한국지하수토양환경학회지 Vol. 15(6), p. 81~90, 2010 ≪原著≫

영산강 · 섬진강 유역 수계 폐금속광산 광해 영향 평가를 위한 개황조사

최경균[1] · 박하승[1] · 오다연[1] · 김갑순[2] · 허유정[2] · 박정훈[1]*
[1]전남대학교 환경공학과, [2]국립환경과학원 영산강물환경연구소

Primary Investigation for Evaluation of Abandoned Metal Mine Effect on Yeongsan and Seomjin Watershed

Kyoung-kyoon Choi[1] · Ha-Seung Park[1] · Da-Yeon Oh[1] · Kap-Soon Kim[2]
Yu-Jeong Huh[2] · Jeong-Hun Park[1]*
[1]Department of Environmental Engineering, Chonnam National University
[2]Yeongsan River Environment Research Center

ABSTRACT

In this study, primary investigation for evaluation of abandoned metal mine effect on watershed has been done. 64 abandoned mines have been selected for primary investigation through literature and field survey. 216 soil and 90 water samples were collected and metal pollution concentrations were analyzed. 24 mines have mine water in the pits and acid water below pH 5 was not observed. Soils from 35 mines were over the soil basis of concern and 16 mines were over the soil basis of action. Arsenic average concentration was 188 times of average concentration of the natural background. Drinking water samples from 3 mines were over the drinking water standard and surface water samples from 12 mines were over the river water standard. Integrated pollution index, which was resulted from the integration of field survey, soil and water pollution concentration, showed that, abandoned metal mines had affected on watershed greatly in the order of Samgeum, Daedeok, Cheongdalgeum, Heungsin, Yeongdae and Myeongbong mines.

Key words : Heavy metals, Contaminated soil, Abandoned mine, Acid mine drainage, Primary investigation, Yeongsan and Seomjin watershed

1. 서 론

전국에 산재되어 있는 폐금속광산의 수는 명확하지 않으나 환경부는 2005년도에 30개의 폐금속광산을 추가로 발굴하여 전체 폐금속광산의 수를 936개로 추정하고 있다(환경부, 2005). 환경부는 1992년부터 폐금속광산 주변의 토양에 대해 개황조사를 시작하여, 토양오염 우려 기준을 초과한 폐금속광산에 대하여 토양 오염도에 대한 정밀조사를 실시하여 왔다. 219개 폐금속광산에 대한 정밀조사를 2006년까지 완료하였으며, 2007년부터 310개 폐금속광산에 대한 정밀조사를 실시하여 2009년도에 완료하였다.

오염도가 높은 폐금속광산에 대해서는 오염원 유출방지사업, 옹벽, 석축, 댐, 수질 정화시설, 집진시설 구축 등 광해방지를 위한 노력을 하여왔다. 그러나 2004년 경남 고성군 병산리 주민들의 이타이이타이병에 관한 지방단체들의 문제제기, 2005년 경북지역 수철, 금장, 다락 폐금속광산 인근 지역 주민들에서 대조군 보다 높은 체내 중금속농도에 관한 보고 등으로 인해(영산강환경관리청, 2001b; 한국보건산업진흥원, 2005) 폐금속광산 주변 지역 주민의 건강영향에 대한 불안감이 증대 되었다. 그래서 현재까지 토양오염 중심의 조사에 한계가 있음을 인식하고 폐금속광산 주변의 종합적인 조사 평가의 필요성이 제기되어 왔다. 즉, 주변 토양오염 조사에 추가하여 주민들의 건강영향 조사, 주변 농작물의 조사, 수질조사 등의 필요성이다. 이들의 종합적인 조사를 통해서 폐금속광산 주변

*Corresponding author : parkjeo1@chonnam.ac.kr
원고접수일 : 2010. 10. 5 심사일 : 2010. 10. 14 게재승인일 : 2010. 11. 9
질의 및 토의 : 2010. 2. 28 까지

주민 및 생태계에 미치는 영향을 평가하고, 광해에 대한 적절한 대처방안, 관리방안, 처리방안이 제시될 수 있을 것이며, 주민들의 막연한 불안감을 해소할 수 있을 것이다.

영산강 · 섬진강 수계유역의 폐금속광산 주변 역시 현재까지는 주로 토양오염 중심의 조사 연구가 이루어져 왔으므로, 수계에 미치는 영향에 대한 연구는 전무한 상태이다. 본 연구에서는 영산강 · 섬진강 수계유역에 존재하는 폐금속 광산에 대한 자료검색 및 현장방문을 통하여 개황조사대상 광산을 선정하고, 선정된 광산 주변의 수질 및 토양 시료채취, 오염농도 분석을 통하여 수계에 미치는 영향 중심으로 광해를 종합적으로 평가하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 자료검색

대상권역에 대한 폐광산 관련 자료는 연구논문, 연구보고서, 연구팀의 기존 연구사업 수행 결과 등을 통하여 폐금속광산 연구자료를 확보하였다(국립환경과학원, 2007a, 2007b; 김정규 외, 2007; 박정덕 외, 2007; 영산강환경관리청, 2001a, 2001b; 정구복 외, 2001; 한국광해관리공단, 2007; 한국보건산업진흥원, 2005; 환경부, 2003, 2005, 2006). 확보된 자료에서 영산강 · 섬진강 유역에 해당하는 광산들에 대한 자료를 선별하였다.

