

장항제련소 주변 비소오염토양의 특성분석에 따른 토양세척 처리효율 평가

문소영¹ · 오민아¹ · 정준교² · 최상일³ · 이재영^{1*}

¹서울시립대학교 환경공학과, ²현대건설 기술연구소, ³광운대학교 환경공학과

Assessment of Soil Washing Efficiency for Arsenic Contaminated Site Adjacent to Jang Hang Refinery

So-Young Moon¹, Minah Oh¹, Junkyo Jung², Sang-Il Choi³, Jai-Young Lee^{1*}

¹Dept. of Environmental Engineering, The University of Seoul, Seoul, Korea

²Hyundai Institute of Construction Technology, Yongin, Korea

³Dept. of Environmental Engineering, Kwangwoon University, Seoul, Korea

ABSTRACT

Cause of contamination in the study area nearby Jang Hang Refinery is dust scattering in refinery stack, and soil washing treatment is one of the proper technologies for soil remediation in this area. Site conditions frequently limit the selection of a treatment process. A treatment technology may be eliminated based on the soil classification or physicochemical characteristics of soil. This study was assessed the soil washing efficiency by conducting of soil characteristic analysis in the vicinity of Jang Hang Refinery Stack within a 2 km radius. Also, it was decided about remedial range with comparative analysis of As in soil by Korean Standard Test Method before/after revision, whereupon As concentration in soil showed a increasing tendency after revision. As a result, the soil washing using the size separation of soil was determined through identifying of As species in the soil. In this site, only particle size distribution and water content of soil can provide the initial means of screening for the potential use of soil washing.

key words : Arsenic, Refinery, Soil Washing, Particle separation

1. 서 론

연구대상지역인 (구) 장항제련소 주변지역은 제련소에서 발생된 중금속류가 제련소 주변지역 토양에서 검출된 중금속류와 동일한 것으로 보아 굴뚝에서 발생하는 분진 및 광석의 운반과정 중 분진의 비산에 의해 토양오염이 유발된 것으로 보고되고 있다(김주용, 전효택, 1993). 정밀조사보고서(한국환경공단, 광해관리공단, 2009)에 의하면 주 오염물질인 As 외에도 Pb, Cd, Ni, Zn, Cu의 중금속 오염토양이 제련소 굴뚝을 중심으로 반경 2km까지 분포하고 있으며, 수직적으로는 지표하 최대 1m까지 분포되어 있는 것으로 보고되고 있다. 이러한 토양오염 현상은 굴뚝으로부터 거리가 멀어질수록 오염물질의 종류, 농도, 심도가 점차 감소되는 경향을 보였다. 대상부지의

부지용도별 오염토양분포현황은 전, 답 등 농작물 재배지역이 46.09%로 가장 높은 비율을 차지하고 있고, 해안가 모래로 이루어진 임 지역이 26.74%로 전, 답 다음으로 많이 분포되어 있다. 전, 답의 농경지와 같이 주민이용 부지 비율이 높고, 2013년에 개관 예정인 국립해양생물자원관 부지가 11.94%로써 연구대상부지는 정화기간이 짧고 현장적용성이 높은 오염토양 정화공법이 고려되어야 할 것이다. 한국환경공단 등에서 작성한 정밀조사보고서에서 제안된 정화공법은 Table 1 및 Fig. 1과 같이 부지용도, 관계법에 따른 정화공법을 제시하고 있으며, 토양환경보전법에 따른 정화공법으로는 토양세척과 고형화안정화를 제안하고 있다.

그러나 2009년 9월 토양오염공정시험기준 중 중금속류에 대한 전처리 방법이 0.1N HCl(As의 경우 1N)로 용

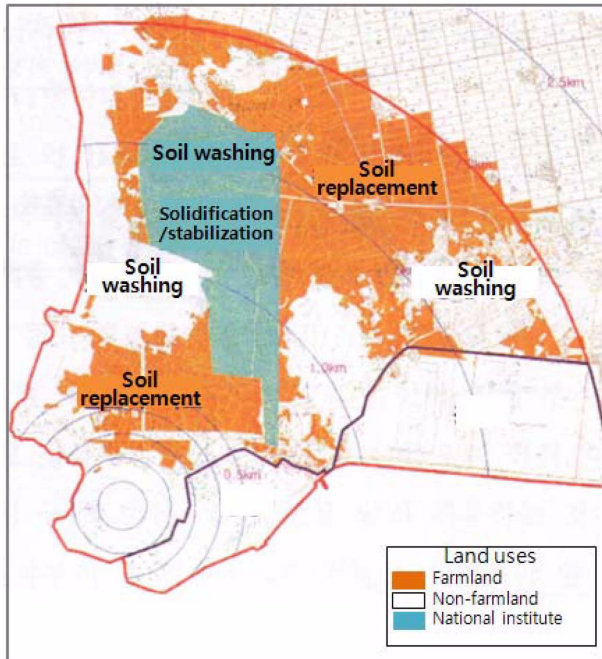
*Corresponding author : leejy@uos.ac.kr

원고접수일 : 2010. 12. 15 심사일 : 2010. 12. 22 게재승인일 : 2011. 1. 28

질의 및 토의 : 2011. 4. 30 까지

Table 1. Application plan of remediation technologies by land uses

Land uses	Related regulation	Remediation technology
National Institute of Marine Life Resource	The Soil Environment Preservation Act	Soil washing, Solidification/Stabilization
Farmland	The Agricultural Land Act (article 21)	Soil replacement
Non-farmland	The Soil Environment Preservation Act	Soil washing

**Fig. 1.** Scheme drawing of remediation technologies by land uses (Korea Environment Corporation & Mine remediation Corp., 2009).

