오염 건설잔토의 적정처리 및 재활용 기술

Optimal treatment and recycling of pollution construction surplus soil

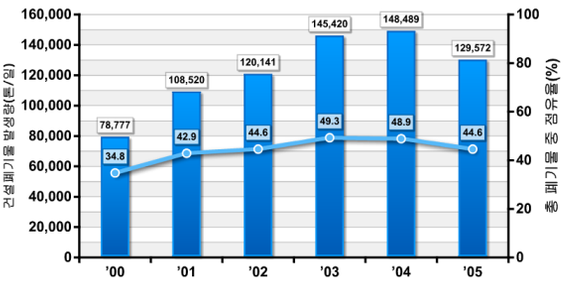
글 | 이세현* / 한국건설기술연구원 건축도시연구본부 건축구조 · 자원연구실 책임연구원
(Lee, Sea-Hyun / Korea institute of construction technology build structure & Resources research division, Builing Urban research department)

1. 서언

토목 및 건축물은 토사로 구성되는 지반상 또는 지중에 구축되므로 토사를 굴삭·성토되는 토목공사를 수반하게 되며, 재건축이나 재개발을 통해 발생되는 건설폐기물에서도 상당량의 토사가 배출된다. 이렇게 배출된 토사는 성토재료 등의 건설용 골재 등으로 재활용하는 것이 가장 바람직하나 토사의 성질의 부적당 할 경우는 잔토로서 장외로 배출되게 된다.

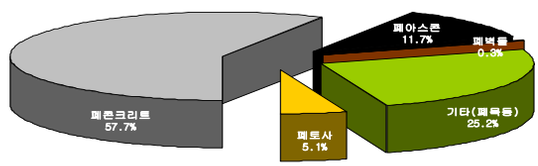
건설폐기물은 적절한 생산공정의 적용, 효율적 활용기술의 개발여부에 따라 높은 부가가치의 창출이 가능한 자원이다. 현재까지 정부 및 학계는 비교적 재활용이 용이한 건설폐재류를 중심으로 재활용하기 위하여 많은 노력을 기울여 왔으나, 주로 폐콘크리트, 아스콘, 폐벽돌 등을 처리하여 얻어지는 순환골재 등에 대하여 한정되어 이루어져 왔으며, 현재 정부 및 학계는 비교적 재활용이 용이한 건설폐재류를 중심으로 재활용하기 위하여 많은 노력을 기울여 왔으나, 주로 폐콘크리트, 아스콘, 폐벽돌 등을 처리하여 얻어지는 순환골재 등에 대하여 한정되어 이루어져 왔다. 현재 국내에서 발생되는 건설폐기물은 129,572톤/일이며, 전체 폐기물의 약 50%를 차지하고 있다. 건설폐기물 중 토사가 차지하는 양은 6,657톤/일로서 5.1%에 달하며 대부분 다른 건설공사에 운반되어 활용되고 있으나, 재활용 되지 못하는 약 27%(1,843톤/일)의 오염된 건설잔토는 지정폐기물로서 매립되고 있는 실정이다.

최근 정부는 반환된 주한미군 기지 28개 가운데 오염된 23개 기지를 정화하는데 최소 276억원에서 최대 1,197억원의 비용이 소요될 것으로 밝혔으며, 현재 1단계 기름유출 복원사업이 진행되고 있으며, 유류로부터 오염된 건설잔토의 주된 발생원인은 주유소, 저유소 등의 매립되어 있는 지하 구조물을 해체 시 발생되고 있다.



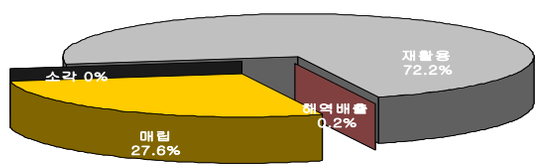
[그림 1] 건설폐기물 발생량 및 점유율

(2005년 환경부 통계연감)



[그림 2] 폐토사 발생현황

(2005년도 환경부 통계연감)



[그림 3] 폐토사 처리현황

* E-mail : shlee@kict.re.kr

오염된 건설잔토는 외부로부터 차단되어 있는 건설현장의 특성으로 인해 실질적으로 그 사용처를 정확히 파악할 수 없으며, 대부분 되메우기 작업 등의 매립형태로 처리되고 있는 실정이다. 특히, 건설 산업의 지역과 용도의 구분 없이 폭넓게 이루어지고 있어 공사 시점에서부터 관리할 수 있는 건설잔토의 오염에 대한 대책과 이미 오염된 건설잔토에 대한 처리 방안이 요구된다.

따라서, 오염된 건설잔토를 재활용하기 위해 정화특성을 평가하고 정화처리 방법 및 공정 정립과 오염된 건설잔토의 관로공사용 골재 등으로 활용할 수 있는 기술개발을 위한 오염된 건설잔토의 재활용의 방안을 제시하고자 한다.

a) 유류오염된 건설잔토　　b) 정화작업

[그림 4] 오염 건설잔토의 정화작업

2. 국내 오염 건설잔토의 관리규정 및 정화처리 기술 현황

2.1 국내 오염 건설잔토의 관리규정 현황

토양환경보전법은 '95년 1월에 제정된 토양환경보전법에 토양오염대책기준과 토양오염우려기준을 두고 있으며 오염지역 복원시 복원기준은 우려기준이하로 유지하도록 규정. 토양오염물질의 선정은 토양오염의 관련성을 고려하여 토양오염의 분포면적이 가장 많은 석유류 제조·저장시설물에서 유류의 오염을 규제하기 위하여 유류성분(BTEX) 및 석유계총탄화수소(TPH)로 규정하고 있으며, 가지역은 「지적법」에 의한 지목이 전·답·대·과수원·목장용지·임야·학교용지·하천·수도용지·공원·체육용지(수목·잔디 식생지에 한한다)·유원지·종교용지 및 사적지인 지역, 나지역은 「지적법」에 의한 지목이 공장용지·도로·철도용지 및 잡종지인 지역으로 구분하여 규정하고 있다.

폐기물관리법은 크게 지정폐기물, 사업장 폐기물로 분류되며, 지정폐기물은 사업장폐기물중 폐유·폐산 등 주변환경을 오염시킬 수 있거나 감염성폐기물 등 인체에 위해를 줄 수 있는 유해한 물질을 규정하고 있으며, 폐유가 함유된 유해물질의 규정은 기름성분 중량비 5% 이상 함유한 경우 지정폐기물로 구분하여 처리하며, 5% 미만일 경우에는 사업장폐기물로 처리한다. 또한, 폐기물은 안정화 또는 고형화 처리하여 매립할 수 있으며 그 밖에 응집·침전·여과·탈수·증발·농축 방법 또는 정제처리 및 소각 등의 방법을 사용하여 규정하고 있다.

