

《原著》

## 토양오염도 평가시 시료채취 불확실성 정량화 및 저감방안

김 건 하\*

한남대학교 공과대학 건설시스템공학과

### Quantification of Uncertainty Associated with Soil Sampling and Its Reduction Approaches

Geonha Kim\*

Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University

#### ABSTRACT

It is well known that uncertainty associated with soil sampling is bigger than that with analysis. In this research, uncertainties for soil sampling when assessing TPH and BTEX concentration in soils were quantified based on actual field data. It is almost impossible to assess exact contamination of the site regardless how carefully devised for sampling. Uncertainties associated with sample reduction for further chemical analysis were quantified approximately 10 times larger than those associated with core sampling on site. Bigger uncertainties occur when contamination level is low, sample quantity is small, and soil particle is coarse. To minimize the uncertainties on field, homogenization of soil sample is necessary and its procedures are proposed in this research as well.

**Key words :** Sampling error, Sample preparation, Sampling protocol, Soil contamination, Uncertainty

#### 1. 서 론

토양오염도를 평가하는 과정은 1. 계획수립, 2. 시료채취 및 실험실 이동, 3. 분석, 4. 자료해석으로 나눌 수 있다. 오염부지 평가에 있어 시료채취는 매우 중요한 단계이나, 토양은 이질성이 매우 크므로 오염부지를 정확하게 평가하는 것은 매우 어렵다. 혼합이 잘되는 지표수도 시료채취 위치와 깊이에 따라 오염도가 과대 혹은 과소 산정되기 쉬우므로 정기적인 모니터링을 통하여 오염도를 평가하도록 되어 있으나, 토양오염도를 장기간 모니터링 하는 경우는 드물며 단기간 또는 한번의 모니터링을 통하여 오염도를 평가하므로 오류가 발생될 개연성이 더욱 높다.

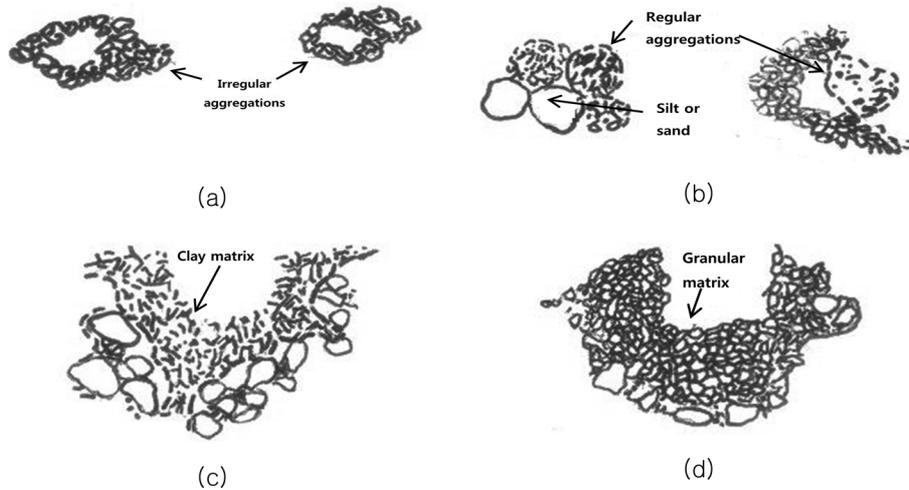
Fig. 1은 미시적인 토양 형태의 몇가지 예를 보이고 있다(Collins and McGown, 1974). 토양은 거시적으로도 불균질하지만 미시적으로도 불균질하다. 그림 (a)와 (b)는 토양입자 사이에 불균질 또는 균질한 세립자 덩어리가 존재하는 것을 보이고 있으며, (c)와 (d)의 경우 토양 입자

사이에 존재하는 실트질 토양 또는 입도분포가 다른 토양 덩어리를 보이고 있는데, 이는 시료채취와 오염도 분석과정에서 많은 오차를 발생시킨다.

오염된 토양을 원위치 정화(*in situ remediation*)하기 위한 대부분 공법은 유체의 통과를 원활히 하여 오염도를 저감시키는 것을 기본현상으로 삼는데 대표적인 공법은 토양세척, 증기추출 공법을 예로 들 수 있다. 공극 내 유체이동은 Fig. 1에 보인 토양 입자에서 모래 등 유체가 이동 가능한 부분을 통과하므로 그 부분은 오염도가 낮아 지지만 세립자가 뭉쳐있는 부분은 오염도가 낮아지기 어렵다. 따라서 부지평가에 있어 이러한 국지오염을 대표농도로 채취한다면, 그 지역 오염도를 과대 산정하는 오류를 발생시킬 것이다. 현재 우리나라는 토양 정화에 있어 위해도 평가가 아닌 농도기준을 적용하고 있으므로 만약 현장에서 토양 시료를 채취하여 가장 오염이 심한 일부분의 시료를 기준으로 오염도를 평가한다면, 이는 원위치 정화공법으로는 가능하지 않은 기준을 설정하는 것이다.

