

## 지하수 · 토양의 매체별 상관성평가를 통한 토양오염저감예측

이민효 · 윤정기 · 김문수 · 노희정 · 이길철, 이석영\*

국립환경연구원, \*삼성건설(주)

e-mail : hyd009@webmail.pusan.ac.kr

### Abstract

The objective of this study is to predict behavior of a contaminant plume and concentration of contaminants in soil through the relations between the concentrations of contaminants in groundwater and in soil on the shallow sandy aquifer contaminated with petroleum hydrocarbons. The current state of the plume and its fate in the study area was simulated by using the MODFLOW-RT3D model and geochemical parameters of groundwater had been monitored and measured during 3 years (1999~2001).

The relations between the concentrations of contaminants in each medium were taken from the investigation of site characterization conducted in 1999. Simulation results showed the center of the plume would migrate 407m twenty years later. At that time, the concentration would be decreased down to about 26 mg/ℓ (93%).

In comparison TEX concentration in the groundwater with that in the soil, the value of correlation coefficient ( $r=0.876$ ) was as high as it could be used. Based on the high  $r$ -value, the linear equation was obtained from regression analysis. The results of model simulation by RT3D engine showed that the highest TEX concentration in the groundwater would be 58.8 mg/ℓ 16 years later, and then the TEX concentration in soil would be below the alarming level (80 mg/kg) of regulation criteria.

**key word** : contaminant plume, TEX, soil, groundwater, RT3D model, correlation coefficient, alarming level

### 1. 서론

자연정화방법(Monitored Natural Attenuation)은 유류를 비롯한 육성오염물질로 오염된 부지에서 복원기술로 인정받고 있으며, 이 방법의 적용은 점차 증가추세에 있다<sup>1,2)</sup>. 오염물질의 거동을 예측하고 자연저감기법의 적용가능성을 평가하기 위해서 컴퓨터를 이용한 모델링은 필수적인 절차가 되었다. 영국 환경청(Environment Agency)의 경우, 자연저감기법을 평가하기 위한 안내서<sup>3)</sup>에서 모델링을 선별단계와 예측·평가단계에서 실시할 것을 권유하고 있다. 또한 미국의 환경보호청(Environmental Protection Agency)의 지침서<sup>4)</sup> 역시 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 오염물질의 거동예측 및 평가를 시행하도록 하고 있다.

본 연구는 Visual MODFLOW<sup>5)</sup> RT-3D<sup>6)</sup>를 사용하여, 3년 동안의 관측 및 분석값을 통하여 모델을 보정하였고, 이를 바탕으로 오염물질(TEX)의 거동과 자연저감의 속도를 계산·예측하였다. 또한 토양과 지하수 내에 있는 TEX 농도간의 상관성에 근거한 회귀직선 공식을 구하였다. 이 두 결과를 사용하여 앞으로 자연저감될 토양오염농도를 예측하였다.

## II. 모델을 이용한 오염물질의 운명·거동의 예측 평가

TEX로 오염된 천부대수층을 대상으로 Visual MODFLOW 2.8.2를 사용하여 오염물의 운명과 거동을 예측하였으며, 모두 54개 지점에서 지하수의 오염농도를 관측하였다. '99년 6월에 조사된 46개 지점의 농도를 초기농도로 사용하였으며, 이 때의 61개 지점에서 측정된 지하수위를 정상류와 부정류 보정에 사용하였다. 오염물질의 운명·거동을 예측하기 위하여 RT3D엔진을 사용하였으며, 이 엔진 속에 포함된 7가지 모델 가운데 하나인 다양한 전자 수용체를 이용한 동력학적으로 제한된 BTEX 분해(Kinetic-limited Degradation of BTEX using Multiple Electron Accepters) 반응모델을 사용하였다.

