

## Cosolvent에 의한 토양 내 Benzene-NAPL 세정 연구

송충현<sup>1</sup> · 정승우<sup>1\*</sup> · 이병진<sup>1</sup> · 고성환<sup>2</sup>

<sup>1</sup>군산대학교 토목환경공학부 환경공학전공, <sup>2</sup>(주)에코필

### Removal of Benzene-NAPL in Soil Column by Cosolvent Flooding

Chung-Hyun Song<sup>1</sup> · Seung-Woo Jeong<sup>1\*</sup> · Byung-Jin Lee<sup>1</sup> · Sung-hwan Go<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Engineering, Kunsan National University

<sup>2</sup>Ecophile Co.,Ltd

#### ABSTRACT

Removal of nonaqueous phase liquid present in the soil column by using cosolvent floods was investigated. The first objective of the study was to elucidate the removal mechanism of cosolvent flooding for benzene-NAPL. The second objective of the study was to evaluate the effects of the alcohol partitioning type (NAPL swelling and non-swelling) and concentration on NAPL removal efficiency from the soil column. The main NAPL removal mechanism of swelling alcohol was mobilization, while that of non-swelling alcohol was NAPL dissolution. The NAPL removal efficiency of swelling alcohol was more effective than that of non-swelling alcohol. Removal of Benzene NAPL entrapped in the soil would be effective under the cosolvent flood condition of alcohol content greater than 40% in volume.

**Key words :** Cosolvent, Benzene-NAPL, Dissolution, Mobilization

#### 요 약 문

토양공극에 위치한 벤젠-NAPL(Non-Aqueous Phase Liquid)에 대한 cosolvent 세정기술을 연구하였다. 토양칼럼을 이용하여 cosolvent 내 알코올 특성 및 농도 변화에 따른 NAPL 제거 변화를 실험하였다. NAPL에 흡수되어 부피를 증가시키는 NAPL swelling 알코올(1-프로판올, TBA)과 Non-swelling 알코올(에탄올) 특성에 따른 NAPL 제거 효과를 평가한 결과, 에탄올 cosolvent의 NAPL 제거 메커니즘은 용해이며, swelling 알코올의 주요 NAPL 제거 메커니즘은 이동임이 확인되었다. 토양 내 NAPL 제거에 있어 용해보다는 NAPL 이동에 의한 제거가 훨씬 효과적이었다. 알코올 농도 변화 실험에서, cosolvent 내 알코올 함유량이 40% 이상 되어야 토양 내 NAPL의 이동이 현저히 증가하는 것으로 나타났다.

**주제어 :** 세척액, 벤젠-NAPL, 용해, 이동

#### 1. 서 론

현재 토양 및 지하수 복원 방법으로 가장 많이 채택되고 있는 기술은 Pump & Treat(P&T) 방법으로서, 이는 오염토양으로부터 유발되는 오염지하수를 지상으로 펌핑하여 처리하는 수동적 정화방법이다(U.S. EPA, 2004). 그러나 수동적인 P&T 방법으로는 수십 년에 이르는 장기간의 복원 소요기간이 요구된다는 점이 알려지면서 구미를 중심으로 대체 복원기술에 대한 연구개발이 매우 활발하게 이루어지고 있다. 근래의 대체 복원기술 개발에 대한 열망은 토양 및 지하수 복원 기술에도 많은 변화를 야기하고 있다. 수동적 방법에서 탈피하여 오염원을 직접적으로 정화하고자 하는 Source Control 기술의 개발과

이의 적용이 급속도로 증가되고 있다(U.S. EPA, 2004).

\*Corresponding author : swjeong@kunsan.ac.kr

원고접수일 : 2008. 2. 20 심사일 : 2008. 5. 26 게재승인일 : 2008. 5. 30  
질의 및 토의 : 2008. 8. 31 까지

Source Control 기술의 적용은 직접적인 오염원을 제거하여 복원기간을 최소화하고 인체 및 주변 환경에 미치는 악 영향을 최소화 할 수 있다. Source Control 기술의 대부분이 지중(In-Situ) 처리 기술로 개발되고 있으며, 이 가운데 지중 세척(In-Situ Flushing)과 지중 산화(In-Situ Oxidation, ISO) 기법은 기존의 P&T 시설을 이용하면서 복원의 효율을 급격히 증가시킬 수 있다는 점에서 각광받고 있다. 미래, 차세대 토양 및 지하수 복원방법의 방향은 지상의 구조물 및 활동에 영향을 주지 않고 복원기간을 줄일 수 있는 방향으로 발전될 가능성이 높으므로 Source Control 방식과 지중(In-Situ) 처리 방식이 적용되는 지중 세척 및 산화기법(In-Situ Flushing and ISO)에 대한 관심이 증대 되고 있다.