\*Corresponding author : kimgh@hnu.kr

원고접수일 : 2012. 12. 27 심사일 : 2013. 2. 5 게재승인일 : 2013. 2. 6  
질의 및 토의 : 2013. 4. 30 까지



**Fig. 1.** Schematic representations of particle assemblages (modified from Collins and McGown, 1974). (a) Irregular aggregations by connector assemblages, (b) regular aggregation interacting with particle matrix, (c) interweaving bunches of clay with silt inclusion, (d) granular particle matrix.

국내기준은 유류오염 부지의 경우 TPH(Total Petroleum Hydrocarbon)와 BTEX(Benzene, Ethylbenzene, Toluene, Xylene) 농도를 평가하여 오염도를 평가하도록 되어 있다. BTEX는 휘발성이 있으므로 원위치 정화공법으로 저감이 비교적 용이하지만 TPH는 국지적인 토양시료에 잔류할 수 있으므로 시료채취에 있어 불확실성이 발생할 개연성이 높다.

오염도를 평가하는 절차에 있어 분석에 의한 오류 또는 불확실성보다 시료채취에 의한 불확실성이 더 높은 것은 많은 전차연구에 의하여 제시된 바 있다(Gustavsson et al., 2006; Gy, 2004a, 2004b, 2004c). 또한 시료채취는 부지평가에 있어 가장 큰 불확실성을 유발하는 단계이나 이에 대한 절차서가 명확하지 않아 오염도를 과대평가하거나 과소평가하는 오류가 많다. 따라서 본 연구는 현장 시료 채취에 필요한 절차와 그 불확실성을 저감하는 방법에 대하여 기술하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 시료의 준비 및 분석

오염토양은 D시 소재 주유소 유류저장탱크 주변 토양을 타격기와 시료채취봉을 이용하여 채취하였다. 평면 약 30 m<sup>2</sup> 넓이 부지 오염도를 산정하기 위하여 총 11개 시료를 채취하였으며, 이때 시료채취 깊이는 100 cm, 200 cm, 300 cm이었다.

시료채취시 사용한 시료채취봉 내경은 2.5 cm, 길이는 150 cm이다. 각 깊이에서 채취한 시료는 약 1000 g 내외

이다. 시료채취 현장에서 칭량할 수 없으므로 사진을 찍어서 후에 시료전체의 양을 추산하였다. 본 연구에서는 TPH와 BTEX를 분석하였으며, TPH용 시료는 250 ml 용량 광구병에 50 g 내외 시료를 담았고, BTEX 분석용 시료는 20 ml 용량 바이얼에 약 5 g을 담아서 실험실로 운반한 후 칭량 및 분석하였다.

BTEX는 토양오염 공정시험기준(환경부 고시 제2009-180호) ES07601.2 퍼지-트랩 기체크로마토그래피 법을 이용하여 Shimazu GC-2010을 이용하여 분석하였으며, TPH는 ES07552.1의 기체크로마토그래피 + FID법을 이용하여 Shimazu GC-2010을 이용하여 분석하였다.

BTEX 분석결과 benzene 농도는 nd~8.9 mg/kg, toluene의 농도는 nd~7.2 mg/kg, ethylbenzene의 농도는 3.64~22.7 mg/kg, xylene의 농도는 9.2~256.7 mg/kg이었다. TPH 분석결과는 373~11341 mg/kg 농도범위를 보였다. 분석결과는 Table 1에 요약하였으며, 시료의 분석결과가 0.5 mg/kg이하인 경우 nd(not detected)로 처리하여 나타내었다.

### 2.2. 분석과 관련된 불확실성 정량화

분석과 관련된 불확실성 정량화를 위하여 표준용액(standard solution, Accustandard®)을 희석하여 BTEX 항목의 경우 각 5, 20, 50, 100, 200 mg/kg 농도를, TPH의 경우 각 170, 340, 680, 1700, 3400 mg/kg 농도를 조제하여 분석하였으며 이때 발생하는 오차를 표준분산과 변동계수(coefficient of variation, 평균/표준분산)를 통하여 나타내었다.

