

공간정보시스템과 지하수모형을 결합한 지하환경관리시스템의 구축

A Subsurface Environmental Management System using Spatial Information System and Groundwater Model

김 준 현* 한 영 한**
Kim, Joon Hyun Han, Young Han

Abstract

This study was performed to develop an information processing system for the sound conservation of soil and groundwater resources. The system contains the geographic spatial information system(GSIS), and the numerical model of groundwater flow and contamination. Numerical models (MODFLOW, MOC3D, MT3D, PMPATH, PEST, UCODE) and GSIS (ArcView) were integrated for the construction of an integrated management system of subsurface environment. The developed system was applied to the management of three mineral water companies located in clean mountain area. The impact of pumping over the overall catchment basin was modeled using the developed system for the decision of future management criteria.

키워드 : 지하환경관리시스템, PMWIN, ArcView, 먹는 샘물 공장, 양수에 의한 영향

Keywords : subsurface environmental management system, PMWIN, ArcView, mineral water companies, impact of pumping

1. 서론

지표면 하부에는 여러 가지 형태의 유체의 유동이 존재하는데, 이중 지하수는 인류가 이용 할 수 있는 최대의 수자원이며, 전체 물 순환계의 일부분으로서, 하천수, 지표수 및 해수와 연결되어 전체 물 순환 및 오염물 이동 및 변환에 중요한 근원 및 경로가 된다.

지하수는 미국, 영국, 독일, 일본 등 선진 국가에서 전체 물 사용량에 매우 중요한 부분을 차지하고 있다. 우리 나라의 경우도 지구온난화에 의한 물 부족 현상의 가속화를 고려할 때, 지하수 개발의 필요성은 매우 증대하고 있는 실정이다.[1] 그러나, 무분별한 지하수 개발로 인해 오염이 심화되고 있고, 가까운 시일 내에 이러한 지하수 오염문제는 어느 환경 문제보다도 중요한 사안이 될 것으로 판단된다. 따라서, 이러한

문제를 해결하기 위해서는 지하환경을 보전하기 위한 합리적인 정책이 시급히 수립되어야 할 것이다. 특히, 지하수의 오염은 매우 느린 속도로 진행되기 때문에, 지표수보다 훨씬 안전한 것처럼 보일지라도, 현재에도 오염이 진행되고 있으며, 일단 오염된 후에는 오염물질이 대수층에 반영구적으로 잔존하여 오염의 복구에 많은 경비와 시간이 소모되고 완전한 복구가 어렵다. 각국의 산업화에 의한 영향으로 환경오염이 심각해지면서, 지하수 관련 연구 부분의 대부분이 이러한 지하수 오염에 관한 부분으로 선회하게 되었다.[1][3]

국내의 지하수 연구는 외국에 비하여 지하수 오염에 대한 사회적인 인식의 결여 및 전문 분야에 대한 연구가 뒤져 있는 실정이며, 이미 많은 지역의 지하수 자원이 오염되고 있는 실정이다. 특히, 지하수 개발 후 폐공의 관리 소홀, 매립지, 공단, 주유소 등의 지하 저장 탱크, 농경지 및 골프장 등의 농약 및 비료로부터의 오염 등 지하 환경에 대한 관리가 소홀한 현실

* 강원대학교 환경·생물공학부 부교수, 공학박사

** 강원대학교 환경·생물공학과 박사과정

에서 국내의 토양 및 지하수환경은 매우 심각한 상황으로 오염이 진행되고 있다. 정부에서 이러한 문제점에 대한 인식을 가지기 시작한 것도 1990년대 이후로, 지하수자원이나 토양의 정화가 매우 어렵다는 문제점을 고려한다면 심각한 환경 문제라고 할 수 있다.[2]

