

공장부지 토양 · 지하수 오염 조사기법 및 정화기술의 적용

황중식 · 박연정 · 손명기

(주) 에코솔루션

요 약 문

토양과 지하수 오염은 오염원이나 그 정화 방법에 있어서 서로 밀접한 관계를 가지고 있으며, 수질오염이나 대기오염과 달리 일단 한번 오염이 되면 오염 정화과정이 매우 복잡하고 어려우면서도 비용이 많이 드는 특성을 갖고 있기 때문에 오염원의 형태에 따른 통합된 관리 및 효율적 정화기술의 적용이 무엇보다 필요하다.

따라서 표준화된 오염조사 절차 (Environmental Site Assessment)를 통해 대상부지를 조사한 후, 확인된 오염원의 정화를 위한 기술을 선정함에 있어 필요한, 오염원 · 대상부지 특성 및 사업환경에 따른 정화기술에 대해 설명하고, 토양 및 지하수 통합 정화기술의 적용 예를 들어 토양과 지하수를 통합 · 관리함이 필요함을 살펴보고자 한다.

I. 서론

토양 및 지하수계에는 유류, 중금속, 유해물질 등 여러 가지 오염원이 복잡하게 존재하는데, 이들 오염원이 전파되어 가는 과정은 다음의 네가지 단계로 설명된다.

1. 불포화 지층으로의 침투 (Infiltration)

오염물질은 지표수의 유입이 없는 경우에는 중력에 의하여 침투되는데 그 경로는 다공질 매체(Porous Media)인 토양의 국소적인 투수율 불균질성(Permeability Heterogeneity)에 의한 핑거링(Fingering) 현상으로 설명될 수 있다. 즉 큰 공극을 따라서 오염물질은 선택적으로 유동하게 된다. 이 과정에서 포집(trap)현상이 발생하게 되는데 이는 토양 입자와 오염물질 사이의 모세관력에 의하여 오염물질이 토양 공극내에 존재하여, 대수층에 지속적으로 잔류하게 되는 것을 의미한다. 차후 오염 재발을 방지하기 위하여 오염제거 기법 적용시 이 잔류물질을 제거해주는 것이 매우 중요하다.

2. 둔덕 형성 (Mound Formation)

중력에 의해 하강한 물질이 지하수면이나 모세관대(Capillary Fringe)에 축적되는 현상으로, 계절에 따라 지하수위가 변하게 되면 모세관대에서 대수층으로 오염물질 유입이 일어나게 된다.

3. 지하수면에 인접한 이동(Migration)

지하수의 유동에 의해, 주로 지하수면에서 지하수가 유동하는 방향으로 이동한다. 또한 지하수와 오염물질 간의 비중 차이에 의해서 지하수위가 높은 방향으로 유동하기도 한다.

4. 용해된 오염물질의 전파 (Plume Diffusion)

지하수와 접촉된 지역에서 수용액 상태로 용해되어 지하수의 유동과 오염물질의 확산에 의해 전파된다.

II. 오염 조사 기법 (Environmental Site Assessment)

토양 및 지하수 오염의 평가는 미국 EPA와 ASTM E1527 방법에 의해 명시된 환경부지평가 (Environmental Site Assessment)의 절차와 항목에 의한다.

Phase	Definition	Contents
Phase I	(사전 오염 평가 단계) Phase I 의 목적은, 표준화 된 절차에 따라 대상부지의 REC (Recognized Environmental Condition) 를 확인하는 것인데, 여기서 REC 라 함은 평가하고자 하는 대상 부지에 유해물질이나 석유류 제품이 토양이나 지하수로 누출될 가능성이 있는 상태, 혹은 과거에 누출이 있었던 상황하에서 유해 물질이나 석유류 제품이 존재하는 상태를 말한다.	Record Review 지질/수리학적 자료, 항공사진 검토, data/문헌 참고 Site Reconnaissance 신체적인 감각기관 (예:시각, 후각등) 을 통해 대상 부지의 환경 오염 상태 확인 오염 유발 물질이 위치한 장소, 보관상태, 대상 부지와 주변지역의 지형 지질 상황, 식물들의 성장상태, 오염이 예상되는 징후등을 상세히 기록 Interview key site manager, 거주자, 공무원 등을 대상으로 면담을 통하여 환경오염 상태를 확인 Preliminary Risk Assessment Exploratory Boring & Analysis를 통한 평가
Phase II	(정밀 오염 평가 단계) Phase I 에서 확인된 오염 예상 지역과, 명백하게 유해 물질의 누출이 확인된 지역의 실제 오염정도를 정확히 측정하는 단계로, 오염물질의 잠재적 이동경로 및 이동률, 그리고 오염된 범위와 양을 산정하여 복원 방법 선정에 필요한 정보를 제공하는데 활용된다.	현장 조사 와 시료 분석 및 오염원 해석 지질, 수리학적 조사와 토양/지하수 시료 채취 등으로 오염원을 해석 Evaluation of Data 토양 또는 투수층의 상대적인 투수성, 지하수면 깊이, 지하수 흐름 방향, 오염물질의 성질, 잠재적인 이동경로 등을 적절하게 고려하여 인체/생태학적 위해성을 평가 Interpretation of Results 시료 채취, 분석 후 결과 데이터로 대상 부지의 위험성 상태를 파악하여 복원기술 선정

