

새로운 계면활성제들에 의한 두 PAH의 수중 용해도 증가

이진희·박재우*

이화여자대학교 과학기술대학원 환경학전공

Effect of Surfactant Molecules on the Aqueous Solubility of two PAHs

Jinhee Lee · Jae-Woo Park

*Environmental Science and Engineering Program,
Ewha Institute of Science and Technology, Ewha Womans University*

ABSTRACT

Surfactants have been extensively considered for decontamination of the subsurface polluted with hydrophobic organic compounds. In order to investigate the effect of molecular structures on the solubilization of hydrophobic organic compounds, solubility enhancement of two PAHs in solutions of three different surfactants-conventional, dianionic, and gemini. The batch experimental results showed that the gemini was the most effective and the dianionic was the least, indicating that organic carbon content of the surfactants was the major factor which determines the sorption capacity of surfactant aggregates in water, unlike some of the previous reports.

요약문

계면활성제를 사용하여 토양에 존재하는 소수성 유기오염물질을 제거하는 방법이 많이 연구되어져 왔다. 본 연구에서는 계면활성제의 구조적 차이에 따른 오염물질의 용해도 증가 효율을 평가하기 위하

여 기존 계면활성제와는 다른 구조를 가진 계면활성제들을 가지고 비교·실험하였다. 그 결과 쌍둥이형 계면활성제(gemini surfactant)인 DADS12가 가장 용해도 증가율이 높게 나타났으며 머리가 두 개인 쌍두형(雙頭形) 계면활성제(dianionic surfactant)가 일반 계면활성제인 SDDBS보다 적은 용해도 증가를 나타내었다. 이는 계면활성제의 유기탄소분율이 큰 것일수록 용해도 증가가 크고 계면활성제의 구조적 특성에 따른 마이셀의 형태나 구조에 크게 영향을 받지 않으며, 오염물질과 계면활성제 분자에 다 존재하는 벤젠 고리간의 상호 인력 작용이 거의 일어나지 않거나 아주 미미한 것으로 보이며, 이에 따라 나프탈렌과 휘난트렌의 경우 오염물질의 제거 기작이 주로 마이셀 내부에 형성된 소수성 pseudophase로 오염물질이 흡수되는 것으로 추측된다.

주제어 : 용해도 증가, PAH, 쌍둥이형 계면활성제, 쌍두형 계면활성제, 유기탄소분율

1. 서론

많은 유기화합물이 토양과 지하수를 오염시켰으며 일반적으로 토양과 지하수에서 발견되는 유기물질은 PAHs, TCE, PCBs, BTEX 등이다. 이런 유기오염물질이 한 번 환경에 유출되면 대부분 소수성으로 인하여 토양과 지하수에 존재하는 유기물질과 쉽게 결합하며 이렇게 흡착된 유기오염물질은 장시간 넓은 범위를 오염시킨다¹⁾.

토양과 지하수 정화에서 계면활성제의 사용은 토양의 유기물 증가, 수질 환경 내에서 유기오염물질의 용해도 증가, 그리고 Non-Aqueous Phase Liquids(NAPLs)의 용해도증가 이동 등의 목적으로 사용되어졌다^{1), 2), 3)}. 토양과 계면활성제 사이의 상호작용에 대한 연구는 계면활성제로 처리된 토양에 의해 유기 오염물질을 고정화시키는 것에 대하여 주로 이루어졌다^{1), 2)}. 또한 오염물질이 토양의 광물 표면에 계면활성제와 경쟁적 흡착에 의한 방출이나 이동 또는 고정상 사이에서 흡수된 오염물질의 재분배 등도 연구되었다^{4), 5)}.

계면활성제를 이용한 토양오염정화의 주된 관심은 NAPLs의 제거였다. NAPLs는 포화 또는 불포화 층에 존재할 수 있고 만일 많은 양의 유기화합물질이 갑작스레 또는 장시간 동안 환경에 유입

된다면 대부분이 지하에서 그 유기화합물의 농도나 지하수 조건에 따라 자유 액체상태로 축적될 가능성이 있다. 잔류상태의 NAPLs 역시 장시간 지하수의 오염원으로 존재할 수 있다.

