

## Toluene의 생물학적 분해능 향상을 위한 계면활성제의 선정

김용식<sup>1</sup> · 손영규<sup>1</sup> · 김지형<sup>1</sup> · 송지현<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>고려대학교 사회환경시스템공학과, <sup>2</sup>세종대학교 토목환경지구정보공학부

## Surfactant Selection for the Enhanced Biological Degradation of Toluene

Yongsik Kim<sup>1</sup> · Younggyu Son<sup>1</sup> · Jeehyeong Khim<sup>1</sup> · Jihyeon Song<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Civil & Environmental Engineering, Korea University

<sup>2</sup>Dept. of Civil & Environmental Engineering, Sejong University

### ABSTRACT

Surfactants can be used to enhance the mass transfer rate of hydrophobic compounds into the biologically active liquid phase, resulting in an increase in biodegradation rate of toluene. In this study, the mass transfer rate and the biocompatibility of toluene in the presence of various surfactants were evaluated. Four anionic and nonionic surfactants were tested: sodium dodecyl sulfate (SDS), TritonX-100, Tween 80, and BYK-345 (silicone surfactant). Experimental results showed that BYK-345 at the critical micelle concentration (CMC) enhanced the solubility of toluene. However, there was no increase in the solubility of toluene by SDS and TritonX-100 at their CMCs. With the addition of each surfactant into deionized water the mass transfer rate became faster than that of the case with no surfactant. A bottle study using toluene-degrading microorganisms showed that SDS seriously reduced toluene removal presumably due to the toxicity of the anionic surfactant and/or the substrate competition between the surfactant and toluene. In addition, the degradation rate of toluene was decreased in the presence of BYK-345, indicating that BYK-345 adversely affects the activity of microorganisms. However, TritonX-100 and Tween 80 did not decrease the degradation rate of toluene significantly. Rather, at the low concentration of TritonX-100 toluene degradation rate was even increased. Overall the experimental results suggest that TritonX-100 be the appropriate surfactant for enhanced biological degradation of toluene.

**Key words :** Surfactant, Biocompatibility, Toluene solubility, Mass transfer rate

### 요 약 문

계면활성제는 소수성 물질(톨루엔)의 물질전달율을 증가시켜 미생물이 있는 액상으로 잘 녹아들어가게 함으로써 미생물에 의한 분해를 증가시킨다. 본 연구에서는 여러 종류의 계면활성제가 존재할 때 톨루엔의 물질전달율과 미생물에 의한 분해가 어떻게 이루어지는지에 대해 알아보았다. 사용한 계면활성제는 다음과 같다: Sodium Dodecyl Sulfate (SDS), TritonX-100, Tween 80, BYK-345 (silicone 계면활성제). 실험결과에 따르면 BYK-345는 critical micelle concentration (CMC)에서 톨루엔의 용해도를 증가시켰다. 하지만, SDS와 TritonX-100은 CMC에서 톨루엔의 용해도를 증가시키지 못했다. 증류수에 계면활성제를 첨가하면 증류수만 있는 경우보다 톨루엔의 물질전달율( $K_L a$ )이 증가했다. 톨루엔 분해 미생물을 이용한 회분식 실험에서 SDS는 톨루엔의 분해를 감소시켰다. 그 이유는 SDS가 미생물에 독성을 미쳤기 때문일 수도 있고, 기질로서 이용되어서 톨루엔과 경쟁관계에 놓였기 때문일 수도 있다. BYK-345를 계면활성제로 사용한 실험에서도 톨루엔의 분해가 감소했는데 이것은 BYK-345가 미생물의 활성도에 심각한 영향을 미쳤기 때문이다. 하지만, TritonX-100 와 Tween 80의 경우에는 톨루엔의 분해가 크게 감소하지 않았다. 낮은 농도의 TritonX-100의 경우에 오히려 톨루엔의 분해는 증가했다. 이와 같은 결과들을 통해 톨루엔의 생물학적 분해를 위해 가장 적절한 계면활성제는 TritonX-100임을 알 수 있었다.

