

유류오염토양의 정화에서 미생물, 영양제 및 계면활성제의 영향

선용호*

상지대학교 환경공학과

The Effect of Microorganisms, Nutrients, and Surfactants on the Bioremediation of Oil-Contaminated Soil

Yong-Ho Seon*

Department of Environmental Engineering, Sangji University, Wonju, Kangwon-Do 220-702, Korea.

Abstract This study was focused on the investigation of the characteristics of TPH and BTEX removal in oil-contaminated sandy soil and fine soil with injection of microorganisms, nutrients, and surfactants. As the result of the experiments maintained moisture contents by 10~20%, the TPH removal efficiency in oil-contaminated sandy soil was the highest in C-1 (microorganisms+nutrients), and the efficiency in C-2 (microorganisms+nutrients+surfactants) was higher than the efficiency in C-0(microorganisms). In 81 days, TPH removal efficiency in case of C-0, C-1 and C-2 showed 51%, 83%, 63% respectively. The results of D group with fine soil showed similar trends as C group, but the TPH removal efficiency of D group was lower than that of C group. Those of both C and D group were the highest in 1 group (microorganisms+nutrients). The pH of fine soil was some lower than that of sandy soil or was similar to sandy soil. In 14 days, BTEX removal efficiency in case of C-0, C-1, C-2, D-0, D-1 and D-2 showed 99.8%, 99.4%, 96.0%, 99.5%, 99.2%, 96.3% respectively. Those of both C and D group were the highest in 0 group (microorganisms).

Keywords: TPH, BTEX, oil-contaminated soil, microorganisms, nutrients, surfactants, removal efficiency, bioremediation

서 론

현재 급속한 경제발전과 생활수준의 향상으로 가솔린, 디젤 등 유류의 소비가 비약적으로 증가하고 있으며 이에 따른 유류 저장시설이 증가하여 2008년 환경부 자료에 의하면 특정 토양오염유발시설을 설치, 신고한 업소는 전국적으로 22,215개소, 그 중 주유소가 14,734개소로서 상당수를 차지하고 있으며 계속 증가 추세이다(1). 군부대 내에서 사용되는 유류 저장탱크에 의한 토양오염 및 저유소, 주유소 등 유류저장시설의 노후화, 송유관 부식으로 인한

가솔린, 디젤 등 유류의 지하 유출에 따른 토양오염이 가속화되고 있으며 이로 인해 사회문제화 되고 있다. 특히 군부대의 이전으로 기존 부지에서의 석유계 탄화수소 누출에 의한 토양오염이 속속 밝혀지고 있다(2).

토양은 물, 공기와 함께 가장 기본적인 환경의 구성 요소이고, 생물 존재의 기반으로, 물질순환의 매체로서 매우 중요하고 다양한 역할을 수행하고 있다. 토양이 물, 공기와 크게 다른 점은 유동성이 거의 없다는 점인데, 토양 내에 유입된 오염물질은 스스로 움직이지 않는 한 토양 공극 내에 존재하는 토양수나 토양공기의 흐름에 의해서만 움직이게 되어 있어 오염물질이 토양 내로 유입되면 오염정도가 쉽게 드러나지 않고 청정한 상태로 보이게 된다. 그러나 일단 토양이 유해물질에 의해 오염되면 생물존재기반으로서의 본래 기능이 훼손되고 물질의 이동성이 악화되어 장

*Corresponding author

Tel: +82-33-730-0445, Fax: +82-33-730-0403
e-mail: yhseon@sangji.ac.kr

기간에 걸쳐 식물 오염과 지하수 오염 등의 수질환경 오염을 유발시켜 생태계는 물론 사람의 건강 및 생활환경까지 위협하게 된다. 또한, 한번 오염된 토양은 그 특성상 자정 작용이 쉽게 나타나지 않고 정화에 많은 시간과 비용이 수반되는 문제점을 안고 있어 토양오염을 사전 제어하는 것과 함께 확실한 사후처리공정을 개발하고 적용하여 오염된 토양을 복원하는 것은 매우 중요한 일이 아닐 수 없다(3). 특히 유류에 의한 오염은 더욱 심각한 실정이다.

