

ORIGINAL ARTICLE

수리전도도 적용 방식에 따른 지하수특성 분석

안승섭 · 박동일^{1)*}

경일대학교 건설공학부, ¹⁾제주국제대학교 토목공학과

Groundwater Characterization according to Hydraulic Conductivity Input Method

Seung-Seop Ahn, Dong-Il Park^{1)*}

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

¹⁾*School of Civil Engineering, Jeju International University, Jeju 690-714, Korea*

Abstract

Hydraulic conductivity is an important parameter in the analytical model of groundwater. This study analyzed the groundwater movement characteristics by estimating optimal parameters according to hydraulic conductivity input methods with the MODFLOW model which is widely used. It first estimated the optimal parameters by dividing hydraulic conductivity zones by attitude. Next, it estimated optimal parameters by geological characteristic. It analyzed the groundwater movement characteristics by applying the recharge quantity and amount of evapotranspiration of drought periods and flood years with the estimated parameters.

As the result was analyzed that there are differences of observation water level values according to hydraulic conductivity input methods but there is no big differences of overall groundwater movement characteristics by hydraulic conductivity input method, the two methods have found to be applicability in analyses of groundwater. So, it is judged that studies on more exact application of hydraulic conductivity and the application methods are needed.

Key words : Groundwater, MODFLOW, Hydraulic Conductivity

1. 서 론

산업의 발달과 인구의 밀집으로 수자원의 수요는 증가하고 있지만 공급량은 한정 되어있다. 특히 화산도서 지역인 제주특별자치도의 경우 지역적인 특성으로 인해 강수량 편차가 심하여 지표수를 이용한 수자원 공급에 비해 지하수를 이용한 수자원 공급이 주를 이루고 있는 실정이다. 따라서 지하수이용량이 많은 화산도서의 지하수관리계획에 대한 명확한 체계와 평가가 필요하다.

제주특별자치도에서는 효율적인 지하수관리계획을 위해 제주특별법으로 지하수법령을 제정하여 체계적인 보존관리 중에 있으며, 지하수영향조사서를 이용하여 개발에 따른 지하수 영향평가를 운영하고 있다. 과거 2차원 분석을 통한 지하수유동 분석이 주를 이루었다면 현재는 3차원 유한차분법모형을 많이 사용하고 있으나, 연 구자별로 각각의 적용방식들이 다양하여 지하수영향조사서의 획일적인 구축 매뉴얼이 필요한 실정이다. 특히 지하수 모의 모형의 구축에 있어 투수계수는 중요한 매

Received 9 March, 2015; Revised 1 April, 2015;

Accepted 6 May, 2015

*Corresponding author : Dong-Il Park, School of Civil Engineering, Jeju International University, Jeju 690-714, Korea
Phone: +82-54-335-7074
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.

개변수로 작용한다. 투수계수의 값을 어떻게 적용하느냐에 따라서 도출되는 결과가 달라지므로 이러한 매개변수가 미치는 영향에 대한 연구가 필요한 실정이다.

기존 화산도서지역의 지하수관련 연구를 살펴보면 MODFLOW 모형을 이용하여 제주시를 대상으로 지표수와 지하수사이의 유동특성 분석(Jung, 2003)과 제주도 지역에 적용할 수 있는 지하수 흐름 모델 개발에 관한 연구(Jung, 2010)를 진행한바 있다. 또한 지표수와 지하수를 연계하여 관정 양수기간이 지하수 유동에 미치는 영향에 대한 연구(Seo, 2009; Ahn, 2009)를 진행하였다. 도서지역의 포화구간을 분석하여 대상지역의 안정채수량을 산정(Park, 2009)하여 MODFLOW모형에 적용하여 토지이용 변화에 따른 지하수유동특성 연구(Park, 2010)를 진행하였으며, 또한 수리전도도 매개변수추정방법에 따라 화산도서지역의 해수침투특성 및 지하수 유동분석 연구(Park, 2010)를 진행한 바 있다.

