

계면활성제와 폭기를 이용한 대수층의 특정깊이에 존재하는 휘발성 유기오염물질 (톨루엔)의 휘발제거

송영수 · 권한준 · 양수경 · 김헌기*

한림대학교 환경생명공학과, 한림대학교 에너지 · 환경 연구소

Removal of Volatile Organic Contaminant(toluene) from Specific Depth in Aquifer Using Selective Surfactant-Enhanced Air Sparging

Young-Su Song, Han-Joon Kwon, Sukyeong Yang and Heonki Kim*

Dept. of Environmental Sciences and Biotechnology, Hallym University
Institute of Energy and Environment, Hallym University

An innovative application of surfactant-enhanced air sparging(SEAS) technique was developed in this study. Using a laboratory-scale physical model packed with water-saturated sand, air sparging was implemented to remove water-dissolved toluene that was introduced into a specific depth of the system with finite vertical width prior to sparging. An anionic surfactant(Sodium dodecylbenzene sulfonate) was introduced into the contaminated layer as in dissolved form in the toluene-contaminated solution for SEAS, whereas no surfactant was applied in the control experiment. Due to the suppressed surface tension of water in the surfactant(and toluene)-containing region, the toluene removal rate increased significantly compared to those without surfactant. More than 70% of the dissolved toluene was removed from the contaminated layer for SEAS application while less than 20% of toluene was removed for the experiment without surfactant. Air intrusion into the contaminated layer during sparging was found to be more effective than that without surfactant, enhancing air contact with toluene-contaminated water, which resulted in improved volatilization of contaminant. This new method is expected to open a new option for remediation of VOC(volatile organic compound)-contaminated aquifer.

Key words : aquifer remediation, surfactant, groundwater air sparging, surface tension

계면활성제를 이용하여 대수층의 특정층에 존재하는 휘발성 오염물질을 선택적으로 제거할 수 있는 새로운 지하수 폭기기술을 개발하였다. 모래가 충전된 실험실 규모의 물리적 모델을 이용하여 이 폭기기술의 효율성을 검증하였다. 모델의 특정깊이(바다으로부터 약 22 cm)에 일정한 두께로 존재하는 용해된 상태의 톨루엔 플룸을 제거하는 실험을 실시하였으며, 오염물질이 존재하는 영역의 표면장력을 저감하기 위하여 음이온계 계면활성제인 SDBS(Sodium dodecylbenzene sulfonate)를 주입하였다. 또한 비교를 위하여 동일한 조건에서 계면활성제가 주입되지 않은 실험도 실시하였다. 오염영역의 하부로부터 공기로서 폭기한 결과, 계면활성제에 의하여 저감된 표면장력의 효과에 의하여 오염영역에 대한 폭기영향권의 크기가 현저히 증가하였으며, 그 결과 70%이상의 톨루엔이 제거되었다. 반면 계면활성제가 주입되지 않은 조건에서는 20%이하의 톨루엔만 제거되었다. 이는 계면활성제에 의하여 표면장력이 낮아져 폭기 과정에서 플룸에 대한 공기주입이 매우 효율적으로 이루어졌으며, 따라서 톨루엔을 포함하는 대수층의 지하수가 공기와의 접촉이 보다 용이해졌음을 의미한다. 이 새로운 방법은 휘발성 유기물질로 오염된 대수층을 복원하는 데 유용하게 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 대수층복원, 계면활성제, 지하수 폭기, 표면장력

