

《原著》

부지 오염도 평가시 불확실성 정량화 및 저감방안

김건하¹ · 백종환² · 송영우^{1*}

¹한남대학교 건설시스템공학과

²환경자원분석인증센터(CERAC)

Quantification of Uncertainty Associated with Environmental Site Assessments and Its Reduction Approaches

Geonha Kim¹ · JongHwan Back² · Yong-woo Song^{1*}

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University

²Center for Environment and Resource Analysis Certification of HNU

ABSTRACT

Uncertainty associated with a sampling method is very high in evaluating the degree of site contamination; therefore, such uncertainty affects the reliability of precise investigation and remediation verification. In particular, in evaluating a site for a small-sized filling station, underground utilities, such as connection pipes and oil storage tanks, make grid-unit sampling impossible and the resulting increase in uncertainty is inevitable. Accordingly, this study quantified the uncertainty related to the evaluation of the degree of contamination by total petroleum hydrocarbon and by benzene, toluene, ethylene, and xylene. When planning a grid aimed at detecting a hot spot, major factors that influence the increase in uncertainty include grid interval and the size and shape of the hot spot. The current guideline for soil sampling prescribes that the grid interval increase in proportion to the area of the evaluated site, but this heightens the possibility that a hot spot will not be detected. In evaluating a site, therefore, it is crucial to estimate the size and shape of the hot spot in advance and to establish a sampling plan considering a diversity of scenarios.

Key words : Uncertainty, Protocol, Assessment, Site contamination, Sampling planning

1. 서 론

2011년 현재, 차량용 연료 소매업소인 주유소는 전국 약 14,000여 개소가 있다(KSME, 2012). 주유소는 일반적으로 면적이 협소하고 건축물과 주유기, 연결파이프 등 부지 내 지장물이 다수 존재하기 때문에 오염도 평가를 위한 시료 채취가 까다롭다. 또한 토양은 이질성(heterogeneity)이 크므로 물리화학적 특성을 파악하는 것은 매우 어렵고 부지오염도 평가에 있어 오류가 발생할 개연성이 높다(Gy, 2004a, Kim, 2013).

여러 연구에서 부지오염도 평가시 시료채취에 따른 불확실성이 화학적 분석에 의한 불확실성보다 더 크다고 제시된 바 있다(Gy, 2004a, Gy, 2004b, Gy, 2004c, Kim,

2013). 또한 부지오염도 평가 절차서가 확립되어 있지 않아 오염도를 과대/과소 평가하는 경우가 많다.

부지오염도를 평가하기 위한 시료채취계획은 1) 시료채취 목적 확인; 2) 시료채취 계획의 비용/편익 분석; 3) 오염물질의 변화양상 추정; 4) 시료채취 용이성, 접근성, 장비활용계획 등 네 단계로 구성된다. 면밀하게 시료채취 계획을 수립 하여도 실제적용에 있어 부지내 지장물, 평가 비용, 장비성능, 현장기술자 경험에 의하여 필연적으로 불확실성이 발생한다.

부지오염도 평가에 있어 시료 채취지점 선정과 심도 결정이 매우 중요하다. 오염도와 오염형태를 확실하게 알지 못하는 상태에서 수립한 시료채취 계획에 따라 오염의 형태 및 농도가 다르게 평가될 수 있다. 우리나라는 토양정

*Corresponding author : pinteros@naver.com

Received : 2013. 10. 22 Reviewed : 2014. 1. 16 Accepted : 2014. 1. 18

Discussion until : 2014. 4. 30 까지

Table 1. Number of sampling points and grid distance (after KMOE, 2010)

Area (m ²)	Number of sampling Points	Grid Distance (m)
500 <	5	10~14
1,000 <	6	13~17
2,000 <	7	18~22
3,000 <	9	20~24
4,000 <	11	21~25
5,000 <	13	21~25
6,000 <	15	22~26
7,000 <	17	22~26
8,000 <	19	22~26
9,000 <	20	23~27
10,000 <	21	24~28
15,000 <	25	27~31
20,000 <	30	29~33
25,000 <	35	30~34
30,000 <	40	30~34
35,000 <	45	31~35
40,000 <	50	31~35
45,000 <	52	33~37
50,000 <	55	34~38

밀조사지침(KMOE, 2010)에서 제시하고 있는 평가대상 부지에 대한 격자간격과 시료채취 지점 수를 제안하고 있는 토양시료 채취방법을 준용하고 있는데 Table 1은 동 지침상 평가대상 면적에 대한 격자간격과 시료채취점을 보이고 있다. 예를 들어 평가대상 부지면적이 500 m² 이하인 경우 격자간격은 10 m로 하여 5개 이상의 시료채취 지점을 선정하도록 제시하고 있다.

