

점오염원 형태의 유류누출 사건에 의한 실트질 토양층에서 BTEX와 TPH 성분의 오염도 연구

강동환¹ · 정상용¹ · 고동호^{2*}

¹부경대학교 환경지질학과

²한국농촌공사 환경지질팀

The Contamination Characteristics of BTEX and TPH Components in Silty Soils with the Oil Leakage Event from Point Source

Dong Hwan Kang¹, Sang Yong Chung¹, and Dong Ho Go^{2*}

¹Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University

²Environmental Geology Team, Korea Rural Community & Agriculture Corporation

본 논문에서는 점오염원 형태의 유류누출이 발생되었던 실트질 토양층에서 BTEX와 TPH 성분의 오염특성이 연구되었다. TPH 성분의 토양오염기준별 초과율은 BTEX 성분에 비해 1.5~1.7 배 정도 높았다. BTEX와 TPH 성분의 채취지점별 평균과 최대값은 B-zone > A-zone > C-zone의 순이며, 두 성분 모두 지표면하 1~2 m 구간에서 오염농도가 가장 높게 나타났다. 오염원에서 수리경사 하부 방향으로 120 m와 80 m 이내인 지역에서는 BTEX와 TPH 농도가 이격거리에 따라 증가하였으며, 120 m 이상 이격된 지역에서는 토양오염기준 이하인 것으로 나타났다. BTEX와 TPH 성분에 대한 지시크리깅의 제한값으로는 토양오염 확인기준, 우려기준 및 대책기준 값이 적용되었다. 지시변환된 자료의 베리오그램 분석에 의하면, BTEX와 TPH 성분 모두 선형모델이 가장 적합한 것으로 나타났다. 선형모델을 적용한 BTEX와 TPH 성분의 확률도에서 토양오염 확인기준과 우려기준의 오염 범위는 유사하게 나타났으나, 대책기준의 오염 범위는 매우 축소되었다. 토양오염 확인기준, 우려기준 및 대책기준에 의해 작성된 확률도에서 BTEX와 TPH 성분의 최대 오염 확률은 BTEX 성분이 26%, 26% 및 13%, TPH 성분은 44%, 38% 및 26%인 것으로 추정되었다.

주요어 : 점오염원, BTEX, TPH, 토양오염특성, 지시크리깅, 오염 범위, 오염 확률

The contamination characteristics of BTEX and TPH components in silty soils with the oil leakage event from point source were studied. The over ratios of three soil pollution standard for TPH component were 1.5~1.7 times higher than that of BTEX component. The mean and maximum values of BTEX and TPH components with sample points were B-zone > A-zone > C-zone, and the highest concentrations were measured at 1~2 m depth below surface. BTEX and TPH components were increased with linear distance in zone within 120 m and 80 m from point source. For the zone more than 120 m, BTEX and TPH concentrations were under soil pollution standard. The cutoff values of indicator kriging using BTEX and TPH components were defined as confirmative limit, warning limit and counterplan limit. The variograms of indicator-transformed data were selected linear model. The contamination ranges of BTEX and TPH components using confirmative limit and warning limit were estimated similar, but the contamination range of those using counterplan limit was much reduced. The maximum contamination probabilities were estimated by probability maps using confirmative limit, warning limit and counterplan limit. The maximum contamination probabilities with three soil pollution standard were estimated 26%, 26% and 13% for BTEX component, and 44%, 38% and 26% for TPH component.

Key words: point source, BTEX, TPH, soil contamination characteristic, indicator kriging, contamination range, contamination probability

*Corresponding author: 2002geo@ekr.or.kr

서 론

토양은 인간에게는 삶의 터전이며, 다른 모든 생물에 게는 물, 공기와 더불어 가장 중요한 생존 기반이다. 또한 토양의 자정능력으로 인해 각종 오염물질이 분해되거나 완화되어 진다. 우리나라에서는 급속한 산업화와 도시화로 인해 토양의 자정능력이 상실되거나 토양 자체가 더 이상 회복될 수 없을 정도로 오염되고 있다. 토양오염은 대부분 유류와 중금속에 의해 발생하고 있으며, 유류에 의한 토양오염은 대부분 주유소, 군부대 및 송유관으로부터의 누출에 의한 것이다.

따라서 유류오염의 예방대책과 오염토양에 대한 복원 사업이 필요한 실정이며, 국내에서 수행된 유류오염 토양과 지하수의 현장복원공법 적용 사례로는 계면활성제 원위치 토양 세정법(이민희 외, 2002), 토양증기추출법 및 바이오벤팅(이진용 외, 2002), DSB(deep-site biopile) system(한승호 외, 2005) 등이 있다. 이러한 유류오염토양 복원사업을 효과적으로 수행하기 위해서는 오염토양 부지의 수리지질 조사와 대수성시험에 의한 지하수 유동, 오염 범위 및 확산가능성 등이 우선적으로 규명되어야 한다. 또한 토양오염특성 규명을 위해 현장 조사 및 시험과 실내실험 자료들에 대한 지구통계학적 분석이 요구된다. 이러한 분석을 통해 대수층 매질과 오염물질의 시·공간적인 분포를 파악할 수 있다.

