한 상리에서 채취한 침출수(S-1) 및 하천수(S-2) 중의 Pb 농도는 농업용수 수질기준인 0.1 mg/L을 초과하였다.

Table 2. Mean concentration and water pollution index(WPI) of main pollutants in the lower reaches stream affected by mine drainage discharged from the closed Sambo mine

Sampling sites	Cd	Pb	Zn	Al	Fe	Mn	SO ₄ ²⁻	WPI*
------(mg/L)-----								
S-1	0.035	0.232	29.7	4.81	16.7	7.2	238	8.86
S-2	0.036	0.194	37.8	6.47	31.0	10.3	298	12.13
S-3	0.001	0.030	0.5	1.08	2.1	0.2	78	0.39
S-4	0.007	0.036	6.4	1.44	2.4	2.9	167	2.94
S-5	0.004	0.021	2.9	1.44	2.5	1.6	126	1.67
N-1	0.018	0.067	69.8	7.73	9.6	40.6	1073	35.58
N-2	0.019	0.032	66.1	4.17	6.4	27.2	1289	25.69
N-3	0.001	0.020	0.1	0.41	0.7	0.1	22	0.15
N-4	0.007	0.014	17.9	4.44	1.1	14.9	681	12.66
N-5	0.001	0.020	3.6	0.94	1.7	7.9	330	6.26
SN-1	0.001	0.017	2.3	1.26	2.0	1.2	103	1.21
SN-2	0.001	0.013	1.8	1.46	2.0	1.0	165	1.10

한편 FAO에서 제시한 관개용수 중 미량원소의 최대 권고치(Cd 0.01, Pb 5.0, Zn 2.0, Al 5.0, Fe 5.0, Mn 0.2, SO₄²⁻ 0.2 mg/L)(An *et al.*, 2006)와 비교하여 Cd, Zn, Al, Fe, Mn, SO₄²⁻ 성분이 권고농도를 초과하였다. 특히 두 지역의 침출수 중 Zn, Mn 및 SO₄²⁻의 평균 값은 FAO 관개용수 권고치와 비교하여 각각 약 15~35배, 36~203, 1,190~5,365배 이상 높은 것을 알 수 있었다. 여러 보고(Lin *et al.*, 2007; Moncur *et al.*, 2006; Olias *et al.*, 2004)들에 의하면 광산배수는 고농도의 Zn, Al, Fe 및 Mn을 함유하는 공통적인 특징이 있다. 반면에 일부 유해 중금속은 대상 광산별로 농도 차이가 있는 것으로 보고 되는데, 이는 대상광산 주변의 광물조성, 수문지질 및 지화학적 특성 등의 차이에 기인할 수 있다(Jung *et al.*, 2008; Jung *et al.*, 2004; Kang *et al.*, 2006). 또한 미량성분 농도는 수계 내에서 희석 및 침전 등 자연저감으로 낮아질 수 있는 반면, 수계 내 퇴적토의 고농도 농축과 콜로이드 상태의 부유물질로 원거리까지 이동될 가능성이 있다(Dinelli *et al.*, 2001; Jeon *et al.*, 2001).

Table 2의 각 지점별 상대적인 수질오염 상태를 파악하기 위하여 오염지수(Water Pollution Index, WPI)를 평가하였다. 삼보광산 하류 수계의 수질 오염지수(WPI)를 보면, 상리보다 주 광미장이 위치한 내리 지역이 상대적으로 오염도가 높았으며, 두 지역 하천의 합류지점(SN-1, SN-2)까지 오염지수가 1보다 높아 광산에서 1 km 이상의 하류까지 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 결과적으로 광산배수가 하류 수계에 유입되면서 광산에서 거리가 멀어질수록 주요 용존 이온들이 자연 감소하였는데, 이는 광산배수에 영향이 없는 주변 유입수(S-3, N-3)에 의한 희석작용, pH 값 상승에 의한 침전 및 흡착 등 완충작용의 결과로 볼 수 있다(Jung *et al.*, 2008; Jeon *et al.*, 2001). 또한 하천 수질의 자연저감 이면에

는 저니토 및 콜로이드 상태로 농축된 미량금속이 pH 값 등의 수계환경이 변화될 경우 다시 용해되어 오염이 확산될 수 있는 위험성이 있다(Bhattacharya *et al.*, 2006; Cherry *et al.*, 2001; Jung *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2001).

