

수분함량이 쌍둥이형 계면활성제 및 소수성 유기오염물질의 거동에 미치는 영향에 관한 연구

Effect of Water Content on the Transport of Gemini Surfactant and Hydrophobic Organic Compounds

박인선* · 박재우** · 조종수* · 황인성*

Park, In-Sun · Park, Jae-Woo · Cho, Jong-Soo · Hwang, In-Seong

Abstract

An immobilization zone can be constructed by modifying soils in the vadose zone with surfactants, which can be used to promote retardation of organic contaminants in the subsurface. Column experiments were conducted to investigate the behavior of surfactants and organic contaminants in unsaturated and saturated conditions with different water contents (25%, 50%, 75%, 100%). Transport and sorption of surfactant (dialkylated disulfonated diphenyl oxide) in the columns containing aluminum oxide was similar under the conditions at different water contents. However, transport of a model organic compound (naphthalene) was retarded as the water content decreased by enhanced partitioning of the compound into the surfactants that were sorbed on the aluminum oxide. This suggests that the immobilization method could well be applied to vadose zone as well as to saturated zone.

Keywords : immobilization zone, transport, surfactants, unsaturated conditions, water content

요 지

계면활성제를 이용하여 불포화 지역에 고정화 지역을 설정함으로써, 지하수로 유입되는 유기오염물질의 거동을 지연시킬 수 있다. 본 연구에서는 다양한 수분함량을 보유한 불포화 및 포화 조건에서 연속식 컬럼 실험을 수행함으로써, 수분함량에 따른 계면활성제와 유기오염물질의 거동에 대하여 연구하였다. 산화알루미늄(aluminum oxide)이 충전된 컬럼 실험에서 계면활성제(dialkylated disulfonated diphenyl oxide)의 거동 및 수착 특성은 수분함량이 달라져도 비슷한 결과를 나타내었다. 그러나 계면활성제(DADS)로 개질된 산화알루미늄이 충전된 컬럼 실험에서는 유기오염물질인 나프탈렌(naphthalene)이 수분함량이 감소됨에 따라 거동이 지연되는 현상을 나타내었으며, 또한 더 많은 양의 나프탈렌이 알루미늄 산화물에 흡착된 계면활성제로 흡수되었다. 따라서 본 연구를 통하여 유기오염물질의 고정화 방법이 불포화 지역에도 효과적으로 적용될 수 있음을 알 수 있었다.

주요어 : 고정화 지역, 거동, 계면활성제, 불포화 조건, 수분함량

* (주)이엔쓰리 환경기술연구소

** 정회원 · 한양대학교 토목공학과 교수, 교신 저자

1. 서론

토양과 지하수 오염은 그 범위와 정도를 정확하게 측정하기도 어렵고 오염지역이 지하라는 특성으로 인하여 처리 방법이 매우 제한적이다. 따라서 오염이 일어난 후 처리하는 것보다는 발생하기 이전에 미리 대비를 두는 것이 경제적 비용과 처리기간을 감소시키는 방법일 것이다. 소수성 유기오염물질(Hydrophobic Organic Compounds, HOCs)에 의한 오염은 토양 및 지하수에서 광범위하게 발견되고 있으며, 이러한 오염물질의 거동 특성 및 정화 방법에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 소수성 유기오염물질로 오염된 토양 및 지하수 복원 방법은 다양하나 근래에는 용매의 표면장력을 감소시키는 물질인 계면활성제를 이용하여 토양오염을 처리하는 방법이 적용되고 있으며, 계면활성제를 이용하는 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫번째, 오염물질의 이동성(mobility)을 증가시켜 토양하부의 오염물질을 지상으로 끌어올려 처리하는 이동화(mobilization) 방법, 둘째는 오염물질의 이동성(mobility)를 감소시켜 토양의 고정상(immobile phase)에 고정시킴으로써 하부 토양이나 지하수의 유출을 막는 고정화(immobilization) 방법이 있다(Ko et al., 1998). 그러나 첫번째 방법인 이동화 방법은 토양하부의 오염물질을 지상으로 이동시켜 다시 재처리가 필요하다는 점과 오염물질의 이동성을 증가시켜 하부의 토양이나 지하수를 오염시킬 수 있는 단점이 있으므로, 오염물질을 토양에 고정하여 비오염 토양이나 지하수를 보호하는 고정화 방법이 경우에 따라서는 더욱 효과적일 수 있다.

