

유류오염 토양/지하수 정화를 위해 개발된 DSB(Deep-Site Biopile) System 현장적용특성

한승호¹ · 공성호^{2*} · 강정우¹

¹(주)드림바이오스, ²한양대학교 화학공학과

Site Application Characteristics of Deep-Site Biopile System for Cleaning Oil-Contaminated Soil/Underground Water

Seung Ho Han¹ · Sung Ho Kong^{2*} · Jung Woo Kang¹

¹Dreambios Co. Ltd

²Department of Chemical Engineering, Hanyang University

ABSTRACT

The aim of this article is to assess the application characteristics of the site by remediating oil-contaminated area using DSB (Deep-site Biopile) system. In the contaminated area, the soil was composed of penetrable sand and the leaked oil was spread widely (total 7,201 cubic meters) through 2.5 meter deep underground water flow. DSB system was operated for 30 minutes intervals for 24 hours in a day (30 minutes operation and 30 minutes stop). To check contamination level change in the contaminated area after DSB system was operated, samples were taken. The result from the site shows that BTEX/TPH contamination level was dropped 50% after 30-day operation of DSB system, and that contamination level was dropped below contamination level check standard after 165 days and the remediation was completed. Unlike traditional biological remediation methods DSB system could efficiently process soil and water which were contaminated by high levels of oil compounds.

Key words : DSB (Deep-site Biopile) System, Oil contamination, TPH (Total Petroleum Hydrocarbon), BTEX (Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene), Soil remediation, Groundwater remediation

요 약 문

본 논문은 유류로 오염된 부지를 DSB(Deep-site Biopile) system을 이용하여 정화함으로써 적용 가능한 현장특성을 평가하기 위한 것이다. 오염부지는 유류가 유출되어 깊이 약 2.5 m 부근에 위치하는 지하수의 흐름에 따라 광범위하게 오염(총 7,201 m³)되어 있었으며, 투수성이 좋은 Sand층으로 구성되어 있다. 부지 내 설치된 배관은 각 지점마다 독립적으로 제어될 수 있도록 하였으며, DSB system의 가동은 24시간을 기준으로 30분 가동/30분 정지되도록 하였다. 오염부지 내 오염원이 저감되는 현황을 파악하기 위하여 DSB system 가동시간에 따른 시료채취 작업을 수행한 결과, DSB system 가동 후 약 30여일 만에 총석유계탄화수소 및 BTEX 오염원이 약 50% 이상 저감되었으며 약 165일이 경과한 후에는 토양오염 확인기준 이하로 저감되어 정화작업이 정상적으로 완료되었다. 이와 같이 본 DSB system은 기존에 적용되어 왔던 생물학적 공법들과는 달리 높은 농도의 유류화합물로 오염되어 있는 토양 및 지하수를 약 6개월의 단기간에 효과적으로 처리할 수 있었으며 정화 system을 지상이 아닌 지중에 설치함으로써 별도의 부지가 확보되지 않은 경우에도 적용할 수 있는 특성이 있음을 알 수 있었다.

주제어 : DSB(Deep-site Biopile) system, 유류오염, 총석유계탄화수소(TPH, Total Petroleum Hydrocarbon), BTEX (Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene), 토양정화, 지하수정화

*Corresponding author : shkong@hanyang.ac.kr

원고접수일 : 2004. 10. 19 게재승인일 : 2005. 3. 21

질의 및 토의 : 2005. 6. 30 까지

1. 서 론

우리나라에서 단기간에 이루어진 산업화와 자동차의 증가에 따라 유류사용량이 급격히 증가하여 선진국에서 주로 문제가 되고 있는 난분해성 유독물질들에 의한 오염보다는 상대적으로 유류오염이 토양 및 지하수의 가장 일반적인 오염원인으로 나타나고 있다. 국내에 산재한 주유소 저유소등의 석유류 저장시설 및 석유화학공장, 그리고 군사지역의 연료저장시설과 같이 토양환경보전법에서 토양 오염유발시설로 지정한 시설들의 설비 노후화 및 취급 부주의 등으로 유출된 유류 및 유기오염물로 인한 오염토양에 대한 적절한 처리가 필요하다.

