

Effects of Hydrodynamic Condition on DNAPL Dissolution: Experimental Observation

김용철· 이강근
서울대학교 지구환경과학부
tracer76@netian.com

요 약 문

The dissolution process of NAPLs is significantly important in predicting the transport and/or fate of the contaminants and designing remedial systems. In this research, experimental observations on dissolution of TCE pool under various hydrodynamic conditions are done using an aquifer model. Hydrodynamic parameters such as linear pore velocity and dispersion coefficient are estimated from the results of preliminary tracer tests using bromide as conservative tracer before doing the TCE dissolution experiments. It is found that hydrodynamic parameters are distinctly affected by the clay lens imbedded in the aquifer model. Nonequilibrium and transient dissolution rates are observed from the results of TCE dissolution experiments.

key word : NAPLs, TCE, dissolution, aquifer model, Hydrodynamics.

1. 서론

부주의하게 버려지거나 우연한 사고로 누출된 NAPLs(Non-aqueous phase liquids)은 지하 매질을 오염시키며, 또한 이렇게 누출된 NAPLs이 지하수에 용해되면서 장기적인 지하수 오염원으로 작용하게 된다. 따라서 NAPLs의 용해 기작을 이해하는 것은 오염물의 이동과 운명을 예측하고 정화 시스템을 설계하는데 매우 중요하다 [Guo, 2002].

일반적으로 미세규모에서의 NAPLs의 용해기작은 평형상태로 가정할 수 있다고 보고되었지만 [Levich, 1962], 보다 큰 규모에서는 용해속도가 지하수 유속과 밀접한 관계가 있어 평형상태 용해의 가정에서 벗어나는 경우가 많다 [Hunt et al., 1988; Powers et al., 1991; Powers et al., 1992]. 그러나 용해속도와 수리동력학적 조건과의 관계에 대한 많은 연구 결과 [Miller et al., 1990; Powers et al., 1992; Imhoff et al., 1993; Powers et al., 1994]는 이러한 관계가 수행한 실험조건에 좌우된다는 것을 보여주고 있다. 또한 residual NAPL과는 달리 pool상태로 존재하는 경우는 이것이 3차원의 문제라는 점에서 이러한 용질 전이 관계를 규명하기가 더욱 어렵다.

이 연구는 3차원의 대수층 모형을 이용하여 수리동력학적 조건과 TCE pool의 용해기작에 대한 관계를 고찰하기 위해 수행되었다.

2. 본론

2.1. 실험장치

다공성 매질에서 오염물질의 이동을 여러 조건하에서 연구하기 위해서 그림 1과 같은 모양의 실내 실험 장치를 제작, 설치하였다. 이 대수층 모형은 크게 대수층, 유입부, 유출부, 관정들로 구성된다. 유입부와 유출부는 대수층 양 끝의 수두를 일정하게 유지해주는 장치가 되어 있고, 수두의 높이는 자유롭게 조절할 수 있는 특징이 있다.

대수층 매질로는 하천사를 이용하였고, 입자가 250 μm 에서 1mm사이의 fine sand와 medium sand가 대부분을 차지하는 분급(sorting)이 좋은 세립에서 중립의 모래로 분류되며, uniformity coefficient(D_u)는 2.3이다. 대수층 중심에 위치한 점토렌즈로 사용된 정제된 해안 점토는 55 μm 이하의 고른 입자로 구성되었다. 추정된 주 대수층 매질의 공극율은 0.4, 비산출율은 0.06이다.

DNAPLs 오염물질로서 TCE를 연구 대상으로 선정하였다. TCE는 많은 오염 부지에서 발견되는 DNAPLs에 속하는 대표오염원이다. 추적자 시험에 사용한 브롬은 흡착이나 생분해와 같은 물리, 화학, 생물학적인 반응을 거의 겪지 않는 보존성 이온 추적자다. 브롬이온은 이온 선택적 전극으로, TCE는 액체 크로마토그래피를 이용하여 분석하였다.