부지오염도 평가를 위한 시료채취계획 수립은 통계기반 시료채취(probability sampling, statistical sampling)를 사용한다. Fig. 1은 통계기반 시료채취 계획에 대한 개념을 개략적으로 설명하고 있다(Gilbert, 1987). Fig. 1(a)는 random sampling을 보이고 있는데 평가대상 모집단에서 시료를 무작위로 채취하는 것이다. Fig. 1(b)는 stratified random sampling을 보이고 있는데 우선적으로 지층(strata)을 확인한 후 그 지층 내에서 무작위로 시료채취를 하는 것이다. Fig. 1(c)는 two-stage sampling을 보이고 있다. 이는 1차적으로 집중 모니터링할 지역(first stage unit)을 선정하고 unit내에서 random sampling하는 것이다. Fig. 1(d)는 cluster sampling을 보이고 있다. Fig. 1(c)에서 보인 two stage sampling과 다른 점은 cluster의 선정도 무작위인 점이다. Fig. 1(e), Fig. 1(f)는 systematic grid sampling을 보이고 있다. Fig. 1(e)는 격자 내에서

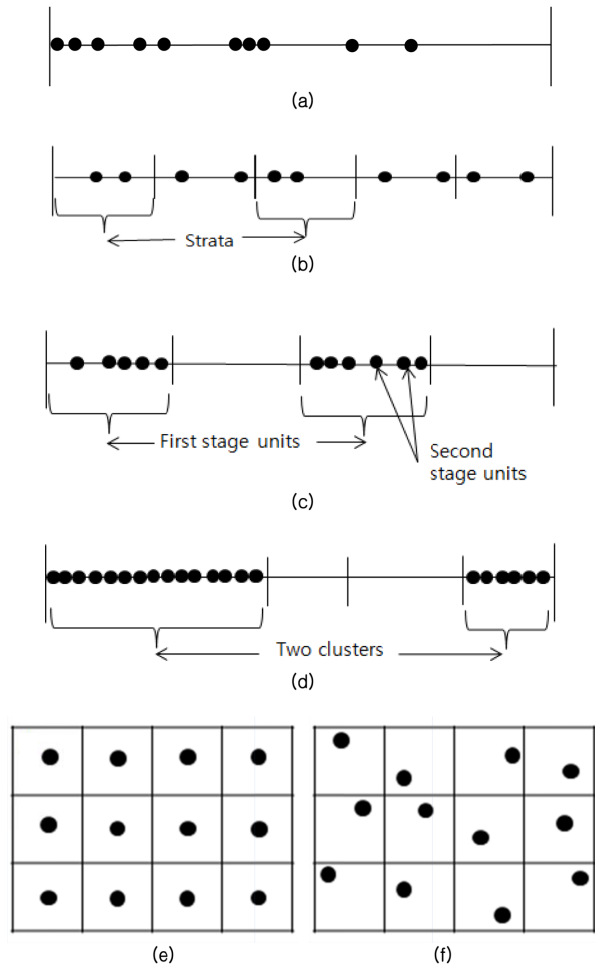


Fig. 1. Graphical Representation of Sampling Planning: (a) Simple random sampling; (b) Stratified random sampling; (c) Two-stage sampling; (d) Cluster sampling; (e) Systematic grid sampling; (f) Random sampling with blocks (after Zirschky and Gilbert, 1984).

규칙적으로 시료를 채취하는 것이고 Fig. 1(f)는 격자 내에서 무작위로 시료를 채취하는 것이다. 토양환경보전법 시행규칙의 토양시료채취방법에서 제시하고 있는 방법은 Fig. 1(e)이지만 실제 주유소 시료채취 현장에서는 부지내 지장물로 인해 격자단위 시료채취가 어려울 경우가 많다.

부지평가의 목적은 대상부지의 오염형태와 농도를 평가하는 것이지만, 핫스팟(hot spot, 최고오염지역)의 크기와 형태 위치 및 평균오염도를 결정하는 것도 중요하다. 핫스팟을 찾는 것은 오염도를 평가하는 목적이 아니라 중점적으로 제거할 지역을 찾는 것이다. 일반적으로 핫스팟의 크기와 위치를 결정하고 평균오염도를 낮추기 위하여 이에 따라 원위치정화 또는 반출 등 공법을 결정하여 정화하므로 핫스팟의 검출은 부지평가에 있어 매우 중요하다. 부지오염도 평가를 위한 시료채취와 관련된 가장 큰 오류

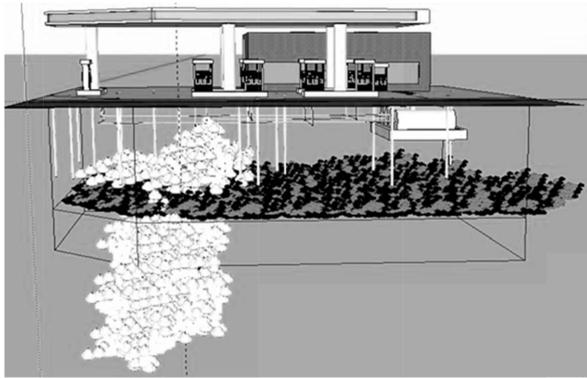


Fig. 2. Outlook of the assessed site with presumed underground structure.

