

## 정화 보조지표와 시료 채취 방법 제안을 통한 토양정화검증 제도 개선 연구

권지철<sup>1</sup> · 이군택<sup>1\*</sup> · 김태승<sup>2</sup> · 윤정기<sup>2</sup> · 김지인<sup>2</sup> · 김용훈<sup>1</sup> · 김준영<sup>1</sup> · 최정민<sup>1</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 농생명과학공동기기원

<sup>2</sup>국립환경과학원

### Improvement of Verification Method for Remedial Works through the Suggestion of Indicative Parameters and Sampling Method

Ji Cheol Kwon<sup>1</sup> · Goontaek Lee<sup>1\*</sup> · Tae Seung Kim<sup>2</sup> · Jeong-Ki Yoon<sup>2</sup> · Ji-in Kim<sup>2</sup>  
Yonghoon Kim<sup>1</sup> · Joonyoung Kim<sup>1</sup> · Jeongmin Choi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>NICEM, Seoul National University

<sup>2</sup>National Institute of Environmental Research

#### ABSTRACT

In addition to the measurement of the concentration of soil contaminants, the new idea of indicative parameters was proposed to validate the remedial works through the monitoring for the changes of soil characteristics after applying the clean up technologies. The parameters like CFU (colony forming unit), pH and soil texture were recommended as indicative parameters for land farming. In case of soil washing, water content and the particle size distribution of the sludge were recommended as indicative parameters. The sludge is produced through the particle separation process in soil washing and it is usually treated as a waste. The parameters like water content, organic matter content, CEC (cation exchange capacity) and CFU were recommended as indicative parameters for the low temperature thermal desorption method. Besides the indicative parameter, sampling methods in stock pile and the optimal minimum amount of composite soil sample were proposed. The rates of sampling error in regular grid, zigzag, four bearing, random grid methods were 17.3%, 17.6%, 17.2% and 16.5% respectively. The random grid method showed the minimum sampling error among the 4 kinds of sampling methods although the differences in sampling errors were very little. Therefore the random grid method was recommended as an appropriate sampling method in stock pile. It was not possible to propose a value of optimal minimum amount of composite soil sample based on the real analytical data due to the dynamic variation of  $CV_{funderror}$ . Instead of this, 355 g of soil was recommended for the optimal minimum amount of composite soil sample under the assumption of ISO 10381-8.

**Key words :** Composite sample, Indicative parameter, Soil sampling, Verification

#### 1. 서 론

현행의 토양환경보전법 제15조의6 제1항에 의하면 정화책임자는 오염토양을 정화하기 위하여 토양정화업자에게 토양정화를 위탁하는 경우에 제23조의제2항2호에 따라 지정을 받은 토양오염조사기관으로 하여금 정화과정 및 정화완료에 대한 검증을 받도록 하고 있으며, 이에 따라 환경부에서는 토양정화 검증방법에 요구되는 사항을

토양정화 검증방법에 관한 고시(환경부 고시 제 2013-60호, 이하 “토양정화검증지침”으로 함)로 정하여 토양정화 검증을 수행하도록 하고 있다.

현행 토양정화검증지침은 오염도분석, 환경관리, 굴착작업 및 정화토양 처분 등 4개 항목으로 구성되어 있다. 4개 항목 중 토양정화의 완료여부를 판단하는 핵심 항목은 오염도 분석이며 정화처리 후 토양의 오염 농도가 토양오염우려기준을 충족하는지를 확인 하는 것이 토양정화검증

\*Corresponding author : gtleee@snu.ac.kr

Received : 2016. 11. 30 Reviewed : 2016. 12. 12 Accepted : 2016. 12. 28

Discussion until : 2017. 2. 28

절차의 전부라고 해도 과언이 아니다. 영국 환경청의 경우에는 “Line of evidence”라는 개념을 도입하여 오염도 평가 외에도 적용된 공법이 적절하게 구현되었는지 여부를 확인하고 있다. “Line of evidence”는 정화기술 성능이 정화기준을 충족시키고 있다는 사실을 보여주기 위하여 중요 지표를 수집하는 것을 의미한다(UKEA, 2010). 본 연구의 주요 목적은 국내에서 주로 적용되는 정화공법(토양경작법, 토양세척법, 저온열탈착법)에 대하여 “Line of evidence”가 될 수 있는 토양 특성 지표를 제안하고 이를 향후 오염도 분석과 더불어 정화성능을 확인할 수 있는 보조지표로 활용 가능하게 하는 것이다. 토양 특성 중 보조지표로 활용 가능한 항목을 결정하기 위하여 정화공법 적용 전·후 토양을 대상으로 토양 특성을 비교 평가하였다. 토양경작법의 경우에는 pH, 종속영양미생물수, 수분함량, 유기물함량, C:N:P 비율, 토성을 평가하였다. 일반적으로 토양경작법 적용에 적합한 토양의 pH는 6~8 범위이고 종속영양미생물수는  $10^3$  CFU/g-건조토양 이상, 12~30%(w/w) 수준의 수분함량, 100:10:1~100:10:0.5 수준의 C:N:P 비율로 알려져 있다(KMOE, 2007). 그 외 토성의 경우 토양경작과정에서 변화될 가능성이 낮기 때문에 토양의 일관성 여부를 확인하여 오염토양 교체 및 희석 등 불법행위를 검증하기 위한 지표로 토성을 추가적으로 평가하였다. 토양세척법은 pH, 공정슬러지 수분함량, 공정슬러지 입경, 토양세척수 중의 오염물질 농도를 평가하였다. 토양 pH는 세척액 종류에 따른 토양 pH의 변화 여부 확인, 공정슬러지 수분함량은 폐기물관리법 시행규칙 별표 5의2 <폐기물재활용 기준 및 구체적인 재활용 방법>에서 규정하는 수분함량 70% 미만 준수를 통한 재활용 가능성 여부 확인, 공정슬러지 입경은 설계에 제시된 입경을 준수함으로써 미세 토양의 과도한 폐기물 처리 여부 확인, 그 외 토양 세척수 중의 오염 물질 농도 확인을 통한 토양세척 시스템 적정 가동 여부 확인 등의 목적으로 항목을 선정하였다. 저온열탈착법의 경우는 유기물함량, 양이온교환용량, 수분함량, 종속영양미생물수, 토성의 변화를 평가하였다(Kim et al., 2015). 유기물함량, 수분, 종속영양미생물수는 가열 과정에서 감소 여부, 양이온교환용량은 유기물 감소 등으로 인한 동반 저감 여부 등을 확인할 목적이며 그 외 토성은 토양경작과 동일한 이유로 평가해 보았다. 지금까지 언급된 정화공법별 보조지표는 최적의 정화 공법을 선정하기 위한 토양 특성 지표로도 사용될 수도 있지만 그렇게 활용하기 위해서는 보다 세부적인 적용 기준이 제시되어야 할 것이다. 예를 들면 미국 환경복구배상책임법(CERCLA)에 근거한 토양세척 적용

지침에 의하면 입경 0.25 mm 이하 미세입자가 많은 경우는 세척효과가 저하되며 최소 50% 이상의 입자가 모래나 자갈로 구성된 토양이 토양세척에 적합하다고 기술되어 있다. 또한 양이온교환용량은 5~10 cmol/kg 수준으로 낮아야 토양세척에 적합한 것으로 기술되어 있다(USEPA, 1991). 그러나 국내의 경우 정화공법 선정에 관련된 구체적인 토양 특성 지표가 제안되어 있지 않으며, 정화공법을 고려하여 효과적으로 적용될 수 있는 오염토양에만 해당 공법을 사용하게 하는 규정도 없으므로 이미 정화공법이 선정되고 정화가 진행되는 단계에서 오염토양이 적용되고 있는 공법에 적합한 것인지 여부를 판단하는 것은 정화검증의 취지에 부합되지 않는다. 따라서 본 연구에서 토양정화검증의 보조 지표로 제안하고자 하는 것은 적정 공법 선정에 필요한 오염토양의 특성 지표 개념 보다는 설계에 명시된 공정을 오염토양에 적용하였을 때 정화공법 특이적으로 변화되는 토양 특성 지표를 도출함으로써 정화공법이 전혀 적용되지 않았거나 매우 부실하게 적용되는 극단적인 경우를 확인할 때 사용될 수 있는 최소한의 지표이다. 이렇게 도출된 지표는 토양정화검증 과정에서 오염 농도 감소가 적정 기술 적용에서 유래하였다는 당위성을 확보하게 할 수 있는 보조지표로 활용될 수 있다. 또한 그 밖에 현행 토양정화검증지침에 명시되어 있지 않은 최적의 혼합시료 채취 방법, 혼합시료의 최소 요구량 등을 제안함으로써 토양정화검증 시료채취의 신뢰성 향상 및 업무의 일관성을 달성하고자 하였다. 적지 토양에서 채취방식에 따른 시료채취 오차를 평가하기 위하여 분석 오차와 시료채취 오차 비교 시에 적용되는 계산식을 사용하여 평가해 보았다(Gustavsson et al., 2006; Kim, 2013). 그리고 혼합시료 채취 시 요구되는 혼합시료의 최적 최소량을 구하기 위해서 시료채취에 관한 국제표준(ISO, 2006)에 표기된 방법을 적용하여 산출해 보았다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 토양정화 보조지표 결정

