

# 지하수 관리와 수치 모델링

박 남 식\*

## 2.1 지하수 관리

### 1. 시작하는 말

근래에 들어 지하수의 수자원으로서의 가치가 높아지고 있어 지하수 자원의 효과적 관리의 필요성이 대두되고 있다. 본고에서는 관리의 한 도구로 사용되고 있는 수치 모델링에 대하여 소개한다.

수치 모델링은 지하수 분야뿐 아니라 다른 수자원 분야에서 광범위하게 활용되고 있다. 지하수 모델링 전반에 대해서는 이미 이(1994)에 의하여 소개된 바 있고, 또한 지하수 모델링과 많은 부분을 공유하는 지표 수질 모델링에 대해서도 이미 소개된 바 있다 (한, 1995). 따라서 본고에서는 모델링 비전문가들을 위하여 모델링의 기본적 절차에 대하여 간략하게 다룬 후 수치 모델링을 실제 문제에 적용할 때 발생할 수 있는 어려움들을 분석하고 그에 관련된 연구 과제들을 중점적으로 논하고자 한다.

본고의 순서는 다음과 같다. 2절에서는 지하수 관리에 대한 정의와 모델링의 역할에 대하여 간략히 논하였다. 3절에서는 지하수 수치 모델의 개발과 모델링의 기본적 절차에 대하여 소개하였고, 4절에서는 수치 모델링의 문제점들과 연구 경향에 대하여 논하였다. 맺음말과 참고문헌으로 본고를 마무리하였다.

### 2. 지하수 관리와 모델링

다음은 Bear와 Verruijt(1987)의 정의에 기본적인 것이다. 관리란 어떤 변수에 값을 지정하여 대상 시스템의 상태를 수정하는 결정을 내리는 행위를 가리킨다. 시스템의 상태를 수정하는 이유는 어떤 목적을 달성하기 위함이다. 그런데 관리의 어려움은 각기 다른 방침(여러 결정들의 집합)에 의해서도 동일한 목적이 달성될 수 있다는 데 있다. 예를 들면 어느 지역에 일정 수량의 지하수를 공급하기 위하여 관정을 개발하고자 할 때 필요 수량을 공급할 수 있는 관정의 수와 양수량의 경우의 수는 가히 무한대라 할 수 있다. 그러나 경제적, 사회적, 기술적 제약조건 때문에 모든 방침들이 다 실현 가능하지는 않다. 따라서 실현 가능한 방침 중 최선의 것을 찾는데 관리의 목적이 있다. 최선의 방침을 찾기 위해서 여러가지 방침들이 목적을 달성하는데 있어서의 효율을 측정하는 것이 필요하다. 여러가지 방침들의 효율을 정량적으로 나타내는 척도를 목적함수라 한다. 지하수 관리에 있어 지하수의 상태를 나타내는 변수에는 지하수위, 오염물의 농도 등이 있다. 상태를 변경시킬 수 있는 결정변수로는 관정의 수와 위치, 양수량의 시간적 분포, 인공 함양의 양과 분포, 대수층과 연결된 하천의 수위 등이 있다. 달성하고자 하는 목적으로는 최소한의 양수량, 혹은 최대 허용 농도 등을 들 수 있으며, 방침의 효율을 나타내는 목적함수로는 최대

\* 동아대학교 토목공학과

화되어야 하는 이익, 최소화되어야 하는 경비 등이 있다. 수문적 제약조건으로는 최저 지하수위, 최저 용천수량, 최고 오염물 농도, 최소 양수량 등을 들 수 있다.

지하수 관리는 제약조건을 위반하지 않는 범위 내에서 최선의 방침을 선정하는 것이다. 따라서 방침의 결정자는 여러가지 방침에 대한 지하수 시스템의 반응을 비교할 수 있어야 하므로 어떤 방침에 대한 지하수 시스템의 반응을 예측하는 것이 지하수 관리에 있어서 필수적 요소라는 것은 명백하다. 이 때 지하수 시스템의 반응을 예측하기 위해서 사용하는 도구가 바로 모형(모델)이다.

