한국농공학회논문집
제47권 제5호

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS, SEP. 2005, pp. 63-71

연직배수재(VDs)에 의한 오염지반정화 메커니즘 연구

Mechanism of Soil Remediation in Contaminated Area Using Vertical Drains

이 행 우* · 장 병 욱** · 강 병 윤* · 김 현 태*

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

Abstract

In-situ soil remediation mechanism through the vertical drains (VDs) is analyzed with numerical model as the error and complementary error function. Results from in-situ test and analysis indicate that the contaminant concentration ratio as initial one (C/C_0) increases as the radius ratio (r/R) increases from the injection well, and also increases as the depth ratio (z/H) increases from the top of contaminated area. The elapse time needed to attain 50% and 90% clean up level (t_{50}, t_{90}) increases as the radius ratio (r/R) and the depth ratio (z/H) increase. As above results, the procedure of soil flushing in contaminated area using vertical drains makes progress from the top of injection well to the bottom of extraction well.

Keywords : In situ, Remediation, Contaminated area, Vertical drains, Contaminant concentration ratio, Elapsed time.

I. 서 론

우리나라는 인구에 비해 협소한 국토면적으로 인하여 해마다 약 1만여 ha의 농경지가 주택, 도로, 산업단지 등으로 전용되고 있고 앞으로도 이와 같은 현상은 지속될 것으로 전망하고 있다. 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.[1)]

선진외국에서는 오염지반의 복원에 많은 공법들이 개발되어 실용화되고 있다. 우리나라에서도 농업기반공사에서 시행한 문현지구 토양오염복원사업이 대규모 오염지반 정화의 효시로 보고되고 있다.[7)] 오염지반 현장복원공법에는 미생물정화, 진공/공기추출, 토양세척 공법 등이 있다. 이들 공법은

* 농업기반공사 농어촌연구원
** 서울대학교 농업생명과학대학 조경·지역시스템공학부
* Corresponding author. Tel.: +81-31-400-1782
Fax: +81-31-400-1611
E-mail address: hwlee@karico.co.kr

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. 미생물정화의 경우에도 오염지역 내로 영양소를 주입하는 데 어려움이 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.[3),4)]

본 연구에서는 Gabr 등(1996)이 유도하고 해석식을 도출해낸 지배방정식에 대하여 해를 구하는 전산프로그램을 개발하고 사례연구를 통해 연직배수재를 활용한 오염지반에서의 정화경로를 분석하고자한다.

Ⅱ. 공법개요

연직배수복원공법은 세립지반에 연직배수재를 설치하여 기존의 미생물정화공법, 진공추출공법, 토양세척공법 등의 효율을 증진시키는 것이다.

본 공법은 미국에서 1995년도부터 실내시험과 현장시험을 통하여 많은 연구가 수행되었다. 1995년에서 1997년까지 미국 버지니아대학에서 진공추출과 병행한 연직배수재의 투수특성에 관한 모델시험, 오염물질회수셀에 대한 대형시험 및 수치해석 모델 개발이 수행되었고, 1997년에는 오하이오 등지에서 두 차례의 현장적용시험이 수행되었다. 그리고 1998년에는 텍사스 오스틴대학에서 연직배수재 설치 간격 및 연직배수재와 화학물질의 반응성에 대한 연구가 수행되었다.[1)]

연직배수복원공법은 오염된 세립지반을 복원하는 경우에 조립지반에 많이 사용되고 있는 복원기술의 하나인 양수 및 처리공법(pumping and treatment system)과 유사한 시스템을 가진다. 본 공법은 Fig. 1과 같이 세립지반 내에서 세척수의 주입 또는 추출 지점과 오염토 또는 간극수 지점과의 이동시간을 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.