출하는 방법에서 왕수추출로 개정됨에 따라 고형화안정화 공법의 적용시 정화효율을 평가하는데 한계가 존재하는 문제가 있다(홍성혁 외, 2010). 따라서 대상부지의 경우 토양환경정보전법에 근거하여 정화공법 선정시 토양세척이 적합한 정화공법으로 압축된다. 토양세척 공법에 의한 오염토양 정화 원리는 크게 두 가지로서 첫 번째는 토양에 존재하는 오염물질을 세척액으로 용해시켜 토양에서 물로 오염물질을 이동(mass transfer)하는 세척방법과, 두 번째로 토양의 입경 크기별로 분리를 하여 고농도 미세토만을 선별하여 오염토양의 부피를 감소시키는 입경분리(size separation) 방법이 있다(USEPA, 2007; CL:AIRE, 2007). 오염토양에 토양세척의 두 가지 원리 중 어떤 원리를 적용할지는 오염물질의 토양내 존재형태 및 분포상태에 따라 결정되어야 한다. 특히 토양오염물질이 대상지역과 같이 비소 및 중금속류일 경우에는 중분석을 통하여 토양내 중금속화합물의 형태와 분포를 파악할 수 있으며, Tessier et al.(1979)이 제시한 연속추출방법의 경우 중금속화합물

의 형태를 5단계로 구분하고 있다. 연속추출에 의한 화학적 분포형태는 일반적으로 1단계 - 미립자의 표면에 흡착된 이온성교환형태(exchangeable fraction), 2단계 - 탄산염의 형태로 존재하는 탄산염형태(carbonate fraction), 3단계 - 금속산화물과 공침된 환원성형태(Fe/Mn oxide fraction), 4단계 - 유기물과 관련되거나 유화물 형태로 분류되는 산화성형태(organic/sulfide fraction), 5단계 - 퇴적물 자체의 구성성분과 관련된 잔류성형태(residual fraction)로 분류된다. 본 시험결과 오염토양이 이온교환이 가능한 형태 또는 약산에 용출 가능한 1~2단계 존재형태 비율이 높을 경우에는 토양세척 원리 중 세척방법이 적합할 것이며, 5단계인 Residual 한 형태의 존재비율이 높을 경우에는 입경분리방법이 적합할 것이다.

오염토양의 물리·화학적 특성인자에 따라 토양세척의 처리효율을 사전에 예측할 수 있으며, 상기 제시된 주요 화학적 특성으로써 중금속류의 존재형태 외에도 주요 물리적 특성으로 토양의 입경분포범위에 따라서도 처리효율을 평가할 수 있다. 예컨대 pH나 함수율과 같은 처리공정에 제한을 주는 인자는 때때로 처리공법 적용 전에 적절한 범위로 조정되기도 하며, 심지어는 토양의 입경분포와 같은 토양특성으로 인해 처리공법 자체가 배제될 수도 있다(<http://www.frtr.gov>).

본 대상지역과 같이 비소가 주 오염원인 지역에 토양세척처리 기법 적용성을 평가할 경우에는 Table 2에서 제시된 항목 중 토양입경분포, 수분함량, 중금속의 농도 및 중, 그리고 pH, 완충능력이 정량적으로 평가가 가능한 토양특성인자일 것이다.

토양세척처리기법의 적용성을 평가하고자 하는 (구) 장항제련소 주변지역은 지목상 크게 전, 답, 임으로 구분되어 있어, 부지용도에 따라 토양내 실트, 점토 등의 미세토 함량, 수분함량, CEC 등의 물리·화학적 특성이 매우 상이할 것으로 예상되므로 이에 따른 토양세척 공법 적용시 처리효율 또한 큰 차이가 있을 가능성이 있다.

또한 (구) 장항제련소 주변지역에 대한 부지오염도 조사는 2008년 공단 정밀조사보고서에서 실시된 바 있으나 앞서 언급하였듯이 2009년 6월 토양환경정보전법 시행규칙이 일부개정(환경부령 제333호, 2009.6.25)됨에 따라 비소

Table 2. Waste Soil Characterization Parameters (USEPA, 1990)

Parameter	Purpose and Comment
<u>Key Physical</u>	
Particle size distribution:	
> 2 mm	Oversize pretreatment requirement
0.25~2 mm	Effective soil washing
0.063~0.25 mm	Limited soil washing
< 0.063 mm	Difficult
<u>Other Physical</u>	
Type, physical form, handling properties	Affects pretreatment and transfer requirements
Moisture content	Affects pretreatment and transfer requirements
<u>Key Chemical</u>	
Organics Concentration	Determine contaminants and assess separation and washing efficiency, hydrophobic interaction, washing fluid compatibility, changes in washing fluid with changes in contaminants.
Volatility Partition coefficient	May require preblending for consistent feed. Use the jar test protocol to determine contaminant partitioning.
Metals	Concentration and species of constituents (specific jar test) will determine washing fluid compatibility, mobility of metals, posttreatment.
Humic acid	Organic content will affect adsorption characteristics of contaminants on soil. Important in marine/wetland sites.
<u>Other chemical</u>	
pH, buffering capacity	May affect pretreatment requirements, compatibility with equipment materials of construction, wash fluid compatibility.

에 의한 토양오염기준이 변경되었고, 동년 9월에 토양오염공정시험기준상 전처리방법이 1N HCl 용출법에서 왕수(aqua regia)분해에 의한 전함량법으로 개정되었기 때문에, 이들 법의 개정 전·후 변화에 따른 대상부지내 오염물질을 비교평가할 필요가 있다(환경부, 2009).

본 연구에서는 장항제련소 주변 지역을 대상으로 주 오염물질인 비소의 토양오염공정시험기준 개정에 따른 개정 전과 후의 토양오염분포도 변화를 확인하여 정화대상지역을 선정할 다음에 비소의 중분석을 통하여 토양세척기법의 종류를 결정하고, 시간과 비용효율적인 측면을 고려한 최소한의 토양특성분석을 실시하여 비소오염토양에 대한 토양세척공법 적용시 처리효율을 예측하고자 한다(Fig. 2).

2. 실험방법

2.1. 토양시료채취 계획의 수립(Step 1)

토양시료채취계획은 크게 토양 중 비소의 농도 분석을 위한 계획과 비소의 중분석 및 물리화학적 특성분석을 위한 계획으로 이원화하여 수립하였다. 시료채취지점 및 지점별 지표하 채취 심도의 선정시 오염원으로 추정되는 장항제련소 굴뚝을 중심으로 굴뚝으로부터의 이격거리, 기

Step 1: Plan a Soil Sampling

- Sampling plan for analysis of As contamination in soil
- Sampling plan for analysis of As species and physicochemical characteristics in soil

Step 2: Distribution Map of the Contaminated Area

- Analysis of As concentration in soil
- Visualization of contaminated soil distribution by As

Step 3: Determination of Soil Washing Type

- Analysis of As species in soil

Step 4: Assessment of Soil Washing Efficiency

- Physicochemical analysis in soil
- Correlation analysis between soil characteristics and soil washing efficiency

Step 5: Zoning Map by efficiency of Soil Washing

- Ranking determination of soil washing efficiency about group in study area

Fig. 2. Assessment procedure for soil washing efficiency.

