

계면활성제를 이용한 오염 토양 세정 성능 평가

Performance of Soil Flushing for Contaminated Soil Using Surfactant

이 채 영[†] · 장 영 수¹⁾

Lee, Chaeyoung · Jang, Yeongsu

ABSTRACT : In this study, a series of experiments were carried out to remove total petroleum hydrocarbon(TPH) and toluene by soil flushing. In batch experiments, Triton X-100 and SWA 1503 showed TPH removal efficiency of 79.0% and 69.0%, respectively. Although the TPH removal efficiency increased as the surfactant was increased in the concentration range 1-11mmol/L, the optimum concentration was 1mmol/L, considering the ratio of the removal efficiency to the amount of surfactant injected. In column experiment, the optimal velocity was 0.3mL/min. The physical aquifer model(PAM) result revealed that the soil flushing removed as much as 5.5% of the toluene under 3 pore volume(PV) conditions. To improve the soil flushing efficiency, it is necessary to find optimal condition through recirculation or reuse of surfactant.

Keywords : PAM(Physical Aquifer Model), Surfactant, Soil flushing, TPH(Total Petroleum Hydrocarbon), Toluene

요 지 : 본 연구에서는 석유계총탄화수소와 톨루엔을 토양세정에 의해 제거하기 위하여 일련의 실험을 수행하였다. 회분식 실험 결과 Triton X-100과 SWA 1503의 경우 각각 79.0%와 69.0%의 TPH 제거효율을 나타내었다. 계면활성제의 농도 1-11mmol/L에서 계면활성제 농도 증가에 따라 TPH 제거효율은 증가하였으나 주입량 대비 제거효율 고려 시 최적 농도는 1mmol/L로 나타났다. 칼럼 실험 결과 최적의 유속은 0.3mL/min으로 나타났다. PAM(Physical Aquifer Model) 실험 결과 3 PV(Pore Volume) 동안 토양세정을 통해 주입한 톨루엔 중 약 5.5%가 제거된 것으로 나타났다. 따라서 토양세정의 효율을 증가시키기 위해서는 계면활성제의 재순환 또는 재이용을 통한 최적 운전조건의 도출이 필요하다.

주요어 : PAM(Physical Aquifer Model), 계면활성제, 토양세정, 석유계총탄화수소, 톨루엔

1. 서 론

석유계총탄화수소 화합물로 인한 토양과 지하수 오염은 환경과 건강에 영향을 미치는 주된 원인으로 제기되어 왔다. 그 결과 지하수, 토양의 복원을 위한 획기적이고 안전한 기술개발에 대한 관심이 증가되고 있다(Whang 등, 2008). 그러나 국내에서는 아직까지 실험실 규모의 연구에 제한되어 있으며 실제 오염된 지역에서 오염물질의 확산 및 분포, 정화에 관련된 연구는 오염지역의 비공개, 복원 비용 문제 및 복원 관련법의 미비함 등으로 인하여 매우 저조한 실정이다(이민희 등, 2002). 토양을 복원하는 방법은 위치에 따라 크게 두 가지로 구분된다. 오염된 토양을 굴착하여 복원하는 탈위치(Ex-situ) 복원기술과 제자리에서 처리하는 원위치(In-situ) 복원기술이다. 이러한 두 가지 복원 기술은 처리 방법에 따라 생물학적, 물리·화학적, 열적 처리 방법으로 구분된다. 휘발성 유류오염인 경우는 오염물을 기상으로 분리시키는 기작을 이용하는 토양증기추출(soil vapor extraction),

증기주입(air sparging), 미생물 분해를 함께 이용하는 바이오벤팅(bio-venting) 기술들이 효과가 좋은 것으로 나타났으며, 준휘발성이나 비휘발성 유류오염인 경우는 화학물질을 첨가한 토양세정, 토양세척, 미생물 분해, 열탈착 등이 오염 복원에 주로 사용되어 왔다(Fetter, 1998; 이민희 등, 2002). 특히 계면활성제 용액을 이용한 원위치 토양세정은 다양한 실내 실험과 현장 적용 실험들로부터 그 효율성을 인정받아 국외에서는 현장 오염 지하수와 토양을 정화하는데 실제로 사용되고 있다(Fountain 등, 1996). 따라서 본 연구에서도 토양입자에 결합된 오염물질의 표면장력을 약화시키거나 토양 입자로부터 오염물질을 액상으로 추출 분리하여 제거하는 원위치 세정기술에 대해 일련의 실험을 수행하였다. 계면활성제 선정에 있어서 중요한 요인은 세정효율, 비용, 생분해성, 오염물질 분해능, 인간·동물·식물에 대한 독성과 재사용여부 등이다(Zhao 등, 2005). 또한 계면활성제가 토양에 부착되어 토양의 공극을 감소시켜 오염부지 내의 투수성을 낮출 수 있으며 토양과 계면활성제의 상호작용으로 오

† 정회원, 수원대학교 공과대학 토목공학과 교수(E-mail : chaeyoung@suwon.ac.kr)