기존 연구과정을 살펴보면 일반적으로 대부분의 투수계수 적용방식은 실제 관측 자료를 이용하여 적용을 하거나, 큰 유역의 경우 표고별로 투수계수를 추정하여 적용하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 지하수모의 분석에 중요한 투수계수 적용방식을 기존 표고별 적용방식과 대상유역의 지질도를 이용하여 지질별 투수계수를 추정하여 이에 따른 지하수특성을 비교 분석하였다.

2. 지하수유동 모형의 기본이론

지하수 분석의 경우 대수층 내에서 발생하는 지하수 유동은 대수층의 조건에 따라 시·공간적으로 변동이 심하고 자연 상태 대수층내의 지하수유동 상태를 나타내는 특성인자들이 다양하여 지하수특성분석에 모두 반영한다는 것은 매우 어려운 실정이다(Han, 1999). 따라서 본 연구에서는 이러한 문제 해결을 위한 수치해석적인 방법으로 유한차분법모형인 MODFLOW모형을 사용하여 연구를 진행하였다.

전 세계적으로 널리 사용되고 다양한 수리지질학적 구조를 손쉽게 모의할 수 있는 MODFLOW모형의 유한차분법은 지배방정식에서부터 직접 유한차분식을 유도하고 격자와 격자 사이의 관계에 바탕을 둔 pointwise approximation에 의한 방법으로 3차원 유한차분법에 근

거한 모형으로서 일정한 밀도를 가지는 다공성 매질을 통해 흐르는 지하수 유동은 다음과 같은 편미분 방정식으로 나타낼 수 있다(Han, 1999).

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

여기서, K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} : x, y, z방향에 따른 투수계수,
 h : 지하수의 수두,
 S_s : 다공질포화매체의 비저유계수,
 t : 경과시간,
 W : 단위포화체적당 유·출입량 이다.

MODFLOW모형은 주 프로그램과 여러 모듈(Module)인 서브루틴(Subroutine)으로 이루어져 있으며, 이 모듈들은 각각의 패키지(Packages)로 묶여진다. 각각의 패키지는 하천 RIV (river)이나 배수 DRN (drain)와 관정 WELL (Well)과 같은 특정한 수리지질학적 특성 인자를 SIP, PCG, SOR, 등의 방법으로 모의를 할 수 있다(Han, 1999). 본 연구에서는 이러한 투수계수 적용 패키지를 이용하여 적용 방식에 따른 지하수영향을 분석을 진행하였다.

3. 모형의 적용 및 입력자료

3.1. 연구대상유역 선정 및 초기 모형매개변수 설정

투수계수 추정방법에 따른 지하수유동특성을 알아보기 위하여 연구 대상유역을 제주도 구좌와 성산 유역을 대상으로 모의영역을 구성하였다. 구좌와 성산유역의 경우 제주특별자치도에서 기저지하수의 부존량이 약 80%를 차지하며, 염지하수와 담수지하수의 개발량과 가장 많은 곳으로 타 지역에 비해 정확한 관측데이터가 많은 지역이다. 대상유역의 격자 구성은 500 m × 500 m 크기의 Grid로 X축 23 km Y축 26 km의 유역을 총 239,200개로 구성한 후, 유역경계에 해당하는 폴리곤(Polygons)을 이용하여 활성화셀과 유역 외부는 비활성화 셀로 정의하여 프로그램 상 모의가 가능한 최대 격자 개수로 구성하였다(Fig. 1.).

본 연구에서 분석하고자하는 투수계수 적용방식에 따

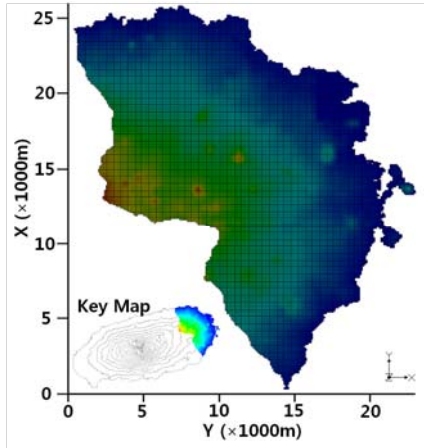


Fig. 1. Grid and location map of study area.