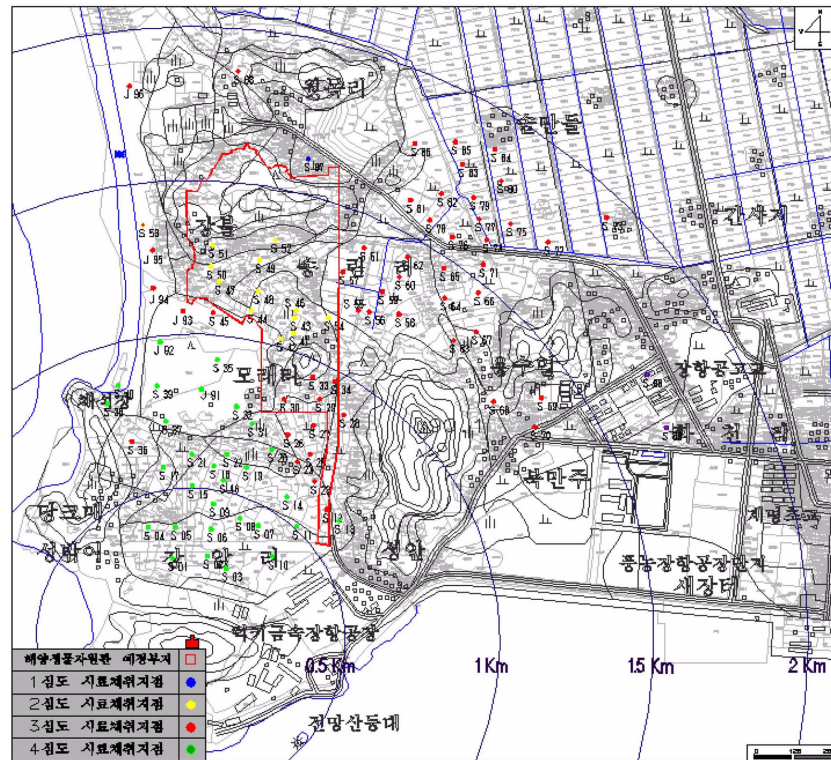


Fig. 3. The map marked sampling point and group for analysis of As concentration.

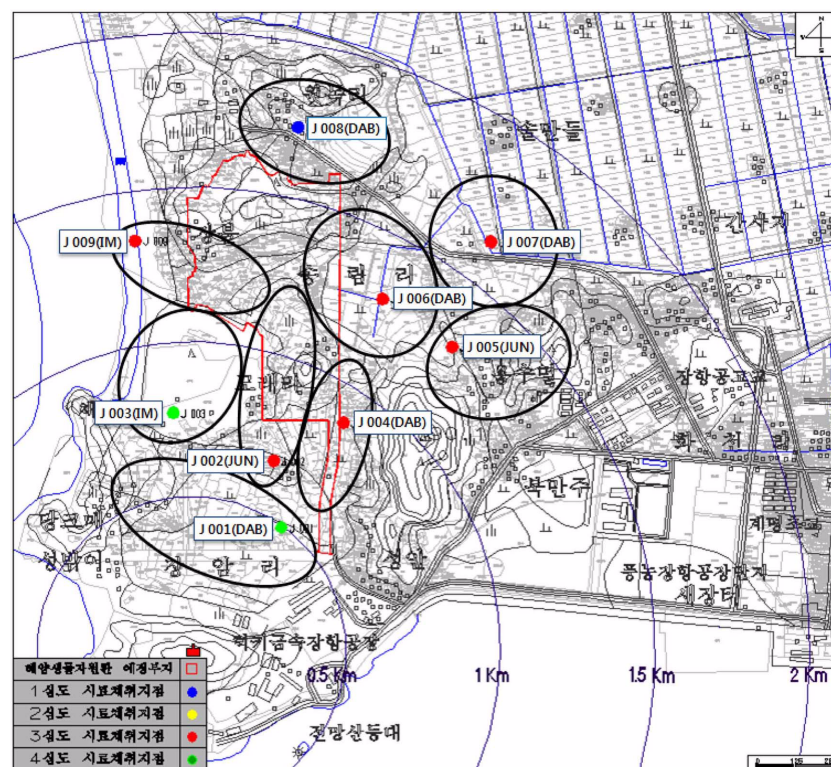


Fig. 4. The map marked sampling point and group for analysis of As species and soil characteristics (9 groups).

존 정밀조사보고서상 오염분포도 및 전, 담, 임 등의 부지 용도를 고려하였다. 이때 시료채취 심도는 1심도(0~0.3 m), 2심도(0.3~0.6 m), 3심도(0.6~1.0 m), 4심도(1.0~1.5 m)로써 총 4심도로 구분하여 굴뚝으로부터 이격거리에 따라 차등 적용하였다. 이러한 기준으로 결정된 토양 중 비소의 농도분석을 위한 시료채취 지점 및 시료의 수는 96지점, 299개이며(Fig. 3), 비소의 중분석 및 물리화학적 특성분석을 위한 시료채취 지점 및 시료의 수는 9지점, 27개이다(Fig. 4). 이 때 비소의 중분석 및 물리화학적 특성분석을 위한 9개의 시료채취 지점에서 채취된 토양의 분석 결과는 Fig. 4와 같이 9개 지역을 대표하는 값으로 해석하였다.

2.2. 오염토양 분포도 작성(Step 2)

토양 중 비소의 농도분석을 위한 전처리 방법은 2009년 9월 이전의 개정 전 토양오염공정시험기준과 개정 후 방법을 모두 적용하였다. 비소 분석용 전처리 시료는 개정 전 토양오염공정시험기준의 경우에는 풍건 토양을 2 mm 이하로 체가름(10 mesh)을 실시하여 10 g을 준비하고 1N HCl 용액 50 mL를 주입하여 30분간 항온수평진탕(진폭 10 cm, 100회/분, 30°C) 후 5B 여과지로 여과한

용액을 사용하였다. 개정 후의 기준으로 비소를 분석할 경우에는 0.15 mm 이하로 체가름(100 mesh)한 풍건토양 3 g에 HCl 21 mL와 HNO₃ 7 mL를 주입하여 가온분해 및 환류 냉각한 다음에 여과(Whatman No. 40) 후 0.5M HNO₃로 100 mL가 되도록 정용된 용액을 준비하였다. 준비된 시료의 분석은 수소화물생성장치가 설치된 ICP-AES(Genesis, SPECTRO Co.)를 이용하였다.

대상부지내 오염분포현황을 시각화하고자 비소 오염도 분석 데이터 및 시료채취 좌표 등의 데이터를 3D 그래픽 프로그램인 Surfer(Golden Software INC.)에 적용하여 개정 전과 후의 오염분포지도들 각각 작성하였다(Fig. 5).

