

ORIGINAL ARTICLE

제주도 지하수 유역의 적절성 평가와 수리학적 유역설정

김민철 · 양성기^{1)*}

제주연구원, ¹⁾제주대학교 토목공학과

Hydraulic Watershed Classification and Analysis of Flow Characteristics of Groundwater on Jeju Island

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

This study was carried out to identify the problems of the underground watersheds on Jeju Island, and to establish the hydraulic groundwater basin to be used as basis for the analysis of the groundwater model. In order to evaluate the adequacy of the groundwater basin on Jeju Island, a correlation analysis between elevation and groundwater level was conducted using data from 125 observation wells. The analysis, conducted with an elevation step of 100 m, exhibited values of R2 in the range 0.1653-0.8011. No clear correlation was observed between elevation and groundwater level. In particular, the eastern and western areas showed an inverse proportionality between elevation and groundwater level. The Kriging technique was used to analyze the underground water level data and to define the equipotential lines for all areas of Jeju Island. Eight groundwater watersheds were delineated by considering the direction of groundwater flow, the positions of the observation wells, and the long and short axes of the watersheds.

Key words : Jeju, Groundwater, Watershed, Kriging

1. 서론

제주도의 연평균 강수량은 2,061 mm로서 국내 최다 우지역이지만, 대부분의 하천은 건천의 형태로 유지되어 지표수를 활용한 수자원 확보는 매우 어렵다(Jung and Yang, 2009). 그러나 투수성이 높은 지질특성을 가지고 있어 지하수 함양량은 전체 수자원의 44.5%로 주요 수 자원은 지하수로 이용된다(Jeju Special Self-Governing

Province, 2013). 최근 제주도는 기후·환경 변화로 2017년에는 지하수위가 관측 이래 최저로 내려가고, 2011년과 2013년, 2017년에는 일부지역에서 해수침투가 발생하는 등 지하수 문제가 발생하였다. 이와 더불어 인구와 관광객 급증, 주택건설 및 관광단지 등의 개발사업 증가 등 인문·사회 환경이 급변하고, 특용작물 및 시설하우스 증가 등으로 용수요량이 증가되고 있다. 특히, 안정적인 용수 공급을 위해 지속적인 지하수 개발이 진행되고

Received 21 February, 2019; Revised 21 February, 2019;
Accepted 14 March, 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.

있으며, 지하수 스트레스는 지속적으로 발생되고 있는 실정이다.

신규 지하수를 개발하기 위해서는 제주특별자치도 지하수 관리조례에 의거하여 지하수 영향조사서를 작성하고 지하수관리위원회의 심의를 받도록 하고 있다. 보고서에는 지형 및 지질, 지하수 오염원 등 일반현황 뿐만 아니라 수리모형을 기반으로 지하수 유동해석을 실시하도록 하고 있다. 지하수 유동 해석을 위해서는 3차원 수치 해석 모형이 적용되는데 수치해석 모형에서의 활성화 경계(Boundary)는 지하수 유역을 기준으로 설정되며, 지하수 유역구분은 지하수 모델 분야에서 가장 중요한 요소로 강조된다(Franke and Reily, 1987; Feanke et al., 1987). 모델분석에서는 유역을 기준으로 인접유역과의 지하수 유·출입은 제한되고, 지하수 흐름은 유역경계 내에서 형성되므로 지하수 유동해석 시 유역 경계설정은 매우 중요하다고 할 수 있다.

일반적으로 유역은 지표수 유역과 지하수 유역으로 구분된다. 지표수 유역은 하천, 지형 및 경사, 분수계 등을 통해 작성되고, 지하수 유역은 지하수 수위면의 능선에 해당된다. 지표수 유역은 위성자료와 DEM자료 등을 통해 유역을 세분화할 수 있지만, 지하수 유역은 지하수면의 분포를 정확하게 알 수 없기 때문에 정확히 세분화하기에는 매우 어렵다(Kim, 2011). 제주도과 수자원공사(2003)는 수문지질학적 특성에 의거하여 제주도의 지하수 관리 유역 구분을 시도하였다. 지하수 부존형태, 지하수위 및 수질, 수문지질단위 분류, 대수층의 수리특성 등의 조사·분석을 수행하고, 서귀포층과 암맥의 분포에 의한 수문지질방벽의 존재 가능성을 검토하였다. 그러나 수문지질방벽의 분포를 규명하고, 지하수 분수령을 세분화하기에는 한계가 있어 1:5,000 수치지형도의 지형, 하천, 지표분수령 등 지표특성을 고려하여 설정된 16개의 소유역을 지하수 유역으로 구분하였다. 이에 지하수 모델분석에 적용되는 유역경계는 지표유역으로 구분된 소유역으로 적용된다(Jejudo, 2003). 그러나 제주지역은 지역별 표고와 지하수위간의 일정한 관계를 찾기 어려울 정도로 대수층의 수리적 차이가 크게 발생하고(Choi, 1999), 일부지역에서는 표고와 지하수위가 반비례적인 경향을 보이므로 표고에 따른 지하수위 분포에 대한 관계해석이 필요하다(Ko, 2015). 특히, Kim et al.(2015)과 Park et al.(2016)의 연구결과에 의하면, 지표유역 경

계를 적용하여 지하수 모델링 분석을 수행할 경우, 지표가 낮아지는 방향에 따라 지하수 유동이 발생되었으며, 유역 경계 설정에 따라 모델분석결과는 실제 흐름과 상이한 결과가 도출 될 수 있다고 제시하였다.