*Corresponding author: heonki@hallym.ac.kr

1. 서 론

오염된 대수층을 복원하는 기법으로서 지하수 폭기법(groundwater air sparging)은 지하 대수층에 존재하는 휘발성 유기오염물질을 제거하려는 목적으로 이용된다. 유기물로 오염된 지반환경에 대하여 미생물을 이용함으로써 정화를 도모하는 생물학적 방법과 더불어 오염물질을 휘발토록하여 대수층으로부터 제거하는 물리화학적 정화기술의 하나인 지하수 폭기법은 다양한 현장에서 오염물질의 제거효과가 검증된, 비교적 새로운 지하수 복원기술중 하나이다(Marley *et al.*, 1992; Johnson *et al.*, 1993; Lundegard and LaBrecque, 1995; Reddy *et al.*, 1995; Reddy and Adams, 1998; Rabiouar *et al.*, 1999; Johnston, *et al.*, 2002). 오염물질이 존재하는 영역의 하부에 설치된 공기주입부(주로 공기주입관정)를 통하여 대수층에 주입된 공기는 부력과 압력구배에 의하여 상방향으로 이동하며, 이 과정에서 지하수에 용해된 오염물질을 휘발시키거나(volatilization) 지하수와 섞이지 않는 유류(NAPL, nonaqueous phase liquid)의 구성성분 중 휘발성이 큰 물질을 휘발(vaporization)토록 하여 불포화층으로 이동하게 하여 토양상부에 설치된 포집장치를 통하여 처리되도록 한다(Unger *et al.*, 1995; Braida and Ong, 1998).

지하수 폭기공정에 의한 유기오염물질의 제거효율은 다양한 요인에 의하여 영향을 받는다. 오염물질을 포함하는 대수층의 수리지질학적 특성은 공정을 설계하는데 우선 고려하여야 할 요소이다. 폭기대상영역이 균일한 모래매질일 경우에는 공기주입부로부터 상방향으로 길쭉기 모양의 폭기영역을 쉽게 예측할 수 있으나, 수리전도도(Hydraulic conductivity)가 조금이라도 다른 부분이 불규칙하게 존재하는 경우에는 도입된 공기가 매우 복잡한 통로(channel)를 통하여 상방향으로 이동할 수 있다. 또한 입자의 크기가 큰 모래매질이라면 주입된 공기가 도입공 근처에 연속적인 불포화영역을 형성할 수 있지만, 대부분의 실제 대수층에서 나타나는 균일하지 않은 매질에서는 불연속적인 통로를 형성한다. 매질의 성질에 따른 이와 같은 불포화 영역의 형성은 오염물질이 존재하는 영역 또는 지하수와 접촉효과와 직접적인 관계가 있으며, 결과적으로 오염물질의 제거 효율에 영향을 미친다고 할 수 있다. 오염영역의 수리지질학적 특성에 대한 정보(예: 수리전도도의 분포특성)가 충분하다면 폭기공정의 조건을 결정할 수 있다. 공기주입관정의 수, 공기주입관정이 복수일

경우에는 인접한 관정간의 거리, 공기주입속도, 공기주입형식(연속적 또는 단속적 도입)에 따라 지하수 폭기효율의 차이를 보이는 것으로 나타났다(Reddy and Adams, 1998; Adams and Reddy, 2000).

지하수 폭기법이 다른 적극적인 대수층 복원기술에 비하여 경제적이며, 오염물질제거 매체로서 공기만을 사용함으로써 2차오염의 가능성이 희박한 장점은 있으나 폭기의 영향권이 공기도입부의 근처에 국한되고 특히 불균일한 지질학적 구조에서 폭기영향권과 오염영역이 일치하지 않는 등의 문제가 있다(National Research Council, 1999). 이 문제를 해결하기 위한 전통적인 공정상의 접근방법은 대체로 폭기를 위한 공기주입부(관정)의 수와 간격, 공기 주입속도 등을 조절하는 데 집중되어왔다. 지하수 폭기공정에서 폭기 영향권의 크기가 제한적인 이유는 매질의 air entry pressure(또는 bubbling pressure)때문이며, 주입된 공기가 수평방향으로 air entry pressure를 용이하게 극복하지 못하고 부력의 지배를 받음으로써 수평방향의 이동이 제한되고 상방향 이동이 유리하게 된다. 최근, 지하수의 표면장력을 낮춤으로써 매질의 air entry pressure를 줄여 지하수 폭기시 폭기영역을 증대하려는 기술(SEAS, surfactant-enhanced air sparging)이 보고된 바 있으며, 미량의 계면활성제가 도입된 대수층에 대한 폭기효율이 전통적인 폭기기술에 비하여 현저히 증대되는 효과가 확인되었다(Kim *et al.*, 2004, 2006a, 2006b).

