Journal of Radiation Industry 3(3) : 247~254(2009)

Technical Paper

ModelCARE 분석 및 처분장 적용 비교 연구

김 기 철 · 서 경 석*

한국원자력연구원 원자력환경안전연구부

Analysis of ModelCARE and Intercomparison Study for Application of Models at Repository

Ki Chul Kim and Kyung Suk Suh*

Nuclear Environmental Safety Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353, Korea

Abstract - A ModelCARE (Calibration and Reliability in Groundwater Modeling) is an international forum on state-of-the-art for methodologies and techniques of the calibration and reliability assessment of the groundwater flow and pollutant transport models. In this study, the characteristics of the models in ModelCARE were described and the application capability of models was analyzed. The radioactive waste repository at Hanford site was selected to perform the intercomparison study and the basic input data such as topography, initial hydraulic head and source rate were constructed to simulate the velocity and concentration fields. The calculated results between models agreed well.

Key words : ModelCARE, Groundwater flow, Pollutant transport

서 론

지하 수자원은 식수로서의 물 공급과 농업 및 산업용수로서 활용되는 중요한 자원이다. 지하 환경내 지하수 유동과 지하 매질내 오염물 거동 특성을 평가하는 것은 수자원 보호 뿐 아니라 주변 지하 생태계에 미치는 영향을 조사하는 측면에서 중요하다. 지하수 모델링은 현장 또는 실제 상황의 지하수 유동 및 오염물질의 거동 특성 등을 이론적 모델을 이용하여 재현, 분석 그리고 예상되는 변화를 예측하는 과정이다. 그리고 대수층 구조와 지하수 유동 현상을 여러 가지 수학적 수식으로 단순화시켜 묘사하고 이를 프로그램화 한 것으로서 지하매질의 경계조건, 수리상수, 지하수 유출입 조건 등을 모델에 입력하여 지하 매질내 지하수 및 오염물 이동 특성을 모수화한 것이다.

지하수 유동 및 오염물 이동 수치 모델은 지난 30년간 많은 진전과 다수의 모델이 개발되어져 왔다. ModelCARE (Calibration and Reliability in Groundwater Modeling)는 지하수 모델링 시스템들의 보정과 신뢰성을 평가하기 위해 첨단 방법론과 기술을 소개하고, 선진 사례연구를 통하여 현존하는 문제들에 대한 다양한 접근 방법과 나아갈 방향을 제시하기 위해 결성된 국제 모임이다. 본 연구에서는 ModelCARE 참가 모델 (Wang 2009)의 특성을 분석하고, 모델의 장 · 단점을 평가하여 모델 적용의 적합성과 한계성에 대해 기술하였다. 또한 참가

* Corresponding authors: Kyung Suk Suh, Tel. +82-42-868-4788, Fax. +82-42-868-8943, E-mail. kssuh@kaeri.re.kr

모델 중 CFEST 모델(Williams *et al*. 2002)과 GMS 모델(GMS v6.5 2005)을 이용하여 미국 Hanford 처분 매립장 주변에서 H3 농도의 시·공간적 거동 특성을 동일 시나리오를 이용하여 평가하였다.

ModelCARE 개요 및 참가 모델

ModelCARE는 1990년에 시작된 ICGW(International Commission for Groundwater)에 의해 조직된 지하수 유동 및 오염물 이동 모델링을 상호 비교하는 국제 모임이다. ModelCARE는 각각의 모임에 동기부여를 주기 위해 적절한 목적을 두고 진행되어왔으며 제7회째는 "Managing Groundwater and the Environment."라는 주제하에 중국 우한에서 개최되었다(Wang 2009). ModelCARE는 연구원들과 엔지니어들이 지하수 모델 개발에 새로운 아이디어와 해석 방법을 증명하고 당면한 문제점을 토의하는 국제 포럼이다. 지하수 모델에 의해 예측된 모사결과는 모델의 신뢰성과 불확실성을 제시한다.

지하수의 흐름 상태나 지하수 내의 오염물질의 거동현상을 재현, 분석 그리고 예측하는 것이 지하수 모델링이다. 지하수 모델링은 지하 매질내의 시·공간적인 수두(hydraulic head)의 변화나 오염물질의 농도분포와 같은 미지의 변수를 예측하는 일련의 과정이다. 지하수 수치모델에 관한 연구는 Hubbert(1940)가 지하수 유동이론을 소개한 것을 시작으로, Freeze and Witherspoon(1966)은 수학적 모델에 의한 3차원 비균질 및 이방성 매질에서의 정상 지하수 흐름을 해석하였다. Pinder and Bredehoeft(1970)는 유한차분 모델을 이용하여 빙하 퇴적물로 이루어진 대수층을 해석하였고, Kuiper and Fisher(1975), Gupta *et al*.(1984)은 이질층들로 구성된 지하수 체제에 관한 3차원 유한요소법을 이용한 모델을 개발하였으며 정상류에서 3차원 모델의 응용성을 개선시켰다. 이 후에 Narasimhan and Witherspoon(1976)은 3차원 지하수 흐름체계에 대한 유한차분방정식의 적용을 발전시켰고, Wang and Anderson(1982)은 유한차분 및 유한요소법에 의한 지하수 모델링에 관한 기본 이론을 정리하였다.

