

Analysis on the contaminant transport in subsurface soil at Daeduk site

Kyung Suk Suh · Eun Han Kim · Won Tae Hwang ·
Hyo Joon Jeong · Moon Hee Han and Chang Woo Lee

Nuclear Environ. Res. Division, Korea Atomic Energy Research Institute

대덕부지 토양내 오염물 이동 해석

서경석 · 김은한 · 황원태 · 정효준 · 한문희 · 이창우

한국원자력연구소 원자력환경연구부

(2003년 1월 3일 접수, 2003년 7월 6일 채택)

Abstract - The groundwater flow and contaminant transport numerical models have been established for analyzing the movements of pollutants in subsurface soil at Daeduk site. The groundwater flow and concentration of U-234 using the numerical models were simulated around Daeduk nuclear facilities. The computed groundwater flow was mainly advected toward the direction of east and southeast around HANARO in the site. The radioactive material entered into the subsurface soil was transported along the same direction with groundwater flow. The radioactive material deposited on the surface from the calculated concentration distributions was not affected by surrounding environment of the site.

Key words : Daeduk nuclear facilities, groundwater flow, concentration distribution of U-234.

요약 - 대덕 원자력시설 주변 지표 토양 환경내 오염물 거동 해석을 위하여 지하수 유동 및 오염물 이동 수치모델을 수립하였다. 수립된 모델을 이용하여 대덕 원자력시설 주변의 지하수 흐름체계를 해석하고 U-234에 대한 농도분포를 계산하였다. 산정 결과 지하수는 부지내 하나로를 중심으로 동쪽 및 동남 방향으로의 흐름이 나타났고, 지표 토양내로 유입된 방사성 물질은 지하수 유동에 의해 같은 방향으로 이동되었다. 대덕 원자력시설로부터 지표로 침적된 방사성 물질의 농도분포를 산정한 바 환경에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

중심어 : 대덕 원자력시설, 지하수 유동, U-234 농도분포

서 론

원자력시설의 가동시 시설의 건전한 운영을 위하여 각 시설로부터 방출되는 방사성물질이 주변 주민 및 환경에 주는 영향을 평가해야 한다. 시설로부터 방출되는 방사성물질은 대기, 지표수, 지표 토양 환경내로 이동하게 되는데, 이들에 의한 영향을 지속적이고 정기적으로 감시·평가함으로써 주변 주민 및 환경의 방사선에 대한 환경

안전성을 확보할 수 있다.

한국원자력연구소와 한전 원자력연료주식회사 등이 위치한 대덕 원자력부지에는 하나로 연구용 원자로, 원전연료 가공시설 등 여러 원자력 관련 시설 등이 운영되고 있다. 시설로부터 대기 및 지표로 방출되는 기체상 및 액체상 방사성물질에 의한 환경영향 평가와 시설 주변의 일부 지점에서 토양 및 지하수내에 포함되어 있는 방사성물질의 농도 추이변화의 분석·관측은 한국원자력

연구소 원자력 환경연구부에서 지속적으로 수행하고 있다 [1,2] 그러나 지표 토양 및 지하수 등의 시료에 대한 모니터링은 일부 지점에 국한된 것으로 시설 주변 토양내의 방사성물질의 전반적인 거동 역학을 해석하고 모니터링 시스템의 신뢰성을 강화하기 위해서는 시설 주변 토양 환경내 방사성물질의 이동 모델링과 연계되어야 한다.

본 연구에서는 원자력시설 주변 토양 환경내 방사성물질의 이동 현상을 규명하기 위하여 지하수 유동 및 오염물 이동 수치모델을 수립하였다. 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. 수립된 지하수 유동 및 오염물 이동 수치모델을 대덕 원자력 시설 주변 토양에 적용하여 지하수 유동 및 방사성물질의 분포를 산정하였다.

지하수 유동 모델

대덕 부지 토양내 지하수 유동 해석을 위하여 미국 EPA에서 제공하는 3DFEMWATER[3] 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.

$$\alpha(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} [K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial y}] + \frac{\partial}{\partial z} [K(\psi) (-\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1)] + q \tag{1}$$

윗 식에서 $c(\psi)$ 는 저류능(storage capacity), ψ 는 압력수두, $K(\psi)$ 는 수리전도도, q 는 source/sink이고 t 는 시간이다. 윗 식은 불포화 지역에서의 Richard의 방정식이다[4].

