

SVE/Bioventing시 토양의 투기계수 및 영향반경에 관한 연구

A Study on Air Permeability and Radius of Influence During SVE/Bioventing

이철호(Cheol-Hyo Lee)^{1,*} · 장원용(Won-Yong Jang)^{2,**} · 전연호(Yeon-Ho Jeon)^{3,*} ·
이진용(Jin-Yong Lee)^{3,***} · 이강근(Kang-Kun Lee)^{3,***}

요 약: 현장 pneumatic test를 통해 유기화합물로 오염된 불포화 토양의 투기계수와 압력 및 산소의 영향반경을 평가하였다. 대상지역은 약 3미터의 조립질로 구성된 얇은 불포화대로 공기 주입/추출시 압력이 매우 빠르게 정류상태에 도달하였다. 본 연구에서는 측정된 압력 및 산소농도 변화를 이용하여 Theis(1935)와 Hantush(1960) 방법으로 해석하였다. 연구지역의 투기계수는 $1.64 \times 10^{-7} \sim 5.66 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$ 로 추정되었다. 현장시험으로 추정된 투기계수와 영향반경은 SVE 또는 bioventing 시스템의 설계시 중요한 결정인자로 활용될 수 있다.

Abstract: Soil air permeability and influence of radius in air injection/extraction tests were estimated. These are important factors in the determination of optimal design for SVE or bioventing system. For evaluation of the effects of air leakage from the ground surface on those factors, Theis (1935) and Hantush (1960) methods were used in the data analysis. The air permeability of the studied area was in the range of $1.64 \times 10^{-7} \sim 5.66 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$, and this result would be used for the design of SVE or bioventing system.

개 요

유류 또는 유해화학 물질 저장 시설로부터 유출되는 휘발성 유기화합물은 불포화 토양의 주요 오염원이 되며, 이러한 오염은 최근 심화되고 있다. 이러한 오염지역을 정화하기 위한 기술로는 굴착, 생물학적 처리, 토양증기추출법(SVE), bioventing 등이 있다. 토양증기추출법 및 bioventing은 휘발성 화합물 등의 오염물을 토양으로부터 제거하는 경제적인 기술로 알려져 있다. 토양증기추출법은 토양에 수평 또는 수직 스크린 관정을 설치하여 진공으로 토양 가스를 추출하는 방법이다. 휘발성 오염물은 토양입자나 물분자 또는 비수용성 유체로부터 기체상으로 전달된 후 추출되어 지상의 후처리시설로 이동되거나 대기중으로 배출된다. Bioventing은 토양에 공기를 주입하여 토착 미생물의 활동을 증가시켜 오염물의 생물학적 분해를 향상시키는 기법이다. 일반적으로 이 기술은 현장에서 저속으로 불포화 토양층에 공기를 주입하여 토양 미생물에게 산소를 공급한다(Hoeppe *et al.*, 1990). 이 때 최적의 미생물 활동을 보장하는 양의 산소만 주입되도록 저속으로 공기를 주입한다. 토양증기추출법과 bioventing은 모두 기화와 생분해를 이용하지만, SVE는 지하매질로부터 오염물질을 기화시켜 제거하는 것이 주

목적이고 bioventing은 생분해를 극대화하는 것이 목적이다.

기화와 생분해의 과정을 독립적으로 적용하는 것은 어려우며 SVE와 bioventing은 적절하게 같이 이용되는 경우가 많다. 두 가지를 혼용하는 정화시스템에서는 초기단계에는 SVE를 후기단계에는 bioventing이 이용된다. 기화와 생분해를 촉진하기 위해서는 적절한 공기의 공급이 필수적이며, 이들의 영향범위는 압력 및 산소의 영향반경으로 표현되며 매질의 투과성에 비례한다(Toy, 1997).

오염지역 정화기술의 대안으로 SVE/bioventing을 선정하는 경우의 주요 결정인자는 오염물의 특성과 투기계수 등의 현장특성이다. 이들 시스템을 적절히 설계하기 위해서는 토양내 기체의 거동성질을 특성화하는 것이 필수적이다. 이들 값은 토성 또는 입자 분포를 근거로 추정하는 방법, 현장에서 채취한 토양 시료를 이용하여 실내칼럼시험을 통해 계산하는 방법 그리고 현장시험으로부터 구하는 방법이 있다. 현장시험은 공기 주입/추출시 압력센서로부터 거리별, 시간별 압력변화를 이용하게 된다.

현장 pneumatic pump test는 오염지역의 불포화층에 대한 실제적인 자료를 제공하므로 많은 연구자에 의해 실시되었다. 정류 및 부정류 상태에서의 투기계수에 관한 기존의 연구가 있었으며 지표면으로의 공기 침투가 많은 경우에 대하여 지하수의 누수대수층 모델을 적용한 부정류해가 사용되기도 하였다. Massmann and Madden(1994)은 공기 전도도의 계산에 지표면으로부터의 leakage영향을 무시한 경우와 이를 고려한 경우에 대해 각각 Theis method(1935)와 Hantush method(1960)를 적용하여 비교하였다. Widdowson 등(1997)은 Hantush model을 이용하여 부정류 압력강하 자료로부터 투기계수를 추정하였다.

* 삼성물산 건설기술연구소(Institute of Technology, Samsung Corporation)

** 조지아공과대학교 토목환경공학과(Department of Civil and Environmental Eng., Georgia Institute of Technology)

*** 서울대학교 자연과학대학 지구환경과학부(School of Earth & Environmental Sciences, Seoul National University)

하지만 매우 빠른 시간내 압력이 일정한 상태에 도달하는 경우에는 정류해를 적용하였다.

본 연구는 톨루엔과 자일렌의 누출로 인하여 불포화대 및 지하대수층이 오염된 지역에서 수행되었으며, 공기 주입과 추출을 용이하게 수행하기 위하여 6 지점의 two-level venting well을 그리고 압력 및 가스 농도를 측정할 수 있는 관측센서를 거리 및 깊이별로 각각 설치하였다. 이를 통해 현장 pneumatic test시의 압력 및 산소의 영향반경을 평가하였다.