본 연구에서는 지중 세척 공정의 하나인 cosolvent(알코올 혼합액) 세척 공정으로 NAPL의 제거 효율을 높일 수 있는 효율적인 세척액을 평가하고자 하였다. 오염원인 NAPL의 세척액 연구는 근래 다수의 연구자에 의해 활발히 진행되고 있으며, cosolvent와 계면활성제에 관한 연구가 대부분이다(Lunn and Kueper, 1997; Rasburg and Pennell, 2002; Ramsburg et al., 2003). 본 연구는 알코올과 물의 혼합 cosolvent 세척액 연구에 초점을 맞추었다.

알코올은 NAPL과 접촉 할 경우 알코올 흡수 특성에 따라 Swelling 알코올과 Non-swelling 알코올로 분류된다. Swelling 알코올은 NAPL과 접촉 시 NAPL에 흡수되어 NAPL의 부피 변화를 일으키는 특성을 가지고 있으며, Non-swelling 알코올은 NAPL을 알코올 층으로 용해시키는 특성을 가지고 있다(Hayden et al., 1999). 본 연구는 swelling 알코올의 세척 특성을 연구하기 위하여 1-프로판올(1-propanol)과 TBA(Tert-Butyl Alcohol)를 선정하였고, Non-swelling 알코올의 특성을 파악하기 위하여 에탄올(ethanol)을 선정하였다.

본 연구의 첫 번째 목적은 NAPL swelling 및 Non-swelling 등 알코올 특성에 따른 토양 내 NAPL 제거 효과를 평가하고자 하였다. 두 번째 연구 목적은 선정된 cosolvent 알코올의 농도 변화에 따른 토양 내 NAPL 제거 효과를 평가하였다. 실험에 토양 칼럼을 사용하였으며, NAPL로 벤젠(benzene)을 선정하였다. 칼럼 실험으로부터 배출되는 유출수 분석을 통하여, 알코올 특성 및 농도 차이에 따른 벤젠-NAPL 제거 효율을 평가하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 실험 재료

토양 칼럼으로는 원통형의 스테인리스 칼럼이 사용되었으며, 전체적인 실험 장치는 Fig. 1과 같고 규격은 Table 1과 같다. 칼럼에 채워진 모래는 Table 2와 같은 특성을 가진 주문진사를 이용하였다. 벤젠과 알코올은 삼전화학(경기도, 평택) 제품을, NAPL의 시각화를 위한 Oil-Red-O는 Sigma-Aldrich Inc.의 제품을 사용하였다.

### 2.2. 칼럼 실험 절차

주문진사는 증류수로 세척 후 105°C에서 24 시간 이상 건조 후 칼럼 실험에 사용하였다. 매 실험 마다 동일한 투수성(permeability)을 유지하기 위하여 주문진사 20 g을 채울 때 마다 214 g의 무게를 가진 탄성이 없는 고무롤 13 cm 높이에서 12번 씩 떨어뜨렸다(St-pierre et al. 2004). 주문진사가 채워진 칼럼에 이산화탄소를 10 mL/min 으로 3 공극부피(Pore Volume, 입자로 채워지지 않은 빈 공간의 부피; 1 공극부피 = 160 mL) 주입하였고, 공기가 탈리된 증류수를 5 mL/min으로 2 공극부피 주입하여 포화상태로 만들었다. 벤젠-NAPL은 Oil-Red-O로 염색(0.5 g · Oil-Red-O/L · benzene)시켰으며 12.6 mL를 시린지 펌프(781100, Kd Scientific)를 사용하여 칼럼 하단에서 0.75 mL/min 유속으로 주입하였다.

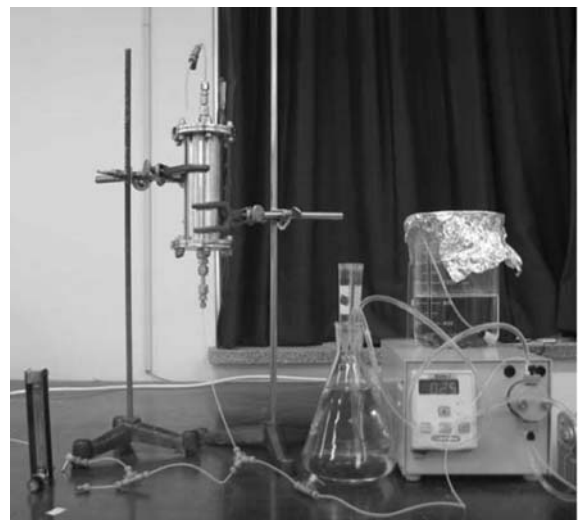


Fig. 1. Apparatus of column experiment.

