

수치모형에 의한 토양증기추출법의 제거효율에 관한 연구

- 차단벽, 추출유량, 펌프가동방법의 영향 -

A Study on the Removal Efficiency of the Soil Vapor Extraction by Numerical Simulation

- On the Effect of Curtain Wall, Extraction Flowrate, Pump Operation -

이 창 수*

Lee, Chang Soo

Abstract

When the soil vapor extraction as a remediation method of contaminated soil and groundwater has been used, the effects of curtain wall, mode of pump operation and magnitude of extraction flowrate were examined by numerical simulation. Consequently, it was found that the removal rate was enhanced in case that the curtain wall was established around the extraction well with the extraction pumps operated alternatively. It was because that the removal of high density gas around the extraction well was possible. It was found that the removal efficiency of TCE gas did not depend on the extraction flowrate. However, the removal rate of TCE gas at varying extraction flowrate was not enhanced flowrate increase.

keywords: removal efficiency, curtain wall, soil vapor extraction, soil-groundwater contamination

요 지

본 연구는 토양 및 지하수 오염의 정화방법으로써 토양증기 추출법을 이용할 경우, 이의 효율적 운용을 위하여 추출공 주변에 차단벽을 설치할 경우, 추출펌프유량의 크기 및 펌프가동의 형태 등이 제거효율에 미치는 영향을 평가하기 위하여 수치해석을 이용하여 검토하였다. 그 결과 추출공 주위에 차단벽을 설치할 경우 및 추출펌프의 운용을 단속적으로 실시하였을 경우, 추출공 주변에 고농도의 가스분포를 밀집시킴으로 인해 고농도의 가스를 제거할 수 있게 되어 제거율이 상승하였다. 추출유량의 크기변화가 TCE가스의 제거율에 미치는 영향은 추출유량이 클수록 상승하지만 TCE가스의 정화효율은 추출유량의 크기에는 의존하지 않는다는 것을 알 수 있었다.

핵심용어 : 제거효율, 차단벽, 토양토양증기추출법, 토양·지하수오염

* 한양대학교 토목환경공학과 박사후과정

Post-Doc. Department of Civil & Environmental Engineering, Hanyang University, Ansan, Kyonggi 425-791, Korea

1. 서 론

트리클로로에틸렌(trichloroethylene, TCE), 테트라클로로에틸렌(tetrachloroethylene, PCE) 등의 휘발성 유기염소화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)의 부적절한 처리에 의한 토양오염, 지하수오염은 선진국에 있어서 사회적·정치적인 관심이 높은 환경문제이며, 과학적인 연구대상으로서 중요하다. 환경 및 생태계에 대한 이들 물질의 영향을 최소한으로 억제하기 위해서 효과적인 정화대책이 필요한 실정이다. VOCs로 인한 지하수 오염, 토양오염의 정화기술로서는, 오염토양의 굴삭제거, 오염된 지하수의 양수처리 및 토양가스의 추출제거 등의 물리적인 정화기술과 화학·미생물분해 등을 이용한 처리방법 등이 있다. 화학·미생물분해를 이용한 정화기술은 그 분해생성물의 예측할 수 없는 독성 등의 문제로 인해, 대책실시 그 자체에 대한 사회적인 수용성 등의 극복해야할 과제들이 많아 화학·미생물분해를 이용한 정화법 실시에 대한 신중성이 요구되고 있다(平田, 1994). 이러한 이유로 인해 미국, 유럽 및 일본에서는 이미 그 유효성이 실증된 물리적인 방법을 이용한 정화방법이 많이 실시되고 있다. 이들 방법 중에서도 그림 1과같이 불포화 토양중에 추출정을 설치하여 토양가스를 추출하여 처리하는 토양가스 추출법은 오염토양을 굴삭하지 않고 원위치에서 정화가 가능한 우수한 정화기술이다. 이 정화법은 대상이 불포화토양으로 제한되고, 제거한 오염물질을 활성탄 흡착 등으로 회수할 필요가 있지만, 휘발성이 높은 유기용매의 회수에는 그 적용성이 뛰어난 정화법이다.