연구지역

연구대상지역은 지하수 흐름 상류에 위치한 각 3개의 지상 및 3개의 지하 저장탱크로부터 톨루엔과 자일렌, 경유가 유출되어 불포화대와 지하대수층이 오염된 지역이다. 유출탱크는 페인트 공장내에 위치하며, 회사 경계지역의 담장을 따라 설치되어 상류지역에 위치한 이들 저장탱크로 인해 인근 하류 지역이 오염되었다. 이 지역은 초기에 하천주변의 저지대였으나 공장조성에 의하여 토양 복토와 다짐이 이루어졌고, 산업시설이 설치되었다. 현장시험은 가장 오염이 심한 유출탱크 주변의 포장되지 않은 주차장지역에서 실시되었다. 대상지역 남쪽으로 100 m가량 떨어진 곳에 폭 30 m 가량의 하천이 남동에서 북서쪽으로 흐르고 있다.

이 지역의 깊이별 토양분포는 Table 1과 같다. 상부 1미터 가량은 모래와 점토가 혼합된 복토층이고, 그 하부에 모래와 자갈 등으로 혼합된 사력층과 연암, 경암층이 각각 발달되어 있다. 지하수위는 지면에서 2.0~4.0 m 사이에 분포하며, 우기에는 지면아래 1 m까지 상승한다. 지하수 흐름방향은 상류의 남동쪽에서 저장탱크를 지나서 하류의 오염지대를 가로질러 북서쪽으로 흐르고 있다.

주 오염물질은 톨루엔이며, 저장탱크는 10년 이상 되었다. 약 6년 전에 보수되어 현재 유출은 없는 것으로 보이나, 이미 유출된 오염물이 불포화대 및 지하수대 상부에 다량 존재하여 지하수 흐름과 수위변동에 의해 수평 수직으로 이동/확산되고 있다. 특히 지하수대는 모래 및 자갈로 구성되어 지하수의 흐름을 원활히 함과 동시에 오염물이 쉽게 이동할 수 있는 취약성을 보이고 있다.

불포화대내의 휘발성유기물질로 인해 토양가스중의 산소는 2%이하로 매우 부족한 상태이며, 이산화탄소는 10% 이상으로 나타나 이 지역에서의 미생물 활성이 양호함을 알 수 있다. 또한 메탄이 존재하여 이 지역은 혐기성 분해양상을 보이고 있음을 확인하였다. 따라서 이 지역의 정화를 위해 SVE, bioventing 또는 air sparging과 같은 in-situ air treatment 정화기술이 적용될 수 있을 것으로 판단되었으며 정화시스템의 선정과 설계를 위한 기본자료로 토양의 투기계수의 측정이 요구되었다.

영향을 받는다. 토양의 투기계수와 영향반경은 실제 현장규모의 SVE, bioventing 시스템에서 주요한 결정인자이다. 현장시험을 통해 토양의 투기계수와 영향반경에 대한 보다 정확한 값들을 얻을 수 있다. 영향반경은 두 가지로 정의되는데 산소 및 압력영향 반경이다. 산소영향반경은 venting well에서 산소의 농도변화가 인지되는 곳까지의 거리로 결정할 수 있다(USEPA, 1995). 압력영향반경은 거리 대 압력의 반대수 그래프, 거리 대 압력강하 그래프, 또는 로그거리 대 압력/진공의 제곱 그래프로부터 구할 수 있다(Toy, 1996; Suthersan, 1997). 현장에서 영향반경의 산정에는 압력자료가 산소자료에 비하여 빠른 시간내에 얻어지므로, 압력영향반경이 가스의 물리적 흐름을 예측하는데 사용된다. 그러나 투기성이 매우 큰 입자의 경우, 관측 가능한 영향반경보다 멀리 가스흐름이 발생할 수 있다(USEPA, 1995). 그러므로 투과성이 큰 지역에 대해서는 압력 자료 뿐 아니라 산소농도자료도 영향반경산정에 사용되어야 하나 이에 대한 현장 연구는 미흡한 실정이다.

영향반경과 투기계수

투기계수(L^2 또는 darcy)는 매질인 토양이 얼마나 기체를 잘 통과시키는지에 대한 지표로서 유체와 매질의 특성을 함께 나타내는 수리전도도(L/T)와는 구분된다(USACE, 1995). 이 투기계수는 SVE/bioventing 시스템의 디자인과 효율을 결정하는 중요한 토양상수중 하나이다. 투기계수를 결정하는 3가지 방법으로 포화수리전도도 함수로 측정하는 방법, 입자크기의 함수로 측정하는 방법과 현장가스 추출시험을 이용한 방법이 있다(Massmann, 1989). 이중 현장실험은 현장의 특성을 잘 반영함으로써 더욱 정확한 값을 알 수 있다. 현장 투기계수 측정을 위한 두 가지 방법으로 부정류 자료를 이용하는 것과 정류 압력과 영향반경을 이용하는 방법이 있다(Dupont, 1993; Massmann, 1989, 1994; Widdowson, 1997). SVE 시스템에서 지표면으로의 공기 leakage 여부에 따라 피압 혹은 누수피압 대수층모델을 적용하여 투기계수를 구할 수 있다.

