

## 조사 대상 부지 신규 분류 체계 제안 및 개황조사 강화를 통한 토양정밀조사 방법 개선 연구

권지철<sup>1</sup> · 이군택<sup>1\*</sup> · 황상일<sup>2</sup> · 김태승<sup>3</sup> · 윤정기<sup>3</sup> · 김지인<sup>3</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 농생명과학공동기기원

<sup>2</sup>한국환경정책·평가연구원

<sup>3</sup>국립환경과학원

## Improvement of Detailed Soil Survey Guidance through the New Site Classification System and Reinforcement of Exploratory Soil Survey

Ji Cheol Kwon<sup>1</sup> · Goontaek Lee<sup>1\*</sup> · Sang-il Hwang<sup>2</sup> · Tae Seung Kim<sup>3</sup> · Jeong-Ki Yoon<sup>3</sup> · Ji-in Kim<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>Korea Environment Institute

<sup>3</sup>National Institute of Environmental Research

### ABSTRACT

This study suggested the new site classification system according to land use, type of contamination and contaminants. Because the present site classification system can not cover all the areas, we changed the concept of land use to more detail one and enlarged the concept of other areas to cover all the areas not defined as certain land use. In case of the present industrial area, it was merged as other areas to avoid the confusion with oil and toxic material storage tank farm area. Accident area was separated from other areas and defined as only accident area caused by the mobile storage facility. In addition to classify the sites according to the basic land use, we classify the sites again in lower level according to the type of contamination and contaminants. With this classification system, we proposed different soil sampling strategy with the consideration of the origin of contamination and the interactions between soil and contaminants. We removed the surface soil sample (0~15 cm depth) around above storage tank because it was not a effective sample to assess whether that area contaminated or not. We also proposed to take the deeper soil samples at minimum three sampling points to confirm the depth of contamination in exploratory soil survey. We also proposed to remove the one point of 15 m depth sampling because it is not effective to confirm contaminated soil depth and needs the exhausted labor and cost. Instead of doing this, we added the continuous sampling to uncontaminated subsoil. Soil sampling points and depth in detailed soil survey is determined based on the results of exploratory soil survey. Therefore, effectiveness and reinforcements of exploratory soil survey would play an important role in improving the reliability of detailed soil survey.

**Key words :** Detailed soil survey, Exploratory soil survey, Sites classification, Soil sampling

### 1. 서 론

현행의 토양환경보전법 제5조 4항에 의하면 환경부장관, 시·도지사 또는 시장·군수·구청장은 토양보전을 위하여 제5조 1항에 따른 상시측정의 결과 우려기준을 넘는 지역 또는 토양오염실태조사의 결과 우려기준을 넘는 지

역, 토양오염사고 등으로 인하여 토양오염우려기준을 넘을 가능성이 크다고 인정되는 지역에 대해 토양정밀조사를 실시할 수 있도록 하고 있으며, 제14조 1항의 각호에 해당하는 경우는 특정토양오염관리대상시설의 설치자에 대하여 토양정밀조사를 명할 수 있게 되어 있다. 이에 따라 환경부에서는 토양정밀조사에 요구되는 사항을 토양정

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

Received : 2015. 7. 16 Reviewed : 2015. 8. 3 Accepted : 2015. 8. 26

Discussion until : 2016. 2. 29

밀조사의 세부방법에 관한 규정(환경부 고시 제 2013-59 호, 이하 토양정밀조사지침)으로 정하여 정밀조사를 수행하게 하고 있다.

토양정밀조사는 토양환경보전법 제23조 2에 따른 토양 오염조사기관(토양관련전문기관)이 실시하며, 기초조사, 개황조사, 정밀조사의 3단계로 수행한다. 조사대상지역은 그 특성에 따라 광산 활동 관련지역, 폐기물 매립 및 재활용 지역, 산업지역, 유류 및 유독물 등 저장시설, 사격장 및 기타지역으로 6개 지역으로 구분하고 있다. 현행 토양정밀조사지침은 부지용도가 같은 경우 일괄적으로 동일한 방식의 조사방법을 규정하고 있다. 그러나 동일 용도의 부지라도 오염물질 특성, 오염유입 형태에 따라서 오염물질의 분포가 달라지므로 조사방법도 이에 상응하여 달라져야 할 것이다. 이에 본 연구에서는 현행 토양정밀조사지침 현황 및 문제점 등을 면밀히 검토하여 궁극적으로 기존의 부지용도 기준의 토양정밀조사지침을 오염유형과 오염물질의 특성을 반영한 보다 과학적이고 현장중심적인 방법으로 개선하고자 하였다. 특히 현행 지침의 경우 개황조사 결과에 따라서 시료채취 지점, 심도 등이 달라지므로 개황조사 매우 중요하다. 따라서 개황조사 방법을 중심으로 그 효율성을 제고하기 위한 최적의 방법을 도출하고자 하였다.

