

고로폐광산 주변 농경지 토양 및 하천 퇴적토의 중금속 오염 분포 및 복원 대책 설계

이민희^{1*}, 최정찬¹, 김진원²

¹부경대학교 환경지질학과, ²한국수자원공사 댐환경처

Distribution and remediation design of heavy metal contamination in farmland soils and river deposits in the vicinity of the Goro abandoned mine

Minhee Lee^{1*}, Jungchan Choi¹ and Jinwon Kim²

¹Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University, 599-1 Daeyondong, Namgu, Pusan, 608-737, Republic of Korea

²Dam Environmental Department, Korea Water Resources Corporation, Daejeon, 306-711, Republic of Korea

River deposits and farmland soils were analyzed to investigate the pollution level of heavy metals in the vicinity of the Goro abandoned Zn-mine. Surface (0-40 cm) and subsurface (40-100 cm) soils were collected around a main river located at the lower part of the Goro mine, and analyzed by ICP-MS for Cd, Cu, Pb, Zn and Cr after 0.1N HCl extraction and by AAS for As after 1N HCl extraction. Concentrations of cadmium and lead at the surface river deposits close to the mine were over the Soil Pollution Warning Limit (SPWL), and 43% of sample sites (6 of 14 samples) were over SPWL for As suggesting that river deposits were broadly contaminated by arsenic. Results from farmland soil analysis showed that surface soils were contaminated by heavy metals, while only arsenic was over SPWL at 50% of sampling sites. Main pollution mechanism around the Goro mine was the discharge of mine tailing and waste rocks from the storage site to the river and to adjacent farmland during flood season. Pollution Grades for sample locations were prescribed by the Law of Soil Environmental Preservation, suggesting that the pollution level of heavy metals around the Goro mine was serious, and the remediation operation for arsenic and the isolation of mine tailing and waste rocks from river and farmland should be activated to protect further contamination. The area needed to clean up was estimated from pollution distribution data and the remediation methods such as a soil washing method and a soil improvement method were considered as the further remediation operation for arsenic contaminated soils and river deposits around the Goro abandoned mine.

Key word : mine pollution, heavy metal contamination, Goro mine, soil contamination

경상북도 군위군에 위치하는 고로 폐아연광산의 광미 및 광폐석 유실에 의한 주변 농경지 토양 및 하천 퇴적토의 오염을 조사하였다. 폐광산하부에서부터 하천을 따라 직선길이 약 12 km 구간에서 퇴적토 및 토양을 표토와 심토로 나누어 채취하였으며, 토양시료에 대한 분석은 0.1N(비소의 경우만 1N) HCl 약산 추출법인 토양오염공정시험법으로 실시하였다. 폐광산 하부 주 하천의 표층 퇴적토는 카드뮴과 납에 대하여 하천 상류 지역에서 토양오염우려기준치를 초과하였으며, 비소는 총 표토 시료 14개 중 6개(43%)에서 토양오염우려기준치를 초과하였고, 이중 4지점은 토양오염대책기준치를 초과하였다. 특히 폐광산과의 거리에 관계없이 하천 전체에 걸쳐 퇴적토의 표토들이 비소에 폭 넓게 오염되어있어서 이들에 대한 복원 대책이 시급한 것으로 나타났다. 폐광산 주변 농경지 토양 분석 결과 표토와 심토 모두 비소를 제외한 중금속의 오염은 토양오염우려기준치이하로 나타났으나, 비소의 경우 표토 시료 채취 8 지점 중 4지점에서 토양오염우려기준치를 초과하였으며, 이중 3지점에서 토양오염대책기준치를 초과함으로써 주변 농경지 토양의 표토도 비소로 심하게 오염되어있음을 알 수 있었다. 폐광산 하부 주 하천 수질 조사 결과, 폐광산 갭내수와 침전지 주변을 제외하고는 하천 수질은 모든 중금속에 대해 매우 낮은 것으로 나타나, 폐광산 주변의 토양오염은 하천

*Corresponding author: heelee@pknu.ac.kr

수질에 의한 오염이기보다는 폐광산 주변에 적재된 폐광석과 광미들이 우기시 하천을 범람하며 유출되어 진행되었을 것으로 판단되었다. 폐광산 주변 지역의 오염 정도를 토양환경보전법에 명시된 오염 등급(Pollution Grade)으로 평가한 결과, 비소의 경우 토양오염우려기준 이상의 농도를 나타내는 농경지 토양과 하천퇴적토 지역이 많아, 향후 비소에 대한 토양 복원이 필요한 것으로 나타났다. 오염분석 결과와 현장 농경지 조사를 바탕으로 복원이 필요한 하천 퇴적토 및 농경지 토양 면적을 산정하였으며, 하천 퇴적토의 경우 토양세척법을 이용하여 비소와 납을 제거하고, 농경지 토양의 경우 석회를 첨가한 반전개토법을 실시하는 토양 복원 대책을 수립하였다.

주요어 : 폐광산, 중금속오염, 비소오염, 광미, 고로광산

1. 서 론

금속광산을 개발하면서 채굴적 충전, 폐광도의 밀폐, 광산폐기물의 안전한 처리 등 충분한 조치를 취하지 않을 경우 발생하는 위해를 광해라고 하는데, 우리나라 금속광산의 경우 광산 폐수의 유출과 광미 및 광산 폐석을 포함하는 광산폐기물광해가 대부분을 차지하고 있으며, 이로 인한 중금속 오염은 가행 광산보다 휴광이나 폐광지역이 더 심각한 것으로 알려져 있다(환경부, 1998; 황은하 등, 2000; 한춘 등, 1998). 이러한 광해 현상은 장기간 지속적으로 발생하며, 원인이 제거되지 않는 한 하천오염, 토양오염, 지역 주민들의 생활환경 피해 등이 발생하게 되며, 심할 경우 생태계에도 피해를 주게 된다(Alloway, 1995). 따라서 이러한 광해에 대한 원인과 현상을 조사하여 환경적인 복원 대책을 수립하고, 복원 사업을 시행함으로써 오염원을 제거하는 것은 매우 중요하다. 현재 우리나라의 휴·폐 금속광산의 수는 약 900여개로 집계되고 있으며, 휴·폐광의 원인을 규명하여 보면 광량의 소진, 경영의 악화, 채산성의 악화 등으로 분석되지만, 대부분의 경우 채산성의 악화로 인해 폐광되기 때문에 채광현장, 광미 및 폐석 적치장, 광산 시설물들이 그대로 방치되어, 이들이 주변 토양과 하천의 주 오염 인자들로 작용하게 된다(수자원공사, 2002).

우리나라는 1995년 토양환경보전법이 제정되기 전에는 휴·폐광산 주변의 오염 조사조차 거의 이루어지지 않은 채 대부분의 휴·폐광산이 그대로 방치되어왔으며, 이루어진 조사들도 대부분 광산 주변 하천 수질에 제한되어왔으나, 1990년대 후반부터 광산주변 토양 오염에 관한 연구가 활발히 진행되어왔다(김경용, 1997; 김선태 등, 1999; 김종욱 등, 1999; 이도경 등, 1997; 이찬희 등, 1998; 이현구와 이찬희, 1998, 전효택 등, 1998; 정예진과 이상훈, 2001). 그러나 대부분의 경우, 토양 오염 정도를 파악하는 기초 단계였으며, 오염된 토양과 하천의 복원 대책 수립에 관한 연구는 매우 미

진한 실정이다(오종기 등, 1998; 이재령 등, 1997; 이효민 등, 1998; 정명채, 1999).

본 논문은 경북 군위군 고로면 석산리에 위치하고 있는 폐아연광산인 고로광산에 의한 주변 토양 및 하천 퇴적토의 오염 범위와 정도를 규명하고, 오염 토양에 대한 복원 대책을 수립하고자 하는 것이 목표이다.

