

화산도에서 유한차분법을 이용한 지하수 유동해석 Groundwater Flow Analysis Using Finite Difference Method in Volcanic Island

최 윤 영* / 이 순 탁**
Choi, YunYoung / Lee SoonTak

Abstract

In this study, MODFLOW model is used to analyze the groundwater flow system of Seoguipo area in Cheju island, The final parameters of permeability coefficient and storage coefficient of target area can be obtained by trial and error method using the measured data of pumping rate as initial values. And it is found that the applicability for groundwater flow system is reflected well from the simulation result of the model. Seoguipo area spring water is thought to appear by relatively stable groundwater recharge below EL. 400m according to head distribution through the analysis of observed data considering topographic and geological characteristics, Lee's study(1996), and the simulation result. Also it is known that point II, III, and VI show relatively large velocity vectors, and groundwater flows through the movement path which is distributed in various directions of I, II, III, IV, V, VI, and VII form the result of velocity vector analysis using head distribution result values to analyze the groundwater flow path under unsteady flow condition.

keywords : MODFLOW, finite difference method, velocity vector, groundwater movement, Cheju island

요 지

본 연구에서는 제주도 서귀포유역의 지하수 유동시스템 해석을 위해 MODFLOW모형을 이용하였으며 양수량 측정자료를 통한 투수량계수 및 저류계수를 초기치로 선정하여 시행착오법을 통한 대상유역의 최종 매개변수를 얻을 수 있었고 모델의 모의발생을 한 결과 지하수유동시스템에 대한 적용성이 잘 반영됨을 알 수 있었다. 서귀포 유역은 지형지질을 고려한 관측치 해석, 이(1996)의 연구결과 및 모의발생을 통한 결과로 볼 때 지하수두 분포는 표고 400m이내에서 안정된 지하수 함양에 의한 용출이 이루어지고 있는 것으로 판단된다. 또한, 부정류상 태하에서 지하수 유동경로 해석을 위하여 수두분포의 결과치를 이용한 유속벡터 분석을 실시한 결과 유속벡터가 상대적으로 크게 나타난 지역은 II, III 및 VI지점이었으며 지하수 유동경로는 I, II, III, IV, V, VI 및 VII지점의 각 방향으로 분산되어 유출되고 있음을 알 수 있었다.

핵심용어 : MODFLOW, 유한차분법, 유속벡터, 지하수유동, 제주도

* 경북도립대학 토목환경학과 전임강사

Full-Time Lecturer, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Kyungbuk Provincial College, Yecheon, Kyungbuk 757-800, Korea(E-mail : yychoi@mail.kyongdo.ac.kr)

** 영남대학교 토목도시공학부 교수

Prof., School of Civil and Urban Engineering, Yeungnam University, Kyungsan, Kyungbuk 712-749, Korea

1. 서 론

수자원에 있어 지하수를 관리, 활용하고 이를 수행하기 위한 계획을 수립하는데 있어서 이에 내포된 수문학적 불확실성을 제거하기 위해서는 대수층내에 발생하는 지형 및 지질 특성인자들의 정확한 상호 관련성의 규명과 이를 통한 함양-유동과정의 정확한 해석과 예측이 필요하다. 그리고 화산도서유역과 같은 다공질 매체에서의 지하수 유동특성을 분석하기 위해서는 정확한 지형 및 지질 특성을 파악하고 수리학적 특성 등에 관한 자료를 토대로 초기 매개변수 등을 추정하여 유동시스템 해석을 통한 정량적 분석과 적용성을 파악함으로써 지하수의 관리 및 이용을 극대화할 수 있다.

특히, 한반도 남쪽에 위치한 제주도의 경우는 국내에서 지하수개발이 가장 활발한 대표적인 지역이며, 용수이용량의 대부분이 관정과 용천수 등에 의존하고 있는 실정이므로 향후 급증할 것으로 예상되는 용수수요를 충족시키기 위해서는 대규모의 지하수 개발이 필요하고 지하수에 의한 안정적인 용수확보를 위해서 지하수에 대한 정확한 조사 분석이 따라야 할 것이다.

지하수유동시스템에 있어서 시스템을 해석하고 유동과정을 모델화 하기 위한 연구과정을 살펴보면, 국외의 연구로서 Hubbert(1940)가 지하수 유동이론을 모델적으로 해석한 것이 시초이며, Freeze와 Witherspoon(1966)은 수학적 모델에 의한 3차원적, 비균질적, 이방성 유역에 있어서의 정상지하수 흐름에 대해 설명하였다. 이 후 Freeze(1971)은 포화-불포화 천이 흐름의 취급에 관한 3차원 유한차분법을 이용한 모델을 개발하였고, 이 모델은 소규모의 가상(hypothetical)유역에 적용되었다. Kuiper(1975), Gupta와 Tanji(1976), Gupta 등(1984)은 이질층들로 구성된 지하수체제에 관한 3차원 유한요소법을 이용한 모델을 개발하였으며 정상류에서 3차원 모델의 응용성을 개선시켰다. 이 후에 Narasimhan과 Witherspoon(1976)은 3차원 지하수 흐름체제에 대한 유한차분방정식의 적용을 발전시켰고 Wang과 Anderson(1982)도 유한차분 및 유한요소법에 의한 지하수 모델링에 관한 활발한 연구를 하였다.