1. MODFLOW

MODFLOW(A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Groundwater Flow Model)는 USGS(United States Geological Survey)에 의해 개발된 지하수 유동 수치모델로 주 프로그램과 서로 독립적인 많은 수의 모듈로 구성되어져 있다(McDonald and Harbough 1983). MODFLOW는 다공성 포화매질 내에서 지하수 유동을 모의하기 위해 개발되었으며, 모의영역은 포화대이고, 대수층은 다공질 매질로 변형되지 않고, 유체는 비압축적이란 가정하에 개발되었다. 따라서 밀도류해석과 DNAPL(Dense Non-Aqueous Phase Liquid)에 의해 오염된 지하수와 같은 다상 유동체, 불연속이 큰 파쇄대 및 이방성의 방향성이 일정치 않는 지하 환경에는 적용하기 어려운 단점이 있다.

토양으로 유입된 강우는 공극을 통해서 거동하며 이러한 거동을 지배하는 일반 이론은 Darcy 법칙이다. 다공성 포화매질 내에서 밀도가 일정한 지하수의 3차원 유동의 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_y\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_z\frac{\partial h}{\partial z}\right)\pm W=S_s\frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

식(1)에서 K_x, K_y 및 K_z는 x, y, z 방향에서 수리전도도(m s^{-1}), h는 지하수의 수두(m), t는 시간(s), W는 대수층의 단위체적당 유동량(m s^{-1}), S_s는 대수층의 비저류계수(m^{-1})이다. 식(1)은 비균질 및 이방성 매질에서 비 정상상태 하에서의 지하수 유동방정식으로 포화 대수층의 경계에서의 지하수 유동체계를 나타낸다. 또한 시간에 따라 수두 분포가 변하는 지하수흐름의 특성을 나타내며 포화 대수층내에 초기에 저류되어 있던 지하수량과 유동에너지를 계산할 수 있을 뿐만 아니라 유동 방향과 유동율도 계산할 수 있다. MODFLOW의 이용분야로는 물관리 및 이수분야로 우물 상호간의 간섭현상을 규명하거나, 최적지하수 관리에 이용될 수 있다. 또한 댐의 누수나 사면배수, 개착시 굴토공사의 배수등을 예측할 때 이용하는 지반공학 분야, 오염지하수의 정화시스템 설계 등에 이 가능하다.

2. MT3D

MT3D(A Modular 3-Dimensional Transport Model)는 MODFLOW와 유사한 모듈식으로 복잡한 수리지질 구조에서의 용질이동에 대해 널리 이용되는 3차원 유한차분 모델이다(Zheng 1990). 정류(steady-state flow)와 부정류(transient flow), 이방성의 분산(anisotropic dispersion), 일차 감쇄(first-order decay), 용질간의 화학반응(chemical reaction), 선형과 비선형의 흡착(linear and non linear adsorption) 등을 모두 고려하면서 이송에 의한 용질 이동을 모사할 수 있다. 초기에는 입자추적기술을 사용하지 않고 Eulerian방식에 의해 효과적이고 빠르게 계산을 수행하였다. 그러나 계산과정에서 상당한 수치적 분산이

발생하여 후에 입자추적방식이 적용되었다.

지하수내의 각종 오염물질의 3차원 거동을 모사한 MT3D 모델의 지배방정식은 다음 식과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial \xi}\left(D_{ij}\frac{\partial C}{\partial X}\right)-\frac{\partial}{\partial X}(ViC)+\frac{g_s}{n}C_s-\sum_{K=1}^{N}R_k \quad (2)$$

