

행정간행물등록번호
11-1480000-000841-01

오염토양 정화방법 가이드라인

2007

오염토양 정화방법 가이드라인

2007

mev 환경부

행정간행물등록번호
11-1480000-000841-01

오염토양 정화방법 가이드라인

2007

 환경부

발 간 사

우리나라는 1960년대 이후 공업화정책에 힘입어 고도경제성장을 이루었으나 이러한 공업화정책으로 에너지와 화학물질 등의 사용량 증가로 인한 환경오염이 불가피하였습니다. 특히 이들 석유류 및 화학물질 취급/저장 시설들로부터의 누출에 의한 토양오염은 잠재성과 시차성이 커서 수질이나 대기 등 다른 매체에 비해 효율적인 관리가 어려운 특성을 가지고 있습니다.

토양은 고정된 상태에서 유지되는 환경자산으로 국가에 의한 최소한의 규제 및 보전이 필요한 유한 자산입니다. 이에 미국 및 유럽을 비롯한 선진국에서는 토양 환경을 보전하기 위해서 지난 수십여 년에 걸쳐 수많은 시행착오와 연구를 거치면서 제도적으로, 기술적으로 발전되어 왔었습니다만, 국내에서는 1995년 토양환경보전법 제정을 시작으로 본격적인 토양오염관리를 위한 체계를 갖추기 시작하였습니다.

최근에는 국민 생활수준의 향상과 더불어 토양오염관리에 보다 많은 관심을 가지게 되었지만 관련업무 종사자들이 오염토양의 정화 등 토양오염관리를 위해 현장에서 활용할 수 있는 관련 정보의 부족으로 업무수행에 많은 어려움을 겪고 있는 실정입니다.

이에 본 책자는 국내·외에서 가장 보편적으로 상용화되고 있는 토양정화기술들을 분류·설명하였으며, 표준화된 지침의 보급이 시급한 기술들을 우선적으로 선정하고 구체적인 적용방법, 설계기준, 운영요령 등을 수록하여 관련 업무담당자들이 효과적으로 참고할 수 있도록 작성하였습니다.

본 책자가 토양정화분야에 종사하는 분들에게 조금이나마 도움이 될 수 있기를 기원하며 그간 노력을 아끼지 않은 토양지하수과, 환경관리공단 토양지하수처 직원들과 자문위원들의 노고를 치하하는 바입니다.

또한 관련 자료를 활용할 수 있도록 허락해 준 미국 환경청에도 감사를 드리며, 앞으로 본 책자가 좀더 유용한 참고자료로 거듭나기 위해서 관련 학계 및 산업계 전문가 여러분들의 많은 조언과 제안을 부탁드립니다.

2007. 3.

환경부장관 이 치 범

목 차

제 I 장. 서 론	1
제 II 장. 오염토양 정화방법별 기술현황 조사	3
1. 오염토양 정화기술	2
2. 국외(미국)의 오염토양 정화관련 기술 현황조사	5
3. 국내의 오염토양 정화관련 기술 현황조사	12
제 III 장. 오염토양 정화사업과 관련된 제반 규정 및 업무범위 분석 ...	15
1. 오염토양 정화사업 관련 국내 제반 법령·규정에 대한 조사 및 분석	15
1.1 토양환경보전법	15
1.2 폐기물관리법	20
1.3 수질환경보전법 및 지하수법	21
1.4 유해화학물질관리법, 위험물안전관리법 등 토양 정화와 관련된 법령 및 인허가 사항	22
2. 토양정화 업무관련 추진체계	23
3. 오염토양 정화사업 추진절차에 따른 세부업무 범위 조사	25
3.1 토양오염도검사	28
3.2 토양 정밀조사	28
3.3 적용성평가 및 설계	30
3.4 오염토양 정화공사	31
3.5 토양정화의 검증	33
제 IV 장. 정화사업 추진 절차에 따른 가이드라인	35
1. 가이드라인 대상 정화기술 선정	35
2. 생물학적통풍법(Bioventing)	36
2.1 기술개요	36
2.2 생물학적통풍법 정화계획의 유효성 평가절차	38
2.3 생물학적통풍법의 초기 적용성 평가	38

2.4 생물학적통풍법의 세부 적용성 평가	39
2.4.1 오염부지 특성에 따른 주요 영향인자	40
2.4.2 오염물질 특성에 따른 주요 영향인자	46
2.4.3 현장 및 실험실 실험	49
2.5 생물학적통풍법의 설계 평가	51
2.5.1 설계를 위한 기본 정보	51
2.5.2 생물학적통풍법 시스템 구성요소	53
2.6 운영 및 모니터링 계획의 평가	57
2.7 생물학적통풍법 적용성 평가 및 정화공정 효율 평가 항목	59
3. 토양증기추출법(Soil vapor extraction, SVE)	61
3.1 기술개요	61
3.2 토양증기추출법 정화계획의 유효성 평가절차	62
3.3 토양증기추출법의 초기 적용성 평가	63
3.4 토양증기추출법의 세부 적용성 평가	63
3.4.1 토양투수성에 영향을 미치는 인자	65
3.4.2 오염물질 휘발성에 영향을 미치는 인자	67
3.4.3 처리가능성 실험	68
3.5 토양증기추출법의 설계 평가	69
3.5.1 설계를 위한 기본 정보	69
3.5.2 토양증기추출법 시스템 구성요소	71
3.6 운영 및 모니터링 계획의 평가	72
3.6.1 초기운영	72
3.6.2 장기운영	73
3.7 토양증기추출법 적용성 평가 및 정화공정 효율 평가 항목	74
4. 토양경작법(Landfarming)	75
4.1 기술개요	75
4.2 토양경작법 정화계획의 유효성 평가절차	77
4.3 토양경작법 적용성 평가	77
4.3.1 토양특성에 따른 주요 영향인자	78
4.3.2 오염물질 특성에 따른 주요 영향인자	81

4.3.3 기후조건에 따른 주요 영향인자	83
4.3.4 생물학적처리(Biotreatability)평가	84
4.4 토양경작법 설계에 대한 평가	84
4.5 운영 및 모니터링 계획의 평가	86
4.6 토양경작법 적용성 평가 및 정화공정 효율 평가 항목	88
5. 화학적산화법(Chemical Oxidation)	90
5.1 기술개요	90
5.1.1 과산화수소와 펜톤산화제	93
5.1.2 과망간산염	98
5.1.3 오존	99
5.2 화학적 산화법 정화계획의 유효성 평가절차	101
5.3 화학적 산화법 초기 적용성 평가	101
5.3.1 실현가능성(Overall Viability)	102
5.3.2 화학적 산화법의 잠재적인 적용성	103
5.4 화학적 산화법의 세부 적용성 평가	104
5.4.1 오염부지 특성에 따른 주요 영향인자	105
5.4.2 오염물질 특성에 따른 주요 영향인자	110
5.5 화학적 산화법의 설계 평가	112
5.5.1 화학적 산화법의 설계를 위한 기본정보 및 정화목표	113
5.5.2 화학적 산화제 선정	115
5.5.3 설계시 검토사항	116
5.5.4 화학적 산화시스템 구성요소	118
5.6 운영 및 모니터링 계획의 평가	123
5.7 화학적 산화법 적용성 평가 및 정화공정 효율 평가 항목	126
6. 저온열탈착법(Low-Temperature Thermal Desorption)	128
6.1 기술개요	128
6.2 저온열탈착법 정화계획의 유효성 평가절차	130
6.3 저온열탈착법의 적용성 평가	130
6.3.1 토양특성에 따른 주요 영향인자	131
6.3.2 오염물질 특성에 따른 주요 영향인자	134

6.3.3 열탈착 공정운영 조건	137
6.3.4 실증실험	138
6.4 저온열탈착법의 실용성 평가	139
6.4.1 오염토양의 수직 및 수평 분포	139
6.4.2 부대시설 배치	139
6.4.3 주변 부지여건	140
6.5 운영 및 모니터링 계획의 평가	140
6.6 저온열탈착법 적용성 평가 및 정화공정 효율 평가 항목	141

제 V 장. 선진 외국의 정화방법 관련 기술자료 143

참고문헌	148
부록 제1장. 정화기술 선정 방법	151
부록 제2장. 토양오염물질 분류	159
부록 제3장. 오염토양 정화기술 개요	165

〈표 차례〉

[표 2-1]	오염토양 정화기술의 분류	3
[표 2-2]	오염토양 정화기술의 종류(FRTR, 2002)	4
[표 2-3]	국내 오염토양 정화기술의 종류	4
[표 2-4]	수퍼펀드 부지 오염물질별 기술 적용현황(1982~2002)	11
[표 3-1]	정화사업 추진절차에 따른 세부업무범위	25
[표 4-1]	생물학적통풍법의 기술분류 및 처리기술	37
[표 4-2]	생물학적통풍법 장·단점	37
[표 4-3]	생물학적통풍법의 주요 영향인자	40
[표 4-4]	관정에 주입하는 공기 유량에 따른 지중 산소 공급량	41
[표 4-5]	토양의 고유투수계수에 따른 생물학적통풍법의 적용성	41
[표 4-6]	중속영양미생물의 농도 및 생물학적통풍법의 적용성	43
[표 4-7]	토양 pH 및 생물학적통풍법의 적용성	44
[표 4-8]	지하수위와 생물학적통풍법의 적용성	45
[표 4-9]	석유계 화학물의 상대적 생분해성(Biodegradability)	46
[표 4-10]	오염물질의 농도 및 생물학적통풍법의 적용성	47
[표 4-11]	석유계 화합물 구성 성분들의 증기압	48
[표 4-12]	주요 석유계 화합물의 끓는점	48
[표 4-13]	주요 석유계 화합물 구성성분의 헨리상수	49
[표 4-14]	적용부지 조건에 따른 관정설치 조건	54
[표 4-15]	모니터링 측정항목 및 시료채취 주기	58
[표 4-16]	토양증기추출법의 기술분류 및 처리물질	61
[표 4-17]	토양증기추출법의 장·단점	61
[표 4-18]	토양증기추출법의 주요 영향인자	64
[표 4-19]	토양의 고유투수계수에 따른 토양증기추출법의 적용성	65
[표 4-20]	지하수위와 토양증기추출법의 적용성	66
[표 4-21]	석유계 화합물 구성 성분들의 증기압	67
[표 4-22]	주요 석유계 화합물의 끓는점	68
[표 4-23]	주요 석유계 화합물 구성성분의 헨리상수	68

[표 4-24]	모니터링 측정항목 및 시료채취 주기	73
[표 4-25]	토양경작법의 기술분류 및 처리물질	76
[표 4-26]	토양경작법의 장·단점	76
[표 4-27]	토양경작법의 주요 영향인자	77
[표 4-28]	중속영양미생물의 농도 및 토양경작법의 적용성	78
[표 4-29]	토양 pH 및 토양경작법의 적용성	79
[표 4-30]	토양수분함량 및 토양경작법의 적용성	79
[표 4-31]	토양온도 및 토양경작법의 적용성	80
[표 4-32]	석유계 화합물의 상대적인 생분해성(Biodegradability)	82
[표 4-33]	오염물질의 농도 및 토양경작법의 적용성	82
[표 4-34]	모니터링 측정항목 및 시료채취 주기	87
[표 4-35]	화학적 산화법의 기술분류 및 처리물질	91
[표 4-36]	화학적 산화법의 장·단점	92
[표 4-37]	산화제 장·단점 비교	94
[표 4-38]	화학적 산화법의 주요 영향인자	104
[표 4-39]	지하수내 무기물질의 산화반응	106
[표 4-40]	유기물질의 산화 화학양론	107
[표 4-41]	고유투수계수에 따른 화학적 산화 효과	108
[표 4-42]	유류 오염물질의 용해도	111
[표 4-43]	화학적산화 시스템 설계를 위한 기본정보	114
[표 4-44]	화학적 산화제의 상대적 산화력	116
[표 4-45]	화학적 산화제법 설계시 고려사항	117
[표 4-46]	과산화수소/펜톤 산화제 주입시스템	119
[표 4-47]	과망간산염 산화제 주입시스템	120
[표 4-48]	오존 주입시스템	121
[표 4-49]	모니터링 측정항목 및 시료채취 주기(지하수)	124
[표 4-50]	모니터링 측정항목 및 시료채취 주기(토양증기 및 토양시료)	125
[표 4-51]	저온열탈착법의 기술분류 및 처리물질	129
[표 4-52]	저온열탈착법의 장·단점	129
[표 4-53]	저온열탈착법의 주요 영향인자	131

[표 4-54] 주요 석유계 화합물질의 끓는점	136
[표 4-55] 모니터링 측정항목 심 시료채취 주기	140
[표 5-1] 오염토양 지중처리기술 자료 목록	145
[표 5-2] 오염토양 지상처리기술 자료 목록	147

<그림 차례>

[그림 2-1] 오염물질 처리기술	2
[그림 2-2] 수퍼펀드 부지의 기술 적용 현황(1982~2002)	6
[그림 2-3] 수퍼펀드 부지의 기술 적용 현황(2000~2002)	8
[그림 2-4] 수퍼펀드 부지에서의 지상처리기술 적용 추세	8
[그림 2-5] 수퍼펀드 부지 혁신기술 적용현황	10
[그림 2-6] 수퍼펀드 부지 혁신기술 적용추세	10
[그림 2-7] 국내 오염토양정화사업 적용기술현황(2000~2006년)	13
[그림 2-8] 국내 오염토양정화사업 세부 적용기술 현황(2000~2006년)	14
[그림 3-1] 국내 정화제도 운영 흐름도	24
[그림 3-2] 오염토양 정화사업관련 업무추진 흐름도	27
[그림 4-1] 생물학적통풍법 모식도	37
[그림 4-2] 생물학적통풍법 초기 적용성 검토	39
[그림 4-3] 평판계수법	43
[그림 4-4] 미생물 호흡률 측정실험 결과	50
[그림 4-5] 압력 변화를 측정하여 도출된 영향반경 실험결과	51
[그림 4-6] 전형적인 추출관정	55
[그림 4-7] 토양증기추출법 모식도	62
[그림 4-8] 토양증기추출법 초기 적용성 검토	64
[그림 4-9] 토양경작 시스템	75
[그림 4-10] 일반적인 토양경작장 설치도면	86
[그림 4-11] 화학적 산화법 모식도	92
[그림 4-12] 화학적 산화법의 초기 적용성 평가절차	102
[그림 4-13] 화학적 산화법의 세부 적용성 평가절차	105
[그림 4-14] 저온열탈착 시스템 흐름도	129
[그림 4-15] 토양내 수분함량 대비 에너지 소모량	132
[그림 4-16] 석유계 화합물에 따른 적절한 처리온도	135

제 1 장 서 론

전 세계적으로 토양환경에 대한 관리는 미국, 호주 및 유럽 등 선진국들을 중심으로 관련제도 및 기술의 발전 등을 통해 각 국가별 현지 실정에 맞는 가이드라인(지침서)을 보유함으로써 토양환경을 관리·유지하고 있다. 특히 이러한 가이드라인을 통하여 토양정화방법의 선정 및 정화결과에 대한 신뢰성을 확보함으로써 부실한 정화로 인해 발생할 수 있는 토지소유자 및 토양정화업체의 경제적 손실을 최소화하고 있으며, 궁극적으로는 토양환경보전의 기본 목적을 달성하고 토양환경 관련기술의 발전을 유도하고 있다.

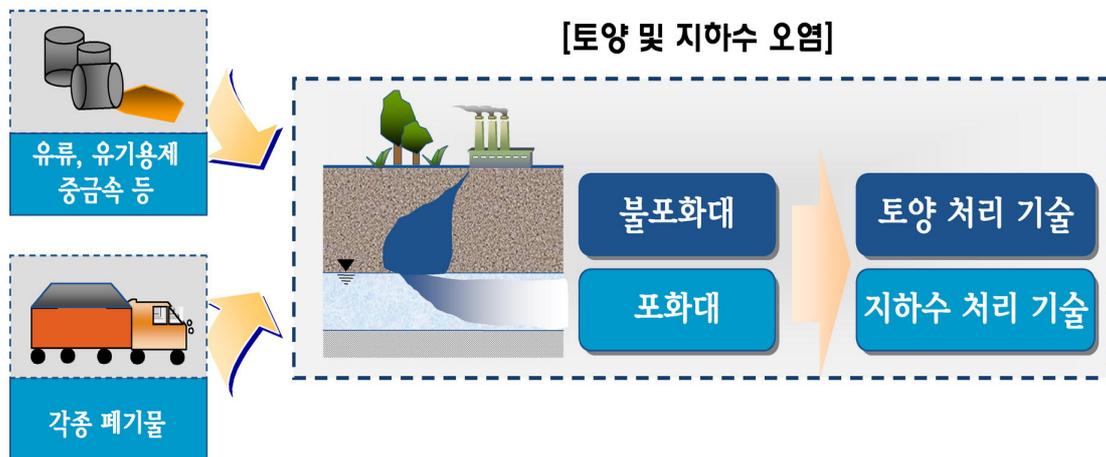
국내에서는 1995년 토양환경보전법 제정을 시작으로 본격적인 토양오염조사 및 정화사업이 시작되었으나, 현행 법규상 오염토양을 처리하기 위한 정화기술 및 방법에 대한 세부적인 지침이 부족한 실정이다. 특히 토양환경보전법 상 오염토양의 정화방법은 “특정토양오염관리대상시설의 방지시설 설치 등에 관한 고시”의 규정에 의거하여 정화토록 정하고 있으나, 각 정화방법에 대한 구체적인 적용방법, 정화시설의 기준, 정화절차에 따른 운영요령 등에 대한 기준이 마련되어 있지 않아 관련종사자들이 업무수행에 어려움을 겪고 있어 현장에서 적용될 수 있는 정화사업 추진절차 등에 관한 가이드라인 마련이 요구되는 실정이다.

따라서 국내·외에서 적용되고 있는 정화방법 및 기술 적용 현황조사 등을 통하여 오염토양 정화방법별, 단계별 운영요령 등 업무수행을 위한 가이드라인을 마련함으로써 오염토양 정화사업 관련업무 종사자들이 현장에서 직접 활용할 수 있는 업무수행지침서를 작성·보급하여 효율적인 업무수행을 위한 참고 자료로 제공하고자 한다.

제 II 장 오염토양 정화방법별 기술현황 조사

1. 오염토양 정화기술

오염된 부지에서의 정화기술은 매우 다양한 형태로 개발되어 현장에 적용되고 있으며 이를 크게 구분하면 [그림 2-1]과 같이 처리대상 매체에 따라 토양 처리기술과 지하수 처리기술 또는 불포화대(Vadose zone) 처리기술과 포화대(Saturated zone) 처리기술로 구분할 수 있다.



[그림 2-1] 오염물질 처리기술

이들 기술들은 다시 오염 부지내에서 처리하는 지중처리(In-situ) 기술과 지상처리(Ex-situ) 기술로 구분되며, 이러한 구분은 오염매체의 굴착(토양의 경우) 또는 양수(지하수의 경우) 공정이 포함되는지의 여부에 따라 결정된다. 즉, 지중처리기술은 오염된 토양 및 지하수를 굴착 또는 양수하지 않고 지중에 관정을 삽입하여 원위치에서 직접 처리하는 기술이고 지상처리기술은 오염된 토양 및 지하수를 굴착 및 양수 후 적절한 처리시설로 이동시켜 처리하는 기술을 말한다.

지상처리기술의 경우 오염토양 및 지하수의 처리과정을 직접 확인할 수 있기 때문에 오염물에 대한 처리공정 관리 및 처리효율 평가가 용이한 반면 굴착(또는 양수), 이송 등에 대한 추가 비용이 소요되며, 처리기간 동안 오염부지의 굴착으로 인하여 부지 사용성이 제한되는 단점이 있다.

한편 지중처리기술의 경우 처리공정이 가시화되지 않으므로 처리효율을 확인하기가 어렵고, 비교적 긴 정화시간과 기술적용 이전 단계에서 면밀한 부지평가 등이 수행되어야 하는 단점이 있으나, 최근 들어 부지평가 및 모니터링 기술이 발달하고, 무엇보다도 처리매체 이송에 따른 비용을 절감할 수 있고 처리기간 중에 부지를 이용할 수 있는 장점으로 인해 지중처리기술이 활발히 적용되고 있는 추세이다.

[표 2-1] 오염토양 정화기술의 분류

기 준	분 류	내 용
오염의 위치	불포화대 처리기술	• 지하수위 상부의 오염토양을 처리하는 기술
	포화대 처리기술	• 지하수위 하부(대수층)의 오염토양과 지하수를 동시에 정화하는 기술
굴착의 유무	지중처리(in-situ) 기술	• 오염된 토양 및 지하수를 굴착 또는 양수하지 않고 지중에 관정을 삽입하여 원위치에서 직접 처리하는 기술
	지상처리(ex-situ) 기술	• 오염된 토양 및 지하수를 굴착 및 양수 후 적절한 처리시설로 이동시켜 처리하는 기술
공정원리	생물학적 처리 기술	• 미생물의 분해작용 및 식물의 흡수작용과 같이 생물학적인 원리를 활용하여 오염토양을 처리하는 기술
	물리·화학적 처리 기술	• 흡착, 화학적 분해 등의 물리·화학적 원리를 이용하여 오염토양을 처리하는 기술
	열적 처리 기술	• 오염토양에 열을 가하여 오염물질을 분리 또는 분해하거나 고정화시키는 기술

오염토양 정화기술은 처리공정에 따라 생물학적 처리기술, 물리·화학적 처리기술, 열적 처리기술로도 분류할 수 있으며 오염물질의 특성 및 부지 특성에 따라 단일 기술로 적용되거나 여러 가지 기술을 복합적으로 사용하기도 한다. [표 2-2]에서는 미국 연방정화기술회의(Federal Remediation Technology Roundtable, FRTR)에서 작성한 오염부지 정화기술에 대한 분류 중 오염토양 정화기술을 정리하였으며, 처리대상 매체별, 처리위치별, 처리방법별로 59개 기술로 세분화하고 있다. 반면 국내의 경우 ‘특정토양오염관리대상시설의 방지시설 등에 관한 고시’에서 처리방법별로 18개 기술로 구분하고 있다[표 2-3].

[표 2-2] 오염토양 정화기술의 종류 [FRTR, 2002]

분 류		처리기술의 종류	
토양 처리 기술	지중 처리 (In-situ)	생물학적 - Bioventing - Enhanced Bioremediation - Phytoremediation	
		물리· 화학적	- Chemical Oxidation - Electrokinetic Separation - Fracturing - Soil Flushing - Soil Vapor Extraction - Solidification/Stabilization
		열적	- Thermal Treatment
	지상 처리 (Ex-situ)	생물학적 - Biopiles - Composting - Landfarming - Slurry Phase Biological Treatment	
		물리· 화학적	- Chemical Extraction - Chemical Reduction/Oxidation - Dehalogenation - Separation - Soil Washing - Solidification/Stabilization
		열적	- Hot Gas Decontamination - Incineration - Open Burn/Open Detonation - Pyrolysis - Thermal Desorption
	차폐		- Landfill Cap - Landfill Cap Enhancements
기타 처리기술		- Excavation, Retrieval, and Off-Site Disposal	

[표 2-3] 국내 오염토양 정화기술의 종류 [환경부 고시 제2005-124호 별표 2]

기 술 명	공 정 개 요
생물학적 분해법 (Biodegradation)	영양분과 수분(필요시 미생물)을 오염토양내로 순환시킴으로써 미생물의 활성을 자극하여 유기물 분해기능을 증대시키는 방법
생물학적통풍법 (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·흡착·침전 등을 통하여 오염토양을 정화하는 방법
퇴비화법 (Composting)	오염토양을 굴착하여 팽화제(bulking agent)로 나무조각, 동식물 폐기물과 같은 유기성 물질을 혼합하여 공극과 유기물 함량을 증대시킨후 공기를 주입하여 오염물질을 분해시키는 방법
자연저감법 (Natural Attenuation)	토양 또는 지중에서 자연적으로 일어나는 회석, 휘발, 생분해, 흡착 그리고 지중물질과의 화학반응 등에 의해 오염물질 농도가 허용가능한 수준으로 저감되도록 유도하는 방법

[표 2-3] 계속

기 술 명		공 정 개 요
물리·화학적 처리 방법	토양세정법 (Soil Flushing)	오염물 용해도를 증대시키기 위하여 첨가제를 함유한 물 또는 순수한 물을 토양 및 지하수에 주입하여 오염물질을 침출 처리하는 방법
	토양증기추출법 (Soil Vapor Extraction)	압력구배를 형성하기 위하여 추출정을 굴착하여 진공상태로 만들어 증으로써 토양내의 휘발성 오염물질을 휘발·추출하는 방법
	토양세척법 (Soil Washing)	오염토양을 굴착하여 토양입자 표면에 부착된 유·무기성 오염물질을 세척액으로 분리시켜 이를 토양내에서 농축·처분하거나, 재래식 폐수처리 방법으로 처리
	용제추출법 (Solvent Extraction)	오염토양을 추출기내에서 solvent와 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 저독성화 시키는 방법
	고형화/안정화법 (Solidification/Stabilization)	오염토양에 첨가제(시멘트, 석회, 슬래그 등)를 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 이동속도를 촉진시켜 포화오염토양을 처리하는 방법
열적 처리 방법	열탈착법 (Thermal Desorption)	오염토양내의 유기오염물질을 휘발·탈착시키는 기법이며, 배기가스는 가스처리 시스템으로 이송하여 처리하는 방법
	소각법 (Incineration)	산소가 존재하는 상태에서 800-1,200℃의 고온으로 유해성 폐기물내의 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

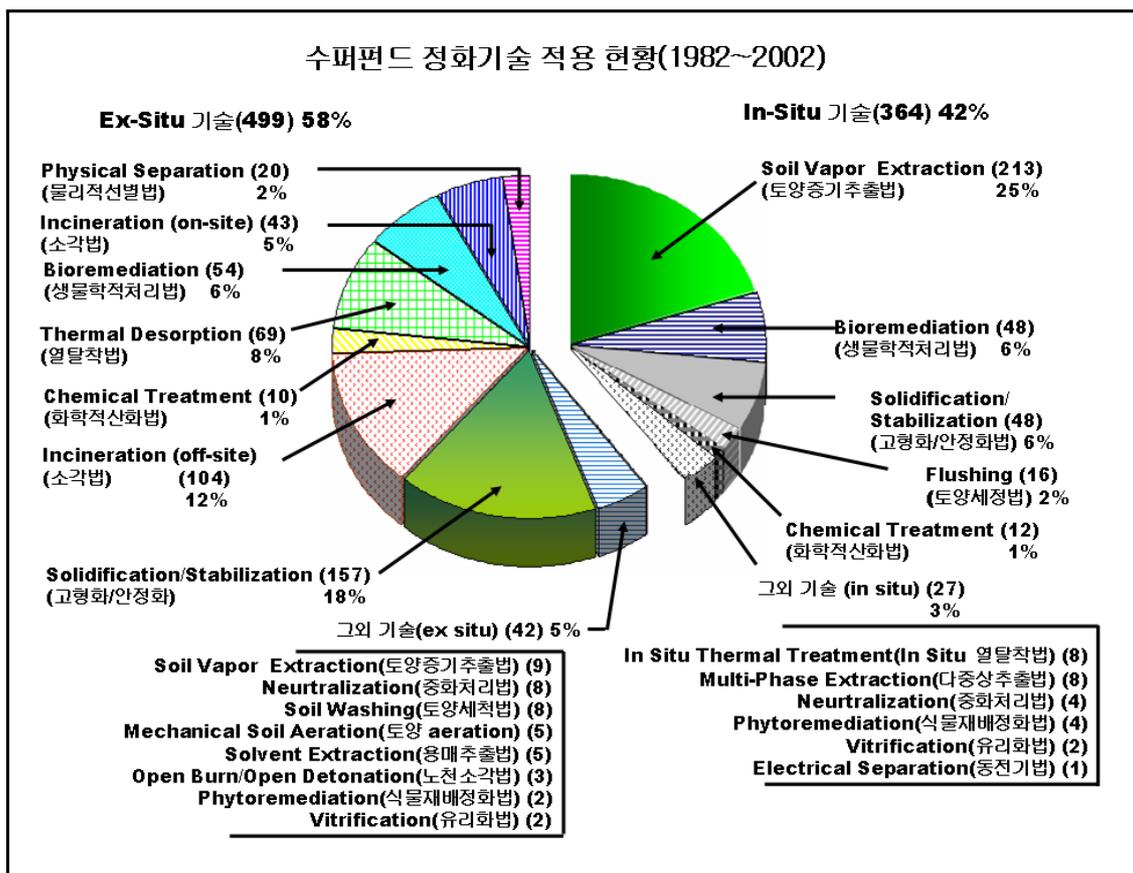
2. 국외(미국)의 오염토양 정화관련 기술 현황조사

미국은 1980년 CERCLA(Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability Act) 법안을 통과시키면서 본격적으로 토양/지하수 오염에 대한 본격적인 관리를 시작하였다. 본 법안에 따라 재원(Superfund)을 조

성하여 토양/지하수 오염지역을 정화하는데 필요한 비용을 지원하고 오염지역에 대한 조사를 통하여 인체 및 환경에 미치는 위해 정도에 따라 우선순위(National Priority List ; NPL)를 정하여 오염지역을 관리하고 있다. 또한 오염지역을 정화하는데 필요한 기술 개발을 지원하고 개발된 기술들에 대한 효용성 등을 체계적으로 검토하고 있다.

따라서 본 장에서는 슈퍼펀드 프로그램에서 적용되고 있는 오염토양 정화기술들에 대한 현황을 조사함으로써 국외 오염토양 정화기술의 상용화 정도 및 효용성 등을 검토하고자 한다.

슈퍼펀드 프로그램이 시작된 이래 1982년부터 2002년까지 슈퍼펀드 오염부지의 토양을 정화하기 위하여 863개의 프로젝트가 수행되었으며, [그림 2-2]에서 나타낸 바와 같이 전체 프로젝트 중 42%(364개)가 지중처리기술을 58%(499개)가 지상처리기술을 적용한 것으로 조사되었다.



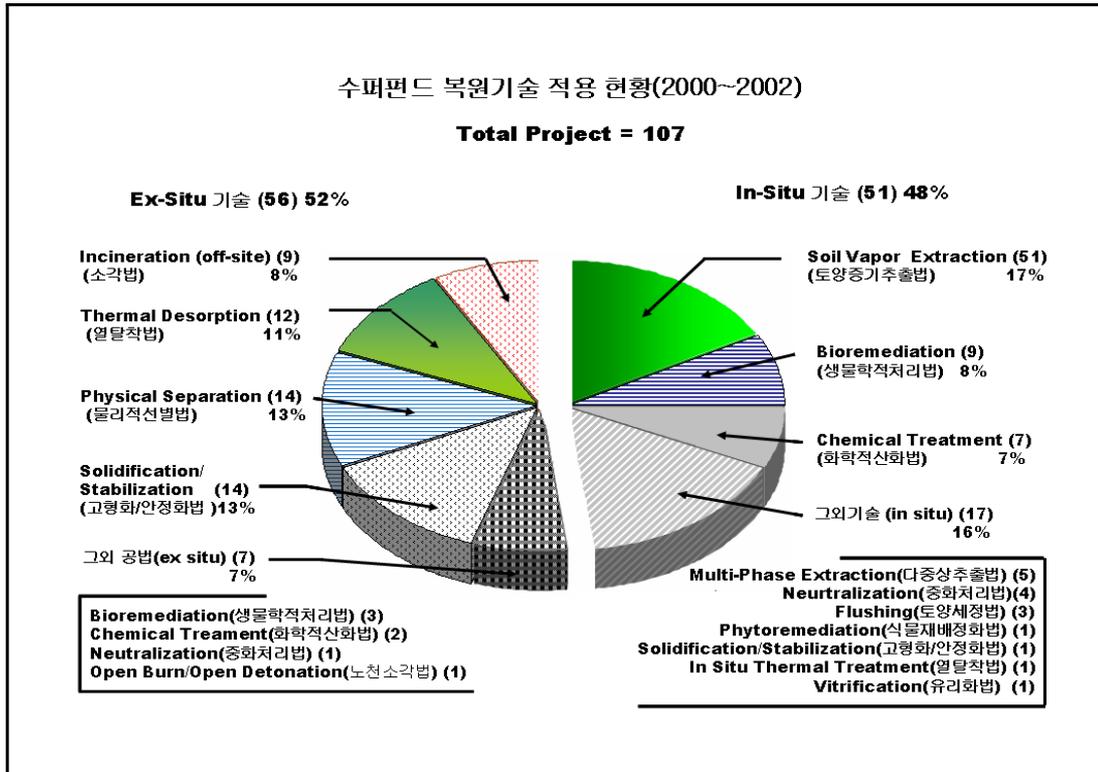
[그림 2-2] 슈퍼펀드 부지의 기술 적용 현황(1982~2002)

특히 지중처리기술 중 토양증기추출법이 전체 863개 프로젝트 중에 213(25%)개 프로젝트에서 적용되어 가장 사용빈도가 높은 것으로 조사되었으며, 그 다음으로 생물학적 처리법과 고형화/안정화법이 각각 48(6%)개 프로젝트에 적용된 것으로 조사되었다. 여기에서 생물학적 처리법은 생물학적 분해법과 생물학적통풍법을 포함하는 방법으로 토양미생물을 이용하여 오염물질을 분해하는 기술을 의미한다.

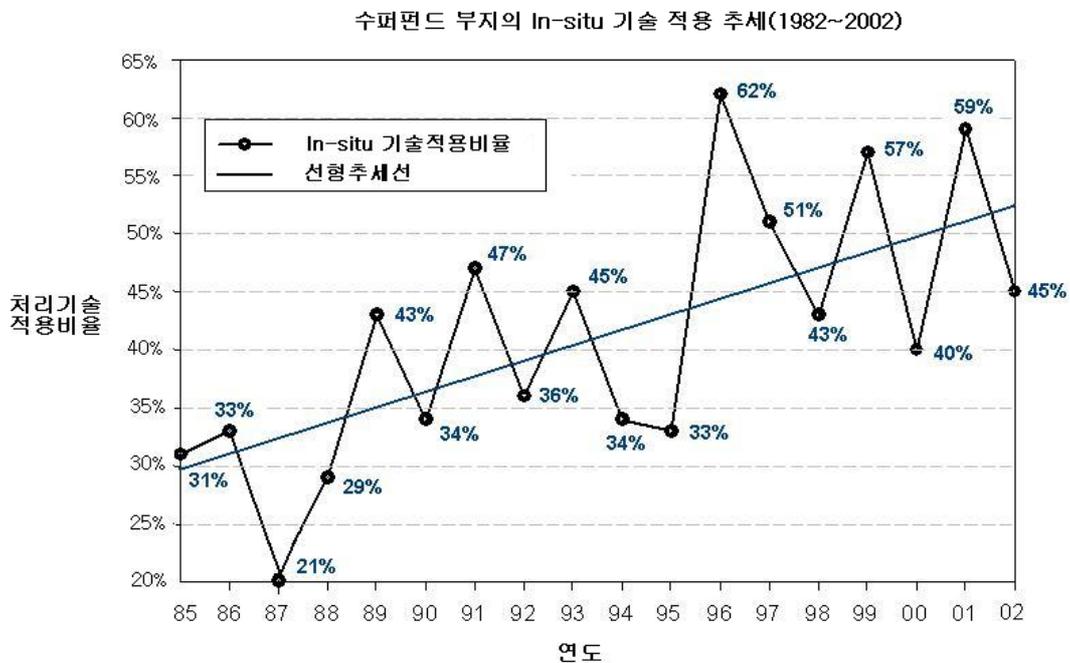
지상처리기술의 경우에는 전체 863개 프로젝트 중에 고형화/안정화법이 157(18%)개 프로젝트에서 적용되어 가장 사용빈도가 높은 것으로 조사되었으며, 그 다음으로 열탈착법이 69(8%)개, 생물학적 처리법이 54(6%)개 프로젝트에 적용된 것으로 조사되었다. 여기에서 생물학적 처리법은 토양경작법과 바이오파일법을 포함하는 방법으로 토양미생물을 이용하여 오염물질을 분해하는 기술을 말한다.

최근의 정화기술 적용 현황을 살펴보기 위하여 수퍼펀드 오염부지에 대한 2000년부터 2002년까지 사용된 오염토양 정화기술을 조사하였다[그림 2-3]. 2000년부터 2002년까지 수퍼펀드 오염부지의 토양을 정화하기 위하여 총 107개의 프로젝트가 수행되었으며, 그 중 지중처리기술이 51(48%)개 프로젝트에서 적용되었으며, 지상처리기술은 56(52%)개 프로젝트에 적용되어 지상처리기술이 좀더 많이 적용된 것으로 조사되었다.

세부적인 기술종류를 살펴보면 지중처리기술 중에서는 토양증기추출법과 생물학적 처리법이, 지상처리기술 중에서는 고형화/안정화법과 소각법, 열분해법 등이 많이 사용되어 1982년부터의 누적 빈도수와 유사한 경향을 보이고 있다. 특히 지중처리기술 중 화학적 산화/환원법의 경우 총 12개 프로젝트 중 7개의 프로젝트가 2000년 이후에 적용되었으며, 이는 최근에 화학적 처리기술의 적용이 선호되고 있다는 사실을 보여주고 있다. 반면 과거에 높은 비율로 사용되었던 소각법이나 고형화/안정화법(지중, 지상), 토양증기추출법 등의 적용사례는 점차 줄어들고 있으며, 생물학적 처리법과 열탈착법의 적용사례는 증가하는 경향을 보여주고 있다.



[그림 2-3] 수퍼펀드 부지의 기술 적용 현황(2000~2002)



[그림 2-4] 수퍼펀드 부지에서의 지상처리기술 적용 추세

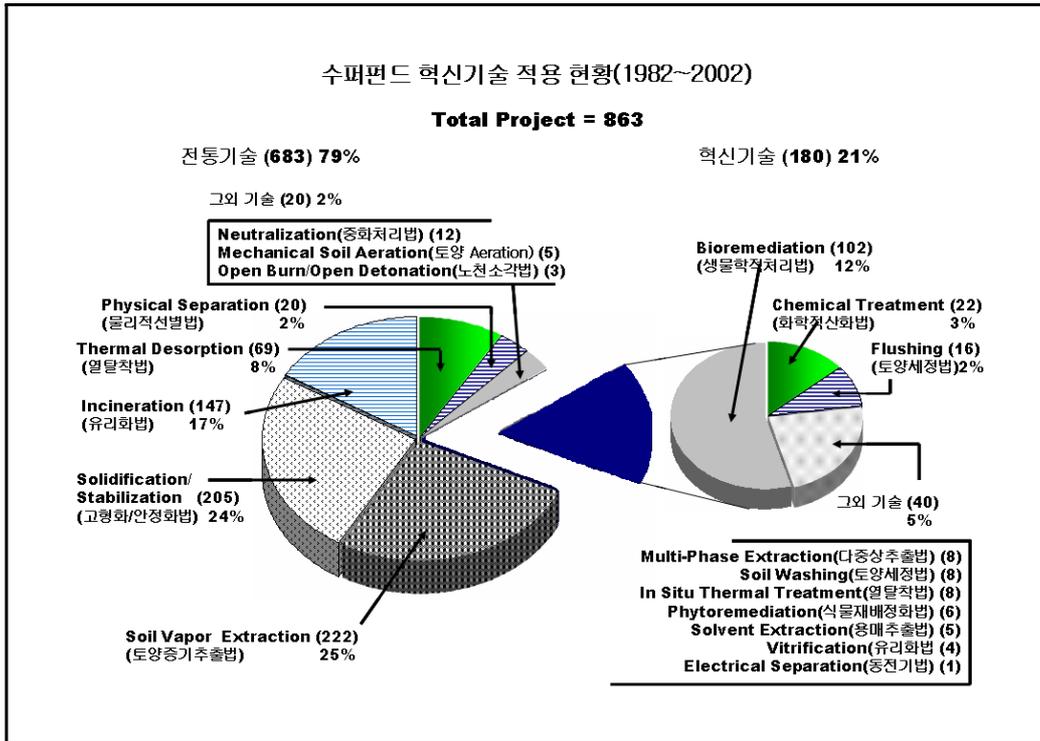
[그림 2-4]는 수퍼펀드 부지에서의 지중처리기술의 적용 추이를 보여주고 있다. 5년간 평균치들을 비교해보면 1985년부터 1989년까지의 지중처리기술 적용 비율이 31%, 1998년부터 2002년까지의 적용 비율이 49%로서 점진적으로 지중처리기술의 적용이 증가하고 있는 것을 볼 수 있다.

이는 지중처리기술이 오염토양 굴착을 통한 직접적인 접촉을 통하여 발생될 수 있는 위해성을 감소시킬 수 있고 비교적 경제적이며 부지조사기법, 모니터링 등의 기술적인 발전으로 인하여 지중처리기술에 대한 전문가들의 신뢰도가 높아졌기 때문으로 판단된다.

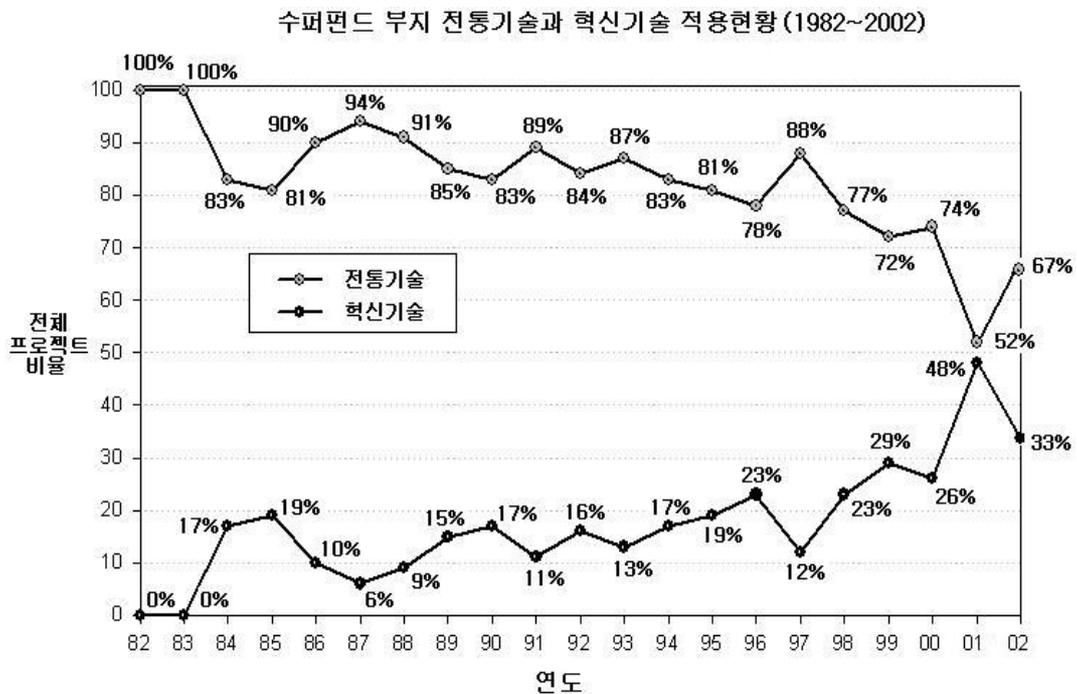
수퍼펀드 부지에 적용되는 기술들은 소각법 및 고형화/안정화법과 같이 전통적으로 사용되어 그 효과가 입증된 기술과 생물학적 처리법과 같이 전통적인 기술에 비하여 늦게 개발되어 비교적 적용기간이 짧았던 혁신기술로 나뉘어 관리되고 있다.

여기서 혁신기술이란 새로 개발된 신기술이라기보다는 기술개발은 완료되었지만 적용 횟수가 적어서 기술에 대한 현장 적용 정보가 전통적인 기술보다는 부족한 기술을 말한다. [그림 2-5]에서는 전통적인 기술과 혁신기술의 수퍼펀드 부지 적용 현황을 보여주고 있다. 그림에서 보여주는 바와 같이 전체 863개 프로젝트 중 약 21%인 180개 프로젝트에 혁신기술이 적용되었으며, 이 중 생물학적 처리법이 102개 프로젝트에서 사용되어 가장 높은 적용비율을 보여주고 있다. 또한 화학적 처리법과 토양세정법 등이 각각 22개, 16개 프로젝트에서 적용되었으며, 이외에도 토양세척법, 식물재배 정화법 및 용매추출법도 다수 적용된 것을 볼 수 있다.

1982년부터의 전통적인 기술과 혁신기술의 적용추이를 살펴보면 [그림 2-6]과 같으며, 전통적인 기술의 경우 1997년까지 매우 높은 비율로 사용되다가 1997년 이후 점진적으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 혁신기술의 경우 적용 비율이 점차적으로 증가하여 2001년에는 전통적인 기술이 52%, 혁신기술이 48%로 서로 비슷해지는 것을 볼 수 있다. 특히 전통적인 기술 중 소각법의 경우 적용 비율이 1990년에 18%에서 2002년에는 3%로 급격히 감소한 것으로 조사되었다.



[그림 2-5] 수퍼펀드 부지 혁신기술 적용현황



[그림 2-6] 수퍼펀드 부지 혁신기술 적용추세

미국의 수퍼펀드 부지에서의 오염물질별 기술적용 현황을 살펴보면 [표 2-4]와 같다. 1982년부터 2002년까지 수퍼펀드 부지에서 발견된 오염물질을 크게 9가지로 나누어 볼 수 있으며, 이중 약 75%가 유기오염물질이고 25%가 중금속류로 조사되었다.

[표 2-4]에서 볼 수 있는 바와 같이 할로겐 휘발성유기화합물질, BTEX, 비할로겐 휘발성유기화합물질로 오염된 부지에는 토양증기추출법이 가장 많이 적용되었으며, 비할로겐 준휘발성유기화합물질 및 PAHs로 오염된 지역에는 생물학적 처리법이 주로 적용된 것으로 나타났다. 또한 PCB (Polychlorinated byphenyls), 유기성 살충제(Pesticides/herbicides) 및 할로겐 준휘발성유기화합물질로 오염된 지역에는 소각법이, 중금속으로 오염된 지역에는 고형화/안정화법이 가장 활발히 적용된 것으로 조사되었다.

결론적으로 [표 2-4]에서 나타난 오염토양 정화기술이 대부분 미국에서는 현장 적용이 가능한 상용화된 기술들이며 수퍼펀드 프로그램을 통하여 처리효율이 입증된 기술들이다. 다만 오염물질, 현장조건, 사회적 요구조건 등에 따라 기술의 개발 및 기술 적용의 경향 등이 변화해 왔으며 최근에는 지중처리기술, 특히 생물학적 처리법, 화학적 산화/환원법과 같은 기술이 가장 활발히 적용되고 있는 것으로 조사되었다.

[표 2-4] 수퍼펀드 부지 오염물질별 기술 적용현황(1982~2002)

기술	Total number of projects	Polycyclic aromatic hydrocarbons	Other nonhalogenated semivolatiles	Organic compounds	Benzene-toluene-ethylbenzene-xylene	Other nonhalogenated volatile organic compounds	Organic pesticides and herbicides	Other nonhalogenated semivolatiles	Halogenated semivolatiles	Polychlorinated biphenyls	Metalloids and metals
Soil Vapor Extraction(토양증기추출법)	222	14	31	102	48	3	27	183	0	0	
Solidification/Stabilization(고형화/안정화법)	205	16	18	12	13	14	7	14	35	174	
Incineration(소각법)	147	28	41	35	23	36	34	47	37	6	
Bioremediation(생물학적처리법)	102	38	49	30	29	25	15	16	1	2	
Thermal Desorption(열탈착법)	69	20	16	23	15	9	11	30	14	2	
Chemical Treatment(화학적산화법)	22	1	2	3	2	2	2	7	4	11	
Physical Separation(물리적선별법)	20	6	2	1	0	3	0	0	5	7	
Flushing(토양세정법)	16	3	6	5	4	1	4	10	0	5	
Neutralization(중화처리법)	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Multi-Phase Extraction(다중상추출법)	8	1	1	5	2	0	2	5	1	0	
Soil Washing(토양세척법)	8	2	1	0	0	2	0	0	1	3	
In Situ Thermal Treatment(In situ 열탈착법)	8	5	0	2	0	3	2	3	0	0	
Phytoremediation(식물체배양법)	6	1	2	2	2	1	1	3	0	4	
Mechanical Soil Aeration(토양 aeration)	5	0	0	1	1	0	1	4	0	0	
Vitrification(유리화법)	4	0	0	1	1	0	1	2	2	1	
Open Burn/Open Detonation(노천소각법)	3	0	2	0	0	0	1	2	2	1	
Electrical Separation(동전기법)	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
Total Project	863	139	172	222	141	100	108	327	103	216	

3. 국내의 오염토양 정화관련 기술 현황조사

과거 선진국과 국내에 적용되고 있는 정화처리기술의 기술격차는 약 5~10년으로 평가되어 왔다. 1990년대 이후 대학과 연구소를 중심으로 산발적인 연구가 진행되어 왔으나, 국내 토양정화 시장의 규모가 작은 관계로 상용화된 기술이 그다지 많지 않았다고 할 수 있다.

수년전부터 환경부 등 관계 부처 등에서 차세대핵심개발사업 등에 오염 토양·지하수 정화에 대한 기술 연구 및 개발을 집중 육성 중이며, 최근에는 중·대 규모의 정화 공사 발주로 인하여 오염토양 정화시장의 확대와 함께 정화기술에 대한 투자의 증가로 현장 적용성을 갖춘 다양한 기술이 개발되고 있으며 현장에 적용되고 있다.

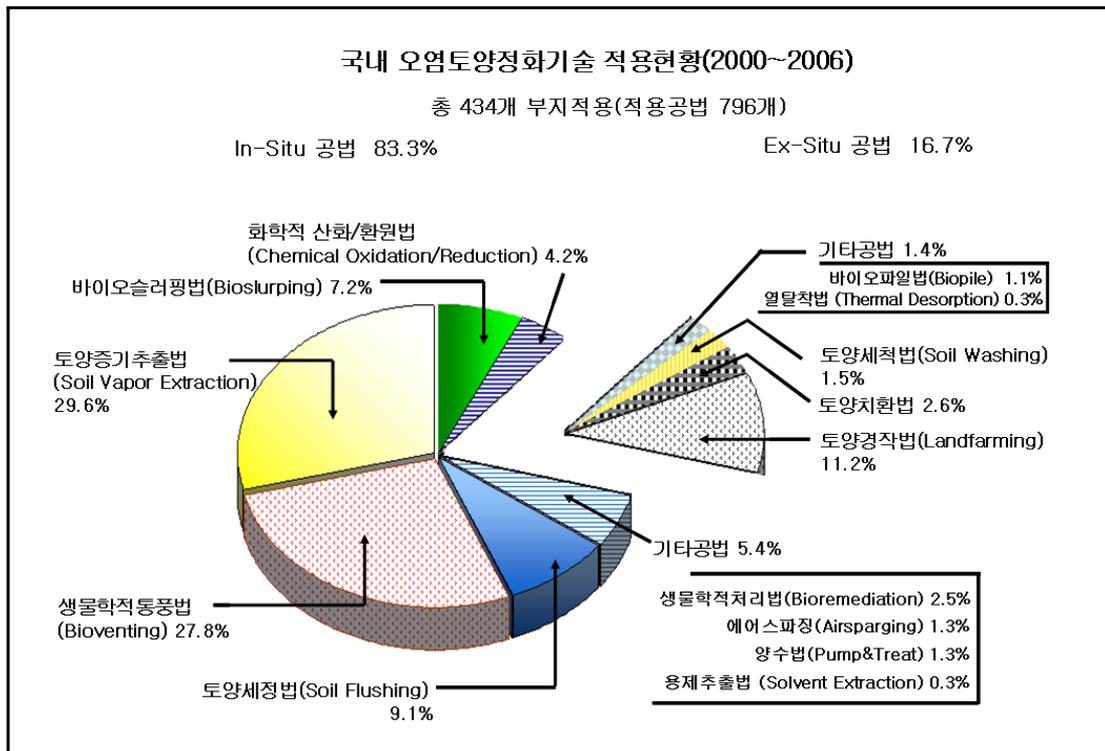
국내 오염토양 정화시장은 신흥시장으로서 역사가 매우 짧고 시장규모 또한 미미하다. 따라서 미국의 슈퍼펀드 프로그램과 같이 오염부지 및 오염토양 정화기술에 대한 체계적인 관리 및 정보수집이 이루어지지 않은 상태이기 때문에 국내 오염부지 현황 및 오염토양 정화기술 적용현황과 같은 통계자료가 아직 마련되어 있지 않는 실정이다.

이에 국내 정화시장의 오염토양 정화기술 적용현황을 파악하기 위하여 현재 토양정화업체로 등록된 43개 업체 중 36개 업체를 대상으로 최근 5~6년간의 정화 실적을 조사하였다. 국내 정화시장의 기술 적용 현황을 살펴보면 총 434개 오염토양 정화현장 내에서 적용된 796개 정화기술 중 지중처리기술이 83.3%로 지상처리 기술 16.7% 보다 현재하게 많이 적용된 것으로 조사되었다[그림 2-7].

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 일부 정화사업 현장에서는 부지 활용을 위해 오염토양의 신속한 처리가 요구됨에 따라 지상처리기술의 적용이 증가하고 있는 추세이다.

국내 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[그림 2-8], 생물학적통풍법과 토양경작법이 27.8%, 11.2%로 많이 적용되어 높은 사용 빈도수를 보이고 있다. 이들 기술은 유류성분 중 휘발성유기화합물질 및 준휘발성유기화합물질을 제거하는데 효과적인 방법으로 국내에서도 효과가 입증된 기술들이다.



[그림 2-7] 국내 오염토양정화사업 적용기술현황(2000~2006년)

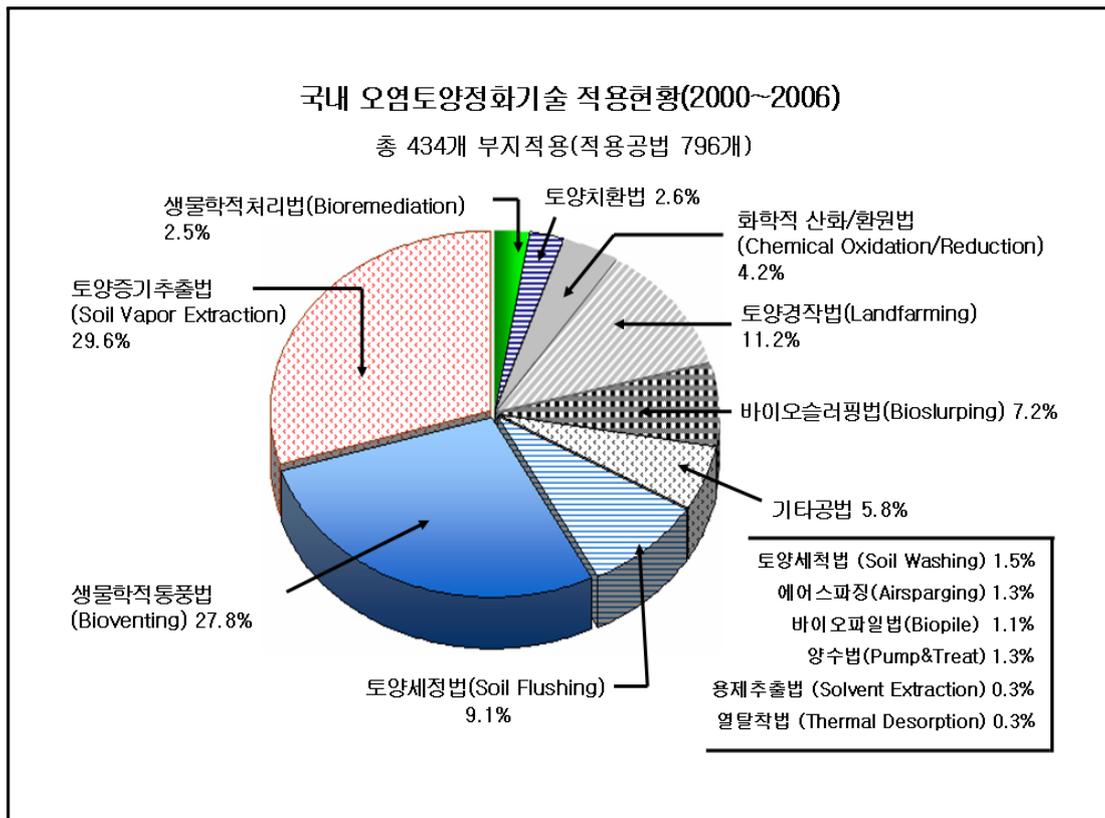
이처럼 국내에서는 현장 적용이 우수하고 경제적인 생물학적 정화기술들이 주를 이루고 있는 실정이나 앞서 미국 수퍼펀드 부지의 기술추이에서 2000년 이후 지중 화학적 산화/환원법(Chemical treatment, chemical oxidation/reduction) 적용이 선호되고 있는 실정이어서 향후 국내에서도 지중 화학적 산화/환원법 등의 최신기술의 적용비율이 점차 늘어날 것으로 예상된다.

토양내 중금속처리에 대해서는 미국 수퍼펀드 부지의 경우 주로 고정화/안정화법이 사용되었다. 이는 미국과 같이 이용할 부지를 많이 가진 국가에서는 오염토양 재이

용에 대한 관심이 상대적으로 적어 타기술에 비하여 적용이 간단하고 외부인자들에 의한 영향이 비교적 적은 고형화/안정화법이 많이 사용된 것으로 판단된다.

반면 국내에서 중금속 처리에 대하여 고형화/안정화법을 적용하기 위해서는 고형화 및 안정화법에 의해 처리된 토양의 사후관리에 있어서 토양환경보전법상의 정화토양으로 관리할 것인가 또는 폐기물관리법에서의 폐기물로 관리할 것인가에 대한 법적관리 문제도 검토되어야 할 것이며, 고형화 및 안정화된 토양내 중금속의 용출 여부, 이에 대한 관리 및 대책을 위한 사후 모니터링 방법 등이 선행되어야 할 것이다.

현재 국내에서는 오염 토양내 중금속을 처리하기 위하여 토양세척법, 동전기법 등의 다양한 처리기술 등이 시도되고 있으나, 아직까지 광산 및 주변 농경지, 산업단지 등에서 발생하는 중금속으로 오염된 토양에 대한 정화 실적이 많지 않은 상태이다. 따라서 이들 다양한 중금속에 의해 오염된 토양을 처리하기 위한 기술 개발과 보급이 시급한 것으로 판단된다.



[그림 2-8] 국내 오염토양정화사업 세부 적용기술 현황(2000~2006년)

제Ⅲ장 오염토양 정화사업과 관련된 제반 규정 및 업무범위 분석

1. 오염토양 정화사업 관련 국내 제반 법령·규정 에 대한 조사 및 분석

1.1 토양환경보전법

토양환경보전법은 토양오염으로 인한 국민건강 및 환경상의 위해를 예방하고 토양을 적정하게 관리·보전함으로써 모든 국민이 건강하고 쾌적한 삶을 누릴 수 있게 함을 목적으로 하고 있다.

1995년 제정된 토양환경보전법은 2006년까지 7차에 걸친 개정을 통하여 현재의 토양환경관리제도가 마련되었다. 토양환경보전법이 갖는 의미는 산업발달에 따른 토양오염을 사전에 방지하고 이미 오염된 토양의 개선사업을 추진할 수 있는 국가의 정책목표를 뚜렷이 제시한 것이라 할 수 있다.

토양환경보전법의 시행을 통하여 토양오염물질의 지정 및 기준의 설정, 특정 토양오염관리대상시설의 관리, 전국적인 토양오염현황 조사 및 오염토양의 정화 관리 등이 이루어지기 시작하였으며, 현재도 지속적으로 합리적인 관리방안을 모색하고 있다. 특히 2005년 7월 토양환경보전법 시행령 및 시행규칙의 일부 개정을 통하여 토양정화업 및 정화검증제도 등을 도입함으로써 토양정화시장의 활성화를 위한 기틀이 마련되었다고 할 수 있다.

토양환경보전법의 구성은 제1장 총칙, 제2장 토양오염의 규제, 제3장 토양보전 대책지역 지정 및 관리, 제4장 보칙 및 제5장 벌칙으로 구성되어 있으며 하위법 및 규정 등으로는 토양환경보전법 시행령, 토양환경보전법 시행규칙, 고시, 예규, 훈령 등이 있다.

오염도조사부터 오염토양 정화 및 검증까지 토양정화업무와 관련된 토양환경보전법의 내용은 다음과 같이 분류하여 요약할 수 있다.

(1) 토양오염검사

토양오염검사는 토양오염도검사와 누출검사로 구분. 토양오염도검사는 토양시료를 직접 채취하여 오염물질의 함유정도를 검사하는 것을 말하고, 누출검사는 지하매설 저장시설에서 저장물질의 누출여부를 확인하기 위하여 실시하는 법정 검사를 말함

□ 토양오염검사(법 제13조)

특정토양오염관리대상시설의 설치자는 토양관련전문기관으로부터 당해 시설의 부지 및 그 주변지역에 대한 토양오염검사를 받아야 함.

□ 특정토양오염관리대상시설의 토양오염검사(시행령 8조)

1. 매년 1회 환경부령이 정하는 때에 토양관련전문기관으로부터 토양오염도검사를 받을 것. 다만, 제7조의 규정에 의한 토양오염방지시설을 설치한 경우에는 환경부령이 정하는 기준에 따라 검사주기를 3년의 범위 내에서 조정.

