

유류오염 토양/지하수 환경복원 조사·설계 사례

김 영 응 (농업기반공사)

Environmental Remedial Investigation and plan for the soil and groundwater contaminated with petroleum

Young Woong Kim (Korea Agriculture & Rural Infrastructure Corporation)

요 약: 유류오염 토양·지하수의 위해성은 널리 알려져 있다. 따라서 오염부지에 대한 조사 및 복원방법도 많이 개발되어 적용되고 있다. 그러나 유류는 그 종류가 다양하고 지중에 스며들면 그 성분들이 휘발, 흡착, 용해, 생분해 그리고 지하수 유동에 따른 확산 등 다양한 기작에 의해서 거동하게 되므로, 조사와 공법 적용 시에는 이에 대한 충분한 이해가 필요하다. 따라서 부지조사시 조사항목의 선정은 물론이고 오염성분 및 농도조사를 위한 시료 채취과정도 매우 중요하다. 또한 공법 선정과 설계 시에는 오염성분의 종류와 농도 외에도, 지층의 구성과 부지의 입지특성 등을 세밀히 파악하고, 관계법령의 숙지, 그리고 복원공사 실시 후 발생할 수 있는 문제의 검토에 이르기까지 체계적인 관찰이 필요하다. 본 고에서는 부지조사방법과 복원공법 선정과정에 대해서 실제 공사 사례를 인용하여 서술하였다.

주요어: 환경복원, 유류오염, 토양/지하수, 조사, 설계

Abstract: The risk of the soil and groundwater that contaminated with petroleum is well known. The behaviour of petroleum in subsurface is governed by combined mechanism of several processes such as volatilization, adsorption, dissolution, biodegradation, etc. Large number of methods of remedial investigation and plan, therefore, have been developed and practiced. In application of the method, it is required engineer understands the mechanism of fate of petroleum in subsurface. So sampling procedures is very important for investigating the type of contaminants and their concentration as well as the selection of items that must be tested. For designing the remedial method, it is also required engineers to verify the structural formation of geology and the locational conditions of a land in detail, to familiar with the regulation, and to investigate the problems that can be happened after the performance was begun. In this paper it is shown that the investigation methods of contaminated land and the proper selection procedure of remedial method using the case history.

Keywords: environmental remediation, petroleum contamination, soil and groundwater, investigation, plan

1. 서론

모든 생태계의 삶의 기반인 토양은 자정작용과 완충능력이 크고, 오염피해가 오랜 시간 후에 나타나기 때문에 지금까지 대기, 수질, 폐기물 오염에 비하여 관심이 적었던 것이 사실이다. 그러나, 불량 매립지의 침출수 또는 공단지역이나 대규모 유류 취급소 등에서 그 동안 대량으로 사용되어 오던 유류성분이 토양생태계 내에 잔류하여 발생하는 주변 주민의 피해가 보고되면서 심각한 사회문제가 되고 있다. 특히, 중질유 및 고농도의 경질유로 오염된 토양은 원하는 수준까지 복원하는데 많은 비용이 필요할 뿐 아니라 고도의 기술이 필요한 특징이 있다. 미국, 캐나다, 네덜란드 등을 중심으로 한 많은 국가들은 토양오염방지를 위한 각종 법률 및 제 규정을 제정, 시행하면서 토양/지하수 오염지역 조사와 복원을 실시하고 있다. 1980년 러브운하 사건 이후 Superfund로 시작된 미국을 비롯한 독일, 일본, 네덜란드 등의 토양정화사업을 통하여 수많은 복원공법이 개발되고 실용화되었으나, 그 중 경제성과 기술적 관점에서 현장적용이 가능한 기술은 제한되어 있다.

유류 오염토양을 복원함에 있어, 선진국에서 유효성이 입증된 복원기술에 대해서는 적극적으로 도입하여 기술격차를 단시일 내에 해소하고, 특히 우리나라 토양특성과 복원작업 현실에 꼭 필요한 핵심기술은 집중적으로 연구 개발하여 선진국과 경쟁할 수 있도록 하여야 한다.

우리나라도 토양환경 보전법과 관련법령 등을 통해 토양오염 유발시설, 오염물질 및 오염지역 복원 등을 지속적으로 감시, 관리하고 있다. 1996년 1월 제정되어, 2001년 2월 개정된 토양환경 보전법에서는 오염 원인자의 오염지역 조사, 정화책임을 강화하고, 주유소, 정유시설 등 유류저장시설 토양오염 검사 시에 총석유계 탄화수소(TPH)의 검사를 의무화하며 지하 매설 대형 송유관시설은 특정 토양 오염 유발시설로 지정하는 등, 기존보다는 한층 강화된 내용으로 11개 항목의 토양오염물질에 대하여 우려기준과 대책기준을 정하여 관리하고 있다. 또한, 최근 정부에서는 전국의 유류저장시설과 군부대 이전지역 등의 토양오염유발시설에 대하여 전면적인 실태조사를 하고, 시급한 정화작업이 필요한 지역과 장기적인 정화대책이 필요한 지역을 구분하여 토양오염복원 우선 순위를 작성하는 등, 유류에 의한 토양이나 지하수 오염에 대한 종합적인 대책을 수립 시행할 계획에 있다.

따라서 본 발표에서는 최근의 토양/지하수의 유류오염 실태와 특성을 우선 살펴보고, 그에 따른 최신의 조사방법과 복원기술에 대해서 실제 적용 사례를 중심으로 설명하고자 한다.

2. 환경오염지구중 유류오염추세

2.1. 미국사례 (토양환경청, 2000년 7월)

미국 연방과 각 주에서 현재 법률의 규제에 의하여 복구 개선이 요구되고 있는 지역(시장규모) 등은 다음 표 1과 같다. 이 지역에 대한 모니터링과 지하수 처리의 프로그램은 이 보다 더 장기간이 요할 것이다.

오염지역은 개별적인 프로그램에 의하여 복구할 예정이나 그 대부분은 같은 종류의 형태의 오염을 이루고 있고, 대부분의 프로그램에 의하면 대상지역의 3분의 2에서 휘발성 유기화합물(VOCs)로 오염되고 있는 것으로 보고되고 있다.

표 1. 복구 개선이 요구되고 있는 지역

국 명	지 역 수	소요비용	소요기간	비 고
미 국	217,000	약 870 억불	10 - 30 년	복구 개선완료 및 진행중인 지역은 제외

RCRA(자원보호회수법)의 지하저장탱크 규칙에 의하여 복구가 요구되는 UST (지하저장탱크) 지역 현황은 다음 표 2와 같다. 이 수치의 산정시에는 개선사업자가 지정되어 있지 않은 지역은 모두 제외되었으며, UST지역에는 평균 2.7기의 탱크가 있는 것으로 추정되고 있기는 하지만 그 정확한 수는 지역에 따라서 어느 정도 차이를 가지고 있다.

