

이학석사 학위논문

비소로 오염된 폐광산 주변 농경지의
토양오염정밀조사와 복원을 위한
석회첨가 토양안정화공법 연구

지도교수 이 미 히

이 논문을 학위논문으로 제출함.



2004년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

응 용 지 질 학 과

차 중 철

차종철의 이학석사 학위논문을 인준함.

2004년 8월 31일

주 심 이학박사

정 상 용



위 원 이학박사

최 정 찬



위 원 이학박사

이 민 희



목 차

List of Figures	iii
List of Tables	v
Abstract	vii
 1. 서 론	 1
2. 지형 및 지질	3
3. 토양오염정밀조사	
3.1. 연구개요 및 시료채취	5
3. 2. 시료의 전처리 및 분석	8
3.3.정밀조사결과 및 중금속 분포 특성	10
3.4. 비소에 대한 오염지도 작성	16
3.5. 복원면적 및 물량산출	20
4. 오염토양 복원기술	
4.1. 비소로 오염된 토양의 정화기술	22
4.2. 생석회를 첨가한 토양복토법	25
5. 토양의 물리 화학적 특성	27
6. 석회를 첨가한 복토법의 효율 실험	
6.1. pH-time에 따른 비소 및 중금속의 분배계수 산정 실험	30
6.2. 생석회 함량에 따른 토양 내 비소 및 중금속의 안정화 효율 실험	32
6.3. 저수지 내 비소용출 모사실험	33
6.4. 강수에 의한 오염토양 하부로 침출되는 비소 및 중금속 침투모사실험	36

7. 석회를 첨가한 복토법의 효율 실험 결과	
7.1. 용액의 pH와 용출시간변화에 따른 비소 및 중금속의 분배계수 산정 결과	39
7.2. 생석회 함량에 따른 토양 내 비소 및 중금속의 안정화 효율 실험결과	42
7.3. 저수지 내 비소용출 모사실험 결과	44
7.4. 강수에 의한 오염토양 하부로 침출되는 비소 및 중금속 침투모사실험 결과	50
8. 결 론	56
참고문헌	58
요 약	62
부 록	64
참 부	76

List of Figures

Fig. 1. Geological map in the study area.	4
Fig. 2. Sampling locations for soil precise investigation(SPI) around Goro abandoned mine.	7
Fig. 3. Preliminary works for heavy metal analysis.	9
Fig. 4.1. Distribution of As concentration for farmland soils according to the distance from Goro mine.	11
Fig. 4.2. Distribution of Cd concentration for farmland soils according to the distance from Goro mine.	12
Fig. 4.3. Distribution of Pb concentration for farmland soils according to the distance from Goro mine.	13
Fig. 4.4. Distribution of Cu concentration for farmland soils according to the distance from Goro mine.	14
Fig. 5. Pollution distribution of cadmium, lead and copper for farmland soil samples.	17
Fig. 6. Arsenic pollution grade map for farmland soils in the research area.	19
Fig. 7. Types of soil texture of farmland soils.	28
Fig. 8. Batch experiment to acquire extraction partition coefficient for As, Cd and Pb.	31

Fig. 9. Physically simulated column experiment for As extraction in soil capping system.	
(a) : Simulation works for the reduction phase.	
(b) : Photograph of experimental column filled with solutions.	
.....	35
Fig. 10. Photograph of the simulated column experiment.	
(a) : As contaminated soils without quick-lime mixing improvement.	
(b) : As contaminated soils with 0.5% quick-lime mixing improvement.	
(c) : As contaminated soils with 5% quick-lime mixing improvement.	
.....	38
Fig. 11. Decrease of As extraction rate of soil sample 1 and 2 mixed with different lime contents.	43
Fig. 12.1. The Infiltrated trend of As downward As contaminated soils.	
.....	52
Fig. 12.2. The Infiltrated trend of Cd downward As contaminated soils.	
.....	53
Fig. 12.3. The Infiltrated trend of Pb downward As contaminated soils.	
.....	54
Fig. 13. The variations of Eh & pH in discharged solution from As contaminated soils.	55

List of Tables

Table 1. The number of samples for soil precise investigation(SPI)	6
Table 2. Average concentration of heavy metals in farmland soil samples	15
Table 3. Average concentration of heavy metals in background soil samples	15
Table 4. Soil sample number and ratio according to each pollution grade index for arsenic	18
Table 5. Estimation of remediation area based on pollution grade	21
Table 6. Estimation of remediation volume based on pollution grade	21
Table 7. Properties of farmland soils around Goro abandoned mine	29
Table 8. Principle component analysis of farmland soils by XRF	29
Table 9. Determination of extraction partitioning coefficient(K_{df}) of As in soils	40
Table 10. Comparison between K_{df} of stream waters and experimental K_{df} for arsenic	40

Table 11. Mean extraction partitioning coefficient (K_{df}) of Cd and Pb in soils	41
Table 12. Results of column experiment without lime mixing improvement	48
Table 13. Results of column experiment with lime mixing improvement	49
Table 14. Parameter used for calculation of As extraction amount in column experiments	49

Soil precise investigation(SPI) and soil improvement method
using lime for arsenic contaminated farmland soils
around an abandoned mine, Korea

Jongchul Cha

Department of Applied Geology, Graduate School
Pukyong National University, Republic of Korea

Abstract

Soil precise investigation (SPI) for farmland soils around Goro abandoned mine, Korea was performed to assess the pollution level of heavy metals (As, Pb, Cd and Cu) and to estimate the remediation volume for contaminated soils. Total investigation area was about 600000m², which was divided into each section of 1500 m² corresponding to one sampling site and 419 samples for surface soil (0~10 cm in depth) and 154 samples for deep soil (10~30 cm in depth) from the investigation area were collected to be analyzed. Concentrations of Cu, Cd and Pb at all samples were shown to be lower than Soil Pollution Warning Limit (SPWL). For arsenic concentration in surface soils, 18.1% of sample sites (69 sites) were over SPWL (6 mg/kg) and 6.8% (26 sites) of sample sites were over Soil Pollution Counterplan Limit (SPCL: 15 mg/kg), suggesting that surface soils were broadly contaminated by As. For deep soils, 8.9% of sample sites (12 sites) were over SPWL and there was no site 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 15.00mg/kg, 6.00~15.00mg/kg, 2.40~6.00mg/kg and 1.23~2.40mg/kg). The pollution contour map around Goro abandoned mine based on PI results was finally created to calculate the contaminated area and the remediation volume for contaminated farmland soils. Total soil volume to be treated for remediation was estimated on the assumption that the thickness of contaminated soil was 30 cm. Based on the excess of SPWL soil volume to be remediated was estimated at

69000 m³, soil volume exceeding 40% of SPWL was about 179400 m³ and soil volume exceeding the background level (1.23 mg/kg) was 234090 m³.

Soil improvement method to remediate farmland soils was investigated with batch and column experiments. For As-contaminated farmland soils around Goro mine, batch tests to quantify As extraction rate from contaminated soils and quick-lime treated contaminated soils were performed. The contaminated soil mixed with quick-lime decreased As extraction rate to one twenty fifth, suggesting that the soil improvement method mixed with quick-lime dramatically decrease As extraction rate. A storage dam will be constructed in the lower part of the main stream connected to Goro abandoned mine and the amount of As extracted from the bottom soils of the reservoir could be the main source to contaminate water in the reservoir. The decrease of As extraction amount from the bottom in reservoir, caused by the application of the soil improvement method was investigated by the physically simulated column experiment and results showed that As extraction rate decreased to one forty when improvement soils mixed quick-lime were applied to contaminated soils. To simulate arsenic contaminated farmland soils in non-submerged area, another column experiment was performed to assess the remediation efficiency, which indicated the capacity of decreasing arsenic extraction amount from the discharged solution downward soils. The addition of quick-lime to the contaminated soil decreased the arsenic concentration in the discharged solution downward soils by formation of hardly soluble calcium-arsenic compounds.

Results of batch and column experiments suggested soil improvement method using quick-lime has a great capability to remediate arsenic contaminated farmland soils in this research area.

Key words : abandoned mine, arsenic, soil precise investigation(SPI), soil improvement, quick-lime, soil remediation

1. 서 론

1995년 토양환경보전법이 제정되고 토양오염 문제에 대한 인식이 확대됨에 따라 90년대 후반부터 휴·폐광산 주변의 토양과 농작물, 하천수에 대한 중금속 오염 연구가 활발히 진행되어왔다(이효민 외, 1998; 김선태 외, 1999; 황은하 외, 2000). 그러나 대부분의 연구과정이 광산주변의 오염도를 개략적으로 평가하는데 머물러 광산의 영향으로 인한 오염분포 및 복원규모를 설정하는데 한계가 있었다. 현재 국내에는 약 2000여 개의 휴·폐광된 금속 광산들이 산재되어 있는 것으로 보고되고 있으며, 이들 중 상당수는 광미·광폐석에 대한 방지사설이 없거나 적절하지 않아 인근 토양 및 하천의 오염원으로 작용하고 있다(박용하 외, 1995; 전관수 외, 1999). 연구지역은 국내 폐광산중 하나인 경북 군위군 고로면 석산리에 위치한 폐아연광산 주변지역(총면적 87.5km²)이며, 주 연구대상은 폐광산과 연결된 주 하천을 따라 댐건설 예정지까지의 하천주변 농경지토양으로, 행정구역은 화북리, 학성리, 양지리, 인곡리 및 석산리 지역에 해당한다. 기존에 실시된 연구지역 주변 개황조사 자료를 바탕으로 비소, 카드뮴, 납, 구리에 대해서 토양정밀조사를 실시한 결과, 연구지역의 농경지토양은 비소에 의해 심각하게 오염되어 있음을 알 수 있었다(이민희 외, 2003). 비소는 자연생태계에서 매우 독성이 강한 물질로 산화-환원, 흡착-탈착 및 용해-침전 등의 화학반응에 따라 토양이나 지하수에서 이동 및 상(species)의 변화를 일으키는 것으로 알려져 있다(서영진 외, 2002). 본 연구지역의 경우 토양의 비소농도가 토양오염우려기준 이하의 낮은 농도라도 댐 건설 후 생성되는 저수지 특성상, 수계의 지속적인 오염원으로 작용하게 되므로, 연구지역의 오염 농경지 토양은 적절한 복원목표를 설정하여 복원이 이루어져야한다. 토양정밀조사결과로부터 오염지도를 작성하여 농경지토양의 오염규모를 설정하였으며, 다양한 복원목표를 설정하여 이에 따른 복원물량과 비용을 산출하였다.

연구지역의 오염된 농경지토양을 복원하기 위한 복원기술로 생석회를 첨가한 토양복토법을 선택하였으며, 복토법의 토양복원효율은 실내배치실험을 통하여 입증하였다. 또한 차후 폐광산 하부 하천에 건설될 댐의 저수지 수질 환경변화에 따라, 댐 건설 후 수몰되는 지역과 비 수몰지역으로 농경지토양을 구분하여, 석회를 첨가한 토양복토법이 저수지 수계에 미치는 영향을 모사칼럼실험을 통하여 예측하였다.

본 연구과정은 한 폐광산에 대하여 복원을 전제로 실시된 국내 최초의 대규모 토양정밀조사라는데 큰 의미가 있으며, 본 연구지역과 유사한 폐광산 주변 오염 농경지토양의 복원에 중요한 자료로 사용될 수 있을 것이다.

2. 지형 및 지질

고로폐광산은 경상북도 군위군 고로면 석산리 산 27-1번지에 위치하고 있고, 광산이 위치한 지역의 암상은 석영 몬조니암(Quartz monzonite), 화강 섬록암(Granodiorite), 반암류(Porphyrries)등의 중성암맥(Intermediate dykes)으로 이루어져있으며(자원개발연구소, 1977; 정운주, 2004), 인접한 하천 및 농경지토양의 주 오염원으로 작용하고 있다. 연구 대상 지역은 석산리 폐광산에서부터 댐 건설 예정지까지의 총 12km구간으로, 행정구역상 경상북도 군위군 고로면 화북리, 학성리, 양지리, 인곡리 및 석산리 지역에 해당한다. 연구지역 농경지토양은 폐광산과 연결된 주 하천인 위천 주변에 형성되어 있으며, 해발고도 300m~900m내외의 옥녀봉, 망가산, 화산등의 산지로 둘러싸여 있다. 위천 하류 댐건설에 의해 수몰되는 지역은 산지의 경사면과 계곡부로 구성되며 일부 농경지 및 주택지가 포함된다. 연구지역의 지질은 백악기 퇴적암층과 화성암류로 구성되어 있으며, 퇴적암층에는 경상층군의 신라층군에 속하는 함안층, 반야월층, 춘산층, 자인층, 신안동층등이 있고, 화성암류는 퇴적암층을 관입 또는 분출한 중성 및 염기성 화산암류와 유문석, 영안산암, 유문암질 각력암, 유문반암, 석영반암, 안산암질 암류, 반려암, 화강암류, 산성 및 중성암류들로 구성되어있다. 백악기 퇴적층의 대부분은 단층이나 화강암의 관입으로 인해 광역적인 변성작용이 일어나 호온펠스화되어 있고, 계곡 및 하천은 제4기의 충적층으로 미고결된 자갈 및 모래와 일부 실트 및 점토가 미량으로 나타난다(한국수자원공사, 2002).

연구논문의 사업지역에 대한 지질도를 Fig. 1에 나타내었다.

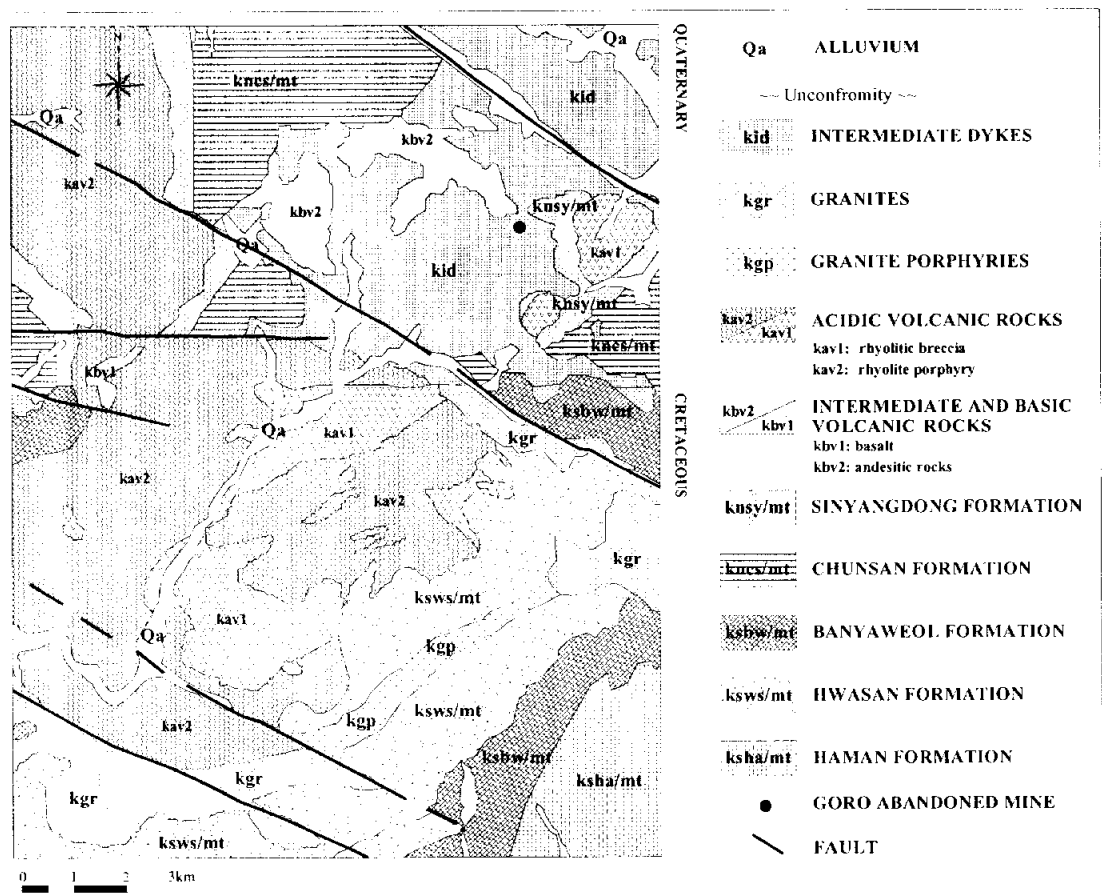


Fig. 1. Geological map in the study area(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2004).

3. 토양오염정밀조사

3.1. 연구개요 및 시료채취

연구지역인 경북 군위군 고로면 석산리에 위치한 고로 폐광산은 1972년에 폐광된 아연광산으로 1998년 군위군으로부터 오염방지사업이 실시되었지만 폐광산 주변에 적재되었던 광미 및 광폐석의 유실로 인한 인근 하천 퇴적토 및 농경지토양의 오염이 보고되었다(한국수자원공사, 2002). 실제 기존에 조사된 토양 오염도 조사와 폐광산 주변 하천 및 농경지의 개황조사로부터 연구지역의 토양은 대부분 비소에 의해 오염된 것으로 나타났고(이민희외, 2003), 정밀조사 이전에 약 16개 지점에서 50cm이상의 깊이로 연속시료를 채취하여 조사한 결과 2개를 제외한 모든 시료에서 토양오염우려기준 이하의 비소농도를 보여 폐광산 주변지역의 토양은 대부분 비소로 오염된 것으로 나타났다. 기존에 조사된 폐광산 주변 토양과 하천수의 조사결과를 바탕으로, 본 연구지역의 분석 중금속은 비소, 카드뮴, 납, 구리로 선정하였고, 토양오염정밀조사지침에 따라 토양정밀조사를 실행하였다(환경부, 2001). 폐광산에서 댐건설 예정지까지 1500m²당 1개의 조사밀도로 표토시료(0~10cm)를 채취하였고, 심토(10~30cm)는 표토시료 3개당 1개의 밀도를 유지하였으며, Geo-probe를 이용한 깊이별 시료(0~100cm)는 4개 지점에서 채취하였다. 채취된 농경지 토양, 대조군 시료 및 연속시료의 수를 표토와 심토로 구분하여 Table 1에 나타내었고, 시료채취 지점은 Fig. 2에 나타내었다.

Table 1. The number of samples for soil precise investigation(SPI)

(unit : counts)

	Farmland soils	Backgroud soils	Geo-probe
Surface soils (0 ~10cm)	382	33	4
Deep soils (10~30cm)	135	15	4
30~100cm	—	—	4
Total	517	48	12

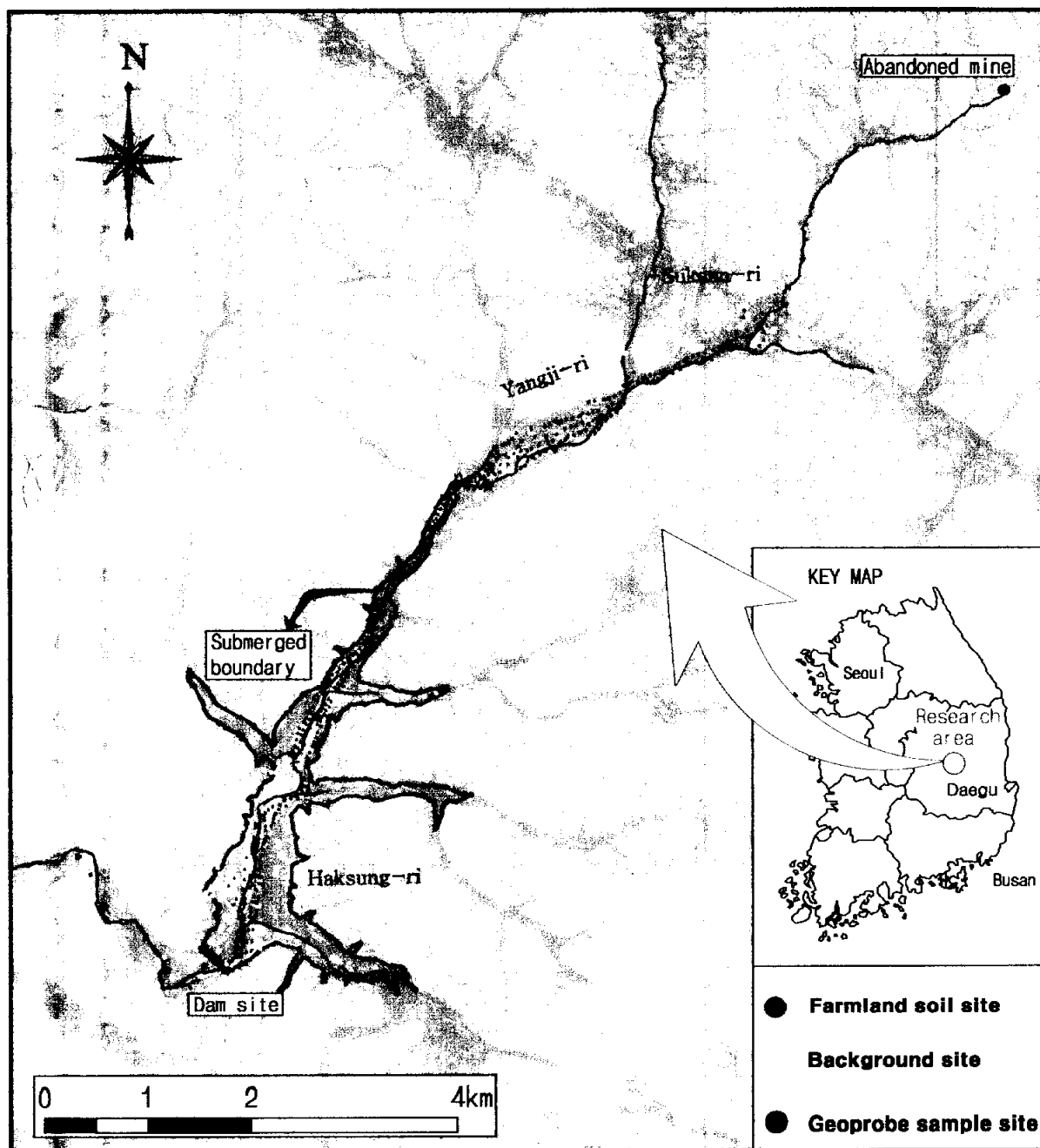
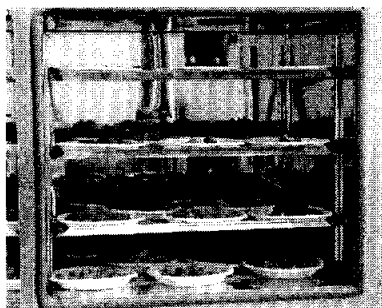


Fig. 2. Sampling locations for soil precise investigation (SPI) around Goro abandoned mine.

3. 2. 시료의 전처리 및 분석

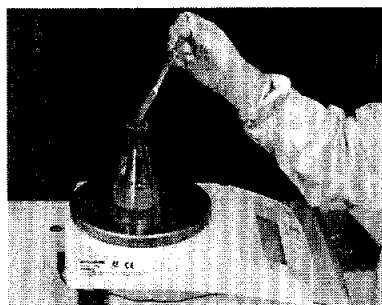
토양오염정밀조사의해 채취된 총 577개의 샘플에 대해서 토양오염공정시험법에 의한 전처리를 실시하였다(환경부, 2002). 현장으로부터 채취된 모든 토양시료는 35℃의 지온에서 건조하였고, 직경 2mm이하(#10체)로 체가름하였다. 토양오염공정시험법에 의해 토양 10g과 추출용매 50ml를 30℃, 100rpm으로 1시간(비소의 경우 30분) 동안 향은 진탕하였다. 비소 분석의 경우는 염산 1N 수용액(solvent)을, 다른 중금속(카드뮴, 납, 구리)은 0.1N의 염산용액을 추출용매로 이용하였으며, 진탕된 용액은 filter paper(5B)로 여과시킨 후 한국 수자원공사 수돗물종합검사센터에서 ICP-MS(Perkin Elmer ELAN 6000)로 분석하였다. 중금속 분석을 위한 시료의 전처리 과정을 Fig. 3에 나타내었다.



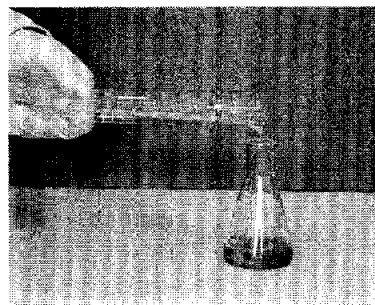
(a) Drying in oven



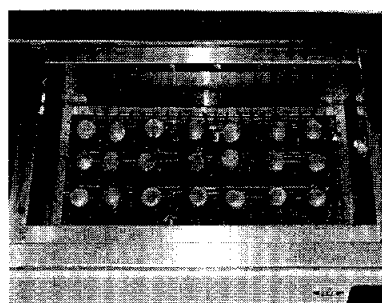
(b) Pulverization & Sieving



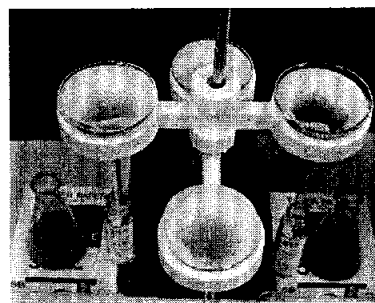
(c) Measure of soil weights



(d) Mixing with acid solvent



(e) Shaking by water bath shaker



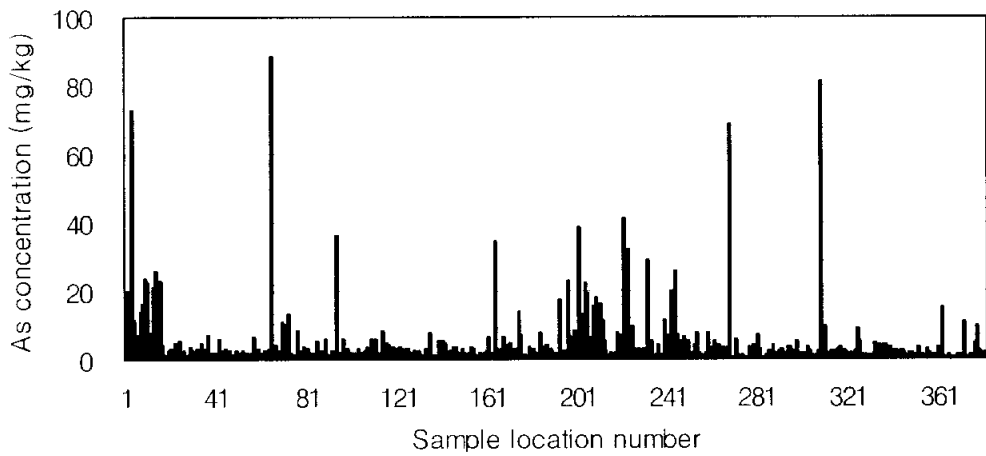
(f) Filtering process (with 5B)

Fig. 3. Preliminary works for heavy metal analysis.

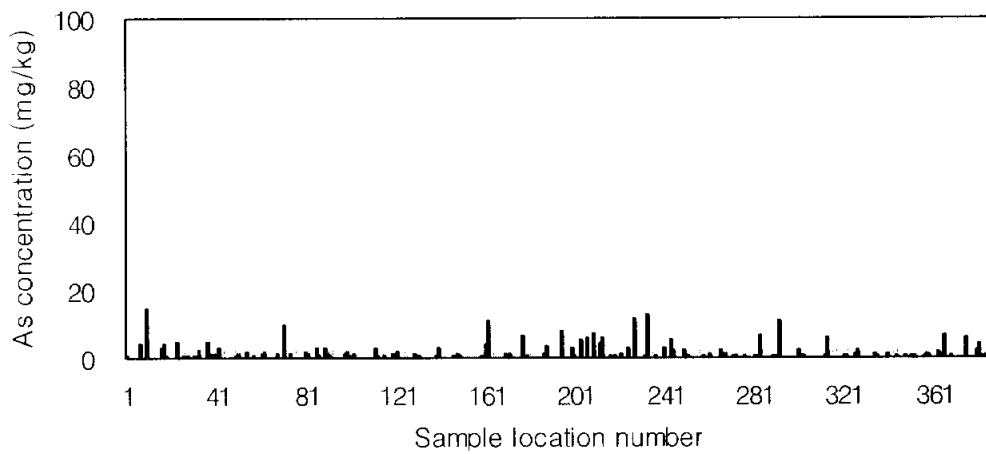
3.3.정밀조사결과 및 중금속 분포 특성

연구지역의 토양정밀조사결과 폐광산에 의한 주 오염 대상물질은 비소로 나타났고, 비소 외 다른 중금속(카드뮴, 납, 구리)은 토양오염우려기준농도보다 낮게 나타나, 비소에 대한 오염 농경지 토양의 복원설계가 반드시 이루어져야 할 것으로 판단되었다. 농경지 토양의 표토에 대한 비소농도 분석결과 토양오염대책기준(15mg/kg)을 초과하는 시료가 26개로 전체 표토 시료수의 6.8%에 해당하였고, 토양오염우려기준(6mg/kg) 이상의 시료수는 55개로 전체 표토 시료수의 11.3%로 나타나 비소에 대한 오염이 심각한 것으로 나타났다. 심토의 경우도 토양오염우려기준농도 이상의 시료수가 12개로 전체 심토 시료수의 8.9%에 달하지만, 토양오염대책기준을 초과하는 시료가 없어 비소에 대한 오염이 표토에 집중되어 있음을 알 수 있었다. 따라서 차후 복원사업의 설계는 주로 심토 깊이인 30cm를 대상으로 이루어져야 할 것으로 판단되었다. 연구지역의 하천 퇴적토에 대한 비소오염 역시 매우 심하며, 폐광산과의 거리가 멀어질수록 비소에 대한 오염 정도가 낮아지는 것으로 보고되고 있다(한국수자원공사, 2003; 이정산, 2004). 농경지 토양의 비소농도분포는 표토의 경우 폐광산하부의 석산교 사이 지역(시료번호:1~20)과 수물지역의 상부인 동곡 2교 부근(시료번호: 200~260)에서 높은 농도를 보이나, 대체적으로 균일한 농도를 유지하고 있다. 농경지토양의 이러한 농도 분포는 광미·광폐석의 유실과 오염된 하천의 범람에 의해 주변 농경지가 광범위하게 오염되었음을 의미한다(Fig. 4.1). Fig. 4.2~4.4는 농경지토양의 표토와 심토에 대한 중금속(카드뮴, 납, 구리)의 농도분포를 보여주는 것으로 비소농도의 분포와 비슷한 양상을 나타내고 있다. Table 2 는 토양정밀조사결과로부터 얻어진 농경지토양의 중금속 평균농도를 댐 건설 후의 수물지역과 비 수물지역, 표토와 심토로 구분하여 나타낸 것으로 비소 외 다른 중금속의 농도는 낮게 나타남을 알 수 있다.

우리나라 논토양에 대한 비소의 자연함유량은 평균 0.56mg/kg 으로 보고되고 있으나(국립환경연구원, 2001), 조사된 배경치 토양샘플에 대한 비소의 평균농도는 본 연구지역의 암상 및 광화대의 특성상 표토는 1.23mg/kg , 심토는 0.78mg/kg 로 비교적 높은 농도를 보이는 것으로 나타났으며, 배경치토양의 중금속에 대한 평균농도는 Table 3 에 제시하였다.

