환경영향평가 제10권 제2호(2001) pp.99~108

전산모형 및 공간정보시스템을 결합한 지하환경관리시스템의 개발 및 적용

김준현 · 한영한
강원대학교 공과대학 환경 · 생물공학부

A Subsurface Environment Management System Combining Computational Model and Spatial Information System

Kim, Joon-Hyun · Han, Young-Han
Division of Environmental and Biological Eng., Kangwon National University

Abstract

This study was performed to develop an information processing system for the sound conservation of soil and groundwater resources. The system contains numerical models and geographic information systems for underground flow and contamination. Multidimensional Finite Element Model for Subsurface Environment (MFEMSE) was invented to analyze underground flow and pollution problems of water and gas phases. Newly developed and conventional models (MODFLOW, MOC3D, MT3D, PMPATH, PEST, UCODE) were integrated with GIS (ArcView) for the construction of an integrated information management system of subsurface environment. This system was applied to the management of three mineral water companies located in clean high mountain basin. Desirable management criteria and operational strategies were suggested using this system. The system was constructed to be applied for the broad sense of decision supporting tools in related topics of this study, so that it can be used not only for the prevention regulations, but also for clean up projects.

Keyword: ArcView, Integrated System, MFEMSE, MODFLOW, MOC3D

I. 서 론

지하수자원의 수량적 이용가능성 및 지표면 하부 오염에 대한 사회적인 인식의 결여 및 전문분야에 대한 연구가 뒤져 있는 관계로 이미 많은 지역에서 지표면 하부의 토양 및 유체가 오염되고 있는 실정이다. 국내의 지표수자원 관리 정책

은 지구의 기상 변화에 의한 국지성 폭우 등으로 인하여 그 한계를 드러내고 있으므로, 홍수 및 용수 관리를 위한 지하수 이용 및 재충진 기술의 개발이 필요하다. 이러한 지하 환경을 보전하고, 수자원의 통합적 관리 사업을 진행하기 위해서는 사업 전체를 효율적으로 파악할 수 있는 실시간 정보 관리 시스템의 구축이 필수적이다[1,2]. 지하환경을 이해 예측하는 작업은 지표면 하부에서 일어나는 문제를 해석하여야 하기 때문에, 조사에 있어서 비용 및 시간이 많이 요구되기 때문에 수학적 전산 모형들이 많이 사용되고 있다. 최근의 전산 장비의 혁신적인 발전은 이러한 전산모형의 효용성 및 필요성을 빠르게 증대시키고 있으며, 장래에는 인터넷을 활용하여 공간 및 시간에 제한이 없는 시스템으로 발전될 것이 확실시된다. 이러한 시스템은 방대한 자연 자료를 효과적으로 정리 분석하여 모형과 결합시키기 위한 공간정보시스템을 포함한다.

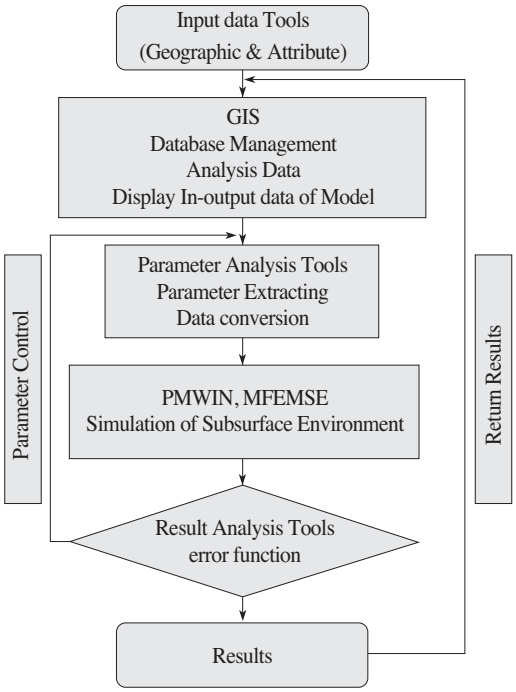

그림 1. 지하환경관리시스템의 운영 체제

II. 연구 내용 및 방법

1. 연구 목적 및 범위

본 연구에서는 토양 및 지하수 등 지하환경 보전을 위한 각종 사업에 있어서 설계, 정책 결정, 실시간 관리의 도구로서 사용될 수 있는 전산시스템을 개발하기 위하여 기존의 전산 모형을 조사하여, 효과적인 전산모형을 개발하고, 이러한 개발된 시스템을 공간정보시스템과 결합하여 전체적인 작업의 효율을 극대화하고, 사용자가 쉽게 이해하여 결과를 입체적으로 나타낼 수 있는 시스템을 구축하였다. 개발된 시스템의 효용성을 입증하기 위하여 연구 대상 유역의 지표 및 지하 환경 자료를 공간정보시스템으로 분석하고, 기존 및 새로이 개발된 전산모형을 공간정보시스템과 결합하여, 자세한 현황 및 장래 예측을 수행하였다.

