

# 토양증기추출법(Soil Vapor Extraction)의 적용성 평가 및 설계

박준범\*, 하태균\*

## 1. 도입

생태계의 중요한 구성요소 중 하나인 흙에 유기오염물질이나 영양염류, 중금속 등이 집적되어 나타나는 지반오염은 매우 중요한 환경문제로 인식되어야 한다. 그러나 흙의 특성상 오염물질의 이동과 전달이 매우 느리므로 환경 피해가 구체적으로 발생하기까지는 오랜 시간이 소요된다. 이렇게 피해가 쉽게 노출되지 않는 지반오염의 특이성으로 인해 그 심각성이 종종 등한시 되어 왔으며, 일단 오염된 지역을 신속히 복원하지 않음으로써 후속적인 복원에 엄청난 비용 및 장기간 피해를 초래하기도 한다(오재일, 2001).

우리나라에서는 1970년대에 들어서면서 시작된 산업화 기간 동안 유류 및 산업 용제 등의 이용이 비약적으로 증가하게 되었다. 하지만 이용물질에 대한 인식 부족으로 그간 누출이나 투기가 활발하게 이루어졌고 그로 인해 지반오염이 심각한 수준에 이르게 되었다. 특히 주요 지반오염물질이 유류 화합물이나 trichloroethylene(TCE) 등과 같은 독성물질이기에

그 심각성은 더욱 두드러진다. 이에 최근 정부에서도 지하수법, 토양환경보전법의 시행 및 개정 등을 통해 그동안 방치해온 지하수, 지반 오염 문제에 적극적으로 대처하고 있다.

실제로 유류나 독성 물질에 의한 흙/지하수 오염이 우리나라에만 국한된 문제는 아니며 미국, 유럽, 일본과 같은 선진국에서도 1980년 이래 지속적으로 문제화되고 있다. 한 예로 미국 EPA에 의하면 미국 내의 약 140만 개의 지하 가솔린 저장탱크 중 80%가 부식 방지가 되어 있지 않은 재질로 이루어져 있으며, 35%가 누출되어 평균 29 liter/day가 지반으로 유출된다고 한다(Donaldson, et, al., 1992). 이러한 지반오염의 피해를 최소화하기 위하여 선진국에서는 다양한 기술 개발 및 복원 사업에 힘쓰고 있으며, 그간의 연구 성과 및 사례를 통해 볼 때 유류 오염물질이나 염소계 용제들과 같이 휘발성을 갖는 Volatile Organic Compounds(VOCs) 성분으로 오염된 지반의 복원을 위한 가장 경제적이면서도 효율적인 기술 중 하나로 토양증기추출법(Soil Vapor Extraction, SVE)이 고려될 수 있다(김학운, 2004). 본 기술기사는 토양증기추출법의 현장 적용성 평가 및 설계의 관점에서 진행된 그간의 연구결과에 초점을 맞추고 있다.

\*1 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 부교수  
(junbpark@snu.ac.kr)

\*2 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 석사과정

## 2. 지반오염 복원기술

지반복원기술은 대상지역에 대한 지반오염의 확인부터 해당부지가 목표기준까지 정화되었는지 확인하는 모니터링, 부지의 사후 관리 및 복원시스템의 해체까지를 모두 포함한다. 이러한 지반복원기술은 크게 현장에서 직접 처리하는 방법(In-situ)과 탈현장 기술(Ex-situ)로 나눌 수 있으며 표 1에 나타난 것처럼 현장상황, 오염물질의 종류 및 농도 등의 기준을 통해 결정된다.

오염지반을 개량시키는 방법은 크게 물리화학적 방법과 생물학적 방법들로 분류할 수 있다. 물리화학적 방법으로는 세척수를 이용하는 Soil flushing/washing, 원위치에서 오염물질의 산화를 촉진하는 In-situ chemical oxidation, 오염물질의 유동을 고정시키는 Solidification, 흡입자에 흡착된 오염물질을 열적으로 탈착시키는 Thermal desorption, 전기적인 전위차를 이용한 방법으로 오염물질을 탈착시키고 이동을 촉진하는 Electrokinetic remediation, 그리고 휘발성 오염물질을 제거하는 Soil vapor extraction 등이 있다. 한편 생물학적 방법으로는 토양 오염물질 제거에 적절한 미생물을 주입하는 Bioaugmentation, 토착 미생물군의 활성을 촉진시키는 Biostimulation 기술이 있다. 이 중 Biostimulation은 공기(산소)와

영양소를 불포화 지역에 주입함으로써 미생물군의 활성을 촉진하여 오염물질을 제거하는 Bioventing, 오염토양을 굴착하여 호기 조건상태를 조성하여 오염물질을 제거하는 Biopile, 박테리아를 이용하여 슬러리상의 흡입자에 붙어 있는 오염물질을 제거하는 Bioslurry 공법 등으로 다시 분류된다. 그리고 기타 생물학적 공법으로는 중금속 오염물질을 식물의 흡착을 이용하여 제거하는 Phytoremediation이 있다(오재일, 2001).

