

파일럿 규모의 토양세척장치 개발

장윤영 · 신정엽 · 황경엽

한국과학기술연구원, 환경복원연구센터

Development of a Pilot-Scale Soil Washing Process

Yoon-Young Chang, Jung-Yub Shin and Kyung-Yub Hwang

Korea Institute of Science and Technology, Environment Remediation Center

ABSTRACT

Soils contaminated with hydrocarbons and residual metals can be effectively treated by soil washing. In developing the soil washing process several major effects for separating contaminants from coarse soils progressively improved upon combinations of mining and chemical processing approaches. The pilot-scale soils washing process consists of the four major parts : 1) abrasive scouring, 2) scrubbing action using a washwater that is sometimes augmented by surfactants or other agents, 3) rinsing, and 4) regenerating the contaminated washwater. The plant was designed based upon the treatment capacity > 5 ton/hr on site.

The lumpy contaminated soil fractions first experience deagglomeration and desliming passing through a rolling mill pipe. In the second unit the attrition scrubbing module equipped with paddles uses high-energy to remove contaminants from the soils. And a final rinsing system is assembled to separate the washwater containing the contaminants and very fine soils from the washed coarse soils. For recycling the contaminated

washwater passes through a washwater clarifier specifically designed for flocculation, sedimentation and gravity separation of fine as well as flotation and separation of oils from the washwater.

In order to more rapidly assess the applicability of soil washing at a potential site while minimizing the expense of mobilization and operation, a mobile-type soil washing process which is self-contained upon a trailer will be further developed.

Key words : Soil Washing, Contaminated Soil, Washwater, Scrubbing, Separation

요 약 문

탄화수소계 화합물이나 중금속 잔류물 등으로 오염된 토양은 토양세척방법에 의해 효과적으로 처리할 수 있다. 본 연구에서 토양세척공정을 개발하는데 있어 토양으로부터 오염물을 분리하기 위한 몇 가지 주요 핵심 공정기술들은 채광기술과 화학공정기술의 접목을 통하여 점차적으로 개선되어 얻어졌다. 본 파일럿 규모의 토양세척장치는 공정 상 크게 네 부분으로 이루어져 있다. 1) 기계적 마찰, 2) 세척수를 이용한 세탁작용, 3) 최종세정, 4) 오염된 세척수의 재생.

장치는 현장에서 오염토양을 시간당 5톤 속도로 처리하기 위한 규모로 설계하였다. 오염된 토양 덩어리는 먼저 1차 세척부인 회전 마찰 분쇄관을 통과하면서 개개의 토양입자로 부서지고 다음, 교반날이 설치된 2차 세척부에서 세척수와 강한 마찰효과에 의해 오염물의 탈착이 이루어지게 된다. 최종 단계인 3차 세척부에선 세척된 토양을 최종적으로 물분사장치를 이용하여 세정하고 오염된 세척수와 정화된 토양을 역방향으로 분리하여 각각 배출시킨다. 세척수를 연속적으로 재사용하기 위하여 오염된 세척수는 미세토의 응집, 침전과 기름성분의 부상분리가 이루어지는 세척수 처리조를 거쳐 세척부로 다시 반송되도록 하였다. 추후 이동과 운전비용을 줄이면서 현장에 적합한 토양세척장치의 적용성을 얻기 위하여 트레일러에 탑재된 이동형 토양세척장치개발에 대한 연구를 진행할 것이다.

주제어 : 토양세척, 오염토양, 세척수, 마찰, 분리

1. 서 론

토양복원을 위한 정화기술의 선택은 오염물의 종류와 부지특성 등을 고려한 처리효율의 극대화와 전체 복원비용의 최소화를 위하여 신중하게 이루어진다. 현재 현장에서 적용되고 있는 여러 가지 형태의 토양 정화기술들과 적용사례들에 대한 문헌상의 보고는 기술선택과정의 중요성을 일깨워 주고

있다.”

