

## 계면활성제를 이용한 오염대수층의 선택적 폭기기술

김헌기\* · 송영수 · 권한준

한림대학교 환경생명공학과

## Air-sparging Technology for Remediation of Specific Aquifer Layer Using Surfactant

Heonki Kim\* · Young-Su Song · Han-Joon Kwon

Dept. of Environmental Sciences and Biotechnology, Hallym University

### ABSTRACT

Air sparging technique has been used for remediation of VOC(volatile organic compound)-contaminated aquifer. The aim of this study was to develop an innovative air sparging technique that enhances the efficiency of air intrusion into a specific horizontal layer of aquifer where the contaminants exist with the help of water-soluble surfactant. A two-dimensional physical box model, packed with homogeneous sand, was used for simulating the aquifer in this study. Aqueous solution of anionic surfactant (100 mg/L, sodium dodecylbenzene sulfonate) was used to suppress the surface tension of groundwater. Three sets of experiments were conducted: air sparging experiment without surfactant application, air sparging experiments for box model where the surfactant solution was applied right above the air injection point, and air sparging experiments with surfactant solution layer formed in the middle of the box. It was found that the sparging influence zone was expanded up to five times of that formed by sparging without surfactant application. The size of sparging influence zone was more sensitive to the air flow (injection) rate with surfactant application than that without surfactant. More importantly, injection of air into the target aquifer layer was successful with surfactant application. Findings in this study are expected to provide more options for designing remediation processes using air sparging.

**Key words :** Groundwater, Remediation, Pollution, Surfactant, Sparging, VOC

### 요 약 문

본 연구는 전통적인 지하 대수층 폭기기술을 시행하는 데 있어서 대수층의 특정층에 미리 수용액상 계면활성제를 수평방향으로 도입함으로써 오염물질이 실제로 존재하는 특정 지층으로 선택적으로 폭기되도록 하여 최소한의 공기량으로 오염물질 제거 효율을 극대화 하는 기술을 개발하는 것을 목적으로 한다. 본 연구에서는 균일질 모래로 충전된 2차원 상자 모델을 대수층 모사를 위하여 사용하였으며, 저농도(100 mg/L)의 음이온계 계면활성제(sodium dodecylbenzene sulfonate) 수용액을 대수층의 표면장력을 조절하는 데 사용되었다. 실험은 첫째, 계면활성제가 처방되지 않은 경우, 둘째, 공기도입부 근처에 계면활성제 용액이 도입된 경우, 그리고 셋째, 공기도입부와 토양표면의 중간부분에 계면활성제 용액이 도입된 경우의 세 부분으로 구성되어 실시되었다. 실험 결과, 계면활성제가 도입된 경우 계면활성제가 투입되지 않은 경우에 비하여 최고 5배에 해당하는 현저한 폭기영향권의 확대가 관찰되었다. 또한 계면활성제가 도입되지 않았을 때에는 폭기영향권의 범위가 도입유량에 거의 영향을 받지 않았으나 계면활성제가 도입된 경우 폭기영향권은 도입유량에 비례하는 것으로 나타났다. 특기할만한 것은 폭기영향권이 계면활성제가 도입된 수평층을 중심으로 형성되어 이 부분에 집중되어 존재하는 오염물질의 제거에 매우 유리할 수 있다는 점이다. 현재

\*Corresponding author : heonki@hallym.ac.kr

원고접수일 : 2008. 8. 1 심사일 : 2008. 8. 6 게재승인일 : 2008. 11. 13

질의 및 토의 : 2009. 2. 28 까지

까지 대수층 폭기기술이 도입공기의 수평확산을 유도하는 기술이 개발되어 있지 않으므로 본 연구는 기존의 대수층 폭기 복원기술의 효율을 획기적으로 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

**주제어** : 지하수오염, 지하수복원, 대수층, 계면활성제, 폭기, 휘발성 유기화합물

## 1. 서 론

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(groundwater air sparging)은 현장적용을 통한 오염물질 제거효과가 검증된 환경복원 기술 중 하나이다(Marley et al., 1992; Johnson et al., 1993; Lundegard and LaBrecque, 1995; Reddy et al., 1995; Reddy and Adams, 1998; Rabiduar et al., 1999; Johnston, et al., 2002). 통상 주입되는 공기는 제거하고자 하는 오염물질이 존재하는 위치보다 낮은 위치에서 공기관정을 통하여 대수층으로 주입되며, 주입된 후 부력(buoyancy) 및 공기 압력구배(pressure gradient)에 의하여 상승 및 수평방향이동을 하게 된다. 이동하는 공기는 여러 가지 크기의 이동경로(channel)를 형성하게 되며 오염물질은 여러 물질이동 기작에 의하여 공기 중으로 이동하게 된다(Unger et al., 1995; Braida and Ong, 1998).