계면활성제 주입 후 폭기하는 이 새로운 기술은 약간의 계면활성제(수십 수백 mg/L 농도범위)를 투여하여 폭기효과를 대단히 효과적으로 향상할 수 있다. 표면장력의 감소는 토양의 air entry pressure를 감소시킨다(식 (1)),

$$P_d = P_d \frac{\sigma'}{\sigma} \quad (1)$$

여기에서 p_d 는 표면장력이 σ (dyne/cm)에서의 air entry pressure(dyne/cm²)이며 p_d' 은 새로운 표면장력(σ')에서의 air entry pressure를 나타낸다. 토양과 같은 다공성매질의 수분함량(또는 함수율 S , 토양 고형 입자를 제외한 전체 부피에 대한 물 부피의 비율)은 모세관 압력과 다음과 같은 관계가 있는 것으로 알려져 있다(Brooks and Corey, 1966).

$$S = (1 - S_r) \left(\frac{P_d}{P_c} \right)^{\lambda} + S_r, \text{ for } P_c > P_d \quad (2)$$

여기에서 S_r 은 잔류 함수율 (매우 높은 모세관 압

력에서도 남아있는 물에 대한 함수율), p_d 는 air entry pressure(dyne/cm^2)이며 λ 는 토양입자의 크기분포를 나타내는 무차원 변수이고 p_c 는 토양의 nonwetting fluid(본 연구에서는 공기)와 wetting fluid(본 연구에서는 물)사이의 압력차를 나타내는 모세관압력(capillary pressure, dyne/cm^2)이다. Air entry pressure, p_d 는 특정 표면장력에서는 상수를 나타내므로, 식(2)는 모세관 압력이 증가하면 함수율이 감소한다는 사실을 나타내며 또한 air entry pressure가 감소하면 원래의 air entry pressure에 대하여 감소한 비율만큼 함수율이 감소하는 결과를 예상할 수 있다. 즉 물의 표면장력이 감소하면 동일한 모세관압력에서 공기의 분율이 높아지는 효과를 기대할 수 있다.

표면장력을 감소하면 폭기효과(폭기영역 증대, 폭기영역내 공기포화도 증가)가 대단히 크게 나타나지만 계면활성제를 대수층에 전면적으로 주입하게 된다면 몇 가지 심각한 문제를 야기할 수 있다. 비록 농도는 낮더라도 대수층에 존재하는 지하수를 모두 계면활성제 수용액으로 치환하려면 대단히 많은 양의 수용액을 제조하여야 하며, 대수층에 존재하는 지하수의 표면장력이 전체적으로 낮아짐으로써 유류형태로 존재하는 오염물질(NAPL)의 하방향 확산을 불러올 수 있다. 또한 불필요하게 많은 양의 물을 공기로 치환함으로써 지하수위의 과도한 상승을 불러올 수도 있다. 본 연구의 목적은 오염물질이 존재하는 대수층의 수평영역에 선택적으로 계면활성제를 도입하여 오염영역에 대한 표면장력을 주변에 비하여 저감한 후 폭기함으로써 폭기된 공기가 표면장력이 인위적으로 낮추어진 영역(즉 오염영역)에만 집중적으로 주입되도록 하는 것이며, 이에 따라 주입공기량 대비 오염물질의 제거 효율을 극대화시키는 기술을 확립하며, 실제 수용성 오염물질(톨루엔)을 모델물질로서 사용하여 본 기법의 효율을 검증하는데 있다.

2. 재료 및 실험방법

2.1. 재료

본 연구에 사용된 토양은 직경 300~500 μm 범위를 갖는 석영질 모래이며, 토양은 수도물을 이용하여 수회 세척하여 점토 입자와 같은 콜로이드성 성분을 제거한 후 사용 하였다. 표면장력을 조절하기 위하여 음이온계 계면활성제인 SDBS(sodium dodecylbenzene sulfonate, Tokyo Kasei Kogyo Co. Ltd., Reagent grade)를 사용하였다. 톨루엔(toluene, Aldrich Chemical

Co., Reagent grade)은 오염물질을 대표하는 물질로서 사용되었다. 톨루엔 수용액에 100 mg/L의 농도로 Sodium fluorescein(Sigma, reagent grade)이 첨가되었다. Sodium fluorescein은 상자모델 실험 시 형광램프를 이용하여 오염물질 및 계면활성제를 포함하는 수용액의 적용 범위를 관측하기 위하여 이용되었다. 오염물질의 생물학적 분해현상을 차단하기 위하여 공기 대신 질소를 폭기가스로 이용하였다. 모든 시약은 공급된 상태로 실험에 사용되었다. 실험에 사용된 모든 수용액의 제조에는 이차증류수가 사용되었다.

