

연직배수재에 의한 토양오염물질 추출에 미치는 영향인자 분석

- 토양 및 오염유체의 물성치를 중심으로

Analysis of Effecting Parameters on Extraction of Soil Contaminants using Vertical Drains

- Focusing on Soil and Contaminants Physical Properties

이행우* (농기공)·장병욱 (서울대)·강병윤·김현태 (농기공)

Lee, Haeng Woo*·Chang, Pyoung Wuck · Kang, Byung Yoon · Kim, Hyun Tae

Abstract

The properties of contaminants, contaminated soil, and the elapsed time are important 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 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 and temperature in ground and unit weight, viscosity of contaminants by using FLUSH1 model. Results from numerical analysis indicate that the most important factor to the in-situ soil remediation using vertical drains is the effective diameter of contaminated soil. It also shows that the viscosity of contaminants, porosity of soil, shape of soil, temperature in ground, unit weight of contaminants are, in order, affected to the soil remediation but density of soil is insignificant to the soil remediation.

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

I. 서론

우리나라는 인구에 비해 협소한 국토면적으로 인하여 해마다 약 1만여 ha의 농경지가 주택, 도로, 산업단지 등으로 전용되어오고 있고 앞으로도 이와 같은 현상은 지속될 것으로 전망하고 있다(농림부, 2005). 더욱이 전 세계적으로 인구증가 및 산업발달로 인하여 발생하는 화학 폐기물로 인하여 토양 및 지하수의 오염이 심각한 상태에 있다. 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). 여러 가지 오염정화 공법중에서 기존의 연약지반 개량공법으로 사용되고 있는 연직배수공법(VDs: Vertical Drains)을 활용한 연직배수복원공법(VD remediation system)이 제안되었다. 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.

II. 분석방법

2.1 수치해석

2.1.1 지배방정식의 유도

연직배수재를 활용한 오염물질 추출의 원리는 Fig. 1과 같이 세립지반 내에서 세척수의 주입 또는 추출 지점과 오염토 또는 간극수 지점과의 이동 시간을 짧게 하여 물 또는 오염수를 배수하는데 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.

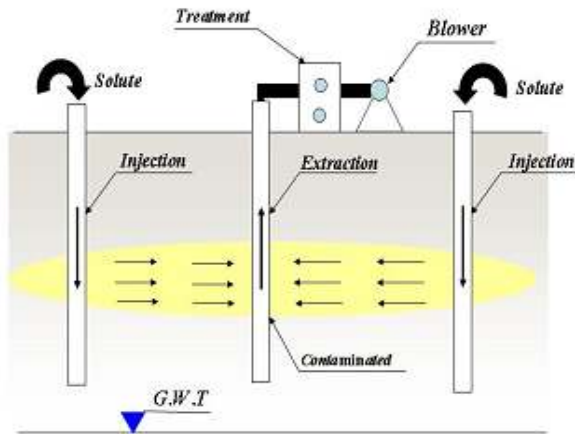


Fig. 1 Concept of using vertical drains for system

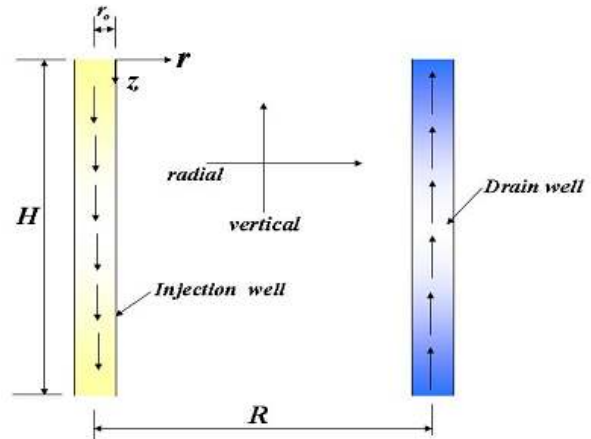


Fig. 2 Seepage profile of a vertical drain subsurface liquid retrieval

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

흡 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 ζ 을 Fig. 2에서 보는바와 같이 연직방향 z 와 방사선방향 r 로 생각할 수 있다(Gabr et. al., 1996). 따라서 오염물질의 이류, 분산 및 흡착에 대해 연직 및 방사선 방향의 식을 유도하여 식 (3)에 대입하면 식 (4)와 같다.