<표 1> 토양오염우려기준(제1조의5관련)

(단위 : mg/kg)

물질	가지역	나지역
카드뮴	1.5	12
구리	50	200
비소	6	20
수은	4	16
납	100	400
6가크롬	4	12
아연	300	800
니켈	40	160
불소	400	800
유기인화합물	10	30
폴리클로리네이티드비페닐	-	12
시안	2	120
페놀	4	20
유류(동·식물성 제외) -벤젠·톨루엔·에틸벤젠·크실렌(BTEX) -석유계총탄화수소(TPH)	 - 500	 80 2,000
트리클로로에틸렌(TCE)	8	40
테트라클로로에틸렌(PCE)	4	24

<표 2> 처리 시설에 따른 폐기물 처리 시설의 분류 (폐기물관리법 시행령 별표2)

구 분	중분류	세분류
중간처리 시설	소각시설	· 일반소각시설 · 고온소각시설 · 열분해시설 · 고온용융시설 · 열처리조합시설 · 시멘트 소성로 및 용광로
	기계적 처리시설	· 압축·파쇄·분쇄 및 절단시설 · 용융 및 연료화시설 · 증발·농축 및 정제시설 · 유수분리 및 탈수·건조시설 · 멸균분쇄시설
	화학적 처리시설	· 고형화·안정화시설 · 반응 및 응집·침전시설
	생물학적 처리시설	· 사료화·퇴비화·소멸화시설 · 호기성·혐기성 분해시설
	기타	· 환경부장관 인정 시설
최종처리 시설	매립시설	· 차단형 매립시설 · 관리형 매립시설
	기타	· 환경부장관 인정 시설

환경부에서는 2007년 2월 폐기물을 건축 · 토목공사 등의 성토재나 복토재로 재활용하는 경우 「토양환경보전법」 제4조의 2에 따른 토양오염우려기준 이내의 품질을 확보하여야 사용할 수 있게 규정되어 있으며, 이에 폐기물 관리법 시행규칙 제2조 [별표 11의2]를 개정 공포하였다.

국토해양부에서는 2006년 12월 「순환골재 품질기준」에서도 성토 및 복토용으로 사용하기 위해서는 「토양환경보전법」에서 규정하는 토양오염우려기준을 만족하도록 규정하고 있다.

2.2 국내 오염 건설잔토의 정화처리 기술 현황

오염토양 정화기술은 처리공정에 따라 생물학적 처리기술, 물리·화학적 처리기술, 열적 처리기술 등으로 분류하고 있으며, 오염물질의 특성 및 부지 특성에 따라 단일 기술로 적용되거나 여러 가지 기술을 복합적으로 사용하기도 한다. 이에 대하여 '특정토양오염관리대상시설의 방지시설 등에 관한 고시'에서 처리방법별로 18개 기술로 구분 고시되어 있다.

1990년대 이후 대학과 연구소를 중심으로 산발적인 연구가 진행되어 왔으나, 국내 토양정화 시장의 규모가 작은 관계로 상용화된 기술이 전무한 실정이며, 환경부 등 관계부처 등에서 차세대핵심개발사업 등에 오염 토양. 지하수 정화에 대한 기술 연구 및 개발을 집중 육성 중에 있다.

최근에는 중·대규모의 정화 공사 발주로 인하여 오염토양 정화시장의 확대와 함께 정화기술에 대한 투자의 증가로 현장 적용성을 갖춘 다양한 기술이 개발되고 있으며 현장에 적용되고 있다.

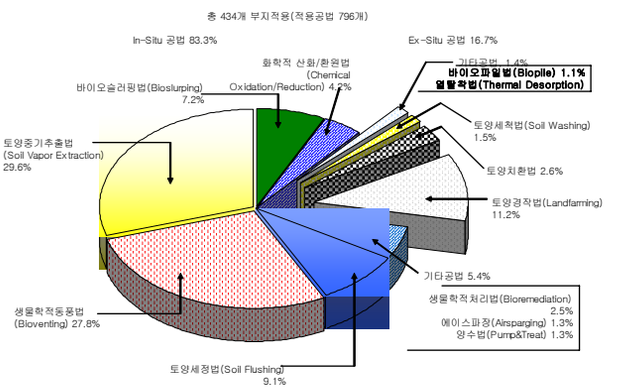
오염토양 정화시장은 신흥시장으로서 역사가 매우 짧고 시장규모 또한, 전무한 실정이며, 오염부지 및 오염토양 정화기술에 대한 체계적인 관리 및 정보수집이 이루어지지 않은 상태이기 때문에 오염부지 현황 및 오염토양 정화기술 적용현황과 같은 통계자료가 아직 마련되어 있지 않는 실정이다.

정화시장의 오염토양 정화기술 적용현황을 파악하기 위하여 현재 토양정화업체로 등록된 43개 업체 중 36개 업체를 대상으로 최근 5~6년간의 정화실적 및 정화시장의 기술 적용 현황을 조사한 결과 총 434개 오염토양 정화현장 내에서 적용된 796개 정화기술 중 지중처리기술이 83.3%로 지상처리기술 16.7% 보다 현저하게 많이 적용된 것으로 조사 되었으며, 이와 같은 이유는 초기 국내 토양정화공사가 주유소 등을 대상으로 수행되었기 때문에 사업장을 유지하면서 경제적으로 정화사업을 수행하기 위해 토양증기추출법이나 생물학적통풍법과 같은 지중처리 기술을 주로 사용하였기 때문으로 판단된다.

반면 지상처리기술은 지중처리기술에 비해 넓은 부지와 굴착공사 등에 따라 비교적 많은 정화비용이 소요되므로 초기에는 많이 적용되지 않았으나, 최근 일부정화사업 현장에서는 부지 활용을 위해 오염토양의 신속한 처리가 요구됨에 따라 지상처리기술의 적용이 증가하고 있는 추세이다.

적용 실적이 있는 정화방법들에 대하여 세부적인 기술별 적용현황을 조사한 결과 총 434개 오염토양 정화현장 내에서 적용된 796개의 정화기술 중 현장 적용이 용이하고 유류오염 정화에 적용이 용이한 토양증기추출법이 29.6%로 사용 빈도가 가장 높게 나타났으며, 생물학적통풍법과 토양경작법이 27.8%, 11.2%로 많이 적용되어 높은 사용 빈도수를 보이고 있음 이들 기술은 유류성분 중 휘발성유기화합물질 및 준휘발성유기화합물질을 제거하는데 효과적인 방법들로 효과가 입증된 기술이다.

이처럼 국내에서는 현재까지 생물학적 정화기술들이 주를 이르고 있는 실정이었으나 2000년 이후 미국 등을 중심으로 최신기술의 적용비율이 점차 늘어나고 있다.



[그림 5] 오염토양정화사업 적용기술현황(2000~2006년)

유류오염 처리에 대하여 열탈착법을 적용하기 위해서는 열탈착법에 의해 처리된 토양의 사후관리에 있어서 토양환경보전법상의 정화토양으로 관리할 것인가 또는 폐기물관리법에서의 폐기물로 관리할 것인가에 대한 법적관리 문제도 검토되어져야 할 것이며, 열탈착된 토양내 유류오염의 용출 여부, 이에 대한 관리 및 대책을 위한 사후 모니터링 방법 등이 선행되어져야 할 것이다.