2.2. 실험장치

본 연구에 사용된 2차원 상자 모델은 투명한 PPMA(poly methylmetacrylate)재질로 제작되었고, 가로, 세로, 내부의 폭이 각각 70 cm, 50 cm, 1.5 cm였으며, 왼쪽과 오른쪽 가장자리에 폭 2 cm의 물 주입관정과 추출관정이 설치되었다(Fig. 1). 두 개의 관정과 모래로 충전된 부분과는 약 0.5 cm의 공극 크기를 갖는 PE(polyethylene) sieve가 설치되어 실험과정에서 모래가 관정으로 유입되는 것을 방지하였다. 충전된 모래의 총 높이는 50 cm였으며 상자의 밑면으로부터 약 45 cm까지 물로 포화되도록 하였고 water table의 높이는 27-33 cm로 설정되었다(모관수대의 폭은 17-23 cm).

오염물질의 수용액이 주입되기 전, 도입관정을 통하여 일정한 속도(약 15 ml/min)로 물(증류수)이 주입되었으며 추출관정에 연결된 물 추출관의 끝 부분의 높

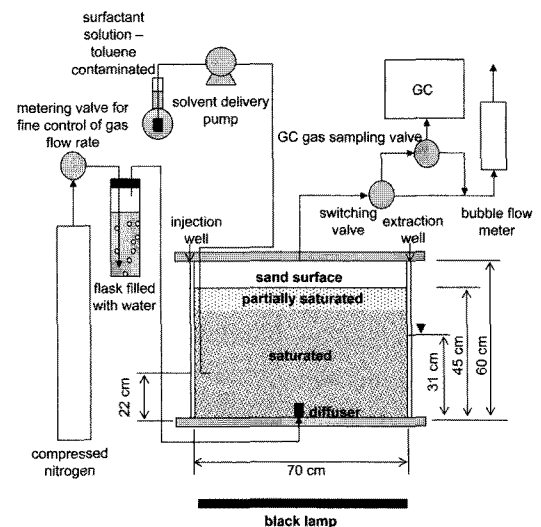


Fig. 1. Experimental set up used in this study.

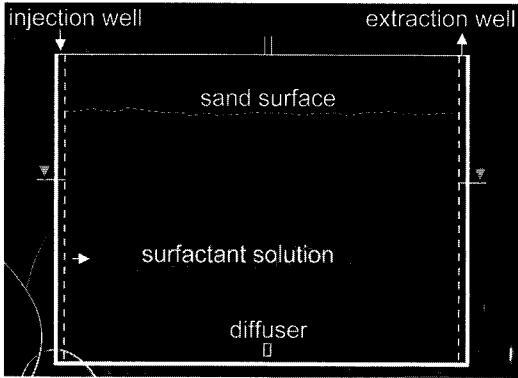


Fig. 2. Formation of horizontal layer of low surface tension for selective sparging.

