

ORIGINAL ARTICLE

지하수 양수량에 따른 지하수유동 및 포획구간 특성 변화

안승섭 · 박동일* · 오영훈

경일대학교 건설공학부

Characteristics of Ground Water Capture Zone according to Pumping Rate

Seung-Seop Ahn, Dong-Il Park*, Young-hun Oh

School of Construction Engineering, Kyungil University, Gyeongsan 712-701, Korea

Abstract

This study analyzed on characteristics of the ground-water capture zone in coastal areas and mid-mountainous area according to pumping rate. For this study, it targeted Jeju island where is the volcanic island. To analyze, MODFLOW model and MODPATH model, which are the ground-water flow analysis models, were used. As a result of research, the following conclusions could be obtained. As a result of analyzing influence of a change in pumping time upon length of capture zone, the length of capture zone in coastal area was indicated to be greater in the changing ratio compared to the length of capture zone in mid-mountainous area. Next, in the coastal area, the pumping rate and the capture-zone length are changing similarly. However, in mid-mountainous area, the length of capture zone was indicated to grow when the pumping rate comes to exceed 1,500m³/day. As a result of analyzing influence of a change in pumping time upon capture area, the tendency of a change in the area was indicated similarly in coastal areas and mid-mountainous area. Especially, it could be known that the larger pumping rate leads to the more definite increase in tendency to a change in capture area. Based on this study, it was allowed to be possibly used in the suitable pumping rate in coastal areas and mid-mountainous area of the volcano island in the future. A follow-up research is judged to necessarily analyze the influence of tubular-well group upon capture zone by additionally analyzing a change in capture zone targeting the concentrated tubular well.

Key words : Capture zone, Pumping rate

1. 서론

최근에 화산도서지역인 제주도 내에서 증가하는 용수수요와 안정적 용수확보를 위하여 지하수개발이 증가되고 있는 실정이다. 지하수 개발과 관리가 체계화되지 못 할 경우에는 지하수위 저하로 인해 토양이 건조해지고 토양 생태계가 파괴되며, 또한 폐공관리 부실로 인해 오염물질이 유입되어 수질악화 등의 문

제의 원인이 될 수 있으므로 지하수 관리의 체계화가 필요한 실정이다. 지하수 모델링은 현장 또는 실제 상황을 표현하기 위하여 그와 유사하게 만든 이론적 모델을 이용하는 것으로, 실제 지하수 유동이나 용질의 이동과 관련된 과거 및 현재의 상황을 재현, 분석하고 미래에 예상되는 변화를 예측하기 위하여 널리 이용되고 있다. 본 연구에서는 비가시적인 지하수 흐름의 복잡한 양상을 단순화하는 모형에 있어 수리지질학적

Received 20 February, 2013; Revised 15 March, 2013;

Accepted 9 April, 2013

*Corresponding author : Dong-il Park, School of Construction Engineering, Kyungil University, Gyeongsan 712-701, Korea
Phone: +82-53-850-7316
E-mail: joy830210@naver.com

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

개념이 가장 중요하며, 개념 모델을 설정한 후 적합한 수치모델을 선정하고, 관측 자료를 입력자료로 하여 분석을 실시하였다.

최근까지 지하수유동시스템 예측에 대한 정확성과 적용성을 향상시키기 위하여 많은 연구가 수행되어 왔으며 지하수 관련 연구과정을 살펴보면 국외의 연구로는 Hubbert(1940)가 지하수 유동이론을 모델화하여 해석한 것을 시초로 하여 Brown(1968)은 높은 염수성 지역에 대한 유동시스템에 관한 연구, Gupta 등(1976)은 이질층들로 구성된 지하수체계에 관한 3차원 유한 요소모델을 개발하였다. 또한 Narasimhan 등(1976)은 3차원 지하수 흐름체계에 대한 유차분석 방정식의 적용하였으며, Wang 등(1982)의 유한차분 및 요소법에 의한 지하수 모델링에 관한 연구, Rowan (1998)는 MODFLOW와 MODPATH를 이용하여 지하수 포획구간에 대하여 분석을 실시하였다.

또한 국내에서는 Cheo(1997)의 지하수 유동 시스템 해석에 관한 연구, Ahn(2008)의 GMS- MODFLOW 모델을 이용한 도서지역의 지하수 유동해석, Oh(2011)의 GIS와 토지피복자료를 이용한 화산도서지역의 장기 지하수함양량추정 등 활발한 연구가 진행되어져 왔다.

