

관정 데이터와 GIS 수치지도를 이용한 지하수면 분포 추정

Estimation of Ground Water Table Using Well Data and GIS Digital Map

이처경(Cheo-K. Lee)* · 문추연(Choo-Yeun Moon)**

요 약 : 지하수 자원의 분포 파악과 효과적인 관리를 목적으로 지하 환경 탐사의 통계적 방법 Kriging을 이용하여 경북 포항시 북부 지역에서 측정된 데이터로(농어촌진흥공사, 1997)부터 지표면으로부터 지하수면까지의 깊이와 지하수면의 해발 고도 분포를 추정하였다. 이를 위해 국가 GIS 사업중 해당 지역의 1:5000 수치 지도(국립지리원)를 이용하였다. 지하수면 깊이는 대체로 7-9.5 m를 나타내며 산봉우리와 농업 용수 사용량이 많은 것으로 추정되는 지점에서는 9.5 m를 상회하여 나타난다. 지하수면의 고도 분포는 대체로 서쪽에서 동쪽으로 낮아지며 최대 변화율은 동서로 6 km 당 90 m 감소하는 경향을 나타낸다. 이러한 지점에서는 지하수가 하루에 수 m 이동하는 것으로 추정된다.

Abstract : The geostatistical method Kriging is used to estimate the areal distributions of the depth to the water table and the altitude of the water table measured from the sea level. A northern part of the city of Pohang, Kyeong-Buk, Korea has been chosen and the digital map of the area with 1:5,000 scale from the National Geographic Information System (NGIS) project by National Geographic Institute has been used to reproduce the ground surface distribution. The water table depth appears to be in the range between 7 m and 9.5 m except a few localities where mountain tops exist and the use of groundwater for agricultural purposes is believed to be heavy. The overall distribution of the water table altitude shows a monotonic gradual decrease from the west to the east (seaward direction from the inland) and to the south with maximum rate approximately at 90 m over 6 km in horizontal distance and indicates that the groundwater is moving several meters per day there.

서 론

지하수는 적절한 개발과 효율적인 관리가 이루어지면 지속적인 이용이 가능한 귀중한 수자원이다. 지표수의 오염이 심각해지는 현실에 비추어 지하수에 대한 인식이 새로워지고 있으며 특히 그의 효율적인 관리 시스템의 필요성이 절실하다. 지하수는 항상 유동하고 있으며 자유면 대수층내에서의 이동속도는 지하수면(water table)의 분포에 의해 직접적인 영향을 받는다. 통상적인 양수 시험에서 알 수 있듯이 지하수면의 분포와 지하수의 흐름은 지하수 개발 상태에 직접적인 영향을 받아 자연 상태와는 현저히 다른 양상을 나타내기도 한다. 자연적인 지하 환경 내에서의 지하수 이동 속도는 일반적으로 매우 작으며 하루에 수 내지 수십 cm 정도에 이른다.

효과적인 지하수자원 관리를 위해서는 우선 지하수면의 분포를 파악하는 것이 중요하다. 자연적인 상태의 지하수면 분포 변화는 매우 완만하며 지하수 유동은 일반적으로 Dupuit 가정에 의해 표현될 수 있다. 이를 위해서는 투수량계수(transmissivity)와 수평면상에서의 지하수면 두께 변화율이 필요하며 지하수층의 깊이를 아는 것이 중요하다. 일반적인 지층구조내에서는

자유면 대수층(unconfined aquifer)의 하층 부분은 투수 계수가 매우 작은 점토층이나 암반층에 접하며 대체로 수평에 가까운 분포를 보인다. 그러므로 지하수층의 깊이를 파악하기 위해서는 지하수면 분포를 알아야 한다.

지하수면의 분포를 추정하기 위해서는 관측점에서 측정된 지하수면까지의 깊이를 이용하지만 이용할 수 있는 관측점 데이터의 숫자에는 현실적으로 한계가 있다. 그러므로 이용가능한 자료들로부터 통계적인 방법을 사용하게된다. 보편적으로 지하 환경탐사에 널리 쓰이는 방법으로 Kriging이 있다. Kriging은 다른 내삽 방법들과는 달리 샘플링 지점의 측정 수치를 정확하게 보존한다. 신뢰성이 보장되는 데이터 값들을 원형 그대로 보존하면서 연구 대상 지역내 자료의 내삽을 추정오차 최소화를 통해 수행하는 장점이 있다. 이러한 이유로 Kriging은 BLUE (Best Linear Unbiased Estimator)라고 불리기도 한다(de Marsily, 1986; Gelhar, 1993). Kriging에 관한 여러 가지 특성과 응용예들은 Isaaks and Srivastava(1989)와 Journel and Huijbregts (1978) 등에서 찾아볼 수 있다.