한편, 국내에 있어서의 지하수 유동시스템에 관한 연구로는 이문원(1977)의 제주도의 지질과 지하수와의 관계 연구가 있었고, 고병연(1984, 91)의 제주도 지하수 부존형태와 지하수위 변동에 관한 연구 및 정상류

의 대수층에서 이차원 흐름해석에 관한 연구가 있었다. 배상근(1991)의 대구지역 지하수 유동계의 변동은 지하수 개발에 의하여 변화하는 양수 주변지역의 물환경, 특히, 하천수와 지하수의 교류에 대한 변화, 하천유량에 미치는 영향, 지하수의 흐름변화와 지하수위 변동 등을 3차원 유한차분법으로 해석하였다. 그리고 이순탁(1996)은 지하수 수온, 안정동위체, 방사성 동위체 및 지하수 수질 등의 환경추적재(Environmental Tracers)분석에 의한 제주 화산섬에서의 지하수 유동에 관한 연구를 하였으나 아직까지도 도서유역에 대한 광역적인 지하수유동의 수치해석은 미미한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 화산도서유역에 대한 지하수 유동시스템의 수치해석을 위하여 매개변수의 초기치는 지형·지질상태에 크게 지배된다는 가정하에 그 동적 거동을 표현토록 하였으며 적용된 모델들은 다수의 매개변수 등을 포함하게 된다. 본 연구에서 적용된 모델은 유한차분법을 이용한 MODFLOW모델이며, 서귀포유역의 함양량과 초기 매개변수들을 결정하여 모의 발생을 통한 최종 수리상수를 산정하고 지하수두 분포 및 유동경로 등 서귀포지역의 광역적인 지하수 유동시스템을 해석함으로써 향후 분석유역에 대한 지하수 관리 및 이용을 극대화할 수 있도록 하는데 그 목적이 있다.

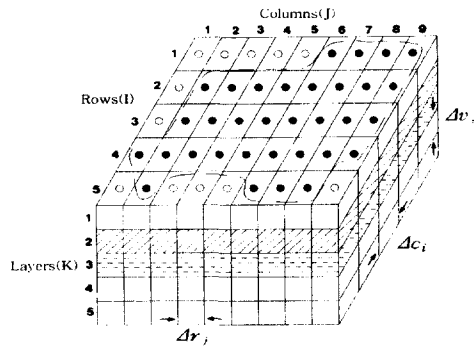
2. 기본이론

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

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

여기서, K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} 는 x , y , z 좌표축에 따른 투수계수이며, h 는 수두, W 는 단위체적당의 체적 flux, S_s 는 비저류율 및 t 는 시간이다.

식 (1)은 대수층 시스템의 경계에서의 흐름이나 수두조건에 대한 설명, 그리고 초기수두조건에 대한 설명 외에도 지하수 유동시스템의 수학적 표현 등으로 구성되어지며, 식 (1)의 해는 시간과 공간에 대한 h 의



----- Aquifer Boundary

- Active Cell
- Inactive Cell

Δr_j Dimension of Cell Along the Row Direction. Subscript(j) Indicates the Number of the Column

Δc_i Dimension of Cell Along the Column Direction. Subscript(i) Indicates the Number of the Row

Δv_k Dimension of Cell Along the Vertical Direction. Subscript(k) Indicates the Number of the Layer

Fig. 1 A discretized hypothetical aquifer system

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 수두값차로부터 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 구성하며 다음의 Fig. 1은 셀 블록(cell block)에 의한 대수층 시스템의 공간적 표현을 도시한 것이다.

3. 적용 및 분석

3.1 지형 및 지질

본 연구에서는 화산도서유역의 지하수 유동해석을 위한 MODFLOW모델의 이론과 알고리즘을 실제 대상유역인 서귀포유역(281.3km²)에 적용하였다. 분석 대상유역인 서귀포 지역은 해수면에 접하여 최고 표고

1,950m까지 지형고도를 가지며, 지형고도 표고0~400m사이의 평탄한 저지대 면적이 총면적의 약 58.03% (163.15km²)를 이루고 있다.

다음의 Fig. 2는 분석대상유역, Fig. 3 및 Fig. 4는 대상유역에서 지형과 지하수두의 평형성에 따른 대수층의 균질성(Gustafsson, 1968)을 파악하기 위하여 유역내의 관측공에 대한 자료를 토대로 경사 및 고도간의 관계를 분석하였으며, 관측공의 지반고와 지하수위 표고 및 지표면의 구배와 지하수면의 구배를 각각 횡축과 종축을 기준으로 도시하여 축사이에 45° 선을 작도하였다. 이 때 모든 관측점들은 선의 우측에 존재하게 되며 45° 선과의 거리는 관정의 깊이를 나타내게 된다.

본 연구대상유역인 제주도의 경우 Fig. 3 및 4에서 보는 바와 같이 각 관측공의 지반고 및 지하수위가 다소 분산되어 있는 것을 알 수 있으며, 이러한 요인들은 서귀포 유역에 있어서 대수층들이 비교적 불균질하다는 것을 반영하고 있다. 한편, 서귀포층은 친해성 퇴적물인 사암, 사질셰일, 셰일 및 용회암질 암석 등으로 구성되어 있으므로 서귀포층 퇴적기에 지반이 불안정한 상태에서 침강과 용기를 수차례 반복했다는 것을 알 수 있다. 그리고 서귀포유역에 대한 전반적인 지질 구조를 살펴보면, 한라산 정상부에서 장석현무암(FB)