오염물질이 대수층에 존재하는 형태는 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 첫째는 지하수에 용해된 상태로 존재하는 경우와, 둘째 물과 서로 섞이지 않는 불용성 유기물질의 덩어리(nonaqueous phase liquid, NAPL)의 형태로 물과 분리되어 존재할 수 있다. 폭기가 진행되는 동안 수용액상 오염물질은 수용액상 내부에서 확산에 의하여 물 표면을 거쳐 이동상인 공기로 물질이동이 발생하며, NAPL에 포함된 오염물질은 NAPL상으로부터 직접 휘발하여 공기로 이동할 수도 있고, NAPL상으로부터 수용액상으로 용해되는 과정을 거쳐 최종적으로 공기 중으로 이동할 수도 있다. 어떤 경우이나 지하수 폭기법에 의한 오염물질제거 효율을 결정하는 요인으로는 폭기가 실시되는 조건 또는 공학적 설계와 오염물질 자체의 화학적 성질을 들 수 있다. 오염물질이 지하수로부터 제거되는 궁극적인 상태가 가스이므로 비교적 증기압이 높은 물질의 제거속도가 동일한 운전조건에서 빠르게 나타난다. 또한 불균일한 매질에서는 공기에 도달하기까지의 지하수 내 물질이동 경로도 문제가 될 수 있는데, 수용액상 확산경향(확산계수)이 큰 물질이 보다 손쉽게 제거될 수 있다. NAPL로부터 직접 공기 중으로 이동하는 기작이 지배적일 경우

NAPL상 내부에서 공기와 접촉하는 NAPL-공기의 계면으로 이동하는 확산속도가 폭기에 의한 제거효율에 영향을 미칠 수 있으며 이 때 NAPL의 조성이 폭기시간의 경과에 따라 달라질 수 있으므로 제거 속도의 현저한 감소현상이 발생할 수 있다. 오염물질을 포함하고 있는 매질의 물리 화학적 성질과 운전조건도 역시 폭기에 의한 오염물질 제거 효율에 절대적인 영향을 미친다. 폭기 영역의 매질 입자의 크기, 크기 분포 및 균일성(homogeneity), 공기주입 형태(연속적, 불연속적), 공기주입속도, 지하수의 유속 등도 지하수 폭기에 의한 휘발성 유기물질의 제거 효율에 크게 영향을 미치는 인자로 작용한다는 사실이 밝혀졌다(Reddy and Adams, 1998; Adams and Reddy, 2000).

지금까지 지하수 폭기법에 대한 연구는 NAPL로부터 지하수 또는 공기로의 물질이동 속도를 결정하는 인자들에 대한 것, 오염물질을 포함하는 매질의 물리적 특성에 따른 영향, 그리고 기본적인 공학적 인자들을 변화함으로써 폭기효율을 제고하려는 연구가 주를 이루었다. 최근에 대수층에 전면적으로 수용성 계면활성제를 투입하여 폭기하는 “surfactant-enhanced air sparging” 기법이 도입되어 그 효과가 보고된 바 있다(Kim et al., 2004, 2006a, 2006b). 그러나 이 새로운 기술은 대수층의 지하수를 전면적으로 계면활성제 수용액으로 치환함으로써 몇 가지 문제점을 갖고 있다. 계면활성제 수용액으로 대수층을 채우기 위해서는 다량의 수용액이 도입되어야 하고, NAPL 등 오염물질이 존재하지 않는 지질층에도 불필요하게 계면활성제가 도입되어야 한다. 또 대수층 상하로 넓은 범위에 걸쳐 지하수의 표면장력이 감소하게 되면 NAPL의 수직이동을 야기하여 오염물질의 확산을 오히려 촉진할 가능성도 있다.

본 연구의 목적은 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 오염된 특정 대수층만 선택적으로 폭기하여 오염물질의 확산을 제한하면서도 폭기효율을 제고할 수 있는 새로운 형태의 지하수 폭기기술을 개발 하는데 있다. 본 연구는 또한 계면활성제의 도입에 따른 폭기영역의 변화정도를 측정하여 표면장력감소의 효과를 정량적으로 측정하며, 특히 도입 공기유량의 변화에 대한 폭기영역의 상관관계를 고찰 및 조사하는 것을 목적으로 한다.

## 2. 이론

토양입자로서 구성된 대수층은 전형적인 다공성 매질 (porous medium)이다. 다공성 매질에 공기와 물이 공존할 때, 매질에 대한 모세관 압력( $p_c$ , dyne/cm<sup>2</sup>)은 물의 표면장력(dyne/cm), 토양입자 표면에서의 물-공기 접촉각( $\theta$ ), 그리고 토양공극에 형성된 물-공기 접촉 굴곡면의 반경( $r$ , cm)에 의하여 결정된다.

$$p_c = \frac{2\sigma}{r} \cos \theta \quad (1)$$

여기에서 토양의 모세관 압력이란 토양입자에 대한 wetting fluid와 non-wetting fluid의 압력차를 의미한다.