다만, 토양정밀조사지침은 개황조사, 정밀조사 단계에서의 조사면적에 따른 최소 시료채취 지점수를 제시하고 있으며, 이 때 제시된 시료채취 지점수는 일정 크기의 오염원과 시료 채취 지점수와의 관계(Gillbert, 1987)에 근거하여 95% 신뢰수준에서 발견될 수 있는 최소 크기의 원형 오염지역을 고려한 것이다(KMOE, 2010). 따라서 본 연구에서는 조사 대상 면적대비 최소 시료채취 지점수(시료채취 밀도) 관련 사항은 연구 범위에 포함하지 않았으며 또한 토양오염공정시험기준에서 정한 시료채취방법 역시 현행 기준을 그대로 적용하였다.

## 2. 방 법

### 2.1. 부지용도 외 오염유형과 오염물질을 고려한 조사지역 재분류 방법 검토

서론에 언급한 바와 같이 현행 토양정밀조사지침은 부지용도가 같은 경우 일괄적으로 같은 방식의 조사채취 방법을 규정하고 있다. 그러나 동일 용도의 부지라도 오염물질특성, 오염 유입 형태에 오염물질의 분포는 달라지므로 조사 방법도 이에 상응하여 달라져야 한다. 따라서 우선 부지 용도를 구분하고 오염유형에 따라 지상유입, 지

중유입으로 그리고 토양오염물질별로 구분하여 조사 지역을 재분류하는 방법을 검토하였다. 이를 위하여 토양정밀조사보고서, 폐광산조사보고서 등 확보 가능한 현장 자료에 나타난 오염물질별 분포 현황을 파악하였으며 이런 과정을 통하여 개별 오염물질 조사 지침을 합리적으로 개선하고 다중 오염물질에 의한 오염지역의 경우에는 해당하는 개별 조사 방법들을 채택하여 조사가 이루어 질 수 있는 근거를 제안할 수 있도록 고려하였다.

### 2.2. 개황조사 기능 강화

개황조사의 완성도는 전체적인 정밀조사 결과 신뢰성을 향상시키는데 중요한 역할을 한다. 따라서 저장시설에 대한 개황조사 채취 지점을 물질의 토양 중 거동 특성을 고려하여 조정하고 수량을 일부 증가시킴으로써 개황조사의 기능을 강화하고 동시에 증가된 시료수는 정밀조사 지점수 산정에 합산할 수 있게 함으로써 효율적이면서 비용 증가 요인을 최소화한 방법을 검토하였다.

#### 2.2.1. 오염물질 종류 및 거동 특성을 반영한 시료채취 방법 개선

현행 지침의 경우 표토를 “지표면 하부 15 cm” 규정하고 오염물질의 종류 및 유입 형태에 대한 고려 없이 모든 지역에 일괄 적용함으로써 경우에 따라서는 채취된 시료가 주는 오염에 대한 정보의 비중이 매우 낮고 현장의 오염을 파악하는데 별 도움이 되지 않는다. 따라서 일괄적인 표토 시료채취를 지양하고 오염물질의 종류, 오염유입 형태에 따른 합리적인 최소심도 조사 방법을 검토하였다.

#### 2.2.2. 개황조사 시료채취지점 및 시료수 증가

개황조사 단계에서 저장시설에서 일정 부분 이격하여 채취하는 지점의 수를 상향 조정함으로써 정밀조사 시료채취 지점 선정의 효율성을 제고하는 방법을 검토하였다. 또한 이격 시료 채취 심도가 15m로 지정되어 있어서 경우에 따라 발생하는 소모적 굴착 작업을 최소화 할 수 있는 방법을 모색하였다.

#### 2.2.3. 현장 확인 평가

과거에 유류를 저장했던 지상탱크를 운영했던 이력이 있는 부지를 선정하여 기존 지침에 따라 시료를 채취한 결과와 본 연구에서 도출한 유류 및 유독물 저장시설 중 지상탱크(세관 누출(가능) 지역)에 대한 개선(안)에 따라 시료를 채취한 결과를 비교 검토 하였다.

2.2.3.1. 현행 지침에 의한 개황조사

표토(0~15 cm) 시료의 경우 과거 지상탱크 주변 4방위와 일정거리 이격된 1개 지점에서 표토 시료 총 5개를 채취하였다. 심토의 경우 4방위의 표토 시료 중 오염의 우려가 있는 1개 지점과 오염의 확산이 예상되는 일정거리 이격된 지역에서 1개 지점에서 시료를 채취하였다. 현장 여건으로 인한 가용 시료채취 장비의 제한성 때문에 암반층의 깊이를 4 m로 가정하여 2개 지점에서 4심도까지 총 8개의 심토 시료를 채취하였다(Table 1).

2.2.3.2. 개선(안)에 의한 개황조사

동일한 지상탱크 주변 4방위에서 표토(15 cm) 개념을 배제하고 토양오염공정시험기준에 따라 탱크로부터 이격거리(약 1.3 m)에 1.5를 곱한 깊이(약 2 m)까지를 시료채취 구간으로 결정하였다. 이런 경우 법적 토양오염도 검사에서는 1~2 m 시료 1개를 채취하는 것이 일반화 되어 있으나 본 연구에서는 개황조사의 특수성 및 지표로부터의 오염 확산을 고려하여 상부 0~1 m 깊이의 시료를 추

가로 채취하여 지점별 2심도까지 총 8개 시료를 채취하였다. 오염심도 확인 시료의 경우 기존 지침 개념을 준용하여 탱크 주변 4방위 시료에서 오염의 개연성이 있는 1개 지점 및 오염의 확산이 예상되는 일정거리 이격된 지역에서 1개 지점, 그리고 1개 지점을 추가하여 총 3개 지점에서 4 m까지 1 m 간격으로 시료를 채취하였다(A-P-2 지점 추가, Fig 1, Table 2).

