강릉시 옥계면의 폐광산 지역 중금속 오염토양 정화

비소와 납 정화를 중심으로

작성자 지구과학교육과
2009-12842 윤누리

지하수 및 토양오염
남경필 교수님

목 차

1. 사업의 개요

1.1. 개요 및 목적

1.1.1. 사업의 배경

1.1.2. 사업의 목적

1.2. 제안범위

1.3. 사업수행 절차

2. 오염현황 및 기지분석

2.1. 부지 지리적 특성

2.1.1. 부지 환경

2.1.2. 부지 지질적 특성

2.1.3. 토양의 이화학적 특성

2.2. 오염 특성

3. 정화공법 선정

3.1 설계 개요

3.2 정화 지역 선정

3.3 적용 가능 정화 공법

3.3.1. 동전기정화법(electrokinetics)

3.3.2. 원위치 토양 세정법(In-situ soil flushing)

3.3.3. 토양 세척법(Soil washing)

3.3.4. 원위치 고형화/안정화 기법
(In-situ solidification/stabilization)

3.3.5. Phytoremediation

3.4. 정화 기술의 평가 및 선정

4. 오염정화 수행 계획

4.1. 원위치 고형화 안정화 기법 - 화학적 고정화

4.1.1. 정화 부지의 특성

4.1.2. 화학적 고정화 공법을 사용한 복합 중금속 오염토양 정화

4.2. Phytoremediation

4.2.1. 정화 부지 특성과 정화 공법의 연계성
4.2.2. 적용가능 식물의 특성
4.2.3. 정화 공법 활성화 방안

5. 정화계획

5.1. 원위치 고형화/안정화 기법 - 화학적 고정화
5.1.1. 정화 방법
5.1.2. 정화 실시
5.2. Phytoremediation
5.2.1. 정화 방법 및 자원
5.2.2. 정화 기간
5.3. 예정 공정표

6. 고정화 처리 후 토양의 장기 안정성 연구

6.1. 연구의 필요성
6.2. 실험 방법
6.3. 실험 결과

7. 참고문헌

1.1. 개요 및 목적

1.1.1. 사업의 배경

Fig 1. 오염부지 위성 사진

도내 토양복원사업을 마친 휴·폐광산 주변 논과 밭에 신경장애와 발암성 피부발진을 일으키는 비소(As) 등 중금속 오염이 심각한 것으로 드러났다. 환경부가 제출한 지난해 광해방지사업 완료 폐광산 주변지역의 사후 환경오염조사결과에 따르면 조사대상 7곳 중 5곳의 중금속 오염이 심각한 것으로 조사됐다. 전국에서는 조사 광산 57곳 중 68%인 39곳의 광산에서 중금속이 검출돼 토양대책기준 또는 우려기준을 초과했으며 이 중 46.2%인 18곳이 토양복원사업을 마친 곳이다. 그 중에서도 이번 정화 선정 지역인 강릉시 옥계면 옥계광산 또한 토양복원사업이 완료된 곳인데도 불구하고, 비소가 42.4㎎/㎏이 검출되었으며, 이는 비소의 토양우려기준인 25㎎/㎏을 초과한 것이다. 국내 폐광산의 수는 1980년대 후반 여러 가지 문제로 인하여 급격히 증가하였다. 폐광산의 주요 오염원이자 복원대상은 이전의 선광장에 남아있는 광미, 그리고 산성배수 등에 의해 오염된 주변 토양이다. 유실방지 시설 없이 폐광산 주변에 방치되어 있는 광미는 바람에 의하여 주변 토양을 산성화 시키고, 중금속으로 오염시키고 있는 상황이다.

1.1.2. 사업의 목적

오염된 폐광산 지역에 대해 제시된 기준에 부합하는 정화를 수행한다.
(토양정화기준은 토양환경보전법 토양오염 우려기준, 지하수 정화기준은 지하수법 생활용수 기준을 바탕으로 한다) 그리고 이 결과를 바탕으로 검증된 정화기술을 국내 여건에 맞게 적용하여 효율적이고 경제적인 정화를 수행하며, 지역 개발과 연계한 공정 및 정화 수행을 통해 최종적으로 고객만족을 달성한다.

1.2. 제안범위

사업기간	7개월	5년	-
사업부지	주거밀집 단지	수련원과 인근 공터	폐광산 지역
총면적	50,000 m^2	20,000 m^2	40,000 m^2
오염면적	15,000 m^2	2,000 m^2	1,500 m^2
오염물질	비소, 납	비소, 납	비소, 납

Table 1. 오염대상지역 특성 및 사업 기간

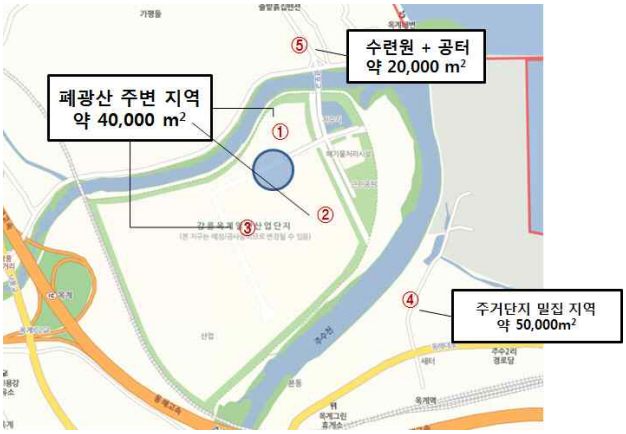


Fig 2. 오염 지역 모식도

1.3. 사업수행 절차

1단계 추가 조사에서는 기본 정밀조사의 분석 및 해석, 현장 자료 수집 및 유관 기관 협의 과정을 거친다. 부지특성조사, 토양 및 지하수 환경 특성조사 및 추가 보완 자료를 수집한다. 다음으로는 실시설계 과정으로 1단계의 추가 조사 결과를 바탕으로 현장 실증시험을 수행하고 토양 정화공정을 설계한다. 본격적인 정화공사 과정에서는 착수 전 오염부하 감소를 위한 선조치를 취하고 여러 정화 공법을 통한 정화를 수행한 후 2차 오염 방지 및 모니터링을 실시한다. 특히 사후 모니터링 시스템을 통해 자연저감 효율을 분석하는 것도 중요한 과정이라 할 수 있다.

