

## 연직배수재를 이용한 토양증기추출법의 적용

### Application of Enhanced Soil Vapor Extraction Using PVDs

신은철<sup>1)</sup>, Eun-Chul Shin, 박정준<sup>2)</sup>, Jeong-Jun Park, 김종인<sup>2)</sup>, Jong-In Kim, 최민근<sup>3)</sup>, Min-Guen, Choi

<sup>1)</sup> 인천대학교 토목환경시스템공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental System Engineering, University of Incheon

<sup>2)</sup> 인천대학교 토목환경시스템공학과 박사과정수료, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental System Engineering, University of Incheon

<sup>3)</sup> 인천대학교 토목환경시스템공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental System Engineering, University of Incheon

**SYNOPSIS** : 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.

Prefabricated vertical drains(PVDs) have been used for dewatering fine-grained soils for more than 25 years. Incorporating PVDs in and 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 work described herein was to effectively incorporate PVDs into a SVE remediation system and to demonstrate a PVDs enhanced SVE system at full scale.

The finding from this research will facilitate the design of field PVD-SVE systems in terms by providing insight into the optimal spacing between PVDs, the radius of influence of the wells and the flow rates to be used to capture and extract gas phase contaminants.

**Keywords** : soil vapor extraction(SVE), gas permeability, remediation system, prefabricated vertical drains(PVDs), radius of influence

## 1. 서 론

최근 국내의 경우, 인구증가 및 산업의 발달로 인하여 부수적으로 발생하는 폐기물과 사용량이 증가하여 토양 및 지하수의 오염이 심각한 상태에 있다. 전국에 산재하고 있는 비위생매립지, 폐금속 광산, 주유소, 수많은 산업공단, 군 주둔지 등에 의하여 심각성이 심화되고 있다.

기존에 오염복원공법으로 사용되어지고 있는 토양증기추출법이나 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. 즉, 토양증기추출공법(SVE)은 불포화 지반상태에서 휘발성 유기화합물(VOCs)

과 유류오염 물질을 제거하는데 효과적이고 경제적인 공법중의 하나이다. 그러나 토양증기추출법은 투기계수가 1 Darcy보다 적은 실트질 모래나 실트질흙과 같이 낮은 투기계수를 가진 지반에서는 비효율적이다. 따라서, 본 연구에서는 기존 연약지반의 지반개량시 사용된 연직배수재(PVDs)를 토양증기추출 시스템에 적용하여 짧은 공기배출거리로 최대한 신속하게 오염물질을 제거할 수 있게 하여 저투수성 지반에 오염된 토양을 효과적으로 복원할 수 있는 토양증기추출 시스템을 적용하는데 목적이 있다. 즉, 연직배수재 설치시 오염지반에 영향을 주는 인자에 대하여 공학적 특성을 규명하여 오염지반 대책공법으로서의 효과를 제시하였다(신은철, 2005). 이를 위해 적용되는 현장의 조건을 파일럿 규모로 모사한 현장 모델링 실험기를 제작하고, 이를 바탕으로 투기계수, 공기흐름률, 영향범위 등의 현장적용성을 분석하여 그 활용가능성을 평가하였다.

## 2. 연직배수재를 적용한 토양증기추출 시스템

토양증기추출(Soil vapor extraction) 공법은 제어되지 않은 유해폐기물 지역으로부터 증발성 오염물질을 효과적으로 처리하는데 사용되는 것으로 불포화 지반에서 휘발성 오염물질을 함유한 공기를 추출하는 시스템이다. 공기를 오염된 지반에 주입하고 진공장치를 이용하여 복구 또는 추출정으로부터 증기가 가득찬 공기를 추출한다. 지반내로 유입된 공기는 추출된 공기와 평형을 이루이지고, 공기주입량은 사용된 장비와 지반 공기 투수성 등의 지반특성에 따라 결정된다.

