

토목섬유 연직배수재를 활용한 토양증기추출복원시스템의 수치해석

Numerical Analysis of Soil Vapour Extraction Remediation System using Prefabricated Vertical Drain

신 은 철¹ Shin, Eun-Chul
박 정 준^{2*} Park, Jeong-Jun
이 규 웅³ Lee, Kyu-Woong

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. The aim of this study is to investigate numerically the performance of a prefabricated vertical drain (PVD) as a SVE well, and the pattern of the induced air flow. A validated numerical model for a single PVD extraction well is developed based on the result of a well-designed laboratory model test. The validity of the simple analytical approach to determine air permeability based on the results of model tests is also discussed.

요 지

토양증기추출공법(SVE)은 불포화 지반상태에서 휘발성 유기화합물(VOCs)과 유류오염 물질을 제거하는데 효과적이고 경제적인 공법중의 하나이다. 그러나 토양증기추출공법은 투기계수가 1 Darcy보다 작은 실트질 흙과 같이 낮은 투기계수를 가진 지반에서는 비효율적이다. 본 연구의 목적은 연직배수재를 토양증기추출기술중 관점으로서의 적용성과 공기 흐름 패턴에 대한 해석적 방법이다. 즉, 연직배수재를 이용한 실내 모형실험의 공기 추출 시험 결과를 바탕으로 하여 단일 배수재로서의 수치해석 모델을 검증하였다. 또한, 추출 시험결과로 투기계수를 결정하여 단순 분석적 접근의 유효성도 평가하였다.

Keywords : Soil vapour extraction, Remediation, Numerical model, Prefabricated vertical drain, Air permeability

1. 서 론

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 야기 시킬 뿐만 아니라 대상지역이 넓은 경우엔 경제적 부

담이 커질 수 있는 문제점을 안고 있다.

그림 1에 나타낸 바와 같이 토양의 구조는 거시적으로 보아 자유수의 분포에 따라 불포화층과 포화층으로 분류할 수 있다. 불포화영역(unsaturated zone)은 지표면에서 가까운 거리에 위치한 수분으로 완전하게 포화되어 있지 않은 영역으로서 함수비는 일반적으로 포화영역보다 낮으며 포화층에 가까워질수록 함수비는 증가한다. 즉, 토양증기추출공법(soil vapour extraction system)은 그림 2에서와 같이 불포화 지반상태에서 휘발성 유기화합물(volatile

1 정회원, 인천대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engrg., University of Incheon)

2* 정회원, 인천대학교 토목환경공학과 연구교수 (Member, Research Professor, Dept. of Civil & Environmental Engrg., University of Incheon, E-mail: frostjun@incheon.ac.kr)

3 비회원, 동신대학교 토목공학과 박사과정 (Non-Member, Ph.D Student, Dept. of Civil Engineering, Dongshin University)

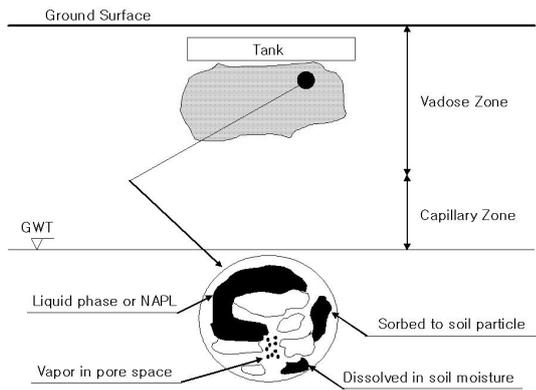


그림 1. 불포화영역에서의 오염물질 상태(USEPA, 1997)

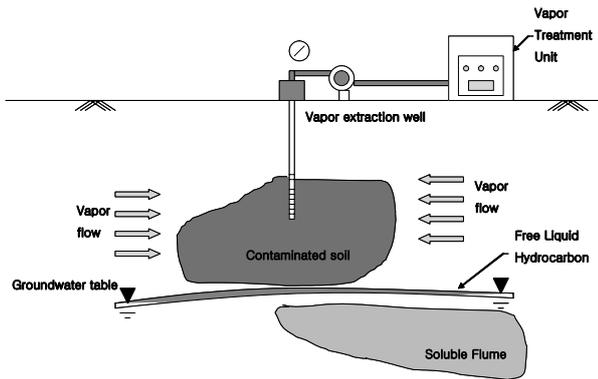
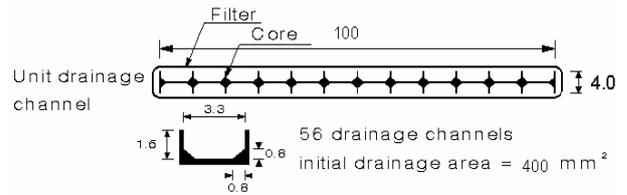


