

지하수관리시스템 구축을 위한 전산모형과 지리정보시스템의 통합

Integration of Numerical Model and GIS for the Construction of Groundwater Management System

김 준 현* 김 정 욱** 한 영 한***

Kim, Joon Hyun Kim, Jung Wook Han, Young Han

Abstract

GIS is linked with Numerical Model(PM5) for the effective conservation and management of groundwater resources. All the relevant system was systematically constructed to analyze the field status by means of precise understanding of the surface and subsurface environment and by accumulating large amounts data and attribute data into developed system. The necessity of integrated management of the groundwater information was demonstrated and the general direction of the construction of groundwater management system was suggested. The proposed system will guide a method for the rational decisions of groundwater development via the establishment of the appropriate database management and accurate prediction of future change.

키워드 : 수치모형, 지리정보시스템, 지하수정보관리

Keywords : numerical model, GIS, groundwater information management

1. 서론

1.1 연구배경

수자원의 개발과 관리에 있어서 주요한 관심의 대상인 수질 문제는 도시화, 산업화, 경제성장예 의한 물 수요의 증가 그리고 물 이용률 증가에 의한 하천 지표수 수급 탄력성의 저감, 하천 지표수의존도가 너무 높은 데서 오는 내갈수성의 악화 등으로 인하여 한계점에 도달하고 있다. 우리나라의 실질적인 수자원 부존량은 연평균 총강수량 1,267억 m^3 의 55%를 차지하는 하천 유출량 697억 m^3 과 증발산량 및 지표면 하부로 침투되어 지하수로 함양되는 손실량이 수자원 총량의 45%로서

570억 m^3 을 차지한다. 전국의 용수 총 이용량은 301억 m^3 으로 연간 수자원 총량의 24%를 이용하고 있는 실정이며, 이 중에서 지하수 이용량은 26억 m^3 으로서 수자원 총량의 2%, 용수 이용량의 8.6%를 차지하고 있다. 건설교통부의 1998년도 지하수 조사연보에 따르면, 1997년말 기준 우리나라의 연간 지하수 개발 가능량은 133억 m^3 에 이르나 총 이용량은 24.5%(33.8억 m^3)에 불과하며, 따라서 미래의 대체 수자원으로서 지하수의 이용 가치는 매우 높다고 할 수 있다.[1] 지속적으로 증가하는 물의 수요를 충족시키며 한정된 수자원을 효과적으로 이용하고, 체계적인 수자원 관리를 위하여 지하수 정보화는 장기적인 지하수 개발 및 관리측면에서 필수적이라고 할 수 있다. 정보화는 산업 발전, 기술 개발 등을 통하여 사회가 다양화되고 전문화되면서 단편적이고 개별적인 정보구축, 공유, 활용뿐만 아니라, 공간 인프라 구축을 위하여 국가 차원

* 강원대학교 환경생물공학부 교수, 공학박사

** 강원대학교 대학원 환경공학과 석사과정

*** 강원대학교 대학원 환경공학과 박사과정

에서 정보 공유를 주도함으로써 많은 비용과 시간을 절감하고 효율적인 정보의 이용과 활용이 가능해지고 있다. 환경 분야에서도 지리정보시스템(GIS)을 응용하여 지리학적인 속성정보를 효율적으로 수집하고 관리하며 분석하는 방법이 보편화되고 있다. 최근에는 인터넷, 인공위성 등 다양한 매체를 통하여 지리 데이터를 수집, 구축하고 분석, 처리하여 의사결정에 도움을 주는 단계에까지 이르고 있다. 국내에서도 1995년부터 국가 차원의 GIS 사업을 추진하면서 GIS 데이터 구축을 수행하는 동시에, 다양한 GIS 시스템을 사용자들에게 서비스하는 계획을 수립하였다. 따라서 GIS는 소수의 전문가의 소유물이 아니라, 일반 국민들에게 제공 가능한 사회 인프라의 성격을 가지고 있다.[2]

1.2 연구목적

정보통신 기술과 컴퓨터의 급속한 발달로 전산 모형의 수치계산 속도가 향상되고 분산된 정보를 효율적으로 분석, 관리하는 것이 가능해짐에 따라 지표 및 지하에서 일어나는 유체의 흐름을 정확히 파악하여 지하수의 오염과 고갈을 방지하고, 체계적으로 지하수를 보전하고 관리하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 따라서 본 연구에서는 효과적인 지하수 관리를 위하여 지하수의 유동현황과 점·비점 오염원으로부터 유입되는 각종 오염물질의 거동을 사전에 미리 예측하고, 다양한 공간자료와 속성자료를 데이터베이스로 구축함으로써, 현장상황을 정확하게 분석하여 효율적이며 체계적으로 지하수를 보전하고 관리하고자 전산모형과 지리정보시스템을 연계, 활용하였다.

본 연구는 급변하는 환경변화에 따른 지하수정보화의 필요성을 인식하고 지하수관리시스템 구축을 위한 기본방향을 제시함과 동시에, 유역에서의 지하수 유동 및 수질과 관련된 데이터베이스를 구축하여 현장상황을 정확하게 분석할 수 있도록 구체적인 활용방안을 마련하여 합리적인 의사결정과 효율적인 관리를 위한 최적의 방법을 모색하고자 한다.

1.3 연구방법

본 연구에서는 강원도 홍천군 화촌면 굴운리 작은골 일대를 연구대상 지역으로 설정하고 수문, 기상, 지형, 지질, 토양, 우물의 위치, 양수량, 지하수위 등 분석에 필요한 자료는 현장방문과 문헌조사를 통하여 수집하였으며, 국립지리원의 1/25,000 수치지도를 이용하여 지리학적 공간정보를 수치지도상에 정확히 도시하고, 공간자료와 동적으로 연결되는 관련 속성정보를 구축하여 효율적인 분석이 가능하게 하였다. 또한 하이퍼텍스트 기능을 제공하는 HotLink를 응용하여 다양한 자료와 지리

형상들이 연결되어 수치지도의 특정 공간형상을 선택, 지정하면 Window상에 관련 이미지가 디스플레이 되도록 시스템을 구성하였다. 새로운 사용자 인터페이스를 구성하여 ArcView 사용자의 편리성을 도모하였으며, 목적에 적합한 새로운 기능을 추가하였다. ArcView의 3차원 공간분석, 수문 분석 등 다양한 분석기능을 이용하고, 객체지향의 스크립트 언어인 Avenue를 적절히 응용하여 지하수 모형 및 기타 Windows 응용프로그램을 GIS 프로그램과 연계시켜 공간 의사결정을 위한 분석 도구로 활용하였다.

