

## 오존과 계면활성제를 이용한 대수층 내 비휘발성 물질 제거

양수경 · 신승엽 · 김헌기\*

한림대학교 환경생명공학과, 한림대학교 에너지 · 환경 연구소

### Removal of Non-volatile Contaminant from Aquifer using Surfactant-enhanced Ozone Sparging

Sukyeong Yang · Seungyeop Shin · Heonki Kim\*

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

#### ABSTRACT

Surfactant-enhanced ozone sparging (SEOS), an advanced version of SEAS (surfactant-enhanced air sparging) was introduced in this study for the first time for removal of non-volatile contaminant from aquifer. The advantages of implementing SEAS, enhanced air saturation and expanded zone of sparging influence, are combined with the oxidative potential of ozone gas. Experiments conducted in this study were two fold; 1-dimensional column experiments for the changes in the gas saturation and contaminant removal during sparging, and 2-dimensional box model experiment for the changes in the size of zone of influence and contaminant removal. An anionic surfactant (SDBS, sodium dodecylbenzene sulfonate) was used to control surface tension of water. Fluorescein sodium salt was used as a representative of water-soluble contaminants, for its fluorescence which is easy to detect when it disappears due to oxidative degradation. Three different gases (air, high-concentration ozone gas, and low-concentration ozone gas) were used for the sparging of 1-D column experiment, while two gases (air and low-concentration ozone gas) were used for 2-D box model experiment. When SEOS was performed for the column and box model, the air saturation and the zone of influence were improved significantly compared to air sparging without surface tension suppression, resulted in effective removal of the contaminant. Based on the experiments observations conducted in this study, SEOS was found to maintain the advantages of SEAS with further capability of oxidative degradation of non-volatile contaminants.

**Key words :** Sparging, Ozone, Surfactant, Aquifer, Groundwater, Remediation, Non-volatile

#### 1. 서 론

오염된 토양에서 토양오염물질을 정화하는 복원기술 (remediation technology)은 오염된 오염토양 및 지하수 환경계를 물리, 화학적 처리 등의 방법으로 토양 중의 오염물질을 감소 제거하거나 토양 중의 오염물질에 의한 위해를 완화하는 것을 말한다. 오염토양복원 기술은 폐기물 저장 및 폐기지역, 지하 유출 저장고의 유류 유출지역, 화학물 제조공장, 세탁소, 군용매립지, 철제 제작소, 지하수 오염지역, 미 관리된 유해물질 방출지역 등 매우 광범위하게 적용되고 있다(Riser-Roberts, 1992).

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. NAPL로서 오염된 토양 및 지하수의 복원을 위하여 빈번하게 사용되는 기술로는 토양증기 추출법(soil vapor extraction), 지하수 폭기법 (groundwater air sparging), 오존폭기법(ozone sparging), 고온공기 주입법(hot air injection) 등이 있다(Gierke et al., 1992). 대수층 오염물질이 휘발성이 강한 물질일 경우 대수층 폭기법(groundwater air sparging)이 효과적으로

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

원고접수일 : 2010. 8. 20 심사일 : 2010. 9. 2 게재승인일 : 2010. 12. 7  
질의 및 토의 : 2011. 2. 28 까지

오염물질을 제거할 수 있는 방법으로 알려져 있다. 지하수 폭기가 진행되는 동안, 수용액상 오염물질은 수용액상 내부에서 확산에 의하여 물 표면을 거쳐 이동상인 공기로 물질이동이 발생하며, NAPL에 포함된 오염물질은 NAPL 상으로부터 직접 휘발하여 공기로 이동할 수도 있고, NAPL상으로부터 수용액상으로 용해되는 과정을 거쳐 최종적으로 공기 중으로 이동할 수도 있다. 어떤 경우이나 지하수 폭기법에 의한 오염물질 제거효율을 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. 오염물질을 포함하고 있는 매질의 물리화학적 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 제거효율에 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. 최근에는 대수층에 전면적으로 수용성 계면활성제를 투입하여 폭기하는 “surfactant-enhanced air sparging(SEAS)” 기법이 도입되어 그 효과가 보고된 바 있다(Kim et al., 2004, 2006a, 2006b). 그러나 이 기술은 폭기면적을 넓혀 오염물질을 효과적으로 제거할 수 있는 장점이 있지만 휘발성물질에만 한정되는 단점이 있다.

오존은 가스 혼합물로서 불포화된 토양, 부분적으로 포화되거나 완전히 포화된 토양에서 모두 효과적으로 사용할 수 있으며 오존의 높은 물 용해도는 포화된 토양에 더 효과적이다. 토양정화에서 산화제로 오존을 사용한 역사는 매우 짧으나, 오존은 독성을 띄거나 폐기물을 함유한 토양에 효과적인 방법임이 확인되었다(Siedel et al., 1993; Voigtlander, 1993).

