

## 지하수 흐름의 해석해를 이용한 토양진공추출 해석

### Analysis of Soil Vacuum Extraction using Analytical Solution of Groundwater Flow

김민환\* · 이 학\*\* · 한동진\*\*\*

Kim, Min Hwan · Lee, Hak · Han, Dong Jin

#### Abstract

An analytical solution of groundwater flow is applied to design soil vacuum extraction for removing volatile organic compounds from the unsaturation zone. The governing equation of gas or vapor flow in porous media is nonlinear in that gas density depends on gas pressure. A linear equation suggested by researcher is similar to that of groundwater flow. The pressure drawdowns of confined and leaky aquifers are calculated using Massmann's field data, and the pressure drawdowns are compared. A solution of Theis equation calculated by Massmann is modified using GASSOLVE9 program in this paper. The pressure drawdown using Hantush's analytical solution for leaky aquifer also compared to that of Massmann. Hantush's analytical solution gives good approximations to pressure drawdown.

**Key words** : vacuum extraction, pressure drawdown, Theis equation, confined aquifers, leaky aquifer, groundwater flow

#### 요 지

불포화지역의 유기화합물을 제거하기 위해 지하수 흐름 해석해를 토양 진공추출 설계에 적용시켰다. 토양 공극 속의 가스 밀도가 압력에 따라 달라지므로 가스나 증기의 흐름을 지배하는 방정식은 비선형이다. 선행 연구자 의해 선형화된 방정식은 지하수 흐름의 지배방정식과 유사하다. 압력대수층과 누수대수층의 압력강하량에 대해서 Massmann의 자료를 이용하여 비교하였다. 압력대수층에 대해서는 Massmann에 의해 제시된 Theis의 해를 수정하였으며 Theis의 해를 검증하기 위해 GASSOLVE9의 프로그램을 이용하였다. Hantush의 해석해를 이용하여 누수대수층 구조에 대해서 압력강하량을 계산하여 Massmann의 해와 비교하였다. 그 결과 압력강하량에 대해 근사적인 결과를 얻었다.

**핵심용어** : 진공추출, 압력강하량, Theis방정식, 압력대수층, 누수대수층, 지하수 흐름모형

#### 1. 서 론

산업화로 인해 유류 사용은 급속하게 증가하고 있다. 유류 저장 시설의 노후화나 저장 시설의 사고로 유류가 유출되어 이로 인한 토양 오염 등이 보고되고 있다. 오염된 토양을 복원하기 위해 오염된 흙을 파내어 처리하거나 처분하는 재래식 방법 등이 사용되어 왔다. 재래식 방법은 물리적, 경제적 제약 때문에 사용할 수 없는 경우가 대부분이다.

토양진공추출방법은 휘발성, 혹은 반휘발성 유기화합물로 오염된 불포화 토양을 복원시키는 방법 중의 하나이다. 이 방법은 유류저장탱크나 수송관로에서의 누출, 기타 사고 등에 의해 누출된 휘발성, 혹은 반휘발성의 유기화합물로 오염된 토양을 복원시키기 위해 적용될 수 있다. 또한 쓰레기 매립장에서 발생하는 메탄가스는 비독성 물질이지만 공기와 접촉하면 폭발 위험성이 있다. 메탄가스는 불포화 토양의 공극을

통해 수백 미터 이동하는데 이를 제어하거나 제거하는데 진공추출 시스템이 적용될 수 있다. Moore 등(1979)은 매립장에서 발생하는 메탄가스와 이산화탄소의 제거와 가스의 이동 조절을 설계하는데 진공추출시스템을 이용하였다. Massmann (1989)은 Darcy 법칙에 의해 유도된 공기 흐름방정식과 지하수 흐름방정식을 비교하였다. 대상이 전지는 기체이고 후자는 유체이므로 공기의 압축성 때문에 공기의 흐름방정식은 비선형방정식이다. 비선형항을 선형화하는 과정에 대해 Massmann은 소개하였으며 그 오차는 적용된 공기의 압력이 0.2기압 이하일 때 무시할 정도라고 하였다. 토양 내부에 대한 진공추출의 물리적 과정은 지하수의 양수 과정과 비슷하기 때문에 오염된 토양 내부의 휘발성 물질을 추출하는 초기 설계수단으로 지하수 흐름 모형을 적용한 경우도 있다(조중수, 2000).