2. 연구 지역 조사 배경

2.1. 토양 오염 조사 대상 지역

연구 대상 지역 내 주 오염원인 고로폐광산은 군위군 고로면 석산리 산 27-1 번지에 위치하고 있으며, 1964년에서 1972년 사이 주로 아연을 채광하였고 이에 따른 폐석 및 광미 발생량은 약 23,000 ton 으로 추정되고 있다(수자원공사, 2002). 현재 폐광산 상류지역에 갱구가 존재하고 있고 갱구에서 발생하는 갱내 침출수는 파이프를 통하여 지표로 유출되고, 상류의 계곡부와 합류하여 유하한다. 폐광 갱구에서 500 m 하류부에 과거 제련소 및 광미 침전지로 사용되던 약 1,000평 정도의 부지에 1999년 군위군청이 콘크리트 옹벽을 치고 뒷채움의 형태로 현재 광미 및 폐광석 일부가 현장에 매립되어 있으며, 매립층 상부에 1 m 정도로 복토하여 잔디를 입혀 놓았으나 일부 구간은 잔디가 훼손된 상태로 남아 있다. 옹벽은 높이가 4~5 m이며 옹벽 주위에 300 m 길이의 우회 배수로가 좌우로 설치되었다. 그러나, 일부 광폐석은 현재까지 갱입구 부근 산사면에 그대로 야적되어 있다. 옹벽 설치 구간에서 실시한 시추조사에 의하면, 매립층의 두께는 약 3.0~3.7 m 정도이고, 그 하부는 화강암이 분포하고 있으며, 지하수위는 지표하 2.9~3.4 m 로서 매립층과 암반 경계부 근처에 형성되어 있다.

본 논문의 연구 대상 지역은 고로폐광산부터 하천을 따라 직선거리 약 12 km에 해당되는 하천 주변 지역으로, 하천 퇴적토와 주변 농경지 토양이 주 조사 대상이며, 행정구역상 경상북도 군위군 고로면 화북리,

학성리, 양지리, 인곡리 및 석산리 지역으로 현재 위천의 상류 유역에 위치하고 있으며, 부근에 해발고도 500~900 m 내외의 옥녀봉, 방가산, 화산 등의 산지로 둘러싸인 계곡지형으로 해발고도 100~200 m 내외에 위치하고 있다.

2.2. 과거 폐광산 주변의 수질과 주변 하천의 수질 및 폐광산 주변 수질 분석 결과

2000년과 2002년 사이 총 5회에 걸쳐 폐광산 하부 하천의 수질분석이 총 9지점에서 실시되었으며, 폐광산 갭내수와 광미 적치장(침전지) 주변 수질 분석은 2002년 2회에 걸쳐 실시되었다. Fig. 1은 본 연구 지역과 폐광산 주변의 하천 수질 조사 지점을 나타내며, Table 1은 하천의 수질 분석 결과 중 중금속의 농도를 나타내고 있고, Table 2는 폐광산 갭내수와 광미 적치장 주변 수질 분석 결과를 나타내고 있다. 폐광산 갭내수와 침전지 주변을 제외하고는 주변 하천의 수질은 하천수 수질 1급 기준 한계 이하의 중금속 농도를 나타냄으로서 양호한 것으로 나타났다. 1998년 폐광산을 중심으로 주변 8개 지점에서 토양 오염 조사가 실시되었는데, 조사결과 카드뮴(Cd), 비소(As), 납(Pb), 아연(Zn)의 농도가 폐광산 하부 1 km 지점의 토양에서 토양오염우려기준치(가지역 기준)를 초과한 것으로 나타

났고, 비소는 토양오염우려기준치 (6 ppm)의 5배를 초과하고 있었으며, 카드뮴은 토양오염우려기준치(2 ppm)의 4배를 초과하였다(수자원공사, 2002). 조사 결과 폐광산 주변의 광미 및 폐석입자들이 주 하천을 따라 하천 하부로 이동되어 퇴적되었거나 주변 농경지 토양을 오염시켰을 가능성이 높은 것으로 판단되었다.

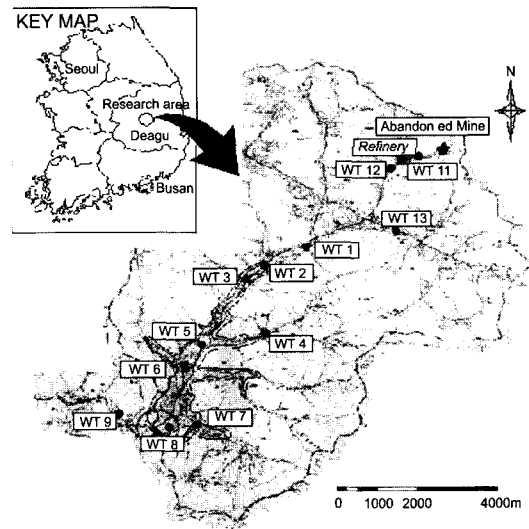


Fig. 1. Research area and water sampling sites around the Goro abandoned mine.

Table 1. Concentration data of heavy metals in the river water originated from the Goro mine (Mean (STD), unit: mg/L)

Item (surface water I-grade limit)	Sample location								
	WT1	WT2	WT3	WT4	WT5	WT6	WT7	WT8	WT9
As (below 0.05)	0.031 (0.018)	n.d.	0.014 (0.004)	n.d.	0.012 (0.003)	0.011 (0.003)	n.d.	0.009 (0.002)	0.010 (0.002)
Zn	0.010 (0.008)	0.006 (0.004)	0.005 (0.002)	0.010 (0.008)	0.030 (0.045)	0.023 (0.027)	0.007 (0.005)	0.015 (0.008)	0.009 (0.006)
Cu	0.002 (0.004)	0.002 (0.004)	n.d.	0.002 (0.004)	0.002 (0.004)	n.d.	0.002 (0.004)	0.002 (0.004)	0.005 (0.007)
Fe	0.032 (0.029)	0.020 (0.027)	0.010 (0.022)	n.d.	0.030 (0.067)	0.010 (0.022)	0.020 (0.027)	0.022 (0.030)	0.010 (0.022)
Mn	n.d.	n.d.	0.003 (0.007)	0.001 (0.001)	0.007 (0.015)	n.d.	n.d.	0.002 (0.005)	n.d.
Cd (below 0.01)	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Pb (below 0.1)	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Hg (not-detected)	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Cr ⁶⁺ (below 0.05)	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

*n.d.: below detection limit

*Mean: arithmetic mean (n=5), STD: standard deviation

Table 2. Concentration data of heavy metals in the water at the mine and mine tailings storage site

Item (Surface Water 1-grade Limit)	Sampling Date (Y-M-D)	Water in the mine entrance	500m down-stream from th mine site (WT11)	Imediate stream below the tailings site (WT12)
pH (6.5-8.5)	02-5-30	7.5	7.1	6.7
	02-7-10	7.6	7.0	7.1
As (below 0.05 ppm)	02-5-30	0.018	0.011	0.008
	02-7-10	0.015	0.011	0.045
Zn	02-5-30	3.570	1.572	11.548
	02-7-10	3.879	1.400	3.495
Cu	02-5-30	n.d.	n.d.	0.065
	02-7-10	0.010	0.073	n.d.
Fe	02-5-30	0.250	0.080	0.560
	02-7-10	0.550	0.400	0.300
Mn	02-5-30	0.023	0.007	0.099
	02-7-10	n.d.	0.010	0.155
Cd (below 0.01 ppm)	02-5-30	0.044	0.017	0.070
	02-7-10	0.046	0.010	0.017
Pb (below 0.1 ppm)	02-5-30	n.d.	n.d.	n.d.
	02-7-10	n.d.	n.d.	n.d.
Hg (need non-detect)	02-5-30	n.d.	n.d.	n.d.
	02-7-10	n.d.	n.d.	n.d.
Cr ⁺⁶ (below 0.05 ppm)	02-5-30	n.d.	n.d.	n.d.
	02-7-10	n.d.	n.d.	n.d.

*n.d.: below detection limit

3. 토양 오염 정밀 조사 방법

기존의 토양 및 수질 오염 조사 결과를 바탕으로 토양 오염의 주 오염원이 하천을 따라 유출된 광미 및 광폐석일 가능성이 크고, 중금속 중에서 비소와 카드뮴에 의한 오염이 가장 심각한 것으로 판단되어, 폐광산에서부터 하천 하류지역까지 연결되는 직선거리 약 12 km 구간에 대하여 주 하천의 퇴적토에 대한 오염 조사를 실시하였으며, 하천 주변에 위치하는 농경작 지역의 토양을 대상으로 토양 오염 조사를 실시하여, 폐광산에서부터 거리에 따른 하천퇴적토의 오염분포 양상과 각 오염 중금속간의 상호 연관성, 그리고 토양 입자들에 따른 오염 농도의 상관 관계를 조사하였다.

