

# 인공 사질자유면대수층 내 TCE 거동예측을 위한 추적자시험 및 예비모사 : Preliminary study

이병선<sup>1)</sup> · 이기철<sup>1)</sup> · 우명하<sup>1)</sup> · 김정희<sup>1)</sup> · 이주영<sup>1)</sup> · 김경훈<sup>1)</sup>  
 우남철<sup>2)</sup> · 이용석<sup>2)</sup> · 현승규<sup>2)</sup> · 이은재<sup>2)</sup> · 박원우<sup>2)</sup>

## 1. 서론

환경부의 환경통계연감(2004)에 따르면, 전국 1500여개소의 지하수에 대해 1996년부터 2003년까지 수질 검사를 실시한 결과, 해가 지날수록 수질기준 초과 관정의 수는 줄어들고 있으나, TCE, PCE에 의한 오염 관정개수는 계속하여 늘어나(2003년의 경우, 전체의 52.3%), 이에 대한 심도 있는 대책이 필요함이 보고되었다. 그리고 최근에는 부산 석대 매립지 주변 지하수에서 법정허용치(50 ppb) 이상의 TCE가 검출되어 사회 이슈화되어 보고된 바 있다.

이러한 현실에 비하여, 국내에서 지금까지 연구 개발된 유기용제에 의한 현장 오염복원기술은 주로 오염토양에 집중되고 있고, 오염지하수 현장복원기술은 오염토양과 관련된 부분에 한정되어 연구되어 왔으며, 오염지하수체 복원은 주로 LNAPLs에 대해서 적용이 이루어져 왔다. 이에 따라, TCE, PCE 와 같은 DNAPLs로 오염된 지하수에 대해, 오염물질의 제거와 함께 지하 대수층에 잔류하는 오염원 자체를 제거할 수 있는 현장복원 기술개발이 시급하다.

이 연구는 그 동안 실내 배치실험이나 수조실험으로 주로 규명되어 온 KMnO<sub>4</sub>를 이용한 TCE 정화효율(Yan and Schwartz, 2000; Seol and Schwartz, 2000; Huang et al., 2002; Lee et al., 2003; Crimi and Siegrist, 2003; Li and Schwartz, 2004; Li, 2004)을, 농업기반공사 부설 농어촌연구원에 설치된 사질 인공자유면 대수층(L×W×D = 8m×2m×2m)에 현장규모로 적용하기 위한 예비연구이다. 이를 통하여, 인공 사질자유면대수층의 추적자 시험결과와 MODFLOW 예측모델 결과를 바탕으로, 추후 KMnO<sub>4</sub> 매체를 이용한 반투수성 반응벽체(Semi PRB)설계에서, KMnO<sub>4</sub>의 이상적인 배열 위치를 정하는 것에 그 목적을 둔다.

## 2. 연구내용 및 결과

인공 사질자유면대수층 규격은 Table 1과 같고, 대수층 구성물질의 물리특성인자는 Table 2와 같다. 현장 수리시험을 통해 도출해 낸 수리전도도는  $2.22 \times 10^{-3}$  (cm/sec)이다.

Table 1. Description of the artificial unconfined aquifer located in KARICO.

artificial unconfined aquifer		Description
Depth	2m	size (L×W×D) = 8m × 2m × 2m
Number of observation wells	105	Screen depth : 1.5 ~ 2.0 m
sampling points	315	3-points(0.5m,1.0m,1.5m) per one well
materials of aquifer	Sand	Jumungin Sand

주요어 : 인공 사질자유면대수층, 추적자시험, MODFLOW, 반투수성 반응벽체, TCE

- 1) 농업기반공사 농어촌연구원 (byungsun94@karico.co.kr)  
 2) 연세대학교 지구시스템과학과 (ncwoo@ysgeo.yonsei.ac.kr)

Table 2. Physical properties of the artificial unconfined aquifer material.

