

# 크리깅 기법에 의한 제주도 기저지하수의 수위 분포

손 주 형  
정 상 용

농업기반공사 경남지사  
부경대학교 환경지질과학과

## 요 약

제주도 지하수는 크게 상위지하수와 기저지하수로 분류된다. 해수와 수동역학적 균형을 유지하고 있는 기저지하수의 수위분포도 작성을 위하여 지구통계기법인 정규크리깅과 코크리깅을 적용하였다. 정규크리깅에는 대수변환된 기저지하수위 자료만을 이용하였으며, 코크리깅에는 대수변환된 표고와 기저지하수위의 자료를 이용하였다. 그 결과 코크리깅에 의한 지하수위등고선도가 지형적인 변화가 복잡한 지역에서 더 정밀한 지하수위 등고선도를 만들 수 있었다.

## 1. 서 론

우리나라 대부분의 지층은 수리지질학적으로 불균질·이방성 대수층으로 구성되어 있고, 지형적으로도 기복이 심하여 수치모델링에 의한 정밀한 지하수위 등고선도를 추정하는 것은 어렵다. 특히 제주도와 같이 절리 및 용암동굴로 인해 지하수위의 변화가 큰 경우에는 수치모델링에 의한 등고선도는 많은 오차를 발생시킬 수 있다. 본 연구에서는 지구통계학에서 많이 이용되는 크리깅(kriging)을 이용하여 제주도 기저지하수의 수위등고선도를 만들었다. Matheron(1969)에 의해서 개발된 크리깅은 최선의 선형불편 추정자(BLUE: best linear unbiased estimator)로서 불편(unbiased)의 조건과 최소의 추정분산(estimation variance)을 갖는 강력한 통계학적 추정 방법이다. 크리깅은 원래 광상의 효율적인 개발을 위해 만들어 졌으나, 오늘날에는 공간상에 분포하는 거의 모든 자료에 이용되고 있다. 특히 지하수 연구(지하수 유동분석, 대수층 상수 추정, 지하수 수질분포 해석등)에서 중요한 역할을 한다(대한광업진흥공사, 1997).

본 연구에서는 제주도에서 개발된 지하수공 중 개발주상도, 양수시험성적서 등을 고려하여 기저지하수를 이용하는 지하수공 187개를 선택하였다. 선택된 지하수공에서 형성된 지하수위와 표고와의 상관성을 이용하여 코크리깅(cokriging)을 기저지하수의 수위등고선도 작성에 이용하였다. 지형적인 변화가 적은 곳의 지하수 위 등고선도는 지하수위 자료만을 이용하여 정밀한 등고선도를 만들 수 있다. 그러나 지형적인 변화가 큰 경우에는 지하수위 자

료 뿐만 아니라, 지형적인 기복(relief)도 고려하는 것이 더 정밀한 지하수위 등고선도를 만들어 낼 수 있다. Hoeksema(1989)은 지하수면은 지형의 복제품이라고 할 정도로 밀접한 상관성이 있으므로, 지하수위 추정을 위하여 지하수위 자료는 물론 지형의 표고자료를 이용할 필요가 있다고 했다. 2 가지 이상의 확률변수(random variables)들의 상관관계를 고려하여 새로운 값을 추정하는 기법이 코크리깅(cokriging)이다.

## 2. 제주도 지하수 부존 형태

제주도의 지하수 부존형태는 여러 기관과 연구자에 따라 다양하게 구분되어 왔다. 농어촌진흥공사(1971)는 제주도의 지하수 부존형태를 화산도 특유의 지형 및 지질조건 등을 고려하여 기저지하수(basal groundwater), 상위지하수(high level groundwater)로 구분하였다.

상위지하수는 강수가 중력에 의해 투수성 균열을 통해 지하로 침투하다 기저지하수체에도달하기 전에 불투수성 치밀질 암석이나 점토층과 만나게 되면 더 이상의 수직강하를 하지 못하고 그 지층 위에 부유수체 형태로 부존 하는 형이며, 상기 조건을 갖춘 지역으로는 지하에 저투수성 퇴적층이 분포하는 서귀포 및 남원 서부지역과 제주지역의 중산간 일부 지역에 국한되어 분포하고, 지하수위도 갈수기와 풍수기에 따라 매우 가변적이며 그 수량도 매우 한정적이라 하였다.

