

토양 세척법과 석회를 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 forty 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 지도를 바탕으로 복원 공정 설계를 실시하였다. 실내 실험을 통하여 오염 농경지 토양에 대하여는 석회를 첨가한 토양 안정화 공법의 처리 효율을 검증하였으며, 오염 하천 퇴적토에 대하여는 토양 세척법의 처리 효율을 규명하였다. 비수몰지역의 오염 농경지 토양의 복원 효율을 규명하기 위하여, 비소 농도가 다른 폐광산 주변 농경지 오염 토양 4종류에 대하여 비소 용출률 배치 실험을 실시한 결과, 석회를 혼합한 토양의 비소 용출이 오염 토양을 그대로 이용한 경우보다 평균 5배 이하로 감소하였다. 댐 건설 후 수몰되는 지역에서 저수지 바닥으로 부터 저수지 수계를 용출되어지는 비소의 용출률을 예측하고, 석회를 첨가한 복토를 실시한 경우 저수지 바닥에서 용출되는 비소의 용출률 감소를 규명하기 위하여 아크릴 칼럼(지름 18.9 cm, 높이 30 cm)을 이용하여 저수지 바닥에서의 비소 용출 모의 실험하였다. 실

*Corresponding author: heelee@pknu.ac.kr

험 결과 복토를 실시하지 않은 오염 토양에서의 비소 용출률은 연간 약 3.05-3.89%를 나타내었으며, 석회 1%를 혼합하여 복토한 경우 저수지 바닥으로부터 비소 용출률은 연간 0.11-0.05%를 나타내어 석회를 혼합한 복토처리 시 저수지 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 배치 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 물량에 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 전제로 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; 이효민 등, 1998; 김선태 등, 1999; 김중욱 등, 1999; 정명채, 1999; 환경부, 1999; 황은하 등,

어지지 않아 주변 오염 토양의 정확한 규모 산출이 불가능하여, 실제 오염 지역에 적합한 복원 방법과 비용 산출에 관한 연구는 매우 제한되어왔다(이현구와 이찬희, 1998; 이효민 등, 1998; 김선태 등, 1999; 김중욱 등, 1999; 정명채, 1999; 환경부, 1999; 황은하 등,

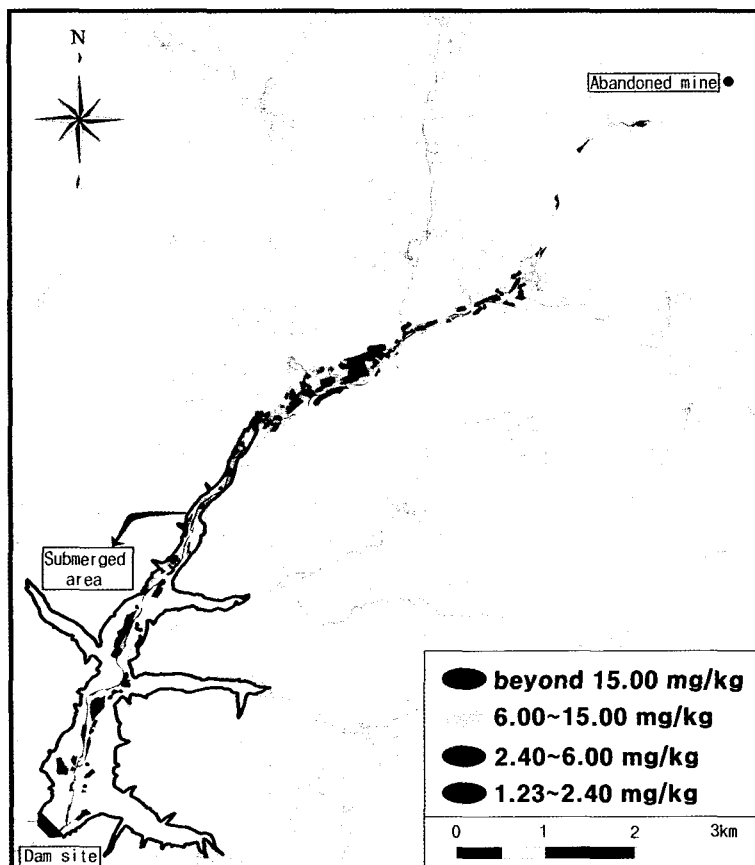


Fig. 1. Pollutant map for As concentration in surface soils around Goro abandoned mine.