표 2. 복구가 요구되는 UST (지하저장탱크) 지역 현황

존재개소	토양잔해 포함량	복구개소	잔존개소수(추정)
165,000	3,100 yard ³	65,000	약 100,000

2.2. 국내사례

국내에서는 산업공단지역, 전국 각지에 산재해있는 주유소 및 지하유류 비축기지 등으로 인해 주변 토양 및 지하수가 유류로 오염되어 가고 있다. 특히, 산업공정에서의 누출과 지하 유류 저장탱크 및 송유관에서의 누출, 석유화학제품 유통과정에서의 사고, 자동차 정비공장에서의 부적절 관리 등에 의하여 배출된 유류물질은 1차적으로 토양으로 흘러 들어간다. 토양내의 유류 성분은 토양생태계에 영향을 주게 되는데, 토양의 자정능력 상실로 인한 생산성 저하, 안전성 위협, 미생물 멸종 등을 유발시킨다. 또한, 공학적인 측면에서는 원 토양 및 지하수가 가지고 있는 고유한 물리적, 화학적 특성을 변하게 한다. 1996년 1월 6일부터 토양환경보전법이 시행됨에 따라 시·도지사에게 신고된 토양오염유발시설은 1999년 말까지 다음 표 3과 같다.

표 3. 시·도지사에게 신고된 토양오염유발시설

(1999년 12월 31일 현재)

신고업소수 (개)	주 유 소	산 업 시 설			기 타 (난방시설등)
		소 계	석유계	유독물	
19,625	12,007	4,513	4,404	109	3,105

3. 토양/지하수의 유류오염 현상과 특성

‘유류’ 라는 단어는 가솔린(gasoline)이나 중유(middle distillate), 그리고 오일 혹은 그리스(heavy fuel oil) 등을 총칭하는 것으로 이것은 원유의 다양한 정제과정 중에서 생산되어진다. 유류의 기원은 현재부터 10억년 전부터 지층사이에 퇴적되었던 생화학물이 혐기성 상

태에서 형성된 것으로 지금 사용되는 원유는 주로 1억에서 6억년 사이에 퇴적된 것들로 추정된다. 따라서 원유의 분자구조는 주로 수소와 탄소만으로 구성된 석유계 탄화수소 (petroleum hydrocarbon)로서 탄소 고리(carbon chain)에 수소나 기타 다른 원자들이 결합되어지는 모양을 하고 있다. 이 탄소 고리들은 그 길이에 따라서 각 종류마다 각기 다른 물리 화학적 성질을 가지게 되며, 탄소원자가 다른 원자들과 공유되어 있는 상태에 따라서 포화 탄화수소 (saturated hydrocarbon) 혹은 불포화 탄화수소 (unsaturated hydrocarbon) 상태로 나눌 수 있다 (그림 1 참조). 특히 불포화 탄화수소는 대부분 특이한 냄새를 가지고 있으며, 대부분은 어느 정도 독성을 띄고 있어 주의가 필요하다. 주요 화합물로서는 PCBs (polychlorinatedbiphenyl), BTEX (benzene, toluene, ethylbenzene & xylene), PAHs (polyaromatic hydrocarbon) 등이 있으며 이들 모두 오염물질로서 규제되고 있다.

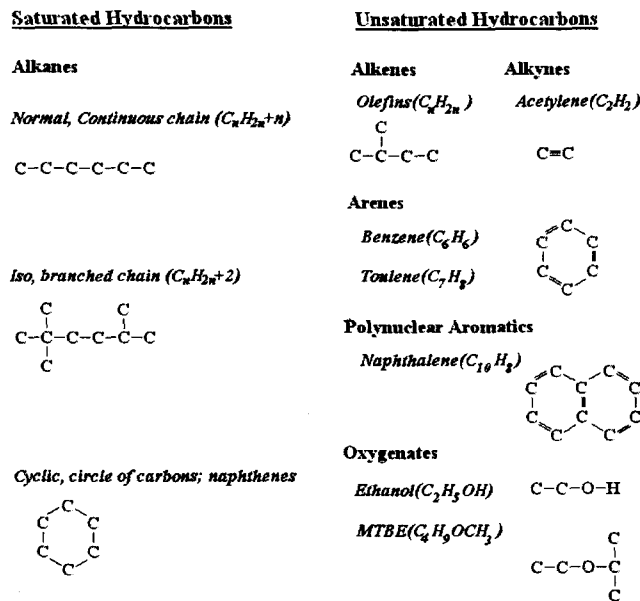


그림 1. 석유계 탄화수소의 분자구조.

3.1. 특 성

가솔린의 경우는 석유계 탄화수소 외에도 알코올이나 에테르(즉, MTBE)와 같은 비석유계 탄화수소가 혼합되어 있는 화합물이다. 가솔린은 분자당 탄소수가 4-10개(혹은 4-12개)로서 분자량이 증유나 오일보다는 가벼워 점성(viscosity)이 작고 휘발성이 높으며 물에도 용해가 잘 되는 편이다. 따라서 가솔린이 지중으로 누출될 경우에는 불포화구간에서 휘발되거나 또는 포화대구간에서 지하수의 유동방향을 따라 용이하게 이동 확산되기 쉽다.

그러나 신선한 가솔린 성분 중에는 높은 농도의 BTEX와 같은 aromatic 탄화수소가 함유되어 있는데, 이것은 물에 대한 용해도가 높고 유독한 성분으로 알려져 있다. BTEX의 경우는 생분해(biodegrade)가 잘되며 휘발성과 물에 대한 용해도가 높기 때문에 누출 초기에는 높은 농도를 나타내지만 누출 후 상당기간 경과된 경우에는 잘 나타나지 않는 특성이 있다. 또한 비석유계 탄화수소 성분도 물에 대한 용해도가 높고 생분해가 잘 되지 않기 때문에 지하수의 흐름에 따라 빠르게 확산될 수도 있다.

경유 (diesel fuel), 등유 (kerosene) 그리고 제트유 (jet fuel) 등의 중유는 최고 약 500여가지의 성분들로 구성될 수 있으며, 탄화수소 고리는 보통 9-20개의 탄소원자를 함유하고 있다. 따라서 가솔린에 비해서 비중이 크고, 물에 대한 용해도도 낮으며, 휘발성도 작은 특성을 가진다.

오일이나 윤활유는 그 조성이나 특성이 중유와 유사하지만 점성이나 분자량이 중유보다는 크고 물에 녹지 않는다 (탄화수소 고리에 14개이상, 최고 30개까지의 탄소원자를 함유하고 있다).

3.2. 유해성

석유계 탄화수소의 구성 성분들은 지중에서 크게 4가지의 상(phase)으로 존재할 수 있는데, 그림 2에서와 같이 지표면 부근의 불포화구간에는 증기(vapor)상태, 흙 입자의 표면에 부착된 잔류물(residual)상태, 물에 용해되어 섞여있는 상태(aqueous) 혹은 흙 입자에 부착되지도 물에 용해되지도 않고 독자적으로 존재하는 자유상(free product)으로 구분할 수 있다.