지하환경관리시스템의 전반적인 운영체제를 다음 그림 1에 나타내었다. 우선, 지하환경관리시스템의 구축을 위해 입력된 공간 및 속성정보는 데이터베이스로 구축되고 공간분석을 통해 새로운 자료를 생성한다. 생성된 자료는 PMWIN 및 MFEMSE의 입력자료로 사용되기 위해 dbf 또는 ascii파일로 변환되어 모형으로 입력된다. 모형의 계산결과는 파라미터 분석 과정을 거쳐 다시 ArcView로 입력되어 도면, 그래프, 도표 등 다양한 형식으로 분석되며, TIN을 이용한 3차원 분석 등 보다 가시적이며 효율적인 결과 분석을 수행할 수 있다.

2. 기존 모형(PMWIN)의 적용

본 연구에서는 기존의 지하수환경 모형중 세계적으로 널리 알려진 MODFLOW 및 MOC3D 모형을 적용하기 위하여, 두가지 모형을 모두 포함하고 있는 Window용 PMWIN 모형을 사용하였다[3,4,7].

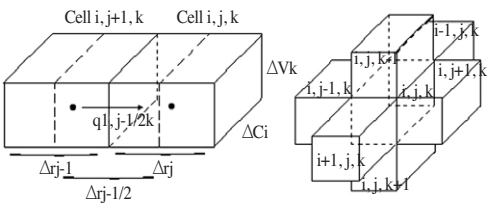

그림 2. MODFLOW 모형의 격자망 구성

본 모형은 사용자에게 편리하도록 MODFLOW, MOC3D[15,16,20], MT3D[21,22,23,24], MT3DMS[25], PEST[8], UCODE[18] 등의 모형을 모두 포함하며 용이하게 운영할 수 있도록 GUI 기능을 강화하였으며, 유선추적을 위한 MODPATH[19]를 확장시킨 PMPATH[5,6]를 포함하고 있다. MODFLOW-88[17], MODFLOW-96[10,11] 등은 미국 USGS에서 개발한 삼차원 유한차분모형으로서 지하수 유동을 계산하는 것 이외에 관정, 하천, 배수, 수위경계조건, 재충진 및 증발산 등에 의한 영향을 해석할 수 있는 기능을 가지고 있다. MODFLOW에서는 그림 2와 같은 격자망에 대하여 운동방정식 대신에 Darcy의 유속(식 (1))과 연속방정식(식 (2))을 적용하여 유한차분법을 사용하여 지하수의 유속과 수심을 구한다.

$$q_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \cdot \Delta c_i \Delta v_k \frac{(h_{i,j-i,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j-1/2}} \quad (1)$$

$$q_{i,j-1/2,k}+q_{i,j+1/2,k}+q_{i-1/2,j,k}+q_{i+1/2,j,k}+q_{i,j,k-1/2}+q_{i,j,k+1/2}+QS_{i,j,k}=SS_{i,j,k} \cdot \frac{(\Delta h_{i,j,k})}{\Delta t} \cdot \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k \quad (2)$$

여기서, $h_{i,j,k}$는 i, j, k 절점에서의 수위이고, $q_{i,j-1/2,k}$는 유량, $KR_{i,j-1/2,k}$는 Δr방향 투수계수, Δc_i Δv_k는 단면적, $\Delta r_{j-1/2}$는 절점사이의 거리를, $\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t}$는 수위의 시간미분항을 유한차분법으로 표현한 것이고, $SS_{i,j,k}$는 비저류계수, $\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k$는 격자의 부피이고, 외부의 생성원인 $QS_{i,j,k}$는 양수정, 충진정, 강우수, 하천, 관거, 증발산 등의 원인으로 발생하며 다음의 식으로 나타낸다.

$$a_{i,j,k,n} = p_{i,j,k,n} \cdot h_{i,j,k} + q_{i,j,k,n} \quad (3)$$

$a_{i,j,k,n}$은 n번째 외부수원으로부터 i, j, k 격자로의 유동을 나타낸다. 그리고 $p_{i,j,k,n}$과 $q_{i,j,k,n}$은 각각 상수이다.