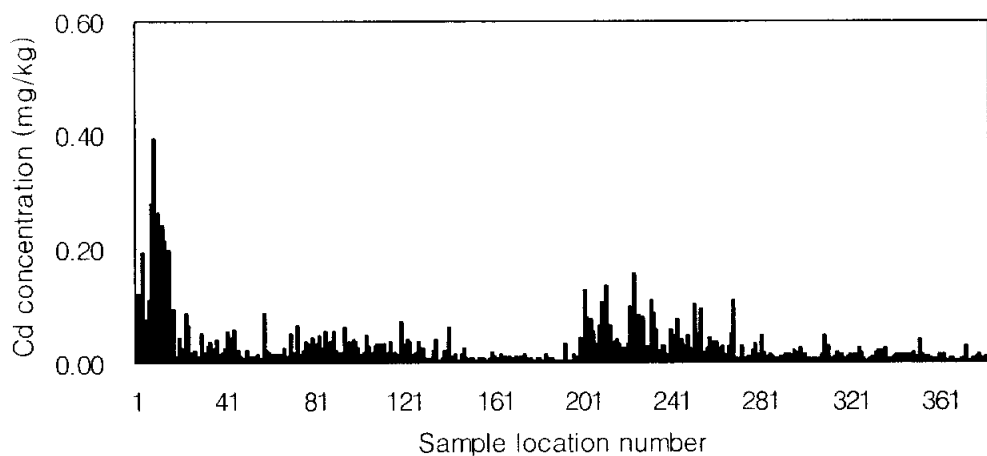


(a) Farmland surface soils

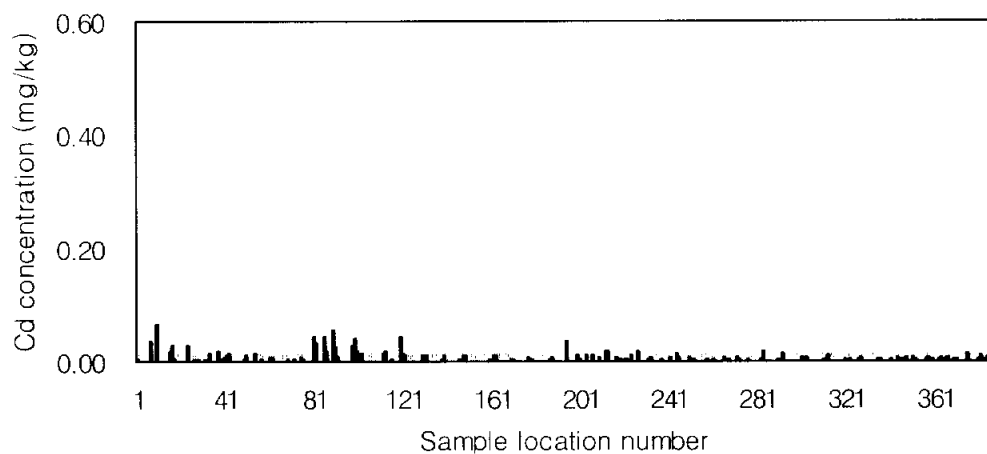


(b) Farmland subsurface soils

Fig. 4.1. Distribution of As concentration for farmland soils according to the distance from Goro mine (Distance increases from left to right).

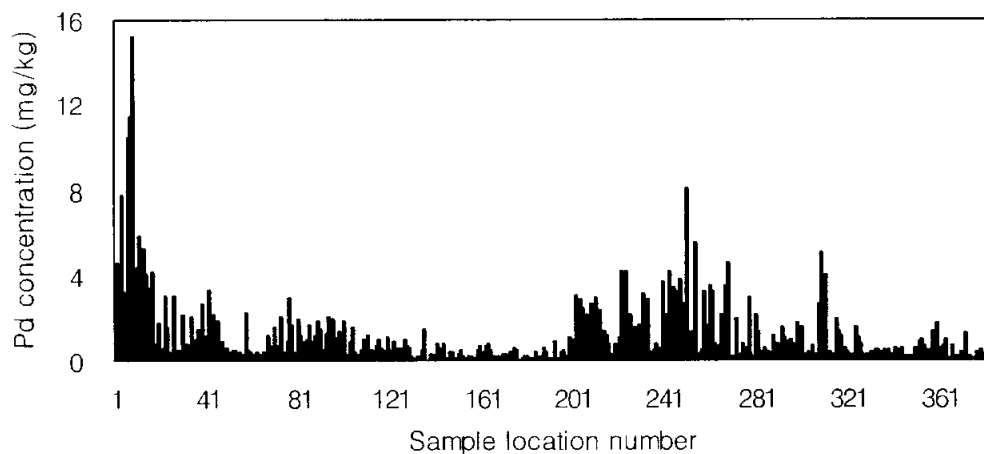


(a) Farmland surface soils

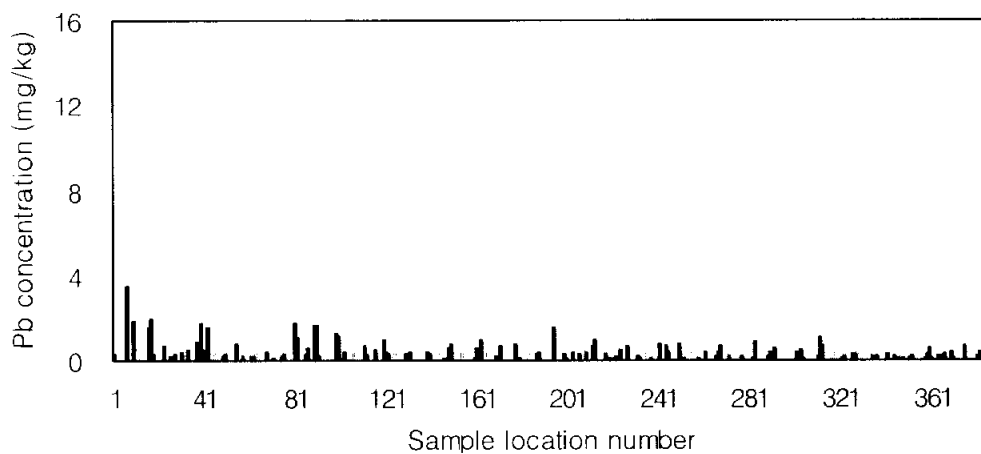


(b) Farmland subsurface soils

Fig. 4.2. Distribution of Cd concentration for farmland soils according to the distance from Goro mine (Distance increases from left to right).

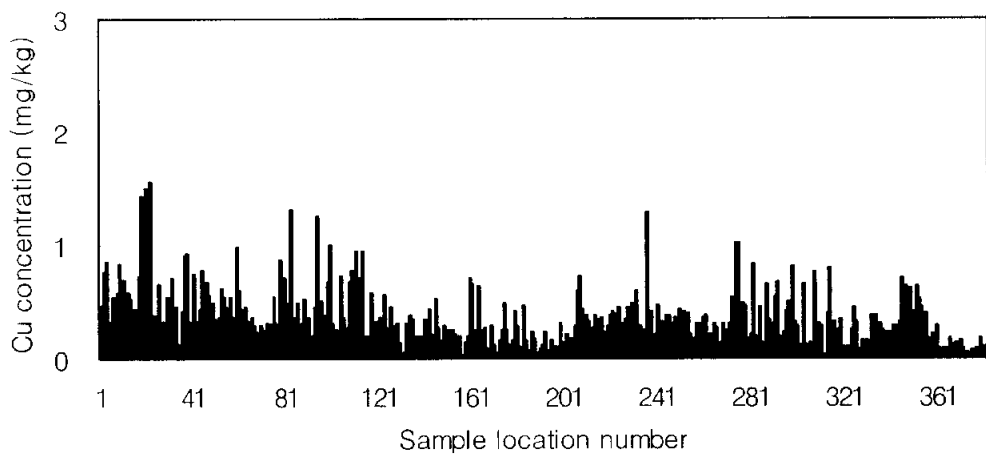


(a) Farmland surface soils

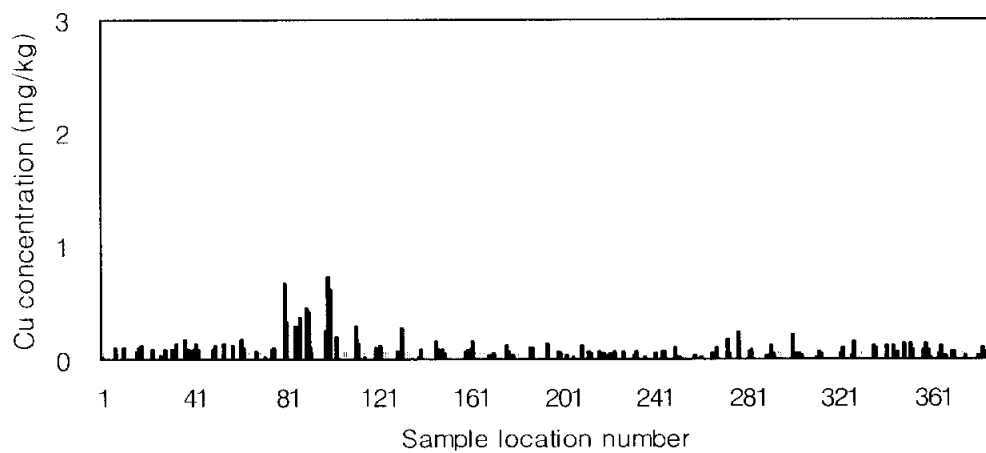


(b) Farmland subsurface soils

Fig. 4.3. Distribution of Pb concentration for farmland soils according to the distance from Goro mine (Distance increases from left to right).



(a) Farmland surface soils



(b) Farmland subsurface soils

Fig. 4.4. Distribution of Cu concentration for farmland soils according to the distance from Goro mine (Distance increases from left to right).

Table 2. Average concentration of heavy metals in farmland soil samples

(unit: 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-surbmerged area (surface area:200 , deep soil:68)	4.871	0.371	0.031	1.063	2.048	0.149	0.014	0.633

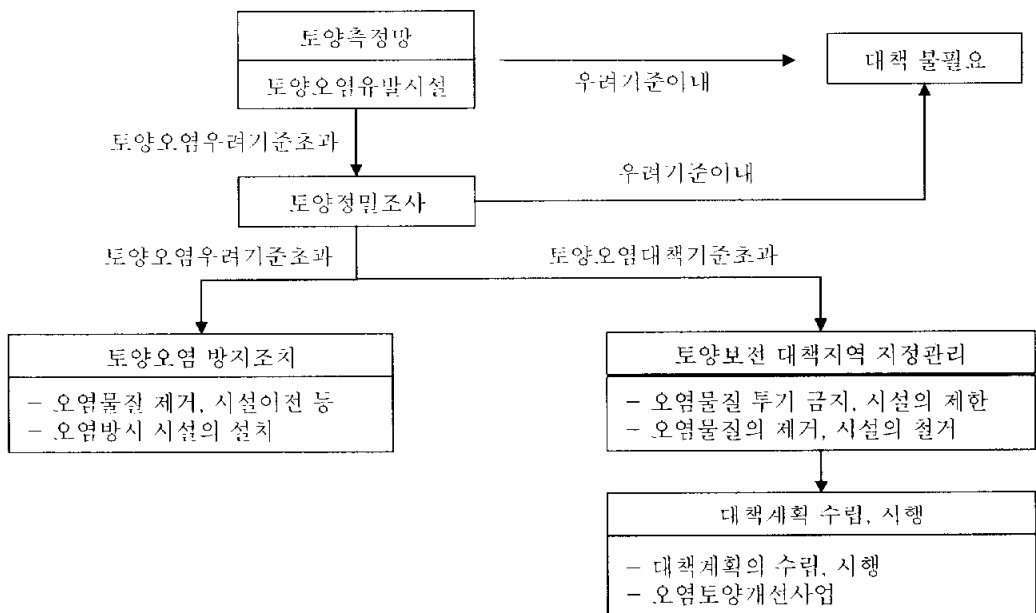
Table 3. Average concentration of heavy metals in background soil samples

(unit: mg/kg)

	As	Pb	Cd	Cu
Surface soil	1.231	0.014	0.005	0.090
Deep soil	0.782	0.085	0.002	0.055

3.4. 비소에 대한 오염지도 작성

토양정밀조사지침에 따르면 토양오염우려기준을 초과하는 물질에 대해서는 토양오염우려기준의 40%농도, 토양오염우려기준농도, 토양오염대책기준농도별로 농도에 대한 등급을 구분하여 오염 지도를 작성하도록 하고 있다. 아래 모식도는 현재 시행되고 있는 토양오염관리체계를 나타내는 것으로 토양오염우려기준 이상의 오염지역에 대하여 행정적인 규제조치가 내려지게 된다. 토양정밀조사 결과 연구지역의 주 오염원은 비소로 판명되었고, 카드뮴, 납, 구리는 오염정도가 우려기준농도에 훨씬 미치지 못하는 것으로 나타났다. 농경지 토양의 표토와 심토에 대한 카드뮴, 납, 구리의 농도분포등급을 3가지로 구분하여 Fig. 5에 나타내었다.



< 토양오염 관리체계 >

(환경부 토양보전과, 2000)

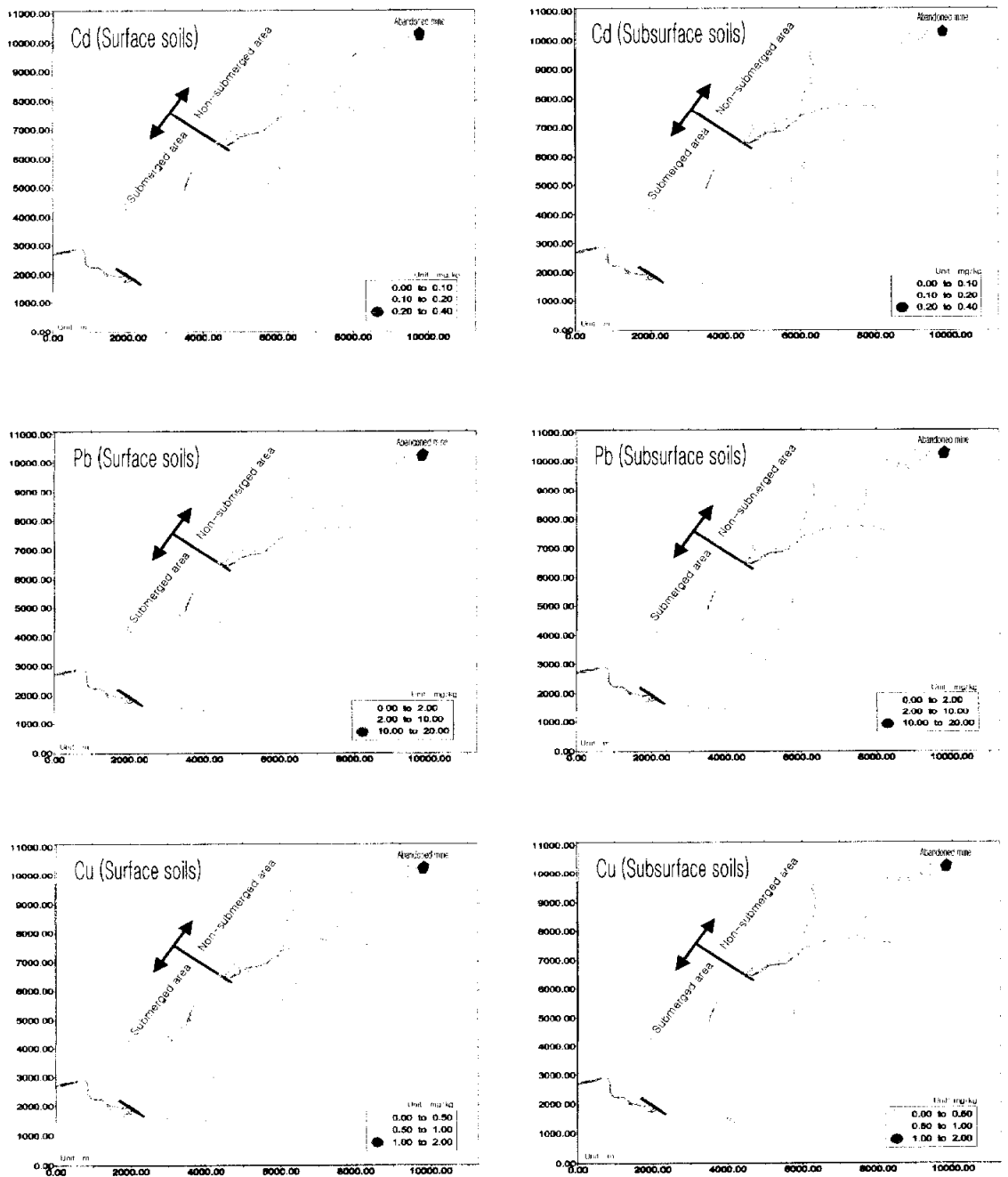


Fig. 5. Pollution distribution of cadmium, lead and copper for farmland soil samples.

본 연구지역에서는 댐 건설 후 생성되는 저수지 특성상 비소가 저수지 수계로 용출되어 지속적인 오염원으로 작용하게 되므로, 저수지 수질의 안전성을 확보하고 깨끗한 물공급을 위해 대상지역의 복원농도설정은 토양오염우려기준이하농도로 낮추어 설정하는 것이 바람직할 것으로 사료되었다. 따라서 비소오염지도의 등급기준을 배경치 농도, 토양오염우려기준의 40%농도, 토양오염우려기준농도, 토양오염대책기준농도로 세분하여 오염지도를 작성하였다. 비소로 오염된 농경지토양의 오염등급별 토양시료수와 비율을 Table 4에서 제시하였으며, Fig. 6은 연구지역의 주오염원인 비소에 대해 작성된 오염지도이다. 수몰지역 상부구간인 동곡2교 구간과 폐광산 하부의 석산교 지역에서 오염도가 높게 나타나 복원사업이 철저하게 이루어져할 것으로 판단되었다.

Table 4. Soil sample number and ratio according to each pollution grade index for arsenic (unit : counts)

Pollution grade index	Concentration range	Farmland soil	
		Surface soil	Deep soil
I grade	lower than 1.23 mg/kg	81 (21.2%)	81 (60.0%)
	1.23~2.4 mg/kg	115 (30.1%)	19 (14.1%)
II grade	2.4~6.0 mg/kg	117 (30.6%)	23 (17.0%)
III grade	6.0~15 mg/kg	43 (11.3%)	12 (8.9%)
IV grade	higher than 15 mg/kg	26 (6.8%)	0 (0.0%)

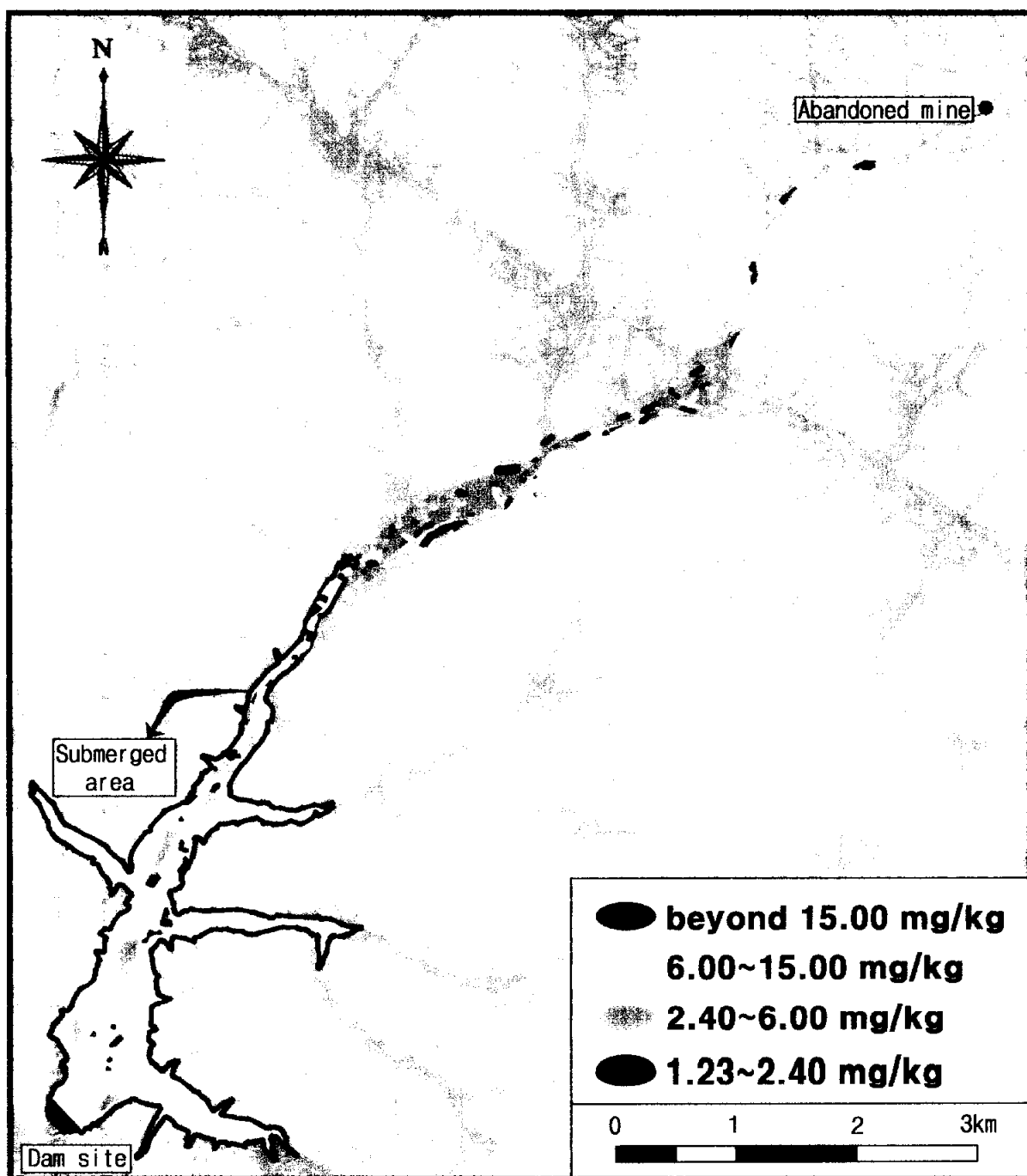


Fig. 6. Arsenic pollution grade map for farmland soils in the research area.

3.5. 복원면적 및 물량산출

토양정밀조사에 의해 작성된 비소오염지도를 이용하여 복원 대상이 되는 오염토양의 면적과 물량을 산출하였다. 또한 댐건설 이후 생성되는 저수지는 오염토양의 복원방법설정과 복원 후 사후관리에 있어서 상당히 민감한 요소로 작용하게 되므로, 오염토양의 복원면적을 수몰지역과 비 수몰지역으로 구분하여 산출하였으며 Table 5에 제시하였다. 토양오염우려기준농도 이상의 오염 면적은 폐광산에서부터 댐 예정지 하천 하부까지의 총 농경지면적(약 7km²)의 약 3.3% 정도이고, 토양오염 우려기준의 40%이상 오염 면적은 약 8.5%에 해당되며, 배경치 농도 이상의 오염면적은 11.1%에 해당되었다. 위천의 하류에 댐 건설 후 형성되는 수몰지내 토양오염 우려기준 이상 오염 면적은 전체 수몰면적 (2.27 km²)의 4.6%정도이며, 토양오염 우려기준의 40%이상 되는 오염 면적과 배경치 농도 이상 되는 면적은 각각 전체 수몰면적의 11.1%, 13.7%로 복원 면적의 차이가 비교적 적게 나타났다. 본 연구지역의 경우 댐 건설 후 생성되는 저수지 수질의 안정성 확보 차원에서 복원기준농도를 낮게 설정하되, 복원면적차이가 적게 나타나는 토양오염우려기준의 40%농도나 배경치 농도를 복원 기준 농도로 설정하는 것이 가장 합리적일 것으로 판단되었다. 본 연구지역의 농경지토양에 대한 토양정밀조사결과 토양오염대책기준을 초과하는 농경지 심토(0.1m~0.3m)는 없는 것으로 나타나 오염분포가 표토와 심토에 제한됨을 알 수 있었다. 따라서 복원물량은 농경지토양의 복원 심도를 표토와 심토를 합한 0.3m로 설정하여 오염면적과 복원심도의 곱으로 산출하였고, 그 결과를 Table 6에 제시하였다.

Table 5. Estimation of remediation area based on pollution grade

Pollution grade	Contaminated area needed for remediation (m ²)		
	Submerged area	Non-submerged area	Total area
Over SPWL (6.0 mg/kg)	105300	124700	230000
Over 40% of SPWL (2.4 mg/kg)	252300	345700	598000
Over background level concentration (1.23 mg/kg)	310300	470000	780300

** SPWL: Soil Pollution Warning Limit

Table 6. Estimation of remediation volume based on pollution grade

Pollution grade	Soil volume to remediate (m ³)		
	Submerged site	Non-submerged site	Total site
Over SPWL (6.0 mg/kg)	31590	37410	69000
Over 40% of SPWL (2.4 mg/kg)	75690	103710	179400
Over background level concentration (1.23 mg/kg)	93090	141000	234090

** SPWL: Soil Pollution Warning Limit

4. 오염토양 복원기술

4.1. 비소로 오염된 토양의 정화기술

EPA에서 발암성 A등급으로 분류되고 있는 비소(As)는 지구의 지각에서 20번째로 풍부한 물질로 광산이나 금속물질 채련 등의 산업 활동으로 인해 토양 및 지하수로 유출되고 있으며, 그 오염사례도 세계적으로 보고되고 있다(William R. Cullen, 1989; M.G.M. Alam, 2001; EPA, 2002; P.L. Smedley, 2002; 국립환경연구원, 2001). 일반적으로 비소로 오염된 토양의 정화방법으로 다음과 같은 복원기술들이 제시되고 있으며, 실제 오염된 지역의 오염정도를 파악하고 현장상황에 적합한 복원기준을 설정한 후 오염토양에 대한 처리기술을 선택해야 할 것이다.

1) Solidification/Stabilization

토양이나 폐기물 내에 존재하는 비소의 이동성을 감소시키는 처리기술로 안정체(a stabilized mass)내에 오염물들을 가두거나 에워싸는 물리적인 효과와 오염물의 용해성, 이동성 및 독성에 대한 위해성을 감소시키는 화학적인 효과에 의한 정화기법이다. 비소의 안정화/고형화에 사용되는 binders 및 reagents로는 cement, fly ash, lime, phosphate, pH adjustment agents, sulfur등이 사용되며, 일반적으로 cement나 lime과 같은 회분물질(pozzolanic materials)이 사용된다.

2) Vitrification

In situ나 ex situ로 사용되는 처리기술이지만, vitrification temperature에 도달하기까지 많은 양의 에너지가 요구되므로, 고가의 비용이 요구되는 정화기법이다. 일반적인 정화기작은 비소와 같은 중금속들이 vitrification 처리과정에서 생긴 glass matrix에 의해 둘러싸이게 되어 matrix내부에 화학적으로 결합되어지는 기법이다. 유리화를 위한 에너지 전달 매체는 plasma torches, microwaves, electrodes(in situ)등이 있으며, in situ로 적용 가능한 최대심도 20feet이며 그 이상의 깊이에서는 다른 기술의 접목이 필요하다.

3) Soil washing/Acid Extraction

물이나 화학적 침가제(leaching agents, surfactants, acids, chelating agents)를 이용하여 제조된 세척수(washing solution)를 오염토양에 혼합하여 토양 내 유기 화합물이나 중금속류를 제거하는 공법으로 비소로 오염된 토양의 ex situ 처리공법으로 사용된다. 일반적으로 soil washing 과정은 오염물의 농도를 저감시키기 위해 입도별로 토양을 분리하여 사용하고, 세척과정에서 생성된 미세한 입자(fines)나 sludge는 오염물질들이 집적되어있기 때문에 후처리 과정을 거친 후 폐기물 처리된다.

4) Pyrometallurgical recovery

비소를 회수(recovery)하기 위해서 비소로 오염된 폐기물이나 토양에 강한 열을 작용시켜 화학적인 변화를 일으키는 처리기술이다. 금속재생(high temperature metals recovery; HTMR)을 위해서 대상금속이 증발 또는 휘발될 때까지 오염된 고형물에 강한 열을 공급하고, 기상으로 전환된 금속들은 제거되거나 재생되어진다. 남은 잔류 고형물들은 제련시설(refining facilities)을 통해 비소를 회수하거나 바로 폐기처분되어진다. 이 정화기법은 아주 고가의 처리비용이 소모되므로 사용이 제한되고 있으며, 일반적으로 10,000mg/kg 이상의 고농도 오염 물질 처리에 사용된다.

5) Flushing (in situ soil)

유기 또는 무기 오염물(비소)로 오염된 토양에 flushing 용액을 주입하여 오염물을 용액내로 추출해내는 in situ 처리기법이다. flushing 용액은 대상 오염물의 탈착 및 용해도를 높이기 위해 산, 염기, chelating 또는 complexing agents와 같은 첨가제(additives)를 사용하며, 오염된 토양에 flushing 용액을 주입 후 배출되는 용액은 처리(treatment), 방류(discharge), 재사용(reinjection)되어진다.

6) Electrokinetic treatment

중금속이나 반(半)금속성의 오염물질이 존재하는 토양이나 지하수를 처리하는 기법으로 두 개의 전극(Cathode & Anode)을 오염지역에 설치함으로써 양(+)전하를 띠고 있는 오염물질은 음(-)전하를 보이는 Cathode로 이동시키고, 음(-)를 보이는 오염물질은 양(+)를 띠는 Anode로 이동시킨 후 두 전극 근처에 존재하는 물을 양수하여 처리하는 복원방법이다. 일반적으로 이 처리법은 점토(clay)와 같은 미세한 입자로 이루어진 토양처리에 유용하며, 비소를 처리하기위해서 황산(sulfuric acid), 인산(phosphoric acid), 옥살산(oxalic acid)과 같은 화학용액이 첨가된다.

7) Phytoremediation

식물을 이용하여 토양, 지하수내에 존재하는 오염물들은 정화시키는 공법으로 비소제거에 사용되는 식물은 poplar, cottonwood, sunflower, indian mustard, corn 등이 있다. 뿌리근처에 존재하는 비소가 식물체내 고동도로 집적되므로 본 공법이 실행된 지역의 식물들은 추가적인 처리공정을 거친 후 처분되어야한다.

8) Biological treatment

미생물이나 박테리아의 활동이 토양 내 존재하는 비소를 침전(precipitate)/공침(coprecipitate)시킴으로써 오염된 토양이나 지하수를 정화하는 복원기술이다. 저비용이고 자연친화적이라는 이점이 있지만 복원시간이 길며 고동도의 오염물 처리에 적용이 어려울 뿐만 아니라, 미생물의 분해환경을 조성하는데 어려움이 있다.

