

오염토양 정화 설계

- 대규모 유류오염 토양 정화현장 적용 사례를 중심으로 -

김 정 호 SK건설(주)

1. 서론

국내의 토양환경보전법은 1995년 제정되어 수차례 개정작업이 이루어졌고, 지난해 말 그 규정을 강화하는 방향으로 시행령과 시행규칙의 개정이 입법예고 된 상태이다. 필자가 서두에 기술적인 내용이나 방향보다는 관련 법을 언급한 이유는 환경 정화의 궁극적인 달성 목표 및 기준이 바로 관련 법규이기 때문이다.

그럼에도 불구하고 국내의 토양환경보전법은 그 이력이 매우 짧고 적용하기 매우 난해한 경우도 종종 발생되고 있으며, 아직까지 기술적인 한계의 반영이 적절하지 못하고 다른 법규들과의 충돌 및 국내의 다양한 여러 여건들을 충분히 반영하지 못하고 있는 경우도 있다.

관련법의 적용 이외에도 토양 정화의 설계과정 중에는 매우 복잡하고 어려운 문제들을 조우하게

된다. 이는 단순 기술적 어려움 뿐만 아니라 여러 가지 외적 변수들에 대한 이해와 고려가 절대적으로 중요함을 의미한다. 예컨대, 기술적으로는 오염특성에 대한 규명, 부지 특이적 특성 이해, 정화기간에 따른 정화공법의 결정 및 비용 분석 등을 들 수 있으며, 외적 변수들로는 부지 내(on-site)에서 처리할 것인지, 부지 밖(off-site)으로 이송하여 처리할 것인지, 사회적 요구와 부지의 향후 활용 계획에 따라 어느 수준까지 정화하여야 할지에 대한 여러 가지 변수들을 복합 고려하여 설계에 반영해야 한다.

본 기사의 내용은 특정 토양정화 기술에 대한 상세한 언급은 지양하고 토양오염 정밀조사 후 토양정화 설계에 관한 전체 흐름을 포괄하는 내용으로 구성하되, 실제 유류로 오염된 대규모 현장에서 적용된 사례를 중심으로 기술하고자 한다.



2. 토양의 정의 및 토양정화의 범위

토양(Soil)은 학문분야에 따라 다양하게 정의된다. 농학과 식물학에서의 토양은 식물이 생장하는 매체로, 공학에서의 토양은 지표면과 암반층 사이에 존재하는 물질로, 그리고 토양학에서의 토양은 물리·화학적 과정을 거쳐 생성된 지구 표면에 있는 광물과 유기물층으로 정의된다.

그러면 우선, 우리가 학부 때 배운 토질역학에서의 흙과 토양환경공학에서 정화대상이 되는 오염된 토양에 대해서 파악해 보자.

토질역학에서 흙(Soil)이라 함은 3相으로 정의하며, 흙(Soil)은 토립자(Solid), 물(Water), 공기(Air)로 구성된다. 토양환경공학에서 오염된 매체를 정화해야 하는 범위도 바로 흙을 구성하는 3개의 항목으로 귀착시킬 수 있다.

따라서 토양환경에서 토양이라 함은 토질역학에서의 흙(Soil)에 해당될 수 있으며, 오염된 토양의 정화범위는 오염된 토립자의 정화, 오염된 물(지하수)의 정화, 오염된 공기의 정화 공정으로 구성된다(그림 1).