본 연구의 대상지역은 지하수위가 얕아 지표면으로부터 공기유입이 크게 일어날 것으로 추정되므로, 공기유입을 고려하지 않은 Theis solution(1935)과 이를 고려한 Hantush leaky solution(1960)을 함께 적용하여 투기계수를 산정하였다. 또한 압력이 평형상태에 매우 빠르게 도달되므로 정류상태에서 압력의 거리별 변화를 적용하여 투기계수를 구하였다. 투수성이 매우 큰 지역임을 고려하여, 미세압력 강하 자료와 함께 산소

Table 1. Description of soils at the study site

Interval (below ground surface, m)	Physical description
0~1.0	Reclaimed soil: Dense brown and brown-grey sand-silt, clay mixtures
1.0~2.4	Well graded sands, gravelly sand with little fines
2.4~3.2	Brownish grey, wet angular pebbles with medium to coarse sand
3.2~4.1	Dark grey and greenish-grey, saturated silty gravel with little sand
4.1~4.8	Weathered rock of granite: Highly weathered greenish grey-brown, moist silty fine-medium sand with partially rock fragments

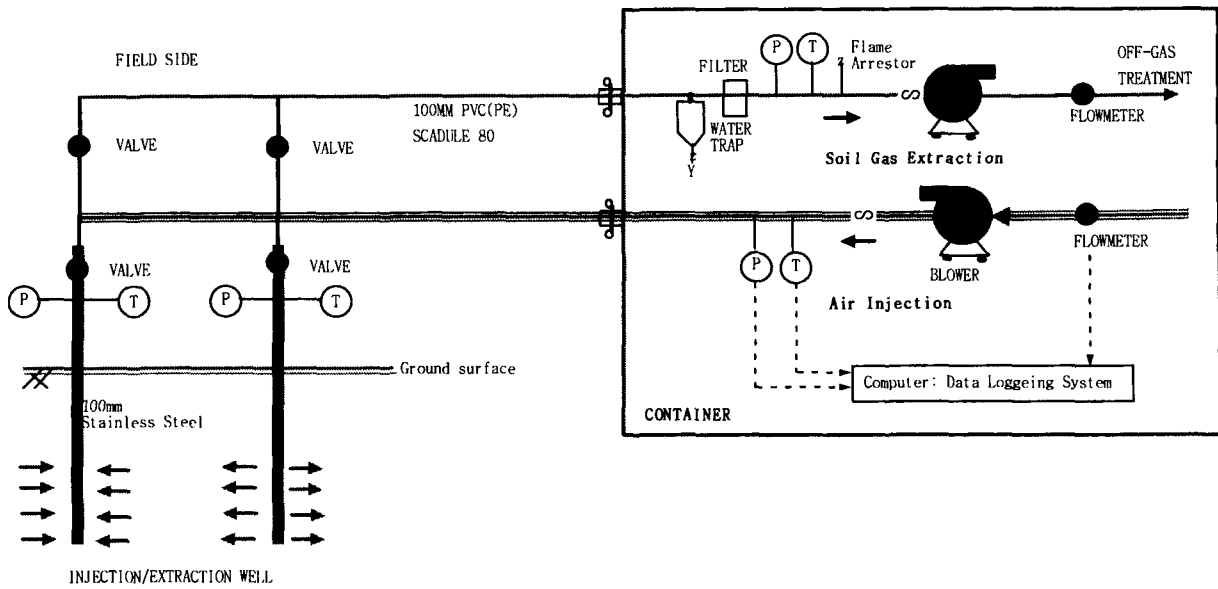


Figure 1. Hybrid SVE and bioventing system.

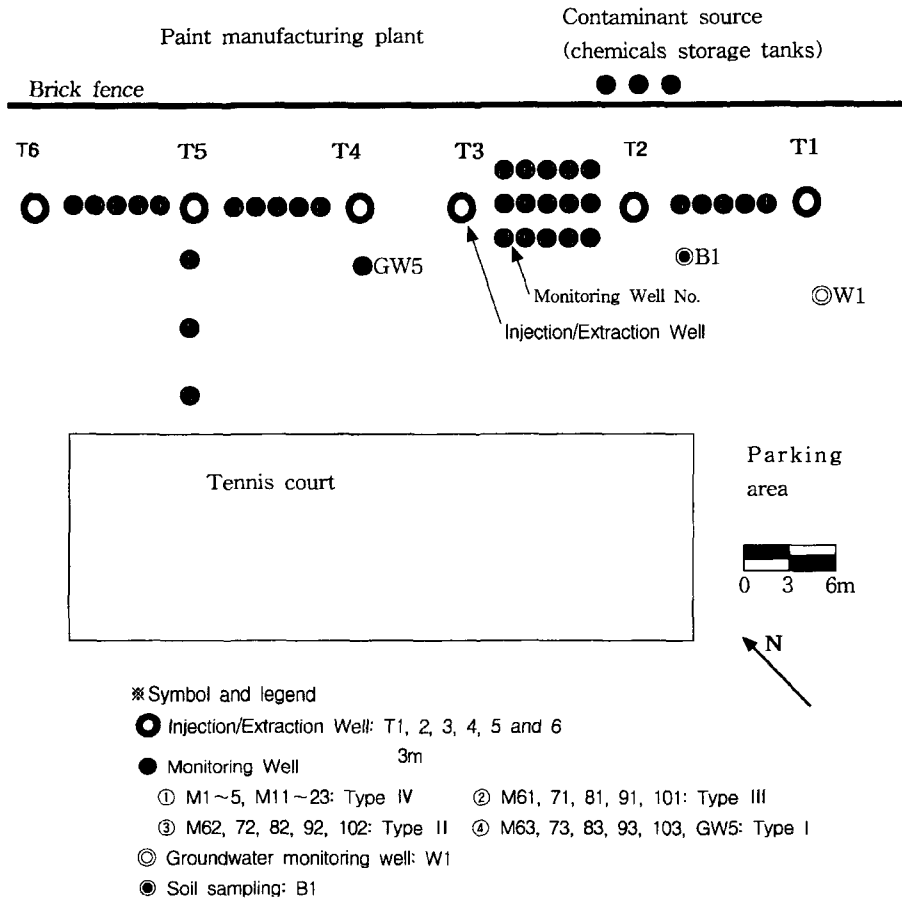


Figure 2. Configuration of the test scheme.

농도 변화를 측정하였다.

현장실험설계

현장에 설치된 pilot plant system은 공기주입과 추출을 적절

하게 적용할 수 있도록 독자적으로 설계하였다(삼성건설기술연구소, 1999). 현장의 이동형 system은 크게 ①콘테이너에 탑재되어 있는 주입/추출장치 ②venting well 및 관측정 시설 ③압력 및 가스분석장치로 나누어진다(삼성건설기술연구소, 1999). 각 venting well별로 밸브를 설치하여 주입과 추출을 개별적으

로 또는 함께 적용할 수 있도록 설계하였다. 현장에 설치한 장치의 구성은 Figure 1과 같다.

