

토양세척에 의한 유류오염부지의 정화

황 경 엽

(한국과학기술연구원 환경공정연구부)

서 론

토양이 오염되면 복잡한 구성으로 이루어진 토양의 특성상, 가시적 조건하에서 예측된 복원을 이루기가 쉽지 않다. 오염토양 복원기술은 대개가 복합기술로 이루어져 있으며 이는 단일 처리공정기술 하나만으로는 원하는 복원목표를 얻는데 한계가 있기 때문이다.

토양복원을 위한 정화기술은 오염물의 종류와 부지특성 등을 고려한 처리효율의 극대화와 전체복원비용의 최소화를 위하여 신중하게 선택되어야 한다. 현재 소개되고 있는 여러 가지 형태의 토양정화기술 중 토양세척공정은 상대적으로 처리비용이 저렴하고 비교적 용이한 방법으로 많은 양의 오염토양을 단시간에 처리할 수 있는 기술로 평가되고 있다.

이 공정은 1980년대 초부터 독일, 네덜란드, 벨기에 등의 유럽국가에서 활발하게 연구·적용되어 왔으며 최근에는 미국, 캐나다 등 북미지역에서도 폭 넓게 사용되고 있는 기술 가운데 하나가 되었다.

토양세척공정은 원래 고전적인 채광공정과 폐수처리공정에 바탕을 두고 있으므로 다른 정화공정과 달리 성능 면에서 이미 예측 가능한 공정이라 할 수 있다. 또한 적용범위도 오염토양의 정화에 국한되지 않고 강이나 호수, 또는 수로나 도크, 그리고 항구 등에서 준설된 퇴적침전물의 세척에도 사용될 만큼 타 공정에 비하여 매우 광범위하며, 이동이 가능한 이동형 토양세척시스템의 개발은 적용가능부지의 한계를 한층 확대시켜 놓았다.

본 고에서는 토양세척공정에 대한 개략적인 내용과 적용사례를 들어본다.

기본 원리

토양세척의 원리는 토양내의 오염물을 세척수(주로 물)와 기계적 마찰력을 이용

하여 미세 토양과 액상으로 이동시킨 후 이를 분리시켜 처리되어야 할 오염물의 부피를 감소시키는 것이다. Fig. 1은 토양세척과정을 개략적으로 나타낸 것이다. 토양세척의 효율을 높이기 위한 균일화 과정을 거친 오염토양은 토양세척기로 투입되어 세척수와 기계적 혼합하에 세척된다. 이때 세척수는 주로 물을 사용하는 것이 일반적이거나 경우에 따라서는 처리효율을 높이하고자 세제를 첨가하기도 한다. 한번 더 헹굼과정을 거친 후 처리된 토양은 분리되어 되메우기 또는 다른 용도로 쓰이고 처리수는 후처리과정을 거쳐 정화후 재이용하게 된다. 최종적으로 남은 오염물질은 매립 또는 소각되거나 별도의 정화과정을 거쳐 처리되기도 한다.

토양에 오염물질이 존재하는 형태는 다양하다. 그러므로 오염토양의 양상에 따라 적절한 토양세척장치의 형태로 여러 가지로 나타날 수 있다. Fig. 2와 3은 각각 오염토양의 양상에 따른 오염물질 분리방법과 토양세척장치의 종류를 나타낸 것이다.

공정 비교

토양세척공정의 장점은

- 외부환경의 조건변화에 따른 영향이 적고
- 오염물 종류에 대한 적용범위가 넓으며 (표 1, 2 참조)
- 신속한 처리가 가능하므로 장치비용이 적게 소요되고
- 타 공정에 비하여 이차오염문제가 매우 적으며
- 이동형 장치가 가능하다.

는 것이다.

그러나 토양세척에도 제한사항이 있으며 이로 인하여 타 공정에 비하여 불리할 경우도 발생할 수 있다. 가장 문제시되는 제한사항은 점토질의 미세 토양 함유량으로서 일반적으로 오염토양 중 이러한 미세 토양의 함유량이 30%를 상회하면 토양세척은 경제성이 없는 것으로 간주되고 있다(표 3 참조) 표 4는 여러 가지 공정에 대한 장단점을 요약한 것이다.

