

《原著》

토양 세척법에 의한 유류오염 사질토양의 TPH 추출 효율 평가

이차돌¹ · 유종찬¹ · 양중석² · 공 준³ · 백기태^{1*}

¹전북대학교 환경공학과

²한국과학기술연구원 강릉분원

³코오롱워터앤에너지

Extraction of Total Petroleum Hydrocarbons from Petroleum Oil-Contaminated Sandy Soil by Soil Washing

Cha-Dol Lee¹ · Jong-Chan Yoo¹ · Jung-Seok Yang² · Jun Kong³ · Kitae Baek^{1*}

¹Department of Environmental Engineering, Chonbuk National University

²KIST Gangneung Institute

³Kolon Water & Energy

ABSTRACT

The influences of various operating parameters on physico-chemical techniques were evaluated to remediate petroleum-contaminated sandy soil including S/L ratio, kinetic, and effect of soil particle size. The simple extraction using tap water removed only 20.6% of total petroleum hydrocarbon (TPH), and addition of NaOH enhanced the removal of TPH to approximately 30%. To meet the regulation levels, a surfactant, sodium dodecyl sulfate, was added, and the removal of TPH increased to 4 times. Probably, the carbonate minerals affected chemical aging and sorption of petroleum, which inhibited the extraction of TPH. The soil with smaller particle size contained more TPH, and the removal of TPH was obstructed with smaller particle size. However, NaOH addition increased the removal of TPH in the smaller particles. The physico-chemical properties of soil influenced greatly the removal of petroleum even in sandy soil.

Keywords : Soil washing, TPH, Diesel, Sodium hydroxide, Sodium Dodecyl Sulfate

1. 서 론

국내 유류와 관련된 토양오염 유발시설로는 전국적으로 산재하는 주유소 및 저유소, 송유관시설과 산업부지, 군사 지역 내 유류저장시설 등으로 나누어진다. 이러한 유류 관련 토양오염 유발시설에서 관리자의 취급 부주의나 시설의 장기간 운영에 따른 유류의 누출은 토양 및 지하수의 오염을 일으키며, 이로 인한 환경문제가 심각하게 대두되고 있다(Ministry of Environment, 2009). 특히, 유류로 인한 토양오염은 주변 환경 및 생태계를 파괴하고 인체에 유해할 뿐만 아니라 오염 지역에 대한 피해배상이나 정화 책임분쟁이 가장 많기 때문에 중점적인 관리가 필요한 실정이다(Park and Kim, 2012).

지금까지 국내에서 정화가 완료된 부지의 대부분은 유류오염이며, 이들의 처리는 생물학적 처리방법 중 하나인 토양경작법(Land farming)이 주를 이루고 있다(Kim et al., 2011). 하지만 생물학적 처리의 경우 호기성 생분해 공정의 특성상 장기간의 처리기간 소요 및 부지와 기후의 영향을 받으며, 높은 유류오염농도에서는 법적 기준치 이내로 정화가 어려운 단점이 있다. 이러한 생물학적 정화의 대안으로 물리화학적 정화방법에 대한 연구가 진행되고 있는데, 대표적으로 산화제를 이용하여 오염물질을 물과 이산화탄소로 산화시켜 처리하는 화학적 산화법(Chemical oxidation)과 세척제가 포함된 수용액과 토양을 접촉시켜 오염물질을 탈착하는 토양 세척법(Soil washing) 등의 정화방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(Back

*Corresponding author : kbaek@jbnu.ac.kr

원고접수일 : 2013. 5. 29 심사일 : 2013. 11. 6 게재승인일 : 2013. 11. 6
질의 및 토의 : 2014. 2. 28 까지