Ⅲ. 정화기술의 선정

토양 및 지하수 정화기술은 물리적 차단, In-Situ 정화, Ex-Situ 정화 등 크게 세가지로 나눌 수 있으며 대표적 정화기술을 살펴보면 다음과 같다.

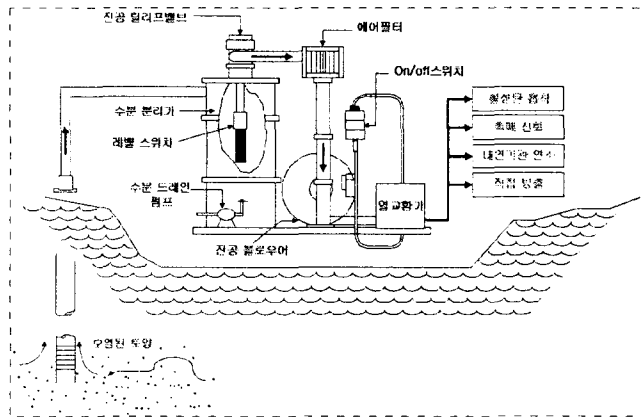
1. 대표적 토양오염 정화기술

가. In-Situ 정화기술

○ Soil Vapor Extraction(토양 증기 추출)

불포화 지대의 토양에 흡착된 석유 성분 중 휘발성물질의 농도를 저감시키는 In-Situ복원 기술이다. 이 기술은 Soil venting 또는 vacuum extraction 이라 부른다. 토양내 오염원지역에 well screen을 설치하여 진공을 걸어 준다.

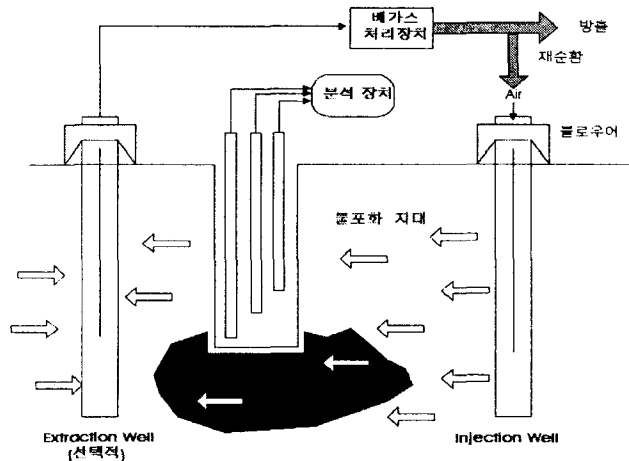
오염물질 중 휘발성분들은 증발하고 증기들은 추출정으로 몰려든다. 추출된 증기들은 일반적으로 활성탄 흡착 등과 같은 공법을 이용하여 필요에 따라 처리 후 대기로 방출한다. 지하에



서의 증가된 공기 흐름으로 인하여 오염물질에 대한 생분해, 특히 휘발성이 낮은 오염물질에 대한 생분해가 촉진된다. Well screen은 수직이 될 수도 수평이 될 수도 있다.

