

분배성 추적자 기법을 이용한 디젤 오염 토양의 정량적 오염도 평가에 관한 2차원 토조 실험 연구

이성수 · 이광현 · 박준범*
서울대학교 공과대학 건설환경공학부

Quantification of Diesel in Soils using the Partitioning Tracer Method with Two-dimensional Soil Box

Sungsu Rhee · Gwanghun Lee · Junboun Park*
Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

ABSTRACT

The partitioning tracer method is to estimate the residual saturation of nonaqueous phase liquid (NAPL) in soils by analyzing tracer's retardation induced by the reversible partitioning of tracer with NAPL. This study is to estimate the residual diesel saturation in soils using the partitioning tracer method. Two-dimensional soil box was used to represent the 2-dimensional flows of groundwater and tracer solution in the saturated aquifer, and the soil box was filled with soil and then saturated with water. The residual diesel saturation was induced in saturated soil, and the partitioning tracer method was applied. The results from batch-partitioning experiment indicated that the diesel-water partitioning was linear with respect to tracer's concentration, and the partition coefficient of tracer between diesel and water was measured by their linearities. The groundwater flow in the saturated aquifer was simulated in the 2-dimensional soil box, and the residual diesel contamination was visually identified. The results from the partitioning tracer method with or without diesel in soils confirmed that 4-methyl-2-pentanol, 2-ethyl-1-butanol and 1-hexanol, can be used as a detecting method for diesel contamination. By the accuracies of estimations for diesel contamination using the partitioning tracer method, 2-ethyl-1-butanol showed the highest accuracy with 83%.

Key words : Soil contamination, LNAPL, Diesel, Partitioning tracer method, 2-D soil box experiment

1. 서 론

산업이 발전함에 따라 지하로 누출된 유류에 의한 토양 및 지하수의 오염은 지반환경의 가장 큰 문제점들 중 하나가 되었다(Brusseau et al., 1999, Cheon et al., 2004, Jha et al., 2008, Son et al., 2009). 가솔린, 디젤, 등유 및 항공유 등의 유류는 일반적으로 물에 대한 용해도가 낮고 밀도가 물에 비해 가볍기 때문에 저밀도 비수용성 유체(LNAPLs)로 알려져 있다. 지중으로 유출된 저밀도 비수용성 유체는 비포화대에서는 중력에 의해 수직적으로 하향 이동을 하게 되고 지하수와 만나면서 지하수위면 위로 떠서 지중에 존재하는 것이 일반적이나, 지하수위의 오

르내림으로 인해 포화대에 잔류하는 형태로 존재하기도 한다(Bedient et al., 1999, Cain et al., 2000, Fetter, 2001, Lee et al., 2001). 유류로 오염된 지하수와 토양을 효과적으로 정화하기 위해서는 지중에 존재하는 유류의 정확한 양과 오염 범위를 아는 것이 필수적이다. 일반적인 오염도 조사법은 주로 시추조사법에 근거하고 있는데, 이러한 방법은 시료의 채취 과정에서 유류의 2차적인 오염이 발생할 수 있고 지역적으로 불균질하게 존재하는 유류 오염을 정확하게 대표할 수 없다는 단점이 있다(Dai et al., 2001).

분배성 추적자 기법은 기존 시추 조사법에 근거한 토양 오염도 조사법의 단점을 보완하기 위해 1990년대 말부터

*Corresponding author : junbpark@snu.ac.kr

원고접수일 : 2010. 2. 3 심사일 : 2010. 2. 19 게재승인일 : 2010. 2. 24
질의 및 토의 : 2010. 4. 30 까지

지금까지 활발히 연구되어 왔다(Jin et al., 1995, Nelson and Brusseau, 1996, Annable et al., 1998, Nelson et al., 1999, Young et al., 1999, Cain et al., 2000, Rao et al., 2000, Davis et al., 2002, Devine et al., 2004, Jones and Smith, 2005, Werner et al., 2009). 분배성 추적자 기법은 유류와 같은 비수용상 유체(NAPL)와 가역적으로 반응하는 추적자를 오염 토양을 통해 흘려보낸 후, 지중 내에서 NAPL과의 반응성 정도에 따라 추적자의 이동 속도가 지연되는 양상을 정량적으로 분석하여 잔류 NAPL의 토양 오염도를 예측하는 방법이다. 따라서 분배성 추적자 시험법의 가장 큰 장점은 NAPL 오염 지역을 점원으로 채취하여 오염도를 분석하는 것이 아니라 상대적으로 넓은 오염 지역에 대해 연속적이고 전체적인 오염도를 측정하여 신뢰성이 높은 오염도 조사 결과를 얻을 수 있다는 데 있다(Jin et al., 1995).