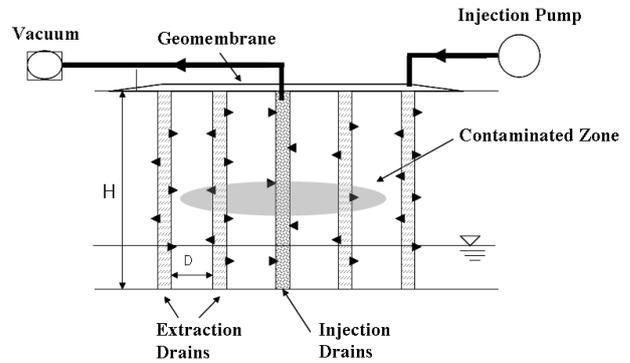
그림 2. 토양증기추출기술 개요도

organic compounds)과 유류오염 물질을 제거하는데 효과적이고 경제적인 공법중의 하나이다(박정준, 2007). 그러나 토양증기추출공법은 투기계수가 1 Darcy보다 작은 실트질 흙과 같이 낮은 투기계수를 가진 지반에서는 비효율적이다. 따라서, Park 등(2007)은 기존 연약지반 개량시 사용된 연직배수재(PVDs)를 토양증기추출시스템에 적용하여 투기계수가 낮은 지반에서 짧은 공기배출거리로 최대한 신속하게 오염된 토양을 복원할 수 있음을 제시하였다. 즉, 본 연구에서는 연직배수재를 이용한 실내 모형실험 결과를 바탕으로 단일 배수재에서의 공기흐름특성에 따른 수치해석 모델을 검증하였고, 모형실험 결과로 투기계수를 결정하여 토양증기추출복원시스템의 유효성을 평가하였다.

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



(a) 연직배수재의 단면 형태 (unit : mm)



(b) 토양증기추출복원시스템 개요도

그림 3. 연직배수재를 이용한 토양증기추출복원시스템

하지만 흙의 압밀로 인하여 간극률이 감소하게 되고, 흙의 투기계수가 저하되어 복원시 소요되는 시간이 더 길어질 수도 있다.

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, 흙의 투기계수가 저하되어 복원시 소요되는 시간이 더 길어질 수도 있다(Abuel-Naga et al., 2008). 즉, 연직배수재를 이용하여 한층 더 발전된 토양증기추출 복원시스템의 매커니즘은 지반개량을 목적으로 사용된 연직배수공법의 설계와 유지관리를 기초로 하고 있다. 그림 3은 각각 본 연구에서 사용되어진 연직배수재의 단면 형태와 불포화지역에서의 토목섬유 연직배수재를 이용한 토양증기추출복원 시스템의 개요도를 나타낸 것이다.

2. 토양증기추출복원시스템의 해석 이론

2.1 모델링 해석

추출정의 배열을 위하여 불포화지역의 공기흐름에 대한 수치해석 모델은 투기계수, 지하수위, 흐름률 등과 같

은 많은 요소들을 고려하여 진공에 따른 압력강하의 영향을 경계조건에 반영하여야 한다. 즉, 본 연구에서 수행한 Airflow/SVE는 불포화영역에서 방사형 대칭방향으로 공기흐름을 분석 할 수 있는 해석 프로그램이다. 표 1은 Airflow/SVE 모델 설정시 요구되는 입력데이터를 나타내었고, 이를 통하여 공기압력분포, 속도영역, 공기의 이동 경로, NAPL(non-aqueous phase liquids) 농도 등을 도출할 수 있다.