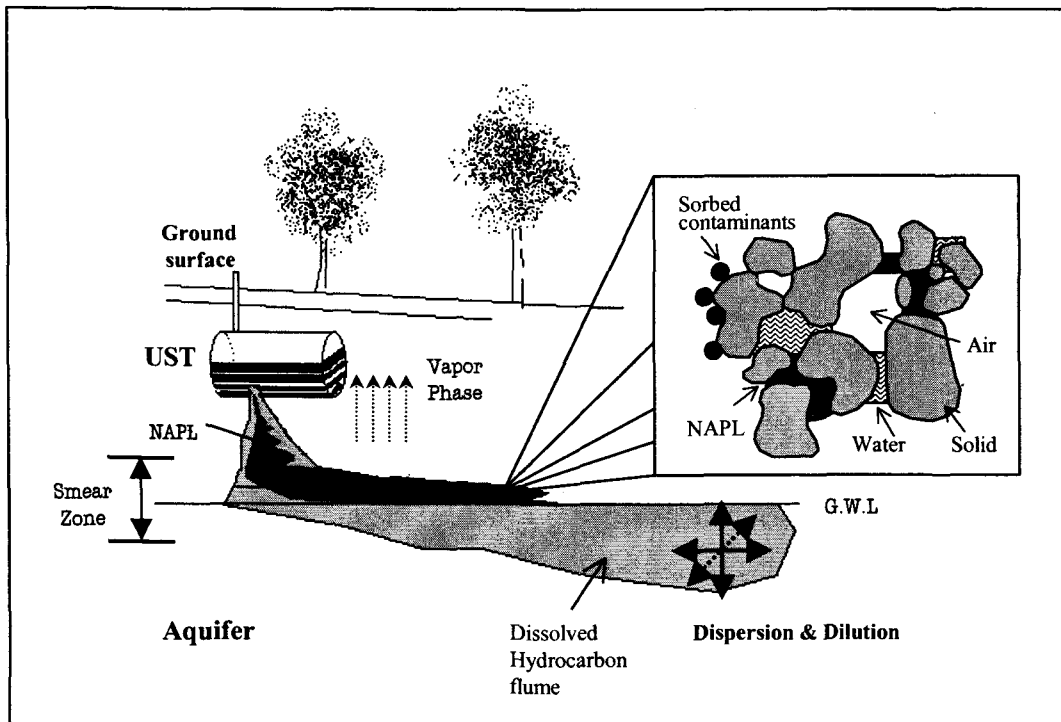


그림 2. 유류 오염성분의 지중오염 개념도.

액체상태의 유류가 지중으로 누출되면 중력과 모세관 작용에 의해서 유류는 아래 방향으로 이동하기 시작해서 모세관대(capillary fringe)에 도달하여 모관압력에 의하여 더 이상의 이동 없이 저류되게 된다. 그러나 유류의 누출이 지속적으로 계속되어 모세관대의 저류능력을 초과하게 되면 유류 운(plume)은 다시 아래 방향으로 이동을 시작하게 되어 지하수 위 면과 접촉하면서 포화구간으로 진입하게 된다. 이때 불포화구간에는 유동성이 낮은 탄화수소의 잔류물들이 흙 입자의 표면이나 공극사이에 잔류상태로 남게되어 토양오염의 원인이

된다.

지하수위 면에 도달한 유류성분은 물보다 비중이 낮은 경우 (LNAPL; light non-aqueous phase liquid)에는 지하수면 위에 자유상(free product)의 형태를 형성하게 되며, 물보다 비중이 무거운 성분 (DNAPL; dense non-aqueous phase liquid)들은 지하수위면 아래로 더 깊이 하강하게 된다. 이때 물에 대한 용해도가 높은 성분들은 지하수에 용해되어 대수층을 따라서 지하수의 유동에 따라서 확산되기 시작한다.

DNAPL성분의 경우에는 대수층 바닥까지 도달할 수 있는데, 이때 기반암에 균열이나 절리 혹은 파쇄대 등이 발달되어 있는 경우에는 기반암 하부의 피압대수층까지 도달되어 지하수를 오염시킬 수 가능성이 있다. 다음 표 4는 미국에서 가솔린 30,000 갤런이 누출된 지역에서 각 상의 분포양상을 분석하여 발표한 예이다.

표 4. 각 상의 분포양상의 예

Phase	Contaminant Volume, gal	% of Total	Contaminant Volume, yd ³	% of Total
Free Product	18,500	64	7,100	1
Residual Phase	10,000	35	250,000	20
Dissolved (water)	333	1	960,000	79

이 결과에서 자유상태의 유류성분은 작은 면적에 높은 농도로 존재하여 비교적 효과적으로 처리할 수 있으나 토양내에 잔류되어 있거나 물에 용해되어 있는 상태에서는 그 면적이 광범위해서 처리가 용이하지 않다는 사실을 알 수 있다.

이와 같은 일련의 과정은 토양의 공극율 (porosity), 저류능력 (retention capacity), 지하수위, 흡 입자의 흡착 (sorption) 능력과 같은 물리적 성질들과 밀접한 관련을 가지고 있다.

4. 토양 및 지하수 환경복원 조사 설계 추진체계

오염된 토양 및 지하수를 복원하기 위해서는 오염된 부지를 대상으로 정밀하게 조사하여 이 결과를 바탕으로 적절한 복원 대책을 수립하는 것이 무엇보다도 중요하다. 오염부지 조사에는 Phase I, II, III단계로 구분되어 있으며, 조사정밀도 및 진행순서는 개략조사에서 정밀조사로 실시하는 것이 일반적이다. 조사 결과를 바탕으로 오염된 토양 및 지하수를 복원하기 위해서는 대상지 토양 및 지하수의 특성, 오염물질의 종류, 오염정도 및 분포범위, 복원기간 등에 따라 적절한 복원대책을 수립해야 한다.

4.1. 환경오염 부지조사

일반적인 환경오염 부지의 조사 흐름도는 그림 3과 같다. Phase I 단계는 오염가능성을 파악하기 위한 개략조사이다. 조사방법은 토지사용이력, 행정자료 등의 기존자료를 수집하여 분석한 후, 현지조사를 통하여 외관조사 및 관리자 등과 면담을 실시한다. 표 5에 수집 자료의 일람표를 표시한다. 지력과 오염물질 사용이력은 평면조사 범위를 설정하는데, 지형 및 지질과 지하수 이용 상황은 시추심도를 설정할 때에 유용한 판단자료가 된다.

