

OC1 지하수 유동해석을 위한 한국형 분석시스템의 개발

최윤영^{*}, 배상근¹, 고병련²

경북도립 경도대학 토목환경과, ¹계명대학교 토목공학과, ²제주산업정보대학 토목과

1. 서 론

지하수는 생활용수, 공업용수 및 농업용수 등의 여러가지 목적을 위한 중요한 수자원으로 이용되고 있으며, 갈수시 하천유량의 유일한 공급원이 되기도 한다. 하지만, 지하수의 부적절한 개발은 자원이용의 비경제성, 이용에 따른 오염확산 등으로 인하여 그 지역의 인문활동 및 생태계에 미치는 영향이 매우 크다. 따라서, 지하수를 수자원으로 적절히 이용하기 위해서는 지하에서의 물의 흐름원리, 즉 지하수의 수리현상을 정확하게 이해함이 필요하다. 지하수유동 및 오염해석 등은 방정식의 형태로 표현할 수 있으나 대부분의 경우에는 현상이 매우 복잡하여 이를 단순화하거나 또는 이상화하지 않으면 방정식에 대한 해법에 어려움이 따르며 현상의 단순화 및 이상화를 최소화할수록 정확한 결과치를 얻을 수 있다. 이러한 최소화는 수치해석적인 방법에 의하여 가능해지며, 수치해석적인 방법이란 방정식을 모두 대수적인 관계식으로 바꾸어서 풀어내는 일련의 방법들을 의미한다. 이러한 수치해석적인 방법에 있어, 유한요소법과 유한차분법을 들 수 있으며, 유한차분법은 지배방정식에서부터 직접 유한차분식을 유도하며 격자점과 격자점사이의 관계에 바탕을 둔 소위 pointwise approximation에 의한 방법이다.

지하수유동시스템에 있어서 시스템을 해석하고 유동과정을 모델화 하기 위한 연구과정을 살펴보면, 국외의 연구로서 Hubbert(1940)가 지하수 유동이론을 모델적으로 해석한 것이 시초이며, Toth(1963)의 소규모 배수유역에 대한 지하수 흐름의 이론적 해석, Freeze와 Witherspoon(1966)은 수학적 모델에 의한 3차원적, 비균질적, 이방성 유역에 있어서의 정상지하수 흐름에 대해 설명하였다. 이후 Freeze(1971)은 포화-불포화 천이 흐름의 취급에 관한 3차원 유한차분모델을 개발하였고 Gupta와 Tanji(1976)은 이질층들로 구성된 지하수 체제에 관한 3차원 유한요소모델을 개발하였으며 Wang & Anderson(1982)의 유한차분 및 요소법에 의한 지하수 모델링에 관한 연구 및 McDonald & Harbaugh(1991)의 유한차분법에 이용한 지하수 모델링에 관한 연구가 있었다. 최근에 와서 지하수에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다. 국내에 있어서는 김영기(1976)의 반야월층의 지하수유동에 관한 연구와 배상근(1991)의 대구지역의 지하수 유동계에 대한 3차원 해석 및 민병형(1994)의 부곡온천 지역에 대한 지하수 흐름을 MODFLOW를 이용하여 해석한 연구 등의 있었다.

하지만, 대표적인 3차원 지하수해석 프로그램인 MODFLOW의 경우에는 그 사용이 매우 복잡할 뿐만 아니라 매개변수들의 이해와 적용성에 있어 실무자들이 쉽게 이용하

기에는 많은 어려움을 안고 있는 실정이다. 또한, 현재까지 현장 적용성을 최우선으로 하는 단순하고 간편한 한국형 지하수 해석프로그램의 개발은 전무한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 한국형 지하수 프로그램 개발(3-DFM, 3-Dimensional Finite Difference Method)을 위하여 대수층에 있어 지형·지질상태가 지하수유동시스템내에서 동적거동을 하는 것으로 취급하여 유동과정의 알고리즘을 확립토록 하였다. 본 연구에서 개발된 모델은 유한차분법을 이용한 수치모델이며, 실제 함양량을 적용하고 매개변수들을 결정하여 관측 지하수두치와 모의발생으로 얻은 계산 지하수두치를 비교 분석하여 개발모델의 적용성을 검토하였다.

2. 모델의 기본이론

본 연구에서는 한국형 실무 지하수해석 프로그램(3-DFM)을 설계하는데 중점을 두었으며 이에 대한 기본 이론 및 모델구조는 다음과 같다.

