

## Nal 리간드화 계면활성제에 의한 토양내 Cd과 Pb 추출 연구

허정현 · 정승우\*

군산대학교 토목환경공학부 환경공학전공

## Extraction of Cd and Pb from Soil by Anionic Surfactant and Ligand NaI

Jung-Hyun Heo · Seung-Woo Jeong\*

Department of Environmental Engineering, Kunsan National University

### ABSTRACT

Heavy metals, Cd and Pb, in soil were extracted by using anionic surfactants such as AOS (alpha olefin sulfonate), SDS (sodium dodecyl sulfate), and LAS (linear alkyl benzene sulfonic acid). Metal extractability from soil was affected by the carbon number and solution pH of surfactants. LAS showed higher metal extractability due to the acidic solution condition. Although SDS has a fewer carbon number than AOS, it would produce smaller micelles and resulted in more efficient extraction of metals by increased soil contact. Cd extractability of surfactant was twice enhanced by adding NaI as a ligand. However, Pb extractability of surfactant was sometimes reduced by adding NaI. Those ligand effects were dependent on solubility of metal-ligand. The column experiment also showed that SDS having smaller micelles resulted in higher metal extractability than AOS.

**Key words :** Anionic surfactant, Heavy metal, Ligand, Soil

### 요 약 문

중금속 오염 토양(Cd, Pb)에 대한 음이온성 계면활성제, AOS(alpha olefin sulfonate), SDS(sodium dodecyl sulfate) 및 LAS(linear alkyl benzene sulfonic acid)의 중금속 추출능력을 평가하였다. 계면활성제의 pH와 탄소성분 개수가 중금속 추출율에 지대한 영향을 미치는 것으로 나타났다. LAS는 산성 pH에 의한 중금속 추출효과가 높게 나타났다. SDS는 탄소개수가 AOS에 비해 적지만 중금속 추출율이 보다 높게 나타난 것은 AOS에 비하여 SDS가 작은 크기 마이셀을 형성하기에 토양과의 접촉이 보다 원활하게 일어난 것으로 판단된다. 계면활성제에 음이온성 리간드(ligand) NaI을 첨가한 결과 중금속 추출율이 Cd의 경우 1.2-2.7배 증가하였다. 반면 Pb의 경우는 0.56-1.76배로 오히려 감소하였다. 이는 I<sup>-</sup> 이온과 Pb 사이에서 형성된 비수용성 화합물이 토양에 그대로 침전되기 때문이었다. 연속식 토양칼럼실험에서도 적은 탄소개수 및 마이셀의 크기를 가지는 SDS가 토양과의 접촉 및 용탈에 보다 효율적인 것으로 나타났다.

**주제어 :** 음이온 계면활성제, 중금속, 리간드, 토양

### 1. 서 론

근래 중금속 토양 정화를 위해 토양 세척법이 널리 사용되고 있다. 토양세척법은 중금속이 주로 흡착되어 있는 미세 토사를 물리적으로 분리하는 공정이며 중금속의 추

출을 위해 산이나 EDTA 등의 세척액을 사용하기도 한다. 그러나 이와 같은 화학세척액의 사용은 토양의 기본 특성을 변화시킬 수 있으며 토양의 기능에 영향을 미칠 수 있다(Zhang et al., 2007). 따라서 최근 소수성 오염물질의 세척에 많이 사용되는 계면활성제를 중금속 추출에도

\*Corresponding author : swjeong@kunsan.ac.kr

원고접수일 : 2008. 7. 4 심사일 : 2008. 7. 18 게재승인일 : 2008. 9. 18  
질의 및 토의 : 2008. 12. 31 까지

적용하고자 하는 연구가 진행되고 있다(Mulligan et al., 2001; 김수삼 외, 2003). 이와 같은 시도는 미생물에 의해 형성된 생물계면활성제(bio-surfactant)를 사용하거나 생분해성 (biodegradable) 계면활성제를 사용하여 토양에 미치는 영향을 최소화 하는 것이다. 그러나 계면활성제에 의한 소수성 유기오염물질과의 반응에 대한 연구는 다수이나 중금속 추출에 관한 특성 연구는 매우 부족하다(이민희 외, 2002).

계면활성제는 친수성 머리와 소수성 꼬리를 가지고 있으며 Critical Micelle Concentration(CMC) 이상에서 마이셀(micelle)을 형성한다. 마이셀의 크기는 계면활성제가 가지고 있는 탄소 개수와 비례한 것으로 알려져 있으며, 마이셀의 양은 계면활성제의 농도와 비례한다(Shin et al., 2005; 최성옥 외, 1999; Rosen, 2004). 그러나 계면활성제 마이셀의 크기와 마이셀의 양이 중금속 추출에 미치는 영향에 대해서는 일부 계면활성제 및 중금속에 한정된 결과만이 보고되었을 뿐이다.