유출된 유류는 자연 상태에서 휘발, 용해, 흡착, 분해, 이동 등 다양한 물리, 화학, 생물학적 기작에 의해 일부 자연정화가 이루어지나 농도와 양이 자정작용 이상으로 증가하면 이때부터 유류는 축적되기 시작한다. 이렇게 오염물질이 축적된 오염토양을 정화하는 방법에는 토양세척법, 액체를 이용한 추출, 열에 의한 탈착 등 물리적 방법, 화학적 방법, 생물학적 방법이 있다(4, 5). 생물학적 방법을 제외한 현재의 토양복원 방법은 고가로 막대한 예산이 소요되고 있고 제2의 오염원이 발생할 소지가 있으므로 계속적으로 토양복원에 이용하기에는 한계가 있으며 생물학적 방법이 가장 경제적이고 환경친화적이므로 앞으로 개발되는 오염 토양 복원 방법으로는 이 방법이 주가 될 것으로 전망된다. 특히 분해능이 뛰어난 미생물에 의한 복원 방법이 필요할 것으로 예상된다.

본 연구는 새로운 실험실 규모 토양오염 정화장치를 설계, 제작한 후 인위적으로 오염시킨 사질토와 미세토를 대상으로 미생물, 영양제 및 계면활성제를 이용하여 성능실험을 수행하여 시간에 따른 석유계 총탄화수소 (TPH)와 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌인 BTEX의 제거 특성에 대해 연구하였다.

재료 및 방법

실험재료 및 장치

본 실험에서 토양입자의 크기에 따른 정화 효율을 비교하기 위해 사용된 사질토 및 미세토는 황토가 섞인 밭의 흙이며 사질토와 미세토의 입자는 각각 0.02 mm 이상, 0.002 mm~0.02 mm이었다. 실험장치는 Fig. 1에서 같이 아크릴재질로 이루어진 가로, 세로 높이가 각각 30cm, 30cm, 20cm인 직육면체의 반응기로 구성되어 있으며 저장용량은 1.8 L로 하부로 침출수가 배출될 수 있도록 바닥 지름 0.6cm인 구멍이 365개이며 그 위에 땅을 설치하여 흙은 밖으로 유출되지 못하도록 하였다.

실험방법

실험에 사용되는 TPH 30,000 mg/kg와 BTEX 15,000 mg/kg으로 오염된 유류오염토양을 조제하기 위해 사질토와 미세토 각각 토양 5 kg에 Diesel, Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene 등을 무게비로 각각 농도에 맞게 투입한 후 혼합하였으며 사질토 3가지, 미세토 3가지 총

6가지의 유류오염토양을 준비하였다. 사질토는 C군으로, 미세토는 D군으로 표시하고 C-0 토양은 사질토에 *Bacillus* sp. 1종, *Pseudomonas* sp. 2종, *Acinetobacter* sp. 2종 등 미생물 5종의 배양액을 5%의 농도로 희석하여 250 g를 투입한 토양이며 C-1 토양은 5종의 미생물에 영양제를 10%로 희석하여 500 g를 투입한 토양이다. C-2 토양은 C-1의 토양에 계면활성제를 5%로 희석하여 250 g를 투입하여 조제한 것이다. D군인 미세토의 경우도 사질토와 마찬가지로 조제하였으며 D-0 토양은 미생물만 투입한 토양이며, D-1 토양은 미생물과 영양제가 투입된 토양이고 D-2 토양은 미생물, 영양제 및 계면활성제가 투입된 토양을 의미한다. 각 실험군의 수분은 10~20%를 유지하였다. 앞에서 언급한 6가지의 반응기에서 성능실험을 수행하여 시간에 따른 TPH와 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌인 BTEX의 제거 특성을 관찰한 후 입자의 크기에 따른 정화 특성과 미생물, 영양제 및 계면활성제 투입이 정화효율 향상에 미치는 효과 등을 비교 분석하였다.

시료는 토양오염공정시험방법(6)에 의해 곧바로 분석되거나 최대 7일 동안 4°C에서 유리 용기에 담겨져 저장되었다. 토양 시료의 TPH를 분석하기 위하여 5 g의 시료와 마이크로웨이브 추출장치를 사용하여 추출한 후 GC-FID를 이용하였다. 토양의 수분 함량은 일정 무게를 건조하여 105°C에서 측정하였다. BTEX의 농도도 토양오염공정시험방법(6)으로 분석하였다.

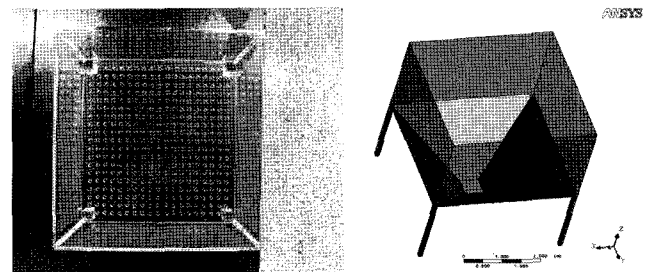


Fig. 1. Experimental apparatus.

