

대수층 폭기공정에서 토양입경 및 지하수 깊이에 따른 표면장력과 함수율의 상관관계

김헌기* · 권한준

한림대학교 환경생명공학과, 한림대학교 에너지·환경 연구소

Surface Tension-Water Saturation Relationship as the Function of Soil Particle Size and Aquifer Depth During Groundwater Air Sparging

Heonki Kim* · Han-Joon Kwon

Dept. of Environmental Sciences and Biotechnology, Hallym University

Institute of Energy and Environment, Hallym University

ABSTRACT

Reduction of groundwater surface tension prior to air sparging (SEAS, surfactant-enhanced air sparging) was known to increase air saturation in the aquifer under influence, possibly enhancing the removal rates of volatile contaminants. Although SEAS was known to be efficient for increasing air saturation, little information is available for different hydrogeological settings including soil particle sizes and the depth of aquifer. We investigated water saturations in the sparging influence zone during SEAS using one-dimensional column packed with sands of different particle sizes and different aquifer depths. An anionic surfactant was used to suppress the surface tension of water. Two different sands were used; the air entry pressures of the sands were measured to be 15.0 cmH₂O, and 36.3 cmH₂O, respectively. No significant difference was observed in the water saturation-surface tension relationship for sands with different particle sizes. As the surface tension decreased, the water saturation decreased to a lowest point and then it increased with further decrease in the surface tension. Both sands reached their lowest water saturations when the surface tension was set approximately at 42 dyne/cm. SEAS was conducted at three different aquifer depths; 41 cm, 81 cm, and 160 cm. Water saturation-surface tension relationship was consistent regardless of the aquifer depth. The size of sparging influence zone during SEAS, measured using two-dimensional model, was found to be similar to the changes in air saturation, measured using one-dimensional model. Considering diverse hydrogeological settings where SEAS to be applied, the results here may provide useful information for designing SEAS process.

Key words : Aquifer, Remediation, Air sparging, Surfactant, SVE, SEAS, groundwater

요 약 문

대수층으로부터 휘발성 유기오염물질을 제거하기 위하여 air sparging을 실시하는 과정에서, 지하수의 표면장력을 인위적으로 감소시킴으로써 지하 대수층의 물 포화율을 낮추어 오염물질제거효율을 높일 수 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 대수층의 구성 토양의 입경의 차이나 대수층의 두께의 차이가 이와 같은, 개량된 air sparging의 물 포화율 변화에 미치는 영향은 연구된 바 없다. 본 연구는 실험실 규모의 물리적인 model을 사용하여 air sparging공정 실시 과정에서 서로 다른 토양입경과 깊이를 갖는 대수층 조건에서 표면장력과 물 포화율의 상관관계를 규명하였다. 표면장력을 감소하기 위한 계면활성제로 sodium dodecylbenzene sulfonate를 사용하였고, 토양은 입경이 서로 다른 두 가지 모래를 사용하여 비교 실험을 수행하였다. 모래의 air-entry pressure는 각각 15.0 cmH₂O, 36.3 cmH₂O로 측정되었

*Corresponding author : heonki@hallym.ac.kr

원고접수일 : 2009. 10. 14 심사일 : 2009. 10. 21 게재승인일 : 2009. 11. 30
질의 및 토의 : 2010. 2. 28 까지

다. 입경에 상관없이 표면장력과 물 포화율의 관계는 서로 비슷한 형태를 보였고, 표면장력이 감소함에 따라 물 포화율이 감소하다 일정 표면장력 이후에 물 포화율이 증가하는 형태로 나타났다. 본 연구에서는 표면장력이 42 dyne/cm일 때 두 가지 모래의 물 포화율이 48%로 최소치에 도달하였다. 대수층의 깊이는 41 cm, 81 cm, 160 cm의 세 가지 조건에서 실험하였으며, 본 실험조건에 해당하는 깊이 영역에서는 표면장력과 물 포화율의 상관관계가 대수층 깊이에 따른 특이한 상이점을 나타내지 않았다. 또한 2차원 모델을 이용한 실험에서 표면장력의 변화에 따른 폭기영역의 변화는 1차원 컬럼을 이용하여 측정된 물 포화율의 변화와 유사하였다. 본 연구결과는 SEAS(surfactant-enhanced air sparging)기술의 실제 적용에 있어서 다양한 현장조건에 따른 공정조건의 선정에 도움이 될 수 있을 것으로 전망된다.