본 연구에서는 최근 들어 가장 문제가 되고 있는 토양 유류오염을 정량적으로 평가하기 위해 분배성 추적자 기법을 적용하였다. 지하수 및 추적자의 2차원 흐름을 모사하기 위해 2차원 모형 토조를 제작하였고, LNAPL로 오염된 토양의 경우 불포화대보다 포화대에서 잔류 유류 오염량이 큼을 고려하여(Dominico and Schwartz, 1997) 2차원 모형 토조를 토양으로 채운 후 포화대로 모사하였고 토양을 디젤로 오염시킨 후 잔류 유류 오염 상태를 형성시켜 분배성 추적자 기법을 적용하였다. 분배성 추적자 기법을 통해 예측된 잔류 디젤 오염량은 실제 오염량과 비교하여 정량적 오염도 분석의 정확도를 분석하였다.

2. 실험방법

2.1. 실험 재료

지하수 및 추적자의 2차원 흐름을 모사하기 위해 아크

릴 재질의 모형 토조를 Fig. 1과 같이 제작하였다. 모형 토조는 내부 폭 4 cm, 길이 80 cm, 높이 35 cm의 크기를 가지며 내부의 토압과 수압을 견디기 위해 아크릴 재질의 보강재를 외벽에 덧대어 안정성을 확보하였다. 토조의 양쪽 옆면에 유입구 및 유출구를 각각 3개씩 설치하였고, 윗면에는 토조 외부에서 오염물질 주입관 연결하기 위한 원형 구멍들을 설치하였다.

충적토로 이루어진 포화대를 모사하기 위해 주문진 표준사를 사용하였고, A사에서 디젤을 구입하여 잔류 디젤 오염을 모사하는데 사용하였다. 디젤은 Sudan IV 시약을 사용하여 빨간색으로 염색되었으며, 사용된 디젤의 비중은 15°C에서 0.81 g/cm³이고 물에 대한 용해도는 47 mg/L로 측정되었다.

분배성 추적자 기법에는 알코올 계열의 물질들이 사용되었다. 디젤과 가역적인 분배 반응을 하는 분배성 추적자로는 4-methyl-2-pentanol, 2-ethyl-1-butanol, 1-hexanol이 사용되었으며, 디젤과 반응하지 않고 지하수의 흐름을 반영하는 비분배성(보전성) 추적자로는 methanol이 사용되었다. 각 추적자들의 기본적인 물리 특성은 Table 1에 정리되어 있다.

2.2. 회분식 분배 실험

분배성 추적자 기법에 사용되는 추적자들이 디젤과 가역적으로 반응하는 정도를 나타내는 인자인 분배계수(K_{ow})는 회분식 분배 실험을 통해 구해졌다. 4-methyl-2-pentanol, 2-ethyl-1-butanol, 1-hexanol과 증류수를 각각 섞어 0, 100, 400, 600 mg/L의 농도 범위로 제작한 후, 20 mL 유리 용기에 염색된 디젤과 알코올들을 각각 10 mL씩 상부 공간을 최소화하여 담고 Teflon 재질의 마개로 막은 후 약 20°C에서 24시간 교반시켰다. 교반이 끝난 후, 1시간동안 수용상(물)과 비수용상(유류)의 분리틀

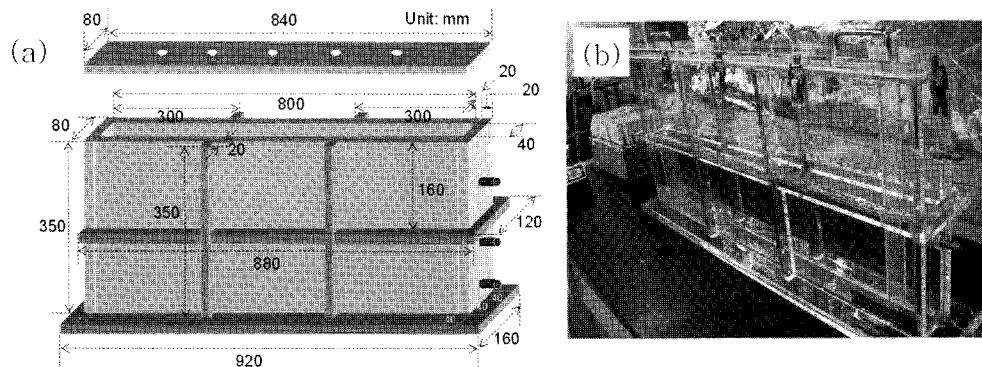


Fig. 1. Two-dimensional soil tank used in this study: (a) schematic design and (b) soil tank before filling soils.