고정화 지역은 오염된 토양이나 비오염 토양의 하부로 계면활성제 용액을 유입하여 설정한 후 상부로부터 유입되는 오염물질을 이 지역에 고정시켜 하부 토양이나 지하수를 보호하는 방법이다. 계면활성제는 표면장력을 약화시키는 물질로서 친수성(hydrophilic)을 띠는 머리부분과 소수성(hydrophobic) 꼬리부분으로 구성되어 있으며 친수성 머리부분은 정전기적 인력으로 인하여 토양입자와 결합하고 소수성 꼬리부분은 소수성 유기오염물질을 흡수한다.

토양에 흡착된 계면활성제에 의한 유기오염물질의 흡수성(partitioning) 증가는 기존의 여러 논문에서 보고된 바 있다. Holsen(1991)의 연구를 살펴보면 ferrihydrite에 흡착된 음이온성 계면활성제 SDS(sodium dodecyl sulfate)로의 몇 가지 HOCs의 흡수는 HOCs의 용해도가

낮을수록 증가한다는 결과를 볼 수 있으며, 또한 흡착된 SDS의 양이 증가할수록 HOCs의 흡수가 증가하는 것으로 보아 계면활성제가 HOCs의 흡수에 큰 역할을 한다는 것을 알 수 있었다(Holsen et al., 1991). Sun and Jaffe (1996)는 쌍두형(dianionic) 계면활성제 monomer, micelle 그리고 알루미늄에 흡착된 계면활성제로의 phenanthrene의 흡수에 대하여 연구하였으며 흡착된 계면활성제로의 흡수가 5~7배 효과적이라는 것을 알 수 있었다(Sun et al., 1996). 이와 비슷하게 Nayyar(1994)와 Sun(1995)은 흡착된 계면활성제로의 유기물질의 흡수가 액상의 계면활성제보다 더욱 효과적이라는 것을 말하고 있다.

위에서와 같이 계면활성제를 이용한 유기오염물질 고정화에 대한 연구들이 진행되어 왔으나 대부분 고체와 액체 2가지 상만 존재하는 포화 상태에서의 실험 결과들이었다. 계면활성제로 처리된 토양으로 유기오염물질이 흡수되는 현상은 계면활성제와 유기오염물질의 물리, 화학적 특성이 매우 중요한 역할을 하며(Nayyar et al., 1994), 각 토양의 수리전도도(hydraulic conductivity)나 분산계수(dispersion coefficient)와 같은 시스템의 특성 또한 유기오염물질의 거동에 큰 역할을 한다. 따라서 2가지 상만 존재하는 포화 상태에서의 실험 결과로는 실제 토양에서 고정화 방안이 적용되었을 때 일어날 수 있는 유기오염물질의 흡, 탈착 및 거동 특성을 설명하는데 한계가 있다. 따라서 포화 상태 뿐만 아니라 기체가 공존하는 시스템에서의 연구가 고정화 방안을 적용하는데 있어서 바탕이 되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 포화 상태 및 다양한 수분함량(25%~75%)에서의 컬럼 실험을 통하여 계면활성제 및 유기오염물질의 수착 및 거동 특성을 파악함으로써, 고정화 지역에서 수분함량이 계면활성제 및 소수성 유기오염물질의 거동에 미치는 영향과 실제 현장에서의 고정화 방안의 적용가능성에 대하여 연구해 보았다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 실험 재료

본 연구에서는 쌍둥이형 계면활성제 DADS(dialkylated disulfonated diphenyl oxide)를 사용하였으며, Dow Chemical(USA)로부터 실험용으로 제공되었다. 본 연구에

서 사용된 DADS는 수용액상에서 head 그룹의 Na⁺이 이온화되면서 head 그룹이 음전하를 띠는 음이온성 계면활성제이며, 계면활성제 monomer 2개가 결합된 형태로 일반 계면활성제 보다 유기오염물질의 흡수에 효과적인 것으로 알려져 있다(조윤경, 1998).

Aldrich Chemical(USA)에서 구입한 표준 등급의 산화알루미늄은 토양 입자를 대신할 계면활성제의 흡착제로 사용되었다. 이 산화알루미늄은 PZC(point of zero charge) 값이 8.3이므로 중성의 수용액 속에서의 표면이 양전하를 띠게 되고 따라서 수용액 상태에서 음이온성인 계면활성제가 흡착된다.