\*Corresponding author : songjh@sejong.ac.kr

원고접수일 : 2004. 8. 20 게재승인일 : 2005. 5. 31

질의 및 토의 : 2005. 10. 31 까지

주제어 : 계면활성제, 생물친화성, 톨루엔 용해도, 물질전달율

## 1. 서 론

계면활성제는 산업현장에서 응집제로 사용되거나, 거품 발생제, de-emulsifiers, penetrants 등으로 사용되기도 한다(Muligan and Gibbs, 1993). 특히, 석유화학 분야에서는 유류의 용해도를 증가시켜 유류 회수율을 증가시키는 데에 계면활성제를 사용 한다(Falatko, 1991). 또한, 환경공학 분야에서는 많은 회분실험과 column 실험을 통해 계면활성제가 지반 내에 존재하는 PAHs (poly aromatic hydrocarbons)의 용해도와 탈착을 증가시킴으로써 토양내의 PAHs를 토양으로부터 씻어낼 수 있다는 것이 알려진 후에는 오염된 토양의 정화에 계면활성제를 많이 이용하고 있다(Deshpande et al., 1999; Muligan et al., 2001; Chang et al., 2000; Huang et al., 2001; Edwards et al., 1991). 이처럼 다양한 분야에서 계면활성제를 많이 사용하는 것은 계면활성제가 지닌 용해도 증가, 표면장력 감소, 거품발생 등의 능력 때문이다(Muligan et al., 2001).

이러한 계면활성제의 특성은 기상의 volatile organic compounds (VOCs)를 미생물로 분해하고자 할 때도 효과적으로 이용될 수 있다. 여기서 특히 주목해야 할 계면활성제의 특성은 거품 발생능력과 용해도 증가이다(Maurice, 1994; Chang et al., 2000; Huang et al., 2001; Deshpande et al., 1999). 계면활성제에 의해 발생된 거품은 액상과 기상 사이의 표면적을 매우 증가시켜 기상과 액상사이의 물질전달계수( $K_L a$ )를 증가 시킨다(Muligan et al., 2001). 따라서 기상에 존재하는 VOCs를 액상으로 더 빠르게 전달시킬 수 있다. 결국, 기상의 VOCs를 액상으로 더 많이 전달시킴으로써 미생물에 의해 더욱 많이 분해되게 할 수 있다.

한편, 용해도 증가는 critical micelle concentration (CMC) 이상의 농도가 되면 계면활성제가 micelle을 형성하고 micelle내부의 소수성 부분에 유기물을 흡착하여 유기물의 용해도를 증가시키는 현상이다. 계면활성제의 이 성질을 이용해 기상의 VOCs를 액상으로 더 많이 용해시켜 미생물에 의해 분해되게 할 수 있다.

이와 같이 VOCs를 미생물을 사용해 분해시키는 과정에 계면활성제를 사용함으로써 더 효율적인 처리 시스템이 되도록 하려면, 먼저 앞에서 말한 계면활성제가 그 종류에 따라 어떠한 성질을 가지고 있으며, 미생물의 활성도에는 얼마나 영향을 미치는지에 대해 알아보아야 한다. 따라서 본 연구에서는 여러 종류의 계면활성제를 이용해 이들 각각의 계면활성제가 지닌 성질들을 알아보고, 다양한 농도의 계면활성제가 미생물의 활성도에 어떠한 영향을 미치는지 알아보려고 한다. 그리고 이 연구 결과를 바탕으로 toluene과 같은 VOCs를 미생물에 의해 분해하고자 할 때 사용할 수 있는 적절한 계면활성제를 선정하고자 한다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1. 실험재료

#### 2.1.1. 계면활성제

실험 대상 계면활성제는 기존의 토양세척이나 미생물을 이용한 오염물질 분해에 관련된 논문을 토대로 많이 사용되어 왔던 것들을 우선적으로 선정하였다. 본 연구에서 실험한 계면활성제는 SDS (Sigma-Aldrich Co.) (Chang et al., 2000; Huang et al., 2001; Deshpande et al., 1999), TritonX-100 (Sigma-Aldrich Co.) (Chang et al., 2000; Hiller and Wandruszka, 1995; Edwards et al., 1991),

Table 1. Chemical properties of surfactants used in this study

Surfactants	Properties	Molecular formula	Molecular weight	Critical micelle concentration (CMC)	Reference
SDS	Anionic	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{OSO}_3\text{Na}$	288 g/mol	8.2 mM	Heyder et al., 1997; Hill, 1999; Hiller and Wandruszka, 1995
TritonX-100	Non-ionic	$\text{C}_9\text{H}_{17}\text{C}_6\text{H}_4\text{O}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_{9.5}\text{H}$	628 g/mol	0.25 mM	Heyder et al., 1997; Huang et al., 2001; Kim et al., 2001
Tween80	Non-ionic	$\text{C}_{18}\text{S}_6\text{EO}_{20}$	1310 g/mol	0.012 mM	Goudar, 1999
BYK-345 (silicone surfactant)	Non-ionic	Polyether modified poly-dimethyl-siloxane	2700~4700 g/mol	1.5 mM	Deeb and Alvarez-Cohen, 1999; Falatko, 1991

