

비포화 토양층 내 유기 용매의 이류 이동에 대한 다상 모델링

이근상*

경기대학교 토목환경공학부

Multiphase Modeling on the Convective Transport of an Organic Solvent through Unsaturated Soils

Kun Sang Lee*

Div. of Civil and Environmental Eng., Kyonggi University

ABSTRACT

In-situ photolysis is one of the most promising ways to clean up a soil contaminated with 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-*p*-dioxin (TCDD). This study focuses on the mathematical description and model development of the convective upward transport of an organic solvent driven by evaporation and photodecomposition at the surface as the major transport mechanism in the clean up process. A finite-element-based numerical model was proposed to incorporate effects of multiphase flow on the distribution of each fluid, gravity as a driving force, and the use of van Genutchen equation for more accurate description of *k-S-p* relations. This paper presents results of extensive numerical calculations conducted to investigate the various parameters that play a role in the solvent migration through a laboratory-scale unsaturated soil column. The numerical results indicate that gravity affects significantly on the fluids distribution and evaporation for highly permeable soils. The soil texture has a profound influence on the fluid saturation profile during evaporation process. The amount of solvent convective motion increases with increasing evaporation rates and decreasing initial water saturation. Simulations conducted in this study have shown that the developed model is very useful in analyzing the effects of various parameters on the convective migration of an organic solvent in the soil environments.

Key words: convective transport, multiphase flow, van Genutchen equation, photolysis, 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-*p*-dioxin (TCDD)

요 약 문

2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-*p*-dioxin(TCDD)로 오염된 토양의 현장 광분해 정화 과정에서 가장 중요한 이동 메커니즘인 지표에서의 증발 및 광분해에 의한 유기 용매의 이류 상방향 이동에 대한 수식화와 모델 개발을 수행하였다. 각 유체 분포에 대한 다상 유동 효과, 구동력으로서의 중력, *k-S-p* 관계의 정확한 묘사를 위한 van Genutchen 방정식을 포함한 유한요소법 기반의 수치 모델을 제안하였다. 실험실 규모의 비포화 토양 컬럼 내 용매 이동에 중요한 영향을 미치는 인자들을 조사하기 위하여 수행한 계산의 결과들을 제시하였다. 중력은 고투수성 토양의 유체 분포와 증발에 상당한 영향을 미쳤다. 토양의 종류 또한 증발 과정 중 유체 포화도 분포에 큰 영향을 미친다. 용매의 이류 이동량은 증발량이 증가할수록 초기 물 포화도가 감소할수록 증가하였다. 본 연구에서 수행한 시뮬레이션은 개발된 모델이 토양 환경 내에서 유기 용매의 이류 이동에 영향을 미치는 다양한 인자들의 영향을 분석하는데 유용함을 보여준다.

주제어 : 이류 이동, 다상유동, van Genutchen 방정식, 광분해, TCDD

*Corresponding author : kslee@kyonggi.ac.kr

원고접수일 : 2003. 12. 9 게재승인일 : 2004. 2. 26

질의 및 토의 : 2004. 9. 30 까지

1. 서 론

2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-*p*-dioxin(TCDD)로 오염된 토양에 대하여 기존의 고온 열분해나 화학적 처리 대신 광분해 특성을 이용한 현장 토양정화법이 주목을 받고 있다^{1,3)}. 토양 표면에 저독성 유기 용매를 살포하여 토양 표면에 밀착되어 있는 TCDD를 제거한 후 지표로 이동시켜 자외선으로 광분해시키면 저독성 분해 물질로 변형시킬 수 있다.

광분해법에 대한 이론적 통찰을 얻기 위하여 Dougherty *et al.*³⁾은 현장 토양 정화 중 균일 매체 내에서 유기용매의 이동에 관한 실험적, 수치적 연구를 수행하였다. 이 연구 결과에 따르면 지표면에서의 증발에 따른 토양 내 유기 용매의 이류 상방향 이동이 TCDD의 가장 중요한 전달 메커니즘으로 밝혀졌다. 이상득과 정일현⁴⁾, 이상득 등⁵⁾은 서로 다른 크기의 입자를 혼합하여 만든 단순 비균일 매체를 대상으로 물의 증발에 관한 실험을 수행하였다. 이를 통하여 비포화층 내 2상 유체 유동에 영향을 미치는 인자들을 조사하였다. Lee^{6,7)}는 물이나 용매의 이동에 영향을 미칠 수 있는 비균일 토양의 물리화학적 성질을 반영하기 위하여 Brooks-Corey 모델로 비포화층을 표현하고 이류 모델을 사용하여 물의 이동 또는 용매 전달을 시뮬레이션하였다.