불포화된 지반의 공극은 평형상태를 이룬 액체와 증기로 구성되어 있다. 증발압이 높은 오염물질은 지반의 공극내에서 증기상태로 분리되며 증기추출 시스템으로 지반속에 진공을 가하여 이러한 분리된 휘발성 오염물질을 추출한다. 이와같이 휘발성 오염물질이 추출되면 결국 지반내에 존재하는 액체-증기가 재평형상태를 유지하기 위하여 액상의 오염물질이 계속적으로 휘발하게 된다. 증기추출 시스템은 모래, 자갈, 조립실트와 같은 투수성 불포화 지반에 국한되어 적용된다. 점성토 지반은, 시스템 적용 초기에 지반을 인위적으로 균열을 발생시키지 않기전에는 투수성이 낮아 효과적이지 못하다. 따라서 그림 1에 제시한 바와 같이 연직배수재를 이용하여 짧은 공기배출거리로 최대한 신속하게 오염물질을 제거할 수 있게 하여 투수성이 낮은 지반에 토양증기추출시스템을 나타낸 것이다.

토양증기추출공법에서 투기계수(air permeability)는 가장 중요한 특성중의 하나로서, 실험을 통하여 방정식 (1)에 제시한 바와 같이 방사형 흐름에 관한 이론을 이용하여 투기계수를 결정할 수 있다. 또한 지반내의 이방성, 흙의 종류, 단위중량, 함수비, 균열의 존재유무 등이 고려되어 결정되어야한다. 대형토조에 설치된 연직배수재에 대한 공기흐름률과 수두손실을 측정하여 흡시료에 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,  $k$ 는 공기흐름상태에서의 투기계수( $\text{cm}^2$  or Darcy),  $\mu$ 는 공기의 점도,  $P_w$ 는 추출정에서의 절대압력(atm),  $P_{atm}$ 은 절대 대기압,  $r_w$ 는 공기추출정의 반경(cm),  $R_i$ 는 공기추출정에서의 영향반경(cm),  $H$ 는 추출정에서의 스크린 간격(cm),  $Q$ 는 추출배수재에서의 유입되는 공기 유량( $\text{cm}^3/\text{s}$ )을 말한다.

이와같이 연직배수재를 이용한 복원시스템은 세립지반에 배수재를 설치하여 기존의 진공추출공법의 효율을 증진시킨 최적 시스템이다. Gabr 등(1996)은 모델시험과 파일럿 규모의 실내실험을 통하여 배수재의 투수특성을 제시하였고, 오염물질회수 실험을 수행하여 수치해석 모델을 개발하였고, Welker 등(2000)은 배수재 설치 간격, 배수저항 및 배수재와 화학물질의 반응에 대한 연구를 수행하였다. Indraratna와 Redana(1998)는 대형압밀시험장치를 이용하여 멘드렐 타설로 인한 주변지반의 스미어존에서는 공기투과율과 투수계수가 감소됨을 보고하였다.

따라서 본 연구에서는 기존 연직배수공법 적용시 주요한 인자로 제시된 등가직경, 영향범위 등의 영

향인자에 대하여 실험적으로 규명하고, 토양증기추출시스템 적용시 발생하는 문제점을 파악하고자 하였다.

