

ORIGINAL ARTICLE

제주도 대정유역의 수리전도도 적용에 따른 지하수 모델링 결과 평가

박재규¹⁾ · 김민철 · 양성기* · 이준호 · 김용석

제주대학교 토목공학과, ¹⁾한국농어촌공사

Assessment of Groundwater Flow Modeling according to Hydraulic Conductivity Zonation in the Dae-jeong Watershed of Jeju Island

Jae-Kyu Park¹⁾, Min-Chul Kim, Sung-Kee Yang*, Jun-ho Lee, Yong-Seok Kim

Department of Civil Engineering, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

¹⁾Korea Rural Community Corporation, Naju 58217, Korea

Abstract

In this study, groundwater flow was analyzed targeting Dae-jeong watershed, which exhibited the largest variations of groundwater levels at the identical elevation points among the 16 watersheds of Jeju Island. The issues of the methods applied in practice were identified and improvement plans were suggested. This groundwater-flow estimates derived by applying hydraulic conductivity values onto zones of equal topographic ground level were found to be quite different from actual measured groundwater flow. Conversely, groundwater-flow estimates that utilized hydraulic conductivity values applied onto groundwater-level equipotential lines indicated relatively lesser divergences from actual measured groundwater flow. The reliabilities of the two approaches were assessed for 60 randomly selected points on DEM (digital elevation model) maps. The method using hydraulic conductivity values applied onto groundwater-level contours turned out to be the more reliable approach for the Dae-jeong watershed in Jeju Island.

Key words : Groundwater flow, Dae-jeong watershed, Hydraulic conductivity, equipotential line, Jeju Island

1. 서론

제주지역은 최근 지하수 보전과 관리를 위해 신규 지하수관정 개발을 제한하고 있으나, 급증하는 인구 유입으로 택지개발과 주택건축이 활발하여 용수의 수요량이 현저하게 늘어나고 있다. 이로 인해 안정적인 용수확보를 위한 지하수의 신규개발이 지속적으로 진행되고 있는 실정이다. 신규 지하수를 개발하기 위해

서는 제주특별자치도 지하수관리 조례에 의거한 지하수 영향조사서가 작성되어야 하고, 굴착예정지역의 지하수위 예측과 해석모델을 이용하여 지하수 양수에 따른 수위강하 및 유동방향 등 다양한 해석을 수행하여야만 한다(Jeju Special Self-Governing Province, 2014).

지하수 해석모형은 실제 현장을 재현하기 위한 수치 해석 모델로서 지역별 지하수 개발에 따른 유동특성,

Received 11 July, 2016; Revised 7 December, 2016;

Accepted 12 December, 2016

*Corresponding author : Sung-Kee Yang, Department of Civil Engineering, Jeju National University, Jeju 63243, Korea
Phone : +82-64-754-3451
E-mail : skyang@jeju.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.

해수침투, 지하수 지표수 연계해석 등 다양한 연구 조사가 수행되고 있다(Ahn et al., 2013; Kim, 2009; Kim et al., 2013; Park et al., 2013). 2015년 제주지역에 지하수 개발을 위해 작성된 지하수 영향조사 보고서는 40건 이상으로 지하수 해석모델을 이용하여 개발예정지의 수위변동 및 포획범위 등 부정류 분석이 수행되었다. 지하수 개발에 의한 부정류 해석을 위해서는 기본적인 정상류 상태의 지하수 흐름을 실제 흐름과 유사하도록 재현하여야만 한다. 또한, 지하수 개발예정지역의 경우 관측 자료가 없는 미계측지역이므로 다양한 검증방법이 도입되어야 한다. 그러나 실무에서는 분석구역 내 위치한 지하수 관측 수위자료만을 이용하여 정상류 흐름의 검증자료로 활용하고 있으며, 일정선 이하의 잔차 결과를 도출한 이후 부정류 해석을 수행한다. 이와 같은 경우 관측지점에 한하여 유사한 지하수위를 도출할 수는 있으나 미계측지역의 수위 및 지하수의 흐름은 검증되지 않은 결과로 명확한 부정류상태의 결과를 나타내는 데는 한계가 발생될 수 있다.

제주지역의 지하수 해석을 위한 유역경계는 지표의 지형 및 분수령, 하천 등으로 구분된 16개의 소유역으로 분석된다(Jeju Special Self-Governing Province, 2013). 일반적으로 지하수위는 지형고도와 이상적인 정비례관계를 보이고(Williams et al., 1985), 지하수위와 표고간의 상관계수는 거의 1에 가까운 직선적인 정비례관계가 형성되며(Cho, 2001; Chung et al., 1999; Kang et al., 2008; Lee, 2001), 지표 및 분수령으로 구분된 결과를 지하수의 유역경계로 이용하여도 큰 무리가 없기 때문에 지표유역으로 이용되고 있다(GIMS, 2013). 그러나 제주지역의 경우 지역별 표고와 지하수위 간의 일정관계를 찾기 어려울 정도로 대수층의 수리적 차이가 크게 발생되며(Choi, 1999), 지역에 따라 표고와 지하수위간의 반비례적인 관계가 나타난다(Kim et al., 2015; Ko, 2016). 또한, Na et al.(2007)은 제주도의 지하수해석을 위해 적용되는 유역설정은 지표유역을 기준으로 분석되고 있어, 지하수 모델분석의 검·보정 과정과 결과에 대해서는 보다 면밀한 검토가 필요하다고 제시한 바 있다.