지하수 유동 모델의 보정결과, 표준화된 RMS 값이 2000.9월의 값(12.29743%)을 제외하고는 모두 10이하로 모든 값들이 합리적인 범위 내에 든다. 따라서 모델의 수두분포가 관측된 수두분포와 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 표 1과 표 2는 반응하는 오염물질의 이송과 운명을 예측하기 위하여 사용된 입력인자들 가운데 민감하게 반응하는 분배계수의 값과 오염농도보정결과를 각각 보여준다. 용질이송·반응모델에 사용된 모든 매개변수들은 실험을 통하여 구하거나, 문헌의 값들을 사용 혹은 근거하여 계산하였다<sup>(7,8,9,10,11,12)</sup>. 각 시기별 측정된 농도값을 이용해 보정한 통계값은 모사된 농도분포가 실측된 농도분포와 합리적인 범위에서 유사함을 알 수 있다. 이러한 보정결과를 바탕으로 오염운의 거동과 운명을 예측한 결과는 그림 1에 보여주고 있다. 10년과 20년 후의 오염운의 거동과 농도는 초기 오염운의 센터(L3)로부터 남서방향으로 각각 약 293m와 407m정도 이동할 것이며, 이 때의 농도는 100mg/l 와 26mg/l 가 될 것으로 예측된다. 결론적으로 20년의 시간이 경과 후 오염운의 중심은 J모직 부지경계까지 이동하며 그 때의 최고농도는 초기농도의 약 93%가 자연저감될 것으로 예측된다.

## III. 오염물질(TEX)의 지하수·토양 매체간 상관성 평가 및 토양의 자연저감 예측

토양과 지하수는 오염물질의 거동에 있어 매우 밀접한 관계를 가지고 있을 것으로 판단된다. 이러한 예측 하에 토양깊이별로 채취한 시료의 농도와 지하수의 농도와의 상관성을 조사한 결과, 토양 2~3m 깊이에서 채취한 TEX의 농도가 지하수 중의 TEX농도와 가장 높은 상관성( $r=0.876$ )을 보이고 있다. 이와 같이 이 구간의 토양깊이(2~3m)에서 지하수와 토양 내 오염물 농도간의 상관성이 높은 이유는 오염물을 함유하고 있는 지하수 층이 외부의 영향(강우, 강설, 대기압 등)에 쉽게 반응하는 천부대수층으로 상당수 조사지점의 지하수

Table 1. Kd values used for RT3D model

매개변수	항목	1층	2층	3층
분배계수 $K_d$ (L/mg)	BTEX	$3.45 \times 10^{-9}$	$2 \times 10^{-6}$	$7 \times 10^{-5}$
	산소	$2 \times 10^{-9}$	$2 \times 10^{-9}$	$2 \times 10^{-9}$
	질산염	$4 \times 10^{-9}$	$4 \times 10^{-9}$	$4 \times 10^{-9}$
	2가철	$2 \times 10^{-9}$	$2 \times 10^{-9}$	$2 \times 10^{-9}$
	황산염	$4 \times 10^{-9}$	$4 \times 10^{-9}$	$4 \times 10^{-9}$
	메탄	$2 \times 10^{-9}$	$2 \times 10^{-9}$	$2 \times 10^{-9}$

Table 2. Statistical values of calibrated concentrations from each elapsed time

경과 시간	일시	Mean Error (m)	Mean Absolute (m)	Standard Error of the Estimate(m)	Root Mean Squared (m)	Normalized RMS(%)
1	1999. 6	7.333449	22.73582	5.393778	39.94621	10.81037
83	1999. 9	-6.032419	41.43064	8.17182	59.79681	18.53768
212	2000. 1	-10.40405	41.73409	8.496735	62.72602	16.25696
809	2001. 9	-8.358711	33.45672	7.221782	53.23567	19.30392

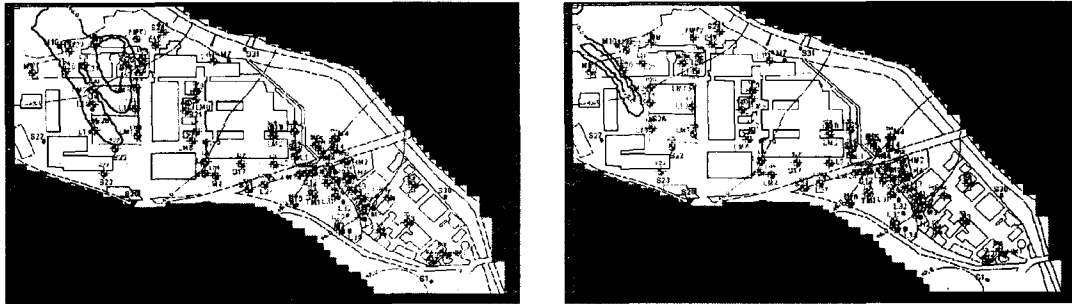


Figure 1. Behavior of the plume and its concentration with time

위가 2-3m에 걸쳐있고, 조사대상지역의 지하수위 변동폭이 2m정도로 큰데 기인된 것으로 판단된다. 따라서 지하수에 의해서 이송되는 오염물은 이러한 영향으로 수직적으로 분포하게 되며, 토양 내에 분포하는 점토질 혹은 실트질 매질에 흡착되어 smear zone을 형성하게 된다. 이러한 결과로 인해 토양 중 TEX농도와 지하수중 TEX의 농도와와의 상관성이 2~3m 구간, 즉 지하수위 변동구간(fluctuation zone)에서 높게 나타나는 것으로 판단된다.