2. 오염현황 및 기지분석

2.1. 부지 지리적 특성

2.1.1. 부지 환경

Fig 3. 폐광산 지역으로부터 하천까지의 거리

강원도 옥계면 폐광산 지역의 총 부지면적은 폐광산 주변 지역과 인근 주거단지 밀집지역, 그리고 근처의 공터와 여성수련원 지역을 포함하여 총 약 110,000m^{2}이다. 그 중 오염물질에 의해 우려 기준보다 심각하게 오염된 지역은 오염된 총 18,500m^{2}으로 약 16.8%정도를 차지하고 있어 상당히 넓은 지역에의 대규모 토양오염이라고 할 수 있다. 그리고 대부분 지역의 지하수에서 비소, 납 등 중금속 오염은 심각하지 않은 것으로 조사되었으나 오염 원인 구역으로부터 인근 하천까지의 거리가 100m 미만인 부분이 있기 때문에 퇴적토에 대한 추가적인 조사가 필요하다고 판단된다. 또한 오염지역 인근 하천 건너 주거 밀집 단지가 있기 때문에 이를 충

분히 고려한 정화가 이루어져야 한다.

2.1.2. 부지 지질적 특성

구분	특성
매립층	- 지층 최상부를 이루고 있으며 실트 섞인 모래로 구성 - 부분적으로 자갈이 혼재하며 자갈 크기는 3~10cm - 두께는 2.0~6.5 m로 분포함 - 황갈색 ~ 암회색의 색조
풍화암	- 기반암이 풍화되어 형성된 지층 - 풍화작용을 받아 구조 및 조직은 유지하고 있으나 실트질 세립 ~ 조립질 모래로 분해된다. - 층후는 0.3m로 BH-1에서만 나타남 - 황갈색의 색조
경암	- 기반암인 적색셰일의 경암 - 절리 및 균열의 발달 - 약함 ~ 보통강함

Table 2. 부지의 지질적 특성

본 지역의 광산이 위치한 상부는 화강암이 우세하고, 하부는 퇴적암 중 셰일, 사암, 역암 등이 불연속적으로 나타난다. 광산 부지 내에 5개소의 시추조사를 실시한 결과 지층은 상부로부터 매립층 및 풍화암, 경암의 순으로 이루어져 있었다. 매립층은 광산폐기물과 주변 오염토성분이 주를 이루고 있으며, 폐광산에 대한 정비사업과정에서 형성된 지층으로, 대부분의 중금속 오염토는 이 곳에 존재하고 있다.

2.1.3. 토양의 이화학적 특성

시험 항목	Soil pH	유기물 함량	CEC (cmol/kg)	Soil Classification	Exchangeable base(mg/kg)
시험 결과	6.18	0.0067	11.34	Loamy Sand Sand 83.64% Silt 6.64 % Clay 9.72 %	Ca 74.56 K 0.99 Mg 208.60 Na 33.74

Table 3. 토양의 이화학적 특성

2.2. 오염 특성

폐광산 지역을 중심으로 5개의 지점을 선정하여 깊이별로 나타내었다. 환경부의 토양환경보전법 시행규칙에 의하면 부지 ①~③의 경우 폐광산이기 때문에 지역 3으로 분류되며, 부지 ④, ⑤는 지역 1로 분류할 수 있다. [1]조사지역의 토양을 천연부존량과 비교하였을 때 대부분의 조사항목에서 농도가 높게 나타났으며, 토양환경보전법상 우려기준을 초과하여 나타난 성분은 납과 비소이었다.[2] 오염도 평균값과 우리나라 밭토양의 천연부존량과 비교해본 결과, 본 광산부지는 수은이나 시안에 의한 오염징후는 없었다.

Sample	표토 (30 cm) (단위 : mg/kg)						
	Pb	As	Hg	Cd	Cu	P	Cl
1	4004	124	0.09	74.8	29.6	4.2	0.13
2	3707	923	0.15	68.13	47.6	5.2	0.09
3	286.3	432.3	0.23	8.928	23.17	3.3	0.18
4	407.4	150	0.16	15.61	21.3	4.3	0.18
5	494	228	0.08	24.88	33.6	5.2	0.13

Sample	심토 (140 cm) (단위 : mg/kg)						
	Pb	As	Hg	Cd	Cu	P	Cl
1	1319	50	-	343	18.7	-	0.03
2	5214	42	-	410.6	16.6	-	0.02
3	386.8	23	-	7.259	18.09	-	0.03
4	1633	69	-	15.51	54.92	-	0.03
5	430.4	23	0.08	52.64	88	2.2	0.03

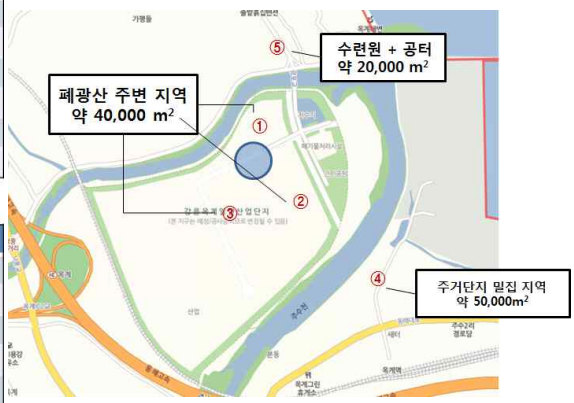


Table 4. 지점별 오염 농도

특히 위의 표에서 알 수 있듯이, 지표로부터 30cm 까지의 표토에서 납과 비소의 오염이 심각한 수준인 것으로 나타났다. 특히 비소의 경우 심토에 비해 표토의 오염 정도가 매우 심각하여 한시라도 빠른 정화가 필요한 것으로 판단되었다.

---

1)

1. 1지역: 「측량·수로조사 및 지적에 관한 법률」에 따른 지목이 전·답·과수원·목장용지·광천지·대(「측량·수로조사 및 지적에 관한 법률 시행령」 제58조제8호가목 중 주거의 용도로 사용되는 부지만 해당한다)·학교용지·구거(溝渠)·양어장·공원·사적지·묘지인 지역과 「어린이놀이시설 안전관리법」 제2조제2호에 따른 어린이놀이시설(실외에 설치된 경우에만 적용한다) 부지
2. 2지역: 「측량·수로조사 및 지적에 관한 법률」에 따른 지목이 임야·염전·대(1지역에 해당하는 부지 외의 모든 대를 말한다)·창고용지·하천·유지·수도용지·체육용지·유원지·종교용지 및 잡종지(「측량·수로조사 및 지적에 관한 법률 시행령」 제58조제28호가목 또는 다목에 해당하는 부지만 해당한다)인 지역
3. 3지역: 「측량·수로조사 및 지적에 관한 법률」에 따른 지목이 공장용지·주차장·주유소용지·도로·철도용지·제방·잡종지(2지역에 해당하는 부지 외의 모든 잡종지를 말한다)인 지역과 「국방·군사시설 사업에 관한 법률」 제2조제1항제1호부터 제5호까지에서 규정한 국방·군사시설 부지

2) 납의 토양오염 우려 기준은 1지역, 2지역 3지역에서 각각 200mg/kg, 400mg/kg, 700mg/kg, 비소의 토양오염 우려기준은 1지역, 2지역 3지역에서 각각 25mg/kg, 50mg/kg, 200mg/kg 이다. 그리고 우리나라 밭토양 천연부존량은 납 2.96mg/kg, 비소 0.43mg/kg이다.