4.2. 생석회를 첨가한 토양복토법

경상북도 군위군 고로면 석산리에 위치한 고로광산은 1972년에 폐광된 아연광산으로, 가행당시 생성된 광미 및 광폐석들이 폐광산을 따라 형성된 주 하천으로 유실 또는 범람되면서 주변 농경지토양을 상당수 오염시킨 것으로 보고되었다(한국수자원공사, 2002; 이민희외, 2003). 본 연구지역의 토양정밀조사결과에 의하면, 농경지토양의 표토시료 중 18%가 비소의 토양오염우려기준을 초과하고 있으며, 약 7%정도는 토양오염대책기준을 초과하는 것으로 나타나 조사 대상 지역의 상당부분이 비소로 오염된 것으로 나타났다. 또한 토양정밀조사가 시행된 직선거리는 폐광산으로부터 하천 하류의 저수지댐 건설 예정지까지 약 12km구간으로, 비소로 오염된 농경지토양의 분포특성이 폐광산 하부에 집중되지 않고 전 구간에 걸쳐 평균적으로 넓게 나타남을 알 수 있었다. 오염된 농경지토양의 표토 평균 비소농도는 일반적으로 고농도로 산출되는 비소폐기물이나 광산입구의 토양과 달리 5.01mg/kg로 토양오염우려기준이하로 나타났다. 따라서 농경지토양이 비교적 낮은 비소농도로 광범위하게 오염되어있는 본 연구지역의 특성에 맞는 복원계획이 요구되며, 오염 농경지토양에 의한 댐 건설 후 형성되는 저수지의 지속적인 오염을 막기 위해 토양의 비소농도를 토양오염우려기준의 40%(2.4mg/kg) 또는 주변 배경치 농도(1.23mg/kg)로 낮출 수 있으며, 오염토양으로부터의 비소 용출을 최소화하여 수계로의 비소유입을 막는 복원방법이 필요할 것으로 판단되었다.

토양복토법은 비 오염토양으로 오염토양상부에 복토하여 토양 내 오염 중금속의 농도와 용출률을 저감시키는 토양복원공법으로 처리비용이 매우 저렴하고, 처리기간도 짧아서, 저 농도의 오염토양 복원에 적합한 것으로 보고되고 있다. 비소의 오염농도가 낮고, 오염분포가 넓게 나타나는 본 연구지역의 농경지토양에 대한 복원 방법으로 생석회를 첨가한 토양복토법을 선택하였다. CaO가 주성분인 생석회(quick-lime)는 비소와 반응하여 불용성의 칼슘비소화합물(calcium-arsenic compound; CaHAsO_3 , $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$)을 생성하게 되는데, 산업폐기물 내에 고농도

로 존재하는 비소 및 중금속의 안정화/고형화를 위해서 많이 이용되고 있다 (Veronika Dutre, 1999; Carlo Vandecasteele, 2002).

비소로 오염된 연구지역의 농경지토양에 생석회가 첨가된 토양 복토법을 실행할 경우, 토양복토에 의한 물리적인 희석 효과와 첨가된 생석회에 의한 화학적인 불용화 작용으로 인해 오염토양으로부터 저수지 수계로 용출되는 비소의 양을 확실하게 억제시킬 수 있을 것으로 판단되어, 생석회를 첨가한 토양 복토법의 복원 효율을 규명하기 위한 실내실험을 실시하였다.

5. 토양의 물리 화학적 특성

비소로 오염된 농경지토양의 물리화학적 특성을 규명하기 위하여 연구지역 오염 토양의 pH, 유기물함량(%)을 측정하였고, 입도분석을 실시하였다. 연구지역 농경지 토양 중 대표성 있는 논 토양, 밭 토양, 과수원 토양을 선정하여, 비소농도차이에 의해 총 8개의 오염토양시료에 대한 실험을 실시하였다. 또한 연구지역 토양과 생식회(quick-lime)의 주성분 분석을 위해서 XRF분석을 실시하였다.

토양의 pH의 측정은 건조된 토양 5g에 증류수 25ml를 넣어 1시간정도 잘 저어주면서 평형에 이르게 한 후 표준액으로 잘 보정된 pH meter(Multi-Analyzer, Istek Inc.)를 사용하여 측정하였으며(환경부, 2002), 측정결과 연구지역 농경지 토양의 평균 pH값은 6.04값을 나타냈다.

유기물 함량(%)을 측정하기위해서 작열감량(loss-on-ignition; %)법을 이용하였다. 작열감량은 105℃로 건조시킨 후의 토양무게와 450℃로 6시간 가열 후의 토양 무게 차를 이용하여 전체 토양무게에 대한 감량된 무게의 비로 표현된다. 계산된 작열감량(LOI)을 이용하여 유기물의 함량을 계산하는 식은 다음과 같다.

$$\blacksquare \text{유기탄소의 함량}(\%) = 0.458 \times \text{LOI}(\%) - 0.4 \quad (\text{Ball, 1964})$$

$$\blacksquare \text{유기물 함량}(\%) = \text{유기탄소함량}(\%) \times 1.724 \\ = \{(0.458 \times \text{LOI}) - 0.4\} \times 1.724 \quad (\text{FitzPatrick, 1986})$$

연구지역 농경지토양의 유기물 함량(%)은 0.45~2.86사이의 값을 보였고, 일반적인 유기물 함량은 논 토양>밭 토양>과수원 토양의 순서로 많음을 알 수 있었다.

입도분석을 위한 농경지토양은 20~30%의 과산화수소(H_2O_2)용액을 이용하여 유기물을 제거한 후 건조하여 각 체(sieve)별로 체가름하여 입도를 분리하였고, #200체 통과한 시료는 피펫분석(pipeting)법을 실시하였다. 피펫분석법은 1000mL의 베스실린더에 #200체이하의 토양과 칼콘(Na_2PO_7)이 5% 첨가된 용액(1L)을 혼합한 후, 토양입자의 크기에 따른 침강속도차를 이용한 Stoke's law에 따라 입도를 분리하는 것으로 연구지역의 농경지 토양의 silt, clay분류에 사용하였다.

Sand, Silt, Clay의 입도분류기준은 미국농부성(USDA)분류법을 따랐고, sand-silt-clay 삼각 다이어그램에 fitting시킨 결과 본 연구지역의 농경지토양은 loam, silt loam, sandy loam, loamy sand의 토성(soil texture)을 나타냈다(Fig. 7). 연구지역 농경지토양의 pH, 유기물 함량(%), 입도분석 결과와 중금속 농도를 Table 7에 나타내었다. 연구지역 농경지토양과 생석회(quick-lime)의 주성분 분석은 부경대학교 공동실험실습관 내 SHIMADZU사의 XRF-1700기종으로 실시하였고 분석결과는 Table 8에 제시하였다.

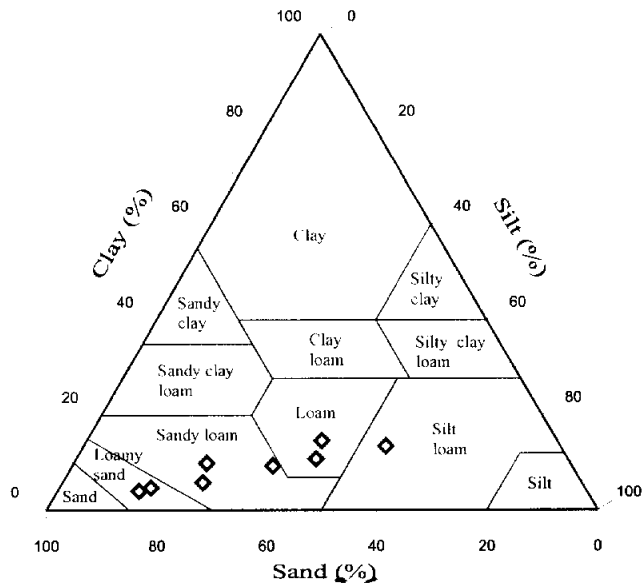


Fig. 7. Types of soil texture of farmland soils.

Table 7. Properties of farmland soils around Goro abandoned mine

farmland soils	pH _{water} 1:5	Organic contents (%)	Heavy metal concentrations (mg/kg)				Soil types	Particle size distribution (%)		
			As	Cd	Pb	Cu		sand	silt	clay
paddy 1	5.67	2.57	14.12	0.28	11.40	0.58	loam	42.58	42.80	14.62
paddy 2	5.55	2.86	1.40	0.02	0.67	0.26	silt loam	31.54	54.98	13.48
field 1	6.08	1.82	7.98	0.04	1.60	0.15	sandy loam	68.74	25.46	5.80
field 2	6.32	1.94	17.68	0.03	0.90	0.24	sandy loam	54.15	36.53	9.32
field 3	6.53	2.21	41.07	0.10	4.13	0.41	loam	45.55	43.65	10.79
orchard 1	6.91	0.84	88.20	0.01	0.42	0.09	loamy sand	81.22	14.80	3.98
orchard 2	5.43	0.90	5.35	0.01	0.38	0.04	sandy loam	65.97	24.15	9.88
orchard 3	5.86	0.45	38.87	0.13	3.05	0.22	loamy sand	78.71	16.58	4.71

Table 8. Principle component analysis of farmland soils by XRF

Soil sample No.	Chemical compositions of the soil samples by XRF-analysis										(units : wt %)	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total
1	63.7	13.32	0.74	4.69	0.14	0.93	1.46	1.76	2.81	0.10	10.55	100.2
2	68.02	13.82	0.73	4.58	0.11	1.26	1.80	2.46	3.38	0.14	5.36	101.66
3	65.83	13.63	0.71	4.63	0.10	0.96	1.24	2.05	3.24	0.24	7.31	99.94
4	67.10	13.81	0.66	4.06	0.08	0.90	1.25	2.05	3.28	0.24	6.55	99.98
5	65.56	15.06	0.67	5.11	0.11	1.06	1.18	2.50	3.43	0.16	5.74	100.58
6	65.73	14.19	0.65	3.90	0.07	0.93	1.15	2.08	3.23	0.25	8.28	100.48
7	67.9	13.92	0.69	4.33	0.09	0.88	1.22	2.20	3.33	0.23	6.42	101.21
8	67.48	12.79	0.65	4.17	0.10	0.81	1.66	1.66	3.42	0.31	7.98	101.03
9	67.02	14.33	0.7	3.44	0.06	0.89	1.05	1.94	3.25	0.24	7.60	100.52
10	59.14	14.58	0.64	6.60	0.30	1.47	1.16	1.52	2.55	0.07	8.02	96.05
Quick-lime	3.77	0.93	0.01	0.13	0.01	30.83	50.60	0.05	0.08	0.00	17.99	104.4

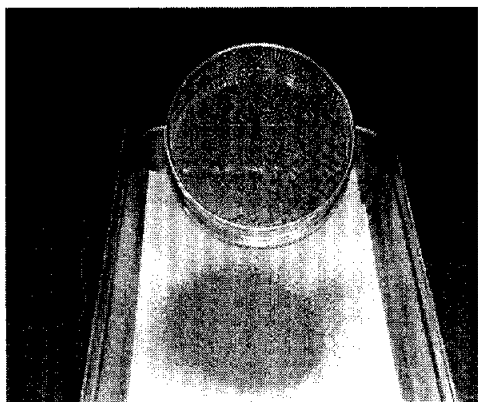
6. 석회를 첨가한 복토법의 효율 실험

6.1. pH-time변화에 따른 비소 및 중금속의 분배계수 산정 실험

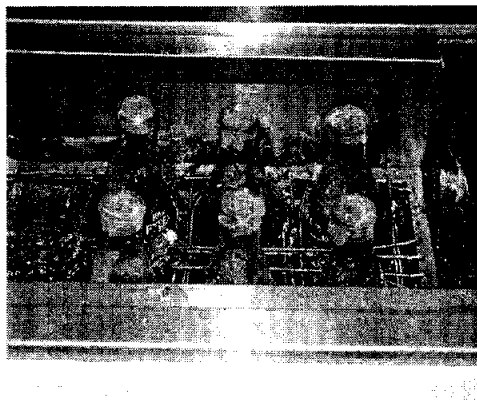
토양과 토양수사이 오염물의 분배특성은 토양매체 내 오염물의 거동에 중대한 영향을 끼치며, 저수지 내 수계와 퇴적물사이 오염물의 분배특성에 따라 저수지 수질 환경이 변화할 수 있다. 특히 본 연구지역 내에 댐이 건설될 경우, 저수지 수계의 비소의 농도를 예측하기 위해서는 수몰되는 농경지토양으로부터 저수지 수계로 이동되는 비소의 용출분배특성을 규명해야하므로, 오염토양과 저수지 수계사이 비소의 용출분배계수(extraction partition coefficient)는 배치실험을 통하여 산출하였다. 연구지역의 5개 토양에 대해서 용액의 pH와 용출시간의 변화에 따른 토양 내 비소, 카드뮴, 납의 용출분배계수를 산정하기 위해 실시된 배치실험과정은 다음과 같다.

- 1) 토양시료를 건조(35℃)한 후 체가름(#10이하 토양)을 한다.
- 2) pH가 조정된 탈이온수 500ml에 토양시료 20g을 첨가한 후 파라필름으로 잘 봉한다.
- 3) 밀봉된 혼합액을 20℃, 100rpm으로 항온 진탕한다.
- 4) 진탕한 혼합액으로부터 30분, 2시간, 12시간, 24시간, 5일 간격으로 각각 10ml를 채취하여 원심분리(2000rpm)와 필터링(5B)을 거친 후 상등액을 분석한다.

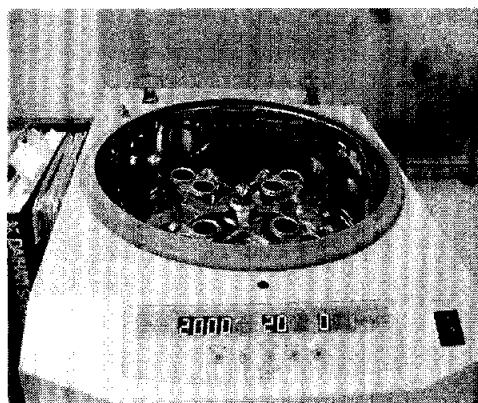
pH의 조정을 위해 염산(HCl)과 수산화나트륨(NaOH)을 사용하였고, 중금속 농도 분석은 부경대학교 공동실험실습관에 의뢰하여 ICP/MS (모델명: Perkin Elmer Elan 6000)로 분석하였으며, 실험과정은 Fig. 8에 나타내었다.



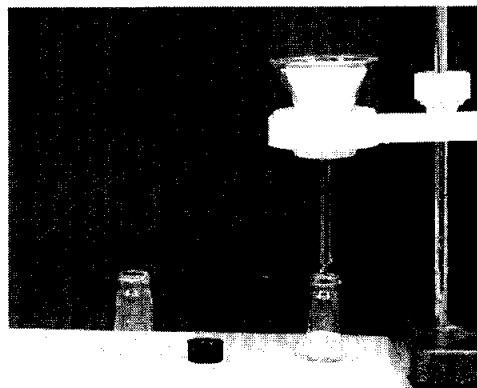
(a) Sieving of contaminated soils



(b) Shaking at constant temperature



(c) Separating with centrifuge



(d) Filtering of sample solution

Fig. 8. Batch experiment to acquire extraction partition coefficient for As, Cd and Pb.

6.2. 생석회 함량에 따른 토양 내 비소 및 중금속의 안정화 효율 실험

댐건설에 의해 수몰되어지는 연구지역 내 수몰지역의 오염토양은, 댐건설로 형성되는 저수지 수계의 직접적인 비소 및 중금속 용출원이 되고, 비 수몰지역의 경우에는 강우나 하천수에 의해서 오염토양으로부터 용출되어 저수지로 유입함으로써 저수지의 중요한 오염원으로 작용하게 된다. 따라서 댐건설 후 안정하고 깨끗한 저수지 수질을 보존하기 위해서 반드시 오염된 농경지토양의 복원이 이루어져야한다. 본 실험은 오염된 농경지토양에 대한 복원의 일환으로 생석회를 첨가한 복토법을 실시할 경우, 오염토양으로부터 수계로 용출되는 비소 및 중금속의 용출률 감소를 규명하여, 석회를 이용한 안정화공법의 효율을 입증하기 위해 실시되었다. 사용된 생석회는 한일 석회회사 제품으로 CaO와 MgO가 주성분인 과립상 생석회를 분쇄하여 #10번체로 체가름한 후 그 통과분을 사용하였으며, XRF 분석을 통한 생석회의 성분분석결과를 Table 8에 나타내었다. 연구지역의 농경지토양 2종류에 대해서 1%, 2%, 5% 생석회가 첨가된 경우와 생석회를 첨가하지 않은 경우에 대해서 배치실험을 실시하였으며, 토양과 생석회의 무게의 합을 20g으로 고정하여 생석회의 함량(%)에 따라 토양을 정량하였고, 용액은 강우의 pH보다 약간 낮은 pH5로 조정된 탈 이온수를 사용하였다. 생석회를 첨가한 토양 안정화 공법의 효율 실험 과정은 다음과 같다.

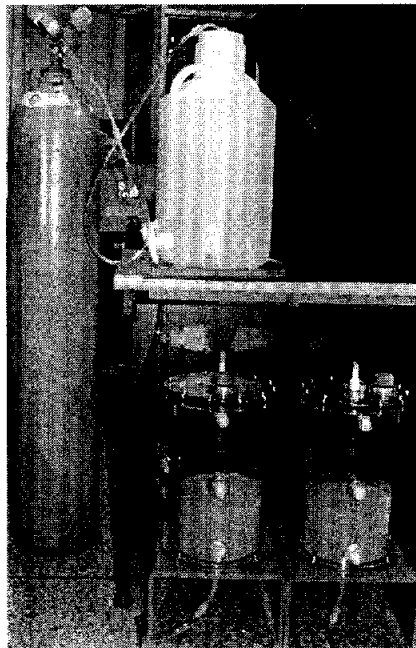
- 1) 토양을 건조(35℃)한 후 체가름(#10이하 토양)을 한다.
- 2) pH가 조정된 초순수 500ml에 생석회 함량별로 조정된 토양(0%, 1%, 2%, 5% 생석회)을 넣고 파라필름으로 봉한다.
- 3) 밀봉한 혼합액을 20℃, 100rpm으로 항온 진탕한다.
- 4) 진탕중인 혼합액으로부터 30분, 2시간, 12시간, 1일, 3일, 5일 간격으로 10ml를 채취하여 원심분리(2000rpm)와 필터링(5B)을 거친 후 상등액을 분석한다.

6.3. 저수지 내 비소용출 모사실험

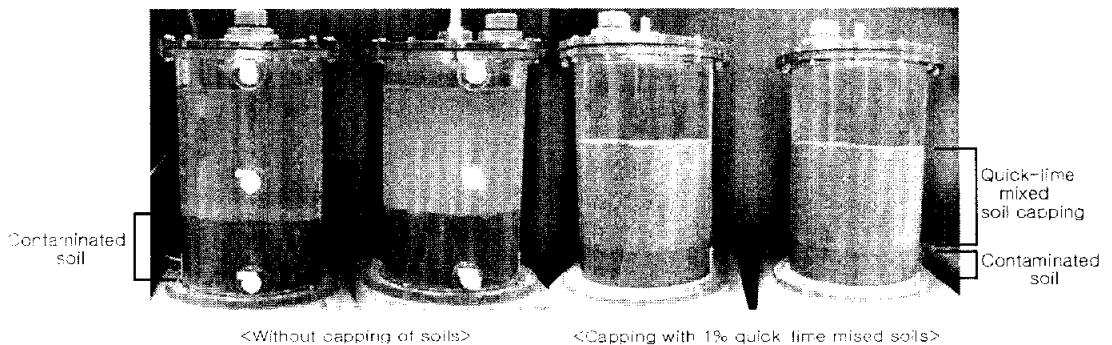
댐 건설 후 형성된 저수지 바닥의 오염토양이나 퇴적물로부터 저수지 수계로의 중금속 이동은 저수지 수계에 주 오염원으로 작용하게 되고 결국 저수지 생태계에도 치명적인 영향을 줄 수가 있다. 특히 본 연구지역의 가장 큰 오염원인 비소는 자연 생태계에서 매우 독성이 강한 물질로 알려져 있으며, pH와 Eh에 따라 산화·환원 상태로 존재하고 산화상태(As^{+5})보다 환원상태(As^{+3})에서 독성이 강하고 이동성이 큰 것으로 보고되고 있다(김선태, 2000; 전효택, 2001; 서영진, 2002; Myoung-Jin Kim, 2002). 따라서 저수지 바닥에서 형성되는 환원상태에서 오염토양으로부터 저수지 수계로 용출되는 비소 및 중금속의 용출률을 대형 모의칼럼실험을 통하여 산출하였다. 사용된 칼럼은 지름 18.5cm, 높이 30cm(면적 268.8 cm^2)의 아크릴 칼럼으로 칼럼의 상부는 용액을 주입할 수 있는 주입장치와, 하부는 토양매체를 지지할 수 있는 격자체와 배출관으로 이루어져 있다. 저수지 바닥의 환원환경 모사를 위해서 칼럼 내 기체를 질소가스로 대체시키면서 오염토양을 충전하였으며, pH7로 조정된 탈이온수는 DO가 0.1 mg/l이하가 될 때까지 질소가스로 퍼지한 후 밀봉된 칼럼 안으로 주입하였다. 오염토양의 상부 10cm까지 용액이 주입되면 주입을 멈춘 후 칼럼 내부로 질소가스를 순환시키고 다시 밀봉하였다. 실험은 오염토양으로부터 바로 수계로 용출되는 경우를 모사한 2개의 칼럼과 오염토양 상부에 1% 생석회로 개량된 비오염토를 복토한 경우를 모사한 2개의 칼럼을 대상으로 이루어졌고, 각각의 경우에 대해서 비소 및 중금속이 수계로 용출되는 양을 단위 면적당 시간에 따른 용출량으로 나타내어 생석회를 첨가한 토양 복토법의 효율을 규명하였다(Fig. 9). 분석을 위한 용액의 샘플링은 칼럼 내 토양 표면 상부 3~5cm 지점에서 한번에 10ml씩 채취하였고 필터링 후 분석하였다. 실험 과정은 다음과 같다.

- 1) 오염토양 및 비 오염토양을 건조(35°C)한 후 적당히 분쇄한다.
- 2) 오염된 토양의 비소농도가 17.68 mg/kg, 5.35 mg/kg인 2개의 칼럼은 칼럼 내부에 오염토양을 10cm깊이로 채우고 칼럼의 내부를 질소로 대체시킨다.

- 3) 비소농도가 6.05mg/kg, 2.43mg/kg인 칼럼은 오염토양을 5cm깊이로 채우고 그 위로 15cm깊이의 개량된 복토(생석회1% 혼합토)를 실행한 후 칼럼의 내부를 질소로 대치시킨다.
- 4) 질소가스로 퍼지된 용액($DO \approx 0$)을 모든 칼럼의 토양상부에서 10cm높이까지 주입한다.
- 5) 약 90여일 동안 하루에 한번씩 샘플용액 10ml를 채취하여 원심분리(2000rpm)와 필터링(5B)을 거친 후 분석한다.



(a)



(b)

Fig. 9. Physically simulated column experiment for As extraction in soil capping system.

(a) : Simulation works for the reduction phase.

(b) : Photograph of experimental column filled with solutions.

6-4. 강수에 의해 오염토양 하부로 침출되는 비소 및 중금속 침투모사실험

토양 성밀조사 결과로부터 연구지역의 상당부분은 비소로 오염되었음을 알 수가 있었고 비소의 오염은 폐광산으로부터 광미·광폐석의 유실에 의한 것으로 추정된다. 특히 하천 주변 농경지의 오염은 우기 시 하천의 범람에 의한 영향이 지배적으로 작용한 것으로 판단된다. 광미나 광폐석과 같은 폐광산 상류부의 오염원이 제거된다 하더라도 기존에 오염되었던 저수지 상부 비수몰지역의 오염토양으로부터 강수에 의해 용출되어지는 중금속은 하천 하류 저수지 수질을 오염시키는 주 오염인자가 될 수 있으므로 저수지 상부 비수몰지역의 오염 농경지토양으로부터 중금속 용출량을 낮추어 저수지 수계로의 중금속 유입량을 줄이는 것은 저수지 환경보존을 위해 매우 중요하다. 따라서 연구지역의 오염 토양으로부터 강수에 의해 용출되어 하부로 침투되는 비소 및 중금속의 양과, 생석회를 이용한 복토를 실시할 경우 중금속 용출량의 변화를 확인하기 위하여 총 3개의 칼럼을 이용해 모의 칼럼실험을 실시하였다. As, Cd, Pb의 농도가 각각 21.83mg/kg, 1.16mg/kg, 51.28mg/kg으로 비소농도가 토양오염대책기준을 초과하는 연구지역의 토양을 실험에 이용하였다. 비소용출칼럼실험에서 사용한 대형칼럼을 이용하여 오염토양만 있는 경우와 오염토양 상부에 비 오염토양을 0.5%, 5% 생석회로 혼합한 복토를 덮은 경우의 총 3가지 칼럼에 대하여 강수에 의해 오염토양 하부로 용출되는 중금속 침투모사실험을 수행하였다. 모든 칼럼의 하부에는 조립질 모래를 이용하여 1cm 두께의 배수층을 두었고, 그 위로 오염토양을 10cm, 개량된 복토를 10cm 채웠고 최상부층에는 다시 1cm 두께의 조립질 모래층을 두었다.

강수량의 설정은 연구지역 인근지역(영천, 구미, 안동)의 10년 동안의 강수량 데이터를 이용하여 월 평균 강수량을 91.2mm로 결정하였다. 전체 강수량 중 실제로 토양 내부로 유입되는 비율을 최대 50%로 가정하면(Nyle C. Brady, 2002), 실험 스케일인 칼럼 내부로 주입되는 한 달 강수량은 45.6mm가 되므로, 칼럼 면적을 고려하여 실제 한달 동안 토양에 유입되는 강수량인 1225.73ml를 칼럼 상부로부터 주입하였다.

칼럼 내부로 배회 주입되는 인공강수는 pH6.0으로 조정된 탈 이온수를 주입하였고, 칼럼 하부로 배출되는 용액은 pH 및 Eh를 측정한 후 기름종이(5B)로 필터링과정을 거치고 중금속의 농도분석을 실시하였다. 인공강수를 이용한 오염된 토양하부로 비소 및 중금속의 침투모사실험에 사용된 칼럼 사진을 Fig. 10에 나타내었고, 구체적인 실험과정은 다음과 같다.

- 1) 오염토양 및 비 오염토양을 건조(35℃)한 후 적당히 분쇄한다.
- 2) 각 칼럼별로 하부에 sand층 1cm와 그 위로 오염토양을 10cm깊이로 채운다.
- 3) 0.5%, 5% 생석회가 첨가된 복토를 실시하는 칼럼은 오염토양 위로 개량된 토양을 10cm 깊이로 채운다.
- 4) 최상부층에는 조립질 모래층을 1cm높이로 둔다.
- 5) 12시간 간격으로 1225.73ml의 인공강수를 주입하고 칼럼의 하부에서 배출되는 용액을 샘플링한다.
- 6) 샘플링된 용액의 Eh 및 pH를 측정하고 필터링(5B)과정을 거친 후 용액을 분석한다.

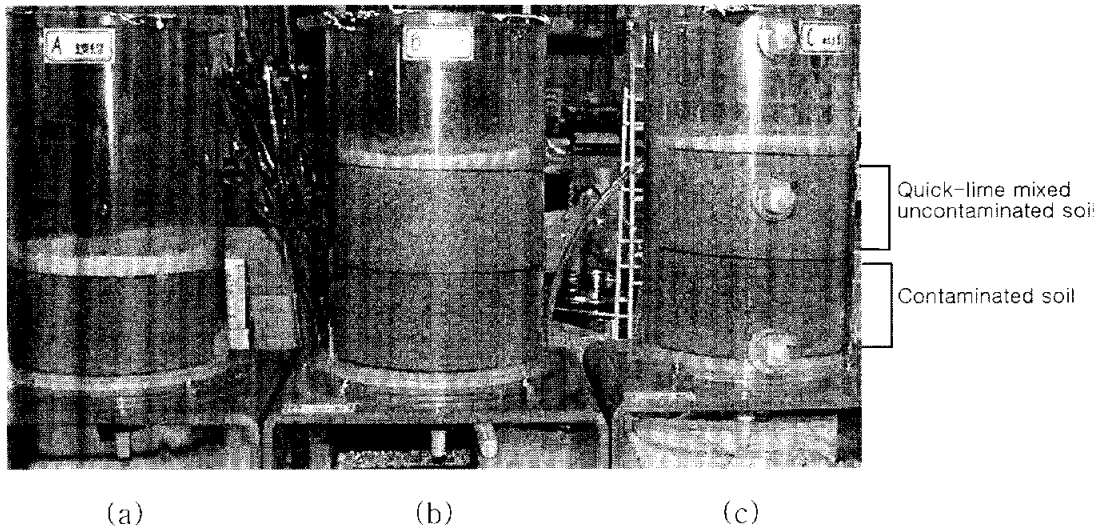


Fig. 10. Photograph of the simulated column experiment.

(a) : As contaminated soils without quick-lime mixing improvement.

(b) : As contaminated soils with 0.5% quick-lime mixing improvement.

(c) : As contaminated soils with 5% quick-lime mixing improvement.

7. 석회를 첨가한 복토법의 효율 실험 결과

7.1. 용액의 pH와 용출시간변화에 따른 비소 및 중금속의 분배계수 산정 결과

연구지역의 농경지토양과 하천 퇴적토중 비소의 농도가 비교적 높게 나타나는 토양 시료 5개로부터 pH와 시간의 변화에 따른 비소의 용출 분배계수를 산정하기 위한 배치실험을 실시하였다. 실험결과 pH가 1인 용액에서의 비소 용출률이 pH 3, 5, 7에서보다 훨씬 높게 나타났고, pH 3이상의 경우에는 비소의 용출정도가 거의 비슷하게 나타나며, 반응 시간은 3일 정도에 거의 평형에 도달함을 알 수 있었다. 고로 폐광산 인근 토양의 pH값이 중성에 가깝게 나타남을 감안하여, 본 연구지역의 비소에 대한 평균 용출분배계수값의 결정은 pH 7일때 3일 동안의 실험 결과값들을 평균하여 산정하였다(Table 9). 결정된 용출분배계수값, K_{df} 는 0.005412(kg/l)로 나타났고, 인근 하천의 비소 농도를 분석하여 계산된 값의 신뢰성을 검증하였다. 실제 하천농도로부터 구해진 비소의 평균 K_{df} 값은 0.00112(kg/l)로 실험으로부터 구해진 값보다 5배정도 낮게 나타났으며(Table 10), 이러한 결과는 오염토양으로부터 하천수로의 비소용출시 발생하는 kinetic효과 때문인 것으로 판단된다. 비소의 용출분배계수(K_{df})결정을 위한 배치실험 결과는 부록의 Table 1에 제시하였다.