3. 토양정화 공정의 설계

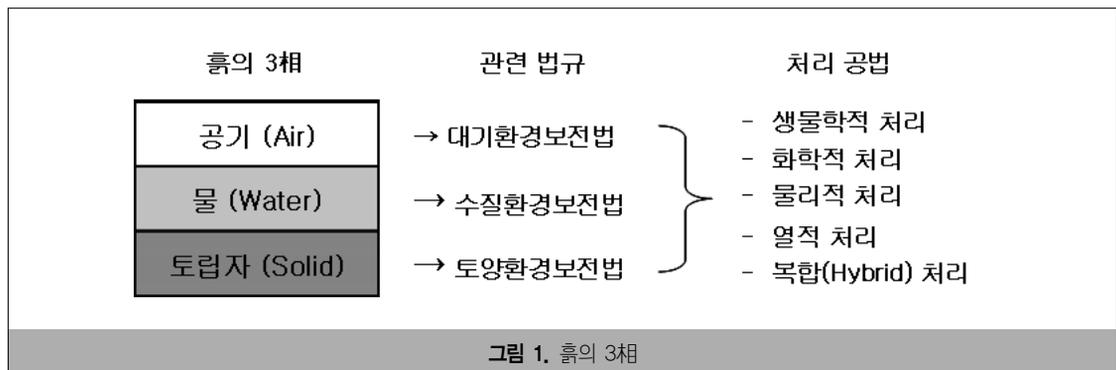
토양오염 정밀조사 결과를 이용한 토양정화 공법의 설계절차는 크게 사전조사 단계, 정화공법의 선정 단계, 적용성 시험 단계, 공정설계 단계의 4 단계를 거쳐 설계를 수행하게 된다(그림 2).

3.1 사전조사(오염의 확인 및 확산 조사)

대부분의 오염된 토양을 정화해야 하는 부지의 경우 여러 이해관계자들이 복잡하게 얽혀 있고, 오염원 및 오염유발자의 확인과 오염범위에 대한 논란 등 환경문제와 직면하는 여러 가지 이유로 인하여 정밀조사가 수행된 후에도 적게는 수개월에서 많게는 수년이 지난 후야 설계에 착수되는 경우가 더러 있다. 이런 경우 설계를 수행하기 전 정밀조사 결과의 확인 및 확산에 대한 사전조사가 반드시 수행되어야 한다.

사전조사는 주로 토양과 지하수에 대한 조사를 수행한다.

