지하수자원 개발을 위한 지하수 유동 해석

Model Application for Groundwater Resource Development and Management

김 규 범*

*한국수자원공사 K-water연구원 지하수연구팀장

1. 서 언

지하수계의 수리학적 모사는 대수층에 적합한 모델을 만들어서 실제 대수층의 행동과 거동 현상을 재현하는 유동 모델링 과정을 통하여 이루어 진다. 지하수 모델링은 실제 지하수계를 모델을 통하여 재현하고, 장래 발생가능한 지하수계의 변화를 예측하는 것으로서 모델의 설계는 결과에 매우 중요한 요인으로 작용한다. 지하수 모델은 실제 지하수계를 재현한 것이므로 지하수의 관리, 예측 및 지하수오염 방지에 매우 유용하게 쓰일 수 있다.

지하수 모델링은 대수층내에서 일어나는 물리, 화학 및 생물학적 현상을 이해하고, 구조물(차수벽, 지하댐, 지하철, 터널 등)에서 예상되는 제반 활동으로 인해 추후 발생될 현상을 예측하며, 오염 지하수 정화방법 및 설계, 위해성 평가 등에 활용되고, 불균질 이방성 대수층에서 우물보호계획 수립 및 지하수자원 개발시 최적개발가능량과 지하수자원의 보호구역 결정 등 지하수 이용관리 분야에 활용이 된다.

지하수 모델링의 과잉 신뢰는 문제를 야기시키거나 오용할 소지가 있다. 모델링을 잘못 활용하는 경우로는 모델을 실제 요구하는 목적 이상으로 복잡하게 작성하고, 부적절한 부지 특성화 결과(수리상수 등)를 이용하여 모델링하며, 사용 모델의 한계성을 완전히 이해하지 않고 부적절한 모델을 적용하며, 특정 지역에 일반적인 모델을 사용하거나, 모델 결과를 잘못 해석하며, 물수지 분석 결과치를 보정치로 이용하지 않을 경우 등이 있다. 지하수 모델링은 현장 경험과 수학적 이론을 겸비하여 주의 깊게 이루어져야 하며 그 결과에 대해서는 가능하다면 다양한 검증 과정을 통하여 활용될 수 있도록 하는 것이 바람직하다. 모델링 결과는 자연을 상대적으로 단순화시킨 후 수행한 것이므로 결과에 대한 맹신은 오류를 일으킬 수 있으므로 유의해야 한다.

2. 모델링의 과정

지하수 모델링의 일반적 과정은 개념 모델을 개발하여 현상을 단순화시키며, 이를 토대로 수학적 모델로 변형한 후 보정과정을 거쳐 다양한 경계조건을 고려한 해를 찾아내는 것으로 구성된다. 개념 모델은 지하수 환경의 현상을 지배하고 있는 물리, 화학, 생물학적인 작용을 표현할 수 있는 개념적 모델로서 대상 현장을 잘 표현하는 가장 단순한 모형에 해당한다. 개념모델은 실제의 지하수계를 단순화한 모형으로 자연에서 일어나는 모든 미세한 세부사항을 완전하게 설명할 수는 없을 것이나 유동계를 이해하기 위해서는 개념모델이 요구된다. 수학적 모델은 개념 모델을 바탕으로 경계조건 등이 포함된 편미분방정식으로 구성된

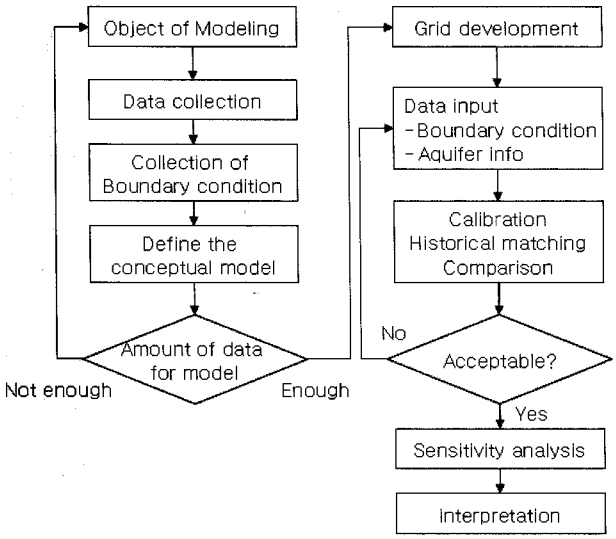


그림 1 일반적인 지하수 모델링의 과정

수학적 모델을 의미한다.