계면활성제는 일반적으로 두 가지 방법으로 NAPLs를 제거할 수 있는데 하나는 '용해'이고, 다른 하나는 '이동'이다. 이동 현상은 대수층에 계면활성제가 유입되었을 때 토양과 물의 계면에 모이는 경향의 결과 계면간의 힘이 감소됨에 따라 일어난다. 이는 NAPLs과 토양의 유기물질 사이의 인력을 감소시키며 결과적으로 공극에서 잔류된 NAPLs 덩어리들을 이동시키는데 훨씬 적은 에너지가 요구되는 것이다. 주로 pump-and-treat 방법을 통해 제거된 토양 오염물질의 양은 오염물질의 용해도에 의존한다. 계면활성제가 적당량 물에 추가되어서 마이셀이 형성되기 시작하면 물속에 유기성 pseudophase를 형성하여 유기성 오염물질을 녹인다⁶⁾. 유기오염물질이 마이셀 내에 용해되는 범위는 Octanol-Water Partitioning Coefficient(K_{ow})와 관련된다⁷⁾.

토양오염물질이 마이셀에 용해되는 것은 그 구조에 따라 그 기작이 달라질 수 있으며, 마이셀이 오염물을 용해할 수 있는 부분은 다음과 같이 나눌 수 있다. 마이셀 표면은 전하를 띠거나 극성을 갖

는 부분으로 주로 극성 오염물질들이 흡착되어 제거된다. 그리고 친수성 머리부분과 소수성 꼬리부분의 연결부위에서 중간 정도의 극성을 띤 오염물을 용해시킬 수 있으며 소수성 꼬리 끝부분만 모인 중심부에서는 소수성 유기오염물질이 제거된다⁸⁾. 용해되는 부분을 엄밀히 나눈 two state model도 제안되었는데, 이는 마이셀 표면에는 극성오염물이 흡착되는 상태이며 유기탄소로 이루어진 마이셀의 core부분에는 소수성 오염물이 용해되어 있는 상태라고 나눈 것이었다⁸⁾. 용해도에 영향을 끼치는 인자는 계면활성제의 구조, 유기오염물질의 구조외에 전해질의 영향, 비이온성과 음이온성 계면활성제의 혼합, 온도등이 있다.

최근에 새로운 구조를 가진 계면활성제에 대한 연구가 활발한데 그중 두 개의 계면활성제를 spacer로 연결시킨 것을 쌍둥이형 구조의 계면활성제라 한다¹⁰⁾. 이 계면활성제는 쌍둥이형 계면활성제라 하는데 기존의 계면활성제보다 낮은 농도에서도 수월하게 마이셀을 형성하며 표면장력도 효율적으로 줄이는 효과가 있는 것으로 밝혀졌다¹⁰⁾. 또한 쌍둥이형 계면활성제의 새로운 특징에 대한 설명이 제시되었으며, spacer가 포함된 구조적 특성에 의해 새로운 구조의 집합체를 형성한다는 것이 연구되었다^{11), 12)}.

본 연구에서는 계면활성제의 구조에 따른 오염물의 용해도 증가에 초점을 두었다. 즉, 기존 계면활성제와는 다른 구조를 가지는 계면활성제를 사용하여 계면활성제의 구조와 특성에 따른 용해도의 효율을 비교·분석해보고자 쌍둥이형 계면활성제와 쌍둥이형 계면활성제를 사용하였다. 쌍둥이형 계면활성제는 기존 계면활성제에 비해 친수성 머리부분이 하나 더 많은 것이고 쌍둥이형 계면활성제는 친수성 머리부분과 소수성 꼬리부분이 하나씩 더 많은 구조, 즉 계면활성제 분자가 두 개 연결된 구조를 가지는 것이다. 이 구조 때문에 쌍둥이형 계면활성제라고도 불린다. 하나의 monomer로 이루어진

