

연직배수재에 의한 토양오염물질 추출에 지반의 투수계수가 미치는 영향분석 Analysis on Effects of Permeability in Contaminated Area on Extraction of Contaminants from Soil Using Vertical Drains

이행우¹⁾, Haeng-Woo Lee, 장병욱²⁾, Pyoung-Wuck Chang, 강병윤³⁾, Byung-Yoon, Kang

¹⁾ 농업기반공사 농어촌연구원 책임연구원, Principal Researcher, Rural Research Institute, KARICO

²⁾ 서울대학교 조경·지역시스템공학부 교수, Professor, Dept. of Landscape Architecture and Rural System Engineering, Seoul Nat'l Univ.

³⁾ 농업기반공사 농어촌연구원 주임연구원, Researcher, Rural Research Institute, KARICO

SYNOPSIS : The permeability of contaminated soil and elapsed time are important considering factors to in-situ soil remediation. Gabr et. al. (1996) derived the solution equation of contaminant concentration ratio as initial one (C/C_0) with time and spatial changes in contaminated area which embedded with vertical drains. The contaminant concentration ratio (C/C_0) is analyzed with time and spatial changes in three different permeability areas which are $k=1.0 \times 10^{-5}$, 1.0×10^{-6} , $1.0 \times 10^{-7} m/s$ by using the Gabr's equation. Results from numerical analysis indicate that the ratio (C/C_0) decreases as the elapsed time increases in every point, however, remediation efficiency decreases as the analyzing point is far from injection well to extraction one and is deeper from top level of contaminated area. And also it decreases as the permeability of contaminated area decreases. Especially, the lower permeability of contaminated area effects directly on the soil remediation, in this research, under condition which the permeability of contaminated area is $1.0 \times 10^{-7} m/s$, the maximum time needed to attain 90% clean up level (t_{90}) is 65,690 hours(7.5 years), it takes so much time to clean the low permeability contaminated soil.

Keywords : Contaminated area, Vertical drains, Permeability, In-situ soil remediation, Contaminant concentration ratio as initial one (C/C_0)

1. 서론

세계적으로 인구증가 및 산업발달로 인하여 발생하는 화학 폐기물로 인하여 토양 및 지하수의 오염이 심각한 상태에 있다. 국내의 경우도 전국에 산재하고 있는 823여 개의 비위생 매립지, 2,000여 개의 폐금속 광산, 12,000여개의 주유소, 수많은 산업공단, 군 주둔지 등에 의하여 농경지 오염문제의 심각성이 대두되고 있다(정하익, Internet Edition).

선진외국에서는 오염지반의 복원에 많은 공법들이 개발되어 실용화되고 있다. 오염정화는 현장에서 직접 처리하는 현장복원공법과 오염토를 현장 밖으로 이동시켜 처리하는 현장 외 복원방법이 있다. 현장 외 복원방법은 오염처리 효과 면에서 큰 장점이 있으나 규모가 큰 오염지반 정화에는 적용성의 한계가 있다. 현장복원공법에는 미생물을 이용하여 오염물질을 분해하는 미생물정화공법과, 진공/공기추출, 토양세척 공법 등이 있다. 이들 공법은 주로 조립지반(coarse grained soils)에 사용되는 것으로, 세립지반(fine grained soils)과 같이 투수성이 매우 낮은 곳에서는 오염물질의 이동 및 추출에 어려움이 있다.

세립토의 간극은 매우 미소하기 때문에 세척제 및 탈착제가 토양 속으로 주입되거나 추출되는 데 한계가 있기 때문이다. 따라서 오염된 세립지반 현장에서 이들 공법을 적용할 때에는 이러한 문제점을 개선할 수 있는 방안이 강구되어야 한다. 이러한 방안의 하나로 기존의 연약지반 개량공법으로 사용되고 있는 연직배수공법(VDs: Vertical Drains)을 활용한 연직배수복원공법(VD remediation system)이 제안되었다.