#### 2.1.1. 토양경작

시료채취는 석유계총탄화수소(TPH)를 대상으로 토양경작을 수행하고 있는 곳에서 이루어졌으며 토양경작 처리 전 오염토양에서 시료 40점, 토양경작 중인 토양에서 1주일 시간 간격을 두고 시료 32점씩 2회 총 64점 시료를 채취하여 TPH 오염 농도를 분석하였다. 그리고 오염분석과는 별개로 토양경작과 관련된 보조 지표를 결정하기 위하여 과정, 완료 검증 시점에 각각 2점씩 총 4점의 토양

시료를 채취하였으며 pH, 중속영양미생물수, 수분함량, 유기물함량, C:N:P 비율, 토성의 변화를 분석하였다.

2.1.2. 토양세척

시료채취는 중금속(아연)을 대상으로 토양세척을 수행하고 있는 곳에서 이루어졌으며 토양세척처리 전 오염도 양 30점, 1차 배치 처리 토양에서 35점 시료를 채취하여 아연 성분의 농도저감 여부를 확인하였다. 그리고 오염도 분석과는 별개로 토양세척과 관련된 보조 지표를 결정하기 위하여 위해 폐기물 처리 대상으로 선별된 토양 세척 후 공정슬러지를 2회 채취하여 수분함량과, 토성, 입경별 함량 분포를 분석하였다. 공정슬러지의 입경별 함량 분포는 당초 토양세척공법 설계에서 제안한 0.075 mm 이하 입자에 대한 폐기물처리되는 설계기준을 충족하는지 여부를 평가하기 위하여 분석하였다. 전통적인 침강법으로는 모래(0.05~2.0 mm), 미사(0.002~0.05 mm), 점토(0.002 mm 이하) 등 3개 입경으로만 입경분포를 구분할 수 있으므로 설계조건으로 제시된 공정슬러지 0.075 mm 이하 입경 충족여부를 판단하기에는 부족함이 있어서 공정슬러지의 보다 세부적인 입경분포 분석을 위하여 입도분석기(Mastersizer 3000, Malvern)를 사용하였다. 우선 토양 적당량(0.1~0.5 g)에 증류수와 토양분산제(Sodium Hexametaphosphate)를 넣고 현탁액 상태로 만든다. 그리고 입도 분석기에 전처리한 현탁액을 주입하여 분산시키고 측정구역을 통과하는 시료입자에 빛을 조사하여(633 nm Helium Neon laser 조사 후 470 nm solid-state Blue light source 추가 조사) 검출기가 시료입자에 의해 산란되는 빛의 세기를 측정하여 입자크기의 분포를 자동으로 계측하였다. 입도분석기(Mastersizer 3000, Malvern)의 측정가능한 입경은 0.01~3500 μm으로 모래(> 0.05 mm), 미사(0.002~0.05 mm), 점토(< 0.002 mm)의 입경을 고려할 때 토양 입자 분석에 적절한 측정범위를 가지고 있으며 정확도(< 0.6%), 정밀도 및 반복성(< 0.5%), 재현성(< 1%)를 만족시킨다고 알려져 있다. Laser diffraction을 이용한 입경 분석 장비로서 국제 표준(ISO, 2009)에 제시된 방법을 적용하여 개발된 장비 이다 또한 실제로 토양세척액에 의하여 중금속 성분의 세척이 일어났는지 확인하기 위하여 세척 장치에서 배출되는 세척액을 채취하여 중금속 농도를 분석하였다.

2.1.3. 저온열탈착

시료채취는 TPH, 벤젠·톨루엔·에틸벤젠·자일렌(BTEX)를 대상으로 저온열탈착 방법을 수행하고 있는 곳

에서 이루어졌으며 저온열탈착 처리 전 오염도양 25점, 처리 후 토양 25점 시료를 채취하였다. 그리고 오염도 분석과는 별개로 저온열탈착과 관련된 보조 지표를 결정하기 위하여 처리 전 오염도양 5점, 처리 후 토양 5점 등 총 10점의 시료를 채취하여 유기물함량, 양이온교환용량, 수분함량, 중속영양미생물수, 토성을 분석하였다.

2.2. 시료채취의 근원적 오차를 고려한 혼합시료 채취 방법 결정

적치의 혼합시료 채취방법을 검토하기 위해 석유계총탄화수소(TPH)를 대상으로 토양경작을 수행하고 있는 적치 토양에서 시료를 채취하였다. 적치 토양 1개 격자의 크기는 가로 6 m, 세로 20 m이었으며 1개 격자 내에서 정규 격자법 9개, 지그재그법 7개, 사방위법 5개, 임의격자법 9개 시료를 채취하여 혼합시료를 만들었으며 8개 격자에서 시료를 채취하였다. 2회에 걸쳐 두 개의 다른 적치 토양(A plot 및 B plot)에서 동일한 방법으로 총 16개 혼합시료를 채취하였다. 각 격자에서 시료채취 깊이는 시료채취 방식 비교를 위한 목적이므로 시료채취 깊이에 대한 변수를 배제하고자 표토(0~10 cm)로 한정하여 시료를 채취하였다(Fig. 1).

분석 값을 이용하여 시료채취에서 유래되는 근원적 오차를 계산하기 위하여 아래와 같은 계산식을 통해 오차를 구하였다(Gustavsson et al., 2006; Kim, 2013).

$$S_{FE} = \sqrt{\left(\frac{1}{M_E} - \frac{1}{M_L}\right) \times D_{95}^3 \times c \times \beta \times f \times g} \tag{1}$$

식 (1)에서  $S_{FE}$ 는 근원적 오차의 표준편차(standard deviation of fundamental error),  $M_E$ 는 채취토양 질량(extracted sample mass, g),  $M_L$ 은 평가대상 토양 질량(mass of the lot to be sampled, infinity),  $D_{95}$ 은 입경 상위 5%를 제외한 최대입경(mesh sieve size where 5% of the material is retained, cm),  $c$ 는 광물학적 계수(mineralogical factor, g/cm<sup>3</sup>),  $\beta$ 는 분리계수(liberation factor),  $f$ 는 입자형태계수(particle shape factor),  $g$ 는 입경분포 보정계수(particle size range factor)를 말한다. 광물학적 계수는 아래 식 (2)에 의해 구한다.

$$c = \frac{\left(1 - \left(\frac{a_L}{\alpha}\right)\right)^2}{\frac{a_L}{\alpha}} \times \rho_c + \left(1 - \frac{a_L}{\alpha}\right) \times \rho_{particle} \tag{2}$$