2. 누출검사대상시설을 설치한 후 10년이 경과하는 때에는 6월 이내에 토양관련전문기관으로부터 누출검사를 받아야 하며, 그 후에는 다음 각 목의 구분에 따라 누출검사를 받을 것.

가. 누출검사를 개방식에 의한 비파괴검사방식으로 받은 경우 : 6년주기

나. 누출검사를 가압시험 또는 감압시험 등 간접방식으로 받은 경우 : 4년주기

3. 토양오염도검사결과 토양오염우려기준 중 '나' 지역기준의 40 퍼센트 이상인 경우 누출검사를 받음

□ 특정토양오염관리대상시설의 토양오염도 검사주기(시행규칙 제 12조 제 2항 별표 2)

1. 토양오염방지시설을 설치한 경우의 토양오염도 검사주기

가. 저장시설 설치 후 5년까지는 최초 검사 후 3년 및 5년이 되는 해에 각각 1

나. 저장시설 설치 후 5년에서 15년까지의 기간 중에는 매 2년에 1회

다. 저장시설 설치 후 15년이 지난 때에는 매년 1회

2. 다만 다음의 시설은 매년 토양오염도 검사를 받아야 함

가. 최종 오염도검사결과 오염물질이 우려기준 이상으로 검출된 시설. 다만, 최종 누출검사 결과 누출이 확인되어 누출방지조치를 완료하였거나 누출이 확인되지 아니한 시설로서 토양오염도 검사결과가 토양오염우려기준 미만이며 직전 토양오염도검사결과와 비교하여 오염도가 내려간 경우에는 제외

나. 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」 제6조제4호의 규정에 의한 자연환경보전지역, 「지하수법」 제12조의 규정에 의한 지하수보전구역, 「수도법」 제5조의 규정에 의한 상수원보호구역, 「환경정책기본법」 제22조의 규정에 의한 특별대책지역(대기보전대책지역을 제외한다)에 설치되어 있는 시설

(2) 토양정밀조사

상시측정 또는 토양오염실태조사결과 우려기준을 넘는 지역이나 토양오염사고 등으로 인하여 우려기준을 넘을 가능성이 크다고 인정하는 지역 및 토양오염도 검사결과 우려기준 초과시 토양정밀조사를 실시

□ 토양오염의 신고(법 제11조 제3항)

오염도가 우려기준을 넘는 토양에 대하여는 대통령령이 정하는 바에 따라 기간을 정하여 오염원인자에게 토양관련전문기관에 의한 토양정밀조사의 실시, 오염토양의 정화조치를 할 것을 명함.

□ 정밀조사명령(시행령 제5조의2)

오염원인자에게 토양정밀조사를 실시할 것을 명하는 때에는 토양오염지역의 범위 등을 감안하여 6개월의 범위 안에서 그 이행기간을 정함, 단 시장·군수·구청장은 조사지역의 규모 등으로 인하여 부득이하게 이행 기간 내에 조사를 이행하지 못한 자에 대하여 6개월의 범위 안에서 그 이행기간을 연장할 수 있음.

(3) 오염토양 정화

생물학적 또는 물리·화학적 처리 등의 방법으로 토양중의 오염물질을 감소·제거하거나 토양중의 오염물질에 의한 위해를 완화하는 것을 말함.

□ 오염토양의 정화(법 제15조의3)

오염토양은 토양정화업의 등록을 한 자에게 위탁하여 정화하여야 하며, 오염토양을 정화하는 자는 오염토양에 다른 토양을 섞어서 오염농도를 낮추는 행위를 하여서는 아니 된다.

□ 오염토양의 정화기준 및 정화방법(시행령 제10조)

1. 미생물을 이용한 오염물질의 분해 등 생물학적 처리
2. 오염물질의 차단·분리추출·세척처리 등 물리·화학적 처리
3. 오염물질의 소각·분해 등 열적 처리

□ 오염토양정화계획서의 제출(시행규칙 제19조의3)

오염원인자는 다음 각 호의 내용을 포함하는 오염토양정화계획서를 작성하여 정화공사 7일 전에 관할 시장·군수·구청장에게 제출

1. 오염토양의 양 및 오염범위(도면을 포함한다)
2. 토양오염물질 및 오염정도
3. 정화방법 및 정화일정
4. 시공할 토양정화업자
5. 검증할 토양관련전문기관
6. 그 밖에 오염토양의 정화에 필요한 사항

단 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 사유가 발생한 날부터 30일 이내에 오염토양계획(변경)을 관할 시장·군수·구청장에게 제출.

1. 제1항제1호의 규정에 의한 오염토양의 양 또는 오염범위의 20퍼센트 이상의 증감
2. 제1항제2호의 규정에 의한 토양오염물질의 종류의 증감 또는 오염정도의 20퍼센트 이상의 증감

□ 반출정화대상(시행규칙 제 19조 및 오염토양 반출정화대상고시(제2005-174호))

1. 「국토의 계획 및 이용에 관한 법률」에 의한 도시지역안의 건설공사 현장 등 환경부장관이 정하여 고시하는 경우
2. 토양오염물질 운송차량의 전복 등 긴급한 사고로 인한 오염토양으로서 즉시 처리하여야 하는 경우
3. 오염토양의 양이 5세제곱미터 미만으로서 현장에서 정화하는 때에는 정화효율이 현저하게 저하되는 경우
4. 비소, 폴리클로리네이티드비페닐, 유기인화합물의 토양오염으로 열적처리 방법으로 처리하여야 하는 오염토양
5. 정화부지가 50제곱미터 이내로 협소하여 부지안에서 정화가 곤란한 오염토양

□ 오염토양의 반출절차 및 방법 등(시행규칙 제19조의2)

시장·군수·구청장은 오염토양반출정화계획서를 검토하여 반출정화의 계획이 적정한 경우에는 10일 이내에 적정통보하고, 반출정화계획의 내용을 반입지를 관할하는 시장·군수·구청장에게 통보

□ 오염원인자에 의한 직접 정화(시행령 제 11조)

다음 각 호에 해당하는 오염토양에 대해서는 오염원인자가 직접 정화할 수 있음

1. 「국방·군사시설 사업에 관한 법률」에 의한 군부대시설안의 오염토양 또는 군사활동으로 인한 오염토양으로서 그 양이 50세제곱미터 미만인 것
2. 유기용제 또는 유류에 의한 오염토양으로서 그 양이 5세제곱미터 미만인 것

(4) 정화 검증

오염원인자에 의해 검증기관으로 선정된 토양오염조사기관이 오염원인자로부터 위탁된 토양정화업자의 정화공사 진행과정과 완료를 독립적이고 객관적으로 확인하는 검사

□ 토양정화의 검증(법 제15조의6)

오염원인자는 오염토양을 정화하기 위하여 토양정화업자에게 위탁하는 경우 토양오염조사기관으로 하여금 정화과정 및 정화완료에 대한 검증을 받아야 함

□ 정화과정 검증의 생략(시행령 제11조의2)

오염토양의 양이 1,000세제곱미터 미만[중금속에 의한 오염토양 중 토양오염도가 토양오염대책기준을 초과하는 것으로서 500세제곱미터 이상인 것을 제외한다]인 경우에는 정화과정에 대한 검증을 생략할 수 있음

□ 검증의 절차·방법 등(시행규칙 제19조의4 및 토양정화검증방법 및 검증수수료 산정에 관한고시, 제2005-194호)

정화과정 및 정화완료에 대한 검증은 정화착공에서 정화완료까지 토양정화의 단계별로 오염토양이 적정하게 정화되도록 하여야 하며, 검증의 절차, 내용 및 방법에 관한 구체적인 사항은 환경부장관이 정하여 고시함.

1.2 폐기물관리법

폐기물관리법은 폐기물의 발생을 최대한 억제하고 발생된 폐기물을 적정하게 처리함으로써 환경보전과 국민생활의 질적 향상에 이바지함을 목적으로 하고 있다. 폐기물관리법상 폐기물은 발생원 기준으로 생활폐기물과 사업장폐기물로 분류하고 유해성을 가진 사업장폐기물은 지정폐기물로 별도 관리함으로써 두 가지 분류방법을 혼용하고 있다.

토양정화사업 관련 시 발생하는 폐기물은 사업장폐기물에 속한다. 사업장폐기물이라 함은 대기환경보전법·수질환경보전법 또는 소음·진동규제법의 규정에

의하여 배출시설을 설치·운영하는 사업장 및 기타 대통령령이 정하는 사업장에서 발생하는 폐기물을 말하며, 지정폐기물이라 함은 사업장폐기물 중 폐유·폐산 등 주변환경을 오염시킬 수 있거나 감염성폐기물 등 인체에 위해를 줄 수 있는 유해한 물질로서 대통령령이 정하는 폐기물을 말한다.

토양정화공사 시 발생하는 페콘크리트, 폐토사 등의 폐기물은 동법 제25조 사업장폐기물 처리에 따라 처리한다. 터파기공사시 토양에 폐기물이 혼입되어 있는 경우에는 토양과 폐기물을 구분하여, 폐기물은 용출실험 결과를 바탕으로 사업장폐기물 및 지정폐기물로 구분하여 위탁처리하고 오염토양의 경우 오염도 조사 결과를 바탕으로 토양환경보전법상의 우려기준을 초과시 정화업에 등록된 업체에 의하여 처리되어야하며, 외부 반입정화시설로 오염토양을 운반하는 때에는 오염토양이 흘날리거나 누출되지 아니하도록 하여야 하며, 침출수가 유출되지 아니하도록 하여야 한다.

또한 토양세척 등 정화공사 중 발생하는 기름성분이 함유되어있는 폐슬러지는 중량비로 기름성분이 5% 이상이면 지정폐기물로 구분하여 처리하며, 5% 미만일 경우에는 사업장폐기물로 처리한다. 그 외의 폐유기용제, 폐산, 폐알카리, 폐석면 등 지정폐기물로 처리하는 물질에 대해서는 시행령 제3조 별표 1에 20종의 지정폐기물의 종류가 나타나있으며, 이들 물질들은 제16조에 의하여 적법하게 처리하도록 한다.

1.3 수질환경보전법 및 지하수법

수질환경보전법은 수질오염으로 인한 국민건강 및 환경상의 위해를 예방하고 하천·호소 등 공공수역의 수질을 적정하게 관리·보전함으로써 국민으로 하여금 그 혜택을 널리 향유할 수 있도록 함과 동시에 미래의 세대에게 승계될 수 있도록 함이며, 지하수법은 지하수의 적절한 개발·이용과 효율적인 보존·관리에 관한 사항으로 지하수개발 및 이용의 적정을 기하고, 지하수오염 예방을 그 목적으로 하고 있다.

오염토양을 처리하는 과정에서 발생하는 침출수나 오염지하수 등의 수질오염에 대해서는 수질환경보전법과 지하수법에 적용을 받는다. 특히 오염토양 정화공정에 따라 폐수가 발생할 수도 있으며(예 : 토양세척법, 양수처리법 등), 이 경우 오염물질의 종류 및 배출량에 따라 폐수처리시설을 설치하여야 하며 수질환경보전법 제32조 배출허용기준에 적합하게 처리하여 방류하여야 한다.

오염지하수에 대한 정화는 기술적으로 대부분 토양오염과 연계되어 처리되어야 하며, 지하수법상의 정화절차는 토양환경보전법상의 정화절차와 함께 유기적으로 병행관리 되어야 한다. 2005년 지하수법의 개정으로 제29조2의 지하수정화업 등록제가 시행되어 지하수정화업에 등록을 한 자만이 지하수정화업무를 할 수 있도록 제도를 보완하였다.

오염누출로 인한 지하수 오염은 지하수정화업체가 지하수정화기준에 적법하게 처리하여야 한다. 또한 오염토양정화지역을 포함하여 지하수오염이 우려되거나 지하수 오염이 발생한 때(지하수오염유발시설을 운영하는 과정에서 오염물질이 인근 지하수로 누출된 때)에는 시행령 제26조의2 지하수오염유발시설의 오염방지에 따라서 오염물질의 제거나, 오염물질의 확산을 방지하기 위한 시설을 설치하여야 한다.

1.4 유해화학물질관리법, 위험물안전관리법 등 토양 정화와 관련된 법령 및 인허가 사항

국내에서 시행하고 있는 토양정화기술 중 화학적 산화법에서 주로 사용되는 과산화수소는 위험물안전관리법 시행령 별표 1에 의해 위험물질로 규정되어있다. 과산화수소의 농도가 36 중량퍼센트 이상이며, 300kg 이상 사용 시 위험물안전관리 제6조에 의해 위험물시설의 설치신고를 하여야한다.

또한 피부나 점막에 대한 자극성이 있는 염산이나 황산 10% 수용액, 페놀·수산화나트륨·수산화칼륨 5% 수용액과 동등 또는 이상인 화학물질은 유해화학물질관리법상 유독물에 속하므로(유해화학물질관리법 시행령 별표 1) 이들 물질을 일정 용량 사용할 때에는 사용신고를 하여야한다(법 20조5항).

유해화학물질관리법 제52조 유독물관리자 등에 대한 교육의 규정에 의하여 유독물 또는 취급제한·금지물질 관리자를 두어야 하는 유독물영업자 및 취급제한·금지물질영업자는 유독물 또는 취급제한·금지물질 관리자에 대하여 환경부령이 정하는 바에 의하여 환경부장관이 실시하는 교육을 받게 하여야 한다.

유해화학물질을 취급하는 자는 당해 유해화학물질로 인한 사고로 인하여 사람의 건강 또는 환경에 관한 위해가 발생하거나 발생할 우려가 있는 경우에는 관찰 지방자치단체, 지방환경관서, 경찰관서, 소방관서 또는 지방노동관서에 신고하여

야 한다(법 제40조). 유독물 사용 시 한국화학물질관리협회에 매년 1월 31일까지 연간실적보고서를 제출하여야 한다.

또한 정화공사를 수행하기 위해 검토되어야 하는 관련 법령들은 터파기 등 토목공사로 인하여 비산먼지 등이 발생할 수 있으므로 비산먼지 발생신고(대기환경보전법 제28조) 등이 검토되어야 하며, 현장사무실 개설 등을 위해서는 가건축물신고(건축법 제15조), 하천 및 주변지역에 대한 정화공사가 수행될 경우 하천점용허가(하천법 제33조1항) 등 다양한 관계 법령을 검토하여야 한다.

또한 대상부지의 도시계획법상 용도에 따라 산지점용허가, 공원점용허가 등 기타 다양한 인허가 사항이 종합적으로 검토되어야 한다.

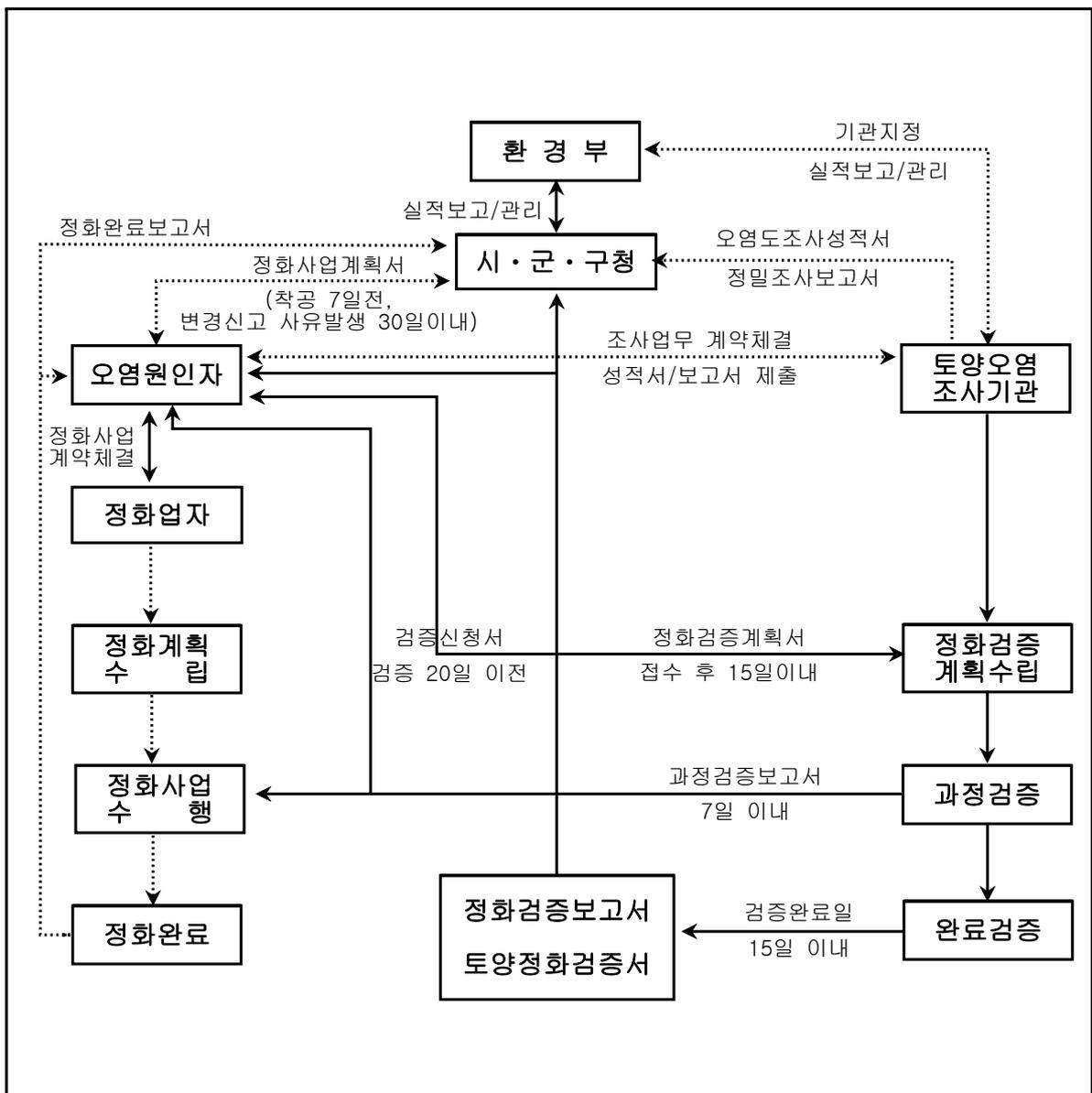
2. 토양정화 업무관련 추진체계

현행 국내 토양환경관리체계는 토양오염조사 및 정화를 적극적으로 유인할 수 있도록 환경부에서 토양환경보전법에 의해 관리하고 있다. 토양환경보전법에 의해 정해져 있는 기관 및 해당요건을 갖추어 환경부로부터 지정된 토양관련 전문기관이 토양오염조사 업무를 담당하도록 하고 있으며, 최근 제도화된 토양정화업 등록제를 통하여 일정한 등록요건을 갖추어 환경부에 등록한 업체만이 토양오염정화사업을 수행할 수 있도록 하고 있다.

오염토양의 정화는 오염현황 파악을 위한 정밀조사와 조사결과에 따른 정화설계, 시공, 정화공정 운영 및 관리 등이 일정한 기준에 따라 일관성 있게 수행되어야만 궁극적인 정화목적을 달성할 수 있는 기술적 특성을 가지고 있다. 정화제도 운영을 위한 기본 절차는 아래와 같으며, [그림 3-1]에 국내 제도 운영의 기본 절차를 도시하였다.

- 오염도 조사 및 정밀조사 : 토양오염조사기관
- 정화계획 수립 : 오염원인자, 토양정화업체
- 오염토양 정화계획서 제출 : 오염원인자
- 정화 및 검증의 신청 : 오염원인자
- 검증계획서 제출 : 검증기관

- 오염토양 정화 : 오염원인자, 토양정화업체
- 정화과정 검증 : 검증기관
- 정화완료 검증 : 검증기관
- 검증보고서/검증서 제출 : 검증기관
- 이행보고서 제출(정화완료) : 오염원인자
- 관할지역 내 토양 정화 및 검증 실적 보고 : 관할 시·군·구청



[그림 3-1] 국내 정화제도 운영 흐름도

3. 오염토양 정화사업 추진절차에 따른 세부업무 범위 조사

본 장에서는 특정토양오염관리대상시설 등에서 오염도가 확인되었을 경우 정밀조사부터 최종 정화검증까지의 정화사업 추진 체계를 설명하고, 정화사업을 추진하기 위한 각 단계별 세부업무범위를 소개하고자 한다.

최초 특정토양오염관리대상시설 설치자는 토양오염도 검사를 통해 오염물질이 토양환경보전법상의 우려기준을 초과할 때에는 정밀조사를 수행하여야 한다. 정밀조사는 크게 기초조사, 개황조사, 정밀조사로 나누어지며 단계별 추진체계는 [표 3-1]과 같다.

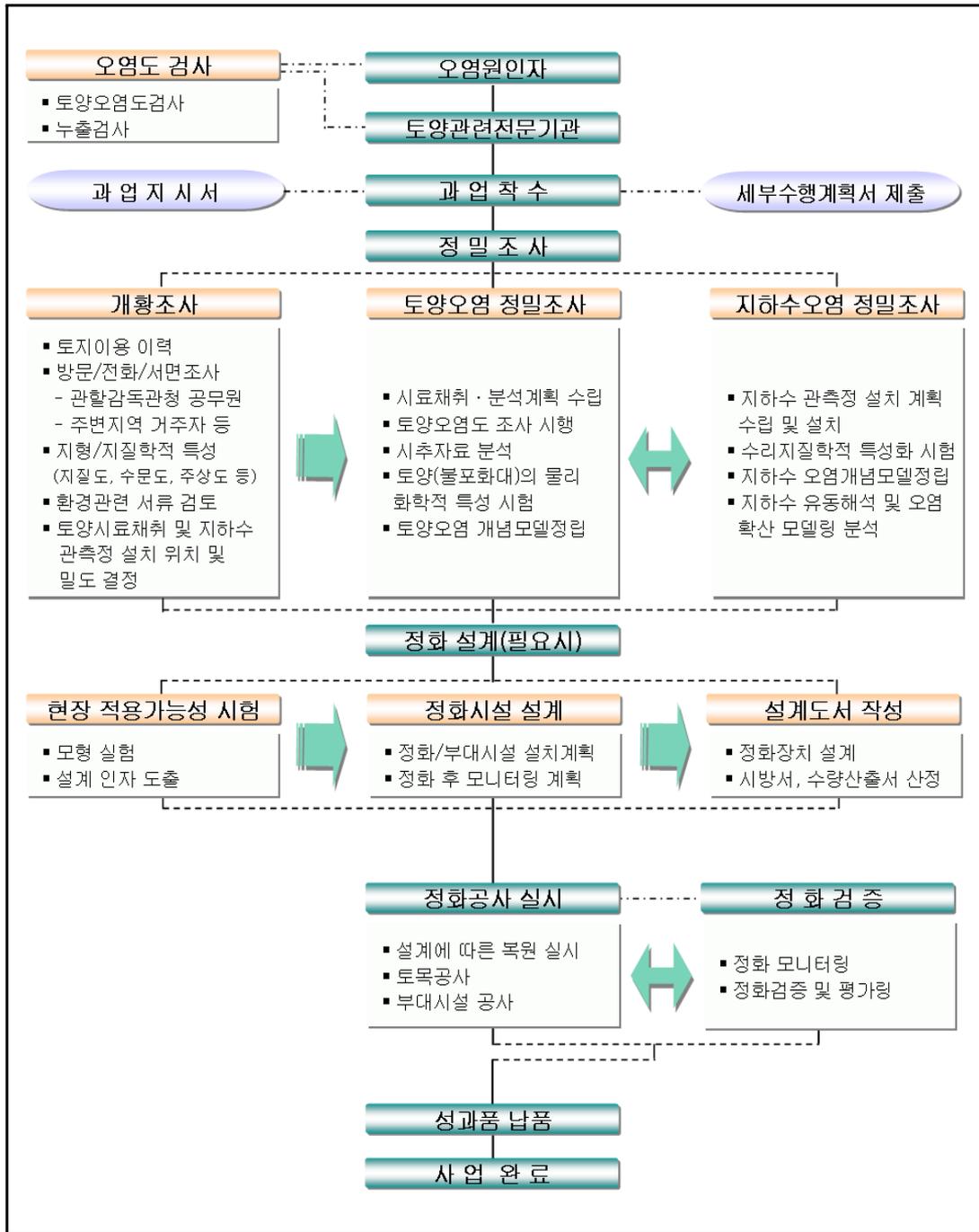
[표 3-1] 정화사업 추진절차에 따른 세부업무범위

1. 오염도검사	특정토양오염관리대상시설 설치자가 토양관련 전문기관을 통해 실시하는 법정 검사	
2. 정밀조사	기초조사	자료조사, 청취조사 및 현지조사 등을 통하여 토양오염 가능성 유무를 판단
	개황조사	조사지역의 오염면적 및 오염범위를 파악하기 위한 사전 개략조사
	정밀조사	정밀조사는 오염개연성이 확인된 오염물질을 대상으로 토양오염 현황을 평가하는 것을 그 목적으로 하며, 작업의 범위를 고려하여, 조사계획 수립, 조사 활동, 조사 자료의 분석/평가, 조사결과 해석 및 오염량 산출, 그리고 최종보고서 작성과 같이 5단계 작업으로 수행 함
3. 적용성 평가 및 설계	적용성 평가는 오염이 확인된 부지에 대하여 지질학적 특성, 토양 및 오염물질의 성상 등을 조사한 후 처리물질, 최종처리 농도, 대상 부지의 활용 방안, 처리 기간 등을 복합적으로 고려하여 현 부지에 적용 가능한 정화기술을 선정하고, 이를 바탕으로 기본설계 및 실시설계 수행 함	
4. 정화공사	정화공사는 타당성 평가 및 설계를 바탕으로 토양정화업에 등록된 업체를 통하여 정화공사를 수행 함	
5. 정화검증	토양정화의 검증은 오염원인자에 의해 검증기관으로 선정된 토양관련 전문기관이 오염원인자로부터 위탁받은 토양정화업자의 정화공사 진행과정과 완료를 독립적이고 객관적으로 확인하는 업무	

정밀조사를 통하여 조사부지의 오염물질 종류 및 오염범위 등을 분석·평가하여 최종적으로 대상 부지의 토양오염현황을 평가한다. 이러한 토양오염현황평가 결과를 바탕으로 대상 부지에 적용 가능한 정화기술을 선정하기 위하여 적용성 평가(RI/FS : Remedial Investigation / Feasibility Study)를 실시하게 되며, 특히 적용성 평가에서는 대상 부지의 지질학적 특성, 토양 및 오염물질의 성상을 조사한 후 처리물질, 최종처리 농도, 대상 부지의 활용 방안, 처리 기간 등을 복합적으로 고려하여 현 부지에 적용 가능한 최적의 정화기술을 선정하게 된다. 최종 기술이 선정되면 처리에 필요한 설계인자 및 제한 인자들을 바탕으로 실시설계를 실시하게 된다.

실시설계가 완료되면 토양정화업에 등록된 업체를 대상으로 하여 정화공사가 시행된다. 이 과정에서 정화가 적정하게 진행되고 있는지, 정화 공사가 완료되어 오염 토양의 정화기준을 만족하는지에 대한 정화검증 단계를 거쳐야 한다.

또한 정화검증은 정화된 오염토양이 정화기준을 만족하는가를 확인하는 동시에 토양환경보전법, 폐기물관리법, 수질환경보전법, 대기환경보전법, 기타 관련법 및 환경부에 의해 제정된 관련 규정들에 따라 적법하게 이루어지면서 토양정화가 진행되었는지를 검증한다. [그림 3-2]는 정밀조사부터 정화검증까지 전반적인 업무 추진 흐름도를 보여주고 있다.



[그림 3-2] 오염토양 정화사업관련 업무추진 흐름도

3.1 토양오염도검사

토양오염도검사

일정기간이 경과한 특정토양오염관리대상시설에서 실시하여야 하는 법정검사

※ 토양오염공정시험방법 참조(환경부고시 제2002-122호)

(1) 토양오염도조사

- 토양오염조사기관에 의해 실시
- 특정토양오염관리대상시설 지역의 토양 오염도 조사의 경우 토양오염물질의 누출이 인지되거나 토양오염의 개연성이 높은 2개 지점, 주변지역 1개 지점에서 토양시료 채취 및 분석
- 토양시료채취 방법 및 기타사항은 토양오염공정시험방법 참조

(2) 누출검사

- 누출검사기관에 의해 실시
- 탱크 및 배관을 대상으로 비파괴시험법, 가압시험법 등을 통하여 오염물질의 누출 여부 판단

3.2 토양 정밀조사

(1) 기초조사

기초조사

자료조사, 청취조사 및 현지조사 등을 통하여 토양오염 가능성 유무를 판단하기 위한 것으로 다음과 같은 조사활동 등이 포함됨

※ 토양오염정밀조사지침 참조(환경부고시 제2001-186호)

□ 자료조사

토지사용 이력조사, 특정오염관리대상시설 등에 관한 시설내역조사 등

□ 현지 확인조사 및 청취조사

1. 토양오염물질의 종류, 오염물질의 진행방향 예측 및 개략적인 오염범위 추정
2. 기타 과거 사고 이력 등 토양오염의 영향을 파악할 수 있는 관련자료 조사

(2) 개황조사 및 정밀조사

개황조사 및 정밀조사

기초조사 결과를 바탕으로 오염개연성이 존재하는 부지에 대하여 시료 채취 및 분석 등을 통하여 오염물질, 오염범위 및 오염량 등을 조사

※ 토양오염정밀조사지침 참조(환경부고시 제2001-186호)

□ 기초조사 검토

기초조사 검토를 통해 조사에 필요한 소요기간 산정, 조사대상 오염물질의 선정, 시료 채취 지점 및 시료 채취 지점수 등을 결정

□ 시료채취

시료채취 지점 밀도, 채취 깊이 결정은 토양오염정밀조사지침을 준수하되 현장 여건에 따라 조정이 가능. 단 시료채취 지점 등을 선정하기 위해서는 많은 현장 경험 등을 필요로 함

□ 오염범위 및 오염토량 산정

토양오염범위를 산정하기 위해서는 조사 대상 부지에 대한 수치지도(1:5000)가 필요로 하며, 더 정확한 토양오염범위의 산정을 위해서는 GPS 측량, 토목 측량 등의 작업이 필요로 함. 이러한 측량 자료와 토양관련 전문프로그램(예 Surfer v.8) 등을 이용하여 최종 토양오염범위 및 오염토량을 산정

□ 토양오염방지대책 및 정화방안 제시

대상부지에서 검출된 오염물질, 오염물질의 농도, 정화기간, 대상부지의 이용여부, 지형 및 지질여건 등을 고려하여 조사부지에 적용 가능한 정화방안을 제시, 단 최적의 정화기술 선정은 정화 타당성 평가 등을 통한 실시설계 후 최종 정화방안 선정

3.3 적용성 평가 및 설계

적용성 평가 및 설계

적용성 평가는 대상 부지에 선정된 정화기술들의 적용가능 여부를 평가하는 것으로서 설계에 필요한 정보를 제공하고, 이러한 자료를 바탕으로 설계도서, 내역서, 시방서 등을 작성

(1) 정화방안 수립

□ 정화목표 설정

법적 기준치, 사회적 요구 사항, 오염물질의 종류, 부지여건, 정화 후 부지의 활용 방안, 정화기간 등을 복합적으로 검토하여 정화목표 설정

□ 정화방안 제시

1. 대상부지에 대하여 법적 및 사회적 요구 사항 등을 고려한 정화목표 설정
2. 현장 및 실내 시험 등을 통한 정화 적용성 평가를 수행 후 효율적이고 경제적인 정화 방안 제시
 - 실내실험(Bench test) : 실험실 규모에서 처리기술의 변수를 고려하며 효율성을 평가하는 실험
 - 현장실험(Pilot test) : 실내실험 수행결과에 의해 산출된 여러 변수를 현장에 직접 적용함으로써 처리기술의 실제적인 효율성 및 운전조건 등을 도출하기 위한 실험

(2) 정화 설계

법정의 건설기술관리법, 엔지니어링 사업대가 기준 등을 통하여 기본설계, 실시설계 업무를 수행하며, 기본설계 및 실시설계에 대한 업무범위는 다음과 같다.

□ 기본설계

- 주요 설계수행 지침
- 예비설계 및 기본공사비 산정
- 설계요강의 결정
- 설계지침의 작성 등

□ 실시설계

- 기본설계 또는 계획의 검토(제반 인허가 사항 포함)
- 실시설계에 필요한 자료의 수집
- 설계요강의 결정
- 설계지침의 작성
- 도면 및 계산서 작성
- 시방서 및 예정공정표 작성
- 공사수량산출 및 공사비 내역서 작성 등

3.4 오염토양 정화공사

오염토양 정화공사

대상부지에 대한 실시설계 결과를 바탕으로 정화계획을 수립하고 오염토양 실시설계 및 시방서에 따라 정화공사 수행

(1) 정화계획 수립

□ 지적법상 지적구분에 따른 정화목표 설정

- 처리토양 및 오염범위
- 대상오염물질 및 이를 처리하기 위한 정화방법
(예 : 처리대상 물질이 중금속일 경우 생물학적 처리기술 등은 적용 불가)
- 정화방법에 따른 정화일정
(예 : 토양환경보전법상 토양정화기간은 2년이내에 이행기간을 정하여야 하며, 부득이하 경우 1년의 범위안에서 2회까지 그 이행기간을 연장할 수 있음)
- 적절한 적용성 평가 등을 통한 정화방법 선정
- 정화공사를 위한 관련 인허가 사항
- 정화검증 기관 및 시공업체 선정

(2) 시공

정화공사에서의 시공에 포함된 일련의 과정은 다음과 같다

- 부지준비 및 부대시설 공사
- 오염토양 터파기 등을 포함한 기초 토목공사
- 기술별 시스템 제작 및 설치

(3) 시스템 운영 및 모니터링

- 시스템 작동 및 시운전
- 주기적인 시스템 점검
- 기술별로 주요 영향인자 점검
- 주기적인 모니터링을 통한 오염농도 저감 확인
- 가스 처리, 폐수 처리 등에 필요한 기타 보조 시스템 점검 및 교체 등

기타 기술별 세부 검토사항은 제Ⅳ장 오염토양 정화방법 가이드라인에 설명되어져 있다.

3.5 토양정화의 검증

토양정화의 검증

정화공사 수행시 정화공사에 대한 진행과정과 정화완료를 독립적이고 객관적으로 확인하는 업무

※ 토양정화검증방법 및 검증수수료 산정기준에 관한 고시(환경부고시 제2005-194호)

(1) 검증계획의 수립

정밀조사보고서, 설계보고서, 정화계획서 등 관련자료 검토 및 현장조사, 청취조사 등을 통하여 검증계획서 작성

(2) 과정검증

과정검증은 토양정화 진행 중에 실시하는 검증단계로서 오염토양정화계획의 이해여부 확인 및 주기적인 토양시료 채취·분석을 통해 오염농도의 저감을 확인하는 업무, 단 오염토량 1,000 m³ 이하일 경우 과정검증 생략

(3) 완료검증

정화완료 후 최종 시료채취·분석을 통해 오염농도가 정화목표까지 달성되었는지의 여부 확인, 정화목표까지 정화 완료시 검증기관은 토양정화검증서를 발급하며, 정화 목표까지 정화되지 않았을 경우 재검증 수행

(4) 과정검증 및 완료검증 공통사항

□ 굴착작업

- 굴착현장을 현장 확인하여 오염토양이 적정하게 굴착되었는지 확인

- 굴착된 오염토와 비오염토가 적정하게 분류되는지 확인
- 굴착된 오염토양이 현장에서 적정하게 야적·보관·이송되는지 여부 확인
- 환경의 적정관리여부 확인
 - 정화공사 중 발생하는 폐기물, 폐수, 폐가스 등의 적정 관리여부 확인

(5) 정화토양 처분

자료검토, 현장 확인 등을 통하여 정화 목표로 정화된 토양이 최종적으로 토양 환경보전법상의 지역 기준에 맞게 반출되어 처분되었는지 확인

제Ⅳ장 정화사업 추진 절차에 따른 가이드라인

1. 가이드라인 대상 정화기술 선정

제Ⅱ장에서 언급된 바와 같이 국내·외에는 매우 다양한 종류의 오염토양 정화기술이 개발되어 있으며, 1980년대부터 토양오염에 대한 체계적인 관리를 하고 있는 미국의 경우 기술들이 대부분 상용화되어 활발히 사용되고 있으나 국내의 경우에는 다양한 기술들이 개발되어 있음에도 불구하고 제한된 정화 기술만이 현장에 적용되고 있는 실정이다.

또한 토양오염의 체계적인 관리에 대한 역사가 다른 환경선진국에 비하여 상대적으로 짧기 때문에 개발된 기술을 안정적으로 보급하고 기술적, 관리적 운용에 도움을 줄 수 있는 지침서 등이 부족한 상태이다.

따라서 다양한 기술 중 현재 국내에서 많이 사용되어 효용성이 입증되었거나 향후 적용성이 높을 것으로 예상되는 정화기술에 대한 지침서를 우선적으로 제공하는 것이 매우 중요하다. 본 장에서는 표준화된 지침의 보급이 시급한 기술들을 우선적으로 선정하고 선정된 기술들에 대한 구체적인 적용방법, 설계기준, 운영요령 등의 기준을 제공하고자 하였으며, 소개되는 기술별 업무지침서는 오염토양 정화기술에 대한 통계조사 결과를 바탕으로 주로 석유계 화합물을 처리하기 위한 기술에 대하여 작성하였다.

반면 폐금속광산, 사격장 등에서 발생하는 중금속으로 오염된 토양을 처리하기 위해서는 “특정토양오염관리대상시설의 방지사설 설치 등에 관한 고시”의 규정에 의거하여 고형화/안정화, 식물재배 정화법, 토양세척법, 용제추출법, 동전기법, 유리화법 등의 6개 기술이 적용 가능하다. 그러나 아직까지 국내에서 중금속을 대상으로 이러한 기술을 적용한 실적이 매우 적고, 현장 적용성 등에 대한 효율성 등의 검증에는 한계가 있어 본 책자에서는 포함하지 않았으며, 향후 중금속이나 불소, 유기인 등으로 오염된 토양을 처리하기 위하여 지속적인 기술의 상용화 및 기술의 축적 등을 통해 이 분야에 대한 지침서 작성도 진행되어져야 할 것으로 판단된다.

이에 본 책자에는 주로 석유계 화합물을 처리하기 위한 생물학적통풍법, 토양증기추출법, 토양경작법, 화학적산화법 및 저온열탈법에 대하여 이들 기술에 대한 기술개요, 영향인자, 설계인자 및 설계방법, 운영방법 및 모니터링 방법등의 내용을 외국자료

(How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Site, US EPA, 2004) 및 국내 실정 등을 고려하여 작성하였다. 다만 바이오파일 기술의 경우에는 국내에서 적용실적이 많은 기술이지만, 국립환경과학원에서 (행정간행물등록번호 11-1480083-000244-01, 2004년) 바이오파일 기술에 대한 세부 업무지침서를 작성 및 보급하였기 때문에 본 책자에서는 제외하였다.

2. 생물학적통풍법 (Bioventing)

2.1 기술개요

생물학적통풍법은 지하 불포화대에 존재하는 생분해성 유기물을 토착미생물을 활용하여 제거하는 원위치 토양정화 기술로 주입정 또는 추출정을 이용하여 불포화대로 공기를 주입하거나 영양염류를 공급하여 토양미생물에 의한 오염물질의 분해를 유도하는 기술이다.

생물학적통풍법은 토양증기추출법(SVE)과 유사하나 토양증기추출법은 오염물질을 주로 휘발시켜 제거하는 반면 생물학적통풍법은 오염물질의 증발을 최소화하고 생분해를 촉진시키는 기술이다[그림 4-1]. 따라서 일반적으로 생물학적통풍법에서는 토양증기추출법에 비해 공기의 흐름을 약 10배 정도 낮게 유지한다. 그러나 실제 현장 적용시 두 기술 모두 어느 정도의 생분해와 휘발이 동시에 발생하게 된다.

생물학적통풍법으로 처리 가능한 오염물질은 주로 휘발유, 항공유, 등유, 경유 등의 석유계 물질이며, 특히 경유나 등유와 같은 중간 정도의 분자량을 갖는 물질로 오염된 토양을 정화하는데 매우 효과적이다. 휘발유를 비롯한 저분자량 유류의 경우는 생물학적통풍법을 적용하기 보다는 토양증기추출법(SVE)이 더 효과적이다. 또한 윤활유와 같은 고분자 유류로 오염된 지역에 생물학적통풍법을 적용할 경우에는 토양미생물에 의한 생분해 과정에 긴 시간이 소요되기 때문에 정화기간이 비교적 장시간 요구되기도 한다.

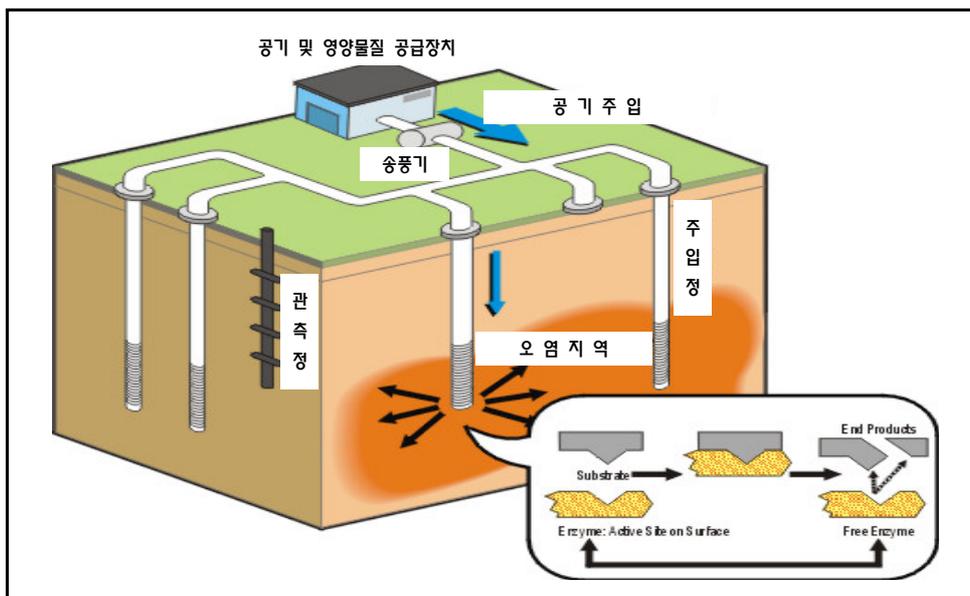
생물학적통풍법에 대한 자세한 기술분류 및 처리물질은 [표 4-1]에 기술하였으며, 생물학적통풍법에 대한 장·단점은 [표 4-2]에 기술하였다.

[표 4-1] 생물학적통풍법의 기술분류 및 처리물질

기술분류	원위치/위치외	In-situ 적용		Ex-situ 적용
	공정원리	생물학적 처리	물리/화학적처리	열적 처리
	적용지역	불포화지역		포화지역
	적용매질	토양		지하수
	상용화 단계	상용화(full scale)	pilot scale	lab scale
처리물질	<ul style="list-style-type: none"> 유류계탄화수소, 비염소계 용매, 살충제, 유기화합물질 비할로겐 VOCs 및 SVOCs, 유류 			

[표 4-2] 생물학적통풍법 장·단점

장 점	단 점
<ul style="list-style-type: none"> 소요 장비의 조달이 용이하며 설치가 간단함 정화공사 중에도 부지를 활용할 수 있으며 건물하부와 같은 접근이 불가능한 곳도 정화 가능 정화비용이 타기술에 비해 저렴 공기분산법(airspaging) 이나 지하수양수 처리법 등의 다른 정화 기술과 조합 가능 	<ul style="list-style-type: none"> 높은 초기 오염농도에 의하여 미생물의 활동에 독성을 나타낼 수 있음 토양투수성이 낮거나 점토질의 함량이 높은 경우, 지하특성에 대한 정보가 부족할 경우 등에는 적용이 제한될 수 있음 매우 낮은 농도까지 처리가 어려움 경우에 따라 배출가스 처리를 위한 비용이 추가됨



[그림 4-1] 생물학적통풍법 모식도

2.2 생물학적통풍법 정화계획의 유효성 평가절차

정화계획의 유효성 평가는 정화계획 수립시 유류로 오염된 토양을 생물학적통풍법으로 정화하고자 할 때 오염부지에 본 기술의 적용 가능여부 및 적절한 정화계획 수립 등을 평가하기 위한 자료로 활용된다.

이러한 유효성 평가 절차는 아래와 같이 4개 부분으로 구성되어 있다.

□ 생물학적통풍법의 유효성 평가절차

1단계 : 생물학적통풍법의 초기 적용성 평가 단계에서는 생물학적통풍법이 본 부지의 정화방법으로서 고려대상인지 여부를 신속하게 결정한다.

2단계 : 생물학적통풍법의 세부 적용성 평가 단계에서는 생물학적통풍법이 대상 부지의 정화에 효과적으로 적용될 수 있는지에 대한 토양 특성 및 오염물질의 특성 등 세부 기준들을 평가하며 실내 및 현장 실험, 자료 등의 검토를 통해 본 기술의 적용가능 여부를 최종 판단하게 된다.

3단계 : 생물학적통풍시스템 설계평가 단계로서 기본 설계를 위한 설계인자 및 충분한 적용성 평가시험이 수행되었는지의 여부를 평가한다.

4단계 : 운영 및 모니터링 계획 평가 단계에서는 시운전 계획, 운영/모니터링 계획의 적정여부, 정화과정 중 모니터링 항목 등이 적절한지 검토한다.

2.3 생물학적통풍법의 초기 적용성 평가

초기 적용성 평가에서는 특정 오염부지에 생물학적통풍법의 적용가능성 여부를 결정하기 위하여 아래와 같은 주요 인자를 검토한다.

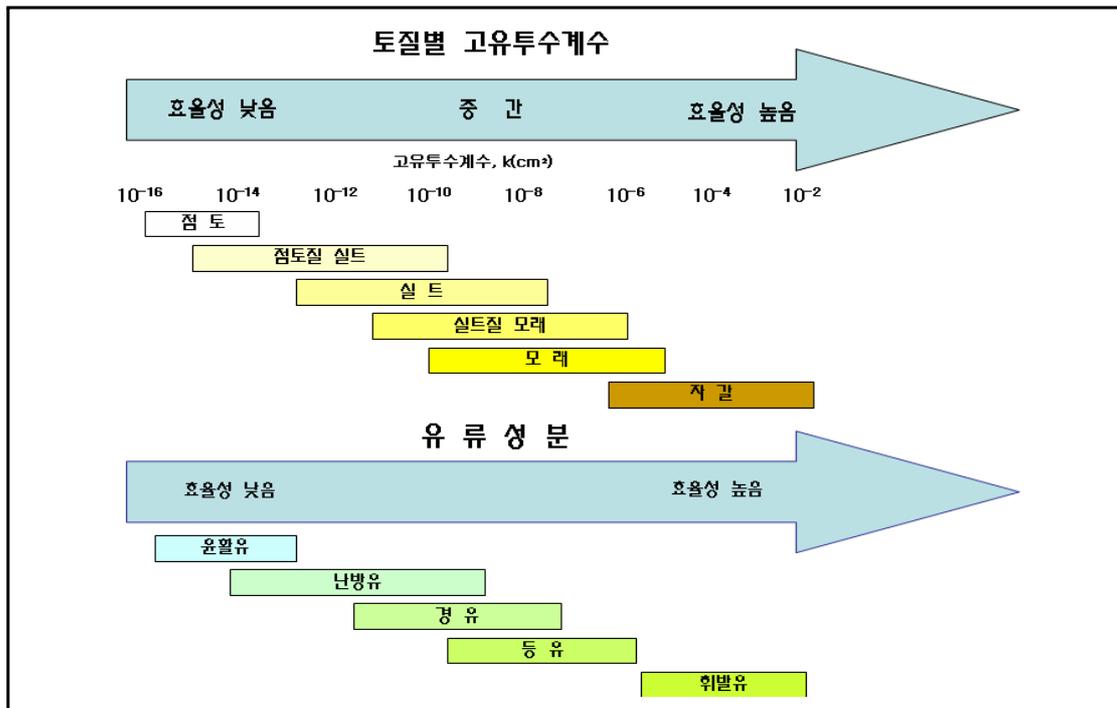
□ 석유계물질로 오염된 토양의 투수계수(Permeability)

□ 오염물질의 생분해성(Biodegradability)

일반적으로 토양의 종류의 의해 결정되어지는 토양의 투수계수는 미생물의 생

분해에 영향을 미치는 산소의 전달속도를 결정하는 주요 인자이다. 점토나 실트와 같은 미세토양은 모래나 자갈과 같은 조대토양에 비해 투수성이 낮다. 특히 생물학적통풍법을 적용하기 위해서는 토양의 투수계수가 10^{-10}cm^2 이상이어야 적용 가능한 것으로 보고되고 있다[그림 4-2]. 즉 미사질토 보다 입경이 큰 토양으로 구성 되어 있을 경우 보다 높은 효율을 기대할 수 있다.

오염물질의 생분해성은 미생물이 석유계 화합물을 이산화탄소와 물로 분해하는 능력의 척도이다. 토착 미생물에 적당한 산소와 영양분을 공급해 주면 석유계 화합물은 보통 분자량에 상관없이 분해가 이루어진다. 고분자 오염물질은 생분해 속도가 저분자 물질에 비해 낮으므로 저분자 물질일수록 생물학적통풍법에 의해 높은 정화효율을 기대할 수 있다[그림 4-2].



[그림 4-2] 생물학적통풍법 초기 적용성 검토

2.4 생물학적통풍법의 세부 적용성 평가

정화계획에 대한 개략적인 초기평가 결과 생물학적통풍법이 본 부지의 정화에 적절하다고 판단되었다면 생물학적통풍법에 대한 세부 적용성 평가를 수행한다. 세부 적용성 평가에서는 초기평가에서 다루지 않았던 주요 영향인자들에 대하여 구체적으로 검토한다.

[표 4-3]은 세부 적용성 평가에서 고려되어야 할 영향인자들에 대하여 나타내고 있으며, 제공된 영향인자와 실제 현장에서 도출된 영향인자들을 비교·분석 평가함으로써 생물학적통풍법이 본 부지에 효과적으로 적용될 수 있는지를 결정하게 된다.

[표 4-3] 생물학적통풍법의 주요 영향인자

오염부지 특성	오염물질 특성
고유투수계수 토양구조 및 지층구조 토착미생물 토양 pH 수분함량 토양온도 영양염류 농도 지하수위	화학구조 농도 및 독성 증기압 오염물질의 구성 및 비등점 헨리상수

2.4.1 오염부지 특성에 따른 주요 영향인자

(1) 고유투수계수(Intrinsic Permeability)

토양의 고유투수계수는 유체를 전달할 수 있는 정도를 나타내는 것으로서 휘발작용의 극대화과 지중 미생물에 공급할 수 있는 산소의 양을 결정하는 요소이기 때문에 생물학적통풍법을 적용하는데 있어 가장 중요한 요소이다.

석유계 화합물을 분해하기 위해서는 이것을 분해할 수 있는 많은 개체수의 지중의 미생물이 필요하며, 지중 미생물들은 산소를 이용하여 석유계 화합물을 분해하고 미생물자체의 증식에도 활용한다. 보통 1g의 석유계 화합물을 분해하는데 3~3.5g의 산소가 필요하며 [표 4-4]는 한 개의 주입정에서 유량을 조절하면서 공기를 주입했을 경우 실제로 지중에 공급되는 산소량을 나타낸 것이다.

[표 4-4] 관정에 주입하는 공기 유량에 따른 지중 산소 공급량

공기 유량		공급되는 산소량	
SCFM*	m ³ /day	lb/day	kg/day
1	2.83×10 ⁻²	23	10
5	1.42×10 ⁻¹	117	52
10	2.83×10 ⁻¹	233	106
20	5.66×10 ⁻¹	467	212
50	1.42×10 ⁰	1170	529
100	2.83×10 ⁰	2330	1060

* SCFM : Standard Cubic Feet per Minute

토양의 종류에 따라서 다양한 고유투수계수 값을 나타내지만 대체로 굵은 입자의 토양(Coarse-grained soil)이 작은 입자의 토양(Fine-grained soil)보다 더 큰 고유투수계수 값을 가지고 있어 생물학적통풍법을 적용하기에 보다 유리하다. 특히 토양의 공극 사이에 물이 함유되어 있으면 공기의 흐름을 방해하는데 이러한 현상은 작은 입자 토양에서 잘 나타난다. [표 4-5]는 토양의 고유투수계수에 따른 기술의 적용성을 나타내고 있다.

[표 4-5] 토양의 고유투수계수에 따른 생물학적통풍법의 적용성

고유투수계수[cm ²]	생물학적통풍법의 적용성
$k \geq 10^{-8}$	적합
$10^{-8} \geq k \geq 10^{-10}$	부분적 적합
$k \leq 10^{-10}$	부적합

토양의 고유투수계수는 포화대에 존재하는 토양의 투수계수(수리전도도)를 이용하여 평가하며, 투수계수란 물이 토양을 통과하는 능력의 척도를 말한다. 투수계수는 슬러그시험 또는 양수시험을 통해 결정하며 투수계수는 다음 식을 이용하여 고유투수계수로 변환하여 사용한다.

$$k = K (\mu / \rho g)$$

k = 고유투수계수 (cm^2)

K = 투수계수 (cm/sec)

μ = 물의 점도 ($\text{g}/\text{cm} \cdot \text{sec}$)

ρ = 물의 비중 (g/cm^3)

g = 중력가속도 (cm/sec^2)

20°C 에서 $\mu/\rho g = 1.02 \times 10^{-5} \text{ cm}/\text{sec}$

k 값은 cm^2 에서 Darcy로 변환할 경우 10^8 을 곱하면 된다.

(2) 토양의 구조 및 지층구조

토양 매질의 공극을 따라서 공기가 공급되기 때문에 토양 입자의 구조 또한 중요한 요소이며, 점토(Clay)로 구성된 토양이라고 할지라도 미세한 단열(Fracture)이 많으면 보통의 점토 토양보다 더 큰 처리 효과를 볼 수도 있다. 이러한 이유는 일반적으로 단열이 많은 토양이 그렇지 못한 토양보다 유체의 흐름이 원활하기 때문이다.

반면 토양의 종류가 깊이별로 서로 다른 층으로 구성되어 있을 경우, 점토와 같은 불투수성 토양이 중간에 삽입되어 있는 경우도 있다. 이러한 경우에는 특정 부분에서 효율이 현저하게 저하될 수도 있다. 토양 구조의 특성 파악 및 깊이별로 어떠한 매질로 구성되어 있는가는 토양 시료채취시 기록한 자료를 통해서 평가할 수 있다.

(3) 토착미생물

유기오염물질의 생물학적 처리란 미생물이 증식하거나 생존하는데 필요한 에너지원이나 탄소원으로 유기오염물질을 사용하는 과정에서 보다 효과적인 처리가 될 수 있도록 산소 및 영양염류 주입 등 인위적인 조절을 통하여 유기오염물질이 생분해되도록 유도하는 것을 말한다. 통상적으로 생물학적 처리에서 유기오염물질을 분해하기 위해 이용되는 미생물은 종속영양미생물로서 유기오염물질을 탄소원과 에너지원으로 이용한다. 이러한 유기오염물질은 미생물에 의한 분해과정을 통해서 분자구조가 변화하거나, 완전히 분해되게 된다.

토양내 토착미생물의 존재여부 및 농도를 평가하기 위해서는 토양시료 채취 후 평판계수법 등의 실험을 통하여 종속영양미생물의 농도를 구한다. 종속영양미

생물의 경우 대부분의 토양에서 관찰되지만 1,000 CFU/g 이상일 경우 생물학적통풍법에 적용이 가능한 반면, 1,000 CFU/g 이하로 관찰되어질 경우 인위적인 종속 영양미생물 및 영양염류의 주입, 산소량 조절 등의 인위적인 조절을 통하여 생물학적통풍법을 적용하기에 적절한 수준까지 종속영양미생물을 증식시킬 수도 있다.

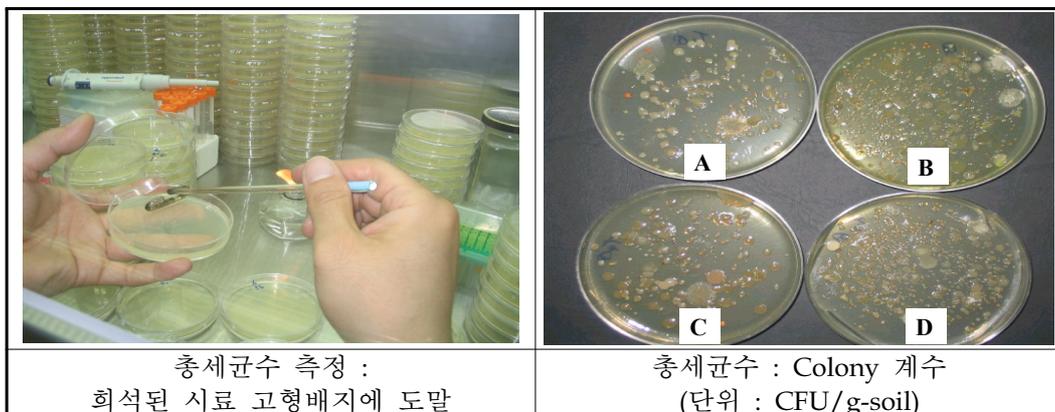
이러한 미생물을 이용한 기술의 적용시에는 토양내 토착미생물의 존재여부 및 농도 등이 중요하며, 이를 측정하기 위하여 토양시료를 채취하여 평판계수법 등의 실험을 수행한다. 평판계수법에는 표면평판법과 주입평판법이 있다. 주입평판법은 배양액 0.1~1.0ml를 피펫을 이용하여 살균된 페트리접시에 옮긴 후 녹인 한천배지를 주입하고 작업대 위에서 약하게 흔들어서 잘 혼합한다. 이 방법은 시료가 녹인 한천배지와 혼합되고 녹인 한천배지 온도가 45°C이기 때문에 45°C에서 살아남을 수 있는 세포만을 측정할 수 있다.

표면평판법에서는 0.1 ml이하의 배양액을 살균된 유리봉을 이용하여 한천평판배지 표면에 끌고루 도말한다. 이 평판배지를 집락이 형성될 때까지 배양한 후 집락의 수를 측정하여 종속영양미생물의 농도를 구한다[그림 4-3].

[표 4-6] 종속영양미생물의 농도 및 생물학적통풍법의 적용성

총 종속영양미생물 농도	생물학적통풍법의 적용성
>1000 CFU/g 건조토양	적합
<1000 CFU/g 건조토양	부분적 적합

* CFU : colony forming units



[그림 4-3] 평판계수법

(4) 토양 pH

일반적으로 미생물의 활동에 가장 적합한 토양 pH는 7이다. 따라서 생물학적 통풍법을 적용하기에 적합한 토양의 pH는 6~8의 범위이며, 이 범위를 벗어나는 토양을 처리시에는 석회물질 투여 등 토양 pH 조절에 대한 공정이 설계 및 운영 계획 등에 포함되어져 있는지 확인한다.

[표 4-7] 토양 pH 및 생물학적통풍법의 적용성

토양 pH	생물학적통풍법의 적용성
$6 \leq \text{pH} \leq 8$	적합
$6 > \text{pH} > 8$	토양 pH 조절 필요

(5) 수분함량

미생물은 증식 및 활동을 위해 일정량의 수분을 필요로 한다. 반면 수분은 미생물의 신진 대사에 중요한 요소이지만 과도한 수분의 공급은 토양의 공극을 막아서 공기 흐름을 제한하고, 산소의 활용능력을 감소시키는 결과를 가져오기 때문에 적당한 수분을 유지하는 것이 중요하다. 가장 이상적인 토양내 수분함량은 40~85%이다.

특히 토양 수분함량이 높은 구간은 모세관대로서 점토층에서 주로 많이 나타나며, 모세관대의 함수율이 위의 범위를 벗어나는 경우에는 지하수 양수 등을 통해 주변의 지하수위를 하강시킬 필요가 있다.

(6) 토양온도

미생물의 증식 속도는 수분이나 산소, 영양염류의 공급 이외에 온도에 따라 결정되어 진다. 토양 미생물은 10℃ 이하의 특정 온도에서는 활동이 둔해지고 온도가 5℃가 되면 완전히 멈추게 된다. 그리고 석유계 화합물을 분해하는 미생물들은 45℃ 이상의 온도에서 분해 작용에 제한을 받는다. 보통 10℃~45℃의 온도범위에서 미생물의 활동과 증식 속도는 온도가 10℃ 상승할 경우 2배정도 빨라진다.

(7) 영양염류 농도

미생물은 세포성장 및 생분해 과정을 수행하기 위해 질소와 인 등의 영양염류를 필요로 한다. 이러한 영양염류 물질은 토양으로부터 충분한 양을 얻을 수 있으나 경우에 따라서는 미생물의 농도를 유지하기 위해 영양염류를 추가로 공급해야 하는 경우도 있다. 그러나 특정 영양염류의 과잉공급은 미생물의 대사를 저해시킬 수도 있다.

가장 널리 알려진 미생물의 세포구조식은 $C_5H_7O_2N$ 과 $C_{60}H_{87}O_{32}N_{12}P$ 이며, 주요 구성물질은 탄소(C), 질소(N), 인(P) 등으로 이루어져 있다. 이들 미생물을 이용하여 생분해를 촉진하기 위한 탄소:질소:인의 비율은 오염물질의 조성 및 생분해 과정에 관여하는 미생물의 종류에 따라 결정되나 보통 100:10:1~100:10:0.5가 일반적인 범위이다. 보통 생물학적통풍법에서 영양염류 공급은 주입정을 활용하여 액상형태로 공급한다.

