

# 지하수유동해석을 위한 한국형 분석시스템의 개발

Koreanized Analysis System Development

for Groundwater Flow Interpretation

최 윤 영\*

Choi, Yun Yeong

---

## Abstract

In this study, the algorism of groundwater flow process was established for koreanized groundwater program development dealing with the geographic and geologic conditions of the aquifer have dynamic behaviour in groundwater flow system. All the input data settings of the 3-DFM model which is developed in this study are organized in Korean, and the model contains help function for each input data. Thus, it is designed to get detailed information about each input parameter when the mouse pointer is placed on the corresponding input parameter. This model also is designed to easily specify the geologic boundary condition for each stratum or initial head data in the work sheet. In addition, this model is designed to display boxes for input parameter writing for each analysis condition so that the setting for each parameter is not so complicated as existing MODFLOW is when steady and unsteady flow analysis are performed as well as the analysis for the characteristics of each stratum. Descriptions for input data are displayed on the right side of the window while the analysis results are displayed on the left side as well as the TXT file for this results is available to see. The model developed in this study is a numerical model using finite differential method, and the applicability of the model was examined by comparing and analyzing observed and simulated groundwater heads computed by the application of real recharge amount and the estimation of parameters. The 3-DFM model is applied in this study to Sehwa-ri, and Songdang-ri area, Jeju, Korea for analysis of groundwater flow system according to pumping, and obtained the results that the observed and computed groundwater head were almost in accordance with each other showing the range of 0.03 - 0.07 error percent. It is analyzed that the groundwater flow distributed evenly from Nopen-orum and Munseogi-orum to Wolang-bong, Yongnuni-orum, and Songja-bong through the computation of equipotentials and velocity vector using the analysis result of simulation which was performed before the pumping started in the study area. These analysis results show the accordance with MODFLOW's.

**Key words :** MODFLOW, 3-DFM model, Groundwater analysis system

---

\* 경북도립 경도대학 건설환경계열

## 요 지

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 3-DFM모델은 입력변수 자료에 대한 설정이 모두 한글로 구성되어 있으며, 각 입력자료와 매개변수들의 이해와 적용치에 대한 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 설계되어 있다. 최종 입력자료를 이용한 분석결과에서는 우측에 입력자료에 대하여 설명과 더불어 좌측에 분석 결과치를 나타나게 하였으며 이에 대한 결과는 TXT파일로도 출력할 수 있도록 설정하였다. 본 연구에서 개발된 모델은 유한차분법을 이용한 수치모델이며, 실제 함양량을 적용하고 매개변수들을 결정하여 관측 지하수두치와 모의발생으로 얻은 계산 지하수두치를 비교 분석하여 개발모델의 적용성을 검토하였다. 본 연구에서는 제주도 세화리 및 송당리 일대의 양수에 따른 지하수 유동시스템 해석을 위하여 3-DFM모델을 적용 분석한 결과, 정류상태에서 따른 관측치와 계산된 지하수두와의 상대오차백분율(E.P.)이 0.03~0.07의 범위로서 관측치와 거의 일치하였다. 그리고 분석 유역의 양수 전의 모의발생분석 결과를 이용하여 지하등수두분포와 유속벡터를 산정한 결과 지하수 유동분포는 높은 오름과 분석이오름 등에서 월랑봉, 용눈이오름 및 손자봉 등 각 방향으로 고르게 유출되고 있는 것으로 분석되었다. 이러한 분석결과는 MODFLOW모델과 비교할 때 일치된 결과를 나타내었다.

핵심용어 :

## I. 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 수치해석적

인 방법에 있어, 유한요소법과 유한차분법을 들 수 있으며, 유한차분법은 지배방정식에서부터 직접 유한차분식을 유도하며 격자점과 격자점사이의 관계에 바탕을 둔 소위 pointwise approximation에 의한 방법이다.

유한차분법의 장점은 간편하고 이용하는데 있어 유한요소법보다 편리하다는 장점은 있으나 보편성 있는 연산규칙을 세우는데에 따른 제한성이 있는 것이 단점이라 할 수 있다. 따라서, 특정한 형상이나 경계조건 등을 전제로 하여 경우에 따른 프로그램을 작성하는 것이 일반적이다. 하지만, 수치해석의 방법에 의한 모델의 실제 적용시 모델의 특성에 따라 많은 문제점을 내포하고 있다. 즉, 모델의 불확실성, 입력자료의 불확실성, 매개변수의 불확실성 및 시스템의 초기상태 등으로 인해 모델에 의한 결과치와 실측자료가 불일치하는 문제가 발생하게 된다. 따라서 이와 같은 불확실성에 의한 모델오차를 극복하는 연구가 필요한데, 특히, 목적에 가장 잘 부합하는 구조로 구성된 모델의 확정과 대상유역에 대한 매개변수의 최적화 작업이 선결되어야

하며, 그 모델에서 취하고 있는 매개변수 추정방법의 특징과 제한사항들은 선택과정에서 신중하게 고려되어야 한다.

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 Gupta 와 Tanji(1976)은 이질층들로 구성된 지하수체계에 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 지하수 유동에 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 이용하기에는 많은 어려움을 안고 있는 실정이다. 또한, 현재까지 현장 적용성을 최우선으로 하는 단순하고 간편한 한국형 지하수 해석 프로그램의 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.

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

여기서,  $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$ ,  $K_{zz}$ 는  $x$ ,  $y$ ,  $z$  좌표축에 따른 투수계수이며,  $h$ 는 수두(potential meteric 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.

식 (1)은 대수층 시스템의 경계에서의 흐름이나 수두조건에 대한 설명, 그리고 초기수두조건에 대한 설명 외에도 지하수 흐름 시스템의 수학적 표현 등으로 구성되어지며, 식 (1)의 해는 시간과 공간에 대한  $h$ 의 도함수가 식 (1)로 치환될 때 초기조건과 경계조건을 만족시키는  $h(x, y, z, t)$ 의 대수적인 형태로 표현된다.