소수성 유기오염물질로는 Aldrich Chemical(USA)에서 구입한 나프탈렌을 사용하였으며 나프탈렌은 25°C에서 증류수에 31~34 mg/L 농도까지 용해된다. 수용액 중에서 계면활성제로 처리된 산화알루미늄으로 제거되는 양상을 살펴보기 위하여 사용되었다.

2.2 실험 방법

2.2.1 컬럼 실험을 통한 불포화 상태에서의 계면활성제 거동에 관한 연구

본 연구에서 사용한 컬럼은 높이 13.7cm, 내부 직경 0.5cm로 Kontes 사에서 구입하였다. 컬럼에 산화알루미늄을 증류수를 이용하여 기포가 들어가지 않도록 습식 충전(wet packing) 후 충전 전 후의 질량을 측정하여 공극의 부피(pore volume)를 계산하였다. 포화 상태와 불포화 상태에서의 계면활성제 거동을 알아보기 위해 공극수를 일부 배출시켜 포화 상태(100%)의 75%, 50%, 25%의 상태로 만든 후 실험하였다.

계면활성제 DADS 5g/L의 용액을 만들어 peristaltic pump (Masterflex 7518-00)를 이용하여 3ml/min, 6ml/min의 유속(flow rate)으로 컬럼의 상부로 유입하고 유입수의 농도와 배출수의 농도가 같아질 때까지 산화알루미늄의 표면에 흡착시켰다. 다시 증류수를 주입하여 공극속에 존재하는 계면활성제를 제거하고 배출수의 농도는 UV spectrophotometer (Jasco V-550)를 이용하여 측정하였다.

2.2.2 컬럼 실험을 통한 불포화 상태에서의 소수성 유기오염물질 거동에 관한 연구

위의 계면활성제 실험에서와 같이 산화알루미늄을 컬럼에 습식 충전 후 5g/L DADS 용액을 컬럼 상부로 주입하여 개질시켰다.

포화 상태와 불포화 상태에서의 나프탈렌의 거동을 알아보기 위해 개질된 산화알루미늄이 충전되어 있는 컬럼 안의 공극수를 일부 배출하여 포화 상태(100%)의 75%, 50%, 25%의 상태로 만든다. 여기에 나프탈렌 용액을 20mg/L로 조제하여 약 0.8ml/min의 유속으로 컬럼의 상부로 유입시켜 산화알루미늄 표면에 흡착된 계면활성제로 흡수시키고 배출수는 Liquid Chromatography (Waters 515 HPLC, Micro bondapack-18, 3.9×300mm HPLC column)를 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 컬럼 실험을 통한 불포화 상태에서의 DADS 거동에 관한 연구

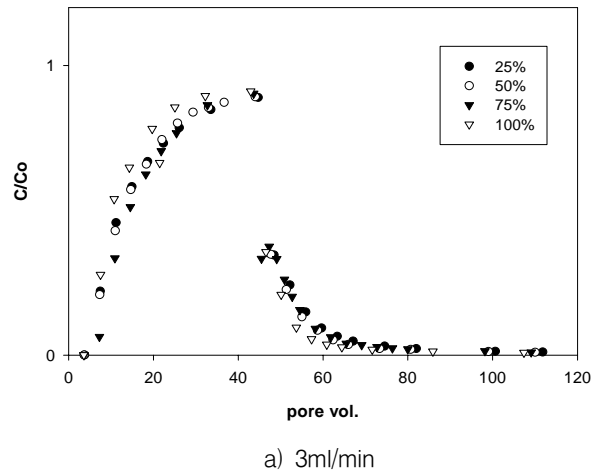
실제 현장에서의 계면활성제의 거동을 알아보기 위해 수분함량을 달리하여 포화 상태 및 불포화 상태에서 연속식 컬럼 실험을 수행하였다. 본 실험에서는 유속에 따른 계면활성제의 이동 경향을 비교하기 위해 3ml/min과 6ml/min의 유속으로 실험하였으며 각 컬럼 실험의 특성을 Table 1에 나타내었다. 각 실험에서의 컬럼 특성을 살펴보면 공극률(porosity)은 3ml/min, 6ml/min의 유속에서 평균 0.78을 나타내고 있고, 공극속에서 흐르는 실제 용액의 속도를 알아보기 위해 공극 유속(pore velocity)를 계산한 결과 3ml/min의 경우는 평균 4.95cm/min, 6ml/min의 경우는 10.50cm/min을 나타내었다.