2.1 3-DFM모델의 기본이론

일정한 밀도를 가지는 다공성 매질을 통해 흐르는 3차원 지하수 유동은 다음의 식 (1)과 같이 편미분 방정식으로 나타낼 수 있다.

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

(1) 여기서, K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} 는 x , y , z 좌표축에 따른 투수계수이며, h 는 수두 (potentio metric head), W 는 단위체적당의 체적 flux, S_s 는 비저류율 및 t 는 시간이다. 한편, S_s , K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} 는 공간의 함수 ($S_s = S_s(x, y, z)$, $K_{xx} = K_{xx}(x, y, z)$, etc)이고, W 는 시간과 공간의 함수이며 ($W = W(x, y, z, t)$), 식 (1)은 불균질, 비등방성 매질에서의 비평형 상태하에서 지하수 흐름을 나타낸다.

2.2 모델의 구조

본 연구에서 개발한 모델은 적용성이 검증된 대표적인 3차원 지하수해석프로그램인 MODFLOW모델을 기초로 하였다. 하지만 MODFLOW의 경우에는 그 사용이 매우 복잡할 뿐만 아니라 매개변수들의 이해와 적용성에 있어 실무자들이 쉽게 이용하기에는 많은 어려움을 안고 있는 실정이다. 본 연구에서 개발한 한국형 3-DFM모델은 입력자료를 간단하게 설정할 수 있을 뿐만 아니라 변수들을 모두 한글로 구성하였고 각 입력자료와 매개변수들의 이해와 적용값에 대해 관측값 및 기왕의 자료를 제시한 도움말을 설정하여 정확한 변수값을 지정할 수 있도록 하였다. 3-DFM모델은 주 프로그램과 모듈 (module)이라 불리는 6개의 독립 서브루틴(subroutine)으로 구성되어 있으며 시뮬레이션 기간은 지정된 스트레스 매개변수가 일정한 일련의 스트레스 기간(stress period)으로 분할되고 각각의 스트레스 기간은 시간간격으로 분할된다. 다음의 표 1에는 본 모델 개발의 사용에 포함된 다양한 형태의 패키지들에 대한 개략적인 설명이다. 이들 중 중요한 두개의 범주에 속하는 패키지들이 흐름성분 패키지(the Flow Component Packages)와

연산 패키지(the Solver Packages)이며, 흐름성분 패키지에는 스트레스 패키지(Stress Package)가 포함된다. 흐름 성분 패키지는 각각의 셀(cell)에 대하여 유한차분 방정식의 계수를 계산하는 역할을 수행하고 연산 패키지는 유한차분 방정식 시스템의 해를 구하기 위한 알고리즘을 수행한다.

표 1. 본 분석에 이용한 유한차분모델(3-DFM)에 포함된 패키지

인자	프로그램 내용
주 프로그램	제목, 모델연산 범위, 대수층 경계, 초기수위, 계산기간, 정류 및 부정류해석
BBF	대수층 종류, 등방성, Cell 길이, 수리매개변수, 대수층 표고
WELL	관정 Cell수, Cellquf 유출입량, 관정별 층번호(행·열번호, 양수량)
RECH	강우 유입층 조건, Cell 별 유입량
RIVER	하천 Cell 수, Cell 조건(층번호, 하천수면표고, 하상 투수계수, 하상표고)
EVAP	증발산층 조건, 최대 증발산율, Cell 별 증발산 표고
SIP	연산법(접촉면 계산법) -최대 반복횟수, 수렴허용오차

본 연구에서 개발된 3-DFM모델은 입력변수 자료에 대한 설정이 모두 한글로 구성되어 있으며, 각 입력자료에 대해 도움말을 설정하여 두었다. 따라서, 입력변수에 대해서는 아이콘을 입력변수에 두면 각각에 대한 상세한 정보를 알 수 있도록 설계하였다. 또한, 각 지층의 지질경계 상태나 초기수위자료를 지정할 때는 work sheet상에서 간단히 지정할 수 있도록 설계되어 있다. 각 대수층의 특성과 더불어 정류 및 부정류 해석시에 각 매개변수들에 대한 입력설정은 기존 지하수모델들과 같이 복잡하지 않도록 활성칸이 설정되도록 설계되어 있다. 최종 입력자료를 이용한 분석결과에서는 우측에 입력자료에 대하여 설명과 더불어 좌측에 분석 결과치를 나타나게 하였으며 이에 대한 결과는 TXT파일로도 출력할 수 있도록 설정하였다.

