

연직배수시스템을 이용한 토양증기추출공법의 성능 평가

신은철¹ · 박정준^{2*}

¹인천대학교 토목환경시스템공학과, ²인천대학교 공학기술연구소

Performance Evaluation of Soil Vapor Extraction Using Prefabricated Vertical Drain System

Eun Chul Shin¹ · Jeong Jun Park^{2*}

¹Department of Civil & Environmental System Engineering, Univ. of Incheon

²Research Institute for Engineering and Technology, Univ. of Incheon

ABSTRACT

Soil vapor extraction (SVE) is an effective and cost efficient method of removing volatile organic compounds (VOCs) and petroleum hydrocarbons from unsaturated soils. However, soil vapor extraction becomes ineffective in soils with low gas permeability, for example soils with air permeabilities less than 1 Darcy. Incorporating PVDs in an SVE system can extend the effectiveness of SVE to lower permeability soils by shortening the air flow-paths and ultimately expediting contaminant removal. The objective of the research described herein was to effectively incorporate PVDs into a SVE remediation system. The test results show that the gas permeability was evaluated for four different equivalent diameters, increasing the equivalent diameter results in a decrease in the calculated gas permeability. It was found that the porosity for the dry condition was greater than that of the wet condition and will allow flow rate for the same vacuum flow, offering a low resistance to the air flow.

Key Word: Gas permeability, Prefabricated vertical drains, Radius of influence, Remediation system, Soil vapor extraction

요 약 문

토양증기추출공법(SVE)은 불포화 지반상태에서 휘발성 유기화합물(VOCs)과 유류오염 물질을 제거하는데 효과적이고 경제적인 공법중 하나이다. 그러나 토양증기추출공법은 투기계수가 1 Darcy보다 작은 실트질 흙과 같이 낮은 투기계수를 가진 지반에서는 비효율적이다. 따라서, 본 연구에서는 기존 연약지반의 지반개량시 사용된 연직배수재(PVDs)를 토양증기추출시스템에 적용하여 짧은 공기배출거리로 최대한 신속하게 오염물질을 제거할 수 있게 하여 투기계수가 낮은 지반에서 오염된 토양을 효과적으로 복원할 수 있는 토양증기추출공법을 적용하는데 목적이 있다. 실험결과, 등가직경이 증가할수록 계산된 투기계수의 값은 감소하였고, 흡시료의 조건이 건조상태일 경우가 습윤상태 보다 공기가 차지하는 비율이 더 커지게 되어 같은 진공이 주어졌을 때, 공기흐름에 대한 낮은 저항으로 흐름률이 더 높게 나타났다.

주제어 : 투기계수, 연직배수재, 영향범위, 복원시스템, 토양증기추출

1. 서 론

토양은 인간이 살아가는 터전이고 개발사업이 수행되는

원천적 환경매체로서 매우 중요한 자원이다. 최근, 전세계적으로 인구증가 및 산업 발달로 발생하는 폐기물과 유해 화학물질로 인하여 토양 및 지하수 오염의 심각성이 고조

*Corresponding author : frostjun@incheon.ac.kr

원고접수일 : 2007. 5. 18 게재승인일 : 2007. 10. 1

질의 및 토의 : 2007. 12. 31 까지

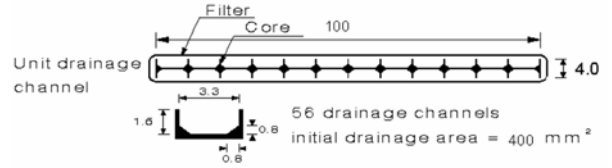
*본 논문은 2007년 춘계학술발표회 특별호 논문입니다.

되어 개발사업으로 영향 받게 되는 토양환경에 대한 중요성이 대두되고 있다. 지하저장탱크에서 유출된 오염물질은 토양과 강한 흡착을 이루어 오랜 시간 잔류하여 지하수와 함께 이동하면서 광범위한 지역에 오염원으로 작용하게 된다. 특히 주유소, 군부대 유류저장시설 및 산업공단 저장시설 등의 유해오염물질로 인한 토양오염은 생태계를 파괴하고, 지속적인 오염원으로 작용할 가능성이 높아 매우 심각한 환경문제로 대두되고 있어 오염지역 복원기술 개발과 관련된 연구가 필요한 실정이다(정하익 등, 1995).

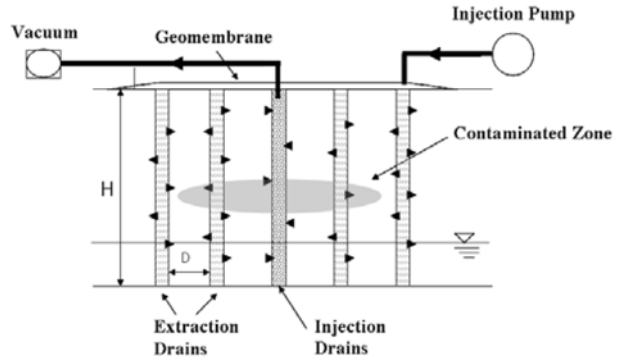
기존에 오염복원공법으로 사용되어지고 있는 토양증기추출공법이나 양수처리공법 등은 투수성이 양호한 지반에 복원효과가 큰 공법으로 해안매립지반과 같이 투수성이 낮은 지반에서는 기대하기가 어렵다. 따라서 오염지반을 굴착하여 정화하는 방법이 사용될 수 있으나, 오염토양을 굴착한 후 이동해야하므로 이동 지역에 이차오염유발을 야기시킬 뿐만 아니라 대상지역이 넓은 경우엔 경제적 부담이 커질 수 있는 문제점을 안고 있다. 토양증기추출공법(SVE)은 불포화 지반상태에서 휘발성 유기화합물(VOCs)과 유류오염 물질을 제거하는데 효과적이고 경제적인 공법중 하나이다. 그러나 토양증기추출공법은 투기계수가 1 Darcy보다 작은 실트질 흙과 같이 낮은 투기계수를 가진 지반에서는 비효율적이다. 따라서, 본 연구에서는 기존 연약지반의 지반개량시 사용된 연직배수재(PVDs)를 토양증기추출시스템에 적용하여 짧은 공기배출거리로 최대한 신속하게 오염물질을 제거할 수 있게 하여 투기계수가 낮은 지반에서 오염된 토양을 효과적으로 복원할 수 있는 토양증기추출공법을 적용하는데 목적이 있다. 즉, 연직배수시스템의 적용성을 위하여 오염토양 복원시 오염지반에 영향을 주는 인자에 대한 공학적 특성 규명과 파일럿 규모의 실내 오염복원 실험을 통하여 공기흐름률과 투기계수와의 관계를 분석하여 연직배수재의 효율성을 평가하였고, 오염물질의 복원효율 등을 분석하였다.