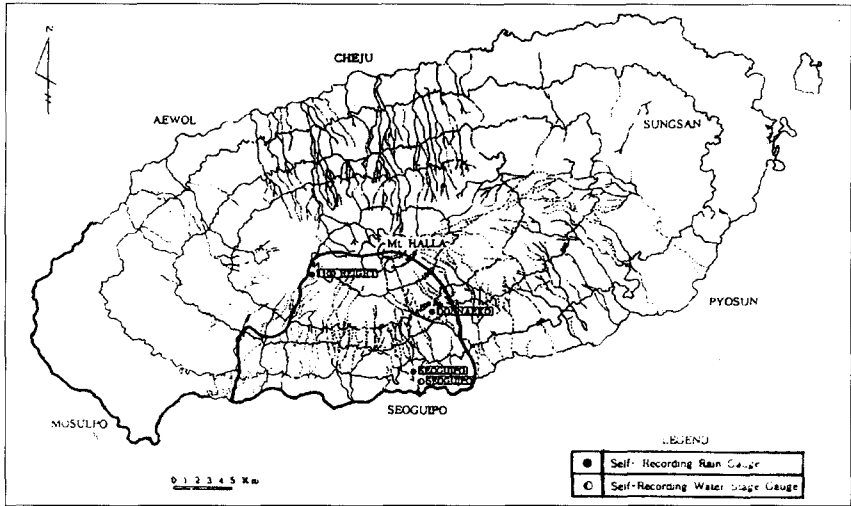


Fig. 2 Study Area

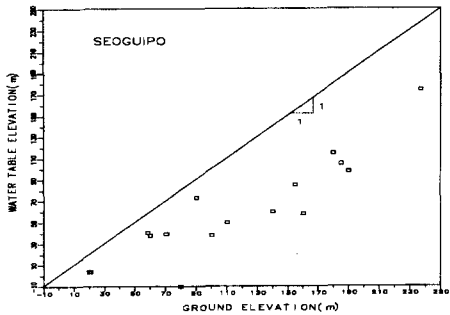


Fig. 3 Relation of Water Table Elevation and Ground Elevation

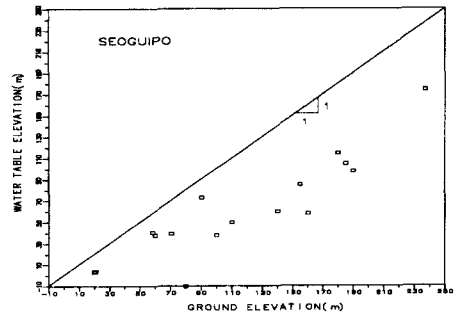


Fig. 4 Relation of Water Table Slope and Ground Slope

이 국지적인 부분을 제외하고 전반적으로 표고 약 800m에서 부터 한라산 정상부까지 존재하고 있으며, 반장석현무암(PFB)이 표고 약 1,400m, 조면암(T)이 표고 약 1,100m, 비현정질현무암(APB)이 표고 약 1,300m 및 반상휘석현무암(PAB)이 표고 약 1,000m 정도 등에서 지질구성을 이루고 있다. 또한, 표고 약 400m지대에서는 국지적인 장석현무암을 제외하면 서귀포(FOB)층이 주종을 이루고 있다. 다음 Fig. 5의 A-A' 및 B-B'는 서귀포유역의 중·횡단에 따른 지형·지질상태를 도시한 것이다.

3.2 경계조건 및 매개변수 추정

본 연구에서 모의발생을 위한 서귀포지역의 경계설정 에 있어서는 동측, 서측 및 북측지역은 분수계를, 남측지역은 해안부를 경계지역으로 설정하였고, 이에 따른 경계조건으로써 상부경계는 일정수두경계, 측면 및 하부경계는 불투수경계로 하였다. 그리고 모델에 적용할 투수량계수(T) 및 저류계수(S)의 초기치 결정을 위하여 서귀포시 중문에 위치한 회수지점(D-38, 표고 79.38m)의 양수측정치를 이용하였다. 따라서, 회수지점을 양수정으로 하여 상류로 20.5m의 거리에 있는

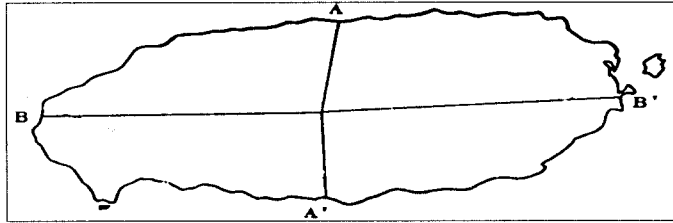


Fig. 5(a) Plan View of Study Area

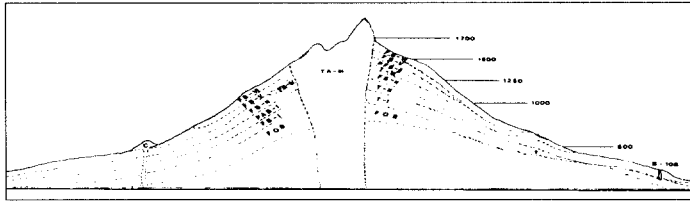


Fig. 5(b) Cross Section (A-A') of Study Area

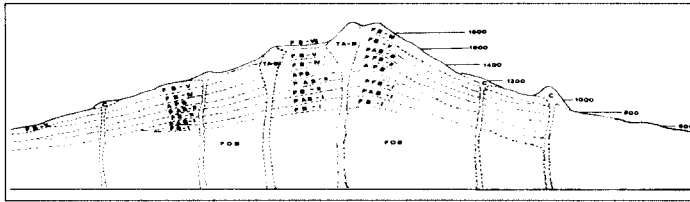


Fig. 5(c) Cross Section (B-B') of Study Area

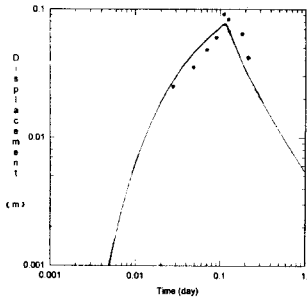
관측지점(표고81.11m)에서 실시한 관측정의 시간에 따른 수위변화 측정결과를 Table 1에 나타내었다. 이러한 측정결과를 토대로 Aqtesolv 프로그램을 이용하여 Theis방법, Cooper-Jacob방법 및 Papadopoulos-