오염물 이동 모델

오염물 이동 해석을 위하여 미국 EPA에서 제공하는 3DLEWASTE[3] 모델을 이용하였는데, 이 모델은 포화 및 불포화 지역에서 오염물 이동의 3차원 비정상상태 해석이 가능한 모델이다. 지

하수를 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. 지배 방정식은 다음과 같다.

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

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, w 는 x, y, z 방향의 지하수 유속성분, λ 는 붕괴상수, Q 는 지하수의 source/sink, C_i 는 source/sink에 용해된 용질농도이다.

오염물 이동을 나타내는 지배방정식에서 지하수내 용해되어 있는 용해물질과 흡입자의 표면에 흡착되는 것과의 관계를 설정하여야 한다. 이 모델에서는 이러한 흡착 관계식을 선형 흡착, Freundlich 등온식 및 Langmuir 등온식이 이용되었다. 등온 관계식은 실험으로부터 측정된 관계를 log-log 그래프선상에 표시하여 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\log S = n \log C + \log K \quad \text{or} \quad S = KC^n \tag{3}$$

식 (3)은 Freundlich 등온 관계식이며, $n=1$ 인 경우를 선형 등온 관계식이라 하여 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{dS}{dC} = K_d \tag{4}$$

식 (4)에서 K_d 는 분계계수이다. Langmuir 형태의 등온 관계식은 다음과 같다.

$$S = \frac{S_{\max} KC}{1 + KC} \tag{5}$$

식 (2)의 지배방정식을 벡터 형태로 표시하면 다음과 같다.

$$\theta \frac{DC}{Dt} + \rho_b \frac{dS}{dC} \frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (\theta D \cdot \nabla C) - \lambda(\theta C + \rho_b S) + QC_i - QC \quad (6)$$

오염물 이동 모델의 수치기법

식 (6)의 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. 시간 적분항은 후진차분(backward difference)이나 중앙차분(central difference)이 이용되었고, 시스템의 비선형 항은 Picard 반복법을 이용하였고, 선형화된 방정식은 block iterative method 에 의해 해석된다. 식 (6)의 지배방정식을 Galerkin 유한요소법에 의해 해석하는 방법은 다음과 같다.

$$C = N_j(x_i, t)C_j(t), \quad j=1,2,3,\dots,n \quad (7)$$

윗 식에서 $N_j(x_i, t)$ 는 3차원 shape함수이고, $C_j(t)$ 는 형성된 유한 요소망의 n개 절점에서 어떤 시간 때의 농도 값이다. 식 (6)을 trial 함수로 대체함으로써, 다음과 같은 가중 잔차 최소화방정식(weighted residual minimization equation)이 구해진다.

$$\int_{R_s} W_i (\theta + \rho_b K_d) \frac{DC}{Dt} - \nabla \cdot (\theta D \cdot \nabla C) - \lambda(\theta + \rho_b K_d)C + QC_i - QC dR = 0 \quad (8)$$

윗 식에서 W_i 는 가중함수이고, R_s 은 계산영역의 체적이다. Galerkin방법에 의하면 가중함수는 shape함수와 같으므로 W_i 를 N_i 로 대체하면 식 (6)과 식(8)은 다음과 같이 표시된다.

$$\int_{R_s} N_i (\theta + \rho_b K_d) \frac{DC}{Dt} - \nabla \cdot (\theta D \cdot \nabla C) - \lambda(\theta + \rho_b K_d)C + QC_i - QC dR = 0 \quad (9)$$

윗 식에서 n은 절점 수이다. 식 (9)에 부분 적분을 적용하면 다음과 같다.

$$\int_{R_s} N_i (\theta + \rho_b K_d) N_j \frac{DC_j}{Dt} dR + \int_{R_s} \nabla N_i \cdot \theta D \cdot \nabla N_j dR C_j - \int_{B_s} n \cdot \theta D \cdot \nabla N_j dBC_j + \int_{R_s} \lambda (\theta + \rho_b K_d) N_i N_j dR C_j - \int_{R_s} \frac{\partial \theta}{\partial t} N_i N_j dR C_j - \int_{R_s} Q C_i N_i dR + \int_{R_s} Q N_j N_i dR C_j = 0 \quad (10)$$

윗 식에서 B_s 는 계산경계이다. 식 (10)의 적분형

태를 유한요소 격자의 각각의 요소의 합으로 대체할 수 있는데, 이러한 유한요소 형태로 나타내면 식 (10)은 다음과 같은 절점 방정식의 형태로 나타난다.

$$A_{ij} \frac{\partial C_j}{\partial t} + B_{ij} + E_{ij} C_j = R_{ij}, \quad i=1,2,\dots,n, \quad j=1,2,\dots,n \quad (11)$$