Fig 4. 토양 단면도

하천 퇴적토의 오염 수준은 아래 표와 같다. 폐광산 주변을 흐르는 하천으로 오염물질이 유입되어 바다와 하천 유역이 오염될 우려가 있다. 하지만 계속해서 흐르는 하천의 중금속 농도를 조사하기보다는 하천 퇴적토의 중금속 농도를 조사하여 실제로 하천이 폐광산의 오염물질로부터 중금속 오염이 이루어지고 있는지를 알아볼 필요가 있다. 실제로 조사 결과 하천 퇴적토의 비소와 납을 포함한 중금속은 우려기준 이하로 측정되었기 때문에 하천 오염은 없는 것으로 사료된다.

Sample	하천 퇴적토 (30 cm) (단위 : mg/kg)						
	Pb	As	Hg	Cd	Cu	P	Cl
1	130	5	0.08	74.8	29.6	4.2	0.13
2	110	7	0.15	68.13	47.6	5.2	0.09
3	98	6.5	0.23	8.928	23.17	3.3	0.18

Table 5. 하천 퇴적토 지점 별 오염 수준

3. 정화공법 선정

3.1. 설계 개요

각 부지 별 토양 오염에 대한 정화 계획 및 정화 수행 방안을 정량적으로 제시하고, 토목공사, 전기계장, 기계설비 등의 설계를 완료하여 정화공사가 원활이 이루어지도록 추진한다. 정화실시설계는 총 7 단계로 이루어진다. 우선 진단 과정에서 기지별 토양 특성에 따라 오염물질이 어떻게 확산될 것인지, 인자가 무엇인지 규명한다. 그리고 이를 바탕으로 부족한 자료에 대한 추가 조사를 실시한 후 이전 사례 등 자료 검토를 통해 정화공법을 선정한다. 이 때는 친환경 공법을 우선적으로 적용하도록 하며, 실증시험을 통해 현장에 적합한지를 확인한다. 다음으로 부지별 특성에 맞는 정화 공법을 확정한 후 최종적으로 토목설계, 전기계

장 기계설비, 계측설계를 완료한다. 총 실시설계 기간은 120일로 결정하였다.

- 정화목표

오염물질		정화목표 (mg/kg)	적용기준 선정 사유
중금속	Pb	200mg/kg	향후 부지 활용 계획 및 현재 활용 용도에 적합한 수준의 정화 목표 강화
	As	25mg/kg	

Table 5. 중금속 별 정화 목표

3.2. 정화 지역 선정

① ~ ⑤까지 모든 지역에서의 오염 농도 수준이 높게 나타났으나, 특히 현재 주거지역으로 활용되고 있는 구역 4와 향후 농경지 및 수련원 부지로 활용될 구역 5의 정화가 선행되어야 할 것으로 판단되었다. 따라서 이번 정화 사업의 경우 구역 4, 5를 우선적으로 정화대상지역으로 선정하고 향후 결과를 바탕으로 나머지 지역의 정화를 실시하도록 하겠다.

오염구역	구역 4 (주거 밀집지역)	구역 5 (수련원과 공터 지역)
토양오염 분포도		
오염물질	As, Pb	As, Pb
최고농도(mg/kg)	As : 150 Pb : 407.4	As : 228 Pb : 494
오염심도(-m)	0~1.5	0~1.5
오염면적 (m^2)	2,000	1,500
오염토량 (m^3)	3,000	2,250
오염토량 무게(ton)	3,900	2,925
오염 경로	폐광산 폐기물	폐광산 폐기물

Table 6. 지점 별 오염 특성

3.3. 적용 가능 정화 공법

3.3.1. 동전기정화법(electrokinetics)

지중 내에 직류 전류를 공급하여 전기삼투, 전기이온이동 등의 동전기 현상을 발생시켜 토양 내 중금속을 이동, 제거시키는 기술로서 굴착이 불필요한 원위치 기술이다. 토양은 공극에 물을 함유하고 있으며 염의 존재로 인해 전기 전도도를 갖고 있기 때문에 토양 내에 전기장을 형성시켜주면 전하를 띤 물질, 입자 등을 이동시킬 수 있다. 이 공법은 높은 투과능을 가진 토양에 존재하는 무기오염물질을 제거하는 데 효과적이다. 하지만 추출 폐액에 대한 추가적인 처리가 필요하며 토양이 불균질할 경우 효율이 저하되는 단점이 존재한다. 점토와 같은 미세토양에서도 오염 물질을 이동시킬 수 있고 운영비가 비교적 싸며 처리된 물질을 회수하여 사용할 수 있는 장점이 있지만 아직 국내 현장에서는 적용된 사례가 없다.

3.3.2. 원위치 토양 세정법(In-situ soil flushing)

오염 물질의 용해도를 증가시키기 위해 첨가제를 함유한 물이나 순수한 물을 토양 및 지하수에 주입하여 오염토양 지역 내의 지하수 수위를 상승켜 오염물질을 지하수내로 침출해서 추출 처리하는 공법이다. 세척액 주입 공정을 통해 추출액을 이동시키고 다른 지역에 관정을 설치하여 지하 대수층으로부터 추출액을 제거하는 방식으로 오염토양을 정화한다. 추출된 지하수에 탈착된 오염물질을 포함한 세정액은 추가적으로 처리해야 할 필요성이 존재한다. 제거 효율은 토양의 특성에 따라 다르며 오염물질의 성분보다는 토양의 수리지질학적인 요소에 더 많이 좌우된다. 다만 투수성이 낮은 토양은 처리하기 힘들고, 첨가된 계면활성제가 토양 공극을 감소시키거나 오염물질의 유동을 감소시킬 수 있다. 그리고 세척액의 흐름 경로를 적절하게 조절하지 못할 경우 주변 지역으로 오염을 확산시킬 수 있고 처리비용이 매우 높다는 단점이 존재한다.

