

유류로 오염된 토양의 생물학적 처리기법에 관한 연구 A Study on the Biological Remediation Technology for Oil Contaminated Sites

조 재 립
경희대학교 산업공학과
Jai-Rip Cho

Dept. of Industrial Engineering, Kyung Hee University

Abstract

Contamination of industrial sites has happened by a variety compounds. Petroleum hydrocarbons, which are readily biodegradable, are reported principle contaminants in most industrial sites. Therefore, the use of biological processes will be a promising technology for remediation of industrial sites.

This paper addresses the possible use of biological processes in remediation of contaminated industrial sites and discusses the background and main streams of the process. The paper also characterizes representative biological systems developed for application.

1. 서론

오염된 토양을 생물학적으로 정화하는 방법은 하천이나 토양 등의 자연 상태에서 진행되는 생분해 과정을 이용하는 것으로 산소를 별도로 공급하거나 결핍 영양분의 제공이나 오염물질의 분해에 적절한 미생물을 공급함으로써 인위적으로 처리속도를 증진시키는 방법이 그 주종을 이룬다. 거의 모든 물질은 1) 물에 용해됨으로써 생물체에 의한 흡수가 가능하고, 2) 생물체에 피독작용을 하지 않으며, 3) 적절한 농도 범위로 존재한다면 원칙적으로 생물학적인 방법으로 분해될 수 있다. 생물체로는 갈대와 같이 뿌리를 땅 속 깊이(약 2m) 내리는 고등생물인 식물이 이용되기도 하며 미생물이 이용되기도 한다. 그러나 식물들은 오랜 진화과정의 산물이므로 적절한 성장조건이 주어지는 지표의 상부에 활동범위가 국한되어 있으며 이에 따라 사용될 수 있는 공정도 지극히 제한되어 있다.

한편 환경에 대한 적응성이 뛰어난 미생물들은 토양 내에서 토양의 형태를 변화시키지 않으면서 유해물질을 분해하는 장점도 있으나 적절한 조건에서는 증식속도와 이에 따른 처리속도가 식물에 비

하여 월등하게 빠르기 때문에 특히 유류오염 토양의 정화에 여러 공정형태로 이용되고 있다. 오염된 산업기지는 여러 가지 유형이 있을 거시나 그 중에서도 유류에 의한 오염이 가장 빈도가 높은 것으로 나타나고 있다. 따라서 유류오염 토양의 생물학적 처리 공정은 앞으로 산업기지의 정화에 많은 역할을 할 것으로 기대되고 있다.

본 연구에서는 이러한 관점에서 토양의 생물학적 처리와 관련된 몇 가지 생물학적 배경과 처리공정을 수행할 때까지의 주요과정 및 지금까지 개발되어 온 공정들의 특징에 대하여 논하고자 한다.

2. 공정의 해석

생물학적인 토양정화공정을 일반화하면 다음과 같다. 오염물질에 미생물과 전자공여체를 투과시키면 바이오매스와 반응생성물이 산출하게 된다. 여기서 미생물은 오염물질의 종류에 따라 호기성, 혐기성이 사용될 수 있으며, 전자공여체로는 산소, 질산염, 과산화수소, 오존 등이 사용된다. 반응생성물은 전자공여체의 종류와 전자수용체인 오염물질의 종류에 따라 결정된다.

토양에 함유된 오염물질을 생물학적으로 제거하는 방법은 기존의 폐수처리공정과 원리상으로는 동일하다고 할 수 있다. 그러나 폐수가 물로 이루어진 균일상인 반면에 토양오염은 유해물질과 물, 공기 토양입자로 이루어진 비 균일계이므로 나타나는 물질전달양상과 주변조건 등 적정 공정조건 등을 유지하기 위한 방법에서 큰 차이가 발생한다.

