

토양층 내 BTEX 및 TPH 성분의 토양오염기준별 오염 확률과 확률도

고동호¹ · 정상용² · 강동환^{1*} · 김을영¹

¹한국농촌공사 경남본부
²부경대학교 환경지질학과
2000geo@daum.net

요 약 문

본 연구에서는 BTEX 및 TPH로 오염된 토양층의 오염범위 추정을 위해 지시변환된 자료에 의한 확률도를 작성하였다. 지시변환 시 제한값은 토양오염 확인기준, 우려기준 및 대책기준이 적용되었다. 지시변환된 자료의 베리오그램 분석을 통해 선정된 가우시안모델을 적용하여 크리깅이 수행되었다. 지시크리깅에 의해 토양오염기준별로 작성된 확률도를 분석하여 BTEX 및 TPH 성분으로 오염된 토양층의 공간적인 오염확률이 추정되었으며, 확률에 따른 오염범위를 비교 분석하였다.

주요어 : 토양층, BTEX, TPH, 토양오염기준, 확률도, 오염 확률

1. 서론

지하수의 수위 및 수질성분값들로 구성된 모집단이 정규분포(normal distribution)를 이루는 경우에는 모수적(parametric) 통계기법인 정규크리깅(ordinary kriging)에 의해 좋은 추정치를 구할 수 있다(심병완 외, 2000; 정상용 외, 1999). 그러나, 모집단(population)이 정규분포를 이루지 못하거나 분포함수를 정의할 수 없는 경우에는 현실적인 추정기법이 될 수 없다. 즉, 정규크리깅 기법의 적용 시에는 이상치(outlier)에 의한 과대추정(overestimate) 혹은 과소추정(underestimate)과 같은 평활화 효과(smoothing effect)의 문제가 발생한다(Marinoni, 2003). 이상치에 의한 과대/과소 추정의 문제를 해결하기 위해 모집단의 분포에 대한 가정 없이 이론을 전개해 나가는 비모수적(nonparametric) 통계기법인 지시크리깅(indicator kriging)에 의해 확률도를 작성한다. 지시크리깅을 적용한 사례로는 토양지질로깅 자료를 이용하여 토양의 투수성 분포도를 작성한 연구들이 있다(Johnson et al, 1989; Sminchak et al, 1996). 그리고, 지시크리깅의 비모수적 통계분석방법으로서의 이론 및 수학적 연구는 Carr and Mao(1993), Goovaerts(1994) 및 Posa and Marcotte(1992) 등에 의해 연구되었다.

본 연구에서는 확률분포함수(probability distribution function)를 정의할 수 없는 토양층 내 BTEX 및 TPH 성분 값들에 대해 지시크리깅을 수행하였다. 먼저, BTEX 및 TPH 성분 값을 토양오염기준 초과 시 "1", 그 외의 경우에는 "0"의 값으로 변환(transform)하였다. 변환된 자료들의 공간적인 상관성과 오염의 방향성을 파악하기 위하여 베리오그램 분석을 실시하여 최적의 모델을 선정하였다. 선정된 모델을 적용하여 지시크리깅을 수행하였으며, 지시크리깅에 의해 작성된 확률도를 분석하여 지하수 수질성분의 오염 확률과 범위를 추정하였다. 이러한 연구는 국부적인 토양오염지역에서 오염된 성분의 확산범위와 공간적인 오염확률을 파악함에 있어 유용한 방법이 될 것이다.

2.본론

2.1. 토양층 내 BTEX 및 TPH 성분의 오염현황

본 연구지역에서 토양층 내 BTEX 및 TPH 성분의 함량을 측정하기 위해 Geoprobe를 이용하여 74개 지점의 토양시료를 채취하였다. 연구지역 내 74개 지점에서 채취된 토양시료의 BTEX와 TPH 성분을 분석하였다. 오염여부를 판단하는 기준은 토양환경보전법(환경부)에 의거한 확인기준(confirmative limit), 우려기준(warning limit) 및 대책기준(counterplan limit)을 적용하였다. BTEX 및 TPH 성분의 확인기준은 32 mg/kg, 800 mg/kg 이며, 우려기준은 80 mg/kg, 2,000 mg/kg 이며, 대책기준은 200 mg/kg, 5,000 mg/kg 이다. 74개 지점의 토양시료 내 BTEX 및 TPH 성분의 분석 결과는 Table 1에 정리하였다. 토양오염기준을 초과하는 BTEX 성분의 비율은 12.16%, 9.46% 및 5.41% 이며, TPH 성분의 초과비율은 18.92%, 16.22% 및 8.11%로 나타났다. 본 연구지역에서는 BTEX 성분에 비해 TPH 성분의 오염정도가 약간 높은 것으로 판단된다.