2.2.3.3 개황조사 시료채취 방법 변경에 따른 정밀조사 결과 평가

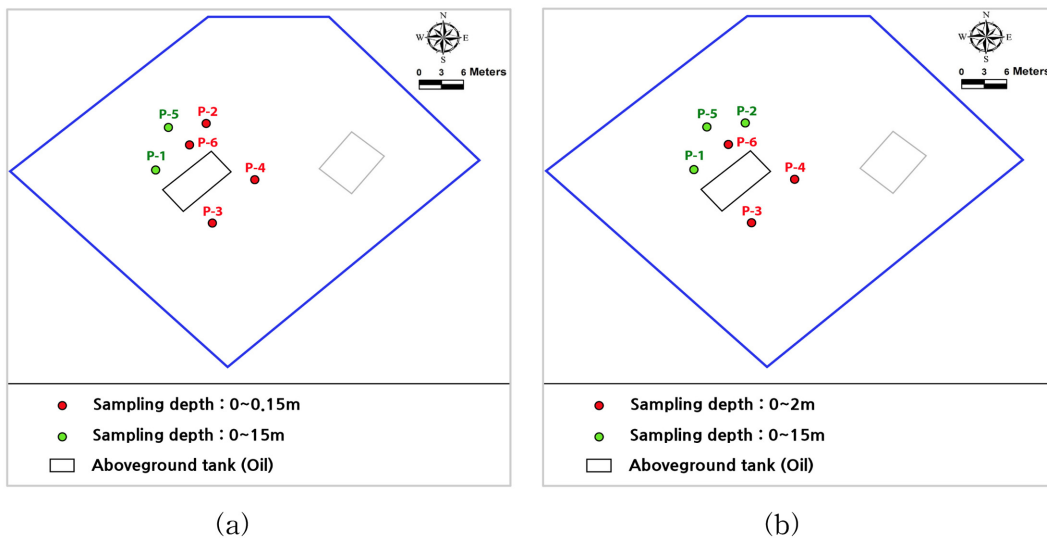
앞서 언급한 두 가지 방법에 따라 개황조사를 수행하고 이에 따른 정밀조사 결과(오염면적, 부피)를 평가해 보았다. 정밀조사의 경우 현행 토양정밀조사지침에 따라 1,000 m<sup>2</sup>까지는 75 m<sup>2</sup>당 1개 지점과 1,000 m<sup>2</sup>를 초과하는 경우 300 m<sup>2</sup>당 1개 지점을 선정하여 시료를 채취하였다. 현행

**Table 1.** Summary of sampling works according to detailed soil survey guideline of Korean ministry of environment (2013)

| Sample ID | Sampling depth     | Number of samples |
|-----------|--------------------|-------------------|
| A-P-1     | 0~4 m (1 sample/m) | 4 samples         |
| A-P-3     | 0~15 cm            | 1 sample          |
| A-P-4     | 0~15 cm            | 1 sample          |
| A-P-5     | 0~4 m (1 sample/m) | 4 samples         |
| A-P-6     | 0~15 cm            | 1 sample          |
| Total     |                    | 11 samples        |

**Table 2.** Summary of sampling works according to proposed guideline implementing the increased number of sampling point and 1 m interval sampling strategy with the exclusion of the sample from 0~15 cm depth

| Sample ID | Depth              | Number of sample |
|-----------|--------------------|------------------|
| A-P-1     | 0~4 m (1 sample/m) | 4 samples        |
| A-P-2     | 0~4 m (1 sample/m) | 4 samples        |
| A-P-3     | 0~2 m              | 2 samples        |
| A-P-4     | 0~2 m              | 2 samples        |
| A-P-5     | 0~4 m (1 sample/m) | 4 samples        |
| A-P-6     | 0~2 m              | 2 samples        |
| Total     |                    | 18 samples       |



**Fig 1.** Sampling points according to two different methods (a : legal guideline(present), b : proposed guideline).

**Table 3.** Relative comparison of soil contamination for heavy metals between surface soil (0~0.15 cm) and subsoil (0.15~0.60 cm) at abandoned mining area

