Journal of Environmental Science International
28(12); 1157~1169; December 2019

pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
https://doi.org/10.5322/JESI.2019.28.12.1157

ORIGINAL ARTICLE

지하수 모델을 이용한 제주도 지하수 유동특성 및 수리전도도 분석

김민철 · 양성기[1)*]
제주연구원, [1)]제주대학교 토목공학과

Analysis of Groundwater Flow Characterstics and Hydraulic Conductivity in Jeju Island Using Groundwater Model

Min-Chul Kim, Sung-Kee Yang[1)*]
Jeju Research Institute, Jeju 63147, Korea
[1)]Department of Civil Engineering, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

Abstract

We used numerical models to reliably analyze the groundwater flow and hydraulic conductivity on Jeju Island. To increase reliability, improvements were made to model application factors such as hydraulic watershed classification, groundwater recharge calculation by precipitation, hydraulic conduction calculation using the pilot point method, and expansion of the observed groundwater level. Analysis of groundwater flow showed that the model-calculated water level was similar to the observed value. However, the Seogwi and West Jeju watersheds showed large differences in groundwater level. These areas need to be analyzed by segmenting the distribution of the hydraulic conductivity. Analyzing the groundwater flow in a sub watershed showed that groundwater flow was similar to values from equipotential lines; therefore, the reliability of the analysis results could be improved. Estimation of hydraulic conductivity distribution according to the results of the groundwater flow simulation for all areas of Jeju Island showed hydraulic conductivity > 100 m/d in the coastal area and 1 - 45 m/d in the upstream area. Notably, hydraulic conductivity was 500 m/d or above in the lowlands of the eastern area, and it was relatively high in some northern and southern areas. Such characteristics were found to be related to distribution of the equipotential lines and type of groundwater occurrence.

Key words : Jeiu Island, Groundwater, Flow, Modeling, Hydraulic conductivity

1. 서 론

제주도는 화산활동에 의해 형성된 섬으로 지표수를 활용한 수자원 확보는 어렵지만, 지하수 함양량은 수문 총량의 40.6%로 전체 수자원의 90% 이상을 지하수로 이용하고 있다(Jeju Special Self-Governing Province, 2018). 최근 제주도는 인구와 관광객 급증, 특용작물 및 시설하우스 증가 등으로 인해 상수도 및 농업용수 수요량이

Received 8 October, 2019; **Revised** 30 October, 2019;
Accepted 2 December, 2019
***Corresponding author**: Sung-Kee Yang, Department of Civil Engineering, Jeju National University, Jeju 63243, Korea
Phone : +82-64-754-3451
E-mail : skyang@jejunu.ac.kr

ⓒ 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.

※ 본 논문은 2018년도 제주대학교의 박사 학위논문의 축약본(일부)입니다.

급격하게 증가하고 있어 안정적 용수공급을 위한 지하수 개발이 지속적으로 이루어지고 있다. 신규 지하수를 개발하기 위해서는 제주특별자치도 지하수 관리 조례에 따라 현장관측 자료와 함께 수치모델을 기반으로 한 지하수 개발에 따른 영향분석을 실시하도록 하고 있다. 특히, 지하수 개발에 의한 수위변동 및 유동특성 분석 등의 부정류(Transient)해석을 위해서는 우선 정상상태의 개념모델이 신뢰할 수 있도록 구축되어야만 한다. 개념모델 구축을 위해 모델에 입력되는 주요 인자는 유역경계, 지층구조, 지하수 함양량, 지하수위 관측정, 수리전도도 등이며, 모의된 분석결과가 지하수위 관측자료와 부합하도록 매개변수를 보정하여 모델을 구축하고 있다(Ko, 2016).

지하수 모델 입력인자 중 유역경계는 지표수 유역으로 구분된 16개의 소유역으로 적용되며(Jejudo, 2003), 지하수 함양량은 2013년 제주특별자치도 수자원관리종합계획에서 물수지 분석을 통해 산정된 20년(1992~2011년)평균값을 입력하고 있다. 지하수위 자료는 도내 133개소의 지하수위 관측망 자료를 활용하고 있으며, 수리전도도는 지하수 관정 개발당시 산정된 결과를 모델에 입력하고 있다. 그러나 모델에 입력되는 단일 인자들의 적용방법에 대하여 다양한 문제점을 가지고 있다. 제주지역은 지역별 표고와 지하수위간의 일정한 관계를 찾기 어려울 정도로 대수층의 수리적 차이가 크게 발생하고(Choi, 1999), 전역 적으로 표고와 지하수위의 상관관계가 낮아 지표수 유역을 지하수 유역으로 적용하기에는 어려움이 있다(Kim and Yang, 2019). 지하수 함양량은 과거 물수지 분석을 통해 산정된 1992~2011년의 평균값을 모델에 입력하고 있지만 모델의 검·보정을 위한 지하수위 자료는 물수지 분석 이후의 관측된 자료로 활용되고 있어 분석방법에 문제점이 내재되어 있다. 지하수위 관측정은 도내 133개소가 설치되었으나, 16개의 소유역 중 10개소 미만의 관측정이 설치된 유역이 11개로 모델 분석결과를 검·보정하기 위한 관측정 수가 적어 모델결과의 신뢰성을 판단하기가 매우 어렵다. 또한 수리전도도는 공간적으로 비균질적인(heterogeneity) 특성이 나타나므로 수리전도도를 예측하기가 매우 어렵다. 실무에서는 분석결과의 신뢰성을 확보하기 위해 양수시험을 통해 산출된 결과를 이용하지만, 소수의 자료를 연구지역 전체에 대푯값으로 적용하고 있어 모델링 분석결과에 대한 신뢰성은 낮아질 수밖에 없는 실정이다.

본 연구에서는 제주도의 지하수 흐름을 보다 현실적으로 도식화하고 유동특성을 분석하기 위하여 지하수 모델에 입력되는 지하수 소유역 경계와 지하수 함양량, 지하수위 관측지점, 수리전도도 적용방법을 개선하여 적용하였다. 또한 모델링 분석 결과를 토대로 제주도 전역의 수리전도도 분포 특성 공간적으로 분석하고, 수리전도도 분포를 지하수위 특성과 비교하여 상호관계를 고찰하였다.

2. 지하수 모델 입력자료 구축

2.1. 소유역경계

제주도의 지하수 유역은 4개의 중유역과 16개의 소유역으로 구분하고 있다. 2003년 제주도와 수자원공사에서는 수문지질학적 특성에 의거하여 지하수 관리유역 구분을 시도하였으나, 지하수 분수령을 세분화하기에는 한계가 있어 1:5,000 수치지형도의 지형, 하천, 지표분수령 등 지표특성을 고려하여 설정된 16개의 소유역을 지하수 유역으로 제시하였다(Fig. 1).

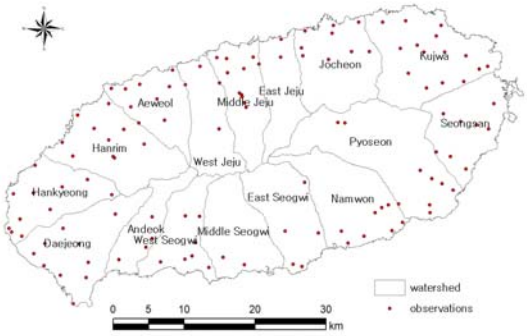


Fig. 1. Watershed and Groundwater Observations of Jejudo (2003).