2.1 생분해가능물질

물질의 생분해성은 그 물질의 거시적 구조와 치환기, 기능그룹에 의하여 결정된다. 그러나 생분해 여부는 아주 다양하게 나타나서 물질구조 내에 약간의 변화가 있더라도 생분해 가능물질이 불가능 물질로 되는 경우도 있다. 분해정도, 분해속도와 관련된 일반적인 경향은 다음과 같이 요약할 수 있다. 1) 분자내 가지 : tertiary 탄소원자는 난분해성으로 한다. 2) 탄소고리의 길이 : 쇠상 탄화수소의 경우 C=12 이하에서는 탄소수가 감소하면서 분해가 어려워진다. 3) 고산화물질인 염소원자로 다 치환된 탄

화수소는 호기성 조건에서 분해가 어려우나 혐기성 조건에서는 환원될 수 있다. 4) 쇠상 포화탄화수소는 불포화 탄화수소보다 쉽게 분해된다. 5) 치환물질 : (1) 알콜, 알데히드, 산, 에스테르, 아미드, 아미노산 등은 그와 상응하는 Alkane, Olefin, Ketone, Dicarboxylic acid, Nitrile, Amine, Chloroalkane 보다 쉽게 분해된다. (2) 방향족 물질이 치환기로서 -OH, -COOH, -NH₂, -OCH₃ 를 함유하고 있는 것은 쉽게 분해되며 -F, -Cl, -NO₂, -CF₃, SO₃H 기를 함유하고 있는 것은 난분해성이며 이 때 난분해성은 치환기의 숫자가 많을수록 증가한다. (3) 벤젠의 수소 2개가 -F, -Cl, -NO₂, -CF₃, SO₃H, -CR₃ 기로 치환하였을 경우 ortho 형태는 난분해성인 반면에 meta, para 형태는 분해가 잘 된다. (4) 할로겐화 페놀의 경우 -OH 기에 대하여 meta 형태 배열시 분해가 어려우나 -NO₂ 기로 치환되었을 경우는 ortho 형태의 분해가 가장 어렵다. (5) PAH의 경우 벤젠고리 숫자가 많아질수록 분해가 어려우며 3개 이상의 고리로 형성된 물질은 보통 환경조건에서는 거의 분해되지 않는다. 따라서 유류물질을 중심으로 주요 물질에 대한 생분해성을 정리해 보면 <표 1>과 같다.

<표 1> 유류물질의 생분해성

생분해 가능	부분적 분해가능	분해(거의)않됨
광물류	long Chain Alkane	
방향족 화합물	cross linked Alkane	
페놀	Alkene	
휘발성 염화유기물	Cycloalkane	중금속
PAH	고농축 PAH	폴리머
클로르벤젠	PCB	방사성동위원소
클로르페놀	PCDF(소수)	2,3,7,8 PCDD/PCDF
살충제 일부	PCDD(소수)	
시아나화합물	복합시아나화합물	
니트로방향족 화합물	polynitro aromatic comp.	

다음으로 이러한 유류물질을 중심으로 한 주요 물질의 종류와 유입농도에 따른 제거율을 정리해 보면 <표 2>와 같이 나타낼 수 있다.

<표 2> 물질의 종류와 초기농도에 따른 생물학적 처리공정의 제거율

물질의 종류	제거율(%)	최대 초기농도(g/kg)
aliphatic Hydrocarbhone	95	50
Cycloalkane	60 - 99	1
Isoalkane	60 - 99	20 - 40
디젤, 연료유, 광물유	90 - 99	70
BTX	90 - 99	70
PAH	80 - 95	1
Phenol 화합물	80 - 95	5
시아나 화합물	90	6
휘발성 염화탄화수소	70 - 99	200mg/l

2.2 미생물의 분석

오염물질 중 탄화수소를 분해하는 미생물들은 조류, 박테리아, 곰팡이류 등 여러 종류가 있으나 일부에서는 이들 미생물 중 특별한 종류를 배양하여 정화에 사용하기도 한다. 그러나 대부분의 경우 현장조건에 적용이 되어 있는 현장서식 미생물을 더욱더 많이 사용한다. 토양중 탄화수소 분해 미생물들을 분류해 보면 <표 3>과 같다.

<표 3> 토양 중 탄화수소 분해 미생물

Algae	Prototheca
	<Bacterium> Brevibacterium, Caulobacter, Chromobacterium, Clostridium, Corynebacterium, Cytophaga, Desulfovibrio, Erwinia, Flavobacterium, Hypomicrobium, Leptothrix, Methanobacterium, Methanomonas, Methylococcus, Micrococcus, Microcystis, Micromonospora, Mycobacterium, Nocardia, Proteus <Pseudobacterium> Pseudomonas, Sarcina, Serratia, Spaerotilus, Spirillum, Streptomyces, Thiobacillus, Vibrio, Xanthomonas
효모 및 곰팡이	Absidia, Acremonium, Aspegillus, Beauvaria, Botrytis, Cancida, Cephalosporium, Chaetomium, Chloridium, Chrysosporium, Cladiosporium, Claviceps, Cochliobolus, Collectrichum, Cryococcus, Cunninghamella, Cyllindrocarpon, Debaryomyces, Demaltium, Endomyces, Epicoccum, Fusarium, Geotrichum, Gliocladium, Graphium, Hansenula, Helicostylum, Helminthosporium, Humicola, Monillia