이에 본 연구에서는 2014년 지하수 등수위선과 등고선 자료를 활용하여 동일표고지점에서의 지하수위

의 관계를 검토하였으며, 수위차이가 가장 크게 발생하는 유역을 연구대상유역으로 선정하여 지하수 해석 모델링을 수행하였다. 일반적으로 적용되는 연구방법인 표고기준의 유역분할 방법으로 지하수 해석결과를 평가하고, 제주지역에 대수층 수리적 차이를 구분하여 적용될 수 있도록 등수위선경계를 기준으로 수리전도도를 적용한 후 지하수 해석결과를 평가하였다. 또한, 분석된 결과를 대상으로 실제 등수위선 자료와 비교·검토하여 미계측지역에 대하여 지하수위 검증이 수행하였다. 본 연구를 통해 실제 지하수 모델링 수행 시 발생가능한 문제점을 파악하고, 지역의 특성에 적절한 모델 적용방안과 정상류 상태의 검증방법을 제안하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1. 지하수 관측망 현황 및 등수위선 작성

제주지역의 지하수 관측공은 고지대 시추조사공 6공, 광역상수도 감시정 13공, 국가 지하수 관측망 4공, 인공함양조사공 8공 지하수위 관측공 50공, 해수침투 감시 관측공 50공, 총 131개공이 개발·운영 중이다. 동부지역의 경우 기저지하수의 분포가 광범위하여 표고 200 m 이상 지역까지 해수침투 관측공을 설치·운영 중이며, 각각의 관측공은 지역의 특성에 따라 목적별로 운영된다. 지하수위의 관측은 전체 관측공에서 동일방법으로 모니터링 되고 있다(Jeju Special Self-Governing Province, 2013).

지하수 등수위선은 지하수위 높이가 동일한 지점을 연결한 선으로 측정지점의 수리수두를 의미한다. 등수위선을 작성하기 위해서는 다양한 방법이 적용되는데, 본 연구에서는 공간상 분포하는 확률변수들을 이용하여 미계측지역의 결과를 예측하는 통계학적 방법인 Kriging 기법을 적용하였다(Sacks et al., 1989). 본 연구에서는 전체 지하수 관측공 131개소 중 지하수위의 자료 확보가 가능한 126개소를 대상으로 2014년 일별 관측 자료를 연평균 자료로 환산하여 지하수 등수위선을 작도하였다(Fig. 1). 연구대상유역은 작성된 지하수 등수위선과 제주도 16개 소유역별 표고의 관계를 비교하여 수위차이가 가장 크게 나타나는 지역으로 선정하였다.

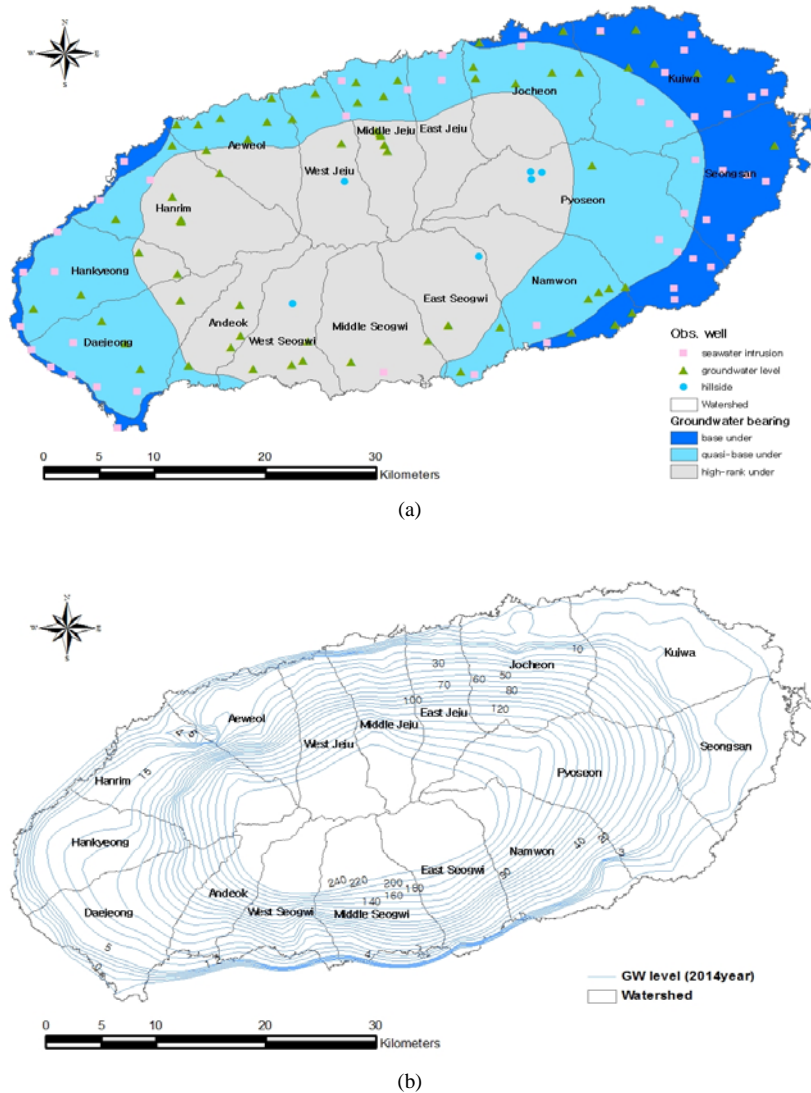


Fig. 1. Groundwater monitoring wells (a) and groundwater level contour map (b) over Jeju Island.

2.2. 지하수 모형구축

실제 자연현상은 매우 많은 불확실성이 내재되어 있어 정확히 묘사하는 것은 불가능하며, 복잡한 실제 현상을 모델로 재현하기 위해서는 단순한 가정을 사용할 수밖에 없다. 일반적으로 실제 상황과 근사하게 나타내기 위해서 수치기법을 사용하며, 계략적인 수학적 모델로 다루어야 한다(Han, 1999). 본 연구에서는 수리지질학적 구조를 손쉽게 구현하고,

과학적 타당성과 적용성이 높은 미국지질조사소(U.S. Geological Survey)에서 개발된 MODFLOW(McDonald and Harbaugh, 1988)를 이용하였다.