본 연구에서는 TCDD의 제거의 유용한 유기 용매로 알려진 tetradecane의 비포화 토양층 내 이류 이동에 대한 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 기존의 연구들이 유기 용매를 물과 동일한 습윤 유체로 취급하여 2상 유동 모델을 적용한 것과는 달리 별도의 상으로 취급하여 3상으로 모델링하였다. 수치 모델을 대표적인 토양인 모래, 롬, 실트, 점토층에 적용하여 중력, 토양의 종류, 지표면에서의 증발량, 초기 포화도 분포가 유기 용매의 이류 이동현상에 미치는 영향을 검토하고자 한다.

2. 수식화

비포화 토양층 내 유체 이동에 관한 물리적 현상을 수식화하기 위하여 유체 속도와 포화도에 관한 편미분 방정식을 유도하였다. 기존의 연구에서는 수식화 및 계산 과정에서 복잡성을 피하기 위하여 중요도가 떨어지는 일부 전달 메커니즘을 생략한 경우가 많았다. 이러한 가정에는 유기 용매를 물과 동일한 습윤 유체로 취급, 중력의 효과 무시, 상대투수도 및 모세관압에 대한 단순 관계식 적용 등을 들 수 있다. Dougherty *et al.*³⁾은 중력의 효

과를 무시하였고 유기 용매를 물과 동일한 습윤 유체로 취급하여 2상 유동 방정식을 제안하고 이를 균일 매체에 적용한 바 있다. Lee⁷⁾는 실제 용매의 이동에 영향을 미칠 수 있는 토양의 물리화학적 성질을 반영하기 위하여 가장 단순한 상대투수도-물 포화도-모세관압(*k*-*S*-*p*) 관계인 Brooks-Corey 모델을 이용한 이류 이동 모델을 사용하였다.

본 연구에서는 이러한 가정들을 제거함으로써 이전 모델의 한계를 극복하고자 하였다. 실제 유기 용매가 부분 포화된 토양층에 살포되면 기체상, 물상, 유기용매상 등 3상이 되므로 다공성 매체 내 3상 유동에 관한 방정식을 이용하였다. 또한 수직 방향의 유체 유동을 정확하게 계산하기 위하여 중력항을 구동력에 포함시켰다. *k*-*S*-*p* 관계를 좀더 정확하게 표현하기 위하여 van Genuchten 모델에 바탕을 상관 관계식을 도입하였다.

2.1. 유동 방정식

각 유체상의 포화도 분포를 계산하기 위하여 유체상에 대한 연속방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다⁸⁾.

$$\frac{\partial(nS_{\alpha})}{\partial t} + \nabla \cdot (nS_{\alpha}v_{\alpha}) = 0 \quad (1)$$

여기에서 n 은 공극률, S_{α} 는 α 상 유체의 포화도, v_{α} 는 α 상 유체의 평균 속도[Lt^{-1}]이다. 본 계산에서 고려하는 유체상은 물(w), 기체(g), 용매(n)이다.

식 (1)에서 정의된 유체 속도 v_{α} 는 다상 유동에 대한 Darcy 법칙으로 나타낼 수 있다.

$$v_{\alpha} = -\frac{kk_{\gamma\alpha}}{nS_{\alpha}\mu_{\alpha}}(\nabla p_{\alpha} - \gamma_{\alpha}\nabla z) \quad (2)$$

여기에서 p_{α} 는 α 상 유체의 압력[$ML^{-1}t^{-2}$], γ_{α} 는 유체 비중($\rho_{\alpha}g$), k 는 고유투수도 텐서[L^2], $k_{\gamma\alpha}$ 는 상대투수도이다. 식 (1)과 (2)를 결합하면 비포화 다공성 매체 내 다상 유동에 관한 편미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial(nS_{\alpha})}{\partial t} + \nabla \cdot \left\{ -\frac{kk_{\gamma\alpha}}{\mu_{\alpha}}(\nabla p_{\alpha} - \gamma_{\alpha}\nabla z) \right\} = 0 \quad (3)$$

2.2. 수리특성 모델

식 (3)을 이용하기 위해서는 유체의 상대투수도와 모세관압을 포화도의 함수로 표현해야 한다. 모세관압을 평가하기 위하여 포화도의 함수로 일반화된 van Genuchten 관계식⁹⁾을 사용하여 토양의 불균일도를 고려할 수 있는

모델을 적용하였다. van Genuchten 모델에 따르면 모세관 압 [ML⁻¹t⁻¹]는 유효투수도의 함수로서 다음과 같이 나타난다.

$$p_c = \frac{\rho_{\omega} g \left(S_e^{\frac{1}{m}} - 1 \right)^{\frac{1}{n}}}{a} \quad (4)$$

여기에서 a 는 크기인자, n 는 공극 크기분포를 나타내는 인자, $m = 1 - \frac{1}{n}$, S_e 는 유효공극률이다.