1) 비회원, 수원대학교 공과대학 토목공학과 석사과정

염물질의 유동을 감소시킬 수 있다. 이러한 여러 가지 이유로 인하여 계면활성제 성능에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있다. Rothmel 등(1998)은 Triton X-100과 Rhamnolipid의 연구결과 효율은 Triton X-100이 더 좋다고 보고되었으며, Rodriguez 등(2005)은 SDS와 Triton X-100이 유기물 제거와 무기물의 일부를 제거하는데 효율적인 것으로 보고되고 있다. 따라서 본 연구에서는 세정효율이 우수하고 경제적인 계면활성제의 선정, 적정 농도 및 주입유속 등에 대해 평가를 수행하였다. 또한 원위치 토양세정의 성능 향상을 위하여 관정의 주입방법 개선 및 운전 방안을 도출하였다. 원위치 토양세정은 오염물질과 계면활성제의 특성뿐만 아니라 토양의 수리·지질학적인 요소에 영향을 받는다. 따라서 현장 적용성을 증가하기 위해서는 실험실 규모의 2차원적 실험뿐만 아니라 3차원의 현장을 모사할 수 있는 실험이 필수적이다. 본 연구에서는 대수층의 다양하고 복잡한 지구·화학적 불균질성을 반영한 PAM(Physical Aquifer Model) 실험을 통해 계면활성제를 이용한 원위치 토양세정의 적정 인자 도출 및 성능 평가를 수행하고자 하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 분석 방법

2.1.1 톨루엔 분석

톨루엔 농도는 head space 법을 이용하여 분석을 수행하였다. 채취한 10mL 시료 중 4mL 시료를 제거한 후 20°C 항온 혼합 배양기에 30분간 배양하여 시료의 온도를 일정하게 유지하였다. 시료의 톨루엔 농도는 head space 상의 기체를 100 μ L 채취하여 GC/FID(Agilent 7890A)를 이용하여 분석하였다. 칼럼은 HP-5(30m \times 0.32mm I.D., 25 μ m df, Agilent Technologies)를 사용하였으며 GC 오븐 온도는 40°C에서 200°C까지 10°C/min으로 승온하였다. Spilt ratio는 3:1, 유입구 및 검출기 온도는 모두 250°C로 설정하였다. 운반기체로는 고순도 질소(99.999%)를 사용하였으며 유속은 25mL/min으로 설정하여 분석하였다.

2.1.2 TPH 분석

TPH(Total Petroleum Hydrocarbon)는 지하수 시료 5mL에 무수황산나트륨 1g을 첨가하여 수분을 제거한 후 디클로로메탄 5mL를 주입하였다. 그리고 교반기를 이용하여 120rpm에서 12시간 동안 교반 후 추출된 시료를 GC/FID(Agilent 7890A)를 이용하여 분석하였다. 칼럼은 HP-5(30m \times 0.32mm I.D., 25 μ m df, Agilent Technologies)를 사용하였으며 GC

오븐 온도는 50°C(3min)에서 10°C/min로 프로그램화하여 최종 온도가 310°C(10min)가 되게 운전하였다. GC의 injector와 detector 온도는 각각 280°C와 300°C로 고정하여 분석을 수행하였으며 운반기체로는 고순도 질소(99.999%)를 사용하였다. 기타 분석 방법은 standard methods(Eaton 등, 2005)에 준해 실험을 수행하였다.

2.2 실험 조건

2.2.1 회분식 세정실험

회분식 세정실험은 오염토양의 효과적인 복원을 위해 적정 계면활성제와 주입 농도를 선정하기 위해 수행되었다. 본 연구에서는 비교적 오염 토양 정화에 좋은 것으로 알려진 음이온, 비이온 계면활성제를 사용하였으며 주입 농도를 1, 3, 5, 7, 9, 11mmol/L로 변화하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 토양 시료의 경우 함수율 13.4%의 토양을 건조시킨 후 표준체를 이용하여 0.254~6.35mm 크기로 선별하여 사용하였다. 40mL의 borosilicate glass 재질의 바이알에 토양 3g과 핵산 2mL를 주입하고 디젤을 주입하여 10,000mg/kg TPH의 농도로 토양을 오염시킨 후 하루 동안 방치한 시료를 실험에 사용하였다. 계면활성제를 각 농도별로 20mL를 주입한 후 120rpm에서 12시간 동안 교반시켰다. 교반시킨 시료는 원심분리기에서 2,500rpm으로 10분간 원심 분리하여 침전물을 침전시켰다. 상등액 10mL를 추출한 후 디클로로메탄 10mL를 주입하여 20분간 교반시킨 후 분리된 층에서 디클로로메탄을 추출하였다. 추출한 디클로로메탄은 0.45 μ m 멤브레인 필터를 이용하여 여과한 후 GC/FID로 계면활성제 용액에 추출된 TPH를 분석하였다. 실험에 사용된 계면활성제의 특성은 표 1에 제시하였다. 계면활성제의 CMC(Critical Micelle Concentration) 값은 문헌 또는 직접 표면장력계를 이용하여 측정하였다.