결과 및 고찰

TPH의 변화

TPH는 Total Petroleum Hydrocarbon의 약자로서 유류로 오염된 시료 중 등유, 경유, 제트유, 병커C유로 인한 오염 여부를 나타낸다. 유류 중에서도 비등점이 높고 운송 시설이나 공장 등지에서 많이 사용되는 디젤은 대량 사용으로 인해 주유소나 공업지역 등지에 심각한 토양 오염을 나타낼 것으로 판단되어 진다. 디젤은 토양 중에서 분해되지 않고 오랫동안 잔류하는 물질로서 농작물의 생육을 저해하고 사람의 건강에 악영향을 미치는 물질로서 토양 오염물질로 지정되어 있으며 그 농도를 TPH로 표현한다(7).

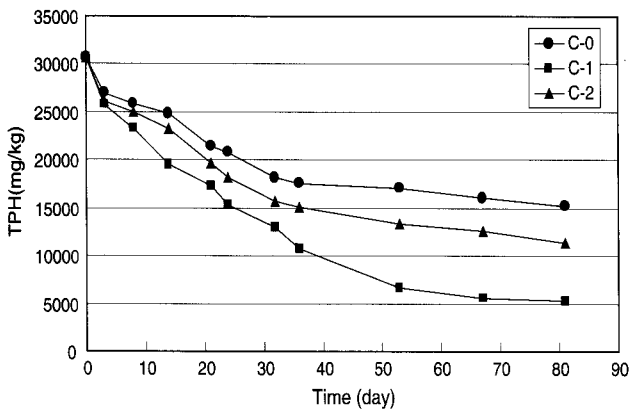


Fig. 2. Changes of TPH concentration in sandy soil.

Fig. 2은 사질토의 경우 미생물, 영양제 및 계면활성제의 투입 여부에 따른 토양에서의 TPH 농도의 변화를 나타낸 것이다. C-0 (미생물), C-1 (미생물 + 영양제), C-2 (미생물 + 영양제 + 계면활성제)가 모두 시간이 경과함에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있으며 처음에는 크게 감소하다가 감소율은 점점 적어졌다. 이는 미생물이 TPH 오염물질을 제거함으로써 TPH가 시간이 흐름에 따라 감소하는 것으로 사료되며 감소의 폭이 줄어드는 것은 잔존하는 TPH의 양이 점점 낮은 이유로 추정된다. 53일 경과 후, C-0과 C-1, C-2의 TPH 농도는 각각 17,090 mg/kg, 6,700 mg/kg, 13,390 mg/kg이었으며 81일 경과 후에는 각각 15,160 mg/kg, 5,350 mg/kg, 11,370 mg/kg으로 C-1, C-2, C-0 순으로 낮았으며 미생물과 영양제를 투입한 C-1의 경우가 C-0과 C-2에 비해 TPH 농도는 경과시간 53일에서 각각 0.39배, 0.50배, 81일에서 각각 0.35배, 0.47배로 더 낮았다.

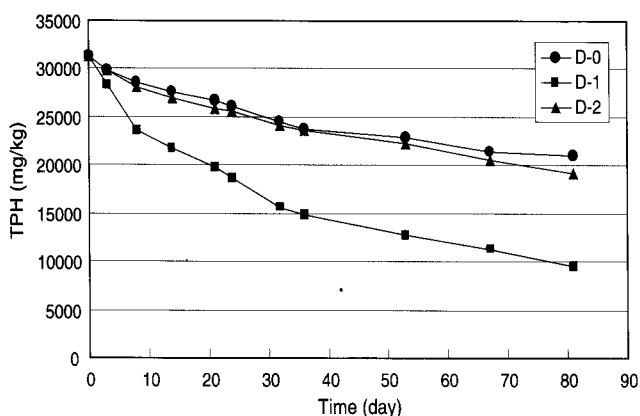


Fig. 3. Changes of TPH concentration in fine soil.