주제어 : 대수층, 정화, 지하수 폭기, 계면활성제, 토양증기추출법, SEAS, 지하수

1. 서 론

토양 및 지하수 복원기술의 일종인 지하수 폭기법(groundwater air sparging)은 지하수에 용해된 휘발성 유기오염물질(volatile organic compound, VOCs)과 대수층에 존재하는 불용성 유기물질의 덩어리(nonaqueous phase liquid, NAPLs)를 제거하기 위한 복원기술로 개발되었다(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). 전통적인 양수처리법(pump and treat)의 단점을 보완하기 위하여 개발된 여러 가지 새로운 기술의 하나인 이 기술은 여러 군데의 현장적용을 통하여 오염물질 제거효과가 검증되었다. 지하수 폭기법은 실험장치가 간단하고, 운영비가 적게 들고, 공기만을 사용하므로 2차 오염의 발생 가능성이 낮고, 생산되는 폐수가 적으며, 폭기 영역 내 산소를 공급함으로써 토양 미생물에 의한 생물학적 분해를 도모할 수 있는 등의 여러 이점을 갖고 있다(Unger et al., 1995; Braida and Ong, 1998).

지하수 폭기기술의 오염물질 제거 효율을 결정하는 요인들은 실험실 규모의 물리적인 모델을 사용한 기존의 여러 연구결과로부터 확인할 수 있다. 지하수 폭기법의 오염물질 제거 효율은 크게 이 기술의 공학적 설계에 따른 요인, 오염물질 자신의 화학적 성질, 그리고 대수층의 물리화학적 성질, 세 가지로 나눌 수 있다. 대수층의 물리화학적 성질로서는 폭기 영역 내 매질의 특성(매질의 입자 크기, 크기 분포 및 균일성), 지하수의 유속 등을 들 수 있으며, 공학적 설계인자로서는 공기주입 형태(연속적, 불연속적), 공기 주입 속도와 유량, 공기 이동경로(air channel)를 주요인자로 들 수 있고, 오염물질의 화학적 성질 중 지하수 폭기법에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 증기압과 수용해도라 할 수 있다(Reddy and Adams, 1998; Adams and Reddy, 2000).

오염 현장에 대한 지하수 폭기법의 실시에 대한 다수의

연구를 통하여 많은 양의 정보가 축적되었으나, 대부분의 연구가 기술의 공학적 설계인자의 변화에 따른 폭기 영향권의 변화 또는 오염물질 제거 효율의 변화에 초점을 맞추고 있다. 실험적 접근 이외에도 수리적 모델을 이용한 폭기 영향권에 대한 연구도 상당히 이루어져 왔으나, 이 역시 앞서 설명한 지하수 폭기법의 효율성에 대한 대수층의 성질과 공학적 설계인자의 영향에 대한 연구에 국한되고 있다. 지하수 폭기법의 효율을 결정하는 위의 세 가지 요인에 더하여 지하수의 표면장력을 조절함으로써 지하수 폭기법의 영향권을 획기적으로 증대할 수 있는 새로운 개념이 최근에 소개되었다. 큰 입자 크기(직경 > 10 mM)의 구형의 유리구슬(silica beads) 매질을 사용한 연구에서, 첨가된 수용성 계면활성제에 의한 물의 표면장력 감소에 의하여 물로 포화된 매질내에서 부상(浮上)하는 공기방울의 크기와 크기분포를 줄일 수 있다는 사실이 확인되었으며(Burns and Zhang, 2001), 최근에는 대수층에 전면적으로 수용성 계면활성제를 투입한 후, 폭기하는 “surfactant-enhanced air sparging(SEAS)”기술이 도입되어 그 효과가 보고된 바 있다(Kim et al., 2004, Kim and Annable, 2006, Kim et al., 2006).

이 기술은 수용성 계면활성제의 첨가에 의해 물의 표면장력을 감소시킴으로서 포화토양의 air-entry pressure(또는 bubbling pressure)를 감소하게 되고, 결과적으로 폭기 영향권을 현저히 확대시킬 뿐 아니라 폭기 영향권 내의 물 포화율을 획기적으로 감소하는 효과가 있다. 그러나 SEAS 기술에 대한 기존의 실험적 연구는 대부분 한 가지 종류의 토양(주로 모래)을 이용함으로써 대수층의 깊이 변화가 있거나 토양의 종류(예: 입경)가 달라지는 경우에 대한 연구는 아직 이루어진 바 없다. 따라서 본 연구의 목적은 다양한 수리지질학적 현장조건에 대한 SEAS의 효율을 검증하기 위하여, 첫째, SEAS 실행에 따른 폭기영역 내의 물(공기) 포화율과 표면장력과의 상관관계의 대수층의 깊이에 따른 변화를 평가하고, 둘째, air-entry pressure가 서로 다른(즉 입경이 다른)토양에 대하여

물(공기) 포화율과 표면장력간의 상관관계를 규명하며, 셋째, 2차원 상자모델 실험을 통하여 표면장력 변화와 폭기 영향권의 크기 변화의 상관성을 규명하는 것이다.