본 연구의 목적은 기존의 지하수 폭기법에 비하여 획기적인 폭기효율을 나타내는 SEAS 기법의 단점인 비휘발성 오염물질에 대한 적용성 문제를 해결하기 위하여 폭기 가스로서 오존가스를 이용하는 기법의 효율성을 검증하는 것이다. SEAS기법에 의한 폭기효율 상승효과, 즉 폭기

중 공기포화도의 증대 및 폭기영역의 확대효과와 오존에 의한 화학적 산화분해 효과의 결합(SEOS, surfactant-enhanced ozone sparging)을 통하여 비휘발성, 수용성 물질이면서 형광성을 갖는 오염물질을 대상으로 제거효과를 측정하였다.

## 2. 재료 및 실험방법

### 2.1. 재료

본 연구는 직경이 300~500  $\mu\text{m}$ , 500~1000  $\mu\text{m}$  범위의 모래토양을 이용하였다. 표면장력을 조절하기 위해 SDBS(sodium dodecylbenzene sulfonate, Tokyo Kasei Kogyo Co. Ltd., Reagent grade)를 사용하였으며 계면활성제를 이용한 모든 실험에 균일한 농도(200 mg/L)로 적용하였다. 비휘발성 오염물질로서 Fluorescein sodium salt(Sigma, Reagent grade)를 사용하였으며 모든 실험에 균일한 농도의 수용액(100 mg/L)로 제조하여 사용하였다.

폭기 가스로는 공기와 오존가스를 사용하였다. Air compressor(Keseong Scientific, GSOC-95MC)에서 발생된 공기 또는 순산소(압축가스)를 원료로 하여 오존 발생장치(Ozononia, LAB2B)를 통해 오존가스를 생성하였다. 발생된 오존가스의 오존농도는 표준분석법인 IOA 국제공인 측정법으로 측정하였다. 건조공기를 2 L/min으로 공급하여 1.45 g-O<sub>3</sub>/Nm<sup>3</sup>-Air의 오존을 발생시켰으며 순산소를 이용하였을 때는 43.5 g-O<sub>3</sub>/Nm<sup>3</sup>-O<sub>2</sub>의 오존을 발생시켰다.

Fluorescein sodium salt의 형광성 소실현상은 black lamp를 이용하여 육안으로 관찰하였고 사진을 통해 비교하였으며, 실험에 사용된 수용액의 표면장력은 매달린 고리법(Fisher Scientific Co., Tensiomat Model 21)을 사용하여 측정하였다.

### 2.2. 1차원 컬럼실험

지하수의 표면장력이 저감된 조건에서 오존가스에 의한 비휘발성 유기물질인 Fluorescein의 형광성 소실율을 측정하기 위한 실험으로서 내경 5.3 cm, 길이 81.0 cm인 등근 유리 컬럼을 사용하였다. 등근 유리 컬럼 바닥에서 3 cm 부분은 500~1000  $\mu\text{m}$  모래토양으로, 나머지 78 cm는 300~500  $\mu\text{m}$  모래토양으로 충전 하였으며, 공극률은 0.46로 측정되었다. 충전된 컬럼은 증류수, Fluorescein 수용액, 또는 Fluorescein과 SDBS 혼합수용액으로 포화되었다. 포화된 컬럼은 공기, 저농도 오존가스(원료: 공기), 고농도 오존가스(원료: 순산소)를 사용하여 폭기 하였으며 폭기과정에서 Fluorescein의 형광성 소실정도를 관찰하였다. 폭

**Table 1.** Experimental condition for 1-D column experiments

No.	Concentration (mg/L)		Sparging gas*	Sparging time (hrs)	etc.
	SDBS	Fluorescein			
1	0	100	Air	192	Control, AS
2	200	100	Air	192	SEAS
3	0	100	O <sub>3</sub> <sup>1</sup>	192	OS <sup>1</sup>
4	0	100	O <sub>3</sub> <sup>2</sup>	17	OS <sup>2</sup>
5	200	100	O <sub>3</sub> <sup>1</sup>	192	SEOS <sup>1</sup>
6	200	100	O <sub>3</sub> <sup>2</sup>	17	SEOS <sup>2</sup>

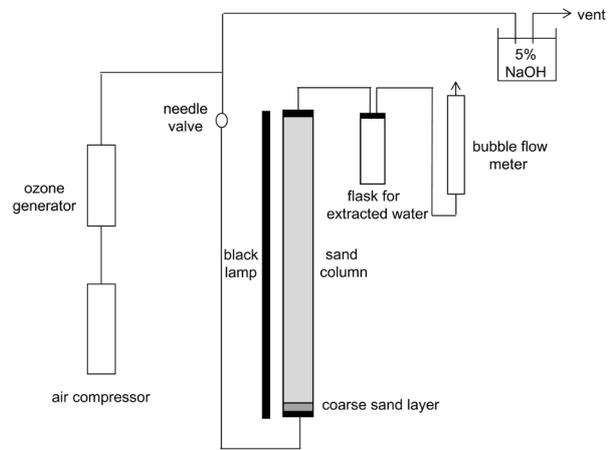
\*O<sub>3</sub><sup>1</sup>: low-conc. O<sub>3</sub> gas from air  
 O<sub>3</sub><sup>2</sup>: high-conc. O<sub>3</sub> gas from pure oxygen

기유속은 모든 실험에서 10 mL/min으로 유지되었다. 폭기 가스가 공기, 저농도 오존가스일 때는 8일 동안 실험을 진행하였고, 고농도 오존가스일 때는 17시간 동안 진행하였다. 실험조건을 Table 1에 나타내었다.

