

계면활성제 첨가에 따른 지하수 폭기법의 폭기효율 변화 연구

소효은 · 최경민 · 이승재 · 김현기*

한림대학교 환경시스템공학과

Surfactant Aided Air-sparging for Groundwater Remediation

Hyo-Eun Soh, Kyong-Min Choi, Seoung-Jae Lee and Heonki Kim*

Department of Environmental System Engineering, Hallym University, Okchon-dong 1, Chonchun, Kangwon-do, 200-700, Korea

Lab-scale experiments were conducted to evaluate the effect of surface tension reduction on the extension of the influence zone and the VOC removal efficiency of ground water sparging. A glass column packed with coarse sand was used for VOC removal test at two different surface tensions. A glass column without porous media was also used for control purpose prior to sand-packed column test. A quasi-two-dimensional glass box model, packed with a sand, was used for sparging zone tests at different water surface tensions. Surface tension of the aqueous solution used in this study was controlled using sodium dodecyl sulfate (SDS). For the glass, sand column experiments, total amount of air filled in the media increased as surface tension decreased. Toluene (used as VOC in this study) removal rate increased slightly with decreased surface tension for both free water column and sand-packed column. Air sparging zone extended up to 500% as the surface tension decreased. Combining the results from two different experiments, VOC removal efficiency is expected to increase significantly with surface tension reduction.

Key words : surfactant, air sparging, VOC, groundwater, remediation

계면활성제를 사용하여 지하수의 표면장력을 인위적으로 감소하였을 때, 감소된 표면장력이 지하수 폭기시의 폭기 영향권 및 VOC 제거 효율에 미치는 영향을 실험실 규모의 실험을 통하여 규명하였다. 내경 9.5 cm, 길이 100 cm의 유리 컬럼에 계면활성제(sodium dodecyl sulfate, SDS) 및 toluene 100 ppm 포함하는 물로 채운 후 일정한 속도로 공기를 주입하였을 때의 toluene의 제거 속도를 측정하였다. 또한 같은 컬럼에 토양(모래)이 채워진 상태에서 동일한 실험을 반복하였다. 토양이 존재하지 않는 상태에서의 stripping에 의한 toluene의 제거 속도는 표면장력의 감소(계면활성제 농도의 증가)에 따라 증가하는 것으로 나타났으며, 토양이 존재하는 경우에도 비슷한 결과를 나타내었다. 2차원 유리 상자에 모래와 SDS를 포함하는 물을 채운 후 일정한 공기 유속을 유지하였을 때, 폭기의 영향권(공기의 침투영역)은 물의 표면장력 감소에 따라 현저히 증가하는 것으로 나타났다. 특히 SDS의 critical micelle concentration(CMC)보다 훨씬 낮은 농도에서 폭기 영향권이 최대화하는 것으로 밝혀졌다. 본 연구결과는 폭기에 의한 지하수 오염물질 중, 특히 휘발성 유기오염물질의 제거 공정의 효율을 증대하는데 기여할 것으로 생각된다.

주요어 : 계면활성제, 휘발성 유기오염물질, 지하수, 지하수 오염복원, air sparging

1. 서 론

휘발성 유기오염물질(volatile organic compounds, VOCs)로 오염된 지하 대수층 또는 포화층에 공기를 강제 주입함으로써 오염물질을 휘발토록 하여 불포화

층에 설치된 포집 관정을 통해 수집 처리하는 지하수 폭기법(groundwater sparging)은 현장적용을 통한 오염물질 제거효과가 검증된 환경복원 기술중 하나이다 (Marley *et al.*, 1992; Johnson *et al.*, 1993; Lundgard and LaBrecque, 1995; Rabideau *et al.*, 1999; Reddy *et al.*, 1995; Reddy and Adams, 1998). 통상 주입되는 공기는 제거하고자 하는 오염물질이 존재

*Corresponding author: heonki@hallym.ac.kr

하는 위치보다 낮은 위치에서 공기관정을 통하여 대수층으로 주입되며, 주입된 후 부력(buoyancy) 및 공기압력구배(pressure gradient)에 의하여 상승 및 수평방향 이동을 하게된다. 이동하는 공기는 여러 가지 크기의 이동경로(air channel)를 형성하게 되며 오염물질은 여러 가지 물질이동 기작에 의하여 공기중으로 이동하게 된다(Braider and Ong, 1998; Unger *et al.*, 1995).