그러나 Na et al.(2007)은 제주도의 지하수 해석을 위해 적용되는 유역설정은 지표유역을 기준으로 분석되고 있어, 지하수 모델분석의 검·보정 과정과 결과에 대해 면밀한 검토가 필요하다고 제시하였다. Kim et al.(2015)과 Park et ak.(2016)은 지표유역을 기준으로 모델링 분석시 관측수위와 계산수위를 유사하게 분석할 수 있지만, 유동방향에 대한 결과가 실제 지하수 흐름과 상이하게

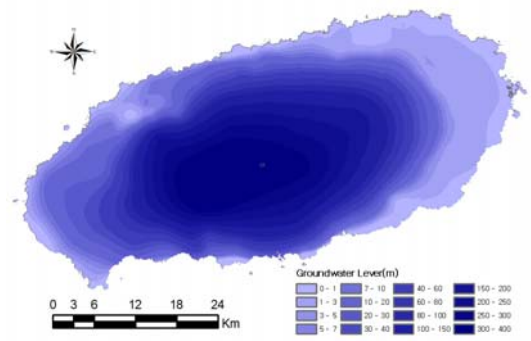


Fig. 2. Groundwater contour map in Jejudo.

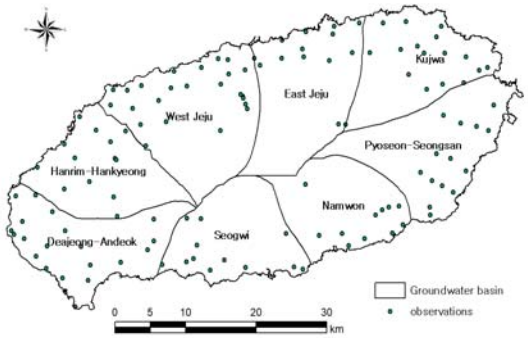


Fig. 3. 8watershed of Jejudo.

분석되므로 지하수 흐름에 대해서도 감·보정이 필요하다고 제시하였다. 또한, Ko(2016)에 의하면 제주지역의 독특한 지하수위 특성으로 인해 동일유역 내에서도 표고와 지하수위가 상반된 결과가 나타나고 있어 지하수 유동해석의 감·보정에는 한계가 있다고 제시하였다. 특히, 지하수 유동 해석을 위해서는 3차원 수치해석 모형이 적용되는데 수치해석 모형에서의 활성화 경계(Boundary)는 지하수 유역을 기준으로 설정되며, 지하수 유역구분은 지하수 모델 분야에서 가장 중요한 요소로 강조되고 있다(Feanke et al., 1987; Franke and Reily, 1987).

따라서 이 연구에서는 지하수위 등수위선을 기준으로 지하수 경계를 설정하여 소유역을 구분하였다(Kim and Yang, 2019). 지하수위 데이터는 125개소의 지하수위 관측정에서 2012년부터 2016년까지 관측된 자료를 이용하였으며, 지하수위 등수위선은 Kriging 기법을 적용하여 작성하였다(Fig. 2). 지하수 경계는 지하수 흐름방향과 장·단경, 소유역 내 지하수위 관측소 위치를 고려하여 8개의 소유역으로 구분하였다(Fig. 3)

2.2. 지하수 함양량

지하수 함양량을 추정하는 방법으로는 물수지, 토양수분수지, 기저유출분리, 지하수위 변동, 지하수위 감수곡선 등 다양한 방법이 있으며, 각각의 지하수 함량량 산정방법은 연구자, 또는 연구의 개념에 따라 상대적인 오차와 장단점이 있다(Yun et al, 2009). 본 연구에서는 강수분석을 수행한 후 제주특별자치도 수자원종합계획 2013-2022(2013)에서 물수지 방법으로 산정된 함양율 44.5%를 적용하여 유역별 함양량을 산정하였다.

도내에는 2016년 기준 총 91개소의 강우관측소가 있으며, 이 연구에서는 지하수위의 관측 자료와 동일시기로 적용하기 위해 2012년부터 2016년까지 측정된 강우관측소 71개소의 자료를 활용하였다(Fig. 4.). 제주도의 강수특성은 고도에 의해 편차가 크게 나타나므로 등우선법을 적용하였다(Jung, 2013).

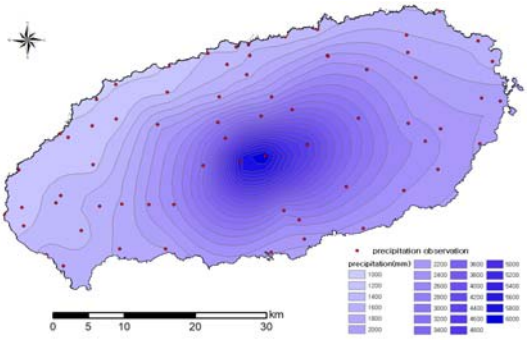


Fig. 4. observation station and Isohyetal map of Jejudo.

강우관측소의 지점별 데이터를 기반으로 Fig. 4과 같이 등우선을 구축한 후 각각의 소유역 면적과 등우선 간격에 따라 4~5개의 함양경계를 설정하고, 경계지역의 면적을 고려하여 면적강우량을 산정하였다. 산정된 면적강우량에 제주도의 평균 함양율 44.5%를 적용하여 소유역별 지하수 함양량을 산정하였다(Table 1).

2.3. 지층구조

제주도는 수십회의 용암분출로 형성된 화산섬으로 용암분출 시기에 따라 용암류의 특성이 다르고, 지층구조는

Table 1. Groundwater recharge by subwatershed

unit : cm/s

Subwatershed	Zone1	Zone2	Zone3	Zone4	Zone5
Namwon	3.26.E-06	3.91.E-06	4.88.E-06	6.02.E-06	7.25.E-06
Seogwi	3.16.E-06	3.90.E-06	4.88.E-06	6.02.E-06	7.41.E-06
Pyoseon-Seongsan	2.78.E-06	3.19.E-06	3.86.E-06	4.94.E-06	-
Kujwa	2.25.E-06	2.65.E-06	3.22.E-06	3.90.E-06	-
East Jeju	2.13.E-06	2.94.E-06	4.04.E-06	5.40.E-06	7.36.E-06
West Jeju	1.78.E-06	2.62.E-06	3.77.E-06	4.96.E-06	6.65.E-06
Deajeong-Andeok	1.69.E-06	1.98.E-06	2.36.E-06	3.12.E-06	
Hanrim-Hankyeong	1.67.E-06	2.09.E-06	2.77.E-06	3.58.E-06	-

용암류의 특성에 따라 다층의 지질구조를 보이며, 지역적으로 상이하고 다양한 지질구조 특성을 보인다. 그러나 실제 수치해석 모형에서는 복잡한 지하지질구조를 표현하는데 어려움이 발생되기 때문에 이 연구에서는 현무암층과 저투수층 등 2개의 Layer로 단순화하여 설정하였다.