다양한 복원기술 중 Soil vapor extraction은 휘발성이 강한 유류 오염물질인 halogenated VOCs, BTEX, non-halogenated VOCs 등의 처리에 매

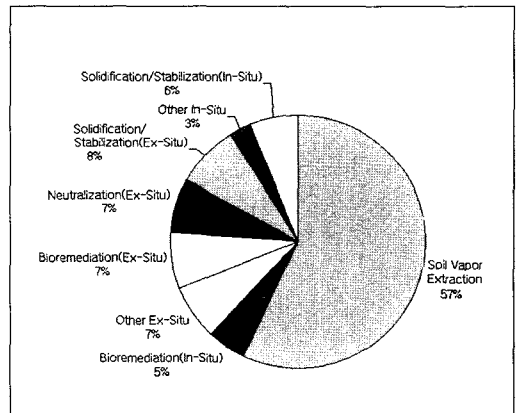


그림 1. Superfund에서 사용되고 있는 복구기술 (1982-1999)(EPA, 2001a)

표 1. 지반복원기술의 분류 (대분류)

복원조건	복원기술	
	In-situ	Ex-situ
처리량	많은 경우	적을 경우
오염원의 종류	유류/유기물/방사성 폐기물	중금속/유해폐기물(PCB등)
오염원의 분포 및 오염물질의 농도	분포가 광범위하고 농도가 낮은 경우	분포가 밀집되고 농도가 높은 경우
처리공간 확보여부	곤란	용이
처리기간	장기	단기
처리비용	저가	고가
처리효율	낮다	높다



우 유리하며 현재 널리 사용되고 있다. 그림 1에서 보듯이 미국 환경청에서 주관한 Superfund program에서 쓰이고 있는 복구 기술의 50% 이상을 Soil vapor extraction이 차지 하고 있으며, 그 외 Bioremediation과 Solidification, Stabilization 등이 비슷한 정도로 이용되었다.

### 3. Soil Vapor Extraction

#### 3.1 기술개요

Soil vapor extraction(SVE)은 불포화 대수층(Vadose zone)에서 흙을 진공상태로 만들어 줌으로써 흙에 흡착된 휘발성(VOCs) 오염물질의 농도를 저감시키는 원위치 복원 기술이며, Soil venting extraction 혹은 Soil vacuum extraction이라고도 불린다. 오염지반의 중심에 Well Screen을 설치하고 감압을 하게 되면 오염물의 휘발성분들은 증발하여 추출정(Extraction well)으로 배출된다. 추출된 증기들은 필요에 따라 활성탄 흡착 같은 처리 후 대기로 방출된다. 지하에서의 증가된 공기 흐름으로 인하여 오염물질에 대한 생분해(Biodegradation), 특히 휘발성이 낮은 오염물질에 대한 생분해가 일어

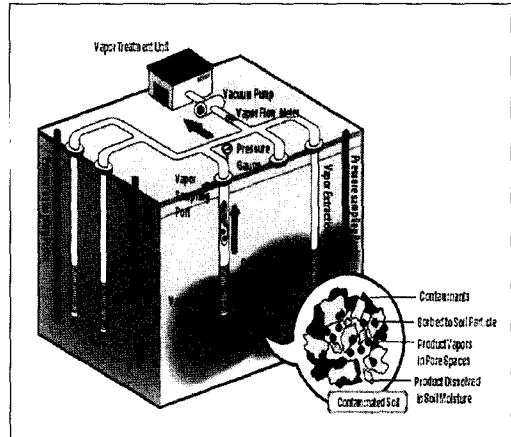


그림 2. SVE 처리 공정도

나므로 부수적인 효과도 기대할 수 있다. 그림 2는 SVE의 개념도를 보여준다.

