

〈論 文〉

MODFLOW 模型을 利用한 부곡온천지역 地下水 流動解析
 An Analysis of Groundwater Flow at Bugok Area Using MODFLOW

鄭 相 奭* 李 榮 大** 閔 丙 亨***

CHUNG Sang-Ok LEE Young-Dae MIN and Byung-hyung

Abstract □ This study was conducted to analyse groundwater flow in the Bugok hot spring area using the MODFLOW model which can simulate three dimensional groundwater flow both in confined and unconfined aquifers. Based on this study the following conclusions were obtained:

- 1) The hydraulic conductivity and the specific storage of the aquifer were 0.0135 m/day and 0.020, respectively, and the model predicted groundwater elevation agreed well with the observed one.
- 2) Simulation results showed that the groundwater level declines at the end of the one-year simulation period when the annual recharge rate is small and the annual pumping rate high, which is the worst combination. Except that combination, the groundwater level does not decline at the end of one year simulation period indicating the pumping rates used were allowable.
- 3) The safe yield depends upon the magnitudes of the recharge and pumping rates. The pumping rate should not produce excess decline of groundwater level around April when the water level is the lowest in a year.

요 지 : 부곡온천 지역의 지속적인 지하수위 하강에 대비하여 온천지역의 지하수 흐름을 3차원 모형인 MODFLOW 를 이용하여 해석하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 변수보정 과정에서 대수층의 투수계수는 0.0135m/d로, 저류계수는 0.020 으로 나타났으며, 모형이 추정 한 장기간의 지하수위 변동은 관측치와 잘 맞았다.
- 2) 여러가지 시나리오에 대하여 1년간의 기간에 대한 시뮬레이션을 한 결과 가장 나쁜 조건인 연간 함양량 이 작고 연간 양수량이 큰 경우에는 시뮬레이션 기간의 초기에 비해 말기에 지하수위가 저하 되었으나 그 외 의 경우에는 말기의 수위가 초기의 수위보다 낮아지지 않았다.
- 3) 온천지역의 안전채수량은 함양율의 크기와 지하수위의 고저에 크게 영향을 받는 바, 양수량의 결정은 년 중 지하수위가 가장 낮은 4월경에 과다한 수위저하가 발생하 지 않도록 하여야 한다.

1. 서 론

온천지역의 합리적인 지하수 관리를 위하여 수치 모형을 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 문헌 조사를 통하여 수집하였다.

온천의 생성과정을 보면 온천수의 근원은 일반 지하수와 마찬가지로 강수로 부터의 침투가 되며 침투한 물이 지하 1500-3000m 까지 내려가서 하부의 뜨거운 마그마로 부터 열을 전달받아 물이 더

* 정희원, 경북대학교 농공학과 부교수, 기술사
 ** 정희원, 부산공업대학교 토목공학과 부교수, 기술사
 *** 정희원, 동아대학교 토목공학과 교수, 기술사

워져서 대류흐름에 의하여 상부로 이동하여 지표 가까이 도달하게 되어 온천이 된다 (Todd, 1980).

온천수는 지하수이므로 Darcy의 법칙에 따라 흐른다. 정확한 지하수의 유동을 조사하기 위해서는 장기간 동안 추적자(tracer)를 이용한 관측과 양수시험이 필요하며 많은 비용과 시간이 소요된다. 따라서 비용과 시간 면에서 큰 제약을 받지 않는 컴퓨터 시뮬레이션 기법이 지하수 유동해석이나 지하수관리를 위해 많이 이용된다.

지하수 유동 수치 모형에는 여러가지가 있다. 간단한 지하수 유동 해석을 위하여 Austin(1984)은 35개의 컴퓨터 프로그램을 소개하였으며, McDonald and Harbaugh(1988, 1991)는 3차원 지하수 유동 해석을 위하여 유한차분법을 이용한 수치모형인 MODFLOW를 개발하였다. 농업진흥공사(1987)는 충적층 지하수 유동해석을 위하여 수치모형을 개발하였고, 정우엔지니어링주식회사(1984)도 지하 원유 비축기지의 수리 분석을 위하여 유한차분법을 이용한 모형을 개발하여 적용하였다. 유한차분법과 유한요소법을 이용한 지하수 유동해석을 위한 수치모형의 개발에 대하여는 Wang and Anderson (1982)에 자세히 소개되어 있다.