오염물질이 대수층에 존재하는 형태는 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 첫째는 지하수에 용해된 상태로 존재하는 경우가 있을 수 있고, 둘째는 물과 서로 섞이지 않는 불용성 유기물질의 덩어리(nonaqueous phase liquids, NAPLs) 형태로 물과 분리되어 존재할 수 있다. 폭기가 진행되는 동안 수용액상 오염물질은 수용액상 내부에서 확산에 의하여 물표면을 거쳐 이동상인 공기로 물질이동이 일어나며, NAPL에 포함된 오염물질은 NAPL 상으로부터 직접 휘발하여 공기로 이동할 수도 있고, NAPL 상으로부터 수용액상으로 용해되는 과정을 거쳐 최종적으로 공기 중으로 이동할 수도 있다. 어떤 경우나 지하수 폭기법에 의한 오염물질 제거 효율을 결정하는 요인으로는 폭기가 실시되는 조건, 또는 공학적 설계와 오염물질 자신의 화학적 성질을 들 수 있다. 오염물질이 지하수로부터 제거되는 궁극적인 상태가 가스 상태이므로 비교적 증기압이 높은 물질의 제거 속도가 동일한 운전조건에서 빠르게 나타난다. 또한 불균일한 매질(heterogeneous media)에서는 공기에 도달하기까지의 지하수내 물질이동 경로도 또한 문제가 될 수 있는데, 수용액상 확산경향(확산계수)이 큰 물질이 보다 손쉽게 제거 될 수 있다. NAPL로부터 직접 공기중으로 이동하는 기작이 지배적일 경우에는 NAPL상 내부에서 공기와 접촉하는 NAPL-공기의 계면으로 이동하는 확산이동의 속도가 폭기에 의한 제거 효율에 영향을 미칠 수 있으며, 이때 NAPL의 조성이 폭기시간에 경과에 따라 달라질 수 있으므로 제거 속도의 현저한 감소현상이 발생할 수 있다. 오염물질을 포함하고 있는 매질의 물리 화학적 성질과 운전조건도 역시 폭기에 따른 오염물질 제거 효율에 절대적인 영향을 미친다. 폭기 영역의 매질 입자의 크기, 크기 분포 및 균일성(homogeneity), 공기주입 형태(연속적, 불연속적), 공기주입 속도(또는 유량), 지하수의 유속등도 지하수 폭기에 의한 휘발성 유기물질의 제거 효율에 크게 영향을 미치는 주요인자로 작용한다는 사실이 밝혀졌다(Reddy and Adams, 1998; Adams and Reddy, 2000).

지금까지 지하수 폭기법에 대한 연구는 NAPL로부터

터 지하수 또는 공기로의 물질이동 속도를 결정하는 인자들에 대한 것(Miller *et al.*, 1990; Powers *et al.*, 1991), 오염물질을 포함하는 매질의 물리적 특성에 따른 영향(Reddy and Adams, 1998; Roosevelt and Corapcioglu, 1998; van Dijke and van der Zee, 1998)등과 기본적인 공학적 인자(예: 주입공기유속)를 변화함으로써 폭기 효율을 제고하려는 연구(Rogers and Ong, 2000; Johnson *et al.*, 1999)가 주를 이루었다. 본 연구는 이와 같은 기초연구에서 더 나아가 적극적으로 지하수 특성의 변화를 유발하여 지하수 폭기 효율을 제고할 수 있는 가능성을 처음으로 확인하고자 하였다. 본 연구에서는 계면활성제를 이용하여 지하수내 공기흐름에 가장 중요한 인자가 되는 표면장력을 감소하는 실험을 실시하였으며 이를 통하여 다음과 같은 효과를 검증하려 하였다. 첫째, 휘발성 유기오염물질로 오염된 지역이 폭기영역 내부에 있을 때, 표면장력의 감소가 폭기에 따른 오염물질 제거 속도에 미치는 영향의 정도를 측정하였으며, 둘째, 지하수의 표면장력을 감소시킴으로써 동일한 조건에서 폭기영역이 늘어나는 정도와 폭기영역을 최대화하기 위하여 필요한 표면장력 감소정도를 측정하였다.

2. 실험방법

본 연구에서 VOC를 대표하는 오염물질로서 시약급 toluene(>99%, Junsei Co.)을 사용하였으며 동일한 물질을 정량분석을 위한 표준시료 제조에 사용하였다. 표면장력을 조절하기 위하여 음이온계 계면활성제인 Sodium dodecyl sulfate(SDS: >99%, Fischer Scientific Co.)를 사용하였다. 모든 실험에는 이차증류수가 사용되었으며 실험온도는 25°C에서 일정하게 유지되었다.

첫 번째 컬럼 실험은 토양을 포함하지 않은 상태에서 폭기에 의한 toluene의 제거 속도를 측정하였다. 컬럼의 내경은 9.5 cm, 길이는 100 cm 이며 전체적인 실험장치구성은 Fig. 1과 같다. toluene의 초기 농도는 100 ppm으로 고정되었으며, toluene 수용액의 양은 컬럼 하단부로부터 40 cm 및 70 cm의 수두를 유지토록 하여 두 차례 실시되었다. 폭기를 위한 공기의 컬럼 유입속도는 needle valve를 사용하여 100 ml/min으로 일정하게 유지하였다. toluene 농도는 컬럼 하단의 시료주입구에서 시간대 별로 채취된 물 시료를 UV spectrophotometer(Shimazu, UV1601)를 이용하여 분석하였다. 표면장력의 감소가 toluene stripping