따라서 본 연구에서는 화산도서인 제주도 지역의 해안저지대와 중산간지역을 대상으로 하여 양수량에 따른 지하수 유동 및 포획구간 특성을 규명함으로써 도서지역 지하수관리의 기초자료로 제공하고 한다.

2. 연구방법

본 연구에서는 지하수 해석에 사용되는 수치기법 중 보편적으로 사용되는 3차원 지하수 유동을 모의할 수 있는 MODFLOW모형을 사용하였으며, 포획구간 분석을 위해서는 MODPATH모형을 사용하였다. 연구 대상지역의 지하수 유동 모델링은 지표지질조사, 지층구조조사 등을 통한 세부 지하 지질조사 결과와 관측정에 의해 획득된 대수성 수리특성 자료를 이용하여 입력 자료로 활용하였으며, 지하수 유동 변화와 유입·유출량 변화를 예측하였다. 또한 이를 토대로 화산도서지역의 해안 및 중산간지대의 포획구간을 산정하여 지하수유출특성분석을 실시하였다.

MODFLOW모형은 3차원 유한차분 지하수 유동

모형으로 다양한 수리지질학적 구조를 보다 손쉽게 구현하여 모의할 수 있는 장점으로 인하여 전 세계적으로 널리 이용되는 지하수 유동모형이다. 지하수 유동해석 시 모의영역은 포화대이고 대수층은 다공성 매질로 변형되지 않으며, 유체는 온도와 밀도가 항상 일정하며 비압축(incompressible) 상태로 유동한다는 가정으로 부터 Darcy법칙과 연속방정식을 통해 식(1)과 같이 도출된다.

$$\frac{S}{b} \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) \pm Q \quad (1)$$

여기서, K_{ij} : 수리전도도, h : 동수두, Q : source/sink, S : 저류계수, b : 대수층 두께, t : 시간간격이다.

또한 MODFLOW모형은 주프로그램(main program)과 모듈(module)이라 불리는 서브루틴(subroutine)으로 구성되어 각각의 수리특성인자를 패키지(package)로 구성한다. 하천(river)이나 배수(drain)와 같은 특정한 수리지질학적 특성 인자를 PCG(Preconditioned Conjugate Gradient), SIP(Strongly Implicit Procedure), SOR(Successive Over-Relaxation) 등의 방법을 통해 지하수 유동을 나타내는 선형 방정식으로 다루고 있다. 또한 BAS(BASic package)는 모의할 모형에 대한 전반적인 구조를 형성하는 패키지이며, BCF(Block Centered Flow package)는 대수층의 수리 매개 변수를 읽고 층이 어떤 성질을 가진 대수층인지를 지정한다. 그 외 WELL(WELL package)는 지하수 관정에 대한 양수량, 양수 위치 등을 입력하고 유동의 상황을 모의에 반영하고 RCH(ReCHarge package)는 함양량에 대한 자료를 입력하게 되며, 실제 입력하는 것은 함양율(recharge rate)로 각 Grid의 함양량은 함양율에 넓이를 곱한 값이 할당된다. 이외에도 RIV(RIVer), DRN(DRAiN), EVT (EVapo Transpiration), SIP(Strongly Implicit Procedure) 및 SOR(Successive Over-Relaxation) 패키지 등을 사용하여 지하수 유동에 관한 분석을 하게 되며 MODFLOW모형은 제주도과 같이 불포화대 구간이 큰 대수층에서의 분석에 용이하다.

MODPATH는 MODFLOW의 정류 및 부정류 모의결과로부터 계산된 출력값을 사용하여 3차원 지하수 및 오염물질의 거동경로를 파악하기 위해서 개발

된 입자추적의 후처리 패키지로 각각의 유한차분셀 내에서 일어나고 있는 입자들의 이동경로를 해석학적으로 표현하는 준-해석학적인 입자추적법을 사용하고 있다. 입자의 유동 경로는 한 개의 입자가 경계나 내부에 소재한 공급원과 배출원에 도달할 때까지 기타 이동종료시간에 도달할 때까지 1개 셀에서 다음 셀로 움직이는 현상을 추적해 계산하며 MODPATH의 정류 흐름상태의 질량보존법칙의 편미분 방정식을 통해 식 (2)와 같이 도출된다(한, 1999).

$$\left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)(\eta v_x) + \left(\frac{\partial h}{\partial y}\right)(\eta v_y) + \left(\frac{\partial h}{\partial z}\right)(\eta v_z) = W \quad (2)$$