2. 문헌연구

지하수 모형은 실제에 접근하기 위하여 현장 조건을 단순화된 형태로 표현하도록 고안된 도구이며, 실제 지하수 유동이나 용질의 거동과 관련된 과거 및 현재의 상황을 재현, 분석하고 미래에 발생할 일련의 변화를 예측하기 위하여 이용되고 있다. 지하수 유동을 모사하기 위해서는 우선, 모델링의 목적을 수립하고 개념적인 모형을 구성한다. 개념적인 모형에는 단위 및 경계가 정의되어야 하고, 파라미터, 수리지질학적 기간, 물 수지에 관한 정보 등을 포함하는 현장자료가 수집, 정리되어야 하며, 과거의 시공간적 자료의 경향을 분석해야 한다. 개념적 모형은 모델링을 수행하기에 적절한 형태를 갖추어야 하며 격자망의 설정, 시간간격의 선택, 경계 설정, 초기조건, 대수층 파라미터와 수문학적 기간에 대한 예비적인 수치입력 등이 수행되어야 한다. 보정은 현장에서 측정된 수두와 유동을 재현할 수 있도록 모형을 설정하는데 목적이 있으며, 모형의 타당성은 모형이 현장의 조건을 얼마나 잘 재현하였는지에 달려있다. 지하수 유동 모형은 많은 자료와 비용을 필요로 하지만 복잡한 분석을 수행하고 정보화된 예측을 수행한다는 점에서 필수적이라고 할 수 있다.

2.1 PM5(Processing Modflow)

기존의 지하수 수리 모형중 전 세계적으로 가장 많이 쓰이는 모형인 MODFLOW에 대하여 고찰하였다. 본 모형을 연구하기 위하여 1998년 12월에 개발된 PM5모형을 사용하였다.[3] 본 모형은 독일에서 폐기물 처분지의 정화 사업을 위해 개발되었으며 MODFLOW의 전후처리 프로그램으로 개발이 시작되어, 사용자가 편리하게 MODFLOW를 운영할 수 있도록 GUI 기능을 강화하였다. PM5는 MODFLOW88, MODFLOW96, PMPATH, MT3D, MT3DMS, MOC3D, PEST, UCODE로 구성되며, 지하수 유동과 오염물질의 거동을 모델링하기 위한 통합적인 모델링 시스템을 제공한다. MOC3D[4]는 입자추적법을 사용한 용질이동모형이

며, MT3D[5]와 MT3MS[6]는 유한차분법을 사용한 용질이동모형, PEST[7]와 UCODE[8]는 파라미터 추정모형이다. MODFLOW[9]와 MOC3D는 MODFLOW와 연계되어 통합적으로 사용되고 있다. PM5에서는 이러한 모형들을 통합적으로 운영하여 지하수 유동 및 오염 문제를 해석할 수 있는 도구를 제공하고 있다.

(1) MODFLOW 모형

미국 지질조사국(U.S. Geological Survey)에서 개발된 3차원 지하수 모형으로 McDonald와 Harbough에 의해 1983년에 개발되었다. 유한차분법을 이용하여 지하수의 유동을 3차원으로 해석할 수 있고, 자유수면 지하수는 물론 피압 지하수의 유동도 해석할 수 있다. MODFLOW는 상호 독립적인 모듈로 구성된 각각의 Package와 주프로그램으로 구성되어 있으며, 사용자의 필요에 따라 각각의 Package를 선택적으로 사용할 수 있다. Fortran77로 구성된 이 프로그램은 행렬을 해석하기 위하여 PCG, SIP, SSOR 방법을 사용한다. 최근에는 MODFLOW 자체만을 사용하지 않고 여러 개의 프로그램을 연계하여 지하수 유동과 오염물의 거동을 해석하고 있다.

MODFLOW내 지하수 유동의 지배방정식을 유도하기 위해서는 지하대수층의 저류특성과 Darcy 유량의 물질평형을 연결하여야 한다. 지하대수층의 저류능은 대수층을 구성하는 토양 구조의 특성과 지하수 특성(압축성 및 탄성)에 따라 결정된다. 토양의 압축도는 Terzaghi의 압축이론을 사용하여 유도한다. 이러한 대수층의 저류능에 대하여 다음과 같이 비저류계수(S_s : Specific Storativity)를 정의한다.

$$S_s = \frac{\Delta U_w}{U_b \Delta \phi} \quad (1)$$

여기서, ΔU_w 는 늘어나거나 줄어든 지하수량을, U_b 는 전체 대수층부피를, ϕ 는 Piezometric Head를 의미한다. 즉, 비저류계수는 단위 지하수 수두 변화에 의한 지하수 부피의 변화율을 의미한다.