기저지하수는 지표로부터 유입된 지하수가 섬 하부까지 침투 하강하여 Ghyben-Hertzberg 관계를 이루면서 존재하고 있는 것으로 추정된다. 기저지하수는 제주도 전역에 걸쳐 풍부한 수량이 부존 되고 있으나, 여러 차례의 화산분출로 다양한 종류의 용암류와 화산쇄설물, 퇴적암류 등으로 구성되어 있어 투수성이 균일하지 못하므로 지하수 lens체가 이상적인 형태로 전지역에서 균일하게 형성되어 있지는 않은 것으로 추정된다.

한국수자원공사(1993)는 제주도의 지하수를 지하지질구조와 산출상태에 따라 상위지하수, 기저지하수, 준기저지하수로 분류하였다. 상위지하수는 제주도의 중산간지대 및 고지대와 남부 해안지역에 걸쳐 광범위하게 분포하는데 그 부존 상태에 따라 세가지 유형으로 세분되었다. 기저지하수는 상위지하수와는 달리 담수체 상하부가 항상 유동상태에 있으며 담수체의 변화에 따라 해수의 수평 및 수직운동이 일어난다. 해수와 담수의 접촉면은 렌즈의 수축, 팽창과 조석의 영향으로 인하여 뚜렷한 경계면을 갖기보다는 담수와 해수가 혼합된 접이대를 갖추고 있다.

준기저지하수는 하부가 불투수성 또는 저투수성 지층에 의하여 해수와 직접적인 접촉이 차단되어 기저지하수와 비교할 때 양수에 따른 해수침입 우려가 상대적으로 적으므로 용수 개발에 그 중요성이 크다. 준기저지하수의 부존여부는 상기한 저투수성 지층의 대수층 하부분포 위치에 따라 결정하였는데, 제주도 하부에 투수성이 낮은 퇴적층이 넓게 분포하고 있는 것으로 추정되므로 준기저지하수가 광범위하게 분포할 것으로 예상되나 현재까지 부존이

확인된 곳은 서부 해안지역과 북부의 삼양 및 신촌지역, 남부 서귀포의 자굴이지역 등이라 하였다.

고기원(1997)은 상위지하수, 상부준기저지하수, 하부준기저지하수, 기저지하수, 기반암지하수로 제주도 지하수를 5대분 하였다. 이는 준기저지하수를 서귀포층의 분포심도에 따라 상부준기저지하수와 하부준기저지하수로 세분하였고, 기반암지하수를 추가하였다.

본 연구에서는 제주도 지하수를 기저지하수와 상위지하수로 구분하여 기저지하수로 판단된 지하수위 자료를 이용하여 지하수위 등고선도를 작성하였다.

### 3. 지구통계학적 기법

#### 3.1. 정규크리깅(Ordinary Kriging)

크리깅은 지구통계학적 추정방법으로 주변값들의 선형적인 조합(linear combination)으로 최선의 선형 불편 추정자(BLUE: Best Linear Unbiased Estimator)이다. 크리깅은

$$Z_k^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i \quad (1)$$

이고, 여기서  $Z_i$  는 공간상에 분포하는 자료값,  $\lambda_i$  는  $Z_i$ 의 가중치(weight)  $Z_k^*$  는 크리깅에 의한 추정치이다.

크리깅의 가중치는 추정치가 불편(unbiased)이고, 추정분산이 최소가 되도록 결정된다. 크리깅의 불편조건은

$$E[Z_v - Z_k^*] = 0 \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} E[Z_k^*] &= E[Z_v] \\ &= E\left[\sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i\right] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

이고, 방정식 (2), (3)로부터

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (4)$$

여기서  $Z_v$ 는 미지의 참값이며  $Z_k$ 는 추정치이다.

크리깅의 추정분산은

$$E\{[Z_v - Z_k^*]^2\} = E[Z_v^2] - 2E[Z_v Z_k^*] + E[Z_k^{*2}] \quad (5)$$

로서 최소가 되어야 한다. 추정분산은 크리깅분산(kriging variance)이라고도 하며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_k^2 = E\{[Z_v - Z_k^*]^2\} = C(V, V) + \mu - \sum_{i=1}^n \lambda_i C(v_i, V) \quad (6)$$

여기서  $C(V, V)$  는 표본자료간의 공분산,  $\mu$  는 Lagrange multiplier,  $C(v_i, V)$  는 표본자료와 추정치간의 공분산이다.