윗 식에서 변수 $A_{ij}, B_{ij}, E_{ij}, R_{ij}$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \sum_{k=1}^m \int_{R_e} \theta + \rho_b K_d N_i^e N_j^e dR, \\ B_{ij} &= \sum_{k=1}^m \int_{R_e} \nabla N_i^e \cdot \theta D \cdot \nabla N_j^e dR \\ E_{ij} &= \sum_{k=1}^m \int_{R_e} N_i^e \lambda (\theta + \rho_b K_d) + Q N_j^e dR, \\ R_{ij} &= \sum_{k=1}^m \left[\int_{R_e} Q C_{inp} N_i^e dR + \int_{B_e} n \cdot \theta D C_j \cdot \nabla N_j^e dB \right] \end{aligned} \quad (12)$$

윗 식에서 m 은 분할된 요소의 수이고, N^e 는 요소의 shape함수이다.

식 (12)의 선형화된 상미분 방정식을 풀기 위하여 시간항은 유한 차분법을 이용하였는데 그 식은 다음과 같다.

$$\frac{A_{ij}}{\Delta t_k} C_j^{k+1} - C_j^k + B_{ij}^{k+1} + E_{ij} C_j^{k+1} = R_i^{k+1} \quad (13)$$

윗 식에서 $k+1$ 은 현재 시간이고 k 는 전 시간이며, Δt 는 시간증분이다. 식 (13)을 이용하여 계산 영역에 대해 구성된 절점에서 농도 값이 계산된다.

대덕 부지내 지하수 유동 해석

한국원자력연구소가 위치한 대덕 부지는 부지 반경 8 km 이내에는 낮은 야산과 구릉지대로 이루어져 있고, 북서쪽 약 1.1km 지점에 용바위 고개(353.8 m)가, 북동쪽에 보덕봉(263 m)이, 남쪽 약 0.9km 지점에는 적오산(255 m)이 위치하며, 북북서쪽 약 0.5km 지점에 있는 덕진 소류지는 용바위 고개에서 발원하여 북서향에서 남동향으

로 소하천을 형성하여 금강수계의 1차 지류인 갑천으로 흐르면서 부지의 우측 경계를 이룬다. 부지 내에는 북서쪽 용바위고개와 연결되는 218.1m와 208.2m의 봉우리를 가진 능선이 덕진소류지를 가로막고 있으며, 남쪽으로는 적오산과 사이에 큰 계곡이 가로놓여 있다. 원자력연구소내 하나로 연구용 원자로를 중심으로 반경 2 km에서의 지형도를 그림 1에 나타내었고, 3차원 지형도를 그림 2에 나타내었다. 대덕 부지내 지질특성은 1999년 지하처분 모의시험시설 연구를 위한 지질 조사 내용을 인용하였다[5]. 위의 지역에 대한 단면 지질도를 그림 3에 나타내었다.

대덕 부지내 방사성물질의 지표 토양내 거동을 살펴보기 위하여 부지내 3차원 지하수 유동체계를 해석하였다. 계산 영역은 연구소내 하나로를 중심으로 반경 2 km까지를 고려하여, x(동서) 방향으로 4 km, y(남북) 방향으로 4 km, z 방향으로는 평균해수면 상에서 지형 고도까지를 고려하였다. x 방향의 격자 간격 $\Delta x=200$ m, y 방향의 격자 간격 $\Delta y=500$ m, z 방향의 격자는 10개로 각기 분할하여 20 x 8 x 10개의 요소(element)와 21 x 9 x 11의 절점(node)으로 구성하였다. 지하매질은 그림 3과 같이 2개의 다층 매질로 구성되어 있어 지표면하 20 m까지는 풍화토(silty sand)로 그 아래부터 기반암까지는 화강암(granite)으로 고려하였다. 이들 지하매질은 각각 균질(homogeneous) 및 등방성(isotropic)으로 가정하였다. 또한, 지표면하에서 5 m 위치에 지하수위가 존재한다고 가정하여 지표면하에서 5 m까지는 불포화지역으로, 지하수위 아래에서 기반암까지는 포화지역으로 고려하였다. 3차원 지하수 유동 모델을 운영하기 위한 기본 입력자료인 수리전도도 및 공극률을 표 1에 나타내었다 [3,5].