지하수 흐름 해석을 위해 지층, 함양량, 공극률, 수리전도도, 관측수위자료를 입력하였다. 제주도의 일반적인 층서는 하부로부터 기반암, U층, 서귀포층, 화산암류, 표토층으로 이루어져 있다. 상부의 화산암류는 여러 차례의 화산활동으로 인하여 다공질 현무암과

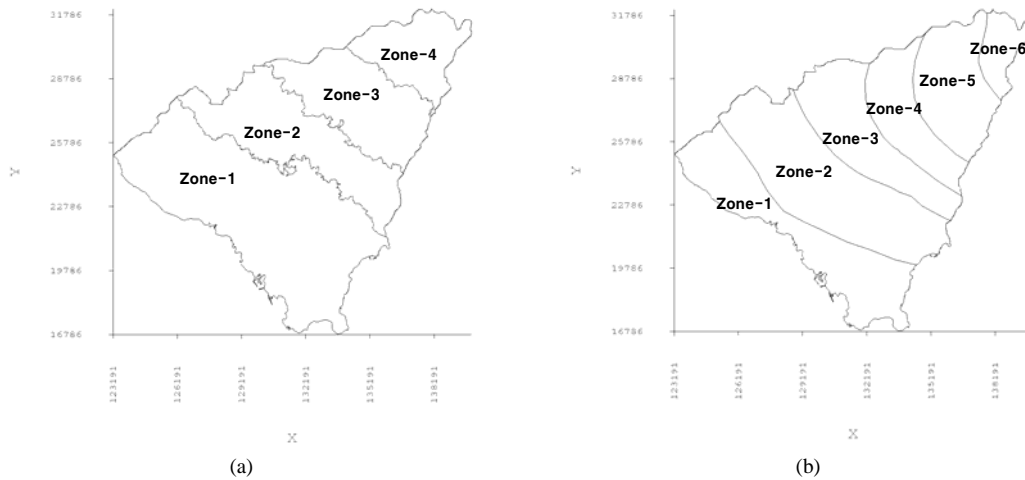


Fig. 2. Hydraulic conductivity zonation in Dae-jeong watershed based on ground level (a) and equipotential line (b).

치밀한 현무암층으로 반복되며(Ko, 1997) 저투수성 퇴적층은 서귀포층 하위에 분포하는 층서로 구분할 수 있다(Jeju Special Self-Governing Province, 2013). MODFLOW는 grid층위가 연속성을 가지고 있는 구조화된 대수층 분석에 적합한 방법으로서, 제주도과 같이 pinchout 형태의 대수층을 명확하게 분석하기에는 한계가 발생된다. 이에 따라, 지하수 모델링을 위한 개념모델로서 1층은 투수성이 양호한 화산암층, 2층은 투수성과 공극률이 낮은 저투수층으로 단순화하여 적용하였다. 유역의 격자 구성은 50×50 m로 설정하였고, 연구유역을 제외한 지역은 비활성화 셀(inactive cells)로 구분하였다. 해안지역의 경우 일정수두경계 조건을 설정하였으며, 저투수층이 낮아지는 방향은 흐름조건으로 적용하였다(Kim et al., 2015). 지하수 함양량은 제주특별자치도 수자원관리종합계획(Jeju Special Self-Governing Province, 2013)의 자료를 참고하여 표고별 함양량을 적용하였으며, 수리전도도는 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사Ⅲ(Jeju, 2003) 중 제주도 광역상수도 및 해수침투 감시관측정 자료의 평균 수리전도도에 제시된 자료를 이용하여 분석하였다. 공극률은 화산분출암의 공극률 14~40% 범위 내에서 적용하였다(Fetter, 1994).

2.3. 수리전도도 적용을 위한 유역분할

수리전도도는 매질 속을 통과하는 유체와 매질의

물리적 성질을 고려한 투수계수로서 대수층 내의 위치 및 방향에 따라 다양한 결과로 나타난다. 기존에는 투수계수(coefficient of permeability)로 사용되었으나 USGS에서 1968년에 처음 제안한 이후 수리전도도의 용어로 광범위하게 사용되고 있다. 수리전도도를 적용하기 위해서는 지층 및 대수층의 특성 등 다양한 수리학적 요소를 고려하여 유역을 분할해야 하지만 지하지질의 형태를 명확히 판단하기 어렵고, 매우 복잡한 구조로 형성되었기 때문에 정확히 유역을 구분하기란 한계가 있다(Kim, 1999).

본 연구에서는 실무에서 일반적으로 적용되는 표고기준의 유역분할방법과 지하수 등수위선기준의 유역분할 방법으로 세분화된 소유역에 수리전도도를 적용하여 지하수 흐름을 검토하였다. 표고기준의 유역분할 방법은 토지이용현황을 배경으로 주거지 및 상업지역이 분포하는 표고 50 m이하(Zone-1), 과수원과 밭이 혼합지역인 50 ~ 100 m(Zone-2), 산림으로 형성된 표고 200 m이상(Zone-4) 총 4개의 구역으로 세분화하여 수리전도도를 적용하였다(Fig. 2a). 지하수 등수위선을 이용한 유역구분은 앞 절에서 구축한 제주도 지하수 등수위선 자료를 토대로 5 m이하(Zone-1), 5 ~ 20 m(Zone-2), 20 ~ 30 m(Zone-3), 30 ~ 50 m(Zone-4), 50 ~ 100 m(Zone-5), 100 m이상(Zone-6)으로 분할하여 수리전도도를 적용하였다(Fig. 2b).