토양의 중금속 추출은 pH에 의해 크게 영향을 받는다. 그러므로 토양세척법에서 사용되는 세척용제 pH에 의해서도 중금속 추출이 크게 영향을 받게 된다. 계면활성제는 종류에 따라 pH가 매우 상이하므로 중금속 추출 능력이 pH에 의한 것인지 계면활성제의 화학적 결합에 의한 것인지 구체적인 연구가 필요하다.

최근 토양내 Cd은 음이온성 리간드 I-와 비이온성 계면활성제의 혼합용액에 추출되는 것으로 알려져 있다(Shin et al., 2005). 그러나 음이온성 리간드 및 계면활성제의 혼합용액과 다양한 양이온성 중금속간의 결합반응 효과는 아직 평가되지 못했다.

본 연구의 목적은 첫째, 음이온성 계면활성제의 탄소 개수, 농도 및 pH가 중금속 추출에 미치는 영향을 조사하는 것이며 둘째, 음이온성 계면활성제 및 리간드 NaI를 이용하여 토양 내 양이온성 중금속 추출 효과를 증대시키고자 하였다.

계면활성제의 탄소개수와 pH 영향 평가를 위해 SDS(sodium dodecyl sulfate), AOS(alpha olefin sulfonate) 및 LAS(linear alkyl benzene sulfonic acid)의 각 10 mM 과 50 mM 용액을 사용하였고 회분식 조건 및 토양 칼럼 조건에서 중금속 추출 능력을 모두 평가하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 중금속 오염 토양

실험을 위한 중금속 오염 토양은 군산대학교 공과대학

**Table 1.** Properties of soil used in the study

Parameter	Value
Organic matter contents (%)	2.8%
pH	7.6
Soil texture	loamy sand
porosity	0.45
permeability	$3.28 \times 10^{-8} \text{ cm}^2$

뒤편의 야산에서 채집된 토양에 중금속을 흡착시켜 제작하였다. 사용된 토양 특성은 Table 1과 같으며 토양특성 분석은 Methods of Soil Analysis(SSSA, 2002)방법에 의하여 이루어졌다. 토양을 건조시킨 후 막자사발을 이용하여 분쇄하고 Sieve No.35 체분석을 통하여 500 μm 이하의 토양만을 실험에 사용하였다. 토양 시료 300 g에 대해 Cd 용액과 Pb 용액 각각 1.5 L을 주입하여 혼합한 후 교반기에서 온도 25°C, 교반시간 24시간 동안 교반후 100°C에서 수분을 증발시켰다. 수분을 증발시킨 시료는 데시케이터내에서 24시간 보존시켰다. 수분을 완전히 제거한 토양은 다시금 응결되어 있으므로 분쇄 후 체분석을 통해 500 μm 이하의 토양 입자를 선별하여 이용하였다. 동일한 방법에 의해 제조된 중금속 오염 토양의 Cd과 Pb의 농도범위는 각각 96-145 mg/kg, 325-544 mg/kg 이었다.

### 2.2. 계면활성제 및 리간드

본 연구에 사용되었던 계면활성제인 AOS와 LAS는 애경정밀화학(주)에서 제공받은 35 wt% AOS(ASCO1416)와 96 wt% LAS(ASCO96)이며 SDS는 JUNSEI(810 65-1501) 제품이다. 사용된 리간드는 NaI(Kanto Inc., 37198-00)를 이용하였다. 모든 실험은 각각의 분자량을 구하여 wt% 농도는 mM 농도로 변환하여 사용하였다. 사용된 계면활성제의 특성은 Table 2와 같다.

### 2.3. Batch 실험

계면활성제의 탄소개수 및 pH 조건하에서 토양내 중금속 추출 특성을 평가위해 Batch 실험을 하였다. 중금속 오염 토양 3 g을 삼각 플라스크에 넣고 0.1%, 0.5% 계면활성제를 각각 15 mL 씩 주입하여 밀봉한 후 교반기에서 24시간 동안 150 rpm의 속도 및 25°C의 항온 조건에서 교반하였다. 교반후 원심분리를 통해 상등액을 분리한 후 0.45 μm 멤브레인 필터를 이용하여 부유물질을 제거한 다음 EPA Method 3050B의 질산-과산화수소 추출법으로 전처리하고 AAS(perkinelmer 3110)를 이용하여 중금속 농도를 분석하였다. 상등액에 존재하는 중금속 농도

**Table 2.** Properties of surfactants used in the study

Surfactant	Molecular formula	CMC	Biodegradable	Density(g/mL)* / Viscosity(cp)*	pH*
SDS	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>11</sub> OSO <sub>3</sub> Na	8 mM <sup>4</sup>	Yes <sup>1</sup>	10 mM	0.9894/1.97
				50 mM	0.9808/2.60
LAS	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>11</sub> C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> SO <sub>3</sub> H	1.5 mM <sup>5</sup>	Yes <sup>2</sup>	10 mM	0.9782/1.39
				50 mM	0.958/1.63
AOS	RCH(OH)CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>n</sub> SO <sub>3</sub> Na (n = 14~16)	8 mM <sup>6</sup>	Yes <sup>3</sup>	10 mM	0.9859/1.09
				50 mM	0.9704/1.20