SVE는 이용하는데 있어서 이차오염과 같은 부작용이 거의 없고, 흙의 특성상 발생하는 제한요인이 다른 기술에 비해 적은 편이며, 소요비용이 저렴하고, 광범위하게 오염된 지반의 복원에 적합한 기법이다. 또한 상대적으로 설치가 용이하며, 다른 미생물 공정에 비해 소요 시간이 짧고, 독성물질은 분리되어 다시 흙에 부착되지 않고 완전히 제거되어 분해된다. 또한 Air-sparging, Bioremediation과 같은 다른 복원기술과 복합적으로 사용될 수 있다. 이러한 이점 때문에 SVE를 이용한 흡제정 방법이 많

표 2. SVE의 장점과 단점(EPA, 1994, <http://www.epa.gov/swrust1/cat/sve1.htm>)

장 점	단 점
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 수행성이 증명됨</li> <li>● 장비를 구하기 쉽고 설치가 간단함</li> <li>● 설치되는 지역의 동요 최소화</li> <li>● 짧은 처리 시간 : 초상의 조건에서 보통 6개월에서 2년</li> <li>● 경제성 : 20~50\$/ton</li> <li>● 다른 기술과의 접목이 용이</li> <li>● 굴착이 불가능한 지역에도 적용 가능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 90% 이상의 제거율 확보 어려움</li> <li>● 낮은 투수계수 지반 혹은 다층지반에 적용시 효율성 감소</li> <li>● 휘발성이 낮은 오염물질은 처리 곤란</li> <li>● 추출된 증기의 처리를 위한 추가비용 필요</li> <li>● 공기 방출 허가 필요</li> <li>● 불포화된 흙에 대해서만 적용가능</li> </ul>

은 현장에서 적용되고 있다. 하지만 이 방법은 90% 이상의 제거율을 확보하기 힘들며, 투수성이 낮은 지반이나 불포화 지반에서는 적용하기 힘든 단점이 있다. 표 2는 SVE의 장점과 단점을 보여준다.

### 3.2 SVE 적용성 평가

SVE 기술은 지반의 투과특성과 오염물질의 휘발 특성에 따라 그 효율과 오염원 제거에 대한 성패가 결정된다. 따라서 이러한 영향인자에 대한 엄밀한 사전조사가 SVE의 적용성을 평가하는데 있어서 가장 중요하다.

#### 3.2.1 지반의 투과특성

##### (a) 고유 투수계수

##### (Intrinsic permeability)

지반 내에서 유체의 수송에 관한 능력을 의미하는 intrinsic permeability는 흙의 특성에 따라 다양한 범위( $10^{-13} \sim 10^{-5} \text{cm}^2$ )를 가지며 SVE의 효율성을 평가하는데 있어서 가장 중요한 인자이다. intrinsic permeability는 현장 투수능 시험 혹은 SVE pilot scale 시험을 통하여 정확하게 평가되어야 하지만 편의상 현장에서 채취한 코어샘플을 이용한 lab scale 시험을 통해 산정되기도 한다. 기본적으로 모래처럼 큰 입자로 구성된 흙은 실트나 점토처럼 작은 입자로 구성된 흙에 비하여 훨씬 큰 intrinsic permeability를 갖는다. 흙에 물이 함유되었을 경우에는 물이 간극을 채우기에 공기의 흐름이 방해되어

그 투과능이 저하되고 따라서 SVE의 효율성이 떨어진다. 특히 세립토로 구성된 흙의 경우에는 물이 함유되어 있을 가능성이 크므로 보다 엄밀하게 조사되어야 한다.

EPA(1994)에서 제시한 intrinsic permeability에 따른 SVE 시스템의 적용 효율성은 표 3과 같다.

##### (b) 흙의 구조 및 층상

##### (Soil structure and stratification)

흙의 구조와 층상은 추출 과정에서의 증기가 지반 내에서 이동하는 방법과 방향에 영향을 주므로 SVE의 적용성 평가에 있어 매우 중요하다. 이러한 인자들은 시추 주상도나 샘플의 면밀한 관찰을 통해 흙의 종류 및 구조 그리고 지질주상 단면특성을 확인함으로써 평가해야 한다. 미세 균열(microfracturing)과 같은 구조는 투과성을 증가시켜 SVE의 효율성을 증가시킨다. 서로 다른 투과성을 갖는 흙으로 층이 구분된 경우에는 보다 투과성이 큰 층을 따라 횡방향으로 증기가 이동하는 흐름이 증가하며 투과성이 작은 층을 따라서는 거의 흐름이 없다. 따라서 여러 층으로 구성된 지반에 SVE시스템을 적용할 경우에는 설계 단계에서 투과성이 낮은 층이 어디에 존재하는지를 확인하는 것이 중요하다.