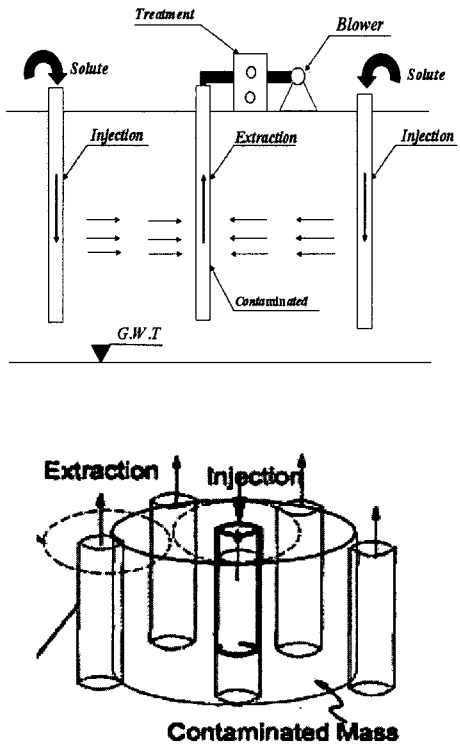


Fig. 1 Concept of using vertical drains for subsurface liquid retrieval

Ⅲ. 오염물질이동 모델

1. 개 요

오염물질이동 모델은 많은 학자들에 의하여 개발되었다. 그중 대표적인 것이 미국 EPA의 물, 공기, 불수용성 물질의 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, 상용화에 성공한 MODFLOW 등이 있다. Gabr M. A 등(1996)와 연직배수재를 이용한 오염지반의 정화촉진모델을 개발하였으며, Collazos (2003) 및 Bowders 등(2005)은 연직배수재를 오염지반에 설치하여 오염지반 정화촉진 효과를 분석하였다.

2. 지배방정식 및 해석해

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 모염물질의 이동은 다음과 같이 이류-분산 및 흡착에 의해 설명할 수 있다.[5),6)]

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

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_d는 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, ρ_b: 흙의 용적밀도

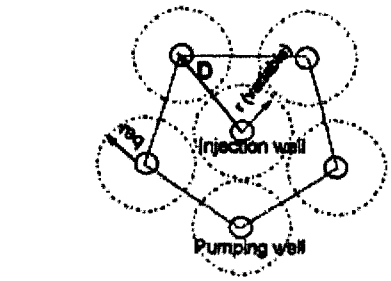
K_d: 흙입자와 용액의 평형분포계수

n: 간극률

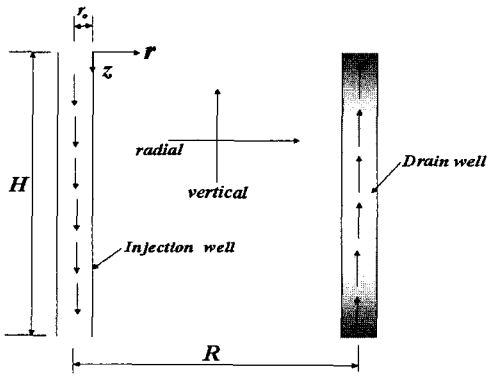
흙 입자의 간극률을 고려하고 식 (2)을 식 (1)에 대입하여 시간변화에 따른 오염농도변화량을 정리하면 다음과 같다.[4),6)]

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

연직배수재에 의한 오염지반 정화는 식 (3)에서 임의의 방향 ξ을 Fig. 2에서 보는바와 같이 연직



(a)



(b)

Fig. 2 Schematic diagram of a vertical drain system: (a) cross-section with circular boundary and (b) seepage profile.

방향 z와 방사선방향 r로 생각할 수 있다.[8] 따라서 오염물질의 이류, 분산 및 흡착에 대해 연직 및 방사선 방향의 식을 유도하여 식 (3)에 대입하면 식 (4)와 같다.

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

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

Gabr 등(1996)은 식 (4)의 시간에 변화에 따른 오염농도 변화량을 여러 가지 수학적 처리와 방사성 및 연직 방향의 정화도에 대한 중첩의 원리를 이용하여 식 (5)와 같이 error 및 complementary error function[9]으로 유도하였다.