<sup>1</sup> 김용식 et al. 2005, <sup>2</sup> 김유옥 and 고완석. 1998, <sup>3</sup> Milton, 2004, <sup>4</sup> 김수삼. 2003, <sup>5</sup> Schranun et al., 1995, <sup>6</sup> Abed et al., 2003  
\*Measured in this study

로부터 중금속 추출량을 산정하였다. 계면활성제의 pH는 0.1 M NaOH 용액과 0.1 M HNO<sub>3</sub>를 이용하여 조절하였다. 모든 특성실험에서 물을 이용한 배경 실험을 동일하게 진행하였다.

음이온성 리간드와 계면활성제의 중금속 추출능력 평가도 상기한 방법과 동일하게 이루어졌으며 사용된 NaI 농도는 100, 300, 500 mM이었으며 사용된 계면활성제는 50 mM SDS 및 AOS였다.

#### 2.4. 토양 칼럼 실험

실험에 사용된 칼럼은 Omni fit사에서 제조된 유리제 Column으로서 직경 3.5 cm, 높이 12 cm이며 부피가 115 mL이다. 동일한 투수성을 유지하기 위하여 중금속 오염 토양 20 g을 채울 때 마다 214 g의 무게를 가진 고무롤 13 cm 높이에서 12번 씩 떨어뜨렸다. 중금속 오염 토양이 채워진 칼럼에 이산화탄소를 10 mL/min으로 3공극 부피(pore volume) 주입하였고, 공기가 탈리된 증류수를 5 mL/min으로 2공극부피 주입하여 포화상태로 만들었다. 이후 SDS 50 mM과 AOS 50 mM을 리간드 혼합과 비혼합으로 나누어 주입하였으며 세척용액은 10분당 1공극 부피만큼 들어가도록 5.63 mL/min으로 조절하였다. 유출수내 중금속은 AAS를 이용하여 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 계면활성제의 이온별 용출 능력 평가

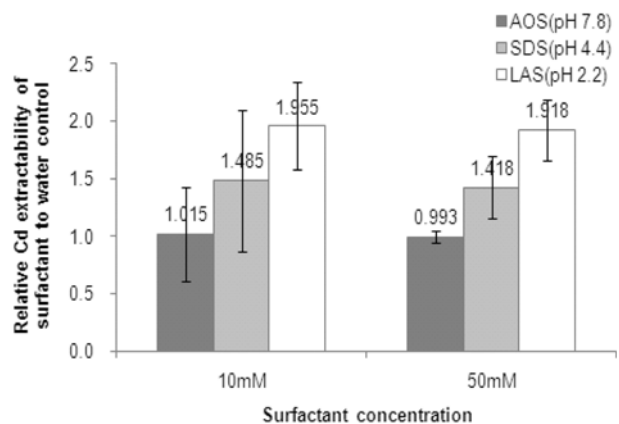
비이온성 계면활성제의 경우 토양의 Cd 용출이 쉽지 않은 것으로 보고되고 있다. Table 3는 Shin et al. (2005)에 보고된 비이온 계면활성제 Triton-x series의 Cd 용출율과 본 연구의 음이온 계면활성제의 용출율을 비교한 것이다. 토양 특성 및 결합형태에 따라 직접적 비교는 어렵지만 음이온 계면활성제가 동일 농도에서 보다 높은

**Table 3.** Extraction of Cd in soil by nonionic and anionic surfactants

	Triton x-114 <sup>1</sup>	LAS*	AOS*	SDS*
Cd	1% or less	27%	11%	18%

<sup>1</sup> Shin et al, 2005 (50 mM)

\*Surfactant concentration 50 mM in this study experiment

**Fig. 1.** Relative Cd extractability of surfactant to water control.

Cd 추출을 보이고 있다. 음이온성 계면활성제에 의해 형성된 마이셀 표면의 음이온이 양이온 중금속추출에 영향을 미쳤다고 볼 수 있다(Wang and Mulligan, 2004).

#### 3.2. 계면활성제 농도 별 용출 능력 평가

계면활성제 SDS, AOS, LAS 등의 10 mM와 50 mM의 농도 변화에 대한 Cd 용출능력과 Pb 용출 능력을 각각 Fig. 1과 Fig. 2에 도시하였다. 용출능력은 물에 의한 용출량과 비교한 Relative Extractability (식 1 참조)로 나타냈다.