Table 1. Properties of soil column

Item	Diameter of column (cm)	Length of column (cm)	Total volume (mL)	Column material
Value	5.5	16	380	stainless

**Table 2.** Soil properties

Media	Grain size (μm) : (w/w)	Bulk density (g/mL)	Porosity (ratio)	permeability k (× 10 <sup>-8</sup> )
Joomoonjin sand	< 250 : 0.85%	1.53 ± 0.01	0.422 ± 0.00	4.67 ± 0.85
	250 ~ 355 : 4.80%			
	355 ~ 425 : 34.33%			
	425 ~ 500 : 41.01%			
	500 ~ 600 : 19.01%			

벤젠을 토양 내에 고르게 분산시키기 위하여 공기가 탈리된 증류수를 7.65 mL/min으로 칼럼의 하단에서 상향식으로 3 공극부피 (480 mL) 주입하였다. 이 조작이 완료된 시점을 실험 시작 시점으로 잡았으며 그래프에 0 Pore Volume으로 표시하였고 이후 알코올-cosolvent를 주입하였다. 위 칼럼 실험 절차는 알코올 특성별, 농도별 실험에서 모두 동일하게 적용되었다.

알코올 특성에 따른 토양 내 NAPL 제거 효과를 평가하기 위한 실험에서는 NAPL과 분배 이동 현상이 뚜렷하게 발생하는 것으로 알려진 70% 에탄올, 50% 1-프로판올, 50% TBA를 사용하였고, 알코올의 농도 변화에 따른 토양 내 NAPL 제거 효과를 평가하기 위한 실험에서는 30%, 40%, 50%(v/v) 1-프로판올과 20%, 30%, 40%(v/v) TBA를 사용하였다.

**2.3. 유출수의 분석**

유출수 내 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 1 mL/min이었고, 이동상은 80% 메탄올을 사용하였다. 고농도의 시료는 80% 메탄올을 이용하여 10배 단위로 희석하였다. 유출수의 부피는 메스실린더를 이용하여 측정하였다.

**2.4. 토양 칼럼 내 벤젠-NAPL 질량비 산정**

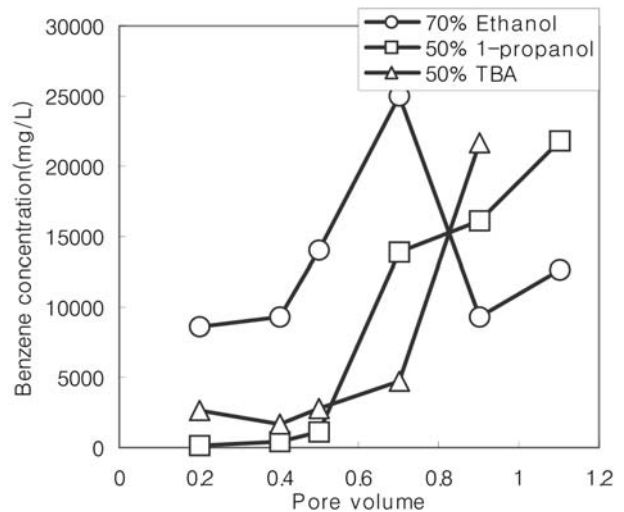
토양 칼럼 세척 기간 중 칼럼 내 잔존하는 NAPL 질량은 초기 NAPL 주입 질량(12.6 mL, 10.96 g)에서 유출수의 벤젠 농도와 부피를 곱하여 산정된 벤젠-NAPL의 질량을 빼어 결정하였다. 벤젠-NAPL 질량비는 다음과 같이 정의하였다.

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

**3. 결과 및 고찰**

**3.1. 세척액 종류에 따른 벤젠-NAPL 제거 효과**

세척액 종류에 따른 토양 내 벤젠-NAPL 제거 효과를



**Fig. 2.** Benzene concentration of effluent discharged from the soil column; cosolvent flood (0.25 mL/min).

알아보기 위하여 70% 에탄올, 50% 1-프로판올, 50% TBA를 각각 0.25 mL/min(Darcy velocity 0.63 cm/s)으로 칼럼에 주입하였고, 유출수 내 벤젠 농도 및 벤젠-NAPL 질량비의 변화를 측정하였다. Fig. 2는 세척액의 주입량에 따른 유출수 내 벤젠 농도를 나타내며, Fig. 3은 벤젠-NAPL 질량비를 나타낸다.