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

여기서, $erf(x)$: x 값에 대한 error function 값

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

$erfc(x)$: x 값에 대한 complementary error function 값

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

T_z, P_z, N_r, M_r 은 치환계수로 다음과 같이 나타낸다.

$$T_z=\frac{u_z t}{nR_d z} \quad \cdots\cdots (6)$$

$$P_z=\frac{z}{\alpha_z} \quad \cdots\cdots (7)$$

$$N_r=\frac{\alpha_r r^2}{nH(r-r_0)^2} \quad \cdots\cdots (8)$$

$$M_r=\frac{Q_0 t}{(r-r_0)^3} \quad \cdots\cdots (9)$$

여기서, C_0: 초기오염농도

Q_0: 추출량 (m^3/h)

α_r, α_z: 방사성 및 연직방향의 분산계수 (m)

r_0: 주입정의 반경 (m)

Ⅳ. 전산프로그램의 개발

1. 전산프로그램의 개발

식 (5)의 error function(erf) 및 complementary error function(erfc) 값은 보통 series 분석으로 값을 구하지만 series는 매개변수의 범위나 적용하는 차수에 따라 값의 변화가 커 안정적인 값을 구하는데 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 안정적인 erf(x) 및 erfc(x) 값을 구하고 많은 양의 분석을 하기위하여 전산프로그램 FLUSH을 개발하였다. Fig. 3은 개발된 프로그램의 흐름도이고 사용된 Language는 Visual C++(6.0)이다.

본 프로그램의 입력자료는 Table 1에서 보는바와 같이 오염지반의 토질자료, 오염물질의 이류, 분산 및 흡착에 관련된 자료와 추출정의 용량, 주입정의 반경 등이다. 또한 오염물질 분포자료와 분석을 위한 분할 수 및 수렴조건 등을 입력한다. 본 전산프로그램 FLUSH로 분석된 결과는 임의의 위치(깊이, 반경)에서의 시간별 초기오염농도에 대한 오염농도비(C/C_0)이다.

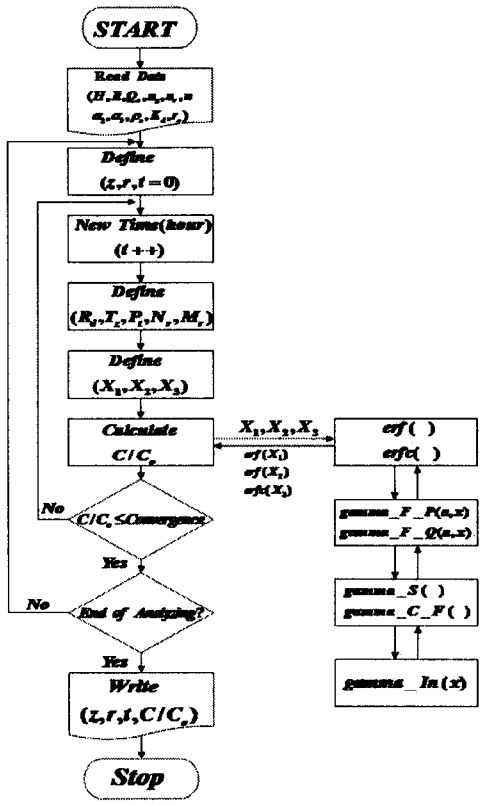


Fig. 3 Flow chart for FLUSH

2. FLUSH 모형의 적용

본 연구에서 개발한 전산프로그램의 적용성을 검토하기 위하여 Bowders 등(1995)이 실험한 모형에 적용하였다. Bowders 등은 연직배수복원공법에 의한 오염물질의 제거효과를 살펴보기 위하여 길이 0.78 m, 너비와 두께가 0.67 m인 상자 시험모형 내에 중앙에 1개의 주입정과 방사성 방향으로 5개의 추출정을 설치하였다. 주입정과 추출정은 폭 32 mm, 두께 3 mm의 배수재를 설치하고, 주입정에는 13.8 kPa의 공기압을 가하고 추출정에는 9.8 kPa의 진공압을 가하였다. 주입정과 추출정의 흐름속도는 상호 평형을 이루도록 하였다. 시험에 사용된 흙에 1000 mg/l의 농도를 가진 염화나트륨 용액으로 포화시켰다. 중앙의 주입정을 통하여 수돗물을 주입하고 외측의 추출정을 통하여 오염수를 추출하였다.[11] 추출된 오염수에서 염소의 농도를 측정한 실측값과 모형에서 사용된 흙과 오염원의 물성치를 전산모형 FLUSH에 입력하여 분석한 분석치를 대상으로 Fig. 4와 같은 초기오염농도에 대한 농도비(C/Co)를 도시하였다.