유류성분 및 유해화학 석유물질 등에 오염된 토양을 처리하기 위한 방법으로 토양공극간의 압력차로 휘발을 자극하여 추출해 내는 토양증기추출방법(SVE, Soil Vapor Extraction)과 포화 대수층 내에 공기를 주입하여 오염물질을 휘발시킴으로써 제거하는 공기주입법(Air Sparging)이 사용되고 있으며, 공기 및 미생물과 영양염을 투입시켜 미생물의 활발한 분해반응을 통하여 처리하는 생물학적 통풍방법(BV, Bioventing)이 사용되고 있으나, 토양증기추출방법이나 공기주입법은 silt나 clay의 비율이 높은 미세토양이나 매우 건조한 토양에서는 오염물질의 흡착능력이 높아 제거효율이 떨어지며 생물학적 통풍방법은 지표아래 지하수가 분포되어 있는 경우나 통기성이 낮은 토양에서는 효율이 낮아지는 문제점이 있다. 또한, 유류 및 유기오염물들이 발생초기 단계에는 토양공극 사이에 잔류하나 오랜 기간에 걸쳐 중력에 의하여 하부로 이동하여 장기적으로 토양뿐만 아니라 지하수 오염에 이르게 된다. 이러한 오염물들이 암반층이나 지하수층에 의해 확산되어 지하수 상부에서 거동되는 형태가 아닌 지하수 및 토양간극수에 용해되어 수용액상태로 존재하거나 토양 내 고체상태로 흡착되는 오염물 지연현상이 나타나게 된다.

이와 같은 지하수 층의 오염원을 제거하기 위한 기존의 정화방법에는 한계가 있어 지하수를 대수층 밖으로 pumping하여 지상에서 처리하는 방법이 사용되고 있으나, 유동성 오일만을 선택적으로 회수하고 지하수 중에 용존되어 있는 오염원을 회수하기에는 한계점이 있었다. 이에 따라 대상 부지의 확보가 어려운 경우와 지하수 대수층 내에 용존되어 수용액상태로 존재하는 오염원을 직접 처리함과 동시에 토양에 흡착된 오염원을 제거하기 위한 지중처리방안이 필요하게 되었다.

토양 내 유류 및 유기오염물질들을 처리하기 위해 종래에는 공기를 주입하여 오염물질을 휘발시키거나 호기성

미생물의 분해반응을 통해 처리하는 방법들이 사용되고 있으며 일반적으로 대부분의 토양을 지상으로 높게 야적하여 토양층 내부로 산소를 공급시켜 줌으로써 미생물의 분해반응을 이용한 생물분해 방법을 사용하고 있다. 그러나 상기 방법은 처리대상 부지의 확보가 어렵거나 유류 및 유기오염물들이 토양 하부로 이동하여 토양뿐만 아니라 지하수까지 오염되었을 경우에 적용하는 한계점이 있어 토양과 지하수를 동시에 처리할 수 있는 방법의 필요성이 대두되었다.

2. DSB(Deep-Site Biopile) System의 개념

본 DSB System은 오염부지 내에 유류 및 유기오염물로 오염된 지중에 지하수가 존재하여 지하수에 용해되어 있는 오염물을 직접 처리함과 동시에 토양 내 흡착된 오염원을 제거하기 위해 부지 내 지중으로 직접 산소를 공급하여 지하수 중의 유기오염물을 미생물에 의해 생물학적으로 분해하는 담체형 생물학적 처리공법이다. 오염토를 굴착하여 원위치에 복토하기 전에 기존에 쓰이던 수직 유공관이 아닌 수평 유공관을 2단으로 설치하여 공기의 주입방법을 효과적으로 하는 동시에 유공관 설치작업 시 오염된 토양층의 굴착에 따른 뒤집기가 수행되어 오염원의 균질한 배분과 영양분이나 미생물의 균등한 혼합이 가능하게 되어 처리효율이 증가하게 된다. 지중에 설치된 수평배관 중 하단배관에서는 공기를 주입함으로써 지하수 내에 용존되어 있는 오염원과 토양 내 흡착되어 있는 고체상태의 오염물질을 기체상태로 휘발시키며 상단배관은 주입한 공기에 의해 휘발된 가스를 진공펌프를 이용하여 지상으로 추출하여 처리하는 기법으로 다량의 지하수와 함께 오염토양의 동시처리에 그 목적이 있다.

본 처리장치는 지중에 설치된 Enhanced BioPile의 개념으로 기존 지상야적처리방법(BioPile)을 지상부가 아닌 지중에 적용함으로써 공기의 Extraction/Injection작업을 상황에 따라 병행하여 수행할 수 있으며, 공기주입시 지하수 유체거동에 변화를 주어 산소가 효율적으로 전달되어 미생물의 활성을 촉진시킨다. 특히 적용부지의 토양공극이 클 경우, 공기주입시 지하수가 순환됨으로써 주입이 효과적이며 대기로 방출되는 휘발성 오염물에 의한 2차 오염이 유발되지 않도록 처리할 수 있는 특징을 갖고 있다.