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

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

2.1.2 전산모형(FLUSH)의 적용성 및 보정

Gabr 등(1995)은 연직배수재가 설치된 오염지반에서 세척에 의한 현장정화의 지배방정식을 정의하고 시-공간적 변화에 따른 오염농도의 변화율을 구하는 식을 식 (5)와 같이 error 및 complementary error 함수로 유도하였다.

$$\frac{C(z, r, t)}{C_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{T_z + 1}{2\sqrt{T_z/P_z}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{T_z - 1}{2\sqrt{T_z/P_z}} \right) \right] \operatorname{erfc} \left(\frac{3M_r N_r}{8\pi R_d} \right) \quad (5)$$

식 (5)에서 $\operatorname{erf}(x)$, $\operatorname{erfc}(x)$ 은 error 및 complementary error 함수이고, T_z, P_z, N_r, M_r 은 매개변수이며 다음과 같다.

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\xi^2} d\xi, \quad \operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-\xi^2} d\xi \quad (6)$$

$$T_z = \frac{u_z t}{nR_d z}, \quad P_z = \frac{z}{\alpha_z} \quad (7)$$

$$N_r = \frac{\alpha_r r^2}{nH(r-r_0)^2}, \quad M_r = \frac{Q_0 t}{(r-r_0)^3} \quad (8)$$

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

$$k = D_e^2 \frac{\gamma_f}{\eta} \frac{e^3}{1+e} C \quad (9)$$

여기서, D_e : 유효입경

γ_f : 유체의 단위중량

η : 유체의 점성계수

e : 간극비

C : 형상계수

식 (9)의 흐름유체의 투수계수는 유속(u_r, u_z)과 분산계수(α_r, α_z), 연직배수재를 통한 배수량(Q_0)에 영향을 미치고 이는 곧 오염농도변화율(C/C_0)에도 영향을 미친다.

이행우 등(2005)은 Gabr 등(1996)이 유도한 식 (5)의 해를 구하는 전산모형(FLUSH)을 개발하고

Bowders 등(1995)이 모형실험한 결과에 적용하여 Fig. 3과 같이 적용성을 입증하였다.

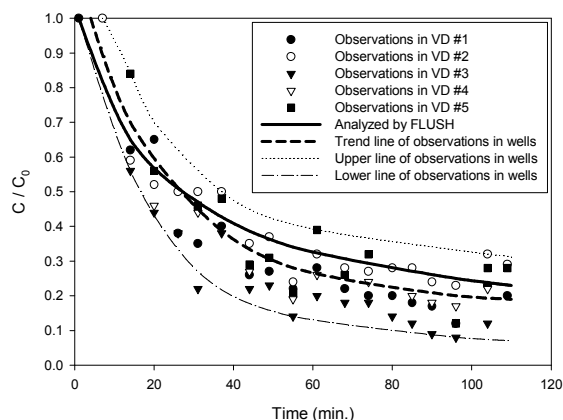


Fig. 3 Observed and analyzed contaminant concentration ratio (C/C_0)

2.2 사례연구

본 연구에서는 오염지반 및 오염물질의 물성치가 연직배수재에 의한 오염물질 추출에 미치는 영향을 규명하기 위하여 Fig. 4와 같이 가상의 사례지구를 설정하였다.

오염지역이 1 ha(100m x 100m)에 걸쳐 10m 두께로 존재하는 지구에서 한변이 20m의 정사각형 격자로 나누고 격자중앙에 주입정, 외곽에 추출정을 설치하였다. Table 1은 오염지반 및 오염물질의 물성치가 오염정화에 미치는 영향을 파악하기 위한 기준이 되는 FLUSH1 모형의 초기 입력 자료이다. Fig. 5 ~11은 오염지반 주입정 및 지표로부터 5m 지점에서 오염지반과 오염물질의 물성치의 변화에 따라 시간변화에 따른 오염농도 변화량을 FLUSH1 모형으로 분석한 결과를 도시하였다. Table 2는 Fig. 5에 나타난 결과를 바탕으로 물성치의 계수분석을 통해 오염정화에 영향을 미치는 정도를 분석하였다.

