

## 토양 정밀 조사에 의한 고로폐광산 주변 비소오염 토양 및 하천퇴적토의 오염도 평가 및 오염 토양 복원 규모 설정

차종철 · 이정산 · 이민희\*

부경대학교 환경지질과학과

### Environmental Assessment and Decision of Remediation Scope for Arsenic Contaminated Farmland Soils and River Deposits Around Goro Abandoned Mine, Korea

Jongchul Cha, Jungsan Lee and Minhee Lee\*

Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea

Soil Precise Investigation(SPI) for river deposits and farmland soils around Goro abandoned Zn-mine, Korea was performed to assess the pollution level of heavy metals(As, Pb, Cd, Cu) and to estimate the remediation volume for contaminated soils. Total investigation area was about 950000 m<sup>2</sup>, which was divided into each section of 1500 m<sup>2</sup> corresponding to one sampling site and 545 samples for surface soil(0-10 cm in depth) and 192 samples for deep soil(10-30 cm in depth) from the investigation area were collected for analysis. Concentrations of Cu, Cd, Pb at all sample sites were shown to be lower than Soil Pollution Warning Limit(SPWL). For arsenic concentration, in surface soils, 20.5% of sample sites(104 sites) were over SPWL(6 mg/kg) and 6.7%(34 sites) were over Soil Pollution Counterplan Limit(SPCL: 15 mg/kg) suggesting that surface soils were broadly contaminated by As. For deep soils, 10.4% of sample sites(18 sites) were over SPWL and 0.6%(1 site) were over SPCL. Four pollution grades for sample locations were prescribed by the Law of Soil Environmental Preservation and Pollution Index(PI) for each soil sample was decided according to pollution grades(over 15.0 mg/kg, 6.00-15.00 mg/kg, 2.40-6.00 mg/kg, 1.23-6.00 mg/kg). The pollution contour map around Goro mine based on PI results was finally created to calculate the contaminated area and the remediation volume for contaminated soils. Remediation area with over SPWL concentration was about 0.3% of total area between Goro mine and a projected storage dam and 0.9% of total area was over 40% of SPWL. If the remediation target concentration was determined to over background level concentration, 1.1% of total area should be treated for remediation. Total soil volume to be treated for remediation was estimated on the assumption that the thickness of contaminated soil was 30 cm. Soil volume to be remediated based on the excess of SPWL was estimated at 79,200 m<sup>3</sup>, soil volume exceeding 40% of SPWL was about 233,700 m<sup>3</sup>, and soil volume exceeding the background level(1.23 mg/kg) was 290,760 m<sup>3</sup>.

**Key words** : arsenic contamination, mine pollution, Goro mine, soil pollutant investigation

경상북도 군위군에 위치한 고로 폐야연광산에서 폐광산과 연결된 주 하천을 따라 저수댐 건설 예정지까지 직선 길이 약 12 km 구간에서 농경지 토양 및 하천 퇴적토에 대한 중금속 오염(비소, 납, 카드뮴, 구리) 토양정밀조사를 실시하였다. 총 조사 면적은 약 950,000 m<sup>2</sup> 이고 1,500 m<sup>2</sup> 당 1지점의 조사 밀도를 유지하여, 총 545개 지점에서 표토(0~10 cm 깊이)를 채취하였으며, 192개 지점에서 심토(10~30 cm 깊이)를 채취하였다. 비소를 제외한 구리, 카드뮴, 납 항목은 모든 지점에서 토양오염우려기준 이하를 나타내었으나, 비소는 표토의 경우 토양오염우려기준 이상의 농도를 나타내는 지점이 104지점으로 전체 표토 조사지점의 20.5% 정도 이었으며, 토양오염대책기준을 초과하는 지점은 34지점으로 전체 표토 조사지점의 6.7% 이상이어서 조사 지역 중 상당 부분이 비소로 오염되어 있었다. 심토의 경우 토양오염 우려기준 이상 농도를 나타내는 지점이 18지점으로 전체 심토 조사지점의 약 10.4% 정도 이었으며, 토양오

\*Corresponding author : heelee@pknu.ac.kr

염대책기준을 초과하는 지점은 1지점으로 전체 심토 조사지점의 약 0.6%를 나타내고 있어 비소오염이 주로 30 cm 이내에 집중되어 있는 것으로 나타났다. 조사지점별 비소농도를 기준으로 토양오염대책기준 농도(15 mg/kg) 이상 지역, 토양오염우려기준 농도(6 mg/kg) 이상 지역, 토양오염우려기준의 40% 농도(2.4 mg/kg) 이상 지역, 주변배경농도(1.23 mg/kg) 이상 지역으로 구분하여 하천퇴적토 및 농경지 토양에 대한 오염지도를 작성하였다. 오염지도 결과로부터, 오염 토양을 복원하기 위한 복원 목표를 토양오염우려기준 농도 이상, 우려기준의 40% 농도 (토양오염확인기준 농도) 이상, 배경치 농도 이상으로 구분하여 설정하는 경우에 해당되는 토양 복원 면적과 물량을 산출하였다. 토양오염우려기준 농도 이상의 경우 총 복원 면적과 물량은 264,000 m<sup>2</sup>, 79,200 m<sup>3</sup>이었으며, 우려기준의 40% 농도 이상의 경우 복원 면적과 물량은 779,000 m<sup>2</sup>, 233,700 m<sup>3</sup>, 배경치 농도 이상의 복원 목표 설정의 경우에는 각각 969,200 m<sup>2</sup>, 290,760 m<sup>3</sup> 이었다. 토양오염 우려기준 농도의 40%를 복원 목표로 하는 경우와 배경치 농도를 복원 목표로 하는 경우, 복원 물량은 우려기준 농도를 복원 목표로 하는 경우의 3.0배와 3.7배 정도 증가하는 것으로 나타나 복원 목표치 설정 시 우려기준 농도의 40%와 배경농도의 차이에 따른 복원 물량의 차이는 적어서, 복원 목표 설정시 배경치 농도로 복원계획을 세우는 것이 가장 바람직한 것으로 판단되었다.