한편 해당부지의 정밀조사시<sup>8)</sup> 조사된 오염물질의 토양·지하수 매체간 상관성 평가에서 얻어진 회귀방정식은 다음과 같다.;

$$Y(\text{토양 내 TEX농도}) = 1.2108X(\text{지하수 내 TEX의 농도}) + 8.7344^{12)}$$

이 회귀공식을 이용해 계산한 토양 내 TEX농도가 우려기준(80 mg/ℓ)이 되는 지하수의 농도는 58.858 mg/ℓ이다. 따라서, 모델 예측에 의해 16년 후 오염원 중심의 농도는 58.8 mg/ℓ 이하가 되며, 이때 조사지역 토양의 TEX농도가 토양오염 우려기준이하가 될 것으로 예측할 수 있다.

#### IV. 논의 및 결론

유류로 오염된 현장부지에서 RT3D 모델을 이용하여 오염물질의 이동예측 평가를 실시하였으며, 매체간 상관성 평가도 실시하였다. 이 두 결과를 바탕으로 토양의 오염저감을 예측해보았다. 비록 둘 사이에 높은 상관성이 있지만, 지하수와 토양에서 오염물질이 저감되는 메카니즘은 서로 다르며 두 매체가 가지고 있는 특성 또한 다르다. 지하수는 오염물 이송의 역할을 주로 하며, 토양은 오염체의 지연, 보관, 유출의 역할을 각각 맡고 있다. 이러한 요인들이 보완된다면, 보다 정확하고 정량적인 토양오염저감을 예측할 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

1. Thomas H. Christensen, Poul L. Bjerg, and Peter Kjeldsen, 2000, Natural Attenuation: A Feasible Approach to Remediation of Ground Water Pollution at Landfills?, Ground Water Monitoring and Remediation, winter ed., 69 - 77.
2. Lee, S. Y., Lee, M. H., *et al.*, 2000, Monitored Natural Attenuation for Contaminated Soil and Groundwater Remediation: Concept and Application, Proceedings of the Commemorative International Symposium for the 40th Anniversary of KSACB: 45~63.
3. Environment Agency, 2000, Guidance on the assessment and monitoring of natural attenuation of contaminants in groundwater, R&D Publication 95.
4. Environmental Protection Agency, 1998, Technical Protocol for Evaluating Natural Attenuation of Chlorinated Solvents in Ground Water (600/R-98/128).
5. Waterloo Hydrogeologic Inc, 1999, User's Manual for Visual Modflow, Version 2.8.2.
6. U.S. Department of Energy, 1997, A Modular Computer Code for Simulating Reactive Multi-species Transport in 3-Dimensional Groundwater Aquifers, Version 1.0
7. 이 민효, 이 길철외 9인, 2000, 자연정화촉진방법에 의한 유류오염부지에서의 유류분해능에 관한 연구(Ⅱ), 국립환경연구원보고서.
8. 이 민효, 이 석영외 10인, 1999, 자연정화촉진방법에 의한 유류오염부지에서의 유류분해능에 관한 연구(Ⅰ), 국립환경연구원보고서.
9. Lee, Jin-Yong, 2001, Environmental site assessment and evaluation of attenuation characteristics for a petroleum contaminated site, Thesis for A Ph.D. degree, school of earth and environmental sciences, Seoul National University.
10. Fetter, C. W., 1994, Applied Hydrogeology, 3rd ed., Prentice Hall, Inc.
11. Domenico, P. A. and Franklin, W. S., 1990, Physical and Chemical Hydrogeology.
12. 이 민효, 이 길철 외 7인, 2001, 자연정화촉진방법에 의한 유류오염부지에서의 유류분해능에 관한 연구(Ⅲ), 국립환경연구원보고서.