경계조건은 Dirichlet 형태로 계산영역의 동서 및 남북방향의 각 절점에서 지하수위를 입력하였고, 나머지 방향에서는 무한 경계조건을 입력하였다. 대덕 부지내 지하수 유동이 일정한 형태를 갖

는 정상상태로 계산을 수행하였다. 이러한 경계조건 설정은 지하수 흐름이 포텐셜 흐름이므로 일반적으로 지형 고도차에 의해 유동되므로, 입력 자료를 쉽게 구할 수 있는 지형자료를 각 경계 절점에서 입력하는 Dirchlet 경계조건을 사용하였고, 나머지 경계에서는 흐름이 자유롭게 유동되도록 무한 경계조건을 취하였다.

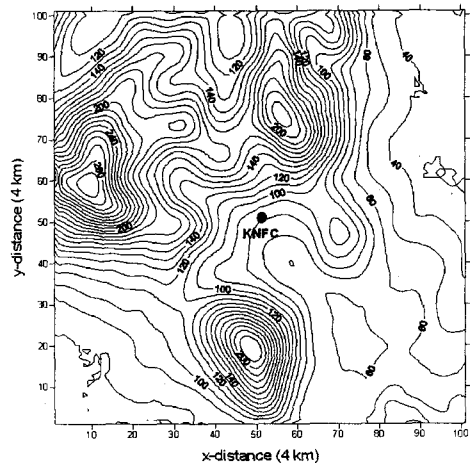


Fig. 1. Two-dimensional topography map.

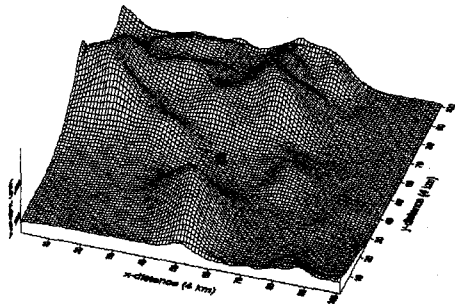


Fig. 2. Three-dimensional topography map.

Table 1. Hydraulic conductivity and porosity at Daeduk site

	K_{xx} (m/day)	K_{yy} (m/day)	K_{zz} (m/day)	porosity
silty sand	8.64×10^{-2}	8.64×10^{-2}	8.64×10^{-2}	0.35
granite	4.32×10^{-3}	4.32×10^{-3}	4.32×10^{-3}	0.25

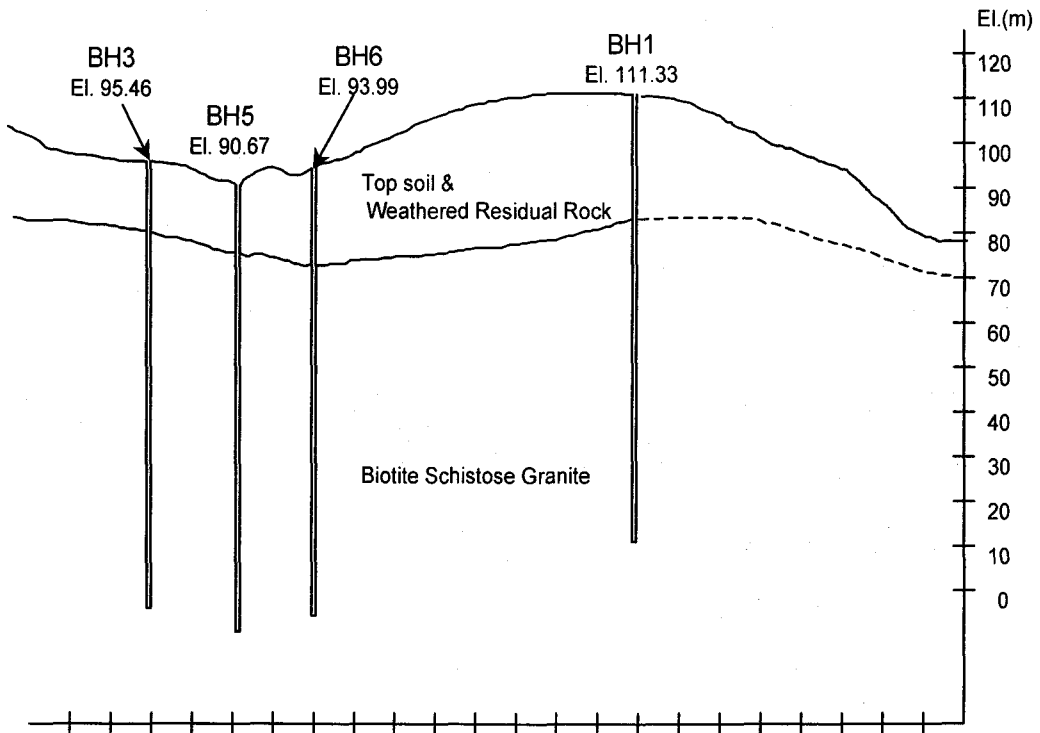


Fig. 3. Cross-sectional geological map.