2.3 생분해 공정의 주변조건

1) 전자공여체 분석

생물반응에서 전자공여체로 작용할 수 있는 것은 산소 외에도 여러 가지가 있을 수 있다. 일반적으로 지하수에서 발생할 수 있는 몇 가지의 전자공여체에 의한 산화환원반응을 정리해 보면 <표 4>와 같다.

<표 4> 생물반응에서의 산화환원반응

1	호기성 반응	$4CH_2 + 6O_2 \rightarrow 4CO_2 + 4H_2O$
2	호기성 반응	$4CH + 5O_2 \rightarrow 4CO_2 + 2H_2O$
3	탈 질 반응	$5CH + 4HNO_3 \rightarrow 4N_2 + 5CD_2 + 2H_2O$
4	황 환원반응	$8CH + 5H_2SO_4 \rightarrow 4H_2S + 8CO_2 + 4H_2O$
5	철 환원반응	$CH + 5Fe + 3 + 5OH \rightarrow 5Fe^{+2} + CO_2 + 3H_2O$
6	메탄화 반응	$2CH + 1.5H_2O \rightarrow 0.75CH_4 + 1.25CO_2$

이 반응식에서 CH₂는 일반적인 포화탄화수소를 CH는 방향족탄화수소를 상징적으로 나타낸다. 일반적으로 오염부지의 지하수에는 용존산소가 약 3ppm, 질산염이 총 질소농도로 약 10ppm, 황산염이 약 20ppm, 철염이 약 40ppm 그리고 메탄이 양 24ppm(찬물에서 메탄의 용해도)정도 용해되어 있는 것으로 간주하고 있다. 결국 <표 4>의 반응에서 나타난 바와 같이 전자공여체 중 산소만이 포화탄화

수소와 방향족화합물의 분해에 사용된다. 방향족탄화수소의 생분해 강도는 메탄환원 → 탈질 → 황환원 → 철 환원반응 순으로 나타나며 메탄환원의 경우 산소에 의한 산화보다 강한 것으로 나타나고 있다. 이를 요약하면 <표 5>와 같다.

<표 5> 전자공여체별 지하수에서의 탄화수소 분해 정도

반응식 번호	A 전자공여체	B 탄화수소소모량	소모량비 =B/A
1	산소 : 3 ppm	0.9 ppm	0.3
2	산소 : 3 ppm	1.0 ppm	0.33
3	질산 : 17.8 ppm	5.2 ppm	0.29
4	황산 : 20 ppm	4.2 ppm	0.21
5	철 : 40 ppm	1.8 ppm	0.05
6	메탄 : 24 ppm	32.5 ppm	1.35

(1) 산소, NO3, H2O2 공급

EX-Situ 공정에서 산소는 주로 자연적인 동기나 퇴비공정에서와 같이 정기적인 뒤집기 또는 강제 송풍에 의하여 이루어지며 이로써 나타나는 문제는 일차적으로 토양의 통기성에 있다. 그러나 In-Situ 공정에서는 적절한 미생물 성장조건을 조성하는 것이 가장 큰 문제가 되는 만큼 산소를 주입하는 것이 가장 급선무가 될 수 있다. 일반적으로 비 포화층에서 산소를 투입시키기 위해서는 별도의 기도를 설치하는 방법과 토양공기 흡입과 병행하여 투입시키는 방법이 있다. 이 때 토양의 성상과 관련하여 통기성이 나쁜 곳에는 산소투입의 한계가 있다. 그러나 포화층에서는 공기로 산소를 투입하는 방법은 훨씬 어려우며 특히 통기성이 나쁜 곳에서는 기포가 공기통로를 차단하여 공기의 흐름이 불균일하게 되고 공기의 흐름양상을 지상에서는 전혀 예측할 수 없게 될 수도 있다. 그러므로 공기를 직접 불어 넣어주는 방법 외에 산소를 물에 용해하여 투입하는 방법을 사용하기도 하나 아주 심하게 오염된 토양에서는 산소를 직접 공급하는 방법은 실용성이 거의 없어 과산화수소 또는 질산을 사용하기도 한다. 예를 들면 포화 용존산소농도는 약 10mg/l, (필요산소중량)/(탄화수소중량)의 비는 약 4배가 된다. 즉, 탄화수소 오염토양의 초기농도가 5000mg/l, 처리후 농도 목표치를 1000mg/l로 한다면 결국 4000mg/l를 줄이기 위해서 ① 1리터의 오염토양의 정화에 필요한 산소량은 16000mg, ② 1리터의 오염 토양에 필요한 물의 양은 1600리터, ③ 토양비중 = 2kg/l 일 경우 토양 1m³당 3200m³의 물이 필요하게 되어 매우 비경제적이다.