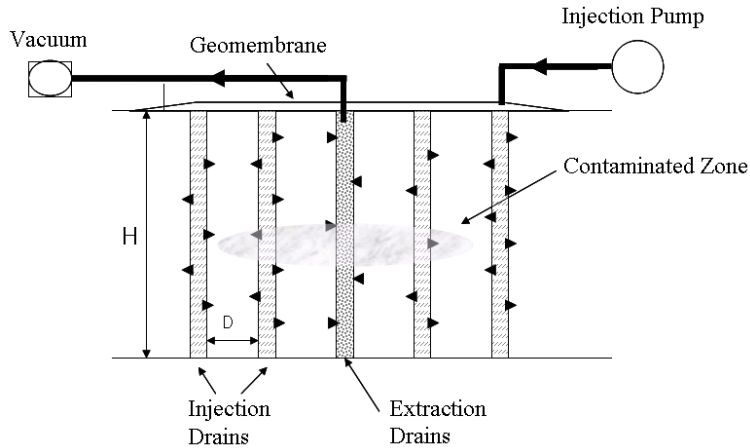


그림 1. 연직배수재를 이용한 토양증기추출시스템

### 3. 실험내용 및 방법

본 연구에서 수행한 실내실험은 토목섬유로 제작된 연직배수재(PVDs)의 기본적인 거동 특성을 고려하여 설계된 토양증기추출공법의 적용에 있다. 수행된 실험은 연직배수재의 등가직경 평가, 토양증기추출법을 적용시 연직배수재의 영향반경 평가, 투기계수의 예측을 통하여 연직배수재를 토양증기추출법으로 적용시 현장 실험의 기초자료로 활용하기 위해 실시하였다.

#### 3.1 실험재료

본 연구에서는 사용된 흙시료의 최대건조밀도는  $1.67 \text{ t/m}^3$ , 최적함수비는 16.36%, 통일분류법으로 SM인 실트질모래를 사용하였다. 또한, 연직배수재는 D 회사에서 생산되는 VD-808 제품의 배수재로서 본 연구에서는 축소된 크기(폭 2.5cm)의 연직배수재를 사용하였고, 코어 단면 형태는 그림 2에 나타낸바와 같다. 연직배수재는 물의 원활한 흐름을 유도하기 위한 코어부분과 세립분의 침투를 억제하기 위한 필터부분으로 구성되어 있으며, 진공조건 상태에서 수두손실을 평가하기 위하여 현장에서 오염토양 복원 적용시와 유사한 조건으로 설계 및 실험을 수행하였다.

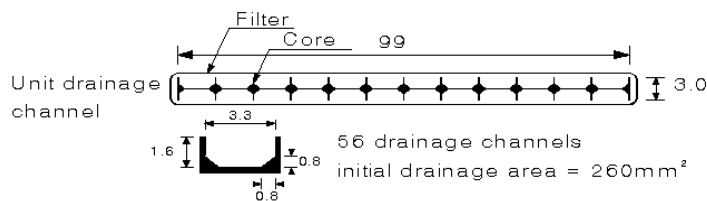


그림 2. 연직배수재의 코어 구조

#### 3.2 오염복원 토조 실험장치

그림 3은 연직배수재에 대한 실험실 규모의 오염복원토조 실험장치의 개요도를 나타낸 것으로, 모형토조의 크기는 가로 150cm, 세로 70cm이고, 높이는 110cm이다. 그림 4에 나타낸 바와 같이 흙의 중량과 다짐으로 인한 토조의 과도한 변형을 억제하기 위하여 모형토조 외부에 강철로 제작된 브레이싱 시

시스템을 설치하였다. 또한 모형토조의 양쪽 벽면에는 대기압에 노출시키기 위해서 지오텍스타일을 설치하였고, 그중 한쪽 면에는 흡시료의 유출을 방지하기 위하여 지오킴포지트를 설치하였다. 또한, 토조에 진공흐름을 가하기 위하여 플라스틱 튜브와 연결시켰다. 그림 5는 모형토조내에서 연직배수재를 통한 진공시 공기압력을 측정하면서 연직배수재 주변의 영향범위를 알 수 있도록 각각의 거리에 따라 5개의 피에조미터를 설치하였고, 단면을 축소시킨 폭이 25mm인 연직배수재를 설치하였다. 연직배수재에서의 진공손실과 공기침투를 최소화하기 위해서 덕트 테이프로 봉인을 하고 압력계와 연결하기 위하여 연직배수재 상부 5cm 정도를 직경이 19mm인 플라스틱튜브를 끼워 공기와 물의 흐름이 원활히 유지되도록 하였다.

