

토양내 총 NAPL과 공기집속 NAPL의 측정을 위한 분별 NAPL 분배 추적자 기술의 개발

최경민, 김현기

한림대학교 자연과학대학 환경시스템공학과 (heonki@hallym.ac.kr)

<요약문>

Gaseous partitioning tracer test has been used for determining the volume and spatial distribution of residual non-aqueous phase liquid (NAPL) in the unsaturated soils. In this study, an experimental method for measuring the content of gas-exposed NAPL as well as that of total NAPL in a sand during air sparging was developed. Two different gaseous phase NAPL-partitioning tracers were used; n-pentane, with very low water solubility, was used as the tracer that partitions into NAPL that is only in contact with the mobile gas, and chloroform, with fairly good water solubility, was selected for detecting total NAPL content in the sand. Helium and difluoromethane were used as the non-reactive tracer and water-partitioning tracers, respectively. Using n-decane as a model NAPL (NAPL saturation of 0.018), 25.6% of total NAPL was detected by n-pentane at the water saturation of 0.68. Only 9.1% of total NAPL was detected by n-pentane at the water saturation of 0.84. This result implies that the quantity of gas-exposed NAPL increased about three times when the water saturation decreased from 0.84 to 0.68. At the water saturation of 0.68, more than 90% of total NAPL was detected by chloroform while 65.8% of total NAPL was detected by chloroform at the water saturation of 0.84. Considering that the removal rate of NAPL during air sparging for NAPL-contaminated aquifer is expected to be greatly dependent upon the spatial arrangement of NAPL phase with respect to the mobile gas, this new approach may provide useful information for investigating the mass transfer process during air-driven remedial processes for NAPL-contaminated subsurface environment.

key word : NAPL, tracer, partition, transport, soil, groundwater, contamination, remediation

1. 서론

토양 및 지하수에 포함된 NAPL (non-aqueous phase liquid)의 양과 분포를 정확히 측정하는 것은 오염의 정도, 오염의 위험성 및 지반환경복원의 타당성과 복원 후 복원효과의 평가를 위하여 대단히 중요하다. 토양 코어시료의 채취와 분석은 전통적으로 토양오염을 측정하는데 사용되어 왔으나 코어시료의 분석결과는 오염지역의 극히 일부분에 대한 정보만을 제공하므로 NAPL의 3차원적 분포를 측정할 수

없다. 이와 같은 전통적인 지반환경의 NAPL 오염측정기술의 단점을 보완하기 위하여 1990년대 중반 NAPL분배 추적자 기술이 도입되었다(1-3). 이 새로운 기법은 기존의 기술에 비하여 최소한의 굴착을 요구하며 적절한 수의 도입-측정관정의 설치에 따라 관심지역을 전체적으로 평가할 수 있으며 두개 이상의 추적자를 동시에 도입함으로써 보다 정확하게 NAPL 오염 정도를 평가할 수 있다. NAPL 분배 추적자는 도입되는 상에 따라 가스상 추적자와 수용액상 추적자로 구별할 수 있으며 가스상 추적자는 주로 토양층에 대하여, 수용액상 추적자는 대수층에 대하여 주로 사용된다.

기존의 가스상 NAPL 분배 추적자는 주로 동일한 기능을 하는 화합물을 추적자로 사용하여 토양층 내에 존재하는 NAPL의 총량을 측정한다. 토양 내에 존재하는 유체가 물, 토양가스, NAPL로서 세 가지라 한다면 토양 내의 NAPL은 다시 토양가스에 노출된 NAPL과 토양수에 의하여 토양가스로부터 분리된 NAPL로 구별할 수 있다. 토양 내의 NAPL을 토양가스에 노출된 부분과 그렇지 않은 부분으로 분리하여 측정할 수 있으면 토양증기추출 (SVE, Soil vapor extraction)과 같은 NAPL제거 기술의 기초가 되는 휘발 mechanism의 연구에 중요한 정보를 제공할 수 있다. 본 연구의 목적은 두 가지 서로 다른 종류의 가스상 분배 추적자 (분별 NAPL분배 추적자)와 비반응성, 물분배 추적자등 모두 네 가지의 추적자를 동시에 사용하여 이동상 토양가스에 노출된 NAPL과 토양수에 의하여 토양가스로부터 차단된 NAPL 그리고 총 NAPL의 양을 각각 측정하는 새로운 기술을 개발한다.