본 논문의 목적은 지하수 흐름의 해석해를 증기추출 시스

\*정회원 · 호남대학교 토목환경공학과 교수(E-mail:kimmh@honam.ac.kr)

\*\*호남대학교 대학원 토목환경공학과 석사과정

\*\*\*호남대학교 대학원 토목환경공학과 박사과정

템에 적용하기 위한 것이며 비정상상태의 압력대수층과 누수 대수층에 대한 해석해를 토양진공추출 해석에 적용하여 그 가능성을 검토하고 관련된 변수들을 평가함으로써 진공추출 문제에 대한 설계의 기초를 제공하는데 있다. 이를 위해 지하수 흐름 지배방정식과 기체 이송방정식을 비교하여 적용 가능성을 검토한다. 또한 기체 이송의 지배방정식과 경계조건에 필요한 변수 값의 평가 방법에 대해 논의한다.

## 2. 기체 이송방정식

진공추출시스템에서 압력강하량을 결정하기 위한 일반적인 방정식은 Massmann(1989)에 의해 제시되었으며 그 식은 연속방정식, 운동방정식, 상태방정식이다. 다공성 매질에서 공기 흐름에 대한 연속방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(n\rho)}{\partial t} = \nabla(\rho q) \quad (1)$$

여기서  $n$ 은 토양의 공극율,  $\rho$ 는 기체 밀도,  $q$ 는 Darcy 속도이다. Darcy 속도는 압력경사의 향으로 나타낼 수 있으며 점성흐름에 대한 Darcy 방정식은 다음과 같다.

$$q = \frac{-k}{\mu} \nabla P \quad (2)$$

여기서  $k$ 는 토양 속의 기체 고유투수계수,  $\mu$ 는 기체의 점성계수,  $P$ 는 압력이다. 진공추출시스템에서 기체는 압력에만 의존되는 이상기체로 가정할 수 있다. 이상기체에 대한 압력과 밀도 사이의 관계는 Boyle-Mariotte 법칙에 의해 나타낼 수 있다(Collins, 1961).

$$\rho = \frac{W_m P}{RT} \quad (3)$$

여기서  $W_m$ 는 기체분자량,  $R$ 은 이상기체상수,  $T$ 는 기체의 절대온도이다. 식(1)의 연속방정식에 식(2)의 Darcy 방정식을 대입하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial(n\rho)}{\partial t} = \nabla\left(\frac{\rho k}{\mu} \nabla P\right) \quad (4)$$

한편, 지하수 흐름 모형에서 식(4)의 왼쪽 항은 Freeze and Cherry(1979)에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial(n\rho)}{\partial t} = \frac{S_s \partial P}{g \partial t} \quad (5)$$

여기서  $S_s$ 는 비저류상수(specific storage),  $g$ 는 중력가속도이다. 식(5)의 왼쪽항은 chain rule에 의하면,

$$\frac{\partial(n\rho)}{\partial t} = \frac{n \partial \rho}{\partial t} + \frac{\rho \partial n}{\partial t} \quad (6)$$

이다. 오른쪽 두 번째 항은 첫 번째 항과 비교하면 무시할 수 있으며(Massmann, 1989) 식(3)을 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial(n\rho)}{\partial t} = \frac{n \partial \rho}{\partial t} = \frac{n W_m \partial P}{RT \partial t} \quad (7)$$

식(5)와 (7)을 비교하면 이상기체의 이송을 비저류상수로 나타낼 수 있다.

$$S_s = \frac{g n W_m}{RT} \quad (8)$$

식(4)와 (5)로부터 오른쪽 항이 서로 같기 때문에 이를 정리하면,

$$S_s \frac{\partial P}{\partial t} = \nabla\left(\frac{\rho g k}{\mu} \nabla P\right) \quad (9)$$

이다. 식(9)의 오른쪽 항의 밀도  $\rho$  때문에 비선형방정식이 된다. 그러나 일반적으로 토양진공추출 운영에서 기체압력과 초기토양기체압력 관계는  $P/P_0 = 0.8 \sim 0.9$ 로서 큰 차이가 나지 않는다. 그러므로 식(9)의 오른쪽 항의 밀도  $\rho$ 를 기체의 초기밀도  $\rho_0$ 인 상수로 가정할 수 있다. 이와 같은 선형화는  $P/P_0 > 0.8$ 일 때 1%보다 작은 오차가 발생하는 것으로 알려져 있다(조종수, 2000). 즉, 이 식을 선형화하여 나타내면 다음과 같다.

$$S_s \frac{\partial P}{\partial t} = \nabla\left(\frac{\rho_0 g k}{\mu} \nabla P\right) \quad (10)$$

여기서  $\rho_0$ 는 초기 기체 밀도이다. 이 식은 지하수 흐름에 대한 지배방정식의 형태와 동일하며 이의 해석하는 후술된다.

## 3. 입력변수의 평가와 경계조건

불포화토양에서 공기흐름을 모의하기 위해 사용할 식(10)에서 필요한 입력변수는 점성계수, 초기밀도, 온도, 기체의 분자량, 다공질 입자의 공극, 고유투수계수(permeability)이다. 이들 변수를 평가하는 방법은 다음과 같다(Massmann, 1989).