토양가스 추출법의 정화효율을 평가할 때에는 불포화토양 중에서의 유기염소화합물 가스의 거동특성을 파악하는 것이 중요하다. 江種와 神野(1995)는 계면에서의 질량수송을 기본적으로 비평형상태로 가정하여 휘발·용해과정을 상세히 해석하는 2상모델을 이용하여 토양가스 추출시에 대한 불포화 다공대층의 가스거동에 관하여 검토하였다. 下村(1995) 등은 원액상, 토

양간극수상 및 기상의 각상간 계면에서의 질량수송이 국소적으로 평형이 성립되는 것을 가정한 액상, 기상중의 TCE제거에 관한 토양증기추출법의 효율을 평가하였다. Mendoza 와 Frind(1990) 및 이 창수와 村岡(1998)는 불포화다공대층의 유기염소화합물가스의 이동이 액상중의 유기염소화합물의 이동보다 지배적이기 때문에 불포화다공대 중에서의 가스이동만을 주목하여 원액상으로부터의 가스 휘발 및 지연현상을 고려한 2차원 실내실험 및 수치해석을 이용하여 TCE가스의 수송 및 가스 추출시 가스의 거동특성을 해명하여 왔다.

그러나 실제 정화를 실시할 경우, 토양가스를 추출하는 추출정의 위치 및 지표면의 피복조건 등의 경계조건이 정화효율에 미치는 영향에 관한 연구는 平田·下村(1995)등의 연구정도에 불과한 실정이다. 따라서 본 연구는 토양증기추출법의 효율적인 운용을 위하여, 추출공주변에 차단벽을 설치할 경우, 가스추출량과 정화효과 및 펌프가동의 연속성 등이 정화효과에 미치는 영향등을 수치계산을 이용하여 검토하였다.

2. 기초방정식

토양가스 추출법에 의한 불포화 다공대층의 유기염소화합물가스의 거동은 유기염소화합물가스의 흐름방정식과 물질수송방정식으로 풀 수 있다. 이 때 온도변화에 대한 영향은 배제하며, 화학적, 생물학적인 변화의 영향은 고려하지 않으며, 기상상, 액상, 고상온도변화에서는 비압축성이고 평형인 것을 가정하여 모델을 구축하였다(이창수와 村岡, 1998).

2.1 유체이동 방정식

가스상의 비압축성과 밀도를 농도의 함수로서 고려한 경우의 불포화 다공대층의 2차원 유체의 이동방정식은 다음 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k^* k_{xx} \frac{\rho_0 g}{\mu} \frac{\partial h^*}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k^* k_{zz} \frac{\rho_0 g}{\mu} \left(\frac{\partial h^*}{\partial z} + \rho_r \right) \right) + Q_h = S_s \frac{\partial h^*}{\partial t} \quad (1)$$

2.2 물질수송 방정식

물질보존법칙에 의한 물질수송의 방정식은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta_D D_{xx} \frac{\partial C_G}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta_D D_{xz} \frac{\partial C_G}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta_D D_{zx} \frac{\partial C_G}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta_D D_{zz} \frac{\partial C_G}{\partial z} \right) - \theta_D v_x \frac{\partial C_G}{\partial x} - \theta_D v_z \frac{\partial C_G}{\partial z} + F = R \frac{\partial}{\partial t} (\theta_D C_G) \end{aligned} \quad (2)$$

오염원으로 부터의 휘발량 F는 Sleep와 Sykes에 의해 다음 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\theta_D \frac{\partial C_G}{\partial t} = k_{in} (C_{Gmax} - C_G) \quad (3)$$

3. 수치시뮬레이션

3.1 해석영역 및 해석조건

수치해석은 토양증기추출법을 이용하여 TCE가스를 추출할 때의 불포화다공매중 TCE가스의 거동을 모델화하였다. 수치해는 반복교호방향 음해법(Iterative Alternating Direction Implicit, IADI)을 이용하여 식 (1)과 식 (2)를 커플링함으로써 구했다. 계산영역은 그림 1과 같이 길이 1.2m, 높이 0.5m의 2차원 단면이다. 계산영역의 상부는 건물이나 도로포장 등에 의해 피복되어 있으며 다공체는 균질, 등방성상태를 가정하였다. 상세한 경계조건은 표 1과 같으며, 초기조건은 콘트를 불투명내에 TCE가스가 포화되어 있는 상태를

가정하여 식(4)와 같이 설정하였으며, 가스추출중 오염원으로 부터의 TCE가스 유입은 없는 것으로 하였다. 계산조건은 격자간격 $\Delta x, \Delta z$ 는 1.5cm의 등간격 격자(80×33)를 이용하였으며, 격자간격을 이산화합으로 인해 발생하는 수치분산을 억제하기 위해서, Courant 기준($v_x \Delta x / 2 \leq D_{xx}$)과 Peclet기준($Pex = (u_x \Delta x / D_{xx} < 1, Pex = (u_z \Delta z / D_{zz} < 1) = (上田年比古, 1990)$)을 만족하는 $\Delta x, \Delta z$ 를 선택하였으며, 시간간격 Δt 는 10초를 선택하였다. 수치계산에 이용된 각 변수들의 값은 표 2와 같다.