이를 조절하여 추출관정으로부터 제거되는 물의 속도도 물의 주입속도와 동일하게 유지되도록 하였다. 모델내부로 증류수가 일정한 속도(15 ml/min)로 흐르는 동안 오염물질인 톨루엔과 계면활성제(100 mg/L)의 혼합 수용액을 solvent delivery pump(Yonglin Co., M925)를 이용하여 일정한 속도(3 ml/min)로 상자의 밑면으로부터 22.5 cm의 높이의 포화층에 수평방향으로 일정하게 주입하였다. 주입시간은 대략 20분간이었으며, 혼합수용액의 식별을 용이하게 하기 위하여 형광물질인 Sodium fluorescein을 첨가하여 형광램프에 의하여 혼합수용액의 분포를 관측하였다(Fig. 2). 오염물질인 톨루엔과 계면활성제의 혼합 수용액이 수평방향으로 일정한 두께(약 7.2~7.5 cm)와 길이(55~57 cm)로 형성되었을 때 상자모델의 뚜껑(gas tight)을 덮고 오염물질 수용액 배관 등을 차단하여 폭기에 의한 오염물질의 제거 효과 외의 다른 방해 기작들에 의한 톨루엔의 손실을 최소화 하였다. 주입된 톨루엔의 농도는 표준시료를 제조하여 HPLC[Yonglin Co., M925(pump), M240(UV detector 254 nm)]를 이용하여 농도를 측정하였다.

주입되는 오염물질 수용액의 표면장력은 매달린 고리법 표면장력측정기(Surface Tensiomat, Model 21, Fisher Scientific Co.)를 이용하여 측정하였다. 본 연구에서 실행된 실험의 세부조건을 Table 1에 나타내었다.

2.3. 실험방법

톨루엔의 제거 실험은 SDBS의 유무에 따른 실험과 폭기유량(100, 200, 400 ml/min)에 따른 실험으로 총 여섯 가지의 실험 조건에서 실시되었다(Table 1). 톨루엔의 제거 실험은 압축공기실린더의 밸브를 열면서 시작되었고, 유량조절밸브와 bubble flow meter를 이용하여 공기유량 100, 200, 400 ml/min을 조절하여 실험하였다. 폭기 실험 과정에서 모델로부터 제거되는 톨루엔은 GC(Yonglin Co., M600D, 10% OV-101 CW-HP 80/100, 6 feet×1/8 inch(Alltech co.), sample inlet 200°C, oven 250°C, FID detector 250°C)를 이용하여 톨루엔의 농도를 측정함으로써 제거된 톨루엔의 질량을 구하였다. 폭기 시간은 톨루엔의 농도가 GC의 유효검출한계농도 이하로 내려갈 때 까지 실시하였으며, 폭기 과정에서 공정이 안정화(수위가 일정한 상태, 또는 폭기영역의 변화가 더 이상 없는 상태)되면 폭기영역의 범위를 측정하였다. 폭기가 끝난 후에 남아있는 톨루엔의 질량을 측정하기 위하여 모델내부의 수용액을 methylene chloride를 사용하여 추출하여 위에 언급한 GC분석조건과 동일한 조건으로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 사용한 조건에서 모델 내에 안정적으로 오염물질의 수평층이 형성되었다(Fig. 2). 계면활성제의 유무에 상관없이 동일한 범위의 오염층이 형성되는 것이 관찰되었다. 비록 본 연구에서는 오염물질(톨루엔)과 SDBS가 용해된 수용액을 모델에 주입함으로써 지하수내의 표면장력 저감구간과 오염물질이 존재하는 영

Table 1. Experimental conditions used in this study

exp. number	volume of water (L)	height of saturated zone (cm)	height of water level (cm)	surface tension (dyne/cm)	conc. of toluene solution (mg/L)	total mass of toluene introduced (mg)	sparging gas flow rate (cm ³ /min)
1	2.31	44.8	28.5	52.5	203.2	58.2	109
2	2.32	45.3	28.6	53.2	198.4	62.5	193
3	2.24	45.5	27.5	52.5	216.5	64.9	400
4	2.18	44.4	32.5	72.2	177.2	52.1	103
5	2.28	45.1	32.0	72.4	211.8	67.0	198
6	2.33	44.9	32.7	72.7	200.9	63.6	402

역이 일치할 수밖에 없었으나, 실제 오염현장에서는 제거하고자 하는 오염물질이 존재하는 위치에 계면활성제 수용액을 주입하는 형식이 되어야 할 것이다. 안정적인 수평층의 형태로 계면활성제 수용액이 대수층에 주입되기 위해서는 도입되는 수용액의 밀도가 중요하게 작용하는데, 본 연구에서는 매우 낮은 농도(100 mg/L)의 계면활성제 수용액을 사용함으로써 밀도차에 따른 계면활성제 수용액의 상승현상 또는 하강현상이 나타나지 않았다. 또한 본 실험에서 사용된 모든 수용액의 점도는 측정오차범위(Ubbelohde점도계사용)이내에서 일치하였으므로 점도변화에 의한 폭기율의 변화 효과는 무시하였다. 그러나 만약 인위적으로 계면활성제 수용액이 특정한 상하방향을 지향해야 한다면 알코올(밀도를 낮추어 상방향으로 도입)이나 염류(밀도를 높여 하방향으로 도입)를 이용할 수도 있을 것이다.