외국에서는 지하수자원 개발시 양수 시험 등의 결과를 해석하여 개발 가능 지하수 자원량을 추정하기 위해 전산모형을 많이 사용하고 있다. 이러한, 지하수 유동을 해석하기 위한 컴퓨터를 이용한 수치모형은 경제성이 뛰어나고 적용이 비교적 쉽기 때문에 먹는 샘물 개발 등 여러 지하수 개발 분야에서 많이 사용되고 있다. 그러나, 이러한 전산모형을 적용하기 위해서는 현장의 파라미터에 대한 정확하고 방대한 조사작업이 필요하며, 공극율, 투수도, 저류계수, 확산계수, 생화학적 반응 계수, 경계조건 등의 파라미터를 잘못 추정할 경우 수학적 엄밀해를 사용하는 수계산 방법보다 부정확한 결과를 나타낼 수도 있다. 또한 전산모형은 수치계산에 비하여 일반적으로 입력자료 구성시 요구되는 파라미터가 방대하고, 그 준비 과정에서 작업량이 많다.[3]

본 연구에서는 위의 문제점을 극복하기 위하여 국내외에서 대표적으로 많이 사용되고 있는 MODFLOW, MOC3D, MT3D 등의 모형을 분석하고, 입력자료 및 파라미터 등을 효과적으로 분석하기 위하여 공간정보시스템(ArcView)을 분석, 전산모형과 연계 운영할 수 있는 시스템을 개발하였다. 이러한 시스템을 활용하여 토양 및 지하수 개발 및 관리를 위한 종합적인 토양 및 지하수환경 관련 정보를 통합적으로 해석할 수 있는 정보처리시스템을 개발하였다.

2. 연구 내용 및 방법

2.1 PMWIN 모형 연구

본 연구에서는 기존의 지하수 유동 해석 모형중 세계적으로 널리 알려진 모형인 MODFLOW 모형을 연구하기 위하여, 1998년 12월에 개발된 PMWIN (Processing Modflow) 모형을 사용하였다. 본 모형은 독일에서 폐기물 처분지의 정화 사업을 위해 개발되었다. 본 모형은 사용자가 편리하게 MODFLOW를 운영할 수 있도록 GUI 기능을 강화하였으며, MODFLOW 이외에도 MOC3D, MT3D, MT3MS, PEST, UCODE 등의 모형을 사용할 수 있도록 개발되었으며, 유선 추적을 위한 MODPATH를 확장시킨 PMPATH를 포함하고 있다.[4]

MODFLOW 모형은 미국 USGS에서 개발한 삼차

원 유한차분 모형으로서 지하수 유동 상황을 계산할 수 있다. 1988년에 McDonald와 Harbargh 등에 의해 MODFLOW-88이 처음으로 개발된 이후에 여러 개선작업을 거쳐 1996년에는 MODFLOW-96이 개발되었다. 1996년도 개발품은 단순한 지하수 유동이외에도 관정, 하천, 배수관거, 수위경계조건, 재충진 및 증발산 등에 의한 영향을 해석할 수 있는 기능을 가지고 있다.[6] 오염물 추적을 위한 MOC3D는 입자추적법을 사용하였으며, MT3D[7]과 MT3MS[5]는 유한차분법을 사용하였다. PEST[6]와 UCODE는 파라미터 추정 모형이다.

본 연구에서는 먹는 샘물 공장의 지하수 유동 및 지하 오염 상황 해석을 위하여, 관련 자료를 공간정보 시스템에 구축한 이후에 PMWIN 모형을 사용하여 현재 상세 정보 및 장래 변화를 예측하였다. 이러한 작업을 효율적으로 수행하기 위하여 ArcView와 PMWIN을 연계하였다. 이러한 작업은 ArcView내의 프로그래밍 기능을 이용하여 수행하였으며, 이것에 의하여 ArcView의 GUI를 연구 목적에 적합하게 수정하였다.