2. 이론적 배경

토양입자로서 구성된 대수층은 전형적인 다공성 매질 (porous medium)이다. 다공성 매질에서 물 포화율(S_w)은 다음과 같이 모세관 압력의 함수로 표현할 수 있다 (Brooks and Corey, 1966).

$$S_w = (1 - S_r) \left(\frac{P_d}{P_c} \right)^\lambda + S_r \quad \text{for } P_c > P_d \quad (1)$$

여기에서 S_w 는 물 포화율(water saturation, $= V_w/V_v$, V_w 토양내 물부피, V_v 토양내 전체 빈공간의 부피), S_r 는 잔류 물 포화율(residual water saturation), P_c (dyne/cm²)는 모세관 압력이며, P_d (dyne/cm²)는 해당 토양의 air-entry pressure이고, λ 는 무차원상수이다. 잔류 물 포화율(S_r)은 토양에 충분히 강한 모세관 압력을 가하더라도 함수율의 변화가 미미할 때의 함수율에 해당한다. 토양의 모세관 압력(P_c)은 토양입자에 대한 wetting fluid(여기에서는 물)와 non-wetting fluid(여기에서는 토양공기)의 압력차를 의미한다. 모세관 압력(P_c)은 물의 표면장력(σ , dyne/cm), 토양입자 표면에서의 물-공기 접촉각 (α), 그리고 토양공극에 형성된 물-공기 접촉 굴곡면의 반경(r , cm)에 의하여 결정된다(식 2).

$$P_c = \frac{2\sigma \cos \alpha}{r} \quad (2)$$

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.

$$P_d' = P_d \frac{\sigma'}{\sigma} \quad (3)$$

여기에서 P_d' 와 P_d 는 각각 표면장력 새로운 표면장력 σ' 와 σ 에서의 air entry pressure를 나타낸다. 위 식(3)은 air-entry pressure는 지하수의 표면장력(σ)에 비례하므로, 계면활성제를 이용하여 표면장력을 낮추게 되면 air-entry pressure가 이에 비례하여 감소하게 되고, 식(1)에 제시된

대로 물 포화율이 감소하게 된다. 물 포화율이 감소한다는 사실은 결국 공기 포화율이 증대한다는 의미가 되며, 공기 포화율이 증대하게 되면 유류로서 존재하는 오염물질과 공기와의 접촉확률이 높아지게 되므로, 휘발에 의한 오염물질의 제거효율이 높아질 것을 기대할 수 있다.

3. 재료 및 실험방법

3.1. 실험재료

실험에 사용된 다공성 매질로서 직경이 각각 53~300 μ m, 300~500 μ m 범위를 갖는 석영질 모래를 사용하였다. 지하수의 표면장력을 조절하기 위한 계면활성제는 음이온 계면활성제인 SDBS(sodium dodecylbenzene sulfonate, Tokyo Kasei Kogyo Co. Ltd., Reagent grade)를 사용 하였고, 모든 수용액은 증류수를 이용하여 제조되었다. 모든 실험은 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 에서 수행되었다.

3.2. 실험방법: 1차원 컬럼실험

표면장력변화에 따른 토양 내 함수율 변화 측정을 위하여 구성된 1차원 컬럼실험에는 내경이 5.3 cm이고 길이가 각각 41 cm, 81 cm, 160 cm인 둥근 아크릴재질의 컬럼을 사용하였다. 빈 컬럼에 일정량의 탈기된 증류수를 채운 후, 모래를 컬럼의 위에서부터 투입하여 충전하는 습식충진을 하였으며, 이는 충진이 완료된 후 모래가 물로 완전히 포화되도록 하기 위함이다. 컬럼하부로부터 공기가 들어오는 구멍(1/8인치 튜브)이 모래나 토양으로 막히는 현상을 방지하고 도입된 공기가 컬럼의 단면에 고루 분포되도록 하기 위하여 컬럼의 하단으로부터 3 cm까지 500~1000 μ m 크기의 굵은 모래로 충전하였다. 실험장치의 개략도를 Fig. 1(a)에 나타내었다.