그러나 식 (1)의 해석적 해는 거의 불가능하므로 근사해를 얻기 위하여는 매우 다양한 수치적 기법들이 적용되어야만 한다. 그러한 접근 중의 하나가 유한차분법으로서, 식 (1)로 묘사되는 연속시스템은 공간과 시간에서의 불연속 점들(혹은 별개의 점들)의 유한집합에 의해 교체되고 부분 도함수들은 이러한 점들의 수두값의 차로부터 계산된 항들로 교체된다. 그 과정은 연속적인 선형 대수 차분방정식의 시스템으로 도입하게 되며 그들의 해는 특정 시간과 점에서의 수두값을 제공한다. 이러한 값들은 흐름의 편미분방정식의 해석적 해에 의해 주어지게 되는 시변계적인 수두분포에 대한 근사치를

구성한다.

한편, 식(1)을 완전음해법으로 차분화하면 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & K_{xx\ i, k+1/2, k} \cdot (h_{i, j+l, k} - h_{i, j, k}) / \Delta x_j^2 \\
 & - K_{xx\ i, j-1/2, k} \cdot (h_{i, j, k} - h_{i, j-l, k}) / \Delta x_j^2 \\
 & + K_{yy\ i+1/2, j, k} \cdot (h_{i+l, j, k} - h_{i, j, k}) / \Delta y_i^2 \\
 & - K_{yy\ i-1/2, j, k} \cdot (h_{i, j, k} - h_{i-l, j, k}) / \Delta y_i^2 \\
 & + K_{zz\ i, j, k+1/2} \cdot (h_{i, j, k+1} - h_{i, j, k}) / \Delta z_k^2 \\
 & - K_{zz\ i, j, k-1/2} \cdot (h_{i, j, k} - h_{i, j, k-1}) / \Delta z_k^2 \\
 & - W_{i, j, k} = S_{s\ i, j, k} \cdot (h_{i, j, k} - h_{i, j, k}) / \Delta t \quad (2)
 \end{aligned}$$

여기서  $\Delta x_j$ ,  $\Delta y_i$  및  $\Delta z_k$ 는 각각 x(j), y(i), z(k) 격자점간의 간격이고  $h_{ijk}$ 는 수리수두의 계산치이며  $h_{i, j, k}$ 는 한 단계 전의 수리수두이고  $\Delta t$ 는 시간간격, i, j, k는 각각 y, x, z 좌표의 지수이다. 여기서 식 (2)를 정리하여 재배열하면 다음 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned}
 & Z_{i, j, k} h_{i, j, k-1} + B_{i, j, k} h_{i-l, j, k} \\
 & + D_{i, j, k} h_{i, j-l, k} + E_{i, j, k} h_{i, j, k} + F_{i, j, k} h_{i, j+l, k} \\
 & + H_{i, j, k} h_{i+l, k} + S_{s\ i, j, k} h_{i, j, k+1} = Q_{i, j, k} \quad (3)
 \end{aligned}$$

여기서,

$$\begin{aligned}
 Z_{i, j, k} &= 2K_{zz\ i, j, k} \cdot K_{zz\ i, j, k-1} \\
 &/ (K_{zz\ i, j, k} \Delta Z_{k-1} + K_{zz\ i, j, k-1} \Delta Z_k) / \Delta z_k \\
 B_{i, j, k} &= 2K_{yy\ i, j, k} \cdot K_{yy\ i-l, j, k} \\
 &/ (K_{yy\ i, j, k} \Delta y_{i-1} + K_{yy\ i-l, j, k} \Delta y_i) / \Delta y_i \\
 D_{i, j, k} &= 2K_{xx\ i, j, k} \cdot K_{xx\ i, j-l, k} \\
 &/ (K_{xx\ i, j, k} \Delta x_{j-1} + K_{xx\ i, j-l, k} \Delta x_j) / \Delta x_j \\
 F_{i, j, k} &= 2K_{xx\ i, j, k} \cdot K_{xx\ i, j+l, k} \\
 &/ (K_{xx\ i, j, k} \Delta Z_{j+1} + K_{xx\ i, j+l, k} \Delta Z_j) / \Delta x_j \\
 H_{i, j, k} &= 2K_{yy\ i, j, k} \cdot K_{yy\ i-i, j, k} \\
 &/ (K_{yy\ i, j, k} \Delta y_{i+1} + K_{yy\ i+l, j, k} \Delta y_i) / \Delta y_i \\
 S_{s\ i, j, k} &= 2K_{zz\ i, j, k+1} \cdot K_{zz\ i, j, k} \\
 &/ (K_{zz\ i, j, k} \Delta z_{k+1} + K_{zz\ i, j, k} \Delta z_k) / \Delta z_k
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_{i, j, k} &= -(B_{i, j, k} + D_{i, j, k} + F_{i, j, k} + H_{i, j, k} \\
 &+ S_{s\ i, j, k} + Z_{i, j, k} + S_{s\ i, j, k} / \Delta t) \\
 Q_{i, j, k} &= W_{i, j, k} - (S_{s\ i, j, k} / \Delta t) h_{i, j, k}
 \end{aligned}$$

따라서, 격자내 각 변수두 셀(cell)에 대한 식을 매트릭스 형태로 나타내면 다음의 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$[A] \{h\} = \{q\} \quad (4)$$

이때, [A]는 격자내 수두계수에 대한 매트릭스이며, {h}는 격자내 모든 교점에 대해 시간 간격 m의 마지막 수두벡터값이고 {q}는 격자의 모든 교점에 대한 현 조건들의 벡터값이다. 한편, 계산의 가속화를 위하여 조정행렬 [N]을 고려하여 양변에 [N]{h}를 더하면 식 (4)는 다음 식 (5)와 같다.