모델내에 오염물질의 수평층이 완성되고 폭기가 시작되면 공기도입부로부터 토양의 표면으로 폭기영역(zone of influence)가 형성되었다. SDBS가 사용되지 않은 조건에서는 오염물질이 존재하는 수평층에 공기가 선택적으로 더 많이 주입되거나 하는 현상은 관찰되지 않았다. 다만 깔대기 모양의 전형적인 폭기 영향권의 모양이 만들어 졌는데, 영향권의 내부도 공기의 채널(channel)이 형성되어 모델 외부로는 군데군데 불연속적인 불포화 영역이 나타나는 것처럼 관측되었다(Fig. 3(b)). 단지 폭기유량이 증가할수록 폭기영향권의 크기가 조금씩 확대되는 현상이 관찰되기는 하였으나 폭기영향권내부에 공기포화율이 증대되지는 않았다. 반면, 오염층에 SDBS가 주입된 조건에서는 폭기 영향권의 크기가 SDBS가 주입되지 않은 조건에 비하여 증가하였으며, 이 현상은 이미 Kim *et al.*(2004)에 의하여 보고된 바 있다. 그러나 본 연구에서는 대수층 전면에 계면활성제가 주입된 조건이 아니라, 오염층에 국한하여 계면활성제가 주입되었고 계면활성제가 주입된 영역에 국한하여 선택적으로 폭기효율이 증대되는 현상을 확인하였다는 데에서 이전의 연구와 다르다. SDBS가 오염층에 주입된 경우, 폭기 유량이 증가할수록 폭기영역도 증가하였으며(Fig. 3(a)), SDBS가 주입된 영역은 폭기영향권의 내부에 공기포화도가 현저히 증대하여 불연속적인 공기의 경로가 관찰되지 않았다. SDBS가 주입되지 않았을 때의 폭기영향권 내부와 달리 SDBS가 주입된 부분의 폭기영향권 내부는 거의 대부분 공기로 충만되어 있으며 따라서 주위의 포화영역과 뚜렷하게 구별되었다. SDBS에 의한 폭기영역의 확대 및 공기포화도 증대효과는 모델내 water table의

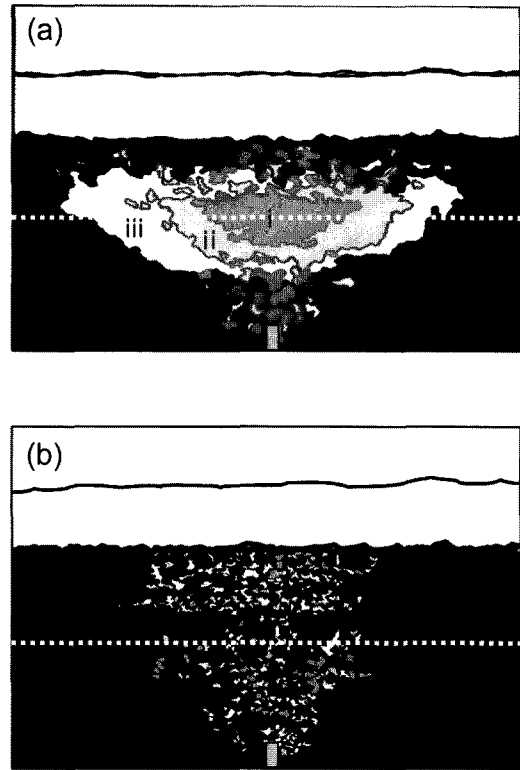


Fig. 3. Sparging influence zone; (a) sparging with SDBS applied, i, ii, iii, represent sparging zone with different gas flow rates, 109 ml/min, 193 ml/min, 400 ml/min, respectively, (b) sparging without SDBS applied, gas flowrate 402 ml/min; horizontal dotted lines represent the initial depth of surfactant solution layer.