연직배수복원공법은 오염된 세립지반을 복원하는 경우에 조립지반에 많이 사용되고 있는 복원기술의 하나인 양수 및 처리공법(pumping and treat system)과 유사한 시스템을 가진다. 본 공법은 그림 1과 같이 세립지반 내에서 세척수의 주입 또는 추출 지점과 오염토 또는 간극수 지점과의 이동 시간을 짧게 하여 물 또는 오염수를 배수하는 데 걸리는 시간을 줄인다. 또한 본 공법은 다수의 주입정 및 추출정을 설치하므로 연속적으로 분포하지 않고 포켓상으로 분포하고 있는 오염물질을 수집, 제거하는 데 장점이 있다. 이상과 같이 본 공법은 지중내 오염수의 배수길이를 감소시키고 오염물질의 탈착 및 이동을 증진시켜 오염물질의 제거를 촉진 시키게 된다.

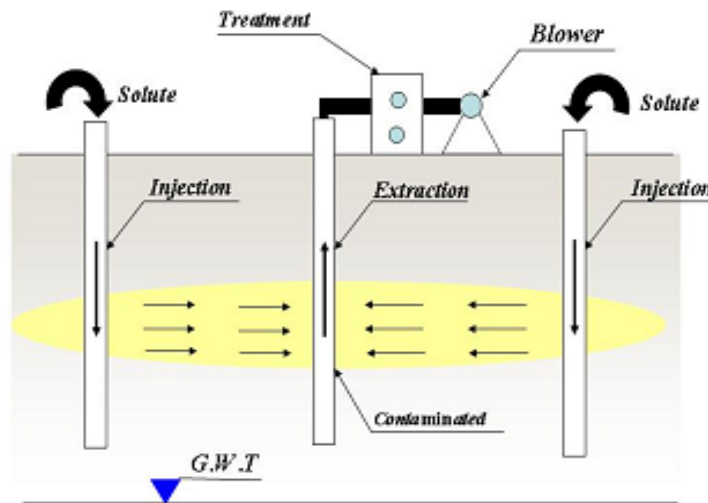


그림 1. 연직배수재에 의한 오염물질 추출

Gabr 등(1996)은 연직배수재가 설치된 오염지반에서 시·공간적 변화에 따른 오염농도의 변화량을 구하는 지배방정식을 정의하고 해를 구하는 식을 유도하였다.

본 연구에서는 Gabr 등(1996)의 해석식을 이용하여 투수성이 다른 3개의 오염지반을 대상으로 시·공간적 변화에 따른 오염농도의 변화량을 구하여 지반의 투수성이 현장세척 오염정화에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 오염물질이동모델

오염물질이동 모델은 많은 학자들에 의하여 개발되었다. 그중 대표적인 것이 미국 EPA의 물, 공기, 불수용성 물질(NAPL)의 이동모델인 NAPL Simulator, 3상의 2차 유한요소모델인 MOFAT-2D, 북서태평양연구소(Pacific Northwest Lab.)에서 개발한 다상의 표면이동모델인 STOMP, 불포화지반에서 지하수, 열 이동모델인 TOUGH 및 이의 새로운 모델인 TOUGH2, 현재 실무에 많이 이용하고 있는 MODFLOW 등이 있다. Gabr 등(1996)은 연직배수재를 이용한 오염지반의 정화축진모델을 개발하였으며, Collazos (2003) 및 Bowders 등(2005)은 연직배수재를 오염지반에 설치하여 오염지반 정화축진효과를 분석하였다.