3.1. 토양 오염 조사 지역과 시료 채취 방법

하천 퇴적토의 경우 폐광산하부에서부터 주 하천 하부지역까지 14 지점에서 표토 (0~40 cm 깊이)와 심토 (40~100 cm)로 구분하여 시료를 채취하였으며, 오염지

역과 관련 없는 배경치 농도를 얻기 위해 2개의 대조군 지점에서 시료를 채취하였다(총 24개 시료 분석). 폐광산 주변 농경지 토양의 경우 하천 주변의 농경작지 중에서 9개 지점과 배경치 농도를 위한 1개의 대조군 지점에서 시료를 채취하였다(총 13개 시료 분석). 하천 퇴적토 및 농경지 토양 채취의 경우 차량 진입이 곤란하여 수동타격식(Geoprobe MTK)장비를 사용하여 심토는 0.4~1 m까지 깊이까지 채취를 시도하였으며, 표토는 40 cm 깊이까지 삽으로 채취하여 지퍼백에 담아 분석할 때까지 냉동 상태로 보관하였다. Fig. 2는 하천 퇴적토 시료 채취 지점을 나타내고, Fig. 3은 농경지 토양의 시료 채취 지점을 나타낸다.

3.2. 토양의 주 오염원인 비소 성분의 광석 산출 상태

광폐석 및 광미의 주 구성 광물을 규명하여 그 분포 및 특성을 조사 하는 것은 이로부터 하천에 의해 유입되는 중금속 오염원의 특성을 파악하는데 매우 중요

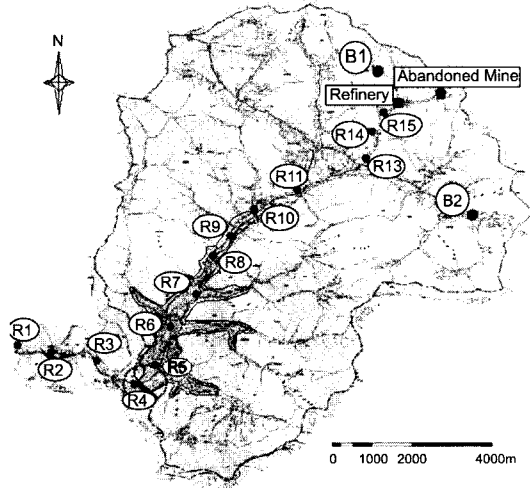


Fig. 2. Sampling sites for river deposit analysis in this study.

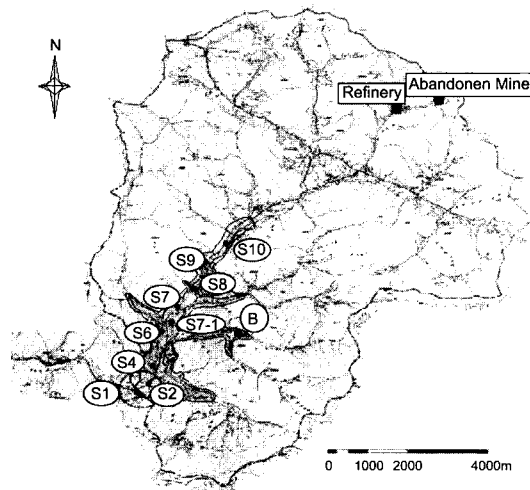


Fig. 3. Sampling sites for farmland soil analysis in this study.

하다(최선규와 최인식, 1998). 따라서 대표적인 폐광산의 광폐석을 박편 시료로 제작하여, 폐석 내 토양 오염원의 가능성이 높은 광물과 그 분포를, 비소를 포함하는 유비철석(AsFeS)을 중심으로 조사하였다. Fig. 4는 폐석 내 구성 광물의 분포를 나타내는 대표적인 반사현미경(Nicon, Optiphot-2POL) 사진이다. 산출되는 광석광물들은 대부분 황화광물로서 아연 함유광물인 섬아연석, 황철석, 황동석, 방연석이 산출되고, 비소를 함유하는 10~15µm 크기의 유비철석들이 분포하고 있다. 이러한 황화광물의 입자들이 풍화되어 하천에 유입되면서 하천 퇴적토 및 주변 토양에 납(Pb)과 비소(As)의

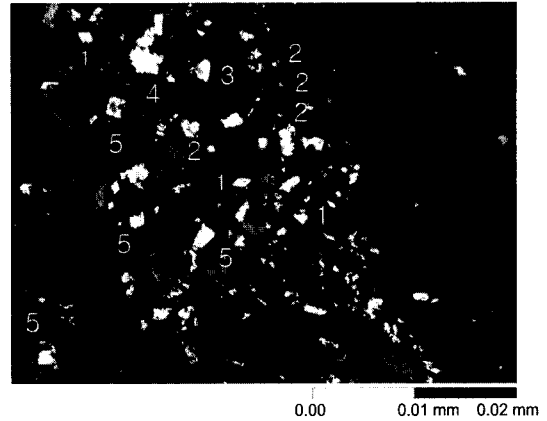


Fig. 4. Microphotographs showing minerals in a waste rock from the mine. (1: arsenopyrite, 2: chalcopyrite, 3: sphalerite, 4: galena, 5: pyrite)

Table 3. Results of grain size distribution analysis for surface river deposits

Sample number*	Sand (%)	Silt (%)	clay (%)
R1	95.77	3.53	0.7
R2	95.36	4.09	0.56
R3	93.64	5.69	0.67
R4	99.68	0.27	0.05
R5	96.74	2.93	0.34
R6	99.42	0.5	0.08
R7	99.06	0.84	0.1
R10	99.54	0.38	0.08
R11	99.75	0.21	0.04
R13	99.84	0.13	0.02
R14	99.64	0.3	0.05
R15	99.41	0.5	0.09

*see Fig.2 for sampling locations

주 오염원으로 작용했던 것으로 판단된다.

3.3. 하천퇴적토 표토 시료의 입도 분포

토양에 흡착되는 중금속은 토양을 구성하는 입자들의 특성과 깊은 관계가 있다. 따라서 토양의 입도 분포를 조사함으로써, 토양에 흡착된 중금속의 농도와 토양특성과의 관계를 규명하고자 하였다. 채취된 하천 퇴적토의 표토를 건조시킨 후, 입경이 2~0.075 mm 인 경우는 체분석법을 이용하였고, 0.075 mm 이하의 실트와 점토 성분들은 피펫분석법을 실시하여 입도 분석을 하였다. 하천 퇴적토의 표토 시료(총 12 시료)에 대하여 입도 분석을 실시하였으며, 그 결과는 Table 3에

Table 4. Results of heavy metal concentration (unit: mg/kg) and pollution grade for river deposits

Sample I.D.	Sampling depth (m)	Cd	Cu	Pb	Hg	Cr ⁺⁶	As	pH	Pollution Grade (As)
R1-1	0.1-0.2	0.44	5.21	20.06	0.01	0.72	4.65	6.31	2
R1-2	0.4-1.0	0.07	2.33	11.77	0.01	0.09	0.90	6.37	1
R2-1	0.1-0.2	1.05	3.79	31.77	n.d.	0.69	1.50	6.04	1
R2-2	0.4-1.2	1.12	6.32	22.95	n.d.	1.05	10.00	6.28	3
R3-1	0.1-0.2	1.07	3.37	20.41	n.d.	0.81	13.50	6.27	3
R3-2	0.4-1.0	0.89	2.56	14.43	n.d.	0.81	3.00	6.45	2
R4-1	0.1-0.2	0.27	1.32	15.65	n.d.	0.78	3.80	6.54	2
R4-2	0.4-1.0	0.65	9.98	36.07	n.d.	1.03	4.35	6.41	2
R5-1	0.1-0.2	0.30	3.25	13.50	n.d.	0.79	1.80	6.44	1
R5-2	0.4-1.0	0.86	5.49	39.57	n.d.	0.95	5.35	6.54	2
R6-1	0.1-0.2	0.81	5.35	32.79	n.d.	0.80	(18.50)	6.60	4
R6-2	0.4-1.0	0.58	4.49	26.14	n.d.	1.32	4.50	6.70	2
R7-1	0.1-0.2	0.82	3.57	34.52	n.d.	0.80	11.00	6.51	3
R7-2	0.4-1.0	1.00	5.62	39.79	n.d.	0.49	2.50	6.50	2
R8-1	0.0-0.1	0.45	5.00	19.80	n.d.	1.30	4.10	6.42	2
R9-1	0.0-0.1	0.35	7.25	24.05	n.d.	1.20	3.40	6.75	2
R10-1	0-0.1	2.24	8.03	85.34	n.d.	0.68	(25.50)	6.49	4
R10-2	0-0.9	1.94	4.27	51.63	n.d.	0.54	0.80	6.64	1
R11-1	0-0.1	0.20	2.39	34.25	n.d.	0.50	(19.50)	6.46	4
R13-1	0-0.1	1.76	2.48	55.57	n.d.	0.45	4.50	6.72	2
R14-1	0-0.1	(12.97)	18.36	(2115.83)	n.d.	0.91	(19.50)	6.63	4
R15-1	0-0.1	2.93	4.14	177.20	n.d.	0.50	0.85	6.39	1
Background sample B2-1	0-0.1	0.16	2.61	9.36	n.d.	0.58	2.85	6.46	
Background sample B1-1	0-0.1	0.11	1.22	4.22	n.d.	0.56	2.00	6.06	

*n.d.: below detection limit

*bold number: over SPWL(soil pollution warning limit) and parentetic bold number: over SPCL(soil pollution counterplan limit)

*sample name(R#-1: surface deposit, R#-2: subsurface deposit)

나타나왔다. 하천 퇴적토의 경우 94% 이상이 모래입 자들로 이루어져 있으며, 점토 성분은 1% 이하였다.