$$p_c = p_{nw} - p_w \quad (2)$$

여기에서  $p_{nw}$ 와  $p_w$ 는 각각 토양입자에 대한 wetting fluid(대개 물)와 non-wetting fluid(공기 또는 NAPL)의 압력(dyne/cm<sup>2</sup>)을 나타낸다. 토양과 같은 다공성매질의 수분함량(또는 함수율  $S$ , 토양 고형입자를 제외한 전체 부피에 대한 물 부피의 비율)은 모세관 압력과 다음과 같은 관계가 있는 것으로 알려져 있다(Brooks and Corey, 1966).

$$S = (1 - S_r) \left( \frac{p_d}{p_c} \right)^\lambda + S_r, \text{ for } p_c > p_d \quad (3)$$

여기에서  $S_r$ 은 잔류 함수율(매우 높은 모세관 압력에서도 남아있는 물에 대한 함수율),  $p_d$ 는 air entry pressure (dyne/cm<sup>2</sup>)이며  $\lambda$ 는 토양입자의 크기분포를 나타내는 무차원 변수이다. Air entry pressure,  $p_d$ 는 특정 표면장력에서는 상수를 나타내므로, 식 (3)은 모세관 압력이 증가하면 함수율이 감소한다는 사실을 나타낸다. 물로 포화된 토양에 공기를 도입하기 위해 필요한 최소압력의 의미를 갖는  $p_d$ 도 역시 표면장력에 영향을 받는다. 즉 표면장력이 낮아지면 이에 비례하여  $p_d$  값도 작아진다.

$$p'_d = p_d \frac{\sigma'}{\sigma} \quad (4)$$

여기에서  $p'_d$ 는 새로운 표면장력에서의 air entry pressure를 나타낸다. 위 식 (4)는 인위적으로 지하수 표면장력을 감소하게 되면 대수층에 공기를 도입하기가 수월해 지는 것을 의미한다(Brooks and Corey, 1966). 또한 단순히 대수층에 공기를 도입하기 위한 압력이 낮아지는 것을 의미할 뿐 아니라 수직 상방향 이외의 방향(예: 대수층의 수평방향)으로의 공기확산도 가능하다는 사실을 시사한다.

## 3. 재료 및 실험방법

### 3.1. 재료

본 연구에 사용된 토양은 직경 300-500  $\mu$ m 범위를 갖는 석영질 모래이며, 수돗물로 수회 세척하여 점토 입자와 같은 콜로이드성 성분을 제거한 후 사용하였다. 표면장력을 조절하기 위하여 음이온계 계면활성제인 SDBS (sodium dodecylbenzene sulfonate, Tokyo Kasei Kogyo Co. Ltd., Reagent grade)를 사용하였다. 계면활성제 수용액은 SDBS 100 mg/L의 농도로 제조되었으며, 이 용액의 표면장력은 50.2 dyne/cm로 측정되었다(중류수는 70.6 dyne/cm)(Fisher Tensiomat 21). 계면활성제 수용액에 100 mg/L의 농도로 Sodium fluorescein(Sigma, reagent grade)이 첨가되었다. Sodium fluorescein은 상자모델 실험 시 형광램프를 이용하여 계면활성제용액의 적용 범위를 관측하기 위하여 이용되었다. 지하수 폭기실험을 위한 장치의 모식도를 Fig. 1에 나타내었다.

### 3.2. Tempe pressure cell 실험

본 연구에 사용된 토양의 압력-함수율 상관관계를 측정하기 위하여 Tempe pressure cell(Soilmoisture Co., Ltd)을 사용하였다. Tempe cell의 토양포함 부분은 내경 3 cm, 높이 5 cm의 황동 컬럼이 사용되었으며, capillary barrier로서 0.5 기압의 air entry pressure를 갖는 세라믹 플레이트가 사용되었다. 토양은 Tempe cell 내부에 습식 충전(먼저 물을 넣은 후 수면아래의 포화상태에서 토양을 충전하는 방식)을 취하였으며 충전된 토양의 공극율 등 제반 특성은 상자모델에 충전된 토양과 동일하게 유지되었다. Cell 내부의 토양이 완전히 물로 포화된 상태에서 cell의 하부에 연결된, 물로 가득찬 튜브의 끝부분의 높이를 서서히 낮추며, 각 높이에서의 물의 유출량을 측정하였다. 튜브 끝부분의 높이로부터 토양에 가해지는 압력을 구하였으며, cell로부터 제거된 물의 양으로부터 함수율을 계산하였다.

### 3.3. 상자모델을 이용한 폭기실험

상자모델은 투명한 PMMA(poly methylmetacrylate)재질로 제작되었고, 가로, 세로, 내부의 폭이 각각 70 cm, 50 cm, 1.5 cm이며, 왼쪽과 오른쪽 가장자리에 폭 2 cm의 물 도입관정과 추출관정이 설치되었다(Fig. 1). 두 개의 관정과 모래로 충전된 부분과는 약 0.25 mm의 공극크기를 갖는 PE(polyethylene) sieve가 설치되어 모래가 관정으로 유입되는 것을 방지하였다. 충전된 모래의 총 높이가