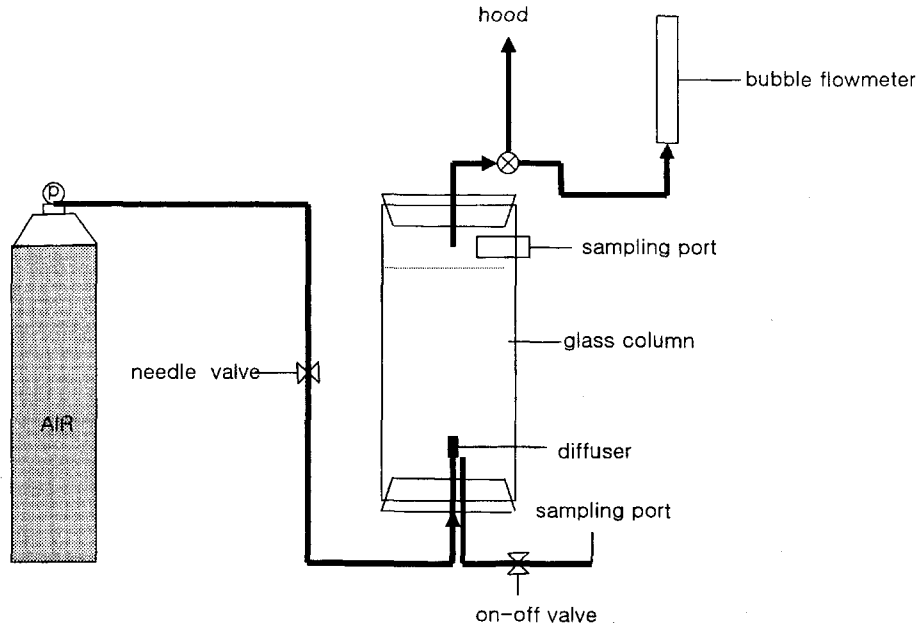


Fig. 1. Schematic diagram of the air-sparging experiment using a glass column; the same glass column was used for both air-stripping (no sand in the column) and air-sparging experiments (with sand in the column).

속도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 SDS가 투여되지 않은 toluene 수용액과 SDS가 35 ppm 투여된 toluene 수용액 두 경우에 대하여 실험이 실시되었다. 본 연구에 사용된 모든 수용액의 표면장력은 적하법(drop weight method : Harkins and Brown, 1919)를 이용하여 측정되었다.

두 번째 컬럼 실험은 첫 번째 컬럼실험과 같으나, 평균입경 0.5~1.5 mm 정도의 비교적 굵은 천연모래가 충전된 컬럼에 toluene 수용액을 투입하여 폭기실험을 실시하였다. 천연모래는 주문진 해안에서 채취되었으며 약 20회 정도 수돗물로 세척한 다음 건조하여 사용하였다. 모래의 충전깊이는 85 cm로서 약 15 cm 정도의 빈 공간을 컬럼 상층부에 유지하였으며, 이 빈 공간에 시료를 채취할 수 있는 시료채취구(sampling port)를 설치하여 가스 시료를 gas-tight syringe를 이용하여 채취하였다. 컬럼에 투입되는 수용액의 toluene 농도는 앞서의 실험과 마찬가지로 100 ppm으로 유지되었으며 모래를 충전하기 전에 미리 약 21 cm 정도의 toluene 수용액을 채운 후 컬럼 상부로부터 모래를 충전하였다. 이는 실험시작전에 컬럼하단부가 물로서 완전히 포화되도록 하기 위해서이다. 모래 충전후 toluene 수용액의 수위는 컬럼 하단으로부터 55~60 cm로 상승하였다. 실험은 SDS가 투입되지 않은

toluene 수용액과 SDS가 100 ppm 투여된 toluene 수용액에 대하여 각각 실시되었다. 컬럼내로 투입되는 공기의 유속은 100 ml/min으로 일정하게 유지하였다. 본 실험에서는 물 시료 대신에 가스시료가 채취되었으며 gas-tight syringe로 채취된 가스시료는 직접 Gas Chromatograph(GC, Hewlett Packard 6890GC)를 이용하여 분석되었다. GC 분석을 위한 toluene의 가스표준시료는 60 ml serum bottle에 액체 toluene을 정확히 1~8 μ l 주입한 후 35°C에서 완전 휘발토록 한 다음 가스 시료를 일정량 gas tight syringe를 사용하여 GC에 도입하였다. 실험컬럼으로부터의 시료의 채취는 폭기와 동시에 일정한 시간간격을 두고 이루어졌으며 채취즉시 GC에 도입되어 분석되었다. 시료의 분석 외에도 컬럼내 수위의 변화도 측정되었다.