## 2.2 모델

모형(혹은 모델)은 주어진 입력에 대한 실제 시스템의 출력을 근사적으로 모의하는 기구로 정의할 수 있다. 모형은 실제보다 단순하지만 실제 시스템의 본질적인 요소들을 포함한다는 데 그 의미가 있다.

모형은 물리적 모형, 수학적 모형의 크게 두 가지로 나뉘어 진다. 물리적 모형은 원형에서 일어나는 현상을 축척모형을 이용하여 재현하는 도구이나 운영비가 비싸고 적용성이 제약 받는 등의 한계가 있다. 수학적 모형은 질량, 에너지, 운동량들에 대한 보존법칙을 방정식으로 나타낸 것이다. 수학적 모형은 방정식의 해법에 따라 해석모형과 수치모형으로 나뉘어진다. 해석모형은 방정식의 해석적 해를 이용하는 모형을 가리키고, 수치모형은 여러가지 이산화 방법(유한요소법, 유한차분법 등)을 방정식에 적용시켜 근사적 해를 산출하는 전산코드(numerical code)를 이용하여 얻어지는 모형을 가리킨다.

전산코드는 수식화된 기초 물리량들의 보존법칙을 풀이하는 도구이다. 따라서 전산코드가 어느 특정 영역에 적용될 때 비로소 현실적 의미를 가진다. 그러므로 동일한 전산코드를 영역 A에 적용시키면 하나의 수치모형이 얻어지고, 영역 B에 적용시키면 또 다른 수치모형이 얻어진다. 따라서 수치

모형은 전산코드에 특정 대상에 대한 고유 정보(수리지질적, 기하학적, 수리학적)가 포함된 형태를 의미한다. 그러므로 엄밀하게 얘기하면 수치모형과 전산코드는 별개의 개념이지만, 개념의 차이가 미세하므로 분리의 필요가 없을 때에는 전산코드를 수치모형으로 지칭하는 경우가 많다. 그러나 본고에서는 필요에 의해 수치모형과 전산코드를 별개의 것으로 취급하였다.

모델링이란 모형을 사용하여 주어진 시스템의 반응을 예측하는 행위를 일컫는다. 대상 문제가 간단하면 해석적모형을 사용할 수 있다. 그러나 거의 모든 실제 문제에 대하여 해석적 방법의 적용은 불가능하여 수치모형에 의존해야 한다.

## 3. 지하수 수치 모델링

수치 모델링은 일반적으로 다음의 4단계를 거쳐 수행된다. 모델링 전반에 걸친 자세한 내용은 Anderson과 Woessner(1992)를 참고할 수 있다.

### 3.1 문제의 개념화

모델링의 첫 단계는 분석해야 하는 문제가 무엇인지를 규명하는 것이다 (예: 관정을 설치할 때 인근의 지하수위 변화가 관건인지, 지하수질 변화가 문제인지). 실제 문제에서 관심의 대상이 되는 현상은 여러가지 요소들의 복합적 영향을 받는다. 그러나 많은 요소들 중에는 문제에 미치는 영향이 큰 것들과 작은 것들이 있다. 모델링에서는 기법의 제약, 컴퓨터의 계산 능력의 한계 등으로 이러한 요소들 중 그 영향이 큰 것들만 고려한다. 이렇게 문제의 본질적 요소들만을 선정하는 절차를 개념화라한다.

