

계면활성제 용액을 이용한 소수성 유기화합물로 오염된 토양의 정화 Remediation for Hydrophobic Organic Compound Contaminated Soils by Surfactant Solution

윤현석¹⁾, Hyunsuk Yoon, 박민균²⁾, Mingyun Park, 권오정³⁾, Ohjung Kwon, 박준범⁴⁾, Junboun Park

^{1,2,3)} 서울대학교 토목공학과 대학원, Graduate Student, Dept. of Civil Eng. Seoul Nat'l Univ.

⁴⁾ 서울대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Eng. Seoul Nat'l Univ.

SYNOPSIS : Hazardous substances produced from industrial sectors have caused serious contamination of soils and groundwater. The hydrophobic organic compounds in the subsurface are hard to be decomposed, and as they sorb on the soil or last as a NAPL they might contaminate the groundwater for a long time. Although we recognize the danger of contaminated subsurface, very little was known about the effective remediation technique. This paper focuses on the remediation of the *p*-Cresol which contaminated subsurface by applying the surfactant-enhanced desorption technique. Sorption characteristics of soils and organic compounds are studied, and the applications of surfactant solution are studied for effective remediation. The results from this study could be used as some data for surfactant-enhanced remediation. The flexible-wall permeameter tests are performed in which in-situ remediation is simulated. Results show that triton X-100 at 2% solution desorbs *p*-Cresol 1.7 times as much as water desorption in the flexible-wall permeameter tests.

Key words : *p*-Cresol, Surfactant, Soil-washing, Sorption, Desorption,

1. 서론

유기화합물의 사용이 급증함에 따라 이에 의한 지반오염이 환경문제로 대두되고 있다. 지반 오염의 원인으로는 쓰레기 매립장의 침출수, 노후된 유류 저장시설 및 지중 매설관의 기름 유출, 처리되지 않은 공장의 폐수 유입, 농약의 과다사용, 화공약품과 유류 운반 중 사고에 의한 누출등 다양한 원인에 의하며, 그에 대한 폐해는 여러 문헌에서 찾아볼 수 있다(U.S. EPA 1995). 소수성 오염물질로 오염된 토양과 지하수를 처리함에 있어 전통적으로 사용해 온 대표적 방법인 양수처리법(pump and treat : 오염된 지하수를 지속적으로 추출하여 처리하는 방법)은 시간적, 경제적 한계점을 나타내는데 이는 소수성 오염물질이 물에 대한 용해도가 작고 그 유동성이 낮아 오염물질을 지하수로 녹여 내어 분리하는 양수처리 기술이 시간이 많이 걸리고, 비용이 많이 들기 때문이다(Mackay et al., 1989; Hunt et al., 1988). 결국 양수처리법에 의한 정화는 간극 사이에 존재하는 오염물만을 주로 제거하고 물리·화학적 작용(physico-chemical process)으로 흡입자에 흡착된 오염물질은 제거하지 못하여 그대로 지반 내에 존재하게 함으로 장기적인 환경문제를 일으키게 된다. 이를 leveling effect(잔류효과)라 한다. 이러한 기존의 양수처리법의 한계점을 극복하고 효율을 개선하기 위하여 제기된 것이 계면활성제의 활용이다. 계면활성제는 수용액상에서 소수성 물질들의 용해도를 증가시키는 것으로 알려져 있기 때문에 계면활성제 용액으로 오염지역을 순환시킬 경우 오염물질의 유동성을 증가시키고 결과적으로 pumping에 의해 제거되

는 오염물질의 양을 증가시킬 수 있다. 이는 또한 NAPL 방울들(ganglia)의 표면장력을 낮추어 유동성을 증가시키는 역할도 할 수 있다.

2. 계면활성제(Surfactant)에 의한 오염물질 제거 메카니즘

물에 잘 녹지 않는 소수성 유기물질의 용해도를 증가시키고, 또한 그 유동성을 증가시킬 수 있는 역할로서 계면활성제를 이용한 지반 오염 물질의 제거 주요 메커니즘을 살펴보면 다음과 같다.

- 계면활성제의 마이셀(micelle) 형성과 오염물질의 용해도 증가의 메커니즘
- 지반오염물질에 대한 각 계면활성제의 세척력
- 계면활성제 용액을 이용한 오염물의 토양으로부터의 탈착

계면활성제의 이름에서 알 수 있듯이 서로 다른 phase간 경계면을 활성화시킬 수 있는 이유는 바로 계면활성제의 한 분자 내에 소수성과 친수성을 띠는 두 부분이 있는 양수성(amphipatic) 분자구조 때문이다(그림 1).