Table 1. Physical characteristics of the column experiments in this study

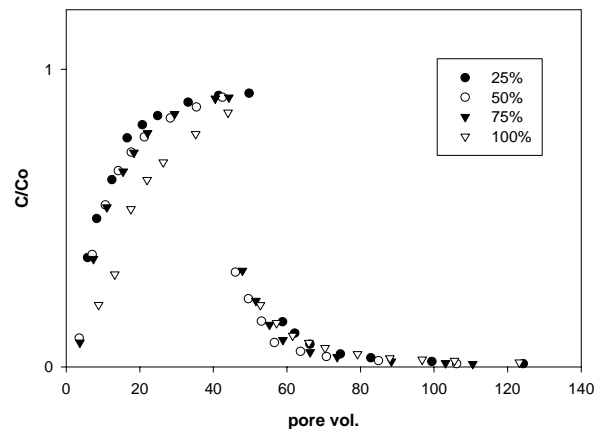
Experiment No.	Flow Rate (ml/min)	Condition (% saturation)	Water Content	Porosity	Pore Velocity (cm/min)	
Surfactant DADS	I	6	25	0.20	0.79	11.35
			50	0.40	0.79	9.71
			75	0.58	0.77	10.90
			100	0.76	0.76	10.03
	II	3	25	0.19	0.75	5.11
			50	0.40	0.80	4.79
			75	0.58	0.77	4.98
HOC Naphthalene	III	0.8	25	0.22	0.89	1.47
			50	0.38	0.76	1.33
			75	0.63	0.84	1.21
			100	0.80	0.80	1.28

포화 및 불포화 상태에서의 각 계면활성제의 파괴곡선은 Figure 1에 나타내었다. 각 그래프에서 농도가 높아지는 부분은 계면활성제 용액을 주입하여 흡착시킨 부분이고 다시 낮아지는 부분은 증류수를 주입하여 산화알루미늄 표면에 흡착된 계면활성제를 탈착시킨 부분이다. 본 연구에서 사용한 계면활성제 DADS는 음이온성 계면활성제로서 정전기적 인력으로 인하여 수환경에서 양전하를 띠는 산화알루미늄 표면에 흡착된다. 파괴곡선을 살펴보면 파괴의 비대칭적인 형태로 보아 평형(equilibrium) 상태보다는 비평형(nonequilibrium) 상태에 가까운 곡선을 나타내는 것을 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서 적용된 시스템에서의 계면활성제는 주입 용액의 빠른 유속으로 인하여 평형에 이르지 못하고 이동하는 것을 알 수 있었다. 일반적으로 흡착과정은 Figure 2의 모식도와 같이 크게 세가지 부분으로 구성되어 있다(Knox et al., 1993). 첫째, 오염물질은 bulk liquid로부터 흡착제 표면으로 이동하고(film diffusion), 둘째, 흡착제의 공극(intraparticle pore)을 통해 diffusion되어 실제 흡착 site로 이동한 후, 셋째, 흡착제 표면에 흡착이 된다. 위의 3가지 과정 중 film transport나 intraparticle diffusion 과정에서 제한이 일어날 경우를 physical nonequilibrium이라 하고 반면 실제 흡착과정에서 제한이 되는 경우는 chemical nonequilibrium이라 할 수 있다. 본 계면활성제 실험에서와 같이 유속이 빠른 경우는 흡착이 일어날 만한 충분한 접촉시간(residence time)을 제공하지 못하며, 오염물질의 흡착 표면까지의 이동

이 제한되는 physical nonequilibrium이라 할 수 있다.



a) 3ml/min



b) 6ml/min

Figure 1. Breakthrough curve of DADS at different flow rates.

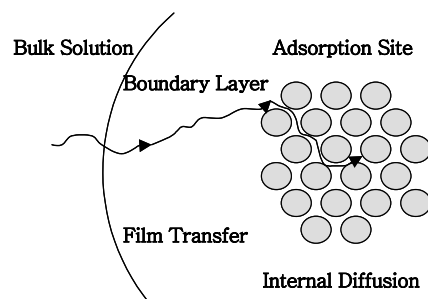


Figure 2. Conceptualization of dual resistance (Sabatini and Austin, 1990)

수분함량에 따른 계면활성제의 거동을 살펴보면 25%부터 100%까지 수분함량이 달라졌을 때에도 각각의 파괴곡선이 비슷하게 나타나는 것을 볼 수 있으며, 따라서 컬럼안의 수분함량이 계면활성제의 거동에 그리 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었다.