본 논문에서는 Kriging을 이용하여 경북 포항 북부 지역(홍해읍, 송라면, 청하면)의 자연 지하수면의 분포를 추정하였으며 이용 가능한 지하수 관련 자료(농림부 농어촌진흥공사, 1997)를 토대로 하였다. 이를 위해 국립 지리원에서 수행하는 NGIS 사업 자료중 포항 지역 1:5,000 수치지도(국립지리원)를 이용하여 지표면의 분포를 재구성한 후에 관측점이 위치한 지점에서 지표면으로부터 자연 지하수면까지의 깊이를 뺀 값으로써

* 한동대학교 건설도시환경공학부(School of Construction & Urban Environmental Engineering, Handong University, Pohang, Korea)

** 한동대학교 GIS연구소, 경운대학교 환경공학과(GIS Institute, Handong University, Pohang, Korea; Department of Environmental Engineering, Kyung-woon University, Gumi, Korea)

관정 위치에서의 지하수면 해발 고도 자료로 취하였다. 이 과정에서 두 가지 종류의 데이터를 Kriging을 이용하여 분석하였다. 이들은 각각 지표면으로부터 자연 지하수면까지의 깊이와 자연 지하수면의 해발 고도이다. 전자는 장차 비상시 농업용수 조달 등의 목적을 위해 취수정이나 관측정을 설치할 경우 위치 선정에 이용할 수 있는 지하수면 깊이 분포를 제공하며, 후자는 미개발 상태의 자연적인 지하수 유동 상황 및 특성을 파악하는 데에 쓰일 뿐만 아니라 지하수 오염원의 유입시 그의 확산 과정 및 범위를 이해하고 예측하는 데에 유용하게 이용될 수 있다.

연구 대상 지역은 경북 포항시 북구 흥해읍, 신평면, 송라면, 청하면에 걸쳐 있으며 동서와 남북 방향으로 각각 13 km와 21 km에 이른다. 이 지역내에 약 200개의 관정이 있으나(농림부 농어촌진흥공사, 1997) 자연 지하수면 깊이가 측정된 것 중 신뢰성을 가진 데이터는 35개이다. 해당 지역이 광역인데 비해 데이터의 숫자가 한정되어 있고 편중되어 분포하므로 비교적 지형 변화가 적은 지역을 선정하고 그 지역내의 측정 자료로부터 Kriging을 이용하여 자연 상태의 지하수면 깊이와 해발 고도의 분포를 추정 분석하였다.

지표면 분포와 암반정 및 관측정의 위치 분포

지표면 분포

DXF format의 1:5,000 수치지도에서 지형적 분포를 잘 나타낼 수 있는 주곡선(layer number 7111), 간곡선(layer number 7112)을 추출하여 연구대상 지역의 지표면 분포를 작성하였다. 이 지역은 동경 129도 14분 30초에서 129도 23분 0초에 이르며 북위 36도 5분 0초에서 36도 15분 0초에 이르고 있다. 지표면 분포는 Figure 1에 보이고 있으며 균등한 간격으로 표시한 격자 평면에 실제 지표면을 입체적으로 나타내었다. 북위 36도 지점에서 경도 1도차와 위도 1도차는 각각 동서 90.166 km와 남북 110.966 km에 해당한다(한균형, 1996).

그림에서 격자 간격 6개는 2 km에 해당한다. 입체적 분포를 조감도로 나타내기 위해서 전산 프로그램 Surfer(Yoshizaki, 1996)를 이용하였다. 그림에 보듯이 몇 개의 산봉우리 부분을 제외하고는 지표면의 해발고도가 높은 북서 지역에서는 약 200 m에서 300 m까지 이르고 있으며 상대적으로 낮은 동부 지역에서는 수십 m 수준에 이른다.

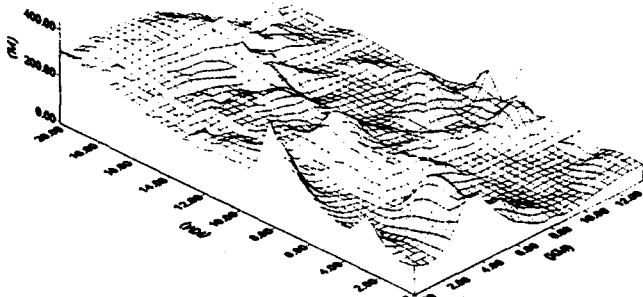


Figure 1. Distribution of the ground surface elevation and its 3-D contour plot.

암반정 및 관측정의 위치 분포

통계적인 분석에 이용된 관측정들은 해발 고도가 비교적 낮은 지역에 분포되어 있으며 그들의 위치는 Figure 2에 나타내었으며 원점을 동경 129도 14분 30초와 북위 36도 5분 0초 지점으로 하였다. 이들 중 D로 표시된 것은 암반정을 나타내며 OS 및 OD로 표시된 것은 관측정을 의미한다. 암반정이 대부분을 차지하고 있음을 알 수 있다. Figure 2에 보이는 거의 모든 관정들에서 양수 시험이 수행되었으며 심도는 100~200 m 구간에 속하고 소수 지점에서 200 m를 상회한다. 기존의 고수압에 의한 분출이 보고되어 있지 않고, 또한 양수 시험 시작과 동시에 관정내의 수위가 급격히 강하하고 있다. 이에 따라 대상 지역내의 지하수층을 자연 대수층으로 분류하고 데이터 값들을 자연 지하수위로써 취급한다.

Figure 1과 2의 비교에서 보이듯이 북서 방면(동서 0~6 km, 남북 9~21 km)에는 관정이 없고 남서 방면(동서 0~6 km, 남북 0~9 km)에서는 지표면의 변화가 크고 관정들(D5부터 D48까지)이 편중되어 있다. 이에 본 연구에서는 동서 6~13 km, 남북 3~21 km에 이르는 지역을 선정하였으며(Figure 2에 쇄선으로 표시) 각각의 관측정에서 측정된 자연 지하수면까지의 깊이 데이터는 Figure 2(a)의 기호에 따라 Table 1에 열거하였다. 이들 관측정을 시추하게된 주요 배경은 예기치 못한 비상 시기에 농업 용수를 공급하고자 함이기 때문에 관측정들이 실제로 전담이 존재하는 저지역에 주로 분포되어 있음이 Figure 1과 Table 1의 비교로부터 잘 나타나고 있다.