공기 폭기 실험은 충진이 완료된 컬럼의 하단으로부터 공기를 주입함으로써 시작하였다. 컬럼으로 도입되는 공기의 유량은 미세조절밸브(needle valve)를 이용하여 조절하였고, 컬럼의 상단부에 설치된 bubble flowmeter로 column안에 흐르는 유량을 측정하였다. 폭기과정에서 컬럼으로부터 배출되는 물은 수집병을 이용하여 수집하였다. 공기유량은 10.0 mL/min으로 고정하였다. 포집된 물의 양으로서 컬럼내부로 도입된 공기의 양(또는 물, 공기 포화율)을 측정하였다. 또한 포집된 물은 표면장력 측정을 위해 사용되었다.

컬럼으로부터 더 이상 물이 유출되지 아니하고, 공기유속이 일정하게 유지되면 해당 표면장력에서의 실험을 종료하고, 또 다른 표면장력에서 실험을 진행하기 위해 컬

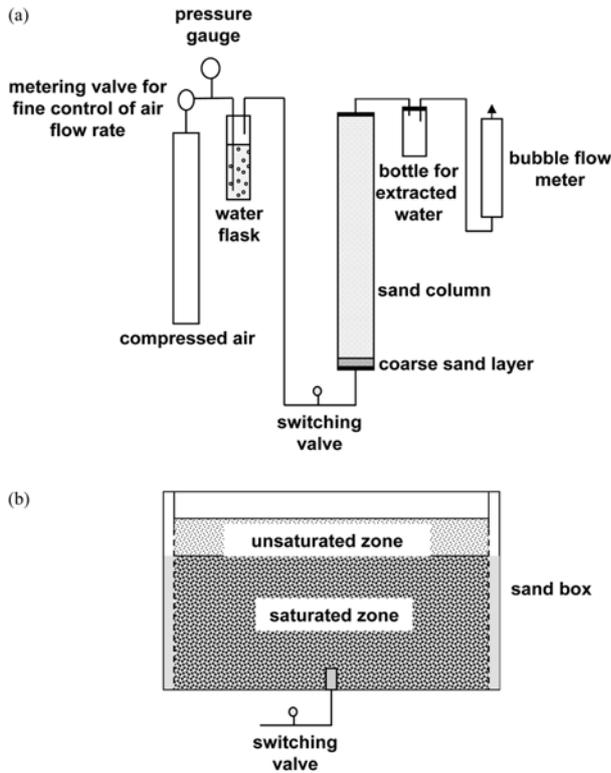


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental set-up used in this study: (a) 1-dimensional column experiment, (b) 2-dimensional box model that displaced 1-dimensional column for 2-dimensional experiments.

럼내부를 다시 포화상태로 변환하였다(참조: Kim et al., 2006). 폭기 실험이 종료되면, 공기의 도입방식과 동일한 방법으로 이산화탄소를 컬럼내부로 주입하여 공기를 이산화탄소로 완전히 치환한 후, 헬륨가스로 탈기한 증류수를 충분한 양(약 8 Liter)으로 세척하여 실험 초기와 동일한 상태로 변환한다. 컬럼이 실험 초기 상태로 돌아가면 미리 준비한 계면활성제 수용액을 충분히 도입하여 컬럼 내부의 증류수를 원하는 농도의 계면활성제 수용액으로 교환한다. 이와 같은 방법으로 다양한 표면장력에서의 폭기 실험을 동일한 매질에 대하여 실험하였으며, 모래를 재충진 하지 않음으로써 실험의 조건의 일관성을 확보하였다.

계면활성제의 농도는 0~400 mg/L 범위에서 변화시키면서 실험을 수행하였다(SDBS의 critical micelle concentration = 414 mg/L, Faisal Anwar et al., 2000). 표면장력은 Fisher Surface Tensionmat Model 21을 사용하여 측정하였다. 실험조건은 Table 1에 상세히 나타내었다.

3.3. 실험방법: 2차원 상자모델실험

투명한 PMMA(polymethylmetacrylate)재 질로 제작된 상자모델은 가로, 세로, 내부의 폭이 각각 70 cm, 50 cm, 1.5 cm이며, 왼쪽과 오른쪽 가장자리에 폭 2 cm의 물 도입관정과 추출관정이 설치되었다(Fig. 1(b)). 두 개의 관정과 모래로 충전된 부분과는 약 0.25 mm의 공극크기를 갖는 PE(polyethylene) sieve가 설치되어 모래가 관정으로 유입되는 것을 방지하였다. 상자모델은 1차원 컬럼실험에 사용된 300~500 μm 입경범위 모래를 1차원 컬럼과 같은 방식으로 충전되었으며, 충전된 모래의 총 높이는 48 cm 이고, 공극율(porosity)은 0.41이었으며, 상자의 밑면으로부터 35 cm까지 물로 포화되도록 하였다(water table의 높이는 상자의 밑면으로부터 약 25 cm).