##### (c) 지하수까지의 깊이

##### (Depth to groundwater)

지하수의 변동 역시 중요하게 고려되어야 한다. 계절이나 날씨(조류나 강우와 관계된)에 따라 발생하는 지하수의 변동은 오염 지반을 물에 잠기게 하거나 추출정의 일부를 물에 잠기게 함으로써 공기

표 3. Intrinsic permeability에 따른 SVE의 효율성

Intrinsic Permeability(k)	SVE 효율성
$k \leq 10^{-10} \text{cm}^2$	일반적으로 효율적
$10^{-10} \text{cm}^2 \leq k \leq 10^{-8} \text{cm}^2$	효율적일 수 있으나 정밀한 사전조사 요구됨
$k \geq 10^{-8} \text{cm}^2$	비효율적일 수 있음



의 유동을 방해하여 SVE 시스템의 효율성을 떨어뜨린다. 특히 수평 추출정이 지하수에 잠겼을 경우에는 SVE 시스템 전체에서 운영상에 큰 문제가 될 수도 있다. 이러한 이유로 인해 지표면에서 3 feet 이내에 지하수위가 존재한다면 SVE를 적용하기 힘들다. 또한 10 feet 이내에 지하수위가 존재할 경우에는 진공압에 의해서 물이 빨아올려지므로 (upwelling) 특별한 주의가 필요하다.

### 3.2.2 오염물질의 휘발특성

#### (a) 증기압(Vapor pressure)

증기압은 SVE system에서 적용성과 잠재적 효율성을 판단하는 가장 중요한 특성 중의 하나이다. 이것은 물질이 액체상태에서 증기상태로 넘어 가는 경향을 측정한 것으로, 주어진 온도에서 액체와 평형상태를 이루고 있는 기체의 압력을 말한다. 증기압이 큰 물질로 구성된 오염원일수록 쉽게 휘발되어 SVE 시스템에서 효율적으로 제거된다. 일반적으로 0.5mm Hg 이상의 증기압을 가지는 오염물질일 경우에 대하여 SVE는 효율적이다. 다양한 유류 구성성분의 증기압은 표 4와 같다.

#### (b) 오염원의 구성성분과 끓는점

##### (Composition and boiling point)

가솔린, 디젤유, Kerosene, 윤활유 등의 유류 오염물질은 다양한 성분으로 구성된 화합물이기에 각 구성성분의 특성 보다는 화합물의 전체적인 특성을 대변할 수 있는 기준에 의해 분류되어야 한다. 오염원의 휘발성과 관련된 끓는점은 유류 계열의 분류에 있어서 중요한 기준이 되며 이를 통해 SVE 시스템의 적용성을 평가할 수 있다. 일반적으로 끓는점이 250℃에서 300℃ 이하인 화합물은 SVE 시스템에서 제거가 가능하다. 표 5는 다양한 유류 화합물의 끓는점을 보여주고 있다. SVE는 거의 모든 가솔린

표 4. 유류 구성성분에 따른 증기압

유류 구성성분	증기압(mm Hg at 20℃)
Methyl Tertiary Butyl Ether(MTBE)	245
Benzene	76
Toluene	22
Ethylene dibromide	11
Ethylbenzene	7
Xylene	6
Naphthalene	0.5
Tetraethyl lead	0.2

표 5. 유류 화합물의 끓는점

유류 화합물	끓는점(℃)
Gasoline	40~225
Kerosene	180~300
Diesel fuel	200~338
Heating oil	> 275
Lubricating oil	비휘발성

물질을 제거 할 수 있으며, kerosene 과 디젤유 구성성분, 그리고 heating oil의 구성성분의 일부분에 대해 제거가 가능하다. 하지만 윤활유와 같이 끓는점이 매우 높아 SVE만으로 제거가 어려운 경우에는 Bioventing과 같은 기술에 의하여 제거해야 한다.

#### (c) 헨리상수(Henry's law constant)

헨리상수는 평형 상태에서 물에 녹아 있는 농도와 기체상의 부분압에 관계된 분리 계수(partitioning coefficient)이다. 다시 말하면 이는 용해된 물질이 액체와 기체로 분배되는 경향성을 보여주는 상수이며 휘발성에 밀접하게 관련된다. 높은 Henry 상수를 가진 물질일수록 기체/물 시스템의 평형 농도가 높아지고 따라서 SVE 시스템에 의해 쉽게 제거될 수 있다. 유류 계열의 구성성분에 따른 헨리상수는 표 6과 같으며 일반적으로 헨리상수가 100 기압 이상 되는 오염물질에 대해서 SVE 시스템의 적용이 가능하다고 한다.