**2.3. 시료채취와 관련된 불확실성 정량화**

시료채취와 관련된 이론은 1950년대 초기부터 개발되었다. 본 연구는 부지오염도 평가에 미치는 시료채취 불확실성에 대하여 다루고 있으나, 금광과 같은 자원채취에 있어서도 시료채취의 불확실성은 매우 중요한 문제이다 (Gy, 2004a, 2004b, 2004c). 시료채취와 관련된 오차는 다음과 같이 나눌 수 있다(EPA, 1992; Gustavsson et al., 2006)

**2.3.1. 부지이질성 오차**

부지이질성으로 유발되는 오차(constitution heterogeneity error)는 시료를 채취하는 대상부지 조성이 균질하지 않음으로 발생하는 오차이므로 근원적 오차(fundamental error)로도 불린다. 이 오차는 채취하는 시료의 양을 늘리거나 채취한 시료를 완전히 혼합하여 줄일 수는 있어도 완전히 없앨 수 없다. 다음 식 (1)은 근원적 오차로 인한 시료채취 오차를 계산하는 식을 보이고 있다(Gustavsson et al. 2006):

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

$M_E$ =extracted sample mass (g),  $M_L$ =mass of soil to be assessed (g) (assumed infinity),  $d_{95}$ =the mesh size where 5% of the material is retained (cm),  $c$ =the mineralogical factor ( $g/cm^3$ ),  $\beta$ =the liberation factor,  $f$ =particle shape factor,  $g$ =particle size range factor. Mineralogical factor,  $c$ 는 다음 식 (2)와 같이 정의될 수 있다:

$$c = \frac{\left(1 - \left(\frac{\alpha_L}{\alpha}\right)^2\right)}{\frac{\alpha_L}{\alpha}} \rho_c + \left(1 - \frac{\alpha_L}{\alpha}\right) \rho_m \tag{2}$$

$\alpha_L$ =the mass proportion of the contaminant in the site to be sampled,  $\alpha$ =the contaminant proportion in the critical particles,  $\rho_c$ =the contaminant density ( $g/cm^3$ ),  $\rho_m$ =the soil density ( $g/cm^3$ ).

즉,  $\alpha_L$ 의 값은 측정하려는 오염도와 같으며,  $\alpha$ 의 값은 각 입자에서 오염도가 차지하는 비율을 나타낸다. 본 연구에서는 입자의 오염도가 최대인 것으로 가정하여  $\alpha$ 의 값으로 1을 사용하였다.  $\beta$ ,  $f$ ,  $g$ 의 값은 문헌상의 값 (EPA, 1992)을 사용하였으며 각각 1, 0.5, 0.25를 사용하였다.  $\rho_c$ 의 값은 benzene, toluene, xylene, ethyl-

benzene은  $0.87 g/cm^3$ 을 사용하였으며, TPH는  $0.66 g/cm^3$ 을 사용하였다.  $\rho_m$ 의 값은  $1.4 g/cm^3$ 를 사용하였다.

**2.3.2. 시료내 이질성에 의한 오차**

시료내 이질성에 의한 오차는 집단화 및 분리에 따른 오차(grouping and segregation error)로도 불리며 대상부지에서 채취한 시료내에서도 이질성이 존재하기 때문에 발생하는 오차이다. 만약 시료가 완전히 균질하다면 시료내 이질성에 의한 오차는 0이 되지만, 오차 최대값은 부지이질성에 의한 오차와 같은 값이 된다. 집단화 및 분리에 따른 오차로 인한 표준오차  $S_{GSE}$ 는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다:

$$S_{GSE} = \sqrt{S_{FE}^2 \cdot Y \cdot Z} \tag{3}$$

$Y$ =grouping parameter,  $Z$ =the segregation parameter. 식 (3)에서 보인 바와 같이 이 오차는 근원적 오차와 밀접한 관계가 있다. Pitard(1993)는  $YZ$  값이 대부분 1과 같다고 주장하였는데 이는 시료내 이질성에 의한 오차가 부지이질성 오차와 같은 정도로 발생한다는 의미이다.

**2.3.3. 공간적 이질성에 의한 오차**

부지내 근거리 이질성(short-range heterogeneity)과 원거리 이질성(long-range heterogeneity)에 의하여 오차가 발생한다. 근거리 이질성은 무작위적인 경향을 보이지만 원거리 이질성은 특정한 발생경향을 보인다.

**2.3.4. 시간적 이질성에 의한 오차**

이 오차는 대상부지의 주기적인 변동(periodic heterogeneity error)에 의하여 발생한다. 시간적인 오차는 계절 변화에 의한 온도변화도 한 요인이 될 수 있으며 강우사상 등으로 발생할 수 있다.