Table 1 Water Level Data of Observation Wells and Pumping Wells

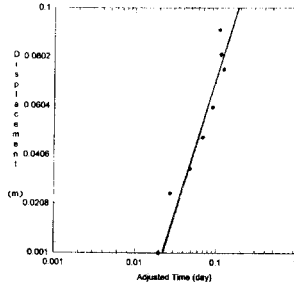
Pumping Period Data		Observation Data	
Time(day)	Rate(m ³ /day)	Time(day)	Displacement(m)
0.00000	900.	0.02000	0.00000
0.02000	900.	0.02778	0.02500
0.02778	900.	0.04860	0.03500
0.04860	900.	0.06940	0.04800
0.06940	900.	0.09030	0.06000
0.09030	900.	0.11110	0.00910
0.11110	900.	0.12560	0.08300
0.11180	0.00	0.18250	0.06400
0.11200	0.00	0.21340	0.04200

Table 2 Initial Values of T and S

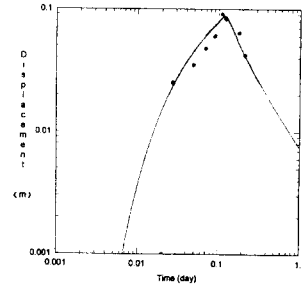
Equation \ Parameter	T(m ² /day)	S	Residual Statistics		
			Mean	Var.	S.E.
Theis	1559.8	0.1864	-0.0003708	6.00E-5	0.007747
Cooper-Jacob	1641.7	0.1620	-1.18E-11	0.0001098	0.010480
Papadopoulos-Cooper	1118.5	0.1962	-0.0003341	7.001E-5	0.008367



(a) Theis



(b) Cooper-Jacob



(c) Papadopoulos-Cooper

Fig. 6 Calibration of Parameters in Each Method

Cooper방법 등의 비교를 통한 투수량 계수 및 저류계수의 초기치를 결정하였고 분석대상 유역의 개발당시에 있어 15개 관측공에 대한 유효수두 및 등수두선도(한국수자원공사, 1995)와 비교하여 시행착오법을 통한 최종 수리상수를 결정하였다. 다음의 Table 2 및 Fig. 6은 투수량계수 및 저류계수의 초기치 산정에 대한 결과이다. Table 2에서 분석치 중 안정적인 측면을 고려하여 Theis 방법을 채택하였으며 산정된 투수량계수 및 저류계수의 초기치를 통한 최종 수리상수를 산정토록 하였다.

3.3 적용 및 결과

본 연구에서는 모델에 사용된 매개변수의 초기치를 서귀포유역에서 관정개발 당시에 관측된 지하수 등수두선과 일치될 수 있도록 초기매개변수를 변화시키면서 각 층에 대한 최종매개변수를 결정하였다. 먼저, 본 연구에서 유한차분법에 의한 3차원 지하수 유동해석을 위해 사용된 유역의 격자망 구성 및 정호의 위치는 Fig. 7과 같다.

본 분석에 이용된 정호의 제원은 제주도지하수개발보고서(농림부, 1990)와 제주도 광역상수도 I 단계 기본 및 실시설계보고서(한국수자원공사, 1995)로 부터

자료를 조사하여 이용하였다. 다음의 Table 3에 나타난 바와 같이 본 분석에 이용된 대표 관정은 15개 지점으로서 D-24지점을 제외하면 대체적으로 E.L. 200m이하 지점에 위치하고 있으며, D-24지점이 E.L. 236.76m로서 가장 최상류에 위치한 관정으로 나타났다. 그러나 각 관측공의 지하수위는 모두 E.L. 200m이하 지점에 위치하고 있으며, D-24지점이 174.36m으로 가장 높은 수치를 보이고 있고, D-48지점이 4.40m으로 가장 낮은 수치를 보이고 있다. 전체적으로 관측된 지하수두선을 볼 때 서귀포유역의 중앙지점보다는 동서 방향으로의 지하수위가 다소 작게 나타나고 있다.

다음으로, MODFLOW을 이용한 지하수유동해석을 위하여 유한차분망의 경우 격자망(X, Y)의 구성은 Fig. 7에서 보는 바와 같이 종·횡축에 있어 격자요소는 254×403개이며, 격자간격은 0.5m~250m로서 정호 부근은 세격자(finer grid)로, 양수에 의한 영향이 적은 원거리 지점은 조격자(coarser grid)로 구성하였다.

마지막으로, 모의발생을 위한 지하수 함양량은 제주도 서귀포유역의 년강우량에 대한 평균침투량을 약 42%(제주도수자원개발보고서, 1985, 93)로 하여 분석