는 핫스팟을 검출하지 못하는 것, 이에 따른 부지오염물질 총오염량과 평균오염도를 정확하게 측정하지 못하는 것이다.

주유소와 같은 협소한 부지의 오염도를 평가할 경우 시료채취 절차에서 발생하는 불확실성에 대한 대책이 제시되지 않아서 부지오염도 평가시 상대적 오차가 발생한다. 따라서 본 연구는 실제 부지의 오염도 평가를 예시하여 현장 오염도 평가와 관련된 불확실성을 정량하고 그 불확실성을 저감하는 방법에 대하여 기술하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. 연구부지

본 연구에서 오염도를 평가한 부지는 도심소재 주유소이다. 다음 Fig. 2는 평가대상 부지의 조망도를 보이고 있다. 부지면적은 528.6 m²이고 정방형이며 경사도는 후면과 전면비교 3%이다. 전면과 좌측은 도로, 우측과 후측은 상가이고, 부지의 20%가량은 사무실 등 건축물이다. 주유기 5기 및 3000 L 용량 휘발유와 경유 탱크 각 2기를 구비하고 있다. Fig. 2는 오염도평가 부지의 지상구조물과 지하구조물 및 추정된 오염현황을 입체적으로 보이고 있다. 주유기와 연결파이프에서 누출된 유류는 부지경계 외부 또는 평가대상부지 하부로 확산될 수 있는 것으로 사전 추정하였다.

2.2. 조사계획 수립 및 실행

오염부지를 평가하기 위한 시료채취 계획은 다음과 같다. 부지면적이 500~1000 m²의 범위이므로 Table 1에 보인 토양환경보전법 시행규칙의 토양시료채취방법(KMOE, 1996, KMOE, 2009)을 준용, 격자간격을 14~17 m로 하여 최소채취공은 최소 6공이 필요하지만 정확한 오염도

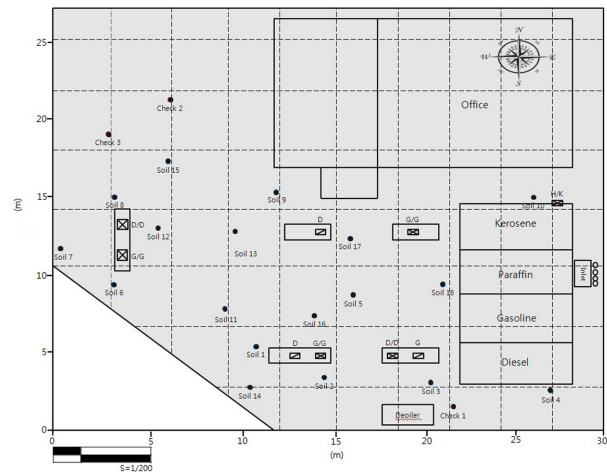


Fig. 3. Schematic layout of the assessed studied site and location of sampling points.

산정을 위하여 총 18개 채취공을 선정하였다. 다음 Fig. 3은 연구대상부지의 평면도 및 시료채취공 위치를 보이고 있다. 또한 토양환경보전법 시행규칙에 의하여 50만리터 이하 유류탱크 주변에서 3공을 채취하였다(soil4, soil10, soil18). 시료채취공의 밀도는 전체 면적에 비하여 1공/37.8 m²이지만, 건축물, 유류저장탱크 등 지장물을 제외한 부지에 대하여 1공/20 m² 이상이다. 격자의 크기는 약 4 m × 4 m로 결정되었으나 유류탱크 주변은 그 크기가 다르다. 또한 오염개연성이 높은 지점에서 이격된 지역에서 3개의 시료채취공을 추가선정하여 정확한 오염도를 산정하고자 하였다(Check 1, Check 2, Check 3).

본 연구에서 제시하는 측정자료는 과정검증 단계에서 측정된 자료이다. 오염도를 산정함에 있어 유류저장탱크 주변 soil4, soil10, soil18번 채취공은 탱크조실을 새로 설치하였으므로 분석자료를 제시하지 않았고, check1, check2, check3은 완료검증용 시료채취 지점이므로 제외하였다.

2.3. 시료채취 및 분석

오염토양은 시료시추장치(geo-probe)와 시료채취봉을 이용하여 채취하였다. 부지 오염도를 산정하기 위하여 총 11개 시료를 채취하였으며 이때 시료채취 깊이는 300 cm, 500 cm, 700 cm이었다. 7 m 이하는 기반암으로 시료채취가 불가능하였으며, 7 m까지 지하수는 없었다. TPH 용 시료는 250 ml 용량 광구병에 50 g 내외의 시료를 담았으며, BTEX 분석용 시료는 20 ml 용량 시료채취용에 약 5 g을 담아서 실험실로 운반한 후 칭량 및 분석하였다.

