

MODFLOW 모형을 이용한 부곡온천지역 지하수 흐름해석

鄭 相 玉*

李 榮 大**

閔 丙 亨***

I. 서론

온천지역의 합리적인 지하수 관리를 위하여 수치모형을 이용한 시뮬레이션 기법을 이용하여 여러가지 조건에 따른 지하수위의 변동을 추정하여 향후 적정 양수량을 결정하는데 이용할 수 있다. 분석에 필요한 자료인 水文, 기상, 지형, 지질, 토양, 우물의 위치, 양수량, 지하수위 등은 현장방문과 문헌조사를 통하여 수집하였다.

정확한 지하수의 유동을 조사하기 위해서는 장기간 동안 추적자(tracer)를 이용한 관측이 필요하며 많은 비용과 시간이 소요된다. 따라서 비용과 시간 면에서 큰 제약을 받지 않는 컴퓨터 시뮬레이션 기법이 지하수 유동해석이나 지하수관리를 위해 많이 이용된다.

지하수 유동 해석을 위하여 많은 수치 모형이 개발되어 있다. 본 연구에서는 McDonald and Harbaugh(1988, 1991)가 3차원 지하수 유동 해석을 위하여 개발한 유한차분 모형인 MODFLOW를 이용하였다.

본 연구의 목적은 부곡온천지역의 지속적인 지하수위 하강에 대비하여 시뮬레이션 기법을 이용하여 여러가지 경우에 대한 지하수위 변동을 추정하여 적정 양수량을 결정하는 방향을 제시하는 데 있다.

* 정회원, 경북대학교 농공학과 부교수, 기술사

** 정회원, 부산공업대학교 토목공학과 부교수, 기술사

*** 정회원, 동아대학교 토목공학과 교수, 기술사

II. 모형의 개요

비정상 3차원 지하수의 흐름은 다음의 편미분 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

여기서

K_x, K_y, K_z : x, y, z 축 방향의 투수계수 (LT^{-1})

h : 총수두 (L)

W : 대수층 단위체적당 sink 또는 source 유량 (T^{-1})

S_s : 대수층의 비저류량 (specific storage) (L^{-1})

t : 시각 (T)

여기서 지하수 흐름 해석에서 지질을 일반적으로 사용하는 등방성과 균질성이라고 가정한다면 식(1)은 다음과 같이 된다

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} - \frac{W}{K_s} = \frac{S_s}{K_s} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

식(2)가 본 연구에서 사용된 기본 흐름방정식이다. 이 식에서 시각과 위치에 따른 수위 $h(i, j, k, t)$ 의 값을 구하게 된다. 여기서 i, j, k 는 격자망의 행, 열, 층을 나타내고 t 는 시각을 나타낸다.

III. 입출력 자료

본 모형의 적용에 필요한 입력 자료에는 대수층 종류, 초기수위 조건, 격자의 크기, 시간 간격 등의 일반적인 것과 우물 배치 및 양수율, 하천, 지하배수, 증발산량, 재충전율 등이 있으며, 출력자료에는 지하수위, 수위저하량, 및 제어체적(control volume)에서의 물 收支등이며 McDonald and Harbaugh(1988)에 자세하게 설명되어 있다.

대상지역인 부곡온천지역의 유한 차분 격자망은 그림 1과 같다. 그림에서

가운데 부분 블록은 온천지역을 나타낸다. 격자망의 간격은 200m 내지 400m로 우물이 밀집되어 있는 온천지역에는 조밀하게 하였으며 외곽으로 갈수록 크게하였다.

유역 경계에서의 흐름 조건은 모두 불투수 경계(no-flow boundary)로 가정하였으며 유역면적은 9.4 km² 으로 나타났다.