일반적으로 칼륨의 첨가는 요구되지 않지만, 적용성 시험을 통해 칼륨(K)이 충분하지 않다고 판단되는 부지에서는, 인(P)의 절반정도의 양을 추가할 수 있다. 탄산칼륨(K_2CO_3)은 일반적인 칼륨(K) 공급원이다.

(8) 지하수위

생물학적통풍법의 경우 기본적으로 불포화대(Unsaturated zone)에 적용하는 기술로서 지표면에서 지하수위가 약 1m(3ft)보다 높으면 적용하는데 어려움이 있다.

지하수위가 높은 경우에는 진공 압력에 의해서 지하수위가 같이 상승한다. 따라서 휘발성 가스 및 이산화탄소 등을 회수하기 위한 추출정에서는 지하수위 상승으로 인하여 관정 스크린 막힘 현상에 따른 지중에 가해지는 진공 압력이 줄어들어 휘발성 가스의 회수가 어려워질 수 있다. 이러한 잠재적인 문제를 해결하기 위하여 지하수위가 낮은 지역은 주로 주입정을 이용하거나, 주위에 양수정을 설치하여 지하수위를 낮추기도 한다.

[표 4-8] 지하수위와 생물학적통풍법의 적용성

지하수위(m)	생물학적통풍법의 적용성
> 3m	적합
1m < 지하수위 < 3m	부분적 적합
< 1m	부적합

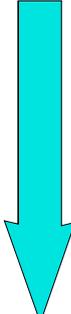
2.4.2 오염물질 특성에 따른 주요 영향인자

(1) 화학구조

대부분의 석유계 화합물은 휘발이나 미생물에 의한 분해가 가능하지만 복잡한 구조의 성분일수록 분해가 어렵고 반응 속도도 느리다. 또한 가장 작은 분자량(9개 이하의 탄소원자)을 가진 지방족(Aliphatic) 화합물 및 단일 방향족(Monoaromatic) 화합물들은 높은 분자량의 지방족 화합물 및 복합 방향족 화합물(Polyaromatic)보다 쉽게 분해된다. [표 4-9]는 석유계 화합물에서 보이는 여러가지 성분들의 생분해성(Biodegradability)을 나타내고 있다.

오염물질의 화학구조를 살펴보면 어떤 오염물질이 가장 난분해성 인지 확인이 가능하다. 따라서 이러한 정보를 이용하여 정화기간 산정, 생물학적 정화 가능성 평가, 현장 파일럿실험, 생물학적통풍법 운전 및 모니터링 계획 등은 생분해가 가장 느린 오염물질을 기준으로 이루어져야 한다.

[표 4-9] 석유계 화합물의 상대적 생분해성(Biodegradability)

생분해성	구성성분	주요 석유계 화합물
분해가 잘 됨  분해가 어려움	n-butane, l-pentane, n-octane	휘발유
	Nonane	경유
	Methyl butane, dimethylpentanes, methyloctanes	휘발유
	Benzene, toluene, ethylbenzene, xylenes	휘발유
	Decanes	경유
	Dodecanes	등유
	Tridecanes	난방유
	Tetradecanes	윤활유
	Naphthalenes	경유
	Fluoranthenes	등유
	Pyrenes	난방유
	Acenaphthenes	윤활유

(2) 오염물질의 농도 및 독성

토양에 높은 농도의 석유계 화합물과 중금속이 함유되어 있으면 독성으로 인

하여 분해에 관여하는 미생물의 활동이 둔화되며 분해 속도도 감소하게 된다. 일반적으로 석유계 화합물의 농도가 25,000 mg/kg을 초과하거나, 중금속의 농도가 2,500 mg/kg을 넘어서게 되면 미생물의 활동은 제약을 받게 되고 호기성 미생물에게는 독성을 가지므로 생물학적통풍법이 적용되기 위해서는 석유계총탄화수소 (Total Petroleum Hydrocarbon) 및 중금속의 농도가 각각 25,000 mg/kg, 2,500 mg/kg 이하가 되어야 한다.

[표 4-10] 오염물질의 농도 및 생물학적통풍법의 적용성

오염물질농도	생물학적통풍법의 적용성
석유계총탄화수소 ≤ 25,000 mg/kg 중금속 ≤ 2,500 mg/kg	적합
석유계총탄화수소 > 25,000 mg/kg 중금속 > 2,500 mg/kg	부적합(장기간 정화시간 필요)

미생물이 분해할 수 있는 최고 농도의 제한과 더불어 미생물이 분해할 수 있는 최저 임계농도도 있다. 어떤 오염물질이 최저 임계농도 이하가 되면 미생물은 활성에 필요한 충분한 탄소를 공급받지 못하게 된다. 지중의 미생물의 종류 및 석유계 화합물의 종류에 따라 최저 임계농도는 다르게 나타나지만 보통 0.1 mg/kg 정도로 알려져 있다. 또한 석유계총탄화수소 중에는 난분해성 물질도 포함되어 있기 때문에 석유계총탄화수소 농도의 95% 이상을 제거하는 것은 매우 어려운 것으로 알려져 있다.

(3) 증기압

증기압으로는 오염물질이 생분해되지 않고 휘발되는 정도를 판단할 수 있다. 오염물질의 증기압은 휘발 정도의 척도로서 어떤 물질의 증기가 그 물질의 액체 또는 고체와 평형상태에 있을 때 나타내는 압력이다. 높은 증기압(0.5 mmHg 이상)을 갖는 오염물질은 생분해 보다는 휘발에 의해 제거되기 쉽고, 비교적 낮은 증기압(0.5 mmHg 이하)인 오염물질은 주로 미생물에 의한 생분해로 제거된다.

석유계 화합물은 다양한 화학물질로 구성되어 있으며, 각각의 오염물질은 증기압에 따라 생물학적통풍법에 의해 휘발되는 정도가 다르다. 특히 휘발성 오염물

질의 농도가 높으면 추출 가스내의 유해가스를 제거할 수 있는 가스 처리장치를 설치하여야 한다.

[표 4-11] 석유계 화합물 구성 성분들의 증기압

석유계 화합물 구성 성분	증기압 [mmHg at 20℃]
Methyl t-butyl ether	245
Benzene	76
Toluene	22
Ethylene dibromide	11
Ethylbenzene	7
Xylenes	6
Naphthalene	0.5
Tetraethyl lead	0.2

(4) 끓는점(Boiling Point)

끓는점은 어떤 물질의 휘발성(Volatility)을 나타내는 또 다른 지표로서 석유계 화합물의 복잡한 구조 때문에 종종 끓는점으로 석유계 화합물들을 분류하기도 한다. 거의 모든 석유계 화합물들은 높은 분자량을 가지거나 끓는점이 높아서 정화하기에 긴 시간이 필요한 경우도 있지만 대부분 생물학적 분해가 가능한 물질들이다. 끓는점이 250~300℃에 있는 물질들은 어느 수준까지 휘발과 생분해로 제거할 수 있다. [표 4-12]는 주요 석유계 화합물질의 끓는점을 나타내고 있다.

[표 4-12] 주요 석유계 화합물의 끓는점

석유계 화합물	끓는점(℃)
휘발유	40~205
등유	175~325
디젤	200~338
난방유	>275
윤활유	비휘발성

(5) 헨리 상수(Henry's law constant)

헨리 상수도 역시 물질의 휘발성을 나타내는 방법 중의 하나로서 평형상태에

서 기체가 가하는 증기 압력을 의미하며, 헨리 상수가 100atm보다 큰 물질은 휘발성이 강한 물질로서 생물학적 분해보다는 휘발이 더 잘 일어난다.

[표 4-13] 주요 석유계 화합물 구성성분의 헨리상수

성분	헨리상수(atm)
Tetraethyl lead	4,700
Ethylbenzene	359
Xylenes	266
Benzene	230
Toluene	217
Naphthalene	72
Ethylene dibromide	34
Methyl t-butyl ether	27

2.4.3 현장 및 실험실 실험

현장 및 실험실 실험은 설계에 앞서 정화 효율성을 검토하고, 주요 인자를 도출함으로써 정화설계의 기초 자료로 활용되어 진다. 생물학적통풍법에서 주로 수행되어지는 현장 및 실험실 실험은 다음과 같다.

- 실험실 미생물 생분해 실험
- 미생물 호흡률 측정실험
- 추출/주입 관정실험(영향반경 실험)

(1) 실험실 미생물 생분해 실험

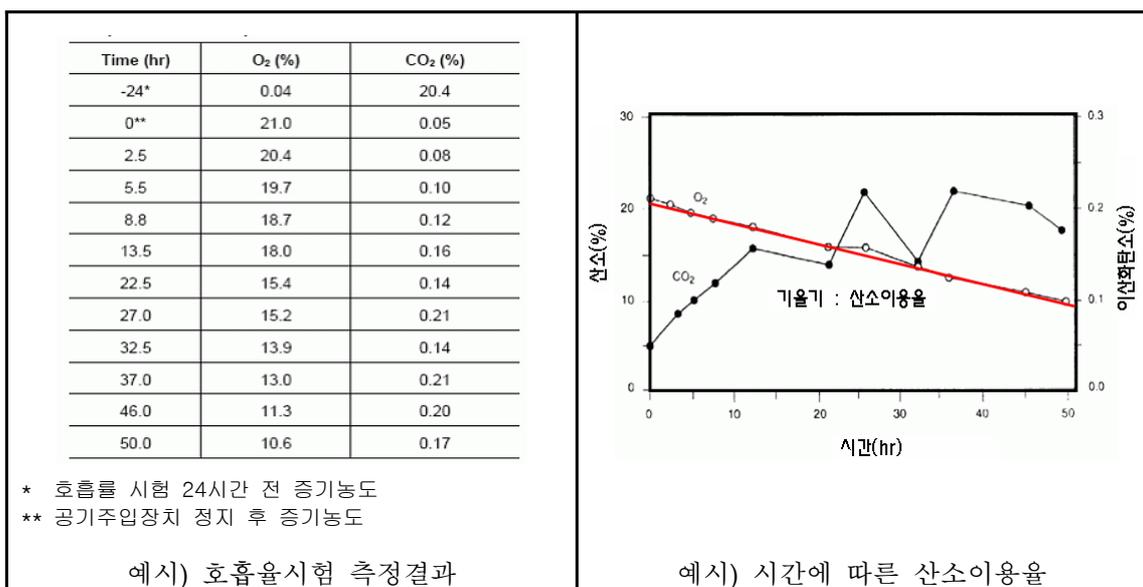
생분해 실험은 상온에서 오염물질의 생분해 정도 및 무기성 영양염류의 공급 여부를 평가하기 위해 수행한다. 미생물 생분해 실험에는 슬러리실험법과 컬럼실험법이 있으며, 슬러리실험법이 주로 이용되고 있다. 슬러리실험법은 현장토양시료와 현장 지하수를 혼합하여 여러 개의 토양모형을 제작한 후 미생물을 멸균한 시료, 산소만 공급하고 영양염류를 공급하지 않은 시료, 산소 및 영양염류를 모두 공급하는 시료로 구분하여 실험을 수행한다. 각 시료에 대해서는 4~12 주간동안 1주일 주기로 미생물 및 오염물질 농도를 측정함으로써 농도의 저감정도를 확인한다. 단 슬러리실험에서는 산소전달의 제한이나 토양 불균질 등의 현장상황을 반영

하지 못하기 때문에 최적의 상황에서 발생하는 결과로 추정할 수 있으며 보다, 실질적인 현장상황 등을 고려하기 위해서는 컬럼실험 등을 수행하여야 한다.

(2) 미생물 호흡률 측정실험

미생물 호흡률 실험은 토양 내 오염물질 분해속도를 계산하기 위한 자료를 얻기 위해 수행한다. 호흡률 실험에서 산소값 측정은 현장내 모니터링 관정보로부터 채취된 토양 가스에서 측정한다. 산소가스의 기록은 일반적으로 산소 농도가 5% 미만이거나 또는 산소 농도가 더 이상 감소되지 않을 때까지 수행하며, 측정주기는 2시간 간격으로 하다 점차 4시간, 8시간 등으로 측정간격을 조절하기도 한다. 미공병대 엔지니어링메뉴얼(토양증기추출법 및 생물학적통풍법)에는 미생물 호흡률 실험을 50시간 동안 시행하며, 초기에는 2시간 간격에서 점차 9시간으로 측정간격을 조절하여 측정하기도 한다. 산소 이용율을 결정하기 위해서는 시간과 산소 농도에 대한 상관관계선을 작성한다. 이 관계선의 기울기는 산소 이용율을 나타내며, 일(day)당 산소농도 변화로 표시한다([그림 4-4 참조]).

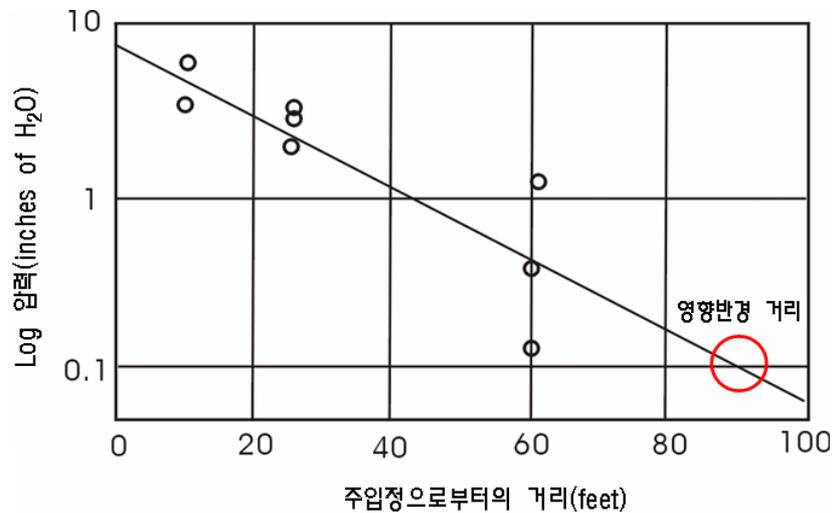
보통 미생물 호흡률 측정결과 산소 이용율이 약 1 %/day 이상일 경우 토착미생물을 이용한 생물학적통풍법이 적용이 가능한 것으로 보고 있으며, 산소 이용율이 1 %/day 이하일 경우 산소 이용율을 1 %/day 이상으로 만족하기 위하여 인위적인 미생물 살포 또는 영양물질 첨가 등이 수행되어야 한다(US EPA, 1995).



[그림 4-4] 미생물 호흡률 측정실험 결과

(3) 추출/주입 관정실험(영향반경 시험)

영향반경이란 추출정 또는 주입정에서 공기를 추출 혹은 주입했을 경우 공기 흐름이 가능한 최대 거리를 말한다. 현장에서 영향 반경을 결정하는 방법은 공기 또는 산소를 주입 또는 추출을 하고 압력계가 설치된 관측정에서 공기의 흐름을 관측하거나 공기 압력 변화를 측정하여 변화량이 0이 되는 최대의 거리를 찾는 것이 이론이지만 현실적으로는 압력 변화량이 0.1 inchH₂O(2.54 mmH₂O)가 되는 거리를 활용한다([그림 4-5] 참조). 이렇게 결정된 영향반경은 향후 설계시 공기를 주입할 주입정의 거리를 결정하는데 활용된다.



[그림 4-5] 압력 변화를 측정하여 도출된 영향반경 실험 결과

2.5 생물학적통풍법의 설계 평가

본 절에서는 설계에 필요한 주요 설계인자를 검토하고, 오염부지 정화를 위하여 기본적인 정화시스템을 포함하고 있는지를 확인하기 위한 생물학적통풍법의 구성요소를 설명하고자 한다.

2.5.1 설계를 위한 기본 정보

생물학적통풍법 시스템의 설계를 위해서는 다음과 같은 정보들을 참고하여야 한다.

(1) 영향반경(Radius of Influence, RIO)

영향반경이란 추출정 또는 주입정에서 공기를 추출 혹은 주입했을 경우 공기 흐름이 가능한 최대의 거리를 말한다. 설계시 영향반경은 토양의 물리·화학적 성질, 습도, 정화소요기간 등 여러 가지 요인들에 따라 달라질 수 있다. 영향반경은 보통 현장에서 현장실험을 통하여 압력계가 설치된 관측정에서 공기 압력 변화를 측정하여 변화량이 0.1 inchH₂O(약 2.5 mmH₂O)가 되는 거리를 활용하지만, 공기 흐름 모델링이나 다른 경험식을 이용하여 평가할 수도 있다. 대체로 설계 영향반경은 1.5m(점토)부터 30m(사토)까지 가능하다.

(2) 관정압력

관정압력이란 영향반경내에 설치된 관정에서 적절한 공기의 주입 및 추출을 평가하기 위하여 관정 상단에서 측정되는 압력(또는 진공)을 말한다. 관정압력(또는 진공)은 보통 현장에 설치된 관정에서 측정되며, 일반적으로 추출의 경우 약 75~2,500 mmH₂O, 주입의 경우 약 0.7~3.5 kgf/cm²의 범위 내이다. 투수성이 낮은 토양의 경우 적절한 영향 반경을 만들어내기 위해 더 높은 진공이나 압력이 필요하다.

그러나 관정내 높은 진공 압력은 지하수면의 상승에 따른 추출정 스크린 막힘 현상을 유도할 수 있으며, 공기 주입의 경우 높은 압력으로 주입시 오염된 증기를 오염되지 않은 토양과 지하수로 전이시켜 오염을 확산시킬 수 있다.

(3) 공기공급량

공기공급량은 각각의 주입정에 주입되는 단위 용적당 공기의 속도로 표현하며, 이러한 공기공급량으로 처리 구역으로의 산소전달율을 구한다. 공기공급량, 영향반경, 관정압력은 모두 서로 종속관계(예 : 특정 공기공급량을 유지하기 위해서는 특정 관정압력과 영향반경이 필요함)에 있다.

공기공급량은 보통 현장에 설치된 관정에서 측정되며, 수치해석 모델링을 이용하여 계산할 수도 있다(EPA, 1993). 생물학적통풍법 적용시 일반적인 공기공급량은 0.15~2.8 m³/min이다

(4) 초기증기농도(토양 및 추출가스)

초기 토양 시료 분석 및 가스 분석을 통하여 정화를 위한 적절한 공기 주입 및 추출량을 산정하여야 하며, 초기 가스 분석 결과는 향후 추출가스를 대기로 즉시 방출 가능한지 또는 배기가스처리장치를 설치하여야 할지에 대하여 결정하는데 이용된다.

(5) 가스 배출 및 모니터링

시스템 설계자는 휘발성 성분이 추출되는 장소에 휘발성유기화합물질의 모니터링을 위해 시료채취구가 포함되어지도록 고려하여야 하며, 이러한 시료채취구를 이용하여 휘발성유기화합물질(VOCs)을 주기적으로 측정하여야 한다. 생물학적통풍법의 경우 상황에 따라 설치된 추출정에서 배출가스가 발생되며, 이러한 배출가스를 대기로 방출하기 전에 적정 농도까지 저감시킬 수 있는 배기가스처리장치를 설치하여야 한다.

(6) 기타사항

시스템 설계시에는 주변 건물, 설비, 매설물, 주거지 등 현장 상황 등을 설계 공정내에서 고려하여야 한다. 또한 토양시료 채취 등을 통해 토양내 영양염류 조성비 등을 조사 후 대상지역에 영양염류의 추가 주입 여부 등을 결정하여야 한다.

2.5.2 생물학적통풍법 시스템 구성요소

설계 기준이 마련되면, 생물학적통풍법 시스템의 설계를 진행한다. 보통의 생물학적통풍법 시스템 설계에는 아래와 같은 정보들이 포함된다.

- 추출정(또는 주입정)의 방향, 배치, 설치 세부내역
- 파이프 설계
- 증기 사전 처리 설계(필요한 경우)
- 송풍기 사양
- 제어 설계

(1) 추출/주입정

생물학적통풍법 시스템에서는 지중 이산화탄소, 일부 휘발성유기화합물질 등의 가스를 제거하기 위한 수직 추출정이나 수평 추출정을 사용할 수 있다. 또한 이러한 수직 추출정 및 수평 추출정은 공기 주입을 위한 공기주입 관정으로도 사용되어 진다. 관정의 설치는 오염분포 및 현장상황을 고려하여야 하며, [표 4-14]는 오염부지에 특성에 따른 수직 추출정 및 수평 추출정 설치 조건을 보여주고 있다.

[표 4-14] 적용부지 조건에 따른 관정설치 조건

구 분	적용부지 조건
수직추출정	- 비교적 낮은 오염 심도(약 1.5 ~ 30m) - 지하수위 < 3 m
수평추출정	- 낮은 오염 심도(< 약 7.5m) · 일반적으로 오염심도가 < 3m 경우에는 수직관정이 더 효율적임 · 오염심도가 > 7.5m일 경우 수평관정을 설치하기 어려움 - 오염분포가 특정 지층에서만 확인될 경우

설치관정의 수는 처리가 필요한 오염된 지역을 관정 하나가 가지는 영향반경으로 나누어 필요한 관정의 개수를 구하며, 관정 배치는 관정 하나가 가지는 영향반경이 서로 겹쳐질 수 있도록 배치한다.

$$\text{필요한 정 의 수} = \frac{\text{처리 구역 (m}^2\text{)}}{\text{한 개 추출정의 영향반경 (m}^2\text{ / well)}}$$

또한 관정을 배치하기 위해서는 아래 사항을 추가로 고려하여야 한다.

- 오염 농도가 높은 구역에서는 산소 흐름을 증가시키고, 오염의 저감 속도를 증대시키기 위하여 관정의 이격거리를 되도록 좁게 설치한다.
- 관정을 설치하는 구간이 지표에 아스팔트나 콘크리트 구조물 등으로 외부와 격리되어 있을 경우 관정의 간격을 멀리 설치 할 수 있다. 지표가 외부로부터 격리되어 있을 경우 지중 공기가 짧게 순환하는 것을 방지하고 보

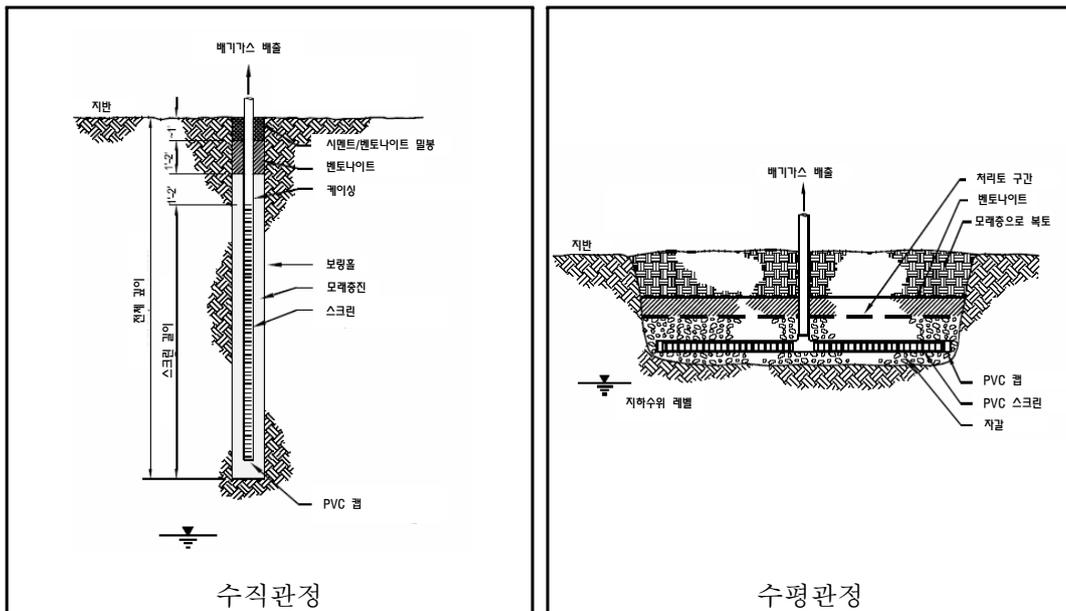
다 먼 거리의 공기를 끌어 들임으로서 영향반경이 증가하기 때문이다.

- 층이 존재하는 토양에서는 관정의 간격이 불규칙 할 수 있다. 보통 투수성이 낮은 구역에 설치된 관정은 투수성이 높은 구역에 설치된 관정에 비해 관정의 이격거리가 가까워져야 한다.

오염부지내에 설치되는 추출정은 보통 PVC 케이싱과 스크린으로 구성되어 있으며, 추출정의 직경은 공기 유속 및 관정 깊이에 따라 5 ~ 30cm 이며, 보통 10cm 직경의 관정이 사용된다.

[그림 4-6]은 일반적인 수직 추출정을 나타내고 있다. 관정내 스크린 설치 구간은 토양 조건이 균일한 현장에서는 오염 구역 전체 구간에 스크린을 설치하여야 하며, 계절에 따른 지하수위를 고려하여 지하수면 깊이까지 설치한다.

수직관정에 비해 수평관정은 보통 지하수가 얇은 지역에 사용된다. 수평관정은 오염부지를 굴착 후 스크린이 설치된 PVC 파이프를 바닥 가까이 배치하여 설치한다[그림 4-6]. 스크린은 지하수면 위로 설치하며, 스크린 주변은 자갈로 덮어 충분한 공기투수성을 유지할 수 있게 한다. 또한 진공 추출시 진공 압력에 의해 지하수위가 상승하여 스크린 막힘현상이 발생할 수 있으므로, 지하수에 의해 스크린이 막히지 않도록 주기적으로 점검하여야 한다.



[그림 4-6] 전형적인 추출관정

(2) 공기주입정

공기주입정 설치는 추출정과 유사하지만, 균일한 공기 흐름을 확보하기 위하여 스크린 간격을 넓게 설계하는 것이 특징이다. 반면 주입정의 배치, 스크린 설치 구간, 관정설치 방법 등은 추출정과 동일하다.

공기주입정은 단독으로 사용할 수도 있고, 추출정과 함께 사용할 수도 있다. 주입정/추출정 배합은 지표가 외부와 격리되어있는 장소(예, 포장도로나 건물)에서 주로 사용되며, 관정과 관정사이에 발생하는 정체구역(공기 흐름이 없는 구역)이 생기는 것을 방지하는데 효율적이다.

국내에서 상용화되고 있는 생물학적통풍법에서는 대부분 주입정과 추출정을 배합하여 사용하고 있으며, 공기주입정을 단독으로 사용하는 경우는 휘발성이 낮거나 휘발성이 없는 석유계 화합물질을 제거하기 위한 용도로 사용되고 있다.

(3) 파이프 설계

생물학적통풍법이 적용되는 대부분의 오염부지의 경우 지속적으로 산업 활동을 하는 경우가 많으므로 주입정 및 추출정과 송풍기 사이에 연결되는 파이프의 경우 산업 활동에 지장이 없도록 얇은 지중에 설치한다. 또한 파이프 설치시 동파 등을 대비하여 파이프 주변으로 열선을 설치하기도 한다. 추출정에 연결된 파이프의 경우 지하수의 상승으로 인하여 지하수가 파이프로 유입될 수 있으므로 파이프 설치시 추출정 방향으로 약간 기울어지게 설치한다.

(4) 증기 전처리

추출정에서 추출된 증기에는 응축된 수분과 미립자가 혼재되어 있어 송풍기 등의 기계에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 송풍기를 보호하기 위하여 송풍기와 파이프 사이에 기액분리기 및 미립자 필터 등을 설치하여야 한다.

(5) 송풍기 사양

송풍기의 크기는 추출정에 필요한 진공압력의 크기에 의해 결정되어진다. 특히 휘발성이 높은 유기화합물질을 정화할 때에는 폭발이 발생할 수 있으므로, 송풍기의 폭발을 방지할 수 있는 폭발 방지 모터, 전기 제어시스템 등을 검토하여야 한다.

□ Centrifugal blowers : 높은 유속, 낮은 압력 및 진공이 필요시 사용
($< 500 \text{ mm/H}_2\text{O}$)

□ Regenerative and turbine blower : 높은 압력 및 진공이 필요시 사용
($500 \text{ mm/H}_2\text{O} < 2,000 \text{ mm/H}_2\text{O}$)

□ Rotary lobe blower : 더 높은 압력 및 진공이 필요시 사용
($< 2,000 \text{ mm/H}_2\text{O}$)

(6) 제어

생물학적통풍법에서 일반적으로 다음과 같은 요소에 대하여 주기적으로 모니터링을 실시하여, 최적의 운전 조건을 유지하여야 한다.

- 압력 (또는 진공)
- 공기공급량
- 추출된 증기 속 이산화탄소/산소의 농도
- 오염물질 농도
- 온도
- 영양염류(영양물질이 추가된 경우)

2.6 운영 및 모니터링 계획의 평가

운영 및 모니터링 계획시에는 시스템의 성능을 최적화하고, 오염물질의 저감 등을 확인하기 위한 시스템 운영과 모니터링 계획을 수립하여야 한다. 특히 생물학적통풍법에서는 휘발성유기화합물질, 산소, 이산화탄소(미생물의 호흡 생성물)의 농도 등을 모니터링 하는 것이 중요하다.

(1) 초기운영

초기가동 단계에는 7-10일 동안 여러 가지 밸브들을 조정하는 작업을 수행하며, 이러한 조절을 통하여 오염물질의 휘발을 최소화 하고, 공기주입량 등의 조절

을 통하여 가능한 한 오염물질이 생분해되도록 유도한다.

따라서 초기운영 기간에는 각 관점에서 압력, 공기 유량, 산소 농도, 이산화탄소 농도, 휘발성유기화합물질 농도 등을 매일 측정하여야 한다. 만약 초기운영단계에서 인위적인 영양염류를 주입 할 경우 초기 현장 측정 값의 오류를 유발할 수 있으므로 영양염류는 가급적 공급해서는 안 된다.

(2) 장기운영

장기 모니터링은 공기유량, 압력 측정, 이산화탄소 농도 측정, 산소 농도 측정, 휘발성유기화합물질 농도 등을 측정한다. 측정은 매주 또는 격주 단위부터 매월 단위로 시스템 운영 기간 동안 수행하며, 영양염류 주입은 필요시마다 규칙적(매달 또는 분기별)으로 이루어져야 한다. [표 4-15]에는 시스템 모니터링 주기 및 항목에 대하여 간략히 나타내고 있다.

오염물질의 저감 및 효율 등을 확인하기 위해서는 분기별 미생물호흡률 실험 및 처리오염물질에 대한 정기적인 분석이 수행되어야 하며, 공기주입에 따른 오염물질의 확산을 예측하기 위하여 오염된 지역의 경계 부분에서도 처리오염물질에 대하여 정기적인 분석이 수행되어야 한다.

[표 4-15] 모니터링 측정항목 및 시료채취 주기

분석항목	운전개시기 (7~10일)	정화기간 전반 및 사후관리 기간의 모니터링		비고 (측정장소)
	매일	매주~매달	분기	
공기공급량	○	○		관정 및 배관
관정압력	○	○		관정 및 배관
휘발성유기화합물질 (VOCs)	○	○		관정 및 배기가스처리처리장치
이산화탄소(CO ₂)	○	○		관정 및 배관
산소(O ₂)				관정 및 배관
미생물호흡률 실험			○	대상부지
처리대상물질			○	대상부지

2.7 생물학적통풍법 적용성 평가 및 정화공정 효율 평가 항목(Checklist)

(1) 부지특성 평가

예	아니오	평가 항목
		토양의 고유투수계수가 10^{-10}cm^2 이상인가?
		토양이 불투수층을 포함하고 있거나 공기의 흐름을 방해하는 조건을 가지고 있는가?
		총 중속영양미생물이 수가 1,000 CFU/gram을 초과하는가?
		토양의 pH가 6~8 범위인가?
		토양의 수분함량이 40~80% 범위인가?
		탄소:질소:인의 비율이 100:10:5~100:1:0.5 범위인가?
		지하수의 깊이가 1m 이상인가?

(2) 오염물질특성 평가

예	아니오	평가 항목
		오염물질이 모두 생물학적 분해가 가능한가?
		토양내 TPH 농도가 25,000mg/kg, 중금속의 농도가 2,500mg/kg 이하인가?
		오염물질의 증기압이 0.5 mmHg, 끓는점이 300℃, 헨리상수가 100atm 이상일 경우 정화계획에 이들 휘발성 물질들을 처리하기 위한 계획을 포함하고 있는가?

(3) 장치설계 평가

예	아니오	평가 항목
		정화를 위한 충분한 공기공급량이 공급되고 있는가?
		영향반경은 1.5~30m 범위인가?
		영향반경이 오염지역의 토양특성에 맞게 계산되었는가?
		제안된 수직 및 수평추출정은 대상부지 상황을 고려하였는가?
		관정스크린 크기는 적절한가?
		주입정의 위치가 오염지역 맞게 적절하게 설계되었는가?
		원하는 압력을 유지하기 위한 적절한 송풍기가 선정되었는가?

(4) 운영 및 모니터링 계획 평가

예	아니오	평가 항목
		산소, 이산화탄소, VOCs 등이 모니터링 계획에 포함되어 있는가?
		오염물질의 저감 및 생물학적 분해 조건을 판단하기 위한 토양시료 채취가 포함되어 있는가?
		초기운전단계에서 오염물질의 휘발을 최소화하고, 생물학적 분해를 최대화하기 위한 밸브 조정 작업 등의 계획이 포함되어 있는가?
		필요시 영양염류의 공급이 계획되어 있는가?

3. 토양증기추출법 (Soil vapor extraction, SVE)

3.1 기술개요

토양증기추출법(Soil vapor extraction, SVE)은 진공추출이라고도 하며, 불포화 대수층위에 가스 추출정을 설치하여 토양을 진공상태로 만들어 증으로서 토양으로부터 휘발성 및 준휘발성유기화합물질을 제거하는 지중처리기술이다.

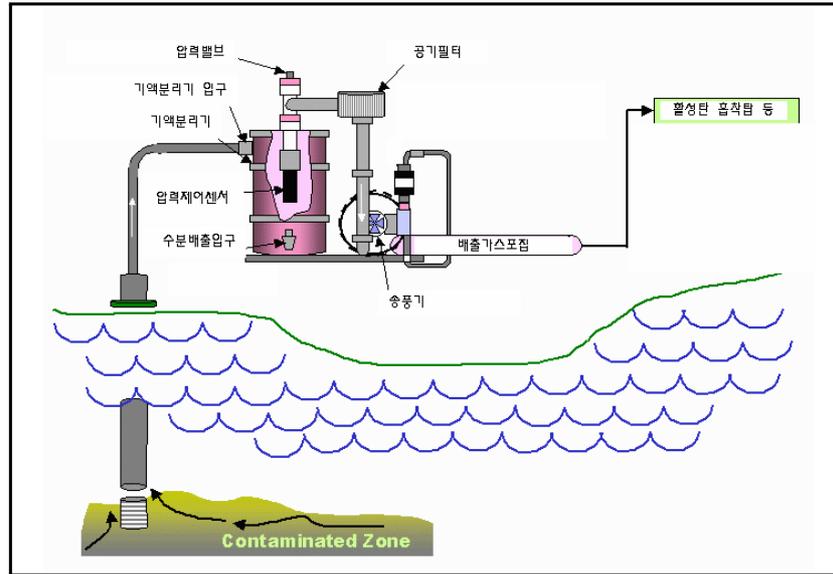
본 기술은 지하저장탱크 지역에서 석유계 화합물질 중 휘발성유기화합물질과 일부 준휘발성유기화합물질의 농도를 줄이는데 효과적인 것으로 알려져 있다. 토양증기추출법은 일반적으로 휘발성이 높은 휘발유, 항공유 등으로 오염된 토양을 처리하는데 효율이 높은 반면 휘발성이 낮은 난방유, 윤활유 등으로 오염된 토양을 처리하기에는 효율이 낮은 것으로 보고되고 있다. 전형적인 토양증기추출법의 시스템은 [그림 4-7]과 같으며, 토양증기추출법에 대한 기술분류 및 처리물질, 기술의 장·단점은 [표 4-16, 17]에 기술하였다.

[표 4-16] 토양증기추출법의 기술분류 및 처리물질

기술분류	원위치/위치외	In-situ 적용		Ex-situ 적용
	공정원리	생물학적 처리	물리/화학적 처리	열적 처리
	적용지역	불포화지역		포화지역
	적용매질	토양		지하수
	상용화 단계	상용화(full scale)	pilot scale	lab scale
처리물질	<ul style="list-style-type: none"> 비할로젠 VOCs 및 유류 			

[표 4-17] 토양증기추출법 장·단점

장 점	단 점
<ul style="list-style-type: none"> 소요 장비의 조달이 용이하며 설치가 간단함 정화공사 중에도 부지를 활용할 수 있으며 접근이 불가능한 곳도 정화 가능 정화비용이 타기술에 비해 저렴 공기분산법(airspaging) 이나 지하수양수처리법 등의 다른 정화 기술과 조합 가능 	<ul style="list-style-type: none"> 90%이상 농도를 저감시키기 어려움 토양투수성이 낮거나 점토질의 함량이 높은 지역에 적용시 처리효과가 낮음 배출가스 처리를 위한 비용이 추가됨 불포화 대수층내 토양만 처리 가능



[그림 4-7] 토양증기추출법의 모식도

3.2 토양증기추출법 정화계획의 유효성 평가절차

정화계획의 유효성 평가는 정화계획 수립시 유류로 오염된 토양을 토양증기추출법으로 정화하고자 할 때 오염부지에 본 기술의 적용 가능여부 및 적절한 정화계획 수립 등을 평가하기 위한 자료로 활용된다.

이러한 유효성 평가 절차는 아래와 같이 4개 부분으로 구성되어 있다.

□ 토양증기추출법의 유효성 평가절차

1단계 : 토양증기추출법의 초기 적용성 평가 단계에서는 토양증기추출법이 본 부지의 정화방법으로서 고려대상인지 여부를 신속하게 결정한다.

2단계 : 토양증기추출법의 세부 적용성 평가 단계에서는 토양증기추출법이 대상 부지의 정화에 효과적으로 적용될 수 있는지에 대한 토양 특성 및 오염물질의 특성 등 세부 기준들을 평가하며 실내 및 현장 실험, 자료 등의 검토를 통해 본 기술의 적용가능 여부를 최종 판단하게 된다.

3단계 : 토양증기추출법시스템 설계평가 단계로서 기본 설계를 위한 설계인자 및 충분한 적용성 평가시험이 수행되었는지의 여부를 평가한다.

4단계 : 운영 및 모니터링 계획 평가 단계에서는 시운전 계획, 운영/모니터링 계획의 적정여부, 정화과정 중 모니터링 항목 등이 적절한지 검토한다.

3.3 토양증기추출법의 초기 적용성 평가

초기 적용성 평가에서는 특정 오염부지에 토양증기추출법의 적용가능성 여부를 신속히 결정하기 위하여 아래와 같은 주요 인자를 검토한다.

- 석유계물질로 오염된 토양의 투수계수(Permeability)
- 오염물질의 휘발성(Volatility)

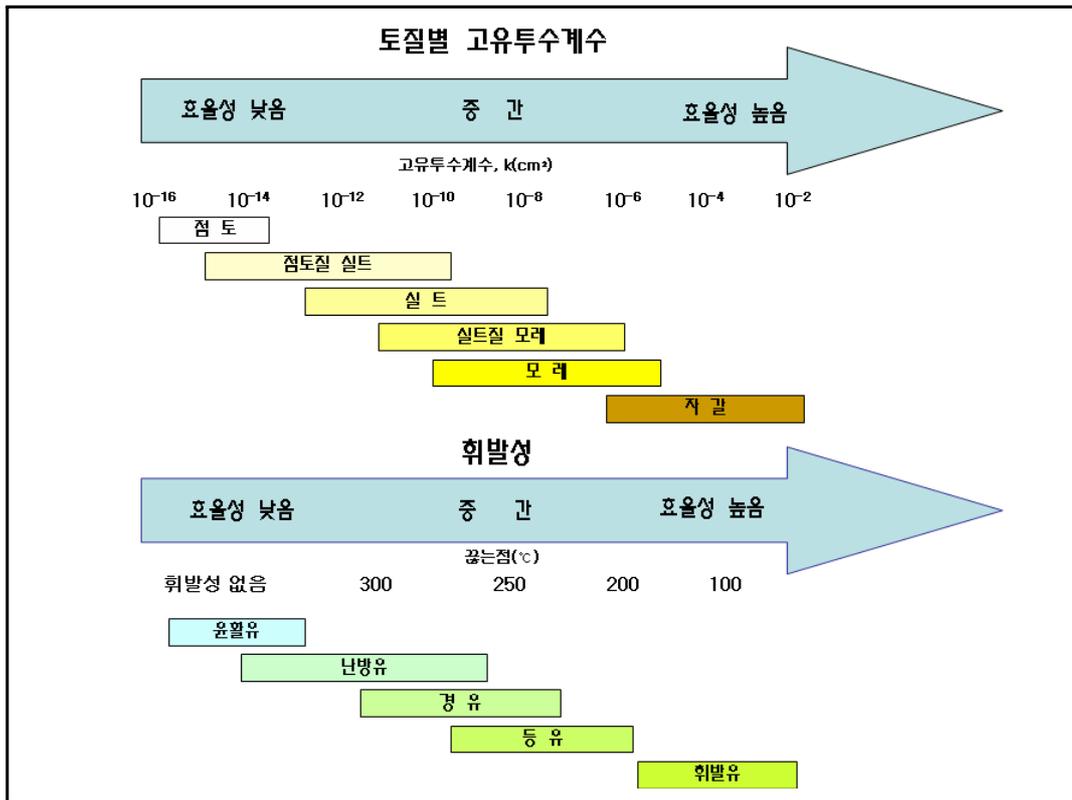
토양증기추출법에서 토양의 종류의 의해 결정되어지는 토양의 고유투수계수는 오염물질이 증기상태로 추출될 수 있는 비율에 영향을 미친다. 일반적으로 입자가 미세한 토양(점토, 실트)은 입자가 비교적 큰 조대토양(모래, 자갈)에 비해 투수성이 낮다. 즉 미사질 토양 보다 입경이 큰 토양으로 구성되어 있을 경우 더 많은 양의 오염물질을 증기 상태로 추출할 수 있어 처리 효율이 증가하게 된다.

석유계 화합물의 휘발성은 오염물질이 토양에 흡착되어 있는 상태로 존재하다가 증기상태로 증발되는 정도로서 토양증기추출법을 적용시 반드시 검토하여야할 중요한 인자이다. 석유계 화합물의 경우 화학성분이 대부분 복잡한 혼합물이기 때문에 석유계 화합물의 휘발성은 대략 각 석유계 화합물의 끓는점(Boiling point)으로 판단하며[그림 4-8], 휘발유나 등유로 오염된 오염부지에 토양증기추출법을 적용시 보다 높은 정화효율을 기대할 수 있는 것으로 보고되고 있다.

3.4 토양증기추출법의 세부 적용성 평가

정화계획에 대한 개략적인 초기평가 결과 토양증기추출법이 본 부지의 정화에 적절하다고 판단되었다면 토양증기추출법에 대한 세부 적용성 평가를 수행한다. 세부 적용성 평가에서는 초기평가에서 다루지 않았던 주요 영향인자들에 대하여 구체적으로 검토한다.

[표 4-18]은 세부 적용성 평가에서 고려되어야 할 영향인자들에 대하여 나타내고 있으며, 제공된 영향인자와 실제 현장에서 도출된 영향인자들을 비교·분석 평가함으로써 토양증기추출법이 본 부지에 효과적으로 적용될 수 있는지를 결정하게 된다.



[그림 4-8] 토양증기추출법 초기 적용성 검토

[표 4-18] 토양증기추출법의 주요 영향인자

토양 투수성에 영향을 미치는 인자	오염물질 휘발성에 영향을 미치는 인자
고유투수계수 토양구조 및 지층구조 수분함량 토양 pH 지하수위	증기압 오염물질의 구성 및 비등점 헨리상수

3.4.1 토양 투수성에 영향을 미치는 인자

(1) 고유투수계수(Intrinsic Permeability)

토양의 고유투수계수는 유체를 전달할 수 있는 정도를 나타내는 것으로서 토양증기추출법의 적용하는데 있어 가장 중요한 요소이다. 토양의 고유투수계수는 토양 종류에 따라 $10^{-16} \sim 10^{-3} \text{ cm}^2$ 까지 차이가 매우 크다. 일반토양의 경우는 $10^{-13} \sim 10^{-5} \text{ cm}^2$ 의 범위를 나타낸다.

모래와 같은 조대토양의 경우 점토나 실트에 비해 높은 고유투수계수를 갖고 있다. 반면 모래와 같은 조대 토양이라도 고유투수계수는 토양에 존재하는 수분에 의해 감소할 수 있으며, 이는 토양내 수분이 공극을 막아 공기의 흐름을 방해하기 때문이다. 특히 미세토양의 경우 수분보유성이 높아 이런 현상이 잘 나타난다. [표 4-19]는 토양의 고유투수계수에 따른 토양증기추출법의 적용성을 나타내고 있다.

[표 4-19] 토양의 고유투수계수에 따른 토양증기추출법의 적용성

고유투수계수[cm^2]	토양증기추출법의 적용성
$k \geq 10^{-8}$	적합
$10^{-8} \geq k \geq 10^{-10}$	부분적 적합
$k \leq 10^{-10}$	부적합

(2) 토양의 구조 및 지층구조

토양증기추출법은 토양 매질 공극내의 휘발성 물질을 추출하기 때문에 토양 입자의 구조 또한 중요한 요소이며 토양내 미세균열과 같은 구조적인 특징은 점토를 많이 함유한 토양일지라도 투수성을 높아지게 하는 결과를 초래한다.

상이한 투수성을 가진 다층구조의 토양에서의 토양증기는 투수성이 높은 층을 통해 이동함으로써 수평이동이 증가하게 된다. 이러한 현상은 투수성이 낮은 층의 오염을 정화하는데 더 많은 시간 및 비용을 소요되게 한다. 토양 구조의 특성 파악 및 깊이별로 어떠한 매질로 구성되어 있는가는 토양 시료채취시 기록한 자료를 통해서 평가할 수 있다.

(3) 지하수위

토양증기추출법의 경우 기본적으로 불포화대(Unsaturated zone)에 적용하는 기술로서 지표면에서 지하수위가 약 1m(3ft)보다 높으면 적용하는데 어려움이 있다.

지하수위가 높은 경우에는 진공 압력에 의해서 지하수위가 같이 상승하고, 이로 인하여 관정 스크린 막힘 현상에 따른 지중에 가해지는 진공 압력이 줄어들어 공기의 흐름도 감소하게 된다. 이러한 잠재적인 문제를 해결하기 위하여 주위에 양수정을 설치하여 지하수위를 낮추기도 한다.

[표 4-20] 지하수위와 토양증기추출법의 적용성

지하수위(m)	토양증기추출법의 적용성
> 3m	적합
1m < 지하수위 < 3m	부분적 적합
< 1m	부적합

(4) 수분함량

토양내 과도한 수분함량은 토양 투수성을 감소시킬 수 있으며, 토양공극을 통한 공기의 흐름을 방해함으로써 토양증기추출법의 효과를 감소시킬 수 있다.

특히 다량의 오염물질이 지하수면 근처의 수분함량이 많은 모세관대에 위치할 경우 토양증기추출법의 효과가 현저히 줄어들게 된다. 모세관대는 지하수면에서 30cm에서 수 미터에 이르기도 한다. 따라서 모세관대에 다량의 오염물질이 상존하고 있을 경우에는 주변에 양수정을 설치하여 지하수위를 충분히 낮추어야 한다.

아스팔트나 콘크리트가 포장 되어 있지 않은 지역에서는 빗물의 침투에 의한 수분함량이 일시적으로 증가하게 되고, 특히 침투속도가 느린 미세토양의 경우 장시간 과도한 수분함량이 지속될 수 있으므로 주기적으로 토양내 수분함량을 점검하여야 한다. 일반적으로 토양증기추출법 적용을 위한 토양내 적정 수분조건은 20 ~ 30% 정도로 보고되고 있다.

3.4.2 오염물질 휘발성에 영향을 미치는 인자

(1) 증기압

오염물질의 증기압은 휘발 정도의 척도로서 어떤 물질의 증기가 그 물질의 액체 또는 고체와 평형상태에 있을 때 나타내는 압력이다. 토양증기추출법의 경우 높은 증기압을 가진 오염물질일수록 처리 효율이 증가하게 되며, 일반적으로 증기압이 0.5 mmHg 이상인 오염물질을 처리하는데 적용된다. 보통 휘발유, 경유, 등유와 같은 석유계 화합물의 경우 수백 가지의 성분으로 구성되어 있으며, 이러한 물질로 오염된 토양에서 토양증기추출법을 적용시 석유계 화합물을 구성하고 있는 각 성분의 증기압에 따라 각기 다른 속도로 추출되게 된다. [표 4-21]은 석유계 화합물을 구성하는 성분들의 증기압을 나타내고 있다.

또한 오염이 심한 부지에 대하여 토양증기추출법 적용시 추출 가스를 대기로 방출하기 이전에 대기오염 방지를 위한 배기가스처리시설을 설치하여야 한다.

[표 4-21] 석유계 화합물 구성 성분들의 증기압

석유계 화합물 구성 성분	증기압 [mm Hg at 20°C]
Methyl t-butyl ether	245
Benzene	76
Toluene	22
Ethylene dibromide	11
Ethylbenzene	7
Xylenes	6
Naphthalene	0.5
Tetraethyl lead	0.2

(2) 오염물질의 구성성분 및 끓는점(Boiling Point)

끓는점은 어떤 물질의 휘발성(Volatility)을 나타내는 또 다른 지표로서 석유계 화합물의 경우에는 복잡한 구조 때문에 종종 끓는점을 사용하여 분류하기도 한다. 일반적으로 끓는점이 약 250~300°C보다 낮은 성분들은 토양증기추출법에 의해 처리가 가능하며, 석유계 화합물 중에 휘발유가 이에 속한다. 반면 경유, 등유, 난방유 등은 토양증기추출법만으로는 처리하기에는 한계가 있으며, 이를 보완하기 위

하여 생물학적통풍법을 병행하여 적용하거나, 가열된 공기 주입 등의 추가 기술이 병행되어야 한다.

[표 4-22] 주요 석유계 화합물의 끓는점

석유계 화합물	끓는점(℃)
휘발유	40~205
등유	175~325
디젤	200~338
난방유	>275
윤활유	비휘발성

(5) 헨리 상수(Henry's law constant)

헨리 상수도 역시 물질의 휘발성을 나타내는 방법 중의 하나로서 평형상태에서 기체가 가하는 증기 압력을 의미하며, 일반적으로 헨리 상수가 100 atm보다 큰 물질의 경우 토양증기추출법에 의해 처리가 가능한 것으로 보고되고 있다.

[표 4-23] 주요 석유계 화합물 구성성분의 헨리상수

성분	헨리상수(atm)
Tetraethyl lead	4,700
Ethylbenzene	359
Xylenes	266
Benzene	230
Toluene	217
Naphthalene	72
Ethylene dibromide	34
Methyl t-butyl ether	27

3.4.3 처리가능성 실험(Pilot scale study)

처리가능성 실험은 토양증기추출법이 특정 부지에 대하여 효과가 매우 높은지, 일부 효과만 있는지 또는 전혀 효과가 없는지를 판단하는 실험이다. 실험에서 도출된 변수는 향후 현장의 토양증기추출 시스템의 설치 및 운영에 필요하므로 현장 상황을 얼마나 정확히 재현하느냐가 중요하다.

실험은 단기간 실험의 경우 일반적으로 한 개의 추출정에서 약 1 ~ 30일 정도 토양증기를 추출하며, 오염범위가 넓어 장기간 실험하는 경우에는 보통 2개 관정에서 약 6개월 정도 토양증기를 추출하여 모니터링을 수행한다.

최적의 운전 조건을 도출하기 위하여 추출정에는 서로 다른 추출 압력을 가하여 효율을 극대화 시킬 수 있는 추출압력 및 증기추출 유속을 산출하게 되며, 기존 관정들을 활용하여 거리에 따른 압력측정을 통해서 영향반경을 결정하게 된다.

영향반경을 산출하는 개략적인 실험 방법은 제IV장 2.4.3절에 언급하였다. 또한 현장에 적용될 토양증기추출 시스템에서 처리하여야 할 증기 농도 기준을 정하기 위하여 본 실험에서 적어도 2회에 걸쳐 추출된 증기 농도를 측정하여야 한다. 이러한 추출된 증기의 농도, 증기 추출 유속 및 추출 압력 등은 토양증기추출을 위한 장비를 선택하기 위한 공정에 활용된다.

기타 토양증기추출법의 적용성을 검토하기 위하여 HyperVentilate (EPA, 1993)같은 모델링 프로그램을 통해 토양증기추출법의 적용성을 평가하기도 하며, 토양증기추출법이 대상부지에 적용하기에 가능한 기술 인지를 판단하고, 공기투과 실험, 정화에 필요한 추출관정의 최소 개수 등을 예측하는데 사용되기도 한다.

3.5 토양증기추출법의 설계 평가

본 절에서는 설계에 필요한 주요 설계인자를 검토하고, 오염부지 정화를 위하여 기본적인 정화시스템을 포함하고 있는지를 확인하기 위한 토양증기추출법의 구성요소를 설명하고자 한다.

3.5.1 설계를 위한 기본 정보

토양증기추출 시스템의 설계를 위해서는 다음과 같은 자료들을 참고하여야 한다.

(1) 영향 반경(Radius of Influence, ROI)

영향 반경이란 추출정 또는 주입정에서 공기를 추출 혹은 주입했을 경우 공기 흐름이 가능한 최대의 거리를 말한다. 설계시 영향반경은 토양의 물리·화학적 성

질, 습도, 정화소요기간 등 여러 가지 요인들에 따라 달라질 수 있다. 영향반경은 보통 현장에서 현장실험을 통하여 압력계가 설치된 관측점에서 공기 압력 변화를 측정하여 변화량이 0.1 inchH₂O(약 2.5 mmH₂O)가 되는 거리를 활용하지만, 공기 흐름 모델링이나 다른 경험식을 이용하여 평가할 수도 있다. 대체로 설계 영향반경은 1.5m(점토)부터 30m(사토)까지가 일반적이다.

(2) 관정압력

관정압력이란 영향반경내에 설치된 관정에서 적절한 공기의 주입 및 추출을 평가하기 위하여 관정 상단에서 측정되는 압력(또는 진공)을 말한다. 관정압력(또는 진공)은 보통 현장에 설치된 관정에서 실험을 통해 결정되며, 일반적으로 75~2,500 mmH₂O의 범위를 갖도록 설계한다. 공기의 투수성이 떨어지는 토양에서는 적당한 영향반경을 확보할 수 있도록 더 높은 진공압력을 가해주기도 하지만 너무 높은 관정압력(2,500 mmH₂O 이상)에서는 지하수위 상승에 따른 추출정 스크린 막힘현상을 유발할 수 있다.

(3) 증기추출속도

증기추출속도는 각 증기 추출점에서 추출되는 단위 용적당 토양 증기의 유량이다. 증기추출속도, 영향반경, 관정압력은 상호 의존성을 가지고 있다(예: 추출 속도 변화는 관정진공과 영향반경의 변화를 가져옴). 증기추출속도는 현장실험을 통하여 결정되며, 수치해석모델링(EPA 1993) 등을 통해 계산할 수도 있다. 증기추출 유속은 토양증기추출 시스템의 운영시간에 영향을 미치며, 일반적인 추출속도는 관정당 약 0.3~2.8 m³/분이다.

(4) 초기증기농도

초기증기농도는 현장실험이나 초기 토양시료 분석 및 가스 분석을 통하여 측정되며, 이 농도를 이용하여 오염물질 제거 속도와 토양증기추출 공정의 운영 시간 등을 결정하게 된다. 또한 추출가스를 대기로 즉시 방출 가능한지 또는 배기가 스처리장치를 설치하여야 할지에 대하여 결정하는데 이용된다.

(5) 가스 배출 및 모니터링

시스템 설계자는 휘발성 성분이 추출되는 장소에 휘발성유기화합물질(VOCs)의 모니터링을 위해 시료채취구가 포함되도록 고려하여야 하며, 이러한 시료채취구를 이용하여 휘발성유기화합물질을 주기적으로 측정하여야 한다. 추출정에서 추출된 휘발성유기화합물질이 설계 기준의 적정 농도를 초과하는 경우 배기가스처리장치를 설치하여야 한다.

(6) 기타사항

시스템 설계시에는 주변 건물, 설비, 매설물, 주거지 등 현장 상황 등을 설계 공정내에서 고려토록 해야 한다.

3.5.2 토양증기추출법 시스템 구성요소

설계 기준이 마련되면 토양증기추출법 시스템의 설계를 진행한다. 보통의 토양증기추출법 시스템 설계에는 아래와 같은 정보들이 포함된다.

- 추출정의 방향, 배치, 설치 세부내역
- 파이프 설계
- 증기 사전 처리 설계(필요한 경우)
- 송풍기 사양
- 제어 설계

(1) 시스템 설치

토양증기 추출법 시스템의 경우 추출정의 방향, 배치, 설치내역, 파이프 및 연결배관, 증기사전 처리, 송풍기 사양 등은 제IV장 2.5.2절의 생물학적통풍법과 유사하여 본 장에서의 설명은 제외하였다.

(2) 제어

토양증기추출법에서는 일반적으로 다음과 같은 요소에 대하여 주기적으로 모니터링 하여 최적의 운전 조건을 유지하여야 한다.

- 압력 (또는 진공)
- 공기/증기 유속
- 오염물질 저감율
- 송풍기 온도

(3) 추출된 최종 가스 처리

추출된 증기 농도가 대기로 방출되기 전에 설계 기준의 적정 농도를 초과하는 경우 배기가스처리장치를 설치하여야 한다. 보통 배기가스처리는 입상활성탄, 연소, 바이오필터 등으로 처리하며 비교적 사용이 간편하고, 비용이 저렴한 입상활성탄(GAC : Granular activated carbon)이 가장 많이 이용되고 있다.

3.6 운영 및 모니터링 계획의 평가

운영 및 모니터링 계획시에는 시스템의 성능을 최적화하고, 오염물질의 저감등을 확인하기 위한 시스템 운영과 모니터링 계획을 수립하여야 한다.

3.6.1 초기운영

초기가동 단계에는 7~10일 동안 여러 가지 밸브들을 조정하는 작업을 수행하며, 이러한 조절을 통하여 각 관정마다 일정한 압력과 증기추출유속을 유도하여 추출정으로 농도가 높은 증기를 최대한 회수할 수 있도록 한다. 따라서 초기운영 기간에는 각 관정 및 배관 등에서 추출압력 및 휘발성유기화합물질의 농도를 매일 측정하여야 한다.

3.6.2 장기운영

장기 모니터링에서는 각 관정당 일정한 압력 및 추출유속의 유지 여부, 관정압력, 휘발성유기물질의 농도를 매주 또는 격주 단위부터 매월 단위로 시스템 운영기간 동안 측정한다. [표 4-24]는 토양증기추출 시스템의 모니터링 주기 및 항목에 대하여 간략히 나타내고 있다.

오염물질의 저감 및 효율 등을 확인하기 위해서는 분기별 처리오염물질에 대한 정기적인 분석이 수행되어야 하며, 오염물질의 확산 등을 예방하기 위하여 오염된 지역의 경계 부분에서도 처리오염물질에 대하여 정기적인 분석이 수행되어야 한다. 이외에 오염물질의 저감정도는 장기 모니터링 자료를 활용하여 아래의 식을 이용하면 간단하게 확인할 수 있다.

$$\text{누적 오염물질 저감량(kg)} = \text{증기농도(kg/m}^3\text{)} \times \text{증기추출유속(m}^3\text{/hr)} \times \text{시스템운영시간(hr)}$$

[표 4-24] 모니터링 측정항목 및 시료채취 주기

분석항목	운전개시기 (7~10일)	정화기간 전반 및 사후관리 기간의 모니터링		비고 (측정장소)
	매일	매주~매달	분기	
유속(유량)	○	○		관정 및 배관
압력	○	○		관정 및 배관
휘발성유기화합물질 (VOCs)	○	○		관정 및 배기가스처리처리장치
처리대상물질			○	대상부지

3.7 토양증기추출법 적용성 평가 및 정화공정 효율 평가 항목(Checklist)

(1) 토양 투수성에 기여하는 인자 평가

예	아니오	평가항목
		토양의 고유투수계수가 10^{-9}cm^2 이상인가?
		지하수의 깊이가 1m 이상인가?
		처리하고자 하는 토양이 일반적으로 건조한가?

(2) 오염물질의 휘발성에 영향을 미치는 인자 평가

예	아니오	평가항목
		오염물질의 증기압이 0.5 mmHg 이상인가?
		오염물질의 증기압이 0.5 mmHg 이하라면, 이를 증대시킬 수 있는 방안이 포함되어 있는가?
		오염물질의 끓는점이 300°C 이하인가?
		오염물질의 헨리상수가 100atm 이상인가?

(3) 장치설계 평가

예	아니오	평가항목
		추출정의 영향반경(ROI)이 1.5~30m 범위인가?
		영향반경이 오염지역의 토양특성에 맞게 계산되었는가?
		증기추출유속을 조사하였는가?
		제한된 수직 및 수평추출정은 대상부지 상황을 고려하였는가?
		영향반경을 고려하여 추출정 위치를 선정하였는가?
		관정스크린 크기는 적절한가?
		진공조건을 고려하여 송풍기를 선정하였는가?