지하수와 온천수는 중요한 자연자원으로 효율적인 관리를 하지 않으면 지하수 자원의 고갈등 정과 배 (1990)가 소개한 바 있는 여러가지 부작용을 야기하게 된다. 지하수와 온천수의 효율적인 관리를 위하여는 관측정을 굴착하여 수위를 관측하고, 각 우물마다 양수기를 설치하여 양수량을 관측하여 성실한 관측기록을 유지하는 것은 물론 지하수 물收支에 있어서 揚水量이 함양량보다 많아지지 않는 안전 채수량 (safe yield)을 산정하여 지하수 揚水量이 안전 채수량의 범위내에 있게 관리하여 지하수와 온천수 자원관리를 철저하게 하여야 할 것이다. 본 연구의 목적은 부곡온천지역의 지속적인 지하수위 하강에 대비하여 시뮬레이션 기법을 이용하여 여러가지 경우에 대한 장래 지하수위 변동을 추정하여 적정 양수량을 결정하는 방향을 제시하는데 있다.

II. 모형의 개요

본 연구에서는 미국 지질조사국(U.S. Geological Survey)에서 개발한 MODFLOW(Modular Three-Dimensional Finite Difference Flow Model)모형을 사용하였다. 이 모형은 McDonald and Harbaugh(1988, 1991)에 의하여 개발되었고, 미국 콜로라도 광산대학 부설 국제 지하수 모델링센터가 배포하고있다.

이 모형에서는 지하수 흐름에 대한 편미분 방정식을 유한차분법을 이용하여 격자중심(block-centered)에 대하여 풀었으며, 자유수면지하수는 물론 피압지하수의 유동도 해석할 수 있으며, 3차원 흐름에 대한 것으로 연직방향은 여러 개의 지층으로 구분하였다. 이 모형은 모듈형식으로 구성되어 있어 필요한 부분만 선택적으로 사용할 수 있고, 추가로 필요한 부분을 더할 수도 있다. 이 모형은 우물, 지하배수, 지표면 함양, 하천흐름 및 증발산등을 포함하고 있다. 본 수치모형은 ANSI FORTRAN77언어로 쓰여졌으며 IBM 80386 이상의 컴퓨터에서 사용할 수 있다.

등온조건에서 3차원 지하수 부정류는 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 비저류계수(specific storage coefficient) (L⁻¹)

t : 시간 (T)

여기서 지하수 흐름 해석에서 지질을 일반적으로 가정하는 등방성과 균질성이라면 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.

유한차분 격자망의 각 격자마다 유한차분 방정식이 한개씩 만들어지며 전 격자망에서는 격자망의 개수와 같은 숫자의 차분방정식이 있게 되며 매 시각단위 마다 이 식들을 연립으로 풀어야 한다. 각 시각에서의 연립방정식을 행렬기호로 표시하면 다음과 같다.

$$[A] \{h\} = \{q\} \quad (3)$$

여기서 $[A]$ 는 계수항 사각행렬, $\{h\}$ 는 유한차분 격자망의 각요소에서의 수두벡터, $\{q\}$ 는 부하항 벡터이다. 식(3)을 푸는 데는 여러가지 방법이 있으나 MODFLOW모형에서는 Strongly Implicit Procedure 또는 Slice-Successive Overrelaxation 방법을 이용할 수 있다.

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, 함양율 등이 있으며, 출력자료에는 지하수위, 수위저하량, 및 제어체적(control volume)에서의 물 收支등이며 McDonald and Harbaugh(1988)에 자세하게 설명되어 있다.

