

오염토양/ 대수층 복원을 위한 선택적 폭기 기술의 개발

김헌기

한림대학교 자연과학대학 환경시스템공학과

e-mail : heonki@hallym.ac.kr

요 약 문

대수층 폭기법(aquifer air sparging)은 대수층에 가압공기를 주입하여 휘발성 유기오염물질을 제거하는 지반환경복원 기술의 하나이다. 본 연구는 전통적인 지하 대수층 폭기기술 시행에 있어서 특정층에 미리 수용액상 계면활성제를 수평방향으로 도입함으로써 오염물질이 실제로 존재하는 층에 선택적으로 폭기 되도록 하여 최소한의 공기량으로 제거 효율을 극대화 하는 기술을 개발하는 것을 목적으로 한다. 본 연구에서는 균일질 모래로 충전된 2차원 상자 모델을 사용하였으며, 표면장력 조절을 위하여 저농도(100mg/L) 음이온계 계면활성제(sodium dodecyl benzene sulfonate) 수용액이 사용되었다. 실험은 계면활성제가 처방되지 않은 경우, 공기도입부 근처에 계면활성제 용액이 도입된 경우, 공기도입부와 토양표면의 중간부분에 계면활성제 용액이 도입된 경우의 세 가지 방법으로 실시되었다. 실험 결과, 계면활성제가 도입된 경우는 투입되지 않은 경우에 비하여 최고 5배에 해당하는 폭기영향권의 확대가 관찰되었으며 폭기영향권이 계면활성제가 도입된 수평층을 중심으로 형성되어 이 부분에 집중되어 존재하는 오염물질의 제거에 매우 유리할 수 있다는 점이다. 대수층 도입공기의 수평확산을 유도하는 기술로 본 연구는 기존의 대수층 폭기 복원기술의 효율을 획기적으로 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

key word : air sparging, VOC aquifers, remediation,

1. 서론

휘발성 유기오염물질(volatile organic compounds, VOCs)로 오염된 지하대수층 또는 포화층에 공기를 강제 주입함으로써 오염물질을 휘발토록 하여 불포화 층에 설치된 포집관정을 통해 수집 처리하는 지하수 폭기법(groundwaterair sparging)은 환경복원 기술 중 하나이다¹⁻⁵. 최근에 대수층에 전면적으로 수용성 계면활성제를 투입하여 폭기하는 "surfactant-enhanced air sparging" 기법이 도입되어 그 효과가 보고된 바 있다⁶. 이 방법은 대수층을 채우기 위해서 다량의 계면활성제 수용액이 도입되어야 하고, 대수층의 넓은 범위에 걸쳐 지하수 표면장력이 감소하게 되면 NAPL의 수직이동을 야기하여 오염물질의 확산을 오히려 촉진할 가능성도 있다.

본 연구 목적은 오염된 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 수리 지질층만 선택적으로 폭기하여 오염물질의 확산을 제한하면서도 폭기효율을 제고할 수 있는 가능성을 확인하는데 있으며, 계면활성제의 도입에 따른 폭기영역의 변화정도를 측정하여 표면장력감소의 효과를 측정하며, 도입 공기유량과 폭기영역간의 상관관계를 표면장력의 함수로 구하는 것을 목적으로 한다.

2. 본론

토양은 직경 500-1000 μm 범위를 갖는 석영질 모래를 사용하였다. 표면장력을 조절하기 위하여 음이온계 계면활성제인 SDBS(sodium dodecyl benzene sulfonate, Tokyo Kasei Kogyo Co. Ltd., Reagent grade)를 100mg/L의 농도(50.2dyne/cm)로 제조하여 사용하였다. 형광램프를 이용하여 계면활성제용액의 적용 범위를 관측하기 위하여 이 수용액에 100mg/L의 Sodium fluorescein (Sigma, reagent grade)을 이용되었다.

상자모델은 투명한 PMMA(poly methylmetacrylate)재질로 가로, 세로, 내부의 폭이 각각 70cm, 50cm, 1.5cm였으며, 왼쪽과 오른쪽 가장자리에 폭 2cm의 물 도입관정과 추출관정을 설치하여 일정한 속도(약 100ml/min)로 물(증류수)을 도입, 추출하였다. 충전된 모래의 높이는 48cm였으며, 밑면으로부터 33cm까지 물로 포화하였다. 모식도를 Fig. 1에 나타내었다.