### 3.2. 코크리깅(Cokriging)

코크리깅의 일반적 이론은 Matheron(1970)에 의해 개발되었으며, 코크리깅의 행렬공식은 Myers(1982)에 의해서 정리되었다. 확률변수군  $\bar{Z}(x) = [Z_1(x), \dots, Z_n(x)]$  가 2 계의 정상확률함수(second order stationary random function)를 이룰 때, 그 평균은

$$E[\bar{Z}(x)] = [m_1, \dots, m_n] \quad (7)$$

이고, 여기서  $m$ 은 상수를 뜻한다. 공분산 행렬은

$$\bar{C}(h) = E[\bar{Z}(x+h)^T \bar{Z}(x)] \quad (8)$$

이고, 여기서  $h$ 는 확률변수군들간에 떨어진 거리이며,  $T$ 는 행렬의 전치(transpose)를 뜻한다.

선형추정자(linear estimator)군은

$$\bar{Z}^*(x) = \sum_{k=1}^n \bar{Z}(x_k) \Gamma_k \quad (9)$$

이고, 여기서  $\bar{Z}(x_k)$ 는 확률변수군이며,  $\Gamma_k$ 는 가중치군으로  $n \times n$  행렬을 이룬다. 가중치군의 총합은  $n \times n$  단위행렬은

$$\sum_{k=1}^n \Gamma_k = I \quad (10)$$

이고, 가중치군  $\Gamma_k$ 의 충분조건은 불편조건과 최소추정분산으로 다음과 같다.

$$E[\bar{Z}_i(x) - \bar{Z}_i^*(x)] = [0, 0, 0, \dots, 0] \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^m \text{Var}[\bar{Z}(x) - \bar{Z}^*(x)] = \min \quad (12)$$

추정분산(estimation variance)을 나타내는 식 (12)을 공분산을 이용해서 나타내면,

$$\sigma_k^2 = T_r \bar{C}(0) - T_r \left[ \sum_{j=1}^n \bar{C}(x - x_j) \Gamma_j \right] - T_r \bar{\mu} \quad (13)$$

이다. 여기서  $T_r$ 은 trace를 뜻한다.

## 4. 지구통계학적 분석

### 4.1. 자료수집

지하수 자료는 1996년도 제주도 지하수 개발보고서와 1997년도 제주도지하수개발보고서, 1998년도에 농어촌진흥공사에서 작성된 영향조사서 및 1998년까지 제주도에서 발표한 영향조사서의 양수시험자료와 지질주상도 자료를 수집하였다. 수집된 지하수공의 자료는 기저지하수로 판명될 수 있는 것만 이용하였으며, 불확실한 경우에는 1998년 10월에서 11월까지 현장을 방문하여 기저지하수에 해당되는 것을 확인하고 지하수위를 측정하였다.

연구대상 지하수공은 총187개로서 제주시에 23개공, 서귀포시에 16개공, 기타 북제주군에 64개공 그리고 남제주군에 64개공이 분포하고 있다(Fig. 1).

