

토양증기추출복원 시스템에서 중첩이론을 고려한 무한 경계조건 실행

Implementation of Infinite Boundary Condition Considering Superposed Theory on SVE Remediation System

박 정 준^{1*} Park, Jeong-Jun

ABSTRACT

Soil vapor extraction (SVE) is an effective and cost efficient method of removing volatile organic compounds (VOCs) and petroleum hydrocarbons from unsaturated soils. 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. With this approach, the real bounded system is replaced for the purposes of analysis by an imaginary system of infinite areal extent. The boundary conditions for the contaminant remediation model test include constant head and no flow condition. Due to these parallel boundaries conditions, image wells should be developed in order to maintain the condition of no flow across the impermeable boundary. It is also assumed that the flow is drawdown along the constant head boundary condition. The factors contributing to the difference between the theoretical and measured pressure heads were also analyzed. The flow factor increases as the flow rate is increased. The flow rate is the most important factor that affects the difference between the measured and theoretical pressure heads.

요 지

토양증기추출공법(SVE)은 불포화 지반상태에서 휘발성 유기화합물(VOCs)과 유류오염 물질을 제거하는데 효과적이고 경제적인 공법중의 하나이다. 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. 연직배수재를 이용한 토양증기추출시스템 적용시 실제 현장에서 나타나는 무한 경계 조건을 만족하기 위해서 실내에서 파일럿 규모의 오염복원 모형실험을 결과로 유한경계조건 시스템에서 이미지웰 중첩이론을 이용하여 압력분포를 가정하였다. 즉, 압력강하가 없는 일정수두 경계조건 상태와 토조의 상·하부와 같이 흐름이 없는 불투수경계조건 상태를 유지하기 위해서 이미지웰 중첩이론을 도입하여 경계조건을 수립하였다. 결과, 공기흐름률이 증가할수록 흐름비율도 증가하였다. 따라서 높은 흐름률에 대한 흐름비율도 더 커지게 되는 것이고, 최적화과정 동안 공기흐름률은 측정 압력수두와 이미지웰 중첩이론으로부터 구해진 이론 압력수두의 오차율에 미치는 가장 중요한 인자로 판단된다.

Keywords : Infinite boundary condition, Superposed theory, SVE remediation system, Pressure heads, Flow factor

1. 서 론

최근, 전세계적으로 인구증가 및 산업 발달로 발생하는 폐기물과 유해화학물질로 인하여 토양 및 지하수 오염의 심각성이 고조되어 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 복원기술개발과 관련된

^{1*} 정회원, 인천대학교 공학기술연구소 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Research Institute for Engineering and Technology, University of Incheon, E-mail: frostjun@incheon.ac.kr)

연구가 필요한 실정이다(정하익 등, 1995).

기존에 오염복원공법으로 사용되어지고 있는 토양증기 추출공법(SVE)이나 양수처리공법 등은 투수성이 양호한 지반에 복원효과가 큰 공법으로 해안매립지반과 같이 투수성이 낮은 지반에서는 기대하기가 어렵다. 또한, 토양증기 추출공법은 불포화 지반상태에서 휘발성 유기화합물(VOCs)과 유류오염 물질을 제거하는데 효과적이고 경제적인 공법중의 하나이다. 그러나 토양증기 추출공법은 투기계수가 1 Darcy보다 작은 실트질 흙과 같이 낮은 투기계수를 가진 지반에서는 비효율적이다(US EPA, 1997). 따라서, Park 등(2007)은 기존 연약지반 개량시 사용된 연직배수재(PVDs)를 토양증기 추출시스템에 적용하여 투기계수가 낮은 지반에서 짧은 공기매출거리로 최대한 신속하게 오염된 토양을 복원할 수 있음을 제시하였다. 이를 기초로하여 본 연구에서는 불포화지반에서의 공기흐름 해석시 투기계수, 지하수위, 흐름률 등의 영향인자를 고려하여 토양증기추출복원 시스템 적용시 경계조건을 수립하는데 목적이 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.

Gabr 등(1996)은 모형실험과 파일럿 규모의 실내실험을 통하여 배수재의 투수특성을 제시하였고, 오염회수토조를 제작하여 실험 및 수치해석을 실시하였다. Welker 등(1998)은 추출시 배수재 주변의 농도분포, 배수재 설치 간격 및 수치해석적 방법에 대한 연구를 수행하였으며, Collazos 등(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. 그림 1은 불포화지역에서의 토목섬유 연직배수재를 이용한 토양증기추출복원 시스템의 개요도를 나타낸 것이다.

즉, 불포화지반에서의 추출에 따른 압력강하의 영향을 경계조건으로 반영하여 실내에서 수행된 오염복원토조 모

형실험의 유한경계조건 시스템을 이미지웰 중첩이론을 바탕으로한 무한경계시스템으로 경계조건을 수립하여 압력 분포를 나타내었다. 복원실험으로 측정된 압력수두에 따라 이미지웰로 추정된 이론적 압력수두의 최적화된 변수를 결정하였고, 각각 건조, 습윤, 느슨, 조밀한 조건에 따라 피에조미터에서 측정된 압력수두와 이론적으로 계산된 압력수두를 나타내었다.