70% 에탄올을 세척액으로 사용하였을 때 유출수 내 벤젠 농도가 다소 높았지만 자유상 NAPL의 유출은 없었다. 따라서 70% 에탄올에 의한 벤젠-NAPL 제거 메커니즘은 NAPL 이동(mobilization)이 아닌 용해(solubilization)에 의한 것으로 나타났다. 70% 에탄올 세정 시 유출수의 벤젠 농도는 상대적으로 높았지만 Fig. 3의 NAPL 질량비 변화를 보면 70% 에탄올에 의한 NAPL 제거 효과가 가장 낮은 것으로 나타났다. 에탄올은 높은 알코올 부피함량이지만 제거효율이 낮게 나타난 것이다.

TBA 세척 실험에서 0.5, 0.7 공극부피에 해당하는 시간에 칼럼으로부터 free phase NAPL이 유출되었으며, 이들의 부피는 각각 6.0, 10.5 mL이었다. 이때까지 유출되어 나온 자유상 NAPL의 부피의 합은 16.5 mL로 주입된 NAPL의 부피보다 많은 이유는 TBA가 NAPL에 흡수되어 swelling 시켰기 때문이다. Fig. 3은 2.4절에서 이미

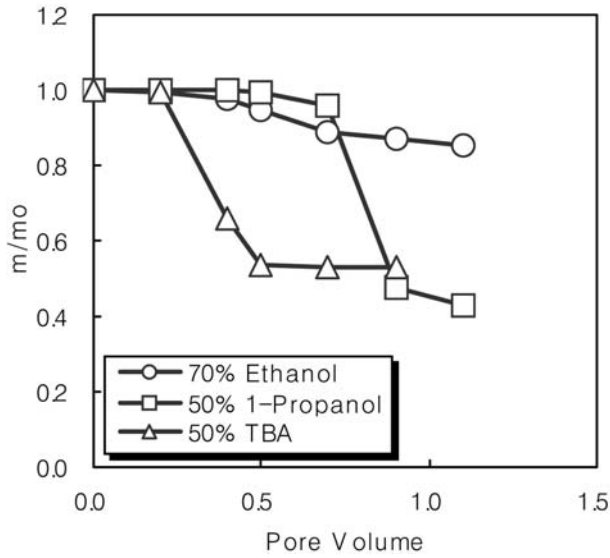


Fig. 3. Reduction in NAPL mass present in the soil column ( $m/m_0$ : NAPL mass / initial NAPL mass).

언급한 바와 같이 세척액에 용해되어 유출된 벤젠과 자유상 NAPL 상태로 유출된 벤젠의 양을 모두 고려하여 토양 내 잔류하는 벤젠의 양을 산정한 결과이다. 토양 내 벤젠 NAPL의 제거에 있어 세정 초기에 가장 효과적인 세척액은 TBA임을 확인 할 수 있었다. NAPL swelling 알코올류(1-프로판올, TBA)에 의한 NAPL 제거 메커니즘은 주로 이동에 의한 것으로 나타났다.

3.2. 세척액 농도 변화에 따른 벤젠-NAPL 제거 효과

알코올 성분이 NAPL에 흡수되는 swelling 알코올류인 1-프로판올과 TBA가 토양 내 NAPL 제거에 효과적인 것으로 나타나 두 알코올의 농도변화에 따른 벤젠 제거 효과를 평가하였다. 칼럼 실험에 앞서 세척액의 알코올 농도 차이에 의한 벤젠-NAPL의 swelling 부피를 평가하였다.

3.2.1. 1-프로판올 세정

Fig. 4는 벤젠 25 mL 씩을 유리 시험관(vial)에 주입하고 알코올 농도를 다르게 한 세척액을 25 mL 씩 주입한 후 평형상태에 이르렀을 때의 모습이다. 가운데 검은색 선 상층이 벤젠 층이고 하층이 세척액 층이다. 20% ~ 40%의 알코올 농도 범위에서는 농도가 높을수록 알코올이 벤젠으로 많이 이동하여 벤젠의 부피를 증가시켰다.

