

지하수 환경영향평가

09. 지하수 모델링

1. 지하수 모델

지하수 모델은 복잡한 지하의 실제 대수층에서의 지하수의 흐름이나 용질의 거동 상황을 단순화시켜 해석하고 재현하는 분석 도구로서 지하수환경의 최적관리 등을 위한 목적으로 유용하게 사용할 수 있다.

지하수모델의 분류

지하수모델은 모델의 기능, 수학적 표현방식, 차원(dimension), 시간변화, 수학적 처리방식 등에 따라 다양하게 분류된다 (표 1). 가장 일반적인 지하수모델의 분류는 기능에 따른 것으로 지하수유동모델, 오염물질거동모델, 지화학 모델, 열이동모델, 변형모델로 구분한다 (한정상 외, 1999).

표 1 . 지하수모델의 분류와 분류별 종류 (한정상 외, 1999)

분 류	종 류
1. 기능	<ul style="list-style-type: none"> • 지하수유동 모델 (groundwater flow model) • 오염물질거동 모델 (solute transport model) • 지화학 모델 (geochemical model) • 열이동 모델 (heat transport model) • 변형 모델 (deformation model)
2. 수학적 표현방식	<ul style="list-style-type: none"> • 개념모델 (conceptual model) • 물리모델 (physical model) • 수학모델 (mathematical model) - 해석모델(analytical model), 수치모델(numerical model)
3. 차원	<ul style="list-style-type: none"> • 1차원, 2차원모델 (평면, 단면), 준3차원모델, 3차원모델
4. 시간변화	<ul style="list-style-type: none"> • 정류(steady-state)모델, 부정류(transient) 모델
5. 기본인자	<ul style="list-style-type: none"> • 전향모델(forward model), 반전모델(inverse model)
6. 수학적 취급방식	<ul style="list-style-type: none"> • 결정론적 모델(deterministic model) • 추계론적 모델(stochastic model)

그 중에서도 지하수의 흐름이나 오염물질의 거동을 해석하고 예측하는 지하수유동 모델과 오염물질거동 모델은 환경영향평가 시 유용하게 사용되고 있는 지하수모델이다. 특히 고성능 컴퓨터의 개발로 인해 최근에는 컴퓨터를 이용하여 지하수 유동과 오염물질 거동을 수치적으로 모사하는 지하수모델들이 많이 개발되어 이용되고 있다.

흔히 사용되는 지하수 관련 모델

현재까지 개발된 지하수계에 일어나는 물리화학적 현상을 시뮬레이션 할 수 있는 프로그램은 공용과 상용을 포함하여 무수히 많으나 주로 사용되고 있는 프로그램을 나열하여 보면 표 2와 같다.

표 2 . 일반적으로 통용되는 지하수모델

모델명	개 요
MODFLOW	3차원 지하수 유동모델, 유한차분법, 포화대 GMS, Visual MODFLOW 등 다양한 전처리, 후처리프로그램들 여러 개의 모듈(패키지)로 구성
MODPATH	3차원 지하수유동 경로모델, MODFLOW 와 연계하여 사용 MODFLOW의 입자추적 후처리 모델
MT3D	3차원 오염물질 거동모델. 포화대 비반응성 물질 MODFLOW와 연계하여 물질거동 모사
RT3D	3차원 오염물질 거동모델, 유한차분법, 포화대 MT3D에 반응성 물질의 화학반응을 추가 모사 MODFLOW와 연계 활용
HydroGeosphere	3차원 지하수유동모델, 유한요소법, 지표수-지하수 연계 모델링 가능. 변동포화대 모델 용질, 에너지(열) 거동모델
FEFLOW	3차원 유한요소법 모델, 물의 밀도차이 고려 지하수유동 + 오염물질 거동
SUTRA	2차원 또는 3차원 유한요소법 모델. 밀도차이 고려 포화대 + 불포화대 지하수유동 모델 + 오염물질 거동모델 (반응성) SutraSuite: SUTRA의 전처리, 후처리 프로그램
HST3D	3차원 지하수 유동, 열과 오염물질 거동 모델 전처리, 후처리 사용
FracMan	3차원 지하수 유동 및 저장 모델 단층, 절리, 카르스트 지형에서의 지하수 유동 모델

●쉬어가기 퀴즈(학습 중에 학습자가 쉽게 풀어 볼 수 있는 O, X 퀴즈 1문항을 제시해 주
세요. 정답과 해설도 함께 제시해 주셔야 하고, 해당 주제 다음에 넣어주세요.)