Table 9. Determination of extraction partitioning coefficient(K_{df}) of As in soils

Soil samples	As con. (mg/kg)	K _{df} (kg/L)	Fixed items
1	14.121	0.008581	· pH 7 · Extraction periods · 3days
2	88.201	0.001269	
3	41.07	0.004741	
4	48.92	0.002912	
5	24.29	0.009557	
Average		0.005412	

$$\ast C_s = K_d(m^3/g) \cdot C_w, \quad C_w = K_{df}(kg/L) \cdot C_s, \quad K_d = K_{df}^{-1} \div 10^6$$

Table 10. Comparison between K_{df} of stream waters and experimental K_{df} for arsenic

Stream water			Experimental K_{df} (kg/l)	
Sampling location	As con. in stream deposits (mg/kg)	K_{df} (kg/l)	K_{df} at pH 5	K_{df} at pH 7
Ha 5	48.920	0.00118	0.00589	0.00541
Ha 27	13.685	0.00090		
Ha 73	24.290	0.00040		
Ha 105	4.275	0.00198		
Average		0.00112		

비소 외에 다른 중금속인 카드뮴과 납의 경우, 용출분배계수의 평균값이 0.00008 (kg/l)로 비소의 K_{df} 값보다 10배 이상으로 낮게 나타나고(Table 11), 토양오염정밀조사결과로부터 본 연구지역의 비소 외 다른 중금속의 토양오염정도가 매우 낮으므로 비소를 제외한 다른 중금속의 용출에 의한 수계로의 오염도 거의 없을 것으로 사료되었다.

Table 11. Mean extraction partitioning coefficient(K_{df}) of Cd and Pb in soils

Heavy metal	Mean extraction partitioning coefficient(K_{df})	
	K_{df} (kg/l) at pH 5	K_{df} (kg/l) at pH 7
Cd	0.00007	0.00008
Pb	0.00004	0.00005

7.2. 생석회 첨가에 따른 토양 내 비소 및 중금속의 안정화 효율 실험결과

폐광산의 지류를 따라 형성된 오염 농경지토양에 대한 복원법으로 석회를 첨가한 복토법이 적용될 경우, 그 복원 효율을 규명하기 위해서 배치실험을 실시하였다. 비소농도가 88.2mg/kg, 41.1mg/kg인 토양(Soil Sample 1, 2)을 실험에 사용하였고, 이들 토양에 0%, 1%, 2%, 5%의 생석회를 첨가하여 생석회 함량에 따른 비소 및 중금속(카드뮴, 납)의 용출정도를 규명하였다. 실험결과 2종류의 토양샘플 모두 시간이 증가하면서 비소의 용출분배계수(K_{df}) 값은 증가하는 경향을 보였지만 증가율은 감소함을 알 수가 있었고, 생석회의 함량이 높을수록 오염토양으로부터 비소의 용출을 억제시키는 효과가 좋은 것으로 나타났다(Fig. 11). 토양샘플1(As농도 88.2mg/kg)은 생석회를 1%, 2%, 5%로 첨가함에 따라 비소의 K_{df} 값이 5일간 초순수용액의 K_{df} 을 기준으로 45%, 83%, 92%씩 감소하였고, 토양샘플2(As농도 41.1mg/kg)도 1%, 2%, 5%의 생석회 함량에 따라 각각 12%, 70%, 98%로 감소하였다. Cd과 Pb의 분석결과, 토양샘플1(Cd농도 0.013mg/kg, Pb농도 0.419mg/kg)과 토양샘플2(Cd농도 0.099mg/kg, Pb농도 4.131mg/kg) 모두 생석회를 첨가함에 따라 용출이 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다. 토양의 물리·화학적 특성 차이에 따라 사용된 토양샘플의 K_{df} 값은 차이를 보이지만, 오염토양에 생석회를 첨가함에 따라 오염토양으로부터의 비소 및 중금속 용출억제효과가 매우 높게 나타남을 알 수가 있었다. 연구지역의 오염 농경지토양 복원법으로 생석회를 첨가한 복토법이 시행된다면, 순수 생석회에 의한 오염중금속의 용출억제효과와 비오염토인 복토에 의한 희석효과로 인해, 실험결과 이상으로 비소 및 중금속의 농도 저감 및 용출률 감소효율을 볼 수 있을 것으로 사료된다. 비소에 대한 오염정도가 높게 나타나는 토양샘플 1, 2에 대한 석회함량별 K_{df} 저감효율을 다음 그림을 통해 나타내었고, 실험 결과는 부록의 Table 2에서 제시하였다.

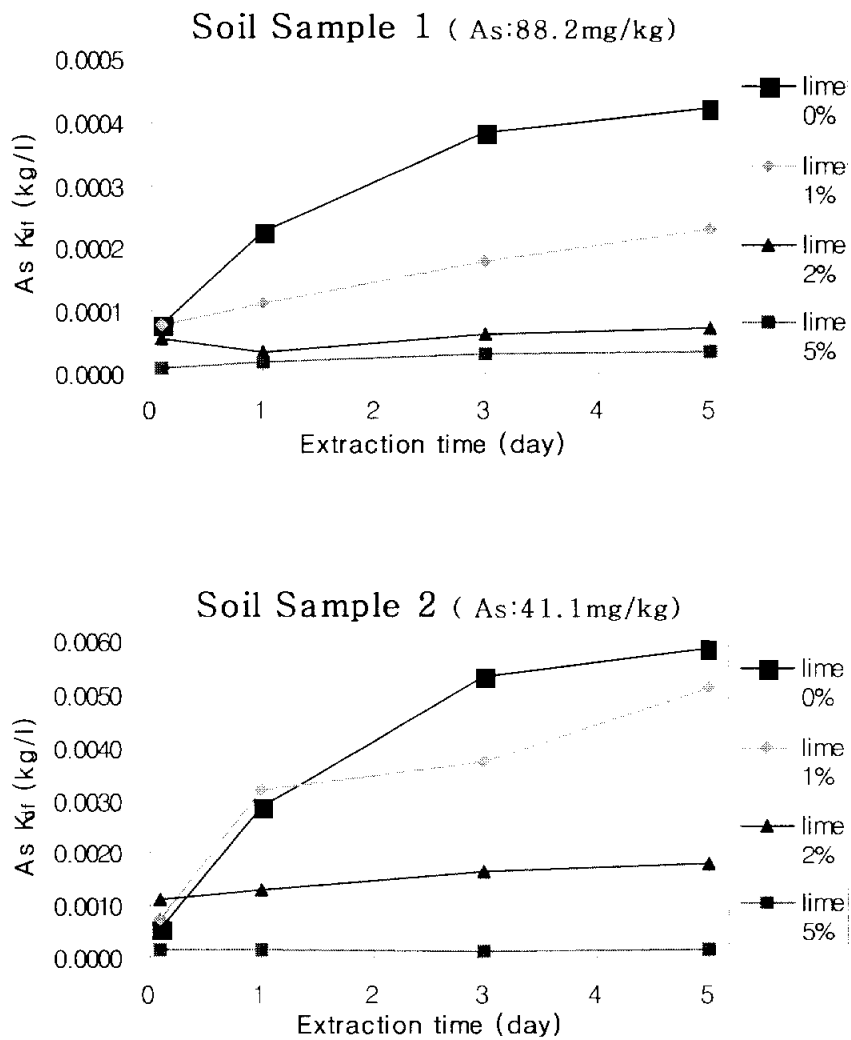


Fig. 11. Decrease of As extraction rate of soil sample 1 and 2 mixed with different lime contents.

7.3. 저수지 내 비소용출 모사실험 결과

저수지 하부의 환경상태에서 저수지 바닥의 오염토양으로부터 비소 및 중금속의 용출을 예측하기 위해 4종류의 토양샘플에 대해서 대형칼럼을 이용한 모사실험이 이루어졌다. 오염된 토양의 비소농도가 각각 17.68 mg/kg, 5.35 mg/kg인 2개의 칼럼실험은 오염토양으로부터 수계로 직접 용출되는 환경을 약 90일 동안 모사한 것이고, 비소농도가 6.05mg/kg, 2.43mg/kg인 칼럼실험은 오염토양 상부에 1%의 생석회가 첨가된 비오염토를 복토한 경우 수계로 용출되는 비소 및 중금속의 용출 환경을 모사한 것이다. 복토를 실시한 토양과 실시하지 않은 토양으로부터 용출되는 비소의 농도를 분석하여 단위 면적당 시간에 따른 비소의 용출량을 계산하였고, 계산된 값을 이용하여 1년 동안 저수지 수계로 용출되는 비소의 양과 용출률을 각 칼럼 별로 비교하였다.

복토를 하지 않은 칼럼실험과 1%의 생석회가 첨가된 복토를 실시한 칼럼실험결과로부터 비소에 대한 용출분배계수를 산정하여 Table 12, 13에 나타내었다. 실험 과정에서 채취한 수용액의 비소농도를 이용하여 4가지의 오염토양으로부터 저수지 수계로 용출되는 비소의 양을 계산하여 1년 동안 용출되는 단위면적당(m^2) 비소 양으로 나타내었다. 오염된 토양의 비소농도가 17.68 mg/kg인 토양은 단위면적당(m^2) 223.1mg의 비소가 1년 동안 수계로 용출되었으며, 이 값은 초기 17.68 mg/kg의 비소오염토양 내 비소절대량(mg)이 3.05%만큼 저수지 바닥의 토양으로부터 수계로 이동됨을 의미한다. 토양비소농도가 5.4mg/kg인 토양은 1년 동안 86.1mg의 비소가 단위면적당 용출되고, 이 값은 초기 비소량의 3.89%에 해당한다. 초기비소농도가 6.05mg/kg인 칼럼은 1%의 lime이 첨가된 복토법을 실시한 칼럼으로 1년 동안 초기 비소량의 0.05%에 해당하는 1.29mg의 비소가 단위면적당 용출된다. 초기비소농도가 2.43mg/kg인 칼럼도 1%의 lime이 첨가된 복토법을 실시한 칼럼이며, 단위면적당 1.12mg의 비소가 1년 동안 용출되며 이 값은 초기 비소 절대량의 0.11%에 해당된다. 생석회를 첨가한 칼럼의 경우 1년 동안 비소의 용출률이 0.05%, 0.11%로 복토를 실시하지 않은 토양의 용출률에 비해 약 40배 이

상 감소함에 따라 수몰된 지역의 오염된 농경지토양의 복원으로 석회를 첨가한 복토법이 오염토양으로부터 저수지 수계로의 비소용출을 감소시키는 적절한 방법임을 확인할 수 있었다. 위의 모사실험의 결과를 얻기 위해 사용된 변수값들을 Table 14에 나타내었고, 4종류의 오염토양에 대한 계산과정은 아래의 (1)~(4)와 같다.

기타 중금속인 카드뮴과 납도 비소와 같이 생석회가 첨가된 복토를 실시한 칼럼에서 더 좋은 용출저감효율을 보였으며, 실험 결과는 부록의 Table 3.1~3.2에 나타내었다.

(1) 퇴적물의 비소 농도가 17.68 mg/kg 토양인 경우

- 칼럼 면적 : $9.25 \times 9.25 \times 3.1415 = 268.8 \text{ cm}^2$
- 칼럼 내 퇴적물 상부 용액 체적 : $268.8 \text{ cm}^2 \times 10 \text{ cm} = 2688 \text{ cm}^3 = 2.688 \text{ L}$
- 실험 결과로부터, 91일 동안 용출된 비소농도 : 0.55622mg/L

$$(92\text{일 농도} - 1\text{일 농도} = 0.55922\text{mg/L} - 0.00300\text{mg/L} = 0.55622\text{mg/L})$$

- 91일 동안 칼럼으로 용출된 비소량 : 1.49512 mg / 91day
 $(0.55622 \text{ mg/L} \times 2.688 \text{ L}(\text{용액 체적})) = 1.49512 \text{ mg} / 91\text{day}$

- 단위 면적 (cm^2) 당, 1년 동안 용출된 비소량 계산

$$\Rightarrow \frac{1.49512\text{mg}/91\text{day}}{268.8\text{cm}^2} \times 365\text{day/year} = 0.02231\text{mg/year} \cdot \text{cm}^2 = 223.1\text{mg/year} \cdot \text{m}^2$$

저수지 하부 오염 토양의 부피를 1m^2 당 0.3m 두께로 가정하면,

- 오염토양의 무게 : 414 kg
 $(0.3\text{m}^3 \times 1.38 \text{ ton/m}^3 (\text{wet bulk density})) = 414 \text{ kg}$
- 오염토양 내 총 비소량 : 7,319.52 mg
 $(414 \text{ kg} \times 17.68 \text{ mg/kg}) = 7,319.52 \text{ mg}$

⇒ 1년 동안 3.05%의 비소가 단위면적당(m^2) 용출

$$(223.1 \text{ mg} / 7,319.52 \text{ mg} = 0.03048 = 3.05\%)$$

(2) 퇴적물의 비소 농도가 5.35 mg/kg 토양인 경우

- 칼럼 면적 : $9.25 \times 9.25 \times 3.1415 = 268.8 \text{ cm}^2$
- 칼럼 내 퇴적물 상부 용액 체적 : $268.8 \text{ cm}^2 \times 10 \text{ cm} = 2688 \text{ cm}^3 = 2.688 \text{ L}$
- 실험 결과로부터, 91일 동안 용출된 비소농도 : 0.21463 mg/L
(92일농도 - 1일농도 = $0.21763 - 0.003 = 0.21463 \text{ mg/L}$)
- 칼럼 면적에서 용출된 비소량 : 0.57693 mg / 91day
($0.21463 \text{ mg/L} \times 2.688 \text{ L}$ (용액 체적) = 0.57693 mg / 91day)
- 단위 면적 (cm^2) 당, 1년 동안 용출된 비소량 계산
 $\Rightarrow \frac{0.57693 \text{ mg/91day}}{268.8 \text{ cm}^2} \times 365 \text{ day/year} = 0.008609 \text{ mg/year} \cdot \text{cm}^2 = 86.09 \text{ mg/year} \cdot \text{m}^2$

서수지 하부 오염 토양의 부피를 1m^2 당 0.3m 두께로 가정하면,

- 오염토양 부게 : 414 kg
($0.3\text{m}^3 \times 1.38\text{ton/m}^3$ (wet bulk density) = 414 kg)
- 오염토양 내 총 비소량 : 2,214.9 mg
($414 \text{ kg} \times 5.35 \text{ mg/kg} = 2,214.9 \text{ mg}$)

⇒ 1년 동안 3.89%의 비소가 단위 면적당 (m^2) 용출

$$(86.09 \text{ mg} / 2,214.9 \text{ mg} = 0.03887 = 3.89\%)$$

(3) 퇴적물의 비소 농도가 2.43 mg/kg 토양 상부에 1%의 석회로 복토한 경우

- 칼럼 면적 : $9.25 \times 9.25 \times 3.1415 = 268.8 \text{ cm}^2$
- 칼럼 내 퇴적물 상부 용액 체적 : $268.8 \text{ cm}^2 \times 10 \text{ cm} = 2688 \text{ cm}^3 = 2.688 \text{ L}$
- 실험 결과로부터, 83일동안 용출된 비소농도 : 0.00254 mg/L
(84일농도 - 1일농도 = $0.00281 - 0.00027 = 0.00254 \text{ mg/L}$)
- 칼럼 면적에서 용출된 비소량 : 0.00683 mg / 83day
($0.00254 \text{ mg/L} \times 2.688 \text{ L}$ (용액 체적) = 0.00683 mg / 83day)
- 단위 면적 (cm^2) 당, 1년 동안 용출된 비소량 계산
 $\Rightarrow \frac{0.00683 \text{ mg/83day}}{268.8 \text{ cm}^2} \times 365 \text{ day/year} = 0.000112 \text{ mg/year} \cdot \text{cm}^2 = 1.12 \text{ mg/year} \cdot \text{m}^2$

지수지 하부 오염 토양의 부피를 1m^2 당 0.3m 두께로 가정하면,

- 오염토양 무게 : 414 kg

$$(0.3\text{m}^3 \times 1.38\text{ton/m}^3 \text{ (wet bulk density)}) = 414\text{ kg}$$

- 오염토양 내 총 비소량 : $1,006.02\text{ mg}$

$$(414\text{ kg} \times 2.43\text{ mg/kg}) = 1,006.02\text{ mg}$$

⇒ 1년 동안 0.11%의 비소가 단위면적당(m^2) 용출

$$(1.12\text{ mg} / 1,006.02\text{ mg}) = 0.00111 = 0.11\%$$

(4) 퇴적물의 비소 농도가 6.05 mg/kg 토양 상부에 1%의 석회로 복토한 경우

- 칼럼 면적 : $9.25 \times 9.25 \times 3.1415 = 268.8\text{ cm}^2$

- 칼럼 내 퇴적물 상부 용액 체적 : $268.8\text{ cm}^2 \times 10\text{ cm} = 2688\text{ cm}^3 = 2.688\text{ L}$

- 실험 결과로부터, 83일동안 용출된 비소농도 : 0.00294 mg/L

$$(84\text{일농도} - 1\text{일농도}) = 0.00352 - 0.00058 = 0.00294\text{ mg/L}$$

- 칼럼 면적에서 용출된 비소량 : $0.00790\text{ mg} / 83\text{day}$

$$(0.00294\text{ mg/L} \times 2.688\text{ L (용액 체적)}) = 0.00790\text{ mg} / 83\text{day}$$

- 단위 면적 (cm^2) 당, 1년 동안 용출된 비소량 계산

$$\Rightarrow \frac{0.00790\text{ mg}/83\text{day}}{268.8\text{ cm}^2} \times 365\text{ day/year} = 0.000129\text{ mg/year} \cdot \text{cm}^2 = 1.29\text{ mg/year} \cdot \text{m}^2$$

지수지 하부 오염 토양의 부피를 1m^2 당 0.3m 두께로 가정하면,

- 오염토양 무게 : 414 kg

$$(0.3\text{m}^3 \times 1.38 \text{ (wet bulk density)}) = 414\text{ kg}$$

- 오염토양 내 총 비소량 : $2,504.7\text{ mg}$

$$(414\text{ kg} \times 6.05\text{ mg/kg}) = 2,504.7\text{ mg}$$

⇒ 1년 동안 0.05%의 비소가 단위면적당(m^2) 용출

$$(1.29\text{ mg} / 2,504.7\text{ mg}) = 0.00052 = 0.05\%$$

Table 12. Results of column experiment without lime mixing improvement

Soil sample	Sampling time	Solution volume in column (ml)	C _w (mg/l)	C _s (mg/kg)	Extraction partitioning coefficient (K _{dt} : kg/l)
Soil sample 5 (As concentration : 17.68 mg/kg)	12hours	2688	0.001000	17.679219	0.000057
	1 day	2678	0.003000	17.677667	0.000170
	2 days	2668	0.002000	17.678450	0.000113
	3 days	2658	0.003000	17.677684	0.000170
	4 days	2648	0.004000	17.676924	0.000226
	5 days	2638	0.006000	17.675403	0.000339
	6 days	2628	0.006000	17.675421	0.000339
	10 days	2588	0.013924	17.669535	0.000788
	19 days	2518	0.044197	17.647680	0.002504
	28 days	2473	0.081876	17.621197	0.004646
	35 days	2428	0.145039	17.577729	0.008251
	41 days	2413	0.245456	17.507990	0.014020
	51 days	2398	0.330623	17.449748	0.018947
	92 days	2368	0.559220	17.295421	0.032333
Soil sample 6 (As concentration : 5.35 mg/kg)	12hours	2688	0.001000	5.349219	0.000187
	1 day	2678	0.003000	5.347667	0.000561
	2 days	2668	0.004000	5.346901	0.000748
	3 days	2658	0.005000	5.346140	0.000935
	4 days	2648	0.007000	5.344617	0.001310
	5 days	2638	0.008000	5.343871	0.001497
	6 days	2628	0.010000	5.342368	0.001872
	10 days	2588	0.021780	5.333630	0.004084
	19 days	2518	0.036230	5.323506	0.006806
	28 days	2473	0.042850	5.319225	0.008056
	35 days	2428	0.075710	5.296614	0.014294
	41 days	2413	0.096570	5.282326	0.018282
	51 days	2398	0.128040	5.260830	0.024338
	92 days	2368	0.217630	5.200334	0.041849

Table 13. Results of column experiment with lime mixing improvement

Soil sample	Sampling time	Solution volume in column (ml)	C _w (mg/l)	C _s (mg/kg)	Extraction partitioning coefficient (K _{df} : kg/l)
Improved soil sample 7 with 1% lime (As concentration : 2.43 mg/kg)	1 day	2688	0.000265	2.429565	0.000109
	3 days	2668	0.000357	2.429418	0.000147
	6 days	2643	0.000528	2.429149	0.000217
	27 days	2538	0.002062	2.426808	0.000850
	33 days	2523	0.007395	2.418622	0.003057
	43 days	2508	0.002217	2.426610	0.000913
	84 days	2478	0.002813	2.425749	0.001160
Improved soil sample 8 with 1% lime (As concentration : 6.05 mg/kg)	1 day	2688	0.000579	6.049050	0.000096
	3 days	2668	0.000592	6.049037	0.000098
	6 days	2643	0.000632	6.048981	0.000105
	27 days	2538	0.001815	6.047191	0.000300
	33 days	2523	0.008329	6.037185	0.001380
	43 days	2508	0.002715	6.045847	0.000449
	84 days	2478	0.003517	6.044686	0.000582

Table 14. Parameter used for calculation of As extraction amount in column experiments

Area of column	268.8 cm ²
Volume of solution above soil surface	2.688 liter
Soil wet bulk density	1.38 kg/m ³
Extraction concentration of As during 91 days for soil sample 5	0.55622mg/L (0.55922mg/L - 0.003mg/L)
Extraction concentration of As during 91 days for soil sample 6	0.21463mg/L (0.21763mg/L - 0.003mg/L)
Extraction concentration of As during 83 days for soil sample 7	0.00254mg/L (0.00281mg/L - 0.00027mg/L)
Extraction concentration of As during 83 days for soil sample 8	0.00294mg/L (0.00352mg/L - 0.00058mg/L)

7.4. 강수에 의해 오염토양 하부로 침출되는 비소 및 중금속 침투모사실험 결과

냄 건설 후 저수지 상부에 위치하는 비 수몰지역 오염 농경지토양의 복원으로 생석회를 첨가한 복토법이 실시될 경우 오염토양으로부터 강수에 의해 하부로 용출되는 비소량을 규명하기 위하여, 약 4년 동안의 강수량에 해당하는 인공강수를 칼럼 상부로부터 주입하여 오염토양 하부로 용출되는 용액내의 비소 및 중금속량을 측정하였다. 생석회를 첨가하지 않고 오염된 토양만 있는 칼럼과 0.5%, 5%의 생석회가 첨가된 복토법을 실시한 칼럼으로부터 강수에 의해 배출되는 용액의 농도 값을 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 12.1~12.3에 나타내었다. 실험에서 칼럼상부로부터 1회 주입되는 용액의 양은 실제 연구지역의 한 달 동안의 평균 강수량을 의미하며, 주입 후 칼럼하부로 배출된 용액의 중금속농도는 한 달 동안 오염토양으로부터 용출되어 하부로 침투되어지는 비소 및 중금속의 농도를 의미한다. 복토를 하지 않은 칼럼의 경우 오염토양 상부로 용액주입 후 3달 정도가 지나면 비소의 하부침투농도가 일정하게 유지됨을 알 수 있었고, 실험이 종료되는 약 4년 동안 한 달에 약 $63.2 \mu\text{g/l}$ 의 농도로 지속적인 비소의 토양하부침투가 이루어짐을 알 수 있었다. 오염토양 상부에 0.5%의 생석회를 첨가한 비오염토로 복토한 모사칼럼실험의 경우 비소의 하부침투농도는 약 3달 후에 일정한 농도값을 보였고, 약 $79.59 \mu\text{g/l}$ 의 평균농도로 오염토양 하부로의 비소용출이 이루어짐을 알 수 있었다. 5%의 생석회로 복토를 실시한 컬럼은 비소의 불용화효과가 상당히 좋은 것으로 나타났다. 다른 컬럼의 실험결과와 비슷한 경향으로 3달 정도에 비소의 침투 농도가 일정하게 유지되지만, 1년 정도가 지나면서 비소의 농도가 평형농도의 3배정도로 급격히 감소됨을 볼 수 있었고, 이후 1년 6개월부터는 $10 \mu\text{g/l}$ 이하의 아주 낮은 농도를 보였다. 이것은 생석회에 의한 비소의 불용화에 의한 것으로 사료되며, 연구지역의 오염토양의 복원법이 적절함을 증명하고 있다(Fig. 12.1). 연구지역의 복원에 있어 생석회의 첨가비율결정은 0.5%이상~5%이하의 비율로 더 많은 실험을 실시한 후 적절한 비율을 선택해야 될 것으로 판단된다. Cd, Pb의 침투농도는 5%의 생석회로 복토를 실시한 칼럼에서 초기에 $0.2 \mu\text{g/l}$, $1 \mu\text{g/l}$ 이하의 아주 낮은 농도로 안정화되나, 복

토를 실시하지 않은 토양의 경우도 시간의 지나면서 침투농도가 낮아져 생석회로 복원한 토양과 큰 차이를 보이지 못했으며, 이러한 결과는 토양 시료 내 Cd과 Pb의 농도가 비교적 작아서 생석회의 효과가 두드러지게 나타나지 않은 것으로 판단된다. 약 4년 동안의 자료에 해당하는 비소 및 중금속에 대한 침투모사실험결과를 부록의 Table 4.1~4.3에 나타내었다.

복토를 하지 않은 컬럼과 0.5%의 생석회로 복토된 컬럼의 하부로 배출되는 용액은 실험이 종료될 때까지 pH 6~8정도로 중성의 값을 보였으나, 5%의 생석회가 첨가된 컬럼의 pH는 용액 주입 후 7달 정도는 중성의 pH값을 유지하지만 이 후 토양의 완충능력 이상의 OH^- 가 유입되면서 갑자기 증가하기 시작하고, 10달부터는 pH 12~13의 값을 계속적으로 유지하였다.

Eh값은 5%의 생석회가 첨가된 컬럼에서 초기 200mV의 산화상태에서 계속적으로 감소하여 1년 정도가 지난 후에 -20mV~-30mV의 환원상태의 값으로 변화하는 양상을 보였다. 이 값의 변화양상은 pH가 증가하는 양상과 일치하며, 일반적인 산화-환원반응에서 두 변수(Eh, pH)의 관계를 잘 보여주었다(G. Nelson Eby, 2004). 나머지 두 컬럼에서의 Eh값은 100mV~300mV의 산화상태의 값을 계속 유지하였다. 실험에 사용된 컬럼으로부터 하부로 배출된 용액의 pH와 Eh의 변화양상을 Fig. 13에 나타내었다.

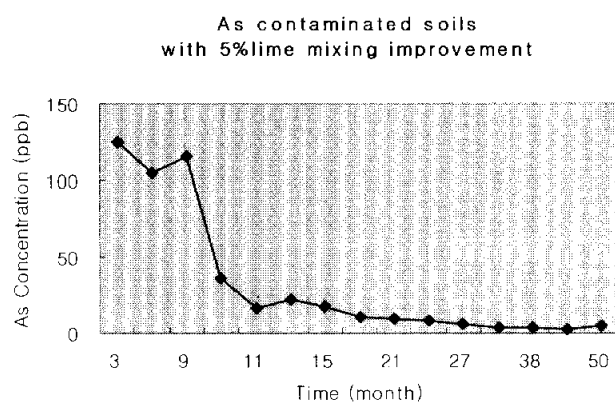
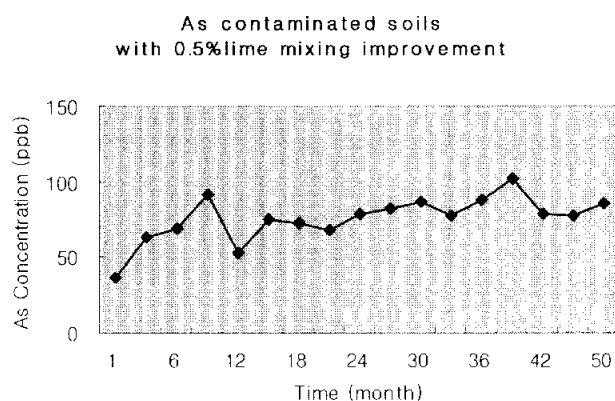
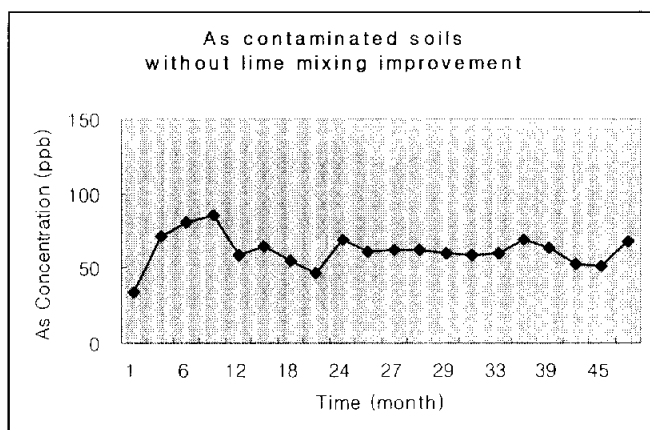


Fig. 12.1. The Infiltrated trend of As downward As contaminated soils.

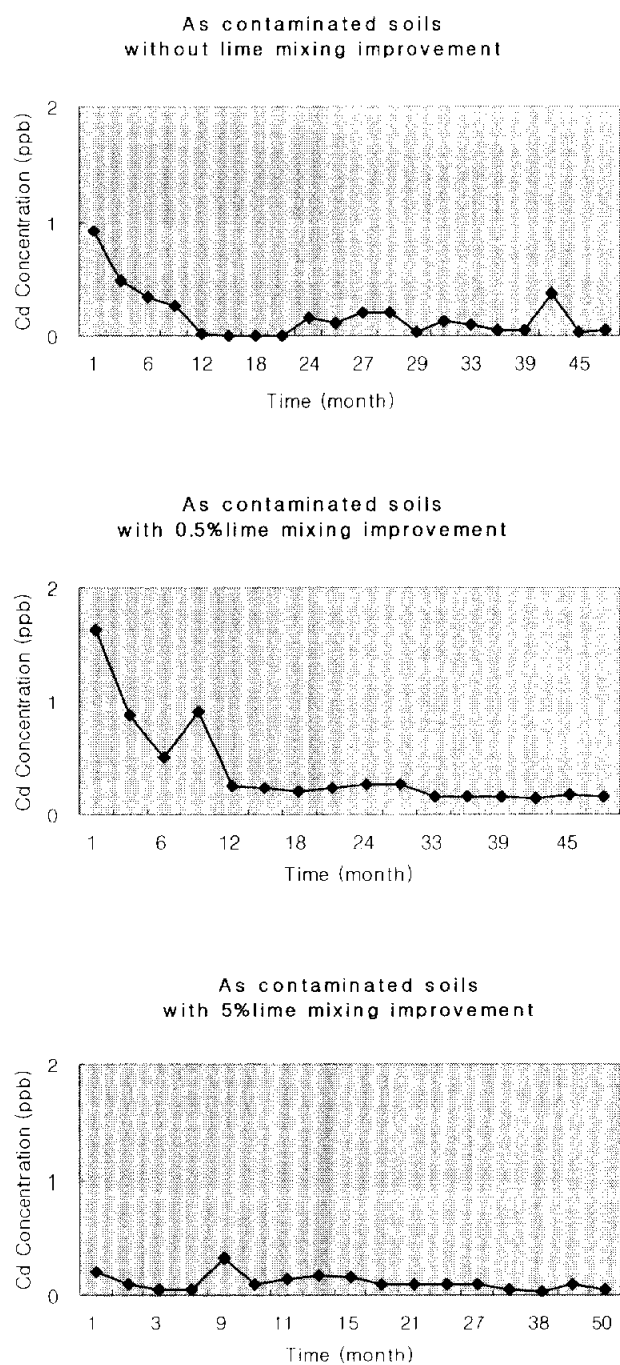


Fig. 12.2. The Infiltrated trend of Cd downward As contaminated soils.

