

## 현장규모의 유류오염 토양세척 및 무방류 세척 유출수 처리 공정

서용식<sup>1</sup> · 최상일<sup>2\*</sup> · 김종민<sup>2</sup> · 김보경<sup>2</sup> · 김성규<sup>2</sup> · 박상현<sup>2</sup> · 주원하<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(주)알파환경엔지니어링, <sup>2</sup>광운대학교 환경공학과, <sup>3</sup>환경관리공단 토양지하수사업처

## Full-scale Soil Washing and Non-discharged Washing Water Treatment Process of Soil Contaminated With Petroleum Hydrocarbon

Yong-Sik Seo<sup>1</sup> · Sang-Il Choi<sup>2\*</sup> · Jong-Min Kim<sup>2</sup> · Bo-Kyung Kim<sup>2</sup> · Sung-Gyoo Kim<sup>2</sup>  
Sang-Hean Park<sup>2</sup> · Weon-Ha Ju<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Alpha Environmental Engineering Co., Ltd.

<sup>2</sup>Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University

<sup>3</sup>Department of Soil and Groundwater, Environmental Management Corporation

### ABSTRACT

A non-discharged system of sequentially physico-chemical water treatment was used to treat the contaminated water produced from washing system of soils according to full-scale soil washing. After washing the TPH contaminated soils, the remaining concentrations of COD<sub>Mn</sub>, SS, and n-hexane were analyzed for each compartment to estimate the treatment efficiencies of non-discharged system. Three times of sampling events were conducted for 4 different compartments (sediment tank, flocculation tank, oil/water separator, and process-water tank). In addition, soil washing efficiencies and concentrations of each parameter (COD<sub>Mn</sub>, SS, and n-hexane) for process-water tank were analyzed for about 8 months. As results, the average efficiency of soil washing was high to have 95.9%, regardless of the condition of TPH contamination level for soils, as well as the concentrations of COD<sub>Mn</sub>, SS, and n-hexane in the process-water tank were below the regulation limits of the Water Environmental Conservation Act. Accordingly, the full-scale washing treatment system in this study could make the washing water 100% recycled which lead the system to be environmentally-friendly and economical.

**Key words :** Non-discharged washing water treatment system, Full-scale soil washing system

### 요 약 문

현장규모의 유류오염 토양세척에 따른 세척 유출수를 처리하기 위해 다단계 물리화학적 무방류 수처리시스템을 이용하였다. 오염토양세척 후 세척토양과 세척수 처리효율을 평가하기 위해 단위공정별 잔류하는 TPH(세척토양), COD<sub>Mn</sub>, SS, n-hexane을 분석하였다. 세척 유출수 시료채취지점은 침사지, 응집·침전조, 그리고 유수분리조의 유출수, 공정수, 저장조 유입수로 4곳의 시료채취 지점에서 총 3회에 걸쳐서 실시하였다. 또한, 약 8개월간의 토양세척 및 공정수 저장조의 COD<sub>Mn</sub>, SS, 그리고 n-hexane을 분석하였다. 그 결과, 오염토양의 농도조건과 상관없이 오염토양의 세척효율이 평균 95.9%로 높았고, 수처리공정 최종 방류구인 공정수 저장수의 COD<sub>Mn</sub>, SS, 그리고 n-hexane가 수질환경보전법상 청정지역 방류수질기준 미만으로 검출되었다. 현장규모의 토양 세척수 처리시스템은 세척수를 100% 세척공정수로 재이용하여 환경친화적이고 경제적인 토양세척 처리공법이 될 수 있음을 시사하고 있다.

**주제어 :** 무방류 세척수 처리시스템, 현장규모의 토양세척 시스템

\*Corresponding author : sichoi@kw.ac.kr

원고접수일 : 2008. 10. 28 심사일 : 2008. 10. 29 게재승인일 : 2009. 2. 3

질의 및 토의 : 2009. 4. 30 까지

## 1. 서 론

유류 또는 중금속 등으로 오염된 토양은 오염물의 종류, 부지 및 토양 특성에 따라 정화공법 선정이 달라지며, 선정공법에 따라 정화비용과 처리효율의 차이가 발생한다. 따라서 현장에 적용될 정화공법 선정은 신중하게 이루어져야 한다. 특히, 현장적용 이전 실험실규모의 적용성 평가를 통한 운전변수의 최적화 도출은 매우 중요한 과정이라 할 수 있다.