른 평면적 지하수위와 지하수유동특성 분석을 위해, 지층 구조를 구분함에 따른 격자 개수를 최소화하기 위해 지층구조를 단일층으로 설정하였다. 단일 지층구조의 상부표고는 DEM자료를 이용, 하부표고는 서귀포층과 미교결퇴적층의 경계자료를 이용하여 지층구조의 보간을 실시하였다.

대상구역의 초기 경계조건의 입력을 위해 각각의 Map Coverage를 생성하였다. 제주특별자치도 수자원관리종합계획(2013-2022)의 고도별로 계산된 최근 20년 평수기에 해당하는 함양량과 증발산량을 Fig. 2(a)와 같이 4개의 지대로 단순화하여 table. 1과 같이 입력하였다. 또한 해안지역으로 지하수가 유출되도록 해안선을 일정수 두경계로 설정하였다.



(a) Recharge rate, evapotranspiration, Porosity Coverage



(b) Hydraulic conductivity (Elevation type)



(c) Hydraulic conductivity (Geologic map type)



(d) Observation water level (115 wells)

Fig. 2. Map coverage configuration of the study area.

Table 1. Hydraulic conductivity to distribution stratigraphy

Layer		Elevation (EL.m)	Recharge rate (m/d)	Evapotranspiration (m/d)	Porosity (%)
Extrusive basalt	Zone 1	0 ~ 200	2.474×10^{-3}	1.778×10^{-3}	30
	Zone 2	200 ~ 400	2.444×10^{-3}	1.745×10^{-3}	30
	Zone 3	0 ~ 200	3.035×10^{-3}	1.543×10^{-3}	30
	Zone 4	400 ~ 400	3.061×10^{-3}	1.531×10^{-3}	30

다음으로 투수계수 보정을 위하여 두 가지 적용방식을 이용하여 최적의 매개변수를 산출하였다. 먼저 Fig. 2(b)와 같이 기존 연구에서 가장 많이 사용하는 방식인 표고별 지대를 구분하였으며, 다음으로 Fig. 2(c)와 같이 대상구역의 지질도를 이용하여 각 지질별로 최적의 매개

변수를 추정하였다.

3.2. 투수계수 적용방식에 따른 매개변수 추정

매개변수 추정은 Fig. 2(d)와 같이 대상구역의 전체 관정 932개소 중 비교적 수위가 안정적이고 연구대상유

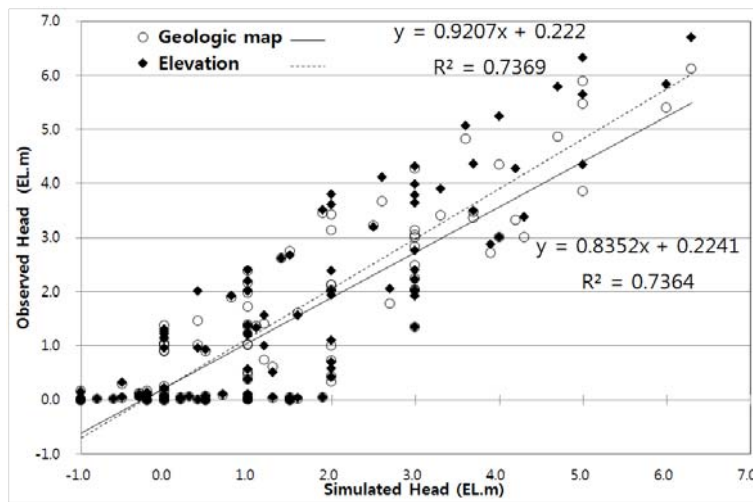


Fig. 3. Simulated and observed groundwater level.