식 (2)에서 C는 오염물 농도, D_{ij}는 분산계수, V_i는 지하수 유속, ρ_s는 토양 밀도, n은 공극, $\sum_{K=1}^{N}R_k$는 화학 반응항으로 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$\sum_{K=1}^{N}R_k=\frac{\rho_b}{n}\frac{\partial \overline{C}}{\partial t}-\lambda\left(C+\frac{\rho_b}{n}\overline{C}\right) \quad (3)$$

$$\frac{\rho_b}{n}\frac{\partial \overline{C}}{\partial t}=\frac{\rho_b}{n}\frac{\partial C}{\partial t}\frac{\overline{C}}{\partial C} \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)를 식 (2)에 대입하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R\frac{\partial C}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial X_i}\left(D_{ij}\frac{\partial C}{\partial X_i}\right)-\frac{\partial}{\partial X_i}(ViC)+\frac{g_s}{n}C_s-\lambda\left(C+\frac{\rho_d}{n}-\overline{C}\right) \quad (5)$$

식 (5)에서 R은 지연계수 (retardation factor), C는 지하수내에 용해되어 있는 오염 물질의 농도 (kg m^{-3}), X_i는 해당 좌표의 거리 (m), D_{ij}는 수리 분산계수 (m^2 s^{-1}), Vi는 평균 선형 유속 (m s^{-1}), g_s는 대수층의 단위 체적당 유량 (s^{-1}), ρ_b는 다공질 매체의 건조단위중량 (kg m^{-3}) $\overline{C}$는 다공질 매체에 흡착된 오염물질 농도 (kg kg^{-1}), λ는 1차 반응률의 반응계수 (s^{-1})이다. 식 (5)는 지하수에 용해되어 있는 오염물질이 유속과 동일한 속도로 이동하는 이류항과 농도차 등에 의한 거동을 나타내는 분산항, 우물, 배수로, 강 및 하천과 함양 및 증발산을 나타내는 공급 배출원으로 이루어져 있으며 화학반응이 포함되어 있다.

3. CFEST

CFEST (Coupled Fluid Energy Solute Transport)모델은 3차원 유한요소모델로 지하수 유동과 오염물 이동을 동시에 계산할 수 있는 모델이다 (Williams *et al*. 2002). 지하수 흐름은 보통 토양 유체의 균형 방정식의 해석을 통해 계산된다.

$$\frac{\partial(\varepsilon S_w\rho_f)}{\partial t}=-\nabla\cdot(\varepsilon S_w\rho_f v)+Q \quad (6)$$

식 (6)에서 ε는 공극률, S_w는 수면 포화율, ρ_l는 유체 밀도 (kg m^{-3}), v는 평균 유속 (m s^{-1}), Q는 유량 (m^3 s^{-1})이다. 비흡착에 관한 질량 보존 방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho C)}{\partial t}=-\nabla\cdot(\varepsilon\rho vC)+\nabla\cdot(\varepsilon\rho(D_mI+D)\cdot\nabla C)+QC^* \quad (7)$$

식 (7)에서 C는 용질의 농도 (kg m^{-3}), D_m은 분자확산계수 (m^2 s^{-1}), I는 Identity tensor, D는 분산계수 (m^2 s^{-1}), c*는 흐름해석에 의한 용질의 농도 (kg m^{-3})이다.

4. PHREEQC

PHREEQC는 물의 화학 반응을 포함하여 폭 넓게 다양한 지구화학적 연산을 수행하기 위해 설계된 C언어 프로그램으로 Fortran 프로그램인 PHREEQE (Parkhurst and Appelo 1999)를 근본으로 하는 모델로 종 형성과 포화 지수 계산, 특정 불역 반응, 용액의 혼합, 광물 및 기체 평형, 표면 화합물화 반응 그리고 이온 교환 반응을 포함하는 반응-경로 및 이류-수송 계산, 특정 성분 불확실도 내에서 여러 물 사이의 성분차이를 설명하는 광물 및 기체 몰 전달의 집합을 찾는 역 모형화의 특성을 갖고 있다. 또한 시간의 경과에 반응속도를 통합하고, 변환된 미네랄 화합물의 몰을 결정하기 위해 Runge-Kutta algorithm을 사용한다. Transition state 이론을 기반으로 하는 일반적 반응속도는 미네랄과 수용액 사이의 모델링 하는데 사용된다.

5. PEST와 UCODE

PEST (Parameters Estimation Procedure: Doherty 1994)와 UCODE (Universal inverse CODE)는 지하수 유동 및 오염물질 변화 해석에 관계된 파라미터를 추정하기 위하여 실측된 지하수 수위, 유속, 농도 등을 모델링 결과와 비교하여 오차를 최소화하여 파라미터를 추정하는 모형방법으로, PEST는 비선형 파라미터를 추정 패키지로 어떤 파라미터를 포함하는 문제를 위한 예측 분석을 실행 할 수 있다. PEST는 비선형추정이론 패키지와는 차이가 있으며 PEST는 모델의 “take control”을 할 수 있으며, 선택된 모델은 출력 및 필드 또는 실험실 측정의 집합 사이의 불일치를 보완하기 전까지 매개 변수를 조정하기 위해 최소한으로 필요한 최소 제곱법에 가중치를 두어 여러 번 실행할 수 있다.