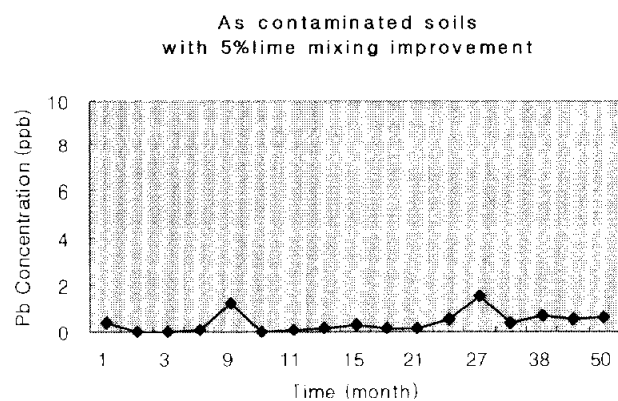
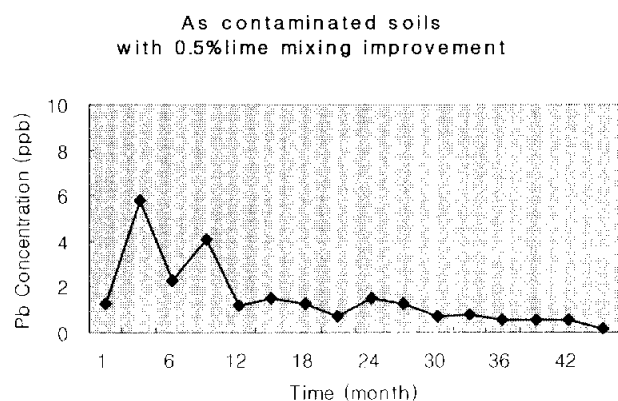
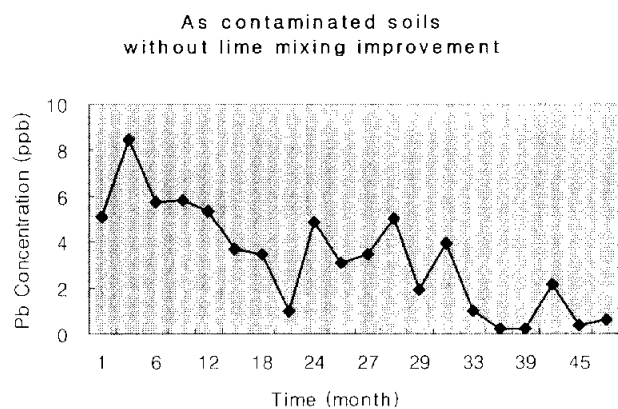


Fig. 12.3. The Infiltrated trend of Pb downward As contaminated soils.

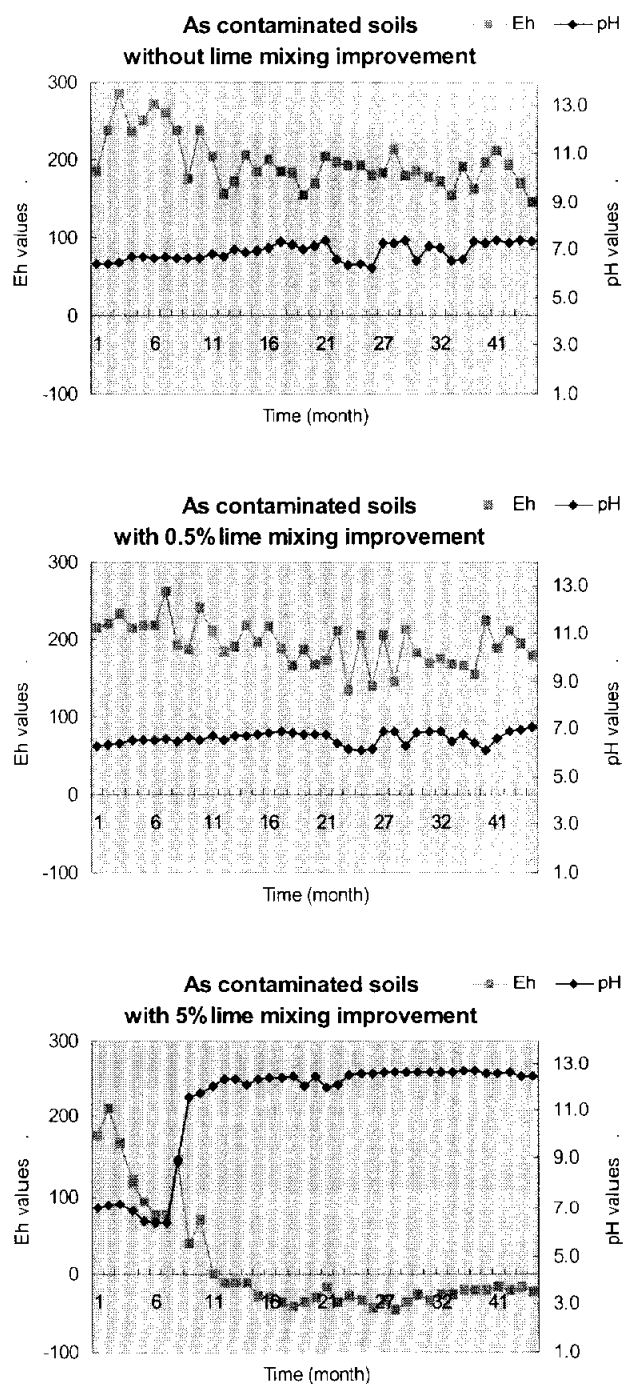


Fig. 13. The variations of Eh & pH in discharged solution from As contaminated soils.

8. 결론

비소로 오염된 고로폐광산 주변 농경지토양의 토양정밀조사와 생식회를 첨가한 토양복토법의 효율실험 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 고로 폐광산지역의 농경지토양에 대한 본 연구논문은 그 규모면에서 국내 최초의 대규모 토양정밀조사라는 점과, 총 577개 토양시료의 조사 결과에 따라 오염농도의 분포 특성 및 복원대상 규모를 명확히 제시하였다는데 큰 의미가 있다.
- (2) 연구지역 농경지토양의 토양정밀조사 결과, 카드뮴, 납, 구리는 모든 지점에서 토양오염우려기준이하의 농도값을 보였으나, 비소의 경우 토양오염우려기준농도인 6mg/kg을 초과하는 시료가 표토 평균 18.1%, 심토 평균 8.9%로 비소에 의한 오염이 심각한 것으로 나타났다. 그러나 심토의 경우 전체 샘플 시료 중 토양 오염대책기준을 초과하는 시료가 없어 본 정밀 조사 지역의 비소에 대한 오염이 대부분 0~30cm에 제한되어 있음을 알 수 있었다.
- (3) 오염된 농경지토양의 복원 목표를 토양오염우려기준, 우려기준의 40%, 배경치 농도로 구분하여 각 각 복원 면적 및 물량을 산출하였다. 토양오염우려기준 농도를 복원목표로 설정할 경우는 230000m², 69000m³의 복원면적과 물량이 산출되었고, 우려기준의 40%농도이상의 경우 총 복원면적과 물량은 598000m², 179400m³이었고, 배경치 농도 이상을 복원목표를 설정할 경우는 780300m², 234090m³이었다. 댐 건설 후 생성되는 저수지 수질의 안정성 확보 차원에서 비교적 물량차이가 적은 토양오염우려기준의 40%농도나 배경치 농도를 복원기준 농도로 설정하는 것이 합리적일 것으로 판단되었다.
- (4) 토양오염정밀조사결과 농경지토양이 비교적 낮은 비소 농도로 광범위하게 오염되어있는 연구지역의 특성과 하천 하류에 댐 건설시 저수지 수제로의 비소 용출 및 유입을 최소화해야 되는 여건을 고려하여, 폐광산 주변 오염된 농경지 토양의 복원기술로 생식회가 첨가된 토양복토법을 선정하였다.

(5) 비소로 오염된 농경지 토양에 0%, 1%, 2%, 5%의 생석회를 첨가하여 생석회 함량에 따른 비소 및 중금속의 용출정도를 규명하기 위한 배치실험결과, 토양의 물리·화학적 특성 차이에 따라 사용된 토양샘플의 K_{df} 값은 차이를 보이지만, 오염토양에 생석회를 첨가함에 따라 오염토양으로부터의 비소 및 중금속 용출 억제효과는 매우 높게 나타났다. 연구지역의 오염 농경지토양 복원법으로 생석회를 첨가한 복토법이 시행 시 순수 생석회에 의한 오염중금속의 용출억제효과와 비오염토인 복토에 의한 희석효과로 인해, 배치실험결과 이상으로 비소 및 중금속의 농도저감 및 용출률 감소효율을 볼 수 있을 것으로 판단되었다.

(6) 댐 건설 후 수몰지역 저수지 하부의 환원상태를 모사한 대형칼럼실험에서, 석회를 첨가한 칼럼의 경우 1년 동안 초기 비소함량에 대한 비소 용출률은 0.05%, 0.11%로 복토를 실시하지 않은 토양의 비소 용출률인 3.05%, 3.89%에 비해 약 40배 이상 감소함에 따라 수몰된 지역의 오염된 농경지토양의 복원으로 석회를 첨가한 복토법이 오염토양으로부터 저수지수계로의 비소용출을 감소시키는 적절한 방법임을 확인할 수 있었다. 강수에 의해 비 수몰지역의 오염 농경지 토양 하부로 침출되는 비소 및 중금속의 침투모사실험결과, 5%의 생석회로 복토를 실시한 칼럼에서 비소의 불용화효과가 상당히 좋은 것으로 나타나, 오염 토양으로부터 하부로의 비소 용출률은 생석회가 첨가된 복토 실시 후 상당한 저감효율을 볼 수 있을 것으로 사료되며, 비소로 오염된 비수몰지역의 농경지토양 복원에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

(7) 본 연구논문은 연구지역과 유사한 폐광산 주변 오염 농경지토양의 복원에 중요한 자료로 사용될 수 있을 것으로 사료되며, 실제 현장에서 생석회가 첨가된 토양복토법이 최적의 복원효율과 경제성을 갖추기 위해서는 생석회의 함량을 0.5% ~ 5%로 조정하여 더 많은 실험이 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

국립환경연구원, 2001, 비소측정방법

김선태·윤양의·박제안·심의섭, 1999, 진곡광산 광미와 주변 토양의 오염조사, 한국토양환경회지 Vol.4, No.2 175~183.

김선태·윤양의·박제안·심의섭·박경수, 1998, 임천광산 광미와 주변 토양 및 지하수의 오염조사, 한국토양환경회지 Vol.3, No.2 33~44.

김선태·임유리·박경수·정진호, 2000, 수소화불 발생-유도결합 플라즈마 원자 방출 분광법을 이용한 폐광산 광미 시료 중의 As(3+)와 As(5+)의 동시 정량, Analytical science & technology Vol.13, No.2.

박용하·이승희, 1995, 토양환경보전을 위한 오염방지기준 및 관리대책, 한국환경 기술개발원.

시영진·김찬용·박 만·이동훈·최충렬·김광섭·최 정, 2002, 폐광산 인근 논토양과 수도의 비소함량 조사, J.Korean Soc. Agric. Chem. Biotechno. 45(3), 152~156.

이민희·이정산·차종철·최정찬·이정민, 2004, 토양 세척법과 석회를 첨가한 토양 안정화 공법을 이용한 폐광산 주변 비소 오염토양 및 하천 퇴적토 복원, 자원환경지질 제 37권 1호.

이민희·최정찬·김진원, 2003, 고로폐광산 주변 농경지 토양 및 하천 퇴적토의 중금속 오염 분포 및 복원대책 설계, 자원환경지질 제 36권 제2호.

이정산, 2004, 비소로 오염된 폐광산 주위 하천퇴적토의 오염특성 규명과 토양세척법을 이용한 복원, 부경대학교 대학원 석사학위논문

이호민·윤은경·최시내·박송자·황경업·조성용·김선태, 1998, 폐광산 지역의 비소오염에 대한 복원목표 설정, 한국토양환경학회지 Vol.3, No.2 13~29.

자원개발연구소, 1997·1980, 한국지질도 구산동·신령 도폭(1:50,000).

전관수·이철희·원양수·신덕구·정진욱·박병삼, 1999, 금정폐광산 주변환경의 중금속 농도 분포, 한국환경공학회지 Vol.21, No.10, pp.1945~1958.

전관수·이철희·원양수·정진욱·박병삼·신덕구, 1999, 폐광산 주변 토양 및 하천의 중금속 함량, 한국환경과학회지 제8권(제2호), 197~204.

전효백·안주성·오석영·제현국·윤정섭, 2001, Arsenic geochemistry in ground water, 환경지질연구센터.

강운주, 2004, 고로폐광산 ARD(Acid Rock Drainage)의 비소 제거 효율성에 대한 실험적 연구, 부경대학교 대학원 석사학위논문

차종철·이정산·이민희, 2003, 토양 정밀 조사에 의한 고로폐광산 주변 비소오염 주변 비소오염 토양 및 하천퇴적토의 오염도 평가 및 오염 토양 복원 규모 설정, 자원환경지질 제 36권 6호.

한국수자원공사, 2002, 화북댐 건설사업 환경영향평가서, 187~208.

한국수자원공사, 2003, 화북댐 유역 및 고로폐광산 토양오염 복원대책 수립 연구.

한국지질자원연구원(<http://geoinfo.kigam.re.kr/>), 2004, 구산동·신령 지질도폭.

환경부 토양보전과, 2000, 토양오염관리의 규제현황과 규제 방향

환경부, 2001, 토양정밀조사지침, 환경부고시 제2001-186호.

환경부, 2002, 토양오염공정시험방법, 131~148.

황은하 · 위수민 · 이평구 · 최상훈, 2000, 서성 연-아연광산 주변 농경지 토양의 중금속 오염 연구, 한국토양환경학회지 Vol.5, No.2 67~85.

Carlo Vandecasteele · Veronika Dutre · Daneel Geysen · Guido Wauters, 1995, Solidification/stabilisation of arsenic bearing fly ash from the metallurgical industry. Immobilisation mechanism of arsenic, Waste Management 22(2002) 143~146.

EPA, 2002, Arsenic Treatment Technologies for Soil, Waste, and Water,

G. Nelson Eby, 2004, Principles of Environmental Geochemistry, 94~128.

M.G.M. Alam · S.Tokunaga · T.Maekawa, 2001, Extraction of arwenic in a synthetic arsenic-contaminated soil using phoshate, Chemosphere 43(2001) 1035-1041.

Myoung-Jin Kim · Kyu-Hong Ahn · Yejin Jung, 2002, Distribution of inorganic arsenic species in mine tailings of abandoned mines from Korea, Chemosphere 49(2002), 307~312.

P.L. Smedley · D.G. Kinniburgh, 2002, A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters, Applied Geochemistry 17(2002), 517~568.

Veronika Dutre • Carlo Vandecasteele, 1995, Solidification/stabilisation of arsenic-containing waste: leach tests and behaviour of arsenic in the leachate, Waste Management, Vol.15, No.1, pp.55~62.

Veronika Dutre • Carlo Vandecasteele, 1995, Solidification/stabilisation of hazardous arsenic containing waste from a copper refining process, Journal of Hazardous Materials 40(1995) 55~68.

Veronika Dutre • Carlo Vandecasteele, 1996, An evaluation of the solidification/stabilisation arsenic containing waste using extraction and semi-dynamic leach tests, Waste Management, Vol.16, No.7, pp.625~631.

Veronika Dutre • Carlo Vandecasteele, 1999, Oxidation of arsenic bearing fly ash as pretreatment before solidification, Journal of Hazardous Materials B68(1999) 205~215.

William R. Cullen • Kenneth J. Reimer, 1989, Arsenic Speciation in the Environment, Chemical Reviews, Vol. 89, No 4, 713~764.

요 약

경북 군위군 고로면 석산리에 위치한 고로 폐광산으로부터 폐광산과 연결된 주 하천을 따라 연장 12km되는 하천 하류의 댐건설 예정지까지 형성된 농경지 토양을 대상으로 토양정밀조사지침에 의한 토양정밀조사를 실시하여 오염 분포특성과 오염 규모를 규명하고, 오염된 토양의 복원 방법 및 복원 효율을 제시하였다.

토양정밀조사 결과 비소를 제외한 카드뮴, 납, 구리의 농도는 토양오염우려기준보다 매우 낮게 나타나, 연구지역의 주 오염물은 비소로 나타났다. 연구지역의 농경지 토양 표토의 비소농도는 토양오염우려기준농도인 6mg/kg을 초과하는 시료가 표토 평균 18.1%, 심토 평균 8.9%로 비소에 의한 오염이 심각한 것으로 나타났다. 그러나 농경지토양 심토의 경우 전체 샘플 시료 중 토양오염대책기준(15mg/kg)을 초과하는 시료가 없어 본 정밀 조사 지역의 비소에 대한 오염이 0~30cm에 제한되어 있음을 알 수 있었다. 토양정밀조사를 바탕으로 복원등급을 토양오염우려기준, 우려기준의 40%, 배경치 농도로 구분하여 비소에 대한 오염지도를 작성하고, 작성된 오염지도로부터 오염된 농경지토양의 면적과 물량을 산출하여 연구지역의 복원규모를 설정하였다. 토양오염우려기준 농도를 복원목표로 설정할 경우는 230000m², 69000m³의 복원면적과 물량이 산출되었고, 우려기준의 40%농도이상의 경우 총 복원면적과 물량은 598000m², 179400m³이었으며, 배경치 농도 이상을 복원목표를 설정할 경우는 780300m², 234090m³로 나타났다. 따라서 댐 건설 후 생성되는 저수지 수질의 안정성 확보 차원에서 비교적 복원물량차이가 적은 토양오염우려기준의 40%농도나 배경치 농도를 복원 기준 농도로 설정하는 것이 합리적인 것으로 판단되었다.

토양오염정밀조사결과 농경지토양이 비교적 낮은 비소 농도로 광범위하게 오염되어있는 연구지역의 특성과 하천 하류에 댐 건설시 저수지 수계로의 비소 용출 및 유입을 최소화해야 되는 여건을 고려하여, 폐광산 주변 오염된 농경지토양의 복원 기술로 생석회가 첨가된 토양복토법을 선정하였고, 첨가된 생석회에 의한 비소의

불용화 효율(복원효율)을 규명하기 위해 댐 건설 후 형성되는 수몰지역과 비 수몰 지역을 모사한 칼럼실험과 배치실험을 실시하였다.

비소농도가 88.2mg/kg, 41.1mg/kg인 토양에 0%, 1%, 2%, 5%의 생석회를 첨가하여 생석회 함량에 따른 비소 및 중금속의 용출정도를 규명하기 위한 배치실험결과 토양의 물리·화학적 특성 차이에 따라 토양샘플의 K_{df} 값은 차이를 보이지만, 오염토양에 생석회를 첨가함에 따라 오염토양으로부터의 비소 및 중금속 용출억제 효과가 매우 높게 나타남을 알 수가 있었다. 연구지역의 오염 농경지토양 복원법으로 생석회를 첨가한 복토법이 시행된다면, 순수 생석회에 의한 오염중금속의 용출 억제효과와 비오염토인 복토에 의한 희석효과로 인해, 배치실험결과 이상으로 비소 및 중금속의 농도저감 및 용출률 감소효율을 볼 수 있을 것으로 판단되었다.

댐 건설 후 수몰지역 저수지 하부의 환원상태를 모사한 대형칼럼실험에서, 석회를 첨가한 칼럼의 경우 1년 동안 초기 비소함량에 대한 비소 용출률은 0.05%, 0.11%로 복토를 실시하지 않은 토양의 비소 용출률인 3.05%, 3.89%에 비해 약 40배 이상 감소함에 따라 수몰된 지역의 오염된 농경지 복원으로 석회를 첨가한 복토법이 오염토양으로부터 저수지 수계로의 비소용출을 감소시키는 적절한 방법임을 확인할 수 있었다. 또한 강수에 의해 비 수몰지역의 오염 농경지토양 하부로 침출되는 비소 및 중금속의 침투모사실험결과 5%의 생석회로 복토를 실시한 칼럼에서 비소의 불용화 효과가 상당히 좋은 것으로 나타나 오염 토양으로부터 하부로의 비소 용출률은 생석회가 첨가된 복토 실시 후 상당한 저감효율을 볼 수 있을 것으로 사료되며 비소로 오염된 비수몰지역의 농경지 토양 복원에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 판단되었다.

본 연구과정은 한 폐광산에 대하여 복원을 전제로 실시된 국내 최초의 대규모 토양정밀조사라는데 큰 의미가 있으며, 연구지역과 유사한 폐광산 주변 오염 농경지 토양의 복원에 중요한 자료로 사용될 수 있을 것이다.

APPENDIX

Table 1. The results of batch test for deciding partitioning coefficient(K_{df}) of As

Soil samples	pH	Sampling time (min.)	partitioning coefficient K_{df} (kg/ ℓ)	As con. in initial soils (mg/kg)
1	1	30	0.006063	14.121
		120	0.009652	
		720	0.025857	
		1440	0.144429	
		4320	-	
		7200	1.948122	
	3	30	0.006458	
		120	0.000740	
		720	0.000635	
		1440	0.000809	
		4320	0.006561	
		7200	0.000452	
	5	30	0.000549	
		120	0.000545	
		720	0.000650	
		1440	0.000954	
		4320	0.006698	
		7200	0.006060	
	7	30	0.000392	
		120	0.005646	
		720	0.000614	
		1440	0.000834	
		4320	0.008581	
		7200	0.006622	
2	1	30	0.000464	88.201
		120	0.000644	
		720	0.001155	
		1440	0.001466	
		4320	0.003321	
		7200	0.002241	
	3	30	0.000163	
		120	0.000172	
		720	0.000234	
		1440	0.000352	
		4320	0.001044	
		7200	0.001147	
	5	30	0.000839	
		120	0.000112	
		720	0.000187	
		1440	0.000275	
		4320	0.001489	
		7200	0.000337	

<Table 1>

continued

Soil samples	pH	Sampling time (min.)	partitioning coefficient K _{df} (kg/ℓ)	As con. in initial soils (mg/kg)
2	7	30	0.000089	88.201
		120	0.000105	
		720	0.000214	
		1440	0.000241	
		4320	0.001269	
		7200	0.001214	
3	1	30	0.003591	11.070
		120	0.008856	
		720	0.023053	
		1440	0.064394	
		4320	0.137558	
		7200	-	
	3	30	0.000724	
		120	0.001216	
		720	0.001937	
		1440	0.002415	
		4320	0.006840	
		7200	0.004076	
	5	30	0.000578	
		120	0.001021	
		720	0.001672	
		1440	0.002349	
		4320	0.007124	
		7200	0.003693	
	7	30	0.001972	
		120	0.000760	
		720	0.001692	
		1440	0.002520	
		4320	0.004741	
		7200	0.005157	
4	1	30	0.007095	48.920
		120	0.029123	
		720	0.097668	
		1440	-	
		4320	-	
		7200	-	
	3	30	0.000926	
		120	0.001234	
		720	0.001276	
		1440	0.002087	
		4320	0.002853	
		7200	0.001144	

<Table 1>

continued

Soil samples	pH	Sampling time (min.)	partitioning coefficient K _{df} (kg/ℓ)	As con. in initial soils (mg/kg)
4	5	30	0.001757	48.920
		120	0.000639	
		720	0.001112	
		1440	0.001289	
		4320	0.003388	
		7200	0.003590	
	7	30	0.001165	
		120	0.001973	
		720	0.000953	
		1440	0.001328	
		4320	0.002912	
		7200	0.001613	
5	1	30	0.022232	24.290
		120	0.058014	
		720	0.299618	
		1440	-	
		4320	-	
		7200	-	
	3	30	0.004522	
		120	0.002173	
		720	0.003280	
		1440	0.004171	
		4320	0.009210	
		7200	0.007951	
	5	30	0.001404	
		120	0.002318	
		720	0.003011	
		1440	0.004291	
		4320	0.010772	
		7200	0.008141	
	7	30	0.001572	
		120	0.002777	
		720	0.003752	
		1440	0.004960	
		4320	0.009557	
		7200	0.009482	

Table 2. Results of batch extraction experiment for quick-lime effect

	Extraction time	As in soil sample		Partitioning coefficient (K_{df} : kg/l)	pH in extration solution
		Initial soil concentration (mg/kg)	Extraction concentration (mg/kg)		
Soil sample 1 (Pure water of pH7)	2 hours	88.2	0.172675	0.000078	6.82
	1 day	88.2	0.486401	0.000226	6.91
	3 days	88.2	0.804864	0.000384	6.80
	5 days	88.2	0.864838	0.000421	6.79
Soil sample 1 with lime 1%	2 hours	88.2	0.176346	0.000079	10.83
	1 day	88.2	0.245119	0.000113	11.21
	3 days	88.2	0.378795	0.000178	10.98
	5 days	88.2	0.480005	0.000231	11.02
Soil sample 1 with lime 2%	2 hours	88.2	0.130130	0.000058	11.11
	1 day	88.2	0.079625	0.000036	11.53
	3 days	88.2	0.134824	0.000063	11.52
	5 days	88.2	0.153829	0.000073	11.65
Soil sample 1 with lime 5%	2 hours	88.2	0.020771	0.000009	11.51
	1 day	88.2	0.044367	0.000020	11.87
	3 days	88.2	0.066589	0.000031	11.95
	5 days	88.2	0.070871	0.000033	12.12
Soil sample 2 (Pure water of pH7)	2 hours	41.1	0.575788	0.000569	6.55
	1 day	41.1	2.702093	0.002875	6.60
	3 days	41.1	4.644408	0.005313	6.39
	5 days	41.1	4.958500	0.005843	6.44
Soil sample 2 with lime 1%	2 hours	41.1	0.768667	0.000755	10.63
	1 day	41.1	3.018202	0.003205	10.77
	3 days	41.1	3.399382	0.003722	10.29
	5 days	41.1	4.453604	0.005124	9.94
Soil sample 2 with lime 2%	2 hours	41.1	1.130462	0.001110	10.93
	1 day	41.1	1.310598	0.001319	11.36
	3 days	41.1	1.595782	0.001651	11.27
	5 days	41.1	1.679214	0.001778	11.32
Soil sample 2 with lime 5%	2 hours	41.1	0.160513	0.000149	11.25
	1 day	41.1	0.168336	0.000160	11.83
	3 days	41.1	0.125179	0.000121	11.81
	5 days	41.1	0.142215	0.000140	11.98

<Table 2>

continued

	Extraction time	Cd in soil sample		Partitioning coefficient (K_{dt} : kg/l)	pH in extration solution
		Initial soil concentration (mg/kg)	Extraction concentration (mg/kg)		
Soil sample 1 (Pure water of pH7)	2 hours	0.013	—	—	6.82
	1 day	0.013	—	—	6.91
	3 days	0.013	—	—	6.80
	5 days	0.013	—	—	6.79
Soil sample 1 with lime 1%	2 hours	0.013	—	—	10.83
	1 day	0.013	—	—	11.21
	3 days	0.013	—	—	10.98
	5 days	0.013	—	—	11.02
Soil sample 1 with lime 2%	2 hours	0.013	—	—	11.11
	1 day	0.013	—	—	11.53
	3 days	0.013	—	—	11.52
	5 days	0.013	—	—	11.65
Soil sample 1 with lime 5%	2 hours	0.013	—	—	11.51
	1 day	0.013	—	—	11.87
	3 days	0.013	—	—	11.95
	5 days	0.013	—	—	12.12
Soil sample 2 (Pure water of pH7)	2 hours	0.099	—	—	6.55
	1 day	0.099	—	—	6.60
	3 days	0.099	—	—	6.39
	5 days	0.099	—	—	6.44
Soil sample 2 with lime 1%	2 hours	0.099	—	—	10.63
	1 day	0.099	—	—	10.77
	3 days	0.099	—	—	10.29
	5 days	0.099	—	—	9.94
Soil sample 2 with lime 2%	2 hours	0.099	—	—	10.93
	1 day	0.099	—	—	11.36
	3 days	0.099	—	—	11.27
	5 days	0.099	—	—	11.32
Soil sample 2 with lime 5%	2 hours	0.099	—	—	11.25
	1 day	0.099	—	—	11.83
	3 days	0.099	—	—	11.81
	5 days	0.099	—	—	11.98

<Table 2>

continued

	Extraction time	Pb in soil sample		Partitioning coefficient (K_{df} : kg/l)	pH in extration solution
		Initial soil concentration (mg/kg)	Extraction concentration (mg/kg)		
Soil sample 1 (Pure water of pH7)	2 hours	0.419	0.06189	0.006932	6.82
	1 day	0.419	0.03016	0.003166	6.91
	3 days	0.419	0.06545	0.007714	6.80
	5 days	0.419	0.07114	0.008702	6.79
Soil sample 1 with lime 1%	2 hours	0.419	—	—	10.83
	1 day	0.419	—	—	11.21
	3 days	0.419	—	—	10.98
	5 days	0.419	—	—	11.02
Soil sample 1 with lime 2%	2 hours	0.419	—	—	11.11
	1 day	0.419	—	—	11.53
	3 days	0.419	—	—	11.52
	5 days	0.419	—	—	11.65
Soil sample 1 with lime 5%	2 hours	0.419	—	—	11.51
	1 day	0.419	0.00445	0.000425	11.87
	3 days	0.419	—	—	11.95
	5 days	0.419	—	—	12.12
Soil sample 2 (Pure water of pH7)	2 hours	4.131	0.06356	0.000625	6.55
	1 day	4.131	0.04335	0.000433	6.60
	3 days	4.131	0.05319	0.000543	6.39
	5 days	4.131	0.04317	0.000449	6.44
Soil sample 2 with lime 1%	2 hours	4.131	0.00230	0.000022	10.63
	1 day	4.131	0.02500	0.000246	10.77
	3 days	4.131	0.02979	0.000300	10.29
	5 days	4.131	0.04146	0.000427	9.94
Soil sample 2 with lime 2%	2 hours	4.131	0.00324	0.000031	10.93
	1 day	4.131	—	—	11.36
	3 days	4.131	0.00138	0.000014	11.27
	5 days	4.131	—	—	11.32
Soil sample 2 with lime 5%	2 hours	4.131	—	—	11.25
	1 day	4.131	—	—	11.83
	3 days	4.131	—	—	11.81
	5 days	4.131	—	—	11.98

Table 3.1. The result of physically simulated column experiment for Cd extraction