| Site ID | Number of contaminated samples (relative percentage of each depth) |
|---------|--|
| Site1   | Surface soil : 15 samples (75%) / Subsoil : 5 samples (25%)        |
| Site2   | Surface soil : 8 samples (73%) / Subsoil : 3 samples (27%)         |
| Site3   | Surface soil : 2 samples (67%) / Subsoil : 1 sample (33%)          |
| Site4   | Surface soil : 3 samples (75%) / Subsoil : 1 sample (25%)          |
| Site5   | Surface soil : 5 samples (71%) / Subsoil : 2 samples (29%)         |
| Site6   | Surface soil : 15 samples (71%) / Subsoil : 6 samples (29%)        |
| Site7   | Surface soil : 3 samples (75%) / Subsoil : 1 sample (25%)          |
| Site8   | Surface soil : 8 samples (89%) / Subsoil : 1 sample (11%)          |
| Site9   | Surface soil : 29 samples (74%) / Subsoil : 10 samples (26%)       |
| Site10  | Surface soil : 5 samples (63%) / Subsoil : 3 samples (37%)         |
| Site11  | Surface soil : 41 samples (76%) / Subsoil : 13 samples (24%)       |
| Site12  | Surface soil : 20 samples (87%) / Subsoil : 3 samples (13%)        |
| Site13  | Surface soil : 5 samples (100%) / Subsoil : 0 samples (0%)         |
| Site14  | Surface soil : 2 samples (100%) / Subsoil : 0 samples (0%)         |
| Site15  | Surface soil : 16 samples (67%) / Subsoil : 8 samples (33%)        |
| Site16  | Surface soil : 14 samples (64%) / Subsoil : 8 samples (36%)        |
| Site17  | Surface soil : 17 samples (77%) / Subsoil : 5 samples (23%)        |

지침에 따른 정밀조사에서는 개황조사에서 발견된 1심도 (0~1 m)에 대하여 20개 지점 20개 시료를 채취하였으며 개선(안)에 의한 개황조사 결과에 따른 시료는 20개 지점 40개 시료(1, 2심도)에 추가적으로 오염부채를 확인하기 위하여 석유계총탄화수소(TPH)가 검출된 심도 보다 1심도 깊은 지점의 시료를 채취함으로써 총 60개 시료를 채취하여 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 부지용도 외 오염유형과 오염물질을 고려한 조사지역 재분류 및 조사 방법 제안

현행 토양정밀조사지침은 부지용도를 기준으로 광산활동 관련지역, 폐기물매립 및 재활용지역, 산업지역, 유류 및 유독물 등 저장시설, 사격장, 기타지역으로 구분하고 이에 따른 시료채취 방법을 기술해 놓았다. 세부적인 사항으로는 산업지역 내부에 설치되어 있는 저장시설은 유류 및 유독물 저장시설에 준하여 조사하도록 산업지역 조사 방법에 별도로 기재되어 있지만 지역을 완전히 구분하여 주는 것보다 명확하지 않으며 또한 기타지역의 경우는 내부적으로 다시 오염사고지역과 기타지역으로 구분되어 있어 용어의 혼선을 일으키고 후자의 경우 산업지역과의 구분도 분명하지 않다. 따라서 기존 분류체계에서 사안의 중요성을 감안하여 오염사고 지역을 단일 지역으로 부각

시켰으며 동시에 산업지역을 삭제하고 유류 및 유독물 저장 시설을 산업지역에서 완전히 분리하였다. 또한 기타지역에 대한 개념을 확장하여 산업지역을 포함한 여타 분류에 포함되지 않은 모든 지역에 적용될 수 있게 정의하였다. 현행 광산 활동 관련지역과 사격장 지역 조사의 경우는 주요 오염원이 중금속임을 고려하여 채취되는 시료의 주요 심도를 1 m 이내에 집중하고 있다(0~15 cm, 15~30 cm, 30~60 cm, 60~100 cm). 이는 이미 알려진 바와 같이 토양(점토) 표면에 발생하는 과잉의 음전하에 의하여 중금속 이동이 제한되는 사실에 기반 한 것으로 판단된다 (Schreiber et al., 1999). 또한 전국 폐금속광산 주변 정밀조사(KMOE, 2007)에서 지역별로 대표적인 광산 20개 광산을 대상으로 주요 오염심도를 분석한 결과, 아래 Table 3에 나타난 바와 같이 광산 지역의 주요 오염심도가 주로 15 cm 이내의 표토이며 최대 60 cm 이내로 나타났다. 따라서 광산 지역 및 사격장을 대상으로 한 현행 토양정밀조사지침의 조사 전략은 오염의 유형과 오염물질의 토양 중의 거동 특성을 반영하여 적절하게 규정되어 있다고 판단된다.

Table 4는 토양오염실태조사 결과 중금속 성분이 토양 오염우려기준을 초과하여 토양정밀조사를 수행한 5개 지역의 사례를 분석한 결과이다. 광산지역이나 사격장과 같이 동일한 중금속 오염지역이지만 오염의 유입형태가 주로 표토에 오염물질이 유입되는 광산지역이나 사격장과는

달리 매립 등의 행위를 통해 보다 깊은 심도까지 토양이 오염되는 것을 볼 수 있다. 이는 동일한 중금속이라도 부지용도 및 오염 물질의 유입형태에 따라 토양 중에 오염 물질이 분포하는 특성이 다르다는 점을 보여준다 할 수 있다. 또한 현행 산업지역과 기타지역의 경우에는 중금속과 유류 등의 성분이 모두 오염될 개연성이 있는 지역임에도 불구하고 광산지역과 사격장에서 주요 오염물질인 중금속의 거동 특성을 고려하여 조사 방법을 정한 것과는 달리 오염물질의 종류에 따른 특성이 적극적으로 반영되지 않았고 따라서 오염형태와 오염물질에 따른 적절한 조사 방법이 고려되어 있지 않은 상태이다.