2.3. 토양세척기법의 선정(Step 3)

비소의 중분석을 위한 단계별 용출절차는 풍건하여 0.175 mm 이하로 체가름(80 mesh)한 토양시료 1 g을 대상으로 Tessier 등이 제시한 연속추출방법에 따라 수행하였다(Table 3).

Tessier의 연속추출방법에 의해 준비된 단계별 시료는 수소화물생성장치가 설치된 ICP-AES(Genesis, SPECTRO Co.)로 분석하였다. 분석된 결과를 통하여 토양내 비소의 주 존재형태에 따라 토양세척처리기법을 결정하였다.

Table 3. The methodology of the Tessier's Sequential Extraction scheme

Fraction	Chemical extractant	Extraction technique
Exchangeable	8 mL of 1M MgCl ₂ , pH7	Continuous agitation (1 h, room Temp.)
Carbonates	8 mL of 1M NaOAc adjusted to pH5 with HOAc	Continuous agitation (5 h, room Temp.)
Fe-Mn oxides	20 mL of 0.04 M NH ₂ OH·HCl in 25% (v/v) HOAc	96 ± 3°C for 6hr with occasional agitation
Organic & Sulfides	(1) 3 mL of 0.02M HNO ₃ and 5mL of 30% H ₂ O ₂ adjusted to pH2 with HNO ₃ (2) 3mL aliquot of 30% H ₂ O ₂ (pH2 with HNO ₃) (3) After cooling, 5 mL of 3.2M NH ₄ OAc in 20% (v/v) HNO ₃ (4) Dilution to 20 mL and agitation for 30 min	(1) 85 ± 2°C for 2hr with occasional agitation (2) 85 ± 2°C for 3hr with intermittent agitation
Residuals	(1) Evaporation to 2 mL of HClO ₄ and 10 mL of HF to near dryness (2) Evaporation to 1 mL of HClO ₄ and 10 mL of HF to near dryness (3) Evaporation to 1 mL of HClO ₄ until the appearance of white fumes	(1) 90°C for 4.5 hr → 140°C for 1.5 hr → 190°C for 5 hr (2) 90°C for 4.5 hr → 140°C for 1.5 hr → 190°C for 5 hr

Table 4. Test methods for soil characteristics

Parameter	Standard analytical method
Concentration of As	Korean Standard Test Method for Soil
Speciation of As	Tessier's Sequential Extraction Procedure
Particle size distribution	Korean Industrial Standards -KS F 2302
Water content (wt%)	Korean Standard Test Methods for Soil
Cation exchange capacity (meq/100g)	Soil Society Science of America Method
pH	Korean Standard Test Methods for Soil

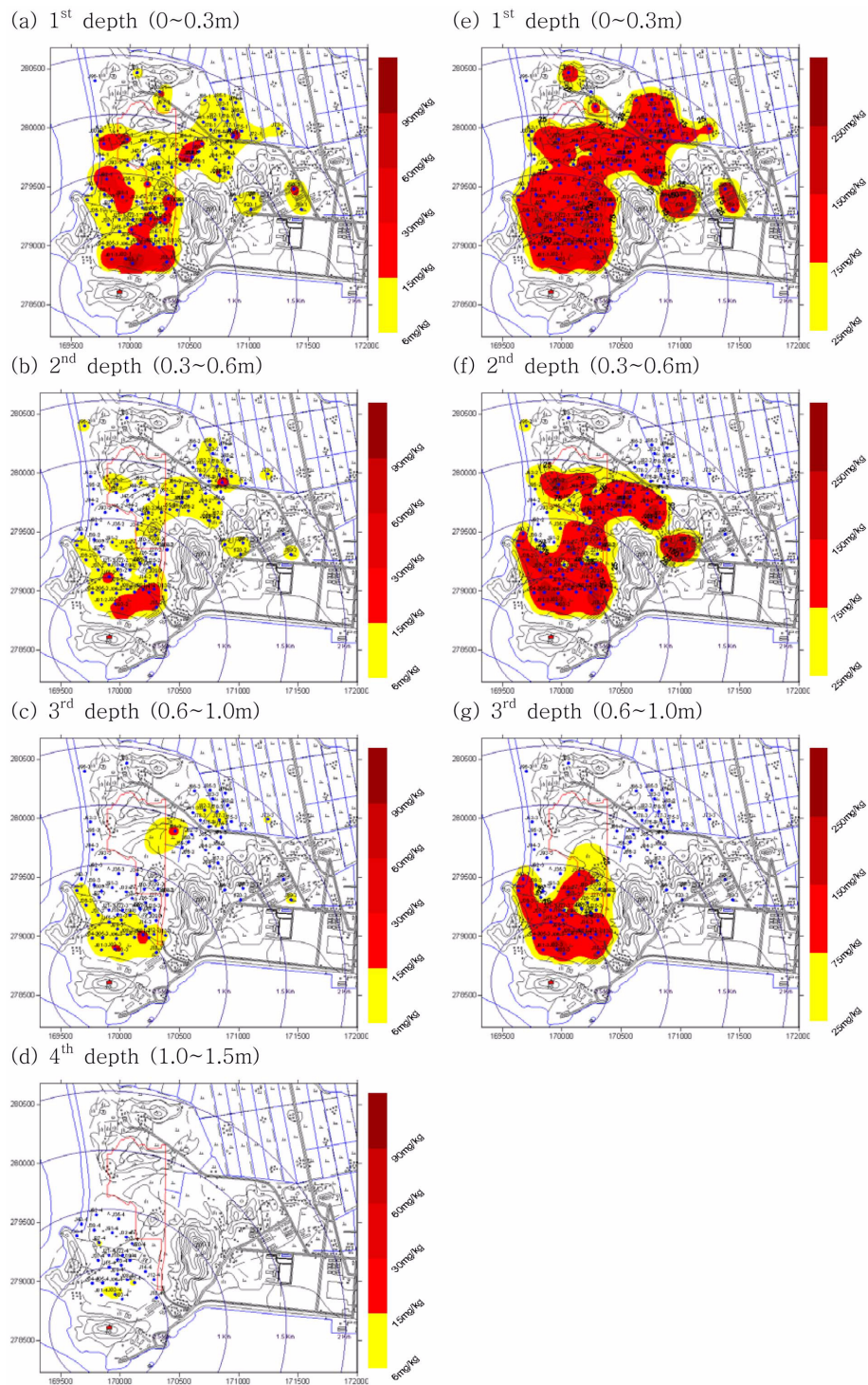


Fig. 5. The map of contaminated soil distribution by As - before revision (left), after revision (right).