2.2 지하환경관리를 위한 공간정보시스템(ArcView)의 적용

본 연구에서는 지하환경에 관련된 각종 정보를 GIS에서 처리하기 위하여 먹는 샘물 업체의 각종 지하 환경 자료를 입력하여 시스템을 구축하였다. 즉, 강원도 지역에 위치한 3개의 먹는 샘물 생산 공장의 최적 수질 유지에 관련된 환경 자료를 구축하였다.

ArcView의 공간 및 3차원 분석 기능을 이용하였으며, Avenue를 사용하여 ArcView와 PMWIN을 결합하였다. PMWIN의 격자망을 ArcView상에서 동일하게 구성하고, 각종 입력자료 및 파라미터를 공간정보 시스템상에서 직접 처리하여 모델링이 수행되도록 하였다. 그리고, 계산 결과는 PMWIN의 후처리프로그램에서 분석할 수 있을 뿐만 아니라, ArcView상에서 구성된 격자망에 계산 결과가 연계되어 CAD 기능을 이용한 입체적인 분석이 가능하도록 시스템을 구축하였다.

공간정보시스템을 이용한 종합적인 관리체제 구축은 현장조사 자료의 입체적, 효율적 관리라는 측면이 외에 지하 환경 관련 전문가시스템의 개발을 한층 더 용이하게 추진할 수 있으며, 유역내 모든 점 및 비점 오염원을 관리 및 추적하여 비상시 신속히 대처할 수 있는 중앙 집중적 통합화된 관리 시스템의 구축을 가능하게 할 수 있을 것이다. 이러한 종합적 관리체제

구축은 실시간 수질 및 유량 자료의 처리로 먹는 샘물업체에 적합한 통합적인 관리 시스템으로 발전될 수 있을 것으로 판단된다.

다. 각 모델링 결과는 DXF 파일로 저장되어 ArcView상에서 구성된 격자망과 연계되어 시·공간적인 분석의 효율성을 높일 수 있었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 ArcView를 이용한 지하환경정보시스템의 구축

본 연구는 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 자동생산시스템과 연결될 수 있도록, 유역내의 가용한 모든 자료를 국립지리원의 1/25,000의 수치지도를 이용하여 공간정보시스템에 구축하였다. 구축된 자료는 실질적인 환경 영향성 분석에 매우 효율적으로 이용될 수 있는 것으로 평가되었으며, 본 연구에서 수행된 분석 내용 및 관련되는 구축자료는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

- 지하수 유동 현황 (선구조, 파쇄대 등의 지구물리 탐사 결과, 취수정 및 감시정의 취수량 및 지하수위, 대수층의 투수계수, 저류계수, 공극율)
- 지하수 수질 현황 (취수정 및 감시정의 수질)
- 지하수 오염 가능성 (인근 지하수 및 하천의 수질, 유역내 오염원, 토양오염도)
- 지하수 함양량 추정 (양수시험결과, 유역의 수문 현황)
- 일반적인 수치지도 (등고선도, 도로망도, 수계도) 위에 언급된 분석 내용 및 구축 자료중 일부분을 다음 그림 1 및 그림 2에 나타내었다.