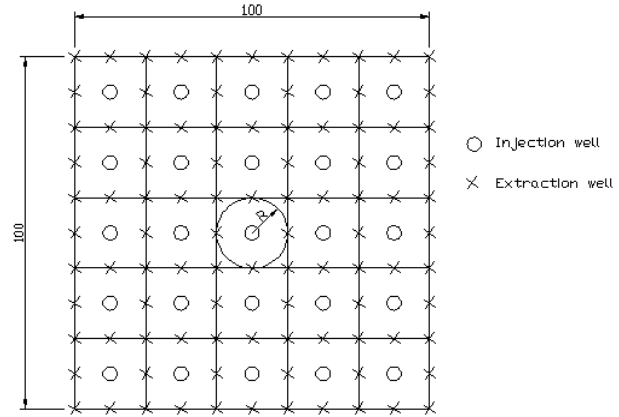


Fig. 4 Case study site of contaminated area

Table 1 Input data to FLUSH1 for case study site

Parameter			Values		Remarks
Variable / Invariable	Symbol	Unit	Initial	Secondary	
Invariable parameter	α_r	m	*2		
	α_z	m	*1		
	K_d	m^3/kg	*1 x 10 ⁻⁵		
	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	
	ρ_s	kg/m^3	2,000	1,800	
	D_e	m	5.0 x 10 ⁻⁶	1.0 x 10 ⁻⁵	
	γ_f	kg/m^3	1,000	1,500	
	v	t/m/s	1.002 x 10 ⁻⁶	8.925 x 10 ⁻⁶	
	T	°C	20	25	
	C	m/s^2	10	15	

* Reference : Gabr et al. (1996)

III. 결과 및 고찰

Fig. 5의 (a)에서 보는바와 같이 유효입경이 커지면 오염정화의 진행이 원활해지는 것으로 나타났으며, (b)에서는 간극률이 클수록 역시 오염정화 효과가 큰 것으로 나타났다. Fig. 5의 (c)는 형상 계수가 클수록 오염정화가 크게 나타났다. Fig. 5의 (d)는 온도가 높을수록 유체의 점성이 낮아져 이동성이 커 정화효율이 높게 나타났다. Fig. 5의 (e)는 흙의 밀도가 낮을수록 정화효율은 높게 나타나 그 영향은 아주 미세한 것으로 나타나고 있다. Fig. 5의 (f)는 오염유체의 단위중량이 클수록