Table 2. Optimal parameters according to the input method

Layer	Elevation (EL. m)	Elevation type		Layer	Geologic map type		
		Kx = Ky (m/d)	Kz (m/d)		Kx = Ky (m/d)	Kz (m/d)	
Extrusive basalt	Zone 1	0 ~ 100	22.84	Extrusive basalt	Qb (1)	27.48	2.75
	Zone 2	100 ~ 200	19.45		Qb (2)	25.98	2.60
	Zone 3	200 ~ 300	3.45		Qb (3)	20.45	2.05
	Zone 4	300 ~ 400	5.84		Qta (s)	4.84	0.48
	Zone 5	0 ~ 100	24.49		Qtb (2)	14.54	1.45
	Zone 6	100 ~ 200	20.14		Qtb (3)	16.49	1.65
	Zone 7	200 ~ 300	8.48		0.85		

Table 3. Water budget analysis result comparison (unit : Million m³/year)

Water resources management master plan (2013)			Research result			Distinction		
Recharge rate (m/d)	Evapotranspiration (m/d)	Runoff (m/d)	Recharge rate (m/d)	Evapotranspiration (m/d)	Runoff (m/d)	Recharge rate (m/d)	Evapotranspiration (m/d)	Runoff (m/d)
284	177	96	278.63	173.80	104.82	5.37	-8.82	3.20

역에 전체적으로 분포할 수 있는 관정 115개소를 선택하였으며, 기존 연구결과와 함양량, 증발산량, 공극률은 기존 연구결과 제시된 값을 고정시키고, 투수계수를 변화하여 매개변수를 추정하였으며, 추정된 결과와 기존 연구결과와 물수지분석값과 관측수위값을 비교하여 최적의 투수계수를 추정하였다.

투수계수 적용방식에 따른 관측수위와 계산수위값을 비교한 결과 Fig. 3.과 같으며, 표고별 투수계수를 추정 한 결과, 표고 El. 100 m로 구분한 총 7개 지대에 최적의 매개변수가 Table 2.와 같이 분석되었으며, 관측정과의 관계식은 $y = 0.9207x + 0.222$ 으로 $R^2 = 0.7369$ 으로 분석되었다. 다음으로 지질도를 이용한 적용방식은 대상유역을 크게 6개로 구분하여 각각의 지질별 최적 매개변수를 산정한 결과 Table 2.와 같으며, 관계식은 $y = 0.8352x + 0.2241$, $R^2 = 0.7364$ 으로 분석되었다. 두 적용방식의 추정된 매개변수를 사용하여 수위를 비교한 결과 비교적 비슷한 지하수위가 분포하는 것으로 분석되었

다. 하지만 R²값이 다소 낮은 이유로 넓은 지역에 하나의 매개변수 값을 이용하여 많은 관측값을 보정하는 것에 다소 한계가 있어 나타나는 값으로 판단되었다. 하지만 기존 연구결과와 물수지분석을 비교한 결과 Table 3.과 같이 비교적 근사한 차이를 보이고 있어 두 적용 방식 모두 유역전체적인 지하수 유동특성분석에 적용성이 있음을 알 수 있었다.

3.3. 투수계수 적용방식 별 지하수 유동특성

투수계수 적용방식별 정류상태의 지하수 유동분석 결과, Fig. 4.는 표고를 이용하여 투수계수 적용 방식의 지하수등수두선과 유동방향이며, Fig. 5.는 지질도를 이용하여 투수계수 적용 방식으로 최적의 매개변수를 이용하여 모의한 지하수등수두선과 유동방향이다. 두 방식 모두 위치수두를 반영하여 해안으로 갈수록 지하수위가 낮아지며 지하수유동 방향은 해안방향으로 유동하는 것으로 분석되었으며, 두 방식에 지하수위 차이는 Fig. 6.과