그림 4에 나타낸 바와 같이 무한경계조건 상태를 축방향 원형 대칭 시스템으로서 진공추출정은 원통형 중앙에 위치하게 되며, 지하수위는 바다경계조건으로 설정하고, 상부경계는 지표면으로, 우측면 경계는 진공추출정의 영향반경으로 설정할 수 있다. 세로축(z)는 지표면에서부터의 흙의 깊이, 가로축(r)은 추출정으로부터의 영향반경으로 표현할 수 있다. 상부면은 불투수층을 제외하고 지표면을 따라 설정된 대기압 상태이고, 우측 경계면은 추출정으로부터의 영향반경으로서, 이 경우의 압력은 대기압상태

표 1. Airflow/SVE의 입력 데이터

변수	데이터
그리드설계	추출정 반경(m) 영향반경(m) 지하수위(m)
경계조건	추출정의 스크린 위치 추출정에서의 압력[atm] 지표 포설 두께[m]
흙의 특성	투기계수[Darcy] 유효 간극률 유기탄소화합비
공기변수	온도 공기의 몰당 질량비 동점성비 [cp]

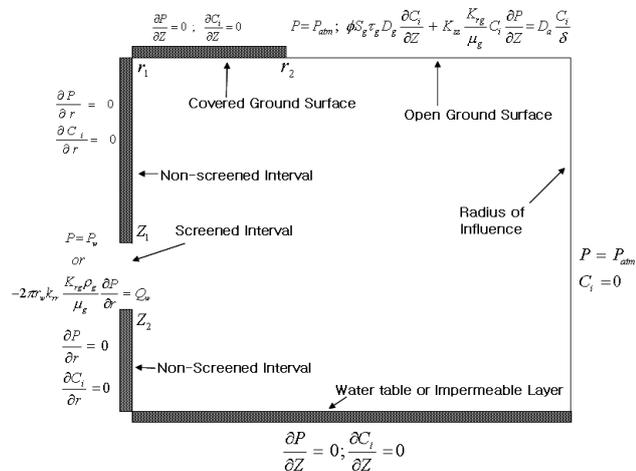


그림 4. Airflow/SVE의 경계 조건

를 나타낸다. 바다 지하수위면은 공기흐름이 없는 불투수성 경계이고, 좌측 경계면의 압력은 추출정의 압력과 같다. 즉, 경계조건($r = r_w$ 일 때 $P = P_w$ 이고, $r = R_I$ 일 때, $P = P_{atm}$)에서 방사형 흐름의 정상상태 해는 무한경계 가정과 함께 복잡한 현장조건을 Airflow/SVE를 통해 모형화 할 수 있다.

2.2 지배방정식의 유도

질량평형 방정식, 기체상태에서의 이동, 서로 다른 상태 관계에서의 NAPL 농도와 관련된 평형방정식, 그리고 포화도와 질량비가 포함된 구속조건 등을 조합하여 지배방정식을 나타낼 수 있다. 불포화 영역에서의 공기압력 분포에 대한 흐름 방정식을 도출하기 위해서 모든 공기의 성분에 대한 질량 균형을 조합한 후 다음과 같이 질량균형 방정식을 나타내었다.

$$\phi \frac{\partial(\rho_g s_g)}{\partial t} - \nabla \cdot \left(\frac{K k_{rg} \rho_g}{\mu_g} \nabla P_g \right) = I_g \quad (1)$$

여기서, ϕ 는 간극률, s_g 는 공기의 포화도, ρ_g 는 공기 밀도, K 는 투기계수, k_{rg} 는 기체상태에서의 무차원 상대투기계수, μ_g 는 공기의 동점도계수, P_g 는 기체상태에서의 압력이다. 또한, $I_g = \sum_i (-I_{og}^i + I_{gw}^i + i_{gs}^i)$ 로서 단위체적당 공기와 다른 상관계에서의 모든 유기화합물 성분의 전체 질량이동비를 의미한다. 식 (1)에서 우항인 질량이동비 I_g 는 기체상태에서의 유기화합물 농도와는 직접적으로 관계가 없다. 공기 흐름 방정식을 간소화하기 위해서 유기화합물의 전체농도는 공기 밀도와 비교하여 작은 것으로 가정하였다. 이 경우 추출정을 향한 전체 질량은 현저하게 작기 때문에 질량이동비 I_g 는 무시할 수 있다. 또한, 기체상태에서의 투기계수 변화에 대하여 살펴보면, NAPL 감소의 시간 특성치가 압력 재분포의 시간 특성치 보다 크기 때문에 압력에 대한 거동은 예상할 수 없으나, NAPL 감소 결과를 일으킨다. 이 가정을 고려하여, 기체상태 압력하에서 quasi 정상 상태 분포의 공기 흐름에 대한 지배방정식을 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \cdot \left(\frac{K k_{rg} \rho_g}{\mu_g} \nabla P_g \right) = 0 \quad (2)$$