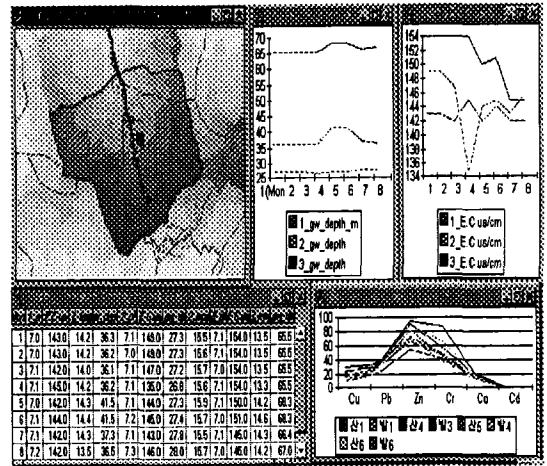


그림 1. 월별 취수정의 지하수위, 수질, 유역내 토양오염도

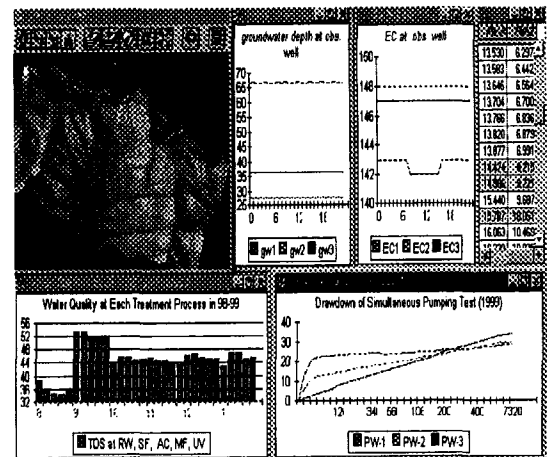


그림 2. 감시정의 지하수위, 수질, 양수시험, 처리공정별 수질

3.2 PMWIN을 이용한 지하수 수리 및 수질 모델링

PMWIN을 이용하여 지하수 유동 및 오염물 이동을 모델링하기 위해서는, PMWIN내의 MODFLOW 모형으로서 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 나타내게 한

3.2.1 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 구성된다. 그림 3에 ArcView와 PMWIN 모형을 결합한 시스템과 모델링 격자망을 나타내었다. 그림 4에 MODFLOW와 PMPATH의 모델링 결과인 지하수 등수위도, 유속장, 유선 등을 나타내었다.

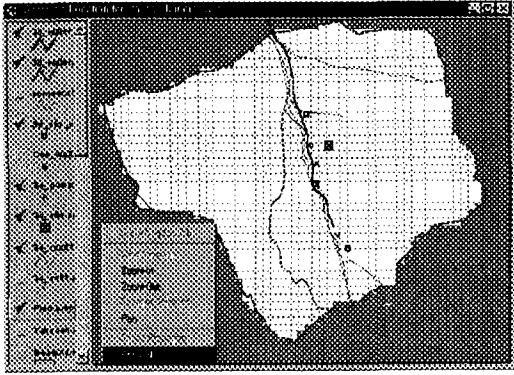


그림 3. PMWIN과 ArcView의 결합, 모델링 격자망도

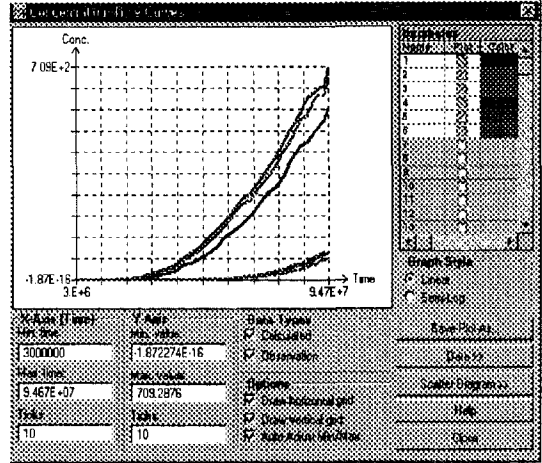


그림 5. 감시정의 농도-시간 곡선

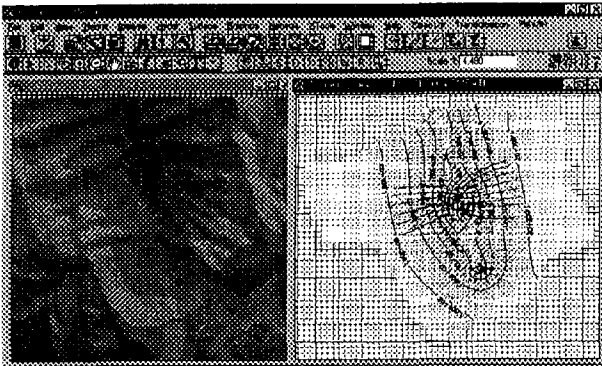


그림 4. MODFLOW 및 PMPATH의 계산 결과
 (등수위도, 유속장, 유선)