따라서 현행 토양정밀조사지침을 앞서 수정 제안한 부지용도 재분류와 더불어 오염유형(지상/지중 유입), 오염물질(무기성물질/유기성)의 종류에 따라서 세부적으로 구분하는 것을 제안하였으며(Table 5), 이와 같은 신규 부지 분류 체계에 따른 적절한 시료채취 전략을 제시함으로써 개황조사의 신뢰성을 제고하고자 하였다.

오염유형에서 지상 유입이라 함은 오염물질이 최초 지

상으로 유입되어 지중으로 확산되는 경우를 말하며, 지중 유입이라 함은 오염물질이 최초 지중으로 유입되어 확산되는 경우로 정의하였다. 폐기물 지상 처리는 관련법에 따라 폐기물이 환경위해성검토를 거쳐 안전하다고 판단되어 토양 상부에 성복토재로 처리된 경우 또는 불법적으로 토양 상부에 처리된 경우를 말하며, 폐기물 지중 처리는 폐기물이 관련법에 따라 환경위해성검토를 거쳐 안전하다고 판단되어 토양 하부에 성복토재로 처리된 경우 또는 불법적으로 토양하부에 매립된 경우로 정의하였다. 토양오염물질의 경우에는 크게 무기성 물질(카드뮴, 구리, 비소, 수은, 납, 6가크롬, 아연, 니켈, 불소, 시안)과 유기성 물질(유기인화합물, PCB, 페놀, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌, 석유계총탄화수소, TCE, PCE, 벤조(a)피렌)로 구분하여 조사 방법을 제안하였다.

시료채취 방법론적으로 주요 사안은 광산/제련소 활동 지역의 경우 오염물질이 지상으로 유입되는 단일 방법으로 기존의 토양정밀조사지침과 동일하게 수행하고, 사격장 지역의 경우 현행 법적오염물질은 아니지만 TNT, RDX와 같은 유기물질들도 검출되고 있으므로(KMOE, 2011) 향후 활용성을 고려하여 유기성오염물질에 대한 부분을 추가 제안하였으며 시료채취 심도는 무기성오염물질과 동일하나 화약류 오염조사에 대한 안전 및 제약 사항에 대하여 언급하였다.

폐기물 처리 지역의 경우 환경위해성평가를 통하여 적정하게 처리된 부분은 토양 조사에서 배제하되 이로 인한 상하부 토양에 미치는 영향을 조사하는 방안을 제안하였

**Table 4.** Major soil contamination depth of heavy metals in detailed soil survey at different land use area (5 sites)

| Site ID | Depth (m) | Remarks (land use)           |
|---------|-----------|------------------------------|
| Site1   | 0~1.0     | Chemical plant               |
| Site2   | 0~4.0     | Paper mill                   |
| Site3   | 0~2.0     | New housing development area |
| Site4   | 0~2.0     | Redevelopment area           |
| Site5   | 0~4.5     | Solid waste landfill area    |

**Table 5.** New site classification system for the contaminated area according to land use, type of contamination and contaminants

| Site use  | Type of contamination                              | Type of contaminants            |
|---|--|---------------------------------|
| Mining and smelting related area                                | Contamination started from surface soil to subsoil | Inorganic compounds             |
| Shooting range  | Contamination started from surface soil to subsoil | Inorganic compounds             |
|   |  | Organic compounds               |
| Waste disposal area   | Surface disposal                                   | Inorganic compounds             |
|   | Underground disposal                               | Organic compounds               |
|   |  | Inorganic compounds             |
| Oil and toxic material storage tank farm area                   | Aboveground tank/pipes leakage area                | Inorganic and organic compounds |
|   | Underground tank/pipes leakage area                | Inorganic and organic compounds |
| Accident area (only accident caused by mobile storage facility) | Contamination started from surface soil to subsoil | Inorganic and organic compounds |
|   |  | Inorganic compounds             |
|   |  | Organic compounds               |
| Other Areas   | Contamination started from surface soil to subsoil | Inorganic compounds             |
|   |  | Organic compounds               |
|   |  | Inorganic compounds             |
|   | Contamination started from subsoil                 | Organic compounds               |

다. 지상처리 지역으로서 무기성오염물질 유출 가능 지역인 경우는 매립하부로부터 1 m 조사, 유기성오염물질 유출 가능 지역인 경우에는 이동성을 고려하여 매립하부로부터 2 m까지를 기본 조사 심도로 제안하였으며 추가적 오염의 가능성이 있는 경우는 1 m 간격으로 추가 시료를 채취하는 것을 제안하였다. 지중처리 지역으로서 무기성오염물질 유출 가능 앞서 언급된 지상처리와 동일한 개념을 적용하되 매립 상부 경계로부터 위쪽 1 m 시료를 추가적으로 채취하고 유기성오염물질 유출 가능 지역의 경우는 지표로부터 폐기물이 존재하는 상부까지 1 m 간격으로 시료채취를 함으로써 지하수 유동에 의한 확산 여부를 고려하였다. 불법투기의 경우는 토양과 폐기물을 구분하지 않고 지표로부터 1 m 간격으로 적정하게 처리된 지역과 동일한 조사 깊이까지 시료를 채취하는 방법을 제안하였다.