① Pilot Plant의 구성

컨테이너에 설치한 이동형 pilot 장치는 속도조절이 가능한 3개의 blower(2, 7, 15 마력), 유량/압력/온도 측정센서, 운전 자료의 저장을 위한 컴퓨터시스템으로 나눌 수 있다. 추출실험시 배기가스로부터 오염물을 제거하기 위하여 소각로를 배출장치의 후반부에 설치하였다. Blower(ring blower)는 유량과 주입압에 따른 영향을 평가하기 위하여 용량별로 4개를 설치하였다. 본 연구에는 2와 7 마력을 주로 이용하였으며, 이들은 각 속도 조절 장치를 통하여 유량을 구간별로 조절할 수 있다. 공기주입시 공기의 오염을 방지하고, 추출시 가스에 포함되어 있는 오염물에 대한 손실을 방지하기 위하여 진공펌프로서 ring blower를 선정하였다. 토양으로부터 가스를 추출할 경우, 토양내 진공으로 인하여, 지하수면이 상승하게 되고 이로 인하여 지하수가 추출관내로 일부 유입될 수 있으므로 이들 지하수 및 수분의 분리를 위하여 공기-물 분리기를 설치하였다. 자료의 자동화 처리를 위하여 측정되는 유량, 압력, 온도 등은 제어컴퓨터로 전송되어 지정한 시간 간격별로 자료를 저장한다.

② 주입/추출 및 관측점

현장에 설치된 관정은 공기의 주입과 추출을 위한 관정과 지하수위 변화를 측정하기 위한 관정 그리고 토양가스의 성분 조사와 변화를 측정하기 위한 관정 등 3가지로 나눌 수 있으며 배치도는 Figure 2와 같다.

위의 3종류 관정은 목적에 따라 그 형태가 달라진다. 주입/추출 관정은 모두 6개로 Figure 3(a)와 같이 2개의 스크린 층으로 구성되어 있다. 이 관정의 스크린 부분은 지하 2.3~3 m 와 1.3~2 m 에 각각 설치되어 있고 2중 관의 구조이므로 깊이 별 주입/추출이 가능하다. 또한 관정의 활용도를 높이기 위하여 주입과 추출 실험을 할 수 있도록 설계하였다. 주입 및 추출 유량 및 압력은 관정의 입구에서 자동으로 측정되고 저장 시스템으로 전송된다.

관측정은 압력측정과 토양 가스 샘플링/현장센서 등을 위하여 설치하였다. 관측정의 형태는 type I과 II의 2가지로 구분되며, type I은 1인치의 PVC재질의 piezometer를 1, 2와 3 m 깊이별로 설치되었고, type II는 강관을 이용하여 3 m 깊이로 제작하였다. 총 21개의 관측정을 주요 측정지점에 정해진 간격으로 현장에 설치하였으며 관측정의 구조는 Figure 3(b)와 같다.

③ 압력/토양가스 분석

주입/추출정의 압력은 관정에서 자동으로 제어컴퓨터로 보내진 후 시간별로 저장된다. 관측정에서 압력은 on-situ data logging sensor에 의해 지정된 시간별로 저장되고 실험 후에 컴퓨터로 자료가 모아졌다. 일정주기별로 현장압력 미터기로 압력을 측정하였으며 산소, 이산화탄소, 메탄은 landfill gas analyser(GA 94)로 분석하였다.

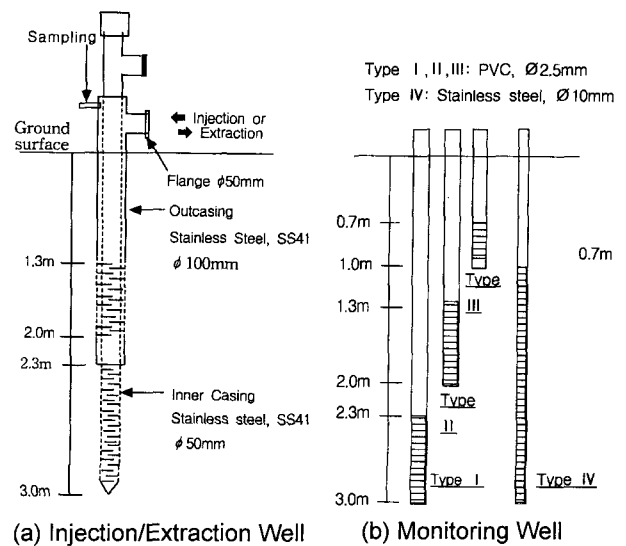


Figure 3. Injection/extraction and monitoring Test 1.

실험과정

본 연구는 톨루엔을 포함한 휘발성 유기물질로 오염된 지역의 정화를 위한 시스템 개발의 한 부분으로 수행되었다. 기본적인 조사를 통하여 지하수위가 알게 분포하는 것을 인지하였으며 오염물이 불포화대를 중심으로 분포하고 있어 이의 정화를 위한 기본자료로 영향반경 및 투기계수를 조사하였다. 이 실험은 크게 공기주입과 토양가스추출로 나눌 수 있다. 총 5 종류의 실험이 다양하게 수행되었으며, Test 1, 2, 와 4의 실험 기간은 각각 5일, 23일, 8일로 각 1회 수행되었고, Test 3과 5는 각 3시간씩, 3회 및 2회 반복 실험을 하였다. 주입시험 1은 venting well의 상부 스크린만을 개방하고 시험 2는 모두 개방하여 수행하였다. 추출실험은 지하수위의 상승을 고려하여 스크린을 선택적으로 개방하여 수행하였다. 각 venting well은 배관으로 연결되어 있으므로 대상 관정만 개방되도록 밸브를 조작한 후, 0.5 기압(atm)이상의 압력을 가하여 배관의 leakage를 우선적으로 검사하였다. 그 후 시험에 사용될 유량을 blower speed control system을 통하여 조절하였다. 주입/추출 유량, 관정내 압력, 온도 그리고 대기압 등은 정해진 시간별로 컴퓨터로 전송되어 저장되었다. 또한 관측지점에서의 압력 및 산소농도는 일정 시간단위(5초-10분)로 측정될 수 있도록 하였으며, 디지털 계기를 이용하여 주기적으로 측정하였다. Test 별 시험대상관정 및 조건은 Table 2에 제시되어 있다. Test 1, 2 그리고 3은 관정 T²에 대하여 주입과 추출 시험을 수행하였고, 각각 유량을 달리하여 적용하였다. 시험에 사용된 유량범위는 3490~9440 cm³/s이고, 압력은 -756~+625 mmH₂O 였으며 시험별로 압력에 비하여 유량에 큰 차이를 보였다. Venting well T2 주변의 관측점은 in-situ oxygen sensor의 설치가 가능하였으나, venting well T4와 T5에서는 in-situ oxygen sensor의 설치가 불가능하였다. 관측지점에서 산소농도의 측정을 위하여 현장 산소미터기를 사용하였다. Test 4와 5는 추출시험만을 수행하였다. 각 시험은 유량중심으로 조절되었으며, 초기 지정후

