

# 토양 및 오염물질의 물성치가 연직배수재에 의한 현장오염정화에 미치는 영향에 대한 수치해석적 연구

## Numerical Analysis of Effects of the Physical Properties of Soil and Contaminant Materials on In-situ Soil Remediation Using Vertical Drain

이 행 우<sup>1\*</sup> Lee, Haeng-Woo

장 병 옥<sup>2</sup> Chang, Pyoung-Wuck

### ABSTRACT

The properties of contaminated soil, contaminants 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 are embedded with vertical drains. The contaminant concentration ratio ( $C/C_0$ ) is analyzed with time and spatial changes as varying the effective diameter, porosity, shape factor, density of contaminated soil, temperature in ground, unit weight and viscosity of contaminants by using FLUSH1 model modified from FLUSH. Results from numerical analysis indicate that the most important factor to the in-situ soil remediation in vertical drain system is the effective diameter of contaminated soil. It also shows that the next important factors are the viscosity of contaminants, porosity of soil, shape of soil, temperature in ground, unit weight of contaminants and density of soil, in order. However, the others except the effective diameter of contaminated soil are insignificant to the soil remediation.

### 요 지

오염토양의 현장정화에 있어서 지반 및 오염물질의 물성치는 정화에 소요되는 시간과 함께 매우 중요한 고려사항이다. Gabr 등(1996)은 연직배수재가 설치된 오염지반에서 시·공간적 변화에 따른 초기오염농도에 대한 오염농도비( $C/C_0$ )를 구하는 식을 유도하였다. 본 연구에서는 Gabr 등이 유도한 식의 전산모형 FLUSH1을 이용하여 오염지반 흙의 유효입경, 간극률, 형상계수, 밀도, 지반의 온도와 오염물질의 단위중량 및 점성계수가 오염정화에 미치는 영향을 알아보기 위하여 시·공간적 변화에 따른 오염농도비( $C/C_0$ )를 분석 하였다. 분석결과 연직배수재가 설치된 오염지반에서 정화에 크게 영향을 미치는 인자는 오염지반 흡입자의 유효입경인 것으로 나타났으며, 그 다음으로 오염물질의 점성, 오염지반 흙의 간극율, 형상계수, 지반의 온도, 오염물질의 단위중량, 흙의 밀도 순으로 분석되었다. 오염지반 흙의 밀도는 오염정화에 미치는 영향이 아주 작은 것으로 나타났다.

**Keywords :** Contaminated soil, Soil and contaminants properties, Soil Remediation, Contaminant concentration ratio ( $C/C_0$ )

### 1. 서 론

우리나라는 인구에 비해 협소한 국토면적으로 인하여 해마다 약 1만여 ha의 농경지가 주택, 도로, 산업단지 등으

로 전용되어오고 있고 앞으로도 이와 같은 현상은 지속될 것으로 전망하고 있다(농림부, 2005). 더욱이 전 세계적으로 인구증가 및 산업발달로 인하여 발생하는 화학 폐기물 로 인하여 토양 및 지하수의 오염이 심각한 상태에 있다.

1\* 정회원, 농림부 농촌진흥과, 사무관 (Deputy Director, Regional Development Div. Ministry of Agriculture and Forestry, E-mail: hwlee2@maf.go.kr)  
2 정회원, 서울대학교 조경·지역시스템공학부 교수 (Professor, Landscape Architecture & Rural System Engineering Dept., Seoul National University)

국내의 경우도 전국에 산재하고 있는 820여 개의 비위생 매립지, 2,000여 개의 폐금속 광산, 12,000여개의 주유소, 수많은 산업공단, 군 주둔지 등에 의하여 농경지가 심각하게 오염되고 있으며 그에 따른 오염문제도 매우 심각하다(정하익 등, 1995).