### 3.2 적합한 전산코드의 선택

문제의 개념화가 이루어지면 적합한 전산코드의 선택은 거의 자동적으로 따른다. 모델링 기법에 대한 제약으로 지하수 흐름에 관계된 모든 현상을 모

## 특집 : 지하수개발 이대로 좋은가? .....

표 1. 전산프로그램 선정 기준

■ 상의 수	{ 단상 : 지하수 흐름만 고려 다상 { 혼합유체(예: 담수와 해수) 분리유체(예: 지하수, 기름, 공기)
■ 대수층 특성	
■ 흐름 특성	{ 다공질/열극 단층/다층
	{ 피압/비피압 포화/불포화
■ 용질의 종류 : 중금속, 화학 물질, 방사성 물질, 미생물 등	

의실험 할 수 있는 전천후(universal) 코드는 존재하지 않는다. 따라서 분석하고자 하는 문제의 특성에 따라 코드를 선정한다. 일반적인 선정 기준들은 표 1에 수록되었다.

위에 나열된 기준 외에도 가용한 계산능력(PC, Workstation, Supercomputer)도 코드의 선택에 큰 영향을 미치는 요소가 된다.

지하수 흐름과 용질의 수송을 모의실험하기 위하여 각기 다른 특색을 지닌 수 많은 전산코드들이 개발되었다. 이들 중 많은 코드들이 Software clearinghouse인 국제지하수모델링센터(IGWMC, 1994)에서 대리 판매되고 있기 때문에 정보를 손쉽게 얻을 수 있고 또 구입하기도 용이한 편이다. IGWMC에서 취급하는 코드의 대부분은 public domain이기 때문에 가격도 저렴한 편이다. 여기서 public domain이라 함은 세금(미국민의)으로 운영되는 공공기관의 지원으로 개발된 코드를 지칭한다. IGWMC에서 취급하는 코드 외에도 대학의 연구소나 모델링 consultant들이 개발하여 관리/판매하는 코드들이 많이 있다. 이들 코드들은 public domain 코드에서 볼 수 없는 첨단 기능을 가지고 있는 경우가 많고, 따라서 가격도 상당히 비싼 편이다.

### 3.3 모델의 개발

선정된 전산코드에 대상 유역에 대한 고유 정보를 첨가시키면 대상 유역에 대한 모델이 구성된다. 이때 필요한 고유 정보는 분석 대상 현상의 주요

mechanism에 영향을 미치는 변수들이다. 예를 들면 지하수 흐름의 매체인 대수층의 구조를 나타내는 기하학적 정보(공극율, 대수층 두께, 열극이 중요한 경우 열극의 두께, 범위, 대수층이 층을 이루고 있으면 대수층 사이의 난투수층의 두께)와 흐름 특성을 나타내는 수리학적 정보(각 방향의 투수계수등)들이 이에 포함된다. 용질의 이동도 분석 대상이 될 때는 확산지수(dispersivity), 그리고 용질의 특성을 나타내는 계수들(예: 흡/탈착 계수, 반감계수등)이 선정된 코드와 함께 특정 유역에 대한 모델을 구성하는 고유한 정보가 된다.

선정된 코드가 고유 정보가 대상 유역과 문제의 본질적 요소에 대하여 충실하면 개발된 모델은 대상 유역의 특성을 잘 나타낸다고 할 수 있다. 그러므로 어떤 “입력”에 대한 유역의 “반응”을 예측하는 실험을 수행할 수 있다. 그러나 먼저 다음의 방법등으로 모델의 충실도를 향상시켜야 한다.

### 3.4 모델의 보정 및 검증

모델을 개발하는 데 필요한 고유 정보는 실측 자료에 의존한다. 그런데 거의 대부분의 경우 모델이 요구하는 고유 정보의 해상도는 가용한 실측 자료의 그것보다 훨씬 더 조밀하다. 따라서 개발된 모델에 사용된 고유 정보는 일반적으로 유역의 몇몇 군데에서 얻어진 정보를 보외(extrapolate)하여 얻는다. 그러므로 고유 정보의 충실도는 대상 유역의 특성과 사용된 보외법에 의하여 결정되지만 100% 충실도를 가지는 것은 불가능하다. 따라서

예측 실험을 하기 전에 모델의 충실도를 향상시키기 위한 두 가지 절차를 거친다. 첫째, 모델(고유 정보)의 충실도를 보완하기 위한 보정(calibration)과 둘째, 보정된 모델의 충실도를 확인하는 검정(validation)과정이다.