3.4. 토양 시료 분석 방법

하천 퇴적토 및 농경지 토양 시료는 토양오염분석기 관련 한국산업기술시험원 환경기술본부에 의뢰하여 토양공정시험법에 의해 전처리를 실시한 후 분석하였으며(환경부, 2002a), pH는 pH/Ion Meter(이스텍회사제품)로, 카드뮴, 구리, 납, 크롬, 아연에 대해서는 ICP/MS(Perkin Elmer Elan 6000)로, 수은은 수은 분석 전용 ICP/MS인 Flow Injection Mercury System(모델명 Perkin Elmer F/MS 400)으로, 비소에 대해서는 원자흡광분광기(AAS: Varian Spectra 300)로 분석하였다.

4. 결과 및 토의

4.1. 하천 퇴적토 분석 결과

Table 4는 하천 퇴적토에 대한 중금속 농도를 나타내고 있으며, 토양오염 우려기준 농도를 초과하는 농도는 굵게 표시하였으며, 토양오염 대책기준 농도를 초과하는 농도는 괄호 안에 굵게 표시하였다.

4.1.1. 하천 퇴적토 중금속 함량 및 pH

하천 퇴적토는 카드뮴, 구리, 납, 수은, 6가크롬, 비소등 광산 활동과 관련되어 주로 오염되는 6개 원소에 대하여 중금속 농도를 분석하였으며, 폐광산으로부터 거리에 따른 하천 퇴적토의 중금속 농도를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다.

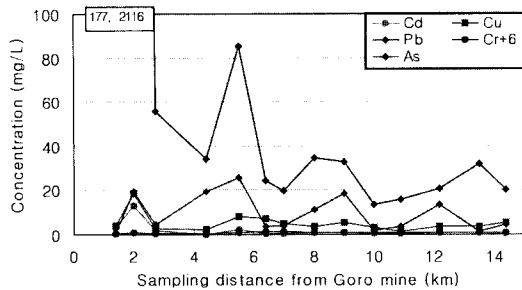


Fig. 5. Results of heavy metals at sampling sites(R15-R1) for surface river deposits.

(1) 납 (Pb)

본 연구 지역 하천 퇴적토의 납 함량은 표토에서는 13.5~2115.8 ppm(평균 191.5 ppm), 심토는 11.8~51.6 ppm(평균 30.3 ppm)으로, 하천 R14 지점이 토양오염 우려기준(100 ppm)의 21배, 하천 R15 지점이 1.8배를 초과하는 것을 제외하고 나머지 지점에서는 표토, 심토 모두 우려기준 이하로 나타났다. 배경치로 선택된 두 곳의 대조 지점(B1과 B2)의 농도는 4.2 ppm 과 9.4 ppm으로 나타나 폐광산과 관련된 하천 퇴적토의 납농도가 전체적으로 높은 것으로 나타났으며, 특별히 퇴적토 표토 내 납농도는 폐광과 가까이 위치할수록 증가하는 추세를 보임으로써(Fig. 5), 폐광 주변에 적재된 광미나 폐광석의 유출에 의해 오염이 진행된 것으로 사료된다.

(2) 카드뮴 (Cd)

카드뮴과 아연은 지화학적으로 밀접한 관련성이 있어서, 대부분의 암석이나 광석에서 함께 산출되며, 본 지역의 광석광물인 섬아연석 구조에 연관되어 아연과 함께 산출되는 것으로 예측할 수 있다. 표토의 경우 0.2~12.97 ppm(평균 1.83 ppm)이고 심토의 경우 0.07~1.94 ppm(평균 0.89 ppm)의 농도를 나타내었다. 심토는 모두 토양오염 우려기준(2 ppm)이하로 나타났으며, 표토의 경우 하천 R10과 R15에서 기준치를 1.5배, 하천 R14는 6.5배를 초과하였으며 나머지 시료에서는 모두 기준치 이하로 나타났다. 대조시료의 농도는 0.11 ppm과 0.16 ppm으로 낮게 나타남으로서 하천 퇴적토의 카드뮴 농도는 전반적으로 높은 것으로 나타났다. 납에서와 같이 폐광산 위치에 따른 일정한 농도 분포를 보이지는 않으나 폐광산과 인접한 하천 R10, R14, R15에서 농도가 높게 나타나고 있음을 알 수 있다.

(3) 비소 (As)

하천 퇴적토의 비소 농도는 표토의 경우 0.85~

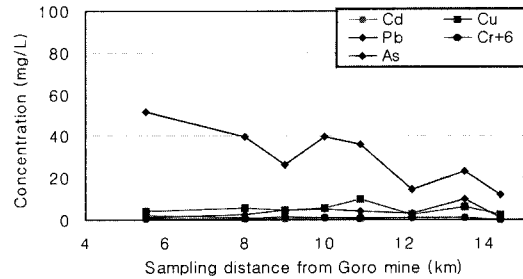


Fig. 6. Results of heavy metals at sampling sites(R10-R1) for subsurface river deposits.

25.50 ppm(평균 9.44 ppm), 심토의 경우 0.8~10.00 ppm(평균 3.93 ppm)을 나타내었다. 표토의 경우 총 14 지점 중 6개 지점(43%)에서 토양오염 우려기준치(6 ppm)를 초과하였으며, 그 중에서 4 지점(29%)은 토양오염 대책기준치(15 ppm)를 초과하였다. 심토의 경우 하천 R2 지점에서만(13%) 토양 오염 우려기준치를 초과하였으며, 나머지 시료는 모두 기준치 이하를 나타냈다(Fig. 6). 오염 정도는 최고치가 토양오염 우려기준치의 약 5배를 나타내고 있으며, 특별히 폐광산 하부 지역 하천 퇴적토 표토 부분이 폭 넓게 오염되어 있어서 오염된 표토에 대하여 복원 사업이 필요한 것으로 나타났다.

(4) 수은 (Hg)

하천 퇴적토에서 수은은 하천 R1 지점만 0.01 ppm 농도를 보였으며, 나머지 지점에서는 모두 검출한계이하의 농도를 나타내, 수은에 의한 하천 퇴적토 오염은 거의 없는 것으로 나타났다.

(5) 6가크롬 (Cr⁶⁺)

표토의 경우 0.45~4.10 ppm(평균 0.78 ppm), 심토의 경우 0.09~1.32 ppm(평균 0.78 ppm)을 나타내어, 모든 시료에 대하여 토양오염 우려기준치(4 ppm)이하를 나타내었으며, 대조군 시료의 농도 (0.58 ppm 과 0.56 ppm)와 비교해서 큰 차이를 보이지 않아 폐광산에 의한 6가크롬의 하천 퇴적토 오염은 심각하지 않은 것으로 나타났다.

(6) 구리 (Cu)

하천 퇴적토 표토의 농도는 1.32~18.36 ppm(평균 5.25 ppm), 심토는 2.33~9.98 ppm(평균 5.13 ppm)으로 모든 시료에서 토양오염 우려기준치(50 ppm)보다 훨씬 낮은 것으로 나타나 구리에 의한 오염의 정도는 심하지 않은 것으로 나타났으나, 배경치 대조군의 농도(2.61 ppm 과 1.22 ppm)보다 높게 나타나 폐광산에 의한 오염 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.

(7) pH

하천 퇴적토의 표토 및 심토 모두 pH가 6.00 과 6.80 사이(평균 6.48)로서 토양 산성화에 따른 중금속 원소들의 유동성 증가나 생태계의 피해는 없는 것으로 나타났다.