기존 계면활성제와 더불어 쌍둥이형 및 쌍둥이형 계면활성제들이 두 가지 PAH 용해도 증가에 미치는 결과를 분석하여 그 효율 평가와 또 이 계면활성제들의 환경적용 가능성들도 생각해 볼 수 있는 자료를 제공하기 위하여 본 연구를 수행한 것이다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 기존 계면활성제로는 sodium dodecylbenzene sulfonate(SDDBS)를 사용하였고 쌍둥이형 계면활성제로는 dialkylated disulfonated diphenyl oxide(DADS)를 사용하였으며 alkyl chain부분의 탄소개수가 12개인 DADS12를 사용하였다. 또 쌍둥이형 계면활성제 외에 쌍둥이형 계면활성제인 monoalkylated disulfonated diphenyl oxide(MADS)를 사용하였는데 이는 음이온성 머리가 두 개이고 꼬리가 하나인 구조를 가진다. 이는 쌍둥이형 계면활성제와 SDDBS의 중간단계라고 볼 수 있고 DADS에 비해 alkyl chain 하나가 더 적으므로 소수성 꼬리부분의 영향을 비교해 볼 수 있을 뿐 만 아니라 꼬리부분에 비해 머리가 크기 때문에 마이셀을 생성할 때 더 느슨한 형태로 생성될 것이고 이에 대한 영향도 생각할 수 있게 되었다¹³⁾. MADS도 alkyl chain의 탄소수가 12개인 MADS12를 사용하였으며 DADS와 MADS는 Dow Chemical사에서 실험용으로 기증 받은 것이다.

유기 오염물질로는 PAH인 나프탈렌, 휘난트렌을 사용하였다. 이들은 대표적인 석유 화합물이고 벤젠 고리가 하나씩 증가하는 것으로 다양한 소수성 범위의 물질로서 실험이 가능하며 또한 계면활성제가 포함하고 있는 benzene ring과의 상호작용도 살펴볼 수 있었다. 다음 Fig. 1는 각 계면활성제의 구조와 특성을 나타낸 것이고 Fig. 2는 오염물질의 구조와 특성에 대해 나타낸 것이다.

실험방법은 각각의 계면활성제를 만들어 농도별

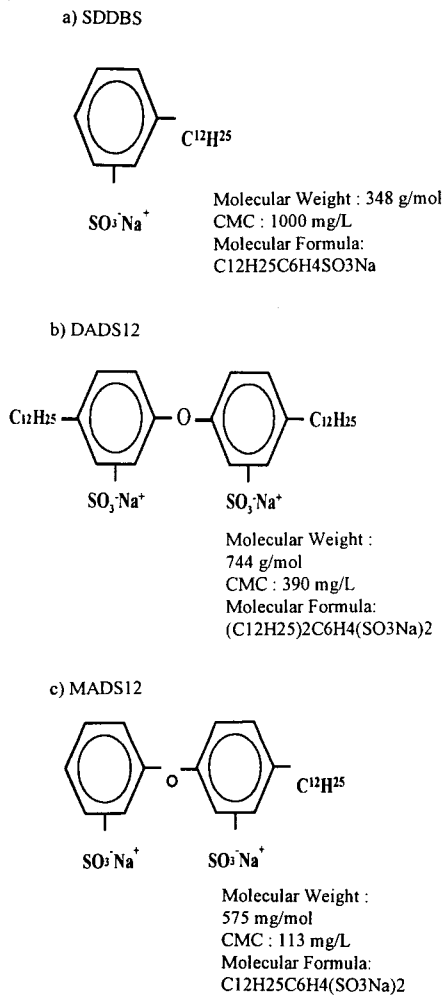


Fig. 1. Structures and properties of surfactants.

로 30ml 유리관에 27.5ml씩 넣는다. 용액이 담긴 유리관에 3 종류의 PAH를 각각 과량으로 넣었으며, 농도별로 두 개의 tube를 실험하였다. 84시간 동안 25℃에서 교반시킨 후 녹지 않는 과량의 PAH를 No. 5 Whatmann 거름종이로 감압여과시킨다. 거름종이에 감압 여과시에는 흡착손실을 피하고 filter내에 존재할 수 있는 유기물의 영향을

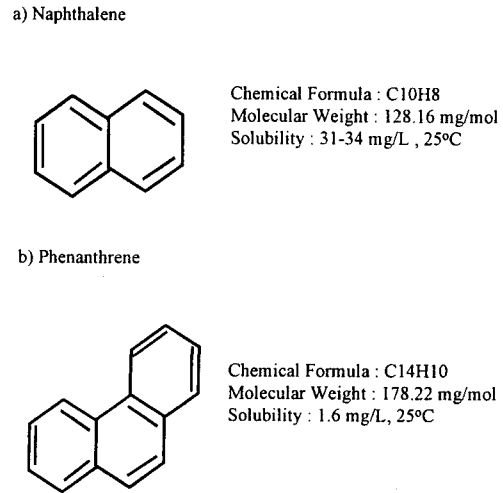


Fig. 2. Structures and properties of organic compounds.