Table 1. Physical properties of the alcohol tracers

Name	Formula	Molecular weight (g/mol)	Boiling point (°C)	Usage
Methanol	CH ₃ OH	32.04	64.7	Nonpartitioning tracer
4-methyl-2-pentanol	(CH ₃) ₂ CHCH ₂ CH(OH)CH ₃	102.18	131.0	Partitioning tracer
2-ethyl-1-butanol	(C ₂ H ₅) ₂ CHCH ₂ OH	102.18	146.0	
1-hexanol	CH ₃ (CH ₂) ₅ OH	102.17	157.0	

위해 정체시키고 원심분리기를 이용해 5분 동안 두 상들을 다시 분리시켰다. 이때, 상부에는 비수용상이 하부에는 수용상이 존재하게 되는데 하부 수용상에서 2 mL를 채취하여 가스크로마토그래피 장비(GC-FID)를 이용하여 액상에 존재하는 알코올의 농도를 분석하였다. 알코올이 디젤과 액상 사이에서 분배되는 분배계수(K_{nw})는 Eq. 1을 이용하여 계산되었는데, 분배계수는 물에 녹아있는 알코올의 농도(C_w)와 디젤에 녹아있는 알코올의 농도(C_n) 사이의 비이며, C_n 은 초기 알코올의 농도와 분배 실험 후 C_w 와의 차이로 계산되었다.

$$K_{nw} = \frac{C_n}{C_w} \quad (1)$$

2.3. 지하수 흐름 및 잔류 디젤 오염의 모사

2차원 모형 토조에 지하수 흐름을 모사하기 위해 다음과 같은 과정으로 토조를 구성하였다. 토조 내부에는 다공성 판과 유리비즈를 설치하였는데, 주입 및 추출되는 지하수들을 토조 전반에 걸쳐 주입 및 추출하기 위해 설치하였다. 다공성 판을 토조 내 지하수 유입구 및 유출구로부터 5 cm 떨어진 거리에 각각 설치하고 오염물질 주입정을 토조 중앙에 위치시켰다. 다공성 판과 유·출입구 사이에는 유리 비즈(glass beads)를, 다공성 판 사이에는 주문진 표준사를 각각 동일한 높이로 유지시키며 30 cm 까지 채워 넣었다. 이때, 토조 내 물질들은 동다짐 횡수와 강도를 일정히 하여 다짐의 정도가 토조 내부에 걸쳐 일정하도록 유지하였다. 포화 지하수대를 모사하기 위해 토조 상부에 5 cm 두께로 물과 반죽된 벤토나이트 층을 설치하여 토조 내부를 밀봉한 후, 토조 최상부를 아크릴 덮개로 막아 밀봉하여 토조 외부로 지하수 및 공기가 새지 않도록 처리하였다.

주문진 표준사로 채워진 2차원 모형 토조를 포화시키기 위해 이산화탄소 가스를 6시간 동안 주입한 후, 3 mL/min의 유량으로 48시간 이상 토조 하부로부터 증류수를 주입하였다. 토조 내 지하수의 이동을 시각적으로 확인하기 위해 빨간색 염료로 염색된 증류수를 2.0 mL/min의 유량으로 4시간 동안 주입하고 이후에 다시 증류수를 동

일한 유량으로 계속 주입하며 토조 벽면에서 염료의 이동 양상을 관찰하였다.

빨간색으로 염색된 디젤은 토조 포화 이후에 토조에 미리 설치해 둔 오염물질 주입관을 통해 0.1 mL/min의 유량으로 24시간 동안 토조 하부에 주입하였다. 주입된 디젤의 양과 토조 밖으로 유출된 디젤의 양을 측정해 토조 내 유류의 오염도를 측정하였다. 디젤 주입이 끝난 후 증류수를 계속 주입하여 이동상의 디젤을 토조 내에서 제거하고 잔류 디젤 오염 상태를 유도하였다.

2.4. 분배성 추적자 실험

토조를 디젤로 오염시키기 전·후, 총 2회에 걸쳐 분배성 추적자 실험을 수행하였다. 분배성 추적자인 4-methyl-2-pentanol과 2-ethyl-1-butanol 및 1-hexanol을 비분배성 추적자인 methanol과 섞어 각각 600 mg/L의 농도로 제작하였다. 추적자 혼합 용액을 4시간 동안 2 mL/min의 유량으로 토조에 주입하고 다시 증류수로 실험이 종료할 때까지 동일한 유량으로 토조에 주입하였다. 유출구에서는 1 시간마다 2 mL의 유출수를 채취하고 공기와의 접촉을 최소화시킨 상태에서 채취한 즉시 GC를 이용해 알코올의 농도를 분석하였다.