질산기의 투입은 혐기성분해가 가능함을 전제조건으로 한다. 그러나 많은 탄화수소의 경우 혐기성 분해가 잘 이루어지고 있지 않아 이에 따른 한계가 있다. 또한 분해될 탄화수소 1에 대하여 필요한 질산기의 중량은 5가 된다. 그러므로 예시한 경우와 같이 400mg/l의 정화를 위하여 토양 1m³당 800m³의 물이 필요하게 된다. 이외에 질산기의 투입은 질산기에 의한 지하수오염 외에 염을 형성하고 있는 급속인 칼륨이나 나트륨에 의한 오염이 발생할 수 있다.

(2) 과산화수소

과산화수소 1은 0.53이 물로 0.47이 산소로 생성된다. 그러므로 고 농도의 과산화수소는 Katalase 농도가 적은 미생물의 활동을 정지시키므로 초기에

는 낮은 농도인 약 50ppm으로 시작하여 점차 높여 갈 필요가 있다. 그러나 과산화수소농도가 너무 높으면 분해된 과산화수소에 의하여 발생하는 기포로 인하여 미세통로가 막힐 우려가 있다. 적절한 과산화수소 농도를 20ppm이라 가정하고 앞의 예를 적용해 보면 과산화수소의 소모량은 토양 1m³당 320m³로 비교적 경제성이 있다.

2) 영양성분

일반적으로 지하수는 영양성분 함량이 매우 적으나 인근에 서식하는 미생물이 활동하는 데에는 충분한 영양분을 함유하고 있다. 대체로 부족한 성분들은 C, N, P와 경우에 따라 S가 부족하기도 하다. 그러나 다른 영양 염들은 충분한 정도로 존재하고 있다. 따라서 지하층 깊이에 따른 미생물들의 수를 <표 6>에 정리하였다.

<표 6> 지하층 깊이에 따른 미생물의 수

깊이(cm)	미생물수/g 토양	%
3 - 8	1.2/10	79
20 - 25	2.5/10 ⁶	16
35 - 40	6.3/10 ⁵	
65 - 75	2.2/10 ⁴	4
135 - 145	4.0/10 ³	1
30	10 ⁶ - 10	
14,000	10 ⁵	

(1) C/N비

유류오염 토양에서와 같이 C성분이 대량 존재하는 상태에서 C/N비는 토양 정화에 큰 영향을 주게 된다. 보편적으로 C/N비는 20/1 -30/1 이 적절한 것으로 알려져 있으나 이를 일반화시키기는 어렵다. 예를 들어 오염물질이 난분해성이거나 아예 분해되지 않는 물질일 경우 N성분은 그 만큼 필요 없게 된다. 미생물활성도에 영향을 주는 모든 인자들은 NRV(Nirtogen Requirment Value)를 변화시킨다. 따라서 온도가 낮거나 산소가 부족하면 NRV도 줄게 된다.

(2) 인(P)성분

일반적으로 인(P)성분은 토양내에 함유되어 있어 질소와 달리 그리 큰 문제가 되지 않으나 토양성분과 함께 특히 토양 중 다량 함유되어 있는 철(3가철)과 함께 불용성 염을 형성한다. 그러므로 토양에 공기를 투입하는 공정(Bioventing 등)에서는 인 성분 결핍으로 인한 장애가 발생하지 않도록 주의해야 한다.