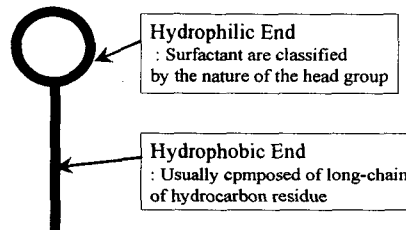


그림 1. 계면활성제 분자 구조

계면활성제의 소수성 부분($[-CH_2-]_n$)과 물분자들의 접촉은 열역학적으로 불리하게 되어 두 부분이 서로 분리되려는 성향을 나타낸다. 하지만 그와는 반대로 계면활성제 내의 친수성 부분은 물과 접촉하려는 성향이 있어 계면활성제 분자가 물로부터 완전히 분리되는 것을 방지한다. 따라서 이 서로 상반되는 두 가지 조건을 동시에 충족하기 위해서 친수성 부분은 물과 접촉하고 소수성 부분은 물과 분리되는 형태로 존재하게 되는데 그 한 방법이 계면활성제 분자들이 물과 다른 상의 계면(공기-물, 물-기름, 물-고체)에 정렬하는 것이다. 이런 현상을 계면활성제의 흡착(adsorption)이라 하며 이로 인하여 물 표면에는 소수성부분의 탄화수소가 늘어서게 되고 물 표면은 그 자체의 표면장력이 아닌 탄화수소의 표면장력에 접근한다. 계면활성제의 농도를 증가시키면 표면으로 흡착되는 양도 커져서, 표면장력을 점점 더 탄화수소 값에 가까워져, 결과적으로 표면장력은 낮아진다. 계면활성제의 소수성 부분과 물과의 접촉을 최소화하는 또 하나의 방법은 계면활성제 분자들이 서로 마이셀(micelle)이라 불리는 집합체를 이루는 것이다(그림 2). 이때 마이셀에서 소수성 부분은 이 집합체의 안쪽으로 정렬되어 물과 분리되고, 친수성 부분은 바깥쪽으로 정렬되어 물분자들과 접하는 형태를 이루는 것이다. 일반적으로 농도가 낮을 때는 계면활성제 분자들의 계면으로의 정렬 형태가 열역학적으로 더 유리하며, 농도가 점차 높아져 일단 계면이 계면활성제 분자들로 포화되면 그 이후로는 마이셀의 형성이 시스템의 자유에너지를 줄이는 주요 메커니즘이 된다. 이때 마이셀이 형성되기 시작되는 수용액상에서의 계면활성제의 농도를 CMC(critical micelle concentration)라고 한다. 마이셀의 크기는 직경이 약 3~4nm 정도이다. 유기오염물의 제거에서 마이셀 형성이 중요한 이유는 마이셀이 불용성 또는 난용성 물질들을 녹일 수 있기 때문이다. 계면활성제 분자의 소수성 부분처럼, 소수성 유기물질들은 수소 결합으로 연결되어 있는 물분자들과 친화되지 못하여 미량을 제외하고는 물에 녹지 못하고 분리된 형태(결정체 또는 NAPL)로 존재하게 된다. 하지만 물 속에 마이셀이 존재