논토양의 오염도 평가

Table 3은 삼보광산 하류 논토양을 상리와 내리에서 거리별로 각각 10점씩 채취하여 분석한 중금속 전함량 및 오염지수를 나타낸 것이다. 논토양의 중금속 전함량 평균치는 내리보다 상리에서 대체적으로 높았는데, 이는 내리보다 상리에서 높았던 광산 침출수 농도의 영향으로 판단되었다. 논토양의 중금속 평균함량을 토양환경보전법(2010)의 토양오염 우려기준(Cd 4, Cu 150, Pb 200, As 25, Zn 300, Ni 100 mg/kg)과 비교하였을때 Pb, Zn 성분이 초과된 것으로 나타났다. 또한 최고치의 경우 상리에서 Cd, Pb, Zn 성분이 기준치를 초과하였고, 특히 Zn의 경우 상리와 내리에서 각각 토양오염 우려기준의 6.0, 3.6배 높은 것으로 나타났다. 논토양의 중금속 함량을 Kloke(1979)가 제안한 중금속의 허용한계치(Cd 3, Cu 100, Pb 100, As 20, Zn 300, Ni 50, Cr 100 mg/kg)를 근거로 하여 오염지수를 평가하였다. 토양 중금속의 오염지수는 중금속 오염상태를 상대적인 지수로 표현한 것으로 퇴적물이나 토양 등의 환경 매개체에 나타날 수 있는 복합적인 중금속 오염정도를 정량화하기 위한 목적으로 도입되었으며, 그 값이 1 이상이면 중금속 오염이 존재하는 오염지역, 1 이하는 비오염 지역으로 구분할 수 있다. 본 조사 결과, 광산 침출수 유입 영향으로 논토양의 오염지수는 상리에서 평균치 및 최고치가 각각 1.2, 2.0으로 나타나 내리보다 상대적으로 오염된 것을 알 수 있었다.

Table 3. Total concentration and pollution index of heavy metals in paddy soils near the closed Sambo mine

Sites	Basic statistics	Cd Cu Pb As Zn Ni Cr							Pollution index
		------(mg/kg)-----							
Sang-Ri (n=10) ¹⁾	Mean	2.72	41.2	259	9.2	1,052	24.4	41.4	1.19
	Min.	1.35	23.2	120	5.5	590	18.9	29.6	0.76
	Max.	4.69	69.9	498	17.5	1,789	27.9	65.3	2.03
	S.D. ²⁾	0.97	13.6	115	3.3	336	2.8	11.4	0.37
Nae-Ri (n=10)	Mean	1.67	15.1	63	6.2	299	25.2	33.7	0.45
	Min.	1.27	9.5	49	5.1	74	19.4	29.2	0.29
	Max.	2.11	18.8	84	7.0	1,068	30.5	43.3	0.88
	S.D.	0.27	2.9	12	0.7	286	3.1	4.5	0.16

¹⁾Sample number, ²⁾Standard deviation.

하천 퇴적토의 오염도 평가

삼보광산 유출 침출수에 의한 영향 정도를 검토하기 위하여 하천 퇴적토를 상리와 하리에서 거리별로 2006년 8월부터 2007년 4월까지 총 3회 채취 분석한 중금속 전함량 평균치 및 오염지수는 Table 4과 같다. 하천 퇴적토의 중금속 전함

량 중 주 오염성분인 Cd, Cu, Pb, Zn 성분은 내리보다 상리에서 대체적으로 높았는데, 이는 농도양과 마찬가지로 광산 침출수의 농도가 내리보다 상리 지역이 높는데 기인된 것으로 판단되었다. 퇴적토의 중금속 함량을 환경부의 토양환경보전법(2010)상 하천용지(2지역) 내 토양오염 우려기준(Cd 10, Cu 500, Pb 400, As 50, Zn 600, Ni 200 mg/kg)과 비교할 때 침출수 발생지역 퇴적토에서 Cd, Pb 및 Zn 성분이 초과된 것으로 나타났다. 특히, 상리지역의 Pb 및 Zn 함량은 기준치 대비 5~10배 정도의 높은 농도를 보였고, 아연의 경우는 상리 및 내리 합류지점인 1 km 아래까지 기준치를 초과한 것으로 나타났다. 이와 관련하여 여러 보고(Choi *et al.*, 2004; Jung *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2004)에서 본 조사지역과 같이 황화물을 많이 함유한 금속광산이 광미 중 중금속 농도가 현저하게 높고, 침출수에 의한 산성배수의 용출 가능성이 매우 높다고 하였다.