지하수 수위/수질 자료가 정규분포(normal distribution)를 이루는 경우에는 모수적(parametric) 통계기법인 정규크리깅(ordinary kriging)에 의해 신뢰성 높은 분포도가 산출된다(심병완 외, 2000; 정상용 외, 1999, 2000(a), 2000(b)). 그러나, 모집단(population)이 정규분포를 이루지 못하거나 분포함수를 정의할 수 없는 자료들에 정규크리깅 기법을 적용하면, 이상치(outlier)에 의한 과대추정(overestimate) 혹은 과소추정(underestimate)과 같은 평활화 효과(smoothing effect)의 문제가 발생하게 된다(Marinoni, 2003). 이러한 이상치(outlier)에 의한 과대/과소 추정의 문제를 해결하기 위해, 모집단의 분포에 대한 가정 없이 통계기법 이론을 전개해 나가는 비모수적(nonparametric) 통계기법인 지시크리깅(indicator kriging)에 의한 확률도가 연구되었다. 지시크리깅의 이론과 수학적인 개발은 Carr and Mao(1993), Goovaerts(1994) 및 Posa and Marcotte(1992) 등에 의해 연구되었으며, 또한 Johnson *et al.*(1989)과 Sminchak *et al.*(1996)에 의해 토양지질로깅 자료에 지시크리깅을 적용하여 토양의 투수성 분포도가 작성되었다. 국내에서는

정규크리깅과 지시크리깅의 상호보완에 의한 지하수 수질의 오염도 연구(강동환 외, 2003; 김태형 외, 2004), 산업단지 내 토양층의 중금속 오염분포특성(유훈선, 2006; 유훈선 외, 2005) 및 유류오염부지 내에서 BTEX와 TPH 성분의 오염범위 추정(고동호, 2006; 고동호 외, 2005) 등에 지시크리깅 기법이 적용된 바 있다.

본 연구에서는 점오염원에 의한 토양층 내 BTEX와 TPH 성분의 오염특성이 등급분포도(classed post map), 일반통계분석 및 오염원에서 이격거리에 따른 농도변화 분석을 통해 규명되었으며, 또한 제한값으로 토양오염 확인기준(confirmative limit), 우려기준(warning limit) 및 대책기준(counterplan limit)을 적용한 지시크리깅의 확률도에서 BTEX와 TPH 성분의 오염 범위와 확률이 추정되었다.

오염부지 현황

경기도 시흥시에 매설된 송유관은 매설심도가 지표면 하 1.5 m, 연장 8.4 km, 직경 30.48 cm로서 2개의 관(경유관, 휘발유관)으로 분리되어 있다. 2001년도에 송유관에서 유류 누출이 최초 확인되어 유류 수송을 차단하였으며, 2003년도에는 유류오염가능성이 높은 160×200 m의 지역에서 토양오염 정밀조사가 수행되었다(농업기반공사, 2003).

지형 및 지질

연구지역의 지형은 북서쪽이 높고 남동쪽이 낮으며, 주택지, 도로, 농지, 상가 및 소규모의 공장 등이 있다. 지방도로(397번 국도)의 서쪽 경계를 따라 유류 누출이 발생한 송유관이 매설되어 있다.

연구지역의 지질은 대부분 선폼브리아기의 흑운모 편마암이며, 관입 화성암이 일부 지역에 존재하고 있다. 변성암을 관입한 화성암들은 주라기 대보화강암과 백악기 안산암 및 규장암의 암맥 등이며, 모든 암체는 제 4기 충적층에 의해 부정합으로 덮혀 있다. 연구지역에서는 흑운모 및 조립질 장석이 우세한 기반암의 풍화특성으로 인해, 풍화심도가 깊고 토양은 점토가 다량 함유된 실트질이 우세하였다. 또한, 토양시료채취 시 녹색의 안산암과 우백질의 규장암이 풍화대 내에 자갈형태로 포함되어 있었다(농업기반공사, 2003).

시료채취 및 토양단면도

토양층 내 BTEX 및 TPH 성분의 함량을 측정하기

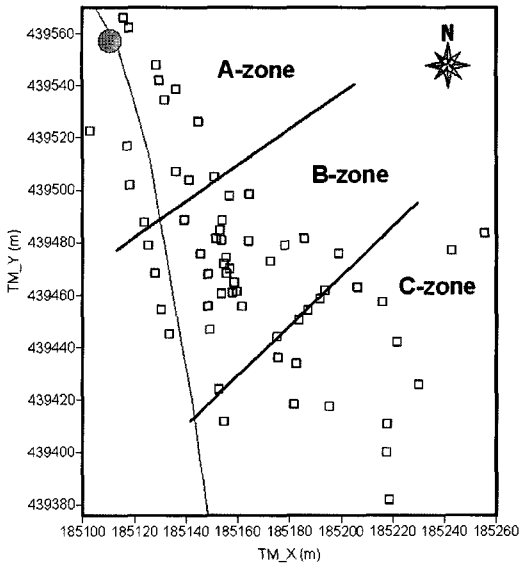


Fig. 1. The location map of soil sampling points.

위해 Geoprobe를 이용하여 74개 지점의 토양시료가 채취되었다. 시료채취는 오염가능 중심지역으로부터 오염이 나타나지 않는 외부지점으로 진행되었다.

Fig. 1에는 시료채취지점의 위치도가 작성되어 있다. 좌측 상단부에 ●로 표기된 것은 점오염원(point source)으로서 송유관에서 유류가 누출된 지점이며, 누출지점에서 남북방향으로 연결된 라인은 송유관이 매설된 위치이다. 그리고, 연구지역 내에서 채취지점을 오염원에서부터의 거리에 따라 A-zone, B-zone 및 C-zone으로 구분하였으며, A-zone은 오염원(contaminant source)에서 수리경사 하부방향으로 0~67m, B-zone은 67~124m, C-zone은 124~200m 정도에 해당하는 지역이다. B-zone은 유동상(free phase)이 집적되어 오염농도가 가장 높게 나타나는 지역이며, C-zone은 BTEX와 TPH 성분의 오염이 미미하거나 나타나지 않은 지역이다.