Relative Extractability of Heavy metal =

$$\frac{\text{Extracted Weight by Surfactant}}{\text{Extracted Weight by Water}} \quad (1)$$

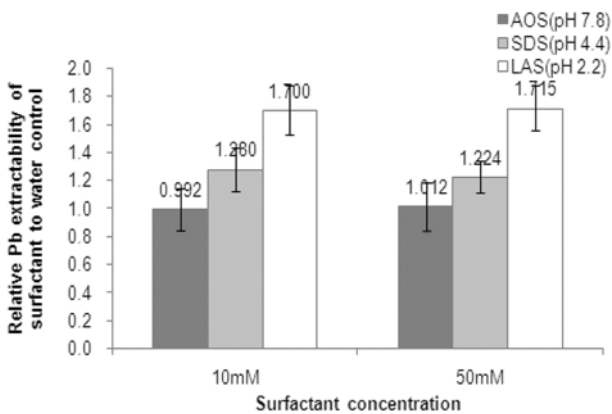


Fig. 2. Relative Pb extractability of surfactant to water control.

Fig. 1과 Fig. 2의 결과를 보면 실험에 사용된 계면활성제의 중금속 용탈율은 농도와 거의 무관한 것으로 평가된다. 계면활성제 용액에서 마이셀이 생성되는 CMC이후의 농도 증가는 세척성, 삼투압, 계면장력 및 표면장력 등의 물성들에 영향을 주지 않게 된다(하윤식 외, 1997). 또한 높은 농도의 계면활성제를 이용하여 토양세척을 실시할 경우 토양 내 계면활성제 잔류 농도가 증가하게 되며 이와 비례하게 계면활성제로 용탈된 중금속도 그대로 잔류하게 되어 오히려 용출을 저하의 가능성도 보고되었다(Wang and Muligan, 2004). 따라서 토양 내 중금속 용출에 사용될 계면활성제의 농도는 마이셀이 생성되는 CMC 농도로 하는 것이 가장 효율적으로 판단된다.

**3.3. 계면활성제 용액의 탄소 개수가 미치는 중금속 용출을 평가**

AOS의 탄소 개수는 18-20개이며 SDS는 12개, LAS는 18개를 지니고 있다. LAS의 경우 계면활성제에 의한 중금속 추출능력보다 pH에 의한 효과가 더욱 높게 나타날 것으로 판단되는 바 계면활성제 용액의 탄소개수가 중금속 용출에 미치는 영향에서는 고려하지 않았다.

Fig. 1과 Fig. 2의 결과에 의하면 SDS와 AOS의 탄소 개수 즉 마이셀의 크기가 영향을 주는 것으로 판단된다. 마이셀의 크기가 클수록 토양 입자와의 접촉이 적어지고, 반면 마이셀의 크기가 작을수록 토양 입자와의 접촉이 많아지게 된다(Shin et al., 2005). 이러한 접촉의 차이는 토양 입자에 흡착되어 있는 중금속의 접촉 빈도에 영향을 미치게 된다. 따라서 마이셀의 크기가 작을수록 토양 입자와의 접촉이 용이하며 중금속 용출이 증가될 것이다.

**3.4. 계면활성제 용액의 pH 영향 평가**

Fig. 1과 Fig. 2에는 각 계면활성제 용액의 pH에 따른

**Table 4.** Variation of pH in surfactant solutions after batch experiment

Agent	Initial pH	Final pH after batch experiment
SDS	4.4	5.1
LAS	2.2	2.7
AOS	7.8	7.9
SDS + Nal	4.6	4.9
LAS + Nal	2.3	2.9
AOS + Nal	7.8	7.8

Cd과 Pb의 용출을 결과를 볼 수 있다. 계면활성제 용액의 pH가 낮을수록 각 중금속 용출율이 증가하였다. 계면활성제 용액의 pH는 토양 pH에 영향을 주게 되며 pH가 낮을수록 중금속의 용출율은 증가하게 된다. 특히 LAS의 경우 H+ 이온이 수중에 해리되어 다른 계면활성제에 비해 더 낮은 pH를 가지게 된다. 이는 낮은 pH를 이용한 탈착과 H+ 이온을 이용한 이온교환을 통하여 중금속 용탈을 촉진할 수 있다(김수삼 외, 2003). 따라서 LAS의 높은 중금속 추출율은 음이온성 계면활성제에 의한 추출보다 pH 효과가 높게 작용한 것으로 판단된다.