세척액 농도에 따른 벤젠-NAPL의 제거 효과를 알아보기 위하여 30%, 40%, 50% 1-프로판올과, 20%, 30% 40% TBA를 각각 0.25 mL/min으로 칼럼에 주입하였고, 유출수 내 벤젠의 농도 변화 및 NAPL 질량비 변화를

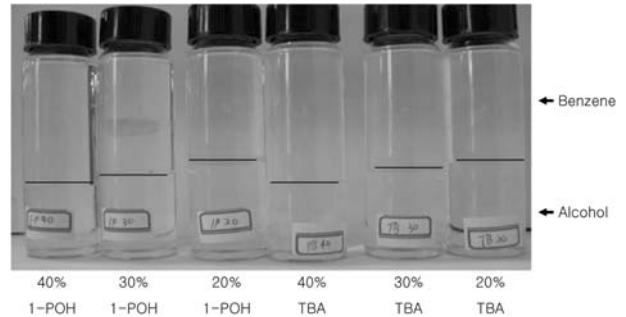


Fig. 4. Partitioning of alcohol into the benzene layer and its swelling.

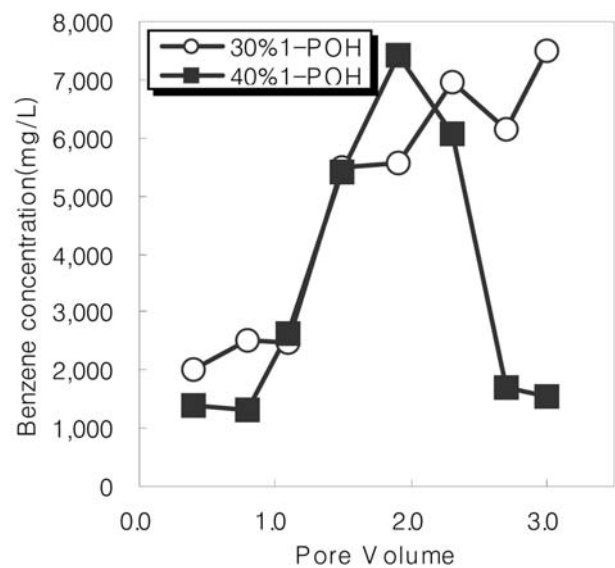


Fig. 5. Benzene concentration of effluent discharged from the soil column; cosolvent flood (0.25 mL/min).

측정하였다. Fig. 5는 30%, 40% 1-프로판올을 세척액으로 사용하였을 때 세척액 주입에 따라 용해된 벤젠의 농도를 보여주며, Fig. 6은 두 세척 과정 중 유출되어 나온 자유상 NAPL의 부피, Fig. 7은 칼럼 안에 남아있는 벤젠의 NAPL 질량비 변화를 보여준다.

Fig. 5에서 보면 30%, 40% 1-프로판올의 경우 유출수 내 벤젠의 농도변화는 매우 비슷하게 전개되었으나 2 공극부피 이상이 주입되면서 40% 1-프로판올을 이용한 세척 공정의 벤젠 농도가 급격히 감소함을 알 수 있었다. 이는 Fig. 6에서 나타난 유출된 자유상 NAPL의 부피와 관련되었다. 40% 1-프로판올 세척 시, 1.1~1.5 공극부피에 해당하는 시간에 많은 양(26 mL)의 자유상 NAPL이 칼럼으로부터 빠져나와 칼럼 내 남아있는 벤젠의 양이 감소하였고, 이로 인하여 용해되어 나오는 벤젠의 양도 적었기 때문이다. 반면 30% 1-프로판올은 Fig. 6에 나타난

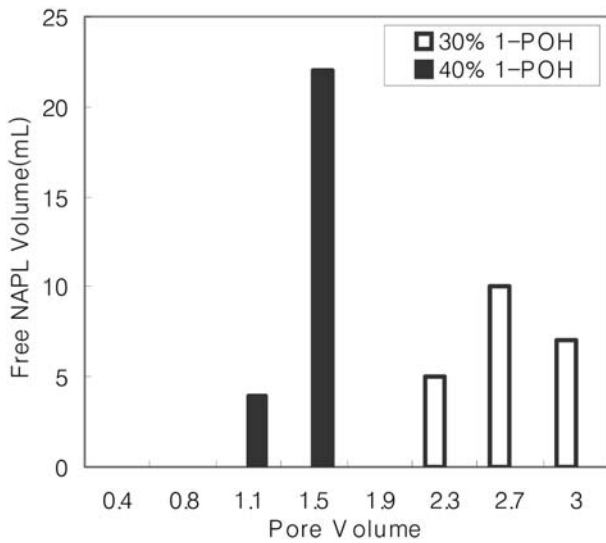


Fig. 6. Mobilized NAPL volume during cosolvent flooding.