유류 및 유독물 저장시설의 오염유형은 지상탱크/배관 누출(가능) 지역과 지중탱크/배관 누출(가능) 지역으로 구분하였으며 저장 물질의 경우 무기성오염물질도 주로 액상인 점과 시설 주변이 일정 두께의 콘크리트 포장에 이루어진 점 등을 고려하여 1 m 단위의 시료채취에서도 충분히 효과적인 조사를 수행할 수 있다고 판단하여 오염물질의 종류에는 구분을 두지 않고 조사 방법을 제안하였다. 특히 사항으로는 아래 절에 언급된 현장 확인 조사 결과 및 이미 많은 토양오염조사기관들이 저장시설 조사 과정에서 표토(0~15 cm) 시료를 채취하지 않고 1 m 단위의 시료채취를 수행하고 있는 점, 표토 시료가 오염분포도 작성에 활용되고 있지 않다는 점 등을 반영하여 표토 시료채취를 제외(기타지역에서 유기성오염물질이 지상 또는 지중으로 유입된 경우 포함하는 방안을 제안하였으며 오염이 개연성이 있는 방향으로 일정거리 이격하여 15 m 깊이까지(압반이 나오는 경우는 해당 깊이까지 채취) 무조건적으로 채취하는 방법을 지양하고 오염 확산이 없는 지점까지 채취하는 방법을 제안함으로써 조사기관의 판단에 따라서 소모적 시료채취 행위를 방지하고자 하였다. 지상 시설의 경우 표토 시료를 배제하고 1 m 단위의 시료채취 방법을 도입하되 토양오염공정시험기준 상의 시료 채취 깊이(구간) 산정 방법을 적용하여 저장시설 주변 4방위와 배관 주변 1개 지점(배관 누출이 의심되는 경우만 해당) 이상에서 시료를 채취할 것을 명시하였으며 이격시료의 경우 지표로부터 오염이 확산이 없을 것으로 판단되는 깊이까지 1 m 단위로 시료를 채취함을 제안함으로써 심도별 오염에 대한 보다 정확한 정보를 얻을 수 있도록 제안하였다. 지중시설의 경우는 지상시설과 동일하게 4방위

및 배관주변에서 토양오염공정시험기준에 의하여 시료를 채취하고 이격시료의 경우 지하수위 유동에 의한 오염 상승 영향을 고려하여 지표로부터 오염의 확산이 없을 것으로 판단되는 깊이까지 1 m 단위로 시료를 채취함을 제안하였다. 아래 절에 기술한 현장 확인 조사 결과를 바탕으로 정밀조사를 위한 시료채취 지점의 선정이라는 개황조사의 본래 기능을 강화하기 위하여 지상/지중 두 가지 시설 모두 이격시료를 기존의 1개 지점 이상에서 3개 지점 이상으로 확대할 것을 제안하였다. 이격 시료채취의 경우 정밀조사 시료 수 산정에 포함시킬 수 있도록 하여 전체적인 비용의 상승은 최소화하고 조사의 효율을 높일 수 있는 방안을 제안하였다.

오염사고지역의 경우는 기존에 기타 지역 일부에 포함되어 있던 것을 별도로 분리하여 부각시킴으로써 사고 지역 대처의 효율성 강조하였으며 이동식 설비에 의한 사고로 한정함으로써 오염사고의 개념을 명확히 하였다. 그리고 역시 표토(0~15 cm) 시료를 제외하였고 기존의 2 m 이내 50 cm 간격, 2 m 이상 1 m 간격시료 채취 개념을 그대로 유지하였다.

기타지역의 경우 기존 산업지역을 포함하여 여타 규정되지 않은 모든 지역을 대상으로 하는 것으로 개념을 확대함으로써 부지 용도가 명확하지 않는 지역에도 적용 가능하도록 하였다. 또한 앞에 언급한 분류 체계에 따라서 지상유입의 경우 무기성오염물질 조사 대상 지역은 사격장과 동일하게 표토(0~15 cm) 시료수 3개 지점 당 1개 지점 이상의 비율로 지표면에서 1m까지를 기준으로 토양을 채취하며, 시료의 심도는 15~30 cm, 30~60 cm, 60~100 cm 깊이 간격으로 각각 1점 이상씩 채취한다. 또한 지표면에서 1 m 이상 깊이까지 오염물질이 확산될 우려가 있다고 판단되는 경우 1 m 이상 초과 깊이부터 50 cm 간격으로 추가 시료 채취하는 방법을 제안하였다. 유기성오염물질 조사 대상 지역은 표토(0~15 cm) 시료를 없애고 최초심도(0~1 m 심도)라 용어를 변경하여 시료를 채취하도록 하였으며 심도의 경우에는 3개 지점에 1개 시료로 오염의 확산이 없을 것으로 판단되는 깊이까지 1 m 단위로 시료를 채취하는 것을 제안하였다. 지중유입의 경우 무기성오염물질 조사 대상 지역은 무기성분(중금속 등)이 토양오염우려기준을 초과하여 발견된 지점의 심도를 기준으로 상하부 ±1 m 구간에서 50 cm 간격으로 시료를 채취하고 다만 오염물질이 확산될 우려가 있다고 판단되는 경우에는 시료채취 구간 아래쪽으로 1 m 간격으로 추가 시료를 채취하는 것을 제안하였다. 유기성오염물질 조사 대상 지역은 지하수 유동에 의한 영향을 받을 수 있으므로