표 6. 유류 구성성분의 헨리상수

유류 구성성분	헨리상수(atm)
Tetraethyl lead	4700
Ethylbenzene	359
Xylene	266
Benzene	230
Toluene	217
Naphthalene	72
Ethylene dibromide	34
Methyl Tertiary Butyl Ether(MTBE)	27

### 3.3 SVE 설계

#### 3.3.1 설계 인자

##### (a) 영향반경의 설계

(Design radius of influence)

추출정의 이격거리 및 개수를 결정하는데 있어 가장 중요하게 고려되어야 하는 인자는 영향반경이다. 영향반경은 흙 속에서 오염원들을 가장 적절하게 추출하고 휘발 시킬 수 있을만한 충분한 진공상태를 유지할 수 있는 추출정으로부터의 최대거리를 의미한다. 정상상태에서 방사상 압력 분포에 근거한 영향반경은 식 (1)로부터 산출 할 수 있으며, 실용적인 측면에서는 최소 0.1 inch의 수압에 해당하는 진공압이 관찰되는 지점까지의 거리로 정의되어 설계 시 이용된다.

$$P(r) = P_w \left[ 1 + \left( 1 - \left( \frac{P_{atm}}{P_w} \right)^2 \right) \frac{\ln(r / R_w)}{\ln(R_w / R_l)} \right]^{1/2} \quad (1)$$

$P(r)$ : 추출정에서의 거리가  $r$ 인 지점의 토양 공기압 (절대압력)

$P_w$ : 추출정에서의 토양공기압(절대압력)

$r$ : 추출정으로부터의 거리

$R_w$ : 추출정의 반경

$R_l$ : 영향반경

영향반경은 연직 · 수평 투과성, 지하수위, 지표 차단막의 유무, 주입정의 사용 유무, 토양의 이질성 (heterogeneity) 등에 따라 달라지며 일반적으로 5 feet(세립토)~100 feet(조립토) 정도이다. 다양한 흙의 종류에 따른 일반적인 영향반경은 표 7에 제시 되어 있다.

##### (b) 추출정 최상단의 진공압

(Wellhead vacuum)

Wellhead vacuum은 적절한 증기 추출 속도를 확보하기 위하여 필요한 추출정 최상단에서의 진공압이다. 일반적으로 3~100 inch의 수압이 사용되며 지반의 투과성이 낮을수록 적절한 영향반경의 확보를 위하여 큰 wellhead vacuum을 필요로 한다. 그러나 100 inch 수압 이상의 큰 진공압은 지하수위의 upwelling을 일으킬 수 있으므로 주의해야 한다.

##### (c) 증기추출속도

(Vapor extraction flow rate)

증기추출속도는 SVE 시스템의 운용시간 결정에 중요한 인자로서 일반적으로 10~100ft<sup>3</sup>/min의 범위를 갖는다. Pilot study를 통하여 산정되는 것이 보통이지만 수학적 혹은 물리학적 모델을 이용하여 계산되기도 한다(EPA 1993). 영향반경과 wellhead vacuum, 그리고 증기 추출 속도는 상호의존적이므로 설계시 하나를 변경할 경우 다른 것들도 동시에

표 7. 흙의 종류에 따른 SVE의 영향반경

흙의 종류	영향반경(ft)
굵은 입자의 흙	> 100
가느 입자의 흙	60~100
실트	20~40
점토	< 20



변경해야 한다.

(d) 기타 인자

초기 오염 농도(initial constituent vapor concentration)는 제거 속도와 운용시간 그리고 추출된 증기의 재처리 여부를 결정에 관련되며, 최종 오염 농도(required final constituent concentration)은 지반 복원 수위를 뜻하며 대상 지반의 범위 및 SVE 시스템 운용 종료를 결정하는데 관련된다. 이 밖에 복원 시간, 처리되어야 할 흙의 부피, 추출된 증기의 배출 규정, 시스템 건설상의 제한 등도 역시 SVE의 설계에 고려되어야 할 인자이다.

3.3.2 SVE 시스템 구성요소

SVE 시스템은 추출정, blower, piping, 증기 선처리 장치, 계측 및 제어 장치와 기타 추가장치(주입정, 지표 차단막, 지하수위 하강 펌프, 추출 증기 처리 장치) 등으로 구성되며 현장상태와 복원계획에 맞게 선택된다.

