

제주지역의 지하수 유동해석에 관한 연구

A Study on Groundwater flow analysis of in Jeju Island

안승섭* · 이남훈** · 이병철*** · 이증석****

Ahn, Seung Seop · Lee, Nam Hun · Lee, Byeung Chol · Lee, Jeung Seok

요 지

본 연구에서는 제주도 지역에서 지속가능한 범위 내에서 지하수의 효율적인 개발과 이용을 위하여 대수층내 에서 발생하는 지형 및 지질 특성인자의 상호 관련성을 규명하고, 화산도서유역에서의 지하수 유동해석을 통하여 적용가능성을 파악하고 지하수의 효과적인 관리와 이용에 적합한 방법을 제시하는데 목적을 두고 있다. 화산도서유역에서의 지하수 유동해석을 위하여 지하수 함양량은 물수지 분석에 의해 산정하였으며, 대상유역에 유한차분모델인 GMS-MODFLOW를 중심으로 지하수두 분포를 산정하고 실제 관측수도와 비교 분석하였다. 또한 분석대상 유역에 지하수 관정의 양수기간에 따른 지하수두 변동폭을 계산하였다. 분석 결과 분석관정에서 일시에 양수할 경우 유속벡터가 초기의 정류상태에 대한 유속벡터와 다소 큰 차이가 있는 결과를 나타내고 있으나, 이후로 안정된 수두결과를 보이고 있으며, 지하수 유동경로 각 방향으로 분석되어 유출되는 것으로 판단된다.

핵심용어 : GMS-MODFLOW, 지하수 유동 , 물수지분석, 지하수 함양량

1. 서 론

우리 나라 지하수 개발은 1970년대부터 본격적으로 추진되어왔으나, 지하수 개발과 이용에 따른 법적 제도적 정비가 완비하지 못한 상태에서 개발이 무분별하게 이루어져 왔다. 이러한 무분별한 지하수 개발은 수량고갈, 과잉양수에 의한 지반침하, 해수 침입 등 각종 지하수 환경재해를 유발하고 있어 지하수의 체계적이고 합리적인 관리와 개발에 대한 영향평가가 필수적이다. 본 연구에서는 제주도 지역에서 지속가능한 범위 내에서 지하수의 효율적인 개발과 이용을 위하여 대수층내에서 발생하는 지형 및 지질 특성인자의 상호 관련성을 규명하고, 지하수유동과정의 해석과 예측이 필요하다. 현재 제주도는 16개의 권역으로 분류하여 지하수를 관리하고 있으나, 동부지역 및 서부지역과 제주지역 및 서귀포지역의 지형 및 지질특성이 상이하어 각 권역별에 대한 지하수부존 특성에 따른 지하수 유동에 관한 연구는 활발하게 이루어지지 않고 있다. 따라서, 합리적이고 효과적인 지하수 개발과 이용을 위해서는 지하수의 유동특성에 대한 지하수의 수리현상을 이해하여야 하며, 화산도서유역에서의 지하수 유동해석을 통하여 적용가능성을 파악하고 지하수의 효과

* 정회원 · 경일대학교 건설정보공학과 교수 공학박사 · E-mail : ahnso@kiu.ac.kr
** 학생회원 · 경일대학교 도시정보·측지·지적공학과 석사과정 · E-mail: nh1253@hanafos.com - 발표자
*** 정회원 · 경일대학교 도시정보·측지·지적공학과 박사과정 · E-mail : cheol@hanmail.net
**** 정회원 · 경일대학교 토목공학과 교수 공학박사 · E-mail : zslee@kiu.ac.kr

적인 관리와 이용에 적합한 방법을 제시하는데 일조하리라 생각된다. 본 연구에서는 제주도의 지하수 함양량을 산정하고 지하수 유동특성을 분석하기 위해 제주도 지역의 지형 및 지질특성을 파악하고 ArcView 3.2 Software 와 GMS(Ground-Water Modeling System) 6.0 모델을 이용하였으며, 합리적인 지하수 개발과 포괄적인 지하수 자원의 보존방법을 제시하는데 목적을 두고 있다.