따라서 본 연구에서는 지하수위와 표고와의 상관관계를 분석하여 지표수 유역을 지하수 유역으로 적절한지에 대한 평가와 기존 지하수 유역구분에 대한 문제점을 도출하였다. 또한 지하수 관측정에서 실시간으로 관측되고 있는 지하수위자료를 Kriging 기법에 적용하여 지하수 등수위선을 작성하고, 지하수 모델 해석을 위한 새로운 지하수 유역을 설정하였다.

2. 자료 및 방법

2.1. 지하수위 관측정

지하수위 관측정은 제주도 지하수의 수위변동을 파악하여 지하수위 하강과 같이 지하수 장애로부터 관리하기 위하여 지속적으로 관측·감시하기 위한 관측시설이다. 지하수위 관측정은 관측정 내부에 설치된 자동측정기로부터 1시간 간격으로 지하수위·전기전도도·수온 등을 모니터링하고 있으며, 필요시에는 10분, 30분 간격으로 주기를 조정해 모니터링 하고 있다. 각 관측정에서 관측되는 데이터는 CDMA(코드분할 다중접속 : Code Division Multiple Access)무선통신망에 의해 실시간으로 관측정 관리 전용서버로 전송되어 관리되고 있다(Jeju Special Self-Governing Province, 2014). 제주도내 지하수 관측정은 2001년부터 관측이 시작되어 2016년 12월 기준 총 133개소가 설치되어 운영되고 있으며, 지하수위 관측정, 해수침투 관측정, 광역 감시정 관측정, 인공함양 관측정으로 구분된다.

고도별 설치현황에 의하면, 해안저지대(200 m 이하)에는 106개소로 전체 79.6%가 분포하며, 중산간지대(200 ~ 600 m)에는 24개소, 고지대(600 m 이상)에는 3개소로 대부분의 관측정은 비교적 낮은 위치에 개발·운영 중이다(Fig. 1).

이 연구에서는 도서지역 관측정과 지하수위가 해수면 이하로 관측되는 관측정, 인공함양조사 목적에 따라 개발된 관측정 등을 제외하여 총 125개소의 5년간 지하수위 자료를 활용하였다.

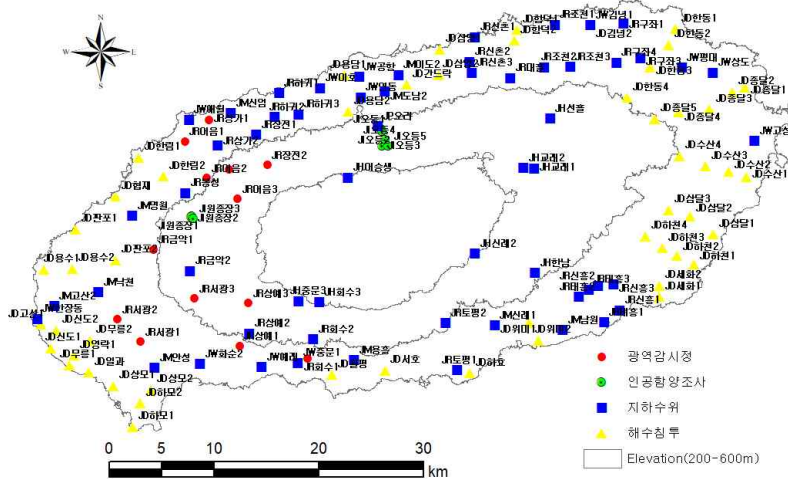


Fig. 1. Groundwater observation location map.

2.2. 상관관계 분석

지표수 유역을 지하수 유역으로 적용가능성을 평가하기 위해 표고와 지하수위간의 상관분석(Correlation Analysis)을 수행하였다. 상관분석은 두 변수 간의 관련성을 규명하기 위한 통계적 분석방법으로 변수간의 관련성을 검토하고 유의성을 검증하기 위해 사용되는 방법이다(Park, 2012). 상관분석에 적용되는 변수로는 독립변수와 종속변수로 구분할 수 있는데, 함수관계에서 다른 변수의 변화와는 관계없이 독립적으로 변화하는 독립변수(Independent Variable)로 분류되고, 독립변수가 변화함에 따라 그 영향으로 변하는 변수를 종속변수(Dependent Variable)로 구분된다(Sung, 2011).

상관분석 결과는 상관관계의 정도를 수치로 나타내어 정도를 표현하며, 이 때 적용되는 수치를 두 변수간의 선형성(Linearity)을 검토할 수 있는 상관계수(r)와 독립변수의 변화에 따라 종속변수의 변동양상을 검토할 수 있는 결정계수(Coefficient of determination, R-Sq)로 판단한다. r의 상관 범위는 $-1 < r < 1$ 로써 0.8이상이면 연관성이 매우 높다고 보며, 0.6 ~ 0.8은 연관성이 높음, 0.4~0.6은 연관이 있음, 0.2~0.4는 연관성이 낮음, 0.2이하는 연관성이 거의 없다고 보고, R^2 의 범위는 $0 \leq R^2 \leq 1$ 로써 1에 가까워질수록 회귀선의 적용성이 높다고 판단한다(Won, 2007).

2.3. 공간보간기법

제주도 전역의 등수위선을 구축하기 위하여 공간보간기법을 이용하였다. IDW는 근접 관측치에 가중 값을 주어 선형가중이동평균을 이용하는 방법으로 관측값과 관측 값의 거리가 짧고, 밀집된 경우에 적절한 방법이며, Spline은 전체 표면의 굴곡을 최소화하는 수학적 연산으로 값을 추정하며, 부드러운 표면을 산출하는 방법으로 기온과 같은 다양한 현상을 부드럽게 표현하기에 적절한 방법이다. Kriging은 관측치의 거리 상관성 또는 방향성이 파악되는 경우 적절하며, 주변의 측정값을 통계적으로 분석하여 예측하는 방법으로 예측하고자 하는 임의 지점 주변의 추정 값에 대한 상관강도를 반영하여 추정하는 방법이다.