비저류계수를 정의한 것과 유사한 방법을 사용하여 대수층의 저류계수를 정의할 수 있다. 피압지하수의 경우 다음의 식으로 정의된다. 이러한 경우, 수평방향의 흐름만 주로 고려하기 때문에 대수층의 주 파라미터는 투수도 $T(=KB)$ 와 저류능 S 이다. 비저류계수는 일반적인 3차원 유동에 대하여 정의되었기 때문에 S 를 S_0B 로 평가하는데 주의가 필요하다. 피압대수층의 저류의 주 원인은 물과 토양의 압축도이다.

$$S = \frac{\Delta U_w}{A \Delta \phi} \quad (2)$$

자유수표면 지하수의 경우 다음의 식으로 저류

능을 정의한다. 저류나 배수의 주원인은 지하수위의 상승이나 하강이다. 지하수위의 하강에 의해 대수층이 지하수를 방출하므로 비생산계수(S_y : Specific Yield)라 정의한다.

$$S_y = \frac{\Delta U_w}{A \Delta h} \quad (3)$$

배수가 완전히 진행된 후에 대수층에 남아있는 지하수에 의한 저류능을 비저류계수(Specific Retention)라 정의한다. 따라서, 비생산계수와 비보유계수의 합은 다음과 같이 공극율이다. 따라서, 비생산계수를 유효공극율(S_r : Effective Porosity)이라 정의하기도 한다.

$$S_y + S_r = \frac{\Delta U_w + \Delta U_r}{A \Delta h} = \frac{\Delta U_v}{U} = n \quad (4)$$

지하 공극을 통한 일정한 밀도의 지하수의 삼차원 유동은 위에 언급한 지하대수층의 저류 특성에 연속방정식과 운동방정식(Darcy의 유속)을 결합하여 지배식을 유도할 수 있다. 2차원 지하수유동에 대한 유도 과정은 다음과 같다.

강우나 충전정 등 모든 지하수의 생성원인은 Dirac Delta 함수를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$W(x, y, t) = \sum_i W(x_i, y_i, t) \delta(x - x_i, y - y_i) \quad (5)$$

대수층의 저류능을 고려한 물수지 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \delta t \left[\delta y \left[Q'_x \left(x - \frac{\delta x}{2}, y \right) - Q'_x \left(x + \frac{\delta x}{2}, y \right) \right] \right. \\ & \left. + \delta x \left[Q'_y \left(x, y - \frac{\delta y}{2} \right) - Q'_y \left(x, y + \frac{\delta y}{2} \right) \right] \right] \\ & + W \delta x \delta y = S_y (\delta x \delta y) [h(t + \delta t) - h(t)] \quad (6) \end{aligned}$$

배수에 의한 방출이 물이나 토양의 압축도에 의한 방출보다 훨씬 크다는 가정하에($S_y \gg S_0h$), 비저류계수대신에 비생산계수를 사용하였다. Q' 를 $-kh \nabla' h$ 로 바꾸고, 양변을 $\delta x \delta y \delta t$ 로 나누다음, $\delta x \delta y \delta t \rightarrow 0$ 로 가정하면 비균질 등방성의 대수층 $K=K(x,y)$ 에서, 다음과 같은 지하수유동식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (Kh \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (Kh \frac{\partial h}{\partial y}) + W = S \frac{\partial h}{\partial t}, \quad S \equiv S_y \quad (7)$$

대수층이 균일한 경우 위의 식은 다음과 같은 Boussinesq식이 된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (h \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (h \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{W}{K} = \frac{S}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (8)$$

3차원 지하수유동식은 다음과 같다. 여기서, 비저류계수를 사용하는 것을 주의하여야 한다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (9)$$

여기서, K_{XX} , K_{YY} , K_{ZZ} 는 x, y, z 좌표축의 수리전도도(Lt^{-1}), h 는 지하수위(L), W 는 지하수 충전량(t^{-1})이다.

일반적으로 S_s , K_{XX} , K_{YY} , K_{ZZ} 는 대수층의 특성에 따라 공간에 대해서 변하는 함수이고 ($S_s = S_s(x, y, z)$, $K_{XX} = K_{XX}(x, y, z)$), W 는 공간과 시간($W = W(t, x, y, z)$)의 함수이다.

(2) MOC3D 모형

용질이동의 3차원 물질이동식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\varepsilon C)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_b \bar{C})}{\partial t} + \frac{\partial(\varepsilon CV_i)}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\varepsilon D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \sum C W + \lambda(\varepsilon C + \rho_b \bar{C}) = 0 \quad (10)$$

여기서, C 는 용질의 농도, ρ_b 는 토양의 밀도(대수층 부피에 대한 토양의 밀도), \bar{C} 는 토양에 흡착된 물질의 농도(토양의 단위질량에 대한 흡착된 물질이 질량), D 는 분산계수의 2차 텐서, W 는 단위체적당 유체 소멸 또는 생성율, C 는 생성/소멸 유체내의 부피 농도, λ 는 감소율이다.

반감기($t_{1/2}$)로 표현되는 방사성 물질의 감소율은 다음과 같다.

$$t_{1/2} = \frac{(\ln 2)}{\lambda} \quad (11)$$

용질의 시간미분항과 이류유송항은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\varepsilon C)}{\partial t} = \varepsilon \frac{\partial C}{\partial t} + C \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\varepsilon CV_i) = \varepsilon V_i \frac{\partial C}{\partial x_i} + C \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} (\varepsilon V_i) \quad (13)$$

위 식을 용질이동의 3차원 물질이동식에 대체하고, $(WC - \bar{WC}) = 0$ 을 추가하면 다음과 같이 재배열된다.

$$\begin{aligned} \varepsilon \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_b \bar{C})}{\partial t} + \varepsilon V_i \frac{\partial C}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\varepsilon D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \sum [WC - C] + \lambda(\varepsilon C + \rho_b \bar{C}) \\ + C \left[\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\varepsilon V_i) - \sum W \right] = 0 \quad (14) \end{aligned}$$

좌변의 마지막 항에서 괄호 []는 유체의 연속방정식이다. 따라서, 괄호 []는 0이 되고 다음 식이 된다

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_b \bar{C})}{\varepsilon \partial t} + V_i \frac{\partial C}{\partial x_i} - \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\varepsilon D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\sum [WC - C]}{\varepsilon} + \lambda C = 0 \quad (15)$$

$$- \frac{\sum [WC - C]}{\varepsilon} + \lambda \left(C + \frac{\rho_b \bar{C}}{\varepsilon} \right) = 0 \quad (15)$$

