

불균질·이방성 대수층의 지하수 유동분석에 지구통계기법의 응용

Application of Geostatistical Methods to Groundwater Flow Analysis in a Heterogeneous Anisotropic Aquifer

정 상 용 (Sang Yong Chung)

유 인 결 (In Kol Yoo)

윤 명 재 (Myung Jae Yoon)

권 해 우 (Hae Woo Kweon)

허 선 회 (Seon Hee Heo)

부경대학교 지구환경과학부

대한광업진흥공사

대한광업진흥공사

대한광업진흥공사

대한광업진흥공사

요약/ABSTRACT

불균질·이방성 대수층에서의 지하수 유동분석을 위하여 지구통계학적 기법을 적용하였다. 연구지역은 대한광업진흥공사의 수문지질조사 사업지구인 전남 함평군 손불면 일대이며, 이 지역 관정의 표고와 지하수위의 선형회귀분석 결과 상관성이 매우 큰 것으로 나타났다. 정규크리깅과 코크리깅을 이용하여 작성된 지하수위 등고선도는 산간지역에서 차이가 크고, 서해에 인접한 구릉이나 평지에서는 큰 차이가 없다. 표고 등고선도를 기준으로 2개의 지하수위 분포도를 비교해 보면 코크리깅에 의한 것이 정밀성이 더 큰 것으로 나타났다. 정규크리깅과 코크리깅에 의해 작성된 지하수위 등고선도에서 손불면의 지하수 유동상태를 검토해 보면, 지형이 높은 산간지역에서 서해바다에 인접한 평야지역으로 지하수가 유동하고 있다. 불균질 이방성·대수층에서의 지하수 유동분석에 대한 지구통계학적 기법의 실효성을 검토하기 위하여 지하수 유동측정기(model 200 GeoFlo[®])를 이용해서 2개 지하수공내의 유향을 측정한 결과, 측정된 지하수 유향은 정규크리깅과 코크리깅의 지하수위 등고선도에서 추정된 지하수 유향과 대체로 일치하였다.

주요어 : 정규크리깅, 코크리깅, 지하수위등고선도, 지하수유동측정기, 지하수유향

Geostatistical methods were used for the groundwater flow analysis in a heterogeneous anisotropic aquifer. This study area is located at Sonbul-myeon in Hampyong-gun of Cheonnam Province which is a hydrogeological project area of KORES(Korea Resources Cooperation). Linear regression analysis shows that the topographic elevation and groundwater level of this area have very high correlation. Groundwater-level contour maps produced by ordinary kriging and cokriging have large differences in

mountain areas, but small differences in hill and plain areas near the West Sea. Comparing two maps on the basis of an elevation contour map, a groundwater-level contour map using cokriging is more accurate. Analyzing the groundwater flow on two groundwater-level contour maps, the groundwater of study area flows from the high mountain areas to the plain areas near the West Sea. To verify the effectiveness of geostatistical methods for the groundwater flow analysis in a heterogeneous anisotropic aquifer, the flow directions of groundwater were measured at two groundwater boreholes by a groundwater flowmeter system(model 200 GeoFlo^R). The measured flow directions of groundwater almost accord with those estimated on two groundwater-level contour maps produced by geostatistical methods.

Key Words : Ordinary kriging, cokriging, groundwater-level contour map, groundwater flowmeter system, flow directions of groundwater

서 언

정밀한 지하수 유동분석은 조사 지역의 수리지질학적 연구(예 : 지하수함양 및 배출지역의 결정, 지하수 유속 및 유향의 결정, 지하수 개발가능지역 선정, 지하수 오염가능성 평가 등)에 매우 중요하다. 유선망(flow net)에서 등압선(equipotential line)을 이루는 지하수위 등고선도는 지하수 유동분석에 필수적으로 요구되어지며, 이 지하수위 등고선도는 보통 지하수 수치 모델링(numerical modeling)에 의해 결정 되어지고 있다. 그러나 지하수 수치 모델링은 지형 및 지질의 변화가 적으며 대수층의 조건이 매우 이상적(균질·동방성)일 때 그 신뢰성이 보장된다.