관측정의 지하수위 경우 산간지역을 제외하고는 전 지역으로 분산화 되어있고, 측정지점 등의 정보 확인이 용이하여 관측치의 거리 상관성 등 파악이 가능하므로, 크리깅을 이용한 등수위선을 작성하였다. 다양한 크리깅 기법 중에서도 표고와의 상관도를 고려한 Co크리깅기법이 일반적으로 사용되고 있지만(Park, 2002; Oh, 2016), 지하수위 자료는 보통 비정상 확률함수(Nonstationary random function)의 특징을 가지고 있기 때문에 (Jonmel and Huijbregts, 1987) 정규 크리깅과 단순 크리깅 등의 다른 기법보다는 EBK크리깅의 시뮬레이션을

통해 미세측 지역의 수위에 대하여 더 정밀한 추정치를 얻을 수 있다(Gribov and Krivoruchko, 2012).

2.4. 지하수 등수위선 검증

지하수 등수위선의 정확성 대하여 검증을 위해 교차 타당성 검증과 그래프 검증을 수행하였다. 교차 타당성 검증을 위해 관측지점의 관측 값과 등수위선에서 얻어진 동일지점의 계산 값을 비교하였으며, 감소오차의 평균 (Mean Reduced Errors, MRE), 감소오차의 표준편차 (Standard Deviation of Reduced Errors, SDRE) 등을 분석하였다(Jung et al., 2001).

적용된 모델이 적절하다면 감소오차의 평균은 0에 가까워야하며(식 1), 감소오차의 표준편차는 1에 가까워야 한다(Davis, 1987; Solow, 1990)(식 2).

$$MRE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left[\frac{Z(x) - Z^*(x)}{\sqrt{\sigma_k^2}} \right]_i \approx 0 \quad (1)$$

여기서, Z_x 는 관측치, Z_k^* 는 추정치, σ_k 는 추정분산이다.

$$SDRE = \sqrt{VRE} \approx 0 \quad (2)$$

$$VRE = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n (RE - MRE)_i^2$$

$$RE = \frac{Z(x) - Z^*(x)}{\sqrt{\sigma_k^2}}$$

평균오차(Mean Errors, ME)는 0에 가까워야하며(식 3), 평균제곱오차(Mean Square Errors, MSE)와 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Errors, RMSE), 평균 크리깅 분산(Mean Kriging Variance, MKV)은 최소가 되어야 한다(식 4, 5, 6)

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n [Z(x) - Z^*(x)]_i \quad (3)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n [Z(x) - Z^*(x)]_i^2 \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (5)$$

$$MKE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} (\sigma_k^2)_i \quad (6)$$

마지막으로 오차의 분산은 평균 크리깅 분산과 유사하게 산출되어야 한다(Samper, 1986)(식 7).

$$VE = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [Error - ME]^2 = MKV \quad (7)$$

그래프 검증은 관측지점의 관측 값과 등수위선에서 얻어진 동일지점의 예측 값을 대응하여 선형 그래프를 통해 검증하는 방법으로 관측 값과 예측 값이 일치할 경우 기울기가 1인 직선에 중첩되고, 오차가 발생하는 값은 직선과 멀어지게 표시된다.

3. 기존 지하수 유역의 적절성 평가

3.1. 해안거리와 표고 상관분석

제주도 전역을 대상으로 해안거리(해안에서부터 관측 정까지의 거리)와 표고의 상관분석 결과 r 은 0.8400, R^2 는 0.7056이며, 거리에 따른 표고의 기울기는 약 39.29로 분석되었다. 지역별 해안거리-표고 상관분석 결과 동부지역의 r 은 0.9662, R^2 는 0.9336로 해안거리와 표고와의 상관도는 비교적 높은 것으로 확인되었으며, 거리에 따른 표고의 기울기는 약 29.65로 분석되었다. 서부지역의 r 은 0.8851, R^2 는 0.7835로 분석되었으며, 거리에 따른 표고의 기울기는 약 35.78로 분석되었다. 남부지역의 r 은 0.9308, R^2 는 0.8664로 분석되었으며, 거리에 따른 기울기는 약 70.97로 분석되었다. 북부지역의 r 은 0.9412, R^2 는 0.8859로 분석되었으며, 기울기는 약 48.75로 분석되었다(Table 1).

동서남북 지역의 해안에서부터 상류지역으로의 거리에 따른 표고의 관계를 분석한 결과 전반적으로 거리가 상승됨에 따라 표고가 높아지는 특성을 보이고, 기울기는 남부지역이 가장 급하고, 북부, 서부, 동부 순으로 분석되었다(Fig. 2).