여기서, v_x, v_y, v_z : 평균선형 지하수유속 벡터의 x,y,z 방향에 대한 유속성분, η : 평균공극률, W : 대수층의 단위체적당 공급원이나 배출원 때문에 생성되거나 소비된 지하수의 체적이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 지하수 유동 및 포획구간 분석

3.1.1. 대상유역 선정 및 모형의 구성

연구 대상유역으로 선정된 북제주도의 경우 해안지역과 중산간지역에 주거지가 밀집되어 있고, 인근 하천은 평시에는 건천인 경우가 많아서 지역 내에서 필

요한 생활·농업용수는 지표수보다 지하수에 크게 의존하고 있는 실정이다. 또한 지역 내 용수 수요량 공급을 위해서 52개소 이상의 정호가 개발되어 있으나 본 연구에서는 비교적 관측 자료가 양호한 14개 정호를 선정하여 분석을 실시하였다.

연구 대상유역의 지하수유동 및 포획구간 특성을 분석하기 위하여 대상유역의 지형적 특성과 수리지질학적 특성을 고려하여 모의격자망은 50×50 m로 총 300행 200열로 구성하였다. 또한 지하수 흐름분포 예측에 중점을 두어 대상유역을 활성화 셀로 설정하고 대상유역 바깥은 비활성 셀로 설정하였다.

지층의 수직적 구조는 제주특별자치도 수문지질도 및 단면도(2010년)를 참고하여 화산암층을 주대수층으로 구성하였으며, 화산암층 표고는 1:5,000의 수치지형도를 수치고도자료(DEM)로 변환하여 각 격자별로 고도값을 내삽하였다. 또한 그 하부에 위치하는 서귀포층은 수문지질도를 참고하여 지질층 경계를 보간하고, 각 Stratigraphy Coverage의 특성을 반영하는 매개변수인 수리전도도(Hydraulic conductivity)와 비산출율(Specific storage), 비저류율(Specific yield), 공극률(Porosity)을 입력하였다.

제주도 지역의 경우 고도별로 강수량의 발생분포가 다양하게 변화하므로 본 연구에서는 Fig.2(a)와 같이 함양량 지대를 고도 범위별로 3개의 함양지대를 구분하였다. 강우자료는 최근 10년간(2001~2012)년 연

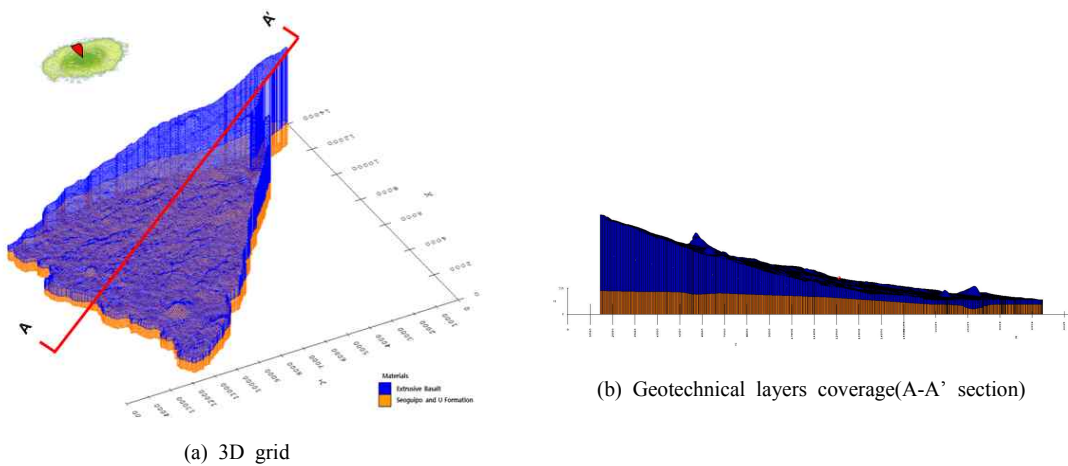


Fig. 1. 3D Grid and geotechnical layers coverage of study area.