폭기 실험은 모두 다섯 가지 실험조건에서 실시되었다. 계면활성제가 투여되지 않은 상태에서 상자에 대한 폭기 실험이 우선 실시되었으며, 순차적으로 계면활성제가 도입된 조건에서 4회(계면활성제의 농도에 따라) 실시되었다. 폭기실험은 압축공기실린더의 밸브를 열면서 시작되었으며, 유량조절밸브와 flow meter를 이용하여 폭기 공기의 유량은 100 mL/min으로 고정되어 실험이 실시되었다. 대수층으로 도입된 공기가 새로운 불포화영역, 즉 폭기영향권을 형성하면서 공기유량과 대수층내의 공기 흐름이 안정된 후 상자모델의 표면에 부착된 투명필름에 대수층 내 불포화 영역의 분포를 표시하였다. 새로이 형성된 불포화 영역, 즉 폭기영향권의 크기는 폭기전 포화영역 크기의 비율로서 계산되었다.

증류수로 포화된 조건에서 폭기실험이 종료되면 1차원 컬럼의 경우와 동일한 방식으로 계면활성제 수용액이 모델내부로 도입되었다. 단, 이산화탄소로 폭기된 후, 증류

Table 1. Conditions for 1-dimensional column experiments used in this study

Description	coarse sand (sand 2)	coarse sand (sand 2)	fine sand (sand 1)	coarse sand (sand 2)
Column length (cm)	41	81	81	160
Mass of sand (g)	1330	2620	2568	5006
Bulk density	1.47	1.47	1.45	1.47
Porosity	0.44	0.44	0.45	0.44
Total volume of column (cm ³)	904	1786	1786	3396
Total volume of water (cm ³)	364	727	770	1235

수 및 계면활성제 수용액은 1차원 컬럼에서와 같이 공기 도입부를 통하여 도입된 것이 아니라 모델의 도입관정 및 추출관정을 통하여 도입되었다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 토양입경에 따른 표면장력과 물(공기) 포화율의 상관관계

본 연구에서 사용된 두 모래는 서로 다른 입경을 보이며, air entry pressure는 굵은 입경의 모래가 15.0 cmH₂O, 가는 모래가 36.3 cmH₂O로 각각 측정되었다(Tempe pressure cell을 이용하여 측정)(Fig. 2). 두 모래의 λ 값 (식 (1)참조)은 굵은 모래와 조밀한 모래가 각각 3.93, 3.55로서 유사한 값을 나타내었으며, 이는 air entry pressure 이상의 압력을 포화조건의 토양(모래)에 가하였을 때, 압력변화에 대한 유효수분비율($S_w - S_r$)이 거의 동일한 정도로 감소함을 의미한다. 길이가 81 cm인 1차원 컬럼에 위의 모래를 충전하여 표면장력을 달리하면서 폭기를 시도한 결과, 동일한 도입공기 유량(10.0 mL/min)에서 표면장력이 감소되면 물 포화율이 감소되는 현상이 관찰되었다(Fig. 3). 그러나 이 현상은 물 포화율이 최저점에 도달한 후 역전되어 표면장력이 그 이상 감소하면 오히려 물 포화율이 증대하는 것으로 관찰되었다. 즉, 본 연구에서 구현한 실험조건의 범위 내에서는 물 포화율을 최소로 하는 최적 표면장력이 존재하는 것으로 결론 낼 수 있다. 물 포

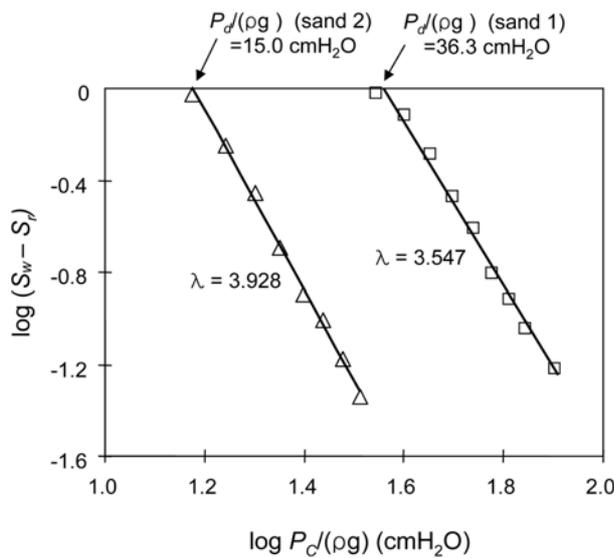


Fig. 2. Water retention curves for the sands used in this study : find sand (sand 1), coarse sand (sand 2).