연구지역에서 시추조사에 의해 작성된 지층의 평균적인 단면도가 Fig. 2에 도시되어 있다. 연구지역의 지층은 매립층, 실트로 구성된 상부토양층, 1~10mm의 잔자갈(pebble)을 함유한 실트로 구성된 중간토양층, 점토질 실트로 구성된 하부토양층, 풍화대층 및 풍화암층으로 구성되어 있다. 각 층별 두께는 표토층 0.5m, 상부토양층 1.0m, 중간토양층 2.0m, 하부토양층 2.5m, 풍화대층 2.0m 이다. 연구지역 내 토양층은 매립층을 제외한 모든 지층에서 실트를 함유하고 있어, BTEX와 TPH 성분의 확산이 실트질 토양의 수리특성에 의해 크게 지

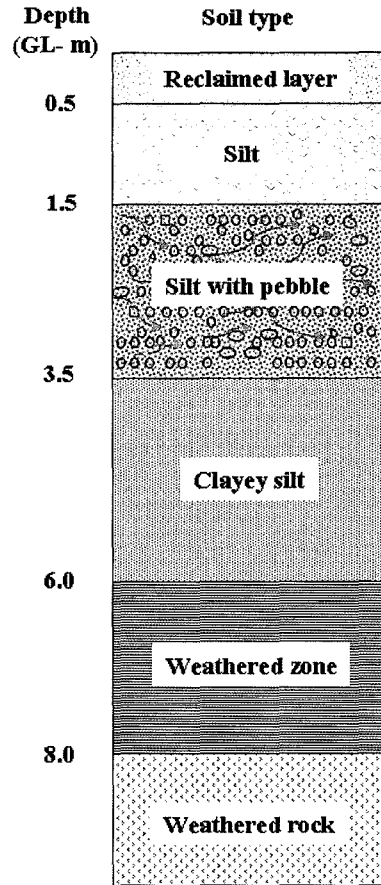


Fig. 2. Typical cross section at study area.

배될 것으로 판단된다.

지하수위와 주 흐름 방향

지하수위 변동특성과 주 흐름 방향을 파악하기 위해, 16개 지점에서 지표면하 5~6m 심도까지 관측공을 착정하여 지하수위를 측정하였다(Fig. 3). 관측공은 A-zone에 4개, B-zone에 8개, B-zone과 C-zone의 경계부에 3개 및 C-zone에 3개 공이 위치하고 있다. 지하수위는 지표면하 1~3m의 범위에 분포하고 있으며, 연구지역 내 지하수위의 변화는 강수에 의해 크게 영향을 받고 있었다(고동호, 2006). 조사기간 동안의 전체적인 지하수 흐름은 지형경사 방향인 남동쪽으로 형성되어 있었으며, 연구지역의 하류부에서는 동쪽방향으로 지하수 흐름이 발달되어 있었다. 지하수위 관측결과, 연구지역 내에서 지하수 유동에 의한 BTEX와 TPH 성분의 주 확산방향은 남동쪽일 것으로 판단되었다.

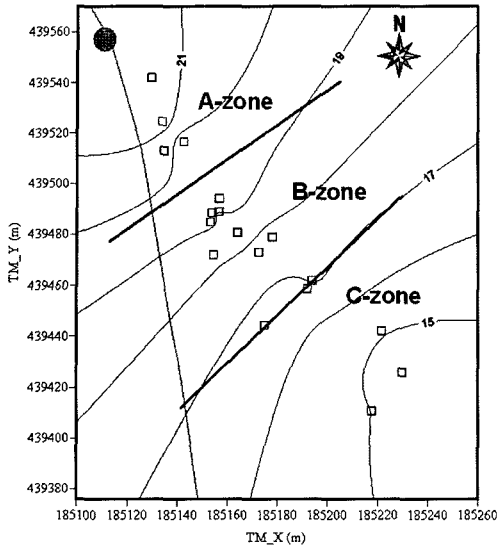


Fig. 3. Groundwater level contour map and the location of monitoring wells.

토양오염특성

연구지역에서 채취된 74개 지점의 토양시료는 실트층

상부, 실트층 및 실트층 하부로 구분하여 총 160점이 분석되었다. BTEX 및 TPH 성분의 농도를 토양오염 확인기준, 우려기준 및 대책기준으로 분류하여 등급분포도를 작성하고, 채취지점 및 심도별 일반통계분석 및 오염원에서 이격거리에 따른 농도변화가 분석되었다.

등급분포도

토양환경보전법에 의하면, BTEX 및 TPH 성분의 토양오염 확인기준은 32 mg/kg과 800 mg/kg이며, 우려기준은 80 mg/kg과 2,000 mg/kg이며, 대책기준은 200 mg/kg과 5,000 mg/kg이다. 74개 지점의 토양시료 내 BTEX 및 TPH 성분의 토양오염 확인기준, 우려기준 및 대책기준을 초과하는 BTEX 성분의 비율은 각각 12.16, 9.46 및 5.41%이며, TPH 성분의 초과비율은 각각 18.92, 16.22 및 8.11%로 나타났다(Table 1). 본 연구지역에서는 BTEX 성분보다 TPH 성분의 오염정도가 더욱 높은 것으로 나타났다.

토양오염 확인기준, 우려기준 및 대책기준에 의해 분류된 BTEX와 TPH 성분의 등급분포도가 Fig. 4에 작성되어 있다. 두 성분 모두 토양오염기준을 초과한 지점의 분포가 북서-남동 방향으로 나타나고 있으며, 이러한

Table 1. Analysis results of BTEX and TPH components in soil samples.

Component	Samplingpoints	Number of limit over		
		Confirmative limit	Warning limit	Counterplan limit
BTEX	74	9	7	4
TPH	74	14	12	6

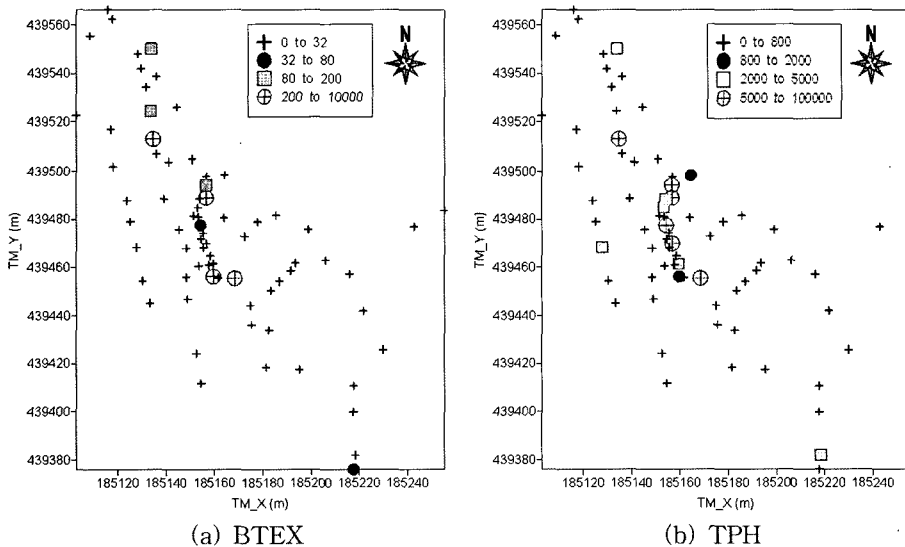


Fig. 4. Classed post maps of BTEX and TPH components in soils.