2. 연직배수재를 이용한 토양증기추출 복원시스템의 개념

연직배수재는 물 혹은 공기를 현장지반과 지하수로 이동시켜 진공조건 상태에서 오염된 공기와 물을 추출하여 오염토양을 복원시키는 매체이다. 오염수나 오염가스의 추출은 연직배수재 상부에 관을 연결시킨 관망을 통해 진공압력을 가하여 추출할 수 있다. 연직배수재의 주입과 추출 흐름은 복원과정 동안 매체의 질량평형이 유지되어야 하지만 흙의 압밀로 인하여 간극률이 감소하게 되고, 흙



(a) Schematic of core with PVDs (unit: mm).



(b) Concept of soil vapor extraction with PVDs.

Fig. 1. SVE remediation system using PVDs.

의 투기계수가 저하되어 복원시 소요되는 시간이 더 길어질 수도 있다. 즉, 연직배수재를 이용하여 한층 더 발전된 토양증기추출 복원시스템의 매커니즘은 지반개량을 목적으로 사용된 연직배수공법의 설계와 유지관리를 기초로 하고 있다.

본 연구에서 사용되어진 연직배수재의 단면 형태는 Fig. 1(a)에 나타난 바와 같고, 각각의 제품 특성은 Table 1에 나타내었다. Hansbo(1979)는 기존에 연약지반의 개량시 압밀촉진에 사용되어지는 연직배수재에 대하여 델포트 시험, 켈리포니아 시험 방법을 제시하였고, ASTM에서는 연직배수재의 투수성과 전수성을 결정하기 위하여 각각 ASTM D 4491, D 4716의 방법을 제시하였다.

Bowders and Gabr(1995)는 기존 적용된 토양세정공법 적용시 세립질 지반에서의 작은 간극을 세정제가 전달되는 데에는 한계가 있기 때문에 복원효율이 떨어져 연직배수재를 이용하여 오염된 토양을 복원함으로써 세립질 지반에서의 토양세정기술의 효과를 실험적으로 규명하였다. Gabr et al.(1996)은 모형실험과 파일럿 규모의 실내실험을 통하여 배수재의 투수특성을 제시하였고, 오염회수토조를 제작하여 실험 및 수치해석을 실시하였다. Welker et al.(1998)은 추출시 배수재 주변의 농도분포, 배수재 설치 간격 및 수치해석적 방법에 대한 연구를 수행하였으며, Long and Covo(1994)는 배수재의 등가직경 산정식을 제

Table 1. Specifications of PVDs

Properties		Units	Dimension	Test method
Material	Filter	-	Polypropylene	KS K 0210
	Core	-	Polypropylene	KS K 0210
	Weight	gf/m	90	KS K 0514
	Width	mm	100 ± 5	KS K 0505
	Thickness	mm	4 ± 0.5	KS K 0506
Drain	Tensile strength	kgf/width	350	KSK ISO 10319
	Discharge capacity	10 kPa	cm ³ /sec	ASTM D4716
		300 kPa	cm ³ /sec	ASTM D4716
Filter	Tensile strength	kgf	50	KS K 0743
	Effective opening size	µm	50~90	KSK ISO 12956

안하였는데, 이는 Hansbo(1979)가 제안한 방정식보다 작은 등가직경 결과를 나타내었다. Collazos et al.(2002)은 불포화영역에서의 연직배수재를 이용한 유기화합물 제거 효과 실험을 수행하여 공기흐름경로가 짧아져 오염제거시간을 신속하게 할 수 있고, 주입배수재와 추출배수재의 개수를 증가시킴으로서 포켓상으로 구성된 오염지역에서 오염물질의 제거효율을 확인하였다. Fig. 1(b)는 불포화지역에서의 토목섬유 연직배수재를 이용한 토양증기추출 복원시스템의 개요도를 나타낸 것이다.

3. 토양증기추출 복원시스템의 지반공학적 특성

토양오염 복원을 위한 연직배수시스템의 기초 연구를 위하여 유기화합물로 오염된 토양의 원위치 복원공법 중 하나인 토양증기추출 복원시스템을 적용함에 있어 신은철 등(2005)은 제시된 등가직경과 영향범위, 진공압조건 등에 대한 영향인자를 평가하여 오염복원토조 모형실험의 기초자료로 활용하였다. 토양증기추출 복원시스템을 적용하여 진공추출시 공기흐름률과 투기계수와 관계를 규명하였고, 대상시료에 대하여 각각 다른 함수비 및 다짐 상태를 조성하여 진공압력을 적용한 후, 그에 따른 연직배수재의 추출률 및 효과를 나타내었다. 투기계수, 입자크기, 함수비, 지반의 다짐도 등은 토양증기추출시스템 적용시 가장 큰 영향을 주는 인자로서 이에 대한 결과를 바탕으로 연직배수시스템의 기본적인 연구자료로 활용하였다.

투기계수(gas permeability, *k*)는 토양증기추출 복원시스템을 적용함에 있어 매우 중요한 인자로서 지반이나 암석 등과 같은 매질이 얼마나 기체를 잘 통과시키는지에 대한 기준이 되며, 유체와 매질의 특성을 함께 나타내는 수리전도도와는 구분된다(US EPA, 1997). 일반적인 흙에서의 투기계수는 보통 10⁻³에서 10⁻⁵ cm² 정도의 범위를 가지

Table 2. Engineering properties of silty soils

Item	Quantity
Specific gravity	2.67
Uniform coefficient	2.0
Coefficient of gradation	0.85
Optimum moisture content (%)	16.4
Max. dry unit weight (kN/m ³)	14.9
Coefficient of permeability (cm/s)	3.61 × 10 ⁻⁴
USCS Classification	SM

며 흙의 함수비나 다짐특성에 따라 큰 영향을 받는다. 본 연구에서는 흙의 투기계수를 측정하고자 모형토조를 이용하여 설치 지반의 다짐도 및 함수비 상태에 따라 각각 공기추출률과 진공압을 도출하여 나타내었다.