EO = ethylene oxide group

Tween 80 (Sigma-aldrich Co.) (Yeh et al., 1999), BYK-345 (silicone surfactant, BYK-Chemie) (Hill, 1999; Maurice, 1994)로 모두 4가지이다. 이들 각각의 계면활성제에 대한 정보는 Table 1에 나타내었다.

2.1.2. 미생물 배양

미생물은 하수처리장 반송 슬러지를 채취하여 약 6개월 간 폐놀에 적응시킨 뒤, 한 달간 toluene을 탄소에너지원으로 반연속식으로 주입하여 배양한 것을 다시 6L의 연속식 생물반응기에서 배양하였다(Song, 2001; Yang and Zhu, 2004). 이때 사용된 영양염류의 조성은 1.36 g/L KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 1.42 g/L Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, 0.5 g/L (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 3.03 g/L KNO<sub>3</sub> 과 미량원소 용액 1 mL/L이다. 미량원소 용액의 조성은 50 g/L MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, 14.7 g/L CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O, 2.86 g/L H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, 1.54 g/L MnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O, 2.5 g/L FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, 0.027 g/L CuCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O, 0.044 g/L ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, 0.041 g/L CoCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O, 0.025 g/L Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O, 0.02 g/L NiCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O이다. 연속식 생물반응기의 체류시간은 20일이고, 톨루엔의 주입농도는 200 ppm<sub>v</sub>이었다.

2.2. 계면활성제 농도에 따른 미생물 회분실험

250 mL의 밀폐용기에 부유상태의 미생물 45 mL을 넣

Table 2. Surfactant concentrations used in this study

Surfactant	Concentration range (%)			
SDS CMC : 0.242 wt%	0.1	0.15	0.2	0.25
TritonX-100 CMC : 0.0141 v/v%	0.005	0.01	0.015	0.03
Tween80 CMC : 0.00148 v/v%	0.0005	0.001	0.0015	0.003
BYK-345 (silicone surfactant) CMC : 0.385 v/v%	0.1	0.2	0.3	0.4

Table 3. Toluene concentrations in the liquid and the gas phase using surfactants

Surfactant	Toluene injection (ppm <sub>v</sub> )	Gas phase conc. at equilibrium (ppm <sub>v</sub> )	Liquid phase conc. measured at equilibrium (mg/L)	Liquid phase conc. (mg/L)			
				calculated by H (equation, 1-1)	calculated by H (equation, 1-2)		
				deviation(%)	deviation(%)		
Deionized water	365.3	143.7	2.2	2.2	0	2.4	+9.1
SDS	361.4	152.5	2.5	2.4	-4.0	2.7	+8.0
TritonX-100	361.4	153.7	2.5	2.4	-4.0	2.7	+8.0
BYK-345 (silicone surfactant)	361.4	124.8	2.7	2.0	-25.9	2.2	-18.5

은 후, 다양한 농도의 계면활성제와 증류수를 함께 넣어 총 액상의 부피가 50 mL이 되도록 하였다. 여기에 gas-tight 실린지를 이용하여 기상으로 toluene을 넣은 후 stirrer bar를 사용해 1분간 빠르게 교반시켜주어 기상과 액상의 toluene이 평형상태를 이루게 하고, 그 후에는 적절한 속도로 교반하면서 시간에 따른 기상의 toluene 농도를 측정하였다. 기상으로 채취된 toluene은 FID가 장착된 HP6890 GC에 manual injection 하여 분석하였다. 액상에 존재하는 toluene의 농도는 Purge & Trap이 장착된 GC/FID를 이용해 구하였다. 실험에 사용된 각 계면활성제의 농도 범위는 Table 2에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 계면활성제로 인한 toluene의 용해도 변화