4.1.2. 오염 중금속의 상호 연관 관계

하천 퇴적토에서 중금속 원소들의 함량간의 상관성을 검토한 결과 원소 함량간의 직선회귀 결정계수(r^2)는 Pb-Cd(96%), Pb-Cu(68%), Cu-Cd(66%)를 제외하고는 다른 중금속간의 상관관계는 매우 낮은 것으로 나타났다. Pb, Cd, Cu 서로 간에 비교적 높은 상관관계를 보이는 이유는 광석의 주 산출 광물인 방연석(PbS)과 첨아연석(ZnS)내 존재하는 Cd, 황동석(CuFeS₂)들이 공존하여 산출되기 때문인 것으로 판단된다. 비소(As)는 다른 중금속들과 특별한 상관관계가 없는 것으로 나타났다.

4.1.3. 하천 퇴적토의 입도 분포와 오염 농도와의 상관관계

폐광산에 인접한 하천 상류 지점의 퇴적토 입자 분포가 하류 지점들에 비해서 모래 입자들이 많았으며, 하류 지점에서 실트나 점토 성분이 증가하는 일반적인 하천 퇴적토의 특성을 나타내고 있다. 그러나, 대부분의 퇴적토에서 모래입자 크기를 가지는 토양 비율이 94%를 초과하고 있어서 사질 토양임을 알 수 있었다. 실트나 점토 함량이 상대적으로 많은 하천 하류 지역의 퇴적토에서 중금속 농도가 높게 나타나기 보다는 오염원인 폐광산과 가까운 하천 상류에서 중금속 농도가 대부분 높게 나타나므로, 본 연구 지역의 하천 퇴적토의 오염은 표토의 입자 크기에 영향을 받기보다는 주로 오염원인 폐광산과의 거리에 더 영향을 많이 받을 수 있었다.

4.1.4. 하천 퇴적토 중금속 오염 평가

하천 퇴적토 중금속 오염 분석 결과 표토의 경우 중금속 원소의 절대량은 납, 비소, 구리 순으로 나타났으며, 심토는 납, 구리, 비소 순으로 나타났다(Fig. 5, 6). 구리, 수은, 6가크롬은 표토와 심토를 포함한 모든 하천 시료 채취 지점에서 토양오염 우려기준치 이하로 나타났으며, 카드뮴의 경우 폐광산과 근접한 하천 R10, R14, R15 지점의 표토에서 우려기준치 이상으로 나타났고(총 시료 개수의 14%), 납은 하천 R14, R15 지점의 표토에서 우려 기준치를 초과하였다(총 시료 개수의

9%). 결과적으로 폐광산과 인접한 하천 상부의 퇴적토 중에서 표토들이 납과 카드뮴에 오염된 것으로 판단되며 이들에 대한 복원이 필요한 것으로 나타났다. 비소는 총 시료 개수의 32% 인 7개 시료에서 토양오염 우려 기준치를 초과하였으며, 하천 R2의 심토를 제외하면 모두 표토에서 기준치 이상을 나타내었고, 특히 폐광산과의 거리에 관계없이 하천 전체에 걸쳐 표토들이 폭넓게 오염되어 있었다. 따라서, 비소로 오염된 하천 퇴적토의 표토들을 복원하는 것이 가장 중요한 토양 오염 복원 과정이 되어야 할 것으로 판단된다.

Fig. 5는 하천 퇴적토의 표토에 함유하는 각 중금속의 농도를 하천 지점에 대해 나타낸 것으로, 비소를 제외한 다른 중금속들이 폐광산에 인접한 하천 상류 지점에서 높게 나타나는 것을 보여주고 있다. 심토는 표토에 비해 훨씬 적게 오염되어있음을 알 수 있었으며(Fig. 6), 폐광산으로부터 거리에 따른 농도 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서, 본 하천 퇴적토의 오염은 토양 오염 우려기준을 근거로 판단할 때, 대부분이 퇴적토의 표토에 집중되어 있으며, 폐광산 인접 부분의 하천 지역은 카드뮴, 납에 의해 오염되었고, 비소는 거리와 관계없이 하천 전반에 걸쳐 표토에 분포하고 있음을 알 수 있었다.

중금속에 의한 하천 퇴적토의 종합적인 토양 오염 양상을 규명하기 위하여 토양오염우려기준과 대책기준에 근거한 토양환경보전법의 오염등급(Pollution Grade)을 계산하여 Table 4와 5에 제시하였다(환경부, 2002b). 비소에 의한 오염등급의 경우 4등급을 나타내는 시료는 모두 표토에 한정되어 있어서, 폐광산 주변의 폐석 및 광미의 지속적인 하천 유입을 막고, 비소 오염 하천 퇴적토를 선별하여 복원한다면 전체적으로 효과적인 복원이 가능하리라 판단되어진다.

4.2. 농경지 토양 분석 결과

Table 5는 하천 주변 농경지 토양에 대한 중금속 농도를 나타내고 있으며, 토양오염 우려기준 농도를 초과하는 부분은 굵게 표시하였으며, 토양오염 대책기준 농도를 초과하는 부분은 괄호 안에 굵게 표시하였다.

4.2.1. 농경지 토양의 중금속 함량 및 pH

폐광산에 의해 오염이 되었을 가능성이 있는 폐광산 하부로부터 하천 주변 농경지 토양에 대하여 카드뮴, 구리, 납, 수은, 6가크롬, 아연, 비소를 포함하는 총 7개 원소에 대하여 중금속 농도를 분석하였다. 농경지 9개 지점(배경치 포함)에서 표토, 심토 또는 표토/심토

Table 5. Results of heavy metal concentration (unit: mg/kg) and pollution grade for farmland soils

Sample I.D.	Sampling depth (m)	Cd	Cu	Pb	Hg	Cr ⁺⁶	Zn	As	pH	Pollution Grade (As)
S1-1	0.0-0.6	0.40	3.35	16.70	0.05	0.90	14.10	3.80	6.37	2
S1-2	0.6-1.2	0.10	1.95	7.15	n.d.	1.05	5.10	0.60	6.04	1
S2-1	0.1-0.3	0.15	3.60	14.90	n.d.	1.30	6.30	0.95	6.28	1
S2-2	0.4-1.0	0.20	3.05	17.55	n.d.	1.70	13.25	1.20	6.27	1
S4-1	0.0-0.4	0.35	4.75	19.90	n.d.	1.50	21.80	(46.00)	6.45	4
S6	0.0-0.8	0.10	3.30	19.20	n.d.	1.35	4.05	2.05	6.54	1
S7	0.0-0.8	0.15	5.10	9.05	n.d.	1.50	23.50	1.50	6.41	1
S8-1	0.0-0.1	1.45	5.10	43.05	n.d.	1.20	48.95	(28.50)	6.44	4
S8-2	0.1-0.6	0.65	5.00	32.70	n.d.	1.20	23.50	10.30	6.54	3
S9-1	0.0-0.6	0.55	6.10	13.90	n.d.	1.35	33.50	14.60	6.60	3
S10-1	0.0-0.6	1.40	5.00	28.90	n.d.	1.40	78.00	(40.00)	6.70	4
S10-2	0.6-1.0	0.25	4.25	32.00	n.d.	1.60	22.00	3.05	6.51	2
Background sample B	0.0-0.9	0.10	3.90	1.80	n.d.	1.25	3.45	0.50	6.50	

*n.d.: below detection limit

*bold number: over SPWL(soil pollution warning limit) and parentetic bold number: over SPCL(soil pollution counterplan limit)

*sample name(S#-1: surface soil, S#-2: subsurface soil)

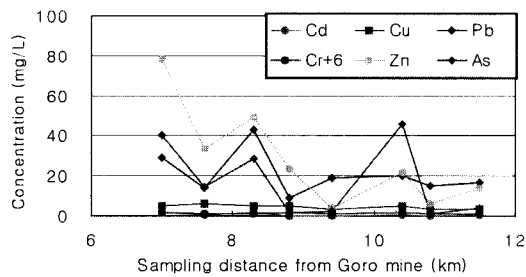


Fig. 7. Results of heavy metals at sampling sites (S10 - S1) for surface farmland soils.

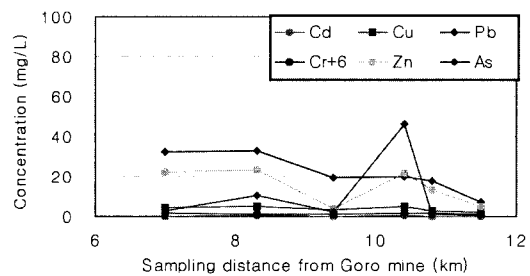


Fig. 8. Results of heavy metals at sampling sites for subsurface farmland soils.