각각의 휘발성 유기화합물에 대한 이류-확산 이동 방정

식은 다음 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi \frac{\partial (s_g \rho_g f_g^i + s_w \rho_w f_w^i)}{\partial t} + \rho_b \frac{\partial C_s^i}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\frac{K k_{rg} \rho_g f_g^i}{\mu_g} \nabla p_g \right) + \nabla \cdot (\phi s_g \tau_g D_g \rho_g \nabla f_g^i) - I_{og}^i - I_{ow}^i \quad (3)$$

여기서, f_g^i 와 f_w^i 는 각각 기체상태와 액체상태에서 유기화합물의 질량비, s_w 는 물의 포화도, ρ_w 는 물의 밀도, ρ_b 는 흙의 밀도, C_s^i 는 고체상태에서 흙의 단위부피당 NAPL의 흡착량, τ_g 는 기체상태의 비틀림계수(= $\phi^{1/3} S_g^{7/3}$), D_g 는 분자확산계수, I_{og}^i 와 I_{ow}^i 는 각각 유기화합물의 NAPL-공기상태, NAPL-액체상태간 질량이동비이다.

상기 식 (3)으로부터 $c_g^i = \rho_g f_g^i$ 를 고려하면 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\phi \frac{\partial (R_i s_g c_g^i)}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\frac{K k_{rg} c_g^i}{\mu_g} \nabla p_g \right) + \nabla \cdot [\phi s_g \tau_g D_g \rho_g \nabla (c_g^i / \rho_g)] + \lambda_i (c_{ge}^i - c_g^i) \quad (4)$$

여기서, $R_i = 1 + s_w / (H_i s_g) + \rho_b [K_{CO} \exp(-s_w / b_i) + K_{OG}^i f_{OC} / H_i] / s_g$ 이로서 무차원 지연계수를 의미한다. 여기서, K_{CO} 는 건조된 공기의 흡착계수, K_{OG}^i 는 유기탄소화합물의 분배계수, b_i 는 증기흡착시 정규화된 매개변수, f_{OC} 는 흙에서 유기탄소화합물의 질량비이다. 흙 구성인자의 국부적 평형은 구성인자들간에 내부적인 상호관계가 아닌 독립적인 것으로 가정하였다. 즉, 국부적 평형으로 가정하면, 무한히 큰 지역에서의 유기물질상에서 NAPL 화학물질에 대한 질량이동계수 $\lambda_i = \phi (\lambda_v s_g + \lambda_d s_w / H_i)$ 이다. 오염지역에서 화학물질의 공기오염 농도에 대한 초기 경계조건으로 $\lambda_i = 0$ 이 된다. 즉, 지하수문학에서는 화학물질의 질량과 구성비율의 기울기보다 확산과 분산에 의한 기체오염 농도 기울기가 사용되어 지고 있다(Sleep and Sykes, 1989; Mendoza and Frind, 1990). 각각의 유기화학물질에 대한 공기의 포화도와 지연계수가 일정한 조건에서 NAPL은 단지 시간에 따른 변화를 나타낸다. 기체 상태에서의 포화도나 지연계수 중 하나는 본 지배방정식 유도에서 시간에 따른 불변 변수로 가정하여 식 (5)와 같이 나타내었다.

$$\phi R_i s_g \frac{\partial c_g^i}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\frac{K k_{rg} c_g^i}{\mu_g} \nabla p_g \right) + \nabla \cdot (\phi s_g \tau_g D_g \nabla c_g^i) \quad (5)$$

또한, 각각의 휘발성 유기 화학물질에 대한 NAPL 감쇠방정식은 식 (6)과 같다.

$$\phi \rho_o \frac{\partial (s_o f_o^i)}{\partial t} = \lambda_i (c_g^i - c_{ge}^i) \quad (6)$$