○ Bioventing

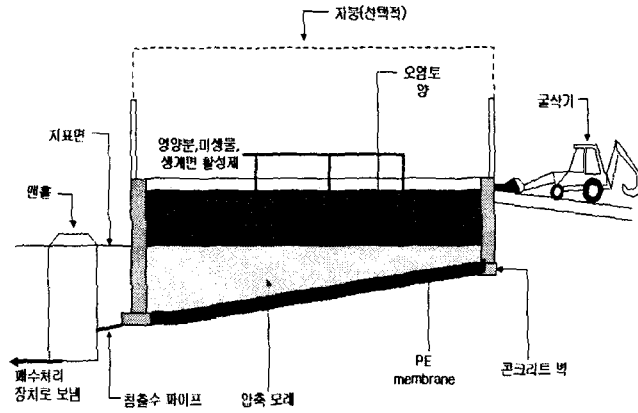
Bioventing(이하 BV)은 불포화지역에서 자생적인 미생물을 이용하여 토양에 흡착된 유기물을 생분해시키는 In-Situ 복원 기술이다. 모세관대와 포화토양은 본 기술로 복원이 어렵다. BV에서는 추출정(extraction well)이나 주입정(injection well)을 이용하여 불포화지역으로 공기나 산소의 흐름을 유도함으로써 자생적 박테리아의 활성을 증진시킨다.



나. Ex-Situ 정화기술

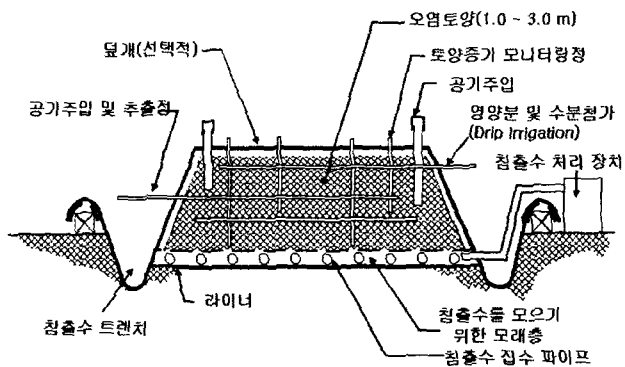
○ Landfarming

랜드파밍은 오염된 토양을 굴착하여 처리지역에 얇게 펼친 후 미네랄, 영양분, 수분, 그리고 필요한 경우 생계면활성제를 넣어주어 미생물로 오염물을 제거하는 기술이다. 오염 토양을 섞어주면서 휘발성 유기 화합물을 자연적으로 증발시키고 오염물을 미생물 분해함으로써 휘발유와 같은 휘발성이 강한 범위부터 윤활유 같은 비휘발성 유류까지 법적 한계치 이하로 농도를 낮추는 데에 효과적이다.



○ Biopile

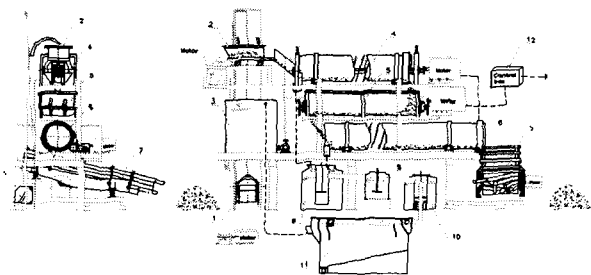
바이오파일(Biopile, 이하 BP)은 biocell, bioheap, biomound 등으로 알려져 있으며 생분해 방법을 이용하여 파헤쳐진 흙더미에 오염되어 있는 유류 오염물질 등을 제거하는데 사용되는 방법이다. BP는 흙더미를 파내어 지표 위에서 작업하고 산소(보통 공기)를 사용하여 호기성박테리아를 증식시켜 토양에 흡착되어 있는 오염물질을 분해시킨다는 점에서 랜드파밍과 유사한 점이 있으나 랜드파밍은 tilling으로 공기를 공급하지만 BP는 공극이 있거나 slit이 있는 파이프를 통해서 공기를 공급한다.



○ Soil Washing (토양 세척)

토양세척의 원리는 토양내의 오염물을 세척수(주로 물)와 기계적 마찰력을 이용하여 토양에서 액상으로 이동, 분리시켜 오염물질을 감소시키고자 하는 것이다.

토양의 특성과 오염물질의 종류에 따라 세척수에 세제, EDTA, 산 등이 첨가되는 경우도 있으며 경험적으로 석유와 연쇄상 탄화수소, 단핵 방향족 화합물(BTX, BTEX, AHC)에 효과적으로 적용 가능하며 탄화수소계 화합물이나 중금속 잔류물 등으로 오염된 토양의 복원에 대해서 적용될 수 있다.