Mualem¹⁰⁾의 통계 모델에 van Genuchten 관계식을 대입하면 물, 기체, 유기용매의 상대투수도 k_{rw} , k_{rg} , k_{rm} 은 다음과 같다.

$$k_{rw} = S_{ew}^{\zeta} \left[\left(1 - S_{wt}^m \right) - \left(1 - S_w^m \right)^m \right] \quad (5)$$

$$k_{rg} = S_{eg}^{\phi} \left[\left\{ 1 - (1 - S_g)^m \right\}^m - \left\{ 1 - (1 - S_{gt})^m \right\}^m \right] \quad (6)$$

$$k_{rm} = S_{em}^{\xi} \left[\left\{ 1 - (S_n + S_{nwt})^m \right\}^m - \left\{ 1 - (1 - S_g - S_{nwt})^m \right\}^m \right] \quad (7)$$

여기에서 ζ, ϕ, ξ 는 물, 기체, 유기용매에 대한 공극 연결도 인자로서 보통 0.5로 가정하며¹¹⁾ 하첨자 t 는 별도로 계산된 피포획량을 나타낸다.

3. 시뮬레이션 결과 및 해석

3.1. 수치 모델

유동 방정식은 상대투수도-포화도-모세관압 관계와 상호 종속적이며 비선형이므로 표준 유한요소법을 이용한 수치 모델을 이용하여 해를 계산하였다. Lee⁷⁾가 사용하였던 모델을 바탕으로 3상 유동, 중력, 수리 특성 관계식 등을 수정 보완하였다. 이 모델의 수치해는 Dougherty *et al.*³⁾의 실험 결과치와의 정성적 비교 검증 과정에서 포화도의 분포 양상, 범위, 시간에 따른 변화 등이 유사함을 보여준 바 있다.

태양광 노출 실험을 모사하기 위하여 깊이가 1.0 m인 토양 컬럼의 전 영역에 대하여 일정한 초기 유체 포화도를 가정하였다. 이후 중력의 영향 하에서 일정 시간동안 배수가 일어나도록 한 뒤 평형 상태에 이르게 되면 각 유체의 포화도를 계산하였다. 토양 종류에 따라 평형 상태에 이르는 시간이 다르므로 이를 반영하여 중력 배수 시간을 정하였다. 이후 지표면에서 일정한 총 증발 속도

Table 1. Physical Properties of Fluids Used in the Simulations

	water	gas	tetradecane
viscosity (poise)	0.01	0.0002	0.021
density (g/cm ³)	0.9982	0.00129	0.763
surface tension (dyne/cm)	$\sigma_{gw} = 72.75, \sigma_{mw} = 37.3, \sigma_{gm} = 26.56$		

Table 2. Hydraulic Properties of Soils Used in the Simulations

	n	S_{wr}	S_{gr}	a (cm ⁻¹)	η	k (cm ²)	K (cm/sec)
sand	0.43	0.105	0.1	0.145	2.68	8.42×10^{-6}	8.24×10^{-3}
loam	0.43	0.181	0.1	0.036	1.56	2.95×10^{-7}	2.88×10^{-4}
silt	0.46	0.074	0.1	0.016	1.37	7.09×10^{-8}	6.94×10^{-5}
clay	0.38	0.179	0.1	0.008	1.09	5.67×10^{-8}	5.56×10^{-5}

로 5시간 동안 증발이 일어나도록 하였다. 시뮬레이션에 사용된 용매는 Dougherty *et al.*³⁾이 제안한 tetradecane (C₁₄H₃₀)이다. 용매 및 기타 유체의 중요한 물성은 Lide¹²⁾의 문헌을 참고하였으며 Table 1에 정리하였다.

모래, 롬, 실트, 점토 등 4종의 토양을 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다. Table 2는 계산에 사용된 토양의 수리 특성을 나타내는 인자들로서 Carsel and Parrish¹³⁾가 발표한 논문의 자료를 이용하였다.

3.2. 초기 및 경계조건

유동 방정식을 풀기 위해서는 적절한 초기 및 경계조건을 알고 있어야 한다. 본 연구에서는 실험실 규모의 1차원 컬럼 시험을 시뮬레이션하기 위하여 초기 및 경계조건을 설정하였다.