Kriging을 이용한 자연 지하수면 깊이 분포 추정

해당 지역내에서 이용 가능한 21개의 자연 지하수면 깊이 샘플링 데이터로부터 Kriging을 이용하여 조사 대상 지역의 자연 지하수면 깊이 분포 상황을 추정하였다. 이를 위해 미국 환경청에서 개발한 전산 프로그램 Geo-Eas(Englund and Sparks, 1991)를 이용하였다. Kriging은 위에서 언급한 장점들이 있으나 그의 효과적인 이용을 위해서는 해당 지역의 데이터간의 분리 거리에 따른 변화 정도를 잘 나타내는 Variogram 모델을

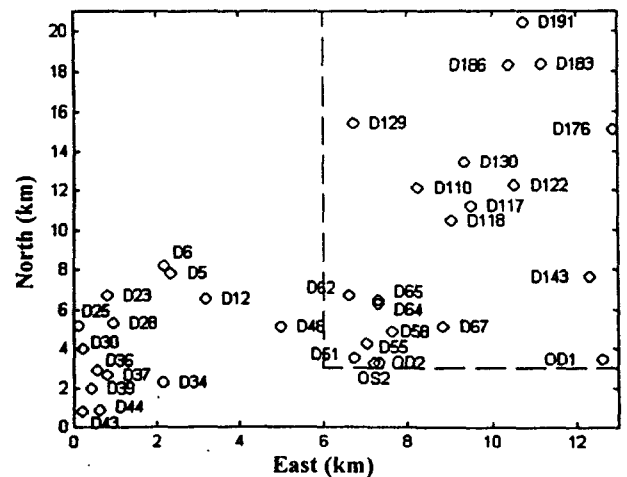


Figure 2. Distribution of wells.

Table 1. Location of the wells with distances measured along the east (X) and the north (Y) from the reference point

Symbol	X (km)	Y (km)	water table depth (m)	water table height (m)
D51	6.71	3.49	15.0	25.0
D55	7.01	4.23	13.0	37.0
D58	7.63	4.86	14.0	26.0
D62	6.61	6.68	8.0	52.0
D64	7.28	6.29	7.8	42.2
D65	7.28	6.47	8.0	42.0
D67	8.84	5.13	9.2	30.8
D110	8.23	12.11	11.5	48.5
D117	9.49	11.18	7.0	23.0
D118	9.04	10.47	7.0	33.0
D122	10.51	12.26	8.3	21.7
D129	6.71	15.45	6.9	103.1
D130	9.34	13.45	10.2	29.8
D143	12.32	7.63	14.0	6.0
D176	12.87	15.12	9.6	3.4
D183	11.16	18.38	6.0	14.0
D186	10.39	18.26	6.5	23.5
D191	10.74	20.45	7.5	22.5
OD1	12.62	3.46	4.2	40.7
OS2	7.31	3.28	6.9	23.0
OD2	7.21	3.28	5.3	24.6

선정하여야 한다(Isaaks and Srivastava, 1989).

Variogram

샘플링 데이터의 통계적 분석에 이용되는 Variogram은 다음과 같이 정의된다.

$$\gamma_{yy}(x, h) = \frac{1}{2} Var\{Y(x+h) - Y(x)\} = \frac{1}{2} E\{[Y(x+h) - Y(x)]^2\} \quad (1)$$

여기서 Y 는 random 변수, x 는 위치벡터, h 는 데이터 값이 존재하는 두 지점간의 거리벡터, $Var[\cdot]$ 와 $E[\cdot]$ 는 각각 분산 (Variance)과 기대값(Expectation)을 나타낸다. 기대값 $E[Y(x)]$ 가 x 에 따라 변하지 않는 상수이면 식 (1)은 원래의 변수 Y 에서 $E[Y(x)]$ 를 감한 $\tilde{Y} = Y - E[Y]$ 에 동일하게 적용된다. 여기서는 이 조건을 만족한다고 가정한다.

Variogram이 x 와는 무관할 경우에는, 즉 h 만큼 떨어져 있는 지역내의 두 지점에 대한 Variogram이 x 와 관계없이 동일할 때, $\gamma_{yy}(x, h) = \gamma_{yy}(h)$ 를 만족하고, Y 가 통계적으로 균질일 때에는 (stationary) $E[Y^2(x+h)] = E[Y^2(x)] = R_{yy}$ 이므로 Variogram이 다음과 같이 된다.

$$\gamma_{yy}(h) = R_{yy}(0) - R_{yy}(h) \quad (2)$$

여기서 $R_{yy}(h)$ 는 Covariance 함수를 나타낸다. 이론상 $\gamma_{yy}(0) = 0$ 이므로 Variogram은 분리 거리 h 에 따라 변수 Y 의 변화 정도를 보여준다. 많은 경우 h 가 증가함에 따라 $\gamma_{yy}(h)$ 가 상수값에 접근하며 이 접근치를 Sill이라 하고, 그 값에 이르는 거리 h 는 Range라고 한다.