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

Component	Sampling point	Confirmative limit (over ratio)	Warning limit (over ratio)	Counterplan limit (over ratio)
BTEX	74	9 (12.16%)	7 (9.46%)	4 (5.41%)
TPH	74	14 (18.92)	12 (16.22%)	6 (8.11%)

토양시료 채취지점의 위치와 BTEX 및 TPH 성분의 분석농도를 확인기준, 우려기준 및 대책기준별로 분류하여 도시하였다(Fig. 1). 두 개 성분 모두 토양오염기준을 초과한 지점의 분포가 NW-SE 방향으로 나타나고 있으며, 이러한 오염방향은 연구지역이 지하수 유동방향과 일치한다(농업기반공사, 2003). 특히, TPH 성분은 20×50 m 지역(185150~185170, 439450~439500)에 집중되어 있다.

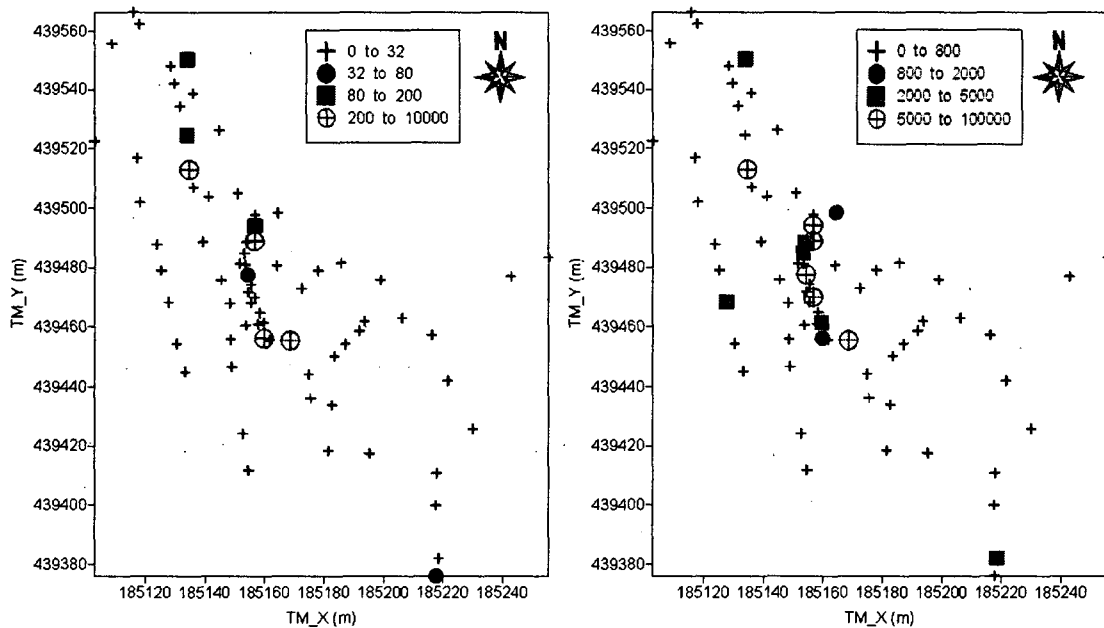


Fig. 1. Classed posting maps of BTEX(left) and TPH(right) components in soils.