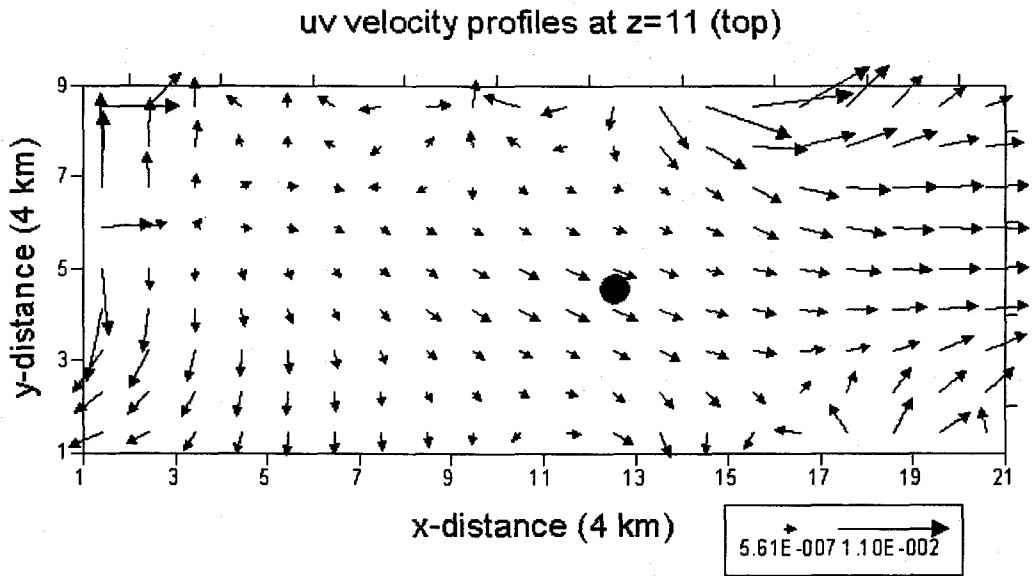


Fig. 4. Calculated groundwater flow profiles on xy plane.

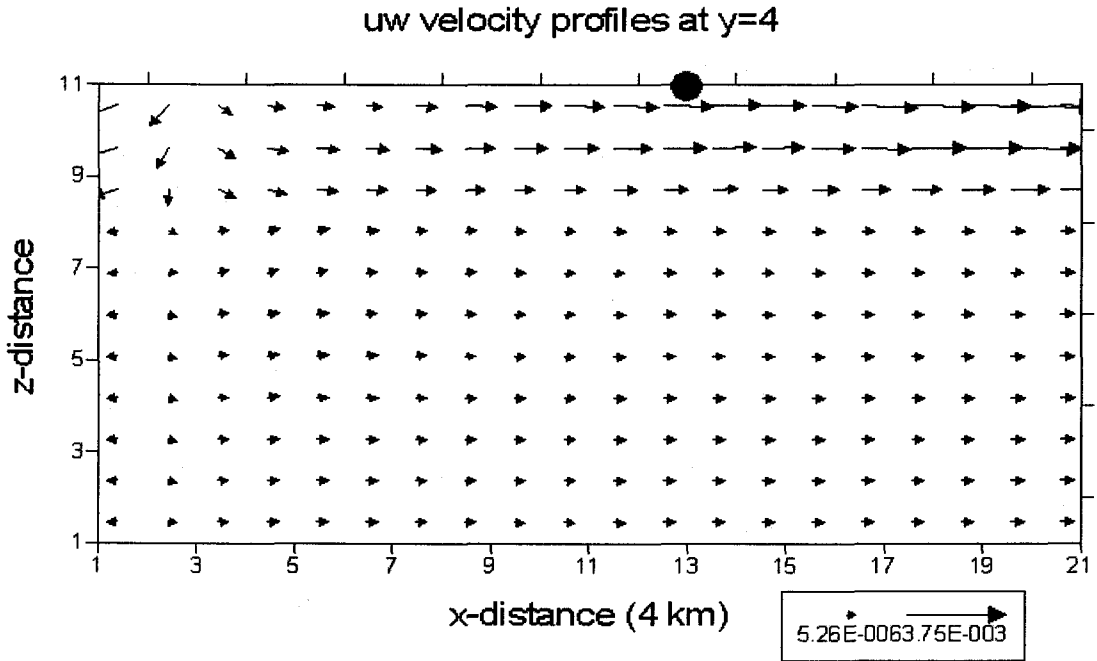


Fig. 5. Calculated groundwater flow profiles on xz plane.