오염물 추적을 위한 용질이동모형인 MOC3D는 입자추적법을, MT3D[7]과 MT3MS[5]는 유한차분법을 사용하였다. MOC3D 모형의 지배식은 비압축성 유체의 3차원 용질이동식이다.

$$\frac{\partial(\varepsilon C)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_b \bar{C})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon C V_i) - \frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j}) - \sum C' W + \lambda(\varepsilon C + \rho_b \bar{C}) = 0 \quad (4)$$

여기서, ε는 공극율, C는 용질의 농도, ρ_b는 토양의 부피밀도(대수층의 단위 부피당 토양의 밀도), $\bar{C}$는 흡착된 물질의 농도, V는 공극내 유속, D는 분산 계수, W는 생성이나 소멸의 원인이 되는 외부 유입/유출 유량, C'는 W내 물질의 농도, λ는 소멸율이다.

평형 흡착에 의한 흡착 농도를 고려하면, 다음과 같은 흡착농도와 지연계수를 유도할 수 있고, 지배식은 다음의 식으로 표현된다.

$$\bar{C} = K_d C, \quad R_f = 1 + \frac{\rho_b K_d}{\varepsilon} \quad (5)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{V_i}{R_f} \frac{\partial C}{\partial x_i} - \frac{1}{\varepsilon x_i} \frac{\partial}{\partial x_i}(\varepsilon D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j}) - \sum \frac{[W(C' - C)]}{\varepsilon R_f} + \lambda C = 0 \quad (6)$$

위의 물질이동식에서 유속에 의한 이송은 입자추적법을 사용하여 물질이 이동한 위치를 추적하며, 확산에 의한 이동은 유한차분법을 적용시켜 해석하여 농도를 구한다.

PEST와 UCODE는 지하수 유동 및 오염물질 변화 해석에 관계된 파라미터를 추정하기 위하여 실측된 지하수 수위, 유속, 농도 등을 모델링 결과치와 비교하여 오차를 최소화하는 방법으로 파라미터를 추정하는 모형이다. MODFLOW의 파라미터 추정 모형으로 많이 사용되는 모형은 MODFLOWP이다.

3. 다차원유한요소법을 이용한 지하수환경 모형의 개발

토양 및 지하수환경 변화를 전체적으로 고찰할 수 있는 종합적인 모형을 개발하기 위하여 가스, 물, 유류, 고형물상의 다상에 대한 이동 및 오염물 변화를 고찰할 수 있는 모형을 다차원 유한요소법을 이용하여 개발하였다[12,13]. 다차원모형은 사업대상지역의 특성에 따라 1, 2, 3차원을 선택적으로 모델링할 수 있는 장점을 지닌다. 유한요소법을 사용하여 객체지향적인 유한요소모듈을 이용하여 지배식의 편미분항을 해석함으로서, 다차원의 해석은 물론, 오염부하원 및 반응식 등 여러 조건이 다른 경우에도 쉽게 해석을 수행할 수 있다. 비선형문제인 경우에도 이러한 객체지향적인 모듈을 연결하여 반복해석함으로서 해의 안정성을 높일 수 있다.

지하에 존재하는 상별로 지배식에서 파라미터가 조금 틀릴 수 있으나, 유사한 형태의 편미분방정식으로 표현된다. 가스상의 경우 연속, 운동, 물질이동식은 다음과 같다[14].

$$\frac{\phi}{RT}\rho_w g+\frac{\partial h_g}{\partial t}=\nabla(\rho_g K_g \nabla h_g)+\frac{\partial}{\partial y}(\rho_g K_{gy}\frac{\rho_g}{\rho_w})+Q_g \quad (7)$$

$$\vec{V_g}=\frac{K_g}{\theta_g}\nabla(h_g+\frac{\rho_g}{\rho_w}y) \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\phi C_g^i)}{\partial t}+\nabla(\phi C_g^i \vec{V_g})=\nabla(\phi D_g^i \nabla(C_g^i))+\phi(k_g^i C_g^i+S_g^i) \quad (9)$$

위 식의 주변수는 가스의 압력 수두, 유속, 가스상내 구성물질의 농도이고, 파라미터는 공극율, 가스상수, 온도, 물의 밀도, 가스밀도, 중력가속도, 투기계수, 경계 유입 속도, 확산 계수, 구성물질별 생성원 등이다.

4. 공간정보시스템(ArcView)의 적용

지하수 유동 및 지하 오염 상황 해석을 위하여, 관련 자료를 공간정보시스템에 구축한 후, PMWIN 모형을 사용하여 현재의 상세 정보 및 장래 변화를 예측하였다. 이러한 작업을 효율적으로 수행하기 위하여 ArcView와 PMWIN을 연계하였다. 이러한 작업은 ArcView의 프로그래밍 기능을 이용하여 GUI를 연구 목적에 적합하게 수정하였다.