$$[A+N] \{h\} = \{q\} + [N] \{h\} \quad (5)$$

여기서, [A+N]의 인자가 구해져 있음으로 식 (5)에서 우변이 기지이면 해를 얻을 수 있으며, 식 (5)를 반복식으로 나타내면, 다음 식(6)과 같다.

$$[A+N] \{h\}_n = \{q\} + [N] \{h\}_{n-1} \quad (6)$$

이때, n은 반복지수이고 계산 중의 반올림 오차를 줄여 정도를 유지하기 위하여 식 (6)의 우변에  $[A+N] \{h\}_{n-1}$ 을 더하고 뺄으로써 잉여형으로 표시하면 다음 식(7)과 같이 표시된다.

$$[A+N] \{\xi\}_n = \{R\}_{n-1} \quad (7)$$

여기서,  $\{\xi\} = \{h\}^{n-1}$ ,  $\{R\}^{n-1} = \{q\} - [A] \{h\}^{n-1}$ 이며, 수속판별계수( $\varepsilon$ )보다  $\xi_{max}^{n-1}$  적을 때 해가 얻어지며, 식 (7)이 지하수유동해석에 있어 가장 빠른 수렴률을 가져오는 기법 중의 하나인 Strongly Implicit Procedure(SIP)의 기본방정식이다.

## 2.2 모델의 구조

본 연구에서 개발한 모델은 적용성이 검증된 대표적인 3차원 지하수유동해석프로그램인 MODFLOW 모델을 기초로 하였다. 하지만 MODFLOW의 경우

표 1. 본 분석에 이용한 유한차분모델(3-DFM)에 포함된 팩키지

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 충번호(행·열번호, 양수량)
RECH	강우 유입층 조건, Cell 별 유입량
RIVER	하천 Cell 수, Cell 조건(충번호, 하천수면표고, 하상 특수계수, 하상표고)
EVAP	증발산층 조건, 최대 증발산율, Cell 별 증발산 표고
SIP	연산법(접촉면 계산법) -최대 반복횟수, 수렴허용오차

에는 그 사용이 매우 복잡할 뿐만 아니라 매개변수들의 이해와 적용성에 있어 실무자들이 쉽게 이용하기에는 많은 어려움을 안고 있는 설정이다. 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 기

간은 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 팩키지들에 대한 개략적인 설명이다. 이들 중 중요한 두개의 범주에 속하는 팩키지들이 흐름성분 팩키지(the Flow Component Packages)와 연산 팩키지(the Solver Packages)이며, 흐름성분 팩키지에는 스트레스 팩키지(Stress Package)가 포함된다. 흐름 성분 팩키지는 각각의 셀(cell)에 대하여 유한차분 방정식의 계수를 계산하는 역할을 수행하

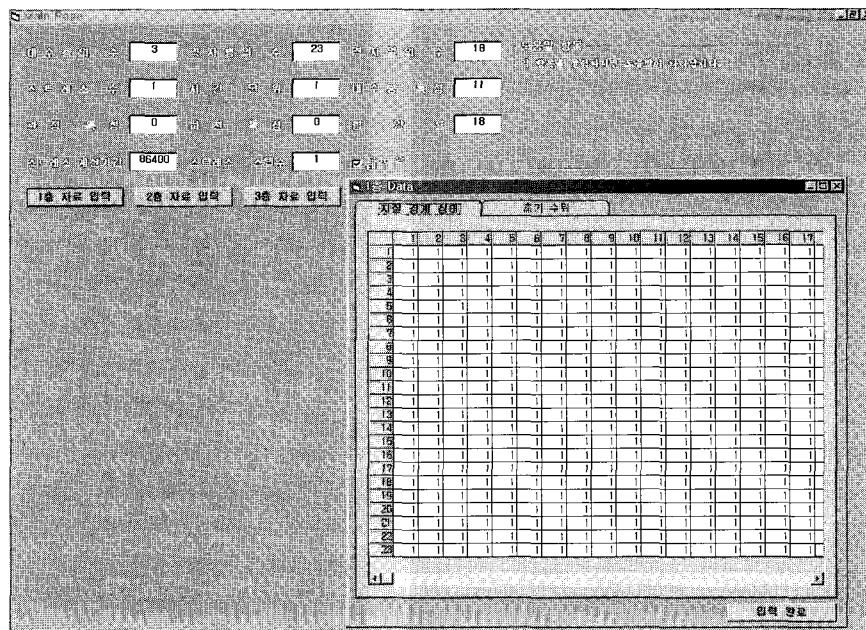


그림 1. 3-DFM모델의 Input Sheet

고 연산 팩키지는 유한차분 방정식 시스템의 해를 구하기 위한 알고리즘을 수행한다.

본 연구에서 개발된 3-DFM모델은 입력변수 자료에 대한 설정이 모두 한글로 구성되어 있으며, 각 입력자료에 대해 도움말을 설정하여 두었다. 따라

서, 입력변수에 대해서는 아이콘을 입력변수에 두면 각각에 대한 상세한 정보를 알 수 있도록 설계하였다. 또한, 각 지층의 지질경계 상태나 초기수위 자료를 지정할 때는 work sheet상에서 간단히 지정할 수 있도록 설계되어 있다. 각 대수층의 특성과