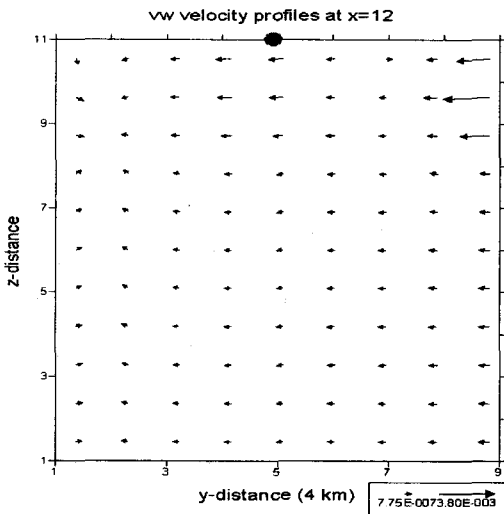


Fig. 6. Calculated groundwater flow profiles on yz plane.

높은 구릉에 의해 지하수가 북쪽방향으로 진행하다가 동쪽으로 흐름이 바뀌는 양상을 나타내고 있다. 용바위 고개가 위치한 지역의 아래쪽에서는 남서방향의 흐름이 또, 위쪽에서는 북쪽방향의 흐름이 강하게 나타나고 있다. 그림 5의 xz 방향의 지하수 유동분포를 살펴보면 계산영역의 중심 부근에서는 xy 방향의 지하수 유동과 유사한 흐름이 전반적으로 동쪽방향으로 향하고 있다. 그림 6의 yz 방향의 지하수 유동분포를 살펴보면 계산영역의 중심 부근인 x=12 면에서는 전반적으로 남쪽방향의 흐름이 나타나고 있다. 적오산이 위치한 계산영역의 하단에서는 적오산으로부터 연구소를 향하는 북쪽방향의 흐름이 잘 제시되고 있다. 산정된 3차원 지하수 유동분포를 살펴보면 연구소내 시설로부터 방출된 방사성물질은 지표에 침적한 후 주변 토양내로 유입하여 주로 동쪽 및 동남방향으로 이동될 것으로 추론할 수 있다.

대덕 부지내 오염물 이동 해석

계산된 3차원 지하수 유동 결과를 그림 4부터 6까지에 나타내었다. 지하수 유속의 단위는 m/day로 나타내었다. 그림 4에서 지표면 부근에서 xy 방향의 지하수 유동분포를 살펴보면 하나로 중심을 주로 동쪽방향으로 지하수가 흘러가고 있고, 오른쪽 하단 부근에서는 상대적으로

대덕 부지내 방사성물질의 지표 토양내 거동을 살펴보기 위한 오염물 이동모델의 계산영역은 지하수 유동모델과 동일한 영역과 격자체계를 취

하였다. 지표 토양내로 유입되는 방사성 물질은 한국원자력연료주식회사의 기존 가공시설로부터 대기중으로 방출되는 α 핵종인 U-234를 고려하였다. 기존 가공시설의 굴뚝에서 방출되는 U-234의 대기중 농도 및 지표침적을 평가하는 XOQDOQ [1]코드의 계산결과로부터 가공시설이 위치하는 지역에서 남쪽방향으로 800 m 떨어진 곳에서 최대 지표 침적이 발생한다. 이 지역에 지표 침적된 U-234의 핵종 농도를 선원항으로 고려하여 오염물 이동모델에 2.4 Bq/m^3 의 값을 선원항 자료로 입력하였다. 오염물 이동모델에 필수적인 지하수 유동 자료는 앞에서 계산한 지하수 유동 결과를 연계하여 입력자료로 이용하였다. 오염물이 대상 영역에서 충분히 퍼져나가 정상상태에 이르는 시간까지 정상상태의 계산을 수행하였다. 경계조건은 동서 및 남북방향의 경계면에서 무한 경계조건을 취하였다. 3차원 오염물 이동 모델을 운영하

기 위한 기본 입력자료인 종방향, 횡방향 분산도, 밀도 및 분배계수 등을 표 2에 나타내었다 [3,6]. 토양 내로 오염물이 흡착되는 것은 선형 흡착식을 이용하여 모사하였다. 계산된 방사성물질의 농도 단위는 Bq/m^3 이다.