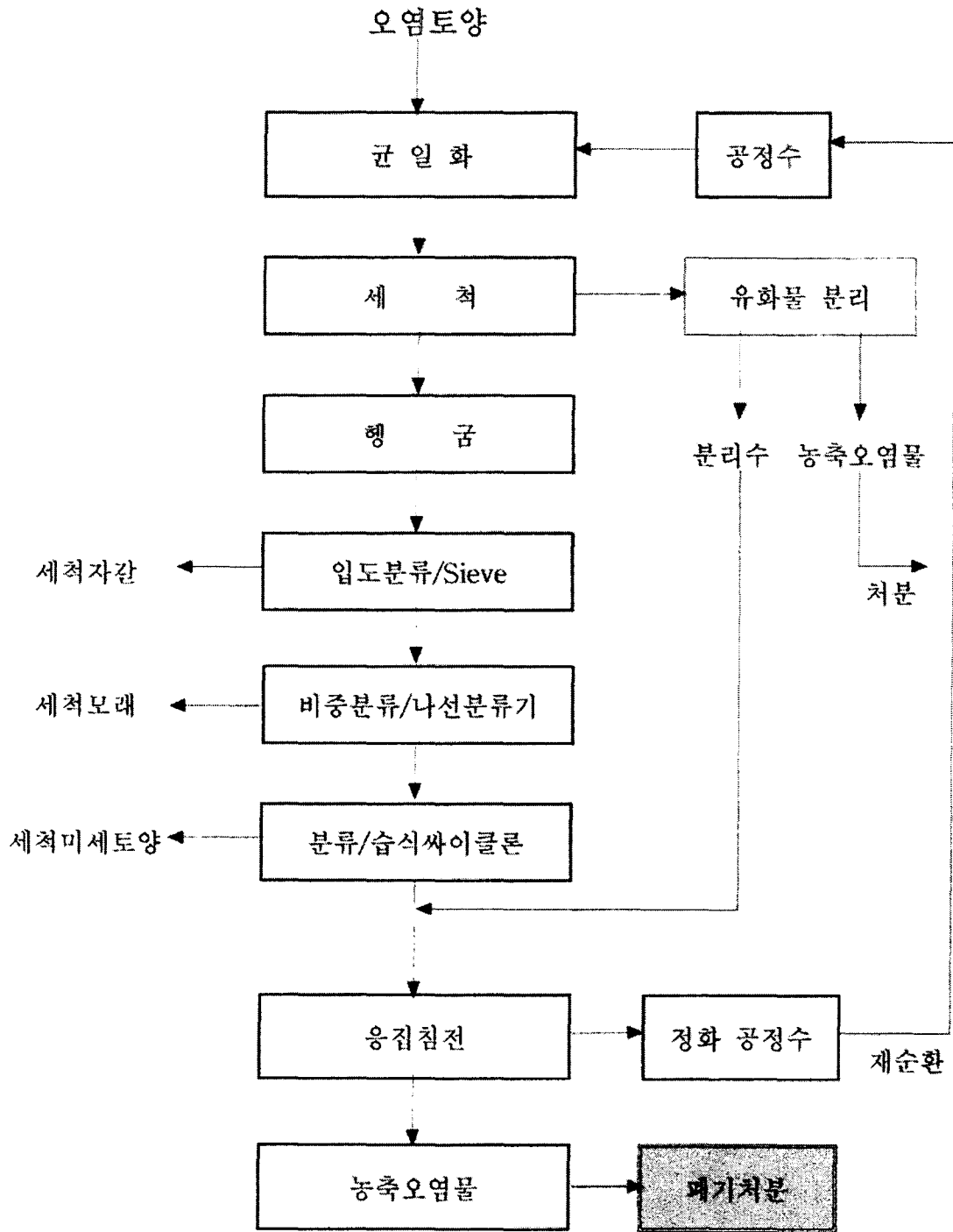


그림 1. 토양세척공정 예

오염물질 결합형태

탈착원리

분리오염물질

1. 집적물



전단력



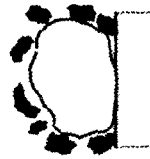
현탁형태



2. 굵은입자표면 오염



충돌력



분산형태



3. 작은입자표면 오염



마찰력



분산형태



4. 오일필름



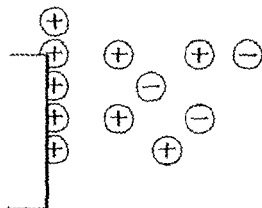
탈착력



유화형태



5. 화학결합



용해력



용액

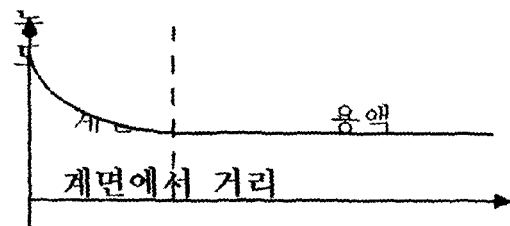


그림 2. 오염토양의 양상과 오염물질의 제거과정

그림 3 : 토양세척장치의 종류

에너지투입원리	장치의 기본형	개념도
공정공간 회전	회전드럼(일반형)	
	회전드럼(특수형)	
교반	스크류형	
	교반기형	
	경사축형	
진동	진동 Sieve	
	진동세척기	
	초음파 세척기	
유동	유동상 세척기	

O : 오염토양, Z : 정화토양, L : 폐수, W : 물

표 1. 주요오염물질에 대한 공정별 적정성

물 질 공 정	중금속	시안 화합물	석유, 탄화수 소	PAH	VOC	할로젠 화합물
진공 흡입	-	-	-	-	+	-
고온 처리	?	+	+	+	+	+
저온 처리	-	+	+	?	+	-
토양세척 및 추출	+	+	+	+	+	?
생물학적처리	-	?	+	?	?	-

+ : 적절 ? : 조건부 적절 또는 미지 - : 부적절

표 2. 토양세척 예