3.1. 사용 시료

본 연구에서 사용된 시료는 실트질 흙으로서 공학적 특성은 Table 2에 나타내었고, 입도분포곡선은 Fig. 2에 나타내었다. 입도분포곡선에 나타난 바와 같이 세립토의 대부분은 실트질로 구성되어 있어 통일분류법상 실트질 모래(SM)로 판명되었다. 실트질 흙의 표준다짐시험 결과는 최적함수비가 16.4%, 최대건조밀도는 14.9 kN/m³을 나타내었고, 투수계수는 3.61 × 10⁻⁴ cm/s로 도출되었다.

3.2. 실험 방법

본 연구에서는 실험실 규모의 모형토조실험을 통하여 연직배수재의 등가직경과 영향범위를 산정하였고, 공기흐름률에 따른 투기계수를 측정하였다. 모형 토조는 Fig. 3(a)에 나타낸 바와 같이 길이 120 cm, 폭 70 cm, 깊이 110 cm이며, 전면판은 투명 아크릴 판넬로 제작하여 지하수위와 흙시료의 상태를 확인할 수 있도록 하였다. 또한,

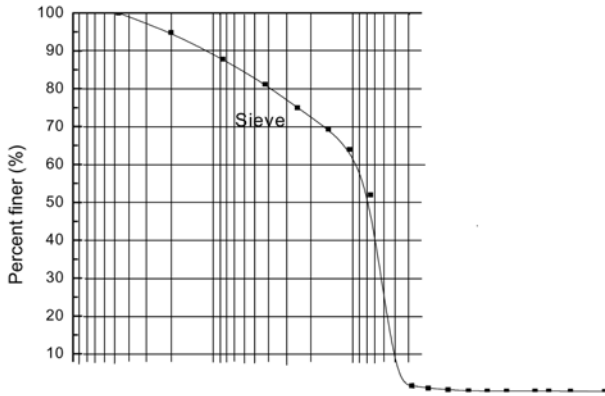


Fig. 2. Grain size distribution for silty soils.



(a) Photos of model test box.



(b) PVD extraction and piezometer installation setup

Fig. 3. Laboratory model test box.

토조의 양측면은 지하수위를 조절을 위한 저수조를 두었으며, 저수조와 토조 사이는 흙의 중량과 다짐으로 인한 토조의 과도한 변형을 억제하기 위하여 모형토조 외부에 강재로 제작된 브레이싱 시스템을 설치하였다. 측압에 견딜 수 있도록 브레이싱을 보강 후에 0.074 mm 와이어매쉬 및 지오텍스타일 섬유로 처리를 하여 대기압력이 유지됨과 동시에 흙 시료의 유출을 방지하였다. 또한, 토조에

진공흐름을 가하기 위하여 플라스틱 튜브와 연결시켰다.

모형실험 장치에서는 주입펌프에서 공기를 공급하고, 진공추출을 유도하기 위해서 진공브로워 장치를 구성하였으며, 상부에 압력을 조절할 수 있는 게이지를 부착하여 공기흐름률과 진공압을 조절할 수 있도록 하였다. 또한, 시료의 상부표면에서의 진공손실을 줄이고, 배수재를 통한 추출시 방사형 방향으로의 공기 흐름을 유도하기 위해서 불투수성 진공차수막으로 도포하였으며, 시료와 진공차수막 사이가 잘 밀착될 수 있도록 진공막 상부에 5 cm 두께로 시료를 포설하였다.

축소된 단면의 배수재는 지반 내에 각각 30, 50 cm 깊이까지 압입하였으며, Gabr et al.(1999)이 제시한 바와 같이 상부에서 20 cm 깊이까지 플라스틱 슈트에 끼워 진공손실을 최소화 하였고, 압력수두를 측정하기 위하여 압력계와 연결시켰다. 연직배수재 상부에서의 브로워를 통한 진공흐름은 10~25 kPa로 변화시키며, 각각의 진공압력에 따른 수두변화를 압력계에서 기록하도록 설치하였다.

Fig. 3(b)에 나타낸 바와 같이 모형토조내 설치된 간극수압계와 연직배수재를 통한 진공압을 적용시에 공기압력을 측정하면서 폭이 2.5 cm 인 축소된 연직배수재를 타입한 후, 불포화 지반에서의 연직배수재의 깊이에 따른 영향범위를 측정할 수 있도록 각각의 계산된 거리에 따라 각각 깊이별 3개의 피에조미터를 설치하였다. 앞선 영향범위 평가 결과를 바탕으로 투기계수를 측정하기 위해서 각각의 피에조미터 연결관과 연직배수재는 압력수두를 측정하기 위해서 간극수압계에 연결하였고, 측정시 다른 피에조미터는 닫은 상태로 두었다. 연직배수재 상부에서의 진공흐름률은 1,111~3,333 cm³/s로 변화시켰고, 각각 수두와 거리에 따른 진공압력의 변화는 간극수압계와 데이터 수집장치를 통하여 기록하였다. 공기유량계와 간극수압계에서의 읽음값은 각각의 진공흐름이 안정화될 때의 값으로 하였다. 연직배수재와 진공튜브는 진공손실과 공기침투를 최소화하기 위하여 덕트 테이프로 봉인을 하고 압력계와 연결하기 위하여 연직배수재 상부 5 cm 정도를 직경이 19 mm 인 플라스틱 튜브를 이용하여 공기와 물의 흐름이 원활히 유지될 수 있도록 하였다.

3.3. 실험결과 및 분석

토양증기추출기술에서 투기계수는 가장 중요한 영향인자로서 투기계수의 정확한 값은 현장시험 또는 실내실험을 통하여 얻을 수 있다. 실내모형실험을 통하여 데이터를 수집하고, 이를 방사형 흐름에 관한 이론을 이용하여 도출된 다음 식 (1)로 투기계수를 결정할 수 있다(Johnson

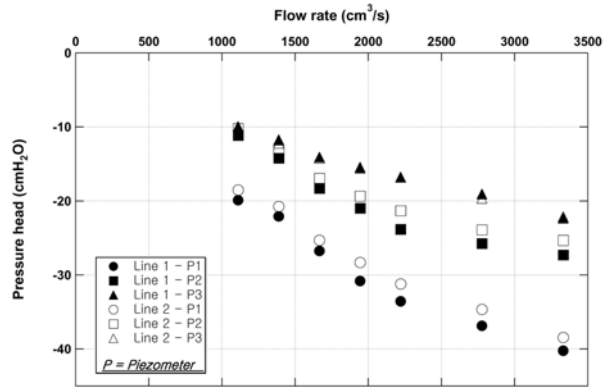
et al., 1990). 또한 지반내의 이방적 특성, 흙의 종류, 단위중량, 함수비, 균열의 존재유무 등이 고려되어 결정되어야 한다. 모형토조에 설치된 연직배수재를 통한 공기흐름률과 수두손실을 측정하여 흙시료에 대한 투기계수를 계산할 수 있다.