국내기준은 “3”지역 유류오염 부지의 경우 TPH(Total

Table 2. Analyses results of soils sampled in the assessed site

Number		BTEX (mg/kg)				TPH (mg/kg)
Number	Depth (m)	Benzene	Toluene	Ethylbenzene	Xylenes	
Regulation Criteria		3	60	340	45	2,000
1	3.0	0.1	Nd	2.0	6.1	2,357
	5.0	Nd ^{*1}	Nd	3.3	3.7	5,483
3	3.0	Nd	0.1	0.2	0.5	Nd
	5.0	Nd	Nd	0.4	0.5	855
5	7.0	Nd	0.2	0.1	0.4	Nd
	3.0	Nd	0.5	0.5	2.7	2,309
6	5.0	0.6	0.1	13.0	73.0	7,456
	9	Nd	Nd	0.1	0.3	1,578
11	3.0	Nd	Nd	1.3	5.3	463
	5.0	Nd	Nd	4.1	13.4	5,197
12	5.0	Nd	Nd	2.3	15.5	4,344
	3.0	Nd	1.4	3.4	19.1	4,594
13	5.0	0.2	Nd	5.8	23.6	3,739
	7.0	Nd	Nd	4.6	27.2	8,236
14	1.0	Nd	Nd	Nd	Nd	112
	3.0	Nd	Nd	Nd	0.1	Nd
15	5.0	Nd	Nd	1.8	5.9	2,094
	1.0	Nd	Nd	Nd	Nd	49
17	3.0	Nd	Nd	0.2	1.0	7,202
	5.0	Nd	Nd	2.8	6.2	3,025

*1 Nd: not detected

Petroleum Hydrocarbon)와 BTEX(Benzene, Ethylbenzene, Toluene, Xylene) 농도를 측정하여 오염도를 평가하도록 되어 있으며(KMOE, 1996), TPH는 2000 mg/kg, BTEX에서 Benzene, Ethylbenzene, Toluene, Xylene은 각각 3 mg/kg, 60 mg/kg, 340 mg/kg, 45 mg/kg 초과시 오염으로 간주한다. 시료채취는 다음과 같은 절차에 따라 수행하였다.

1. 시료채취봉의 시료를 꺼내어 오염개연성이 높은 지점의 상하 15 cm 총 30 cm를 시료로 삼으며 오염개연성에 대한 판단이 명확하지 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.

BTEX는 토양오염 공정시험기준(KMOE, 2009)

ES07601.2 퍼지-트랩 기체크로마토그래피 법을 이용하여 Shimazu GC-2010을 이용하여 분석하였으며, TPH는 ES07552.1의 기체크로마토그래피+FID 법에 따라서 Shimazu GC-2010을 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 토론

3.1. 오염도 분석결과

Table 2는 대상부지에서 채취한 토양 분석결과이다. 시료의 분석결과가 0.5 mg/kg 이하인 경우 nd(not detected)로 처리하여 나타내었다. BTEX 분석결과 Benzene 농도는 0.10.6 mg/kg, toluene의 농도는 0.11.4 mg/kg, Ethylbenzene의 농도는 0.113.0 mg/kg, Xylene의 농도는 0.1-73.0 mg/kg의 농도로 분석되었다. TPH 분석결과는 497,456 mg/kg 농도범위를 보였다. 연구부지는 TPH뿐만 아니라 BTEX의 한 종류인 Xylene으로 기준농도 초과 오염시료(6번 5 m)가 있으며 전체 20개 시료 중 9개 시료가 기준 값을 초과하고 있다.