Variogram은 h 가 0으로 접근함에 따라 0이 아닌 값을 나타 내기도 하는데, 예를 들면 광석의 광물 함량이나 순도의 경우, 이 때의 유한한 Variogram 값 $\gamma_{yy}(0)$ 을 Nugget이라 한다. 이는 데이터내의 최소 h 값보다 작은 거리 척도에서 나타나는 비상 관 변화나 측정 오차를 반영한다. 이러한 Nugget 효과를 감안 하기 위하여 Variogram을 다음과 같이 나타낸다.

$$\gamma(h) = C[1 - \delta(h)] + \gamma(h) \quad (3)$$

여기서 C 는 Nugget 값이고 $\delta(h)$ 는 Dirac delta 함수이다. $\delta(h)$ 는 h 가 0일 때는 단위값이 되고 그 외의 경우에는 0이 된다. $\gamma(h)$ 는 (h, γ) 좌표계에서 $(0, C)$ 를 원점으로 하는 Variogram 이다. 즉 $\gamma(h)$ 의 Nugget 값은 0이 되고 (3) 식으로 정의 되는 Variogram $\gamma(h)$ 는 데이터로부터 계산되는 Variogram 수치들을 대표함과 동시에 $\gamma(0) = 0$ 을 만족한다.

이와 같이 Variogram의 특성을 나타내는 인자들은 Sill, Range 및 Nugget 등이며, 대표적으로 쓰이는 Variogram 모델은 Spherical, Exponential, Gaussian 및 Cubic 모델 등이 있다.

지하수면 깊이 데이터의 Kriging 분석

본 연구에서는 이용하는 Variogram은 벡터 h 의 크기에만 의 존하고 방향에는 무관한 것으로 가정한다. 실제로 많은 경우에 지하수면의 지역 분포와 실제 지표면 분포는 수평 방향의 장 척도 거리에 따른 변화를 제외하고는 상관 관계가 작다. 즉 지표면은 오랜 세월에 걸친 여러 가지 복잡한 지질학적 변화 과정의 결과로 형성되나 자연 지하수면은 수분이 지표로부터 중 력의 영향하에 침투하는 과정에서 완만한 분포를 보이게 된다. 결과적으로 유한한 갯수의 지하수면 깊이 데이터로부터 계산 되는 Variogram은 아주 작은 h 값에 대해서도 0이 아닌 값을 가지는 경우가 있다. 그러나 본 연구 대상 지역에서는 충분한 데이터가 존재하지 않고 궁극적으로는 지표면과 지하수면이 연 속적으로 변화한다는 것을 고려하여 Nugget 값을 0으로 취하 였다. 지하수면 깊이 데이터로부터 계산된 Variogram의 값들은 Figure 3(a)에 별표(*) 기호를 이용하여 표시하였다. 이 수치들 을 비교적 잘 대표하는 Variogram으로서 다음과 같은 Spherical 모델을 선정하여 Figure 3(a)에 곡선으로 나타내었다.

$$\gamma(h) = \omega \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad (h < a) \quad (4-1)$$

$$\gamma(h) = \omega \quad (h > a) \quad (4-2)$$

여기서 ω 는 Sill이고, a 는 Range 이다. Nugget 값은 0($C=0$)으 로 취하고, 계산된 Variogram 값의 분포가 거의 상수로 나타 나므로 ω 는 9.32를 취하고 a 는 1로 취하였다.

Kriging을 실행함에 있어서는 Block Kriging을 이용하였다. 이는 연구 대상 지역을 여러 개의 Block으로 나눈 뒤 각각의 Block을 대표하는 값을 추정하는 방법이다. 대표값은 각 Block 안의 몇 개의 지점에서 Point Kriging을 이용하여 추정된 값들 의 평균치와 같다. 자연 지하수면 깊이 추정치의 분포를 등고 선도를 이용하여 Figure 3(b)에 나타내었다.

남쪽 하반부에서 높은 값을 보이며 남쪽 3~13 km 구간에서

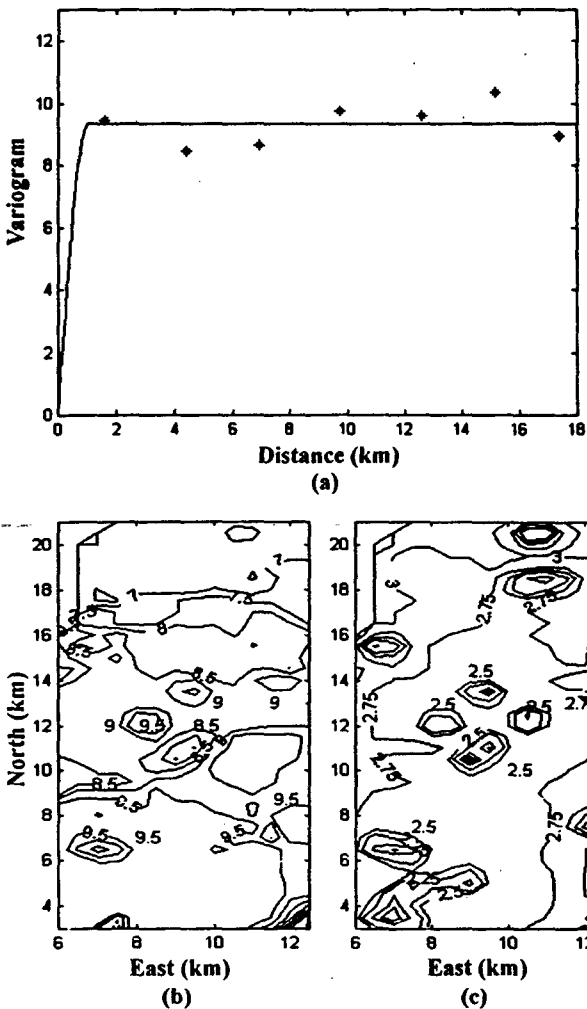


Figure 3. (a) Variogram for the watertable depths and fitting by a spherical model with a nugget of 0 and a sill of 9.323. (b) Contour plot for Kriging result of the watertable depths. (c) Contour plot for Kriging standard deviation of the watertable depths.