오염물질종류	Dutch Standard		처리전 농도 [mg/kg]	처리후 농도 [mg/kg]
	B	C		
Mineral Oil	1000	5000	6000 273-933	<20 <20
CN(Total)	50	500	75-300 400-1000	7-10 6-10
PCBs	1	10	2-4	0.1-0.2
Oil			19600 233 3000-18000	334 <20 20
PCAs(Total)	20	200	250-400 79 19 638	0.5-10 7.9 0.34 7.8
Chlorinated Hydrocarbon	1	10	20-30 5.3	<1 0.4

-표 2. 계속-

오염물질종류	Dutch Standard		처리전 농도 [mg/kg]	처리후 농도 [mg/kg]
	B	C		
Cr	250	800	100-2500 110-320 43-45	70-120 3 11-15
Ni	100	500	250-890 100-600	40-70 50-80
Zn	500	3000	6040 460-720 160-170	150 140-200 50-80
Pb	150	600	11900 110-450 1450	110 20-70 20
Hg	2	10	67 67	15 14
As	30	50	135 180	19 3
Cd	5	20	3000-18000 4-18	20 0.5-1.4

표 3. 토양 성상에 대한 공정별 적정성

토양성상 공정	굵은 모래	가는 모래	미세토양	유기물 다량함유	매우 불균일
진공 흡입	+	+	-	?	?
고온 처리	+	+	+	?	+
저온 처리	+	+	+	?	+
토양세척 및 추출	+	+	-	?	?
생물학적처리	+	+	?	+	+