문제> 널리 쓰이는 지하수 모델인 MODFLOW는 지하수유동과 오염물질 거동을 함께 모사
하는 지하수모델이다.

정답> X

해설> MODFLOW는 3차원 지하수유동모델로서 대수층에서의 지하수위를 계산한다.
MODFLOW와 연계하여 오염물질 거동을 모사하는 모델에는 MT3D 또는 RT3D 등이 있다.

2. 지하수 모델링 절차와 주요 입력자료

지하수모델을 이용하여 지하수 환경을 해석하고 변화를 예측, 분석하는 작업을 지하수 모
델링이라고 한다. 지하수 모델링은 다음의 단계를 따라 수행한다 (그림 1).

- 1) 모델 목적 파악: 대상지역의 문제를 이해하고 모델링을 수행하는 필요성과 목적을 파악한다.
- 2) 자료수집: 모델링에 필요한 자료를 수집, 분석한다
- 3) 개념모델 설정: 대상지역 대수층에 대한 개념모델을 설정한다.
- 4) 수학적모델 선정: 현장여건을 가장 적절하게 해석할 수 있는 수학적모델을 선정한다.
- 5) 수치모델 선정 및 수치 개념모델 설정: 계산격자망 설계 및 모사시간, 초기조건, 경계조건, 모델입력인자 규정: 모델링 대상대수층에 설정할 격자망을 설계하고 모사에 적용할 예측시간, 초기 및 경계조건, 대수층의 수리지질학적 특성(수리전도도, 저유계수, 관정현황 등)에 대한 입력인자 등을 결정한다.
- 6) 모델보정(calibration): 현장에서 측정한 수두, 유출량 또는 농도에 가까운 모사결과 값을 예측하는 모델의 입력인자들을 결정하는 과정을 보정이라고 한다.
- 7) 민감도 분석: 수리지질학적 특성인자와 경계조건, 각종 외부 스트레스는 불확실성을 가지는데, 이 불확실성이 보정된 모델에 미치는 영향, 즉 민감도를 분석한다.
- 8) 검증(verification): 보정된 모델이 다른 현장측정값을 모사할 수 있는지 비교하여 보정된 모델의 모사능력을 검증한다.
- 9) 예측: 위에서 보정한 모델에 환경의 변화요인을 적용하여 모델링을 수행하여 환경변화에 따른 발생가능한 현상을 예측한다.
- 10) 사후검사를 통한 모델 입증(validation): 모델링 결과 예측한 값의 타당성을 입증하기 위해 모델링 완료 후 사후 현장자료를 수집하여 예측 값과 현장측정값을 비교한다.

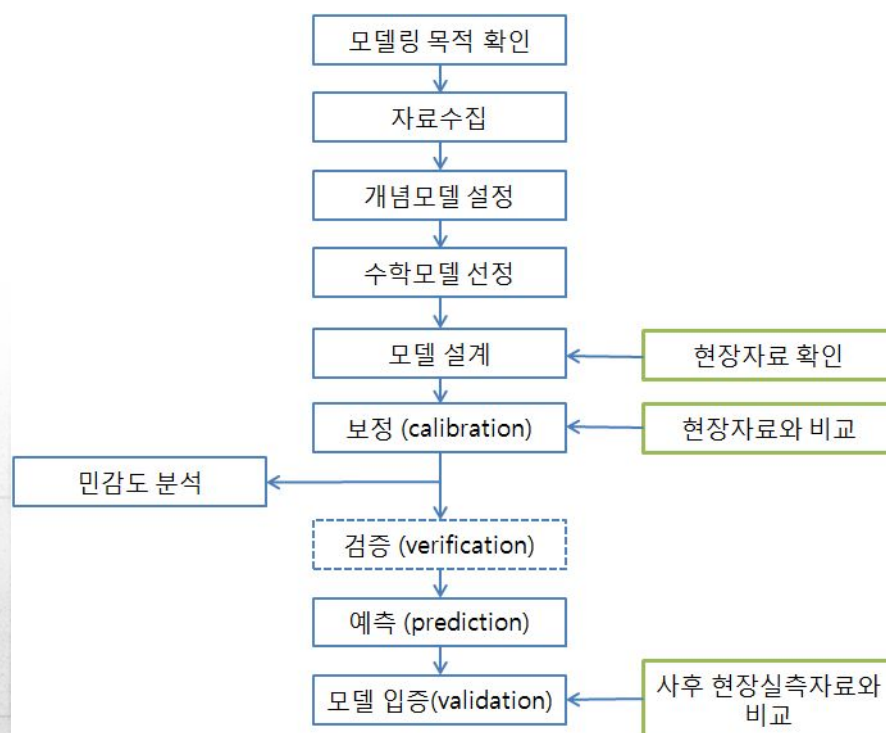


그림 1 . 모델링 수행 흐름도

그림 1의 모델링 수행 흐름도에서 주요 단계에 대해 상세하게 살펴보겠다.