Texture	Sand (%)	32.5	Exchangeable Cations (me/L)	Ca	4.3
	Silt (%)	52.4		Mg	11.6
	Clay (%)	15.1		K	1.5
	Class	Sand-Silt		Na	1.6
Concentration of Elements from total samples (mg/kg)	Ca	787.5	Soluble ions (me/L)	Ca	1.1
	Cr	2.2		Mg	23.3
	Cu	< 1		K	4.9
	Fe	717.4		Na	25.1
	K	38,301.0		Cl	107.1
	Mg	124.7		SO <sub>4</sub>	14.1
	Mn	12.8		organic matter(%)	0.8
Na	6,049	EC (dS/m)	7.9		
soil pH	7.9	S.P (%)	35.0		

### 1) 추적자 시험

추적자 시험은 비반응용질인 Cl<sup>-</sup>를 이용하여 25시간동안 실시하였다. 추적자는 D2.0 위치에서 5분간 주입하였으며, 이 후, 1.5m 떨어진 수직 하향 지점(D3.5)에서 최고 농도를 보였다(Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3). 이를 바탕으로 인공 사질자유면대수층의 P<sub>cc</sub> 수를 계산하였다. P<sub>cc</sub> 수 산출시, 2차원, 3차원 관계식에 필요한 변수를 취득하지 못하였으므로 1차원 순간 주입 방식해(Sauty, 1980)로 산출하였다(Eq.1). Eq.1에 대입한 변수 중, C<sub>max</sub>는 82.59 mg/L, t<sub>max</sub>는 16 시간, C는 79.23 mg/L, t<sub>R</sub>는 13 시간을 이용하였으며, 이로써 구한 P<sub>cc</sub> 수는 1.64로서 인공 사질자유면대수층의 용질이동기작은 역학적인 분산과 분자확산이 공통적으로 기여함을 알 수 있다.

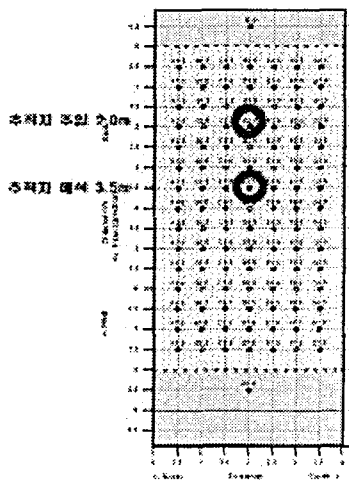


Fig. 1. Injection and Detection wells of this tracer test.

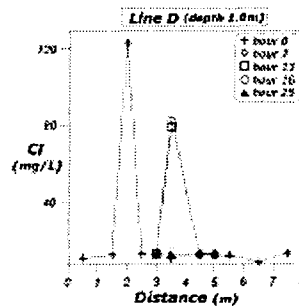


Fig. 2. The variation of chloride concentration along Line D.

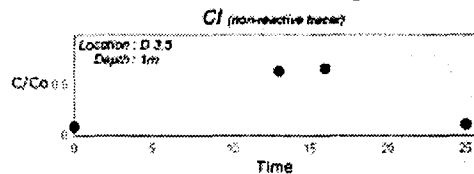


Fig. 3. Breakthrough curve of D3.5

$$C_R(t_r, P_{ec}) = \frac{E}{t_R^{0.5}} \exp\left[-\frac{P_{ec}}{4t_R} (1-t_R)^2\right]$$

여기에서  $E = t_{R_{max}}^{0.5} \exp\left[-\frac{P_{ec}}{4t_{R_{max}}} (1-t_{R_{max}})^2\right]$  (Eq.1)

$$C_R = \frac{C}{C_{max}}$$

$$P_{ec} = \frac{v \times \alpha}{D_L} = \frac{v \times d_m}{D^*}$$

$$t_{R_{max}} = (1 + P_{ec}^{-2})^{0.5} - \frac{1}{P_{ec}}$$

## 2) MODFLOW를 이용한 TCE 거동 예측

인공 사질자유면대수층을 대상으로 MODFLOW(MT3D) 프로그램을 이용하여 TCE 거동 예측 모델링 실시하였으며, 입력조건은 아래의 Table 3과 같다. 입력인자는 기 수행된 수리 시험 결과를 이용하였으며, 주입 후 1일, 15일, 30일 후의 TCE의 예측거동은 Fig. 4와 같다. 본 결과는  $KMnO_4$  를 이용한 반투수성 반응벽체 설계를 위한 참고자료로 활용할 예정이다(Fig 4(d)).