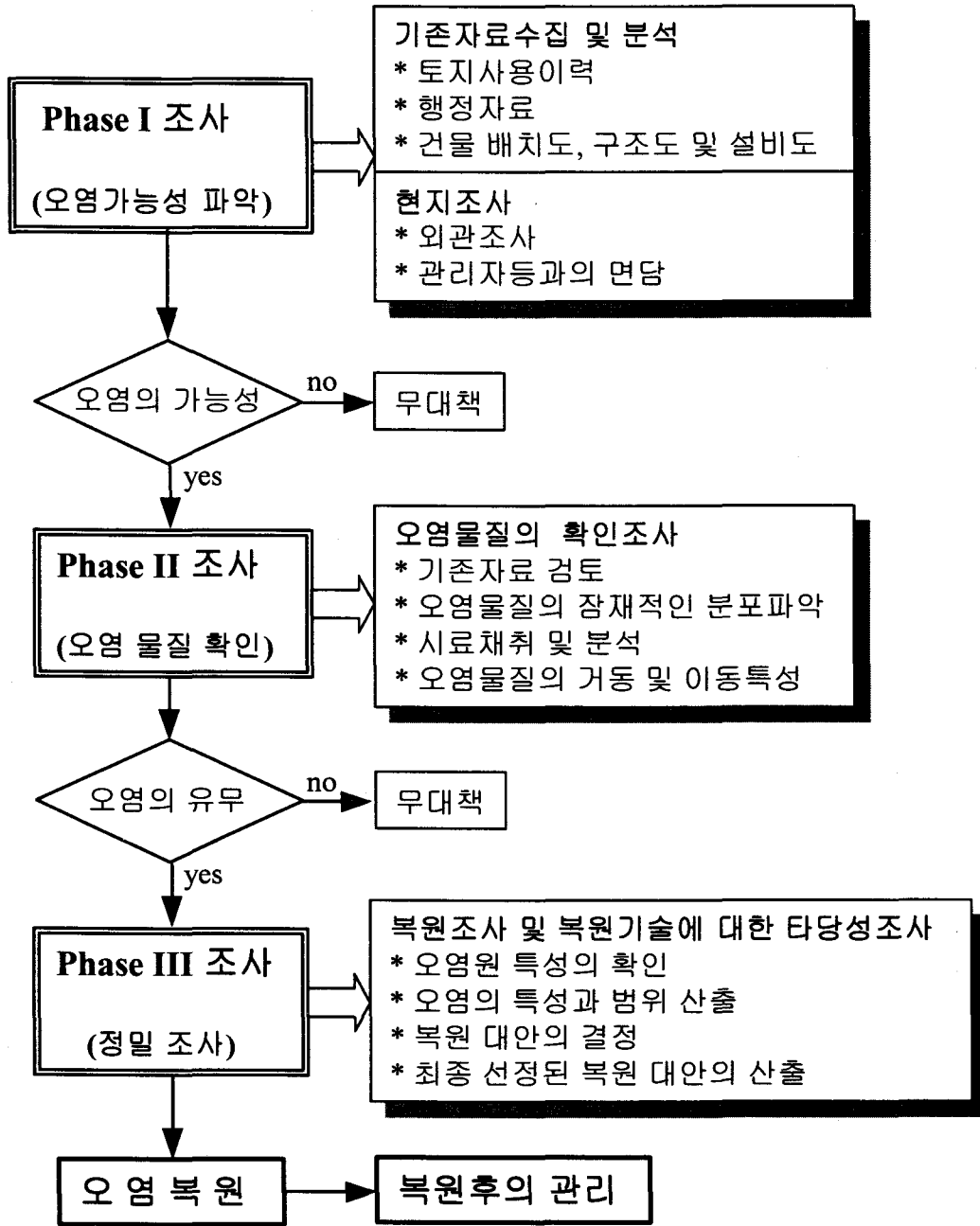


그림 3. 환경오염 부지의 조사 흐름도.

표 5. 수집 자료의 일람표

조사종별	수집자료
지력	토지이용변경, 건물, 시설의 이동 등
오염물질 사용이력	오염물질의 경년적인 사용량, 사용 장소, 폐기처분 방법
지형 및 지질	수리지질도, 지질주상도, 전기검층, 현장투수시험 등
지하수 이용 상황	기설정호의 분포, 제원, 이용수량, 수위, 수질 등

Phase II 단계는 오염가능성이 있는 곳을 대상으로 시료채취 및 분석 등을 통하여 구체적으로 오염물질을 확인한다. 조사방법으로는 오염부지의 현장조사와 더불어 토양 및 지하수 시료를 채취하여 분석한다. 오염물질이 중금속과 같이 이동성이 작은 경우는 표토조사를 실시하고, 휘발성 유기염소화합물의 경우는 침투한 지층 내의 토양가스 농도를 조사한다. 조사 결과를 이용하여 오염물질의 종류별로 농도평면 분포도를 그리고, 사용 장소나 배수경로의 배치도를 중첩시켜 오염원과 평면오염분포를 추정한다.

휘발성이 있는 유기염소계화합물에 적용되는 각종의 표층가스 조사법을 비교하면 표 6과 같다.

표 6. 표층가스 조사법의 비교

	활성탄흡착 Pyrolysis 질량분석법	검지관법	Portable Gas Chromatograph (GC-PID법)	활성탄흡착 열탈착법(GC-PID법)
샘플링방법	천공, 특수활성탄 흡착관리설치 1~4주 후 회수	천공, 지중가스 정량강제흡인	천공, 지중가스 정량강제흡인	천공, 특수흡착관삽입 지중가스 정량강제흡인
측정법	흡착가스를 가열방출 Pyrolysis 질량분석	산화 비색법	Gas Chromatograph 법	열탈착 Gas Chromatograph법
검출농도한계	< ppb (상대치)	ppm	ppb	< ppb
분석시간	(>2개월)	10 분	15 분	15 분
표준적인 측정간격	수 ~ 수십m (정밀조사)	수m	수 ~ 수십m	수 ~ 수십m (정밀조사)
현장적응성	부적합	가장 적합	적 합	적 합

Phase III 단계는 토양 및 지하수 오염부지에 대한 정밀조사로서 복원조사 및 복원기술에 대한 타당성을 조사한다. 조사내용은 Phase I, II 단계의 조사를 바탕으로 시추조사 및 물리탐사 등을 실시하여 오염부지의 특성조사, 시료채취 및 분석, 지하수조사 등을 통하여 오염물질의 분포 및 거동해석, 오염 규모 및 오염량을 산출한다.

시추조사는 그림 4에 나타낸 것과 같이 지하수위 및 수질의 측정뿐만 아니라 충분한 정보가 얻어지지 않을 경우에는 지질 및 토양의 오염상황, 대수층 별로 지하수의 오염상황 등을 파악하고 관측정을 설치할 목적으로 실시한다. 조사지점의 선정은 원칙적으로 정호조사에 있어서 천층 지하수가 가장 오염된 정호에 근접한 지점, 혹은 표층오염조사에 있어서 가장 오염농도가 높게 검출되는 지점을 선정한다. 다음으로는 그림 5에서 표시한 바와 같이 지하수 하류지역에 지하수 유향과 오염농도 분포를 파악하기 위하여 2~3점을 선정하고, 필요에 따라서는 지하수 상류지역(BH-5 지점)의 오염유무를 확인하기 위하여 조사를 실시한다. Phase III 단계의 조사 결과를 종합적으로 해석하여 오염된 토양 및 지하수를 복원하기 위한 대책을 수립한다. 이 과정에서 복원공법의 실증시험 및 복원목표를 선정하고, 복원 실시 설계를 통하여 복원비용을 산정한다.

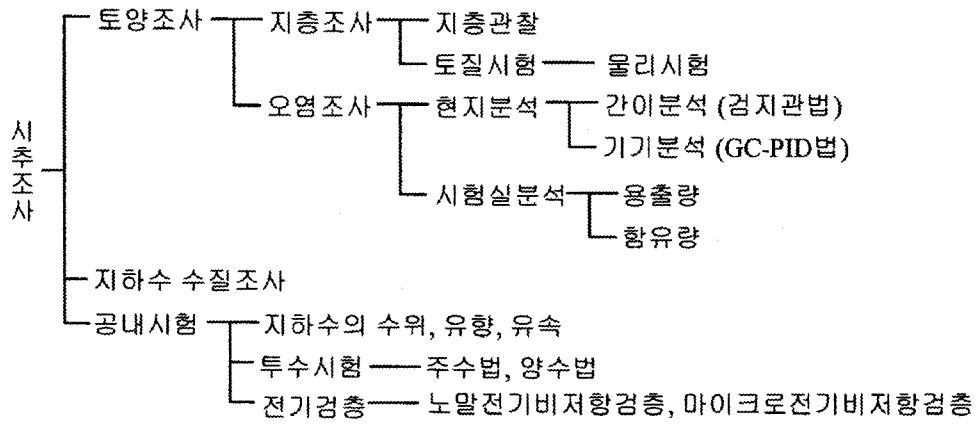


그림 4. 시추조사 내용.