마지막 실험은 2차원 상자모형을 이용하여 표면장력의 감소가 지하수 폭기 시 폭기영역에 미치는 영향을 알아보려는 실험이다. 이 실험에서는 VOC는 사용되지 않았으며 단지 SDS의 농도변화에 따른 폭기대역(영향권)의 변화만 측정되었다. SDS의 농도는 CMC(critical micelle concentration)보다 훨씬 낮은 0~900 ppm 사이에서 실험이 실시되었다(SDS의 CMC는 약 2,400 ppm). 실험장치는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 가로 70 cm, 세로 50 cm, 내부폭 1.5 cm의 유사 2

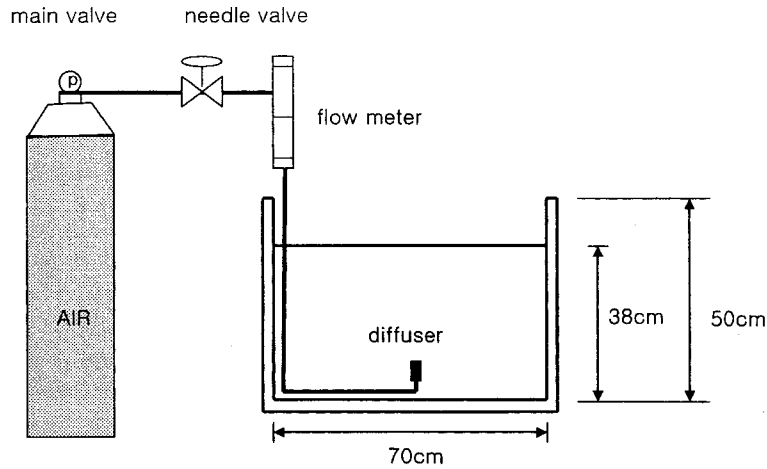


Fig. 2. Configuration of the 2-dimensional box model, gas line installation, and necessary parts alignment for experiments.

차원 상자모델(quasi 2-dimensional box model)이며 모래는 상자의 바닥면으로부터 약 38 cm 지점까지 충전되었다. 컬럼실험과 마찬가지로 상자내에 모래가 충전되기 전에 SDS 수용액을 먼저 채웠으며 결과적으로 토양의 약 80%정도가 SDS수용액으로 포화되도록 하였다. 충전에 사용된 모래는 주문진 해수욕장에서 채취된 모래를 표준망체로 걸러 200-1000 μm 범위의 입경을 가지는 모래가 사용되었다. 폭기에 사용된 공기유속은 400 ml/min으로 고정되었다. 실험 시작 후 상자모델 내에 형성된 공기 경로 및 불포화대역이 안정되면 모델 밖에 붙여진 필름에 폭기영역이 표시되어 data로 활용되었다. 이 연구에는 모두 동일한 stainless steel 재질의 diffuser가 사용되었는데, 외경과 길이는 각각 1 cm, 2 cm이며 공극의 크기는 평균 0.25 μm 이다.

3. 결과 및 토의

3.1. 컬럼실험

첫 번째 컬럼실험이 실시된 이유는 계면활성제의 존재(특히 물-공기 계면에 흡착된 계면활성제)가 수용액-공기간에 이루어지는 VOC의 물질이동 속도에 미치는 영향을 알아보기 위함이다. 토양이 존재하지 않는 상태에서도 계면활성제를 투여하게 되면 크게 두 가지 효과를 예견할 수 있는데, 첫째는 표면장력의 감소에 따라 기포의 크기가 작아지므로 전체적인 물질이동 속도가 증대되는 현상인데 이는 단위부피, 단위시간당 생성되는 물-공기 계면적의 증가에 물질이동이 직접적인 비례관계에 있다는 사실에 기초한다. 둘째, 앞서 언급

한 대로 물-공기 물질이동에 물 표면에 흡착된 계면활성제가 또 다른 저항층의 역할을 하여 물-공기간 물질 이동속도를 저하시킬 수도 있다.

SDS를 넣지 않은 toluene 수용액과 SDS가 35 ppm 포함된 toluene 수용액의 표면장력은 적하법(drop-weight method)으로 각각 71.4 ± 0.5 dyn/cm와 68.0 ± 0.9 dyn/cm로 측정되었다(±기호는 standard deviation). SDS를 35 ppm으로 고정하여 실험한 이유는 본 연구에 사용된 실험장치에서 SDS농도를 35 ppm 이상으로 증가하면 물표면에 지속적으로 거품이 축적되어 실험을 수행하는 것이 어려워졌기 때문이며, 35 ppm에서는 일부 거품이 발생하였으나 일정수준에서 안정화되는 현상을 나타내었다. 컬럼내 toluene 수용액의 수위를 40, 70 cm로 고정하여 실험했을 때 toluene의 농도 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 두 실험 모두 계면활성제를 투여하였을 때, 그렇지 않을 때보다 toluene 농도의 감소속도가 빨라지는 것을 알 수 있다. 폭기에 의하여 toluene 수용액으로부터 toluene이 감소하는 속도는 전형적인 1차 반응의 형태로 표현할 수 있다(Fig. 3). 컬럼내 수위를 40 cm로 유지한 실험에서, SDS 투입함으로써 toluene의 제거속도상수, k, 값은 0.0073에서 0.0084으로 약 15% 증가한 것으로 나타났으며, 70 cm의 수위에서는 0.0047에서 0.0056으로 19% 증가하였다. 본 실험결과 35 ppm의 SDS 수용액에서 물-공기 계면에 흡착하는 SDS 흡착층에 의한 물질이동 저항성은 물-공기 계면적이 증가함으로써 증대되는 전체물질이동을 최소화한 완전삭감하지 않는 것으로 결론지을 수 있다. 계면활성제의 투입에 의한 부정적 영향, 즉 계면에서