대상지역인 부곡온천지역의 지형과 유역 경계는 그림 1과 같으며 유역면적은 9.4km²로 나타났다. 유한 차분 격자망은 그림 2와 같으며 각 격자내의 수치는 평균 지표면 고도를 나타낸다. 그림에서 가운데 부분 블록은 온천지역을 나타낸다. 격자망의 간격은 200m 내지 400m로 우물이 밀집되어 있는 온천지역에는 조밀하게 하였으며 외곽으로 갈수록 크게하였다. 그림 2에서와 같이 가로와 세로 방향으로 13개씩으로 하였다. 대수층은 많은 양수로 인하여 피압현상이 없어졌기 때문에 (중앙개발주식회사, 1981) 자유수면지하수로 보고 연직 방향으로 1개의 층으로 하였으며, 균질성과 등방성을



그림 1. 부곡온천유역 지형 및 유역경계도

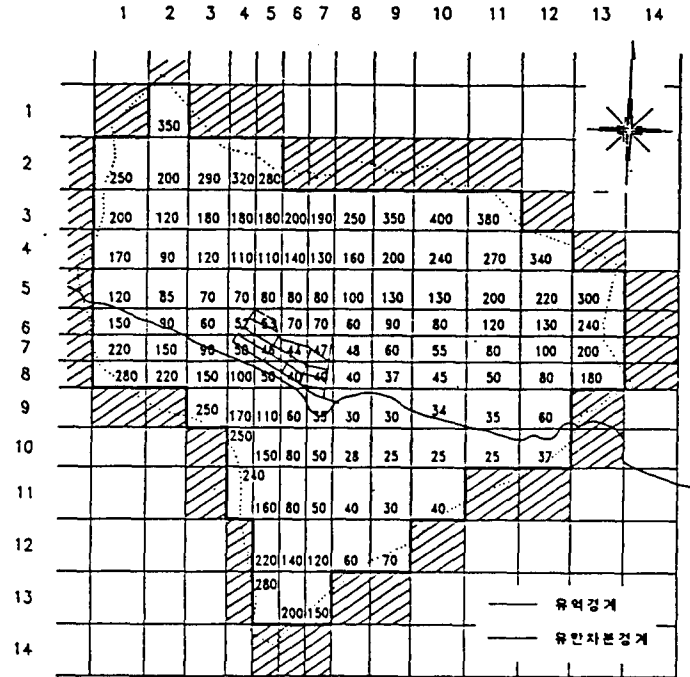


그림 2. MODFLOW 적용을 위한 유역 격자망과 각 격자의 평균 표고(m)

갖는다고 가정하였다. 따라서 총 169개의 격자가 있으며 유한차분 경계유역내에 있는 격자는 115개이다.

경계조건은 일반적으로 많이 사용되는, 지표수 분수령이 지하수 분수령과 같다고 가정하여 불투수 경계(no-flow boundary)로 보았으며, 온천구역의 수위가 주위에 비해 매우 낮기 때문에 하류쪽으로 지하수가 흘러가기 어려우므로 하류인 동남쪽의 경계에서도 지하수 분수령이 된다고 가정하여 불투수 경계로 가정 하였다.

1. 지하수 함양량의 산정

지하수 함양량 계산은 정우엔지니어링주식회사(1984)에서 사용한 방법인 강우량에서 SCS방법으로 구한 지표 유출량을 뺀 값인 손실량의 얼마만큼이 되는지를 모형의 보정과정에서 결정하였다.

한편, 지하수위 저하 및 지하수와 온천수 자원의 고갈을 방지하는데 필요한 함양량의 크기는 1984

년에서 1988년 사이에 연간 최대 온천수 사용량은 1988년의 1,344,060m³이고, 최소 사용량은 1984년의 1,082,045m³이므로 이들을 유역면적 9.4km²으로 나누면 1988년에는 143mm이상이, 1984년에는 115mm이상의 함양이 필요하다.