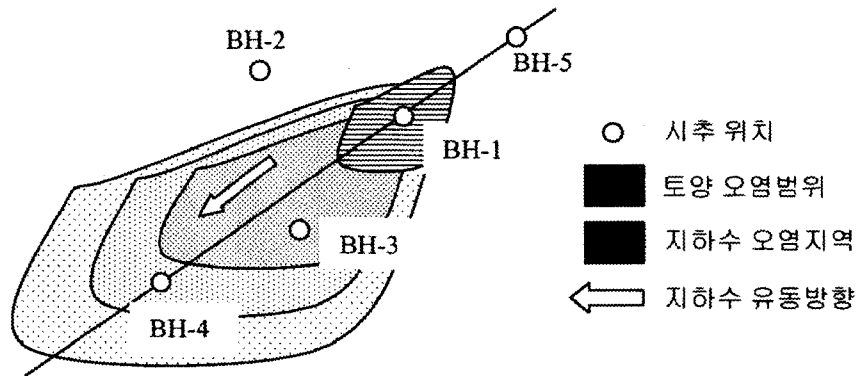


그림 5. 오염원 주변의 시추배치 계획.

4.2. 오염대책 기술

오염된 토양 및 지하수를 복원하기 위해서는 조사 결과를 토대로 적절한 복원공법을 선정해야 한다. 복원공법의 선정에 있어서는 오염물질의 특성, 대상지질, 복원기준 및 복원기간, 경제성 등을 고려해야 한다.

그림 6은 토양 및 지하수의 조사, 오염 대책기술에 대해서 열거한 것이다. 일반적인 오염정화 대책기술은 오염물질이나 대상지질에 따라서 크게 나누어지고 있으며, 오염정화 목적별 기술분류는 오염물질이 지하수로 확산되지 않도록 방지하는 기술과 대상매체로부터 오염물질을 제거하는 기술로 대별할 수 있다. 확산 방지 기술은 불용화 처리, 고형화, 봉쇄처리 등 오염물질의 용출을 방지하는 기술과 봉쇄처리, 양수처리 등의 지하수 이동을 방지하는 기술이 있다. 또 오염물질의 제거기술은 원위치에서나 굴착제거에 의하여 오염물질을 분리 및 분해시키는 기술이 다양하게 적용되고 있다. 이들 기술 중에서, 봉쇄처리는 휘발성 유기화합물의 항구대책으로는 사용할 수 없게 되어있다.

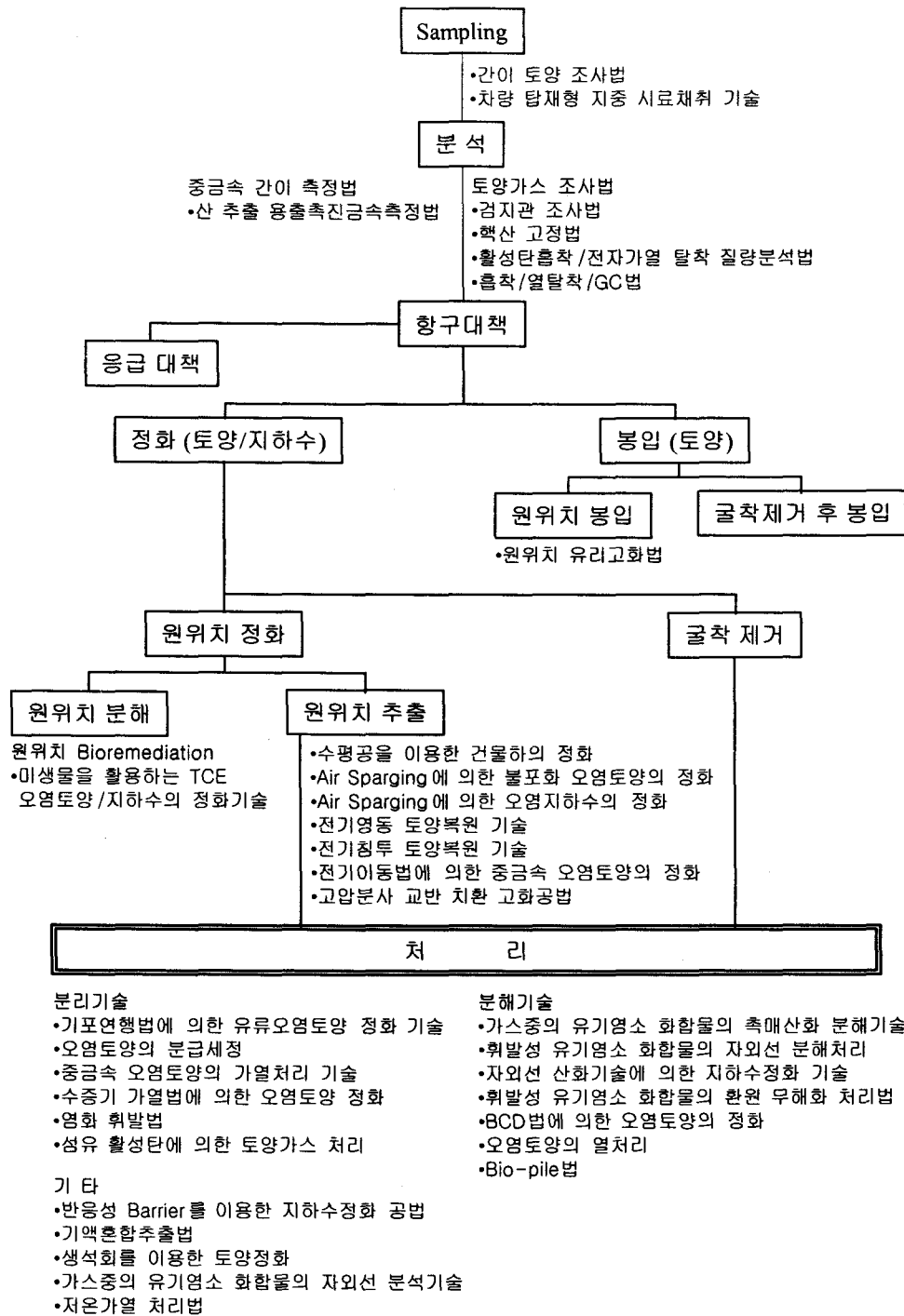


그림 6. 토양 및 지하수의 조사, 오염 대책 기술.

5. 유류오염 토양 및 지하수 환경복원 조사 설계시 유의사항

석유계 탄화수소는 휘발성의 액체이고 물에 잘 녹지 않으며 물보다 가볍고 미생물에 의해서 분해되기 쉬운 성질을 가지고 있다. 오염에 의한 지중에서의 존재상태는 원액의 상태나 물과 혼합한 상태, 간극 중의 가스 상태나 토립자에 흡착된 상태 등 다양하게 존재한다

액상의 상태로 지중에 침투해 들어가면 물보다 가볍기 때문에 양이 많을 경우에는 지하수면까지 도달한다. 오염물질이 지하수면에 도달하면, 그 일부는 지하수면에 떠 있지만, 비중이 물보다 크기 때문에 대수층의 하부까지 침강해 들어간다.