6. PHT3D

PHT3D는 MODFLOW와 MT3D를 기반으로한 수성복합, 무기물 침전·용해와 이온 교환을 포함하여, 평형과 활동적 반응 처리의 폭넓은 범위를 다룰 수 있는 모델이다 (Steefel and MacQuarrie 1996). PHT3D는 다중성분 NAPL-phase로부터 간기 물질 이동, 다중성 유기화합

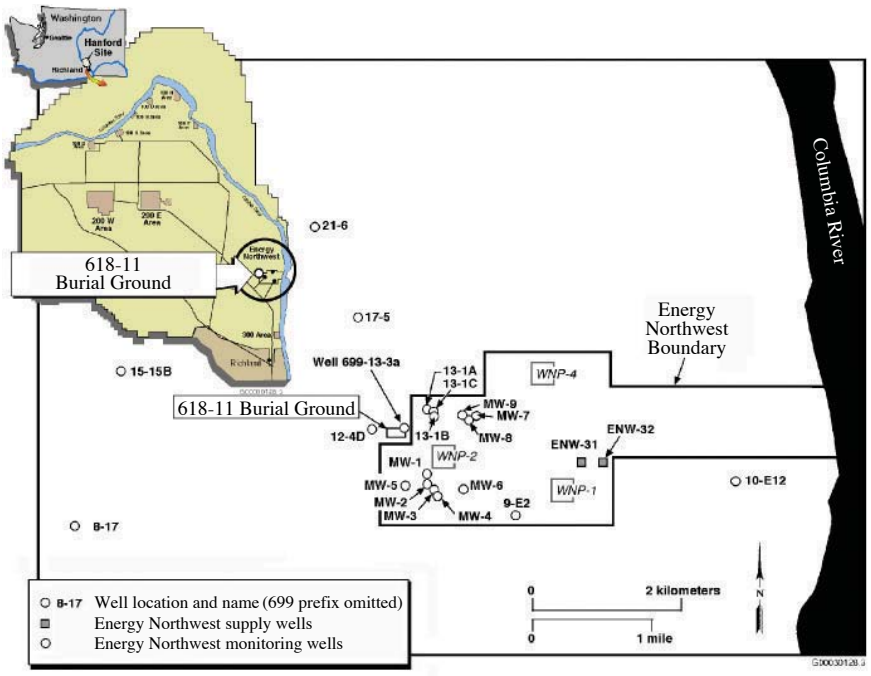

Fig. 1. Well locations in the vicinity of the 618-11 burial ground.

물과 무기화합물 3차원적 이류-분산 흐름, 생분해 모듈 그리고 지구화학 평형 모듈을 통해 연결한다. 이류-분산 흐름은 각각 유기 화합물을 위해 개별적으로 실행되며, 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial C_i}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x_\alpha}\left(D_{\alpha\beta}\frac{\partial C_i}{\partial x_\beta}\right)-\frac{\partial}{\partial x_\alpha}\left(v_\alpha C_i\right)+\frac{q_s C_i^s}{\theta}+r_{reac,i} \qquad (8)$$

식 (8)에서 C_i는 i^{th}성분의 전체 물의 성분 농도, C_i^s는 source나 sink flux의 농도, v_α는 x_i방향의 공극 속도, $D_{\alpha\beta}$는 수리 분산계수, q_s는 유체 source와 sink를 나타내는 대수층의 단위부피당 체적의 유동율, θ는 지하 매체의 공극률, $r_{reac,i}$는 화학반응에 의한 source와 sink의 비율이다.