이러한 현상을 더 자세히 살펴보기 위하여 각 계면활성제의 단위 산화알루미늄당 최종 흡착량을 비교하여 Table 2과 Figure 3에 나타내었으며, 최종 흡착량은 계면활성제 용액 주입시의 초기 흡착량에서 증류수 주입시의 탈착량을 뺀 값으로 최종적으로 산화알루미늄 표면에 남아있는 계면활성제의 양을 나타낸다. 결과를 살펴보면 실험 I, II 모두 최종 흡착량이 수분함량에 따라서 그리 변화되지 않음을 볼 수 있다. 이러한 결과가 나타나는 이유는 본 계면활성제 실험(실험 I, II)의 경우 공극 유속(pore velocity)이 약 5cm/min 이상으로 rate limiting이 일어날 만큼 빠르기 때문에 판단된다. 컬럼안에서 공극을 흐르는 용액의 속도가 빨라지면 빠른 속도의 영향으로 preferential flow path가 생기고 따라서 용액이 접촉할 수 있는 흡착제의 표면이 flow path 부분으로 제한된다. 이러한 flow path는 속도가 빠른 경우 수분함량의 영향을 받지 않으며 따라서 수분함량에 따라 계면활성제의 거동이 비슷하게 나타난 것으로 사료된다.

유속에 따른 각 계면활성제의 흡착량을 살펴보면, 실험 I(DADS 3ml/min)의 경우보다 실험 II(DADS 6ml/min)의 경우에 흡착량이 작아지는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과가 나타나는 이유는 유속이 빨라질수록 film diffusion이나 intraparticle diffusion에 의한 rate limiting이 증가되어 실제 흡착량이 줄어드는 것으로 사료된다. 그러나 유속이 2배 증가했을 때 감소된 흡착량은 약 10% 정도로 유속이 계면활성제의 흡·탈착에 그리 큰 영향을 미치지 않는 것으로 생각된다.

Table 2. Adsorbed DADS on aluminum oxide

Experiment No.		Flow Rate (ml/min)	25%	50%	75%	100%
Surfactant DADS (mg/g oxide)	I	6	42.83	38.60	40.50	49.94
	II	3	45.65	46.20	49.04	46.87

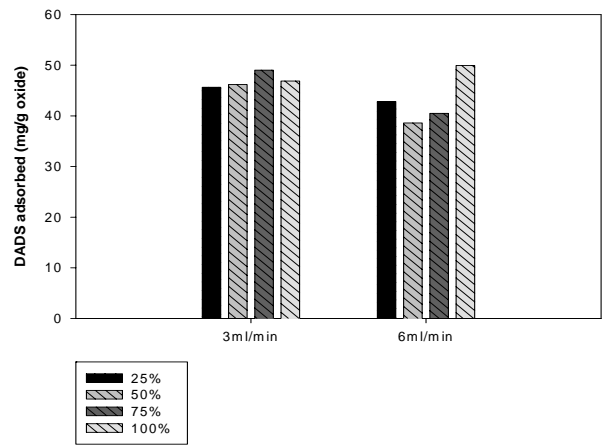


Figure 3. Adsorbed DADS at different flow rates

3.2 연속 실험을 통한 불포화 상태에서 휘 naphthalene 의 거동에 관한 연구

계면활성제로 개질된 고정화 지역에서의 나프탈렌의 거동을 알아보기 위해 컬럼 실험을 수행하였다. 본 실험에서는 유기질 함량을 높이기 위하여 계면활성제 DADS를 사용하였고, 실제 현장 토양 하부에서의 오염물질의 이동 속도를 고려하여 계면활성제 실험에서보다 낮은 유속인 0.8ml/min을 적용하였으며, 공극율은 평균 0.82, 공극 유속은 평균 1.33cm/min를 나타내었다.