### 3.1 기체점성계수

혼합기체의 점성계수는 합성함수이고 Geankoplis(1972)와 Dullien(1979)에 의해 제시된 공식을 이용하여 평가할 수 있다.

$$\mu_{mix} = \sum_{i=1}^m X_i \mu_i \quad (11)$$

여기서  $X_i$ 는 화합물  $i$ 의 몰비이고,  $\mu_{mix}$ 는 혼합기체의 점성계수,  $\mu_i$ 는 화합물  $i$ 의 점성계수,  $m$ 은 혼합된 기체화합물의 수이다. 메탄과 증기 추출 시스템에 관련된 전형적인 성분에 대한 점성계수를 표 1에 나열하였다.

식(11)을 사용하여 기체 점성계수를 평가하며, 기체화합물에 대한 정보가 유용하지 않으면 공기의 점성계수는  $1.8 \times 10^{-4}$  g/cm/s(0.0018 centipoise)로 가정한다.

표 1. 가스의 근사적인 점성계수(Weast, 1968)

Gas or vapor	Viscosity(Micropoise)	
	30°C	40°C
Air	180	190
Carbon dioxide	148	157
Ethane	90	96
Ethylene	100	106
Methane	108	114
Nitrogen	174	182

3.2 기체밀도

이상기체의 초기밀도는 압력에 따라 반비례하고 분자화합물에 따라 변한다. 화합물의 변화에 기인되는 밀도변화는 특정 기체 화합물에 의존하며 식(3)에 의해 평가할 수 있다. 진공 추출시스템에 적용되는 전형적인 기체화합물의 밀도는 일반적으로 100% 메탄인 0.7 g/L에서부터 휘발성 유기 증기에서의 고농도 공기인 1.3 g/L까지이다.

증기 화합물에 기초를 두고 초기 기체 밀도를 평가한다. 화합물에 관한 유용한 정보가 없으면 공기 밀도는  $1.3 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$  (1.3g/L)로 간주한다.

3.3 기체 분자량

기체 혼합물의 분자량은 각 기체 성분의 평균 분자량에 물비를 곱하여 산정한다.

$$W_m = \sum_{i=1}^m X_i(W_m)_i \quad (12)$$

여기서  $(W_m)_i$ 는 성분  $i$ 의 분자량이다. 이 식을 이용하여 기체 혼합물의 분자량을 평가하고 기체화합물에 관한 유용한 정보가 없으면 공기분자량은 28 g/mole로 가정한다.

3.4 입자공극률

식(8)과 (9)의 비저류상수에 사용되는 공극률은 증기나 기체로 채워진 토양부피의 일부이다. 토양 공극 안에 수분이 존재하기 때문에 공기 공극은 일반적으로 총 공극보다 작다. 공기 공극률과 총 공극률의 관계는 다음과 같다.

$$n_a = n_t(1-S) \quad (13)$$

여기서  $n_a$ =공기 공극률,  $n_t$ =총 공극률,  $S$ =포화도이다.

3.5 고유투수계수(permeability)

고유투수계수는 상당히 불확실하고 식(10)에 포함된 입력변수이다. 그 값은 지질과 함수상태에 따라 다르다. 대부분 진공추출시스템이 실트, 모래, 자갈로 구성된 미고결상태 층에 적용된다. 이와 같은 건조한 재료의 고유투수계수 범위를 표 2에 나열하였다.

기체의 고유투수계수를 평가하는 일반적인 방법은, (1) 포화된 수리전도도의 함수로서 고유투수계수를 평가하는 방법, (2) 입자 크기 함수로서 고유투수계수를 평가하는 방법, (3)

표 2. 미고결상태의 재료에 대한 고유투수계수(Freeze and Cherry, 1979)

Geologic material	Range of permeability(Darcies)
Silt	$10^{-3} - 1$
Silty sand	$10^{-2} - 10^2$
Clean sand	$10^{-1} - 10^3$
Gravel	$10^2 - 10^5$

기체 추출시험으로부터 고유투수계수를 평가하는 방법이 있다. 포화된 수리전도도(K)와 고유투수계수의 관계는 다음과 같다.

$$K = \frac{\rho g k}{\mu} \quad (14)$$

고유투수계수는 오직 다공성 매질 성질의 함수이고, 반면에 수리전도도는 다공성 매질 성질과 유체 성질의 함수이다. 건조한 토양에서 운영될 수 있는 진공추출시스템에 대해 포화된 수리전도도는 알려져 있으며 물의 점성과 밀도를 조합하여 식(14)를 이용하여 고유투수계수를 결정한다. 수리전도도의 단위는 cm/sec, 기체 고유투수계수의 단위는 darcy(1 darcy= 근사적으로  $1 \times 10^8 \text{ cm}^2$ )이고 변환은 다음과 같다.