2.2. 현장방문

자료검색을 통해 선정한 폐금속광산에 대해 현장조사를 실시하였다. 문헌을 통한 위치파악 후 현장을 방문하였으나, 대부분의 경우에 정확한 현장위치를 찾기는 어려웠으며, 주변 주민의 도움을 받아 현장을 파악할 수 있었다. 현장 방문 시 정성적으로 현장을 파악하여 정량 평가하였다. 현장 정성평가(Survey Index of mine site; SI) 항목은 갱내수 유출유무, 갱내수 산성도, 토양 산성도, 폐석 존재 여부, 폐석 유실우려, 광산에 대한 주민인지도, 광산에 대한 접근성, 광해방지시설의 존재여부, 광산 주변 식생현황, 지표유출수의 하천 유입여부에 관하여 10개 항목으로 설정하였으며 각 항목은 0에서 1의 점수를 갖게 된다(Table 1). 정성평가 항목은 수계별 광산유출수 영향조사 1년차 최종보고서를 참조하여 영산강 · 섬진강 수계유역 폐금속광산의 평가에 적합하도록 수정 보완하여 작성하였다(김정규 외, 2007). 총 점수에 항목 수 10을 나누어 SI값을 산정하게 된다. 따라서 각 광산의 SI 평가범위는 $0 \leq SI \leq 1$이며 이 값은 통합오염도 지수 평가 모델식(Integrated Pollution Index, IPI)에 일정 비율로 반영하여 시료의 오염농도 외에 각 광산의 특성이 반영되도록 하였다. 현장방문 시 각 광산의 갱구 및 시료채취 지점을 WGS84좌표계(World Geodetic System, 1984 : GRS80 타원체)로 기록 하였다(국토지리정보원, 2004).

2.3. 시료채취 및 분석

시료는 토양오염도 조사를 위한 토양시료(광미, 폐석적치장 내, 선광장 내 토양 및 주변 토양 등)와 수질오염도 조사를 위한 수질시료(갱내수, 하천수 및 지하수 등)를 광산별 영향권을 고려하여 채취하였다. 토양시료는 갱구를 기점으로 거리별 채취하였으며 조사항목은 pH 및 중금속 8종(Cd, Cu, As, Hg, Pb, Cr, Ni, Zn)이였다. 토양시료 채취 시 표토 (0~10 cm), 심토 (표토에서 30~1 m 깊이의 토양)로 구분하여 채취하였다. 시료채취 지점은 폐광산 하류 방향 2 km 이내에서 채취하였다. 선광장, 광미적치장 등의 시설물이 있는 경우는 해당 토양을 함께 채취하였다. 채취된 토양시료는 2009년 개정 전 토양오염공정시험 기

Table 1. Survey index of mine site

Assessment item	Assessment Criteria	Score	Result	Note
1. Existence of mine water	Y/N	1/0	24/40	
2. Mine water acidity	Below pH5/above	1/0	0/64	
3. Soil acidity	Below pH5/above	1/0	15/49	
4. Existence of debris	Y/N	1/0	14/50	
5. Possibility of debris losing	Slope/Flat	1/0	10/54	
6. Mine recognition level of residents	H/M/L	1/0.5/0	20/25/19	
7. Approachable to mine	H/M/L	1/0.5/0	30/16/18	
8. Installation of mine damage control facility	N/Y	1/0	59/5	
9. Vegetation condition of mine	H/M/L	0/0.5/1	59/4/1	
10. Drainage outflow in river	Y/N	1/0	1/63	
Total		10~0	(/10)	

준에 준하여 전처리하고 분석하였다(환경부고시, 2002). 수질시료의 분석 및 시료채취는 수질오염 공정시험기준에 준하였으며 조사항목은 토양오염 조사항목과 추가로 현장의 온도, 용존산소, 전기전도도를 측정하였다(환경부고시, 2009).

2.4. 오염지수 평가식

수계별 광산 유출수 통합 오염도 지수 평가모델식(Integrated Pollution Index, IPI)을 도입하여 광산별 오염도지수를 평가하였다(김정규 외, 2007). 수계별 광산 유출수 오염도 평가 기준 모델식은 수질 오염도, 토양 오염도, 문헌 및 현장방문조사를 항목별 50%, 30%, 20%의 가중치를 주어서 산술평균을 계산하는 모델식이다. 각 항목별 평가기준은 Kloke, A.이 제안한 모델식을 적용하였다(Kloke, 1979).

수질 오염도 평가 기준(Pollution index of water; PIw)은 Kloke, A.이 제안한 모델식을 적용하여 수질 오염기준항목인 Cd, Pb, Cu, Zn, As, Hg, Cr를 기준으로 갱내수 및 주변 하천 수질시료의 초과여부를 평가하였다. 수질 오염도 평가를 위한 산출은 식 (1)과 같이 하였다.

$$PIw = \frac{\sum \frac{Heavy\ metal\ concentration}{Tolerable\ level}}{Number\ of\ heavy\ metals} \quad (1)$$

토양 오염도 평가 기준(Pollution index of soil; PIs)은 Kloke, A 이 제안한 모델식을 적용하여 Cd, Pb, Ni, Zn, Cu, As, Hg, Cr의 항목을 갱구입구 토양에서 500 m 이내 토양시료(표/심토) 대상으로 평가하였다(Kloke, 1979). 또한 폐석 및 선광장이 존재할 경우 대상 시료(표/심토)도 평가 대상에 포함하였다. 토양 오염도 평가를 위한 산출은 식 (2)와 같이 하였다.

$$PIs = \frac{\sum \frac{Heavy\ metal\ concentration}{Tolerable\ level}}{Number\ of\ heavy\ metals} \quad (2)$$

현장조사 결과 평가(Survey index of mine site, SI)에는 Table 1에 나열한 10개의 항목별 오염도를 이용하였다.