**2.3.5. 시료채취계획에 의한 오차**

시료채취계획에 의한 오차는 오염도 한정오차(incremental delimitation error)로도 불린다. 시료채취에 있어 대상부지의 모든 토양이 같은 확률로 시료에 포함되는 것이 필요하다. 만약 코어시료가 3m를 대표한다고 하면 가장 이상적인 시료채취 방법은 3m에 걸친 코어시료를 채취하는 것이다. 따라서 적절한 형태의 시료채취 계획이 필요하다.

**2.3.6. 시료추출에 의한 오차**

시료추출에 의한 오차(incremental extraction error)는

현장에서 채취한 시료에 오염물질이 포함되어 있고 이 오염물질이 적절하게 분석시료에 포함되지 않을 경우 나타난다. 이러한 오차를 저감시키기 위하여 오염도 평가에 적합한 시료채취도구를 사용하여야 하고 적절한 방법으로 사용하여야 한다.

2.3.7. 시료준비오차

시료준비오차(preparation error)는 관련된 사람과 관련하여 발생한다. 시료채취 계획이나, 거짓자료, 잘못된 시료채취계획, 시료의 망실 등으로 인하여 발생한다.

2.4. 총 시료채취 오차(Total sampling error)

모든 시료채취 오차는 총시료채취오차(Total Sampling Error, TSE)로 나타낼 수 있고, 이에 분석오차를 더하면 Overall Error(OE)가 된다.

$$S_{TSE} = \sqrt{\sum S_{sampling\ error, sampling\ step}^2} \tag{4}$$

총 오차는 시료채취와 관련된 오차와 분석과 관련된 오차의 근해이다

$$S_{OE} = \sqrt{S_{TSE}^2 + S_{AE}^2} \tag{5}$$

3. 결과 및 토론

3.1. 분석오차 정량화

Table 2는 BTEX와 TPH에 관하여 2.2에 설명된 바와 같이 평균, 분산, 변동계수를 이용하여 분석관련 오차를 제시하였다. COV(Coefficient of Variation, 변동계수)는

TPH, BTEX 모든 항목에 걸쳐 1.043-1.061로서 분석과 관련된 오차는 매우 작은 것을 알 수 있다. 즉 현장 오염도를 평가함에 있어 시료를 분석하는 과정에서 발생하는 오차는 비교적 작다.

3.2. 시료채취 오차 정량화

3.2.1. 근원적 오차

Table 1에 보인 1번 시료의 TPH 분석치를 이용하여, 시료채취시 발생하는 근원적 오차를 계산하였다. 1번 시료는 현장에서 약 650 g의 토양을 채취하였고 이 중 48 g의 시료를 실험실로 가져와 TPH를 분석한 결과 5564.8 mg/kg로 산정되었다. 즉,

$$M_{E1} = 650\text{ g}, M_{L1} = \text{infinite g}, d_{95} = 0.2\text{ cm}, \beta = 1, f = 0.5, g = 0.25, \alpha_L = 5565 \times 10^{-6}, \alpha = 1, \rho_c = 11.4\text{ and } \rho_m = 2.65\text{ g/cm}^3$$

$$c = \frac{\left(1 - \frac{5565 \times 10^{-6}}{1}\right)^2}{5565 \times 10^{-6}} \cdot 0.65 + \left(1 - \frac{5565 \times 10^{-6}}{1}\right) \cdot 1.4 = 6600\text{ g/cm}^3 \tag{6}$$

$$S_{FE} = \sqrt{\left(\frac{1}{650} - \frac{1}{M_L}\right) \cdot 0.2 \cdot d_{95}^3 \cdot c \cdot \beta \cdot f \cdot g} \\ = \sqrt{\left(\frac{1}{650} - \frac{1}{\infty}\right) \times 0.2^3 \times 6600 \times 1 \times 0.5 \times 0.25} = 41\% \tag{7}$$

현장에서 코어를 이용하여 채취하는 경우 불확실성은 41%로 산정된다. 이 시료를 분석을 위하여 48 g으로 채취한다면  $M_{E1} = 48\text{ g}, M_{L1} = 650\text{ g}$ 이 되며 이는 다음과 같이

Table 1. Sample size at the site (M1), reduced amount for analysis (M2), and analyzed results for BTEX, TPH concentrations