2. 본론

가스상에서 유동하는 화합물은 여러 가지 분배 및 흡착현상을 경험하게 된다. 물에 용해되지 않는 가스상 화합물은 유동하는 토양가스에 노출된 토양의 표면 및 NAPL에 분배된다. 반면 물에 용해되는 가스상 화합물은 토양가스에 노출된 NAPL 뿐 아니라 물에 용해된 후 물과 접촉하는 NAPL에 분배되거나 물과 접촉하고 있는 토양의 표면에 흡착될 수 있다. 이와 같은 흡착현상은 토양가스와 함께 이동하는 휘발성 유기화합물 (VOC, volatile organic compound) 의 이동속도에 영향을 미치게 된다. 따라서 VOC의 이동속도를 측정하게 되면 각 흡착 domain 의 양을 측정할 수 있다. 지체상수 (retardation factor, R_t)는 토양가스의 이동속도에 대한 VOC의 이동속도의 비율을 의미하며, 또한 흡착 domain의 양과 흡착상수의 크기에 따른다. 물과 NAPL에 분배하며 토양표면 등 다른 domain에 흡착하지 않는 어떤 VOC를 추적자로 사용하였을 때 R_t 와 이들 변수와의 상관관계는 다음과 같다.

$$R_t = \frac{v_g}{v_i} = 1 + \frac{S_w}{K_H S_g} + \frac{K_n(S_{na} + S_{nw})}{S_g} \quad (1)$$

여기에서 v_g 와 v_i 는 각각 토양가스 (비반응성 추적자)와 분배 추적자의 선형이동속도이며 K_n , K_H 는 공기-NAPL분배상수, Henry 상수이고, S_w , S_g , S_{na} , S_{nw} 는 각각 함수율, 공기함유율, 토양가스에 노출된 NAPL의 함유율, 토양가스에 포함되지 않는 NAPL의 함유율에 해당한다. 본 연구에서는 비반응성 추적자로서 Helium을 사용하여 토양가스의 이동속도 v_g 를 측정한다. 첫 번째 NAPL분배 추적자는 n-pentane이며 이 추적자는 물에 대한 용해도가 극히 낮으므로 물에 의하여 이동상 토양가스와 분리된 NAPL에는 분배되지 않는다. 따라서 n-pentane의 이동속도(v_i)에 해당하는 R_t 는 물에 대한 분배항(S_w)과 S_{nw} 가 각각 무시되므로 실험적으로 측정된 R_t 는 S_{na} 를 측정하는 데 사용될 수 있다. 두 번째 NAPL분배 추적자로서 chloroform이 사용되었으며 chloroform의 R_t 는 식(1)의 모든 항이 R_t 의 결정에 간여한다. 물분배 추적자로서 difluoromethane(DFM)이 사용되었으며 DFM은 NAPL에는 분배하지 않으므로 물의

함량(S_w)항만 측정한다. 본 연구에서는 NAPL로서 n-decane이 사용되었다. 실험은 내경 5cm, 길이 85cm의 유리컬럼이 사용되었으며 토양으로서 200-500um의 모래가 사용되었고 총 NAPL함량($S_{na}+S_{nw}$)는 약 2%였다. 컬럼실험은 높은 함수율(S_w 0.68), 낮은 함수율(0.84)의 두 경우에 대하여 실시되었으며 토양가스 이동속도는 2.5cm/min로 일정하게 유지되었다.

3. 결론

함수율이 0.68에서의 비반응성 추적자(He), 물분배추적자(DFM), 그리고 NAPL분배추적자의 파과곡선은 다음 그림(1)과 같다. 비반응성 추적자인 He의 토양컬럼통과 시간에 비하여 물분배 추적자인 DFM, NAPL분배 추적자인 n-pentane, 물과 NAPL에 동시에 분배하는 추적자인 chloroform의 컬럼통과시간이 뚜렷하게 긴 것을 확인할 수 있다. 본 파과곡선의 moment를 분석함으로써 지체상수(R_t)값을 결정하였다(4).

함수율 0.68, 0.84에서 각각 측정된 DFM, n-pentane, chloroform의 R_t 값은 식(1)을 이용하여 각각 S_w , S_{na} , 그리고 $S_{na}+S_{nw}$ 를 계산하는 데 사용되었으며 그 결과를 그림(2)에 나타내었다.