대상광산의 PIw와 PIs, SI 값의 상대비교를 위해서 전체광산 중 최대값으로 나누어 통합 오염지수(Integrated pollution index, IPI) 계산에 이용(PIw'와 PIs'; SI')하였다. 그 평가 범위는 $0 \leq IPI \leq 1$이다. 통합 오염도 지수 평가모델은 식 (3)과 같으며, 갱내수가 존재하지 않은 경우 식 (4)와 같다.

$$IPI = 0.5PIw' + 0.3PIs' + 0.2SI' \quad (3)$$

$$IPI = 0.3PIs' + 0.2SI' \quad (4)$$

PIw' : 개별광산에서 구한 PIw 값을 조사한 폐금속광산 중 최대 PIw 값으로 나눈 값

PIs' : 개별광산에서 구한 PIs 값을 조사한 폐금속광산 중 최대 PIs 값으로 나눈 값

SI' : 개별광산에서 구한 SI 값을 조사한 폐금속광산 중 최대 SI 값으로 나눈 값

3. 결과 및 고찰

영산강 · 섬진강 유역를 3개권역(영산강권역, 섬진강권역, 기타권역)으로 분할하고 각 권역내의 행정구역(군, 시)를 기준으로 문헌조사를 수행하여 광산정보를 수집한 후 총 64개를 조사 대상광산으로 선정하였다(김정규 외, 2007; 박정덕 외, 2007; 영산강환경관리청, 2001a, 2001b; 한국광해관리공단, 2007; 환경부, 2003, 2005, 2006). 이들 광산에 대해 수계에 미치는 영향을 평가하기 위한 개황조사를 실시하였다. 선정된 64개 광산의 분포는 Fig. 1과 같다.

3.1. 현장 방문평가 결과

현장 방문을 통하여 섬진강권역 33개 폐금속광산 중 16개에서 갱구를 확인할 수 있었으며, 나머지 17개 광산은 자연매몰 5개소, 접근불가 9개소, 광해관리공단 산림복구 공사 중 2개소, 강제매몰 1개소로 인해 갱구를 확인할 수 없었다. 영산강권역 16개소 중 12개소에서 갱구를 확인할 수 있었으며, 나머지 4개소는 자연매몰 1개소, 접근불가 2개소, 광해관리공단 토양복원공사 중 1개소의 이유로 갱구를 확인할 수 없었다. 기타권역의 경우 15개소 중 12개소에서 갱구를 확인할 수 있었으며, 나머지는 접근불가 2개소, 광해방지사업 중 1개소 등의 이유로 갱구를 확인할 수 없었다. 광산 현장 방문 평가 결과를 Table 1에 요약하였다. Table 1 항목에서 갱내수가 존재하는 광산은 24개였으며, 갱내수에서 pH 5 이하의 산성도를 보이는 광산은 없었다. 토양에서 pH 5 이하의 산성도를 보이는 광산은 15개소이었다. 폐석이 존재하는 광산은 14개소였으며 경사가 있어 폐석의 유실우려가 있는 광산은 10개소였다. 폐금속광산에 대한 주민의 인지도가 높은 광산은 20개소이며 중간은 25개소이었다. 갱구로의 접근성이 좋은 광산은 30개소이며 다소 접근이 어려운 광산은 16개소였다. 광해방지시설이 일부 갖춰진 시설은 5개소이었다. 광