Table 1 Description of input data for FLUSH

Classification	Parameter	Description
Soil data	n	Porosity
	ρ_s	Bulk density (kg/m^3)
Solute data	u_r	Seepage velocity in the radial direction (m/h)
	u_z	Seepage velocity in the vertical direction (m/h)
	α_r	Radial dispersity (m)
	α_z	Vertical dispersity (m)
	K_d	Equilibrium distribution coefficient (m^3/kg)
Well and sectional data	Q_0	Total well discharge rate (m^3/h)
	r_o	Radius of injection well (m)
	H	Thickness of contaminated area (m)
	R	Distance between injection and extraction well (m)
	Nsr	Number of slice in radial direction
	Nsz	Number of slice in vertical direction
Convergence	Conv	Convergence value between C and Co

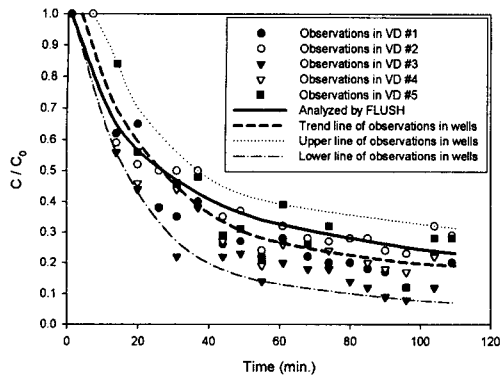


Fig. 4 Observed and analyzed contaminant concentration ratio (C/Co)

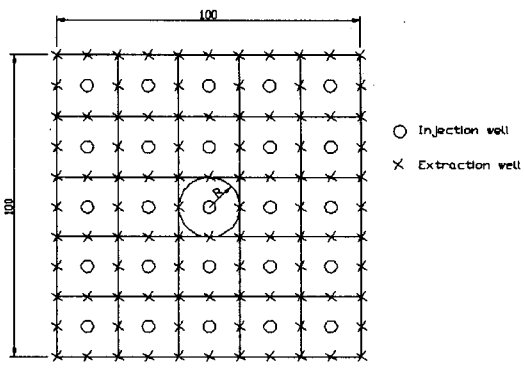


Fig. 5 Wells on the contaminated area in the case study

그림에서 보는바와 같이 실측한 5개 추출정의 농도비(C/Co)는 시간이 경과함에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있다. 전산모형 FLUSH로 분석한 결과는 5개의 추출정 값들의 분포내에 있고 이들 값들의 추세선과 비교하여 정화정도가 50% 진행되는 시점까지는 정화진행이 과대평가되어 추세선보다 아래 즉 실측값들의 하한선에 근접하고 있다. 반면 정화정도가 50% 이상의 시점에서는 분석치가 실측값들의 추세선과 상한선 중간정도에 분포하고 있어 정화진행이 과소평가되어 개발한 FLUSH 모형이 토양오염정화 분석 및 설계, 현장에 적용하는 데는 무리가 없을 것으로 판단된다.

V. 사례연구

1. 사례지구

본 연구에서는 오염지반에 설치한 연직배수재에 의한 오염정화 촉진효율을 분석하기 위해 개발한 모형을 다음 사례지구에 적용하였다.

사례지구

1) 오염지역: 정사각형 100 m x 100 m (1 ha), 오염층 두께: 10 m.
2) 연직배수재 배치: 오염된 구역을 Fig. 5와 같이 한변이 20 m인 정사각형 격자로 나누고 격자 중앙에 주입정, 외곽에 추출정을 배치하였다.