오염 분포는 연구지역 내 지하수의 주 흐름 방향과 일치한다(Fig. 3 참조). 연구지역 내에서 BTEX와 TPH 성분의 농도가 토양오염 확인기준 이상인 지점들은 대부분 오염원에서 120 m 이내에 존재하는 것으로 나타났다. 따라서, 오염원에서 지하수 주 흐름 방향으로 120 m 이상 이격된 지역에서의 오염물 확산은 미미한 것으로 판단된다.

일반통계분석

연구지역 내 토양시료의 채취지역별(A-zone, B-zone 및 C-zone) 최소(minimum), 최대(maximum), 평균(mean), 왜도(skewness) 및 첨도(kurtosis)에 대한 일반통계분석 결과가 Table 2에 정리되어 있다.

BTEX와 TPH 성분의 최대값은 B-zone > A-zone > C-zone의 순으로 나타났으며, 평균값도 동일한 순으로 나타났다. TPH 성분이 B-zone에서 가장 높은 것은 오염원이 차단된 상태에서 오염운(contaminant plume)이 지하수에 의해 이송(transport)되었기 때문이다. 오염운이 지하수에 의해 이송되는 과정에서 BTEX 성분의 농도감소가 TPH 성분에 비해 크게 나타났으며, 이는 BTEX 성분의 높은 휘발성에 의한 것이다.

연구지역 내 BTEX와 TPH 성분의 농도는 A-zone,

B-zone 및 C-zone 모두 양성왜도(positive skewness)로서 평균보다 낮은 값들이 많은 것으로 나타났다. 첨도는 A-zone과 B-zone이 C-zone에 비해 높게 나타났다.

연구지역 내 토양층의 채취심도별 BTEX와 TPH 성분의 일반통계분석 결과가 Table 3에 정리되어 있다. BTEX와 TPH 성분의 최대농도는 지표면하 1~2 m 구간에서 각각 404.08 mg/kg과 15,776 mg/kg 으로 나타났다. 연구지역 내 지표면하 지하수위가 1~3 m 정도에 형성되어 있으며, 따라서 BTEX와 TPH 성분의 농도가 불포화대와 포화대 구간의 경계부인 1~2 m 구간에서 높게 나타나게 된 것이다.

BTEX 성분의 평균농도는 지표면하 4~5 m 구간에서 34.90 mg/kg으로 가장 높았으며, 지표면하 1~2 m 구간에서도 18.01 mg/kg으로 높게 나타났다. TPH 성분은 지표면하 1~2 m 구간에서 883.94 mg/kg으로 가장 높고, 지표면하 4~5 m 구간에서도 645.33 mg/kg으로 높게 나타났다. 두 성분 모두 지표면하 4~5 m 구간에서 평균 농도가 높게 나타난 것은 지표면하 3.5~6.0 m 구간이 점토질 실트로서 투수성이 매우 낮아 BTEX와 TPH 성분이 집적되었기 때문이다. 또한, 지표면하 1~2 m 구간에서 평균농도가 높게 나타난 것은 BTEX와 TPH 성분이 지하수위면 부근에서 대부분 이송되었기 때문이다.

Table 2. Results of general statistical analysis according to sample location.

Samplelocation	Component	N	Min.	Max.	Mean	Skewness	Kurtosis
A-zone	BTEX	19	0.00	280.00	30.42	2.97	9.00
	TPH	19	0.00	5769.00	479.26	3.61	13.63
B-zone	BTEX	40	0.00	404.00	31.92	3.21	9.49
	TPH	40	0.00	15776.00	1522.89	2.76	7.74
C-zone	BTEX	15	0.00	69.41	5.36	3.83	14.78
	TPH	15	0.00	2157.00	158.73	3.84	14.79

Table 3. Results of general statistical analysis for BTEX and TPH components according to sample depth (mg/kg).

Component	Depth (m)	N	Min.	Max.	Mean	Skewness	Kurtosis
BTEX	0~1	21	0.00	12.95	0.64	4.57	20.92
	1~2	54	0.00	404.08	18.01	4.61	22.26
	2~3	42	0.00	381.79	10.06	6.47	41.87
	3~4	29	0.00	149.54	9.94	3.94	16.09
	4~5	9	0.00	280.46	34.90	2.99	8.94
	5~6	5	0.00	37.26	9.65	1.82	3.15
TPH	0~1	21	0.00	0.00	0.00	-	-
	1~2	54	0.00	15776.00	883.94	4.01	17.71
	2~3	42	0.00	10618.00	374.25	5.66	33.87
	3~4	29	0.00	2136.00	113.72	4.65	22.90
	4~5	9	0.00	5769.00	645.33	3.00	9.00
	5~6	5	0.00	774.00	154.80	2.24	5.00

BTEX와 TPH 성분은 모든 심도에서 양성왜도를 나타내었으며, 지표면하 1~4 m 구간이 4~5 m 구간에 비해 높은 것으로 나타났다. 침도는 지표면하 1~4 m 구간에서는 높게 나타났으나, 지표면하 4~5 m 구간에서는 상대적으로 낮게 나타났다.