+ : 적절 ? : 조건부 적절 또는 미지 - : 부적절

표 4. 주요 토양정화기술의 장단점

공 정	장 점	단 점
소 각	<ul style="list-style-type: none"> ○ 신속한 처리 ○ 광범위한 처리대상물질 ○ 모든종류 토양처리가능 ○ 고효율처리 ○ 기술숙성도 높음 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 과도한 폐가스처리장치 소요 ○ 에너지 소모량 큼 ○ 폭발사고 발생가능 ○ 주민 수용도 낮음 ○ 토양의 비가역적 변화
세척/추출	<ul style="list-style-type: none"> ○ 신속한 처리 ○ 이동형 및 In-Situ 가능 ○ 다양한 물질 처리가능 ○ 중금속 선택적 분리가능 ○ 용출가능물질 고도처리 ○ 이차오염문제 적음. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 미세토양처리 부적합 ○ 용출 가능 물질에만 적용可 ○ 오염세척액 처리 ○ In-Situ 시 토양에 용매잔류 및 정화효과 입증 어려움
고형화/ 고정화	<ul style="list-style-type: none"> ○ 중금속 결속가능 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 오염물이 제거되지 않음 ○ 최종생성물이 폐기물임 ○ 안전성 장기적보장 불투명
진공흡입	<ul style="list-style-type: none"> ○ 경제적 In-Situ 공정 ○ 기술숙성도 높음 ○ 휘발성물질에 대한 높은 처리효율 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 비휘발성- 및 무기물질 잔류 ○ 통기성 양호토양에만 사용可 ○ 오염물질 잔류
생물학적 처리	<ul style="list-style-type: none"> ○ 탄화수소 고효율처리 ○ 경제성이 높음 ○ 주민 수용도 높음 ○ In-Situ 공정 가능 ○ 장치가 단순함 ○ 토양생태계 보존 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 중금속 및 난분해성물질 처리 어려움 ○ 장기간의 처리시간 소요 ○ In-Situ시 지하수오염 가능 및 처리효과 입증 어려움

토양세척장치 개발 및 적용사례

1) 개발동기 : KIST Star Project (환경복원 및 재생기술 : 1996~1999)

2) 개발방향

- 규모 : 준현장화 규모 (애초 목표 : 5톤/시간)
- 세척기 종류 선정 : 제작용이, Compact 형
 - 1단 : 오염토양 덩어리 분쇄 및 균질화
 - 2단 : 강력 세척 (2축 이방향 Paddle Type)
 - 3단 : 마무리세척 (회전드럼 ϕ 800)
- 오염공정수 처리 : 정화 후 재사용
 - 자체개발 유수/미세토양분리기
 - 습식싸이클론 : 분리입도 $20 \mu m$
- VOC 처리 : 자체개발 Biofilter
- 공정형태 : 연속식

3) 1차 개발장치 (그림 4, 5 참조)

- 세척장치 제원
 - 총규모 : H 3m x L 6m x W 2m
 - 최대 사용전력 : 40kW
 - 최대 처리속도 : 7ton/hr
 - 최대 공정수공급량: $10m^3/hr$
- 오염공정수 처리조
 - 총규모 : H 1.6m x L 2.3m x W 1.1m ($4m^3$)
- 처리시험
 - 대상토양 : 경유로 오염된지 6개월된 토양(TPH 약 13,000ppm)
 - 적정운전조건
 - 토양투입속도 : 3 ton/hr
 - 세척수량 : 3ton/hr
 - 응집제 투입량 : Alum 150ppm, 고분자응집제 1.5ppm
 - 오염토양 처리결과(그림 6)
 - 오염세척수 처리결과
 - 처리 전 : TPH 567 ppm
 - 처리 후 : TPH 10 ppm 이하

4) 현장 적용 장치 (그림 7 참조)

○ 세척장치 제원

- 총규모 : H 3m x L 6m x W 2m
- 최대 사용전력 : 50kW
- 최대 처리속도 : 13 ton/hr
- 최대 공정수공급량 : 10m³/hr

○ 오염공정수 및 오염공기 처리조

- 유수분리/침전조 : H 1.6m x L 2.3m x W 1.1m (4m³)
- 유분정화조 : 1m³
- Biofilter : 2 m³

○ 처리시험

- 대상토양 : E시 H사 오염부지 (그림 8, 9, 10 참조)
- 부지특성 : 복토층이 형성된 하상부지
- 오염도 : BTEX 0~2000, TPH 0~2000 mg/kg
- 적정운전조건
 - 토양투입속도 : 10 ton/hr
 - 세척수량 : 5 ton/hr
 - 응집제 투입량 : Alum 150ppm, 고분자응집제 1.5ppm
- 오염토양 처리결과
 - 0.2mm 이상 : 모든 정화토양 오염도 N.D.
 - 20 μ m < d < 0.2mm : TPH 50ppm 이하