선진외국에서는 오염지반의 복원에 많은 공법들이 개발되어 실용화되고 있다. 우리나라에서도 한국농촌공사에서 시행한 문현지구 토양오염복원사업이 대규모 오염지반 정화의 효시로 보고되고 있다(임채신, 2003). 장병욱(1995)은 우리나라 공업단지의 지하수 오염실태를 지적하고 정화 공법을 소개한바 있다. 오염지반 현장복원공법에는 미생물정화, 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. 유체가 흙과 같은 간극사이를 흐를 때는 흙 입자의 크기와 형상, 간극의 크기와 유체의 비중, 토양 내부의 온도 등에 따라 투수성이 변한다. 또한 흙 입자 세립토의 간극은 매우 미소하기 때문에 세척제 및 탈착제가 토양 속으로 주입되거나 추출되는 데 한계가 있다. 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. Bowders 등(2005) 및 Collazos (2003)는 연직배수재에 의한 오염정화 현장자료를 분석하여 적용성을 입증하였다. 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 오염물질의 이동에 영향을 미치는 흙 입자의 크기, 형상, 간극의 크기, 오염물질의 단위중량, 토양속의 온도 등의 변화에 따른 현장세척에 의한 오염정화에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 연직배수재에 의한 오염정화 모형

### 2.1 지배방정식의 유도

연직배수재를 활용한 오염물질 추출의 원리는 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. 본 공법은 지중내 오염수의 배수길이를 감소시키고 오염물질의 탈착 및 이동을 증진시켜 오염물질의 제거를 촉진 시키게 된다.

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).

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

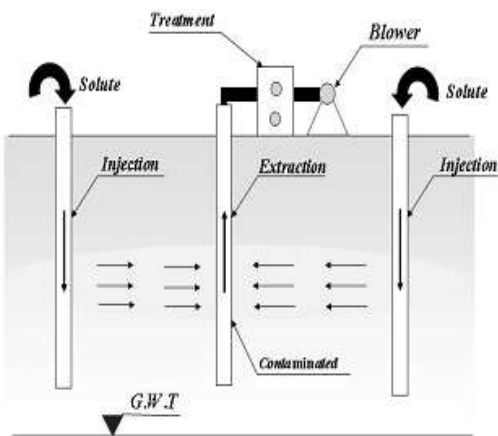


그림 1. 연직배수재에 의한 오염정화 모식도

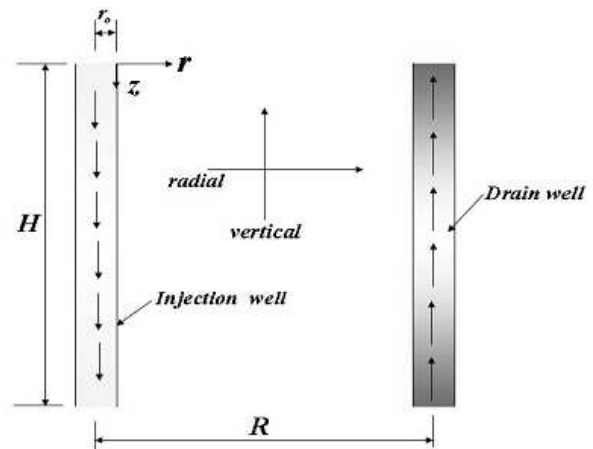


그림 2. 배수재안에서의 오염물질의 흐름 방향

여기서,  $R_d$  : 지연계수

$C$  : 지반내에서 오염물의 농도

$t$  : 시간

$u_\xi$  : 임의의  $\xi$  방향의 유체의 흐름속도

$D_\xi$  : 임의의  $\xi$  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,  $\rho_b$  : 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.

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

연직배수재에 의한 오염지반 정화는 식 (3)에서 임의의 방향  $\xi$ 을 그림 2에서 보논바와 같이 연직방향  $z$ 와 방사선 방향  $r$ 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.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} = & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (D_r r \frac{\partial C}{\partial r}) + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{1}{nr} \frac{\partial(r u_r C)}{\partial r} \\ & - \frac{1}{n} \frac{\partial(u_z C)}{\partial z} - \frac{1}{n} \frac{\partial(\rho_s K_d C)}{\partial t} \end{aligned} \quad (4)$$

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

## 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

$\Psi$  : 수두

$s$  : 수위 강하량

Taylor(1948)는 토양속을 흐르는 유체의 투수계수는 유체와 흙의 모든 영향을 반영하는 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$k = D_e^2 \frac{\gamma_f}{\eta} \frac{e^3}{1+e} C \quad (6)$$