현재 국내에서는 오염 토양내 유류를 처리하기 위하여 다양한 처리기술 등이 시도되고 있으나, 아직까지 주유소, 저유소, 군시설, 산업단지 등에서 발생되는 유류로부터 오염된 토양에 대한 정화 실적이 많지 않은 상태이다. 따라

서, 이들 다양한 유류에 의해 오염된 토양을 처리하기 위한 기술개발과 보급이 시급한 것으로 판단된다.

<표 3> 국내 오염토양 정화기술의 종류(환경부 고시 제 2005-124호 별표 2)

기술명		개요
생물학적 처리 방법	생물학적 분해법 (Biodegradation)	영양분과 수분(필요시 미생물)을 오염토양내로 순화시킴으로써 미생물의 활성을 자극하여 유기물 분해기능을 증대시키는 방법
	생물학적 통풍법 (Bioventing)	오염된 토양에 대하여 강제적으로 공기를 주입하여 산소농도를 증대시킴으로써 미생물의 생분해능을 증진시키는 방법
	토양경작법 (Landfarming)	오염토양을 굴착하여 지표면에 깔아 놓고 정기적으로 뒤집어줌으로써 공기중의 산소를 공급해 주는 호기성 생분해 공정법
	바이오파일법 (Biopile)	오염토양을 굴착하여 영양분 및 수분 등을 혼합한 파일을 만들고 공기를 공급하여 오염물질에 대한 미생물의 생분해능을 증진시키는 방법
	식물재배 정화법 (Phytoremediation)	식물체의 성장에 따라 토양내의 오염물질을 분해·흡수·침전 등을 통하여 오염토양을 정화하는 방법
	퇴비화법 (Composting)	오염토양을 굴착하여 팽화제(bulking agent)로서 나무조각, 동식물 폐기물과 같은 유시성 물질을 혼합하여 공극과 유기물 함량을 증대시킨후 공기를 주입하여 오염물질을 분해시키는 방법
	자연저감법 (Natural Attenuation)	토양 또는 지중에서 자연적으로 일어나는 희석, 휘발, 생분해, 흡착 그리고 지중물질과의 화학반응 등에 의해 오염물질 농도가 허용가능한 수준으로 저감되도록 유도하는 방법
물리·화학적 처리 방법	토양세정법 (Soil flushing)	오염물 용해도를 증대시키기 위하여 첨가제를 함유한 물 또는 순수한 물을 토양 및 지하수에 주입하여 오염 물질을 침출 처리하는 방법
	토양증기추출법 (Soil Vapor Extraction)	추출정을 굴착·설치하여 감압 하에서 압력구배를 형성시킴으로써 토양 내의 휘발성 오염물질을 휘발·추출하는 방법
	토양세척법 (Soil Washing)	오염토양을 굴착하여 토양입자 표면에 부착된 유·무기성 오염물질을 세척액으로 분리시켜 이를 토양내에서 농축·처분하거나, 재래식 폐수처리방법으로 처리하는 방법
	용제추출법 (Solvent Extraction)	오염토양을 추출기내에서 용제(solvent)와 혼합시켜 용해시킨 후 분리기에서 분리하여 처리하는 방법
	화학적 산화/환원법 (Chemical Oxidation/ Reduction)	오염된 토양에 오존, 과산화수소 등의 화합물을 첨가하여 산화/환원반응을 통해 오염물질을 무독성화 또는 저독성화시키는 방법
	고형화/안정화법 (Solidification/ stabilization)	오염토양에 첨가제(시멘트, 석회, 슬래그 등)을 혼합하여 오염성분의 이동성을 물리적으로 저하시키거나, 화학적으로 용해도를 낮추거나 무해한 형태로 변화시키는 방법
	동전기법 (Electrokinetic Separation)	투수계수가 낮은 포화토양에서 이온상태의 오염물(음이온·양이온·중금속 등)을 양극과 음극의 전기장에 의하여 이동을 촉진시켜 오염물질을 처리하는 방법
열적 처리 방법	열탈착법 (Thermal Desorption)	오염토양내의 유기오염물질을 휘발·탈착시키는 기법이며, 배기가스는 가스처리 시스템으로 이송하여 처리하는 방법
	소각법 (incineration)	산소가 존재하는 상태에서 871~1,204℃의 고온으로 오염토양 내의 유기오염물질을 소각·분해시키는 방법
	유리화법 (Vitrification)	굴착된 오염토양 및 슬러지를 전기적으로 용융시킴으로써 용출특성이 매우 적은 결정구조로 만드는 방법
	열분해법 (Pyrolysis)	산소가 없는 혐기성 상태에서 열을 가하여 오염토양중의 유기물을 분해시키는 방법

국내에 소개된 오염건설잔토 정화기술에 대한 장·단점은 다음과 같다.

<표 4> 정화처리기술의 장 · 단점

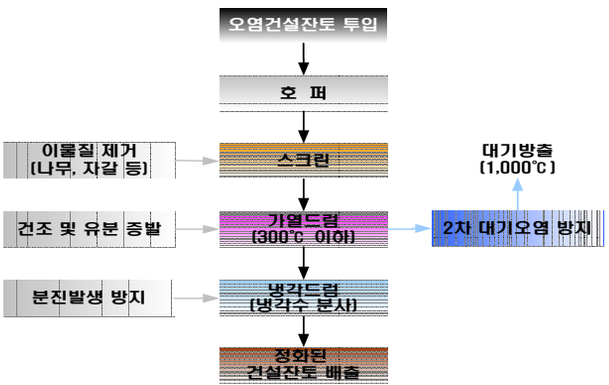
구분	장점	단점
생물학적 처리 방법	· 소요 장비의 조달이 용이하며 설치가 간단 · 건물하부와 같은 접근이 불가능한 곳도 정화 가능 · 정화비용이 타기술에 비해 저렴 · 공기분산법(airspaging) 이나 지하수양수처리법 등의 다른 정화 기술과 조합 가능 · 설계와 운전이 용이함 · 6~24개월의 정화기간 소요됨 · 생분해 속도가 느린 유기물질에 효과	· 높은 초기 오염농도에 의하여 미생물의 활동에 독성을 나타낼 수 있음 · 토양투수성이 낮거나 점토질의 함량이 높은 경우 등에는 적용이 제한될 수 있음 · 매우 낮은 농도까지 처리가 어려움 · 경우에 따라 배출가스 처리를 위한 비용이 추가됨 · 90%이상 농도를 저감시키기 어려움 · 총 석 유 계 탄 화 수 소 가 25,000mg/kg 이상인 오염토양 정화시 효율이 떨어짐 · 중금속의 농도가 2,500mg/kg 이상일 때 처리 효율이 떨어짐 · 처리를 위한 대규모의 부지가 필요함 · 토양경작시 비산먼지 및 증기 발생에 따른 대기오염 문제를 야기할 수 있음 · 경작시 침출수에 의한 2차 오염이 발생 할 수 있어 바닥차수가 필요함
물리·화학적 처리 방법	· 오염물질을 원위치에서 정화할 수 있음 · 오염물질의 분해가 수주 또는 수개월로서 매우 빠름 · 정화기간이 짧고, 운영비와 모니터링 비용을 감소시킴 · 자연정화법과 연계되어 사용될 수 있음 · 일부 산화법은 환경교란을 최소화 할 수 있음	· 타기술에 비하여 초기투자 비용 및 운영비가 많이 소요됨 · 투수성이 낮은 토양에서는 오염물질과 산화제의 접속이 쉽지 않음 · 산화방법의 경우, 토양증기추출법과 같은 타기술의 적용이 필요함 · 화학적 산화법의 적용 후 수주 또는 수개월 후에 오염물질의 용존농도가 다시 증가 할 수 있음 · 산화제의 적용시 인체에 위험하므로 건강 및 안전에 유의하여야 함 · 기술적 또는 경제적인 면에서 오염물질의 농도를 배경농도 또는 매우 낮은 농도까지 낮추기 어려움 · 토양 중의 구성물질과 반응하여 산화제의 소요량이 증가할 수 있음 · 산화반응으로 인하여 대수층의 지구화학적인 성질이 변할 수 있음. 즉, 산화반응으로 광물질이 공극에 침전되어 대수층의 막힘현상이 발생할 수 있음
열적 처리 방법	· 무기물질 및 방사성 물질을 제외한 대부분의 석유계 화합물의 처리에 효과가 탁월함 · 토양의 형태나 특성, 오염물질에 관계없이 적용범위가 매우 넓음 · 처리효율이 높고 단기간에 처리가 가능 · 토질의 종류, 비용절감 등 저온처리 방법을 적용할 경우 비교적 경제성이 높음	· 카드뮴이나 수은을 제외한 중금속 등은 정화가 불가능함 · 수분함량이 높거나 점토 등을 높게 함유한 토양의 경우 반응시간이 길어지고 처리비용이 증가함