오염토양 및 지하수의 동시 처리를 위해 가장 효율적이며 적극적인 방법으로서 현장의 오염토양을 굴착한 후 공기주입 및 가스추출을 위한 2단 배관의 정화처리 시스템을 설치하고 오염토양을 다시 복토하는 작업을 수행하도

록 한다. 우선 하단배관에서 Air Injection을 함으로써 지하수 내에 용존되어 있는 오염원과 토양 내 흡착되어 있는 휘발성 오염원을 Air Sparging시키며, 상단에서는 SVE기법을 병행함으로써 그 처리 효율을 극대화 시킨다.

본 기법은 전체부지를 대상으로 오염토를 우선적으로 Excavation하여 줌으로써 토양의 Air Permeability를 크게 향상시켜주며, 배관 Line이 기존 제시된 Vertical Type이 아닌 Horizontal Type을 채택함으로써 그 정화효율이 최대한으로 향상되고 지하수가 있는 하단부 유공배관에 공기를 가압하여 주입할 시에는 지하수의 수직적인 유체 거동에 변화를 주어 산소가 효율적으로 전달 되도록 하는 효과가 있다. 특히, 현장적용부지의 토양구성의 특성에 따라 토성이 Gravel임으로 Air Sparging 시에는 지하수가 Circulation됨으로 지하수 처리에 가장 효과적이며, 감압을 통한 Extraction을 함으로써 오염지하수에서 발생하는 오염된 Gas를 배출시켜 처리함과 동시에 토양 내 흡착되어 있는 오염원의 Gas Pressure를 낮춤으로 휘발성 오염원을 제거해 낼 수 있다. 또한 지표면 가까이 설치된 유공배관은 지하수 상부의 불포화대에 설치되며 하단부 배관에서 가압공기에 의해 지표면 방향으로 휘발되는 오염원을 흡입하여 지상으로 배출하는 기능을 갖고 있다.

3. DSB 정화공법의 현장 Test

3.1. 오염부지 현장개요

본 부지는 OO군에 위치하는 시멘트 공장 내 부지를 통과하는 송유관의 파열로 인한 유류가 유출되어 인근 공장부지 및 과수원, 농경지 일대의 토양 및 지하수가 오염된 부지이다. 오염원은 누출지점을 중심으로 인접한 철로 변을 경유하여 하천과 도로부지방향으로 지하수와 함께 지속적으로 거동되고 있는 것으로 평가되었다.

3.2. 오염 부지의 토양오염도 조사

본 부지 내 오염토양의 지질특성 및 오염원의 종류, 농도 오염분포도의 확산 형상 등의 오염현황을 파악하기 위하여 오염 부지를 4구역(A, B, C, D 구역)으로 나누어 토양오염도 조사를 수행하였다(Fig. 1).

토양오염도 조사를 위한 시료채취지점은 현장에서 오염이 확인되는 지점에 대해 5m×5m 정도의 구획을 설정하였으며 순차적으로 평가하면서 오염구배가 구분되도록 일정간격을 현장조건에 따라 선정하였다. 그리고 토양시료채취는 Geoprobe 540U(US, Geoprobe System Inc.)를 이용하여 직관식 방법으로 약 0.3~5.0 m 깊이까지 채취하

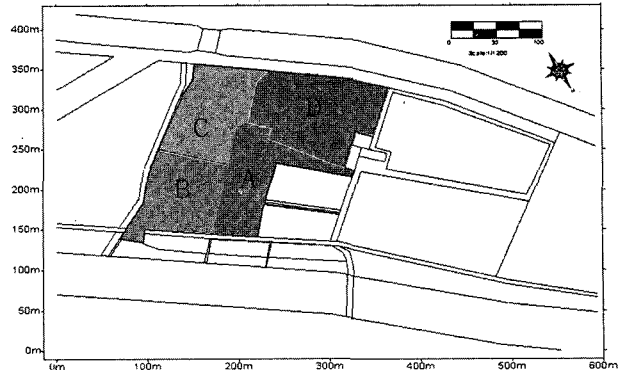


Fig. 1. Partition drawing of site into quarters.

였으며, 이때 채취한 시료는 수분여부, 토양색, 지질구성 및 오염취기 등의 항목을 구별하여 현장에서 측정된 후 Soil Boring log 및 Field log sheet에 작성하였으며 저온상태로 보관하여 실험실로 운반하였다.