3) 습도

습도는 미생물의 활동에 중요한 역할을 한다. 토양에 함유되어 있는 수분은 영양물질을 주변으로부터 미생물로 운반하여 주며 미생물에 의하여 생성된 폐기물을 주변으로 운반처리 하는 역할을 수행하며 토양 내 수분은 토양의 통기성에도 결정적인 역할을 한다. 그 외에도 토양수분은 용해되는 물질의 종류와 양, 삼투압, pH에 영향을 주어 결과적으로는 유류의 생분해속도에 영향을 준다. 일반적으로

미생물은 수분함량이 15%이하가 되면 활동을 멈춘다고 한다. 그러므로 퇴비화의 경우에는 수분함량이 약 50 - 60%가 적절한 것으로 알려져 있다. rmj나 토양정화의 경우에는 물이 토양내부로 흡수되지 못할 경우도 있어 절대적 수분함량 대신 보수율을 사용하기도 한다. 토양의 보수율이란 토양이 포화된 상태에 함유하고 있던 물의 양에 대하여 자연적으로 물이 빠져나간 후 도달한 상태의 물의 양에 대한 비를 뜻한다. 생물학적 처리공정에 적합한 토양의 보수율은 50 - 80%가 적절한 것으로 조사되고 있다. 보수율에 따른 유해물질의 분해속도를 <표 7>에 정리하였다.

<표 7> 보수율에 따른 유해물질의 분해속도

보수율(%)	Anthracen	Phenanthren	Flouranthen
20 - 40	43일	61일	559일
60 - 80	37일	54일	231일

4) Redox 조건

미생물은 산화/환원 반응에 의하여 에너지를 얻으므로 미생물의 활성도는 토양내의 Redox-process에 큰 영향을 준다. Redox 포텐셜은 산화물질과 환원물질의 농도 또는 활성도 상태의 차이에 따라 발생하는 전하이동 상태를 나타내며 직접 측정 또는 Nernst식에 의하여 계산될 수 있다. E : Redox 전압, E₀ = 표준전압, R : 가스 상수, T : 온도, F : Faraday 상수, n : Redox과정에서 이동한 전자 수, Ar/Aa : 환원/산화된 물질의 활성도라 하면 이들의 관계는 다음 식 : $E = E_0 + (R \cdot T/n \cdot F) \cdot \ln Aa/Ar$ 과 같다. 그러므로 Redox 포텐셜은 물질의 산화/환원 정도와 함께 온도와 pH에 의하여 크게 영향을 받는다. 물질의 산화/환원 정도에는 토양으로 투입되는 산소의 농도도 큰 역할을 하므로 결과적으로 산소의 투입양상을 결정 짓는 토양의 성상과 토양내에 존재하는 미생물의 활성도도 큰 영향인자가 된다. 미생물 반응 시 토양내의 Redox 전압을 나타내면 <표 8>과 같다.

<표 8> 생물반응과 Redox 전압

미생물반응종류	Redox 전압
호기성반응	+810 mV
탈질반응	+750 mV
황환원반응	220 mV
메탄화반응	-240 mV

5) pH

대부분의 토양미생물들은 pH 변화에 대하여 크게 민감하지 않다. 그러므로 토양미생물이 활발히 활동하는 pH값의 범위는 5.5 - 9.0 정도로 넓게 분포되어 있다. 그러나 이 pH범위에서 직접적인 원인보다 간접적인 영향으로 인하여 미생물의 활동에 저해가 올 수 있다. 예를 들면 pH값이 변함에 따라 영양성분들이 고정화되거나 유해성분이 용해되어 미생물 활동을 억제하는 요인이 될 수 있다. 그러므로 사용되는 미생물의 종류에 따라 적절한 pH 값이 선택되어야 한다. 일반적으로 pH가 5.0 정도에서는 곰팡이류의 번식이 왕성하여지며 pH가 8.0에서는 박테리아의 활동에 적합하다.

3. 사전조사

생물학적 처리를 위한 사전조사는 Ex-Situ 처리의 경우에는 토양의 성상 및 영양물질 함유량 및 추가배합에 따른 생분해속도 조사 정도인 반면, In-Situ 처리공정을 위해서는 오염부지특성 및 생분해성 등 처리속도에 대한 인자와 부지의 위치 등 사회적 인자가 고려되어야 한다.

3.1 오염부지 특성조사

오염부지의 토질 화학적 특성조사는 토양의 성상 및 pH 및 영양분(질소, 인), TOC 등을 조사하게 된다. 영양분 조절 및 토질과 반응생성물에 의한 복합작용으로 나타날 수 있는 주변조건의 변화를 예측(알카리 금속화합물 함유 토양은 pH 완충력 높음, 영양성분 침전 또한 풍화가 심한 토양은 pH 완충력 낮음)에 필요하다. 지하수의 성상은 영양성분 및 유기물 그리고 이온을 말한다. 미생물 활동에 필요한 전자공여체 및 영양성분 함유여부와 pH조를 할 수 있다. 토양 내 유체의 흐름성은 비포화층 및 포화층의 물, 공기의 흐름성을 내포한다. 오염물질 측정은 유류오염지역인 경우로 한정한다.