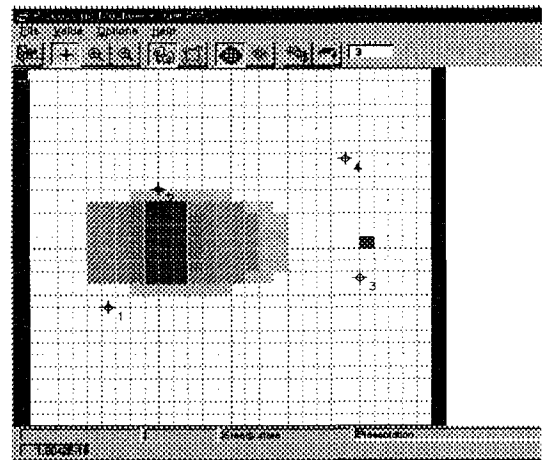


그림 6. 지하수 오염의 동영상 화면

3.2.2 MT3D 및 MOC3D를 이용한 지하수 오염 해석

MOC3D나 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 5는 지하수 오염 모델링 결과(관측정에서의 오염도)이며, 그림 6은 계산결과를 동적으로 볼 수 있는 동영상 화면을 나타낸 것이다.

4. 결론

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, 분석하였다.
- PMWIN의 다음과 같은 장점을 활용할 수 있었다.
 - * 모든 입출력 작업을 모델링 격자망상에서 수행하였다.
 - * 계산 결과는 등수위, 등농도, 유속장, 유선 등으로 표현된다.
 - * 동영상 파일을 구성하여 변화 양상을 효과적으로 분석할 수 있다.
 - * 자동 파라미터 예측 모형을 이용하여, 투수도, 저류능 등의 계수를 쉽게 분석한다.
 - * 모델링 결과를 DXF 파일로 저장하여 ArcView에서 분석이 가능하다.
- 먹는 샘물 생산 공장의 최적운동을 위해서 ArcView에서 운영 상황을 분석하였다.

본 연구에 의해 개발된 시스템은 지하수 개발 및

보전에 관련된 각종 사업에 효과적으로 이용될 수 있으며, 특히 먹는 샘물 환경 영향 심사에 적용하기 적합하다고 판단된다.

사 사

본 연구는 1996-1998년도의 강원도 중소기업청의 산학연 공동기술개발 지역컨소시엄 및 1998년도 국립환경연구원 공공기반기술개발과제(G7)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 김준현 등, "생수 수출을 위한 생수의 의학적 효과 분석, 시장 조사 및 자동화 기술 확립", 산학연 공동기술개발 지역컨소시엄, 1999.
- [2] 김교선, 김준현, "지하매설 가스배관중 누출가스의 지중 확산거동에 관한 연구", 한국가스안전공사, 1998.
- [3] 함광준, "지하수유동의 해석해, 수치모형 및 GIS를 연계한 통합적 지하수자원 정보관리시스템 개발", 강원대학교 환경공학과 석사학위 논문, 1998.
- [4] Chiang, W. H. and W. Kinzelbach, "Processing Modflow for Windows (PMWIN), A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Pollution", 1996-1998.
- [5] Doherty, J, et al., "PEST - Model-Independent Parameter Estimation, Watermark Computing", Australia, 1994.
- [6] McDonald, M. C. & A. W. Harbaugh, "MODFLOW, A modular three-dimensional finite difference ground-water flow model", U. S. Geological Survey Open-file report : Chapter A1, pp.83-875, 1988.
- [7] Zheng, C., MT3D, "A modular three-dimensional transport model", S. S. Papadopoulos & Associates, Inc. Bethesda, Maryland, 1990.
- [8] Pollock, D. W., "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 ground-water model", U. S. Geological Survey Open-file report, pp.89-381, 1989