2. 지하수 오염 정화기술

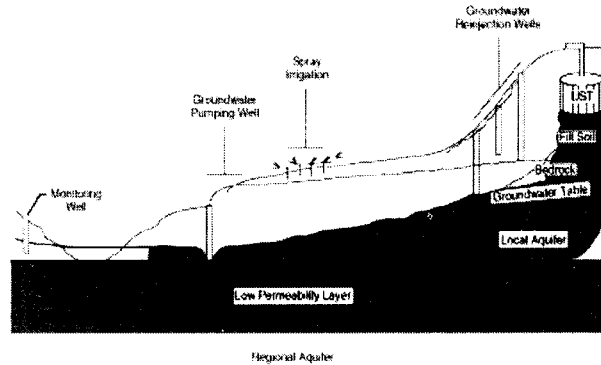
지하수 오염 정화기술 선정시에는 오염물질의 형태, 부지의 수리지질학, 오염원의 특성, 지하수내의 오염물질의 위치 등을 고려해야 한다. 정화 체계의 능력은 유체(물과 오염물질), 영양염류, NAPL(Nonaqueous Phase Liquid-비수용성 물질), 증기나 공기를 이동시키는 대수층(aquifer)의 발달 정도에 기인한다.

가. Containment-Physical barriers

불투수 장애물 (Slurry walls, Grout curtains, Sheet piling, Compacted liners, Geomembranes)이 오염된 지하수 혹은 침출수를 함유하거나, 깨끗한 지하수가 오염된 지역으로 침투하는 것을 막는다. 이러한 장애물은 완전한 수리학적 제어를 위하여 well system 이나 leachate collection system 등과 함께 사용된다.

나. Pumped removal of product or contaminated water and above ground treatment (Pump and Treat with activated carbon or air stripping)

본 정화기술에서 추구하는 수리학적 제어의 목적은 지하수 흐름 영역을 변경하는 것으로써, 지하의 오염된 물질을 제거하여 외부로의 유출을 막거나 plume의 이동물을 낮추고, pumping & injection well 에 의해 plume의 전위차를 낮추어 plume이 흘러가지 못하게 하는 것이다.



-Interceptor systems : water table

에 가까이 있는 지하수를 모을 때

사용되며, 주로 가벼워서 water table 바로위에 있는 capillary fringe 로 이동하는 경향이 있는 LNAPLs (Nonaqueous-Phase Liquids : crude oil, gasoline, etc)을 모을 때 쓰인다.

-Pumping wells : 주로 포화지대(saturated zone)로부터 지하수를 추출할때 쓰이며, well 로 포집할수 있는 오염물질 지역을 미리 정한 후 recovery well system을 설계 한다.

다. In-Situ biological or chemical treatment

-Site Investigation : In-Situ 복원을 하기전에 오염의 정도와 지하수 흐름방향, 지하수 위 깊이, 토양의 균등성 등 수리지질학적 특성을 확인한다.

-Free Product Recovery : 수리 지질학적 정보를 확인하고 나면 오염되지 않은 물질을 물과 탄화수소 만으로 회수하는 free product 의 회수가 수행되어야 한다.

-Microbial degradation enhancement study : 복원을 실시하기 전에 부지 오염물질의 생물학적 분해에 관한 feasibility study를 한다.

-System design : 대수층의 오염된 부분으로 적절하게 영양염류를 주입하도록 system이 설계되어야 한다.

-Operation & Maintenance

3. 오염원, 대상부지 특성 및 사업환경에 따른 정화기술의 적용성 평가

토양 및 지하수 오염을 유발하는 오염원의 종류 및 특성, 그리고 대상 부지의 토질 특성 및 기타 사업환경에 따라 적용되는 정화기술이 상이하며 보다 효과적인 정화능력을 위해서 다양한 정화 기술을 복합적으로 사용하기도 한다.

가. 오염원의 종류

석유류, 기타 유기화합물(솔벤트류, PCB, TCE, DCE 등), 농약, 중금속, 방사능 물질 등

나. 오염물질의 물리화학적 특성

농도, 비중, 점도, 분자량 등

다. 오염 매체(토질) 특성

Soil Classification, Hydroconductivity, permeability, density, etc.

라. 사업환경

비용, 정화기간, 작업 용이성 등

대표적 정화 기술별 특징은 다음과 같다.