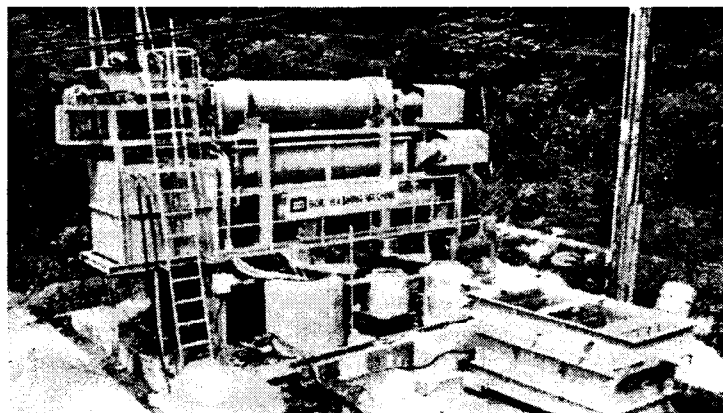


그림 5. 1차개발 장치 사진

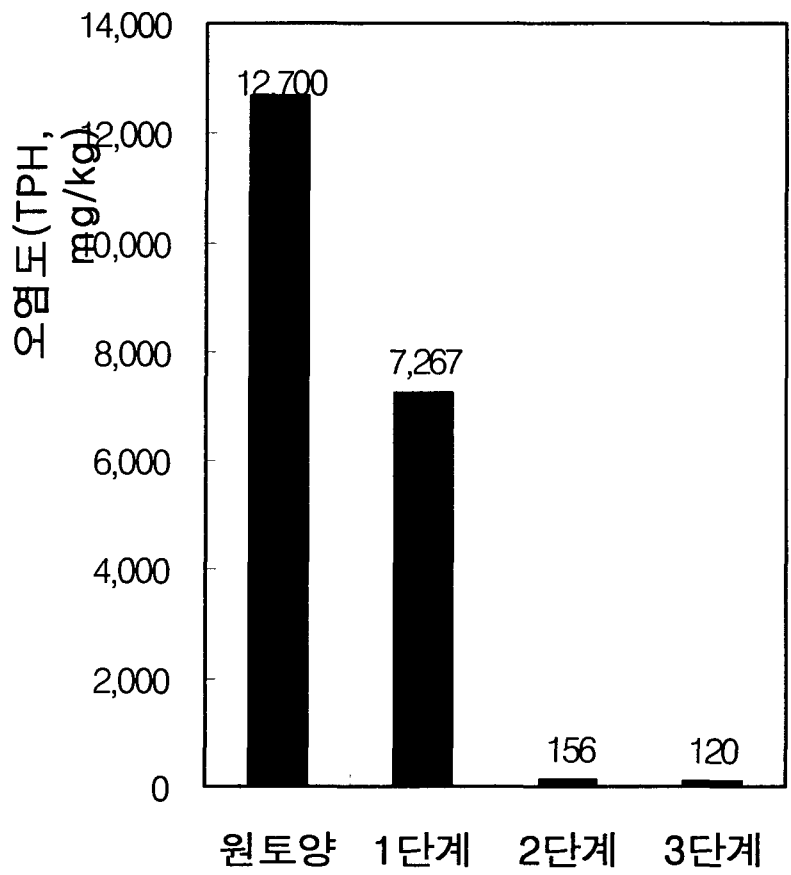