**주요어** : 폐광산, 토양오염정밀조사, 비소오염, 토양오염복원, 고로광산

## 1. 서 론

현재 우리나라의 휴·폐 금속광산은 약 900여개로 집계되고 있으나, 대부분의 경우 채광 현장 시설물과 광미·광폐석들이 그대로 방치되어 광산 주변 토양과 하천의 주 오염 인자들로 작용하여왔다 (석탄산업합리화사업단, 1995; 환경부, 1999). 토양환경보전법이 제정된 1990년대 중반 이전까지는 휴·폐광산 주변의 토양오염조사는 거의 전무한 상태였으며, 제한된 광산에 대하여 광산 폐수 및 주변 하천 수질 조사가 이루어져왔다(정영욱과 Thornton, 1994; 오대균 등, 1995; 유재영, 1995). 1990년대 후반에서 광산 주변 오염 토양에 대한 연구가 활발히 진행되어왔으나, 대부분 광산 주변의 개략적인 토양 오염 정도를 확인하는 수준이었으며, 주변 토양에 대하여 세밀한 조사가 이루어진 경우에도 조사 대상 광산 당 100개 미만의 토양 시료에 대한 오염 조사가 이루어져, 오염 분포의 규명과 오염 토양 복원을 위한 정확한 복원 규모를 결정하는데 매우 미흡하였다(김경웅, 1997; 이도경 등, 1997; 이현구와 이찬희, 1998; 전효택 등, 1998; 정명채, 1999; 황은하 등, 2000). 토양정밀조사지침 (환경부, 2001)에는 폐광산 주변 오염 가능 토양에 대하여 약 1,500m<sup>2</sup> 면적당 1개의 표토시료와 표토 3개당 1개의 심토, 그리고 표토 6개당 연속시료를 채취하여 토양오염 정밀조사를 하게 되어있으나, 이러한 규모의 정밀조사는 지방자치단체나 광산개발업체들의 예산확보 어려움, 오염 토양 복원 사업의 부진, 오염 사실의 공개를 꺼리는 지역 주민들에 의해 현재까지 거의 전무한 수준이었다. 그러나 2000년대에 이르러 광산 주변의 오염 토양 복원 사업이 계획되기 시작하여, 몇 개 폐광산을 대상

으로 구체적인 오염 토양 복원 사업이 계획되어있고, 이러한 복원 사업을 위해서는 해당되는 광산 주변 오염 토양의 분포와 규모를 정확하게 규명하는 토양정밀 조사가 필수불가결한 과정이 되었다(한국수자원공사, 2002).

본 연구는 경북 군위군 고로면 석산리에 위치한 폐아연광산에서부터 폐광산과 연결된 주 하천을 따라 연장 약 12 km 되는 하천 하류의 저수담 건설 예정지역까지 주변 오염 농경지 토양과 하천 퇴적토(약 950,000 m<sup>2</sup> 면적)에 대하여 토양정밀조사지침에 의한 정밀 조사를 실시하여 폐광산 주변 중금속 오염 분포 특성과 정확한 오염 규모를 규명함으로써 고로폐광산 주변 오염 토양 복원 대책을 수립하기위한 자료를 제공하고자 하였다. 총 표토 시료수 545개, 심토 시료수 192개를 포함하여 총 741개 시료를 채취하여 중금속 오염 조사를 실시하였으며, 한 폐광산에 대하여 복원을 전제로 하여 이루어진 국내 최초의 대규모 토양정밀조사라는데 큰 의미가 있다.

## 2. 연구 지역 조사 배경

본 연구 대상 지역 내 주 오염원인 고로폐광산은 경상북도 군위군 고로면 석산리 산 27-1 번지에 위치하고 있으며, 1964년에서 1972년 사이 주로 아연을 채광하였고 이에 따른 폐석 및 광미 발생량은 약 23000 ton 으로 추정되고 있다(한국수자원공사, 2002). 폐광갱구로부터 약 500 m 하부에서 제련소 및 광미 침전소를 운영하였으며, 대부분의 광미를 그대로 산적하여 방치하던 중, 1999년 군위군에서 콘크리트 옹벽을 치고, 남아있던 광미 및 폐광석을 뒷채움의 형태로 현장

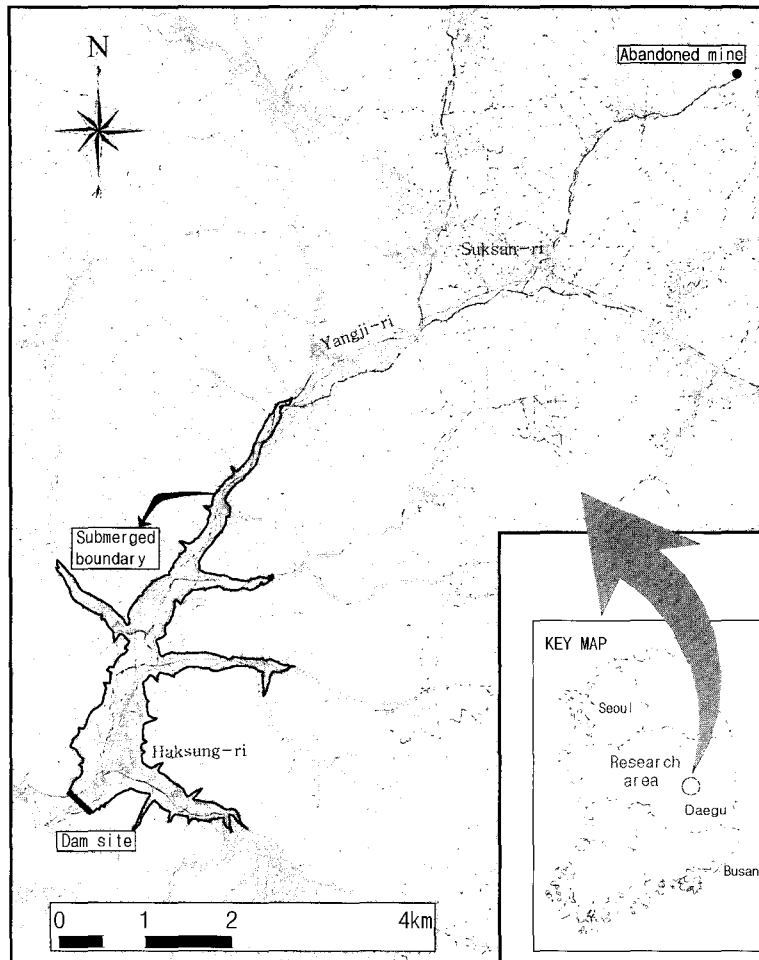


Fig. 1. Research area from Goro abandoned mine to a projected storage dam site.