Fig. 3은 미세토의 경우 각각 미생물, 영양제 및 계면활성제의 투입 여부에 따른 토양에서의 TPH 농도의 변화를 나타낸 것이다. TPH 농도 변화는 사질토의 경우와 거의 비슷한 경향을 보이고 있으며 53일 경과 후, D-0과 D-1, D-2의 TPH 농도는 각각 22,830 mg/kg, 12,690 mg/kg, 22,200 mg/kg이었으며 81일 경과 후에는

각각 20,970 mg/kg, 9,520 mg/kg, 19,230 mg/kg으로 D-1, D-2, D-0 순으로 낮았으며 미생물과 영양제를 투입한 D-1의 경우가 D-0과 D-2에 비해 TPH 농도는 경과시간 53일에서 각각 0.56배, 0.57배, 81일에서 각각 0.45배, 0.50배로 더 낮았으며 D-0과 D-2의 경우 TPH 농도가 거의 유사하였다. 두 그래프에서 살펴보면 모든 경우에 사질토의 경우가 미세토의 경우보다 TPH 농도가 낮았다. 이는 2가지 토양의 공극율의 차이와 전체 표면적의 차이에 기인한 것으로 사료된다.

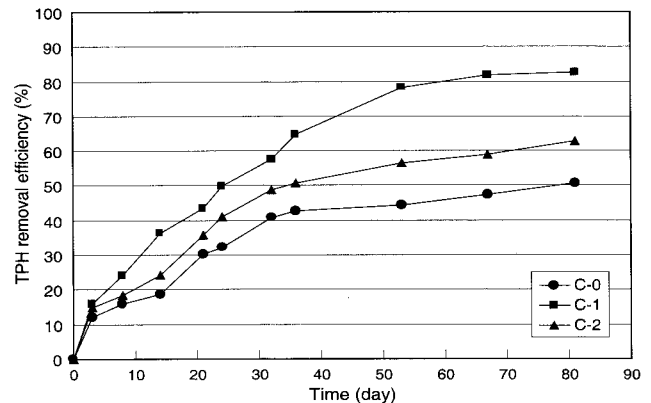


Fig. 4. Variation of TPH removal efficiency in sandy soil.

Fig. 4는 사질토의 경우 각각 미생물, 영양제 및 계면활성제의 투입 여부에 따른 토양에서의 TPH 제거율의 변화를 나타낸 것이다. 가장 높은 제거율과 제거속도를 보인 것은 미생물과 영양제를 투입한 C-1이었으며 C-1, C-2, C-0 순으로 높았으며 경과시간 53일에서 C-0, C-1, C-2의 TPH 제거율은 각각 44%, 78%, 56%이며 경과시간 81일에서는 각각 51%, 83%, 63%를 나타내었다. 예상대로라면 C-2가 제거율이 가장 높게 나와야하지만 실제 C-1 경우가 C-2의 경우보다 제거율이 높게 나왔다. 이는 계면활성제의 독성에서 기인한 것으로 사료된다. 따라서 실제 현장에서의 정화 처리시 계면활성제의 투입 여부를 신중하게 고려해야 할 것으로 사료된다.

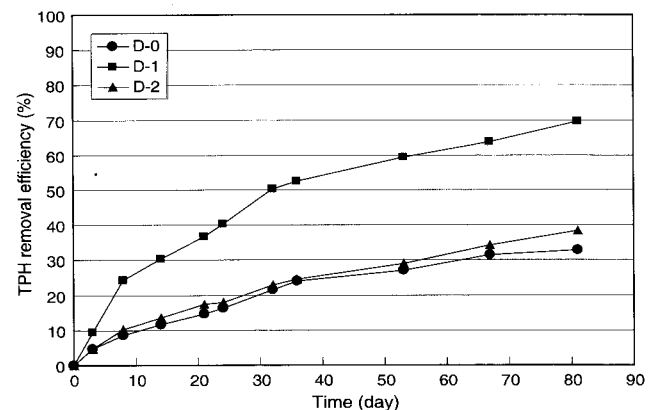


Fig. 5. Variation of TPH removal efficiency in fine soil.

Fig. 5는 미세토의 경우 각각 미생물, 영양제 및 계면활성제의 투입 여부에 따른 토양에서의 TPH 제거율의 변화를 나타낸 것이다. 가장 높은 TPH 제거율과 제거속도를 보인 것은 사질토의 경우와 마찬가지로 미생물과 영양제를 투입한 D-1이었으며 D-1, D-2, D-0 순으로 높았으며 경과시간 53일에서 D-0, D-1, D-2의 TPH 제거율은 각각 27%, 59%, 29%이며 경과시간 81일에서는 각각 33%, 70%, 38%를 나타내었다. 이 TPH 제거율은 사질토와 비교하면 현저히 낮은 제거율로 미세토의 경우에는 실제 현장에서는 혼합과 더불어 통풍을 고려해야 할 것으로 사료된다. 미세토의 경우 D-0과 D-2의 경우가 거의 비슷한 제거율을 나타내고 있으며 미세토의 경우는 특히 계면활성제의 투입 여부를 신중하게 고려해야 할 것으로 사료된다. 사질토와 미세토의 2가지 경우 미생물과 영양제를 투입한 경우가 가장 높았다.