여기서,  $D_e$  : 유효입경

$\gamma_f$  : 유체의 단위중량

$\eta$  : 유체의 점성계수

$e$  : 간극비

$C$  : 형상계수

또한, 연직배수재에 의한 추출량  $Q_0$ 는,

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

식 (7) 연직배수재가 오염지역바닥까지 완전 관통한다면 수위강하량  $s$ 는 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$s = \frac{Q_0}{2\pi k H} \ln(\frac{r}{D}) \quad (8)$$

여기서,  $H$  : 오염지반층의 두께

$Q_0$  : 배출량

$D$  : 주입관정과 양수관정간 거리

식 (8)을 식 (5)에 대입하면,

$$u_r = \frac{Q_0}{2\pi H r} \quad (9)$$

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

$$D_r = \alpha_r u_r / n = \frac{\alpha_r Q_0}{2\pi H r} \quad (10)$$

여기서,  $\alpha_r$  : 방사성 방향의 분산율,

연직방향 분산계수  $D_z$ 은,

$$D_z = \alpha_z u_z / n \quad (11)$$

여기서  $\alpha_z$  : 연직방향 분산율,

식 (9), (10), (11)을 식 (4)에 대입하면 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} = & \frac{Q_0 \alpha_r}{2\pi n H r} \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{\alpha_z u_z}{n} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{Q_0}{2\pi n H r} \frac{\partial C}{\partial r} \\ & - \frac{q_z}{n} \frac{\partial C}{\partial z} - \frac{1}{n} \frac{\partial(\rho_s K_d C)}{\partial t} \end{aligned} \quad (12)$$

Carrillo(1942)의 중첩원리에 따라(Freeze 등, 1979),

$$C(z, r, t) = C_z(z, t) \cdot C_r(r, t) = C_z \cdot C_r \quad (13)$$

여기서,  $C_z, C_r$ 은 임의의 지점에서 연직방향 및 방사선 방향의 오염농도이다. 식 (13)의 시간에 대한 미분방정식은,

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} = & C_z(z, t) \frac{\partial C_r(r, t)}{\partial t} + C_r(r, t) \frac{\partial C_z(z, t)}{\partial t} \\ = & C_z \frac{\partial C_r}{\partial t} + C_r \frac{\partial C_z}{\partial t} \end{aligned} \quad (14)$$

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

$$\frac{\partial C}{\partial z} = C_r \frac{\partial C_z}{\partial z}, \quad \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} = C_r \frac{\partial^2 C_z}{\partial z^2} \quad (16)$$

식 (14)~(16)를 식 (12)에 대입하면,

$$\begin{aligned} (1 + \frac{\rho_s K_d}{n})(C_r \frac{\partial C_z}{\partial t} + C_z \frac{\partial C_r}{\partial t}) = & \frac{Q_0 \alpha_r}{2\pi n H r} C_z \frac{\partial^2 C_r}{\partial r^2} \\ + \frac{\alpha_z u_z}{n} C_r \frac{\partial^2 C_z}{\partial z^2} - & \frac{Q_0 C_z}{2\pi n H r} \frac{\partial C_r}{\partial r} - \frac{u_z}{n} C_r \frac{\partial C_z}{\partial z} \end{aligned} \quad (17)$$

식 (17)을 다시정리하면,

$$\begin{aligned} C_r \left( \frac{\partial C_z}{\partial t} - \frac{\alpha_z u_z}{n + \rho_b K_d} \frac{\partial^2 C_z}{\partial z^2} + \frac{q_z}{n + \rho_b K_d} \frac{\partial C_z}{\partial z} \right) \\ = C_z \left( -\frac{\partial C_r}{\partial t} + \frac{Q_0 \alpha_r}{(n + \rho_b K_d) 2\pi H r} \frac{\partial^2 C_r}{\partial r^2} - \frac{Q_0 \alpha_r}{(n + \rho_b K_d) 2\pi H r} \frac{\partial C_r}{\partial r} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

식 (17)을 연직 및 방사선방향 오염농도 변화율을 나누면,

$$\frac{\partial C_z}{\partial t} = \frac{\alpha_z u_z}{n + \rho_b K_d} \frac{\partial^2 C_z}{\partial z^2} - \frac{q_z}{n + \rho_b K_d} \frac{\partial C_z}{\partial z} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_r}{\partial t} = & \frac{\alpha_r Q_0}{(n + \rho_b K_d) 2\pi H r} \frac{\partial^2 C_r}{\partial r^2} \\ & - \frac{Q_0}{(n + \rho_b K_d) 2\pi H r} \frac{\partial C_r}{\partial r} \end{aligned} \quad (20)$$