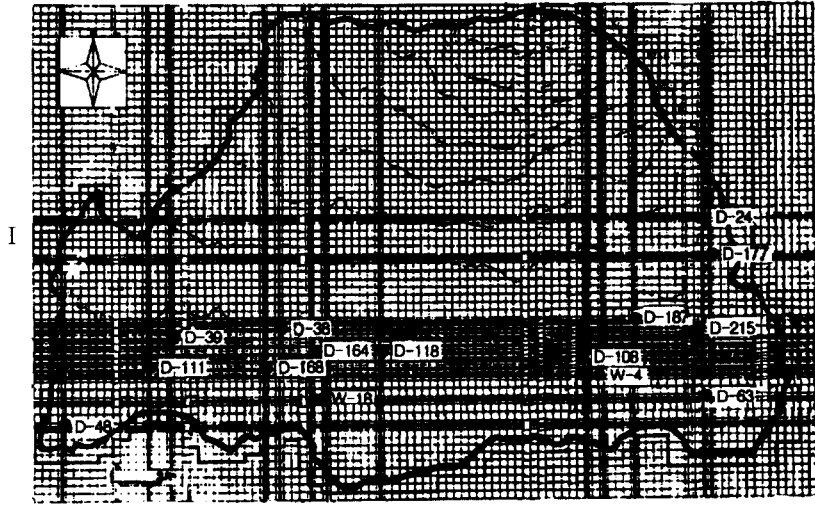


Fig. 7 Finite Difference Grid of Study Are

Table 3 Well Inventory of Cheju Volcanic Island

WELL No.	AREA NAME	GROUND EL. (m)	WELL DEPTH(m)	PUMPING RATE(m ³ /D)	WATER LEVEL(EL.m)
W-4	Seohong	70.35	95.5	1,500	39.35
W-18	Wolpyung	58.38	35.5	1,339	40.68
D-24	Hachal	236.76	92.0	1,339	174.36
D-38	Hoesoo	180.00	122.0	1,088	102.60
D-39	Sakdal	140.00	150.0	1,070	59.80
D-48	Daepyung	20.00	94.0	1,200	4.40
D-63	Pomok	60.00	70.0	2,100	37.70
D-108	Seohong	90.00	100.0	2,030	73.00
D-111	Jungmoon	100.00	222.0	1,000	38.00
D-118	Yongheung	160.00	220.0	1,000	58.00
D-164	Hawon	155.00	144.0	1,500	85.00
D-168	Jungmun	110.00	130.0	2,000	50.00
D-177	Sinhyo	185.00	195.0	1,200	105.00
D-187	Donghong	190.00	172.0	1,300	98.00
D-215	Seohong	180.00	196.0	1,500	115.00

에 이용하였다. 현재, D-24(표고 236.76m)지점 이상에서는 관측공이 존재하지 않고 Fig. 3, 4의 결과와 더불어 서귀포유역의 중산간지대(표고 400m이상)이상에서는 국부적으로 단거리 유동을 가지는 지하수유출

(이, 1996)이 이루어진다는 연구결과를 토대로 본 분석에서는 모델의 적용을 위해 각 관정에 대한 지질주상도를 고려하여 표고 -100m~300m 지점과 300m이상 지점 등으로 5개 대수층을 분류하였다. 한편, 최종

Table 4 Evaluated Parameters

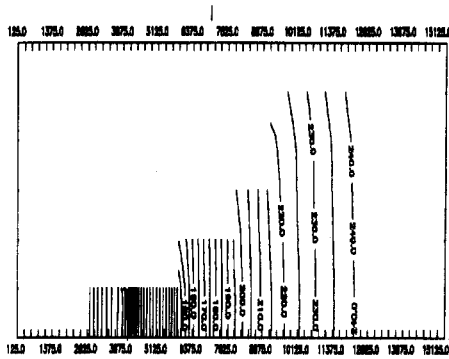
Layer	S	T(m ² /day)	(Kz/Δz)
1	0.1480	1281.0	4.01E-5
2	0.1891	1688.0	3.90E-6
3	0.1994	1891.0	1.08E-8
4	0.1858	1792.0	2.08E-7
5	0.2061	1834.0	-

매개변수는 전절에서 언급한 바와 같이 양수시험에 의해서 산정된 투수량 및 저류계수의 초기치와 기존에 제시된(고, 1991) 서귀포 지역의 투수량 및 저류계수 값의 범위내에서 분석을 통하여 산정하였다.

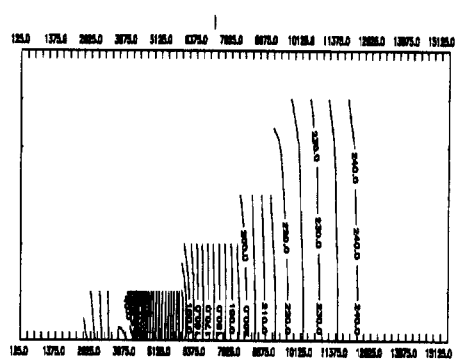
3.3.1 모델에 대한 최종매개변수

본 분석에서는 매개변수 추정을 통하여 실제 대상유

역에서 양수량에 따른 정류 및 부정류 상태하에서의 지하수두 변동분석을 실시하였으며 이에 적용된 최종 매개변수는 다음의 Table 4에 나타난 바와 같이 저류 계수(S)는 1층에서 5층까지 0.1480~0.2061의 범위내의 값을 적용시켰고, T는 1,281~1,891m²/day의 범위로 적용되었으며, 누수계수(Kz/Δz)는 1.08E-8~4.01E-5의 범위에서 적용되었다.



(a) D-168 Vertical-sectional Potential Lines (After 90 day)



(b) D-168 Vertical-sectional Potential Lines (After 180 day)

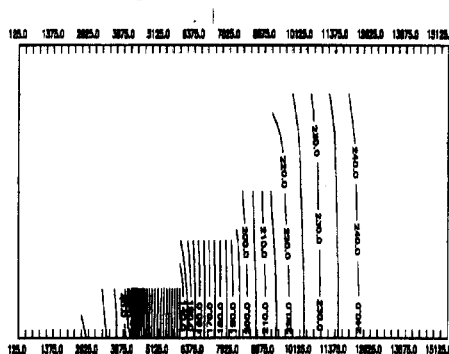
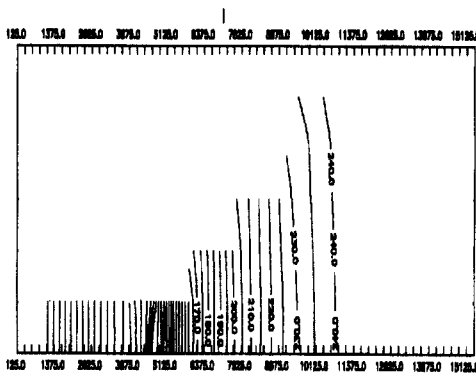
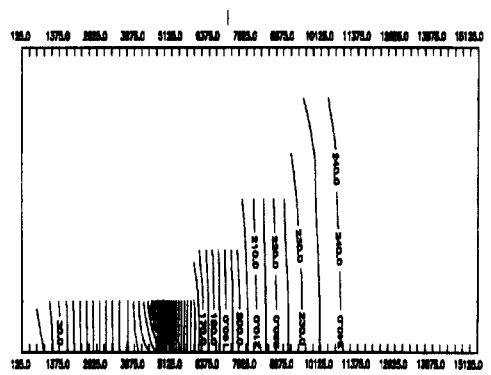


