

Verification of the Contaminant Transport Numerical Model in Subsurface Soil

Kyung Suk Suh, Eun Han Kim, Moon Hee Han and
Chang Woo Lee

Korea Atomic Energy Research Institute

토양내 오염물이동 수치모델 검증

서경석 · 김은한 · 한문희 · 이창우

한국원자력연구소 원자력환경연구팀

(2001년 11월 27일 접수, 2001년 12월 26일 채택)

Abstract - The groundwater flow and contaminant transport numerical models have been established for understanding the movement of pollutants in surface soil environment. The numerical solutions were compared with the analytic solutions for the verification and the application of the models. The numerical solutions from the groundwater and transport models agreed well with analytic solutions. Especially, the results of groundwater flow model were validated in one- and two-dimensional heterogeneous media. Therefore, it will represent well the characteristics of the heterogeneous media in the field applications. Also, the phenomena of the pollutant dispersion represented quite well by the advection and the hydrodynamic dispersion in the results of the transport model. The important input factor is the choice of complicated boundary conditions in operating the numerical models. The numerical results are influenced by the choice of the proper boundary conditions.

Key words : groundwater flow, pollutant transport, numerical solutions, analytic solutions

요약 - 지표 토양 환경내 오염물 거동 해석을 위하여 지하수 유동 및 오염물 이동 수치모델을 수립하였다. 수치모델의 검증 및 현장 적용성 검사를 위하여 해석해와 상호 비교하였다. 계산결과 지하수 유동 및 오염물 이동의 수치해는 해석해와 잘 일치하였다. 특히 지하수 유동의 1차원 및 2차원 비균질 매질에서 수치해가 검증됨 따라 실제 현장 적용시 존재하는 비균질 매질의 특성을 잘 재현할 것으로 판단된다. 또한 오염물 이동 수치모델의 계산결과 이류와 수력학적 분산에 의해 토양내의 오염물 이동이 잘 재현되었다. 수치모델의 운영 결과 모델의 중요한 입력항은 복잡한 경계 조건의 선택으로 이들의 적절한 선택이 모델 결과에 중요한 영향을 주고 있음이 나타났다.

중심어 : 지하수 유동, 오염물 이동, 수치해, 해석해

서 론

원자력시설의 가동시 시설로부터 방출되는 입자상 방사성물질은 바람에 의해 이동한 후 지표에 침적되어 주변 토양 내로 침투하고, 액체상 방사성물질은 방출 허용 기준치 이하로 처리되어 주변 환경으로 방류하게 된다. 토양 내로 유입된 방사성물질은 포화(saturated) 및 불포화(unsaturated) 지역에서 지하수 흐름에 의해 주로 이동하며, 토

양에서 매질과의 흡착, 방사성 붕괴 등의 과정을 거쳐 이동·확산된다.

현재 원자력시설 주변에서는 환경 안전성 확보 측면에서 일부 지점에서 토양 및 지하수내에 포함되어 있는 방사성물질의 농도 추이변화를 지속적으로 분석·관측하고 있다. 그러나 이러한 모니터링 시스템은 일부 지점에 국한된 것으로 시설 주변 토양내의 방사성물질의 전반적인 거동 역학을 해석하고 모니터링 시스템의 신뢰성을 강

화하기 위해서는 시설 주변 토양 환경내 방사성 물질의 이동 모델링과 연계되어야 한다. 1986년 체르노빌사고와 같은 원자력시설의 사고시 방사성물질은 대기 중으로 뿐만 아니라 주변의 토양으로 다량 유입되어 주변 주민 및 환경에 위대한 영향을 주었다. 따라서 원자력시설의 정상 및 사고시 토양으로 이동·확산된 방사성 물질이 주변 토양 내에서 이동하는 과정을 정확히 평가하여 주변 주민 및 환경에 미치는 피해를 정량적으로 평가하는 것은 환경 안전성 측면에서 매우 중요한 일이다.

본 연구에서는 원자력시설 주변 토양 환경내 방사성물질의 이동 현상을 규명하기 위하여 지하수 유동 및 오염물 이동 수치모델을 수립하였다. 수립된 지하수 유동 및 오염물 이동 수치모델의 결과를 존재하는 해석해와 비교·검증하여 모델의 신뢰도를 확보하고, 추후 적용될 원자력 시설 주변 토양내 방사성물질의 분포를 추정하기 위해 모델의 적용성을 확보하였다. 본 연구에서 채택된 지하수 유동 및 오염물 이동 수치모델은 3차원 비정상 상태 모델로 입력자료의 생성 및 현장 적용시 적절한 경계조건 선택 등을 포함하는 복잡한 모델이다. 따라서 실제 현장 적용에 앞서 모델의 전반적 구조를 이해하고 각 변수들이 모델 결과에 주는 영향성을 평가하기 위해 존재하는 해석해와의 비교를 통해 현장 적용성을 시험하였다.