2. 대수층 상수 보정

모형의 적용을 위하여 현장양수시험을 통하여 대수층 상수를 조사하여야 하나, 본 연구에서는 시간적, 경제적 제약으로 인하여 문헌조사와 모형의 보정과정에서 대수층상수를 보정하였다. 본 모형에서 사용된 대수층상수는 유효공극율과 투수계수이다.

대수층 상수 보정에서는 대상구역 대수층의 대표적인 지질인 혈암의 공극율과 투수계수의 범위를 기존 보고서인 부곡온천 부존자원 조사분석 보고서(경남 장녕군과 동력자원 연구소, 1989)와 부곡 온천 종합개발조사(지질탐사) 보고서(중앙개발 주식회사, 1981) 및 참고문헌(한정상, 1983;

Todd, 1980; Freeze and Cherry, 1977; 地下水ハンドブック編輯委員會, 1980)의 값들을 참고하여 유효공극율은 0.01-0.025의 값을, 투수계수는 0.01 내지 0.02m/day의 값을 사용하였다. 그리고 함양량은 강우량에서 지표유출량을 뺀 양인 손실량의 10%와 20%를 사용하였다.

계수 보정에는 1985년 부터 1989년까지 기간의 자료를 이용하였다. 지하수위의 초기조건은 모형의 예비조사에서 적정하게 구한 값을 사용하였으며, 유입량인 침투량은 SCS방법을 사용하여 구하였고, 유출량인 우물양수량은 우물현황조사에서 구한 값들을 이용하였다. 침투수가 대수층에 도달하는데 1년정도 걸린다고 보고 (동력자원연구소, 1989) 일년 전의 월별 침투량을 일별로 균등하게 나누어 사용하였으며, 침투수는 지표면에 균등하게 분포하는 것으로 가정하였다.

따라서 본 모형의 보정에서 각 월별로 서로 다른 침투율과 양수율이 사용되었으며 양수량의 분포는 온천지역에 사용중인 온천공 분포를 기준하여 결정하였다.

본 모형의 적용에서 사용된 시간 간격의 크기는 1일이었으며, 일정한 침투율과 양수율을 적용한 한

달을 한 기간 (period)으로 하여 1985년부터 1989년까지 60개 기간이 상수 보정에 사용되었다.

유효공극율과 투수계수 및 함양량의 값을 여러가지로 변화시켜 가면서 시뮬레이션한 결과중 온천지역의 지하 수위가 관측치와 가장 근접한 경우의 값을 선정하였다. 그 결과 유효공극율은 0.020, 투수계수는 0.0135m/day, 함양량은 손실량의 20%인 경우가 가장 좋은 결과를 나타내었다. 그림 3은 대수층 상수 보정과정에서 선정된 값을 이용하여 모형이 추정한 수위와 관측치와의 비교를 보여주고 있으며, 모형 추정치가 관측치와 대체로 잘 맞는 것을 볼 수 있다. 또한 이들은 지하수위의 연간 및 장기기간에 걸친 변동 추세를 잘 보여주고 있다.

IV. 모형의 적용

대수층 상수의 보정과정에서 얻은 투수계수 0.0135m/day와 유효공극율 0.020을 사용하여 여러 가지 함양량과 온천지역 양수량 값들에 대하여 시뮬레이션을 하여 그 결과를 분석 하므로써 온천지역 지하수위 저하 양상을 조사하였다.