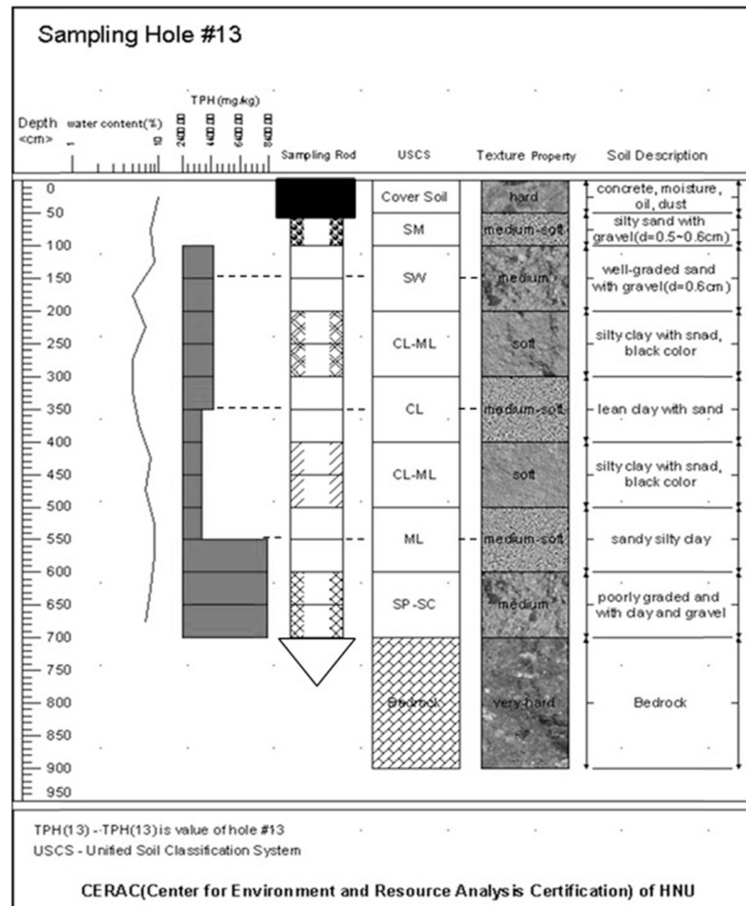


Fig. 4. Physicochemical description & the soil sampled at sampling hole #13.

3.2. 시료채취 지역의 심도별 오염도

Fig. 4는 13번째 시료채취공의 지질학적 단면도를 보이고 있다. 채취심도는 7m까지이고 함수비는 7~10%의 값을 보이고 있다. 좌측에서 세 번째 항목의 경우 시료채취봉을 보이고 있는데, 시료채취봉의 길이는 1m 간격으로 나뉘어져 있다. 7m 이하는 기반암으로 가장 아래 시료채취봉 심도는 깊이는 6m에서 7m까지이지만 이 값은 5.5~7.5m 까지 2.0m를 대표하는 값으로 나타내었다. 두번째 시료는 실제 시료채취 깊이는 45m이고 3.5m에서 5.5m까지의 시료를 대표하는 것으로 사용하였다. 가장 위의 시료채취 깊이는 23m이고 이는 1.53.5m를 대표하도록 하였다. 지표면 기준 01m는 콘크리트 포장 등으로 시료채취지점에서 제외하였다. 시료채취 위치가 아닌 곳의 토성과 분류는 시료채취 지점의 가장 윗부분을 기준으로 판정하였다.

3.3. 오염도 정량화

Table 2에 보인 자료를 이용하여 오염도를 측정하는 경우, 오염도를 추정하는 방법은 다음과 같다. Fig. 5는

Table 2의 값을 등농도곡선으로 도시하여 나타낸 것이다. 탱크조실 굴착부분을 제외하고 시료채취공 별 오염도를 추정하였다. Fig. 5. (a), (b), (c)는 각각 1.5~3.5m, 3.5~5.5m, 5.5~7.5m의 깊이 별 오염도를 나타낸 것이다. 3.5~7.5m 구간 내 오염도는 평가 대상 부지 외로 확산되고 있는 것으로 추정된다. 따라서 이에 대응하는 정화 설계가 필요하다.

다음 Table 3은 채취심도별 오염면적, 오염체적, 오염토 중량, 오염물질의 중량, 연구 부지 밖 채취심도별 오염면적을 정리한 것이다. 오염토량은 다음과 같이 계산될 수 있다:

1. 오염 면적(1.5~3.5m): 75.16 m², 오염토 부피 : 150.32 m³
2. 오염 면적(3.5~5.5m): 241.57 m², 오염토 부피 : 483.14 m³
3. 오염 면적(5.5~7.5m): 192.83 m², 오염토 부피 : 385.65 m³

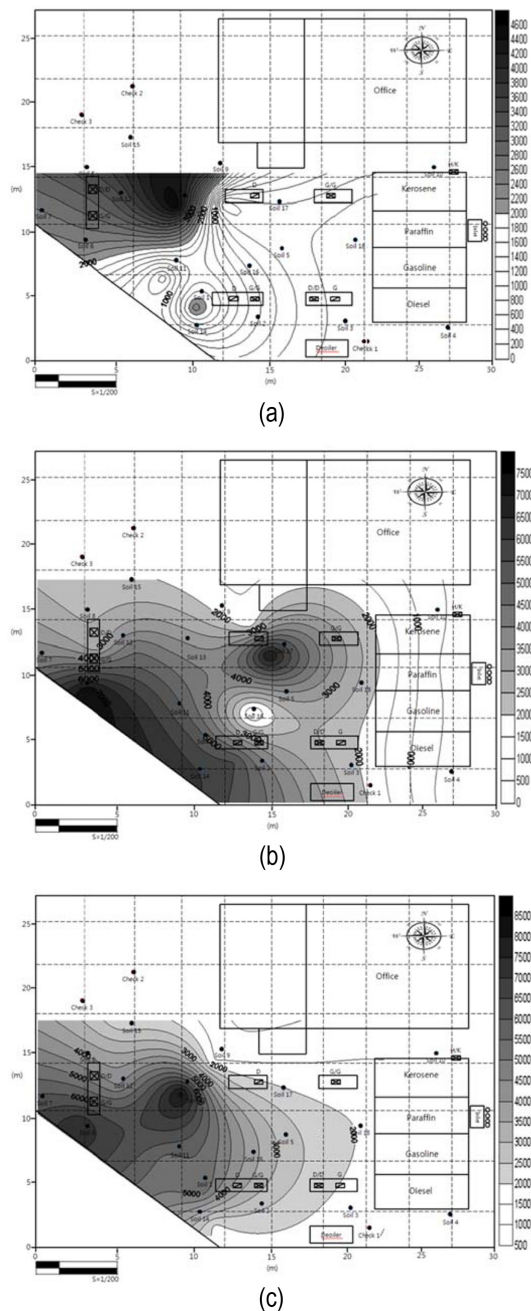
깊이별 오염물질의 양은 다음 식으로 계산할 수 있다:

$$TPH_v = TPH_m / TPH_d \quad (1)$$

TPH_v = 토양 내 TPH 체적(L), TPH_m = 토양 내 TPH

Table 3. Contamination estimation by depth

Item	Depth		
	1.5 m ~ 3.5 m	3.5 m ~ 5.5 m	5.5 m ~ 7.5 m
Contaminated Area (m ²)	75.16	241.57	192.83
Contaminated Volume (m ³)	150.32	483.14	385.65
Contaminated Soil Weight (ton)	300.64	966.28	771.3
Contaminant Weight (kg)	24.09	54.03	103.83
Estimated area of contamination (m ²)	324.74	756.11	439.65

**Fig. 5.** Estimated contaminated area of assessed site by depth. (a) 1.5~3.5 m, (b) 3.5~5.5 m, (c) 5.5~7.5 m.

질량(kg), $TPH_d = TPH$ 밀도(kg/L). 토양 내 오염물질은 단위중량 1.8 t/m³를 사용하였다. 여기서 $TPH_m =$ 토양의 체적(m³) × 평균 TPH농도(mg/kg) 이다.

이와 같은 오염도 평가에 있어 주의할 사항은 다음과 같다:

- 1) Fig. 2에서 보인 바와 같이 기반암 바로 위의 오염도가 상당히 높게 보이고 있는데 이는 기반암 상부를 따라 오염이 부지경계 밖으로 확산될 수 있다.
- 2) 주유기와 연결관의 위치를 정확하게 알지 못하므로 실제 오염 개연성이 가장 높은 곳에서 시료채취를 하지 못하였다.

Soil13번 오염도가 가장 높으므로 기반암 위를 따라 Soil16번 시료채취공으로 오염이 흐르고 도로쪽으로 오염이 되어 있을 가능성이 있다. 또한 부지 밖 추정 오염면적이 조사한 오염면적 보다 크다는 것을 알 수 있다. 그러나 이 시료채취에서 Soil16번 7m 심도 시료가 없고 또한 Soil2번 시료도 없는 상태이므로 이에 대한 확인이 어렵다. 만약 이와 같은 오염도를 이용하여 정화공정을 설계한다면 Fig. 4에 보인 오염토양을 모두 반출하거나 Soil13번 시료채취공을 중심으로 한 원위치 정화공법으로 설계할 것이다. 그러나 이러한 설계는 부지 밖 오염도를 제외한 일부분만을 제거할 수 있기 때문에 실효성이 의문시 된다. 가장 효과적인 처리방법은 오염도가 가장 높은 곳은 반출하고 그 외의 오염토는 원위치 공법으로 시공하는 것이다. 또한 부지 밖 오염도를 추정하여 동시에 정화공정을 진행해야 한다.

3.4. 분석오차 정량화

대부분 주유소 부지의 경우, 오염도가 발견되는 곳은 주유기 부근 표토로 주유시 부주의로 누출된 유류에 의한 오염이다. 반면 연결파이프나 유류저장조 하부 심토에서는 오염추정을 할 수 없기 때문에 오염을 발견하는 것은 어려운 일이다. 즉, 부지평가와 관련되어 가장 큰 오류는

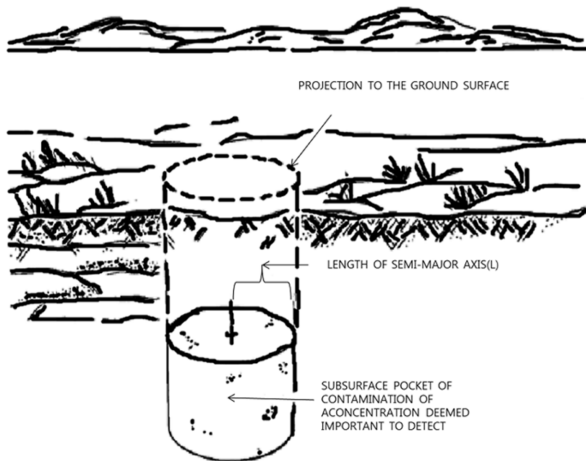


Fig. 6. Hypothetical subsurface pocket of contamination (after Zirschky and Gilbert, 1984).