대덕 부지내 원자력시설로부터 지표 토양 환경 내 U-234의 거동 해석결과를 그림 7부터 9까지에 나타내었다. 그림 7에서 지표면 부근에서 xy 방향의 농도분포를 살펴보면 원전연료의 가공공장을 중심으로 주로 동쪽방면으로 지하수가 흘러가는 방향과 같은 쪽으로 U-234의 농도분포가 나타나고 있다. 선원항을 중심으로 서쪽방향으로도 오염물이 퍼져나가고 있는데, 이는 종방향 및 횡방향의 분산지수에 의한 수력학적 분산에 의해 이동된 것으로 생각된다. 그림 8의 xz 방향의 농도분포를 살펴보면 계산영역의 중심 부근에서는 xy 방향으로의 이동과 유사히 오염물이 전반적으로 동쪽방면으로 향하고 있다. 그림 9의 yz 방향의 농도분포를 살펴보면 용바위 고개가 위치한 곳에서는 용바위 고개를 중심으로 상대적으로 적은 양의 오염물이 남북방향으로 이동하고 있고, 계산영역의 중심 부근인 면에서는 지하수 유동에 의해 전반적으로 남쪽방향으로 오염물이 이동하고 있다.

Table 2. Basic input parameters of transport model

	K_d (m^3/kg)	ρ_b (kg/m^3)	α_L (m)	α_T (m)
silty sand	0.3	1.5×10^3	0.1	0.01
granite	0.6	1.8×10^3	0.1	0.01

concentration profiles on xy plane (z=11)

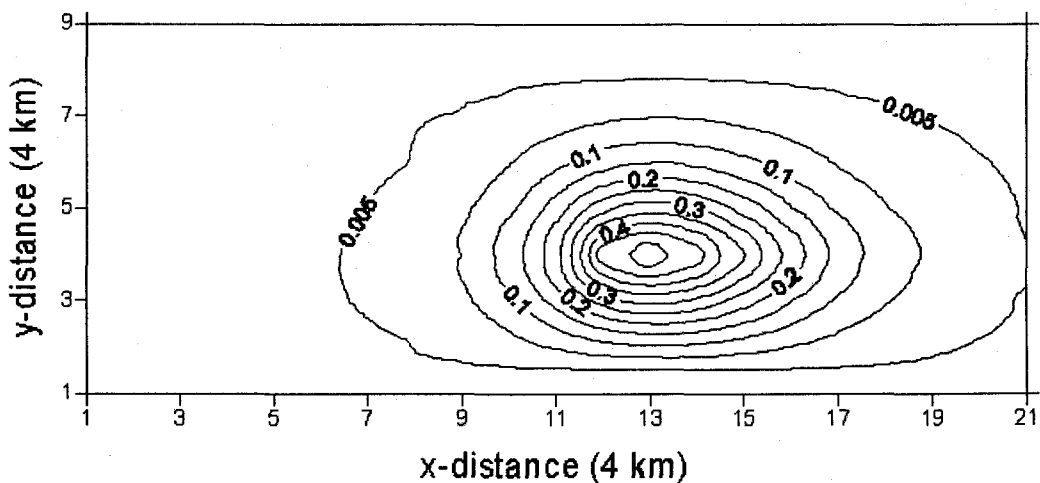


Fig. 7. Calculated concentration profiles on xy plane.