2.1 지배방정식의 유도

오염물질의 시간적, 공간적 농도는 농도경사에 의하여 오염물질이 이동하는 분산작용(dispersion)과 수리경사에 의한 이류현상(advection), 오염물질이 흡입자의 표면에 흡착하는 정도에 따라 변한다. 지반내에서 오염물질의 화학적·생물학적 반응이나 분해에 의한 질량감소를 무시한다면, 일반적으로 다공성 매체를 통한 오염물질의 이동은 다음과 같이 이류-분산 및 흡착에 의해 설명할 수 있다(Li 등, 2000).

$$R_d \frac{\partial C}{\partial t} + u_\xi \frac{\partial C}{\partial \xi} - D_\xi \frac{\partial^2 C}{\partial \xi^2} = 0 \quad (1)$$

여기서, R_d : 지연계수
 C : 지반내에서 오염물의 농도
 t : 시간
 u_ξ : 임의의 ξ 방향의 유체의 흐름속도
 D_ξ : 임의의 ξ 방향의 분산계수

식 (1)에서 지연계수 R_d 는 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_d = 1 + \frac{\rho_b K_d}{n} \quad (2)$$

여기서, ρ_b : 흙의 용적밀도
 K_d : 흡입자와 용액의 평형분포계수
 n : 간극율

흙 입자의 간극률을 고려하고 식 (2)을 식 (1)에 대입하여 시간변화에 따른 오염농도변화량을 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_\xi \frac{\partial^2 C}{\partial \xi^2} - \frac{1}{n} \frac{\partial(u_\xi C)}{\partial \xi} - \frac{1}{n} \frac{\partial(\rho_b K_d C)}{\partial t} \quad (3)$$

연직배수재에 의한 오염지반 정화는 식 (3)에서 임의의 방향 ξ 를 그림 2에서 보는바와 같이 연직방향 z 와 방사선방향 r 로 생각할 수 있다(Gabr 등, 1996). 따라서 오염물질의 이류, 분산 및 흡착에 대해 연직 및 방사선 방향의 식을 유도하여 식 (3)에 대입하면 식 (4)와 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (D_r r \frac{\partial C}{\partial r}) + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{1}{nr} \frac{\partial(nu_r C)}{\partial r} - \frac{1}{n} \frac{\partial(u_z C)}{\partial z} - \frac{1}{n} \frac{\partial(\rho_b K_d C)}{\partial t} \quad (4)$$

여기서, C : 오염농도
 r : 방사선 방향의 반경
 z : 지표로부터 연직거리
 D_r, D_z : 방사선 및 연직방향의 분산계수
 $(= f(u_r, u_z))$
 u_r, u_z : 방사선 및 연직방향의 흐름유속

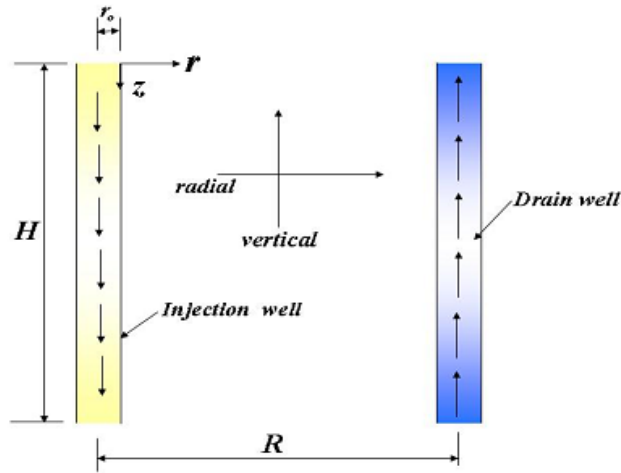


그림 2. 연직배수재에 지반의 오염물질 이동

2.2 해석해의 유도

식 (4)에서 방사선 방향의 흐름유속을 Darcy 법칙을 이용하면,

$$u_r = -k \frac{d\psi}{dr} = k \frac{ds}{dr} \quad (5)$$

여기서, k : 투수계수

ψ : 수두

s : 수위 강하량

또한, 연직배수재에 의한 추출량 Q_0 는,

$$Q_0 = \frac{2\pi k s H}{\ln\left(\frac{r}{D}\right)} \quad (6)$$

식 (5) 및 (6)과 같이 지반의 투수계수는 흐름속도와 유량에 영향을 미친다. 흐름속도와 유량은 오염물질의 이동과 직접적으로 관련이 있어 투수계수가 오염정화에 주요한 요소로 작용한다.