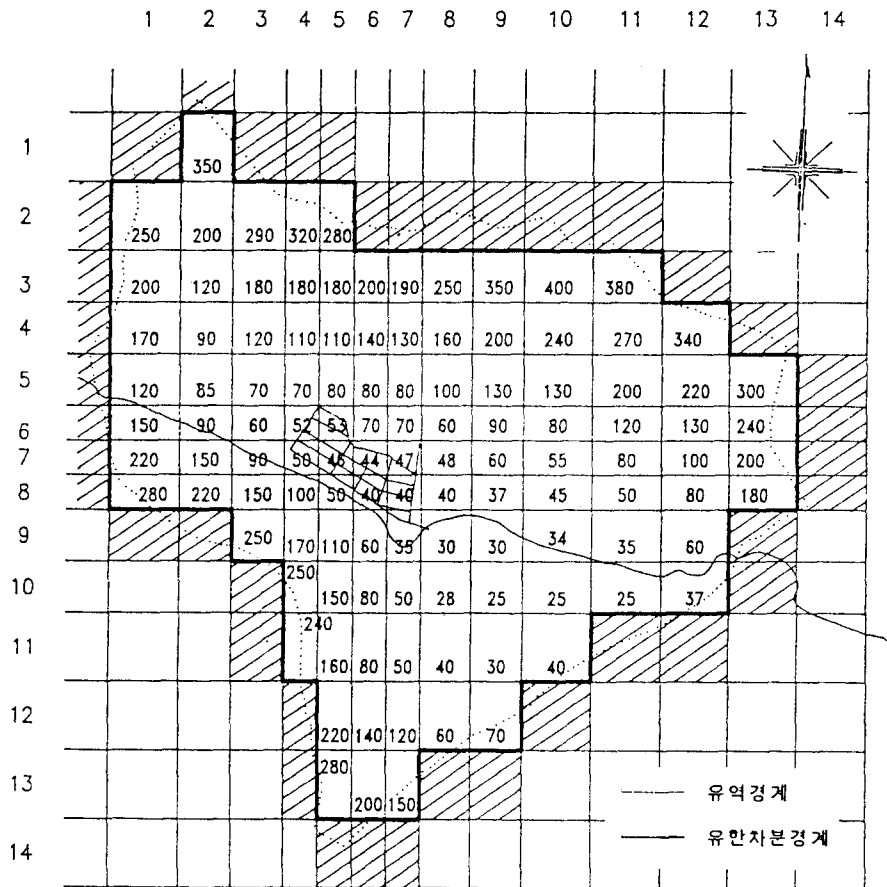


그림 1. 대상지역의 유한차분 격자망과 각 격자의 평균표고 (m)

1. 지하수 재충전량의 산정

지하수 재충전량 계산은 정우엔지니어링주식회사 (1984)에서 사용한 방법인 강우량에서 SCS방법으로 구한 지표 유출량을 뺀 값인 손실량의 몇%가 되는지를 모형의 보정과정에서 결정하였다.

2. 대수층 상수 보정

상수 보정 결과 유효공극율은 0.020, 투수계수는 0.0135m/day, 재충전량은 손실량의 20%로 나타났다. 그림 2는 대수층 상수 보정과정에서 선정된 값을 이용하여 모형이 추정한 수위와 관측치와의 비교를 보여주고 있으며 모형 추정치가 관측치와 대체로 잘 맞는 것을 알 수 있다. 또한 이들은 지하수위의 년간 및 장기간에 걸친 변동 추세를 잘 보여주고 있다.

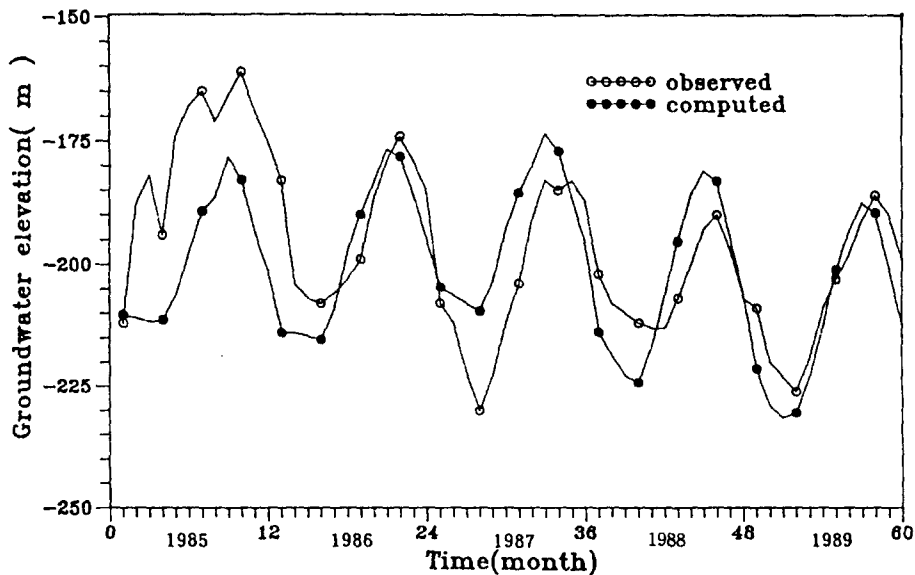


그림 2. 대수층 상수 보정후의 온천지역 계산수위와 관측수위의 비교

IV. 모형의 적용

여러가지 재충전량과 온천지역 양수량 값들에 대하여 시뮬레이션을 하여 그 결과를 분석 하므로써 온천지역 지하수위 저하 양상을 조사 하였다.