매립하였다. 옹벽 설치구간에서 실시한 시추조사에 의하면, 매립층의 두께는 약 3.0~3.7 m 정도이고, 그 하부는 화강암이 분포하고 있으며, 지하수위는 지표하 2.9~3.4 m로서 매립층과 암반 경계부 근처에 형성되어 있다. 연구 대상 지역은 석산리 폐광산에서부터 댐 건설 예정지(하천 하류 12 km 지점)까지의 하천 퇴적토와 하천의 홍수 범람 가능 지역에 해당되는 주변 농경지 토양으로서, 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. 폐광산과 댐 예정지까지의 연구 지역을 댐 건설시 저수지에 의해 수몰되는 예상 수몰지역과 비수몰지역으로 나누어 Fig. 1에 나

타내었다.

1998년 환경부에 의하여 고로 폐광산 주변 토양 70 개 지점에서 중금속 농도 조사가 실시되었으며, 이 중 54개 지점에서 비소, 카드뮴, 납이 토양오염 우려기준을 초과하였고, 폐광산과 연결된 하천수는 15개 조사 지점 중 12 지점에서 비소, 카드뮴이 수질 기준을 초과하였다(환경부, 1999). 2002년에 하천 퇴적토 16개 지점과 농경지 토양 11개 지점에 대하여 토양 오염 개황 조사가 실시되었는데, 하천 퇴적토는 7개 지점과 농경지토양은 4개 지점에서 비소농도가 토양오염 우려기준이상을 나타냄으로서, 폐광산 하부 하천퇴적토와 농경지 상당부분이 비소로 오염되어있음을 알 수 있었으며, 조사 결과 폐광산 주변의 광미 및 폐석입자들이 주 하천을 따라 하천 하부로 이동되어 퇴적되었거나, 홍수시 하천의 범람에 의하여 주변 농경지 토양을 오

염시켰을 가능성이 높은 것으로 판단되었다(이민희 등, 2003).

**3. 토양 오염 정밀 조사**

폐광산 주변 토양과 하천 수질에 대한 기존의 조사 결과를 바탕으로, 중금속 중에서 비소, 카드뮴, 구리, 납을 조사 대상 중금속으로 선정하였다. 토양정밀조사 지침에 따라 1,500 m<sup>2</sup> 면적당 표토(0~10 cm 깊이) 1개의 조사 밀도를 유지하였으며, 심토(10~30 cm 깊이)는 표토 3개 지점 당 1개씩 채취하였다. 심토 이상 되는 깊이에 대한 중금속 농도는 정밀 조사 이전에 50 cm 이상(대부분 1 m 깊이)되는 토양 연속 시료를 약 16 지점에서 채취하여 분석한 결과

두개를 제외한 모든 시료에서 토양오염 우려기준 이하를 나타내었으며, 또한 기존의 개황 조사 결과(이민희 등, 2003)도 이와 비슷하였으므로, 폐광산 주변 농경지 오염 토양의 대부분은 표토와 심토 깊이에 제한되어있는 것으로 나타났다.

폐광산에서부터 댐 건설 예정지까지 하천 전 구간에 대하여 하천 퇴적토를 1500 m<sup>2</sup> 면적(대부분 30 m x 50 m)당 1개의 조사 밀도를 유지하여 표토 시료를 채취하였으며, 표토 3개 당 1개의 심토를 채취하였다. 농경지 토양은 하천 주변 지역에서 홍수에 의한 하천 범람의 가능성이 있는 전 지역에 대하여, 하천 퇴적토와 동일한 조사 밀도를 유지하여 표토와 심토를 채취하였다. 하천 퇴적토는 총 126개의 표토 시료와 38개의 심토를 채취하였으며, 농경지 토양은 총 382개의

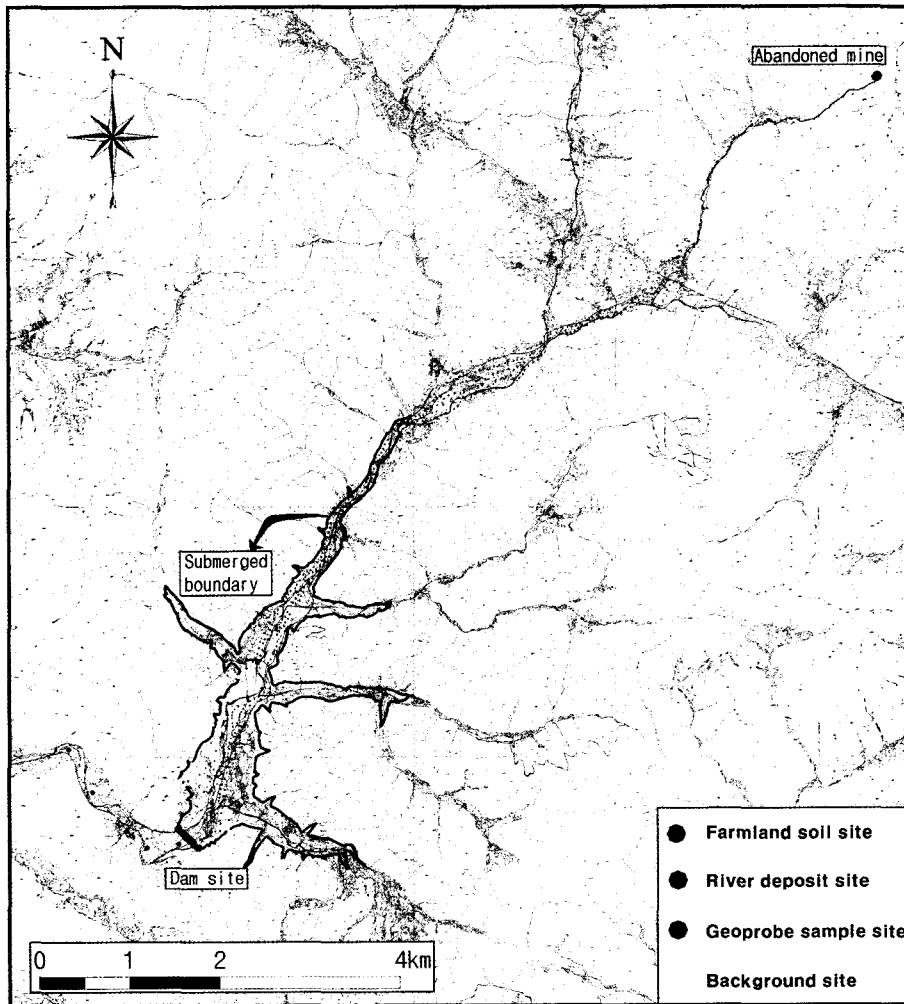


Fig. 2. Sampling locations for farmland soils and river deposits around Goro abandoned mine.