3.2 지하수위와 해안거리 상관분석

제주도 전역을 대상으로 지하수위와 해안거리의 상관 분석 결과 r 은 0.5714, R^2 는 0.3265이며, 거리에 따른 표고의 기울기는 약 15.21로 분석되었다. 지역별 해안거리 에 따른 지하수위 특성 분석결과 동부지역의 r 은 0.7532, R^2 는 0.5673으로 분석되었으며, 서부지역의 r 은 0.6746, R^2 는 0.4551, 남부지역의 r 은 0.8670, R^2 는 0.7516,

Table 1. Coastal distance-elevation correlation analysis

Class	Jejudo	Eastern	Western	Southern	Northern
Data	125	33	33	24	35
r	0.8400	0.9662	0.8851	0.9308	0.9412
R ²	0.7056	0.9336	0.7835	0.8664	0.8859
Leaning	39.30	29.65	35.78	70.97	48.75

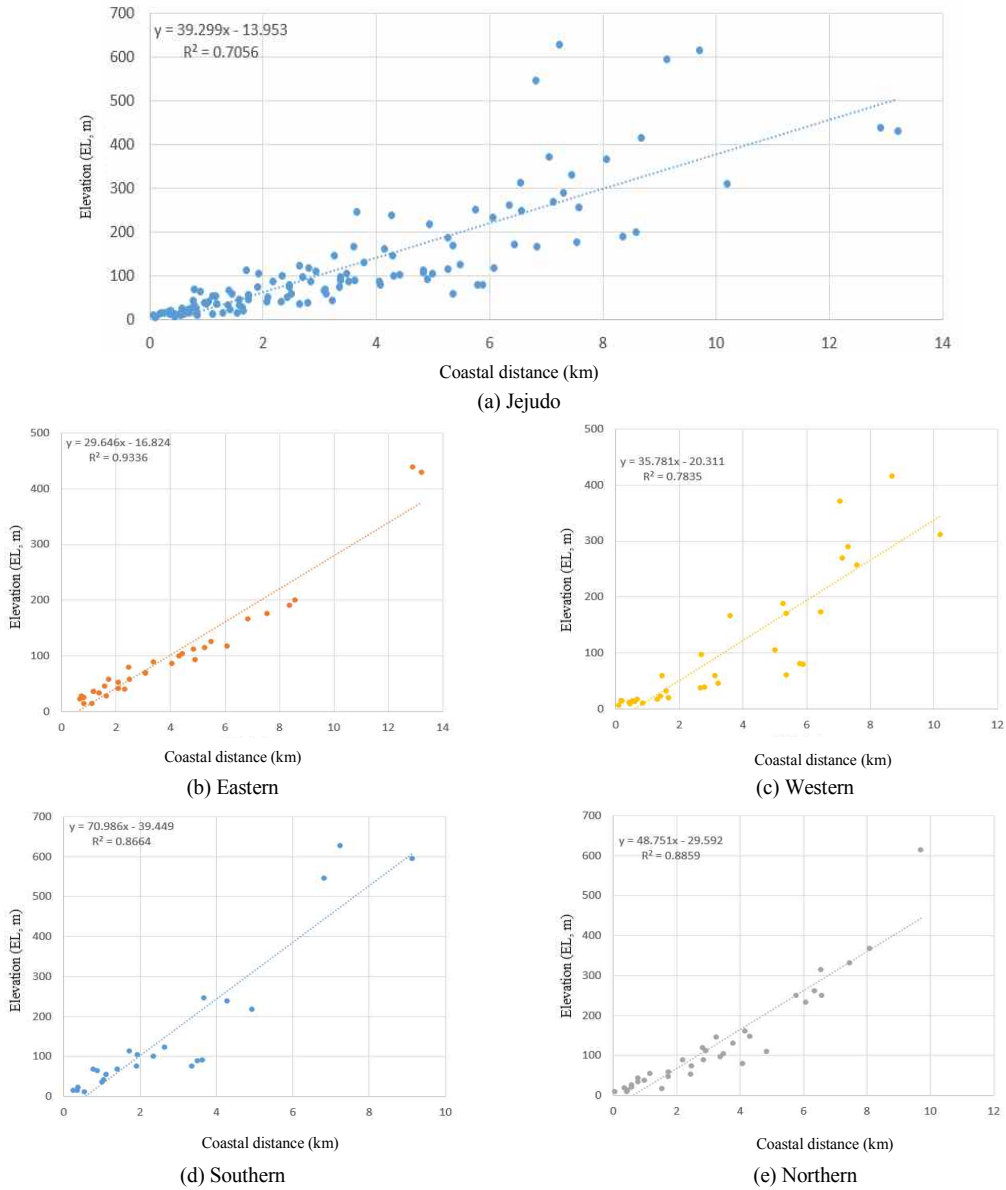
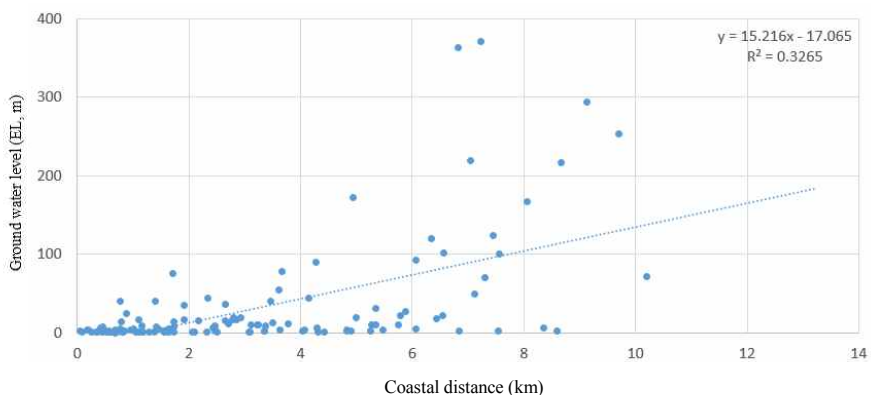


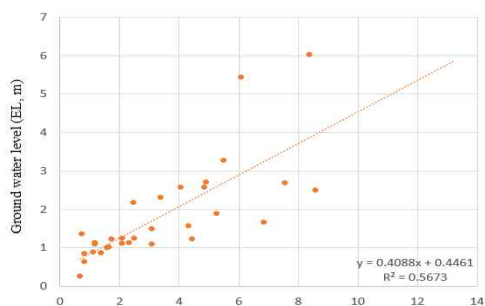
Fig. 2. Regional coastal distance-elevation correlation analysis.