$$C = 1(t=0), H^* = 1(t=0) \quad (4)$$

4. 오염물질 정확효율 검토

토양증기추출법의 효율적인 운용을 위하여, 추출공 주변에 차단벽을 설치할 경우, 펌프의 추출유량이 변할 경우 및 펌프가동형태가 연속적(continuous) 또는 단속적(pulse)일 경우에 대해 정확효율을 검토하였다.

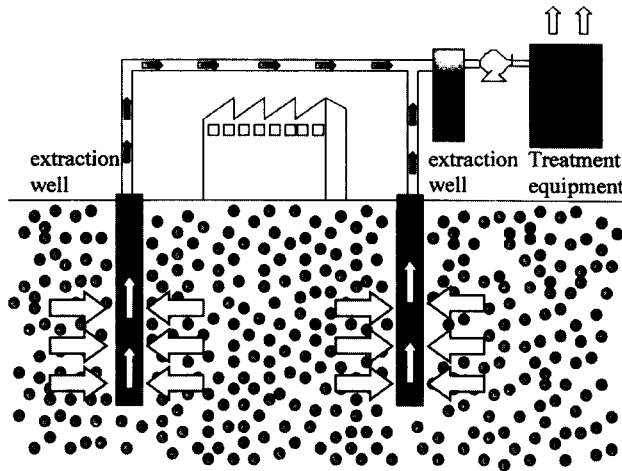


그림 1. SVE의 개념도

표 1. 가스추출시의 경계조건

Equivalent Head		Concentration	
Ground Surface	$\partial h^* / \partial z = 0$	Ground Surface	$\partial C / \partial z = 0$
Left Side(cut-off wall)	$\partial h^* / \partial x = 0$	Left Side(cut-off wall)	$\partial C / \partial x = 0$
Right Side	$\partial h^* = z$	Right Side	$\partial C / \partial x = 0$
Bottom	$\partial h^* / \partial z = 0$	Bottom	$\partial C / \partial z = 0$

표 2. 수치계산에 이용된 변수들의 값

Parameter	Value
Permeability, k	$1 \times 10^{-10} \text{ m}^2$
Porosity, θ_D	40%
Diffusion Coefficient, D_a	$9 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$
Viscosity, μ	$1 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
Longitudinal dispersion constant, α_L	0.15m
Transverse dispersion constant, α_T	0.075m
Specific storage, S_s	$4.814 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$
Retardation coefficient, R	1.0
Flux from source, F	0.0

4.1 차단벽의 영향에 관한 검토

추출공 주위에 차단벽을 설치하는 것이 TCE 제거율에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 추출공의 위치의 좌표가 각각 1.5×1.5 및 600×1.5 지점인 그림 2의 A, B(Run 1, Run 2)와 같이 설치하였다. 이 때, 추출공의 직경 및 스크린의 길이는 각각 15mm이며, 추출유량은 0.30 l/min 로 추출개시 후 24시간까지 계산을 실시하였다. Run 1과 Run 2의 계산결과 중 가스 추출 1시간, 12시간 및 24시간 후의 상대농도분포를 그림 3 (a)~(b)에 나타내었다. 그리고 상대토양가스압 분포는 그림 4의 (a)~(b)와 같다. 등압선은 지표면 전부가 피복(被覆)되어 있기 때문에 지표면과 직교하고 토양가스는 그림 5의 (a)~(b)와 같이 지표면과 평행하게 추출공을 향해 유동되고 있음을 알 수 있다. 그리고 2가지의 수치 실험경우에 대한 TCE가스 제거율을 검토한 결과는 그림 6과 같다. 여기서 제거율은

(정화전 가스 총량-정화후 가스 총량)/ 정화전 가스 총량으로 구했다. 제거율 90%가 될 때까지의 소요시간은 추출공 주위에 차단벽을 설치한 Run 1의 경우 17.10시간이었으며, 추출공 위치가 차단벽으로부터 600mm 떨어진 Run 2의 경우는 23.17시간으로 나타났다. 이것은 Run 1의 경우, 차단벽 설치로 인해 추출공의 한쪽 방향이 물질 수송이 불가능한 경계로 되었기 때문에, 가스 추출공 주변에 고농도의 TCE 가스를 집중시켜 이를 다시 배출할 수 있었기 때문에 제거율이 상승하였다고 생각된다. 이 때, 오염원으로부터 오염물질의 유입은 없는 것으로 가정하였기 때문에 오염원으로 부터의 휘발량 F 는 0으로 하였다.