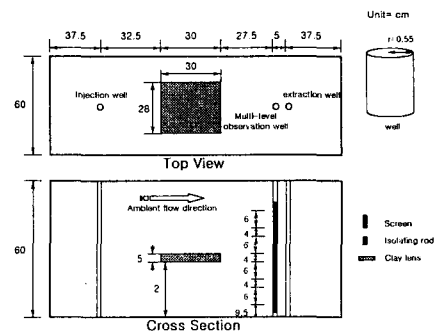


그림 1. 대수층 모형의 전개도

2.2. 실험 방법

TCE 용해 실험에 앞서 대수층의 수리동력학적 변수를 추정하기 위하여 보존성 추적자를 이용한 두 종류의 추적자 시험-자연수두구배 연속 주입 추적자 시험과 순간 주입 추적자 시험-을 수행하였다. 추적자 시험 방법에 대한 설명은 표 1에 요약하였다.

표 12. 추적자 시험 요약

Test Type	Natural gradient continuous injection	Natural gradient finite pulse injection
Gradient	0.0059	0.0059
Tracer	Br ⁻ as KBr	Br ⁻ as KBr
Injection Phase	Inj. zone= 0~46cm above the bottom Injection concentration Rising phase = 1050 mg/ℓ Descending phase = 0 mg/ℓ Injection rate = 18.2 mL/min	Inj. zone= 30~35cm above the bottom Injection concentration = 1000 mg/ℓ Injection volume = 1000 mL Injection rate = 18.2 mL/min
Observation Phase	Observation points Obs. 1 = 42.5cm above the bottom Obs. 2 = 32.5cm " Obs. 3 = 22.5cm " Obs. 4 = 12.5cm " Observation interval = 30 ~ 120 min. Extr. rate for sampling = 1.3 mL/min.	Observation points Obs. 1 = 42.5 cm above the bottom Obs. 2 = 32.5 cm " Obs. 3 = 22.5 cm " Obs. 4 = 12.5 cm " Observation interval = 30 ~ 120 min. Extr. rate for sampling = 1.3 mL/min.

TCE 용해 실험은 점토 렌즈 중앙에 위치한 관정을 통하여 15ml의 TCE를 주입한 후 여러 가지 자연수두구배 조건과 양수 하에서 시간에 따른 농도 변화를 하부구배에 위치한 다중심도 관 측정에서 관찰하였다.

2.3. 실험 결과

자연수두구배 추적자 시험을 통하여 추정된 지하수의 평균 선속도는 $1.01 \times 10^{-3} \sim 1.38 \times 10^{-3}$ cm/s, 분산계수는 $1.18 \times 10^{-3} \sim 5.45 \times 10^{-3}$ cm²/s의 범위를 갖는다. 연속주입추적자 시험과 순간주입 추적자 시험 결과로부터 대수층 중간에 위치한 점토 렌즈의 영향으로 이 부근의 지하수 유속이 감소하고 분산계수가 커지는 것을 확인할 수 있었다.

그림 2와 그림 3은 각각 여러 가지 수두구배와 양수량에 따른 수용액 상태의 TCE의 농도 변화를 보여준다. 안정된 TCE의 농도가 용해도(1100 mg/l)에 비해 낮은 약 200 mg/l의 농도를 보여줌으로써 모형 내에서의 용해 기작이 비평형 상태에서 이루어짐을 알 수 있다. 수두구배가 증가하거나, 양수량이 증가함에 따라 용해속도가 안정되지 못하고 계속 변하고 있음을 알

수 있다. 특히 양수에 의해 대수층 전 영역이 영향을 받는 Q_3 ($=9.4\text{ml/s}$)의 양수량에서는 TCE 오염원이 하부로 하강하는 것을 확인할 수 있다. Q_3 의 양수이후 양수량이 Q_4 ($=4.1\text{ml/s}$)로 작아지면서 "Rebound" 현상을 관찰할 수 있다.