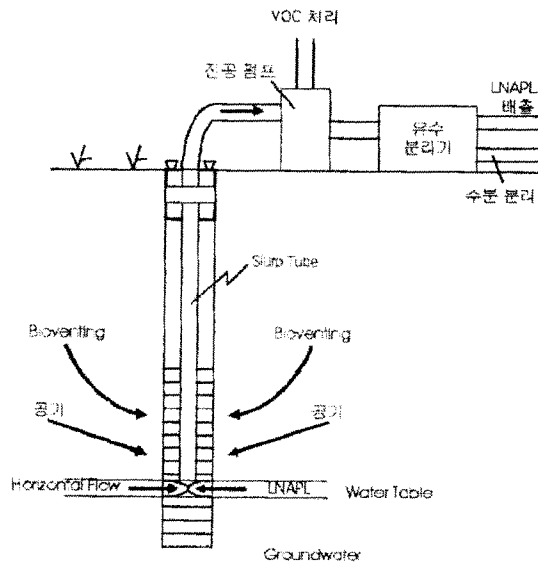
정화기술	특징
Bioventing	<ul style="list-style-type: none"> - 장비 이용이 쉽고 설치하기 쉽다. - 처리기간이 짧다. 적당한 조건하에서 보통 6개월에서 2년 정도 걸린다. - 다른 기술과의 병합 사용이 용이하다. - 비싸게 off가스 처리를 할 필요가 없다.
Soil Vapour Extraction	<ul style="list-style-type: none"> - 성능이 증명되었으며, 쉽게 쓸 수 있는 장치이고, 설치가 편리하다. - 부지에 대한 최소 교란 - 처리기간이 짧다. (최적 조건에서 6개월 - 2년) - Free Product가 있는 부지에 적용될 수 있고 다른 기술과도 병용 가능하다.
Bioslurping	<ul style="list-style-type: none"> - 진공 펌핑에 의한 LNAPL recovery에 사용된다. - Bioventing에 의해 불포화 영역의 오염을 동시에 복원 가능하다. - 기존의 dual pump recovery system에 비하여, 회수되는 유류에 대한 지하수의 비율이 상대적으로 낮다. - LNAPL recovery가 끝났을 경우 Bioventing만으로도 전환이 수월하다.
Landfarming	<ul style="list-style-type: none"> - 설계와 복원 수행시 상대적으로 간편하다. - 짧은 처리 기간과 경쟁력 있는 처리 비용이 장점이다. - 미생물 분해속도가 낮은 유기물에 대해 효과적이다. - 넓은 처리 부지가 필요하다. - TPH 50,000ppm이상, 또는 중금속 2,500ppm이상인 경우에는 비효과적이다.
Biopile	<ul style="list-style-type: none"> - 설계 및 개선이 비교적 간단하다. - 기간이 짧고 가격이 경쟁력 있다. - 느린 생분해 속도로 유기성분에 효과적이다. - 랜드파밍보다 소요 면적이 작다. - 폐쇄 시스템이 가능하다. 즉, 증기배출을 조절할 수 있다. - 유류의 종류와 지점에 따라 효과적인 조합이 가능하다.

IV. 오염 토양·지하수 통합 정화기술의 적용 (예)

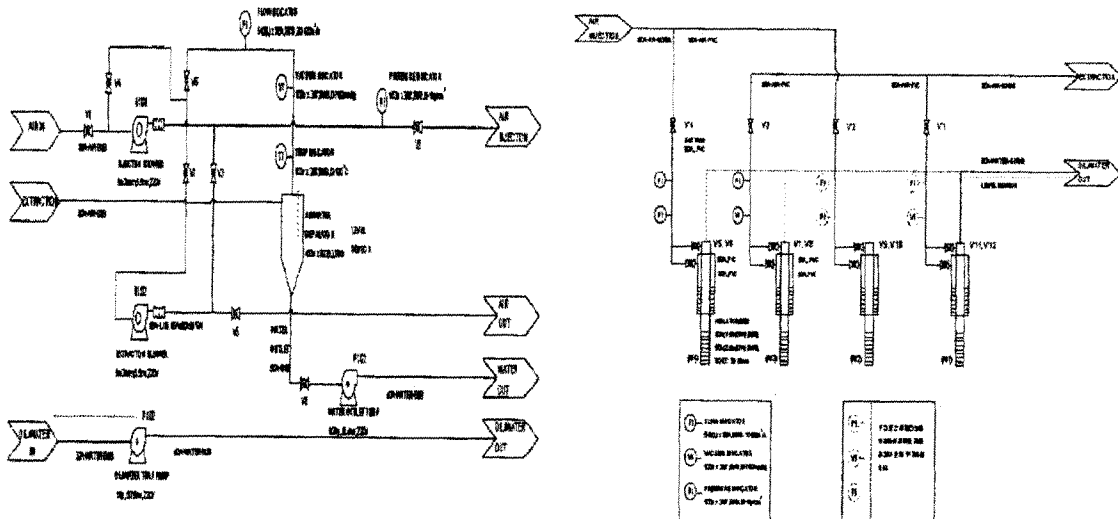
○ SVE/BV(토양) & Bioslurping(지하수)