계면활성제는 CMC 이상의 농도에서 micelle을 형성하고 micelle 내부에 유기물을 흡착시킴으로써 유기물의 용해도를 증가시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 계면활성제가 실제 toluene의 용해도를 얼마나 증가시킬 수 있는지 확인하여 보았다. 기상 부피를 200 mL, 액상의 부피를 50 mL로 하고 이때의 각 계면활성제의 농도가 문헌에 제시된 CMC가 되도록 한 후, 여기에 일정양의 toluene을 기상으로 주입하여 액상과 기상의 toluene이 평형을 이루게 하였다. 평형상태에 도달한 후 액상과 기상에 존재하는 toluene의 농도를 측정하였으며, 문헌에 제시되어 있는 실험식 (1-1) (Deeb and Alvarez-Cohen, 1999) 과 (1-2) (Staudinger and Roberts, 2001)를 적용하여 계산한 헨리 상수값과 비교하였다.

$$H(atm \cdot m^3/mol) = e^{(A-B/T)} \tag{1-1}$$

$$H(atm) = 10^{(A-B/T)} \tag{1-2}$$

식(1-1)에서 toluene의 경우 A값은 5.133이고 B값은

3024이며 T는 절대온도이다. 식(1-2)에서 toluene의 경우 A값은 5.271이고 B는 1745이며 T는 절대온도이다.

Table 3에서 증류수에 대한 실험은 22°C에서 이루어졌고 이때 식(1-1)과 식(1-2)를 이용해 구한 헨리 상수는 각각 0.0153 mg/L/atm과 0.0166 mg/L/atm이었다. Table 3의 나머지 실험은 모두 21°C에서 이루어졌으며 이때 식(1-1)과 식(1-2)를 통해 구한 헨리 상수는 각각 0.0158 mg/L/atm과 0.0175 mg/L/atm이었다. 이 실험을 통해 보면 평형상태의 기상 toluene의 농도를 기준으로 측정된 액상의 toluene 농도와 헨리상수를 통해 계산된 액상의 toluene의 농도가 증류수나 SDS, TritonX-100은 측정된 액상의 농도가 헨리상수를 이용해 계산한 액상의 농도보다 작거나 거의 비슷한 값을 나타냈다. 하지만, BYK-345의 경우에는 측정된 액상의 농도가 헨리상수를 사용한 경우보다 비교적 높았다. 측정된 액상의 농도와 헨리상수를 통해 계산된 액상의 농도차이가 계면활성제의 용해도 증가 효과에 의해 증가된 액상 toluene의 양이 된다. 따라서 본 실험에서는 SDS와 TritonX-100은 용해도 증가의 효과가 거의 없고, silicone 계면활성제인 BYK-345는 용해도 증가의 효과가 어느 정도 있다는 것을 알 수 있다. 즉, SDS나 TritonX-100은 용해도 증가 현상이 일어나기 위해서는 그 농도가 CMC를 훨씬 초과해야 한다. 하지만 본 연구에서 사용한 계면활성제의 농도는 CMC를 넘지 않았다. 그 이유는 계면활성제를 CMC이상 사용하여 용해도 증가가 크게 일어나면 toluene이 micelle내부와 강하게 결합하여 미생물에 의해 이용되기 어려워질 수 있기 때문이다.

3.2. 계면활성제에 의한 물질전달계수 변화

Toluene과 같은 VOCs를 미생물을 이용하여 처리하려면 이러한 유기물을 가능한 빠르게 액상으로 용해시켜 미생물에 의해 분해되도록 해야 한다. 회분식 실험에서 기상과 액상 사이에 일어나는 VOCs의 물질전달은 다음의 식(2), (3), (4)에 의해 설명될 수 있다(Heyder et al., 1997).

$$V_l \frac{dC_l}{dt} + V_g \frac{dC_g}{dt} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{dC_g}{dt} = \frac{V_l}{V_g} \cdot K_L a \cdot (C_l^* - C_l) \tag{3}$$

$$C_l^* = \frac{C_g}{H} \tag{4}$$

여기서 물질전달계수(K<sub>L</sub>a)는 액상과 기상사이의 물질전달계수(1/hr), C<sub>l</sub>는 액상에 존재하는 오염물의 농도(μg/L), C\*는 액상과 기상이 평형상태를 이룰 때의 액상의 농도