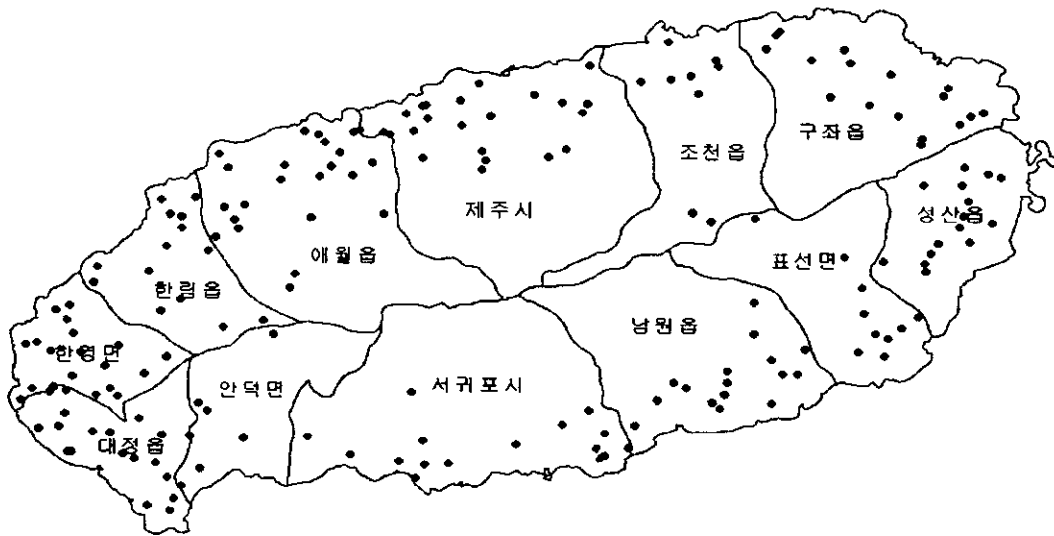


Figure 1. Distribution of groundwater well with administrative districts

### 4.2. 일반 통계분석

지하수공에서 수집된 표고와 지하수위 자료를 이용하여 일반통계분석을 하였으며, 그 결과는 Table 1에 있다. 표고와 지하수위 자료의 왜도는 양의 값으로 정규분포를 많이 벗어나고 있기 때문에, 대수변환(log-transformation)을 실시하였다. 그 결과 표고와 지하수위의 분포는 정규분포를 나타내었다.

Table 1. Basic statistics of well data

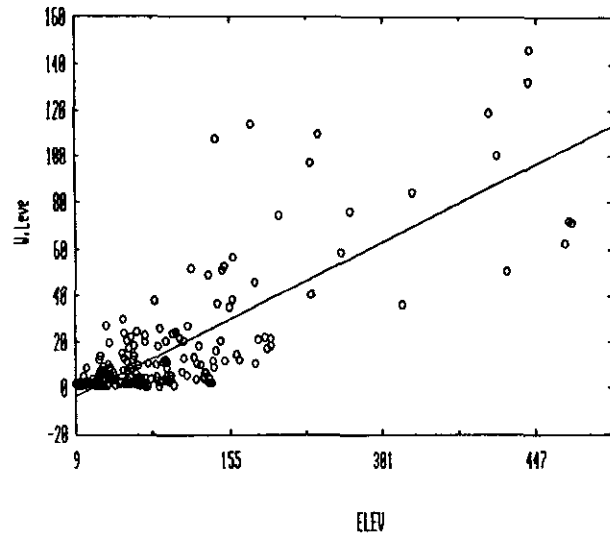
Statistics	Elevation	Groundwater Level
number of data	187	187
mean (m)	101.68	17.81
minimum (m)	9.00	0.06
maximum (m)	520.0	145.80
standard deviation	99.13	28.15
kurtosis	5.84	7.01
skewness	2.34	2.64

#### 4.3. 상관성분석

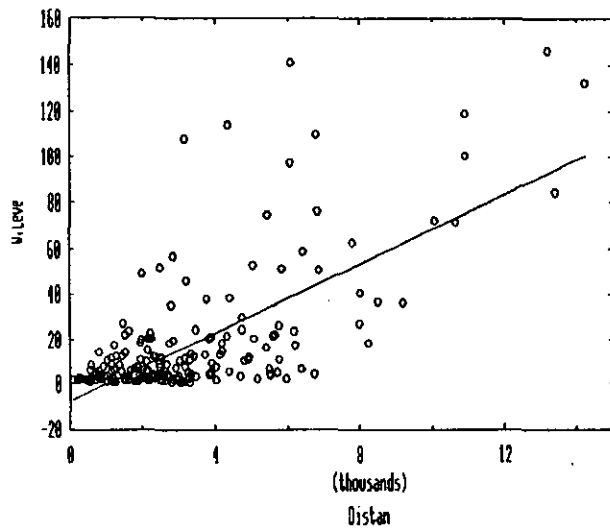
각 자료들 간의 상관성을 파악하기 위하여 선형회귀분석을 실시한 결과 지하수위와 표고의 상관계수가 0.80445로 상관성이 높으나, 지하수위와 해안거리의 상관계수는 0.68973로서 지하수위와 표고에 비해 약간 낮게 나타나고 있다(Table 2). 표고와 지하수위는 서로 상관성이 높기 때문에 코크리징을 이용하여 보다 정밀한 지하수위 등고선도를 만드는 것이 가능하다. Figure 2는 표고와 지하수위의 상관성과 해안거리와 지하수위와의 상관성을 각각 나타낸다.