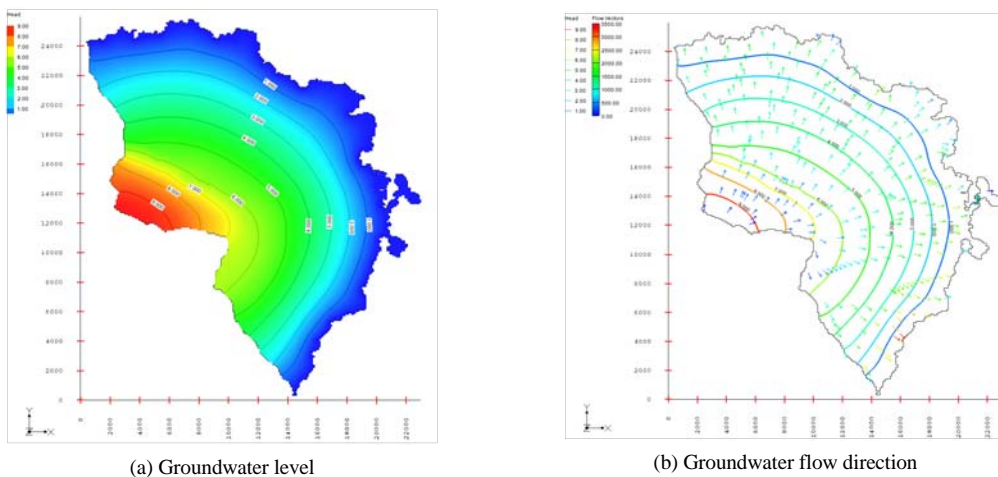


Fig. 4. Groundwater flow characteristics according to elevation type.

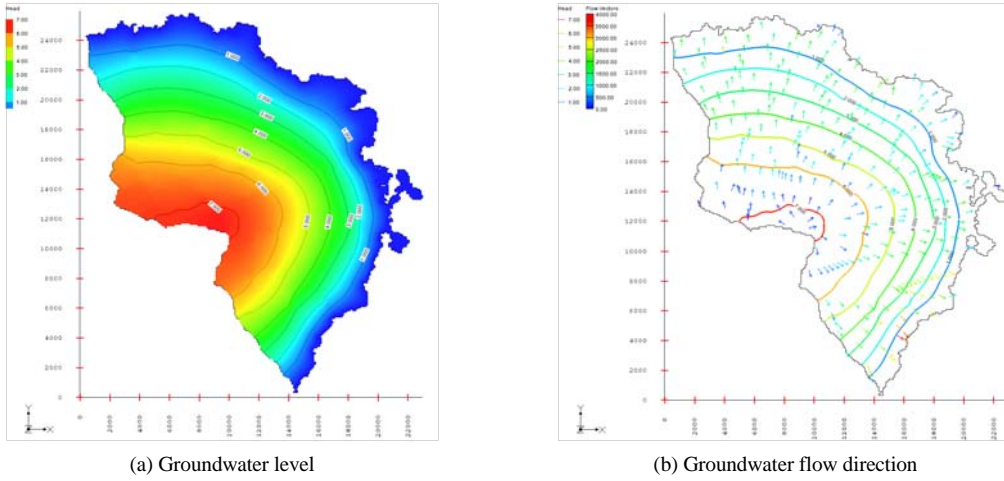


Fig. 5. Groundwater flow characteristics according to geologic map type.

같다. 수위차를 비교한 결과 대상유역의 중하단부에 지하수위차가 El. 1 m차이를 보이고 있으며, 관측정의 자료가 부족한 유역 상류지역에서 약 El. 3 m 가량 차이를

나타내고 있다. 이는 대상유역 상류지역에 관측수위인 관정의 자료가 부족하여 다소 차이가 나타나는 것으로 판단된다.