채취한 시료의 분석은 토양오염 공정시험법에 따라 BTEX(Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene)와 석유계총탄화수소(TPH, Total Petroleum Hydrocarbon) 항목을 측정하였으며 토양특성 평가에 있어 기본이 되는 입도 분석(Soil gradation & Particle size distribution) 및 토양 pH를 추가적으로 분석하였다.

3.3. 본 부지 내 지질특성

본 오염부지의 토양오염도 조사 시 현장에서 토양지질을 육안으로 확인한 결과 상층부(약 0.0~1.2 m)는 Silty - Sand층으로 구성되어 있으며, 중층부(약 1.2~3.5 m)는 Sand와 Gravel, 그리고 하층부(약 3.5 m 이하)는 Clayey-Sand와 Sand층으로 분포되어 있는 것으로 조사되었다(Fig. 2).

또한, 보다 정확한 지질특성을 평가하기 위하여 오염이 확산된 토양의 깊이에 따른 흙의 입도분석(KSF 2302)을

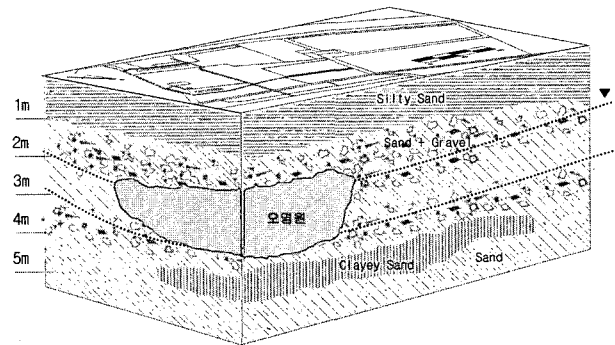


Fig. 2. Geological structure of site.

Table 1. Soil characteristics in depth

Depth (m)	pH	Particle size ditribution (%)			Texture
		Sand	Silt	Clay	
1-2	5.9	98	>1	>1	Sand
2-3	6.2	99	>1	>1	Sand

수행한 결과 Sand층으로서 투수성과 공기투과성이 비교적 양호하여 지하수 회수 시 지하수의 빠른 이동과 공기 주입 토양층 내 공기의 전달이 효과적인 것으로 평가되었다(Table 1).

본 부지는 시료채취 작업 당시 깊이 약 2.0~2.7 m 부근에서 지하수가 발견되었으며, 우천시에 지하수위가 1.5 m까지 상승하고 건기 시에는 지하 3.0 m 이하로 하강하여 지하수위 변동 폭만큼의 지층이 오염되어 있는 것으로 확인되었다. 특히 건기 시의 지하수위는 깊이 약 3.0 m 정도에 분포하고 있으며 지하수의 이동은 거의 없는 것으로 조사되었다. 그러나 우천시에는 정화부지 내 지하수위가 지표면으로부터 약 1.5 m 정도의 깊이까지 급격하게 상승하여 부지 부근에 위치하는 하천의 수위보다 높게 형성된다.

3.4. 부지 내 오염현황

토양 내 오염원은 휘발유와 경유가 혼재되어 있는 것으로 확인되었으며, 검출된 최대 BTEX와 TPH 농도는 각각 851과 27,970 mg/kg이었다. 부지 내 오염확산 현황을 평가하기 위하여 분석된 자료를 토대로 2D simulation(Surfer 8.0) 및 3D simulation program(Visual Groundwater 2.2.1)을 사용하여 오염량 산출 및 오염원의 이동경로를 예측한 결과, TPH 농도 1,000 mg/kg 이상으로 오염된 토양의 최대총량은 7,201 m³이었으며 깊이 약 0.3~3.3 m까지 오염이 진행된 것으로 나타났다(Table 2).

토양 오염도 조사에 따르면 Fig. 3과 같이 지중 오염원은 지하수 흐름에 따라 오염발생지점에서부터 광범위한 오염범위를 나타내고 있으며 토양층에 공극이나 표면에 흡착되어 잔류하는 것으로 사료된다. 또한, 지하수위의 변

Table 2. Simulation result and analysis data

Item	Value
Contamination volume	7,201 m ³
Contamination depth	0.3-3.3 m
Groundwater level	2.0-2.7 m
The highest concentration	BTEX : 851 mg/kg
	TPH : 27,970 mg/kg

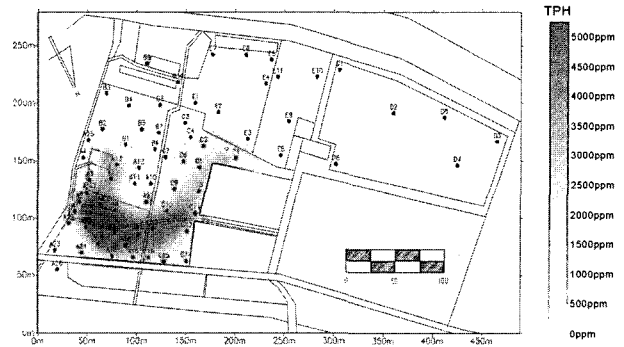


Fig. 3. Distribution map of TPH in the site.