$$k = \frac{Q \ln\left(\frac{r_w}{R_i}\right) \mu}{\pi H P_w [1 - (P_{atm}/P_w)^2]} \quad (1)$$

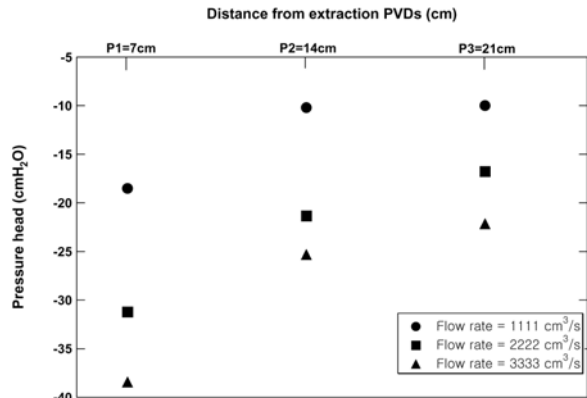
여기서, k = 공기흐름상태에서의 투기계수(cm^2 or Darcy), μ = 공기의 점도 = 1.8×10^{-4} gf/cm-s, P_w = 추출정에서의 절대압력(atm), P_{atm} = 절대 대기압 = 1 atm, r_w = 공기추출정의 반경(cm), R_i = 공기추출정에서의 영향반경(cm), H = 추출정에서의 스크린 간격(cm), Q = 추출배수재에서의 유출되는 공기 유량(cm^3/s)이다.

토양증기추출시스템에서 사용된 폭이 2.5 cm로 단면 축소된 연직배수재도 마찬가지로 각각의 제안자별 등가직경 방정식을 이용하여 투기계수를 결정하였다. 연직배수재에 진공을 가하게 되면 배수재 주변에 위치한 각각의 피에조미터로부터 압력을 측정할 수 있고, 공기흐름률은 1,111~3,333 cm^3/s 범위로 나타났다. 신은철 등(2005)의 영향범위 결과에 나타난 바와 같이 포화영역과 불포화영역의 영향범위는 비슷한 결과로 예측된 바, 연직배수재 주변에 가장 가깝게 위치하며 같은 거리에 위치에 있는 피에조미터 P1에서 공통적으로 간극수압 감소와 수두손실이 비슷한 경향을 나타내었다. 또한, 토양증기추출정에서의 연직배수재 적용은 원형웰과 같이 방사형 흐름 형태 이론을 기초로 하였다. Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)는 연직배수재에서 측정된 각각의 다른 공기흐름률 상태에서의 일정거리에 위치한 피에조미터의 수두를 나타낸 것으로서 피에조미터 P1과 P2 사이에서 더 큰 수두손실을 나타내었다. 수두손실이 증가함에 따라 흐름률도 증가하였고, 피에조미터 P2와 P3 사이에서의 수두는 상대적으로 피에조미터 P1과 P2 사이에서의 수두손실에 약 22%의 차이를 나타내고 있다. 이런 거동을 나타내는 이유는 토조안 포설된 흙의 깊이때 따른 함수비가 일정하지 않기 때문이고, 추출 연직배수재로부터 영향반경이 멀어질수록 함수비는 감소하는 것을 나타내고 있으며, 이는 함수비의 흐름이 추출 연직배수재로 이동되기 때문에 추출배수재에 가장 가까운 곳에서 수두손실이 가장 크게 발생한 것으로 사료된다.

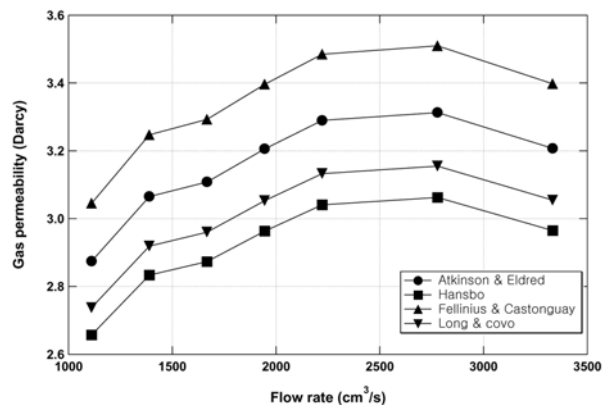
Fig. 4(c)는 다양한 흐름률 상태에서의 4개의 제안식으로 가정된 투기계수를 나타낸 것으로서 등가직경이 증가할수록 계산된 투기계수의 값은 감소함을 나타내었으며,



(a) Pressure head vs. flow rate.



(b) Pressure head as distance from extraction PVDs.



(c) Gas permeability values at various flow rates.

Fig. 4. Pressure head and gas permeability for different flow rates.

특히 4가지 제안된 등가직경 중 보편적으로 사용되고 있는 Atkinson and Eldred(1981) 방정식을 보았을 때, 공기흐름률에 대한 투기계수의 범위는 대략 2.8에서 3.3 Darcy를 나타내었다. 이 값은 주어진 함수비와 단위중량

Table 3. Gas permeability values for different equivalent well radius

Flow Rate (cm ³ /s)	P_w (atm)	k [Darcy]			
		Atkinson-Eldred $R_w = 1.38$ cm	Hansbo $R_w = 1.78$ cm	Fellini & Castonguay $R_w = 1.13$ cm	Long & Covo $R_w = 1.62$ cm
3,333	0.7232	3.2074	2.9649	3.3978	3.0546
2,778	0.7687	3.3129	3.0624	3.5095	3.1551
2,222	0.8083	3.2896	3.0409	3.4849	3.1330
1,945	0.8258	3.2058	2.9634	3.3961	3.0531
1,667	0.8442	3.1083	2.8733	3.2928	2.9602
1,389	0.8665	3.0653	2.8336	3.2473	2.9193
1,111	0.8848	2.8745	2.6572	3.0452	2.7376

조건을 고려할 때, Johnson et al.(1990)이 제안한 세립질 모래의 범위인 1~10 Darcy에 분포하여 실험의 유효성을 입증하고 있다. 또한, Table 3에 나타난 바와 같이 낮은 흐름률 상태에서는 피에조미터에서 낮은 수두손실을 나타내어 흐름률이 2,000 cm³/s보다 작을 때에는 정밀도가 떨어지고, 흐름률이 높을수록 압력수두는 더 정밀한 값을 나타내어 투기계수는 흐름률이 2,778에서 3,333 cm³/s 일 때 가장 정확한 값을 나타냄을 알 수 있다.