초기조건은 일정한 용매, 물, 기체 포화도를 가정하였다.

$$S_w(x, 0) = S_{wo} \quad (8)$$

$$S_n(x, 0) = S_{no} \quad (9)$$

$$S_g(x, 0) = 1 - S_{wo} - S_{no} \quad (10)$$

토양 컬럼의 하부에서는 모든 유체에 대하여 비유동 경계조건을 설정하였다.

$$v_w(l, t) = v_g(l, t) = v_n(l, t) = 0 \quad (11)$$

컬럼의 상부 즉 지표면에서는 유동 단계별로 경계조건을 설정하였다. 중력에 의한 배수단계에서는 상부 경계에서 기체 압력이 대기압과 같다고 가정하였다. 증발 단계에서는 총증발량을 기반으로 즉 일정한 총증발량을 가정하고 지표면에서 물 포화도의 함수로 결정되는 유동도

$\lambda_\alpha = (kk_{r\alpha})/(\mu_\alpha)$ [$M^{-1}Lt$]에 의해 각 유체의 증발량을 결정하였다. 단위 면적당 총증발량이 v_t [Lt^{-1}]일 때 개별 유체 α 의 배출량 v_α [Lt^{-1}]는

$$v_\alpha = f_\alpha v_t \tag{12}$$

로 결정된다. 여기에서 f_α 는 각 유체의 유동도에 의해 다음과 같이 정의되는 분별유동 함수이다.

$$f_\alpha = \frac{\lambda_\alpha}{\lambda_w + \lambda_n + \lambda_g} \tag{13}$$

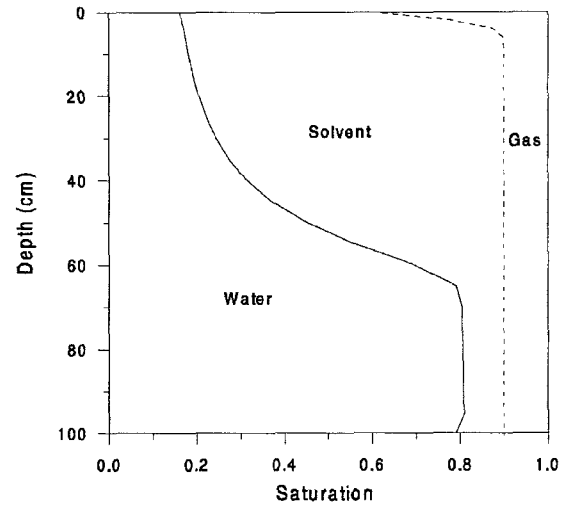
토양 종류별로 각 유동 단계의 경과 시간 및 경계 조건을 Table 3에 정리하였다.

Table 3. Boundary Conditions and Their Duration during Major Steps in the Simulations

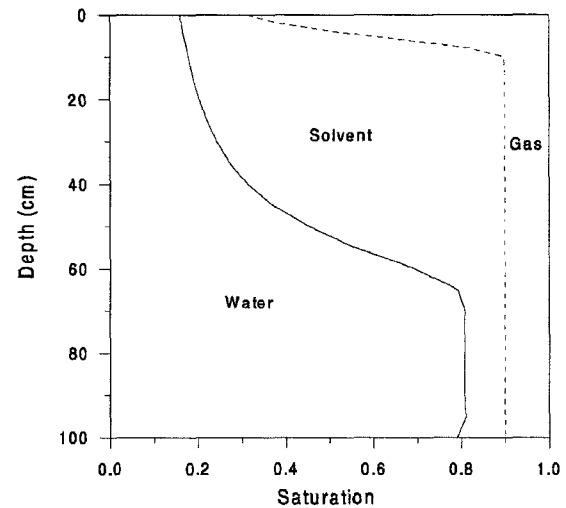
	gravity drainage			evaporation		
	boundary conditions		duration (hrs)	boundary conditions		duration (hrs)
	surface	bottom		surface	bottom	
sand	$p_g = p_{atm}$	$u_w = 0$	4	$p_g = p_{atm}$	$u_w = 0$	5
loam		$u_g = 0$			$u_g = 0$	
silt		$u_n = 0$	$u_t = u_{t0}$		$u_g = 0$	
clay			$u_n = 0$		$u_t = 0$	