본 연구에서는 지하환경에 관련된 각종 정보를 GIS에서 처리하기 위하여 먹는 샘물 업체의 각종 지하 환경 자료를 입력하여 시스템을 구축하였

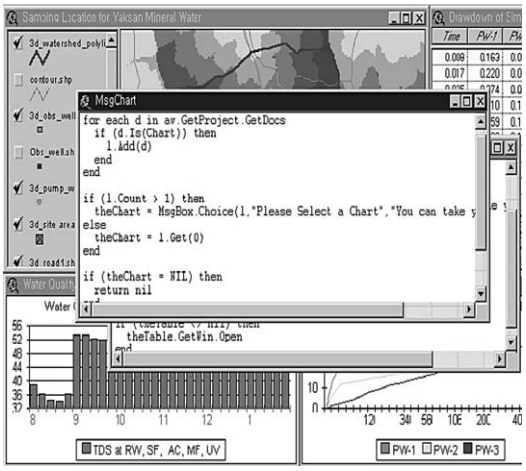

그림 3. 지하환경 구축 정보 검색을 위한 Avenue Script의 구성

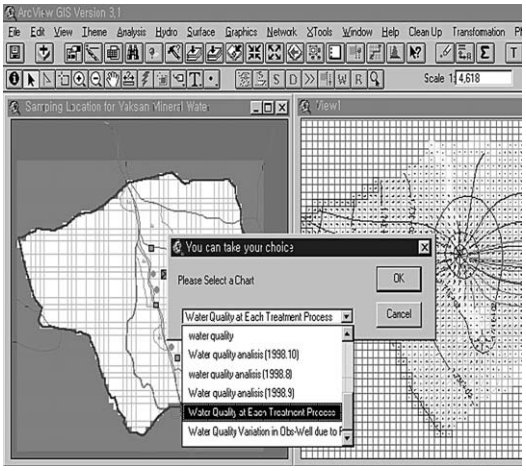

그림 4. Avenue를 이용한 구축 정보 검색

다. 즉, 강원도 지역에 위치한 3개의 먹는 샘물 생산 공장의 최적 수질 유지에 관련된 환경 자료를 구축하였다.

ArcView의 공간 및 3차원 분석 기능을 이용하였으며, ArcView내의 시스템 언어인 Avenue[9]를 사용하여 ArcView와 PMWIN을 결합하였다. ArcView내의 고유 시스템 언어인 Avenue는 객체 지향적인 프로그래밍 언어로서 사용자의 사용환경을 단순화시키며, 특정 목적의 응용에 대해 새로운 기능성을 부여할 수 있으며, 또한 ArcView와 다른 응용과 연계시 유용한 역할을 제공할 수 있다.[9] Avenue의 이러한 기능성을 이용하여, 구축된 지하수환경 관련 정보의 검색 및 자료 분석을 용이하게 하고, PMWIN과 연계 운영할 수 있었다. 그림 4는 사용자가 검색하고자 하는 지점에 대한 정보만이 검색될 수 있도록 하기 위하여 구성한 Avenue Script의 일례를 나타낸 것이며, 이를 통해 선택된 지점에서 검색된 정보가 사용자가 선택할 수 있도록 대화상자가 표시되는 것을 그림 4에 나타내었다.

또한, 입력 자료를 공간정보시스템상에서 직접 처리하여 모델링이 가능하게 하였으며, 계산 결과는 PMWIN의 후처리프로그램뿐만이 아니라, ArcView의 CAD 기능을 이용하여 입체적인 분석이 가능하게 시스템을 구축하였다.

공간정보시스템을 이용한 종합적인 관리체제 구축은 현장조사 자료의 입체적, 효율적 관리라는 측면이외에 지하 환경 관련 전문가시스템의 개발을 한층 더 용이하게 추진할 수 있으며, 유역내 모든 점 및 비점오염원을 추적하여 비상시 신속히 대처할 수 있는 중앙 집중적 통합화된 관리 시스템의 구축이 가능한 것으로 판단되었다. 이러한 종합적 관리체제 구축은 실시간 수질 및 유량 자료의 처리를 통해 먹는 샘물업체에 적합한 통합적인 관리 시스템으로 발전될 수 있을 것으로 판단되었다.