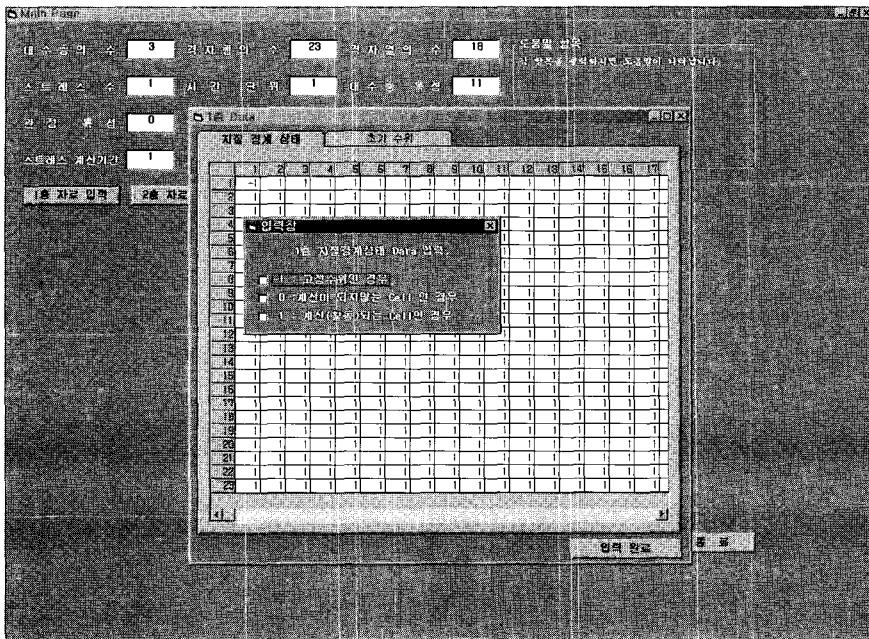


그림 2. 3-DFM모델에서 지질경계상태에 대한 입력 예

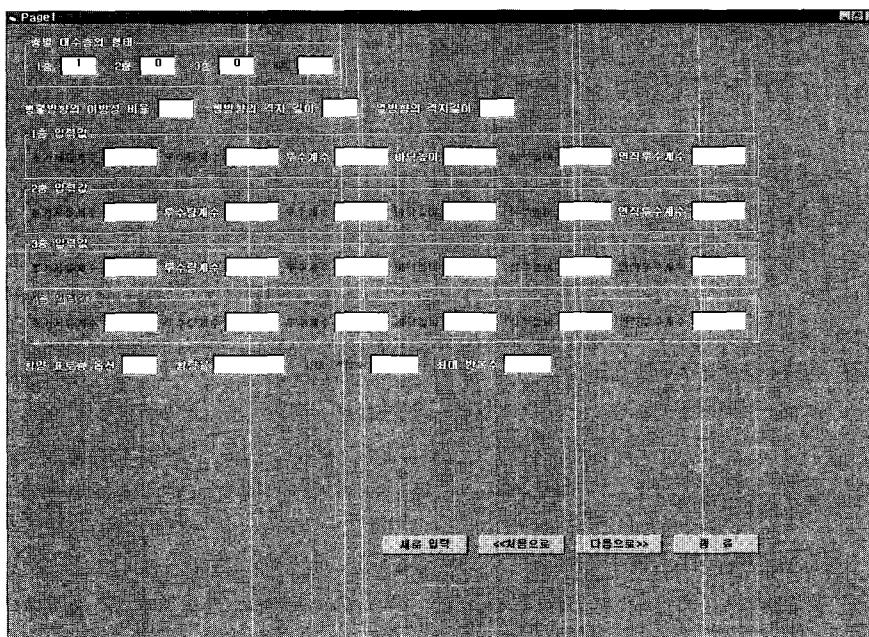


그림 3. 각 대수층의 특성과 수리매개변수 입력 예

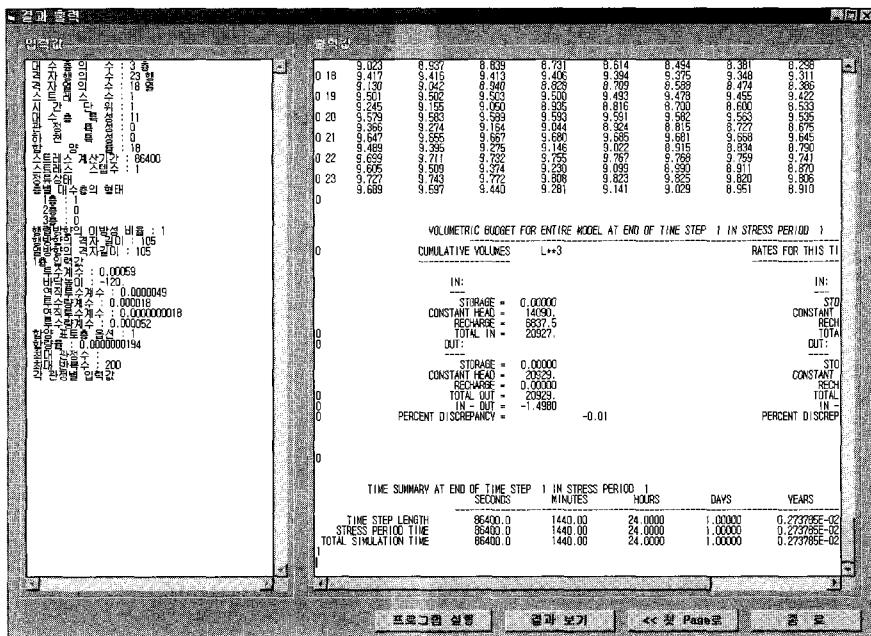


그림 4. 분석 입력자료와 결과에 대한 출력결과

더불어 정류 및 부정류 해석시에 각 매개변수들에 대한 입력설정은 기준 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. 다음의 그림 1~4는 본 연구에서 설계한 3-DFM모델을 실행하는 예를 설명한 것이다.