연직방향의 오염농도변화에서 초기 및 경계조건은,

$$\begin{aligned} C_z[(0 \leq z < \infty), 0] = C_{z0}; \quad C_z(0, t) \\ = 0; \quad C_z(\infty, t) = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

오염지반층에서 연직방향의 초기농도는  $C_{z0}$ 이고, 오염지반층 상부와 하부의 오염농도는 0이다. 방사선방향의 오염 농도변화에서 초기 및 경계조건은,

$$C_r[(r \geq r_0), 0] = C_{r0}; \quad C_r(r_0, t) = 0; \quad C_r(\infty, t) = 0 \quad (22)$$

오염지반층에서 방사선방향의 초기농도는  $C_{r0}$ 이고, 주입관 내부의 오염농도 0이다. 또한 오염지반층 밖의 오염농도 역시 0이다. 식 (19)의 해를 구하기 위하여 Laplace 변환 및 역변환(Marino, 1974)식을 이용하면,

$$C_z(z, t) = \frac{C_{z0}}{2} \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{\frac{u_z t}{n + \rho_s K_d} + z}{2 \sqrt{\frac{\alpha_z u_z t}{n + \rho_s K_d}}} \right) - \operatorname{erf} \left( \frac{\frac{u_z t}{n + \rho_s K_d} - z}{2 \sqrt{\frac{\alpha_z u_z t}{n + \rho_s K_d}}} \right) \right] \quad (23)$$

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\xi^2} d\xi \quad (24a)$$

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-\xi^2} d\xi \quad (24b)$$

식 (24a)는 error function, (24b) complementary error function 이다. 식 (23)에서  $u_z=0$ 인 한계조건에서 오염농도변화율  $C_z/C_{z0}$ 은 1이다. 식 (23)을 농도변화율을 구하기 위한 식으로 전환하면,

$$\frac{C_z(z, t)}{C_{z0}} = \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{T_z + 1}{2 \sqrt{T_z/P_z}} \right) - \operatorname{erf} \left( \frac{T_z - 1}{2 \sqrt{T_z/P_z}} \right) \right] \quad (25)$$

$$\operatorname{erf}(x), \quad T_z = \frac{u_z t}{n R_d z} \quad (26)$$

$$P_z = \frac{z}{\alpha_z} \quad (27)$$

식 (20)의 해를 구하기 위하여 Laplace 변환 및 역변환 (Marino, 1974)식을 다시 이용하면,

$$C_r(r, t) = C_{r0} \operatorname{erfc}\left[\frac{3Q_0\alpha_r r^2 t}{8\pi H(n + \rho_b K_d)(r - r_0)^5}\right] \quad (28)$$

식 (28)에서  $q_r=0$ 인 한계조건에서 오염농도변화율  $C_r/C_{r0}$ 은 1이다. 식 (28)을 오염농도변화율을 구하기 위한 식으로 전환하면,

$$\frac{C_r(r, t)}{C_{r0}} = \operatorname{erfc}\left(\frac{3M_r N_r}{8\pi R_d}\right) \quad (29)$$

여기서,  $N_r = \frac{\alpha_r r^2}{nH(r - r_0)^2}$  (30)

$$M_r = \frac{Q_0 t}{(r - r_0)^3} \quad (31)$$

식 (29)와 (25)를 식 (13)에 대입하면,

$$\frac{C(z, r, t)}{C_0} = \frac{1}{2} \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{T_z + 1}{2\sqrt{T_z/P_z}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{T_z - 1}{2\sqrt{T_z/P_z}}\right) \right] \operatorname{erfc}\left(\frac{3M_r N_r}{8\pi R_d}\right) \quad (32)$$

식 (32)이 식 (4)의 연직배수재가 설치된 오염지반에서의 시간 및 공간변화에 따른 오염농도변화율을 구하는 식이다. 따라서 토양과 유체의 물성치가 식 (6)의 투수계수에 영향을 미치고 투수계수는 식 (5) 및 (7)의 흐름 속도와 유량에 영향을 준다. 따라서 토양 및 오염물질의 물성치는 식 (32) 오염농도의 변화율에 직접적으로 영향을 미친다.