보정은 고유 정보가 대상 유역을 잘 대변하도록 수정을 가하는 행위를 일컫는다. 일반적으로 보정은 모델 실험의 결과와 시스템의 어떤 상태에 대하여 관측된 자료와의 차이를 분석하여 수행한다. 보정된 모델은 원래 모델보다 대상 유역을 더 충실히 대표한다고 볼 수 있지만, 지하수 흐름의 한 상태를 나타낼 수 있는 고유 정보의 집합은 유일하지 않기 때문에 보정된 모델의 충실도를 검정하는 절차가 뒤따라야 한다.

검정은 고유 정보에 대한 추가 수정 없이 어떤 다른 상태(보정에 사용된 상태가 아닌)를 대상으로 수행한 모델 실험결과와 관측자료 사이의 일치도를 조사하는 것으로 상이도가 허용치를 초과하면 보정된 모델이 대상유역을 잘 나타낸다고 볼 수 없다. 따라서 이 경우에는 보정절차가 재수행되어야 한다.

### 3.5 예측 실험

보정과 검정을 거친 모델은 대상 유역을 어느 정도의 확신을 가지고 대표한다고 볼 수 있으므로 예측 실험에 사용될 수 있다. 예측 결과의 충실도는 말할 나위없이 보정과 검정절차의 충실도에 큰 영향을 받는다. 불행히도 보정과 검정은 실험자의 주관적 판단에 크게 좌우되기 때문에 충실도를 체계적으로 향상시키는 기법에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 그 중 활발한 연구가 진행되고 있는 몇몇 분야를 다음에 소개한다.

## 4. 관련 연구과제

수치 모델링은 대상 현상에 간단화 가정을 적용시켜 얻어지는 방정식을 이용하므로 수치 모델링의 결과가 실제 현상을 얼마나 충실히 반영하느냐 하

는 것은 수치 모델링에 있어서 가장 중요한 문제라 할 수 있다. 수치 모델링 결과에는 다음의 두 단계에서 도입된 오차가 누적되어 있다.

- 전산코드에 포함된 오차
- 고유 정보에 포함된 오차

일반적으로 고유 정보의 오차는 전산코드의 오차보다 훨씬 더 크다. 따라서 본고에서는 전자에 대하여 간략하게 설명하고 후자에 대하여 집중적으로 다루었다. 본 절의 마지막 부분에서는 지하수 관리에 관련된 기법에 대한 사항을 다루었다.

참고로, 저자는 지하수 모델링의 되도록 많은 연구 분야를 객관적 관점에서 소개하려고 노력했으나 소개된 내용들이 지하수 모델링 연구 분야의 모든 중요한 연구 성과를 집대성한 결과라고 할 수 없음을 밝혀둔다.

### 4.1 전산코드의 오차

전산코드는 자연현상에 대한 기본법칙을 단순화시켜 얻은 방정식을 근사적으로 풀이하는 도구이다. 따라서 전산코드의 오차는 방정식에 포함된 오차와 근사해에 포함된 오차의 두 가지로 분류될 수 있다.

방정식은 질량, 에너지, 운동량등의 기초 물리량들의 보존을 나타내는 지배방정식과 주요 미지수와 지배방정식에 사용된 계수들 사이의 관계를 나타내는 구성방정식을 포함한다. 지하수 분야에서 구성방정식의 예를 들면 불포화 흐름에서 포화도와 수압과의 관계, 용질의 흡/탈착 계수와 농도와의 관계등을 들 수 있다. 이 관계들은 매우 복잡하여 해석적 분석은 불가능하고 실험결과를 이용하여 얻어지는 실험식에 의존하는 형편이다. 따라서 지배방정식의 정확도는 거의 전적으로 구성방정식의 정확도에 의존한다.