투기계수는 비록 각각의 시료마다 다소 차이는 있지만, 일반적으로 일정 단위중량 상태에서 투기계수는 함수비가 증가 할수록 공기흐름률 감소와 입자표면에 수막이 형성되어 다소 감소함을 예측할 수 있다. 그러나 영향범위 측정시 예측된 결과와 깊이에 따른 공기흐름률과 압력수두 결과를 살펴보면, 모형토조내에 다짐 과정 동안 함수비 증가에 따라 흙이 더 큰 덩어리가 되어 간극크기는 증가하게 되고, 가장 큰 간극을 통한 흐름이 우세해지기 때문에 함수비가 증가될수록 간극의 크기가 더 커져 투기계수가 크게 나타날 수도 있음을 확인하였다.

4. 오염복원률 평가

4.1. 실험 내용 및 방법

연직배수재를 이용한 토양증기추출 복원시스템에서는 휘발성 유기화합물인 유류를 인위적으로 모형토조내에 오염시켜 지속시간과 공기흐름률에 따른 농도변화를 측정하였다. 즉, 대표적 유류오염물질인 BTEX(benzene, toluene, ethylbenzene, xylene)중 톨루엔을 추적자로 하여 토양증기추출 복원시스템을 이용한 휘발성 오염물질에 대한 복원 효율을 분석하였다.

본 연구에서는 오염복원률 평가를 위해서 신은철 등 (2005)이 제안한 연직배수시스템에서의 주요 영향인자인 배수저항, 영향범위, 등가직경 등의 산정결과와 본 연구에

서 수행된 토양증기추출 복원시스템 적용시 가장 큰 영향인자인 투기계수의 지반공학적 특성 등의 실험결과를 종합적으로 분석하여 폭은 2.5 cm, 길이는 50 cm 인 축척 효과에 의해 단면을 축소시킨 연직배수재를 모형토조내에 타입시켜 실험을 수행하였다. 오염복원토조에 배수재 타입깊이는 40 cm로 타설하였다. 즉, 연직배수재 상부 10 cm까지는 플라스틱 튜브로 감싸서 지표면으로부터의 공기유입으로 인한 진공손실을 최소화 하였으며, 강재 스틸로 제작한 맨드릴을 이용하여 유압식 형태로 연직배수재를 타입하였다.

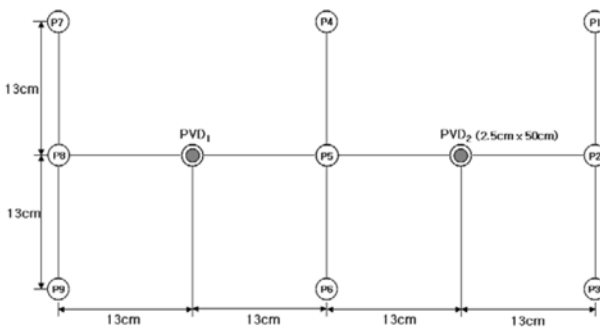
모형토조내의 연직배수재에 진공압력을 가하여 대상 지반내 존재하는 오염물질이 추출되어지며, 이 중 진공브로워에 의하여 추출된 공기는 활성탄을 통해 정화 처리되어 공기중으로 배출되도록 하였다. Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이 모형토조, 진공브로워, 간극수압계 등을 포함한 오염복원을 실험장치는 지반내 토양증기추출 복원시스템을 효과적으로 적용시킬 수 있도록 제작하였다. 즉, 공기를 주입할 수 있도록 제작된 주입브로워, 공기필터장치, 물과 공기의 주입과 추출을 연결시켜주는 분배장치로 구성되었다. 또한, 추출된 물과 공기를 분리시켜주는 유수분리 장치(gas-liquid separator), 진공된 상태에서 연직배수재를 통해 분배장치까지 압력을 가하여 추출시켜주는 실린더 형태의 입력조절장치와 추출된 공기를 여과시켜주는 가스추출장치로 구분하여 파일럿 규모의 오염복원률 실험을 수행하였다. 진공 적용시에 연직배수재의 상부에 불투수성 멤브레인 슈트를 포설하고, 상부에 다시 5 cm 가량의 시료를 포설하여 진공손실을 최소화 하였다.

4.2. 실험결과 및 분석

모형토조내 흙시료의 다짐시, 각각의 다짐도 90%와 70%를 기준으로 하여 조밀한 상태와 느슨한 상태의 조건으로 층다짐을 실시하였다. 연직배수재는 각각의 조건에



(a) Photograph of PVD system



(b) Plan view of PVDs extraction and piezometer.

Fig. 5. SVE remediation system installation setup.

서 다짐을 완료한 후 타입을 하였으며, 대략 40 cm 깊이 까지 타설하고 배수재 끝부분은 단부처리 하였다. 연직 배수재에서의 진공손실과 공기침투를 최소화하기 위해서 덕트 테이프로 봉인을 하고 간극수압계와 연결하기 위하여 연직배수재 상부 10 cm 정도를 플라스틱튜브로 끼워 넣었다. 또한, 다짐조건이 각기 다른 건조한 상태(함수비 = 3%)와 습윤한 상태(함수비 = 16.4%)의 두가지 경우에 대하여 수행하였다. 함수비는 진공 후 변화를 살펴보기 위하여 각각 실험 전후에 측정을 수행하였다.

연직배수재의 축적효과에 의한 축소된 단면 크기는 Theis(1935) 방정식에 기초를 둔 Welker et al.(2000)이 제안한 방정식을 이용하여 연직배수재의 폭과 간격을 결정하였다. 즉, 실내모형실험의 분석을 통하여 대략적인 현장규모의 기하학적 요소를 도출하였다.