유류로 오염된 토양을 처리하는 정화기술은 복원위치에 따라 오염현장내 원위치에서 직접 오염토양을 처리하는 원위치(in-situ) 처리방법과, 지상으로 끌어 올려 오염원을 처리하는 현장외(ex-situ) 처리방법으로 구분되며, 현장외 처리 방법 중 일반적으로 널리 알려진 정화기술로는 오염도를 교반시켜 호기성 조건에서 오염물질의 생물학적 분해를 유도하는 토양경작(land farming), 저온에서 오염물을 토양으로부터 분리하는 저온열탈착(low thermal desorption), 기계적 마찰과 세정수를 이용한 토양세척(soil washing)방법 등이 있다(한국지하수토양환경학회, 2003). 위의 정화공법 중 토양세척 공법은 타 기술에 비하여 주어진 기간 내 많은 양의 오염토양 처리가 가능하고, 처리 효율 또한 높아 최근 들어 대규모 오염부지 정화현장에 사용되고 있다.

토양세척기법은 흔히 분리기법이라 할 만큼 세척공정 뿐만 아니라 분리공정 또한 중요하다. 토양세척 및 분리공정은 다음 2가지 사항을 기초로 한다(Anderson, 1993; 공준 · 최상일, 1998). 첫째, fine fraction(63  $\mu\text{m}$  이하의 토양입자)는 높은 비표면적을 가지고 있어 제거대상 오염물질이 강하게 흡착되어 있기 때문에 현장 오염토양으로부터 미세토양을 분리시킴으로써 처리대상 토양의 부피를 줄일 수 있다. 둘째, 오염부하가 높은 미세토양은 물리적 압밀과 부착에 의해 coarse fraction(2 cm 이상)과 sandy fraction(63  $\mu\text{m}$ ~2 cm)에 결합되어 있으므로 기계적 교반으로 쉽게 탈착시킬 수 있다. 따라서 토양의 입경분포가 토양세척의 효율을 예측할 수 있는 매우 중요한 지표이다(Feng et al., 2001). 예를 들면, 전체토양 중 자갈이나 모래의 함유율이 높은 토양은 세척공정이 매우 효율적인 반면 silt나 clay의 함유율이 약 25%(wt) 이상일 경우에는 비효율적인 단점이 있다(Anderson, 1993; Feng et al., 2001).

토양세척 시 사용하는 세척제는 일반적으로 물과 계면활성제를 사용하고 있다. 계면활성제를 사용한 세척실험 적용시 양이온과 음이온계로 혼합된 계면활성제 5% 용액

주입조건에서 세척효율이 86%, 음이온계 계면활성제 4% 용액 주입조건에서 95%의 세척효율을 보이는 것으로 조사되었다(최상일, 1997). 계면활성제의 경우 토양세척 시 많은 계면활성제의 사용으로 높은 세척효과를 노릴 수 있지만 이로 인한 전체 공정비용의 상승을 반드시 고려해야 한다(Lowe et al., 1999). 따라서 유류오염토양 세척공정에서 세척제로 물(water)을 사용하여 물리적 탈착공정으로 유류오염물질을 제거하고, 이에 따른 효율적인 세척수 처리공정을 구성하여 처리함으로써 세척수를 방류하지 않고 100% 공정수로 재활용할 수 있는 처리시스템의 개발은 경제적 및 친환경적인 무방류 토양세척 시스템에 있어 중요한 요소라 할 수 있다.

본 연구에서는 현장규모의 토양세척시스템에서 물(water)을 세척액으로 사용하여 유류오염토양에 대한 세척효율과 함께 이후 발생하는 세척 유출수를 연속처리하여 100% 공정수로 재활용함에 있어 세척수 처리 단위공정에서 SS, n-hexane, 그리고 COD<sub>Mn</sub>를 분석하여 각 공정별 처리효율을 살펴보았다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1. 세척장치 구성

본 연구에 사용된 현장규모의 세척장치 기본원리는 선별, 가압, 진동, 회전 및 교반 등 일반적인 토양세척 시스템에 바탕을 두고 있으며, 토양세척 시 발생하는 세척유출수는 주로 침사지, 응집·침전조, 가압부상조, 에어스트리핑, 활성흡착조 그리고 공정수 저장조 등 세척수 무방류 처리시스템으로 구성되어 처리하였다. 유류오염토양 세척장치 흐름도는 Fig. 1에서 개략적으로 나타내었다.