2. 토양증기추출시스템의 해석 이론

불포화영역에서 추출정의 타설간격 및 타입 형태를 결정하기 위하여 지반의 투기계수, 지하수위, 공기흐름률 등과 같은 많은 영향인자들을 고려하여야 한다. 즉, 공기흐름률에 대한 해석 이론은 이러한 요소들을 동시에 효과적으로 적용시켜야 한다. 따라서, 진공압력에 따른 압력강하의 영향을 경계조건에 반영하여야 한다.

그림 2에 나타낸 바와 같이 무한경계조건 상태를 축방향 원형 대칭 시스템으로 모델링 할 수 있다. 진공추출정은 원통형 중앙에 위치하게 되며, 지하수위는 바닥경계조

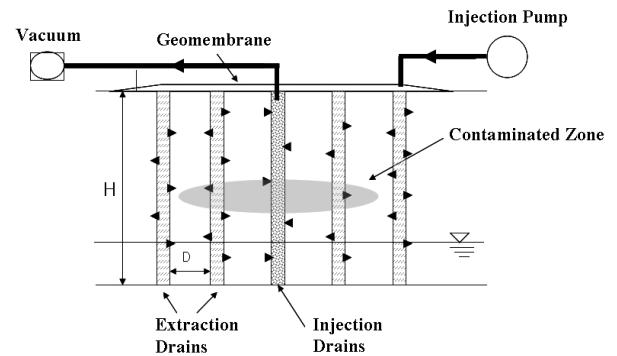


그림 1. 연직배수재를 이용한 토양증기추출복원 시스템의 개요도

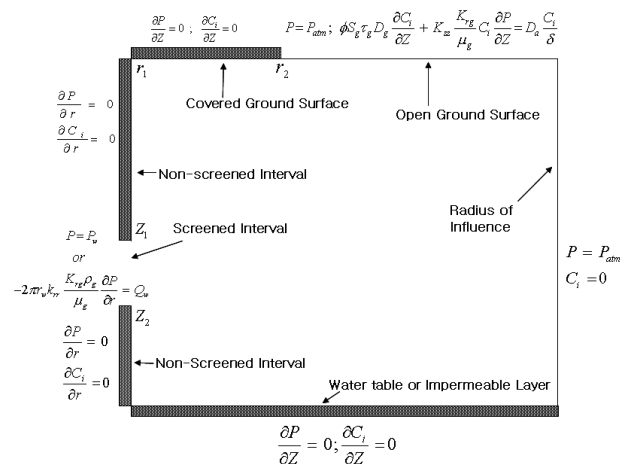


그림 2. 축방향 원형 대칭 시스템을 고려한 경계조건

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

Ferris 등(1962)이 제시한 바와 같이 본 연구에서는 실제 현장을 나타내는 무한 경계 조건을 만족하기 위해서 실내에서 파일릿 규모의 오염복원 모형실험을 바탕으로 유한경계조건 시스템에서 이미지웰 중첩이론을 이용하여 압력분포를 가정하였다. 그림 3에 나타난 바와 같이 토조벽면은 일정수두 경계조건, 토조의 상부와 하부는 불투수 상태의 경계조건으로 모형토조를 모델링 할 수 있다. 즉, 압력강하가 없는 일정수두 경계조건 상태와 토조의 상·하부

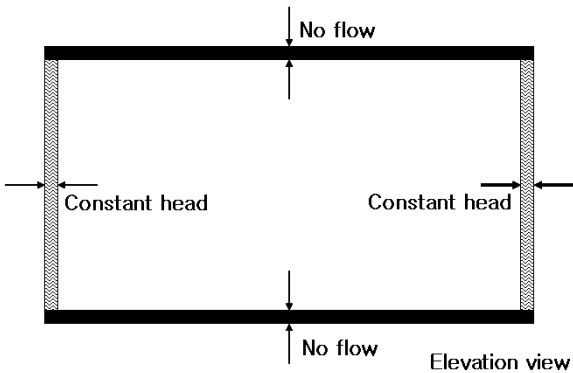
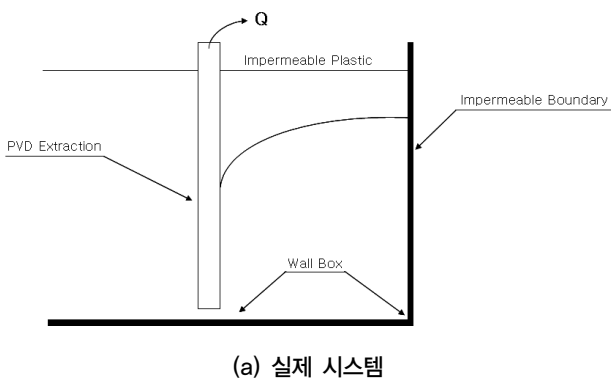


그림 3. 오염복원 실험시 토조의 경계조건



(a) 실제 시스템

와 같이 흐름이 없는 불투수경계조건 상태를 유지하기 위해서 이미지웰 중첩이론을 도입하여 경계조건을 수립하였다.