함수율과 pH의 변화

함수율은 미생물의 활성 및 BTEX의 휘발성에 있어서 중요한 영향인자로서 작용한다. 미생물은 증식 및 활동을 위해 일정량의 수분을 필요로 한다. 반면 수분은 미생물의 신진 대사에 중요한 요소이지만 과도한 수분의 공급은 토양의 공극을 막아서 공기 흐름을 제한하고, 산소의 활용능력을 감소시키는 결과를 가져오기 때문에 적당한 수분을 유지하는 것이 중요하다. 또한, 높은 함수율은 BTEX의 휘발성을 방해함으로써 제거율을 감소 및 완화시킨다. 반대로 너무 낮은 함수율은 미생물의 활성에 악영향을 주어 TPH 및 BTEX의 제거율을 감소시키는 것으로 보여진다. 따라서 본 실험에서는 각 실험군의 수분을 10~20%를 유지하도록 노력하였다.

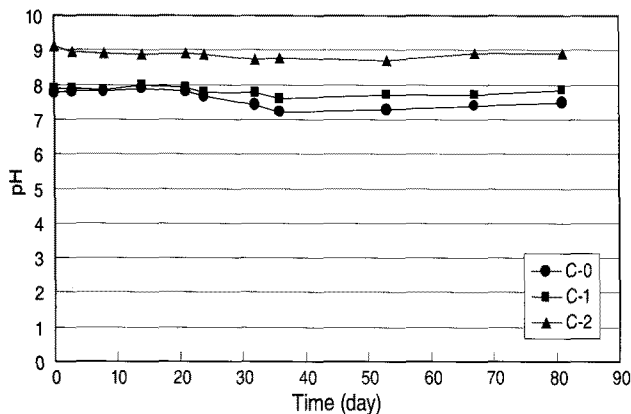


Fig. 6. Changes of pH in sandy soil.

수소이온농도 (pH)는 미생물 효소 활성에 영향을 미쳐 미생물 성장속도에 영향을 준다. 따라서 원활한 미생물 성장을 위한 활성은 pH에 따라 달라진다. 미생물에는 최적 pH의 영역이 있어 그 이상 그 이하가 되면 활성이

급격히 저하되기 때문에 대부분 미생물은 중성인 pH 7 근방이 좋으며 보통 pH 6.0~8.0의 범위내로 유지되어야 하는 것이 보통이고 비교적 좁은 pH 6~8의 범위에서 최고의 처리율을 보인다. pH가 4~5이하이거나 9~9.5이상이면 박테리아 및 미생물의 활성이 저하된다(8).

Fig. 6은 사질토의 경우 각각 미생물, 영양제 및 계면활성제의 투입 여부에 따른 토양의 pH 농도의 변화를 나타낸 것이다. C-2 토양의 경우 pH가 가장 높았으며 그 다음으로 C-1 토양, C-0 토양의 순으로 높았다. 이는 영양제와 계면활성제 투입, 또 영양제 분해에 따른 NH_4^+ 발생 때문인 것으로 사료된다. C-0, C-1, C-2 토양의 pH 범위는 각각 7.20~7.88, 7.58~7.99, 8.70~9.12이었으며 평균 pH는 각각 7.60, 7.81, 8.87로 C-2 토양의 pH가 특히 높은 것은 계면활성제의 영향인 것으로 추정된다. 앞에서 언급한 최적 환경조건은 pH6~8로 C-0 토양과 C-1 토양은 이 pH 범위에 포함되므로 미생물의 영향은 없는 것으로 판단되나 C-2 토양의 경우 이 범위에 속하지 않기 때문에 계면활성제의 독성과 더불어 낮은 TPH 제거율의 한 요인으로 추정된다. 그러므로 산성 및 알칼리성 토양의 경우 미생물 처리 전 전처리로서 중성 토양으로 중화시키는 공정이 필요할 것으로 사료된다.

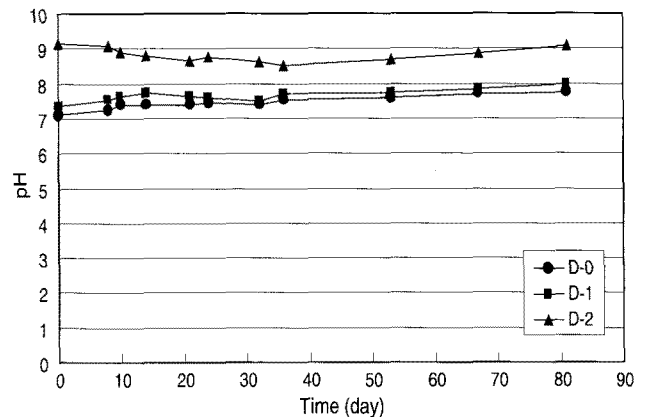


Fig. 7. Changes of pH in fine soil.