세척장치 시스템은 크게 선별, 세척과 수처리시스템 3 단계로 구성되며, 1단계 선별시스템은 오염토양을 정량으로 공급하는 투입장치, 50 mm 이상 토양을 선별하는 골재선별장치와 선별된 50 mm 이상을 고압살수에 의해서 세척하는 간이세척장치로 구성되며, 2단계 세척시스템은 오염토사 투입콘베어에 의해 투입되어진 토사는 고압살수(3 kg/cm<sup>2</sup> 이상)를 통한 습식파쇄 및 탈착장치, 50~10 mm 입경과 10~3.0 mm 입경으로 2단으로 분리하여 세척하는 자갈세척장치, 다단연속탈착장치를 통해 3.0~0.075 mm 입경의 토양을 세척하는 모래세척장치와 회전탈착장치에 의해서 0.075~0.053 mm 입경의 토양을 세척하는 미세토사 세척장치로 구성하였으며, 이러한 단계별 입경분리 구성은 오염토양에 대해서 효율적인 분리를 통한 입경별 세척 효율을 극대화하기 위함이다. 또한 3단계

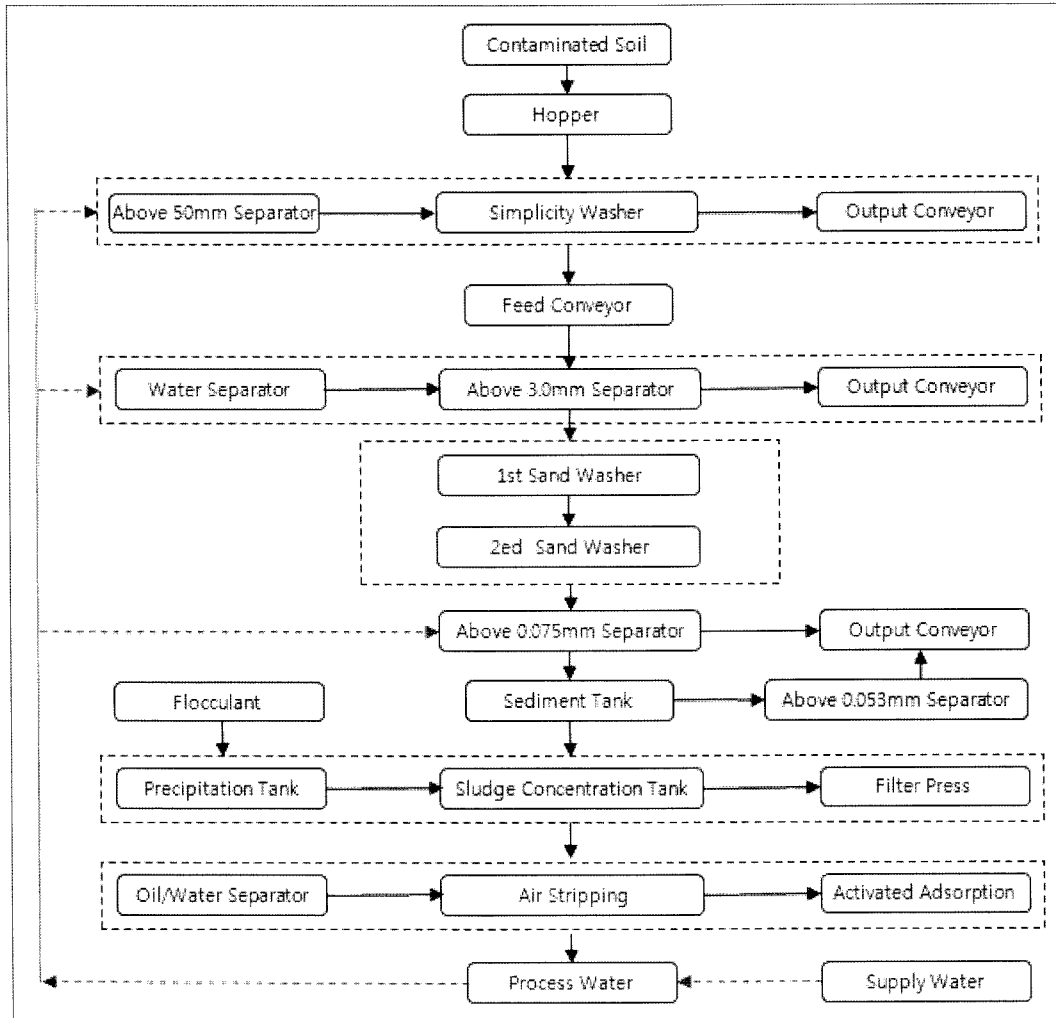


Fig. 1. Flow diagram of soil washing and washing water treatment processes.