오존발생장치로부터 유출되는 오존가스의 최소 유량이 2 L/min 으로 폭기유량 10 mL/min 보다 높으므로 대부분의 오존가스는 외부로 배기하였고 컬럼을 통과하지 않고 배출되는 오존가스는 5% 가성소다 수용액을 통과하게 함으로써 오존이 제거되도록 하였다. 폭기가스는 1/4 inch 타이콘 튜브를 통하여 컬럼의 하부로 도입하였고 컬럼으로 들어오는 폭기가스는 needle valve와 컬럼 유출부에 설치된 bubble flow meter를 사용하여 폭기가스 유량이 10 mL/min으로 유지되도록 하였다. 폭기과정에서 컬럼으로부터 배출되는 물은 lab bottle을 이용하여 수집하였고, 수집된 물의 부피를 측정하여 컬럼 내 함수율을 계산하였으며, 또한 표면장력 측정을 위하여 사용되었다. 1차원 컬럼실험의 모식도를 Fig. 1에 나타내었다.

**2.3. 2차원 상자모델실험**

본 실험은 SEAS 및 SEOS 공정에서의 폭기영향권 및 폭기영향권 내부에서 Fluorescein의 형광성 소실속도 변화를 측정하기 위하여 실시되었다. 사용된 2차원 상자모델은 PMMA(poly methyl metacrylate)재질로 가로 70 cm, 세로 60 cm, 너비 1.5 cm이며, 왼쪽과 오른쪽 가장자리에 폭 2 cm의 물 도입관정과 추출관정이 설치되었다. 충전물은 직경 300~500 μm의 모래토양으로서 충전된 모래의 총 높이는 50 cm이며, 공극률은 0.45로 측정되었다. 상자 밑면으로부터 20 cm에 증류수 또는 SDBS와 Fluorescein 수용액의 water table이 유지 되도록 하였다. 두 개의 관정과 모래로 충전된 부분사이에는 0.25 mm의 공극크기를 갖는 PE(polyethylene) sieve가 설치되어 모래가 관정으로 유입되는 것을 방지하였고 모델내부의 하단 가운데에



**Fig. 1.** Schematic diagram for 1-D column SEOS experiment.

diffuser(Alltech Co., 1/4-28 threaded inlet filter)를 설치하여 이를 통하여 폭기가스가 도입되도록 하였다.

폭기가스로는 공기, 저농도 오존가스(원료: 공기)을 사용하였다. 폭기유량은 100 mL/min으로 유지하였으며 6일 동안 실험을 진행하였다. SEAS 및 SEOS 과정에서의 폭기범위 변화는 육안으로 관찰하였으며, Fluorescein의 형광성 소실효과는 사진을 통해 측정하였다. 2차원 상자모델실험의 모식도를 Fig. 2에 나타내었으며, 실험조건은 Table 2에 나타내었다.

**3. 결과 및 고찰**

**3.1. 1차원 컬럼실험**

**3.1.1. 공기포화도 비교**

Table 3에 SDBS를 도입하였을 때와 그렇지 않았을 때의 공기포화도(air saturation)를 비교하였다. 오존가스로 폭기하는 SEOS는 공기로 폭기하는 SEAS의 공기포화도에 비하여 약간 낮게 측정되었으나, SDBS를 도입하지 않