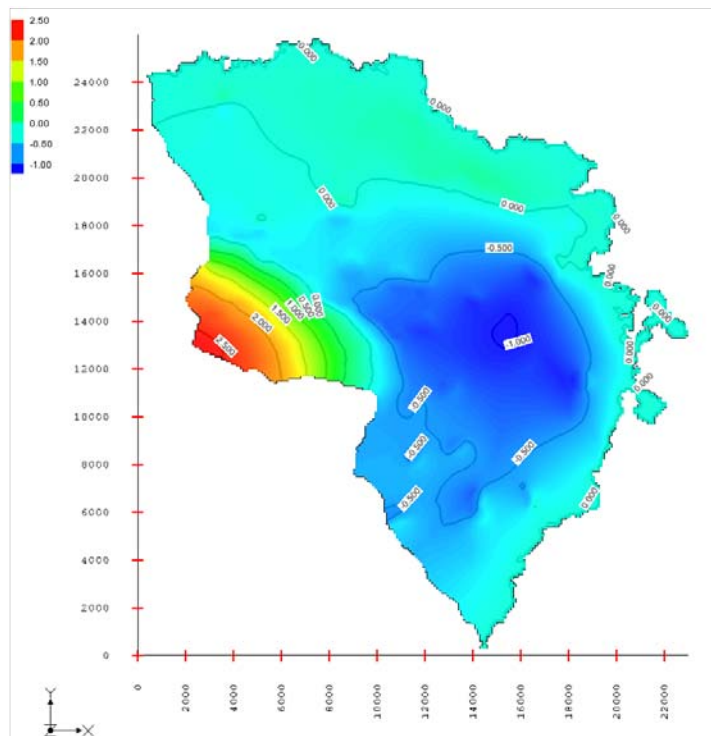


Fig. 6. Groundwater level according to input method. (Elevation type - geologic map type)

3.4. 갈수기, 풍수기 지하수 유동특성

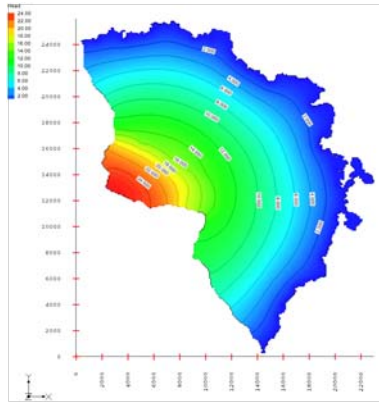
다음으로 20년 평균 갈수기와 풍수기에 해당하는 함양량과 증발산량을 적용하여 적용방식에 따른 지하수유동특성을 분석하였다. Fig. 2(a)의 지대별 초기 함양량

및 증발산량을 Table 4.와 같이 적용하였으며, 풍수기 값을 이용하여 분석된 적용 방식별 투수계수를 적용하여 분석을 실시하였다.

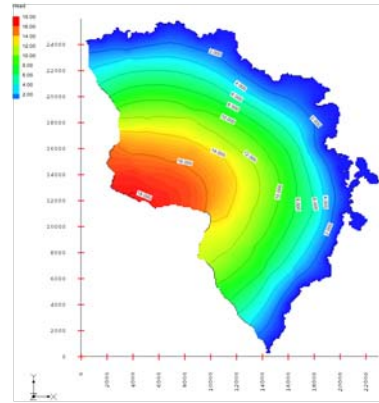
풍수기에 해당하는 함양량과 증발산량을 적용하여 분

Table 4. Zone-specific parameters according to seasonal hydrologic

Layer	Elevation (El.m)	Dry season		Wet season	
		Recharge rate (m/d)	Evapotranspiration (m/d)	Recharge rate (m/d)	Evapotranspiration (m/d)
Zone 1	0 ~ 200	1.681×10^{-3}	1.681×10^{-3}	4.078×10^{-3}	1.952×10^{-3}
Zone 2	200 ~ 400	1.658×10^{-3}	1.658×10^{-3}	4.014×10^{-3}	1.920×10^{-3}
Zone 3	0 ~ 200	2.165×10^{-3}	1.493×10^{-3}	4.255×10^{-3}	1.667×10^{-3}
Zone 4	400 ~ 400	2.041×10^{-3}	1.531×10^{-3}	4.082×10^{-3}	1.531×10^{-3}

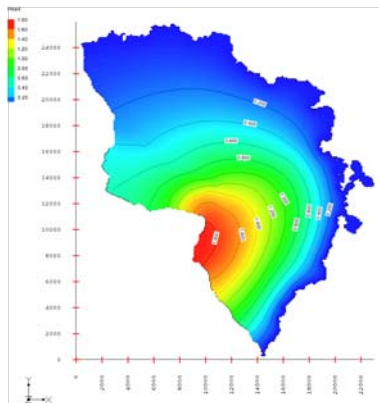


(a) Elevation type

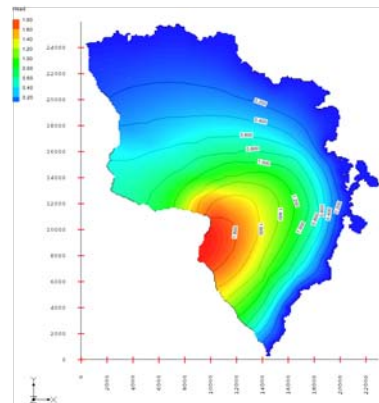


(b) Geologic map type

Fig. 7. Wet season groundwater level.