Table 2. Result of regression analysis

model \ contents	number of data (N)	slope (b)	intercept (a)	correlation coefficient (R)
water level = a + b(elevation)	187	.22846	-5.41514	.80445
water level = a + b(distance)	187	62.84867	2192.11300	.68973



(a)



(b)

Figure 2 (a). Regression analysis of water level versus elevation, (b). Regression analysis of waterlevel versus distance to the shore.

#### 4.4. 베리오그램 분석

크리깅을 적용하기 위해서 자료들의 공간상 분포특성과 연속성(continuity)을 파악하였다. 이를 위하여 Matheron(1963)의 방법을 이용하여 베리오그램을 계산하였고, 각 자료들의 베리오그램 상수를 비선형 최소자승법(non-linear least-squares method)을 이용하여 산출하였다. 표고와 지하수위는 정규분포를 나타내는 대수변환 자료를 이용하였으며, 베리오그램모델은 구상형 모델(spherical model)과 지수형 모델(exponential model)을 적용하였다.

각 모델을 적용하여 구한 베리오그램 상수들은 Table 3과 같다.

Table 3. Variogram parameters of log-transformed elevation and water level

data	model	nugget	sill	range(m)
ln(elevation)	exponential	0	1.2686E+0	5.6285E+3
	spherical	0	1.2767E+0	1.6300E+4
ln(water level)	exponential	4.8496E-3	2.2059E+0	5.2417E+3
	spherical	3.2257E-1	2.1977E+0	1.5439E+4
ln(water level)/ ln(elevation)	exponential	7.8197E-5	7.5141E-1	2.9433E+3
	spherical	0	7.5542E-1	8.5416E+3

#### 4.5. 지하수위 등고선도

제주도 기저지하수의 수위 등고선도를 작성하기 위하여 정규크리깅과 코크리깅을 이용하였다. 먼저 187개의 자료를 이용하여 지하수위 정규크리깅을 실시하였다(Figure 3). 정규크리깅 결과 해안변에는 수위 등고선이 지형등고선과 비슷한 형태를 나타내고 있음을 알 수 있다. 좀 더 정확한 수위등고선도를 작성하기 위해 지하수위와 높은 상관성을 가지는 표고와 코크리깅 하였다. Figure 4는 지하수위와 표고와의 코크리깅 결과이다. Figure 3과 Figure 4를 비교해 보면 서로의 형태는 비슷하나, 서귀포지역에서 정규크리깅보다는 코크리깅이 수위등고선 간격이 좁게 나타나고 있다. 이는 서귀포지역이 다른 지역에 비하여 지형 경사가 급한 것을 코크리깅이 반영하고 있기 때문이다. Figure 5에서 한경면지역의 20m 등수위선을 따라가 보면 국지적으로 표고가 높아지는 지역에서 수위가 올라가 있음을 보여주고 있다. 동부지역의 2m 수위등고선도 코크리깅이 정규크리깅보다 표고와의 상관성이 높게 나타나고 있다. 본 연구지역과 같이 표고와 지하수위의 상관성이 높은 지역에서는 국지적인 지역의 수위분포등고선을 작성할 때, 표고와 지하수위의 코크리깅이 더 정밀성이 있는 수위 등고선도를 만들어 낼 수 있다.