토조 내 잔류 디젤 오염량은 Jin et al.(1995)가 제시한 Eq. 2를 이용하여 예측되었으며 예측된 잔류 디젤 오염량(S_n)을 미리 측정된 실측치와 비교하여 분배성 추적자 기법의 정확도를 계산하였다. Eq. 2에서 R 은 분배성 추적자의 비분배성 추적자에 대한 지연 계수이고, V_n 은 토양 공극 내 존재하는 디젤의 부피이며, V_p 는 토양 내 총 공극의 부피이다.

$$S_n = \frac{R-1}{K_{nw}+R-1} = \frac{V_n}{V_p} \quad (2)$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 추적자와 디젤의 분배 특성

비수용상(디젤)과 수용상(증류수)에 분배되는 추적자의

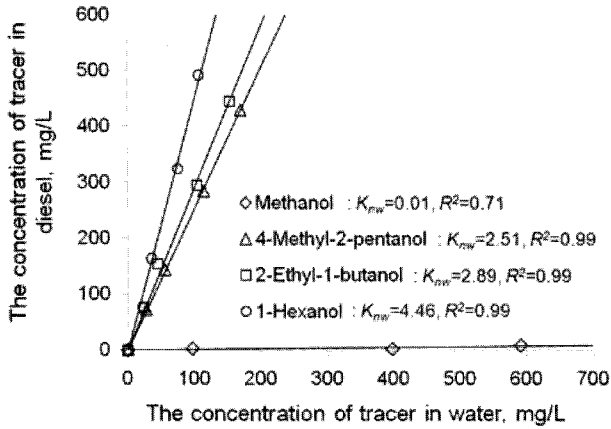


Fig. 2. Partitioning of alcohol tracers between diesel and water.

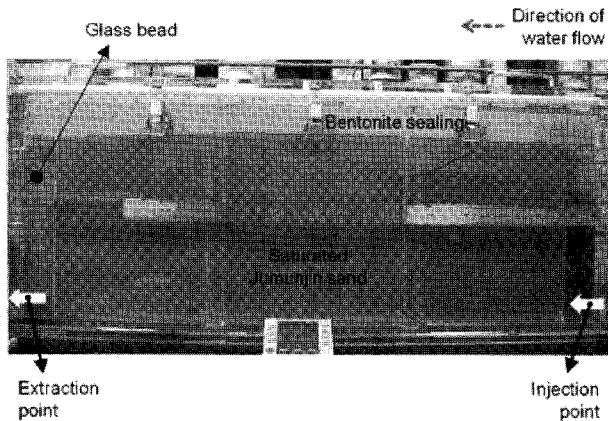


Fig. 3. Dyed groundwater flowing within the two-dimensional soil tank.

분배 특성을 Fig. 2에 도시하였다. 수용상에 녹아있는 추적자의 농도가 커질수록 비수용상에 녹아있는 추적자의 농도는 선형적으로 커졌으며, 그 선형적 분배성을 바탕으로 각 그래프의 기울기가 추적자와 유류의 가역적 반응성 정도를 나타내는 계수인 분배계수(K_{nw})가 됨을 확인하였다. methanol의 K_{nw} 값은 결정계수(R^2)가 0.71로 다른 추적자들에 비해 낮았지만 이는 K_{nw} 값이 0.01로 아주 작기 때문으로 여겨지며 0에 가까운 K_{nw} 값은 methanol이 디젤에 거의 분배되지 않는 비분배성 추적자임을 나타낸다. 다른 추적자들의 경우 K_{nw} 값이 모두 0보다 큰 분배성 추적자임을 확인되었으며 추적자들의 끓는점이 클수록 디젤에 대해서 높은 분배계수를 가짐이 발견되었다.

회분식 분배 실험에서 측정된 이러한 K_{nw} 값들은 2차원 모형 토조 실험에서 구해질 추적자의 지연계수(R)과 함께 Eq. 2에 대입되어 분배성 추적자 기법을 통한 잔류 디젤 오염량 예측 및 정확도 분석에 사용되게 된다.