2000). 2002년 경상북도 군위군 고로면 석산리에 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(차중철 등, 2003). 본 연구 지역의 경우 토양의 비소 농도가 토양오염 우려기준 이하의 낮은 농도라도 댐 건설 후 생성되는 저수지 특성상, 비소가 댐 담수 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 cm로 가정하였을 때, 주변 오염 농경지와 하천 퇴적토의 복원이 필요한 면적과 복원 물량을 Table 1, 2, 3에 나타내었다(차중철 등, 2003).

본 논문은 산출된 오염 토양 규모에 대하여, 차후 폐광산 하부 하천에 생성될 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 정화가 어려울 뿐만 아니라 독성이 강하여 생물체에 과다한 축적을 가져와 심각한 장애를 일으킬 수 있다. 토양이 비휘발성이며 생물학적으로 난분해성인 중금속들로 오염되어있는 경우, 이들을 제거하는데 적합한 정화기술로서 현장에서 널리 쓰이는 방법은 오염토양 굴착/매

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

립법, 고형화/안정화 방법, 전기 영동법, 객토/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(차종철 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 정화가 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, 중금속의 불용화 수단으로 비오염토양을 석회를 혼합하여 복토함으로써 중금속의 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 정화가 거의 이루어지지 않으며, 오염토양이 하천 내에 존재하므로 현장원위치(in-situ) 방법의 적용이 거의 불가능하다. 본 연구 지역의 하천 퇴적토 복원 면적은 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 g 을 혼합하여 500 ml 수용액에 첨가하여 20°C에서 100 rpm 으로 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_{df})를 다음과 같이 계산하였다.

$$K_{df} = C_w / C_s \quad (1)$$

(C_w : 수용액의 비소 농도, C_s : 토양 내 비소 농도)

계산된 용출분배계수를 비교하여 석회를 첨가한 용출률 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 용출률과 석회 1%를 혼합한 비오염토로 복토한 토양으로부터 저수지 수계로 용출되어지는 비소의 용출률을 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 강철격자체와 용액을 주입/배출할 수 있는 연결관으로 이루어져 있으며, 칼럼 원통면에 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 $3\text{--}5\text{ cm}$ 에서 칼럼 벽면의 시료 채취 홈에 시린지를 이용하여 약 90여 일 동안 하루에 한번씩 10 ml 를 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 용출률을 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

고로폐광산 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

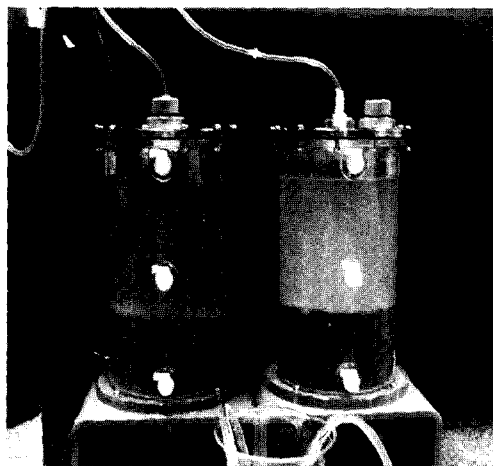


Fig. 2. Column experiment for As extraction from the soil.