수처리시스템은 0.053 mm 이하의 미세토를 분리하는 침사지, 응집·침전조, 농축조, 슬러지탈수, 유수분리조, 에어스트리핑장치, 활성흡착탑, 공정수 저장조 등으로 구성하였다.

2.2. 세척유출수 처리를 위한 응집·침전실험

현장규모 세척 유출수 처리에 있어 가장 중요한 공정인 응집·침전 공정시 적용되는 주요운전조건인 응집제의 최적 농도와 공정 체류시간을 찾기위해 jar-tests를 실시하였다. 침사지 공정에서는 세척 유출수 중 대부분 0.075~0.053 mm에 해당하는 입자가 제거되기 때문에 bench-scale 응집·침전 실험을 유류오염토양 중 침사지를 통과한 유출수중 0.053 mm 이하의 토양을 대상으로 하였다. 실험방법에서 1:5 진탕비(토양 50g: 유출수 250 mL)의 세척유출수 250 ml에 각각 다른 응집제 농도조건(20~100

mg/L)이 되도록 1%로 희석한 액상 고분자 양이온 응집제 (NALCO®1451)를 주입하였다. 응집제가 적용된 진탕액은 100 rpm을 유지하며 5분간 급속교반, 40 rpm에서 60분간 완속교반 후 30분간 정지 후 상등수의 탁도를 분석하였다.

2.3. 세척 및 세척유출수 효율평가를 위한 세척공정의 물 질수지

세척수로 현장 지하수(underground water)를 사용한 현장규모 오염토양 세척공정에서 오염토양 세척효율과 함께 세척유출수 처리 효율을 평가하기 위한 세척시스템에 대한 세척수 투입조건은 다음과 같다.

세척시스템에 공급되는 25 m<sup>3</sup>/hr의 오염토양 중 50 mm 이상의 토양은 약 5%(1.25 m<sup>3</sup>/hr)로 세척수 6.3 ton/hr이 공급되어 간이세척 후 배출되고, 50 mm 이하입경의 오염토사 23.75 m<sup>3</sup>/hr에 대한 초기 세척수 공급은 오염토양을

분리할 수 있는 고압살수 조건인 52.6 ton/hr으로 진탕비 1:2.2 비율로 공급하였으며, 50~3.0 mm 입경의 자갈질 토사 20%(5.0 m<sup>3</sup>/hr)는 세척분리 후, 3.0 mm 이하의 모래질 토사 65%(16.25 m<sup>3</sup>/hr)를 세척하기 위해 침사지 하부에서 미세토를 포함한 세척수 42.4 ton/hr을 추가로 공급하여 진탕비 1:4로 유지하게 구성하였다. 미세토사를 제어하기 위한 침사지는 2단계로 구성하여 전단은 세척공정 월류수로 후단은 2~3%에 해당하는 0.075~0.053 mm의 미세토사를 탈착공정으로 배출하였으며, 평균유속 0.0022 m/sec로 체류시간을 56.8 min로 유지하게 구성하였다. 침사지에서 월류하는 0.053 mm 미만의 실트 및 점토질 토사 7%(1.75 m<sup>3</sup>/hr)와 세척유출수 49.19 ton/hr로 응집·침전조로 유입하게 하였으며, 이때 유입되는 토양의 함유율은 96.56%, 장치의 수면적 부하는 26.735 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/day로 구성하였다. 응집·침전조의 응집제 운전조건은 앞서 실시한 bench-scale 실험결과를 바탕으로 양이온성 고분자 응집제 60 mg/L의 농도조건에서 2시간의 체류시간으로 유출수 중 토양입자를 응집·침강하여 후단공정에 의해서 처리하게 하였다. 기압부상조의 표면부하율이 5~10 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·hr임을 감안하여 유효면적을 8.67 m<sup>2</sup>로 구성하여 침전조에서 월류하는 유류성분 및 부유물질 등의 처리를 극대화하였다. 세척수 중에 녹아있는 유기오염물질을 제어하기 위해 에어스트리핑장치와 활성흡착조를 설치하였으며, 에어스트리핑장치는 6단 트레이에 의한 단위면적 3.56 m<sup>2</sup>으로 구성하였다. 이러한 수처리장치의 구성으로 세척수 무방류시스템을 실현하고자 하였다. 본 연구에서는 유류오염토양을 토양오염공정시험기준(환경부, 2008)에 의해서 분석한 처리효율과 함께 이에 따른 발생 세척 유출수 처리 설비를 이용하여 연속 처리하여 100% 공정수로 재활용함에 있어 처리효율을 확인하고자, 주요 공정별(침사지, 응집·침전조, 유수분리장치, 그리고 공정수 저장조) 유출수의 SS, n-hexane, 그리고 COD<sub>Mn</sub>를 3차에 걸쳐 수질환경공정시험방법에 따라 분석하였다(환경부, 2007). 또한, 토양세척 장기운전시 세척유출수의 처리효율을 확인하고자 약 8개월간 공정수저장조 유출수의 SS, n-hexane, 그리고 COD<sub>Mn</sub>를 분석하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 세척유출수 응집·침전실험