지하수 모델링은 기본적으로 다음 과정을 통하여 이루어진다.

① 대상지역의 평가 및 모델링 기법의 선정
- 연구 조사 목적을 이해하고 이에 부합하는 모델링 기법을 검토
- 조사대상 지역의 지하수계를 이해하고 수리특성, 시추 등의 자료의 가용성을 파악

② 모델링의 과정
- 모델링 대상 지역에 대한 경계조건을 이해하고 설정
- 조사 지역에 대한 Grid 구축 및 이산화 작업 시행
- 대수층의 수리상수와 초기 입력값을 설정
- 지하수위(또는 오염 농도) 자료의 시공간적 분포를 시간별로 구분 산정
- 초기 입력 값을 이용한 모델링 경계 및 흐름 조건을 평가
- 정류상태 모델링을 통하여 지하수 수두 조건을 설정하고 보정작업을 반복 수행
- 지하수 개발, 지질공학적 평가 등을 위하여 적절한 스트레스 조건(양수, 터널, 사면 등)하에서의 모델링을 수행하고 현장 실측값과 비교 평가
- 최종적으로 수립된 모델링을 이용하여 예측 실시

③ 성과의 현장 적용
- 이상 제시된 예측자료는 현장 확인 과정을 통하여 최종적으로 적용하는 것이 바람직하며 실증이 곤란한 경우는 오류의 가능성을 전제로 성과로 활용토록 유의할 필요가 있음

예를 들어, 충적층에서의 지하수 개발량을 평가하기 위한 모델링 입력 자료는 물리적인 인자(대수층의 경계조건, 경계, 지하수위, 지표수체가 표기된 지형도, 투수량 계수와 수리전도도, 가압층의 비저류계수와 투수량계수, 대수층의 저류계수, 주변 지표수체와 지하수체의 수리적인 연결성)와 지하수계에 변화를 주는 인자(강수량, 증발산량, 시공간적인 지표수 유출량, 관개면적, 함양정, 저수지를 포함하는 함양지역의 규모와 형태), 토지이용도를 포함한다. 이러한 지하수 모델의 입력자료 값에 따라 그 민감도 정도는 다르지만 현실과 판이하게 다른 결과를 도출할 수 있으므로 무엇보다도 현장의 실제 데이터를 최대한 확보하여 모사하는 것이 중요하다.

또한, 모델의 보정은 관측결과와 모델 결과를 서로 비교하여 경계조건과 수리특성인자 값을 보다 정밀화하는 것이다. 모델 보정(Model calibration)은 경계조건, 수리전도도, 저류계수, 함양량 등의 수리적 변수를 바꾸어 가면서 시행오차법 또는 자동반복계산에 의하며, 이 때 민감도 분석이 적용된다. 시행오차법은 수작업을 통하여 여러 번에 걸쳐서 수리적 변수를 변화시켜가며 지하수위 실측값과 계산값의 차이를 줄이는 방법이다. 시행오차법을 이용하여 보정을 할 경우 상당한 시간과 노력이 필요하게 된다. 그러나 자동반복계산(일명 역산모델링)은 실측된 지하수위를 기준으로 주어진 범위 내에서 변수를 자동으로 변화시켜가면서 결정한다. 최근에는 역산 모델링방법들이 활발히 제시되고 있다.

3. 지하수 모델링의 종류

지하수 분야에서 사용되는 모델링을 기능적으로 보면, 지하수 유동모델과 오염물질 거동 모델로 크게 분류되며, 유동모델은 지하수의 질량 보전의 법칙, 지하수의 연속방정식인 Darcy's law를 이용한 흐름지배식을 사용하는 것으로서, 지표수와 지하수의 수문학 분야 및 터널, 사면 등 응용지질 분야에서 많이 사용이 된다. 오염물질 거동 모델은 오염물질의 질량 보전 법칙과 지하수 수문방정식인 Darcy's law을 기본으로 하고 있으며, 염수 침투 현상, 매립지의 침출수 이동, 지하수 오염과 정화의 평가 예측, 방사능 폐기물의 처분 등의 분야에 광범위하게 활용이 된다.