Table 2 Input data to FLUSH for case study site

Parameter	Values for Case Study	Parameter	Values for Case Study
n	0.25	Q_0	*1 m^3/h
ρ_s	*2,000 kg/m^3	r_o	0.1 m
u_r	*0.005 m/h	H	10 m
u_z	*0.005 m/h	R	10 m
α_r	*2 m	Nsr	4
α_z	*1 m	Nsz	4
K_d	*1 x 10^{-5} m^3/kg	Conv	0.05

※ Reference: Gabr et al. (1996)

위 사례지구로부터 FLUSH 입력자료를 작성하여 Table 2에 나타냈다.

2. 분석결과

본 연구에서는 Fig. 5의 한 구역에서 방사선 및 깊이 방향을 4등분하여 각 위치에서 시간변화에 따

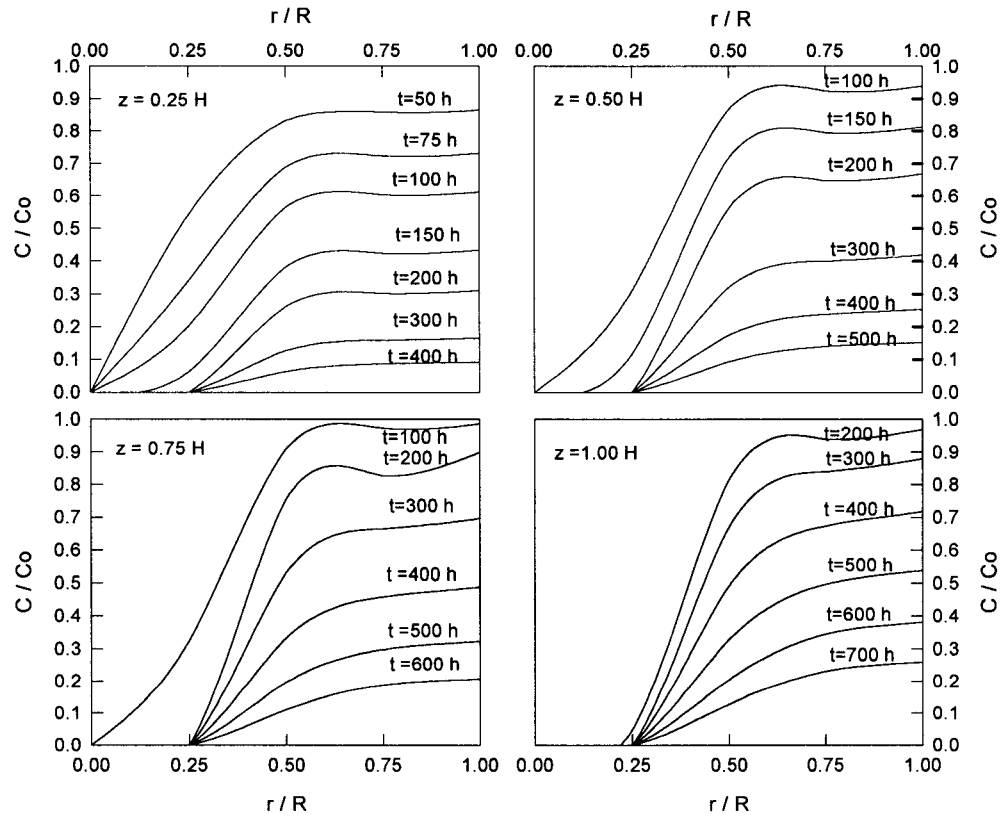


Fig. 6 Relative contaminant concentration as radius and time in various depths

른 초기농도에 대한 오염농도비를 Fig. 6 및 7에 나타냈다. Fig. 6 및 7에서 보는바와 같이 정화에 소요되는 시간은 주입정에서 추출정 방향으로 갈수록, 오염층의 상부에서 하부로 갈수록 길게 나타났고 오염농도비도 높게 나타났다. 또한 이것으로 보아 정화경로는 시간이 경과함에 따라 주입정에서 추출정의 방사선 방향과 오염층의 상부에서 연직하부방향으로 진행되는 것으로 나타났다.