이송거리에 따른 BTEX와 TPH 성분의 농도변화

BTEX와 TPH 성분의 농도가 토양오염 확인기준 이상인 채취지점들의 자료를 이용하여, 지하수 흐름방향으로 오염원에서 거리에 따른 농도변화가 분석되었다 (Fig. 5, 6). BTEX 성분은 오염원에서의 이격거리가 120 m 정도, TPH 성분은 80 m 정도 이내에서 이격거리가 멀수록 농도가 증가하는 분포를 나타내었다. 이러한 오염 분포는 오염원에서 오염물질의 누출이 차단된 후에도, 과거에 누출되었던 오염물질이 지하수의 주 흐

름 방향으로 이송되어 나타난 것이다. BTEX 성분의 오염원 중심부는 오염원에서 남동방향으로 110~120 m, TPH 성분은 70~80 m 정도에 이격된 지역에 형성되어 있는 것으로 판단된다. BTEX와 TPH 성분에 대한 오염원 중심부의 이송거리 차이는 밀도(density)에 의한 것이며, 또한 BTEX 성분이 지하수면을 따라 빠르게 이송되었기 때문이다.

오염 범위 및 확률 추정

지시크리깅 이론

지구통계학(geostatistics)에서의 기본적인 전제조건은 변수들의 공간적인 특성(spatial structure)이 베리오그램(variogram)에 의해 정의되어 진다는 것이다(Journel and Huijbregts, 1978). 2차 정상성(second-order stationarity)

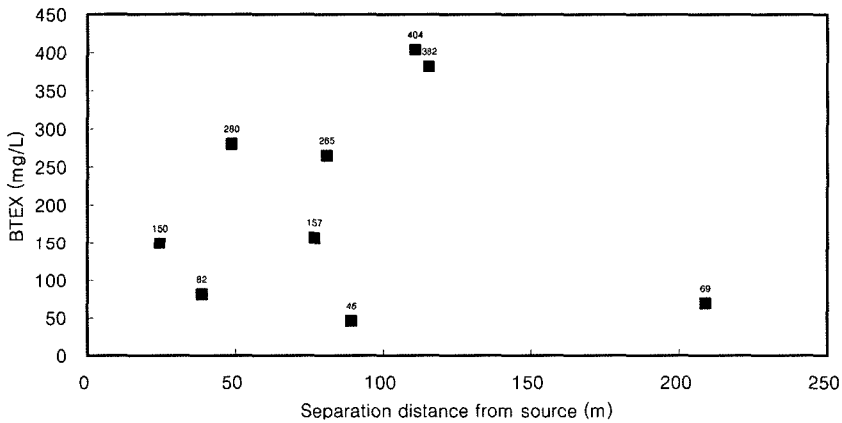


Fig. 5. The concentration plots of BTEX component with linear distance from point source.

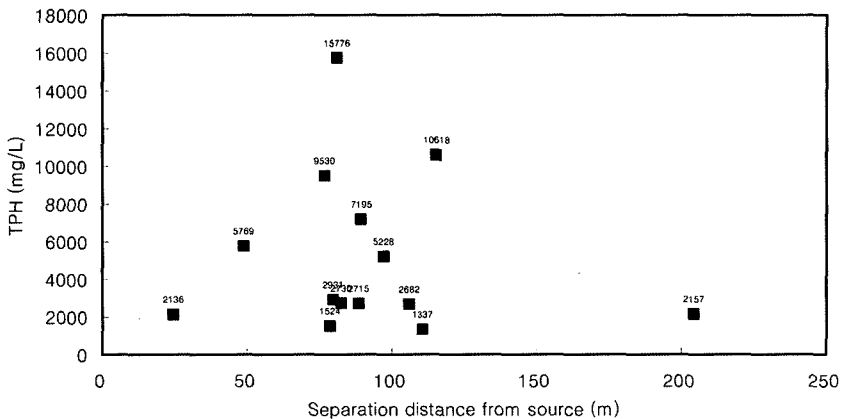


Fig. 6. The concentration plots of TPH component with linear distance from point source.

으로 가정하면, 베리오그램은 자료의 위치에는 무관하며 자료들 간의 이격거리(separation distance)와 방향(direction)의 함수이다. 실험적인 베리오그램($\gamma^*(h)$)은 확률변수 $z(x)$ 의 이산된 조사값들인 $z(x)$ 로부터 식 (1)과 같이 계산된다.

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i+h) - z(x_i)]^2 \quad (1)$$

여기서 $N(h)$ 는 동일거리 h 만큼 떨어진 자료쌍들의 개수이다. 지시크리깅(indicator kriging)은 특정한 제한값(cutoff value)보다 적거나 혹은 동일한 변수값들의 확률을 추정하기 위해 자료를 변환한다(Johnson *et al.*, 1989). 제한값이 z_c 인 2진 지시함수(binary indicator function)는 식 (2)와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} I(x; z_c) &= 1 & \text{if, } Z(x) \leq z_c \\ I(x; z_c) &= 0 & \text{if, } Z(x) > z_c \end{aligned} \quad (2)$$

지시변환된 확률함수(random function) $I(x; z_c)$ 의 평균과 분산은 식 (3) 및 (4)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} E[I(x; z_c)] &= 1P[z(x) \leq z_c] + 0P[z(x) > z_c] \\ &= P[z(x) \leq z_c] = m(z_c) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{Var}[I(x; z_c)] = m(z_c)[1 - m(z_c)] \quad (4)$$

지시확률함수의 실험적인 베리오그램은 식 (5)와 같이 정의된다.

$$\gamma^*(h; z_c) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [I(x_i+h; z_c) - I(x_i; z_c)]^2 \quad (5)$$

베리오그램에 이용되는 자료값들은 [0, 1] 사이의 값으로 변환되어지며, 이를 이용하여 베리오그램 모델이 선정된다. 2진 지시크리깅은 선정된 베리오그램 모델을 이용하여 제한값보다 크거나 동일한 값들에 대한 확률의 추정으로 계산된다(Johnson *et al.*, 1989).