바와 같이 2.3 공극부피 이상의 시간이 되어야 뒤늦게 자유상 NAPL이 유출되어 나왔고 유출된 NAPL의 부피 또한 적었다. 따라서 칼럼 내 남아있는 NAPL의 양이 상대적으로 많아 벤젠의 용해가 오랫동안 지속될 수 있었다.

세척액 주입량 증가에 따른 자유상 NAPL의 유출량은 40% 1-프로판올의 경우에 1.1, 1.5 공극부피에서 4, 22 mL가 유출되었으며(Fig. 6), 이들의 농도는 464, 289 g/L이었다. 또한 30% 1-프로판올의 경우에는 2.3, 2.7, 3 공극부피에서 5, 10, 7 mL의 자유상 NAPL이 유출되었고, 이들의 농도는 538, 341, 358 g/L이었다. 30%, 40% 1-프로판올 세척 시 추출된 자유상 NAPL의 부피가 초기 벤젠-NAPL 주입 부피인 12.6 mL를 초과한 이유는 Fig. 4와 같이 벤젠-NAPL의 swelling으로 인하여 부피가 증가하였기 때문이다.

Fig. 7은 용해된 벤젠과 자유상 NAPL의 유출량을 뺀 후 산정된 칼럼 안의 벤젠-NAPL 질량비의 변화를 도시한 것이다. 40% 1-프로판올을 세척 시, 1 공극부피 이상에서 칼럼 내 NAPL량을 급격히 감소하기 시작하여 1.5 공극부피에서 주입된 NAPL의 약 18%만이 남아있었다. 30% 1-프로판올을 사용하였을 때에는 2 공극부피 이상에서 감소하기 시작하여 약 3 공극부피를 지나서야 주입된 양의 7%에 해당하는 NAPL이 남아있었다. 40% 1-프로판올을 사용하였을 때 세척 공정 초반에 NAPL 질량비가 빠르게 감소하였으나, 1.5 공극부피 이후에 감소속도가 느려진 것은 1-프로판올에 의한 NAPL의 주요 제거 메커니즘인 이동에 의하여 이미 80% NAPL이 제거되었고, 이후 용해에 의한 제거만 이루어졌기 때문이다. 반면, 30%

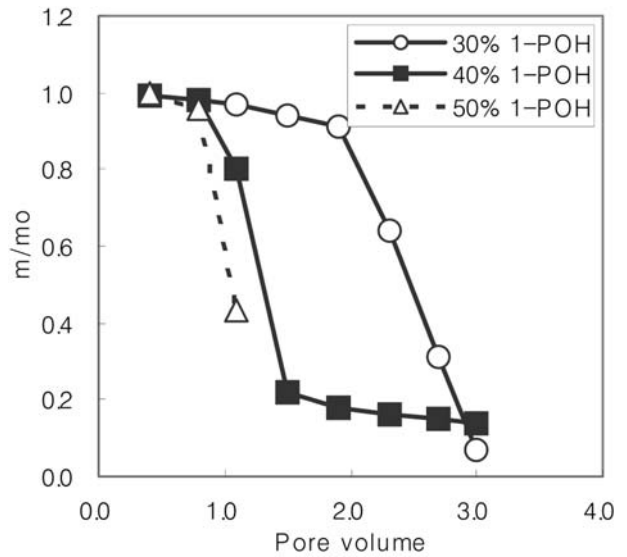


Fig. 7. Reduction in NAPL mass present in the soil column (m/mo; NAPL mass / initial NAPL mass).

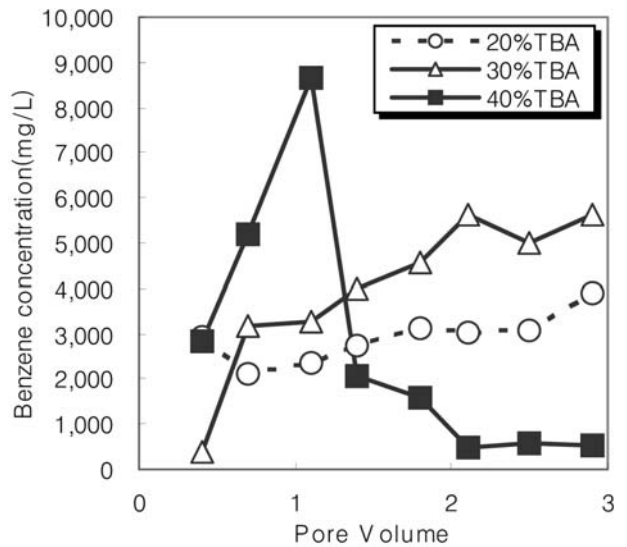


Fig. 8. Benzene concentration of effluent discharged from the soil column; cosolvent flood (0.25 mL/min).