표토와 135개의 심토를 채취하였다. 대조군 토양 시료는 표토 33개, 심토 15개를 채취하였으며, 댐 하류 구간에서도 총 4개 지점에서 1m 깊이까지 연속 시료를 채취하였다. 본 연구에서 총 표토 시료수는 548개, 심토 시료수는 192개, 연속 시료 4개 등, 총 741개 시료를 채취하여 중금속 오염 조사를 실시하였으며, 시료 채취지점은 Fig. 2에 나타내었다.

**4. 토양 시료 분석 방법**

하천 퇴적토 및 농경지 토양 시료는 토양공정시험법(환경부, 2003a)에 의하여 전처리를 실시한 후, 토양오염분석기관인 한국수자원공사 수돗물종합검사센터에 의뢰하여 분석을 실시하였다. 카드뮴, 구리, 납에 대해서는 ICP/MS(Perkin Elmer Elan 6000)로, 비소에 대

해서는 비소 전용 전처리 장치를 부착한 원자흡광분광기(AAS: Varian Spectra 300)로 분석하였다.

**5. 결과 및 토의**

**5.1. 조사 지역 오염 분포 특성**

하천 퇴적토와 농경지 토양 시료에 대한 중금속 측정 항목별 최소, 최대 및 평균 농도와 주변 지역 배경치 농도를 Table. 1, 2, 3, 4에 나타내었다. 댐 건설시 수몰되는 지역과 수몰되지 않는 지역을 구분하여 오염도를 평가함으로써, 정밀 조사 결과를 댐 건설과 연계된 오염 토양 복원 사업 설계에 직접 이용할 수 있도록 하였다. 납, 구리, 카드뮴의 경우, 모든 시료에서 토양오염우려기준인 100 mg/kg, 50 mg/kg, 1.5 mg/kg 보다 훨씬 낮은 값을 나타내었다. 비소의 경우 농경지

**Table 1.** Minimum and maximum concentration of heavy metals in samples (mg/kg).

		Minimum concentration				Maximum concentration			
		As	Pb	Cd	Cu	As	Pb	Cd	Cu
River deposits	Surface soil	0.365	0.000	0.000	0.000	62.440	13.799	0.188	0.364
	Deep soil	0.630	0.091	0.001	0.006	20.370	5.717	0.036	0.158
Farmland soils	Surface soil	0.287	0.026	0.002	0.027	88.201	15.244	0.392	1.571
	Deep soil	0.057	0.035	0.001	0.016	14.742	3.537	0.066	0.728

**Table 2.** Average concentration of heavy metals in river deposit samples (mg/kg).

	Surface soil				Deep soil			
	As	Cu	Cd	Pb	As	Cu	Cd	Pb
Total sample number (surface soil:126, deep soil:38)	6.283	0.025	0.017	1.003	4.660	0.021	0.009	0.785
Submerged area (surface soil:73, deep soil:24)	3.594	0.022	0.005	0.423	3.275	0.012	0.005	0.430
Non-sumerged area (surface soil:53, deep soil:14)	9.935	0.030	0.033	1.802	7.117	0.026	0.016	1.412

**Table 3.** Average concentration of heavy metals in farmland soil samples ( mg/kg).

	Surface soil				Deep soil			
	As	Cu	Cd	Pb	As	Cu	Cd	Pb
Total sample number (surface soil:382, deep soil:135)	5.078	0.338	0.029	1.121	2.142	0.113	0.010	0.476
Submerged area (surface soil:182, deep soil:67)	5.304	0.301	0.026	1.184	2.238	0.075	0.006	0.317
Non-sumerged area (surface soil:200, deep soil:68)	4.871	0.371	0.031	1.063	2.048	0.149	0.014	0.633

**Table 4.** Average concentration of heavy metals in background soil samples (mg/kg).

	As	Pb	Cd	Cu
Surface soil	1.231	0.0136	0.005	0.09
Deep soil	0.782	0.085	0.002	0.055

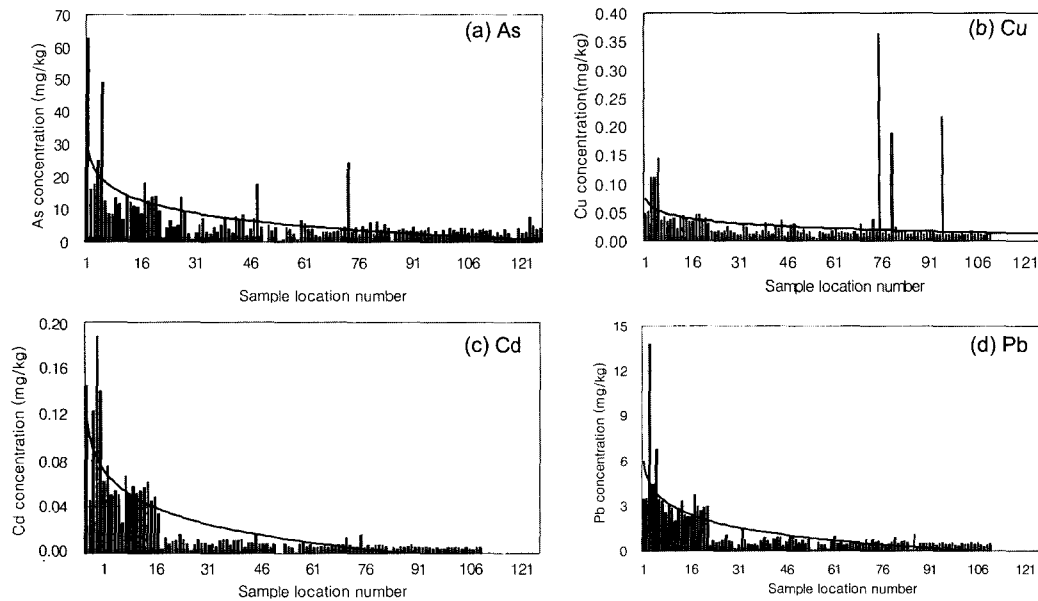


Fig. 3. Distribution of heavy metal concentration for river surface deposits according to the distance from Goro mine (Distance increases from left to right).