세척유출수 처리중 가장 주요한 공정인 현장규모 응집·침전 운전조건 도출을 위해 jar-tests와 column 실험을 실시하였다. 미세입자의 토양 표면은 전기적으로 음성을 띄

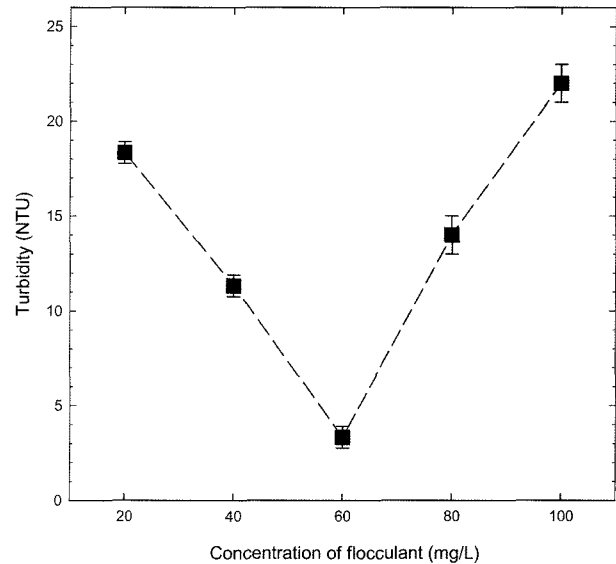
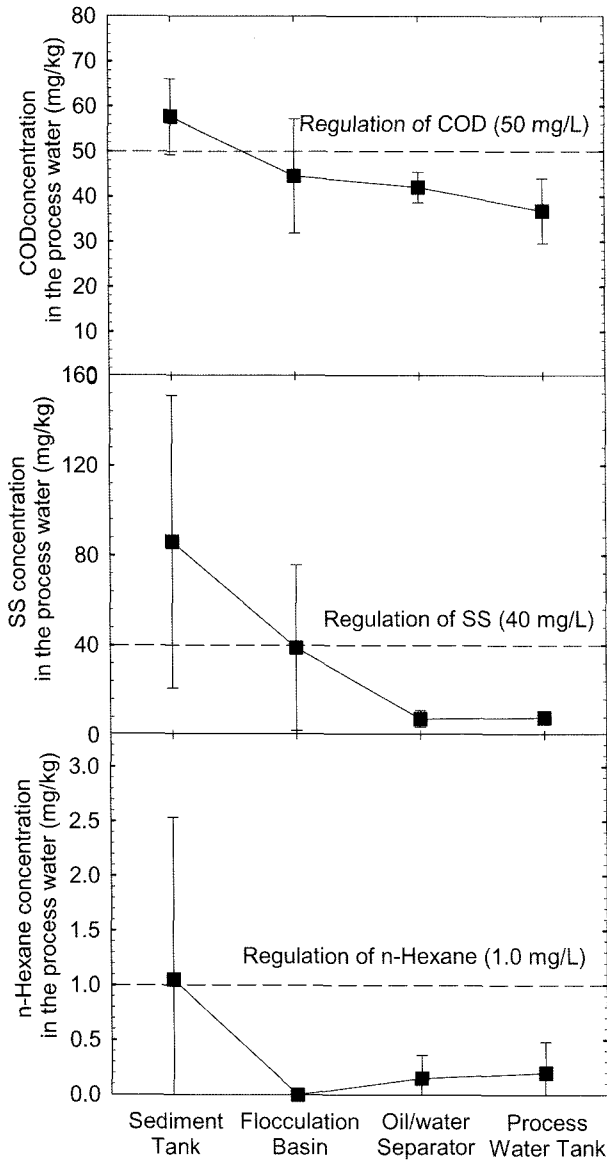


Fig. 2. Turbidity results of flocculation jar-tests (applied flocculant: NALCO®1451, concentration range: 20~100 mg/L).