Table 2. Coastal distance-Groundwater correlation analysis Ground water level (EL, m)

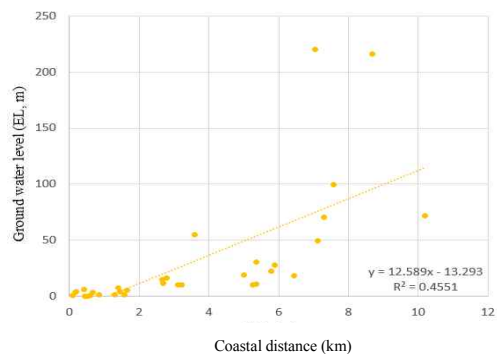
Class	Jejudo	Eastern	Western	Southern	Northern
Data	125	33	33	24	35
r	0.5714	0.7532	0.6746	0.8670	0.8035
R ²	0.3265	0.5673	0.4551	0.7516	0.6455
Leaning	15.21	0.41	12.59	41.00	18.00



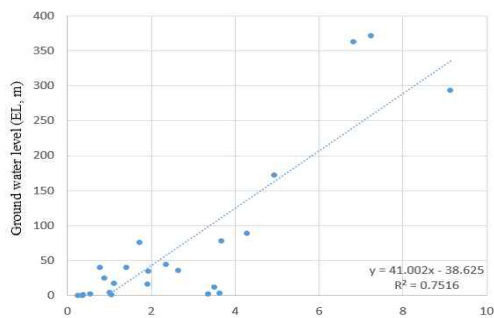
(a) Jejudo



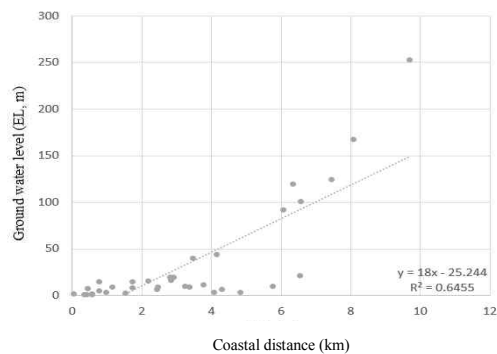
(b) Eastern



(c) Western



(d) Southern



(e) Northern

Fig. 3. Regional coastal distance-groundwater correlation analysis.

Table 3. Elevation-groundwater correlation analysis

Class	Jeju	Over 100 m	Over 200 m	Over 300 m	Over 400 m	Over 500 m
Data	125	76	102	113	118	121
r	0.8950	0.4379	0.4066	0.6767	0.7537	0.8236
R ²	0.8011	0.1918	0.1653	0.4579	0.5681	0.6783