2.2.2 칼럼실험

칼럼실험은 계면활성제의 주입유속에 따른 오염물질의

표 1. 계면활성제의 특성

Surfactant	Ionic type	molecular formula	CMC (mg/L)	Typical molecular weight
SDS	Anionic	C ₁₂ H ₂₅ SO ₄ Na	1455 ¹⁾	288
Triton X-100	Nonionic	C ₁₄ H ₂₂ O(C ₂ H ₄ O) _{9.5}	181 ²⁾	625
SWA 1503	Nonionic	C ₅₇ H ₁₀₂ O ₂₀	50 ³⁾	1106

1) : Shen 등(2007)

2) : Zhou 등(2008)

3) : 측정값

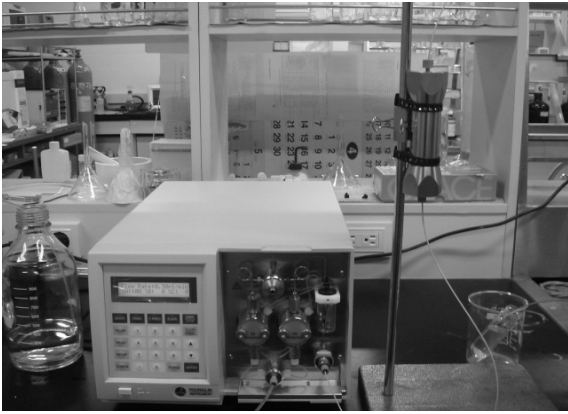


그림 1. 칼럼실험 장치

제거효율을 평가하기 위하여 수행하였다. 사용된 칼럼은 그림 1에 제시된 것과 같이 Alltech의 Preparative HPLC(High Performance Liquid Chromatography)칼럼을 사용하였고, 내경 및 높이는 각각 22mm와 100mm이다. 토양 내부에 있는 미세입자의 이동을 방지하기 위하여 칼럼의 양쪽 끝단에 간극 크기가 0.5 μ m인 스테인리스 frits를 이용하였다. 펌프는 영린기기의 HPLC gradient pump를 사용하였다. 계면활성제의 주입유속은 0.3, 0.5 및 1.0mL/min으로 설정하였으며 흐름은 탄력류의 영향을 최소화하기 위하여 상향류로 주입하였다. 계면활성제는 최대 15 PV(pore volume)까지 주입하였으며 1 PV씩 채수하여 GC/FID로 TPH를 분석하여 세정효율을 평가하였다.

2.2.3 PAM 실험

오염토양복원 공정에서 약품 주입 등을 위해 사용되는 수직 주입정의 잠재적인 문제는 영향반경이 작아 약품 주입이 효과적으로 이루어지지 않고 있는 점이다. 또한 주입된 대부분의 약품이 교란된 관정을 통해 유출되어 효과적인 복원이 이루어지지 않아 이에 대한 대책이 필요한 실정이다. 따라서 본 실험에서는 토양 오염부분 위에서 중력방향으로 분사하여 넓은 범위의 오염부위에 계면활성제 용액이 접촉할 수 있도록 그림 2와 같이 십자모양의 수평관을 설계하여 실험을 수행하였다. PAM 실험을 수행하기에 앞서 3일 전에 그림 2와 3에 제시된 것과 같이 M1, M4, M5, M8에 1번(기체 시료채취) 채취구를 통하여 톨루엔 원액 15mL를 각각 주입한 후 증류수 50mL와 질소가스를 이용하여 톨루엔 오염영역을 확대시켰다. PAM 실험에 사용된 계면활성제와 주입 농도는 세정효율과 생분해 특성이 우수한 SWA 1503과 주입량 대비 세정효율이 우수한 1mmol/L를 선정하여 실험을 수행하였다. 계면활성제의 주입 유속은 실험실 규모에서 세정효율이 가장 우수한 0.3mL/min을 적용하여 PAM의 규모에 맞게 470mL/min으로 설정하여 실험을 수행하였다.