사용 시료의 준비는 단계별로 해머를 낙하시켜 다짐을 실시하였고, 이후 각각의 위치에 피에조미터를 설치하였다. 이 장치에서는 주입펌프에서 공기를 공급하고, 진공상태를 만들기 위해 블로워 장치를 구성하였으며, 상부에 압력을 조절할 수 있는 게이지를 부착하여 공기유량과 진공압을 조절할 수 있도록 제작하였다. 연직배수재 추출정을 통하여 실험을 실시할 경우, 시료의 상부표면에서 진공 손실을 줄이기 위하여 불투수성 진공차수막으로 도포하였다. 또한 시료와 차수막 사이가 잘 밀착될 수 있도록 진공막 상부에 자갈을 포설하였다. 그리고 그림 4에 나타낸바와 같이 연직배수재는 압력수두를 측정하기 위하여 압력계와 연결시켰고, 연직배수재 상부에서의 진공 흐름은 10~25 kPa로 변화시켜, 각각의 진공에 따른 수두변화를 압력계에서 기록하도록 설치하였다.

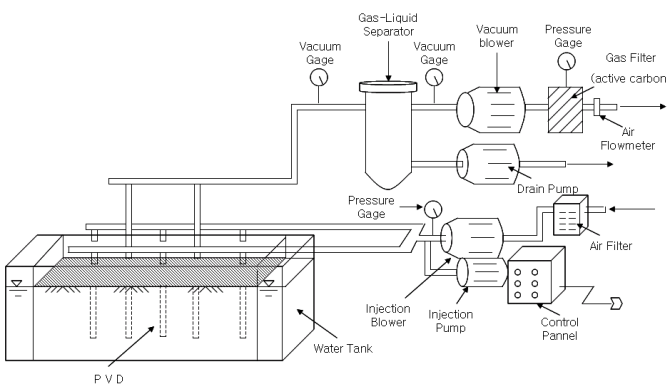


그림 3. 토양증기추출시스템의 설계도

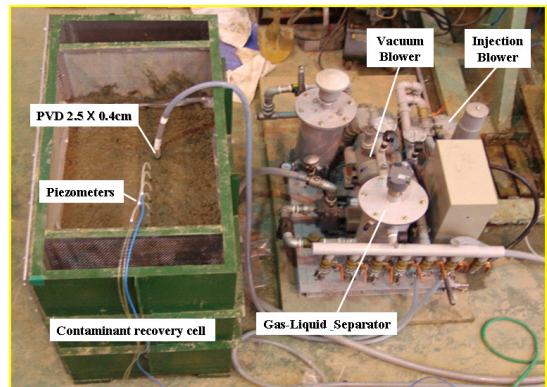


그림 4. 오염복원 토조 시스템 전경

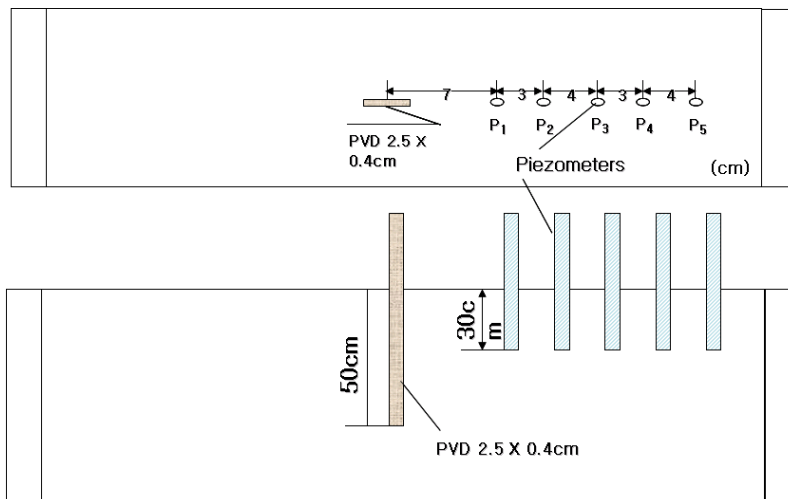


그림 5. 오염복원 토조내 간극수압계 설치 위치도

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 축척효과에 의한 축소된 연직배수재

연직배수재의 축척효과에 의한 축소된 크기는 Theis 방정식에 기초를 두었고, Welker(1998)가 제시한 바와 같이 연직배수재의 폭과 간격을 결정하였다. 방정식 (2)는 연직배수재의 폭과 간격을 결정하는데 이용하였고, 여기서,  $r_e$ 는 펌핑시 영향반경이고,  $r_w$ 는 추출정의 반경이다.