토양의 경우 기존 확인된 오염지역의 변화양상



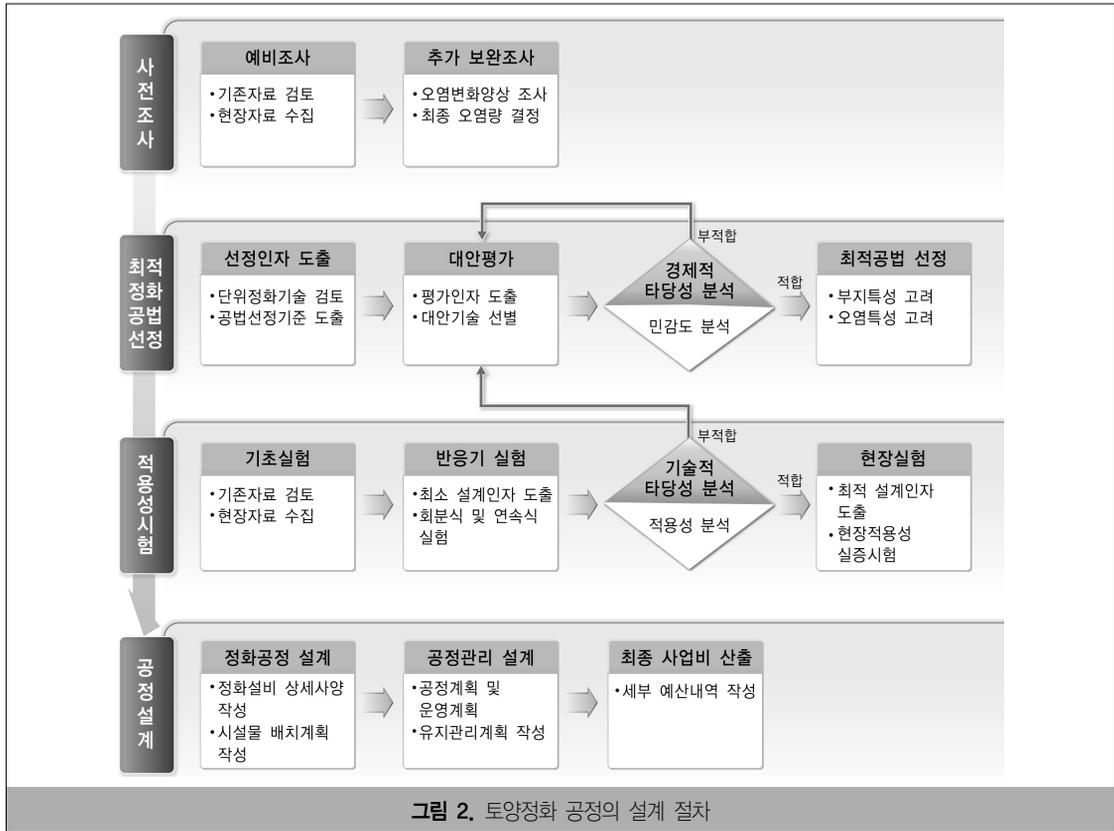


그림 2. 토양정화 공정의 설계 절차

을 위주로 수행하되, 토양의 오염농도 변화 및 대 상부지 내·외부 확산여부 및 이에 따른 기존 오염 플럼(plume)의 농도 변화여부도 조사하여야 한다. 지하수의 경우 정밀조사 결과시 자유상유 류(LNAPL) 존재 지역을 중심으로 반경을 넓혀 해당지점보다 수두가 낮은 지역을 집중적으로 조 사하여야 한다. 토양이나 지하수 오염은 주로 지 하수의 유동에 의해 진행되기 때문에 지하수의 유동특성과 흐름방향 예측은 사전조사의 범위 및 측점 개수를 정하는데 매우 중요한 기준이 되며, 아래의 그림 3에 추가조사 지점의 위치선정 예를 도식화 하였다.

3.2 정화공법의 선정

3.2.1 오염토양 정화공법의 선정

오염토양 정화공법 선정은 크게 정화공법 선 별, 정화대안 평가, 정화공법 선정의 3가지 단계 를 거쳐 선정된다(그림 4).

오염토양 정화 공법은 우선 오염부지 내에서 처리가능한지 여부에 따라 부지내(on-site) 처리 와 부지외(off-site) 처리로 구분하고, 부지내 처 리는 굴착 후(ex-situ) 처리와 굴착하지 않고 지 중에서 처리하는 지중(in-situ) 처리로 구분된다. 표 1은 토양정화 공법의 선정과정 중 1단계로 대



그림 3. 기존 조사결과와 오염확인지점에 대한 확산범위 산정기준 예

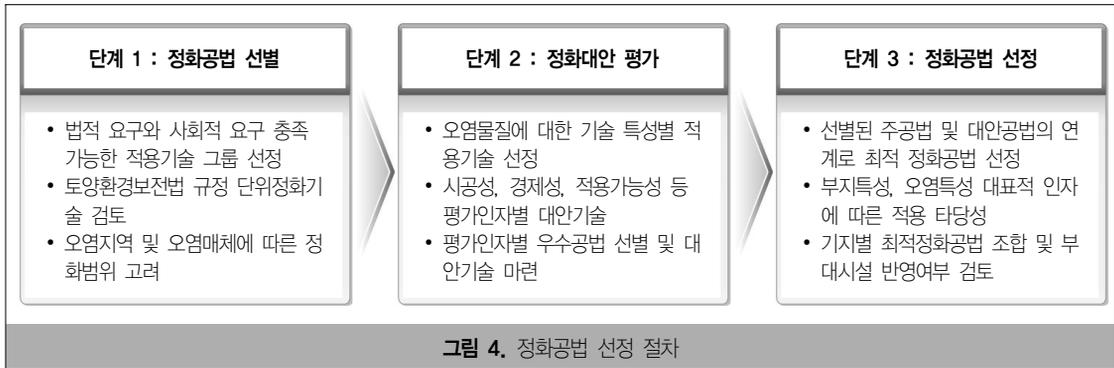


그림 4. 정화공법 선정 절차

표 1. 1단계 : 부지특성을 고려한 정화공법 선별(예)

(단위 : 개)