4.1.2 펌프가동형태에 관한 검토

펌프가동의 형태와 정화효율과의 관계를 살펴보기 위하여 실시한 수치실험은 그림 2과 같은 경계조건하에서 추출펌프를 연속가동할 경우와 TCE가스의 제거

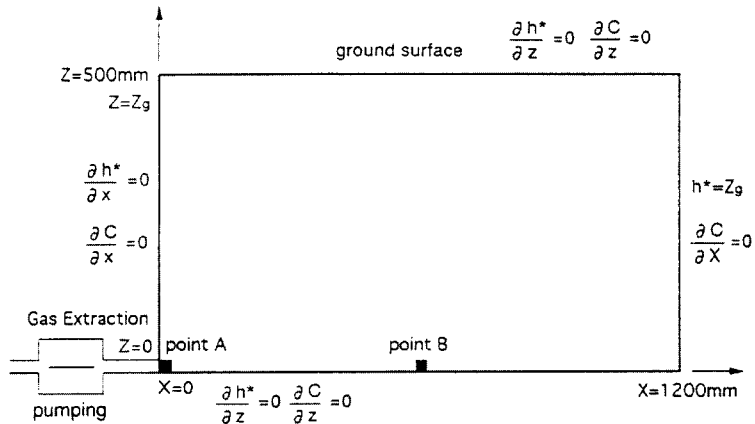
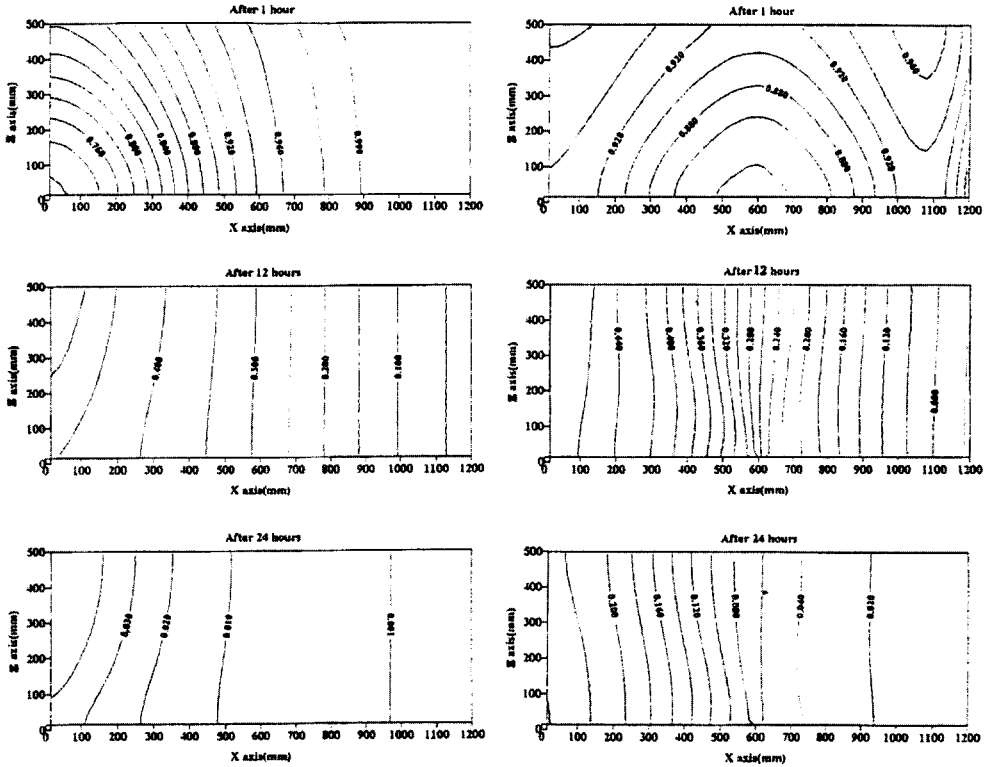


그림 2. 계산영역 및 경계조건



(a) Run 1 (b) Run 2
 (Run 1 : 차단벽을 설치한 경우, Run 2 : 차단벽이 없는 경우)