3. 오염 건설잔토의 재활용 기술

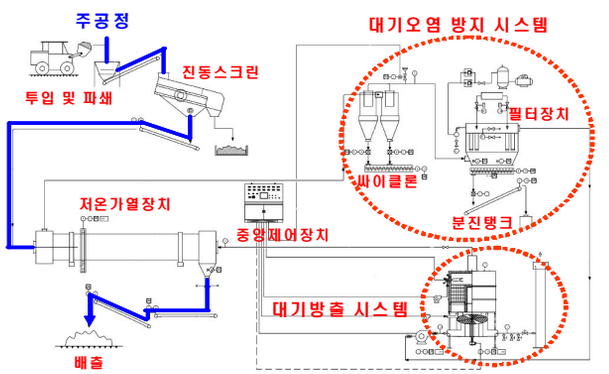
3.1 저온가열 정화장치

[그림 6], [그림 7]과 같이 가열처리 정화장치는 직접 연소에 의한 열처리(소각) 정화장치와 산소가 없는 혐기성 상태에서 열을 가해 유기물질을 분해하는 열처리(열분해) 정화장치의 두 가지 형태로 구분되며, 열분해 형태는 오염

물질을 제거하기 위한 운전 온도에 의해 고온가열 처리(400~800℃)와 저온가열 처리(약 400℃ 이하)로 구분된다. 가열처리 정화장치는 보통 유기물을 분해하지 않고 오염물질을 열을 이용하여 골재로부터 분리하지만 시스템의 온도와 특정유기물 존재에 따라 가스상의 2차 생성물을 발생시키므로 일부 사전 또는 사후 공정이 필요하나 휘발유, 항공유, 중유, 경유, 난방유 및 윤활유를 포함하는 석유계 화합물의 농도를 감소시키는데 효과가 있다. 저온가열 정화장치의 운영조건은 가열장치의 종류에 따라 달라지며 가열장치의 처리온도, 처리시간 및 배출가스 처리 방식 등에 따라 다양하다.



[그림 6] 저온가열 정화장치 공정도



[그림 7] 저온가열 정화장치 시스템

3.1.1 저온가열 정화장치의 종류

저온가열장치는 석유계 화합물로 오염된 물질을 열을 이용하여 오염된 건설잔토를 탈착시켜 가스상으로 처리하는 장치이며, 저온가열시스템의 운영 및 설계는 가열장치의 종류에 따라 달라진다. 대표적으로 이용되고 있는 가열장치는 로터리건조방식(Rotary dryers), 아스팔트 플랜트 혼합 건조방식(Asphalt plant aggregate dryer), 열스크루방식(thermal screw), 컨베이어 로방식(Conveyor furnace) 등이 있다.

3.1.2 배기가스처리

저온가열장치의 배기가스를 처리하는 장치들은 크게 세 가지 물질(분진, 유기가스 및 일산화탄소)을 제어하며, 분진들을 제어하는 방식으로는 습식(예 : 벤츄리스크러버)과 건식(사이클론, 백필터) 방식이 사용된다. 특히, 로터리가열시스템, 아스팔트 플랜트 혼합 건조시스템 등은 일반적으로 건식방법을 이용하며, 기본적으로 큰 입자의 분진은 사이클론으로 먼저 제거하고 미세입자의 분진은 백필터 장치로 제어한다. 또한, 열스크루 시스템은 일반적으로 습식방식인 벤츄리스크러버 등을 사용한다. 유기가스 및 일산화탄소를 처리하기 위하여 로터리건조시스템, 아스팔트 플랜트 혼합 건조시스템은 후연소기를 이용하여 저감시키며, 이때의 처리의 효율성 을 높이기 위하여 후연소기의 온도를 750~900℃로 유지할 수 있도록 설계한다. 보통 후연소기에서의 유기물 분해효율은 약 95~99% 이다. 열스크루 시스템에서는 응축기 및 활성탄 등을 사용하여 응축기에서 배기가스를 응축 시키며, 이때 유기물 제거효율은 약 50~95% 이다. 또한, 응축기에서 처리되지 않은 가스들은 활성탄 등을 이용하여 제어할 수 있으며, 응축기는 수냉식 방식을 적용하고 이때 배기가스의 온도는 약 30~60℃까지 낮아진다.

3.1.3 처리온도

처리온도는 석유계 화합물의 탈착 정도에 영향을 주는 주요 변수이며, 탈착에 필요한 적절한 처리온도는 오염된 건설잔토내 석유계 화합물의 종류에 따라 달라질 수 있다. 또한, 저온가열시스템에서 적용되는 실제 처리온도는 가열장비의 종류, 열전달율, 건설잔토의 입자크기, 열용량, 수분함량 등에 따라 달라질 수 있으며, 저온가열 정화장치의 공정도 및 시스템은 [그림 6], [그림 7]과 같다.

3.1.4 처리시간

처리시간은 정화시 처리속도 및 정화목표 달성 여부를 결정하는 주요 요인이며, 저온열탈착 시스템 장비의 종류, 운전, 토양 및 오염물질의 특징, 정화목표 등에 따라 달라질 수 있다.