지하수 유동 모델

지표하에서는 포화 및 불포화 지역이 포함되므로 지표 토양 환경내 오염물 이동 해석을 위해서는 이들을 동시에 해석할 수 있는 수학적 모델의 도입이 필요하다. 불포화지역에서 표면장력에 의한 tension 수두는 포화지역의 수두와는 다른 양상을 보임으로써 이들의 산정은 복잡하며 지하수 유동 해석에 필수적인 요소이다. 이를 위하여 미국 EPA에서 제공하는 3DFEMWATER[1] 모델을 이용하였는데, 이 모델은 포화 및 불포화 지역의 정상상태, 비정상상태에서 강수, 증발산, well pumping 등의 여러 수문학적 요소들을 고려할 수 있는 것으로 지표 토양 환경내나 방사성폐기물 처분장 건설에 따른 오염물 이동 특성 평가를 위해 폭 넓게 사용되고 있다. 이 모델의 지배방정식은 다음과 같다.

$$c(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} [K(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [K(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial y}] + \frac{\partial}{\partial z} [K(\Psi) (\frac{\partial \Psi}{\partial z} + 1)] + 0 \quad (1)$$

윗 식에서 $c(\Psi)$ 는 수분함유도, Ψ 는 압력수두, $K(\Psi)$ 는 수리전도도, q 는 source/sink이고 t 는 시간이다. 윗 식은 불포화 지역에서의 Richard의 방정식이다[2].

위의 지배방정식을 풀기 위한 수치기법으로 유한요소법(Finite Element Method)이 이용되었는데, 이 수치기법은 계산영역을 사각형 및 삼각형 요소의 격자망으로 구성할 수 있어 불규칙한 계산영역을 좀더 실제적인 경계로 모델에 반영시킬 수 있는 장점이 있다[3]. 경계조건은 일정한 수두 값을 열거할 수 있는 Dirichlet 형태, 플럭스 값을 열거할 수 있는 Cauchy 형태 그리고 수두 gradient를 열거할 수 있는 Neumann형태로 줄 수 있도록 구성되었다.

오염물 이동 모델

지표 토양 환경내 오염물 이동 해석을 위하여 미국 EPA에서 제공하는 3DFEMWASTE [1] 모델을 이용하였는데, 이 모델은 포화 및 불포화 지역에서 오염물 이동의 3차원 비정상상태 해석이 가능한 모델이다. 지하수를 통한 오염물 이동역학은 이류, 수력학적 분산, 분자확산, 화학적 반응, 흡착 및 붕괴 과정 등이 포함되어 있으며, 지하수 유동 모델의 결과물인 시간에 따른 수두 및 유속 분포를 직접 입력 가능하도록 설계되었다. 지배방정식은 다음과 같다.

$$\theta \frac{\partial C}{\partial t} + \rho_b \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\theta D_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\theta D_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\theta D_z \frac{\partial C}{\partial z}) - u \frac{\partial C}{\partial x} - v \frac{\partial C}{\partial y} - w \frac{\partial C}{\partial z} - \lambda (\theta C + \rho_b S) + Q_C - Q_C \quad (2)$$

윗 식에서 θ 는 수분함유도, C 는 지하수내 오염물질의 농도, ρ_b 는 다공성 매질의 밀도, S 는 토양에 흡착된 농도, D_x, D_y, D_z 는 x,y,z 방향의 수력학적 분산계수, u,v,w는 x,y,z 방향의 지하수 유속성분, λ 는 붕괴상수, Q 는 지하수의 source/sink, C_i 는 source/sink내 용해된 용질농도이다. 위의 지배방정식을 풀기 위한 수치기법으로는 지하수 유동모델의 수치기법과 같은 유한요소법이 이용되었다. 그리고 경계조건은 일정한 농도 값을 열거할 수 있는 Dirichlet 형태, 플럭스 값을 열거할 수 있는 Cauchy 형태 그리고 농도 분산 gradient를 열거할 수 있는 Neumann형태로 줄 수 있도록 구성되었다. 또한 오염물의 흡착 관계

식은 선형, Freundlich 및 Langmuir 등은 흡착 식을 이용할 수 있도록 구성되었다.

해석 모델

앞에서 설명한 수치모델의 실제 적용에 앞서 수두 및 농도에 대한 1차원 및 2차원 편미분 방정식의 해석해를 구하여 수치해와 비교함으로써 모델을 검증하고 모델의 입력변수 구성과 영향을 평가하여 보았다.

1차원 지하수 유동모델 해석해

1차원 균질매질의 정상상태에서 지하수 유동 방정식 및 해석해는 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (K \frac{\partial h}{\partial x}) = 0 \quad h(0) \leq x \leq h(L) \quad (3)$$

$$h(x) = \frac{h(L) - h(0)}{L} x + h(0) \quad (4)$$

윗 식에서 h는 수두(hydraulic head), K는 수리 전도도(hydraulic conductivity)이다.

1차원 다층매질의 정상상태에서 지하수 유동 방정식 및 해석해는 다음과 같다[4].

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_n \frac{\partial h_n}{\partial x}) = 0 \quad h(0) \leq x \leq h(L) \quad (5)$$

$$h(x) = \frac{h(L) - h(0)}{\sum_{n=1}^M L/K_n} [x/K_n + \sum_{n=1}^M L/K_n] + h(0) \quad (6)$$

윗 식에서 $\sum_{n=1}^M = \sum_{i=1}^{n-1} l_i (1/K_i - 1/K_{i+1})$ 이다.