본 모형의 적용에서는 최상의 조건인 많은 양의

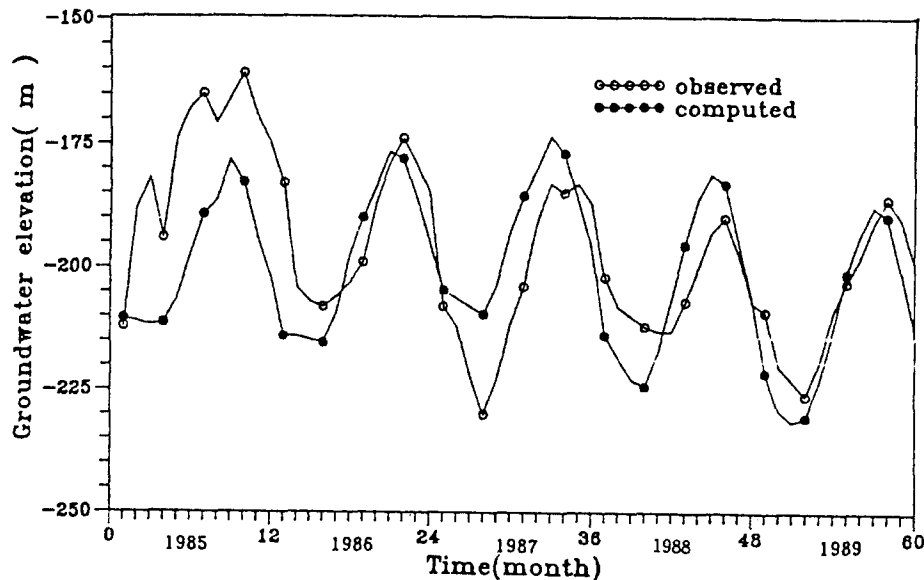


그림 3. 대수층 상수 보정후의 온천지역 계산수위와 관측수위의 비교

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 시물레이션을 하여 그 결과를 분석하였다. 모형의 적용에서 사용된 초기 지하수위 값은 앞의 수리지질상수 보정과정에 1985년부터 1989년까지의 시물레이션에서 얻은 최종 지하수위 값을 이용하였다. 강우량 및 함양량은 최근 10여 년간의 기상 자료를 분석하여 얻은 값 중에서 최대, 최소의 경우를 선정하였으며, 온천 지역의 양수량은 과거의 온천수 사용량 자료로부터 선정하였다. 모형의 적용에서 이용된 연간 함양량 및 온천지역 양수량 값은 표 1과 같다.

모형의 적용에서 일별 시간 단위를 사용하였으며 매월을 한개의 기간(period)으로 보고 월별로 동일한 함양량과 양수량 값을 사용하여 1년 기간 동안 시물레이션 하였다.

온천지역 지하수 유동을 조사하기 위하여 앞에서 소개한 여러가지 경우에 대한 1년간의 시물레이션 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 최고 수위를 나타내는 점을 고려하여 4월과 10월의 지하수위를 중심으로 분석하였다.

그림 2의 유한차분 격자망에서 본 바와 같이 일곱번째 행 여섯번째 열의 격자가 온천지역 중앙부를 나타내고, 여섯번째 행 네번째 열이 온천장 서쪽경계를 나타낸다. 그림 4 와 5는 최악의 조건인 강우 및 침투가 작고 온천수 양수량이 큰 경우의 시물레이션 결과 지하수위의 분포를 보여주고 있다. 지하수위의 값은 평균해수면으로 부터의 고도이다. 그림 4가 4월말의 등고선도이며, 그림 5는 10월말의 등고선도이다. 온천지역 중앙부에서 4월말의 최저 지하수위는 약 -190m이고, 10월말의 최저 지하수위는 약 -150m이었다. 이들 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.

표 1. 모형의 적용에 이용된 연간 함양량 및 양수량

구 분	함 양 량(mm)			온천지역 양수량(m ³)		
	고	중	저	고	중	저
년간	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



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



그림 5. 최저침투율 및 온천지역 최대양수시 1년간 시뮬레이션 결과 10월말의 지하수위 등고선도(m)