Table 2. Experimental conditions for field tests

Test	Test Well No.	Screen Interval (depth, cm)	Flowrate (cm ³ /s)	Gauge Pressure*, well (mmH ₂ O)	Atmospheric Pressure (mbar)
1	T2	200-300	9,440	625	990
2	T2	130-300	3,610	440	991
3	T2	130-300	5,000	-756	1002
4	T4	200-300	9,333	-443	993
5	T5	130-200	3,490	-422	995

*Positive values: injection tests.
Negative values: extraction tests.

인위적인 조절은 없었다. 지표면 1미터 하부는 조립질 모래로 주로 구성되어 있어 비교적 낮은 추출/주입압을 사용하였고 추출시 지하수면의 상승으로 더 높은 진공압력을 적용하지 않았다.

결 과

3개의 다른 venting well에서 2번의 주입과 3번의 추출시험을 실시한 결과 각 시험에서 유속은 초기에 약간의 변화를 보인 후 거의 일정하게 유지되었다. 본 시험에서는 깊이 및 거리별 압력변화와 유량 그리고 불포화대의 산소농도를 측정하였다. 거리별 압력분포는 압력의 영향반경 및 불포화대의 투기계수의 계산에 이용되었으며, 산소의 시간별 농도변화는 거리별 산소전달성의 판단에 이용되었다. 또한 거리별 산소 농도변화를 살펴봄으로써 압력의 영향반경과 비교할 수 있었다. 지표로부터 leakage를 고려하는 모델과 고려하지 않는 모델을 함께 사용하여 그 결과를 비교하였고, 주입과 추출에 따른 온도의 변화도 관찰하였다.

영향반경

각 시험마다 venting well 및 관측지점에서 압력을 측정하였으며 이를 바탕으로 영향반경을 산정하였다. 시험시작 후, venting well 및 관측지점에서의 압력은 30초 이내에 일정하게 되었으므로 정류상태 자료를 이용하였다. 깊이별로 설치된 관

측지점에서 깊이별 압력의 분포를 측정하였고, Test 1의 압력 분포는 Figure 4와 같다. 압력 영향반경의 계산에는 2 m 와 3 m 깊이의 압력자료를 이용하였다. Test 1의 경우, venting well T2에서의 압력이 625 mmH₂O였으나, 관측지점 M63에서의 압력은 7.0 mmH₂O로 측정되었다. 주입압력에 비하여 관측지점에서의 압력이 매우 낮게 감지되고 있는 것은 불포화대를 구성하고 있는 조립질 입자의 영향으로 생각된다. 즉 고투수성 토양에서는 공기유속이 충분히 존재함에도 불구하고 압력이 거의 감지되지 않을 수 있다(USEPA, 1995). Test 1에서 주입은 깊이 스크린 2~3 m부분에 이루어지며, 거리 1m에서 1, 2, 3 m 깊이의 압력은 각각 3, 5.6, 7.0 mmH₂O로 나타났다. Figure 4에서 보는 바와 같이, 거리 3미터까지는 1, 2, 3 m 깊이의 압력이 비교적 뚜렷한 차이를 보이나 점차로 압력차가 감소하여 6 m 이후로는 깊이별로 동일한 값을 보였다. 또한 3 m 깊이의 관측지점에서의 압력은 거리가 멀어짐에 따라 거의 선형적으로 급격히 감소하고 있으나, 깊이 1 m에서는 4.5 m까지 2.2~3 mmH₂O 정도의 비슷한 압력이 유지되고 있음을 알 수 있다. 즉 토양내 공기 흐름이 깊이 1 m이하에서 수평적 흐름이 강하게 일어나고 동시에 깊이 1 m에서의 압력에 의하여 지표면으로 공기가 leakage되는 것을 예상할 수 있다. 얇은 불포화대의 경우 표면 불투수층이 영향반경을 증가시키고 토양내부에서의 공기흐름을 수평적으로 만들 수 있다(USEPA, 1995). Edwards and Jones (1994)는 pneumatic tests에서 영향반경을 증가시키기 위하여 깊이 약 3 미터의 불포화대에 벤토나이트와 토양의 혼합물을 이용하여 약 10 cm의 상부 불투수층을 만들어 실험한 바 있다. 본 연구에서는 연구대상 오염지역이 산업지역이고 기존의 시설물이 많이 존재하므로 실제 정화설계에서 대상지역에 불투수층의 설치가 어려울 것으로 판단되며 깊이 1 m 하부 불포화대의 투수성이 뛰어나고 상부 1 m 두께의 복토층이 존재하므로 불투수층을 설치하지 않았다.