2.4. 토양세척처리효율 평가(Step 4)

토양의 물리화학적 특성분석은 토양입경분포, 함수율, 양이온교환용량, 수소이온농도에 대하여 수행하였으며, 항목별 시험기준은 Table 4와 같다. 도출된 시험결과와 토

양세척 처리효율과의 상관관계를 해석하여 Effective, Limited, Difficult의 세 등급으로 처리효율을 구분하여 정리하였다.

2.5. 토양세척처리효율 예측지도 작성(Step 5)

Step1~4에서 결정된 정화대상 오염토양 분포 범위, 토양세척 처리기법 및 토양특성별 처리효율을 종합하여 최종적으로 대상부지내 9개 지역에 대하여 처리효율이 높은 순서로 순위를 선정하고 대상부지 지도에 예측되는 처리효율별 범위를 표시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 오염토양 분포도 작성 결과

개정 전과 후의 토양오염공정시험기준에 의해 분석된 비소농도를 개정 전과 후의 법적 기준인 토양환경보전법 별표 3의 토양오염도 기준에 적용하여 토양오염여부를 평가하였으며, Surfer를 이용하여 개정 전과 후의 심도별 오염분포지도도를 작성하였다. 그 결과 개정 전과 후의 오염분포도 모두 오염원으로 추정되는 제련소 굴뚝과 멀어질수록, 표토에서 심토로 갈수록 오염도가 감소되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 정밀조사보고서에서도 명시되었듯이 굴뚝으로부터 비산되는 오염물질에 의한 표층오염, 낙하거리에 따른 오염도 감소와 상관성이 있음을 보여준다. 심도에 따라 개정 전보다 개정 후의 오염분포면적이 1.64~2.11배 넓은 특성을 보이며, 분석된 299개의 토양시료의 법적 기준치 초과율 또한 개정 전의 경우 우려기준 초과율 58.5%, 대책기준 초과율 12.0%이고 개정 후의 우려기준 초과율 58.9%, 대책기준 초과율 72.6%를 나타내어 개정 전보다는 개정 후의 기준 적용시 부지내 토양오염도가 증가됨을 확인할 수 있었다. 이는 토양세척 처리기법 결정을 위하여 실시된 비소의 중분석 결과(Fig. 6)와도 상관성을 찾을 수 있는데, 대상부지내 9지역에서 채취된 토양 중 비소의 존재형태 중 약 80% 이상이 잔류성형태(Residual metal)로써 기존의 토양오염공정시험기준에서 사용한 1N 염산을 이용하여 추출하였을 경우 철 및 망간 산화물 형태 이상의 존재형태는 추출이 되지 않는 반면에 개정된 토양오염공정시험기준에 왕수에 의한 추출로 규산염 광물결정형의 잔류성을 제외한 잔류형태까지 모두 추출이 되기 때문이다(양중석 외, 2010).

3.2. 토양세척기법의 선정결과

대상부지내 9지역에서 심도별로 채취된 27점의 토양시료에 대하여 Tessier 등이 제안한 연속추출방법으로 비소의 중분석 결과 지역별, 심도별 차이는 발견되지 않았다. Fig. 6은 9개 지역의 심도별 중분석 결과를 평균 내어 존재형태 비율을 그래프로 나타낸 것으로써 약 80% 이상이

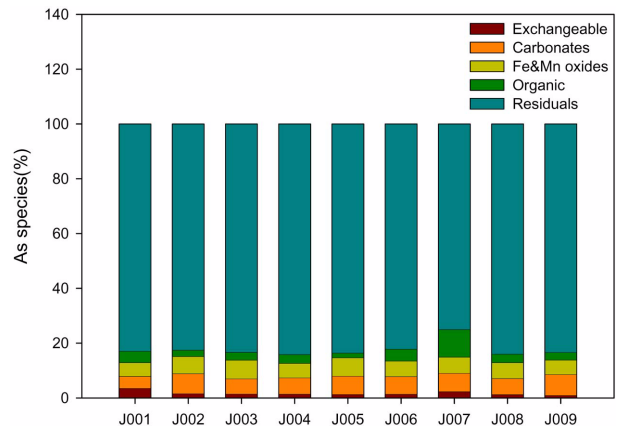


Fig. 6. The species (%) of As in 9 groups.

잔류성형태(Residual metal)임을 볼 수 있다. 잔류성형태는 광물성분과 관련된 금속 또는 광물의 결정 구조 속에 존재하는 금속으로 자연적인 환경에서는 유출가능성이 거의 없는 형태이므로(박준석 외, 2010) 대상부지내 오염토양 처리를 위한 토양세척기법은 세척액으로 토양 중 오염물질을 이동(mass transfer)하는 세척방법보다는 고농도 미세토만을 선별하여 오염토양의 부피를 감소시키는 입경분리(size separation) 방법이 더 적절할 것으로 보인다. 입경분리에 의한 토양세척기법은 세척액으로 오염물질의 용출을 최소한으로 하여야 하므로 세척수의 오염이 적고 재순환율이 높은 장점이 있다.

3.3. 토양세척처리효율 평가결과

토양의 물리화학적 특성분석은 토양입경분포, 함수율, 양이온교환용량, 수소이온농도로 4가지 인자에 대하여 수행하였으며, 본 항목들은 USEPA(1990)에서 제시된 토양세척처리공법의 적용성 평가를 위한 오염토양 특성 인자 중에서 정량이 가능한 항목이면서 무기오염물과 관계된 항목을 선정한 것이다. 시험항목 선정시 유기오염물과 관계된 항목 및 저니, 해양토와 연관성이 큰 항목 등 부지특성과 맞지 않는 항목은 배제하였다. 각 항목별 시험결과와 토양세척처리효율과의 상관관계를 해석하여 “Effective”, “Limited”, “Difficult”의 세 등급으로 처리효율을 구분하였다. 시험된 4개 항목의 결과는 양이온교환용량을 제외한 세 개 항목에 대하여 토양시료채취지점 별로 채취심도에 따른 결과 값이 경향성이나 차이점이 없었기 때문에 심도별 결과를 평균 내어 지점별 결과로 나타내었다. 첫 번째, 물리적 특성인자 중 토양입경분포 시험결과 물리화학적 특성분석을 위해 9개 지역으로 구분된