Fig. 8(c) D-168 Vertical-sectional Potential Lines from the Unsteady State Three-Dimensional Model (After 365 day)



(a) D-118 Vertical-sectional Potential Lines (After 90 day)



(b) D-118 Vertical-sectional Potential Lines (After 180 day)

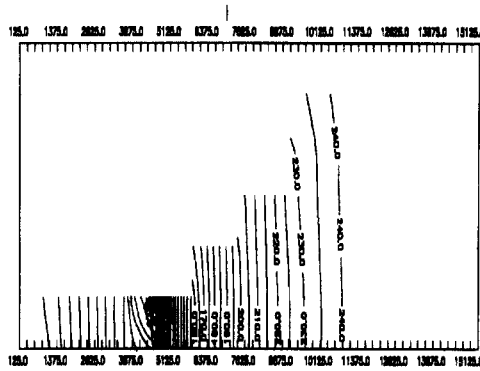


Fig. 9(c) D-118 Vertical-sectional Potential Lines from the Unsteady State Three-Dimensional Model (After 365 day)

3.3.2 유동경로 해석

본 연구에서는 각 관공으로 부터의 양수량과 기간에 따른 서귀포 유역의 부정류 해석을 실시하였다. 유한차분법에 의한 3차원 모의발생 결과로 부터 얻어진 각 정호격자에서 D-168, D-118, 및 W-4의 3개지점에 대한 연직 3차원 포텐셜분포도(Fig. 8(a)~(b))를 살펴보면 먼저, D-168단면은 지형적으로 비교적 안정된 사면을 이루고 있어 상류부에서 하류부로 지하수가 유동하고 있으며, 유속분포가 일정하게 분포하고 있다. D-168관정이 위치하고 있는 지역인 약 4,200m지점(해안으로 부터)에 있어 정상류 모의발생상태인 경우에는 수두의 분포가 정호 주변의 지점들과 큰 차이가 없으나 양수기간이 90일, 180일 및 365일 동안 이루어지는 비정상류 모의발생 상태일 경우 약 4,200m지점

에 있어 수두분포가 각각 표고 38.53m, 표고 33.88m, 표고 27.97m로 분석되어 양수기간동안 수두저하가 상류보다 하류지역에서 활발히 나타나고 있다.

다음으로, D-118단면은 지형적으로 관측정 중에서 비교적 높은 지대에 속하며, 서귀포 지역의 중앙부에 위치하고 있다. 전반적으로 사면을 따라 상류부에서 하류부로 안정되게 지하수가 유동하고 있으나, 지하수두분포가 다른 지역에 비해 비교적 높은 것으로 나타났다.

Fig. 9(a)~(c)에서 보는 바와 같이 D-118관정이 위치하고 있는 지역인 약 4,600m지점에 있어 정상류 모의발생상태인 경우에는 수두 및 유속의 분포가 정호 주변의 지점들 보다 다소 조밀한 상태로 나타나고 있는데 이것은 다른 관공들에 비해 비교적 D-118지점 주변의 유효수두가 상대적으로 낮기 때문인 것으로 판