Table 4는 중금속 토양과 계면활성제간의 회분식 실험 전 및 후의 pH 변화를 표기한 것이다. SDS와 AOS, LAS 같은 황산염 이온을 포함하는 계면활성제는 토양내의 무기물질들과 환원 반응하여 토양 공극에서 pH를 증가시키는 것으로 알려져 실험 후 pH에 약간의 차이가 있었다(이재원, 1997). 토양 내 중금속 용출에 있어 가장 중요한 것은 초기 pH로 Impellitteri의 연구에 의하면 토양 내 Cd, Cu, Ni, Pb, Zn이 가장 잘 용출되는 pH는 2이며 pH 3-7 조건에서는 유사한 중금속 용출율을 보이는 것으로 알려져 있다(Impellitteri et al., 2002). 따라서 LAS에서는 pH에 의한 토양 중금속 추출이 지배적으로 이루어진 것으로 보이며 이외 계면활성제는 pH 효과가 적었을 것으로 판단된다. 따라서 SDS에 일칼리를 가하여 pH를 상승시켰으며 AOS에 산을 가하여 pH를 하강시켜 pH의 영향을 최소화 하여 동일 pH에서의 계면활성제의 중금속 용출능력을 비교하여 Fig. 3과 Fig. 4에 도시하였다. 그 결과 동일 pH 상에서의 SDS의 용출능력이 AOS에 비하여 효과적임을 보였다. 이는 SDS와 AOS 양 계면활성제에서 pH의 영향을 배제할 경우 3.3의 결과와 마찬가지로 탄소 개수가 적은 SDS의 중금속 용출력이 더 뛰어나다는 것을 의미한다.

**3.5. 리간드 첨가에 의한 중금속 용출 평가**

Fig. 5과 Fig. 6는 Nal 리간드를 계면활성제에 사용하

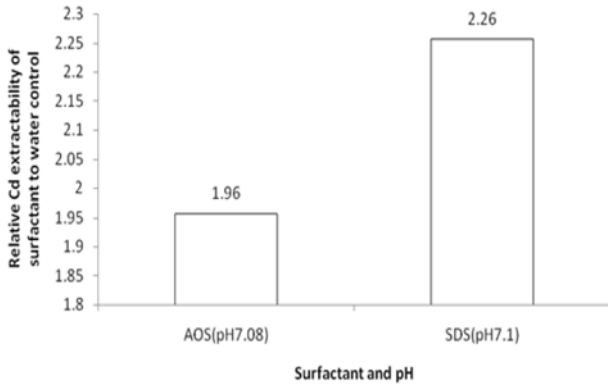


Fig. 3. Relative Cd extractability of surfactant (10 mM) to water control under the similar pH condition.

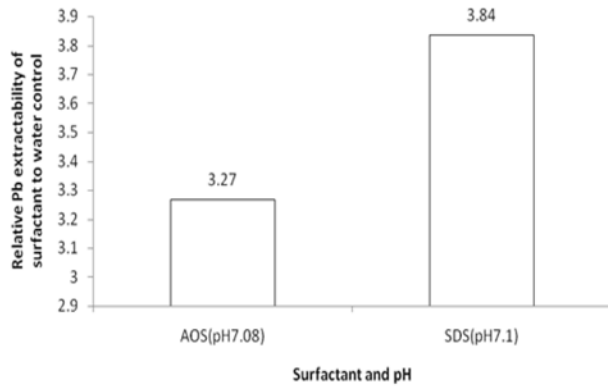


Fig. 4. Relative Pb extractability of surfactant (10 mM) to water control under the similar pH condition

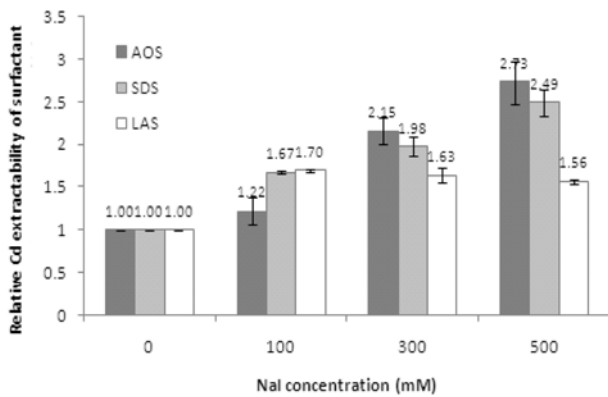


Fig. 5. Relative Cd extractability of surfactant + NaI to surfactant only.

였을 때 Cd과 Pb의 추출율을 물에 NaI를 첨가한 추출율에 대비한 Relative Extractability로 도시하였다. Cd의 경우 NaI의 첨가효과가 눈에 띄게 보였다. AOS 및 SDS의 경우 control에 비해 2배 이상의 Cd 추출율을 보여준다. 반면 LAS의 경우는 NaI 첨가에 의한 Cd 추출효과는 매

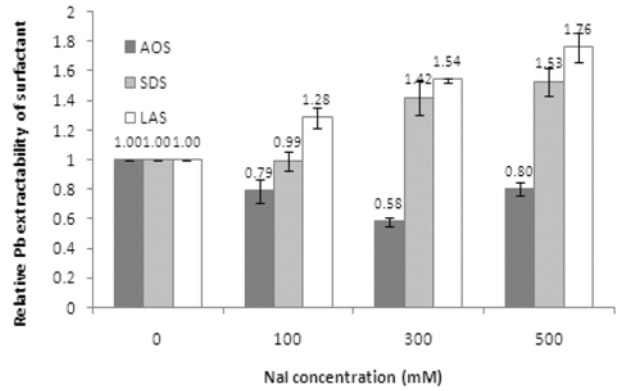


Fig. 6. Relative Pb extractability of surfactant + NaI to surfactant only.