식 (2)에서  $a_L$ 은 오염농도 비율(mass proportion of

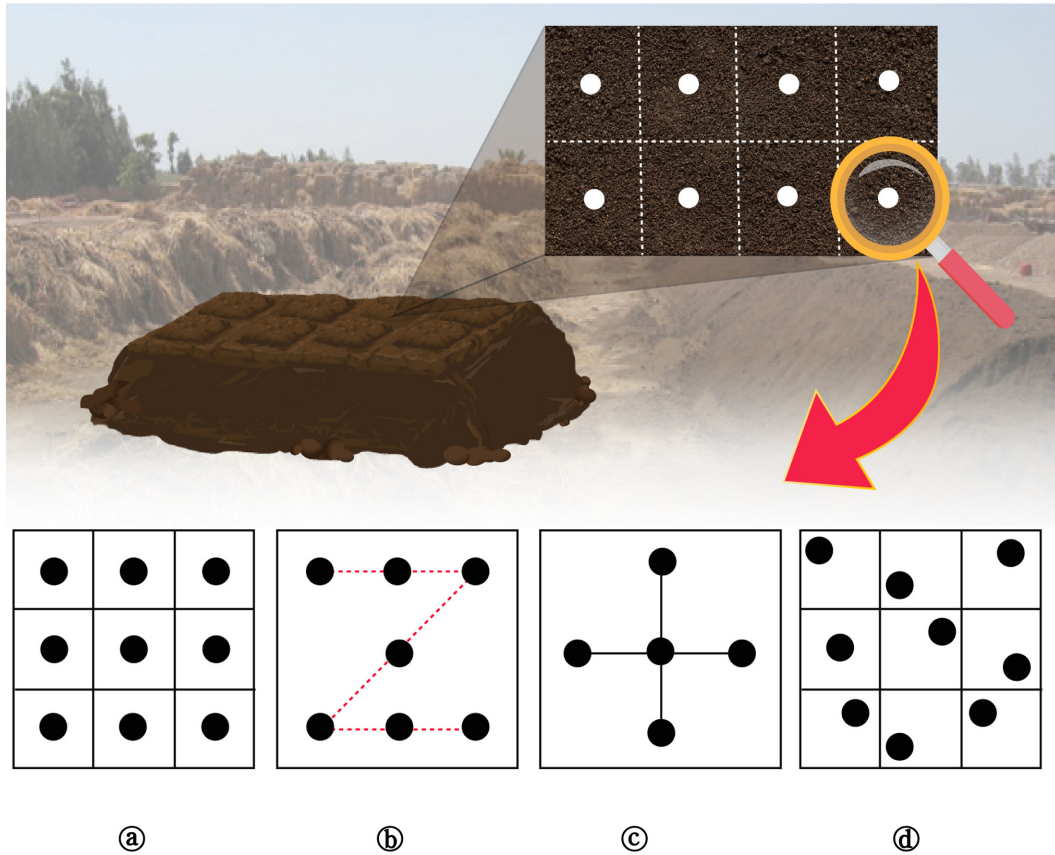


Fig. 1. Schematic layout of sampling method (a) regular grid, (b) zigzag, (c) four bearing, (d) random grid.

the contaminant in the lot to be sampled),  $\alpha$ 는 입자에서 오염물질이 차지하는 비율(contaminant proportion in the critical particles),  $\rho_c$ 는 오염물질의 밀도(contaminant density,  $g/cm^3$ ),  $\rho_{particle}$ 는 입자 밀도(particle density,  $g/cm^3$ )를 말한다.

2.3. 혼합시료의 최적 최소량 결정

혼합시료의 최적 최소량 채취방법을 검토하기 위해 석유계총탄화수소(TPH)를 대상으로 토양경작을 수행하고 있는 적치토양에서 임의격자법으로 채취된 토양시료 8점과 중금속(아연)에 대한 토양세척 처리 과정을 거친 1차 배치 처리 토양시료 35점을 이용하여 국제표준(ISO 10381-8: Soil quality-sampling: Guidance on sampling of stockpiles)에 제시된 아래 식에 따라서 최적 최소량을 산정하였다.

$$m_{min-sample} = \frac{1}{6} \pi (D_{95})^3 \rho_{particle} \times g \frac{(1-p)}{(CV_{fund-error})^2 w_{particle}} \quad (3)$$

식 (3)에서  $m_{min-sample}$ 은 최소 시료 무게(minimum

sample size, g),  $D_{95}$ 는 입경 상위 5%를 제외한 최대입경(cm),  $\rho_{particle}$ 는 입자 밀도( $g/cm^3$ ),  $g$ 는 입경분포 보정계수,  $CV_{fund-error}$ 는 변동계수(coefficient of variation due to fundamental error),  $w_{particle}$ 은 특정 특성을 갖는 입자의 분획(fraction of the particles with a certain characteristic, mass fraction),  $p$ 는 특정 특성을 갖는 입자가 검출될 확률(probability of the occurrence of a particle with the characteristic to be determined,  $0 < p < 1$ )을 말한다. 분산계수는 식 (4)에 의해 표준편차와 평균농도를 이용하여 산정한다.

$$CV_{fund-error} = \sigma(y) : \text{편차} / E(Y) : \text{평균} \quad (4)$$

2.4. 분석 방법

TPH(석유계총탄화수소)는 토양오염공정시험기준(MOE, 2015)에 따라 토양 25 g에 디클로로메탄을 넣고 초음파 추출하여 가스크로마토그래프 불꽃이온화검출기(GC-FID, Agilent 6890N, USA)를 이용하여 분석하였다. 중금속(Cu, Pb, Ni, Hg, Zn, Cd) 및 As는 토양오염공정시험기

준(KMOE, 2015)에 따라 풍건하여 체거름한 시료 3 g을 취하여 왕수추출법으로 추출하여 Cu, Pb, Ni, As, Zn, Cd은 유도결합플라즈마-발광광도기(Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer; ICP-AES, iCAP-7400Duo, Thermo, USA)를 이용하여 분석하였고, Hg은 수은분석기(M-7500, CETAC, USA)를 이용하여 분석하였다. 토성분석은 입자간 침강 속도 차이를 이용한 피펫법(Gee and Or, 2002)을 사용해 입경분석을 하고 미국 농무성법(USDA)의 분류도표에 따라 분류하였다. CEC(양이온교환용량)은 Ammonium acetate법(Sumner and Miller, 1996)에 따라 풍건하여 체거름한 시료에 1 N CH<sub>3</sub>COOH 용액을 넣어 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>로 포화, Isoprppyl alcohol로 흡착되지 않은 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 세척 제거, 10% acidic NaCl 용액으로 흡착된 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>를 치환 회수 과정을 거친 후 이 용액을 Kjeldahl 장비(Kjeltec auto 2400/8400 System, Tecator AB, Sweden)로 증류, 적정하여 정량하였다. 토양의 수분함량은 토양시료 토양오염공정시험기준(MOE, 2015)에 따라 10 g을 105°C 건조기에서 4시간 이상 건조하고 데시케이터에서 식힌 후 항량으로 하여 건조 전과 후의 무게차이를 계산하여 구하였다. 토양 미생물수(총균수)는 희석평판법(NIAS, 2000)에 준하여 분석하였으며 토양현탁액을 희석수로 단계적으로 희석하고 일정량을 평판배지에 배양 후 출현하는 콜로니수를 계수하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 토양정화 보조지표 결정

현행 토양정화검증은 시료채취를 통한 오염도 저감 평가로만 이루어지는 단순성으로 인하여 실제적인 정화공정의 효율적인 적용 여부를 확인하는데 매우 제한적이다. 따라서 오염도 저감을 뒷받침 할 수 있는 간접적 지표의 결정 및 이들에 대한 모니터링은 정화과정에서도 필수적으로 수행되어야 하며 더불어 정화검증 과정에서 검토되어야 할 중요 사항이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서

는 정화공법별로 공법 적용 전후의 농도 저감 및 토양 특성 변화를 확인하고 보조지표로 활용 가능하다고 평가 되는 토양 특성 지표를 제안하였다.