제주도의 수직적인 지층을 구성하기 위해 1 layer는 현무암층, 2 layer는 저투수층 2개의 layer로 구분하였으며, 1 layer의 표면은 1:5,000의 수치지형도를 이용하여 생성한 수치표고자료(DEM)를 interpolation하여 소유역별로 실제 수직적인 층을 적용하였다.

Fig. 5는 하부의 저투수층(low permeable) 구조로 Kim et al.(2015)이 지하수위 관측정 및 기설관정의 지질주상도로부터 저투수성 퇴적층인 서귀포층, 응회암, 고토양층의 포착심도를 고려하여 작성된 결과이며, 현무암층의 하부는 저투수층을 기준으로 구성하였다. 다만, 서귀유역의 하류 지역인 해안가 부근에는 일정수두경계면(Constant Head Boundary)으로 설정한 해안경계선의 지하수위(EL. 0.0 m)보다 하부의 Top elevation이 상부에 위치하여 해안가 인근의 Cell에서 Mark flooded cells 현상이 발생되기 때문에 해안가 인근 하부 현무암층 셀의 바닥 Elevation을 해수면 이하로 낮추어 분석하였다. 이는 MODFLOW의 층위가 연속성을 보이는 구조화된 Grid를 사용하기 때문에 서귀유역의 하류지역과 같이 현무암층이 단절 즉, pinchout과 같이 일반적인 현상을 명확히 표현하는데 제한되므로 유한 차분 격자들의 고도 값들을 재설정하여 분석하였다. 각 유역별 layer에 적용된 Top과 Bottom은 Table 2와 같다.

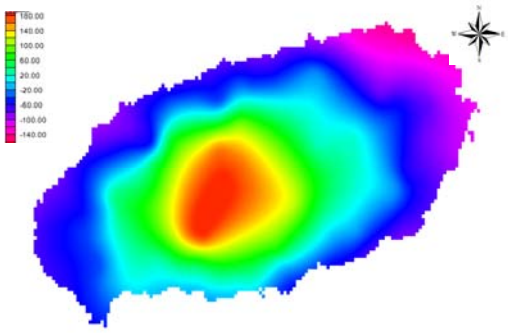


Fig. 5. Plan view of low permeability layer depth.

2.4. 지하수위 자료

도내 지하수위 관측정은 2016년 기준 총 133개소가 설치·운영 중에 있다. 그러나 지하수위 관측정은 대부분 표고 600 m 이하에 위치하고 있으며, 중산간지역인 표고 600 m 이상 지역에는 총 3개소만 위치하고 있어 상류지역에 대한 모델링 결과 검증에 대한 한계가 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 Park et al.(2016)과 Kim et al.(2016)은 지하수 등수위선 자료를 활용하여 미계측지역의 수위를 예측한 후 모델 검증방안으로 제시한 바 있으며, 이 연구에서는 지하수 유역설정을 위해 구축된 지하수위 등수위선을 TIN (Triangulated Irregular Network)형태로 생성하고, DEM자료로 구축하여 미계측지역의 지하수위를 추출한 후 모델의 검증자료로 활용하였다. 수치고도자료의 DEM (Digital Elevation Model) 방식은 지형 고도자료를 처리하는 방법 중 최적의 방법으로 동일한 크기와 밀도를 가지는 격자망을 사용하여 지점별로 고도값을 추출한다. 지하수위의 산정

Table 2. Elevation analysis of basaltic and low permeability layer

unit : El. m

Subwatershed	Basaltic layer		Low permeability layer
	Top	Bottom	
Namwon	1,619.6	-75.3	162.7
Seogwi	1,767.1	-8.3	180.0
Pyoseon-Seongsan	748.1	-117.5	96.0
Kujwa	499.3	-140.2	27.1
East Jeju	1,930.8	-117.2	179.5
West Jeju	1,691.0	-91.6	180.0
Deajeong-Andeok	769.7	-83.2	180.0
Hanrim-Hankyeong	861.2	-94.5	180.0

지점은 기존의 지하수위 관측정의 위치를 포함하였으며, 미계측지역인 경우 유역별 면적과 산출지점간의 거리를 고려하여 유역별로 23∼39개소의 지하수위를 산출하였다(Fig. 6).

2.5. 수리전도도

수리전도도를 적용하기 위해서는 지층 및 대수층의 특성 등 다양한 수리학적 요소를 고려하여 적용해야 하지만 지하지질의 형태를 명확히 판단하기 어렵고, 매우 복잡한 구조로 형성되었기 때문에 정확한 값을 입력하기에는 한계가 있다(Kim, 1999).

제주도의 수리전도도 범위는 8.7∼2,400 m/day로 수리전도도의 편차는 매우 큰 특징을 나타낸다(Jejudo, 2003). 이 연구에서의 수리전도도 적용은 해석모델의 보정 방법 중 Regularization(정규화)라고 불리는 Pilot point 기법을 적용하였다. 정규화방법은 균일한 제한을 통해 interpolation되는 인자의 값에 조밀한 데이터로 적용되어야 하는 객체 함수로부터의 적절한 영향을 보이는 값이 부재한다면, 인근의 Pilot point들로부터 평균값을 제한하도록 하여 모델 자동보정의 과정을 더욱 안정하게 하도록 유도한다. 정규화를 이용한 Pilot point 기법을 이용하면, 관측정의 지하수위의 잔차를 현저하게 줄일 수 있는 복잡한 투수계수 분배를 정의 할 수 있다(Aquaveo, 2015).

제주도와 같이 수리전도도 값이 지역별로 차이가 크고 동일 유역 내에도 다른 지질구조를 보이는 등 동일 매질에서 동일 투수성을 보이지 않는 다양함으로 인해 실측값들을 적용하기에 어려운 곳에서 정규화라는 보정방법은 지하수 유동해석을 함에 있어 최적화된 방법이다(Ko, 2016). 통상적으로 40∼50개 또는 그 이상의 지점을 사용하는 것이 적절하며, 이 연구에서는 Fig. 7과 같이

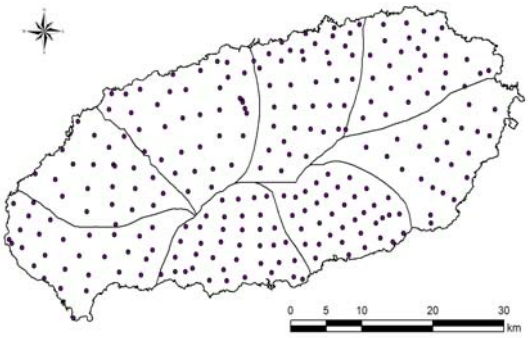


Fig. 6. Random points for groundwater level.

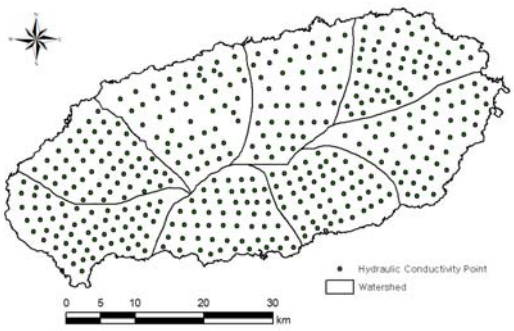


Fig. 7. Pilot point for hydraulic conductivity.