동으로 영향 받는 지역인 약 2.0~3.0 m 지점 부근에 대부분의 오염원이 존재하는 것으로 보아 유동성 오염원이 지하수의 흐름에 따라 부지내로 유입하여 토질에 의해 확산된 것으로 조사되었다.

본 정화대상 부지 내 현장에서 발견된 지하수 상층에서 유동성 오일층은 확인되지 않았으며 깊이 약 3.0 m 정도까지 오염원이 확산되어 있으므로 Bioslurping이나 BioPile과 같은 토양 자체에 흡착된 오염원을 제거하는 공법보다 정화부지 내에 오염된 지하수를 직접 처리함과 동시에 토양에 흡착된 오염원을 제거하기에 효과적인 Deep-site BioPile 공법을 적용해야 할 것으로 평가되었다.

3.5. DSB(Deep-Site BioPile) system

3.5.1. DSB system의 구성

본 부지 내 오염토양을 정화하기 위하여 적용된 DSB system은 토양 및 지하수가 오염된 지층에 설치된 파이프 상의 주입관(1)과 추출관(2), 그리고 주입관을 통하여 산소를 공급하는 진공가압 브로워(3)와 추출관을 통하여 가스를 추출하는 진공감압 브로워(4), 토양속으로 주입된 공기흐름이 토양의 일부분에서만이 아닌 전체적으로 원활히 확산되도록 하기 위하여 주입관과 추출관에 각각 연결되어 수평으로 설치된 하단유공관(5)과 상단유공관(6), 오염 부지를 효과적으로 복원하기 위해 유류분해 미생물을 연속적으로 혼양하여 오염지역에 투입할 수 있는 생물반응기(7)인 PAD-Bioreactor(Pre - Acclimated Device Bio-Reactor), 감압추출 브로워에 의해 대기중으로 방출되는 휘발성 물질을 포집하여 처리하기 위한 입상 활성탄 흡착탑(8) 장치로 구성된다.

또한, 지중에 공기 또는 산소를 주입 후 압력구배를 형성하여 토양에 존재하는 액상의 오염물질을 기체화 하여 추출하기 위한 진공감압 브로워와 진공가압 브로워에 압력계지와 온도조절기를 설치하였으며 감압브로워에 에

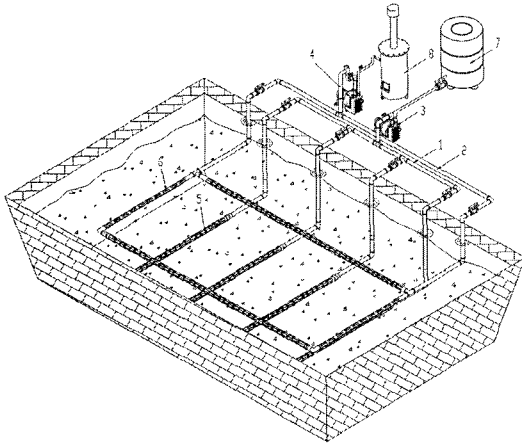


Fig. 4. Design of DSB system.