우리나라 대부분의 지층은 수리지질학적으로 불균질·이방성 대수층으로 구성되며, 또 지형적으로도 기복이 심하여 수치모델링에 의한 정밀한 지하수위 등고선도를 만들어내는 것은 어려운 실정이다. 더욱이 지하수 유동분석의 범위가 단순한 총적층만이 아니고 암반층까지 포함하고 또, 지형적인 변화가 큰 경우에는 수치모델링에 의한 등고선도는 많은 오차를 갖거나 때로는 분석 자체가 불가능한 경우가 많다. 예를 들면 전 세계적으로 많이 이용되고 있는 MODFLOW는 미국 지질조사소의 MacDonald and Harbaugh(1988)가 개발한 수치모델링 소프트웨어로서 이것은 불균질하고 이방성인 대수층에서 3차원 지하수 모델링에 이용되며, 우리나라에서는 현재 먹는 샘물 환경영향평가나 기타 지하수 유동분석에서 많이 활용되고 있다. 그러나

분석 지역이 산간지역이거나 지형적인 변화가 큰 곳에서는 MODFLOW를 이용한 지하수 유동분석에서 많은 오차가 발생되고 있다.

지질, 해양, 대기 등 지구과학분야에서 공간상에 분포하는 자료(spatial data)를 취득할 때, 자료측정의 제한성이나 경제적인 이유로 항상 충분한 자료가 확보될 수 없는 실정이다. 지구통계학은 불충분한 자료의 추가 획득이나 공간자료의 구조적인 분석을 위하여 이용되는 새로운 학문분야 이다(Journel and Huijbregts, 1978). 지구통계학의 핵심인 크리깅(Kriging)은 불균질·이방성 대수층 지역에서 신뢰성을 갖는 지하수위 등고선도를 생산할 수 있다. Matheron(1969)에 의해서 개발된 크리깅은 최선의 선형불편 추정자(best linear unbiased estimator)로서 불편의 조건(unbiased condition)과 최소의 추정분산(minimum estimation variance)을 갖는 강력한 통계학적 추정 방법이다. 크리깅은 원래 광상의 효과적인 개발을 위해 만들어 졌으나, 오늘날에는 공간상에 분포하는 모든 자료의 분석에 광범위하게 이용되고 있다. 특히 지하수 연구(지하수 유동분석, 대수층 상수추정, 지하수 수질현황 분석 등)에서 크리깅은 매우 중요한 역할을 한다.

국내에서 지구통계학을 이용한 지하수 연구는 정상용(1993a,b), 조용현 외(1994), 정상용과 이강근(1995), 장연수·정상용(1997) 등 아주 적은편이다. 그러나 외국에서는 지구통계학을 이용한 연구가 오래 전부터 활발히 이용되고 있다. 즉, 대수층상수의 분석(Yeh et al., 1983; Aboufirassi and Marino, 1984; Kitanidis and Vomvoris, 1983; Russo and

Jury, 1987 a,b ; Wen, 1994 ; Loaiciga et al., 1996), 지하수위 또는 수리경사의 분석(Aboufirassi and Marino, 1983 ; Neuman and Jacobson, 1984 ; Phlip and Kitanidis, 1989), 지하수 유동분석(Neuman, 1984 ; Desbarats, 1994 ; Datta-Gupta et al., 1995 ; Jensen et al., 1996) 등에 널리 이용되고 있다.

연구지역 개황

불균질·이방성 대수층에서의 지하수 유동분석에 크리깅모델을 적용하기 위하여, 대한광업진흥공사의 1997년 1월부터 1998년 12월까지 수문지질조사 사업지구인 전남 함평군 내에서 관정이 비교적 많이 개발되어 있는 손불면의 지하수를 이용하였다. 손불면은 함평군과 영광군이 인접하는 곳에 위치하며, 서쪽에는 서해 바다가 인접해 있다(Fig. 1). 서해에 인접한 지역은 비교적 낮은 구릉과 평지로 구성되어 있으나, 내륙 안쪽으로는 해발 200~300m의 산들이 여러개 분포한다.