구분하지 않은 혼합토 (농경지 S6과 S7 지점: 시료 채취 시 구별 불가)를 포함하여 총 13 시료를 분석하였다. 농경지토양에 대한 중금속 농도를 폐광산으로부터 시료 채취 거리로서 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다.

(1) 납 (Pb)

농경지 토양의 납 함량은 7.15~43.05 ppm(평균 21.25 ppm)으로서 모든 시료에 대하여 토양오염 우려기준치(100 ppm)보다 훨씬 낮은 것으로 나타났으나, 대조 지역 시료 농도는 1.80 ppm으로서, 폐광산 주변 농경지 토양은 오염 우려기준치 이하이기는 하지만 납에 의한 오염이 상당히 진행되었던 것으로 판단된다. 따라서 더 이상의 오염이 진행되지 않도록 폐광산으로부터 광미나 폐광석의 유출을 막는 작업이 매우 필요한 것으로 나타났다.

(2) 카드뮴 (Cd)

농경지 토양의 카드뮴 농도는 표토의 경우 평균 0.72 ppm, 심토는 평균 0.30 ppm, 혼합토는 평균 0.13 ppm으로 나타났으며, 모든 시료에 대하여 토양오염 우려기준치(2 ppm)보다 낮았다. 그러나 납과 같이 대조 지역의 농도가 0.10 ppm 으로 농경지 토양의 농도보다 낮게 나타나, 폐광산 주변 농경지 토양은 토양오염 우려기준치보다는 낮지만 전반적으로 카드뮴의 오염이 진행되어졌던 것으로 사료된다.

(3) 비소 (As)

비소 농도는 표토의 경우 평균 22.3 ppm, 심토는 평균 3.79 ppm, 혼합토는 평균 1.78 ppm으로 나타나 농경지 토양의 표토가 주로 비소에 의해 오염되어있음을 알 수 있었다. 시료 채취 농경지 8지점 중 4 지점(농

경지 S4, S8, S9, S10 지점에서 비소 농도가 토양오염 우려기준치(6 ppm)를 초과하였으며(총 지점의 50%), 이 중 3 지점에서는 토양오염 대책기준치 (15 ppm)를 초과하였다(Fig. 7). 대부분 폐광과 가까운 지역의 농경지 토양의 표토에서 농도가 높게 나타났으며, 대조군의 농도 0.5 ppm 보다 매우 높게 나타남으로서 농경지 토양의 표토가 비소에 의해 폭 넓게 오염되어있는 것으로 나타났다. 결과적으로 폐광산 농경지의 주 오염 성분은 표토에 존재하는 비소로 나타났으며, 이들에 대한 복원 작업이 필요한 것으로 판단된다.

(4) 수은(Hg)

수은은 농경지 S1 지점의 표토가 0.05 ppm 농도를 나타낸 것을 제외하고는 다른 모든 시료에서 검출한계 이하를 나타내어, 하천 퇴적토와 마찬가지로 수은에 의한 오염은 거의 없는 것으로 나타났다.

(5) 6가크롬 (Cr^{6+})

표토의 경우 0.9~1.50 ppm(평균 1.28 ppm), 심토는 1.05~1.70 ppm(평균 1.39 ppm), 혼합토는 1.35~1.50 ppm(평균 1.43 ppm)으로서 모든 시료에 대하여 토양오염 우려기준치(4 ppm)이하로 나타났다.

(6) 구리 (Cu)

구리 농도는 농경지 토양 시료에 대하여 1.95~6.10 ppm(평균 4.21 ppm)으로서 토양오염 우려기준치(50 ppm)보다 훨씬 낮게 나타나 구리에 의한 농경지 토양 오염은 거의 없는 것으로 나타났다.

(7) 아연 (Zn)

농경지 토양의 아연 농도는 4.05~78.00 ppm(평균 24.50 ppm) 으로서 토양오염 우려기준치 (300 ppm)보다 훨씬 낮게 나타났다. 그러나, 대조군의 아연 농도는 3.45 ppm 으로서 폐광산 주변 농경지는 광산으로부터 아연 유입을 받았던 것으로 판단된다.

(8) pH

농경지 토양의 표토 및 심토 모두 pH가 6.04과 6.70사이 (평균 6.43)로서 하천 퇴적토와 마찬가지로 농경지 토양 전체가 중성의 특징을 나타내므로, 이로 인해 하천수 중에 용출되어 나오는 중금속의 함량은 소량에 지나지 않을 것으로 판단되며, 이러한 예측은 기존의 하천 수질 분석 결과로도 유출할 수 있다. 따라서 현재까지 토양 산성화에 따른 중금속 원소들의 이동성 증가나 생태계의 피해는 거의 없는 것으로 나타났다.

4.2.2. 오염 중금속의 상호 연관 관계

농경지 토양에서 중금속 원소들의 농도간의 상관관

계 (결정계수: r^2)는 Zn-Cd (82%), Pb-Cd (54%), As-Zn (50%)을 나타내었으며, 나머지 원소들 간의 농도 상관관계는 매우 낮은 것으로 나타났다. Zn-Cd의 상관관계가 다른 금속들 사이의 상관관계보다 높게 나타난 것은 섬아연석(ZnS) 광물 구성 중에서 Cd가 Zn을 일부분 대신하여 구성하고 있음을 나타내며, 이들이 공존하여 유출됨으로서 토양 내 비교적 높은 농도의 상관관계를 나타나는 것으로 사료된다.

4.2.3. 농경지 토양의 중금속 오염 평가

폐광산 하천 주변 농경지 토양 오염 분석 결과, 토양 내 중금속 원소의 절대량을 기준으로 하였을 때 표토는 아연, 납, 비소의 순서로, 심토에서는 납, 아연, 비소의 순서로 높은 농도를 보였으나(Fig. 7, 8), 비소를 제외한 다른 중금속에 대해서 모든 시료에서 토양오염 우려기준치이하로 나타났으며, 배경치로 사료되는 대조 지점의 중금속 농도보다는 전반적으로 높게 나타나 폐광산에 의한 오염이 상당히 진행되었음을 알 수 있었다. 농경지 S4, S8, S9, S10 지점의 표토와 S8 지점의 심토에서 비소 농도가 토양오염 우려기준치(6 ppm)를 초과하였으며(총 시료 채취지점의 50%), S4, S8, S10 지점의 표토에서는 토양오염 대책기준치(15 ppm)를 초과하여(최고 3배 농도), 폐광산지역 하천 주변의 농경지 토양 표토의 상당 부분이 비소로 오염되어 있었으며, 따라서 하천 퇴적토와 함께 주변 농경지 표토의 비소 제거가 본 조사 지역 토양 오염 복원에 가장 중요시 되는 부분이라고 판단되었다.

폐광산 주변 농경지 토양의 오염 평가를 위해 하천 퇴적토에서와 같이 오염등급을 계산하였으며, 그 결과는 Table 5에 나타나있다. 폐광산 주변 농경지 토양은 비소의 농도만이 토양오염 우려기준치를 초과하는 것으로 나타나, 비소 오염이 심한 폐광산 주변 농경지 표토를 선별하여 복원한다면 본 연구지역 폐광산 일대의 토양오염 복원은 매우 효과적일 것으로 판단되었다.

4.3. 오염 하천 퇴적토 및 농경지 토양 복원 대책

4.3.1. 하천 퇴적토 복원 대책

토양과 하천 퇴적토 내에 존재하는 중금속들은 분해가 거의 일어나지 않아 자연적으로 정화가 어려울 뿐만 아니라, 동/식물의 생장에 영향을 주며, 장기간 노출되는 경우 인체에 과다한 중금속 축적을 가져와 심각한 장애를 일으킬 수 있다. 토양이 비휘발성이며 생물학적 난분해성인 중금속들로 오염되어 있는 경우에,

이러한 물질을 제거하는데 적합한 정화 기술로서 현장에서 널리 쓰이는 방법은 오염토양 굴착/매립법, 고품화/안정화법, 전기 영동법, 객토/복토법, 식물경작법, 토양 세척법 등이 있다(환경부, 1995).