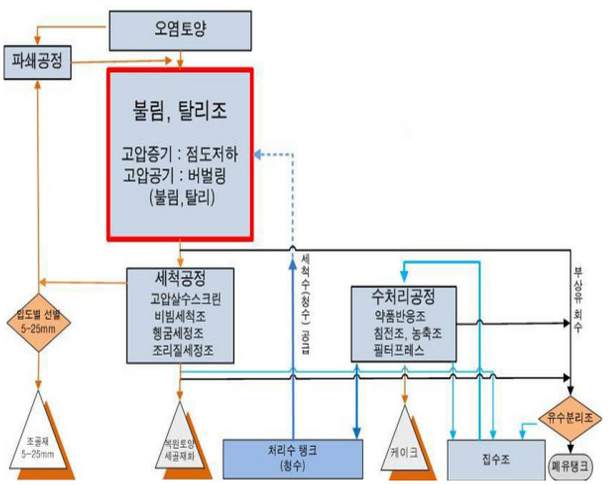
3.2 세척 정화장치

세척 정화장치의 기본 원리는 오염물질은 입자가 작은

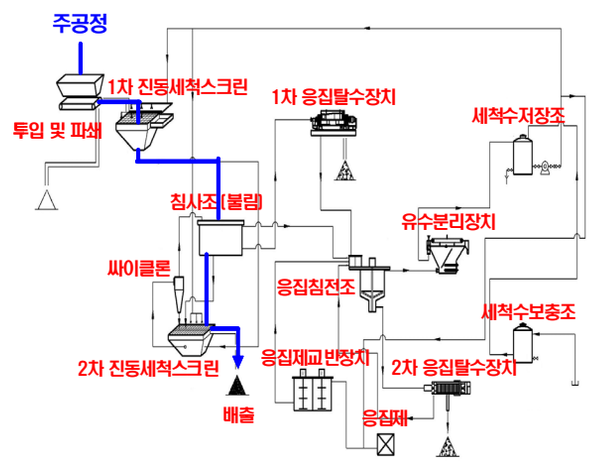
미세골재에 많이 흡착되어 있기 때문에 미세골재 만을 분리하면 오염된 골재의 부피가 현저히 감소된다는 점과 입자와 화학적으로 강하게 결합되지 않은 오염물질은 물리적으로 쉽게 분리될 수 있다.

따라서, 세척 정화장치는 물리적인 선별 및 마찰작용을 활용하여 미세골재의 원골재로부터 분리시키는 기능과 필요할 경우 적절한 세척제를 이용하여 화학적으로 결합된 오염물질을 용출시키는 기능을 목적으로 하고 있으며, 세척 정화장치의 처리공정도 및 시스템은 [그림 8], [그림 9]와 같다.

세척 정화장치는 처리하고자 하는 오염물질의 종류 및 오염된 골재의 특성에 따라 최적의 장치를 구성해야 하지만 일반적으로 파쇄기, 선별기, 분리장치, 혼합 및 추출 장치, 세척액 처리장치, 미세골재의 2차 처리장치 등으로 구성되어 있다.



[그림 8] 세척 정화장치 공정도



[그림 9] 세척 정화장치 시스템

3.2.1 파쇄기(size reduction equipment)

파쇄기는 입도가 큰 골재를 분쇄하는 장치로 입도의 크기가 2~5㎝보다 큰 골재가 심하게 오염되어 있어 세척이 필요한 경우 골재취급과 세척효율을 높이기 위해 설치하여야 한다.

3.2.2 선별기(screening equipment)

선별기는 골재 중에서 세척처리가 불필요하고 입자크기가 큰 자갈이나 나무, 금속 등 이물질을 선택적으로 분리하는 장치이며, 입자의 크기가 큰 자갈의 표면에는 오염농도가 높은 미세골재가 부착되어 있기 때문에 이를 제거하기 위하여 고압 스프레이에서 나오는 물로 표면을 세척한 후 다시 원위치에 매립하고 선별된 골재는 분리장치로 이동한다.

3.2.3 분리장치(separation equipment)

선별기에서 이송된 골재 습식 분리장치를 통하여 다시 미세입자와 중간크기의 입자로 분리되며, 분리장치를 통하여 분리된 중간크기의 모래질 골재는 일반적으로 오염도가 낮기 때문에 바로 되메움 하거나 오염농도가 높을 경우에는 혼합 및 추출장치로 이송하여 2차 처리를 하고 분리된 고농도의 미세골재는 2차 처리과정을 거치거나 탈수과정을 거친 후 폐기물로 처리된다.

3.2.4 혼합 및 추출장치

혼합 및 추출장치는 선별과정만으로 오염된 골재는 농도가 목표치까지 감소되지 않을 경우 계면활성제와 같은 세척제를 활용하여 오염물질을 화학적으로 추출함으로써 정화하는 장치이다. 또한, 혼합 및 추출장치는 반드시 포함되어야 하는 장치는 아니며, 현장적용전 처리시험을 통하여 이 장치의 포함 유무를 결정할 필요가 있다.

3.2.5 세척액 처리장치

세척 후 나오는 폐액은 오염물질을 함유하고 있어 외부로 배출하거나 재사용 시 후처리가 필요하다. 특히, 계면활성제와 같은 세척제를 사용할 경우 세척제를 재생하여 다시 재활용하는 것이 경제성에 중요한 영향을 미칠 수 있기 때문에 세척액 처리장치에 대한 고려가 필수적이다. 폐수처리 기법은 중화, 급속침전, 응집, 생물학적 처리, 활성탄 흡착, 막분리, 여과 등의 방법이 있다.

3.2.6 대기오염 방지장치

오염 건설잔토의 굴착, 파쇄공정, 선별공정, 후처리공정 등에서 휘발성물질 및 미립자가 방출되므로 오염방지 장

치가 필요하며, 굴착시에는 오염방지가 어렵지만 나머지 다른 공정에서는 포집하여 전기 집진, 활성탄 흡착, 스크러버 등으로 처리하여 배출하여야 한다.

3.3 저온가열 및 세척 병용 정화장치

[그림 10]의 공정도와 같이 저온가열 및 세척 병용 정화장치는 오염 건설잔토를 가열하여 유류를 휘발시키는 가열처리단계, 계면활성제를 혼합하여 세척하는 세척처리단계, 이물질을 제거하는 처리단계 등이 순차적으로 이루어지는 공법이며, 석유류에 오염된 건설잔토는 이물질 및 5㎜이상의 골재를 제거한 후 오염잔토를 향류식 회전통(가열탱크)에 주입하여 300℃ 정도의 저온가열을 통해 오염 건설잔토의 유류를 1차적으로 제거하고 배출된 오염 건설잔토는 2차적으로 세척탱크로 이동되어 냉각수 분사 후 적정온도 조건에서 계면활성제 희석액을 첨가하여 석유성분을 완전히 세척하는 기술이다.