et al., 2007; Feng et al., 2001; Lee et al., 2002). 이러한 물리화학적 정화방법은 운영 시 정화비용이 증가하는 단점이 있으나, 생물학적 처리방법에 비해 적용범위가 넓고, 단기간에 보다 높은 제거율을 얻을 수 있는 이점으로 인해 널리 사용되는 추세이다. 그러나 화학적 산화에 의한 정화에서는 산화반응으로 인해 가스 및 열이 발생하여 토양 온도가 상승하고, 산화제 자체가 불안정하여 오염물질과 접촉하기 전에 분해되는 경우도 많다(Huling and Pivetz, 2006). 토양세척법은 주로 중금속 오염 토양을 정화하기 위해 사용되나(Baek et al., 2007), 유류오염을 정화하기 위해서도 적용될 수 있다(Park et al., 2008; Park et al., 2011). 비이온성 계면활성제와 음이온성 계면활성제가 유류오염 토양세척에서 많이 사용되는 세척제로 토양과 오염물질간의 계면장력을 감소시켜, 표면에 흡착된 TPH의 용해도를 증가시키며, 분자량이 작은 탄화수소에서 보다 높은 제거효과가 나타났다(Khalladi et al., 2009). Vreysen and Maes(2005)은 디젤로 인공 오염시킨 사양토를 이용한 연구에서 6.77×10^{-4} mol/L의 낮은 농도의 비이온성 계면활성제를 사용하여 디젤을 50%까지 제거할 수 있었으며, Hernández-Espriú et al.(2013)의 연구에서도 0.5%의 SDS 용액을 이용한 토양 세척법의 경우 60%의 TPH 제거율을 얻을 수 있었다.

계면활성제가 유류의 세척효율을 증가시키기는 하나 토양에 흡착되어 2차 오염을 유발할 가능성이 있고, 미생물에 대한 독성으로 생물학적 정화에 악영향을 미칠 가능성이 있다(Moon et al., 2002). Son et al.(2012)은 초음파 조사와 토양세척을 동시에 적용하면 개별 적용에 비해 TPH 제거율이 상승하는 시너지 효과를 얻을 수 있다고 보고하였다. 이러한 화학적 산화나 계면활성제의 적용은 디젤이 토양과 화학적으로 강하게 결합하고 있을 때 일반적으로 사용되며, 사질토와 같은 화학적 결합 가능성이 낮은 토양에서는 물리적 선별과 별도의 세척제 없이 물과의 교반에 의해서 디젤 오염토양을 처리하는 경우도 많이 있다. 이는 모래의 표면 반응성이 낮아 오염물질이 토양과 약한 물리적 결합을 하고 있기 때문이다. 그러나 누유가 발생하고 오랜시간이 경과하여 풍화가 진행된 경우에는 오염 양상이 변화될 수 있으며, 해수와 접촉하고 있는 오염토양의 경우에는 풍화의 양상이 다르기 때문에 일반적인 토양과는 다른 접근 방법이 필요하다.

본 연구에서는 오염 후 오랜 시간이 경과하여 풍화가 상당부분 진행된 디젤로 오염된 모래에서 다양한 추출 조건에서의 TPH 제거 효율을 평가하였다. 특히 수돗물만을 사용한 물리적 교반의 효율성을 평가하였으며, 추출제로

NaOH와 계면활성제를 사용한 경우의 TPH 제거 효율을 비교평가하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험대상 토양

본 연구에서 사용된 디젤오염 토양시료는 바닷가에 위치한 A 부지에서 채취하였으며, 장기간의 유류저장시설 운영 중 누유로 인해 풍화가 상당부분 진행된 토양이었다. 채취한 토양은 실험에 사용하기에 앞서 상온에서 수일간 풍건 후 2 mm 이하로 체거름하여 사용하였다. 대상 토양의 총석유계탄화수소(TPH)의 가스크로마토그램을 확인한 결과 풍화가 오랜 기간 진행된 것으로 추정되며, 인공 오염시킨 토양과의 비교를 위해 Fig. 1에 크로마토그램을 나타내었다.

2.2. 실험방법

토양에 흡착된 유류를 세척하기 위한 세척제로는 수돗물 및 NaOH(Sodium hydroxide, OCI, Korea)와 SDS(Sodium Dodecyl Sulfate, Sigma Aldrich, USA)를 사용하였다. 토양은 2 mm 이하의 입경을 가지는 토양을 대상으로 원추사분법으로 고르게 섞어준 다음 25 ± 0.001 g을 분취하여, 삼각플라스크에 넣어 항온수평진탕기(SI-900R, JEIO TECH, Korea)를 이용하여 20°C에서 150 rpm으로 교반해주었다. 세척제의 농도 및 고액비, 시간에 따른 TPH의 추출 효율 및 입경별 세척 효과를 비교하였다.

2.3. 분석방법

세척이 완료된 이후 5B 여과지를 사용하여 진공여과를 통해 처리토와 세척수를 분리하고 토양오염공정시험기준에 준하여 분석하였다. 분리된 토양 10 ± 0.1 g에 무수황산나트륨을 충분히 넣어 분말상태 까지 수분을 제거 한 뒤, 50 mL의 dichloromethane을 넣어 초음파 추출법으로 추출 후 20 mL 부피로 농축하였다. 이 중 2 µL를 Gas Chromatography(CP-3900GC/FID, Varian, USA)로 분석하였다.