2.1 불투수 경계조건

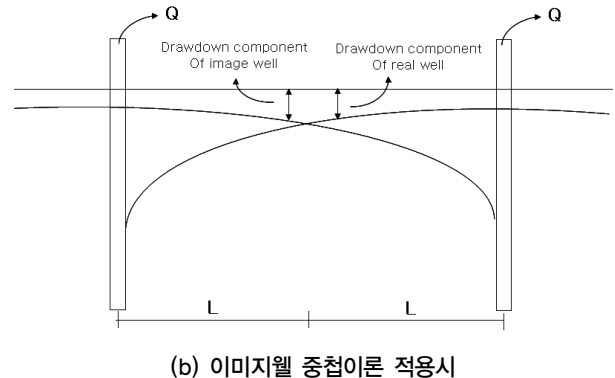
그림 4(a)는 추출정에 영향을 받는 오염복원토조 벽면을 불투수 경계조건으로 나타낸 것이다. 이러한 불투수경계조건 효과로 추출정에서는 압력강하가 증가된다. 즉, 이렇게 구속된 오염복원토조 시스템의 경계조건을 만족시키기 위해서 가정된 무한 압력강하 시스템을 이용할 수 있다.

그림 4(b)는 구속된 경계조건이 없을 경우에 대한 압력강하 곡선을 나타낸 것이다. 이미지웰은 추출물이 같고, 경계로부터 같은 거리에 떨어진 추출정과 대칭의 위치에 놓여있다. 따라서 추출정의 경계는 흐름이 없는 상태로 남아있어 또 다른 추출정과 같게 된다. 그 결과 경계선이 교차된 흐름이 없는 조건으로 만족하게 되는 것이다. 즉, 실제 압력강하 곡선상의 어느 한 점에 대한 압력강하는 실제 추출정과 가상의 추출정이 동시에 작용하였을 때의 합이 되는 것이다.

2.2 일정수두 경계조건

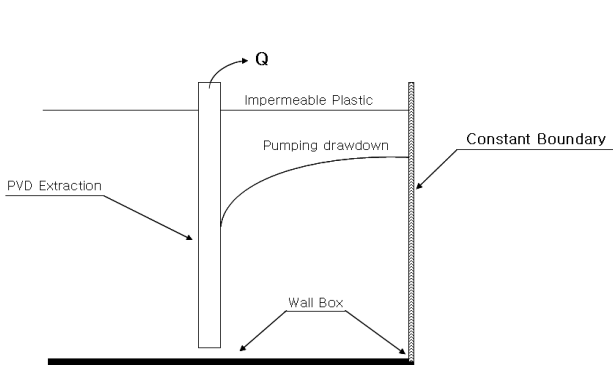
오염복원토조에서 좌우측면에 연직으로 설치된 상부가 개방된 대기압상태의 지오택스타일은 일정수두경계조건으로 적용할 수 있다. 이 경우에는 그림 5에 나타난 바와 같이 일정수두경계하에서는 압력강하가 발생하지 않는다.

가상의 주입정을 실제 추출정과 같이 일정수두경계로부터 같은 거리에 떨어진 곳에 위치시켜 두 개의 관정을 동시에 적용시킨다. 그림 5(b)에서와 같이 경계조건을 만족시키는 실제 추출정에 의해 발생하는 압력강하는 상쇄되고 이와 동일한 곡선의 위치를 따라 증가된 가상의 주입

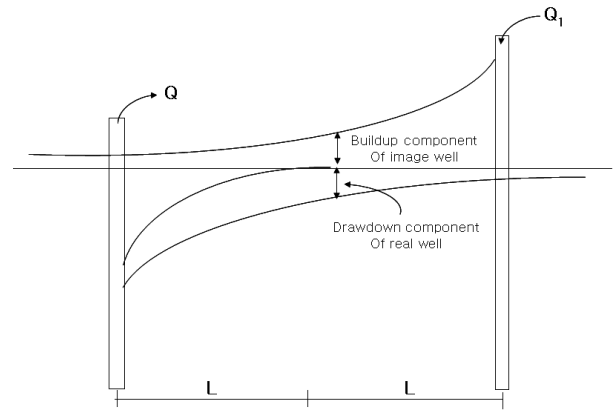


(b) 이미지웰 중첩이론 적용시

그림 4. 불투수 경계조건 적용시 추출배수재에서의 압력강하



(a) 실제 시스템



(b) 이미지웰 중첩이론 적용시

그림 5. 일정수두 경계조건 적용시 추출배수재에서의 압력강하

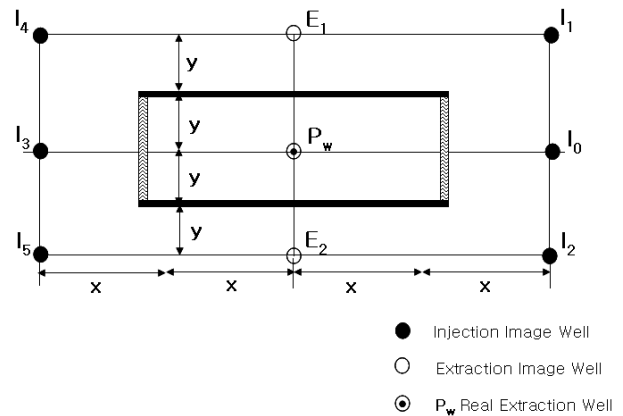
정에 대한 곡선을 볼 수 있다. 즉, 실제 추출정에서의 압력강하와 가상주입정에서의 증가된 값의 합이 압력강하의 합력이 되는 것이다.