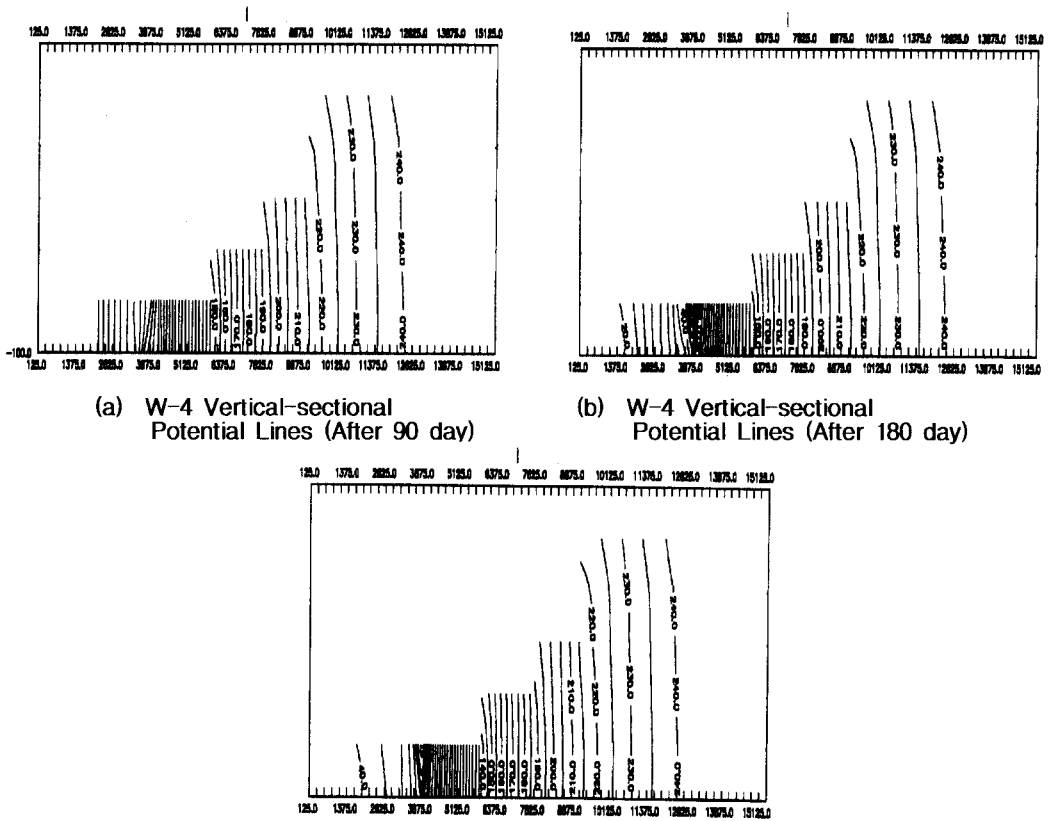


Fig. 10(c) W-4 Vertical-sectional Potential Lines from the Unsteady State Three-Dimensional Model (After 365 day)

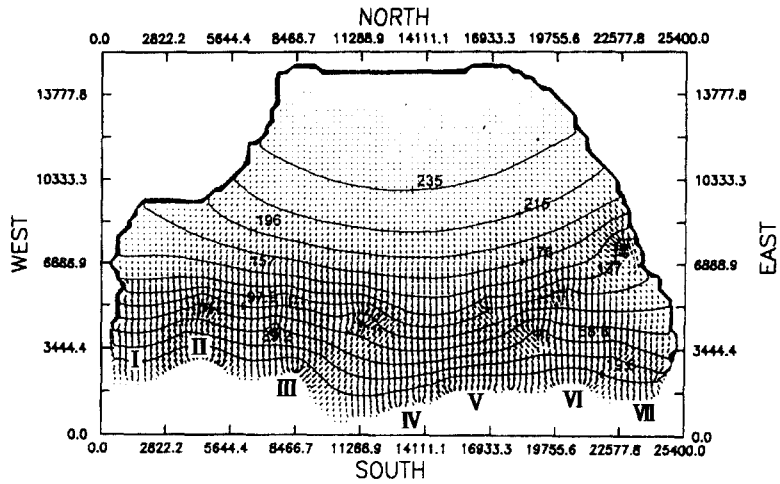
단된다. 한편, 양수기간이 90일, 180일 및 365일 동안 이루어지는 비정상류 모의발생상태일 경우 약 4,600m 지점에 있어 양수기간 동안 수두저하가 상·하류지역에서 다른 지역보다 작게 나타나고 있는데 이는 양수량이 다른 지역보다 상대적으로 작기 때문인 것으로 판단된다.

따라서 양수기간에 따른 수두저하분포가 다른 관정의 경우보다 다소 작으며, 수두분포가 각각 표고 53.03m, 표고 49.49m, 표고 46.70m인 것으로 나타났다. 마지막으로, W-4단면은 지형적으로 안정된 사면을 이루고 있으며, 서귀포 지역의 동쪽에 위치하고 있다. 전반적으로 지하수의 유속분포는 안정되게 분포되어 있으나 상류부보다 하류부에서 유속분포가 조밀하게 나타나고 있어 하류부의 지하수 유동이 상류부보다 활발한 것으로 판단된다. Fig. 10(a)~(c)에서 보는 바와 같이 W-4관정이 위치하고 있는 지역인 약 4,000m 지점에 있어 양수기간이 90일, 180일 및 365

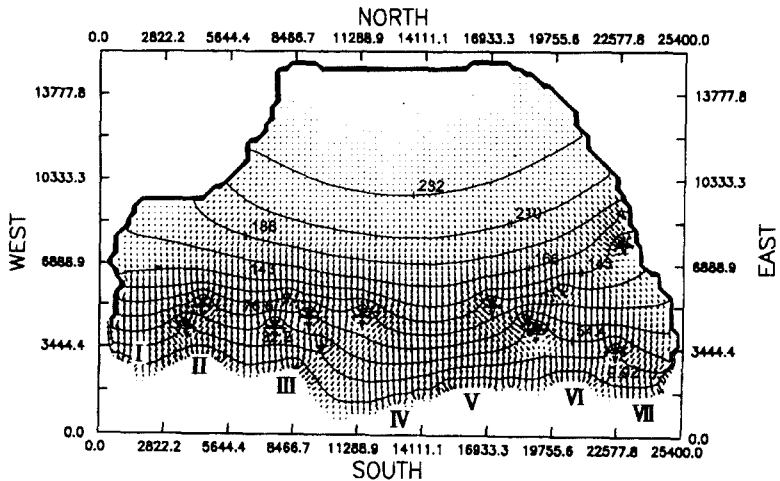
일 동안 이루어지는 비정상류 모의발생상태일 경우 약 4,000m 지점에 있어 양수기간 동안 상·하류지역에서의 수두저하분포가 다른 지역과 유사하게 나타나고 있다. 양수기간에 따른 수두분포는 각각 표고 36.95m, 표고 31.90m, 표고 25.46m인 것으로 나타났다.