3.2 생분해가능성 조사

생분해가능성 조사는 실험실적 조사, 토양공기 성분조사, 지하수 성분조사 등으로 나누어진다. 토양 공기 성분조사는 생분해 진행시 수행하여 산소농도와 탄산가스농도를 조사하게 되며, 지하수 성분조사는 전자공여체 존재여부가 오염/비오염 토양의 생분해 진행여부의 지표가 된다. 따라서 비오염 지하수 특성과 생분해가 진행 중인 오염토양의 분석이 목적이 되고 있다.

3.3 사회적 인자

오염부지의 위치에 따른 위해성 및 주변 이해관계자(stakeholder)들의 민감성을 파악하고 조정하는 문제로 가장 힘들고 어려운 조사가 될 것이다.

4. 정화공정

Ex-Situ 처리방법은 오염토양을 파내어 오염부지 위에서 처리하거나 별도의 장소로 이송하여 처리하는 방법이다. 이에는 오염부지 위에서 처리하는 On-Site 방식과 별도의 부지로 이송 후 처리하는 Off-Site 방식이 있다. In-Situ 처리방법은 오염토양을 본 위치에 그대로 두고 처리하는 방법이다.

4.1 Ex-Situ 처리방법

1) Landfarming 법

이 공정은 원리상 퇴비단식 공정과 동일하나 그 수행방법에서는 아주 간단하다. 방법은 (1) 오염토양을 파낸다. (2) 필요에 따라 전처리(선별, 균일화 등)된 토양을 (3) 바닥이 차단된 부지에 20 - 30 cm 두께로 펼쳐 쌓아두고 (4) 정기적으로 가래질을 하여 공기를 공급하며 필요에 따라 미생물, 영양분, 수분을 공급한다. (5) 정화된 토양을 재사용한다. 이

공법은 주기적인 가래짐을 통하여 공기가 공급되거나 쌓아둔 토양의 두께가 작아서 대기 중의 공기공급이 원활히 됨으로써 미생물의 활동이 왕성하게 유지될 수 있다. 그러나 대기 중으로 휘발성물질이 방출되므로 2차 공해를 유발할 수 있으며 낮은 두께에 따른 열용량의 한계로 처리효과가 대기온도에 크게 종속된다. 비슷한 공법으로 미국에서 사용되고 있는 Land Treatment 공법은 약 30cm의 땅에 쓰레기와 비료를 섞은 후 토양을 혼합하여 줌으로써 쓰레기의 생분해를 가속화 시켜준다. 이러한 방법들은 유해물질이 지하수로 스며들어 오염문제를 이전시키지 않도록 각별한 주의 필요하다.

2) 퇴비단식 법

이 공정은 흐름 양상에서 퇴비화공정과 유사하다. 처리 대상 오염토양을 기계적으로 선별 및 필요한 경우 파쇄공정을 거치면서 자양성분을 첨가하고 오염토양을 퇴비단형태로 쌓은 후 주기적으로 뒤집기를 하거나 정체된 상태에서 공기와 수분을 공급하는 형식을 가지고 있다. 이 방법은 정체식 방법으로 그 공정은 다음과 같다. 전처리→단의형태→수분공급→산소공급→미생물공급으로 요약된다. 이 방법의 장점은 (1) 분해과정 제어가능 (2) 2차 오염발생 방지가능 (바닥차단 및 배기가스처리 가능) (3) 계절 변화 영향이 적음 (4) 부지 소요면적이 매우 작다. 단점은 (1) 기본비용이 많다 (2) 전처리가 필요하다 (3) 미세토양의 처리 불충분

3) 반응기식 공정

폐쇄된 용기에서 오염토양을 정화시키는 반응기식은 우선 미생물에 의한 분해공정을 쉽게 제어하기 위한 목적에서 개발되었다. 그 외에도 이 반응기식의 목표는 생물학적 처리방법의 사용범위를 넓히고 처리속도를 증진시킴과 아울러 부지소요 면적을 줄이기 위한 것이다. 한편 밀폐형 반응장치를 사용함으로써 모든 상태(기체, 액체, 고체)의 배출물에 대한 제어가 가능한 것도 반응기식 장치의 목적이다. 이 방법의 특징은 다음과 같다. (1) 유해물질의 균일화 (2) 생물학적 처리성의 제고(미세토양) (3) 유해물질 처리속도의 증진 (4) 생물공정의 주변조건 조절과 이와 연계하여 분해공정의 조절이 용이하다.