지하수 모델링은 수학적인 표현 방식에 따라서 분류가 가능한데 여기에는 개념모델(Conceptual model), 물리 모델(Physical model), 수학 모델(Mathematical model) 등으로 나누어지며 우리가 흔히 연구 또는 설계에서 사용하는 것은 수학 모델이 대부분이다. 개념 모델은 수학 모델의 수립에 앞서 지하수 유동계와 유동 특성을 단순화 시키기 위한 것이며, 지하의 수리지질학적 환경을 재현할 수 있도록 개념

화하여 제작한 것을 의미한다. 물리 모델은 실제 지하수 유동계와 유사하게 만든 축소판의 실모형에 해당한다(그림 2). 수학적 모델은 개념 모델을 바탕으로 지하에서 발생하는 물리, 화학, 생물학적인 현상을 수학적으로 표현한 모델이다. 여기에는 해석학적 방법을 이용하여 해를 얻을 수 있도록 지배식을 단순화한 해석학적 모델과 지배식을 수치 근사화시켜 컴퓨터를 이용하여 해를 구하는 수치 모델이 해당된다.

시간 변화에 따른 모델링의 분류는 정류(Steady-state) 모델과 부정류(Transient)모델로 나누어지며, 전자는 지하수 흐름이 평형상태로 시간에 따른 저류량 및 수두 변화가 거의 없는 상태를 모사할 경우 사용하며, 후자는 지하수 흐름이 비평형상태로 시간에 따라 저류량 및 수두변화를 모사할 경우 사용하는 모델이다.

지하수 유동 모델링은 일차원 모델에서부터 시작되었으나, 최근에는 3차원 모델링이 일반화되어 있다. 일차원 모델은 균질대수층에서 지하수 흐름이나 용질 이동을 한 방향으로 나타내고자 할 때 적용하는 모델로서 매우 단순화된 모델이다. 2차원 모델에는 평면 모델과 단면 모델로 나눌 수 있는데, 평면 모델은 지하수의 수평 흐름이 우세하게 나타나는 경우 적용성이 높으며 수직 방향의 이방성(대수층의

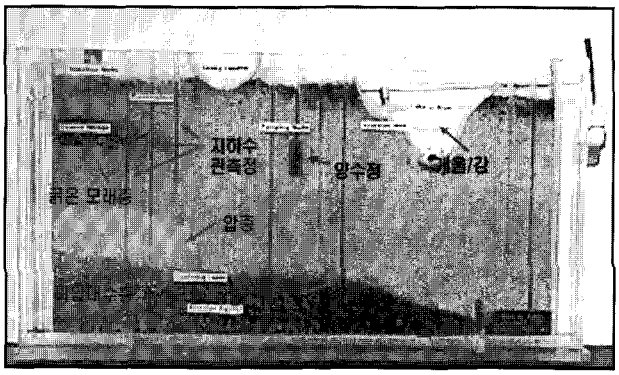
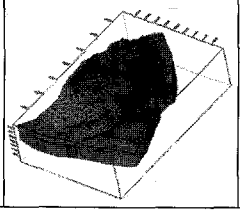


그림 2 물리 모델의 사례

표 1 지하수 모델링의 종류 (한정상, 1998)

분류방식 \ 종류	모 델
기 능	• 지하수 유동 모델(groundwater flow model) • 오염 물질 거동 모델(solute transport model)
수학적인 표현방식	• 개념 모델 (conceptual model) • 물리적 모델(physical model) • 수학적 모델(mathematical model) - 해석학적 모델(analytical model) - 수치 모델(numeric model)
차 원	• 1차원 모델(1D model) • 2차원 평면 모델(2D areal model) • 2차원 단면 모델(2D model) • 준3차원 모델(quasi 3D model) • 3차원 모델(3D model)
시간변화	• 정류 모델(steady-state model) • 부정류 모델(transient or unsteady model)
기본인자	• 전향 모델(forward model) • 반전 모델(inverse model)
수학적인 취급방식	• 결정론적 혹은 확정적인 모델(deterministic model) • 추계론적 혹은 확률통계적 모델(stochastic model)
열 이동	• 열이동 모델(heat transport model)
변 형	• 변형 모델(deformation model)