근사해에 포함된 오차는 전산코드가 방정식들을 풀이할 때 발생하며, 이는 역시 크게 두가지로 분류될 수 있다. 첫째, 방정식의 이산화(유한요소, 유한차분, 경계요소, 등등에 따른)에 따른 오차와 둘째, 이산화로 얻어지는 연립방정식의 해를 구하

## 특집: 지하수개발 이대로 좋은가? .....

는 데 도입되는 오차이다. 방정식의 이산화에 따른 오차는 격자의 크기나 고도의 수치 방법을 써서 줄일 수 있다 (Huyakorn 과 Pinder, 1983). 연립 방정식의 해에 포함된 오차는 다른 오차들에 비하여 상대적으로 작다. 그러나 모의실험에 소요되는 컴퓨터 시간 중 연립방정식의 풀이가 차지하는 비율이 매우 크기 때문에 풀이의 효율은 매우 중요한 문제이다. 현재 연립방정식의 해법으로는 Gauss 소거법과 같은 직접적 방법 대신 Preconditioned Conjugate Gradient 방법, multigrid 방법같은 반복법이 사용되고 있으며 효율과 정확도 향상을 위한 많은 연구가 진행되고 있다(SIAM, 1994a,b).

### 4.2 고유 정보의 오차

고유 정보(입력 자료)의 오차를 줄이기 위한 연구는 두 갈래로 진행되고 있다. 첫째는 입력 자료의 오차를 줄이기 위한 노력이다. 입력 자료는 몇 군데에서 측정된 자료를 유역 전체에 보외시켜 얻어진다. 따라서 입력 자료의 오차는 보외법의 향상이므로 줄일 수 있다. 또 다른 방향은 보외법이 아무리 우수해도 입력 자료의 오차를 완전히 제거할 수 없다는 인식으로부터 출발한다. 따라서 둘째 연구 방향은 입력 자료의 불확실성을 인정하고 그를 모델 실험 결과의 분석에 반영시키는 방법을 찾는 것이다.

#### 4.2.1 입력 자료의 오차

모델에 입력되는 자료는 대수층의 특성을 나타내는 수리지질 자료들이 주를 이룬다. 이들의 정확도를 향상시키는 데 있어 연구는 크게 upscaling, 지구통계, 역산의 세 방향으로 진행되고 있다.

#### Upscaling

어떤 자료가 측정되었을 때 그 자료가 대변하는 범위는 매우 국지적이다. 이렇게 측정된 자료를 수치모델의 한 격자점에 적용시키면 그 격자점이 대변하는 영역은 측정범위보다 훨씬 더 크다. 따라서 이러한 자료가 더 큰 영역을 대표할 수 있도록 변

환하는 절차를 upscaling이라한다.

Desbarats(1995)는 불균질 토양에서 모세관압력과 포화도 관계곡선을 upscale 하는 방법에 대하여 연구하였으며, 투수계수와 공급율이 특정분포를 만족시키면 오차없이 upscaling 하는 방법을 찾아내었다. Dagan(1994)은 용질의 수송문제에서 확산계수가 문제의 scale뿐 아니라 수송과정(수송시간과 공급원의 크기)의 이력에도 종속적이라는 것을 주장하였다.

#### 지구통계(Geostatistics)

지구통계 방법은 몇몇 지점에서 측정된 개별적 자료로부터 유역 전반에 대한 분포를 통계적 기법으로 추정하는 방법이다. 한 점으로부터 격자점의 대표 영역까지 확대 적용시키는 upscaling 방법과 유사한 개념이지만, 지구통계 방법은 적용 범위가 유역전체로 훨씬 더 크다.