Soil sample	Sampling time	Solution volume in column (ml)	C _w (mg/l)	C _s (mg/kg)	Extraction partitioning coefficient (K _{df} : kg/l)
Soil sample 5 (Cd concentration : 0.03 mg/kg)	12 hours	2688	0.00000	0.03000	0.00000
	1 day	2678	0.00000	0.03000	0.00000
	2 days	2668	0.00000	0.03000	0.00000
	3 days	2658	0.00000	0.03000	0.00000
	4 days	2648	0.00000	0.03000	0.00000
	5 days	2638	0.00000	0.03000	0.00000
	6 days	2628	0.00000	0.03000	0.00000
	10 days	2588	0.00003	0.02998	0.00087
	19 days	2518	0.00018	0.02987	0.00613
	28 days	2473	0.00006	0.02996	0.00198
	35 days	2428	0.00022	0.02985	0.00721
	41 days	2413	0.00025	0.02983	0.00832
	51 days	2398	0.00029	0.02980	0.00987
	92 days	2368	0.00007	0.02995	0.00250
Soil sample 6 (Cd concentration : 0.01 mg/kg)	12 hours	2688	0.00000	0.01000	0.00000
	1 day	2678	0.00000	0.01000	0.00000
	2 days	2668	0.00000	0.01000	0.00000
	3 days	2658	0.00000	0.01000	0.00000
	4 days	2648	0.00000	0.01000	0.00000
	5 days	2638	0.00000	0.01000	0.00000
	6 days	2628	0.00000	0.01000	0.00000
	10 days	2588	0.00002	0.00998	0.00206
	19 days	2518	0.00009	0.00994	0.00859
	28 days	2473	0.00007	0.00995	0.00743
	35 days	2428	0.00019	0.00986	0.01954
	41 days	2413	0.00020	0.00986	0.02049
	51 days	2398	0.00031	0.00979	0.03128
	92 days	2368	0.00024	0.00983	0.02452
Improved soil sample 7 with 1% lime (Cd concentration : 0.02 mg/kg)	1 day	2688	0.00002	0.01997	0.00100
	3 days	2668	0.00001	0.01998	0.00065
	6 days	2643	0.00001	0.01998	0.00053
	27 days	2538	0.00003	0.01995	0.00146
	33 days	2523	0.00002	0.01997	0.00089
	43 days	2508	0.00002	0.01998	0.00076
	84 days	2478	0.00007	0.01990	0.00327
Improved soil sample 8 with 1% lime (Cd concentration : 0.01 mg/kg)	1 day	2688	0.00001	0.03998	0.00035
	3 days	2668	0.00003	0.03995	0.00073
	6 days	2643	0.00003	0.03995	0.00075
	27 days	2538	0.00002	0.03997	0.00046
	33 days	2523	0.00002	0.03997	0.00045
	43 days	2508	0.00001	0.03998	0.00035
	84 days	2478	0.00003	0.03996	0.00063

Table 3.2. The result of physically simulated column experiment for Pb extraction

Soil sample	Sampling time	Solution volume in column (ml)	C _w (mg/l)	C _s (mg/kg)	Extraction partitioning coefficient (K _{df} : kg/l)
Soil sample 5 (Pb concentration : 0.09 mg/kg)	12hours	2688	0.00500	0.08610	0.05807
	1 day	2678	0.00000	0.09000	0.00000
	2 days	2668	0.00000	0.09000	0.00000
	3 days	2658	0.00200	0.08846	0.02261
	4 days	2648	0.00000	0.09000	0.00000
	5 days	2638	0.00000	0.09000	0.00000
	6 days	2628	0.00000	0.09000	0.00000
	10 days	2588	0.00000	0.09000	0.00000
	19 days	2518	0.00000	0.09000	0.00000
	28 days	2473	0.00000	0.09000	0.00000
	35 days	2428	0.00332	0.08766	0.03788
	41 days	2413	0.00353	0.08753	0.04032
	51 days	2398	0.00103	0.08928	0.01151
	92 days	2368	0.00066	0.08955	0.00734
Soil sample 6 (Pb concentration : 0.38 mg/kg)	12hours	2688	0.00500	0.37610	0.01329
	1 day	2678	0.00000	0.38000	0.00000
	2 days	2668	0.00000	0.38000	0.00000
	3 days	2658	0.00200	0.37846	0.00528
	4 days	2648	0.00000	0.38000	0.00000
	5 days	2638	0.00000	0.38000	0.00000
	6 days	2628	0.00000	0.38000	0.00000
	10 days	2588	0.00152	0.37886	0.00401
	19 days	2518	0.00000	0.38000	0.00000
	28 days	2473	0.00006	0.37996	0.00015
	35 days	2428	0.00159	0.37888	0.00418
	41 days	2413	0.00067	0.37953	0.00177
	51 days	2398	0.00090	0.37937	0.00237
	92 days	2368	0.00210	0.37856	0.00554
Improved soil sample 7 with 1% lime (Pb concentration : 0.67 mg/kg)	1 day	2688	0.00000	0.67000	0.00000
	3 days	2668	0.00000	0.67000	0.00000
	6 days	2643	0.00000	0.67000	0.00000
	27 days	2538	0.00013	0.66980	0.00020
	33 days	2523	0.00071	0.66891	0.00106
	43 days	2508	0.00001	0.66998	0.00002
Improved soil sample 8 with 1% lime (Pb concentration : 1.94 mg/kg)	84 days	2478	0.00232	0.66650	0.00348
	1 day	2688	0.00000	1.94000	0.00000
	3 days	2668	0.00000	1.94000	0.00000
	6 days	2643	0.00000	1.94000	0.00000
	27 days	2538	0.00004	1.93994	0.00002
	33 days	2523	0.00035	1.93946	0.00018
	43 days	2508	0.00001	1.93998	0.00001
	84 days	2478	0.00061	1.93907	0.00032

Table 4.1. The infiltrated As concentration downward As contaminated soils

As contaminated soils without lime mixing improvement		As contaminated soils with 0.5%lime mixing improvement		As contaminated soils with 5%lime mixing improvement	
Time (month)	Infiltrated As Con. ($\mu\text{g/l}$)	Time (month)	Infiltrated As Con. ($\mu\text{g/l}$)	Time (month)	Infiltrated As Con. ($\mu\text{g/l}$)
1	34.527	1	36.454	1	54.054
3	71.024	3	62.937	2	43.907
6	80.854	6	69.410	3	124.286
9	86.082	9	91.074	6	104.452
12	58.402	12	52.990	9	115.000
15	64.953	15	74.484	10	35.506
18	54.931	18	72.567	11	16.122
21	47.194	21	68.099	12	22.241
24	69.419	24	78.442	15	16.891
26	61.083	27	82.579	18	9.920
27	62.403	30	87.267	21	9.205
28	62.000	33	76.850	24	7.771
29	59.648	36	87.840	27	6.183
31	58.446	39	101.415	32	3.938
33	59.691	42	78.382	38	3.284
36	69.075	45	76.815	44	2.883
39	63.762	50	85.433	50	4.139
42	52.588	–	–	–	–
45	51.360	–	–	–	–
48	67.924	–	–	–	–

Table 4.2. The infiltrated Cd concentration downward As contaminated soils

As contaminated soils without lime mixing improvement		As contaminated soils with 0.5%lime mixing improvement		As contaminated soils with 5%lime mixing improvement	
Time (month)	Infiltrated Cd Con. ($\mu\text{g/l}$)	Time (month)	Infiltrated Cd Con. ($\mu\text{g/l}$)	As contaminated soils with 5%lime	Infiltrated Cd Con. ($\mu\text{g/l}$)
1	0.922	1	1.623	1	0.204
3	0.487	3	0.871	2	0.088
6	0.347	6	0.498	3	0.043
9	0.266	9	0.914	6	0.042
12	0.01	12	0.247	9	0.33
15	0	15	0.241	10	0.09
18	0	18	0.21	11	0.138
21	0	21	0.228	12	0.175
24	0.151	24	0.268	15	0.155
26	0.11	27	0.262	18	0.095
27	0.206	33	0.161	21	0.09
28	0.204	36	0.159	24	0.088
29	0.03	39	0.159	27	0.09
31	0.129	42	0.133	32	0.05
33	0.098	45	0.175	38	0.038
36	0.047	50	0.158	44	0.096
39	0.039	–	–	50	0.052
42	0.368	–	–	–	–
45	0.024	–	–	–	–
48	0.044	–	–	–	–

Table 4.3. The infiltrated Pb concentration downward As contaminated soils

As contaminated soils without lime mixing improvement		As contaminated soils with 0.5%lime mixing improvement		As contaminated soils with 5%lime mixing improvement	
Time (month)	Infiltrated Pb Con. ($\mu\text{g/l}$)	Time (month)	Infiltrated Pb Con. ($\mu\text{g/l}$)	Time (month)	Infiltrated Pb Con. ($\mu\text{g/l}$)
1	5.131	1	1.232	1	0.402
3	8.429	3	5.775	2	0.014
6	5.773	6	2.302	3	0.035
9	5.826	9	4.037	6	0.097
12	5.363	12	1.156	9	1.253
15	3.751	15	1.449	10	0.033
18	3.516	18	1.261	11	0.114
21	1.004	21	0.739	12	0.166
24	4.899	24	1.478	15	0.312
26	3.138	27	1.22	18	0.121
27	3.491	30	0.696	21	0.189
28	5.042	33	0.805	24	0.513
29	1.921	36	0.53	27	1.547
31	3.929	39	0.527	32	0.356
33	0.984	42	0.508	38	0.667
36	0.22	45	0.172	44	0.562
39	0.258	50	0.464	50	0.602
42	2.193	–	–	–	–
45	0.404	–	–	–	–
48	0.595	–	–	–	–

토양 정밀 조사에 의한 폐광산 주변 토양의 오염 부지 특성 규명

차종철, 이정산, 이민희, 최정찬, 김진원*

부산광역시 남구 대연3동 부경대학교 환경지질학과

* 한국수자원공사 댐환경처

geologist@empal.com

요 약 문

광산 및 폐광산으로부터의 오염 및 유해영향에 대한 보고와 관심이 대두되면서 휴·폐광산에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구는 경북 군위군의 고로 폐광산 주변 중 광미 및 광폐석으로 오염된 것으로 생각되어지는 하천 및 농경지에 대한 오염 정도와 분포를 규명하기 위하여 토양정밀조사를 실시하였다. 토양 오염 정밀조사 지침에 따라 총 741개의 토양 시료 분석 결과 Cu, Cd, Pb은 토양 오염 우려 기준에 훨씬 미치지 못하였지만 As는 표토 및 심토 구간(0~30cm)에서 토양 오염 우려 기준농도를 상당 수 초과하여 하천 및 농경지의 복원이 필수적임을 알 수 있었다. 합리적인 복원물량을 산출하기 위하여 배경치 농도(1.23mg/kg), 토양오염우려기준 40%농도(2.4mg/kg), 토양오염우려기준농도(6mg/kg), 토양오염내책기준농도(15mg/kg)별로 오염 등급을 나누어 오염 지도를 작성하고, 각 등급별 복원목표에 따라 복원이 필요한 면적과 복원대상물량을 산출하였다. 본 연구는 오염토양의 복원을 목적으로 국내에서 최초로 실시된 대규모의 토양정밀조사라는 점에서 의미가 있으며, 이 결과는 실제 고로 폐광산지역의 복원 사업설계에 중요한 자료로 사용될 수 있다.

주 요 어 : 폐광산, 광미, 토양오염복원, 토양정밀조사, 비소오염

1. 서론

1995년 토양환경보전법이 제정되고 토양오염 문제에 대한 인식이 확대됨에 따라 90년대 후반에는 휴·폐광산 주변의 토양과 농작물, 하천수에 대한 중금속 오염 연구가 활발히 진행되었다(이효민 외, 1998; 김선태 외, 1998, 1999; 황은하 외, 2000). 그러나 대부분의 연구과정이 광산주변의 오염도를 개략적으로 평가하는데 머물러 광산의 영향으로 인한 오염분포 및 복원규모를 설정하는데 한계가 있었다. 본 연구는 경북 군위군 고로면 석산리에 위치한 고로 폐광산을 중심으로 인근 하천과 농경지 토양의 오염 특성을 규명하고 차후 폐광산과 연결된 주 하천 하부에 댐 건설시 중금속으로 인한 수계 오염을 방지하고자 연구지역내 하천 및 농경지(오염토양)의 복원 대상 물량을 제시하고자 하였다. 고로 폐광산은

1964~1972년에 걸쳐 주 광석광물로 아연을 채광 하였으며, 일부 광폐석이 미처리된 채로 노출되어 홍수 시 광미에 의한 주변 농경지 및 하천의 오염이 있는 것으로 판단되고 있다 (어민희 외, 2003). 현재 생구에서 500m하류 부(과거 제련소 및 광미 침전지)의 부지에 4~5m정도의 콘크리트 옹벽을 치고 뒷채움의 형태로 광미와 광폐석이 현장 배립 되어있다 (한국 수자원 공사, 2003). 2002년 본 연구지역의 개황조사 결과 하천 퇴적토 16개 조사 지점 중 7개, 농경지 토양 11개 조사지점 중 4개에서 비소농도가 SPWL(Soil Pollution Warning Limit)이상으로 나타남에 따라 폐광산 주변 농경지 및 하천의 오염 가능성이 높은 것으로 판단되어 2003년 1월부터 토양 오염 정밀 조사를 시행하였다.

2. 토양 오염 정밀 조사 및 분석

폐광 주변 농경지 및 하천의 오염 특성 및 규모를 설정하기 위하여 사전 개황조사 결과를 바탕으로 하여 문제가 되는 중금속(As, Cu, Cd, Pb)을 중심으로 토양 정밀 조사를 시행하였다. 토양 오염 정밀조사 지침(환경부고시 제2001-186호)에 따라 총 1500m² (30m×50m)면적 당 표토(0~10cm) 1개, 심토(10~30cm)는 표토 3개 지점에 1개씩 채취하였다. 조사구간의 설정은 고로 폐광산을 따라 흐르는 하천과 그 하천을 중심으로 범람 가능성이 있는 좌·우 농경지 지점을 대상으로 하였고 폐광의 영향이 없을 것으로 생각되는 지점으로부터 대조군 샘플을 채취하였다. 연구 지역 내 전체 샘플 수는 741개로 농경지 표토 382개, 심토 135개, 하천은 표토 126개, 심토 38개이며 대조군 시료는 표토 33개, 심토 15개에 대해 조사되었고 연속시료(Geoprobe sample)는 4개이다. 이렇게 조사된 토양 시료들은 토양공정시험법에 의해 비소용 및 기타 중금속용으로 각각 전처리 되어 토양오염분석기관인 한국 수자원공사 수돗물 검사센터에서 ICP/MS, AAS로 분석하였다.

3. 정밀조사 결과분석 및 오염면적·물량 산출

연구 지역인 고로 폐광산 주변지역의 농경지 및 하천에 대한 중금속 오염 농도를 최대, 최소, 평균값으로 나타내어 현 토양 오염 기준과 비교한 결과 Cu, Cd, Pb는 토양오염 우려 기준치인 50, 2, 100 mg/kg을 훨씬 미치지 못하였으나 As의 경우 토양 오염 우려기준인 6mg/kg을 초과하는 시료가 표토 평균 22.95%, 심토 평균 12.35%로 비소에 의한 오염이 심각한 것으로 나타났다. 그러나 심토의 경우 전체 샘플 시료 중 토양 오염 대책기준을 초과하는 시료가 1개로 나타나 본 정밀 조사 지역의 비소에 대한 오염이 0~30cm에 제한되어 있음을 알 수 있었다. 배경치 농도가 1.23mg/kg으로 다소 높게 나타남을 알 수 있었는데 이는 조사 지역 일대의 토양 형성 과정과 일차적으로 관계있을 것으로 사료된다(문희수, 1995). Table 1에서는 전체 조사 샘플들의 복원 규모를 설정하기 위해 오염등급을 배경치 농도(1.23mg/kg), 토양 오염 우려기준 40%농도(2.4mg/kg), 토양 오염 우려기준농도(6mg/kg), 토양 오염 대책기준농도(15mg/kg)로 구분하여 각 등급별로 개수와 백분율로 오염 분포를 나타내어 농경지와 하천에 대한 오염 지도 작성을 위한 기본 등급을 설정하였다.

Table 1. Pollution grade for remediation scale creation

(unit : counts)

		Farmland soil		River deposit	
		Surface soil	Deep soil	Surface soil	Deep soil
I grade	Lower than 1.23 mg/kg	81 (21.2%)	81 (60.0%)	8 (6.3%)	2 (5.2%)
	1.23~2.4 mg/kg	115 (30.1%)	19 (14.1%)	11 (8.7%)	5 (13.2%)
II grade	2.4~6.0 mg/kg	117 (30.6%)	23 (17.0%)	72 (57.2%)	25 (65.8%)
III grade	6.0~15 mg/kg	43 (11.3%)	12 (8.9%)	27 (21.4%)	5 (13.2%)
IV grade	Higher than 15 mg/kg	26 (6.8%)	0 (0.0%)	8 (6.4%)	1 (2.6%)

토양 정밀 조사 결과를 기초로 하여 화북댐 예정지역의 하천과 농경지에 대해 가장 합리적인 복원 면적 및 물량을 산출하기 위해 오염 지도를 작성하였으며 댐 건설 후 수몰지역으로 예상되는 면적을 별도로 산정하여 그 복원 방법 및 복원 규모 설정에 기본이 되는 자료를 Table 2와 Table 3에 나타내었다.

Table 2. Estimation of remediation area based on each grade

Remediation limit	Research area	Contaminated area need to remediation (m ²)		
		River deposit	Farmland soil	Total
Over SPWL	Submerged area	3,200	105,300	108,500
	Non-submerged area	30,800	124,700	155,500
	Total area	34,000	230,000	264,000
Over 40% concentration of SPWL	Submerged area	78,600	252,300	330,900
	Non-submerged area	102,400	345,700	448,100
	Total area	181,000	598,000	779,000
Over background level concentration	Submerged area	83,900	310,300	394,200
	Non-submerged area	105,000	470,000	575,000
	Total area	188,900	780,300	969,200

* SPWL : Soil Pollution Warning Limit

Table 3. Estimation of remediation volume depend on remediation grades

Remediation limit	Soil volume to remediate (m ³)		
	River deposit	Farmland soil	Total
Over SPWL	10,200	69,000	79,200
Over 40% concentration of SPWL	54,300	179,400	233,700
Over background level concentration	56,670	234,090	290,760

* SPWL : Soil Pollution Warning Limit

* Back ground level concentration : 1.23 mg/kg

복원 면적을 기초로 하여, 복원 토양 심도를 30cm로 가정한 복원 물량 산출결과로부터, 토양오염 우려기준농도의 40%이상과 배경치 농도 이상을 복원목표로 선정하는 경우 복원 물량차이가 크지 않음을 알 수 있었다. 따라서 댐 건설 후 수계의 안정성을 확보하기위해서 배경치 농도 이상을 기준으로 하여 복원 규모를 설정하는 것이 가장 합리적이라고 생각되어진다.

4. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

(1) 토양정밀조사 지침에 따라 총 741개의 하천 및 농경지 토양, 대조군, 연속시료를 채취하여 오염 농도와 특성을 규명하였다. 폐광산 주변 오염토양의 복원을 목적으로 실시된 국내 최초의 대규모 토양정밀조사라는 점에서 그 의미가 크다.

(2) 오염 분석결과 Cu, Cd, Pb는 토양 오염 우려기준을 훨씬 미치지 못하였으나 As의 경우 토양 오염 우려기준인 6mg/kg을 초과하는 시료가 표토 평균 22.95%, 심토 평균 12.35%로 비소에 의한 오염이 심각한 것으로 나타났다. 그러나 심토의 경우 전체 샘플 시료 중 토양 오염 대책기준을 초과하는 시료가 1개로 나타나 본 정밀 조사 지역의 비소에 대한 오염이 0~30cm에 제한되어 있음을 알 수 있었다.

(3) 복원 규모를 설정하기 위해 총 4개의 오염 등급으로 구분하여 오염 면적 및 오염 지도를 작성하여 복원 물량을 산출하였다. 특히 토양 오염 우려기준의 40%농도 이상의 복원 면적과 물량은 779,000m², 233,700m³으로 나타나 배경치 농도 이상의 복원 면적과 물량인 969,200m², 290,760m³과 비교 했을 때 물량차이가 많이 나지 않아 배경치 농도를 복원 목표를 설정하는 것이 댐 건설 후 수계의 안정성 확보에 보다 바람직할 것으로 생각되어진다.

5. 참고문헌

- 김선태 외, 인천광산 광미와 주변 토양 및 지하수의 오염 조사, 한국토양환경학회지, Vol.3, No.3 33~44, 1998
- 김선태 외, 진곡광산 광미와 주변 토양의 오염조사, 한국토양환경학회지, Vol.4, No.2 175~183, 1999
- 문희수, 점토광물학, 민음사, pp 615~623, 1995
- 이민희 외, 고로 폐광산 주변 농경지 토양 및 하천 퇴적토의 중금속 오염 분포 및 복원 대책 설계, 자원환경지질, 제36권, 제2호 89~101, 2003
- 이효민 외, 폐광산 지역의 비소오염에 대한 복원목표 설정, 한국토양환경학회지, Vol.3, No.2 13~29, 1998
- 최병순 외, 토양오염개론-부록, 도서출판 동화기술, pp. 263~265, 2001
- 한국 수자원 공사, 화북댐 유역 및 고로폐광산 토양오염 복원대책 수립 연구, 2003
- 한국 수자원 공사, 화북댐 건설사업 환경영향평가서(보완), pp.327~337, 2003
- 환경부, 토양오염 공정시험법, 2003a
- 환경부, 환경부고시 제 2001-186호, 토양정밀 조사지침, 2001
- 황은하 외, 시성 연-아연 광산 주변 농경지 토양의 중금속 오염 연구, 한국토양환경학회지, Vol.5, No.2 67~85, 2000

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

차종철 · 이정산 · 이민희*

부경대학교 환경지질학과

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 m², which was divided into each section of 1500 m² 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 m³, soil volume exceeding 40% of SPWL was about 233,700 m³, and soil volume exceeding the background level(1.23 mg/kg) was 290,760 m³.

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

경상북도 군위군에 위치한 고로 폐아연광산에서 폐광산과 연결된 주 하천을 따라 저수법 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 m² 이고 1,500 m² 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% 정도이었으며, 토양오염대책기준을 초과하는 지점은 34지점으로 전체 표토 조사지점의 6.7% 이상이었으며 조사 지역 중 상당 부분이 비소로 오염되어 있었다. 심토의 경우 토양오염 우려기준 이상 농도를 나타내는 지점이 18지점으로 전체 심토 조사지점의 약 10.4% 정도이었으며, 토양오

*Corresponding author : heelee@pknu.ac.kr

염대핵기준을 초과하는 지점은 1지점으로 전체 심토 조사지점의 약 0.6%를 나타내고 있어 비소오염이 주로 30 cm 이내에 집중되어 있는 것으로 나타났다. 조사지점별 비소농도를 기준으로 토양오염대핵기준 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 m², 79,200 m³이었으며, 우려기준의 40% 농도 이상의 경우 복원 면적과 물량은 779,000 m², 233,700 m³, 배경치 농도 이상의 복원 목표 설정의 경우에는 각각 969,200 m², 290,760 m³이었다. 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 작아서, 복원 목표 설정시 배경치 농도로 복원계획을 세우는 것이 가장 바람직한 것으로 판단되었다.

주요어 : 폐광산, 토양오염성질조사, 비소오염, 토양오염복원, 고로폐광산

1. 서 론

현재 우리나라의 휴·폐 금속광산은 약 900여개로 집계되고 있으며, 대부분의 경우 채광 현장 시설물과 광미·광폐석들이 그대로 방치되어 광산 주변 토양과 하천의 주 오염 인자들로 작용하여왔다 (식탄산업합리화사업단, 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 이루어져 왔다(정영욱과 Thornton, 1994; 오대균 등, 1995; 유새영, 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 이찬화, 1998; 전효택 등, 1998; 정명재, 1999; 황은하 등, 2000). 토양성질조사지침 (환경부, 2001)에는 폐광산 주변 오염 가능 토양에 대하여 약 1,500m² 면적당 1개의 표토시료와 표토 3개당 1개의 심토, 그리고 표토 6개당 연속시료를 채취하여 토양오염 성질조사를 하게 되어있으나, 이러한 규모의 성질조사는 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 토양성질조사가 필수불가결한 과정이 되었다(한국수자원공사, 2002).

본 연구는 경북 군위군 고로면 식산리에 위치한 폐이연광산에서부터 폐광산과 연결된 주 하천을 따라 연장 약 12 km 되는 하천 하류의 저수담 건설 예정지역까지 주변 오염 농경지 토양과 하천 퇴적토(약 950,000 m² 면적)에 대하여 토양성질조사지침에 의한 성질 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 토양성질조사라는 데 큰 의미가 있다.

2. 연구 지역 조사 배경

본 연구 대상 지역 내 주 오염원인 고로폐광산은 경상북도 군위군 고로면 식산리 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 체련소 및 광미 침전소를 운영하였으며, 대부분의 광미를 그대로 산적하여 방치하던 중, 1999년 군위군에서 콘크리트 옹벽을 치고, 남아있던 광미 및 폐광석을 뒷채움의 형태로 힌장

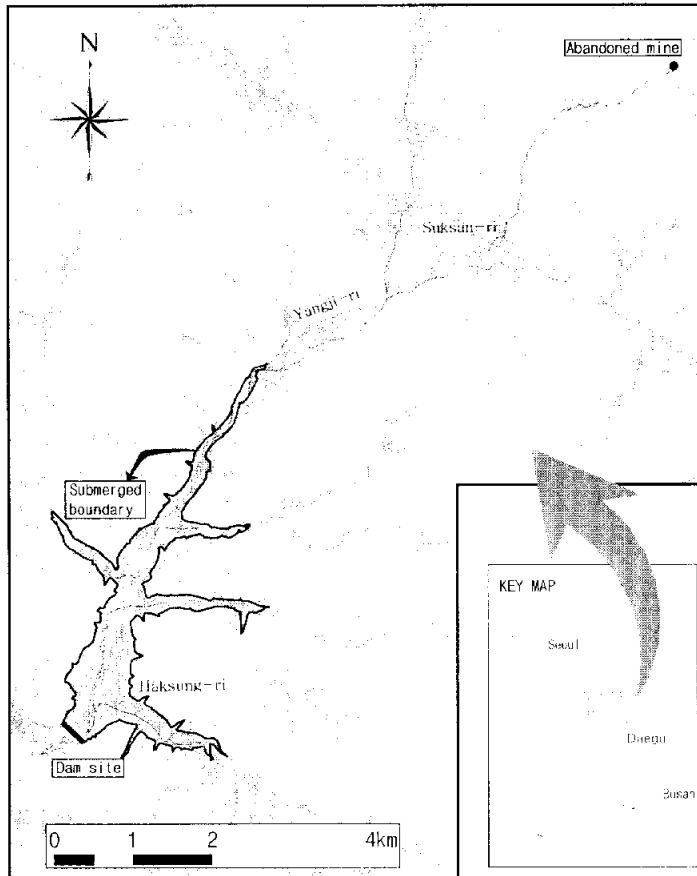


Fig. 1. Research area from Goro abandoned mine to a projected storage dam site.

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 해당하는 주변 농경지 토양으로서, 행정구역상 경상북도 군위군 고로면 화곡리, 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 폐석임자들이 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 m² 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 m² 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

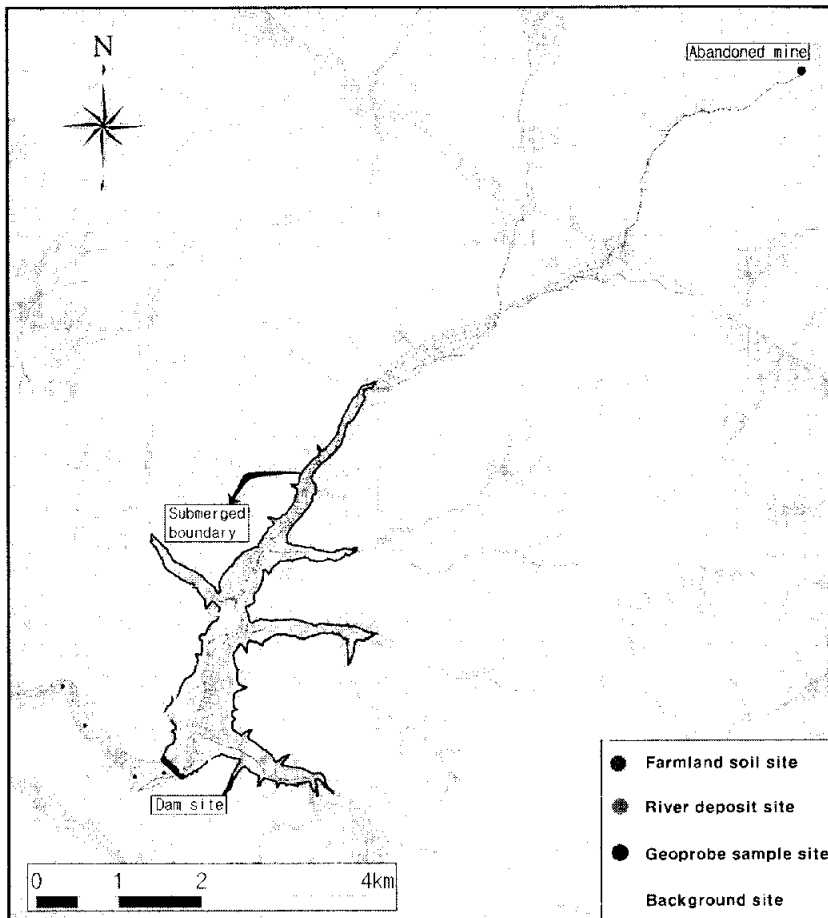


Fig. 2. Sampling locations for farmland soils and river deposits around Goro abandoned mine.

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 토양공성시험법(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 배경지 농도를 Table. 1, 2, 3, 4에 나타내었다. 댐 건설시 수몰되는 지역과 수몰되지 않는 지역을 구분하여 오염도를 평가함으로써, 정민 조사 결과를 댐 건설과 연계된 오염 토양 복원 사업 설계에 직접 이용한 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

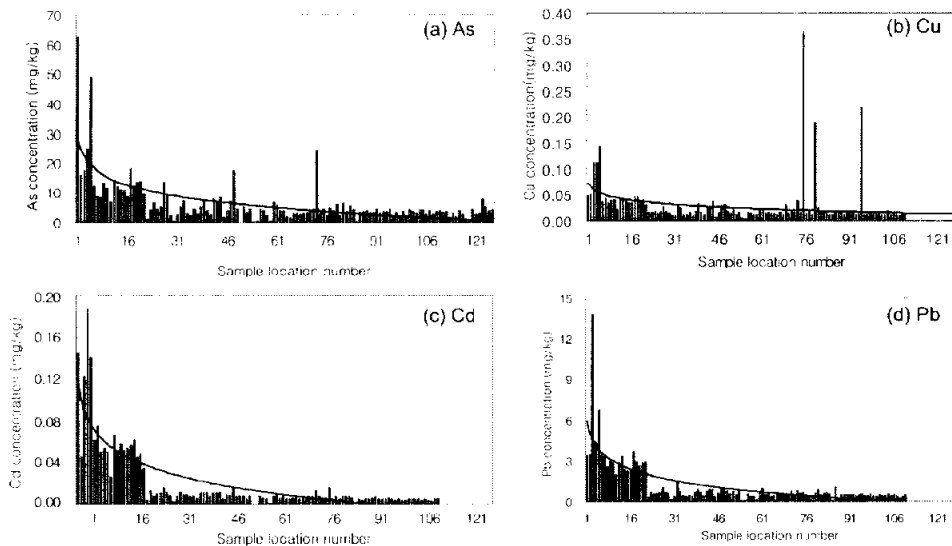


Fig. 3. Distribution of heavy metal concentration for river surface deposits according to the distance from Goro mine (Distance increases from left to right).