2. 기본이론 및 대상구역의 선정

2.1 연구대상구역의 선정 및 특성

본 연구에서는 유한차분법을 이용한 양수에 따른 지하수 유동시스템 해석을 위하여 지하수 이용량이 많고 비교적 분포특성 연구가 활발하게 진행되고 있는 서귀포유역으로 선정하였다. 본 연구 대상지역은 6개의 소유역으로 분할 하였고, (Fig. 1.) 서귀포 유역의 토양도(Fig. 2)와 토지이용도(Fig. 3)과 같이 나타났다. 서귀포시의 평균 고도는 465.09m이며 분석대상 유역의 표고별 면적비는 Table.1 과 같다. 한라산을 중심으로 동서사면은 매우 완만한 경사(3 ~ 5°)를 이루고 있으나, 남북 방향에서는 약간 급한 경사(5°내외)를 보인다. 분석 결과는 Table. 2. 와 같이 0° ~ 14°의 분포가 약 65% 이상을 차지하고 있다.

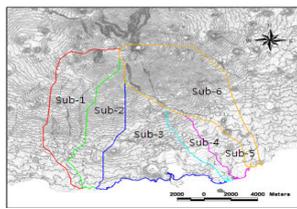


Fig. 1. 연구대상구역의 소유역분할

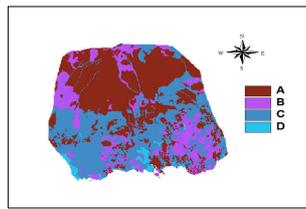


Fig. 2. 연구대상구역의 토양도

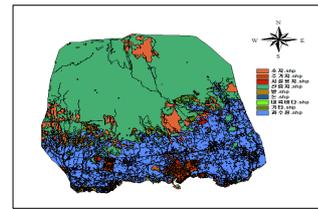


Fig.3. 연구대상구역의 토지이용도

Table.1. Distribution of altitude

E.L(m)	0 ~200	200 ~400	400 ~600	600 ~800	800 ~1000	1000 ~1200	1200 ~1400	1400 ~1600	1600 ~1800	1800 ~2000
Area(Km ²)	93.50	54.14	29.72	23.50	20.88	15.42	8.05	5.91	3.31	0.48
%	36.68	21.24	11.66	9.22	8.19	6.05	3.16	2.32	1.30	0.19

Table. 2. Distribution of Slope

Slope(°)	0 ~7	7 ~14	14 ~21	21 ~29	29 ~36	36 ~43	43 ~51	51 ~58	58 ~65
Area(Km ²)	81.47	84.47	45.86	24.06	9.89	5.20	2.22	1.10	0.61
%	31.96	33.14	17.99	9.44	3.88	2.04	0.87	0.43	0.24

2.2 모델의 기본 이론

GMS(Ground-Water Modeling System) 6.0은 Brigham Young University's Environmental Modeling Research Laboratory에서 개발하고 EMS-I가 공급하는 지하수 모델링 환경에 가장 적합한 프로그램이다.

지역의 특성화에 따른 MODFLOW, MODPATH, MT3D/RT3D, FEMWATER, ART3D,

SEAM3D, NUFT, UTCHEM, FACT & SEEP2D 등의 모델을 갖추고 있다. 본 연구에서는 지하수의 흐름을 모의하고 우물, 지류, 강, 배수구, 증발산, 비균질대수층 특성을 지닌 흐름계로의 재유입, 경계조건 등 복잡한 영향을 고려할 수 있는 MODFLOW interface module을 이용하였다.

본 연구에 있어서 실제유역에서의 지하수유동계를 파악하기 위해 사용된 MODFLOW모델은 유한차분법에 근거한 모델로서 일정한 밀도를 가지는 다공성 매질을 통해 흐르는 3차원 지하수 유동은 다음의 식(1)과 같이 편미분 방정식으로 나타낼 수 있다.

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

여기서, K_x , K_y , K_z 는 x, y, z 좌표축에 따른 투수계수이며, h 는 수두(potential head), W 는 단위체적당의 체적 flux, S 는 비저류율 및 t 는 시간이다.

한편, S , K_x , K_y , K_z 는 공간의 함수($S = S(x, y, z)$, $K_x = K_x(x, y, z)$, etc)이고, W 는 시간과 공간의 함수이며 ($W = W(x, y, z, t)$), 식(1)은 불균질, 비등방성 매질에서의 비평형 상태하에서 지하수 흐름을 나타낸다.