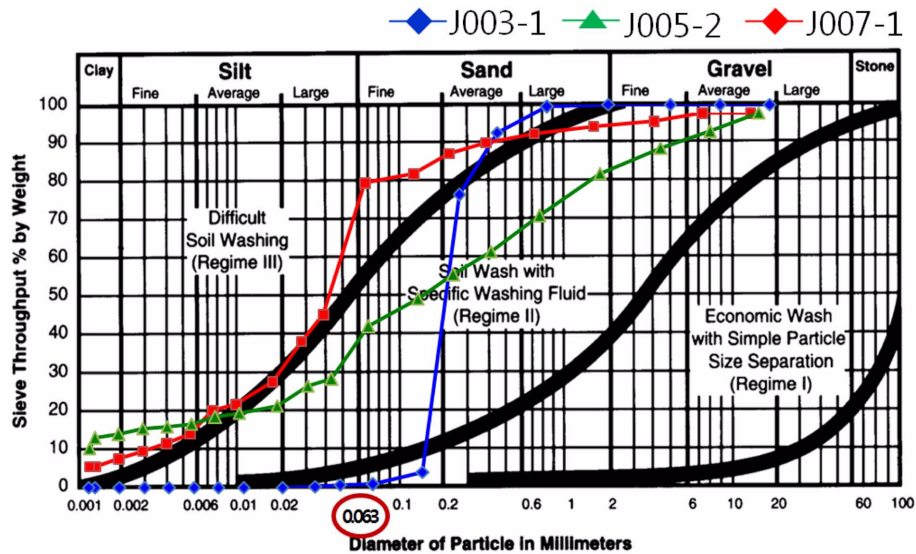


Fig. 7. Soil washing applicable particle size range.

대상부지내 토양은 세 그룹의 입경분포로 대별되었으며, 심도에 따른 차이점은 발견할 수 없었다(Fig. 7). 처리대상 부지의 토양입경이 0.063mm이하인 점토와 실트의 함량이 30~35% 이하일 경우 비용 효율적(cost effective)이라고 볼 수 있는데(CL:AIRE, 2007) 시험지역중 J002~J004 및 J009의 경우 0.063 mm 이하가 0.83~21.9% 범위이므로 “Effective” 등급의 그룹이며, J005, J008지역의 경우에는 0.063 mm 이하가 33.3~40%이므로 “Limited” 등급, J001, J006, J007지역의 경우 64~85%로 “Difficult” 등급으로 구분할 수 있다. “Effective” 등급으로 분류된 4지역은 지리적으로 해안가와 인접한 지역으로 부지용도는 임 2지역(J003, J009), 전(J002), 답(J004) 각각 1지역으로 구성되어 있어 “답”의 경우 일반적으로 실트질 이하의 미세토 함량이 높을 것이라는 예상과 다른 결과를 확인하였다.

두 번째, 물리적 특성인자 중 토양 함수율(%) 시험결과는 Fig. 8과 같으며, 각 지역이 함수율은 심도에 따른 결과 지역별 함수율의 차이를 보였다. 앞서 제시된 토양입경분포 시험결과 “Effective” 등급으로 분류된 4지역 중 답(J004)을 제외한 나머지 지역의 경우 낮은 함수율을 보여 “Effective” 등급으로 분류되었으며, 토양입경과 함수율의 상관관계가 높음을 확인하였다. 대상부지에서 9개로 나눈 지역 중 “답”으로 이용되는 지역은 총 5지역(J001, J004, J006~8)이었으며, 본 지역의 경우 경작시 포화상태로 존재하기 때문에 토성과 관계없이 높은 함수율을 보일 것으로 예상됨에 따라 J006~008의 경우 40%에 가까운

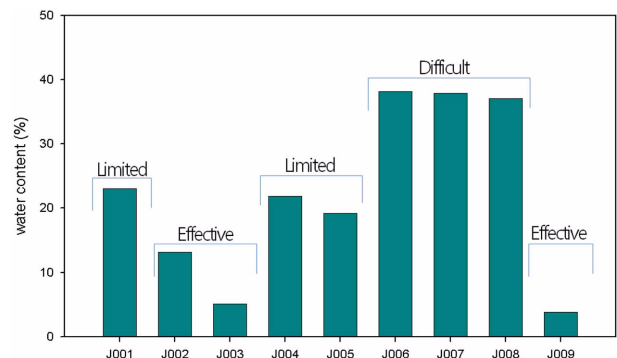


Fig. 8. Water content (%) of 9 groups.

높은 함수율을 보여 “Difficult” 등급으로 분류되었다. 그러나 J004지역의 경우 토양입경이 조립하며, J001의 경우 현재 “답”으로 이용되고 있지 않아 20%대의 함수율을 나타내어 “Limited” 등급으로 분류되었다. 토양 중 높은 수분함량은 토양세척 처리시 굴착 및 이송 등에 어려움을 야기할 수 있는데(USEPA, 1991), 토양 입자의 크기에 따라 토양이 보유하는 수분함량이 달라지며 일반적으로 토양입경이 작을수록 토양수분함량이 높아지는 경향이 있다(Nyle C. Brady, Ray R. Weil, 2004). 이는 토성에 따른 공극률과 공극의 크기가 다르기 때문이다.

다음으로 화학적 특성인자로서 지역별 양이온교환용량(Cation exchange capacity, CEC) 시험결과 심도에 따른 결과 값이 유사성을 나타내지 않아 지역별, 심도별 시험된 모든 데이터를 그래프로 나타내었다(Fig. 9). 토양의 양이온교환용량은 무기 및 유기 콜로이드가 흡착할 수 있

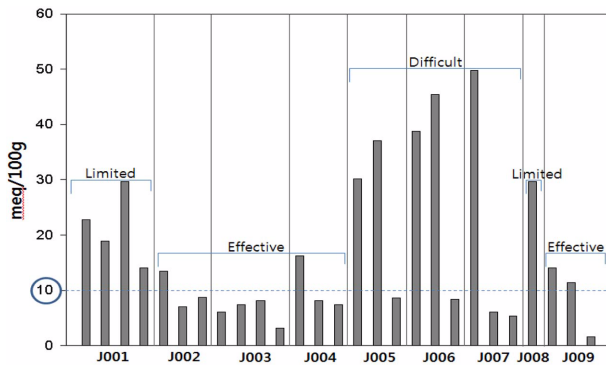


Fig. 9. CEC values of 9 groups.

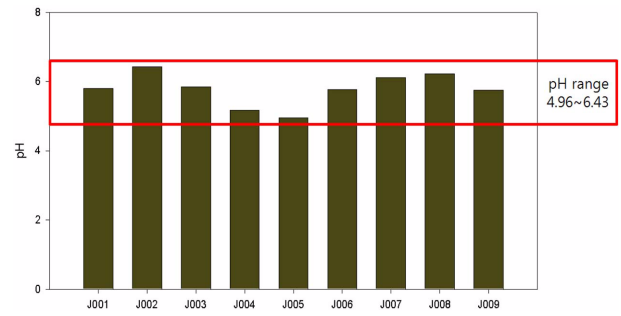


Fig. 10. pH values of 9 groups.