베리오그램 분석

토양층 내 BTEX 및 TPH 성분 농도에 대한 토양오염기준별 지시변환(indicated transformation) 자료의 베리오그램 분석결과가 Table 4에 정리되어 있다. BTEX와 TPH 성분의 지시변환된 자료는 모두 선형모델(linear model)이 가장 적합한 것으로 나타났다. 선형모델에서 자료들 간의 유효상관거리(effective range)는 146 m 정도인 것으로 추정되었다. 자료들에 대한 베리오그램 모델의 적합도(good of fitness)를 의미하는 결정계수(R^2)는 0.34~0.58 정도로서 약간 낮았으나, 선형모델이 다른 모델들(구상형, 가우시안, 지수형 모델 등)에 비해서는 가장 높았다.

확률도 작성

선형모델을 적용하여 작성한 BTEX 및 TPH 성분의 토양오염기준별 확률도가 Fig. 7에 도시되어 있다. 토양오염 확인기준과 우려기준 적용 시의 오염 범위는 유사한 면적으로 나타났으며, 대책기준 적용 시에는 상대적으로 축소되었다.

연구지역 내 지하수 주 흐름 방향으로의 확산은 BTEX 성분이 TPH 성분에 비해 더욱 먼 거리까지 이송되었으며, 농도 저감(attenuation)도 크게 나타났다. 그러나, 횡 방향으로의 확산은 TPH 성분이 더 우세하게 발생되었다. 이는 휘발성 유기오염물(volatile organic compound)인 BTEX 성분은 LNAPL(light non-aqueous phase liquid), TPH 성분은 DNAPL(dense non-aqueous phase liquid)이기 때문에 밀도(density) 차이에 의해 지하수 주 흐름 방향과 횡 방향으로의 확산이 다르게 발생한 것이다. 지하수 주 흐름 방향으로의 이송은 BTEX 성분이 빠르고 오염물질의 농도저감도 크게 일어났다.

토양오염 확인기준을 적용한 BTEX 성분의 확률도에서는 A-zone 및 B-zone에 오염운이 형성되어 있으며, A-zone 및 B-zone의 경계부에서 오염 확률이 가장 높은 것으로 나타났다. 오염운은 지하수의 주 흐름 방향으로 110 m, 횡 방향으로 40 m 정도의 폭으로 형성되었

Table 4. Results of variogram analysis for indicator-transformed data according to standard of pollution limits.

Component	Limit	Model	Nugget (C_0)	Sill (C_0+C)	Effective range (m)	R^2	RSS
BTEX	confirmative	linear	0.025	0.025	146.026	0.43	2.49×10^{-4}
	warning	linear	0.020	0.020	146.026	0.48	1.58×10^{-4}
	counterplan	linear	0.012	0.012	146.026	0.58	1.57×10^{-4}
TPH	confirmative	linear	0.038	0.038	146.026	0.34	1.30×10^{-3}
	warning	linear	0.033	0.033	146.026	0.41	8.32×10^{-4}
	counterplan	linear	0.017	0.017	146.026	0.51	4.09×10^{-4}