4.2.1. 지반조건에 따른 공기흐름률

공기흐름률 실험은 최대진조단위중량이 14.9 kN/m³에 대하여 느슨한 상태와 조밀한 상태, 건조상태와 습윤상태의 조건으로 각각 다짐도와 함수비의 변화에 따른 압력수두를 측정하였다. 첫번째 단계로 함수비가 3%인 건조상태에서 시험지반을 조성하였다. 연직배수재는 3.2절의 영

향범위 산정결과를 바탕으로, 연직배수재 폭을 토조 규모에 맞게 축적효과에 의해 축소 제작된 2.5 cm의 배수재를 사용하였다. 앞서 제시된 바와 같이 폭 2.5 cm에 대한 영향반경을 13 cm로 설계하여 두개의 연직배수재를 설치하였다.

또한, Fig. 5(b)에 나타낸 바와 같이 연직배수재 주변의 압력분포를 측정하기 위해서 각각의 거리에 따라 9개의 피에조미터를 설치하였으며, 진공추출 장치에 설치된 공기유량계를 조절하여 공기흐름률의 범위가 1,111~2,222 cm³/s일 때 압력수두를 측정하였다. 수집된 데이터를 통하여 진공 추출시 공기흐름률, 함수비와 다짐조건에 따른 결과를 도출하였다.

Fig. 6(a)는 오염복원을 평가를 위한 모형토조실험시 설치된 피에조미터에서의 공기흐름률에 따른 압력수두의 변화를 나타낸 것으로서 느슨한 상태와 조밀한 상태 모두 압력수두와 흐름률이 선형거동 관계를 나타내고 있으며, 특히 건조한 상태일 경우에 흐름률 증가에 따른 압력수두가 더 높게 나타났다. 앞서 나타낸 바와 같이 흙의 함수비는 투기계수에 영향을 주기 때문에 건조한 상태일 때 가장 높은 압력수두를 나타낸 것으로 사료된다. 흙 속에 간극수가 차지하는 비율이 커질수록 간극안에 공기흐름률은 감소하게 된다. 그러므로 흙이 건조상태일 경우에는 간극안의 공기를 함유할 수 있는 비율이 커지므로 주어진 진공상태에 대하여 공기의 흐름률은 더 커지게 되는 것이다. 즉, 건조한 상태일 경우가 습윤한 상태보다 공기가 차지하는 비율이 더 커지게 되고, 같은 진공이 주어졌을 때 또한 공기흐름에 대한 낮은 저항으로 흐름률이 더 높게 나타나게 되는 것이다.

Fig. 6(b)는 사용된 흙시료의 다짐조건이 느슨한 경우와 조밀한 경우에 대하여 압력수두의 변화를 나타낸 것이다. 수두변화를 보면 어떤 경우에는 느슨한 상태일 때가 더 크게 나타나고, 또 다른 경우에는 조밀한 상태일 때 더 크게 나타나는 경향이 있다. 즉, 느슨한 경우와 조밀한 경우 사이에서 압력수두의 거동은 뚜렷한 경향을 나타내지 않았다.

이와 같은 결과는 다짐과정 중 공기흐름의 이동 영향으로 입자가 뭉쳐 하나의 덩어리로 입자의 구조적 변화에 기인된 것으로 판단된다. 즉, 균열 등에 의한 흐름경로는 잠재적인 짧은 순환 때문에 토양증기추출 효과에 중요한 의미를 지니게 되는데 이러한 짧은 순환 발생으로 공기흐름형태가 영향을 받게 되는 것이다. 그러나, 결과에 의하면, 흙은 완전한 등방성이 아니므로 다짐으로 인하여 우선적으로 흐름경로가 발생하게 되며, 특히 실제 현장조건

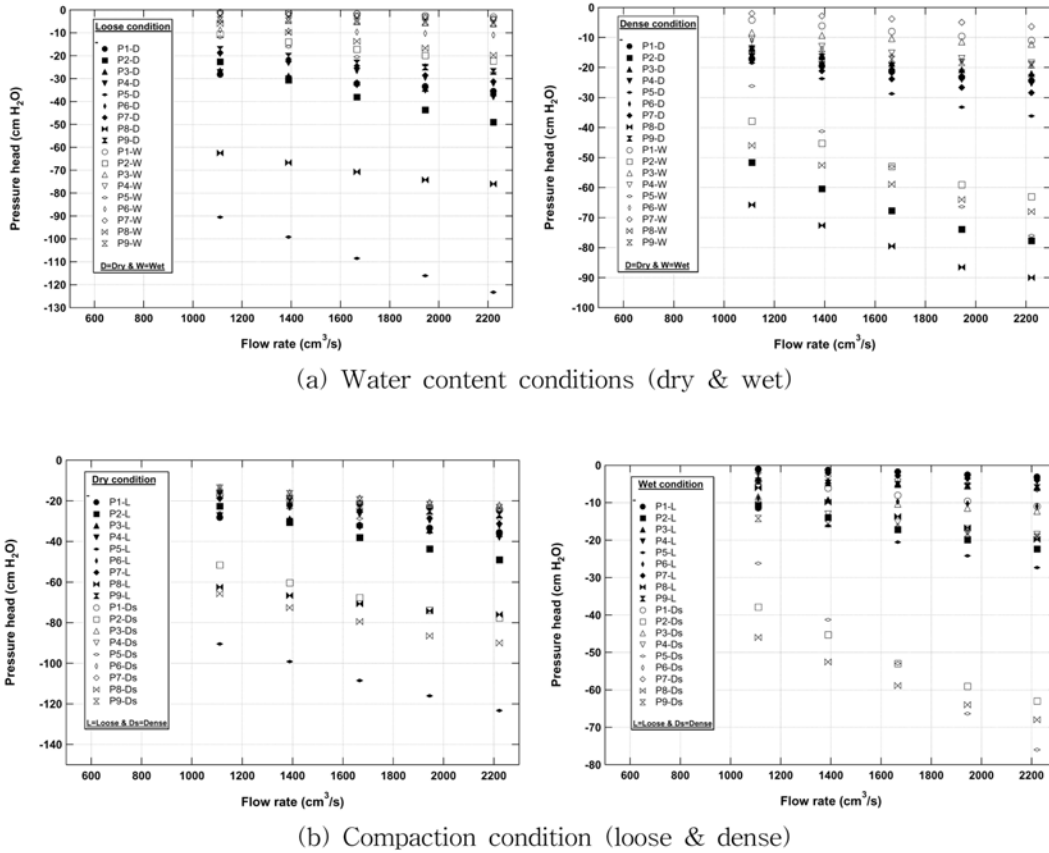


Fig. 6. Pressure head variation for different flow rates at two compaction efforts.