정화위치		특징	단위 토양정화기술			정화공법 선정
			생물학적처리	물리화학적처리	열적처리	
부지내처리 (On-site)	굴착후 처리 (ex-situ)	<ul style="list-style-type: none"> 정화효율 검증용이 정화사업의 신속성 불확실성에 따른 위험 부담 최소 	<ul style="list-style-type: none"> 퇴비화법 토양경작법 자연저감법 바이오파일법 식물재배법 	<ul style="list-style-type: none"> 화학적산화법 토양세척법 고형화/안정화법 	<ul style="list-style-type: none"> 열분해법 저온열탈착법 소각법 	<ul style="list-style-type: none"> 굴착후처리 (ex-situ) 공법 선정
	지중처리 (in-situ)	<ul style="list-style-type: none"> 지상시설물 제약 없음 지상처리대비 경제적 불확실성에 따른 위험 부담 높음 공법연계 한계 	<ul style="list-style-type: none"> 생물학적특정기법 생물학적분해법 식물재배법 자연저감법 	<ul style="list-style-type: none"> 화학적산화법 동전기법 토양세정법 용제추출법 	<ul style="list-style-type: none"> 전극가열법 	
부지외처리 (off-site)	<ul style="list-style-type: none"> 부지개발 신속용이 굴착/개발 동시 추진 현행법상 적용제한 	<ul style="list-style-type: none"> 토양경작법 바이오파일법 	<ul style="list-style-type: none"> 화학적산화법 토양세척법 	<ul style="list-style-type: none"> 저온열탈착법 소각법 		

상부지에 적용 가능한 토양정화 공법을 선별한 예로서, 대상부지가 넓고 부지내 토양굴착에 따

른 제한사항이 적으며, 처리효율이 높은 굴착후 처리(ex-situ) 공법을 선정한 예이다.

표 2는 토양정화 공법의 선정 과정 중 2단계로 오염물질 종류와 정화공법의 기술적 특성을 고려한 정화대안을 평가한 예로서, 대상부지의 오염토양은 토양경작법, 토양세척법 및 열탈착법이 주공법으로 선별되었고 화학적산화법을 토양경작의 연계공법으로 적용된 예이다.

토양정화 공법 선정의 3단계는 선정된 정화공법의 평가항목 별 가중치에 따른 타당성 분석으로서, 2가지 이상의 공법 적용시 소요기간 및 공

법별 적용 오염토양의 양에 따른 비용분석을 통해 최적 정화공법의 조합을 수행하는 단계이다. 그림 5는 2단계에서 선별된 3가지 공법(토양경작법, 토양세척법, 저온열탈착법)에 대한 민감도 분석(오염농도에 따른 적용공법의 비용 분석)을 통해 최적 선정된 공법의 분배 예이다.

이에 따라 해당부지에 최종 선정된 공법은 저온 열탈착법을 제외한 토양경작법과 토양세척법이 적용되었다.

표 2. 2단계 : 오염물질 종류와 정화공법의 기술적 특성을 고려한 정화대안 평가(예)

토양 정화공법	평가 요소					오염물질			선정 여부	적용대상	채택여부
	시공성	경제성	상용성	용이성	소요 기간	(유류) 고농도	(유류) 저농도	중금속			
퇴 비 화	△	△	×	×	△	△	○	×			
토 양 경 작 법	○	○	○	○	△	△	○	×	●	저농도유류	주공법
자 연 저 감 법	○	○	×	×	△	×	○	×			
바 이 오 파 일 법	○	△	○	○	△	△	○	×			
화 학 적 산 화 법	△	△	○	×	○	○	○	×	▲	저농도유류	토양경작연계공법
토 양 세 척 법	△	△	○	○	○	○	○	○	●	고농도유류	주공법
고 형 화 / 안 정 화	△	○	×	×	○	×	×	○			
열 분 해 법	×	×	×	×	○	△	△	×			
저 온 열 탈 착 법	○	△	○	○	○	○	○	△		고농도유류	주공법
소 각 법	△	×	×	×	○	△	○	×			
식 물 재 배 법	△	△	×	×	×	△	○	○			