#### 3.1.1. 토양경작

토양경작 처리 전 오염토양의 TPH 농도는 평균 7,280 mg/kg(최소: 1,045 mg/kg / 최대 26,352 mg/kg)로 토양 경작 진행 중인 64점 토양의 TPH 농도는 평균 1,798 mg/kg(최소: 454 mg/kg / 최대 2,498 mg/kg)으로 토양 경작을 통하여 농도가 저감되었다는 것이 확인되었다. 또한 오염 농도 모니터링과는 별도로 토양경작과 관련된 보조 지표를 결정하기 위하여 과정, 완료 검증 시점에 각각 2점씩 총 4점의 토양 시료를 채취하여 pH, 종속영양미생물수, 수분함량, 유기물함량, C:N:P 비율, 토성의 변화를 분석하였으며 그 결과는 Table 1에 나타난 바와 같다. 토양 pH는 중성으로 적정한 값을 보이고 있어서 토양경작에 적절한 수준은 pH 6~8 수준을 유지하고 있었으며, 종속영양 미생물의 경우 과정검증 시점의 경우 평균  $4.9 \times 10^4$  CFU/g, 완료검증 시점의 경우 평균  $5.4 \times 10^5$  CFU/g으로 완료검증 시점에서 종속영양미생물이 약 10배 정도 높게 검출되었다. 이는 토양경작에 요구되는 최소 수준  $10^3$  CFU/g을 상회하는 것이었고 토양경작이 진행되면서 지속적으로 종속영양미생물의 증가가 이루어진 것으로 보인다(KMOE, 2007). 토성의 경우는 3개 시료는 모두 사양토(sandy loam)로 변함이 없었으나 1개 시료는 사양토(sandy loam)에서 양질사토(loamy sand)로 변화된 것으로 평가되었다. 이는 토성구분 삼각도에 의한 분류체계에서 두 토성이 바로 인접한 부분에 위치하므로 모래 대비 미세입자(미사나 점토)의 함량이 조금 많은 것으로 평가되면 발생할 수 있는 경우라 볼 수 있다(Brady and Weil, 2002). 이는 토양의 불균질성에서 기인된 것으로 보이며 미세입자의 인위적인 투입이 있었을 가능성은 없는 것으로 판단된다. 결국 토양경작 전후에 토성의 변화는 일어나지 않은 것으로 판단된다. 수분함량의 경우 평균 8.9%

**Table 1.** Analytical values of indicative parameters for land farming

Sample number	Total microbial count (CFU/g)	Soil pH	Moisture content (%)	C:N:P	Organic matter (%)	Particle size analysis			
						Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Soil texture
1-1	$7.6 \times 10^4$	7.1	7.29	100:3.3:1.9	2.12	67.56	19.80	12.64	Sandy loam
1-2	$2.2 \times 10^4$	7.5	11.3	100:4.1:2.5	2.09	62.44	24.32	13.24	Sandy loam
2-1	$8.3 \times 10^5$	7.3	6.1	100:4.7:3.2	1.25	76.00	12.84	11.16	Sandy loam
2-2	$2.5 \times 10^5$	7.5	11.1	100:4.8:2.9	1.63	81.68	7.12	11.20	Loamy sand

로서 12~30%(w/w)가 최적범위라고 할 때 다소 부족하였고 C:N:P 비율은 평균 100:4.2:2.9로 100:10:1~100:10:0.5가 최적범위라고 할 때 질소의 함량이 낮고 인의 함량은 높게 나타났다(KMOE, 2007). 수분함량의 경우 관수 시점에 따라서 그 함량이 매우 유동적이고 C:N:P 비율은 최적의 비율이 아니라고 해서 토양경작 자체가 부실하게 이루어졌다고 규정하기 어렵고 현재 정화현장에서 이에 대한 모니터링과 설계기준이 명확하게 이루어져 있지 않아서 토양정화 공정 적용 여부에 대한 결정적 판단 지표로 사용하기에 해석상의 이론의 여지가 있다. 따라서 농도저감 평가 외에 토양경작의 효율성을 확인하기 위한 보조지표로는 미생물 성장에 매우 민감한 지표인 토양 pH, 실제 유류분해의 주체가 되는 중속영양미생물수 그리고 오염토양 교체 및 희석 등의 부적절 행위에 대한 간접적 확인 지표가 될 수 있는 토성 등이 효과적일 것으로 판단된다.

### 3.1.2. 토양세척

토양세척 처리 전 토양의 경우 아연 성분만이 평균 농도 580.3 mg/kg(최소: 434.5 mg/kg / 최대 671.6 mg/kg)로 우려기준(1지역, 300 mg/kg)을 초과하여 나타났다. 토양세척 장치를 통하여 1차 배치 처리된 토양 35점을 분석한 결과 아연 성분의 평균 농도는 378.1 mg/kg(최소: 356.1 mg/kg / 최대 396.5 mg/kg)로 농도의 저감이 확인되었다. 또한 오염농도 모니터링과는 별도로 토양세척과 관련된 보조 지표를 결정하기 위하여 토양세척 적용 후 폐기물처리 대상으로 선별된 공정슬러지를 2회 채취하여 수분함량과 공정슬러지 입경 분포를 분석한 결과는 Table 2에 나타내었다. 공정슬러지 수분함량은 1회차, 2회차 각각 31.4%, 31.9%로 70% 미만이므로 분석되어 폐기물관리법 시행규칙 별표 5의2 <폐기물재활용 기준 및 구체적인 재

활용 방법> 에 규정된 기준을 충족하므로 재활용이 가능한 것으로 나타났다. 공정슬러지를 침강속도를 이용한 피펫법을 적용하여 토성을 분석한 결과 두 개 시료 모두 미사질양토(silt loam)으로 나타났으나, 피펫법으로는 0.002 mm 이하, 0.002~0.05 mm, 0.05~2.0 mm 구간의 입경으로 각각 점토, 미사, 모래 등 3개 입경으로 밖에는 구분할 수 없으므로 공정슬러지의 입경이 설계에 제시된 0.75 mm 이하 여부를 충족하는지를 정확히 판단할 수 없었다. 따라서 입도측정기를 사용하여 공정슬러지의 입경 분포비(% , v/v)를 보다 세밀한 구간으로 구분하여 정량분석 하였으며 그 결과는 Fig. 2, Fig. 3에 나타낸 바와 같다. 시료 sludge 1의 경우에는 설계 기준에서 제시한 폐기물처리 대상이 아닌 입경 0.075 mm(75 µm) 이상의 입자가 약 23.2%(v/v) 수준으로 포함되어 있었다. 분포하는 입자의 체적 평균에 해당하는 입경의 크기는 59.2 µm이었으며, 전체 입경 분포에서 10%, 50%, 90%일 때의 크기는 각각 5.28 µm, 27.8 µm, 140 µm로 나타났다. 시료 sludge 2의 경우에는 입경 0.075 mm(75 µm) 이상 입자가 약 18.7%(v/v) 수준으로, sludge 2 보다는 적지만 역시 설계기준을 충족시키지 못하였다. 분포하는 입자의 체적 평균에 해당하는 입경의 크기는 48.2 µm이었으며, 전체 입도분포에서 10%, 50%, 90%일 때의 크기는 각각 4.74 µm, 23.7 µm, 118 µm로 나타났다. 입경분포 분석 결과 폐기물처리 대상 공정슬러지의 당초 설계 기준을 충족시키지 못하면서 토양세척이 이루어지는 것을 알 수 있었다. 토양세척 기술은 물리적 선별 기술과 연계된 기술이다(Devgun, 1993). 오염물질은 주로 미세입자에 함유되어 있으므로 이에 대한 분리는 오염저감의 주요 기작이라 할 수 있다. 이런 측면에서 토양세척은 오염물질이 주로 미세 입자 부분에 대부분 존재하는 토양에 유용하며 조대 입자에 존재하는 오염물질은 화학적 세척 방법으로 연계

**Table 2.** Analytical values of indicative parameters and contaminants for soil washing

Sample name	pH	water content (%)	SS (mg/L)	Cd	Cu	As	Hg	Pb	Zn	Ni	Cr <sup>6+</sup>	Particle size analysis			
												Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Soil texture
sludge 1	-	31.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	29.6	59.0	11.2	Silt loam
sludge 2	-	31.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21.4	67.8	10.6	Silt loam
washingwater 1 (waste)	6.9	-	14	ND	0.006	ND	ND	ND	0.113	0.03	ND	-	-	-	-
washingwater 2 (waste)	6.9	-	14	ND	ND	ND	ND	ND	0.146	ND	ND	-	-	-	-