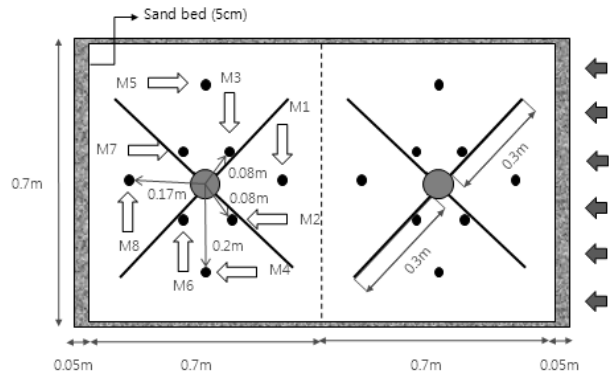


그림 2. 다목적 관정장치 및 모니터링 포트 모식도

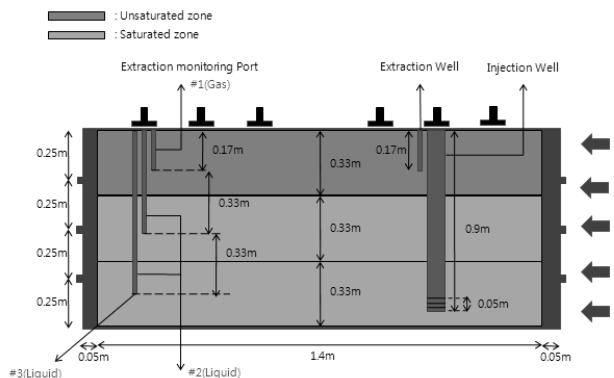


그림 3. PAM 측면도

지하수 흐름은 PAM 오른쪽에서 왼쪽으로 PAM 바닥에서부터 66cm까지 흐르도록 조절하여 실험을 수행하였다. 그림 3에 제시된 것과 같이 상부에서 0.17m 떨어진 곳을 상층(기체) 시료채취 포트 1번, 상부에서 0.5m 떨어진 곳을 중간층(액체) 시료채취 포트 2번 그리고 상부에서 0.83m 떨어진 곳을 하층(액체) 시료채취 포트 3번이라고 명명하였다. 그림 2에 제시된 것과 같이 각각 포트에 번호를 붙여 시료채취를 수행하였다. 또한 유출수는 지하수가 흐르는 중간층과 하층 두 지점에서 시료를 채취하였다. 그림 3에 제시된 것과 같이 모니터링 포트 당 3개의 시료채취 포트가 있다. 모니터링 포트 번호순서는 오른쪽 그리고 아래쪽을 우선으로 번호를 붙였다. 1 PV 당 270 L가 사용되기 때문에 각 PV 당 9시간으로 실험을 수행하였다. 시료채취는 상층과 중간층은 1시간 간격으로 채취하였고 하층에서는 2시간 간격으로 시료를 채취하였다.

3. 실험 결과 및 토의

3.1 회분식 세정실험

그림 4에 제시된 것과 같이 비이온 계면활성제인 Triton X-100과 SWA 1503은 79.0%와 69.0%의 높은 제거효율을

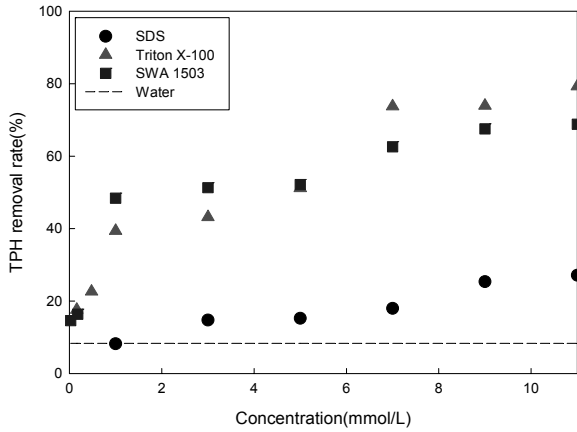


그림 4. 계면활성제 농도별 세정효율

나타내었으나 음이온 계면활성제 SDS는 낮은 세정효율을 보였다. 계면활성제의 CMC 농도의 전후로 세정실험을 하였으나 세정효율에는 큰 차이를 보이지 않았다. Muherei 등(2009)은 Triton X-100 용액에 토양을 넣었을 때가 넣지 않았을 때보다 2배 정도 CMC 농도가 높아졌다. 따라서 CMC 농도의 2배를 주입하여도 계면활성제가 토양에 흡착함에 따라 CMC가 형성되지 않아서 제거효율이 향상되지 않은 것으로 판단된다. Razika 등(2009)에 따르면 SDS의 경우 3.2mL/min의 유속으로 8mmol/L를 주입하였을 경우 97.0%의 제거 효율을 보이는 것으로 나타났다. 본 실험에서 마찬가지로 SDS의 경우 8mmol/L을 기준으로 제거 효율이 증가하는 것으로 나타났다. Triton X-100과 SWA 1503의 경우 7mmol/L에서 세정효율이 가장 좋은 것으로 나타났다. Doige 등(1993)에 의하면 SDS의 경우 저농도에서 미생물 활동성에 억제를 받지만 Triton X-100의 경우는 저농도에서 미생물들이 활발하게 활동한다고 보고되고 있다. 이러한 이유로 인하여 그림 4에서 보여지는 것과 같이 저농도에서 Triton X-100을 사용한 경우 SDS보다 TPH 제거효율이 좋은 것으로 나타났다. 또한 Mohan 등(2006)에 따르면 Triton X-100은 혐기성 조건에서는 부분적으로 생분해가 가능하나 혐기성 조건과 질산 및 황산 환원에 의한 무산소 조건의 경우에는 생분해가 일어나지 않는 것으로 보고되고 있다. 따라서 대부분 혐기성 상태로 존재하는 오염토양에 Triton X-100을 사용하여 세정할 경우 토양 내부에 추가적인 오염물질로 작용할 것으로 판단된다. SWA 1503의 경우 계면활성제 주입농도 1mmol/L와 7mmol/L에서 TPH 제거효율의 차는 10.0% 이내로 나타났다. 따라서 SWA 1503의 경우 주입량의 증가에 따라 제거효율이 비례하지 않아 주입량 대비 세정효율을 고려시 1mmol/L로 농도를 선정하여 복원공정을 운전하는 것이 바람직하다고 판단된다.