적정)에 대하여 각각 토양 세척 효율 배치 실험을 실시하였다. 자연 건조된 퇴적토 시료 20 g 을 세척액 500 ml 에 넣어 20°C 에서 200 rpm 으로 3시간 항온 진탕한 후, 상등액을 취하여 원심분리(2000 rpm 에서 20분)하고, 거름종이로 필터링한 용액을 분석하였다. 적절한 세척 시간을 결정하기 위하여 세척시간을 달리하며 세척률을 측정한 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 88.2 , 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_{df})를 구하였으며, 그 결과를 Table 4에 나타내었다. 토양 종류에 따라 용출되는 비소량의 차이가 심한 것으로 나타났으며 이는 각 토양들의 물리/화학적 특성의 차이 때문으로 여겨진다. 모든 토양에 대하여 용출 시간이 증가함에 따라 용출되는 비소량과 용출분배계수값(K_{df})은 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_{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
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_{df} : 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_{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 (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 중첩되어 실제 오염 토양으로부터 용출되어 수계를

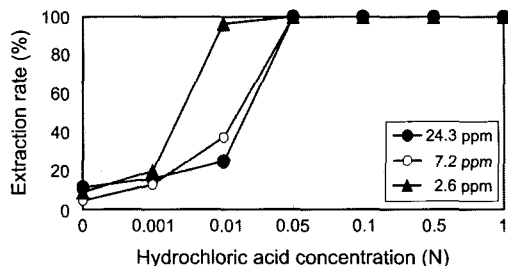
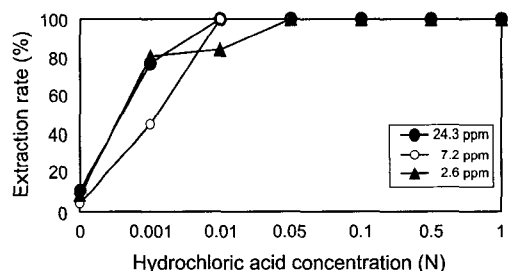
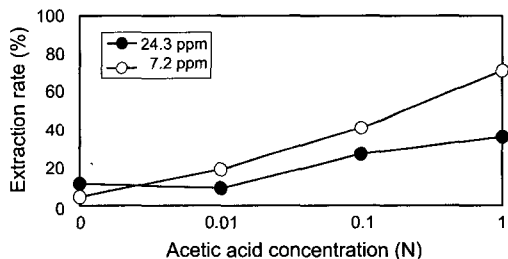
오염 시키는 비소의 용출량은 석회를 첨가한 안정화 공법에 의해 20배 이상 감소할 것으로 판단되며, 이러

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)을 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 적절하게 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

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 적절한 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, 배경치 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

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

토를 심도 깊이인 30 cm 두께로 실시하고, 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 폐슬러지 부분은 반출함으로서 오염 지역의 하천 퇴적토를 복원하는 경우를 가정하여 복원에 필요한 비용을 산정하였으며, 복원 물량에 대한 세척 비용 및 세척 후 발생하는 폐용액 및 폐슬러지 처리 비용을 합한 총 복원 비용을 Table 8, 9, 10에 나타내었다. 복원 심도를 30 cm(심도 깊이)로 가정하였으며, 세척 폐액 및 폐슬러지 처리 및 운반비용은 지정폐기물공공처리시설납입수수료(환경부고시 제1997-1호)에 의거하여 산정하였다. 폐액과 폐슬러지 운반 거리는 본 연구지역으로부터 100 km 이내로 가정하였으며, 세척 후 발생하는 폐세척액과 폐슬러지 양은 토양 세척 시 일반적으로 발생하는 양을 기준하여, 폐세척액은 세척액 부피의 5%, 폐슬러지는 1%로 가정하였으나, 산정된 복원 비용은 실제 퇴적토 세척 후 발생하는 폐수 및 슬러지 양, 세척액의 재활용정도에 따라 변동 될 수 있을 것으로 판단된다.

복원 목표를 토양오염우려기준의 40%(2.4 mg/kg)로 설정하여 세척을 실시하는 경우, 세척이 필요한 대상 면적은 181,000 m²이며, 세척 대상 심도를 0.3 m(심도까지)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 배경치 농도(1.23 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 적절히 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 배경치 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 짧은 장점을 가지고 있으나, 복원의 관점으로만 보면 복토에 의한 토양 내 비소농도의 회석과 석회에 의한 중금속 불용화 효과에 의한 간접적인 복원 방법에 속한다. 따라서 고로폐광산과 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 칼럼 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 고로폐광산 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 석회를 혼합하여 복원 목표 농도 이하로 낮춘 후, 건설되는 댐 배면부 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 현지에서 활용할 수 있어서 현 오염 지역의 복원에 적절한 복원 계획이라고 사료된다.