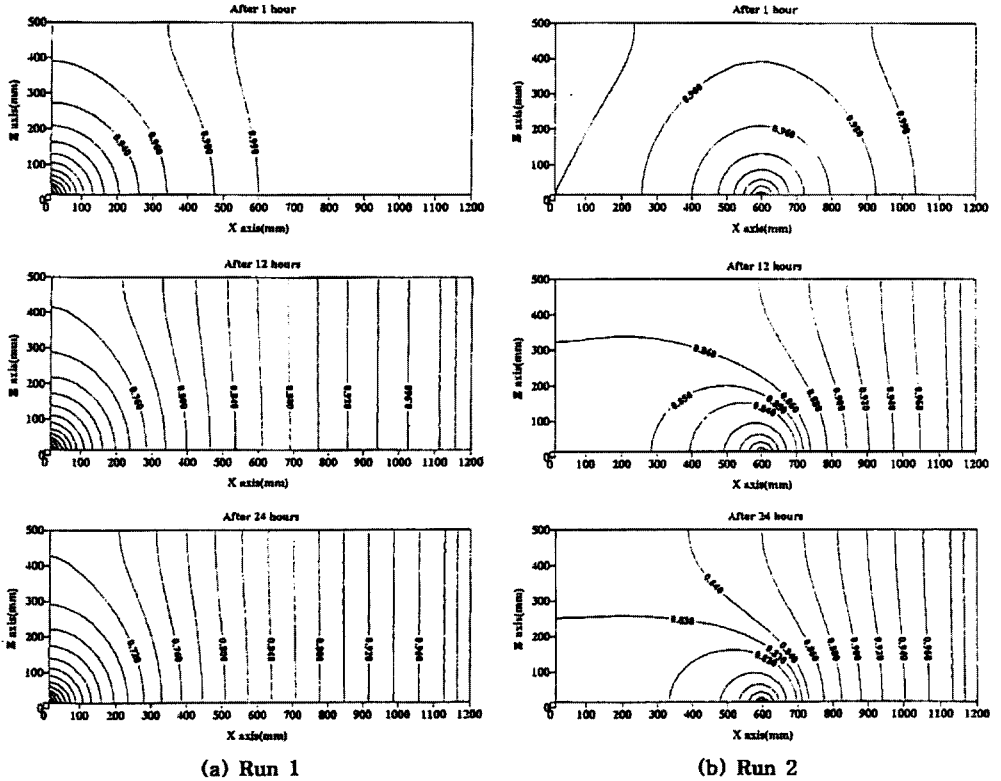
그림 3. 농도 분포

율이 50% 이상이 된 후부터 펌프가동을 8시간 중단시켰다가 다시 추출을 실시하는 경우에 대하여 계산을 실시하였다. 이 때, 추출공의 위치(x, y)는 좌측벽으로부터 600mm, 15mm인 지점이며, 추출공의 직경 및 스크린의 길이는 각각 15mm이다. 추출유량은 0.30 l/min로 추출개시 후 24시간 경과까지에 대하여 계산을 실시하였다. 그림 7은 추출 펌프가동을 연속적 및 단속적으로 운용하였을 경우에 대한 가스 제거율을 나타내고 있다. 그림 7에서 횡축은 각 계산케이스별의 총 펌프의 가동시간을 나타내며, 연속적인 경우는 8~16시간까지이며, 단속적인 경우는 8시간 중단 후 즉 16~24시간까지를 의미한다. TCE가스의 제거율은 가스 추출을 단속적으로 운용하였을 경우가 좀 더 좋은 결과를 나타내고 있다. 이는 추출에 의해 추출공 주변의 농도는 계산영역내의 다른 지점들보다 급격히 농도가 저하되어 상대농도가 0.52 정도로 되었고, 이때부터 펌프가동을 8시간동안 중단하였기 때문에 계산영역내

고농도의 지점으로 부터 분자확산이 발생하여 추출공 주변의 농도가 다시 서서히 높아져 상대농도 0.87로 높아졌다. 이때 다시 가스추출을 실시하여 고농도의 가스를 추출할 수 있었기 때문에 제거율이 상승하였다고 생각된다.