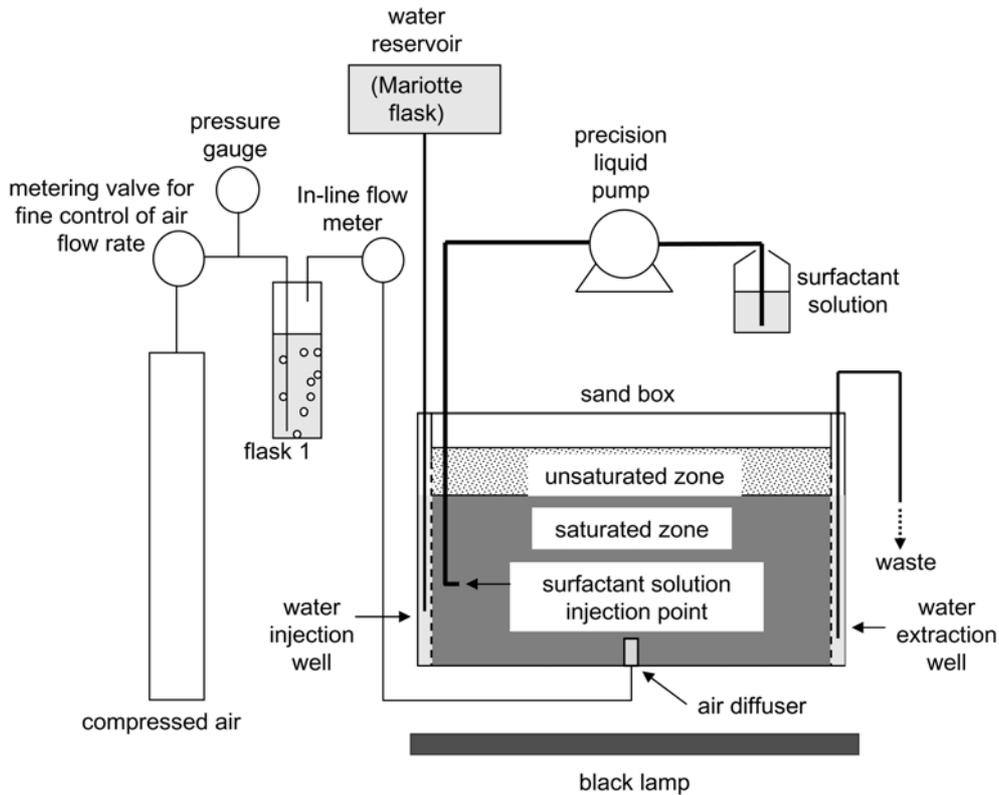


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental set-up used in this study.

는 48 cm이고, 공극율은 0.41이었으며, 상자의 밑면으로부터 33 cm까지 물로 포화되도록 하였다. 도입관정을 통하여 일정한 속도(약 15 mL/min)로 물(증류수)가 도입되었으며, 추출관정에 연결된 물 추출관의 끝부분의 높이를 조절하여 추출관정으로부터 제거되는 물의 속도도 물의 도입속도와 동일하게 유지되도록 하였다.

폭기 실험은 모두 세 가지 실험조건에서 실시되었다. 계면활성제가 투여되지 않은 상태에서 상자에 대한 폭기실험이 우선 실시되었으며, 계면활성제가 도입된 조건에서 2회(계면활성제 도입층의 위치에 따라) 실시되었다. 계면활성제와 sodium fluorescein을 포함하는 수용액은 precision liquid pump(Yonglin Co., M925)를 이용하여 약 3 mL/min의 속도로 상자내 포화층으로 도입되었다. 계면활성제 용액이 도입되는 위치는 첫 번째 실험에서는 밑면으로부터 22.5 cm였으며, 두 번째 실험에서는 밑면으로부터 6.5 cm였다. 계면활성제 수용액이 도입된 조건에서의 폭기실험은, 계면활성제 용액의 떠가 추출관정위치까지 도달하면 증류수와 계면활성제 수용액의 도입을 중단한 후 즉시 시작하였다. 폭기실험은 압축공기실린더의 밸브를 열면서 시작되었으며, 유량조절밸브와 flow meter를 이용하여 공기유량 100, 200, 300, 500 mL/min에서 순차

적으로 실시되었다. 폭기실험의 첫 단계에서는 가장 낮은 100 mL/min의 공기유량이 사용되었으며, 유량과 대수층내의 공기 흐름이 안정된 후 상자모델의 표면에 부착된 투명필름에 대수층내 공기 분포를 표시하였다. 유량 100 mL/min에서 폭기실험이 완결되면 폭기의 중단 없이 다음 높은 단계의 유량에 대하여 동일한 실험이 반복되었다. 계면활성제가 도입되지 않는 실험에 대하여도 대수층내 도입공기의 흐름 관찰하기 위하여 sodium fluorescein(농도 100 mg/L)수용액을 전면적으로 도입하여 사용되었다. 이 수용액의 표면장력은 증류수의 표면장력과 실험오차 범위( $\pm 1$  dyne/cm)내에서 일치하였다. 각 실험에서 투명필름에 표시된 폭기 영역은 그 면적의 계산을 통하여 상대적인 차이를 측정하는 데 사용되었다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1. 함수율과 모세관압력