본 연구지역인 폐광산 근처 하천 퇴적토의 경우 카드뮴과 납으로 오염된 표토에 대하여, 그리고 비소로 오염된 하천 퇴적토의 경우, 오염된 퇴적토를 다른 지역으로 옮겨 매립하거나 처리하는 것은 많은 비용과 제약이 따르게 되므로 가능한 한 오염 지역 내에서 처리하는 방법이 바람직하며, 이 경우 비교적 적은 비용으로 짧은 시간 내에 오염 토양을 안전하게 처리할 수 있는 토양 세척법이 좋은 방법이 될 수 있다(Anderson, 1995). 고정화 및 안정화 방법은 오염 토양을 다른 곳으로 이동하거나 오염 토양을 지역 주민들의 생활과 분리시키지 않는 한 영구적인 복원 방법이 될 수 없다. 본 조사 지역의 오염된 퇴적토는 대부분 하천 주변에 노출된 기반암 상부에 얇게 분포하고 있고, 오염된 퇴적토의 양은 표토에 한정되어있으므로 비교적 짧은 시간 안에 토양 세척법에 의해 처리할 수 있을 것이다. 토양 세척법은 복원 기간이 짧고, 여러 종류의 중금속을 동시에 제거할 수 있으며, 모래 입자에 대하여 매우 좋은 복원 효과를 가지고 있는 것으로 밝혀져 있으며, 특히 광미 중에 존재하는 중금속 제거에 효과가 좋은 것으로 연구되어있다(오종기 등, 1998; 이동호와 박옥현, 1999; 정동철 등, 1997). 본 조사 지역의 하천 퇴적토의 입도 분포를 보면 93% 이상이 모래 크기의 입자들로 되어있어서 토양 세척법의 적용 시 매우 효과가 있을 것으로 판단되었다.

토양 세척법은 적절한 세척제를 사용하여 토양입자에 결합되어 있는 중금속을 액상으로 변화시켜 토양입자로부터 중금속을 분리시켜 처리하는 방법으로서, 토양세척장치와 관련되어 5개 내외의 국내 특허가 출원되어 이미 상용화 단계에 있다. 세정액은 주로 물을 사용하는 것이 일반적이나, 용해되기 어려운 중금속의 경우에는 EDTA(ethylene diamine tetra-acetic acid), 초산, 옥살산, 구연산과 같은 저분자 유기산을 이용한 금속과 유기리간드 사이의 착물형성에 의한 용해도 증가를 유도하거나, 산을 이용하여 용액의 pH를 낮추어 중금속을 용출시켜 세척 효율을 증가시킨다. 실제로 구연산 150 mM 용액을 1:10으로 희석하여 세정액으로 사용한 결과 500~1000 mg/L로 오염된 국내 토양의 중금속 제거율이 75% 이상 되었으며, 특히 국내 광산의 광미들에 대해, 2N의 황산(H₂SO₄) 및 염산(HCl) 용액을 이용한 세정액의 경우 85% 이상의 비소가 제

거 되었던 결과들이 보고 되어 있다(이동호와 박옥현, 1999). 세척후 용액은 주로 알칼리 침출법에 의해 침전시켜 슬러지 형태로 제거한다. 특별히 비소에 대하여 1 N NaOH 용액을 이용한 pH 조절에 의해서 80%이상의 침전율을 얻었으며, 황산나트륨과 염화칼슘을 침전제로 첨가한 경우 99% 이상의 비소를 침전시켜 분리할 수 있다(이재령 등, 1997).

본 폐광산 주변의 오염 퇴적토를 토양 세척법으로 복원하는 대책을 세우는 경우, 토양 오염 조사 결과를 참조하여 폐광산 하부에서부터 하천 하류까지 직선거리 약 12 km 구간의 하천 퇴적토 중, 안전성을 고려한 깊이 0.4 m 이하의 표층에 대하여 토양 세척이 필요한 대상 지역을 Fig. 9에 표시하였다. 토양 세척이 필요한 대상 구간의 면적은 약 195,000 m²이며, 세척 대상 심도를 0.4 m로 고려할 때 토양 세척 대상 물량은 약 78,000 m³으로 산정되었다.

4.3.2. 농경지 토양의 복원 대책

1998년 8월 수해로 고로 폐광산의 도수로와 옹벽이 유실되면서 광미 및 폐광석, 침출수의 유출로 주변 농경지가 오염되어, 경상북도 보건환경연구원의 토양 및 침전지 수질 분석 결과 폐광산 주변 농경지 토양과 침전지 내 다량의 비소가 검출되어, 군위군은 폐광산 주변 오염 농경지 토양에 대해 2000년 2월부터 약 1년

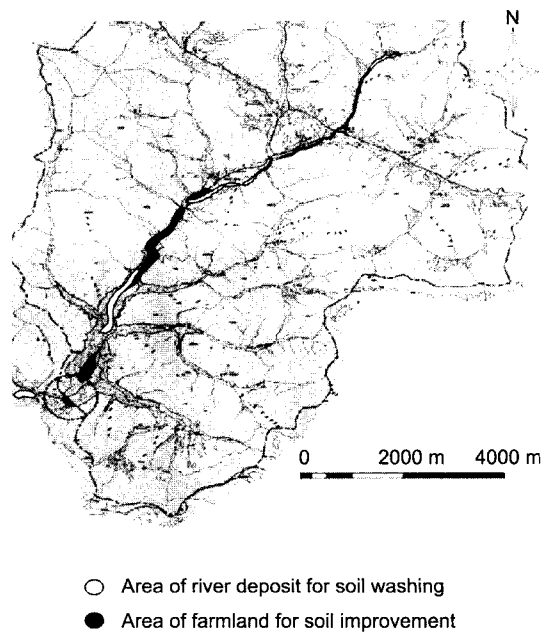


Fig. 9. Estimated Area needed for future remediation in the vicinity of the Goro abandoned mine.

에 걸쳐 복토 사업을 실시하였다. 객토 대상지는 폐광산 주변 6개리(화수1, 화북1, 화북3, 인곡1, 양지, 석산리) 농경지 중 토지소유자가 복원 비용을 일부 부담한 토지, 총 11.3 ha(112,287 m²)지역에 대하여 비오염 토양과 석회를 이용한 토양 복토를 30 cm 깊이로 실시하였으며, 사업비는 총 6천여만원으로 총 복토량은 37,891 톤 이었다. 그러나, 오염 토양 전체에 대한 복원은 예산 부족 등의 이유로 이루어지지 않았고, 하천 주변 퇴적토에 대한 조사 및 복원계획은 수립되지 않았다.

농경지 오염 토양의 경우 주로 폐광산 주변에 한정되어 있으며, 오염도가 높은 중금속은 비소로서, 그 오염 정도가 토양오염 우려기준치의 최고 8배 이하로 나타나(대부분 2~3배 초과), 비교적 오염 정도가 낮은 토양 복원에 사용되는 반전 객토법에 의해 복원하는 것이 바람직한 것으로 나타났다(나춘기 등, 1997). 토양 반전 객토의 경우 오염 토양을 따로 채굴하여 이동 시킬 필요가 없기 때문에 농경지 토양 복원에 특히 적합하며, 석회를 첨가한 복토 사업이 이미 본 폐광산 주변 농지에 효과적으로 사용된 적이 있어서(수자원공사, 2002), 오염 농경지 토양이 주로 표토에 국한되어 있음을 감안 할 때, 본 연구지역의 오염 농경지 토양 복원은 짧은 시간 내에 적은 비용으로 정화가 가능한 객토법이 적당하다고 판단되었다. 폐광산에 매우 가까운 농경지 토양에 대해서는 중금속의 불용화 수단으로 석회(소석회)와 함께 객토한다면 토양 복원 효과는 훨씬 클 것으로 판단되며, 폐광산 주변에서 토양오염 우려기준을 초과하는 농경지 토양의 표층(본 토양 조사에서는 안전성을 고려하여 최고 0.4 m 깊이까지의 토양으로 간주)에 대하여 객토가 이루어져야 한다. 1998년 8월 수해로 상류에 위치한 고로 폐광산의 도로 수로와 옹벽이 유실되면서 광미, 광폐석 및 침출수가 유출되어 주변 농경지가 오염 되었으므로, 홍수시 침수되었던 농경지 토양을 지역 주민과 함께 현지 조사를 실시하였으며, 오염 분석 결과 및 현지 조사결과 객토 대상 농경지 지역을 Fig. 9에 표시하였으며, 면적은 약 176,000 m²이며, 객토 대상 심도를 0.4 m로 간주하면 객토량은 약 70,400 m³ 으로 산정되었으나, 정확한 복원 대상 토양을 규명하기 위해서는 보다 정밀한 시료 채취 지점과 분석이 필요하다고 판단된다.