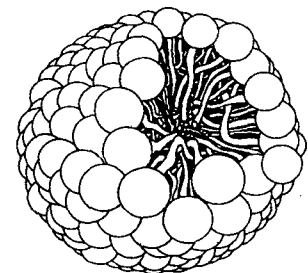


그림 2. Micelle

할 때에는 소수성 물질들도 전체적인 자유에너지를 증가시키지 않고 물에 용해될 수 있다. 즉, 용액으로부터 분리되는 대신 소수성 물질들은 마치 탄화수소 용매와 같은 상태인 마이셀의 중심부분으로 녹아 들어갈 수 있기 때문이다. 마이셀이 형성되기 시작하는 농도인 CMC는 계면활성제의 종류, 온도, 경도(hardness) 등에 대한 함수로 알려져 있다(Rosen, 1989). 계면활성제에서 소수성부분이 증가할수록, 수용액상의 CMC값은 작아진다. 대체로 CMC값의 일반적인 범위는 0.1~10mM이다. CMC값이 작은 계면활성제가 오염물질의 용해도를 더 잘 향상시킨다. 일반적으로 비이온성 계면활성제가 CMC값도 작고, 또한 오염물질의 용해도 향상제로 많이 사용되고 있다. 지중 내 포화영역으로부터 계면활성제의 NAPL 제거에 있어서 계면활성제 용액에서 오염물의 유동상 용해도(mobile-phase solubility)의 증가의 한 예로 TCE(trichloroethylene)의 물에서의 용해도(water solubility)는 15℃에서 약 7.5mM(980mg/L)인데, 0.5M SDS(sodium dodecyl sulfate) 수용액에서는 150mM(19,600mg/L)로 약 20배의 용해도 향상을 나타내었다(West, 1992).

3. 실험재료

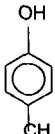
3.1 토양 시료

실험에 사용 할 시료는 난지도 매립장 인근 야산에서 채취한 흙을 건조 후 #40체를 통과시킨 균일한 흙과 주문진 표준사, 그리고 부식토를 혼합한 시료를 사용하였다. 이러한 건조한 혼합토를 실험에 사용한 이유는 연성벽체 투수실험을 할 경우 투수계수가 너무 낮아 실험의 효율성이 떨어지게 되는 것을 방지하고, 또한 소수성 유기 화합물이 *p*-Cresol인 토양에 완전히 흡착된 후 탈착시켜 오염된 지반의 정화를 모사하기 위해서였다. 이를 위하여 투수계수를 위해 주문진 표준사를 사용하고, 유기오염물의 완전한 흡착을 위해 부식토를 첨가하여 토양 시료를 성형하게 되었다. 이렇게 만들어진 시료는 각각의 혼합비율은 난지도 soil : 주문진 표준사 : 부식토의 무게비 2 : 6 : 1로 하였다. 이렇게 얻어진 혼합시료의 유기물의 함량은 6.7%였고, 비중(Gs)은 2.53이었다.

3.2 소수성 유기 화합물

실험에 사용될 오염물질로는 페놀류(Phenols)인 *p*-Cresol을 사용하였다. 이는 농약이나 제초제등로 많이 사용되어 광범위한 토양 오염원으로 알려져 있다. 대상 물질인 *p*-Cresol은 순도 99%로 Sigma Chemical Co.에서 구입하였다. *p*-Cresol의 기본 특성치를 표 1에 정리하였다.

표 1. The Physio-Chemical Properties of *p*-Cresol at 25℃

Compound Name	Structure Formula	Formula	Mol. wt	melt /Boil pt.(℃)	Specific Gravity	Solubility g/m ³	Vapor Press. (Pa)	log K _{ow}
<i>p</i> -Cresol		C ₇ H ₈ O	108.1*	34.8* / 202*	1.035	16800*	14.67*	1.95*

* Mackay, D. 1991

3.2 계면활성제(Surfactant)

탈착용액으로 사용될 계면활성제는 흔히 많이 사용되고 있는 음이온성(anionic) 계면활성제 SDS와 비

이온성(nonionic)으로는 Triton X-100(*t*-Octylphenoxypoly-ethoxyethanol)을 선정하였다. 계면활성제는 Sigma Chemical Co.에서 구입하였다. 각 계면활성제의 물성치는 표 2에 나타내었다.

표 2. Physical and Chemical Characteristics of Selected Surfactants

Trade Name	Chemical	Structure	Type	CMC(mM)	MW	HLB ^{c)}
SDS	Sodium dodecyl sulfate	C ₁₂ H ₂₅ O ₄ SNa	A	8 ^{a)}	288	N/A ^{d)}
Triton X-100	POE(10)octylphenol	C ₈ PE ₁₀	N	1.7 × 10 ⁻¹ b)	646	13.5

C represents alkyl chain length (-CH₂-) P represents a phenol ring (-C₆H₆-)
 E represents an ethoxylate group
 A : anionic, N : nonionic
 a) Clarke, et al. (1991) b) Edwards et al. (1991)
 c) Hydrophile/Lipophile Balance d) N/A : Not available

4. 실험 방법

대상유기화합물인 *p*-Cresol의 토양에 대한 흡착 특성을 파악하기 위해 등온흡착실험을 실시하였다. 그리고 등온흡착실험과 같은 방법으로 오염시킨 토양을 각각의 탈착 용액으로 세척함으로써 탈착능을 살펴보았다. 대상 유기화합물들은 Gas Chromatography(6890 Series, Hewlett Packard Co. USA)로 분석하였다. 분석 조건으로 검출기는 FID(flame ionization detector), 컬럼은 Model No. HP 19091J-413(HP-5, 5% Phenyl Methyl Siloxane, Capillary 30m, 320nm, 0.25mm nominal), 운반가스는 질소가스를 사용하였다. 등온흡착실험 및 탈착실험에 사용된 시험관은 16×100mm Culture c-tube(Wheaton Co., with Teflon-faced cap)을 사용하였다.