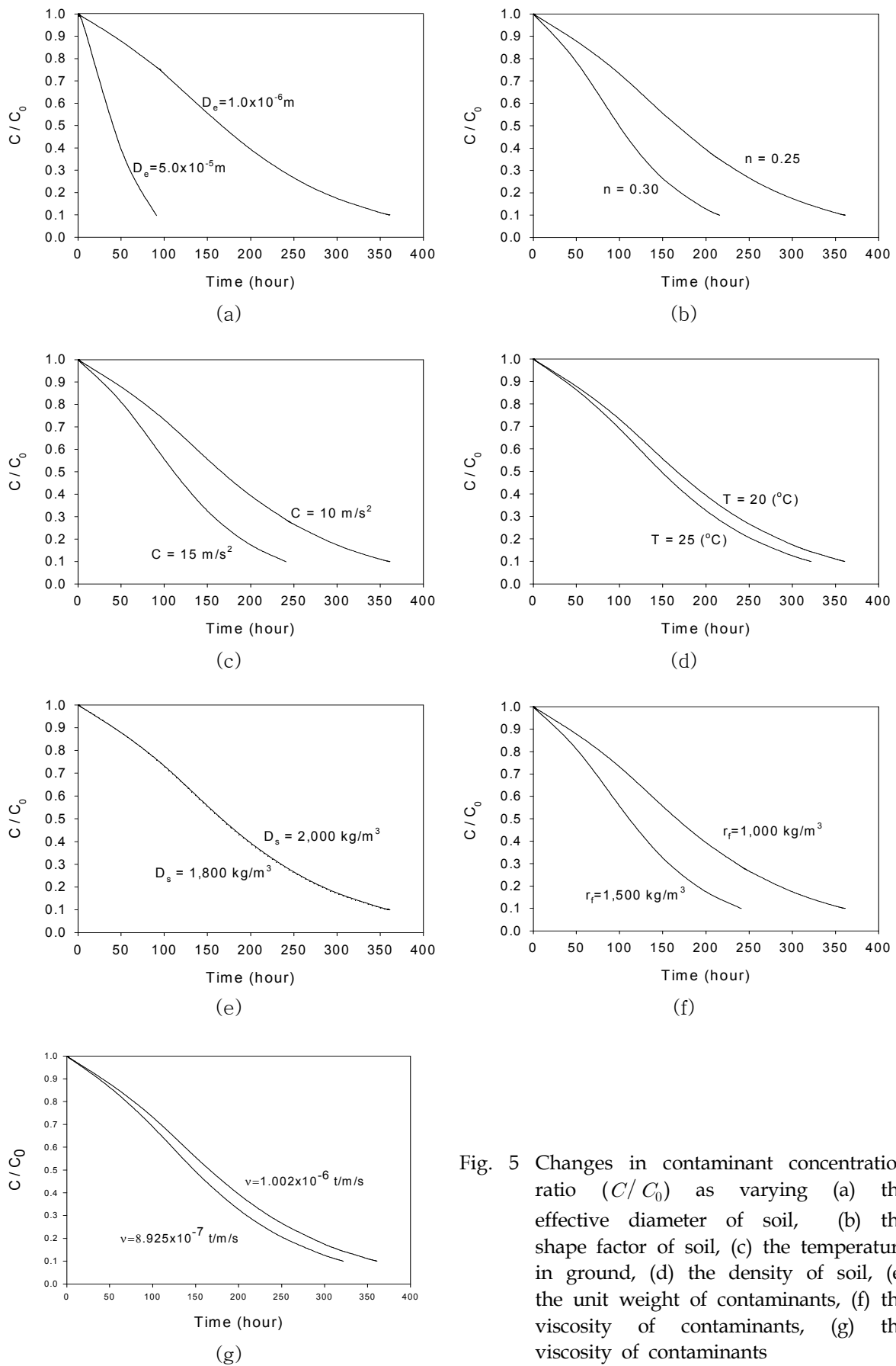


Fig. 5 Changes in contaminant concentration ratio (C/C_0) as varying (a) the effective diameter of soil, (b) the shape factor of soil, (c) the temperature in ground, (d) the density of soil, (e) the unit weight of contaminants, (f) the viscosity of contaminants, (g) the viscosity of contaminants

Table 2 Factor analysis for effects of soil and contaminant properties on soil remediation

Classifications	Properties			Impact ($\frac{\Delta C}{\Delta R}$) (I)	t_{290} (hour)	$\frac{t_{190} - t_{290}}{t_{190}}$ (II)	Effects (II/ I)
	Factors	Range (R)	Change (C)				
Soil and Temperature	Effective diameter, D_e (m)	$1.0 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-7}$	5.0×10^{-6}	5.0×10^{-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, γ_f (kg/m^3)	1,000~1,800	500	0.625	241	0.402	0.64
	Viscosity, ν ($t/m/s$)	$1.783 \times 10^{-5} \sim 8.000 \times 10^{-7}$	1.095×10^{-7}	0.00643	322	0.108	16.80

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

오염정화 효율은 큰 것으로 나타났다. Fig. 5의 (g)는 점성이 클수록 유체의 이동에 저항이 생겨 정화효율은 낮은 것으로 나타났다. Table 2는 오염지반 및 오염물질의 물성치 값을 자연계에서 가질 수 있는 개략적인 범위를 바탕으로 본 연구에서의 물성치의 변화 값을 가미하여 오염정화에 미치는 영향을 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.

IV. 결론

Gabr 등(1996)의 해석식을 이용하여 오염물질의 이동에 영향을 미치는 흙 입자의 크기, 형상, 간극의 크기, 오염물질의 단위중량, 토양속의 온도 등의 변화가 연직배수재를 이용한 토양세척에 의한 오염정화에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구에서는 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.

참고문헌

1. 농림부, 2005, *농림업 주요통계*, p. 161
2. 이행우, 장병욱, 강병운, 김현태, 2005, 연직배수재(VDs)에 의한 오염지반정화 메커니즘 연구, *한국농공학회 논문집*, 제47권, 제5호, pp. - .
3. 정하익, 이용수, 우제윤, 1995, *오염지반 및 지하수 정화기술에 관한 연구*, 한국건설기술연구원 연구보고서, KICT/94-GE-1101-2, 215pp.
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. 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.
6. 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.
7. Taylor, D. W., 1948, *Fundamentals of Soil Mechanics*, John Wiley and Sons Inc., New York.