3.3.3. 토양 세척법(Soil washing)

오염토를 굴착하여 토양 내의 오염물을 세척수와 기계적인 혼합을 통해 미세토양과 액상으로 이동, 분리시켜 토양오염물의 부피를 감소시키는 공법이다. 처리과정은 전처리-> 분리 -> 굵은 모래 처리-> 미세 모래 처리 -> 처리수 정화 -> 처리 잔류물 관리의 6개 과정으로 요약되며 처리효율에 대한 모니터링과 복원공정 품질관리가 용이하다. 세척유출수로부터 미세 토양입자를 분리해 내기 위해 응집제를 추가적으로 첨가해야 할 경우도 있으며 복합오염토양의 경우 세척제의 선정이 어렵다. 그리고 세척 과정에서 발생하는 미세토와 세척 폐액에 대한 추가적인 처리비용이 소모되며 오염토를 굴착해야 하므로 복원기간동안 부지 이용성을 저감시킨다는 단점이 존재한다.

3.3.4. 원위치 고형화/안정화 기법(In-situ solidification/stabilization)

고정화 방법은 토양 내 중금속 오염물질을 물리적 및 화학적 방법을 통해 외부 환경에의 노출을 최소화시키거나 새로운 안정된 형태로 변형시키는 방법이다. 안정화는 폐기물의 용해성, 유동성, 독성 형태를 최소화하기 위해 오염물질을 변형시키는 것이며, 고형화는 비고형화상태의 오염물질을 고형물로 바꾸어 폐기물의 물리적 형태를 변화시키는 것이다. 처리 형태에 따라 시멘트와 같은 바인더(binder)를 오염토와 혼합시켜 오염토양을 물리적으로 안정한 상태의 고화체로 만드는 방법과, 화학제제를 사용하여 토양 내 오염물질의 독성과 이동성을 감소시키는 방법으로 나뉜다. 장점으로는 오염물의 확산을 신속하게 막을 수 있고 주변 상황과 관계 없이 저렴한 비용으로 오염물을 정화할 수 있으며, 오염 물질을 고형화시킴으로서 강우나 지하수에 의한 용출을 제어할 수 있다. 또한 화학적 고정화방 법은 천연 및 합성 화학적 제제를 적용함으로써 토양의 물리적 특성을 변화시키지 않으면서 토양 내의 중금속 오염물질을 안정된 형태로 고정화하여 위해성을 저감시킬 수 있다. 단점으로는 첨가제를 주입함으로써 고형화된 오염물질의 부피가 증가할 가능성이 존재하며 휘발성 유기물질은 안정화된 폐기물 형태로 고정화되지 않기 때문에 처리에 부적합하다.

3.3.5. Phytoremediation

수목, 초본식물, 수생식물 등을 이용하여 환경오염물질을 제거, 분해, 안정화하는 것으로, 식물의 성장이나 대사과정을 이용여 많은 부분이 전통적 농경기술로 이루어져 있다. 가장 큰 장점은 비용이 저렴하며 환경 교란을 최소화할 수 있다는 것이다. 이는 태양 에너지에 의해 가동되는 청정기술이라는 점에서 환경에 미치는 영향이 적으며, 현장성이 높은 기술이다. 뿐만 아니라 친환경적이라는 이미지 때문에 지역 주민 등 이해 당사자들의 지지를 쉽게 얻을 수 있는 기술이다.

Technologies	Cost (US$ ha^{-1})	Cost (US$ ton^{-1})†
Chemical treatment	1,100,000	100-500
Soil washing	500,000	75-200
Soil flushing(in situ)	400,000	40-190
Vitrification(reagent)	300,000	75-90
Vitrification(thermal)	1,200,000	250-425
Thermal desorption	1,200,000	150-500
Thermal treatment	850,000	170-300
Electrokinetics	400,000	20-200
Incineration	3,000,000	200-1500
Landfilling	1,100,000	100-500
Phytoremediation	225,000	25-100

Source: adapted from Ensley (2000). † Cleaning the top 30cm of contaminated soil.

Table 7. 중금속 오염 토양에 적용가능한 처리 공법의 경제성 비교

초기시설비 투입 후 별도의 유지관리비가 소요되지 않으며, 식생의 활착이

후에는 인위적인 관리가 필요치 않다. 선행 정화 사업 자료들에 따르면 기존 물리화학적 기법에 비해 10%에 가까운 비용을 절감할 수 있을 것으로 예상된다. 하지만 시간이 오래 소요되기 때문에 도심에 가까운 토양이나 경제활동이 요구되는 부지의 경우 장기간의 경작이 불가능한 경우가 많다. 복원 우선순위가 낮고 복원의 책임이 있는 당사자가 없는 경우 잘 적용될 수 있으며, 시급하게 중금속 제거의 필요성이 떨어지는 지역의 경우 잘 적용될 수 있다.

3.4. 정화 기술의 평가 및 선정

	지형 특성	소요 기간	정화 부산물	2차 오염	경제성	평가
동전기정화법	○	○	△	△	○	
원위치 토양 세정법	△	○	△	△	△	
토양 세척법	×	○	○	○	△	
원위치 고형화/안정화법	○	◎	○	○	○	선정
식물정화공법	◎	△	◎	◎	◎	선정
◎ : 좋음 ○ : 양호 △ : 나쁨 × : 불가						

Table 8. 각 정화 기술 평가표

폐광산 비소, 납 중금속 오염지역을 정화하기 위해 5가지의 정화 공법을 위에서 간략히 소개하고 각 정화 공법을 지형 특성, 소요 기간, 정화 부산물, 2차 오염, 경제성의 5가지 평가 기준에 맞추어 평가를 하였다. 토양 정화 기술은 크게 굴착 여부에 따라 In-situ 기법과 Ex-situ 기법으로 나눌 수 있는데 In-situ 기법은 굴착이 불필요한 기술이며 Ex-situ 기법은 굴착 후 처리하는 기술이다. 폐광산과 주변 지역의 오염 부지의 가용성이 한정되어 있기 때문에 굴착 후 오염지역 이외의 곳에서 처리해야 하는 ex-situ 공법보다는 in-situ기법의 효용성이 높다.