4.1 토양에 대한 *p*-Cresol의 등온흡착실험

실험 토양에 대한 대상 소수성 유기화합물의 흡착 특성을 파악하기 위하여 등온흡착실험을 실시하였다. 이에 앞서 흡착평형실험을 통해서 *p*-Cresol이 토양에 대하여 어느 정도 시간 이후에 흡착평형에 도달하는가를 실험하였다. 실험 결과 흡착 평형 도달 시간을 24시간 이후였으며, 이후 등온 흡착 실험 및 탈착 실험시 흡착평형에 충분히 도달되도록 3일 이상 항온 항습실에서 교반시킨 후 실시하였다.

4.1.1 등온흡착실험방법

실험 토양 5g과 오염물질용액(*p*-Cresol: 5~100mg/L)을 시험관에 빈공간(headspace)이 없게 넣었다. 이때, 오염물질용액에 NaN₃(Sodium Azide)를 극미량(중량비로 0.01%) 첨가하여 흡 속 미생물의 활동에 의한 생분해에 의한 오차를 없도록 하였다. 시험관을 항온실에서 교반기로 흡착평형에 도달하도록 충분히 교반 시킨 후 각각의 시험관을 원심분리기(Maraton 8K, Fisher Scientific)에서 20분간 2500rpm 이상의 속도로 고액 분리시키고 상정액(Supernatant)을 2ml vial에 채취한 후 이를 GC를 이용하여 농도를 측정하였다.

4.1.2. 등온흡착실험결과

흡착 평형에 도달한 이후 실험대상 토양에 흡착된 오염유기물질의 양을 구한 값을 가지고 선형 흡착 평형 모델을 이용하여 각 유기화합물에 대한 흡착 특성을 파악할 수 있다.

$$K_p = \frac{C_s}{C_e} \quad (1)$$

여기서, K_p = linear equilibrium partition coefficient

C_s = amounts of the solute sorbed in the soil, (mg/kg)

C_e = concentration of the solution in equilibrium with soil, (mg/L)

그림 3 은 등온 흡착실험결과를 나타내는 것으로 *p*-Cresol의 흡착강도의 비교를 위해 BTEX의 등온 흡착실험결과를 함께 도시하였고, 표 3 에는 선형분배계수 K_p 의 값을 나타내었다. *p*-Cresol의 K_p 값은 1.21로 BTEX와 비교하면 대상토양에 대해서 흡착이 상대적으로 잘 안되지만, 반면 오염토양의 정화면에서 보면 탈착도 어려울 것으로 판단되었다.

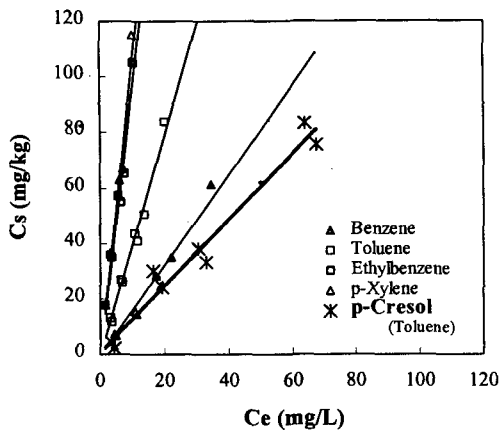


표 3. Sorption Isotherm Parameter on Soil

	K_p
<i>p</i> -Cresol	1.21
Benzene	1.61
Toluene	1.94
Ethylbenzene	9.58
<i>p</i> -Xylene	10.55

그림 3. Linear sorption isotherm

4.2 토양에 대한 *p*-Cresol의 탈착실험

대상 유기화합물로 오염된 토양에 대하여 각각의 계면활성제의 종류별, 농도별, 그리고 첨가물에 의한 세척효율 특성을 파악하기 위하여 회분식 탈착실험을 실시하였다. 회분식 실험에서 얻어진 결과는 뒤의 연성벽체 투수기를 이용한 탈착실험과 비교 검토자료로 이용된다.