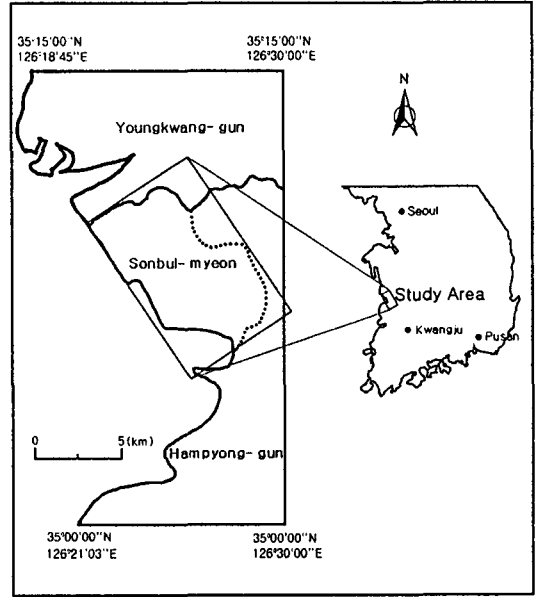


Fig. 1. Location map of study area.

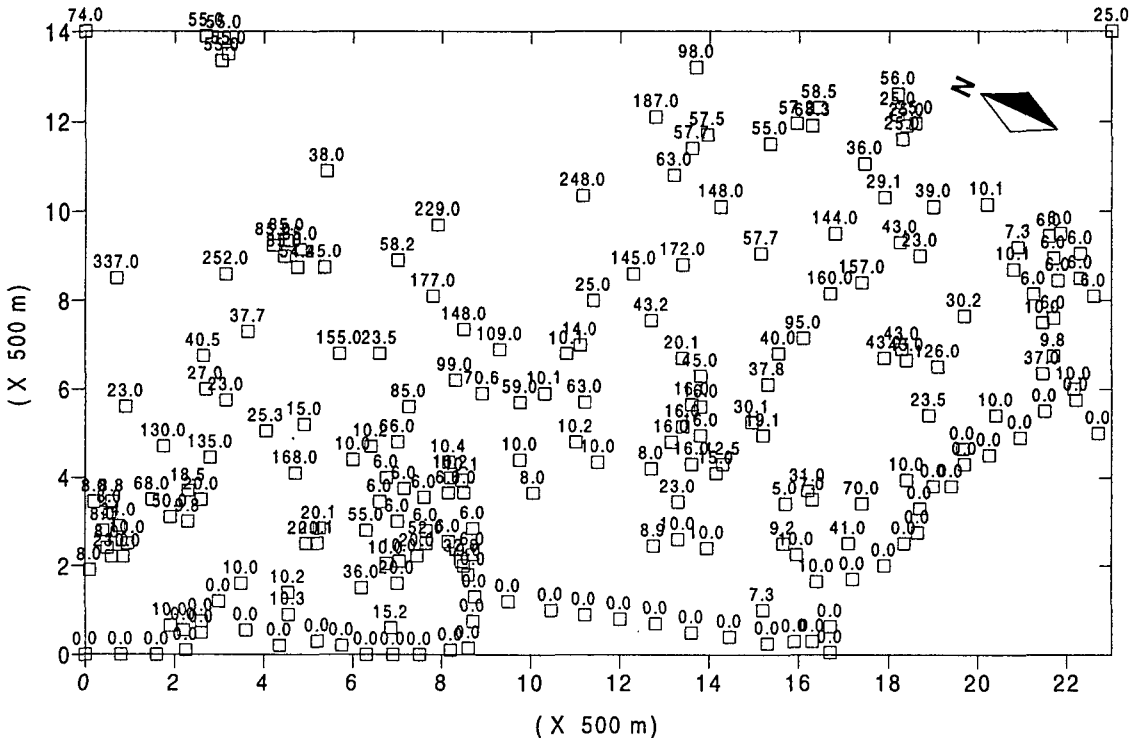


Fig. 2. Distribution map of elevation data at the study area.