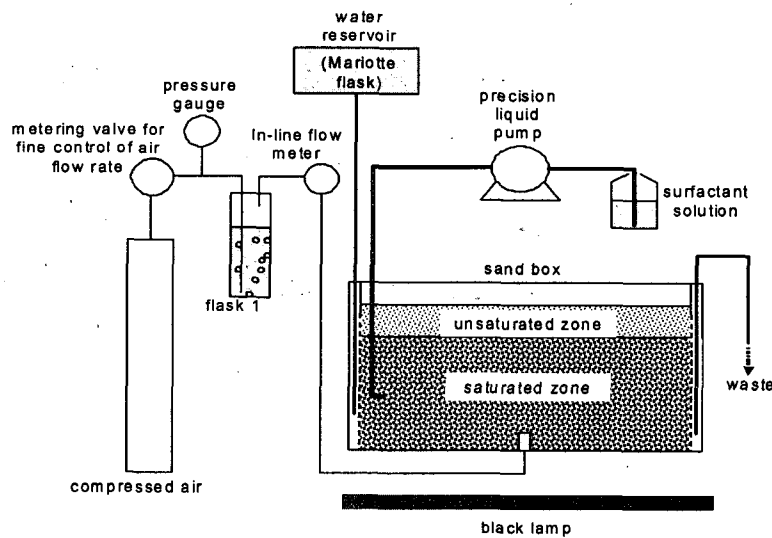


Figure 1. Schematic diagram for experimental setup used in this stud

실험은 계면활성제가 투여되지 않은 상태에서의 폭기실험, 계면활성제를 각각 밑면으로부터 22.5cm (experiment a), 6.5cm (experiment b)에 도입하여 실시한 2회의 실험의 세 가지 조건에서 진행되었다. 계면활성제 수용액이 도입된 조건에서의 실험은 계면활성제 용액을 도입하여 추출관정위치까지 때가 형성된 후 시작하였다. 폭기는 유량조절밸브와 flow meter를 이용하여 가장 낮은 공기 유량부터 100, 200, 300, 500 ml/min로 실시되었다. 유량과 대수층내의 공기 흐름이 안정된 후 투명필름에 공기 분포를 표시하였다. 일정 유량의 폭기실험이 완료되면 폭기의 중단 없이 다음 단계 유량에서 동일한 실험이 반복되었다. 계면활성제가 도입되지 않는 실험에서도 도입공기의 흐름관찰 위하여 100 mg/L의 sodium fluorescein이 사용되었다.

상자모델의 도입 및 추출관정을 통하여 증류수를 한쪽 방향으로 100 ml/min의 유량으로 유동하면서 계면활성제 용액을 약7ml/min로 도입한 결과 안정적인 계면활성제 층이 형성되었다. 계면활성제 수용액으로 치환된 부분은 black lamp하에서 밝은 연두색으로 관찰이 용이하였다. 실제 오염현장의 지층구조는 균일한 매질이 아닐 가능성이 많고 또한 수평방향으로부터 왜곡된 지층으로 구성되어 있을 가능성이 높아 복원대상 층의 선택적인 표면장력 저감을 위해서는 세밀한 대수층 지층구조를 이해할 필요가 있다.

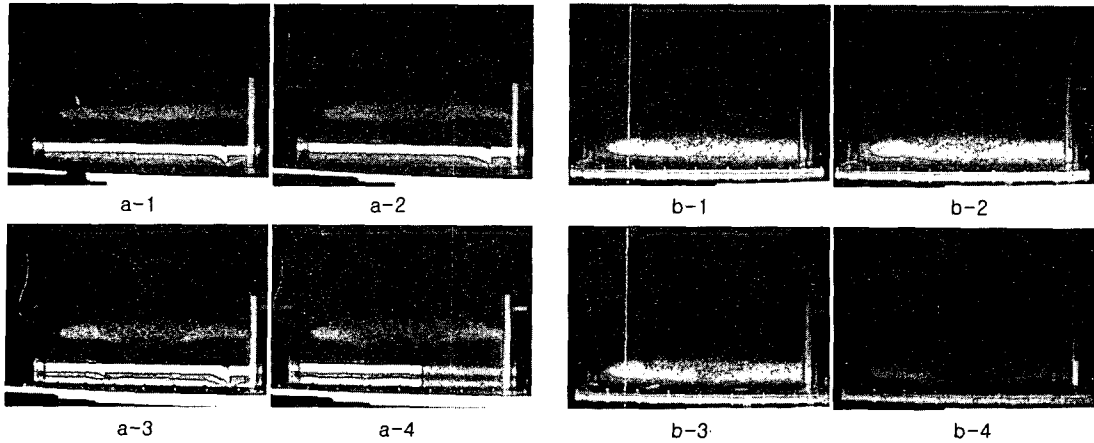


Figure 2. The influence zone of air sparging; a and b represent experiments (a) and (b); 1, 2, 3, and 4 represent the air flow rates of 100, 200, 300, 500 ml/min.

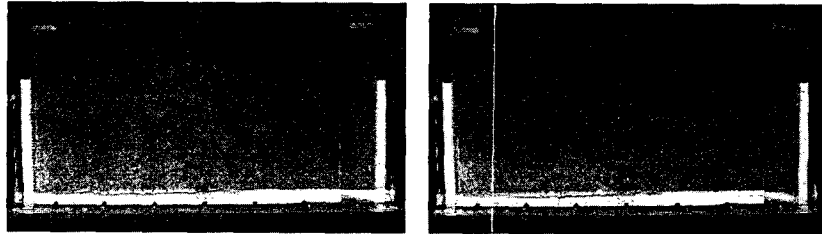


Figure 3. Influence zone of air sparging with no surfactant applied (a) air flow rate 200 ml/min, (b) air flow rate 500 ml/min.