4.2.1 탈착 실험 방법

흡착실험에서와 마찬가지로 일정량의 흙(5g)과 일정농도(50mg/L)의 오염용액과 시험관에 빈 공간없이 채운 후(이때 토양/용액의 비는 1:2), 흡착평형에 도달 할 때까지 항온실에서 교반시킨다. 평형에 도달한 시험관을 원심분리기로 고액 분리시킨 후 상정액을 2ml vial에 채취한 일정량을 조심해서 버린 후 시험관의 무게를 잰다. 탈착용액(계면활성제 용액, 이온제거수)을 시험관에 빈공간 없이 채운 후 무게를 잰다. 즉, 시험관에 넣은 탈착용액의 양을 측정하고 30분 이상 항온실에서 탈착 평형에 도달할 때까지 교반시킨다. 이후 다시 원심분리기로 고액 분리시킨 후 상정액의 vial에 채취한다. 그리고 GC로 농도를 분석한다.

4.2.2 탈착 실험 결과

(1) 비이온성 계면활성제 Triton X-100 (TX)의 농도 변화에 따른 탈착능을 알아보기 위해 TX의 농도 0.05%, 0.1%, 0.5%, 1%, 2%의 각각의 용액으로 탈착실험을 실시하였다. 여기서 TX 1% 용액은 CMC 농도로는 대략 100 CMC에 해당하는 값이다. 실험결과를 그림 4 에 나타내었다. TX 0.05%에서 0.1%

(즉, 5CMC에서 10CMC)로 농도를 증가시킴에 따라 탈착능이 25%에서 43%로 큰 향상 폭을 나타내었다. 반면 1%에서 2%농도로의 증가에서는 56%에서 60%로 계면활성제 용액의 큰 증가에 비해 탈착능의 향상은 크지 않은 것으로 나타났다. 이 결과로 계면활성제의 용액과 탈착능의 관계에 있어 적정농도는 2%이하의 계면활성제가 적당하다고 판단되었다.

(2) 음이온성 계면활성제 SDS는 1CMC의 농도가 퍼센트 농도로 약 0.24%(무게비)로 CMC의 농도에 따른 탈착능의 경향을 알아보기 위해선 많은 양의 SDS가 요구된다. 그러므로, 이러한 많은 양의 계면활성제의 사용을 피하기 위해 첨가물에 의한 탈착능 향상을 살펴보고자 하였다. 이를 위해 이온성 계면활성제의 CMC는 염의 첨가에 크게 영향을 받는다는 것에 착안하여 염을 첨가하였다. 이온성 계면활성제 수용액에 염을 첨가하는 것은 그 이온이 마이셀 표면에 보다 밀착하여 군(群)을 형성하여 전기이중층이 압축된다. 이리하여 계면활성제 이온 사이의 반발력이 저하되고 마이셀이 안정화되므로 인해 CMC가 저하된다. SDS의 경우 NaCl 0.4M을 첨가하면 CMC가 8mM에서 1mM이하로 떨어진다고 한다. 실험은 1CMC의 SDS용액의 NaCl을 첨가하여 0.05M, 0.1M, 0.2M, 0.4M의 용액을 만들어 각각에 대하여 탈착실험을 실시하였다. 여기서, 약 0.6M의 NaCl의 농도가 바다물의 농도이다. 실험 결과 염의 첨가에 따라 탈착능의 향상이 있음을 알 수 있었다. 0.4M NaCl 첨가 SDS 1CMC 용액의 경우에도 장시간(2-3주) 방치 후 침전물이 발생하는 것을 확인하였다. 그림 5는 1CMC의 SDS 용액에 첨가되는 NaCl의 농도에 따른 *p*-Cresol의 세척율을 도시한 것이다. 첨가되는 NaCl의 농도가 0.2M까지는 탈착능의 향상이 뚜렷했다.