관정조사에서 얻어진 자료들의 지구통계학적 처리를 위하여 각 관정들의 위치에 지리적 좌표가 아닌 격자망의 순번을 나타내는 좌표를 설정하였다. 관정의 표고는 1:5,000 지형도에서 판독하였으며, 해수면과 만나는 해안지역의 표고와 지하수위는 모두 0으로 간주하였다. 또한 코크리깅 분석을 위하여 지형이 높은 지역의 표고도 추가하였으며, 지하수위 자료는 지표면하 심도에서 모두 해수면기준의 높이로 환산하였다.

Fig. 2에 지구통계학적 분석에 이용된 표고 자료의 위치와 값들이 있으며, X축, Y축의 숫자는 격자의 간격 수를 나타내며, 간격의 실제 거리는 500m

이다. 따라서 분석대상 지역의 X축 길이는 11.5km, Y축 길이는 7km이다. 조사된 지하수위의 위치와 값들은 Fig. 3에 있으며, 이것들은 표고자료와 같은 지역적 범위에 속한다.

자료의 일반 통계분석

전남 함평군 손불면의 관정조사에서 얻어진 표고와 지하수위 자료의 일반 통계분석 결과(Table 1)에 의하면, 표고의 평균값은 34.75m, 중앙값은 12.59m로 손불면 지역은 대부분 낮은 구릉과 평지로 되어있다. 그러나 북쪽은 200~300m의 높은 산

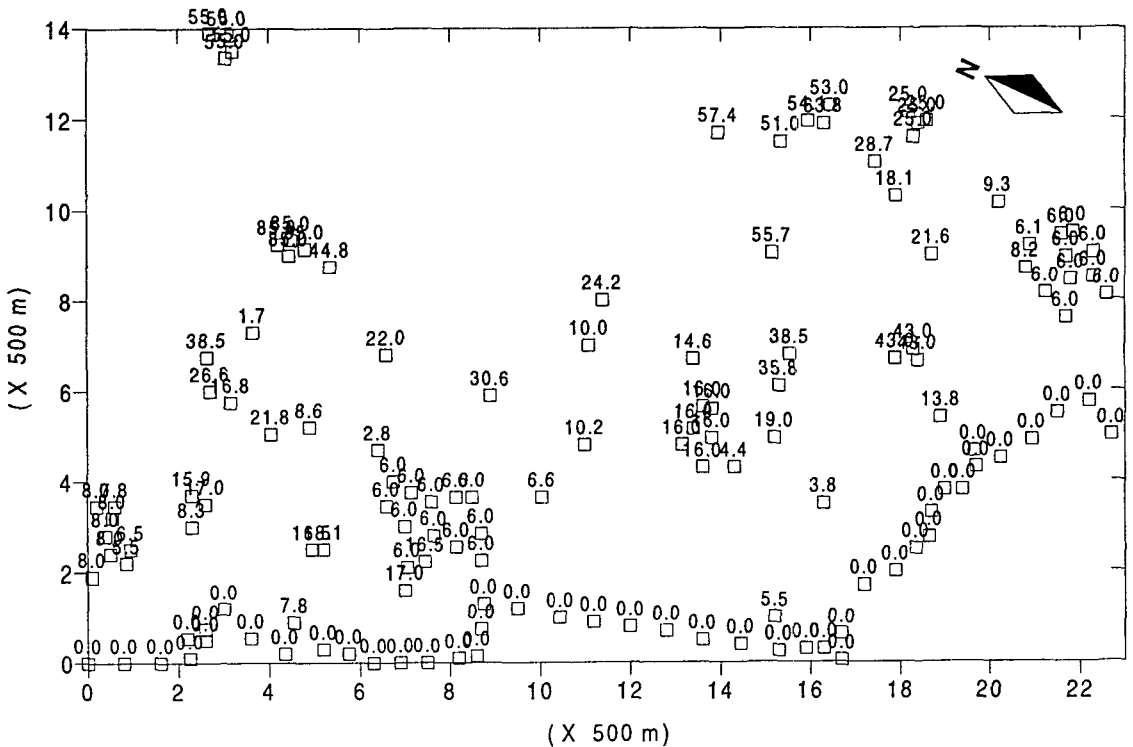


Fig. 3. Distribution map of groundwater level data at the study area.