식 (6) 연직배수재가 오염지역바닥까지 완전 관통한다면 수위 강하량 s 는 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$s = \frac{Q_0}{2\pi k H} \ln\left(\frac{r}{D}\right) \quad (7)$$

여기서, H : 오염지반층의 두께

Q_0 : 배출량

D : 주입관정과 양수관정간 거리

식 (7)을 식 (5)에 대입하면,

$$u_r = \frac{Q_0}{2\pi H r} \quad (8)$$

방사선 방향의 흐름 방향을 토대로 하여 분산계수 D_r 은 오염물질을 포함한 유체의 흐름이 대부분 방사선 방향으로 흐르기 때문에 연직방향 흐름유량은 일정하다고 가정한다.

$$D_r = \alpha_r u_r / n = \frac{a_r Q_0}{2\pi H r} \quad (9)$$

여기서, α_r : 방사선 방향의 분산율,

연직방향 분산계수 D_z 은,

$$D_z = \alpha_z u_z / n \quad (10)$$

여기서 α_z : 연직방향 분산율,

식 (8),(9),(10)을 식 (4)에 대입하면 식 (11)과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{Q_0 \alpha_r}{2\pi u H r} \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{\alpha_z u_z}{n} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{Q_0}{2\pi u H r} \frac{\partial C}{\partial r} - \frac{q_z}{n} \frac{\partial C}{\partial z} - \frac{1}{n} \frac{\partial(\rho_s K_d C)}{\partial t} \quad (11)$$

Carrillo (1942)의 중첩원리에 따라,

$$C(z, r, t) = C_z(z, t) \cdot C_r(r, t) = C_z \cdot C_r \quad (12)$$

여기서, C_z, C_r 은 임의의 지점에서 연직방향 및 방사선 방향의 오염농도이다. 식 (12)의 시간에 대한 미분방정식은,

$$\frac{\partial C}{\partial t} = C_z(z, t) \frac{\partial C_r(r, t)}{\partial t} + C_r(r, t) \frac{\partial C_z(z, t)}{\partial t} = C_z \frac{\partial C_r}{\partial t} + C_r \frac{\partial C_z}{\partial t} \quad (13)$$

$$\frac{\partial C}{\partial r} = C_z \frac{\partial C_r}{\partial r}, \quad \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} = C_z \frac{\partial^2 C_r}{\partial r^2} \quad (14)$$

$$\frac{\partial C}{\partial z} = C_r \frac{\partial C_z}{\partial z}, \quad \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} = C_r \frac{\partial^2 C_z}{\partial z^2} \quad (15)$$

식 (13)~(15)를 식 (11)에 대입하면,

$$\left(1 + \frac{\rho_s K_d}{n}\right) \left(C_r \frac{\partial C_z}{\partial t} + C_z \frac{\partial C_r}{\partial t}\right) = \frac{Q_0 \alpha_r}{2\pi u H r} C_z \frac{\partial^2 C_r}{\partial r^2} + \frac{\alpha_z u_z}{n} C_r \frac{\partial^2 C_z}{\partial z^2} - \frac{Q_0 C_z}{2\pi u H r} \frac{\partial C_r}{\partial r} - \frac{u_z}{n} C_r \frac{\partial C_z}{\partial z} \quad (16)$$

식 (16)를 다시정리하면,

$$C_r \left(\frac{\partial C_z}{\partial t} - \frac{\alpha_z u_z}{n + \rho_s K_d} \frac{\partial^2 C_z}{\partial z^2} + \frac{q_z}{n + \rho_s K_d} \frac{\partial C_z}{\partial z} \right) = C_z \left(\frac{\partial C_r}{\partial t} + \frac{Q_0 \alpha_r}{(n + \rho_s K_d) 2\pi u H r} \frac{\partial^2 C_r}{\partial r^2} - \frac{Q_0 \alpha_r}{(n + \rho_s K_d) 2\pi u H r} \frac{\partial C_r}{\partial r} \right) \quad (17)$$