피하기 위하여 초기에 충분한 양의 3차 증류수를 흘려준 후 여과 대상 용액을 다시 흘려준 후에 여과하였다. 녹지 않는 과량의 PAH를 걸러낸 용액을 HPLC로 용액 속에 녹아 있는 PAH를 정량분석 한다. HPLC의 detector는UV이고 column은 3.9×300mm μbondapack C18 reverse phase column을 사용하였다. 용매로는 acetonitrile이 사용되었고 유속은 1.8ml/min이며 gradient flow condition은 Table 1과 같다. 나프탈렌과 휘난트렌의 retention time은 각각 6분과 8분이며 UV측정은 254nm에서 하였다.

Table 1. Gradient Flow Condition

Time(min)	CH ₃ CN(%)	H ₂ O(%)
0	50	50
2	50	50
16	100	0
18	50	50
43	50	50

3. 결과 및 고찰

3.1 계면활성제의 농도에 따른 오염물의 용해도 증가 비교

Fig. 3, 4에 나타낸 각 오염물질에 따른 계면활성제의 효율을 비교하여 보면 DADS12에 의한 용해도 증가가 가장 크고 SDDBS와 MADS12의 순서로 용해도가 증가함을 볼 수 있다. 본 연구에 나타난 결과로는 각 계면활성제의 한계마이셀농도 (Critical Micelle Concentration)값과 실제 용해도 증가가 보이기 시작하는 점이 다르게 나타나고 있다. SDDBS의 경우에는 거의 한계마이셀농도 근처에서 바로 용해도가 증가하는 것이 보이지만 MADS12나 DADS12의 경우는 한계마이셀농도가 어느 정도 지난 이후에 용해도 증가가 일어나기 시작하는 것을 알 수 있다. MADS12의 한계마이셀농도는 113mg/L로 DADS12의 한계마이셀농도인 390mg/L 보다 훨씬 낮은 한계마이셀농도값을 갖

는다. 따라서 MADS12가 DADS12보다 더 빨리 마이셀과 같은 계면활성제의 집합체들을 형성하며 이 집합체들에 의해 일어나는 주된 현상인 용해도 증가가 MADS12에서 더 빨리 나타날 것이라고 예상되어졌다. 그러나 본 연구결과에서는 예상과 달리 DADS12와 MADS12가 각 한계마이셀농도에서 바로 용해도 증가가 나타나지 않고 또한 MADS12가 DADS12보다 더 늦게 용해도 증가가 나타났고 효율도 가장 적은 것으로 보여졌다. 결국 이와 같은 결과에 따라 MADS12와 DADS12의 한계마이셀농도 주변에 형성된 계면활성제의 집합체들이 오염물을 흡수하는데 효율적이지 못한 구조를 가지고 있다고 결론지을 수 있다. 앞의 계면활성제들은 기존 계면활성제와는 다른 구조적 특성을 가지므로 마이셀 형성기작과 특성도 일반 계면활성제와는 다르며 따라서 기존의 이론을 적용하여 쌍둥이형 계면활성제나 쌍두형 계면활성제의 마이셀의 구조나 특성을 예측하는 것은 부적절한 것으로 사료된다.

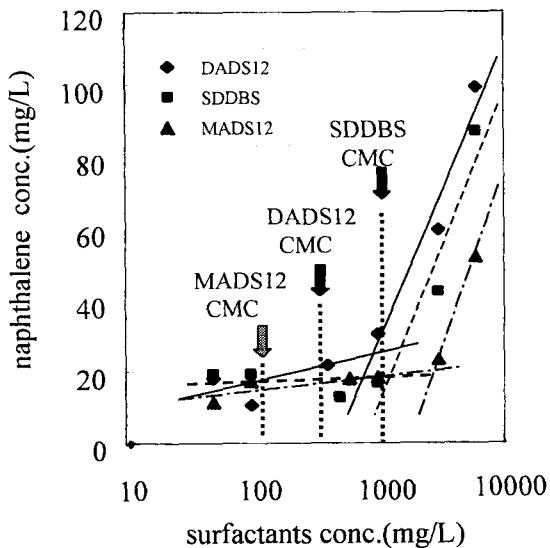


Fig. 3. Naphthalene solubility enhancement with surfactant weight concentration.