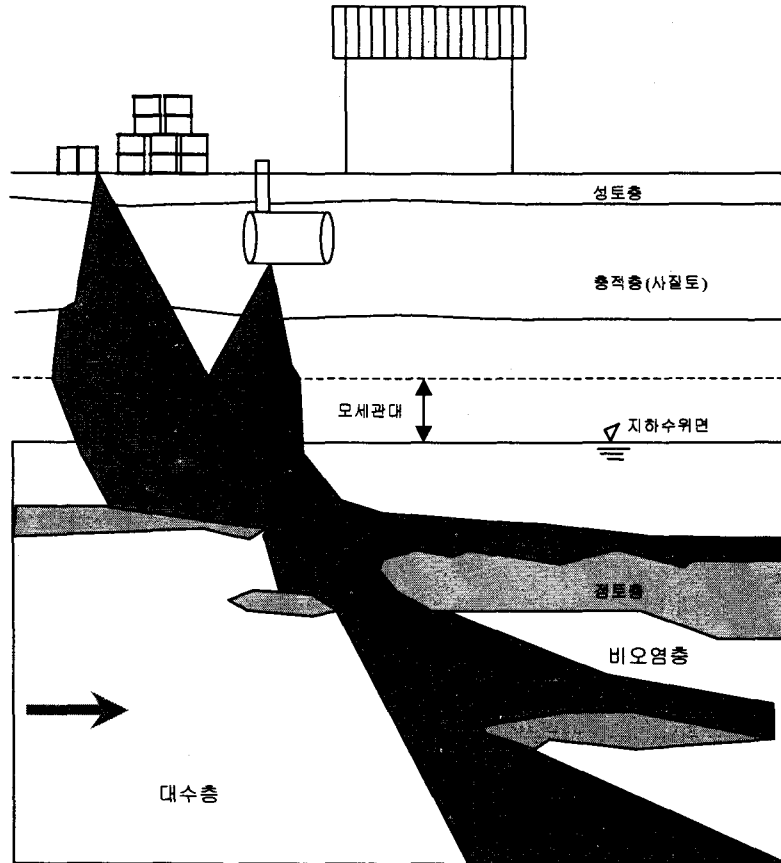


그림 7. 유기염소계 화합물의 지하 침투경로.

지하수에 용해된 오염물질은 그림 7과 같이 지하수의 흐름에 따라 이동되거나 농도구배에 의하여 확산되어 고농도의 오염부분이 넓게 분포한다. 유류는 지하수에 대한 용해도는 작지만, 오염기준치가 낮기 때문에 지층 중에 잔류하고 있는 오염물질을 제거하지 않고는 장기간에 걸쳐 지하수의 오염을 유발시킨다.

휘발성 유기화합물에 관련된 조사의 유의사항은 다음과 같다.

- 휘발성 유기화합물에 의한 토양/지하수오염의 분포범위는 오염물질의 물리화학적 특성으로부터 중금속 오염에 비하여 확산되기 쉽다. 따라서 조사가 장기간에 걸쳐 실시될 경우, 적절한 조사방법이나 배치, 수량 등에 유의하여야 한다.
- 휘발성 유기화합물에 의한 오염현장에 때때로 중금속과 유분이 공존하는 경우가 있다. 이 때문에 조사계획을 세울 때 중금속과 유류의 존재 가능성을 확인하여 이들의 공존물질의 존재가 예상될 경우에는 양자의 특성을 고려하여 적절한 조사방법 및 순서를 선정하여 조사

를 수행한다.

- 휘발성 유기화합물이 유분과 공존할 경우, 휘발성 유기화합물의 휘발성이 억제되어, 표층 토양가스조사에서 정확한 토양오염상황이 파악되지 않을 경우가 있다.
- 조사를 수행함으로써 오염의 확산이나 2차 오염이 발생되지 않도록 세심한 주의가 필요하다.

6. 국내 유류오염 현장 조사·설계 사례

6.1. 조사지역의 현황 및 조사목적

오염복원 대상부지는 전체 부지면적이 약 2.8만평에 이르며, 과거 차량정비를 위하여 사용되다가 최근 이 곳에 기타 다른 용도의 설치를 위한 터파기 작업을 수행하던 중에 오염물질이 발견되어 토양오염조사를 실시하게 되었다.

대상부지에 대한 개략조사 (Phase I) 및 기초조사(Phase II)가 실시되었다. 이런 일련의 조사과정들에서 부지의 오염이 확인되었으며, 현재는 정밀조사 완료 후 복원공사가 진행 중이다. 이 조사는 2000년 1월부터 3월까지 3개월간에 걸쳐 이루어졌으며, 조사자료를 바탕으로 오염복원의 세부 설계가 마련되었다. 이에 의하면 총 122억원의 사업비를 투입하여 2001년 4월부터 2002년 12월까지 오염토양과 지하수의 정화공정을 완료하고, 2003년 8월까지의 사후 모니터링을 실시하는 계획으로 되어있다. 따라서 본 고에서는 정밀조사 (Phase III)단계에서 대상부지에 대한 오염 조사기법과 복원공법의 선정과정에 대해서만 언급하기로 한다.

6.2. 정밀조사 (Phase III)

정밀조사(Phase III)단계의 목적은 궁극적으로 부지내 오염물질의 구성성분과 그 공간적 분포상황 그리고 농도를 파악하고 이를 이용해 적용 가능한 복원공법을 선정하여 설계를 실시하는데 필요한 신뢰성 있는 자료를 수집하는데 있다.

따라서 Phase I, II단계의 조사결과를 근거로 시추조사 및 물리탐사 등을 실시하고 오염부지의 특성조사, 시료채취 및 분석, 지하수조사 등을 실시하여 오염물질의 분포 및 거동 해석, 오염 규모 및 오염량을 산출하고자 하였다. 본 조사지역에서는 표 7과 같은 항목에 대해서 정밀조사를 실시하였다. 구체적인 조사범위는 기 확인된 오염범위의 굴착계획 수립을 위한 현장자료 수집 및 유관기관과의 협의, 정밀조사에서 누락된 일부 보완자료 수집 (지하수성분, 대수층 특성, 지층구조분포), 부지내 공사를 위한 환경영향조사, 폐기물 매립위치 확인조사 그리고 공사비 산정 및 공사계획 수립에 필요한 자료 수집 등이 포함되었다.

시추조사와 물리탐사, 토양, 지하수 및 가스 시료의 채취, 그리고 소음 및 진동의 측정은 대상 부지를 그림 8과 같이 격자 모양으로 나누어 실시하였으며, 그 결과를 이용하여 대상부지의 지층구성과 오염의 분포범위를 추정하여 그림 9와 같은 개념도를 작성하였다.

표 7. 정밀조사 실시항목

실 시 계 조 사	예비조사	<ul style="list-style-type: none"> ● 기존자료분석(DB/GIS 구축) ● 조사 보완자료 수집 (지적도, 부지활용계획 등) ● 유관기관협의(국방부, 군수사, 부산시, 도개공, 시공회사, 환경단체 등)
	부지환경조사	<ul style="list-style-type: none"> ● 일반현황(인구, 교통, 토지이용, 사업현황 등) ● 지구현황(수계, 지질, 토양, 기상 등) ● 환경조사(대기·소음·분진) ● 배경농도조사(토양, 지하수, 지표수)
	부지특성조사	<ul style="list-style-type: none"> ● 지하대수층특성조사 ● 정밀시추조사 ● 지구물리탐사 ● 시료채취분석 ● 벤치테스트 (Bench Test) ● 위해성 평가 ● 악취(토양가스) 안정화
	시설계획수립	<ul style="list-style-type: none"> ● 토목조사(부지지형측량, 지표수문조사, 토질조사) ● 농경작 및 열탈착 처리장 ● 야적장 및 적치장 기초시설 ● 부지기초시설(배수로, 가설공사) ● 전기가설계획
	공사계획수립	<ul style="list-style-type: none"> ● 관련법령 검토 ● 오염복원 계획수립 ● 현장적용성시험(Pilot Plang Test) ● 사후모니터링 계획수립 ● 관련자료 전산화 ● 사업비내역서 작성 ● 설계도서 및 시방서 작성



그림 8. 토양 및 지하수, 가스 시료채취, 소음 및 분진측정 지점.

