



토양 탱크에서 흡수 알코올과 비흡수 알코올을 이용한 벤젠-비수용상액체 제거 연구

송충현, 정승우[†]

군산대학교 환경공학과

(2009년 8월 25일 접수일, 2009년 9월 23일 수정일, 2009년 9월 26일 채택일)

Removal of Benzene-Nonaqueous Phase liquid(NAPL) in Soil Tank by NAPL Swelling and Non-swelling alcohols

Chung-Hyun Song, Seung-Woo Jeong[†]

Department of Environmental Engineering, Kunsan National University

ABSTRACT

Coinjection of alcohol and air or alcohol flooding only were evaluated with 3-D soil tank for removal of nonaqueous phase liquid (NAPL) contaminant from soil. 70%-ethanol and 40%-iso-propanol were used for non-NAPL-swelling alcohol and NAPL-swelling alcohol, respectively. 729 ml-benzene was placed in the 37 liter soil tank. Alcohols were respectively injected from the injection well placed near the bottom of the tank and mobilized free phase NAPL and aqueous phases were then recovered from the extraction well placed in the upper part of the soil tank. Approximately 50% of removed NAPLs were free-phase in all experiments. The results were completely different to the previous soil column experiment results and also implied that alcohol properties did not affect the NAPL removal efficiency in the 3-D soil tank experiment. Air was also co-injected with alcohol to evaluate co-injection effects on NAPL removal. Enhanced NAPL removal effect of co-injection of 70%-ethanol and air was also found even in the 3-D soil tank evaluation. However, co-injection effect of 40%-iso-propanol and air was less apparent. This study determined that the most important parameter governing alcohol flooding for NAPL removal would be extraction capacity to recover NAPL and aqueous phase flowing in the soil. More researches are required for improving recovery efficiency of extraction well in real soil contamination conditions.

Keywords : Nonaqueous phase liquid; alcohol flooding; soil contamination

[†]Corresponding author : swjeong@kunsan.ac.kr

초록

토양으로 유출된 비수용상액체(nonaqueous phase liquid; NAPL)의 제거를 위한 알코올 희석 세정공정의 기술개발을 위하여 3-D 토양탱크에서 NAPL 흡수 및 비흡수 알코올 단독 또는 공기 동시 주입공정에 의한 벤젠 NAPL 제거 효과를 평가하였다. 37L 규모의 토양탱크에 729mL의 벤젠을 주입하고 70%에탄올(NAPL 비흡수 알콜)과 40%이소 프로판올(NAPL 흡수 알콜)을 탱크 하부에 설치된 주입정에 주입하고 상부의 추출정으로부터 자유상 NAPL 및 수용액을 추출하였다. 그리고 알코올 주입과 공기를 동시 주입하여 기존 토양칼럼실험에서 확인된 공기 동시주입시 화학세정 증대 효과를 아울러 평가하였다. 70% 에탄올 및 40% 이소-프로판올에 의한 토양탱크 세정공정 결과 전체 벤젠 제거율의 과반수는 자유상 NAPL 형태로 제거되었다. 알코올의 NAPL 흡수 특성에 따라 벤젠 제거 특성이 현저히 다르게 나타난 토양칼럼결과와 달리 3-D공정에서는 알코올 NAPL 흡수특성의 영향이 매우 적게 나타났다. 70%에탄올과 공기 동시 주입에 의한 벤젠 제거 증대 효과는 3-D 토양탱크 실험결과에서도 여전히 확인되었다. 그러나 NAPL 흡수 알코올인 40% 이소-프로판올은 공기 동시 주입에 의한 벤젠 제거 증대효과가 여전히 미미하게 나타났다. 3-D 토양탱크 실험결과 화학세정공정에 의한 NAPL제거에 있어 가장 중요한 인자는 추출정의 NAPL 및 유출수 추출능력이었다. 즉 토양내 효과적인 NAPL 정화를 위해서는 화학적인 작용에 의하여 이동된 자유상 NAPL 및 수용액을 밖으로 효율적으로 추출할 수 있는 공정이 필요하다.