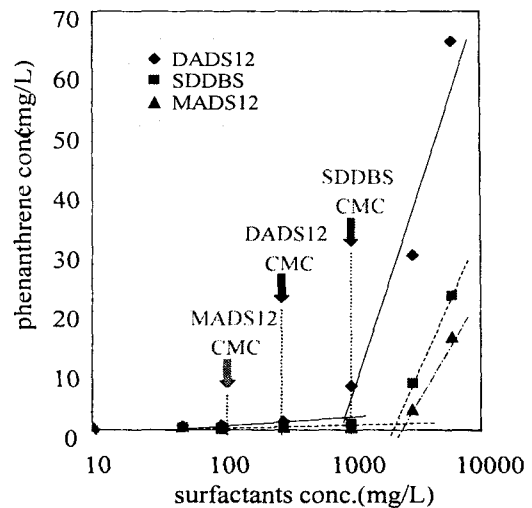


Fig. 4. Phenanthrene solubility enhancement with surfactant weight concentration.

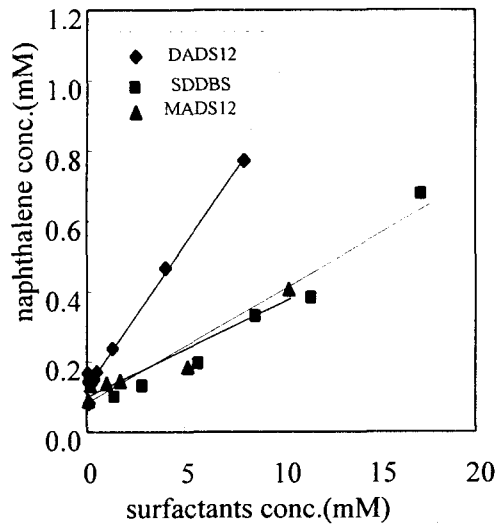


Fig. 5. Naphthalene solubility enhancement with surfactant molar concentration.

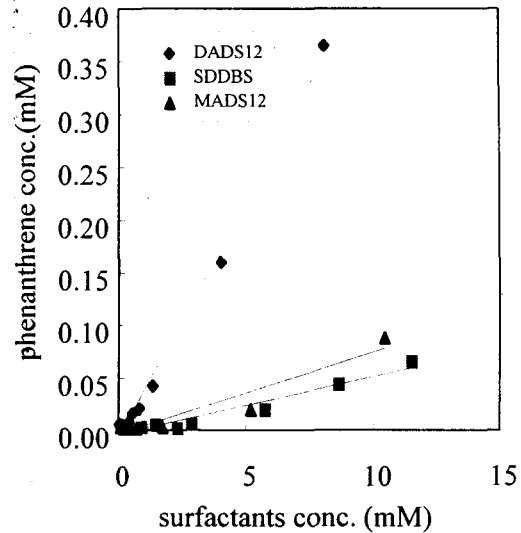


Fig. 6. Phenanthrene solubility enhancement with surfactant molar concentration.

용해도 증가를 계면활성제의 물 농도를 기준으로 그렸을 때의 결과는 다음 Fig. 5, 6에 나타내었으며 결국 DADS12 한 분자가 SDDBS나 MADS12 한 분자보다 오염물질을 흡수하는 능력이 훨씬 크다고 할 수 있다. 그에 비해 SDDBS와 MADS12의 분자당 오염물의 제거효율은 비슷하게 보여지고 있다. 이것은 MADS12와 SDDBS의 결정적인 차이인 머리의 갯수나 구조가 용해도 증가에 큰 영향을 미치지 않으며 결과적으로 계면활성제의 꼬리부분만이 오염물을 흡수하는 결정적인 역할을 하는 것으로 보인다. 그리고 Fig. 5와 Fig. 6에서의 경향성은 서로 같으나 DADS12와 나머지 계면활성제 간의 차이가 나프탈렌보다 휘난트렌에서 더 크게 보여지고 있다. 이렇게 PAH에 따라 계면활성제의 용해도 격차가 다르게 보여지는 것은 각 오염물질간의 소수성, 즉 K_{ow} 가 다르기 때문인데 휘난트렌이 나프탈렌보다 더 소수성을 나타내므로 기름의 성질을 띄는 마이셀 내부에 더 잘 흡수되며 용해도 증가율의 차이가 휘난트렌이 더 크게

나타나는 것이다. 결국 계면활성제 자체의 특성 뿐 아니라 이런 오염물질의 소수성 차이에 따라서도 용해도 증가효율의 차이가 결정된다는 것을 알 수 있다.