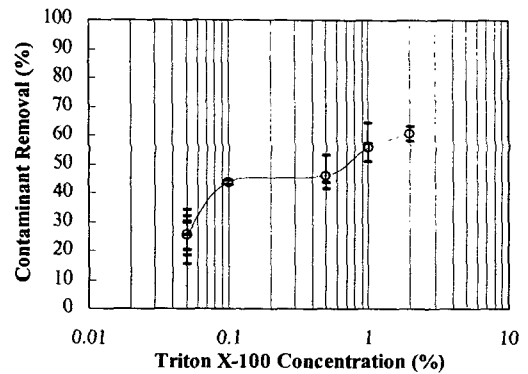


그림 4. Desorption w/ Triton X-100

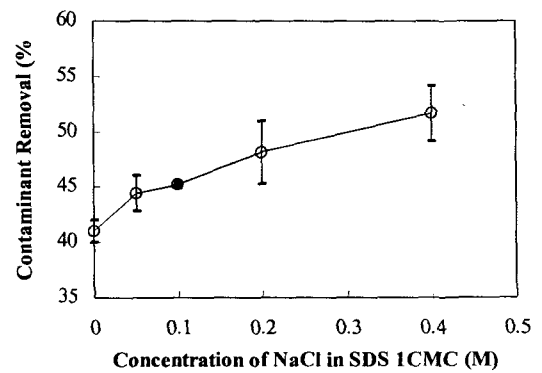


그림 5. Effect of desorption in addition NaCl to SDS 1 CMC solution

5. 연성벽체 투수기에 의한 주상 실험

5.1 연성벽체 투수기

현장에서 오염된 흙을 계면활성제 용액으로 세척·정화하는 방법(In situ remediation)을 실험실에서 모델링하기 위해 삼축압축시험기를 응용한 연성벽체투수기(flexible-wall permeameter)를 제작하였다. 연성벽체투수기는 고정벽체투수기에 비하여 연성 멤브레인에 구속압을 가하므로써 시료의 현장응력상태 효과적으로 모사할 수 있고, 실험 도중 발생하는 side wall flow effects를 최소화 할 수 있다. 이는 side wall channels을 통과하는 탈착용액은 오염 시료와 접촉하지 않으므로 적절하게 정화 작용을 할 수 없게 된다. 그림은 연성벽체투수기 시스템을 나타낸 것으로 ① 투수기

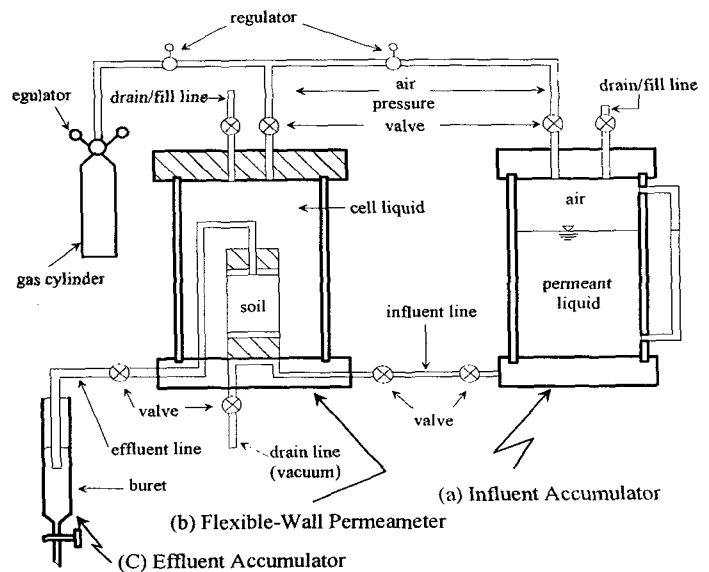


그림 6. Diagram of the flexible-wall permeameter

본체, ② 탈착용액 공급통(influent accumulator), ③ 시료투수 탈착용액을 모으는 뷰렛, ④ 압력공급장치로서 gas cylinder로 구성된다.