핵심용어 : 비수용상액체, 알코올세정, 토양오염

1. 서론

유류, 금속세척제 등으로 사용되는 벤젠(benzene)과 TCE(Tri-chloroethylene) 등은 물에 대한 용해도가 상당히 낮은 비수용상액체(Non-aqueous phase liquids, NAPL)로서 토양이나 지하수에 유출될 경우 장기간 오염물질을 발생시키는 오염원으로 작용한다¹⁾. NAPL제거를 위해 양수후 처리방법(Pump&Treat)을 많이 사용하고 있지만 낮은 NAPL 용해도로 인해 많은 시간을 필요로 한다²⁾. 최근 NAPL의 용해도를 증대시키기 위해 알코올 희석액을 사용한 cosolvent 세정공정이 적용되기에 이르렀다^{3,4)}. cosolvent 세정공정 또한 불균질한 토양의 성질로 인해 세정액과 NAPL간의 접촉의 문제점이 나타나 접촉효율의 증대를 위해 cosolvent와 공기의 동시주입 공정이 최근 연구되고 있다^{5,6)}.

본 연구의 목적은 3-D 토양탱크에서 알코올 희석액과 공기 동시 주입공정에 의한 벤젠 NAPL 제거 효과를 평가하고자 하였다. 그동안 토양칼럼에서의 NAPL

제거효과는 평가되었지만 규모가 큰 3-D 토양탱크에서의 NAPL 제거효과는 평가된 적이 없었다. 그리고 본 연구의 세부 목적으로는 토양탱크 조건에서 NAPL 제거 메커니즘이 NAPL를 용해시키는 작용과 이동시키는 작용으로 각기 다른 알코올특성에 따른 제거 효과를 평가하여 실제 현장에서 고려되어야 할 운영인자를 도출하는 것이다. 본 연구에서는 NAPL이 알코올로 용해되는 비흡수성 알코올로 에탄올을 사용하였고, 알코올이 NAPL로 흡수되는 흡수성 알코올로 이소-프로판올(Iso-propanol)을 사용하여 알코올의 NAPL 흡수 특성에 따른 NAPL 제거효과를 평가하였다.

2. 재료 및 방법

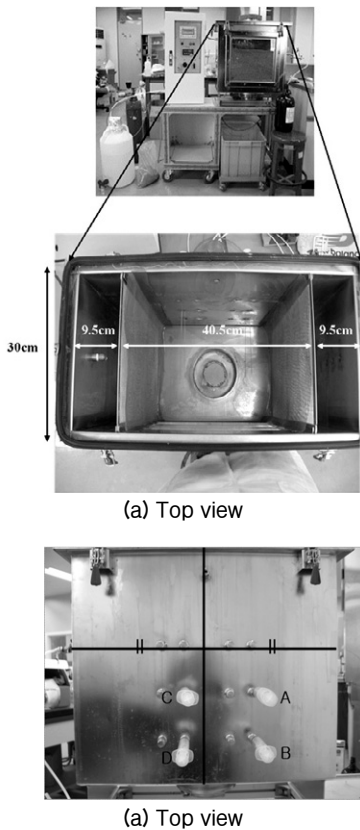
2.1 알코올 희석액과 벤젠-NAPL간의 평형 특성

본 연구에서 사용한 에탄올 및 이소-프로판올과 벤젠간의 평형시 물리·화학적 특성을 파악하였다. 두 개의 50ml 메스실린더에 각각 70% 에탄올, 40% 이소-

프로판올 25ml를 넣고 염색된 벤젠(0.5g Oil-Red-O/L benzene)을 25ml 씩 넣은 후 혼합하였다. 두 층의 분리를 위하여 48시간 동안 정치시킨 후 상하로 분리된 각 층의 시료를 일정량 채취하여 벤젠 용해도, 밀도 및 점도를 측정하였다.