Hanford 처분 매립장에서 모델간 상호 비교

ModelCARE 참가 모델중 미국에서 개발된 CFEST (Williams *et al*. 2002)모델의 산정 결과를 GMS (GMS v6.5 2005)시스템내 포함된 MODFLOW 및 MT3D를 이용하여 동일 시나리오에서 모사하였다. 상호 비교를 위한 부지로 미국의 Hanford 처분장의 618-11 폐기물 매립장을 선정하였다. 618-11 폐기물 처분장은 1962～1967년까지 약 5년 동안 폐기물을 매립하였고, 이후 1972년 Pacific Northwest Laboratory에서 이 지역의 지질조사를 위해 core를 채취한 결과 깊이 8.8 m, 9.4 m에서 소량의 방사성 핵종이 관측되었다. 이후 처분장 주변의 정확한 모니터링을 위하여 여러 지역에 시추공을 설치하여 모니터링을 하였고 기존에 매립한 방사성폐기물로부터 H3, Uranium 및 Cs-137 등의 농도가 관측정에서 관측됨에 따라 주변 지하매질을 통한 방사성폐기물의 거동 특성 평가가 CFEST 모델을 이용하여 수행되었다. 동일 조건에서 모델간 비교 평가를 위해 618-11 매립장으로부터 누출된 방사성폐기물 중 H3의 장기 거동 영향을 선정하였다. Hanford 처분장 618-11 처분 매립장의 위치 및 시추공 위치도를 Fig. 1에 나타내었다. 618-11 매립장에서 시추공을 통한 모니터링 결과 방사성폐기물로부터 유출된 H3이 시간이 경과함에 따라 매립장에서 콜롬비아 강이 위치한 동쪽 방향으로 지하매질을 통하여 이동하는 것이 조사 되었다. 618-11 매립장 주변의 지질은 상부에 자갈과 모래로 구성된 층이, 하부에 점토질 성분이 있고 평균해수면에서 상부 40 m 위치에서는 모래성분이 함유된 실트질 흙으로 구성되어져 있다. 681-11 매립장 주변 지질도를 Fig. 2에 나타내었다.

Hanford site의 618-11 매립장 주변 지하 매질내 H3 거동 상호 비교를 위하여 MODFLOW와 MT3D 모델이 본 연구에서 사용되었다. 계산영역은 동서방향으로 8 km, 남북방향으로 7 km의 영역을 선정하여 $\Delta x=72$ m, $\Delta y=$

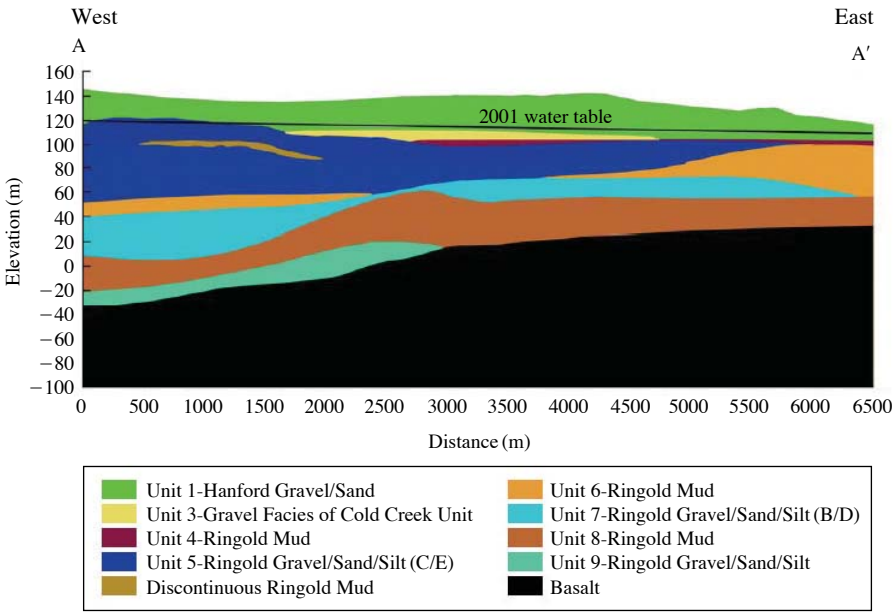

Fig. 2. Geological structure at west-to-east cross section.

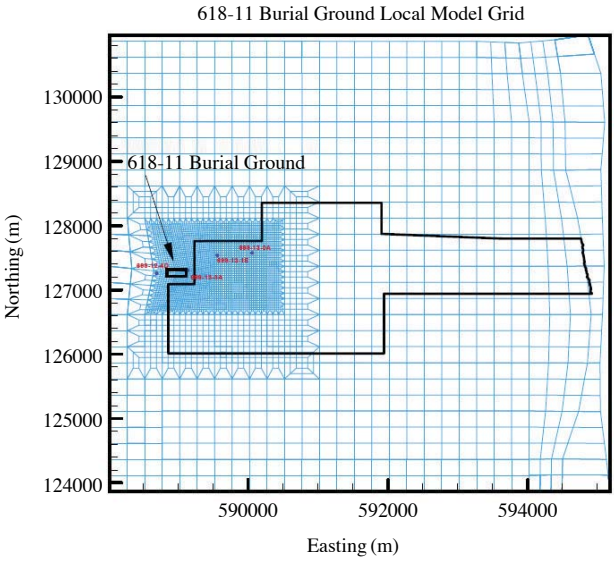

Fig. 3. 618-11 Burial ground model grids.

Fig. 4. Calculated hydraulic head using MODFLOW.