감쇠방정식의 또 다른 형태로서 국부적 평형 상태와 $c_g^i = c_{ge}^i$ 를 고려하여 Airflow/SVE 프로그램에서의 수치 해석 과정 안에서 NAPL 감쇠방정식의 형태는 식 (7)과 같다.

$$\phi \rho_o \frac{\partial (s_o f_o^i)}{\partial t} + \phi \frac{\partial (R_i s_g c_g^i)}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\frac{K k_{rg} c_g^i}{\mu_g} \nabla p_g \right) + \nabla \cdot (\phi s_g \tau_g D_g \nabla c_g^i) \quad (7)$$

여기서, ρ_o 는 NAPL의 밀도, s_o 는 NAPL의 포화도, f_o^i 는 유기물질상에서 NAPL 구성물질의 질량비, c_g^i 는 기체상태에서 화학적 농도이다.

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 투기계수와와의 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^{-13} 에서 10^{-5} cm^2 정도의 범위를 가지며 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. Johnson (1990)은 표 2에 나타낸 바와 같이 흙의 입자크기에 따른 투기계수의 범위를 제시하였다.

표 2. 흙의 종류에 따른 투기계수

흙의 종류	투기계수, k		투수계수 $k(\text{cm/s})$
	(Darcy)	(cm^2)	
중간입도 모래	10~100	$1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-6}$	0.01~1
세립질 모래	1~10	$1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-7}$	0.001~0.01
점토	0.01~0.1	$1 \times 10^{-10} \sim 1 \times 10^{-9}$	<0.000001

3.1 실험 방법

본 연구에서 사용된 시료는 실트질 흙으로서 세립토의 대부분은 실트질로 구성되어 있어 통일분류법상 실트질 모래(SM)로 판명되었다. 실트질 흙의 표준다짐시험 결과는 최적함수비가 16.4%, 최대건조밀도는 14.9kN/m^3 을 나타내었고, 투수계수는 $3.61 \times 10^{-4}\text{cm/s}$ 로 도출되었다.

본 연구에서는 실험실 규모의 모형토조실험을 통하여 연직배수재의 등가직경과 영향범위를 산정하였고, 공기흐름률에 따른 투기계수를 측정하였다. 모형 토조는 그림 5(a)에 나타난 바와 같이 길이 1.20m, 폭 0.7m, 깊이 1.1m이며, 전면판은 투명 아크릴 판넬로 제작하여 지하수위와 흙시료의 상태를 확인할 수 있도록 하였다. 또한, 토조의 양측면은 지하수위를 조절을 위한 저수조를 두었으며, 저수



(a) 모형토조 전경



(b) 토조내 추출배수재와 피에조미터 설치

그림 5. 실내 모형토조 실험장치

조와 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 0.074mm 와이어매쉬 및 지오텍스 타일 섬유로 처리를 하여 대기압력이 유지됨과 동시에 흙시료의 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 5cm 두께로 시료를 포설하였다.

축소된 단면의 배수재는 지반 내에 각각 0.3, 0.5m 깊이 까지 삽입하였으며, Gabr et al.(1999)이 제시한 바와 같이 상부에서 0.2m 깊이까지 플라스틱 쉬트에 끼워 진공손실을 최소화 하였고, 압력수두를 측정하기 위하여 압력계와 연결시켰다. 연직배수재 상부에서의 브로워를 통한 진공흐름은 10~25kPa로 변화시키며, 각각의 진공압력에 따른 수두변화를 압력계에서 기록하도록 설치하였다.

그림 5(b)에 나타난 바와 같이 모형토조내 설치된 간극수압계와 연직배수재를 통한 진공압을 적용시에 공기압력을 측정하면서 폭이 250mm인 축소된 연직배수재를 타입한 후, 불포화 지반에서의 연직배수재의 깊이에 따른 영향 범위를 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 $1,111 \sim 3,333\text{cm}^3/\text{s}$ 로 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 50mm 정도를 직경이 19mm인 플라스틱 튜브를 이용하여 공기와 물의 흐름이

원활히 유지될 수 있도록 하였다.

3.2 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 (8)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.

$$k = \frac{Q \ln\left(\frac{r_w}{R_i}\right) \mu}{\pi H P_w [1 - (P_{atm} / P_w)^2]} \quad (8)$$

여기서, k = 공기흐름상태에서의 투기계수(cm^2 or Darcy), μ = 공기의 점도 = $1.8 \times 10^{-4} \text{ gf/cm-s}$, P_w = 추출정에서의 절대압력(atm), P_{atm} = 절대 대기압 = 1atm, 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 250mm로 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.