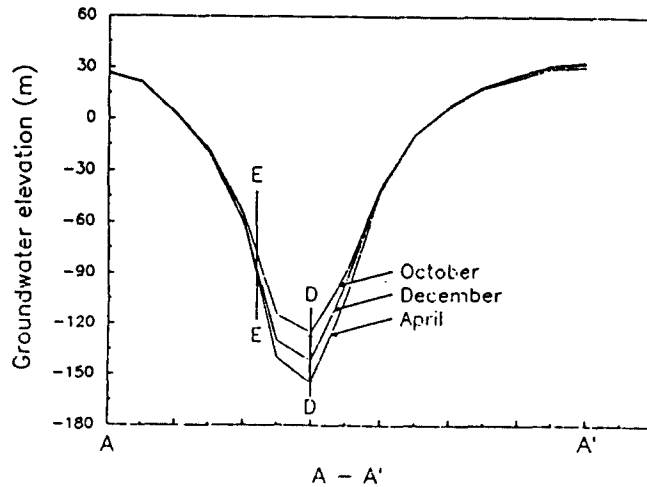


그림 6. 함양량이 작고 온천지역 양수량이 큰 경우 단면 A-A'에서의 지하수위의 비교

그림 6은 온천지역을 가로지르는 A-A' 단면에서의 월별 지하수위의 비교를 보여 주고 있다. 그림에서 지하수위가 가장 낮은 D-D 지점은 온천지역의 중앙부이며, E-E 지점이 온천지역의 서쪽 경계에 해당된다. 온천지역에서 4월말, 10월말 및 12월말의 지하수위의 상대적인 변화를 잘 볼 수 있다.

표 2는 함양량과 온천지역 양수량의 크기에 따른 여러가지의 시뮬레이션 결과에서 온천장 지역 중앙부와 서쪽 경계 부근에서의 지하수위 변화를 보여주고 있다. 각 경우에 대하여 년중 최저수위인 4월말과 년중 최고 수위인 10월말과 1년간 시뮬레

이션 기간의 끝인 12월말의 지하수위 값을 보여 주고 있다.

1월초와 12월말의 1년사이의 지하수위 저하여부를 보면 함양량이 작고 온천장 양수량이 큰 Run No. 1의 경우에는 1월초의 초기조건보다 12월말의 지하수위가 온천지역 중앙에서 3.4m 저하되었고 서쪽 경계부에서는 3.8m 저하되었다. 그 외의 경우 즉 함양량이 큰 경우와 함양량이 작으나 온천지역 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 조

건으로 계속하여 양수하는 경우에는 지하수위 변동 효과는 매년 거의 같은 수준으로 중복되게 된다.

표 3은 함양량과 온천지역 양수량의 크기에 따른 온천지역 중앙부에서 연간 지하수위 변동폭을 보여주고 있으며, 표 4는 이때 온천지역 중앙부에서 12월말(1년후)의 지하수위의 비교를 보여주고 있다. 표 3에서 보는 바와 같이 온천장 중앙부에서의 년중 최저와 최고 수위인 4월과 10월의 수위 변동폭을 보면 함양량과 온천장 양수량의 대소에 따라 27.5m내지 48.5m에 달하는 것을 알 수 있다. 또 함양량이 많을 때가 적을 때 보다 수위 변동의 폭이 약 6.8m 더 큰 것을 알 수 있으며, 온천장 양수량이 클 때 수위 변동폭이 양수량이 적을 때보다 약 14m 더 큰 것을 알 수 있다.

표 4에서 12월말(1년후) 온천지역 중앙부의 지하수위는 함양량이 큰 경우가 작은 경우보다 9.1m 정도 높았으며, 온천지역 양수량이 적은 경우가 큰 경우보다 19.4m정도 높았다. 표 3과 4에서 보는 바와 같이 온천장 양수량의 대소가 함양량의 대소보다 지하수위 변동에 더 큰 영향을 미치는 것을

알 수 있다.

온천지역 지하수의 향후 적정 사용 가능량은 지하수 함양을 좌우하는 전년도 강우량의 크기와 온천지역 지하수위의 고저를 충분히 고려하여 적정하게 결정하여야 할 것이다. 여러가지 조건에 대한 시뮬레이션 결과인 표 2를 기준으로 판단하면 함양량의 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 지질조사국 (U.S. Geological Survey) 에서 개발한 유한 차분법을 이용한 수학적 모형인 MODFLOW를 이용하여 조사하였다.