2.2 탱크 실험 장치

실험 탱크의 구조와 규격은 [Fig. 1]과 같다. 탱크 가운데 40.5 cm간격의 36.45 L [40.5 cm(가로) × 30 cm(세로) × 30 cm(높이)]에 해당하는 공간에 모래를 채웠다. 탱크의 양 옆 벽면에서 9.5 cm 떨어진 위치에서 철망 스크린을 설치하여 유리구슬을 채워 넣어 수용액 흐름의 연속성을 유지하였다. 실험에 사용된 모래의 특성은 [Table 1]과 같다.

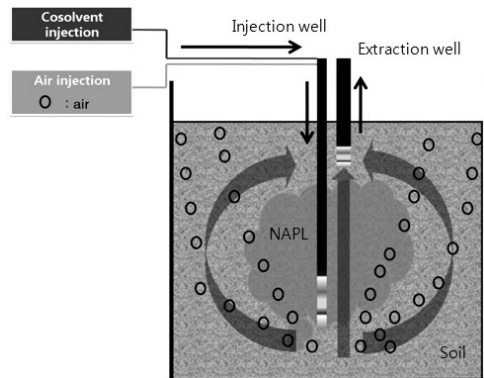


[Fig. 1] Configuration of soil tank used for this study (A, B, C, D shown in (b) Rear view : sampling points)

[Table 1] Soil Properties Used in Soil Tank Experiments

Particle size(μm) (w/w)	Porosity	Permeability (*10 ⁻⁸ cm ²)	Pore volume (mL)
53 ~ 106 (2.98%)	0.40±0.01	2.37±0.17	14,580
106 ~ 250 (14.81%)			
250 ~ 355 (12.64%)			
355 ~ 425 (7.96%)			
425 ~ 500 (5.32%)			
500 ~ 600 (7.76%)			
600 ~ 700 (15.91%)			
1000 ~ 2000(19.40%)			
2000 ~ (12.07%)			

벤젠-NAPL 주입량은 공극부피 (Pore volume (PV), 36.45 L × 0.4(공극률) = 14.58 L)의 5%에 해당하는 0.729 L 이었다. 본 연구에서는 공극부피 산정 시, 스크린과 스크린 사이의 모래로 채워진 부분만을 고려하였다. 알코올 희석액 및 공기의 주입과 유출수 배출을 위하여 [Fig. 2]과 같이 주입·추출정을 설치하였다. 알코올 희석액과 공기는 탱크 바닥에 설치된 주입정을 통해 토양으로 주입되고 배출수는 상부 토양표면으로부터 3cm 에 설치된 추출정을 통해 배출된다. 주입정은 하부로부터 6cm 길이 안에 12개의 주입구가 뚫려있고, 추출정은 하부로부터 12cm 길이 안에 20개의 추출구가 뚫려있으며 모래의 유입을 막기 위하여 철망 스크린을 씌웠다.



[Fig. 2] A flushing scheme applied in the NAPL contaminated soil tank.

2.3 탱크실험 방법

탱크에 건조시킨 모래를 하부로부터 30cm 까지 채우고, 탱크 양 옆의 스크린으로 차단된 빈 공간은 유리구슬로 채웠다. 정 중앙의 상부로부터 5cm 깊이에 벤젠을 7.43ml/min 으로 1시간 38분 동안 0.729 L(공극 부피의 5%)를 주입하였다. 벤젠-NAPL 주입 완료 후, 양 옆의 유리구슬이 채워진 부분으로 각각 55 ml/min 으로 물을 주입하여 탱크내 수위를 설치된 추출정에 유입 가능한 높이인 하부로부터 27cm 높이까지 상승시켰다.

수위가 27cm 가 되면 이 시점을 알코올 희석액 주입 시작점(0 PV)으로 하여 알코올 희석액을 단독 혹은 공기와 함께 동시 주입하였다. 추출정으로 부터 55ml/min 의 유량으로 유출수를 추출하였으며 1시간 단위로 시료를 채취하였다. 추출정의 유출수에는 자유상 NAPL 및 수용액이 혼합되어 있어 층 분리 후 각각의 부피 및 벤젠 농도를 측정하였다.