일 경우, 이러한 흙의 이방성이 존재하기 때문에 오염지역내에서 최적의 공기 흐름을 감안하여 스크린이 설계되었을지라도 부분적으로 효율이 떨어지는 경우가 발생할 수 있는 것이다.

4.2.2. 유류오염 복원을 평가

본 연구에서는 오염복원을 평가를 위해서 오염복원토조 실험장치에 대표적 유류오염물질인 BTEX중 톨루엔을 추적자로 하여 토양증기추출 복원시스템을 이용한 휘발성 오염물질의 복원 효율성을 분석하였다. 복원 실험에 사용된 흙시료는 실트질 모래로서 오염복원토조에 각각의 결정된 다짐값에 따라 단계별 포설 후 다짐을 실시하였다. 오염물질의 농도 변화는 연직배수시스템 작동 후 각각 시간에 따라 샘플링포트를 통해 시료를 추출하여 복원시스템 작동 시 감소되는 톨루엔의 농도변화를 측정하였다.

실험시 온도는 20~25°C 범위에서 실시하였고, 지반조건은 앞서 수행된 실험결과를 바탕으로 조성하기 위하여 최적함수비 상태인 16.4%, 다짐도 80%로 조성하여 모형토조에 시료를 포설하였다. 토조내 흙시료를 상부표면에서

30 cm 아래, 20 cm 두께를 인위적으로 유류 오염시켰으며, 휘발이 더 이상 되지 않도록 오염토조를 완전히 밀폐시킨 후 24시간 동안 방치하여 공극 내 오염물질의 농도가 균등하게 이루어지도록 하였다. 시료를 다짐한 후에 연직배수재와 간극수압계를 위치시켰으며, 모형토조 내부의 상부표면에는 불투수성 멤브레인 쉬트로 도포한 후 시료의 상부에 흙시료를 5 cm 정도 더 포설하여 진공압에 의한 시료표면으로의 공기유입을 최소화 하였다. 또한 연직배수재에 진공을 적용하기 위하여 배수재 상부에는 10 cm 크기의 플라스틱튜브를 삽입한 후 치수테이프를 감아 진공손실을 최소화하였으며, 각각의 추출배수재에 일정한 진공을 가압함으로써 실험을 진행시켰다.

Fig. 7에 나타난 바와 같이 모형토조내 오염된 시료의 추출은 제작된 토조 후면부에 위치한 각각의 샘플링포트를 통하여 시료추출기로 토양오염공정시험법에 준하여 시료를 전처리하여 5 ml HDPE 유리병에 보관하였다. 초기 농도의 측정 후 초기 5시간은 1시간 간격으로 샘플링을 하였으며, 이후 오염물질 농도감소율을 고려하여 각각 2 시간, 3시간 간격으로 샘플링을 하였다. 추출된 시료는 실

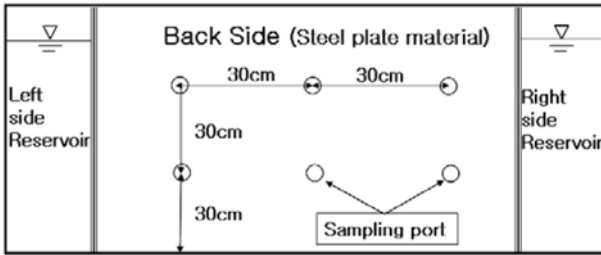


Fig. 7. Location of sampling port in model box.

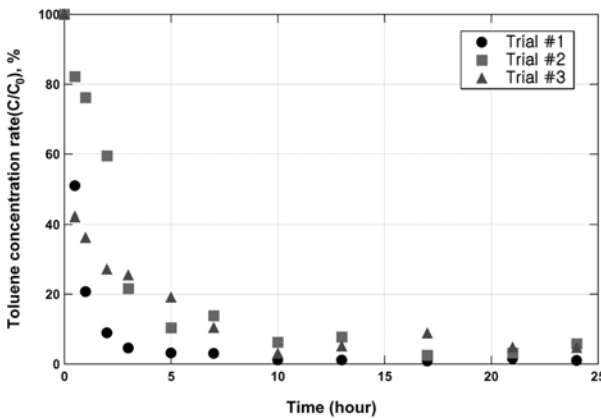


Fig. 8. Toluene concentration rate with elapsed time.

험실로의 이동까지 손실오차를 최소화하기 위하여 용매제인 메탄올과 함께 유리시료샘플러에 담겨진 후 가스크로마토그래피(gas chromatography)에 의하여 농도분석을 실시하였다.

연직배수재를 이용한 토양증기추출 복원시스템을 적용하였을 경우 모형토조내 휘발성 오염물질의 농도가 현저히 감소하는 것으로 복원효과를 확인할 수 있었다. 복원효율을 확인하기 위하여 추적자인 톨루엔에 대하여 지속 시간에 따른 복원효율을 Fig. 8에 나타내었다.

복원효율은 복원시스템 적용 초기농도를 100%로 보았을 경우(C_0)에 대한 잔존량을 백분율로 환산하여 나타내었다. 시간에 따른 톨루엔의 농도는 약 200분이 지나면서 96% 이상이 제거되는 결과를 나타내었으며, 400분의 시간이 경과하면서부터는 약 99% 이상의 복원효율을 나타내었다. 톨루엔의 경우 휘발성 오염물질인 BTEX의 4가지 인자중에 중간정도의 휘발성을 나타내는 인자로서 짧은 시간내에 큰 농도감소 효과를 나타내었다. 또한, 토양증기추출 복원시스템 적용시 가장 큰 영향을 미치는 요소는 앞선 결과에 나타난 바와 같이 투기계수와 오염물질의 특성중 하나인 헨리상수이다. 헨리상수는 흡의 함수비에 용해되어 있는 휘발성 물질을 토양증기추출에 의해 휘

Table 4. Henry's law constant of petroleum constituents (USEPA, 1995)

Constituent	Henry's law constant (<i>atm</i>)
Tetraethyl lead	4,700
Ethylbenzene	359
Xylene	266
Benzene	230
Toluene	217
Naphthalene	72
Ethylene dibromide	34
Methyl t-butyl ether	27

발되어 기화되는 구성물질의 정도로서 온도에 대단히 민감한 반응을 나타내는 영향인자이다.