2차원 지하수 유동모델 해석해

2차원의 경우 균질매질에 대해 그림 1과 같이 양옆과 바닥은 흐름이 없는 불투수성으로, 또 지표면에서는 지하수위가 x=0에서 x=s까지 바닥을 기준으로 선형으로 증가하는 함수의 형태로 경계 조건을 주었다. 이러한 경계 조건하에서의 지배 방정식 및 해석해는 다음과 같다[5].

$$\frac{\partial}{\partial x} (K \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K \frac{\partial h}{\partial y}) = 0 \quad (7)$$

$$h(x, y) = y_0 + \frac{cs}{2} - \frac{4cs}{\pi^2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\cos[(2m+1)\frac{\pi x}{s}] \cosh[(2m+1)\frac{\pi y}{s}]}{(2m+1)^2 \cosh[(2m+1)\frac{\pi y_0}{s}]} \quad (8)$$

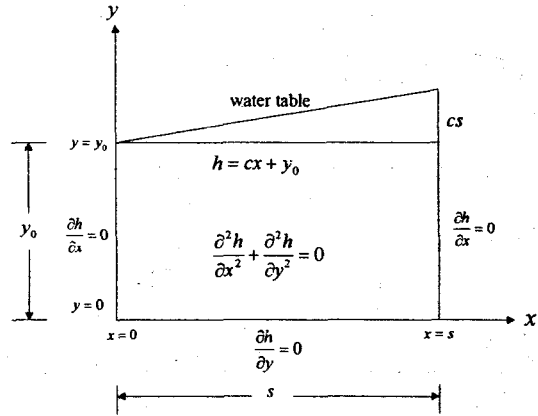


Fig. 1. Groundwater flow system in two-dimensional homogeneous media.

2차원의 경우 다층매질의 경우는 그림 2와 같이 양옆과 바닥은 흐름이 없는 불투수성으로, 또 지표면에서는 지하수위가 x=0에서 x=s까지 바닥을 기준으로 선형으로 증가하는 함수의 형태로 또, 각 매질의 경계에서 수두와 유량이 같은 것으로 경계조건을 주었다. 이 경우의 지배방정식과 해석해는 다음과 같다[6].

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_{1,2,3} \frac{\partial h_{1,2,3}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{1,2,3} \frac{\partial h_{1,2,3}}{\partial y}) = 0 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} h_1(x, y) &= A_0/2 + \sum_{m=1}^{\infty} A_m \cos(m\pi x/s) [\cosh(m\pi y/s)(U) + \sinh(m\pi y/s)(Y)] \\ h_2(x, y) &= A_0/2 + \sum_{m=1}^{\infty} A_m \cos(m\pi x/s) [\cosh(m\pi y/s)(W) + \sinh(m\pi y/s)(V)] \\ h_3(x, y) &= A_0/2 + \sum_{m=1}^{\infty} A_m \cos(m\pi x/s) \cdot \cosh(m\pi y/s), m=0,1,2,\dots \end{aligned} \quad (10)$$

식(10)에서의 계수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A_0 &= 1/s[y_0 s + cs^2/2], \\ A_m &= 2/sQ[(s/m\pi)^2 \cdot (c \cdot \cos m\pi - c)] \\ W &= \cosh^2(m\pi y_2/s) - (K_3/K_2) \cdot \sinh^2(m\pi y_2/s), \\ V &= (1 - W)/\tanh(m\pi y_2/s) \\ T &= \cosh^2(m\pi y_1/s) - (K_2/K_1) \cdot \sinh^2(m\pi y_1/s), \\ R &= (1 - T)/\tanh(m\pi y_1/s) \\ U &= W \cdot T + \cosh(m\pi y_1/s) \cdot \sinh(m\pi y_1/s) \cdot V \cdot (1 - K_2/K_1) \\ Y &= W \cdot R + V(1 + K_2/K_1 - T), \\ Q &= \cosh(m\pi y_0/s) \cdot U + \sinh(m\pi y_0/s) \cdot Y \end{aligned}$$

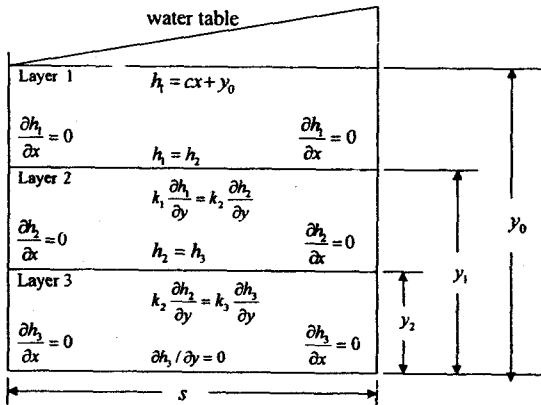


Fig. 2. Groundwater flow system in two-dimensional layered media.