지상유입과 동일하게 적용하였다. 본 연구에서 제안한 방법은 개황조사의 효율성을 강화하여 정밀조사의 신뢰성을 증진시키고자 하는 취지에서 제안한 방법이며 신규 부지 분류 체계는 정밀조사에서도 동일하게 적용될 수 있다. 다만, 위해성평가에 토양정밀조사 결과를 활용할 때 표토(0~15 cm)의 오염 정보가 확인되지 않는 경우는 표토에 대한 별도의 조사를 수행한다.

## 3.2. 현장 확인 평가 결과

### 3.2.1. 현행 지침에 의한 개황조사 결과

현행 지침에 따라 지상탱크 4방위에서 채취한 표토(0~15 cm) 시료의 경우 모든 시료에서 TPH 성분이 불검출 되어 지상저장 시설에 의한 오염의 개연성이 있는 지점을 확인하여 정밀조사 지점 선정의 근거로 한다는 취지에 표토 시료가 적합하지 않은 것으로 나타났다. 또한 표토 시료에서 TPH 성분이 불검출 되어 임의로 선택한 저장시설 주변 1개 지점(A-P-1) 4심도 시료도 모두 불검출되었다. 일정거리 이격되어 있는 1개 지점(A-P-5)의 경우 1심도(0~1 m) 시료에서만 TPH 성분이 569 mg/kg로 토양오염우려기준(3 지역)의 약 28.5%가 검출되었다. 이런 경우 현행 토양정밀조사지침에 따르면 토양오염우려기준의 40%를 초과하는 지점이 없으므로 정밀조사의 추가적 수행 여부가 불명확해지는 상황도 초래될 수 있다(KMOE, 2013).

### 3.2.2. 개선(안)에 개황조사 결과

개선(안)에 의하여 지상탱크 4방위에서 표토 시료를 토양오염공정시험기준에 따라 약 0.7 m 이격한 거리에서 1심도(0~1 m) 시료로 대체하여 채취하여 분석한 결과, A-P-1 시료를 제외한 모든 시료에서 유류가 검출되었으며, A-P-6 시료의 경우에는 TPH 성분이 976 mg/kg로 토양오염우려기준(3 지역)의 약 48.8%가 검출되었다. 따라서 지상탱크 지역의 경우 표토(0~15 cm) 채취보다 최대한 탱크에 인접하여 토양오염공정시험기준에 따라 최초 심도를 결정하여 시료를 채취하는 방식이 보다 개황조사의 효율성을 높이는 방법이라 판단된다. 개선(안)에 의하여 추가적으로 채취된 A-P-2 지점의 경우에는 2심도(1~2 m)에서 TPH 성분이 검출되어 2심도에도 유류오염의 가능성이 있다는 사실을 인지 할 수 있었다. 이는 이격거리 시료를 추가적으로 채취함으로써 발견된 정보로서 정밀조사 시료 채취 지점과 심도를 결정하는데 유용한 정보가 되었다고 판단되며 기본적으로 개황조사 수행시 오염심도를 예측해 볼 수 있는 이격시료 채취 지점의 증가가 정밀조사 오염심도를 결정하는데 있어 불확실성을 저감하고 정밀조사의

신뢰성을 높이는 데 중요한 요소가 될 수 있음을 시사한다고 할 수 있다.

### 3.2.3. 정밀조사 결과 비교

부지 내에서 총 20 지점에서 60개 토양시료를 채취하여 분석한 결과 13개 지점에서 TPH 항목이 토양환경보전법 “1지역” 토양오염우려기준을 초과하였다. 1지역 우려기준을 초과한 13개 지점에서 8개 지점은 1, 2심도에서만 기준을 초과하였으며, 나머지 5지점은 3심도까지 기준을 초과하였다. 최고농도는 A-D-16 지점 3심도에서 20,390 mg/kg으로 법정기준농도의 4배 이상인 농도로 검출되었다. A-D-17 지점에서는 1심도 5,963 mg/kg, 2심도 10,961 mg/kg, 3심도 7,963 mg/kg으로 전 심도에서 기준을 초과하였다. A-D-15, A-D-19 지점은 3심도에서만 각각 526 mg/kg, 16,082 mg/kg으로 검출되었다. 정밀조사 결과 5개 지점에서 최대 심도인 3 m에서 토양오염우려기준을 초과하여 검출되었다.