$$k = 1,040K \quad (15)$$

기체 고유투수계수는 토양 샘플을 채분석하여 평가할 수 있다. 공극 반경의 함수로서 고유투수계수를 나타낼 수 있다.

$$k = 0.125r^2 \quad (16)$$

여기서 고유투수계수  $k$ 와 공극 반경  $r^2$ 은  $L^2$ 의 차원을 갖는다.  $k$ 를 darcy로,  $r$ 를 mm로 나타내면 식(16)은 다음과 같다.

$$k = 125,000r^2 \quad (17)$$

입도분석의 결과로부터 모래와 자갈의 평균공극을 평가하기 위한 식은 다음과 같다.

$$r = cD_{15} \quad (18)$$

여기서  $c$ 는 경험상수,  $D_{15}$ 는 입자의 무게로 15% 보다 작은 입경이다. Sherard 등(1984)은 모래와 자갈에 대해 합리적인 근사 값으로  $c = 0.1$ 을 제안하였다.

식(17)과 (18)을 조합하여 입경의 함수로 기체 고유투수계수를 나타낼 수 있다.

$$k = 1,250D_{15}^2 \quad (19)$$

여기서 고유투수계수  $k$ 는 darcy이고 입경  $D_{15}$ 는 mm이다. 식(19)에 의해 계산된 고유투수계수는 근사값이다.

기체 고유투수계수를 평가하는 또 다른 방법은 기체 추출 시험 동안에 수집된 압력강하 자료에 의해 결정된다. 지하수 양수시험을 평가하기 위해 사용된 Theis, Jacob, Hantush 방법과 유사한 곡선 피팅기법이 이용된다. 일반적인 과정은 불포화 토양에서 추출정에 진공펌프를 부착하고 시간의 함수로

서 부근에 기체 검침부를 설치하여 압력강하를 측정한다. 시간에 대한 압력강하의 관계에서 지하수 양수시험과 유사한 접근방법으로 기체 전도도를 평가할 수 있다. 기체 고유투수계수는 기체의 점성과 밀도를 식(14)에 대입함으로써 전도도로부터 평가할 수 있다. 고유투수계수는 cm<sup>2</sup>의 단위를 1darcy(1×10<sup>-8</sup> cm<sup>2</sup>)로 변환하여 본 논문에서 사용한다.

비저류계수 S<sub>s</sub>는 식(8)에 의해 평가하고 단위는 cm<sup>-1</sup>이다. 이 때 식(13)의 공극률을 이용한다. RT 값으로 2.5×10<sup>10</sup> cm<sup>2</sup>g/s<sup>2</sup>mole 이용한다.

이상에서와 같이 불포화토양에서 공기 흐름을 모의하기 위해 필요한 변수들을 설명하였다. 이 변수들을 평가한 다음, 식(10)에 대한 지배방정식의 해를 구하기 위해 경계조건이 필요하다. 불포화토양 하부의 지하수위를 불투수층으로 간주한다. 그리고 상부의 경계조건에 대해 불투수 재료로 덮여 있지 않는 경우는 압력수두가 일정한 상수로 처리하며 상부가 불투수 재료로 덮여 있는 경우는 불투수층으로 다룬다.

#### 4. 지하수 흐름의 해석해와 그 응용

본 논문에서 지하수 흐름의 해석해를 진공추출시스템에 적용하려는 문제는 2가지이다. 하나는 비정상상태의 압력대수층, 다른 하나는 비정상상태의 누수대수층이다. 이들 문제를 다루기 위해 Massmann(1989)에 의해 제시된 예제를 대상으로 비교 검토하려고 한다.

##### 4.1 압력대수층

Massmann(1989)은 Washington의 Kent 지역 매립장에서 메탄가스의 이동을 예측하기 위해 예비설계를 실시하였다. 예비설계를 위해 지하수 흐름에 대한 Theis 해를 기체 추출정에 적용하였다. 예비설계를 위해 사용된 입력변수에 대한 값은 다음과 같다.

기체점성은 부피를 기준으로 메탄 50%와 공기 50%인 혼합기체에 대한 점성계수를 평가하였다. 메탄 점성계수는 1.1×10<sup>-4</sup> g/cm/s 이고, 공기 점성계수는 1.8×10<sup>-4</sup> g/cm/s 이다. 기체혼합에 대한 점성계수는 식(11)에 의해 평가할 수 있다.

$$\mu_{mix} = 0.5(1.1 \times 10^{-4}) + 0.5(1.8 \times 10^{-4}) = 1.45 \times 10^{-4} \text{ g/cm/s}$$

기체밀도의 평가는 메탄과 공기의 밀도를 이용하여 평가한다. 메탄 밀도는 근사적으로 0.7×10<sup>-3</sup> g/cm<sup>3</sup>이고 공기의 밀도는 근사적으로 1.3×10<sup>-3</sup> g/cm<sup>3</sup>이다. 기체 혼합 밀도는 1.0×10<sup>-3</sup> g/cm<sup>3</sup>이다.