식 (16)을 연직 및 방사선방향 오염농도 변화율을 나누면,

$$\frac{\partial C_z}{\partial t} = \frac{\alpha q_z}{n+\rho_b K_d} \frac{\partial^2 C_z}{\partial z^2} - \frac{q_z}{n+\rho_b K_d} \frac{\partial C_z}{\partial z} \quad (18)$$

$$\frac{\partial C_r}{\partial t} = \frac{\alpha_r Q_0}{(n+\rho_b K_d)2\pi H} \frac{1}{r} \frac{\partial^2 C_r}{\partial r^2} - \frac{Q_0}{(n+\rho_b K_d)2\pi H} \frac{1}{r} \frac{\partial C_r}{\partial r} \quad (19)$$

연직방향의 오염농도변화에서 초기 및 경계조건은,

$$C_z[(0 \leq z < \infty), 0] = C_{d0}; \quad C_z(0, t) = 0; \quad C_z(\infty, t) = 0 \quad (20)$$

오염지반층에서 연직방향의 초기농도는 C_{d0} 이고, 오염지반층 상부와 하부의 오염농도는 0이다. 방사선방향의 오염 농도변화에서 초기 및 경계조건은,

$$C_r[(r \geq r_0), 0] = C_{r0}; \quad C_r(r_0, t) = 0; \quad C_r(\infty, t) = 0 \quad (21)$$

오염지반층에서 방사선방향의 초기농도는 C_{r0} 이고, 주입관 내부의 오염농도 0이다. 또한 오염지반층 밖의 오염농도 역시 0이다. 식 (18)의 해를 구하기 위하여 Laplace 변환 및 역변환(Marino, 1974)식을 이용하면,

$$C_z(z, t) = \frac{C_{d0}}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{\frac{u_z t}{n+\rho_b K_d} + z}{2\sqrt{\frac{\alpha_z u_z t}{n+\rho_b K_d}}} \right) - \operatorname{erfc} \left(\frac{\frac{u_z t}{n+\rho_b K_d} - z}{2\sqrt{\frac{\alpha_z u_z t}{n+\rho_b K_d}}} \right) \right] \quad (22)$$

여기서, $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\xi^2} d\xi$ (23a)

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-\xi^2} d\xi \quad (23b)$$

식 (23a)는 error function, (23b) complementary error function 이다. 식 (22)에서 $u_z=0$ 인 한계조건에서 오염농도변화율 C_z/C_{d0} 은 1이다. 식 (22)을 농도변화율을 구하기 위한 식으로 전환하면,

$$\frac{C_z(z, t)}{C_{d0}} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{T_z + 1}{2\sqrt{T_z/P_z}} \right) - \operatorname{erfc} \left(\frac{T_z - 1}{2\sqrt{T_z/P_z}} \right) \right] \quad (24)$$

여기서, $T_z = \frac{u_z t}{nR_d z}$ (25)

$$P_z = \frac{z}{\alpha_z} \quad (26)$$

식 (19)의 해를 구하기 위하여 Laplace 변환 및 역변환(Marino, 1974)식을 다시 이용하면,

$$C_r(r, t) = C_{r0} \operatorname{erfc} \left[\frac{3Q_0 \alpha_r r^2 t}{8\pi H (n+\rho_b K_d) (r-r_0)^5} \right] \quad (27)$$

식 (27)에서 $q_r=0$ 인 한계조건에서 오염농도변화율 C_r/C_{r0} 은 1이다. 식 (27)을 오염농도변화율을 구하기 위한 식으로 전환하면,

$$\frac{C_r(r, t)}{C_0} = \text{erfc}\left(\frac{3M_r N_r}{8\pi R_d}\right) \quad (28)$$

