

현장규모의 유류오염토양 세척공법에 다단연속탈착 및 교반탈착기법을 이용한 세척공정 성능향상에 관한 연구

서용식¹ · 최상일^{2*} · 장 민³

¹(주)알파환경엔지니어링, ²광운대학교 환경공학과, ³한국광해관리공단 기술연구센터

A Study on the Full-scale Soil Washing Process Improved by Multi-stage Continuous Desorption and Agitational Desorption Techniques to Remediate Petroleum-contaminated Soils

Yong-Sik Seo¹ · Sang-Il Cho^{2*} · Min Jang³

¹Alpha Environmental Engineering Co., Ltd.

²Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University

³Korea Mine Reclamation Corporation (MIRECO) Technology Research Center

ABSTRACT

In accompany with the transfer of US army bases, recent surveys reported serious contamination of soils by the release of petroleum from storage facilities and heavy metals accumulated in rifle-ranges. These problems have made an increased concerns of cleanup technology for contaminated soils. In this study, a full-scale soil washing process improved by multi-stage continuous desorption and agitational desorption techniques was examined for petroleum-contaminated soils obtained from three different remedial sites that contained 29.3, 16.6, and 7.8% of silt and clay, respectively. The initial concentrations of total petroleum hydrocarbon (TPH) were 5,183, 2,560, and 4,860 mg/kg for each soil. Pure water was applied to operate washing process, in which water used for washing process was recycled 100% for over 6 months. The results of full-scale washing tests showed that the TPH concentrations for soils (>3.0 mm) were 50~356 mg/kg (85.2~98.2% removal rates), regardless of the contents of silt and clay from in A, B and C soil, when the soils were washed at 3.0 kg/cm² of injection pressure with the method of wet particle separation. Based on the initial TPH concentration, the TPH removal rates for each site were 85.2, 98.2 and 89.9%. For soils in the range of 3.0~0.075 mm, the application of first-stage desorption technique as a physical method resulted 834, 1,110, and 1,460 mg/kg of TPH concentrations for each soil, also additional multi-stage continuous desorption reduced the TPH concentration to 330, 385, and 245 mg/kg that were equivalent to 92.4, 90.6, and 90.1% removal rates, respectively. The result of multi-stage continuous desorption for fine soil (0.075~0.053 mm) were 791, 885, and 1,560 mg/kg, and additional agitation desorption showed 428, 440, and, 358 mg/kg of TPH concentrations. Compared with initial concentration, the removal rates were 92.0, 93.9 and 92.9%, respectively. These results implied we could apply strategic process of soil washing for varies types of contaminated soils to meet the regulatory limit of TPH.

Key words : Petroleum-contaminated soil, Soil washing with water, Physical desorption, Multi-stage continuous desorption, Agitational desorption

요 약 문

최근 주한미군기지 이전에 따른 토양오염도 조사결과, 유류저장시설에서의 누출 및 사격장내 중금속에 의한 오염이 심각한 것으로 보고되었으며 오염토양 정화에 대한 관심이 증대되고 있다. 다단연속탈착기법과 교반탈착기법을 적용