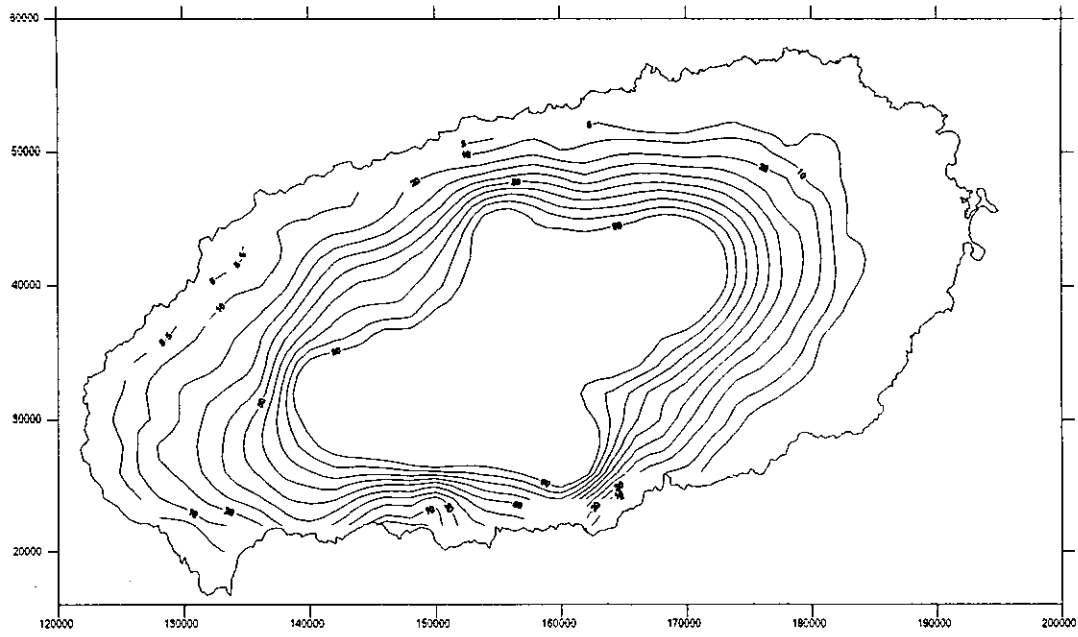


Fig 3. Contour map of basal groundwater level by ordinary kriging

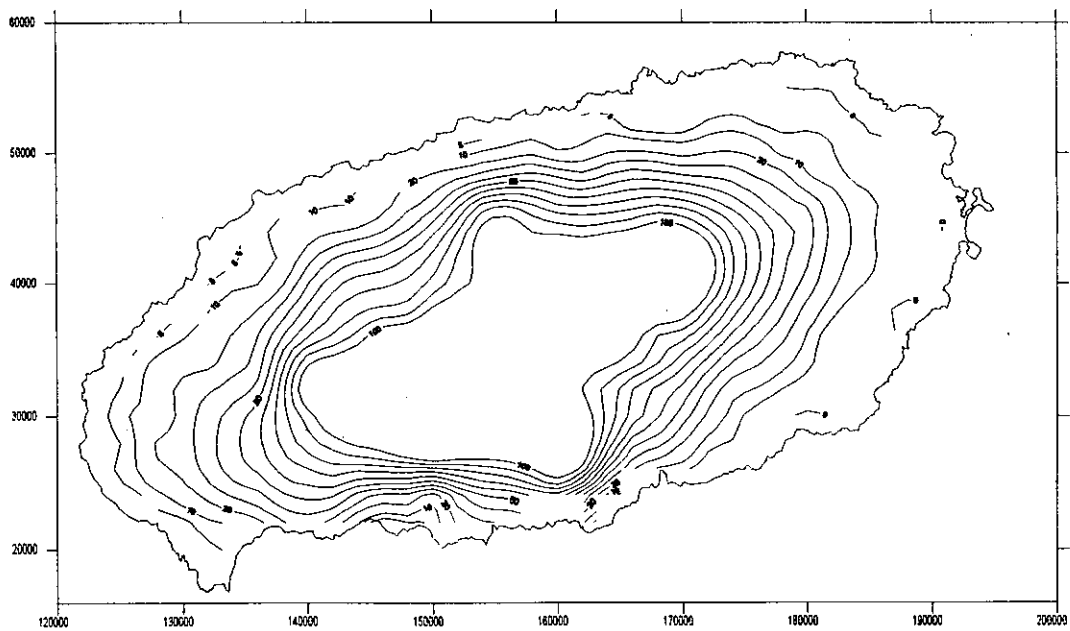


Fig 4. Contour map of basal groundwater level by cokriging

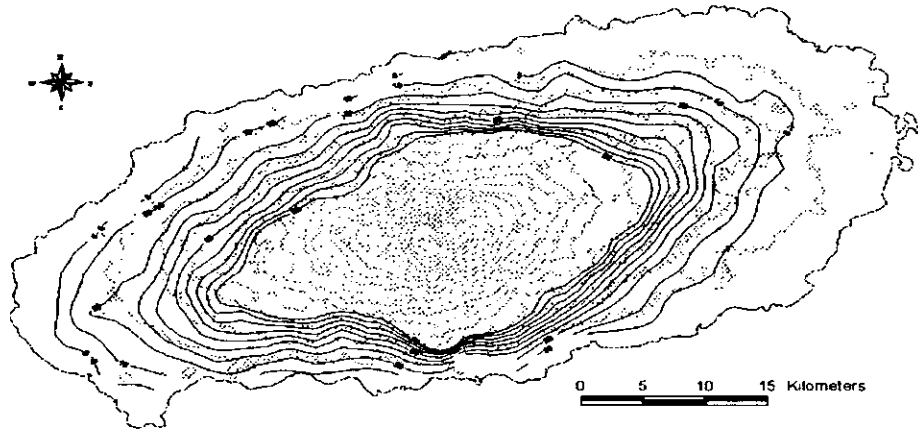


Fig 5. Basal groundwater level distribution on the topographic map of the Cheju Island