2.3 복합 경계조건

Ferris 등(1962)은 그림 4에서와 같이 오염복원토조의 벽면은 복합경계 조건으로서 복합경계조건의 분석은 단순 경계보다 복잡하여 이미지웰에 영향을 주는 인접한 경계 뿐만 아니라 대칭된 맞은편 경계에 영향을 주기 때문에 이미지웰이 증가 될수록 더 복잡해지며, 복합경계조건 시스템을 분석하기 위한 가장 간단한 방법은 각각의 경계조건을 분리하여 어떤 특정한 조건을 도출시켜 나타내었다.

그림 6에 나타난 바와 같이 가상의 주입정으로 표시된 I_0 는 일정수두조건으로 나타내었다. 또한, 가상의 추출정으로 표시한 E_1 은 불투수 경계조건을 만족시키기 위하여 나타내었다. 가상의 주입정인 I_0 에서는 불투수경계조건을 따라 압력수두가 증가하는 것을 알 수 있다. 흐름이 없는 상태를 만족시키기 위해서 불투수경계로부터 같은 거리에 떨어져 가상의 주입정 I_1 을 위치시켰다. 같은 방법으로 E_1 의 추출정에서는 일정수두조건을 따라 가정된 압력강하가 발생되고, 가상의 주입정 I_1 에서는 이 압력강하와 균형을 이루게 된다.

흐름이 없거나 압력강하가 없는 상태의 모든 것이 만족된 조건을 가진 최초 이미지웰의 위치를 결정한 후 대칭면의 경계로부터 같은 거리에 떨어진 위치에 두번째 이미지웰을 위치시킨다. 이와 같이 두 번째 경계에 대해서도 같은 과정을 걸쳐 요구되는 경계조건에서 효과를 만족시켜 최종적으로 모든 이미지웰에서의 압력강하 혹은 압력증가



- Injection Image Well
- Extraction Image Well
- ⊙ P_w Real Extraction Well

그림 6. 이미지웰 적용에 따른 경계조건 평면도

효과를 조합하여 나타낼 수 있다. 즉, 면밀한 분석과 상호 균형 과정을 통하여 주어진 모든 경계조건상태에서 균형을 이루거나 전체결과와 비교하여 증가된 이미지웰의 결과가 불필요 할 때까지 이 시스템을 반복하여야 한다.

그림 7은 오염복원토조에 대한 최종 경계조건 형태를 나타낸 것이다. 즉, 추출-주입 특성을 지닌 이미지웰이 같은 간격을 가진 반복 형태로 위치하고, 그 위치에 대하여 추가된 이미지웰의 특성을 가진 것을 위치시켰다. 이론적으로 이미지웰은 각각의 방향으로 무한히 확장 시킬 수 있다. 그러나 경계 조건의 확실한 결과를 얻기 위해서는 실제로 그 수가 제한되어야 한다.

3. 이미지웰 중첩이론에 의한 압력수두

각각 지반조건에 따른 공기흐름률 실험은 그림 8에 나타난 바와 같이 $110 \times 150 \times 70 \text{cm}$ 크기의 모형 토조와 진공 브로워, 간극수압계 등의 실험장치를 이용하여 실시하였다. 최대전조단위중량인 14.9kN/m^3 에 대하여 느슨한 상태와

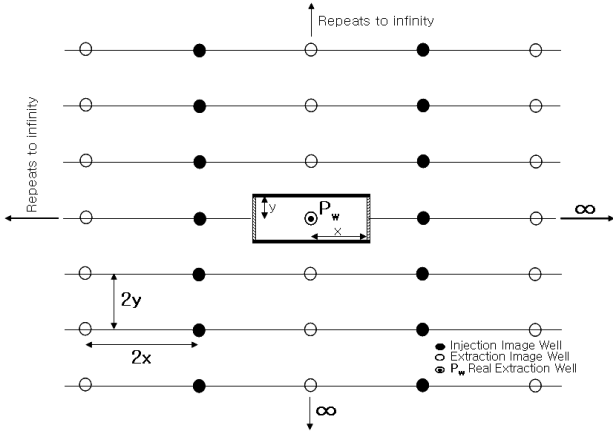


그림 7. 오염복원토조에 대한 무한 경계조건 시스템

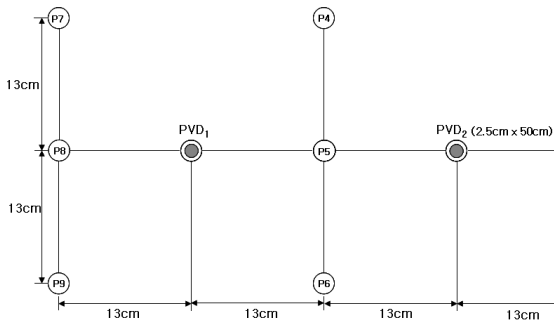
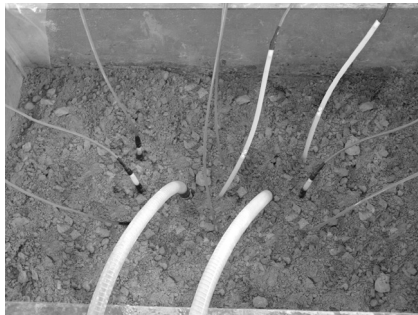