상승현상으로도 확인할 수 있다. 폭기가 시작되면 포화층으로 주입된 공기가 물을 밀어냄으로써 수위가 상승하게 되는데, 최초에 물로 포화된 영역에 폭기가 진행되는 동안 많은 공기가 존재하게 되면 수위의 상승이 크게 된다. SDBS가 주입된 조건에서 수위의 상승이 그렇지 않은 조건에 비하여 현저히 높았으며, 수위의 상승정도는 폭기유량에 대략 비례하였다(Fig. 4).

오염층에 주입된 SDBS에 의한 부분적인 SEAS (surfactant-enhanced air sparging) 기법의 효과는 오염물질로서 사용된 톨루엔의 휘발속도에 직접적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 즉, 폭기와 동시에 시작된 모델로부터 배출되는 가스의 톨루엔 농도는 SDBS가 주입된 조건에서 그렇지 않은 조건에 비하여 현저히 높았다(Fig. 5). 특히 폭기 시작 후 공기가 포화층을 관통하는 시점부터 약 20~30 L의 공기가 주입되는 동안 대부분의 톨루엔 질량이 모델로부터 제거되었

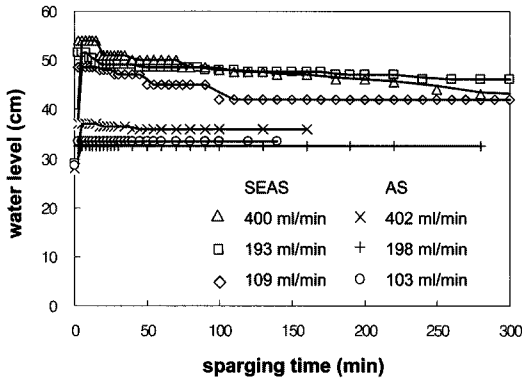


Fig. 4. Changes in height of water table during air sparging: AS stands for air sparging without SDBS applied.

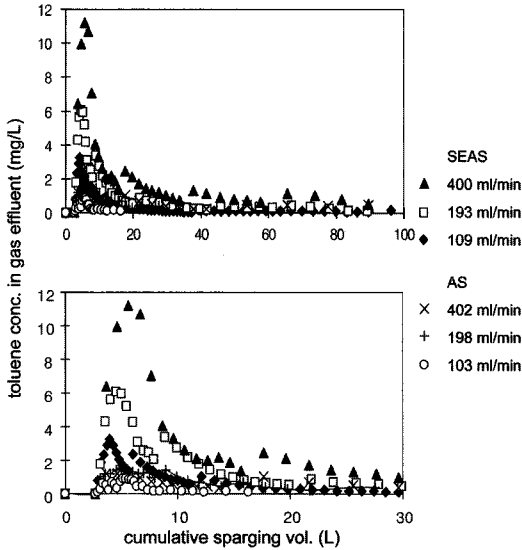


Fig. 5. Concentration of toluene in the gas effluent from the box model during air sparging.

다(Fig. 5). 이는 제거된 톨루엔의 폭기공기량 대비 누적 제거량 곡선(Fig. 6)을 통하여 보다 명확하게 알 수 있다. 누적 제거량 곡선은 SDBS의 도입유무나 폭기유량에 상관없이 거의 유사한 형태를 띠고 있는데, 이는 톨루엔의 제거 메커니즘이 수용액으로부터 유동 공기층으로 질량이동이며 유동공기층 근처의 수용액에 포함된 톨루엔의 농도와 공기층의 톨루엔 농도의 비평형 조건이 구현되었기 때문이며, 농도차가 큰 초기에는 휘발속도가 빠르다가 공기층 인근의 수용액내부의 톨루엔 농도가 줄어들게 되면 제거속도가 느려지는 공통적인 결과를 보인다. 다만 폭기영역이 넓고 공기포화도가 큰 경우 톨루엔 오염 수용액과 유동 공기층과의 접