6. 결 론

비소에 의해 오염된 고로폐광산주변 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 석회복토에 의한 비소 불용화 효율을 측정하기 위하여 배치 실험과 칼럼실험을 실시하였다. 실험 결과 오염 토양으로부터 비소 용출률은 석회복토 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(중류수 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 토양오염우려기준, 우려기준의 40%, 주변 배경치 농도로 구분하여 복원 대책을 수립하였고, 하천퇴적토 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 댐이 건설되는 경우, 댐수에 의해 수몰되는 지역과 비수몰 지역을 구분하여 농경지 오염 토양 복원대책을 수립하였다. 비수몰 지역 농경지 토양은 석회복토법으로 복원하는 계획을 수립하였으며, 수몰지역의 농경지 토양은 석회복토법으로 복원하는 계획과 수몰지역으로부터 굴착/격리하여 토양의 비소 오염 농도를 우려기준의 40% 이하로 낮추어서 댐 건설 현장에서 재활용하는 계획을 제시하였다.

(4) 본 연구는 대규모 토양 정밀 조사 자료를 기초로 하여 폐광주변 오염 토양 복원을 목표로 실시된 구체적인 복원 공정 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 공정의 설계 자료라는 측면에서 그 의미가 크다.

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

공정이 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 감사드린다.

참고문헌

- 김선태, 윤양희, 박재안, 심의섭 (1999) 진곡광산 광미와 주변 토양의 오염조사. 한국토양환경학회지, v. 4, p. 175-183.
- 김종욱, 문희수, 송윤구, 유장한 (1999) 구룡광산 일대 광미, 하상퇴적물 및 주변 토양에서의 중금속광산의 존재 형태, 자원환경지질, v. 32, p. 261-271.
- 나춘기, 이무성, 정재일 (1997) 폐금속광산하부 농경지 토양의 중금속오염과 그 복구방법으로서 반전재토의 효율성. 자원환경지질, v. 30, p. 123-135.
- 오종기, 이화영, 김성규, 이재형, 박재구 (1998) 산철출에 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, 박송자, 황경엽, 조성용, 김선태 (1998) 폐광산 지역의 비소오염에 대한 복원목표 설정. 한국토양환경학회지, v. 3, p. 13-29.
- 이민호 (2003) 토양·지하수오염. 동화기술교역, 306p.
- 이현구, 이찬희 (1998) 충추호 상류, 상곡 광산 수계에 분포하는 토양과 하상퇴적물의 중금속 오염. 한국지하수환경학회지, v. 5, p. 10-20.
- 정동철, 이지희, 최상일 (1997) 중금속에 의해 오염된 토양에 대한 토양세척기법의 적용성 연구. 한국토양환경학회지, v. 2, p. 53-60.
- 정명채 (1999) 휴폐광 금광산 주변의 토양오염조사과 복구시스템 연구. 자원환경지질, 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. 자원환경지질, v.36, p. 457-467.
- 한국수자원공사 (2002) 화북댐 건설사업 환경영향평가서 초안. 517p.
- 한국수자원공사 (2003) 화북댐 건설사업 환경영향평가서 (보완). p. 243-487.
- 한춘, 서명조, 윤도영, 최상일, 이화영, 김성규, 오종기 (1998) 광산매립지에서 중금속(As)의 용출특성에 관한 실험적 연구. 한국토양환경학회지, v. 3, p. 55-63.
- 환경부 (1999) 폐금속광산 오염실태 정밀조사 결과 보고서.
- 환경부 (2003) 토양환경보전법.
- 황은하, 위수민, 이평구, 최상훈 (2000) 서성 연·아연광산 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.