표 2 주요 지하수 유동 모델링 소프트웨어 사례

해석차원	제 품 명	기 능	특 성
3 차원	Visual Modflow	2차원 3차원 지하수 흐름 및 오염물 이동모의를 제공하는 상용프로그램. 유한차분 모델링	• 미국지질조사소와 EPA가 개발한 MODFLOW, MODPATH, MT3DMS 및 RT3D 등을 직관적인 GUI 환경으로 통합하여 지하수 유동, 입자추적 및 오염물질의 거동을 쉽게 분석 및 가시화할 수 있는 세계적 소프트웨어 • 지하수 흐름, Pathline, 오염물 이동 시뮬레이션, 수원 보호를 위한 Well Capture Zones 윤곽 묘사
3 차원	GMS	2차원 3차원 지하수 흐름 및 오염물 이동모의를 제공하는 상용프로그램. 유한차분 모델링	• ART3D, MT3D, RT3D, SEAM3D, UTCHEM, MODFLOW, FEMWATER, UCODE, PEST, MODAEM, SEEP2D 등을 GUI 환경으로 통합하여 지하수 유동, 입자추적 및 오염물질의 거동을 쉽게 분석 및 가시화할 수 있음 • 지하수흐름, 오염물 거동에 대한 시뮬레이션을 GIS기반으로 개념화할 수 있도록 되어 있음
3 차원	FEFLOW 	2차원, 3D 유한요소 지하수 모델링 소프트웨어. 밀도 의존 흐름, 열흐름, 오염물질 이동 특성을 포함하는 상용소프트웨어	• 정류 및 부정류, 포화 및 불포화 흐름, 밀도종속 흐름, 질량 및 열흐름에 대한 모의가 가능 • 정교한 해석 기법을 다양한 시각화 도구와 연계

두께 변화, 수직 흐름 등)이 있는 경우에는 사용에 제약성이 있으며, 단면 모델은 수직 방향의 지하수 흐름이 존재하는 경우에 표현하는 모델 기법이다. 준 3차원 모델은 2차원적인 수평방향의 주대수층이 여러 개 존재하고 그 사이에 난대수층이 협재되어 있을 경우에 적용가능한 모델링으로서, 난대수층은 수직적 누수현상이 일어나 두 대수층 사이의 수두차가 있을 경우 두 대수층간의 누수가 일어나는 통로 역할을 하는데, 수평 흐름 대수층은 2차원 평면 모델을 적용하고 수직흐름의 난대수층은 2차원 단면 모델을 이용하므로 부분적 수평 및 수직 흐름을 계산하는 3차원적 모델에 해당한다. 최근 가장 보편적으로 사용하는 3차원 유동 모델에서는 각 대수층에서 수직 및 수평 등 모든 방향의 흐름을 계산할 수 있으며, 대표적인 모델로서 MODFLOW 및 FEFLOW 등이 있다(표 1 및 표 2).

4. 적용 사례

국내의 경우 1990년대초 지하수 모델링 프로그램들이 도입되면서 지하수개발, 사면, 터널 및 댐 시공 현장 등에서 지하수 관련 유동 모델들이 활발히 사용되고 있고 많은 사례들을 갖고 있다. 본 고에서는 현재 과학기술부에서 시행하는 21세기 프론티어 연구개발사업의 일부인 "수자원의지속적확보기술개발" 사업중 과제명 3-4-3에서는 "지속가능한 지하수 개발 시스템 구축 및 상용화" 연구를 수행중에 있으며 본 연구에서 수행한 모델링의 적용 사례를 중심으로 소개한다.