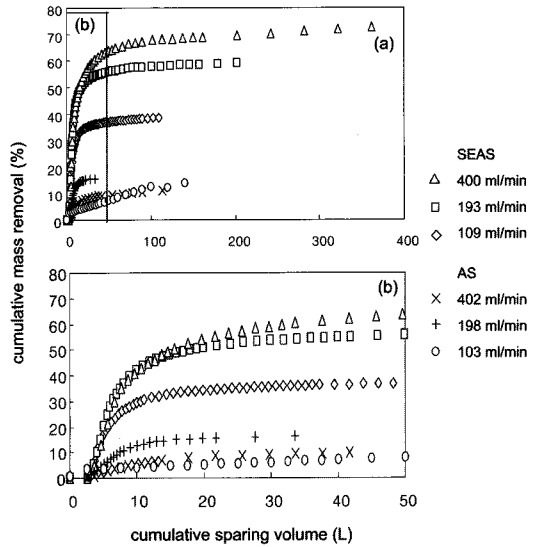


Fig. 6. Cumulative mass of toluene removed from the box model during air sparging.

촉면적(overall contact area)이 커지게 되고 따라서 물질이동속도가 크게 되어 보다 효율적인 제거가 이루어지게 된다.

모델에서 배출되는 폭기가스내 톨루엔의 검출이 더 이상 어려워질 때까지 실험을 계속하여 최종 제거율을 측정 한 결과 SDBS가 주입되었을 때, 폭기유량 109 mL/min, 193 mL/min, 400 mL/min적용 시 톨루엔의 제거율이 각각 36.5%, 55.6%, 72.6%로 나타났으며, SDBS가 주입되지 않았을 때에는 폭기유량을 103 mL/min, 198 mL/min, 402 mL/min로 적용하였을 때 톨루엔의 제거율이 각각 10.4%, 15.6%, 11.8%로 나타났다. 모든 실험에서 톨루엔의 도입량 대비 제거량 및 잔존량의 합은 모두 100%±5%였다. 본 결과는 SDBS의 주입효과와 폭기유량에 따른 휘발성 오염물질 제거율을 매우 잘 설명한다고 하겠다.

4. 결 론

본 연구에서는 지하 대수층의 특정 수평층이 휘발성 유기오염물질 특히 휘발성 유류(volatile nonaqueous phase liquid)로 오염되었을 때 계면활성제 수용액을 이용하여 해당층만 선택적으로 폭기함으로써 폭기가스량 대비 오염물질 제거효율을 극대화 하는 새로운 기법을 시도하였다. 수평층으로 도입된 계면활성제 수용액은 수평층 하부에서 주입된 폭기가스가 오염층으로 효과적으로 주입되었으며 또한 폭기영향권내부의 공기

포화율도 개선되었다. 이 두 가지 효과는 휘발성 오염 물질로서 사용된 톨루엔의 휘발 제거 속도를 증대하였으며 계면활성제를 사용하지 않은 경우와 비교하여 최소 두 배 이상 제거효율이 개선되었다. 본 연구결과는 향후 휘발성 유류로 오염된 지하대수층의 정밀 복원에 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

이 논문은 2010년도 한림대학교 교비 학술연구비(HRF-2010-023)에 의하여 연구되었음.

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.
- Brooks, R.H. and Corey, A.T. (1966) Properties of porous media affecting fluid flow. *J. Irrig. Drain.* v. 92, p. 61-68.
- 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.* v.13, p.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.* v.59, p.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.* v.41, p.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. Conatam. Hydrol.* v.88, p.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.* v.38, p.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.* v.19, p.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. *Gound Water Monit. Rev.* v.12, p.137-145.
- National Research Council (1999) *Groundwater and Soil Cleanup.* National Academy Press, Washington D.C., p.147-150.
- Rabiduar, 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 groundwater using air sparging. *J. Environ. 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 of VOC-contaminated saturated soils and groundwater. *Haz. Waste and Haz. Mat.* v.12, p.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.* v.31, p.1913-1925.