압력의 유효 영향반경을 산정할 때, 공기를 유동시킬 수 있는 압력기준은 현장의 특성에 따라 달라지며, 경험적 수치로 0.1 인치 수두압, 10% 또는 1%의 가압진공이 제시되고 있다(USACE, 1995; Toy, 1997; Suthersan, 1997). 본 연구현장의 불포화대는 투수성이 좋고 관측점에서 압력변화가 작아 거리

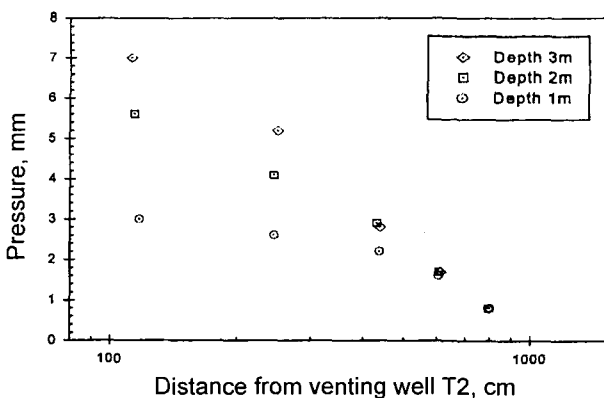


Figure 4. Pressure distribution over distance at monitoring points during Test 1.

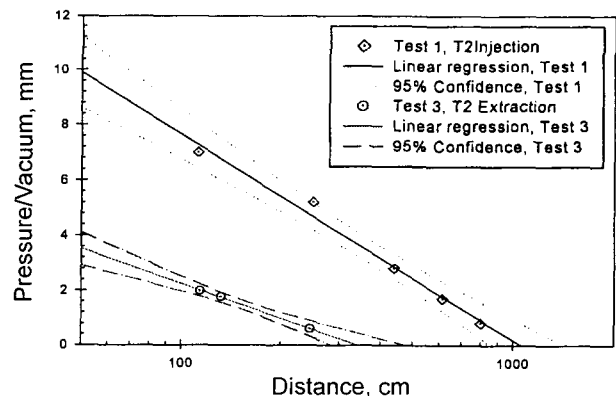


Figure 5. Estimation of pressure radius of influence of Tests 1 and 3.

별 압력분포에 대하여 cut-off pressure/vacuum level의 적용이 어려웠다. 따라서 vapor probe vacuum/pressure versus log (distance)를 연장하여 vacuum/pressure가 0이 되는 값을 통해 영향반경을 산정하였다(Dupont 1993). Test 1과 3에서 관측점의 정류상태 자료를 이용하여 최소자승법으로거리별 압력변화에 따른 영향반경 계산결과를 Figure 5에 제시하였다.

정류상태의 압력자료로 계산한 각 시험별 압력의 영향반경 및 결정계수를 Table 3에 나타내었다. 압력의 영향반경은 Test 3에서 최저 3.3 m, Test 5에서 최고 17.0 m를 보였다. Test 1, 2와 3의 각 영향반경은 10.5, 7.4, 3.3 m로 venting well에서의 유량과 압력을 고려하면, 주입시의 압력 영향반경이 추출시에 비하여 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Toy(1997)는 일정상수 조건에서(유속, 진공, 토양투기계수, 유효수직두께) 거리에 따른 압력분포가 선형이면 대상 매질이 균질하다고 보고한 바 있다. 따라서 Table 3에서 결정계수가 0.94~0.99로 보아 시험지역의 매질이 상대적으로 균질하다고 판단된다. 이는 현장에서 회수한 토양시료의 분석에서도 1m 하부의 불포화도가 비교적 균일한 입자분포를 나타낸 것과 일치하였다.

토양내 산소의 전달은 bioventing과 같이 미생물의 생분해에 의해 오염물을 제거하고자 하는 경우에 매우 중요하다(Hinchee et al., 1991; USEPA, 1995). 특히 5%이상의 일정 산소농도를 유지하는 것은 미생물에 의한 호기성 분해에 필수적인 것으로 알려져 있다. 공기주입시험 Test 1과 2는 투기계수뿐 아니라 산소의 영향반경, 산소의 이용률 계산을 위해 수행되었으며 산

소농도는 현장산소센서와 현장산소미터기로 측정하였다. Figure 6은 Test 1에서 공기주입에 따른 토양중의 농도변화를 나타내고 있다. 각 관측점에서 산소농도는 매우 빠르게 증가하고 있으며, M63은 시작 30분만에 산소농도 19.2%에 이르렀고, M82와 T3의 산소농도가 5%에 도달하는데 약 100분과 700분이 소요되었다. Venting well에서 멀어짐에 따라 농도증가에 시간 지체가 발생하였으나, 약 3600분(2.5일) 후에는 각 관측점에서 19%이상의 산소농도를 나타내었다.

Test 2는 Test 1에 비해 주입유량을 감소시켰으며, 거리별 산소농도를 측정할 수 있었으며 시간에 따른 산소농도의 변화를 Figure 7에 나타내었다. 공기주입유량이 산소농도의 증가시간과 직접적으로 연관되고 있으며, M82의 산소농도가 5%에 이르는 데 약 2200분(1.5일)이 소요되었다. 한편 M72는 600분(10시간)까지 15.22%로 농도가 급격히 증가하고, 2900분(2일)까지 18.33%로 다소 증가한 후, 18.5%로 비교적 안정된 형태를 보이고 있다. 특히 M82의 산소농도는 2단계의 증가 형태를 보이고 있다. 즉, 2900분(2일)까지 1차 증가하고 일정농도를 유지한 후, 12240분(8.5일)까지 14.6% 증가하여 안정되었다. 거리별 산소농도의 감소는 회석과 생분해에 의한 산소의 소모로 추정되며 산소의 영향반경은 미생물의 활동과 연관되므로 미생물활동이 최고에 도달된 경우의 산소농도 분포를 이용해야 한다(USEPA, 1995). 운전 시작 후 22일째에 측정된 산소농도는 Figure 8과 같으며 이때의 산소농도는 미생물이 안정화된 상태의 산소농도 분포라 할 수 있다. 산소농도가 5% 이상을 유지하는 거리가 770 cm에 이르렀다. 즉, Test 2의 산소영향반