표 2. 함양량과 온천지역 양수량의 크기에 따른 온천지역 중앙부 서쪽경계에서의 지하수위의 변화(해발고도, m)

Run No.	함양량	온천장 양수량	4월말		10월말		12월말		비 고
			서쪽경계	중 앙	서쪽경계	중 앙	서쪽경계	중 앙	
1	小	大	-92.5	-189.7	-80.4	-148.0	-87.7	-170.9	1월초 초기
2	小	小	-83.7	-162.3	-73.4	-134.7	-78.7	-151.5	조건 :
3	大	大	-91.4	-188.6	-73.0	-140.0	-79.5	-161.8	서쪽 -83.9
4	大	小	-82.7	-161.2	-66.0	-126.8	-70.6	-142.5	중앙 -167.5

표 3. 함양량과 온천지역 양수량의 크기에 따른 온천지역 중앙부에서의 1년동안의 지하수위 변동폭

구 분	온천장 양수량		차 이	
	大	小		
함 양 량	大	48.5m	34.2m	14.3m
	小	41.6m	27.5m	14.1m
차 이		6.9m	6.7m	

표 4. 함양량과 온천지역 양수량의 크기에 따른 온천지역 중앙부에서의 12월말(1년후)의 지하수위 비교

구 분	온천장 양수량		차 이	
	大	小		
함 양 량	大	-162.1m	-142.8m	19.3m
	小	-171.3m	-151.8m	19.5m
차 이		9.2m	9.0m	

모형의 적용에 필요한 자료는 현장조사와 문헌조사로부터 수집하였다. 본 연구에서는 암반 대수층의 피압현상이 없어졌기 때문에 자유수면지하수로 보고 균질성과 등방성을 갖는다고 가정하였으며, 대수층 수리 특성과 침투량은 모형의 매개변수 보정과정에서 결정하였다. 본 연구에서 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 대수층의 수리지질특성인 투수계수는 0.0135m/day이고, 비저류량 또는 유효공극율은 0.020이었다. 지하수 함양량은 일년전의 강우량에서 하천유출량을 뺀 양의 20%가 적정한 것으로 나타났다.
- 2) 온천지역 지하수위의 변화는 1년의 기간에 대한 시뮬레이션 결과를 분석하여 결정 하였다. 시뮬레이션 결과를 보면 함양량이 작고 온천장 양수량이 큰 경우에는 1 월초의 초기조건보다 12월말의 지하수위가 저하 되었으나, 그 외의 경우인 함양량 이 큰 경우와 함양량이 작으나 온천지역 양수량이 적은 경우에는 1년후인 12월말 의 지하수위가 오히려 상승하였으므로 최악의 조건인 함양량이 작고 온천장 양수 량이 큰 경우 이외에는 지하수위 저하가 예상되지 않는다.
- 3) 온천지역에서 향후 적정 지하수 양수 가능량은 함양의 대소, 지하수위의 고저 등 에 따라 달라 지게 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 부존 자원 조사분석 보고서.
2. 국립지리원. 1990. 지형도 중 영산도폭.
3. 농업진흥공사. 1987. 지하수 Modeling 연구 보고서. 474pp.
4. 민병형, 정상옥, 이영대. 1992. 부곡골프장 지하수 양수와 온천지역 온천수량과의 상관성 조사연구. 유원개발주식회사. 135pp.
5. 정상옥, 배상근. 1990. 지하수 관리. 한국건설기술 연구원. 101pp.
6. 정우엔지니어링주식회사. 1984. 지하원유 비축기지 주위의 지하수분석. 서울대학교 공과대학 생산기술 연구소. 100pp.
7. 중앙개발주식회사. 1981. 부곡온천 종합개발조사 (지질탐사) 보고서.
8. 한정상. 1983. 지하수학개론. 박영사.
9. 地下水ハンドブック編輯委員會. 1980. 地下水ハンドブック. 建設産業調査會.
10. Austin, T.A. 1984. Modeling groundwater quantity and quality using microcomputers. 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.
15. Wang, H.F. and Anderson, M.P. 1982. Introduction to Groundwater Modeling: Finite Difference and Finite Element Methods. W.H. Freeman and Co. San Francisco.