1차원 오염물 이동모델 해석해

1차원 균질매질의 비정상상태에서 일정 유속과 선형 흡착을 가정할 경우의 이류·확산 방정식은 다음과 같다.

$$D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} - \lambda RC = R \frac{\partial C}{\partial t} \quad (11)$$

윗 식에서 D_L 은 종방향 수력학적 분산계수, C 는 농도, v 는 x방향의 일정 유속성분, λ 는 붕괴상수, R 은 지연계수($= 1 + \rho K_d / \theta$, K_d 는 분배계수, θ 는 수분 함유도)이다. 윗 식을 풀기 위한 초기 및 경계조건은 다음과 같다.

초기조건 : $C(x,t) = 0, t=0$
 경계조건 : $C(0, t) = C_0 \exp(-at),$

$$\left. \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} \right|_{x \rightarrow \infty} = 0 \quad (12)$$

식(12)와 같은 초기 및 경계조건하에서 식 (11)의 해석해는 다음과 같다[7].

$$C(x, t) = C_0 \exp(-at) \cdot \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{Rx - vt}{2\sqrt{D_L Rt}} \right] + \sqrt{\frac{v^2 t}{\pi D_L R}} \cdot \exp \left[-\frac{(Rx - vt)^2}{4D_L Rt} \right] - \frac{1}{2} \left[1 + \frac{v^2 t}{D_L R} + \frac{v^2 t}{D_L R} \right] \cdot \exp \left[\frac{v^2 t}{D_L R} \right] \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{Rx + vt}{2\sqrt{D_L Rt}} \right] \quad (13)$$

2차원 오염물 이동모델 해석해

2차원 균질매질의 비정상상태에서 x방향의 일정 유속과 선형 흡착을 가정할 경우의 이류·확산 방정식은 다음과 같다.

$$D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_T \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} - \lambda RC = R \frac{\partial C}{\partial t} \quad (14)$$

윗 식을 풀기 위한 초기 및 경계조건은 다음과 같다. 그림 3에 오염물 선원형 부근에서의 경계조건을 도시적으로 나타내었다.

초기조건 : $C(x,y,t) = 0, t=0$
 경계조건 : $C(0, y, t) = C_0 \exp(-at), -a \leq y \leq a$
 $C(0,y,t) = 0, |y| < a, \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x \rightarrow \infty} = 0,$
 $\left. \frac{\partial C}{\partial y} \right|_{y \rightarrow \pm \infty} = 0 \quad (15)$

식(15)와 같은 초기 및 경계조건하에서 식 (14)의 해석해는 다음과 같다[8].

$$C(x, y, t) = \frac{C_0 x}{4\sqrt{\pi D_L}} \cdot \exp \left[\frac{v^2 t}{2D_L} - at \right] \cdot \int_0^{y+a} \exp \left[-(\lambda R - aR + \frac{v^2}{4D_L})r - \frac{y^2}{4D_L r} \right] r^{-3/2} \cdot \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{a-y}{2\sqrt{D_L r}} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{a+y}{2\sqrt{D_L r}} \right) \right] dr \quad (16)$$

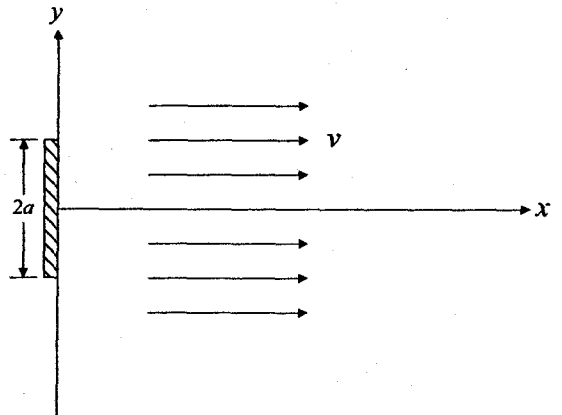


Fig. 3. A schematic diagram showing the two-dimensional dispersion model

수치모델의 검증

수립된 지하수 유동 및 오염물 이동 수치모델의 검증을 위하여 앞에서 설명한 기존의 해석해와 상호 비교하였다. 1차원 정상상태 지하수 유동 모델의 경우 균질 및 다층매질에 대하여 동일하게 거리 100 m를 5 m의 등간격으로 20개 구간으로 분할하여 경계조건으로 $x=0$ 일 때 수두 $h=20$ m, $x=100$ 일 때 수두 $h=10$ m로 가정하였다. 또한 균질매질의 경우 전구간에 대해 수리전도도를 일정하게 주었고, 다층매질의 경우는 매질을 3개로

분할하여 각 매질에 따라 수리전도도가 변화하는 것으로 주었다. 그림 4에서 보는 바와 같이 균질 및 다층매질의 경우 수치해와 해석해가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