고유투수계수는 가스 감시 검침기를 설치할 때 수집된 토양 샘플을 채분석하여 이용하였다. 모래와 자갈로부터 수집된 47개 자료에 의해 평균 D<sub>15</sub>는 0.1 mm이다. 이 값을 식(19)에 대입하면 고유투수계수는 10 darcy(1×10<sup>-7</sup> cm<sup>2</sup>)이다.

기체 전도도(conductivity)는 식(14)를 사용하여 평가할 수 있다.

$$K = \frac{\rho g k}{\mu} = \frac{1 \times 10^{-3} (980) 1 \times 10^{-7}}{1.45 \times 10^{-4}} = 7 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$$

분자량은 메탄과 공기의 분자량을 이용하여 식(12)에 의해 평가한다. 이 때 메탄과 공기 분자량은 각각 16 g/mole과 28 g/mole이다.

$$W_m = 0.5(16) + 0.5(28) = 22 \text{ g/mole}$$

비저류계수는 공극율 0.15를 이용하여 식(8)에 의해 평가한다.

$$S_s = \frac{gnW_m}{RT} = \frac{(980)(0.15)22}{2.5 \times 10^{10}} = 1.3 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-1}$$

이와 같은 값을 이용하고 지배방정식 식(10)에 대해 Theis의 비평형방정식의 해를 이용하여 압력강하량을 평가한다.

$$s = \frac{Q}{4\pi kb} W(u) \quad (20)$$

여기서 b=불포화층의 두께(L), Q=유량(L<sup>3</sup>/T), W(u)=우물함수, s=압력강하량(L), u=r<sup>2</sup>S<sub>s</sub>/4Kt이다. 구체적인 압력강하량은 다음과 같다.

$$s = \frac{Q}{4\pi kb} W(u) = \frac{QW(u)}{4(3.14)(0.0007)(2,500)} \quad (21)$$

식(21)에 의해 계산된 압력강하량은 기체로서 cm 단위를 갖는다. 물의 강하량으로 변환시키기 위해서는 계산된 압력강하량에 기체의 비중을 곱한다. 근사적으로 기체밀도 1.3×10<sup>-3</sup> g/cm<sup>3</sup>에 대해 0.001이다. 115 L/s의 추출률로 운영하는 추출정의 직경은 15 cm이다. 이와 같은 상황에서 Massmann(1989)에 의해 계산된 압력강하량이 표 3에 제시되어 있다. 양수 70일 이후에 추출정 내에서 평가된 압력강하량은 수주 높이로 약 80cm를 제시하였다.

본 논문에서 식(21)에 의해 계산된 결과를 보면 서로 다른 값을 보여 주고 있다. 이 결과는 식(21)을 이용하여 계산된 결과이므로 Massmann(1989)에 의한 결과에 오류가 있음을 알 수 있다. 동일한 해석해에 대한 결과이므로 이는 계산오차로 판단된다. 이를 재차 검증하기 위해 Falta(1996)에 의해 개발된 GASSOLVE9 포트란 프로그램을 이용하였다. GASSOLVE9은 본 논문에서 제시된 지배방정식을 이용하여 대수층의 형태, 정상류와 비정상류, 관입정과 부분관입정에 따라서 8가지 형태에 대해 고유투수계수를 결정할 수 있는 프로그램이다. 상세한 내용은 Falta(1996)의 문헌으로 대신한다. 이

표 3. 우물에서 115L/s로 추출할 때 압력강하량

Time after start-up	Pressure drawdown(cm of water)		Diff. (cm) (2)-(1)
	Massmann(1989) (1)	This study (2)	
10 min	43	58	15
100 min	52	71	19
1,000 min	62	83	21
7 days	71	96	25
70 days	80	108	28

표 4. GASSOLVE9 프로그램에 의해 산정된 고유투수계수

Time	Pressure drawdown(cm of water)					
	Massmann (1989)	Cal. Val.	Diff.	This study	Cal. Val.	Diff.
10 min	43.	44.	1.	58.	59.	1.
100 min	52.	53.	1.	71.	71.	0.
1,000 min	62.	62.	-0.	83.	83.	0.
7 days	71.	71.	-0.	96.	95.	-1.
70 days	80.	79.	-1.	108.	108.	0.
Total Ave. Err.	1.17%			0.44%		
Permeability (cm <sup>2</sup> )	1.572E-7			1.157E-7		

프로그램과 관측된 현장의 자료를 이용해 미지의 변수인 고유투수계수를 결정한다. 이를 구하기 위해 수립된 목적함수는 다음과 같다.