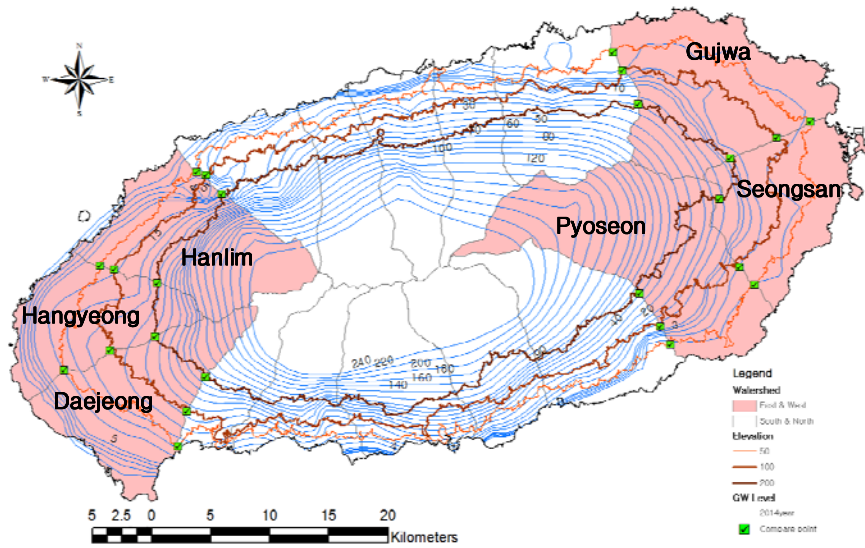


Fig. 3. Groundwater lever compared to ground level over Jeju Island.

3. 결과 및 고찰

3.1. 동·서부지역 동일 표고에 대한 수위비교

제주지역 지하수 등수위선과 소유역별 표고분포를 비교한 결과 제주도 남·북지역의 지하수흐름은 표고 상승에 따라 등고선과 유사하게 나타나지만 동·서지역은 표고상승 방향과 지하수흐름방향이 상이하게 나타났다. 이러한 결과를 토대로 제주도 동부지역(구좌, 성산, 표선유역)과 서부지역(한림, 한경, 대정유역)을 대상으로 동일 표고지점에 대한 수위를 비교하였다 (Fig. 3).

동·서부 6개의 유역을 대상으로 표고 50, 100, 200 m지점 별 수위를 확인한 결과 동부지역의 구좌유역과

성산유역의 경우 표고 50, 100 m지점에서는 유사한 수위특성을 보였으나, 200 m지점에서 8.81 ~ 10.92 m로 비교적 큰 차이가 발생되었다. 표선유역의 경우 50 m지점에서는 동일한 수위분포를 형성하였으나, 200 m지점에서 수위차이가 크게 발생되어 동부지역에서는 가장 큰 수위범위를 나타냈다(Table 1). 일반적으로 표고 50 m이하 지역은 지하수위 분포가 크지 않기 때문에 수위차는 작게 확인되지만, 서부지역의 경우 해안지역에서부터 큰 차이가 발생하는 것으로 확인되었다. 특히, 서부지역의 대정유역은 표고 50 m지점에서 5.72 m, 평균 23.85 m의 수위차이로 6개의 비교대상 유역 중 가장 큰 차이를 보여 수치모델의 적용유역

Table 1. Groundwater level difference compared to ground level

ground level (m)	Groundwater level difference in eastern watersheds (m)			Groundwater level difference in western watersheds (m)		
	Gujwa	Seong-san	Pyoseon	Hanlim	Han-gyeong	Dae-jeong
50	0.20	0.20	0.00	3.91	2.95	5.72
100	0.14	0.92	4.25	5.88	15.91	19.54
200	10.92	8.81	39.18	23.66	18.39	46.29
average	3.75	3.31	14.48	11.15	12.42	23.85

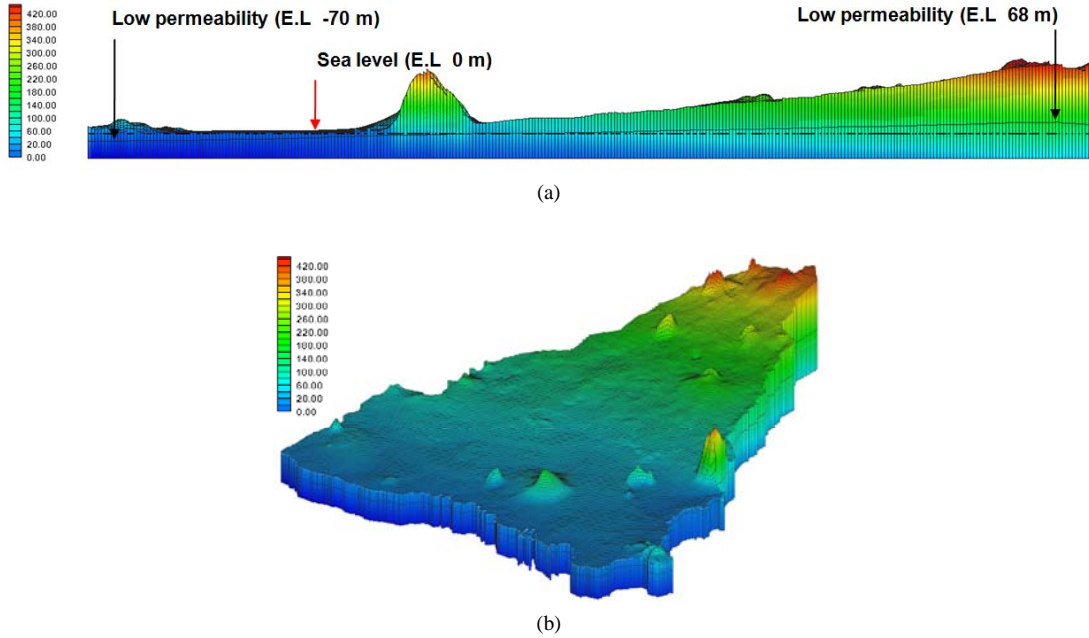


Fig. 4. Dae-jeong watershed based on front view (b) and active cells (a).