3. 연구대상유역의 분석 및 고찰

3.1 서귀포 지역의 지하수 함양을 산정

지하수 함양량을 산정하기 위하여 이승현, 배상근(2004)의 연구에서와 같이 기초수문자료와 정밀토양도 및 토지피복도를 이용하여 ArcView 3.2 Software를 통하여 자료추출 및 통합과정을 거치고 WMS(Watershed Modeling System) 모형으로 6개의 소유역별 CN값을 산출한 결과, 최근의 하천정비기본계획 수립 및 하천대장작성지침(국토해양부, 2004.12)에서는 과거 주요호우사상의 선행 토양함수를 비교하여 CN37방법 및 AMC-II, AMC-III 조건 중 유역특성에 맞는 조건을 적용하도록 하고 있다. 본 연구대상지역에는 유출율이 보통인 상태 AMC-II 조건이 적합한 것으로 판단되어 AMC-II조건을 적용하였다. 강우량 자료는 서귀포 기상대의 1995~2006년의 자료를 추출하여 각각의 소유역별 강우량 및 유출량, 지하수함양율을 산정하였으며, 그 결과는 다음 Table 1과 Fig. 4. 와 Fig. 5. 같다.

Table. 3. 소유역별 지하수 함양율

연도	강우량 (mm)	sub-1	sub-2	sub-3	sub-4	sub-5	sub-6
		함양률(%)	함양률(%)	함양률(%)	함양률(%)	함양률(%)	함양률(%)
1995	2280.4	41.17	46.07	30.60	43.88	46.36	36.43
1996	1656.0	45.78	47.74	36.78	33.19	39.20	42.17
1997	1575.8	46.30	47.64	37.71	30.75	37.41	42.96
1998	2091.9	42.59	46.86	32.26	41.79	45.10	38.06
1999	2970.5	36.34	42.52	25.65	47.39	47.73	31.32
2000	1368.5	47.37	46.71	40.29	22.49	31.17	44.96
2001	1782.1	44.90	47.68	35.37	36.39	41.48	40.94
2002	1877.2	44.21	47.52	34.36	38.36	42.85	40.04
2003	2280.1	41.17	46.07	30.60	43.89	46.36	36.43
2004	2018.0	43.15	47.12	32.96	40.75	44.44	38.73
2005	1390.3	47.29	46.87	40.01	23.53	31.96	44.76
2006	1757.6	45.08	47.71	35.64	35.83	41.08	41.18
평균	1920.7	43.78	46.71	34.35	36.52	41.27	39.83

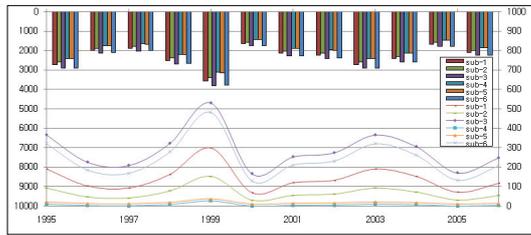


Fig. 4. 소유역별 강우량 및 유출량

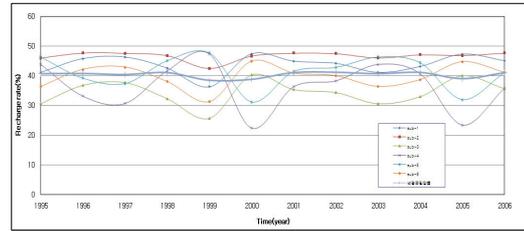


Fig. 5. 소유역별 지하수 함양율

3.2 경계조건 및 매개변수 추정

대수층내에서 발생하는 유동시스템은 대수층의 조건에 따라 시공간적으로 변동이 매우 심하고 대수층내의 지하수 유동상태를 나타내는 특성인자들은 그 수가 매우 많으므로 지하수 유동시스템 해석에 모두 반영한다는 것은 매우 어려운 문제이다.

본 연구에서 모의발생을 위한 서귀포지역의 경계설정에서 동측, 서측 및 북측 지역은 분수계를, 남측지역은 해안부를 경계지역으로 설정하고 실측한 양수자료를 토대로 정류상태의 해석을 위한 투수량 계수 및 부정류상태 해석을 위한 저류계수의 초기치를 결정하고, 이로 인한 결과치를 이용하여 MODFLOW모델에 적용하여 정류상태 하에서 기존에 관측된 지하수위 자료에 가장 접근할 수 있는 최적매개변수를 산정하였다.