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/kg 으로, 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 토양성질조사 지침에 의하여 4등급으로 구분하여 나타내었으며, 1등급의 경우에는 주변 지역 비소 배경농도를 기준으로 세분하여 나타내었다. 표토는 조사 시료의 비소 항목에 대한 오염 등급별 시료 수 및 비율을 나타낸다. 표토의 경우 토양오염우려기준 이상(3등급)의 농도를 나타내는 시료가 11~21% 정도이며, 토양오염대척기준(15 mg/kg)을 초과(4등급)하는 시료도 6~7% 이어서 성밀 조사 지역의 상당한 부분이 비소로 오염되어 있었다. 심토는 하천 퇴적토가 농경지 토양에 비해 오염도가 더 높았으나 표토보다 낮게 나타났으며, 토양오염대척기준을 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 예정지까지 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 평지 석재소로부터 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 오염시켰을 때, 폐광산으로부터의 거리와는 무관하게 하천 제방의

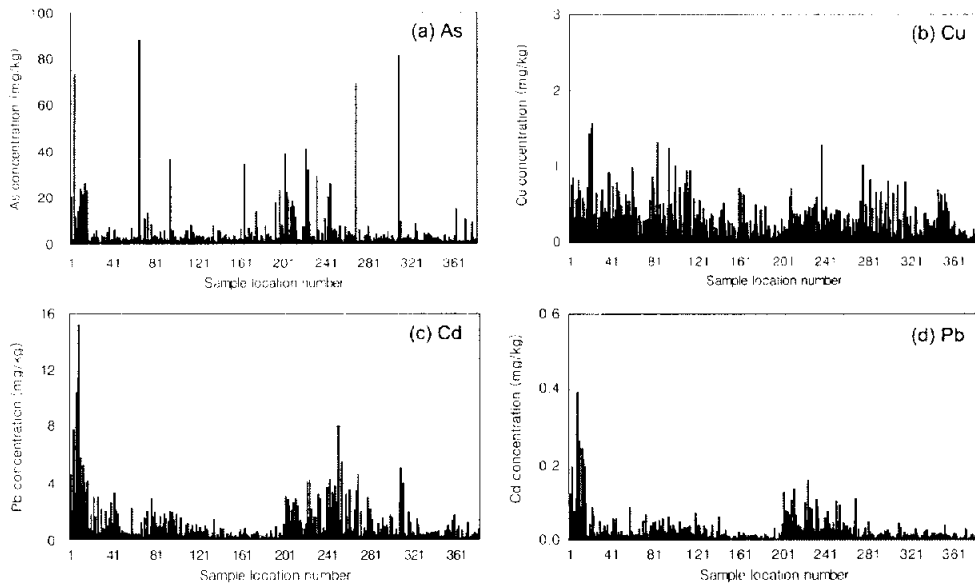


Fig. 4. Distribution of heavy metal concentration for farmland surface soils according to the distance from Goro mine (Distance increases from left to right).

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

		I grade	II grade	III grade	IV grade	
		(lower than 1.23mg/kg)	(1.23~2.4mg/kg)	(2.4~6mg/kg)	(6~15mg/kg)	(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 토양오염 대책지역으로 지정되어 토양오염 복원 사업을 실시하는 이원화 체계로 되어있다(한성부, 2003b). 그러나 본 연구 지역의 경우 토양의 비소 농도가 토양오염 우려기준 이하의 낮은 농도라도 댐 건설

후 생성되는 저수지 특성상, 비소가 댐 담수 이후에 형성되는 저수지 바닥으로부터 용출되어 지속적인 수체에 영향을 줄 수 있으므로, 저수지 수질의 안전성을 확보하고 깨끗한 물공급을 원하는 지역 수요자의 기대에 부응하는 측면에서 토양오염우려기준 농도 이하, 우려기준치의 40%(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 수불지역 상부 구간에서 높은 비소 농도를 나타냈으며, 농경지 토양은 폐광산에서 석산고 구간과 수불지 상부에서 동곡2고 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^2)의 약 0.3% 정도이고, 토양오염우려기준의 40%(확인기준) 이상 오염 면적은 약 0.9%에 해당되며, 패경지 농도 이상의 오염면적은 1.1%에 해당된다. 또한 댐 건설 후 수불지내 토양오염 우려기준 이상 오염 면적은 전체 수불면적(2.27 km^2)의 3.9% 정도이며, 토양오염우려기준의 40% 이상 되는 오염 면적과 배경 농도 이상 지역은 각각 전체 수불면적의 12.0%, 14.3%에 해당되었다. 성밀 조사 결과로부터 토양 복원 심도를 표토와 심토를 포함한 0.3 m로 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 m³, 233,700 m³, 290,760 m³으로 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 작은 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 바람직한 것으로 판단되었다.

6. 결 론

본 연구에서 실시된 고로폐광산 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 ²)		
	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 ²)		
	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 (1.23mg/kg)

	Contaminated area needed for remediation (m ²)		
	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 ³)	Remediation volume (m ³)	Remediation volume (m ³)
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% 정도이었으며, 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 m², 79,200 m³이었으며, 우려기준의 40% 농도 이상의 경우 복원 면적과 물량은 779,000 m², 233,700 m³, 배경치 농도 이상의 복원 목표 설정의 경우에는 각각 969,200 m², 290,760 m³이었다. 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 감사드립니다.

참고문헌

김성용 (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, 김성업, 전효택 (1995) 동해 탄광 주변 산성 광산 폐수와 하상퇴적물의 지구화학. 자원환경지질, 30권, p. 105-116.
- 유재영 (1995) 광산폐수의 산성화 및 그에 따른 환경문제, 1995년 대한지질학회학술발표 논문집, p. 32-35.
- 이도성, 정덕영, 이규승 (1997) 구룡평산 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.
- 이현수, 이찬희 (1998) 중수호 상류, 상곡 광산 수계에 분포하는 토양과 하상퇴적물의 중금속 오염, 한국지하수 환경학회지, 5권, p. 10-20.
- 전효택, 김주용, 최시영 (1998) 폐석탄광 주변 지구화학지질의 중금속 오염 평가 -강동탄전 임곡천 일대를 중심으로-. 자원환경지질, 31권, p. 499-508.
- 정명재 (1999) 휴/폐광 광은광산 주변의 토양오염조사와 복구시스템 연구. 자원환경지질, 32권, p. 385-398.
- 정영옥, 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) 시성 연·아연광산 주변 농경지 토양의 중금속 오염 연구. 한국토양환경학회지, 5권, p. 67-85.

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

토양 세척법과 식회를 첨가한 토양 안정화 공법을 이용한 폐광산 주변 비소 오염 토양 및 하천 퇴적토 복원

이민희^{1*} · 이정산¹ · 차종철¹ · 최정찬¹ · 이정민²

¹부경대학교 환경지질학과

²한국수자원공사 댐환경처

Remediation Design Using Soil Washing and Soil Improvement Method for As Contaminated Soils and Stream Deposits Around an Abandoned Mine

Minhee Lee^{1*}, Jungsan Lee¹, Jongchul Cha¹, Jungchan Choi¹ and Jungmin Lee²

¹Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea

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

Removal efficiencies of soil washing and soil improvement processes to remediate farmland soils and stream deposits around Goro abandoned mine were investigated with batch and column experiments. For As-contaminated farmland soils around Goro mine, batch tests to quantify As extraction rate from contaminated soils and lime treated contaminated soils were performed. The contaminated soil mixed with lime decreased As extraction rate less than one fourth, suggesting that the soil improvement method mixed with lime dramatically decrease As extraction rate. A storage dam will be constructed in the lower part of the main stream connected to Goro abandoned mine and the amount of As extracted from the bottom soils of reservoir could be the main source to contaminate water of reservoir. The decrease of As extraction amount from the bottom in reservoir, caused by the application of the soil improvement method was investigated from the physically simulated column experiment and results showed that As extraction rate decreased to one fourth when 1% lime mixed soil improvement was applied to contaminated soils. For contaminated stream deposits connected Goro mine, the removal efficiency of the soil washing method was investigated with batch experiments. Hydrochloric acid, citric acid, acetic acid and distilled water were used as soil washing solution and 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1.0 N of washing solution were applied to extract As. When washing with 0.05 N of hydrochloric acid or citric acid, more than 99.9% of As was removed from stream deposits, suggesting that As contaminated stream deposits around Goro mine be successfully remediated with the soil washing process. Total volumes of contaminated soils and deposits needed for remediation were calculated based on three different remediation target concentrations and the operation cost of soil washing for calculated soil volumes was estimated. Results from this research could be directly used to make a comprehensive countermeasure to remediate contaminated area around Goro mine and also many contaminated areas similar to this research area.

Key words : arsenic, soil washing, soil improvement, abandoned mine, soil remediation

비소로 오염된 고로폐광산 주변 농경지 토양과 하천 퇴적토에 대하여, 토양 정밀조사를 통하여 규명된 오염 면적과 오염 정도를 바탕으로 복원 공정 설계를 실시하였다. 실내 실험을 통하여 오염 농경지 토양에 대하여는 식회를 첨가한 토양 안정화 공법의 처리 효율을 검증하였으며, 오염 하천 퇴적토에 대하여는 토양 세척법의 처리 효율을 규명하였다. 비수불지역의 오염 농경지 토양의 복원 효율을 규명하기 위하여, 비소 농도가 다른 폐광산 주변 농경지 오염 토양 4종류에 대하여 비소 용출률 배치 실험을 실시한 결과, 식회를 혼합한 토양의 비소 용출이 오염 토양을 그대로 이용한 경우보다 평균 5배 이하로 감소하였다. 댐 건설 후 수몰되는 지역에서 지수지 바닥으로 부터 지수지 수계로 용출되어지는 비소의 용출률을 예측하고, 식회를 첨가한 복토를 실시한 경우 지수지 바닥에서 용출되는 비소의 용출률 감소를 규명하기 위하여 아크릴 칸럼(지름 18.9 cm, 높이 30 cm)을 이용하여 지수지 바닥에서의 비소 용출 모의 실험하였다. 실

*Corresponding author: heelee@pknu.ac.kr

한 결과 복토를 실시하지 않은 오염 토양에서의 비소 용출률은 연간 약 3.06-3.89%를 나타내었으며, 석회 1%를 혼합하여 복토한 경우 지수지 바닥으로부터 비소 용출률은 연간 0.11-0.05%를 나타내어 석회를 혼합한 복토처리 시 지수지 바닥에서 수계로의 비소 용출은 약 40배 이상 감소할 수 있는 것으로 나타나, 수몰된 농경지 복원에 매우 적절한 방법으로 사용될 수 있을 것으로 판단되었다. 토양 세척법을 이용하여 하천 퇴적토를 복원하는 경우, 세척 효율을 규명하기 위하여 하천 퇴적토 3종류에 대하여 초산, 구연산, 염산 각 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1.0 N 수용액과 증류수에 대하여 각각 토양 세척 효율 배지 실험을 실시하였다. 실험 결과 염산과 구연산 용액으로 세척하는 경우 0.05 N에서 한 시료를 제외하고는 비소에 대하여 99.9% 이상의 제거 효과를 나타내었다. 결론적으로 비소로 오염된 하천 퇴적토는 적절한 세정용액을 이용한 세척과정에 의해서 충분히 제거될 수 있는 것으로 나타나, 기존 오염 퇴적토 내 비소의 90% 이상을 효과적으로 제거할 수 있는 것으로 나타났다. 오염 지도에 근거하여 산출된 복원 불량에 대하여 토양세척법을 이용하는 경우 복원 비용을 산출 하였으며, 이와 같은 자료는 고로폐광산 주변 오염 토양에 대한 실제 복원 공정의 설계에 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 폐광산, 중금속오염, 비소오염, 토양세척법, 토양 안정화 공법

1. 서 론

현재까지 국내에서의 폐광산 연구는 폐광산 주변 오염 토양에 대한 개략적인 개황조사가 대부분이었으며, 복원을 선제로 한 적절한 토양 정밀 조사가 거의 이루어지지 않아 주변 오염 토양의 정확한 규모 산출이 불가능하여, 실제 오염 지역에 적합한 복원 방법과 비용 산출에 관한 연구는 매우 제한되어왔다(이현구와 이찬희, 1998; 이호민 등, 1998; 김선태 등, 1999; 김종욱 등, 1999; 정명채, 1999; 환경부, 1999; 황은하 등,

이러한 연구는 폐광산 주변 오염 토양의 정확한 규모 산출이 불가능하여, 실제 오염 지역에 적합한 복원 방법과 비용 산출에 관한 연구는 매우 제한되어왔다(이현구와 이찬희, 1998; 이호민 등, 1998; 김선태 등, 1999; 김종욱 등, 1999; 정명채, 1999; 환경부, 1999; 황은하 등,

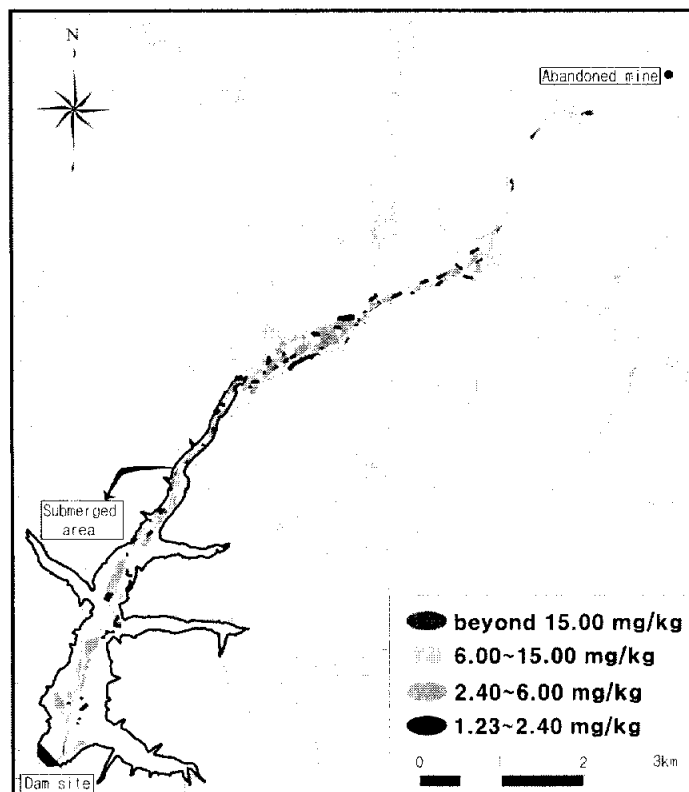


Fig. 1. Pollutant map for As concentration in surface soils around Goro abandoned mine.

2000). 2002년 경상북도 군위군 고로면 식산리에 위치한 고로폐광산과 연결된 주 하천 하부에 댐 건설 계획이 수립되어, 고로폐광산 주변 환경영향평가의 일부분으로 폐광산 주변 농경지와 하천 퇴적토에 대한 토양 정밀조사가 실시되었다. 조사 면적 950000 m²에 대하여, 총 741개의 토양 시료를 채취하여 중금속 분석을 실시하였으며, 이 결과 폐광산 주변이 비소에 의해 심각하게 오염 되어 있음을 알 수 있었고, 분석 결과로부터 조사 지역에 대한 비소 오염 지도를 작성하여 오염 분포를 규명하였으며, 복원 목표 비소 농도에 따른 복원 면적과 물량을 산출하였다(차종철 등, 2003). 본 연구 지역의 경우 토양의 비소 농도가 토양오염 우려기준 이하의 낮은 농도라도 댐 건설 후 생성되는 저수지 특성상, 비소가 댐 답수 이후에 저수지 바닥으로부터 용출되어 지속적인 수계에 영향을 줄 가능성이 존재하므로, 저수지 수질의 안전성을 확보하고 깨끗한 물 공급을 원하는 지역 수요자의 기대에 부응하는 측면에서 토양오염우려기준 농도(6 mg/kg), 우려기준치의 40% 농도(오염확인기준: 2.4 mg/kg), 그리고 최상의 경우인 주변 배경치 농도(1.23 mg/kg)로 복원 목표를 설정하는 경우에 대하여 복원 대상 물량을 산정하였다(환경부, 2003). Fig. 1은 토양정밀조사결과, 비소의 오염 등급에 따라 나타난 고로폐광산 주변 토양의 오염 분포 지도이다. 폐광산 주변 오염 토양의 복원 목표를 토양오염 우려기준, 우려기준의 40%(확인기준), 배경치

농도 기준으로 나누어, 복원 토양 심도를 30 cm 로 가정하였을 때, 주변 오염 농경지와 하천 퇴적토의 복원이 필요한 면적과 복원 물량을 Table 1, 2, 3에 나타내었다(차종철 등, 2003).

본 논문은 산출된 오염 토양 규모에 대하여, 차후 폐광산 하부 하천에 생성된 댐의 건설과 관련하여 주변 환경이 변화되므로, 댐 건설 후 수몰되는 지역과 비수몰 지역으로 나누어 오염 농경지 토양과 하천 퇴적토에 대하여 적절한 복원 대책을 수립하여, 선택된 복원 방법의 효율성을 실내 실험을 통하여 검증하고, 선정된 복원 방법에 의한 고로폐광산의 오염 토양 복원 공정을 설계하는데 중요한 자료를 제공하고자 하였다. 연구 결과들은 본 연구지역과 유사한 폐광산 주변 오염 농경지 토양과 하천 퇴적토 복원에 매우 중요하게 사용될 수 있다는 점에서 그 의미가 크다.

2. 오염 지역 복원 대책 수립

농경지 토양 및 하천 퇴적토 내에 존재하는 중금속들은 분해가 거의 일어나지 않아 자연적으로 성화가 어려울 뿐만 아니라 독성이 강하여 생물체에 과다한 축적을 가져와 심각한 장애를 일으킬 수 있다. 토양이 비휘발성이며 생물학적으로 난분해성인 중금속들로 오염되어있는 경우, 이들을 제거하는데 적합한 성화기술로써 현장에서 널리 쓰이는 방법은 오염토양 굴착/배

Table 1. Estimation of soil area and volume for remediation (based on Soil Pollution Warning Limit (SPWL) concentration).

	Contaminated area needed to remediate (m ²)		Total volume of soil to remediate (m ³)
	Submerged area	Non-submerged area	
Stream deposit	3,200	30,800	10,200
Farmland soil	105,300	124,700	69,000
Total area	108,500	155,500	79,200

Table 2. Estimation of soil area and volume for remediation (based on 40% concentration of Soil Pollution Warning Limit (SPWL)).

	Contaminated area needed to remediate (m ²)		Total volume of soil to remediate (m ³)
	Submerged area	Non-submerged area	
Stream deposit	78,600	102,400	54,300
Farmland soil	252,300	345,700	179,400
Total area	330,900	448,100	233,700

Table 3. Estimation of soil area and volume for remediation (based on background level concentration (1.23 mg/kg)).

	Contaminated area needed to remediate (m ²)		Total volume of soil to remediate (m ³)
	Submerged area	Non-submerged area	
Stream deposit	83,900	105,000	56,670
Farmland soil	310,300	470,000	234,090
Total area	394,200	575,000	290,760

림법, 고형화/안정화 방법, 전기 영동법, 재토/복토법, 식물 경작법, 토양 세척법등이 있다(Anderson, 1995; 이민희, 2003). 본 연구지역의 토양 정밀조사 결과 폐광산 주변 농경지 오염은 주로 폐광산과 연결된 하천의 범람에 의하여 발생되어 폐광산과의 거리와 무관하게 비교적 넓게 오염되어 있었으며, 오염 대상 물질은 비소로 한정되어있고 시료의 평균 비소 농도(표토 평균 농도: 5.1 mg/kg, 심토 평균 농도: 2.1 mg/kg)가 토양오염우려기준인 6 mg/kg 보다 낮았다(차중철 등, 2003). 따라서 이미 본 폐광산 주변 농지에 부분적으로 적용한 사례가 있으며(한국수자원공사, 2002), 오염 농경지 토양이 주로 표토에 국한되어 있음을 감안하여 단기간에 적은 비용으로 성화가 가능한 석회를 첨가한 토양 안정화 공법(토양 복토법)으로 복원하는 것을 계획하였다. 복토법은 오염 정도가 비교적 낮은 토양 복원에 주로 적용되는 방법으로서, 오염 토양 상부를 심토 깊이(30 cm) 만큼 비오염 토양으로 복토함으로써 토양으로부터 수계로 용출되는 비소 양을 감소시키는 방법으로 오염토양을 따로 채굴하여 이동 시킬 필요가 없기 때문에 주로 광범위한 농경지토양 복원에 적합한 것으로 나타났으며, 증균속의 분용화 수단으로 비오염토양을 석회를 혼합하여 복토함으로써 증균속의 용출을 토양으로부터 억제하여 복원 효과를 증대시키는 방법이다(나춘기 등 1997; 한국수자원공사, 2003). 그러나 본 연구지역의 경우 댐 건설 후 수몰되는 구역 내의 오염 토양은 장기간 담수 시 복토 후에도 비소의 용출이 우려되는 측면을 고려하여 오염된 표층부 30 cm 토양(표토+심토)을 완전히 제거하여 수몰지역으로부터 오염토양을 격리시키고, 비수몰지역인 하천 상류지역 오염 농경지에 대해서만 지속적으로 농경지로 활용하는 것을 고려하여 석회를 혼합한 복토를 실시하는 계획을 수립하였다. 서로 다른 비소 농도를 나타내는 4종류의 실제 농경지 토양을 대상으로 복토를 실시하지 않은 경우와 석회를 첨가한 복토법의 경우 토양으로부터 수계로의 비소 용출 배치실험과 대형 칼럼실험을 실시하여 본 연구 지역의 오염 농경지에 대한 석회복토법의 복원 효과를 규명하였다.

폐광산 주변 하천 퇴적토의 주 오염원은 비소로서 자연적인 성화가 거의 이루어지지 않으며, 오염토양이 하천 내에 존재하므로 현장원위치(in-situ) 방법의 적용이 거의 불가능하다. 본 연구 지역의 하천 퇴적토 복원 빈작은 복원 목표 농도에 따라 변화가 있으나 농경지 토양의 30% 이하를 나타내고 있다(Table 1, 2, 3). 따라서 비용이 비교적 고가이기는 하나 단시간 내에

복원이 가능하고 복원효과가 우수하여 복원 목표 농도 이하로 처리하기가 쉬우며, 하천 퇴적토의 주 입도 분석 결과 94%(평균 98%) 이상이 모래 입자로 구성되어 있다는 점, 복원된 모래를 댐 건설의 재료로 활용할 수 있다는 점을 감안하여 토양세척방법이 가장 효과적으로 적용될 수 있다고 판단되었다(정동철 등, 1997; 오종기 등, 1998; 한춘 등, 1998; 이동호와 박옥현, 1999). 비소로 오염된 하천 퇴적토를 토양세척장비를 사용하여 제거하여 토양과 세척수를 분리한 다음, 세척액은 순환시켜 재사용하고, 최종 세척액과 미세 토양을 포함한 폐슬러지 부분은 위탁 처리하는 대책을 수립하였으며, 토양세척의 비소 제거 효율을 규명하기 위하여 연구지역의 오염 하천 퇴적토를 채취하여 토양 세척 배치 실험을 실시하였다.

3. 실험 방법

3.1. 석회를 첨가한 토양 안정화 공법 효율 실험

본 지역 농경지 토양의 비소 오염은 하천 하류에 댐이 건설된 경우, 수몰지역의 오염 토양으로부터 댐 저수지 수계로의 직접적인 비소 용출이 가장 중요한 수계 오염원이 되고, 또한 비수몰지역 오염 토양의 경우에는 강우나 하천수에 의하여 용출된 비소의 저수지 유입이 오염원으로 작용할 수 있다. 오염 농경지 토양 복원 방법으로 토양 안정화 공법을 적용하는 경우, 석회를 이용한 토양 복토법에 의하여 토양으로부터 수계로의 비소 용출량을 얼마나 감소시킬 수 있는지가 복원 효율을 결정하게 된다. 따라서 본 연구 지역에 적용될 토양 복토법에 사용되는 석회의 효율을 규명하기 위하여, 비소농도가 다른 농경지 토양 4종류에 대하여, 석회에 의한 비소 용출률 영향을 측정하였다. 배치 실험을 통하여 석회 1%, 2%, 5%를 첨가한 토양의 비소 용출률을 석회를 첨가하지 않은 토양의 용출률과 비교하였다. 5%의 석회 첨가 실험의 경우 건조 토양 시료 19 g 과 과립상 석회(한일석회 회사 제품) 1 g을 혼합하여 500 ml 수용액에 첨가하여 20°C에서 100 rpm으로 항온 진탕하였으며, 30분, 2시간, 12시간, 1일, 3일, 5일에 대하여 5 ml의 시료를 채취하여 2000 rpm으로 원심분리한 후 거름종이로 필터링한 용액을 분석하였다. 채취한 수용액 시료의 비소 농도와 초기 토양의 비소 농도로부터 토양의 비소 용출분배계수(K_d)를 다음과 같이 계산하였다.

$$K_d = \frac{C_w}{C_s} \quad (1)$$

(C_w : 수용액의 비소 농도, C_s : 토양 내 비소 농도)

계산된 용출분배계수를 비교하여 석회를 첨가한 용출물 감소 효과를 규명하였으며, 용출액의 비소 분석은 부경대학교 공동실험실습관에 의뢰하여 비소분석을 위한 기화장치가 부착된 ICP/MS(모델명: Perkin Elmer Elan 6000)로 분석하였다.

수몰지역 내 저수지 바닥의 오염 토양으로부터 환원 상태에서 저수지 수계로 용출되어지는 비소의 용출물과 석회 1%를 혼합한 비오염토로 복토한 토양으로부터 저수지 수계로 용출되어지는 비소의 용출물을 비교하기 위하여, 4종류의 비소 농도를 가지는 농경지 오염 토양을 대상으로 모의 칼럼실험을 실시하였다. 칼럼 면적이 268.8 cm^2 (지름 18.9 cm, 높이 30 cm)인 아크릴 칼럼이 사용되었고, 칼럼 상/하부는 조밀한 강철격자재와 용액은 주입/배출한 수 있는 연결관으로 이루어져 있으며, 칼럼 윗통면에 30 cm 간격으로 시료 채취 홈이 제작되어 밸브와 함께 튜브와 연결되어있다. 저수지 바닥의 환원 환경을 만들기 위하여 칼럼 내 기체를 질소 가스로 대체한 후 오염 농경지 토양을 칼럼 내 10 cm 깊이로 채우고 다시 질소 가스로 칼럼 내를 순환시킨 후 밀봉하였다. pH 7의 탈이온수를 질소가스로 퍼지하여 용액의 용존 산소 농도가 0.1 mg/L 이하가 되게 한 후 튜브를 통하여 칼럼 내로 주입하여 토양 표면 위 10 cm 까지 채웠다. 토양 표면 상부 3-5 cm에서 칼럼 벽면의 시료 채취 홈에 시린지를 이용하여 약 90여 일 동안 하루에 한번씩 10 ml를 채취한 후, 수용액의 비소 농도를 분석하였다. 석회복토 칼럼 실험의 경우, 비오염 토양 (초기 비소 농도 0.001 mg/kg 이하)에 석회 1%를 혼합하여 복토재로 사용하였으며, 칼럼 하부로부터 오염 농경지 토양을 5 cm 깊이로 채우고 오염 토양 상부에 복토를 15 cm 깊이로 채운 후 탈이온수를 복토 토양 상부 10 cm 높이까지 채웠으며, 나머지 실험 과정은 이전과 같다. 복토를 실시한 토양과 실시하지 않은 토양에 대하여 채취한 수용액의 비소 농도로부터 단위 면적당 시간에 따른 비소의 용출량을 계산하여 1년 동안 수계로 용출되는 비소의 양과 용출물을 계산하여 비교함으로써, 수몰지역에서 석회를 이용한 토양 안정화 공법(토양 복토법)의 효율을 규명하였다. Fig. 2는 칼럼 실험을 보여주는 사진이다.

3.2. 토양 세척법 효율 실험

교로폐광산 주변 하천 퇴적토를 토양 세척법을 이용하여 복원하는 경우, 세척 효율을 규명하기 위하여 하천 퇴적토 3종류에 대하여 초산, 구연산, 염산 각각 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1.0 N 수용액과 증류수(pH 5.3

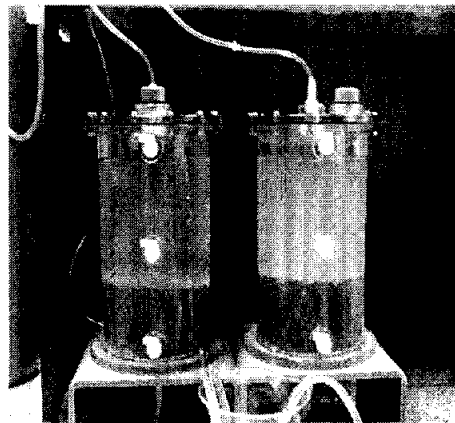


Fig. 2. Column experiment for As extraction from the soil.

석성)에 대하여 각각 토양 세척 효율 배치 실험을 실시하였다. 자연 건조된 퇴적토 시료 20 g을 세척액 500 ml에 넣어 20°C에서 200 rpm으로 3시간 항온 진탕한 후, 상등액을 취하여 원심분리(2000 rpm에서 20분)하고, 거름종이로 필터링한 용액을 분석하였다. 적절한 세척 시간을 결정하기 위하여 세척시간을 달리하며 세척율을 측정하고 결과 총 세척 실험의 95% 이상에서 180분 이상 세척하는 경우, 세척률이 거의 일정하게 유지되어서, 적절한 세척 시간을 3시간으로 결정하였다. 퇴적토의 초기 비소 농도와 세척액의 비소 농도로부터, 세척되는 비소량과 토양으로부터 비소 제거율을 계산하였다.

4. 결과 및 분석 방법

4.1. 석회를 첨가한 토양 안정화 공법 효율

폐광산 주변 비소 오염 농경지 중, 대표성이 있는 논, 밭, 과수원에서 오염 토양의 비소 농도가 각각 882, 41.1, 6.6, 2.8 mg/kg 인 토양 시료(토양시료 1, 2, 3, 4)를 채취하여 석회를 혼합하지 않은 경우와 석회 1%, 2%, 5%를 혼합한 경우 토양으로부터 용출되는 비소량과 용출분배계수(K_d)를 구하였으며, 그 결과를 Table 4에 나타내었다. 토양 종류에 따라 용출되는 비소량의 차이가 심한 것으로 나타났으며 이는 각 토양들의 물리/화학 특성 차이 때문으로 여겨진다. 모든 토양에 대하여 용출 시간이 증가함에 따라 용출되는 비소량과 용출분배계수(K_d)는 증가하는 형태를 보이나 증가율은 감소하는 것을 볼 수 있다. 5일 동안 용출된 비소 양을 비교하여보면, 석회를 첨가한

Table 4. Results of batch extraction experiment for lime effect.