토양 표토/심토의 평균 비소농도 모두 토양오염우려기준 농도 이하(6 mg/kg)를 나타내었으나, 하천퇴적토는 표토의 경우 평균 비소농도가 토양오염우려기준을 초과하였으며, 특히 폐광산과 가까운 비수물지역의 경우에는 표토/심토에 대하여 평균 농도가 우려기준을 초과하여 비소 오염이 심각한 것으로 나타났다. 폐광산 주변 배경치 비소 농도는 표토는 1.23 mg/kg, 심토는 0.78 mg/kg으로, 다른 지역의 토양보다 상대적으로 높게 나타났는데 그 원인은 이 지역의 암상 및 광화대와 연관이 있는 것으로 판단된다.

조사 지역의 오염 정도를 구체적으로 파악하기 위하여 하천 퇴적토와 농경지 토양 시료의 비소 항목에 대한 오염 등급을 토양정밀조사 지침에 의하여 4등급으로 구분하여 나타내었으며, 1등급의 경우에는 주변 지역 비소 배경농도를 기준으로 세분하여 나타내었다. 표 5는 조사 시료의 비소 항목에 대한 오염 등급별 시료 수 및 비율을 나타낸다. 표토의 경우 토양오염우려기준 이상(3등급)의 농도를 나타내는 시료가 11~21% 정도이며, 토양오염대책기준(15 mg/kg)을 초과(4등급)하는 시료도 6~7% 이어서 정밀 조사 지역의 상당한 부분이 비소로 오염되어 있었다. 심토는 하천 퇴적토가 농경지 토양에 비해 오염도가 더 높았으나 표토보다 낮게 나타났으며, 토양오염대책기준을 초과하는 시료는 농경지 토양과 하천 퇴적토 전체에 대하여 1개 뿐으로 오염이 주로 표토에 집중되어 있음을 알 수 있

었다.

조사 지역의 지역적인 오염 분포를 파악하기 위하여, 폐광산으로부터 댐 예정지 까지 농경지 토양과 하천 퇴적토의 비소 농도를 거리에 따라 나타내었다. Fig. 3은 하천 퇴적토 표토의 중금속 농도 분포를 나타내고 있는데, 중금속의 농도가 폐광산으로부터 거리에 따라 감소하는 형태를 보여주고 있으며, 이 같은 결과는 광미 적재소로부터 유실된 광미가 하천을 따라 퇴적되어 폐광산 거리에 따라 감소하는 광미 양의 직접적인 영향을 받고 있는 것으로 판단된다. Fig. 4는 농경지 표토의 중금속 농도 분포를 나타내고 있으며, 하천 퇴적토와는 다르게 폐광산 주변 전 지역에 걸쳐 비교적 균일한 농도를 나타내고 있으며, 광산과 거리가 떨어진 지역에서도 중금속 농도가 높은 지역이 나타나는데, 비소, 납, 카드뮴의 경우에는 폐광산하부에서 석산교 사이 지역(시료번호: 1~20)과 수물지 상부에서 동곡 2교 사이 지역(시료번호: 200~260)에서 높은 농도를 나타내었다. 심토의 경우에는 표토보다 농도가 낮았으며, 특별히 높은 농도가 집중되는 구간은 발견하기 어려우나 폐광산 근처 지역(시료번호: 1~20)과 가암교 주변지역(시료번호: 80~100)에서 높은 농도를 나타내었다. 농경지 토양의 경우 하천 퇴적토보다 지역적으로 균일한 농도 분포를 나타내는 이유는 과거 홍수 시(예: 98년 홍수) 폐광산의 광미가 다량 유실되어 하류 농경지를 오염 시켰을 때, 폐광산으로부터의 거리와는 무관하게 하천 제방의

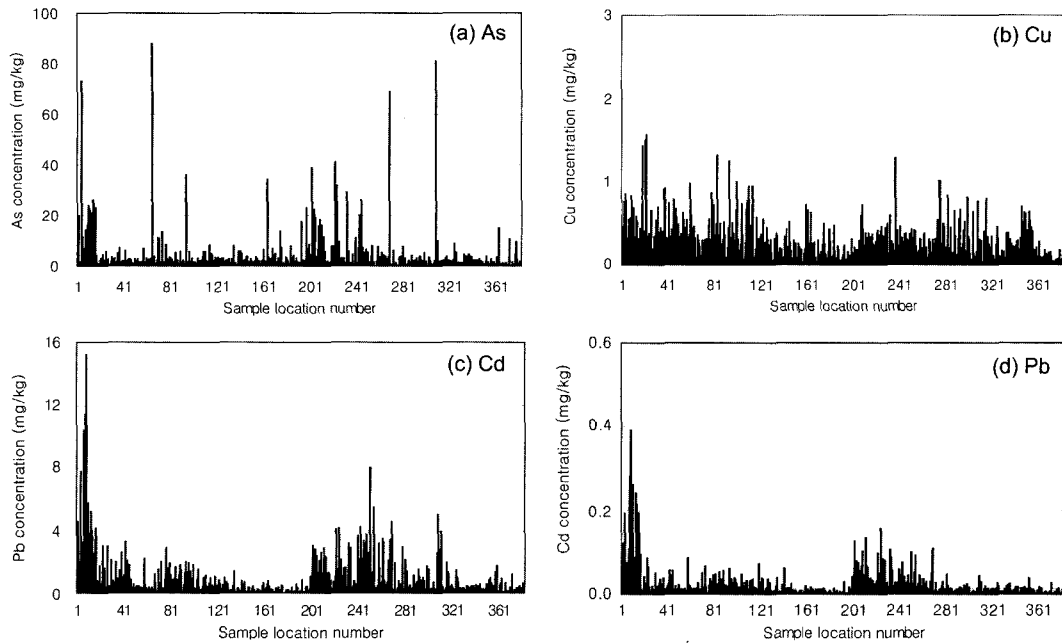


Fig. 4. Distribution of heavy metal concentration for farmland surface soils according to the distance from Goro mine (Distance increases from left to right).