88 m로 분할하여 110×80개의 수평 격자망을 형성하였고, 수직방향으로는 평균 해수면위의 3개의 수직층을 고려하였다. x, y 방향의 계산영역은 Fig. 3에 나타내었고, 계산에 이용된 수리 변수 값은 Table 1과 같다. 지하수 유동 및 오염물 이동 모델인 MODFLOW와 MT3D의 운영을 위한 경계조건은 남북방향에서는 불투수성 조건, 동서 방향에서는 수두 값을 입력하였다. 618-11 매립장에서 H3 농도는 2.0×10^{7} pci를 선원항으로 입력하여 10년간 H3이 방출되었다고 고려하고, 2000년부터 2030년까지 30년간 계산을 수행하여 CFEST 모델과 본 연구에서 이용한 MT3D 모델 계산 결과를 상호 비교하였다. 선정된 영역에서 Table 1의 수리 변수 값과 지형도를 이용하여 산정한 등수두선의 분포를 Fig. 4에 나타내었다. 또한 MT3D 모델의 계산 결과를 CFEST 모델의 결과와 비교하여 Fig. 5에서 Fig. 10에 나타내었다.

2001년에 618-11 처분 매립장 주변에서 산정된 H3의 농도 분포를 비교하여 보면 Fig. 5의 CFEST 결과가 Fig. 6의 GMS 결과보다 약간 북쪽방향으로 이동함을 알 수 있다. 그 이유는 Pacific Northwest National Lab. (Vemeul

Table 1. Flow and transport properties for the geological units

	Kx (m d^{-1})	Ky (m d^{-1})	Kz (m d^{-1})	Porosity	A_L (m)	A_T (m)	Dm (m^2 d^{-1})
Unit 1	363.0	363.0	36.3	0.25	7.0	1.40	1.73E-4
Unit 2	1.0E-4	1.0E-4	1.0E-5	0.15	7.0	1.40	1.73E-4
Unit 3	297.0	297.0	29.7	0.30	7.0	1.40	1.73E-4
Unit 4	5.0E-4	5.0E-4	5.0E-5	0.40	7.0	1.40	1.73E-4
Unit 5	10.6	10.6	1.06	0.20	4.5	0.70	1.73E-4
Unit 6	1.0E-2	1.0E-2	1.0E-3	0.40	4.5	0.70	1.73E-4
Unit 7	1.0	1.0	0.1	0.15	4.5	0.70	1.73E-4
Unit 8	1.0E-5	1.0E-5	1.0E-6	0.15	4.5	0.70	1.73E-4
Unit 9	1.0	1.0	0.1	0.15	4.5	0.70	1.73E-4

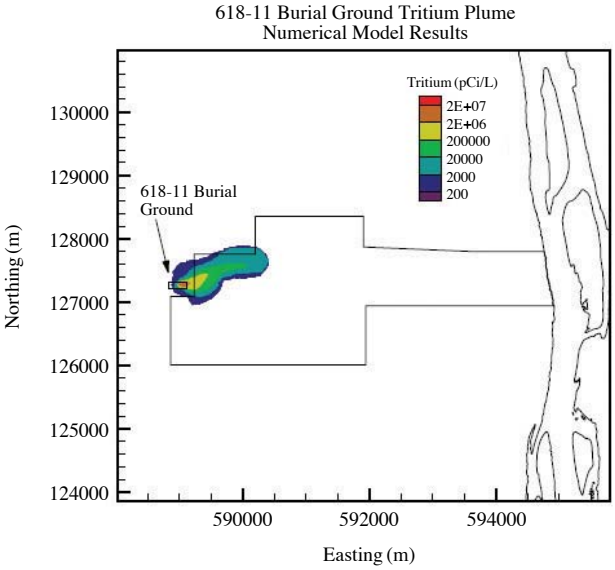

Fig. 5. Tritium concentration contour using CFEST model in 2001.

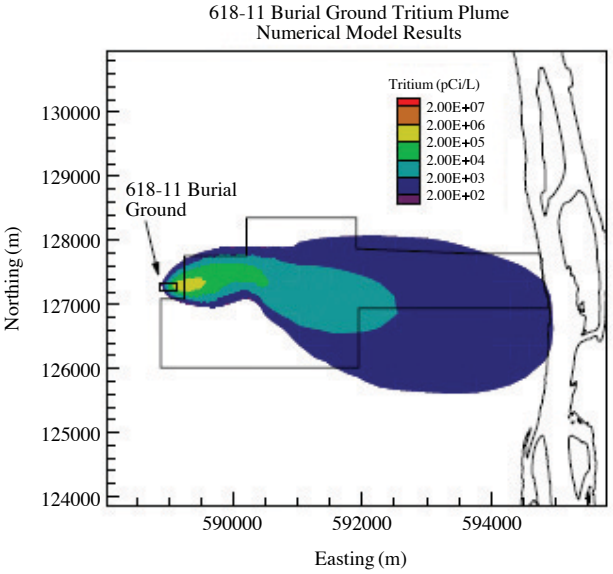

Fig. 7. Tritium concentration contour using CFEST model in 2007.