모세관 압력( $P_c$ , 식 (3) 참조)가 커질수록 토양에 평형 상태로 존재하는 물의 양(또는 함수율  $S$ )가 식 (3)에 묘사된 비와 같이 줄어든다는 사실은 실험결과(Fig. 2)를 통하여 확인할 수 있다. 본 실험에 사용된 토양을 증류수와

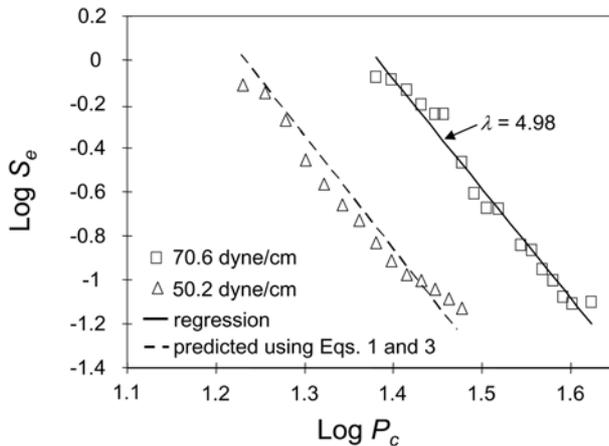


Fig. 2. Water retention curves for the sand used in this study (logarithmic scale for effective water saturation,  $S_e$ ): □ measured at 70.6 dyne/cm (no SDBS), solid line - the regressed curve; △ measured at 50.2 dyne/cm (SDBS = 100 mg/L) with a predicted (dashed) line based on regressed curve (measured at 70.6 dyne/cm) and Eqs. 1 and 3.

함께 Tempe cell로 실험하였을 때, air entry pressure는 22.4  $\text{cmH}_2\text{O}$ 였으며, 100 mg/L 농도의 SDBS 수용액을 사용하여 측정된 값은 14.5  $\text{cmH}_2\text{O}$ 였다. 증류수(70.6 dyne/cm)에 대하여 측정된 air entry pressure를 바탕으로 식 (4)를 이용하여 예측된 SDBS 수용액(50.2 dyne/cm)의 air entry pressure는 15.5 dyne/cm였으며 이는 측정치 14.5  $\text{cmH}_2\text{O}$ 와 매우 근사하였다. 증류수와 SDBS 수용액에 대하여 측정된 water retention curve를 Fig. 2에 나타내었다. 증류수에 대하여 측정된 본 토양의 값[식 (3)참조]은 4.89로서 굵은 모래의 전형적인 값으로 나타났다. 식 (1)과 식 (3)으로 예측할 수 있는 바와 같이 토양의 water retention curve는 표면장력의 비율에 따라 수평이동하는 것이 확인 되었다. SDBS 수용액에 대한 water retention curve의 측정치(Fig. 2에서 삼각형으로 표시)는 수용액에 대한 water retention curve와 식 (1)과 식 (3)을 이용하여 예측된 curve(Fig. 2에서 점선으로 표시된 선)와 잘 일치하였다. 본 실험결과는 표면장력을 저감함으로써 보다 낮은 공기압으로 포화상태의 토양에 공기를 도입할 수 있음을 의미하며, 지하수 폭기법을 보다 효과적으로 시행할 수 있도록 한다. 또한 대수층의 일부공간에만 국한하여 표면장력을 저감할 수 있다면 해당 부분만 선택적으로 폭기효율을 증대할 수 있는 가능성이 있음을 의미한다.