여러 In-situ 기술 중 동전기정화법과 토양 세척법은 오염토양 정화 후 발생하는 2차 폐액으로 인한 오염의 우려가 있으며 추가적인 처리에 많은 비용이 소요된다. 원위치 고형화/안정화 기법에서 화학적 제제를 사용한 안정화 기법은 화학적 제제가 중금속과 반응하여 용해도적이 매우 낮은 안정한 물질로 형태가 바뀌며, 기존의 다른 중금속 정화기술에 비해 비용 절감이 크다. 따라서 토양의 물리화학적 변화를 최소화하면서 중금속의 생채이용능력과 이동성을 최소화시킬 수 있는 화학적 고정화 공법을 선정하였다.

4. 오염정화 수행 계획

4.1. 원위치 고형화 안정화 기법 - 화학적 고정화

4.1.1. 정화 부지의 특성

조사 지역의 시료 분석 결과 현장토양은 입도분포가 좋은 모래질 흙으로 분류되었다. 표토는 곳곳에 폐석더미와 광미가 존재하고 대부분의 시료에서 우려기준을 초과하는 납과 비소가 검출된 것으로 판단할 때 복합 중금속 오염 토양이며, 높은 중금속 오염도 때문에 적은 양이온 교환능과 치환성 염기의 양이 적게 포함되어 있다. 토양의 pH는 7.5정도로 높게 형성되어 있으며 이는 대부분의 중금속이 주변의 토양에 침전된 형태로 흡착되어 있다고 판단된다. 심토 시료는 표토와 비슷하였으나 비소의 농도는 표토보다는 낮았다. 하지만 우려기준을 초과하였으며 이를 통해 강우 등에 의한 지중으로의 오염 확산이 일어나고 있음을 알 수 있다.

4.1.2. 화학적 고정화 공법을 사용한 복합 중금속 오염토양 정화

화학적 고정화 기술은 화학적 제제를 투입하여 토양 내 중금속과 반응해 화학적으로 매우 안정되고 용해도적이 매우 낮은 형태로 변환시키는 기술이다. 이러한 화학적 고정화 기법에 사용되는 화학 제제는 인산염 물질이 각광을 받고 있다. 토양 내 존재하는 비소음이온은 철과 매우 잘 결합하여 안정된 침전물을 형성하는데 이 때 비소의 고정화에 사용되는 제제는 철 제제 FSM(Ferrous Sulfate Monohydrate)으로, 수용액 상태에서 토양의 비소와 매우 잘 결합하여 용해도가 매우 낮은 안정한 형태의 화합물로 존재한다. 납과는 초기에 높은 고정화율을 보이나 실험 결과 시간이 지남에 따라 잔류 납 농도가 증가하였다. 따라서 납을 효율적으로 고정시킬 수 있는 인산염 제제인 MKP(Mono potassium Phosphate)을 복합적으로 투입하여 이를 해결할 수 있다. MKP의 투입으로 토양에 존재하는 납과 비소는 광범위한 pH조건에서 용해도가 낮은 안정한 반응물을 생성한다. 하지만 연구 결과 복합 제제를 투입하였을 때 납은 99%의 고정화율을 보였으나, 비소는 약 50%의 고정화율을 보였다. 따라서 잔류 비소를 장기적인 관점에서 효과적으로 정화시키기 위해 식물 정화 공법을 도입하여 이를 해결할 수 있다.

4.2. Phytoremediation

4.2.1. 정화 부지 특성과 정화 공법의 연계성

광산 주변은 중금속에 의한 독성이 있을 뿐 아니라 토양의 경사가 심하고 얇은 작토층으로 이루어져 있다. 때문에 폐광산의 경우 식피가 없는 나대지로 존재할 때 비바람에 의한 오염 물질 유거나 토양 침식 등이 일어날 수 있다. 여기에 토양 개량제를 이용하여 중금속의 이동성과 유효도 저감하고 중금속 내성 식물 투입하며 토양 침식 막을 수 있다는 부대 효과도 있다. Phytoremediation의 경우 수동적이지만 유휴지, 휴경지, 임야 등의 오염지에 안정화를 목적으로 비용 효율적인 측면 고려해야 한다. 이번 정화 사업의 대상지인 5번 구역의 경우 정부 방침에 따라 약 10년 후부터 농경지로 사용되고, 수련원이 재이용될 계획이기 때문에 Phytoremediation이 적합하다고 판단되었다.

4.2.2. 적용가능 식물의 특성

	토양 그룹별 인자	토양조건, 기능과의 관계	As
물리적 인자	토성	수분과 화학물질의 보유, 이동	연관성 높음
	토양 깊이, 표토, 뿌리	생산성 평가, 침식 가능성	연관성 높음
	침투력, 토양용적밀도	용탈과 침식 잠재성	연관성 높음
	수분보유능력	수분 보유, 수송, 침식과 관련	연관성 높음
화학적 인자	토양 유기물 합량	토양 비옥도, 안정성, 침식 정도 규명	연관성 보통
	pH	생물학적 화학적 활성 한계 표시	연관성 높음
	전기전도도	식물과 미생물의 환성 한계 규명	연관성 높음
	Extractable N, P, K	식물이 이용 가능한 양분 질소 유실 가능성	연관성 높음
생물학 인자	미생물의 생체량 C,N	미생물의 효소 활력 및 C,N 보유력	연관성 보통
	광물화 형태의 N의 함량	토양 생산성, N 공급능력	연관성 보통
	토양호흡, 수분함량, 온도	kg C/ha/d	연관성 보통

Table 9. 인자 별 식물 정화 연관도

처리 기간과 관련하여 중금속의 고축적능, 높은 생체량을 가진 식물일수록 효과적으로 정화가 가능하다. 또한 폐광산 지역이라는 특성에 맞게 낮은 토양 pH, 수분 함량 등 여러 척박한 조건에서 잘 자랄 수 있어야 한다. 그리고 지속적인 피복 상태를 유지해야 하기 때문에 다년초, 생체생산량이 많은 식물이 우선적으로 요구된다.

즉, 중금속에 대한 충분한 내성을 가지고 있으며, 흡수한 중금속이 느린 속도로 지상부로 이행할수록 좋다. 또한 수분 스트레스 등 열악한 토양 조건에서도 잘 견디는 내 스트레스성을 갖춘 동시에 빠른 식피 조성이 가능한 속성 식물이며 자가 번식이 활발한 식물이어야 한다. 마지막으로 증발산 능력이 높을수록 더 선호된다.