3.4 분석결과의 비교검토

본 연구에서는 부정류 상태하에 모의발생한 결과치를 이용하여 지하수 유동경로 해석을 실시한 결과 90일 및 365일 동안 양수할 경우에 있어 각각에 대한 유속벡터 분포를 다음의 Fig. 11에 도시하였다. 본 분석유역에 대한 정류상태하의 수두분포로서 유속벡터를 계산한 결과를 보면 해안지역의 각 방향으로 비교적 동일한 유속벡터를 이루고 있었으나 부정류상태하에서 15개 대표 관정으로부터 일시에 90일 양수할 경우에 유속벡터는 정류상태하의 유속벡터와 결과치에서 다소 차이를 보이고 있으며, 180일, 270일 및 365일 이후로



(a) Unsteady state(After 90 day)



(b) Unsteady state(After 365 day)

Fig. 11 Groundwater Velocity Vector and Potential Distribution

는 지속적인 지하수 두 저하가 발생되고 있으나 3년 경과 후 안정된 수두분포를 나타내었다. 따라서 양수에 따른 부정류하에서 모의발생된 결과치를 이용하여 계산된 유속벡터는 다음의 Fig. 11에서 보는 바와 같이 I, II, III, IV, V, VI 및 VII에서 각 방향으로 분산되어 유출되고 있으나 II(천제연폭포), III(월평동) 및 VI(천지연, 정방폭포)지점이 다른 지점에 비해 비교적 크게 나타나고 있는데 이 지점이 타 지점에 비해 용출량이 많은 것을 고려해 볼 때 투수성이 양호한 지질구조

를 형성하고 있는 것으로 판단된다.

4. 결 론

화산도서유역의 지하수 유동시스템 해석을 위하여 실제 도서유역인 제주도 서귀포 유역을 대상으로 수치 해석을 실시하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1) 본 연구에서는 제주도 서귀포유역의 지하수 유동 시스템 해석을 위해 MODFLOW모델을 이용하였으며 양수량 측정자료를 통한 투수량계수 및 저류계수를 초

기치로 선정하여 시행착오법을 통한 대상구역의 최종 매개변수를 얻을 수 있었고 모델의 모의발생을 한 결과 지하수유동시스템에 대한 적용성이 잘 반영됨을 알 수 있었다.

2) 서귀포 유역은 지형지질을 고려한 관측치 해석, 이(1996)의 연구결과 및 모의발생을 통한 결과로 볼 때 지하수 분포는 표고 400m이내에서 안정된 지하수 함양에 의한 지하수용출이 이루어지고 있는 것으로 판단된다. 또한, 부정류상태하에서 지하수 유동경로 해석을 위하여 수두분포의 결과치를 이용한 유속벡터 분석을 실시한 결과 유속벡터가 상대적으로 크게 나타난 지역은 II, III 및 VI지점인 것을 알 수 있었다.

3) 서귀포유역에 대한 지하수 유동경로는 해안지역으로 I, II, III, IV, V, VI 및 VII지점인 각 방향으로 분산되어 유출되고 있음을 알 수 있었다. 따라서, 본 분석의 결과는 추적자를 이용한 제주도지역의 지하수 유동에 관한 연구(이순탁, 1996)에서 발표된 서귀포 지역에 대한 지하수 유동경로가 중산간 지대(표고 400m)이상에서는 단거리 지하수 유동경로를 가지며 저지대(표고 400m이하)에서는 각 방향으로 분산한 안정된 지하수유동을 이루고 있다는 연구결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

이문원 (1967) : 제주도의 지질과 지하수와의 관계 연구. 건국대학교논문집, 제 1집.
 고병린 (1984) : 제주도 지하수 부존형태와 지하수 위 변동에 관한 연구. 건국대학교 석사논문.
 고병린 (1991) : 정상류의 대수층에서 이차원 흐름 해석. 제주대학논문집, 제 12집.
 배상근 (1991) : 대구지역의 지하수 유동계의 해석. 계명대학교 논문보고집, 제 14집.
 농림부 (1990) : 제주도지하수개발보고서.
 한국수자원공사 (1985, 93) : 제주도수자원개발보고서.
 한국수자원공사 (1995) : 제주도 광역상수도 기본 설계 보고서.
 Hubbert, M. K. (1940) : The theory of groundwater motion. *J. Geol.*, 48, pp. 785~944.
 Freeze, R. A. and Witherspoon, P. A. (1966) :

Theoretical analysis of regional groundwater flow ; 1. Analytical and numerical solutions to the mathematical model, *Water Resour. Res.*, 2, pp. 641~656.

Freeze, R. A. (1971) : Three-dimensional, transient, saturated-unsaturated flow in a groundwater basin, *Water Resour. Res.*, 7, pp. 347~366.
 Kuiper, L. K. (1975) : A state-wide hydrological model, *Trans. Am. Geophys. U.*, 56, pp.982.
 Gupta, S. K., Tanji, K. K. (1976) : A three-dimensional Galerkin Finite Element solution of flow through multiaquifers in Sutter Basin, California, *Water Resour. Res.*, 12, pp. 152~162.
 Gupta, S. K., Cole, C. R., Pinder, G. F. (1984) : A finite element three-dimensional groundwater model for a multiaquifer system, *Water Resour. Res.*, 20, pp. 553~563.
 Gustafsson, Y. (1968) : The influence of topography on groundwater formation. Groundwater problems. Pergamon Press.
 Lee Soontak (1996) : Groundwater Movement in the Volcanic Island of Cheju, Korea, Ph.D.(Sc.)Thesis, Inst. of Geosci., Univ. of Tsukuba, 1996.
 Narasimhan, T. N., Witherspoon, P. A. (1976) : An integrated finite difference method for analyzing fluid flow in porous media, *Water Resour. Res.*, 12, pp. 57~64.
 Wang, H. F., Anderson, M. P. (1982) : Introduction to groundwater modeling.
 McDonald, M.G. and A.W. Harbaugh. (1991) : A modular three dimension finite difference flow model. IGWMC groundwater modeling software, International groundwater modeling center. Colorado, USA. pp. 12

(논문번호:00-033/접수:2000.05.29/심사완료:2000.09.14)