Table 4. Total concentration and pollution index of heavy metals in the sediments of downstream affected by mine drainage in the Sambo mine creek

Sampling sites	Cd	Cu	Pb	As	Zn	Ni	Cr	Pollution index
	------(mg/kg)-----							
S-1	13.0	234.7	2,178	18.4	6,305	21.4	37.9	7.32
S-2	8.2	138.0	1,081	11.2	3,708	19.2	40.7	4.09
S-3	4.5	26.4	131	10.4	757	18.1	35.8	0.98
S-4	6.3	67.6	337	6.5	3,394	19.3	38.0	2.65
S-5	8.0	118.6	569	9.4	2,442	21.3	40.0	2.71
N-1	8.1	62.9	541	6.8	5,342	10.0	49.7	3.94
N-2	14.7	48.2	829	14.9	6,351	27.2	79.2	5.27
N-3	2.4	15.5	37	3.5	75	15.0	28.8	0.34
N-4	4.3	26.9	143	7.0	1,234	17.4	34.5	1.18
N-5	5.0	25.5	49	5.2	747	28.3	50.3	0.89
SN-1	5.5	72.3	354	6.4	1,533	21.3	40.7	1.76
SN-2	4.5	33.6	98	12.3	1,051	24.1	44.6	1.12
Control soil	0.4	12.1	29	4.8	59	17.1	30.7	0.23

퇴적토의 지점별 중금속 함량을 Kloke(1979)가 제안한 중금속의 허용한계치(Cd 3, Cu 100, Pb 100, As 20, Zn 300, Ni 50, Cr 100 mg/kg)를 근거로 하여 오염지수를 평가하였다. 오염지수는 광산 침출수에 영향을 받지 않은 지점(S-3, N-3)을 제외하고는 1km 하류 합류지점까지 오염지수가 1 이상으로 광산 침출수의 영향으로 오염된 것을 알 수 있었다. 본 조사 결과에서 나타난 광산배수에 의한 중금속 등 오염물질 확산에 대하여 Lin *et al.*(2007)은 하류 수계 3.5 km까지 생물학적 독성이 매우 높았고, 이들 미량금속은 수계에 유입되면 감소되나 수계 내 퇴적물 중 농도가 크게 높아지는 특징을 보인다고 하였다(Cherry *et al.*, 2001; Choi *et al.*, 2004).

Fig. 2 및 Fig. 3은 삼보광산 하류 하천 퇴적토의 중금속 함량을 근거로 하여 산출된 부화계수 평균치와 범위, 그리고 채취지역 및 합류 지점까지의 부화계수를 나타낸 것이다. 부화계수를 제안한 Duce *et al.*(1975)은 부화계수 값이 1~10은 토양 및 지각의 원소조성 차이에서 비롯되어 부화상태가 아니며, 10~100은 지각의 자연 화학조성보다 강우 중 성분 조성이 상대적으로 부화가 있는 상태, 100 이상은 인간활동에 의한 인위적인 오염으로 부화조건이 매우 높은 상태로 정의하였다.

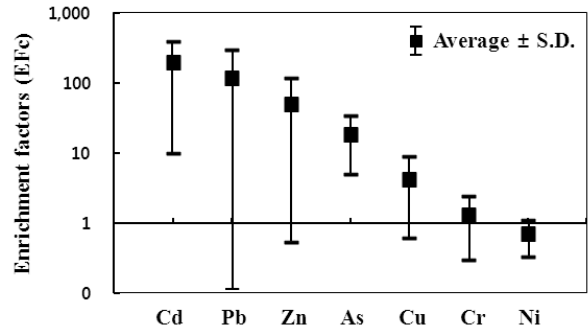


Fig. 2. Enrichment factors for heavy metals in the sediments of downstream affected by mine drainage discharged from the closed Sambo mine.

성분별 부화계수(EFc) 평균치는 Cd>Pb>Zn>As>Cu>Cr>Ni 순이었으며(Fig. 2), 지점간 편차가 큰 것으로 나타났는데, 이는 광산 침출수에 영향을 받지 않은 지점(S-3, N-3)이 상대적으로 낮은 원인에 있다(Fig. 3). 특히 Cd, Pb 성분은 광산 침출수 영향 지점에서 모두 10이상으로 나타나 상대적으로 오염도가 높았고, Cd, Pb 및 Zn 성분의 경우 1km 합류지점까지 10이상에 분포하는 것을 알 수 있었다. 일반적으로 폐금속광산 주변에서 유실 및 강우 등으로 수계에 유입되는 광미 및 침출수 등은 유해한 중금속을 다량 함유되어 있으며, 이러한 중금속의 부화 및 이동도는 산성폐수의 원인인 SO₄²⁻함량 뿐만 아니라 Al, Mn 및 Fe 수산화물에 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Jung *et al.*, 2005; Jung *et al.*, 2008).