### 2.3 전산모형(FLUSH)의 적용성 및 보정

Gabr 등(1996)은 연직배수재가 설치된 오염지반에서 세척에 의한 현장정화의 지배방정식을 정의하고 시·공간적 변화에 따른 오염농도의 변화율을 구하는 식을 유도하였다. 이행우 등(2005a, b)은 Gabr 등(1996)이 유도한 식의 해를 구하는 전산모형(FLUSH)을 개발하고 Bowders 등(1995)이 모형실험한 결과에 적용하여 적용성을 입증하였다(이행우 등, 2005c). 따라서 본 연구에서는 이행우 등이 개발한 전산모형을 토양 및 오염물질의 물성치의 변화에 따른 오염농도의 변화량을 구하는 수정 FLUSH 모형(FLUSH1)을 개발하였다.

### 3. 사례연구

본 연구에서는 오염지반 및 오염물질의 물성치가 연직배수재에 의한 오염물질 추출에 미치는 영향을 규명하기 위하여 그림 3과 같이 가상의 사례지구를 설정하였다. 오염지역이 1ha(100m × 100m)에 걸쳐 10m 두께로 존재하는 지구에서 한변이 20m의 정사각형 격자로 나누고 격자중앙에 주입정, 외곽에 추출정을 설치하였다.

표 1은 오염지반 및 오염물질의 물성치가 오염정화에 미치는 영향을 파악하기 위하여 기준이 되는 FLUSH1 모형

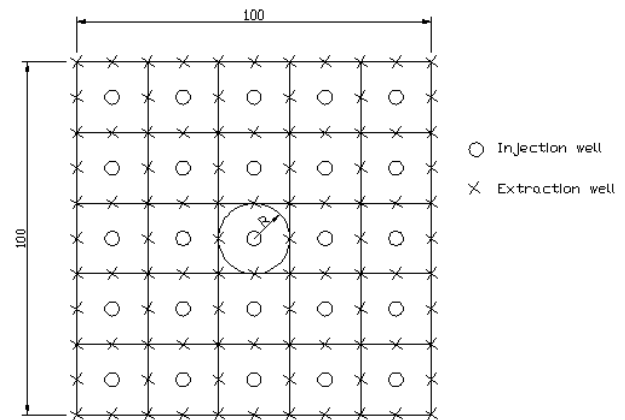
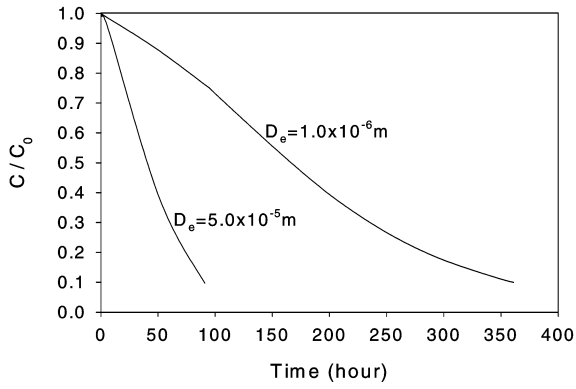


그림 3. 주입정과 배출정 관입 모식도

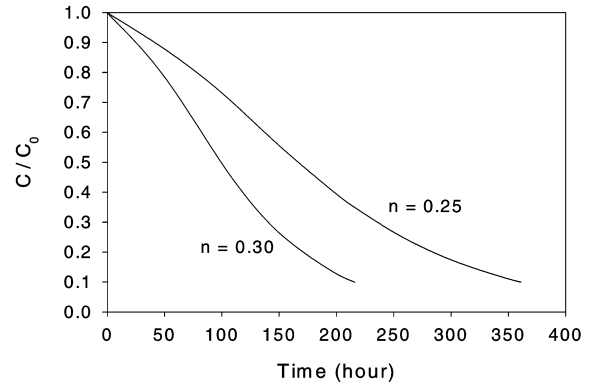
표 1. 입력자료

Parameter		Values		Remarks
Variable / Invariable	Symbol	Unit	Initial	Secondary
Invariable parameter	$\alpha_r$	m	*2	
	$\alpha_z$	m	*1	
	$K_d$	$m^3/kg$	*1 × <sup>-5</sup>	
	$r_o$	m	0.1	
	H	m	10	
	R	m	10	
	Nsr	EA	4	
	Nsz	EA	4	
Conv	-	0.10		
Variable parameter	n		0.25	0.30
	$\rho_s$	$kg/m^3$	2,000	1,800
	$D_e$	m	$5.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-5}$
	$\gamma_f$	$kg/m^3$	1,000	1,500
	v	t/m/s	$1.002 \times 10^{-6}$	$8.925 \times 10^{-6}$
	T	°C	20	25
C	$m/s^2$	10	15	Shape factor