현행 토양정밀조사 지침에서는 개황조사 결과 오염이 우려되는 농도의 깊이까지 시료를 채취하는 것으로 규정해 놓았다. 따라서 현행 지침에 따라 수행된 개황조사 결과를 반영하여 정밀조사 시료를 최대 1심도까지 수행한 결과에서는 2심도 이상의 오염은 발견할 수 없다. 이는 개황조사를 통하여 조사 심도를 결정한다는 본연의 취지에 부합되지 않는다. 본 연구에서는 현행 지침보다 개황조사 시료채취 지점을 1개 추가하여 토양 깊이별 오염 양상을 파악함으로써 3심도의 오염까지는 발견 할 수 있었다. 그러나 A-D-16, 17, 19 지점의 경우 3심도에도 심각한 오염수준을 나타내고 있기 때문에 4심도의 오염이 예상되는 상황이다. 따라서 개황조사의 오염심도 확인용 시료(이격시료)의 경우, 탱크 및 배관 주변 지점수 그리고 일정 거리 이격한 1개 지점을 합한 수(5개 지점)의 최소 60% 이상(3개 지점이상)으로 상향 조정하고 이를 정밀조사 시료 지점수에 포함시킴으로써 비용 상승을 최소화하고 개황조사의 효율을 높이는 방법을 제안하고자 한다. 미국의 경우는 유독물 또는 유해폐기물을 저장하는 모든 시설에 대해 탱크용량/길이에 따라 시료수와 심도를 결정하고 있다(NJDEP, 2012). 반면에 국내는 탱크의 용량/길이에 상관없이 탱크 주변의 4방위와 이격지점 포함하여 5개의 시료채취로 규정되어 있어 현장 요건에 따라서 시료 채취 지점수의 확장성이 제한되어 있다. 따라서 앞에 언급한 바와 같이 최소로 채취되는 지점수를 확대하는 것이 현 상황에서는 효율적이라고 판단된다. 그러나 이는 개황조사에서 오염심도를 정확히 발견하기 위한 확률을 높이

는 것이지 완전한 방법은 아니므로 개황조사에서 결정된 오염심도를 초과하는 지점의 경우는 오염이 발견되지 않는 부분까지 확인하여 오염범위를 확정한다는 사항을 추가적으로 제안한다. 같은 맥락에서 현행 지침에서 1개 지점에서 확일적으로 15 m 깊이까지 시료채취를 하는 것은 비효율적인 방법이므로 지침에서 삭제하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

현행 토양정밀조사지침은 단순히 부지용도를 기준으로 광산활동 관련지역, 폐기물매립 및 재활용지역, 산업지역, 유류 및 유독물 등 저장시설, 사격장, 기타지역으로 구분하고 일부 지역에 한하여 오염물질의 특성을 고려하여 조사 방법을 제안하였고 여타 지역에 대해서는 이와 상관없이 확일적인 조사 방법을 적용해 놓았다. 따라서 본 연구에서는 부지 용도에 따른 구분에 추가적으로 오염유형과 오염물질에 따라 부지를 재분류하고 이에 상응하는 조사 방법을 제안하였다. 오염물질이 토양에 유입되는 형태와 이들이 지중 거동 특성을 고려하여 세부적으로 시료채취 깊이를 구분하여 기술함으로써 오염분포를 파악하기 위한 용도로서의 정밀조사 신뢰성을 제고하고자 하였다. 또한 부지용도, 오염유형, 오염물질에 따라 조사 방법을 세분화 하였으므로 동일부지에서 오염유형과 특성이 다른 물질이 동시에 오염된 경우 사용자 측면에서 지침의 적용 및 활용이 보다 용이할 수 있도록 개선하였다. 한편 정밀조사의 오염심도 결정에 있어서 개황조사 결과가 필수적이므로 개황조사에서 도출된 결과가 정밀조사 계획수립에 보다 정확하게 적용될 수 있도록 오염심도 결정을 위한 이격시료 채취 지점수를 상향조정 하였고 대신에 이를 정밀조사 시료채취 지점수에 포함시킬 수 있게 함으로써 개황조사의 기능은 강화하고 비용 상승은 최소화 하고자 하였

다. 또한 개황조사의 한계성으로 인하여 정밀조사에서 야기되는 오류를 최소화 하고자 개황조사에서 결정된 심도 이상의 깊이에서 토양오염우려기준을 초과하는 경우는 추가적인 시료 채취를 통하여 오염범위를 확정해야 함을 명시할 것을 제안하였다.

#### 사 사

이 논문은 국립환경과학원에서 지원한 “토양 정밀조사 및 토양정화검증방법에 관한 세부지침 마련 연구(I)”의 일환으로 수행된 결과이며 이에 감사드립니다.

#### References

- Gillbert, R.O., 1987, Statistical Method for Environment Pollution Monitoring, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 320.
- KMOE, 2007, Study for the soil detailed survey guideline revision, Korea Ministry of Environment, Sejong.
- KMOE, 2010, Development of Guidelines for the Investigation of Soil and Groundwater, Korea Ministry of Environment, Sejong.
- KMOE, 2011, Proposition for soil explosive compounds criteria based on risk assessment, Korea Ministry of Environment, Sejong.
- KMOE, 2013, Soil monitoring system and soil pollution survey in 2012, Korea Ministry of Environment, Sejong.
- New Jersey Department of Environmental Protection (NJDEP), 2012, Technical Guidance for Investigation of Underground Storage Tank System.
- Schreiber, M.E., Simo, J.A., and Freiberg, P.G., 1999, Stratigraphic and geochemical controls on naturally occurring arsenic in groundwater, eastern Wisconsin, USA, *Hydrogeol. J.*, **8**, 161-176.