4.1 MODFLOW를 이용한 지하댐의 개발가능량 평가

MODFLOW는 블록 중심 유한차분 모델로서 피압대수층, 누수대수층, 자유면 대수층을 모사할 수 있도록 미국 지질조사소에서 개발된 모델로서 여러 층의 다공질 매질에서의 유체유동을 모사할 수 있는 3차원 모델이다.

고성군 북천의 하류에 지하댐을 설치하여 이용 가능량을 모사한 사례로서, 모델 영역은 5,000m×4,200m×180m이며 총 157,500 250×210×3)개의 격자망(20m×20m)을 구성하였다. 첫 번째 Layer는 충적층으로서 두께는 24m, 임야 지역의 충적층은 10m로 설정하였다. 지하댐 설정은 수평유동차수막 경계조건을 사용하였고, 지하댐 하단부는 기반암까지 완전 차수형식으로 설정하였다. 시간에 따른 지하수위의 변화와 양수에 의한 수직적이고 수평적인 수위변화를 측정하기 위해 설정영역의 지하댐을 기준으로 가로 29개, 세로 31개 관측정을 설치하여 지하수위 값을 분석하였다.

MODFLOW를 이용하여 지하댐 설치 지역에서의 수위변화를 측정하여 지하댐 설치 후 증가된 지하수 이용 가능량을 산출하였다. 지하댐 설치 후 지하수 이용 가능량은 차수벽 설치 이전 대수층의 지하수 저수량과 차수벽 설치 후 증가한 대수층의 지하수 저수량을 고려하여 산정하였다. 일일 개발가능량을 구하기 위한 정류상태가 되기까지의 지점은 수위 변화량이 1cm일 때를 기준으로 하였으며, 1cm에 도달하는 시점은 약 30일 정도 시간이 경과했을 경우 나타났다. 지하댐 설치한 후 포화 대수층에서 증가된 부피는 161,120m^{3}이고, 비산출률을 적용한 유효 저수량은 32,224m^3 만큼 부피가 증가되었다. 일일 개발가능량은 1,239m^{3}로 산정하였다.

지하댐 취수시설의 위치 선정 및 평가를 위하여 지하댐으로부터 일정한 간격으로 양수정을 설치한 후 양수정의 위치 변화로 인한 양수량 및 지하수위의 변화를 모의하였다. 양수정의 위치는 지하댐 설치 후 지하수위의 변화량이 가장 큰 지점에 지하댐으로부터 50m, 100m, 150m, 200m의 간격으로 총 4회의 모의를 실시하였고, 양수는 지하댐 설치 후 정류상태에 도달하는 30일이 지난 후의 수위를 초기 수