본 연구결과를 가지고 분배계수를 계산한 결과는 아래 Table 2와 같다. MSR은 molar solubility ratio이고 WSR은 weight solubility ratio의 약자이다. 그리고 K_m 은 micellar phase와 aqueous phase 사이의 분배계수를 질량단위로 계산한 것이다. 결과는 앞의 그래프에서 보여준 것과 동일하게 $DADS12 \geq SDDBS \geq MADS12$ 로 나타난다. 기존의 연구결과 쌍두형 계면활성제와 기존 계면활성제의 효율에서는 실험의 결과들이 상반되게 나타난다. 쌍둥이형 계면활성제와 기존 계면활성제를 함께 실험한 결과는 항상 쌍둥이형 계면활성제가 좋다고 나타나지만 쌍두형 계면활성제와 기존 계면활성제를 비교했을 경우 Rouse et al.¹³⁾의 실험에서는 쌍두형 계면활성제의 효율이 기존계면활성제 보다 더 좋게 나타났는데 그 이유

Table 2. Partition Coefficients of Contaminants in this Study

a) Naphthalene

	SDDBS	MADS12	DADS12
K _w (L/kg)	9.78 × 10 ²	3.75 × 10 ²	1.03 × 10 ³
logK _w	2.99	2.57	3.02
WSR	1.53 × 10 ⁻²	5.85 × 10 ⁻⁴	1.55 × 10 ⁻²
K _m (L/mol)	3.40 × 10 ²	2.15 × 10 ²	7.85 × 10 ²
logK _m	2.53	2.33	2.90
MSR	4.16 × 10 ⁻²	2.62 × 10 ⁻²	8.02 × 10 ⁻²

b) Phenanthrene

	SDDBS	MADS12	DADS12
K _w (L/kg)	9.60 × 10 ¹	4.53 × 10 ¹	2.32 × 10 ¹
logK _w	3.98	3.66	4.37
WSR	5.03 × 10 ⁻⁴	2.52 × 10 ⁻⁴	1.12 × 10 ⁻²
K _m (L/mol)	3.40 × 10 ¹	2.65 × 10 ²	7.85 × 10 ²
logK _m	3.53	4.42	5.26
MSR	9.81 × 10 ⁻⁴	8.14 × 10 ⁻⁴	4.75 × 10 ⁻²

로는 계면활성제의 집합체들이 형성하는 palisade layer가 더 증가하거나 또는 계면활성제의 머리부분에 연결되어있는 벤젠고리와 방향족을 포함하는 오염물질들간의 상호인력으로 인하여, 제거 효율이 증가한다고 설명하였다. 그러나 이전부터 Domenico와 Schwartz¹⁴⁾가 보고한대로 흡수제 (sorbent)로 작용하는 계면활성제의 유기탄소 분율(f_{oc})과 partitioning coefficient(K_p)가 비례하며 계면활성제가 소수성 오염물질을 제거하는 것은 일반적으로 계면활성제의 유기탄소 함유량, 즉 K_p 값에 의존한다는 것을 증명하는 연구들도 많이 수행되었으며 계면활성제의 기본 이론으로 받아들여져 왔다. 유기탄소분율은 쌍두형 계면활성제인 MADS12는 50%, 기존 계면활성제인 SDDBS는 62%이다¹⁵⁾. 결과적으로 유기탄소분율 만으로 비교해볼 때 SDDBS가 MADS12보다 유기오염물질을

더 효과적으로 제거할 수 있는 흡수제의 역할을 하는 것으로 생각할 수 있다. 본 연구결과에서는 K_w 나 K_m 의 값이 대부분 MADS12보다 SDDBS가 크게 나타나는 것으로 보아서 나프탈렌과 휘난트렌을 제거하는 기작은 유기탄소에 의한 흡수에 의한 것으로 사료되며, Rouse et al.¹³⁾의 연구에서처럼 계면활성제의 구조의 차이에 의한 영향이나 벤젠고리간의 상호인력에 의한 용해도 증가 현상의 유무를 확인하기 위해서 다음과 같이 분석해 보았다.