그림 8. 토양증기추출복원 시스템의 추출배수재와 간극수압계 설치 장면 및 평면도

조밀한 상태, 건조상태와 습윤상태의 조건으로 각각 다짐도와 함수비의 변화에 따른 압력수두를 측정하였다. 첫번째 단계로 함수비가 3%인 건조상태에서 시험지반을 조성하였다. 연직배수재는 영향범위 산정결과를 바탕으로(Park 등, 2007), 연직배수재 폭을 토조 규모에 맞게 축척효과에 의해 축소 제작된 2.5cm의 배수재를 사용하였다. 앞서 제시된 바와 같이 폭 2.5cm에 대한 영향반경을 13 cm로 설계하여 두개의 연직배수재를 설치하였다.

또한, 연직배수재 주변의 압력분포를 측정하기 위해서 각각의 거리에 따라 9개의 피에조미터를 설치하였으며, 진공추출 장치에 설치된 공기유량계를 조절하여 공기흐름률의 범위가 1,111~2,222cm³/s일 때 압력수두를 측정하였다.

수집된 데이터를 통하여 진공 추출시 공기흐름률, 함수비와 다짐조건에 따른 결과를 도출하였다.

Park 등(2007)은 오염복원률 평가를 위하여 실내오염복원 모형실험결과를 바탕으로 연직배수재를 이용한 토양증기추출 복원시스템의 유효성과 적합성을 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 모형실험으로 측정된 압력수두와 제안된 이미지 중첩이론을 바탕으로 한 이론 결과치를 상호 비교 분석하여 각각의 영향인자에 대하여 오차율을 나타내었다.

불포화조건에서의 공기흐름률, 압력분포, 흐름속도 등은 정상류 상태의 조건을 기본으로 하여 평가할 수 있다. 정상류 상태에서의 방사형 흐름은 다음과 같이 추출배수재에서의 거리, 등가반경, 영향반경, 압력 등으로 경계조건을 표현할 수 있다.

$$r = R_w \text{ 일 때, } P = P_w$$

$$r = R_I \text{ 일 때, } P = P_{RI}$$

여기서, r 은 추출배수재에서의 방사형 거리, R_w 는 연직배수재의 등가반경, R_I 는 영향반경, P_{RI} 는 영향반경내에서의 압력(=1atm)으로서 지반내에서의 압력분포는 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_r = P_w + (P_{RI} - P_w) \frac{\ln \left[\frac{r}{R_w} \right]}{\ln \left[\frac{R_I}{R_w} \right]} \quad (1)$$

여기서, P_r 는 추출배수재로부터 방사형방향으로 r 만큼 떨어진 거리에서의 압력(atm), P_w 는 추출배수재에서의 압력, P_{RI} 는 영향반경에서의 압력(=1atm), r 은 추출배수재로부터 방사형 거리(cm), R_I 는 영향반경(cm), R_w 는 연직배수재의 등가반경(cm) 이다. 여기에서 나타낸 압력은 현장이나 실험실에서 측정된 계기압력이 아닌 절대압력을 나타내는 것이다. 식 (1)은 흙의 특성에 따른 압력분포를 나타낸 것으로서 영향반경은 흙의 특성과 지층에 따라 값이 변하기 때문에 약간의 오차가 발생할 수도 있다.

토양증기추출 복원시스템을 적용한 실내오염복원 모형실험의 경우, 경계조건의 결과를 분석하기 위해서 이미지웰 중첩이론을 이용한 복합경계조건을 수립하였다. 그림 8에 나타난 바와 같이 오염복원률 평가를 위한 모형실험 결과를 바탕으로 각각의 지반조건(느슨, 조밀, 습윤, 건조 상태)과 피에조미터(P1~P9)의 위치에 따라 이미지웰 중첩

이론으로 압력수두를 나타내었다. 즉, 타입된 추출배수재에 대하여 이미지웰 중첩이론을 적용하여 나타낸 것이다. 식 (1)은 이미지웰 중첩이론으로 나타내기 위한 것으로서 경계조건의 영향에 따라 값이 변화하는 영향반경의 함수이다. 그림 9는 이미지웰 중첩이론을 적용시킨 이론값에 따른 측정값의 영향반경이 최소 차이에 도달할 때까지의 변화를 나타낸 그래프이다.

측정값과 이미지웰 중첩이론으로 계산된 이론적인 압력수두값의 차이는 영향반경이 증가함에 따라 감소하고 있다. 그러나 이 차이는 영향반경이 1,000cm 보다 더 커질 경우에는 그 값의 변화가 적으므로 무시하였고, 따라서 영향반경은 1,000cm로 예측할 수 있다. Wong 등(1997)에 의하면 loess 흙의 영향반경은 600~1,200cm 정도이고, 이 범위 안에서 값을 도출할 수 있다고 제시하였다. 측정된 압력수두와 계산되어진 이론적 압력수두의 평가 결과, 약간의 오차가 발생하였고, 최대 오차값은 피에조미터 P5에서 나타난 것을 알 수 있었다. 이들 피에조미터와 남아있는 피에조미터의 압력수두값을 비교시 더 높게 나타난 것을 확인할 수 있었다. 이는 그림 8에서 나타난 바와 같이 대칭된 그룹인 피에조미터 P4와 P6은 추출배수재에 더 가까이 위치하고 있어 그 압력수두가 높게 나타난 것으로 판단된다.