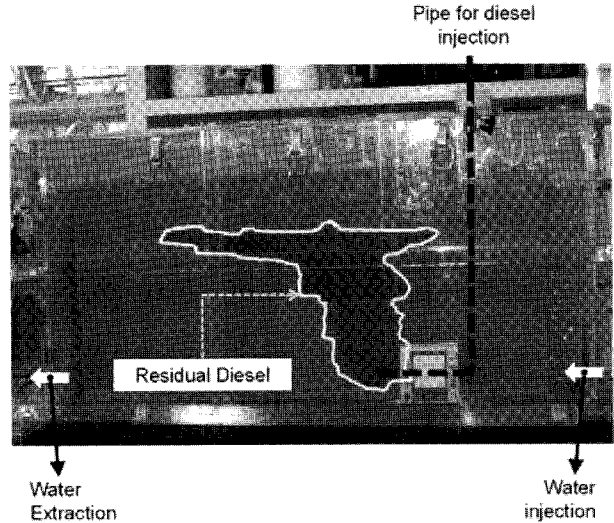


Fig. 4. Residual contamination of diesel within the two-dimensional soil tank.

3.2. 2차원 모형 토조로 모사된 포화 지하수대의 흐름과 잔류 디젤 오염

2차원 모형 토조 실험에서 토조 내의 지하수 흐름은 주문진 표준사 층의 전반에 걸쳐 주입한 용액이 통과하는 것을 확인하기 위해 필요하다. Fig. 3은 빨간색 염료로 염색된 증류수를 토조로 약 10시간 동안 주입했을 때의 모습으로 유리 비즈 층을 통과하면서 끌고루 퍼진 용액은 토양층 전체에 걸쳐 흘러가며 피압대수층에서의 지하수 흐름 양상과 유사했다.

Fig. 4는 포화된 주문진사 층의 하부에서 염색된 디젤을 주입하고 3일이 지난 이후의 분포를 보여준다. 주입된 디젤 중 이동상 디젤은 물보다 가벼운 비중으로 인해 토조 상부로 상승하였고 모세관력에 의해 토양 공극 내에 고정상으로 잔류하는 것으로 판단된다(Bedient et al., 1999). 이와 같은 상태에서는 지하수가 흘러가더라도 디젤은 더 이상 이동하거나 확산하지 않는 잔류 오염 상태임이 가시적으로 확인되었다.

3.3. 분배성 추적자 기법을 이용한 잔류 디젤 오염량 예측

토조 내 토양을 디젤로 오염시키기 전 분배성 추적자 기법을 적용한 결과는 Fig. 5와 같다. 1차 모멘트 방법(Jin et al., 1995)으로 각 추적자들의 토조 내 평균 체류 시간을 계산한 결과, methanol은 2839 mL, 4-methyl-2-pentanol은 2852 mL, 2-ethyl-1-butanol은 2860 mL, 1-hexanol은 2864 mL이었다. 비분배성(보존성) 추적자인 methanol을 기준으로 분배성 추적자들의 지연 계수(R)를 각각 계산해보면 4-methyl-2-pentanol은 1.00, 2-ethyl-1-

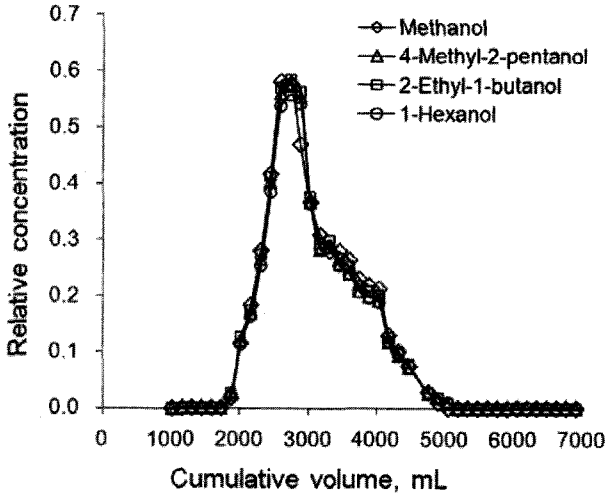


Fig. 5. Effluent concentration of tracers from the two-dimensional soil tank containing water-saturated soils without diesel.