## 5. 결 론

1. 연구 대상 지하수공은 총 187개로서 표고 평균은 101.68m로 주로 해안가에 집중되어 있고, 최소값은 9m이고 최대 값은 520m이다. 지하수위는 평균 17.81m, 최소값은 0.06m, 최대 값은 145.80m 이다.
2. 연구대상 지하수공의 지하수위와 표고의 상관계수는 0.8044, 지하수위와 해안과 거리의 상관계수는 0.68973로서 지하수위와 표고의 상관관계가 지하수위와 해안과거리의 상관성 보다 더 크다.
3. 베리오그램 분석결과에서 정규분포를 나타내는 대수변환 자료를 이용하였다. 연구대상 지하수공의 지하수위, 표고는 정상확률함수를 나타내었으며, 정상확률함수일 때 일반적으로 수리지질학에서 널리 사용하는 구상형모델, 지수형 모델 중 상관성범위등을 분석한 결과, 구상형 모델이 적합하였다.
4. 기저지하수의 수위분포를 파악하기 위하여 지하수위 자료만을 이용한 정규크리깅과 지하수위와 표고의 상관성을 고려한 표고와 코크리깅을 이용하였다. 정규크리깅과 코크리깅의 수위등고선도 형태는 비슷하였으나 국지적으로 코크리깅이 표고에 영향을 많이 받는 지역의 지하수위를 더 잘 반영하였다. 제주도과 같이 지하수위와 표고의 상관성이 큰 지역에서는 코크리깅이 더 정밀성이 높은 수위등고선도를 만들어 낼 수 있다.

## 참 고 문 헌

- 농어촌진흥공사, 1970 ~ 1997, 제주도개발보고서
- 농림부·농어촌진흥공사·제주도, 1992 ~ 1997, 장기관측망 보고서
- 대한광업진흥공사, 1997, 불균질·이방성 대수층의 지하수 유동분석 기술연구, 광진 97-2, 153p
- 고기원, 제주도의 지하수 부존특성과 서귀포층의 수문지질학적 관련성
- 농어촌진흥공사, 농림부, 제주도, 1989, 제주도 지하수장기개발계획조사보고서
- 건설부, 한국수자원공사, 제주도, 1993, 제주도수자원조사보고서
- 한국수자원공사 1995, 제주도 광역상수도 I 단계 기본 및 실시설계용역 기본설계보고서
- 제주도, 1998, 제주·에월 도폭 지질보고서
- 농수산부, 농업진흥공사, 1971, 제주도 지하수보고서
- P.K. Kitanidis, 1997, Introduction to Geostatistics : Application to Hydrogeology, CAMBRIDGE University, pp.120-149
- Carr,J.R, D.E.Myers, and C.E. Grass, 1985, CoKriging-A Computer Program, Computer & Geosciences Vol.11, No2, pp.111-127
- Delfiner,P.,1976, Linear Estimation of Non stationary Spatial Phenomena, Advanced Geostatistics in the Mining Industry, edited by M.Guarascio, M.David, and C.Huijbregts, pp49-68, D.Reidel Publishing Company, Dordrech-Holland
- Dowed,P.A., 1984. The Variogram and Kriging : Robust and Resistant Estimators, Geostatistics for National Resources Characterization, Part 1, Isaaks, E.H. and R.M.Srivastava, 1989, Applied Geostatistics, Oxford University, 561p
- Journel, A.G., and C.J. Huijbregts, 1978, Mining Geostatistics, Academic Press, 600p
- Matheron, G., 1969, Le Krigeage Universal, Cah. Centre Marphol, Math. 1
- Matheron, G., 1970 The Intrinsic Random Functions and Their Applications, Advanced Applied Probability, Vol. 5 pp439-468.
- Myers,D.E., 1982, Matrix Formulation of Co-Kriging, Mathematical Geology, Vol, 14(3), pp.249-257