(4) 운영 및 모니터링 계획 평가

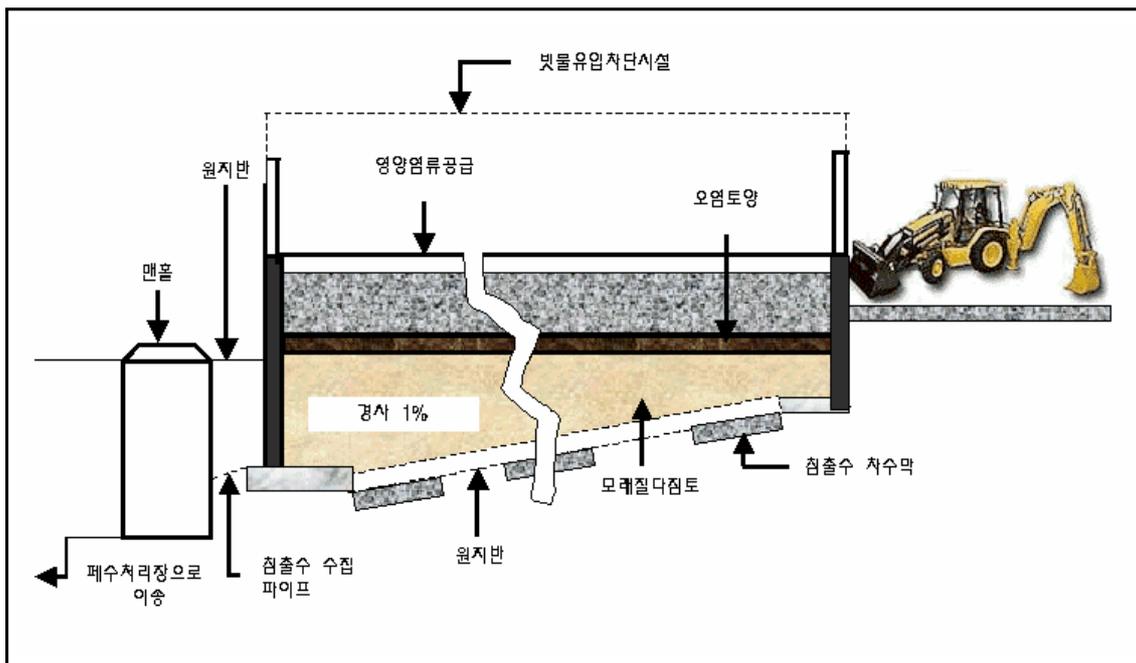
예	아니오	평가항목
		운전초기에(7일~10일 사이) 매일 각 추출구에서 압력, 증기추출유속, VOCs 농도를 측정하도록 계획되었는가? 또한 격주 또는 월별 상기 내용을 측정하도록 계획되었는가?
		적어도 분기별 오염농도 저감 정도를 측정하도록 되어 있는가?

4. 토양경작법 (Landfarming)

4.1 기술개요

토양경작법은 오염토양을 굴착하여 지표면에 깔아 놓고 정기적으로 뒤집어줌으로써 공기를 공급하여 미생물에 호기성 생분해 조건을 제공함으로써 토양에 잔류되어 있는 유기성 오염물질을 제거하는 생물학적 정화기술이다. 또한 오염된 토양과 공기와의 접촉을 최대로 증가시킴으로써 토양에 흡착되어 있는 휘발성유기화합물질의 휘발을 촉진시키는 물리/화학적 공정도 포함되어 있다.

본 기술은 생물학적통풍법과 적용원리는 유사하지만 생물학적통풍법이 지중처리기술인 반면 본 기술은 지상처리기술이라는 점이 기본적으로 다르다. [그림 4-9]는 일반적인 토양경작법의 시스템을 보여주고 있다.



[그림 4-9] 토양경작 시스템

토양경작법은 오염부지의 범위 및 깊이를 정확히 조사한 후 오염토양을 굴착하여 준비된 경작지역으로 옮겨 처리하는 방법이므로 지중처리기술에 비하여 공기의 접촉량을 최대화 시킬 수 있다. 따라서 지중처리기술에 비하여 처리기간을 단축시킬 수 있으며, 또한 별도의 시설 없이 부지만 충분히 확보될 경우 적용 가능

하다. 그러나 처리부지가 확보되지 않을 경우에는 토양경작법을 적용하기 어려울 뿐만 아니라 오염토양의 굴착, 하우스 등의 부대시설 설치, 이송 비용 등으로 인하여 오염토양 처리비용이 증가되는 단점을 가지고 있다.

또한 오염물질의 휘발에 의하여 공기중으로 휘발성유기화합물질(VOCs)이 확산될 수 있기 때문에 배기가스처리장치와 같은 후처리시설이 필요할 수도 있으며, 겨울철과 같이 대기의 온도가 낮아질 경우 미생물의 활성이 급격히 감소하기 때문에 효과적인 처리가 불가능한 단점이 있다. 토양경작법에 대한 자세한 기술분류 및 처리물질은 [표 4-25]에 기술하고 있으며, 토양경작법의 장·단점은 [표 4-26]에 나타내었다.

[표 4-25] 토양경작법의 기술분류 및 처리물질

기술분류	원위치/위치외	In-situ 적용		Ex-situ 적용
	공정원리	생물학적 처리	물리/화학적 처리	열적 처리
	적용지역	불포화지역		포화지역
	적용매질	토양		지하수
	상용화 단계	상용화(full scale)	pilot scale	lab scale
처리물질	<ul style="list-style-type: none"> 비할로겐 VOCs 및 SVOCs, 유류 : 효과적 무기물질 또는 방사성물질: 비효과적 			

[표 4-26] 토양경작법의 장·단점

장 점	단 점
<ul style="list-style-type: none"> 설계와 운전이 용이함 정화기간이 짧음, 최적조건에서 6~24개월 소요됨 생분해 속도가 느린 유기물질에 효과적임 	<ul style="list-style-type: none"> 90%이상 농도를 저감시키기 어려움 총석유계탄화수소가 25,000mg/kg 이상인 오염토양 정화시 효율이 떨어짐 중금속의 농도가 2,500mg/kg 이상일때 처리 효율이 떨어짐 휘발성분이 생분해되기 전에 증발되기 쉬움 처리를 위한 대규모의 부지가 필요함 토양경작시 비산먼지 및 증기발생에 따른 대기오염 문제를 야기할 수 있음 경작시 침출수에 의한 2차 오염이 발생할 수 있어 바닥차수가 필요함

4.2 토양경작법 정화계획의 유효성 평가절차

정화계획의 유효성 평가는 정화계획 수립시 유류로 오염된 토양을 토양경작법으로 정화하고자 할 때 오염부지에 본 기술의 적용 가능여부 및 적절한 정화계획 수립 등을 평가하기 위한 기초 자료로 활용된다.

이러한 토양경작법의 유효성 평가 절차는 아래와 같이 3개 부분으로 구성되어 있다.

□ 토양경작법의 유효성 평가절차

1단계 : 토양경작법의 적용성 평가 단계에서는 토양경작법이 대상부지에 어느 정도 효과가 있는지 판단하고, 토양경작법에 영향을 미치는 토양특성 및 오염물질 특성, 기후 등 세부 기준들을 평가한다.

2단계 : 토양경작시스템 설계평가 단계에서는 설계를 위한 설계인자 및 충분한 적용성 평가시험이 수행되었는지의 여부를 평가한다.

3단계 : 운영 및 모니터링 계획 평가 단계에서는 시운전 계획, 운영/모니터링, 계획의 적정여부, 정화과정 중 모니터링 항목 등이 적절한지 검토한다.

4.3 토양경작법의 적용성 평가

토양경작법에 영향을 미치는 인자는 [표 4-27]과 같으며, 이들 인자는 토양특성, 오염물질특성, 기후조건 등 크게 3개의 그룹으로 나눌 수 있다. 본 절에서는 제공된 영향인자와 실제 현장에서 도출된 영향인자를 비교·분석 평가함으로써 본 기술이 적용될 수 있는지를 결정하고, 본 기술에 대한 최적의 운영방안을 마련하기 위하여 이러한 영향인자들을 부지 환경에 맞도록 보정하여야 한다.

[표 4-27] 토양경작법의 주요 영향인자

토양 특성	오염물질 특성	기후조건
미생물 군집 농도 토양pH 수분함량 토양온도 영양염류 토성	휘발성 화학구조 농도 및 독성	대기온도 강우 풍속

4.3.1 토양특성에 따른 주요 영향인자

(1) 미생물 군집 농도

토양에는 일반적으로 박테리아, 조류, 곰팡이, 원생동물, 방사선균 등 다수의 다양한 미생물들이 존재한다. 이들 미생물 중 토양경작법에 일반적으로 이용되는 미생물은 대부분 호기성 미생물이다. 이들 호기성 미생물의 다수는 박테리아이며, 생화학적으로 활성도가 가장 높은 종이다. 박테리아는 증식과 대사를 유지하기 위한 에너지원으로 토양내 탄소를 이용하며, 세포 증식을 위하여 질소, 인을 포함한 영양염류를 필요로 한다.

일반적으로 미생물은 석유계 물질이나 천연유기물을 탄소원으로 이용하는 종속영양미생물과 이산화탄소와 같은 무기물을 탄소원으로 이용하는 독립영양미생물로 구분한다. 특히 토양경작법에서는 호기성 미생물이면서 종속영양미생물이 가장 중요한 역할을 한다.

토착미생물의 존재여부와 농도를 평가하기 위해서 토양시료 채취 후 평판계수법 등의 실험을 통하여 종속영양미생물의 농도를 구한다. 일반적으로 토양에 존재하는 종속영양미생물의 경우 $10^4 \sim 10^7$ CFU/g 정도 관찰되지만 미생물의 농도가 1,000 CFU/g 이상일 경우 토양경작법에 적용이 가능한 것으로 보고되고 있으며, 토양내 미생물의 농도가 1,000 CFU/g 이하일 경우 인위적인 미생물 및 영양염류를 주입하는 등 인위적인 조절을 통해 미생물의 농도 및 활성도를 증대시킬 수 있다.

[표 4-28] 종속영양미생물의 농도 및 토양경작법의 적용성

총 종속영양미생물 농도	토양경작법의 적용성
>1000 CFU/g 건조토양	적합
<1000 CFU/g 건조토양	부분적 적합

(2) 토양 pH

일반적으로 토양내 미생물이 성장하기에 가장 좋은 pH 조건은 7이며, 토양경작법을 적용하기에 적합한 토양의 pH는 6~8의 범위이다. 이 범위를 벗어나는 토

양을 처리시에는 석회물질 투여 등 토양 pH 조절에 대한 공정이 설계 및 운영 계획 등에 포함되어져 있는지 확인한다.

[표 4-29] 토양 pH 및 토양경작법의 적용성

토양 pH	토양경작법의 적용성
$6 \leq \text{pH} \leq 8$	적합
$6 \geq \text{pH} \geq 8$	토양 pH 조절 필요

(3) 수분함량

미생물의 적절한 성장을 위해서는 토양내 적당한 수분을 필요로 한다. 일반적으로 오염된 토양을 생물학적 기술로 처리하기 위한 적절한 수분함량은 약 40~85%, 무게단위로 12~30%의 범위인 것으로 보고되고 있다. 그러나 수분함량이 높은 토양의 경우 토양공극 사이로의 공기의 흐름을 막아 산소의 공급을 방해하고, 토양이 건조할 경우 미생물의 활동을 억제하기도 한다.

경작장 운영시 수분증발에 의해 수분이 결핍될 수 있는데 이러한 경우에는 주기적으로 수분을 보충해 주어야 하며, 강우로 인해 수분이 과다해진 경우 처리효율을 저하, 침출수 과다 발생 등을 대비하여 하우스 등의 빗물유입차단 시설의 설치도 고려하여야 한다.

[표 4-30] 토양수분함량 및 토양경작법의 적용성

토양 pH	토양경작법의 적용성
$40\% \leq \text{수분함량} \leq 85\%$	적합
수분함량 < 40%	정기적인 수분공급 필요
수분함량 > 85%	배수시설 및 하우스 등 설치 필요

(4) 토양온도

토양온도는 미생물의 성장에 가장 큰 영향을 미친다. 미생물은 적정 온도까지는 온도의 증가에 따라 급격히 증식한다. 토양 미생물의 활성은 10℃ 이하에서는 활동이 둔화되고 5℃ 이하에서는 활동을 멈추게 된다. 또한 45℃ 이상의 온도에서도 석유계 화합물의 분해에 관여하는 미생물의 활성이 감소한다. 보통 10℃~45℃의 온도

범위에서 미생물의 활동과 증식 속도는 온도가 10℃ 상승할 경우 2배정도 빨라진다.

토양경작법의 경우 토양온도는 대기온도에 의해 영향을 받기 때문에 일년 중 미생물이 최적으로 성장하는 시기를 고려하여 경작장 운영시기를 결정하여야 한다.

[표 4-31] 토양온도 및 토양경작법의 적용성

토양온도	토양경작법의 적용성
$10^{\circ}\text{C} \leq \text{토양온도} \leq 45^{\circ}\text{C}$	적합
$10^{\circ}\text{C} \geq \text{토양온도} \geq 45^{\circ}\text{C}$	부분적 적합, 하우스 등의 설치를 통한 토양온도 조절 및 특정 미생물 이용

(5) 영양염류 농도

미생물은 세포성장 및 생분해 과정을 수행하기 위하여 암모니아와 인 등의 영양염류를 필요로 한다. 이러한 영양염류는 토양으로부터 충분한 양을 얻을 수 있으나 경우에 따라 미생물의 농도를 유지하기 위해 영양염류를 추가로 공급해야 하는 경우도 있다. 그러나 특정 영양성분의 과잉공급은 미생물의 대사를 저해할 수도 있다.

가장 널리 알려진 미생물의 세포구조식은 $\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N}$ 과 $\text{C}_{60}\text{H}_{87}\text{O}_{32}\text{N}_{12}\text{P}$ 이며, 주요 구성물질은 탄소(C), 질소(N), 인(P) 등으로 이루어져 있다. 이들 미생물을 이용하여 생분해를 촉진하기 위한 가장 이상적인 탄소:질소:인의 비율은 오염물질의 조성과 생분해 과정에 관여하는 미생물의 종류에 따라 결정되며, 보통 100:10:1 ~ 100:10:0.5의 범위가 일반적이다. 영양염류의 공급은 물에 녹여 수분 첨가시 공급하거나 혼합과정에서 토양에 영양염류 용액을 뿌려서 첨가 혹은 분말형태나 과립 형태로서 첨가할 수 있다. 일반적으로 칼륨의 첨가는 요구되지 않지만, 적용성 시험을 통해 칼륨(K)이 충분하지 않다고 판단되는 부지에서는, 인(P)의 절반정도의 양을 추가할 수 있다. 탄산칼륨(K_2CO_3)은 일반적인 칼륨(K) 공급원이다.

(6) 토성(Soil texture)

토성은 토양의 투수계수, 수분함량, 겉보기 밀도 등에 영향을 미친다. 특히 토양내 영양염류 및 수분함량 등을 적절한 범위 내에서 유지할 수 있도록 운영하려

면, 토성을 고려하여야 한다. 예를 들어 응집력이 높은 토양(예 : 점토)은 산소를 공급하기 어려우며, 빗물유입차단시설이 설치되지 않을 경우 비나 눈이 온 이후 오랫동안 과도한 수분을 함유하게 된다. 이러한 경우에는 점토성분이 많은 토양의 응집력을 느슨하게 하기 위해서 토양개량제(예 : 석고) 및 톱밥이나 짚 등의 물질을 토양에 적절히 섞어 주어야 한다.

4.3.2 오염물질 특성에 따른 주요 영향인자

(1) 휘발성

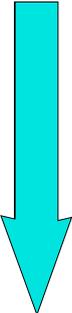
휘발성 오염물질은 처리과정 중 경작장 및 기타 밀폐된 공간에 잔존하기 때문에 토양경작시 고려되어야 할 중요한 인자이다. 특히 휘발유, 등유, 경유 등의 휘발성이 강한 석유계 화합물로 오염된 토양을 처리하는 경우 다량의 휘발성유기 화합물질(VOCs)이 발생하므로 작업장내 작업자의 안전 및 대기오염을 방지하기 위하여 휘발성유기화합물을 적정한 농도로 조절할 수 있는 배기가스처리장치 등의 설치가 고려되어야 한다.

(2) 화학구조

대부분의 석유계 화합물은 휘발이나 미생물에 의한 분해가 가능하지만 복잡한 구조의 성분일수록 분해가 어렵고 반응 속도도 느리다. 가장 작은 분자량(9개 이하의 탄소원자)을 가진 지방족(Aliphatic) 화합물 및 단일 방향족(Monoaromatic) 화합물들은 높은 분자량의 지방족 화합물 및 복합 방향족 화합물(Polyaromatic)보다 쉽게 분해된다. [표 4-32]는 석유계 화합물에서 보이는 여러 가지 성분들의 생분해성(Biodegradability)을 나타내고 있다.

오염물질의 화학구조를 살펴보면 어떤 오염물질이 가장 난분해성 인지 확인이 가능하다. 따라서 이러한 정보를 이용하여 정화기간 산정, 생물학적 정화 가능성 평가, 현장 파일럿실험, 토양경작법 운전 및 모니터링 계획 등은 생분해가 가장 느린 오염물질을 기준으로 이루어져야 한다.

[표 4-32] 석유계 화합물의 상대적 생분해성(Biodegradability)

생분해성	구성 성분	주요 석유계 화합물
분해가 잘 됨  분해가 어려움	n-butane, l-pentane, n-octane	휘발유
	Nonane	경유
	Methyl butane, dimethylpentanes, methyloctanes	휘발유
	Benzene, toluene, ethylbenzene, xylenes	휘발유
	Decanes	경유
	Dodecanes	등유
	Tridecanes	난방유
	Tetradecanes	윤활유
	Naphthalenes	경유
	Fluoranthenes	등유
	Pyrenes	난방유
	Acenaphthenes	윤활유

(3) 오염물질의 농도 및 독성

토양에 높은 농도의 석유계 화합물과 중금속이 함유되어 있으면 독성을 가질 가능성이 크고 분해를 담당하는 미생물의 활동을 둔화시키고 분해 속도도 감소한다. 보통 석유계 화합물의 농도가 25,000 mg/kg을 초과하거나, 중금속의 농도가 2,500 mg/kg을 넘어서게 되면 미생물의 활동은 제약을 받게 되고 호기성 미생물에게는 독성을 가지므로 토양경작법이 적용되기 위해서는 석유계총탄화수소(Total Petroleum Hydrocarbon)의 농도가 25,000 mg/kg 이하가 되어야 하고 중금속의 농도도 2,500 mg/kg 이하가 되어야 한다.

[표 4-33] 오염물질의 농도 및 토양경작법의 적용성

오염물질농도	토양경작법의 적용성
석유계물질 ≤ 25,000 mg/kg 중금속 ≤ 2,500 mg/kg	적합(보통 10,000 mg/kg 이하로 오염된 토양에 적용)
석유계물질 > 50,000 mg/kg 중금속 > 2,500 mg/kg	부적합

4.3.3 기후조건에 따른 주요 영향인자

일반적인 토양경작법은 지상에서 진행되므로 적정시설을 갖추지 아니할 경우 비, 눈, 바람 및 대기온도에 영향을 받기 쉽다. 따라서 이들 인자들이 토양경작법에 미치는 영향을 알아보는 것이 필요하다.

(1) 대기온도

대기온도는 토양온도에 직접 영향을 끼치기 때문에 중요한 인자이다. 앞서 설명한 바와 같이 토양온도는 경작지 내에 서식하는 미생물의 활동도와 생분해에 영향을 미친다. 보통 토양경작에 적합한 온도는 10℃~45℃이다. 따라서 추운기온에서도 경작장을 유지하기 위하여 다양한 열공급 장치를 설치하기도 한다.

(2) 강우

강우는 직접 토양에 접하기 때문에 토양경작 부지의 수분함량을 증가시켜 경작에 악영향을 미친다. 앞서 설명한 바와 같이 토양경작에 적합한 수분함량은 적정한 범위내에 있어야 한다. 우기시는 미생물의 활동에 필요한 것보다 많은 수분이 토양에 함유 될 수 있고, 건기시에는 토양수분함량이 불충분하여 추가적인 수분의 공급이 이루어질 수도 있다.

보통 연 강수량이 약 75 mm 이상 발생하는 지역에서는 경작장이 실내에 설치되어야 하며, 경작지역이 강우에 영향을 받지 않도록 배수시설 및 기타 차수시설 등의 설치가 필요하다.

(3) 풍속

풍속이 강한 지역에서의 토양경작시 비산먼지의 발생 및 비산먼지의 이동에 따른 오염물질의 확산 등이 발생할 수 있으므로 바람이 많이 부는 계절에는 토양 뒤섞기 등을 자제하여야 하며, 강풍으로 인한 하우스 등 빗물유입차단시설이 날려가지 않도록 이를 설계에 반영하여 설치하여야 한다.

4.3.4 생물학적처리(Biotreatability) 평가

토양경작법의 적용성 평가 단계에서 토양특성에 따른 영향인자, 오염물질 특성에 따른 영향인자, 기후조건에 따른 영향인자가 토양경작법을 적용하기에 적절한 범위내에 드는 경우, 토양경작법의 설계 및 운영에 필요한 적정한 변수(생분해 정도, 생분해 속도, 첨가할 영양염류 농도 등)를 결정하기 위하여 생물학적처리 평가를 수행한다.

생물학적처리 평가는 플라스크실험(Flask study) 또는 펜실험(Pan study)을 통하여 다음과 같은 정보를 얻기 위한 실험을 수행하게 된다.

- 대상부지 오염토양에 영양염류의 추가 없이 토착미생물이 호기성 환경에서 오염물질을 분해하는 속도 측정
- 동일한 조건하에서 영양염류의 농도를 달리하여 미생물이 최대 분해를 유도할 수 있는 최적의 C:N:P 결정
- 토착미생물에 의한 오염물질의 저감 또는 정화 효과가 없는 것으로 관찰되었을 때 성능이 검증된 인위적인 미생물 등을 공급하여 오염물질의 저감정도 확인
- 오염물질의 농도 저감이 생분해에 의한 효과인지 휘발에 의한 효과 인지를 확인하기 위하여 오염토양을 멸균처리한 후 시간경과에 따른 오염물질의 농도 확인

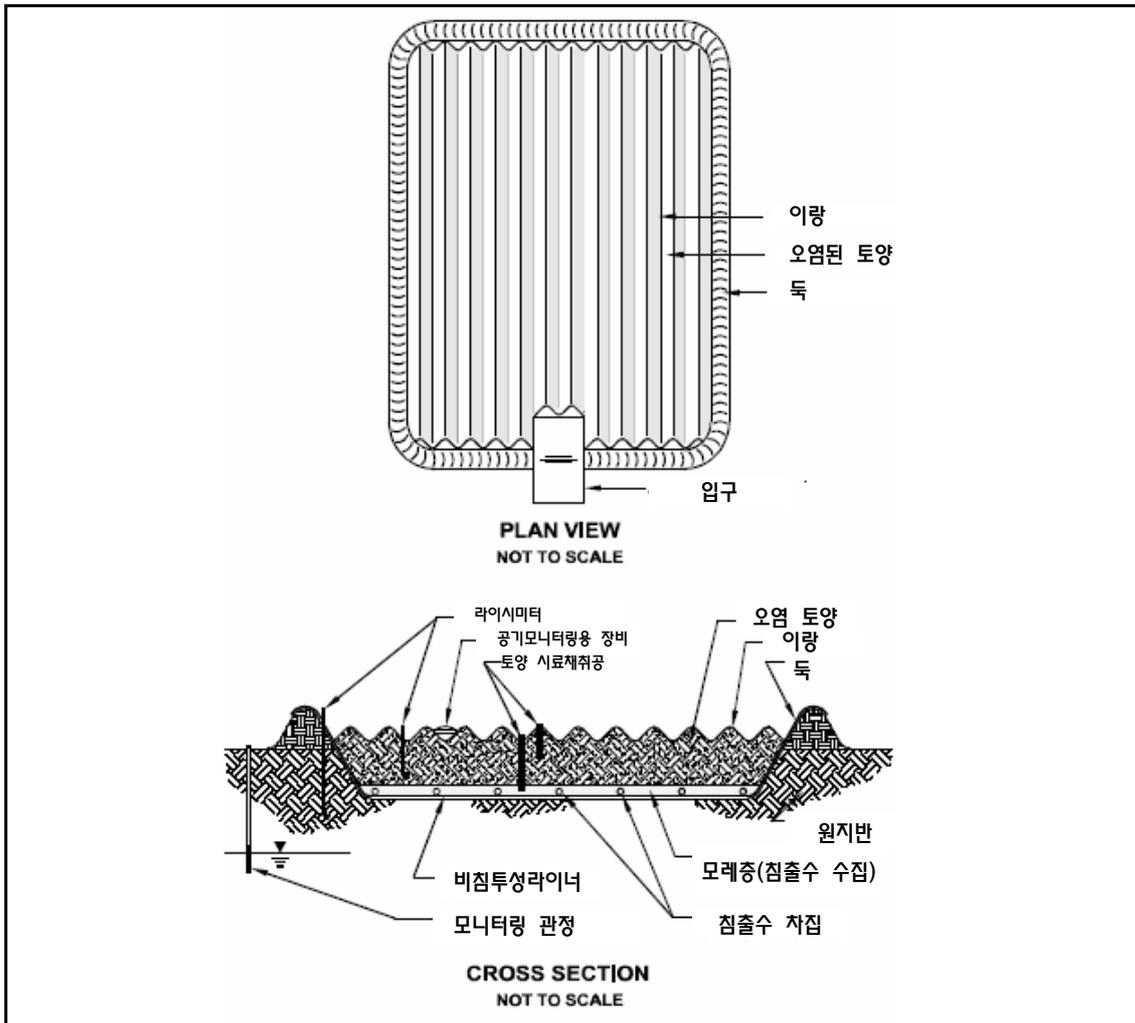
4.4 토양경작법 설계에 대한 평가

설계의 기준이 마련되면 토양경작법 시스템의 설계를 진행하게 된다. 토양경작법의 설계에는 아래 내용의 정보가 포함되어져야 한다.

- 소요부지넓이는 처리할 토양의 규모를 토양경작 토양의 깊이로 나누어 결정한다. 토양경작 높이는 보통 30~45cm 사이이며, 사용되는 경작장비에 따라 최대 60cm까지 가능하다. 예를 들어 오염토양 1,200m³, 경작 높이가 0.6m, 경작횟수를 2회로 한다면 소요부지면적은 1,000m²이다. 추가 오염물질확산을 방지하기 위한 방지턱 및 접근로를 설치할 추가 부지가 필요하다.

$$\text{소유부지면적(m}^2\text{)} = \frac{\text{오염토량(m}^3\text{)}}{\text{경작높이(m)} \times \text{경작횟수}}$$

- 토양경작장 배치는 부지여건, 접근의 용이성 및 굴착지역과 이동거리가 가장 짧은 거리에 배치하며, 정화기간에 따라 단일 및 복수로 배치한다.
- 토양경작 주기는 오염물질 제거효율 실험을 통해 도출된 제거속도를 바탕으로 하여 1회당 소요되는 기간으로 경작주기를 결정하며, 경작 횟수는 총 정화기간과 경작주기를 이용하여 경작횟수를 결정한다. 예를 들어 총 정화기간이 300일이고 경작주기가 60일이라면 경작횟수는 5회가 된다.
- 토양경작장건설에는 오염토의 개간, 정리, 고르기 등을 위한 부지, 오염확산 방지턱, 갓길, 침출수방지를 위한 바닥차수재(필요시), 침출수 차집 및 처리 시스템, 배기가스처리장치(필요시) 등이 포함되어져야 하며, [그림 4-10]은 토양경작에 필요한 일반적인 경작장을 보여주고 있다.
- 산소공급장비는 일반적으로 농업용 경작기(Roto-tillers) 등을 많이 사용하며, 장비는 산소가 공급된 토양이 트랙터 타이어에 다져지지 않도록 트랙터 뒤쪽에 장치되도록 한다.
- 토양경작 도중 외부의 빗물 또는 내부의 수분을 통제하기 위한 시설을 설치하여야 한다.
- 바람 또는 물에 의한 토양침식 및 비산을 방지하기 위하여 경작지역의 경사면을 다지거나, 경작지역 덮개, 스프레이링 등의 비산먼지 방지장치 등을 설치한다(단 하우스 설치시 필요하지 않음).
- 토양 pH의 조정 및 영양염류를 공급하기 위하여 정기적으로 고체비료, 석회, 황 등을 적절히 토양에 섞어준다.
- 휘발성이 강한 유종으로 오염된 토양을 처리하는 경우 경작장내에서 휘발성유기화합물에 의한 작업자의 안전 및 대기오염을 방지하기 위한 가스처리장치 등의 설치가 필요하며, 정기적으로 경작장 내부의 휘발성유기화합물 질의 농도를 측정하여야 한다.



[그림 4-10] 일반적인 토양경작장 설치도면

4.5 운영 및 모니터링 계획의 평가

운영 및 모니터링 계획시에는 시스템의 성능을 최적화하고, 오염물질의 저감 등을 확인하기 위한 시스템운영 및 모니터링 계획을 수립하여야 한다. 토양경작법 운영계획에는 토양 경작주기, 영양염류 및 수분 공급 주기 등이 검토되어야 하며, 토양 농도의 모니터링 결과에 따라 최적의 효율을 유지하기 위해 토양 뒤섞기 (tilling)주기, 영양염류 및 수분 공급 주기 등을 변경하여 준다.

또한 계절에 따른 대기 온도 및 강우 등에 대하여 모니터링을 수행한다. 일반적으로 하절기에는 토양 뒤섞기(tilling)주기와 영양염류 및 수분 공급 주기를 짧게 하며, 건기에는 비산먼지 및 수분 증발을 방지하기 위하여 덮개를 설치해 주기도 한다.

모니터링 계획에는 오염물질의 저감정도, 휘발성 농도가 높은 오염물질을 처리한다면 작업장내 휘발성유기화합물질(VOCs)의 농도, 토양경작장 외부로의 오염 확산 방지를 위한 주기적인 토양 및 지하수 모니터링, 침출수 처리 등이 포함되어 져야 한다.

또한 오염물질의 저감정도를 확인하기 위한 토양 시료채취 지점 및 시료채취 방법 등도 고려되어야 한다. [표 4-34]는 일반적인 토양경작법 모니터링 주기 및 항목 등을 보여주고 있다.

토양경작 중에는 토양의 pH, 수분함량, 미생물농도, 영양염류, 오염물질 농도 등이 적어도 분기마다 모니터링이 수행되어야 하며, 이러한 모니터링 결과를 바탕으로 토양 뒤섞기 주기, 영양염류 및 수분 공급 주기 및 공급량, pH 조절 방법 등을 결정한다.

[표 4-34] 모니터링 측정항목 및 시료채취 주기

모니터링 대상	모니터링의 목적 및 주기		측정항목
	목적	주 기	
오염토양	오염의 저감정도 및 생분해 상태 확인	매달~분기	미생물군수, 오염물질 농도, pH, 영양염류, 수분함량 등
공기	작업자 안전 및 대기오염 방지	토양 뒤섞기 작업 시	휘발성유기화합물(VOCs), 분진 등
외부배수 (침출수 포함)	오염확산 예방	매달~분기	대상오염물질
경작장 하부 토양	오염확산 예방	반년	대상오염물질
경작장 주변 지하수	오염확산 예방	일년	대상오염물질

4.6 토양경작법 적용성 평가 및 정화공정 효율 평가 항목(Checklist)

(1) 토양특성 평가

예	아니오	평가 항목
		총 중속영양미생물의 수가 1,000 CFU/gram을 초과하는가?
		토양 pH가 6~8의 범위인가?
		토양 수분함량이 40~60% 범위인가?
		토양 온도가 10~45℃ 범위인가?
		탄소:질소:인의 비율이 100:10:1~100:10:0.5 범위인가?
		토양이 쉽게 부스러지는가?

(2) 오염물질특성 평가

예	아니오	평가 항목
		오염물질이 생분해 가능한 물질인가?
		오염토양내 총 TPH 농도가 25,000mg/kg 이하인가, 중금속의 농도는 2,500mg/kg 이하인가?

(3) 기후조건 평가

예	아니오	평가 항목
		경작기간동안 강수가 75mm 이하인가?
		바람이 강하게 부는가?

(4) 생분해성 평가

예	아니오	평가 항목
		생물학적 분해도 실험이 수행되었는가?
		영양염류 적용 및 잠재적 방해요인(독성조건 등)에 따른 생분해성을 설명하고 있는가?

(5) 장치설계 평가

예	아니오	평가항목
		토양경작을 수행하기 위한 토양 경작 깊이, 경작장 넓이 기타 필요한 공간 등이 설계에 반영되어 있는가?
		침출수 및 기타 강우 등에 의한 빗물 등의 유입을 제어할 수 있는가?
		토양침식 및 비산을 방지하기 위한 시설이 마련되어 있는가?
		영양염류 주입 주기 및 pH 조절을 위한 물질이 구체화되어 있는가?
		수분보충이 필요한가?
		부지내 출입통제가 이루어지고 있는가?
		경작장 내부 및 대기중의 공기 모니터링이 설계에 반영되어 있는가?
		필요시 경작장 내부 및 대기중의 공기를 제어할 수 있는 계획이 마련되어 있는가?

(6) 운전 및 모니터링 계획

예	아니오	평가항목
		대기 중 공기, 토양, 침출수 등에 대한 모니터링을 수행하는가?
		운전계획에 토양경작 주기, 영양분첨가, 수분첨가 등이 포함되었는가?
		분기별 토양 pH, 함수율, 미생물 수, 영양분 조성, 토양내 오염물질의 농도 등에 대하여 모니터링을 계획하고 있는가?

5. 화학적산화법 (Chemical Oxidation)

5.1 기술개요

화학적 산화법은 타기술에 비하여 유류 오염물질을 빠른 시간 내에 분해하여 처리할 수 있으며, 현재 다양한 산화제 및 오염물질을 효과적으로 접촉시키기 위한 다양한 방법이 개발되어 적용되고 있다.

화학적 산화법의 적용을 통하여 산화제와 접촉한 유류 오염물질은 지중에서 이산화탄소와 물로 분해되고 결과적으로 오염물질의 농도가 감소하게 된다. 화학적 산화법은 수십년 동안 폐수처리 공정에 효과적으로 사용되어 왔으며, 최근에는 원위치 토양 및 지하수 오염 정화 분야에도 활용되고 있다.

화학적 산화법은 주로 포화지역과 모세관대(capillary fringe)의 오염원(source area)을 정화하기 위하여 사용되지만, 범위가 넓고 저농도로 오염된 지역에 적용하는 것은 비용적인 면에서 경제적이지 않다. 또한 오염물질의 농도가 매우 높거나 비수용액체상(Non Aqueous Phase Liquids ; NAPL)이 다량 존재할 경우에는 공정 운영의 안전성 또는 경제성 측면에서 화학적 산화법을 적용하기 전에 '유동유분의 회수법(free product recovery)'과 같은 타기술을 적용하는 것을 고려하여야 한다.

포화지역과 불포화지역의 오염원을 동시에 정화하기 위해서는 일반적으로 토양증기추출법과 같은 불포화지역 정화기술과 화학적 산화법을 연계하여 적용하기도 한다. 종종 토양증기추출법은 불포화지역의 오염원을 정화할 필요가 없다 할지라도 화학적 산화법과 연계되어 사용되기도 하는데 이는 화학적 산화공정 중 지중에서 발생하는 배기가스를 회수하거나 조절하는데 도움을 주기 때문이다.

화학적 산화법에 사용되는 산화제 및 적용방법들은 각각의 장점과 단점을 가지고 있다. 일부 산화제는 다른 산화제들보다 산화력이 강하고 지중에서 오염물질과의 접촉시간이 길어 효과적으로 오염물질을 분해할 수 있다. 다양한 산화제 중 적절한 산화제를 선택하기 위해서는 오염물질의 특성에 대한 구체적인 이해가 필요하다. 예를 들어 유류오염 지역에서 대표적으로 발견되는 벤젠과 같은 오염물질은 과망간산염을 이용한 원위치 화학적 산화법을 적용할 경우 쉽게 분해되지 않을 수도 있기 때문이다.

오염부지의 수리지질학적 특성을 이해하는 것은 화학적 산화법을 적용하는데 있어서 매우 중요하다. 이는 수리지질학적 특성이 지중에 주입되는 산화제와 오염물질이 접촉할 수 있는 범위를 결정하기 때문이다. 예를 들어 산화제는 투수성이 낮은 균질한 토양 또는 다량의 유류 오염물질이 포함되어 있고 수평으로 불균질한 토양이 분포하고 있을 경우 쉽게 침투하지 못한다.

산화제와 토양 중 구성물질과의 반응성 또한 화학적 산화법의 비용적인 측면을 고려할 때 매우 중요하다. 즉, 지중에 주입된 산화제는 오염물질 뿐 만 아니라 토양 중 유기물질과도 반응하여 소모되기 때문에 산화제의 사용량이 증가하고 따라서 전체 정화비용이 증가하게 된다. 또한 각각의 화학적 산화제는 수리지질학적 특성에 따라 적용 가능 여부가 결정되기도 한다. 즉, 펜톤 산화제의 반응을 통하여 생성되는 수산화 라디칼은 오염물질과 반응하기 전에 탄산염이 먼저 소모시키기 때문에 펜톤 산화제는 탄산염의 농도가 높은 포화지역 정화에는 효과적이지 못하다. 이와 반대로 과망간산염을 이용한 화학적 산화는 토양내 다량의 탄산염을 포함하고 있더라도 비교적 높은 처리 효율을 나타낼 수 있다.

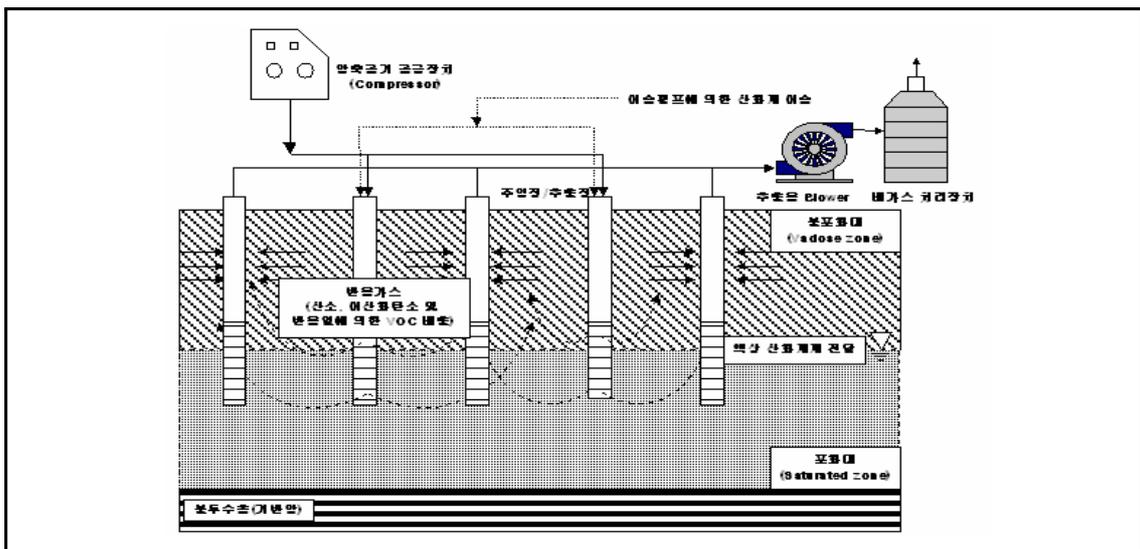
대부분의 화학적 산화법은 오염물질의 분해와 동시에 생물학적 분해를 위하여 호기성 미생물에 활용되는 용존산소를 생성하여 제공하기도 하고, 환원된 전자수용체인 질소/황을 질산염/황산염으로 산화시켜 혐기성 미생물이 오염물질을 분해할 수 있도록 하기도 한다. 따라서 화학적 산화법은 오염원에서의 오염물질 분해와 함께 오염원 주변 오염원의 생물학적 분해를 유도함으로써 자연정화법과 연계되어 사용되기도 한다. 화학적 산화법에 대한 자세한 기술분류 및 처리물질은 [표 4-35]에 기술하고 있으며, [표 4-36]은 화학적 산화법의 장·단점을 기술하고 있다.

[표 4-35] 화학적 산화법의 기술분류 및 처리물질

기술분류	원위치/위치외	In-situ 적용		Ex-situ 적용
	공정원리	생물학적 처리	물리/화학적 처리	열적 처리
	적용지역	불포화지역		포화지역
	적용매질	토양		지하수
	상용화 단계	상용화(full scale)	pilot scale	lab scale
처리물질	<ul style="list-style-type: none"> 비할로겐 및 할로겐 휘발성유기화합물질, 비할로겐 및 할로겐 준휘발성유기화합물질, 연료유류, 무기물질, 방사성 물질 			

[표 4-36] 화학적산화법의 장·단점

장 점	단 점
<ul style="list-style-type: none"> ◆ 오염물질을 원위치에서 정화할 수 있음 ◆ 오염물질의 분해가 수주 또는 수개월로서 매우 빠름 ◆ 펜톤 산화를 제외한 다른 산화제의 경우 부산물이 발생되지 않음 ◆ 일부 산화제(펜톤 산화제는 제외)는 MTBE를 완전히 산화시킬 수 있음 ◆ 정화기간이 짧고, 운영비와 모니터링 비용을 감소시킴 ◆ 자연정화법과 연계되어 사용될 수 있음 ◆ 일부 산화법은 환경교란을 최소화 할 수 있음 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 타기술에 비하여 초기투자 비용 및 운영비가 많이 소요됨 ◆ 투수성이 낮은 토양에서는 오염물질과 산화제의 접촉이 쉽지 않음 ◆ 펜톤 산화는 폭발성 배기가스를 발생시키므로 이를 제어하기 위하여 토양증기추출법과 같은 타기술의 적용이 필요함 ◆ 화학적 산화법의 적용 후 수주 또는 수개월 후에 오염물질의 용존농도가 다시 증가 할 수 있음 ◆ 용존 오염물질의 오염운의 모양이 화학적 산화법의 적용을 통하여 변할 수 있음 ◆ 산화제의 적용시 인체 건강 및 안전에 각별한 조심이 필요함 ◆ 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 지구화학적 성질이 변할 수 있음. 즉 산화반응으로 광물질이 공극에 침전되어 대수층의 막힘현상이 발생할 수 있음



[그림 4-11] 화학적 산화법 모식도

여러가지 화학적 산화제가 유류 오염물질을 분해하는데 사용되고 있으며, 이 중 대표적인 산화제로는 과산화수소, 펜톤 산화제 및 오존을 들 수 있다. 과망간산나트륨 및 과망간산칼륨은 실험실 또는 현장실험을 통하여 효과가 입증된 산화제이나 과산화수소 및 펜톤 산화제에 비하여 사용실적이 적어 실제 사용하기에는 어려움이 있다.

또한 현재 주목되고 있는 산화제 중의 하나는 과황산나트륨(sodium persulfate ; $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$)이 있으며, 과황산나트륨은 오염물질을 직접 산화시키는데 사용될 뿐 만 아니라 다른 산화제를 사용하기 전에 전체 산화제 소모량을 감소시키기 위한 전처리제로서 사용되기도 한다. 과황산나트륨은 2가철을 촉매제로 혼합할 경우 황산라디칼($\text{SO}_4\cdot$)을 형성하여 오염물질을 산화시킨다. 주요 산화제에 대한 특성 및 적용방법을 아래와 같이 간략히 나타내었으며, [표 4-37]은 각각의 산화제의 장·단점을 비교 검토하였다.

5.1.1 과산화수소와 펜톤 산화제

과산화수소는 강한 산화제로서 유류 오염물질을 분해하기 위하여 오염지역에 바로 주입될 수 있다. 지중으로 주입된 과산화수소는 매우 불안정하지만 유기오염물질 및 지중의 유기물질들과 반응하며 지중으로 주입 후 수시간 안에 산소와 물로 분해되고 이때 열을 발생시킨다. 일반적으로 과산화수소는 5~50% 농도(무게비)의 액체 형태로 오염지역으로 주입된다.

반면 과산화수소를 100mg/L 이하의 적은 농도로 주입시 지하수의 용존산소의 농도가 약 9~10mg/L까지 증가하며, 이때 산소가스가 생성되어 기포형태로 포화지역으로부터 불포화지역으로 이동하는 탈기 현상이 발생되므로 과산화수소가 지중에서 원활하게 이동(확산)하기에 제한을 받는다.

과산화수소는 특히 펜톤 산화반응을 생성시키기 위하여 2가철(Fe^{2+})과 반응할 경우 매우 효과적이다. 2가철은 토양 또는 지하수에 자연적으로 존재하거나, 또는 과산화수소와 함께 지중으로 주입하기도 한다. 2가철이 존재할 경우 과산화수소는 반응을 통하여 수산화라디칼($\text{OH}\cdot$), 3가철(Fe^{3+}) 및 수산화이온(OH^-)을 형성한다.

수산화이온은 매우 강한 산화제로서 유기화합물질과 효과적으로 반응하고 수산화라디칼 또한 BTEX, PAH 및 MTBE(휘발유 첨가제) 등의 오염물질의 탄소고리를 끊어

오염물질을 분해한다. 펜톤 산화제는 수산화라디칼을 형성하기 위하여 용존형태의 2가 철이 필요하고 최적의 펜톤 산화반응은 상대적으로 낮은 pH 상태(pH 2~4)에서 발생된다. 따라서 화학적 산화과정을 효과적으로 유도하기 위해서는 pH 조절이 필요하며 이를 위해서, 산성으로 조절한 과산화수소를 주입하거나 킬레이트 산을 첨가하기도 한다.

[표 4-37] 산화제 장·단점 비교

산화제의 장점	과산화수소 /펜톤산화	과망간산염	오존
빠른 시간 안에 정화를 완료할 수 있음.	○		
MTBE와 벤젠을 산화시킬 수 있음.	○		○
산화반응을 통하여 발생하는 열로 인하여 VOC를 포함한 배기가스가 발생되지 않음.	○ ¹⁾	○	
산화제의 지속시간을 증가시켜 오염물질과의 접촉 시간을 높일 수 있음.		○	
호기성 생분해에 필요한 용존산소를 제공할 수 있음.	○		○
공정운영 기간동안 건강 및 안전에 대한 위험을 감소시킬 수 있음.		○ ²⁾	
자동화시스템을 이용하여 적용 가능함.			○
산화제의 단점	과산화수소 /펜톤산화	과망간산염	오존
벤젠 또는 MTBE를 효과적으로 산화시킬 수 없음.		○	○
충분한 증기회수시설이 없을 경우 건물 또는 배관 등으로 유독한 증기가 유입될 수 있음.	○		○
오염운의 모양 및 범위를 변화시킬 수 있음.	○		○
투수성이 낮은 토양의 경우 짧은 시간안에 산화제의 원활한 유입이 어려움.	○	○	○
현장에 산화제 취급시설 및 저장시설이 필요함.	○	○	○
현장에 가스 생산 및 이송시설이 필요함.			○
제한적인 효과로 인해서 본 기술을 이용한 프로젝트의 예가 별로 없음.		○	
지중에서 2차 부산물이 생성될 수 있음 ³⁾ .	○	○	○
침전물을 생성하여 대수층의 공극을 막을 수 있음.	○	○	

- 1) 10% 이하의 고체 과산화염이 주입될 경우, 열이 발생하는 것을 감소시켜 VOCs가 배기가스에 혼합되어 배출되는 것을 피할 수 있음
- 2) 과망간산나트륨은 종종 40% 액체형태로 주입되기도 하는데 이 경우 폭발위험이 있기 때문에 취급상 매우 세심한 주위가 요구됨
- 3) 화학적 산화법은 독성이 강하고 유동성이 높은 2차 부산물을 생성할 수 있음. 따라서 화학적 산화법의 적용시에는 2차 부산물에 대한 분석이 항상 수반되어야 함

황산철 용액은 지하수의 pH를 조절할 수 있을 뿐 만 아니라 동시에 펜톤 산화에 필요한 철 촉매를 제공할 수 있다. 효과적인 반응을 위해서는 낮은 pH가 요구되기 때문에 펜톤 산화법은 석회암 지역, 특히 높은 pH를 나타내거나 완충효과가 높은 퇴적물에는 효과적이지 못하다. 더욱이 과산화수소와 3가철사이의 반응을 통하여 과산화수소가 소비되고 따라서 일정량의 산화제당 분해효율은 감소하게 된다.

펜톤 유사반응 또한 강력한 산화제인 수산화라디칼을 형성하지만 이 반응은 속도가 너무 빨라 오염물질을 산화시킬 수 있는 충분한 접촉시간을 제공할 수 없기 때문에 오염물질 분해에 효과적이지 않다. 또한 일부 오염물질은 토양에 존재하는 유기물질과 매우 강하게 결합되어 있어 분해가 쉽지 않을 뿐 만 아니라 점토 함량이 높아 투수성이 낮은 층(layer or lenses)을 포함하고 있는 부지의 경우에는 투수성이 높은 층의 오염은 정화되지만 투수성이 낮은 층에는 오염물질이 분해되지 않고 남아있게 된다.

이렇게 투수성이 낮은 토양의 경우에는 공기파쇄(pneumatic fracturing) 및 수압파쇄(hydraulic fracturing)의 방법을 이용하여 투수도를 높일 수 있다. 그러나 일반적으로 수압파쇄는 1.5m 간격 이하로는 생성하기 힘들기 때문에 실제적인 산화제의 침투효과는 그리 높지 않다.

현재 사용되고 있는 방법 중 산화제와 오염물질의 접촉을 증가시킬 수 있는 가장 효과적인 방법으로는 직경이 넓은 오거를 이용하여 산화제와 오염토양을 골고루 섞어주는 방법을 들 수 있다. 어떤 경우에는 펜톤 산화의 성공여부를 판단하기 위하여 오랜 기간에 걸친 지하수 오염도 모니터링이 필요한 경우도 있다. 즉, 산화제와 오염물질간의 충분한 접촉이 발생되지 않았다면 오염물질의 농도는 일시적으로 감소되었다가, 오염토양 표면에 흡착되어 있던 오염물질이 지하수로 용출됨으로써 오염물질의 농도가 다시 증가할 수 있기 때문이다.

따라서 최근에는 고체상태의 과산화물, pH 조절제 및 촉매제를 사용하는 새로운 접근방식이 시험되기도 하는데 이 방법은 과산화염과 유류 오염물질과의 반응 속도를 조절할 수 있을 뿐 아니라 오랜 기간에 걸쳐 산소를 제공할 수 있기 때문에 호기성 생분해 또한 촉진시킬 수 있다.

또한 개선된 펜톤형 시스템(modified Fenton-type system)은 슬러리 형태의 고체 과산화물과 금속 또는 유기금속 형태의 촉매제를 사용하고 pH가 중성 또는

염기성의 경우에도 효과적으로 반응하는 시스템이다. 이 시스템의 장점은 중성의 pH에서도 효과적으로 반응할 수 있기 때문에 지중의 상태를 산성으로 조절할 필요가 없다는 점이다. 또한 산화제와 함께 환원제를 동시에 주입함으로써 과산화물의 산화반응 속도를 조절할 수 있으며, 호기성 생분해 또한 촉진시킬 수 있다.

펜톤 유사반응은 발열반응이고 따라서 지하수의 온도를 높이며 증기를 발생시켜 지중의 압력을 증가시킬 수 있다. 특히 오염층이 깊은 불포화지역, 또는 모니터링 및 주입관정에서 압력이 높아질 경우, 펜톤 유사반응에 의하여 폭발이 발생할 수 있으며 이러한 폭발성 증기가 선택적 통로(preferential pathway)를 통하여 이동할 경우 폭발위험은 더욱 증가하게 된다.

펜톤 산화의 운영과정 중 발생된 지중의 증기에 의하여 폭발사고가 발생한 사례가 있으며, 정화과정 중 생성된 VOCs가 이동하여 빌딩으로 유입되거나 오염원이 확대되는 사고 예도 있다. 이러한 위험을 방지하기 위하여 화학적 산화법을 선택하여 수행하기 전에 최소한 다음의 사항들을 검토하는 것이 중요하다.

- 오염부지내 고농도의 오염지역이 있는지 확인할 것
- 산화제의 흐름방향을 확인하고 평가할 것
- 지중설비, 지하실 등 증기가 모일 수 있는 공간을 확인할 것
- 오염부지내 다른 저장시설 및 배관이 존재하는지의 여부를 확인할 것

화학적 산화법의 운영 중에는 다음의 사항들을 고려하여야 한다.

- PID/FID 검출기 및 폭발성 물질 검출기 등의 이용
- 펜톤 산화공정 중 토양증기 포집시설의 설치 및 가동
- 지중 온도 측정 장치 사용, 예를 들어 과산화수소의 경우 65℃ 이상의 온도에서 분해되어 산화가 진행되기 때문에 지중 온도를 조절하는 것이 중요함
- 과산화수소와 촉매제의 주입을 자주 모니터링하고 토양가스 및 지하수 시료의 현장 분석결과를 바탕으로 주입량 조절
- 오염부지의 수리화적인 특성을 충분히 고려하여 화학적 산화반응에 의해 발생된 압력으로 인한 오염물질의 확산을 최소화함

위의 사항들 이외에 안전상 주의사항으로는 현장에서의 과산화수소 저장 및 취급문제를 들 수 있다. 과산화수소와 직접적인 접촉을 했을 경우 화상 및 실명을 초래할 수 있기 때문에 과산화수소와 같은 유해물질의 취급을 위해서는 보호복 및 보호안경 등의 보호장비를 착용해야 한다. 또한 사고발생 시 세척할 수 있도록 세면시설 및 샤워시설을 갖추어야 한다.

펜톤 산화반응을 일으키는 과산화수소 및 촉매제는 일반적으로 가압주입방식 또는 중력주입방식을 이용하여 관정을 통해서 오염부지로 주입된다. 가압주입방식은 압축된 공기를 분사하여 짧은 기간 동안 과산화수소와 촉매제를 지중으로 주입하고 분사된 공기의 힘을 이용하여 과산화수소 및 촉매제가 영향범위까지 이동하게 된다. 이 방법은 보다 적극적인 주입방식으로 생성된 VOCs 증기가 이동하거나 오염운의 범위에 영향을 주는 단점을 가지고 있다.

중력주입방식은 소량의 산화제를 장기간 중력에 의하여 침투되도록 주입하는 방식으로 포화지역으로의 산화제의 확산은 그 지역의 수리지질학적인 특성에 따라 달라진다. 중력주입방식은 화학적 산화법과 관련된 몇 가지 위험을 줄일 수 있으며, 특히 적용기간이 길어질 경우 산화제가 더 깊게 침투할 수 있다.

과산화수소와 펜톤 산화반응의 추가적인 장점으로는 오염부지내 또는 그 주변의 산소농도를 증가시킬 수 있다는 점이다. 오염지역에서의 산소의 증가는 자연적으로 발생하는 호기성 생분해를 촉진시키고 결과적으로 오염물질의 양을 감소시킬 수 있다.

또한 펜톤 산화반응으로 인해 지중 미생물은 쉽게 사멸되지 않을 뿐만 아니라 펜톤 산화반응 후에 미생물 군수가 다시 빠른 속도로 증가한다는 연구결과를 바탕으로 화학적 산화 후 생물학적 분해공정을 연계하여 사용할 수 있는 충분한 가능성을 보여주고 있으며, 호기성 생분해를 촉진시킬 뿐만 아니라 질소와 황을 질산과 황산으로 산화시켜 혐기성 미생물이 전자수용체로 활용할 수 있도록 함으로써 혐기성 생분해도 촉진시킬 수 있다.

5.1.2 과망간산염

과망간산염은 최근 주목받고 있는 화학적 산화제로서 토양 및 지하수 중의 유류 오염물질 및 기타 유기오염물질을 분해하고 특히 최근에 수행된 실험실 또는 모형규모의 연구결과를 살펴보면 MTBE의 분해에 효과적인 것으로 보고되고 있다. 과망간산염은 과산화수소 보다 약한 산화제이고 또한 벤젠을 산화시키지 못하는 특성 때문에 화학적 산화제의 선정시 제외되기도 하였다. 그러나 과망간산염은 다음과 같은 장점을 가지고 있다.

- 넓은 pH 범위에서 사용이 가능함
- 지중에서 오랜시간 반응하기 때문에 산화제와 오염물질이 접촉할 수 있는 가능성 및 시간이 증가됨
- 반응과정 중 열, 증기 등이 발생되지 않음

과망간산염은 일반적으로 과망간산칼륨(KMnO_4) 또는 과망간산나트륨(NaMnO_4) 형태로 사용된다. 비용적인 면이 우선으로 고려되는 부지에서는 과망간산칼륨이 산화제로서 선호되는데 이는 구하기 쉽고 가격이 저렴하며 취급이 쉬운 고체형태로 사용할 수 있기 때문이다. 비용 이외에 다른 인자들이 중요하게 고려되는 부지에서는 액상형태의 과망간산나트륨이 사용된다.

오염부지에 사용할 화학적 산화제로서 과망간산칼륨을 적용할 경우에는 다음의 3가지 특성을 충분히 고려하여야 한다.

- 과망간산칼륨은 칼륨광석으로부터 만들어내기 때문에 자연적인 특성상 염 또는 금속(비소, 크롬, 납 등)을 일부 포함할 수 있다. 따라서 오염부지에 적용할 경우 이러한 불순물에 의한 2차 오염이 발생될 수도 있기 때문에 이에 대한 모니터링이 필요함
- 과망간산칼륨은 의약품의 생산에도 사용되기 때문에 세심한 주의와 관리가 필요함
- 낮은 점도를 가진 과망간산칼륨은 실리카를 포함하고 있기 때문에 관정 및 스크린에 막힘 현상을 초래할 수 있음

다른 산화제와 마찬가지로 과망간산염의 오염물질 분해효과는 산화제와 오염물질과의 접촉 가능성에 달려있다. 충분한 접촉시간을 확보하기 위해서 과망간산염은 고체 또는 액체형태로, 연속적 또는 주기적으로 주입기(injection probe), 토양파쇄(soil fracturing), 지하수 재주입 등의 방법을 이용하여 주입한다. 일반적으로 용해된 과망간산염은 주입관정에 100~40,000 mg/l의 농도로 주입하고 슬러리 주입(slurry injection), 심토 혼합(deep soil mixing) 또는 수압파쇄방법을 이용할 경우에는 5,000~40,000 mg/L 또는 50%(무게비) 농도의 과망간산염 용액을 이용한다.

원위치 과망간산염 반응은 낮은 pH(pH 3), 높은 Eh(+800mV)에서 발생되는데 이 경우 자연적으로 또는 오염물질로서 존재하는 금속의 이동성이 높아진다. 그러나 이러한 금속의 유출은 과망간산염을 이용한 화학적 산화과정 중 침전되는 이산화망간으로 유출된 금속들이 강하게 흡착됨으로써 유출로 인한 손실을 상쇄할 수 있다. 또한 높은 농도의 과망간산나트륨은 점토의 팽창 및 대수층의 막힘현상을 초래하여 점토질의 투수성에 영향을 미칠 수 있다.

토양 중의 수산화크롬($\text{Cr}(\text{OH})_3$)은 화학적 산화과정 중에 6가 크롬으로 산화될 수 있는데 6가 크롬은 3가 보다 독성이 강하고 지속성이 긴 특징을 가지고 있기 때문에 정화부지의 지하수를 음용수로 사용할 경우 문제가 될 수 있다. 그리고 과망간산염을 화학적 산화제로서 사용할 경우 생성되는 이산화망간(MnO_4)의 양이나 이산화망간이 지중 환경 및 생태계에 미치는 영향에 대해서는 아직 연구가 필요하다.

5.1.3 오존

오존은 과산화수소의 약 1.2배의 산화전위(oxidation potential)를 가진 강력한 산화제이며, 원위치에서 유류 오염물질을 분해하는데 사용할 수 있다. 오존 가스는 일반적으로 현장에서 막여과 시스템(membrane filtration system)을 통하여 생성되고 주입정을 통하여 지중으로 주입된다. 오존의 높은 반응성 때문에 오존가스의 주입 농도와 속도는 현장에 따라 매우 다양하며, 가능한 처리부지와 근접한 장소에서 생성하여 오염지역과 근접하게 배열된 주입관정을 통하여 주입한다.

오존은 용존 형태로 지중에 주입할 수도 있다. 즉, 추출한 지하수에 오존가스를 공급함으로써 지하수에 오존을 용해시키고 이를 다시 주입관정을 통하여 지중

으로 주입함으로써 오염지역으로 산화제인 오존을 이송한다. 그러나 가스 형태의 오존이 일반적으로 더 많이 사용된다.

일반적으로 오존 주입은 5% 이상의 오존을 포함한 공기를 주입관정을 통하여 주입하며, 이때 오존은 지하수로 용해되어 지중의 유기물질과 반응하고 결과적으로 산소로 분해된다. 오존은 지중의 오염물질을 직접적으로 산화시키기도 하고 산화전위가 오존의 1.4배로 산화력이 매우 강한 수산화라디칼($\text{OH}\cdot$)을 형성하여 유기물질을 분해하기도 한다. 오존은 BTEX, PAHs 및 MTBE 등을 모두 분해할 수 있다.

높은 농도의 오존을 이용하여 산화반응을 일으킬 경우 열과 VOCs 증기가 생성될 수도 있으며, 따라서 발생하는 배기가스를 포집하여 처리할 수 있는 시스템(토양증기추출 시스템과 배기가스처리 시스템 등)이 필요할 경우도 있다.