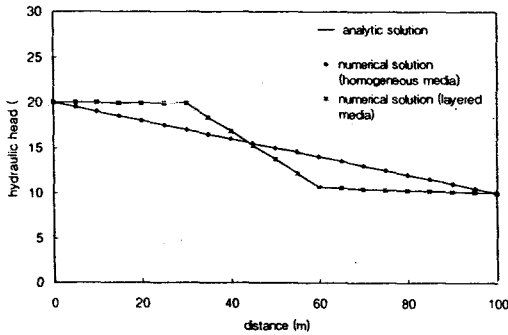


Fig. 4. Comparison of analytic and numerical solution in one-dimensional system

2차원 균질매질의 경우는 x, y 거리를 동일하게 100 m로 주고 5 m의 등간격으로 20개 구간으로 분할하였다. 양옆과 바닥은 흐름이 없는 불투수성으로, 또 지표면에서는 지하수위 경사 c는 0.2로 주어 지표면에서 선형으로 증가하는 지하수위를 주었다(그림 1 참고). 그림 5에 계산된 수두 분포를 나타내었는데 해석해와 수치해가 서로 잘 일치하고 있다. 2차원 다층매질의 경우는 x축 거리 120 m를 6 m 간격으로 20개 구간으로, y축 거리 120 m를 40 m 간격으로 3개 구간으로 나누어 수치해와 상호 비교하였다. 수리전도도는 $K_1=1$, $K_2=10$, $K_3=1$ 로 변화시켜 계산하였다. 그림 6에 다층매질의 경우 해석해와 수치해의 산정결과를 나타내었다. 전반적인 결과는 서로 일치하고 있는데, y축 60 m 근처에서 약간의 차이를 보이고 있다. 이는 3개 다층매질의 비교를 위해 y축을 3개 구간으로 나누었기에 수치모델에서 약간의 오차를 유발한 것으로 생각되는데, 실제 적용에 있어서 y축을 좀 더 많이 분할하면 이 오차를 최소화할 수 있을 것으로 생각된다.

1차원 오염물 이동에 대한 해석해와 수치해의 비교를 위하여 x축의 거리 100 m를 5 m 등간격으로 분할하여 총 21개 절점을 형성하였다. 경계 조건으로 $x=0$ 에서 농도값은 $C_0=1$ 로 연속 방출로 주었고, 오염물은 보존성으로 가정하여 흡착량은 일정하게 그리고 붕괴항은 없는 것으로 가정하였다. 지하수 유속은 $v=20$ m/day로, x방향의 수력학적 분산계수는 $D_L=10$ m²/day로 일정하게 입력하였다. 그림 7에 계산결과를 나타내었는데, 해석

해와 수치해가 전반적으로 일치하고 있다. 그림 7에서 시간이 경과함에 따라 오염물은 이류와 수력학적 분산에 의해 x방향으로 이동하게 되는데, 특히 수력학적 분산에 의해 4일 이후에 오염물이 $x=100$ m에 도달하고 있음이 잘 나타나고 있다. 그림 8은 계산영역의 중앙지점($x=50$ m)에서 시간의 변화에 따른 농도 변화곡선을 나타내고 있는데, 앞의 경우와 동일하게 해석해와 수치해가 잘 일치하고 있다. 그림 8에서 제시된 바와 같이 4일 이후에 계산영역의 중앙지점은 농도 값이 정상상태에 도달해 있음을 알 수 있다.

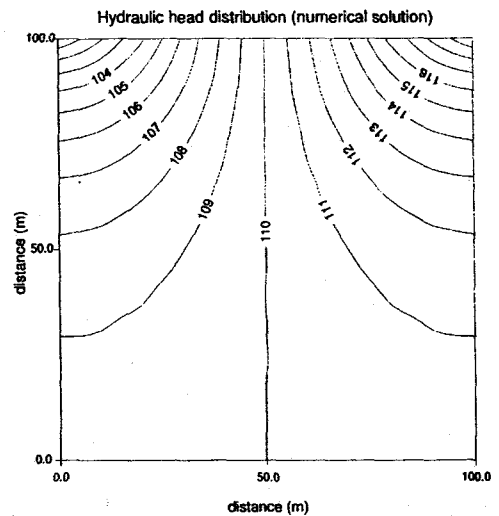
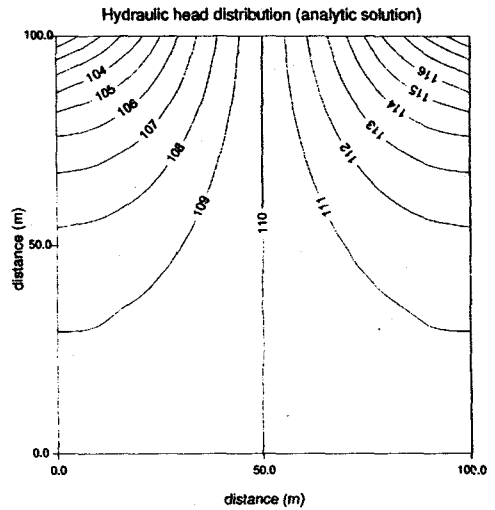


Fig. 5. Comparison of analytic and numerical solution in two-dimensional homogeneous media