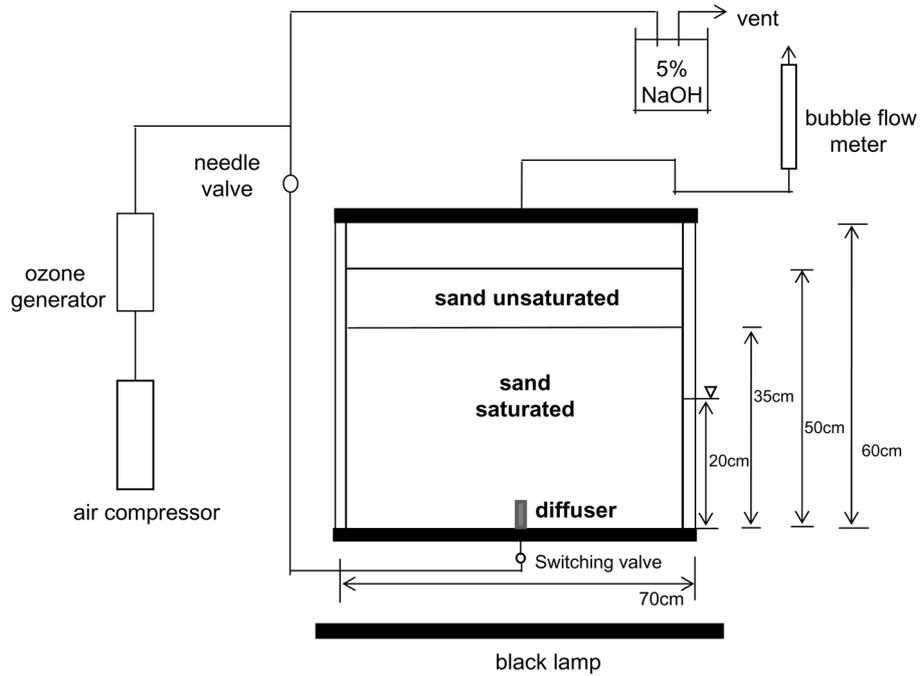


Fig. 2. Schematic diagram for 2-D SEOS experiment.

Table 2. Experimental condition for 2-D box model experiments

No.	Concentration(mg/L)		Sparging gas*	Sparging time (hr)	etc.
	SDBS	Fluorescein			
1	0	100	Air	144	control, AS
2	200	100	Air	144	SEAS
3	0	100	O <sub>3</sub>	144	OS
4	200	100	O <sub>3</sub>	144	SEOS

\*O<sub>3</sub> gas produced using ambient air

Table 3. Final air saturations for air sparging experiments conducted using 1-D column

	Sparging gas*	Surface tension (dyne/cm)	Air saturation (%)	Volume of water extracted (mL)
AS	Air	72.4	15.2	108.6
OS <sup>1</sup>	O <sub>3</sub> <sup>1</sup>	71.8	17.6	125.7
OS <sup>2</sup>	O <sub>3</sub> <sup>2</sup>	71.9	14.1	100.6
SEAS	Air	42.34	62.2	444.37
SEOS <sup>1</sup>	O <sub>3</sub> <sup>1</sup>	47	57	407.22
SEOS <sup>2</sup>	O <sub>3</sub> <sup>2</sup>	43.37	50.8	362.03

\*O<sub>3</sub><sup>1</sup>: low-conc. O<sub>3</sub> gas from air  
 O<sub>3</sub><sup>2</sup>: high-conc. O<sub>3</sub> gas from pure oxygen

은 조건에 비해서는 여전히 현저한 증기를 나타내었다. 즉, SDBS를 도입하지 않은 조건에서의 폭기(AS)에 의한 공기포화도는 약 15% 수준인데 비하여 SEAS가 62%, SEOS가 51%, 57% 수준으로 나타났다. 이는 오존가스의

투입에도 불구하고 여전히 폭기영향권 내 폭기효율이 SDBS의 도입에 따른 표면장력 저감의 효과가 뚜렷하게 나타남을 의미한다. 이와 같은 결과는 SEAS 공정에서 오존가스로 폭기를 하더라도 폭기 영향권 내 공기포화도가

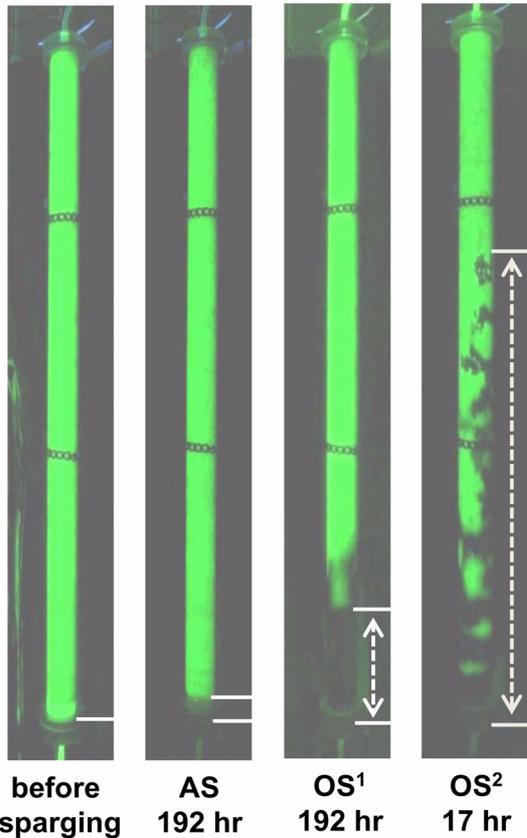


Fig. 3. Change in fluorescence before and after sparging (1-D column); AS, OS<sup>1</sup>, OS<sup>2</sup> stand for Air sparging, ozone sparging with low concentration ozone gas, ozone sparging with high concentration ozone gas, respectively; vertical arrow-region of no fluorescence observed.