일반적으로 널리 알려진 토양복원기술로는 기계적 마찰과 세정수를 이용한 세척방법, 온도를 높여 고온에서 오염물을 토양으로부터 분리하는 열적 처리방법, 미생물을 이용한 생물학적 처리방법, 반응 화합물을 첨가하여 화학적 변환에 의해 오염물의 위해도를 저감시키는 화학적 처리방법과 휘발성 오염물질의 처리에 적합한 토양증기추출법 등이 있

다. 이러한 각 처리 방법을 수행하기 위한 장치는 저마다 다양한 형태의 구조를 가지고 있으며, 현장 위주의 설계를 통하여 공정이 이루어진다.²⁾ 이러한 토양복원기술의 특성상 대상 오염토양의 특성에 따라 유동적인 장치 설비가 필요하고 운전조건도 각 경우에 맞게 조절되어야 하므로, 국외에서 완성된 처리기술을 국내의 경우에 바로 적용하는데에는 많은 위험부담이 따른다. 따라서, 경제적이고 국내 오염현황에 적합한 경제적 토양복원 장치개발이 필요하며 토양세척공정은 처리비용과 처리방법에 있어서 국내실정에 부합되는 기술 가운데 하나로 포함시킬 수 있다.³⁾

이 공정은 1980년대 초부터 유럽국가, 즉 독일, 네덜란드, 벨기에 등에서 활발하게 연구 적용되어 왔으며 좀 더 최근에는 미국, 캐나다 등 북미지역에서도 폭 넓게 사용되고 있는 기술 가운데 하나로 고전적인 채광공정과 폐수처리공정의 기본토대에 바탕을 두고 있다. 적용범위에 있어서도 토양에 국한하지 않고 강이나 호수, 또는 수로나 도크, 그리고 항구 등에서 준설된 퇴적침전물의 세척 등 적용 범위가 광범위한 기술로 알려져 있다.⁴⁾

본 연구에서는 여러 토양 처리방법 중 경제성과 효율성에서 타기술에 비하여 여러 가지 장점이 있는 세척방법을 선택하여, 유류에서부터 중금속에 이르기까지 다양한 종류의 오염부지처리가 가능하고 용도에 따라 공정라인을 유동적으로 변형함으로써 작업효율을 높이고 처리시간과 비용을 최소화할 수 있는 파일럿 규모의 토양 세척장치를 개발하고자 하였다.

2. 배경

2.1 기본원리

토양세척의 원리를 간단하게 요약하면 토양내의 오염물을 세척수(주로 물)와 기계적 마찰력을 이용

하여 미세토양과 액상으로 이동 분리시켜 토양의 오염부피를 크게 감소시키고자 하는 것이다. Fig. 1 에서 토양세척과정을 간략히 설명하였다. 먼저 초기단계에서 굴토된 오염토양을 처리에 적합하도록 이물질 및 부적합한 크기의 토양성분을 제거하는 전 단계 준비작업이 이루어진다.

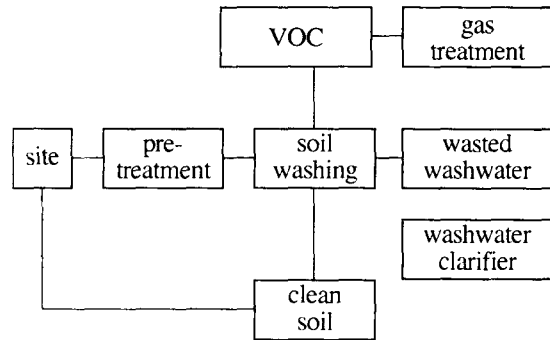


Fig. 1. Typical soil washing process diagram

이러한 전처리를 거친 토양은 토양세척기로 들어가 세정액과 기계적 교반이 이루어지게 되는데 이때 세정액은 주로 물을 사용하는 것이 일반적이거나 경우에 따라서는 처리효율을 높이고자 세제를 첨가하기도 한다. 한번 더 행균 과정을 거친 후 처리된 토양은 분리되어 재매립 또는 다른 용도로 쓰이고 처리수는 후처리과정을 거쳐 정화후 재 이용하게 된다.