3.2. 결과 해석

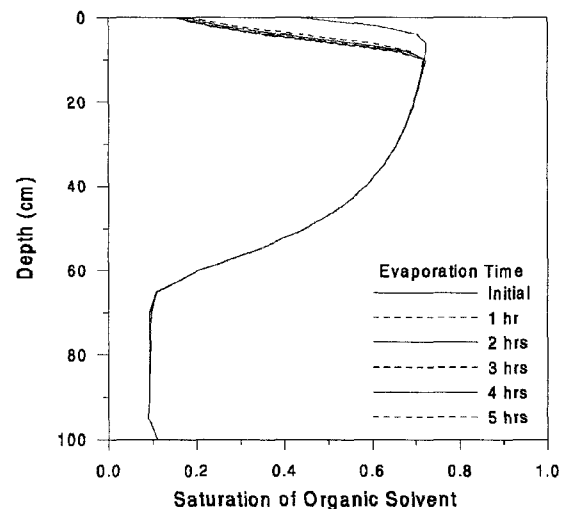
투수도와 중력의 영향이 가장 크게 나타나는 모래를 대상으로 중력 배수 및 증발에 따른 각 유체의 포화도를 계산하였다. 초기 물 포화도 0.5, 용매 포화도 0.4인 토양 컬럼에 대한 계산 결과를 Fig. 1에 제시하였다. 중력 배수 기간 중 밀도가 큰 물이 아래쪽으로 이동하여 하부의 물 포화도가 커짐에 따라 깊이 70 cm 이하 지점에서는 잔류 포화도 상태의 용매와 기체만이 존재하였다[Fig. 1(a)]. 반면에 상부에서는 용매의 포화도가 증가하였다. 증발이 시작됨에 따라 용매의 포화도는 급격히 감소하기 시작했고 기체의 포화도가 증가하였다. 중력배수에 따라 지표면의 물 포화도는 0.161로 낮아져 유동도가 매우 작아졌으므로 증발 과정에서 포화도가 0.159로 약간 감소하는데 그쳤다[Fig. 1(b)]. Fig. 1(c)에서 알 수 있듯이 대부분의 용매 증발은 증발 시작 후 1시간 이내에 발생하였다. 이후 지표면 인접 영역에서는 유동도가 큰 기체의 포화도가 커지므로 배출되는 유체의 대부분은 기체이고 깊이 10 cm 이하 지점에서는 용매의 포화도 변화량이 미미하였다. 본 논문에 제시되지 않은 예비 계산의 결과에 따르면 투수도가 큰 모래는 중력에 의한 물의 하방 이동으로 깊이 에 따른 초기포화도 분포의 변동이 컸으나 다른 토양의



(a) after gravity drainage



(b) after evaporation



(c) solvent saturation during evaporation

Fig. 1. Saturation profiles of fluids for sand ($S_{wo}=0.5$, $S_{no}=0.4$, $u_{evap} = 0.025 \text{ cm}^3/\text{cm}^2/\text{sec}$).

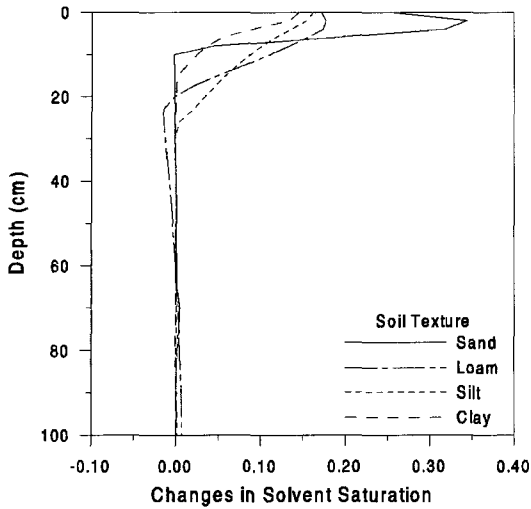


Fig. 2. Changes in solvent saturation for various soil columns ($S_{wo}=0.5, S_{no}=0.4, v_{evap}=0.0125 \text{ cm}^3/\text{cm}^2/\text{sec}$).

경우 포화도 변동량은 무시할 수 있을 정도로 작았다.

토양의 종류를 변화시키면서 증발에 따른 용매 포화도의 변화량을 계산하였다. 초기 물 포화도 0.5, 용매 포화도 0.4인 토양에 대하여 $0.0125 \text{ cm}^3/\text{cm}^2/\text{sec}$ 의 속도로 5 시간 동안 증발이 일어났을 때 중력 배수 종료 시점에서의 용매 포화도와 비교하였다. Fig. 2에 각 토양 별로 계산된 변화량을 제시하였다. 일부 토양의 경우 20 cm 이하 깊이에서 음의 변화량을 나타냈다. 이는 증발에 의한 상방 유동보다 중력에 의한 하방 유동의 영향이 더 크게 작용했음을 의미한다. 그림에서 할 수 있듯이 전 영역에 대한 용매 포화도의 변화량은 모래, 톱, 실트가 비슷하고 점토의 경우 다른 토양의 약 40%선으로 나타났다. 지표면 부근에서의 포화도 변화량은 모래, 톱, 실트, 점토의 순으로 나타났다. 증발로 인해 포화도 감소가 나타나는 깊이는 톱과 실트의 경우 크게 나타났고 모래와 점토는 지