정밀 조사결과 대상부지에서 오염 원인물질은 유류로서 토양환경보전법상의 규제 항목인 TPH, BTEX와 폐기물 관리법상 지정폐기물에 해당하는 유분으로 나타났으며, 우려기준을 초과한 것은 정밀조사시 전체 시료 중 7%, TPH는 전체 시료 중 32.7%인 것으로 확인되었다. 토양내의 중금속은 대부분 오염기준을 크게 미달하고 있으나, 납(Pb)은 분석시료 평균 46 ppm (확인기준 160 ppm)인 상태에서 1개 시료에서 229 ppm이 검출되어, 확인조사가 필요하였고, 지하수내의 중금속 중 납(Pb)이 일부 지하수 수질기준에 미달하는 것으로 분석되었으며, 시료의 80%가 지하수 수질기준은 물론 폐수배출 허용기준을 크게 초과하여 검출되어, 처리대책의 강구가 필요한 것으로 나타났다 (표 8 참조).

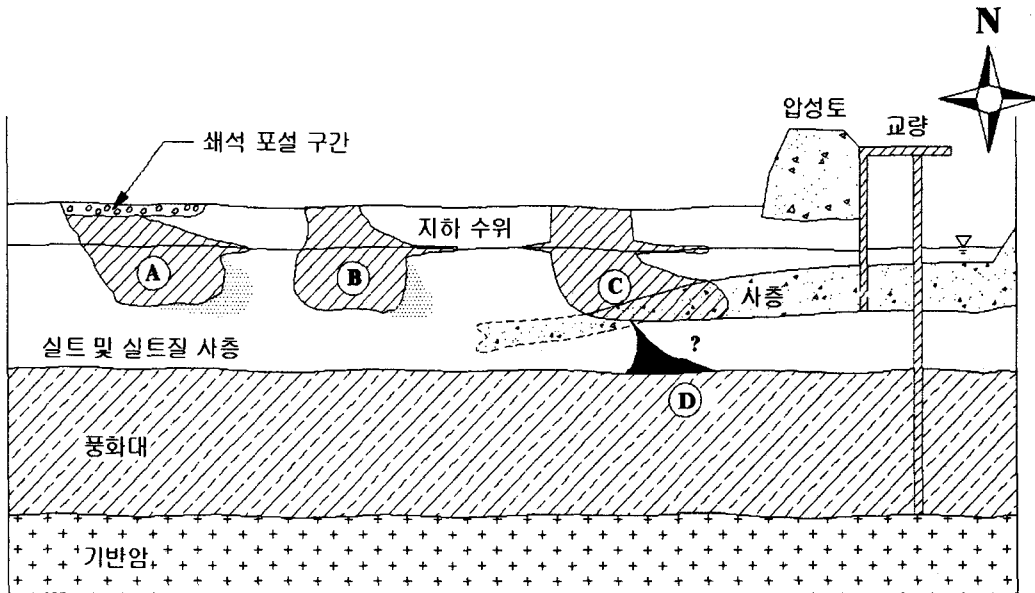


그림 9. 현장의 개념도.

표 8. 토양 및 지하수 조사결과

항 목	조사지역 (ppm)	지하수 수질기준(ppm)			
		먹는물기준	생활용수	농업용수	공업용수
Cd	< 0.02	0.01	0.005	0.01	0.02
As	< 0.03	0.05	n/a	0.05	0.1
Hg	< 0.0005	0.001	불검출	불검출	불검출
Pb	0.69-12.4	0.05	n/a	0.1	0.2
Cr ⁺⁶	< 0.03	0.05	n/a	0.05	0.1
CN ⁻	< 0.003	0.01	0.05	불검출	0.2

한편 분진과 소음에 대한 조사결과에서 측정값들은 허용치 내에 있는 것으로 확인되었으나 분진의 경우에는 허용치에 근접한 것으로 나타났으며, 소음의 경우에도 향후 민원발생의 여지가 큰 것으로 판단되었다. 따라서 이에 대한 대책을 설계에 반영하였다.

6.3. 복원공법 선정 및 정화목표 설정

대상부지에 대한 정밀조사가 완료된 후, 각종 조사 및 실험자료를 근거로 최적의 복원 공법의 선정을 위한 분석을 실시하였다 (표 8 참조). 본 지역은 오염성분이 비중과 점성이 큰 디젤유와 오일이 주 원인 물질인데 반해서 지층은 실트질을 다량 함유한 저 투수성 토양이 주를 이루고 있어 비수용성액체(NAPL)와 비휘발성 유기화합물(Non Volatile Organic Compound)이 중심이 된 오염물질을 제거하기 위해서 원위치(in-situ)에서의 토양세정계통 공법(soil flushing, soil stripping, SVE)은 매우 제한적일 것이며, 시공과정에서 중금속(heavy metals), TCE, PCB를 중심으로 한 토양오염기준 항목들이 검출되는지를 확인하여 위해성 여부를 판단하고 규정 항목들의 법정 기준치가 초과되지 않도록 관리하는 것이 중요하다고 판단되었다.

또한 조사지역이 도심 중앙에 위치하고 있으며, 공사 기간의 제약(실공사기간 최대 2년 5개월)과 사용 가능 토지의 제한도 공법선정에서 고려해야 할 사항이었다. 따라서 현장의 처리공법의 적용시 부근에 토취장과 토사장 확보에 어려움이 있었으며, 운반비 과다 소요, 토양 반출로 인한 민원 발생으로 공사지연 여지가 상존 할 수 있다고 판단되었다.

토양정화목표 설정시 본 부지의 주 오염성분인 TPH (총탄화수소계), BTEX (휘발성탄화수소계)에 대해서 오염 토량의 산정 기준은 표 9와 같이 현행 기준을 적용하여 TPH 2,000 ppm 이상으로 하였다. BTEX오염범위는 TPH 오염범위와 중복되었으므로 별도로 산정하지는 않았으며, 따라서 오염면적은 총 부지면적의 44%인 것으로 파악되었다.

표 9. TPH와 BTEX의 현행 기준

구 분	TPH	BTEX	비 고
법률적 정화기준	2,000	80	우려기준
사회적 정화기준	800	32	확인기준

그러나 우리 나라는 환경관련 법령은 대부분 소급입법의 성격이 강하여, 정화목표의 설정은 현행법상의 기준을 참고하되, 입법추세와 향후의 사회적 환경도 고려되어야 할 것으로 판단되었다. 또한 토양과 지하수는 상호간에 오염원으로 작용할 수 있는 불가분의 관계에 있으므로, 토양정화목표의 설정에는 지하수의 수질도 함께 고려하였다.

이상의 사항들에 대해서 문제점을 최소화 할 수 있는 방안으로서 현장내 처리 (on site) 방안을 검토하고, 공기(工期)의 제약에서 오는 문제점들을 해결할 수 있는 적절한 혼합공정으로 구성하여 계획하는 것이 필요하다고 판단하였다. 따라서 표 10과 같은 체계적인 공법 적용성을 비교·검토하였으며, 최종적으로 선정된 공법은 현장내에서 그림 11과 같은 농경작법 (Landfarming), 그림 12와 같은 바이오파일공법 (Biopile), 그리고 그림 13의 열탈착공법 (Thermal Desorption)을 조합하여 수행하기로 하였다. 현장내 처리시 지중처리는 부지조성공사 및 건축공사로 토양 굴착이 필요한 상황이었으며, 부지특성이 지중처리에 부적합한 것으로 판단하였다.