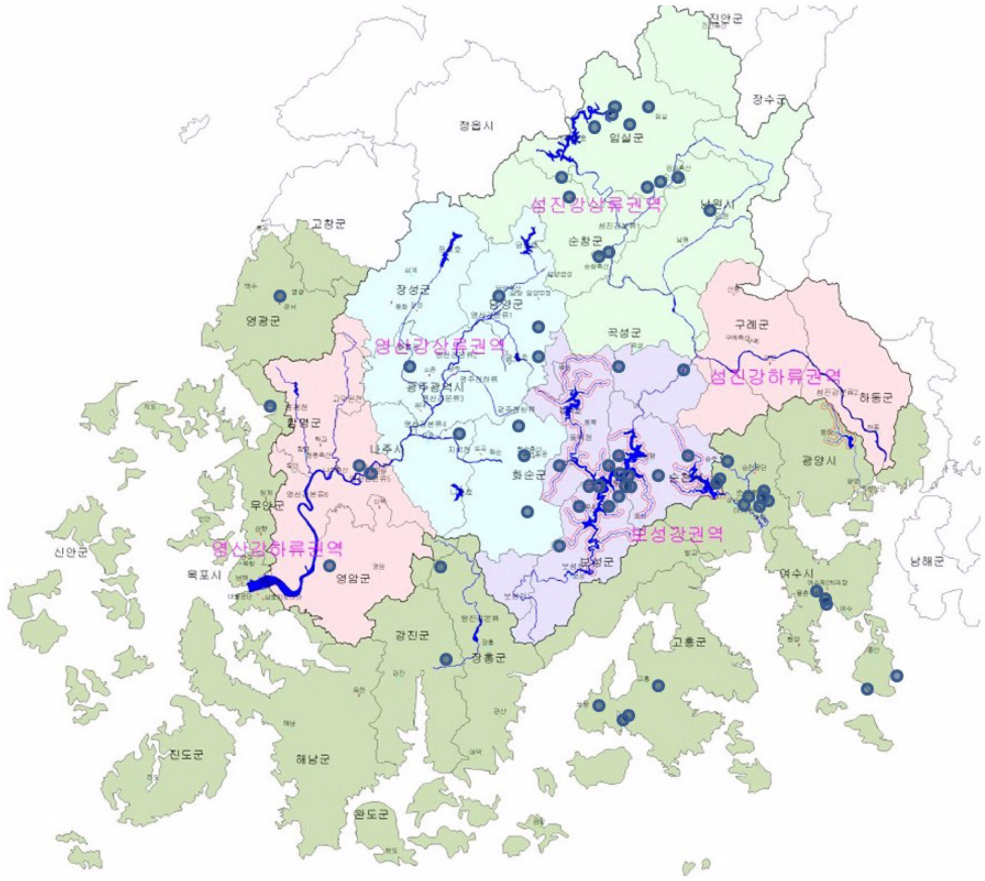

Fig. 1. Distribution of abandoned metal mines on Yeongsan · Seomjin river watershed.

Table 2. Summary of soil heavy metal analysis results for all mines studied

Classification	Cr	Cu	Cd	Pb	Ni	Zn	As	Hg
	(unit : mg/kg)							
Basis of action	10	125	4	300	100	700	15	10
Basis of concern	4	50	1.5	100	40	300	6	4
Max.	2.05	650.69	4.58	3520.83	137.72	36934	1031.04	3.00
Min.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.79	0.00	0.00
216 sample Avg.	0.09	11.16	0.34	35.12	23.90	326.96	16.76	0.03
Over basis of action.	0	4	1	3	2	4	21	0
Over basis of concern	0	8	12	9	38	26	49	0
Concentration of the natural background*	0.09	0.48	0.04	3.06	17.28	54.27	0.089	0.085

*Sukkyeong Jung, et al., 2009

해방지공사가 진행 중으로 식생이 적은 곳은 4개소이고 1개소가 주변 식생이 거의 없었다. 1개소에서 지표유출수가 하천으로 유입되고 있었다.

3.2. 토양 및 수질 시료 분석

토양시료는 총 216개를 채취하였으며, 토양시료 분석결과 및 자연농도를 Table 2에 요약하였다(유영복, 1998; 정숙경 외, 2009). 크롬은 폐금속광산의 경우 0.09 mg/kg로 크롬의 자연농도인 0.09 mg/kg과 동일한 값으로 나타났다. 구리의 경우는 자연농도가 0.48 mg/kg이며 폐금속광산 평균이 11.16 mg/kg, 최대 650.69 mg/kg, 최소 0 mg/kg으로 나타나 자연농도보다 22배 이상 높게 조사되었다. 카드뮴의 경우 자연농도가 0.04 mg/kg이었으며 폐금속광산 평균 0.34 mg/kg, 최대 4.58 mg/kg, 최소 0

Table 3. Summary of water heavy metal analysis results for all mines studied

Code		Cd	Pb	Cu	Ni	Zn	As	Cr	Hg
		---------- mg/L ----------							
Drinking water standard		0.005	0.05	1	-	1	0.05	0.05	0.001
Ground water standard	Residence	0.01	0.1	-	-	-	0.05	0.05	ND
	Agriculture	0.01	0.1	-	-	-	0.05	0.05	ND
	Industry	0.02	0.2	-	-	-	0.1	0.1	ND
River water standard	Human health care standard	0.01	0.1	-	-	-	0.05	0.05	ND
Avg. of ninety water samples		0.002	0.0091	0.0377	0.0337	0.2333	0.0136	0.0015	0.0003
Over drinking water std.		10	4	1	-	3	7	0	1
Over Ground water	Residence	6	3	-	-	-	7	0	1
	Agriculture	6	3	-	-	-	7	0	1
	Industry	4	0	-	-	-	3	0	1
Over river water std.		6	3	-	-	-	7	0	1

mg/kg으로 폐금속광산 평균이 8배 이상 높은 것으로 조사되었다. 납의 경우 자연농도가 3.06 mg/kg이며 폐금속광산 평균 35.12 mg/kg, 최대 3520.83 mg/kg, 최소 0 mg/kg으로 약 13배 이상 자연농도보다 폐금속광산 평균이 높은 것으로 나타났다. 니켈의 경우에는 자연농도가 17.28 mg/kg, 폐금속광산 평균이 23.90 mg/kg으로 약 1.4배 높은 것으로 조사되었다. 아연의 경우 자연농도가 54.27 mg/kg이고 폐금속광산 평균이 326.96 mg/kg으로 6배 이상 높은 것으로 조사되었다. 비소의 경우 자연농도 0.089 mg/kg, 폐금속광산 평균 16.76 mg/kg으로 188배 높은 것으로 나타났다. 크롬을 제외한 다른 중금속항목들은 모두 자연농도 보다 높게 나타났으며, 자연농도에 비해 중금속의 높은 용출로 수계에 지속적인 영향을 미치고 있다고 사료된다.

수질시료는 총 90개를 채취하였으며, 수질시료 분석결과 Table 3에 요약하였다. Cd의 평균농도는 0.002 mg/L, Pb의 평균농도는 0.0091 mg/L, Cu는 평균 0.0377 mg/L, Ni은 평균 0.0337 mg/L, Zn은 평균 0.2333 mg/L, As는 평균 0.0136 mg/L, Cr은 평균 0.0015 mg/L, Hg은 평균 0.0003 mg/L로 조사되었다. 갱내수와 하천수를 포함한 모든 채취시료 중 먹는 물 기준을 초과한 시료는 항목별로 Cd 10개, Pb 4개, Cu 1개, Zn 3개, As 7개, Hg 1개이었으며 Cr 의 경우 먹는 물 기준치를 초과한 시료는 없었다(환경부고시, 2008a). 한편, 음용수 시료 중 먹는 물 수질기준을 초과한 시료는 모두 3점이었으며, 두 개 시료에서 비소가 0.06 mg/L로 먹는 물 수질기준인 0.05 mg/L를 초과하였고, 한 개 시료에서 카드뮴이 0.01 mg/L로 먹는 물 수질기준인 0.005 mg/L를 초과하였다.