III. 결과 및 고찰

1. ArcView를 이용한 지하환경정보시스템의 구축

본 연구에서는 먹는 샘물 공장의 지하수 및 기타 모든 환경 자료를 GIS상에서 구축하여 최적의 지하 환경을 유지할 수 있는 관리 시스템을 구축하였다. 3개의 먹는 샘물업체의 수질 감시체제 및

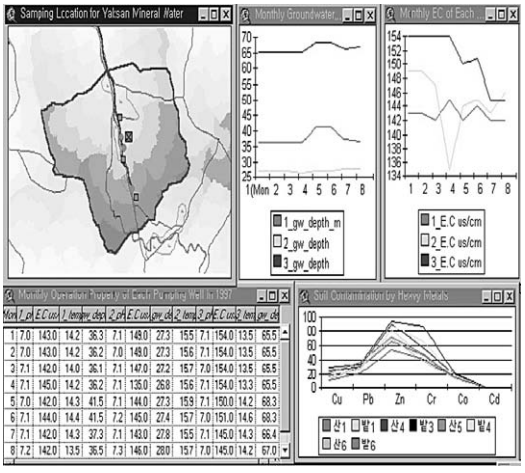

그림 5. 월별 취수정의 지하수위, 수질, 유역내 토양오염도

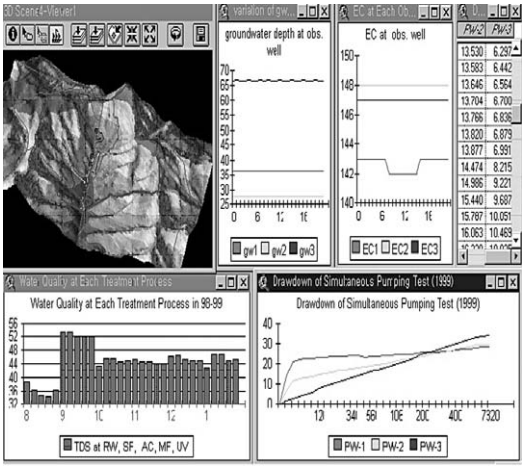

그림 6. 감시정의 지하수위, 수질, 양수시험, 처리공정별 수질

자동생산시스템과 연결될 수 있도록 다음과 같은 부분에 대한 자료를 국립지리원의 1/25,000의 수치지도를 이용하여 공간정보시스템에 구축하였다.

- 지하수 유동 현황 (선구조, 파쇄대 등의 지구물리탐사 결과, 취수정 및 감시정의 취수량 및 지하수위, 대수층의 투수계수, 저류계수, 공극율)
- 지하수 수질 현황 (취수정 및 감시정의 수질 (그림 5, 6))
- 지하수 오염 가능성 (인근 지하수 및 하천의 수질, 유역내 오염원, 토양오염도)
- 지하수 함양량 추정 (양수시험결과, 유역의 수문현황)
- 일반적인 수치지도 (등고선도, 도로망도, 수계도)

2. PMWIN을 이용한 지하수 수리 및 수질 모델링

PMWIN을 이용하여 지하수 유동 및 오염물 이동을 모델링하기 위해서는, PMWIN내의 MODFLOW 모형으로 지하수 유동 상황을 해석한 후, PMPATH의 입자추적 모듈을 사용하여 지하수 유선을 추적한 후, 계산된 지하수 유동장을 이용하여 MOC3D나 MT3D로 오염물 이동을 계산한다. 지하수 유동 및 오염물 이동에 관련된 파라미터를 추정하기 위해서는 현장의 지하수위, 유속, 오염도 등의 자료가 가용한 경우, PEST나 UCODE를 사용하여 자동으로 파라미터를 추정할 수 있다. 이러한 파라미터 추정 모형은 일반적인 OR(Operational Research) 기법을 사용하여 수치해와 실측치와의 오차를 최소화하는 알고리즘으로 파라미터를 계산한다. PMWIN은 계산 결과에 대하여 등수위나 등농도선뿐만 아니라, 부정류 모델링의 경우 시간에 따라 변하는 양상을 동영상으로 나타나게 한다.

1) MODFLOW 및 PMPATH를 이용한 지하수 유동 해석

지하수의 유동 상황을 모델링하기 위해서는 대수층의 형상, 격자망, 경계조건, 모델링 시간, 초기 지하수위, 투수계수, 공극율, 취수정 및 감시정의 위치와 양수량 등의 입력자료가 필요하다. 모델링이 수행된 후 출력 파일을 이용하여 계산 결과의 정확도를 검증하기 위하여 각 격자망별로 물수지 분석을 수행한다. 대수층의 격자망은 행(i), 열(j), 층(k)의 수와 크기를 설정하여 구성된

