

DNAPL removal from a rough-walled single fracture with Density-surfactant-motivated method

이항복(sss777@snu.ac.kr), 지성훈, 여인옥*, 이강근

서울대학교 지구환경과학부

*전남대학교 지구환경과학부

요 약 문

We applied the density-surfactant-motivated method to the removal of DNAPL within a rough-walled single fracture. Observations are made to compare the DNAPL residual distribution before and after the flushing of surfactant-enhanced solution or water flushing. Results show that density-motivated method with surfactant-enhanced solution effectively removed DNAPL in a single fracture.

key word: DNAPL, density-surfactant-motivated method, rough-walled single fracture.

1. 서론

본 연구에서는 다른 정화 방법들 [e.g. Zhong et al., 2001]과 중액첨가방법 [e.g. Yeo et al., 2003]을 비교 실험하여 결과적으로 이 방법이 거친 표면을 지니는 단일 단열에서 적용 가능한지에 관해 평가해보았다. 자연상에 존재하는 화강암을 본떠 실험에 필요한 투명한 유리 암반 모형을 제작하였고 이 모형을 지하수의 수두구배와 경사각을 자유롭게 조절할 수 있는 실험 장치에 설치하였다 (Figure 1). 각각의 실험에 대해 같은 방법으로 잔여 DNAPL을 분포시켰으며 그 후에 물이나 계면활성제, 또는 중액으로 세척하여 DNAPL 제거 실험을 하였다. 또한 각각의 정화실험 후 남아있는 DNAPL의 분포를 시각적으로 직접 비교하였다. 실험을 통해, 중액첨가방법이 적은 양을 가지고도 거친 표면을 지니는 단일 단열에서 효과적으로 작용하는 것을 보았다.

2. 실험 설계 및 사용 물질

제작된 유리 단일 단열 모형은 가로, 세로, 높이가 각각 21 cm, 12 cm, 10 cm이며 실제 암반과 흡사하게 다양한 간극 분포와 거칠기를 갖는다 (Figure 2). DNAPL 분포의 변화 양상은 디지털 캠코더를 사용하여 촬영하고 그 이미지를 수집 분석하여 관찰하도록 하였다. 실험에 사용된 모든 물은 증류수를 사용했으며 모형을 물로 완전히 포화시키기 위해 진공 펌프를 이용해 증류수 내에 기포를 제거하였다. DNAPL로는 밀도가 1.464 g/ml인 Trichloroethylene (TCE)이 사용되었고 시작적인 구분을 위해 1 g/L의 농도로 Sudan IV를 첨가하였다. 계면활성제 용액은 증류수에 비이온성 Tween80 (polyoxyethylene (20) sorbitan monooleate)을 5% 혼합하여 제조하였다 포함하고 있다. 그리고 실험에 이용된 중액은 부피비로 47.5%의 물과 47.5%의 CaBr₂, 5%의 Tween80을 혼합하여 만들었고

그 밀도는 1.52 g/ml였다.

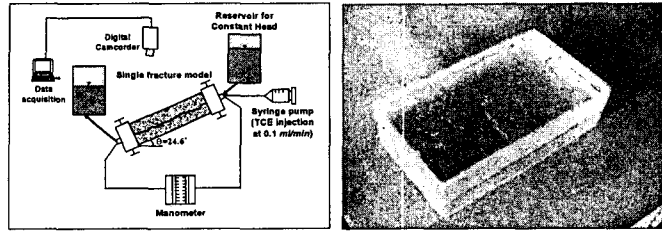


Figure 1. 실험 장치 개략도

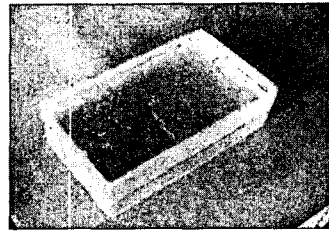
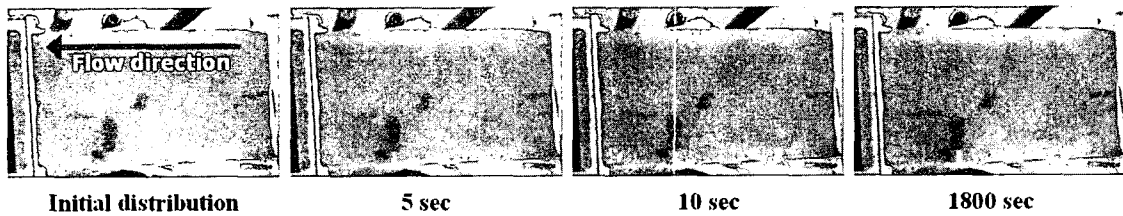