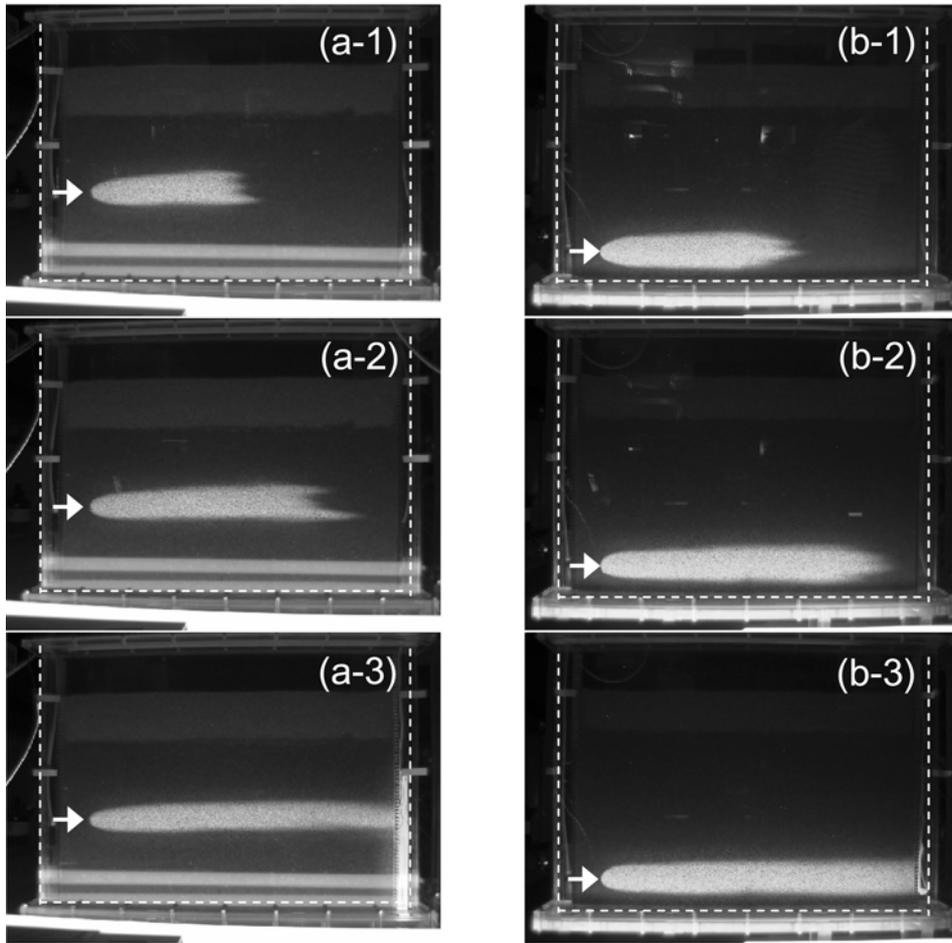
#### 4.2. 토양 수평층에 대한 폭기실험

모래로 충전된 상자모델의 도입 및 추출관정을 통하여

증류수를 한쪽 방향으로 15 mL/min의 유량으로 유동하도록 하면서 계면활성제 용액을 약 3 mL/min로 도입한 결과 매우 안정적인 계면활성제 수용액의 층[두께 약 10( $\pm$  2) cm]이 형성됨을 확인하였다(Fig. 3). 이는 용액에 포함된 계면활성제와 sodium fluorescein의 농도가 충분히 낮아 수용액의 밀도와 점도가 배경 지하수와 거의 차이가 없음을 의미한다. 따라서 실제 현장에서도 특별히 구조적인 지층의 왜곡현상이 존재하지 않는다면, 본 연구에서 사용한 수준의 농도에 해당하는 계면활성제 수용액을 도입함으로써 계면활성제 수용액의 수평층을 형성할 것으로 예상할 수 있다. 계면활성제 수용액으로 치환된 대수층 부분은 black lamp 하에서 sodium fluorescein의 형광작용에 의하여 매우 밝은 연두색으로 관찰이 용이하였다. 계면활성제 층의 두께는 증류수의 유량과 계면활성제 용액의 유량의 비에 따라 달라질 것으로 예상되며, 얇은 계면활성제의 층을 형성하기 위해서는 증류수(지하수) 유량에 대한 계면활성제 용액의 유량의 비율이 낮아야 할 것으로 생각된다. 실제 오염현장의 지층구조는 본 실험조건과 같이 균일한 매질이 아닐 가능성이 많고 또한 수평방향으로 부터 왜곡된 지층으로 구성되어 있을 가능성이 매우 높다. 따라서 복원대상 층의 선택적인 표면장력 저감을 위해서는 보다 세밀한 대수층 지층구조를 이해할 필요가 있다.

대수층에 계면활성제의 층이 형성된 후 폭기를 실시하였을 때, 각 공기유속에서의 폭기영역의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 공기의 유속이 증가하면서 폭기영향권도 증대되는 것이 뚜렷이 관찰되었다(Fig. 4에 각 폭기영역에 대한 공기유량은 표기하지 않았으나 공기유량이 증대되면서 폭기영역도 순차적으로 증대하였음). 계면활성제가 도입된 경우, 본 연구에서 구현한 조건에서 관찰한 최대 폭기영향권의 범위는 계면활성제가 도입되지 않은 경우에 비하여 최대 5배 정도 증대(공기 유량 500 mL/min 일 때)한 것으로 나타났다. 그러나 계면활성제가 적용되지 않은 상태에서 폭기를 실시하였을 때에는 폭기의 영향권이 매우 제한적일 뿐 아니라 폭기 영향권 내부에서도 공기의 포화도가 매우 낮은 것으로 관찰되었다. 계면활성제가 적용되지 않았을 때에도 공기유량의 증가에 따른 폭기 영향권의 증가가 관측되기는 하였으나, 그 효과는 계면활성제를 적용하였을 경우에 비하여 미미하게 나타났다.

계면활성제 수용액의 수평층이 형성된 후 폭기가 실시되었을 때, 도입된 공기는 계면활성제가 적용되지 않았을 경우에 비하여 계면활성제 용액을 따라 수평확산되는 것으로 나타났다. 이와 같은 경향은 공기도입위치에 대한 계면활성제 수평층의 위치에 관계없이 유사한 효과를 보였



**Fig. 3.** Formation of low surface tension layer by injecting aqueous solution (white color) of surfactant: injection of SDBS solution at (a) 22.5 cm, (b) 6.5 cm from the bottom of the sand box; numbers represent the sequence of injection, 1 - beginning, 2 - middle, 3 - completed injection; dashed line represents the inner boundary of the box; arrow represents the injection point of surfactant solution.