(a) 추출정

연직 추출정(vertical extraction well)과 수평 추출정(horizontal extraction well)으로 구분되며 대상 지반의 상황에 맞게 선택되어야 한다. 연직 추출정은 오염물질이 5~100 feet 깊이에 위치할 경우 그리고 지하수위가 10 feet 이상인 경우에 적절하다. 이에 반해 수평 추출정은 오염물질이 10 feet 이하의 깊이에 위치할 경우 혹은 일부 층에서만 오염물질이 존재할 경우 효율성이 뛰어나며, 오염물질이 25 feet 이상 존재할 경우에는 시공이 힘들다.

추출정의 개수는 전체 대상 영역을 단일 추출정의 영향반경으로 나눔으로써 구하거나 전체 추출 속도를 단일 추출정의 추출 속도로 나눔으로써 구할 수 있다. 추출정은 전체 오염 지역을 모두 커버할 수 있도록 균등하게 위치시키되 상대적으로 오염 농도가

질거나 투과성이 낮은 영역에서는 보다 조밀하게 설치해서 제거 속도를 높일 필요가 있다. 또한 지표 차단막이 존재하거나 설치될 예정이라면 추출정의 간격을 늘릴 수 있는데 이는 횡방향으로 이동하는 공기의 양이 증가하기 때문이다.

(b) Blower

Blower는 흙에 부압력 경사(negative pressure gradient)를 발생시켜 증기 추출에 필요한 공기 흐름을 만들어 내는데 사용된다. 일반적으로 centrifugal blower, regenerative blower, rotary lobe blower의 세 가지 종류가 사용되고 있으며 이들의 종류와 그에 따른 크기는 추출정 수두에서의 설계 진공압과 총 유량에 따라 결정된다. 그림 3은 진공압과 유량에 맞는 blower의 종류를 보여준다. Centrifugal blower는 높은 유량(>280 ft<sup>3</sup>/min)과 낮은 진공압(<30 inch)을 요할 경우에 사용하며, Regenerative blower는 약간 높은 진공압(>80 inch)에서 적용된다. rotary lobe blower는 매우 높은 진공압(>80 inch)과 적정량의 공기 유량이 필요할 경우 적용된다.

(c) Piping

추출정과 blower 및 기타 장치를 연결하는 piping은 현장 상태, 온도, 인접 건물 등에 따라 지상 혹은 지하에 설치되며 일반적으로 지중내에 설치된다.

(d) 증기선 처리 시스템

(vapor pretreatment system)

추출된 증기는 응축액, 기포를 포함하는 지하수, 미립자 등을 포함할 수 있으며 이것들은 blower에 손상을 입히고 추출 증기 처리의 효율성을 떨어뜨린다. 이러한 피해를 최소화하기 위하여 증기는 blower로 들어가지 전에 수분 분리장치(moisture separator), 미립자 필터(particulate filter) 등에서 선처리 된다.

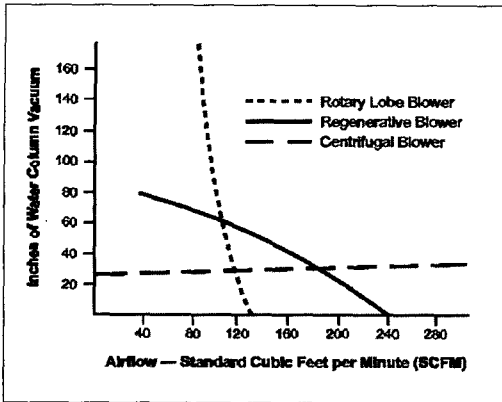


그림. 3 Blower의 종류에 따른 Performance Curve (EPA, 1994, <http://www.epa.gov/sewrust1/cat/sve1/htm>)

(e) 모니터링 및 제어 시스템 (Monitoring and control system)

계측 시스템은 압력, 유량, 오염물질 제거 속도, blower의 온도 등을 측정하며 이를 통해 시스템 조정 및 복원 과정에 필요한 정보를 확보한다. 제어 장치는 각 추출정의 압력 및 유량을 조절한다.

(f) 기타 추가 장치

공기 주입정 (air injection well)은 공기 흐름의 분산을 막고 유량을 증가시키기 위해 이용되며 주로 오염물질이 깊이 위치하거나 투과성이 낮은 지역에서 효율적이다. 지표 차단막 (surface seals)은 지표면의 물이 투과되는 것을 방지하기 위하여 설치되며, 지하수위 하강 펌프 (groundwater depression pump)는 지하수위를 낮추고 upwelling을 방지하기 위하여 이용된다. 증기 처리 시스템 (vapor treatment system)은 추출된 증기를 방출하기 전에 처리함으로써 이차적인 오염을 방지하기 위하여 설치되며 활성탄 (granular activated carbon), catalytic oxidation, thermal oxidation 등이 주로 이용된다.