4.2 In-Situ 공정

이 방법의 공정은 토양을 파내지 않고 수행되기 때문에 처리비용이 저렴하고 Ex-Situ 공법으로는 처리하기 어려운 오염부지의 정화가 가능한 것이 가장 큰 장점으로 부각되고 있다. 이 공정은 투수성이 큰 토양과 생물학적으로 분해가 가능한 물질이 너무 높지 않은 농도로 분포되어 있을 때 적절한 처리방법으로 사용될 수 있다. 그러나 투수성이 나쁜 토양과 오염상태가 고르지 않고 점 오염형태로 분산되어 있으면 실효성이 없다.

일반적으로 이 공정에서 가장 주안점으로 두고 있는 것은 산소공급과 부분적으로는 영양물질의 공급이다. 그러므로 지금까지 개발된 방법들도 이 문제를 해결하기 위한 방법에 초점이 맞추어져 있으며 대표적인 방법으로는 Pumping 과 Treatment 방법과 연계하여 생물학적으로 처리하는 방법과 단독 또는 대개는 토양공기 흡입법(SVE : Soil Vapor

Extraction)과 연계하여 비포화층/포화층에 공기와 경우에 따라 영양물질을 넣어주는 방법(Bioventing, Bioslurping, Airsparging) 등이 있다.

1) Pumping 과 Treatment를 연계한 방법

이 공법은 Pumping과 Treatment 방법과 유사한 형태로 미생물과 자양분을 유입수와 혼합하여 토양 속으로 투입한 후 다시 흡입하여 처리수를 회수하는 방법이다. 이 공정에서의 정화속도는 일반적인 생물학적 처리공정에서와 같이 정화대상물질의 종류 및 농도와 지하에서 생물학적인 주변조건이 어떻게 형성되는가에 따라 좌우된다. 그러므로 정화속도를 증진시키기 위한 주요한 방법으로는 토양 중의 산소농도를 높이기 위하여 오존 또는 과산화수소를 주입하거나 통기성을 높이는 조작들이 있다. 또한 이 공정은 오염부지 위의 건축물을 그대로 둘 수 있고 또한 굴착할 필요가 없는 In Situ공정의 일반적인 장점을 가지고 있으나 자양분을 첨가하고 경우에 따라서 미생물을 첨가하여야 함으로 이로 인하여 발생할 수 있는 지하수의 오염에 감별이 유의하여야 한다.

2) 토양공기 흡입방법과 연계한 방법

(1) Bioventing

이 공정은 오염된 비포화층의 정화에 사용되며 오염부위에서의 생분해반응을 촉진시키기 위하여 땅 속의 오염부위에 강제로 투입시키는 방법을 사용한다. 공기를 사용하여 산소를 투입하는 방법의 장점은 물을 사용할 때 보다 확산속도가 커서 보다 쉽게 산소가 공급될 수 있다는 장점이 있으며 물을 사용할 때에 비하여 투입되어야 하는 양이 훨씬 적을 수 있다는 것이다. 대체적으로 1kg의 탄화수소를 정화시키는 데 소요되는 공기의 양은 약 13kg으로 추정되고 있으나 물을 사용할 경우 과산화수소 500ppm을 사용한다면 약 13,000kg의 물이 소요되는 것과 비교해보면 경비면에서 훨씬 유리할 수도 있다. 일반적으로 이 공정의 진행은 (1)오염토양의 공기분석 (2) 생분해성 조사 (3) 토양공기의 통기성 조사를 통한 영향반경 설정 등의 4단계로 이루어진다.

(2) Bioslurping

누출된 휘발유 등 경질의 기름이 지하수층 위에 고여 있을 때 효과적으로 제거하기 위한 공법으로 지하수층 표면에서 기름을 흡입 제거함으로써 처리해야 할 폐수의 양이 격감되며 부압상태로 운전되므로 비포화층에 존재하는 휘발성물질이 SVE에서와 같은 원리로 제거될 수 있다.