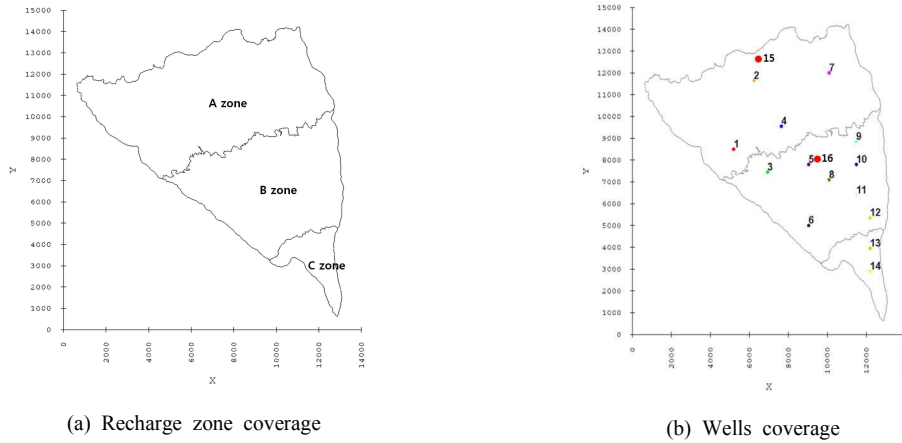


Fig. 2. Coverage composition.

평균 강수량을 1,754 mm/yr을 적용하였으며, 함양량의 경우 기존의 연구(수자원 관리 종합계획, 2012년) 자료를 인용하여 43.6%로 적용하여 분석을 실시하였다. 또한 본 연구대상지역내의 지하수유동특성 분석에 사용되는 모형 매개변수의 추정을 위하여 Fig. 2(b)와 같이 고도별로 관측정의 수를 분포시켰다.

따라서 본 연구에서는 지하수 양수량에 따른 지하수유동 및 포획구간변동특성을 분석하기 위하여 14개 관측정 자료를 이용하여 매개변수를 추정하고, 여기서 추정된 매개변수를 이용하여 Fig. 2(b)에 표시된 15, 16 관정을 이용하여 지하수 영향 특성 분석을 하였다.

3.1.2. 정류상태 지하수 유동분석

지하수유동 및 포획구간 분석을 위한 모형의 최적 매개변수의 추정을 위하여 표고 및 공간적인 분포를 고려하여 Fig. 2(b) 및 Table 2와 같이 14개 관측정에 대한 관측수위를 이용하여 시행착오법으로 매개변수를 추정하였다. 그 결과 본 연구대상지역내 3개 지대(해안지역, 중산간지역, 산간지역)에 대하여 추정된 최적 모형 매개변수(수리전도도와 비산출율 비저류율, 공극율)는 Table. 1와 같다.

추정된 매개변수를 이용한 정류상태의 지하수위분포 분석결과 Fig. 3(b) 및 Table 2에서 나타난 바와 같이 분석되었으며, 전체 관정을 대상으로 분석한 결과

Table 1. Optimum model parameters

Division	Hydraulic conductivity value	Zone	Kx = Ky (cm/sec)	Kz (cm/sec)	Specific storage (m ⁻¹)	Specific yield (-)	Porosity (-)
Extrusive Basalt	First Value	A, B, C	2.37×10 ⁻²	2.37×10 ⁻²	2.3×10 ⁻⁵	0.13	0.4
		A	0.04×10 ⁻²	0.14×10 ⁻³	2.3×10 ⁻⁵	0.13	0.4
	Correction Value	B	0.74×10 ⁻²	0.14×10 ⁻³	2.3×10 ⁻⁵	0.13	0.4
		C	2.37×10 ⁻²	0.14×10 ⁻³	2.3×10 ⁻⁵	0.13	0.4
Seoguiipo Formation	First Value	A, B, C	1.35×10 ⁻⁴	1.35×10 ⁻⁴	2.0×10 ⁻⁵	0.12	0.1
		A	0.04×10 ⁻⁴	1.35×10 ⁻⁵	2.0×10 ⁻⁵	0.12	0.1
	Correction Value	B	0.72×10 ⁻⁴	1.35×10 ⁻⁵	2.0×10 ⁻⁵	0.12	0.1
		C	1.35×10 ⁻⁴	1.35×10 ⁻⁵	2.0×10 ⁻⁵	0.12	0.1