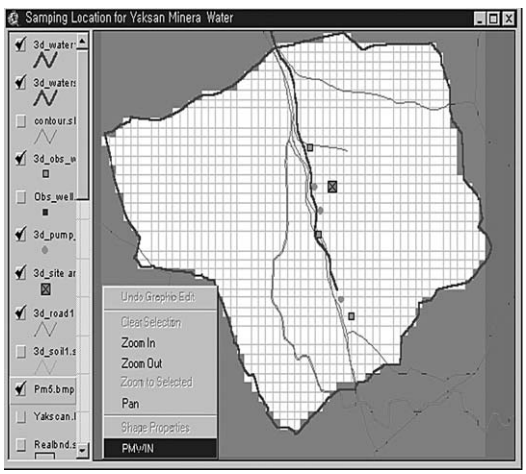

그림 7. PMWIN과 ArcView의 결합, 모델링 격자망도

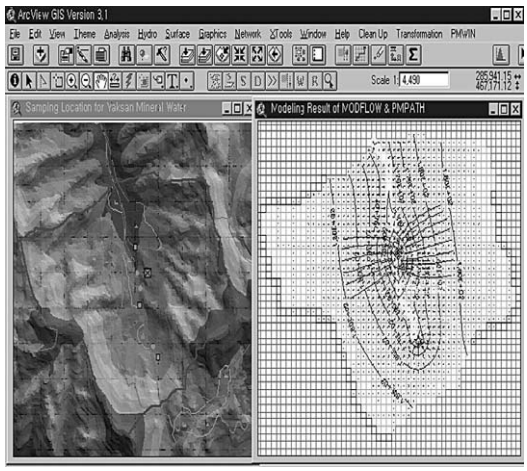

그림 8. MODFLOW 및 PMPATH의 계산 결과 (등수위도, 유속장, 유선)

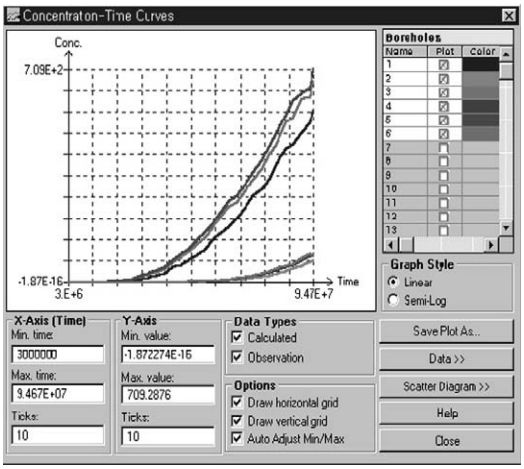

그림 9. 감시정의 농도-시간 곡선

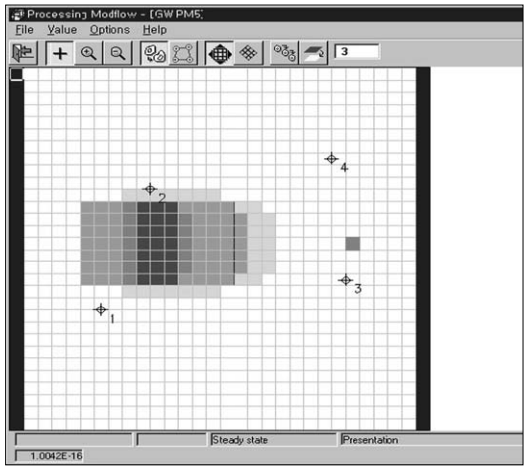

그림 10. 지하수 오염의 동영상 화면

다. 그림 7에 ArcView와 PMWIN 모형을 결합한 시스템과 모델링 격자망을 나타내었다. 그림 8에 MODFLOW와 PMPATH의 모델링 결과인 지하수 등수위도, 유속장, 유선 등을 나타내었다.

2) MT3D 및 MOC3D를 이용한 지하수 오염 해석

MOC3D와 MT3D는 오염물질의 이동을 해석하기 위하여 오염물의 3차원적 이동 경로를 추적하는 모형이다. 오염원은 경계조건, 부하 등으로 입력되며, 양수나 기타 지하수 유동 및 확산에 의해 이동되고, 흡착 및 1차 생화학적 반응에 의해 변환된다. 흡착현상은 지연계수로 입력된다. 모든 자료는 격자망 단위로 입력되지만, 관측정만 X와 Y의 좌표로 입력된다. 그림 9은 지하수 오염 모델링 결과(관측정에서의 오염도)이며, 그림 10은 계산결과를 동적으로 볼 수 있는 동영상 화면을 나타낸 것이다.