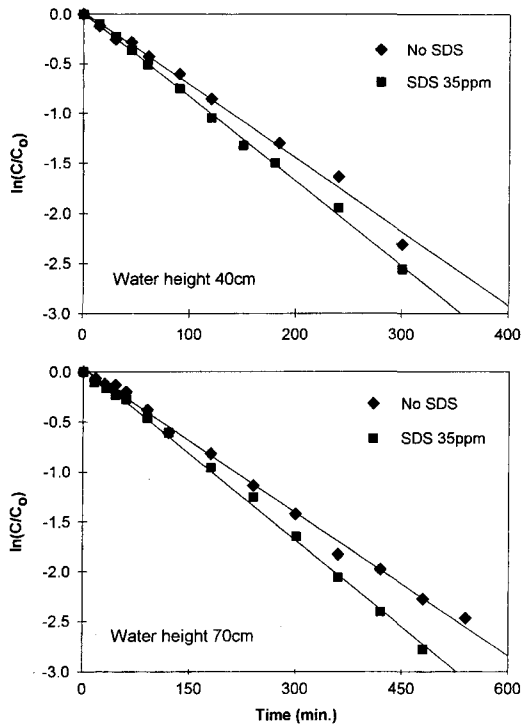


Fig. 3. The change in toluene concentration in free aqueous solution over time, at different surface tensions, due to air-stripping; C and C₀ represent the concentrations of toluene in the water samples and the initial toluene concentration, respectively.

의 물질확산에 대한 저항의 증가가 전체 물질이동속도를 지배적으로 결정하는 인자가 아니며 물-공기간 접촉면적의 변화가 보다 근본적인 총괄 물질이동속도 결정인자라는 사실은 토양포화층 또는 지하대수층에 대하여 동일하게 적용될 수 있을 것으로 생각된다.

두 번째 컬럼실험에서는 첫 번째 실험보다 높은 농도(100 ppm)의 SDS가 사용되었는데 이는 불포화 토양층의 존재에 의하여 거품축적문제가 거의 발생하지 않았기 때문이다. SDS 및 toluene을 각각 100 ppm 씩 포함하는 수용액의 표면장력은 앞서 언급한 동일한 표면장력 측정법을 사용하여 58.3 dyn/cm로 측정되었으며 SDS에 의한 표면장력의 감소분은 약 14 dyn/cm이다. SDS가 투입되지 않은 컬럼에서, 폭기 전 컬럼내 toluene 수용액의 수위는 59.0 cm였으며, 폭기후 67.0 cm로 상승하였으며 이는 대략 8 cm에 해당하는 컬럼 내부의 부피가 공기에 의하여 점유되었음을 의미한다. 이를 공기포화율(매질내 총 빈공간중 공기가 차지하는 비율)로 환산

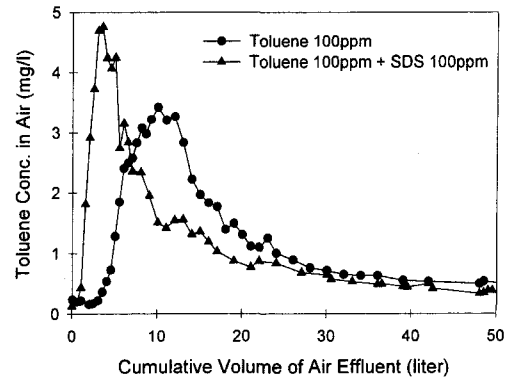


Fig. 4. Toluene concentration in gas from the column during air-sparging experiment at different surface tensions; experiments performed in a glass column (Fig. 1) packed with a sand.

하면 폭기중 매질에 존재하는 공기분율은 약 12%가 된다. SDS가 100 ppm 투입된 실험에서 수위는 폭기 전 56.8 cm에서 69.8 cm로 약 13 cm의 증가를 나타내었으며 폭기 후 공기포화율은 약 19%에 해당한다. 이는 낮은 표면장력에서 공기포화율이 높아진다는 것을 의미하며 증가된 공기량은 높은 표면장력에서 침투할 수 없었던 보다 미세한 공극까지 공기가 침투한 결과로 풀이된다. 즉 계면활성제를 투입하게 되면 공기가 공극을 통과하는 데 필요한 모세관 압력이 표면장력의 감소에 따라 그만큼 적어지므로 동일한 공기압을 적용하였을 때 그만큼 손쉽게 작은 공극에 까지 공기가 침투해 들어갈 수 있다.