3.3 관측정의 연중 지하수위 변동량

본 연구에서 매개변수 추정을 통한 수치해석을 이용하여 실제 대상 유역에서의 적용가능성을 검토하기 위하여 정류 및 부정류 상태에 따른 양수량에 의한 지하수위 변동 분석을 검토하기 위하여 정류 및 부정류 상태에 따른 양수량에 의한 지하수위 변동분석을 실시하였다.

Table. 4. 관측정의 연중 지하수위 변동량

관측정	최저지하수위 (m, EL.)	최고지하수위 (m, EL.)	지하수위 변화율 (m, EL.)
A	156.79	159.53	2.74
B	137.71	140.45	2.74
C	78.78	81.22	2.44
D	11.65	13.24	1.59
E	7.95	9.28	1.33
F	5.19	6.20	1.01
G	1.79	2.21	0.42

본 연구에 있어 지하수위의 초기치를 구하기 위하여 유한요소법에 의한 2차원 부정류시물레이션 실시하였다. 부정류상태에 대한 해석을 위해 본 연구대상 유역인 서귀포지역인 유한요소격자망을 구성하였으며, 다음으로 연구에 적용된 투수량계수, 저류계수 및 비산출율의 산정을 위한 초기치는 유한차분법에서 적용된 값을 분석에서 이용하였다.

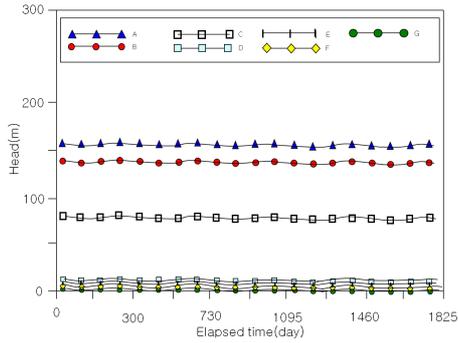


Fig. 5. 10년 평균 강수량 연중 지하수 변동

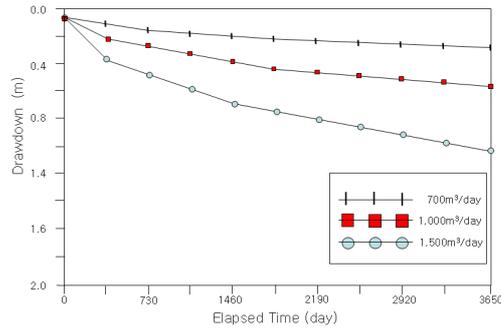


Fig 6. 취수량 변동에 따른 수위 강하량

본 연구에서 사용되는 각 층에 대한 매개변수의 값들을 개발당시의 각 정호에서 관측된 유효수두를 이용한 지하등수선도에 일치시키기 위하여 시행착오법을 이용하여 추정하였다. 지하수 유동시스템의 모의발생을 위한 유동해석 모델이 선정되면 모델로부터 산정된 결과치가 관측치에 최대한 접근하도록 모델의 매개변수를 조정하고 점차적인 수정과정을 통하여 최종계산치를 결정하였다. 본 연구에서 MODFLOW모델에 사용된 매개변수의 초기치를 서귀포유역에서 관측된 지하수 등수위선 및 최근 측정된 제주특별자치도 수위관측망 자료를 최대한 일치될 수 있도록 초기매개변수를 변화시키면서 각 층에 대한 최종매개변수의 최확치를 결정하였다.

5. 결론

본 유역에서 화산도서유역에서의 지하수 유동해석을 위하여 대상유역에 유한차분모델인 MODFLOW를 중심으로 지하수두분포를 산정하고 실제 관측수두와 비교 분석하였다. 또한 분석대상 유역에 지하수 관정의 양수기간에 따른 지하수두변동분포를 계산하였다.

- 1) 지하수 유동시스템 해석을 위하여 대상유역을 수치해석을 실시하였으며, 그 결과 지하수 유동시스템의 특성이 잘 반영됨을 알 수 있다.
- 2) 지하수 유동해석을 위하여 양수자료를 이용하여 매개변수 추정하여, 이로부터 투수량계수 및 저류계수 초기치를 선정하여 시행착오법을 통한 최종 매개변수를 얻을 수 있다.
- 3) 본 대상유역에 분석관정에서 일시에 양수할 경우 유속벡터가 초기의 정류상태에 대한 유속벡터와 다소 큰 차이가 있는 결과를 나타내고 있으나, 이후로 안정된 수두결과를 보이고 있으며, 지하수 유동경로 각 방향으로 분산되어 유출되는 것으로 판단된다.