Table 3. Grid network configuration

Class	Grid configuration	
Cell refine	Base size: 200m, Bias : 1.0, Max. size: 200m	
Number of layers	2 layers	
Pyoseon-Seongsan	111 columns× 168 rows × 2 layers = 37,296 cell	(Active cells: 13,070 cell / Inactive cells: 24,226 cell)
Kujwa	96 columns× 127 rows × 2 layers = 24,384 cell	(Active cells: 11,456 cell / Inactive cells: 12,928 cell)
Deajeong-Andeok	95 columns× 149 rows × 2 layers = 28,310 cell	(Active cells: 11,528 cell / Inactive cells: 16,782 cell)
Hanrim-Hankyeong	87 columns× 140 rows × 2 layers = 24,360 cell	(Active cells: 10,782 cell / Inactive cells: 13,578 cell)
Namwon	82 columns× 122 rows × 2 layers = 20,008 cell	(Active cells: 9,664 cell / Inactive cells: 10,344 cell)
Seogwi	84 columns× 121 rows × 2 layers = 20,328 cell	(Active cells: 10,546 cell / Inactive cells: 9,782 cell)
East Jeju	121 columns× 103 rows × 2 layers = 24,926 cell	(Active cells: 13,062 cell / Inactive cells: 11,864 cell)
West Jeju	127 columns× 129 rows × 2 layers = 32,766 cell	(Active cells: 15,302 cell / Inactive cells: 17,464 cell)

소유역별 면적을 고려하여 49~59개 지점을 유역 내에 분산화 하여 수리전도도 값을 설정하였다.

2.6. 격자망 구성

격자망을 구성하는 과정에서 각각의 연구유역과 인접한 유역의 경계면은 지하수 흐름에 의한 영향이 없는 NO-FLOW로 설정하고, 비활성화 셀(Inactive cells)로 설정하여 모델분석의 효율성을 높였으며 각각의 분석유역은 Active cell로 구성하였다.

각각의 소유역별 격자망을 구성하기 위해서는 유역경계 Coverage에서 Max size와 Base size를 적용하여 소유역별로 격자망을 200m × 200m로 설정하고, 연구대상유역 이외의 지역은 비활성화 셀로 설정하였다. 표선-성산유역 내 활성화셀(active cells)은 2개의 layer를 포함하여 13,070개의 셀 격자망으로 구성되었으며, 구좌유역은 11,456개, 대정-안덕유역은 11,528개, 한림-한경유역은 10,782개, 남원유역은 9,664개, 서귀유역은 10,546개, 동제주유역은 13,062개, 서제주유역은 15,302개로 구성되었다(Table 3).

3. 지하수 유동 해석 결과

제주도를 8개의 소유역으로 구분하여 지하수 유동분석을 실시하였다. 일반적으로 모델분석 결과의 검증은 실제 관측된 지하수위자료와 모델에서 분석된 수위자료를 비교하여 잔차를 산정하고, 수위 차이에 따라 모의된 결과를 평가한다. 그러나 Park et al.(2016)은 관측지점에 대해서만 검증을 할 경우, 소유역 내 지하수 흐름에 대한 검증은 어려워 지하수 방향에 대한 검증도 필요하다고 제시하였다. 따라서 이 연구에서는 관측수위와 분석수위간의 잔차와 지하수 흐름방향의 검증을 실시하여 모델 결과의 적정성을 평가하였다.

지하수 흐름은 지하수가 가장 높게 형성된 상류지역에서 하류(해안)지역으로 낮아지는 형태로 분석되었다. 특히, 동부 표선-성산유역과 구좌유역의 경우 상류지역에서 하류지역까지 지하수위가 가장 완만한 특성을 보이고, 남부 남원유역과 서귀유역은 가장 급하게 지하수위가 형성되었다. 이는 현무암층 하부의 저투수층이 동부지역은 −140.2 ~ 96.0 m에 분포하는 반면, 남부지역은 −75.3 ~ 180.0 m에 분포하고, 해안에서부터 거리는 동부 약 46 km인 반면, 남부지역은 약 17 km로 지형적 영향에 따라 지하수위의 경사차이가 발생되는 것으로 판단된다(fig, 8).

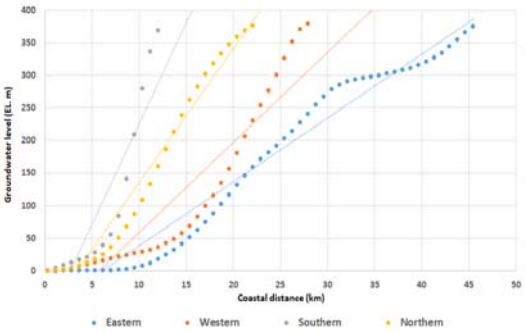
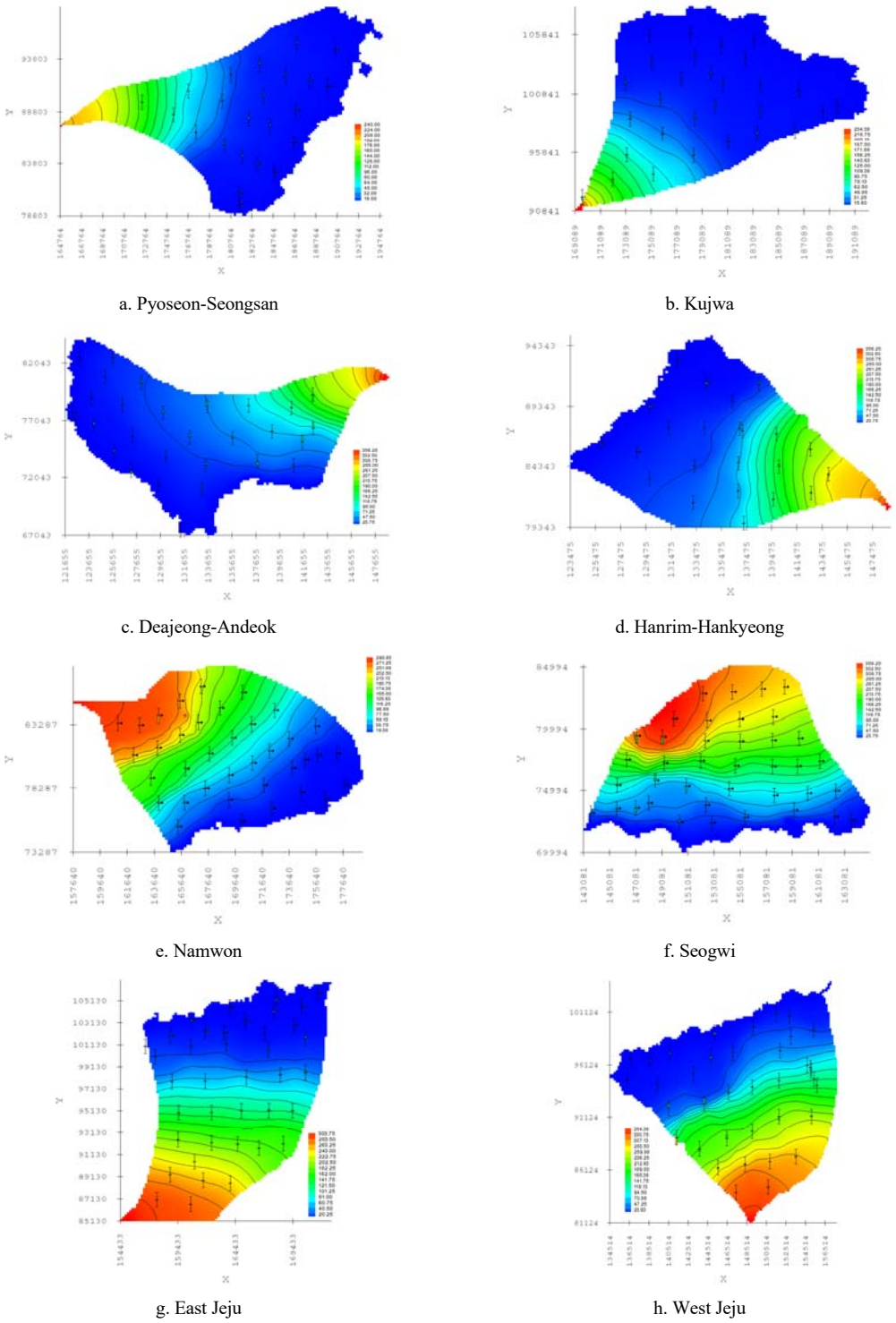