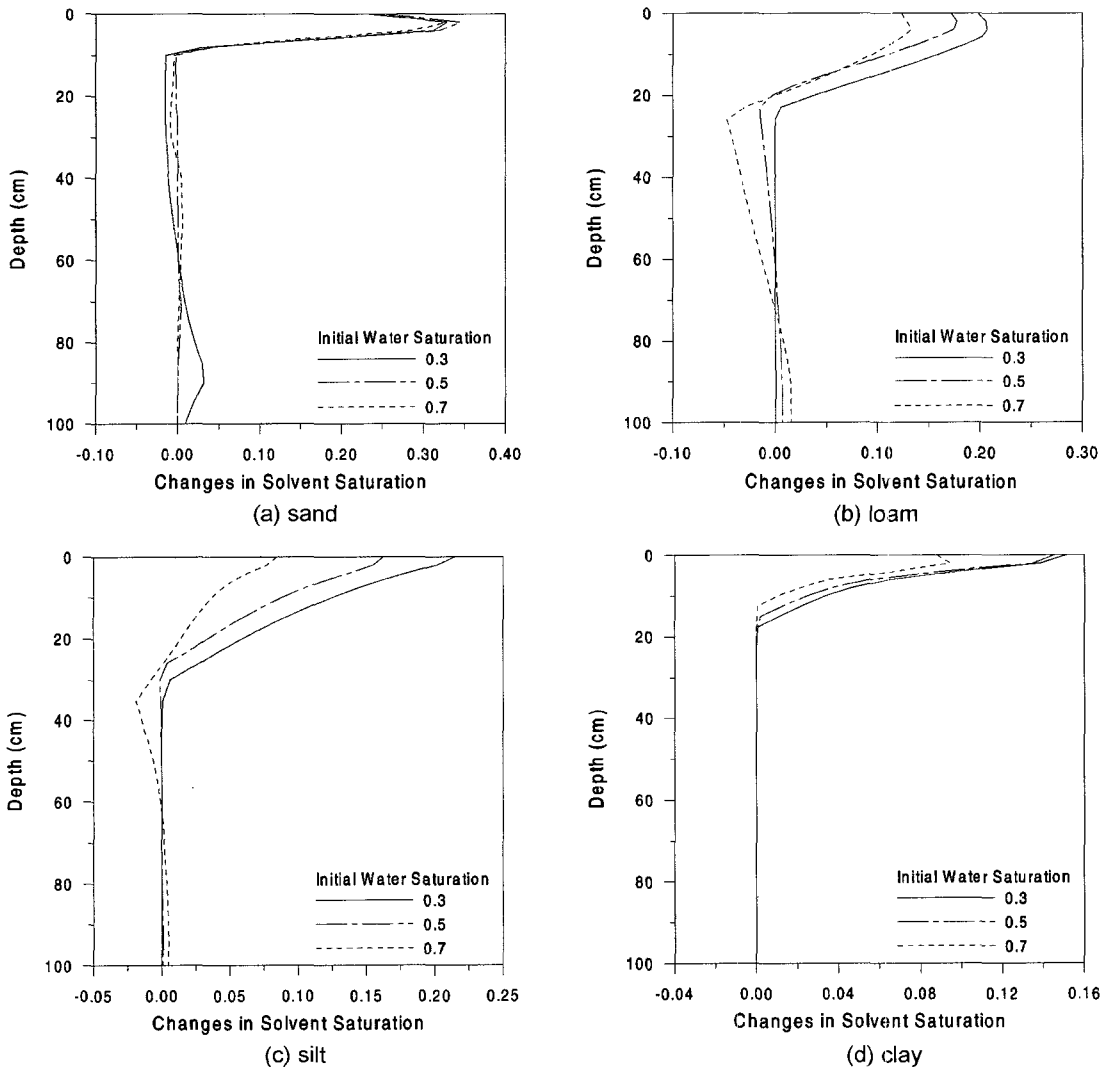


Fig. 3. Changes in solvent saturation for various soil columns of different initial water saturation ($v_{evap}=0.0125 \text{ cm}^3/\text{cm}^2/\text{sec}$).