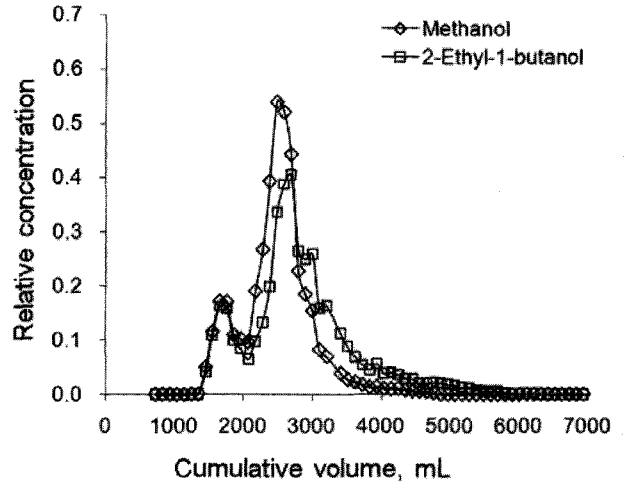


Fig. 7. Effluent concentrations of methanol and 2-ethyl-1-butanol from the two-dimensional soil tank containing water-saturated soils contaminated by residual diesel.

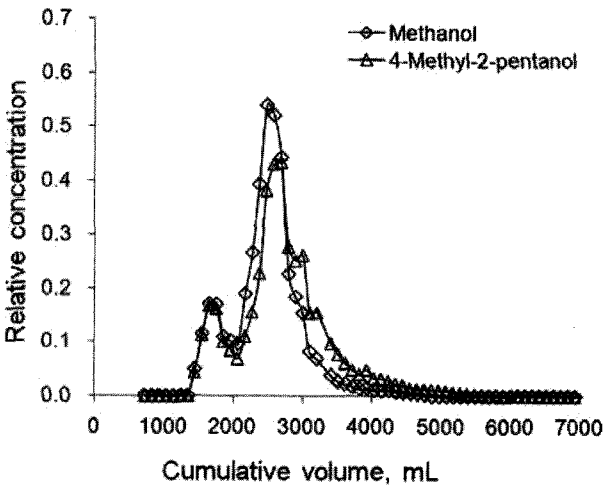


Fig. 6. Effluent concentrations of methanol and 4-methyl-2-pentanol from the two-dimensional soil tank containing water-saturated soils contaminated by residual diesel.

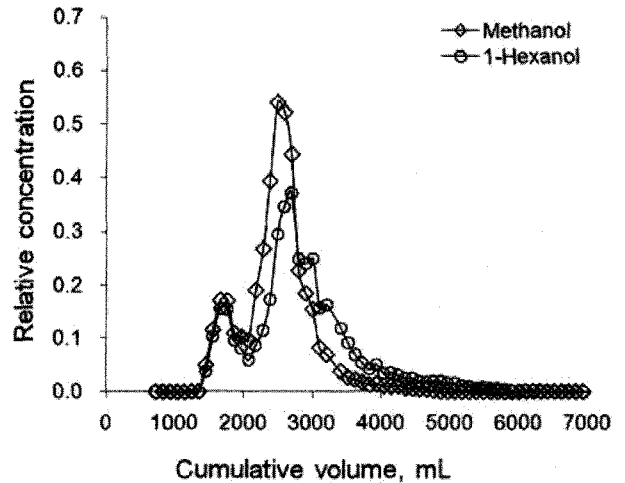


Fig. 8. Effluent concentrations of methanol and 1-hexanol from the two-dimensional soil tank containing water-saturated soils contaminated by residual diesel.

butanol은 1.01, 1-hexanol은 1.01로 모든 분배성 추적자들은 토양이 디젤로 오염되지 않을 경우 자연 현상이 거의 발생하지 않음을 확인할 수 있었다. 이는 역으로 디젤의 오염 여부를 모르는 토양에 분배성 추적자 기법을 적용하였을 때 추적자들의 분리 현상이 발생하지 않으면 그 토양은 디젤로 오염되지 않았음을 지시한다. 한편, 디젤로 오염되지 않은 주문진사로만 채워진 토조에 주입된 추적자들의 분리 현상이 없음으로부터 주입된 알코올 추적자는 공기 중으로의 휘발이나 토양으로의 흡착 등의 반응이 없음을 유추할 수 있었다.

디젤로 오염된 토조에 분배성 추적자 기법을 적용한 결

과를 Fig. 6~8에 도시하였다. 1차 모멘트 방법으로 추적자들의 평균 체류 시간을 계산한 결과, methanol은 2337 mL, 4-methyl-2-pentanol은 2570 mL, 2-ethyl-1-butanol은 2660 mL, 1-hexanol은 2667 mL이었다. 비분배성(보존성) 추적자인 methanol을 기준으로 분배성 추적자들의 지연 계수(R)를 각각 계산해보면 4-methyl-2-pentanol은 1.10, 2-ethyl-1-butanol은 1.14, 1-hexanol은 1.14로 분배성 추적자인 4-methyl-2-pentanol, 2-ethyl-1-butanol, 1-hexanol은 디젤과 반응하지 않는 methanol에 비해 그 이동속도가 지연됨이 각각 확인되었다. 또한, 디젤로 오염되지 않은 토조로부터의 분배성 추적자 실험 결과와의 비교를 통해,