Fig. 4는 삼보광산 수계 퇴적토의 중금속 오염도를 오염되지 않은 퇴적토와 비교하기 위하여 대조토양과 비교하여 상대적인 중금속 오염정도를 산출한 지화학적 농축계수(Index of geoaccumulation, Igeo)이다(Espinosa *et al.*, 2009; Jung *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2005; Loska *et al.*, 2004; Muller, 1979; Varol, 2011). 수계 퇴적토의 Igeo 값은 중금속 성분 및 지점별로 약간의 차이는 있으나 주 오염성분인 Zn, Pb 및 Cd이 높게 나타났다. 또한, 이들 성분은 광산 침출수의 영향을 받지 않은 퇴적토(S-3, N-3)를 제외한 Igeo 값이 2~6으로 경보오염(moderately to heavily contaminated) 이상이었고, 하류 1 km 지점까지 Igeo 값이 3이상으로 경보오염 수준으로 나타났다. 특히 Zn의 경우 침출수 유입 인근 퇴적토(S-1, S-2, N-1, N-2)에서 모두 위험오염(Igeo 5.4~6.2) 상태로 심하게 오염된 것을 알 수 있었다.

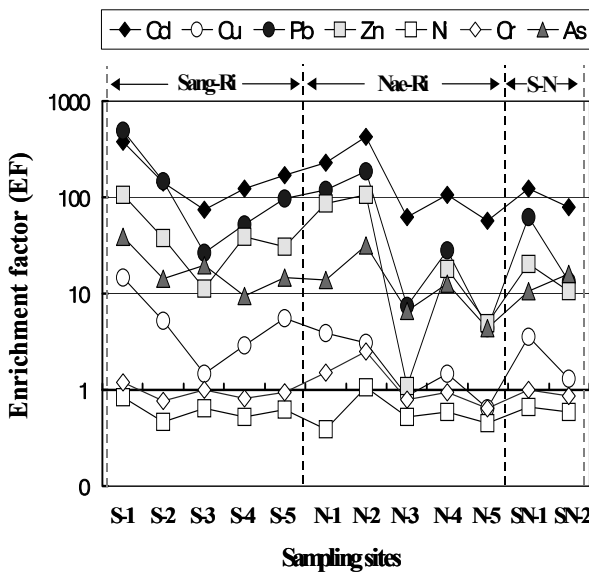


Fig. 3. Enrichment factors for heavy metals at sampling site in the sediments of downstream affected by mine drainage discharged from the closed Sambo mine.

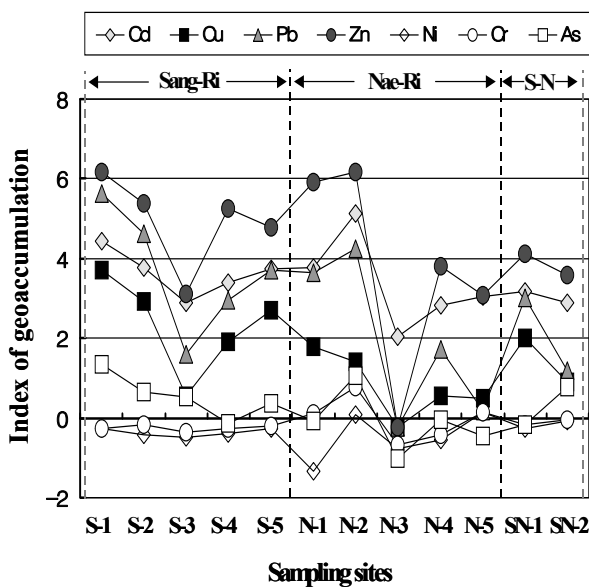


Fig. 4. Index of geoaccumulation(Igeo) of heavy metal in the sediments of downstream affected by mine drainage discharged from the closed Sambo mine.