## 4. 시공사례

### 4.1 국내사례

디젤과 중금속으로 오염된 복합오염지반지역 JCRO의 복원을 위하여 SVE와 Bioventing기술의 복합 적용을 위해 개발한 hybrid system을 이용하여 pilot test를 수행하고, SVE의 오염물질 처리가능성을 평가하였다. 현장에 적용된 pilot 장치는 SVE용 추출정 2기, Bioventing용 주입정 2기, 주위의 감시정 7개로 구성되어있으며 공기 투과성 (air permeability) 측정용 감시정 3개가 별도로 설치되었다. SVE 추출정을 통하여 감압을 실시하고 별도로 설치된 2m, 4m, 6m 깊이의 감압 감시정의 압력 강하를 측정하였다. 또한 SVE의 운영에 의해 처리되는 VOC 량을 산출하기 위하여 추출증기의 VOC 변화량도 관찰하였다.

현장에서 portable VOC meter를 이용하여 측정 한 초기 VOCs의 농도는 834~2,400 ppm이었다. SVE기술 적용기간 동안 VOC 제거량은 실험기간 중 분당 3.6 m<sup>3</sup>/min로 측정되었으며 정상상태로 3주간 SVE 처리를 실시하였다. 그리고 추출된 오염 농도를 기준으로 총량을 산정한 결과 SVE 시스템으로 총 17.42 kg의 오염물질을 제거할 수 있었음을 알 수 있었다.

### 4.2 국외사례

Rocky Mountain Arsenal (RMA) Superfund site의 Moor Pool 지역에서는 TCE가 주를 이루는 할로젠화 된 휘발성 유기물 화합물 (VOCs)를 제거하기 위해 SVE가 사용되었다. 이 지역은 원래 세척 서비스 기구, 운반차량, 레일로드 차량, 디젤, 가스,





오일 제품들이 저장되어 있던 곳이다.

SVE 시스템은 pilot-scale의 실험을 거친 후 full-scale로 확장하는 것으로 계획되어 있었고, 적용에 있어서도 pilot-scale 실험에서 만족할 만한 증기 오염원들이 제거된 것이 확인된 후 1991년 6월에서 12월까지 가동 되었다. Motor Pool 지역 안에서 알은 증기 추출정과 깊은 추출정이 하나씩 사용되었으며, 증기 관측정이 부가적으로 설치되었다. 초기 65 ppm까지 측정되었던 TCE가 증기 관측정에서 검출되지 않을 때까지 이 프로그램을 수행 하였고, 이로써 약 70 파운드의 TCE가 제거되었다. 시스템의 운용과정에서 수집된 수행 결과들을 종합해 보면 이 지역 아래에 놓여 있던 진흙 층이 얇은 추출정과 깊은 추출정의 수직적인 영향반경을 제어하여 SVE 시스템의 수행에 영향을 미친 것을 볼 수 있다.

이 시스템에서는 설치 및 가동비에 75,600 달러, 유통과정과 준비작업, 모니터링, 실험결과 분석비를 포함한 전처리 과정에 88,490 달러, pilot study를 포함한 후처리에 19,650 달러가 사용되었다.

## 5. 맺음말

토양증기추출법은 불포화 대수층에서 흙을 진공 상태로 만들어 줌으로써 흙에 흡착된 휘발성(VOCs) 오염물질의 농도를 저감시키는 기술로서 지반오염에 있어서 가장 큰 비중을 차지하는 유류 오염물질 및 염소계 용제를 제거하는데 효과적이다. 따라서 현재 가장 널리 사용되고 있는 복원기술 중 하나이며 앞으로 그 위상은 변치 않을거라 생각된다.

토양증기추출법인 적용성 평가, 시스템 설계, 시공 및 운영의 단계를 거쳐 지반을 복원한다. 적용성 평가는 크게 지반의 투과특성과 오염물질의 휘발특

성 측면에서 진행된다. 이 중 지반의 투과특성은 고유 투수계수, 대상지반의 구조 및 층상, 지하수위까지의 거리 등의 기준에 의해 평가되며 오염물질의 휘발특성은 유류 구성물질의 증기압과 헨리상수 그리고 유류 화합물의 끓는점을 통해 평가된다. 토양증기추출법의 적용성이 확인된 후에는 영향반경, 추출정 최상단의 진공압, 추출 속도 등의 다양한 인자를 고려하여 시스템의 구성요소인 추출정, blower, piping, 선처리 시스템, 계측 및 제어장치 등을 선택하고 설계한다.