GC 분석조건은 Carrier gas로 질소(N₂)를 이용하였으며, flow rate 1.0 mL/min으로 사용하였다. 주입구와 검출기는 300°C, 오븐은 45°C에서 2분간 유지 후 18°C/min으로 320°C까지 승온 후 20분간 유지하였다. 이러한 분석방법은 토양오염공정시험기준에 따른 분석조건과 비교했을 때, 동일한 결과를 얻을 수 있으며, 분석시간 단축의 이점이 있었다. 모든 실험은 2회 이상 반복 수행하여 평균값으로 표시하였다.

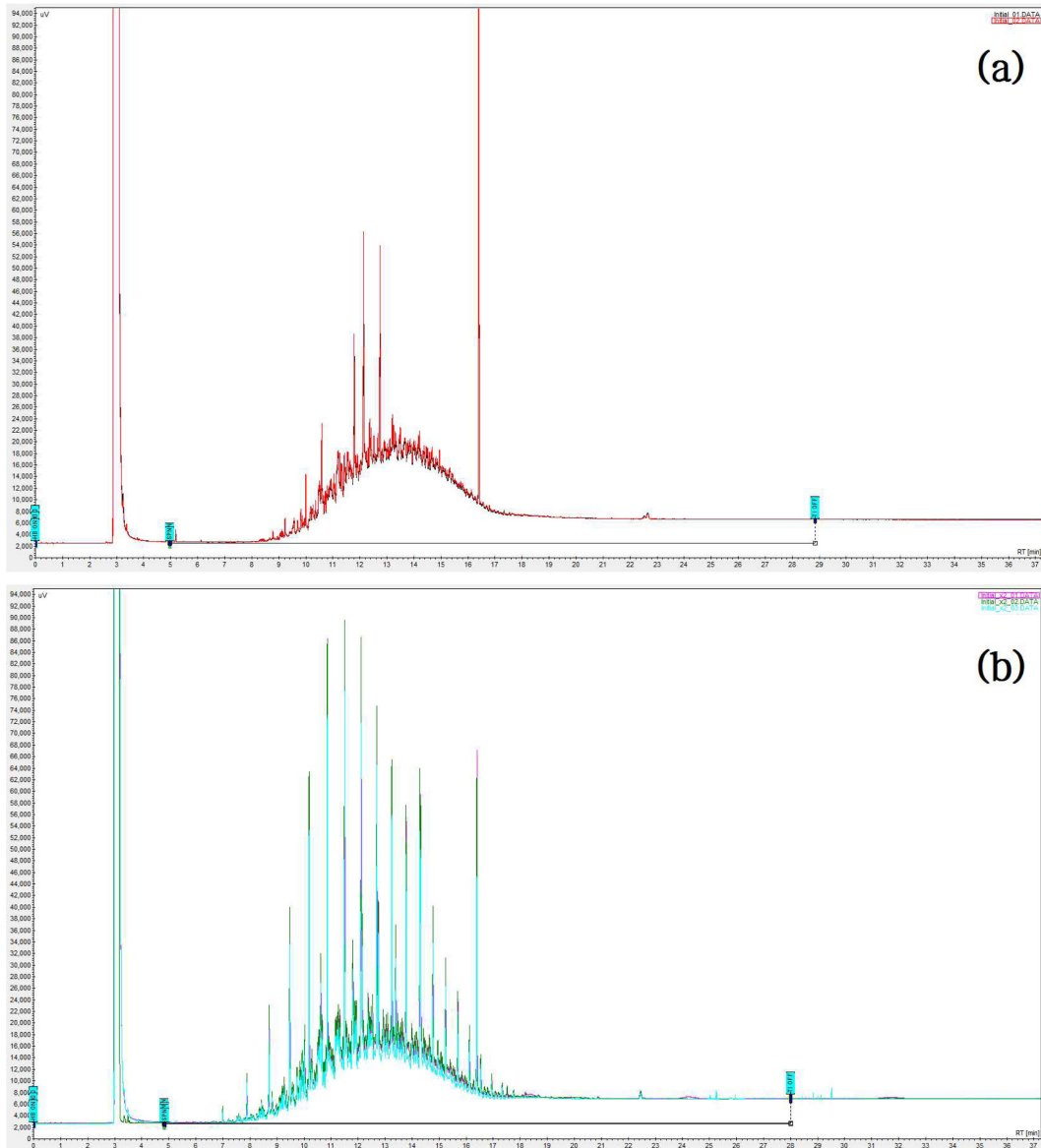


Fig. 1. GC chromatogram of TPH (a) soil sample; (b) General diesel-contaminated soil.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 토양의 물리화학적 특성