는 소수의 지점을 제외하고 9 m를 상회하고 있다. 즉 이러한 지역 주위에서는 10 m가 훨씬 넘는 관정을 설치하여야 비상시의 용수 조달이 원활히 이루어질 수 있다. Figure 3(b)의 추정치들의 오차를 나타내기 위해 Figure 3(c)에 Kriging의 표준 편차의 분포를 등고선도로 표현하였다. 북서 방향 모서리의 좁은 지역에서는 추정이 실행되지 않았으며 연구 대상 지역의 경계 부분을 따라서는 표준 편차의 값이 상대적으로 크게 나타나고 있다. 특히 표준 편차의 크기가 큰 경우 추정치의 25%에 이르고 있음을 알 수 있다. 물론 샘플 데이터의 분포가 상대적으로 높은 지역에서는 작은 표준 편차가 나타나고 있다. 이로부터 관정이나 취수정의 추가 설치시에는 단지 설치 지점들의 깊이만 고려하지 말고 기존 관정들을 포함한 지역 전체 관측정 체계의 지하수면 깊이 추정 신뢰도를 높이기 위해서 기존 관정들에 편중되어 근접하지 않도록 효율적이고 경제적인 계획의 수립이 중요함을 알 수 있다.

Kriging을 이용한 자연 지하수면 고도 분포 추정

기하학적으로는 지표면의 해발 고도 분포로부터 지하수면 깊이 분포 추정치를 변 분포 상황을 지하수면 해발 고도 분포로 간주할 수 있겠으나 이는 앞에 설명한 상관 관계의 회박함 때문에 효과적이기 어렵다. 본 연구에서는 측정이 실시된 유한한 지점들에서의 지표면 해발 고도에서 자연 지하수면 깊이를 감한 값들을 독립적인 자연 지하수면 해발 고도 데이터로 간주하면서 Kriging을 별도로 적용하여 자연 지하수면 고도 분포 추정을 한다.

자연 지하수면 해발 고도 데이터를 독립된 변수로 취급하여 Kriging 추정을 하는 것은 다음의 이유들에 기인한다.

우선 자연 지하 환경 내에 존재하는 지하수면의 공간적 분포는 매우 완만하게 변화하며 복잡한 지표면 분포 양상과는 거의 무관하다. 그러므로 위에 언급한 단순 감산 방식으로 지하수면 고도 분포 추정을 하는 방식은 실제의 고도 분포를 효과적으로 표현하기 어려우며 지표면 분포 상황의 직접적인 영향을 받아 비사실적으로 불필요하게 복잡한 분포를 가져오기 쉽다.

다음으로는 Kriging 방법에 이용하는 Random variable 가정이다. 분석 대상으로 선택된 변수는 통계적 처리 시에 독립된 Random variable로 취급되며 그의 공간적 상관 관계 특성을 통해 관심 대상 변수의 분포를 추정하게 된다. 특히 본 연구에서 다루고 있는 지표면 해발 고도와 지하수면 깊이는 그들 사이의 상관 관계를 가정하기 매우 어려우며 지하 환경 공간내의 여러 수리지질학적인 요소들이 지하수의 분포 상황에 직접 반영된다. 그러므로 지하수면 고도 분포는 지표면 고도 분포와 분리하여 별개로 취급하는 것이 바람직하다.

이상과 같은 이유로 인해서 자연 지하수면 고도 데이터 자체의 Kriging 분석을 수행하였다.

자연 지하수면 고도 데이터

위에 언급한 관측정 소재 지점들에서 1:5,000 GIS 수치 지도의 지표면 해발고도로부터 지하수면 깊이를 빼면 자연 지하수면의 해발고도 데이터를 얻는다. 그 수치들은 Table 1에 열거하였다. 이들 값의 Quartile 분포는 Figure 4(a)와 같으며 25% 구간으로 나누어 보이고 있다. 수면 고도는 대체로 서쪽 방향으로부터 동쪽 방향으로 감소하고 있다. 이는 자연 상태에서의 지하수 유동이 비록 느리기는 하나 동쪽 방향으로 일어나는 것을 의미하며 실제로 주변 지형의 분포는 서쪽과 북서쪽에 산악지형이 있고 동쪽으로 동해안이 있는 점을 감안하면 자연스러운 지하수 유동임을 알 수 있다. 위에 언급한 농어촌진흥공사 보고서(1997)에 수록된 수맥도에 부분적으로 지하수 유동을 표시하고는 있으나 이는 매우 국지적인 정보로서 지역내의 효율적인 지하수 자원 관리를 위해서는 많이 보완되어야 한다고 사려된다.

지하수면 고도 데이터의 분포를 더욱 효과적으로 나타내기 위해 히스토그램과 누적%를 Figure 4(b)와 (c)에 보이고 있다. Figure 4(b)에 의하면 수면고도는 20~30 m 구간의 데이터가 많으며 100 m를 상회하는 데이터를 제외하고는 50 m 정도까지 고른 분포를 보이고 있다. 이는 지하수면 관측정의 샘플링에

따른 것이며 상기 구간의 고도 수치가 존재하지 않는다는 의미는 아니다. 더욱 많은 샘플링이 이루어지면 이러한 분포 차이는 감소하며 신뢰도 또한 증가할 것으로 기대된다.