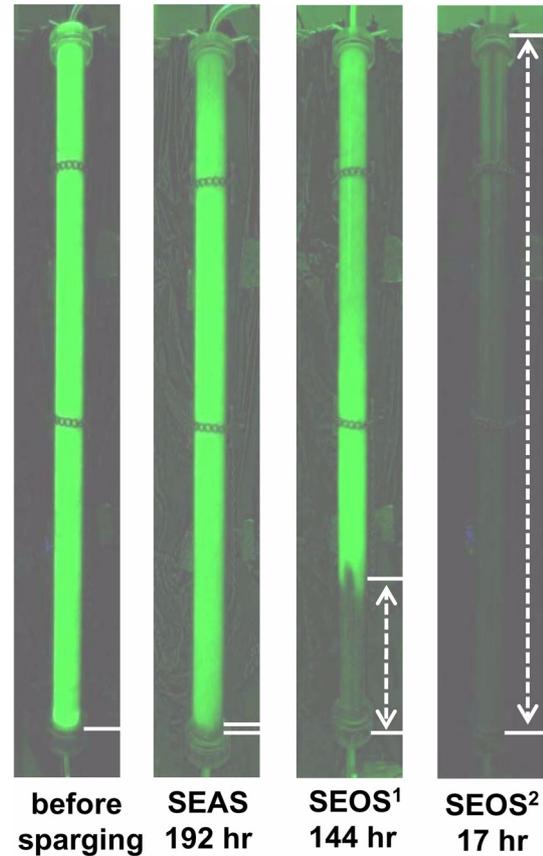


Fig. 4. Change in fluorescence before and after surfactant-enhanced air/ozone sparging (1-D column); superscript 1, 2 represent low and high ozone concentration, respectively.

오존가스에 의하여 현저히 낮아지지 않는다는 것을 의미하며, 따라서 SEAS의 장점인 폭기영향권 내 폭기효율 향상효과가 비교적 잘 유지되고 있음을 의미한다. 이는 오존에 의한 SDBS의 분해농도에 비하여 폭기가스를 컬럼을 통과하는 시간이 짧기 때문으로 풀이된다. 즉 폭기가스에 포함된 오존에 의하여 SDBS가 분해되고, 따라서 표면장력이 상승하여 공기포화도에 영향을 미치지 전에 이미 폭기에 의한 공기포화도가 안정되는 것으로 해석할 수 있다. 그러나 오존에 의하여 매우 쉽게 분해가 되는 계면활성제를 쓰게 되면 본 실험의 결과보다 낮은 공기포화도가 나타날 가능성도 배제할 수 없다.

### 3.1.2. Fluorescein의 형광성 소실

SDBS가 도입되지 않은 조건에서 Fluorescein의 형광성 소실율(전체컬럼에 대한 형광제거부분의 비율)은 공기로 폭기하였을 때(AS) 4%, 저농도 오존가스를 폭기하였을

때(OS<sup>1</sup>)는 23%, 고농도 오존가스를 폭기하였을 때(OS<sup>2</sup>)는 66%를 나타내었다(Fig. 3). 공기도입조건에서의 4% 형광성 소실율은 Fluorescein의 분해에 따른 것이 아니라 컬럼 하부 3 cm 구간에 설치된 짧은 모래층으로부터 대부분의 수용액이 폭기에 의하여 제거됨으로써 발생한 것으로 보인다. 특히 고농도 오존가스로 폭기를 할 경우, 공기로 폭기할 때 보다 Fluorescein의 형광성 소실율은 높았으나 전체적인 제거가 이뤄지지지는 않았다. 이는 SDBS가 도입되지 않은, 높은 표면장력조건에서는 폭기된 가스가 컬럼내부에 유동경로(channel)를 형성하며, 오로지 가스 이동경로 주변의 Fluorescein 만 산화된 결과로 풀이된다.

SDBS를 도입하였을 때 Fluorescein의 형광성 소실율은 공기로 폭기하였을 때(SEAS)는 4%로 SDBS를 넣지 않았을 때의 Fluorescein 형광성 소실효과와 같다. 이는 공기포화율이 높아지더라도 Fluorescein의 제거효율에는 변함이 없으며 Fluorescein의 제거가 휘발이 아닌 산화적분해에 의한 것임을 확인할 수 있다. 저농도 오존가스의 유

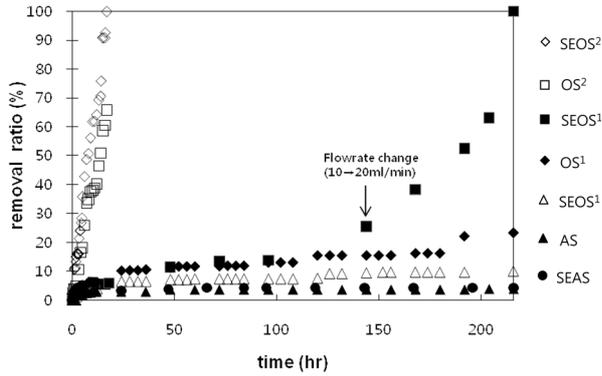


Fig. 5. Fluorescence removal ratio; removal ratio-length of column with no fluorescence to that with fluorescence.