2.4 분석방법

유출수내 벤젠 농도 분석을 위하여 Luna 10u C18(2) 100A(Phenomenex) 칼럼이 장착된 HPLC (High Performance Liquid Chromatography, Waters)를 이용하였다. 검출기의 파장은 250 nm, 유량은 1ml/min 이었고, 이동상은 80% 메탄올을 사용하였다. 고농도의 시료는 80% 메탄올을 이용하여 10배 단위로 희석하였다. 유출수의 부피는 메스실린더를 이용하여 측정하였다. 밀도는 시료의 부피를 피펫으로 측정하고, 정밀화학저울 (Ohaus Corp., Model AR2140, Pine Brook, NJ)로 무게를 측정하여 계산하였다. 점도는 Brookfield 점도계 (Brook field viscometer, Model LVDV-II +pro cp, Stoughton, MA)를 이용하여 측정하였다.

2.5 탱크실험장치 내 벤젠-NAPL 질량비 산정

탱크실험장치 세정 기간 중 탱크 내 잔존하는 NAPL 질량은 초기 NAPL 주입 질량에서 유출된 NAPL 및 수용액의 벤젠 농도와 부피를 곱하여 산정된 벤젠 질량을 빼어 결정하였다. 벤젠-NAPL 질량비는 다음과

같이 정의하였다.

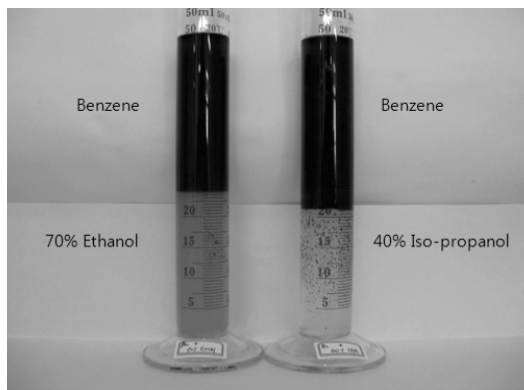
$$\text{벤젠 NAPL 질량비}(m/m_0) = \frac{\text{해당시간 NAPL 잔여질량}}{\text{초기 NAPL 주입 질량}}$$

공기의 주입으로 인한 벤젠의 휘발량은 선행된 연구 결과를 참고하여 본 연구에서는 영향이 미비하다고 판단하여 벤젠-NAPL 질량비 산정에 고려하지 않았다⁷⁾.

3. 결과 및 고찰

3.1 알코올 희석액과 벤젠-NAPL 간의 물리·화학적 특성 변화

알코올 희석액과 벤젠-NAPL 혼합 후, 평형 상태에서 물리·화학적 특성 변화를 조사한 결과는 [Fig. 3]과 [Table 2]와 같다. [Fig. 3]은 혼합 후 평형상태에서의 NAPL 부피 변화를 보여준다. 70% 에탄올 및 40% 이소-프로판올과 혼합된 벤젠의 부피가 각각 1.04 배, 1.16 배 증가되었다. 밀도와 점도의 변화는 [Table 2]와 같다. 70% 에탄올의 벤젠 용해도는 84 g/L로서 많은 양의 벤젠을 용해시키지만 40% 이소-프로판올은 3 g/L에 그치고 있다. 에탄올을 NAPL과 접촉시 알코올 층에 머물러 있으면서 벤젠을 용해시키는 비흡수알콜(non-swelling alcohol)이며 이소-프로판올은 NAPL에 흡수되므로 (i.e., 흡수알콜 (swelling-alcohol)) 벤젠의 용해도가 적은 반면 NAPL의 점도를 떨어뜨리는 특징을 나타냈다.