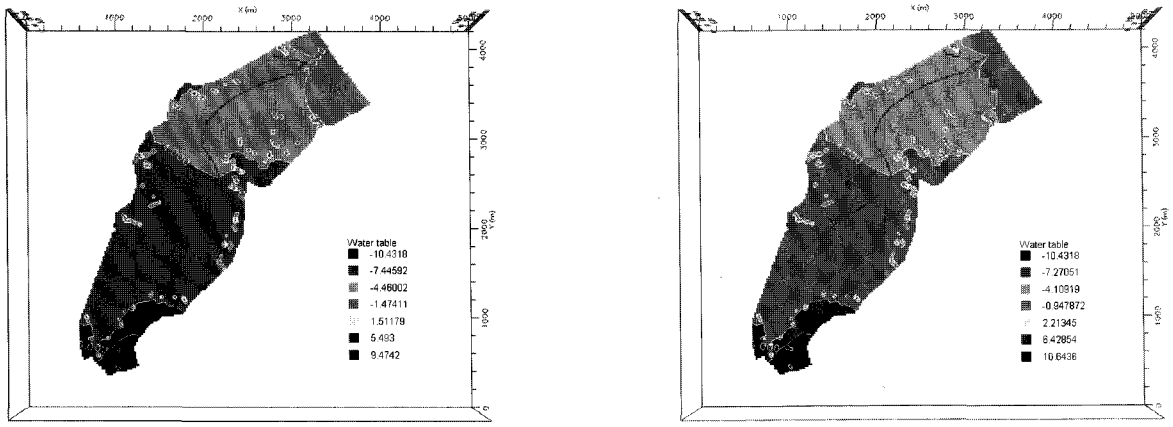


그림 3 정류모사 결과 및 지하댐 설치 후 모사결과

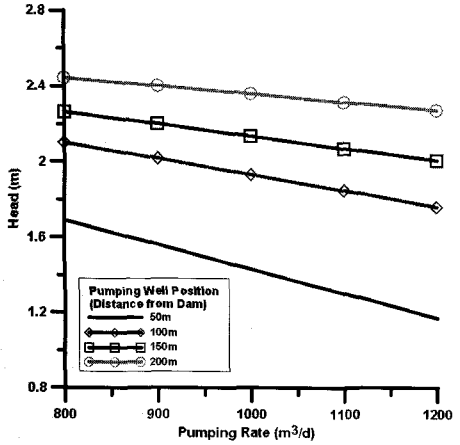


그림 4 지하댐과 양수정의 이격거리에 따른 양수량과 지하수위의 변화

위로 설정하여 수행하였다. 일정한 간격으로 설치된 양수정에 각각 800m³/d, 900m³/d, 1,000m³/d, 1,100m³/d, 1,200m³/d의 양수량의 변화로 인한 지하수위 변화도 모델을 적용시켜 그 변화를 모의하였다. 각 Case의 자료를 바탕으로 양수량에 따른 지하수위 변화를 그래프로 나타낸 결과, 양수정의 위치가 지하댐으로부터의 이격거리가 가까울수록 지하수위의 변화량은 증가하는 것을 볼 수 있다(그림 4).

4.2 FEFLOW를 이용한 강변여과수 개발량 평가

국내에서는 최근 강변여과수 개발에 대한 관심이 높아지고 낙동강 지역에서는 실제 운영 및 신규 시설 설치 등이 이루어지고 있다. 강변여과수 개발 예정 지역에 대하여 적절한 수리 모델링을 통해 각 취수정에서의 적정양수량, 지하수 및 하천수의 유동 특성 확인이 가능하며, 또한 하천수 및 지하수의 유입비율을 확인 할 수 있다.

강변여과수 개발 시설이 시공중인 김해시 딴섬에서의 수평집수정을 통한 지하수 개발량 평가를 수행하였다. 3,000m×3,000m(가로×세로)의 모델영역을 설정하였고, 모델영역에 대한 지표 고도자료를 상부 지표로부터 하부 2m 심도를 충적층의 특성을 가지는 Layer-1층으로 부여하였다. 지표로부터 하부 약 20m까지는 모래층이 존재하고, 약 30m 심도까지 모래/자갈층이 발달되어 있어, 이 구간이 강변여과 취수의 주대수층으로 이용된다. 전반적으로 약 40m 심도에서 기반암을 형성하고 있다. 이를 토대로 3D 모델영역을 생성하였으며, 유한요소망은 3,000개로 분할하였고, 방사형 수평집수정이 설치되는 주변을 보다 세밀하게 묘사하였다(그림 5).

방사형 수평집수정의 형태는 FEFLOW의 1차원 선형 불연속 특징 요소기법을 이용하여 직경 6m의 수직정 우물통을 기반암까지 설치하고, 길이 30m의 방사형 수평 집수정