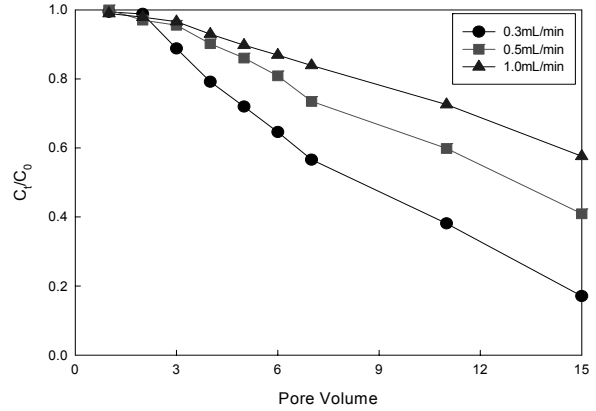


그림 5. 칼럼실험시 유속에 따른 TPH제거 효율

3.2 칼럼실험

그림 5에 제시된 것과 같이 주입유속을 0.3mL/min으로 적용시 15 PV에서 TPH 제거효율은 약 80.0%로 나타났다. 그러나 1 PV, 2 PV 및 3 PV까지는 각각 0.6%, 1.2% 및 11.2%로 낮게 나타났다. 따라서 계면활성제를 이용한 토양 세정 적용 시 성능 향상을 위해 PV를 계속적으로 증가시키는 것은 토양 내부에 계면활성제의 농도 증가로 인해 잠재적인 문제를 야기할 수 있다. 따라서 낮은 PV에서 세정효율 향상을 위한 방안의 도출이 필요하다. 칼럼실험 결과를 통하여 효율이 가장 좋은 0.3mL/min을 PAM 실험에서 적용할 유속으로 선정하였다.

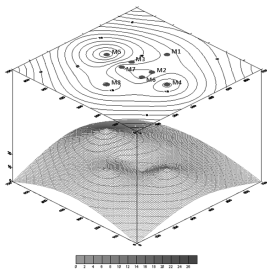
3.3 PAM 실험

3.3.1 상부층(기체)

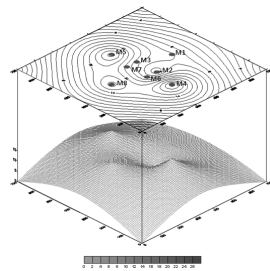
그림 6에 제시된 것과 같이 상부층(기체 시료)에서 채취한 시료 분석 결과 오염물질(톨루엔)을 주입한 4개의 관정을 중심으로 농도가 높게 나타났으며 타원형의 분포를 보이는 것으로 나타났다. 초기 농도가 가장 높았던 지점은 M5 관정으로 28.5mg/L로 나타났으며 시간이 지남에 따라 톨루엔 농도가 감소하는 것으로 나타났다. 실험을 수행한지 27시간 후에는 M4 관정과 M5 관정에서 각각 7.4mg/L와 5.2mg/L로 나타났으며 나머지 관정에서는 4.5 미만으로 검출되었다.

3.3.2 중간층(액체)

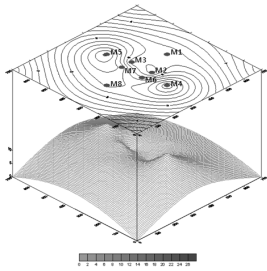
그림 7에 제시된 것과 같이 중간층(액체)의 경우 상부층(기체)과 다르게 PAM 반응조 정면에 유출수가 나오는 관정이 있어 약간의 농도 분포의 변화가 나타났다. 상부층과 마찬가지로 톨루엔을 주입한 관정인 M1, M4, M5, M8번 관정을 중심으로 톨루엔 농도가 매우 높게 나타났다. 지하수의 흐름에 따라 M1번 관정 방향에서 M8번 관정 방향으로 농