4. 영향인자 분석

본 연구에서는 실내오염복원 모형실험에서 측정된 압력수두에 따라 이미지웰 중첩이론으로 계산된 이론적 압력수두의 최적화된 변수를 결정하기 위해서 각각의 다짐 조건과 함수비조건에 따라 수집된 모든 데이터들을 간소화한 후 상호 연관시켜 오차율을 분석하였다. 즉, 분석된

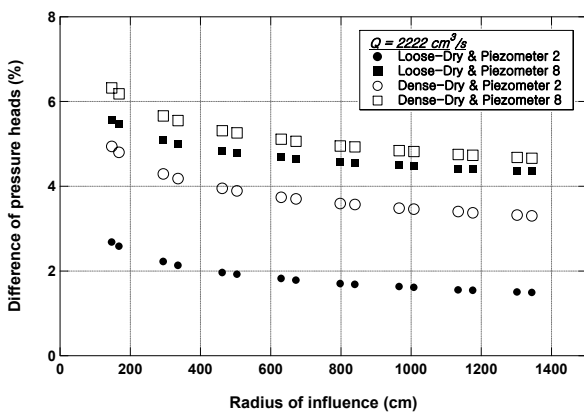


그림 9. 이미지웰 결과값과 실험 측정값의 영향반경

이론적인 수두와 측정된 압력수두 사이의 오차를 최적화하여 나타내었다. 모든 이론적인 압력수두값은 다음 식 (2)와 같이 최적화하여 나타낼 수 있다.

$$Factor = \frac{\text{측정된 압력수두}}{\text{이론적인 압력수두}} \quad (2)$$

각각의 이론적인 값과 측정된 값을 조합하여 하나의 인자를 얻을 수 있고, 여기서 인자는 다음의 일정비, 함수비, 흐름비로 나타내어 분석할 수 있다.

4.1 일정비의 영향

표 1은 추출 배수재에 대한 각각의 지반조건에 대하여 측정된 압력수두와 이론적인 압력수두의 평균값으로 하여 나타낸 것이다. 나타낸 모든 이론적인 압력수두값은 압력수두의 평균값으로 하여 구한 일정비 0.9877을 곱하여 얻을 수 있다. 식 (3)을 이용하여 측정된 압력수두와 이론적인 압력수두의 차이를 계산하였고, 식 (4)를 이용하여 최적화된 이론적 압력수두의 오차를 나타내었다.

$$\text{Difference error (\%)} = \left[\frac{\text{Measured} - \text{Theoretical}}{\text{Measured}} \right] \times 100 \quad (3)$$

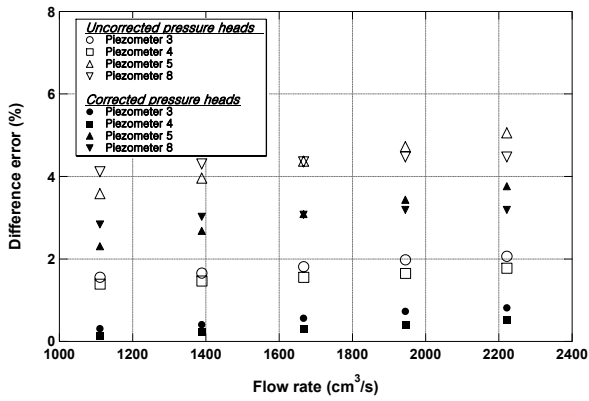
$$\text{Difference error (\%)} = \left[\frac{\text{Measured} - (\text{Theoretical} \times \text{Factor})}{\text{Measured}} \right] \times 100 \quad (4)$$

그림 10은 식 (3)과 (4)를 이용하여 계산된 오차율을 대칭된 피에조미터끼리 그룹화하여 대표적인 위치를 선정하여 나타낸 것으로서, 각각 느슨한 상태와 조밀한 상태에 대하여 보정된 이론적 압력수두값은 검은점으로 표시하였으며 순수하게 이미지웰 중첩이론으로 보정되지 않은 이론적 압력수두 값은 빈점으로 표시하였다.

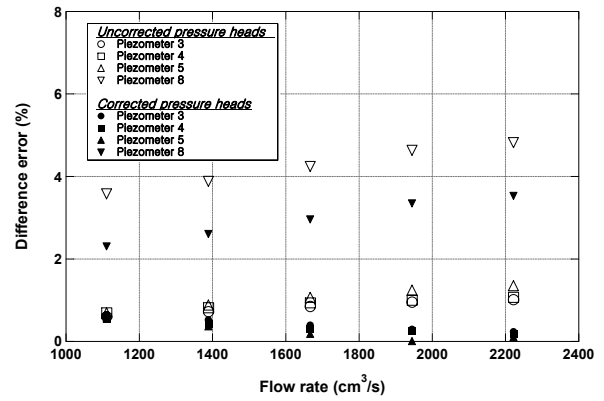
즉, 그림 10(a)의 느슨한 상태일 경우에는 공기흐름률에 따른 오차율 감소가 뚜렷한 경향을 나타내지 않았지만, 그림 10(b)의 조밀한 상태일 경우에는 1,667~1,945cm³/s 사이에서 최소의 오차율을 나타내었다.