오염 개연성 가장 높은 부분을 검출하지 못하는 것이다. 시료채취계획 수립과 부지오염도 평가에 있어 다음과 같은 고려가 중요하다:

- 1) 미리 정한 확신수준으로 찾으려면 시료채취 격자 크기를 얼마로 하면 되는가?
- 2) 격자 간격이 정해졌다면, 일정한 크기의 핫스팟을 찾을 확률은 얼마인가?
- 3) 격자를 이용하여 채취한 시료채취에서 핫스팟이 검출되었다면 다른 핫스팟이 있을 확률은 얼마인가?

Zirschky and Gilbert(1984)는 이를 확인하기 위한 절차를 제안하였다. 이에 대한 가정은 다음과 같다:

- 1) 핫스팟의 모양은 원형이다.
- 2) 시료채취는 사각형 격자망을 이용하여 실시한다.
- 3) 표본 지점 보다 격자 지점간 거리는 훨씬 크다.
- 4) 핫스팟을 구성하는 항목과 농도는 배경농도와 확실하게 구별된다.
- 5) 측정분석과 관련된 오류는 없다.

Fig. 6은 지중에 원형단면 핫스팟이 존재하고 이를 지표면에 투영하고 있다. 격자크기가 지름보다 크다면 핫스팟을 검출하지 못하는 확률이 높아지게 된다. Fig. 7은 Zirschky and Gilbert(1984)가 제안한 확률표를 보이고 있다. 핫스팟의 반지름 L 과 정사각형 격자 한변의 길이 G , 핫스팟 단면의 장변과 단변의 비를 S , 핫스팟을 검출하지 못하는 위험도를 β 로 하는 경우에 대한 관계도이다. Fig. 7은 다음과 같이 사용할 수 있다.

1. 격자 크기를 결정한다.

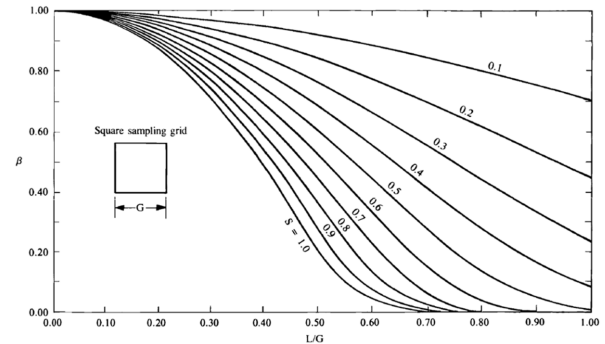


Fig. 7. Curves relating L/G (L : length of semi-major axis, G : grid spacing) to consumer's risk, β , for different target shapes when sampling is on a rectangular grid pattern (after Zirschky and Gilbert, 1984).

2. 핫스팟의 반지름 L 을 구한다
3. 핫스팟 모양을 결정한다.
4. 불검출 위험도를 결정한다.

만약 가상의 부지에 대하여 격자간격을 200 cm인 25개의 정사각형 격자로 시료를 채취하는 경우를 가정할 때 90% 확신수준으로 검출할 수 있는 원형 핫스팟의 크기를 계산하면 다음과 같다. Fig. 7에서 $\beta = 0.1$, $S = 1$, $L/G = 0.56$ 이므로 $L = 200 \text{ cm} \times 0.56 = 112 \text{ cm}$ 이다. 따라서 112 cm 반경을 가지고 있는 원형 핫스팟은 200 cm 간격 격자로 시료채취를 하면 90% 확신 수준으로 검출할 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 7을 확신수준에 따른 격자 간격과 핫스팟의 크기간의 관계를 도시한 것이다. Table 1에 보인 바와 같이 우리나라의 토양시료채취 지침은 평가대상 부지면적이 500-50000 m^2 인 경우 10~38 m로 격자간격을 정하도록 규정되어 있다. Fig. 8이 의미하는 것은 격자 간격이 커질수록 검출할 수 없는 핫스팟이 커진다는 것이다. 예를 들어 격자간격이 40 m 인 경우 핫스팟의 반지름이 30 m 이상되어야 확실하게 검출할 수 있다.

Fig. 8에서 격자간격의 크기가 10 m라면 반지름 4 m인 hot spot을 찾을 수 있는 확률이 50%에 불과한 것을 알 수 있다. 따라서 지장물이 있는 상태에서 hot spot을 검출하는 것은 매우 어렵다는 것을 알 수 있으며 한 두 지점의 모니터링으로 오염도 검출을 평가하는 것은 거의 불가능하다.