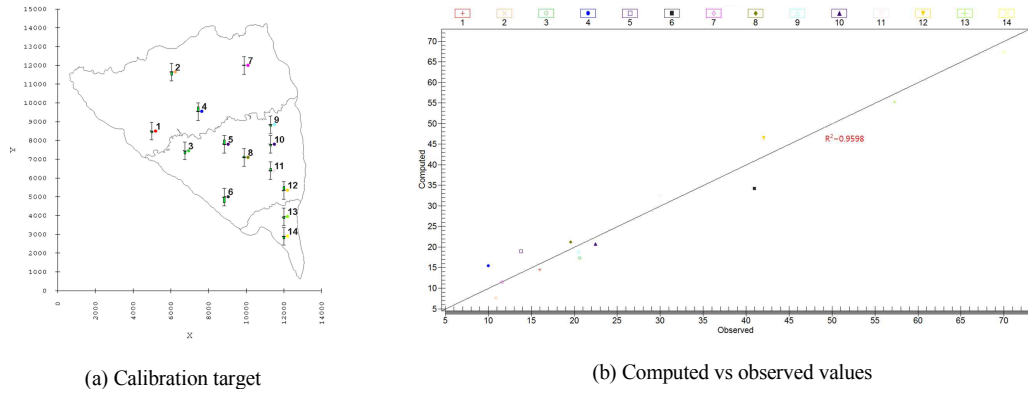


Fig. 3. Computed vs observed values.

평균오차는 -0.286 m, 평균제곱오차는 3.519 m, R²는 0.9598로 분석되었다.

또한 Fig. 4는 최적매개변수를 이용한 정류상태 지하수위 분포도를 형성하고 있으며, 지하수 유동방향은 남쪽 한라산에서 발원하여 해안지역으로 유입되는

형상이며, 지하수위 평균분포는 해안지역(A zone)의 경우 EL. 14.6 m, 중산간지역(B zone) EL. 37.5 m, 산간지역(C zone) EL. 88.1 m으로 분석되었다.

Table 2. Comparison of observed and computed groundwater level

Well	Observed (EL.m)	Simulated ground water (EL.m)	Residual head (EL.m)
1	16.000	14.453	1.547
2	10.872	7.526	3.346
3	20.655	17.262	3.392
4	10.000	15.438	-5.438
5	13.805	19.005	-5.200
6	40.997	34.212	6.785
7	11.611	11.482	0.128
8	19.570	21.240	-1.670
9	20.505	18.932	1.573
10	22.494	20.744	1.750
11	30.000	32.447	-2.447
12	42.031	46.505	-4.474
13	57.299	55.241	2.057
14	70.000	67.342	2.658
average	25.720	25.460	0.27

※ 관측수위는 2000~2010 측정된 수위의 평균값

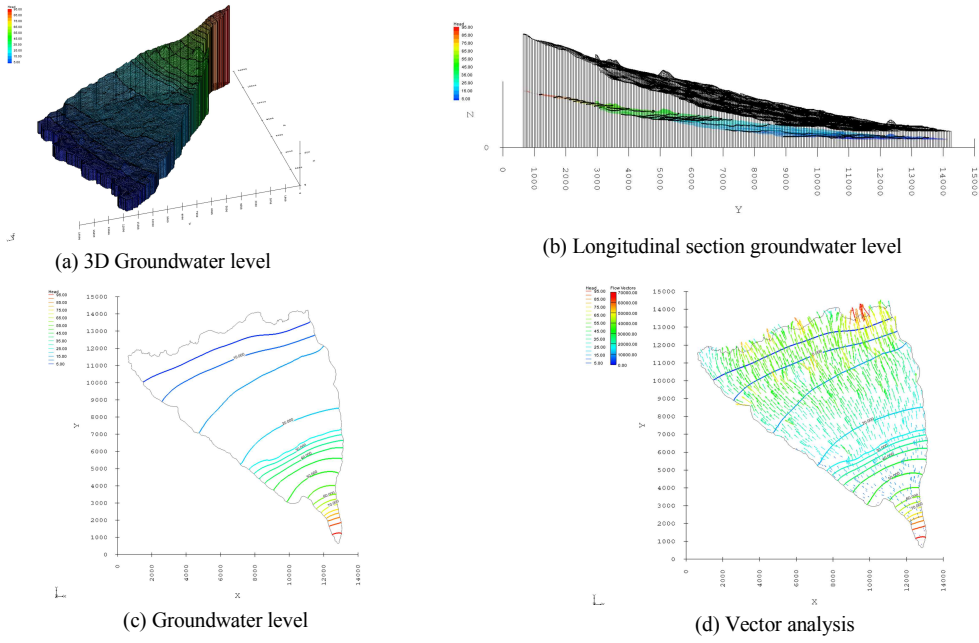


Fig. 4. Groundwater level and vector analysis.