- 선택 식물

달맞이 꽃은 2년생 귀하 식물이다, 다양한 종류의 광산지역 뿐 아니라 일반 지역에서도 광범위하게 관찰 보고, 큰 생체량, 많은 종자생산, 고온과 건조에 대한 저항성, 로제트 형태로 피복한다.. 광산지역에서 자연 선발된 계통으로, 다량의 비소와 납을 동시에 축적하는 특성을 가지고 있다. 지상 및 지하부에 90, 900μg/g 까지 축적되기 때문에, 중금속 흡수능이 높을 뿐 아니라 지상부로의 이행이 매우 더딤을 알 수 있다. 비소의 농도가 100mg/kg 이하인 토양에서 원활하게 적용될 수 있으며, 그 이상일 경우 황백화 현상이 나타날 수 있다.

4.2.3. 정화 공법 활성화 방안

수분보유능 향상 위한 퇴비, 비소 유효도 저감 위한 2가 철 이용한 달맞이 꽃의

활착능 증대와 생체량 증진을 모색할 수 있다. 실험실의 결과에 의하면 2가 철 1.8%, 퇴비 6.9%에서 최대 처리량을 보였다.

Fig 5. 달맞이 꽃

비소오염지에서 서식하는 달맞이꽃은 체내 비소흡수저해와 흡수된 비소를 무독화 시키는 PCs의 합성하여, 비소에 내성을 가지게 된다. 또한 비소오염토양에 내성을 가진 달맞이꽃을 적용하기 위해 균근을 접종할 수 있다. 비소와 인은 화학적으로 유사해서 체내 비소의 축적량이 증가하고, 균근에 의한 안정한 인영양 개선으로 지상부 인축적량 증가한다. 이에 따른 생체량 증가로 인한 희석효과에 의해 달맞이꽃의 내성이 더욱 증진될 수 있다.

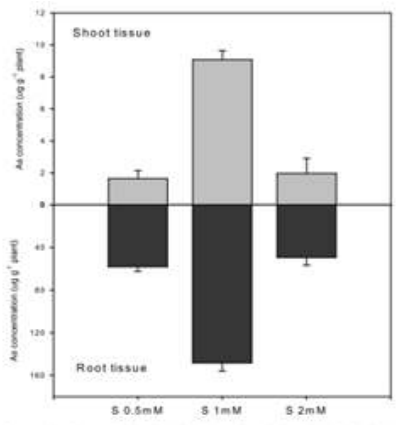


Fig 6. 황(S)과 비소 처리 시 달맞이꽃의 지상부 및 지하부 조직의 비소 농도

thiol기의 합성 유도를 위해 1mM로 양액 중 황함량을 증진하여 비소의 흡수 농도가 약 5배 가까이 증가시킬 수 있다.

5. 정화계획

5.1. 원위치 고형화/안정화 기법 - 화학적 고정화

5.1.1. 정화 방법

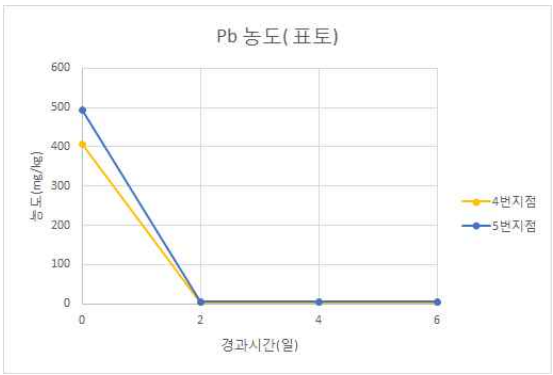
항 목	화학적 고정화 시험 구역
위치 및 크기	• 주거단지 : 2000m^2, 심도 : 약 1.5m • 수련원 : 1500m^2, 심도 : 약 1.5m
오염토량 및 처리비용	• 오염토량 -주거단지 : 3,900ton -수련원 : 2925ton • 처리비용 - 총 511,875,000원 (75,000원/ton)
고정화제제 종류	• Ferrous Sulfate Monohydrate (FSM) • Mono(potassium)Phospahte (MKP)
고정화제제 주입비	• 복합제제 (FSM+MKP)= 1wt%(68.25ton)+2wt%(136.5ton)
주입 방법 및 모니터링	• 오염토층에 일정영향반경 이상으로 균일, 신속하게 전달 위해 지표에서 5,000psi이상의 고압으로 안정화제제 직접 주입 • 2일 간격으로 토양시료채취(0, 2, 4, 6일)후 농도 측정

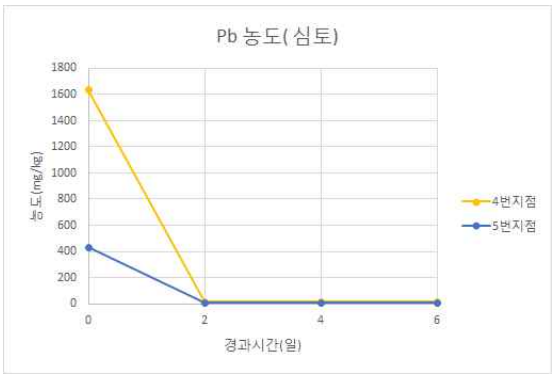
모니터링 시료에 대한 분석은 토양의 경우 토양오염공정시험법에 준하여 3회 반복하여 납과 비소의 농도를 측정하였다.

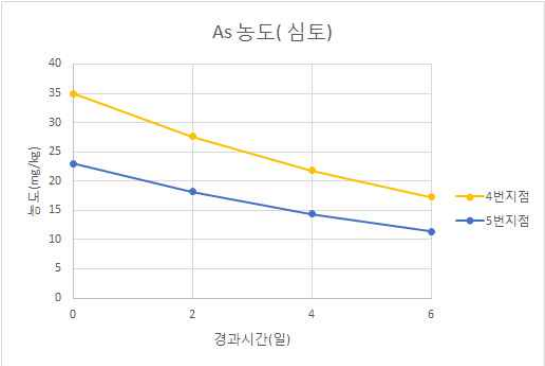
5.1.2. 정화 실시

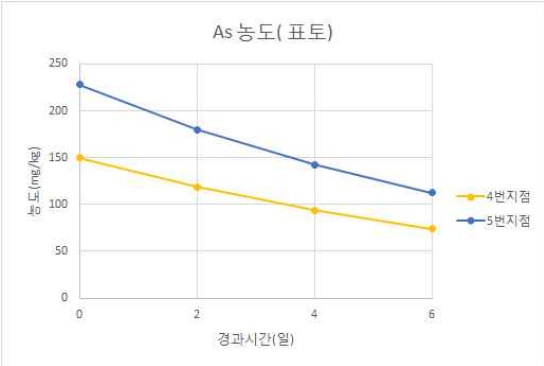
단일 고정화 제제를 사용하는 것보다 복합 고정화 제제를 투입해야 비소와 납을 효율적으로 고정할 수 있으므로 철제제FSM과 인산염제제MKP 수용액을 혼합하여 토양에 주입하였고, 주입 후 이틀 간격으로 토양을 채취하여 중금속 농도를 측정하였다.