*Corresponding author : sichoi@kw.ac.kr

원고접수일 : 2008. 7. 9 심사일 : 2008. 7. 18 게재승인일 : 2008. 10. 21

질의 및 토의 : 2008. 12. 31 까지

한 현장규모의 유류오염토양 세척공정 성능향상에 관한 연구를 위해서 각각 다른 세지역의 정화대상부지 오염토양 중 미세토사가 29.3, 16.6, 7.8% 함유된 토양을 사용하였으며, 초기 오염농도는 각각 5,183, 2,560, 4,860 mg/kg이었다. 세척실험에 사용한 세척제로는 물을 이용하였으며 세척수를 6개월 이상 100% 재활용하여 세척공정을 운영하였다. 현장규모 세척 실험 결과 각기 다른지역의 오염토양 중 3.0 mm 이상의 오염토양은 세척수 분사압력 3.0 kg/cm²의 고압분사를 통한 습식분리 후 TPH 농도는 280, 50, 356 mg/kg으로 초기농도 대비 각각 85.2, 98.2, 89.9%의 TPH 제거율을 보였다. 3.0~0.075 mm의 모래입경에 대하여 1차 물리적 탈착 후 TPH 농도 [초기 입경별 오염부하량 대비]는 834, 1,110, 1,460 mg/kg 이었으며, 추가적인 세척공정의 2차 연속 물리적 탈착인 다단연속탈착기법을 통한 TPH 농도는 각각 330, 385, 245 mg/kg으로 초기농도 대비 각각 92.4, 90.6, 90.1%의 세척효율을 보였다. 미세모래 입경(0.075~0.053 mm)에 대한 다단연속세척 후 TPH 농도는 791, 885, 1,560 mg/kg으로 나타났으며, 추가적인 교반 탈착 후 TPH 농도는 각각 428, 440, 358 mg/kg으로 초기농도 대비 92.0, 93.9, 92.9%의 제거율을 보였다. 이와 같은 결과를 바탕으로, 토양세척기법은 TPH 법적기준을 맞출 수 있는 전략적 복합공정을 통해 다양한 오염토양에 폭 넓게 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

주제어 : 유류오염 토양, 물 세척, 물리적 탈착, 다단연속탈착, 교반탈착

1. 서 론

최근 들어 주한미군기지 이전이 본격화 되면서 시행된 토양오염도조사결과 유류저장시설에서의 누출 및 사격장 내 중금속에 의한 오염이 심각한 것으로 보고되면서 오염 토양 정화에 대한 관심이 증대되고 있다(환경부, 2005). 이러한 대규모 정화부지에서는 굴착 후(ex-situ) 정화방법을 선호하고 있으며, 정화기술로는 토양경작법(land farming), 열탈착법(Thermal desorption), 토양세척(soil washing)등의 기술이 적용되고 있다. 중금속 및 고농도 유류오염토양에 적용하고 있는 토양세척공법은 1980년대 초부터 유럽국가(독일, 네덜란드, 벨기에 등)에서 활발하게 적용되어 왔으며, 최근에는 미국, 캐나다 등 북미지역에서도 폭 넓게 사용되고 있는 정화기술이다(Domenic, 1993).

토양세척공법은 경제적인 비용으로 짧은 시간 내 많은 양의 오염토양 처리가 가능하다는 장점을 가지고 있는 반면, 미세토가 상대적으로 많을 경우 2차 처리비용의 증가, 정화효율 저하 및 불안정한 공정운영 등의 문제점이 발생할 수 있으므로 세척공법 적용시 합리적인 적용성 평가를 통하여 최적의 세척공정을 구성할 필요가 있다.

유류오염토양 세척에 사용되는 세척제로는, 물(water)과 함께, 화학물질인 계면활성제(surfactant), 유기산(organic acid), 무기산(inorganic acid), 과산화수소(hydrogen peroxide) 등을 들 수 있지만, 본 세척실험에서는 세척제에 의한 2차 오염방지 및 세척수의 안정된 pH조정과 함께, 세척수를 100% 장시간 재활용하기 위해 순수한 물(Water)을 사용하였다.

본 논문에서는 토양세척공법을 적용한 대규모 정화현장 중 토양 특성이 각기 다른 3곳의 오염토양을 대상으로 다

단연속탈착기법 및 교반탈착기법을 적용한 현장규모(full-scale) 토양세척을 실시하여 미세토를 포함한 토양입자별 토양세척 성능을 관찰하고자 하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 대상시료 및 특성