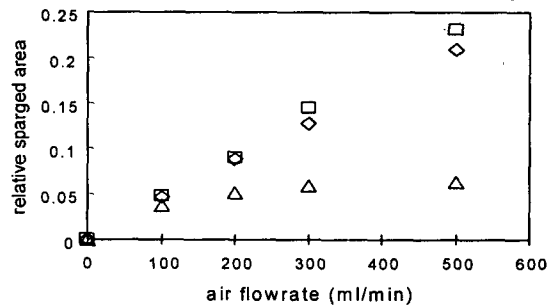


Figure 4. The measured area of sparging zone as the function of air flowrate; relative sparged area means the ratio of sparged area to total area of the sand-paced box model: open rectangle and diamond represent experiments with surfactant applied at 22.5cm and 7cm from the bottom of the physical model, respectively: open triangle represents experiment with no surfactant applied.

계면활성제의 층이 형성된 후 폭기를 실시하였을 때, 각 공기유속에서의 폭기영역의 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 공기의 유속이 증가하면서 폭기영향권도 증대되는 것이 관찰되었고 계면활성제 수평층의 위치에 따라 공기가 도입되는 위치만 다를 뿐, 수평방향으로의 폭기 영역이 확대되는 효과는 차이가 없는 것을 관찰하였다. 반면 계면활성제가 적용되지 않은 상태에서 폭기를 실시하였을 때에는 폭기 영향권이 매우 제한적이며 내부의 공기포화도가 매우 낮은 것으로 관찰되었다(Fig. 3).

관찰된 폭기 영역의 면적을 측정하였다(Fig. 4). 계면활성제가 투입되지 않았을 경우 도입공기 유량이 100ml/min에서 500ml/min으로 증가하더라도 뚜렷한 폭기 영역의 증대가 관찰되지 않은 반면 계면활성제 수용액의 수평층이 조성된 후 폭기가 실시되었을 때에는 유량의 증가에 따라 폭기영역의 현저한 증가가 정비례하는 것으로 관찰되었다.

3. 결론

- (1) 계면활성제 수용액의 도입 유량과 배경 지하수의 적절한 유량 조절을 통하여 안정적인 계면활성제 수평층의 조성이 가능하였다.
- (2) 계면활성제가 도입되지 않았을 때에 비하여 계면활성제 수용액 수평층이 조성되었을 때 폭기 영향범위가 최고 5배 (도입유량 500 ml/L에서)까지 증가하였다.
- (3) 계면활성제 수용액의 수평층의 위치에 관계없이 폭기영역의 증대가 관찰되었다.
- (4) 계면활성제 수용액의 수평층을 따라 폭기 공기의 수평확산이 관찰되었으며, 이는 계면활성제가 도입되지 않았을 경우 관찰되지 않았다. 따라서 계면활성제 수용액의 수평층 조성은 지하수 폭기 방향을 수직 방향 뿐 아니라 수평방향으로 제어할 수 있다.
- (5) 계면활성제가 도입되지 않은 경우 도입 공기유량이 증대되더라도 폭기영역의 확대효과가 나타나지 않았다. 그러나 계면활성제 수용액의 수평층이 조성된 후 폭기되었을 때에는 폭기영역이(본 실험에서 적용한 범위내에서) 공기유량에 정비례 하는 것으로 나타났다.
- (6) 본 연구 결과, 미량의 수용성 계면활성제가 포함된 수용액이 대수층에 적절한 두께의 수평층으로 도입되면 지하수 폭기 시 수평방향으로의 공기확산이 가능하고 결과적으로 최소한의 화학물질을 이용하여 오염물질 휘발제거효과가 현저하게 개선될 것으로 기대된다.
- (7) 본 연구는 지하수 폭기 중 공기 확산을 수평방향으로 제어하는 데 최초로 성공하였다.

4. 참고문헌

- (1) Marley, M. C., Hazebrouck, D. J., Walch, M. T., The application of in situ air sparging as an innovative soils and ground water remediation technology. *Ground Water Monit. Rev.* 12, 137-145.
- (2) Johnson, R. L., Johnson, P. C., McWhorter, D. B., Hinchey, R. E., Goodman, I., 1993. An overview of in situ air sparging. *Ground Water Monit. Rev.*, 13, 127-135.
- (3) Lundegard, P. D., LaBrecque, D., 1995. Air sparging in a sandy aquifer (Florence, Oregon, USA): Actual and apparent radius of influence. *J. Contam. Hydrol.*, 19, 1-27.
- (4) Rabiduar, A. J., Blayden, J. M., Ganguly, C., 1999. Field performance of air-sparging system for removing TCE from groundwater. *Environ. Sci. Technol.*, 33, 157-162.
- (5) Reddy, K. R., Adams, J. A., 1998. System effect on benzene removal from saturated soils and groundwater using air sparging. *J. Environ. Engrg.*, 124, 288-299.
- (6) Kim, H., Soh, H., E., Annable, M. D., Kim, D.- J., 2004. Surfactant-enhanced air sparging in saturated sand. *Environ. Sci. Technol.*, 38, 1170-1175.