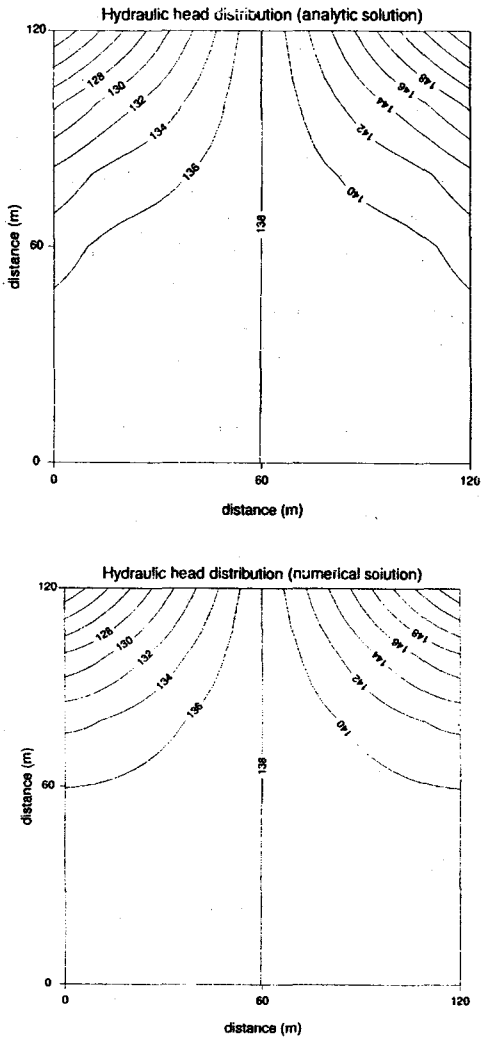


Fig. 6. Comparison of analytic and numerical solution in two-dimensional layered media

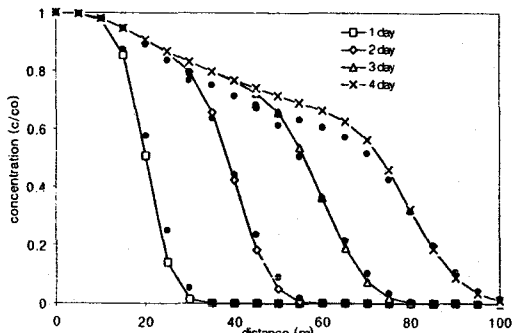


Fig. 7. Concentration profiles of analytic and numerical solution in one-dimensional media at various time

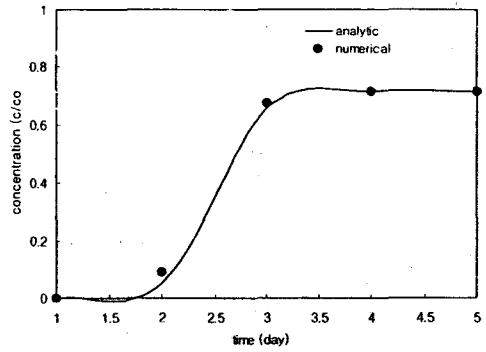


Fig. 8. Concentration profile of analytic and numerical solution in one-dimensional media at $x=50$ m

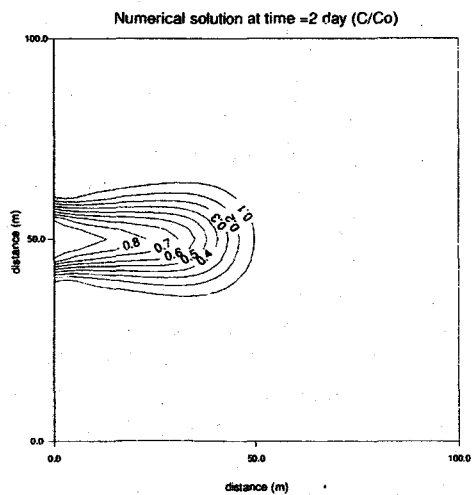
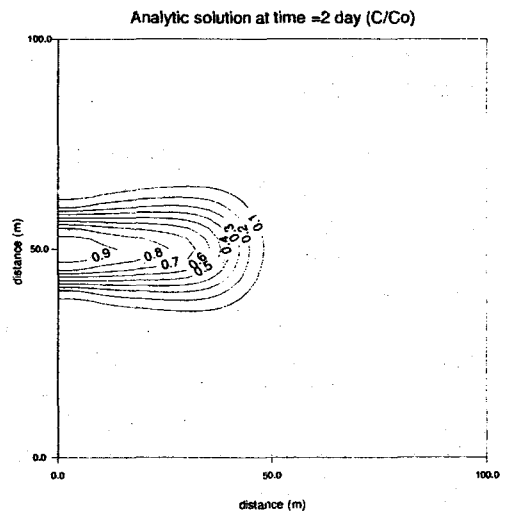


Fig. 9. Concentration profiles of analytic and numerical solution in two-dimensional saturated media at $t=2$ day