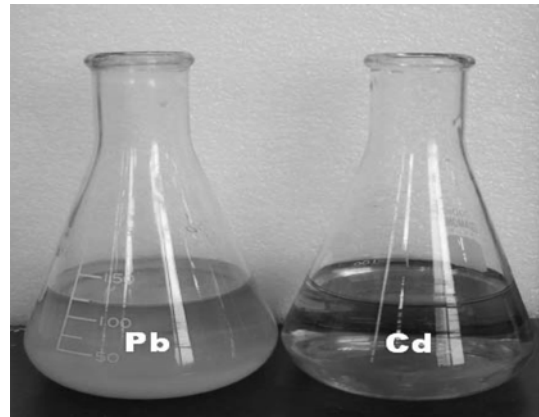


Fig. 7. Images of the mixture of metal, surfactant and NaI; (left) Pb(500 mg/L) + AOS(50 mM) + NaI(300 mM);(right) Cd(100 mg/L) + AOS(50 mM) + NaI(300 mM).

우 약하게 나타났다.

Fig. 6에 나타낸 NaI 첨가에 의한 계면활성제의 Pb 추출결과를 보면 Cd에 비해 높지 않았다. 이는 리간드인 I<sup>-</sup>와 중금속 사이에서 생성된 화합물 특성때문으로 사료된다. NaI는 수용액에서 해리되어 Na<sup>+</sup> 이온과 I<sup>-</sup> 이온으로 나누어지며 Cd과 결합하여 CdI<sub>2</sub> 화합물을 생성한다. 이 생성된 화합물은 수용성으로 계면활성제의 마이셀 내로 용해되어 토양에서 실질적인 Cd 용탈을 이끌어 낸다(Shin et al., 2005). 그러나 Pb의 경우 해리된 I<sup>-</sup> 이온에 의하여 PbI<sub>2</sub> 화합물을 구성하지만, PbI<sub>2</sub> 화합물은 음이온계면활성제 용액 및 증류수에서 앙금을 발생시켜 침전하였다. Fig. 7는 각 중금속, I<sup>-</sup> 및 계면활성제 용액을 혼합하였을 때의 이미지이다. Pb과 혼합된 리간드 및 계면활성제 용액은 노란색 앙금을 띤다. 이는 PbI<sub>2</sub>의 고유 색상이다.

### 3.6. Mass balance

Fig. 8과 Fig. 9은 토양내 잔존하는 중금속의 양과 수

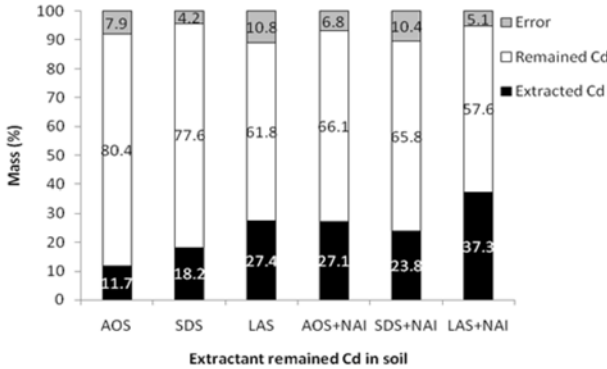


Fig. 8. Mass balance of Cd (Experiment conditions: All surfactant concentration = 50 mM All ligand concentration = NaI 300 mM, Cd in soil = 100 mg/kg).

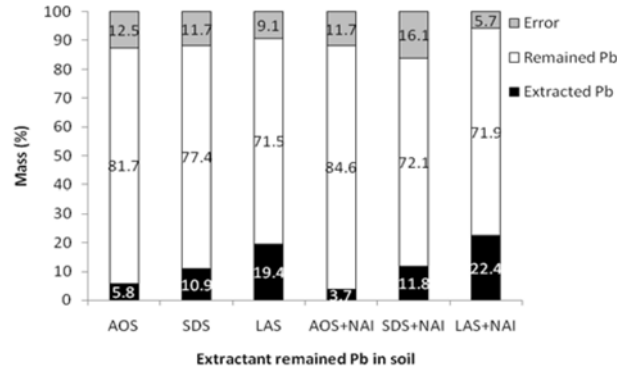


Fig. 9. Mass balance of Pb (Experiment conditions: All surfactant concentration = 50 mM All ligand concentration = NaI 300 mM, Pb in soil = 500 mg/kg).