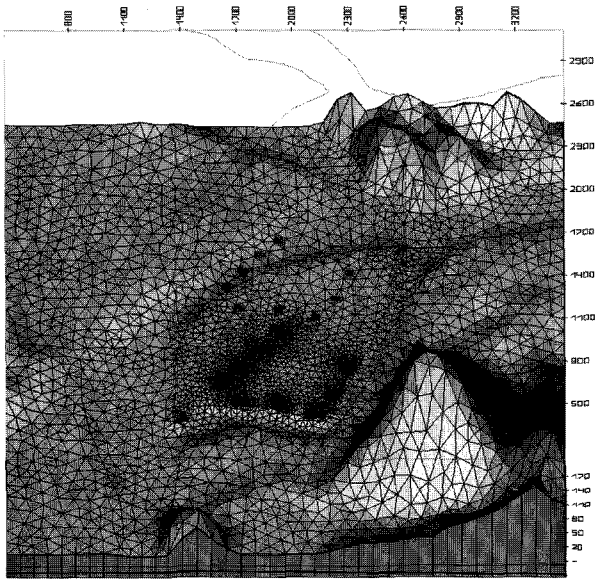


그림 5 모델영역의 유한요소망과 3D 영역

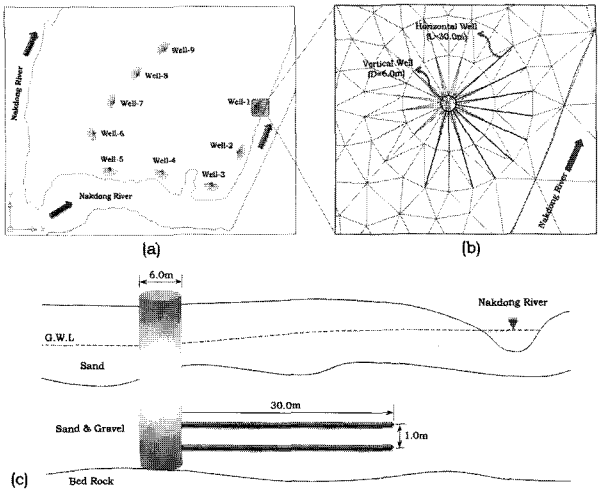


그림 6 방사형 수평집수정의 설치와 형태

을 강 쪽 방향으로 10개 설치하였다(그림 6).

딴섬 내 평균 수리전도도는 1.5×10-4m/s이며, 딴섬 외 지역은 일반적인 충적층의 수리전도도 1.0×10-4m/s를 적용하였다. 하상 수리전도도는 딴섬 주변의 하상 6개 지점에서 시료를 채취한 후 수리전도도 값을 계산하였다. 이는 입력인자 Transfer In의 값을 부여하는데 적용하였다. 모델에 적용한 Transfer In은 강변여과 취수 주변 하상의 평균 수리전도도인 20.131m/d를 적용하였고, Transfer Out은 In의 4배인 80.5248m/d를 적용하였다. 대수층 수리전도도는 양수시험 및 현장 투수시험 결과 자료를 이용하여 모래층 0.204m/s, 자갈층 0.427m/s 구하였다.

지하수 함양조건은 2가지로 첫 번째는 함양량을 120mm를 적용하였으며, 두 번째는 기저유출 분리법에 의해서 구

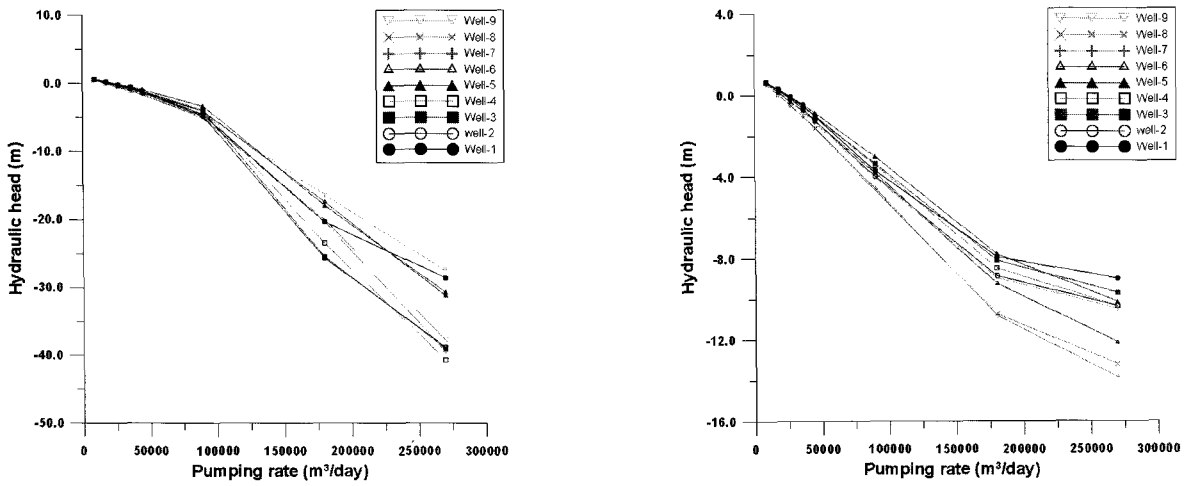


그림 7 취수량에 따른 안정 지하수위(함양량조건-1 및 함양량조건-2)