자료수집

지하수 모델링에 필요한 자료는 기존자료를 활용하거나 지하수환경 조사를 통해 얻게 된다. 지하수 모델링에 필요한 자료는 다음과 같다.

- 수리전도도, 투수량계수, 지층의 두께, 공극률, 비산출률, 이방성, 기상자료
- 지하수위, 지하수 수질
- 오염물질의 물리, 화학, 생물학적 특성 인자, 오염 이력
- 지형자료, 정천현황

개념모델 설정

모사 대상지역 지하수환경의 경계조건이나 수리지질학적 특성 및 현황을 반영하여 실제 지하수환경을 단순화시킨 모델을 ‘개념모델’이라고 한다. 개념모델의 설정은 지하수유동이나 오염물질거동을 모사할 대상영역을 단면도나 다이어그램의 형태로 도식화해서 표현하는 작업을 말한다(그림 2). 일단 개념모델을 설정하면 그에 따라 모델링에 사용할 수치모델의 차원이나 격자망의 설계를 하게 된다. 따라서 개념모델의 설정은 지하수모델링의 초석이라고 할 수 있다. 개념모델은 실제 환경을 단순화시킨 것으로 모델 자체에 가정과 불확실성이 내재되어 있음을 명심하고 추후 모델링 결과를 해석하여야 한다.

수학모델 선정

개념모델이 설정되면 그 개념모델에서의 지하수 유동 및 오염물질 거동을 해석할 수학모델을 선정하여야 한다. 수학모델을 선정할 때에는 다음의 사항을 고려해야 한다.

- 대상영역의 차원: 1차원, 2차원, 3차원
- 지하수 흐름 상태: 정류상태, 부정류상태
- 지하수 모델의 기능: 지하수 유동모델, 오염물질 거동 모델
- 대수층의 특성: 균질성, 불균질성, 등방성, 이방성
- 공급원, 배출원 유무
- 오염물질의 특성: 반응성, 비반응성
- 전향모델, 반전모델 여부

수학모델이 선정되면 그에 따른 지하수유동 또는 오염물질 거동의 지배방정식과 방정식을 풀기위한 초기조건, 경계조건이 결정된다. 수학모델은 문제에 따라 해석해(analytical solution)를 구하거나 수치해(numerical solution)를 구할 수 있다. 해석적인 방법은 불균질하고 이방성을 가진 실제 대수층을 해석하기에는 많은 제한점이 있기 때문에 보다 현장에 가깝게 현상을 해석하기 위해서는 많은 경우 수치적인 방법을 적용한다.

모델 설계

모델 설계는 모델영역을 수치적으로 해석할 수 있도록 이산화(discretization)하고, 경계조건과 초기조건을 부여하고 수리특성인자의 분포 및 공급원과 배출원의 배치하는 과정이다.

1) 시간과 공간의 이산화

유한차분이나 유한요소법에 따라 셀이나, 요소, 격자 등을 이용하여 모델영역을 세분화하여 격자망을 생성한다(그림 2). 사용할 셀 또는 격자의 크기는 모델에 사용한 수리특성이나 경계조건, 컴퓨터 모델의 계산수용력, 계산 소요시간 등을 고려하여 결정한다. 일반적으로 변화가 많을 것으로 예상되는 민감한 영역이나 자세한 답을 구하고자 하는 영역에는 격자 크기를 작게 하고 그 외의 영역은 상대적으로 큰 격자를 설정한다. 인접한 격자간의 크기 차이는 일반적으로 1.5배 이내로 한다. 작은 격자는 정밀도가 높은 결과를 주는 반면 계산에 소요되는 시간이 상당하여 효율성이 떨어질 수도 있다. 모사시간의 세분화는 시간간격의 길이가 수치해의 안정성에 영향을 주므로 계산시간과 비용 등을 고려하여 가능한 짧게 세분한다.