그림 6. 오염토양처리 결과

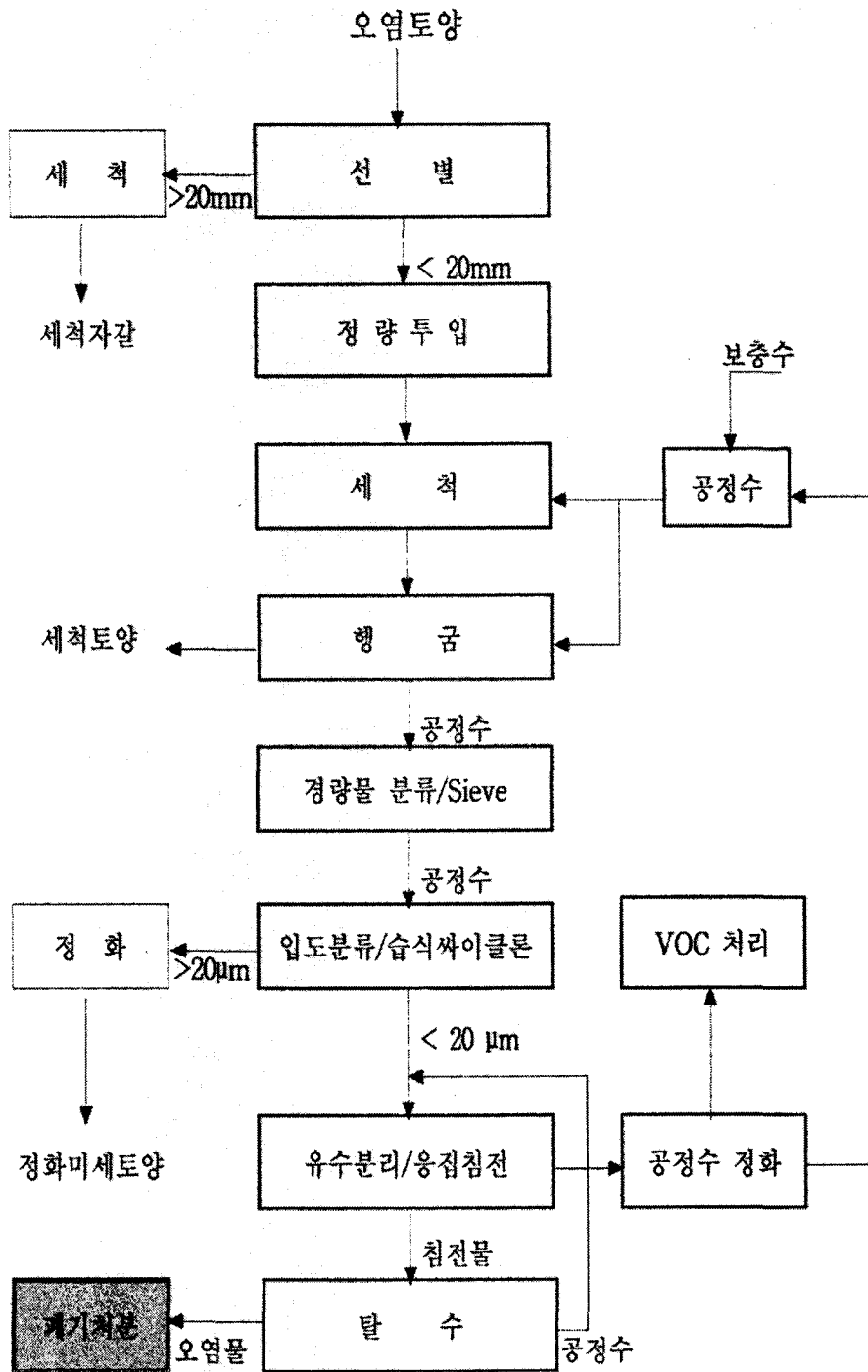


그림 7. KIST 토양세척공정(10 t/hr)