1-프로판올은 주입량이 2 공극부피 이상이 되어야 NAPL의 이동이 일어나는 것으로 나타났다.

### 3.2.2 TBA 세정

Fig. 8은 20%, 30%, 40% TBA를 이용한 세척 공정에서 세척액 주입량에 따른 유출수 내 벤젠의 농도를 보여주며, Fig. 9는 자유상 NAPL의 유출 부피를, Fig. 10은 칼럼 안의 벤젠-NAPL 질량비 변화를 보여준다. 20%, 30% TBA의 경우 세척액 주입량이 증가할수록 용해된 벤

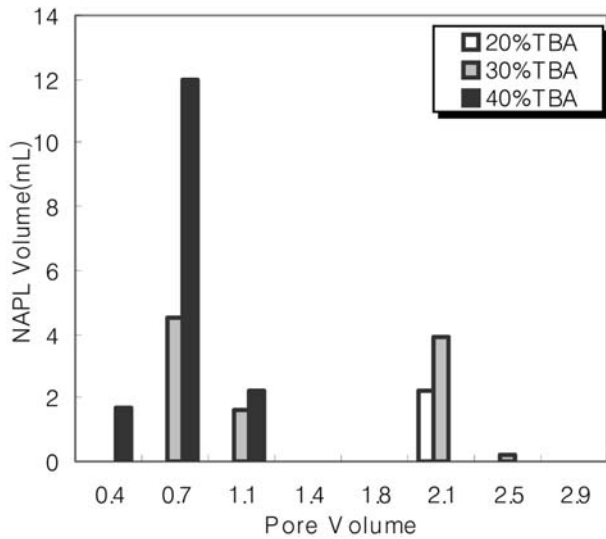


Fig. 9. Mobilized NAPL volume during cosolvent flooding.

젠의 농도가 급격히 증가하여 약 3 공극부피에서 이들의 농도는 각각 3,876, 5,643 mg/L이었다. 40% TBA의 경우, 초기 유출수에 용해된 벤젠 농도가 급격히 상승한 후 1 공극부피 이후에 급격히 감소하였는데, 이는 Fig. 9에서 알 수 있듯이 칼럼 내 벤젠이 초기에 자유상 NAPL로 대부분이 유출되어 칼럼 내 남아있는 벤젠의 양이 감소하여, 시간이 경과 할수록 용해되는 벤젠이 상대적으로 적었기 때문이다.

Fig. 9와 같이 세척액 주입량 증가에 따른 자유상 NAPL의 유출량은 40% TBA의 경우 0.4, 0.7, 1.1 공극부피에서 1.7, 12, 2.2 mL가 유출되었으며, 30% TBA의 경우에는 0.7, 1.1, 2.1, 2.5 공극부피에서 4.5, 1.6, 3.9, 0.2 mL가 유출되었다. 20% TBA를 세척액으로 사용하였을 때에는 2.1 공극부피에서 2.2 mL만 유출되었다. 40% TBA 세척 공정 시 추출된 자유상 NAPL의 부피는 실험 시작 전 주입했던 12.6 mL보다 3.3 mL 초과한 15.9 mL이었다. 이는 1-프로판올 결과와 동일하게 벤젠-NAPL의 swelling으로 인하여 부피가 증가하였기 때문이다.

TBA에 용해되어 유출된 벤젠과 자유상 NAPL 형태로 유출된 벤젠의 양을 고려하여 칼럼 내 NAPL 질량비를 유추한 결과(Fig. 10), 40% TBA를 사용하였을 때에는 0.4 공극부피 이후에 급격히 감소하여 1 공극부피에서 초기 벤젠 주입질량의 20% 만이 칼럼에 남아있었다. 30% TBA를 사용하였을 때에는 40% TBA를 사용하였을 때보다 다소 완만한 속도로 NAPL 질량비가 감소하였으며, 20% TBA를 사용하였을 때에는 약 3 공극부피까지 주입하여도 NAPL 질량비가 초기 NAPL 질량비의 0.7 이하