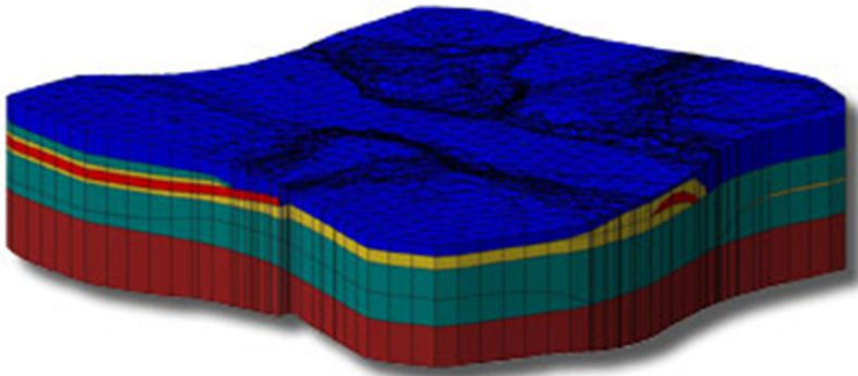


그림 2 . 모사영역의 격자망

2) 초기조건

수학모델의 지하수유동 또는 오염물질 거동 지배방정식을 풀기 위해서는 초기조건과 경계조건이 주어져야 한다. 초기조건은 정류상태를 모사할 경우에는 불필요하다. 일반적으로 초기조건은 $t=0$ 일 때 다음과 같이 주어진다.

$$h(x,y,z,t=0)=h_0 \quad \text{<식 1>}$$

여기서 h_0 은 $t=0$ 일 때 모델영역 전체에 지정된 수두이다.

3) 경계조건

지하수유동모델의 경계조건에는 3가지 형태가 있다.

고정수두경계 (specified head boundary 또는 Dirichlet boundary)

고정 수두경계는 경계지점의 수두를 특정 값으로 고정해놓는 것으로 제 1형 경계조건이라고도 한다.

$$h(x,y,z)=h_0 \quad x,y,z \in \Gamma \quad \text{<식 2>}$$

여기서 모델 경계에 있는 좌표 (x,y,z) 지점에서 h_0 라는 고정수두를 가진다. 대규모 호수나

하천같이 대수층에서의 지하수 채수로 인해 수두가 변하지 않는 경우 고정수두경계를 지정한다.

고정유출경계 (specified flux boundary 또는 Neuman boundary)

고정 유출경계는 경계면의 직각방향으로의 유출량이 일정한 경우이다. 1차원의 경우, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$-K_x \frac{\partial h}{\partial x} = q_0 \quad x \in \Gamma \quad \text{〈식 3〉}$$

고정유출경계조건은 대수층으로부터 일정한 양의 지하수가 주변 지표수나 지표로 용천으로 유출될 경우 사용한다. 불투수성기반암이나 지하수의 분수령 등은 무흐름경계조건(no flow boundary)은 고정유출경계조건인 대표적인 예이다.

혼합경계 또는 수두종속 유출경계 (head dependent flux boundary 또는 Cauchy boundary)

수두종속 유출경계는 경계면의 직각방향에서 발생하는 유출입량이 〈식 4〉와 같이 주어진 경계수두에 의해 좌우되는 경계이다. 일반적으로 상부가압층에서 누수가 발생하는 누수피압대수층의 경우에 이 경계조건을 적용한다.

$$-K_z \frac{\partial h}{\partial z} = \frac{K'}{b} (h_o - h) \quad z \in \Gamma \quad \text{〈식 4〉}$$

여기에서 K_z 는 대수층의 수직수리전도도이고 K', b' 은 가압층의 수직수리전도도와 두께이다.

소하천으로 지하수가 유출입되는 경우에도 이 경계조건을 적용한다.

4) 수리특성인자의 분포

대수층의 수리지질학적 특성을 나타내는 수리전도도, 투수량계수, 저유계수, 이방성계수 등의 대수층 수리상수나 지하수함양량 및 오염물질 거동과 관련된 분배계수, 지연계수, 붕괴상수 등을 모사할 대상영역의 지층의 종류에 따라 입력한다.

불균질한 수리전도도를 이용하여 평균값을 모사영역 내에 부여할 때에는 조화평균을 사용하는 것이 가장 일반적인 방법이다.