며 입자 상호간의 반발력으로 인해 수중에 안정적으로 부유하게 된다. 이와 같은 부유성 미세입자 토양을 응집시키기 위해 양성전하를 띄는 유기성 고분자 응집제는 적절한 농도조건이 투입되어 최적의 응집조건이 도출되어야 한다. 응집제의 적용농도가 적을 경우 미세입자 토양 표면의 전하가 충분히 중화되지 않고, 농도가 많을 경우 표면 전하가 오히려 양성 전하로 바뀌게 되어 응집·침전이 불리하게 된다. 본 연구에서는 1%로 용해된 양이온성 고분자 응집제(NALCO®1451)를 이용하여 응집·침전 jar-tests를 3차례에 걸쳐 실시한 결과, 응집제 농도 60 mg/L에서 가장 낮은 평균 탁도인 3 NTU를 보여 최적 응집제 농도조건임을 확인할 수 있었다(Fig. 2).

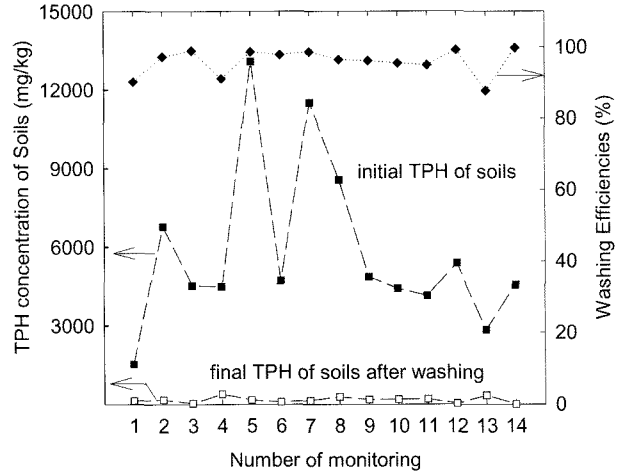
#### 3.2. 세척 및 세척수 처리 효율

본 현장규모의 세척 및 세척수 처리시스템에 사용된 토양은 유류저장 탱크를 보관하던 부지로 오염발견이 약 10년 정도 경과된 토양으로 현장규모의 토양세척장치를 통하여 세척처리 하였으며, 토양의 물리·화학적 특성을 파악하고자 토양오염공정시험법(환경부, 2008), 한국공업표준(KS F) 등에 따라 토양 pH(7.0~8.0), 유기물 함량(organic content, 2.85%), 수분함량(water content, 8.2%), 그리고 가비중(bulk density, 1.56 g/cm<sup>3</sup>)을 분석하였다. 또한 현장규모 세척 시 오염토양의 초기 TPH농도가 1,500~13,000 mg/kg으로 불균일한 조건임을 알 수 있었다. 세척수 무방류 시스템 가동기간 동안 오염토양 초기농도 대비 세척수 처리효율을 평가하기 위해 토양오염 농도조건이



**Fig. 3.** Monitoring results of COD<sub>Mn</sub>, SS, and n-hexane for effluents of each sequential process (sediment tank, flocculation basin, oil/water separator, and process water tank) in the system of washing water treatment.

다른 토양에 대한 세척 및 세척유출수 처리 단위공정별 오염 부하량을 확인하고자 하였으며, 단위공정별 시료채취지점은 침사지, 응집·침전조, 가압부상조의 유출수 및 공정수 저장조로 4곳의 시료채취 지점에서 총 3차례에 걸쳐 잔류하는 COD<sub>Mn</sub>, SS, n-hexane을 수질환경공정시험방법(환경부, 2007)에 의해서 분석하였다. 분석결과, 오염토사의 초기오염농도(TPH mg/kg)가 2,277, 8,614와 12,649 mg/kg이었으며, 세척 후 오염농도(TPH mg/kg) 346.0, 410.6과 325.7로 분석되었다. 이에 따른 세척수 처리 단위공정별 농도는 저농도(2,277 mg/kg) 오염토사 투입 시 공



**Fig. 4.** Results of initial TPH and final TPH of soils after washing, as well as soils washing efficiencies for 8 months.