오존 또한 유류로 오염된 토양에 산소를 공급함으로써 호기성 생분해를 유도하는데 효과적인 산화제로 사용되고 있다. 오존은 순수산소에 비하여 10배 이상 용해도가 높기 때문에 오존이 주입될 경우 지하수는 오존의 분해를 통하여 생성된 용존산소에 의하여 포화상태에 이르게 된다.

지중으로 주입된 오존의 1/2이 약 20분 안에 산소로 분해되며, 용해된 산소는 토착미생물의 호기성 생분해에 이용된다. 오존의 산화특성은 지중의 생물활성을 일시적으로 감소시킬 수 있으나 이러한 감소는 일시적인 현상으로서 오존을 이용한 원위치 화학적 산화 후에도 충분한 양의 미생물이 살아남아 생물분해를 수행한다. 또한 호기성 미생물은 오존의 분해로 인한 산소의 공급으로 화학적 산화 처리 부지 주변에 번성하게 된다.

5.2 화학적 산화법 정화계획의 유효성 평가절차

정화계획의 유효성 평가는 정화계획 수립시 석유계유기화합물질 등의 물질로 오염된 토양을 화학적 산화법으로 정화하고자 할 때 오염부지에 본 기술의 적용 가능여부 및 적절한 정화계획 수립 등을 평가하기 위한 자료로 활용된다.

유효성 평가절차는 다음과 같이 4개 부분으로 구성되어 있다.

□ 화학적 산화법의 유효성 평가절차

1단계 : **화학적 산화법의 초기 적용성 평가** 단계에서는 화학적 산화법이 본 부지의 정화방법으로서 고려대상인지 여부를 신속하게 결정한다.

2단계 : **화학적 산화법의 세부 적용성 평가** 단계에서는 화학적 산화법이 대상 부지의 정화에 효과적으로 적용될 수 있는지에 대한 세부 인자들을 평가하며, 실내실험 및 자료 등의 검토를 통해 본 기술의 적용가능 여부를 평가한다.

3단계 : **화학적 산화시스템 설계평가** 단계로서 기본 설계를 위한 설계인자 및 충분한 적용성 평가시험이 수행되었는지 여부를 평가한다.

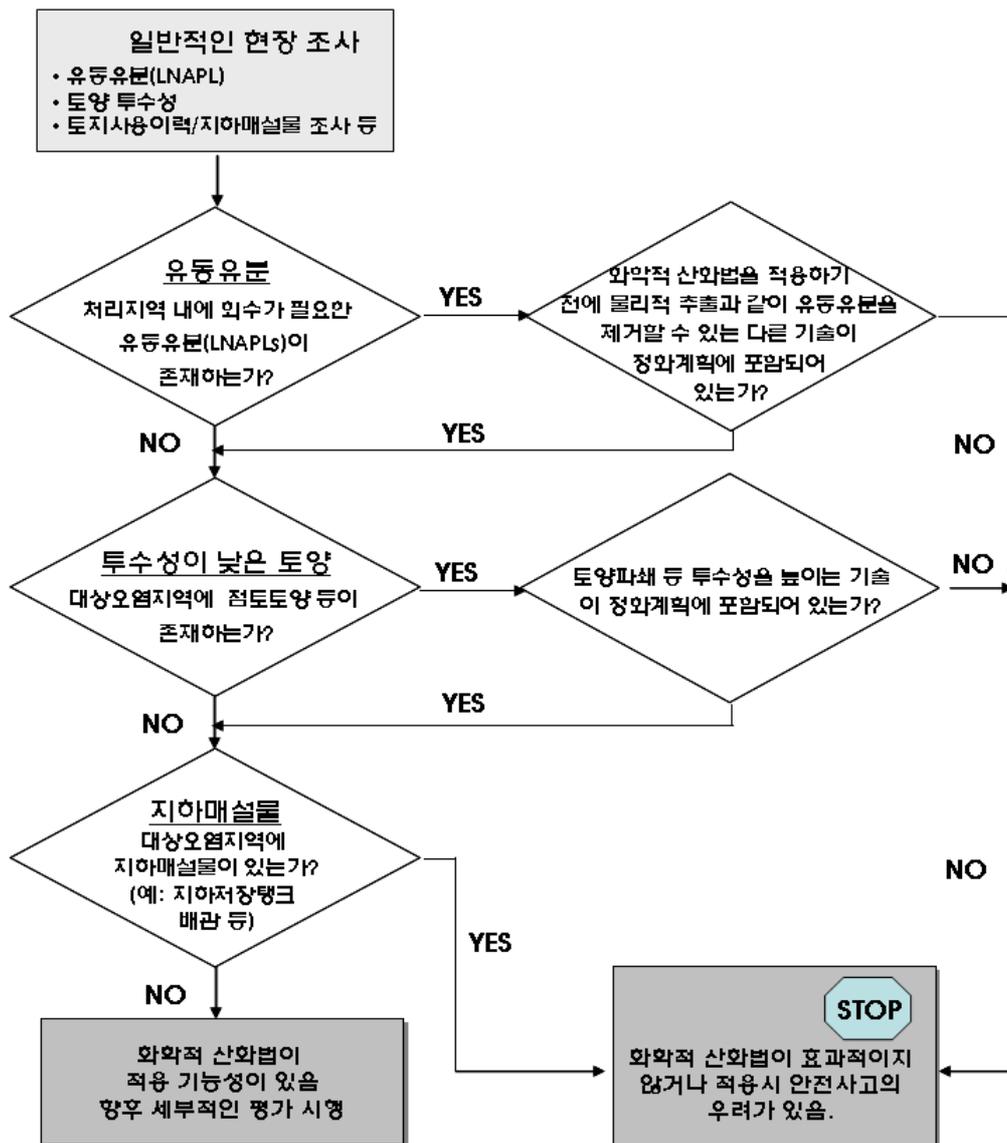
4단계 : **운영 및 모니터링 계획 평가** 단계에서는 시운전 계획, 운영/모니터링 계획의 적정여부, 정화과정 중 모니터링 항목 및 긴급조치계획(contingency plan)등이 적절한지 검토한다.

5.3 화학적 산화법의 초기 적용성 평가

초기 적용성 평가 단계에서는 화학적 산화법이 유류로 오염된 지역의 정화에 효과적인 방법인지에 대한 초기 적용성 평가를 수행한다. 화학적 산화법을 오염부지의 정화방법으로 선정하기 전에 오염부지의 특이적인 여러 가지 특성들을 충분히 고려했는지 살펴보고 정화방법으로서 전반적인 실현가능성을 제한하는 요인들을 검토한다.

이러한 제한 요인들에 대한 검토는 전체적인 정화사업을 검토하고 정화방법으로서 화학적 산화법의 적절성을 평가하는데 도움을 준다. 화학적 산화법의 전반적

인 실현가능성을 검토한 후 이에 대한 세부적인 평가를 위하여 부지 및 오염물질 특성을 검토한다. [그림 4-12]는 화학적 산화법의 초기 적용성을 평가하기 위한 단계별 평가절차를 보여주고 있다.



[그림 4-12] 화학적 산화법의 초기 적용성 평가절차

5.3.1 실현가능성(Overall Viability)

다음의 현장 특성들은 화학적 산화법의 실현가능성을 감소시키는 제한요소로

서 작용하며 만약 다음의 특성들이 부지조사결과 발견된다면 화학적 산화법은 본 부지의 정화방법으로서 적절하지 않다.

□ 부지내 비수용액채상(NAPL)이 존재할 경우 이를 회수하거나 처리할 수 있는 다른 방법이 정화계획에 포함되어 있지 않을 경우

- 화학적 산화법은 비수용액채상의 처리에는 경제적이지 않으며, 폭발의 위험성도 가지고 있다. 따라서 다량의 비수용액채상이 존재할 경우 화학적 산화법을 적용하기 전에 적절한 방법을 통하여 회수할 필요가 있다.

□ 지하저장탱크, 배관, 하수관거 등의 설비들이 처리부지에 근접해 있을 경우

- 화학적 산화법의 운영 중 발생하는 열, 휘발성유기화합물질(VOCs)의 발생, 산소농도의 증가 및 이에 따른 부식 등의 문제가 발생될 수 있으며, 특히 매설되어 있는 설비의 경우 폭발 및 화재가 발생되거나 건물 지하실로 휘발성유기화합물질이 유입될 수 있다.

□ 오염지역에 투수성이 낮은 점토층이 존재할 경우

- 토양에 점토가 많이 포함되어 있을 경우에는 투수성이 낮아 지중으로 주입된 화학적 산화제가 오염물질과 쉽게 접촉하기 힘들고 충분한 접촉시간을 갖지 못하면 오염물질이 분해되지 않고 투수성이 낮은 층에 남아있게 된다. 토양 파쇄, 반응속도가 느린 산화제의 사용(예 : 과망간산염) 등이 오염물질과 산화제의 접촉가능성을 증가시키는데 도움을 줄 수 있지만 실제 기술적, 경제적인 면에서 다른 기술을 고려하는 것이 효과적일 수도 있다.

5.3.2 화학적 산화법의 잠재적인 적용성

화학적 산화법의 유효성에 대한 세부적인 평가를 하기 전에 본 기술을 적용하는데 있어서 반드시 고려해야 하는 핵심 인자를 살펴보는 것이 중요하다. 화학적 산화법의 적용성에 큰 영향을 미치는 인자로는 오염부지의 투수성을 들 수 있다. 미세토양, 점토, 실트 등과 같이 투수성이 낮은 토양에서는 오염물질과 산화제의 접촉이 어렵기 때문에 모래질 토양과 같이 투수성이 높은 토양에 비해 분해효과가 낮다.

또한 중요한 인자로는 각각의 오염물질에 대한 산화제의 분해효과를 들 수 있

다. 예를 들어 과망간산염의 경우 벤젠이나 MTBE를 쉽게 산화시키지 못하기 때문에 이 오염물질을 정화하기 위해서는 산화제를 신중하게 선택해야 한다.

5.4 화학적 산화법의 세부 적용성 평가

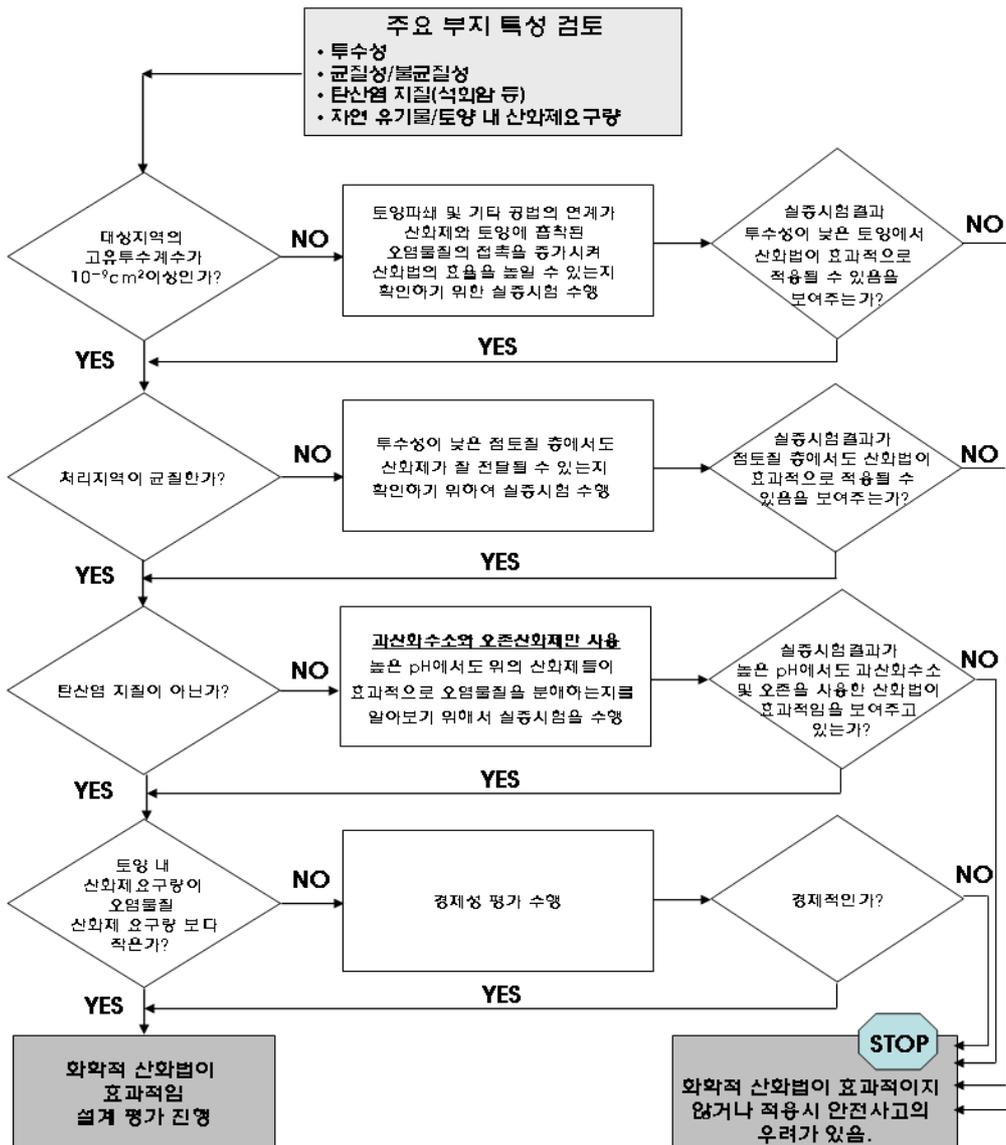
정화계획에 대한 개략적인 초기평가 결과 화학적 산화법이 본 부지의 정화에 적절하다고 판단되면 화학적 산화법에 대한 세부 적용성 평가를 수행한다. 세부 적용성에서는 초기평가에서 다루지 않았던 주요 영향인자들에 대하여 구체적으로 검토한다.

[표 4-38]은 세부 적용성 평가에서 고려되어야 할 영향인자들을 보여주고 있으며, 제공된 영향인자와 실제 현장에서 도출된 영향인자들을 비교·분석 평가함으로써 화학적 산화법이 본 부지에 효과적으로 적용될 수 있는지를 결정하게 된다.

본 장에서는 화학적 산화법을 통하여 유류 오염물질을 분해시키는데 영향을 주는 다음의 2가지 영향인자를 구체적으로 살펴보고자 하며, [그림 4-13]은 화학적 산화법의 세부 적용성을 평가하기 위한 단계별 평가절차를 보여주고 있다.

[표 4-38] 화학적 산화법의 주요 영향인자

오염부지특성	오염물질특성
<ul style="list-style-type: none"> ○ 산화제 요구인자 ○ 물질이송인자 <ul style="list-style-type: none"> - 고유투수계수 - 토양구조 및 지층구조 - 동수경사(hydraulic gradient) - 지하수에 용해되어 있는 철 또는 기타 환원상태의 물질 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 화학물질 분류 및 화학적 산화에 대한 지속성 ○ 용해특성 <ul style="list-style-type: none"> - 용해도 - 분배계수(Koc)



[그림 4-13] 화학적 산화법의 세부 적용성 평가절차

5.4.1 오염부지 특성에 따른 주요 영향인자

(1) 산화제 요구인자

화학적 산화제와 촉매제가 포화지역으로 주입되면 이송(advection) 및 확산(dispersion)현상에 의하여 오염지역으로 퍼져나간다. 이상적으로는 산화제가 오염물질과 접촉할 때까지 산화제의 주입농도가 일정해야 하지만 실제 산화제의 농도는 공극수로 인한 희석, 오염물질이 아닌 기타 토양 유기물질과의 반응을 통하여 주입과 동시에 점점 감소한다. 토양내 주입된 산화제는 토양내 유기물질과의 반응

으로 소실되는 산화제의 양(자연적인 산화제 요구량(natural oxidant demand : NOD))에 의해 지속적으로 손실이 발생한다. 따라서 효율적인 정화공정 및 비용을 절감하기 위하여 정화에 필요한 적정한 산화제 요구량을 도출하여야 한다.

자연적인 산화제 요구량은 토양 중에 자연적으로 존재하는 유기물질 및 무기물질과의 반응을 통하여 소모된다. 즉 산화제는 지중의 유기물질(natural organic material : NOM)과 반응하여 소모되고 결과적으로 오염물질과는 반응하지 못한다. 또한 무기물질과의 반응은 2가철과 같은 환원형태의 무기이온이 지하수 및 포화지역의 토양에 존재할 경우에 발생된다.

따라서 자연적인 산화제 요구량 및 오염물질의 분해를 위해 필요한 산화제의 양 모두를 만족시킬 수 있는 충분한 양의 산화제를 첨가하지 않는다면 지중의 오염물질을 목표치까지 분해시킬 수 없다. [표 4-39]는 지하수에 존재하면서 산화제 또는 산소를 소비하는 대표적인 무기물질의 반응을 나타내고 있으며, 일반적으로 포화지역에서의 자연적인 산화제 요구량은 모형규모의 실험실 시험을 통하여 도출한다.

[표 4-39] 지하수내 무기물질의 산화반응

산 화	반 응
황산화(Sulfide Oxidation)	$O_2 + 1/2HS \rightarrow 1/2SO_2 + 1/2H^+$
철산화(Iron Oxidation)	$1/4O_2 + Fe^{2+} + H^+ \rightarrow Fe^{3+} + 1/2H_2O$
질산화(Nitrification)	$O_2 + 1/2NH_4^+ \rightarrow 1/2NO_3^- + H^+ + 1/2H_2O$
망간산화(Manganese Oxidation)	$O_2 + 2Mn^{2+} + 2H_2O \rightarrow 2MnO_2(s) + 4H^+$
황화철산화(Iron Sulfide Oxidation)	$15/4O_2 + FeS_2(s) + 7/2H_2O \rightarrow Fe(OH)_3(s) + 2SO_4^{2-} + 4H^+$

[표 4-40]은 일반적으로 유류 오염지역에서 발생하는 오염물질의 분해를 위한 이론적인 산소요구량을 나타내고 있다. 지중에 존재하는 유류 오염물질을 목표치까지 분해하기 위해서는 이론적으로 필요한 산소요구량의 최소 3~3.5배의 산소를 정화기간 동안 주입해야 한다.

[표 4-40] 유기물질의 산화 화학양론

석유류	산화반응	산소요구량 (g 산소/ g 오염물질)
MTBE	$C_5H_{12}O + 7.5O_2 \rightarrow 5CO_2 + 6H_2O$	2.7
벤젠	$C_6H_6 + 7.5O_2 \rightarrow CO_2 + 3H_2O$	3.1
톨루엔	$C_5H_5CH_3 + 9O_2 \rightarrow 7CO_2 + 4H_2O$	3.1
에틸벤젠	$C_5H_5C_6H_5 + 10.5O_2 \rightarrow 8CO_2 + 5H_2O$	3.2
크실렌	$C_5H_4(CH_3)_2 + 10.5O_2 \rightarrow 8CO_2 + 5H_2O$	3.2
큐멘	$C_5H_5C_3H_7 + 12O_2 \rightarrow 9CO_2 + 6H_2O$	3.2
나프탈렌	$C_{10}H_8 + 12O_2 \rightarrow 10CO_2 + 4H_2O$	3.0
플루오린(fluorene)	$C_{13}H_{10} + 15.5O_2 \rightarrow 13CO_2 + 5H_2O$	3.0
페난트린(phenanthrene)	$C_{14}H_{10} + 16.5O_2 \rightarrow 14CO_2 + 5H_2O$	3.0
헥산(hexane)	$C_6H_{14} + 9.5O_2 \rightarrow 6CO_2 + 7H_2O$	3.5

실제 현장의 자연적인 산화제 요구량은 매우 다양하며, 또한 쉽게 예상하기가 힘들다. 예를 들어 과망간산염에 의한 산화과정과 관련된 실제 현장의 자연적인 산화제 요구량은 처리현장의 단위 유기물질 g당 2~100 mg MnO_4^- 를 필요로 하며, 이 값은 오염물질을 처리하기에 필요한 산소요구량과 비슷하거나 큰 값을 나타낸다. 또한 자연적인 산화제에 의한 산화반응은 토양 공극에 침전물을 축적하기도 한다. 예를 들어 과망간산염의 산화는 이산화망간의 침전을 초래하여 토양의 투수성을 감소시키기도 한다.

(2) 물질이송인자

지중의 용존산소의 이송 및 확산에 영향을 미치는 인자는 다음과 같다.

- 고유투수계수
- 토양구조 및 지층구조
- 지하수 이동 속도
- 지하수에 용해된 철 및 기타 환원형태의 물질

① 고유투수계수

고유투수계수는 토양에서 유체가 이동할 수 있는 능력을 나타내는 인자로서 일반적으로 지중 산소는 점토질과 같은 낮은 고유투수계수를 가진 토양에서보다 모래질과 같은 높은 고유투수계수를 가진 토양에서 보다 쉽게 확산되나, 주입관정 주변 등에서 탄산염의 일종인 방해석(calcite)등의 침전이 발생할 경우 투수성이 감소하기도 한다.

고유투수계수는 투수계수(수리전도도)를 통하여 계산할 수 있으며 투수계수는 현장에서 수행되는 양수시험을 통하여 측정할 수 있다. 양수시험 또는 슬러그 시험을 통하여 측정된 투수계수의 범위는 불균질한 토양의 수리적인 특성을 대표하는 값이라 할 수 있다.

토양의 고유투수계수는 토양 종류에 따라 $10^{-16} \sim 10^{-3} \text{ cm}^2$ 까지 차이가 매우 크며, [표 4-41]은 토양의 고유투수계수에 따른 화학적 산화법의 효율성을 나타내고 있다.

[표 4-41] 고유투수계수에 따른 화학적 산화 효과

수리전도도(K)(cm/sec)	고유투수계수(k)(cm ²)	화학적 산화 효과
$K > 10^{-5}$	$k > 10^{-9}$	일반적으로 효과적임.
$10^{-5} \leq K \leq 10^{-6}$	$10^{-9} \leq k \leq 10^{-10}$	효과적일 수 있음. 다만, 상세한 평가가 필요함.
$K < 10^{-6}$	$k < 10^{-10}$	거의 효과 없음.

화학적 산화법 적용시 토양의 고유투수계수는 감소될 수 있는데 이는 화학적 산화반응이 진행됨에 따라 2가철과 같이 토양 중에 자연적으로 존재하는 원소들이 산화되어 토양공극에 침전될 수 있기 때문이다.

만약 토양의 고유투수계수가 화학적 산화법 적용성의 경계 값인 $10^{-9} \sim 10^{-10} \text{ cm}^2$ 를 나타낸다면 처리하고자 하는 지역의 지질학적 특성을 면밀히 검토하여야 하며, 때에 따라서는 토양중의 환원형태의 물질 농도를 측정할 필요도 있다.

② 토양구조 및 지층구조

토양의 불균질성은 지중에서 유체의 흐름에 영향을 미치고 따라서 화학적 산화법의 적용시 지중으로 주입되는 산화제와 촉매제의 분산 및 확산에 영향을 준다. 즉 모래질, 실트질 및 점토질층으로 이루어진 불균질한 토양에서는 산화제가 모래질층에서 보다 효과적으로 확산되어 이 층에 존재하는 오염물질을 성공적으로 분해할 수 있으나 실트 또는 점토질층으로는 산화제의 침투가 어렵기 때문에 오염물질의 분해가 어렵다.

만약 실트 및 점토질 층의 두께가 모래질의 층 보다 두껍고, 심각한 수준의 오염물질을 포함하고 있을 경우에는 화학적 산화법이 오염물질의 정화에 효과적이지 않다. 또한 펜톤 산화 또는 오존 주입 방법은 토양내 선택적 통로(preferential pathway)를 만들거나 더욱 확장시킬 수 있기 때문에 화학적 산화법의 효과를 감소시킬 수 있다.

실제 토양은 균일하지 않고 낮은 고유투수계수를 가진 층을 포함할 수 있기 때문에 토양의 평균적인 고유투수계수는 화학적 산화법의 실현가능성을 결정하는데 충분하지 않다. 만약 고유투수계수가 낮은 층에 전체 오염량의 50%가 포함되어 있고 정화목표치가 95%를 제거하는 것이라면 화학적 산화법을 이용하여 오염물질을 95%이상 제거하는 목표치를 달성하기는 현실적으로 힘들다.

그러나 이러한 경우에도 토양과쇄와 같이 고유투수계수를 증가시킬 수 있는 다른 방법들과 연계하여 화학적 산화법을 적용하거나 화학적 산화법 후에 생분해법을 추가적으로 사용한다면 정화목표치를 달성할 수도 있다.

③ 지하수 이동 속도

화학적 산화과정에서 산화제 및 촉매제를 지중에 확산시키는 데는 지하수의 이송 및 분산 정도가 매우 중요하다. 즉, 산화제와 촉매제의 확산은 지하수의 속도가 빠를수록 쉽게 일어난다. 실제 지하수 이동 속도는 침윤속도(seepage velocity ; q_s)로서 다음의 식을 통하여 계산할 수 있다.

$$q_s = \frac{K(dh/dl)}{n_e}$$

여기에서 dh/dl : 동수경사
 K : 수리전도도 (L/T)
 n_e : 토양 유효공극률

동수경사 및 토양의 수리전도도가 증가할수록 지하수 이동 속도는 비례하여 증가하고 유효공극률이 증가할수록 감소하게 된다. 지하수에 용해된 오염물질의 이동은 이송(advection), 분산(dispersion) 및 물리/화학적 반응에 의해 결정된다. 이송은 지하수의 흐름에 의하여 오염물질이 이동하는 것으로서 일반적으로 오염물질의 이송속도는 지하수의 평균속도와 같다.

분산은 확산과 기계적인 혼합에 의해서 발생되며 용해된 오염물질은 분산에 의하여 오염원 주변으로 확산된다. 분자확산은 일반적으로 지하수의 이동속도가 매우 느릴 때 발생하고, 기계적인 혼합은 지하수가 굴곡진 토양입자 사이로 지나가거나 지하수 이동 속도가 서로 다른 공극을 지나갈 때 발생된다. 오염물질의 이동은 물리/화학적 반응에 의해서도 영향을 받는데 흡착 및 탈착 등을 대표적인 예로 들 수 있다.

④ 지하수에 용해된 철 및 기타 환원형태의 물질

환원형태의 철(2가철) 또는 다른 환원형태 광물의 농도가 높을 경우 화학적 산화과정 중 이러한 물질들이 산화 및 침전되어 토양의 공극을 막을 수 있기 때문에 토양의 투수성이 감소할 수 있다. 예를 들어 토양 중 2가철은 산화제에 노출되어 3가철로 산화되고 산화된 3가철이 침전되어 토양 공극에 축적된다.

따라서 토양의 투수성이 감소하는 현상이 산화제의 주입지점 가까이에서 발생할 가능성이 높다. 이를 방지하기 위해서는 모형규모의 시험 등을 통하여 무기물질에 대한 자연적인 산화제 요구량 등을 검토하여야 한다.

5.4.2 오염물질 특성에 따른 주요 영향인자

화학적 산화법의 적용성을 검토하는데 있어서 화학적 산화법의 효율에 영향을 미칠 수 있는 오염물질의 특성(오염물질의 화학적 구조, 화학적 특성, 농도 및 독성 등)을 검토하는 것이 중요하다.

유류 오염물질은 수백 또는 수천가지 탄화수소의 혼합 형태로 이루어져 있으며, 각기 다른 원자구조 때문에 화학적 산화에 반응하여 분해되는 효율로 달라진다. 벤젠과 같이 특별한 경우를 제외하고 기본적인 3가지 화학적 산화제(과산화수소/펜톤산화, 과망간산염, 오존)을 통하여 대부분의 유류 오염물질은 분해할 수 있다. 벤젠은 과망간산염에 의한 산화가 어렵고 과망간산염에 의한 MTBE의 산화는 모형규모의 실험 정도만 수행되었을 뿐 현장적용 사례는 아직 부족한 실정이다.

(1) 용해도

용해도는 주어진 온도에서 물에 최대로 녹을 수 있는 물질의 양을 말하며, 대부분의 유류 오염물질은 낮은 용해도를 나타내기 때문에 유류에 의한 지하수의 오염농도는 제한을 받는다. [표 4-42]는 일반적인 유류 오염물질의 용해도를 나타내고 있다.

일반적으로 벤젠과 같이 높은 용해도를 가진 물질은 분자가 작고 분자량이 낮다. 이러한 물질이 누출되었을 경우 지하수 중에 높은 농도로 용해되고 지하수를 따라 빠르게 주변으로 이동한다. 반면, 나프탈렌과 같이 분자가 크고 무거운 경우 물에 대한 용해도가 낮기 때문에 지하수로 용해되는 농도에 제한을 받게 된다.

[표 4-42] 유류 오염물질의 용해도

화학물질	분자량(g/mol)	용해도(g/L)	유기탄소 분배계수(Koc-ml/g)
MTBE	88	51	12
벤젠	78	1.79	58
톨루엔	92	0.53	130
에틸벤젠	106	0.21	220
크실렌(총)	106	0.175	350
큐멘	120	50	454
나프탈렌	128	0.031	950
아세나프탈렌	154	0.0035	4,900

또한 용해도는 오염물질이 토양에 흡착되는 정도를 나타내는 인자이기도 하다. 즉 물질의 용해도와 유기탄소 분배계수는 반비례 관계를 나타내는데 높은 용해도를 가진 물질은 토양에 흡착이 잘 되지 않으며, 이는 화학적 산화제와 좀더 쉽

게 접촉할 수 있음을 나타낸다. 반대로 토양에 쉽게 흡착되는 오염물질은 화학적으로 쉽게 산화되지 못한다.

(2) 유기탄소 분배계수(Koc)

유기탄소 분배계수(Koc)는 수용액 상의 오염물질의 농도와 유기탄소에 흡수된 오염물질 사이의 평형상태를 정의하는데 도움을 줄 수 있는 물질의 특성이다. 유기탄소 분배계수는 오염부지에서 유기탄소함량(fraction of organic carbon content : foc)을 사용하여 포화지역에서의 지하수와 토양사이의 오염물질의 평형 농도를 결정하는데 사용될 수 있다. 일반적으로 표토의 유기탄소함량은 1~3.5% 정도이고 대수층 토양에서의 함량은 0.1~0.01% 정도이다.

유기탄소 분배계수 및 분배계수(Kd)가 높을수록 오염물질은 토양에 잔존하려는 경향이 강하고 따라서 화학적 산화제와 쉽게 접촉하지 못하며 유기탄소 분배계수와 분배계수가 낮을 경우는 반대의 현상이 발생된다. 용해도와 유기탄소 분배계수는 반비례적인 관계를 나타낸다.

실제 현장에서의 오염물질의 양 및 분포를 설명해 줄 수 있는 부지 특이적인 정보가 없다면 용해도와 유기탄소 분배계수를 통하여 화학적 산화가 이 부지에 적합한지를 개략적으로 판단할 수 있다. 높은 용해도와 낮은 유기탄소 분배계수를 가지고 있는 유류 오염물질의 경우 보다 쉽게 산화제와 접촉할 수 있고 따라서 쉽게 분해될 수 있으며, 낮은 용해도와 높은 유기탄소 분배계수를 나타내는 오염물질은 특히 투수성이 낮은 토양에서 오염물질과 충분한 접촉을 할 수 없기 때문에 화학적 산화법의 효과는 낮아진다.

5.5 화학적 산화법의 설계 평가

본 절에서는 설계에 필요한 주요 설계인자를 검토하고, 오염부지 정화를 위하여 기본적인 정화시스템을 포함하고 있는지를 확인하기 위한 화학적 산화법의 구성요소를 설명하고자 한다.

5.5.1 화학적 산화법의 설계를 위한 기본정보 및 정화목표

화학적 산화처리의 설계를 평가하기 위해 고려해야 하는 두 가지 기본적인 요소는 다음과 같다.

- 설계를 위한 기본 정보
- 정화목표

(1) 설계를 위한 기본 정보

화학적 산화법의 설계를 위한 기본 정보들과 수행되어야 할 기본적인 실험들을 [표 4-43]에서 간략히 기술하고 있다. 또한 화학적 산화법의 설계를 위한 기본 정보 검토시에는 기본 정보 뿐만 아니라 산화제 등의 화학물질로 인하여 유발될 수 있는 환경 위해 정도 등도 고려하여야 한다.

(2) 정화목표

선정된 정화기술 및 설계를 평가하는데 있어서 가장 크게 영향을 미치는 인자 중의 하나는 달성하고자 하는 정화 목표치이다. 실제 정화기술을 선정하는데 있어서 가장 핵심적인 질문 중의 하나는 '과연 화학적 산화법을 통하여 경제적으로 정화목표치를 달성할 수 있는가?'이며 이에 대한 답을 위해서는 자연적으로 소비되는 산화제의 양이 어느 정도인지, 낮은 투수성을 가지는 토양에 산화제를 주입할 경우 오염물질의 분해를 위해 소비되는 산화제의 양 이외에 과잉으로 소비되는 산화제의 양이 얼마인지, 정화 목표를 위해 사용된 과량의 산화제 주입에 따른 2차 오염물질이 발생되는지 등의 다수의 문제에 대하여 검토가 이루어져야 한다.

[표 4-43] 화학적 산화 시스템 설계를 위한 기본정보

기본 설계 정보	근거 및 실험방법
<p>정화목표치</p> <ul style="list-style-type: none"> - 오염물질의 양 및 농도(토양 및 지하수) - 정화기간 - 지하수 오염확산방지 - 기타 	<p>국내 토양환경보전법상 기준치 이내로 처리</p>
<p>지질학적 특성</p> <ul style="list-style-type: none"> - 균질성(균질/비균질) - 층상구조(모래, 실트, 점토 등 수직적 토성 구조) - 지화학적 특성(환원형태의 광물함량, 유기물함량, 철이온, 황산이온, 질산이온, 용존산소 등) - 기반암(구조, 깊이, 주향, 경사, 균열 등) - 토양 고유투수계수 	<p>부지조사, 시추조사, 관정설치, 시료채취 및 분석, 지질학적 조사 수행</p>
<p>수리학적 특성</p> <ul style="list-style-type: none"> - 지하수위 - 지하수 흐름방향 및 동수경사 - 대수층의 구조(피압, 비피압 대수층 등) - 수리계수(수리전도도, 투수량계수, 저류계수, 유효공극률 등) - 지화학적 특성(철이온, 황산이온, 질산이온, 용존산소 등) - 모델링(지하수 흐름 모사 등) 	<p>부지조사, 수위측정, 대수층 양수시험, 시료채취 및 분석, 데이터 분석, 수리지질학적 조사 수행</p>
<p>오염물질</p> <ul style="list-style-type: none"> - 오염물질 구성요소 - 산소를 소모하는 다른 화학물질의 농도 - 오염량(흡착량, 용존량, 액체 및 기체량) - 오염범위(수직적 또는 수평적) - 이동특성(용해도, 분배계수 등) - 증기압, 헨리상수 등 - 모델링(오염물질 이동 모사 등) 	<p>토양 및 지하수 시료채취 및 분석, 오염물질에 대한 문헌정보 조사 및 분석 수행, 기타 물질안전성 데이터시트(MSDS) 정보 조사 등</p>

5.5.2 화학적 산화제 선정

구체적인 설계를 위해 필요한 기본적인 정보를 도출함과 동시에 본 단계에서는 화학적 산화법이 본 부지의 정화에 과연 효과적으로 적용될 수 있는지를 다시 한번 검토하여야 한다. 이는 프로젝트의 특성에 따라 또는 부지의 특성에 따라 실제 오염부지에 적용할 수 있는 산화제는 한정되어있기 때문이다.

[표 4-37]은 산화제의 각각의 특성을 비교한 표로서 이러한 인자들은 선택된 산화제의 적절성과 유효성을 평가할 수 있도록 해준다. 실제 화학적 산화법의 유효성과 적절성을 평가하는데 유용한 인자로는 (1)생분해를 위한 산소의 생성정도 (2)화학적 산화력을 들 수 있다.

몇 가지 화학적 산화제들의 구별되는 특징 중의 하나는 지하수로 산소를 공급하는 능력이 다르다는 것을 들 수 있다. 특히 오존과 과산화수소는 강한 산화제로서 산화 과정 중 매우 강력한 산화력을 가진 수산화라디칼을 생성함과 동시에 반응과정 동안 산소를 지중으로 공급함으로써 화학적 산화처리지역 주변에서 호기적인 생분해가 활발히 일어날 수 있도록 한다.

또한 산화제는 2가철을 3가철로 산화시키는 등 환원형태의 물질을 산화시켜 혐기성 미생물이 이용할 수 있는 형태로 변환시킴으로써 혐기성 생분해를 돕기도 한다. 이렇게 오존 및 과산화수소를 이용한 화학적 산화와 생분해를 연계시켜 처리함으로써 지중의 난분해성 물질을 분해할 수도 있다.

그러나 오존 및 과산화수소는 오염물질만을 선택적으로 분해하는 것이 아니라 지중의 유기물질을 모두 분해한다. 즉 유기물질이 많은 토양에 주입된 오존과 과산화수소는 오염물질을 분해하기 전에 지중의 유기물질을 분해하는데 많은 양이 소모되는 단점이 있다. 산화제의 상대적인 산화력은 산화제의 종류를 결정하는데 도움을 주며, [표 4-44]에서는 수산화라디칼, 오존, 과산화수소 및 과망간산염 등의 산화력을 비교하여 나타내고 있다.

[표 4-44] 화학적 산화제의 상대적 산화력

산화제	산화전위(volt)	상대적인 산화력(Cl ₂ =1.0)
수산화라디칼	2.8	2.1
황산라디칼	2.6	1.9
오존	2.1	1.5
과산화수소	1.8	1.3
과망간산염	1.7	1.2
이산화염소	1.5	1.1
염소	1.4	1.0
산소	1.2	0.90
브롬	1.1	0.80
요오드	0.76	0.54

5.5.3 설계시 검토사항

[표 4-45]는 화학적 산화시스템의 설계시 주요 검토사항을 나타내고 있다.

(1) 산화제 적용 설계시 고려사항

산화제를 어떻게 오염부지에 적용할 것인지(농도, 주입량, 주입회수 등)의 문제는 오염부지에서의 오염물질의 양, 부지특성 및 정화목표치 등을 기본적으로 고려하여 결정해야 한다. 오염부지의 처리를 위하여 주입하는 산화제의 양은 자연적인 산화제 요구량과 오염물질을 분해하기 위해 필요한 산화제 요구량을 만족시키는 양으로 결정해야 하고, 또한 산화제 및 촉매제의 주입을 통하여 발생할 수 있는 2차적인 환경오염문제도 고려해야 한다.

(2) 인허가 및 관련법규

오염부지의 정화를 수행함에 있어서 필요한 모든 인허가 및 관련법규는 설계 단계에서 확인하고 이를 준수하면서 정화업무를 수행할 수 있도록 설계시에 충분히 반영되어야 한다.

[표 4-45] 화학적 산화제법 설계시 고려사항

구 분	내 용
산화제 및 촉매제 이송 설계	<ul style="list-style-type: none"> - 이론적인 산화제 요구량 - 자연적인 산화제 요구량 추정치 - 산화제 이송 속도 - 주입정의 수 및 깊이 - 장치
인허가 및 관련법규	<ul style="list-style-type: none"> - 주입관정 설치 관련 인허가 - 폐수처리 관련 인허가 - 대기오염 관련 인허가 - 화학약품 사용 및 관리 관련 인허가
모니터링 계획	<ul style="list-style-type: none"> - 산화제의 주입(주입량, 주입농도 등) 모니터링 - 오염물질의 점감정도 모니터링
긴급조치 계획	<ul style="list-style-type: none"> - 산화제 주입이 불충분할 경우 - 오염물질의 분해가 예상치보다 낮을 경우 - 과잉의 오염물질이 유입되었을 경우 - 난분해성 오염물질이 형성되었을 경우 - 오염증기가 발생될 경우 - 처리 후 오염물질의 농도가 다시 증가할 경우 - 침전물이나 미생물군체에 의해서 대수층 공극에 막힘(clogging) 현상이 생길 경우

(3) 모니터링 계획

모니터링은 화학적 산화시스템의 운영효율을 평가하기 위하여 필요하다. 모니터링 계획은 충분하고 신뢰성 있는 자료의 수집을 위하여 시료채취 시기, 시료채취 개수, 시료채취 장소 등의 포함되어 있어야 한다. 또한 모니터링 계획에는 화학적 산화 과정 중 다음 각항의 효율을 평가하기 위한 계획도 포함되어져야 한다.

- 산화제와 촉매제의 전달정도
- 오염지역 전반으로의 산화제의 확산 정도
- 오염물질 농도
- 장기간 모니터링을 통한 오염물질의 저감 정도
- 기타 정화목표 달성을 위한 수행 상황

(4) 긴급조치 계획

정화업무 수행 중 발생될 수 있는 문제에 대한 대응계획을 세우는 동시에 아래와 같이 가능성은 낮지만 발생될 수 있는 문제 등을 예측하기 위한 긴급조치 계획 등이 검토되어야 한다.

- 산화제가 불충분하게 주입될 경우
- 투수성이 낮은 지역이 존재할 경우
- 오염물질의 분해효율이 낮을 경우
- 과잉의 오염물질이 유입될 경우
- 난분해성 오염물질이 존재할 경우
- 오염증기가 발생할 경우
- 처리 후 오염물질의 농도가 다시 증가할 경우
- 계획되지 않은 방향으로 산화제가 유입될 경우

5.5.4 화학적 산화시스템 구성요소

[표 4-46, 47, 48]은 과산화수소/펜톤산화, 과망간산염 및 오존을 이용한 화학적 산화시스템의 주요설비를 개략적으로 설명하고 있다. 화학적 산화법에 사용되는 주요 장비는 상황에 따라 크게 달라지기 때문에 각 요소에 대한 세부적인 설명을 할 수 없으나 화학적 산화법에 사용되는 관정의 배향, 위치, 숫자 및 구조 등의 설계요소에 대해서는 개략적으로 살펴볼 필요가 있다.

일반적인 주입관정의 형태는 가압식 또는 중력을 이용한 수직관정 형태를 들 수 있으며, 주입관정으로 산화제 또는 산화제를 용해시킨 지하수를 다시 주입할 수 있다. 오존 주입에 있어서는 수직 형태의 주입정이 일반적으로 이용되지만 수평관정도 활용 가능하다. 과망간산염에 의해 처리된 지하수도 마찬가지로 수직 또는 수평관정, 수로를 각각 이용하거나 이들을 조합한 방법으로 재주입할 수 있다.

관정의 설치방법은 정화대상 부지의 특성을 고려하여 결정하여야 한다. 예를 들어 처리된 지하수를 지하수위가 낮은 곳에 높은 유속으로 재주입하고자 할 경우에는 수평관정이 바람직하다. 또한 건물하부와 같이 지상건조물 아래에 위치한 오염지역을 정

화하거나 포화지대의 두께가 3미터보다 작을 경우에도 수평관정을 활용할 수 있다.

[표 4-46] 과산화수소/펜톤 산화제 주입시스템

구성요소	기능
추출관정	추출관정을 통하여 화학적 산화과정 중 발생하는 증기(VOCs, 산소를 포함)를 포집한다. 또한 지하수를 양수함으로써 산화제 및 촉매제의 주입과정 중 지하수의 흐름을 조절할 수 있다.
주입관정	주입관정을 통하여 과산화수소 및 촉매제가 포함된 용액을 주입하고 오염 물질과 산화제와의 접촉효율을 증가시키기 위하여 압축공기를 주입한다.
추출, 주입, 이송 및 정량 펌프와 탱크	추출, 주입, 이송 및 정량 펌프는 다음과 같은 목적으로 사용된다. (1) 지하수의 양수 및 재주입 (2) 양수된 지하수의 이송 (3) 설계상의 농도를 유지하기 위한 과산화수소 및 촉매제의 계량 - 펌프들은 과산화수소에 의하여 손상될 수 있으며, 따라서 교체가 필요할 수도 있다.
송풍기	추출용 송풍기는 지중에서 발생하는 유독한 VOCs 증기와 산소를 추출하는데 사용된다.
지하수 및 배출가스 처리장치	양수된 지하수 및 추출된 배기가스는 탈기(air stripping), 활성탄 흡착 등을 통해 오염성분을 제거 후 배출한다.
계기 및 제어설비	계기 및 제어설비는 시스템의 설비를 통합하고 시스템을 작동시키거나 중지시키는데 사용된다. 또한 설계된 물질수지가 유지되도록 하고 부적당한 처리나 부적절한 배출이 일어나지 않도록 도와준다.
모니터링 관정	정화작업의 효율성을 검토하기 위해 시료를 채취하는데 사용된다. 지하수 시료는 산화제와 촉매제가 적절히 분산되는지 판단하고 오염 물질의 감소 효율을 평가하기 위하여 분석한다. 오염물질의 농도를 장기간에 걸쳐 모니터링 하는 것은 화학적 산화기술의 효과를 평가하는데 매우 중요한 업무 중 하나이다.

[표 4-47] 과망간산염 산화제 주입시스템

구성요소	기능
추출관정	추출관정은 오염부지의 동수경사를 증가시켜 지중으로 주입된 과망간산염이 보다 빠르게 이동됨으로써 오염물질과의 접촉을 증가시키는데 사용된다.
주입관정	주입관정을 통하여 과망간산염 및 과망간산염을 용해시킨 지하수를 오염지역으로 주입하는데 사용된다. 과망간산염을 용해시킨 지하수를 상류에 위치한 주입관정으로 주입하고 하류에 위치한 추출관정에서 추출함으로써 지하수의 동수구배를 증가시켜 과망간산염의 확산을 촉진시킬 수 있다.
추출, 주입, 이송 및 정량 펌프와 탱크	추출, 주입, 이송 및 정량 펌프는 다음과 같은 목적으로 사용된다. (1) 지하수의 양수 및 재주입 (2) 양수된 지하수의 이송 (3) 설계상의 농도를 유지하기 위한 과망간산염의 계량
지하수 처리장치	양수된 지하수는 포함된 유류 오염물질을 제거하기 위한 처리를 수행한 후 배출하여야 하며, 이러한 설비로는 활성탄 흡착, 화학적 산화, 탈기(air stripping)등이 있다.
계기 및 제어설비	계기 및 제어설비는 시스템의 설비를 통합하고 시스템을 작동시키거나 중지시키는데 사용된다. 또한 설계된 물질수지가 유지되도록 하고 부적당한 처리나 부적절한 배출이 일어나지 않도록 도와준다.
랜스 주입 (lance injection)	슬러리형태의 과망간산염은 push-point 방법을 이용하여 오염부지에 격자 형태로 주입할 수 있다.
큰 직경의 오거를 이용한 심토 혼합	과망간산염은 큰 직경의 오거를 이용하여 오염부지의 심토 및 지하수와 혼합될 수 있다.
모니터링 관정	정화작업의 효율성을 검토하기 위해 시료를 채취하는데 사용된다. 지하수 시료에 포함된 용존산소 및 오염물질의 시간에 따른 비교분석을 통하여 산소가 오염지역에 효과적으로 전달되는지와 오염물질의 감소가 효율적으로 발생되고 있는지 알 수 있다.

[표 4-48] 오존 주입시스템

구성요소	기능
스파징 관정	스파징 관정은 오염된 지하수로 오존을 주입하는데 사용되고 주입된 오존은 오염물질을 분해할 뿐만 아니라 주변으로 확산되어 생분해에 필요한 산소를 공급하기도 한다.
공기압축기	오존을 생산하기 위해 필요한 공기를 압축하고 생산된 오존을 지중으로 주입하는데 필요한 압력을 제공한다. 보통 유류를 사용하지 않는 컴프레서가 선호되는데 이는 배관 등에서 발생할 수 있는 산화반응을 방지하기 위해 컴프레서는 유류 또는 오염물질이 포함되지 않은 공기를 공급해야 하기 때문이다.
오존발생기	오존은 현장에서 오존발생기를 통하여 생성되고 일반적으로 5%의 농도를 사용한다.
토양증기 추출설비	산화과정 중 불포화지역에서 발생하는 오존 증기 및 VOCs의 처리가 필요할 경우 사용된다. 토양증기추출설비는 불포화지역을 진공상태로 만들어 가스를 포집할 수 있는 낮은 진공압의 송풍기와 활성탄, 바이오필터 등 가스 처리시설로 이루어진다.
계기 및 제어설비	계기 및 제어설비는 시스템의 설비를 통합하고 시스템을 작동시키거나 중지시키는데 사용된다. 또한 설계된 물질수지가 유지되도록 하고 부적당한 처리나 부적절한 배출이 일어나지 않도록 도와준다.
모니터링 관정	정화작업의 효율성을 검토하기 위해 분석되는 환경시료를 채취하는데 사용된다. 지하수 시료에 포함된 용존산소 및 오염물질의 시간에 따른 비교 분석을 통하여 산소가 오염지역에 효과적으로 전달되는지와 오염물질의 감소가 효율적으로 발생되고 있는지 알 수 있다.

(1) 주입, 추출 및 재주입 관정

화학적 산화법 적용을 위해 사용되는 주입, 추출 및 재주입 관정 설치 시에는 다음과 같은 사항을 고려하여야 한다.

- 관정의 종류 : 수직 및 수평관정 모두 지중의 유류 오염물질을 처리하는데 활용할 수 있다. 그러나 과산화수소와 촉매를 이용한 펜톤 산화법의 경우에는 주로 수직관정을 이용한다.
- 관정의 위치와 숫자 : 관정의 위치와 숫자는 (1) 산화제와 촉매제를 오염지역으로 전달할 최적의 방법, (2) 화학적 산화법에 의한 처리율을 모니터링

할 수 있는 통로의 확보 등의 사항을 고려하여 설계과정에서 결정된다. 과망간산염을 사용하여 재주입하는 경우에는 주입정을 상부에 배치하고 추출정을 하부에 배치한다. 이렇게 배치함으로써 자연적으로 동수경사를 확보하여 오염지역을 가로질러 산화제가 확산되어지게 한다. 추출관정의 숫자, 위치 및 구조는 주로 오염지역의 수리지질학적 특성, 오염층의 두께, 현장 실증실험 결과, 수리학적 모델링 결과 등을 고려하여 결정한다. 또한 시간의 경과에 따라 관정을 경유하는 지하수의 흐름 특성이 변할 수 있기 때문에 정화가 진행됨에 따라 관정의 위치 변경이 필요할 수도 있음을 유의하여야 한다.

오존 주입공정의 경우에도 관정의 숫자 및 위치를 현장 실증실험을 통해 결정할 수 있으며, 다음과 같은 일반적인 사항을 고려하여야 한다.

- 고농도로 오염된 지역의 경우에는 산화제를 많이 필요로 하는 지역으로 산화제를 효과적으로 전달 및 확산시키기 위해 관정사이의 간격을 줄여서 배치한다.
- 관정 사이의 간격을 줄여서 산화제를 오염물질에 직접 전달할 경우 산화제 자체에 의한 효과 이외에 지하수의 흐름을 촉진하여 정화기간을 단축할 수 있다.

(2) 관정구조

화학적 산화법에 이용되는 관정은 지름 25~150mm 사이의 PVC관, 아연도금관, 스테인리스관 등을 이용한다. 특히 스테인리스관의 경우 과산화수소 등 pH가 낮은 산화제 이용시 사용하여서는 아니 된다. 오존주입공정의 경우 주입정은 일반적으로 관정상단으로부터 300~1,000mm 사이 오염토양 층에 해당하는 부위에 스크린을 만든다.

주입정은 산화제가 관정 외부의 불포화대를 통해 동심원을 따라 지상으로 분출되는 것을 막기 위하여 적절한 그라우팅을 하여야한다.

재주입 관정은 일반적으로 관정의 바닥으로부터 불포화대까지 이르는 스크린을 가지고 있다. 지하수 양수관정의 경우에는 고농도의 유류 오염물질이 존재하는 포화대에 스크린을 설치한다. 일반적으로 지하수의 양수량 및 주입관정의 구조 및 형태를 설계시에는 현장 실증실험 등의 결과에 기초한 수리학적 모델링 등을 통하여 결정하기도 한다.

5.6 운영 및 모니터링 계획의 평가

운영 및 모니터링 계획시에는 시스템의 성능을 최적화하고, 오염물질의 저감 등을 확인하기 위한 시스템운영 및 모니터링 계획을 수립하여야 한다. 화학적 산화법의 경우 정화시스템의 운영에 따른 효율성을 검토하기 위하여 다양한 시료를 채취·분석 하여 다음과 같은 항목을 평가한다.

- 오염지역까지의 산화제 전달 정도
- 오염지역내 산화제의 분산 정도
- 토양 및 지하수에 존재하는 유류 오염물질의 저감 정도

[표 4-49, 50]은 이러한 항목을 평가하기 위한 지하수, 토양 및 토양증기 시료를 대상으로 측정 주기 및 측정항목에 대하여 나타내고 있다. 특히 효율성을 검토하기 위하여 사용 중인 주입정 및 주입정 주변에서 토양 시료를 채취하는 것은 바람직하지 않다. 주입지점 내부 또는 주입정 근처의 토양 특성은 유류 오염물질을 제거하는 산화제에 의해 이미 변질되어 부지 전체 토양의 특성을 대표하기 어렵기 때문이다.

또한 모니터링 계획에는 대상부지 경계 밖으로 오염물질 및 산화제의 확산 등을 감시하기 위한 모니터링 계획 및 정화업무 수행 중 발생될 수 있는 문제에 대한 긴급조치 계획 등도 포함되어져야 한다.

[표 4-49] 모니터링 측정항목 및 시료채취 주기(지하수)

분석항목	운전개시기 (7~10일)	정화기간 전반 및 사후관리 기간의 모니터링		목적
	매일	매주~매달	분기~매년	
지하수				
정화대상지역 및 주변지역에 위치한 관측정과 추출정에서 시료를 채취한다. 반면 산화제 주입정에서는 정화효율 평가를 위한 시료를 채취하지 아니하며, 이러한 이유는 산화제 주입정으로의 고농도 산화제 주입에 따른 국지적인 현상(예 : 주입정 일부 지역에서만 지하수내 오염물질의 정화효율이 높음)이 나타나기 때문이다.				
용존산소	○	○		산화제가 용존산소에 미치는 영향 및 이차적인 호기성 생분해 촉진에 미치는 영향을 결정
산화환원전위	○	○		정화시스템이 지중에 호기성 환경을 조성하는 정도에 대한 측도
pH	○	○		pH 조건의 추세를 파악하거나 pH가 안정적인지 또한 펜톤 산화에 적합한지 판단
과산화수소, 오존, 과망간산염	○	○		산화제가 분해되기 전까지 정화시스템에 의해 이동하는 거리에 대한 정보
대상오염물질			○	정화 진행률 파악
분해부산물 (예:3차부틸알콜)			○	불완전 산화의 척도
지하수위	○	○		지하수의 흐름과 같은 수리학적 조건이 설계 의도와 부합하는지 판단하거나 화학적 산화가 수리학적 조건에 예기치 못한 영향을 미치는지에 대한 판단 근거

[표 4-50] 모니터링 측정항목 및 시료채취 주기(토양증기 및 토양시료)

분석항목	운전개시기 (7~10일)	정화기간 전반 및 사후관리 기간의 모니터링		목적
	매일	매주~매달	분기~매년	
토양증기				
정화대상지역 및 주변지역에 위치한 관측정과 추출정에서 시료를 채취한다. 반면 산화제 주입정에서는 정화효율 평가를 위한 시료를 채취하지 아니하며, 이러한 이유는 산화제 주입정으로의 고농도 산화제 주입에 따른 국지적인 현상(예 : 주입정 일부 지역에서만 토양 증기의 농도가 낮게 나타남)이 나타나기 때문이다.				
이산화탄소	○	○		화학적산화의 증거
산소	○	○		주입된 산화제가 불포화대를 통해 유실될 수 있음
휘발성 유기화합물질	○	○		토양증의 잔유물이나 화학적 산화법에 의한 생성물 배출
오존 과산화수소의 배출	○	○		지중으로 주입된 산화제의 손실
토양				
정화대상지역 및 주변지역으로부터 시추, 천공 또는 유압식 장비를 이용하여 시료를 채취한다. 토양시료는 이전 시료와 비교하기 위하여 매번 동일한 위치에서 동일한 심도로 채취하여야 한다.				
대상오염물질			○	흡착된 오염물질이 화학적 산화법에 의해 제거 가능한 한계 파악 및 오염물질의 제거율 및 정화 진행을 확인

5.7 화학적 산화법 적용성 평가 및 정화공정 효율 평가 항목(Checklist)

(1) 오염부지특성 평가

예	아니오	평가 항목
		토양의 고유투수계수가 10^9cm^2 이상인가?
		불투수성 또는 투수성이 낮아 오염물질의 이동성을 낮추거나 생물이용성에 영향을 줄 수 있는 층(점토층 등)이 존재하는가?
		토탄층 및 휴믹산과 같이 토양 유기물이 많이 포함된 층이 존재하는가?
		정화기간 동안 토양의 온도가 10°C 이상인가?
		지하수의 pH가 5~8 사이인가?
		지하수 중에 용존되어 있는 철 농도가 10mg/L 이하인가?
		즉각적이고 심각하게 인체 및 생태계에 미칠 수 있는 위험이 제거되었는가?
		본 부지의 정화업무의 수행과 관련하여 준수하거나 취득해야 하는 특정 법규 및 인허가가 있는가?

(2) 화학적 산화시스템 설계 평가

예	아니오	평가 항목
		자연적인 산화제 요구량을 고려하여 산화제량을 산정하였는가?
		포화대 오염물질을 분해하기 위해 필요한 용존산소의 양은 산정되었는가?
		제안된 화학적 산화법이 정해진 정화기간 동안 필요한 양의 산소를 오염지역에 공급할 수 있는가?
		오염부지에 충분한 양의 산소를 공급하기 위하여 화학적 산화시스템의 설계용량이 충분한가?
		설계된 산화제 주입정의 개수 및 위치가 오염부지의 수리지질학적인 상황을 고려했을 때 전체 오염부지에 균일하게 산소를 공급하기에 충분하도록 설계되어 있는가?

(3) 인허가

예	아니오	평가항목
		본 부지의 정화업무의 수행과 관련하여 준수하거나 취득해야 하는 특정 법규 및 인허가가 있는가? 있다면 정화계획상에 인허가 취득 계획이 포함되어 있는가?

(4) 모니터링 계획 평가

예	아니오	평가항목
		화학적 산화시스템을 운영하기 전에 기준(baseline)을 설정하기 위한 시료 채취 및 분석이 이루어졌는가?
		화학적 산화법의 효율성을 모니터링하기 위한 시료채취 지점 중 산화제 주입정에서의 시료채취는 제외되었는가?
		화학적 산화법의 효율성을 모니터링하기 위한 모니터링 관정은 산화제 주입정 사이에 적절히 배치되어 있는가?
		토양/지하수 시료채취 수, 채취주기, 채취지점 등을 포함한 구체적인 계획을 수립하였는가?
		모니터링 인자로서 토양, 토양증기 및 지하수 시료를 채취하여 분석하는가?
		모니터링 주기가 [표 4-49, 50]에 포함된 내용과 부합하는가?

6. 저온열탈착법(Low-Temperature Thermal Desorption)

6.1 기술개요

열탈착법은 통제된 환경에서 토양을 일정온도로 가열하여 토양에 흡착된 오염 물질을 휘발 및 탈착시키는 지상처리기술로서 오염지역의 굴착된 오염토양을 열탈착장치에 투입하여 처리하는 방법이다. 열적 처리는 직접 연소에 의한 열처리(소각)와 산소가 없는 혐기성 상태에서 열을 가해 유기물질을 분해하는 열처리(열분해)의 두 가지 형태로 구분되며, 다시 열분해 형태는 오염물질을 제거하기 위한 운전 온도에 의해 고온열탈착법(400~800℃)과 저온열탈착법(약 400℃ 이하)으로 구분된다.

열탈착법은 보통 유기물 성분을 분해하지 않고 오염물질을 열을 이용하여 토양으로부터 분리하지만 시스템의 온도와 특정유기물 존재에 따라 가스상의 2차 생성물을 발생시킨다. 이런 가스상의 물질은 대기로 방출되기 전에 2차 처리장치(후연소장치, 촉매산화탑, 응축기, 또는 흡수탑)에 의해 처리된다.

또한 저온열탈착법을 적용하기 위해서는 일부 사전 또는 사후 공정이 필요하다. 예를 들어 굴착된 오염 토양 중 입경이 큰자갈(2인치 직경이상)은 선별을 통해 먼저 제거하고, 선별된 토양은 다시 탈착기로 유입되기 전에 분쇄 및 파쇄 과정을 거치게 된다. 또한 탈착기에서 처리된 토양은 냉각과정에서 분진 등을 저감하기 위해 살수작업 및 안정화 작업 등을 수행한다.