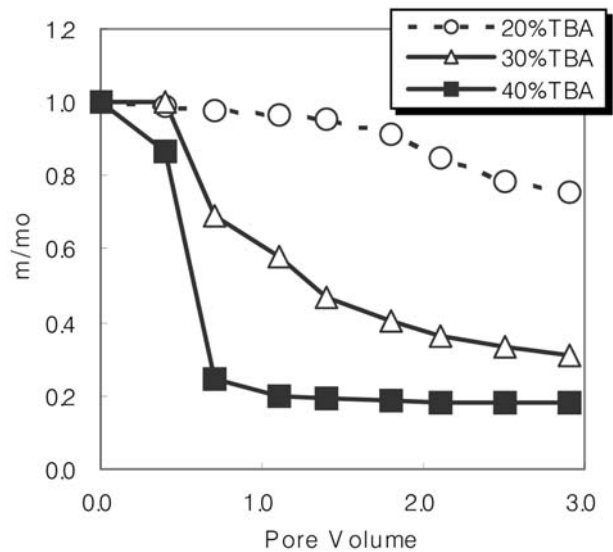


Fig. 10. Reduction in NAPL mass present in the soil column ( $m/m_o$ : NAPL mass / initial NAPL mass).

로 감소하지 않았다. 이 결과로 볼 때 적용된 세척액의 농도 범위에서는 세척액의 농도가 40% 이상 조건에서 칼럼 내 벤젠을 보다 효과적으로 제거할 수 있음을 알 수 있었다. 그리고 40% 1-프로판올과 40% TBA의 처리효율을 비교해보면 1-프로판올 보다는 TBA가 벤젠-NAPL 제거에 효과적인 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구에서 실행한 에탄올-cosolvent 세척 공정은 벤젠-NAPL이 세척액 층에 용해되어 제거 되었고, 자유상 NAPL 형태의 용출은 발생하지 않았다. 이에 반해 1-프로판올과 TBA는 swelling된 자유상 NAPL과 세척액이 동시에 두 개상(2-phase) 형태로 용출되었다. 이러한 결과로부터 에탄올-cosolvent 세척 공정에 의한 NAPL 주요 제거 메커니즘은 용해이며, 1-프로판올과 TBA에 의한 벤젠-NAPL 제거 메커니즘은 자유상 NAPL의 이동이라는 것을 확인 할 수 있었다. 칼럼 안의 NAPL 질량비 산정 결과로부터 NAPL 용해에 의한 제거 메커니즘을 가진 에탄올보다는 자유상 NAPL의 이동에 의한 제거 메커니즘을 가진 1-프로판올과 TBA의 제거 효율이 뛰어난 것이 증명되었다.

세척액 농도 실험에서는 1-프로판올과 TBA 모두 40%의 알코올 농도 이상에서 토양 내 NAPL의 이동이 현저히 증가되는 것으로 나타났다. 1-프로판올과 TBA 모두 40% 알코올 농도에서 유출수의 자유상 NAPL 부피가 초

기 NAPL 오염 부피를 초과하였으며, NAPL 질량비의 결과도 40% 알코올 농도에서 충분한 벤젠-NAPL 제거가 이루어졌다. 1-프로판올과 TBA를 이용한 물과 알코올 혼합 세척액 세척 공정 적용 시, 적어도 알코올의 농도가 40% 이상은 되어야 할 것으로 판단된다. 앞으로 cosolvent 세정의 효율적 적용을 위해 잔류하는 알코올의 생물학적 분해능 증대효과 및 독성 등에 관한 연구가 있어야 한다.

## 사 사

본 연구는 환경부 “토양·지하수오염방지기술개발사업”의 지원으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

Brandes, D. and Farley, K., J., 1993, Importance of phase behavior on the removal of residual DNAPLs from porous media by alcohol flooding, *Water Environment Research*, **65**, 869-878.

Hayden, N.J. et al., 1999, Phase behavior of chlorinated solvent+water+alcohol mixtures with application to alcohol flushing, *J. Chem. Eng. Data*, **44**, 1085-1090.

Lunn, S.R.D. and Kueper, B.H., 1997, Removal of pooled dense, nonaqueous phase liquid from saturated porous media using upward gradient alcohol floods, *Water Resources Research*, **33**(10), 2207-2219.

Ramsburg, C.A., 2003, Use of a surfactant-stabilized emulsion to deliver 1-butanol for density-modified displacement of trichloroethene, *Environ. Sci. Technol.*, **37**, 4246-4253.

Ramsburg, C.A. and Pennell, K.D., 2002, Density-modified displacement for dense nonaqueous-phase liquid source-zone remediation: Density conversion using a partitioning alcohol, *Environ. Sci. Technol.*, **36**, 2082-2087.

St-Pierre, C., 2004, TCE recovery mechanisms using micellar and alcohol solutions: phase diagrams and sand column experiments, *Journal of contaminant hydrology*, **71**, 155-192.

U.S. EPA, 2004, Treatment Technologies for Site Cleanup: annual status report, 11th edition, p. 4-8.