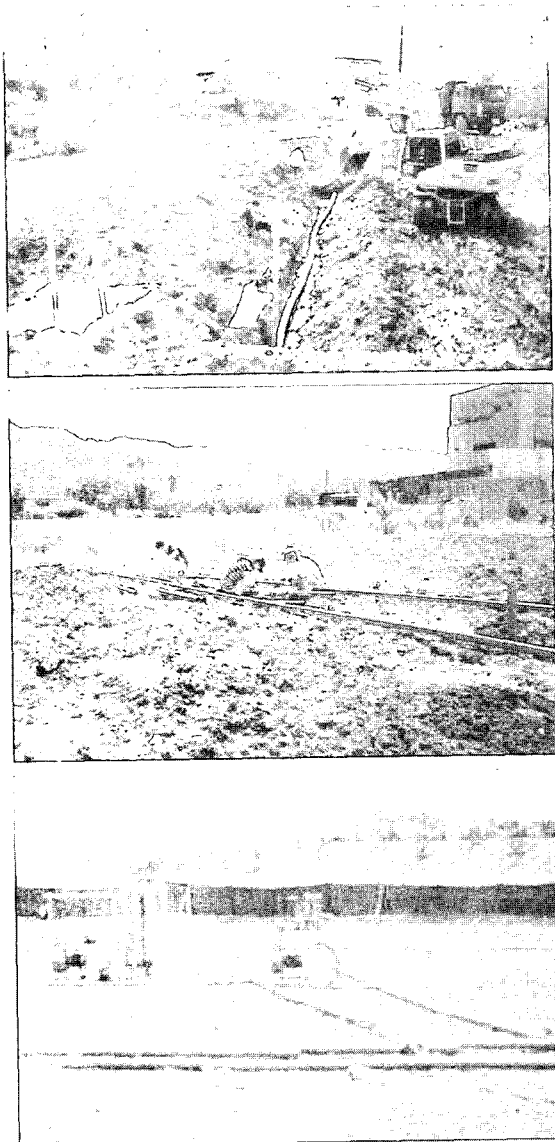


Fig. 5. Photo of DSB system installation.

어 필터와 활성탄 흡착탑을 배관으로 연결하였다(Fig. 4).

3.5.2. DSB system의 설치 및 운전

지하수가 존재하고 있는 지역인 부지 약 3.0~3.5 m 부근까지 토양을 굴착하여 지중에 공기주입정(Air injection well)을 하단부분인 지하수 수면에 잠기도록 설치하였으며, 지중 약 1.0~1.5 m 지역인 상단에는 공기주입정(Air injection well)과 엇각으로 추출정(Extraction well)을 수평으로 설치하였다. 설치되는 가압유공관은 약 4m의 간격으로 하며 추출유공관의 간격도 각각 4m 정도로 하였다(Fig. 5).

상기와 같이 오염이 집중된 중앙지역에 수평으로 설치된 유공관 하단부에는 공기를 공급하여 지하수에 산소를 공급하도록 하며 상단부에서는 감압 브로워를 작동하여 상층부에서부터 토양층에 이르기까지 휘발성 물질들의 기화를 촉진시키며 공기의 흐름이 원활이 유지되도록 하여 처리장치내에 유류 및 유기물 분해 미생물의 활성효율을 최적상태로 유지하도록 구성된다. 또한, 호기성 미생물의 활성유지를 위한 산소를 하단수평배관을 통해 공급시켜 주었다.

브로워로 배출되는 휘발성 가스는 입상활성탄으로 충전된 흡착탑을 통과하여 처리된 후 배출되도록 하였으며 감압추출정의 장시간 가동에 따른 Biopile의 토양 내 오염원 분포도의 평형을 고려하여 가동시간을 주기적으로 반복하여 작동하도록 함으로써 휘발성 가스의 회수를 최대화하도록 하였다. 또한 위치에 따라 추출정의 개폐밸브를 조절함으로써 고농도의 지점을 집중적으로 관리하였다.

PAD-Bioreactor는 유류분해 미생물을 혼양하여 정화부지로 공급하기 위해 지하 토양층으로부터 오염된 지하수를 회수하여 지하수 내 존재하는 수용성 유류물질을 탄소원으로 하여 영양염류(N, P)와 함께 PAD-Bioreactor내에서 혼양한 후 주입정을 통하여 주입함으로써 오염원을 분해하도록 유도하였다.

지중에 설치된 Well은 각 지점마다 독립적으로 제어되도록 설계되었으며 작업이 필요한 지점을 선정하여 반복적으로 순회하면서 가동하며 감압추출장비는 가동시간과 정지시간을 24시간을 기준으로 최적화(30분 가동/30분 정지)하여 주기적으로 순환시키면서 가동하였다.

4. 정화효율 평가 작업 수행

4.1. 정화평가 작업

본 부지 내 오염토양의 복원 정화작업이 진행됨에 따라

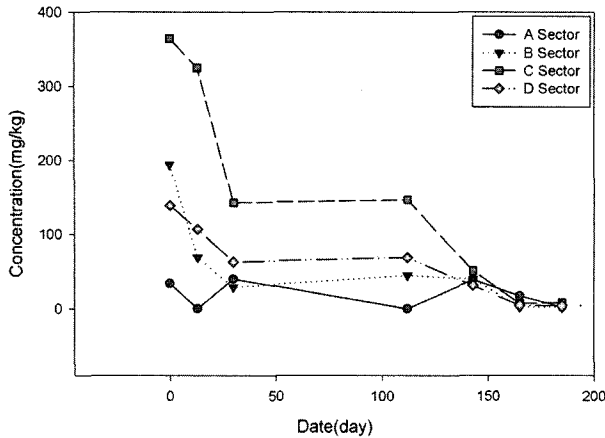


Fig. 6. Variation of BTEX in soil.