Fig. 8. Groundwater level slope by region.



a. Pyoseon-Seongsan

b. Kujwa

c. Deajeong-Andeok

d. Hanrim-Hankyeong

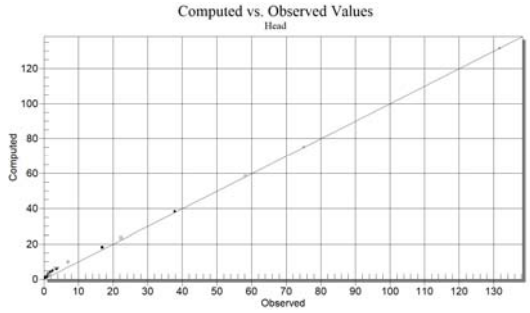
e. Namwon

f. Seogwi

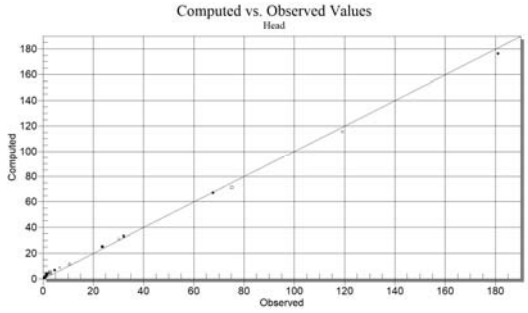
g. East Jeju

h. West Jeju

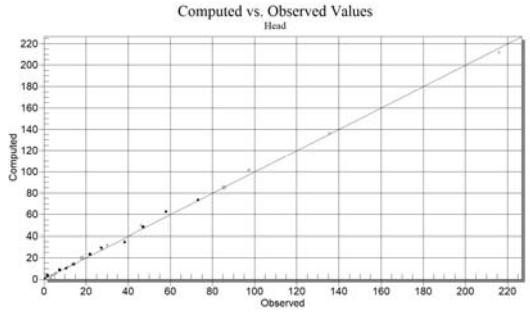
Fig. 9. Groundwater flow analysis results.



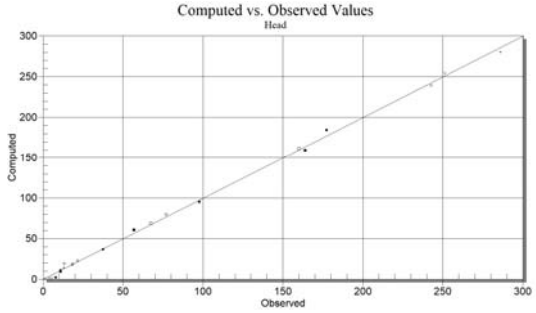
a. Pyoseon-Seongsan



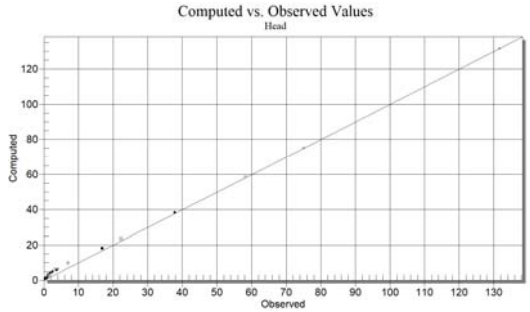
b. Kujwa



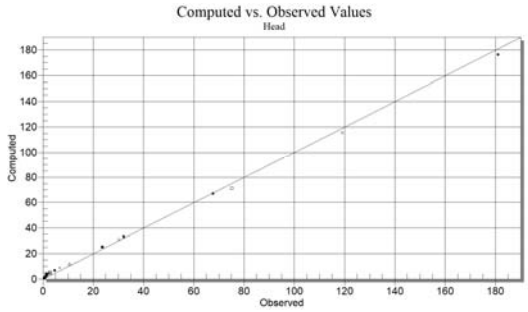
c. Deajeong-Andeok



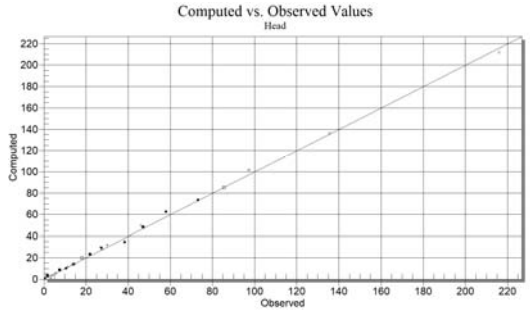
d. Hanrim-Hankyeong



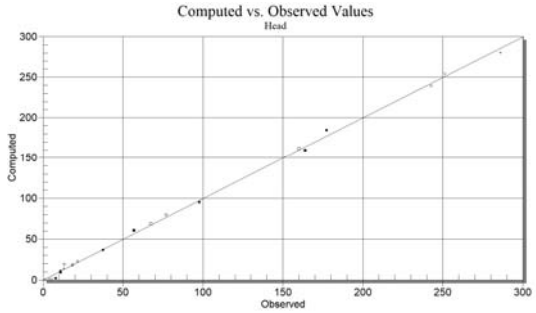
e. Namwon



f. Seogwi



g. East Jeju



h. West Jeju

Fig. 10. Computed vs. Observed Values.