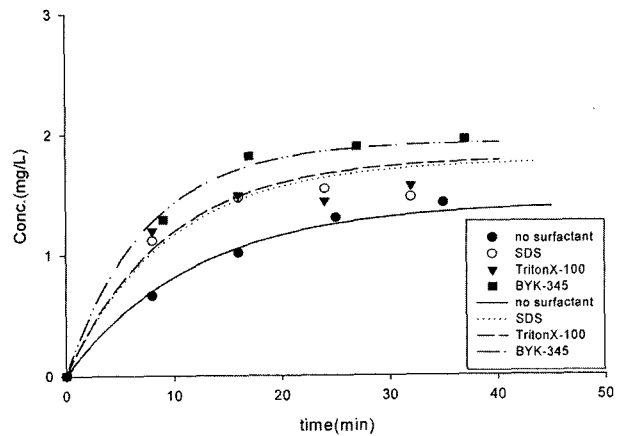


Fig. 1. Changes in toluene concentration in the liquid phase during the abiotic bottle teste The symbols represent experimental data while lines illustrate simulated results.

Table 4. Mass transfer coefficients (K<sub>L</sub>a) determined using the experimental data from the bottle studies and the nonlinear regression

Surfactant	K <sub>L</sub> a (1/hr)
Deionized water	3.308
SDS	3.621
TritonX-100	3.649
BYK-345 (silicone surfactant)	4.077

(μg/L), C<sub>g</sub>는 기상의 오염물 농도(ppm), V<sub>l</sub>은 액상의 부피(mL), V<sub>g</sub>는 기상의 부피(mL), H는 액상과 기상사이의 무차원 물질분배계수이다. 평형상태에서 측정된 기상과 액상의 농도를 이용해 각 조건에 해당하는 H를 구할 수 있다. 물질전달의 속도는 오염물의 농도차에 비례하며 그 비례상수인 K<sub>L</sub>a의 값이 물질전달의 속도를 나타내는 척도가 된다. 따라서 각각의 계면활성제를 사용했을 경우의 물질전달계수(K<sub>L</sub>a) 값을 구함으로써 계면활성제 사용으로 변화된 물질전달 속도를 알아볼 수 있다.

본 연구에서는 기상 200 mL, 액상 50 mL로 실험하고, 사용된 각 계면활성제의 농도는 문헌에 제시된 CMC로 하였다. 기상으로 동일한 양의 toluene을 주입한 후 28°C에서 일정한 속도로 교반하면서 시간에 따라 기상의 농도를 측정함으로써 액상으로 이동된 toluene의 양을 구하였다. 이를 바탕으로 시간에 따른 액상의 농도 변화를 구해 Fig. 1에 나타내 보았다. 또한 Fig. 1에 나타난 액상 농도 변화 자료들을 바탕으로 식(2), (3), (4)를 이용해 비선형 회귀분석 함으로써 물질전달계수(K<sub>L</sub>a) 값을 구하였으며, 계산된 물질전달계수 값을 이용해 액상의 toluene 농도를 모델링하였다. 그 결과는 Fig. 1과 Table 4에 나타내