농경작법은 토질과 국내 시공사례를 감안하여 볼 때, TPH 10,000 ppm 내외 토양의 2,000 ppm까지 저감은 효율적이나, 2,000 ppm이하 저감은 경제적 효율이 낮으며, 열탈착공법은 TPH 10,000 ppm 이상의 오염토양을 최소 200 ppm까지 저감 가능하나, 사업기간이

비교적 충분함을 감안하여 볼 때 오염도가 낮은 토양의 열탈착은 경제적인 측면에서 비효율적으로 판단되었다. 또한 현장의 전자수용체, 분해부산물 및 수리 지구화학적 인자들에 대한 정보가 충분치 못하여 정량적인 효과의 예측은 어려우나, 부지토양환경이 미생물의 활동에 적합한 조건을 갖추고 있는 것으로 조사되어 있으므로, 부수적인 자연저감효과를 기대할 수 있을 것으로 판단되었다.

표 10. 복원공법 비교검토

구분	공법 범주	부지내 처리	복원방법	오염물질 처리가능성			토양 특성		기술상업성	정화시간	소요비용	제한요소
				VO C	유류	고농도오염물질	조립질	세립질				
In-Situ	물리·화학적 처리	○	토양세정법	△	△	×	○	×	△	△	△	•부지굴착으로 적용불가
		○	토양증기추출법	○	×	×	○	×	○	△	△	•부지굴착으로 적용불가
Ex-Situ	생물학적 처리	○	농경작법	○	△	△	○	△	○	×	○	•고농도처리 장기간 소요 •세립질토양 처리 곤란 •저농도까지 저감 곤란
		○	바이오파일	○	△	×	○	△	○	△	○	•저농도까지 저감 곤란
	물리·화학적 처리	○	토양세척법	△	△	△	○	×	△	△	△	•수처리비용 과다 •세립질 토양 적용어려움
		○	고형화안정화법	×	×	○	○	○	○	○	△	•유류오염 적용 어려움
	열적 처리	×	소각	○	○	○	○	○	○	○	×	•고비용
		○	열탈착공법	○	○	○	○	○	○	○	△	•비용 중간 수준

※ 적용성 : ○ 높음 △ 중간 × 낮음

그리고 공사 수행 중, 국내에서는 오염 토양 및 지하수를 자력 복구하는 경우, 통상 800 ppm을 오염정화목표로 하고 있으므로, 정부 예산으로 시행하는 사업이 법적 기준만을 목표로 하기보다는 위해성 평가 개념을 함께 고려하는 것이 합리적이며, TPH 2,000 ppm이상의 토양을 굴착하는 경우, 굴착사면의 안정을 위하여 굴착 깊이에 따라 여유를 주게 되면, 약 800 - 1,000 ppm 의 오염농도를 갖은 토양이 함께 굴착되는 경우가 많으므로 가능한 한 정밀한 굴착계획을 수립하여 오염토양을 최대한 굴착하면, 추가 토양 발생에 의한 사업비 증가 없이 오염토양의 대부분을 제거할 수 있을 것으로 판단되었다.



그림 11. 농경작법.

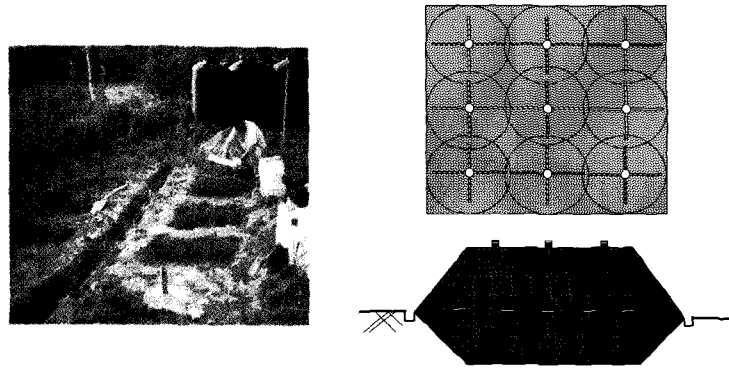


그림 12. 바이오파일 공법.

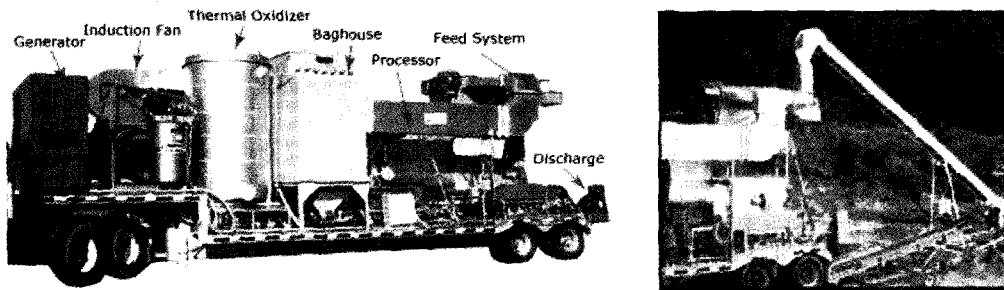


그림 13. 열탈착 설비.

7. 결 언

현재 유류오염 토양/지하수의 조사 및 복원에 대해서는 전세계 각국에서 새로운 기법과 공법이 개발되어 적용되고 있다. 아직까지 우리 나라는 외국에서 개발된 기술의 도입과 적용단계에 머물러 있는 실정이다. 그런데 외국에서 개발된 공법은 반드시 우리 나라 상황에 맞추어 적용시켜야 하며, 따라서 실제 적용사례가 없는 공법에 대해서는 그 효과를 예상하기에 어려움이 많다. 또한 아직까지 국내에서 실용화된 사례가 적기 때문에 실증실험의 수행은 이에 대한 보완책으로서 매우 유용할 것이며, 관계법령이 점차 강화되는 최근의 상황에 부응하고 경제적이면서 효과적인 오염 토양/지하수 복원을 위해서는 지속적인 조사기법과 복원기술의 개발이 반드시 병행되어야 한다.

참고문헌 (본문에 직접 인용되지는 않았슴)

농업기반공사, 2001, 오염토양 효율적 복원을 위한 최적방안 연구.

환경부, 2001, 토양환경보전법.

AFCEE, 1998, Handbook for remediation of petroleum-contaminated sites (A risk-based strategy).

Boulding, J. R., Practical handbook of soil, vadose zone, and ground-water contamination (Assessment, Prevention, and Remediation): *Lewis*.

Calabrese, E. J., and Kostecki, P. T., 1989, Petroleum contaminated soils (Vol. 2): *Lewis*.

Japan Environment Agency, 1999, Survey and countermeasure guidelines for soil and groundwater contamination.

Kovalick, W. W., and Kingscott, J., 1996, Status of remediation technology in the United State: *2nd Intl' congress on environmental geotechnics*, 285~300.

Meyers, R. A., 1998, Environmental analysis and remediation: *John Wiley & Sons*.

U.S. EPA, 1996, How to effectively recover free product at leaking underground storage tank sites (A guide for state regulators).

U.S. EPA, 1993, Subsurface characterization and monitoring techniques (A desk reference guide, Vol. 1).

U.S. EPA, 1993, Subsurface characterization and monitoring techniques (A Desk reference guide, Vol. 2).

U.S. EPA, 1993, Use of airborne, surface, and borehole geophysical techniques at contaminated sites (A reference guide).