Table 3은 각 위치에서 오염정화가 50% 와 90% 완료되었을 때 소요시간(t_{50}, t_{90})을 나타냈으며, Fig. 8에 지체시간에 대한 등시간선을 도시하였다. Table 3과 Fig. 8에서 보는바와 같이 주입정 부근의 지표에서 추출정 바닥 방향으로 갈수록 정화에 소요되는 시간이 길게 나타났다.

Table 3 Elapsed time(hour, t_{50}, t_{90}) as relative contaminant concentration 50% and 90%

[unit: hour]

Depth \ Radius		r/R			
		0.25	0.50	0.75	1.00
z/H	0.25	55	116	126	129
		130	**334**	**376**	**386**
	0.50	68	222	256	264
		156	**409**	**564**	**582**
	0.75	69	315	373	393
		166	**620**	**732**	**758**
	1.00	69	396	498	523
		167	**738**	**892**	**927**

※ upside: t_{50}, downside: t_{90}

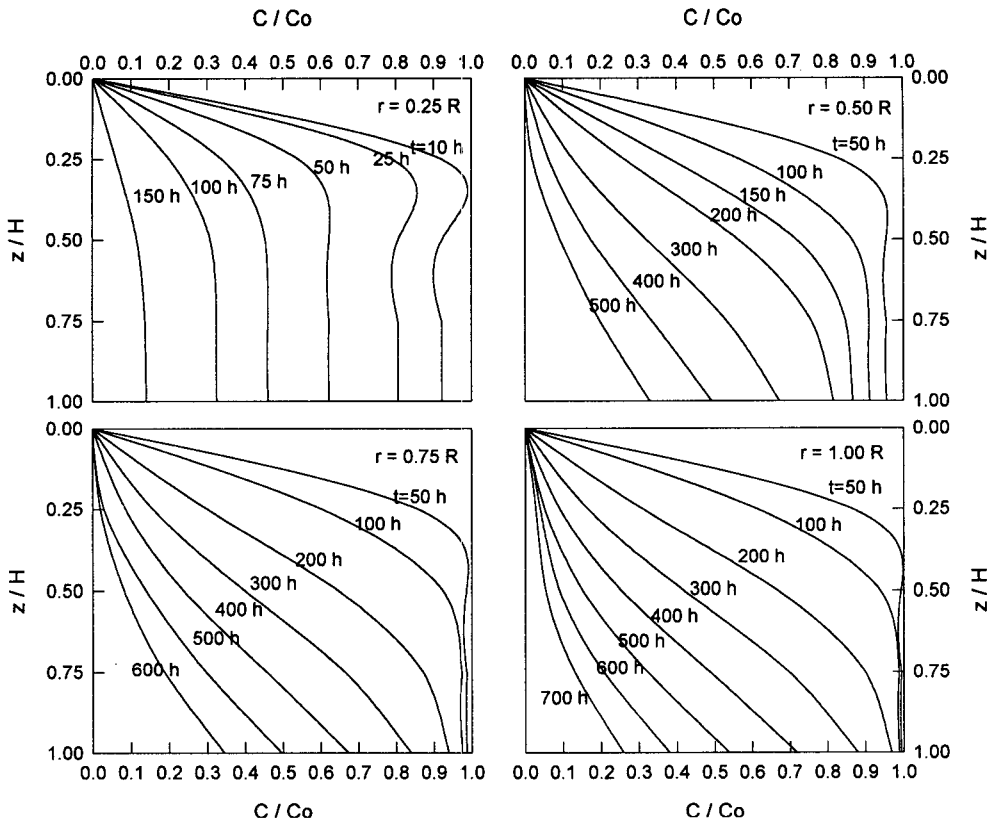
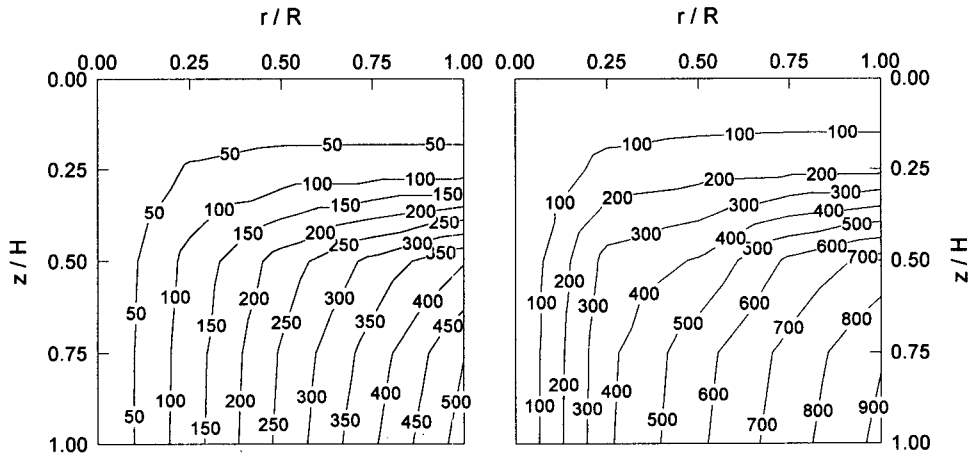