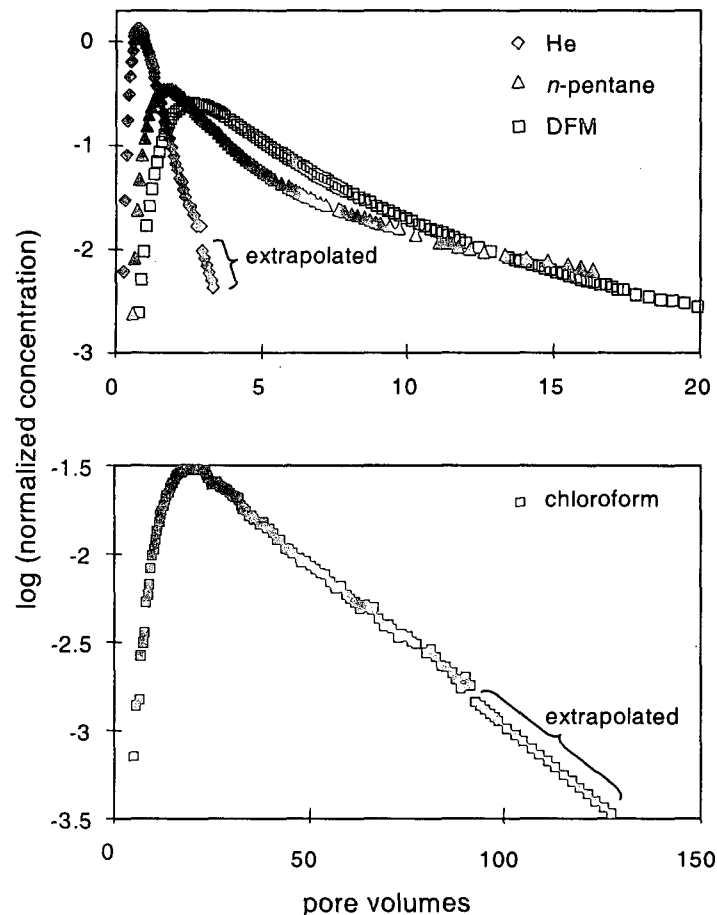
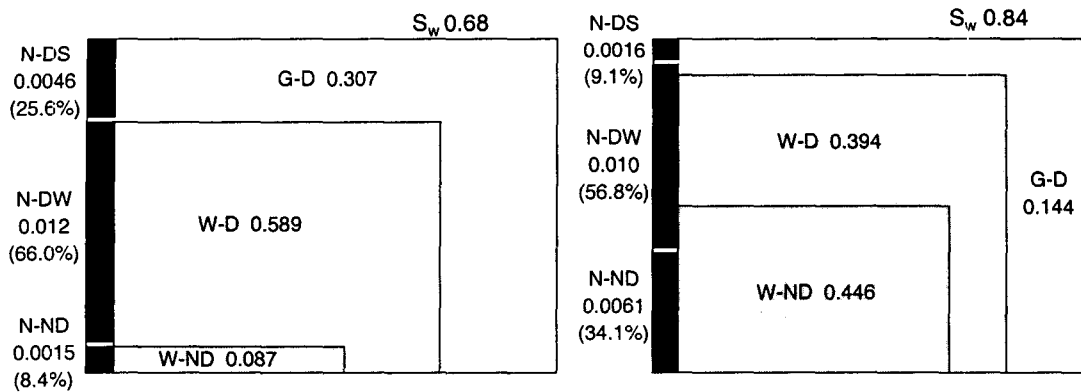


그림 (1). 비반응성 추적자(He) 및 물분배, NAPL 분배 추적자의 파과곡선

그림(2). 추적자에 의하여 측정된 각 유체의 함량분포: 수치는 공기함유율(S_g), 함수율(S_w), NAPL 함유율(S_{na} , S_{nw}); 괄호안의 수치는 총 NAPL에 대한 토양가스 노출 NAPL(N-DS), 노출되지 않은 NAPL (N-DW) 및 분배추적자에 의하여 검출되지 않은 NAPL의 %; G-토양가스, W-토양수, N-NAPL, D-검출

된 유체, ND-추적자에 의해 검출되지 않은 유체, DS-토양가스에 노출된 유체, DW-토양가스에 노출되지 않은 유체.



함수율이 낮을 경우($S_w=0.68$) 대부분의 물이 물분배 추적자인 DFM에 의하여 검출되었으며 토양가스에 노출된 NAPL이 전체 NAPL의 약 26%로서 상대적으로 많은 양의 NAPL이 공기에 노출되었음을 알 수 있다. 함수율이 높을 경우($S_w=0.84$) 전체 NAPL의 9%만 공기에 노출된 것으로 나타났다. 또한 DFM에 의하여 검출된 물보다 검출되지 않은 물이 더 많았다. 낮은 함수율 실험에서는 92%의 전체 NAPL이 chloroform에 의하여 검출되었으나 높은 함수율 실험에서는 65%의 NAPL이 검출되었다. 본 연구의 결과 비반응성 추적자, 물분배 추적자, 두종류의 NAPL분배 추적자를 동시에 사용함으로써 토양가스에 노출된 NAPL의 양과 전체 NAPL의 양이 성공적으로 측정되었으며 이를 바탕으로 토양내 NAPL의 휘발 mechanism을 분석 연구하는데 유용한 기술로서 사용될 수 있을 것으로 전망된다.

4. 참고문헌

- (1) Jin, M.; Delshad, M.; Dwarakanath, V.; McKinney, D. C.; Pope, G. A.; Sepehrnoori, K.; Tilburg, C. E. Partitioning tracer test for detection, estimation, and remediation performance assessment of subsurface nonaqueous phase liquid. *Water Resour. Res.* **1995**, 31, 1201-121
- (2) Deeds, N. E.; Pope, G. A.; McKinney, D. C. Vadose zone characterization at a contaminated field site using partitioning interwell tracer test. *Environ. Sci. Technol.* **1999**, 33, 2745-2751
- (3) Mariner, P. E.; Jin, M.; Studer, J. E.; Pope, G. A. The first vadose zone partitioning interwell tracer test for nonaqueous phase liquid and water residual. *Environ. Sci. Technol.* **1999**, 33, 2825-2828
- (4) Kim, H.; Rao, P. S. C.; Annable, M. D. Gaseous tracer technique for estimating air-water interfacial areas and interface mobility. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **1999**, 63, 1554-1560