$$RSS = \sum_{n=1}^{ndata} [s_{calc}(n) - s_{field}(n)]^2 \quad (22)$$

여기서  $RSS$ 는 잔차의 제곱 합,  $s_{field}(n)$ 은 측정된 압력강하량,  $s_{calc}(n)$ 은 해석해에 의해 계산된 압력 강하량이다. 여기서는 식(22)를 만족하는 최적의 고유투수계수를 결정하는 것이 목적이다. 즉, 진공추출 문제에서 증기추출을 시행할 때 불포화지역에서 고유투수계수를 추정할 수 있다. Massmann에 의해 식(21)을 이용하여 계산된 압력강하량이지만 이 값들을 입력 자료로 사용하여 고유투수계수를 추정할 수 있기 때문에 표 3에 제시된 Massmann의 압력강하량을 입력하여 고유투수계수를 추정하였다. 그 결과  $1.572 \times 10^{-7} \text{ cm}^2$ 로 추정되었다. 식(19)에 의해 계산되고 Massmann에 의해 이용된 고유투수계수  $1 \times 10^{-7} \text{ cm}^2$ 과는 차이를 보여주고 있다. 이 논문에서는 식(21)에 의해 새로 계산된 본 연구의 압력강하량을 이용하여 GASSOLVE9에 의해 평가된 고유투수계수는  $1.157 \times 10^{-7} \text{ cm}^2$ 로 계산되었다. 이 값은  $1 \times 10^{-7} \text{ cm}^2$ 과 비슷한 결과를 보여주고 있다. Falta(1996)의 프로그램에 의해 검증한 결과, Massmann(1989)의 압력강하량은 큰 오차를 보여주고 있음을 알 수 있다. 또한 이 결과로부터 진공추출문제에서 고유투수계수는 압력강하량에 민감한 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 이 결과를 종합하여 표 4에 제시하였다. 이 결과들로부터 고유투수계수의 적용은 유의해야함을 알 수 있다.

#### 4.2 누수대수층

지하수에서 누수대수층(leaky aquifer)은 하부에 불투수층(impervious)과 상부에 반투수층(semipervious)의 구조로 그림 1과 같이 이루어 졌다. 누수층의 두께가 일정할 때 지하수 흐름의 지배방정식은 다음과 같다(Gupta, 1989).

$$\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial s}{\partial r} - \left( \frac{s}{L^2} \right) = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (23)$$

여기서  $s$ 는 압력강하량,  $r$ 는 우물로부터 떨어진 거리,  $t$ 는 양수 이후의 시간,  $S$ 는 저류계수,  $T$ 는 전달계수,  $L$ 은 누수계수(leakage factor)이며  $L = \sqrt{Kb/K'/b'}$ 이다. 이에 대한 해석해

지하수 흐름의 해석해를 이용한 토양진공추출 해석

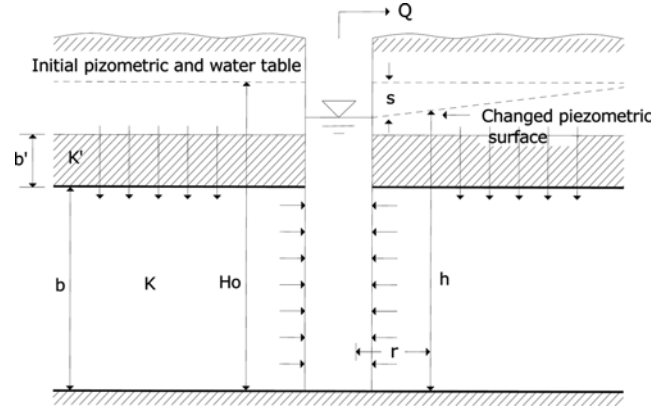


그림 1. 누수대수층 개략도

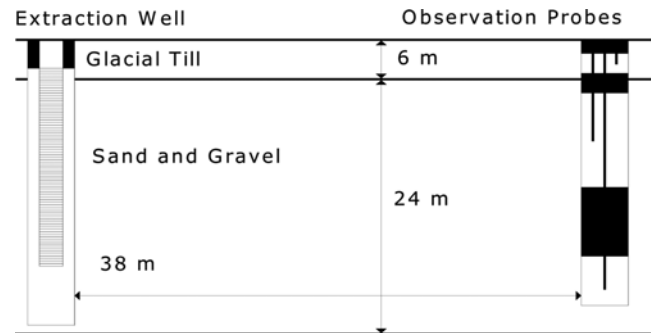


그림 2. 현장추출시험에서 사용된 우물과 검침부의 개략도 (Massmann, 1989)

를 Hantush(1964)가 다음과 같이 유도하였다.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[ 2K_0\left(\frac{r}{L}\right) - W(q) \right] \quad (24)$$

여기서  $K_0\left(\frac{r}{L}\right)$ 은 2종 0차(second kind and zero order) 수정 벡셀함수이고,  $W(q)$ 는 우물함수이며 이 때  $q$ 는 다음과 같다.

$$q = \frac{Tt}{SL^2} = \frac{r^2}{4L^2u} \quad (25)$$

여기서  $u = \frac{r^2 S}{4Tt}$ 이다.