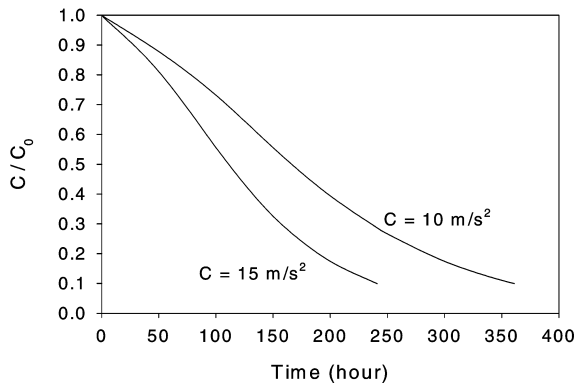
\* Reference : Gabr et al. (1996)



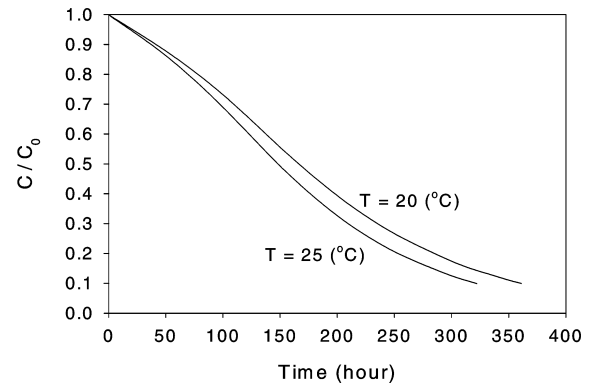
(a) Effective diameter



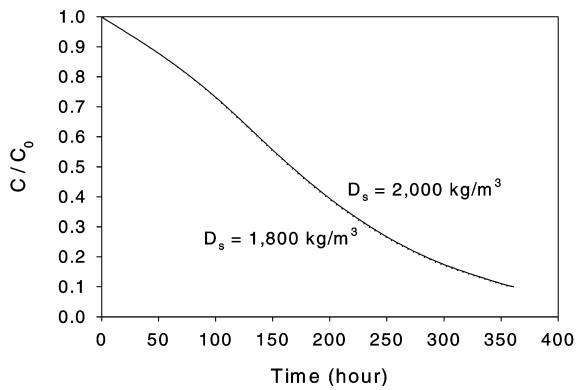
(b) Porosity of soil



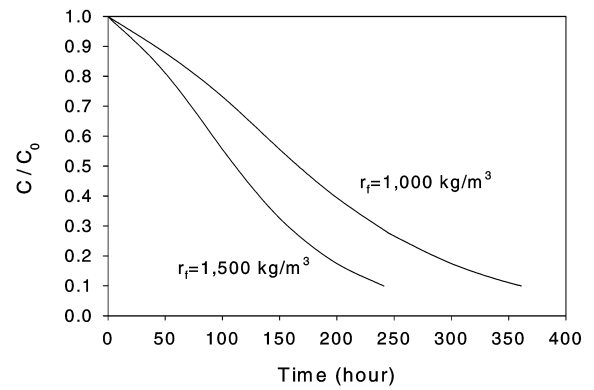
(c) Shape factor of soil



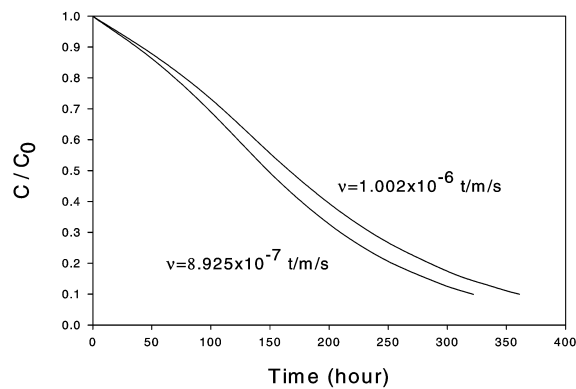
(d) Temperature in ground



(e) Density of soil



(f) Unit weight of contaminants



(g) Viscosity of contaminants

그림 4. 토양 및 오염물질 물성치 변화에 따른 오염정화도 변화

표 2. 오염정화에 미치는 영향 파악을 위한 계수분석

Classifications	Properties			Impact ( $\frac{\Delta C}{\Delta R}$ ) (I)	$t_{290}$ (hour)	$\frac{t_{190} - t_{290}}{t_{190}}$ (II)	Effects (II/I)
	Factor	Range (R)	Change (C)				
Soil and Temperature	Effective diameter, $D_e$ (m)	$1.0 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-7}$	$5.0 \times 10^{-6}$	$5.0 \times 10^{-3}$	91	0.748	149.60
	Porosity, $n$	0.20~0.99	0.05	0.06	216	0.402	6.70
	Shape factor, $C$ ( $m/s^2$ )	10~100	5	0.056	241	0.332	5.92
	Temperature, $T$ ( $^{\circ}C$ )	0~30	5	0.167	322	0.108	0.65
	Density, $D_s$ ( $kg/m^3$ )	1500~2200	200	0.286	359	0.00554	0.019
Contaminants	Unit weight, $\gamma_f$ ( $kg/m^3$ )	1,000~1,800	500	0.625	241	0.402	0.64
	Viscosity, $\nu$ ( $t/m/s$ )	$1.783 \times 10^{-5} \sim 8.000 \times 10^{-7}$	$1.095 \times 10$	0.00643	322	0.108	16.80