USEPA(1995)에서는 높은 헨리상수로 구성된 BTEX의 경우, 100 *atm* 이상이 되면 기체상태와 액체상태 시스템이 평형상태를 유지할 경우 공기중에서 매우 높은 농도를 가지려는 경향을 나타내며, 이 때 물질들은 용해되어 있던 상태에서 쉽게 기체상태로 변화됨을 나타내었다. 따라서 토양증기추출시스템 적용시 공기흐름률의 증가로 인하여 지중속에 존재하는 휘발성 오염물질은 더 쉽게 제거될 수 있다. Table 4에 나타난 바와 같이 BTEX 중 본 연구에서 측정된 톨루엔은 217 *atm*으로 가장 낮은 헨리상수를 나타내는 오염물질로서 실험시 측정되지 않은 벤젠, 에틸벤젠, 자일렌과 같은 다른 오염물질의 경우 톨루엔 보다 더 높은 헨리상수값을 나타내고 있기 때문에 오히려 토양증기추출 복원시스템에 의한 복원효과는 더 클 것으로 사료된다.

5. 결 론

오염된 토양의 복원을 목적으로 연직배수시스템의 적용성 평가를 위하여 실내오염복원 실험을 통한 오염물질의 복원 효율 등을 분석하였고, 공기흐름률과 투기계수와와의 관계를 분석하여 연직배수재의 효율성을 평가하였다. 이에 도출된 결론은 다음과 같다.

(1) 다양한 흐름률 상태에서의 투기계수 산정 결과, 등가직경이 증가 할수록 계산된 투기계수의 값은 감소함을 나타내었으며, 특히 Atkinson and Eldred(1981) 등가직경 방정식의 경우, 공기흐름률에 대한 투기계수의 범위는 대략 2.8에서 3.3 *Darcy*를 나타내어 주어진 함수비와 단위 중량 조건을 고려할 때, Johnson et al.(1990)이 제안한 세립질모래의 범위인 1~10 *Darcy*에 분포하여 유효성을 입증하였다.

(2) 투기계수는 비록 각각의 시료마다 다소 차이는 있지만, 일반적으로 일정 단위증량 상태에서 투기계수는 함수비가 증가 할수록 공기흐름률 감소와 입자표면에 수막이 형성되어 다소 감소함을 예측할 수 있다. 그러나 영향 범위 측정시 예측된 결과와 깊이에 따른 공기흐름률과 압력수두 결과를 살펴보면, 모형토조내에 다짐 과정 동안 함수비 증가에 따라 흙이 더 큰 덩어리가 되어 간극크기는 증가하게 되고, 가장 큰 간극을 통한 흐름이 우세해지기 때문에 함수비가 증가될수록 간극의 크기가 더 커져 투기계수가 크게 나타날 수도 있음을 확인하였다.

(3) 공기흐름률에 따른 압력수두의 변화를 살펴보면, 흙 시료의 조건이 건조 상태일 경우가 습윤 상태보다 공기가 차지하는 비율이 더 커지게 되어 같은 잔공이 주어졌을 때, 공기흐름에 대한 낮은 저항으로 흐름률이 더 높게 나타났지만, 느슨한 경우와 조밀한 경우 사이에서 압력수두의 거동은 뚜렷한 경향을 나타내지 않았다. 이는 다짐과정 중 공기흐름의 이동 영향으로 입자가 뭉쳐 하나의 덩어리로 입자의 구조적 변화에 기인된 것으로 판단된다.

(4) 톨루엔을 추적자로 하여 토양증기추출 복원시스템을 이용한 휘발성 오염물질의 복원 효율성을 초기농도를 100%로 보았을 경우(C_0)에 대한 잔존량을 환산하여 나타낸 결과, 시간에 따른 톨루엔의 농도는 약 200분이 지나면서 96% 이상이 제거되는 결과를 나타내었으며, 400분 이상의 시간이 경과하면서부터는 약 99% 이상의 복원효율을 나타내었다.

사 사

이 논문은 인천대학교 2005년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

신은철, 박정준, 노정민, 2005, 연직배수재를 이용한 오염토양복원 특성 평가, 2005년 한국지반공학회 봄학술발표회, 한국지반공학회, 한국시설안전기술공단, p. 1400-1407.

정하익, 이용수, 우제윤, 1995, 오염지반 및 지하수 정화기술에

관한 연구, KICT/94-GE-1101-2, 한국건설기술연구원.

Atkinson, M.S. and Eldred, P.J.L., 1981, Consolidation of soil using vertical drains, *Geotechnique*, **31**(1), 33-43.

Bowders, J.J. and Gabr, M.A., 1995, Strip-drains for in silty clean up of contaminated fine-grained soils, *Geotechnical News*, **13**(3), 21-25.

Collazos, O.M., Bowders, J.J., and Bouazza, M., 2002, Enhanced soil vapor extraction using PV drains, *4th ICEG Environmental Geotechnics*, Sweta & Zeitlinger, Brazil, p. 761-766.

Gabr, M.A., Bowders, J.J., Wang, J., and Quaranta, J.D., 1996, In situ soil flushing using prefabricated vertical drains, *Canadian Geotechnical Journal*, **33**(1), 97-105.

Gabr, M.A., Williamson, A., Sabodish, M., and Bowders, J.J., 1999, BTEX extraction from clay soil using prefabricated vertical drains, *J. Geotech. & Geoenviron. Engrg.*, **125**(3), 615-618.

Hansbo, S., 1979, Consolidation of clay by band-shaped prefabricated drains, *Ground Engrg.*, **12**(5), 16-25.

Johnson, P.C., Stanley, C.C., Kembrowsky, D.L., Byers, D.L., and Colthart, J.D., 1990, A practical approach to the design, operating, and monitoring of in-situ soil venting systems, *Ground Water Monitoring Review*, **10**, 159-178.

Long, R. and Covo, A., 1994, Equivalent diameter of vertical drains with an oblong cross section, *J. Geotech. Engrg.*, **120**(9), 1625-1630.

Theis, C.V., 1935, The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, *Transactions of the American Geophysical Union* **2**, 519-524.

US EPA, 1995, *How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites: A guide for corrective action plan reviewers*, EPA/510/B-95/007, Chapter II, p. 1-29.

US EPA, 1997, *Remediation case studies: Soil vapor extraction and other in situ technologies*, EPA/542/R-97/009.

Welker, A.L., Logan, M., and Knight, S.B., 1998, Design issues of a prefabricated drain remediation system, *Geotechnical News*, **16**(1), 31-35.

Welker, A.L., Gilbert, R.B., and Bowders, J.J., 2000, Using a reduced equivalent diameter for prefabricated vertical drain to account for smear, *Geosynthetics International*, **7**(1), 47-57.