가장 보편적으로 사용되는 방법은 Kriging 방법(Tompson과 Gelhar, 1990)이 있다. Kriging 방법은 미비 지역의 자료를 그외 지역의 자료와 매끄러운 분포를 이루도록 추정한다. 따라서 유역 내 존재할 수 있는 불규칙한 변화를 탐지해내는 데에는 한계가 있다. Kriging의 이러한 단점을 보완하려는 연구가 시도되고 있다 (Ospey 등, 1993; 정, 1993a, 1993b).

#### 역산(Inverse Modeling)

통상적 의미의 수치 모델링은 수리지질 자료들을 입력시키고 모의실험을 수행하여 종속변수(지하수위 혹은 농도)를 구하는 것이고, 이를 forward modeling이라 한다. 그에 반해 역산방법(inverse modeling)은 관측된 지하수위 혹은 농도를 입력 자료로 하여 수리지질 자료들의 분포를 구하는 것이다. 따라서 이 방법은 가용한 현장 자료에 가장 부합하는 수리지질 자료의 분포를 추정할 수 있는 방법이라 할 수 있다. 그러나 역산과정은 대개의 경우 ill-posed이다. 즉, 관측 자료에 대한 수리지질 자료의 분포가 유일하지 않거나, 작은 관측오차에 대해서 계산 과정이 불안정한 경우가 많다. 따

라서 이 분야는 현재 활발한 연구가 진행되고 있다 (Sun등, 1995; McLaughlin과 Reid, 1993).

#### 4.2.2 모델실험 결과의 불확실성

어떠한 방법으로 수리지질 변수들의 분포를 구해도 그 자료에는 오차가 불가피하다. 그러므로 한 set의 수리지질 자료로부터 얻어지는 하나의 모의 실험 결과를 그대로 받아들이는 확정론적(deterministic) 접근 방법 자체에 한계가 있다. 따라서 확률 분포를 이용하여 입력 자료의 불확실성을 명시적으로 나타내는 추계론적(stochastic) 방법이 사용되고 있다.

미 환경청은 쓰레기 매립지 침출수로 인한 주변의 위해 정도를 평가하기 위한 모델에서 주요 입력 자료들에 대한 확률분포를 추정하여 입력 자료의 불확실성을 Monte Carlo 방법으로 처리하였다 (Huyakorn 등, 1993). Cooley(1995)는 지하수 흐름 수치모형을 하천과 대수층이 상호작용하는 문제에 적용시켜 대수층의 지하수위와 하천과의 유출량에 대한 신뢰 구간을 산정하는 방법에 대하여 연구하였다. Brooks등(1994)은 지하수 흐름 수치모형으로부터 수리지질 변수들의 가능한 변화 범위(매개변수 공간) 내에서 최선과 최악의 경우를 효과적으로 구하는 방법에 대하여 연구하였다. 그들의 방법은 매개변수 공간에 포함되는 모든 가능성에 대하여 모의실험하는 Monte Carlo 방법에 비하여 훨씬 더 경제적이다. 이 방법은 최악의 경우에 대하여 결정을 내려야 할때 유용한 방법이 된다. 모델링 절차 중 모델실험 결과와 관측 자료 사이의 일치도를 향상시키는 방법으로 유역에 대한 고유 정보를 보정한다. 따라서 관측 자료의 양과 질이 수치모델의 정확도와 복잡도를 결정한다. 그러나 이 절차에서 입력 자료가 필요 이상으로 복잡해질 가능성이 있다. Sun등(1993)은 주어진 target를 허용오차 내에서 재생시킬수 있는 가장 간단한 매개변수들의 set를 구하는 방법을 연구하였다. 박과 이(1995)는 제주도 중산간 지역에 대한 수리지질 자료의 불확실성이 유역내 주관심 대상인 해안 지역의 지하수 흐름 모델실험 결과에 미치는 영

향을 분석하였다.