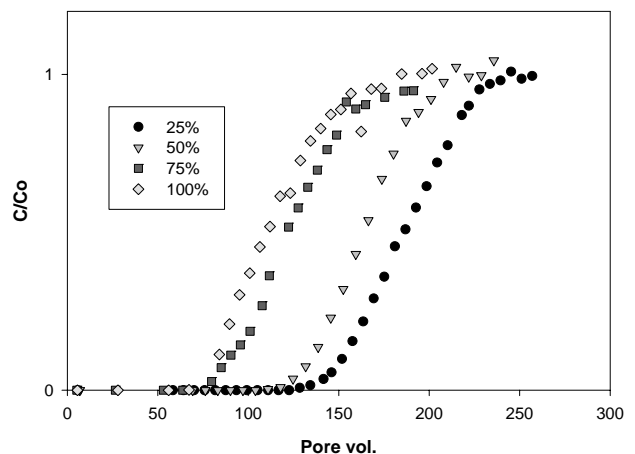


Figure 4. Breakthrough curve of naphthalene at different water contents

수분함량에 따른 나프탈렌의 흡수 경향 및 거동 특성을 Figure 4에 나타내었다. 수분함량에 따른 파괴곡선을 살펴보면, 계면활성제 실험과는 달리 수분함량에 따라 나프탈렌의 거동이 달라지는 것을 볼 수 있다. 즉 수분함량이 100%인 경우 가장 먼저 파괴곡선을 보이고 75%, 50%, 25%로 작아질수록 나프탈렌의 거동은 지연되었다. 각 수분함량에서의 지연계수(retardation factor)를 살펴보기 위하여 CXTFIT 2.1 모델(Toride et al., 1999)을 이용하였다. CXTFIT 2.1 모델은 일반적으로 실험실이나 실제 현장에서 측정한 자료를 이용하여 one-dimensional flow transport에 필요한 인자를 예측하는데 이용되는 모델이며, 또한 특정 인자를 이용하여 시간과 장소에 따른 물질 분포를 예측하는데 사용되기도 한다. 각 수분함량에서의 지연계수를 살펴보면 100%의 경우는 112.3, 75%의 경우는 122.3, 50%의 경우는 166.4, 마지막으로 25%의 경우는 186.9를 나타내고 있으며, 이를 수분함량에 따라 그래프를 그려보면 Figure 5와 같다. 그래프에서도 볼 수 있듯이 지연계수가 수분함량의 증가에 따라 직선적으로 감소하고 있음을 알 수 있다.

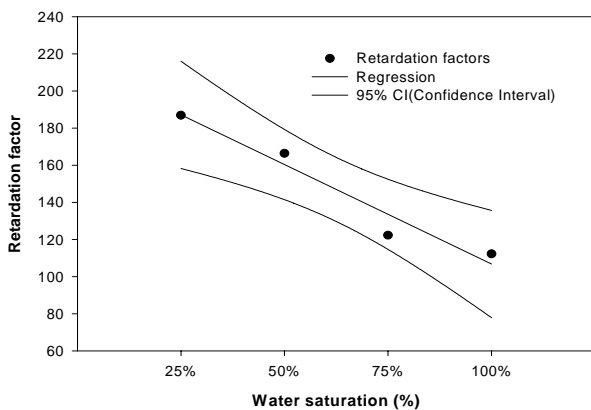


Figure 5. Decrease in retardation factor with increasing water content

수분함량의 감소에 따라 지연계수가 증가되는 원인은 다음 두 가지로 살펴볼 수 있다. 첫 번째는 나프탈렌이 계면활성제로 개질된 산화알루미늄의 표면에 흡수될 때의 분배계수(partition coefficient) K 의 증가이며, 두 번째는 불포화 상태에서의 기체-액체간 계면 흡착(gas-water interfacial accumulation)을 들 수 있다.

일반적으로 오염물질의 지연정도를 나타내는 지연계수 R 은 분배계수와 수분함량에 따라서 달라질 수 있다. 분배계수는 전형적인 흡착등온선(sorption isotherm)이나 포화 상태의 컬럼 실험을 통해서 구할 수 있으나 이러한 방법을 통해서 구한 분배계수는 부분적으로 포화되어 있는 시스템에서의 분배계수와는 다른 값을 가진다. 이렇게 고체 표면을 덮고 있는 수분함량에 따라 분배계수 값이 달라지는 이유는 아직 명확하게 밝혀지지 않았으나 여러 논문에서 위와 같은 현상을 제시하고 있다. 대표적으로 Peterson(1988)은 humic acid로 개질된 산화알루미늄으로의 trichloroethylene(TCE)의 수착을 연구한 결과 완전히 포화된 경우보다는 수분이 표면에 monolayer의 1.6, 2.4 배였을 때 수착량이 더 많은 것을 보여주고 있으며 따라서 공극이 완전히 물로 포화되었을 경우보다는 고체 표면만 덮고 있는 경우에 sorptive binding strength가 더 커진다고 말하고 있다(Peterson et al., 1998). 따라서 수분함량 감소에 따라 오염물질의 거동이 지연되는 이유는 불포화 상태로 갈수록 분배계수 값이 커지기 때문으로 사료된다.