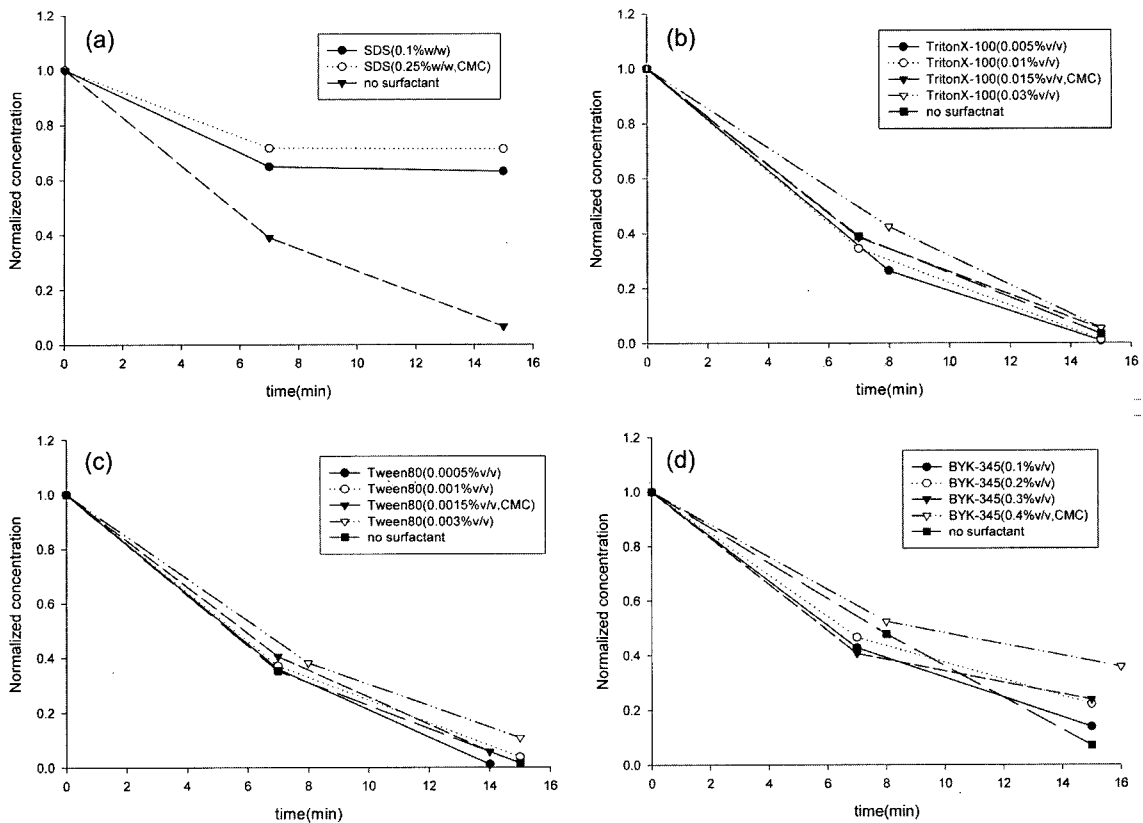


Fig. 2. Biological toluene degradation in the presence of (a) SDS, (b) TritonX-100, (c) Tween 80, and (d) Silicone surfactant.

었다.

Table 4에서 보면 toluene이 기상에서 액상으로 이동될 때 silicone 계면활성제인 BYK-345의 물질전달계수 값이 가장 크고 TritonX-100과 SDS의 물질전달계수 값은 비슷한 경향을 보이고 증류수의 물질전달계수 값이 가장 낮은 것을 알 수 있다. 따라서 계면활성제의 사용으로 기상에서 액상으로 toluene이 이동되는 속도가 증가한다고 말할 수 있다.

3.3. 미생물에 의한 toluene의 분해에 계면활성제가 미치는 영향

계면활성제를 사용해 기상의 toluene이 액상으로 더 잘 이동되게 한 후, 이것을 미생물을 이용해 분해시키는데 있어서 가장 중요한 것은 첨가한 계면활성제에 의해 미생물의 활성도가 영향 받지 않아야 한다는 것이다. 계면활성제가 미생물에 미치는 영향을 알아보기 위해 미생물과 계면활성제, 증류수를 합쳐 액상의 부피가 50 mL이 되게 하고 기상의 부피가 200 mL이 되게 한 후, 여기에 기상의 toluene을 주입해 시간에 따른 농도 변화를 측정하였다. 각 계면활성제에 대해 실험할 때 마다 연속식 생물반

응기에서 미생물을 sampling을 함으로써 실험 대상 계면활성제에 대해서는 동일한 활성도의 미생물이 사용되도록 하였고, 각 실험에 사용된 미생물의 농도와 온도도 일정하게 유지하여 주었다.

본 실험에서는 먼저 계면활성제를 첨가하지 않은 상태에서 미생물에 의한 toluene 분해속도를 측정하였다. Fig 2(a)~(d)에 제시된대로, 계면활성제가 첨가되지 않은 상태에서는 매우 빠른 속도로 기체 toluene이 제거되었으며, 계산된 toluene 분해속도는 약 36 mg/L/hr이었다. 이 분해속도는 활성도가 높은 단일 미생물(pure culture)의 toluene 분해속도와 유사하여(Deeb and AlvarezCohen, 1999), 따라서 본 연구에서 사용한 혼합미생물의 활성도가 매우 높음을 확인할 수 있다.

계면활성제로 SDS를 사용하였을 경우에는 Fig 2(a)에서 보는 것처럼 계획했던 계면활성제의 농도 중에서 가장 작은 농도인 0.1%w/w를 사용하였을 때 실험 초기에 이미 미생물에 의한 toluene의 분해가 저해 받는 것을 확인할 수 있다. 또한 문헌에 제시된 SDS의 CMC인 0.25%w/w에서도 같은 현상이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 즉, 계면활성제로 SDS를 사용하면 미생물에 의한 toluene의

분해가 심각한 저해를 받았다. 그 이유는 두 가지 정도로 설명될 수 있는데, 첫째 SDS가 미생물의 cell membrane이나 주요 enzyme을 변성시켜 미생물의 활성도를 떨어뜨리기 때문에 toluene의 분해가 이루어지지 않을 수 있다 (Cserhati et al., 2002). 둘째, SDS와 같이 미생물에 의해 쉽게 분해될 수 있는 계면활성제는 toluene과 동시에 존재할 경우 미생물이 SDS를 주 기질로 사용하기 때문에 toluene의 분해속도가 낮아질 수 있다(Goudar et al., 1999).