Sample	Volatile Organics						TPH	
	M1 (g)	M2 (g)	Benzene (mg/kg)	Toluene (mg/kg)	Ethylbenzene (mg/kg)	<i>o.m.p.</i> -xylene (mg/kg)	M2 (g)	Concentration (mg/kg)
1	650	5.5	nd <sup>*1</sup>	nd	3.6	9.2	48	5565
2	540	4.6	nd	1.1	17.7	28.0	45	4926
3	480	5.0	nd	1.1	3.6	21.3	51	373
4	400	6.5	1.1	5.4	35.7	150.9	65	4483
5	650	6.2	1.4	7.2	48.4	182.4	65	3769
6	540	5.6	1.7	6.9	75.7	178.5	55	4709
7	480	7.2	nd	3.5	25.3	80.3	51	5379
8	450	6.4	8.9	5.6	422.7	256.7	71	11340
9	650	5.7	6.8	4.2	264.9	162.1	52	5408
10	550	6.9	nd	1.6	17.9	26.4	63	1241
11	670	6.6	nd	3.8	20.1	95.9	47	5565

\*1 not detected (unit: mg/kg)

**Table 2.** Mean concentrations (ppm), standard deviation(ppm) and coefficient of variation (%) of spiked samples for quantifying analytical error

Standard (mg/kg)	Benzene measured	Toluene measured	Ethylbenzene Measured	Xylene measured	Standard (mg/kg)	TPH measured
5.00	8.9	6.7	8.6	8.3	170.0	209
20.00	21.2	18.8	20.7	21.2	340.0	374
50.00	49.6	55.8	49.5	49.7	680.0	675
100.00	91.4	92.9	93.0	92.3	1700.0	1580
200.00	203.6	202.4	203.0	203.2	3400.0	3449
Mean	75.0	75.3	75.0	75.0		1257
SD	78.5	78.6	78.6	78.6		1334
COV	1.047	1.043	1.048	1.048		1.061

**Table 3.** Fundamental error (SFE) associated with sample reduction to M1 on sampling site and further reduction to M2 for analysis

	Benzene		Tolunene		Ethylbenzene		Xylene		TPH	
	E. M1	E. M2	E. M1	E. M2	E. M1	E. M2	E. M1	E. M2	E. M1	E. M2
1	8	93	89	93	110	35	69	22	41	404
2	9	93	66	63	50	16	27	12	26	256
3	10	93	63	63	110	35	30	14	18	181
4	7	62	25	28	24	11	5	5	15	148
5	5	56	22	24	18	9	4	5	13	128
6	5	50	24	25	13	8	4	5	12	114
7	10	93	29	35	41	13	9	7	11	105
8	2	22	25	28	2	3	4	4	9	91
9	2	25	30	32	3	4	6	5	7	74
10	9	93	44	52	49	16	23	13	6	64
11	8	93	29	34	47	15	8	7	6	57

계산될 수 있다.

$$S_{FE} = \sqrt{\left(\frac{1}{48} - \frac{1}{650}\right) \cdot 0.2 \cdot d_{95}^3 \cdot c \cdot \beta \cdot f \cdot g}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{1}{48} - \frac{1}{650}\right) 0.2^3 \times 6600 \times 1 \times 0.5 \times 0.25} = 404\% \quad (8)$$

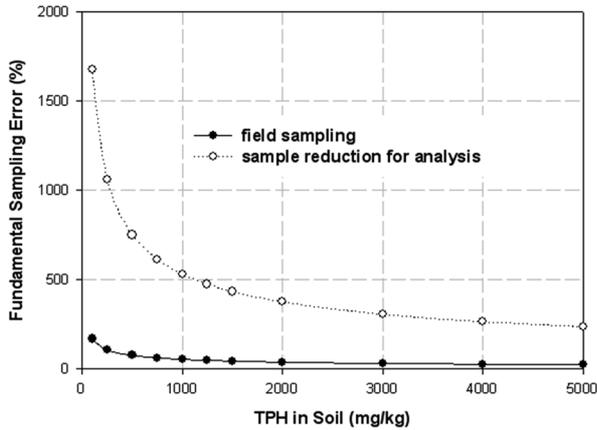
즉, 토양시료 채취시 대표시료를 취하는 과정에서 매우 큰 오차가 발생함을 보이고 있다. Table 3은 Table 1에 제시된 분석값을 위와 같은 계산과정을 걸쳐 요약한 것이다. TPH의 경우 M1 시료를 취하는 경우보다 M2 시료를 취하는 경우 약 10배 오차가 발생하지만 BTEX의 경우 현장에서 채취한 시료의 양이 적으므로 M1 시료와 관련된 근원적 오차가 비교적 작게 산정된다.