3. 개발된 지하수모형(MFEMSE)의 적용

토양 및 지하수환경 변화를 전체적으로 고찰할 수 있도록 개발된 MFEMSE 모형을 지하에서 LPG 가스가 누출한 경우의 확산이동 문제에 대하여 적용하였다. 모형의 타당성을 검증하기 위하여 실험값과 모형의 예측값을 비교·분석하였으며, 문제에 대한 개발 모형의 검증 결과를 그림 11에 나타내었다. 그림 11에서 점으로 표시된 부분은 실험값을 나타내며 선으로 표시된 부분은

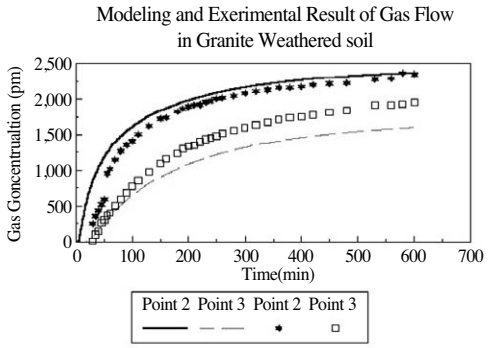

그림 11. 지하가스 유동의 모델링 및 실험 결과의 비교

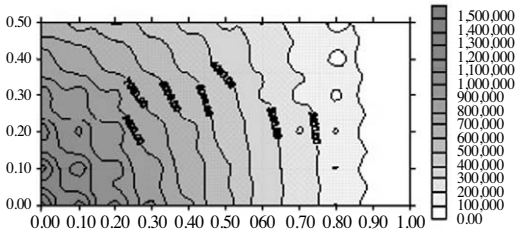

그림 12. 지하가스 유동의 3차원 모델링 결과 (t=400min.)

개발된 모형을 이용하여 수행된 모델링 결과값을 나타낸다. 실험값에 대해 모델링을 수행한 결과, 실제 현상을 잘 재현할 수 있는 것으로 나타나 모형의 타당성을 검증할 수 있었다. 검증된 모형을 이용하여, 누출된 LPG 가스의 확산 및 이동에 대하여 3차원 모델링을 수행한 결과를 그림 12에 나타내었다. 좌측 하부(좌표 0, 0)에서 가스가 누출되는 경우에 대해 3차원 모델링을 수행하였으며, 누출후 400분이 경과된 후의 예측 결과를 Surfer를 이용하여 등농도장으로 도시하였다.

MFEMSE 모형은 지하의 가스상 뿐만 아니라 물, 유류, 고형물상의 다상에 대한 이동 및 오염물 변화를 해석할 수 있는 기능성을 보유하였으며, 유한요소법을 사용하여 객체지향적인 유한요소모듈을 사용함으로서 문제의 특성에 따라 1, 2, 3차원을 선택적으로 모델링할 수 있는 편이성을 지닐 수 있었다.

IV. 결 론

지하수 및 토양 등 지하 환경 보전을 위한 통합 관리 시스템을 개발하기 위하여 전산모형과 지리정보시스템을 연계하였다. 공간정보해석기능이 뛰어난 ArcView와 PMWIN을 사용하여 다음과 같은 연구 결과를 도출할 수 있었다.

- ArcView를 이용하여 지하 환경에 관련된 각종 자료를 수치지도상에 구축·분석하였으며, 이를 통해, 관련 정보의 종합적 관리 및 용이한 검색·분석이 가능하였다.
- PMWIN의 다음과 같은 장점을 활용할 수 있었다.
  * 모든 입출력 작업을 모델링 격자망상에서 수행하여, 관련 자료의 정확한 입력 및 출력 자료의 효율적인 도시가 가능하였다.
  * 계산 결과는 등수위, 등농도, 유속장, 유선 등으로 표현되어 지하수 유동현상의 분석, 오염물 영향범위 파악 등의 효율적인 분석을 용이하게 하였다.
  * 동영상 파일을 구성하여 지하환경의 변화 양상을 효과적으로 분석할 수 있다.
  * 자동 파라미터 예측 모형을 이용하여, 투수도, 저류능 등의 계수를 쉽게 분석할 수 있었다.
  * 모델링 결과를 DXF 파일로 저장하여 ArcView와 연계함으로서, 각 지점에 대해 구축된 과거 및 현재의 정보자료와 비교할 수 있는 효율적 분석이 가능하였다.
- 먹는 샘물 생산 공장의 최적운영을 위해서 GIS상에 관련 정보를 구축하고 전산 모델링을 연계 운영함으로서 운영 상황 분석 및 효율적인 관리시스템으로 이용할 수 있다.

본 연구에 의해 개발된 시스템은 지하수 개발 및 보전에 관련된 각종 사업에 효과적으로 이용될 수 있으며, 특히 먹는 샘물 환경 영향 심사 등의 실제 사업에 적용하기 적합하다고 판단된다.