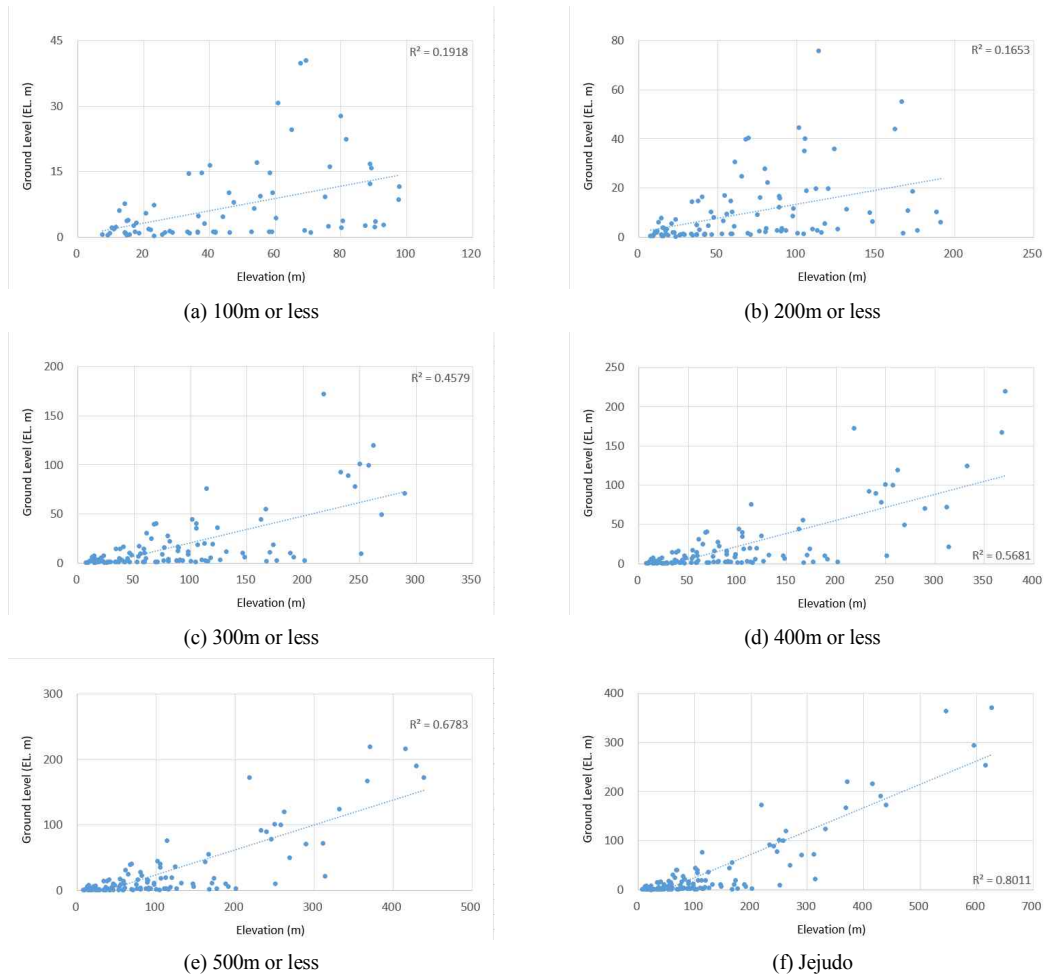


Fig. 4. Elevation-groundwater correlation analysis by elevation.

북부지역의 r은 0.8035, R²는 0.6455로 분석되었다 (Table 2). 전반적으로 해안에서부터 거리가 길어짐에 따라 지하수위는 상승하는데, 남부와 북부지역은 비교적 높은 상관도를 나타냈으며, 동부지역과 서부지역은 비교적 낮은 상관도를 보였다(Fig. 3).

거리에 따른 지하수위 기울기 특성을 보면, 동부지역

은 약 0.41, 서부지역은 약 12.59, 남부지역은 약 41.00, 북부지역은 18.00으로 분석되어 남부지역이 가장 급하고, 동부지역이 가장 완만한 특성으로 분석되었다.

3.3. 표고와 지하수위 상관분석

표고와 지하수위의 상관분석을 수행한 결과 r은 0.8950,

R^2 는 0.8011로 비교적 높은 상관도를 나타냈다. 그러나 표고를 100 m 단위로 구분하여 표고-지하수위 상관분석을 수행한 결과 100 m 이하 76개의 지하수위를 이용하여 분석한 결과 r 은 0.4379, R^2 는 0.1918로 매우 낮은 상관도를 보였으며, 200 m 이하 102개의 지하수위를 이용하여 분석한 결과 r 은 0.4066, R^2 는 0.1653으로 매우 낮은 상관도를 보였다(Table 3).

전체 지하수위 자료를 입력하여 분석한 결과 비교적 양호한 상관도를 보였으나, 200 m 이하의 지역은 매우 낮게 분석되는데, 이는 표본자료의 분산도와 표준편차의 차이에 따라 차이가 발생한다. 200 m 이하 102개소의 지하수위 표본의 분산은 183.1, 표준편차는 13.5인 반면, 전역 125개소의 지하수위 표본의 분산은 5,121.8, 표준편차는 71.6으로 분산도는 약 28배의 차이를 보이고 표준편차 또한 5.3배 차이를 보인다. 즉, 표고와 지하수위 자료의 범위가 증가되면서 상대적으로 전체 지하수위 표고 상관분석 결과가 높게 나오는 경향이 나타났다.

결과적으로 표고와 지하수위가 제주도 한라산의 중심부로 진행될수록 상승패턴은 나타나지만 동일 표고지점에서 다양한 수위특성을 보이고 있어, 지표의 특성으로 구분한 유역을 지하수 유역으로 적용하기에 적절하지 않은 것으로 분석되었다.

4. 지하수 등수위선 작성 및 유역경계 설정

제주지역의 지하수는 대기압의 영향과 중력에 의해 대수층 사이를 유동하는 자유지하수(Free Groundwater)체로 수리학적 측면에서 지하수면 아래의 지하수는 포화상태로 상류지역에서 하류지역으로 유동한다. 따라서 125개소의 관측 지하수위자료를 Kriging 기법에 적용하여 제주도 등수위선을 작성하고, 지하수의 흐름방향, 유역의 장·단경 등을 고려하여 지하수 유역을 설정하였다.

4.1. 지하수 등수위선 작성

지하수위는 제주도의 중앙으로 진행될수록 상승되고, 최대수위지점은 한라산 중앙부에서 남서방향으로 8.8

km 지점으로 분석되었다. 남부-북부지역의 해안에서부터 상류지역까지의 수두경사 특성을 보면, 북부지역의 수두경사 대비 남부지역의 수두경사가 크게 나타나고, 동부-서부지역의 경우 동부지역이 서부지역보다 완만한 경사특성이 나타난다(Fig. 5).

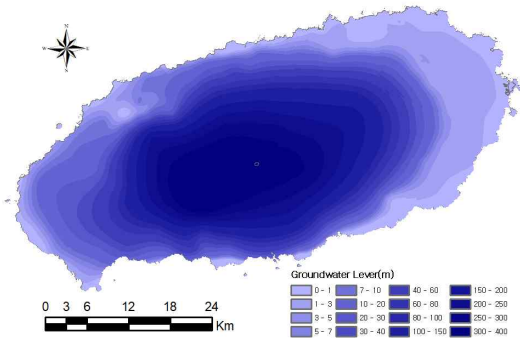


Fig. 5. Groundwater table contour map in Jeju.

4.2. 지하수 등수위선의 검정

평균오차와 감소오차의 평균은 -0.044와 -0.008로 0에 가까운 결과를 보였고, 평균 제곱 오차와 평균 제곱 근 오차는 2.002와 1.415로 낮은 결과를 보였다. 평균 크리깅 분산은 12.917로 근접위치에 지하수위의 차이가 크게 발생하는 지점과 지하수위가 상반되는 자료에 의해 분산도는 다른 검정자료 대비 높게 나타났다. 오차의 분산은 평균크리깅 분산과 유사하게 나타났으며, 감소오차의 표준편차는 1에 가까운 0.968로 신뢰도는 높게 나타났다(Table 4).