\*  $t_{190}$  (=361 h) : Elapsed time (hour) of 90% clean up at H x Z =  $5.0 \times 5.0$ m spot as condition of unchanged properties.

의 초기 입력 자료이다. 그림 4는 오염지반 주입정보로부터 및 지표로부터 5m 지점에서 오염지반과 오염물질의 물성치의 변화에 따라 시간변화에 따른 오염농도 변화량을 FLUSH1 모형으로 분석한 결과를 도시하였다. 표 2는 그림 4에 나타난 결과를 바탕으로 물성치의 계수분석을 통해 오염정화에 영향을 미치는 정도를 분석하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

그림 4의 (a)에서 보는바와 같이 유효입경이 커지면 오염정화의 진행이 원활해지는 것으로 나타났으며, (b)에서는 흙의 간극률이 클수록 역시 오염정화 효과가 큰 것으로 나타났다. 그림 4의 (c)는 형상계수와 시간경과에 따른 지반의 오염농도의 변화량을 나타낸 것인데 형상계수가 클수록 오염정화가 크게 나타났다. 그림 4의 (d)는 지반의 온도변화에 따른 오염농도의 변화량이며 온도가 높을수록 유체의 점성이 낮아져 이동성이 커 정화효율이 높게 나타났다. 그림 4의 (e)는 오염지반 흙의 밀도에 따른 오염농도 변화량을 도시한 것으로 그림에서 보는바와 같이 흙의 밀도가 낮을수록 정화효율은 높게 나타나나 그 영향은 아주 미세한 것으로 나타나고 있다. 그림 4(f)는 오염물질의 단위중량의 변화에 따른 오염농도의 변화량이다. 그림 4(f)에서 보는바와 같이 오염유체의 단위중량이 클수록 오염정화 효율은 큰 것으로 나타났다. 그림 4(g)는 오염유체의 점성 및 시간 경과에 따른 지반의 오염농도 변화량을 나타내고 있으며 그림에서 보는바와 같이 점성이 클수록 유체의 이동에 저항이 생겨 정화효율은 낮은 것으로 나타났다. 표 2는 오염지반 및 오염물질의 물성치 값을 자연계에서 가질 수 있는 개략적인 범위를 바탕으로 본 연구에서의 물성치의 변화값을 가미하여 오염정

화에 미치는 영향에 대하여 계수분석을 실시하였다. 실시결과 오염정화에 미치는 영향이 가장 큰 물성치는 오염지반 흙의 유효입경으로 나타났으며, 그 다음으로 오염물질의 점성, 오염지반 흙의 간극율, 형상계수, 지반의 온도, 오염물질의 단위중량, 흙의 밀도 순으로 분석되었다. 오염지반 흙의 밀도는 오염정화에 미치는 영향이 아주 작은 것으로 나타났다.