자연 지하수면 고도 데이터의 Kriging 분석

지하수면 깊이 분포 추정에서와 마찬가지로 지하수면 해발 고도 분포를 전산 프로그램 Geo-Eas를 이용하여 Kriging으로 추정하였다. 이를 위해 Figure 4의 샘플 데이터로부터 Variogram

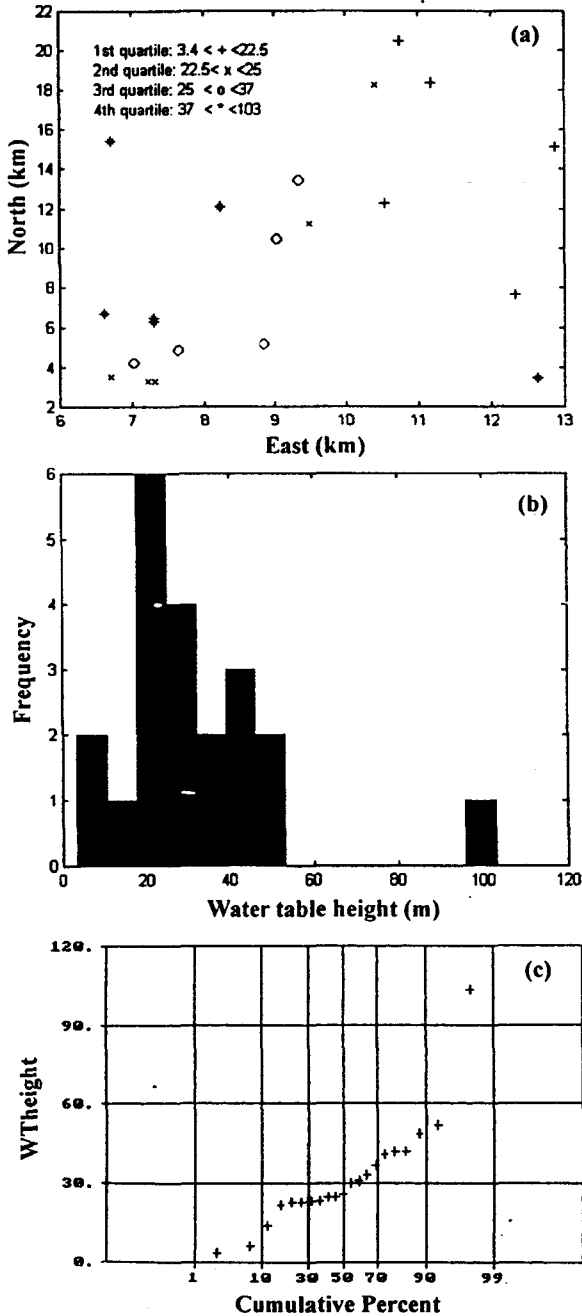


Figure 4. (a) Location and quartile distribution of water table height data measured from the sea level. (b) Histogram of the water table height. (c) Probability distribution of water table height.

을 계산하였으며 결과를 Figure 5에 나타내었다.

거리가 6 km를 넘는 영역에서는 명백한 경향을 정의하는데 어려움이 있으나 고정값에 접근한다고 간주하여 Spherical 모델을 취하였다. 거리가 0으로 접근할 때의 Variogram 값 Nugget은 0으로 취하였다. 지하수 유동에서 단위 시간당 단위 면적을 통과하는 유량은 Darcy의 법칙에 의해 지하수두(hydraulic head)의 공간 변화율에 비례한다. Nugget이 0이라 함은 거리 간격이 영에 접근할 때 수두의 차이가 0이 됨을 의미한다. 만약에 Nugget이 0이 아니면 아주 근접한 지점간의 수두의 급격한 변화가 존재하고 이는 지하수의 유동 속도가 비현실적으로 큰 값이 됨을 뜻하며 실제의 자연 상황에서는 불가능한 일이다. Sill과 Range를 ω 와 a 라 하면 Spherical Variogram은 식 (4-1)과 (4-2)에 주어진 바와 같다.

Figure 5로부터 Range 값은 $a=6.5$ 로 선택하였으며 Sill 값 ω 는 식 (4-1)과 (4-2)로 표현되는 모델과 Figure 5의 데이터와의 차이를 최소화하여 결정하였다. 각 데이터 값에서 모델과의 차이의 제곱의 합은

$$\epsilon = \sum_{i=1}^{im} \{\gamma_i - \omega[\dots]\}^2 + \sum_{i=im+1}^N \{\gamma_i - \omega\}^2 \quad (5)$$

로 주어지고, 여기서 $[\dots]$ 은 (4-1)의 표현과 같으며 Figure 5의 각 데이터 거리 h_i 에서 계산한 값이며 γ_i 는 h_i 에 해당하는 Variogram 값이다. im 은 Figure 5에서 $h < h_i$ 를 만족하는 데이터의 갯수이고 N 은 전체 데이터 숫자이다. 이로부터 $\partial\epsilon/\partial\omega=0$ 에 해당하는 ω 값을 결정하면 596이 된다. 이 Spherical Variogram 모델은 Figure 5에 곡선으로 나타내었다.