지금까지 누수대수층의 지배방정식과 해석해에 대해 기술하였다. 매립장에서 쓰레기를 채우고 그 위에 복토를 시행한 경우에 일정한 시간이 지나면 매립장에서 메탄가스가 발생하며 가스의 이동이 시작되는데 이 구조는 누수대수층과 유사하다. Massmann(1989)은 매립장의 메탄가스 제거와 이동 문제를 다루기 위해 그림 2와 같은 누수대수층 구조에 대해 현장 추출시험을 시행하였다.

추출정에서 일정한 율로 양수하는 동안에 시험은 관측정과 부근의 관측 탐지부에서 시간의 함수로서 압력강하량을 측정하였다.

그림 2에 예시된 바와 같이 일련의 관측기기들을 얕은 곳, 중간, 깊은 곳에 설치하여 압력을 측정하고 대부분의 압력 측정은 중간부의 기기에 의해 약 5시간 동안 수행하였다. 압

표 5. 누수대수층에서 양수할 때 압력강하량의 비교(단위 : cm in Water)

Time (min.)	Solution of Massmann		This study
	Corrected drawdown	Calculated drawdown	Calculated drawdown
0	0.00	0.00	0.00
1	0.05	0.00	0.00
2	0.08	0.00	0.00
3	0.05	0.02	0.00
5	0.03	0.15	0.00
6	0.18	0.25	0.00
7	0.38	0.43	0.00
9	0.66	0.74	0.00
11	1.02	1.04	0.00
14	1.60	1.52	0.00
18	2.29	2.16	0.08
21	2.82	2.60	1.04
26	3.43	3.22	2.31
31	4.06	3.81	3.32
41	5.05	4.82	4.81
46	5.44	5.23	5.39
61	6.53	6.35	6.68
101	7.95	8.00	8.52
166	9.37	9.14	9.68
306	10.11	10.16	10.48

력은 대기압의 영향을 받으며 대기압이 시간에 따라 변하는 양을 측정하여 압력강하량을 보완하였으며 그 결과를 표 5의 수정된 압력강하량(Corrected drawdown)으로 제시하였다. 또한 Massmann은 Theis 해에 의해 해석해의 결과를 제시하였으나 구체적인 방법을 기술하지 않았다. Theis 해를 이용한 것이라고 기술하였기 때문에 압력대수층에 대한 해석해를 이용한 것으로 추정할 수밖에 없다. 이 연구에 적용된 대수층의 특성은 그림 2에 나타나 있으며 누수대수층에서 양수량은 105 L/s이고, 대수층의 특성과 기체 특성은 다음과 같다.

메탄 50%와 공기 50%인 혼합기체에 대한 점성계수는  $\mu_{mix} = 1.45 \times 10^{-4}$  g/cm/s, 혼합기체 밀도는  $1.0 \times 10^{-3}$  g/cm<sup>3</sup>이다. 고유투수계수는 하부층의 7 darcy(Sand and Gravel, 24 m)와 상부층의 0.3 darcy(Glacial Till, 6m)이다. 공극율은 0.11, 비저류계수는  $S_s = 0.94 \times 10^{-7}$  cm<sup>-1</sup>, 분자량은  $W_m = 22$  g/mole을 적용하였다.

본 연구에서는 Hantush(Sen, 1986)에 의해 제시된 식(24)의 해석해를 이용하여 압력강하량을 계산하였다. 해석적으로 초기에 우물을 굴착하여 양수를 하는 경우에 누수대수층이므로 압력강하량이 발생하지 않고 오히려 계기에 압력상승으로 나타나는 것이 물리적으로 옳다고 판단된다. 압력상승에 대해서는 양수를 안 하는 것으로 간주하였으며 본 연구에서는 17분정도가 되어야 비로소 누수대수층을 기준으로 우물에서 상하의 압력이 평형상태가 되며 이 시간이 지난 후부터 누수대수층하에서 압력강하가 나타나는 것으로 계산되었다. 초반부의 차이는 실제상황에서 압력을 받고 있는 대수층에 우물을 굴착함과 동시에 압력에 의해 가스가 상승하고 어느 정도 시간이 지난 후에 가스 추출이 시작될 것으로 예상된다. 하지만 해석해에서 굴착과 동시에 양수를 하는 경우이므로 초기의 양수와 상관없이 가스의 압력이 상승할 것으로 예상되