3.3.1 저온가열 및 세척 병용 정화장치의 구성

저온가열 및 세척 병용 정화장치의 구성은 [그림 11]과 같이 오염된 건설잔토를 저온가열장치에서 1차 처리 후 2차 세척장치내에서 계면활성제를 고압분사 및 혼합하여 세척처리 한다. 정화처리 단계에서 2차오염은 가열처리 과정, 세척처리 냉각과정 등에서 휘발된 배기가스(다이옥신류 등)가 발생할 수 있으며, 배기가스 처리는 2단계의 여과필터를 통해 배출되도록 구성하고 있다. 필터링 구성 단계는 방사선 폐기물의 소각 시 배기 계통 및 Clean Oven, 고온 살균 건조 시 사용되는 필터로서 그 성능은 0.3㎛ 크기 이상의 입자를 최소 99.97%의 포집율을 가지고 있다. 또한, 250℃~350℃의 고온상태에서 정상적인 효율을 장시간 유지할 수 있는 고온형 필터인 고성능 필터(HEPA Filter)와 0.0002~0.005㎛ 유기용제 및 냄새제거에 효과적인 활성탄 필터(Activated Carbon Filter)에 의한 2단계의 필터링 과정을 통해 다이옥신류 등의 대기 중으로 배출되는 2차오염을 방지할 수 있으며, 송풍기에 의한 강제배연 공정과 연동시킬 수 있다.

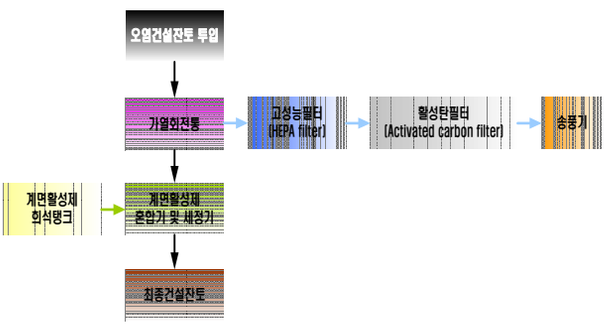
3.3.2 저온가열 및 세척 병용 정화장치의 특징

저온가열 및 세척 정화장치를 병용하므로서, 오염 건설잔토 등을 효율적으로 정화시킬 수 있으며, 2단계에 걸친 정화를 효과적으로 할 수 있으므로, 고온가열을 회피할 수 있고, 세척수의 사용량을 줄일 수 있다.

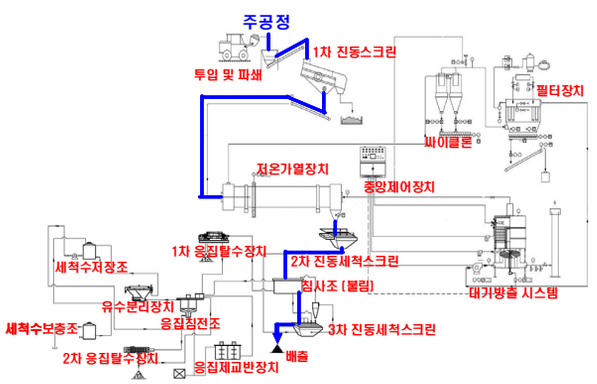
가열단계에서는 300℃의 저온가열을 함으로서, 1차적으로 유류를 휘발시킬 수 있고, 고온가열시 문제되었던 연소문제를 해소할 수 있어 정화공정 후에도 건설잔토가 갖는 물리적 성질을 유지할 수 있다.

세척단계에서는 계면활성제와 희석된 세척수를 가열된 오염 건설잔토에 고압분사하여 오염물질을 제거할 수 있으며, 남아 있는 오염물질은 냉각수의 분사와 동시에 증발하여 제거시킬 수 있다.

가열단계 및 세척단계에서 발생하는 기화된 유류와 배기가스는 별도의 배연설비를 통해 필터링처리(고성능필터, 활성탄필터 등) 후 배출되므로 정화작업시 발생하는 다이옥신 등에 의한 대기의 2차적 오염을 근본적으로 방지할 수 있으며, 오염 건설잔토를 정화하는데 소비되는 시간, 정화의 정도 측면에서 효율적이다.



[그림 10] 저온가열 및 세척 병용 정화장치 공정도



[그림 11] 저온가열 및 세척 병용 정화장치 시스템

4. 오염 건설잔토의 주요영향인자 및 정화장치별 유류오염 제거

4.1 주요영향인자

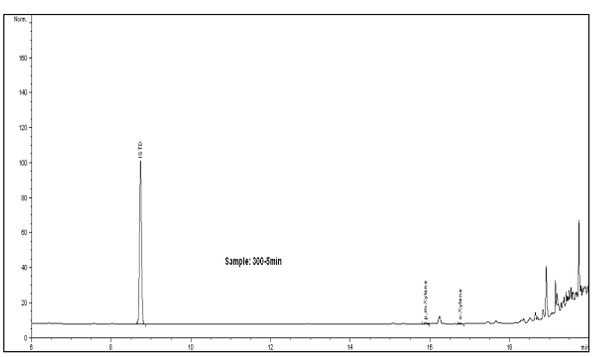
오염 건설잔토의 정화장치별 주요영향인자는 <표 7>과 같다.

<표 7> 정화장치별 주요영향인자

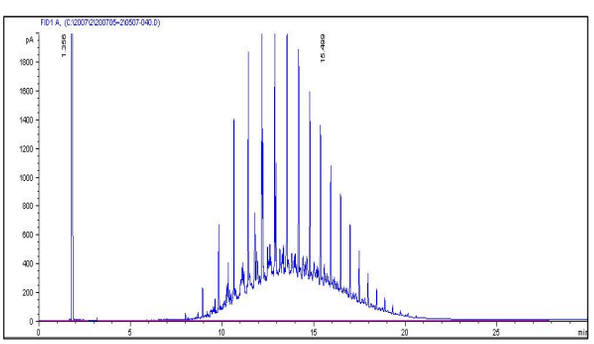
영향인자 / 정화장치	처리시간	유류 오염율	석유류	토질 (5㎜ 이하)	함수율	세척액 (계면활성제)
저온가열 정화장치 (300℃ 이하)	3분 이상 (가열온도 240℃ 이상)	5% 이내	휘발유, 등유, 경유, 윤활유 90% 이상 제거	모래, 건설잔토, 혼합토, 점토 등 제거	30% 이하 제거	오염인자 아님
세척 정화장치 (세척액 : 계면활성제)	30분 이상	5% 이내	휘발유, 등유, 경유 90% 이상 제거, 윤활유 80% 이내 제거	모래, 건설잔토, 혼합토 등 제거	세척으로 인한 함수율 증가	중량비 0.3%
저온가열 및 세척 병용 정화장치	3분(가열) +10분 (세척) =13분	5% 이내	휘발유, 등유, 경유, 윤활유 90% 이상 제거	모래, 건설잔토, 혼합토, 점토 등 제거	30% 이하 제거, 세척으로 인한 함수율 증가	중량비 0.3%

4.2 정화장치별 유류오염 제거

BTEX(벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌) 및 TPH(석유계 총 탄화수소)는 [그림 12], [그림 13]과 같다. 토양오염공정시험방법의 기기분석방법(흡광광도법, 원자흡광광도법, 유도결합플라스마발광광도법, 가스크로마토그래프법, 이온전극법) 중 하나인 가스크로마토그래프를 나타낸 것이다.