오염도 추정의 목적은 그 지역의 최대값, 오염체적, 평균치, 총오염도 등 4개 인자를 추정하는 것에 목적을 두고 실행해야 할 것이다. 본 연구에서 제시한 바와 같이 격자 간격이 커질수록 핫스팟의 검출이 어려워므로 토양의 불균질성(heterogeneity)을 감안하면 정확한 부지평가는 매우 어렵다. 부지면적에 따라 격자간격을 달리하지 않고

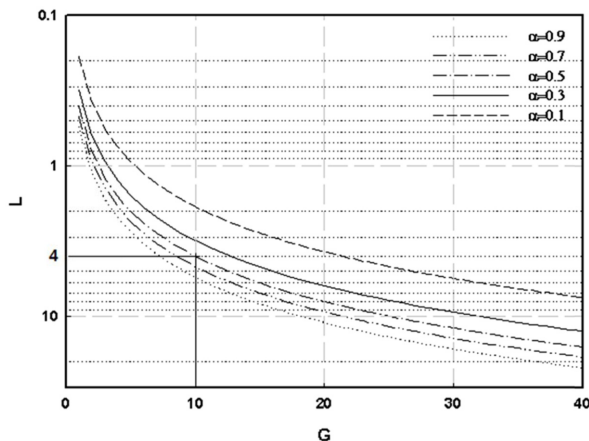


Fig. 8. Curves relating grid distance, G , and the radius of circular hot spot, L , by confidence level, α .

일정한 간격을 이용하는 것이 필요하며 특히 지장물이 존재하며 일정한 격자 단위 시료채취가 불가능한 경우 1회 조사보다 여러 번에 걸쳐 시료채취를 하고 그 경향을 관찰하는 것이 필요하다. 특히 평가대상 부지 외로 확산된 오염물질 또는 기반암 확산 오염물질을 검출하지 못하므로 이에 대한 고려가 필요하다.

4. 결 론

부지오염도 평가에 있어 시료채취와 관련된 불확실성이 매우 크기 때문에 정밀조사 또는 정화검증 신뢰도에 영향을 미친다. 특히 도시지역 주유소와 관련된 부지평가는 주유기, 파이프, 저장탱크와 같은 지장물로 인하여 격자단위 시료채취가 불가능하고 이로 인한 불확실성 증가를 피할 수 없다.

핫스팟(hot spot)을 검출하기 위한 격자를 계획할 때 불확실성 증가에 미치는 인자는 격자간격, 핫스팟의 크기 및 형태이다. 현행 토양시료채취 지침에는 부지오염도 평가면적에 따라 격자간격이 증가하는 것으로 제시되어 있으나, 이는 핫스팟이 검출되지 못하는 확률을 높이게 된다. 따라서 오염부지 평가에 있어 핫스팟의 크기, 형태 등을 추정하고 그에 따른 시료채취 계획의 수립이 매우 중요하다.

오염도 추정의 목적은 그 지역의 최대값, 오염체적, 평균치, 총오염도 등 4개 인자를 추정하는 것에 목적을 두

고 실행해야 할 것이다. 부지면적에 따라 격자간격을 달리하지 않고 일정한 간격을 이용하는 것이 필요하며 특히 지장물이 존재하며 일정한 격자 단위 시료채취가 불가능한 경우 여러 번에 걸쳐 시료채취를 하고 그 경향을 관찰하는 것이 필요하다. 특히 평가대상 부지 외로 확산된 오염물질 또는 기반암 확산 오염물질을 검출하지 못하므로 이에 대한 고려가 필요하다.

사 사

본 연구는 2012학년도 한남대학교 교비학술연구조성비 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사의 뜻을 포함합니다.

참 고 문 헌

- Gilbert, R.O., 1987, Statistical Method for Environment Pollution Monitoring, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 320 pp.
- Gy, P., 2004a, Sampling of discrete materials- a new introduction to the theory of sampling I. Qualitative approach, *Chemometr. Intell. Lab. Syst.*, **74**(2004), 7-24.
- Gy, P., 2004b, Sampling of discrete materials II. Quantitative approach- sampling of zero-dimensional objects, *Chemometr. Intell. Lab. Syst.*, **74**(2004), 25-38.
- Gy, P., 2004c, Sampling of discrete materials III. Quantitative approach- sampling of one-dimensional objects, *Chemometr. Intell. Lab. Syst.*, **74**(2004), 39-47.
- Kim, G.H., 2013, Quantification of uncertainty associated with soil sampling and its reduction approaches, *J. Soil Groundw. Environ.*, **18**(1), 94-101.
- KMOE, 1996, Soil Environment Conservation Law.
- KMOE, 2009, Sampling preparation and handling in soil contamination regulation (ES01730), National Institute of Environmental Research.
- KMOE, 2010, Site Assessment Protocol, Korean Ministry of Environment.
- KSME, 2012, Industry Economics Census 2011, Korea Survey Management Bureau.
- Zirsky, J. and Gilbert, R.O., 1984, Detecting hot spots at hazardous-waste sites, *Chem. Eng.*, 97-100.