4.1.3 추출유량과 정화효율에 관한 검토

추출유량의 변화가 정화효율에 미치는 영향을 살펴 보기 위하여, 그림 2와 같은 경계조건하에서 추출유량이 0.06 l/min(Run 1), 0.18 l/min(Run 2), 0.30 l/min(Run 3) 및 0.60 l/min(Run 4) 인 경우에 대하여 수치실험을 실시하였다. 이 때, 추출공의 위치(x, y)는 좌측벽으로부터 600mm, 15mm인 지점이며, 추출공의 직경 및 스크린의 길이는 각각 15mm이다. 그림 7은 추출유량 변화에 따른 제거효율의 결과를 나타내고 있다. TCE 가스 제거율은 추출유량이 클수록 높다는 것을 알 수 있다. 그러나 24시간 경과후의 제



(a) Run 1 (b) Run 2
 (Run 1 : 차단벽을 설치한 경우, Run 2 : 차단벽이 없는 경우)

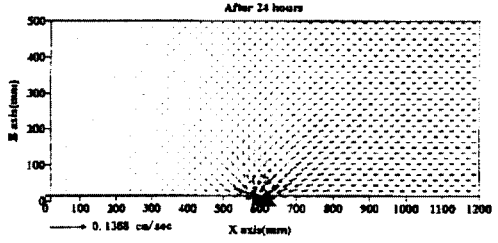
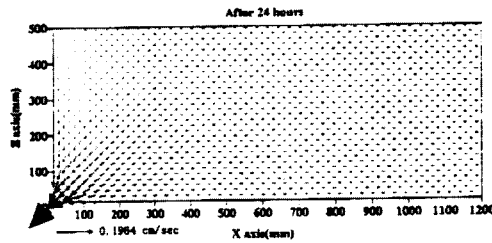
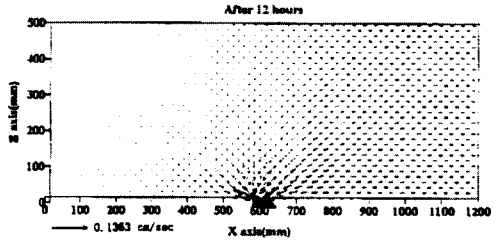
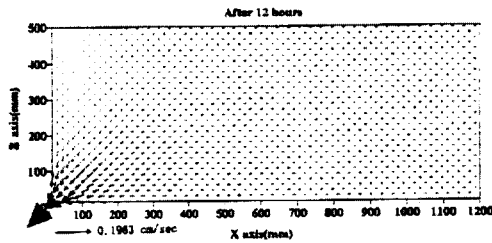
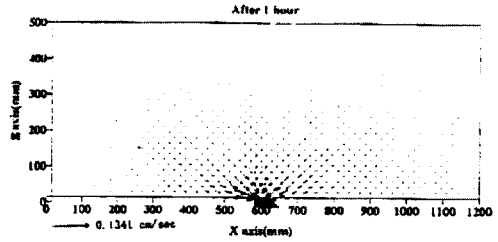
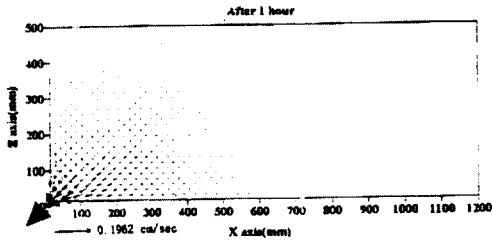
그림 4. 토양가스압 분포

거울은 추출유량 0.60 l/min의 경우가 98.14%, 0.30 l/min가 90.64%가 되었으며, 더욱이 38시간 후에는 추출유량 0.60 l/min의 경우가 99.62%, 0.30 l/min가 96.74% 그리고 0.18 l/min의 경우가 90.05%로 되어 제거율의 차이는 그리 크지 않음을 알 수 있다. 그림 9는 추출유량 0.06 l/min의 가스 제거율 90%에 대한 소요시간을 기준으로 해서 각 추출유량의 소요시간에 기준유량에 대한 추출유량의 배수(Run 1에 대하여 Run2, 3, 4에 각각 3, 5, 10배)를 곱하여 정화효율을 계산한 결과를 나타내었다. 추출유량이 0.06 l/min의 경우 제거율이 90%가 될 때까지의 소요시간은 105.65시간으로 나타났으며, 추출유량 0.18, 0.30 및 0.60 l/min의 경우는 각각 113.70, 115.84 및 112.51 시간으로 계산되었다. 이번에 실시한 수치실험의 케이스에 대해 얻은 결과로 미루어 보아 TCE 가스의 제거효율은 추출유량의 크기에는 의존하지 않는다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