이 Variogram을 이용하여 연구 대상 지역을 소규모 격자 구조로 분할하여 Block Kriging을 통한 지하 수두의 내삽을 수행하였으며 샘플 데이터를 반영하는 원의 반경은 4.3 km로 취하였다. 그 결과를 등수두선 분포로 Figure 6(a)에 나타내었다. 앞서 언급한 바와 같이 지하수두의 분포는 (6.5 km, 16 km) 지점에 peak가 존재하고, 남동쪽(12 km, 3.5 km) 지점의 소규모 봉우리를 제외하고는 대체로 서쪽에서 동쪽으로 감소하는 추

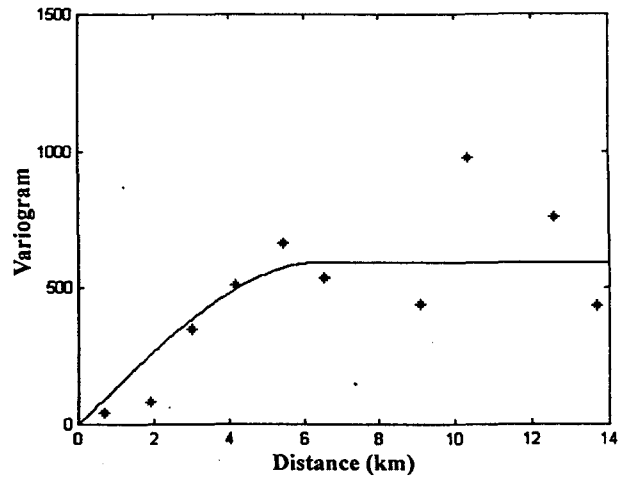


Figure 5. Variogram for the watertable height and fitting by a spherical model with a range 6.5 and a sill 596.

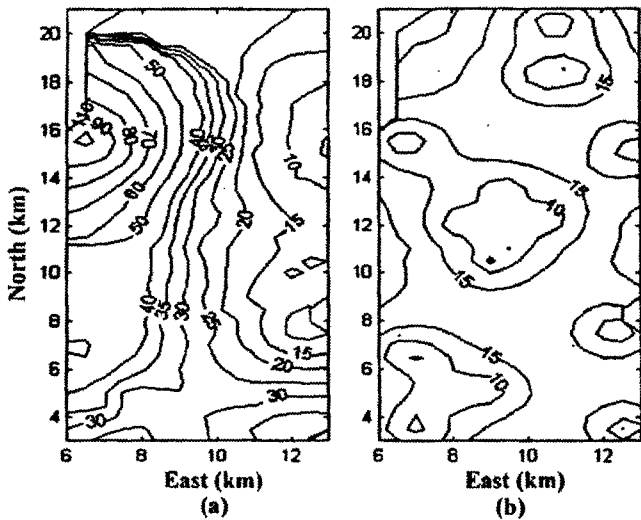


Figure 6. (a) Contour plot for Kriging result of the watertable height. (b) Contour plot for Kriging standard deviation of the watertable height.

세를 보이고 있다. 또한 남쪽으로 완만한 변화를 보이고 있다. 이러한 지하수면 분포는 Figure 1의 지표면 분포와 비교하면 주요 변화 양상이 대략 비슷하게 나타남을 알 수 있다. 지하수의 유동은 물론 다양한 수리지질학적인 인자들의 영향을 받는데 그림의 지하수면 분포는 지하수의 유동이 동향임을 암시한다. Block Kriging에 따른 오차의 표준 편차의 분포를 Figure 6(b)에 나타내었다. 앞서 지하수면 깊이에서와 같이 샘플링 지점들이 밀집되어 있는 곳에서는 표준 편차의 값이 작게 나타나고 전체적으로 고르게 10~15m의 값을 보이고 있다. 한편 샘플링 지점이 존재하지 않는 북서 방향 작은 모서리 지역에는 동수두선과 표준 편차의 등고선이 표시되어 있지 않다. 자연 지하수면의 입체적 분포를 또한 전산 프로그램 Surfer(Yoshizaki, 1996)를 이용하여 Figure 7에 나타내었다. Figure 1과 Figure 7으로부터 지표면은 굴곡이 많은 반면 지하수면은 매우 부드럽게 변화하는 것으로 나타나고 있으며 이는 Figure 3(a)와 Figure

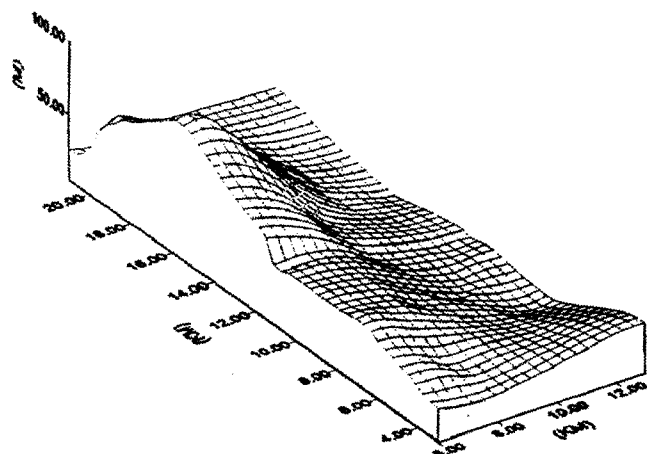


Figure 7. Three-dimensional contour plot of the watertable height.

5의 지하수면 깊이와 고도 변화 Variogram에 반영되고 ; 즉 지하수면 깊이의 경우 Range가 1인 반면 지하수면 고도 경우 Range가 6.5로 나타나므로 수평 방향 거리에 따라 지하수면 깊이의 변화 정도가 상대적으로 크게 나타난다. 이와 이 연구 대상 지역 전반에 걸친 자유면 대수층내의 지하수 고도 분포로부터 자연 상태의 지하수 유동의 대략적인 특성을 파악할 수 있으며 지하 수자원 관리에 유용하게 이용할 수 있다.