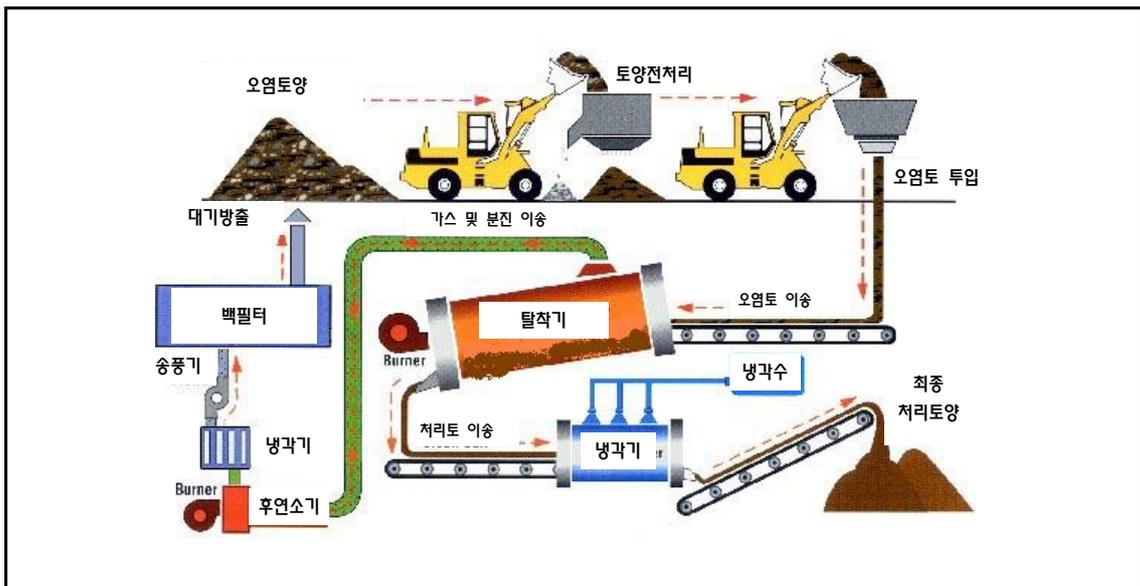
저온열탈착은 휘발유, 항공유, 중유, 경유, 난방유 및 윤활유를 포함하는 석유계 화합물의 농도를 감소시키는 데에 매우 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 저온열탈착법에 대한 자세한 기술분류 및 처리물질은 [표 4-51]에 기술하였으며, 저온열탈착법의 장·단점을 [표 4-52]에 나타내었다.

[표 4-51] 저온열탈착법의 기술분류 및 처리물질

기술분류	원위치/위치의	In-situ 적용		Ex-situ 적용
	공정원리	생물학적 처리	물리/화학적 처리	열적 처리
	적용지역	불포화지역		포화지역
	적용매질	토양		지하수
	상용화 단계	상용화 (full scale)	pilot scale	lab scale
처리물질	<ul style="list-style-type: none"> 비할로젠 및 할로젠 VOCs, 비할로젠 및 할로젠 SVOCs, 유류 			

[표 4-52] 저온열탈착법의 장·단점

장 점	단 점
<ul style="list-style-type: none"> 무기물질 및 방사성 물질을 제외한 대부분의 석유계 화합물의 처리에 효과가 탁월함 토양의 형태나 특성, 오염물질에 관계없이 적용범위가 매우 넓음 처리효율이 높고 단기간에 처리가 가능함 	<ul style="list-style-type: none"> 카드뮴이나 수은을 제외한 중금속 등은 정화가 불가능함 다른 정화기술에 비해 높은 에너지 비용이 소요되어 경제성이 낮음 수분함량이 높거나 점토 및 휴믹산 등을 높게 함유한 토양의 경우 반응시간이 길어지고 처리비용이 증가함



[그림 4-14] 저온열탈착 시스템 흐름도

6.2 저온열탈착법 정화계획의 유효성 평가절차

정화계획의 유효성 평가는 정화계획 수립시 유류로 오염된 토양을 저온열탈착법으로 정화하고자 할 때 오염부지에 본 기술의 적용 가능여부 및 적절한 정화계획 수립 등을 평가하기 위한 자료로 활용된다.

이러한 토양의 유효성 평가 절차는 아래와 같이 3개 부분으로 구성되어 있다.

□ 저온열탈착법의 유효성 평가절차

1단계 : **저온열탈착법의 적용성 평가** 단계에서는 저온열탈착법이 대상부지에 어느 정도 효과가 있는지 판단하고, 저온열탈착법에 영향을 미치는 토양특성 및 오염물질 특성, 열탈착 장치의 공정운영조건 등 세부 기준 등을 평가한다.

2단계 : **저온열탈착법 사용에 따른 실용성 평가** 단계에서는 오염토양의 양, 오염의 수직/수평 범위, 현장면적, 현장 사용 용도 및 주변 지역의 사용용도 등 현장 특성 인자 및 탈착 공정에 따른 인자, 경제성 등을 고려하여 저온열탈착법의 실용성을 평가한다.

3단계 : **저온열탈착법의 효율성 및 모니터링 계획 평가** 단계에서는 오염물질의 처리농도 비교·분석 등을 통한 법적기준 달성 여부 등을 평가한다.

6.3 저온열탈착법의 적용성 평가

저온열탈착에 영향을 미치는 인자는 [표 4-53]과 같으며, 이들 인자는 토양특성, 오염물질특성, 열탈착 공정 운영조건 등 크게 3개의 그룹으로 나눌 수 있다. 본 절에서는 제공된 영향인자와 실제 현장에서 도출된 영향인자를 비교·분석 평가함으로써 대상부지에 본 기술이 효과적으로 적용될 수 있는지를 평가한다.

[표 4-53] 저온열탈착법의 주요 영향인자

토양 특성	오염물질 특성	열탈착 공정운영 조건
토양가소성 입도분포 수분함량 열용량 유기물질 농도 중금속 농도 결보기밀도	오염물질의 농도 끓는점 증기압 분배계수(Kow) 수용성 다이옥신 형성	탈착장비의 종류 배출가스 처리 처리온도 체류시간

6.3.1 토양특성에 따른 주요 영향인자

(1) 토양가소성

토양에 힘을 가했을 때 파괴되는 일 없이 모양이 변화되고, 힘이 제거된 후에도 원형으로 돌아가지 않는 성질을 가소성이라 한다. 토양이 소성을 나타낼 때의 최소수분량(%)을 소성한계, 최대수분량(%)을 액성한계라 하고, 소성한계 및 액성한계의 차를 소성지수라 한다. 소성한계는 흙덩이를 골라서 직경 3.18mm의 실과 같이 만들어질 때의 함수비로 정의한다. 만약 소성지수가 큰 토양이란 대부분이 실트와 점토로 구성되어 토양이 큰 덩어리가 될 확률이 높은 토양이다.

이러한 소성은 토양내 함수량과 관련이 있으며, 소성을 가진 토양이 스크린이나 다른 장비에 붙으면 큰 덩어리로 뭉치려는 경향이 있다. 이러한 경향은 토양이 처리 장비로 투입되는 속도를 느리게 하며, 단위 표면적 감소 및 유기성분을 흡착하려는 성질 때문에 소성이 낮은 토양을 처리할 때 보다 더 높은 온도를 필요로 한다. 따라서 토양내 소성을 낮추기 위하여 토양의 파쇄 또는 토양개량제(예 : 석고)와 혼합하는 등의 처리가 필요하다.

(2) 입도분포

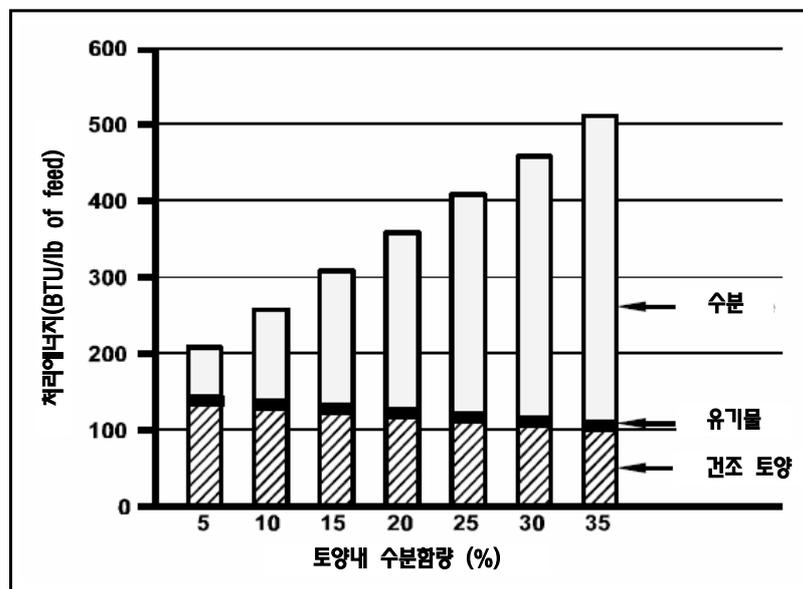
입도분포는 사전처리공정과 열탈착기의 종류의 선정을 위한 중요한 인자이다. 저온열탈착법 적용시 직경이 5cm 이상인 토양은 분쇄 또는 제거가 필요하다. 보통 입도가 큰 토양의 경우 덩어리로 뭉치지 않으려는 경향이 있다. 이러한 토양은 일반적으로 과잉 수분을 갖지 않으므로 입도가 작은 토양에 비해 오염물질이 쉽게 탈착된다. 입도가 작은 토양의 경우 입도가 큰 토양에 비해 오염물질의 탈착이 어

려울 뿐만 아니라 처리토양을 건조할 시 많은 양의 먼지를 발생시켜 분진포집시설 등을 막히게 할 수 있다.

(3) 수분함량

열탈착 시스템의 처리용량은 투입된 토양의 수분함량에 반비례한다. 특히 유류성분의 탈착을 위하여 탈착장치에서 대부분의 토양 수분을 증발시키며, 이 과정에서 탈착장치에 상당한 가열 및 처리에 필요한 체류시간이 증가하게 된다[그림 4-15]. 일반적인토양의 수분함량은 5~35%의 범위를 가지고 있다. 반면 열탈착처리를 위한 최적의 수분함량은 10~25%의 범위이며, 무게비로 약 20% 이상인 토양은 반드시 탈수과정을 거쳐야 한다.

일반적인 탈수 방법은 대기 중 건조, 건조된 토양과의 혼합, 기계적인 탈수가 있다. 만약 저온열탈착법에 의해 처리가 계획된 토양이 지하수위면 아래에 위치해 있거나 또는 수분함량이 무게비로 약 20~25%이상이라면 정화계획수립 단계에서 적절한 탈수공정이 포함되어져 있는지 검토해야한다.



[그림 4-15] 토양내 수분함량 대비 에너지 소모량

(4) 열용량

토양의 열용량은 유기오염물질을 휘발시킬 수 있도록 충분한 토양 온도를 상승시키기 위해 전달해야 하는 열의 양을 결정하게 한다. 그러나 일반적으로 토양의 열용량 값은 비교적 범위가 작기 때문에 저온 열탈착법의 적용에 큰 영향을 주지는 않는다.

(5) 유기물질(Humic material)의 농도

토양내 휴믹물질은 식물의 부패에 의해 형성된 유기물로 보통 유기물이 많이 포함된 유기토 등에서 관찰된다. 토양내 휴믹물질은 특정 유기물질을 흡착하여 저온열탈착법 적용시 탈착을 어렵게 만들며, 토양내에 TPH 및 BTEX가 함유되어 있는 것처럼 분석의 오류를 유발시키기도 한다.

(6) 금속농도

과거에는 다양한 납성분(예 : tetraethyl lead)을 휘발유의 옥탄등급을 올리기 위한 유류첨가제로 일반적으로 사용하였다. 현재 납의 사용은 중단되었지만, 오래전에 오염된 현장에 있는 토양의 경우 비교적 높은 납의 농도를 가질 수 있다. 이러한 토양내 납성분의 존재는 탈착에 의해 생성되는 고형폐기물 처리의 제한과 일부 납성분이 대기로 방출될 수도 있기 때문에 비록 유류로 오염된 토양일지라도 토양내의 중금속 농도 등을 분석하여야 한다.

(7) 겔보기밀도

굴착된 토양의 부피로부터 오염토양의 무게를 추정할 때 보통 겔보기밀도를 사용한다. 일반적으로 굴착되기 전 토양의 겔보기밀도 범위는 1,200~1,800 kg/m³이며, 굴착된 토양의 겔보기밀도는 굴착되기 전 토양의 겔보기밀도의 75~90% 수준이다.

6.3.2 오염물질 특성에 따른 주요 영향인자

(1) 오염물질의 농도

오염물질의 농도는 저온열탈착법 공정상의 토양처리온도 및 체류시간에 영향을 미친다. 일반적으로 저온열탈착법은 [그림 4-16]과 같이 유종에 상관없이 석유계 화합물에 의해 오염된 토양을 처리하는데 적용될 수 있다.

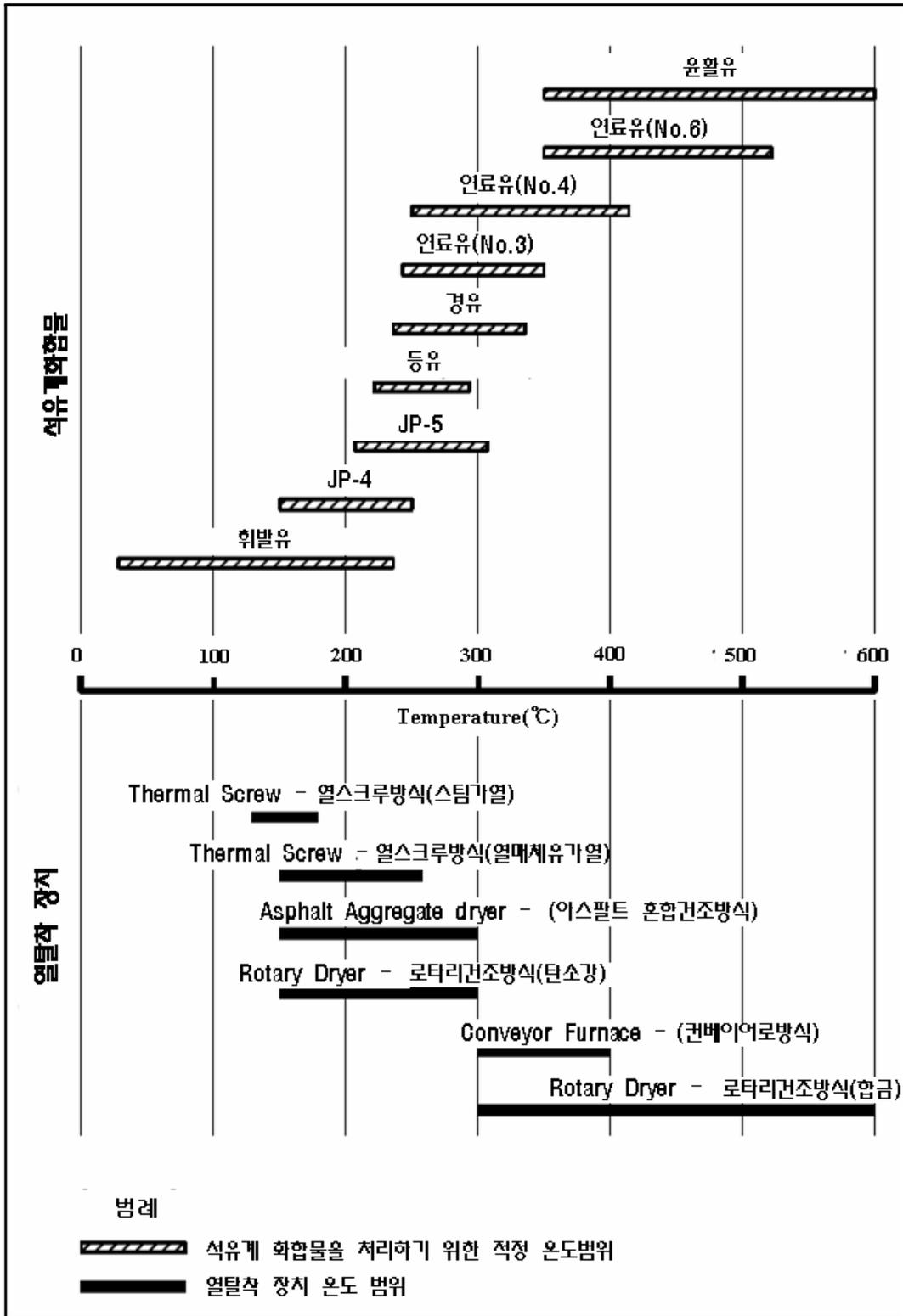
반면 각 석유계 화합물은 열처리시 화합물 자체에서 보유하고 있는 열에너지를 방출하며, 고농도로 오염된 토양일수록 높은 열에너지를 방출한다. 이렇게 방출되는 열은 탈착장치 및 후연소기로 가열에 따른 손상을 일으켜 완전연소되지 않은 가스를 대기로 방출시킬 수 있다. 일반적으로 열에너지가 900 BTU/kg 이상인 토양의 경우 농도가 낮은 토양과 혼합하여 처리한다.

또한 오염물질의 초기농도는 탈착장치내에서 폭발하한계(LEL : lower explosive limit)를 초과하는 가스를 발생시킨다. 따라서 안전을 위하여 열탈착장치에서 발생하는 가스의 농도를 폭발하한계의 25%이하로 제한하여야 한다. 일반적으로 폭발하한계를 초과하지 않고 열탈착법에 의해 처리 가능한 TPH(석유계총탄화수소) 농도는 1~3%이며, TPH 농도가 3% 초과 시에는 농도가 낮은 토양과 혼합하여 처리하거나, 낮은 산소조건하에서 운영되는 열스크류 탈착장치 등을 이용하여야 한다.

(2) 끓는점

끓는점은 어떤 물질의 휘발성을 나타내는 또 다른 지표로서 석유계 화합물질의 복잡한 구조 때문에 종종 끓는점으로 석유계 화합물을 분류하기도 한다. 일반적으로 대부분의 석유계 화합물은 저온열탈착법을 적용하여 처리할 수 있지만 끓는점이 높은 석유계 화합물은 처리하기에 탈착장치내에서 좀더 긴 체류시간 및 높은 처리온도를 필요로 한다. [표 4-54]는 일반적인 석유계화합물질의 끓는점을 나타내고 있다.

대부분의 열탈착 장치들은 149~537℃ 사이의 온도로 운영되며, 특수합금으로 제조된 탈착장치의 경우 650℃까지의 온도에서도 운전이 가능하다. 휘발성이 강한 석유계 화합물(예 : 휘발유)은 낮은 운전범위에서도 탈착이 가능하지만 준휘발성 석유계 화합물(예 : 등유, 경유)은 일반적으로 370℃ 이상의 온도가 요구되며, 비휘발성 석유계 화합물(예. 난방유, 윤활유)은 좀더 높은 온도가 요구된다.



[그림 4-16] 석유계 화합물에 따른 적절한 처리온도

[표 4-54] 주요 석유계 화합물의 끓는점

유 종	끓는점	
	℃	°F
휘발유	40~205	104~401
등유	175~325	347~617
경유	200~338	392~640
난방유	>275	>527
윤활유	비휘발성	비휘발성

(3) 증기압

증기압은 어떤 물질의 증기가 그 물질의 액체 또는 고체와 평형상태에 있을 때 나타내는 압력으로 성분의 휘발성을 측정하는데 사용한다. 증기압은 열탈착 속도에 영향을 주며, 온도증가와 비례한다. 따라서 탈착온도의 증가는 더 빠른 탈착 속도를 기대할 수 있다.

(4) 옥탄올/물 분배계수(Kow)

옥탄올/물 분배계수(Kow)는 물과 옥탄올에 용해된 유기물질의 비율을 나타내는 인자로서 Log Kow는 일반적으로 유기화합물질이 토양내 흡착되는 정도를 나타내는 상대지표로 사용된다. 보통 높은 Log Kow 값을 가진 성분들은 장기간 동안 토양에 흡착되어 있으려는 경향을 가지며, 낮은 Log Kow 값을 가진 성분들보다 처리하는데 더 많은 체류시간 및 열에너지를 필요로 한다.

(5) 수용성

수용성은 물질이 물에 녹는 정도의 측정치이다. 수용성은 분자질량에 일반적으로 반비례한다. 즉 분자질량이 높을수록 수용성이 낮으며, 높은 분자 질량의 성분은 일반적으로 낮은 분자질량을 갖는 성분보다 처리하는데 더 많은 체류시간 및 열에너지를 필요로 한다.

(6) 다이옥신 생성

다이옥신은 PCB와 기타 염소계 화합물을 저온열탈착법으로 처리시 생성될 수

있다. 일반적인 석유계 화합물은 PCB 물질을 갖고 있지 않기 때문에 다이옥신이 생성되지 않지만 염화탄화수소를 포함한 폐유는 다이옥신을 생성할 수도 있다. 따라서 폐유로 오염된 토양을 처리시에는 PCB 및 기타 염화탄화수소 등에 대하여 분석을 수행하여야 한다.

6.3.3 열탈착 공정운영 조건

저온열탈착법의 운영조건은 열탈착 장치의 종류에 따라 달라지며 탈착장치의 처리온도, 처리시간 및 배출가스 처리 방식 등에 따라 다양하다.

(1) 저온열탈착 장치의 종류

열탈착 장치는 석유계 화합물로 오염된 물질을 열을 이용하여 토양으로부터 탈착시켜 가스상으로 처리하는 장치이다. 저온열탈착 시스템의 운영 및 설계는 탈착 장치의 종류에 따라 달라진다. 흔히 이용되고 있는 탈착 장치들로는 로터리건조방식(Rotary dryers), 아스팔트 플랜트 혼합 건조방식(Asphalt plant aggregate dryer), 열스크루방식(thermal screw), 컨베이어로방식(Conveyor furnace) 등이 있다. [그림 4-16]은 석유계화합물을 처리하기 위한 탈착 장치의 적용범위를 보여주고 있다.

(2) 배기가스처리

저온열탈착장치의 배기가스를 처리하는 장치들은 크게 세 가지 물질(분진, 유기가스 및 일산화탄소)을 제어한다. 분진들을 제어하는 방식으로는 습식(예 : 벤츄리스크러버)과 건식(사이클론, 백필터) 방식이 사용된다.

특히 로터리탈착시스템, 아스팔트 플랜트 혼합 건조시스템 등은 일반적으로 건식방법을 이용하며, 기본적으로 큰 입자의 분진은 사이클론으로 먼저 제거하고, 미세입자의 분진은 백필터 장치로 제어한다. 열스크루 시스템은 일반적으로 습식방식인 벤츄리스크러버 등을 사용한다.

유기가스의 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%내이다.

열스크루 시스템에서는 응축기 및 활성화탄 등을 사용한다. 먼저 응축기에서 배기가스를 응축 시키며, 이때 유기물 제거효율은 약 50~95%이다. 응축기에서 처리되지 않은 가스들은 활성화탄 등을 이용하여 제어한다. 응축기는 보통 수냉식 방식을 이용하며, 이때 배기가스의 온도는 약 30~60℃까지 낮아진다.

(3) 처리온도

처리온도는 석유계 화합물의 탈착 정도에 영향을 주는 주요 변수이다. 탈착에 필요한 적절한 처리온도는 토양내 석유계 화합물의 종류에 따라 달라질 수 있다. [그림 4-16]은 다양한 저온열탈착 시스템에 대한 운전 온도범위 및 각 석유계 화합물에 대한 권장 처리온도를 나타내고 있다. 그러나 저온열탈착 시스템에서 적용되는 실제 처리온도는 열탈착 장비의 종류, 열전달율, 토양입자크기, 열용량, 수분함량 등에 따라 달라질 수 있다.

(4) 체류시간

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

6.3.4 실증실험

현장내 오염토양을 저온열탈착 장치를 이용하여 실험을 수행한다. 본 실험을 통하여 해당 장치가 토양을 처리하기에 얼마큼 효과적인지를 파악하며, 정화목표 달성 여부를 확인한다. 단 현장에서 채취한 오염토양의 경우 대상부지에 대하여 대표성을 가져야 하며, 저온열탈착이 효과적인지를 확실히 결정하기 위해 처리 전 후에 충분한 시료를 분석하여야 한다. 또한 본 실증실험에서는 처리하고자 하는 오염물질에 대한 처리온도, 체류시간, 처리효율 등을 도출한다.

6.4 저온열탈착법의 실용성 평가

저온열탈착법의 경우 적용성 평가시 특정 오염물질을 제거하기에 효율이 입증되었더라도 대상부지에 저온열탈착법을 적용하기에 앞서 부지여건, 타 기술과 비교하여 토양 부피당 처리 비용, 오염토 운송거리 등을 포함한 경제성 여부를 평가하여야 한다.

6.4.1 오염토양의 수직 및 수평 분포

열탈착 장치에서 처리될 토양은 반드시 굴착해야 하기 때문에 오염지역의 굴착 가능 여부를 확인하여야 한다. 만약 오염토가 지표면으로부터 약 8m 아래에 위치해 있을 경우 굴착에 필요한 토공비용 등이 증가하여 경제성이 떨어지며, 건물 하단 또는 기초 부근에 위치할 때에는 기존의 기술로는 오염토를 굴착할 수 없기 때문이다. 또한 지하수위 하단의 토양을 굴착하여 저온열탈착법 적용시 수분함량이 적은 토양과의 혼합 및 건조 등의 사전처리 없이는 본 기술을 적용하기 어렵다.

오염토양의 수직 및 수평 분포는 정화에 필요한 토양의 양을 결정한다. 정화에 필요한 시간 및 비용은 정화하고자 하는 오염토양의 양과 비례하며, 처리토양의 양은 현장내에서 정화의 실행가능 여부를 결정한다. 저온열탈착법의 경우 일반적으로 장비 이송비용, 설치비용, 운영비용 등이 타기술에 비해 많이 소요되므로 처리토량이 많고 고농도로 오염된 토양을 빠른 시간 내에 처리하기 위해 사용되며, 기타 저농도이며 비교적 많지 않은 오염토양을 처리시에는 경제성 등을 고려하여 타기술의 적용 가능성도 검토되어야 한다.

6.4.2 부대시설 배치

대상부지가 굴착이 가능하다면 다음과 같이 현장 내 열탈착법 운영에 필요한 부대시설 배치 등을 고려하여야 한다.

- 처리토양 및 오염토양을 적재할 부지
- 열탈착 장비 설치 및 운영에 필요한 공간
- 사업자(예 : 주유소, 휴게소 등)가 사업을 유지하기 위한 공간
- 유류저정시설들의 부근에서 열탈착 설치 부지까지 안전 및 화재 등을 대비한 최소거리

일반적으로 열탈착 장비 운영에 필요한 부지 면적은 장치 사양 및 처리토양의 양 등에 의해 달라질 수 있으나 최소 2,000m²가 필요한 것으로 보고되고 있다.

6.4.3 주변 부지여건

대상부지 주변에 학교, 공원, 병원, 상가, 민간인 거주지역이 밀집되어 있을 경우 대기배기가스에 의한 민원 등이 발생될 수 있으며, 이러한 민원 등을 방지하기 위하여 고가의 열탈착 시스템을 설치해야 하는 경우도 있다. 또한 열탈착 장치는 보통 하루 24시간 운영시 가장 경제적인 것으로 보고 있으나 일부지역에서는 소음 등을 고려하여 운영시간 등을 제한하여야 하는 경우도 발생할 수 있다.

6.5 운영 및 모니터링 계획의 평가

운영 및 모니터링 계획시에는 시스템의 성능을 최적화하고, 오염물질의 저감 등을 확인하기 위한 시스템운영 및 모니터링 계획을 수립하여야 한다. 저온열탈착법의 운영계획에는 열탈착 시스템 운영시 온도 과부하에 의한 시스템 고장이나 안전사고를 방지하기 위해 탈착장치 온도, 후처리기 온도, 초기 오염물질 농도 측정 주기 등이 검토되어야 한다.

모니터링 계획에는 처리토양의 오염물질 농도 및 분진농도, 휘발성유기화합물 질(VOCs)농도, 일산화탄소 등 배기가스의 농도 측정 등이 포함되어져야 한다. [표 4-55]는 전형적인 저온열탈착법의 모니터링 주기 및 항목 등을 보여주고 있다.

[표 4-55] 모니터링 측정항목 및 시료채취 주기

모니터링 대상	모니터링의 목적 및 주기		측정항목
	목적	주 기	
오염토양	오염의 저감정도 확인	매달~분기	대상오염물질
배기가스	작업자 안전 및 대기오염 방지	매일	휘발성유기화합물(VOCs), 분진, 일산화탄소 등
탈착장치 온도	운전효율평가 및 장비고장 예방	매일	온도
후처리기 온도	운전효율평가 및 장비고장 예방	매일	온도

6.6 저온열탈착법 적용성 평가 및 정화공정 효율 평가 항목(Checklist)

(1) 저온열탈착법의 효율성평가

예	아니오	평가항목
		토양이 높은 가소성을 지니고 있는가?
		토양이 큰 자갈이나 입자를 포함하고 있는가?
		함수율이 35% 이상인가?
		TPH 농도가 무게비로 2% 이상인가?
		물질이 높은 휘발성을 가지고 있는가?

※위의 사항이 '예' 일 경우 전처리 필요

예	아니오	평가항목
		토양이 높은 휴믹물질을 포함하고 있는가?
		토양이 높은 중금속을 포함하고 있는가?
		옥탄올/물 분배계수가 상대적으로 높은가?
		다이옥신 형성인자가 존재하는가?

※위의 사항이 '예' 일 경우 현장 실증실험(pilot test) 수행

예	아니오	평가항목
		실증실험 결과 저온열탈착법의 적용이 가능한가?

(2) 저온열탈착법 실용성 평가

예	아니오	평가항목
		오염토양의 깊이가 약 8m 이하인가?
		오염토양이 부지경계, 건물아래 등에 존재하는가?

※위의 사항이 '아니오' 일 경우 토양굴착은 실용적이지 않음, 타기술의 적용 등을 고려

(2) 저온열탈착법 실용성 평가(계속)

예	아니오	평 가 항 목
		장비운영과 오염토양의 임시보관을 위한 충분한 부지가 확보되었는가?
		열탈착 장치와 유류탱크 등의 시설 사이에 안전거리는 확보되었는가?

※위의 사항이 '아니오' 일 경우 타기술의 적용 등을 고려

(3) 저온열탈착법 모니터링 및 효율성 평가

예	아니오	평 가 항 목
		오염물질의 저감 및 정화목표를 달성하였는가?
		배기가스 모니터링이 주기적으로 수행되고 있는가?
		탈착장치, 후처리장치 등에서 온도 등을 주기적으로 점검하고 있는가?

제 V 장 선진 외국의 정화방법 관련 기술자료

미국의 EPA(Environmental Protection Agency)에서는 각 오염토양 정화방법과 관련된 자료나 기술의 효율, 경제성, 적용범위 등 풍부한 자료들을 제공하고 있다. 특히 미국환경청 EPA 홈페이지에서는 수퍼펀드 부지 정화와 관련된 오염부지 관련 보고서 및 지침서 등의 정보들을 전자파일(PDF파일)형태로 구축하고 있고, 전자화하여 관리하고 있어 일반인들이 기술 자료를 쉽게 이용할 수 있도록 제공하고 있다.

다음은 토양정화방법과 관련된 기술들을 검색할 수 있는 웹사이트들로서 오염토양정화방법과 관련된 다양한 기술 자료들을 보유하고 있어 유용하게 이용할 수 있다.

- 국내 토양정화관련 홈페이지

- www.me.go.kr : 환경부
- www.nier.go.kr : 국립환경연구원
- www.kipe.re.kr : 한국정책평가연구원
- www.emc.or.kr : 환경관리공단
- www.kossge.or.kr : 한국지하수토양환경학회
- www.kigam.re.kr : 한국지질자원연구원
- www.konetic.or.kr : 국가환경기술정보센터
- www.gims.go.kr : 국가지하수정보센터

- 해외토양정화관련 홈페이지

- www.epa.gov : 미국환경청 EPA(Environmental Protection Agency)
- www.usace.army.mil : 미공병단 United States Army Corps of Engineers (USACE)
- www.clu-in.org : Harzadous Waste Clean-Up information
유해폐기물 오염정화 기술정보 제공 및 EPA와 연계해서 운영
- www.nttc.edu : 미국 환경청의 수퍼펀드 신기술 평가
(Superfund Innovative Technology Evaluation, SITE)

- www.frtr.gov : 오염부지 정화 신기술 개발 및 적용과 관련된 사업 협의회인 연방복원기술협의회
(Federal Remediation Technologies Roundtables)
- www.umweltdatenkatalog.de : 독일토양정보시스템
- www.contaminatedland.co.uk : 영국의 오염토양에 대한 포괄적 정보 제공

국내 토양정화 기술자료는 일부 정화사업을 제외하고 대부분의 정화 사업장에서는 보고서 및 자료의 공유 또는 공개가 되지 않아 선진국과 같이 토양정화방법과 관련된 기술들에 대한 자료의 습득이 어려운 실정이다. 따라서 토양정화관련 자료의 세분화 및 자료작성이 효율적으로 관리되어 정보이용자들이 이용목적에 따라 유용한 정보를 얻을 수 있도록 시스템 구축이 필요하다.

선진외국에서는 오염 토양 및 지하수 정화기술에 대한 많은 연구로 현재 수십종의 기술이 개발되어 실용화되고 있으며, 이러한 자료들이 기록·수집·관리되고 있다. 아래 [표 5-1, 2]는 오염토양정화기술 중 대표적인 기술들을 위 기관들에서 조사하여 기술별로 분류하여 목록화한 자료이다. 이 중 The Citizen's Guide Series 자료들은 전문가가 아닌 일반인들이 이해하기 쉽도록 2페이지 분량으로 각 오염정화기술에 대해서 설명한 자료들이며, 그 외에도 오염토양정화에 필요한 설계지침서나 각 기술들의 적용사례들을 자세히 서술한 보고서가 공개되어 있다.

[표 5-1] 오염토양 지중처리기술 자료목록

공 법	제 목	출 처	내 용
Soil Vapor Extraction	The Citizen's Guide to Soil Vapor Extraction and Air Sparging	www.clu-in.org	SVE와 Air sparging 일반적인 설명 및 개요
	Analysis of Selected Enhancements for Soil Vapor Extraction	www.epa.gov	SVE 기술의 적용성 평가에 관련된 내용을 상세하게 제공
	How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Site : A Guide for Corrective Action Plan Reviewers: Chapter II Soil Vapor Extraction	www.epa.gov	지하저장탱크 주변의 오염지역의 Soil Vapor Extraction 기술 적용 시 기술평가방법, 설계, 현장운영, 모니터링 등에 관한 지침서
	Soil Vapor Extraction Implementation Experiences	www.epa.gov	SVE 기술의 설계지침 및 관련 자료 목록 · 현장 리스트 목록 수록
Bioventing	How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Site : A Guide for Corrective Action Plan Reviewers: Chapter III Bioventing	www.epa.gov	지하저장탱크 주변의 오염지역의 Bioventing 기술 적용 시 기술평가방법, 설계, 현장운영, 모니터링 등에 관한 지침서
	Application of the NUFT Code for Subsurface Remediation by Bioventing	www.clu-in.org	Bioventing을 적용한 정화시스템 설계 및 현장 고려사항 등을 기술
	Procedures for Conducting Bioventing Pilot Tests Long-Term Monitoring of Bioventing Systems	www.clu-in.org	Bioventing 현장적용절차의 개요 및 장기간 모니터링 기술에 대한 지침서
Biopile	Biopile Operations and Maintenance Manual	http://.enviro.nfesc.navy.mil	바이오파일공정운영, 시료채취, 분석방법, 유지관리 등 바이오파일 처리시스템의 적용성과 절차 방법 등에 대한 매뉴얼
	How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Site : A Guide for Corrective Action Plan Reviewers: Chapter VI Biopiles	www.epa.gov	지하저장탱크 주변의 오염지역의 Biopile 기술 적용 시 기술평가방법, 설계, 현장운영, 모니터링 등에 관한 지침서
	Biopile Design and Construction Manual	http://.enviro.nfesc.navy.mil	유류오염토양의 Biopile 설계 및 복원공사에 관한 매뉴얼

[표 5-1] 오염토양 지중처리기술 자료목록(계속)

공 법	제 목	출 처	내 용
Chemical Oxidation	The Citizen's Guide to Chemical Oxidation	www.epa.gov	Chemical Oxidation 일반적인 설명 및 개요
	In-situ chemical oxidation of contaminated soil and groundwater	www.epa.gov	화학적 산화법 소개 및 토양 지하수 복원기술 사례 및 관련법에 대한 내용 소개
	Field Applications of Situ Remediation Technologies: Chemical Oxidation	www.epa.gov	화학적 산화법을 적용한 현장사례들의 적용방법 및 결과를 기술
	How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Site : A Guide for Corrective Action Plan Reviewers: Chapter VIII Chemical Oxidation	www.epa.gov	지하저장탱크 주변의 오염지역의 화학적 산화법법 적용 시 기술평가방법, 설계, 현장운영, 모니터링 등에 관한 지침서
Phytoremediation	The Citizen's Guide to Phytoremediation	www.epa.gov	Phytoremediation 일반적인 설명 및 개요
	Brownfields Technology Primer: Selecting and Using Phytoremediation for Site Cleanup	www.epa.gov	Phytoremediation의 개요 및 현장 적용성 평가, 운영, 모니터링, 비용 등에 관한 지침서
	Phytotechnology Technical and Regulatory Guidance Document	www.epa.gov	Phytoremediation의 이론적인 설명과 현장 적용 시 필요한 설계인자 및 운영방법, 모니터링 등의 가이드라인제공. 또한 Phytoremediation의 신기술을 소개

[표 5-2] 오염토양 지상처리기술 자료목록

공 법	제 목	출 처	내 용
Soil Washing	The Citizen's Guide to Soil Washing	www.epa.gov	Soil Washing의 일반적인 설명 및 개요
	Using Physical Separation and Acid Leaching to Process Small-Arms Range Soils	www.clu-in.org	물리적인 분리와 산(아세트산, 염산)세척을 이용한 세척법의 현장실증보고서
	Remediation of Basford Gasworks Using Soil Washing	www.clu-in.org	Soil Washing을 이용한 가스공장 부지 복원에 관한 현장적용 사례에 관한 내용
Land farming	How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Site : A Guide for Corrective Action Plan Reviewers: Chapter V Landfarming	www.epa.gov	지하저장탱크 주변 오염지역의 Landfarming 적용방법에 관한 보고서. Landfarming의 개요, 설계, 운영, 모니터링 및 현장적용 checklist 수록
	Engineering and Design - Bioremediation Using Landfarming Systems	www.usace.army.mil	생물학적 기술인 Landfarming의 설계지침 및 full-scale 설계 디자인 예시 수록
Thermal Desorption	The Citizen's Guide to Thermal Desorption	www.epa.gov	Thermal Desorption의 일반적인 설명 및 개요
	How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Site : A Guide for Corrective Action Plan Reviewers: Chapter VI Low Temperature Thermal Desorption	www.epa.gov	지하저장탱크 주변 오염지역의 저온열탈착 적용방법에 관한 보고서. 저온열탈착의 개요, 설계, 운영, 효율성평가 및 현장적용 checklist 수록
	Application Guide for Thermal Desorption Systems	www.clu-in.org	Thermal Desorption의 개요, 설계 및 운전 특성, 처리비용에 대한 가이드라인과 현장사례를 수록
Solvent Extraction	The Citizen's Guide to Solvent Extraction	www.epa.gov	Solvent Extraction의 일반적인 설명 및 개요
	Solvent Extraction Technology	www.epa.gov	유기화합물로 오염된 지역의 Solvent Extraction의 적용에 관한 보고서. Solvent Extraction 기술 개요, 적용사례, 비용 등 수록
	Solvent Extraction /Dechlorination at the New Bedford Harbor Superfund Site, New Bedford, Massachusetts	www.epa.gov	용매추출법을 적용하여 PCB로 오염된 지역을 복원한 실증사례 보고서

참 고 문 헌

1. 유류오염토양의 바이오과일 정화기술, 국립환경연구원, 2004.
2. 토양정화 검증방법 및 검증수수료 산정기준 연구, 환경부, 2005.
3. 토지환경 조사·평가 및 복원기법에 관한 연구, 한국토지공사, 2003.
4. 「오염토양 복원작업 품셈자료 산출근거」 마련을 위한 연구, 환경부, 2003.
5. 토양복원사업 진출을 위한 기술개발계획 및 사업전략수립 지원, 한국전력기술주식회사, 2005.
6. 토양복원 기술 및 사례집, 환경부, 2002
7. 토양환경공학, 향문사, 2001
8. Biopile Design and Construction Manual, Technical Memorandum: TM-2189-ENV, Naval Facilities Engineering Service Center (NFESC), 1996.
9. FY 2004 Superfund Annual Report, U.S. EPA, 2005.
10. Guidance On Natural Attenuation For Petroleum Release, Remediation and Redevelopment Program, Wisconsin Department of Natural Resources, 2003.
11. How to Evaluate Alternatives Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Site (A Guide for Corrective Action Plan Reviewers), U.S. EPA, 2004.
12. Introduction to Phytoremediation, U.S. EPA, 2000.
13. Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, Version 4.0, Federal Remediation Technologies Roundtable(FRTR)
14. Technology Overview Report : Electokinetics, Groundwater Remediation Technologies Analysis Center, 1997.
15. Technology Overview Report : In-situ Flushing, Groundwater Remediation Technologies Analysis Center, 1997.
16. Technical and Regulatory Guidelines for Soil Washing, Interstate Technology and Regulatory Cooperation Work Group, 1997.
17. Treatment Technologies for Site Cleanup : Annual Status Report (Eleventh Edition), U.S. EPA, 2004.
18. NSW, Contaminated Land Management Act No. 140, Australia Environmental Protection Authority, New South Wales, Australia, (1997).
19. NSW, Contaminated Sites: Draft Guidelines for the NSW Site Auditor Scheme, Environmental Protection Authority-New South Wales, New South Wales, (1997).

부 록

제1장 정화기술 선정 방법

제2장 토양오염물질 분류

제3장 오염토양 정화기술 개요

제1장 정화기술 선정 방법

국내·외에서 개발된 다양한 오염토양 정화기술을 실제 부지오염에 효과적으로 적용하기 위해서는 오염부지의 환경적 특성과 오염물질의 물리·화학적 특성 및 기타 부지의 특이적인 상황을 고려하여 대상부지에 적절한 정화기술을 선택하는 것이 매우 중요하다.

일반적으로 오염의 형태 및 거동은 오염물질의 종류 및 성질에 따라 매우 다른 형상을 나타내고, 같은 오염물질이라 할지라도 매체의 특성에 따라 또는 부지의 지질학적 특성에 따라 다르게 나타난다. 따라서 각 각의 정화기술은 이러한 특성에 따라 단일 기술로 또는 복합적으로 부지의 오염 특성에 맞게 적용되어야 하며, 이러한 특성을 분석하여 적절한 정화기술을 선정하는 과정을 기술 적용의 적용성 평가라 한다.

실제 현장에서 수행되는 정화사업의 적절성을 평가하는데 있어서 첫 번째 단계가 적용된 기술의 효용성 및 적용성 평가이며, 따라서 본 장에서는 각각의 기술에 대한 세부적인 지침을 설명하기 전에 효과적으로 정화기술을 선정할 수 있는 단계적인 절차를 제공하고자 한다.

오염토양의 정화를 위한 기술을 선정하는 기본적인 진행방법은 [그림 1-1]과 같다. 기본적으로 정화기술의 선정을 위해서는 오염지역의 정밀조사 등 오염도조사를 통하여 오염물질 및 오염부지의 특성을 구체적으로 파악하는 과정이 선행되어야 한다. 이러한 조사를 통하여 오염지역의 문제점을 전반적으로 평가하고 본 부지에 필요한 정화작업의 범위를 수립한다.

1. 매체별 적용기술그룹의 선정 : 1단계

오염도 조사를 바탕으로 적용성 평가의 1단계에서는 오염지역 및 매체에 따라 정화범위를 구분한다. 즉, 오염이 불포화지역에 국한되었는지 아니면 포화지역까지 침투하여 지하수의 유동에 의한 확산이 발생되었는지를 파악한다. 오염이 불포화지역에만 국한된 경우에는 본 책자에 포함된 오염토양 정화기술만을 고려하면 되지만, 포화지역까지 오염범위가 확대되었다면 오염토양 정화기술 외 지하수 정

화기술 또는 비수용성액체상(NAPLs : Nonaqueous phase liquids)의 회수기술까지 기술의 선정범위 안에 포함해야 한다.

또한 [표 1-1]에서는 각 기술별로 불포화지역 또는 포화지역에의 적용 가능성 여부를 나타내었다. 즉, 생물학적 분해법은 불포화지역의 토양 및 포화지역의 토양까지 모두 가능한 오염토양 정화기술이지만 생물학적 통풍법의 경우에는 불포화지역에만 적용 가능하고 포화지역 즉 지하수가 존재하는 지역에는 적용이 불가능하다. 이를 바탕으로 하여 1단계로 매체별 적용 가능한 기술을 선정한다.

예시) 불포화 및 포화지역의 토양이 모두 오염된 경우 [표 1-1]의 기술 중 생물학적 통풍법, 식물재배 정화법, 토양증기추출법, 유리화법을 제외한 아래와 같은 다른 기술들이 1단계로 매체별 적용 가능한 기술그룹에 해당된다.



- [매체별 적용기술그룹]**
- 생물학적으로 처리 가능한 기술
 - 생물학적 분해법, 토양경작법, 바이오파일법, 퇴비화법, 자연저감법
 - 물리·화학적으로 처리 가능한 기술
 - 토양세정법, 토양세척법, 용제추출법, 화학적 산화/환원법, 고형화/안정화법, 동전기법
 - 열적으로 처리 가능한 기술
 - 열탈착법, 소각법, 열분해법

2. 오염물질별 적용기술그룹의 설정 : 2단계

1단계 과정을 통하여 매체별 적용 가능한 기술을 선정한 후 2단계에서는 [표 1-1]의 오염물질별 정화기술 비교표를 이용하여 오염물질의 종류에 따른 적용 가능한 기술그룹을 선정한다. [표 1-1]에서는 오염물질을 휘발성유기오염물질, 무기물질 및 화약류 등의 오염물질 그룹으로 나누어 각 기술별로 정화효율이 높은지, 보통인지, 낮은지를 평가하여 나타내고 있으며, 본 표에 나타난 오염물질그룹에 포함되는 구체적인 오염물질의 종류는 부록 제2장에 나타내었다.

부록 제2장에 나타난 토양오염물질에는 국내 토양환경보전법상의 오염물질 또한 포함되어 있으며, 국내 토양환경보전법상의 오염물질은 아니지만 어떤 특정 오

오염물질이 파악된 경우에는 부록 제2장을 통하여 오염물질 그룹을 결정하고 [표 1-1]을 통하여 이 오염물질 그룹을 효과적으로 처리하기 위한 몇 가지 오염토양 정화기술을 선정하여 2단계 오염물질별 적용기술그룹을 도출한다.

예시) TPH로 오염된 불포화 및 포화지역의 경우 제1장에서 TPH는 오염물질그룹 중 '유류'에 포함되는 물질이므로 유류로 오염된 토양을 정화하는데 효과적인 기술들을 [표 1-1]을 참고하여 1단계의 매체별 적용기술그룹 중에서 선정하면 생물학적 분해법, 토양경작법, 바이오파일법, 퇴비화법, 자연저감법, 화학적 산화/환원법, 열탈착법 및 소각법 등이 2단계로 오염물질별 적용 가능한 기술그룹에 해당된다.



[오염물질별 적용기술그룹]
<ul style="list-style-type: none"> • 생물학적으로 처리 가능한 기술 <ul style="list-style-type: none"> - 생물학적 분해법, 토양경작법, 바이오파일법, 퇴비화법, 자연저감법 • 물리·화학적으로 처리 가능한 기술 <ul style="list-style-type: none"> - 화학적 산화/환원법 • 열적으로 처리 가능한 기술 <ul style="list-style-type: none"> - 열탈착법, 소각법

3. 기술특성별 적용기술그룹의 설정 : 3단계

2단계 오염물질별 적용 가능한 기술그룹의 선정 후 3단계에서는 [표 1-2]의 오염토양 정화기술의 특성 비교표를 이용하여 기술별 특성에 따른 정화기술그룹을 선정한다. [표 1-2]에서는 각 기술별 개발상태, 적용용이성, 정화기간 등의 특성을 나타내고 있으며, 이러한 특성을 살펴보고 오염부지의 특이적인 상황에 적합한 3단계 기술특성별 적용기술그룹을 2단계의 오염물질별 적용 가능한 기술그룹 중에서 선정한다.

예시) 위의 예에서와 같이 불포화 지역과 포화지역이 TPH로 오염된 경우에 만약 부지 특성상 굴착이 불가능하다면 지중처리기술만이 적용 가능할 것이다. 즉, 2단계 오염물질별 적용기술그룹 중 지중처리기술과 국내 상용화된 기술을 선별한다면 생물학적 분해법과 화학적 산화법이 3단계의 기술특성별 적용 가능한 기술그룹에 해당될 것이다.



[기술특성별 적용기술그룹]

- 생물학적으로 처리 가능한 기술
 - 생물학적 분해법
- 물리·화학적으로 처리 가능한 기술
 - 화학적 산화/환원법

4. 최적기술의 선정 : 4단계

3단계 기술특성별 적용기술그룹이 선정되면 본 책자에서 제시한 기술별 가이드라인 및 기타 기술 관련 자료를 참고하여 4단계로 최적기술을 선정한다. 4단계의 기술 선정을 위해서는 본 오염부지의 전반적인 정화계획을 다시 한번 검토하고, 부지환경 및 오염물질의 특성을 세부적으로 반영할 뿐 만 아니라 경제성을 충분히 고려하여 최종적인 정화기술을 선정한다.

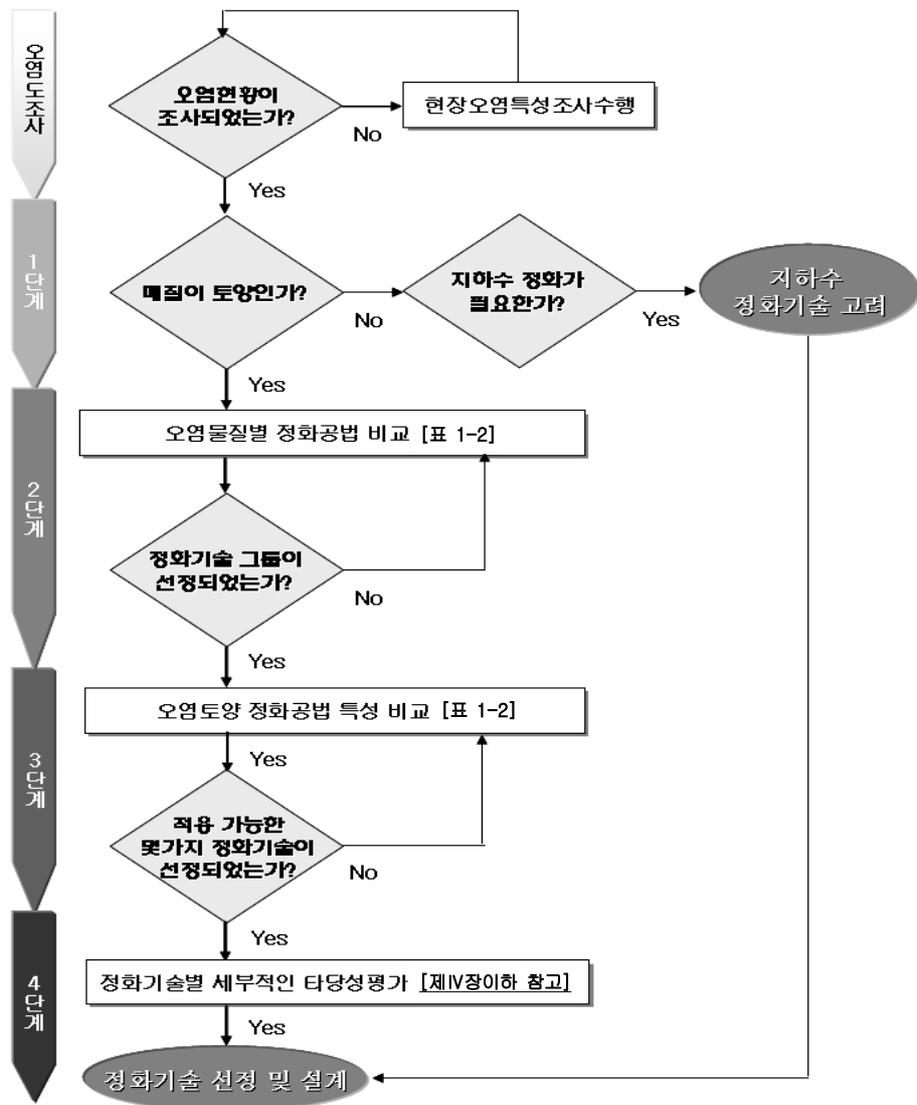
위의 예시에서 대상정화부지의 환경 및 오염물질의 특성 평가 결과에 따라 생물학적 처리공정의 적용이 어렵다는 결론이 도출된다면 정화기술은 3단계 기술특성별 적용기술그룹 중 화학적 산화법으로 결정될 것이다. 실제 정화기술의 선정은 이렇게 한 가지 인자에 의하여 결정되는 것이 아니라 다양한 인자들을 복합적으로 충분히 고려한 후에 수행되어야 하며, 정화기술을 선정된 후에는 설계과정을 진행하게 된다.

예시) 위의 예시에서 부지특성 상 생물학적 처리공정의 적용이 어렵다는 결론이 도출된다면 정화기술은 3단계 기술특성별 적용기술그룹 중 화학적 산화법으로 결정될 것이다.



[최종선택된 정화기술]

- 화학적 산화/환원법



[그림 1-1] 정화기술 선정과정 절차도

[표 1-1] 매체 및 오염물질별 정화기술 비교

기술명		적용 가능 오염 지역 ³⁾	오염물질 ²⁾							
			비할로젠화 VOCs	할로젠화 VOCs	비할로젠화 SVOCs	할로젠화 SVOCs	유류	무기물질	방사성물질	화약류
생물학적 처리 방법	생물학적 분해법 (Biodegradation)	포화 불포화	○	○	○	◆	○	◆	◆	○
	생물학적 통풍법 (Bioventing)	불포화	○	◆	○	▲	○	▲	◆	▲
	토양경작법 (Landfarming)	포화 불포화	○	○	○	○	○	▲	▲	◆
	바이오과일법 (Biopile)	포화 불포화	○	○	○	◆	○	◆	▲	▲
	식물재배 정화법 (Phytoremediation)	불포화	○	○	○	◆	○	○	▲	▲
	퇴비화법 (Composting)	포화 불포화	○	○	○	◆	○	▲	▲	○
	자연저감법 (Natural Attenuation)	포화 불포화	○	○	○	○	○	▲	▲	▲
물리·화학적 처리 방법	토양세정법 (Soil Flushing)	포화 불포화	○	○	○	○	○	○	▲	▲
	토양증기추출법 (Soil Vapor Extraction)	불포화	○	○	▲	▲	○	▲	▲	▲
	토양세척법 (Soil Washing)	포화 불포화	○	○	○	○	○	○	▲	▲
	용제추출법 (Solvent Extraction)	포화 불포화	○	○	○	○	○	○	○	▲
	화학적산화/환원법 (Chemical Oxidation/Reduction)	포화 불포화	○	○	○	○	○	○	▲	▲
	고형화/안정화법 (Solidification/Stabilization)	포화 불포화	▲	▲	○	○	▲	○	○	▲
	동전기법 (Electrokinetic Separation)	포화 불포화	○	○	○	○	▲	○	○	▲
열적 처리 방법	열탈착법 (Thermal Desorption)	포화 불포화	○	○	○	○	○	▲	▲	▲
	소각법 (Incineration)	포화 불포화	○	○	○	○	○	▲	▲	○
	유리화법 (Vitrification)	불포화	▲	▲	○	○	○	○	○	▲
	열분해법 (Pyrolysis)	포화 불포화	○	○	○	○	○	▲	▲	▲

1) ○-높음 ○-보통, ▲-낮음, ◆-비고
 2) 부록 제2장의 토양오염물질 분류 참고
 3) 포화지역 (saturated zone), 불포화 (unsaturated zone)

[표 1-2] 오염토양 정화기술 특성비교

기술명	In/Ex situ	개발상태		단독적용가능여부	부산물	O&M/Cap	적용용이성		정화기간	
		미국	국내				미국	국내		
생물학적처리방법	생물학적 분해법 (Biodegradation)	IN	F	F	Y	N	N	◎	◎	○
	생물학적 통풍법 (Bioventing)	IN	F	F	Y	N	N	◎	◎	○
	토양경작법 (Landfarming)	EX	F	F	Y	N	N	◎	◎	○
	바이오과일법 (Biopile)	EX	F	F	Y	V	N	◎	◎	○
	식물재배 정화법 (Phytoremediation)	IN	F	P	N	L,S	N	○	▲	▲
	퇴비화법 (Composting)	EX	F	F	Y	N	N	◎	◎	○
	자연저감법 (Natural Attenuation)	IN	F	L	Y	N	O&M	◎	▲	◆
물리·화학적처리방법	토양세정법 (Soil Flushing)	IN	F	L	Y	L	O&M	◎	▲	○
	토양증기추출법 (Soil Vapor Extraction)	IN	F	F	N	L,V	O&M	◎	◎	○
	토양세척법 (Soil Washing)	EX	F	F	N	S,L	B	◎	○	◎
	용제추출법 (Solvent Extraction)	EX	F	L	N	L	B	◎	▲	○
	화학적산화/환원법 (Chemical Oxidation/Reduction)	IN/EX	F	F	Y	L,V	B	◎	○	○
	고형화/안정화법 (Solidification/Stabilization)	IN/EX	F	L	Y	S	Cap	◎	▲	◎
	동전기법 (Electrokinetic Separation)	IN	F	L	N	L	O&M	○	▲	○
열처리방법	열탈착법 (Thermal Desorption)	EX	F	P	N	L,S,V	B	◎	○	◎
	소각법 (Incineration)	EX	F	F	Y	L,S,V	B	◎	◎	◎
	유리화법 (Vitrification)	IN	F	L	Y	S	Cap	◎	▲	◎
	열분해법 (Pyrolysis)	EX	F	F	Y	L,S,V	B	◎	◎	◎

1) ◎-높음 ○-보통, ▲-낮음, ◆-비교

2) Y-Yes, N-No

3) F-Full(상용화), P-Pilot(파일럿), S-Solid(고체), L-Liquid(액체), V-Vapor(증기)

4) O&M-Operation & Maintenance(운영&유지), Cap-Capital(초기투자비), B-Both(모두)

[표 1-2] 오염토양 정화기술 특성비교(계속)

인자	정의			
개발상태 기술의 상용화 상태	F Full scale : 실제 정화현장에 사용되고 있는 기술	P Pilot test : 현장규모의 연구가 진행된 상태의 기술	L Laboratory scale : 실험실 규모의 연구가 진행된 상태의 기술	
단독적용가능여부 기술을 단독으로 적용하여 오염물질의 처리가 가능한가? 단, 배가스(off-gas) 처리는 제외임.	Y 단독으로 사용하여 오염물질의 처리 가능함.		N 본 기술 외 잔여물을 처리해야 하는 다른 기술이 요구됨.	
부산물 공정운영 중 생성되는 부산물 처리필요	S : 고체	L : 액체	V : 증기	N : 없음
운영비과 초기자본 어느 부분에 주요 사업비가 소요되는가?	O&M 운영비 및 유지비용	Cap 시설비와 같은 초기 투자비	B 운영비 및 초기 투자비 모두	N 둘다 아님.
In-situ/Ex-situ 원위치인가 위치외 적용인가?	IN : in-situ		EX : ex-situ	

인자	▲ 낮음	○ 보통	◎ 높음	◆ 비교
적용 용이성 정화기술의 설계, 시공, 운전, 유지 등을 적용할 수 있는 숫자	2개 이내	2~4개	4개 이상	정보 없음
처리오염물질 오염물질의 항목	효과 없음	부분적으로 효과 있음	효과 있음	오염물질특성 및 부지특성에 따라 매우 다름
정화기간 오염토양 20,000톤을 정화하는데 소요되는 기간	In-situ 3년 이상	1-3년	1년 이하	오염물질에 따라 매우 다름
	Ex-situ 1년 이상	0.5~1년	0.5년 이하	오염물질에 따라 매우 다름

제2장 토양오염물질 분류

본 장에서는 오염물질에 따른 오염물질이 발생할 수 있는 오염부지의 종류 및 각 오염물질을 처리할 수 있는 정화기술을 개략적으로 살펴보고자 한다. 오염물질의 종류 및 특성은 오염부지 정화기술의 선정에 있어서 가장 중요한 영향인자이지만, 모든 오염성분에 대해 일일이 처리기술을 나열하기에는 어려우므로 성질별로 그룹화하는 것이 필요하다. 오염된 부지내에서 발견되는 오염물질의 종류는 다음과 같이 크게 4개 그룹으로 구분할 수 있다.

- 휘발성 유기화합물(volatile organic compounds : VOCs)
- 준휘발성 유기화합물(semivolatile organic compounds : SVOCs)
- 연료유(fuels)
- 무기물(inorganics)

1. 휘발성 유기화합물질

휘발성 유기화합물(VOCs)이란 높은 증기압을 가지고 있어 대기 중으로 쉽게 휘발하는 성질이 있는 물질을 말한다. 휘발성 유기화합물의 특징은 높은 휘발성 및 용해성, 비교적 작은 분자량이다. 이러한 휘발성 유기화합물은 할로젠족과의 결합 여부에 따라 할로젠 유기화합물 및 비할로젠 유기화합물로 나누어지며, 이는 휘발성 유기화합물의 처리기술 선정시 중요한 인자로 작용한다. 할로젠 화합물의 처리시에는 2차 생성물(다이옥신 등)을 처리하기 위한 추가적인 처리가 필요로 하며, 생물학적 처리기술 적용시 할로젠족원소가 많이 결합되어 있을수록 생분해가 어려워진다. [표 2-1]은 휘발성 유기화합물의 종류 및 이러한 휘발성 유기화합물에 의한 오염부지의 종류 및 일반적인 처리기술을 나타내고 있다.