TCE 등의 휘발성 유기화합물에 의해 오염된 불포화 토양의 정화방법으로써 토양가스 추출법을 실시할 경우, 제거율을 향상시키고 정화시간을 단축시키는 등의 정화효율을 향상시키는 방안으로써 추출공 주위에 차단벽을 설치 할 경우 및 추출 펌프 가동을 단독적으로 하였을 경우에 대한 정화효율을 수치계산을 이용하여 검토하였다. 그리고 추출유량의 크기가 각각 다른 경우에 대한 정화효율에 대하여 검토한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 추출공 주위에 차단벽을 설치함으로써 인해 제거율이 상승함을 알 수 있었다. 이는 추출공 주변에 고농도의 가스분포를 밀집시킬 수 있어, 가스 추출시 고농도의 가스를 제거할 수 있기 때문이다.
- (2) 단독적인 펌프운용시점들 가스 제거율이 50%이상인 시점부터 시작한 결과, TCE 가스의 제거율은

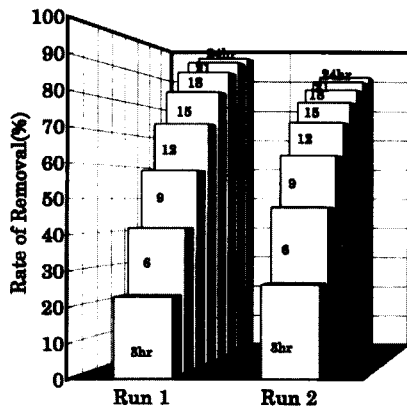


(a) Run 1

(b) Run 2

(Run 1 : 차단벽을 설치한 경우, Run 2 : 차단벽이 없는 경우)

그림 5. 유속 분포



(Run 1 : 차단벽을 설치한 경우,
Run 2 : 차단벽이 없는 경우)

그림 6. 차단벽 설치로 인한 가스제거율의 비교

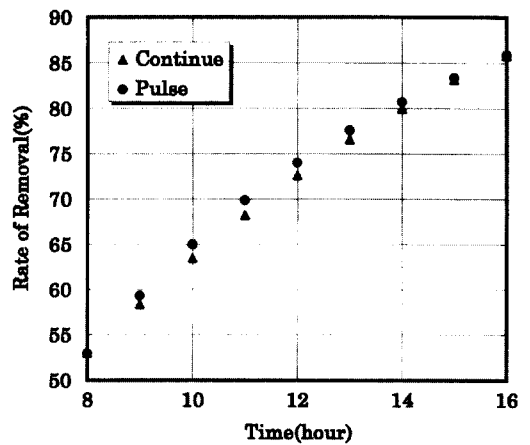
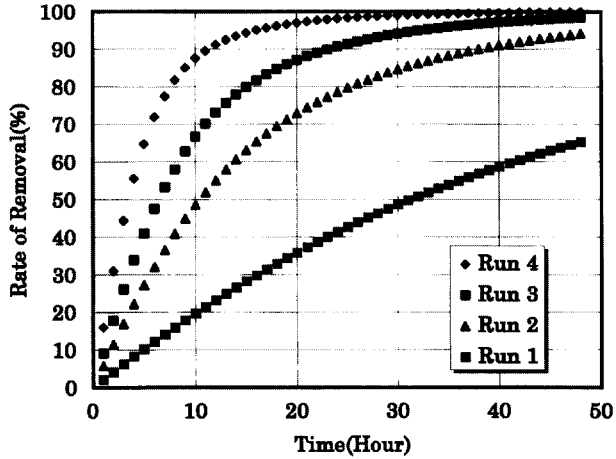
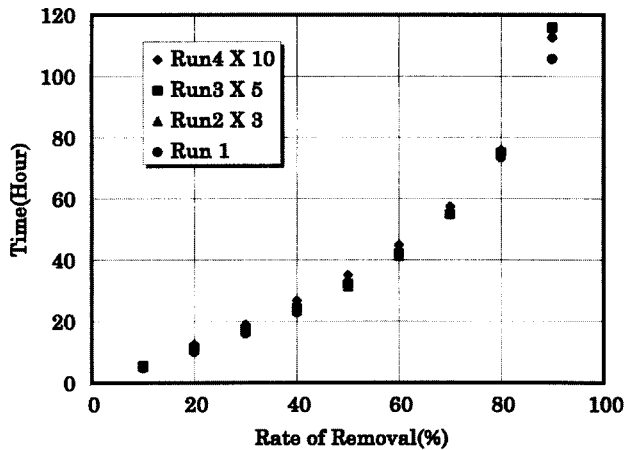