컬럼에 toluene 수용액에 공기를 주입한 후 컬럼으로부터 추출되는 공기에 포함된 toluene의 농도를 분석한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. SDS를 투입하여 표면장력을 떨어뜨렸을 때 보다 빠른 속도로 toluene이 휘발, 제거되는 것을 명확하게 알 수 있다. Fig. 4에 나타난 toluene의 농도곡선이 차이가 나기는 하지만, 본 실험이 매우 균일한 거친 모래를 사용하였다는 점에서 본 결과는 상당히 적은 효과를 구현한 것으로 판단된다. 예를 들어 흔히 현장에서 발견되는 불균일한 매질에 폭기법을 적용하였을 때는 공기 흐름이 몇몇 특정 경로에 국한된다. 이와 같은 경우, 표면장력의 감소시키게 되면 공극으로 공기가 침투하기 위한 최저압력, 즉 모세관 압력이 줄어들게 된다. 결과적으로 표면장력을 감소하여 보다 많은 공극까지 공기가 침투하고, 또 공기의 이동경로의 수가 증가하여 오염물질을 휘발속도를 증대함으로써 본 실험에서 구현한 효과보다 훨씬 큰 효과가 나타날 것으로 판단된다. 또 다음

에 소개될 상자모델 실험에서도 언급되었지만, 컬럼 실험에서는 공기가 통과하는 단면이 컬럼의 내부로 제한되어 모든 공기가 강제로 전 단면을 통과되도록 되었으나 현실적으로 지하수 폭기는 물리적으로 제한된 영역에서 이루어지는 것이 아니므로 실제 표면장력을 감소하여 얻을 수 있는 VOC 제거 효과는 훨씬 클 것으로 기대된다.

3.2. 2차원 상자모델 실험

2차원 상자모델은 1차원 컬럼실험의 한계점을 극복하고 보다 현장에 가까운 물리적 조건에 대한 적용가능성을 알아보기 위해 흔히 사용된다. 본 연구에서도 앞서 소개한 1차원 컬럼실험에서 시험할 수 없었던 폭기 영역의 변화 실험을 2차원 상자모델을 이용하여 실시하였다. 본 실험에 사용된 SDS 용액은 모두 7종류로서 각 농도에서의 표면장력 측정결과는 Fig. 5에 나타났다. SDS 수용액의 표면장력은 초기에 급격히 감소하여 800 ppm 이상에서는 큰 변화를 보이지 않는 것을 알 수 있다. 폭기를 시작하여 폭기영역이 안정화된 후(약 10분)에 형성된 폭기영역을 Fig. 6에 나타내었다. 폭기영역은 SDS의 농도가 600 ppm에 이를 때까지 급격히 증가하였으며 그 이후에는 오히려 감소하는 경향을 보이고 있다(Fig. 7). SDS를 전혀 투여하지 않았을 때 발생하는 폭기영역을 100으로 할 때, 600 ppm의 SDS 수용액의 폭기영역은 500% 이상이므로 5배 이상의 폭기영역의 확대가 발생한 것으로 측정되었

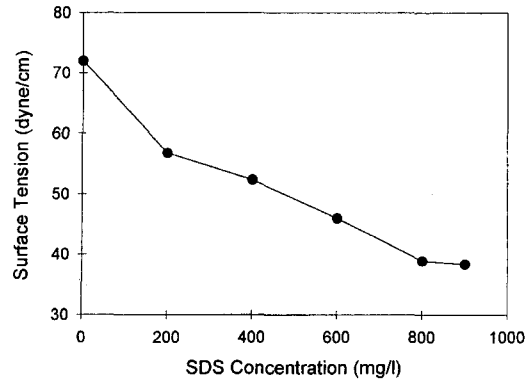


Fig. 5. Surface tensions of SDS aqueous solutions, measured by drop weight method.

다. SDS를 물에 용해하였을 때 SDS 수용액의 표면장력은 초기에 급격히 감소하며 800 ppm 이상에서는 큰 변화를 보이지 않는데, 폭기 영역은 600 ppm 정도까지만 증가하고 있다. 현재까지 600 ppm 이상의 SDS 농도에서 폭기영역이 감소하는 이유는 뚜렷이 알 수 없다. 다만 표면장력이 지나치게 낮아지면 지하수 표면으로 너무 쉽게 공기 통로가 형성되어 수평방향의 불포화대 확장이 줄어드는 결과가 나타난 것으로 보여진다.