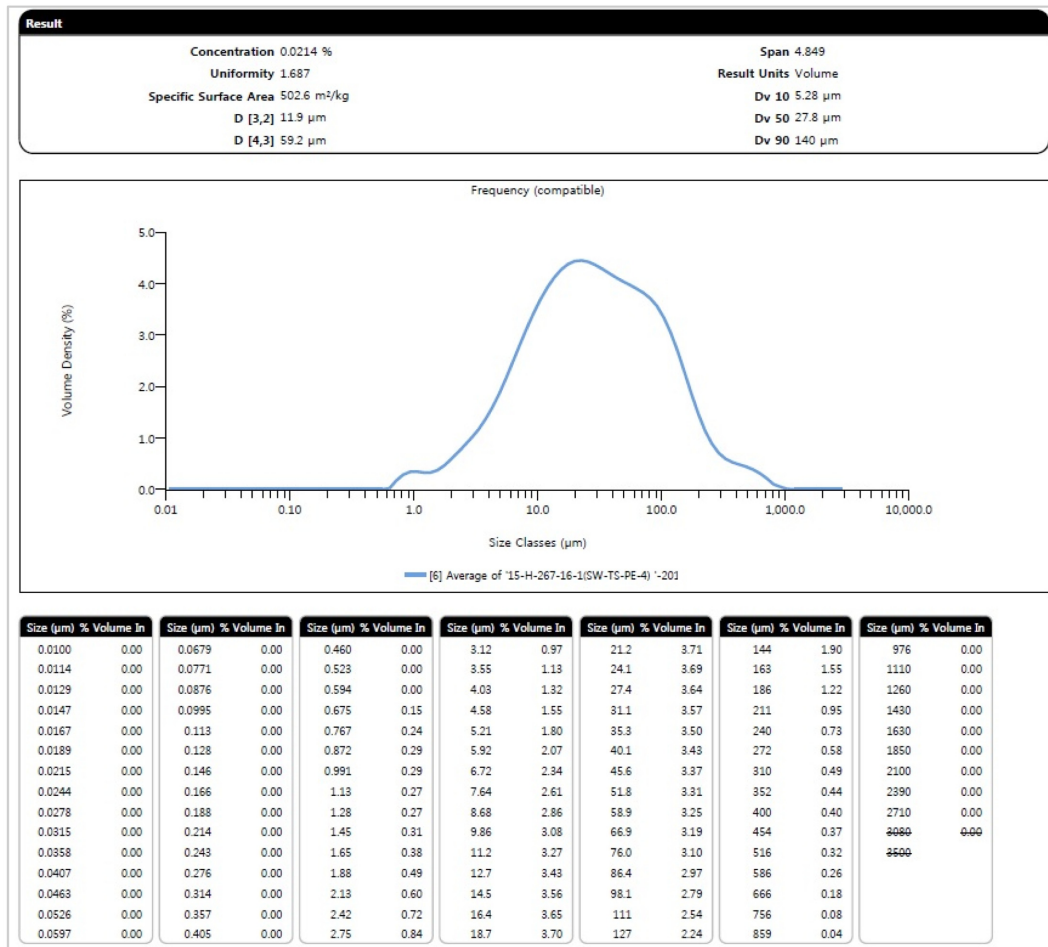


Fig 2. Results of particle size analysis for sludge 1.

처리되기도 한다(Bradbury, 1992; USEPA, 1988). 이런 기작의 특성상 토양세척을 통하여 유용한 미세 토사가 폐기물로 취급이 되는 점이 토양세척을 적용할 때 생각해야 할 부분으로 판단된다. 따라서 공법 설계에 제시된 폐기물 처리 대상 미세토사의 입경에 대한 검증은 매우 중요하며 현재 전혀 이루어지고 있지 않다. 따라서 정화검증 단계에서 공정슬러지로 분리되는 미세 토양의 입경에 대한 확인은 유용한 토양 자원을 보존하고 토양세척이 설계에 따라 적정하게 운영되고 있는지 판단할 수 있는 매우 중요한 보조지표가 될 수 있다.

그리고 실제로 토양세척액에 의하여 중금속 성분의 세척이 일어났는지 확인하기 위하여 세척 장치에서 배출되는 세척액을 2회 채취하여 중금속과 비소(카드뮴, 구리, 수은, 납, 아연, 니켈, 6가크롬, 비소) 농도를 분석하였다. 그 결과 배출 세척액 중의 아연 농도가 1회차, 2회차 각각 0.113 mg/l, 0.146 mg/l로 나타나 아연이 세척액에 용

해되어 추출되는 것을 확인할 수 있었다. 여타 구리와 니켈 성분의 경우 1회차 세척액에서만 각각 0.006 mg/l, 0.03 mg/l 수준으로 검출되었으며 그 밖의 중금속과 비소는 세척액에서 검출되지 않았다. 토양세척은 미세입자 분리와 세척액을 통한 오염물질의 제거를 주요 공정으로 하고 있으므로 배출 세척액 중의 세척 대상 오염물질 농도로 전체적인 토양세척 효율을 평가하는 것은 적절하지 않다. 그러나 실제 현장에서 세척액을 통한 오염물질의 제거가 이루어지고 있는지, 세척 장비가 적정하게 가동되고 있는지 여부를 확인하는 수단으로 배출 세척액 중의 오염물질 농도를 측정하는 것은 토양정화검증의 보조지표로서 활용 가능할 것으로 생각된다. 따라서 본 연구에서 수행된 시험결과를 기초로 하여 판단해 보면, 농도저감 평가 외에 토양세척의 효율성을 확인하기 위한 보조지표로는 토양세척 후 폐기물처리 대상으로 분리된 공정슬러지의 수분함량, 입경분포의 설계 조건 충족여부, 토양 세척액

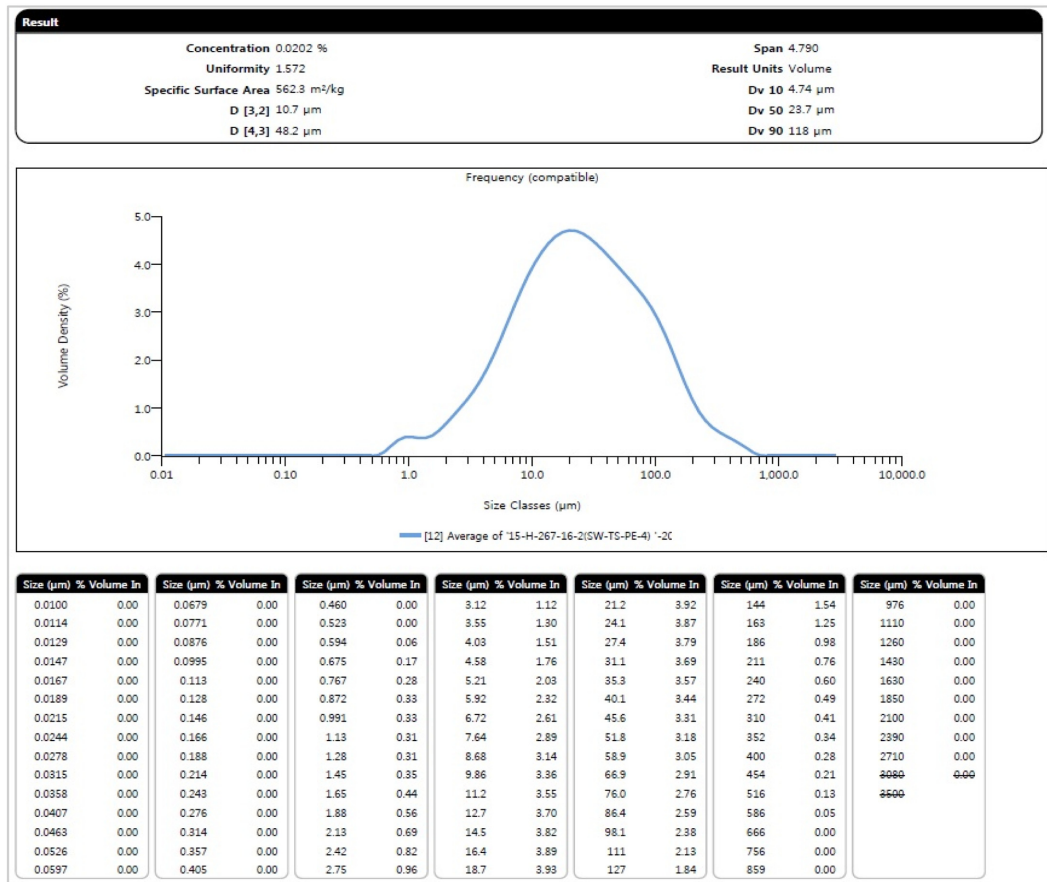


Fig 3. Results of particle size analysis for sludge 2.

중의 세척 대상 오염물질 포함여부 등이 효과적일 것으로 판단된다. 특히 현재의 토양세척 공법이 일반적으로 입자 분리 공정과 세척 공정이 병행 사용되고 있으므로 정화대상 토양을 입경분리를 통하여 폐기물로 처리하는 것을 확인하기 위해서 공정슬러지 입경분석은 검증과정에서 매우 중요하게 모니터링 되어야 한다고 판단된다.