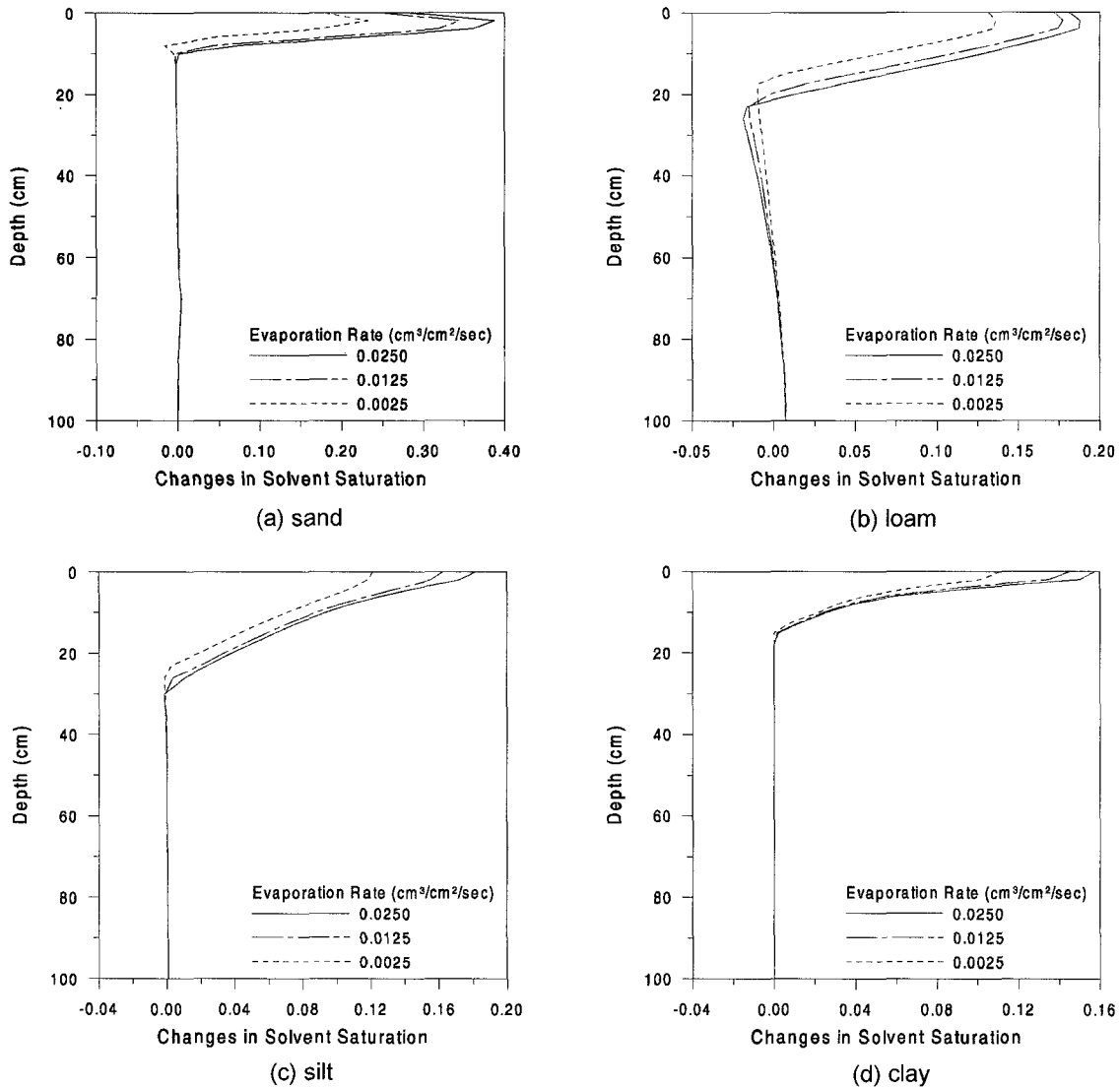


Fig. 4. Changes in solvent saturation for various soil columns exposed to different evaporation rate ($S_{wo} = 0.5, S_{no} = 0.4$).

표면 부근에 한정되었다. 즉 고투수성 토양의 경우 지표 부근에서의 이류 이동량이 크게 나타나며 투수성이 작아 지면서 지표 부근의 포화도 변화량은 감소하나 영향을 미치는 깊이는 커진다. 그러나 점토와 같은 초저투수성 토양은 깊은 지점에서의 용매 포화도 변화량이 무시할 수 있을 정도로 작게 나타났다.

기체 포화도가 0.1일 때 초기 물 포화도를 0.3, 0.5, 0.7로 변화시키면서 증발 현상을 시뮬레이션하여 용매 포화도의 변화량에 미치는 영향을 조사하였다. Fig 3에 따르면 초기 물 포화도가 작아질수록 즉 용매 포화도가 커질수록 증발량이 증가함을 알 수 있다. 이는 용매 포화도가 커질수록 상대투수도가 커져 유동성이 증가하기 때문이다. 따라서 건조한 토양에 대하여 용매를 살포하면 이

류 이동량을 증가시켜 정화 효율을 증대시킬 수 있다.

모래의 경우 증발 배수 기간 동안 물이 아래쪽으로 이동하여 지표면에서 물의 포화도가 작고 용매의 증발로 인한 영향이 미치는 깊이가 작아서 초기 물 포화도 차에 따른 포화도 변화량의 차가 크지 않다. 흙과 실트의 경우 변화량의 차이가 크게 나타났으며 점토의 경우 지표면에서만 차이가 크게 나타났다.