본 모형의 적용에서는 최상의 조건인 많은 양의 강우 및 침투와 적은 온천수 사용량의 경우와, 최악의 조건인 적은 양의 강우 및 침투와 많은 온천수 양수량의 경우 및 그 중간인 경우등에 대하여 1년간의 기간 동안에 대하여 시뮬레이션을 하여 그 결과를 분석하였다. 모형의 적용에서 이용된 연간 재충전량및 온천지역 양수량 값은 표 1과 같다.

표 1. 모형의 적용에 이용된 연간 재충전량 및 양수량

구 분	재충전량 (mm)			온천지역 양수량 (m ³)		
	고	중	저	고	중	저
년 간	276.6	198.4	119.6	1,344,060	1,211,555	1,082,045
일 평균	0.758mm/d	0.544mm/d	0.327mm/d	3,674m ³ /d	3,319m ³ /d	2,965m ³ /d

온천지역 지하수 흐름을 조사하기 위하여 앞에서 소개한 여러가지 경우에 대한 1년간의 시뮬레이션 결과를 비교 분석하였다. 분석은 주로 지하수위의 변동에 대하여 실시하였다. 온천지역의 지하수위 관측치의 년중 변화에서 볼 수 있는 바와 같이 매년 4월경에 최저 수위를 나타내고 10월경에 최고수위를 나타내는 점을 고려하여 4월과 10월의 지하수위를 중심으로 분석하였다.

그림 3은 최악의 조건인 강우 및 침투가 작고 온천수 양수량이 큰 경우의 시뮬레이션 결과 4월말의 지하수위 등고선도를 보여주고 있다. 온천지역 중앙부에서 4월말의 최저 지하수위는 약 -190m 이었고, 10월말의 최저 지하수위는 약 -150m 이었다. 그림에서 지하수는 수위 등고선과 직각방향으로 수위가 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐른다. 그림에서 보는 바와 같이 온천지역의 지하수위 등고선은 동서 방향으로 약간 긴 타원형 모습을 보여주고 있다.



그림 3. 최저침투율 및 온천지역 최대양수시 1년간 시뮬레이션 결과 4월말의 지하수위 등고선도 (m)

표 2. 재충전량과 온천지역 양수량의 크기에 따른 온천지역

중앙부에서의 지하수위의 변화 (해발고도, m).

Run No.	재충전량	양수량	4 월말	10 월말	12 월말	비 고
1	小	大	-189.7	-148.0	-170.9	1월초 초기 조건: 중앙-167.5
2	小	小	-162.3	-134.7	-151.5	
3	大	大	-188.6	-140.0	-161.8	
4	大	小	-161.2	-126.8	-142.5	

표 2는 재충전량과 온천지역 양수량의 크기에 따른 여러가지의 시뮬레이션 결과에서 온천장 지역 중앙부와 서쪽 경계 부근에서의 지하수위 변화를 보여 주고 있다. 각 경우에 대하여 년중 최저수위인 4월말과 년중 최고 수위인 10월말과 1년간 시뮬레이션 기간의 끝인 12월말의 지하수위 값을 보여 주고 있다.

1월초와 12월말의 1년사이의 지하수위 저하여부를 보면 재충전량이 작고 온천장 양수량이 큰 Run No. 1의 경우에는 1월초의 초기조건보다 12월말의 지하수위가 온천지역 중앙에서 3.4m 저하 되었고 서쪽 경계부에서는 3.8m 저하되었다. 그 외의 경우 즉 재충전량이 큰 경우와 재충전량이 작으나 온천 지역 양수량이 적은 경우에는 1년후인 12월말의 지하수위가 오히려 상승한 것을 알 수 있다.

표 2는 1년간의 시뮬레이션 기간에 대한 지하수위 변동을 보여주고 있으며, 만약 수년간 같은 조건으로 계속하여 양수하는 경우에는 지하수위 변동 효과는 매년 거의 같은 수준으로 중복되게 된다.