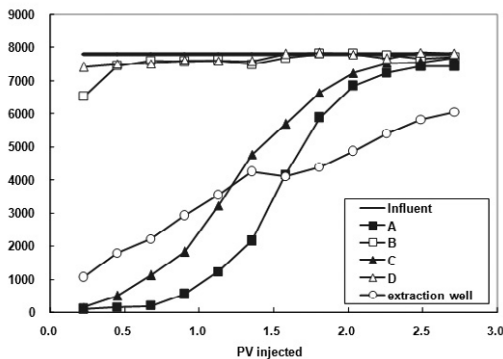
[Fig. 3] Divided layers after equilibrated between red-dyed benzene and alcohols

[Table 2] Properties of Benzene and NAPL Mixtures on Equilibrium

Item		Density (g/mL)	Viscosity (cP)	Solubility (mg/L)	Partition ratio
Dyed benzene		0.869±0.015	0.71±0.00		
70%-ethanol		0.895	2.33		
40%-Iso-propanol		0.908±0.006	4.21		
Benzene + 70%-ethanol	Benzene layer	0.851±0.021	0.72±0.01		1.04
	70%-ethanol layer	0.854±0.016	3.03±0.06	84486±3169	
Benzene + 40%-Iso-propanol	Benzene layer	0.848±0.010	0.68±0.03		1.16
	40%-Iso-propanol layer	0.930±0.001	3.56±0.02	3297±27	

3.2 토양 탱크 실험장치의 추적자 실험

토양 탱크 실험에 앞서 토양내 유체의 분포정도를 파악하기 위하여 10,000mg/L NaI 수용액으로 추적자 실험을 수행하였다. 하부에 설치된 주입정으로부터 추적자를 주입하였고, [Fig. 1]에 제시된 탱크 뒷면의 시료 추출지점 A, B, C, D와 추출정[Fig. 2]에서 유출수를 채취하여 추적자의 농도(전기전도도로 측정함)를 모니터링하였고 각 지점 및 추출정에서의 농도변화는 [Fig. 4]와 같았다.



[Fig. 4] Tracer test results conducted in the soil tank(tracer: 10000 mg/l NaI; A, B, C, D : sampling points placed on the wall of the soil tank)

토양탱크 하단에 위치하여 주입정과 가까운 B와 D 지점은 0.5 공극부피에서 유입수에 가까운 전기전도도를 나타내었지만 상단에 위치한 A와 C 지점은 2.5 공극부피에 도달하여야 유입수에 가까운 전기전도도 값을 나타내었다. 그리고 4개의 시료 추출 지점보다 높은 곳에 위치한 추출정에서 수집된 시료의 전기전도도는 2.94 PV 에서도 주입 추적자에 상응하는 전기전도도 값을 갖지 못하였다. 추적자 실험결과, 세정액 주입량이 3 공극부피가 되면 탱크 실험장치 내부 곳곳으로 알코올 혼합액이 충분히 전달되는 것으로 판단되어 실험 종말점을 3공극부피로 결정하였다.

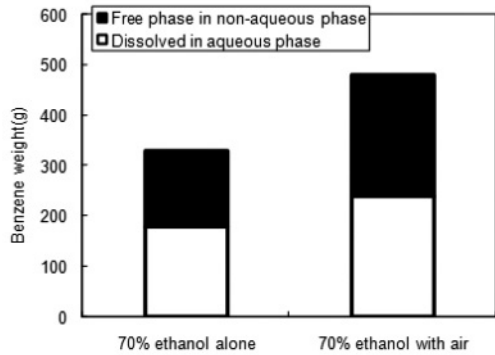
탱크 하부에 위치한 B와 D에서는 주입정과 추출정과의 이격 거리가 의미 없을 정도로 유체의 전달이 빠르게 일어났지만, 상부의 A와 C, 두 지점에서는 주입·추출정에 근접할수록 유체 전달이 빠르게 일어났다.

3.3 에탄올 희석액 세정 공정의 공기 동시 주입효과

[Fig. 5]는 70% 에탄올 단독 주입 시와 공기 동시 주입 시에 탱크로부터 유출된 자유상 벤젠과 용해된 벤젠의 양을 나타낸다. 선행 토양 칼럼을 이용한 연구에서는 벤젠-NAPL의 70% 에탄올 세정 시, 대부분의 벤젠이 70% 에탄올 층에 용해되어 유출되었다⁸⁾. 그렇

지만 토양 탱크 실험에서는 자유상 형태로 유출되는 벤젠의 양과 에탄올 층에 용해되어 유출된 벤젠의 양이 비슷하게 나타났다.