토양세척은 토양복원을 위한 단일공정으로 쓰이기보다는 토양의 전체부피중 대부분을 차지하는 모래입경이상의 토양을 경제적으로 처리·분리함으로써 오염토양의 양을 현저히 줄이기 위한 공정으로 더욱 많이 쓰이고 있다. 보통 오염부지에서 토양의 70~90%정도가 토양세척에 의해 부피감량이 이루어지면 토양세척은 적합한 공정으로 인정된다.³⁾

2.2 적용범위

토양세척을 적용할 수 있는 곳은 가스 제조공장, 코크스 제조공장, 금속가공공장, 주(저)유소, 원유 가공공장, 화학공장, 군사기지 등을 들 수 있고 처리성능은 부지특성과 오염물의 종류에 의해 좌우된다.⁵⁾

토양성상에 따른 제한은 토양의 입도분포(토양종류)와 함유된 유기물의 종류에 의해 결정된다. 모래, 자갈 등과 같이 점착성이 없는 토양은 토양세척에 적합한 반면에 진흙 등과 같이 입자의 크기가 0.06mm 이하 되는 미세토양은 비표면적이 크고 오염물질의 점착성이 커서 이들 미세토양의 함량이 높은 토양은 처리에 한계가 있다.⁶⁾

토양 중 유기성 부식물질은 대부분 미세한 입자(<0.002mm이하)로 존재하여 비표면적이 매우 크고 오염물질과 강하게 결합하는 특성이 있다. 일반 토양과 농지, 하천침적물, 늪지 등에서 넓은 분포를 보이고 있는 부식물질이 많이 함유된 토양은 토양세척에 부적합하다.

토양성상에 따른 토양세척의 한계는 미세토양과 부식물질의 혼합율에 의하여 결정된다. 최근에 들어서는 미세토양의 혼합율을 50%까지도 경제성의 한계 내로 설정하는 공법에 대한 소개도 있으나 일반적으로 혼합율 30% 이하를 토양세척의 경제적 한계로 보고 있다.³⁾

토양세척은 경험적으로 석유와 쇠상탄화수소, 단핵 방향족화합물(BTX, BTEX, AHC)에 잘 적용될 수 있는 것으로 알려져 있다.⁴⁾

중금속 제거에 대한 토양세척의 효과는 중금속의 결합형태에 의하여 좌우된다. 일 예로 만일 중금속이 용해되기 쉬운 금속염 형태로 존재하거나 미세토양과 결합된 상태로 존재하면 처리가 용이할 수 있으나 난용해성 화합물들의 경우, 공정수와 EDTA, 산 첨가 등의 첨가에 의한 추출로 제거될 수 있다.⁷⁾

3. 장치구성 및 운전

3.1 주요구성

Fig. 2는 본 연구에서 개발한 토양세척장치의 개략적인 투시도로서, 제 1차, 제 2차 및 제 3차 세척부로 나뉘어져 있다.

오염된 토양이 세척장치로 투입되는 토양주입부는 장치 바닥에서 연결되는 토양 승강기 1와, 이어지는 각 세척부에 토양을 일정한 속도로 보내기 위한 왕복축이 연결된 호퍼(hopper) 2로 구성되어 있으며 공급되는 세척수를 위한 저수조 3는 일정한 수위를 유지하는 수위조절밸브와 저수조의 세척수를 각 세척조에 이송하는 펌프로 구성되어 있다. 제 1 차 세척부 4는 내부표면상에 토양이동을 위한 나선형 날을 구비하며, 종축방향으로 길게 신장되어 있는 원통형 외부드럼과; 상기 외부드럼의 내면과 접촉하면서 회전하는 마찰수단과; 세척수를 분사하기 위하여 상기 외부드럼 내부에 설치되어 있는 복수의 세척수 분사용 압력노즐과; 상기 마찰수단의 종축과 상기 외부드럼의 종축 사이의 각도를 조절하는 기울임 조절장치; 및 오염물 배출수단을 구비하고 있다.