크리깅에 의한 예측 값과 관측 값의 그래프 검정 결과는 Fig. 6와 같으며, 예측 값과 관측 값은 기울기가 1인 직선에 거의 중첩된 $Y=0.9772X+0.8388$ 로 검토되어 그래프 검정에 의해서도 크리깅 예측 값의 정확성이 입증되었다.

4.3. 지하수 유역경계 설정

지하수 경계를 설정함에 있어 지하수면의 능선을 정확하게 예측할 수 없으므로 지하수의 흐름방향을 고려하

Table 4. Cross validation of kriging results and observations

Class	Data	ME	MSE	RMSE	MKV	VE	MRE	SDRE
Result	125	-0.044	2.002	1.415	12.917	13.020	-0.008	0.968

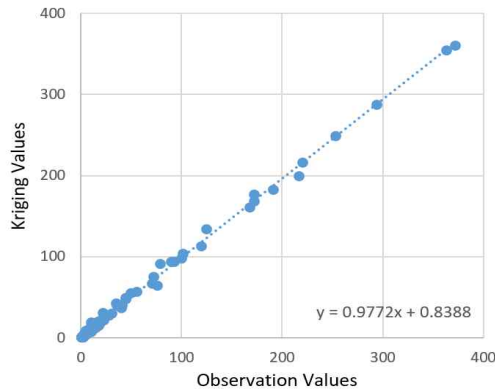


Fig. 6. Graph test of kriging results and observations.

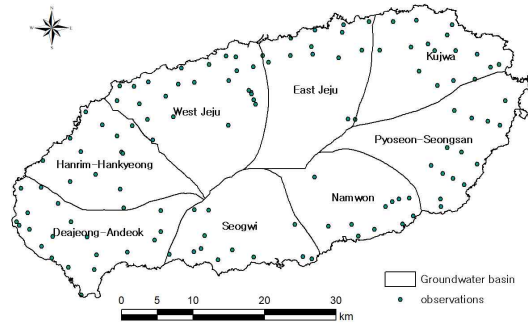


Fig. 7. watershed of Jeju do.

였으며, 유역의 출구지점으로부터 지하수 흐름방향의 직각으로 유역경계선을 작도하였다. 제주도 등수위선은 제주도 중심부에서 해안으로 진행될수록 지하수위가 낮아지는 방사형 형태로 유역을 상세히 세분화하게 되면 유역상부로 진행될수록 폭은 좁아지고 길이는 길어지는 경향이 나타난다. 특히, 지하수 유동해석 등에서는 분석유역과 인접유역간의 유출입이 없기 때문에 단경이 짧아질 경우 지하수 흐름방향성에 대한 정확성이 떨어지게 되므로 유역의 장·단경(폭과 길이)의 차이를 고려하였다. 그리고 기존의 16개 소유역의 경우 지하수 해석 등 검증자료로 활용되는 지하수 관측정 지점의 편차가 소유역별로 매우 큰 것으로 확인되어 이 연구에서는 유역 내 최소 10개의 관측정이 분포될 수 있도록 고려하였다. 지하수 해석 모델에 적용되는 지하수 유역은 서제주, 동제주, 구좌, 표선-성산, 남원, 서귀, 대정-안덕, 한림-한경유역으로 총 8개의 유역으로 구분하였다(Fig. 4).

서제주유역은 제주시 서부지역과 애월읍지역이 포함되며, 동제주유역은 제주시 동지역과 조천읍지역을 포함하고 있다. 구좌유역은 구좌읍지역을 포함하고 있으며, 조천읍 동부지역 일부를 포함하고 있다. 표선-성산유역은 표선면지역과 성산읍지역을 포함하고 있으며, 남원유역은 남원읍지역을 포함하고 있다. 서귀유역은 서귀포시 대부분지역을 포함하며, 대정-안덕유역은 대정읍지역과 안덕면지역, 한경면 남부지역을 포함하고 있다. 한림-한경유역은 한림읍지역을 포함하고, 한경면 북부지역과 안덕면 북부지역을 포함하고 있다(Fig. 7).

유역별 둘레는 표선-성산유역이 117.7 km로 가장 길

고, 대정-안덕유역이 104.5 km, 동제주유역 98.0 km, 서제주유역 96.4 km, 구좌유역 95.7 km, 한림한경유역 88.4 km, 서귀유역이 81.4 km, 남원유역이 72.3 km 순이다. 유역면적은 서제주유역이 292.8 km²로 전체의 15.9%를 차지하고, 표선-성산유역이 257.2 km² (14.0%), 동제주유역 252.4 km²(13.7%), 대정-안덕유역 220.1 km²(12.0%), 구좌유역 218.9 km²(11.9%), 한림-한경유역 208.9 km²(11.3%), 서귀유역 200.1 km² (10.9%), 남원유역 190.2 km²(10.3%) 순이다.

소유역별 관측정은 서귀유역이 12개소, 남원유역이 11개소, 표선-성산유역이 14개소, 구좌유역이 18개소, 동제주유역이 13개소, 서제주유역이 24개소, 한림-한경유역이 13개소, 대정-안덕유역이 20개소가 분포되었다.

5. 결론

제주도 지하수위 자료와 표고와의 상관관계를 분석하여 기존 지하수 유역으로 적용되고 있는 문제점을 파악하고, 적절성을 평가하였다. 또한 지하수위 자료를 Kriging 기법에 적용하여 지하수 등수위선을 작성하고, 등수위선의 지하수면을 기준으로 수리학적인 지하수 유역을 설정한 결과는 다음과 같다.