토양탱크에서 자유상 벤젠의 유출은 70% 에탄올의 주입으로 인한 압력 증가와 계면장력 감소로 인해 실험초기에 발생할 수 있다²⁾. 선행 토양 칼럼 실험 결과와 다르게 유출된 자유상 벤젠의 양이 전체 벤젠 추출량의 50%에 가깝게 나타난 것은 실험 초반에 추출정 주위에 많은 양의 벤젠이 위치해 있기 때문인 것으로 판단된다⁹⁾. 그리고 [Fig. 5]에서 보듯이 공기 동시 주입 세정에서 자유상 벤젠의 용출이 70% 에탄올 단독 주입 세정보다 상대적으로 많은 이유는 공기 동시 주입으로 인한 압력의 증가로 인하여 추출정 밑부분에 위치해 있던 자유상 벤젠이 위쪽으로 밀려 올라와 추출되었기 때문인 것으로 판단된다.

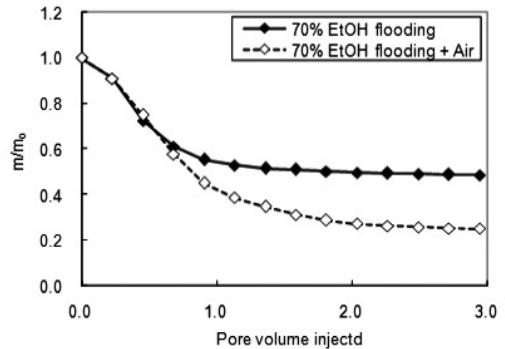


[Fig. 5] Comparison of dissolved benzene and free phase of benzene discharged from the soil tank; 70% ethanol alone: 70% ethanol (55 ml/min) flooding; 70% ethanol with air: 70% ethanol (55 ml/min) flooding with air (150 ml/min).

용해된 벤젠 양이 70% 에탄올 단독 세정과 공기 동시 주입 세정에서 차이를 보인다. 이는 기존 연구결과와 동일하게 공기가 우선흐름경로를 통과하면서 우선흐름경로에 위치한 70% 에탄올을 우선흐름경로 밖으로 밀어내어 벤젠-NAPL과의 접촉을 증대시켜 벤젠 용해를 향상시켰기 때문이다^{5),6)}. 또한 70% 에탄올과 동시에 주입된 공기는 NAPL을 잘게 부수어 70% 에탄

올과 NAPL의 혼합을 향상시켜 제거를 용이하게 한다. 따라서 3-D 토양 탱크 실험에서도 70% 에탄올과 공기 동시 주입 세정에 의한 NAPL 제거 증대 효과를 확인하였다.

[Fig. 6]은 에탄올에 의한 NAPL 세정시 토양탱크 내 초기 NAPL질량에 대한 잔존하는 벤젠-NAPL 질량비를 나타낸 것이다. 이 질량비는 앞서 언급한 바와 같이 초기 벤젠 NAPL 주입 질량(729ml, mo = 633.5g)에서 유출수내 용해된 벤젠과 자유상 벤젠의 양을 차감하여 결정하였다. 70% 에탄올공정은 공기를 동시 주입 할 경우 NAPL 오염원의 제거 효율이 향상되는 것으로 나타났다.



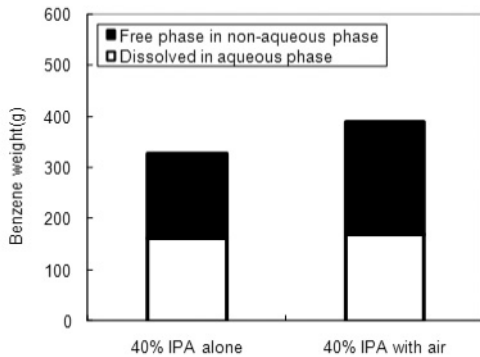
[Fig. 6] Effect of co-injection of air on 70% ethanol (55 ml/min) flooding; m/mo is the ratio of mass of NAPL to the initial mass; cosolvent : air = 1 : 2.7.