Table 5. Pollution grades for sample location and their proportions (counts).

		I grade (lower than 1.23mg/kg)	II grade (1.23~2.4mg/kg)	III grade (2.4~6mg/kg)	IV grade (6~15mg/kg)	IV grade (higher than 15mg/kg)
Farmland soil	Surface soil	81 (21.2%)	115 (30.1%)	117 (30.6%)	43 (11.3%)	26 (6.8%)
	Deep soil	81 (60.0%)	19 (14.1%)	23 (17.0%)	12 (8.9%)	0 (0.0%)
River deposit	Surface soil	8 (6.3%)	11 (8.7%)	72 (57.2%)	27 (21.4%)	8 (6.4%)
	Deep soil	2 (5.2%)	5 (13.2%)	25 (65.8%)	5 (13.2%)	1 (2.6%)

유무 또는 제방의 범람 여부에 따라 하천 하부의 농경지가 광범위하게 오염되었기 때문으로 판단된다.

5.2. 오염 토양 복원 면적과 물량 산출

우리나라 토양오염 지역의 관리 및 복원체계는 토양오염 조사 체계에 따라 실시된 토양오염 정밀조사와, 조사 결과 토양오염우려기준을 초과하는 경우 토양오염방지조치를 실시하고 토양오염대책기준을 초과하는 경우에는 토양보전 대책지역으로 지정되어 토양오염 복원 사업을 실시하는 이원화 체계로 되어있다(환경부, 2003b). 그러나 본 연구 지역의 경우 토양의 비소 농도가 토양오염 우려기준 이하의 낮은 농도라도 댐 건

설 후 생성되는 저수지 특성상, 비소가 댐 담수 이후에 형성되는 저수지 바닥으로부터 용출되어 지속적인 수계에 영향을 줄 수 있으므로, 저수지 수질의 안전성을 확보하고 깨끗한 물공급을 원하는 지역 수요자의 기대에 부응하는 측면에서 토양오염우려기준 농도 이하, 우려기준치의 40% 농도(확인기준치)이하, 최상의 경우 주변 배경 농도치 이하로 낮추어 복원하는 계획을 검토하여, 오염 면적/물량 및 복원 비용을 산정하여 비교한 후 최종 복원 목표 및 복원 대책을 수립하는 것이 바람직하다고 판단되었다.

이와 같이 세가지 복원 목표에 의해 복원 공정이 진행되는 경우, 각각의 복원 목표에 대한 복원 면적

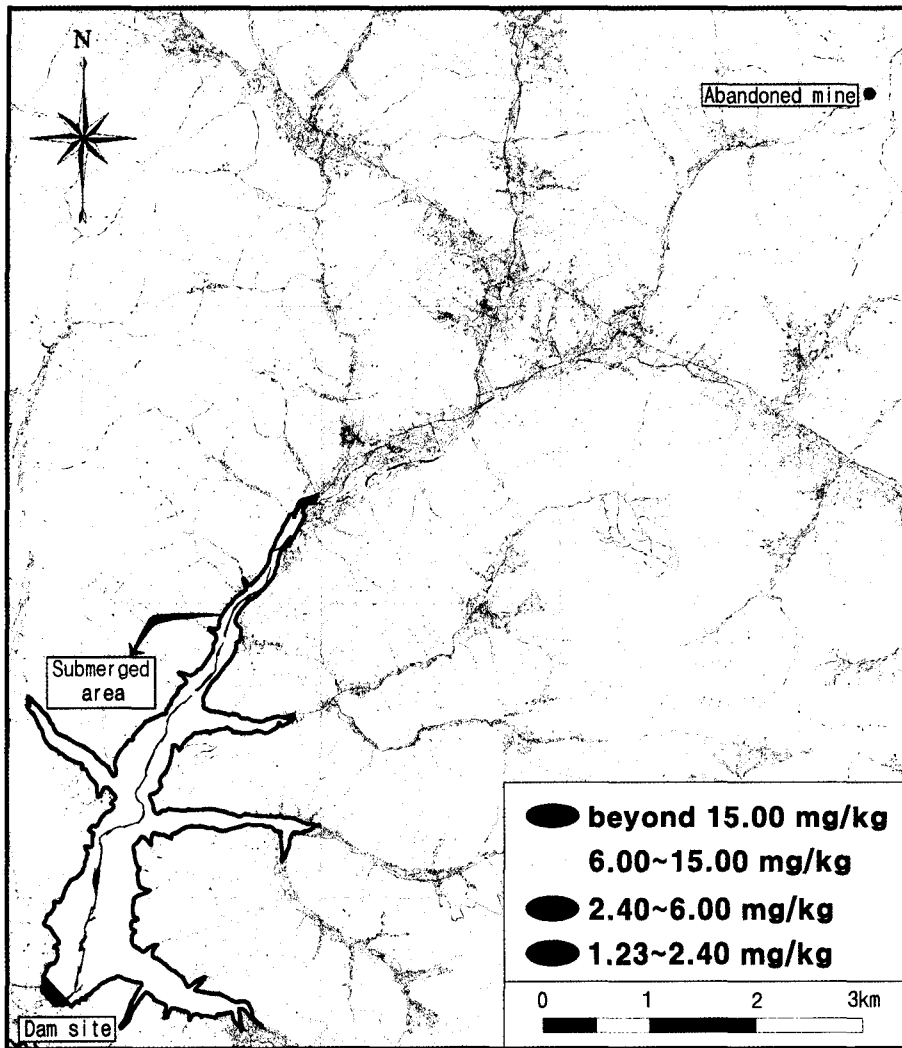


Fig. 5. Pollution grade map for river deposits in the research area.

을 산출하기 위하여, 비소에 대한 조사 지점별 농도를 기준으로 Table 5에서 분류한 오염 등급에 의하여 하천 퇴적토 및 농경지 토양 조사 면적에 대한 오염 지도를 작성하였다. Fig. 5와 6은 하천 퇴적토와 농경지 표토의 오염 지도를 나타낸다. 하천 퇴적토는 폐광산에서부터 수몰지역 상부 구간에서 높은 비소 농도를 나타냈으며, 농경지 토양은 폐광산에서 석산교 구간과 수몰지 상부에서 동곡2교 구간에서 높은 비소 농도를 나타내어, 토양 오염 복원 사업 시 이들 구간에서 오염 복원이 철저하게 이루어져야 할 것으로 판단되었다.