불포화 상태는 포화 상태와는 달리 기체, 액체, 고체의 3가지 상이 존재하며, 따라서 포화 상태인 경우보다 물질의 거동이 복잡하게 나타난다. 휘발성 유기오염물질(volatile organic compounds; VOCs)의 불포화 상태에서의 거동에 대한 연구결과들을 살펴보면, 휘발성 유기오염물질의 거동이 지연되는 이유로 액체상으로의 용해, 고체상으로의 흡착 뿐만 아니라 기체-액체간 계면 흡착이 보고되고 있다(Brusseau et al., 1997, Kim et al., 2001). 기체-액체간 계면 흡착은 기체와 기체-액체간 계면사이의 흡착계수와 기체-액체 계면의 표면적에 따라서 달라질 수 있으며, 포화 상태에서 불포화 상태로 수분함량이 감소되는 경우 기체-액체간 계면의 표면적 증가로 휘발성 유기오염물질의 지연계수가 증가할 수 있다고 말하고 있다. 본 연구에서 사용한 유기오염물질인 나프탈렌은 준휘발성 물질(semi-volatile organic compounds)로서 불포화 상태의 경우 기체상 나프탈렌의 거동 또한 전체적인 물질이동에 있어서 중요한 부분이라 생각된다. 따라서 수분함량의 감소에 따른 표면적 증가로 인하여 기체-액체간 계면 흡착이 증가됨으로써, 불포화 상태가 심화될수록 지연계수가 증가한 것으로 사료된다.

수분함량이 감소됨에 따라 나프탈렌의 이동이 지연되는 현상을 보다 자세히 살펴보기 위해 계면활성제에 흡수된 나프탈렌의 양을 Table 3과 Figure 6에 나타내었다. 이

그래프에서 나타나는 것처럼 수분함량이 감소할수록 계면활성제에 흡수되는 나프탈렌의 질량이 증가하는 것을 볼 수 있으며, 따라서 오염물질의 거동을 나타낼 때 포화 상태의 실험에서 도출한 인자들을 바탕으로 불포화 상태에서의 거동을 설명한다는 것은 비합리적이거나 사료된다. 또한 불포화 상태에서의 나프탈렌의 지연계수가 증가되는 현상으로 보아 계면활성제를 이용한 고정화 방안은 불포화 상태의 토양에 적용할 경우에도 효과적으로 유기오염물질을 제어할 수 있으리라 판단된다.

Table 3. Sorbed naphthalene on modified aluminum oxide

Experiment No.		25%	50%	75%	100%
HOC Naphthalene (mg/g oxide)	III	2.792	2.538	1.772	1.538

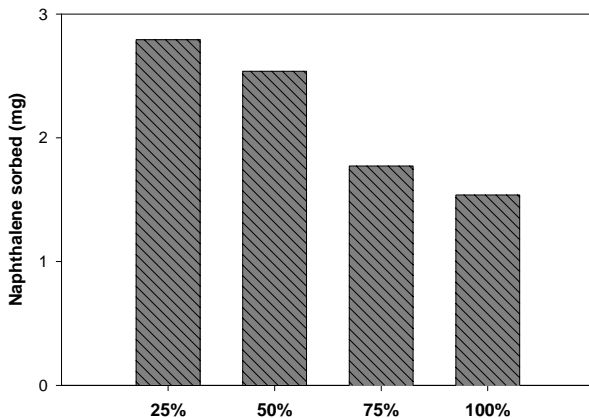


Figure 6. Decrease of sorbed naphthalene with increasing water content

4. 결론

본 연구에서는 오염물질의 이동성을 감소시켜 토양에 고정시키는 고정화 기술의 적용 시 토양 속의 수분함량이 미칠 수 있는 영향에 대하여 알아보았다.

1. 불포화 지역에서의 계면활성제의 흡착 특성에 대하여 연구한 결과 계면활성제의 주입속도가 빠르면 불포화 상태나 포화 상태나 수분 함량의 영향을 받지 않고 비슷한 경향

을 보이는 것을 볼 수 있으며 따라서 현장에서의 여러 가지 환경적 요인이 고려된다면 포화 상태의 실험을 통하여 얻은 결과를 실제 현장에 적용하는 것도 큰 무리가 없음을 알 수 있었다.