그림 6은 다양한 흐름률 상태에서의 4개의 제안식으로 가정된 투기계수를 나타낸 것으로서 등가직경이 증가할수록 계산된 투기계수의 값은 감소함을 나타내었으며, 특히 4가지 제안된 등가직경 중 보편적으로 사용되고 있는

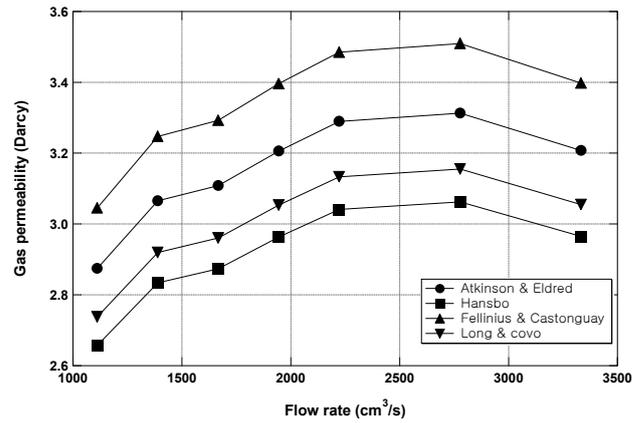


그림 6. 공기흐름률에 따른 투기계수

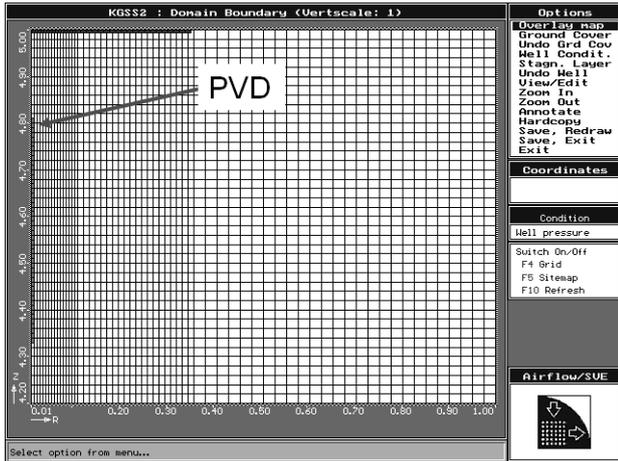
Atkinson and Eldred(1981) 방정식을 보았을 때, 공기흐름률에 대한 투기계수의 범위는 대략 2.8에서 3.3 Darcy를 나타내었다. 이 값을 주어진 함수비와 단위중량 조건을 고려할 때, Johnson et al.(1990)이 제안한 세립질모래의 범위인 1~10 Darcy에 분포하여 실험의 유효성을 입증하고 있다. 또한, 낮은 흐름률 상태에서는 피에조미터에서 낮은 수두손실을 나타내어 흐름률이 2,000 cm^3/s 보다 작을 때에는 정밀도가 떨어지고, 흐름률이 높을수록 압력수두는 더 정밀한 값을 나타내어 투기계수는 흐름률이 2,778에서 3,333 cm^3/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, 모형토조에 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.

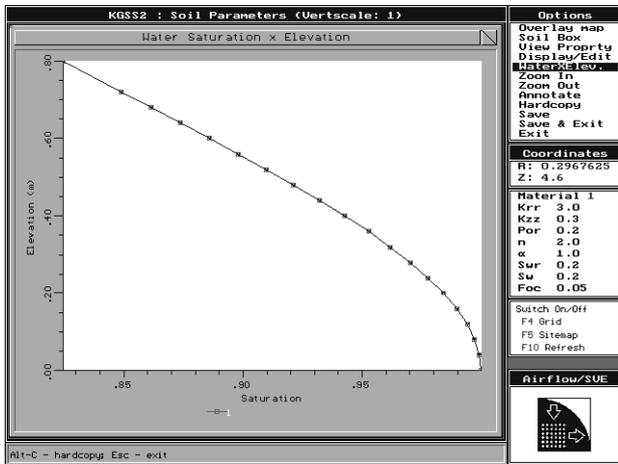
4. 해석결과 및 분석

그림 7은 수치해석시 요소망을 도시한 것으로서, 프로그림 자동실행으로 망을 형성하였고, 해석시 실내모형실험을 기초로 구성된 추출배수재의 진공압력에 따른 깊이별 초기포화도를 나타낸 것이다.