정수에서 COD<sub>Mn</sub>은 31.7 mg/L로 38.7%, SS는 7.7 mg/L로 80.8%, n-hexane은 불검출의 처리효율을 보였으며, 고농도(8,614 mg/kg) 오염토사 투입시 공정수에서 COD<sub>Mn</sub>은 80.4 mg/L로 69.7%, SS는 25.7 mg/L로 92.8%, n-hexane은 0.8로 55.6%의 처리효율을 나타나는 것으로 분석되었고, 최고농도(12,649 mg/kg) 오염토사 투입시 공정수에서 COD<sub>Mn</sub>은 41.9 mg/L로 34.1%, SS는 8.2 mg/L로 93.8%, n-hexane은 0.4로 81.0%의 처리효율을 나타나는 것으로 분석되었다. 각 공정별 COD<sub>Mn</sub>, SS, n-hexane의 평균값과 표준편차를 Fig. 3에 도시하였다. 분석결과, 각 분석항목별로 침사지와 응집·침전조의 유출수 표준편차가 유수 분리조와 공정수 저장조의 표준편차에 비해 상대적으로 높음을 알 수 있었다. COD<sub>Mn</sub>과 SS의 경우 침사지와 응집·침전조 유출수에서 평균값 내지 표준편차 값이 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률 청정지역 방류수질기준을 초과하였고, n-hexane의 경우 침사지의 유출수만 그 수질 기준을 초과하였다. 결과적으로, 다양한 오염농도조건의 토양세척 후 발생하는 현장규모의 세척유출수의 처리에 있어 가압부상유수분리장치 이후 세척수의 수질은 기준을 만족할 수 있음을 알 수 있었다.

위의 수처리 공정별 조사결과를 바탕으로 세척장치가 동기간 약 8개월에 걸쳐서 14회 채취된 시료를 분석하여 세척수 무방류 처리시스템의 처리효율을 검증하고자 하였다. 우선, 오염토양의 처리효율을 분석한 결과, 평균 초기 TPH농도는 5,811 mg/kg이었으며, 세척토사의 TPH 평균농도는 178 mg/kg으로 분석되어 평균 TPH 제거효율이 95.9%로 나타났다. Fig. 4는 각 채취회수별 초기 및 세척 후 토양의 TPH농도와 처리효율을 보여준다. 유입되는 토

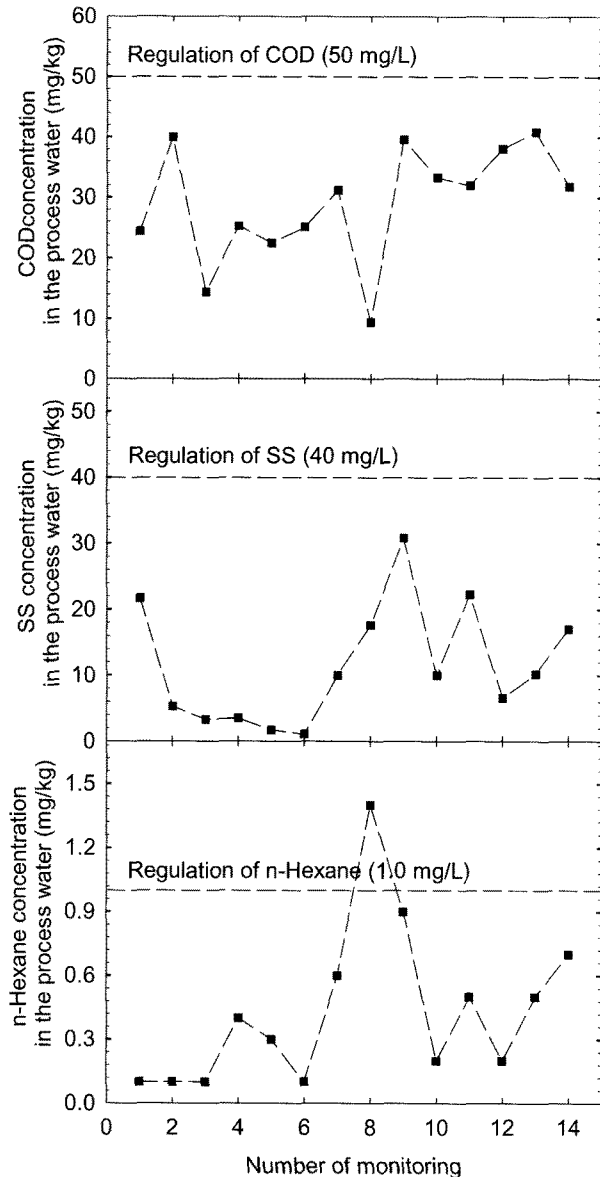


Fig. 5. Results of COD<sub>Mn</sub>, SS, and n-hexane concentrations at process water tank measured for 8 months.