고찰 및 결론

이상에서 경북 포항시 북부 지역의 자연 지하수면 깊이와 해발 고도를 통계학적 분석 방법을 이용하여 그 분포를 추정하였다. 농어촌 진흥 공사(1997)가 측정 수집한 지하수면 관측점 자료를 토대로 지하 환경 탐사에 널리 쓰이는 Kriging을 이용하였다. 대상 지역이 광역인데 반해 이용 가능한 데이터가 35개 지점에 국한되어 있음을 고려하여 지형의 변화가 비교적 작고 관정이 고르게 분포되어 있는 소규모 지역을 선정한 후 관측점 내 지하수면 깊이 자료로부터 Kriging을 이용하여 지하수면 깊이 분포를 추정하고 해당 지점들의 해발 고도로부터 지하수면 깊이값을 뺀 수치 데이터를 별개의 지하수면 해발 고도 자료로 취급하여 Kriging을 통해 자연 지하수면 해발 고도 분포를 추정하였다.

지하수면 깊이의 저지점들(9m 이상)은 앞에서 언급하였듯이 대체로 남북 방향 3~13 km 구간에서 나타나고 있으며 3 지점에서는 9.5m를 상회하고 있다. (Figure 3(b)에서 동향 8 km, 북향 12 km 지점, 동향 11 km, 북향 10 km 지점 및 동향 12 km, 북향 7 km 지점) 이들 중 처음 두 지점(Figure 3(b)의 동향 8 km, 북향 12 km 지점, 동향 11 km, 북향 10 km 지점)은 관정들이 비교적 근거리로 소재하는 구역에 위치하며(Figure 2의 D117, D118, D110, D122, D130) 이는 주위의 지속적인 지하수 이용과 밀접한 관련이 있을 것으로 추측 된다. 다른 한 지점(Figure 3(b)의 동향 12 km, 북향 7 km 지점)은 산봉우리에 근접한 곳에 위치하고 있다.

지하수면 해발 고도의 극대 지점은 Figure 6(a)에 보이듯이 (6.5 km, 15.5 km) 지점과 (12.5 km, 3 km) 위치하며 이를 Figure 1과 비교하면 이 두 지점들이 높은 지표면 고도 지역과 거의 일치함을 알 수 있다. 즉 강수량에 의한 수분 공급이 지표면을 통해 침투하는 과정에서 지하수면의 분포가 전반적인 지표면 변화의 양상을 따르고 있음을 보여준다. 이는 수문지질학적 관점에서 침투에 의한 수분 공급과 증발에 의한 배수가 평형을 유지하는 형태의 지하수면 분포이며 보편적으로 나타나는 상황이다.

해당 지역의 지하수면 변화는 Figure 6(a)로부터 북방 16 km에서 동서 방향으로 가장 크게 나타나며 6 km에 90 m 정도 감소하는 것으로 나타나며 동수 경사(hydraulic gradient)는 0.015 정도이다. 대수층의 투수 계수는 극히 소수 지점에서 10^{-2} m/sec 정도로 측정되고 있으며(농어촌 진흥 공사, 1997) 이는 상기 최대 동수 경사 구역에서 하루에 수 m 정도로 지하수가 서쪽에서 동쪽으로 유동하고 있음을 의미한다. 그러나 투수계수 또는 투수량 계수는 대개 지역 공간내에서 매우 큰 변화폭을 나타내므로 국지적으로 신뢰성 있는 수치의 확보가 중요하다.

본 연구의 대상인 경북 포항 북부 지역(홍해읍, 송라면, 청하면)의 지하수 관련 측정 데이터를 Kriging 을 이용하여 분석한 내용은 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 지표로부터 지하수면까지의 깊이 분포는 대체로 7 m에서 9.5 m 범위에 이르며 지하수의 이용도가 높을 것으로 추정되는 지점에서는 9.5 m를 상회하는 것으로 나타난다.
2. 지하수면의 해발 고도 분포는 대체로 완만한 서고동저의 양상을 보이며 북부 높은 지표면 지역에서 최대값을 보이고 동쪽 및 남쪽 방향으로 감소하는 경향을 보이고 있다.
3. 통계적 분석의 신뢰도는 이용 가능한 데이터의 갯수와 함께 증가하므로 기존 설치된 암반정과 관측정들 중에서 이용하지 않는 부분을 적극 활용하는 것이 중요하다.
4. 관측정을 추가로 설치할 경우 효율적인 지하수 자원관리를 위해 지역 데이터의 전반적인 신뢰도를 높이는 방향으로 계획 진행되어야 한다.

사 사

본 연구는 학술진흥재단의 대학 부설 연구소 중점 과제

일부로서 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 국립지리원, 1996, 포항 지역 1:5,000 수치지도.
농림부 농어촌진흥공사, 1997, 영청지구 광역 수맥조사 보고서, pp. 152.
한균형, 1996, 지도학 원론, 민음사.
Cressie, N.A.C., 1991, Statistics of Spatial Data, Wiley Interscience.
de Marsily, G., 1986, Quantitative Hydrogeology, Academic Press.
Englund, E. and Sparks, A., 1991, GEO-EAS 1.2.1, Geostatistical Environmental Assessment Software, Environmental Monitoring Systems Laboratory, Las Vegas, NV, USA.
Gelhar, L., 1993, Stochastic Subsurface Hydrology, Prentice-Hall.
Journel, A. and Huijbregts, C., 1978, Mining Geostatistics, Academic Press.
Isaaks, E.H. and Srivastava, R.M., 1989, Applied Geostatistics, Oxford University Press.
Yoshizaki, H., 1996, LHA Version 2.55E for Surfer.