#### 5. 결론

오염지반의 정화가 진행되는 동안 초기오염농도 대비 오염농도의 변화량을 구하는 FLUSH 전산모형을 수정하여 오염지반 및 오염체의 물성치의 변화에 따른 오염농도 변화량을 구하는 FLUSH1 모형을 개발하였다. 개발된 FLUSH1 모형으로 오염지반 1ha(100m × 100m)를 한 번이 20m인 정사각형 격자로 분할하고 각 격자의 중앙에 주입정, 외곽에 추출정을 설치한 가상의 사례지구에서 각 격자의 주입정에서 방사선 및 깊이방향의 중앙지점을 대상으로 오염지반 흙 및 오염유체의 물성치의 변화와 시간경과에 따른 오염농도 변화량과 정화가 90% 완료되는 소요시간을 바탕으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

연직배수제가 설치된 오염지반에서 정화에 크게 영향을 미치는 인자는 오염지반 흡입자의 유효입경인 것으로 나타났으며, 그 다음으로 오염물질의 점성, 오염지반 흙의 간극율, 형상계수, 지반의 온도, 오염물질의 단위중량, 흙의 밀도 순으로 분석되었다. 오염지반 흙의 밀도는 오염정화에 미치는 영향이 아주 작은 것으로 나타났다. 하지만 흙의 유효입경을 제외한 다른 물성치는 유효입경과 비교하여 영향이 미세한 것으로 나타났다. 또한 오염지반 흙의 밀도는 오염정화에 미치는 영향이 미미한 것으로 나타났다.

## 참고문헌

1. 농림부, (2005), 농림업 주요통계, p.161.
2. 이행우, 장병욱, 강병윤, 김현태 (2005a), 연직배수재(VDs)에 의한 오염지반 정화촉진, 2005년도 한국농공학회 지반분과위원회 학술발표회, 의왕, 2005년 7월, 발표논문집, pp.1-10.
3. 이행우, 장병욱, 강병윤, 김현태 (2005b), 연직배수재(VDs)에 의한 오염지반정화 메커니즘 연구, 한국농공학회논문집, 제47권, 제5호, pp.63-71.
4. 이행우, 김승욱, 김현태, 박광수 (2005c), 연직배수재(VDs)에 의한 오염지반정화 적용성 평가, 한국관개배수, 제12권, 제2호, pp.17-25.
5. 임채신 (2003), 문헌지구 통양오염복원, 한국농공학회지, 제45권 제5호, pp. 28-38.
6. 장병욱 (1995), 공업단지의 토양 및 지하수오염의 개선공법, 한국농공학회지, 제37권 제6호, pp.8-11.
7. 정하익, 이용수, 우제윤 (1995), 오염지반 및 지하수 정화기술에 관한 연구, 한국건설기술연구원 연구보고서, KICT/94-GE-1101-2.
8. 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.
9. Collazos, O. M. (2003), "Soil Vapor Extraction Enhanced with Prefabricated Vertical Drains", *Dissertation, Civil & Environmental Engineering*, University of Missouri-Columbia, USA.
10. Bowders, J. J., Gabr, M. A. and Collazos, O. M. (2005), "Prefabricated Vertical Drains for Enhanced In Situ Remediation", *Proceedings of the Geo-Frontiers 2005 Congress*, GRI-18, January 24-26, 2005, Austin, Texas, USA.
11. 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.
12. Gabr, M. A., Wang, J. and Bowders, J. J. (1996), "Model for Efficiency of Soil Flushing Using PVD-Enhanced System", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, November, 1996, pp. 914-919.
13. Marino, M. A. (1974), "Models of Dispersion in a Granular Medium", *Journal of Hydrology*, 23, pp.313-318.
14. Taylor, D. W. (1948), *Fundamentals of Soil Mechanics*, John Wiley and Sons Inc, New York.

(논문접수일 2006. 5. 26, 심사완료일 2006. 6. 14)