가역적이고 즉각적인 평형 흡착인 경우에는 지배식이 더 단순화될 수 있다. 이러한 경우, 흡착된 농도 \bar{C} 는 다음으로 주어진다.

$$\bar{C} = K_d C \quad (16)$$

여기서, K_d 는 흡착 계수, 또는 시간에 대해 일정하다고 가정되는 분포 계수이다. 흡착되는 물질에 대한 시간미분은 다음과 같이 평가된다.

$$\frac{\partial(\rho_b \bar{C})}{\partial t} = K_d \frac{\partial(\rho_b C)}{\partial t} = \rho_b K_d \frac{\partial C}{\partial t} \quad (17)$$

대수층 토양의 밀도가 시간에 대해 일정하다고 가정하면, 물질이동식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{\rho_b K_d}{\varepsilon} \right) \frac{\partial C}{\partial t} + V_i \frac{\partial C}{\partial x_i} - \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\varepsilon D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) \\ - \frac{\sum [WC - C]}{\varepsilon} + \lambda C \left(1 + \frac{\rho_b K_d}{\varepsilon} \right) = 0 \quad (18) \end{aligned}$$

흡착을 조절하는 인자들은 단일 상수인 지연인자(R_f)로 결합될 수 있으며 다음과 같이 정의된다.

$$R_f = 1 + \frac{\rho_b K_d}{\varepsilon} \quad (19)$$

일시적 유동의 영향으로 인해 공극율이 변화한다면, R_f 는 약간 변동한다. 이러한 미미한 변동 가능성을 무시하고, 지연인자는 시간에 대해 일정하다고 가정하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{V_i}{R_f} \frac{\partial C}{\partial x_i} - \frac{1}{\varepsilon R_f} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\varepsilon D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) \\ - \frac{\sum [WC - C]}{\varepsilon R_f} + \lambda C = 0 \quad (20) \end{aligned}$$

이 식이 MOC3D에서 해석되는 지배방정식의 형태이다.

상기 식은, 전미분함수를 이용하여 Eulerian 형태에서 Lagrangian 형태로 변환된다. 이는, 지연된 속도(V/R_f)로 움직이는 농도에 대해 다음과 같이 간단한 지배방정식이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{dC}{dt} - \frac{1}{\varepsilon R_f} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\varepsilon D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) \\ - \frac{\sum [WC - C]}{\varepsilon R_f} + \lambda C = 0 \quad (21) \end{aligned}$$

농도는 공간적으로 움직이는 지점에서의 농도(Lagrangian 좌표계)로서 C 로 표기된다.

(3) PMPATH 모형

입자추적모형 PMPATH는 지하수 경로와 이동시간을 계산하기 위하여 반분석적인 입자추적법(semi-analytical particle tracking scheme)을 이용한다. 사용자는 PMPATH를 사용하여 단지 몇번의

마우스 조작만으로도 입자 추적을 실행시킬 수 있다. 정상류, 부정류 유동장에 대하여 전방, 후방 입자추적법 모두를 사용할 수 있다. PMPATH는 유선을 추정하고 도시하거나, 유선과 이동시간을 동시에 기록한다. 그것은 등수위선, 수위강하 곡선, 속도장을 포함하는 다양한 옵션을 포함하고 있다.

(4) MT3D 모형

MT3D 모형은 3차원 이류, 분산, 반응에 대한 거동 방정식의 해를 구하기 위하여 혼합 Eulerian-Lagrangian법을 사용한다. MT3D는 농도장내 변화가 유동장에 심각한 영향을 미치지 않는다는 가정을 기초로 한다. 따라서 사용자는 독립적으로 유동 모형을 구축하거나 보정할 수 있다. 유동 모사가 완전히 끝난 후에, MT3D를 이용하여 계산된 수리수두와 다양한 유동 조건을 사용하여 오염물질의 거동을 모사할 수 있으며, 이류, 분산, 단순 화학반응을 고려한 지하수내 단일 오염물질 농도 변화를 모사할 수 있다. 모형에 포함된 화학 반응은 평형-제어 선형 또는 비선형 흡착 그리고 제1차 비역행 소멸 또는 생물학적 분해로 제한된다.

MT3DMS는 MT3D의 더 발달된 형태이다. 약자 MS는 부가적인 반응 Package를 고려하기 위한 다중(multispecies) 구조를 의미한다.

MT3DMS는 거동 해석기법의 3가지 중요한 부류로서 표준 유한차분법, Eulerian-Lagrangian법을 기초로 한 입자추적법, 고차수 유한체적 TVD법(higher-order finite-volume TVD method)을 포함하고 있다. MT3D의 양함수 공식외에도, MT3DMS는 GCG(Generalized Conjugate Gradient)법에 기초한 음함수 반복 해석기를 포함하고 있다. 만약 이러한 해석기를 사용한다면, 임의의 안정도를 강제하지 않아도 분산, 유입/유출원, 반응조건들을 음함수적으로 풀 수 있다.

(5) PEST와 UCODE 모형

PEST와 UCODE의 용도는 자료 해석과 모형 보정을 돕는 것이다. 만약 현장이나 실험 측정치가 있다면, PEST와 UCODE는 모형이 생성한 적절한 값과 이에 대응하는 측정치사이의 차이점을 최소화하기 위하여 모형 파라미터를 보정한다. PEST와 UCODE는 모형(MODFLOW)을 제어하고 파라미터를 최적으로 설정하기 위하여 모형을 수차례 반복 실행하여 적절한 파라미터를 추정한다.

2.2 지리정보시스템

GIS는 공간 문제를 해결하고 공간 관련 계획 수립에 대한 해를 제공하기 위하여 지리정보자료의 구축, 유지관리, 편집, 분석, 디스플레이 및 출력 등의 과정을 통하여 고품질의 공간 정보를 확

득하고 합리적인 공간 의사결정을 위한 도구로서 사용되고 있다.