#### 4.3 지하수 관리 기법 : 최적화

지하수 관리는 주어진 목적을 달성할 수 있는 여러가지 방침중 최선의 것을 가리는 체계적 방법이 필요하므로 단순한 모델링만으로는 그 한계가 있다. 따라서 여러 방침들의 효율을 나타내는 목적함수를 극대화 시키는 방법을 찾아내는 최적화 기법과 수치모델링과의 연계는 자연스러운 현상이다.

최적화에 대하여는 이미 많은 연구가 수행되었다. 대표적인 방법으로 linear programming, dynamic programming, integer programming등이 있다. 최근에는 생물체의 진화과정을 모방하는 유전자방법(genetic algorithm)이 많이 사용되고 있다 (Goldberg, 1989). Newton-Raphson과 같은 통상적인 최적화 방법은 목적함수의 도함수를 이용하여 반복적으로 극치를 찾는다. 그러나 초기치의 위치가 좋지 않거나 목적함수의 도함수의 거동이 나쁘면 반복절차가 발산하게 된다. 그러나 유전자 방법은 목적함수의 도함수를 필요로 하지 않고, 또한 국부 극치에 수렴할 염려가 훨씬 적기 때문에 상당히 안정된 최적화 방법이다. 최근에 지하수 모델링에도 많이 적용되어 실용성을 인정받고 있다 (Wang 등, 1995).

Reely와 Tyagi(1993)는 3개의 대수층으로부터 양수하는 146개의 관정에 대하여 유역내 지하수 흐름에 미치는 영향이 최소가 되는 운영 방침을 linear programming과 지하수 수치모형을 연계하여 구하였다.

### 5. 맺음말

미국의 국립연구위원회(NRC, 1992)는 “지하수 흐름 과정을 이해하는 데 있어 수치모형은 가장 중요한 과학적 도구 중의 하나이다”라고 하였다. 이는 지하수 관리에서 모델링이 차지하는 위치를 단적으로 보여주는 것이라 할 수 있다. 그리고 이를 반영하듯 국내에서도 전산코드의 사용은 증가 추세

**특집 : 지하수개발 이대로 좋은가? .....**

에 있다.

그러나 아직도 모델링에 대한 이해의 부족으로 전산코드의 소유가 곧 성공적 모델링을 의미하는 것으로 오해하거나, 모델링 결과를 전적으로 불신하는 경우가 많이 있다. 이러한 양 극단적 태도에 대한 일차적인 책임은 모델링 전문가에게 있다. 본고에 서술한 것처럼 모델링은 사용자의 주관적 판단에 의존해야 하는 절차들을 포함하고 있다. 따라서 전문가들은 모델링 절차를 충실히 수행하고 그 결과를 과장됨 없이, 결과의 한계와 함께, 보고하여 비전문가들의 모델링에 대한 올바른 이해를 위하여 노력해야 할 것이다.

모델링은 지하수 관리의 전반적 과정에 걸쳐 더욱 활발히 사용되어야 한다. 현재 국내 사정은 상대적으로 많은 자료가 집적되어 있으나 그 자료들을 이용한 지하수 시스템의 분석 노력은 상대적으로 미흡해 보인다. 또한 모델링은 지하수 관리의 초기 단계인 지질조사 계획 단계에서부터 적용되어야 한다. 모델링(특히 역산기법등)과 현장조사가 병행될 때 투자에 대한 최대한의 효과를 올릴 수 있다.

**참 고 문 헌**

박남식, 이용두, 제주도 중심부 수리지질 자료의 미비가 해안 지역에 대한 수치실험에 미치는 영향에 대한 연구, 대한 지하수 환경학회 춘계 학술회의 회의록, p 27, 1995.

이강근, 모델링에 의한 지하수 평가와 분석, UR대응대 심포지엄 보고서, 농어촌진흥공사, 191-226, 1994.