4. 결 론

본 연구에서는 지하 대수층에 존재하는 휘발성 유기

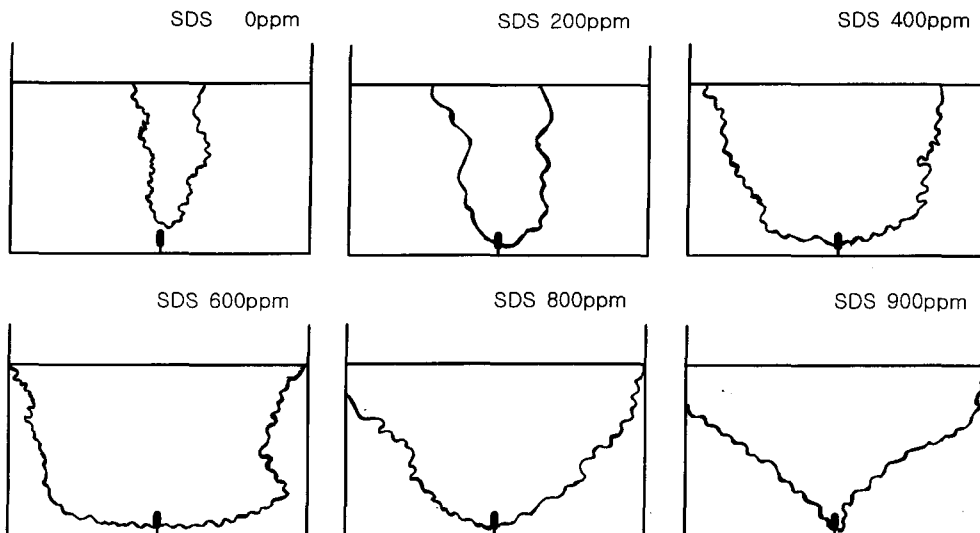


Fig. 6. The influence zone (unsaturated part) established by air-sparging in 2-dimensional sand box at different surface tensions; solid line represent the boundary between saturated and unsaturated part generated.

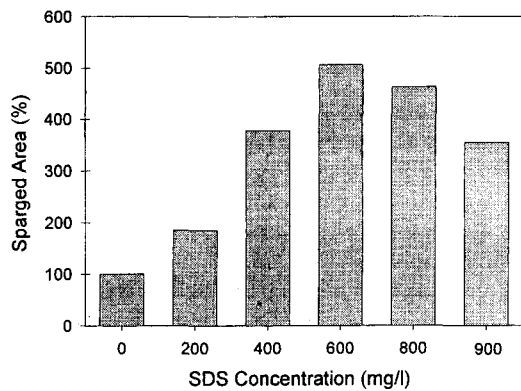


Fig. 7. Relative extent of the influence zone at different surface tensions; the unsaturated area of a 2-dimensional box experiment with no SDS was set to be 100%.

물질을 제거하기 위해 빈번하게 사용되는 지하수 폭기법의 효율을 개선하기 위해 지하수의 표면장력을 감소하는 데 따르는 효과를 관찰하였다. 우선 토양매질이 존재하지 않는 상태에서 toluene으로 오염된 물의 표면장력을 감소한 결과 수용액으로부터 toluene이 제거되는 속도가 향상되었다. 이는 계면활성제가 물-공기 계면에 흡착하더라도 수용액으로부터 공기중으로의 VOC 물질이동에 미치는 부정적 영향, 즉 물질이동을 저하시키는 효과가 계면활성제를 투여함으로써 발생하는 긍정적 효과, 즉 물질이동을 증대시키는 효과를 상쇄하지 않는 것으로 나타났다. 토양(모래)를 매질로 사용한 컬럼실험 결과 표면장력을 감소함으로써 폭기에 의한 대수층내 공기포화율이 증가하는 현상을 확인하였으며 toluene으로 오염된 지하수로부터 toluene이 제거되는 속도도 증대됨을 확인하였다. 이는 표면장력저하가 보다 작은 토양내 공극까지 공기통로를 형성할 수 있도록 하는 데 따른 것으로 판단된다. 마지막으로 2차원 상자실험을 통하여 표면장력의 감소가 동일한 조건에서 폭기영역을 현격하게 확대시킨다는 사실을 입증하였으며 따라서 CMC 이하의, 소량의 계면활성제를 사용하여 폭기효율을 제고할 수 있는 가능성을 확인하였다.

본 연구결과는 지하수에 이미 용해되어있는 휘발성 물질의 제거보다는 지하수 또는 토양의 오염원으로서 존재하는 NAPL의 제거에 보다 유용하게 적용될 수 있을 것으로 보인다. 지금까지의 연구결과를 토대로 현재 2차원 상자모델을 사용하여 지하대수층으로부터 VOC의 제거하는데 있어서 그 제거속도가 표면장력의 조절에 따라 개선되는 정도를 정량적으로 측정하는 실

험이 진행되고 있으며, 현장 규모의 NAPL 오염지역에 대한 실험도 실시될 예정이다. 본 연구는 또한 NAPL로서 오염된 지하 대수층을 물리화학적으로 휘발제거하는 효과 외에도 산소공급영역을 확대하고(폭기 영역의 확대), 여분의 탄소원(예: 생분해성 계면활성제)을 공급하며, 산소공급속도를 증대(미세 공극까지 공기통로 형성)하므로써 미생물을 증폭하여 기존의 폭기에 따른 생물학적 방법(Johnson *et al.*, 1998)에 비하여 한층 개선된 분해제거 효과를 유발할 수 있을 것으로 기대된다. 단 지나치게 과다한 표면장력의 감소는 공극내 모세관 압력에 의하여 고정되어 있는 NAPL 방울을 중력에 의해 수직이동하여 보다 깊은 지하로 이동시킬 가능성이 있으므로 주의하여야 한다.