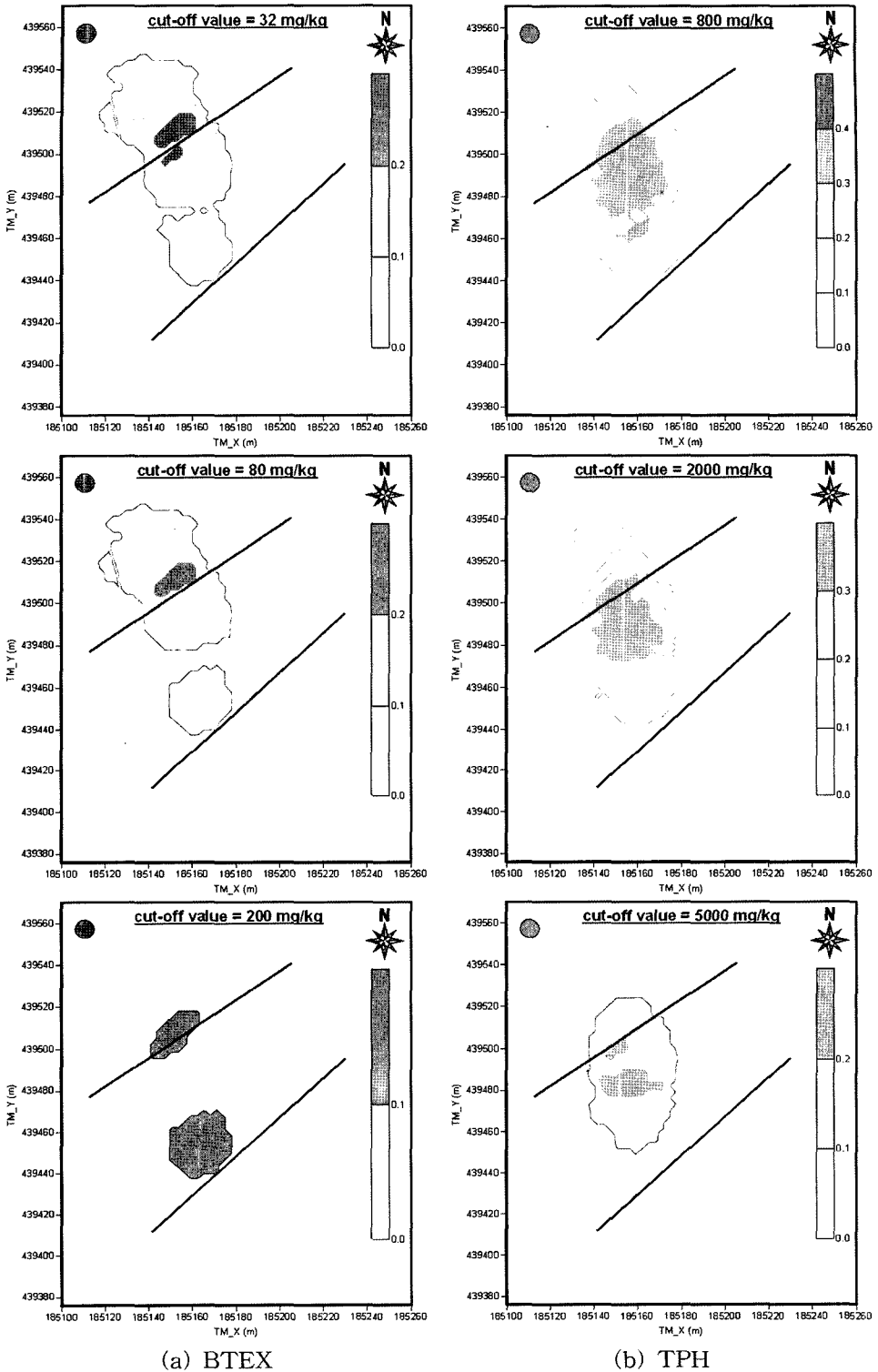


Fig. 7. Probability maps of BTEX and TPH components using indicator kriging.

다. 토양오염 우려기준을 적용한 경우의 확률도에서는 오염 범위가 확인기준 확률도에 비해 약간 축소되었으며, B-zone과 C-zone의 중간지역에서는 오염이 나타나지 않았다. 토양오염 대책기준을 적용한 경우의 확률도에서는 오염 범위가 매우 축소되었으며, A-zone과 B-zone의 경계부와 B-zone의 하부지점에서 오염 확률이 가장 높은 것으로 나타났다(Fig. 6(a)).

토양오염 확인기준을 적용한 TPH 성분의 확률도에서는 A-zone의 중~하부 구간과 B-zone 전체에 걸쳐 오염원이 형성되어 있는 것으로 나타났다. 오염원은 지하수의 주 흐름 방향으로 100 m, 횡 방향으로 50 m 정도의 폭으로 형성되었다. 제한값으로 토양오염 우려기준을 적용한 경우의 확률도에서는 오염 범위가 확인기준 확률도에 비해 지하수 주 흐름 방향으로는 약간 축소되었으나, 횡 방향으로는 동일하게 나타났다. 이는 주 흐름 방향에 비해 횡 방향에서 TPH 성분의 확산이 상대적으로 느리게 진행되기 때문이다. 제한값으로 토양오염 대책기준을 적용한 경우의 확률도에서는 지하수 주 흐름 방향에서의 오염 범위는 90 m 이하로 축소되었으며, 횡 방향에서는 40 m 정도인 것으로 나타났다. B-zone의 상~중부 지역에서의 오염 확률이 가장 높은 것으로 나타났다(Fig. 6(b)).

토양오염 확인기준, 우려기준 및 대책기준을 적용하여 작성된 확률도를 분석한 결과, 최대 오염 확률은 BTEX 성분이 26%, 26% 및 13%로, TPH 성분은 44%, 38% 및 26%로 추정되었다. 본 연구지역 내 토양층에서는 TPH 성분의 오염이 더욱 심각한 것으로 나타났다.

결론

본 연구에서는 점오염원에 의해 BTEX와 TPH 성분으로 오염된 실트질 토양층의 오염특성이 분석되었으며, 다음의 결과들이 도출되었다.

1. 연구지역 내 74개 지점에서 토양시료를 채취하여 BTEX 및 TPH 성분의 농도가 분석되었으며, BTEX와 TPH 성분의 토양오염 확인기준 초과율은 12.16%와 18.92%, 우려기준 초과율은 9.46%와 16.22%, 대책기준 초과율은 5.41%와 8.11%로 나타났다. 본 연구지역의 토양층에서는 BTEX 성분에 비해 TPH 성분의 토양오염기준 초과율이 1.5~1.7 배 정도 높게 나타났다.

2. 토양시료의 채취지역별 BTEX와 TPH 성분의 최대값과 평균값은 B-zone > A-zone > C-zone의 순으로 나

타났으며, B-zone에서 오염농도가 가장 높은 것은 오염원이 차단된 상태에서 오염원이 지하수에 의해 하류부로 이동되었기 때문이다. 토양층의 채취심도별 BTEX와 TPH 성분의 최대농도는 지표면하 1~2 m 구간에서 각각 404.08 mg/kg과 15,776 mg/kg 으로 가장 높게 나타났다. BTEX 성분의 평균농도는 지표면하 4~5 m 구간에서 34.90 mg/kg으로 가장 높았으며, TPH 성분은 지표면하 1~2 m 구간에서 883.94 mg/kg으로 가장 높았다. 지표면하 4~5 m 구간에서의 평균농도가 높은 것은 지표면하 3.5~6.0 m 구간이 점토질실트로서 투수성이 매우 낮아 BTEX와 TPH 성분이 집적되었기 때문이다.

3. 토양오염 확인기준 이상인 농도자료를 이용하여 오염원에서 수리경사 하부 방향으로 거리에 따른 농도변화를 분석한 결과, BTEX 성분은 오염원에서 120 m 정도, TPH 성분은 80 m 정도 이내에서 거리에 따른 농도가 증가하는 분포를 나타내었다. 이러한 오염 분포는 오염원에서 오염물질의 누출이 멈춘 후에도, 과거에 누출되었던 오염물질이 지하수의 주 흐름 방향으로 이동되었기 때문이다.

4. 토양오염 확인기준을 적용한 BTEX 성분의 확률도에서는 A-zone과 B-zone에 오염원이 형성되어 있는 것으로 나타났다. 우려기준을 적용한 확률도에서는 오염 범위가 확인기준 확률도에 비해 약간 축소되었으며, B-zone과 C-zone의 중간지역의 오염은 미미한 것으로 나타났다. 대책기준 적용 시의 확률도에서는 오염 범위가 매우 축소되었다.