작성된 오염 지도로부터 세 가지 복원 목표에 대한 오염 토양 면적을 산출하였으며, Table 6, 7, 8에 각

각 제시하였다. 복원이 필요한 토양오염우려기준 농도 이상의 오염 면적은 폐광산에서부터 댐 예정지 하천 하부까지의 총 면적(87.5 km<sup>2</sup>)의 약 0.3% 정도이고, 토양오염우려기준의 40%(확인기준) 이상 오염 면적은 약 0.9%에 해당되며, 배경치 농도 이상의 오염면적은 1.1%에 해당된다. 또한 댐 건설 후 수몰지내 토양오염 우려기준 이상 오염 면적은 전체 수몰면적(2.27 km<sup>2</sup>)의 3.9% 정도이며, 토양오염우려기준의 40% 이상 되는 오염 면적과 배경 농도 이상 지역은 각각 전체 수몰면적의 12.0%, 14.3%에 해당되었다. 정밀 조사 결과로부터 토양 복원 심도를 표토와 심도를 포함한 0.3m로 하여 복원 물량을 산정한 결과를 Table 9에 나타내었다. 복원 토양 물량은 하천 퇴적토와 농경지



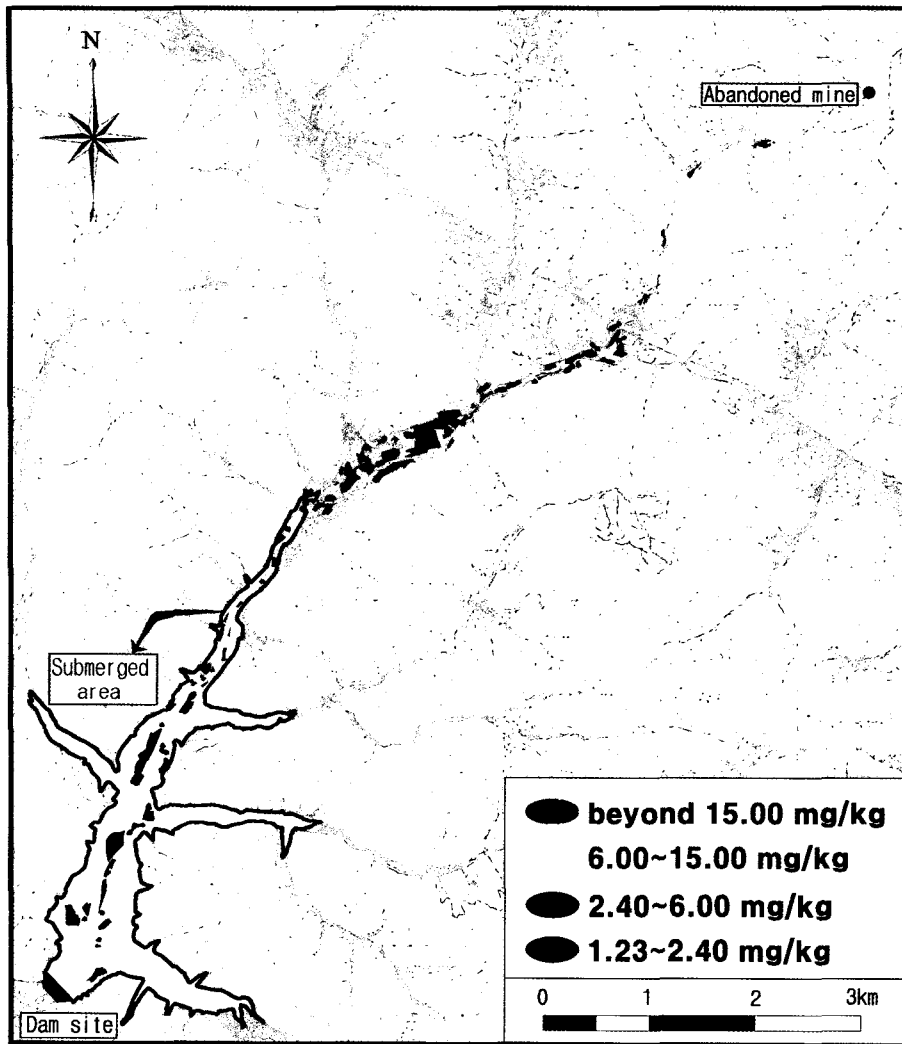


Fig. 6. Pollution grade map for farmland soils in the research area.

토양을 합하여, 복원 목표를 토양오염우려기준, 우려기준 40%, 배경치 농도로 하였을 경우 각각 79,200 m<sup>3</sup>, 233,700 m<sup>3</sup>, 290,760 m<sup>3</sup>으로 산정되었다. 토양오염우려기준 농도의 40%를 복원 목표로 하는 경우와 배경치 농도를 복원 목표로 하는 경우, 복원 물량은 우려기준 농도를 복원 목표로 하는 경우의 3.0배와 3.7배 정도 증가하는 것으로 나타나 복원 목표치 설정시 우려기준 농도의 40%와 배경농도의 차이에 따른 복원 물량의 차이는 적은 것으로 나타났다. 따라서 본 연구 지역의 경우 비소 오염 토양의 복원 목표를 댐 건설 후 저수지 수질의 안전성 확보 차원에서 배경치 농도이하로 복원하는 것이 가장 바람직할 것으로 판단되었다.