해진 지하수 함양률 30%를 적용하였다. 삼랑진 유역 강수량은 127개 강우관측소로부터 티센망을 이용하여 유역 평균 강수량인 1,168mm를 구하여 30%인 350.4mm를 적용하여 모사하였다. 그림 7은 각 함양량 조건에서의 수위 강하를 모사한 결과이다.

방사형 수평집수정 1개소 당 30,000m^3/d으로 총 270,000m^3/d 취수 시 대상지역의 평균안정수위는 함양조건-1의 경우 -34.830m로 35.559m의 수위강하 후 안정수위에 도달하였으며, 함양조건-2의 경우 -11.025m로 11.754m의 수위강하 후 안정수위에 도달하였다. 함양조건-1의 경우에는 자갈층 구간까지 수위가 하강한 상태이며, 모델 모사시 48일 후 취수조건에 수렴하지 않고 지속적으로 수위가 강하하는 특성으로 볼 때 최대 목표 취수량까지 개발이 불가능한 것으로 판단되며, 함양조건-2의 경우에는 충분한 여유수량이 확보되어 있기 때문에 개발이 가능한 것으로 판단된다.

국내 강변여과수를 이용한 충적층 지하수는 지형학적 특성과 대수층의 수리지질학적 특성을 면밀히 조사, 검토한 후, 여러 요인의 조건에 따른 지하수 수치해석 모델링을 수행하고 이로부터 설계에 필요한 인자를 도출하는 것이 요구된다.

5. 결 언

지하수 모델 개발은 기본적으로 충분하고 정확한 입력자료에 의존하고 있다. 자료가 부족한 경우에는 모델링과정을 중단하고 현장이나 실험실에서 자료를 추가로 수집하는 것이 필요하며, 만약 시간과 예산상 자료의 수집이 불가능하면 모델링과정을 포기하는 것이 오히려 바람직하다. 오늘날 쉽게 접할 수 있는 컴퓨터 프로그램은 적은 양의 자료나 신뢰성이 결여된 자료를 이용해서도 전문적으로 보이는 그래픽 결과를 내놓을 수 있으나, 이러한 결과는 무의미한 결과를 초래할 수도 있다. 따라서, 모델 수행자의 경험과 입력 자료의 정확성 및 양은 모델링결과의 신뢰성을 높이는데 중요한 역할을 한다. 특히, 모델링은 반복 계산 과정에 의하여 이루어 지는 것이므로 초기 단계에 단순한 모델을 설정하고 현장에서 취득된 추가 자료를 접목시킴으로써 보다 현실적인 모델로 발전시켜 나가는 과정이라 볼 수 있다. 따라서, 지하수 유동 모델에서의 신뢰성있는 입력자료의 충분한 확보는 필수적인 요소라 할 수 있다.

이와 같이 적절한 모델링과정을 통하여 분석·평가되었다고 하더라도, 전문적인 최종 판단은 지하수 전문가의 역할이며, 모델은 지하수 전문가가 수리지질 환경을 평가하는 데 있어 안내하는 역할을 할 뿐임을 명심해야 한다.

참 고 문 헌

1. 수자원의지속적확보기술개발 사업단, 수자원의 지속적 확보기술 개발 사업 (과제명 3-4-3): 지속가능한 지하수 개발 시스템 구축 및 상용화, 2009
2. 한정상, 지하수환경과 오염, 박영사, 1998
3. Bredehoeft, J.D., and Hall, P., Ground-water models: Ground Water, V.33, No.4, pp.530-531, 1995
4. Tsang, C. F., The modeling process and model validation. Ground Water, V.29, No.6, pp.825-831, 1991

[담당 : 최인길, 편집위원]