3. 적용 및 분석

3.1 격자망 설정

본 연구에서는 조사지역의 전반적인 지하수위 분포 및 유동경향을 구하기 위하여 수리모델링을 수행하였다. 조사지역 일대의 수리지질학적인 특성을 고려하여 유역을 구분하고 그 유역을 포함하는 격자망을 구성하였으며, 지하수 유동해석을 위해 사용된 분석 유역의 격자망 구성 및 정호의 위치는 다음의 표 2 및 그림 1에 나타내었다.

본 연구유역에 적용된 3차원 지하수유동 해석을 위한 유한차분망의 경우에는 조사지역 주변의 분포암석을 파악하여 각 지층의 지질특성에 맞는 수리인자를 설정하였다. 또한 사각형 격자요소이기 때문에 곡선형태의 유역을 정확히 표현할 수 없는 점에 유의하여 작성하였다. 격자망(X, Y)의 구성은 그림 5에서 보는 바와 같이 종·횡축에 있어 격자요소는 18×23개, 총격자수는 897개이고 격자간격은 105m로 구성하였으며 이용된 도면

의 축척은 1 : 3,000이다.

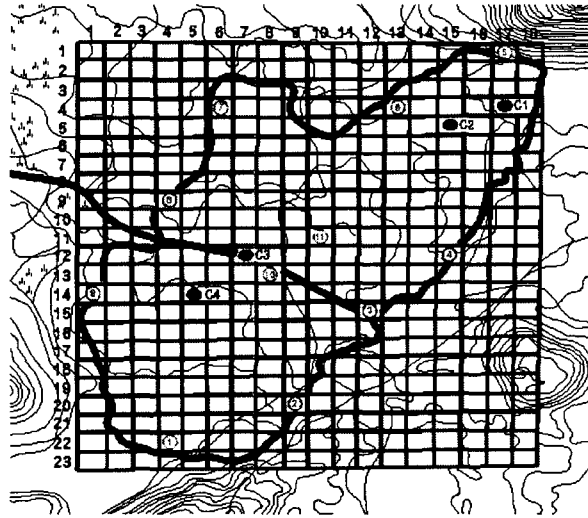


그림 5. 분석구역의 격자망에 따른 관측정 및 양수정호의 위치도

표 2. 각 모델에 적용된 관정현황

관 정	위 치	고도 (EL.m)	관측 수위 (EL.m)	굴착심도(m)	비고
C1	구좌읍 세화리 산 38번지	177.99	8.69	680	
C2	구좌읍 세화리 산 38번지	186.26	8.98	714	
C3	구좌읍 세화리 산 38번지	203.44	9.32	960	
C4	구좌읍 세화리 산 38번지	210.44	8.73	903	

※ 한국자원연구소의 제주지구 온천자원조사보고서(1992. 8)

3.2 경계조건 및 입력자료

본 연구구역의 지하수 유동해석을 위한 기본모델은 본 연구에서 제시한 MODFLOW 및 3-DFM모델이며, 경계조건 및 모의발생을 통한 모델의 분석과 매개변수 추정은 다음과 같다. 먼저, 본 조사구역은 강, 댐 등의 특별한 경계조건이 없으므로 General Head-Boundary를 설정하지 않았고 분수량을 최대한 고려하여 경계를 설정하였으며 격자 경계는 지하수 분리선(Water Divide Line)으로서 비공급 경계로 지정하였다. 그리고 격자 경계를 벗어나는 지역은 양수량 분석에 있어 최저조건으로 고려하기 위해 분석구역의 지하수 유동에는 직접적으로 영향을 미치지 않는 것으로 설정하였고 구역내의 격자는 Active Cell로 지정하였다. 다음으로, 양수량에 따른 삼차원 비정상류 해석을 위한 초기 조건은 정수두 조건으로 하였다. 이에 따른 경계조건으로 지하수면을 자유수면 경계로 하였으며 측면 및 하부경계는 불투수경계로 하였다. MODFLOW모델 및 3-DFM모델에 적용할 투수계수(K) 및 저류계수(S)는 한국자원연구소(1992) 및 최운영(1997)에 의한 자료를 인용하였으며 최상부층인 1층의 경우에 $5.9 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 및 $1.428 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ 이

고 최하부층인 3층의 경우에는 $5.20 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ 및 $1.409 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ 이다.