Table 4. Groundwater Flow Direction

Subwatershed	Direction	x, y standard	Inclination (°)	
			Groundwater contour map	Analysis
Pyoseon-Seongsan	Southeast	y	14	15
Kujwa	Northeastward	x	35	35
Deajeong-Andeok	Southwest	x	27	26
Hanrim-Hankyeong	Northwestward	y	19	19
Namwon	Southeast	y	47	47
Seogwi	South	x	3	3
East Jeju	North	y	94	94
West Jeju	Northwestward	y	75	73

소유역별 정상류 상태의 지하수 흐름분석 결과에 대하여 관측수위와 계산수위의 잔차, RMSE (Root Mean Square Error)를 분석하였다. 표선-성산유역의 관측수위는 0.26 ~ 131.66 m이며, 계산수위는 0.29 ~ 131.68 m로 관측수위와 계산수위간의 잔차는 0.03 ~ 3.11 m로 확인되었다. 구좌유역의 관측수위는 0.47 ~ 181.03 m, 모델분석 결과는 0.5 ~ 176.45 m로 잔차는 -4.57 ~ 2.54 m로 분석되었으며, 대정-안덕유역은 관측수위 0.39 ~ 215.96 m, 계산수위 0.06 ~ 211.64 m로 잔차는 -4.32 ~ 4.72 m로 분석되었다. 한림-한경유역은 관측수위 1.08 ~ 286.05 m, 계산수위 0.19 ~ 283.77 m로 잔차는 -15.69 ~ 10.14 m로 분석되었으며, 남원유역은 관측수위 0.43 ~ 290.43 m, 계산수위 0.29 ~ 287.43 m로 잔차는 15.11 ~ 5.01m로 분석되었다. 서귀유역의 관측수위는 1.25 ~ 365.05 m, 계산수위는 3.59 ~ 362.75 m로 잔차는 -19.87 ~ 18.13 m로 분석되었으며, 동제주유역은 관측수위 0.2 ~ 295.39 m, 계산수위 0.2 ~ 295.99 m, 잔차는 -1.06 ~ 1.54 m로 분석되었다. 서제주유역의 관측수위는 0.95 ~ 341.76 m, 계산수위는 0.42 ~ 339.81 m로 잔차는 -20.82 ~ 14.48 m로 분석되었다. 특히, 서귀유역과 서제주유역에서 관측수위와 계산수위간의 잔차가 가장 큰 것으로 확인되었다. 서귀유역은 서쪽 상류 관측정과 중앙의 관측정에서 잔차가 크게 나타나는데, 두 지점간의 거리는 약 2.1 ㎞의 짧은 거리인 반면 지하수위는 276.93 m로 크게 발생되어 상류지역 수위는 관측수위 대비 비교적 낮은 수위가 산출되고, 중앙의 관측정은 비교적 높은 수위가 산정되었다(fig. 9(f)) 서제주유역은 서쪽 중앙에 위치한 관측정에서 지하수 잔차가 크게 나타나는데, 서귀유역과 마찬가지로 두 관측지점간의 거리는 2.9 ㎞이지만, 지하수위의 차이는 170.76 m로 수두차이가 크게 나타나 이상적인 지하수위 값을 도출하기가 어려웠다(fig. 9(h)). 이러한 지역은 지하지질의 대수층 구조 특성에 따라 국부적으로 상·하류간 수두차이가 크게 나타나는 것으로 판단되며, 모델분석 시 수리전도도 분포를 세분화하여 분석되어야 할 것으로 판단된다.

RMSE 분석 결과 표선-성산유역은 1.616, 구좌유역은 1.864, 대정-안덕유역은 1.941, 한림-한경유역은 3.41, 남원유역은 2.943, 서귀유역은 6.177, 동제주유역은 0.544, 서제주유역은 6.005로 수두잔차가 크게 분석된 서귀유역과 서제주유역을 제외하고 낮은 결과를 도출할 수 있었다(fig. 10).

소유역별로 분석된 지하수 유동방향을 앞에서 분석된 지하수 등수위선과 비교하여 모델링 결과를 평가하였다. 표선-성산유역은 동남방향으로 지하수 흐름이 발생되었으며, Y축 기준 등수위선은 약 14°, 분석결과는 약 15°로 유사한 흐름을 보였다. 구좌유역은 북동방향으로 지하수 흐름이 발생되고, 등수위선은 X축 기준 약 35°, 분석결과는 X축 기준 약 35°의 흐름을 보였으며, 대정-안덕유역은 남서방향으로 흐름이 발생되고, X축 기준 등수위선은 약 27°, 분석결과는 약 26°로 분석되었다. 한림-한경유역은 북서방향으로 지하수 흐름을 보이고, Y축 기준 등수위선은 19°, 분석결과는 19°로 분석되었다. 남원유역은 동남방향으로 지하수 흐름을 보이고, Y축 기준 등수위선은 47°, 분석결과는 47°이며, 서귀유역은 남쪽방향으로 지하수 흐름이 발생되고, X축 기준 등수위선은 3°, 분석결과는 3°이다. 동제주유역은 북쪽방향의 지하수

Table 5. Hydraulic conductivity results by subwatershed

unit : m/d

Classification	Deajeong-Andeok	Hanrim-Hankyeong	Seogwi	Namwon
Maximum	445.41	1,534.35	1,525.48	2,771.84
Range	444.41	1,533.35	1,525.48	2,770.84
Average	26.79	78.85	60.92	112.42
Median value	8.18	10.80	7.72	8.12
Standard deviation	60.98	229.31	226.62	403.86

Classification	Kujwa	Pyoseon-Seongsan	West Jeju	East Jeju
Maximum	2,626.39	2,707.61	875.30	2,205.77
Range	2,625.39	2,705.53	874.30	2,204.77
Average	186.26	227.67	39.37	110.89
Median value	53.37	33.23	3.43	16.65
Standard deviation	403.24	456.98	133.16	348.85

흐름으로 Y축 기준 등수위선은 94°, 분석결과는 94°이며, 서제주유역은 북서방향으로 흐름이 발생되고, Y축 기준 등수위선은 75°, 분석결과는 73°로 분석되었다. 총 8개의 소유역 지하수 흐름방향은 등수위선 구축결과와 유사한 흐름을 보이고 있어 분석 결과의 신뢰도를 향상시킬 수 있었다.

4. 지하수 수리전도도 특성

4.1. 모델링 분석을 통한 수리전도도 분포 특성

Fig. 11은 제주도 8개 유역을 대상으로 모델분석을 통해 산출된 수리전도도 결과이다. 전반적으로 해안지역은 100 m/d 이상의 수리전도도 특성을 보이며, 중 상류지역은 1 ~ 45 m/d의 수리전도도 결과가 산출되었다.

동제주유역, 구좌유역, 표선-성산유역, 남원유역의 하류지역은 수리전도도가 500 m/d 이상 크게 분포하고 있는 반면, 표고 약 200 m 이상 지역과 대정-안덕지역의 경우 500 m/d의 이하의 결과가 산출되었다. 특히, 동부지역의 경우 해안에서 내륙으로 약 12 km까지 수리전도도가 500 m/d 이상 분포하는 것으로 분석되었다.