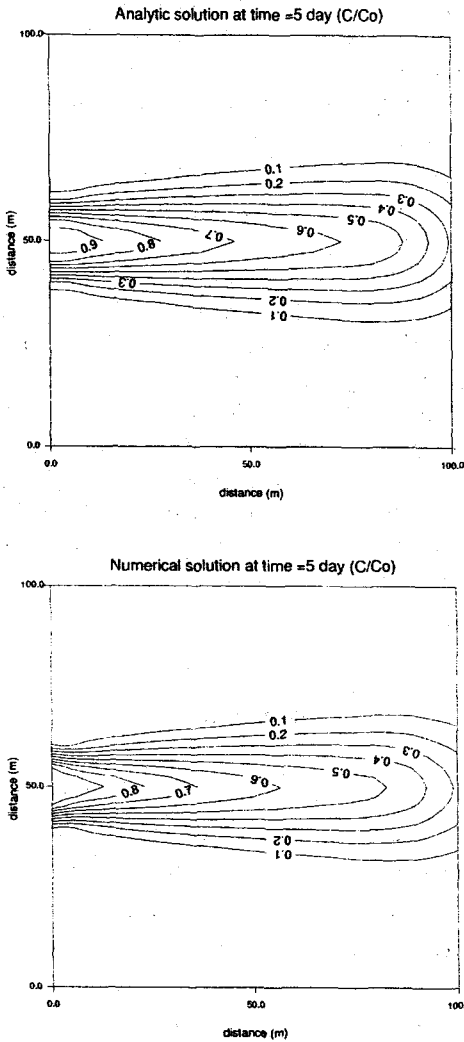


Fig. 10. Concentration profiles of analytic and numerical solution in two-dimensional saturated media at t=5 day

2차원의 경우는 포화지역과 불포화지역으로 나누어 계산을 수행하였는데, 포화지역의 경우 수분 함유도와 공극율이 같으므로 $\theta = n = 0.3$ 으로 주었고, 불포화지역의 경우 수분 함유도는 공극율보다 적게 $\theta = 0.2$ 로 주어 각각 계산을 수행하였다. x, y거리는 동일하게 100 m로 주고 5 m의 등간격으로 20개 구간으로 분할하였다. x의 오른쪽 경계와 y면 경계는 무한 경계조건을 취하였고, x=0에서 농도값은 $C_0 = 1$ 로 연속 방출로 주었으며 붕괴항은 없는 것으로 가정하였다. 지하수 유속은 $v = 20$ m/day로, x, y방향의 수력학적 분산계수는 $D_L = D_T = 10$ m²/day로 일정하게 입력하였다. 그림

9 및 10에는 포화지역에서의 해석해와 수치해의 결과를 나타내었다. 이들의 결과는 전반적으로 잘 일치하고 있다. 그림 9는 오염물이 지하매질내로 방출된 후 2일 후에 등농도 분포곡선을 나타낸 것으로 종방향 및 횡방향 분산계수를 동일하게 입력함으로써 플룸(plume) 형태로 퍼져나가고 있음을 알 수 있다. 그림 10은 5일 후에 등농도 분포곡선으로 5일 후에는 계산영역의 끝부분까지 오염물이 확산되고 있음이 잘 나타나 있다. 그림 11 및 12는 불포화지역에서의 해석해와 수치해의 결과를 나타내었는데, 이들의 결과는 전반적으로 잘 일치하고 있다.

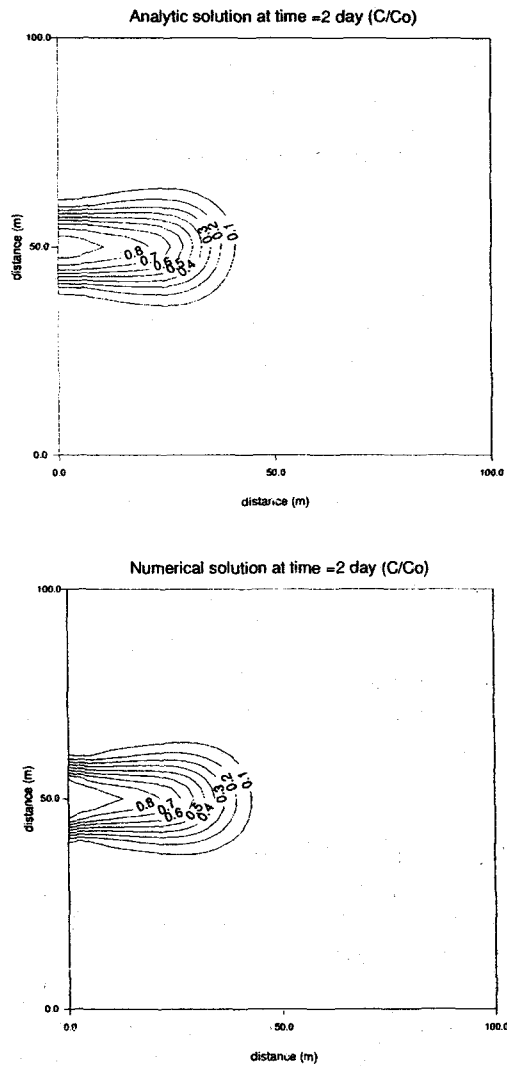


Fig. 11. Concentration profiles of analytic and numerical solution in two-dimensional unsaturated media at t=2 day