3.1.3. 저온열탈착

저온열탈착 처리 전 오염토양의 TPH 평균 농도는 10,101 mg/kg(최소: 6,912 mg/kg / 최대: 12,033 mg/kg)로 검출되었고, 저온열탈착 처리 후 처리토양의 TPH 평균 농도는 713 mg/kg(최소: 205 mg/kg / 최대: 864 mg/kg)로 검출되었다. 분석 대상 모든 토양에서 처리 전후 90% 이상의 농도 저감율을 나타내었다. 그리고 저온열탈착과 관련된 보조 지표를 결정하기 위하여 처리 전 오염토양 5점, 처리 후 토양 5점 등 총 10점의 시료를 채취하여 유기물 함량, 양이온교환용량, 수분함량, 종속영양미생물수, 토성을 분석하였으며 그 결과는 Table 3에 나타나 바와 같다.

저온열탈착법 적용시 토양 수분함량은 효율 측면에서 매우 중요한 요소이며 처리 대상 토양의 최적 수분함량은 10~25%(w/w) 으로 알려져 있다(KMOE, 2007). 따라서 저온열탈착 장비 투입 전 오염토양의 수분함량을 측정해 보았으며 그 결과는 평균 약 11%(w/w)의 수분함량을 나타내어 저온열탈착 대상으로 적절한 수준의 수분함량임을 확인하였다. 또한 저온열탈착 처리 후의 토양 수분함량이 평균 7.49%로 저감되어 있음을 확인하였다. 또한 저온열탈착 처리 전 토양의 유기물 함량은 평균 약 4.0%으로 우리나라 토양 평균 2.5% 수준을 상회하고 있었다. 처리 후 토양의 유기물함량은 평균 약 0.46%로 처리 전 오염 토양 보다 매우 낮은 값을 나타내었다. 유기물함량의 감소는 자연스럽게 pH 의존전하의 공급을 감소시키므로 토양의 양이온교환용량(CEC)의 감소를 예측해 볼 수 있는데(Choi et al., 2009), 측정 결과에서 보면 처리 전 토양의 CEC 평균값이 약 12.3 cmol/kg이었고 처리 후 토양의 CEC 평균값이 약 10.04 cmol/kg로 나타나 저온열탈착 처리에 의한 토양 유기물함량의 감소가 CEC의 감



**Table 3.** Analytical values of indicative parameters for low temperature thermal desorption

Sample number	Organic matter (%)	CEC (cmol/kg)	Moisture content (%)	Total microbial count (CFU/g)	Particle size analysis		
					Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
CS1 <sup>1)</sup>	4.23	12.08	10.37	3.3×10 <sup>6</sup>	84.92	4.64	10.44
CS2	4.26	12.72	10.78	3.4×10 <sup>6</sup>	80.60	9.28	10.12
CS3	4.23	11.99	11.34	3.4×10 <sup>6</sup>	85.00	4.08	10.92
CS4	4.22	12.33	11.71	3.4×10 <sup>6</sup>	85.56	4.00	10.44
CS5	4.20	12.53	10.73	3.4×10 <sup>6</sup>	82.88	6.68	10.44
average	4.23	12.3	11.0	3.4×10 <sup>6</sup>	83.79	5.74	10.47
standard deviation	0.02	0.31	0.53	—	2.05	2.26	0.29
TS1 <sup>2)</sup>	0.47	10.17	6.97	3.2×10 <sup>5</sup>	71.88	12.96	15.16
TS2	0.45	10.02	8.92	3.3×10 <sup>5</sup>	73.04	12.40	14.56
TS3	0.44	10.02	7.1	3.2×10 <sup>5</sup>	73.80	12.00	14.20
TS4	0.47	9.78	7.08	3.2×10 <sup>5</sup>	74.80	11.72	13.48
TS5	0.48	10.22	7.39	3.2×10 <sup>5</sup>	73.76	12.56	13.68
average	0.46	10.04	7.49	3.2×10 <sup>5</sup>	73.46	12.33	14.22
standard deviation	0.02	0.17	0.81	—	1.08	0.48	0.68

<sup>1)</sup>CS : contaminated soil <sup>2)</sup>TS : treated soil

소를 동반함을 확인할 수 있었다. 토성 분석결과에 의하면 점토의 함량이 전체적으로 증가하였는데 이는 저온열탈착 공정에서 발생하는 미세 분진을 정화토양에 혼합시키는 행위에서 기인한 것으로 본래의 공정에 부합되지 않은 부정적 요인에 의한 것이다. 처리 후 토양의 점토 함량이 증가하면 CEC도 증가해야 하는데 낮아진 것은 이유는 유기물이 가지고 있는 CEC는 100~300 cmol/kg 수준이고 우리나라 주요 점토 광물인 카올리나이트의 CEC는 3~15 cmol/kg 수준이므로 많게는 유기물의 CEC가 100배 이상 높으므로 유기물함량의 감소가 점토의 증가보다 CEC에 더욱 큰 영향을 미쳤기 때문이라고 해석된다(Choi, 2009). 또한 중속영양미생물수의 경우 저온열탈착 처리 전  $3.4 \times 10^6$  CFU/g에서 처리 후  $3.2 \times 10^5$  CFU/g으로 약 10배 정도 감소하여 나타났다. 이는 저온열탈착 처리 온도(90~350°C)에서 미생물 성장 저해가 나타나고 있음을 나타낸다(NIER, 2012). 중속영양미생물이 저온열탈착 처리 효율을 평가하는데 직접적인 인자는 될 수 없으나, “Line of evidence”의 개념이 정화기술이 적절한 성능을 구현하고 있는지 확인하기 위한 중요 지표를 수집한다는 것이므로 저온열탈착 처리 후 중속영양미생물의 감소가 발생하지 않았다면 이는 열처리 공정의 효율에 의문을 제기할 수 있는 근거가 될 수 있다. 따라서 토양정화검증 차원에서 농도저감 평가 외에 저온열탈착 처리 공법이 적절하게 적용되었는지 여부를 확인하기 위하여 토양의 수분함량, 유기물함량, CEC, 중속영양미생물수 등이 필수적인 보조지표가 될 수 있다고 판단된다.

### 3.2. 시료채취의 근원적 오차를 고려한 혼합시료 채취 방법 결정

적치토양에서 정규격자법, 지그재그법, 사방위법, 임의격자법등 총 4가지 방법으로 시료를 채취하여 분석한 결과는 Table 4에 나타내었고 앞서 언급한 식 (1)과 식 (2)를 사용하여 시료채취에 의한 근원적 오차율을 구하였다. 오염농도는 시료채취 방법별로 측정된 농도의 평균값을 사용하였으며, 오염의 정도는 최대인 것으로 가정하여  $\alpha$  (입자에서 오염물질이 차지하는 비율)는 1의 값을 사용하였다.  $\beta$ (분리계수),  $f$ (입자형태계수),  $g$ (입경분포 보정계수)는 문헌상의 값(USEPA, 1992)을 적용하였다.  $\beta$ 의 경우는 0과 1사이의 값이며 매우 불균질한 물질(very heterogeneous material), 불균질한 물질(heterogeneous material), 평균 수준 물질(average material), 균질한 물질(homogeneous material), 매우 균질한 물질(very homogeneous material)에 따라서 각각 0.8, 0.4, 0.2, 0.1, 0.05 값을 부여하는데 본 연구에서는 적용 대상 토양이 매우 불균질한 점을 고려하여 0.8을 계산에 사용하였다.  $f$ 의 경우는 입자의 형태를 모든 입자가 정방형, 대부분의 입자가 정방형, 운모/흑운모 등 판상형, 타르와 같은 부드러운 고상형, 무기물질 등 침상형으로 구분하며 각각 1, 0.5, 0.1, 0.2, >1 값을 부여하는데 본 연구에서는 대부분의 입자가 정방형이라고 가정하고 0.5를 계산에 사용하였다.  $g$ 는 입경분포 보정계수로서 완전하게 입경을 측정할 경우, 입경을 측정하지 않은 경우, 입경을 측정할 경우(예, 두 개의 체 사이에 남아 있는 입자), 해사일정한 자갈 등 자연적으로 입경이 측정되