	Extraction time	As in soil sample		Partitioning coefficient (K_{dr} : kg/l)	pH in extraction solution
		Initial soil concentration (mg/kg)	Extraction concentration (mg/kg)		
Soil sample 1 (Pure water of pH7)	2 hours	88.2	0.172675	0.000078	6.82
	1 day	88.2	0.486401	0.000226	6.91
	3 days	88.2	0.804864	0.000384	6.80
	5 days	88.2	0.864838	0.000421	6.79
Soil sample 1 with lime 1%	2 hours	88.2	0.176346	0.000079	10.83
	1 day	88.2	0.245119	0.000113	11.21
	3 days	88.2	0.378795	0.000178	10.98
	5 days	88.2	0.480005	0.000231	11.02
Soil sample 1 with lime 2%	2 hours	88.2	0.130130	0.000058	11.11
	1 day	88.2	0.079625	0.000036	11.53
	3 days	88.2	0.134824	0.000063	11.52
	5 days	88.2	0.153829	0.000073	11.65
Soil sample 1 with lime 5%	2 hours	88.2	0.020771	0.000009	11.51
	1 day	88.2	0.044367	0.000020	11.87
	3 days	88.2	0.066589	0.000031	11.95
	5 days	88.2	0.070871	0.000033	12.12
Soil sample 2 (Pure water of pH7)	2 hours	41.1	0.575788	0.000569	6.55
	1 day	41.1	2.702093	0.002875	6.60
	3 days	41.1	4.644408	0.005313	6.39
	5 days	41.1	4.958500	0.005843	6.44
Soil sample 2 with lime 1%	2 hours	41.1	0.768667	0.000755	10.63
	1 day	41.1	3.018202	0.003205	10.77
	3 days	41.1	3.399382	0.003722	10.29
	5 days	41.1	4.453604	0.005124	9.94
Soil sample 2 with lime 2%	2 hours	41.1	1.130462	0.001110	10.93
	1 day	41.1	1.310598	0.001319	11.36
	3 days	41.1	1.595782	0.001651	11.27
	5 days	41.1	1.679214	0.001778	11.32
Soil sample 2 with lime 5%	2 hours	41.1	0.160513	0.000149	11.25
	1 day	41.1	0.168336	0.000160	11.83
	3 days	41.1	0.125179	0.000121	11.81
	5 days	41.1	0.142215	0.000140	11.98
Soil sample 3 with lime 5%	2 hours	6.6	0.000183	0.000298	-
	1 day	6.6	0.000166	0.000282	11.83
	3 days	6.6	0.000135	0.000233	-
	5 days	6.6	0.000402	0.000720	-
Soil sample 4 with lime 5%	2 hours	2.8	0.000171	0.001429	-
	1 day	2.8	0.000121	0.001045	11.92
	3 days	2.8	0.000307	0.002813	-
	5 days	2.8	0.000284	0.002651	-

토양의 경우 비소의 용출량이 현저하게 감소하고 있다. 토양 시료 1의 경우 비소 용출량은 석회 1% 혼합한 경우 약 절반으로 감소하였으며, 2%와 5%를 혼합한 토양은 용출량이 각각 6배, 12배 감소하는 것으로 나타났다. 토양 시료2의 실험 결과도 2%, 5% 석회를 혼합한 경우 비소 용출량은 각각 3배, 35배 감소하였

다. 본 연구 지역의 경우 대부분의 비소 오염이 표토에 집중되어 있으므로, 오염이 되지 않은 복토에 의하여 발생하는 오염 토양의 평균 비소 농도 감소 효과는 비오염 토양의 복토 두께를 30 cm 로 가정하는 경우, 표토의 깊이가 10 cm 인 것을 감안하면, 순수한 토양 혼합에 의한 비소 농도의 희석효과는 4배에 이르게 된

Table 5. Results of column experiment without lime mixing improvement.

	Sampling time	Solution volume in column (ml)	Cw (mg/l)	Cs (mg/kg)	Extraction partitioning coefficient (K_{dr} : kg/l)
Soil sample 5 with 1% lime (As concentration: 17.68 mg/kg)	12 hours	2688	0.001000	17.679279	0.000057
	1 day	2678	0.003000	17.677667	0.000170
	2 days	2668	0.002000	17.678450	0.000113
	3 days	2658	0.003000	17.677684	0.000170
	4 days	2648	0.004000	17.676924	0.000226
	5 days	2638	0.006000	17.675421	0.000339
	6 days	2628	0.006000	17.675403	0.000339
	10 days	2588	0.013924	17.669535	0.000788
	19 days	2518	0.044197	17.647680	0.002504
	28 days	2473	0.081876	17.621197	0.004646
	35 days	2428	0.145039	17.577729	0.008251
	41 days	2413	0.245456	17.507990	0.014020
	51 days	2398	0.330623	17.449748	0.018947
	92 days	2368	0.559220	17.295421	0.032333
Soil sample 6 (As concentration: 5.35 mg/kg)	12 hours	2688	0.001000	5.349219	0.000187
	1 day	2678	0.003000	5.347667	0.000561
	2 days	2668	0.004000	5.346901	0.000748
	3 days	2658	0.005000	5.346140	0.000935
	4 days	2648	0.007000	5.344617	0.001310
	5 days	2638	0.008000	5.343871	0.001497
	6 days	2628	0.010000	5.342368	0.001872
	10 days	2588	0.021780	5.333630	0.004084
	19 days	2518	0.036230	5.323506	0.006806
	28 days	2473	0.042850	5.319225	0.008056
	35 days	2428	0.075710	5.296614	0.014294
	41 days	2413	0.096570	5.282326	0.018282
	51 days	2398	0.128040	5.260830	0.024338
	92 days	2368	0.217630	5.200334	0.041849

Table 6. Results of column experiment with lime mixing improvement.

	Sampling time	Solution volume in column (ml)	Cw (mg/l)	Cs (mg/kg)	Extraction partitioning coefficient (K_{dr} : kg/l)
improved soil sample 7 with 1% lime (As concentration: 2.43 mg/ kg)	1 day	2688	0.000265	2.429565	0.000109
	3 days	2668	0.000357	2.429418	0.000147
	6 days	2643	0.000528	2.429149	0.000217
	27 days	2538	0.002062	2.426808	0.000850
	33 days	2523	0.007395	2.418622	0.003057
	43 days	2508	0.002217	2.426610	0.000913
	84 days	2478	0.002813	2.425749	0.001160
Improved soil sample 8 (As concentration: 6.05 mg/kg)	1 day	2688	0.000579	6.049050	0.000096
	3 days	2668	0.000592	6.049037	0.000098
	6 days	2643	0.000632	6.048981	0.000105
	27 days	2538	0.001815	6.047191	0.000300
	33 days	2523	0.008329	6.037185	0.001380
	43 days	2508	0.002715	6.045847	0.000449
	84 days	2478	0.003517	6.044686	0.000582

다. 또한 석회 첨가에 의한 비소 용출량의 감소 효과가 증대되어 실제 오염 토양으로부터 용출되어 수계를

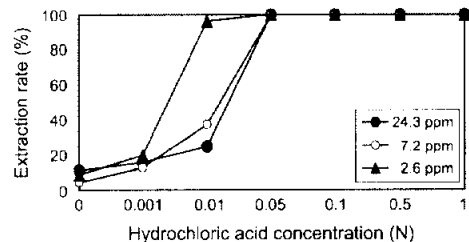
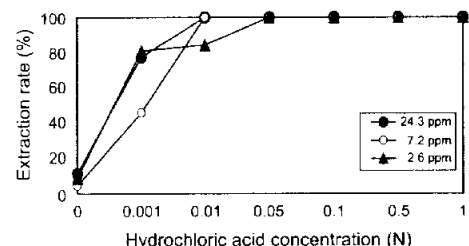
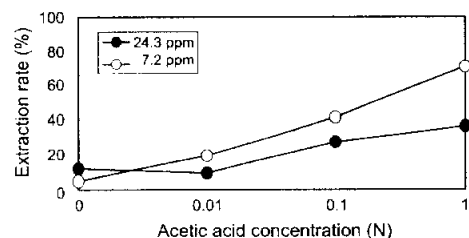
오염시키는 비소의 용출량은 석회를 첨가한 안정화 공법에 의해 20배 이상 감소한 것으로 판단되며, 이러

Table 7. Parameter used for calculation of As extraction amount in column experiments

Area of column	268.8 cm ²
Volume of solution above soil surface	2.688 liter
Soil wet bulk density	1.38 kg/m ³
Extraction concentration of As during 91 days for soil sample 5	0.55622 mg/L (0.55922 mg/L-0.003 mg/L)
Extraction concentration of As during 91 days for soil sample 6	0.21463 mg/L (0.21763 mg/L-0.003 mg/L)
Extraction concentration of As during 83 days for soil sample 7	0.00254 mg/L (0.00281 mg/L-0.00027 mg/L)
Extraction concentration of As during 83 days for soil sample 8	0.00294 mg/L (0.00352 mg/L-0.00058 mg/L)

한 복원 효율의 예측은 다음의 모의 칼럼실험 결과와 일치한다.

비소 농도가 각각 17.7 mg/kg, 5.4 mg/kg 인 농경지 토양(토양 시료 5, 6)에 대하여 저수지 바닥의 환원 상태에서 총 92일 동안 시간에 따른 비소 용출 칼럼 실험을 실시하였으며, 농도가 각각 6.1 mg/kg, 2.4 mg/kg 인 농경지 토양(토양 시료 7, 8)은 석회 1%를 혼합한 비오염 토양으로 복토한 후 같은 조건에서 총 84일 동안 용출 칼럼 실험을 실시하였다. Table 5는 복토를 실시하지 않은 칼럼 실험 결과를 나타내며, Table 6은 석회 1% 복토를 실시한 칼럼 실험 결과를 나타낸다. 칼럼 실험으로부터 시간에 따라 용출된 비소 농도와 오염 토양의 깊이를 30 cm(심토 깊이)로 한정하였을 때, 단위 면적(m²) 당 1년 동안 오염 토양으로부터 저수지 수계로 용출되는 비소량을 산출하였다. Table 7은 비소량 산출에 사용된 변수 값을 나타낸다. 복토를 하지 않은 토양 시료 5(토양 비소 농도: 17.7 mg/kg)의 경우, 단위면적(m²) 당 1년 동안 223.1 mg의 비소가 토양으로부터 용출되며, 이것은 초기 비소량의 3.05%에 해당한다. 토양 시료 6(토양 비소 농도: 5.4 mg/kg)의 경우에는 86.1 mg의 비소가 1년 동안 용출되어 토양 내 존재하는 비소량의 약 3.89%가 용출하게 된다. 그러나 석회 1%를 혼합한 비오염 토양으로 복토를 한 경우, 토양 시료 7(초기 비소 농도 6.1 mg/kg)에 대해서는 단위면적(m²) 당 1년 동안 1.29 mg의 비소가 용출되며 이것은 토양 내 존재하는 초기 비소량의 0.05%에 해당한다. 또한 복토 토양 시료 8(초기 비소 농도 2.4 mg/kg)인 경우에는 비소의 용출량은 1.12 mg이며, 단위 면적당 1년 동안 총 비소량의 0.11%의 비소가 용출하게 된다. 따라서 석회 복토를 실시한 토양의 경우 저수지 바닥으로부터 수계로의 비소 용출률은 약 40배 정도 감소하는 것으로 나타나, 석회복토법에 의한 오염 토양의 수계 오염 감소 효과가 매우 크다는 것을 알 수 있다. 배치 실험 및 대형 칼럼 실험을 통하여 석회를 첨가한 토양 안정화 공법에 의한 비소

**Fig. 3.** Removal efficiency of hydrochloric acid solution washing for three different stream deposits.**Fig. 4.** Removal efficiency of citric acid solution washing for three different stream deposits.**Fig. 5.** Removal efficiency of acetic acid solution washing for two different stream deposits.

의 불용화 효과를 확인 할 수 있었으며, 따라서 본 연구 지역의 오염 농경지 토양 복원에 석회하게 사용될 수 있을 것으로 판단되었다.

4.2. 토양 세척법 효율

비소 농도가 각각 24.3 mg/kg, 7.2 mg/kg, 2.6 mg/

kg 인 3종류의 하천 퇴적토(토양 시료 9, 10, 11)에 대하여 세척 효율 배치 실험을 실시하였다(초산으로 세척한 실험의 경우에만 비소 농도가 24.3 mg/kg, 7.2 mg/kg인 퇴적토 이용). 기존의 토양 세척과 관련된 참고 문헌으로부터 염산, 구연산, 초산, 증류수(염산으로 pH 5.3 적정)를 선택하여(오종기 등, 1998; 한춘 등, 1998; 이동호와 박옥현, 1999) 세척액 농도에 따른 세척 효과를 비교하였으며, 그 결과를 Fig. 3, 4, 5에 나타내었다. 세척 실험 결과 염산의 경우 비소 농도와 관계없이 0.05 N 세척액에 의해 전량 용출되었으며, 구연산의 경우에도 한 시료를 제외하고는 0.05 N 세척액에 의해 비소가 전량 제거됨으로서 염산과 구연산 세척액의 세척 효율은 매우 뛰어난 것으로 판단되었다. 초산으로 세척한 경우에는 1 N 세척액에 의해 36%와 71%의 비소 제거율을 나타내어 세척 효과가 다른 세척액에 비해 낮은 것으로 나타났으며, pH 5.3인 증류수로 세척한 경우에는 약 20% 내외의 세척 효율을 나타내었다. 결론적으로 비소로 오염된 하천 퇴적토는 적절히 세정용액을 이용한 세척과정에 의해서 충분히 제거 될 수 있는 것으로 나타나, 기존 오염 퇴적토 내 비소의 90% 이상을 효과적으로 제거할 수 있으며, 복원 목표 농도를 토양오염우려기준, 우려기준의 40%(오염 확인 기준)로 설정하여 복원할 수 있을 것으로 판단되었다. 또한 오염 퇴적토의 비소오염농도 분포에 따라 세척액을 선별하여 세척한다면 세척 효과를 훨씬 증대시킬 수 있을 것으로 사료된다.

4.3. 복원 공정 설계 계획과 복원 비용 산정

Table 1, 2, 3에서 제시한 바와 같이 고로폐광산 주변 오염 농경지 토양과 하천 퇴적토를 복원하기 위하여, 토양 복원 목표 농도를 3가지로 설정하여 복원 물량과 비용을 산정하였다. 토양오염 우려기준 농도 이상의 오염 면적은 폐광산에서부터 댐 예정지 하천 하부까지의 총 면적(87.5 km²)의 약 0.3% 정도이고, 토양오염 우려기준의 40%(확인기준) 이상 오염 면적은 약 0.9%에 해당되며, 배경지 농도 이상의 오염면적은 1.1%에 해당된다. 또한 댐 건설 후 수몰지내 토양오염 우려기준 이상 오염 면적은 전체 수몰면적(2.27 km²)의 3.9% 정도이며, 토양오염 우려기준의 40% 이상되는 오염 면적과 배경 농도 이상 지역은 각각 전체 수몰면적의 12.0%, 14.3%에 해당되었다.

4.3.1. 비수몰 지역 오염 농경지 토양 복원 계획

반 건설시 저수지 상류에 위치하게 되는 비수몰 지역 농경지 오염 토양에 대하여 비오염 토양을 이용하여 복

토를 심토 깊이인 30 cm 두께로 산식하고, 복토에 사용되는 비오염 토양에 1%의 석회를 첨가하는 것을 가정하여 석회복토법을 적용하는 경우, 토양으로부터 비소 용출을 20배 이상 최소화 할 수 있을 것으로 판단되며, 따라서 저수지 상류의 오염 농경지 토양에 의한 저수지 수질 악화를 예방할 수 있고, 복토에 의한 농경지 토양의 오염을 줄일 수 있을 것으로 판단되었다.

4.3.2. 오염 하천 퇴적토 복원 계획

비소로 오염된 하천 퇴적토를 토양 세척 장비를 이용하여 세척하여, 비소를 토양으로부터 제거하고, 복원된 퇴적토는 세척수와 분리하여, 세척액은 순환시켜 재 사용하고, 최종 세척액과 미세토양을 포함한 페슬러지 부분은 반출함으로서 오염 지역의 하천 퇴적토를 복원하는 경우를 가정하여 복원에 필요한 비용을 산정하였으며, 복원 물량에 대한 세척 비용 및 세척 후 발생하는 폐용액 및 페슬러지 처리 비용을 합한 총 복원 비용을 Table 8, 9, 10에 나타내었다. 복원 심도를 30 cm(심토 깊이)로 가정하였으며, 세척 폐액 및 페슬러지 처리 및 운반비용은 지성폐기물공공처리시설반입수수료(환경부고시 제1997-1호)에 의거하여 산정하였다. 폐액과 페슬러지 운반 거리는 본 연구지역으로부터 100 km 이내로 가정하였으며, 세척 후 발생하는 폐세척액과 페슬러지 양은 토양 세척 시 일반적으로 발생하는 양을 기준하여, 폐세척액은 세척액 부피의 5%, 페슬러지는 1%로 가정하였으나, 산정된 복원 비용은 실제 퇴적토 세척 후 발생하는 폐수 및 슬러지 양, 세척액의 재활용성도에 따라 변동 될 수 있을 것으로 판단된다.

복원 목표를 토양오염우려기준의 40%(24 mg/kg)로 설정하여 세척을 실시하는 경우, 세척이 필요한 대상 면적은 181,000 m²이며, 세척 대상 심도를 0.3 m(심토까지)로 가정하면, 퇴적토의 토양 세척 대상 물량은 54,300 m³이었다. 대상 물량에 대한 세척 비용 및 세척 폐용액 및 슬러지 처리 비용을 합한 총 복원 비용은 4511,520,930원으로 산정되었으며, 복원 목표를 주변 토양 배경지 농도(123 mg/kg)로 설정하는 경우 총 세척 비용은 4708,565,000원으로서 비용의 큰 차이는 없으나, 복원 목표를 토양오염우려기준(6 mg/kg)으로 설정한 경우의 세척 비용인 847,468,020원과는 큰 차이를 보였다. 이러한 결과로부터 복원 목표 설정에 따른 비용차이가 크므로 세척 비용과 주변 환경의 안전성을 신중히 고려하여 최종 복원 목표를 결정할 필요가 있음을 알 수 있었으며, 복원 후 퇴적토를 댐 유역으로부터 격리시켜 매립하는 경우에는 복원 목표를 토양오염우려기준으로 설정하는 것이 바람직하나, 퇴적토

를 댐 건설을 위해 재활용하는 경우에는 안전성을 고려하여 토양오염우려기준농도의 40%나 주변 배경지 농도를 복원 목표로 설정하는 것이 바람직 할 것으로 판단되었다.

4.3.3. 수물 지역 오염 농경지 토양 복원 계획

비수물 지역의 오염 농경지 토양 복원에 사용되었던 안정화 공법은 복원 비용이 다른 복원 방법에 비해 매우 적고, 복원 기간도 짧다는 장점을 가지고 있으나, 복원의 관점으로부터 보면 복도에 의한 토양 내 비소농도의 희석과 식화에 의한 중금속 불용화 효과에 의한 간접적인 복원 방법에 속한다. 따라서 고로페광산과 연결된 주 하천 하부에 댐이 건설되어 수물지가 형성되는 경우, 수물지 내 오염된 농경지 토양은 저수지 바닥으로부터 저수지 수계의 오염에 직접적인 원인 인자로 작용하게 된다. 비수물지역의 경우, 토양복토 이후에도 필요한 경우 주변 수계의 오염을 막기 위한 후처리 공정의 적용이 가능할 수 있으나, 수물지역의 경우에는 저수지 형성 후에는 더 이상의 오염 토양 처리는 거의 불가능하다. 따라서 복토 완료 실험 결과에서와 같이, 수물지역의 경우 석회복토법이 저수지 바닥의 비소 용출을 40배 이상 감소시켜, 저수지 수계의 영향은 거의 없을 것으로 판단되나, 수물지역의 오염 농경지 토양 복원에 대해서는 석회복토법을 실시하는 복원 계획보다는 수계 오염의 원인이 되는 오염 토양을 굴착/제거하여 수물 지역으로부터 격리시키는 계획

이 보다 안전하다고 판단되었다. 그러나 수물지역 오염 토양을 굴착하여 수물지역으로부터 격리하는 계획은 현실적으로 본 고로페광산 지역 주변에서 오염 토양 70,000-100,000 m³ 규모를 폐기물 처리할 수 있는 공간을 확보하기가 어려우며, 오염 토양을 외부로 반출/운송하는 절차가 환경법상 매우 까다롭고, 주변 지역 주민의 정서를 감안할 때 불가능하다고 판단되었으며, 따라서 굴착된 오염 토양을 현장에서 비오염토와 식회를 혼합하여 복원 목표 농도 이하로 낮춘 후, 건설되는 댐 배민부 환경 친화층(댐의 담수와 접촉되지 않는 부분)에 매립하고 지속적인 모니터링을 실시하여 오염 누출을 제어하는 방법이 보다 현실적인 복원 방법이라 판단되었다. 이러한 복토/재활용 방법의 적용은 복토된 토양 전량을 현장에서 활용한 수 있어서 현 오염 지역의 복원에 적절한 복원 계획이라고 사료된다.

6. 결 론

비소에 의해 오염된 고로페광산주변 농경지 토양 및 하천 퇴적토 복원을 위한 복원 공정의 효율성 실험을 실시하였고, 선정된 복원 방법에 대한 오염 토양 복원 비용 산정하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 폐광산 주변 농경지 오염 토양 복원을 위해 석회를 첨가한 안정화 공법을 적용하는 경우, 복원 효과

Table 8. Cost estimation for washing stream deposit.

Remediation target concentration	Volume of stream deposit to wash (m ³)	Cost of washing per unit volume	Total washing cost (won)
Below 6 mg/kg	10,200	72,000 won/m ³	734,400,000
Below 2.4 mg/kg	54,300	72,000 won/m ³	3,909,600,000
Below 1.23 mg/kg	56,670	72,000 won/m ³	4,080,240,000

Table 9. Cost estimation for waste treatment and transport from stream deposit washing.

Remediation target concentration	Volume of waste after washing (m ³)		Cost of treatment per unit waste volume (won/m ³)		Cost of transport per unit waste volume (won/m ³)		Total cost of treatment and transport for waste (won)
	Waste liquid	Waste sludge	Waste liquid	Waste sludge	Waste liquid	Waste sludge	
Below 6 mg/kg	510	102	180,000	85,400	20,170	22,260	113,068,020
Below 2.4 mg/kg	2,715	543	180,000	85,400	20,170	22,260	601,920,930
Below 1.23 mg/kg	2,834	567	180,000	85,400	20,170	22,260	628,325,000

Table 10. Total cost estimation of the soil washing for stream deposits.

Remediation target concentration	Area of stream deposit for remediation (m ²)	Volume of stream deposit to wash (m ³)	Total cost to remediate with soil washing process (won)
Below 6 mg/kg	34,000	10,200	847,468,020
Below 2.4 mg/kg	181,000	54,300	4,511,520,930
Below 1.23 mg/kg	188,900	56,670	4,708,565,000

를 규명할 수 있는 식회복도에 의한 비소 불용화 효율을 측정하기 위하여 배지 실험과 칸팅실험을 실시하였다. 실험 결과 오염 토양으로부터 비소 용출률은 식회복도 실시 후 약 40배 정도 감소하여, 본 연구 지역 오염 농경지 토양 복원에 효과적으로 사용될 수 있음을 알 수 있었다.

(2) 폐광산 주변에 오염된 하천 퇴적토 복원에 토양 세척법을 이용하는 경우, 현지 오염 퇴적토에 대한 세척 효과를 검증하기 위하여, 4종류(종류수 포함)의 세척액을 선정하여 각각 다른 농도에서 세척 효율을 측정함으로써 오염 퇴적토를 세척하는데 적절한 세척액의 종류와 농도를 결정하였다. 염산과 구연산 0.05 N 세척액으로 세척하는 경우 대부분의 비소가 오염토양으로부터 제거됨을 알 수 있었다.

(3) 오염 토양 복원 목표를 토양오염우리기준, 우리기준의 40%, 주변 배경지 농도로 구분하여 복원 대책을 수립하였고, 하천 퇴적토 복원의 경우 토양 세척법을 이용하여 복원하는 계획을 수립하였으며, 비소로 오염된 하천 퇴적토를 토양세척장비를 사용하여 제거하여 토양과 세척수를 분리한 다음, 세척액은 순환시켜 재사용하고, 최종 세척액과 미세 토양을 포함한 폐슬러지 부분은 위탁 처리하는 것이 바람직할 것으로 판단되었다. 폐광산과 연결된 주 하천 하부에 땀이 건설되는 경우, 담수에 의해 수몰되는 지역과 비수불 지역을 구분하여 농경지 오염 토양 복원대책을 수립하였다. 비수불 지역 농경지 토양은 식회복도법으로 복원하는 계획을 수립하였으며, 수몰지역의 농경지 토양은 식회복도법으로 복원하는 계획과 수몰지역으로부터 굴착/격리하여 토양의 비소 오염 농도를 우리기준의 40% 이하로 낮추어서 땀 건설 현장에서 재활용하는 계획을 제시하였다.

(4) 본 연구는 대규모 토양 성밀 조사 자료를 기초로 하여 폐광주변 오염 토양 복원을 목표로 실시된 구체적인 복원 공성 설계라는 측면에서, 본 연구 지역과 유사한 폐광산 주변 지역의 오염 토양 복원 대책 수립 시 매우 중요한 자료를 제공할 수 있으며, 고로폐광산 오염 토양 복원 사업에 바로 적용될 수 있는 복원 공성의 설계 자료라는 측면에서 그 의미가 크다.

(5) 토양 세척 복원 공성 계획에서, 본 논문은 학술적인 자료로서의 의미가 있는 실제 복원 공성지체에 관한 비용만을 산출하였으며, 전체 공성에 포함되는 설비비, 부대 비용등과 같은 토목비용에 대한 구체적인 비용은 제시하지 않았다. 본 논문에 제시된 복원 방법에 의한 복원 사업 시행에 앞서, 파일럿규모의 플랜트

공성이 선행된다면, 보다 구체적인 복원 대책 설계 및 비용 산정이 이루어질 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 2003년도 한국과학재단 지역대학우수과학자 지원(R05-2003-000-10869)에 의하여 연구되었음. 본 논문을 세심히 심사하여주신 심사자들과 시료 채취와 분석에 도움을 준 한국수자원공사 댐환경처에 감사 드린다.

참고문헌

- 김신태, 윤양화, 박재안, 심의섭 (1999) 전국광산 광미와 주변 토양의 오염조사. 한국토양환경학회지, v. 4, p. 175-183.
- 김종옥, 분희수, 송윤구, 유상한 (1999) 구불광산 일대 광미, 하상퇴적물 및 주변 토양에서의 중금속원소의 존재 형태. 자연환경지질, v. 32, p. 261-271.
- 나준기, 이무성, 정재일 (1997) 폐금속광산하부 농경지 토양의 중금속오염과 그 복구방법으로서 반건조토의 효율성. 자연환경지질, v. 30, p. 123-135.
- 오종기, 이화영, 김성규, 이재영, 박재구 (1998) 산침출에 의한 광미중 비소성분의 제거에 관한 연구. 한국토양환경학회지, v. 3, p. 21-31.
- 이동호, 박옥현 (1999) 폐금속광산 광미 및 주변 오염토양 세정에 관한 연구. 한국토양환경학회지, v. 4, p. 87-101.
- 이효민, 윤은경, 최시내, 박종자, 황성업, 조성용, 김신태 (1998) 폐광산 지역의 비소오염에 대한 복원복표 설정. 한국토양환경학회지, v. 3, p. 13-29.
- 이민호 (2003) 토양·지하수오염. 동화기술교역, 306p.
- 이현구, 이완희 (1998) 충주호 상류, 상곡 광산 수계에 분포하는 토양과 하상퇴적물의 중금속 오염. 한국지하수학회지, v. 5, p. 10-20.
- 정동철, 이지희, 최상민 (1997) 중금속에 의해 오염된 토양에 대한 토양세척기법의 적용성 연구. 한국토양환경학회지, v. 2, p. 53-60.
- 정병채 (1999) 유/폐광 금은광산 주변의 토양오염조사와 복구시스템 연구. 자연환경지질, v. 32, p. 385-398.
- 차종철, 이정산, 이민희 (2003) 토양 정밀 조사에 의한 폐광산 주변 오염 토양 및 하천퇴적토의 오염도 평가 및 오염 토양 복원 규모 설정. 자연환경지질, v. 36, p. 457-467.
- 한국수자원공사 (2002) 화북댐 건설사업 환경영향평가서 초안. 517p.
- 한국수자원공사 (2003) 화북댐 건설사업 환경영향평가서 (보완). p. 243-487.
- 현준, 시병조, 윤도영, 최상일, 이화영, 김성규, 오종기 (1998) 광산매립지에서 중금속(As)의 용출특성에 관한 실험적 연구. 한국토양환경학회지, v. 3, p. 55-63.
- 환경부 (1999) 폐금속광산 오염현황 정밀조사 결과 보고서. 환경부 (2003) 토양환경보전법.
- 황은하, 위수민, 이평근, 최상훈 (2000) 서성 연·이연광산 주변 농경지 토양의 중금속 오염 연구. 한국토양환경학회지, v. 5, p. 67-85.
- Anderson, W.C. (1995) Innovative site remediation technology (Soil Washing/Soil Flushing). American Academy of Environmental Engineers.

2003년 11월 19일 원고접수, 2003년 2월 14일 게재승인.

감사의 글

이 논문을 작성하는 동안 헤아릴 수 없을 만큼의 위대한 학문의 산과 한 구절의 글을 적기위한 명확하면서도 세밀한 글 솜씨 그리고 인내와 열정... 등, 이 모든 것들에 부족함을 느끼면서 이 논문을 완성하였습니다.

먼저 항상 저를 믿어주시고 아껴주시는 어머니, 형, 누나 그리고 친지분들께 감사드리며 앞으로 더 큰 은혜로 보답드릴 것을 약속드립니다.

부족한 저를 받아주시고 지도해주신 이민희교수님께 정말 감사의 말씀을 드립니다. 항상 건강하시고 저 또한 부끄럼 없는 제자가 되도록 하겠습니다. 그리고 지질학이라는 위대한 학문을 이해시켜주신 정상용교수님, 최정찬교수님, 박맹언교수님, 백인성교수님, 송용선교수님, 박계현교수님께 감사의 말씀드립니다. 대학원과정에서 많은 조언과 육체적·정신적 도움을 주신 영교선배, 동환선배, 원진선배, 남훈선배, 자현선배, 태형선배, 병우선배, 승균선배, 선옥선배, 용준선배 감사합니다. 아직 미숙한 점이 많지만 언제나 함께 해준 동기 현민, 필근, 기한, 민우에게도 감사한다. 못난 선배지만 잘 따라준 귀여운 후배 찬수, 윤환, 민, 호섭, 희석, 정윤, 정은에게도 감사하며 더욱더 파이팅 해주기를 바란다. 가족만큼 많이 의지하고 살아온 영원한 환토가족 정산형, 형기형, 현정, 원홍, 나인, 인수, 남호, 예선, 영재, 지혜의 많은 도움에 누구보다 깊은 감사의 뜻을 표합니다. 그 외 항상 뒤에서 지켜봐주신 모든 분들께 감사드립니다. 마지막으로 항상 나의 편에서 편안한 안정을 찾게 해주고 나 스스로를 아끼게 해준 정현에게 감사드리며, 아직 미흡한 점이 많은 논문이지만 누군가에게 작은 보탬이 되었으면 하는 것이 저의 작은 바램입니다.