최근 정보기술 분야의 발전은 대규모 데이터베이스 기술로서의 DBMS(Data Base Management System) 기술과 인터넷 등을 중심으로 한 네트워크 기술의 발전, 컴포넌트 형태의 기술 발전, 클라이언트/서버 등으로 인한 다중 사용자 환경 등이 보편화되고 있으며, 이러한 주요한 기술 및 방법이 GIS 분야에 적용, 통합되고 있다. GIS는 목적 및 용도에 따라서 전문가 중심의 GIS와 일반 사용자를 위한 GIS로 나눌 수 있다.

전문가를 위한 GIS 소프트웨어는 다양하면서도 높은 수준의 공간 분석을 목적으로 이용되고 있으며, 하나의 프로세서보다는 다양하면서 복잡한 프로세서들이 복합적으로 연결되어 사용되고 있다(ARC/INFO 등). 반면 일반 사용자를 위한 소프트웨어는 보다 쉽게 사용자들이 GIS를 사용할 수 있도록 하며, 구현되는 기능도 전문화되거나 어려운 기능보다는 기본적인면서 핵심적인 기능들만을 데스크탑 상에 구현함으로써 짧은 시간 내에 사용방법을 습득하여 필요한 공간 속성정보를 얻을 수 있도록 하고 있다(ArcView GIS 등).

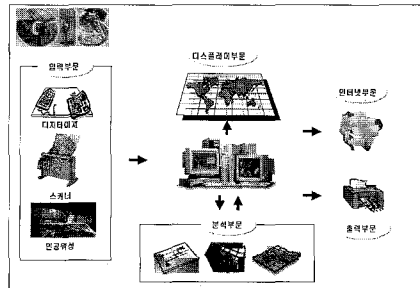


그림 2.1 GIS의 구성

국내의 GIS 분야는 시설물 관리 및 지도제작 부문이 주를 이루어 발전되어 오고 있으며, 최근 지방자치단체에서 각 관할 지역에 대한 시설물 관리 및 행정서비스 시스템을 구축하고 있다. 고난도 공간 분석 및 모델링을 요구하는 공간 의사결정 부문 및 공간 분석 부문은 상대적으로 비중이 작으며, 연구기관이나 학교 등에서 수행되고 있다.[2]

3. 연구방법 및 결과

3.1 기존 지하수 모형의 적용

본 연구에서는 (주) 태백산수음료 약산 먹는샘물 환경영향조사 보고서의 모델링 입력자료를 토대로 하여 격자망을 1/2로 축소시켜 모델링을 수행하였으며, 입력자료는 구성된 격자망내 평균값을 산정하여 사용하였다.

3.2 적용 지역

(1) 지리적 위치

본 연구대상지역이 포함되는 홍천군은 홍천지형도(축척 1:25,000)에서 북동부에 위치하며, 행정구역으로는 강원도 홍천군 화촌면 굴운리와 부근 일대로서 북위 37° 42' 00" ~ 37° 43' 00", 동경 120° 57' 30" ~ 120° 00' 00" 사이에 위치한다.

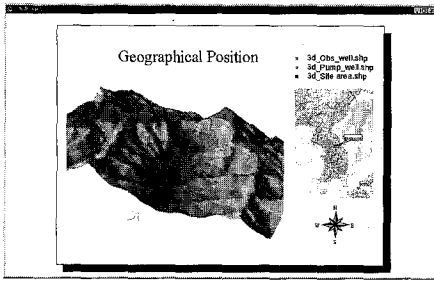


그림 3.1 조사지역의 지리학적 위치

그림 3.2는 본 조사지역 일대의 인공위성 영상 자료를 이용하여 선구조 양상을 조사한 것으로서, 작은골 지역의 공장부지를 지나는 선구조가 최소한 2개 이상의 것이 교차하는 양상을 보이는데, 대략 N20W 방향의 선구조가 N10~40E인 수조의 선구조를 절단한 경향으로 나타난다. 따라서 본 조사대상 지역일대에는 최소한 3방향 이상의 선구조 양상이 교차를 하고 있어 지하지질에 대한 균열의 양상이 상당한 발달을 이루고 있는 것으로 추정할 수 있다.



그림 3.2 선구조도 분석

(2) 집수 유역

집수 유역은 부지의 동측 주변에 470.8~554.0m를 이루는 산계와 서측으로는 463.0~558.6m의 지형으로 이루어지는 중앙부분으로서 북북서향의 길고 좁다란 곡간 분지상의 형상을 갖는다. 계곡 분지상의 형성은 N20W방향의 선구조 형성을 따라 이루어져 있으며, 상류부는 30%이상의 급한 경사

이고, 하류부는 3%정도의 완만한 경사를 이루고 있다. 따라서 공장부지가 위치한 굴운리 일대의 지형은 비교적 지형경사가 급한 곳에 취수정이 위치하며, 지하수의 주된 유동방향은 표고차에 의하여 유속이 빠른 계곡부로 이동되고 있다. 조사지역의 연평균 강수량은 1,383.5mm/year(1988~1999.5)로 전국의 평균 강수량 1,217mm/year보다 다소 양이 많고, 연 최대 강수량과 연 최소 강수량과의 차이가 약 2.7배로 심한 기복 현상을 나타낸다. 조사지역은 여름철인 6월부터 9월까지의 월평균 강수량이 993.7mm로서 강수량의 71.8%를 차지하고 있다.

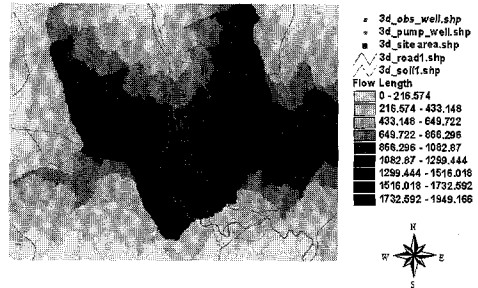


그림 3.3 조사지역의 유동길이 분석

3.3 격자망의 설계

강원도 홍천군 화촌면 굴운리 작은골 일대를 격자대상지역으로 설정하였고, 이 중 주변 지형의 능선을 잇는 구간을 수리적 경계로 설정하였다. 격자대상지역의 격자수는 남북방향 47개, 동서방향 54개로서 약산먹는샘물 보고서 격자수의 1/2로 축소 설정하였으나, 격자의 크기는 본래 크기의 두 배인 30m×30m로 설정함으로써 실제 모사영역과 유사하게 설계하였다.