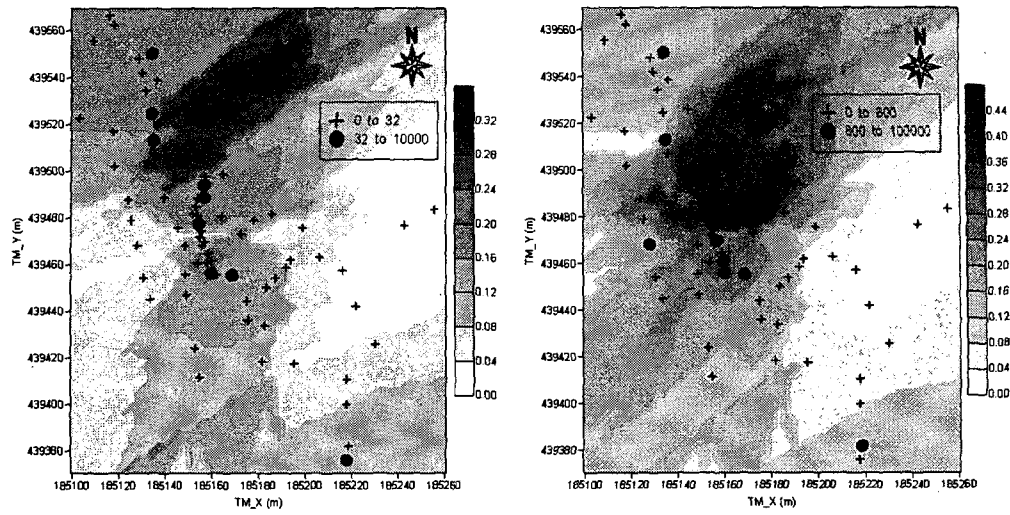
2.2. 지시크리깅에 의한 확률도 분석

토양층 내 BTEX 및 TPH 성분의 원자료(raw data)와 토양오염기준에 의해 지시변환(indicated transformation)자료의 배리오그램 분석결과가 Table 2에 정리되어 있다. BTEX 성분과 TPH 성분의 원자료와 지시변환된 자료 모두에서 선형모델(linear model)과 가우시안모델(gaussian model)이 적합하게 나타났다. 두 개의 모델을 적용하여 교차타당성(cross-validation test)과 등치선도를 작성하여 분석한 결과, 가우시안모델이 가장 적합한 것으로 나타났다.

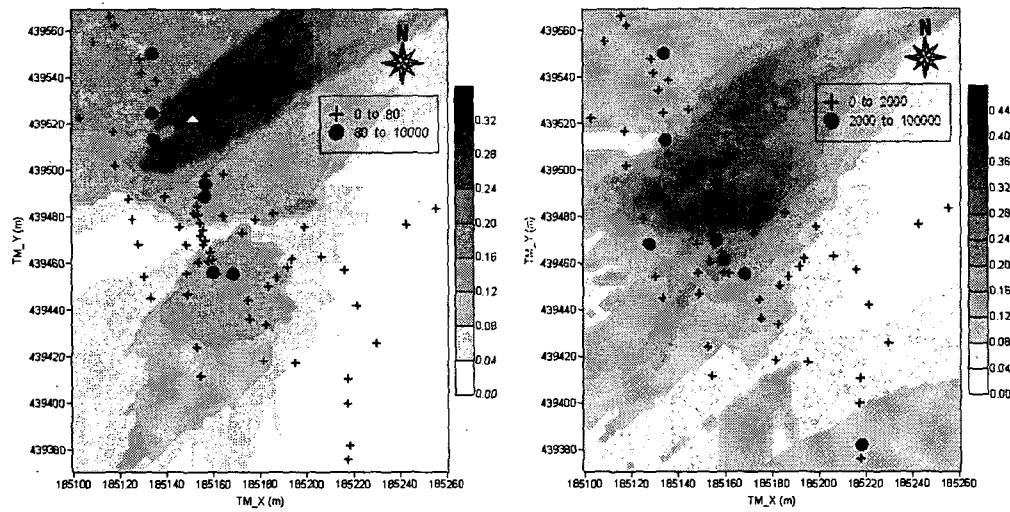
Table 2. Variogram model and parameters of BTEX and TPH components