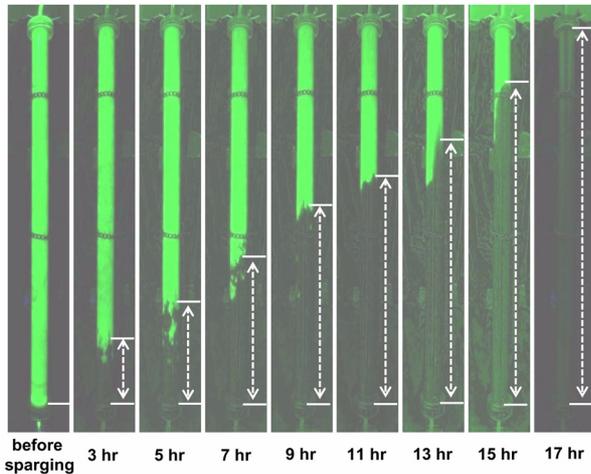


Fig. 6. Change in fluorescence region over-time during SEOS<sup>2</sup> (1-D column); vertical arrows represent length of no fluorescence observed.

량을 10 mL/min으로 일정하게 유지하며 폭기하였을 때 (SEOS<sup>1</sup>), 공정이 안정된 후(즉, 공기포화율이 일정해진 후) 6일경과 시점에서 Fluorescein의 형광성 소실이 미미하였다(Fig. 4). 그러나 6일 경과 후 폭기유량을 두배(20 mL/min)로 변경하였을 때 Fluorescein의 형광성 소실속도가 빨라져 3일 후인 9일 경과 후에는 거의 완전히 Fluorescein의 형광성이 사라지는 것을 관찰하였다(Fig. 5). 따라서 SEOS공정에 있어서 오존의 농도뿐 아니라 폭기 가스의 유량도 결정적인 영향을 미친다는 것을 의미하며, 유속의 증가율보다 높은 Fluorescein 형광성 소실율을 나타내었다. 이 결과는 본 연구에서 매우 제한된 관찰결과에 다른 것으로서 향후 이 부분에 대한 연구가 더 필요하다 하겠다. 고농도 오존가스를 폭기하였을 때(SEOS<sup>2</sup>)는 실험개시 17시간 후 Fluorescein의 형광성이 100% 제거

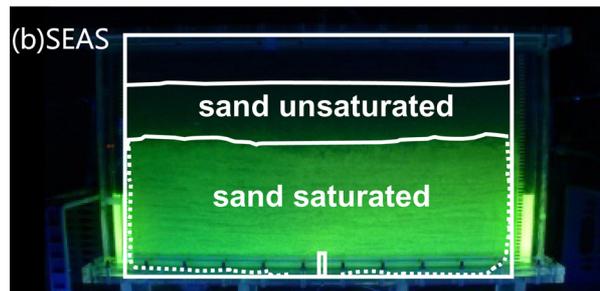


Fig. 7. Sparging influence zone for 2-D box model experiments: dotted lines represent desaturated zone due to sparging.

되었다(Fig. 6). 고농도 오존가스는 저농도 오존가스에 비하여 약 30배 높은 농도의 오존을 포함하므로 Fluorescein의 형광성 소실속도도 그에 비례하여 증대된 것으로 판단된다. 1차원 컬럼실험 결과 관찰된 Fluorescein의 형광성 소실속도를 Fig. 5에 나타내었다.

### 3.2. 2차원상자모델실험

#### 3.2.1. 폭기영역

SDBS가 도입되지 않은 조건에서의 폭기영역(최초 포화 영역의 21%)에 비하여(Fig. 7(a)) SDBS가 100 mg/L의 농도로 도입된 조건에서는 폭기영향권(Fig. 7(b))이 현저히 증대하였다. 이는 이미 SEAS 관련 연구에서 검증된 바 있다(Kim et. al., 2004, 2006a, 2006b). 동일한 조건에서 공기대신 오존가스(저농도)를 이용하여 폭기하였을 때에도 폭기영향권의 크기가 SEAS의 결과와 유사하게 나