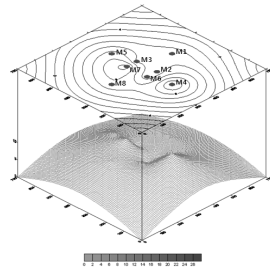
(a) 상부층(기체) 초기 톨루엔 농도 분포



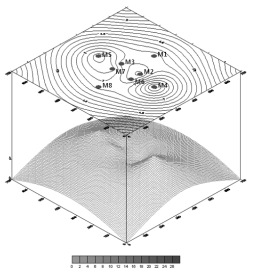
(b) 상부층(기체) 2시간 후 톨루엔 농도 분포



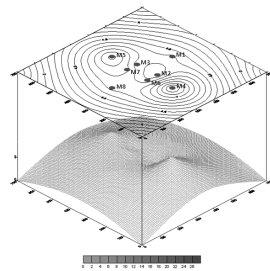
(c) 상부층(기체) 4시간 후 톨루엔 농도 분포



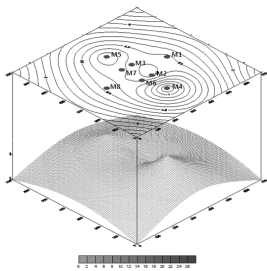
(d) 상부층(기체) 9시간 후 톨루엔 농도 분포



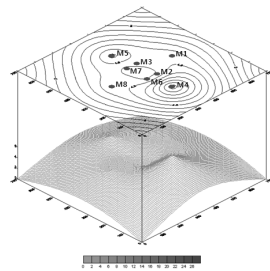
(e) 상부층(기체) 13시간 후 톨루엔 농도 분포



(f) 상부층(기체) 16시간 후 톨루엔 농도 분포



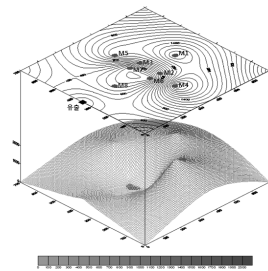
(g) 상부층(기체) 20시간 후 톨루엔 농도 분포



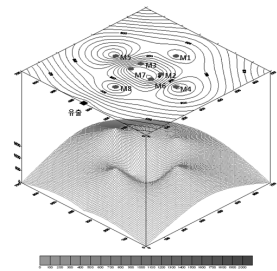
(h) 상부층(기체) 27시간 후 톨루엔 농도 분포

그림 6. PAM 상부층(기체) 시간에 따른 톨루엔 농도 분포

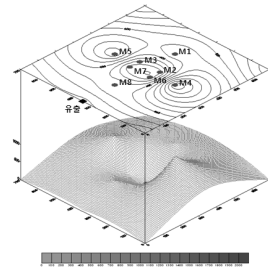
도가 낮아지는 것으로 나타났다. 초기 농도가 가장 높았던 지점은 M4번 관정으로 2127.8mg/L로 가장 높게 나타났고 시간이 지남에 따라 상부층과 마찬가지로 감소하는 경향을 보여주었다. 상부층과 달리 일부 관정에서는 초기 톨루엔이 낮게 검출되다가 2시간 뒤 톨루엔 농도가 갑자기 증가한 후 점차 감소하는 경향으로 나타났다. 이는 윗부분에 농축되어 있던 톨루엔이 수평관을 통하여 분사된 계면활성제에 의하여 씻겨 내려오면서 발생하는 현상으로 판단된다. 실험을



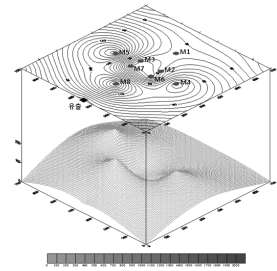
(a) 중간층(액체) 초기 톨루엔 농도 분포



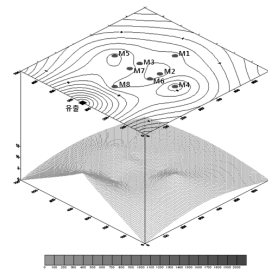
(b) 중간층(액체) 2시간 후 톨루엔 농도 분포



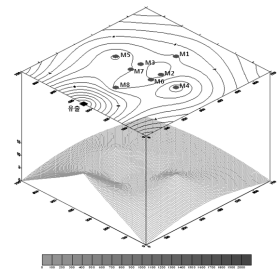
(c) 중간층(액체) 4시간 후 톨루엔 농도 분포



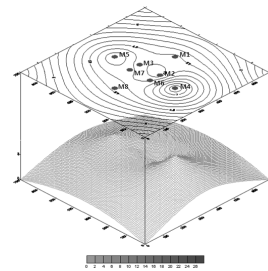
(d) 중간층(액체) 9시간 후 톨루엔 농도 분포



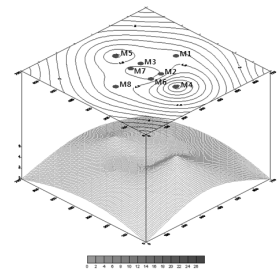
(e) 중간층(액체) 13시간 후 톨루엔 농도 분포



(f) 중간층(액체) 16시간 후 톨루엔 농도 분포



(g) 중간층(액체) 20시간 후 톨루엔 농도 분포



(h) 중간층(액체) 27시간 후 톨루엔 농도 분포

그림 7. PAM 중간층(액체) 시간에 따른 톨루엔 농도 분포

수행한지 27시간 뒤에는 M4, M5, M8번 관정에서 각각 30.0mg/L, 45.9mg/L, 22.5mg/L로 나타났고 나머지 관정에서는 15.0mg/L 미만으로 검출되었다.