표 1. 지반조건에 따른 일정비

Soil condition	Average pressure heads (atm)		Factor = $\frac{\text{Measured}}{\text{Image well theory}}$
	Measured	Image well	
Loose-Dry	0.9586	0.9772	0.9810
Loose-Wet	0.9917	0.9954	0.9963
Dense-Dry	0.9680	0.9829	0.9848
Dense-Wet	0.9751	0.9863	0.9886
Average			0.9877



(a) 느슨한 상태



(b) 조밀한 상태

그림 10. 일정비에 대한 이미지웰 중첩이론의 보정 유무에 따른 압력수두의 오차율

4.2 함수비의 영향

그림 11은 함수비 인자에 대하여 최적화를 위해서 각각 건조 상태와 습윤 상태일 경우의 함수비 영향을 전술한 과정을 통하여 나타낸 것이다. 추출배수재에 진공압력을 가했을 경우 공기 추출흐름에 가장 많은 영향을 받는 피에조미터 P5에 대하여 나타낸 것으로써 공기흐름률이 높을수록 더 큰 오차율 감소를 보였으며, 1,667~2,222cm³/s 사이에서 최소의 오차율을 나타내었다.

4.3 흐름비의 영향

압력수두에 따른 흐름비에 대한 영향인자 분석은 매우 중요하다. 표 2에 나타난 바와 같이 각각의 지반조건에 대하여 공기흐름률에 따른 측정된 압력수두와 이론적인 압력수두를 평균하여 오차율을 도출하여 최적화하였다. 흐름비의 범위는 0.9851~0.9907이고 공기흐름률이 증가할수록 흐름비율은 감소하였다.

그림 12는 측정된 압력수두의 최적화 곡선을 나타낸 것이다. 모든 데이터들은 45° 추세선에 잘 일치하고 있다. 식 (3)과 (4)를 이용하여 보정된 이론적 압력수두와 이미지웰 중첩이론 값을 그대로 사용한 보정되지 않은 이론적인 압력수두 사이의 오차율은 그림 13에 나타내었다. 특히, 그림 13(b)의 조밀한 상태일 경우, 공기추출흐름에 가장 많은 영향을 받는 피에조미터 P5 위치에서는 12%의 오차율이 감소하였고, 일정비 영향 분석 결과와는 좀 다르게 1,389~1,667cm³/s 사이에서 오차율이 최소로 나타났다.

즉, 공기흐름률이 증가할수록 흐름비율도 증가하였다. 따라서 높은 흐름률에 대한 흐름비율도 더 커지게 되는 것이고, 최적화과정 동안 공기흐름률은 측정 압력수두와 이

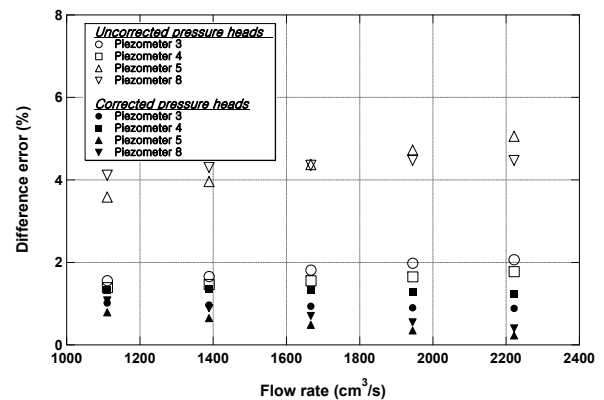


그림 11. 함수비 인자에 대한 이미지웰 중첩이론의 보정 유무에 따른 압력수두의 오차율

표 2. 지반조건에 따른 흐름비

Flow rate (cm ³ /s)	Average pressure heads (atm)		Factor = $\frac{\text{Measured}}{\text{Image well theory}}$
	Measured	Image well	
2,222	0.9677	0.9823	0.9851
1,945	0.9700	0.9836	0.9862
1,667	0.9729	0.9852	0.9875
1,389	0.9762	0.9871	0.9890
1,111	0.9797	0.9890	0.9907