온천지역 지하수의 향후 적정 사용 가능량은 지하수 재충전을 좌우하는 전년도 강우량의 크기와 온천지역 지하수위의 고저를 충분히 고려하여 적정하게 결정하여야 할 것이다. 여러가지 조건에 대한 시뮬레이션 결과인 표 2를 기준으로 판단하면 재충전량의 크기와 온천장 양수량의 크기에 따라 지하수위가 크게 좌우된다. 온천장 양수량의 크기는 최저 지하수위를 나타내는 4월경에 과대한 수위저하가 발생하지 않도록 주의하여야 한다.

V. 요약 및 결론

본 연구는 부곡온천지역의 합리적인 지하수 관리를 위하여 수치모형을 이용한 시뮬레이션 기법을 이용하여 여러가지 조건에 따른 지하수위의 변동을 추정하여 향후 적정 양수량을 결정하기 위하여 미국 지질조사소 (US Geological Survey) 에서 개발한 모형인 MODFLOW를 이용하여 조사하였다.

모형의 적용에 필요한 자료는 현장조사와 문헌조사로부터 수집하였다. 대수층은 균질성과 등방성을 갖는다고 보고 대수층 수리 특성과 침투량은 모형의 매개 변수 보정과정에서 결정하였다. 본 연구에서 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 대수층의 수리지질특성인 투수계수는 0.0135m/day 이고, 비저류량 또는 유효공극율은 0.020 이었다. 지하수 재충전량은 일년전의 강우량에서 하천유출량을 뺀 량의 20%가 적정한 것으로 나타났다.
- 2) 온천지역 지하수위의 변화는 1년의 기간에 대한 시뮬레이션 결과를 분석

하여 결정하였다. 시뮬레이션 결과를 보면 재충전량이 작고 온천장 양수량이 큰 경우에는 1월초의 초기조건보다 12월말의 지하수위가 저하 되었으나, 그 외의 경우인 재충전량이 큰 경우와 재충전량이 작으나 온천 지역 양수량이 적은 경우에는 1년후인 12월말의 지하수위가 오히려 상승하였으므로 최악의 조건인 재충전량이 작고 온천장 양수량이 큰 경우 이외에는 지하수위 저하가 예상되지 않는다.

- 3) 온천지역에서 향후 적정 지하수 양수 가능량은 재충전의 대소, 지하수위의 고저 등에 따라 달라지게 되는 바, 온천장 양수량의 크기는 최저 지하수위를 나타내는 4월경에 과대한 수위저하가 발생하지 않도록 주의하여야 한다.

參 考 文 獻

1. 경남 창원군, 동력자원연구소. 1989. 부곡온천 부존자원 조사분석 보고서.
2. 국립지리원. 1990. 지형도 중 영산도폭.
3. 농업진흥공사. 1987. 지하수 Modeling 연구 보고서. 474pp.
4. 민병형, 정상욱, 이영대. 1992. 부곡골프장 지하수양수와 온천지역 온천 수량과의 상관성 조사연구. 유원개발주식회사. 135pp.
5. 정상욱, 배상근. 1990. 지하수 관리. 한국건설기술연구원. 101pp.
6. 정우엔지니어링주식회사. 1984. 지하원유 비축기지 주위의 지하수분석. 서울대학교 공과대학 생산기술연구소. 100pp.
7. 중앙개발주식회사. 1981. 부곡온천 종합개발조사(지질탐사) 보고서.
8. 한정상. 1983. 지하수학개론. 박영사.
9. 地下水ハント”フ”ツタ編輯委員會. 1980. 地下水ハント”フ”ツタ. 建設

産業調査會.

10. Austin, T.A. 1984. Modeling ground quantity and quality using microcomputers: Model user manual. ASCE continuing Education Short Course.
11. Freeze, R.A. and J.A. Cherry. 1979. Groundwater. Prentice Hall. New Jersey.
12. McDonald, M.G. and A.W. Harbaugh. 1988. A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model. Techniques of water-resources investigations of United States Geological Survey. Book 6, Chapter A1.
13. McDonald, M.G. and A.W. Harbaugh. 1991. MODFLOW: A Modular three-dimensional Finite Difference Flow Model. IGWMC Ground Water Modeling Software, International Ground Water Modeling Center. Colorado, USA. 12pp.
14. Todd, D.K. 1980. Groundwater Hydrology. 2nd Ed. Wiley. New York.