TritonX-100를 계면활성제로 사용한 경우에는 Fig 2(b)에 나타난 것처럼 서로 다른 계면활성제의 농도에 대해 미생물의 활성도가 크게 영향 받지 않는 것을 확인할 수 있었다. TritonX-100은 농도가 낮을수록 빠른 분해속도를 보이지만 미생물만 있는 경우와 크게 차이가 없기 때문에 TritonX-100에 의한 미생물 활성도감소는 없다고 할 수 있다.

Tween 80를 계면활성제로 사용한 경우도 Fig 2(c)에서 보는 것처럼 서로 다른 계면활성제의 농도에 대해 미생물의 활성도가 크게 영향 받지 않는 것을 확인할 수 있었다. Tween 80는 미생물만 있는 경우와 비교해 미생물에 의한 toluene 분해속도의 차이는 거의 없지만, 농도가 증가하면 TritonX-100 보다는 toluene의 분해가 덜 이루어지는 것을 알 수 있다. 이것은 Tween 80가 TritonX-100보다 분자량이 작아 미생물에 의해 더 쉽게 기질로 이용될 수 있기 때문이라고 판단된다(Kim et al., 2001).

Silicone 계면활성제인 BYK-345를 사용한 경우에는 초기에 기상의 toluene농도가 빠르게 감소하다가 점점 감소하는 속도가 줄어든다. 초기에 기상의 toluene이 빠르게 감소한 것은 미생물에 의한 분해라기보다는 BYK-345에 의해 기상에 존재하던 toluene이 액상으로 많이 이동되었기 때문이다. 앞의 물질전달계수 측정실험에서 BYK-345는 다른 계면활성제보다는 기상의 toluene을 액상으로 더 많이 녹일 수 있는 것으로 나타났다. 하지만, 초기에 액상으로 toluene이 많이 이동되고도 시간이 지날수록 기상 toluene의 농도감소가 빠르지 않은 것은 BYK-345에 의해 미생물의 활성도가 감소했기 때문이라고 판단된다. 즉, silicone 계면활성제인 BYK-345는 미생물의 활성도에 영향을 미쳐 미생물에 의한 분해반응을 저해할 수 있다.

#### 4. 결 론

Toluene과 같은 VOCs를 미생물을 이용해 분해하는 시스템에서 사용할 계면활성제를 선정하기 위해 미리 문헌 조사를 통해 몇 가지를 선정하였다. 그리고 선정된 각 계

면활성제들의 용해도 증가 능력과 물질전달속도 증가 능력에 대해 알아보고, 계면활성제가 미생물의 활성도에 미치는 영향에 대해서도 알아본 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 각 계면활성제의 농도가 CMC인 경우 silicone 계면활성제인 BYK-345는 toluene의 용해도를 증가시켰지만 SDS나 TritonX-100에 의한 toluene의 용해도 증가는 거의 없었다.

2) 기상의 toluene이 액상으로 이동되는 속도는 용매가 순수한 증류수일 때보다 계면활성제가 포함된 경우에 더 빠르게 나타났다. 물질전달 속도는 동일한 교반속도와 온도에서는 BYK-345, TritonX-100, SDS의 순서였지만 값의 차이는 크지 않다.

3) SDS는 미생물의 활성도를 저하시켜 미생물에 의한 toluene의 분해가 거의 이루어지지 않았고, silicone 계면활성제인 BYK-345도 미생물의 활성도를 저하시켜 toluene 분해속도를 감소시켰다. TritonX-100과 Tween80는 모두 미생물의 활성도를 거의 감소시키지 않았으며, TritonX-100 같은 경우는 낮은 농도에서 오히려 toluene 분해속도가 증가하는 결과를 보여주었다.