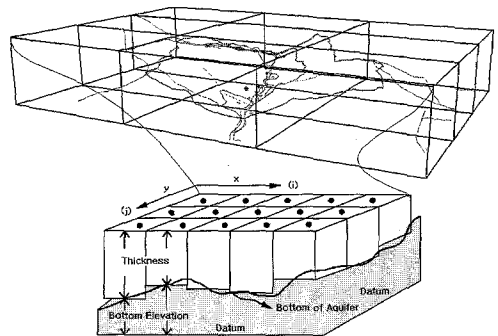


그림 3.4 3차원 및 유한차분격자

3.4 경계 조건

모델링 대상지역 일대의 현장과 주변지역의 지

형적, 수리지질학적 특성을 충분히 반영하고 계산의 정확성을 기하기 위하여 지하수위가 EL+300m로 추정되는 지점들은 제3형 경계(수두종속경계)인 GHB로 설정하여 모사영역의 상부지역에서 강우에 의해 함양되는 지하수량을 고려하였다. 대상지역의 동쪽과 서쪽 수계의 지형 분수령은 지하수 흐름에 직접적으로 영향을 미치지 않으므로 지하수위가 EL+300m이상 되는 지점들의 외곽지역은 유동이 발생하지 않는 경계조건으로 설정하였다.

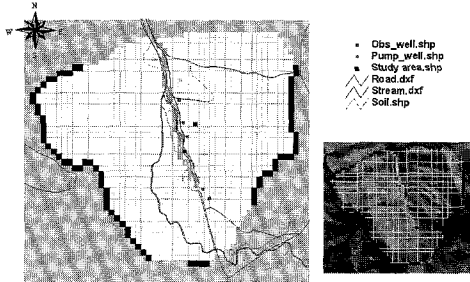


그림 3.5 조사지역의 수리지질학적 경계

3.5 초기 조건

모델링의 입력자료는 95~96년에 수행된 약산 먹는샘물 보고서의 현장조사 자료를 이용하여 입력하였으며 가정조건도 동일하게 적용하였다. 입력자료는 MS-Excel 프로그램으로 수정되었고 ASCII 파일로 저장되어 각각의 Cell에 입력되었다.

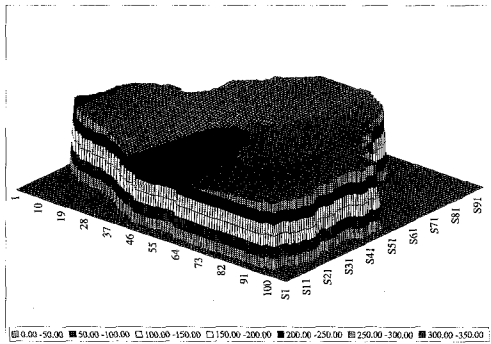


그림 3.6 초기 수두 분포

3.6 수리상수

대수층의 수리전도도는 하천 인근의 구조선을 따라 배치된 Cell에서는 다소 높게 적용하고, 그 이외의 대수층에서는 대수성 시험에서 구한 암반 구간의 수리전도도 0.001~0.269m/day를 적용하였다.

3.7 모형 실행 및 결과 분석

(1) MODFLOW의 실행결과

본 연구에서는 지하수위의 공간적 분포와 시간적인 변화를 분석하고 지하수의 물리적인 특성을 규명하기 위하여 30일 단위로 1년 동안 각 취수점에서 190m³/day, 70m³/day, 200m³/day로 지하수를 채수시 경과시간에 따라 발생하는 지하수위의 유동변화를 분석하였다. 모사결과에 의하면 지하수 취수 초기에는 대수층에 저류된 지하수가 취수량의 주 공급원 역할을 하고 있으며 상류구배 구간의 GHB로부터 유입되는 지하수 유입량과 강수에 의한 지하수 함양량이 취수에서의 취수량과 모사지역내 하류구배 구간에 위치한 인근 하천 및 작은골로 유출되는 양과 균형을 이루고 있다. 하루 460m³/day의 지하수를 장기적으로 채수할 때 모사지역내로 유입되는 전체 지하수량은 964.4m³/day이며 유출되는 양은 964.3m³/day로서 유입량과 유출량의 차이는 0.074m³/day이며 편차는 대략 0.01%로 나타났다.



그림 3.7 지하수 유동 변화 분석

(2) MT3D의 실행결과

오염물질의 이동경로를 사전에 미리 예측하여 유역내 오염물질의 유입을 최대한 억제함과 동시에 효율적이고 현실성 있는 방법으로 오염물질의 농도를 감소시켜 수질에 미치는 영향을 최소화하는 것이 현실적으로 중요하다. 따라서 본 연구에서는 특정지역을 오염원으로 설정하고 오염원으로부터 발생한 오염물질의 거동을 분석하기 위하여 MT3D 모형을 사용하였다. 오염물질의 농도는 오염물질의 용해율을 1×10⁻⁴μg/s/m²으로 가정하고 지하수 함양율 6.917×10⁻⁴m/day로 나누어준 12500 μg/m³으로 설정하였으며, 그 결과를 그림 3.8에 나타내었다.

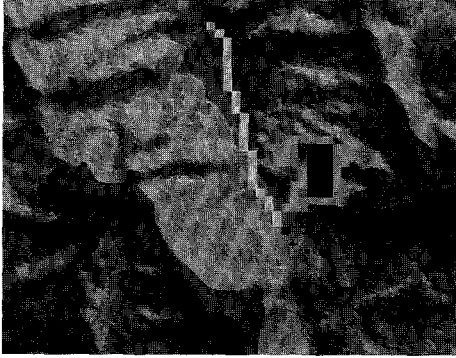


그림 3.8 MT3D의 실행결과

(3) PMPATH의 실행결과

지하수를 $460m^3/day$ 로 채수할 때, PMPATH 모형을 이용하여 입자추적을 실시하였다. 입자추적 모형 PMPATH는 정류, 부정류 유동에 대하여 전방, 후방 입자추적법 모두를 사용할 수 있다.