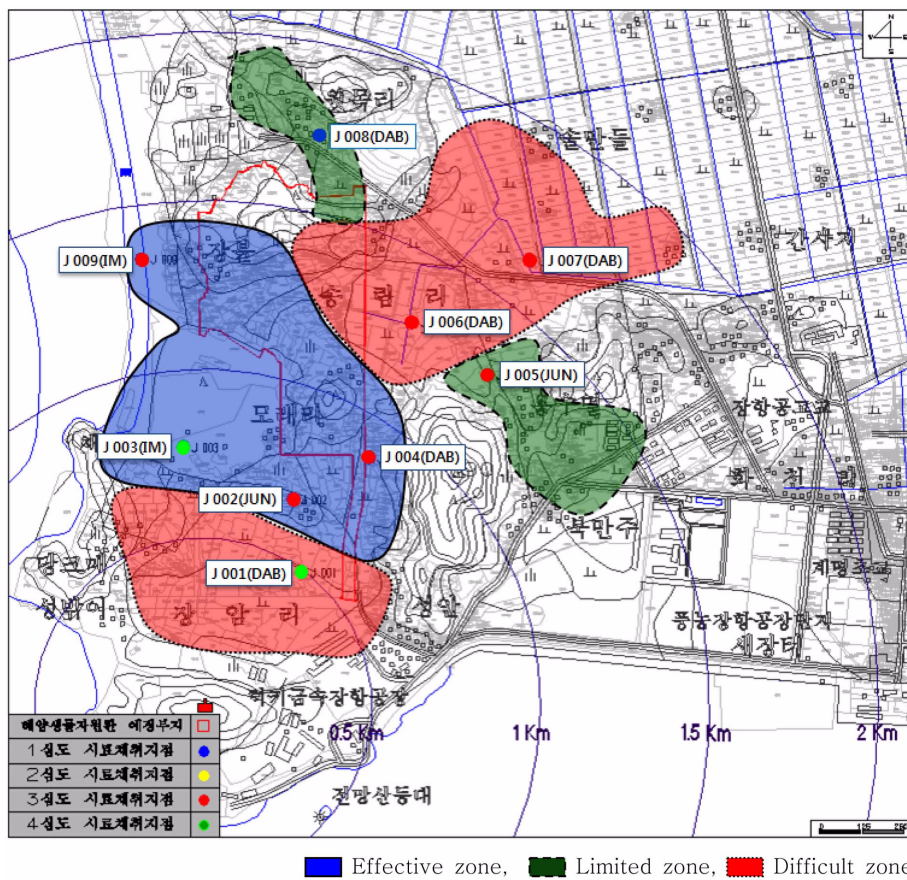


Fig. 11. Zoning map by efficiency prediction of soil washing.

는 양이온의 총량으로 점토의 함량이나 점토광물의 종류 및 유기물의 함량에 따라 차이가 있다(김계훈 외, 2006). 일반적으로 모래와 미사는 표면적이 적기 때문에 양이온 교환용량에 거의 기여하지 않으므로 모래의 함량이 많은 사토보다는 점토를 많이 함유하는 토양이 양이온 교환용량이 더 크며, 토양세척기법 적용시 처리대상 토양의 양이온교환용량이 5~10 meq/100 g 이상일 경우 처리효율이

저하되는 것으로 알려져 있다(USEPA, 1991). 대상부지는 앞서 토양입경분포 결과 “Effective” 등급이었던 지역이 양이온 교환용량 측정결과가 10 meq/100 g 부근이었기 때문에 양이온교환용량 측면에서도 동일한 등급으로 구분되었다.

마지막으로 화학적 특성인 토양의 수소이온농도(pH)를 측정하여 토양세척처리효율과의 관계를 해석하였다. 대상

Table 5. Ranking determination of soil washing efficiency about 9 group in study area

Radius (km)	Group	Land use	Particle size distribution	Water content	CEC	Efficiency ranking
0~0.5	J001	DAB	×	▲	▲	5
	J002	JUN	●	●	●	1
0.5~1	J003	IM	●	●	●	1
	J004	DAB	●	▲	●	2
1~1.5	J009	IM	●	●	●	1
	J005	JUN	▲	▲	×	3
	J006	DAB	×	×	×	6
1.5~2	J007	DAB	×	×	×	6
	J008	DAB	▲	×	▲	4

● Effective, ▲ Limited, × Difficult

부지내 토양의 수소이온농도의 측정결과 토양심도, 부지 용도 등과 관계없이 4.96~6.43의 범위를 나타내었다(Fig. 10). 대부분의 중금속은 중성이나 약알칼리성 토양보다 산성 토양에서 용해도가 커서 수용성의 농도가 높다. 그러나 비소의 경우 자연조건에서 다른 중금속들과 달리 음이온적인 거동을 하며 조건의 변화에 따라 다양한 형태로 존재한다. 토양과 수질에 주로 Arsenate(As^{3+})와 Arsenite(As^{5+})로 존재하는데 이들은 산화, 환원상태의 조건에 따라 존재형태가 변화되며(정우식 외, 2009; Ravenscroft et al., 2009) pH가 11이상의 범위에서는 금속성 화합물에 흡착이 거의 이루어지지 않아 다른 중금속과는 반대의 특성을 가지고 있다(Alam et al., 2001; Dixit and Hering 2003). 따라서 약산성에서 중성에 가까운 수소이온농도 범위를 갖는 본 지역의 경우 토양 중 비소가 물로 전이할 가능성이 희박할 것으로 보이므로 대상부지내 토양의 수소이온농도는 입경분리에 의한 토양세척 기법 적용시 영향인자에서 배제하여도 무방할 것으로 보인다.