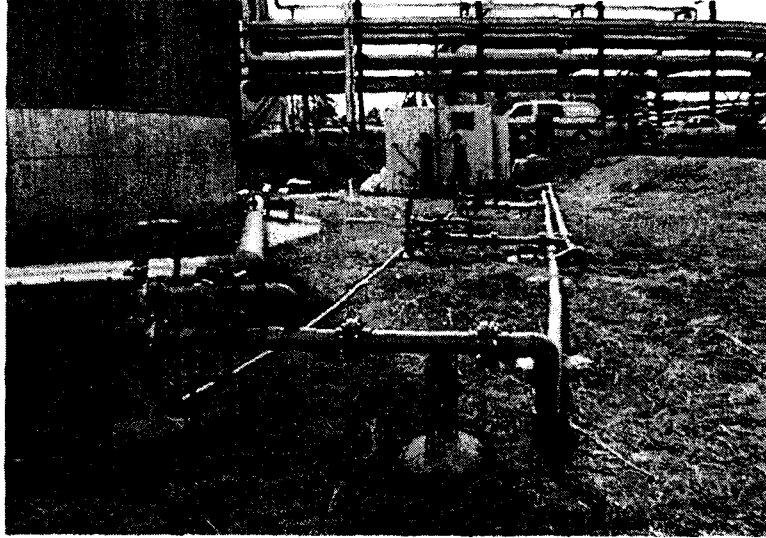
Vacuum-enhanced extraction 혹은 bioslurping 공법은 지표하에 다양하게 오염되어 있는 지하수, free oil, 탄화수소 증기 등의 오염원을 원위치에서 복원하는 공법이다.

즉, bioventing 복원 기술과 free product recovery 기술을 합쳐서 두 개의 다른 미디어에서의 오염을 동시에 복원하는 기술이다.

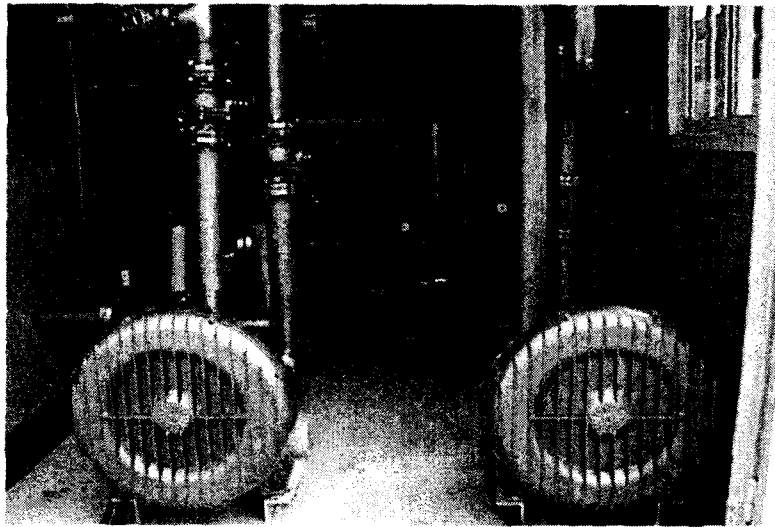


○ 개략적 시설도면





SVE/BV & Bioslurping 설비 현장 운전



SVE/BV & Bioslurping 설비 내부

참 고 문 헌

- Philip B. Bedient, et al., Ground Water Contamination-transport and remediation, 1994
Raymond N. Yong, et al, Principles of Contaminant Transport in soil, 1992
Eric Reichard, et al, Groundwater Contamination Risk Assessment,1990