(주) ● 채택, ○ 양호, △ 보통, × 불량

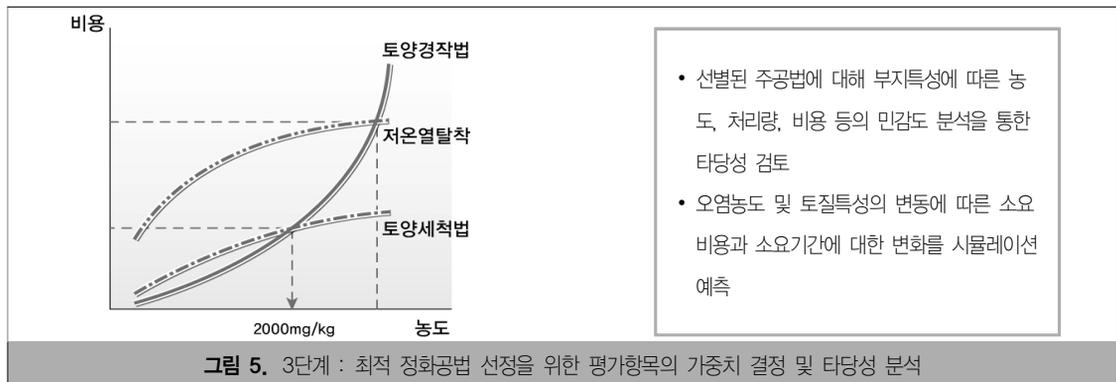


그림 5. 3단계 : 최적 정화공법 선정을 위한 평가항목의 가중치 결정 및 타당성 분석



3.2.2 오염지하수 정화공법의 선정

오염지하수 정화공법의 선정은 지하수 오염의 특성 및 범위에 따라 양수(굴착배수 또는 양수정)하여 일정규모의 처리장에서 처리(pumping & treatment)할 것인지 또는 별도의 양수철차 없이 지중에서 처리(in-situ)할 것인지를 우선 결정하고, 지하수 수질정화기준과 방류수 수질기준을 동시에 만족시킬 수 있는 정화공법 선정하여야 한다. 표 3은 오염지하수 정화공법의 선정을 위한 정화대안을 평가한 예이다. 본 예에서는 현장적용성이 뛰어난 양수처리를 주공정으로 선정하였으며, 처리방법은 현장적용성시험을 통해 결정하였다.

3.2.3 사전안정화 공법의 선정

사전안정화 공법의 적용은 다음의 2가지 목적을 가진다. 지중에 존재하는 휘발성 유기화합물(VOCs)을 오염토양 굴착 전 제거하여 대기오염 방지 및 작업자의 안전을 위한 것이 첫 번째 목적이고, 일부 자유상 유류를 회수하여 자유상유류의 유동을 굴착 전에 방지하는 것이 두 번째 목적이다. 사전안정화 공정의 선정 및 정화대안 평가의 예를 다음의 표 4에 나타냈으며, 해당 오염부지의 경우 정화적용 위치 및 오염분포현황 등의 부지특성을 고려하여 휘발성 유기화합물은 다중상추출법, 자유상유류의 경우 트렌치양수법을 선정하였다.

표 3. 지하수 정화 공법의 선정을 위한 정화대안 평가(예)

지하수 정화공법	평가 요소						오염물질		선정 여부	적용대상
	시공성	경제성	상용성	용이성	소요 기간	외부확산 가능성	TPH	BTEX		
화학적산화	△	×	×	○	○	△	○	○		
양수처리	○	○	○	○	○	△	○	○	●	오염지하수
투수성반응벽체	△	△	×	×	△	△	×	○		
여과	×	△	○	○	△	△	△	△		
이온교환수지	×	×	△	×	△	△	×	×		
활성탄흡착	△	△	△	△	△	×	×	○		

(주) ● 채택, ○ 양호, △ 보통, × 불량

표 4. 사전안정화 공법의 선정 및 대안평가

처리대상	구 분	평가 요소						효율성	선정여부
		시공성	경제성	상용성	용이성	소요 기간	외부확산 가능성		
휘발성 유기화합물	대기포집법	△	×	×	○	○	△	○	
	다중상추출법	○	△	○	○	○	△	○	●
	증기추출법	○	○	○	△	○	×	○	대안공법
	마스크링법(약품)	△	×	△	×	△	×	△	
자유상유류	다중상추출법	○	△	○	○	○	△	△	대안공법
	트렌치양수법	○	○	○	○	△	○	○	●

(주) ● 채택, ○ 양호, △ 보통, × 불량

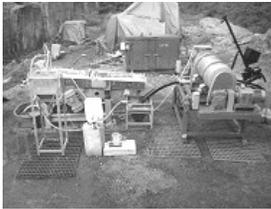
3.3 적용성 시험

기초실험을 토대로 최소 설계인자 도출을 위한 회분식 및 연속식 실험 등의 반응기실험을 수행한다. 이를 토대로 기술적 타당성 및 적용성을 분석하여 적합할 경우 설계인자 도출을 위해 현장 실증시험을 수행한다(표 5).