3.4. 토양세척처리효율 예측지도 작성결과

앞서 토양세척 처리기법과 토양의 네 가지 물리화학적 특성별 처리효율의 개연성을 종합하여 지역별, 영향반경별 토양세척 처리기법 적용시 처리효율을 예측하여 순위를 평가하였다. 비소의 중분석을 통하여 결정된 입경분리에 의한 토양세척기법 적용시 본 연구에서 분석된 토양의 네 가지 물리화학적 중에서 가장 중요한 영향인자는 토양 입경분포이며, 토양의 수소이온농도의 경우 토양중 비소가 세척수로 용출될 가능성이 없는 범위에 속하기 때문에 영향인자에서 제외하였다. 또한 양이온교환용량보다 함수율이 처리효율에 더 큰 영향을 주는 인자로 고려할 수 있는데, 이는 비소가 주로 잔류성형태로 존재하는데 근거

를 둘 수 있다. 따라서 본 지역의 비소오염토양을 처리하고자 입경분리에 의한 토양세척 처리기법 적용시 토양의 물리화학적 특성인자를 영향이 큰 항목부터 나열하자면, 토양입경 분포 > 함수율 > 양이온 교환용량 > 수소이온농도의 순서일 것이다. 물리화학적 특성별 결과 값을 바탕으로 토양세척 적용시 처리효율을 Effective, Limited, Difficult로 구분한 결과와 인자간 영향력을 고려하여 결정된 대상지역내 9개 지역별 처리효율별 순위를 선정한 결과는 Table 5와 같다.

1, 2위, 3, 4위 및 5, 6위로 평가된 지역을 각각 Effective zone, Limited zone과 Difficult zone으로 구분하여 대상지역 도면에 표시하여 최종적으로 토양세척 처리효율 예측지도를 작성하였다(Fig. 11).

4. 결 론

본 연구에서는 장항제련소 주변 지역을 대상으로 주 오염물질인 비소의 토양오염공정시험기준 개정에 따른 개정 전과 후의 토양오염분포도 변화를 확인하여 정화대상지역을 선정하였으며, 최소한의 토양특성분석을 통해 비소오염토양에 대한 토양세척공법 적용시 처리효율 예측 방안을 도출하였다. 따라서 개정 전과 후의 토양오염공정시험기준에 따라 토양 중 비소분석을 수행하여 장항제련소 주변 부지의 토양오염분포 변화를 비교한 결과 개정 후의 기준 적용시 오염분포면적이 심도에 따라 1.64~4.11배 범위가 확대됨을 확인하였으며, 본 결과는 비소의 중분석 결과 80% 이상이 광물 격자 내에 존재하는 잔류성형태(Residual metal)로써 개정 전의 시험기준 적용시 용출되기 어려운 형태이기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 토양중 비소의 존재형태는 물로 전이될 가능성이 적으므로

입경분리(particle separation)에 의한 토양세척 기법 적용이 적합한 것으로 결정하였다. 대상지역을 9개 지역으로 나누어 각 지역에 대하여 심도별 토양의 물리화학적 특성 분석을 실시한 결과 토양입경 분포 > 함수율 > 양이온 교환용량 > 수소이온농도의 순으로 토양세척기법 적용성 판단시 영향력이 큰 순서를 나열할 수 있었다. 특히 본 지역의 경우 토양입경분포와 함수율이 토양세척 처리효율을 예측하는데 가장 중요한 인자로서 향후 정화를 위한 더욱 정밀한 처리효율 예측이 필요할 경우 두 가지 인자 분석만으로 실행 가능할 것으로 보인다. 이러한 연구결과는 토양특성이 상이한 광범위한 오염지역에 대한 정화공법 효율을 예측하는데 모든 영향인자 분석이 아닌 일부 인자분석으로도 가능함을 보여 경제성, 효율성 측면에 의의를 둘 수 있겠다.

사 사

본 연구는 환경부 “토양지하수오염방지기술개발사업”으로 지원받은 과제임(173-092-014).

참 고 문 헌

- 김계훈, 김길룡, 김정규, 사동민, 서장선, 손보균, 양재의, 엄기철, 이상은, 정관용, 정덕영, 정연태, 정종배, 현해남, 2006, 토양학, 향문사, P. 471.
- 김주용, 전효택, 1993, 서울지역 토양과 분진 중의 Cu, Pb, Zn, Cd의 지구화학적 분산, 한국자원공학회지, **30**, 163-176.
- 김주용, 전효택, 1993, 장항제련소지역 토양과 분진중의 Cu, Pb, Zn 및 Cd의 지구화학적 분산과 산출상태, 광산지질, **26**, 175-185.
- 박준석, 황선숙, 남궁완, 2010, 단일 및 다단계 세척이 중금속 오염토양의 토양세척 효율에 미치는 영향, 한국폐기물자원순환학회지, **27**(7), 646-654.
- 양중석, 이주영, 박영태, 백기태, 최재영, 2010, 추출방법에 따른 금속광산 주변의 토양오염 특성, 지하수토양환경, **15**(3), 1-6.
- 정우식, 이상훈, 정형근, 김선준, 최재영, 전병훈, 2009, 무산소 조건에서의 Fe(II)와 As(V)의 반응에 관한 연구, 자원환경지질, **42**(5), 487-494.
- 홍성혁, 박혜민, 강완협, 박주양, 2010, 고형화/안정화 공법의 토양오염공정시험법 적용, 한국지하수토양환경학회 추계학술발표회 및 통합 10주년 기념 국제 심포지엄, 한국지하수토양환경학회, 한양대학교, p. 282.
- 환경부, 2009, 토양오염공정시험기준.
- 환경부, 2009, 토양환경보전법.
- Alam, M.G.M., Tokunaga, S., and Maekawa, T., 2001, Extraction of arsenic in a synthetic arsenic-contaminated soil using phosphate, *Chemosphere* **43**, 1035-1041.
- Brady, N. and Weil, R., 2004, Elements of the Nature and Properties of Soils, Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey 07458, P. 606.
- CL:AIRE, 2007, Understanding Soil Washing, CL:AIRE (Contaminated Land: Applications in Real Environments) technical bulletin, TB13.
- Dixit, S. and Hering, J.G., 2003, Comparison of Arsenic(V) and Arsenic(III) Sorption onto Iron Oxide Minerals: Implications for Arsenic Mobility, *Environ. Sci. Technol.*, **37**, 4182-4189.
- Ravenscroft, P., Brammer, H., and Richards, K., 2009, Arsenic Pollution A Global Synthesis, Wiley-Blackwell, p. 580.
- Tessier, A., Campbell, P.G.C., and Bisson, M., 1979, Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals. *Anal. Chem.*, **51**, 844-851.
- USEPA, 1990, Engineering Bulletin Soil Washing Treatment, USEPA, Office of Emergency and Remedial Response Washington, D. C. 20460, Office of Research and Development Cincinnati, OH 45268, EPA/540/2-90/017.
- USEPA, 1991, Guide for Conducting Treatability Studies Under CERCLA : Soil Washing Interim Guidance, USEPA, Office of Emergency and Remedial Response Washington, D. C. 20460, EPA/540/2-91/20A.