2. 유속에 따른 계면활성제의 거동을 살펴본 결과 유속이 높아질수록 계면활성제의 거동은 빨라지고 흡착량 또한 줄어드는 것을 볼 수 있었으나 유속의 증가량에 비해 흡착량의 감소가 작은 것으로 보아 실제 큰 영향을 미치지 않을 것이라 생각한다. 그러나 계면활성제를 이용하여 고정화 지역을 설정할 때 주입 속도, 계면활성제 농도 등과 같은 여러 가지 요인들을 고려하여 가장 효과적인 결과를 얻을 수 있는 방안을 선택해야 할 것이다.

3. 대표적인 유기오염물질로 나프탈렌의 불포화 지역에서의 거동을 살펴본 결과 계면활성제의 경우와는 달리 수분함량이 감소함에 따라 나프탈렌의 거동이 지연되는 것을 볼 수 있었으며 따라서 불포화 상태에서의 나프탈렌의 거동을 설명할 때 포화 상태에서의 실험 결과를 적용하는 것은 무리가 있으리라 생각된다. 불포화 상태에서 나프탈렌의 거동이 지연되는 것은 첫째, 수분함량에 따라 분배계수가 증가하는 것을 들 수 있으며, 둘째, 기체-액체간 계면 흡착량의 증가가 그 주된 요인으로 보인다. 또한 불포화 상태 즉 수분함량이 감소할수록 계면활성제로의 나프탈렌 흡수량은 증가하는 경향을 볼 수 있었으며 실제 불포화 지역에 적용되는 고정화 지역에서 나프탈렌의 흡수는 포화 상태의 실험 결과 보다 효과적일 수 있다고 예측된다.

감사의 글

본 연구는 2002년도 한양대학교 교내 연구비 지원으로 수행된 것입니다.

(접수일자 : 2003년 2월 8일)

참 고 문 헌

1. 조윤경(1998), 계면활성제를 이용한 토양에서의 유기오염물질의 고정화 방안에 관한 연구, 석사, 이화여자대학교 대학원
2. Holsen, T. M., Taylor, E. R., Seo, Y.-C. and Anderson, P. R.(1991), Removal of sparingly soluble organic chemicals from aqueous solutions with surfactant-coated ferrihydrite, *Environ. Sci. Technol.*, 25, pp.1585-1589
3. Knox, R. C., Sabatini, D. A., and Canter, L. W.(1993), *Subsurface transport and fate processes*, Lewis publishers, pp.8-124
4. Ko S-O, Schlautman M. A. and Carraway E. R.(1998), Partitioning of hydrophobic organic compounds to sorbed surfactants , *Environ. Sci. Technol*, 32(18), pp.2769-2775
5. Nayyar, S. P., Sabatini, D. A. and Hawell, J. H.(1994), Surfactant adsorption and modified adsorption of nonpolar, polar and ionizable organic contaminants , *Environ. Sci. Technol.*, 28(14), pp.1874-1881
6. Peterson, M. S., Lion, L. W., and Shoemaker, C. A.(1988), Influence of vapor phase sorption and diffusion on the fate of trichloroethylene in an Unsaturated Aquifer System , *Environ. Sci. Technol.* 22(4), pp.571-578
7. Sabatini, D. A., and Austin, T. A.(1990), Adsorption, desorption and transport of pesticides in groundwater: A Critical Review , *J. Irrig. Drainage Div., ASCE*, 116(1), pp.3-15
8. Sun, S., Jaffe, P. R.(1996), Sorption of phenanthrene from water onto alumina coated with dianionic surfactants , *Environ. Sci. Technol.* 30(10), pp.2906-2913
9. Sun, S., Inskip, W. P. and Boyd, S. A.(1995), Sorption of nonionic organic compounds in soil-water system containing a micelle-forming surfactant, *Environ. Sci. Technol.*, 29(4), pp.903-913
10. Toride, N., Leij, F. J., and van Genuchten, M. Th.(1999), The CXTFIT Code for Estimating Transport Parameters from Laboratory or Field Tracer Experiments, U. S. Salinity Laboratory Agricultural Research Service, U. S. Department of Agriculture Riverside, California, USA.
11. Mark L. Brusseau, Jarmila Popovicova and Jeff A. K. Silva (1997), Characterizing gas-water interfacial and bulk-water partitioning for gas-phase transport of organic contaminants in unsaturated porous media, *Environ. Sci. Technol.* 31(6), pp.1645-1649
12. Heonki Kim, Michael D. Annable and P. Suresh C. Rao (2001), Gaseous transport of volatile organic chemicals in unsaturated porous media : Effect of water-partitioning and air-water interfacial adsorption, *Environ. Sci. Technol.* 35(22), pp.4457-4462