Fig. 7 Relative contaminant concentration as depth and time in various radius



(a) t_{50} (b) t_{90}

Fig. 8 Equivalent time line of elapsed hour (a) t_{50}, (b) t_{90}

Ⅵ. 결 론

오염물질의 시간적, 공간적 농도변화는 오염용매의 수리경사에 의한 이류현상(advection)과 농도경사에 의한 분산작용(dispersion), 오염물질의 흙입자의 표면에 흡착하는 정도에 좌우된다(Gabr et al., 1996; Li et al., 2000) Gabr 등(1996)은 연직배수재가 설치된 오염지반에서 오염물질의 이동에 대한 지배방정식을 설정하고 이 식으로부터 공간적, 시간적 변화에 따른 오염농도의 변화량을 구하는 해석식을 유도하였다.

본 연구에서는 Gabr 등이 유도한 해석식의 해를 구하는 전산프로그램을 개발하고, 오염지반 1 ha (100 m x 100 m) 에서 한 변이 20 m인 정사각형 격자로 분할하고 각 격자의 중앙에 주입정, 외곽에 추출정을 설치한 가상의 사례지구에서 각 격자의 주입정에서 방사선 및 깊이방향을 4 등분한 각 위치에서 시간변화에 따른 오염농도 변화량과 정화가 50% 및 90% 완료되는 소요시간을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 연직배수재가 설치된 오염지반에서의 정화가 진행되는 동안 주입정에서 추출정 방향으로 r/R 이 증가할수록, 오염층의 상부에서 하부 방향으로 z/H가 증가할수록 오염농도가 높게 나타났다.

2. 오염지반이 50% 및 90% 정화에 소요되는 시간은 r/R 및 z/H 가 증가할수록 길게 나타났다.

3. 이상의 결과 연직배수재가 설치된 오염지반의 정화경로는 시간이 경과함에 따라 주입정 상부의 지표부근에서부터 시작하여 추출정 바닥 방향으로 진행되는 것으로 나타났다.

References

1. Chung, H. I., Lee, Y. S., and Woo, J. Y., 1995, A Study on remedial technology for contaminated soil and groundwater, KICT/94-GE-1101-2, p.215 (in Korean)
2. 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.
3. Collazos, O. M., 2003 "Soil Vapor Extraction Enhanced with Prefabricated Vertical Drains," *Dissertation, Civil & Environmental Engineering, University of Missouri-Columbia*, USA, p.205
4. 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
5. Kim, S. S. and Han, S. C., 2003, Electrokinetic Ground Remediation Technology, Goomi Book Company, p.219. (in Korean)
6. 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.
7. Lim, C. S., 2003, "The Restoration of Oil Contaminated Site in Munhyeon District", *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineer*, Vol.45, No.5, September, pp.28-38. (in Korean)
8. 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.
9. M. A. Marino, 1974, "Models of Dispersion in a Granular Medium", *Journal of Hydrology*, 23, pp.313-318.
10. Ministry of Environment, 2004, The Development of Hybrid Electrokinetic Remediation Technique on Shooting Range Soils Contaminated by Heavy Metals, Hanyang Univ., Chapter 3.3, pp.1-29. (in Korean)