**Table 4.** Concentration of TPH in composite soil samples taken from the stock piles

Sample number	Soil sampling method							
	Regular grid		Zigzag		Random grid		Four bearing	
	A plot (mg/kg)	B plot (mg/kg)	A plot (mg/kg)	B plot (mg/kg)	A plot (mg/kg)	B plot (mg/kg)	A plot (mg/kg)	B plot (mg/kg)
1	1,765	2,105	1,554	2,081	1,832	2,341	1,665	1,938
2	1,838	2,176	1,590	2,000	1,725	2,112	1,573	2,109
3	1,809	2,229	2,106	2,408	2,074	2,395	1,902	2,351
4	1,921	2,350	1,888	2,206	1,990	2,397	2,081	2,498
5	1,435	1,436	1,269	1,585	1,197	1,494	1,183	1,690
6	1,005	1,690	454	1,709	1,530	1,574	907	1,519
7	1,686	1,743	1,376	2,015	1,533	2,095	1,537	2,077
8	1,774	1,820	1,513	2,131	1,435	2,103	1,746	1,969
average	1,654	1,943	1,458	2,016	1,664	2,061	1,574	2,017
standard deviation	299	317	488	263	295	349	378	318

**Table 5.** Fundamental error ( $S_{FE}$ ) according to sampling methods

Sample volume	No.	Regular grid	Zigzag	Four bearing	Random grid
200 g	A plot	18.0%	19.0%	18.3%	17.0%
	B plot	16.5%	16.1%	16.1%	16.0%
	Average	17.3%	17.6%	17.2%	16.5%
500 g	A plot	18.0%	19.0%	18.3%	17.0%
	B plot	16.5%	16.1%	16.1%	16.0%
	Average	17.3%	17.6%	17.2%	16.5%

있다고 보는 경우로 구분하며 각각 1, 0.25, 0.55, 0.75의 값을 부여하는데 본 연구에서는 입경을 측정하지 않았으므로 0.25를 계산에 사용하였다.  $\rho_{particle}$ (입자 밀도)는 대부분의 무기질 토양이 평균  $2.65 \text{ g/cm}^3$ 로 알려져 있으므로(Yoo, 2000) 동일한 값을 적용하였다.  $\rho_c$ (오염물질의 밀도)는 TPH 밀도  $0.66 \text{ g/cm}^3$ 를 적용하였으며, 채취한 토양 무게는 시료가 담긴 광구병의 무게를 제외시키고 토양시료 무게를 측정된 결과 평균 약 200 g을 나타내어 대표값으로 이 값을 적용하였으며 평가대상 토양 질량은 무한값(infinity,  $\infty$ )을 적용하여 식 (5), 식 (6)와 같은 방식으로 시료채취 방법 간의 오차율을 구하였다(Table 5).

$$c = \frac{\left(1 - \frac{1,654 \times 10^{-6}}{1}\right)^2}{\frac{1,654 \times 10^{-6}}{1}} \times 0.66 + \left(1 - \frac{1,654 \times 10^{-6}}{1}\right) \times 2.65 = 400.3 \text{ g/m}^3 \quad (5)$$

$$S_{FE} = \sqrt{\left(\frac{1}{200} - \frac{1}{\infty}\right) \times (2)^3 \times 400.3 \times 0.8 \times 0.5 \times 0.25} = 18\% \quad (6)$$

정규격자법, 지그재그법, 사방위법, 임의격자법의 평균 오차율은 각각 17.3%, 17.6%, 17.2%, 16.5%로 나타났다. 시료채취 방법 간에 오차율의 차이는 크지 않았지만 임의격자법으로 채취한 경우 1회차(A plot), 2회차(B plot) 모두 오차율이 가장 낮게 나타났다. 또한 임의격자법의 경우 현장 적용도 비교적 용이하므로 적치토양에서 혼합시료를 채취하는데 임의격자법이 상대적으로 효율적이라고 판단되었다. 또한 채취된 시료의 양을 500 g으로 가정하고 동일한 방법으로 근원적 오차율을 계산하여 실제 채취된 시료량을 사용하여 산출된 값과 비교한 결과 방법별 오차율이 동일하였다. 식 (6)에 보면 시료채취량이 증가할수록 오차율은 작아질 것으로 예측되지만 200 g~500 g 수준의 시료량에서는 오차율의 차이가 거의 없는 것으로 계산되었다. 따라서 채취된 시료의 농도가 동일한 경우에는 200 g~500 g 수준의 시료량이 시료채취 오차율에 미치는 영향은 거의 없다고 볼 수 있으며 오염농도에 의한 광물학적계수(c), 오염물질의 밀도( $\rho_c$ )의 변화가 보다 중요한 요인이 될 것으로 판단된다.

3.3. 혼합시료의 최적 최소량 결정

적치토양(stockpiles)에서 시료를 취하는 경우 시료채취 과정에서 발생하는 오류를 최소화하여 가능한 대표시료를 채취하는 것이 가장 중요하게 고려할 사항이다. 그러기 위해서는 입자 사이의 변이가 시료의 평균 농도에 미치는 영향이 심각하지 않은 수준의 시료량을 채취해야한다. 식 (3)을 이용하여 혼합시료 최적 최소량을 결정하기 위하여 식에 사용되는 지표들은 ISO 10381-8에서 제시된 값을 사용하였다(ISO, 2006).  $D_{95}$ (입경 상위 5%를 제외한 최대입경)은 일반적인 토양에서 1.6 cm 이하로 가정하며 이 값은 최적 최소량을 매우 안전하게 추정할 수 있도록 해준다. 1.6 cm를 최대 입경으로 가정하면 시료 채취에서 큰 입단(macro aggregate) 자체가 개별 입자로 간주되지 않는다.  $g$ (입경분포 보정계수)는 3.2에서 언급한 바와 같이 입경을 측정하지 않은 경우이므로 0.25를 계산식에 사용하였다.  $w_{particle}$ (특정 특성을 갖는 입자의 분획)은 채취되는 토양과 토양 중에서 정량되는 물질에 의하여 결정된다. 그러나 토양의 결지성(consistency) 등으로 인하여 이 값이 농도와 상응하는 것은 아니다. 일반적으로 매우 균질한 토양에서는 0.1을 사용하지만  $w_{particle}$ 의 보다 안전한 추정을 위해서는 0.02를 적용함을 권장하고 있으므로 본 연구에서는 0.02를 계산식에 사용하였다.  $CV_{funderror}$ 는 추정값을 사용하지 않고 채취된 시료의 분석 결과와 표준 편차를 식 (4)에 따라 구하여 사용하였다. 식 (3)에 따라 최종적으로 산출된 혼합 시료 최적 최소량은 토양경작은 108 g, 토양세척은 3.8 kg으로 나타났다. 토양경작과 토양세척의  $CV_{funderror}$  값은 각각 0.18, 0.03으로 산정되어 중금속 처리가 진행되었던 토양세척에서 채취된 시료의 변동계수가 작게 나타나서 혼합 시료 최적 최소량이 상대적으로 매우 높게 나타났다. 혼합 시료 최적 최소량은 오염물질의 균질성에서 기인하는 농도 변이의 영향에 따라 변화되는 값으로 다른 변이들 보다 그 영향이 크다. 따라서 모든 정화공법, 오염물질, 다양한 특성의 토양 등에 동일하게 적용할 수 있는 혼합 시료 최적 최소량 결정하는 것은 한계가 있어 보인다. ISO 10381-8에 의하면 일반적으로  $CV_{funderror}$ (변동계수)의 크기는 일부 알려지거나 또는 전혀 알려지지 않은 모든 원인에서 기인되므로 대부분의 경우에 보통 0.1을 적용한다. 따라서 토양정화검증에 범용적인 값을 제안해 본다는 취지로  $CV_{funderror}$  0.1을 식 (3)에 적용하여 계산한 결과 355 g 이상의 토양을 혼합 시료로 채취하는 것이 일반적이라는 결과가 도출되었다.

$$m_{min.sample} = \frac{1}{6} \pi (1.6)^3 2.65 \times 0.25 \frac{(1-0.95)}{(0.1)^2 0.02} = 355g \quad (7)$$