여기서, $N_r = \frac{\alpha_r r^2}{nH(r-r_0)^2}$ (29)

$$M_r = \frac{Q_0 t}{(r-r_0)^3} \quad (30)$$

식 (28)과 (24)를 식 (12)에 대입하면,

$$\frac{C_z(z, r, t)}{C_0} = \frac{1}{2} \left[\text{erfc}\left(\frac{T_z+1}{2\sqrt{T_z/P_z}}\right) - \text{erfc}\left(\frac{T_z-1}{2\sqrt{T_z/P_z}}\right) \right] \text{erfc}\left(\frac{3M_r N_r}{8\pi R_d}\right) \quad (31)$$

식 (31)이 식 (4)의 연직배수채가 설치된 오염지반에서의 시간 및 공간변화에 따른 오염농도변화율을 구하는 식이다.

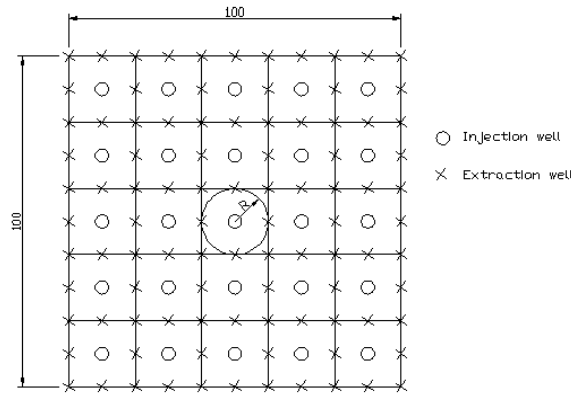


그림 3. 사례지구 연직배수채 설치도

3. 사례연구

오염지반의 투수성(k)의 영향은 식 (5)의 흐름속도(u_r, u_z)와 식 (6)의 추출량(Q_0)에 관계된다. 또한, 흐름속도와 추출량은 식 (9), (10)의 분산계수(D_r, D_z)에 영향을 미친다. 따라서 오염지반내 투수계수는 연직배수채를 활용한 오염정화 과정에서 중요한 역할을 한다.

따라서 본 연구에서는 오염지반의 투수계수가 연직배수채에 의한 오염물질 추출에 미치는 영향을 규명하기 위하여 그림 3과 같이 가상의 사례지구를 설정하였다. 오염지역이 1ha(100m x 100m)에 걸쳐 10m 두께로 존재하는 지구에서 한변이 20m의 정사각형 격자로 나누고 격자중앙에 주입정, 외곽에 추출정을 설치하였다.

표 1에서와 같이 식 (31)에 관련된 모든 인자를 고정하고 위치와 투수계수에 관련된 인자를 변화하면서 정화효율을 분석하였다.

4. 분석결과

그림 3의 격자의 한변의 길이는 20m이고 좌우 대칭이므로 분석을 위한 길이는 10m이다. 오염층의 길이방향과 깊이방향을 4등분하면 r/R 및 z/H 가 0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 등분된다. 그림 4는 이중 (0.5,

0.5), (0.75, 0.50), (0.75, 0.50), (0.75, 0.75)의 4 지점에서 오염물질의 투수성을 변화를 주고 시간경과에 따른 오염농도변화율을 도시하였다.