3.4 토양정화 공정의 설계 (공정 조합)

토양정화 공정의 설계는 오염토의 굴착 및 이송 동선을 최소화하여 대상부지의 활용 가능한 비오염 지역에 정화시설물을 우선 배치하고, 각 공정들의 처리 절차 및 오염토양의 경로를 추적하는 시스템으로 설계되어야 한다.

표 5. 적용성 시험 내용

구분	항목	세부내용	예시
실험실 실험	기초 실험	<ul style="list-style-type: none"> 오염물질 물리화학적 특성 조사 제반환경인자의 측정 환경인자 결과치 회분식 실험 조건 반영 	
	반응기 실험	<ul style="list-style-type: none"> 기초 실험결과를 반영한 소규모 반응기 제작 비연속식 및 연속식 조작의 소규모 실험 다양한 실험조건에 따른 효율 실험 공법별 예상 처리기간 파악 	
현장 실험	파일럿 실험	<ul style="list-style-type: none"> 규모 증가된 시제품제작을 거친 공법운영모사 공법운영 모사를 통한 실질적 현장 시험 정화활동의 효과와 정화목표의 도달여부 결정 효율안정성 검증 정화공정 2차오염물질 발생량 모니터링 기계장치, 전기장치 등의 기계적 인자 확인 	

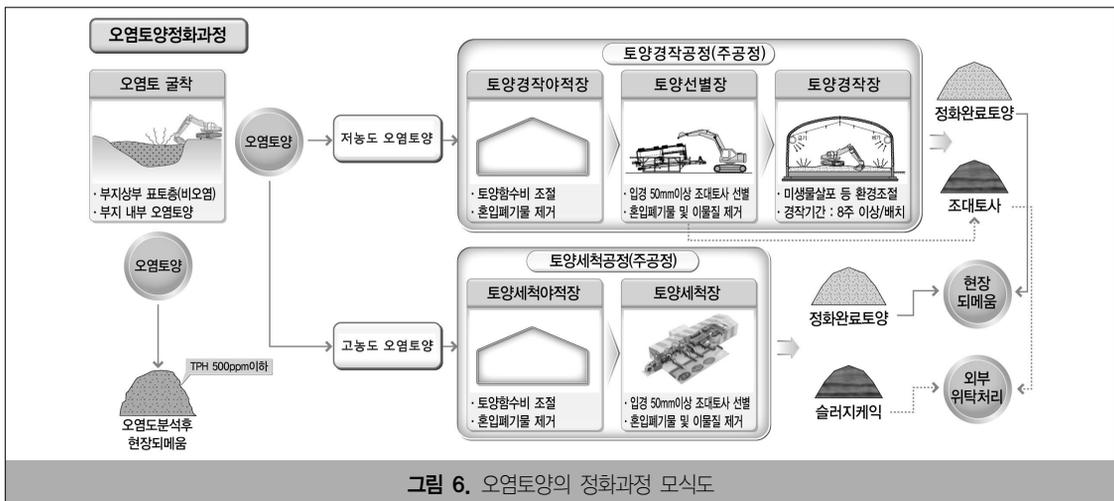


그림 6. 오염토양의 정화과정 모식도



정화대상 부지에 따라 다소 차이는 있겠지만, 그림 6은 대상부지의 오염토양의 굴착에서부터 각각의 공정(토양경작공정 및 토양세척공정)을 거쳐 되메움까지의 정화과정을 모식화 한 예이다.

4. 맺음말

오염토양의 정화 설계는 다양한 현장경험을 토

대로 수행되어야 한다. 즉, 전체 공정에 대한 운영 경험이나 명확한 이해 없이는 설계와 시공이 전혀 맞지 않는 상황이 발생할 수도 있기 때문이다.

물론 일각에서는 정화사업을 설계보다는 현장 운영에 더 큰 무게를 두는 면도 있지만, 중요한 것은 올바른 현장 운영은 올바른 설계를 바탕으로 이루어진다는 것이다. ☺

참 고 문 헌

1. “ ”, ,
2. “ 가 ”, 2007.,
3. “ ”, 2001. 12., 2001-186
4. “ ”, 2001.,
5. “〇〇〇〇 ”