으로 선정된 후 모델링을 통한 지하수위 및 흐름을 해석하였다.

3.2. 표고경계에 따른 지하수 흐름분석

대정유역의 정상류 상태의 흐름을 모의하기 위하여 지하수 함양량은 표고별로 200 m이하, 200 m이상으로 구분하여 각각 590.67 mm/year, 945.59 mm/year을 입력하였으며(Jeju Special Self-Governing Province, 2013), 저류계수는 서부지역의 평균값인 0.12를 입력하였다(Jejudo, 2003). 분석유역의 표고는 E.L 0 ~ 455 m, 저투수층은 E.L -70 ~ 68 m로 확인되었으며 (Fig. 4a), 모델수행을 위한 활성화 셀(active cells)은 2개의 층을 포함하여 총 100,117개의 셀 격자망으로

구성되었다(Fig. 4b).

수리전도도는 실무에서 일반적으로 사용되는 방법인 표고기준 경계에 따라 적용하였으며, 최대한 관측 수위에 근접하도록 보정을 실시하였다. 표고경계를 기준으로 수리전도도를 적용하여 분석한 결과 $5.79 \times 10^{-4} \sim 5.78 \times 10^{-3}$ m/sec의 범위로 산출되었으며 (Table 2), 산출값은 높은 고도지역으로 진행될수록 작게 분석되었다(Table 2).

대정유역 정상류상태에서 계산된 수위를 실제 관측수위와 비교한 결과 수위차이는 -4.22 ~ 1.54 m, RMSE (root mean square error)는 1.465로 비교적 양호한 결과로 분석되었다(Table 3). 지하수의 흐름은 DEM (digital elevation model)을 이용하여 분석된

Table 2. Hydraulic conductivity distribution of the Dae-jeong watershed based on elevation

Hydraulic conductivity	Zone-1 (Below EL. 50 m)	Zone-2 (EL. 50 ~ 100 m)	Zone-3 (EL. 100 ~ 200 m)	Zone-4 (Above EL. 200 m)
Horizontal (m/sec)	5.78×10^{-3}	2.31×10^{-3}	6.94×10^{-4}	5.79×10^{-4}
Vertical (m/sec)	5.78×10^{-4}	2.31×10^{-4}	6.94×10^{-5}	5.79×10^{-5}

Table 3. Comparison results between observed and computed groundwater level based on ground level

Observation wells	Observed groundwater level (EL. m)	Computed groundwater level (EL. m)	Residual (m)
SG2	24.56	26.10	1.54
SG1	27.54	23.32	-4.22
AS	14.50	14.68	0.18
HM2	1.38	2.87	1.49
HM1	0.34	0.35	0.01
IG	3.33	3.48	0.15
YR1	2.86	3.73	0.87
SM2	6.56	6.12	-0.44
SM1	2.75	2.96	0.21
ML2	8.82	8.97	0.15
SG3	98.61	98.92	0.31

대정유역의 지형구배와 유사한 서남방향으로 발달하는 것으로 확인되었다(Fig. 5). 반면, 등수위선을 통해 구축된 대정유역의 지하수 흐름은 Fig. 6과 같이 서쪽 방향으로 흐름을 보이다가 해안지역으로 진행될수록 서남방향으로 진행되어 분석결과와 지하수 흐름과 상이한 것으로 확인되었다.

실무에서는 지하수 흐름에 대한 검증은 실시하지 않고, 관측소 지점의 실제 관측수위와 계산된 수위의

차이만을 비교하여 부정류 해석을 실시하게 된다. 표고를 기준경계로 설정하여 지하수 해석을 실시한 경우 관측지점에 대한 오차율은 비교적 작게 나타나지만 지하수의 흐름은 상이한 결과를 보여주는 것으로 확인되었다.

3.3. 등수위선경계에 따른 지하수 흐름분석

수리전도도 적용방법에 따른 지하수 흐름을 분석하기 위하여 함양량, 저류계수, grid cells, 지층 등의

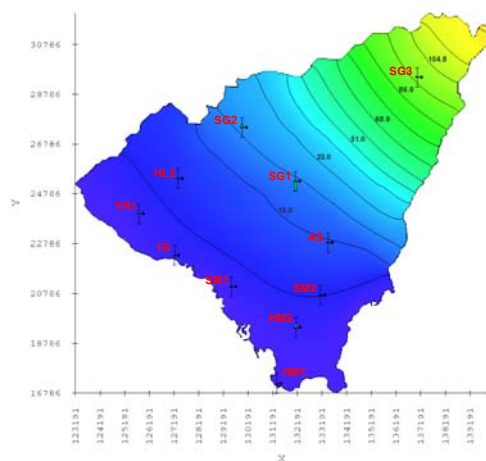


Fig. 5. Steady flow analysis based on ground level.

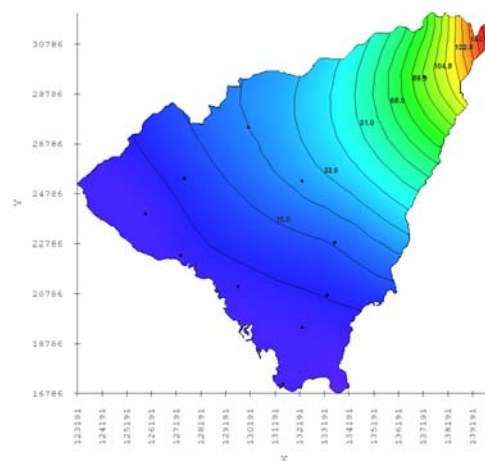


Fig. 6. Groundwater flow in Dae-jeong watershed.