수질 및 토양의 광산 별 개황조사 종합결과를 Table 4에 요약정리 하였다. 64개의 광산 중 토양오염 우려기준을 초과한 광산은 35개소, 토양오염 대책기준을 초과한 광산은 16개소였다. 또한 채취한 모든 수질시료에서 먹는 물 수질기준을 초과한 광산은 13개소(음용수 시료 중 먹는 물 수질기준을 초과한 광산은 3개소), 하천수 수질기준을 초과한 광산은 12개소로 조사되었다.

토양시료의 분석결과를 항목별로 보면 카드뮴의 경우 영산강 · 섬진강 수계에서 채취한 216개의 토양 시료 중 덕재광산 외 8개 광산 12개의 시료에서 토양오염 우려기준(1.5 mg/kg)을 초과하였으며, 이 중 1개 시료는 대책기준(4 mg/kg)을 초과하였다. 비소의 경우 덕재광산 외 24개 광산 49개의 시료에서 토양오염 우려기준(6 mg/kg)을 초과하였으며, 이 중 21개 시료는 대책기준(15 mg/kg)을 초과하였다(환경부고시, 2008b). 구리의 경우 대덕광산 외 3개 광산 8개의 시료에서 토양오염 우려기준(50 mg/kg)을 초과하였으며, 이 중 4개 시료는 대책기준(125 mg/kg)을 초과하였다. 아연의 경우 덕재광산 외 17개 광산 26개의 시료에서 토양오염 우려기준(300 mg/kg)을 초과하였으며, 이 중 4개 시료는 대책기준(700 mg/kg)을 초과하였다. 니켈의 경우 덕재광산 외 13개 광산 38개의 시료에서 토양오염 우려기준(40 mg/kg)을 초과하였으며, 이 중 2개 시료는 대책기준(100 mg/kg)을 초과하였다. 크롬 및 수은의 경우 토양오염 우려기준(크롬 및 수은 모두 4 mg/kg)을 초과한 시료는 없었다. 납의 경우 대덕광산 외 5개 광산 9개의 시료에서 토양오염 우려기준(100 mg/kg)을 초과하였으며, 이 중 3개 시료는 대책기준(300 mg/kg)을 초과하였다.

토양오염 우려기준 항목 중 가장 초과를 많이 한 항목은 비소(As)로 오염된 광산 35개소 중 총 24개 광산에서

Table 4 . Summary of primary investigation for all mines studied

River	Site	Mine name	Mine water	Over Soil Criteria		Over Water Criteria			Visit Month	Note	
				Basis of concern	Basis of action	Drinking water	Ground water	River water		IPI	IPI rank
SeomJin riv.	Namwon	Geumseong	×	-	-	-	-	-	Oct	0.0940	37
		Sanseong	×	Ni(1)	-	-	-	-	Oct	0.0521	59
	Sunchang	Geumgwa	○	-	-	-	-	-	Sep	0.1251	21
		Samjindonggye	×	-	-	-	-	-	Sep	0.0790	47
	Imsil	Yongheung	×	-	-	-	-	-	Sep	0.0956	35
		Buheung	×	Cd(1), Zn(1)	-	-	-	-	Sep	0.1038	30
		Seokdu	×	-	-	-	-	-	Sep	0.1271	19
	Jangsu	Yeongdae	○	Pb(2), Zn(2) As(2)	As(2)	As(1)	As(1)	As(1)	Oct	0.2589	5
		Sanseo	×	-	-	-	-	-	Oct	0.1245	22
		Undae	×	-	-	-	-	-	Oct	0.0490	60
		Beonam	×	Ni(5), As(2)	Ni(1), As(2)	As(1)	As(1)	As(1)	Oct	0.1109	27
		Palgong	×	Cu(2), As(4)	Cu(1) As(2)	-	-	-	Oct	0.1687	11
	Jinan	Banryong	×	-	-	-	-	-	Oct	0.0643	55
		Bugwi	×	As(2)	As(2)	-	-	-	Sep	0.0405	61
		Yeonchang	×	-	-	-	-	-	Oct	0.0791	46
		Yeonggwang	×	-	-	-	-	-	Sep	0.0640	56
	Boseong	Boknae	○	As(1)	-	-	-	-	Jun	0.1330	17
		Oyang(Sambo)	×	Ni(1), Zn(1)	-	-	-	-	Jul	0.0538	58
		Cheongwol	×	-	-	-	-	-	Jun	0.0685	51
		Seorisil	×	-	-	-	-	-	Jun	0.0380	62
		Cheongdalgeum	○	Cd(1), Ni(3) Zn(1)As(3)	Zn(1), As(1)	-	-	-	Jul	0.2970	3
		Dumungol	○	Ni(2), As(2)	As(1)	As(1)	As(1)	As(1)	Jul	0.1203	23
		Bodeok	○	Ni(1)	-	-	-	-	Jul	0.1632	12
Seomjin riv.	Boseong	Gago	○	-	-	As(1)	As(1)	As(1)	Jul	0.1102	28
		Myeongbong	○	Ni(2), Zn(1), As(5)	As(3)	-	-	-	Jun	0.2100	6
		Sanyang	×	Zn(2), As(3), Cd(2)	Cd(2) As(2)	-	-	-	Jun	0.1268	20
		Jeonbo	×	Ni(1), As(1)	-	-	-	-	Jul	0.1042	29
	Gokseong	Gokseong	○	-	-	-	-	-	Mar	0.1585	14
	Hwasun	Dongsin	×	Cd(1), As(2)	As(1)	-	-	-	Apr	0.0758	49
	Suncheon	Oseong	×	-	-	-	-	-	Apr	0.0657	53
		Suncheonyuil	○	-	-	Cd(1),Zn(1), Cu(1)	Cd(1)	Cd(1)	Apr	0.1868	10
		Adok	×	Zn(1), Pb(2)	Pb(2)	-	-	-	Apr	0.0838	44
		Suncheon (Jukcheong)	×	Zn(1), As(3)	-	-	-	-	Apr	0.0857	43