표선-성산유역의 평균 수리전도도는 227.67 m/d로 8개 유역 중 가장 크게 산출되었으며, 구좌유역 186.24 m/d, 남원유역 112.42 m/d, 동제주유역 110.89 m/d로 동부지역의 평균 수리전도도가 비교적 크게 분포하였다. 서부지역의 서제주유역, 한림-한경유역, 대정-안덕유역, 서귀유역은 각각 39.37 m/d, 78.85 m/d, 26.79 m/d, 60.92 m/d로 동부지역에 비해 비교적 작게 분포하였다. 수리전도도의 범위가 가장 큰 유역은 남원유역으로 동부 해안지역에서 가장 큰 수리전도도(2,770.84 m/d)가 산출되었다. 표선-성산유역은 2,707.61 m/d, 구좌유역은 2,625 m/d, 동제주유역은 2,205.77 m/d, 한림-한경유역 1,533.35 m/d, 서귀유역 1,525.48 m/d, 서제주유역 874.30 m/d, 대정-안덕유역 444.41 m/d로 분석되었다 (Table 5).

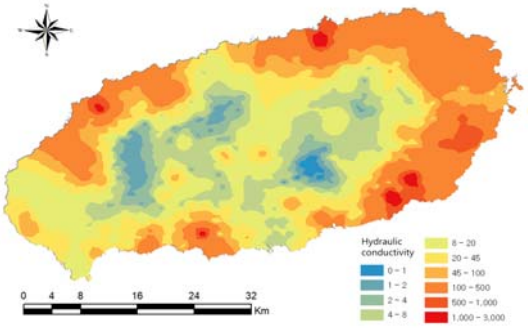
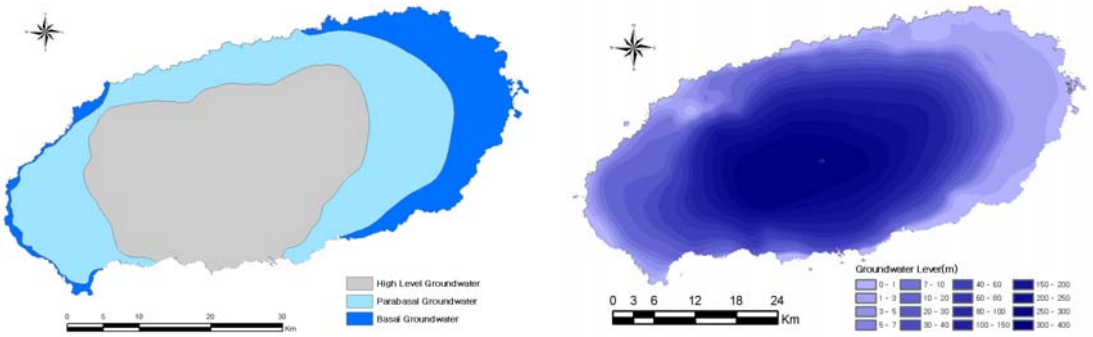


Fig. 11. Hydraulic conductivity distribution map of Jejudo.

4.2. 모델분석에 따른 수리전도도와 지하수 유동특성 비교·검토

Fig. 12(a)는 제주도의 지하수 부존형태로서 동부지역에 기저지하수체가 광범위하게 분포하며, Fig. 12(b)



a. Groundwater Occurrence b. Groundwater table contour map

Fig. 12. Groundwater Occurrence and Groundwater table contour map in Jejudo.

는 지하수 등수위선으로 동부지역에는 해안선 12 km까지 10 m 이내의 지하수위를 나타내고 있다.

제주도의 지하수 부존형태는 G-H원리와 현무암층 하부의 저투수층 구조에 따라 기저지하수, 준기저지하수, 상위지하수로 구분되는데, 동부지역과 서부해안지역에서는 담수지하수 하부에 염지하수가 부존하고 있어 기저지하수로 분류된다. 특히, 동부지역은 해안에서 내륙지역으로 9 ~ 12 km의 범위의 투수성이 좋은 현무암류가 누층을 이루고 있으며, 해수의 압력에 의해 바닷물이 내륙으로 유입할 수 있는 공극 또는 틈이 잘 발달되어 있는 특성을 보인다(Koh et al, 2006). 수리전도도 산출결과에 의하면, 기저지하수체가 분포하고 있는 동부지역의 경우 타 지역에 비해 비교적 높은 500 m/d 이상의 수리전도도 특성이 광범위하게 나타났다.

제주도의 지하수위는 제주도 중심에서부터 해안지역으로 진행될수록 낮아지는 경향을 보인다. 특히, 동부지역은 전반적으로 완만한 수두경사특성을 보이고, 북서부와 남부 일부지역의 상류부에서는 급격한 수위특성을 보이다가 하류부에서는 완만한 수두경사특성을 보이고 있다. 수리전도도는 대수층 내의 지하수가 단위면적의 면을 통과할 수 있는 척도로서 균일한 층의 단면적과 길이가 동일하다고 할 때 지하수의 이동속도는 수두차(수두경사)와 수리전도도에 의해 결정된다(Park, 2016). 즉, 이 연구에서 수리전도도 결과가 높게 나타난 서북부와 남부지역과 같은 경우 상류부의 급격한 수위경사특성에 반해 갑작스럽게 완만해진 수위에 영향으로 국소적으로 수리전도도가 500 ~ 1,500 m/d로 산출되었다.

제주도의 수리전도도특성과 지하수 부존특성, 등수위선 분포특성을 종합적으로 비교·검토한 결과, 비교적 높은 수리전도도 산출특성이 광역적으로 분포하는 지역은 완만한 지하수위 분포특성을 보이며, 기저지하수가 광범위하게 분포하는 지역이다. 즉, 지하 대수층의 수리전도도 특성은 지하수위와 지하수 부존형태와의 상호 연계가능성이 나타나는 것으로 판단된다.

4.3. 수리전도도의 지하수 양수시험 결과와 비교·검토

Table 6은 제주도 동부, 서부, 남부, 북부지역에 위치한 광역상수도 취수정 84공과 해수침투 감시 관측정 4공의 양수시험을 통해 산정된 수리전도도 결과이다(Jejudo, 2003). 동부지역의 27개공 대상 수리전도도는 평균 839.0 m/d, 최대 2,266.2 m/d이며, 서부지역은 4개공 대상 평균 199.20 m/d, 최대 385.00 m/d, 남부지역은 21개공 대상 평균 637.50 m/d, 최대 2,400.00 m/d, 북부지역은 36개공 대상 평균 358.40 m/d, 최대 1,650.10 m/d이다.

Table 7은 본 연구에서 산출된 수리전도도 결과로 동부(표선-성산, 구좌유역), 서부(대정-안덕, 한림-한경유역), 남부(남원, 서귀유역), 북부(동제주, 서제주유역)지역으로 구분하여 2003년에 분석된 수리전도도와 비교하였다.