본 연구에서는 물을 세척제로 사용하여 미세토사 함량이 각각 다른 오염토양에 대하여 다단연속탈착기법 및 교반탈착기법 적용시 미세토사함량에 따른 세척효율의 영향 및 상관관계를 규명하고자 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 토양은 각기 다른 3곳의 대규모 정화대상 부지(이하 A, B 그리고 C 지역이라 함)의 토양을 사용하였다. 토양 특성이 각각 다른 A, B 그리고 C지역에서 채취하여 풍건한 토양을 #4체(4.75 mm)로 체질한 후 균일하게 혼합하였다. 대상 토양의 입경 분포를 파악하기 위하여 체분석을 실시한 결과, A, B 그리고 C지역에서 실트(silt)와 점토(clay) 크기의 입경을 갖는 미세토사(#200체 이하)가 각각 29.3, 16.6, 7.8 wt%로 분포하였다. 일반적으로 미세토사 함유율이 약 25 wt% 이상일 경우 토양세척기법의 적용이 부적합하며, 세척효율 증가를 위해 세척시간을 증가시켜야 한다(William and Anderson, 1993). 실험대상 토양의 기초특성을 알아보기 위해 토양오염공정시험법(환경부, 2006) 및 한국공업표준(KS F 2103 : 2309)등에 따라 토양 pH, 유기물 함량(organic content), 토양입자 진 비중(particle density), 가비중(bulk density), 그리고 수분 함량(water content)을 분석하였다. 일반적인 토양의 경우 유기물 농도는 평균 논 2.2%, 밭 1.9%(한국유기농협회, 2004) 인 것에 비해 본 연구에서 사용된 토양의 유

기물 함량은 0.94~3.4%로 폭넓은 범위를 보였고, 이는 토양중 미세입자 함량과 선형적인 관계가 있었다(Fig. 1, A). 기타 토양의 물리·화학적 특성은 Table 1과 같다. 또한 오염토양의 입경별 TPH(total petroleum hydrocarbon: 석유계 총 탄화수소) 초기 오염농도 및 입자크기 분포를 분석하였다(Table 2). A, B 그리고 C 지역의 유류오염토양의 초기 농도는 각각 5,183, 2,564, 4,860 mg/kg로 토양환경보전법(환경부, 2006)의 “가” 지역 우려기준치(500

mg/kg dry soil)를 5~10배 이상 초과하는 것을 알 수 있었다. 평균 입경별 TPH 평균농도를 구한 결과(Fig. 1, B), 입경이 미세할수록 오염농도는 증가하였는데, 이는 미세토사의 높은 비표면적으로 인해 많은 량의 TPH가 결합되기 때문인 것으로 판단된다.

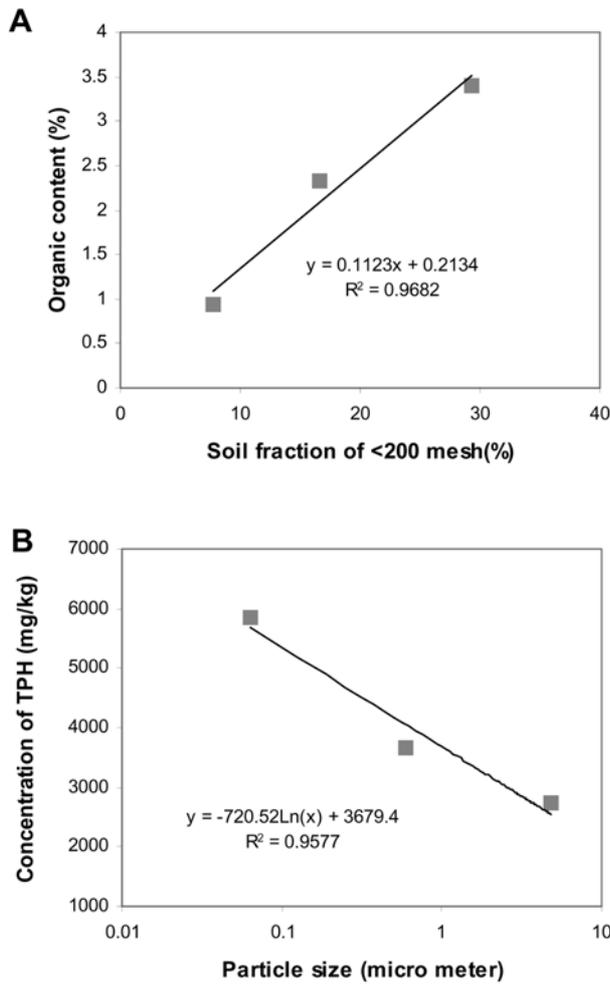


Fig 1. Organic content via soil fraction of < 200 mesh (A), concentration of TPH according to average particle size (B).