3.3.3 하부층(액체)

그림 8에 나타난 것과 같이 가장 하부층에서의 톨루엔 경향은 다른 층과 유사하게 톨루엔 주입관정을 중심으로 높게 나타났다. 하부층의 가장 뚜렷한 경향은 중간층에서도 나타

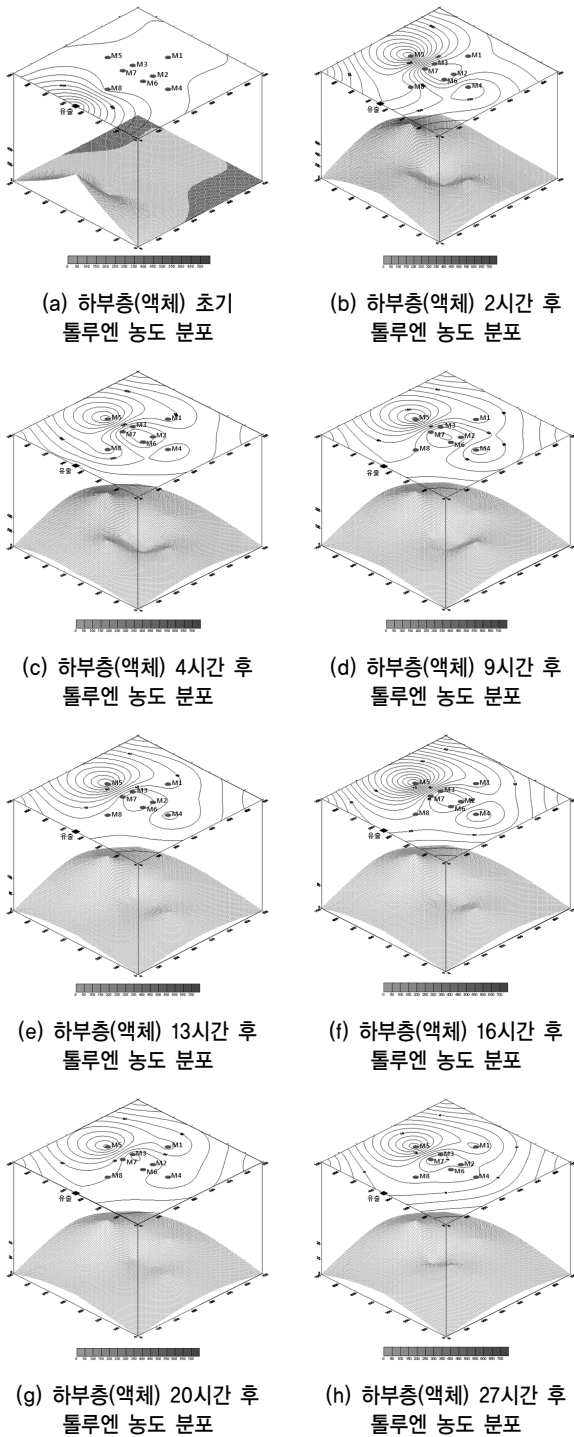


그림 8. PAM 하부층(액체) 시간에 따른 톨루엔 농도 분포

났지만 유출수를 받는 관정을 제외한 모든 관정에서 초기 톨루엔 농도보다 2시간 또는 4시간 뒤의 톨루엔 농도가 가장 크게 나타났고 점차 감소하는 경향으로 나타났다. 이는 가장 아랫부분까지 오염된 톨루엔이 씻겨 내려가는데 시간이 걸려서 일어나는 현상으로 판단된다. 가장 높은 톨루엔 농도를 보인 관정은 M5번 관정으로 718.5mg/L로 나타났다. 27시간 후에 가장 높은 톨루엔 농도를 보인 관정도 M5번

관정으로 26.3mg/L로 검출되었다. 초기에는 유출수를 중심으로 톨루엔 농도가 높게 나타났지만 시간이 지남에 따라 M5번 관정을 중심으로 타원형으로 나타나는 경향을 보였다.

기체 및 지하수의 톨루엔 농도 분포 등을 이용한 물질수지 해석결과 주입한 톨루엔(51,342g) 중 토양세정을 통해서 제거된 양은 약 5.5%로 나타났다. 이와 같은 결과는 실험실 규모 칼럼 실험의 3 PV에서 얻은 세정효율 11.2%의 0.49배로 나타났다. PAM의 경우 2차원의 칼럼과 달리 3차원 형태이며, 칼럼의 경우 모든 토양이 주입한 계면활성제와 접촉하는 대신 PAM의 경우 단락류 등에 의해 접촉이 되지 않는 경우가 존재하기 때문이다. 칼럼실험의 결과에서도 알 수 있듯이 계면활성제를 이용한 복원공정에서 세정효율을 30.0% 또는 50.0%를 달성하기 위해서는 최소 5 PV 또는 10 PV의 계면활성제의 주입이 필요하다. 그러나 성능 향상을 위해 PV를 계속적으로 증가시키는 것은 토양 내부에 계면활성제의 농도 증가로 인해 잠재적인 문제를 야기할 수 있다. 따라서 낮은 PV에서 세정효율 향상을 위해서는 세정한 계면활성제의 재순환 또는 재이용 등을 통한 최적 운전조건의 도출이 필요하다.