3.3 결과 및 고찰

본 연구에서는 한국형 지하수해석 프로그램(3-DFM)의 개발에 대한 현장 적용성을 검토하기 위하여 실제 유역인 제주도 세화리 및 송당리일대를 대상으로 양수에 따른 지하수 유동시스템 해석을 실시하였다. 먼저, 3-DFM모델을 이용한 분석결과를 비교하기 위하여 현장 관측치 및 MODFLOW를 이용하였다. 다음으로, 본 유역에 대한 지하수 유동해석에 있어 정류상태에서 따른 관측치 및 MODFLOW모델과의 지하수두에 대한 분석결과치의 비교 검토에서 3-DFM모델의 상대오차백분율(E.P.)을 비교 검토한 결과 0.03~0.07의 범위로서 거의 일치하였다.

4. 결 론

1) 본 연구에서 개발된 3-DFM모델은 입력변수 자료에 대한 설정이 모두 한글로 구성되어 있으며, 각 입력자료에 대해 도움말을 설정하여 두었다. 따라서, 입력변수에 대해서는 아이콘을 입력변수에 두면 각각에 대한 상세한 정보를 알 수 있도록 설계하였다. 또한, 각 지층의 지질경계 상태나 초기수위자료를 지정할 때는 work sheet상에서 간단히 지정할 수 있도록 설계되어 있다. 그리고 각 대수층의 특성과 더불어 정류 및 부정류 해석시에 각 매개변수들에 대한 입력은 기존의 모델과 같이 복잡하지 않도록 활성칸이 설정되도록 설계하였다. 최종 입력자료를 이용한 분석결과에서는 우측에 입력자료에 대하여 설명과 더불어 좌측에 분석 결과치를 나타나게 하였으며 이에 대한 결과는 TXT파일로도 출력할 수 있도록 설계하였다.

2) 본 유역에 대한 지하수유동해석에 있어 정류상태에서 따른 관측치 및 MODFLOW 모델과의 지하수두에 대한 분석결과치의 비교 검토에서 3-DFM모델의 상대오차백분율(E.P.)을 비교 검토한 결과 0.03~0.07의 범위로서 거의 일치하였다. 그리고 분석유역의 양수 전의 모의발생분석 결과를 이용하여 지하등수두분포와 유속벡터를 산정한 결과 지하수 유동분포는 높은오름과 문석이오름 등에서 월랑봉, 용눈이오름 및 손자봉 등 각 방향으로 고르게 유출되고 있는 것으로 분석되었다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 3-3-1)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- Hubbert, M.K.(1940), The Theory of Groundwater Motion, J. Geol., pp. 48-56.
Toth, J.(1963), A Theoretical Analysis of Groundwater Flow in Small Drainage Basins, j. Geophy. Res., 5, pp. 512-518.
Freeze, R. A. and Witherspoon, P. A.(1966), Theoretical analysis of regional

- groundwater flow: 1. Analytical and numerical solutions to the mathematical model, WRR, 2., pp.417-421.
- Freeze, R. A.(1971), Three-dimensional, transient, saturated-unsaturated flow in a groundwater basin. Water Resour. Res., pp. 7, 774-786.
- Gupta, S. K. and Tanji, K. K.(1976), A three-dimensional Galerkin finite element solution of flow through multiaquifers in Sutter basin, California. Water Res., 12, pp. 128-132.
- McDonald, M.G. and A.W. Harbaugh.(1991), MODFLOW: A Modular three-dimensional Finite Difference Flow Model. IGWMC Groundwater Modeling Software. International Ground Water Modeling Center. Colorado, USA. pp. 12-215.
- Wang, H.F., Anderson, M.P.(1982), Introduction to Groundwater Modeling-Finite Difference and Finite Element methods, W.H. Freeman and Company, pp. 52-66.
- 김영기(1976), 반야월층의 지하수 유동에 관한 연구, 공산지질학회 논문집, 9(4), pp. 66-78.
- 배상근(1992), 대구지역의 지하수 유동계의 해석, 계명대학교 산업기술연구소 논문보고집, 제 15권 2집, pp. 73-86.
- 한국자원연구소(1992), 제주지구 온천자원조사보고서, pp. 136-214.
- 민병형(1994), MODFLOW 모형을 이용한 부곡온천지역 지하수 유동해석, 한국수문학회지 v.27, n.1, pp.79-88.
- 최윤영(1997), 지하수 흐름의 유동시스템 해석, 영남대학교 박사논문, pp. 55-57.