Table 3. Input parameters of MODFLOW(MT3D) to predict transport of TCE

Input parameters		Description
Number of cells	41×82	distance of cell by cell : 10cm
Number of observation wells	61	-
Hydraulic conductivity (K)	$2.22 \times 10^{-3}$ (cm/sec)	vertical K = horizontal K × 0.01
Storage	0.15	referred by Hahn.(1998)
TCE concentration	1 mg/L	pulse injection
period of simulation	1 year	Freundlich isotherm

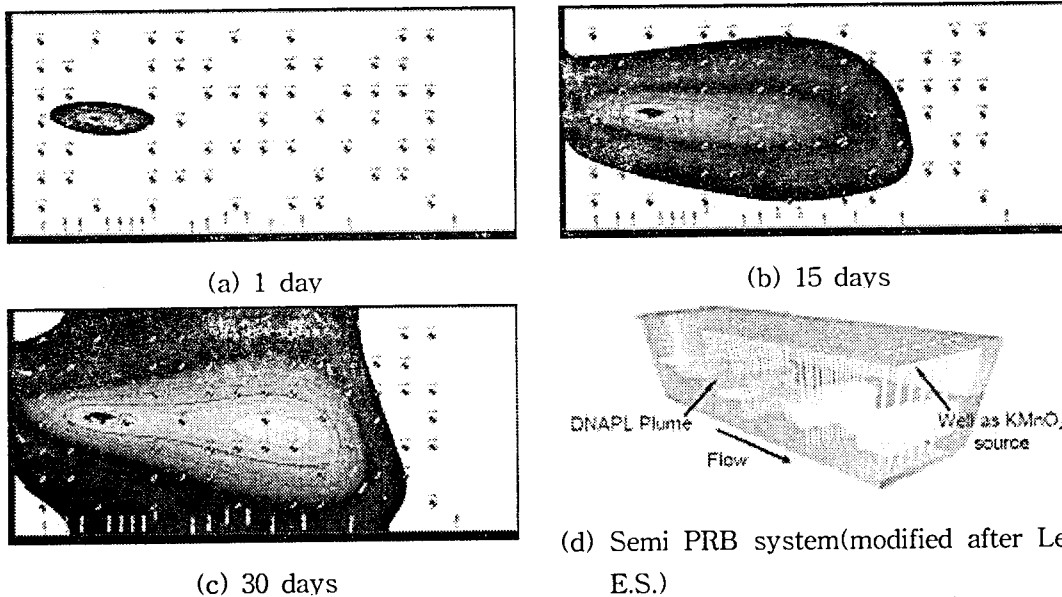


Fig. 4. The predictable path of TCE solution through the artificial unconfined aquifer (a), (b), (c) and Semi PRB system(d)

### 3. 결론

- 1) 추적자 시험을 통해 도출한 Pec 수는 1.64로서 인공 사질자유면대수층의 용질이동기작은 역학적인 분산과 분자확산이 공통적으로 기여함을 알 수 있다.
- 2) 인공 사질자유면대수층을 대상으로 MODFLOW(MT3D) 프로그램을 이용하여 TCE 거동 예측 모델링을 실시하였으며, 본 결과는 추후  $\text{KMnO}_4$  를 이용한 반투수성 반응벽체 설계를 위한 참고자료로 활용할 예정이다.

### 4. 참고문헌

- 1) 환경부, 2004, 환경통계연감 2004(제 17호), 730
- 2) 한정상, 1998, 지하수환경과 오염, 박영사, 1071
- 3) Kun-Chang Huang, George E. Hoag, Pradeep Chheda, Bernard A. Woody and Gregory M. Dobbs, 2002, Chemical oxidation of trichloroethylene with potassium permanganate in a porous media, *Adv. Env. Res.*, 7, 217-229
- 4) Lee E. S., Seol Y., Fang Y. C. and Schwartz F. W., 2003, Destruction efficiency and dynamics of reaction fronts associated with the permanganate oxidation of trichloroethylene, *Environ. Sci. Technol.*, 37, 2540-2546
- 5) Michelle L. Crimi and Robert L. Siegrist, 2003, Geochemical effects on metal following permanganate oxidation of DNAPLs, *Groundwater*, 41, 458-469
- 6) X. David Li and Franklin W. Schwartz, 2004, DNAPL remediation with in situ chemical oxidation using potassium permanganate II. Increasing removal efficiency by dissolving Mn oxide precipitates, *J. Cont. Hydro.*, 68, 269-287
- 7) Y. Eugene Yan and Franklin W. Schwartz, 2000, Kinetics and mechanism for TCE oxidation by permanganate, *Environ. Sci. Technol.*, 34, 2535-2541
- 8) Yongkoo Seol and Franklin W. Schwartz, 2000, Phase-transfer catalysis applied to the oxidation of nonaqueous phase trichloroethylene by potassium permanganate, *J. Cont. Hydro.*, 44, 185-201