Table 2. Residual saturation of diesel in the soil box

Contaminant	S_n^{mea} *	Tracer	S_n^{est} **	Accuracy, %
Diesel	0.06	4-Methyl-2-pentanol	0.04	67
		2-Ethyl-1-butanol	0.05	83
		1-Hexanol	0.03	50

*: The residual saturation of diesel obtained using the method of volume measurement

** : The residual saturation of diesel estimated using the partitioning tracer method

Accuracy (%) = $S_n^{est} / S_n^{mea} \times 100$

추적자들의 분리 현상은 디젤 오염으로 인해 발생하는 것으로 유추할 수 있었다. 따라서 4-methyl-2-pentanol, 2-ethyl-1-butanol, 1-hexanol을 추적자로 사용하는 분배성 추적자 기법은 디젤 오염의 여부를 감지할 수 있는 디젤 오염 탐지 기법으로 사용될 수 있음이 본 실험을 통해 확인되었다.

토조 실험으로부터 구해진 R 값과 분배 실험으로부터 구해진 K_m 값을 Eq. 2에 대입하여 토조 내 존재하는 잔류 디젤 오염량을 분배성 추적자 기법을 통해 정량적으로 예측하였고(S_n^{est}), 토조 내로 실제로 주입 및 추출된 디젤 양으로부터 디젤 오염량(S_n^{mea})을 구하여 비교하였다(Table 2). 비록 1-hexanol이나 4-methyl-2-pentanol의 경우 디젤 오염량 예측의 정확도가 각각 50 및 67%로 신뢰성이 떨어졌지만, 2-ethyl-1-butanol의 경우 83%의 정확도로 디젤 오염량을 예측함이 확인되었다. 본 연구에서는 2-ethyl-1-butanol의 정확도가 가장 높은 이유를 정확히 밝혀내지는 못했지만, 분배성 추적자 기법에 사용되는 분배성 추적자의 종류에 따라 오염량 예측이 영향을 받음을 의미하여 보다 정확한 오염량 예측을 위해서는 다양한 종류의 분배성 추적자의 적용성 검토가 필요함을 시사한다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 분배성 추적자 기법을 적용하여 토양 내 디젤 오염을 정량적으로 평가하고자 하였다. 지하수 및 추적자의 2차원 흐름을 모사하기 위해 2차원 모형 토조를 제작하였고, 포화대에서의 LNAPL 오염을 모사하기 위해 2차원 모형 토조를 토양으로 채우고 물로 포화시킨 후 잔류 유류 오염 상태를 형성시켜 분배성 추적자 기법을 적용하였다.

회분식 분배 실험 결과, 수용상에 녹아있는 추적자의 농도가 커질수록 비수용상에 녹아있는 추적자의 농도는 선형적으로 커졌으며, 그 선형적 분배성을 바탕으로 각 그래프의 기울기가 추적자와 유류의 가역적 반응성 정도를 나타내는 계수인 분배계수를 구할 수 있었다.

2차원 모형 토조실험을 통해, 포화 지하수대에서의 지하수 흐름이 확인되었고, 토조 내 토양이 잔류 디젤로 오염되었음을 가시적으로 확인할 수 있었다. 비록 제작된 2차원 모형토조를 이용한 실험에서 2차원 지하수 흐름의 모사에는 한계점이 나타났지만, 추적자의 2차원 흐름 및 국지적 디젤 오염이 가능하였다. 토양을 디젤로 오염시킨 전·후에 각각 분배성 추적자 기법을 적용한 결과, 4-methyl-2-pentanol, 2-ethyl-1-butanol, 1-hexanol은 토양의 디젤 오염 여부를 확인할 수 있는 지시자(detector)로서 사용될 수 있음이 확인되었다. 또한 실험에 사용된 추적자의 오염도 예측의 정확도를 분석해 본 결과, 2-ethyl-1-butanol이 83%의 가장 높은 정확도로 디젤 오염을 정량적으로 예측함이 확인되었다.