3.2.2. 집단화 및 분리에 따른 오차

식 (3)에서 YZ의 값이 1과 같다면, 집단화 및 분리에

따른 오차  $S_{GSE}$ 는 근원적인 오차와 같게 된다. 현장에서 공간적 이질성에 의한 불확실성, 시간적 이질성에 의한 불확실성 등 여러 오차들이 발생하지만, 추산하기는 어려우므로 이를 무시한다고 하면, 시료채취와 관련된 오차는 근원적 오차의 두배로 추정할 수 있다. 위의 예에서 보인 바와 같이, 식 (1)에서 보면 입자가 크거나 시료의 양이 작으면 오차가 많이 일어난다.

Fig. 2는 시료채취에 관련된 오차를 코어시료 채취와 분석용 시료를 제작하는 경우로 나누어 보이고 있다. TPH의 오염도는 0-5000 mg/kg까지 변화시키고, 현장에서 시료를 1000 g 채취하는 경우, 1000 g 시료에서 5 g으로 시료를 줄여서 분석에 사용하는 경우로 나누어 근원적 오차를 계산하였다. 이때 사용한 인자값은 식 (6)-식 (8)에 사용한 값과 같다. 이 그림을 보면 코어시료를 채취하는 과정에서 발생하는 불확실성보다 분석용 시료를 취하는 경우에 발생하는 불확실성이 매우 큰 것을 보이고 있다. 특히 오염도가 낮을수록 불확실성이 커지는데 이는 식 (6)



**Fig. 2.** Fundamental sampling error calculated for field sampling and sample reduction for analysis as a function of TPH in soil ( $M_{E1} = 650$  g,  $M_{L1} = \text{infinite}$  g,  $d_{95} = 0.2$  cm,  $\beta = 1$ ,  $f = 0.5$ ,  $g = 0.25$ ,  $\alpha_L = \text{TPH}$ ,  $\alpha = 1$ ,  $\rho_c = 11.4$  and  $\rho_m = 2.65$  g/cm<sup>3</sup>).

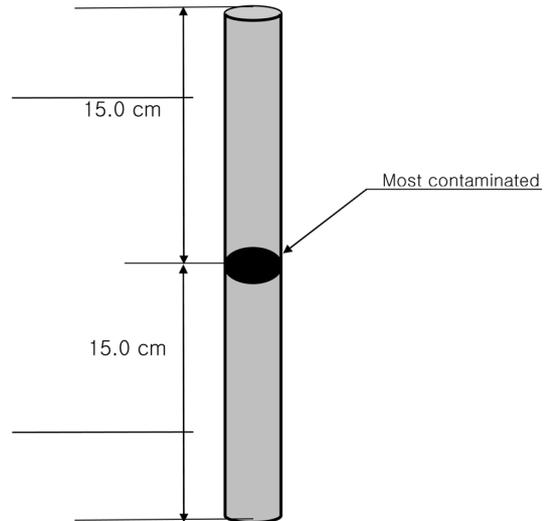
에 보인 바와 같이 mineralogical factor,  $c_{\text{값}}$ 이 작아지기 때문이다. 즉, 오염도가 낮을수록 불균질한 코어시료에서 채취한 분석용 시료의 불확실성이 높으므로 코어시료를 혼합할 필요성이 대두된다.

**3.3. 토양시료채취와 관련된 불확실성 저감방안**

3.2절에서 고찰한 바와 같이 현장에서 시료채취지점을 선정하는 과정보다 분석을 위한 시료로 양을 줄이는 과정에서 많은 오차가 발생한다. 부지 오염도 평가의 목적은 현장에 존재하는 오염물질 총량을 평가하는 것이며, 오염물질 총량은 오염부피와 오염농도를 산정하여 얻는다. 따라서 오염도 평가는 이질성이 높은 토양의 국부 농도 최대값보다, 평균값을 산정하는 것이 적절하다. 또한 정화검증 중의 경우도 오염물질의 총량이 어느 정도 저감이 되었는지를 평가하는 것이 타당하다.

이때 정화공사 계획을 위한 정밀조사는 가장 오염이 심한 지점(hot zone)을 선정하는 것이 필요하다는 반론이 제기될 수 있으나, hot zone을 찾지 못하는 경우도 많으므로, 현장에 적용될 수 있는 보편적인 방법을 제시할 필요가 있다.