토양의 입자 크기 분포는 습식 체분리 시험법(KS F2302)에 준하여 500 ± 0.001 g의 토양을 흐르는 물을 이용하여 단계별로 체걸음한 후, 105°C 에서 무게의 변화가 없을 때까지 건조하여 건조중량의 무게차를 이용하여 계산하였다. 습식 입도선별은 선별 과정에서 TPH가 물에 씻겨 오염도의 차이가 발생할 수 있기 때문에, 본 연구에서는 입도별 토양 세척을 적용하기 위해 건식 입도선별을 통해 TPH 농도 분석을 수행하였다.

토양의 초기 pH는 8.2, 풍건 후 수분함량은 약 1%였으며, 토양 입경 분포와 입경별 오염도 분석 결과는 Table 1에 나타내었다.

대상 토양의 초기 TPH 오염도는 6회 측정결과 평균 6618.7 ± 544.7 mg/kg으로 토양환경보전법의 3지역 대책기준을 초과하는 농도로 나타났다. 입자 크기 분포에 따라 토성은 모래가 99.5%, 미사가 0.4%, 점토가 0.1%의 사질토였으며, 입경별 오염도에서 크기가 작아질수록 TPH 농도가 증가하는 경향을 보였다. 이러한 특징을 나타내는 것은 토양표면이 주로 오염되었으며 넓은 표면적을 가지는 작은 입경의 모래에 많은 양의 유류가 물리적으로 결

Table 1. Size distribution and initial TPH concentration of soil

Size (mm)	< 0.15	0.15-0.212	0.212-0.5	0.5-1	1-2	Total
Distribution (%)	9.9	10.6	54.0	18.5	7.1	100
TPH conc. (mg/kg)	7432.1	6090.1	6200.1	4832.9	1377.5	6618.7

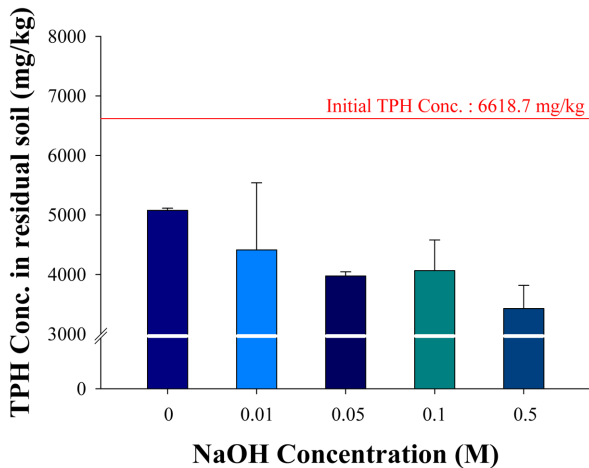


Fig. 2. TPH concentration in residual soils after soil washing experiments; effect of Sodium hydroxide concentration.

합하고 있음을 의미한다.

3.2. 유류오염토양 세척에서 NaOH의 농도에 따른 세척 효율

세척수의 NaOH 농도에 따른 영향을 알아보기 위해 고액비 1:2에서 NaOH를 0 M, 0.01 M, 0.05 M, 0.1 M, 0.5 M로 다양하게 적용한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 또한, 선행실험에서 10 분 이상의 시간에서 교반이 이루어질 경우, TPH의 세척효율 결과가 비슷한 수치를 보일 수 있어 비교를 위해 세척시간을 10분으로 고정하였다.

NaOH 투입없이 수돗물만으로 세척한 경우 6618 mg/kg의 초기 TPH를 5076 mg/kg까지 약 23%를 제거하였다. 그러나 NaOH가 투입되면서 세척 후 잔류농도는 서서히 감소하였으며, 0.5 M의 NaOH로 세척한 경우 3429 mg/kg까지 약 48%의 TPH 제거율이 증가하였다.