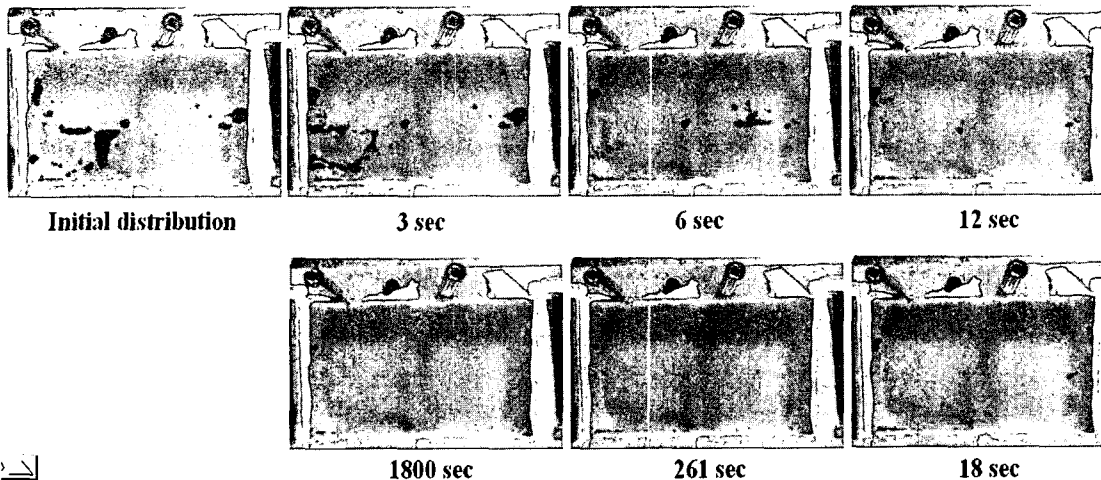
Figure 2. 유리 암반 모형

3. 실험 결과

Figure 3a는 낮은 수두 구배 ($i=0.014$) 상태에서 물 세척 정화 실험을 수행하였을 때의 TCE 분포 변화를 나타낸 것이다. 이때 물은 사진의 오른쪽에서부터 왼쪽으로 움직인다. 맨 왼쪽 사진은 세척 정화를 하기 전의 초기 분포이고 맨 오른쪽 사진은 실험이 모두 수행된 후, 30분 후의 TCE의 분포를 보여주고 있다. 붉게 염색된 TCE의 분포를 육안으로 관찰한 결과 낮은 수두 구배의 물 세척 정화는 TCE를 전혀 제거하지 못하였다.



(a) 낮은 수두 차이($i=0.014$) 에서의 TCE 분포 변화 양상



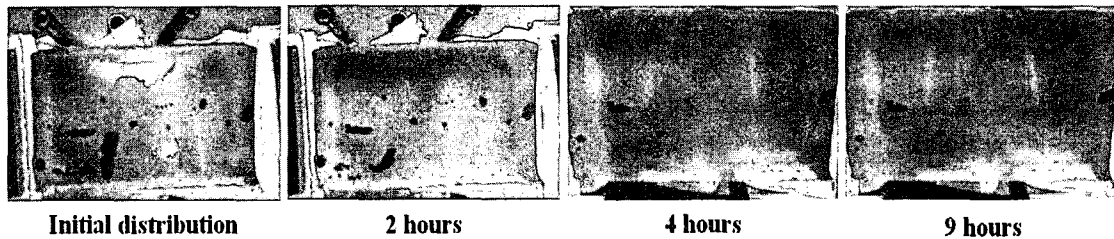
(b) 높은 수두 차이($i=0.298$) 에서의 TCE 분포 변화 양상