5. 결 론

폐이연광산인 고로광산 주변 농경지 토양 및 하천 퇴적토의 오염을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻

을 수 있었다.

1. 본 고로 폐광산 지역의 토양 및 하천 퇴적토의 오염 정밀 조사 결과, 폐광산으로부터 중금속을 다량으로 함유하고 있는 광미 및 광폐석의 관리 부실과 부적절한 처리 등으로 인하여, 적재되었던 광미 및 광폐석이 하천 하류로 유실됨으로서 주변 토양과 하천 오염이 진행되고 있었다. 폐광산지역 하천 주변의 농경지 토양과 하천 퇴적토 표토의 대부분이 비소로 오염되어서, 하천 퇴적토와 함께 주변 농경지 표토의 비소 제거가 본 조사 지역 토양 오염 복원에 가장 중요시 되는 부분이라고 판단되었다. 하천 하류의 퇴적토에서는 토양오염 우려기준치 이하이기는 하지만 전반적으로 중금속 함량이 배경치보다 4~5배 정도 높게 나타남으로서, 하천 퇴적토의 오염이 진행되었음을 파악할 수 있었고 따라서 지속적인 오염 진행을 차단하기 위한 복원 사업이 수행되어야 할 것으로 판단되었다.

2. 폐광산에 인접한 하천 퇴적토의 표토들이 부분적으로 카드뮴과 납의 토양오염 우려기준치를 초과하였으며, 폐광산과 주 하천 하류 사이 약 12 km 하천 구간의 하천 퇴적토 표토 상당 부분과 폐광산 인근 일부 농경지 표토들이 비소의 토양 오염 우려기준치를 초과하였다. 분석 결과 하천 퇴적토 및 농경지 토양의 심토는 조사 지점의 98% 이상에서 모든 중금속에 대하여 토양오염 우려기준치 이하로 나타나 조사 지역 주변의 토양 오염 진행 과정이 표토에 제한되어있음을 확인할 수 있었다. 따라서 토양환경보전법에 근거하여 토양오염 우려기준치를 초과하는 하천 퇴적토와 농경지 토양의 표토를 선별하여 복원하고, 더 이상의 오염 진행이 이루어지지 않도록 하천 상부에 위치한 폐광산 주변에 적재된 광미, 폐광석의 유실방지 및 침출수의 유출을 막는 오염원 방지 대책이 이루어 져야 할 것으로 사료된다.

3. 하천수 수질의 경우 과거 5차례에 걸친 수질 조사 자료로부터, 폐광산 갭내수와 침전지 주변을 제외 하고는 주변 하천의 수질은 모든 중금속에 대해 매우 낮은 것으로 나타나, 폐광산 주변의 토양 오염은 하천 수질에 의한 오염이기 보다는 폐광산 주변에 적재된 폐광석이나 광미들이 하천을 따라 유출되어 오염이 진행되었을 것으로 판단되었다. 그러나 지속적인 광미 및 광폐석의 하천 유출과 이에 따른 하천 퇴적토 및 농경지 토양 오염이 지속적으로 진행된다면, 토양 오염에 의한 2차적인 하천수의 오염이 발생할 수 있으므로 오염 퇴적토 및 토양의 복원이 반드시 필요하다.

4. 폐광산 하류 하천 퇴적토와 주변 토양 및 수질오

염의 주 원인으로 조사된 야적 광폐석을 수거 처분하고, 하천 퇴적토 중에서 오염된 표토는 토양 세척법을 통하여 중금속, 특히 비소와 납의 제거를 실시하고, 농경지 오염 토양은 석회를 포함한 반전 개토가 이루어진다면 고로 폐광산 주변의 토양 복원은 효과적으로 이루어 질 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

이 논문은 2001년도 한국 학술진흥재단의 지원(KRF-2002-041-D00261)에 의하여 연구되었음. 본 논문을 심사한 익명의 심사자와 시료 채취와 분석에 도움을 준 수자원공사 댐환경처에 감사드립니다.

참고문헌

- 나춘기, 이부성, 정재일 (1997) 폐금속광산하부 농경지 토양의 중금속오염과 그 복구방법으로서 반전개토의 효율성. 자원환경지질, 30권, p. 123-135.
- 김경웅 (1997) 달성광산지역 토양의 중금속함량 분석결과에 대한 평가. 한국지하수환경학회지, 1권, p. 20-26.
- 김선태, 윤양희, 박제안, 심의섭 (1999) 진곡광산 광미와 주변 토양의 오염조사. 한국토양환경학회지, 4권, p. 175-183.
- 김중옥, 문희수, 송윤구, 유장한 (1999) 구봉광산 일대 광미, 하상퇴적물 및 주변 토양에서의 중금속원소의 존재 형태. 자원환경지질, 32권, p. 261-271.
- 수자원공사 (2002) 화북댐 건설사업 환경영향평가서(폐광산 및 제련소 오염방지대책).
- 오종기, 이화영, 김성규, 이재령, 박재구 (1998) 산침출에 의한 광미중 비소성분의 제거에 관한 연구. 한국토양환경학회지, 3권, p. 21-31.
- 이도경, 정덕영, 이규승 (1997) 구봉광산 주변 중금속의 분포양상 및 인근농경지와 하천수계에 미치는 영향. 한국토양환경학회지, 2권, p. 69-80.
- 이동호, 박옥현 (1999) 폐금속광산 광미 및 주변 오염토양 세정에 관한 연구. 한국토양환경학회지, 4권, p. 87-101.
- 이재령, 오종기, 이화영, 김성규, 박재구 (1997) 알카리 용출법에 의한 폐광산 광미중의 비소제거에 관한 연구. 한국토양환경학회지, 2권, p. 73-79.
- 이찬희, 이현구, 유봉철, 조애란 (1998) 삼광 금은광산 일대의 하상퇴적물과 토양내 함유된 환경적 독성원소의 지구화학적 부화과 이동. 자원환경지질, 31권, p. 111-125.
- 이현구, 이찬희 (1998) 충주호 상류, 상곡 광산 수계에 분포하는 토양과 하상퇴적물의 중금속 오염. 한국지하수환경학회지, 5권, p. 10-20.
- 이효민, 윤은경, 최시내, 박송자, 황경엽, 조성용, 김선태 (1998) 폐광산 지역의 비소오염에 대한 복원목표 설정. 한국토양환경학회지, 3권, p. 13-29.
- 전효택, 김주용, 최시영 (1998) 폐석탄광 주변 지구화학적 환경의 중금속 오염 평가 -강릉탄전 임곡천 일대를 중심으로-. 자원환경지질, 31권, p. 499-508.
- 정동철, 이지희, 최상일 (1997) 중금속에 의해 오염된 토양에 대한 토양세척기법의 적용성 연구. 한국토양환경학회지, 2권, p. 53-60.
- 정명채 (1999) 휴/폐광 금은광산 주변의 토양오염조사와 복구시스템 연구. 자원환경지질, 32권, p. 385-398.
- 정예진, 이상훈 (2001) 폐광산 복구지역 잔류광미로 인한 주변 지하수 토양 오염 가능성-시흥광산 사례. 자원환경지질, 34권, p. 461-470.
- 최선규, 최인식 (1998) 한국 금은광산에서 산출되는 유비철석의 상변화. 자원환경지질, 31권, p. 89-99.
- 한춘, 서명조, 윤도영, 최상일, 이화영, 김성규, 오종기 (1998) 광산매립지에서 중금속(As)의 용출특성에 관한 실험적 연구. 한국토양환경학회지, 3권, p. 55-63.
- 환경부 (1995) 오염토양 정화기술 개발, 선도기술개발사업 "유해폐기물 처리기술 사업" 1차년도보고서. 삼성건설 기술연구소, 558 p.
- 환경부 (1998) 폐금속광산 오염실태 정밀조사 결과 보고서.
- 환경부 (2002a) 토양오염공정시험법.
- 환경부 (2002b) 토양환경보전법.
- 황은하, 위수민, 이평구, 최상훈 (2000) 서성 연-아연광산 주변 농경지 토양의 중금속 오염 연구. 한국토양환경학회지, 5권, p. 67-85.
- Alloway, B.J. (1995) Heavy metals in soils. 2nd(ed.) Blackie Academic and Professional, p. 105-150.
- Anderson, W.C. (1995) Innovative site remediation technology(Soil Washing/Soil Flushing). American Academy of Environmental Engineers.

2002년 11월 27일 원고접수, 2003년 3월 19일 게재승인.