NaOH에 의해 세척수 내 알칼리 농도가 증가할수록 TPH의 제거율 또한 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 토양 내 풍화된 디젤에 존재하는 다양한 페놀(-OH)기와 카르복실(-COOH)기를 가진 유기 분자들이 알칼리와 반응하여 비누화(Saponification)가 일어나며, 반응 후 생성된 물질이 물과 오염물질간의 계면장력을 감소시키는 계면활성제 역할을 하기 때문이라 사료된다(Park et al., 2010). NaOH에 의해 알칼리화 된 세척수는 토양에 이차오염을 유발할 수 있는 계면활성제의 대안으로서의 가능성을 보

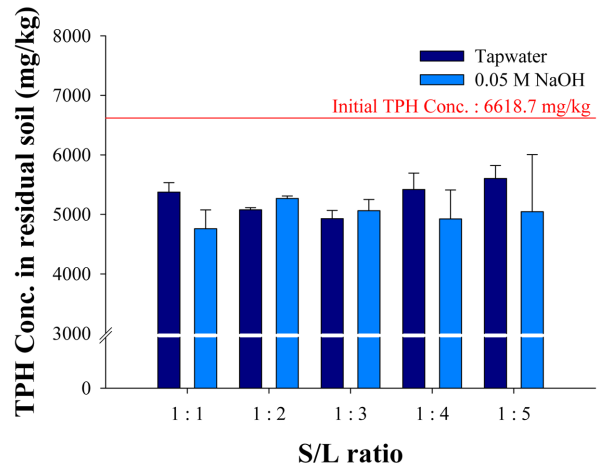


Fig. 3. TPH concentration in residual soils after soil washing experiments; effect of Solid/Liquid ratio.

였으나, 실험에 적용한 모든 농도에서 TPH는 기준치 이하로 제거되지 않았다. 또한, Jang(1997)은 NaOH의 첨가는 세척효율을 증가시키나 높은 농도에서는 오히려 세척효율을 감소시킨다고 보고하였다. 따라서, 본 연구에서는 0.05 M 이상의 농도부터 약품의 사용량 대비 세척효율의 변화가 크지 않았기 때문에 이후 고액비에 따른 실험은 0.05 M의 농도로 진행하였다.

3.3. 고액비에 따른 세척 영향

고액비에 따른 유류오염토양의 세척효율을 살펴보기 위하여, 앞서 수행한 실험을 통해 선정된 농도의 NaOH와 수돗물을 세척수로 사용하여 고액비를 각각 1:1, 1:2, 1:3, 1:4, 1:5로 증가시켜 진행하였으며, 세척시간은 10 분으로 고정하였고, 이를 제외한 나머지 실험조건은 동일하게 수행하였다.

세척에 의해 제거된 TPH 양은 큰 차이가 없었으나, 고액비 1:1에서 실험을 진행한 경우 토양 대비 세척액의 양이 적어 교반이 원활히 이루어지지 않았다(Fig. 3). 고액비 1:5 이상의 경우에도 마찬가지로 토양오염 우려기준까지 TPH 농도를 저감할 수 없었으며, 세척수가 과도하게 사용되기 때문에 경제적이지 않을 것으로 사료된다. 0.05 M NaOH를 세척제로 사용한 실험에서는 모든 고액비에서 수돗물보다 많은 양의 TPH를 제거하는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 고액비 1:3이 가장 효

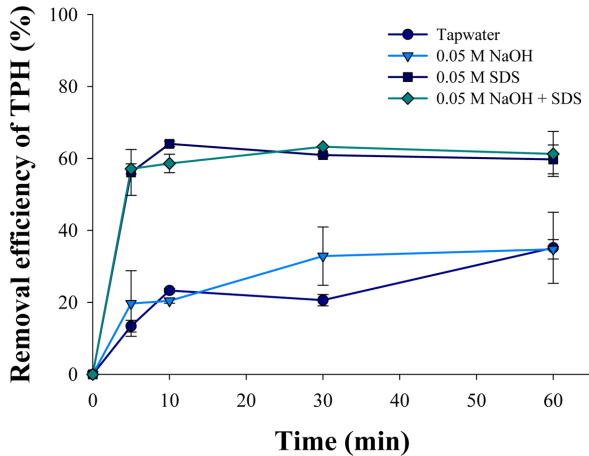


Fig. 4. Effect of contact time on soil washing experiments.

과적이라고 판단하였다.

3.4. 세척제 종류에 따른 세척 시간

세척시간이 세척효율에 미치는 영향을 평가하였다. 1 시간 이상 세척을 진행할 경우 동력 소모량이 증가하기 때문에 비경제적일 것으로 판단하여 범위는 5분, 10분, 30분, 60분으로 구분하고 세척제 종류에 따른 실험결과를 Fig. 4에 나타내었으며, 세척 시간을 제외한 나머지 조건은 이전 실험과 동일하고 앞서 선정된 세척제 농도 0.05 M로 세척 실험을 진행하였다.