Table 4. Hydraulic conductivity distribution of the Dae-jeong watershed based on equipotential line

Hydraulic conductivity	Zone-1	Zone-2	Zone-3	Zone-4	Zone-5	Zone-6
Horizontal (m/sec)	2.89×10^{-3}	1.15×10^{-3}	1.04×10^{-3}	8.68×10^{-4}	8.10×10^{-4}	4.63×10^{-4}
Vertical (m/sec)	2.89×10^{-4}	1.15×10^{-4}	1.04×10^{-4}	8.68×10^{-5}	8.10×10^{-5}	4.63×10^{-5}

인자는 앞 절에서 분석한 결과를 동일하게 입력하였으며, 수리전도도는 지하수 등수위선을 기준으로 대정유역을 세분화하여 적용하였다. 관측지점의 수위결과와 유사하도록 분석한 결과 수리전도도는 $4.63 \times 10^{-4} \sim 2.89 \times 10^{-3}$ m/sec의 범위로 산출되었다(Table 4). 이는 표고를 기준으로 산출된 수리전도도와 동일하게 유역의 상부지역으로 진행될수록 작아지는 것으로 분석되었다. 제주도의 비포화대 두께는 상부지역으로 진행될수록 매우 두꺼워지고, 하류지역에 비해 높은 지하수위를 형성한다(Kim, 2011). 하류지역의 경우 비포화대의 두께가 매우 얇고, 낮은 수위를 유지하고 있어 수리전도도의 결과는 비포화대의 두께와 지하수위와의 관계에 따라 산출된 것으로 판단된다.

등수위선을 기준하여 유역을 세분화하고 모의한 결과 관측수위와 계산수위의 차이는 $-0.95 \sim 1.26$ m

이며, RMSE는 0.676으로 기존 표고를 기준으로 세분화하여 분석한 결과에 비해 작게 발생되었다(Table 5). 또한 지하수 흐름은 대정유역의 등수위선과 유사한 방향으로 진행되는 것으로 분석되어 등수위선으로 세분화하여 수리전도도를 적용한 결과가 상대적으로 높은 상관도가 있는 것으로 확인되었다(Fig. 7).

3.4. 미계측지역에 대한 지하수위 검증

표고기준의 유역구분방법과 지하수 등수위선을 이용한 유역구분방법을 적용하여 관측지점의 수위차이와 지하수의 흐름특성을 비교하였다. 그러나 관측지점별 수위자료만을 이용하여 모의된 것으로 어떠한 방법이 미계측유역의 지하수위특성을 유사하게 묘사되는지 검증이 필요하다. 이에 지하수 등수위선 자료를 활용하여 대정유역의 지하수위 분포를 TIN (triangulated

Table 5. Comparison results between observed and computed groundwater level based on equipotential line

Observation wells	Observed groundwater level (EL. m)	Computed groundwater level (EL. m)	Residual (m)
SG2	24.56	23.61	-0.95
SG1	27.54	28.78	1.24
AS	14.50	14.91	0.41
HM2	1.38	2.65	1.27
HM1	0.34	0.28	-0.06
IG	3.33	3.25	-0.08
YR1	2.86	3.38	0.52
SM2	6.56	5.91	-0.65
SM1	2.75	2.55	-0.20
ML2	8.82	8.56	-0.26
SG3	98.61	98.59	-0.02

Table 6. Calculated groundwater level for 60 random points from DEM compared to groundwater level based on ground level and equipotential line

NO.	Groundwater level (m)			NO.	Groundwater level (m)		
	Calculated	Ground level	Equipotential line		Calculated	Ground level	Equipotential line
1	7.47	7.98	7.55	31	35.85	35.94	41.56
2	7.82	8.2	7.69	32	36.4	34.41	42.33
3	7.7	7.33	6.82	33	35.97	34.02	43.3
4	5.53	5.5	4.77	34	34.36	32.28	41.28
5	3.55	4.45	3.91	35	33.74	31.14	39.31
6	1.95	3.05	2.79	36	36.16	56.24	41.26
7	0.63	1.22	1.15	37	40.34	54.32	48.03
8	14.08	12.96	11.15	38	44.34	53.29	51.81
9	13.84	11.81	11.36	39	47.05	51.57	54.23
10	13.34	11.64	11.2	40	47.71	50.41	55.34
11	10.75	10.43	9.94	41	48.47	50.38	56.59
12	8.56	9.27	8.86	42	49.12	49.54	57.02
13	6.33	6.85	6.51	43	43.99	71.83	50.6
14	4.43	2.72	2.48	44	50.06	70.96	58
15	20.53	22.07	15.91	45	57.2	72.24	64.74
16	20.14	19.15	15.11	46	60.26	70.14	67.33
17	19.53	15.92	14.56	47	64.69	71.12	70.59
18	17.2	15.02	14.13	48	66.06	70.52	71.61
19	14.03	13.8	13.51	49	67.81	70.81	72.74
20	11.65	11.4	11.53	50	65.3	89.73	74.64
21	10.27	7.27	7.6	51	75.21	89.88	82.17
22	26.28	29.68	28	52	78.82	86.99	84.68
23	26.32	27.76	28.27	53	83.43	86.74	88.39
24	27.71	26.01	29.57	54	87.33	86.89	90.91
25	25.71	20.98	26.54	55	82.66	103.42	91.41
26	23.5	19.87	24.82	56	98.79	101.89	100.61
27	20.52	17.97	18.97	57	109.21	101.47	114.14
28	19.52	14.95	14.88	58	106.87	115.91	109.14
29	30.37	38.31	35.3	59	117.38	115.21	124.86
30	33.33	36.12	38.62	60	127.33	115.24	134.16