Table 3. Estimated pressure radius of influence and determination coefficient

Test	Test Well	Flowrate (cm ³ /s)	Gauge pressure, well (mmH ₂ O)	Pressure radius of influence (m)	r ²
1	T2	9,440	625	10.5	0.98
2	T2	3,610	440	7.4	0.94
3	T2	5,000	-756	3.3	0.99
4	T4	9,333	-443	6.5	0.95
5	T5	3,490	-422	17.0	0.95

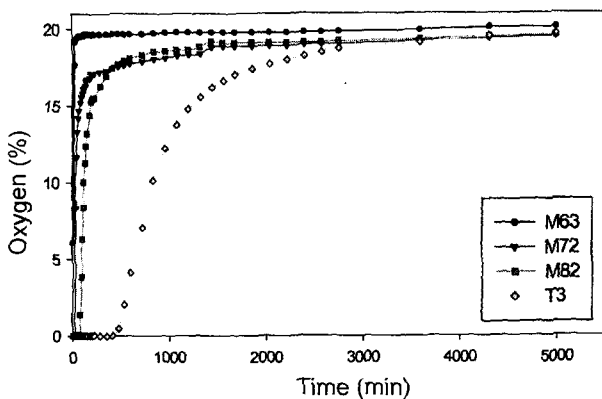


Figure 6. Oxygen concentration (%) change over time (min) at Test 1.

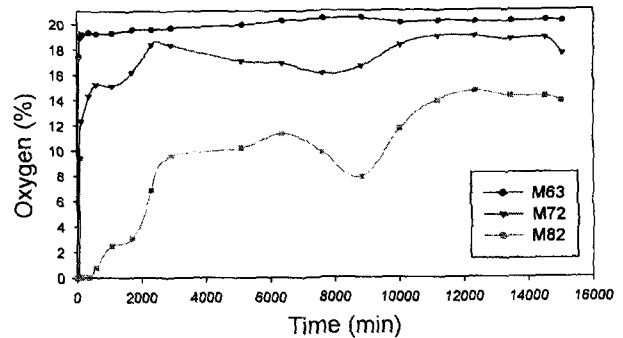


Figure 7. Oxygen concentration (%) change over time at Test 2.

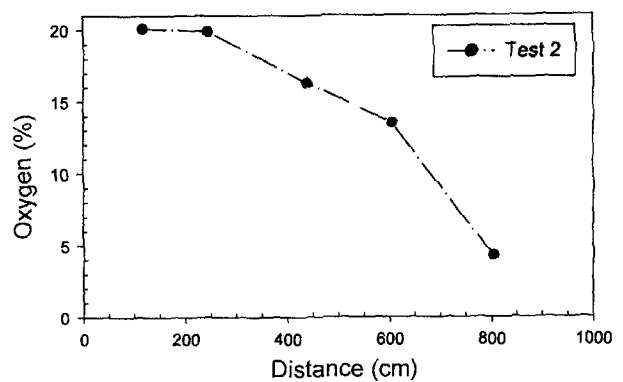


Figure 8. Oxygen concentration vs. distance at Test 2.

경은 7.7 m이고 이것은 Table 3에 추정된 압력의 영향반경 7.4m 와 거의 일치하고 있다.

투기계수

5번의 시험 자료를 2개의 지하수 흐름모델을 이용하여 투기계수를 계산하였다. 첫째로, 지표면으로부터의 공기유입이 없다고 가정한 Theis method(1935) 에 포화수리전도도와 고유투수계수의 관계를 이용하여 투기계수를 계산하였다. 압력영향반경 및 압력강하 자료를 이용하여(Table 3) 투기계수를 계산하였고, 이를 Table 4에 나타내었다.

둘째로, 지표면으로부터 leakage가 있다고 가정한 경우 투기계수는 Hantush method(1960)를 이용하여 계산하였다. 본 현장의 경우, 불포화대가 얇을 뿐 아니라, 토양입자가 커서 압력안정이 매우 빨리 일어나므로 압력을 시간의 함수로 이용하는 대신, vacuum과 거리에 대하여 leaky log-log analysis를 적용하였다. 압력강하대 거리를 대수 그래프에 도시하고 이를 type curve에 중첩시켜 구하였다. 이 때 임의의 match point로부터 얻은 자료를 이용하여 공기전도도와 투기계수를 구하였다.

이 계산을 각 시험결과에 대하여 수행한 결과는 Table 4와 같다. Hantush leaky method(1960)에 의해 계산된 현장의 투기계수는 $1.64 \times 10^{-7} \sim 5.66 \times 10^{-6} \text{cm}^2$ 이고, Theis method(1935)에 의해 계산된 투기계수는 $4.98 \times 10^{-7} \sim 5.10 \times 10^{-6} \text{cm}^2$ 이다. Table 4에서 유량이 비교적 큰 Test 1(9440)과 4(9333)는 Theis method(1935)의 결과가 Hantush method(1960)의 결과보다 각각 약 1.4배, 3배 크게 나타났다. 하지만, Test 2, 3과 5는 서로 거의 유사한 값을 보이고 있다. Massmann and Madden (1994)의 연구에서 Theis method(1935)에 의한 평균 공기 전도도가 Hantush method(1960)의 결과보다 2배 이상 크게 나왔고, 이로부터 본 연구지역에서 leakage가 상당한 영향을 미침을 알 수 있다. 본 대상지역에서 상대적으로 높은 유량에서 지표면으로부터 leakage의 영향이 크고, 가스추출이 공기주입에 비하여 leakage의 영향을 크게 받는다 할 수 있다. 주입과 추출 시험에 의한 투기계수의 비교에서, Kearn 등 (1990)은 주입시험이 추출시험의 결과에 비하여 거의 같거나, 또는 한 order 이상 크다고 하였다. 그러나 Massmann and Madden(1994)은 상반된 의견을 제시하였다. 본 연구에서는 주입시험 결과가 추출 시험 결과에 비하여 다소 큰 수치를 보였다. 이는 Kearn 등 (1990)의 결과와 일치한다. Table 4의 투기계수 결과는 Johnson

등(1990)의 중립질 모래와 조립질 모래의 투기계수에 속한다. 계산된 투기계수가 불포화대의 고유투수계수를 나타낸다고 할 경우 불포화대의 수리전도도는 $1.41 \times 10^{-4} \sim 4.86 \times 10^{-3} \text{m/sec}$ ($12 \sim 420 \text{m/d}$)가 된다.