제 2 차 세척부 5는 외부 케이싱과; 소정경사를 가지는 교반날이 일정간격으로 배열되어 있는 복수의 평행한 회전축과; 복수의 세척수 분사용 압력분사 노즐; 및 오염물 배출수단을 가지고 있다. 제 3 차 세척부 6은 상기 마찰수단을 제외하고는 상기 1 차 세척부와 동일한 구성을 하고 있다.

제 3 차 세척부의 배출구 바깥에 위치한 토양입경분류장치 7은 여러층의 경사진 스크린 망으로 구성되어 있으며 진동장치가 설치되어 원활한 입경분리가 이루어지도록 하였다. 오염된 세척수 중 미세토양의 응집처리를 위해 설치된 교반응집조 8, 9, 10은 교반날과 응집제 연속투입장치가 설치되어 있다. 세척수 정화조 11은 미세토양의 응집침전과

기름성분의 부상분리가 이루어지도록 설계되었으며 배출되는 정화수는 저수조 3으로 재순환되도록 하였다. 모든 운전조건은 제어판넬 12에서 이루어 지도록 하였다.

3.2 작동원리

제 1 차 세척부에서는 토양 주입부에서 도입된 토양이 나선형 날에 의하여, 서로 반대 방향으로 회전하는 마찰수단과 드럼 내부표면 사이에서 부분적으로 형성되어 있는 마찰면을 통과하면서 뭉쳐진 토양이 잘게 부서져 토양의 표면적 증가와 동시에 토양표면으로부터 오염물의 1차 분리가 이루어진다. 이때, 드럼 내부에 있는 노즐관에 설치되어 있는 복수의 노즐로부터 분사되는 세척수는 토양으로부터 오염물의 효율적인 분리와 분리된 오염물을

오염물 배출수단을 통하여 토양의 이동 방향과 반대방향으로 이송시켜 세척부 밖으로 배출시킨다. 토양의 이동속도는 드럼의 회전속도 또는 드럼내부에 있는 나선형 날의 각도에 의하여 조절된다.

교반날이 설치되어 있는 2차 세척부에서는 회전하는 교반날의 각도에 의하여 오염토양이 전진하면서 세척수와 강한 마찰효과에 의해 오염물의 탈착이 이루어지게 된다.

제 3 차 세척부에서는 제 1 및 2 차 세척부에서 세척된 토양이 회전하는 드럼을 통과하면서 내부노즐관을 통하여 분사되는 세척수에 의하여 표면에 남아 있는 오염물을 마지막으로 떨어내는 최종 세척과정이 이루어진다. 제 1 차 세척부에서와 동일하게, 제 3 차 세척부에서도 오염된 세척수를 토양과 역방향으로 이동하게 하여 오염물 배출수단으로