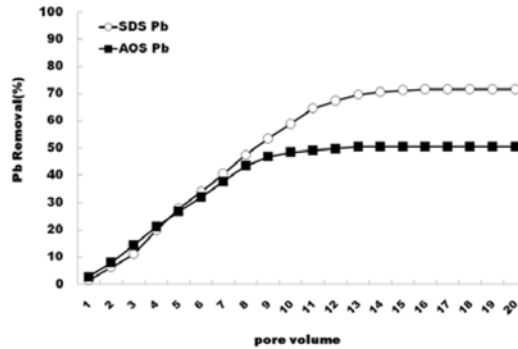
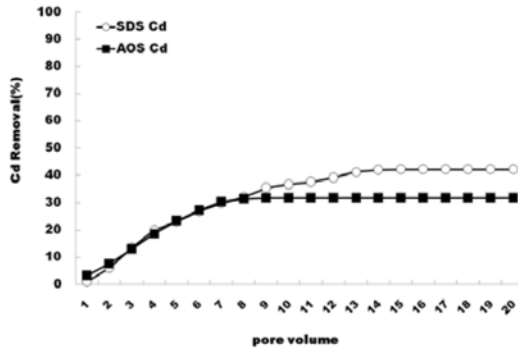


Fig. 10. Removal of heavy metal from soil column by surfactant flushing (All surfactant = 50 mM, Cd = 100 mg/kg Pb = 500 mg/kg).

중에 용탈된 중금속의 양을 조사한 중금속 물질수지 결과를 %로 환산한 것이다. 계면활성제에 의한 Cd의 추출은 약 20%까지 일어나며 NaI를 첨가할 경우 약 10% 정도의 Cd 추출 향상효과가 있는 것으로 나타났다. 반면, Pb의 경우 계면활성제에 의해 약 10% 정도의 추출효과가 있으며 NaI에 의한 Pb 추출향상효과는 거의 없는 것으로 나타났다.

3.7. 토양칼럼에서 계면활성제에 의한 중금속 용출

토양칼럼에서 AOS 및 SDS에 의한 중금속 용출 경향을 Fig. 10에 도시하였다. LAS는 자체적으로 가지고 있는 낮은 pH 영향으로 연속식 평가에서 제외하였다. AOS와 SDS는 7공극 부피(pore volume)까지 Cd 및 Pb 모두 비슷한 용출율을 보인다. AOS는 7공극부피 이후 중금속 용출이 거의 없었지만 SDS의 경우 13공극부피까지 중금속 용출이 일어났다.

연속식 토양칼럼에서 오염물질의 용출을 결정짓는 것은 토양오염물질과 용매와의 접촉에 있다. 적은 탄소개수를 가진 SDS의 중금속 용출이 보다 용이하게 이루어진 것은

형성된 마이셀의 크기가 토양과의 접촉에 지대한 영향을 미치고 있음을 시사한다.

4. 결 론

(1) 음이온성 계면활성제 AOS, SDS, LAS의 농도 변화에 따른 토양 중금속 Cd, Pb의 추출능력을 평가한 결과 CMC 이후의 농도 조건에서는 용출율에 큰 차이가 없었다.

(2) LAS, SDS, AOS 순으로 Cd과 Pb의 추출율이 높게 나타났으며, 계면활성제의 pH와 계면활성제의 탄소성분 개수가 중금속 추출율에 지대한 영향을 미치는 것으로 나타났다. LAS는 용액의 pH가 2.2-2.7로서 산성 pH에 의한 중금속 추출율이 높게 나타났다.

(3) SDS는 탄소개수가 AOS에 비해 적지만 중금속 추출율이 보다 높게 나타난 것은 적은 마이셀 형성으로 토양과의 접촉이 보다 원활하게 일어난 것으로 판단된다.

(4) 음이온 계면활성제에 음이온성 리간드인 NaI를 첨가한 결과 중금속 추출율이 Cd의 경우 1.2-2.7배 증가하

었다. 반면 Pb의 경우는 0.56-1.76배로 오히려 감소하는 경우도 발생하였다. 이는 I<sup>-</sup> 이온과 Pb 사이에서 형성된 비수용성 화합물이 토양에 그대로 침전되기 때문이었다.

(5) 토양칼럼에서의 연속식 중금속 추출실험결과 SDS의 경우 Cd, Pb 모두 AOS에 비해 높은 중금속 추출율을 보이는 것은 작은 탄소개수 및 미셀의 크기를 가지는 SDS가 토양과의 접촉 및 용탈에 효율적이기 때문이다. 따라서 형성된 계면활성제 마이셀의 크기가 토양과의 접촉에 지대한 영향을 미치고 있음을 시사한다.