3.4 이소-프로판올 희석액 세정 공정의 공기 동시 주입효과

[Fig. 7]은 40% 이소-프로판올 단독 세정 시와 공기 동시 주입 세정 중 토양탱크로부터 유출된 자유상 벤젠과 용해된 벤젠의 양을 나타낸 것이다. 70% 에탄올 세정 결과와 유사하게 40% 이소-프로판올 세정에서도 추출된 벤젠의 50% 정도가 자유상 형태로 추출되었다.

앞선 1-D 칼럼실험에서는 자유상 NAPL을 이동시켜 제거하는 흡수 알코올(1-프로판올, TBA, Tert-butanol)이 NAPL을 용해시켜 제거하는 비흡수 알코

올(에탄올)보다 벤젠-NAPL 제거 효율이 뛰어나게 나타났다^{6),8)}. 그렇지만 3-D 탱크 실험에서 흡수 알코올세정의 벤젠-NAPL 제거 효율은 1-D 칼럼 실험과 비교하여 우수하지 못하였다. 이와 같은 이유는 1-D 토양칼럼과 3-D 토양탱크의 구조적 차이에 의한 것으로 판단된다. 즉, 1-D 토양 칼럼 실험에서는 상부의 유출구로 제거된 오염물질이 자연스럽게 흘러나오지만 토양 탱크에서는 추출정으로부터 펌프를 이용하여 추출정 주변에 모인 오염물질만을 추출하게 된다. 따라서 3-D 토양 탱크실험에서 이소-프로판올의 NAPL 제거 효율이 그다지 우수하지 못한 이유는 탱크실험에 사용된 추출정이 효과적으로 NAPL을 회수하지 못한 것으로 판단된다.

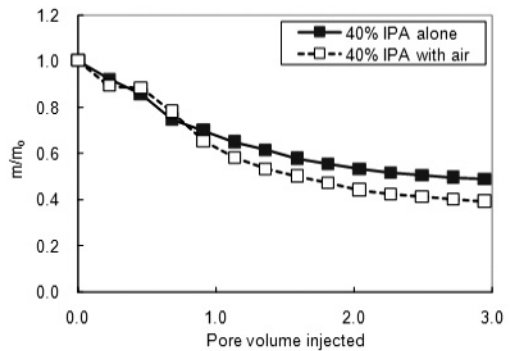


[Fig. 7] Comparison of dissolved benzene and free phase of benzene discharged from the soil tank; 40% IPA alone: 40% IPA-cosolvent(55ml/min) flooding; 40% IPA with air: 40% IPA-cosolvent(55ml/min) flooding with air(150 ml/min)

추출정[Fig. 2] 흡입구가 1군데로 한정되어 있어 벤젠 NAPL의 추출이 원활하지 못한 것이 첫 번째 이유가 될 수 있으며, 벤젠은 밀도가 낮으므로 토양상부로 이동된 NAPL의 경우 토양하부에 설치된 추출정으로는 배출시킬 수 없는 것도 이유가 될 수 있다. 따라서 NAPL이동을 주요 제거 메카니즘으로 사용하는 흡수성 알코올 세정의 경우 현장 및 3-D 토양탱크실험에서 이동된 NAPL의 추출이 가장 중요한 운영 인자로 작용할 것으로 판단된다.

[Fig. 8]은 이소-프로판올에 의한 NAPL 세정시 토양탱크 내 초기 NAPL질량에 대한 잔존하는 벤젠-NAPL 질량비를 나타낸 것이다. 40% 이소-프로판올 단독 주입 세정의 경우 앞 문단에서 언급하였듯이 추출정의 구조적인 문제 때문에 40% 이소-프로판올이 3 공극부피 주입되었을 때 약 50%의 벤젠-NAPL만이 제거되었다. 선행된 토양 칼럼 실험장치에서는 tert-butyl alcohol (TBA)에 의해 약 80%의 벤젠이 제거되었었다⁹⁾.