Table 4 . continued

River	Site	Mine name	Mine water	Over Soil Criteria		Over Water Criteria			Visit Month	Note	
				Basis of concern	Basis of action	Drinking water	Ground water	River water		IPI	IPI rank
Yeongsan-riv	Hampyeong	Cheonyong	○	-	-	-	-	-	Mar	0.0957	34
		Sonbul	×	-	-	-	-	-	Mar	0.0649	54
		Deokeum	×	-	-	Zn(1)	-	-	Mar	0.0958	33
	Naju	Gongsan	○	-	-	-	-	-	Mar	0.0788	48
		Jwachang	×	-	-	-	-	-	Mar	0.0615	57
	Gwangju	Eodeung/ Seodeung	×	-	-	-	-	-	Mar	0.0308	64
		Yongjin	×	-	-	As(1)	As(1)	As(1)	Mar	0.0923	39
		Imgok	×	As(1)	-	-	-	-	Mar	0.0793	50
	Yeongam	Hanil	×	Ni(6), As(1)	-	Cd(2),Hg(1)	Cd(2)	Cd(2)	Aug	0.0868	41
		Eunjeok	○	As(2)	-	-	-	-	Aug	0.1154	25
	Damyang	Daedeok	×	Cd(1), Cu(1) Pb(1), Zn(1)	Pb(1) Zn(1)	-	-	-	Mar	0.4538	2
		Saminsan	×	Cd(1)	-	-	-	-	Mar	0.1031	31
		Mudong	○	Pb(1), As(1)	-	-	-	-	Mar	0.0396	38
	Hwansun	Hwalyong	○	-	-	-	-	-	Apr	0.1168	24
		Hwasun	○	-	-	-	-	-	Apr	0.1010	32
		Josan	○	Ni(1), As(2)	As(1)	-	-	-	Apr	0.1303	18
Etc	Gwangyang	Bonggang	×	-	-	-	-	-	Apr	0.0365	63
Others	Gwangyang	Deokjae	○	Cd(1), Ni(1) Zn(2), As(1)	Zn(1)	-	-	-	Apr	0.1126	26
		Geumseong	×	As(1)	-	-	-	-	Apr	0.0684	52
		Wanggeum	×	As(3)	-	-	-	-		0.0866	42
		Seokdong (Gwangok)	×	As(2), Zn(1)	As(1)	-	-	-	Apr	0.0951	36
	Goheung	Nokdong	×	Cd(2)	-	As(1), Cd(1)	As(1)	As(1)	Aug	0.1891	9
		Heungsin	○	Cu(3), As(1) Cd(2), Pb(2), Ni(4)Zn(2)	Cu(3)Zn(1) As(1)	Pb(2), Cd(2)	Pb(2), Cd(2)	Pb(2), Cd(2)	Aug	0.2783	4
		Pungnam	○	Zn(2), Cu(3) Ni(8)	-	Cd(1), Pb(1)	Pb(1)	Pb(1)	Aug	0.2099	7
	Yeosu	Samgeum	○	Zn(1)	-	Cd(1), Zn(1)	Cd(1)	Cd(1)	Apr	0.7011	1
		Samtaek	○	-	-	-	-	-	Apr	0.0892	40
		Donsan/Yeosu	○	-	-	-	-	-	Apr	0.1418	15
		Bonghwang	×	Zn(1)	-	-	-	-	Apr	0.1613	13
		Sanggeum	×	Pb(1), Zn(2) As(1)	-	-	-	-	Apr	0.1397	16
	Yeonggwang	Yeonggwang	×	-	-	-	-	-	Mar	0.0640	56
	Gangjin	Gangjin	○	Ni(1)	Ni(1)	Cd(2), Pb(1), As(1)	As(1)	As(1)	Aug	0.2004	8

49개의 토양 시료가 우려기준을 초과하였으며, 토양오염 대책기준을 가장 많이 초과한 항목 또한 As로 대책기준을 초과한 광산 16개소 중 총 12개 광산에서 21개의 토양시료가 As의 대책기준을 초과한 것으로 나타났다.