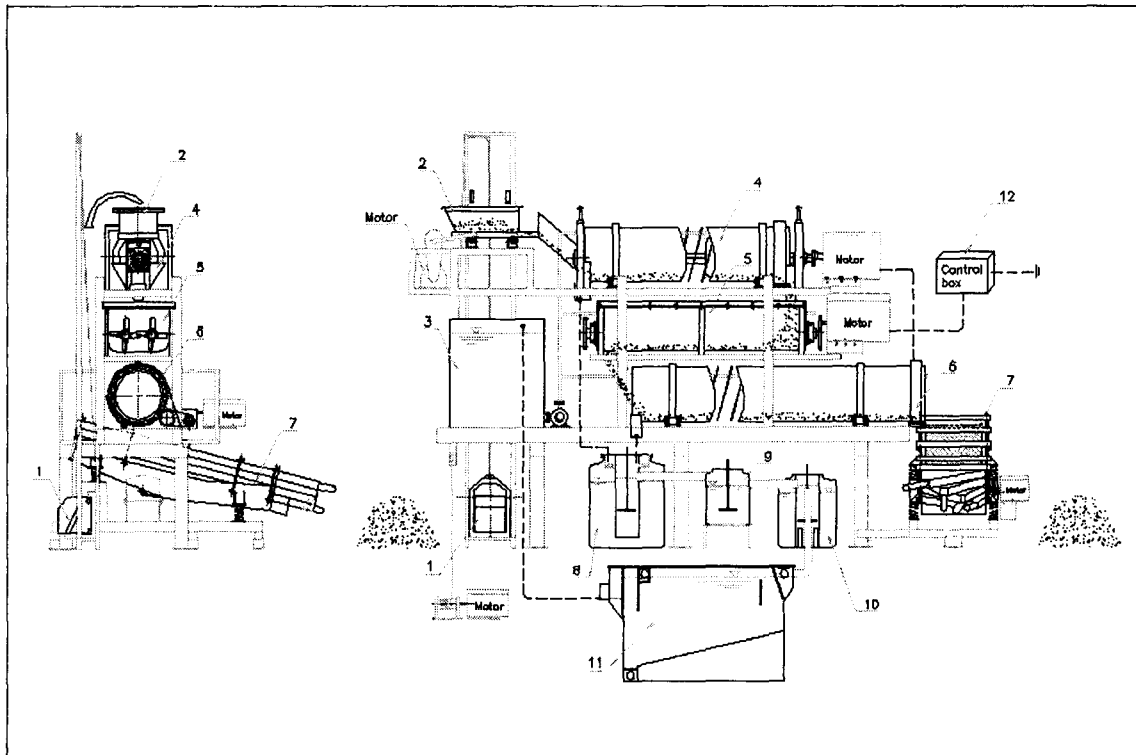


Fig. 2. Schematic illustration of the pilot-scale soil washing process

배출되게 함으로써 분리된 오염물이 다시 토양을 오염시키지 않도록 하였다.

정화된 토양은 입경분류장치에서 입경별로 분류되어 최종적으로 배출된다. 세척부에서 발생하는 오염 세척수는 교반 응집조를 통과하여 응집제와 혼합, 응집된 후 세척수 정화조에서 세척수 중 미세토양은 침전 분리되고 기름성분은 위로 부상 분리되어 따로 수집된다. 정화된 세척수는 다시 저수조로 이송되어 재 사용된다.

4. 오염토양 처리성능 시험

본 토양세척장치의 세척효과를 실험하기 위하여 경유로 오염된 지 6개월 이상이 경과된 유류오염토양과 등유로 오염된 주유소부지 토양을 세척 처리하였다. 설정된 운전조건은 Table 1에 나타내었다. 토양의 오염도는 토양 중 TPH (Total Petroleum Hydrocarbons)의 농도값으로 나타냈으며 분석은 US EPA method 8020에 따라 FID 컬럼이 장치된 HP Gas Chromatography를 이용하여 이루어졌다. 토양입경 분류는 KS F2302에 의하여 체 분석과 비중계 분석방법에 의해 이루어졌으며 세척수 중 SS(Suspended solid)의 농도값은 토양공정시험법에 따라 분석하였다. 세척실험에 대한 결과를 Fig.1~6에 나타내었다.

Fig.1, 2, 4, 5는 토양세척장치의 주 세척부인 1차, 2차, 3차 세척단계를 각각 통과한 토양의 오염도와 입경분포를 나타내고 있다. Fig.1과 4에서 보듯이, 경유와 등유로 각각 오염된 토양의 TPH는 각 단계를 거치면서 급격하게 낮아져 세척에 의

한 대상 오염토양의 처리가 효과적임을 알 수 있다. 또한 Fig.2와 5의 실험결과로 미루어 각 세척 단계를 거치면서 토양 중 미세토양은 세척수와 함께 배출되어 토양의 입경분포는 대칭에서 점차 큰 입경쪽으로 기울어짐을 알 수 있다.