공기 동시주입에 의한 영향은 토양칼럼실험결과와 유사하게 나타났다. 즉 이소-프로판올과 같은 NAPL 흡수알콜의 경우는 공기에 의한 NAPL제거 증대효과가 거의 일어나지 않았다. 이는 동시에 주입된 공기가 40% 이소-프로판올의 토양 공극 간의 이동을 방해하는 것으로 판단된다⁶⁾.



[Fig. 8] Effect of co-injection of air on 40% IPA-cosolvent(55 ml/min); m/m0 is the ratio of NAPL to the initial mass; cosolvent : air = 1 : 2.7.

4. 결론

3-D 토양탱크에서 흡수 및 비흡수 알코올 희석액과 공기 동시 주입공정에 의한 벤젠 NAPL 제거 효과로 고찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 70% 에탄올 (NAPL 비흡수 알콜) 및 40% 이소-프로판올(NAPL 흡수 알콜) 모두 토양탱크 세정

에서 전체 벤젠 제거량의 과반수가 자유상 NAPL로 제거되었다. 알코올의 NAPL 흡수 특성에 따라 자유상 NAPL 제거량이 현저히 다르게 나타난 토양칼럼에 비해 3-D공정에서는 알코올 NAPL 흡수특성에 따른 영향이 매우 적게 나타났다.

- (2) 3-D 토양탱크내 공기 동시주입에 의한 벤젠 제거 증대 효과는 70% 에탄올 공정에서 여전히 확인되었다. 그러나 NAPL 흡수 알코올인 40% 이소-프로판올에서는 공기 동시 주입에 의한 벤젠 제거 증대효과는 여전히 미미하게 나타났다.
- (3) 3-D 토양탱크 실험결과 알코올 세정공정에 의한 NAPL제거에 있어 가장 중요한 인자는 추출정의 NAPL 및 유출수 추출능력이었다. 즉 토양내 화학적인 작용에 의하여 이동된 자유상 NAPL 및 수용액이 밖으로 효과적으로 추출될 수 있는 공정이 적용되어야 한다.

사사

본 연구는 환경부 토양·지하수 오염방지 기술개발 사업의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. USEPA, Treatment Technologies for Site Cleanup: Annual Status Report, 11th edition, pp. 4~8. (2004).
2. Hofstee, C., Ziegler, C. G., Trotschler, O. and Braun, J., "Removal of DNAPL contamination from the saturated zone by the combined effect of vertical upward flushing and density reduction", J. Contam. Hydrol., 67(1-4), pp. 61~78. (2003).
3. Imhoff, P. T., Gleyzer, S. N., McBride, J. F., Vancho, L. A., Okuda, I. and Miller, C. T., "Cosolvent-enhanced remediation of residual dense nonaqueous phase liquids: experimental investigation", Environ. Sci. Technol., 29(8), pp. 1966~1976. (1995).
4. Jawitz, J. W., Sillan, R. K., Annable, M. D., Rao, P. S. C. and Warner, K., "In-situ alcohol flushing of a DNAPL source zone at a dry cleaner site", Environ. Sci. Technol., 34(17), pp. 3722~3729. (2000).
5. Jeong, S-W., Wood, A. L. and Lee, T.R., "Enhanced contact of cosolvent and DNAPL in porous media by concurrent injection of cosolvent and air", Environ. Sci. Technol., 36(23), pp. 5238~5244. (2002).
6. 송충현, 정승우, "Cosolvent와 공기 동시 주입 공정에 의한 토양 내 벤젠-NAPL 세정 증대 연구", 대한 환경공학회지, 7(11), pp. 1095~1101. (2008).
7. Jeong, S-W., Wood, A. L. and Lee, T.R., "Enhanced removal of DNAPL trapped in porous media using simultaneous injection of cosolvent with air: influencing factors and removal mechanisms", J. Hazard. Mater., 101(2), pp. 109~122. (2003).
8. 송충현, 정승우, 이병진, 고성환, "Cosolvent에 의한 토양 내 Benzene-NAPL 세정 연구", 한국지하수도 양환경학회지, 13(3), pp. 45~51. (2008). 