현장시료 채취와 관련된 국내외 관련기술을 고찰하면 다음과 같다. 국내 절차서는 2009년 10월 개정된 토양오염공정시험기준(KMOE, 2009)의 “시료의 채취 및 조제(ES01730)” 관련 기준 중 “2.2.2 시료의 채취 및 보관”에 지하매설저장시설에 대한 시료채취 방법에 대하여 기술하고 있는데, 특히 2.2.2.2 항의 내용을 보면 다음과 같이 기술되어 있다: “시료채취 봉을 꺼내어 오염의 개연성



**Fig. 3.** Representative sampling extraction technique prescribed in Korean guideline.

이 가장 높다고 판단되는 부위 ± 15 cm를 시료부위로 한다. 다만, 오염의 개연성이 판단되지 않을 경우는 제일 하부의 토양 30 cm를 시료부위로 한다.” 즉, 타격기와 시료채취봉을 이용하여 채취한 토양시료 중 오염개연성이 높은 30 cm를 대표시료로 삼는 것을 규정하고 있다(Fig. 3 참조).

타격기를 이용한 시료채취봉에서 추출된 시료의 길이는 대부분의 경우 1.0 m 내외인데 시료채취봉에서 육안으로 가장 오염도가 높은 지점부위 30 cm를 대표시료로 간주한다는 언급은 있으나 분석용 시료를 취하는 추가적인 지침이 기술되어 있지 않아 오염도 평가기관 및 시료채취자에 따라 대표시료가 다를 가능성이 높다. 예를 들어 유기물질과 결합된 토양이 코어시료 표면에 육안으로 관찰되어 이 부분만을 채취하여 분석한다면 그 지역 토양 오염도를 과대 산정하는 결과를 가져오게 된다. 다른 시료채취자가 동일한 토양시료를 채취하는 것은 매우 어려우므로 같은 부지에 대한 오염도를 산정하는 경우에도 채취기간, 시료채취 관리인에 따라 오염도는 매우 다른 결과를 나타낸다.

따라서 부지오염도평가를 위한 토양시료 채취시 대표시료를 혼합하여 분석용 시료로 취하는 것은 관련된 불확실성을 감소시키기 위하여 필요한 절차이다. 이를 실행하는 방법은 토양오염공정시험기준에 기술되어 있지 않으나, 문헌 등을 살펴보면 다음과 같다. 폐기물공정시험기준(KMOE, 2007) 중 제2항 시료의 조제방법에서는 시료의 전처리로 다음과 같은 절차를 제시하고 있다:

### 1. 시료의 전처리

(가) 분석용 또는 수분측정용 시료(“대시료”라 한다)의 양이 많을 경우에는 시험에 들어가기 전에 시료의 조성을 균질화하기 위하여 시료의 축소방법에 따라 균질화한다.

(나) 조각잔재, 오니 또는 입자상 물질은 그대로 작은 돌맹이 등의 다른 물질을 제거하고, 입경이 5 mm 미만인 것은 그대로, 입경이 5 mm 이상인 것은 분쇄하여 체로 걸러서 입경이 0.5-5 mm로 한다.

### 2. 시료의 축소방법

대시료를 균일하게 혼합 또는 혼화하여 측정에 필요한 적당량을 취하고 시료의 축소방법중 하나의 방법에 따라 균질화 한다.

#### 구획법

- (1) 모아진 대시료를 네모꼴로 얇게 균일한 두께로 편다.
- (2) 이것을 가로 4등분 세로 5등분하여 20개의 덩어리로 나눈다.
- (3) 20개의 각 부분에서 균등량씩을 취하여 혼합하여 하나의 시료로 한다.

#### 교호삼법

- (1) 분쇄한 대시료를 단단하고 깨끗한 평면위에 원추형으로 쌓는다.
- (2) (1)의 원추를 장소를 바꾸어 다시 쌓는다.
- (3) 원추에서 일정량을 취하여 장방형으로 도포하고 계속해서 일정량을 취하여 그 위에 입체로 쌓는다.
- (4) (3)의 육면체의 측면을 교대로 돌면서 균등량씩을 취하여 두개의 원추를 쌓는다.
- (5) 하나의 원추는 버리고 나머지 원추를 (1)~(4)의 조작을 반복하면서 적당한 크기까지 줄인다.

#### 원추사분법

- (1) 분쇄한 대시료를 단단하고 깨끗한 평면위에 원추형으로 쌓아 올린다.
- (2) (1)의 원추를 장소를 바꾸어 다시 쌓는다.
- (3) 원추의 꼭지를 수직으로 눌러서 평평하게 만들고 이것을 부채꼴로 사등분한다.
- (4) 마주 보는 두 부분을 취하고 반은 버린다.
- (5) 반으로 준 시료를 (1)~(4)의 조작을 반복하여 적당한 크기까지 줄인다.