므로 초반부의 차이는 이로 인한 것으로 예측된다. 본 논문에서는 압력상승 부분에 대해서 0으로 취급하였다. 이 결과를 Massmann의 해와 비교하여 표 5에 제시하였다. 본 연구에서는 Massmann의 해와 비교할 때 17분까지 압력강하가 발생하지 않았으나 그 이후의 값들은 비슷한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

다공성 매질에서 가스밀도가 가스압력 함수이므로 가스 이송을 지배하는 방정식은 비선형방정식이다. 비선형항인 가스 밀도를 초기값 혹은 평균값으로 대치하고 선형화하여 지하수 흐름 모형과 동일한 형태로 변환시켰다. 이를 근거로 지하수 흐름의 지배방정식의 해석해를 토양 내부의 휘발성 유기화합물을 제거하기 하기 위한 공기 흐름 해석을 수행하는데 이용하였다. 현장에서 오염 제거의 효율성은 운영변수에 영향을 받는다. 본 논문에서 지하수 흐름 모형을 이용하여 공기 흐름에 대한 해석을 수행함으로써 운영변수의 검증이 가능하고 진공추출 시스템의 초기 해석과 설계에 무리가 없음을 보여 주고 있으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 토양 내부의 공기흐름에 대해 진공추출의 물리적 과정은 지하수의 양수 과정과 유사함을 알 수 있었으며 이를 기초로 토양 내부의 공기 흐름에 대한 기초적인 해석이 가능함을 알 수 있었다.
- 2) 압력대수층에 대한 지하수 지배방정식을 진공추출문제에 적용하였다. 이를 토대로 누수대수층의 해를 매립장의 구조에 적용하여 그 적용성을 입증하였으며 예비설계에 유용하리라 판단된다. 즉, 압력대수층과 누수대수층의 지하수 흐름 모형의 해석하는 기체 흐름 현상에 양호한 근사해를 제공하고 있음을 알 수 있다.
- 3) Massmann(1989)에 의해 적용된 고유투수계수의 정확한 값을 본 연구의 해석해와 GASSOLVE9의 포트란 프로그램에 의해 재산정하여 제시하였으며 고유투수계수는 압력강하량에 민감함을 알 수 있었다. 여기서 제시된 해석해와 GASSOLVE9의 포트란 프로그램을 이용하여 대수층의 특성변수인 고유투수계수를 보다 정확하게 추정할 수 있으며 고유투수계수의 민감도에 대해서는 별도의 연구가 이루어져야 할 것이다.

## 참고문헌

- 조종수, 최우희, 김민환 (2000) 토양진공추출에서 공기흐름 모의, **대한토목학회**, 제20권, 제3-B호, pp. 369-376.
- Collins, R.E. (1961) *Flow of Fluids through Porous Materials*. Reinhold, New York, pp. 51-73.
- Dullien, F.W. (1979) *Porous Media : Fluid Transport and Pore Structure*. Academic Press, New York, pp. 200-209.
- Falta, R.W., 1996, A Program for Analyzing Transient and Steady-state Gas Pump Tests. *Ground Water*, Vol.34, No.4, pp.750-755.
- Freeze, R.A. and Cherry, S.A. (1979) *Groundwater*. Prentice\_hall, Englewood Cliffs, N.J., pp. 26-30.
- Geankoplis, C.H. (1972) *Mass Transport Phenomena*, Holt, New

- York, pp. 78-108.
- Gupta, R.S. (1989) *Hydrology and Hydraulic Systems*. Prentice Hall, pp. 174-177.
- Hantush, M.S. (1964) *Hydraulics of wells, Advances in Hydro-science*. Academic Press, New York, Vol.1, pp. 281-432.
- Massmann, J.W. (1989) Applying Groundwater Flow Models in Vapor Extraction System Design. *Journal of Environmental Engineering*, Vol.115, No.1, pp. 129-149.
- Moore, C.A., Rai, I.S. and Alzaydi, A.A. (1979) Methane Migration around Sainitary landfills. *J. Geotech. Engr. Div., ASCE*, 105(2), pp. 131-144.
- Sen, Z. (1986) Determination of Aquifer Parameters by the Slope-matching Method. *Groundwater*, Vol.24, No.2, pp. 217-233.
- Sherard, J.L., Dunnigan, L.P. and Talbot, J.R. (1984) Basic Properties of Sand and Gravel Filters. *J. of Geotech. Eng.*, 110(6), pp. 684-700.
- Weast, R.C., ed. (1968) *Handbook of Chemistry and Physics*. CRC Press, Cleveland, Ohio, pp. 1289.

◎ 논문접수일 : 09년 07월 22일  
 ◎ 심사의뢰일 : 09년 07월 22일  
 ◎ 심사완료일 : 09년 08월 25일