Table 1. Physicochemical Characteristics of Soil Samples

Item	Water Content (%)	pH	Organic content (%)	Particle density (g/cm ³)	Bulk density (g/cm ³)	Initial conc. (mg/kg dry soil)
A	18.2	6.04	3.40	2.00	1.46	5,183
B	12.7	7.71	2.33	2.36	1.59	2,560
C	2.8	9.51	0.94	2.46	1.69	4,860
Ave	11.23	7.75	2.22	2.27	1.58	4,201

2.2. 다단연속탈착기법 적용에 따른 세척 효율 실험

토양세척 효율 향상을 위해서 다단연속탈착기법과 교반탈착기법을 적용한 토양세척시스템을 구성하였으며, 세척 효율 평가를 위한 세척 공정을 각각 Fig. 2와 3에 개략적으로 나타내었고, 다단연속탈착기법을 적용한 운전조건을 Table 3에 나타내었다.

입자크기 3.0 mm 이상의 토양은 다단계로 구성된 세척수 분사노즐에 의해서 압력 3.0 kg/cm²의 고압분사를 통한 습식분리 후 청정자갈로 배출되고, 3.0 mm 이하의 모래는 물리적 마찰을 통한 다단연속탈착기법을 적용하였다. 다단연속탈착기법 적용을 위해서 세척공정의 진탕비는 1 : 3 비율 이상을 적용하였으며, 장치의 구성은 펌프, 탈착관 및 하이드로싸이클론에 의한 2단 연속으로 구성하였다. 1차 저장조의 3.0 mm 이하 오염토와 세척수는 모래이송펌프(P-1)에 의해 고압 이송되어 오염물질 탈착관(1)을 통과한 후 하이드로싸이클론(1)에 의해서 3.0~0.075 mm 입경 크기로 분급 함으로써 1차 오염물질 탈착공정이 진행되고, 분급된 오염토사는 2차 저장조로 유입되어 1차탈착공정에서 배출하고 부족한 세척수를 보충하기 위해 2차 저장조로 약 40~50%의 세척수를 침사지 하부에서 공급 받아 진탕비 1 : 3 이상을 다시 유지하게 된다. 오염토사는 다시 모래이송펌프(P-2)에 의해 고압 이송되어 오염물질 탈착관(2)을 통과한 후 하이드로싸이클론(2)에 의해서 또 다시 입경분급 함으로써 2차 탈착공정이 완성되고 3.0~0.075mm 크기로 모래입경은 청정모래로 배출되도록 구성하였다.

적용된 펌프의 동력 및 용량은 각각 22 Kw(160 ton/hr), 11 Kw(80ton/hr), 18 Kw(120 ton/hr)로 1차와 2차 탈착공정에 동일하게 구성하였으며, 펌프 임펠러의 회전수는 1,200 rpm으로 고정하였다. 탈착관은 오염토사가 고압

Table 2. Particle Size Distribution of Soils and TPH initial Concentrations

Region	Sieves		mass fraction[%]	TPH conc. [mg/kg dry soil]	Contamination loading for each size fraction (%)
	#	Opening size [mm]			
A	~4	~4.75	11.1	1,890	4.8
	4~200	4.75~0.075	59.6	4,317	59.1
	200~	0.075~	29.3	5,370	36.1
B	~4	~4.75	11.5	2,784	7.1
	4~200	4.75~0.075	71.9	4,126	66.2
	200~	0.075~	16.6	7,182	26.6
C	~4	~4.75	30.6	3,530	35.4
	4~200	4.75~0.075	61.6	2,571	51.8
	200~	0.075~	7.8	5,011	12.8