지표에서의 총증발량을 0.0025 $\text{cm}^3/\text{cm}^2/\text{sec}$ 에서 0.025 $\text{cm}^3/\text{cm}^2/\text{sec}$ 까지 변화시킬 때 토양 컬럼 내부에서의 포화도 변화량을 계산하였다. Fig. 4에서 총 증발량이 커질수록 용매 포화도의 변화량이 커짐을 알 수 있다. 특히 투수도가 큰 토양일수록 변화량 자체도 크고 증발 속도의 증가에 따른 변화량의 증가 정도도 크게 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 비포화 토양층 내에서 tetradecane의 이류 이동에 대한 메커니즘을 검토하여 3상 유동 방정식, 중력을 포함한 유체 유동의 구동력, van Genuchten 관계식에 바탕을 둔 수리 특성(k - S - p 관계)을 포함하는 수학적 모델을 개발하였다. 이를 바탕으로 유한요소법 기반의 수치 모델을 이용하여 토양 종류, 초기 포화도 분포, 지표면에서의 총증발량이 유기 용매의 이류 이동현상에 미치는 영향을 해석하였다.

계산의 결과에 따르면 투수도가 큰 토양층의 경우 중력에 의한 물의 하방 이동으로 깊이에 따른 초기포화도 분포의 변동이 크게 나타났으며 이로 인해 지표면에서 용매의 유동성을 증가되었다. 투수도가 작은 토양층의 경우 중력이 초기 포화도 분포에 미치는 영향은 미미했다. 토양의 종류에 따른 전 영역에서의 용매 포화도 변화량은 모래, 롬, 실트가 비슷하고 점토는 작았으며 지표면 부근에서의 포화도 변화량은 모래, 롬, 실트, 점토의 순으로 나타났다. 증발로 인해 포화도 감소가 나타나는 깊이는 롬과 실트의 경우 크게 나타났고 모래와 점토는 지표면 부근에 한정되었다. 초기 물 포화도가 작아질수록 지표면에서 용매의 유동성이 커짐에 따라 증발량이 증가하였다. 지표면에서의 총 증발량이 커질수록 용매 포화도의 변화량이 증가하였다. 투수도가 큰 토양일수록 변화량 자체도 크고 증발 속도의 증가에 따른 변화량의 증가 정도도 크게 나타났다.

참 고 문 헌

1. LaGrega, M.D., Buckingham, P.L., and Evans, J.C., Hazardous Waste Management, 2nd Edition, McGraw-Hill, Boston (2001).
2. Riser-Roberts, E., Remediation of Petroleum Contaminated Soils: Biological, Physical, and Chemical Processes, Lewis, Boca Raton (1998).
3. Dougherty, E.J., McPeters A.L., Overcast M.R., and Carbonell R.G., "Theoretical Analysis of a Method for In Situ Decontamination of Soil Containing 2,3,7,8-Tetrachlorodibenzo-p-Dioxin", *Environ. Sci. Tech.*, **27**(3), pp. 505-515 (1993).
4. 이상득, 정일현, "흙의 입경조성과 함수율이 토양의 증발 Parameter에 미치는 영향", *대한환경공학회지*, **19**(1), pp. 1-8 (1997).
5. 이상득, 박성천, 이강일, "토양-대기 간의 잠열 수송 모델에 관한 연구", *대한환경공학회지*, **20**(11), pp. 1511-1522 (1998).
6. Lee, K.S., "Finite-Element Simulation on the Water Migration through a Nonuniform Unsaturated Zone", *Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Desai et al. (eds), pp. 837-842 (2001).
7. Lee, K.S., "Finite-Element Modeling on the Convective Transport of an Organic Solvent through Nonuniform Soils during In-Situ Photolysis Process", *Environ. Eng. Res.*, **8**(3), pp. 122-129 (2003).
8. Helmig, R., *Multiphase Flow and Transport Processes in the Subsurface*, Springer, Berlin, Germany, pp. 47-82 (1997).
9. van Genuchten, M. Th., "A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, pp. 892-898 (1980).
10. Mualem, Y., "A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media", *Water Resour. Res.*, **12**(3), pp. 513-522 (1976).
11. Vogel, T., van Genuchten M. Th., and Cislerova, M., "Effect of the Shape of the Soil Hydraulic Functions near Saturation on Variably-Saturated Predictions", *Adv. in Water Resour.*, **24**, pp. 133-144 (2001).
12. Lide, D.R., *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 83rd Edition, CRC Press, Boca Raton (2002).
13. Carsel, R.F., and Parrish, R.S., "Developing Joint Probability Distributions of Soil Water Retention Characteristics", *Water Resour. Res.*, **24**(5), pp. 755-769 (1988).