Fig. 7은 미세토의 경우 각각 미생물, 영양제 및 계면활성제의 투입 여부에 따른 토양의 pH 농도의 변화를 나타낸 것이다. 사질토와 마찬가지로의 경향을 보이고 있으며 D-0, D-1, D-2 토양의 pH 범위는 각각 7.10~7.73, 7.34~8.00, 8.51~9.16이었으며 평균 pH는 각각 7.45, 7.66, 8.84이었다. 사질토의 경우보다 다소 낮거나 유사한 수치를 나타내고 있으며 이러한 차이는 두 토양의 공극율과 흡착 표면적의 차이에 의한 것으로 추정된다.

BTEX 변화

BTEX란 유류의 오염도 등을 조사할 때 분석항목에 포함되는 유기화합물질인 벤젠 (Benzene), 톨루엔 (Toluene),

에틸벤젠 (Etylbenzene), 자일렌 (Xylene)을 지칭하며 이들은 물보다 가벼운 물질이고 난용성 물질이다. BTEX는 휘발성 방향족 탄화수소로 휘발유 같은 석유제품이나 원유에서 주로 발견되며 BTEX에 의한 오염은 주로 저장탱크에서의 누출, 송유관로 파손 등으로 발생한다. BTEX는 유독성이 강한 유기용제들로 피부에 묻으면 지방질을 통과해 체내에 흡수되며 대부분 중독성이 강해 뇌와 신경에 해를 끼치는 독성물질로 분리된다. 벤젠은 인체 발암물질에 속하며, 저농도의 벤젠에 장기간 노출될 경우 만성중독을 일으켜 빈혈, 혈액응고장애 등이 발생하고 백혈구가 파괴되어 감염에 대한 저항력을 떨어뜨린다. 또한 톨루엔에 일정 시간 노출될 경우에는 두통, 마비감, 탈력감, 전신경직, 구토, 경련 등의 신체적 증상이 일어날 수 있으며, 자일렌과 에틸벤젠은 유해화학물질로 물에 잘 녹지 않으며 기준치 이상의 자일렌은 목에 염증을 일으키거나 피부염, 폐렴, 폐수종 등을 유발시키는 물질이다(9).

BTEX는 휘발성이 강해 300°C 이상에서는 대기 중으로 거의 대부분 휘발되며 미생물로 분해할 경우 온도, 수분함량, 미생물의 활성, 전자수용체에 의해 영향을 받는다. 온도는 높을수록 미생물의 활성에 영향을 주기 때문에 BTEX의 분해를 촉진시키는 역할을 하며 유기물질들은 미생물이 성장을 위한 신진대사의 부산물과 에너지를 생성하기 위해 전자수용체, 전자공여체 및 영양분과 결합할 때의 생물학적 산화과정을 통해 저장된다(10).

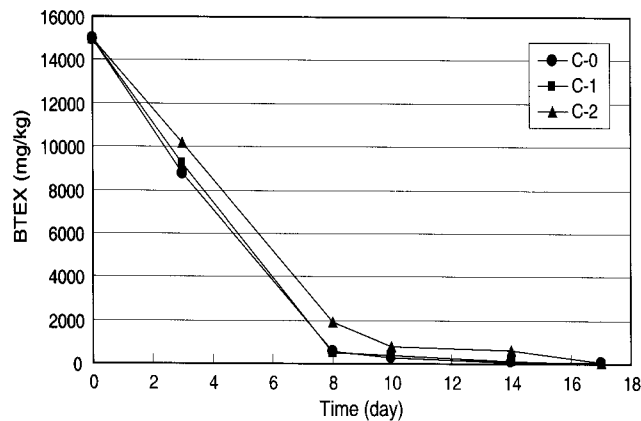


Fig. 8. Changes of BTEX concentration in sandy soil.