납의 경우 주입 즉시 99%가까운 고정화 효율을 보였으며 시간에 따른 고정화 효율 변화는 미미한 것으로 판단되었고, 비소의 고정화 효율은 약 50%정도로 확인되었으며 시간이 지남에 따라 고정화 효율이 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 복합 고정화제제가 토양 내에 흡착되어, 강우시에도 제제의 유출이 없이 토양 내 잔류하는 중금속과 계속적으로 반응하기 때문이라 생각된다.









화학적 고정화 공법을 적용하여 정화 후 측정한 토양 내 잔류 납의 농도는 우려 기준치 이하를 만족하였으나 비소의 경우 점차 고정화가 진행된다 하여도 화학적 제제의 추가 투입 없이는 약 50%정도 정화가 되는 것으로 나타났다. 납은 모두 고정화된 상태에서 비소 제거를 위해 화학적 제제를 계속해서 투입하는 것은 토양의 오염을 야기할 우려가 있으므로 잔류 비소의 제거는 식물 정화 공법을 사용하여 친환경적으로 처리하는 것이 바람직하다.

5.2. Phytoremediation

5.2.1. 정화 방법 및 자원

우선 달맞이꽃 발아시키기 위한 관리가 필수적이다. 다음으로 종자를 심기 위해 토목공사를 실시하여야 한다. 이를 위해 0.6m^3 궤도식 굴삭기와 경운기가 필요하다. 달맞이꽃 종자를 파종한 후 비소의 흡수능을 향상시키기 위하여 돈분 퇴비와 황 분말을 골고루 뿌려주어야 한다. 이후 지속적인 관리를 통해 달맞이꽃의 생장을 모니터링한다.

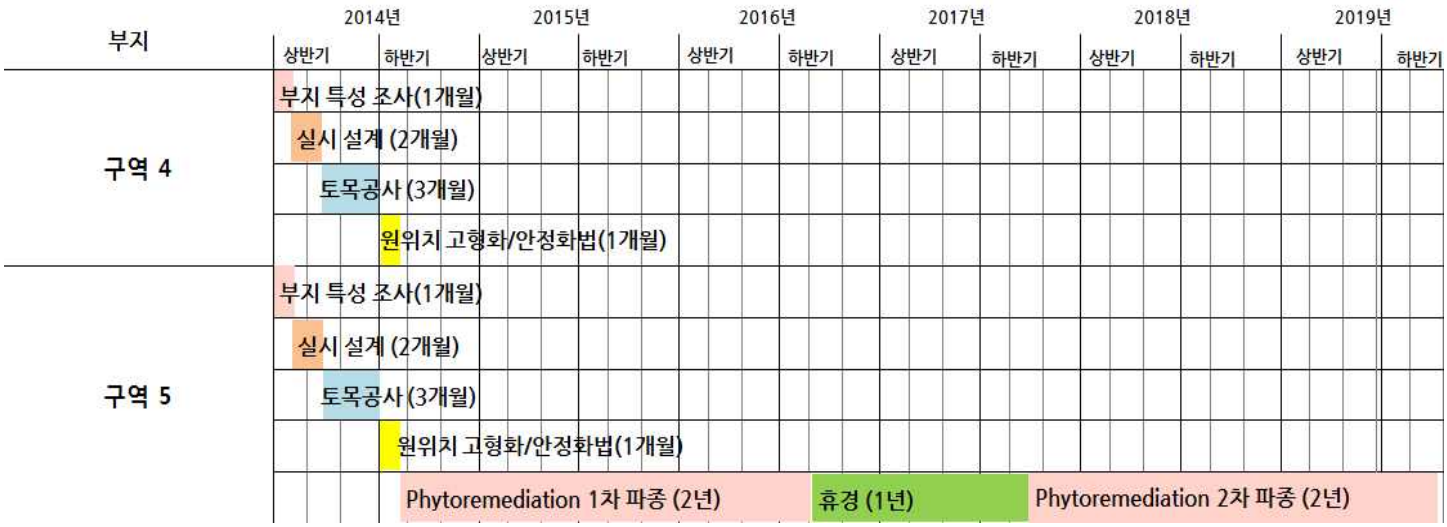
구분	비용(원)	산정기준 (5번 구역 1,500m^2 기준)
인건비	420,000	60,000 * 7인
토목공사	370,000	270,000원/대/일*1대(0.6m^3 궤도식 굴삭기) 100,000원/대/일*1대(경운기)
돈분퇴비	240,000	3,000원/1포(20kg) * 80 포
황 분말	750,000	15,000/1ea.(1kg) * 50
관개수	1,200,000	150,000원/1회 물차 * 8회
종자구입비	105,000	15,000원 / 300ea. 1포 * 7포
유묘구입비	100,000,000	400원/1ea * 25,000ea
발아관리	240,000	관리인건비 60,000원/1인/일 * 40일
합계	103,325,000 (35,300원/ton)	

5.2.2. 정화 기간

달맞이 꽃은 높은 축적량과 생체량을 가졌을 뿐 아니라, 화학적 고정화 안정화 기법의 적용 후에 Phytoremediation 을 적용하였기 때문에 비교적 짧은 기간 안에 토

양우려기준 도달 목표를 달성할 수 있을 것으로 판단된다. 달맞이 꽃이 2년생 귀화 식물이라는 점을 토대로 정화 기간을 산정해볼 수 있다. 구역 5의 비소오염농도는 228mg/kg이고 정화기준은 25mg/kg이므로 203mg/kg을 정화해야 한다. 실험실의 자료에 의하면 화학적 고정화 공법만으로도 약 50% 이상의 비소가 제거될 수 있다. 따라서 Phytoremediation 으로 정화해야하는 비소는 대략 100mg/kg 수준이다. 한 세대당 2년 동안 약 60~70mg/kg 의 비소를 흡수하기 때문에 2세대만으로 만족할만한 수준의 정화가 가능할 것이라고 예상된다. 처음 파종 후 2년 후 바로 2차로 정화 식물을 심는 것 보다는 약 1년 정도 휴경을 하면서 종자가 잘 자랄 수 있는 환경을 조성해 주는 것이 더욱 바람직하다. 그 이후 한 차례 정도 더 달맞이 꽃을 파종하면 충분히 목표치까지 비소의 농도를 감소시킬 수 있을 것이라고 판단된다. 요컨대 1차 파종(2년) 후 1년 휴경, 2차 파종(2년)으로 총 5년이라는 기간이 소요될 것으로 판단된다.