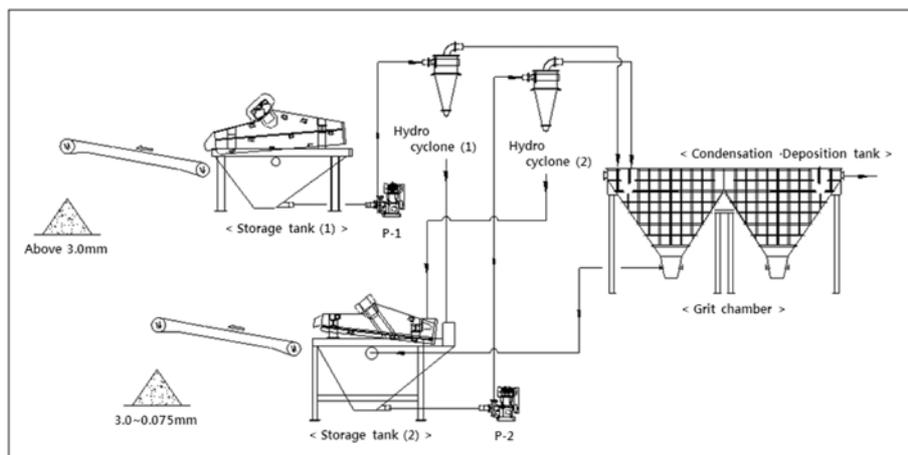


Fig. 2. Process of multi-stage continuous desorption system.

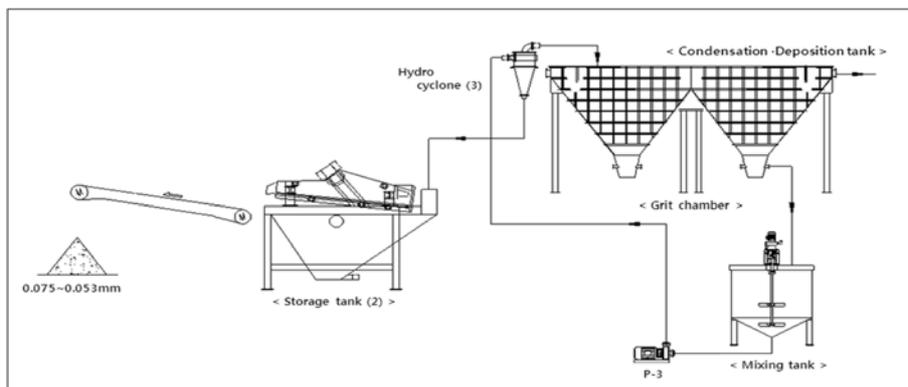


Fig 3. Process of agitational desorption system

Table 3. Process Parameters of Soil Washing System

Region	Mixing ratio	Pump capacity (ton/hr)	Pump power (kw)		Spindle speed rotational (rpm)		Hydro cyclone size (Ø)	
			P-1	P-2	P-1	P-2	1st	2nd
A	Mixing ratio 1 : 3	160	22	22	1,200	1,200	660	660
B		80	11	11	1,200	1,200	430	430
C		120	18	18	1,200	1,200	530	530

이송시 물리적 마찰력이 최대 효과를 발휘할 수 있게 길이가 800 mm로 구성하였으며, 또한 추가적인 오염탈착 및 입경분리에 사용된 하이드로싸이클론은 각각 660, 430, 530φ 1차와 2차 동일한 크기로 구성하였다.

2.3. 교반탈착기법 적용에 따른 세척 효율 실험

0.075~0.053 mm (#200체~#270체)입경에 해당하는 미세 모래는 높은 비표면적으로 인해 다단연속탈착기법 적용이 후에도 법적기준을 만족하지 못하므로, 추가적인 교반탈착기법을 적용하였다. 침사지 하단에서 배출되는 오염토사는 약 96.6%의 함유율로 교반조에 유입되고, 감속모터에 장착된 3단의 좌·우 회전날개에 많은 수의 10 mm 홀을 구성하여 30분 이상 체류시간을 유지하면서 오염토사에 흡착된 오염물질을 회전 유속에 의한 탈착을 유도하였으며, 추가적으로 교반조 벽면에 15° 각도 기울기로 마찰벽을 설치하여 추가적인 탈착을 유도하였다. 교반탈착 이후 미세토사의 배출은 소형 하이드로싸이클론에 의해서 입경분리 후 청정모래와 같이 배출되도록 하였다. 교반탈착장치에 적용된 교반조 사양은 내용적 4톤, 감속기 동력 7.5 Kw, 교반속도 300 rpm이며, 미세토 입경분리를 위해 150φ 하이드로싸이클론을 적용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 다단연속탈착기법 적용에 따른 세척 효율 실험