$$\left[ \frac{r_e}{r_w} \right]_{Field} = \left[ \frac{r_e}{r_w} \right]_{Laboratory} \quad (2)$$

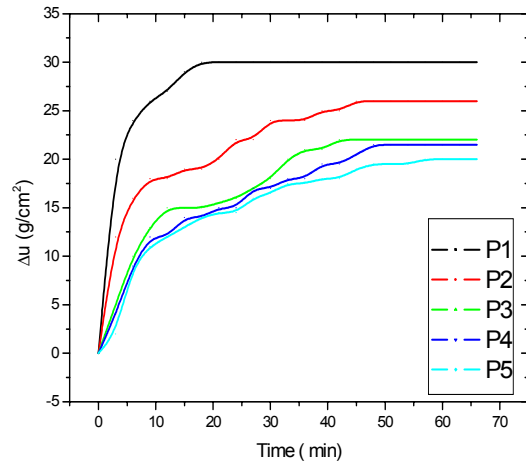
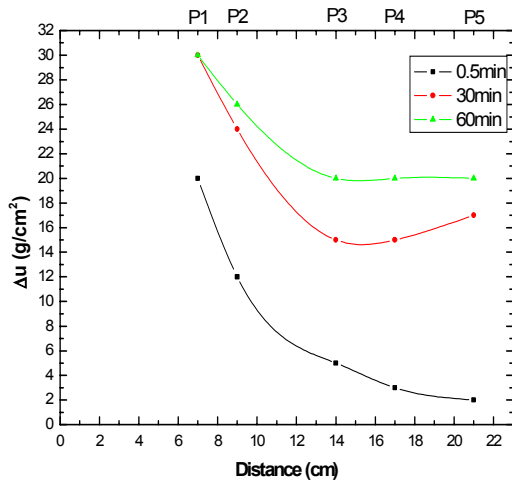
실내실험을 수행할 때,  $r_e/r_w$ 의 비가 19를 유지하기 위해서 폭이 25mm인 연직배수재를 중앙과 중앙의 간격이 23.8cm 위치하도록 하였다. 축소된 크기의 연직배수재를 해체, 절단, 제조업 단계로 준비하였고, 코아의 폭을 25mm로 자른 뒤 지오텍스타일로 덮고, 꿰매어 단단히 고정시켰다. 축소된 연직배수재의 상부에는 플라스틱 슈트로 감싸서 진공손실이 없도록 테이프로 밀봉하였다.

### 4.2 간극수압의 변화

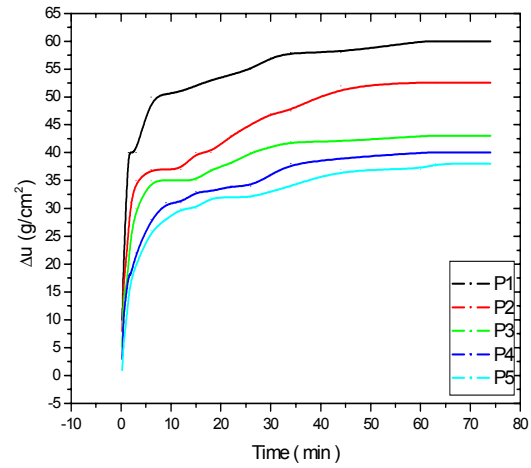
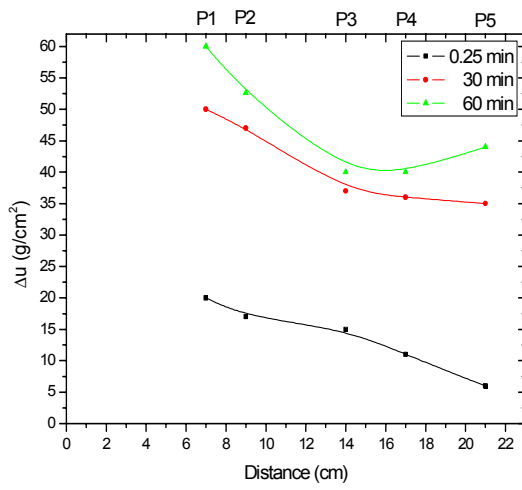
각각의 진공압을 적용 시 배수재로부터의 거리가 멀어짐에 따라 진공압에 대한 영향력이 감소하여 시간에 따른 간극수압의 변화폭은 감소하였다. 그림 6에 나타난 바와 같이 10kPa의 진공압을 적용하였을 경우 거리에 따른 간극수압의 변화는 대략 11cm에서 13cm 까지 급격하게 감소한 후 일정하게 유지되는 경향을 보였다. 30분후의 간극수압과 60분후의 간극수압의 변화가 크게 차이를 나타내지 않고 있다. 이는 30분정도 시간이 경과이후 부터는 대략 간극수압이 평형상태를 이룬다는 것을 추정할 수 있다. 즉, 시간에 따른 간극수압의 변화를 살펴보았을 때, 대략 30분 정도의 시간이 경과 후 일정한 간극수압을 유지하는 것으로도 이해할 수 있다.