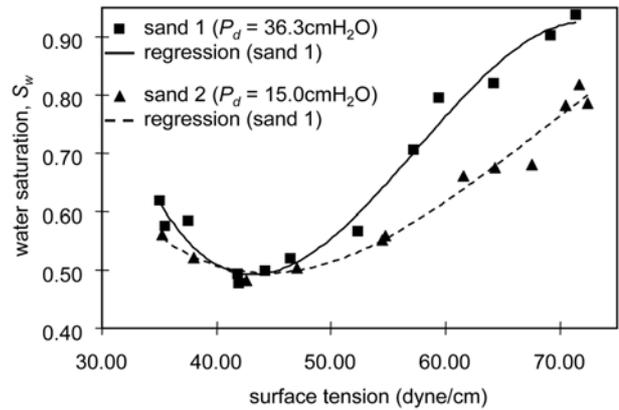


Fig. 3. Surface tension-water saturation relationship for sands with different particle sizes.

화율이 최저점에 도달한 후, 표면장력이 더욱 낮아지면 물 포화율이 오히려 증가하는 현상은 아직 정확한 설명이 어렵고 향후 이에 대한 연구가 필요하지만, 지나치게 낮은 표면장력에서는 공기에 의하여 공극으로 밀려나간 물이 지역적으로 재순환되어 공극으로 되돌아오는 현상이 발생하는 것으로 추정된다.

입경이 서로 다른 두 모래의 물 포화율-표면장력 관계는 상당히 유사한 형태를 보인다(Fig. 2). 그러나 계면활성제가 도입되지 않은 상태에서는 굵은 모래(sand 2)의 물 포화도가 가는 모래(sand 1)의 물 포화도 보다 낮게 측정되었으며, 이는 굵은 모래가 큰 공극의 비율이 비교적 높으므로 동일한 조건에서 전체적으로 공극이 작은 가는 모래보다 추출되는 물의 양이 많기 때문으로 해석된다. 그러나 이 차이는 표면장력이 낮아지면서 점차 감소하여 궁극적으로는 동일한 최저 물 포화율(48%) 또는 최고 공기 포화율(52%)을 나타내는 것으로 관찰되었다. 최저 물 포화율을 나타내는 표면장력 이하로 표면장력이 감소할 때, 표면장력 감소에 대한 물 포화도의 증가율 또한 굵은 모래가 가는 모래보다 작은 것으로 나타났다. 이는 앞서 설명한, 높은 표면장력에서 입경의 차이와 물 포화율의 차이의 관계와 같은 이유로 설명할 수 있겠다. 즉, 높은 표면장력 영역에서 가는 모래보다 굵은 모래에 상대적으로 많이 존재하는 큰 공극의 물이 적은 압력변화에 의하여 쉽게 공극에서 제거될 수 있는 것과 마찬가지로 낮은 표면장력 영역에서도 일단 공극에서 제거된 물이 비교적 낮은 압력변화에 의하여 재순환되어 공극을 빨리 채울 가능성이 클 것으로 추측된다.

본 연구는 매우 제한된 조건, 즉 두 종류의 모래를 대상으로 단일한 폭기유량(10.0 mL/min)조건에서 실시한 실험

힘이므로 실제 토양에 대하여 다양한 조건에서 동일한 결과(동일한 최저 물 포화율, 최저물 포화율을 나타내는 최적 표면장력)를 기대하기 어려울 수 있다. 그러나 본 연구결과를 통하여, 오염현장에서 SEAS 기법을 실시할 때 현장의 대수층 매질에 대한 최적 표면장력이 존재할 가능성이 매우 높으며 본 연구에서 제시된 최적 표면장력, 즉 물 포화율이 최저가 되는 표면장력을 현장의 최적 표면장력을 탐색하는 출발점으로 이용할 수 있을 것이다.

4.2. 대수층 깊이에 따른 표면장력과 물(공기) 포화율의 상관관계

본 연구에서는 1차원 컬럼의 높이를 41 cm, 81 cm, 160 cm로 조절하여 대수층의 깊이가 서로 다른 조건을 구현하였으며 대수층의 깊이를 제외한 다른 모든 실험조건은 동등하게 유지하였다. 동일한 토양(굵은 모래)을 서로 다른 깊이에서 폭기한 결과, 대수층 깊이에 따른 특이할 만한 차이점은 나타나지 않았다(Fig. 4). 즉, 41 cm의 대수층 깊이에서 측정된 물 포화율-표면장력 상관관계는 앞서 설명한 81 cm에서의 관계와 크게 다르지 않았으며, 또 160 cm의 깊이에서의 관계와도 크게 다르지 않았다. 대수층의 깊이에 관계없이 높은 수준의 표면장력 구간(즉 낮은 농도의 계면활성제)에서는 표면장력의 감소에 따라 물 포화율이 감소하는 현상을 보였고, 물 포화도가 최저치를 나타내는 표면장력 이하에서는 대수층의 깊이에 관계없이 표면장력의 감소에 따라 물 포화율이 증가하는 현상을 나타내었다.