3. 결론

추적자 시험 결과 대수층 모형 내에 존재하는 점토 렌즈의 지하수와 용질 이동에 미치는 영향을 확인할 수 있었다. TCE 용해 실험으로부터 TCE의 용해 기작이 수두구배와 양수와 같은 대수층의 수리동력학적 상황에 많은 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 따라서 오염 부지의 오염운을 조사함에 있어서 자연수 두구배의 방향과 함께 그 크기도 매우 중요한 변수가 됨을 알 수 있고, 양수-처리와 같은 정화 방법을 적용하면서 최적의 정화시간과 정화비용을 산출함에 있어 양수량에 의해 TCE와 같은 NAPLs의 용해 속도가 영향받으므로 이를 반영해야 할 것이다. 그리고, 과도한 양수는 DNAPLs의 오염운의 수직방향의 확산을 유도할 수 있기 때문에 이를 유의해야 함을 확인할 수 있다.

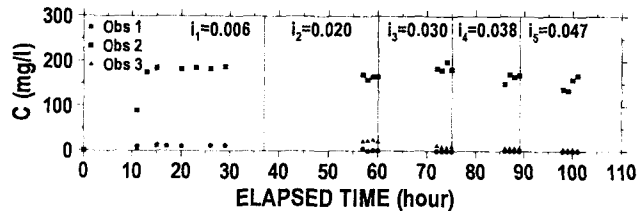


그림 30. 수두구배에 따른 TCE 농도 변화

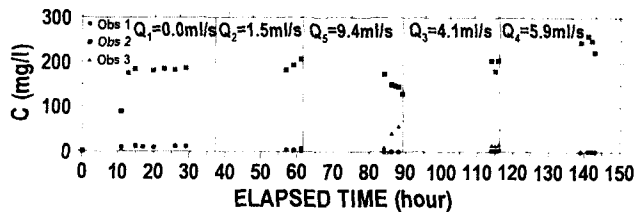


그림 31. 양수량에 따른 TCE 농도 변화

앞으로 이 연구의 실험결과에 대한 수학적 해석, 수치모의수행을 통한 심화연구의 여지가 남아있다.

4. 사사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호:3-5-1)에 의해 수행되었습니다.

5. 참고문헌

1. Guo, G, 2002, The effects of local hydrodynamics on mass transfer in disordered porous media, A dissertation submitted to Louisiana State Univ. for Ph. D.
2. Hunt, J. R., Sitar, N. and Udell, K. S., 1988, Nonaqueous phase liquid transport and cleanup 1. Analysis of mechanisms, Water Resour. Res. 24(8), 1247-1258.
3. Imhoff, P. T., Jaffe, P. R. and Pinder, G. F., 1993, An experimental study of complete dissolution of a nonaqueous phase liquid in saturated porous media, Water Resour. Res. 30(2), 307-320.
4. LeVinch, V., 1962, Physicochemical hydrodynamics, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
5. Miller, C. T., Poirier-McNeill, M. M. and Mayer, A. S., 1990, Dissolution of trapped nonaqueous phase liquids: mass transfer characteristics, Water Resour. Res. 26(11), 2783-2796.
6. Powers, S. E., Loureiro, C. O., Abriola, L. M. and Weber, W. J., 1991, Theoretical study of the significance of nonequilibrium dissolution of nonaqueous phase liquid in subsurface systems, Water Resour. Res. 27(4), 463-477.
7. Powers, S. E., Abriola, L. M. and Weber, W. J., 1992, An experimental investigation of nonaqueous phase liquid dissolution in saturated subsurface systems: Steady state mass transfer rates. Water Resour. Res., 28(10), 2691-2705.
8. Powers, S. E., Abriola, L. M. and Weber, W. J., 1994, An experimental investigation of nonaqueous phase liquid dissolution in saturated subsurface systems: Transient mass transfer rates, Water Resour. Res. 30(2), 321-332.