Component		Model	Nugget (C ₀)	Sill (C ₀ +C)	Effective range (m)	R ²	RSS
BTEX	Raw	linear	5730	5730	145	0.88	4.76×10 ⁷
		gaussian	5480	10961	712	0.83	5.61×10 ⁷
	Confirmative limit	linear	0.11	0.11	145	0.02	1.09×10 ⁻³
		gaussian	0.11	0.21	712	0.001	1.23×10 ⁻³
	Warning limit	linear	0.08	0.08	145	0.73	1.33×10 ⁻³
		gaussian	0.08	0.16	712	0.62	1.97×10 ⁻³
	Counterplan limit	linear	0.05	0.05	145	0.89	3.75×10 ⁻³
		gaussian	0.04	0.09	712	0.87	4.36×10 ⁻³
TPH	Raw	linear	6347136	6347136	145	0.92	9.45×10 ¹³
		gaussian	6070000	12150000	712	0.88	1.08×10 ¹⁴
	Confirmative limit	linear	0.14	0.14	145	0.93	1.09×10 ⁻²
		gaussian	0.14	0.28	712	0.91	1.45×10 ⁻²
	Warning limit	linear	0.13	0.13	145	0.90	7.52×10 ⁻³
		gaussian	0.12	0.25	712	0.82	1.00×10 ⁻²
	Counterplan limit	linear	0.07	0.07	145	0.93	1.04×10 ⁻²
		gaussian	0.06	0.13	712	0.87	1.19×10 ⁻²

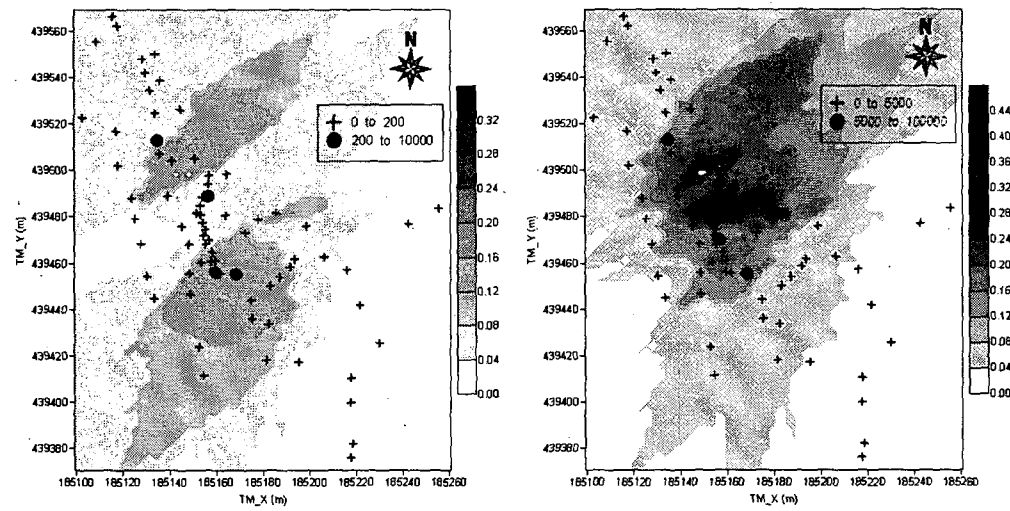
Fig. 2에는 가우시안모델을 적용하여 작성한 BTEX 및 TPH 성분의 토양오염기준별 확률도가 도시되어 있다. BTEX 성분에 비해 TPH 성분의 오염형태가 국부적으로 집중되어 있다. 오염범위는 확인기준과 우려기준 적용 시에는 유사한 면적으로 나타났으며, 대책기준 적용 시의 오염범위는 상대적으로 축소되어 나타났다. 연구지역의 북동지역(185170~185270, 439500~439570)과 남서지역(185100~185140, 439370~439440)의 조사자료가 부족하여 오염범위는 넓게, 오염확률은 높게 추정되었다. 연구지역 내에서 자료가 부족한 지역들은 현장조사에 의하면, 오염의 가능성이 적을 것으로 판단된다. 따라서, 이러한 지역들에 현실적인 자료를 추가한다면, 더욱 정확한 오염확률도가 작성되어 질 것이다. 연구지역의 토양층 내 최대오염확률은 확인기준 적용 시 BTEX 성분은 32%, TPH 성분은 44% 정도이며, 우려기준 적용 시 BTEX 성분은 31%, TPH 성분은 44% 정도이며, 대책기준 적용 시 BTEX 성분은 13%, TPH 성분은 25% 정도인 것으로 나타났다. 연구지역 내 토양층에서의 BTEX 성분의 오염확률은 확인기준과 우려기준 적용 시에는 거의 동일하였으며, 대책기준에 해당하는 오염확률은 2.46배 정도 낮은 것으로 추정되었다. TPH 성분의 최대오염확률은 확인기준과 우려기준 적용 시에는 동일하였으며, 대책기준 적용 시에는 오염확률이 1.76배 정도 낮은 것으로 추정되었다. 오염확률도를 이용한 분석결과, 오염기준 초과지점 주변에서의 오염범위와 확률은 현실적이나, 자료가 부족한 지점들은 현실성이 낮게 나타났다.