### 3. 적용 및 분석

#### 3.1 지형 및 지질

본 연구유역의 지역 및 유역특성 분석을 위하여 현지답사 및 관련자료를 수집하였으며, 본 조사지역을 포함한 북체주군 구좌읍 세화리, 송당리유역을 대상으로 광범위하게 지하수 유동과 관련된 자료를 수집하고 이 지역의 자연환경과 실태를 면밀히 파악하고 분석토록 하였다. MODFLOW 및 3-DFM모델을 적용할 연구대상유역인 세화리 및 송당리 지역의 조사대상 면적은 약 4.56Km<sup>2</sup>이다. 연구 유역의 지형 및 지질분포를 보면 낮은 경사의 용암지대가 널리 분포되어 있고 동측에서 한라산 중심을 향하여 서쪽으로 갈수록 신생대의 용암이 분출되어 있고 각각의 용암 경계부분에서는 단계

형태의 지형으로 서로 상이한 용암들로 형성되어 있다. 또한 EL. 178~215m 사이의 완만한 용암대지위에 여러 분화구들이 용기되어 있어 지형적 식별이 가능하고 EL. 405m의 높은 오름과 EL. 382m의 월류봉, 284m의 뚝오름 등이 주변에 발달되어 있다. 본 분석유역의 지질은 비현정질현무암이 주종을 이루며 분포하고 있다.

#### 3.2 격자망 설정

본 연구에서는 조사지역의 전반적인 지하수위분포 및 유동경향을 구하기 위하여 수리모델링을 수행하였다. 조사지역 일대의 수리지질학적인 특성을 고려하여 유역을 구분하고 그 유역을 포함하는 격자망을 구성하였으며, 지하수 유동해석을 위해 사용된 분석유역의 격자망 구성 및 정호의 위치는 다음의 그림 5에 나타내었다.

먼저, 정류상태 해석을 위하여 분석에 이용된 관측정의 제원은 한국자원연구소의 제주지구 온천자원조사보고서(1992. 8)를 인용하였으며, 이에 대한 결과는 표 2와 같다. 본 분석에 이용된 관정은 총 4개 지점으로서 C3 및 C4지점을 제외하면 C1과 C2는 E.L. 200m이하 지점에 위치하고 있다. 그리고 각 관측공의 자연 지하수위는 거의 E.L. 10m이하 지점에서 관측되었으며, C3지점이 E.L. 9.32m으로

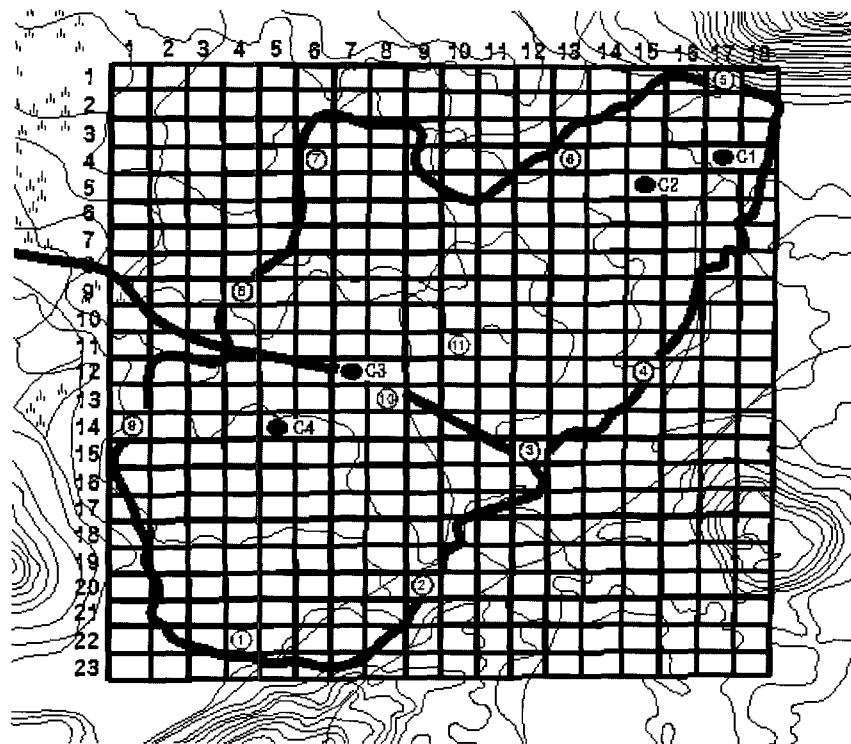


그림 5. 분석유역의 격자망에 따른 관측정 및 양수정호의 위치도

가장 높은 수치를 보이고 있고 C1지점이 E.L. 8.69m으로 가장 낮은 수치로 조사되었다.

다음으로, 모의발생을 위한 강우의 침투는 갈 수기 및 풍수기자를 고려하지 않고 모델링의 주목적인 양수에 따른 지하수 유동변화와 적정양수량 산정을 파악하기 위하여 일반적으로 지하수 함양에 직접적인 영향을 미치는 강우, 중발산 하천유입 등을 고려하여 성산포와 대정의 평균강우량(1961~2000)에 대한 평균침투량을 고려한 1.67mm/day를 분석에 적용하였다. 또한, 비산출율은 0.2를 적용하였으며, 양수에 따른 지하수두 변동을 해석하기 위한 지층의 구분은 지질주상도를 참고하여 대

상유역의 지층을 E.L. -300m까지 3층으로 구분하여 적용하였다.

본 연구유역에 적용된 3차원 지하수유동 해석을 위한 유한차분망의 경우에는 조사지역 주변의 분포 암석을 파악하여 각 지층의 지질특성에 맞는 수리 인자를 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 격자 요소는 18×23개, 총격자수는 897개이고 격자간격은 105m로 구성하였으며 이용된 도면의 축척은 1 : 3,000이다.