들이 분포한다. 관측된 지하수위의 평균값은 해수면 기준으로 14.71m이며, 최대값은 85m이다. 표고의 평균값과 비교해 볼때, 손불면의 지하수위는 평균적으로 지표면에서 약 20m 하부에 존재한다. 그러나 중앙값을 비교해 보면 표고는 12.59m, 지하수

위는 6.0m로서 지하수위는 대부분 지표면에서 약 6~7m 범위에 분포한다.

표고와 지하수위의 표준편차는 각각 51.31과 20.2로서, 고도가 높은 지역에 개발된 관정의 영향으로 약간 크게 나타나고 있다. 왜도는 양성왜도로서 표

Table 1. General statistics of topographic elevation and groundwater level data.

Data	Statistics	No. of Data	Mean	Median	Standard Deviation	Variance	Skewness	Kurtosis	Mimum Value	Maximum Value
Elevation		221	34.75	12.59	51.31	2621.27	2.68	8.72	0.0	337.0
Groundwater Level		137	14.71	6.0	20.20	404.87	1.82	5.82	0.0	85.0

고와 지하수위 분포는 모두 정규분포보다 왼쪽으로 치우쳐 있다(Fig. 4). 이것은 표고와 지하수위의 자료가 평균치보다 적은 것들이 큰 것들에 비하여 더 많기 때문이다. 표고와 지하수위 분포곡선의 첨도는 모두 정규분포보다 평탄하다(Fig. 4). 표고나 지

하수위 자료들은 보통 측정시의 오차나 자료의 제한적인 취득 등으로 완전한 확률변수(random variable)가 될 수 없기 때문에, 이들 자료들의 분포는 완전한 정규분포를 이루지 못하는 것이 일반적인 경향이다.

자료의 회귀분석

우리나라 지하수의 경우 지하수위와 지형의 표고와는 밀접한 관련이 있다. 일반적으로 지형이 높은 지역은 지하수 충전지역의 역할을 하기 때문에 지형이 낮은 곳에 비하여 지하수위가 높게 형성된다. 건설교통부(1998)에서 수집 및 관리하고 있는 지하수자료 중 영산강·섬진강 유역의 지하수위 자료와 표고와의 상관관계분석에 의하면 그들의 상관계수는 거의 1.0이다. 본 연구지역에서의 지하수위

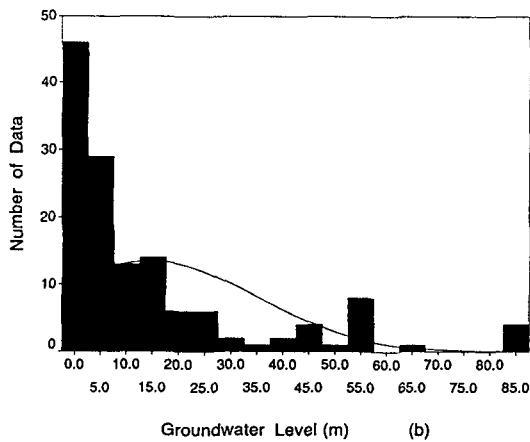
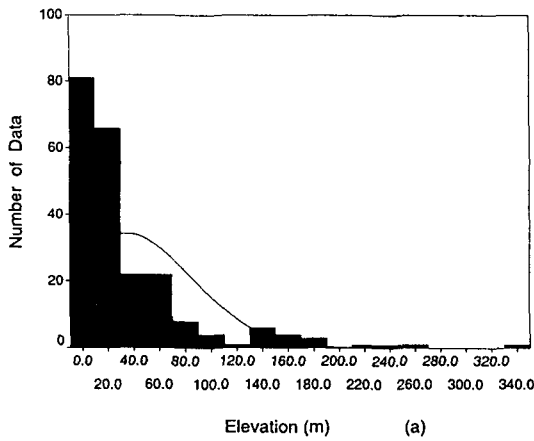


Fig. 4. (a) Histogram of elevation data
(b) Histogram of groundwater level data.