토양증기추출법은 수행성이 이미 증명되어 있으며 설치의 용이성, 경제성 등의 장점을 가진다. 하지만 90% 이상의 제거율을 확보하기 어려우며 투과성이 낮은 불포화 지반에서는 적용하기 힘들다. 따라서 Bioventing, Air sparging, Dual-phase extraction, Directional drilling, Pneumatic and hydraulic fracturing, Thermal enhancement 등과의 접목을 통해 토양증기추출법의 제한점을 줄이면서 장점을 부각시키는 방향으로 현재 많은 연구가 진행 중이며 앞으로도 계속될 것이다.

## 참고문헌

1. 국립환경연구원 (2000), 오염토양정화 기술([http://211.114.21.1/remscreen/rs\\_index.html](http://211.114.21.1/remscreen/rs_index.html)).
2. 오재일, 이홍연, 최영화 (2001), "SVE(Soil Vapor Extraction) 기술과 시스템 최적화 방안", 환경공학 연구정보센터.
3. 김학운, 오재일 (2004), "SVE(Soil Vapor Extraction)를 이용한 토양 내 TCE 정화 실험", 대한환경공학회 2004 춘계학술연구발표회 논문집, pp. 1309-1311.

4. 강순기, 김무훈 (1999), "유류오염지역 정화기술인 SVE와 Bioventing 혼합공정의 현장적용성 실험연구", 한국환경농학회 학술발표회 논문집.
5. 윤석표, 차명철, 류범수, 윤범한 (1996), "Soil Vapor Extraction과 Bioventing 기술의 원리와 적용에 관한 고찰", 한국 폐기물 학회지 Vol 13, pp. 161-171.
6. 이민호 (2000), 21세기 토양환경의 문제 및 발전방안, 국립환경연구원.
7. 환경부 (2001), 2000 토양 측정망 운영결과 (<http://www.me.go.kr>).
8. 김무훈, 강순기, 조미영, 정우성, 박덕신 (2000), "SVE와 Bioventing 기술을 이용한 유류 오염토양의 복원", 한국지하수토양환경학회 춘계학술발표회, pp.137-140.
9. EPA (1994), Soil Vapor Extraction, Office of Underground Storage Tanks (<http://www.epa.gov/swerst1/cat/sve1.htm>).
10. EPA (1996 a), A citizen's Guide to Soil Vapor Extraction, EPA-542-F-96-008.
11. EPA (1997 a), Analysis of Selected Enhancements for Soil Vapor Extraction, EPA-542-R-97-007.
12. FRTR (1995 b), Cost and Performance Report: Soil Vapor Extraction at the Rocky mountain Arsenal Superfund Site, motor pool Area(OU 18), Commerce city, Colorado.

## 제 5회 한일 지반환경 세미나 안내 및 Call for Papers

2001년 서울대학교에서 1회 세미나 이후 올해로 5번째인 한일 지반환경 세미나가 다시 서울대학교에서 개최됩니다. 서울대학교 지반환경공학연구소와 한국건설기술연구원(KICT), 그리고 일본 교토대학교(Kyoto Univ.)가 공동으로 개최하는 이번 세미나에서는 양국의 다양한 지반환경분야에서 연구되는 주제에 관한 발표와 토론을 계획하고 있습니다. 따라서 이 분야와 관련된 분들의 많은 성원을 바라며, 세미나 논문 발표에 많은 분들의 참가를 부탁드립니다.

- 일 시 : 2005년 6월 4일 (세미나), 6월 5일 (현장견학)
- 장 소 : 서울대학교 멀티미디어 강의동(43-1동)
- 주 제 : 지반환경 전분야
- 논문 요약문 제출 일시 : 2005년 4월 15일까지
- 논문 요약문 제출 방법 : 온라인 제출 (monkey@snu.ac.kr)
- 논문 전문 제출 기한 : 2005년 5월 15일까지
- 발표방법 : 15분 발표 5분 질의응답 (영어발표)
- 참 가 비 : 무료
- 연 락 처 : 박준범(교수) 02-880-8356 (junbpark@snu.ac.kr)  
이광현(박사과정) 011-9722-2925 (monkey@snu.ac.kr)