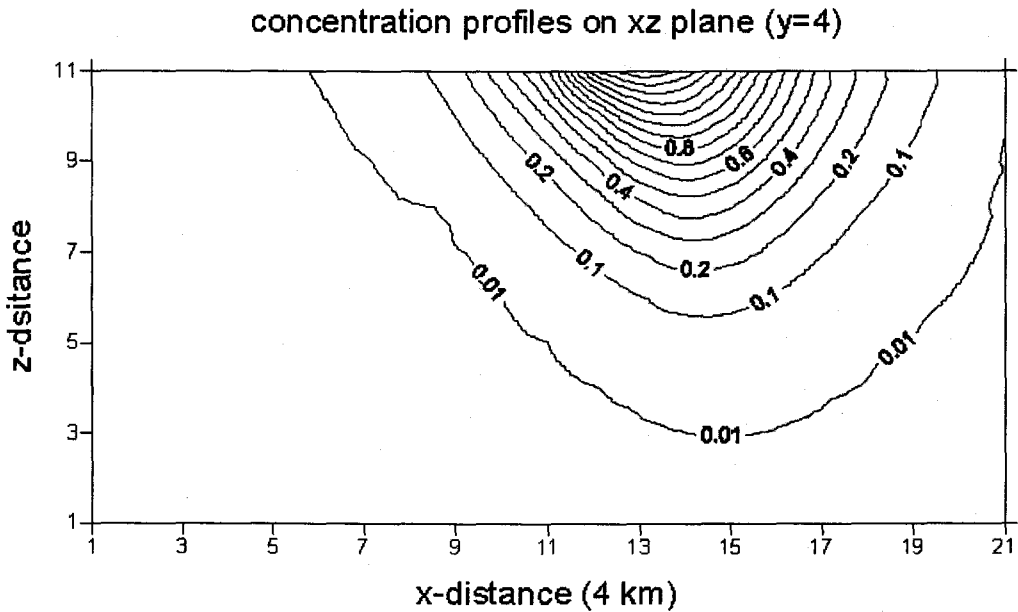


Fig. 8. Calculated concentration profiles on xz plane.

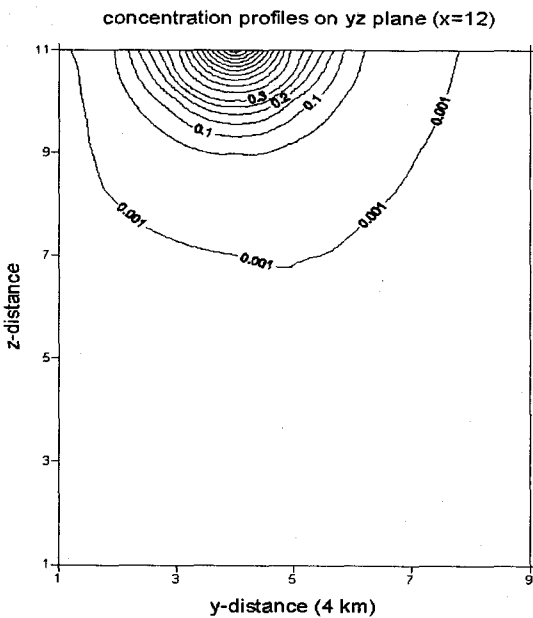


Fig. 9. Calculated concentration profiles on yz plane.

이동·확산되는 과정을 평가하기 위하여 3차원 지하수 유동 및 오염물 이동모델을 수립하였다. 대덕 단지에 적용한 결과 지하수는 하나로를 중심으로 동쪽 및 동남 방향으로 주로 흘러가고 있었고, 지표 침적된 방사성 물질은 주로 이들의 경로를 따라 이동되고 있었다. 본 연구를 통하여 계산된 U-234의 토양내 농도 값은 상당히 적게 산정됨으로써 대덕 부지내 원자력시설로부터 대기 중으로 방출된 후 지표 침적에 의해 토양내로 유입되는 방사성물질에 의한 환경내 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

본 연구를 통하여 수립된 모델은 원전시설의 정상 가동시 주변 토양내 환경 방사능 농도분포 예측기술을 제공할 수 있으며, 또한 원전시설의 비상시 토양을 통한 주변 환경 생태계 피해 예측기술을 제공할 수 있을 것이다. 수립된 모델의 현장 적용을 통하여 원전시설의 일부 지점에서 분석되는 모니터링 자료의 신뢰성을 향상하고, 궁극적으로는 방사선 비상 대응 시스템의 부모들로 제공되어 국가 방사선 비상 대응 기술의 건전성 확립할 것이다.

결론

대덕 원자력시설로부터 대기 중으로 방출된 후 지표에 침적되어 토양 환경내에서 방사성물질이

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 지원한 원자력중장기과제 연구사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 한국원자력연구소, 대덕 원자력관련시설의 운영중 방사선 환경영향평가(2001년보), 한국원자력 연구소, KAERI/CR-126/2002 (2002).
2. 한국원자력연구소, 원자력시설주변 환경방사선 평가, 한국원자력연구소, KAERI/RR-2192/2001 (2002).
3. G.T. Yeh, S.S. Hansen, B. Lester, R. Strobl and J. Scarbrough, *3DFEMWATER /3DLEWASTE : Numerical codes for delineating wellhead protection areas in argricultural regions based on the assimilative capacity criterion*, U.S. EPA, EPA/600/R-92/223 (1992).
4. R.A. Freeze and J.A. Cherry, *Groundwater*, Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs (1979).
5. 한국원자력연구소, 고준위 방사성폐기물 처분 시스템 엔지니어링 연구, 한국원자력연구소, KAERI/CCM-075/96 (1997).
6. 한정상, *환경수리지질학*, 신우문화사 (1988).