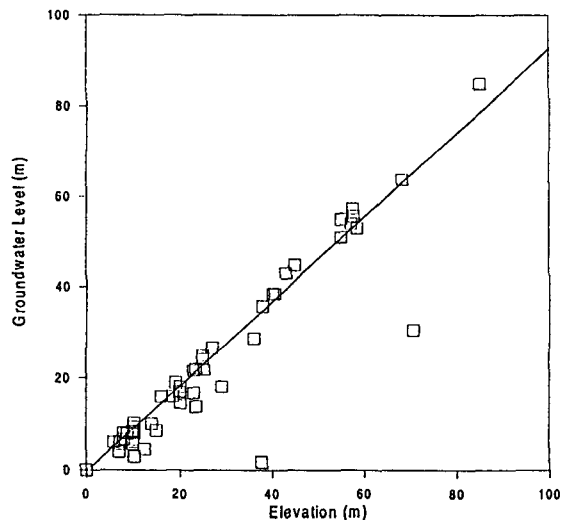


Fig. 5. Linear regression of groundwater level versus elevation.

Table 2. Linear regression of topographic elevation and groundwater level.

No. of Data	Slope	Threshold	Multiple Correlation Coefficient (R)	Goodness of Fit (R ²)
137	0.931	-0.478	0.972	0.946

와 지형의 표고간의 상관관계를 파악하기 위하여 선형회귀 분석을 실시하였으며, Fig. 5의 선형회귀 분석 도표에 의하면 일부 자료들이 회귀선에서 벗어나고 있으나 대부분의 자료들은 회귀선상에 가깝게 위치하고 있다. Table 2의 분석결과에 의하면 상관계수는 1.0에 가깝기 때문에, 본 연구지역에서도 표고와 지하수위의 상관성이 매우 높은 것으로 나타났다.

지구통계학적 기법의 이용

크리깅은 공간상에 분포하는 확률변수(random variables)들을 이용하여 자료가 없는 필요한 지점에서 값을 추정해내는 강력한 통계학적인 방법인데, 연구지역의 지형과 지하수분포 특성에 따라 적절한 크리깅 모델을 지하수 유동분석에 이용하여야 한다.

지하수 유동분석 대상지역의 지형적인 변화가 크지 않은 경우에는 분석 대상에서 지하수위 자료만을 이용하여 지하수위 등고선도를 만들어도 정밀한 결과를 얻을 수 있다. 이 경우에는 보통 정규크리깅(ordinary kriging)을 이용해서 지하수위 등고선도를 작성한다. 그러나, 지하수위 자료에 대한 베리오그램(variogram)을 작성해 보면 보통 거리에 따라 반베리오그램(semivariogram)이 증가하는 경향을 갖는다. 이 경우에는 지하수위 자료는 비정상 확률함수(nonstationary random functions)를 이루기 때문에 만능크리깅(universal kriging)을 이용해서 분석을 하면 더 정밀한 지하수위 등고선도를 얻을 수 있다(정상용, 1993a).

지하수 유동분석 대상 지역의 지형적인 변화가 큰 경우에는 지하수위 자료 뿐만 아니라 지형적인 기복도 고려하면, 더 정밀한 지하수위 등고선도를 만들어 낼 수 있다. Hoeksema et al.(1989)은 지하수면을 지형의 복제품으로 간주하고 지하수위 추정

을 위하여 지하수위와 표고자료를 이용하였다. 2가지 이상의 확률변수들의 상관관계를 고려하여 새로운 값들을 추정해 낼 수 있는 방법이 코크리깅(cokriging)이다. 따라서 지하수 유동 분석 대상 지역이 평야와 산간지역을 동시에 포함하여 지형적 변화가 큰 경우에는 코크리깅을 이용하여 유동분석을 하는 것이 보다 정밀한 결과를 만들어 낼 수 있는 것으로 알려져 있다.