그림 3.9은 장기간 지하수를 채수할 때 각 취수정으로 유입되는 지하수의 경로와 등수위선을 나타낸 것으로 조사지역의 남쪽과 동쪽 경계를 통하여 유입이 발생함을 알 수 있다.

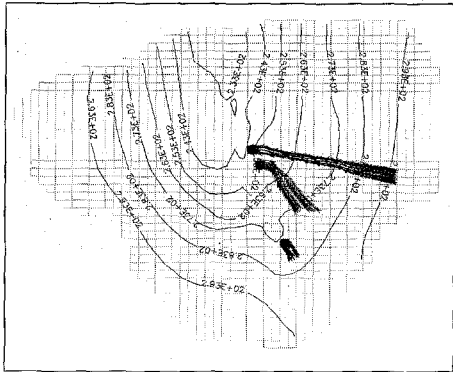


그림 3.9 수두와 유선망도(5년후)

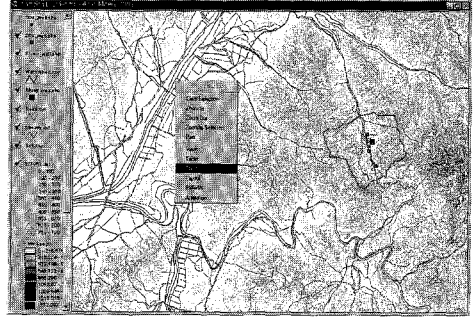
4. 개발된 GIS 프로그램의 적용

본 연구에서는 지리정보시스템을 보다 능률적으로 이용하고 사용자 업무에 적합한 공간자료와 속성자료의 디스플레이, 자료 검색, 분석 등의 기능을 효율적으로 제공하기 위해 일반적인 프로그램 환경을 적절히 수정하여 새로운 메뉴와 버튼 그리고 Tool 모델을 설계하였고 핵심적인 기능들만을 데스크탑 상에 구현하여 필요한 공간자료의 속성정보를 얻을 수 있도록 Script를 구축하고 새로운 인터페이스에 대한 구체적인 활용방안을 제

시하였다(그림 4.1).



(1) 생성된 인터페이스(V, T, C, L, M, A, D)



(2) 생성된 팝업 메뉴

그림 4.1 개발된 사용자 인터페이스

공간현상에 대한 속성자료의 경향을 효과적으로 비교, 검토하기 위하여 목적에 적합한 새로운 기능을 추가하였고 반복된 작업을 단순화하여 사용자를 위한 GIS 소프트웨어로서 보다 쉽게 이용할 수 있도록 인터페이스를 구성하였다. 그림 4.2는 개발된 스크립트를 사용하여 생성된 인터페이스를 도시한 것으로 Project Window에 구축된 View, Table, Chart, Layout Document를 호출하여 원하는 정보를 선택할 수 있다.

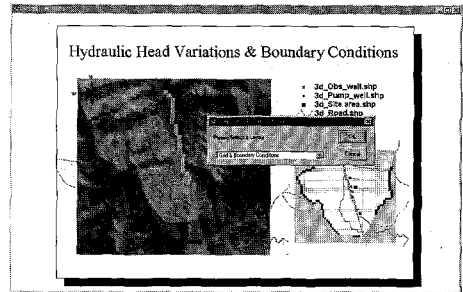


그림 4.2 생성된 메뉴 박스

그림 4.3은 MODFLOW로 계산된 지하수위의 유동변화를 경과시간에 따라 분석한 것으로 지하에서 일어나는 유체의 흐름과 현상의 지형적, 수리지질학적 특성을 정확히 파악하고 유역에서의 지하수 유동상황을 분석하여 효율적으로 지하수를 보전하고 체계적으로 관리하여 의사결정에 도움을 주기 위한 분석도구로 이용하고자 전산모형과 지리정보시스템을 연계하여 활용한 결과를 나타낸

것이다. ArcView와 지하수 모형은 system.execute 명령을 이용하여 연계되어 있다.

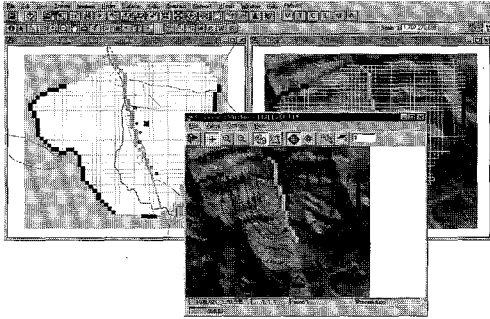


그림 4.3 PM5와 ArcView의 결합

그림 4.4는 지상과 지하의 폐기물 매립시설, 토양오염 유발시설, 폐수배출시설, 골프장 등 잠재오염원이 있을 경우를 가정하여 조사지역의 오염물질이 지하공간에 미치는 영향을 분석한 것이다. Animation Program은 PM5 Package중의 하나로써 Avenue Script를 사용하여 지리정보시스템과 연계되었다.