표 2. 각 모델에 적용된 관정현황

관정	위치	고도 (E.L.m)	관측 수위 (E.L.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)

### 3.3 경계조건 및 입력자료

본 연구유역의 지하수 유동해석을 위한 기본모델은 본 연구에서 제시한 MODFLOW 및 3-DFM 모델이며, 경계조건 및 모의발생을 통한 모델의 분석과 매개변수 추정은 다음과 같다. 먼저, 본 조사 유역은 강, 댐 등의 특별한 경계조건이 없으므로 General Head-Boundary를 설정하지 않았고 분수령을 최대한 고려하여 경계를 설정하였으며 격자경계는 지하수 분리선(Water Devide Line)으로서 비공급 경계로 지정하였다. 그리고 격자경계를 벗어나는 지역은 양수량 분석에 있어 최저조건으로 고려하기 위해 분석유역의 자하수 유동에는 직접적으로 영향을 미치지 않는 것으로 설정하였고 유역 내의 격자는 Active Cell로 지정하였다. 다음으로, 양수량에 따른 삼차원 비정상류 해석을 위한 초기 조건은 정수두 조건으로 하였다. 이에 따른 경계조

건으로 지하수면을 자유수면 경계로 하였으며 측면 및 하부경계는 불투수경계로 하였다. MODFLOW 모델 및 3-DFM모델에 적용할 투수계수(K) 및 저류계수(S)는 한국자원연구소(1992) 및 최윤영(1997)에 의한 자료를 인용하였으며 최상부층인 1층의 경우  $5.9 \times 10^{-2}$  cm/sec 및  $1.428 \times 10^{-4}$  cm/sec이고 최하부층인 3층의 경우에는  $5.20 \times 10^{-5}$  cm/sec 및  $1.409 \times 10^{-4}$  cm/sec이다.

### 3.4 지하수 유동분석

#### 1) 정류상태에 따른 지하수 유동분석

본 연구에서 지하수 해석을 위하여 3-DFM모델을 적용하였으며, 분석결과는 모델에서 계산된 지하수두와 관측수두를 비교할 수 있도록 정호에 따른 수두분포표를 작성하여 비교하였다. 먼저, 표 3에 나타난 바와 같이 세화리와 송당리 분석유역의

표 3. 관측치와 계산치에 대한 지하수두 비교

공 번	위 치	고도 (EL.m)	자연수위 (EL.m)	분석 수위 (EL.m)		지하수두 상대오차
				MODFLOW	3-DFM	
C1	구좌읍 세화리 산 38번지	177.99	8.69	8.216	8.215	0.05
C2	구좌읍 세화리 산 38번지	186.26	8.98	8.322	8.321	0.07
C3	구좌읍 세화리 산 38번지	203.44	9.32	8.803	8.801	0.05
C4	구좌읍 세화리 산 38번지	210.44	8.73	9.014	9.010	0.03

표 4. 정류상태 하에서의 물수지 분석결과(3-DFM모델)

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN STRESS PERIOD 1	
CUMULATIVE VOLUMES L**3 RATES FOR THIS TIME STEP L**3/T	
IN:	IN:
---	---
STORAGE = 0.00000	STORAGE = 0.00000
CONSTANT HEAD = 14090.	CONSTANT HEAD = 0.16308
RECHARGE = 6837.5	RECHARGE = 0.79137E-01
TOTAL IN = 20927.	TOTAL IN = 0.24221
OUT:	OUT:
---	---
STORAGE = 0.00000	STORAGE = 0.00000
CONSTANT HEAD = 20929.	CONSTANT HEAD = 0.24223
RECHARGE = 0.00000	RECHARGE = 0.00000
TOTAL OUT = 20929.	TOTAL OUT = 0.24223
IN - OUT = -1.4980	IN - OUT = -0.17330E-04
PERCENT DISCREPANCY = -0.01	PERCENT DISCREPANCY = -0.01

관측치와 계산된 지하수두와의 상대오차백분율(E.P.)을 비교 검토한 바, 0.03~0.07의 범위를 나타내어 관측치와 거의 일치하였다. 다음으로, 모의발생 결과에 있어 관측치와 계산치가 가장 큰 차이를 나타내고 있는 지점은 C2지점으로서 상대오차 백분율이 7%의 값을 나타내었고 가장 작은 차이를 보이고 있는 지점은 C4지점으로서 3%의 값을 나타내었다. 따라서 전절에서 나타낸 각 매개변수를 입력자료로 이용하여 모의발생한 지하수두 계산치는 현장에서 실측한 지하수두와 매우 일치하였다. 또한 현재 지하수계에서의 지하수두와 모델에서 분석된 지하수두를 유사하게 일치시킨 Calibration과정을 거친 후 각종 Stress에 따른 정류 및 천이상태 하에서 시뮬레이션을 실시하는 Historical Matching에서도 Influx = Outflux이어야 하는데 정류상태하에서의 물수지 분석결과(표 4)에 대한 불일치척도가 거의 0%로서 유출량과 유입량이 동일하게 분석되었다.

## 2) 부정류 상태에 따른 지하수 유동분석

본 연구에서 3-DFM모델을 이용한 5일, 10일, 30일, 90일 양수경과 후에 따른 지하수 유동시스템 분석결과를 MODFLOW모델에서 계산된 지하수두 및 관측수두와 비교할 수 있도록 정호 인근과 정호 외곽에 따른 수두분포표를 작성하였다. 본 분석에서는 표 5에 나타낸 바와 같이 ①, ③, ⑥, ⑧ 및 ⑪지점의 정호를 C1, C3, C6, C8과 C11정호로 표시하고 정호의 상호간섭이 가장 적다고 판단되는 5개 정호를 선정하였으며 분석유역에서 1,000t/day를 양수할 경우에 대한 지하수 유동변화, 수두저하 변동 및 안정수위 등을 분석하기 위해 모의발생을 실시하였다.