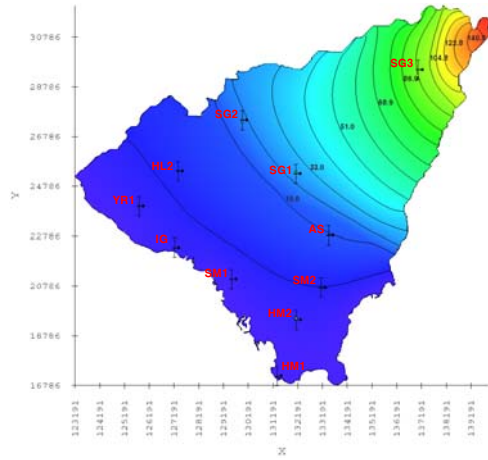


Fig. 7. Steady flow analysis based on equipotential line.

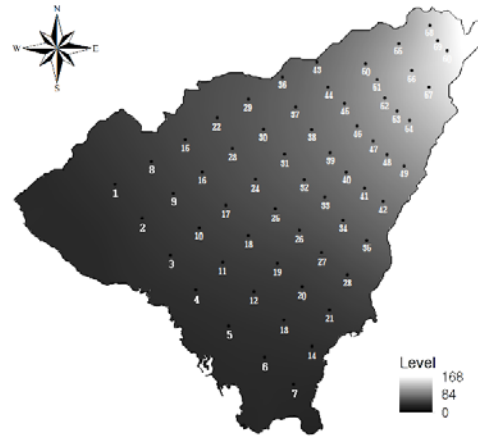
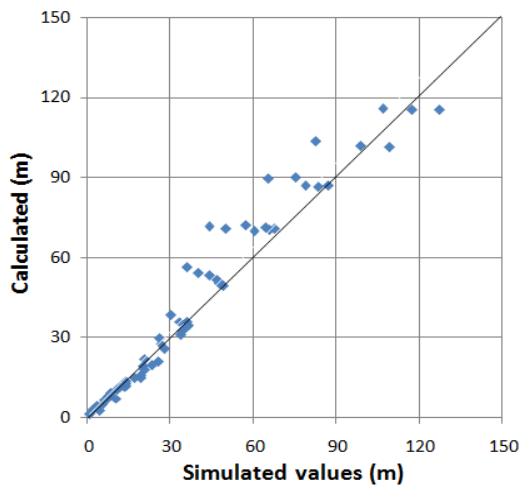


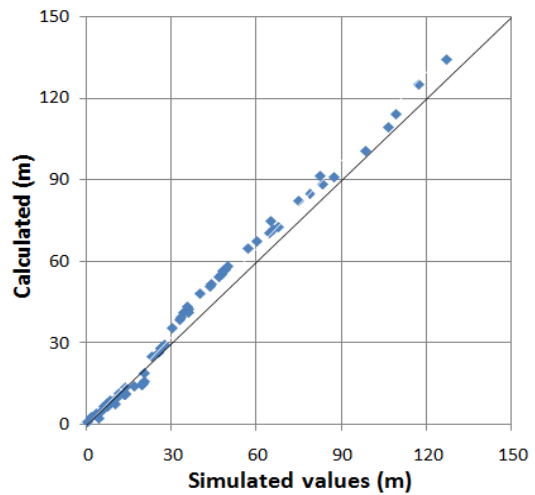
Fig. 8. 60 random points in Dae-jeong watershed.

irregular network) 형태로 생성하고, DEM자료로 구축하였다. DEM방식은 지형자료의 처리방법 중 가장 일반화된 방법으로 동일한 밀도와 크기를 갖는 격자를 사용하여 지점별 레벨 값을 산출한다. 미세측지역에 대한 수위비교를 위해 Fig. 8과 같이 대정유역 내 60개의 임의지점을 선정하여 표고기준 및 등수위선기준 유역구분을 통해 산출된 지하수위를 DEM으로 구축한 수위자료와 비교하였다.

표고를 기준으로 수리전도도를 적용하여 모의한 결과 지하수분포의 차이는 -27.84 ~ 12.09 m로 분석되었으며, 등수위선을 기준으로 모의한 지하수분포의 차이는 -9.34 ~ 5.03 m의 범위로 분석되었다 (Table 6). 수위분포가 30 m이하(Table 6의 NO. 1 ~ 28) 지역의 경우 표고기준 유역구분의 수위차는 -3.40 ~ 4.73 m, 등수위선 기준 유역구분의 수위차는 -1.95 ~ 5.03 m로 두 방법 모두 상대적으로 계산



(a)



(b)

Fig. 9. Comparison results between calculated and simulated groundwater level based on ground level (a) and equipotential line (b).

수위와 유사한 결과를 산출할 수 있었으나, 지하수위 30 m 이상(NO. 29 ~ 60) 지역의 경우 표고기준 유역구분의 수위차가 -27.84 ~ 12.09 m로 비교적 크게 발생되고, 불규칙한 양상이 나타났다(Fig. 9a). 반면, 등수위선을 기준으로 유역을 구분한 결과(NO. 29 ~ 60) 수위차이는 -9.34 ~ -1.82 m로 계산수위에 비해 높게 산출되었지만, 비교적 일정한 수위 분포가 형성되었다(Fig. 9b). 이러한 결과는 대정유역의 지하수위 관측소가 지하수위 30 m 이하에 대부분 분포하고, 상류지역에는 1개의 지하수 관측소가 위치하고 있어 하류지역의 지하수위는 유사하게 산출할 수 있지만, 상류지역의 지하수위 분포는 정확하게 분석되지 못하기 때문으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 2014년 지하수 등수위선과 등고선을 이용하여 동일표고지점에서의 지하수위 관계를 검토하였으며, 제주도 서부지역에 위치한 대정유역이 표고수위간의 차이가 가장 큰 것으로 확인되었다. 이에 대정유역을 대상으로 지하수 해석 모델링을 수행하였으며, 일반적으로 적용되는 연구방법인 표고기준의 유역분할 방법과 대수층 수리적 차이를 구분하기 위해 등수위선 기준으로 수리전도도 적용한 후 지하수의 흐름 결과를 평가하였다. 또한, 실제 등수위선 자료와 비교·검토하여 미세측지력에 대하여 검증한 결과는 다음과 같다.