5) 공급원(source)과 배출원(sink)

모델영역의 경계면이 아닌 모델영역 내에 존재하는 하천이나 지하수 관정 등은 모델영역 내에서 한 개의 절점이나 셀에서의 공급 또는 배출로 지정한다. 예를 들어 관정에서의 지하수 채수의 경우 한 개의 격자의 절점에 양수량을 입력하여 배출원으로 지정해준다. 이때 계산된 지하수두는 지하수 관정에서의 지하수위가 아니라 관정이 설치된 해당 격자에서의 평균수두값이 된다.

보정과 민감도 분석

현장 실측 자료인 수두나 오염물질 농도를 모델결과와 서로 비교하여 일치시키기 위해 대수층의 경계조건과 수리상수특성인자를 보다 정밀하게 정량화하는 과정을 보정이라고 한다. 이 과정에서 보정하는 인자들은 표 3과 같다.

표 5 . 지하수 모델 보정인자 (한정상, 1999)

지하수유동모델	오염물질거동모델
수리전도도, 저유계수 함양량 경계조건 압층의 누수율 지하수배출량과 기저유출량	오염원의 위치 오염물질의 이력 분산계수와 분산지수 분배계수, 환산계수 지연계수, 붕괴율

보정의 작업은 대수층의 경계조건과 보정과정을 통해 설계한 모델을 보완하여 보다 정확한 예측모델을 설정할 수 있다.

민감도분석은 모사영역의 격자망, 수리특성인자, 경계조건 등의 불확실성이 모델 결과에 미치는 영향을 분석하는 것으로, 모델 보정 완료 후 보정된 모델에 대해 민감도 분석을 실시한다.

검증(verification)

수치모델로 계산한 모델결과와 해석학적 모델을 사용하여 계산된 값을 서로 비교하여 수치모델 결과와 해석학적 모델 결과 값 간의 차이를 최소화하는 과정을 검증이라고 한다. 그러나 매우 복잡한 실제 지하수 환경과는 달리 해석학적 모델은 매우 단순한 경우에만 가능하므로 실제로 완전한 모델의 검증은 불가능하다. 따라서 일반적으로 보정과 민감도 분석을 거친 모델을 예측모델로 활용한다.

예측(prediction)

모델적용의 최종단계로 보정, 검증, 민감도 분석을 거쳐 수정, 보완된 모델을 이용하여 외부의 변화요인에 의해 추후에 발생할 지하수계의 변화를 예측하는 것이다. 따라서 환경영향평가 시, 모델링을 이용한 예측을 통해 개발사업이 지하수환경에 미치는 영향을 분석, 평가할 수 있다.

입증(validation)

모델의 타당성 입증은 보정된 모델을 이용하여 부정류상태 또는 보정단계에서 사용하지 않은 정류상태의 현장자료를 제대로 모사할 수 있는지로 확인할 수 있다. 그러나, 보정단계에서 사용한 현장자료가 아닌 다른 자료가 없는 경우가 많으므로 예측단계 전에 모델 입증의 과정을 생략하는 경우가 흔하다.

한편 사전 입증없이 보정모델로 예측한 후 사후에 지속적인 모니터링으로 자료가 축적이

되면 이를 이용하여 모델의 사후입증을 하게 되는데, 이 과정은 앞서 예측 전에 모델 입증을 수행하지 않은 경우 모델의 정확성과 타당성을 검토하여 모델의 수정, 보완을 하기 위한 목적으로 반드시 수행하여야 하는 단계이다.

3. 지하수 모델링 시 유의사항

지하수모델을 이용하여 지하수환경을 분석, 예측할 때 유의해야 할 사항들을 열거하면 다음과 같다.

- 1) 현장조건을 최대한 반영한 개념모델 설정 - 모델링을 위한 개념모델은 대상영역의 각종 경계와 경계조건은 실제상황을 최대한 반영하여 정확하게 설정한다.
- 2) 모델 보정과 검증 - 모델은 반드시 보정한다. 모델보정은 정류상태와 부정류상태에서 수두와 물수지결과를 동시에 보정한다.
- 3) 민감도 분석 - 모델 보정 후 민감도 분석을 실시한다.
- 4) 예측은 가장 보수적인 조건으로 - 지하수모델을 예측의 목적으로 이용할 경우에는 가장 보수적인 조건과 방법으로 모델링을 수행하여야 한다.
- 5) 모델의 한계점 명시 - 모델링에 사용한 가정과 모델의 한계를 반드시 명시한다.