5.3. 예정 공정표



6. 화학적 제제로 고정화 처리 후 토양의 장기 안정성 연구

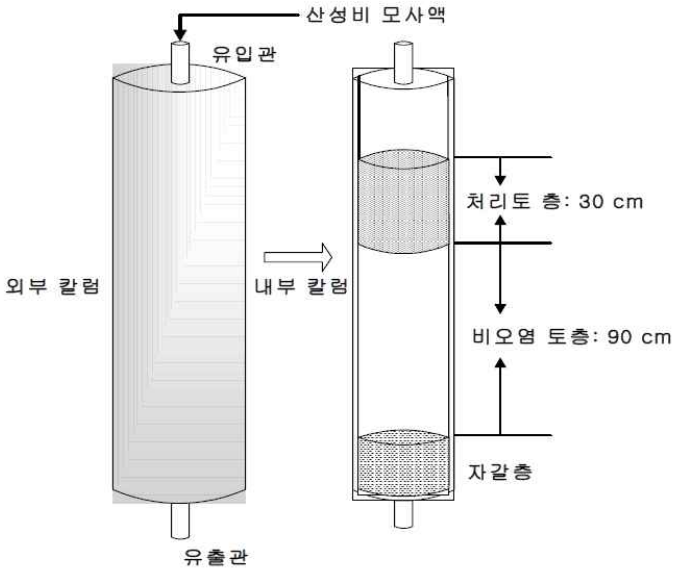
6.1. 연구의 필요성

수용성 염을 이용해 토양의 중금속을 고정화/안정화 처리를 하면 토양 내 중금속과 화학적 제제가 안정한 불용성 화합물을 형성해 중금속 용출을 저하시킬 수 있으며 단기간에 중금속 용출을 억제할 수 있다. 하지만 실제 현장에서 인산염 고정화제제에 다량 함유되어 있는 인 성분이 토양 매트릭스 내에서 시간 경과에 따라 수직으로 침투하는 과정에서 하부 지하수에 부영양화를 유발할 가능성이 존재한다.

토양 내에 유입된 인산염이 이동하는 과정에서 이온교환, 흡착 등의 지화학적 반응을 거쳐 다른 물질로 변화하거나, 이동성이 낮은 안정된 형태로 존재한다. 이러한 물리적, 화학적 이동은 토양의 공극률, 토양 내에 포함된 금속성 물질, 토착 유기물, 점토 함량 등에 영향을 받는

다. 따라서 장기적으로 화학 제제로 인한 토양과 지하수의 2차 오염을 막기 위해 토양에 주입된 인산염 제제의 유동성을 파악할 필요성이 존재한다.

6.2. 실험 방법



실험실 규모의 칼럼실험을 통해 고정화 처리된 토양 내로 인공 산성비 모사액을 투입하여 인과 납의 수직 이동성에 대한 평가를 실시한다. 외부 칼럼에는 산성비 모사액의 유입관과 유출관이 있으며 칼럼의 하단에는 용출액이 정상적으로 유출될 수 있는 자갈층으로 구성되어 있다. 내부 칼럼에는 하부에 비오염토양과 자갈층, 상부에 오염지역의 토양을 채취하여 채웠다. 이는 일반적인 폐금속광산의 경우 오염층이 표토에 집중되어 나타나기 때문에 표토에만 고정화 처리를 실시한 토양을 채웠다. 그리고 평균 산성비의 pH 4.9와 동일하게 만든 산성비 모사용액을 지속적으로 국내 평균 강우 강도(선속도 12cm/day)를 적용하여 주입하였다.

6.3. 실험 결과

인산염의 토양 내 수직이동특성 및 고정화된 중금속의 이동성을 알아보기 위해 정화 후 오염지역의 토양을 채취하여 실험실에서 칼럼실험을 한 결과, 고정화처리를 하지 않은 오염토양(대조군)과 고정화처리를 한 토양의 용출액 pH는 각각 6.6, 6.1 정도로 유사한 범위를 나타내었다. 그리고 용출수내의 인 농도를 측정한 결과 고정화 공법을 처리한 토양은 시간에 따라 인의 농도가 감소하였으며, 비처리토양은 인의 농도가 계속하여 증가하였다. 이를 통해 볼 때 산성비 강우 조건하에서 고정화 처리토에 대한 인과 중금속 용출 시험시 지하수 중으로 인의 용출은 계속해서 감소하였으며 0.1mg/L이하로 나타났다. 그리고 중금속의 용출은 나타나지 않았는데 비소와 납이 검출되지 않은 이유 중 하나는 미량으로 용출되어 나오는 비소와 납이 비산납을 형성하여 제거된 것으로 생각되며, 비소응집제로 투입되었던 철 제제는 용출되어 나오지 않았다. 장기적으로 모니터링이 필요할 것으로 생각되지만 비소•납 고정화 반응의 장기 용출 실험 결과로 볼 때 장기적인 안정성을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

7. 참고문헌

- 기획재정부 외, (2009), 구 장항제련소 주변지역 토양오염 개선 종합대책, 환경부.
- 김대연•김정규, (2004), 비소에 의한 토양 오염과 복원기술, 생명자원연구, Vol. 12.
- 김정규. (2007). 토착식물을 이용한 중금속 오염지역의 자연형 장기복원 기술개발. 고려대학교 산학협력단.
- 어영식, (2007), 인산염을 이용한 중금속 오염토양의 고정화 기술에 관한 연구, 광운대학교 환경대학원.
- 양재규 외 5인, (2003), Iron-Coated Sand를 이용한 독성 3가비소 제거, 대한환경공학회 춘계학술연구발표회 논문집.
- 이상봉 외 8인, (2006), 중금속 오염 토양 정화를 위한 원위치 고정화 기술 개발, 환경부.
- 이의상 외 3인, (), 인산염으로 고정화 처리된 비소•납 복합오염토양의 장기 안정성에 관한 연구
- 한국지하수토양환경학회. (2001). 토양환경공학. 향문사.
- 환경부. (2007). 오염토양 정화방법 가이드라인.
- EPA. (2004). How To Evaluate Alternative Cleanup Technologies For Underground Storage Tank Sites: A Guide For Corrective Action Plan Reviewers.
- http://www.epa.gov/oust/pubs/tums.htm
(검색일 : 2013년 12월 3일)