정상용, 지하수위 분포 모델링을 위한 Universal Kriging의 응용: I. K계의 고유확률함수, 대한 지질공학회지, 3(1), 39-49, 1993a.

정상용, 지하수위 분포 모델링을 위한 Universal Kriging의 응용: II. 제한적 최대 우도법, 대한 지질공학회지, 3(1), 51-61, 1993b.

한건연, 수질모델링, 대한토목학회지, 43(3), 39-46, 1995.

Anderson, M. P. and W. W. Woessner, Applied

groundwater modeling: simulation of flow and advective transport, Academic Press, Inc., New York, 381 pp, 1992.

Bear, J. and A. Verruijt, Modelling groundwater flow and pollution, Kluwer Academic Publishers, pp 413, 1987.

Brooks, R. J., D. N. Lerner, and A. M. Tobias, Determining the range of predictions of a groundwater model which arises from alternative calibrations, Water Resources Research, 30(11), pp2993-3000, 1994.

Cooley, R. L., Uncertainty analysis for groundwater models: a comparison of four methods, Eos 76(17), p S146, 1995.

Dagan, G., The significance of heterogeneity of evolving scales to transport in porous formations, Water Resources Research, 30(12), pp 3327-3336, 1994.

Desbarats, A. J., Upscaling capillary pressure-saturation curves in heterogeneous porous media, Water Resources Research, 31(2), pp 281-288, 1995.

Goldberg, D. E., Genetic Algorithms, Addison-Wesley Publishing, 412 pp, 1989.

Huyakorn, P. S. and G. F. Pinder, Computational Methods in Subsurface Flow, Academic Press, 472 pp, 1983.

Huyakorn, P. S., Y. S. Wu, N. S. Park, S. Panday, and Z. Saleem, Efficient composite modeling approach for 3D multiphase flow and solute transport in the subsurface, Eos, 74(16), p127, 1993.

IGWMC, IGWMC Software Catalog, International Ground Water Modeling Center, ColoradoSchool of Mines, Golden, USA, 1994.

McLaughlin, D. B. and L. B. Reid, Estimating continuous aquifer properties from field measurements: The inverse problem for groundwater flow and transport, Computational Methods in Water Resources X, Kluwer Publishers, pp 777-784, 1994.

- Opheys, S, A. F. B. Tompson and G. Rouve, Comparison of two indicator simulation methods, *Computational Methods in Water Resources X*, Kluwer Publishers, pp 563-570, 1994.
- NRC, A. review of groundwater modeling needs for the US Army, Washington DC, p3, 1992.
- Reely, B. T., and A. K. Tyagi, A unified optimization-simulation aquifer management model, *Hydraulic Engineering, Proc. of the Symposium*, ASCE, vol 1, pp466-470, 1993.
- SIAM, Special section on iterative methods in numerical linear algebra, *SIAM Journal on Scientific Computing*, 15(2), pp 295-493, 1994.
- SIAM, Special section on iterative methods in numerical linear algebra, *SIAM Journal on Scientific Computing*, 15(3), pp 545-754, 1994.
- Sun, N.-Z., M.-C. Jeng, M.-J. Horng, C. Wang, B. Mortazavi, and W. W.-G. Yeh, Model structure validation in groundwater modeling, *Engineering Hydrology, Proc. of the Symposium*, ASCE, pp1043-1047, 1993.
- Sun, N.-Z., M.-C. Jeng, and W. W.-G. Yeh, A proposed geological parameterization method for parameter identification in three-dimensional groundwater modeling, *Water Resources Research*, 31(1), pp 89-102, 1995.
- Tompson, A. F. B. and L. W. Gelhar, Numerical simulation of solute transport in three-dimensional randomly heterogeneous porous media, *Water Resources Research*, 26(10), pp 2541-2562.
- Wang, M., C. Zheng, C. L. Karr, and M. Sun, Application of genetic algorithms to groundwater management and remediation problems, *Eos* 76(17), p S136, 1995.