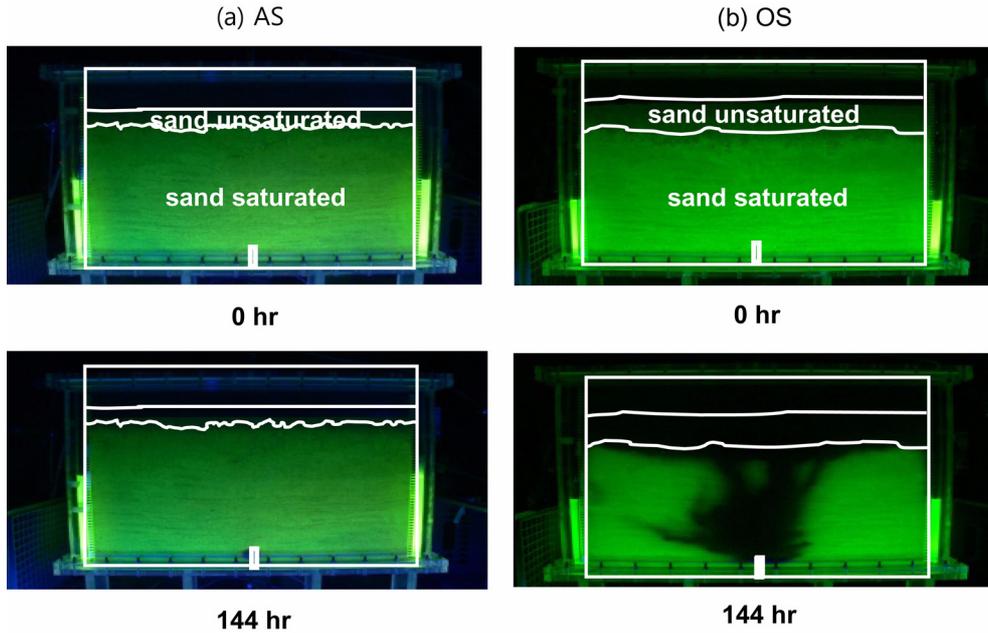


Fig. 8. Changes in zone of fluorescence due to oxidative degradation of fluorescence: no surfactant applied.

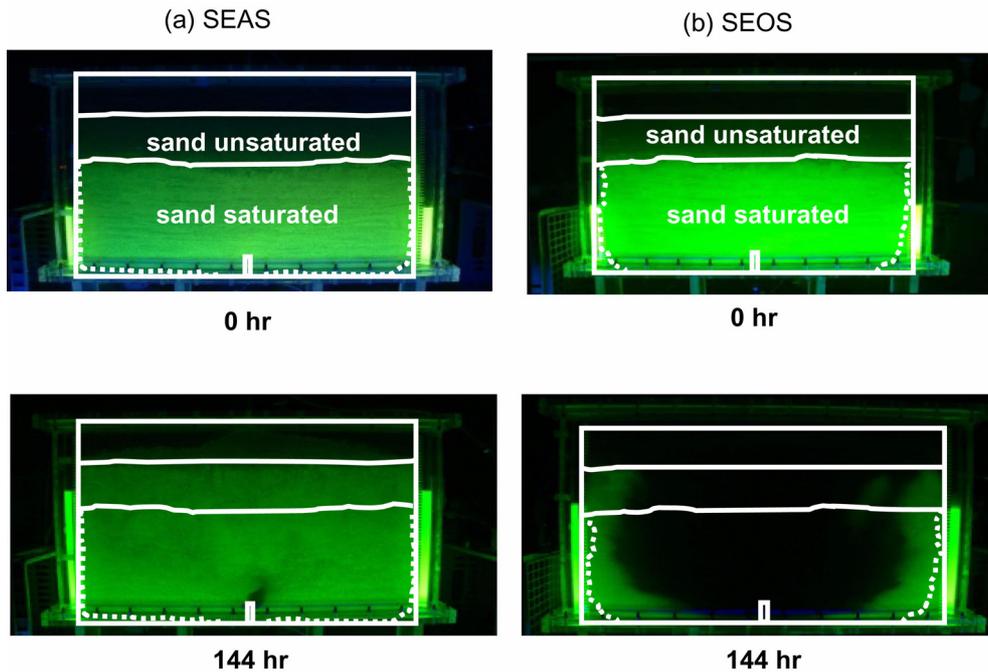


Fig. 9. Changes in zone of fluorescence due to oxidative degradation of fluorescence: surfactant applied.

타났다(Fig. 7(c)). SEAS에서는 최초 포화영역이 모두 폭기영향권에 포함되었으나 SEOS(저농도 오존가스사용)에서는 90~95%의 영역이 폭기에 의하여 불포화영역이 되었다. 이 차이가 오존에 의한 계면활성의 분해에 따른 결과인지, 단순히 실험오차인지는 추가적인 연구가 필요하다.

### 3.2.2. Fluorescein의 형광성 소실

SDBS를 도입하지 않은 조건에서 Fluorescein의 형광성 소실율은 공기로 폭기하였을 때(AS) 전체 포화영역의 0.5%, 저농도 오존가스를 100 mL/min의 유량으로 폭기하였을 때(OS) 전체 포화영역의 약 30%에 해당하는 영역