수질시료의 분석결과를 항목별로 분석하면 카드뮴의 경우 총 90개의 수질시료 중, 순천유일광산 외 6개 광산 10개의 시료에서 먹는 물 수질기준(0.005 mg/L)을 초과하였으며, 이 중 4개 시료는 지하수의 공업용수 수질기준(0.02 mg/L)을 초과하였다. 비소의 경우 용진광산 외 6개 광산 7개의 시료에서 먹는 물 수질기준(0.05 mg/L) 및 지하수의 생활용수 및 농업용수 수질기준(0.05 mg/L)을 초과하였고 이 중 지하수의 공업용수 수질기준(0.1 mg/L)초과시료가 3개로 나타났다. 구리의 경우 순천유일광산 1개의 시료에서 먹는 물 수질기준(1.00 mg/L)을 초과하였다. 아연의 경우 덕음광산 외 2개 광산 3개의 시료에서 먹는 물 수질기준(1.00 mg/L)을 초과하였다. 니켈의 경우 80개의 시료에서 니켈이 검출되지 않았으며 국내 니켈의 수질기준은 없다. 크롬의 경우 먹는 물 수질기준(0.05 mg/L) 및 하천수 수질기준(0.05 mg/L)을 초과한 시료는 없었다. 수은의 경우 1개 시료에서 먹는 물 수질기준(0.001 mg/L)을 초과하였다. 납의 경우 강진광산 외 2개 광산 5개의 시료에서 먹는 물 수질기준(0.05 mg/L)을 초과하였으며, 이 중 3개 시료는 지하수 수질기준 중 생활용수와 농업용수기준인 (0.1 mg/L)을 초과하였다. 수질오염에서 먹는 물 수질기준과 공업용수 수질기준을 가장 많이 초과한 항목은 카드뮴으로 확인되었다.

3.3. 광산별 IPI 순위 평가결과

조사 대상광산 별 현장평가, 토양시료와 수질시료 분석결과를 이용하여 각각 PIs, PIw, SI를 산출하였으며 가중치를 고려한 산술평균으로 오염수치(IPI)를 산정하여 Table 4에 요약하였다. 상위 20위의 폐금속 광산은 Table 5에 요약하여 나타내었다. 이들 순위는 수계에 미치는 폐금속 광산의 영향평가를 위한 정밀조사 대상 우선 순위라 할 수 있겠다. IPI 수치가 가장 높은 삼금광산의 경우 PIw 값에서도 가장 높은 수치를 보였는데, 이는 아연과 카드뮴에서 먹는 물 기준을 초과하여 높은 농도로 검출되었기 때문이다. 삼금광산의 PIs는 7위로 토양시료 중 Ni이 672 mg/kg으로 높게 검출되었기 때문이다. SI순위 2위를 차지했는데 갱내수가 다량 존재하여 유출되고 있으며 3개의 토양시료 중 2개가 pH가 5.0이하로 다른 광산보다 높은 오염평가 값을 얻었다.

PIs에서 가장 높은 광산은 대덕광산이었는데 8개중금속 항목 중 4개의 항목에 대해서 기준치를 초과하였는데 특히 Pb와 Zn이 각각 토양오염 대책기준의 50배, 10배 높게 측정되어 높은 PIs값을 획득하였다. 대덕광산은 종합 IPI순위에서 두번째 이었는데 PIs 뿐만 아니라 SI의 값도 2위로 높은 값을 얻어 전체 순위가 높아졌다.

SI에서 가장 높은 수치를 보인 광산은 영대광산 이었다. 갱내유출수의 존재, 토양산성도 낮음, 폐석존재, 폐석유실

Table 5. List of above 20 ranked mines in PIw, PIs, SI and IPI

Mine	PIw Rank	Mine	PIs Rank	Mine	SI Rank	Mine	IPI Rank
Samgeum	1	Daedeok	1	Yeongdae	1	Samgeum	1
Heungsin	2	Cheongdalgeum	2	Daedeok		Daedeok	2
Nokdong	3	Palgong	3	Samgeum	2	Cheongdalgeum	3
Suncheonyuil	4	Nokdong	4	Bodeok		Heungsin	4
Pungnam	5	Myeongbong	5	Gokseong		Yeongdae	5
Hanil	6	Sanyang	6	Myeongbong	6	Myeongbong	6
Gangjin	7	Samgeum	7	Cheongdalgeum		Pungnam	7
Gago	8	Bonghwang	8	Nokdong		Gangjin	8
Dumungol	9	Yeongdae	9	Bonghwang		Nokdong	9
Yeongdae	10	Heungsin	10	Heungsin		Suncheonyuil	10
Deokeum	11	Mudong	11	Donsan	7	Palgong	11
Beonam	12	Adok	12	Sanggeum		Bodeok	12
Seokdu	13	Deokjae	13	Boknae		Bonghwang	13
Yongjin	14	Josan	14	Gangjin		Gokseong	14
Buheung	15	Beonam	15	Seokdu		Donsan	15
Geumgwa	16	Seokdong	16	Sanseo		Sanggeum	16
Palgong	17	Donsan	17	Josan		Boknae	17
Yeonchang	18	Dumungol	18	Pungnam	17	Josan	18
Geumseong	19	Sanggeum	19	Eunjeok		Seokdu	19
Bugwi	20	Dongsin	20	Hwalyong		Sanyang	20

우려, 광산에 대한 주민인지도 높음, 광산에 대한 접근성 쉬움, 광해방지시설의 존재 없음으로 각 항목별 평가합계 점수 6.5로 전체 폐금속 광산 중 가장 높은 SI 평가점수를 얻었다. 한편 영대광산은 전체 IPI순위에서 5위를 차지하였는데 SI의 순위는 높지만 PIw와 PIs가 각각 10위, 9위로 상위권 폐금속 광산에 비해 시료의 오염농도가 낮았기 때문이다.