사 사

본 연구는 서울대학교 SIR BK21 (안전하고 지속가능한 사회기반건설)사업단의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

- Annable, M.D., Rao, P.S.C., Hatfield, K., Graham, W.D., Wood, A.L., and Enfield, C.G., 1998, Partitioning tracers for measuring residual NAPL: Field-scale test results, *J. Environ. Eng.*, **124**, 498-503.
- Bedient, P.B., Rifai, H.S., and Newell, C.J., 1999, *Groundwater Contamination: Transport and Remediation* (2nd ed.), Prentice Hall, New Jersey.
- Brusseau, M.L., Nelson, N.T., and Cain, R.B., 1999, The partitioning tracer method for In-situ detection and quantification of immiscible liquids in the subsurface, in: *Innovative Subsurface Remediation, Field Testing of Physical, Chemical, and Characterization Technologies*, ACS Symposium Series 725, American Chemical Society, Washington, p. 208-225.
- Cain, R.B., Johnson, G.R., McCray, J.E., Blanford, W.J., and

- Brusseau, M.L., 2000, Partitioning tracer test for evaluating remediation performance, *J. Ground Water*, **38**, 752-761.
- Cheon, J.Y., Lee, J.Y., and Lee, K.K., 2004, Characterization of the hydrogeologic environment at a petroleum hydrocarbon contaminated site in Korea, *Environ. Geol.*, **45**, 869-883.
- Dai, D., Barranco, Jr. F.T., and Illangasekare, T.H., 2001, Partitioning and interfacial tracers for differentiating NAPL entrapment configuration: Column-scale investigation, *Environ. Sci. Technol.*, **35**, 4894-4899.
- Davis, B.M., Istok, J.D., and Semprini, L., 2002, Push-pull partitioning tracer tests using radon-222 to quantify non-aqueous phase liquid contamination, *J. Contam. Hydrol.*, **58**, 129-146.
- Devine, C.E., McCray, J.E., Martin, L.M.W., Blanford, W.J., Blitzer, D.J., Brusseau, M.L., and Boving, T.B., 2004, Partitioning tracer tests as a remediation metric: Case study at naval amphibious base little creek, Virginia Beach, Virginia, *Remediation, J.*, **14**, 7-31.
- Domenico, P.A. and Schwartz, F.W., 1997, *Physical and Chemical Hydrogeology* (2nd ed.), Wiley, New York.
- Fetter, C.W., 2001, *Contaminant Hydrogeology* (4th ed.), Prentice Hall, New Jersey.
- Jha, R., Singh, V.P., and Vatsa, V., 2008, Analysis of urban development of Haridwar, India, using entropy approach, *KSCE J. Civ. Eng.*, **12**, 281-288.
- Jin, M., Delshad, M., Dwarakanath, V., McKinney, D.C., Pope, G.A., Sepehrnoori, K., Tilburg, C.E., and Jackson, R.E., 1995, Partitioning tracer test for detection, estimation, and remediation performance assessment of subsurface nonaqueous phase liquids, *Water Resour. Res.*, **31**, 1201-1211.
- Jones, E.H. and Smith, C.C., 2005, Non-equilibrium partitioning tracer transport in porous media: 2-D physical modeling and imaging using a partitioning fluorescent dye, *Water Res.*, **39**, 5099-5111.
- Lee, J.Y., Cheon, J.Y., Lee, K.K., Lee, S.Y., and Lee, M.H., 2001, Factors affecting the distribution of hydrocarbon contaminants and hydrogeochemical parameters in a shallow sand aquifer, *J. Contam. Hydrol.*, **50**, 1539-1583.
- Nelson, N.T. and Brusseau, M.L., 1996, Field study of the partitioning tracer method for detection of dense nonaqueous phase liquid in a trichloroethene-contaminated aquifer, *Environ. Sci. Technol.*, **30**, 2859-2863.
- Nelson, N.T., Oostrom, M., Wietsma, T.W., and Brusseau, M.L., 1999, Partitioning tracer method for the in situ measurement of DNAPL saturation: Influence of heterogeneity and sampling method, *Environ. Sci. Technol.*, **33**, 4046-4053.
- Rao, P.S.C., Annable, M.D., and Kim, H., 2000, NAPL source zone characterization and remediation technology performance assessment: Recent developments and applications of tracer techniques, *J. Contam. Hydrol.*, **45**, 63-78.
- Son, Y., Oh, M., and Lee, S., 2009, Influence of diesel fuel contamination on the electrical properties of unsaturated soil at a low frequency range of 100 Hz-10 MHz, *Environ. Geol.*, **58**, 1131-1348.
- Young, C.M., Jackson, R.E., Jin, M., Londergan, J.T., Mariner, P.E., Pope, G.A., Anderson, F.J., and Houk, T., 1999, Characterization of a TCE NAPL zone in alluvium by partitioning tracers, *Ground Water Monit. Remediat.*, **19**, 84-94.