먼저, 표 6에 나타난 바와 같이 정호 인근의 관측치와 계산된 지하수두의 수두차는 Grid I4×J14일 경우에 1.32~4.74m의 범위로 수두저하가 나타났으며 Grid I10×J4일 경우는 1.42~5.15m의 범위로 수두가 저하되었다. 그리고 Grid I12×J10일 경우에 1.52~5.15m의 범위로 수두저하가 나타났으며 Grid

표 5. 양수정의 위치 및 재원

양수 정호	위 치		양수량(t/day)	비 고
	Grid I (행)	Grid J (열)		
① → C1	22	4	1,000	-
③ → C3	15	12	1,000	-
⑥ → C6	4	13	1,000	-
⑧ → C8	9	4	1,000	-
⑪ → C11	11	10	1,000	-
합 계			5,000	

표 6. 관측치와 계산치에 대한 지하수두 비교(정호인근, 5일~90일 양수경과 후)

(단위 : EL.m)

구 분			양 수 기 간										비 고	
행	열	정류	1일		5일		10일		30일		90일			
			3-DFM	MODF.	3-DFM	MODF.	3-DFM	MODF.	3-DFM	MODF.	3-DFM	MODF.		
4	14	8.112	3.372	3.376	5.713	5.717	6.241	6.240	6.638	6.641	6.781	6.786		
9	3	8.638	3.523	3.527	6.064	6.066	6.630	6.633	7.064	7.069	7.223	7.227		
10	4	8.705	3.554	3.557	6.112	6.118	6.695	6.691	7.126	7.130	7.287	7.289		
12	10	8.667	3.512	3.517	6.005	6.009	6.561	6.566	6.997	6.994	7.148	7.149		
15	14	8.571	4.115	4.113	6.728	6.730	7.303	7.307	7.746	7.749	7.905	7.908		
22	5	9.767	4.210	4.213	7.016	7.013	7.631	7.635	8.114	8.111	8.286	8.283		

표 7. 관측치와 계산치에 대한 지하수두 비교(정호외곽, 5일~90일 양수경과 후)

(단위 : EL.m)

구 분			양 수 기 간										비 고	
행	열	정류	1일		5일		10일		30일		90일			
			3-DFM	MODF.	3-DFM	MODF.	3-DFM	MODF.	3-DFM	MODF.	3-DFM	MODF.		
2	4	8.132	4.212	4.210	6.833	6.833	7.403	7.407	7.844	7.847	8.002	8.005		
7	16	8.125	4.181	4.183	6.765	6.766	7.332	7.330	7.765	7.761	7.914	7.916		
10	16	8.190	4.225	4.222	6.843	6.847	7.423	7.420	7.853	7.859	8.016	8.016		
14	3	9.052	4.555	4.559	7.496	7.499	8.140	8.142	8.636	8.633	8.813	8.810		
17	10	9.096	4.546	4.543	7.401	7.404	8.034	8.030	8.505	8.508	8.680	8.681		
19	15	8.816	4.535	4.534	7.375	7.377	7.997	7.999	8.478	8.474	8.647	8.645		

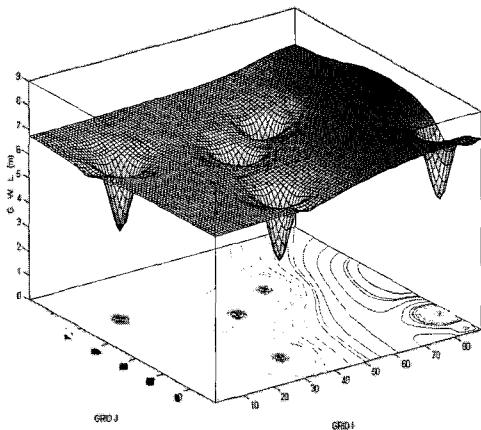
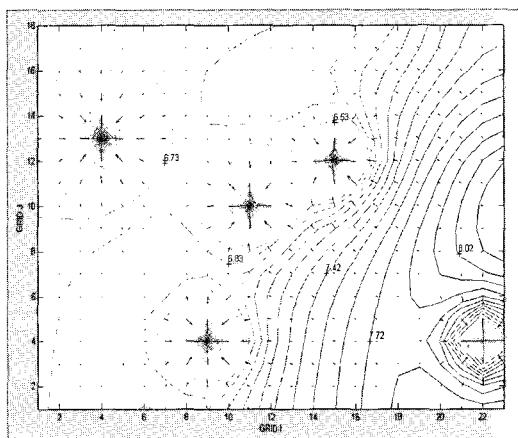


그림 6. 분석에 의한 지하등수도 분포도(5일 경과 후)

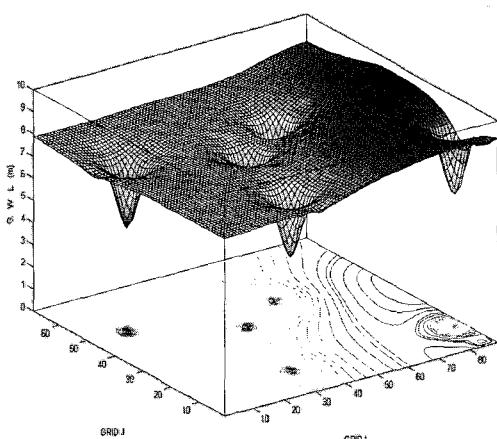
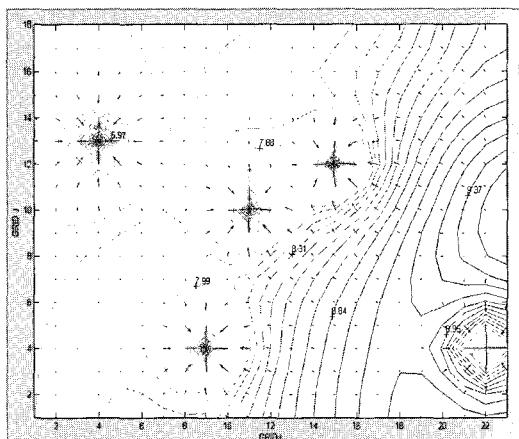


그림 7. 분석에 의한 지하등수도 분포도(90일 경과 후)

I22×J5일 경우는 1.48~5.55m의 범위로 수두가 저하되었다. 다음으로, 표 7에 나타난 바와 같이 정호 외곽의 관측치와 계산된 지하수두의 수두차는 Grid I2×J4일 경우에 0.13~3.92m의 범위로 수두가 저하되었으며, Grid I14×J3일 경우는 0.24~4.49m의 범위로 수두저하가 나타났고 Grid I19×J15일 경우에 0.17~4.28m의 범위로 수두가 저하되었다. 이와 같은 분석결과에서 MODFLOW모델과 3-DFM모델은 거의 유사한 결과치를 나타내었다. 다음의 그림 6 및 7은 분석에 의한 지하수두 분포도를 2차원 및 3차원으로 도시한 것이다.