## 사 사

본 연구는 학술진흥재단 신진교수연구지원사업(KRF-2006-331-D00302)의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드리고 계면활성제를 공급해 주신 (주)애경정밀화학에 또한 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

김수삼, 김병일, 한상재, 김정환, 2003, 납으로 오염된 철성분 함유토의 동전기 정화 특성에 세척제가 미치는 영향, 지하수토양환경, **9**(1), 54-62.

김용식, 손영규, 김지형, 송지현, 2005, Toluene의 생물학적 분해능 향상을 위한 계면활성제의 선정, 지하수토양환경, **10**(4), 26-32.

김유욱, 고완석, 1998, 유기공업화학, 제2판, 동화기술

유선재, 김종구, 2006, pH 단계별 증가에 따른 토양 금속의 용출 특성, 한국환경과학회지, **15**(4), 379-384.

이재원, 1998, 토양세척을 위한 계면활성제의 선정방법과 Column을 이용한 포화지층내 저비중 비수용성 유기용매의 제거거동에 관한 연구, 중앙대 대학원.

이민희, 정상용, 최상일, 강동환, 김민철, 2002, 계면활성제 원위치 토양 세정법을 이용한 유류 오염 지역 토양 지하수 정화 실증 시험, 지하수토양환경, **7**(4), 77-86.

최성욱, 이진희, 김상춘, 남기대, 1999, 계면활성제 수용액에서 미셀형성(제2보) - 계면활성제/탄화수소/물의상 변화에 따른 자기확산-, 한국공업화학회지, **10**(1), 112-117.

하윤식, 백우현, 장윤호, 1997, 계면활성제의 친수·소수성 그룹의 전기음성도와 CMC 특성, 한국공업화학회지, **8**(6), 914-919.

Abed, M.A., Saxena, A., and Bohidar, H.B., 2003, Micellization of alpha-olefin surfonate in aqueous solutions studied by turbidity, dynamic light scattering and viscosity measurements, *Colloids and Surfaces A: Physicochem. eng. Aspects*, **233**, 181-187.

Cabaleiro-lago, C., Garcia-Rio, L., and Herves, P.J., 2007, Spectrophotometric study of metal-ligand reactions in isooctane/Brij30/water nonionic micro emulsions., *Colloids and surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, **295**, 49-54.

Hong, K.J., Tokunaga, S., and Kajiuchi, T., 2002, Evaluation of remediation process with plant-derived biosurfactant for recovery of heavy metals from contaminated soils, *Chemosphere*, **49**, 379-387.

Impellitteri, C.A., Lu, Y., Saxe, J.K., Allen, H.E., and Peijnenburg, W., 2002, Correlation of the partitioning of dissolved organic matter fractions with the desorption of Cd, Cu, Ni, Pb and Zn from 18 Dutch soils, *Environ. Internat.*, **28**, 401-410.

Mulligan, C.N., Yong, R.N., and Gibbs, B.F., 2001, Surfactant-enhanced remediation of contaminated soil: a review, *Engineering Geology*, **60**, 371-380.

Nivas, B.T., Sabatini, D.A., Shiao, B.J., and Harwell, J.H., 1996, Surfactant enhanced remediation of subsurface chromium contamination, *Wat. Res.*, **30**, 511-520.

Rosen, M.J., 2004, *Surfactants and Interfacial Phenomena*, Third Edition, Wiley Inc., New Jersey, USA.

Schranun, K.W., Wu, W.Z., Henkelmann, B., Mera, M., Xu, Y., Zhang, Y.Y., and Kettrup, A., Influence of LAS as organic cosolvent on leaching behaviour of PCDD/Fs from fly ash and soil, *Chemosphere*, **31**(6), 3445-3453.

Shin, M., Barrington, S.F., Marshall, W.D., and Kim, J.W., 2005, Effect of surfactant alkyl chain length on soil cadmium desorption using surfactant/ligand systems, *Chemosphere*, **58**, 735-742.

Semer, R. and Reddy, K.R., 1996, Evaluation of soil washing process to remove mixed contaminants from a sandy loam, *Jour. hazard. mat.*, **45**, 45-67.

SSSA, 2002, Methods of Soil Analysis, Soil Science Society of America, Inc., Wisconsin, USA.

Tondre, C., Hebrant, M., Perdicakis, M., and Bessiere, J., 1997, Removal of Copper ions by Micelle-Based separation Processes. Electrochemical Behavior of Copper Ions Trapped in Micellar particles., *Langmuir*, **13**, 1446-1450.

Wang, S. and Mulligan, C.N., 2004, Rhamnolipid Foam enhanced remediation of Cadmium and Nickel contaminated soil, *Water, Air & Soil Pollut.*, **157**, 315-330.

Zhang, W., Tsang, D.C.W., and Lo, I.M.C., 2007, Removal of Pb and MDF from contaminated soils by EDTA- and SDS-enhanced washing, *Chemosphere*, **66**, 2025-2034.