오염원의 저감되는 현황을 파악하기 위하여 토양시료채취 작업은 총 6회, 지하수 채취 작업은 총 4회 수행하였다. 시료채취 작업은 각각의 구역에 대해 일정한 면적을 구획하여 대표적인 시료를 채취하여 분석함으로써 정화효율을 평가하였다.

본 부지 내 A구역과 C구역은 4개의 지점에서 시료를 채취하였으며 B구역과 D구역은 6개 지점에서 시료를 채취하였다. 채취지점은 초기 토양오염도 조사 수행 시 확인된 지점을 중심으로 선정하였으며, 이때 채취깊이는 약 2.0~3.0 m 사이의 단일 토양층에서 채취하였다. 또한 확인이 필요한 지점에 대해서는 추가적으로 시료를 채취하여 분석하여 구역별 평균값으로 나타내었다.

분석항목으로는 토양시료의 경우 BTEX와 TPH 항목을 분석하였으며, 지하수 시료는 BTEX, TPH, TCE, PCE, CODcr, 중금속 오염물질(6가 크롬, 비소, 납, 카드뮴, 수은) 등 농업용수 기준에 대하여 분석하였다.

4.2. 정화작업결과

본 오염부지 내 DSB 공법을 약 185일 정도 적용한 후 수행한 1차 정화평가결과 타 구역에 비해 오염도가 높지 않았던 A구역은 오염이 현저히 낮아진 것을 확인할 수 있었으며, 2차 및 4차 정화평가에서 각각 한 지점씩 일부 높은 농도의 오염원이 검출되는 Hot spot이 나타났으나 전체적으로 오염이 확연히 저감되었다.

B구역과 C구역은 오염정도가 상당히 높았던 부지였으나 DSB공법을 적용한지 약 30여일 만에 50% 이상 오염원이 저감되었으며 165일 후에는 토양오염 확인기준이하로 저감되어 정화작업을 정상적으로 완료할 수 있었다. 그리고 D구역은 초기오염농도 최대값이 BTEX 139 mg/kg, TPH 4,615 mg/kg으로 정화작업이 진행됨에 따라 오염원

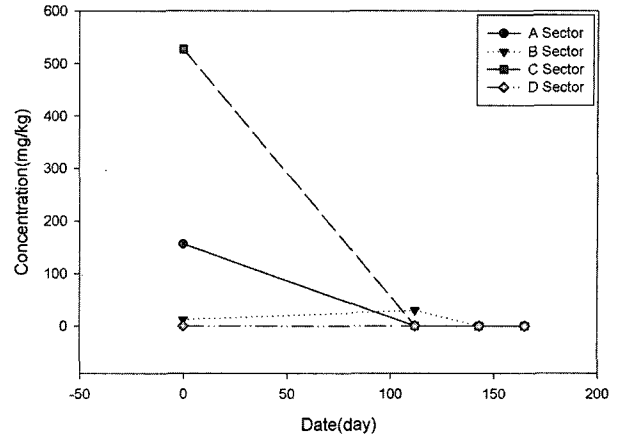


Fig. 7. Variation of TPH in soil.

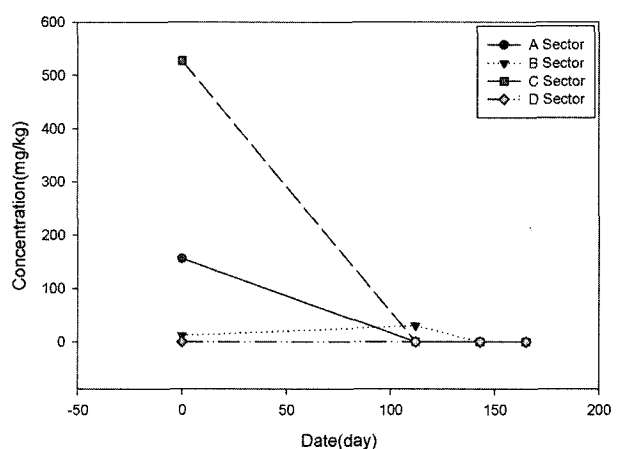


Fig. 8. Variation of BTEX in groundwater.