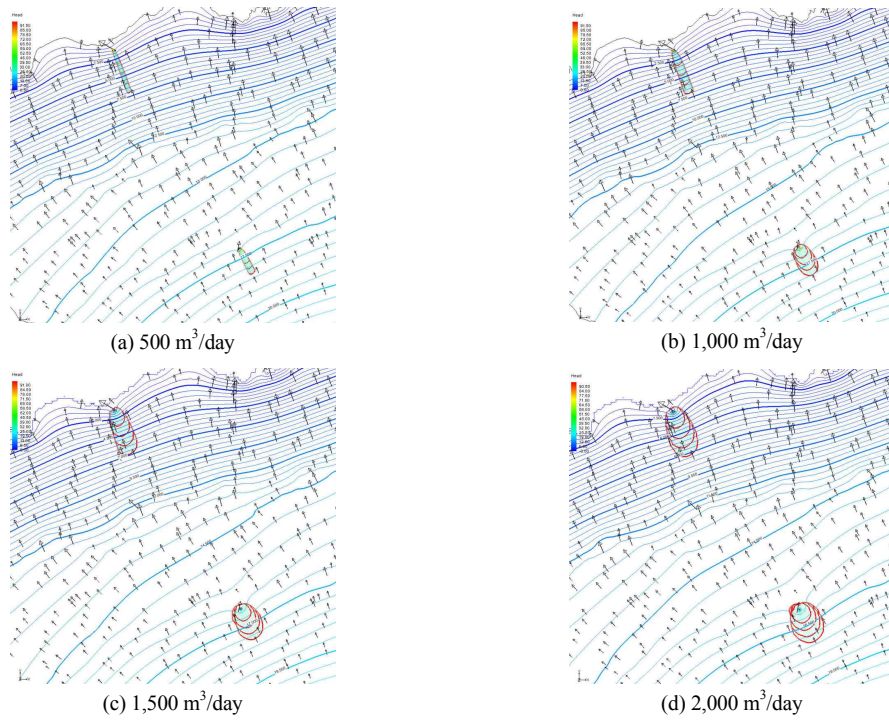


Fig. 5. Capture zone according to pumping rate.

3.1.3. 해안지역 및 중산간지역 양수량에 따른 포획구간 비교

양수량에 따라 지하수계는 영향을 받게 되며 이를 예측하기 위하여 MODPATH모형을 이용하여 포획구간 및 수위 강하량을 분석하였다. 먼저 해안지역과 중산간지역의 양수량에 따른 포획구간 분석을 위해 양수량은 500 m³/day, 1,000 m³/day, 1,500 m³/day, 2,000 m³/day, 로 구분하여 양수 기간 100일, 200일, 300일, 400일에 대한 포획구간 분석을 실시하였다.

해안지역의 경우 Fig. 5에서 나타낸 바와 같이 양수량이 증가함에 따라 상류 지역으로 타원형의 형태의 포획구간이 점차 커지는 것을 알 수 있으며, 중산류 지역은 원형에 가까운 포획구간으로 양수량 증가에 따라 커지는 것으로 분석되었다.

지하수유동의 경우 정류상태의 지하수유동방향과 크게 차이가 없었으며, 양수량에 따른 지하수수위 변화는 Table 3 및 Fig. 6과 같이 중산간지역과 해안지역의 지하수위 감소비는 0.7704 m³/day 및 0.6126 m³/day으로 분석되었다. 이 결과로 볼 때 중산간지역에서 해안지역보다 양수량 증가에 따른 수위강하 폭이 약 1.25 배 정도 큰 것으로 분석되었다.

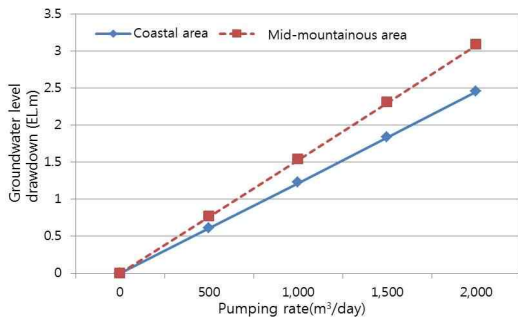


Fig. 6. Groundwater level drawdown according to pumping rate.