이 현상은 일정한 깊이의 대수층에 공기를 도입하기 위하여 필요한 최소압력(P_{lim})을 구성하는 요소들을 고려하여 설명할 수 있다(Kim et al., 2004).

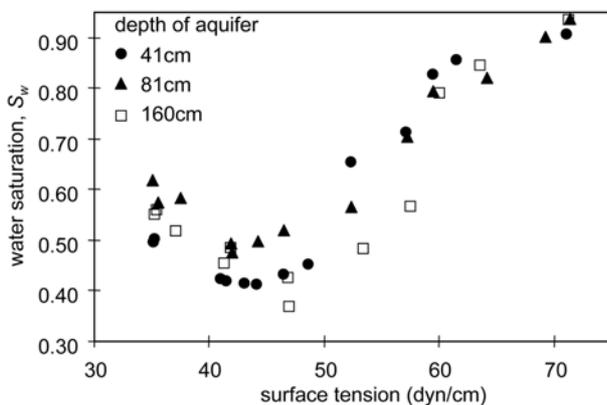


Fig. 4. Surface tension-water saturation relationship for sand (coarse sand 2) at different aquifer depths.

$$P_{lim} = P_w + P_d \quad (4)$$

위 식 (4)에서 P_w 는 대수층의 높이에 해당하는 압력 (hydraulic pressure)이며 일정한 깊이의 대수층에서는 표면장력의 변화에 관계없이 P_w 는 일정하다고 볼 수 있다. 따라서 일정한 압력이 아닌 일정한 공기유량을 유지한 본 연구에서는 도입공기가 대수층을 관통할 만큼 충분한 압력차가 제공되었으므로 P_w 는 극복되었다고 할 수 있으며, 결국 P_d 의 변화가 토양 공극을 차지하는 물을 공기로 치환하기 위한 압력의 변화를 유도하며, P_d 의 변화가 물 포화율을 변화시키는 정도는 P_w 의 값과 상관없이 일정하다 볼 수 있다. 따라서 동일한 토양이라면 대수층의 깊이에 관계없이 대수층의 공기도입부로부터 불포화층을 관통할 수 있는 정도의 공기압력이 적용되었다면 폭기 영향권 내부는 P_d 의 크기에 따라 물 포화도가 영향을 받는다. 다만 대수층이 수직방향으로 균일한 수리지질학적 특성을 보이지 않을 때에는 대수층의 깊이에 따라 물 포화율과 표면장력간의 상관관계가 현저히 달라질 수 있다는 점에 유의해야 할 것이다.

4.3. 표면장력변화에 따른 폭기영향권의 변화(2차원 상자 실험)

1차원 컬럼을 이용한 폭기 실험은 지하수 폭기공정 과정에서 폭기 영역(또는 영향권)내부의 물 포화율 변화를 관찰하는 데 그 목적이 있었다면, 2차원 상자실험은 표면장력의 변화에 따른 폭기영역의 크기변화를 관찰하는 데 목적이 있다고 할 수 있다. 본 연구에서는 계면활성제가 도입되지 않은 조건을 포함하여 모두 다섯 번의 실험을 각각 서로 다른 표면장력(즉 서로 다른 계면활성제 농도)에서 실시하였다. 폭기 실험 전에는 모래로 채워진 영역 중에서 물로 포화된 영역의 크기와 폭기 실험이 진행되어 폭기 유량 및 폭기 영역이 모두 안정된 다음 공기가 새로이 도입된 영역의 비율을 측정하였다.

계면활성제가 도입되어 대수층의 표면장력이 감소하게 되면 폭기 영향권, 즉 폭기에 의한 불포화 영역의 크기가 현저히 증대되었다(Fig. 5). 1차원 컬럼실험에서 표면장력의 감소에 따라 폭기 영역내 물 포화율이 획기적으로 감소하는 경향과 유사한 경향이 폭기영역의 크기변화에서도 나타났으며, 더욱이 일정 표면장력 이하로 표면장력을 감소하였을 때, 폭기영역의 크기가 오히려 줄어드는 현상도 나타났다. 낮은 표면장력에서 폭기 영역이 오히려 작아지는 현상은 대수층 하부로 도입된 공기가 낮은 표면장력에서는 대수층 상부로 관통하여 공기의 수직채널을 형성하