사 사

본 연구는 1998-1999년도 국립환경연구원 공공기반기술개발과제(G7)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 국립환경연구원, 1999, 통합환경관리시스템의 개발 및 적용 - 통합하수도 관리시스템의 개발 및 적용 -, 환경기술연구개발사업 1차년도 최종보고서.
2. 국립환경연구원, 2000, 통합환경관리시스템의 개발 및 적용 - 통합하수도 관리시스템의 개발 및 적용 -, 환경기술연구개발사업 2차년도 최종보고서.
3. Chiang, W.-H., W. Kinzelbach and R. Rausch, 1998, Aquifer Simulation Model for Windows - Groundwater flow and transport modeling, an

integrated program. Gebrer Borntraeger Berlin, Stuttgart, ISBN 3-443-01039-3.

4. Chiang, W. H. and W. Kinzelbach. 1993. *Processing Modflow (PM)*, Pre- and postprocessors for the simulation of flow and contaminants transport in groundwater system with MODFLOW, MODPATH and MT3D.
5. Chiang, W.-H. and W. Kinzelbach, 1994, *PMPATH for Windows*. User's manual. Scientific Software Group. Washington, DC.
6. Chiang, W.-H. and W. Kinzelbach, 1998, *PMPATH 98*. An advective transport model for Processing Modflow.
7. Chiang, W. H. and W. Kinzelbach, 1998, Processing Modflow for Windows (PMWIN), A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Pollution.
8. Doherty, J, et al., 1994, PEST - Model-Independent Parameter Estimation, Watermark Computing, Australia.
9. Environmental Systems Research Institute, 1996, Customization and Application Developement for ArcView GIS, Avenue Manual, 65-187.
10. Harbaugh, A.W. and M. G. McDonald, 1996a, User documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model, USGS Open-File Report 96-485.
11. Harbaugh, A.W. and M. G. McDonald, 1996b, Programmer documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model, USGS Open-File Report 96-486.
12. Kim, Joon Hyun, 1996, A study on fluid flow and mass transformation in immiscible liquids, WEFTEC'96, Water Environment Federation.
13. Kim, Joon Hyun, 1996, A Comprehensive groundwater modeling using multicomponent multiphase theory : 1. Development of a multidimensional finite element model, Journal of Korea Soil Environment Society, 1 (1): 89-102.
14. Kim, Kyo Seon, and Joon Hyun Kim, 1998, Model Development and Experimental Validation of Gas Flow in Soil due to Leaks in Pipe Lines, Korea Gas Safety Cooperation.
15. Konikow, L. F. and J. D. Bredehoeft, 1978. Computer model of two-dimensional solute transport and dispersion in ground water. U. S. Geological Survey. Water Resources Investigation. Book 7, Chapter C2, 90 pp.
16. Konikow, L. F., D. J. Goode and G. Z. Homberger, 1996. A three-dimensional method-of-characteristics solute-transport model. U. S. Geological Survey. Water Resources Investigations report 96-4267.
17. McDonald, M. C. & A. W. Harbaugh, 1988, MODFLOW, A modular three-dimensional finite difference ground-water flow model. U. S. Geological Survey Open-file report : Chapter A1, 83-875.
18. Poeter E. P. and M. C. Hill, 1998. *Documentation of UCODE*, A computer code for universal inverse modeling, U.S. Geological Survey, Water Resources Investigations Report 98-4080.
19. Pollock, D. W., 1989, MODPATH (version 1.x), Documentation of computer programs to compute and display pathlines using results from the U. S. Geological Survey modular three-dimensional finite difference groundwater model. U. S. Geological Survey Open-file report, 89-381.
20. U.S. Geological Survey, A Three-Dimensional Method-of-Characteristics Solute-Transport Model (MOC3D), Water Resources Investigations Report 96-4267.

21. Zheng, C., MT3D, 1990, A modular three-dimensional transport model, S. S. Papadopulos & Associates, Inc. Bethesda, Maryland.
22. Zheng, C., 1993. Extension of the method of characteristics for simulation of solute transport in three dimensions. *Ground Water* 31(3), 456-465.
23. Zheng, C. and G. D. Bennett, 1995. Applied contaminant transport modeling: Theory and parctice, 440 pp. Van Nostrand Reinhold, New York.
24. Zheng, C., 1996, *MT3D Version DoD_1.5*, a modular three-dimensional transport model, The Hydrogeology Group, University of Alabama.
25. Zheng, C. and P. P. Wang, 1998, *MT3DMS*, A modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems. Documentation and user guide, Departments of Geology and Mathematics, University of Alabama.