토양세척부에서 배출되는 오염된 세척수 미세토양의 함량(SS)와 유류오염물의 농도(TPH)는 Fig.3과 6에서 보듯이 상당히 높은 값을 나타내어 재사용을 위해서는 후 처리가 반드시 필요함을 알 수 있다. 세척수 정화조에서 처리된 세척수의 정화 정도를 보면 99%이상의 높은 처리도를 나타내어 세척수로서 재사용이 가능한 상태로 재생되었음을 알 수 있다. 이는 경유와 등유의 경우 물에 용해도가 높은 성분의 함량이 상대적으로 낮아 대부분의 유류오염물은 정화조내에서 부상 분리되었고 처리된 세척수내에 용존되어 있는 유류성분의 농도가 매우 낮은 값을 보였기 때문이다.

5. 결 론

본 토양세척장치는 현장에서 바로 적용될 수 있는 성능과 크기의 오염토양 처리장치로, 주변 환경에 심각한 위해를 미칠 수 있는 개인소유의 오염부지, 오염된 공공부지 또는 군사부지 등의 복원을 효율적으로 수행하는 데 직접적인 역할을 수행하도록 설계하였으며 또한, 토양복원기술의 국내제공으로 외국기술의 전적인 의존도에서 벗어날 수 있는 자립기술의 확보에 역점을 두고 연구를 수행하였다.

실제 오염토양에 대한 장치의 처리성능실험 결과 미세토양의 함량이 지나치지 않은 유류로 오염된 토양의 경우 세척에 의한 효과적인 처리결과를 얻을 수 있었으며 이를 통하여 국내 적용가능한 오염부지의 선정과 복원을 통하여 장치의 완성도를 높임과 동시에 다양한 오염부지 조건에도 신축성있는 장치 설치가 가능하도록 이동형 토양세척장치의

Table 1. Operation conditions

Soil treatment	Washwater feed	Coagulant and flocculant feed		Electric power
		coagul.	floccul.	
3 ton/hr	100 L/min	150 ppm	1.5 ppm	30 kw

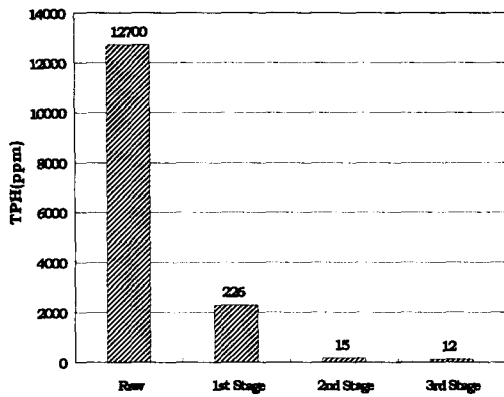


Fig. 1. TPH content of soil at the end of each stage in the main washing part for treatment of diesel-contaminated soil

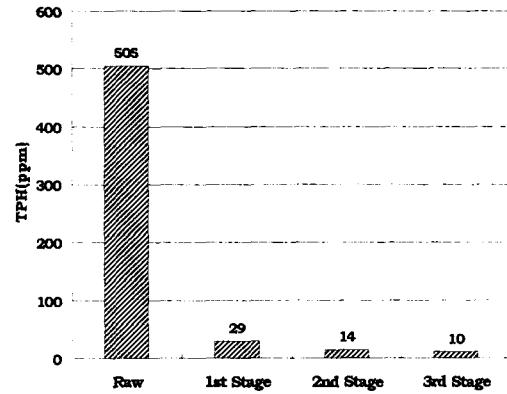


Fig. 4. TPH content of soil at the end of each stage in the main washing part for treatment of kerosene-contaminated soil