### 3.5 결과 및 고찰

본 연구에서는 한국형 지하수해석 프로그램(3-DFM)의 개발에 대한 현장 적용성을 검토하기 위하여 실제 유역인 제주도 세화리 및 송당리 일대를 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. 그리고 분석유역의 양수 전의 모의발생분석 결과를 이용하여 지하등수두분포와 유속벡터를 산정한 결과 지하수 유동분포는 높은 오름과 문석이오름 등에서 월랑봉, 용눈이오름 및 손자봉 등 각 방향으로 고르게 유출되고 있는 것으로 분석되었다. 마지막으로, 단기간 양수경과 후의 유동변화에서 2차원 유속벡터를 보면 상류유역(높은 오름, 문석이 오름 등)의 지하수 유동분포가 각 정호를 기점으로 유량이 집중되고 있으며 하류지점(월랑봉, 용눈이 오름 등)에서는 상류유역보다 우물의 영향권이 다소 크게 작용하고 있는 것으로 분석되었다. 그리고 3차원 지하등수두도에 나타난 바와 같이 정호외곽보다 정호 인근을 중심으로 수두경사가 비교적 급한 것으로 나타났다. 장기간 양수경과 후의 지하수두 및 유동경로에서 2차원 유속벡터를 보면 단기간 양수일 때와 같이 상류유역의 지하수 유동분포가 각 정호를 기점으로 유량이 집중되고 있으며 하류지점에서는 상류유역보다 우물의 영향권이 크게 작용하고 있는 것으로 분석되었으나 전

체적인 지하수두는 단기간일 경우 보다 많이 상승한 것을 알 수 있다. 그리고 3차원 지하등수두도에 나타난 바와 같이 정호 및 정호인근을 중심으로 지하수두가 많이 상승함으로서 동수경사가 점차 안정화되고 있는 것으로 나타났다. 또한, 3차원 등수두 분포를 보면 단기간 양수경과 후보다 상류유역의 지하수 동수구배는 상당히 완만한 경사를 이루는 것으로 분석되었으며 이러한 결과는 MODFLOW모델과 거의 일치하는 것으로 나타났다.

## 4. 결론

실무자를 위한 이해하기 쉽고 간편한 영향원 분석 프로그램 개발은 실제적으로 많은 어려움을 내포하고 있는 것이 사실이다. 하지만 실무자가 쉽게 접근할 수 있는 현장 적용성을 최우선으로 하는 영향원 프로그램 개발은 무엇보다 시급한 과제인 것 만은 누구도 부인할 수 없다. 본 연구에서는 이러한 프로그램 구축을 위하여 한국형 3-DFM모델을 개발하였으며, 이에 대한 현장적용 및 모델간의 분석 결과에 대한 비교검토는 다음과 같다.

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 기준의 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 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. 그리고 분석유역의 양수 전의 모의발생분석 결과를 이용하여 지하등수두분포와 유속벡터를 산정한 결

과 지하수 유동분포는 높은오름과 문석이오름 등에서 월랑봉, 용눈이오름 및 손자봉 등 각 방향으로 고르게 유출되고 있는 것으로 분석되었다.

3) 셀(Grid I 15~23 - Grid J 10~18) 지점의 유출이 셀(Grid I 1~14 - Grid J 1~9)지점보다 유출이 활발하게 일어나고 있는 것으로 나타났으며 3차원 등수두분포를 보면 상류에서 하류로 완만한 동수구배를 이루고 있는 것으로 분석되었다. 또한, 이러한 분석결과는 MODFLOW모델과 비교할 때 일치된 결과를 나타내었다.

하지만 한국형 3-DFM모델은 실무자들이 현장 적용의 편이성 및 적용성에 있어 입력 변수값들의 정확한 산정을 위해 다양한 자료구축과 출력결과의 다양한 그래프화 등의 개선해야 할 부분이 많이 산재해 있으며 향후 이러한 미비점을 중점적으로 보완 개선해야 할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

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

### 참 고 문 헌

- 1) Hubbert, M.K.(1940), The Theory of Groundwater Motion, *J. Geol.*, pp. 48-56.
- 2) Toth, J.(1963), A Theoretical Analysis of Groundwater Flow in Small Drainage Basins, *j. Geophy. Res.*, 5, pp. 512-518.
- 3) 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.
- 4) Freeze, R. A.(1971), Three-dimensional, transient, saturated-unsaturated flow in a ground-water basin. *Water Resour. Res.*, pp. 7, 774-786.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 김영기(1976), 반야월층의 지하수 유동에 관한 연구, *공간지질학회 논문집*, 9(4), pp. 66-78.
- 9) 배상근(1992), 대구지역의 지하수 유동계의 해석, 계명대학교 산업기술연구소 논문보고집, 제15권 2집, pp. 73-86.
- 10) 한국자원연구소(1992), 제주지구 온천자원조사 보고서, pp. 136-214.
- 11) 민병형(1994), MODFLOW 모형을 이용한 부곡 온천지역 지하수 유동해석, *한국수문학회지* 1994, 03 v.27, n.1, pp.79-88.
- 12) 최윤영(1997), 지하수 흐름의 유동시스템 해석, 영남대학교 박사논문, pp. 55-57.