위에서 산출하여 제시한 농수로 퇴적토양 및 재배토양의 중금속 오염지수와 농축계수로 볼 때 수계로부터 유입된 중금속을 다량 함유한 침출수가 주 원인이고, 주된 오염성분인 카드뮴과 구리의 오염상태가 심각하게 진행된 것을 알 수 있었다. 기존의 보고(Espinosa *et al.*, 2009; Jung *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2005)에 의하면 광산하류 수계 퇴적토의 지화학농축계수는 광산폐기물 및 침출수의 중금속 농도와 더불어 pH 값 및 황 등 화학성분 함량에 영향을 받고, 건기

보다 강우량이 많은 우기가 상대적으로 낮다고 하였다.

이상의 결과에서 삼보광산 주변 광산 침출수의 Cd, Pb 성분이 우리나라 농업용수 수질기준을 상회하고, 수계 내 퇴적토 뿐만 아니라 인근 논토양도 광산 침출수의 영향을 받아 중금속 오염정도가 심각한 것으로 나타났다. 따라서 광미댐 광산 침출수를 그대로 방치할 경우, 광산 하류의 수계환경 및 농경지가 환경오염에 완전히 노출되기 때문에 수계 내 오염 확산 방지 및 환경개선을 위한 감시 및 오염원 제거 등 종합적인 대책수립이 필요할 것으로 판단된다.

요 약

폐금속 광산에서 유출되는 광산배수로 인한 하류 수계의 환경오염 영향을 검토하기 위하여 삼보광산 하류 수계 내 하천수질, 퇴적토양 및 인근 논토양에 대한 중금속 오염도를 평가한 결과는 다음과 같다.

삼보광산 주변 광미댐 침출수의 Cd 평균 농도(0.018~0.035 mg/L)는 우리나라 농업용수 수질기준(0.01 mg/L)을 초과하였고, 미량성분 중 Zn, Fe 및 Mn 함량도 FAO의 관개용수 최대 권고치(Zn 2.0, Fe 5.0, Mn 0.2 mg/L)를 초과하였다. 광산 하류 논토양의 Pb, Zn 평균함량은 우리나라 농경지의 토양오염 우려기준(Pb 200, Zn 300 mg/kg)을 초과하였고, 중금속 오염지수 평균치는 상리지역 0.45보다 높게 나타났다. 광산 하류 수계 내 퇴적토의 Cd, Pb 및 Zn 함량은 우리나라 하천용지의 토양오염 우려기준(Cd 10, Pb 400, Zn 600 mg/kg)을 초과하였다. 또한 퇴적토의 중금속 오염지수(PI)는 상리지역 0.98~7.32, 내리지역 0.34~5.27로 지점별 편차가 컸으며, 하류 1km 지점 합류지점(SN-1, SN-2)까지 오염된 것으로 나타났다. 퇴적토의 부화계수(EFc) 평균치는 Cd>Pb>Zn>As>Cu>Cr>Ni 순으로 지점간의 편차가 큰 것으로 나타났다. 퇴적토의 중금속별 지화학농축계수(Igeo)는 지점별로 약간의 차이는 있으나 Zn>Cd>Pb>Cu>As>Cr>Ni 순으로 높았으며, 특히 Zn의 경우 광산 침출수 영향을 받은 퇴적토에서 경보오염에서 위험오염(Igeo 3.1~6.2) 상태로 심하게 오염된 것으로 나타났다. 결과적으로 삼보광산 하류 하천수질 및 퇴적토의 오염도 평가를 종합해 볼 때 광산 침출수의 영향이 하류 수계 1 km 이상(SN-1, SN-2)까지 미치는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

This study was carried out with the support of “cooperative Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No. PJ006906)” Rural Development Administration, Republic of Korea.

참고문헌

An, Y.J., Lee, W.M., Yoon, C.G., 2006. Evaluation of Korean water quality standards and suggestion of