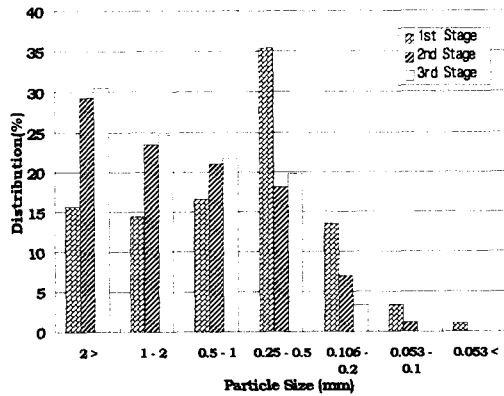


Fig. 2. Particle size distribution of soil at the end of each stage in the main washing part for treatment of diesel-contaminated soil

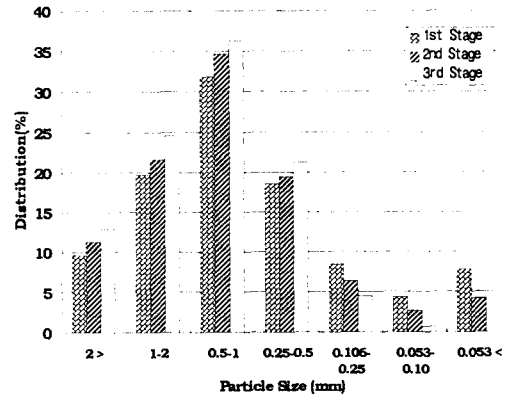


Fig. 5. Particle size distribution of soil at the end of each stage in the main washing part for treatment of kerosene-contaminated soil

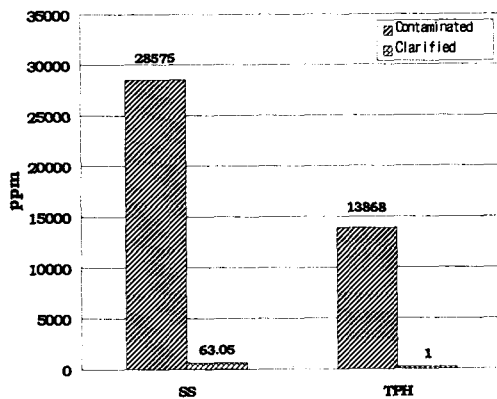


Fig. 3. Separation of SS and TPH(diesel) from wasted washwater in a clarifier

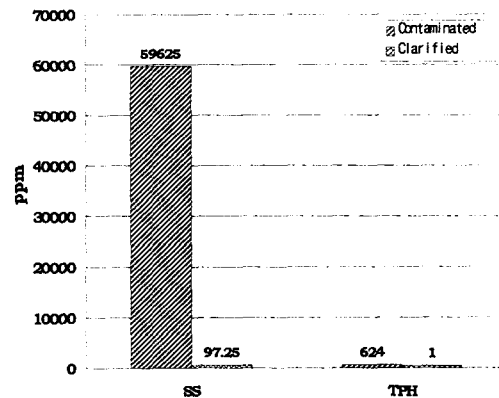


Fig. 6. Separation of SS and TPH(kerosene) from wasted washwater in a clarifier

개발이 앞으로 남은 과제이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 환경복원 및 재생기술 과제의 일환으로 지원/수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. EPA, Superfund Innovative Technology Evaluation, EPA/540/R-93/526 (1993).
2. DOD, Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, 2nd ed. (1994).
3. 한국과학기술연구원, 환경복원기술자료집 (1997).
4. Malcolm Pratt, " Remedial Processes for Contaminated Land", Institution of Chemical Engineers (1994).
5. EPA, "Clean Up the Nations Waste Sites : Markets and Technology Trends", EPA 542-R-96-005, April (1997).
6. 장운영, "유류저장소에서의 토양오염과 복원 기술", 월간폐기물, pp174-182, 5월 (1997).
7. EPA, "NATO/CCMS Pilot Study" EPA542-R-98-001b, June (1998).
8. 한국과학기술연구원, "환경복원 및 재생 기술", 11월 (1995).