수돗물과 NaOH에 의한 세척실험을 진행한 결과, NaOH의 경우 반응 시간 초기 5분까지 토양 내 TPH 농도가 급격히 감소하여, 30분 이후로는 최종시간까지 완만한 그래프를 그리고 있으며,

32.9%의 제거 효율을 보였다. 수돗물의 경우 최종시간인 60분에서 NaOH와 비슷한 제거율을 보이고 있는데, 이는 물리적 탈착의 한계에 도달한 것으로 사료된다.

따라서, 수돗물과 NaOH에 의한 세척만으로는 우려기준까지 TPH를 제거할 수 없었기 때문에 직접적인 세척효율의 증대를 위해 추가적으로 계면활성제에 대한 실험을 진행하였다. 유류오염 토양의 세척수에 주로 이용되는 계면활성제의 특성으로 토양 내 Ca과 점토 함량에 영향으로 흡착능이 결정되며, 이에 대해 Park and Lee(2011)의 연구에서는 계면활성제의 토양 흡착 특성에 대한 연구를 통해 음이온 계면활성제인 SDS의 경우 생계면활성제(Biosurfactant)나 비이온 계면활성제 보다 비교적 토양 흡착능이 낮다고 보고되었다. 이는 일반적인 토양표면이 음전하를 띄며, 음이온성 계면활성제의 친수성 부분도 음전하를 띄기 때문에 정전기적 반발력이 토양으로의 흡착을

저해하기 때문이다. 이에, 본 연구에서는 계면활성제가 표면장력을 낮추어 오염물질의 탈착을 증가시키나, 토양에 잔류할 경우 2차 오염을 유발할 수 있는 점을 고려하여, 토양에 흡착이 적고 세척효율이 우수하다고 알려진 음이온성 계면활성제인 SDS를 NaOH와 같은 농도인 0.05 M로 첨가한 실험을 진행하였다.

세척 후 30분 경과 시 SDS 단독, NaOH와 SDS의 동시적용에서 제거효율은 각각 61.0%, 및 63.3%로 SDS를 첨가할 경우 수돗물을 사용할 때와 비교하여 약 3배 정도의 세척 효율 증가를 볼 수 있었다. 이는 SDS에 의해 토양의 표면에 흡착되었던 TPH가 세척수와 표면장력을 낮추는 작용으로 세척효율이 증가한 것이라 사료된다. 하지만, SDS의 첨가 역시 우려기준까지 TPH를 제거하지 못하였으며, 세척 시간 60분에서 수돗물과 NaOH를 사용한 실험의 제거율이 비슷하였듯이, SDS를 첨가한 실험에서도 NaOH의 영향은 미약하였다.

3.5. 입도분포에 따른 유류오염토양의 세척 효율

토양 입자의 크기가 작아질수록 TPH의 오염 농도가 높아, 본 연구에서는 입경별로 분리 한 토양의 세척 효율을 비교하였다. 세척제의 농도, 고액비 및 세척 시간 실험의 결과를 바탕으로 수돗물과 NaOH 농도 0.05 M의 세척제로 고액비 1:3에서 30분간 실험을 진행하였으며, 5가지로 구분한 입경별 세척 효율을 Fig. 5에 나타내었다.

실험 전·후의 수돗물과 0.05 M NaOH에 의한 입경별 토양 내 TPH 제거율을 살펴보면, 입경의 크기가 큰 토양보다 입경이 작아질수록 수돗물에 비해 NaOH에 의한 제거효율이 높아졌다. 이는 입경이 큰 토양에서는 TPH의 토양 표면에 비슷한 강도로 흡착되어 세척 효율에서 큰 차이를 보이지 않은 것이라 사료되며, 입경이 작아질수록 보다 강하게 흡착되었던 TPH가 NaOH의 영향에 의하여 수돗물에 비해 보다 쉽게 탈착된 것으로 판단된다.