Figure 3. 물 세정 방법에 의한 TCE 정화 실험

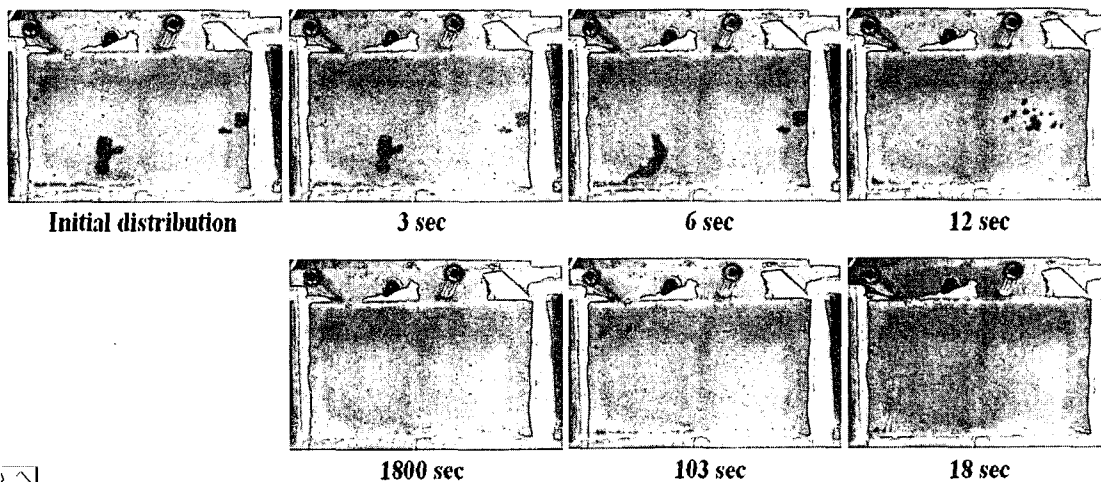
Figure 3.1.3b는 물 세척 정화 실험을 높은 수두 구배 ($i=0.298$)를 유지하면서 시행하였을 때의 TCE 분포 변화이다. 왼쪽에서 두 번째 사진이 3초가 경과된 후의 모습인데, 오른쪽에서 왼쪽으로 물의 흐름을 따라 잔여 TCE가 빠르게 빠져나가는 것을 관찰할 수 있다. 다섯 번째 사진은 18초가 경과된 후의

모습으로 왼쪽 끝 경계의 일부분을 제외하고는 TCE가 대부분 제거되었음을 보여준다. 시험이 모두 마무리 된 30분 후에는 잔여 TCE가 거의 남아 있지 않는 것을 볼 수 있다.

Figure 4a는 낮은 수두 구배 ($i=0.009$)에서 계면활성제 용액 세척 정화 실험의 결과를 보여준다. 왼쪽 첫 번째 사진은 초기 TCE분포를 나타내는 것으로 물 세척 정화 실험의 경우와 비슷한 분포를 나타내고 있다. 오랜 시간이 지난 후 가운데 부분의 일부분을 제외하고 많은 부분이 제거되었음을 확인할 수 있으며 앞의 물 세척 정화 실험의 경우와 비교해 보면 오랜 시간을 필요로 하긴 했으나 결과적으로 TCE의 용해를 통해 많은 양의 TCE가 제거되었다. 잔여 TCE의 주위로 하얀 유탁액이 형성되어 있었는데 이는 계면활성제 용액이 TCE와 접촉하여 형성시킨 교질입자 (micelle)로 생각된다.



(a) 낮은 수두 차이($i=0.009$)에서의 TCE 분포 변화 양상



(b) 높은 수두 차이($i=0.298$)에서의 TCE 분포 변화 양상

Figure 4. 계면활성제 용액을 이용한 TCE 정화 실험

높은 수두 구배 ($i=0.298$)에서 계면활성제를 이용한 세척 정화 실험을 시행하였을 때의 결과는 Figure 4b에서 보여 진다. 물 세척 정화 실험과 비교했을 때, 높은 수두 구배의 물 세척 정화 실험 결과와 비슷한 결과를 보여주며 약 18초가 경과된 후 TCE가 대부분 제거되었음을 관찰하였다. 하지만 높은 수두 구배의 물 세척 정화 실험 결과와 달리 30분이 지나 실험이 마무리 되었을 때는 왼쪽 경계 끝 부분에 남아 있던 작은 TCE 덩어리까지도 모두 제거되어 좀더 좋은 정화효율을 보여준다. 실험 결과를 통해 계면활성제 용액 세척 방법을 이용하면 작은 수두 구배로도, 즉 적은 양의 용액을 사용해도 TCE를 효과적으로 제거할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 그러나 이 방법은 물의 흐름이 거의 없는 비유동성 단열 등에 간혀 있는 DNAPL 제거에는 효과를 발휘하지 못하며, 오랜 시간이 걸린다. 또한 계면활성제에 의해 운동성이 증가된 TCE는 여전히 그것이 가지는 높은 밀도 때문에 지하 더 깊은 곳으로 하강하여 오염 범위를 확산시킬 수 있는 위험성도 내포하고 있다.