또한 20kPa과 25kPa의 더 큰 진공 추출압을 작용시켰을 경우에도 10kPa의 추출압력을 작용시켰을 때와 마찬가지로 30분의 시간이 경과 후부터 간극수압의 변화가 크게 변하지 않는 것을 볼 수 있다. 그림 6에 나타난 바와 같이 진공추출압력이 두 배로 증가하면서 간극수압의 감소량도 두 배로 증가하고 있는데, 이는 진공압의 증가에 따라 간극수압도 비례적인 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 그러나 25kPa로 진공압을 더 크게 증가시켰을 경우 그래프의 곡선은 약간 변화하나, P1과 P5에서의 최종 간극수압은 변화하지 않는 것을 보아 이를 한계진공압으로 산정하였다. 또한 진공압력이 10kPa에서 20kPa로 증가하였을 경우에도 마찬가지로 반경 13cm를 넘어가면서부터는 간극수압이 더 이상 감소하지 않고 일정해지는 것으로 보아 배수재가 영향을 미칠 수 있는 유효영향범위는 약 13cm로 판단하였다.

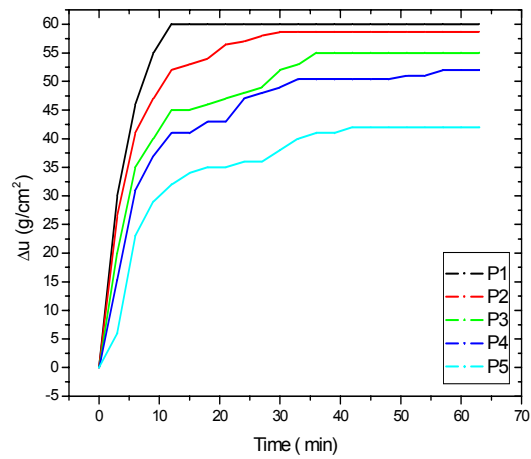
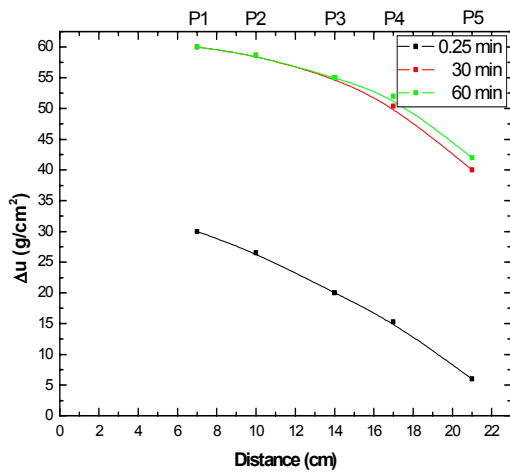
따라서, 4.1절에서 제안한 Welker(1988) 방정식과 비교분석한 결과, 연직배수재의 설치 간격은 보통 1~3m이다. 보통  $r_e$ 의 값은 간격의 1/2정도(50cm)이다. 표 1에 나타난바와 같이 폭이 25mm에 대한 Atkinson과 Eldred(1981)가 제시하였던 연직배수재의 등가윌 직경을 구하는 방법으로 계산되었다. 이 방정식에 의하면 등가직경은 연직배수재 크기가 10×0.43cm에 대하여 5.3cm이다. 즉, 본 연직배수재의 크기를 방정식 (2)에 대입하여 계산하면, 실험실에서의 펌핑시 영향범위는 13.3cm가 도출되어, 간극수압 변화에 의한 등가직경 추정값과 비슷한 범위를 나타내었다.