5.2 투수기 탈착 실험

5.2.1 투수기 탈착 실험방법

실험에 사용되는 건조한 혼합토 110g 정도를 농도가 100mg/L인 *p*-Cresol 용액을 섞어 함수비가 약 16%이상 되도록 Havard Miniature 다짐기를 이용하여 길이 70mm, 직경 35mm의 시료를 만들었다. 이때 *p*-Cresol용액 제조시 NaN_3 (Sodium Azide)를 중량비 0.5% 첨가하여 토양 속 미생물에 의한 생분해를 막고자 하였다. 성형된 시료는 mold에 담겨진 채로 항온실에서 24시간이상 보관하여 흡착평형에 도달하도록 하였다. 이 후 시료를 mold에서 추출하여 반응성이 없는 Teflon Membrane을 씌운 후 Latex Membrane으로 다시 씌웠다. 그리고 투수기 안에 그림 과 같이 시료를 설치하였다. 이 후 구속응력을 가해주고, 탈착 용액은 동수경사에 의해 시료 바닥으로부터 시료의 상부로 흐르게 하고 오염된 흙을 통과한 약액은 배출관(Effluent Line)을 통하여 배출되어 약액이 오염물질을 흙으로부터 분리 추출해 낼 수 있게 하였다. 구속응력은 약 0.7kg/cm^2 (10psi)을 가해 주는데 이는 지반의 깊이가 대략 2-4m인 곳의 구속응력이며 동수경사는 50~60이 되도록 가해 주었다.

5.2.2 투수기 탈착 실험 결과

투수기 실험은 DI water, Triton X-100 2% 용액(부피비)에 대하여 실시하였다. 실험결과를 그림 7에 나타내었다. 물로의 투수 실험 결과에서 투수계수는 $8 \times 10^{-7}\text{cm/sec}$ 인 경우에는 회수율이 51%가 되었다. 계면활성제 용액을 탈착용액으로 사용한 투수 실험에서 Triton X-100 2%(부피비) 용액으로의 두 번의 투수 실험에서는 *p*-Cresol의 회수율이 평균 86%으로 나타났다. 이는 물로의 회수율에 비하여 1.7배 정도의 향상을 나타낸 것이다. Triton X-100 2%(부피비) 용액으로의 투수 실험 중 2 pore vol. (50mL)이 통과한 후의 탈착 용액에서 가장 높은 탈착능을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 이 때의 순간 탈착능(약 25mg/L)은 물로 만의 순간 탈착능(약 5-10mg/L)에 비하여 4배 이상 높은 값을 나타내었다.

6. 결론

본 연구는 난지도 인근 야산토와 주문진 표준사, 부식토의 혼합토에 대하여 유해성 유기화합물인 *p*-Cresol의 흡착특성과 오염된 지반의 정화를 위한 탈착용액으로써 대표적 계면활성제를 대상으로 농도 및 염의 첨가에 따른 탈착능 향상 실험을 통하여 최적의 조건을 도출해 보고자 하였다. 그리고 현장 정화의 적용성을 검토하기 위해 연성벽체투수기 실험을 통해 실제 현장에서 계면활성제 용액으로 세척하고자 할 때 지반조건을 고려하는 모델링을 실시하였다. 이상의 연구를 통해 얻어낸 결론은 다음과 같다.

- (1) 연성벽체 투수기 실험을 위한 혼합시료(유기물 6.7%)에 대한 흡착실험 결과 선형 분배 계수 K_d 값은 *p*-Cresol이 1.21였으며 이는 BTEX의 분배계수 값보다 작았다.
- (2) 비이온성 계면활성제 Triton X-100으로의 회분식 탈착 실험에서 토양/용액의 비가 1:2(무게비)인 경우 0.05%, 0.1%, 0.5%, 1%, 2%인 경우에 각각 25%, 43%, 46.5%, 56%, 60%로 나타났으며, 이로 미루어 보아 정화를 위한 정적 농도는 2% 미만이라 판단된다.
- (3) 음이온성 계면활성제 SDS에 염의 첨가에 따른 탈착능을 살펴보기 위하여 1CMC(8mM)의 SDS 용액에 NaCl의 농도를 변화시켜 가며 탈착 실험을 실시한 결과, 첨가되는 NaCl농도가 증가함에 따라 탈착능이 증가하는 것을 볼 수 있었으며, 0.4M(바다물 농도의 2/3)정도를 첨가했을 때 탈착능은 41%에서 50%로 향상되었다.

(4) 연성벽체투수기를 이용한 현장정화 모델링 탈착실험을 실시한 결과 비이온성 계면활성제 Triton X-100 2%(약 200CMC) 용액으로 세척했을 경우(86%) 물로 세척했을 경우보다 1.7배 이상의 탈착능 향상을 확인할 수 있었다.