양의 초기 TPH 농도는 횃수별 매우 큰 변화를 보이고 있지만, 세척 후 토양내 TPH농도는 우리나라 토양환경보전법 우려기준("가"지역) 500 mg/kg 미만의 결과로 90% 이상의 안정적인 처리효율을 보이고 있음을 알 수 있었다. 공정수 저장조로 유입되는 처리수를 각 분석항목별로 분석한 결과, COD<sub>Mn</sub> 평균 29.14 mg/L, SS(mg/L) 평균 11.51 mg/L, n-Hexane 평균 0.44 mg/L로 수질기준 미만으로 검출되었다. Fig. 5는 공정수 저장조로 유입되는 처리수의 채취횃수에 따른 각 분석항목별 농도결과로, 오직 n-hexane 만 1회 기준을 초과하였고 나머지 COD<sub>Mn</sub>과 SS의 경우 8개월간 수질기준을 초과하지 않아 세척 유출

수 처리시스템이 매우 안정적인 처리 효율을 보이고 있음을 알 수 있었다.

이와같은 결과는 현장규모의 무방류 세척수 처리시스템이 장시간 세척공정을 운영하여도 세척수 재이용에 따른 처리공정에서의 오염부하가 발생하지 않고 있음을 보여주고 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 다양한 오염농도 분포를 갖는 유류오염 토양 현장에서 세척공법 적용 시 유류오염토양 세척효율 및 무방류 세척수 처리공정의 처리효과를 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 현장 지하수(underground water)를 세척제로 다단계 물리적 세척공정을 적용한 세척수 무방류 시스템을 장기간 가동하여 현장규모의 토양세척을 수행한 결과, 토양오염 초기오염농도 조건에 상관없이 오염토양의 세척효율이 평균 95.9%로 매우 높았으며, 이는 세척수가 처리 후 100% 세척공정수로 재이용할 수 있을 뿐만 아니라 오염토양을 안정적으로 세척할 수 있어 경제적인 처리공법이 될 수 있음을 시사하고 있다.

(2) 약 8개월간 현장규모의 토양세척에 따른 세척수 처리공정별 COD<sub>Mn</sub>, SS, 그리고 n-hexane를 분석한 결과, 가압부상유수분리장치를 통과한 세척수의 경우 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률 상 청정지역 방류수질 기준(COD<sub>Mn</sub> 50 mg/L, SS 40 mg/L, n-hexane 1.0 mg/L)을 장시간 만족하고 있음을 알 수 있었다.

#### 사 사

본 연구는 환경부의 "토양·지하수 오염방지기술개발사업"과 "토양지하수복원관리 환경기술교육혁신지원사업단"의 연구비 지원을 받은 과제입니다.

#### 참 고 문 헌

- 공준, 최상일, 1998, 유류 오염토양 복원을 위한 토양세척장비의 적용성 연구, 한국토양환경학회지, 3(3), 109-116.  
 최상일, 1997, 소수성 유기물 유기오염물질로 오염된 토양에 대한 혼합 계면활성제를 이용한 토양세척기법의 적용성 연구, 대한지하수환경학회지, 4(2), 103-108.  
 한국지하수토양학회, 2003, 토양환경공학, 211-274.  
 환경부, 2007, 수질환경공정시험방법.

환경부, 2007, 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률.

환경부, 2008, 토양오염공정시험기준.

환경부, 2008, 토양환경보전법.

Alexander, M, 1977, Introduction to Soil Microbiology, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., p. 219-222.

Bhandari, A., Novak, J. T., and Dove, D. C., 2000, Effect of soil washing on petroleumhydrocarbon distribution on sand surfaces, J. Haz. Sub. Res, **2**(7), 1-13

Domenic, G, 1993, Hazardous waste Site remediation source control, lewis publishers, USA,G-Chemical Extraction/Soil Washing, p. 18-38.

Feng, D., Lorenzen, L., Adrich. C., and Mare, P.W, 2001, Ex-Situ diesel contaminated soil washing with mechanical meth-

ods. Minerals Engineering, **14**, 1093-1100.

Menezes, F.M., Amal, R. and Luketina, D., 1996, Removal of particles using coagulation and flocculation in a dynamic separator, Powder Technology, **88**, 27-31.

Schwarz, S., Jaeger, W., Paulke, B.-R., Bratskaya, S., Smolka, N. and Bohrisch, J., 2007, Cationic flocculants carrying hydrophobic functionalities, applications for solid/liquid separation, J Phys. Chem. B **111**, 8649-8654.

West, C.C. and Harwell, J.F., 1992, Surfactant and subsurface remediation, Environ. Sci. Technol, **26**(12), 2324-2330.

William, C. and Anderson, P.E., 1993, Innovative site remediation technology soil washing /soil flushing, *American Academy of Environmental Engineers*, **3**, p. 4.3.