사 사

이 논문은 2000년도 한림대학교 교비연구비에 의하여 수행되었음. 본 연구를 위하여 실험자료수집 및 정리를 도와주신 김강현, 김민석, 이원종, 최은주에게 심심한 감사를 드립니다.

참고문헌

- Adams, J.A. and Reddy, K.R. (2000) Removal of dissolved- and free-phase benzene pools from ground water using in situ air sparging. *J. Envir. Engrg.*, v. 126, p. 697-707.
- Braida, W.J. and Ong, S.K. (1998) Air sparging: Air-water mass transfer coefficients. *Water Resour. Res.*, v. 34, p.3245-3253.
- Harkins, W.D. and Brown, F.E. (1919) The determination of surface tension (free surface energy), and the weight of falling drops: The surface tension of water and benzene by the capillary height method. *J. Am. Chem. Soc.*, v. 6, p. 499-524.
- Johnson, C.D., Rayner, J.L., Patterson, B.M., and Davis, G.B. (1998) Volatilisation and biodegradation during sparging of dissolved BTEX-contaminated groundwater. *J. Contam. Hydrol.*, v. 33, p. 377-404.
- Johnson, P.C., Das, A., and Bruce, C. (1999) Effect of flow rate changes and pulsing on the treatment of source zones by in situ air sparging. *Environ. Sci. Technol.*, v. 33, p. 1726-1731.
- Johnson, R.L., Johnson, P.C., McWhorter, D.B., Hinchee, R.E., and Goodman, I. (1993) An overview of in situ air sparging. *Ground Water Monitoring Rev.*, v. 13, p. 127-135.
- Lundegard, P.D. and LaBrecque, D. (1995) Air sparging in a sandy aquifer (Florence, Oregon, USA): Actual and apparent radius of influence. *J. Contam. Hydrol.*, v. 19, p. 1-27.
- Marley, M.C., Hazebrouck, D.J., and Walsh, M.T. (1992) The application of in situ air sparging as an innovative

- soils and ground water remediation technology. *Ground Water Monitoring Rev.*, v. 12, p. 137-145.
- Miller, C.T, Poirier-McNeill, M.M., and Mayer, A.S. (1990) Dissolution of trapped nonaqueous phase liquids: Mass transfer characteristics. *Water Resour. Res.*, v. 26, p. 2783-2796.
- Powers, S.E., Loureiro, C.O., Abriola, L.M., and Weber, W.J. Jr. (1991) Theoretical study of the significance of nonequilibrium dissolution of nonaqueous phase liquids in subsurface systems. *Water Resour. Res.*, v. 27, p. 463-477.
- Rabideau, A.J., Blyden, J.M., and Ganguly, C. (1999) Field performance of air-sparging system for removing TCE from groundwater. *Environ. Sci. Technol.*, v. 33, p. 157-162.
- Reddy, K.R. and Adams, J.A. (1998) System effect on benzene removal from saturated soils and ground water using air sparging. *J. Envir. Engrg.* v. 124, p. 288-299.
- Reddy, K.R., Kosgi, S., and Zhou, J. (1995) A review of in-situ air sparging for the remediation for the remediation of VOC-contaminated saturated soils and groundwater. *Haz. Waste and Haz. Mat.*, v. 12, p. 97-118.
- Roosevelt, S.E. and Corapcioglu, M.Y. (1998) Air bubble migration in a granular porous medium: Experimental studies. *Water Resour. Res.*, v. 34, p. 1131-1142.
- Rogers, S.W. and Ong, S.K. (2000) Influence of porous media, airflow rate, and air channel spacing on benzene NAPL removal during air sparging. *Environ. Sci. Technol.*, v. 34, p. 764-770.
- Unger, A.J.A., Sudicky, E.A., and Forsyth, P.A. (1995) Mechanisms controlling vacuum extraction coupled with air sparging for remediation of heterogeneous formation contaminated by dense nonaqueous phase liquids. *Water Resour. Res.*, v. 31, p. 1913-1925.
- van Dijke, M.I.J., and van der Zee, S.E.A. T.M. (1998) Modeling of air sparging in a layered soil: Numerical and analytical approximation. *Water Resour. Res.*, v. 34, p. 341-353.

2002년 8월 12일 원고접수, 2002년 10월 24일 게재승인.