세척 효율 실험 결과(Fig. 4) A, B 그리고 C지역의 오염토양 중 3.0mm이상 오염토양은 세척수 분사압력 3.0 kg/cm²의 고압분사를 통한 습식분리 후, TPH 농도[초기 입경별 오염부하량 대비]는 280, 50, 356 mg/kg으로 초기 농도 대비 각각 85.2, 98.2, 89.9%의 TPH 제거율을 보였다. 이와 반면, 3.0~0.075 mm의 모래입경에 대하여 1차 물리적 탈착 후 TPH 농도 [초기 입경별 오염부하량 대비]는 834, 1,110, 1,460 mg/kg으로 초기농도 대비 각각 80.7, 73.1, 43.2%의 TPH 제거율을 보였으며, 추가적인 세척공정의 2차 연속 물리적 탈착인 다단연속탈착기법을 통한 TPH 농도 및 제거율[초기 입경별 오염부하량 대비]을 분석한 결과 각각 330, 385, 245 mg/kg으로 초기농도 대비 각각 92.4, 90.6, 90.1%의 제거율을 보였다(Fig. 4). 고압분사를 통한 습식분리 기법의 경우 큰 입자의 오염토양이 작은 입자 토양에 비해 세척결과가 좋은 이유는 부피대비 표면적(surface area-to-volume ratio)과 표면전하(surface charge)가 작아 TPH가 약하게 결합되어 있어 물리적인 고압분사만으로도 충분히 토양으로부터 분리될 수

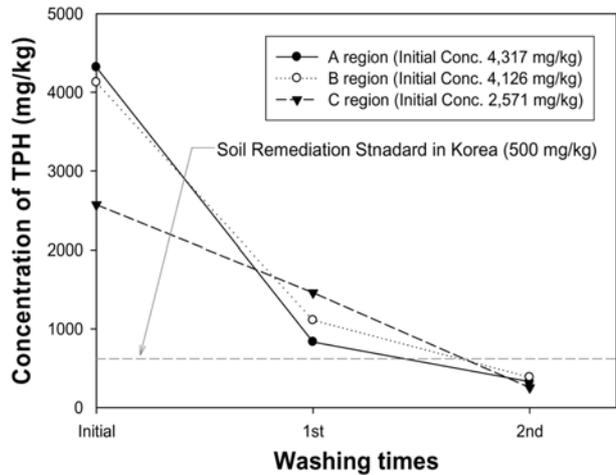


Fig 4. TPH concentrations of soils after 1st step (wet separation with 3.0 kg/cm² of injection pressure with water) and 2nd step (multi-stage continuous desorption) (Particle size = 3.0~0.075 mm, solution mixing ratio = 1 : 3, shaking speed = 1,200 rpm).

있기 때문이다(Bhandari et al., 2000). TPH 오염 부하량이 51.8~66.2%로 가장 높은 입자영역인 3.0~0.075 mm의 경우, TPH 오염의 법적기준을 만족시키기 위해서는 고압 분사를 통한 습식 분리 후, 보다 높은 에너지를 이용한 다단연속탈착기법을 적용한 세척시스템의 구성이 필요한 것으로 판단되었다.