마지막으로 TCE 제거를 위해 높은 밀도를 가지는 중액을 사용하여 세척 실험을 하였다. Figure 5는 중액으로 세척할 때의 TCE 분포의 변화를 보여준다. 초기 수두 구배를 0.009로 설정한

상태에서 오른쪽 저수조에 중액을 주입하였다. 중액 주입 후 오른쪽에서 왼쪽으로 TCE가 빠르게 빠져 나가기 시작하는 것을 관찰할 수 있었으며, 잔존 TCE들도 시간이 지남에 따라 모두 제거되어 10분이 지난 후, 모형 내에 존재하던 잔여 TCE가 모두 사라졌다. 물 세척 정화 실험이나 계면활성제를 이용한 세척 정화 실험 실험과 비교해 본다면 앞의 두 경우는 0.009 정도의 낮은 수두 구배에서는 TCE 분포가 크게 변하지 않았는데 비해 중액을 흘려보낸 경우에는 마치 높은 수두 구배에서의 세척 정화한 결과와 비슷하게 TCE가 대부분 제거된 것을 확인할 수 있었다. 실험 장치에 설치된 액주 압력계를 통해 실험 도중에 처음에 설정해 놓은 0.009의 수두 구배가 갑자기 0.3까지 올라갔다 내려오는 현상을 볼 수 있었는데 이는 중액이 오른쪽 저수조에 투입되면서 높은 밀도로 인해 저수조 내에 수두가 상승하고 이후 중액이 점차 물과 혼합되면서 수두가 낮아지기 때문이다. 즉 중액이 가지는 높은 밀도로 인하여 물의 압력 자체가 증가하게 되고 이러한 힘의 증가가 모형 내에 존재하는 잔여 TCE를 강한 힘으로 밀어내어 제거하게 되는 것이다.

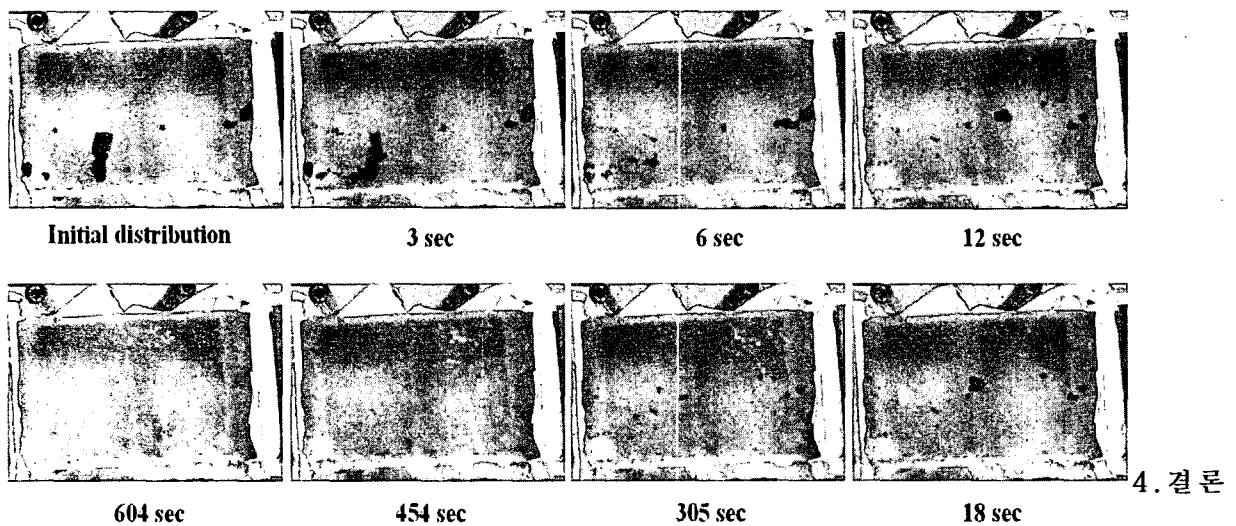


Figure 5. 중액을 이용한 TCE 정화 실험 (초기 수두 차 $i=0.009$)

연구를 통해 굉장히 낮은 수두 차인 경우라도 적은 양의 중액을 주입을 하게 된다면 중액이 지나는 높은 밀도로 인해 높은 수두 구배가 형성되게 되고 이는 높은 수두를 걸어준 상태의 물 세척 정화 방법과 비슷한 효과를 나타낼 수 있음을 알 수 있었다. 또한 중액은 DNAPL보다 밀도가 높기 때문에 DNAPL이 하강하는 것을 막아주고 비유동성 단열에 갇힌 DNAPL을 유동성 단열로 유도하여 오염확산을 방지하는 효과를 기대할 수 있다.

5. 사사

본 연구는 BK21 프로젝트와 선도과학자육성지원사업 (R02-2004-000-10176-0)의 지원에 의해 수행되었습니다.

6. 참고 문헌

- Yeo, I. W., S. -H. Ji, and K. -K. Lee, 2003, Density-surfactant-motivated removal of DNAPL trapped in dead-end fractures, *Geophys. Res. Lett.*, 30(9), 1471.
- Zhong, L., A. Mayer, and R. J. Glass, 2001, Visualization of surfactant-enhanced nonaqueous phase liquid mobilization and solubilization in a two-dimensional micromodel, *Water Resour. Res.*, 37(3), 523-537.