5. 토양오염 확인기준을 적용한 TPH 성분의 확률도에서는 A-zone의 중~하부 구간과 B-zone 전체에 걸쳐 오염원이 형성되어 있는 것으로 나타났다. 제한값으로 토양오염 우려기준을 적용한 경우에는 오염 범위가 확인기준 확률도에 비해 지하수 주 흐름 방향으로는 약간 축소되었으나, 횡 방향으로는 동일하게 나타났다. 제한값으로 토양오염 대책기준을 적용한 경우의 오염 범위는 지하수 주 흐름 방향과 횡 방향 모두에서 축소되었다.

6. 토양오염 확인기준, 우려기준 및 대책기준에 의해 작성된 확률도에서 BTEX와 TPH 성분의 최대 오염 확률은 13~26% 및 26~44%의 범위로 추정되었다. 따라서 본 연구지역 내 토양층의 오염은 BTEX 성분에 비해 TPH 성분에 의한 오염이 더욱 심각한 것으로 나타났으며, 이는 BTEX 성분의 높은 휘발성과 TPH 성분의 고밀도에 의한 것이다.

참 고 문 헌

- 강동환, 정상용, 김병우, 김태형, 2003, Indicator 크리깅을 이용한 부산 지하수 수질의 오염도 연구, 한국지하수토양환경학회 2003년도 총회 및 추계학술발표회, pp.249-253.
- 고동호, 2006, 실트질 토양층에서의 BTEX 및 TPH 성분의 토양오염기준별 확률도를 이용한 오염범위추정, 석사학위논문, 부경대학교, 84p.
- 고동호, 정상용, 강동환, 김을영, 2006, 토양층 내 BTEX 및 TPH 성분의 토양오염기준별 오염 확률과 확률도, 한국지하수토양환경학회 2006년도 총회 및 추계학술발표회, pp.143-147.
- 김태형, 정상용, 강동환, 김민철, 서상기, 2004, 지하수 오염 분포도 작성에서 정규크리깅과 지시크리깅 기법의 상호 보완성 연구, 한국지하수토양환경학회 2004년도 총회 및 추계학술발표회, pp.477-481.
- 농업기반공사, 2003, 103 유류중대 지하수오염정화사업 보고서, 165p.
- 심병완, 정상용, 강동환, 김규범, 박희영, 2000, 영산강·섬진강 유역의 지하수 데이터베이스 자료에 대한 지구통계학적 분석, 지질공학회지, 10(2), pp.131-142.
- 이민희, 정상용, 최상일, 강동환, 김민철, 2002, 계면활성제 원위치 토양 세정법을 이용한 유류 오염 지역 토양·지하수 정화 실증 시험, 한국지하수토양환경학회지, 7(4), pp.77-86.
- 이진용, 이철효, 이강근, 2002, 유류오염 지역에서의 토양증기추출법 및 바이오벤팅의 적용성 평가연구, 지질학회지, 38(1), pp.101-114.
- 유훈선, 2006, 지구통계기법을 이용한 산업단지 토양층 내 중금속 오염특성 연구, 석사학위논문, 부경대학교, 98p.
- 유훈선, 정상용, 강동환, 2005, 크리깅을 이용한 울산미포산업단지의 토양층 내 중금속성분의 농도분포 및 오염가능성 연구, 2005년 대한지질학회 제 60차 정기총회 및 추계학술발표회, p.176.
- 정상용, 강동환, 박희영, 심병완, 2000(a), 부산지역 지하수 오염현황 분석을 위한 지구통계기법의 응용, 대한지질공학회지, 10(3), pp.247-261.
- 정상용, 심병완, 김규범, 강동환, 박희영, 2000(b), 지구통계기법을 이용한 영산강·섬진강 유역의 지하수 수질 특성 연구, 7(3), pp.125-132.
- 정상용, 유인걸, 윤명재, 권혜우, 허선희, 1999, 불균질·이방성 대수층의 지하수 유동분석에 지구통계기법의 응용, 지질공학회지, 9(2), pp.147-159.
- 한승호, 공성호, 강정우, 2005, 유류오염 토양/지하수 정화를 위해 개발된 DSB(Deep-Site Biopile) System 현장적용 특성, 한국지하수토양환경학회지, 10(2), pp.28-34.
- Carr, J. R., and Nai-hsien Mao, 1993, A General Form of Probability Kriging for Estimation of the Indicator and Uniform Transforms, Mathematical Geology, 25(4), pp.425-438.
- Goovaerts, P., 1994, Comparative Performance of Indicator Algorithms for Modeling Conditional Probability Distribution Functions, Mathematical Geology, 26(3), pp.389-411.
- Johnson, N. M., and S. J. Dreiss, 1989, Hydrostratigraphic Interpretation Using Indicator Geostatistics, Water Resources Research, 25(12), pp.2501-2510.
- Journel, A. G., and C. J. Huijbregts, 1978, Mining Geostatistics, Academic Press, 600p.
- Marinoni, O., 2003, Improving geological models using a combined ordinary-indicator kriging approach, Engineering Geology, 69, pp.37-45.
- Sminchak, J. R., David F. Dominic, and Robert W. Ritzi, Jr., 1996, Indicator Geostatistical Analysis of Sand Interconnections Within a Till, Groundwater, 34(6), pp.1125-1131.
- Posa, D., and D. Marcotte, 1992, Robustness of Kriging Weights to Non-Bias Conditions, Mathematical Geology, 24(7), pp.759-773.

2006년 11월 9일 원고접수, 2006년 12월 11일 게재승인

강동환

부경대학교 환경지질학과
608-737, 부산시 남구 대연3동 599-1
Tel: 051-620-6235
Fax: 051-628-6432
E-mail: dhkang@pknu.ac.kr

정상용

부경대학교 환경지질학과
608-737, 부산시 남구 대연3동 599-1
Tel: 051-620-6235
Fax: 051-628-6432
E-mail: chungsy@pknu.ac.kr

고동호

한국농촌공사 환경지질팀
437-703, 경기도 의왕시 포일동 487
Tel: 055-269-9367
Fax: 055-261-8612
E-mail: 2002geo@ekr.or.kr