(a) Confirmative limit



(b) Warning limit



(c) Counterplan limit

Fig. 2. Probability maps of BTEX (left) and TPH (right) components.

3. 결론

본 연구지역에서 74개 지점의 토양시료 내 BTEX 및 TPH 성분의 분석결과, 토양오염기준을 초과하는 BTEX 성분의 비율은 12.16%, 9.46% 및 5.41% 이며, TPH 성분의 초과비율은 18.92%, 16.22% 및 8.11%로 나타났다.

토양시료 채취지점의 위치와 BTEX 및 TPH 성분의 분석농도를 확인기준, 우려기준 및 대책기준별로 분류하여 도시한 결과, 두 개 성분 모두 토양오염기준을 초과한 지점의 분포가 NW-SE 방향으로 나타났다. 이러한 오염방향은 연구지역이 지하수 유동방향과 일치하는 것이다.

BTEX 성분과 TPH 성분의 원자료와 지시변환된 자료 모두에서 선형모델(linear model)과 가우시안모델(gaussian model)이 적합하게 나타났다. 두 개의 모델을 적용하여 교차타당성(cross-validation test)과 등치선도를 작성하여 분석한 결과, 가우시안모델이 가장 적합한 것으로 나타났다.

가우시안모델에 의해 작성된 오염확률도의 분석결과, 오염범위는 확인기준과 우려기준 적용 시에는 유사한 면적으로 나타났으며, 대책기준 적용 시의 오염범위는 상대적으로 축소되어 나타났다. 연구지역의 토양층 내 최대오염확률은 확인기준 적용 시 BTEX 성분은 32%, TPH 성분은 44% 정도이며, 우려기준 적용 시 BTEX 성분은 31%, TPH 성분은 44% 정도이며, 대책기준 적용 시 BTEX 성분은 13%, TPH 성분은 25% 정도인 것으로 나타났다. 연구지역 내 토양층에서 최대오염확률은 확인기준과 우려기준 적용 시에 비해 대책기준 적용 시 BTEX 성분은 2.46배, TPH 성분은 1.76배 정도 낮은 것으로 추정되었다.

4. 참고문헌

- 1) 농업기반공사, 2003, 103 유류중대 지하수오염정화사업 보고서, 165p.
- 2) 심병완, 정상용, 강동환, 김규범, 박희영, 2000, 영산강·섬진강 유역의 지하수 데이터베이스 자료에 대한 지구통계학적 분석, 지질공학회지, 10(2), p.131-142.
- 3) 정상용, 유인걸, 윤명재, 권해우, 허선희, 1999, 불균질·이방성 대수층의 지하수 유동분석에 지구통계기법의 응용, 지질공학회지, 9(2), p.147-159.
- 4) 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), p.425-438.
- 5) Goovaerts, P., 1994, Comparative Performance of Indicator Algorithms for Modeling Conditional Probability Distribution Functions, Mathematical Geology, 26(3), p.389-411.
- 6) Johnson, N. M., and S. J. Dreiss, 1989, Hydrostratigraphic Interpretation Using Indicator Geostatistics, Water Resources Research, 25(12), p.2501-2510.
- 7) Marinoni, O., 2003, Improving geological models using a combined ordinary-indicator kriging approach, Engineering Geology, 69, p.37-45.
- 8) Sminchak, J. R., David F. Dominic, and Robert W. Ritzi, Jr., 1996, Indicator Geostatistical Analysis of Sand Interconnections Within a Till, Groundwater, 34(6), p.1125-1131.
- 9) Posa, D., and D. Marcotte, 1992, Robustness of Kriging Weights to Non-Bias Conditions, Mathematical Geology, 24(7), p.759-773.