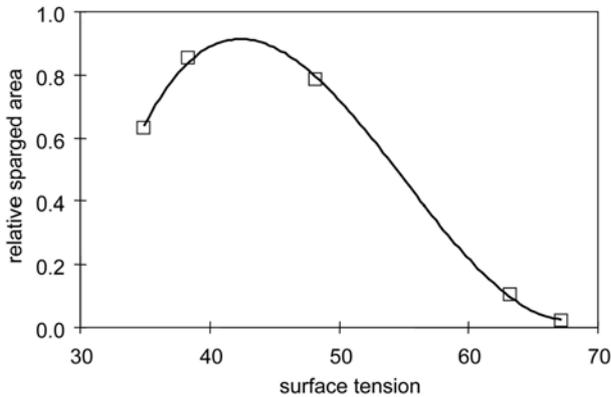


Fig. 5. Surface tension-relative sparged area relationship measured using 2-dimensional box model; relative sparged area means the ratio of newly unsaturated area due to air sparging to initially saturated area.

기가 용이함으로써 도입공기의 수평방향 확산, 즉 폭기영향권의 확산이 제한되는 것으로 판단된다. 특기할 만 한 점은, 본 2차원 상자실험을 통하여 측정된 최대 폭기 영향권을 나타내는 최적 표면장력은 대략 40-45 dyne/cm이 있으며, 이는 1차원 컬럼실험에서 측정된 최적 표면장력(최저 물 포화율)과 일치한다는 것이다. 따라서 최적 표면장력에서는 공기 폭기 영역 및 폭기 영역내 공기 포화율이 최대가 되는 것으로 결론 내릴 수 있으며, 현장조건에서 SEAS 기술을 적용할 때 중요한 설계요소로 작용할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 SEAS 기술이 기존의 지하수 폭기법(air sparging)에 대하여 갖는 높은 효율성이 토양의 종류 및 대수층의 깊이에 따라 나타내는 변화를 측정하였다. 서로 다른 입경을 갖는 모래를 대상으로 폭기영향권 내의 물 포화율을 표면장력의 함수로서 측정한 결과, 표면장력-물 포화율의 상관관계는 토양입경의 크기에 관계없이 유사한 상관관계를 갖는 것으로 관찰되었다. 또한 동일한 토양(모래)에 대하여 서로 다른 깊이에서 SEAS 기술을 적용한 결과 대수층의 깊이에 관계없이 유사한 표면장력-물 포화율의 상관관계를 나타내었다. 일정한 폭기조건(일정한 공기 유량)에서 물 포화율은 표면장력의 감소에 따라 현저히 감소하지만 물 포화율이 최저점에 도달한 후, 더욱 표면장력을 감소하게되면 물 포화율은 오히려 증대하였다. 2차원 상자실험을 통하여 SEAS의 폭기 영역도 표면장력의 감소에 따라 증대하였으나 특정 표면장력보다 낮은 표면장력이 적용되었을 때에는 오히려 폭기영역이 작아지는

결과를 도출하였다. 즉 폭기영역의 크기와 폭기영역내 공기 포화율은 표면장력에 대하여 유사한 관계를 갖는 것으로 나타났다. 본 연구결과는 SEAS 기술을 현장에 적용하기 위한 기초적인 공학적 설계인자를 도출하는 데 유용한 정보로 이용될 수 있을 것으로 판단된다. 지하수의 표면장력을 감소함으로써 폭기효율을 향상하고자 하는 SEAS 기술은 다른 지하수복원기술과 마찬가지로 현장의 수리지질학적 특성에 많은 영향을 받는다. 해당 대수층의 투수능(hydraulic conductivity), 서로 다른 투수능(또는 공기투과능)을 갖는 지층의 존재, 공기가 선택적으로 흐를 개연성이 높은 특이구조(예: fracture)의 존재 등의 SEAS 공정에 대한 영향이 미리 평가되어야 할 것이다. SEAS에 사용되는 계면활성제에 의하여 2차오염이 되거나 대수층 복원에 유용한 미생물 군집이 훼손되지 않는 계면활성제를 선택하도록 하여야 할 것이다.

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.

Burns, S.E. and Zhang, M., 2001, Effect of system parameters on the physical characteristics of bubbles produced through air sparging. *Environ. Sci. Technol.*, **35**, 204-208.

Faisal Anwar, A.H.M., Bettahar, M., and Matsubayashi, U., 2000, A method for determining air-water interfacial area in variably saturated porous media. *J. Contam. Hydrol.*, **43**, 129-146

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 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., 2006, 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., 2006, 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.