이 저감되는 현황을 나타내었으며 약 143일이 경과한 후에는 정화작업이 완료되었다(Fig. 6 & Fig. 7).

부지 내 오염된 지하수 정화저감현황을 구역별로 살펴보면 정화초기 오염정도가 가장 높았던 A구역과 C 구역 모두 정화작업 수행 후 약 100여일 만에 오염원이 기준치이하로 검출되었으며, 오염지하수 정화작업을 확인하기 위하여 토양관련 전문기관으로부터 지하수 수질을 분석한 결과, 지하수법상의 농업용수에 대한 지하수 수질의 정화기준에 적합한 것으로 나타났다(Fig. 8).

5. 결 론

이상과 같이 토양 및 지하수가 동시에 오염된 부지를 정화하기 위해 DSB System을 현장에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 본 정화공정은 기존 생물학적 공법들과는 달리 높은 농도로 오염되어 있는 부지를 약 6개월의 단기간에 효과

적으로 처리한 사례로서 광범위하게 오염된 부지를 단기간에 효과적으로 처리할 수 있었다.

2. 정화장치를 지상이 아닌 지중에 설치함으로써 오염토양을 처리하기 위한 별도의 부지가 확보되지 않은 경우에도 처리가능하며 부지 내 토양뿐만 아니라 지하수도 동시에 처리할 수 있다.

3. Silt층이나 Clay층과 같이 미세토양으로 이루어진 부지에서 가장 문제시 되는 공기주입의 효과 면에서 수직배관이 아닌 수평배관을 상부와 하부에 2단으로 설치하여 적용함으로써 산소의 전달효율을 높이며 장비 설치에 앞서 수행되는 토양 굴착 시 뒤집기 작업으로 인한 혼합효과의 특징이 있다.

4. 또한 Gravel층과 같이 토양 공극이 큰 적용부지의 경우에는 공기주입시 지하수가 순환됨으로써 감압을 통한 추출이 효과적이며 동시에 휘발성 오염물을 부수적으로 처리하여 대기방출에 의한 2차 오염이 유발되지 않아 토양의 특성상 발생하는 제한요인이 다른 기술에 비해 적어 오염토양을 정화하는데 널리 사용될 것으로 평가된다.

참 고 문 헌

- Andew, A.R. and Gray, M.E., 1992, An effective remedial alternative for petroleum hydrocarbon-contaminated soil, *Environmental Progress.*, **11**(4), 318-322.
- Huesemann, M.H., 1994, Guidelines for land-treating petroleum hydrocarbon-contaminated soil, *Journal of Soil Contamination.*, **3**(3), 1-17.
- Johnson, P.C., Kemplowski, M.W., and Colthart, J.D., 1990, Quantitative analysis for the cleanup of hydrocarbon-contaminated soils by in-situ soil venting, *Ground-Water*, **28**(3), 413-429.
- Johnson, P.C., Stanely, C.C., Kemplowski, M.W., Byers, D.L., and Colthart, J.D., A practical approach to the design, operation, and monitoring of in situ soil-venting systems, *Groundwater Monitoring Review*, **10**, 159-178.
- Kirtland, B.C. and Aelion, C.M., Petroleum mass removal from low permeability sediment using air sparging/soil vapor extraction : impact of continuous or pulsed operation, *Journal of Contaminant Hydrology*, **41**, 367-383.
- Massmann, J.W., 1989, Applying groundwater flow models in vapor extraction system design, *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, **115**(1), 129-149.
- Mohn, W.W. Radzimirski, C.Z., Fortin MC, Reimer, K.J., 2001, On site bioremediation of hydrocarbon-contaminated Arctic undra soils in inoculated biopiles, *Application Microbial Biotechnol.*, Oct; **57**(1-2), 242-247.
- NFESC, 1996, Biopile Treatability Studies. NFESC TDS-2024-NV, MAR 96. Naval Facilities Engineering Service Center, Port Hueneme, CA.
- Walworth, J.L., and Reynolds, C.M., 1995, Bioremediation of a petroleum-contaminated cyric Soil : Effect of phosphorous, nitrogen, and temperature, *Journal of Soil Contamination.*, **4**(3), 299-310.
- Widdowson, M.A., Haney, O.R., Reeves, H.W., Aelion, C.M., and Ray, R.P., 1997, Multilevel soil-vapor extraction test for heterogeneous soil, *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, **123**(2), 160-168.