[표 2-1] 휘발성 유기화합물의 종류, 적용부지 및 처리기술

1. 비할로젠 휘발성유기화합물질 (Nonhalogenated VOCs)

<ul style="list-style-type: none"> • 1-butanol • 4-Methyl-2-pentanone • Acetone • Acrolein • Acrylonitrile • Aminobenzene • Carbon disulfide 	<ul style="list-style-type: none"> • Cyclohexanone • Ethanol • Ethyl acetate • Ethyl ether • Isobutanol • Methanol • Methyl ethyl ketone (MEK) 	<ul style="list-style-type: none"> • Methyl isobutyl ketone • n-Butyl alcohol • Styrene • Tetrahydrofuran • Vinyl acetate • <u>BTEX</u>
---	---	---

2. 할로젠 휘발성유기화합물질 (Halogenated VOCs)

<ul style="list-style-type: none"> • 1,1,1,2-Tetrachloroethane • 1,1,1-Trichloroethane • 1,1,2,2-Tetrachloroethane • 1,1,2-Trichloroethane • 1,1-Dichloroethane • 1,1-Dichloroethylene • 1,2,2-Trifluoroethane (Freon 113) • 1,2-Dichloroethane • 1,2-Dichloropropane • 1,2-Trans-dichloroethylene • 1,3-cis-dichloro-1-propene • 1,3-trans-dichloropropene • 1-chloro-2-propene • 2-butylene dichloride • Acetylene tetrachloride • Bromodichloromethane 	<ul style="list-style-type: none"> • Bromoform • Bromomethane • Carbon tetrachloride • Chlorodibromomethane • Chloroethane • Chloroform • Chloromethane • Chloropropane • Cis-1,2-dichloroethylene • Cis-1,3-dichloropropene • Dibromochloropropane • Dibromomethane • Dichlorobromomethane • Dichloromethane • Ethylene dibromide • Fluorotrichloromethane (Freon 11) 	<ul style="list-style-type: none"> • Glycerol trichlorohydrin • Hexachlorobutadiene • Hexachlorocyclopentadiene • Hexachloroethane • Methylene chloride • Neoprene • Pentachloroethane • Perchloroethylene • Propylene dichloride • Trichlorotrifluoroethane • Monochlorobenzene • <u>Tetrachloroethylene (Perchloroethylene) (PCE)</u> • <u>Trichloroethylene (TCE)</u> • Vinyl chloride • Vinyl trichloride • Vinylidene chloride
---	--	---

3. 오염부지의 종류

<ul style="list-style-type: none"> • 소각지역, 소규모 도금공장, 소방훈련지역, 비행기 격납고, 차량정비소, 유출저유탱크, 매립지, 페인트 작업장, 군부대 오염지역 등
--

4. 일반적인 처리기술

• 토양	토양증기추출법, 생물학적통풍법, 소각, 열탈착
• 지하수	탈기, 활성탄흡착
• 배출가스	활성탄흡착, 촉매산화, 열적산화

※ BTEX, TCE, PCE는 토양환경보전법상의 토양오염물질

2. 준휘발성 유기화합물질

준휘발성 유기화합물(SVOCs)은 할로겐 및 비할로겐 SVOCs, 살충제로 크게 구분할 수 있다. 할로겐 및 비할로겐 SVOCs의 특징은 휘발성 유기화합물과 특성이 유사하나 휘발 정도가 상대적으로 낮은 특징을 가지고 있다. 이외에 살충제(pesticide), 제초제(herbicides) 등 수천종의 합성화합물이 포함된다. [표 2-2]는 비휘발성 유기화합물의 종류 및 이러한 비휘발성 유기화합물에 의한 오염부지의 종류 및 일반적인 처리기술을 나타내고 있다.

[표 2-2] 준휘발성 유기화합물의 종류, 적용부지 및 처리기술

1. 비할로겐 준휘발성유기화합물질 (Nonhalogenated SVOCs)

• 1,2-benzacenaphthene	• Benzidine	• Ethyl parathion
• 1,2-Diphenylhydrazine	• Benzo(a)anthracene	• Fluorene
• 1-aminonaphthalene	• Benzo(a)pyrene	• Indeno(1,2,3-cd)pyrene
• 2,3-phenylenepyrene	• Benzo(b)fluoranthene	• Isophorone
• 2,4,-Dinitrophenol	• Benzo(k)fluoranthene	• Malathion
• 2-aminonaphthalene	• Benzoic Acid	• Methylparathion
• 2-Methylnaphthalene	• Benzyl alcohol	• Naphthalene
• 2-Nitroaniline	• Bis(2-ethylhexyl)phthalate	• n-Nitrosodimethylamine
• 2-Nitrophenol	• Butyl benzyl phthalate	• n-Nitrosodi-n-propylamine
• 3-Nitroaniline	• Chrysene	• n-Nitrosodiphenylamine
• 4,6-Dinitro-2-methylphenol	• Dibenzofuran	• Parathion
• 4-Nitroaniline	• Diethyl phthalate	• Phenanthrene
• 4-Nitrophenol	• Dimethyl phthalate	• <u>Phenyl naphthalene (PCB)</u>
• Acenaphthene	• Di-n-butyl phthalate	• Pyrene
• Acenaphthylene	• Di-n-octyl phthalate	• tetraphene
• Allyldioxybenzene methylene ether	• Diphenylenemethane	•
• Anthracene	• Ethion	•

2. 할로젠 준휘발성유기화합물질 (Halogenated SVOCs)

<ul style="list-style-type: none"> • 1,2-benzacenaphthene • 1,2-Diphenylhydrazine • 1-aminonaphthalene • 2,3-phenylenepylene • 2,4,-Dinitrophenol • 2-aminonaphthalene • 2-Methylnaphthalene • 2-Nitroaniline • 2-Nitrophenol • 3-Nitroaniline • 4,6-Dinitro-2-methylphenol • 4-Nitroaniline • 4-Nitrophenol • Acenaphthene • Acenaphthylene • Allyldioxybenzene methylene ether • Anthracene 	<ul style="list-style-type: none"> • Benzidine • Benzo(a)anthracene • Benzo(a)pyrene • Benzo(b)fluoranthene • Benzo(k)fluoranthene • Benzoic Acid • Benzyl alcohol • Bis(2-ethylhexyl)phthalate • Butyl benzyl phthalate • Chrysene • Dibenzofuran • Diethyl phthalate • Dimethyl phthalate • Di-n-butyl phthalate • Di-n-octyl phthalate • Diphenylenemethane • Ethion 	<ul style="list-style-type: none"> • Ethyl parathion • Fluorene • Indeno(1,2,3-cd)pyrene • Isophorone • Malathion • Methylparathion • Naphthalene • n-Nitrosodimethylamine • n-Nitrosodi-n-propylamine • n-Nitrosodiphenylamine • Parathion • Phenanthrene • Phenyl naphthalene • Pyrene • Polychlorobiphenyls • tetraphene •
--	--	--

3. 살충제 (pesticide : 유기인화합물)

<ul style="list-style-type: none"> • Aldrin • BHC-alpha • BHC-beta • BHC-delta • BHC-gamma • Chlordane • 4,4'-DDD • 4,4'-DDE 	<ul style="list-style-type: none"> • 4,4'-DDT • Dieldrin • Endosulfan I • Endosulfan II • Endosulfan sulfate • Endrin • Endrin aldehyde • Ethion 	<ul style="list-style-type: none"> • Ethyl parathion • Heptachlor • Heptachlor epoxide • Malathion • Methylparathion • Parathion • Toxaphene
--	--	---

4. 오염부지의 종류

<ul style="list-style-type: none"> • 소각지역, 소규모 도금공장, 비행기 격납고, 매립지 소각지역, 화학물질 제조공장, 유출저유탱크, 농약오염지역, 차량정비소, 목재보관지역, 군부대 오염지역 변전소, 농업지역(살충제 살포지역) 등

5. 일반적인 처리기술

<ul style="list-style-type: none"> • 토양 • 지하수 	<ul style="list-style-type: none"> • 원위치생물학적정화, 생물학적통풍법, 퇴비화, 소각, 토양세척, 열탈착 등 • 활성탄흡착, 자외선 산화
---	---

※ PCB, 유기인화합물은 토양환경보전법상의 토양오염물질

3. 연료유

연료유류(fuels)로 인한 오염물은 비할로젠화합물로서 할로젠화합물에 비하여 처리할 때 추가적인 비용이 필요하지 않다. 또한 대부분의 경우 물보다 가볍기 때문에 지하수면에 부유상태로 존재하게 되는데, 이를 LNAPL(light nonaqueous phase liquid)이라고 한다. [표 2-3]은 연료유의 종류 및 이러한 연료유에 의한 오염부지의 종류 및 일반적인 처리기술을 나타내고 있다.

[표 2-3] 연료유 유기화합물의 종류, 적용부지 및 처리기술

1. 연료유 (Fuels)

• 1,2,3,4-Tetramethylbenzene	• 2-Methylheptane	• Benzo(k)fluoranthene	• n-Decane
• 1,2,4,5-Tetramethylbenzene	• 2-Methylnaphthalene	• Chrysene	• n-Dodecane
• 1,2,4-Trimethyl-5-ethylbenzene	• 2-Methylpentane	• Cis-2-butene	• n-Heptane
• 1,2,4-Trimethylbenzene	• 2-Methylphenol	• Creosols	• n-Hexane
• 1,3,5-Trimethylbenzene	• 3,3,5-Trimethylheptane	• Cyclohexane	• n-Hexylbenzene
• 1-Pentene	• 3,3-Dimethyl-1-butene	• Cyclopentane	• n-Nonane
• 2,2,4-Trimethylheptane	• 3-Ethylpentane	• Dibenzo(a,h)anthracene	• n-Octane
• 2,2,4-Trimethylpentane	• 3-Methyl-1,2-butadiene	• Dimethylethylbenzene	• n-Pentane
• 2,2-Dimethylheptane	• 3-Methyl-1-butene	• <u>Ethylbenzene</u>	• n-Propylbenzene
• 2,2-Dimethylhexane	• 3-Methyl-1-pentene	• Fluoranthene	• n-Undecane
• 2,2-Dimethylpentane	• 3-Methylheptane	• Fluorene	• <u>o-Xylene</u>
• 2,3,4-Trimethylheptane	• 3-Methylhexane	• Ideno(1,2,3-c,d)pyrene	• Phenanthrene
• 2,3,4-Trimethylhexane	• 3-Methylpentane	• Isobutane	• <u>Phenol</u>
• 2,3,4-Trimethylpentane	• 4-Methylphenol	• Isopentane	• Propane
• 2,3-Dimethylbutane	• Acenaphthene	• Methylcyclohexane	• <u>p-Xylene</u>
• 2,3-Dimethylpentane	• Anthracene	• Methylcyclopentane	• Pyrene
• 2,4,4-Trimethylhexane	• Benz(a)anthracene	• Methylnaphthalene	• Pyridine
• 2,4-Dimethylphenol	• <u>Benzene</u>	• Methylpropylbenzene	• <u>Toluene</u>
• 2-Methyl-1,3-butadiene	• Benzo(a)pyrene	• m-Xylene	• Trans-2-butene
• 2-Methyl-2-butene	• Benzo(b)fluoranthene	• Naphthalene	• Trans-2-pentene
• 2-Methyl-butene	• Benzo(g,h,i)perylene	• n-Butane	• Vinylbenzene

2. 오염부지의 종류

<ul style="list-style-type: none"> 비행장, 소각지역, 화학물처분지역, 군부대 오염지역, 소방훈련지역, 비행기 격납고, 매립지 소각지역, 유출저유탱크, 차량정비소 등
--

3. 일반적인 처리기술

• 토양	원위치생물학적정화, 퇴비화, 소각, 토양세척, 열탈착 등
• 지하수	탈기, 활성탄흡착, 부유유류 회수

※ BTEX, 페놀은 토양환경보전법상의 토양오염물질

4. 무기물

무기성(inorganics) 오염물질은 유기오염물질과 달리 생물학적 분해 및 독성 제거가 용이하지 않다. 금속류의 경우에는 장기간 환경내에 존재하며, 그 형태는 오염지역의 물리·화학적 특성에 크게 영향을 받는다. 즉 토양의 수용한계를 넘거나 pH의 변화 등에 의해서 금속류 오염물의 이동이 일어나게 된다. 방사성 물질의 경우에는 금속류와 같이 대체로 비휘발성이며, 용해 또는 생분해가 어려운 특성을 지니고 있다. [표 2-4]는 무기성 오염물질의 종류 및 이러한 무기성 오염물질에 의한 오염부지의 종류 및 일반적인 처리기술을 나타내고 있다.

[표 2-4] 무기물의 종류, 적용부지 및 처리기술

1. 금속 (Metals)

<ul style="list-style-type: none"> • Alumina • Aluminum • Antimony • <u>Arsenic</u> • Barium • Beryllium • Bismuth • Boron • <u>Cadmium</u> • Calcium • <u>Chromium</u> 	<ul style="list-style-type: none"> • Cobalt • <u>Copper</u> • <u>Iron</u> • <u>Lead</u> • Magnesium • Manganese • <u>Mercury</u> • Metallic cyanides • Molybdenum • <u>Nickel</u> • Potassium 	<ul style="list-style-type: none"> • Selenium • Silver • Sodium • Thallium • Tin • Titanium • Vanadium • <u>Zinc</u> • Zirconium
--	--	---

2. 비금속 (Nonmetals)

• Asbestos	• <u>Fluorine</u>	• <u>Cyanide</u>
------------	-------------------	------------------

3. 오염부지의 종류

<ul style="list-style-type: none"> • 군부대 및 일반 사격장, 배터리처분지역, 소각지역, 화학물처분지역, 군부대 오염지역, 폐광산지역, 소규모 도금공장, 매립지소각지역, 침출수수집지역, 유출저장탱크, 페인트 작업장, 차량정비소 등

4. 일반적인 처리기술

• 토양	고형화/안정화, 토양세척법, 동전기법, 화학적산화/환원, 식물정화재배법 등
• 지하수	침전, 여과, 이온교환

※ 카드뮴, 구리, 비소, 수은, 크롬, 아연, 니켈, 불소, 시안 등은 토양환경보전법상의 토양오염물질

제3장 오염토양 정화기술 개요

본 장에서는 본 지침서에서 언급되지 않은 “특정토양오염관리대상시설의 방지시설 설치 등에 관한 고시”의 규정된 오염토양 정화기술에 대하여 개략적으로 소개하고자 한다.

1. 생물학적 분해법(Biodegradation)

(1) 기술개요

생물학적 분해법이란 지중에 존재하는 미생물을 이용하여 유기성 오염물질을 이산화탄소(CO_2)와 물(H_2O)과 같은 무독한 생성물로 만드는 자연친화적인 기술이다.

생물학적 분해법에서 오염물질을 분해하는 생분해 과정은 호기성 생분해 과정과 혐기성 생분해과정으로 구분되며, 일반적으로 호기성 생분해 과정이란 미생물이 대사작용에 산소를 전자수용체로 이용하여 유기오염물질을 이산화탄소, 물, 그리고 미생물세포 등으로 변화시키는 과정을 말하며, 이와는 달리 혐기성 생분해 과정이란 산소가 충분하지 않을 경우 산소 이외에 다른 물질을 미생물 대사작용의 전자수용체로 이용하여 메탄, 이산화탄소, 수소 등으로 변화시키는 과정을 말한다.

호기성 및 혐기성 생분해 과정이 오염물질의 분해를 위해 모두 사용될 수 있지만 보통 호기성 생분해 과정에 의한 오염물질의 처리가 용이하기 때문에 일반적으로 오염토양 정화에는 호기성 생분해를 이용한 생물학적 분해법이 대부분 활용된다. 따라서 지중의 오염물질의 분해속도를 높이기 위해서는 미생물의 호기성 생분해를 촉진시킬 필요가 있으며, 이를 위하여 필수적인 요건인 산소 및 영양물질을 적절히 공급해야 한다.

생물학적 분해법은 지중처리(In-situ)기술로서 지중에 관정을 삽입하여 산소 및 영양물질 등을 공급하기 때문에 굴착 및 이송 등에 비용이 소요되지 않고 오염된 토양 및 지하수를 동시에 처리할 수 있으며, 또한 생분해 과정에서 무독한 부산물을 생성시키기 때문에 후처리 시설이 필요치 않아 타기술에 비하여 비교적 경제적인 장점이 있다.

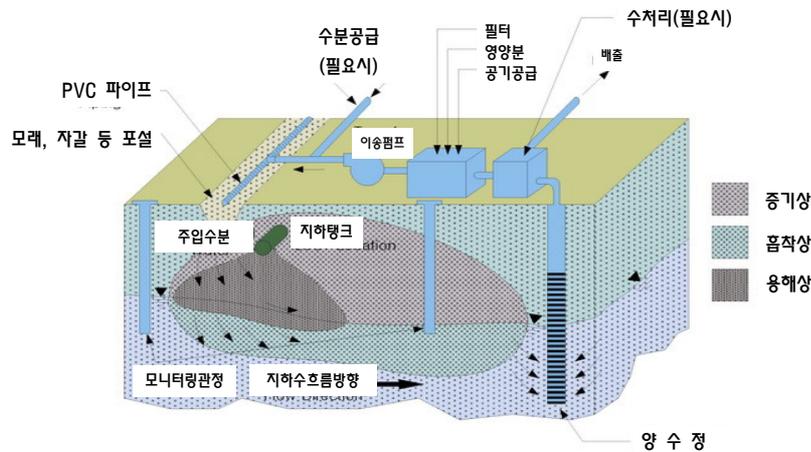
그러나 본 기술과 같이 생분해를 이용하는 기술은 물리/화학적인 기술에 비하여 처리기간이 긴 단점을 가지고 있기 때문에 긴급히 오염지역을 정화해야 하는 경우에는 적용이 용이하지 않다. 또한 미생물에 의한 분해가 가능한 유기물 외에 분해되지 않는 무기물질의 경우에는 본 기술을 사용할 수 없으며, 유기물이라도 난분해성인 물질인 경우 분해하는데 수년이 걸리거나 때때로 오염물질이 초기 오염물질보다 독성 및 이동성이 증가된 중간생성물질을 생성하여 지하수까지 오염을 확산시키기도 한다. 예를 들어 TCE(trichloroethylene)는 혐기성 생분해 과정에서 지속성과 독성이 강한 VC(vinylchloride) 같은 중간생성물을 생성한다. 따라서 본 기술의 효과적인 적용을 위해서는 오염물질 및 부지에 대한 정확한 이해가 필요하다.

(2) 공정원리

오염토양의 지중 생분해 공정은 오염부지에 적절한 수의 관정을 오염깊이까지 삽입, 설치 후 오염되지 않은 물에 산소 및 질소, 인과 같은 영양물질을 섞어 토양에 주입함으로써 이루어진다.

일반적인 생물학적 분해법은 지중에 존재하는 토착미생물의 활성을 증가시켜 오염물질의 분해를 촉진시키는 방법이지만 오염물질을 분해할 수 있는 토착미생물이 존재하지 않거나 그 수가 부족한 경우 산소, 영양분 이외에 인위적인 미생물을 동시에 공급함으로써 오염물질의 분해가 원활이 진행되도록 한다. 또한 효과적인 산소 공급을 위하여 공기를 주입하는 대신 순산소 또는 산소발생물질인 과산화수소, 오존 등을 주입하기도 한다. 산소의 농도와 오염물질 분해공정의 산화/환원력은 오염물질의 생분해에 많은 영향을 미치기 때문에 오염물질에 따라 호기성 혹은 혐기성 상태를 적절히 유지시켜 주어야 한다.

비할로겐 방향족물질, 다환 방향족물질 그리고 비할로겐 유기물질과 같은 수 많은 유기 오염물질은 혐기성 상태보다 호기성 상태에서 빠르게 분해되지만 일부 할로겐 지방족 물질이나 할로겐 방향족물질들(특히 할로겐화가 심하게 되어 있는 경우)은 호기성보다는 혐기성 상태에서 더 잘 분해되는 경우도 있다. 전형적인 생물학적 분해법의 공정원리는 [그림 3-1]과 같다.



[그림 3-1] 생물학적 분해법의 처리공정도

(3) 처리물질 및 효율

생물학적 분해법은 위에서 설명한 바와 같이 미생물에 의하여 분해가 가능한 할로젠 및 비할로젠 VOCs, 비할로젠 SVOCs, 유류 등으로 오염된 토양을 처리할 수 있으나 클로로포름, 살충제와 같은 할로젠 SVOCs, 금속과 같은 무기물질 및 방사성 물질은 분해가 전혀 이루어지지 않기 때문에 적용이 용이하지 않다.

반면 생분해 기법은 무기물질 자체를 분해할 수는 없지만, 물질의 평형상태를 변화시켜 오염물질을 흡착, 응집, 농축시키고자 하는 연구가 광범위하게 진행 중이며, 이는 토양으로부터 무기물질을 제거하여 안정화시키는데 효과가 높다

(4) 영향인자

오염토양 정화기술을 오염부지에 적용하는데 있어서는 정화효율에 영향을 미칠 수 있는 인자를 정확히 이해하고 각 부지의 정화에 적합한 최적의 조건을 구성하는 것이 매우 중요하다. 따라서 생물학적 분해법을 적용하는데 있어서 영향을 미칠 수 있는 인자를 [표 3-1]에 나타내었으며 아래 표에서와 같이 영향인자는 오염부지특성과 오염물질특성 별로 각각 나누어 볼 수 있다.

[표 3-1] 생물학적 분해법 영향인자

오염부지특성(site characteristics)	오염물질특성(constituent characteristics)
<p>산소요구인자(oxygen demand factors)</p> <ul style="list-style-type: none"> 오염물질의 이론적 산소요구량 (contaminant theoretical oxygen demand) 휴믹물질을 포함한 자연적 유기물 함량 (naturally occurring organic materials) 	<ul style="list-style-type: none"> 화학물질 종류 및 생분해성 (chemical class and susceptibility to biodegradation) 오염물질의 분포 형태 (contaminant phase distribution) 농도와 독성 (concentration and toxicity) 생물이용특성 (bioavailability characteristics) <ul style="list-style-type: none"> - 용해도(solubility) - 물질분배계수 및 흡착능 (organic carbon partition coefficient (Koc) and sorption potential)
<p>생분해 인자(biodegradation factors)</p> <ul style="list-style-type: none"> 미생물 군수 및 활성도 (microbial population density and activity) 영양물질 농도(nutrient concentration) 온도(temperature) pH 	
<p>물질이송인자 (advective/dispersive transport factors)</p> <ul style="list-style-type: none"> 고유투수계수(intrinsic permeability) 토양구조(soil structure / stratification) 수리전도도(hydraulic conductivity) 지하수위(depth of groundwater) 용존철함량(dissolved iron content) 	

대부분의 영향인자는 본 기술의 공정원리인 미생물에 의한 생분해에 영향을 주는 인자들이며, 대표적으로 산소공급을 들 수 있다. 호기성 분해과정은 산소가 충분하지 않을 경우 일어날 수 없기 때문에 오염지역으로의 충분한 산소공급은 필수적인 요건이라 할 수 있다.

따라서 오염된 부지에 존재하는 오염물질의 양 및 지중에 존재하는 유기물질의 양을 고려하여 생분해가 일어나는데 충분한 산소량을 계산하고 이를 적절히 공급해야 하며, 이러한 산소를 원활히 공급하기 위해서는 투수성 및 수리전도도와

같은 토양 중의 물질이송특성에 대한 정보도 필요하다. 또한 지중에 생분해가 일어나기에 충분한 양의 미생물 및 영양물질 존재여부, 수분함량, pH 등도 조사하여 생분해 과정의 최적 조건을 유지해 줄 필요가 있다. 일반적으로 미생물에 의한 분해작용이 효과적으로 일어나기 위해서는 1,000 CFU/g 건조토양 (colony forming unit/g dry soil) 이상의 미생물이 존재해야 하고, 온도는 10~45℃, 수분함량은 약 12~30%(무게비), pH는 6~8, 영양물질은 C:N:P 비율이 약 100:10:1~100:1:0.5를 유지할 필요가 있다.

오염물질 중 다음과 같은 구조를 가진 대상 오염물질은 일반적으로 난분해성을 띠는 경향이 있기 때문에 오염물질의 생물이용특성을 충분히 고려해야 하며, 오염물질의 농도가 높을 경우 또는 중금속과 같은 독성물질이 존재할 경우 미생물의 대사작용에 부정적인 영향을 줄 수 있다.

- 할로겐화된 화합물
- 분자내에 많은 수의 할로겐원소를 함유하는 화합물
- 가지구조가 많은 화합물
- 물에 대한 용해도가 낮은 화합물
- 원자의 전하차가 큰 화합물

2. 바이오파일법(Biopile)

(1) 기술개요

바이오파일 공정은 Biocells, Bioheaps, Biomounds, Compost Piles 이라고도 불리우며, 생물학적 반응을 통해 토양의 유기성 오염물질을 처리하는 공정이다. 본 기술은 지상처리(Ex-situ)기술로서 오염된 지역의 토양을 굴착하여 파일(piles)을 쌓은 후 배관을 통하여 공기 및 영양물질 주입하고, 수분함량 등을 조절하여 미생물의 활성을 극대화시키는 과정을 포함한다.

바이오파일 공정은 토양경작법과 같이 지상처리기술로서 오염토양을 굴착, 이송하여 처리하며, 공기주입을 통해 미생물의 활성을 증대시켜 처리효율을 증가시키는 공정이라는 점에서 매우 유사하다.

그러나 토양경작법은 토양을 넓은 지역에 얇게 펴고 경작을 하거나 이랑을 만들어 통기시키는 과정을 거치지만 바이오파일법은 토양경작법보다 좁은 지역에 더미를 만들고 더미 안으로 통하는 배관을 통하여 강제적으로 공기를 주입하는 것이 특징이다.

바이오파일법은 토양경작법과 매우 유사하기 때문에 일반적으로 토양경작법이 가지는 특징을 비교적 비슷하게 나타낸다. 예를 들어 생분해를 이용하기 때문에 처리비용이 적게 소요되고 넓은 범위의 오염물질을 처리할 수 있으며, 특히 유류로 오염된 지역의 경우 탁월한 효과를 나타낸다.

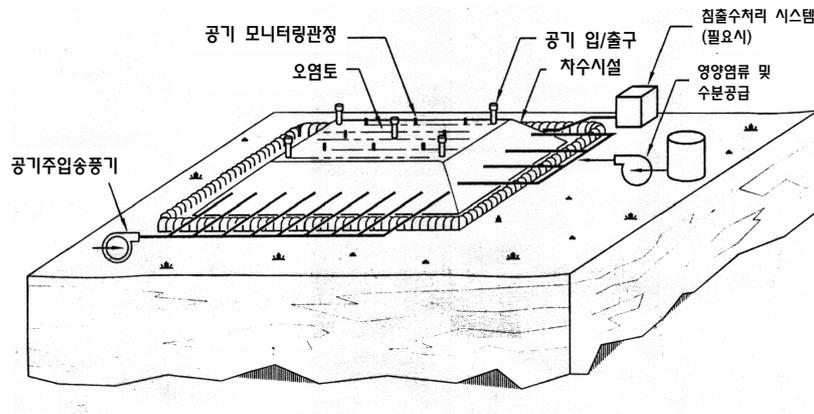
굴착 및 이송비용이 높을 경우 처리단가가 증가할 수 있고 발생하는 배가스의 처리를 위한 후처리 시설이 필요할 수 있으며, 강우를 배제하지 않거나 겨울철과 같이 온도가 낮을 경우 미생물의 활성이 감소하여 처리효율이 낮아질 수 있다.

(2) 공정원리

바이오파일법은 토양경작법과 마찬가지로 오염토양으로부터 유기화합물, 유류물질의 농도를 효과적으로 감소시킬 수 있다. 반면 공기를 주입하는 과정에서 유기물질이 대기중으로 휘발되지 않도록 적절한 전처리 및 후처리 시설을 설치하기도 한다.

예를 들어 휘발성이 강한 유류물질은 공기를 주입하는 과정에서 휘발되며, 일부는 미생물 분해작용에 의해 처리된다. 반면 중간단계의 유류물질(예 : 경유, 등유)인 경우 휘발보다는 생물학적 분해에 의한 반응이 많다.

비휘발성 물질은 통기과정 중에 대기로 휘발되지 않고 대부분이 생물학적 반응을 통해 저분자 생성물로 변형되거나 처리되며, 고분자 형태의 오염물질이 많을수록 처리기간이 증가하게 된다. [그림 3-2]는 전형적인 바이오파일 공정을 보여 준다.



[그림 3-2] 바이오파일법의 처리공정도

바이오파일 공정은 오염토양을 적절한 높이까지 쌓아 배관을 통하여 공기를 비롯한 영양물질 등을 주입하는 과정으로서 바이오파일의 일반적인 높이는 1~3m 범위이고 부지 요구량은 파일의 높이에 대한 오염토양의 비에 따라 결정되어 진다. 추가적인 부지 넓이는 파일면의 경사도, 접근용이성 등에 따라 달라진다.

바이오파일 설계시에는 부지정비, 공기주입/추출정 배열, 영양물질과 수분의 주입관 배열, 침출수 수집 및 처리공정, 토양 전처리 공정, 덮개 및 배출가스 처리 설비 등이 적절히 고려되어야한다.

(3) 처리물질 및 처리효과

바이오파일법은 비할로젠 및 할로젠 VOCs 및 유류로 오염된 지역의 정화에

탁월한 효과를 나타내지만 할로젠 SVOCs와 같은 난분해성 물질 및 무기물질 또는 방사성물질의 경우 미생물에 의한 생분해가 어렵기 때문에 본 기술의 적용이 어렵다. 바이오파일법은 국외 및 국내에서 유류에 의해 발생하는 오염지역에 많이 적용되어 왔으며, 오염물질 제거효과는 오염물질의 형태와 농도, 토양의 형태, 온도, 수분, 오염물질의 휘발성 등에 따라 다르다.

(4) 영향인자

바이오파일법은 소요되는 부지의 면적과 공기 주입방식만 다를 뿐 토양경작법과 매우 유사한 기술이며, 본 기술의 적용시 고려해야하는 영향인자 또한 토양경작법과 유사하다[표 3-2].

[표 3-2] 바이오파일법 영향인자

토양특성 (soil characteristics)	물질특성 (constituent characteristics)	기후특성 (climatic conditions)
<ul style="list-style-type: none"> • 미생물 군수 • 영양물질 농도 • 토양의 온도 • pH • 수분함량 • 토성(texture) 	<ul style="list-style-type: none"> • 휘발성(증기압 및 헨리상수) • 화학적 구조 • 농도 및 독성 	<ul style="list-style-type: none"> • 대기의 온도 • 강우 • 풍속

3. 식물재배 정화법(Phytoremediation)

(1) 기술개요

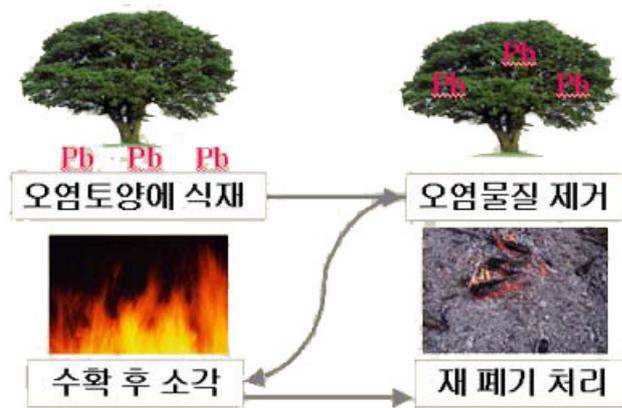
식물재배 정화법은 식물을 이용하여 오염토양 및 지하수를 포함한 수질을 정화시키는 새로운 자연친화적인 토양정화기술이다. 식물재배 정화법은 오염지역에 정화에 필요한 식물들을 식재 후 식물에 의해 발생하는 오염물질의 추출, 안정화 등의 원리를 이용하는 방법으로서 뿌리가 접촉하는 면에 한정되어 일어나기 때문에 오염원의 깊이가 중요한 고려요소이며, 식물종, 식물의 성장속도, 오염물질의 농도, 주변 생태계 및 환경과의 관계 등도 기본적으로 고려해야할 사항들이다.

식물재배 정화법은 기타 물리/화학적 기술에 비해 확실히 경제적인 방법이고, 2차 부산물 발생이 적은 자연친화적인 기술이라는 장점을 가지고 있다. 그러나 얕은 토양, 수변, 지하수에 한정적으로 적용 가능하고 고농도 유기물질인 경우 독성으로 인해 처리의 한계가 있으며, 기타 물리학적 처리공정에 비해 처리기간이 오래 소요된다. 또한 유기성 오염원인 경우 적절히 소수성인 오염원에만 효과적이며, 분해생성물의 독성여부 및 생분해도의 규명이 불명확하다는 단점을 가지고 있다. 식물재배 정화법은 아직 개척 분야에 속하지만 식물재배 정화법의 개발에 관한 많은 연구가 현재 국내외에서 진행되고 있는 상태이다.

(2) 공정원리

식물재배 정화법의 활용분야는 크게 하천, 토양 및 지하수의 오염정화이며 토양오염정화에는 식물추출(phytoextraction), 식물안정화(phytostabilization), 식물휘발화(phytovolatilization), 식물변형(phytotransformation) 등이 있고, 하천 및 지하수 오염정화에는 근권여과(rhizofiltration), 수리적 조절(hydraulic control), 인공습지(constructed wetlands) 등이 활용되고 있다.

식물재배 정화법에 활용되고 있는 식물들은 해바라기, 민들레 및 피를 비롯한 일부 1년생 초본류와 계피나무와 포플러, 미루나무, 버드나무 등 넓은 잎을 가지는 다양한 식물과 대상 지역의 고유한 토착 식물 등 매우 다양하고, 이러한 식물들을 오염지역에 식재하여 오염정화 후 수확하여 적절히 처리하는 과정을 거친다. [그림 3-3]은 일반적인 식물재배 정화법의 처리공정을 보여주고 있다.



[그림 3-3] 식물재배 정화법의 처리공정도

① 식물추출(phytoextraction)

식물추출은 오염물질을 식물체내로 흡수, 농축시킨 후 식물체를 제거하는 방법으로서 주로 토양, 퇴적층 및 폐기물을 대상으로 중금속, 비금속원소, 방사성 동위원소의 제거에 효과적으로 적용될 수 있다. 그러나 중금속을 고농도로 축적할 수 있는 식물은 대부분 생장이 느리며, 수확된 식물체는 고농도의 오염물을 함유하므로 이를 적절히 처리해야 하고, 중금속에 의하여 식물독성이 나타나는 경우에는 적용이 어려운 단점이 있다.

또한 실험실 규모에서의 자료를 실제 부지에 그대로 적용할 수 없는 경우가 많다. 일반적으로 식물추출 방법은 일차적으로 식물체의 뿌리를 통하여 오염물질이 흡수되어야 하므로 뿌리의 깊이에 따라 제거의 정도가 결정된다고 할 수 있다.

② 근권여과(rhizofiltration)

이는 수용성 오염물질이 생물 또는 비생물적인 과정에 의하여 뿌리 주변에 축적되거나 식물체로 흡수되어지는 과정을 말하며, 일반 토양보다는 포화대를 대상으로 한다.

적용대상 오염물질로는 납, 카드뮴 등의 중금속과 우라늄, 세슘 등의 방사성원소등이 포함된다. 이용 가능한 식물은 여러 종이 있으나 대개 수생식물보다는 육상식물이 더 효과적인 것으로 나타나고 있으며, 부유식물 및 습지식물도 이용될 수 있다.

③ 식물안정화(phytostabilization)

식물안정화는 오염물질이 뿌리 주변에 비활성의 상태로 축적되거나 식물체에 의하여 이동이 차단되는 원리를 이용한 처리법이며, 뿌리주변에서의 미생물학적, 화학적 과정을 동반한다. 즉, 뿌리 주변 토양의 pH 변화 등에 의하여 중금속의 산화도가 바뀌어 불용성의 상태로 되는 원리에 기초하는 것이다.

이 방법은 토양, 퇴적층 및 폐기물 등을 대상으로 하며, 토양 및 식물체를 제거할 필요가 없고 저렴한 비용으로 처리가 가능하며, 생태계 정화가 비교적 쉬운 장점이 있으나 오염물질이 대상지역에 그대로 남아 있어 장기간 관리가 필요하고 식생을 돕기 위해 토양을 처리해야 할 필요가 있으며, 오염물질이 식물체로 흡수되거나 지상으로 운반, 확산되는 것에 대한 방지책을 마련해야 한다.

④ 근권분해(rhizodegradation)

뿌리부근에서 미생물 군집이 식물체의 도움으로 유기 오염물질을 분해하는 과정이다. 뿌리 분비물에는 다양한 영양분이 함유되어 있고 뿌리 자체가 서식처를 제공하고 있어 이 부근의 미생물의 활성은 크게 증가되며, 이에 따라 유기 오염물의 분해가 촉진되는 것이다.

이 방법은 오염물이 현장에서 분해되므로 따로 처리할 필요가 없으며, 다른 방법에 비하여 적은 경비가 소요되는 장점이 있으나 근권이 발달하기 위해 상당한 시간이 소요되고 비료의 투여가 필요하며 미생물간의 상호작용, 즉 오염물질의 분해에 관여하는 미생물군과 기타 미생물 군집과의 경쟁 등을 고려하여야 한다. 근권분해를 이용한 식물재배 정화법의 경우 보통 다른 정화 방법 이후에 최종 처리 방법으로 이용된다.

⑤ 식물분해(phytodegradation)

식물분해는 오염물질이 식물체에 흡수되어 그 안에서 대사에 의해 분해되거나 식물체 밖으로 분비되는 효소 등에 의하여 분해되는 과정을 말한다. 식물체가 직접 분해에 관여한다는 점에서 위의 근권분해와 구별이 된다.

오염물의 용해도 및 극성에 따라 흡수정도가 달라지는데, 예를 들어 적당한 소수성을 가진 물질은 비교적 흡수가 잘 되고 식물체내에서의 이동이 용이하지만, 수용성인 물질은 확산되기 쉬우므로 오히려 뿌리로부터 흡수되기가 쉽지 않다. 이

방법은 토양, 퇴적층, 폐기물 및 지하수 등의 처리에 이용 가능하며, 일반적으로 오염의 깊이가 얇은 광범위한 지역에 적당하다

⑥ 식물휘발화(phytovolatilization)

식물휘발화는 오염물질이 식물체에 의하여 흡수, 대사되고 휘발성 산물로 변형되어 대기로 방출되는 과정이며, 특성상 식물분해와 같이 일어나는 경우가 많다. 대부분 지하수에 적용되고 있으나 토양, 퇴적층, 폐기물 등에도 이용될 수 있다. 생성된 휘발성 산물은 대개 독성이 약화되거나 없는 형태이지만 경우에 따라 유독한 산물이 생성되기도 하고 식물체에 축적되기도 한다.

⑦ 수리적 조절(hydraulic control)

이 방법은 식물에 의하여 환경의 물을 제거함으로써 수용성 오염물질의 이동 및 확산을 차단하는 원리에 기초한다. 따라서 지하수, 지표수 및 수분이 많은 토양을 대상으로 한다. 수분의 제거를 전적으로 식물체에 의존하므로 펌프 등 다른 장비를 필요로 하지 않으나 제거량 및 속도는 기후조건에 영향을 많이 받게 된다.

⑧ 완충수로(riparian corridors/buffer strips)

이 방법은 일반적으로 하천으로 유입되는 지표 및 지하수의 처리에 이용되며 수리적 조절, 식물분해, 근권분해, 식물증발 및 식물추출 등 여러 기작이 포함된다. 유기질, 농약 등 수용성 오염물질의 제거에 이용되며 포플러를 이용한 질산염 제거 사례가 많이 연구되고 있다. 충분한 넓이의 지면을 필요로 하며, 오염물의 농도 및 깊이 등이 고려되어야 한다.

완충수로를 이용한 식물재배 정화의 공정은 오염물질, 부지특성, 요구되는 정화시간 정도, 적용되는 식물의 조건에 따라 달라지며, 다음의 사항들을 충분히 고려하여 적용해야 한다.

- 오염원 및 이로 인한 문제점의 파악
- 적합한 식물의 선정
- 선정된 식물의 각 오염원에 대한 처리도
- 식물식종 방법

- 토양 및 지하수내의 포획구간(capture zone) 및 증산량
- 오염원 흡수율 및 정화기간

식물재배 정화법은 일반적으로 오염 대상지 내에서의 적용이 대부분을 차지하지만, 토양을 제거하거나 지하수 또는 지표수를 뽑아 올려 다른 장소에서 처리를 하는 경우도 있다. 식물재배 정화법의 적용에 있어서 대상 환경 및 오염물질에 적합한 식물종을 선택하는 것은 가장 중요한 문제로 오염원을 처리하기 위한 적합한 식물종, 고유한 종, 또는 대상 환경에 자생하는 식물들을 탐색하여 적절한 종류를 선택해야 한다. 특히 식물 종을 선택하기 위하여 다음의 항목 등을 검토하여야 한다.

- 식물정화방법 및 제거 대상 오염원의 선정
- 기후변화, 일조량, 오염원의 정도 등 부지에 대한 정보의 수집
- 식물종 선택기준 확립 : 일반적인 성장조건 및 식물정화관계 필요조건 등 고려
- 선택기준에 의하여 이용 가능한 식물종의 선정

일반적으로 목본류는 포플러, 미루나무, 버드나무 등이, 초본류는 페스큐 등이 이용된다. 그러나 식물에 의한 유기물의 처리시 설계조건은 식물의 성장이 빠르고, 환경에 적응성이 뛰어나고, 삼목이 수월하고, 유지관리가 용이해야한다는 점이다. 또한 지하수를 대상으로 할 때 증산작용에 많은 물을 제거할 수 있어야 하며, 오염원을 덜 유해하거나 무해한 물질로 변형시킬 수 있어야 한다.

(3) 처리물질 및 처리효율

식물재배 정화법은 비할로젠 및 할로젠 VOCs, 비할로젠 SVOCs, 유류 및 중금속으로 오염된 지역의 정화에 대체적으로 적용이 가능하지만 방사성물질 등에는 본 기술의 적용이 어렵다.

효과적으로 처리될 수 있는 대상오염 물질은 소수성을 가진 벤젠(benzene), 톨루엔(toluene), 에틸벤젠(ethylbenzene), 자일렌(xylene), 염소계 용제류(chlorinated solvents), 방향족 탄화수소(PAHs)와 암모늄(ammonium), 인(phosphate)과 같은 과잉의 영양염류 및 특히 중금속들을 제거하는데 효과적으로 이용된다.

토성도 처리효율에 많은 영향을 미치며 토양입경별 처리효율은 가는 모래나 미사의 토성을 가진 토양에서 처리효율이 높고 점토로 구성된 토양에도 적용가능하다.

(4) 영향인자

식물재배 정화법을 적용하는데 있어서 고려해야 할 영향인자를 [표 3-3]에 나타내었다.

[표 3-3] 식물재배 정화법 영향인자

부지특성 (site characteristics)	물질특성 (constituent characteristics)	식물특성 (plant characteristics)
<ul style="list-style-type: none"> • 오염깊이 • 토성 • 토양의 온도 • pH • 수분함량 • 무기영양분 	<ul style="list-style-type: none"> • 오염물질 종류 • 농도 및 독성 • 생분해성 • 용해도 및 분배계수(Kow) • 휘발성(증기압 및 헨리상수) 	<ul style="list-style-type: none"> • 식물종 • 생장율 및 생장기간 • 독성에 대한 내성

식물재배 정화법은 식물을 이용하여 오염물질을 흡수, 추출하거나 안정화시켜 처리하는 기술이므로 부지특성, 물질특성 이외에 식물종의 특성 또한 매우 중요한 영향인자이다. 본 기술에 이용 가능한 식물종은 매우 다양하며 오염물질 또는 오염면적에 따라 적절한 식물종이 선택되어야 한다.

특히 성장이 우수한 포플러나무 등은 가장 효율적으로 적용되고 있는 수종 중의 하나이다. 일반적으로 식물정화법에 이용되는 식물은 속성수이고, 환경에 적응력이 강해야 하며, 많은 양의 물을 증산할 수 있는 충분한 흡수력을 가져야 한다.

또한, 오염원을 무독성 또는 약한 독성의 산물로 전환시킬 수 있는 내성도 지니고 있어야 한다. 척박한 환경일 경우에는 그 주변에서 자생하는 식물을 이용하

는 것이 유리하며, 이를 위해서는 자생식물 종의 분포조사와 오염원에 대한 내성 등을 시험하여 적합한 식물을 선정하는 것이 바람직하다.

식물재배 정화법은 유기오염물질 및 무기오염물질을 광범위하게 처리할 수 있는 기술이지만 오염물질의 특성에 따라 식물종의 종류, 처리효율 등이 달라지기 때문에 오염물질의 특성을 신중히 고려해야 한다. 특히, 유기물인 경우에는 적당히 소수성인 오염물질(log Kow= 1~3)에 대해서만 효율적으로 적용 가능하며, 유기물과 무기물 모두 오염물질의 농도가 높은 경우 오염물질 자체의 독성으로 인하여 처리효율이 감소할 수 있다.

일반적으로 식물재배 정화법은 식물의 뿌리가 뻗을 수 있는 1~3m 범위에서 적용 가능하기 때문에 오염부지의 깊이가 본 기술의 적용 여부를 결정하는데 매우 중요하다. 또한 식물이 원활히 성장하는데 큰 영향을 미치는 수분, pH, 온도, 무기영양분 등의 토양특성에 대한 조사 및 평가가 필수적이다.

식물의 성장에 있어서 가장 결정적인 요인은 수분이다. 물은 영양분 운반체의 기능을 하며, 기체교환을 통제하고, 온도변화를 조절한다. 특히 뿌리의 성장속도는 길이성장하는 뿌리세포와 세포벽을 만드는 대사물질, 세포벽 구조내의 결합을 끊어주는 성장호르몬내의 유체정압을 유지시켜 주는 물의 지속적인 공급에 의해 결정된다.

또한 뿌리와 토양미생물은 연쇄적인 효소촉매반응에 의해 유기물질을 산화시켜 에너지를 얻는다. 식물은 탄수화물을 이산화탄소와 물로 전환시키거나 호흡하는데 산소를 요구한다. 토양내 산소가 부족할 경우에는 환원성 금속이온, 유기산, 휘발산 등을 축적시킴으로써 식물의 뿌리에 유해하고, 고농도의 에틸렌을 함유할 수 있다. 에틸렌의 농도가 증가하면 뿌리의 길이성장, 형성층 활성화 등을 방해하는데, 0.4ppm의 에틸렌은 콩과식물에 있어서 뿌리혹의 발달을 억제하기도 한다.

토양내 낮은 온도는 물의 점성을 높임으로써 수분흡수를 감소시키고, 세포막의 투과성을 감소시킨다. 또한, 물질대사 활동이나 뿌리의 성장 역시 낮은 온도에서 감소된다.

pH 4.0 이하에서의 식물의 뿌리는 짧아지고 두꺼워지며, 수가 적어지고 색상은 밤회색이 된다. 뿌리털의 길이 역시 pH가 7.2에서 5.5로 낮아질수록 짧아지며, 고농도의 수소이온은 흡착지에서 양이온과 경쟁하여 이온수송에도 방해가 되며

뿌리막도 느슨해지게 한다.

염도 역시 식물재배 정화법에 영향을 미치는데, 고농도의 토양염도는 식물의 막투과성, 세포벽의 탄력성, 증산속도 등을 통제하는 호르몬의 균형을 파괴할 수 있으며, 토양내 이온조성을 변환시킴으로써 식물의 영양상의 불균형을 초래할 수 있다. 따라서 오염된 토양의 pH 측정을 통해 그 범위내에서 잘 자라는 식물을 선별할 필요가 있고, pH 교정을 목적으로 석회나 석고 등을 넣어 주는 방법도 있다.

식물은 필요한 무기영양분을 대부분 이온형태로 뿌리를 통해서 흡수한다. 적절한 영양분은 식물의 최적 생체량생산에 필수적이다. 식물의 생장에 요구되는 원소는 탄소, 산소, 질소, 인, 칼슘, 마그네슘, 철, 황, 망간, 아연, 붕소, 구리, 몰리브덴, 염소 등 16가지이다. 무기영양분은 미생물에 의한 부패, 이온교환, 용해, 탈착 등에 의하여 토양이 고상에서 액상으로 분비되어 식물이 적절히 이용하게 된다.

4. 퇴비화법(Composting)

(1) 기술개요

퇴비화법은 지상처리(Ex-situ)기술로서 폐슬러지 등의 폐기물 및 오염토양을 굴착하여 파일을 만들어 유기오염물질을 인위적으로 퇴적 분해시키는 방법을 말한다. 본 기술은 바이오파일과 같이 미생물에 의한 생분해를 이용하지만 오염물질을 물과 이산화탄소로 완전분해하지 않고 일부 무독성의 유기물로 안정화시켜 토양개량제 등으로 활용할 수 있다는 점이 다르다.

퇴비화법은 호기성 상태에서 미생물에 의해 분해 가능한 오염물질을 50~55℃의 온도에서 생물학적으로 분해·안정화시키고 병원균을 사멸시킨다. 퇴비화법에 있어서 온도를 적절히 조절하는 것은 매우 중요하기 때문에 호기성 상태의 유지를 위해 다량의 공기를 파일로 주입하는 것은 파일안의 온도를 낮출 수 있기 때문에 유의하여야 한다. 반면 유기물질이 분해될 때 발생하는 열을 이용하면 적절한 온도를 유지시킬 수 있다. 퇴비화법의 최대 처리 효율은 수분함량, pH, 산소, 온도, 그리고 탄소/질소비가 적절할 경우 얻을 수 있다.

퇴비화법은 일반적으로 하수슬러지의 처리와 같은 폐기물 처리에 주로 활용되어온 기술로서 폐기물 처리에 있어서는 경제성 및 적용성이 입증된 처리기술이라 할 수 있다. 그러나 본 기술은 팽화제의 첨가로 인해 처리해야 할 오염토양의 부피가 증가할 수 있고 악취 등이 발생될 수 있는 등의 단점으로 인하여 국내 오염토양 처리에는 거의 활용되지 못하고 있다.

(2) 공정원리

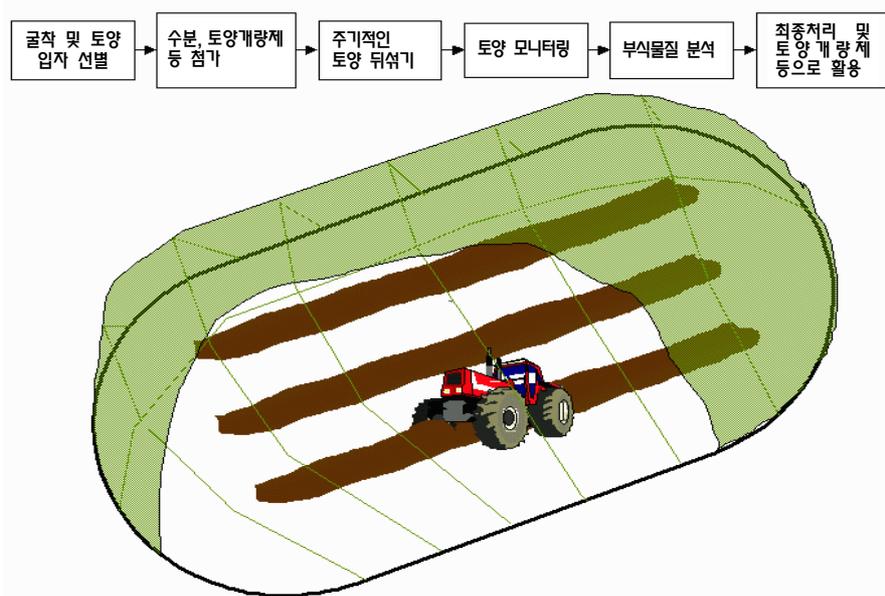
퇴비화 공정은 바이오파일 공정과 대체적으로 비슷하다. 다만, 바이오파일 공정의 최적온도는 약 30℃인 반면 퇴비화 공정의 경우 온도를 50~55℃로 유지해주어야 한다는 점이 다르다.

퇴비화 공정을 적용하기 위한 전처리공정은 오염토양의 굴착, 선별 및 큰 입자를 작은 입자로 분쇄하는 과정이 필요하다. 작은 입자로 만드는 이유는 오염토양의 표면에 미생물에 의한 반응성을 높여주고 토양의 공극율, 투수성 및 용적비중을 높여주기 위함이다. 공정의 효율성을 향상시키기 위해 통기개량제(bulking

agent) 또는 유기물질을 공급해줄 수도 있으며, 토착미생물의 활성도가 그리 높지 않은 경우에는 외부에서 배양된 미생물을 첨가하여 공정의 효율성을 높이기도 한다.

송풍시스템은 오염토양 퇴비화 공정의 효율적인 설계 및 운전에 있어 매우 중요하며, 적절한 양의 공기를 주입시켜 주어야 한다. 그러나 외부로부터의 강제적인 공기주입은 휘발성 유기화합물의 방출에 영향을 줄 수 있으므로 휘발성 오염물질의 수집과 처리를 할 수 있는 시설을 이용해야 한다.

적절한 수분함량을 유지하기 위해 물을 공급해야 하고, 영양원의 부족시에는 외부에서 질소 및 인을 추가 공급하여 처리효율을 높여야 한다. 퇴비화공정이 완료되면 퇴비화물질로부터 팽화제가 분리되고, 퇴비는 다른 토양의 접종에 이용될 수 있다.



[그림 3-4] 퇴비화법의 처리공정도

(3) 처리물질 및 처리효율

퇴비화 공정은 생분해가 가능한 물질로 오염된 토양에 효과적이다. 특히, 유류로 오염된 토양의 정화에 매우 효과적이며, 비할로겐 및 할로겐 VOCs, 비할로겐

SVOCs로 오염된 지역의 정화에도 대체적으로 적용이 가능하다. 또한 화약류와 같은 폭발성 물질로 오염된 토양의 처리에도 적합한 것으로 알려져 있다.

USACE (U.S. Army Corps of Engineers)와 UMDA (Umatilla Depot Activity)에 의해 수행된 현장실험에서 TNT(trinitrotoluene)는 운전을 시작한지 처음 20일 동안에 대부분 제거되었으며, 40일 후에는 99.7%가 감소된 것으로 보고되었다. 그러나 할로젠 SVOCs, 무기물질 및 방사성물질에는 적용이 불가능 하다.

(4) 영향인자

퇴비화법을 적용하는데 있어서 고려해야 할 영향인자를 [표 3-4]에 나타내었다.

[표 3-4] 퇴비화법 영향인자

토양특성 (soil characteristics)	물질특성 (constituent characteristics)
<ul style="list-style-type: none"> • 미생물 군수 • 탄소/질소 비율(C/N ratio) • 온도 • pH • 수분함량 • 토성(texture) 	<ul style="list-style-type: none"> • 휘발성(증기압 및 헨리상수) • 화학적 구조 • 농도 및 독성

퇴비화법은 바이오파일법과 비슷한 기술로서 적용성 및 처리효율에 영향을 줄 수 있는 영향인자 또한 매우 비슷하다.

성공적인 퇴비화반응을 위해서 필수적인 성분이 산소이다. 미생물이 에너지를 얻기 위하여 탄소를 산화시킴에 따라 산소는 사용되고 이산화탄소가 생성된다. 충분한 산소가 없다면 그 과정은 혐기성으로 되고 저급지방산, 황화수소 등의 심한 악취가 발생되게 된다. 계란 썩는 냄새가 나면 황화수소 가스가 발생하여 혐기성으로 전환되었다는 것을 알 수 있다. 반대로 산소가 너무 많으면 미생물의 산화열이 냉각되어 퇴비화반응기 내의 온도가 올라가지 않으며, 저온에서의 분해속도는 고온보다도 상대적으로 느려지게 된다.

대기중의 산소농도는 21%이지만, 퇴비화에 있어서 유용한 호기성미생물은 5%보다 낮은 영역의 산소농도에서도 살아남을 수 있다. 가능한 내부온도의 냉각을 방지하면서 10% 이상의 산소 농도를 유지한다면, 호기성조건을 유지하는 것이 가능하다. 이러한 산소공급을 위하여 많은 장치에서 다양한 방법으로 접근하고 있다. 외부에서 송풍기를 통하여 공기를 공급하기도하고, 주기적으로 퇴비더미를 뒤집기도 한다.

하수오니, 식품폐기물 등과 같이 유기물이 점성을 유지할 경우 산소의 통기가 어려워 혐기성 반응이 일어나 반응속도에 영향을 줄 수 있다. 전처리 과정 중에 볏짚, 왕겨, 톱밥, 나무껍질 등의 통기개량제를 첨가하기도 한다.

퇴비화과정 중에 자연발생 하는 열에 의하여 온도가 적절하게 유지되나 온도가 높거나 낮을 때에는 분해율이 저하된다. 보통 대형 퇴비화시설에서는 온도제어를 하지 않지만 경우에 따라 제어가 요구된다. 퇴비화과정 중에 온도는 70℃ 이상까지도 유지되지만 일반적으로 제어 온도인 50℃~60℃에서 유지되며, 유기물 분해율에 좋은 온도는 60℃로 알려져 있다.

퇴비화의 초기에는 미생물에 의하여 분해되기 쉬운 당류, 단백질, 지방 등이 분해되어 발열반응에 의하여 온도가 상승한다. 온도가 상승되면 반응속도는 수배로 되며, 다시 온도상승을 가져온다. 온도가 높은 상태에서는 고열균이 우점종으로 나타나며, 유기물이 분해되고 수분이 저하되면 온도가 떨어지게 된다.

미생물은 활동에 알맞은 pH를 가지고 있다. 일반적으로 미생물은 pH가 5~9 범위에서 생육하며, 중성 부근에서 미생물의 활동이 전반적으로 높아진다. 퇴비화과정에서 관찰되는 pH 범위는 5.5~8.5 사이로서, 일반적으로 초기에는 낮은 값을 유지하지만 퇴비화반응이 진행됨에 따라 약알칼리성으로 변한다.

퇴비화반응의 초기에는 원료입자의 내부에 충분한 산소가 공급되지 않아서 내부물질이 혐기적으로 분해됨으로써 저급지방산 등이 발생하지만, 시간이 지남에 따라 공기공급이 원활하게 되면서 분해가 활발히 진행되어 질소성분중의 암모니아가 발생하게 된다. 이러한 암모니아의 발생이 활발해지면서 물질 내에 암모늄이온이 잔존되어 약 알칼리성을 띠어 pH 8이상을 유지하게 된다.

퇴비화과정 중 많이 일어나는 현상 중의 하나가 공기가 적게 공급될 때 pH가 4.5이하로 떨어지는 것으로 이러한 현상이 일어나면 공기공급을 원활하게 함과 동

시에 소석회와 같은 중화제를 사용하여 pH를 높여주어야 한다.

많은 원소 중에서 탄소와 질소는 생물에게 매우 중요한 원소로 작용하며, 또한 분해정도를 가름하는 중요한 지표로 사용된다. 이들의 함량비를 C/N비로 나타내게 된다. 오염물질에 따라 최적의 값이 달라질 수 있으나 일반적으로 퇴비화에서 있어서 가장 이상적인 탄소와 질소의 무게비율은 50 이하로서 25~30:1이다. 만약에 비율이 25~30:1 이하일 경우에는 질소성분의 유실이 커지며, 암모니아 등의 악취가 심하게 발생되게 된다. 비율이 25~30:1이상에서는 미생물 성장에 필요한 질소원이 부족하여 미생물의 성장에 장애를 주어 퇴비화의 반응속도가 느려지게 된다.

5. 자연저감법(Natural Attenuation)

(1) 기술개요

자연저감법이란 자연적인 지중 프로세스, 즉 희석, 휘발, 생분해, 흡착 그리고 지중물질과의 화학반응 등에 의하여 불포화지역 및 포화지역의 오염물질 농도가 허용 가능한 수준으로 저감 되도록 유도하는 방법이다. 자연저감법은 다른 기술과는 달리 적극적인 오염토양 정화기술은 아니지만 현재 인체 및 생태계에 대한 위해도가 그리 높지 않고 부지활용이 제한되어 처리기간에 제한을 받지 않는 지역에서는 충분히 활용 가능한 경제적인 방법이라 할 수 있다.

또한 자연저감법은 단일 공정 뿐만 아니라 다른 기술과 함께 후속공정으로써 활용가치가 높은 기술로서 이 공정을 적용하기 위해서는 지중에서 발생하는 각종 물리/화학/생물학적인 반응에 대한 평가가 필수적이며, 따라서 지속적인 모니터링이 진행되어야 한다.

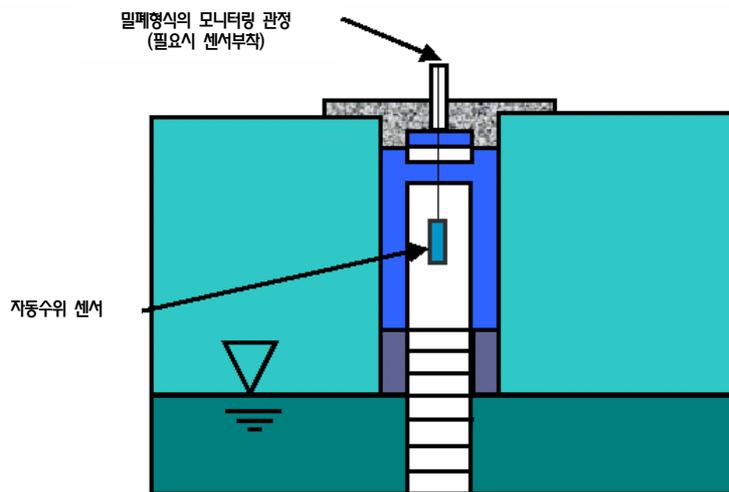
제한요인으로는 지중에 오염원이 존재하여 지속적인 오염이 일어나는 경우에는 우선적으로 오염원을 제거해야 하고 지중에서 발생하는 여러 기작에 의하여 본래 물질보다 유동성이나 독성이 강한 중간 분해 산물이 발생되어 비오염지역으로 확산될 수 있다. 따라서 자연저감법의 효과적인 적용을 위해서는 각종 모델링을 통한 처리효율 및 처리기간의 정확한 산정이 매우 필요하다.