- additional water parameters, *Korean J. Limnol.* 39, 285-295.
- Bhattacharya, A., Routh, J., Jacks, G. Bhattacharya, P., Mörth, M., 2006. Environmental assessment of abandoned mine tailings in Adak, Västerbotten district (northern Sweden), *Applied Geochemistry* 21, 1760-1780.
- Cherry, D.S., Currie, R.J., Soucek, D.J., Latimer, H.A., Trent, G.C., 2001. An integrative assessment of a watershed impacted by abandoned mined land discharges, *Environmental Pollution* 111, 377-388.
- Choi, S.G., Park, S.G., Lee, P.K., Kim, C.S., 2004. An overview of geoenvironmental implications of mineral deposits in Korea, *Econ. Environ. Geol.* 37:1-19.
- Dinelli, E., Lucchini, F., Fabbri, M., Cortecchi, G., 2001. Metal distribution and environmental problems related to sulfide oxidation in the Libiola copper mine area (Ligurian Apennines, Italy), *J. Geochem. Explor.* 74, 141-152.
- Duce, R.A., Hoffman, G.L., Zoller, W.H., 1975. Atmospheric trace metals at remote northern and southern hemisphere sites: pollution or natural?, *Science* 187, 339-342.
- Espinosa, E., Armienta, M.A., Cruz, O., Aguayo, A., Cenicerros, N., 2009. Geochemical distribution of arsenic, cadmium, lead and zinc in river sediments affected by tailings in Zimapán, a historical polymetallic mining zone of Mexico, *Environ Geol.* 58, 1467-1477.
- Jeon, S.R., Chung, J.I., Kim, D.H., 2001. Environmental effects from national waters contaminated with acid mine drainage in the abandoned Backen mine area, *Econ. Environ. Geol.* 35, 325-337.
- Jung, G.B., Kim, W.I., Lee, J.S., Lee, J.S., Park, C.W., Koh, M.H., 2005. Characteristics of heavy metal contamination in residual mine tailings near abandoned metalliferous mines in Korea, *Kor. J. Environ. Agric.* 24, 222-231.
- Jung G.B., Lee J.S., Kim W.I., Ryu J.S., Yun S.G., 2008. Monitoring of Seasonal Water Quality Variations and Environmental Contamination in the Sambo Mine Creek, Korea, *Kor. J. Environ. Agric.* 27, 328-336.
- Jung, M.C., Chon, H.T., 1998. Seasonal variation of heavy metal contents and environmental contamination in paddy fields around the Sambo Pb-Zn mine, Korea, *The Kor. soc. for grosys. engineer.* 35, 19-29.
- Jung, M.C., Jung, M.Y., Choi, Y.W., 2004. Environmental assessment of heavy metals around abandoned metalliferous mine in Korea, *Econ. Environ. Geol.* 37, 21-33.
- Kang, M.J., Lee, P.K., Youm, S.J., 2006. Characteristics of geochemical behaviors of trace metals in drainage from abandoned Sechang mine, *Econ. Environ. Geol.* 37, 213-227.
- Kim, H.J., Park, B.K., Kong, S.H., Lee, J.Y., Ok, Y.S., Jun, S.H., 2005. Fraction and Geoaccumulation Assessment Index of Heavy Metals in Abandoned Mines wastes, *Journal of KoSSGE* 10, 75-80.
- Kloke, A., 1979. Content of arsenic, cadmium, chromium, fluorine, lead, mercury, and nickel in plants grown on contaminated soil, *Paper presented at United Nations-ECE Symp.*
- Lee, C.H., Lee, H.K., Lee, J.C., Jeon, S.R., 2001. Environmental geochemistry and contamination assessment of the Tohyun mine creek, Korea, *Econ. Environ. Geol.* 34, 471-483.
- Lee P.K., Jo H.Y., Youm S.J., 2004. Geochemical Approaches for Investigation and Assessment of Heavy Metal Contamination in Abandoned Mine Sites, *Econ. Environ. Geol.* 37, 35-48.
- Lin, C., Wu, Y., Lu, W., Chen, A., Liu, Y., 2007. Water chemistry and ecotoxicity of an acid mine drainage-affected stream in subtropical China during a major flood event, *J. Hazard. Mater.* 142, 199-207.
- Loska, K., Wiechua, D., Korus, I., 2004. Metal contamination of farming soils affected by industry, *Environment International* 30, 159-165.
- Moncur, M.C., Ptacek, C.J., Blowes, D.W., Jambor, J.L., 2006. Spatial variations in water composition at a northern Canadian lake impacted by mine drainage, *Applied Geochemistry* 21, 1799-1817.
- Muller, G., 1979. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine river, *Geojournal* 2, 108-118.
- Olias, M., Nieto, J.M., Sarmiento, A.M., Ceron, J.C., Canovas, C.R., 2004. Seasonal water quality variations in a river affected by acid mine drainage: the Odiel River (south west Spain), *Sci. Total Environ.* 333, 267-281.
- Varol, M., 2011. Assessment of heavy metal contamination in sediments of the Tigris River (Turkey) using pollution indices and multivariate statistical techniques, *J. Hazard. Mater.* 195, 355-364.