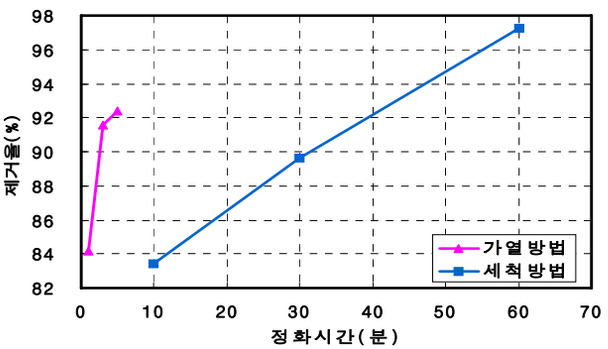
[그림 12] BTEX 농도의 가스크로마토그래프(예)



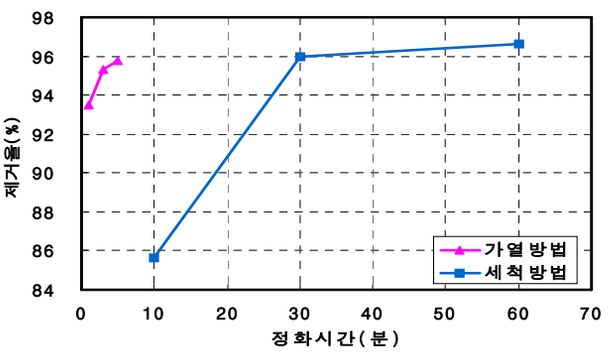
[그림 13] TPH 농도의 가스크로마토그래프(예)

4.2.1 정화시간에 따른 BTEX(벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌) 및 TPH(석유계총 탄화수소)

정화시간에 따른 BTEX 및 TPH 제거율은 [그림 14], [그림 15]와 같다. 정화시간에 따른 BTEX 농도는 저온가열장치 84~92%, 세척장치 83~97% 제거되었으며, TPH 농도는 저온가열장치 93~96%, 세척장치 86~97% 제거되었다. 단시간 내에 BTEX의 제거 효율은 세척방법이 효과적이며, TPH의 제거는 가열방법이 효과적인 것으로 나타났다. 또한, 정화시간에 따라 경제적인 문제가 발생에 할 것으로 사료되며, 정화시간이 길어질수록 TPH의 제거는 세척방법이 효과적일 것으로 사료된다.



[그림 14] 정화시간에 따른 BTEX(mg/kg) 제거율

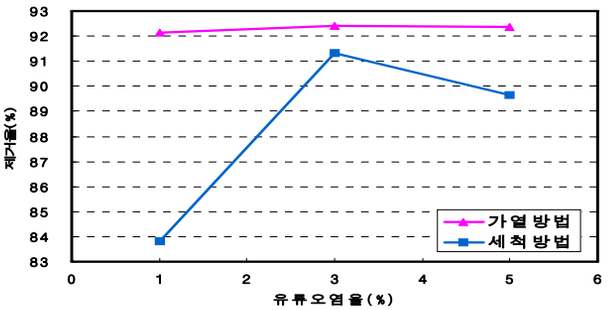


[그림 15] 정화시간에 따른 TPH(mg/kg) 제거율

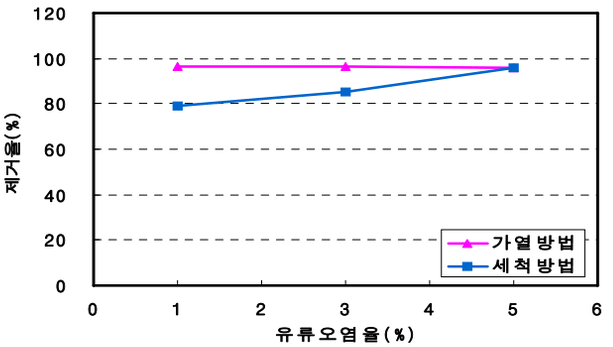
4.2.2 유류오염율(경유)에 따른 BTEX(벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌) 및 TPH(석유계 총탄화수소)

유류오염율에 따른 BTEX 및 TPH 제거율은 [그림 16], [그림 17]과 같다. 유류오염율에 따른 BTEX 농도는 저온가열장치 92~97%, 세척장치 84~92% 제거되었으며, TPH 농도는 저온가열장치 96~97%, 세척장치 79~96% 제거되었다. BTEX 및 TPH의 제거 효율은 저온가열장치 효과적으로 나타났으며, 이는 단시간 내에 유류오염율의 범위에 대한 한

계가 있었으며, 저온가열장치와 세척장치의 TPH 경우 유류 오염율 5% 이상부터 유사한 제거율을 나타내고 있다.



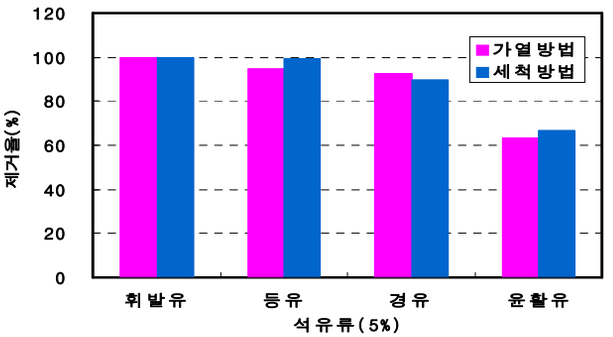
[그림 16] 유류오염율에 따른 BTEX(mg/kg) 제거율



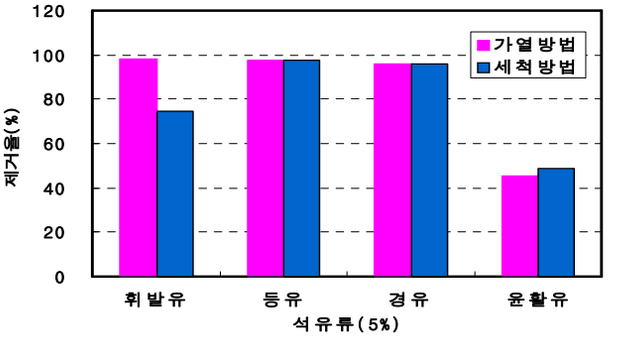
[그림 17] 유류오염율에 따른 TPH(mg/kg) 제거율

4.2.3 석유류의 종류에 따른 BTEX(벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌) 및 TPH(석유계총 탄화수소)

석유류의 종류에 따른 BTEX 및 TPH 제거율은 [그림 18], [그림 19]와 같다. BTEX 농도는 저온가열장치 64%이상, 세척장치 67%이상 제거되었으며, TPH 농도는 저온가열장치 46%이상, 세척장치 49%이상 제거되었다. 또한, BTEX 및 TPH의 제거 효율은 저온가열장치와 세척장치가 모두 유사하게 나타났으며, 세척장치의 TPH 제거는 휘발유의 경우 발화점이 낮은 유류의 특성에 기인한 것으로 사료된다.