결 론

본 연구에서는 현장 pneumatic test를 통해 유기화합물로 오염된 불포화 토양의 투기계수와 압력 및 산소의 영향반경을 평가하였다. 연구 대상지역은 약 3미터의 얇은 불포화대를 이루고 구성입자가 굵어 공기 주입/추출시 압력이 매우 빠르게 정류상태에 도달하여 정류상태 자료를 이용하였다. 또한 투기성이 커서 관측지점에서 측정되는 압력/진공이 매우 낮게 나타나, 공기 이동에 필요로 하는 실험적 압력기준을 적용할 수 없었다.

본 연구에서 압력 분포뿐 아니라 산소농도의 분포를 측정하여, 영향반경의 산정에 이용하였다. 관측점에서 시간별 산소의 농도변화는 압력의 전달에 비해 많은 시간이 소요되며, 특히 상대적으로 낮은 유량인 경우 더욱 많은 시간이 소요됨을 알 수 있었다. 또한 투기성이 큰 지역에서는 압력이 감지되지 않는 범위도 공기가 점차적으로 전달되어 5%이상의 산소농도가 유지되었다.

투기계수의 산정에 지표면으로부터의 leakage를 평가하기 위해 Theis method(1935)와 Hantush method(1960)를 적용하였다. 연구지역에서 투기계수는 $1.64 \times 10^{-7} \sim 5.66 \times 10^{-6} \text{cm}^2$ 으로 추정되었고, 양수시험에서 구한 수리전도도는 투기계수로 계산된 투수성 범위에 속하였다. Test 2, 3, 5와 같이 비교적 낮은 유량에 대해서는 두 가지 방법이 유사한 값을 보였으나 유량이 큰 경우는 Theis method의 결과가 크게 나왔다. 또 주입시험에 비해 추출시험에서 두 수치간에 더욱 큰 차이를 보였다. 이것은 지표면으로부터의 leakage의 영향은 비교적 높은 유량과 추출시험에서 더욱 크다는 것을 지시한다. 공기주입시의 투기계수가 추출시보다 크게 나타났으며, 이는 Kearn 등(1990) 과 Suthersan(1997)과 일치하였다.

본 연구에서는 불포화대중 상부 1 m의 낮은 투기성 구역과 그 하부 2 m에 투과성이 매우 큰 지역을 대상으로 영향반경과 투과계수를 산정 하였으며, 이는 SVE 또는 bioventing 시스템의 실제 설계에 적용될 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 환경부와 삼성물산이 지원하는 G7 연구과제 “오염토양/지하수 정화기술개발”의 일부로 수행되었다. 저자들은 삼성건설기술연구소 및 농어촌 연구원, 그리고 많은 현장실험에 큰 도움을 준 김경 연구원에 진심으로 감사하는 바이다.

참고문헌

삼성건설기술연구소, 1999, 오염토양/지하수 정화기술개발 G7과제 보고서, 환경부.
Dupont, R. R., 1993, Fundamentals of bioventing applied to fuel

Table 4. Match points and calculated air permeability

Test	r/Ba	Sb (mmH ₂ O)	kairc (cm ²)	
			Hantush method	Theis method
1	1.0	2.1	2.76×10^{-6}	3.75×10^{-6}
2	0.5	1.3	3.73×10^{-6}	3.42×10^{-6}
3	0.7	2.1	2.30×10^{-6}	2.50×10^{-6}
4	1.0	35.0	1.64×10^{-7}	4.98×10^{-7}
5	0.4	1.0	5.66×10^{-6}	5.10×10^{-6}

^aMatch point of Hantush type curve

^bPressure drawdown at match point

^cAir permeability computed using the Hantush leaky method (1960)

^dAir permeability computed using the Theis method (1935)

- contaminated sites, *Environmental Progress*, 12(1), p. 45-53.
- Edwards, K. B. and Jones, L. C., 1994, Air permeability from pneumatic tests in oxidized till, *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, 120(2), p. 329-347.
- Hantush, M. S., 1960, Modification of the theory of leaky aquifers, *Journal of Geophysical Research*, 65(11), p. 3713-3725.
- Hinchee, R. E., Arthur, M. F. and Miller, R. N., 1991, Bioventing for in-situ remediation of jet fuel, *Proceedings of Air Force Environmental Restoration Technology Symposium*, San Antonio, TX.
- Hoeppel, R. E., Hinchee, R. E. and Arthur, M. F., 1990, Bioventing soils contaminated with petroleum hydrocarbons, *Journal of Industrial Microbiology*, 8, 141.
- Johnson, P. C., Kemblowski, 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), p. 413-429.
- Kearl, P. M., Zinkl, R. J., Dexter, J. J. and Cronk, T., 1990, Air permeability measurements of the unsaturated bandelier tuff near Los Alamos, New Mexico, *Journal of Hydrology*, 117, p. 225-240.
- Massmann, J. W., 1989, Applying groundwater flow models in vapor extraction system design, *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, 115(1), p. 129-149.
- Massmann, J. W. and Madden, M., 1994, Estimating air conductivity and porosity from vadose-zone pumping tests, *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, 120(2), p. 313-328.
- Suthersan, S. S., 1997, *Remediation engineering-Design concepts*, CRC Press, Inc., Boca Raton, FL.
- Theis, C. V., 1935, The relationship between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage, *Transactions of the American Geophysical Union*, 16, p. 519-524.
- Toy, M. S., 1997, Methodology for analyzing soil vacuum data at VOC-contaminated sites, *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, 123(7), p. 683-690.
- USACE (US Army Corps of Engineers), 1995, *Soil vapor extraction and bioventing*, EM 1110-1-4001, USACE, Department of Army, Washington, DC.
- USEPA (US Environmental Protection Agency), 1995, *Bioventing Principles and Practice*. EPA/540/R-95/534a, Office of Research and Development, Washington, DC. Vol. I & II.
- 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), p. 160-168.