4. 결 론

회분식 세정실험, 혐기성 생분해도 실험, 칼럼 및 PAM 등 일련의 실험을 통하여 아래와 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 회분식 세정실험을 수행한 결과 비이온 계면활성제인 Triton X-100과 SWA 1503의 경우 각각 79.0%와 69.0%의 제거효율을 보였다. 그러나 음이온 계면활성제인 SDS의 경우 낮은 세정효율을 나타내었다. Triton X-100과 SWA 1503의 경우 7mmol/L에서 가장 좋은 세정효율을 보였으나 주입량 대비 저감 효율을 고려 시 1mmol/L 농도가 효과적인 것으로 나타났다.
- (2) 칼럼실험 수행 결과 최적 유속은 0.3mL/min로 나타났으며 SWA 1503을 이용하여 15 PV를 적용하는 경우 TPH 제거효율이 80.0%로 나타났다.
- (3) PAM 실험의 기체 및 지하수의 톨루엔 농도 분포 등을 이용한 물질수지 해석결과 주입한 톨루엔 중 토양세정을 통해서 제거된 양은 약 5.5%로 나타났다. 계면활성제를 이용한 복원 공정 적용 시 잔류 계면활성제에 대한 영향 저감과 성능 향상을 위해서는 낮은 PV에서 세정한 계면활성제의 재순환 또는 재이용 등을 통한 최적 운전조건의 도출이 필요하다.

참 고 문 헌

1. 이민희, 정상용, 최상일, 강동환, 김민철(2002), 계면활성제 원위치 토양 세정법을 이용한 유류 오염 지역 토양지하수 정화 실험, *한국지하수토양환경학회지*, Vol. 7, No. 4, pp. 77~86.
2. Doige, C. A., Yu, X. and Sharom, F. J.(1993), The Effects of Lipids and Detergents on ATPase-active P-glycoprotein, *Biochimica et Biophysica Acta*, Vol. 1146, No. 1, pp. 65~72.
3. Eaton, A. D., Clesceri, L. S., Rice, E. W. and Greenberg, A. E.(2005), *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, APHA., AWWA., WPCF., 21th ed., Washington, DC. pp. 5-16~5-18.
4. Fetter, C. W.(1998), *Contaminant Hydrogeology*, Prentice-Hall, second ed., New Jersey, pp. 1~119.
5. Fountain, J. C., Starr, R. C., Middleton, T. M., Beikrich, M. G., Tayler, C. and Hodge, D.(1996), A Controlled Field Test of Surfactant-Enhanced Aquifer Remediation, *Ground Water*, Vol. 34, No. 5, pp. 910~916.
6. Mohan, P. K., Nakhla, G. and Yanful, E. K.(2006), Biodegradability of Surfactants under Aerobic, Anoxic, and Anaerobic Conditions, *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 132, No. 2, pp. 279~283.
7. Muherei, M. A., Junin, R. and Merdhah, A. B.(2009), Adsorption of Sodium Dodecyl Sulfate, Triton X 100 and Their Mixtures to Shale and Sandstone: A Comparative Study, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 67, No. 3~4, pp. 149~154.
8. Razika, K., Ouassila, B., Fatiha, B. and Naji, M.(2005), Surfactant Remediation of Diesel Fuel Polluted Soil, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 164, No. 2~3, pp. 1179~1184.
9. Rodriguez-Cruz, M. S., Sanchez-Martin, M. J. and Sanchez-Camazano, M.(2005), A Comparative Study of Adsorption of An Anionic and A Non-ionic Surfactant by Soils Based on Physicochemical and Mineralogical Properties of Soils, *Chemosphere*, Vol. 615, No. 1, pp. 56~64.
10. Rothmel, R. K., Peters, R. W., St. Martin, E. and Deflaun, M. F.(1998), Surfactant Foam/Bioaugmentation Technology for In Situ Treatment of TCE-DNAPLs, *Environmental Science and Technology*, Vol. 32, No. 11, pp. 1667~1675.
11. Shen, X., Sun, Y., Ma, Z., Zhang, P., Zhang, C. and Zhu, L. (2007), Effects of Mixed Surfactants on The Volatilization of Naphthalene from Aqueous Solutions, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 140, No. 1~2, pp. 187~193.
12. Whang, L. M., Liu, P. W., Ma, C. C. and Cheng, S. S.(2008), Application of Biosurfactants, Rhamnolipid, and Durfactin, for Enhanced Biodegradation of Diesel-Contaminated Water and Soil, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 151, No. 1, pp. 155~163.
13. Zhao, B., Zhu, L. and Gao, Y.(2005), A Novel Solubilization of Phenanthrene using Winsor Microemulsion-Based Sodium Castor Oil Sulfate, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 119, No. 1~3, pp. 205~211.
14. Zhou, W. and Zhu, L.(2008), Enhanced Soil Flushing of Phenanthrene by Anionic-Nonionic Mixed Surfactant, *Water Research*, Vol. 42, No. 1~2, pp. 101~108.

(접수일: 2011. 2. 7 심사일: 2011. 3. 3 심사완료일: 2011. 5. 3)