표 1. 분석을 위한 계수값의 범위

Parameter	Values to Case Study	Remarks
n	0.25	
ρ_s	*2,000 kg/m ³	
a_r	*2 m	
a_z	*1 m	
K_d	*1 x 10 ⁻⁵ m ³ /kg	
r_o	0.1 m	
H	10 m	
R	10 m	
Nsr	4	
Nsz	4	
Conv	0.10	

* Reference : Gabr et al. (1996)

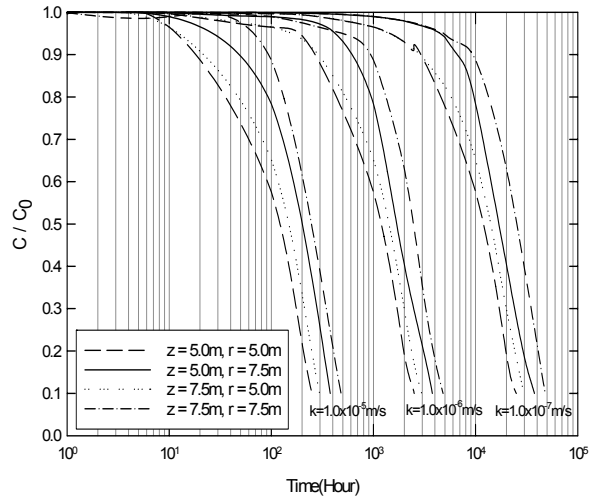


그림 4. 투수성 변화에 따른 오염농도변화율

표 2. 투수성별 90% 정화에 소요되는 시간(t_{90})

r(m) \ z(m)	2.5	5.0	7.5	10.0
2.5	43	185	257	279
	421	1,842	2,564	2,786
	4,206	18,414	25,633	27,857
5.0	45	251	377	418
	444	2,502	3,770	4,172
	4,436	25,012	37,700	41,712
7.5	45	297	481	541
	445	2,963	4,804	5,404
	4,441	29,628	48,037	54,033
10.0	45	330	575	657
	445	3,294	5,746	6,569
	4,441	32,936	57,453	65,690

소요시간 (t_{90} , hour)	$k=1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$
	$k=1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$
	$k=1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$

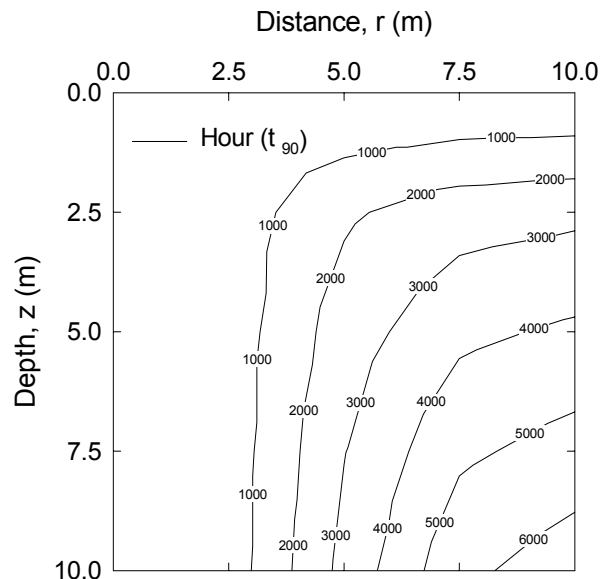


그림 5. 등시간도 (t_{90} , $k=1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$)

그림 4에서 보는바와 같이 초기오염농도에 대한 오염농도비(C/C_0) 모든 위치에서 시간이 경과할수록 낮아졌으나, 분석 위치가 주입점을 중심으로 방사선 방향과 연직하부방향이 멀어질수록, 또는 지반의 투수성이 작을수록 정화효율은 낮은 것으로 나타났다. 특히, 오염물질의 투수성에 따라 변화가 크며 투수성이 $1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$, $1.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$, $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 인 오염지반에서 상기 4지점을 대상으로 오염정화가 90% 완료되는 최대시간은 각각 480(20일), 4,800(200일), 48,000(2000일)으로 투수성이 감소하는 만큼 정화에 소요되는 시간은 반비례하여 증가한다. 소요시간이 48,000(2000일)은 년으로 환산하면 5.5년 정도로 사실상 오염지반의 투수성이 $1.0 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 이상이면 연직배수재에 의한 오염정화공법은 적용성이 없음을 의미한다. 또한, 표 2는 분석구간 길이방향과, 깊이방향을 각각 4등분한 각 지점에서 오염지반의 투수

성별 정확도가 90% 진행되는 소요되는 시간을 나타냈다. 표 2에서 보는바와 같이 오염지반의 투수성이 10배 감소하면 90% 정확도에 소요되는 시간(t_{90})도 10배 증가하는 것으로 나타났다.