실무에서 일반적으로 사용되는 표고경계 기준의 유역구분방법으로 지하수 모델링을 수행한 결과 관측수위와 계산수위의 차이는 -4.22 ~ 1.54 m로 비교적 양호한 결과가 나타났다. 그러나 지하수 흐름방향은 실제 등수위선의 형태와 상이한 결과를 나타내 지하수흐름의 신뢰도는 낮은 것으로 해석되었다. 반면 등수위선 경계에 따라 수리전도도를 적용하여 모델링을 수행한 결과 관측수위와 계산수위의 차이는 -0.95 ~ 1.26 m로 기존 표고기준의 적용방법에 비해 관측지점 지하수위와의 차이를 최소화 할 수 있었으며, 지하수의 흐름도 대정유역의 등수위선과 동일한 방향으로 진행되었다. 미세측지력의 수위 검정을 위해 대정유역 내 60개소의 임의지점을 선정하여 지점별 수위를

비교한 결과 지하수 관측정이 다수 분포하는 하류지역의 경우 표고경계와 등수위선 경계의 결과 모두 작은 수위차이가 나타났으나, 지하수위가 높게 분포하는 지역의 경우 등수위선 경계를 적용한 방법이 신뢰도가 높은 것으로 분석되었다.

본 연구에서는 지하수 관측수위를 활용하여 구축한 등수위선을 실제 지하수흐름으로 적용하였으며, 향후 지하지질의 수리특성 및 미세측지력에 대한 정밀한 수위예측 등 다양한 연구방법에 따라 지역적 특성을 고려하여 지하수 모델적용방안을 개선해 나가는 것이 필요하다.

REFERENCES

- Ahn, S. S., Park, D. I., Oh, Y. H., 2013, Characteristics of ground water capture zone according to pumping rate, *J. Environ. Sci. Inter.*, 22(7), 895-903.
- Cho, B., 2001, Hydrogeological characteristics of the groundwater resources in the Busan area, Korea. Ph. D. Thesis, Kyungpook National University, 36.
- Choi, B. S., 1999, Determination of aquifer characteristics from specific capacity data of wells in Cheju Island, *J. of sci. Groundwater Environment*, 6, 180-187.
- Chung, S. Y., Yoo, I. K., Yoon, M. J., Kweon, H. W., Heo, S. H., 1999, Application of geostatistical method to groundwater flow analysis in a heterogeneous anisotropic aquifer, *J. of Engineering Geology.*, 9(2), 147-159.
- Fetter, C. W., 1994, *Applied hydrogeology*, third edition, Macamillan College Publishing Company.
- GIMS (National groundwater information center), 2013, <https://www.gims.go.kr/>
- Han, J. S., 1999, 3D groundwater model and application, Parkyoungsa.
- Jejudo, 2003, *Comprehensive 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, 2014, *Groundwater management regulations*.
- Kang, D. H., Yang, S. I., Kim, T. Y., Park, H. J., Kwon,

- B. H., 2008, The Variation characteristics of groundwater level with distance from shoreline in the Jeju Island, *J. of Engineering Geology*.
- Kim, B. S., 2011, Study on hydrogeological characteristics of volcanic rocks in Jeju Island, Ph. D. Dissertation, Pusan National University, Korea.
- Kim, G. B., 2009, Model application for groundwater resource development and management, *J. the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 22(4), 40-45.
- Kim, K. J., 1999, Current situation and problems in applying groundwater flow models to EIAs in Korea, *J. the Korean Society Groundwater Environment*, 6(2), 66-75.
- 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. Inter.*, 24(4), 449-459.
- Kim, N. W., Na, H. N., Chung, I. M., 2013, Simulation of groundwater variation characteristics of Hancheon watershed in Jeju Island using integrated hydrologic modeling, *J. Environ. Sci. Inter.*, 22(5), 515-522.
- Ko, G. W., 1997, Characteristics of the groundwater and hydrogeologic implications of the Seoguiipo formation in Cheju Island, Ph. D. Dissertation, Pusan National University, Korea.
- Ko, J. W., 2016, Surface & ground water based on the observation data of Jeju Island midwest basin flow characteristic analysis, Ph. D. Dissertation, Jeju National University, Korea.
- Lee, B. D., 2001, Study on hydrogeological characteristics related to the excavation of Youngchun waterway tunnel, Ph. D. Dissertation, Pusan National University, Korea.
- McDonald, M. G., Harbaugh, A. W., 1988, A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model, *Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey*.
- 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, *Korean Society of Soil and Groundwater Environ.*, 12(3), 53-65.
- Park, N. S., Koh, B. R., Lim, Y. D., 2013, Impacts of fresh and saline groundwater development in Sungsan watershed, Jeju Island, *J. of Korea Water Resour. Assoc.*, 46(7), 783-794.
- Sacks, J., Welch, W. J., Mitchell, T. J., Wynn, H. P., 1989, Design and analysis of computer experiments, *Statistical Science*, 4(4), 409-435.
- Williams, J. R., Nicks, A. D., Arnold, J. G., 1985, Simulator for water resources in rural basins, *J. Hydrological. Eng. ASCE*, 111(6), 970-987.