[그림 18] 석유류의 종류에 따른 BTEX(mg/kg) 제거율

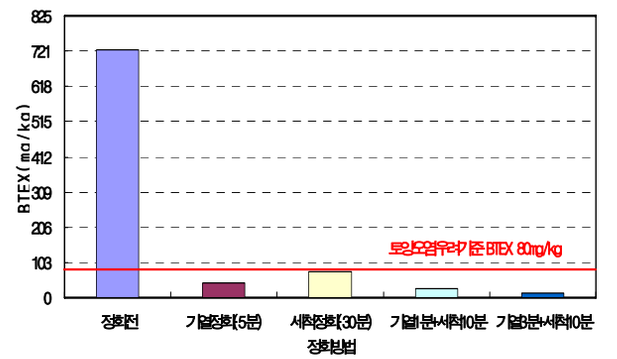


[그림 19] 석유류의 종류에 따른 TPH(mg/kg) 제거율

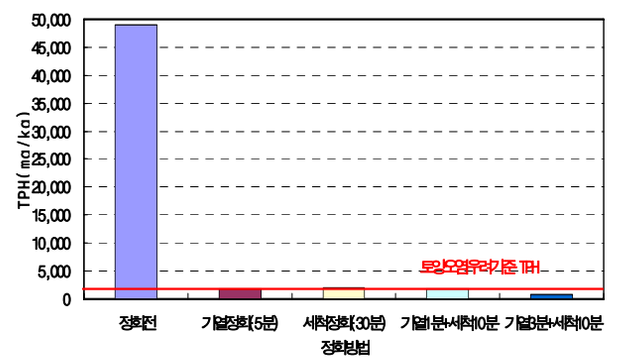
4.2.4 저온가열 및 세척장치를 병용한 BTEX(벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌) 및 TPH(석유계총탄화수소)

저온가열 및 세척장치를 병용한 BTEX 및 TPH 제거율은 [그림 20], [그림 21]과 같다. BTEX 농도는 저온가열 94%, 세척 90%, 가열1분+세척10분 96%, 가열3분+세척10분 98% 제거되었으며, TPH 농도는 저온가열, 세척, 가열1분+세척10분, 가열3분+세척10분 각각 96%이상 제거되었다.

현장에서 BTEX 및 TPH를 가열3분+세척10분의 정화방법을 적용하면 경제적이며, 효율적인 효과가 있을 것으로 사료된다.



[그림 20] 정화장치에 따른 BTEX(mg/kg) 제거율



[그림 21] 정화장치에 따른 TPH(mg/kg) 제거율

5. 결론

이상과 같이 오염 건설잔토의 적정처리와 재활용 기술에 대해 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 저온가열 정화장치는 주공정인 저온가열공정(처리용량 768ton/일)으로 오염된 건설잔토를 휘발시키는 방식으로서 2차오염 발생인자에 대한 다이옥신 처리는 필터링시설(고성능필터, 활성탄필터 등)을 통하여 대기방출시켜야 하며, 대기오염방지 및 방출시설 등을 포함하여 구성되어야 한다. 또한, 오염의 특성인자로서 처리시간, 유류오염율, 석유류의 종류, 토질의 종류, 함수율의 범위 등을 검토한 결과 정화효율이 매우 효과적인 것으로 판단된다.

(2) 주공정인 세척공정(처리용량 560ton/일)과 용수처리시설 등으로 구성되고 2차오염 발생인자인 회수된 유분, 세척액(계면활성제) 등은 별도처리를 하여야 한다.

(3) 세척 정화장치의 처리단가는 경제적이나 제거효율은 79~96%로 낮게 나타났으며, 경제성 대비 정화범위가 비효율적인 것으로 판단된다.

(4) 저온가열 및 세척 병용 공정(처리용량 512ton/일)은 저온가열과 세척을 복합한 공정으로 필터링시설, 용수처리시설 등으로 구성되어 있으며, 오염된 건설잔토를 매우 효과적으로 제거할 수 있으나 초기시설 투자비용이 높아짐. 또한, 2차오염 발생은 복합공정으로 인해 저온가열 공정에서 생성되는 다이옥신과 세척처리 공정에서 발생되는 회수된 유분, 세척액(계면활성제) 등이 발생되므로 경제성이 비효율적인 것으로 판단된다.

(5) 오염 건설잔토의 최적 시스템은 저온가열 정화장치가 처리시간 및 제거율 대비 경제성이 효과적인 것으로 판단된다.

향후, 여러 종류의 오염 건설잔토를 재활용하기 위하여 재료의 성능과 경제적인 정화기술 개발 등을 검토하여 건설공사 등에 효과적으로 재활용할 수 있는 2차제품에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

1. 환경부, 건설폐기물통계연감, 2005
2. 환경부, 오염토양 정화방법 가이드라인, 2007
3. 김광수 외 3인, 유류오염토양 현장복원기술 개발, 한국건설기술연구원, 1998
4. 최상일 외 2인, 소수성 유기오염물질로 오염된 토양에 대한 혼합 계면활성제를 이용한 토양세척기법의 적용성 연구, Journal of korea of groundwater environment, Vol. 4, No. 2, June, 1977, pp. 103~108
5. 박용하 외 2인, 토양오염지역의 책임에 관한 우리 나라, 미국, 영국, 독일, 네덜란드, 덴마크 법과 제도의 비교 분석 및 우리 나라 정책개선 방향, 한국환경기술개발원, 2004
6. 정해종 외 2인, 기름오염토양 중의 유분제거에 관한 연구, 한국해양수산연수원, 2006
7. 공준 외 3인, 유류 오염토양 복원을 위한 토양세척 공정의 개발, 대한지하수학회·한국토양환경회 공동 심포지엄 및 추계학술대회 논문집, 1998
8. 환경부, 토양환경보전법, 토양오염우려기준(제1조의5관련), 2005
9. 오민수, 토양오염 복원기술 및 토양의 환경정책, 한국과학기술정보연구원, 2003
10. 최상일 외 2인, 계면활성제를 이용한 원위치 토양세정기법 적용을 위한 기초 특성 연구, 한국지하수토양환경학회지, 2002, pp. 87~91
11. John Deegan, Jr., Looking back at Love Canal, Env. Sci. Tech., v.21, n. 4, n. 5, 1987.
12. Superfund Record of Decision, 1991, Love Canal(93rd Street School), NY, Third Remedial Action, PB92 - 963805, 1991.
13. German Federal Ministry for the Environment. 2002. German Federal Government Soil Protection Report. Federal Ministry for the Environment. Berlin, Germany.
14. Reisch, M. 2002. “Superfund and Brownfields in the 107th congress”「Congressional Research Service Report」. National Council for Science and the Environment. Washington D. C., U. S. A.