그림 5에서 보는바와 같이 연직배수재가 설치된 오염지반에서 정화경로는 주입정부근 지표에서 추출정 바닥방향으로 진행되는 것으로 나타났다.

5. 종합결론

오염지반 1ha(100m x 100m) 에서 한 번이 20m인 정사각형 격자로 분할하고 각 격자의 중앙에 주입정, 외곽에 추출정을 설치한 가상의 사례지구에서 각 격자의 주입정에서 방사선 및 깊이방향을 4 등분한 각 위치에서 오염지반의 투수성 및 정화시간변화에 따른 오염농도 변화량과 정확도가 90% 완료되는 소요시간을 수치해석으로 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 연직배수재가 설치된 오염지반에서의 정화는 시간이 경과되면서 주입정 부근의 지표에서 추출정 바닥방향으로 진행되는 것으로 나타났다.
- (2) 오염지반의 투수성과 소정의 정확도에 소요되는 시간과의 관계는 투수성의 감소하는 량만큼 소요시간은 반비례하여 증가하였다.
- (3) 따라서, 연직배수재에 의한 오염정화는 지반의 투수성에 크게 영향을 받으며, 본 사례지구에선 투수성이 $\alpha \times 10^{-7} m/s$ 이하의 저투수 지반에서 90% 정확도에 소요되는 시간이 최대 7.5년으로 저투수 오염지반을 정화하는데 너무 많은 기간이 소요 되 적용성에 한계가 있는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 김수삼, 한상채, (2003), 동전기 오염지반 정화기술, 구미서관.
2. 정하익, "연직배수공법에 의한 오염된 토양 및 지하수의 복원", 건설기술정보, Internet Edition, http://www.kict.re.kr/webzine/Platform/98/9812_2.htm
3. 정하익, 이용수, 우제윤, (1995), 오염지반 및 지하수 정화에기술에 관한 연구, 한국건설기술연구원, 연구보고서(KICT/94-GE-1101-2)
4. Bowders, J. J. and Gabr M. A. (1995), "Strip drain for in situ clean up of contaminated fine grained soils", *Geotechnical News*, 13(3), 21-25.
5. Collazos, O. M., 2003 "Soil Vapor Extraction Enhanced with Prefabricated Vertical Drains," *Dissertation, Civil & Environmental Engineering, University of Missouri-Columbia, USA*, 205pp.
6. Freeze, R. A., and Cherry, J. A., 1979, *Groundwater*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, J. J., 604pp.
7. John J. Bowders, Mohammed A. Gabr, Omaira M. Collazos, 2005, "Prefabricated Vertical Drains for Enhanced In Situ Remediation", *Proceedings of the Geo-Frontiers 2005 Congress*, January 24-26, 2005, Austin, Texas, USA
8. Li, A., Chueng, K. A., and Reddy, K. R., 2000, "Cosolvent-enhanced electrokinetic remediation of soils contaminated with phenanthrene", *Journal of Environmental Engineering*, Vol.126, No.6, pp.527-533.
9. M. A Gabr, J. Wang and J. J. Bowders, 1996, "Model for Efficiency of Soil Flushing Using PVD-Enhanced System", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, November, 1996, pp. 914-919.
10. M. A. Marino, 1974, "Models of Dispersion in a Granular Medium", *Journal of Hydrology*, 23, pp.313-318.
11. Welker, A. L., Logan, M., and Knight S. B., 1998, "Design issues of a prefabricated vertical drain remediation system", *Geotechnical News*, Vol. 16, No. 1, pp.31-35.