(a) 10 kPa 일 경우



(b) 20 kPa 일 경우



(c) 25 kPa 일 경우

그림 6. 피에조미터 위치와 시간에 따른 간극수압의 변화

표 1. 등가직경 계산

제안자	방정식	등가직경(cm)
Hansbo (1979)	$d_e = \frac{2(w+t)}{\pi}$	1.84
Atkinson and Eldred (1981)	$d_e = \frac{(w+t)}{2}$	1.45
Fellini and Catonguay (1985)	$d_e = \left[ \frac{4(w \times t)}{\pi} \right]^{0.5}$	1.13
Long and Covo (1994)	$d_e = (0.5 w + 0.7 t)$	1.53

## 5. 결론

본 연구에서는 기존 연직배수공법을 토양오염복원에 이용하기 위하여 현장적용성 평가의 기초적인 실험으로서 연직배수재에 영향을 주는 주요 인자인 등가직경, 영향범위 등에 대하여 실험적으로 규명하고, 토양증기추출시스템 적용시 발생하는 문제점을 파악하고자 하였다. 이에 도출된 결론은 다음과 같다.

각각의 진공압을 적용(10, 20, 25kPa) 하였을 경우, 배수재로부터의 거리가 멀어짐에 따라 진공압에 대한 영향력이 감소하여 시간에 따른 간극수압의 변화폭은 감소하였다. 즉, 10kPa의 진공압을 적용하였을 경우 거리에 따른 간극수압의 변화는 대략 11cm에서 13cm 까지 급격하게 감소한 후 일정하게 유지되는 경향을 나타내었다. 또한 진공추출압력이 두 배로 증가하면서 간극수압의 감소량도 증가하는 결과를 나타내었는데, 이는 진공압의 증가에 따라 간극수압도 비례적인 영향을 받는다는 것으로 사료되고, P1과 P5에서의 최종 간극수압은 변화하지 않는 것을 보아 이때가 한계진공압 상태인 것으로 판단된다.

진공압력이 10kPa에서 20kPa로 증가하였을 경우에 마찬가지로 반경 13cm를 넘어가면서부터는 간극수압이 더 이상 감소하지 않고 일정해지는 것으로 보아 배수재가 영향을 미칠 수 있는 유효영향범위는 약 13cm로 판단되고, Welker(1988) 방정식과 비교분석한 결과, 폭이 25mm에 대한 Atkinson과 Eldred (1981)가 제시하였던 연직배수재의 등가직경을 구하는 방법으로 계산하면, 실험실에서의 평평시 영향범위는 13.3cm가 도출되어, 간극수압 변화에 의한 등가직경 실험값과 비슷한 범위를 나타내었다.

## 참고문헌

1. 신은철, 박정준, 노정민(2005), "연직배수재를 이용한 오염토양복원 특성 평가", *한국지반공학회 봄학술발표회 논문집*, pp. 1400~1407.
2. Gabr, Bowders, Wang, and Quaranta (1996), "In Silty Soil Flushing Using Prefabricated Vertical Drains", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.33, No.1, pp. 97~105.
3. Indraratna, B. and Redana, I.W. (1998), "Laboratory Determination of Smear Zone Due to Vertical Drain Installation." *J. of Geotech. and Geoenvironmental Engrg.*, 124(2), pp.180~184.
4. Long, R. and Covo, A. (1994), "Equivalent Diameter of Vertical Drains with an Oblong Cross Section." *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(9), pp. 1625~1630.
5. 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), pp.47~57.