(3) Air Sparging

이 공법은 포화층의 오염정화를 위하여 지하수 하부에 공기를 불어 넣어줌으로써 휘발성 물질이 탈기되는 현상과 함께 미생물의 활성도가 증가하여 처리시간을 단축케 하고자 하는 방법이다. 포화층에 투입된 공기는 우선 그 곳에 용해되어 있는 휘발성 물질들을 탈기시켜 비포화층을 통한 후 밖으로 빠져나가게 된다.이 때 SAE 또는 Bioventing 등의 방법을 병행하면 탈기효과가 증진될 수 있다. 또한 투입된 공기는 포화층에 있는 물과 토양을 격렬하게 교반시켜 탈기속도를 증진시키며 물속에 용존산소 농도를 높여 생물학적 처리속도를 높이게 된다.

5. 성능평가

생물학적 처리공정은 타 공정에 비하여 장치가 단순하며 비용이 적게 드는 큰 장점이 있어 많은 공정이 소개되고 있다. 그러나 생물공정에서는 장치의 형상 및 배열 상으로 볼 때 공정의 제공자가 주장하는 성능의 평가 시 유의해야 할 요소가 있어 평가에 많은 어려움을 동반하게 된다. 이들 요소를 정리해 보면 다음과 같다. (1)단순히 물리적인 방법에 의하여 제거되었을 가능성 (2) 오염물질이 토양 matrix에 결합되어 시료에 포착되지 않았을 가능성 (3) 분해된 무질이 중간생성물로 변환됨으로써 유입 물질 추적시 포착되지 않았을 가능성. 이러한 문제점들은 공정의 성능평가의 관점에서 뿐만 아니라 주민들에 대한 공정의 수용도 면에서도 아주 중요한 결과를 가져올 수 있으므로 공정선택 시 유념해야 할 것이다.

6. 결론

생물학적 토양오염정화방법은 넓은 범위의 유해 물질을 처리하기 위한 효과적인 방법일 수 있다. 특히 석유로 오염된 토양은 농도가 아주 높지 않으면 효과적으로 사용될 수 있는 방법이다. 이러한 장점에 반하여 경우에 따라서는 장시간의 처리시간이 요구되어 많은 사용 부지를 필요로 하며 자칫 제2차 오염을 유발할 수도 있어 사전에 오염토양 및 부지특성에 대한 철저한 조사가 요구된다. 그러나 취급이 용이하고 타 공정보다 경비가 저렴한 큰 장점이 있으며 특히 대부분 여유부지가 많은 산업 기지에 적합하여 앞으로 오염산업기지 특히 생분해성이 우수한 유류에 의한 오염 부지를 정화함에 있어 생물학적 처리공정에 대한 관심은 더욱더 증대될 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Alexander, M., Scow, K. M.,(1989), Kinetics of biodegradation in soil, in Reactions and movement of organic chemicals in soils, Soil Science Society of America(SSSA) Special publication No. 22, Madison, Wisconsin, USA
- [2] Allison, F.E., Klein, C.J.(1982), Rates of immobilization and release of Nitrogen following additions of carbonaceous materials and Nitrogen to soils, Soil Science 93, pp. 383-386
- [3] Bonke, B., Poppinhaus, K.,(1991), Technologieregister zur Sanierung von Altlasten, Umweltbundesamt Berlin
- [4] Bouwer, H.(1984), Elements of soil science and ground water hydrology, in Ground water pollution microbiology, pp. 9-38
- [5] Kampfer, P., Dott, W.,(1988), Systematisierung der mikrobiologischen Untersuchung von Boden und Wasser, in Altlasten 2, Berlin EF-Verlag für Energie und Umwelttechnik, pp.649-674
- [6] Lyman, W., J. etc.(1990), Handbook of chemical properties estimation methods, ACS Washington
- [7] Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, (1994), DOD Environmental Technology Transfer Committee, EPA/542/B-94/013, Ntis PB95-104782, October
- [8] Schweibfurth, D. (1990), Beseitigung organischer

Abfalle im Bodenbereich, Eine allgemeine und eine spezielle mikrobiologische Betrachtung, Magazin Forschung(1), Uni., Saaland, Saarbrücken

[9] Sims J. L. (1986), Loading rates and frequencies for land treatment systems, in Land treatment : a hazardous waste management alternative Water Resources Symposium(13), Univ., Texas of Austin, Austin, pp. 151-70