(2) 공정원리

자연저감법은 오염물질의 정화를 위해서 아무런 조치를 취하지 않는다는 것이 아니라 처리대상 부지의 환경조건 하에서는 자연정화법의 적용만으로도 법적 요구조건을 만족시킬 수 있는 경우를 말한다. 자연저감법을 채택하는 경우에는 현부지의 상태, 용도, 오염물질, 처리기간, 경제성 등을 다른 채택 가능한 방법과 면밀히 비교 평가하여 채택되어야 한다.

예를 들어 PCBs와 같은 고밀도비수용액체상(Dense Non-Aqueous Phase Liquids : DNAPLs)이 지하 깊은 곳에 흡착되어 유동성이 없다면 이를 제거하여 처리하는 공정은 비용이 많이 소요되고 오염물질의 농도를 효과적으로 감소시키지 못하기 때문에 기술적으로 현실성이 떨어진다.

이러한 경우 자연적으로 오염물질이 분해되도록 유도함으로써 오염물질을 정화할 수 있으며, 자연적인 정화를 돕기 위해 인위적인 조작을 가하여 자연정화의 시간을 줄일 수도 있다. 면밀한 검토과정을 통하여 자연저감법이 채택될 경우 종합적인 부지특성 조사, 위해성평가, 오염원을 제어할 조치, 모니터링 계획 등이 마련되어야 한다. 이 공정은 미국의 수퍼펀드 부지(Superfund site)에서 다수 적용되었으며, 전형적인 자연분해법의 모니터링 관정 시공도는 [그림 3-5]와 같다.



[그림 3-5] 자연저감법의 모니터링 관정 시공도

(3) 처리물질 및 처리효율

자연저감법은 비할로겐 VOCs 및 유류로 오염된 지역의 정화에 매우 탁월한 효과를 나타내며, 할로겐 VOCs, 비할로겐 SVOCs 및 할로겐 SVOCs로 오염된 지역의 정화에도 대체적으로 적용이 가능하지만 살충제의 경우 정화효율이 낮은 것으로 보고되고 있다. 또한 무기물질, 방사성물질 및 화약류에는 본 기술의 적용이 용이하지 않다.

(4) 영향인자

자연저감법을 적용하는데 있어서 고려해야 할 영향인자를 [표 3-5]에 나타내었다.

[표 3-5] 자연저감법 영향인자

토양특성 (soil characteristics)	물질특성 (constituent characteristics)
<ul style="list-style-type: none"> • 고유투수계수 및 수리전도도 • 토양구조 및 토성 • 미생물 군수 • 영양물질 농도 • 온도 • pH • 수분함량 	<ul style="list-style-type: none"> • 휘발성(증기압 및 헨리상수) • 용해도 및 분배계수 • 화학적 구조 • 농도 및 독성

자연저감법이 적용 가능한 지역은 다른 처리방법으로 처리하는 것과 비교하여 유사한 효과를 얻을 수 있는 지역에 한하여 적용 가능하다. 통상적으로 자연저감법은 오염부지에 대하여 초기에 적극적인 정화방법을 적용하여 오염물질의 농도가 상당히 저감되어 더 이상 적극적인 정화방법을 적용하기에는 기술적, 경제적으로 효용성이 떨어지지만 인간이나 다른 동식물에 어느 정도 유해성을 갖는 경우에 이용할 수 있는 방법이다.

즉 자연정화법은 현저한 오염물의 확산이 이루어지거나 인간 및 동식물에 악영향을 줄 것으로 예측된다면 이용해서는 안 되는 방법이다. 자연저감법은 기본적으로 지중미생물의 분해과정을 통하여 정화하므로 온도, 수분 등 미생물의 생육조건은 중요한 인자가 된다.

6. 토양세정법(Soil Flushing)

(1) 기술개요

토양세정법은 물 또는 오염물질 용해도를 증대시키기 위한 첨가제(계면활성제 등)가 함유된 물을 관정을 통하여 토양 공극 내에 주입함으로써 토양에 흡착된 오염물질을 탈착시켜 지상으로 추출하여 처리하는 지중처리(In-situ) 기술 중에 물리/화학적 처리기술에 속한다.

주입관정을 통하여 유입된 세정용액은 지하의 오염지역을 통과하면서 토양입자에 흡착된 오염물질의 용해도를 높여 토양입자로부터 탈착시키고 이를 추출정을 통하여 양수함으로써 오염지역의 토양을 정화한다. 본 기술은 처리과정에서 세정제로서 알코올, 착염물질 또는 계면활성제를 사용하기도 하며, 양수된 물은 지상에서 배출허용기준치까지 후처리하여 배출 또는 다시 지중으로 주입하는 등 재이용한다.

토양세정법은 생분해 과정이 불가능한 중금속의 경우 활용도가 높지만 살충제, 휘발성 유기화합물, 준휘발성 유기화합물질의 처리시 높은 세정제 비용으로 인해 타공정에 비하여 경제성이 떨어지는 단점을 가지고 있다. 또한 투수성이 낮은 토양의 경우 세정용액의 이동에 제약을 받기 때문에 처리효율이 떨어지며 계면활성제와 같은 세정용액에 의해 2차 오염이 발생할 가능성이 있을 뿐 만 아니라 오염물질의 이동성을 증가시켜 비오염지역 특히 포화지역으로의 오염물질 확산을 초래하기도 한다.

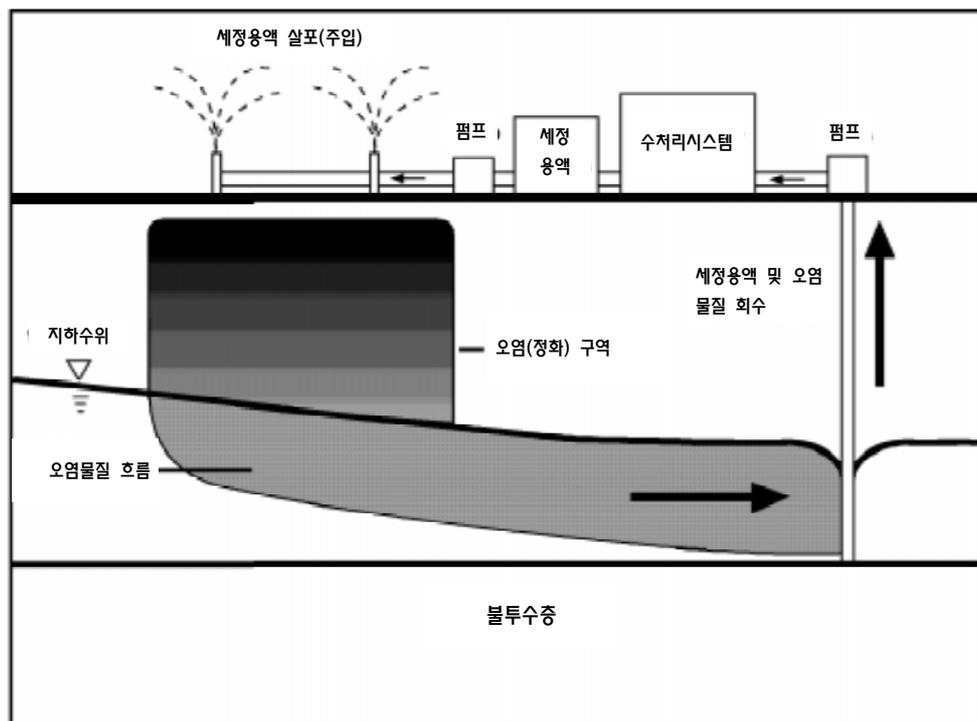
(2) 공정원리

토양세정법은 세정용액을 주입 및 추출공정을 통해서 이동시킴으로써 수행되며, 추출된 세정액은 공공 하수처리장이나 저류조로 보내지기 전에 자체 폐수처리장치를 통하여 적절히 처리한다. 본 기술의 경제성에 가장 큰 영향을 주는 인자로는 세정제의 높은 비용을 들 수 있으므로 경제성을 최대한 증가시키기 위해 재생된 세정액은 세정공정에 재사용하게 된다.

따라서 세정액에 계면활성제를 첨가하였을 경우 처리수에서 계면활성제를 재생하는 과정은 토양세정공정의 비용을 절감하는 데 있어서 매우 중요한 요소이다.

미생물의 생분해를 활용하는 생물학적 처리방법과는 달리 토양세정법을 적용하는데 있어서 처리효율의 차이는 오염물질의 성분보다는 수리전도도, 고유투수계수, 공극률 등 토양의 수리지질학적인 요소에 더 많이 좌우된다. 즉, 토양세정법의 처리효율은 각각의 토양입자에 흡착된 유기오염물질과 세정용액의 접촉이 원활할수록 높아지기 때문에 점토가 많이 포함된 토양의 경우 세정용액의 이송을 방해할 뿐 만 아니라 편류현상(channeling)을 일으켜 오염물질의 처리효율을 감소시킨다.

실제 현장의 수리지질학적인 요소를 실험실에서 모두 모사하기 불가능하기 때문에 실험실 수준(lab-scale)의 연구에서는 제거효율이 높지만 실제 현장에서는 그렇지 않은 경우가 많다. 따라서 지중의 유체흐름을 정확히 이해하는 것이 매우 중요하다. 일반적인 토양세정의 처리공정도는 [그림 3-6]과 같다



[그림 3-6] 세정법 처리공정도

(3) 처리물질 및 처리효율

토양세정법은 [표 3-6]의 오염물질 중 중금속을 비롯한 무기물로 오염된 지역의 정화에 매우 탁월한 효과를 나타낸다. 또한 비할로젠 및 할로젠 VOCs, 비할로

겐 및 할로젠 SVOCs 및 유류로 오염된 지역의 정화에도 대체적으로 적용이 가능하지만 다른 기술보다는 경제성이 떨어진다는 단점이 있다. 또한 방사성물질 및 화약류에는 본 기술의 적용이 용이하지 않은 것으로 알려져 있다.

토양세정법은 현재 미국에서 사용되는 기술로서 현장의 수리지질학적 요인에 영향을 많이 받기 때문에 본 공정을 선택하기 전에 실험실과 현장에서 처리실험이 수행되어야 한다. 토양세정기법은 12개의 슈퍼펀드 부지에서 정화기법의 하나로 사용되었으며, 국내의 경우 실험실 수준의 연구는 활발히 진행되었으나 토양세정법의 여러 가지 제한 요인으로 인하여 실제 현장 적용은 아직 이루어지지 않은 상태이다.

(4) 영향인자

토양세정법을 적용하는데 있어서 고려해야 할 영향인자를 [표 3-6]에 나타내었다.

[표 3-6] 토양세정법 영향인자

오염토양특성 (soil characteristics)	오염물질특성 (constituent characteristics)
<ul style="list-style-type: none"> • 수리전도도 • 토양 표면적(soil surface area) • 탄소함량(carbon content) • 완충능력(buffering capacity) • pH • 양이온 교환능력(cation exchange capacity) • 점토함량(clay content) • 암반균열(fracture) 	<ul style="list-style-type: none"> • 농도 • 용해도 • 흡착성(분배계수) • 증기압 • 점도(liquid viscosity) • 밀도(liquid density)

토양세정법은 지중처리기술로서 지중에서 세정액의 흐름을 유도하여 오염지역을 정화하는 기술이므로 다른 지중처리기술과 같이 지중에서의 유체, 특히 공기보다는 물의 흐름이 매우 중요하다. 따라서 토양 중의 물의 흐름을 나타내는 수리전도도는 토양세정법을 적용하는데 있어 중요한 인자이며, 토양 중 점토의 함량이 높을 경우 수리전도도가 매우 낮아져 물의 흐름이 방해받아 처리효율이 현저히

저하되므로 점토함량도 고려되어야 한다.

본 기술은 토양표면에 흡착되어 있는 오염물질을 세정제와의 접촉을 통하여 용출시켜 처리하는 공정이므로 세정제가 접촉할 수 있는 토양의 표면적도 중요한 인자중의 하나이며, 특히 토양 중 휴믹산과 같은 유기물 함량이 높을 경우 오염물질과 강하게 결합되어 있어 세정액을 통한 용출이 어렵기 때문에 유기물의 함량을 나타내는 탄소함량 또한 고려대상 인자에 해당된다.

뿐만 아니라 본 공정은 생물학적 처리법과는 달리 물리/화학적인 공정이기 때문에 온도, 영양분과 같은 생분해 인자보다는 완충능력, 양이온 교환능력과 같은 토양의 화학적 특성에 초점을 맞출 필요가 있으며, 이러한 특성에 따라 첨가해야 할 세정제의 종류, 농도 등이 달라질 수 있다.

이외에 용해도, 분배계수와 같은 오염물질의 특성을 충분히 고려하여 토양세정공정의 적용 가능성을 결정하여야 하며 적용 가능성을 효과적으로 검토하기 위해서는 처리효율 실험을 수행하는 것이 매우 중요하다.

7. 토양세척법(Soil Washing)

(1) 기술개요

토양세척법은 적절한 세척제를 사용하여 토양입자에 결합되어 있는 유해한 유기오염물질의 표면장력을 약화시키거나 중금속을 액상으로 변화시켜 토양입자로부터 유해한 유기오염물질 및 중금속을 분리시켜 처리하는 지상처리(Ex-situ)기술이다. 기본적으로 토양세척법은 토양세정법(soil flushing)과 비슷한 공정원리를 활용한다. 즉, 토양세척법은 토양세정법과 같이 세정제를 활용하여 오염물질의 용해도를 높여 추출한 후 후처리를 통하여 오염물질을 제거하고 세정용액을 다시 재활용하는 기법을 사용하고 있다.

그러나 토양세정법은 지중처리기술로서 오염지역에 직접 관정을 설치하여 세정용액의 흐름을 유도하는 반면 토양세척법은 오염토양을 굴착 후 최적화된 토양세척장치를 통하여 처리하는 지상처리기술이라는 점이 다르다. 또한 토양세척법은 오염물질의 추출 이외에 선별과정을 통하여 오염된 토양의 부피를 효과적으로 감소시키는 기능을 한다는 점에서 토양세정법과는 다르다고 할 수 있다.

토양세척법에 이용되는 세척제는 오염물질을 토양으로부터 분리·용해시키는 역할을 하는 물질로 계면의 자유에너지를 낮추고 계면의 성질을 현격히 변화시켜 물에 대한 용해성이 적은 물질을 열역학적으로 안정한 상태로 용해시킬 수 있는 중요한 화학물질이다. 그리고 이렇게 분리된 폐액은 농축·처분하거나 폐수처리방법으로 처리하며, 폐액 내의 중금속을 회수할 수도 있다.

토양세척법은 현재 미국 및 유럽 등지에서 활용도가 높은 기술로서 생물학적 분해가 어려운 유해화학물질이나 중금속을 빠른 시간 안에 처리할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 사용하는 세척제의 종류에 따라 광범위한 유기 및 무기오염물질을 제거할 수 있으며, 선별과정을 통하여 효과적으로 오염토양의 부피를 감소시킬 수 있기 때문에 타 공정과 복합적으로 사용할 경우 그 활용도가 더 높아질 수 있다.

그러나 오염토양의 굴착 및 이송 비용, 토양세척장치의 제작비용, 세척제 비용 및 폐수/폐기물 처리비용 등이 높게 소요될 수 있기 때문에 타공정에 비하여 비교적 경제성이 낮고, 오염물질이 복합적으로 존재할 경우 적절한 세척제의 선정 및

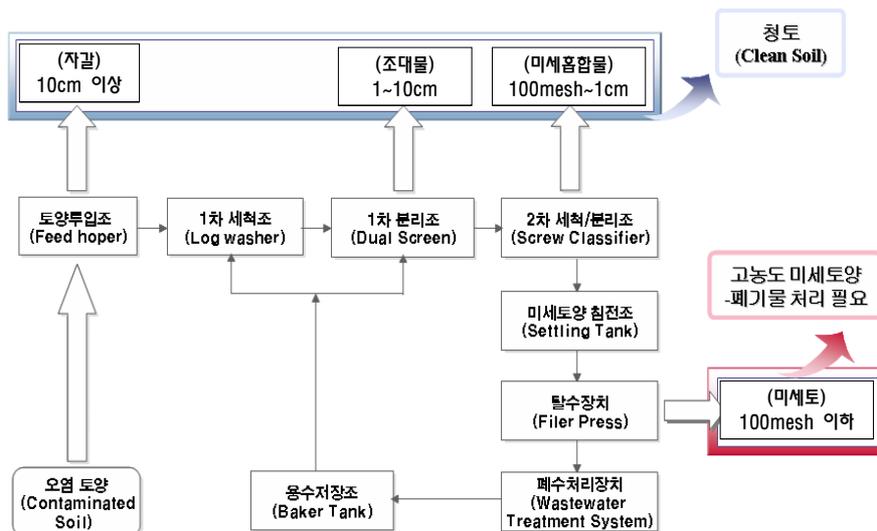
제조하기가 용이하지 않은 단점이 있다. 따라서 토양세척법은 중금속 오염과 같이 타공정의 적용이 어려운 오염지역일 경우, 빠른 시간 안에 긴급히 처리해야 할 경우에 유용하게 사용될 수 있는 기술이라 할 수 있다.

(2) 공정원리

토양세척의 기본 원리는 다음의 가정에 근거를 두고 있다. 첫째, 오염물질은 입자가 작은 미세토양에 많이 흡착되어 있기 때문에 미세토양 만을 분리하면 오염토양의 부피가 현저히 감소된다는 점과 둘째, 토양입자와 화학적으로 강하게 결합되지 않은 오염물질은 물리적인 방법으로 쉽게 분리될 수 있다는 점이다.

따라서 토양세척법은 물리적인 선별 및 마찰작용을 활용하여 미세토양의 원토양으로부터 분리시키는 기능과 필요할 경우 적절한 세척제를 이용하여 화학적으로 결합된 오염물질을 용출시키는 기능을 목적으로 하고 있다. 토양세척법의 일반적인 처리공정도는 [그림 3-7]과 같다.

토양세척장치는 처리하고자 하는 오염물질의 종류 및 오염토양의 특성에 따라 최적의 장치를 구성해야 하지만 일반적으로 파쇄기, 선별기, 분리장치, 혼합 및 추출 장치, 세척액 처리장치, 미세토양의 2차 처리장치 등으로 구성되어 있다.



[그림 3-7] 토양세척법의 일반적인 처리공정도

① 파쇄기(size reduction equipment)

파쇄기는 입도가 큰 토양을 분쇄하는 장치로 입도의 크기가 2~5cm보다 큰 토양이 심하게 오염되어 있어 세척이 필요한 경우 토양취급과 세척효율을 높이기 위해 설치한다.

② 선별기(screening equipment)

선별기는 토양 중에서 세척처리가 불필요하고 입자크기가 큰 자갈이나 나무, 금속 등 이물질을 선택적으로 분리하는 장치이다. 입자의 크기가 큰 자갈의 표면에는 오염농도가 높은 미세토양이 부착되어 있기 때문에 이를 제거하기 위하여 고압 스프레이에서 나오는 물로 표면을 세척한 후 다시 원위치에 매립하고 선별된 토양은 분리장치로 보낸다.

③ 분리장치(separation equipment)

선별기에서 이송된 토양은 습식 분리장치를 통하여 다시 미세입자와 중간크기의 입자로 분리되며, 분리장치를 통하여 분리된 중간크기의 모래질 토양은 일반적으로 오염도가 낮기 때문에 바로 되메움하거나 오염농도가 높을 경우에는 혼합 및 추출장치로 이송하여 2차 처리를 수행한다. 분리된 고농도의 미세토양은 2차 처리 과정을 거치거나 탈수과정을 거친 후 폐기물로 처리된다.

④ 혼합 및 추출장치

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

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, 금속침전, 응집, 생물학적 처리, 활성탄 흡착, 막분리, 여과 등 많은 방법이 있다.

⑥ 대기오염 방지장치

토양의 굴착, 파쇄공정, 선별공정, 후처리공정 등에서 휘발성물질 및 미립자가 방출되므로 오염방지 장치가 필요하다. 굴착시에는 오염방지가 어렵지만 나머지 다른 공정에서는 포집하여 전기 집진, 활성탄 흡착, 스크러버 등으로 처리하여 배출한다.

(3) 처리물질 및 처리효율

토양세척법은 유기오염물질, 유류 및 중금속과 같은 무기물질로 오염된 지역의 정화에 대체적으로 적용이 가능하지만 방사성물질 및 화약류로 오염된 지역의 정화에는 본 기술의 적용이 쉽지 않다. 토양입경별로는 자갈, 모래, 미사 등에 효과가 크고 미사에는 부분적인 효과가 있으며, 점토에는 효과가 없는 것으로 알려져 있다.

토양세척법은 미국에서 개발된 기술이지만 현재 미국보다는 유럽지역에서 일반적으로 많이 사용되고 있다. 토양세척법은 1986에서 1989년 사이에 미국의 여덟 개의 수퍼펀드 부지에서 오염물질 제거 방법 중 하나로 적용되었다. 국내의 경우 토양세척법을 이용한 오염물질 처리비용이 높은 이유로 현장 적용이 많지 않았으나 최근 폐광산과 같은 중금속으로 인한 오염문제가 대두되면서 중금속 오염 처리 및 대형 유류오염토양 정화현장에서 주로 적용되고 있다.

(4) 영향인자

토양세척법을 적용하는데 있어서 고려해야 할 영향인자를 [표 3-7]에 나타내었다.

[표 3-7] 토양세척법 영향인자

오염토양특성 (soil characteristics)	오염물질특성 (contaminant characteristics)	세척첨가제특성 (additives characteristics)
<ul style="list-style-type: none"> • 입도분포 및 점토함량 • 유기물 함량 • 완충능력 • 양이온 교환능력 • pH 	<ul style="list-style-type: none"> • 농도(입도별 농도분포) • 용해도 • 흡착성(분배계수) • 증기압 • 점도 	<ul style="list-style-type: none"> • 종류 • 농도 • 생분해성 • 독성

토양세척법은 오염토양을 굴착 후 세척을 통하여 오염농도를 저감시키고 고농도로 오염된 미세토양을 제거함으로써 오염토양을 감소시키는 기술이다. 미세토양은 비표면적 매우 크기 때문에 흡착되어 있는 오염물질의 함량이 높고 점착성이 커서 큰 입도의 토양을 서로 붙여 큰 덩어리를 만들기도 한다.

또한 토양 중의 휴믹산과 같은 유기물(부식질)도 오염물질을 강하게 흡착(흡수)하는 특성을 가지고 있다. 이러한 미세토양 및 유기물의 함량에 따라 토양세척법의 처리효율 및 경제성이 달라지기 때문에 토양의 입도분포, 점토함량 및 유기물 함량은 토양세척법의 적용 가능성을 검토하는데 있어서 가장 중요한 인자라 할 수 있다.

토양성상에 따른 토양세척법의 적용 한계는 미세토양과 유기물의 혼합률에 의하여 결정된다. 최근에 들어서는 미세토양의 혼합률을 50% 까지도 경제성의 한계 내로 설정하는 기술도 있으나, 일반적으로 혼합률 30% 이하를 토양세척의 경제적 한계로 보고 있다. 토양세척이 적정 입도 범위는 0.24~2.0mm이다.

토양세척법 적용시 고려해야할 토양특성으로 pH 및 완충능력을 들 수 있다. pH 값은 오염물질의 세척액으로의 용해와 밀접한 관계를 가지고 있으며, 완충능력은 pH를 변화시키기 위해 필요한 세척제의 양을 결정하는데 중요한 요소로 작용한다. 즉, 오염물질의 용해도를 증가시키기 위하여 필요한 경우 pH 값을 조절해야 하며, 특히 중금속의 경우 pH의 변화에 따라 산화형태가 달라지고 이에 따라 용해도가 영향을 받기 때문에 토양의 pH 및 완충능력에 따라 처리공정이 영향을 받을 수 있다.

또한 토양세척법은 오염물질의 물리/화학적 특성에 따라 처리효율이 달라질 수 있는데 오염물질의 물에 대한 용해도가 높을수록, 휘발성 강할수록 토양세척효율을 높아지는 경향이 있다. 다만, 휘발성이 강한 오염물질의 경우 처리과정 중 휘발되어 대기로 방출될 수 있기 때문에 공정 중 발생하는 배기가스를 포집하여 처리하기 위한 시설이 필요할 수도 있다.

세척수의 경우 세척효율을 높이기 위하여 여러 가지 첨가물이 물과 함께 사용되는데, 용출시험 등을 이용한 처리성능시험을 통하여 오염특성에 맞는 세척제를 선택을 해야 한다. 자주 쓰이는 첨가제로는 pH 조절제, 세제, 계면활성제, 착화제, 산화제, 응집제 등이 있다. 일반적으로 토양세척용 첨가제로는 계면활성제를 주로

사용한다. 이는 표면에 흡착되어 계면의 활성을 크게 하고 표면장력을 현저히 떨어뜨리는 효과를 이용하는 것이다.

효율적인 토양세척용 계면활성제는 활성제 자체의 용해도, 대상 오염물에 대한 용해도, 흡착성, 생분해성 및 생물학적 독성 등의 성질과 비용 등의 여러 면에서 선택되어야 한다. 토양세척에는 표면장력이 작은 계면활성제를 선택하는 것이 바람직한데, 이는 토양과 계면활성제 용액의 혼합물에서 중력에 의한 고액분리가 용이하기 때문이다.

8. 용제추출법(Solvent Extraction)

(1) 기술개요

용제추출법은 오염토양을 추출기내에서 유기용매와 혼합시켜 용해시킨 후 분리기에서 오염물질을 분리하여 처리하는 물리·화학적 지상처리(Ex-situ)기술이다. 본 기술은 토양세척법과 같이 토양에 흡착되어 있는 오염물질을 추출하여 처리하는 면에서 공통적인 공정원리를 가지고 있지만 오염물질을 용해시키기 위한 세척제로서 물이 아닌 유기용매를 사용한다는 점이 다르다.

용제추출법은 오염물질을 분해하는 기술이기 보다는 토양, 슬러지 및 퇴적물로부터 오염물질을 분리시킴으로써 전체적인 오염토양의 부피를 감소시키는 방법이라 할 수 있다. 용제추출법을 적용할 경우 추출공정의 효율을 높이기 위해 오염토양과 추출용매의 접촉을 극대화 시킬 수 있는 회전 교반 장치가 필요하며, 오염물질 및 토양의 상태에 따라 고형화/안정화, 소각, 혹은 토양세척과 같은 다른 기술과 병합하여 사용할 수 있다.

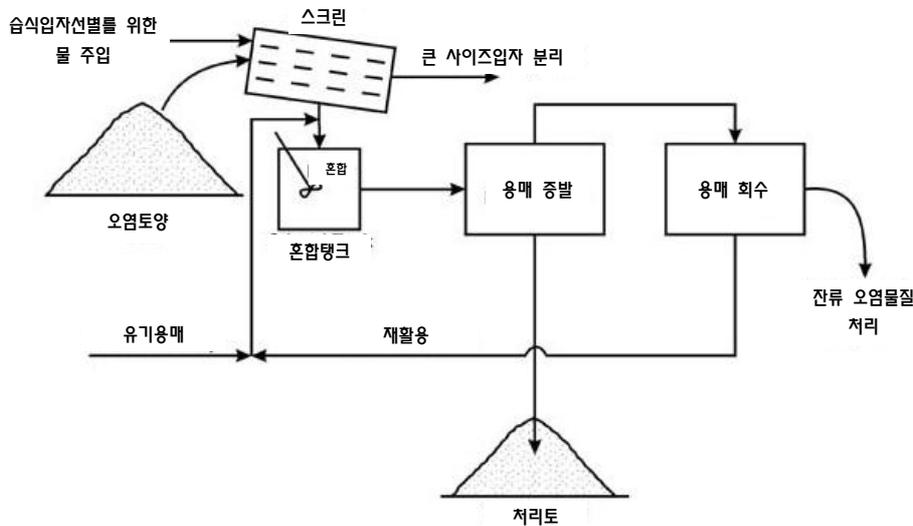
주로 이용되는 추출용매는 triethylamine, kerosene, 그리고 탄화수소 용매 등을 들 수 있으며, 추출과정을 통하여 오염물질을 흡수한 용매는 상분리에 의해 토양으로부터 분리되고, 오염된 용매는 휘발장치에서 휘발된 후 다시 응축시켜 공정에서 재이용한다. 그러나 오염된 용매가 재이용이 불가능한 경우에는 매립하거나 다른 처리법을 이용하여 처분하여야 한다.

용제추출법은 PAHs, PCB와 같은 난분해성 물질을 단기간에 정화하는데 매우 효과적인 기술이지만 수분함량이 높거나 유화제와 같은 물질이 오염토양에 존재할 경우 공정에 방해가 되며, 공정에서 사용된 추출용매가 토양에 잔류하여 2차 오염물질로서 작용할 수도 있는 단점을 가지고 있다.

또한 용제추출법은 일반적으로 고분자 유기물질이나 친수성 물질에는 정화효율이 높고, 유기오염물질과 중금속이 결합되어 있을 경우 중금속이 함께 추출될 수 있으므로 공정설계시 유의하여야 한다.

(2) 공정원리

추출장치에 있어서 기본과정은 ①토양의 선별 ②추출물질과 혼합 ③액상과 고상의 분리 ④정화된 토양의 처리 ⑤추출용액 정화 및 슬러지 처리로 이루어져 있다. 본 기술은 실질적인 추출 이외에도 입자분리기술(입자의 크기나 밀도에 의한 분리), 화학적 처리(주로 산화) 및 부유기술 등 다른 여러 기술과 결합하여 이용되고 있다. 용매추출 장치에 대한 처리공정도는 [그림 3-8]과 같다.



[그림 3-8] 용제추출법의 처리공정도

(3) 처리물질 및 처리효율

용제추출법은 PAHs, PCB와 같은 비할로젠 및 할로젠 SVOCs로 오염된 지역의 정화에 탁월한 효과를 나타내며, 비할로젠 및 할로젠 VOCs, 유류로 오염된 지역의 정화에도 대체적으로 적용이 가능하다.

하지만 중금속과 같은 무기물질, 방사성물질 및 화약류로 오염된 지역의 정화에는 본 기술의 적용이 쉽지 않다. 이 공정은 페인트 찌꺼기, 인조고무 오염토양, 타르 오염토양, 살충제 오염토양, 그리고 유류정제 폐기물 등으로 오염된 토양의 유기오염물질을 분리하는 데 적용할 수 있다.

(4) 영향인자

용제추출법은 토양세척법과 비슷한 공정원리를 가지고 있기 때문에 본 기술 적용시 영향을 미치는 인자들 또한 [표 3-7]의 토양세척법 영향인자와 같다. 다만, 세척용액을 물이 아닌 유기용제를 사용하기 때문에 유기용제의 종류, 물리/화학적 특성, 생분해성, 특히, 독성에 대한 평가가 필요할 수가 있다.

9. 고형화/안정화(Solidfication/Stabilization)

(1) 기술개요

고형화 및 안정화법은 오염토양에 시멘트, 석회, 슬래그 등의 고형화제를 첨가하여 오염물질의 이동성을 물리적으로 저감시키고 화학적으로 용해도를 낮추거나 무해한 형태로 변화시키는 처리기술을 말한다. 고형화/안정화법 또한 화학적 산화/환원법과 같이 지상처리(Ex-situ) 및 지중처리(In-situ)로 모두 활용 가능한 기술로서 중금속 등 무기물질을 고정시키는데 효과가 매우 높다.

다양한 고형화/안정화법 중 가장 많이 활용되는 것은 시멘트화에 의한 고형화 및 안정화 처리기술로서 포틀랜드 시멘트(portland cement), 석회 등의 고형화제를 첨가하여 오염물질을 포함한 토양을 고형물질로 변화시켜 오염물질의 이동을 방지하기 위한 방법을 말한다. 고형화 및 안정화를 위한 첨가제로는 폴리에스테르, 에폭시, 아스팔트 등 유기성 접합제와 시멘트, 포졸란 등의 무기성 접합제로 나누어 볼 수 있으며, 이중 포틀랜드 시멘트가 가장 널리 사용되고 있다.

고형화/안정화법은 중금속으로 오염된 지역에 적용시 타기술에 비하여 처리 효과가 높으며, 처리비용 또한 저렴한 장점이 있다. 그러나 일반적으로 오염물질을 제거하는 것이 아닌 오염물질의 용해도 및 이동성만을 감소시키는 처리기술이기 때문에 향후에 오염물질의 용출이 발생할 가능성이 잠재되어 있으므로 장기간의 모니터링 과정이 필요한 단점을 가지고 있다.

또한 휘발성 유기물질의 경우 고정화가 어렵고 일반적으로 고형화제의 첨가로 인하여 오염토양의 부피가 증가할 수 있으며, 처리 후 고형화된 물질에 대한 처분 작업이 필요할 수도 있다.

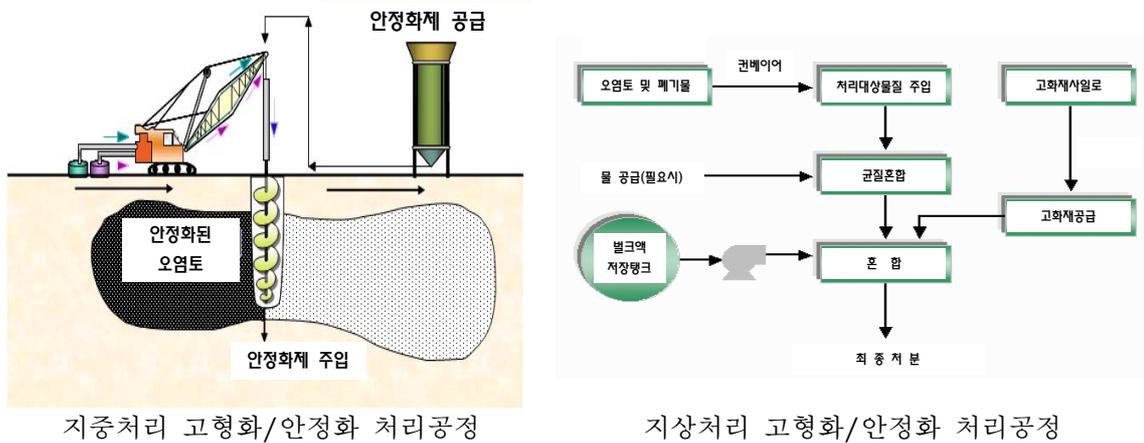
(2) 공정원리

고형화란 액상이나 슬러지와 같은 오염물질에 접합제를 첨가하여 고상의 형태로 만드는 것을 말하며 안정화란 오염물질을 불용해성으로 변화시키는 것을 의미한다.

- 무기접합제 : 시멘트, 석회, 비산재(Kiln dust, fly ash), 규산, 점토, 지올라이트

- 유기접합제 : 아스팔트, 폴리에틸렌, 레자, 에폭시, 우레아 폼알데하이드, 폴리에스테르

무기성 접합제는 비용이 저렴하고 장기적인 안정성이 있으며, 구입이 용이하고 독성이 없기 때문에 다양하게 적용되고 있다. 유기성 접합제는 용해도가 높은 오염물질이나 유기성 오염물질을 화학적으로 접합시켜 안정화시키는 능력이 무기성 접합제보다 크지만 가격이 비싸고 고도의 기술을 요하기 때문에 핵폐기물이나 독성이 강한 오염물질 등의 처리에 국한되어 사용되고 있다. 고형화/안정화법의 처리공정도는 [그림 3-9]와 같다.



[그림 3-9] 고형화/안정화법의 처리공정도

① 시멘트를 기초로 한 고형화/안정화

시멘트를 기초로 한 고형화/안정화법에는 일반적으로 포틀랜드 시멘트를 사용한다. 처리시험을 통하여 혼합비율을 산정한 후 포틀랜드 시멘트와 오염토양을 물과 함께 혼합하면 일반적으로 수산화철이 형성되는데, 이 수산화물은 최초의 형태보다 용해도가 낮아지게 된다. 고형화/안정화법은 금속에 의하여 오염된 토양의 처리에 폭넓게 이용할 수 있으며 Cd^{2+} , $Cr(IV)$, Pb^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , PCBs, 폐오일 슬러지 등의 오염물질의 경우 포틀랜드 시멘트를 이용하여 안정화 할 수 있다.

② 포졸라닉 고형화/안정화

포졸란(pozzolan)은 그 물질 자체로서는 시멘트가 아니며, 보통의 온도에서 석

회(CaO)·물과 결합하였을 때 시멘트 화합물이 된다. 일반적인 포졸란은 화력발전소의 비산재, 석회/시멘트 로(kiln)내의 먼지 또는 고로슬래그로부터 얻어진다.

포졸란 반응은 포틀랜드 시멘트의 수화를 통하여 생산되는 물질과 비슷한 화합물을 생성하지만 수화반응 속도가 포틀랜드 시멘트 반응보다 느리다. 포졸라닉 고형화/안정화법은 폐오일 슬러지, 중금속을 함유한 도금슬러지, 폐산과 크레오소트 등의 오염물질을 안정화시키는데 사용된다.

③ 열가소성 고형화/안정화

열가소성 고형화/안정화법은 오염물질과 입자 사이의 공극을 아스팔트, 폴리 에틸렌과 같이 상온에서 소성을 나타내는 열가소성 물질로 채우는 미세캡슐화 작용의 형태로 이용된다. 미세캡슐화는 물리적 처리기술의 기본으로서 오염물질 부피 감소, 취급 용이, 오염물로부터의 자유수 제거, 투수성 감소, 구조의 강도 증가 등의 장점을 지니고 있다. 단점으로는 대기오염의 잠재성이 높고, 유기물이 다량 포함되어 있을 경우 공정이 방해받을 수 있으며, 또한 고가 장비가 요구되는 점 등을 들 수 있다.

(3) 처리물질 및 처리효율

고형화/안정화법은 무기물질 및 방사성물질의 처리에 탁월한 효과를 나타내며, 비할로젠 및 할로젠 SVOCs로 오염된 지역의 정화에도 대체적으로 적용이 가능하다. 그러나 휘발성 유기오염물질과 유류 및 화약류의 정화에는 효과적이지 못하다.

(4) 영향인자

고형화/안정화법을 적용하는데 있어서 고려해야 할 영향인자를 [표 3-9]에 나타내었다.

[표 3-9] 고형화/안정화법 영향인자

오염토양특성 (soil characteristics)	물질특성 (constituent characteristics)
<ul style="list-style-type: none"> • 토양의 입경(in-situ/ex-situ) • 수분함량(in-situ/ex-situ) • 토양구조(in-situ) • 고유투수계수(in-situ) • 수리전도도(in-situ) • 지하수위(in-situ) • 토양의 온도(in-situ) 	<ul style="list-style-type: none"> • 오염물질 종류 및 농도 • 오염물질 용해도 및 용출가능성 • 안정화된 매체의 강도 및 내구성

오염토양의 부피 또는 무게에 대한 총표면적의 비를 비표면적이라 하며, 동일한 부피나 무게일 때 비표면적은 입자가 작을수록 증가한다. 일반적으로 미립자 매체의 경우 비표면적이 증가할수록 오염물질의 용출능력이 증가하므로 고형화/안정화법을 적용하여 비표면적을 감소시키는 것이 효과적인 방법이 될 수 있다.

고형화/안정화법은 타기술에 비하여 적용이 간단한 기술로서 외부인자들에 의한 영향이 비교적 적다. 다만, 고형화/안정화법에서는 안정화된 매체의 강도와 내구성, 그리고 오염물질의 용출가능성이 가장 큰 영향인자이자 관심사이므로 이러한 인자들은 면밀히 검토되어야 한다.

10. 동전기법(Electrokinetic Separation)

(1) 기술개요

동전기 정화(electrokinetic remediation : ER)법은 투수계수가 낮은 포화토양에서 이온상태의 오염물(음이온, 양이온, 중금속 등)을 양극과 음극의 전기장에 의하여 이동속도를 촉진시켜 포화지역의 오염토양을 처리하는 방법이다. 동전기법은 지중처리(In-situ) 토양 정화 기술로서 오염지역에 전극을 연결하고 낮은 강도의 전류를 흐르게 함으로써 투수계수가 낮은 토양, 점토, 슬러지 그리고 해양준설토로부터 오염물질을 제거한다.

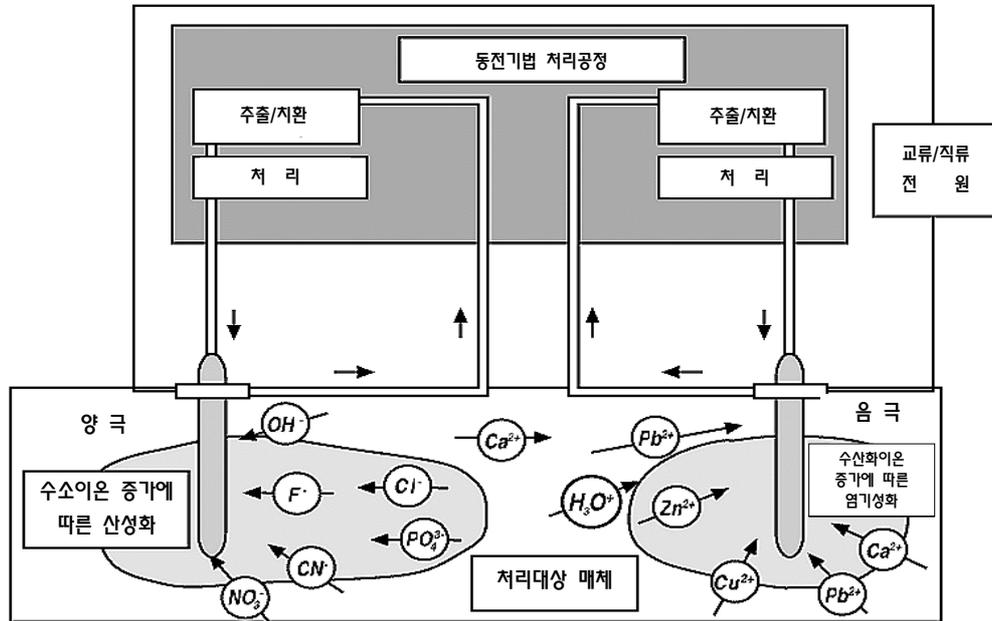
일반적으로 오염토양 처리기술 중 미세토양이 다량으로 혼합되어 투수계수가 낮은 토양의 경우 통기성 및 유체의 이동성이 낮아 토양오염 처리기술의 적용이 용이하지 않지만 동전기법은 투수계수가 낮은 토양의 경우에서도 높은 처리효율을 기대할 수 있다.

그러나 동전기법은 소요되는 전기량이 많아 운영비가 높게 소요되어 경제성이 낮고, 산화/환원 반응에 의해 불필요한 부산물이 생성될 수도 있으며, 토양내 수분함량이 10% 미만인 경우 오염물질 정화효율이 급격하게 감소하기 때문에 다시 수분을 공급해 주어야 하는 단점을 가지고 있다.

(2) 공정원리

동전기법은 오염지역의 토양에 양극과 음극의 세라믹 전극들을 설치하고 낮은 강도의 전류를 흐르게 함으로써 양이온은 음극방향으로 음이온은 양극방향으로의 이동을 촉진시켜 제거하는 방법이다. 일반적으로 중금속 이온, 암모니아 이온 그리고 양으로 대전된 유기물질은 음극을 향하여 움직이고 음이온인 염소이온, 시안, 불소이온, 질산, 그리고 음으로 대전된 유기물질은 양극을 향해 움직인다.

전류는 양극에서 산성극, 음극에서 염기성극을 생성하며, 이러한 산성 조건의 생성은 중금속의 이동성을 증가시키고 음극으로부터 오염물질 수집 장치로 중금속이 이동하는데 도움이 된다. [그림 3-10]은 대표적인 지중 동전기법 처리공정도이다.



[그림 3-10] 동전기법의 처리공정도

(3) 처리물질 및 처리효율

동전기법은 점토질 지반 간극수의 중금속 이온이나 용존하고 있는 유기물질을 효과적으로 제거시킬 수 있으며, BTEX, TCE, 페놀 등의 오염물질 정화에도 유용한 것으로 보고되고 있다.

(4) 영향인자

동전기법을 적용하는데 있어서 고려해야할 영향인자를 [표 3-10]에 나타내었다.

[표 3-10] 동전기법 영향인자

오염토양특성 (soil characteristics)	오염물질특성 (constituent characteristics)
<ul style="list-style-type: none"> • 토성(입도) 및 구조 • 공극수의 전기전도도 (pore water electrical conductivity) • 수분함량 • 양이온 교환능력 • 염도(salinity) • 유기물 함량 • pH 	<ul style="list-style-type: none"> • 오염물질의 종류 및 농도 • 전하(electrical charge)

동전기법의 적용 시 오염물질의 이동속도에 영향을 미치는 인자로는 토양입자 크기(grain size), 이온의 이동성(ionic mobility), 오염물질의 농도(contaminant concentration), 총 이온 농도(total ionic concentration) 및 토양 공극수의 전류밀도(soil pore water current density)라 할 수 있다.

전류밀도란 도체의 단위면적당 흐르는 전류의 양을 말한다. 특히, 동전기법의 처리효율은 투수성과 같은 유체의 흐름에 영향을 받기 보다는 공극수의 전기전도도(electrical conductivity)와 오염물질의 이동경로에 따라 달라지며, 위 두 가지 인자는 모두 토양의 수분함량에 따라 변화된다.

오염물질의 이동방향 및 이동량은 오염물질의 농도(음이온/양이온), 토양의 구조 및 토성, 계면화학(interfacial chemistry) 및 공극수의 전류밀도에 따라 달라진다. 동전기법은 불포화층 및 포화층에서 모두 적용이 가능하지만 전기이동이 일어날 수 있는 최소 수분함량이 필요하다.

일반적으로 토양의 수분함량이 10% 미만인 경우 오염물질 제거효율이 급격하게 감소하는 경향을 나타내며, 토양의 수분함량이 14~18%인 경우 효율이 가장 높게 나타난다.

또한 동전기법에 의한 오염물질 추출효율은 오염물질의 종류, 용해도, 전하, 다른 물질과의 농도차이, 토양유기물질로의 친화성에 따라 달라진다. 본 기술은 수리전도도가 매우 낮은 점토질 토양의 정화에도 적용이 가능하고 특히 양이온 교환능력(CEC)이나 염도가 낮은 지역에서 효과가 높다.

11. 소각법(Incineration)

(1) 기술개요

이 공정은 적당량의 산소를 공급하여 유기물질을 연소시켜 분해하는 열적 파괴공정이다. 오염토양의 유기물질을 871~1,204℃의 고온으로 토양내의 유기오염물질을 소각하여 이산화탄소, 수증기, 황화수소, 그리고 할로젠화 수소로 분해한다. 독성 유기오염물질은 고온 산화로 분해할 수 있지만 불완전 연소가 될 경우 중금속을 함유한 독성의 소각재가 생성될 수 있다.

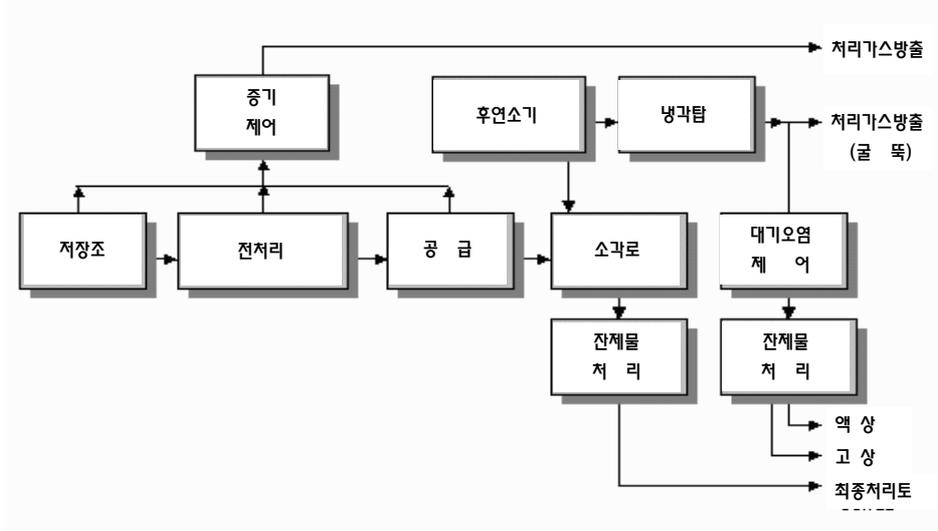
일반적인 소각로의 오염물질 제거효율은 99.99% 이상이고, PCB나 다이옥신(dioxins)에 대해서는 99% 정도의 효율을 나타낸다. 보통 소각법은 오염토양 처리 방법이라기 보다는 폐기물 처리에 주로 활용되고 있는 기술로서 다양한 오염물질을 매우 낮은 수준까지 효과적으로 정화할 수 있는 기술 중의 하나이다. 그러나 처리비용이 타기술에 비하여 매우 높고 중금속으로 오염된 토양을 소각하는 경우 중금속을 포함한 소각재가 발생되므로 소각 후 다시 처분해야 하는 단점을 가지고 있다.

또한 납, 카드뮴, 수은, 비소 등의 휘발성 중금속은 연소 시 유해성 가스를 발생시키며, 이외에 분진, 에어로졸, 염산, 화산화물, 기타 가스 등을 발생시키므로 이를 처리하기 배기가스처리장치를 설치하여야 한다.

소각법은 토양중의 오염물질 뿐 만 아니라 토양 미생물 및 유기물질까지 모두 분해시키기 때문에 향후 소각된 토양은 토양으로서의 기능을 상실하게 되므로 친환경적인 기술이라 할 수 없다.

(2) 공정원리

소각법은 염소계탄화수소, PCBs, 다이옥신으로 오염된 토양을 정화하는데 주로 이용되는 지상처리(Ex-situ)기술이다. 소각로를 이용하여 오염토양을 정화하는 경우 대기로 방출되는 유해성 가스를 고려해야 한다. 소각법의 전형적인 처리공정도는 아래 [그림 3-11]과 같으며, 상업용 공정은 일반적으로 후 연소버너와 배기가스처리장치가 장착된 대용량의 회전식 소각로로 이루어져 있다.



[그림 3-11] 소각법의 처리공정도

(3) 처리물질 및 처리효율

소각법은 [표 3-11]의 무기물질 및 방사성 물질을 제외한 대부분의 유기오염물질 처리에 탁월한 효과를 나타낸다.

(4) 영향인자

소각법은 적용되는 온도 범위가 다를 뿐 열을 이용하여 오염토양을 처리하는 열적 처리법이라는 점에서 열탈착법과 비슷한 공정이라 할 수 있다. 따라서 본 기술을 적용하는데 있어서 고려해야할 영향인자 또한 열탈착법 영향인자와 같다[표 3-11].

[표 3-11] 소각법의 영향인자

오염토양특성 (soil characteristics)	오염물질특성 (constituent characteristics)
<ul style="list-style-type: none"> 토양의 가소성(soil plasticity) 입도분포 수분함량 열용량(heat capacity) 휴밀물질 농도 중금속 농도 겉보기 밀도(bulk density) 	<ul style="list-style-type: none"> 오염물질의 농도 끓는점 증기압 분배계수(Kow) 용해도 열적 안정성(thermal stability) 다이옥신 형성(dioxin formation)

12. 유리화법(Vitrification)

(1) 기술개요

유리화 공정은 굴착한 오염토양을 전기적으로 용융시킴으로써 용출특성이 매우 적은 결정구조로 만드는 기법으로써 이 기술은 오염물질의 농도를 감소시키기 보다는 오염물질을 둘러싸 고립화시키는 지중처리(In-situ) 기술이다.

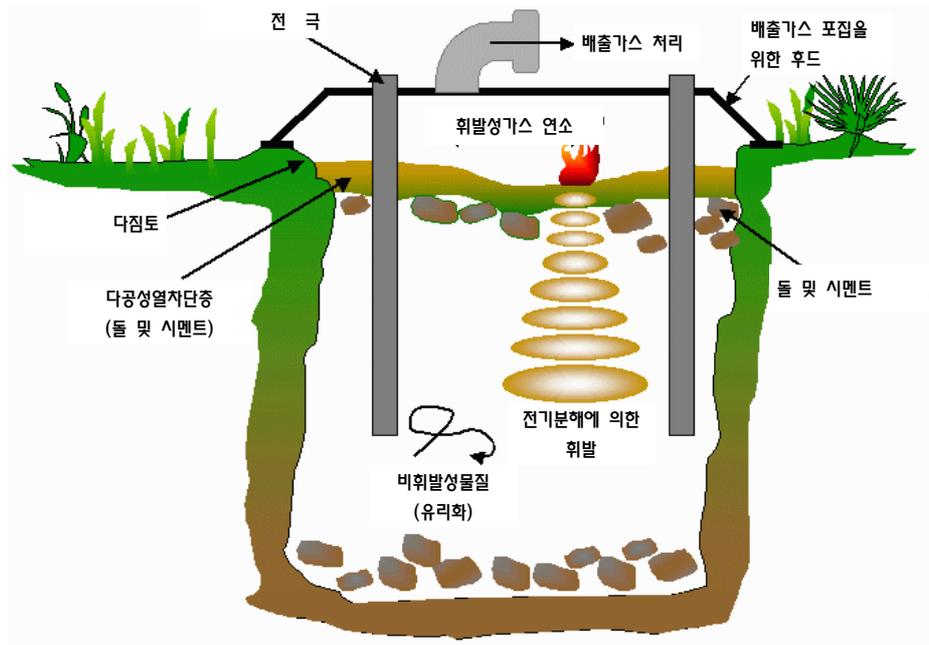
유리화법은 전극을 지중에 연결하여 전류를 흐르게 함으로써 열을 발생시켜 오염토양을 결정구조로 만드는 공정이기 때문에 열을 이용한다는 면에서 열적처리방법에 속하기도 하지만 결정구조 안에 오염물질을 포획하여 이동성을 감소시킨다는 점에서 일종의 고형화/안정화법이라 할 수 있다.

따라서 본 기술은 공정 운영 중 발생하는 열을 이용하여 오염토양에 존재하는 유기오염물질을 정화할 수 있을 뿐만 아니라 고형화 원리를 이용하여 중금속 등의 무기물질을 처리할 수도 있다.

유리화법은 중금속을 비롯한 다양한 오염물질을 처리할 수 있다는 점에서 활용도가 높은 기술이지만 소요되는 에너지 비용이 높고 유리화 공정 중 발생하는 방출 가스를 처리해야 하며, 유리화 된 슬래그를 다시 처분해야 하는 단점을 가지고 있다.

(2) 공정원리

유리화법은 전극을 지중에 연결하여 전류를 흐르게 함으로써 열을 발생시켜 오염토양을 결정구조로 만드는 공정이다. 본 공정은 토양 내에 존재하는 오염물질의 이동성을 감소시키는 데 효과적인 기술로서 유리화된 토양은 고밀도이며 용해성이 매우 낮다. 유리화법의 전형적인 처리공정도는 [그림 3-12]와 같다.



[그림 3-12] 유리화법의 처리공정도

(3) 처리물질 및 처리효율

유리화법은 무기물질 및 방사성물질의 처리에 탁월한 효과를 나타내며, 비할로젠 및 할로젠 SVOCs로 오염된 지역의 정화에도 대체적으로 적용이 가능하다. 그러나 휘발성 유기오염물질과 유류 및 화약류의 정화에는 효과적인 못하다.

(4) 영향인자

유리화법은 일종의 고정화 방법으로서 지중에 전류를 흘려 열을 발생시킴으로써 오염토양을 결정구조로 만든다. 비록 오염물질을 제거하는 것이 아니라 고정화시킨다는 점에서 다른 열적처리방법과는 다르지만 열을 이용한다는 점에서는 열탈착법, 소각법, 열분해법 등과 원리가 비슷하다.

따라서 유리화법을 적용하는데 있어서 고려해야할 영향인자 또한 [표 3-11]의 열탈착법 및 소각법의 영향인자와 비슷하다. 다만, 유리화법은 다른 열적처리방법과는 달리 오염물질을 포획하는 기술이므로 향후 발생할 수 있는 오염물질의 침출 가능성에 대한 고려 및 미세구조 분석 등이 필수적이다.

13. 열분해법(Pyrolysis)

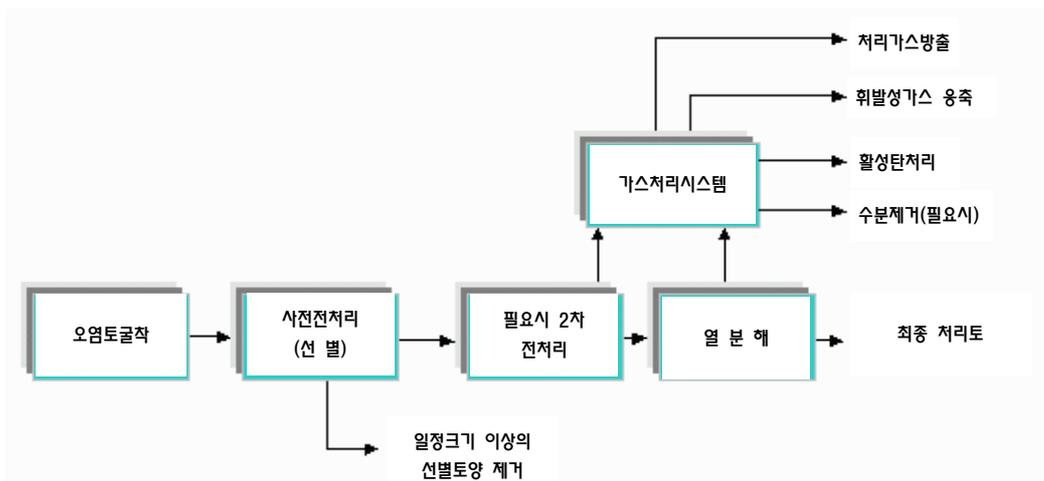
(1) 기술개요

열분해는 산소가 없는 혐기성 상태에서 열을 가해 유기물질을 분해시키는 화학적 분해방법이다. 유기물질은 가스상 물질과 고정탄소 및 재(ash)로 전환되며, 특히 유해성 유기물질을 이산화탄소 및 수소, 메탄, 탄화수소와 같은 연소 가능한 가스상태로 변환시킨다. 휘발성물질이나 준휘발성물질이 포함되어 있을 경우 열탈착이 일어나기도 하며 방출가스는 2차 연소실에서 일부는 연소되고, 일부는 농축된다.

열분해법은 열탈착법 및 소각법과 같은 열적처리기술이기 때문에 이러한 기술들과 비슷한 장점 및 제한요인을 가지고 있다.

(2) 공정원리

열분해는 오염물질을 단기간에 처리할 수 있는 공정이다. 열분해의 개념은 널리 알려져 있지만 처리 현장에 따라 다양한 결과를 나타내며, 전형적인 처리공정도는 [그림 3-13]과 같다.



[그림 3-13] 열분해법의 처리공정도

(3) 처리물질 및 처리효율

열분해법은 비할로젠 및 할로젠 SVOCs의 처리에 탁월한 효과를 나타내며, 비할로젠 및 할로젠 VOCs, 유류로 오염된 지역의 정화에도 대체적으로 적용이 가능하다. 그러나 무기물질, 방사성물질 및 화약류의 정화에는 효과적인 못하다. 본 공정은 정제과정에서 발생하는 폐기물, 콜타르(coal-tar) 오염물질, 탄화수소 오염토양에 적용이 가능하다.

(4) 영향인자

열분해법은 적용되는 온도 범위가 다를 뿐 열을 이용하여 오염토양을 처리하는 열적처리법이라는 점에서 열탈착법과 비슷한 공정이라 할 수 있다. 따라서 본 기술을 적용하는데 있어서 고려해야할 영향인자 또한 [표 3-11]의 소각법 및 열탈착법과 영향인자가 유사하다.

본 오염토양 정화방법 가이드라인에 제시된 정화방법별 가이드라인은 법적 효력을 가지는 것은 아니며 오염토양 정화관련 종사자들에게 도움을 주기 위한 업무 지침서입니다.

편저

환경관리공단	이종득	박정구
	서창일	최석준
	정현석	인병훈
	박정억	김락현
	고병익	이창환
	윤선정	여영도
CH2M HILL	주완호	윤여민
(주)이엔쓰리	박인선	손정은

자문위원

국립환경과학원 토양지하수연구과 과장	김태승
세종대학교 지구환경과학과 교수	정명채
(사)토양환경보전협회 회장	곽무영
(사)한국토양정화업협동조합 이사장	박재수
(주)에코솔루션 토양사업본부 본부장	전기식
(주)에코솔루션 기업부설연구소 연구소장	유도윤
(주)동명엔터프라이즈 전략사업본부 차장	최민주

오염토양 정화방법 가이드라인

2007년 3월 21일 인쇄

2007년 3월 23일 발행

발행인 : 환경부 토양지하수과

인쇄처 : 신성인쇄상사

<비매품>