현장에서 위와 같은 시료의 축소방법을 시행하기에는 번잡하므로 다음과 같은 절차 준용을 고려할 만하다:

미환경청 USEPA Response Team에서 규정한 Soil

Sampling SOP(Standard Operation Procedure)(EPA, 1994)의 7.2.2 Sampling at Depth with Augers and Thin Wall Tube Samplers의 10항에 다음과 같이 기술되어 있다:

“Place the remainder of the sample into a stainless steel, plastic, or other appropriate homogenization container, and mix thoroughly to obtain a homogenous sample representative of the entire sampling interval”. (토양시료를 스테인레스, 플라스틱 또는 다른 적절한 용기에 넣고 완전히 섞어 그 구간을 대표할 수 있는 균질한 대표시료를 제조한다)

이와 같은 상황을 종합할 때 부지평가를 위한 시료채취 및 조제에 있어 다음과 같은 절차를 사용하는 것이 적합하다.

1. 시료채취봉의 시료를 꺼내어 오염개연성이 높은 지점의 상하 15 cm 총 30 cm를 시료로 삼으며, 오염개연성에 대한 판단이 명확치 않은 경우 하부 30 cm를 시료로 삼는다.
2. 시료를 밀폐형 비닐봉지에 넣고 밀봉한 후, 외부에서 주걱 또는 손으로 완전히 혼합하여 대표시료를 현장 조제한다.
3. TPH 분석용 시료를 채취하기 위하여 주걱을 이용하여 시료 일부를 광구병에 담는다.
4. BTEX 분석용 시료를 채취하기 위하여 한쪽이 터진 주사기를 이용하여 시료를 취하여 바이알에 담는다.

### 3. 결 론

토양오염도 평가에 있어 현장에서 채취한 시료가 현장을 대표하지 못한다면, 시료를 아무리 정확하게 분석하여도 오염도 평가에 큰 불확실성을 내포시키므로 시료채취와 관련된 오류를 정량화하고 이를 저감시키려는 노력은 매우 중요하다.

본 연구에서는 유류로 오염된 부지평가에 있어 일반적으로 발생할 수 있는 시료채취관련 불확실성을 정량화하였다. TPH와 BTEX 항목 오염도를 측정하는 경우 분석과 관련된 불확실성은 5% 내외로 산정되었다. 시료채취와 관련되는 불확실성은 코어시료를 채취하는 단계보다 코어시료를 분석용으로 양을 줄이는 과정에서 집중적으로 발생하며, 또한 시료의 농도가 낮을수록 큰 채취관련 불확실성을 나타낸다.

시료채취와 관련된 불확실성을 저감하기 위하여 시료채

취지점의 신중한 선택이 중요하겠으나 코어시료 내 국지적인 이질성을 줄이는 것이 효율적이며, 이는 시료를 균질화하면 된다. 현행 토양오염공정시험기준에서는 가장 오염도가 심한 부분을 기준으로 30 cm를 대시료로 사용하도록 되어 있으나, 구체적인 시료채취 지침이 없으므로 채취한 코어시료를 현장에서 밀폐용기를 이용하여 완전혼합 후 일부를 취하여 분석용 시료로 사용하는 것이 필요하다.

시료채취와 분석을 통한 부지 오염도 평가의 목적은 오염농도 평균치와 오염체적을 알아내어 오염부하량을 산정함에 있음을 주지하여야 하며, 현장 시료채취 방법을 적용함에 있어도, 불확실성을 저감시킬 수 있는 명확한 시료채취 및 대표시료 제조에 관한 절차서가 있어야 개인간 시료채취와 관련된 오차와 불확실성을 저감할 수 있다.

## 사 사

본 연구는 한남대학교 교내연구비 지원으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

KMOE, 2009, Sampling Preparation and Handling in Soil Contamination Regulation (ES01730), National Institute of Environ-

mental Research.

KMOE, 2007, Standard Procedure for Solid Waste Analysis (# 11-1480000-00863-01), National Institute of Environmental Research.

Collins, K. and McGown, A., 1974, The form and function of microfabric features in a variety of natural soils, *Geotechnique*, **24**, 223-254.

Gy, P., 2004a, Sampling of discrete materials- a new introduction to the theory of sampling I. Qualitative approach, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, **74**, 7-24.

Gy, P., 2004b, Sampling of discrete materials II. Quantitative approach- sampling of zero-dimensional objects, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, **74**, 25-38.

Gy, P., 2004c, Sampling of discrete materials III. Quantitative approach- sampling of one-dimensional objects, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, **74**, 39-47.

Gustavsson, B., Luthbom, K., and Lagerkvist, A., 2006, "Comparison of analytical error and sampling error for contaminated soil", *Journal of Hazardous Materials*, B138 252-260.

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

EPA, 1994, Standard Operating Procedures: Soil Sampling, SOP #2012, U.S. EPA Environmental Response Team.