Table 3. Groundwater drawdown according to pumping rate

Groundwater level (EL.m)	0 ①	Pumping rate (m ³ /day)							
		500		1,000	1,500	2,000			
Zone		②	①-②	③	①-③	④	①-④	⑤	①-⑤
Coastal area	1.468	0.859	0.609	0.247	1.221	-0.366	1.834	-0.982	2.450
Mid-mountainous Area	17.624	16.858	0.766	16.090	1.534	15.318	2.306	14.542	3.082

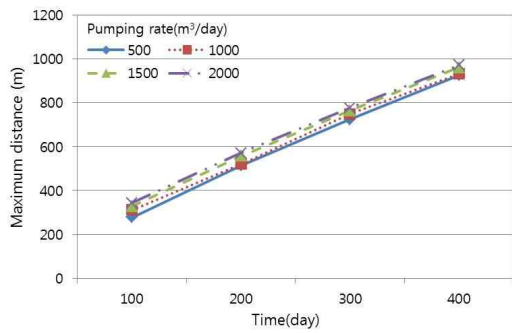
다음으로 양수량에 따른 시간 변화가 포획구간에 미치는 영향에 대하여 포획구간 거리와 포획 면적에 대하여 Table 4 및 Fig. 7과 같이 분석을 실시하였다.

해안지역 양수 기간에 따른 포획구간의 길이변동 비율(영향을 미치는 구간)은 양수량을 500, 1000, 1500, 2000 m³/day로 할 경우 각각 215.69 m/day, 209.54 m/day, 210.92 m/day, 209.51 m/day로 분석되어 양수 기간에 따른 포획구간거리는 큰 변동이 없는 것으로 분석 되었다. 다음으로 중산간지역의 포획구간 길이 변동비율은 각각 129.70 m/day, 138.47 m/day, 149.07 m/day, 152.65 m/day로 분석되었으며 양수량 1,500 m³/d을 기준으로 포획구간 길이 변동비율이 차이가 발생하는 것으로 분석되었다.

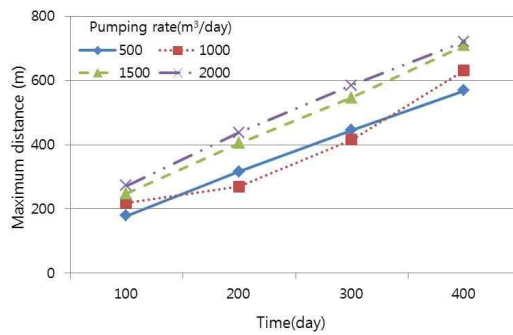
해안지역 양수 기간에 따른 포획구간의 면적변동비율(영향을 미치는 구간)은 양수량을 500 m³/day, 1000 m³/day, 1500 m³/day, 2000 m³/day로 할 경우 각각 17,853 m²/day, 58,012 m²/day, 86,818 m²/day, 113,251 m²/day로 분석되어 양수 기간에 따른 포획구간 면적의 경우 양수량이 증가할수록 포획구간 면적이 증가하는 것으로 분석 되었다. 또한 중산간지역의 경우 포획구간의 면적변동비율은 양수량을 500 m³/day, 1000 m³/day, 1500 m³/day, 2000 m³/day로 할 경우 각각 18,118 m²/day, 40,203 m²/day, 89,715 m²/day, 124,755 m²/day로 분석되어 양수 기간에 따른 포획구간 면적의 경우 양수량이 증가할수록 포획구간 면적이 급격히 증가하는 것으로 분석 되었다.

Table 4. Capture zone according to pumping rate

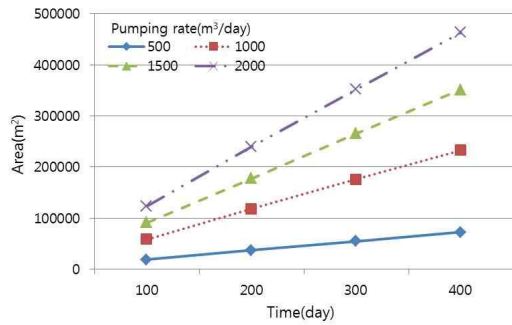
Zone	Pumping rate (m ³ /day)	Maxium distance of capture zone (m)				Capture zone Area (m ²)			
		500	1,000	1,500	2,000	500	1,000	1,500	2,000
Coastal area	100	278.15	311.06	329.05	343.31	19,671	42,846	94,296	129,704
	200	513.92	521.31	557.66	571.67	38,441	84,497	187,017	258,077
	300	725.29	750.53	765.88	778.18	56,546	124,672	276,951	383,200
	400	926.65	933.11	962.71	972.82	74,028	163,464	363,368	503,846
Mid-mountai nous Area	100	179.05	218.44	247.70	272.89	18,580	58,677	91,492	123,484
	200	316.26	269.83	405.14	437.98	36,924	118,393	177,707	240,124
	300	444.87	415.00	546.66	584.47	54,778	175,972	265,238	352,042
	400	568.50	631.62	709.36	720.94	72,140	232,856	351,709	463,681