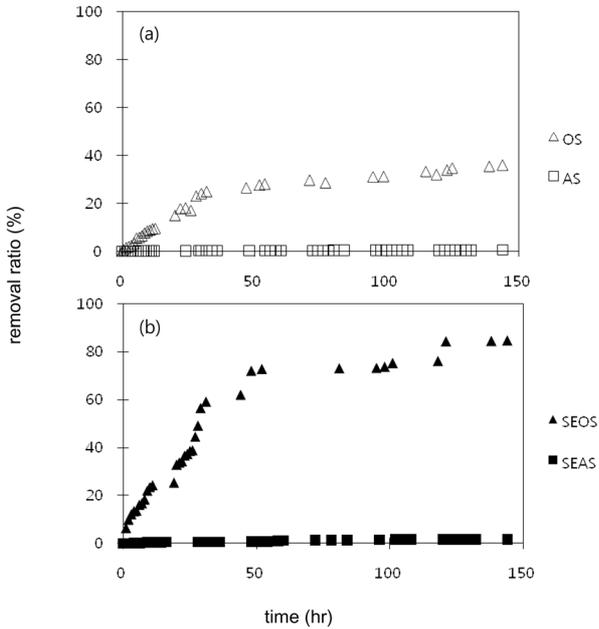


Fig. 10. Fluorescence removal ratio: (a) without surfactant applied, (b) with surfactant.

에서 형광성 소실이 관찰되었다(Fig. 8). AS 공정에서 관찰된 공기도입부 근처의 미세한 형광소실현상은 1차원 컬럼실험에서와 같이 오존에 의한 효과라기보다는 공기포화율이 부분적으로 낮아짐으로써 발생한 것으로 판단된다.

SDBS를 도입한 조건에서 폭기를 실시하였을 때, Fluorescein의 형광성 소실율은 공기로 폭기하였을 때(SEAS) 1.6%, 저농도 오존가스를 100 mL/min의 유량으로 폭기하였을 때(SEOS) 85%의 영역에서 형광성 소실현상이 관찰되었다(Fig. 9, Fig. 10). 이는 표면장력을 저감하여 폭기영역을 확대(1% → 90%)함으로써 폭기가스의 도입영역도 확대되며 발생한 효과라고 할 수 있다. 특히 144시간의 폭기기간 동안 폭기영역이 눈에 띄게 축소되는 현상이 발견되지 않았는데, 오존에 의한 계면활성제 분해에 따른 표면장력의 상승현상이 최소한 본 연구에서 실시한 실험조건에서는 폭기영역의 변화를 일으키지 않는 것으로 보인다. 다만 실제로 SEOS를 현장에 적용할 경우 이 문제를 유의해야 할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

1차원 컬럼 실험을 통하여 SDBS를 도입한 조건에서 오존가스로 폭기를 하는 SEOS 공정의 Fluorescein 형광성 소실효율이 SEAS보다 현저히 향상되는 것을 관찰하였다. SEAS 공정에서 오존가스로 폭기를 하더라도 폭기

영향권 내 공기포화도가 오존가스에 의하여 현저히 낮아지지 않았으며, 이는 SEAS의 장점인 폭기 영향권 내 폭기효율향상 효과가 비교적 잘 유지되고 있음을 관찰하였다. Fluorescein의 형광성 소실율은 저농도 오존가스로 폭기시키는 것 보다 고농도 오존가스로 폭기하였을 때 제거시간이 약 10배 정도 단축되고 Fluorescein 형광성 소실율을 역시 좋은 것이 관찰되었다. 2차원 상자모델실험에서는 SDBS를 도입하였을 때 폭기영역이 SDBS를 도입하지 않았을 때보다 현저히 증대하였고, 저농도 오존가스로 폭기시켰을 때에도 폭기영역이 유사하게 나타났다. 폭기영역의 확대는 직접적으로 SEOS의 Fluorescein 형광성 소실효율에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 본 연구에 오존에 의한 분해현상을 규명하는데 사용한 Fluorescein 형광성 소실현상은 그 자체가 곧 Fluorescein의 완전분해를 의미하는 것은 아니지만 오존에 의한 화학구조의 산화적 변화를 검출하는 수단으로서, 즉 오존의 산화분해능을 식별하기 위한 지표로서 사용되었다. 이로써, SEOS기술은 기존의 SEAS 기술에 비해 폭기효율은 유지되면서 SEAS로는 추구할 수 없는 비휘발성 오염물질의 분해 효과가 더 뛰어난 것이 검증되었다.

#### 사 사

본 연구는 환경부 “토양지하수오염방지기술개발사업”으로 지원받은 과제임.

#### 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.

Gierke, J.S., Hutzler, N.J., and McKenzie, D.B., 1992, Vapor Transport in Unsaturated Soil Columns: Implications for Vapor Extraction, *Water Resour. Res.*, **28**, 323-335.

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.

Rabiduar, A.J., Blyden, 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.

Riser-Roverts, E., 1992. Bioremediation of Petroleum Contaminated Sites, CRC Press, Boca Raton, F L.

Siedel, J.P., Rothweiler, B., Gilbert, E., Eberle, S.H., 1993. Use of ozone for soil remediation. Proceedings of the 4th International KfK/TNO Conference on Contaminated Soil, Berlin, Germany, p. 1285.

Voigtlander, R., 1993. Decontamination of polluted soil and waste water by ozone treatment. Proceedings of the 4th International KfK/TNO Conference on Contaminated Soil, Berlin, Germany, p. 1211.