4. 결 론

국내에서 주로 적용되는 정화공법(토양경작법, 토양세척법, 저온열탈착법)에 대하여 이들의 효율적 적용 여부를 처리 전후 토양 특성 분석을 통하여 판단해 볼 수 있도록 공법별 보조지표를 제안하고 이를 향후 오염도 분석과 더불어 정화성능을 확인할 수 있는 방법으로 사용하기 위하여 본 연구를 수행하였다. 토양경작의 효율성을 확인하기 위한 보조지표로는 토양 pH, 중속영양미생물수, 토성을 제안하였고 토양세척의 효율성을 확인하기 위한 보조지표로는 토양세척 후 폐기물처리 대상으로 분리된 공정슬러지의 수분함량, 입경분포의 설계 조건 충족여부, 토양세척액 중의 세척 대상 오염물질 성분 포함여부 등이 효과적인 것으로 판단되었다. 특히 공정슬러지의 입경분포 확인을 위해서는 세부 입경별 부피비를 측정할 수 있는 방법이 필수적으로 요구되며, 최근에는 빛의 산란(diffraction)을 이용한 입도분석기가 입경 0.01~3500  $\mu m$ 까지 측정이 가능하여 공정슬러지로 구분된 미세 토양 입자의 입경분포를 구분 가능하게 되었다. 또한 저온열탈착 처리 공법에 대한 효율을 평가하기 위한 보조지표로서는 수분함량, 유기물함량, CEC, 중속영양미생물수 등이 효과적인 지표가 될 수 있을 것이라고 제안하였다. 정화 검증의 보조수단으로 사용될 수 있는 상기 지표들을 적용하는 경우에는 토양정화 기술의 적용성이 다분히 부지 특이적이고 사용되는 설비의 규격과 용량에도 관련이 있으므로 일괄적인 기준 값을 적용하기 보다는 정화수행자가 제시한 설계 규격을 기준으로 하여 이의 준수여부를 확인하는 목적으로 사용되는 것이 적절할 것이다. 그러나 본 연구에서 보조지표로 제안한 항목들은 서론에 언급한 바와 같이 정화기술이 실제로 적용되지 않았거나 적용된 공정 효율에 심각한 문제가 있다고 검증기관이 판단할 수 있는 단서를 제공하기 위하여 제안된 것들이다. 즉, 정화검증 단계에서 제안된 보조지표와 관련 사항이 충족되지 않는다면 이는 정화공법이 적용되지 않았거나 매우 심각하게 부실 시공되었다고 판단될 수 있다는 것이다. 따라서 현재와 같이 상주 정화검증이 아닌 경우에 토양 오염농도 저감의 당위성을 보완하는데 유용한 지표가 될 수 있을 것이다. 그러나 본 연구에서 제안된 보조지표와 관련 사항들은 적용된 정화공법의 성능을 보다 세부적으로 평가하기 위한 용도로는 부적절하다. 따라서 정화공법 관련된 각종 토양 지표들에 대한 지속적인 연구를 통하여 적용되고 있는 정화공법 성능을 구체적으로 증명해 줄 수 있는 토양 특성 지표 설정이 요구된다. 특히 국내의 경우 토양경

작법 65.41%, 토양세척법 6.53%, 열탈착법 1.15%로 특정 기술이 지배적으로 사용되고 있으므로(NIER, 2015) 다양한 오염토양에서 이들의 정화 효율에 대한 평가가 필요한 상황이고, 오염 저감 평가 외에 이를 보완할 수 있는 과학적이고 구체적인 지표 설정이 시급하다 할 수 있다. 향후 정화검증에서 이런 보조 지표의 활용은 정화공사 현장에서의 자발적 모니터링 활성화에도 기여함으로써 토양정화기술 및 관련 제도 발전에도 영향을 미칠 것으로 판단된다. 또한 그 밖에 현행 토양정화검증지침에 명시되어 있지 않은 최적의 혼합시료 채취 방법, 혼합시료의 최소 요구량 등을 제안함으로써 토양정화검증 시료채취의 신뢰성 향상 및 업무의 일관성을 달성하고자 하였다. 이를 위하여 여타 연구(Gustavsson et al., 2006; Kim, 2013)에서 사용된 오차를 계산 방식을 적용하여 적치토양에서 정규격자법, 지그재그법, 시방위법, 임의격자법 등 총 4가지 방법에 대한 시료채취 오차를 계산한 결과 임의격자법의 오차가 상대적으로 다른 채취방법 보다 낮게 나타났고 현장 적용성에도 비교적 용이한 것으로 판단되었다. 실측된 분석 값을 가지고 결정된  $CV_{fund\ error}$  값을 이용하여 혼합 시료 최적 최소량을 구한 결과 토양경작 108 g, 토양세척 3.8 kg으로 매우 다르게 나타났다. 이는  $CV_{fund\ error}$  값이 다른 변이들 보다 혼합 시료 최소량 결정에 미치는 영향이 크다는 것을 의미하며, 따라서 다양한 경우에 동일하게 적용할 수 있는 혼합 시료 최적 최소량을 실제 분석결과를 가지고 결정하는 것에는 한계가 있음을 시사한다. 따라서 토양정화검증에 범용적인 값을 제안해 본다는 취지로 ISO 10381-8에서 제안한 추정값( $CV_{fund\ error}$  0.1)을 적용하여 계산한 결과 355 g 이상의 토양을 혼합 시료로 채취하는 것이 일반적이라는 결과가 도출되었다.

## 사 사

이 연구는 “토양 정밀조사 및 토양정화검증방법에 관한 세부지침 마련 연구(II)” 연구의 일부분으로서 국립환경과학원의 지원에 감사드립니다.

## References

- Bradbury, D., 1992, Mixed waste soil washing using environmental benign chemical solvents, *Proceedings of Waste Management*, **12**, 1255.
- Brady, N.C. and Weil, R.R., 2002, The Nature and Properties of Soil, Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ, 129 p.
- Choi, S.I., Lee, G.T., and Yang, J.G., 2009, Management of Soil Contamination and Introduction of Soil Remediation, Dongwha Tec., Seoul, 150 p.
- Devgun, J., 1993, Soil washing as a potential remediation technology for Contaminated DOE sites, *Waste Management*, **20**.
- Gee, G.W. and D. O.R., 2002, Particle-Size Analysis : Methods of Soil Analysis(part 4), Soil Sci. Soc. Am, 255-293.
- Gustavsson, B., Luthbom, K., and Lagerkvist, A., 2006, Comparison of analytical error and sampling error for contaminated soil, *Journal of Hazardous Materials*, **138**, 252-260.
- ISO (International Standardization Organization), 2006, Soil-Sampling-Part 8: Guidance on sampling of stockpiles, ISO 10381-8.
- ISO (International Standardization Organization), 2009, Particle size analysis-Laser diffraction methods, ISO 13320.
- Kim, G.H., 2013, Quantification of uncertainty associated with soil sampling and its reduction approaches, *J. Soil Groundw. Environ*, **18**, 94-101.
- Kim, S.T., Koh, W.C., Lee, S.W., and Kim, H.R., 2015, Development of performance evaluation model for optimal soil remediation technology selection, *J. Soil Groundw. Environ*, **20**(7), 13-22.
- KMOE (Korea Ministry of Environment), 2007, Guideline for Soil Remediation, Korea Ministry of Environment, Sejong.
- KMOE (Korea Ministry of Environment), 2015, Soil Standard Analytical Methods, Korea Ministry of Environment, Sejong.
- NIAS (National Institute of Agricultural Science), 2000, Soil and Plant Analytical Methods, 11-1390093-000055-01, Wanju.
- NIER (National Institute of Environmental Research), 2012, Technical Guideline for the Application of Soil Remediation Technologies, Incheon.
- NIER (National Institute of Environmental Research), 2015, Studies on Development of Site Investigation Guidance and Validations of Soil Remediation(II), Incheon.
- Sumner, M.E. and Miller, W.P., 1996 Cation Exchange Capacity and Exchange Coefficients : Methods of Soil Analysis(part 3), Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, Madison, Wis., 1201-1229.
- UKEA (United Kingdom Environmental Agency), 2010, Verification of Remediation of Land Contamination, United Kingdom Environmental Agency, ISBN: 978-1-84-84911-175-1.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency), 1988, Technical Approaches to the Cleanup of Radiologically Contaminated Superfund Sites, United States Environmental Protection Agency, EPA/540/2-88/002.

USEPA (United States Environmental Protection Agency), 1991, Guide for Conducting Treatability Studies under CERCLA: Soil Washing, United States Environmental Protection Agency, EPA/540/2-91/020B.

USEPA (United States Environmental Protection Agency),

1992, Preparation of Soil Sampling Protocols: Sampling Techniques and Strategies, United States Environmental Protection Agency, EPA/600/R-92/128.

Yoo, S.H., 2000, Soil Dictionary, Seoul National University Press, Seoul, 290 p.