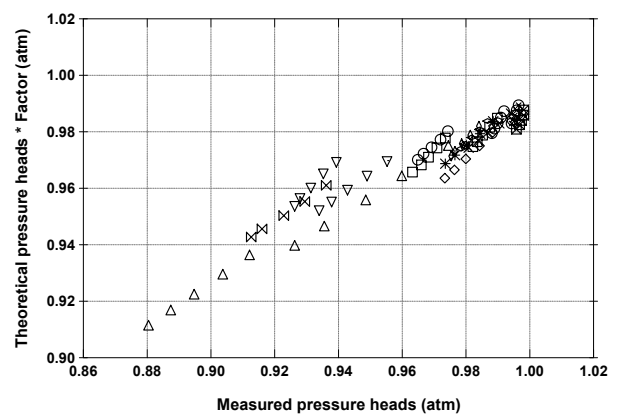
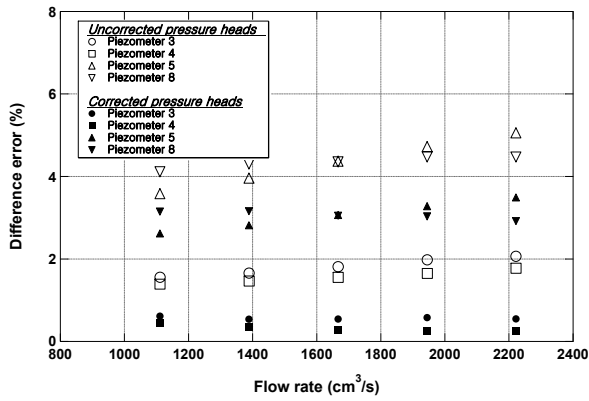
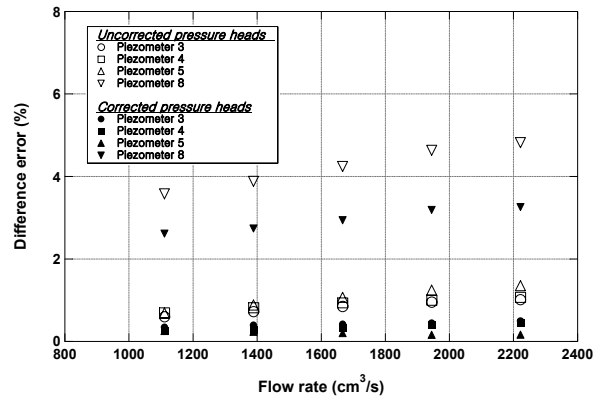


그림 12. 측정된 압력수두에 따른 흐름비의 최적화 곡선



(a) 느슨한 상태



(b) 조밀한 상태

그림 13. 흐름비에 대한 이미지웰 중첩이론의 보정 유무에 따른 압력수두의 오차율

미지웰 중첩이론으로부터 구해진 이론 압력수두의 오차율에 미치는 가장 중요한 인자로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 연직배수재를 이용한 토양증기추출시스템 적용시 실제 현장에서 나타나는 무한 경계 조건을 만족하기 위해서 실내에서 파일럿 규모의 오염복원 모형실험을 결과로 유한경계조건 시스템에서 이미지웰 중첩이론을 이용하여 압력분포를 가정하였다. 즉, 실내오염복원 모형 실험에서 측정된 압력수두에 따라 이미지웰 중첩이론으로 계산된 이론적 압력수두의 최적화된 변수를 결정하기 위해서 각각의 다짐조건과 함수비조건 등의 영향인자에 대하여 오차율을 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

측정값과 이미지웰 중첩이론으로 계산된 이론적인 압력수두값의 차이는 영향반경이 증가함에 따라 감소하였으며, 영향반경이 1,000cm 보다 더 커질 경우에는 그 값의 변화가 매우 작게 나타났다. 즉, Wong 등(1997)이 제시한 loess 흙의 영향반경인 600~1,200cm의 범위와 유사한 결과가 도출되어 본 연구에서의 영향반경은 1,000cm로 예측할 수 있다.

토양증기추출 복원시스템에서의 최적화된 변수를 결정하기 위해서 각각의 다짐조건과 함수비조건 등의 영향인자에 대하여 오차율을 분석한 결과, 공기흐름률이 증가할수록 흐름비율도 증가하였다. 따라서 높은 흐름률에 대한 흐름비율도 더 커지게 되는 것이고, 최적화과정 동안 공기 흐름률은 측정 압력수두와 이미지웰 중첩이론으로부터 구해진 이론 압력수두의 오차율에 미치는 가장 중요한 인자로 판단된다.

상기 제안된 이미지웰 중첩이론의 해를 통하여 추출배수재에 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 가스상 압력수두 변화를 통하여 공기, 물, 흡입자에 대한 상관관계에서의 물질 변환을 위한 변수들의 평형방정식 해를 구하는데 기초자료로 활용할 수 있다.

참고문헌

1. 정하익, 이용수, 우제운 (1995), *오염지반 및 지하수 정화기술에 관한 연구*, KICT/94-GE-1101-2, 한국건설기술연구원.
2. Collazos, O. M., Bowders, J. J. and Bouazza, M. (2002), "Enhanced soil vapor extraction using PV drains", *4th ICEG Environmental Geotechnics*, Sweta & Zeitlinger, Brazil, pp. 761-766.
3. Ferris, J. G., Knowles, D. B., Brown, R. H. and Stallman, R. W. (1962), "Theory of aquifer tests", *U.S. Geological Survey Water-Supply Paper*, 1536-2, pp.144-171.
4. Gabr M. A., Bowders J. J., Wang. J. and Quaranta J. D. (1996), "In situ soil flushing using prefabricated vertical drains", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.33, No.1, pp.97-105.
5. 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.
6. US EPA (1997), *Remediation case studies: Soil vapor extraction and other in situ technologies*, EPA/542/R-97/009.
7. Welker, A. L., Logan, M. and Knight, S. B. (1998), "Design issues of a prefabricated drain remediation system", *Geotechnical News*, 16(1), pp.31-35.
8. Wong, H. C., Lim, C. H. and Nolen, G. L. (1997), *Design of remediation systems*, Lewis Publishers, New York, pp.65-76.

(논문접수일 2007. 6. 8, 심사완료일 2007. 6. 29)