## 6. 결 론

본 연구에서 실시된 고로페광산 지역의 농경지 토양 및 하천 퇴적토에 대한 토양 정밀 조사는, 그 규모에 있어서 토양정밀조사 지침에 따라 이루어진 국내 최초의 대규모 토양 정밀 조사라는 점과, 세밀한 정밀 조사 결과에 따라 오염 토양 복원 대상 규모를 명확하게 제시하였다는데 큰 의미가 있다. 토양 정밀 조사 결과 구리, 카드뮴, 납 항목은 모든 지점에서 토양오염 우려기준 농도 이하를 나타내었으나, 비소는 표토의 경우 토양오염우려기준 이상의 농도를 나타내는 지점이 70 지점으로 전체 표토 조사지점의 13.8%를 차지하였으며, 심토의 경우 토양오염우려기준 이상 농도를 나타

**Table 6.** Estimation of remediation area based on Soil Pollution Warning Limit (SPWL) concentration.

	Contaminated area needed for remediation (m <sup>2</sup> )		
	Submerged area	Non-submerged area	Total area
River deposit	3,200	30,800	34,000
Farmland soil	105,300	124,700	230,000
Total area	108,500	155,500	264,000

**Table 7.** Estimation of remediation area based on 40% concentration of Soil Pollution Warning Limit (SPWL).

	Contaminated area needed for remediation (m <sup>2</sup> )		
	Submerged area	Non-submerged area	Total area
River deposit	78,600	102,400	181,000
Farmland soil	252,300	345,700	598,000
Total area	330,900	448,100	779,000

**Table 8.** Estimation of remediation area based on background level concentration (1.23 mg/kg).

	Contaminated area needed for remediation (m <sup>2</sup> )		
	Submerged area	Non-submerged area	Total area
River deposit	83,900	105,000	188,900
Farmland soil	310,300	470,000	780,300
Total area	394,200	575,000	969,200

**Table 9.** Estimation of remediation volume based on three remediation limit concentrations.

	Over SPWL (6 mg/kg)	Over 40% of SPWL (2.4 mg/kg)	Over background level concentration (1.23 mg/kg)
	Remediation volume (m <sup>3</sup> )	Remediation volume (m <sup>3</sup> )	Remediation volume (m <sup>3</sup> )
River deposit	10,200	54,300	56,670
Farmland soil	69,000	179,400	234,090
Total volume	79,200	233,700	290,760

내는 지점이 17지점으로 전체 심토 조사지점의 약 9.8% 정도 이었으며, 토양오염대책기준을 초과하는 지점은 1지점으로 전체 심토 조사지점의 약 0.6%를 나타내고 있어 비소오염이 주로 30 cm 이내에 집중되어 있는 것으로 나타났다.

오염 토양을 복원하기 위한 복원 목표를 토양오염우려기준 농도 이상, 우려기준의 40% 농도 이상, 배경치 농도 이상으로 구분하여 설정하는 경우에 대하여 오염 토양 복원 면적과 물량을 산출하였다. 토양오염우려기준 농도 이상의 경우 총 복원 면적과 물량은 264,000 m<sup>2</sup>, 79,200 m<sup>3</sup> 이었으며, 우려기준의 40% 농도 이상의 경우 복원 면적과 물량은 779,000 m<sup>2</sup>, 233,700 m<sup>3</sup>, 배경치 농도 이상의 복원 목표 설정의 경우에는 각각 969,200 m<sup>2</sup>, 290,760 m<sup>3</sup> 이었다. 토양오염우려기준 농도의 40%를 복원 목표로 하는 경우와 배경치 농도를 복원 목표로 하는 경우, 복원 물량은 우려기준 농도를 복원 목표로 하는 경우의 3.0배와 3.7배 정도 증가하는

것으로 나타나 복원 목표치 설정 시 우려기준 농도의 40%와 배경농도의 차이에 따른 복원 물량의 차이는 적은 것으로 나타났다. 본 논문의 토양정밀조사 결과로부터 연구 지역 오염토양의 복원공정 설계, 공정의 복원 효율 검증, 복원비용 산출에 관한 연구가 진행되었으며, 관련된 연구 논문이 현재 심사 중이다.

## 사 사

이 논문은 2002년도 한국 학술진흥재단의 지원(KRF-2002-041-D00261)에 의하여 연구되었음. 본 논문을 심사한 익명의 심사자들과 시료 채취와 분석에 도움을 준 한국수자원공사 댐환경처에 감사드린다.

## 참고문헌

김경웅 (1997) 달성광산지역 토양의 중금속함량 분석결과

- 의 평가. 한국지하수환경학회지, 1권, p. 20-26.
- 석탄산업합리화사업단 (1995) 폐광에 따른 광산지역 환경 개선 연구 (폐수, 폐석), pp 268.
- 오대균, 김정엽, 전효택 (1995) 동해 탄광 주변 산성 광산 폐수와 하상퇴적물의 지구화학. 자원환경지질, 30권, p. 105-116.
- 유재영 (1995) 광산배수의 산성화 및 그에 따른 환경문제, 1995년 대한지질학회학술발표 논문집, p. 32-35.
- 이도경, 정덕영, 이규승 (1997) 구룡광산 주변 중금속의 분포양상 및 인근농경지와 하천수계에 미치는 영향. 한국토양환경학회지, 2권, p. 69-80.
- 이민희, 최정찬, 김진원 (2003) 고로폐광산 주변 농경지 토양 및 하천 퇴적토의 중금속 오염 분포 및 복원 대책 설계. 자원환경지질, 36권, p. 89-101.
- 이현구, 이찬희 (1998) 충주호 상류, 상곡 광산 수계에 분포하는 토양과 하상퇴적물의 중금속 오염, 한국지하수 환경학회지, 5권, p. 10-20.
- 전효택, 김주용, 최시영 (1998) 폐석탄광 주변 지구화학적 환경의 중금속 오염 평가 -강릉탄전 임곡천 일대를 중심으로-. 자원환경지질, 31권, p. 499-508.
- 정명채 (1999) 휴/폐광 금은광산 주변의 토양오염조사와 복구시스템 연구. 자원환경지질, 32권, p. 385-398.
- 정영욱, I. Thornton (1994) 강원도 상동지역 옥동천의 광산 산성수 및 하상 퇴적물의 중금속 오염. 자원환경지질, 27권, p. 101-113.
- 한국수자원공사 (2002) 화북댐 건설사업 환경영향평가서 (폐광산 및 제련소 오염방지대책).
- 환경부 (1999) 폐금속광산 오염실태 정밀조사 결과 보고서.
- 환경부 (2001) 환경부고시 제2001-186호, 토양정밀조사지침.
- 환경부 (2003a) 토양오염공정시험법.
- 환경부 (2003b) 토양환경보전법.
- 황은하, 위수민, 이평구, 최상훈 (2000) 서성 연-아연광산 주변 농경지 토양의 중금속 오염 연구. 한국토양환경학회지, 5권, p. 67-85.

2003년 10월 2일 원고접수, 2003년 12월 15일 게재승인.