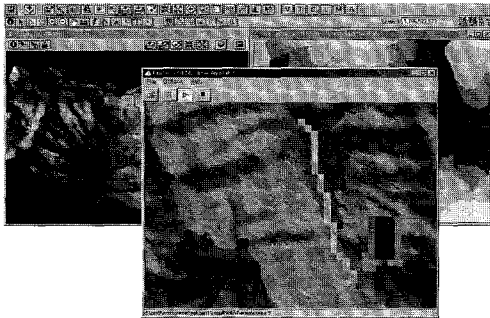


그림 4.4 MT3D의 실행 화면

HotLink는 theme의 속성 Table에 정의된 입력값을 읽어들이어 View document에 구축된 속성을 지정함으로써 주제도, 지형도, 비디오 등 관련 속성 정보를 호출할 수 있다. 그러나 HotLink를 사용하기 위해서는 관련 theme이 활성화된 active 상태에서만이 이용이 가능하므로 다른 theme의 속성 정보를 호출하기 위하여 목적에 적합한 theme을 다시 활성화하여야 하는 불편함이 있다. 이러한 문제점을 해결하고 theme의 active 상태와 상관없이 관련속성 정보를 호출하기 위하여 기존의 HotLink 스크립트를 수정하여 이를 적절히 응용하였다. 그림 4.5는 active 상태에서만이 사용이 가능하였던 Script를 가시화하기만 하면 관련 속성 정보를 이

용할 수 있도록 수정하고 이를 구현한 것을 나타내고 있다.

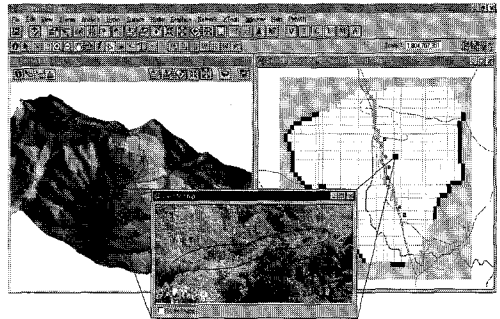


그림 4.5 응용된 HotLink를 이용한 공간자료 분석

실제 공간적 특성을 합리적으로 분석하기 위하여 ArcView와 동영상 프로그램을 연계하였고, 다각적인 분석 및 처리과정을 통해 현장상황을 정확하게 분석하여 고품질의 공간 정보를 획득하고, 합리적인 공간 의사결정을 위한 도구로서의 사용이 가능하도록 GIS 시스템을 구성하였다. 동영상 파일은 Ulead GIF Animator로 제작되었고, 디스플레이한 결과를 그림 4.6에 나타내었다.

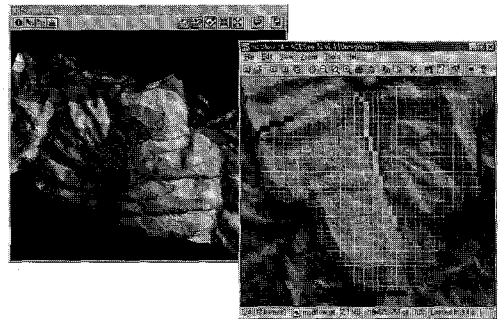


그림 4.6 GIS와 Windows 응용프로그램의 연계

5. 결론

수자원의 지속적인 개발과 안정적인 용수공급을 충족시키면서 발생 가능한 수질오염을 예방하고 이에 대처하기 위해서는 지표 및 지하에서 일어나는 물의 흐름을 정확히 파악하고 분석하여 능동적인 정책수립을 위한 합리적인 의사결정 기반을 마련하는 것이 필수적이라고 할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 강원도 홍천군 화촌면 작은골 일대를 대상으로 지하수위의 공간적인 분포 및 시간적인 변화와 취수정으로 유입되는 지하수의 경로, 등수위선, 수위강하를 분석하고, 점·비

점오염원으로부터 오염물질의 이동경로를 예측하여 유역내 유입을 최대한 억제함과 동시에 수질에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 현장의 지하수 환경을 단순화시킨 모델을 설정하여 분석하였다. 또한 지리학적 공간정보를 수치지도상에 정확히 도시하고 새로운 인터페이스와 기능을 추가하여 ArcView 사용자의 편리성을 도모하였으며, 공간정보와 동적으로 연결되는 다양한 속성정보를 구축하여 효율적인 분석이 가능하도록 시스템을 설계하고, 객체지향의 스크립트 언어인 Avenue를 적절히 응용하여 지하수 모형 및 기타 Window 응용프로그램을 ArcView 프로그램과 연계시켜 공간의 사결정을 위한 분석도구로 활용하였다.

본 연구는 급변하는 환경변화에 따른 지하수 정보화의 필요성을 인식하고 미래의 대체 수자원으로 지속적으로 증가하는 지하수의 체계적인 관리 및 보전을 위해 지하수를 단순화시킨 모델을 설정하여 지하수의 유동현황과 오염물질의 거동을 예측·분석하고, 지리학적인 속성정보를 비교·검토하여, 현장상황을 정확하게 파악할 수 있는 지하수관리시스템 구축을 위한 기본방향과 구체적인 활용방안을 제시하였다.

사 사

본 연구는 1998~1999년도 국립환경연구원 공공기반기술개발과제(통합 환경 관리 시스템의 개발 및 적용)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사를 드린다.

참 고 문 헌

[1] 환경부.
 [2] 지리정보시스템(GIS), " '98 경기도 중등교사 연수 교재", 1998
 [3] Wen-Hsing Chiang, and Wolfgang Kinzelbach, "Processing Modflow-A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Pollution", 1998.
 [4] Konikow, L. F., D. J. Goode and G. Z. Homberger, "A threee-dimensional method-of-characteristics solute-transport model. U. S. Geological Survey". Water Resources Investigations report 96-4267, 1996.
 [5] Zheng, C., MT3D, "a modular three-dimensional transport model", S.S. Papadopoulos & Associates, Inc., Rockville, Maryland, 1990.
 [6] Zheng, C. and P. P. Wang, MT3DMS, "A modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection,

dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems". Documentation and user's guide. Departments of Geology and Mathematics, University of Alabama, 1998.
 [7] Doherty, J., L. Brebber and P. Whyte, "PEST-Model-independent parameter estimation". User's manual. Watermark Computing. Australia, 1994.
 [8] Poeter E. P. and M. C. Hill, Documentation of UCODE, "a computer code for universal inverse modeling", U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 98-4080, 1998.
 [9] Hill, M. C., "MODFLOW/P - A computer program for estimating parameters of a transient, three-dimensional, groundwater flow model using nonlinear regression", U.S. Geological Survey, Open-file report 91-484, 1992.