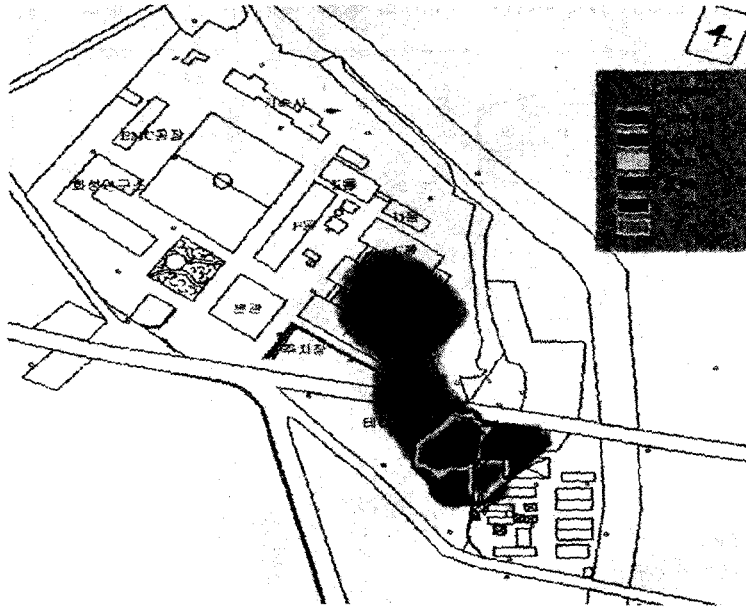
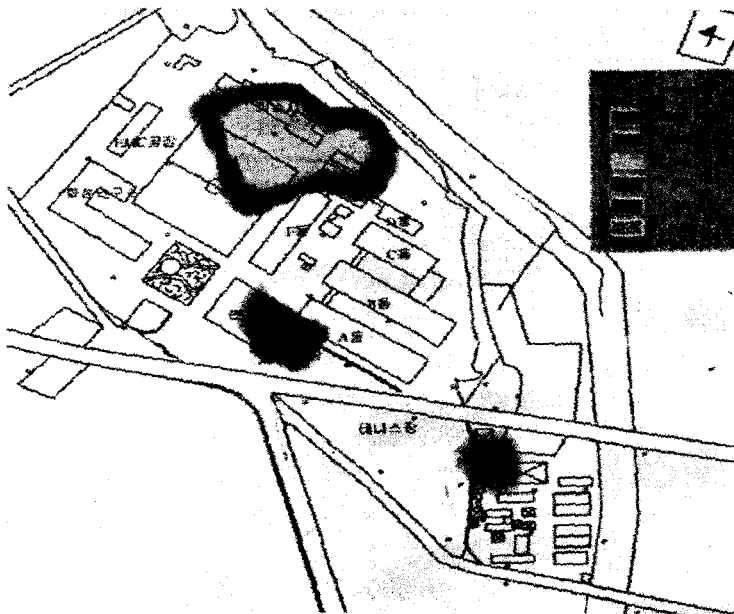


그림 8. 토양오염 분포도 (TPH



5mg/kg 이상, 깊이 1.6m 평단면도)

그림 9. 토양오염 분포도 (TPH 5mg/kg 이상, 깊이 4.6m 평단면도)

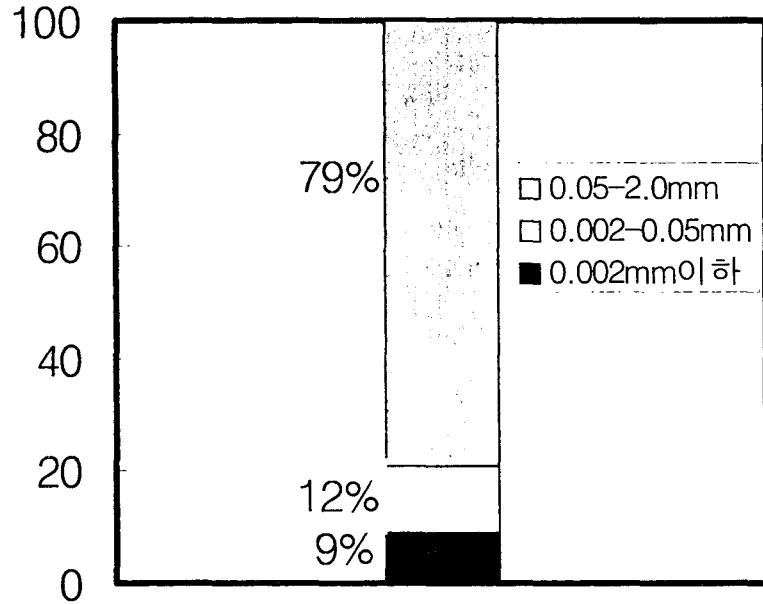


그림 10. 현장토양 평균 입도 분포

결론 및 향후과제

- 물만 사용하여도 유류오염토양의 세척시 효과적으로 처리가 가능하였다
- 하상부지의 경우는 거의 완전한 가까운 처리가 가능하였다.
- 미세오염토양 중 20 μm 이상의 크기는 쉽게 정화가 가능하였다.
- 공정수의 정화 및 재순환 가능하였다.
- 악취물질인 VOC가 Biofilter로 효과적으로 제거되었다.

● 결론적으로

현 정화 대상토양에 대하여 다음과 같이 요약할 수 있다.

항목	
소요전력	40 kW
처리속도	10 ton/hr
세척수량	5 ton/hr
보충수량	500 L/hr
미세토양범위	<20 μm

● 향후과제

- 보다 폭넓은 종류의 오염토양에 대한 세척실험 수행
- 미세토양의 정화기술개발 필요
- 이동형 장치제작