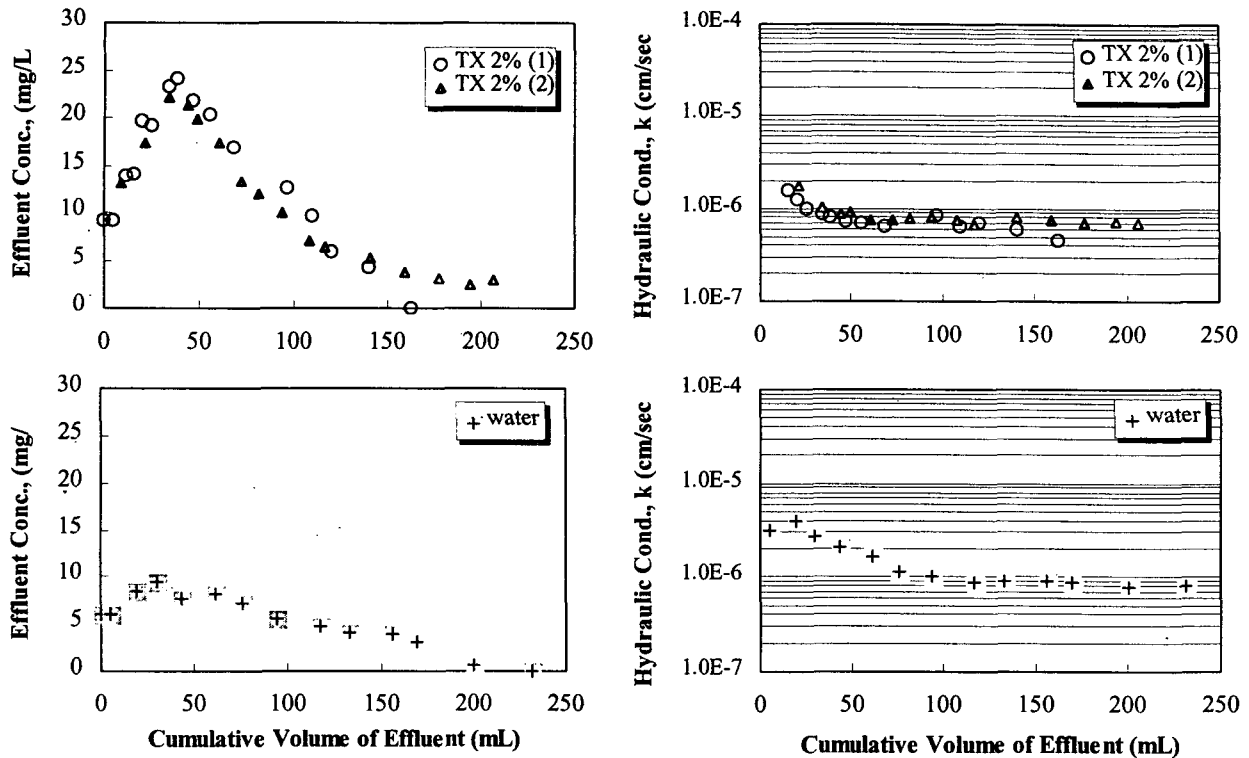


그림 7. Permeameter test results

감사의 글

이 논문은 1998년 한국학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었으며 이에 감사드립니다.

7. 참고문헌

- Clarke, A. N., Plumb, P.D. and Subramanyan, T. K.(1991), "Soil Clean-Up by Sufactant Washing. 1. Laboratory Results and mathematical Modeling." *Separation Science and Technolohy*, Vol.26, pp.301-343.
- Edwards, D.A., Luthy, R.G. and Liu, Z., "Solubilization of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Micellar Nonionic Surfactant Solutions," *ES&T*, 25, 127-133, (1991)
- Hunt, J. R., Sitar, -N. and Udell, K. S.(1988), "Nonaqueous Phase Liquid Trasport and Cleanup, 1. Analysis of Mechanisms," *Water Res.*, Vol.24, pp.1247~1258.
- Mackay, D.(1991), *Multimedia Environmental Models*, LEWIS PUBLISHERS. INC.,
- Mackay, D. and Cherry, J. A.(1989), "Groundwater Contamination : Pump and Treat Remediation," *ES&T.*, Vol.23, pp.630~636.
- Rosen, M. J.(1989), *Surfactants and Interfacial Phenomena*, 2nd Edition, John Wiley and Sons, New York.
- West, C. C. and Harwell, J. H.(1992), "Surfactants and Subsurface Remediation," *ES&T.*, Vol.26, pp.2324~2330
- U. S. EPA.(1995), *Bioremediation of Hazardous Wastes - Research, Development, and Field Evaluations*, EPA., Washington, EPA/540/R-95/532