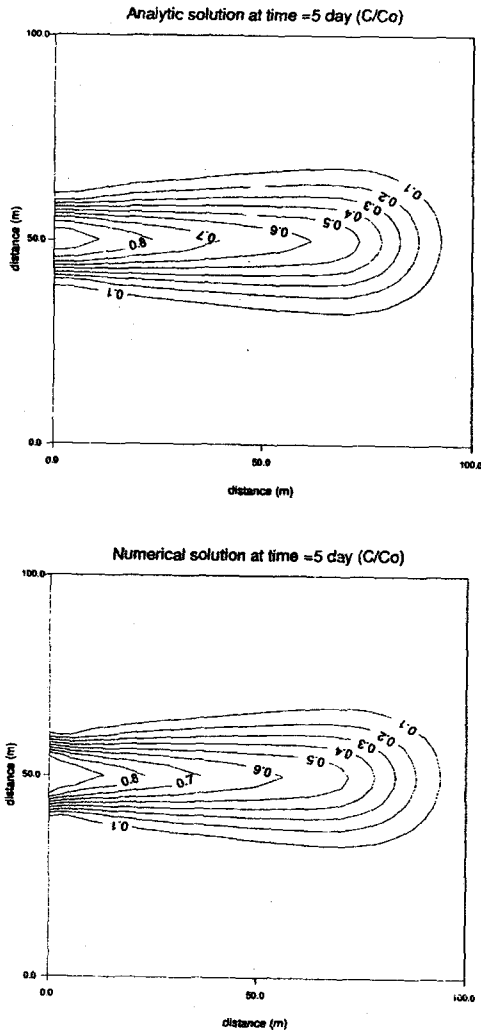


Fig. 12. Concentration profiles of analytic and numerical solution in two-dimensional unsaturated media at $t=5$ day

결론

원자력시설의 정상 및 사고시 토양으로 이동된 방사성 물질이 주변 토양내에서 이동·확산하는 과정을 평가하기 위하여 지하수 유동 및 오염물 이동모형을 수립하였다. 수립된 지하수 유동 및 오염물 이동 수치모델의 결과를 존재하는 해석해와 비교·검증하여 모델의 신뢰도를 확보하고, 추후 적용될 원자력 시설 주변 토양내 방사성물질의 분포를 추정하기 위해 모델의 적용성을 검사하여 보았다. 수치해와 해석해의 상호 비교 결과 산정결과는 서로 잘 일치하였다. 향후 실제 원자

력 시설부지에 수치모델을 적용하여 지표 토양 환경내에서의 방사성물질의 거동분포를 산정할 예정이며 계산된 결과를 일부 지점에서 존재하는 환경 모니터링 값과 상호 비교할 예정이다.

유해폐기물, 일반 폐기물 및 원자력 시설로부터 오염물이 토양내로 이동하는 중요한 메카니즘은 지표침적 및 강수 등의 환경요인에 의한다. 본 연구는 수치모델을 이용하여 원자력시설 주변 토양 환경내 방사성물질의 이동을 규명하는 것으로 현장 모니터링 자료와 연계하여 신뢰성 있는 토양 오염 이동 모델링 시스템을 구축하는데 있다. 앞으로 추가적인 연구분야는 원자력 시설 주변 토양 환경내 오염물의 이동·확산 현상을 이해하기 위해 토양내 전반적인 지하수 흐름 체계 및 오염물 거동 해석을 보다 정확하게 규명하는 것과 수립된 방사성물질 이동 모델을 환경 생태계 피폭해석 체계에 연계시켜 지하매질을 통한 방사선 피해를 최소화하기 위한 기술을 개발하는 것이다.

참고문헌

1. G.T. Yeh, S.S. Hansen, B. Lester, R. Strobl and J. Scarbrough, 3DFEMWATER /3DFEMWASTE : Numerical codes for delineating wellhead protection areas in agricultural regions based on the assimilative capacity criterion, U.S. EPA, EPA/600/R-92/223(1992).
2. R.A. Freeze and J.A. Cherry, Groundwater, Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs(1979).
3. J. Istok, Groundwater Modeling by the Finite Element Method, American Geophysical Union, Florida(1989).
4. 서경석, 이한수, 한경원, "방사성폐기물 처분장 주변에서 정상상태의 지하수 수치모델 개발", 대한토목학회논문집, 9(4), 103-112(1989).
5. J. Toth, "A theory of groundwater motion in small drainage basins in central alberta, Canada", Journal of Geophysical Research, 68(11), 4375-4387(1962).
6. R.A. Freeze and P.A. Witherspoon, "Theoretical analysis of regional groundwater flow : 1.analytical and numerical solution to the

mathematical model", Water Resources Research, 2(4), 641-656(1966).

M.Th.V. Genuchten and W.J. Alves, Analytical solutions of the one-dimensional convective-dispersive solute transport equation, U.S. Dept. of Arri. Tec. Bull. 166I (1982).

R.W. Cleary and M.J. Unga, Groundwater pollution and hydrology, mathematical models and computer programs, Water Resour. Prog., Rep.78-WR-15, Princeton Univ.(1978).