3.2. 교반탈착기법 적용에 따른 세척 효율 실험

다단연속탈착 공정을 거쳐 침사지로 이송되는 0.075~0.053 mm 입경 크기의 미세모래의 TPH 농도는 각각 791, 885, 1,560 mg/kg으로 법적기준 농도(500 mg/kg)를 초과하는 것으로 나타났으며, 이러한 결과는 초기 TPH 농도대비 85.3, 87.7, 68.9%의 세척효율을 보였다. 앞서 실시했던 3.0~0.075 mm의 모래입경에 대한 다단연속탈착공정의 세척효과에 비해 떨어져 같은 세척공정을 적용시 입자크기가 작은 오염토양의 경우 큰입자에 비해 세척효율이 떨어짐을 알 수 있었다. 따라서 고압분사를 통한 습식분리와 다단연속탈착 공정으로 0.075~0.053 mm 입경에 해당하는 오염토양을 세척시, 법적기준을 만족시키지 못할 뿐만 아니라 추가적인 정화공정이 필요하였는데, 이때 보다 강한 탈착방법인 교반탈착기법을 도입하였다. 교반탈착기법(교반속도 300 rpm, 교반시간 30분)을 적용한 결과, TPH 농도는 각각 428, 440, 358 mg/kg으로 법적기준을 만족할 뿐 만 아니라, 초기농도 대비 92, 93.9, 그리고 92.9%의 제거효율을 보이고 있다(Fig. 5). 이러한 결과는, 높은 비표면적을 갖고 있는 0.075~0.053 mm의 미세모래의 경우 교반탈착공정을 추가하여 오염물질을 제

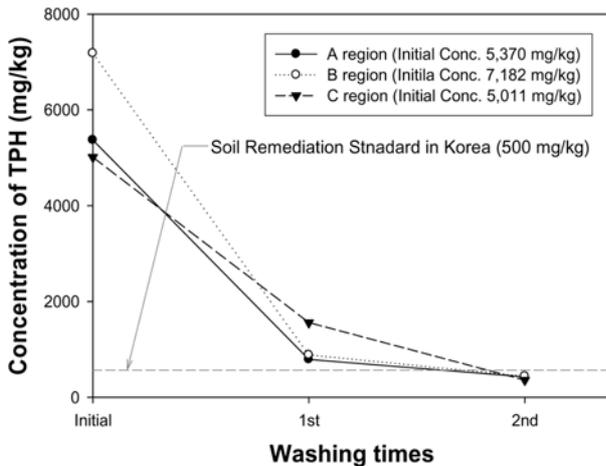


Fig 5. TPH concentrations of soils after multi-stage continuous desorption (1 st step) and agitational desorption sequentially added (2 nd step), (particle size = 0.075~0.053 mm, solution mixing ratio = 1 : 3, shaking speed = 300 rpm).

거하여야만 0.053 mm 이상의 모래입경을 청정토사와 함께 배출할 수 있음을 시사하고 있다.

미국 농무성 기준 토양 입경구분(USDA, 1951)에 의하면 0.05~0.002 mm의 입경을 실트(silt), 0.002 mm 이하 입경을 점토(clay)로 구분하고 있으며, 실트(silt) 및 점토(clay) 토양은 높은 비표면적으로 인한 오염물질의 흡착이 매우 높은 것으로 알려져 있어서 세척효율이 매우 낮은 것으로 알려져 있다. 이러한 미세토사는 현장에서 응집·침전시켜 처리하며 처리시 액상 TPH가 응집된 미세입자에 포함되어 침전되기 때문에 처리후 슬러지의 TPH 농도가 상대적으로 높아지는 현상을 보인다. 또한, 일반적으로 오염토양중 유기물 함량이 높아질수록 TPH 결합력이 강해 세척효율이 떨어지고, 초기 TPH 농도가 높아질수록 법적 기준을 맞추기 어려울 것으로 알려져 있지만, 본 현장규모의 연구에서 적용된 다단연속탈착과 교반탈착기법의 세척효율은 유기물 함량과 초기 TPH 농도조건과 상관성이 매우 낮음을 알 수 있었다. 또한, 오염토양의 입자크기별 다양한 토양세척기법을 적용하고 TPH 법적기준을 맞출 수 있는 전략적 복합공정을 만들 수 있어 다양한 오염토양에 폭넓게 적용할 수 있다는 장점을 발견하였다.