다. 즉 Fig. 4의 (b)와 (c)에서 확인할 수 있듯이 수평층의 위치에 따라 공기가 도입되는 위치만 다를 뿐, 수평방향으로의 폭기 영역이 확대되는 효과는 거의 차이가 없었다. 이 현상은 실제 오염현장의 복원에 있어서 대단히 유용하게 이용될 수 있다. 물보다 밀도가 큰 dNAPL (dense NAPL)로 오염된 대수층은 투수능이 낮은 지층위에 lens(또는 pool)을 형성하며 수평이동하는 경향이 강하다. 또 물보다 밀도가 낮은 INAPL(light NAPL)의 경우 주로 지하수의 수면에 수평방향으로 밀집되어 있거나 이동하므로 dNAPL과 유사한 수평오염층을 형성하는 경우가 대부분이다. 만일 NAPL로 오염된 층의 지하수만 선택적으로 표면장력을 감소할 수 있다면 본 실험의 결과에서 관찰한 대로 매우 선택적인 폭기가 가능할 수 있다. 이와 같이 계면활성제를 이용하여 지하수 폭기시 수평방향의 공기 흐름을 유도한 사례는 본 연구가 최초라 할

수 있다.

앞서 Fig. 4에서 관찰된 폭기 영역은 투명필름에 옮겨 그 면적을 측정하였다(Fig. 5). 계면활성제가 투입되지 않았을 경우 도입공기 유량이 100 mL/min에서 500 mL/min으로 증가하더라도 뚜렷한 폭기 영역의 증대가 관찰되지 않았다. 반면 이미 소개한 바와 같이 계면활성제 수용액의 수평층이 조성된 후 폭기가 실시되었을 때에는 유량의 증가에 따라 폭기영역의 현저한 증가가 관찰되었다. 공기 유량이 100 mL/min일 때 폭기영역은 세 경우가 거의 차이가 없었으나, 공기 유량이 200, 300, 500 mL/min으로 증대 되었을 때 계면활성제 도입된 경우 폭기 영역이 유량의 증가에 정비례하는 것으로 밝혀졌다. 또한 이미 언급한 바와 같이 계면활성제 수용액 수평층의 위치는 폭기 영역의 증가정도에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