(a) Elevation type



(b) Geologic map type

Fig. 8. Dry season groundwater level.

석한 결과 Fig. 7.과 같으며, 표고를 이용한 결과 최대 지하수위는 유역 상류에서 약 El. 25 m로 분석되었으며, 평균 수위는 El. 13 m로 분석되었다. 다음으로 지질도를 이용한 결과 최대 지하수위는 약 El. 19 m, 평균지하수위는 약 El. 12 m으로 두 가지 적용 방식이 비슷한 것으로 분석되었다.

다음으로 갈수년에 해당하는 함양량과 증발산량을 적용한 결과 Fig.8.와 같이 지하수분포가 나타났으며, 두방식 모두 비슷한 지하수위 분포를 나타내고 있으며, 유역 내 최대지하수위는 약 EL. 2.3 m로 분석되었으며, 평균 지하수위는 약 EL. 0.9 m으로 분석되었다.

풍수기와 갈수기의 지하수위차이가 큰 것으로 분석되어 갈수기시에 지하수 이용에 대한 대책이 필요한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 제주특별자치도 구좌유역과 성산유역을 중심으로 투수계수 적용방식에 따른 지하수유동변화를 분석하였다. 유역 평면적 지하수 분석을 위하여 MODFLOW모형을 이용하였으며, 투수계수 적용방법에 있어서 표고별 적용방식과 지질도를 이용한 적용방식을 비교분석하였다. 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

먼저, 적용방식별 최적매개변수를 이용하여 지하수유동분석을 실시한 결과, 두 방식 모두 비교적 비슷한 지하수위와 유동형태를 나타내고 있으며, 물수지 분석 결과 역시 기존 연구 결과와 근사하게 분석되었다. 이는 두 적용 방식이 수문지질통계학적 접근방법에 있어 대상유역의 지하수 유동특성분석에 적용성이 있음을 알 수 있었다. 하지만 일부 지역에서 지하수위차가 발생하여 보다 많은 관측자료의 확보와 소규모 지역별로 분석할 필요가 있는 것으로 판단되었다.

따라서 본 연구에서 기존 투수계수 적용방식과 달리

지질도를 이용한 적용방식이 대상유역의 지하수유동해석에 있어 수문통계학적으로 적용성이 있는 것으로 판단되며, 추후 정밀지질도를 이용하여 각 지질별 투수계수를 산출한다면 지하수특성분석에 적용 및 분석적 측면에서 극대화 할 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCE

- Ahn, S. S., Park, D. I., Jung, D. J. Seok, D. K., 2009, Groundwater movement analysis according to groundwater-surface water interaction, Korea water resources association, 1945-1949.
- Ahn, S. S., Park, R. S., Park, D. I., Lee, S. I., 2011, Analysis of the Groundwater Movement characteristics in volcanic island area with geological features and land use pattern, The Society for Environmental Technology in Korea, 12(1), 43-55.
- Han, J. S., 1999, Pakyoung gallery, 3D Groundwater model and application.
- Jung, S. I., 2003, A study on the surfacewater and groundwater flow using MODLOW, M.Sc. Diss., Kyunghee Univ., Seoul, Korea.
- Korea water resources corporation, 2013, Groundwater management investigation report.
- Park, D. I., Cheol, M. S., Ahn, S. S., Choi, Y. Y., 2009, A study on determining the stable water yielding quantity of the coastal island areas, J. Korea Society Technology, 17(4), 55-64.
- Park, D. I., 2010, The groundwater movement according to land use change, M.Sc. Diss., Kyungil Univ., Gyeongbuk, Korea.
- Park, D. I., 2014, Seawater intrusion characteristics due to parameter estimation method of hydraulic conductivity in volcano island, PhD Diss., Kyungil Univ., Gyeongbuk, Korea.
- Seo, J. A., 2009, Modeling the groundwater flow system of Jeju Island, M.Sc. Diss., Kongju Univ., Kongju, Korea.