또한, TPH의 농도가 가장 높게 분석된 0.15 mm 이하의 입경을 가지는 토양에 대해서 이러한 결과를 가지는 것에 대해 초기 토양을 X-ray fluorescence(XRF) spectroscopy(Bruker S1 Turbo, USA)로 분석하였으며, 분석치를 Table 2에 나타내었다. 일반적인 토양에서 Ca의 함량은 1.4% 정도이나, 실험에 사용한 토양의 경우 5.2%로 많은 양이 존재하는 것을 알 수 있다(Deutsch, 1997). 이 같은 결과는 바닷가 토양의 특성상 탄산칼슘이 주성분인 패각 등이 혼재되어 있으며, 이들이 풍화를 거쳐 토양 입경과 비슷한 크기로 파쇄되어 원 토양과 비슷한 입경크기를 가지고 있는 상태가 된다. 탄산칼슘은 디

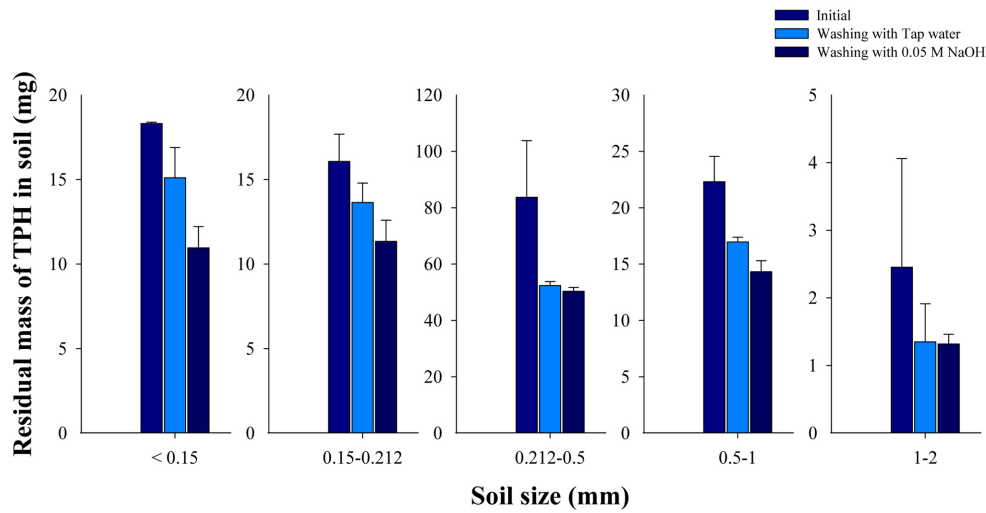


Fig. 5. Effect of soil particle size on soil washing.

Table 2. Mass percent of initial soil sample

	O	Si	K	Ca	Ti	Fe	Total
Mass percent (%)	46.68	40.97	2.98	5.20	0.74	3.19	99.75

젤의 주성분을 흡수할 수 있으며, 이러한 형태의 디젤 오염은 물만 사용한 세척에서는 제거를 기대할 수 없다 (Arbatan et al., 2011).

이로써, 본 연구를 통해 사질토 내 존재하는 탄산칼슘에 디젤이 흡착되었을 때, 토양보다 강한 결합력을 가지기 때문에 물리적인 처리만으로는 제거가 어려운 것으로 판단되며, 입경별 분포에서 오염 정도의 차이가 있기 때문에, TPH 농도가 높은 미세토를 제거한다면 전체적인 TPH 제거율의 향상이 있을 것이며, 토양입경에 따른 세척과정으로 약품 사용량의 차이를 두면 처리비용의 감소를 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구는 디젤로 오염된 모래에서 다양한 추출 조건의 TPH 제거 효율을 평가하였으며, 실험을 통하여 확인한 결과는 다음과 같다.

1. 실험에 사용한 사질토의 경우 해안가 토양으로 육상 토양에 비해 Ca의 함량이 높아, 흡착된 석유계탄화수소를 물리적 교반만으로는 제거하는데 한계가 있었다. Ca이 풍화된 유류와 강력한 결합을 하고 있는 것으로 판단되었다.
2. NaOH의 적용은 비누화 반응을 통해 풍화된 유류의 제거효율을 증가시켰으나, 제거 효율의 한계를 보였다. 입경이 작은 토양에서 TPH의 농도는 높았으며, NaOH의

적용은 0.212 mm 이하의 입경에서 보다 효과적이었다.

3. 음이온성 계면활성제인 SDS를 사용 하였을 때, NaOH의 적용보다 3배 이상의 풍화된 유류를 제거할 수 있었다. 그러나 두 가지 세척제를 혼합하여 사용하여도 상승효과는 없는 것으로 나타났다.

사 사

본 연구는 환경부 “토양지하수오염방지기술개발사업 (The GAIA Project, (2012000550003)) 복합오염녹색연구 단 과제”로 지원받았습니다.