다음 Fig. 7은 $\log K_{mc}(K_w)$ 는 x축이며, $\log K_{oc}$ 는 y축으로 한 그래프이다. 이는 마이셀에 오염물이 흡수되는 양과 계면활성제의 유기탄소에 오염물이 흡수되는 양의 상관관계를 알아보기 위한 것이다. 이 결과에서 볼 수 있듯이 나프탈렌과 휘난트렌이 모두 K_{mc} 와 K_{oc} 가 서로 비례하는 것으로 나타났다. 이것은 마이셀에 흡수되는 유기오염물질은

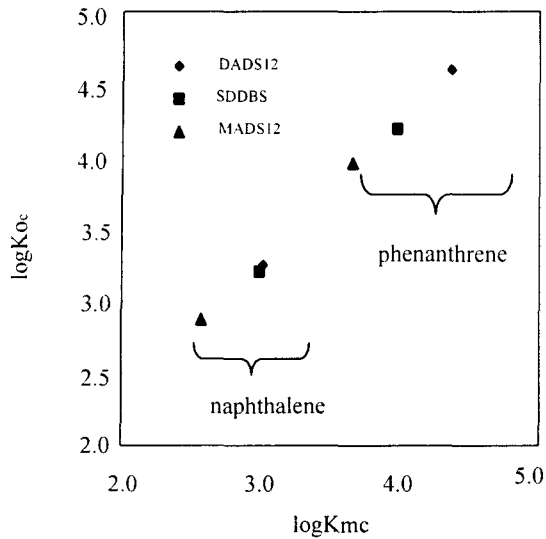


Fig. 7. Benzene ring interaction between the PAHs and the surfactants.

유기탄소의 양에 직접적으로 의존하며, 다른 계면활성제의 특성에 의한 영향은 없는 것으로 간주 될 수 있다. 따라서 본 연구에서 사용된 계면활성제가 나프탈렌과 휘난트렌을 제거하는 기작은 오염물질이 계면활성제로 구성된 마이셀의 유기탄소부분에 흡수되는 것으로 보인다.

4. 결 론

기존 계면활성제와는 다른 구조를 가지는 두 가지 계면활성제를 사용하였을 때 용해도 증가 비교는 다음과 같았다.

- 1) 기존 계면활성제는 한계마이셀농도 부근에서 용해도 증가 현상이 바로 일어나는 반면 쌍둥이형 계면활성제와 쌍두형 계면활성제는 한계 마이셀 농도와 용해도 증가 시작 부분이 일치하지 않았다. 이는 본 연구에서 사용된 두 계면활성제가 기존의 계면활성제보다 구조적인 특성에 의해 낮은 한계 마이셀농도를 보이지만 그 부근에서

생성된 계면활성제의 집합체가 용해도 증가를 일으키는데 효과적이지 못하다고 사료된다. 즉 낮은 한계 마이셀농도가 빠른 용해도 증가 현상을 야기하는 것은 아닌 것이다.

- 2) 계면활성제의 한 분자당의 오염물 처리효율을 비교하여본 결과 DADS12가 가장 높은 효율을 보이고 SDDBS와 MADS12는 비슷한 낮은 효율을 나타낸다. 이는 계면활성제의 꼬리가 두 개인 쌍둥이형 계면활성제가 소수성 꼬리가 1개인 나머지 계면활성제보다 훨씬 효율이 좋은 것으로 주로 오염물질을 처리하는 것이 alkyl chain에 의한 영향이 크다고 생각할 수 있으며 반면 머리구조에 따른 SDDBS와 MADS12의 용해도 증가차이가 크지 않은 것은 상대적으로 머리부분에 의한 오염물 제거가 거의 일어나지 않는다고 사료된다.

- 3) 분배계수를 비교해 볼 때 결과는 DADS12) SDDBS ≥ MADS12로서 계면활성제의 효율이 계면활성제의 유기탄소분율에 의존한다고 할 수 있다. 유기물 제거율이 유기 탄소에 의존하는 것은 결국 오염물이 계면활성제의 유기탄소부분에 흡수되는 것에 의해 오염물이 제거되는 것이라 생각될 수 있다.