IPI순위 3위와 4위는 청달금광산과 홍신광산이었다. IPI 순위 3위인 청달금광산은 PIs 순위 2위로 갱구 내 토양과 갱구 주변 광미에서 카드뮴, 니켈, 아연, 비소가 토양오염 기준치를 초과하여 측정되었다. IPI순위 4위인 홍신광산은 갱내수가 존재하며 토양시료분석결과와 수질시료분석결과에서 기준치를 초과하여 검출된 항목이 다양하게 분포하여 PIw순위에서 2위, PIs 순위에서 10위였으며 SI순위 7위로 조사되었다. 한편, 과거에는 매우 오염이 심했던 것으로 알려진 순천광산과 산양광산은 과거에 복원우선순위 I등급으로 평가 되었는데 IPI순위에서는 각각 43위, 20위로 평가 되었다(한국광해관리공단, 2007). 이는 부분적으로 토양오염도 평가가 중심이 아니라, 수계에 미치는 영향 평가 중심으로 분석을 하였기 때문으로 사료된다. 또한 이 두 광산의 경우 2008년에 진행된 토양복원사업의 성과가 평가에 지대한 영향을 준 것으로 볼 수 있으며, 비소, 카드뮴, 아연의 주변 토양에서의 농도가 복원 전에 비해 현저히 낮아진 것을 확인할 수 있었다(박정훈 외, 2008).

4. 결 론

본 연구에서는 기존의 토양 중심조사에 추가하여 수계에 미치는 영향을 중심으로 폐금속 광산을 개황조사 하였으며, 문헌조사, 현장조사, 수질 및 토양 분석 결과를 종합하여 폐금속 광산의 영향을 평가하였다. 64개 개황조사 대상 광산을 선정하였으며, 현장조사 결과 갱내수가 존재하는 광산은 24개였으며, 갱내수에서 pH 5 이하의 산성도를 보이는 광산은 없었다. 토양 시료 216개, 수질 시료 90개를 채취하여 중금속 오염농도를 분석하였다. 토양분석 결과 토양오염 우려기준을 초과한 광산은 35개소, 토양오염 대책기준을 초과한 광산은 16개소였다. 비소 평균농도는 전국 토양의 평균농도보다 2배까지 높게 조사되었다. 수질시료 분석 결과에서 음용수 시료 중 먹는 물 수질기준을 초과한 광산은 3개소, 갱내수 및 하천수 시료 중 하천수 수질기준을 초과한 광산은 12개소로 조사되었다. 현장조사, 토양 및 수질 오염농도를 종합하여 평가한 결과(IPI순위) 삼금광산, 대덕광산, 청달금광산, 홍신광산, 영대광산, 명봉광산 순으로 수계에 미치는 영향이 큰 폐금속 광산으로 판단 되었다.

사 사

본 연구는 영산강물환경연구소의 환경기초조사사업비(영산강섬진강수계관리기금) 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 또한 폐금속 광산 방문에 도움을 주신 나이 드신 주민들께도 감사드립니다.

참 고 문 헌

국립환경과학원, 2007a, 폐금속광산 주민건강영향조사(대구 경북권역), 국립환경과학원.

국립환경과학원, 2007b, 폐금속광산 주민건강영향조사(부산 경남권역), 국립환경과학원.

국토지리정보원, 2004, 세계측지계 관련, 국토해양부.

김정규, 현승훈, 양재의, 류을렬, 임연택, 이호식, 옥용식, 구남인, 김민희, 2007, 수계별 광산 유출수 영향조사 1년차(최종) 보고서, 한강수계관리위원회, 국립환경과학원 한강물환경연구소.

박정덕, 김현, 손석준, 사공준, 홍영습, 최병선, 2007, 폐금속광산 정밀 주민건강영향조사, 환경부.

박정훈, 김만, 양거승, 최경균, 김혜영, 이주리, 2008, 수계별 광산 유출수 영향 조사1년차(최종)보고서, 영산강섬진강수계관리위원회, 국립환경과학원 영산강물환경연구소.

영산강환경관리청, 2001a, 전남A폐금속광산 오염실태 정밀조사 결과보고서, 영산강환경관리청.

영산강환경관리청, 2001b, 전남B폐금속광산 오염실태 정밀조사 결과보고서, 영산강환경관리청.

유영복, 1998, 우리나라 논토양 및 현미중 중금속 자연함유량에 관한 조사연구, 국립환경연구원보.

정구복, 김원일, 박광래, 윤순강, 2001, 연구보문 : 폐금속광산 주변 논토양 중 중금속의 수직분포 특성, 한국환경농학회지, 20, 297-302.

정숙경, 송형명, 윤상훈, 이재철, 김연희, 백계진, 박종태, 김동수, 2009, 광주지역 어린이놀이터 토양오염 실태 조사연구, 대한폐기물학회지, **26**(2), 168-174.

한국광해관리공단, 2007, 폐금속광산지역 토양오염조사 결과, 한국광해관리공단.

한국보건산업진흥원, 2005, 국민건강영양조사, 한국보건산업진흥원.

환경부, 2003, 폐금속광산 토양오염실태 일제조사(강원, 경기, 전북, 전남권역), 환경부.

환경부, 2005, 폐금속광산 토양오염실태 개황조사(경기, 강원, 전남북권역), 환경부.

환경부, 2006, 폐금속광산 토양오염 실태조사(경남북, 전남권역), 환경부.

환경부고시, 2002, 토양오염공정시험방법, 122호, 환경부.

환경부고시, 2008a, 지하수의 수질보전 등에 관한 규칙, 환경부.

환경부고시, 2008b, 토양환경보전법시행규칙, 환경부.

환경부고시, 2009, 수질오염공정시험기준, 환경부.

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