참 고 문 헌

Arbatan, T., Fang, X., and Shen, W., 2011, Superhydrophobic and oleophilic calcium carbonate powder as a selective oil sorbent with potential use in oil spill clean-ups, *Chem. Eng. J.*, **166**(2), 787-791.

Baek, K., Kim, D.-H., Seo, C.-I., Yang, J.-S., and Lee, J.-Y., 2007, Remediation of Pb-Contaminated Soil by Soil Washing using Hydrochloric Acid, *J. Soil & Groundwater Env.*, **12**(3), 17-22.

Deutsch, W.J., 1997, *Groundwater Geochemistry: Fundamentals and Applications to Contamination*. CRC press, Boca Raton, Florida, p. 22.

- Feng, D., Lorenzen, L., Aldrich, C., and Mar, P.W., 2001, Ex situ diesel contaminated soil washing with mechanical methods, *Mineral Eng.*, **14**, 1093-1100.
- Hernández-Espriú A., Sánchez-León E., Martínez-Santos P., and Torres L.G., 2013, Remediation of a diesel-contaminated soil from a pipeline accidental spill: enhanced biodegradation and soil washing processes using natural gums and surfactants, *J. Soils Sediments*, **13**, 152-165.
- Huling, S.G. and Pivetz, B.E., 2006, In-Situ Chemical Oxidation, EPA, **600/R-06/072**, 1-20.
- Jang, M., 1997, A Study on the Characteristics of Washing Agents for Cleanup of Contaminated Soil, Nowon-gu, Seoul, Master theses, Kwangwoon University.
- Khalladi, R., Benhabiles, O., Bentahar, F., and Moulai-Mostefa, N., 2009, Surfactant remediation of diesel fuel polluted soil, *J. Hazard. Mater.*, **164**(2-3), 1179-1184.
- Kim, J.-M., Chung, C.-K., and Lee, C.-Y., 2011, A Study on Remediation using Microbial Activator from Oil-Contaminated Soil, *J. of KORRA*, **19**(2), 41-48.
- Lee, M.-H., Chung, S.-Y., Kang, D.-H., Choi, S.-I., and Kim, M.-C., 2002, Surfactant Enhanced In-Situ Soil Flushing Pilot Test for the Soil and Groundwater Remediation in an Oil Contaminated Site, *J. Soil & Groundwater Env.*, **7**(4), 77-86.
- Ministry of Environment, 2009, A master plan on soil conservation, 11-1480000-001048-01, 18-32.
- Moon, H.-J., Lim, Y.-K., Kim, Y.-K., Joo, C.-S., Bang, K.-Y., Chung, W.-J., and Lee, S.-W., 2002, A Study on Remediation of Diesel-Contaminated Soil by Biosurfactant-Enhanced Soil Washing, *J. Soil & Groundwater Env.*, **7**(2), 13-22.
- Park, J.-W. and Kim, H.-J., 2012, A Legal Analysis of Disputes concerning Liability for Cleaning up Contaminated Land, Korea Legislation Research Institute, 19-20.
- Park, S.-W., Cho, J.-M., Lee, J.-Y., Park, J.-K., and Baek, K., 2011, Feasibility study on soil flushing for railway soil contaminated with lubricant oil and zinc, *J. Soil & Groundwater Env.*, **16**(4), 31-37.
- Park, S.-W., Lee, J.-Y., Kim, K.-J., Yang, J.-S., and Baek, K., 2010, Alkaline Enhanced-Separation of Waste Lubricant Oils from Railway Contaminated Soil, *Sep. Sci. Technol.*, **45**(12-13), 1988-1993.
- Park, S.-W., Shin, M.-C., Jeon, C.-S., Baek, K., and Lee, J.-Y., 2008, Feasibility Study on Remediation for Railroad-contaminated Soil with Waste-lubricant, *J. Soil & Groundwater Env.*, **13**(2), 30-35.
- Park, S.-Y. and Lee, C.-Y., 2011, Adsorption Characteristics of Surfactants on Soil, *J. of Korean Geoenviron. Soc.*, **12**(10), 23-28.
- Son, Y., Nam, S., Ashokkumar, M., and Khim, J., 2012, Comparison of energy consumptions between ultrasonic, mechanical, and combined soil washing processes, *Ultrason. Sonochem.*, **19**(3), 395-398.
- Vreysen, S. and Maes, A., 2005, Remediation of Diesel Contaminated, Sandy-Loam Soil Using Low Concentrated Surfactant Solutions, *J. Soils Sediments*, **5**(4), 240-244.