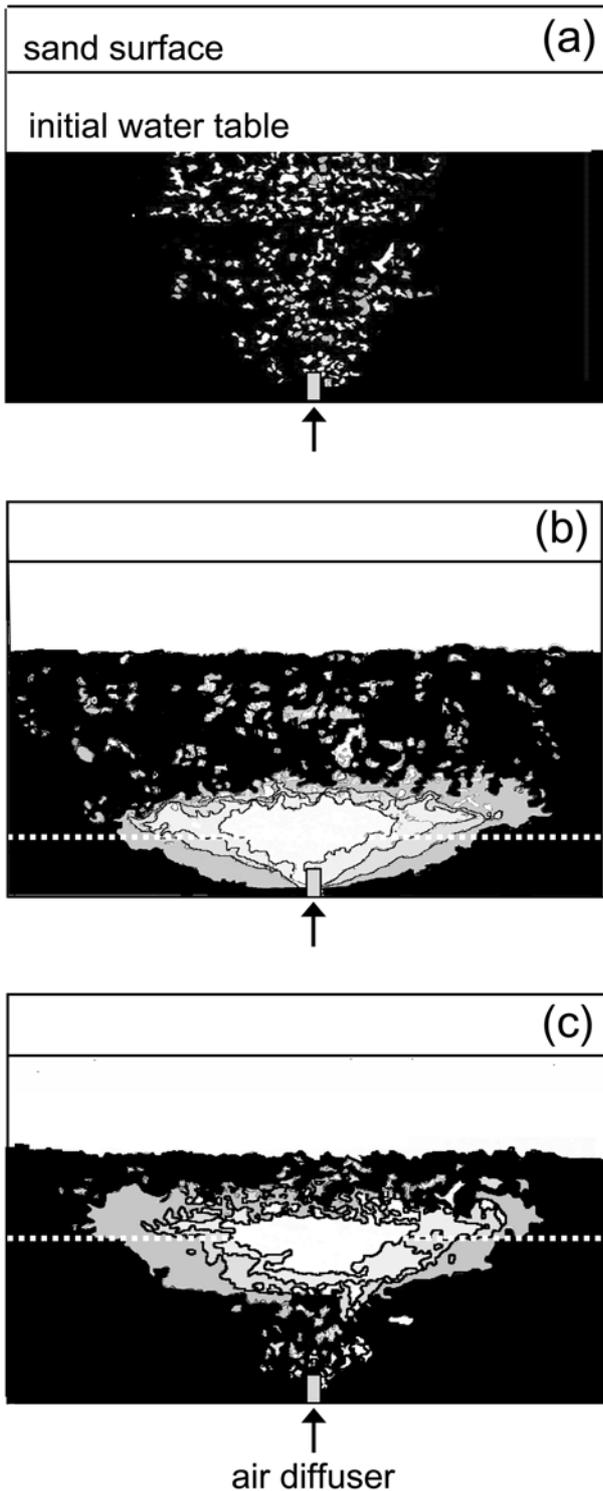


Fig. 4. Changes in sparging influence zone: (a) 70.6 dyne/cm; (b) 50.2 dyne/cm, injection point at 6.5 cm above the bottom; (c) 50.2 dyne/cm, injection point at 22.5 cm above the bottom; the size of sparging influence zone increased as the air flow rates increased from 100 mL/min to 200, 300, 500 mL/min (specific flow rates not shown); dashed lines represent the center lines of initially formed surfactant layer.

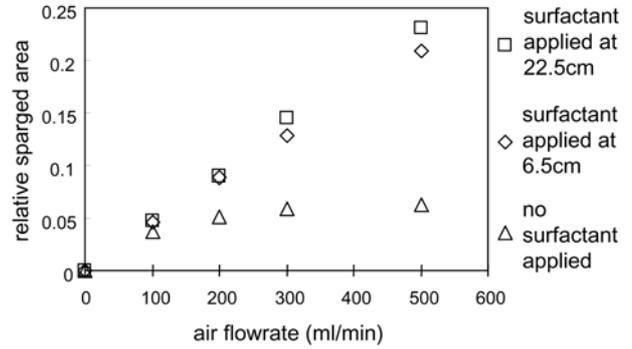


Fig. 5. The measured area of sparging zone as the function of air flow rate: relative sparged area means the ratio of sparged area to the total area of the sand-packed box model.

### 5. 결 론

오염물질이 존재할 것으로 추정되는 지하 대수층의 측정 수평영역에 대하여 계면활성제를 투여한 후 폭기하는 기법은 기존의 지하수 폭기법에 비하여 폭기 영향권의 크기를 현저히 증가시키는 결과를 나타내었다. 또한 폭기공정을 실시하는 과정에서 폭기 영향반경을 제한하는 부력에 의한 수직 상향류의 공기 유통특성을 계면활성제를 이용함으로써 부분적으로 수평방향으로 확산되는 특성을 부여할 수 있다. 본 연구결과는 휘발성 유기오염물질중 유류의 형태(NAPL)로서 오염된 지하수 복원에 응용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 사 사

이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2007-521-D00280).

### 참 고 문 헌

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.*, **126**, 697-707.

Braida, W.J. and Ong, S.K., 1998, Air sparging: Air-water mass transfer coefficients, *Water Resour. Res.*, **34**, 3245-3253.

Brooks, R.H. and Corey, A.T., 1966, Properties of porous media affecting fluid flow, *J. Irrig. Drain.*, **92**, 61-68.

Johnson, R.L., Johnson, P.C., McWhorter, D.B., Hinchey, R.E., and Goodman, I., 1993, An overview of in situ air sparging, *Ground Water Monit. Rev.*, **13**, 127-135.

- Johnston, C.D., Rayner, J.L., and Briegel, D., 2002, Effectiveness of in situ air sparging for removing NAPL gasoline from a sandy aquifer near Perth, Western Australia, *J. Contam. Hydrol.*, **59**, 87-111.
- Kim, H. and Annable, M.D., 2006a, Effect of surface reduction on VOC removal during surfactant-enhanced air sparging, *J. Environ. Sci. Health Part A*, **41**, 2799-2811.
- Kim, H., Choi, K.-M., Moon, J.-W., and Annable, M.D., 2006b, Changes in air saturation and air-water interfacial area during surfactant-enhanced air sparging in saturated sand, *J. Contam. Hydrol.*, **88**, 23-35.
- Kim, H., Soh, H.-E., Annable, M.D., and Kim, D.-J., 2004, Surfactant-enhanced air sparging in saturated sand, *Environ. Sci. Technol.*, **38**, 1170-1175.
- 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.*, **19**, 1-27.
- Marley, M.C., Hazebrouck, D.J., and Walch, M.T., 1992, The application of in situ air sparging as an innovative soils and ground water remediation technology, *Ground Water Monit. Rev.*, **12**, 137-145.
- Rabiduar, A.J., Blayden, J.M., and Ganguly, C., 1999, Field performance of air-sparging system for removing TCE from groundwater, *Environ. Sci. Technol.*, **33**, 157-162.
- Reddy, K.R. and Adams, J.A., 1998, System effect on benzene removal from saturated soils and groundwater using air sparging, *J. Environ. Engrg.*, **124**, 288-299.
- Reddy, K.R., Kosgi, S., and Zhou, J., 1995, A review of in-situ air sparging for the remediation of VOC-contaminated saturated soils and groundwater, *Haz. Waste and Haz. Mat.*, **12**, 97-118.
- 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.*, **31**, 1913-1925.