따라서 계면활성제를 이용해 toluene과 같은 VOCs를 처리하기 위한 시스템에서는 계면활성제에 의한 toluene의 용해도 증가의 측면에서는 silicone 계면활성제인 BYK-345가 가장 적합한 계면활성제지만 미생물의 활성도를 저하시키는 단점이 있으므로 TritonX-100이 더욱 적합하다고 할 수 있다.

#### 참 고 문 헌

- Chang, M.C., Huang, C.R., and Shu, H.Y., 2000, Effects of surfactants on extraction of phenanthrene in spiked sand, *Chemosphere*, **41**, 1295-1300.
- Cserhati, T., Forgacs, E., and Oros, G., 2002, Biological activity and environmental impact of anionic surfactants, *Environ. International*, **28**, 337-348.
- Deeb, R.A. and Alvarez-Cohen, L., 1999, Temperature effect and substrate influence during the aerobic biotransformation of BTEX mixtures by toluene-enriched consortia and *Rhodococcus rhodochrous*, *Biotechnol. Bioeng.*, **62**(5), 526-536.
- Deeb, R.A. and Alvarez-Cohen, L., 1999, Temperature effects and substrate interactions during the aerobic biotransformation of BTEX mixtures by toluene-enriched consortia and *Rhodococcus rhodochrous*. *Biotechnol. Bioeng.*, **62**(5), 526-536.
- Deshpande, S., Shiao, B.J., Wade, D., Sabatini D.A., and Harwell, J.H., 1999, Surfactant selection for enhancing ex situ soil

washing, *Water Res.*, **33**(2), 351-360.

Edwards, D.A., Luthy, R.G., and Liu, Z., 1991, Solubilization of polycyclic aromatic hydrocarbons in micellar nonionic surfactant solutions, *Environ. Sci. Technol.*, **25**(1), 127-133.

Falatko, D.M., 1991, Effects of biologically reduced surfactants on the mobility and biodegradation of petroleum hydrocarbons, MS thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blackburg, VA.

Goudar, C., Strevett, K., and Grego, J., 1999, Competitive substrate biodegradation during surfactant-enhanced remediation, *J. Environ. Eng.*, **125**(12), 1142-1148.

Heyder, B.D., Vanrolleghem, P., and Lagenhove, H.V., 1997, Kinetic characterization of mass transfer limited biodegradation of a low water soluble gas in batch experiments-Necessity for multiresponse fitting, *Biotechnol. Bioeng.*, **55**(3), 512-519.

Hill, RM, 1999, Siloxane surfactant. In: Hill RM, editor. Silicone surfactants, New York: Marcel Dekker Inc.

Hiller G.K. and Wandruszka R.V., 1995, Decontamination of oil-polluted soil by cloud point extraction. *Talanta*, **42**(1), 83-88.

Huang, H.L., Lee, W.M., and Grace, 2001, Enhanced naphthalene solubility in the presence of sodium dodecyl sulfate: effect of critical micelle concentration, *Chemosphere*, **44**, 963-972.

Kim, I.S., Park, J.S., and Kim, K.W., 2001, Enhanced biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons using nonionic sur-

factants in soil slurry. *Appl. Geochem.*, **16**, 1419-1428.

Maurice, R., Porter & Associates Handbook of Surfactants, 2nd ed., 1994.

Muligan, C.N., Yong, R.N., and Gibbs, B.F., 2001, Surfactant-enhanced remediation of contaminated soil: A review, *Eng. Geol.*, **60**, 371-380.

Muligan, C.N. and Gibbs, B.F., 1993, Factors influencing the economics of biosurfactants, In: Kosaric, N (Ed.), Biosurfactants, Production, Properties, Applications. marcel Dekker, New York, p. 329-391.

Song, J.H., 2001, Control and characterization of biomass activity and distribution in vapor-phase bioreactor for VOC removal, Doctoral thesis, the University of Texas at Austin.

Staudinger, J. and Roberts, P.V., 2001, A critical compilation of Henry's law constant temperature dependence relations for organic compounds in dilute aqueous solutions, *Chemosphere*, **44**, 561-576.

Yang, C. and Zhu, X., 2004, Removal of a volatile organic compound in a hybrid rotting drum biofilter, *J. Environ. Eng.*, **130**(3), 282-291.

Yeh, D.H., Pennell, K.D., and Pavlostathis, S.G., 1999, Effect of Tween surfactants on methanogenesis and microbial reductive dechlorination of hexachlorobenzene, *Environ. Toxicol. Chem.*, **18**(7), 1408-1416.