Fig. 8은 사질토의 경우 각각 미생물, 영양제 및 계면활성제의 투입 여부에 따른 토양에서의 BTEX 농도의 변화를 나타낸 것이다. C-0 (미생물), C-1 (미생물 + 영양제), C-2 (미생물 + 영양제 + 계면활성제)가 모두 시간이 경과함에 따라 급격히 감소하며 BTEX가 거의 제거되는 경향을 보이고 있다. C-0과 C-1의 BTEX 제거 양상은 거의 유사하며 C-2의 경우 BTEX가 제거되는 속도는 낮았으며 거의 제거되는 시점이 C-0 토양, C-1 토양에서는 약 10일 정도, C-2 토양인 경우는 17일 정도 소요되는 것으로 나타났다. 17일 경과 후, C-0과 C-1, C-2의 BTEX

농도는 각각 30 mg/kg, 18 mg/kg, 45 mg/kg으로 토양환경보전법에 의한 토양환경기준 중 나지역 우려기준인 80 mg/kg 이하를 나타내고 있다. 또한 BTEX는 휘발성이 강하기 때문에 토양에서 휘발하여 대기 중으로 이동하였을 경우 대기방지시설이 필요하다.

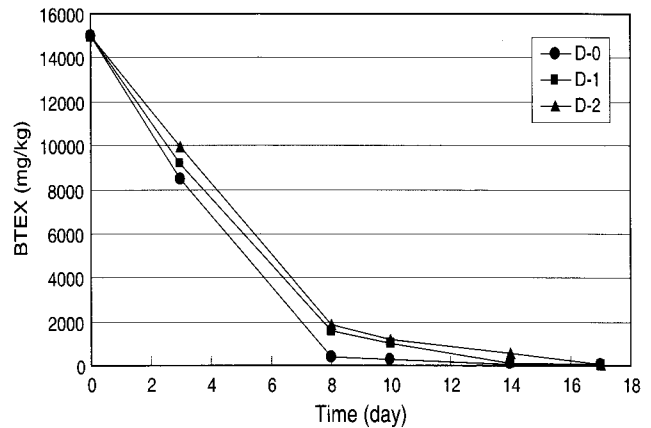


Fig. 9. Changes of BTEX concentration in fine soil.

Fig. 9는 미세토의 경우 각각 미생물, 영양제 및 계면활성제의 투입 여부에 따른 토양에서의 BTEX 농도의 변화를 나타낸 것이다. 미세토의 경우도 사질토의 경우와 비슷한 경향을 나타내고 있으나 D-1 토양에 비해 D-0 토양의 경우가 더 낮은 BTEX 농도를 나타내고 있다. 거의 제거되는 시점이 D-0 토양, D-1 토양, D-2 토양의 경우 각각 약 10일, 14일, 17일 정도 소요되는 것으로 나타났다. 17일 경과 후, D-0과 D-1, D-2의 BTEX 농도는 각각 60 mg/kg, 32 mg/kg, 45 mg/kg으로 토양환경보전법에 의한 토양환경기준 중 나지역 우려기준인 80 mg/kg 이하를 나타내고 있다.

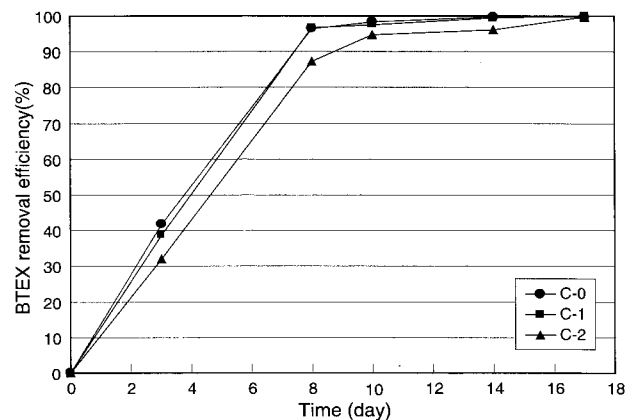


Fig. 10. Variation of BTEX removal efficiency in sandy soil.

Fig. 10은 사질토의 경우 각각 미생물, 영양제 및 계면활성제의 투입 여부에 따른 토양에서의 BTEX 제거율의 변화를 나타낸 것이다. 가장 높은 BTEX 제거율과 제거

속도를 보인 것은 C-0과 C-1 토양으로 거의 비슷한 수치를 나타내고 있으나 C-2 토양은 다소 제거율이 낮았다. 14일이 경과한 후 C-0, C-1, C-2의 제거율은 각각 99.8%, 99.4%, 96.0%이었다.

Fig. 11은 미세토의 경우 각각 미생물, 영양제 및 계면활성제의 투입 여부에 따른 토양에서의 BTEX 제거율의 변화를 나타낸 것으로 사질토와 마찬가지로 양상을 보이고 있으며 사질토에서와는 달리는 D-0 토양과 D-1 토양의 BTEX 제거율 차이가 더 크게 나타났다. 따라서 BTEX 제거율이 높은 순서는 D-0, D-1, D-2 순이었으며 14일 경과 후 D-0, D-1, D-2의 BTEX 제거율은 각각 99.5%, 99.2%, 96.3%이었다. 미생물만 투입한 경우가 가장 높았다.