그림 8은 연직배수재에서의 각각의 공기흐름률에 따른 압력수두 측정값을 살펴보면, 수두손실이 증가함에 따라



(a) 유한요소망

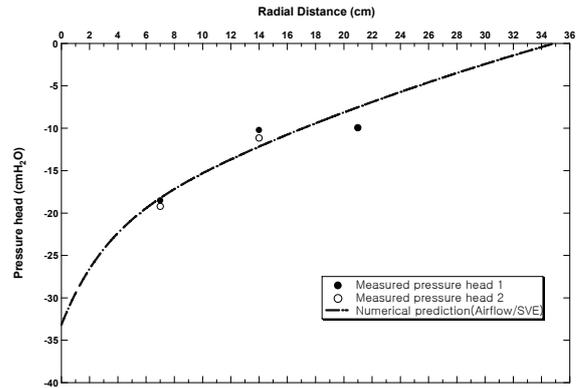


(b) 깊이별 포화도 결과

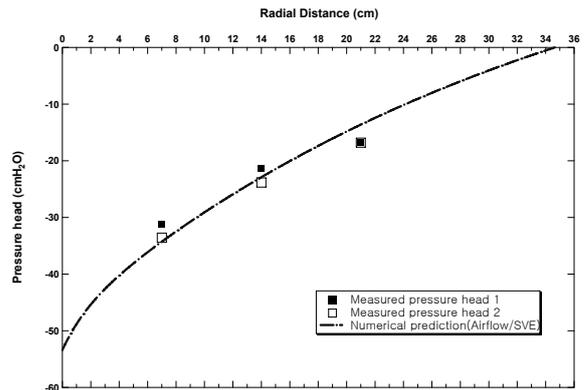
그림 7. Airflow/SVE의 요소망과 포화도

흐름률도 증가하였고, 이런 거동을 나타내는 이유는 토조 안 포설된 흙의 깊이에 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 판단된다.

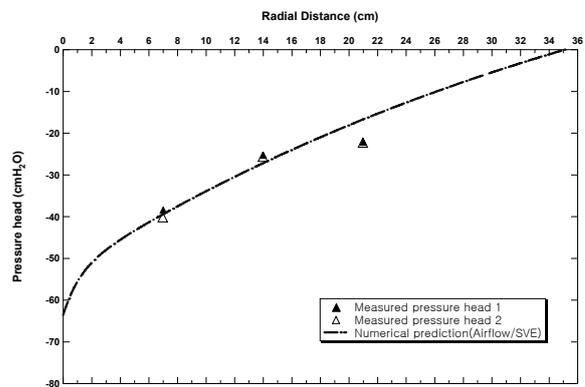
또한, 그림에서 공기흐름률에 따른 압력수두 측정값과 수치해석 예측값은 방사형 거리($r \leq 0.017$)를 포함한 압력수두를 나타낸 것이다. 연직배수재의 등가환산직경내에서는 압력수두값이 급격히 감소하는 타원형 형태를 나타내었으며, 이 범위를 넘어서면 압력수두값이 모든 방향에서 일치하는 원형 형태로 나타나게 된다. 이러한 거동은 제한된 작은 범위 안에서의 흐름 형태상에서 등가환산직경이 고려되지 않은 직사각형 연직배수재 형태의 결과로, 이 한계를 넘어서면 연직배수재는 SVE 관정(대칭 거동)과 같



(a) $Q = 1,111 \text{ cm}^3/\text{s}$



(b) $Q = 2,222 \text{ cm}^3/\text{s}$



(c) $Q = 3,333 \text{ cm}^3/\text{s}$

그림 8. 각각의 공기흐름률 상태에서 압력수두의 변화 예측

은 등가원형형태로 바뀌어 흐름패턴이 유사한 경향을 나타내었다. 또한, 같은 영역내에서 측정된 압력수두가 다소 다른 이유는 흙 시료의 불균질성과 피에조미터 설치에 의한 흐름 교란으로 판단된다.