그림 7. 펌프가동이 연속적·단속적일 때의 TCE 제거율



(Run 1 : 추출유량이 0.06 L/min, Run 2 : 추출유량이 0.18 L/min, Run 3 : 추출유량이 0.30 L/min, Run 4 : 추출유량이 0.60 L/min)

그림 8. 추출유량별 TCE가스의 제거율



(Run 1 : 추출유량이 0.06 L/min, Run 2 : 추출유량이 0.18 L/min, Run 3 : 추출유량이 0.30 L/min, Run 4 : 추출유량이 0.60 L/min)

그림 9. 추출유량별 TCE 제거효율

가스 추출을 단속적으로 실시하였을 경우가 향상되었다. 이는 추출에 의해 지하되어 있던 추출공 주위의 농도분포가 펌프가동을 중단하고 있을 동안에 분자 확산에 의해 그 밀집의 정도가 높아졌고 다시 고농도 가스의 추출이 가능하였기 때문이다.

(3) 추출유량의 크기변화에 대한 TCE가스의 제거율은 추출유량이 클수록 향상되었다. 그러나 기준유량의 소요시간을 기준으로 하여, 각 추출유량들의 소요시

간에 기준유량에 대한 배수를 곱하여 구한 정화효율은 본 논문에서 실시한 수치실험 경우에 대해서는 TCE 가스의 제거효율은 추출유량의 크기에는 의존하지 않는다는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구를 수행함에 있어서 많은 조언을 하여 주신 현 오사카대학 토목공학과 村岡浩爾 교수님께 감사드

립니다.

참 고 문 헌

이창수, 村岡浩爾 (1998). “불포화 다공대중 휘발성 유기염소화합물 가스의 수송모델.” 대한환경공학 회지, 대한환경공학회, 제16권, 제7호, pp. 985-993.

江種伸之, 神野建二 (1995). “土壤가스吸引時における有機鹽素化合物ガスの舉動について.” 地下水學會誌, 地下水學會, 第37卷, 第4号, pp. 245-254.

Kinzelbach W., [土田年比古監譯] (1990). パソコンによる地下水解析, 森北出版, pp. 221-225.

平田建正 (1994). “土壤・地下水汚染の浄化技術の現状と課題.” 水環境學會誌, 水環境學會, Vol. 17, No. 2, pp. 86-90.

平田建正, 下村雅則 (1995). “土壤가스吸引に及ぼす地表面被覆の影響.” 地下水技術, 地下水技術學會, 第37卷, 第1号, pp. 39-49.

下村雅則, 今村 聰, 末岡 徹 (1995). “揮發性有機鹽素化合物汚染土壤浄化豫測.” 地下水技術, 地下水技術學會, 第37卷, 第5号, pp. 21-29.

Carl A. M. and Frind E. O. (1990). “Advective-dispersive transport of dense organic vapors in the un saturated zone” *Water Resour. Res.*, Vol. 26, No. 3, pp. 379-387.

Sleep B. E. and Sykes J. F. (1989). “Modeling of transport of volatile organics in variably

saturated media”, *Water. Resour. Res.*, 25(1), pp. 81-92.

기 호

- h^* : 상당수두(m)
- k^* : 상대투과도
- k_{xx}, k_{zz} : x, z방향의 고유투과도(m^2)
- ρ_0 : 토양중의 기체 밀도(kg/m^3)
- ρ_r : 혼합가스의 상대밀도
- μ : 가스혼합물의 점성계수($kg/m\cdot sec$)
- g : 중력가속도(m/sec^2)
- Q_h : 오염원으로부터 기상예의 휘발량 또는 가스추출에 의해 발생하는 유체유속($1/sec$)
- S_S : 비저류계수(m^{-1})
- C_G : 유기염소화합물 가스의 농도(kg/m^3)
- θ_D : 가스상의 간극율(gas-filled porosity)
- v_x, v_z : TCE가스의 간극유속(m/sec)
- $D_{xx}, D_{zz}, D_{xz}, D_{zx}$: TCE가스의 분산계수(m^2/sec)
- F : 오염원으로부터의 휘발량($kg/m^3/sec$)
- C_{Gmax} : VOC가스의 포화농도(kg/m^3)
- K_{un} : 원액상에서 다공체 기상으로의 휘발계수($1/sec$)
- R : 지연계수
- α_L, α_T : 종방향 및 횡방향의 분산능(m)

(논문번호:98-063/접수:1998.09.09/심사완료:1999.02.02)