향후, 보다 다양한 조건의 오염토양을 대상으로 세척효율을 평가하여 토양의 물리화학적 변수와의 상관성을 검토할 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 다단연속탈착 및 교반탈착기법을 적용한

토양세척장치를 이용하여 토양세척 효율을 평가하고자 현장규모 실험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 29.3, 16.6, 7.8%의 실트 및 점토 함유하고 있는 각기 다른 오염토양 특성을 가지고 있는 A, B 그리고 C 지역에서 고압분사를 통한 습식분리, 다단연속탈착기법, 그리고 교반탈착기법을 통한 유류오염토양 세척공법 적용 결과, 0.053 mm 이상의 토양에서 TPH 법적기준치 500 mg/kg를 만족하는 것으로 확인되었다.

(2) 3.0 mm 이상 오염토사는 3.0 kg/cm²의 고압 세척수 분사를 통한 습식분리만으로 법적기준을 만족하였으며, 3.0 mm 이하 입자 크기 중 3.0~0.075 mm 입경 크기의 모래는 다단연속탈착(세척)공정을 거쳐야 법적기준 농도에 만족하는 것으로 사료되듯이, 세척제를 물(water)을 이용한 유류오염토양 세척공법 적용 시 순수한 입경분리만으로 오염물질을 완벽하게 제거 할 수 없으며, 세척수 분사압력, 일정한 체류시간, 마찰계수, 분리능 등에 따른 다단연속세척공정 구성이 이루어져야 법적기준을 만족할 수 있었다.

(3) 0.075~0.053 mm 입경 크기의 미세모래는 높은 비표면적으로 인해 다단연속탈착기법 적용 이후 추가적 공정인 교반탈착기법을 적용하였을 때 법적기준에 도달할 수 있었다.

사 사

본 연구는 환경부의 “토양지하수복원관리 환경기술교육 혁신지원사업단”의 지원을 받은 과제입니다.

참 고 문 헌

- 강성모, 김대원, 김혜자, 1944, Biosurfactant를 생산하는 *P. aeruginosa* KK-7의 분리 및 Biosurfactant의 생산, *Kor. J. Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **22**(1), 92-99.
- 공준, 최상일, 1998, 유류 오염토양 복원을 위한 토양세척 장비의 적용성 연구, *한국토양환경학회지*, **3**(3), 109-116.
- 한국유기농협회, 2004, 친환경농업-유기농업(1).
- 환경부, 2005, 특정토양오염관리대상시설 설치신고 및 검사결과 현황.
- 환경부, 2006, 토양환경보전법.
- 환경부, 2006, 토양오염공정시험법.
- 환경부, 2007, 오염토양 정화방법 가이드라인.
- Bhandari, A., Novak, J.T., and Dove, D.C., 2000, Effect of soil

washing on petroleum hydrocarbon distribution on sand surfaces, *J. Haz. Sub. Res.*, **2**(7), 1-13.

Grasso, D., 1993, Hazardous Waste Site Remediation Source Control, Lewis Publishers, USA, *G-Chemical Extraction and Soil Washing*, p. 18-38.

Jang, M., Hwang, J.-S., Choi, S.-I., and Park, J.-K., 2005, Remediation of arsenic-contaminated soils and washing effluent, *Chemosphere*, **60**(3), 344-354.

Ramana, K.V. and Karanth, N.G., 1989, Factors affecting bio-surfactant production using *Pseudomonas aeruginosa* CFTR-6 under submerged conditions, *J. Chem. Tech. Biotechnol.*, **43**, 249-257.

Semer, R. and Reddy, K.R., 1996, Evaluation of soil washing process to removed mixed contaminants from a sandy loam,

Journal of Hazardous Materials, **45**(1), 45-57.

United States Environmental Protection Agency, Engineering Bullentin: Soil Washing Treatment, Office of Soil Waste and Emergency Response, EPA, 1990.

U.S. Department of Agriculture (USDA), Soil Survey Staff. 1951. Soil Survey Manual. USDA handbook no. 18. U.S. Government Printing Office, Washington, DC.

Wallace, S. and Cork, J., 1998, Remediation Basford Gasworks Using Soil Washing, *Sixth International FZK/TNO Conference on Contaminated Soil*, Contaminated Soil, London, p. 63-74.

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