동부지역의 평균 수리전도도는 206.36 m/d, 최대 2,707.61 m/d이며, 서부지역의 평균 수리전도도는 51.91 m/d, 최대 1,534.35 m/d이다. 남부지역의 평균 수리전도도는 86.67 m/d, 최대 2,771.84 m/d, 북부지역의

Table 6. Hydraulic conductivity results by pumping test

unit : m/d

Classification	East	West	South	North
Average	839.00	199.20	637.50	358.40
Maximum	2,266.20	385.00	2,400.00	1,650.10
Data (point)	27	4	21	36

Table 7. Hydraulic conductivity results by modeling

unit : m/d

Classification	East	West	South	North
Average	206.36	51.91	86.67	72.85
Maximum	2,707.61	1,534.35	2,771.84	2,205.77
Data (point)	103	114	104	94

평균 수리전도도는 72.85 m/d, 최대 2,205.77 m/d로 분석되었다. 전반적으로 2003년에 분석된 지역별 평균 수리전도도가 본 연구의 평균 수리전도도에 비해 3.8배 ~ 7.4배 크게 나타난다. 2003년에는 실제 굴착된 지하수 및 관측정에 한하여 조사된 결과로 상류지역(표고 600 m이상)의 자료는 부재하고, 하류지역의 표본을 대상으로 하고 있어 비교적 높은 수리전도도가 산출되었으며, 본 연구에서는 유역전체를 바탕으로 수리전도도를 산출하였기 때문에 비교적 낮게 산출된 것으로 판단된다. 그러나 수리전도도의 최대값은 본 연구에서 산출된 결과가 1.15 배 ~ 3.98배 크게 나타났으며, 2003년의 경우 양수시험 표본수가 4개공 ~ 36개공에 반해 본 연구에서는 94지점 ~ 114지점으로 일정간격으로 광범위하게 조사하였기 때문에 수리전도도의 범위는 비교적 크게 산출된 것으로 판단된다.

5. 결 론

제주지역의 지하수 흐름특성을 보다 신뢰성 있게 분석하기 위해 수치모델 적용인자를 개선하여 지하수 유동특성 및 수리전도도를 분석·검토하고, 모델에서 산정된 수리전도도의 분포 특성을 공간적으로 분석한 결과는 다음과 같다.

1) 제주도 지하수 수치모델 결과의 신뢰성을 향상시키기 위해 수리학적 유역구분, 강수특성에 따른 지하수 함양량 산정, Pilot point기법을 적용한 수리전도도 산정, 상세한 모델 검·보정을 위하여 관측 지하수위 자료 확장 등 모델 적용인자를 개선하였다.

2) 지하수 유동분석 결과, 관측수위와 계산된 수위는 전체적으로 유사하게 나타났으나, 서귀와 서제주유역에서는 국부적으로 잔차가 크게 산정되었다. 해당 지역은 지하지질의 대수층 구조 특성에 따라 상하류 지역의 수두차가 크게 나타나는 지역으로 판단되며, 모델 분석 시 수리전도도 분포를 세분화하여 분석되어야 한다.

3) 소유역간의 지하수 흐름 방향성을 검토한 결과, 지하수 등수위선과 유사하게 나타나는 것으로 분석되어 지하수 유동해석의 신뢰도를 향상시킬 수 있었다.

4) 제주도 전역의 지하수 유동모의 결과로부터 수리전도도 분포를 분석한 결과, 해안지역은 100 m/d 이상, 상류지역은 1 ~ 45 m/d로 나타났다. 특히, 동부지역 저지대에서는 500 m/d 이상의 수리전도도를 보였으며, 북부와 남부 일부지역에서는 비교적 높게 나타고 있다. 이러한 특성은 지하수 등수위선 분포와 부존형태 등과 밀접한 관련성이 있는 것으로 나타났다.

제주지역은 지하수의 체계적인 관리를 위해 지하수 분석·예측에 관한 연구는 필수적이다. 이 연구는 제주도 지하수 흐름을 보다 신뢰성 있도록 구축·해석하기 위해 모델적용 인자를 개선하고, 검증한 결과로 향후 지하수의 개발·이용과 관리정책 등을 수립하는데 유용한 자료로 활용될 수 있다. 특히, 모델결과의 신뢰성을 더욱 향상시키기 위해서는 관측망의 확대·조사와 지하지질구조에 대한 상세한 연구·조사가 필요하며, 지속적으로 조사된

연구결과를 비교 · 검토하여 모델 구축을 위한 개선 · 연구가 진행되어야 한다.

감사의 글

이 논문은 2019학년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었습니다.

REFERENCES

Aquaveo, 2015, MODFLOW-USG, Manual.

Choi, B, S., 1999, Determination of aqnifer characteristics from specific capacity data of wells in Cheju Island, J. Groundwater Environment, 6, 180-187.

Franke, O. L., Reilly, T. E., 1987, The effects of boundary conditions on the steady-state response of three hypothetical ground-water systems-Results and implications of numerical experiments, U.S. Geological Survey water-supply paper, 2315.

Franke, O. L., Reilly, T. E., Bennett, G. D., 1987, Definition of boundary and initial conditions in the analysis of saturated ground-water flow systems - An introduction.

Jejudo, 2003, Comperhensive survey of hydrogeology and groundwater resources in Jeju Island(Ⅲ), 173-179.

Jeju Special Self-Governing Province, 2013, Water resources management master plan.

Jeju Special Self-Governing Province, 2018, Water resources management master plan.

Jung, W. Y., 2013, The estimation of parametric runoff characteristics and flood discharge based on riverine in-situ measurements in Jeju Islan, Ph. D. Jeju National Univercity, Korea.

Kim, K. J., 1999, Current situation and problems in applying groundwater flow medels to EIAs in Korea, J. Korean Society Groundwater Environment, 6(2), 66-75.

Kim, M. C., Yang, S. K., 2019, Hydraulic watershed classification and analysis of flow characteristics of groundwater on Jeju Island, J. Environ. Sci. Int., 28(4), 423-433.

Kim, M. C., Yang, S. K., Oh, S. T., 2015, Analysis on groundwater flow according to low permeable layer structure over Seongsan Watershed of Jeju Island, J. Environ. Sci. Int., 24(4), 449-459.

Kim, M. C., Yang, S. K., Lee, J. H., Lee, G. B., 2016, Assessment of groundwater flow modeling according to hydraulic conductivity zonation in Jeju Island, Proceedings of the Korean Environmental Sciences Society Conferences, 25(1), 163

Ko, J. W., 2016, Groundwater flow analysis of Middle-Seogwi watershed area based on monitored filed data, Ph. D. Jeju National Univercity, Korea.

Koh, G. W., Kang, B. R., Moon, D. C., 2006, Hydrogeological and groundwater management system of Jeju Island, Jeju·Hawaii Water Forum, 134-166.

Na, H. N., Koo, M. H., Cha, J. H., Kim, Y. J., 2007, Sensitivity analysis of groundwater model predictions associated with uncertainty of boundary conditions: A Case study, J. Groundwater Soil and Environment, 12(3), 53-65.

Park, J. K., Kim, M. C., Yang, S. K,. Lee, J. H., Kim, Y. S., 2016, Assessment of groundwater flow modeling according to hydraulic conductivity zonation in the Dae-jeong watershed of Jeju Island, J. Environ. Sci. Int., 25(12), 1727-1738.

Yun, S. W., Jo, Y. J., Lee, J. Y., 2009, Comparison of groundwater recharges estimated by waterlevel fluctuation and hydrograph separation in Haean basin of Yanggu, J. Geological Society of Korea, 45(4), 391-404.

• 김민철, 제주연구원 위촉연구위원
minchul1122@jri.re.kr
• 양성기, 제주대학교 토목공학과 교수
skyang@jejunu.ac.kr