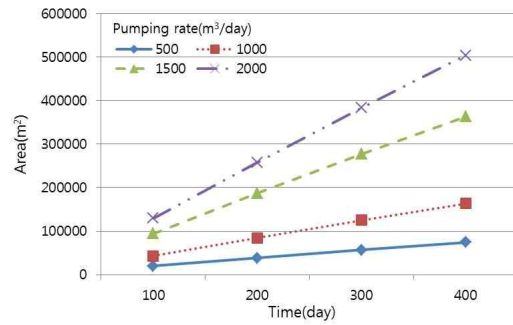
(a) Maxium distance (Coastal area)



(b) Maxium distance (Mid-mountainous Area)



(c) Capture zone Area (Coastal area)



(d) Capture zone Area (Mid-mountainous Area)

Fig. 7. Capture zone analysis.

4. 결론

연구에서는 양수량에 따른 해안저지대지역과 중산간지대의 지하수 포획구간특성에 대하여 분석하였다. 연구를 위하여 화산도서지역인 제주도를 대상으로 하였다. 분석을 위하여 지하수 유동해석 모형인 MODFLOW모형과 MODPATH모형을 이용하였으며, 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

먼저, 양수 시간변화가 포획구간의 길이에 미치는 영향을 분석한 결과 해안저지대지역의 포획구간 길이가 중산간지대의 포획구간 길이에 비하여 변화비크게 나타났다. 다음으로, 해안저지대지역에서는 양수량과 포획구간의 길이가 비슷하게 변화하고 있으나, 중산간지역에서는 양수량이 1,500 m³/day 넘어서게 되면 포획구간의 길이가 증가하는 것으로 나타났다.

마지막으로, 양수 시간 변화가 포획면적에 미치는 영향을 분석한 결과 해안저지대지역과 중산간지역에서의 면적변화경향이 비슷하게 나타났다. 특히, 양수량이 많아질수록 포획면적 변화 경향이 뚜렷하게 증가하고 있음을 알 수 있었다.

본 연구를 바탕으로 향후 화산도서지역의 해안지역 및 중산간지역의 적정양수량 결정에 이용될 수 있도록 하였으며, 추후 연구에서 밀집 관정을 대상으로 포획구간의 변화를 추가적으로 분석하여 관정군이 포획구간이 미치는 영향을 분석할 필요가 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- Ahn, S. S., 2008, Groundwater movement analysis in Island basin using GMS-MODFLOW model, Korea society of water science and technology, Vol.16, No.2, 49-59.
- Brown, R. M., 1968, Hydrology of tritium in Ottawa Valley, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol 21, 199-216.
- Cheo, Y. Y., 1997, Groundwater movement analysis system, Doctoral dissertations, Yeungnam University.
- Gupta, S. K., Tanji K. K., 1997, Computer program for solution of large, sparse, unsymmetric systems of linear equations, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.11, 1251-1259.
- Han, J. S., 1999, 3D Groundwater model and application, Parkyoungsa.
- Hubbert, M. K., 1940, Theory of Groundwater motion, *J.Geol*, Vol 48, 785-944.
- Jeju Special Self-Governing Province, 2010, Jeju island water hydrogeologic map.
- Korea Water Resources Corporation, 2012, Water management plan.
- Narasimhan, T. N., Witherspoon, P. A., 1976, An intergrated finite difference method for analyzing fluid flow in porous media, *Water Reour. Res*, Vol 12, 57-64.
- Oh, Y. H., 2011, Estimation of long-term groundwater recharge in island basins using GIS & land cover data, Master thesis, Kyungil University.
- Rowan, M. E., 1998, Use of MODFLOW and MODPATH to Evaluate Groundwater Capture in a Complex Geologic Setting, Colorado School of Mines, 961-968.
- Wang, H. F., Anderson M. P., 1982, Introduction to Groundwater Modeling-Finite Difference and Finite Element methods, W.H. Freeman and Company, 22-30.