- 4) 마이셀의 분배계수(K_{mc})와 유기탄소의 분배계수(K_{oc})가 서로 비례하는 것은 흡수외에 따로 오염물질을 제거하는 기작이 존재하지 않거나 그 영향이 적은 것으로 생각할 수 있으며 결국 오염물질과 계면활성제간의 벤젠고리간의 상호작용이나 마이셀의 구조적 영향이 나프탈렌이나 휘난트렌을 제거하는 데 거의 영향을 미치지 않는 것으로 사료된다.

5. 사 사

본 연구는 KISTEP의 여자대학교 연구기반확충 사업의 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Park, J.-W., and Jaffe, P.R. "Partitioning of Three Nonionic Compounds between Adsorbed Surfactants, Micelles and Water". *Environ. Sci. Technol.*, 27(12), pp2559-2565(1993).
2. Park, J.-W., and Jaffe, P.R. "Removal of Nonionic Organic Pollutants from Water By Sorption to Organo-Oxides" In *Emerging Technologies for Hazardous Waste Management IV: Tedder, D.W., Pohland F.G., Eds., ACS Symposium Series No. 554*. American Chemical Society : Washington DC, pp171-183(1994).
3. Diallo, M.S., Abriola, L.M., and Weber, W.J.. "Solubilization of Nonaqueous Phase Liquid Hydrocarbons in Micellar Solutions of Dodecyl Alcohol Ethoxylates". *Environ. Sci. Technol.*, 28, pp1829-1837(1994).
4. Sun, S., Inskeep, W.P., and Boyd, S.A.. "Sorption of Nonionic Organic Compounds in Soil-Water Systems Containing a Micelle-forming Surfactant". *Environ. Sci. Technol.*, 29, pp903-913(1995).
5. Park, J.-W., and Boyd, S.A.. "Sorption of Chlorobiphenyls in Sediment-Water Systems Containing Nonionic Surfactants", *J. of Environ. Qual.*, 28, pp945-952(1999).
6. Edwards, D.A., Luthy, R.G., and Liu, Z.. "Solubilization of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Micellar Surfactant Solutions", *Environ. Sci. Technol.* 25(1), pp127-133(1991).
7. Valsaraj, K.T., and Thibodeaux, L.J., "Relationships between Micelle-Water and Octanol-Water Partition Constants for Hydrophobic Organics of Environmental Interest", *Water Res.*, 23(2), pp183-189(1989).
8. Kile, D.E., and Chiou, C.T., "Water Solubility Enhancements of DDT and Trichlorobenzene by Some Surfactants Below and Above the Critical Micelle Concentration". *Environ. Sci. Technol.*, 23, pp832-838(1989).
9. Kile, D.E., Chiou, C.T., and Helburn, R.S., "Effect of Some Petroleum Sulfonate Surfactants on the Apparent Water Solubility of Organic Compounds". *Environ. Sci. Technol.*, 24, pp205-208(1990).
10. Rosen, M.J. "Gemini : A new generation of surfactants". *Chemtech.* 3, pp30-33(1993).
11. Menger, F.M., and Littau, C.A. "Gemini Surfactants : A New Class Self-Assembling Molecules". *J. Am. Chem. Soc.* 115(22), pp10083-10090(1993).
12. Karabomi, S., Esselink, K., Hilbers, P.A.J., Smit, B., Karthaus, J., van Os, N.M., and Zana, R. "Simulating the Self-Assembly of Gemini (Dimeric) Surfactants". *Science*, 266(1583), pp254-256(1994).
13. Rouse, J.D., Sabatini, D.A., and Harwell, J.H. "Minimizing Surfactant Losses Using Twin Head Anionic Surfactants in Subsurface Remediation." *Environ. Sci. Technol.*, 27, pp2072-2078(1993).
14. Domenico, P. A. and Schwartz, F. W. *Physical and Chemical Hydrogeology*, John Wiley & Sons(1990).
15. Neupane, D., and Park, J.-W. "Binding of Dialkylated Disulfonated Diphenyl Oxide Surfactant onto Alumina in the Aqueous Phase", *Chemosphere*, 38, pp1-12(1999).