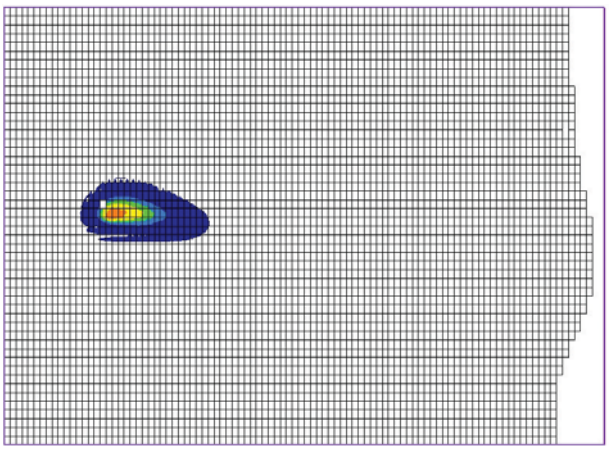

Fig. 6. Tritium concentration contour using GMS model in 2001.

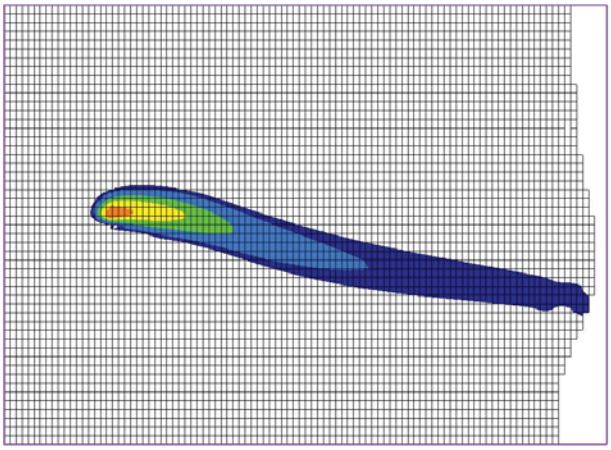

Fig. 8. Tritium concentration contour using GMS model in 2007.

et al. 2005)에서 CFEST 모델을 이용한 평가에서는 618-11 매립장 주변의 영역을 좀더 세분화한 nested grid 수치기법을 사용하여 매립장 가까운 곳의 지하수 유동 체계를 분석하여 이 근방에서 북동방향의 흐름이 산정되었기 때문이다. 시간이 지남에 따라 H3 농도는 동쪽방향으로 이동하고 있고, 2001년부터 2027년까지의 CFEST결

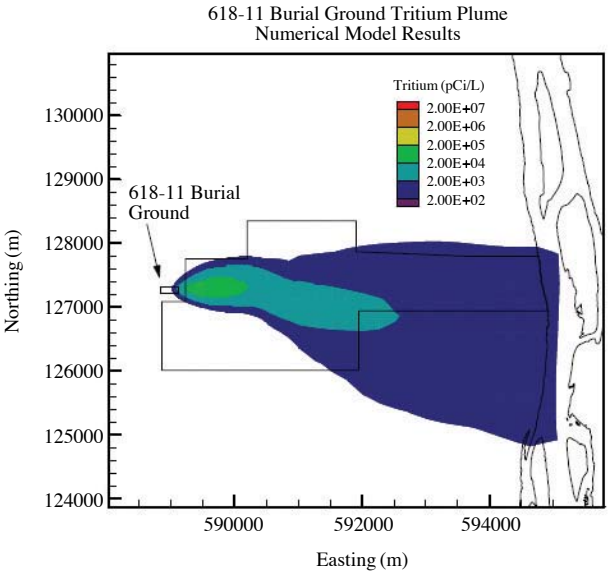

Fig. 9. Tritium concentration contour using CFEST model in 2027.