수치해석 결과, $du_a/dr = 0$ 일 때 영향 반경(R_f)은 토조 반경보다 크게 나타났다. 이는 투기계수의 영향으로서 시험 시료의 투기계수는 영향반경(R_f)에 직접적으로 비례하기 때문에 토조 반경보다 크게 나타난 것으로 판단된다 (Hausmann, 1990). 또한, 수치해석을 통하여 추출배수재

에 대해서 대칭으로 공기흐름이 나타남을 알 수 있고, 공기 추출과정에서 방사방향과 연직방향으로 공기 흐름이 유도되는 것을 확인하였다. 제안된 방법을 바탕으로 현장 실험을 통한 오염물질의 농도 분포와 압력분포에 대한 초기조건과 경계조건의 해를 가정하고, 추출과정동안 시간에 따른 오염물질의 농도와 기체상태에서의 압력수두 변화를 통하여 공기, 물, 흡입자에 대한 상관관계에서의 질량 이동을 위한 변수들의 평형방정식 해를 구하는데 기초자료로 활용할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 연직배수재를 이용한 실내 모형실험 결과를 바탕으로 단일 배수재에서의 공기흐름특성에 따른 수치해석 모델을 검증하였고, 모형실험 결과로 투기계수를 결정하여 토양증기추출복원시스템의 유효성을 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 Darcy를 나타내어 주어진 함수비와 단위중량 조건을 고려할 때, Johnson et al.(1990)이 제안한 세립질모래의 범위인 1~10 Darcy에 분포하여 유효성을 입증하였다.
2. 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 흡이 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 압력수두 측정값과 수치해석 예측값 결과, 연직배수재의 등가환산직경내에서는 압력수두값이 급격히 감소하는 타원형 형태를 나타내며, 이

범위를 넘어서면 압력수두값이 모든 방향에서 일치하는 원형 형태로 나타났다. 이러한 거동은 제한된 작은 범위 안에서의 흐름 형태상에서 등가환산직경이 고려되지 않은 직사각형 연직배수재 형태의 결과로, 이 한계를 넘어서면 연직배수재는 SVE 관정과 같은 원형형태로 바뀌어 흐름패턴이 유사한 경향을 나타내었다. 또한, 같은 영역내에서 측정된 압력수두가 다소 다른 이유는 흙 시료의 불균질성과 피에조미터 설치에 의한 흐름 교란으로 판단된다.

참고문헌

1. 박정준 (2007), “토양증기추출 복원시스템에서 중첩이론을 고려한 무한경계조건 시행”, *한국토목섬유학회 논문집*, 제6권, 제3호, pp.9-16.
2. 신은철, 박정준, 노정민 (2005), “연직배수재를 이용한 오염토양복원 특성 평가”, *2005년 한국지반공학회 봄학술발표회*, 한국시설안전기술공단, pp.1400-1407.
3. Abuel-Naga, H., Bouazza, A., Bowders, J. and Collazos, O. (2008), “Numerical evaluation of prefabricated vertical drain enhanced soil vapour extraction system”, *Geosynthetics International*, Vol.15, No.3, pp.216-223.
4. Atkinson, M. S. and Eldred, P. J. L. (1981), “Consolidation of soil using vertical drains”, *Geotechnique*, Vol.31, No.1, pp.33-43.
5. 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.*, Vol.125, No.3, pp.615-618.
6. Hausmann, M. R. (1990), *Engineering Principles of Ground Modification*, McGraw-Hill, New York, pp.632.
7. 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, pp.159-178.
8. Mendoza, C. A. and Frind, E. O. (1990), “Advective-dispersive transport of dense organic vapors in the unsaturated zone”, *Water Resour. Res.*, Vol.26, pp.379-387.
9. Park, J. J., Kang, J. G. and Kim, J. I. (2007), “Evaluation of PVD-enhanced system in fine-grained soil contaminated with toluene”, *International Geotechnical Symposium, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia*, pp.609-615.
10. Sleep, B. E. and Sykes, J. F. (1989), “Modeling the transport of volatile organics in variably saturated media”, *Water Resour. Res.*, Vol.25, pp.81-92.
11. US EPA (1997), *Remediation case studies: Soil vapor extraction and other in situ technologies*, EPA/542/R-97/009.

(논문접수일 2008. 9. 4, 심사완료일 2008. 11. 27)