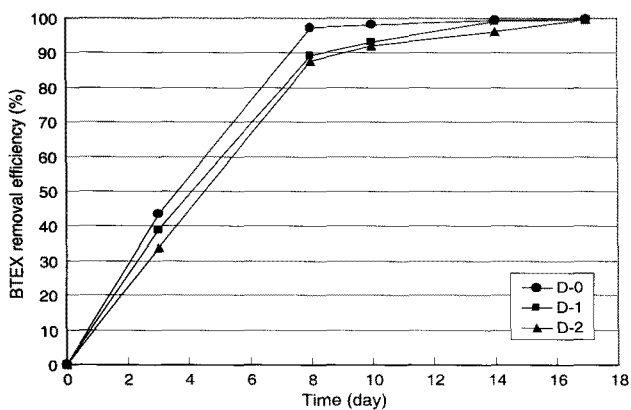


Fig. 11. Variation of BTEX removal efficiency in fine soil.

요약

본 연구는 인위적으로 오염시킨 사질토와 미세토를 대상으로 미생물, 영양제 및 계면활성제를 이용하여 성능실험을 수행하여 시간에 따른 TPH와 BTEX의 제거 특성 등에 대해 알아보았다. 수분 함량을 10~20%로 유지하면서 실험한 결과, 사질토를 이용한 TPH 제거율은 C군의 경우 C-1 (미생물+영양제), C-2 (미생물+영양제+계면활성제), C-0 (미생물) 순으로 높았고 경과시간 81일에서는 각각 51%, 83%, 63%를 나타내었다. 미세토를 이용한 D군의 경우도 마찬가지로 양상을 보이고 있으나 C군 보다 더 낮은 TPH 제거율을 나타내었으며 미생물과 영양제를 투입한 경우가 가장 높았다. 미세토의 pH는 사질토의 pH 보다 다소 낮거나 유사한 수치를 나타내고 있고, C-0, C-1, C-2의 BTEX 제거율은 14일이 경과한 후 각각 99.8%, 99.4%, 96.0%이며 D-0, D-1, D-2의 제거율은 각각 99.5%, 99.2%, 96.3%로 미생물만 투입한 경우가 가장 높았다.

감사

이 논문은 2007년도 상지대학교 교내 연구비 지원에 의한 것으로 이에 감사를 드립니다.

접수 : 2009년 2월 2일, 게재승인 : 2009년 2월 16일

REFERENCES

1. Ministry of Environment (2008), Environmental Statistics Yearbook, p581, Ministry of Environment, Seoul.
2. Lee, W. B., G. O. Kwon, D. S. Kim, and J. Kim (2006), Respiration Measurement for Oily Contaminated Soil in Presence of Microbial Product, *J. of KSWES*, **23**(5), 404-409.
3. Rho, S., C. H. Lee, and D. Jahng (1999), Nutritional Factors Affecting Efficiency of a Bioremediation Process for Diesel-Contaminated Soil, *Korean J. Biotechnol. Bioeng.* **14**(4), 503-510.
4. Ministry of Environment (2007), Guideline of Treatment Methods for Contaminated Soil, p214, Ministry of Environment, Seoul.
5. Kim, S. J., J. Y. Park, Y. J. Lee, and J. W. Yang (2006), Bacterial Behavior in Soil under Electric Field and its Effect on Electrokinetic Bioremediation, *Korean J. Biotechnol. Bioeng.* **21**(3), 175-180.
6. Ministry of Environment (2007), Korean Standard Methods for the Examination of Soil Pollution, p424, Ministry of Environment, Seoul.
7. Ministry of Environment (2008), Soil Environment Conservation Act, p1, Ministry of Environment, Seoul.
8. Metcalf & Eddy (2003), Wastewater Engineering : Treatment and Reuse, 4rd ed., pp887-930, McGraw-Hill, New York.
9. LI, G. C., S. Y. Chung, and J. H. Park (2007), Isolation of BTEX Degrading Bacteria and Biodegradation Characteristics, *J. of KSWES* **24**(8), 689-695.
10. Ha, S. A. and H. K. Yeom (2007), A Study of Treatment Conditions of Oil Contaminated Soil by Low Temperature Thermal Desorption, *J. of KSEE* **29**(8), 956-960.