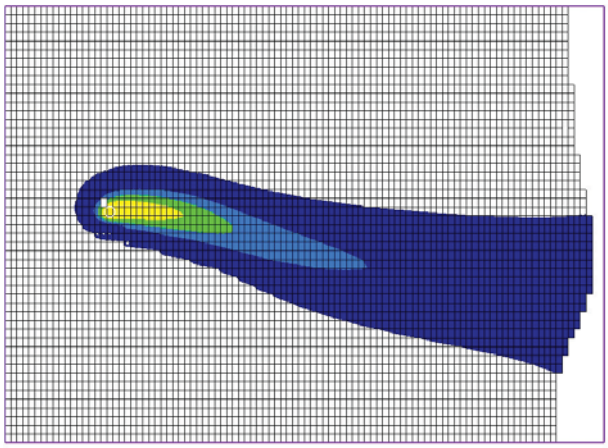

Fig. 10. Tritium concentration contour using GMS model in 2027.

과와 본 연구에서 이용한 GMS의 결과는 서로 유사하게 나타났다.

결 론

지하수 유동 및 오염물 이동에 관한 국제 모임인 ModelCARE 대해 기술하고, 참가 모델의 특성을 분석하였다. 지하 매질내 유입된 오염물의 거동 특성 평가는 지하 수자원의 보호 및 주변 환경에 미치는 영향을 평가하기 위한 중요한 사항이다. 초기 ModelCARE 모임은 개발된 지하수 및 오염물 이동 모델의 수치기법 향상 및 모델의 검증에 주안점을 두었는데, 최근에는 모델의 불확실성 최소화 및 변수의 민감도 해석 부분에 초첨을 맞추고 있다.

미국 Hanford site에서 H3 농도의 지하매질 이동을 평가한 CFEST 모델의 산정 결과와 본 연구에서 이용된 GMS 모델의 산정 결과를 동일 시나리오에서 해석하여 상호 비교하였다. 비교 결과는 유사한 계산 값을 보이고 있었다. 최근 우리나라의 경주 방사성폐기물 처분장이 건설되고 있는 시점에서 건설 완료후 운영 중인 처분장으로부터 강우 침투에 의한 처분장 주변 매질로의 핵종 이동을 평가하는 경우 본 연구에서 제안한 모델이 유용한 도구로 활용 될 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 교육과학기술부에서 시행하는 원자력연구개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

Doherty J. 1994. PEST: Model-Independent Parameter Estimation User Manual. 504pp. US EPA.

EMRL. 2005. Ground Water Modling Sysytem Ver. 6.5. 340pp. Brigham Young University.

Freeze RA and Witherspoon PA. 1996. Theoretical analysis of regional groundwater flow: analytical and numerical solutions to the mathematical model. *Water Resources Research* **2**(4):641-656.

Gupta RC. 1984. Relationships between order statistics and record values and some characterization results. *J. Appl. Prob.* **21**:425-430.

Hubbert MK. 1940. The theory of ground-water motion. *J. of Geology* **48**:785-933.

Kuiper FK and Fisher L. 1975. A Monte Carlo comparison of six clustering procedures. *Biometrics* **31**:777-783.

McDonald MG and Harbaugh AW. 1984. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. 528pp. U.S. Geological Survey Open-File Report.

Narasimhan TN and Witherspoon PA. 1976. An integrated finite difference method for analyzing fluid flow in porous media. *Water Resources Research* **12**:57-64.

Parkhurst DL and Appelo CAJ. 1999. User's Guide to PHREEQC (ver.2) - A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations, 580pp. Water-Resources Investigations Report 99-4259.

Pinder GF and Bredehoeft JD. 1970. Digital analysis of areal flow in multiaquifer groundwater systems: A quasi three-

dimensional model, *Water Resources Research* **26**:883-888.

Steefel CT and MacQuarrie KTB. 1996. Approaches to modeling reactive transport in porous media. In Reactive Transport in Porous Media. *Rev. Mineral* **34**:83-125.

Vermeul VR, Bergeron MP, Dresel PE, Freeman EJ, Peterson RE and Thorne PD. 2005. Evaluation of the fate and transport of tritium contaminated groundwater from the 618-11 burial ground. 120pp. Pacific Northwest Nat. Lab. Richland, WA.

Wang Y. 2009. Calibration and reliability in groundwater modeling : managing groundwater and the environment. 586pp. China University of Geoscience Press.

Wang HF and Anderson MP. 1982. Introduction to Groundwater Modeling: Finite Difference and Finite Element Methods, 237pp. Academic, San Diego.

Williams MD, Cole CR, Foley MG, Zinina GA, Zinin A, Vasilkova NA and Samsonova LM. 2002. Model intercomparison study to investigate a dense contaminant plume in a complex hydrogeologic system. *Environmental Geology* **42**:199-213.

Zheng C. 1990. MT3D: A Modular Three-Dimensional Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reaction of Contaminants in Groundwater Systems. 480pp. U.S. EPA.

Manuscript Received: September 26, 2009
Revision Accepted: September 29, 2009