1) 해안거리와 표고의 상관분석결과 R²는 0.7056으로 비교적 높은 상관도를 보이며, 해안거리와 지하수위 상관분석결과 R²는 0.3265로 비교적 낮은 상관도를 보였다. 표고별 100 m 단위로 표고와 지하수위와의 상관관계를 분석한 결과 R²이 0.1653 ~ 0.8011로 나타나고

있어 표고와 지하수위와의 뚜렷한 상관성을 확인할 수는 없었다.

2) 제주도 지하수 등수위선 구축결과 동부지역은 해수면기준 10 m의 등수위선이 해안으로부터 약 12 km 내륙에 위치하고, 남부지역은 해안에 가까운 지역에 형성되었다. 최대 수위지점은 한라산 중심부에서 남서 방향으로 8.8 km에 위치하는데, 남부와 북부지역의 지하수위 특성에 의하면 남부지역의 수위경사가 급하고, 동부와 서부지역의 경우 서부지역이 비교적 높은 경사특성을 보여 지하수위 최대 지점이 한라산중심에서 멀어진 것으로 분석되었다.

3) 지하수위자료를 통해 구축된 등수위선을 7개의 항목의 교차타당성 검증 결과 전체적으로 높은 신뢰도를 얻었으며, 그래프 검증 결과 예측값과 관측값은 기울기가 1인 직선에 거의 중첩된 $Y=0.9772X+0.8388$ 로 검토되어 크리깅 예측값의 정확성이 입증되었다.

4) 제주도 지하수 유역은 지하수의 흐름방향, 지하수위 관측정 위치, 유역의 장·단경 등을 고려하여 총 8개로 설정하였으며, 서제주유역이 292.8 km²으로 가장 넓고, 표선-성산(257.2 km²), 동제주(252.4 km²), 대정-안덕(220.1 km²), 구좌(218.9 km²), 한림-한경(208.9 km²), 서귀(200.1 km²), 남원(190.2 km²) 유역 순이다.

제주지역은 기후변화와 이상기후로 인해 수자원 특성이 급변하고 있어 미래 기후변화에 대비한 지하수 자원의 분석·예측에 관한 연구는 필수적이다. 이 연구는 지하수 유동모델 분석을 위한 기초자료이며, 제주도 지하수의 개발·이용과 관리정책 등을 수립하는데 기초자료로 활용될 수 있다. 특히, 지하수 수리학적 특성에 따른 지하수 유역설정은 지하수위 관측 결과를 기반으로 하고 있어 보다 넓은 지역으로 관측망의 확대·조사가 필요하며, 지속적·정기적 데이터 구축으로 보다 개선된 연구가 진행되어야 한다.

REFERENCES

- Choi, B. S., 1999, Determination of Aqniifer Characteristics from Specific Capacity Data of Wells in Cheju Island, J. of sci. Groundwater Environment, 6., 180-187.
- Chung, S. Y., Shim, B. O., Kang, D. H., Kim, B. W., Park, H. Y., Won, J. H., Kim, G. B., 2001, Interpolation of Missing Groundwater Level Data Using Kriging at a National Groundwater Monitoring Well, J. Geo. Soc. Korea., 37(3), 421-430.
- Davis, B. M., 1987, Eses and Abises od Cross-Validation in Geostatistics, Mathematical Geology, 19(3), 241-248.
- 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.
- 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.
- Gribov, A., Krivoruchko, K., 2012, New Flexible Non-parametric Data Transformation for Trans-Gaussian Kriging, Quantitative Geology and Geostatistics, 17, 51-65.
- Jeju Special Self-Governing Province, 2013, Water resources management master plan.
- Jeju Special Self-Governing Province, 2014, Groundwater management regulations.
- Jeju, 2003, Comperhensive Survey of Hydrogeology and groundwater resources in Jeju Island(III)., 173-179.
- Journel, A. G., Huijbregts, C. J., 1978, Mining geostatisticsm Academic Press, 600.
- Jung, W. Y., Yang, S. K., 2009, Simulation of runoff of rivers in Jeju island using SWAT model, J. Environ. Sci, 18(9), 1045-1055.
- 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.
- Oh, Y. H., Park, D. I., Koh, B. R., 2016, Comparative Studies of Kriging Methods for Estimation of Groundwater Level Distribution, J. Water Science and Technology. Sci. Inter., 24(6) 137-148.
- 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. Inter., 25(12), 1727-1738.
- Park, J. K., Park, Y. J., Wye, Y. G., Lee, S. H., Hong, C. S., Choo, S. Y., 2002, Application of kriging approach for estimation of water table elevation, Korean Tunnelling

- and Underground Space Association, 4(3) 217-227.
- Park, J. S., Yun, Y. S., Park, L. S., 2012, Contemporary statistics, 332-339.
- Shepard, D, 1986, A Two-dimensional interpolation function for irregularly- spaced data, Proceedings of the 1968 ACM National Conference, 517-524.
- Soeng, T. J., 2011, Modern Basic Statistics - Understanding and Application, 25-27.
- Solow, A. R., 1990, Geostatistical Cross-Validation: A Cautionary Note, Mathematical Geology, 22(6), 637-639.
- Won, Y. S., 2007, Development of Long Term Rainfall-Runoff Model of Combined Surface and Ground Water, Ph. D. Dissertation, Ajou University, Korea.
-
- 김민철, 제주연구원 연구원
minchul1122@jri.re.kr
 - 양성기, 제주대학교 토목공학과 교수
skyang@jejunu.ac.kr