정규크리깅

크리깅은 최선의 선형 불편 추정자를 제공해주며, 그 공식은

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

여기서 Z_i 는 공간상에 분포하는 실험자료 값, λ_i 는 Z_i 에 배당되는 가중치, 그리고 Z_k^* 는 크리깅에 의한 추정치이다.

크리깅의 가중치는 추정치가 불편(unbiased)이고, 추정분산(estimation variance)이 최소가 되도록 결정된다.

크리깅의 불편 조건은

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

여기서 Z_i 는 미지의 참값이며 Z_k^* 는 추정치이다.

방정식(2)로부터

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1.0 \quad (3)$$

크리깅의 추정분산은

$$E\{(Z_v - Z_k^*)^2\} = E\{Z_v^2\} - 2E\{Z_v Z_k^*\} + E\{Z_k^{*2}\} \quad (4)$$

로서 최소가 되어야 한다. 추정분산은 크리깅분산이라고도 하며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_K^2 = E\{(Z_v - Z_k^*)^2\} = C(V, V) + \mu$$

$$-\sum_{i=1}^n \lambda_i C(v_i, V) \quad (5)$$

여기서 $C(v_i, V)$ 는 거리 h 만큼 떨어진 두 영역 v_i 와 V 에 의한 공분산(covariance) 함수 $C(h)$ 와 같다.

코크리깅

코크리깅의 일반적 이론은 Matheron(1971)에 의해 개발되었으며, 코크리깅의 행렬 공식은 Myers(1982)에 의해서 정리되었다.

코크리깅에서 선형추정자군은

$$\bar{Z}^*(x) = \sum_{k=1}^n \bar{Z}(x_k) r_k \quad (6)$$

여기서 $\bar{Z}(x_k)$ 는 확률변수군이며, r_k 는 가중치군으로 $n \times n$ 행렬을 이룬다.

가중치군의 총합은 $n \times n$ 단위행렬을 이룬다. 즉,

$$\sum_{k=1}^n r_k = I \quad (7)$$

가중치군 r_k 의 충분조건은 정규크리깅과 같이 불편조건과 최소 추정분산이다.

즉,

$$E[\bar{Z}(x) - \bar{Z}^*(x)] = [0, 0, \dots, 0] \quad (8)$$

$$Var[\bar{Z}(x) - \bar{Z}^*(x)] = minimal \quad (9)$$

여기서 Var 은 분산을 뜻한다.

베리오그램(Variogram) 분석

크리깅에 의한 자료 추정에서는 조사자료간의 공분산이 필요한데, 이것은 조사자료간의 베리오그램에서 구해진다. 베리오그램은 공간상에 분포하는

표본자료의 변화 특성을 나타내며, 공간상에 분포하는 임의의 두 자료간 차이의 분산으로 구해진다 (Journel and Huijbregts, 1978).

$$2\gamma(h) = E\{[\sum Z(x) - Z(x+h)]^2\} \quad (10)$$

여기서 $2\gamma(h)$ 는 베리오그램, $\gamma(h)$ 는 반베리오그램(semivariogram) 이다. $Z(x)$ 는 임의의 지점 x 에 있는 자료의 값이며 $Z(x+h)$ 는 $Z(x)$ 에서 h 만큼 떨어진 지점의 자료값이다.

조사자료의 구조에 적합한 모델을 선정하기 위하여 교차타당성시험(cross validation test; Davis, 1987)을 실시하였으며, 베리오그램 상수를 결정하기 위하여 비선형 최소자승법(nonlinear least squares method)을 이용하였다. 본 연구지역의 표고와 지하수위 자료에 대한 베리오그램분석 결과 구상형모델이 가장 적합한 것으로 결정되었으며, 각 베리오그램의 상수들은 Table 3에 있다. 베리오그램의 구상형모델(spherical model) 방정식은 다음과 같다.

$$\gamma(h) = CO + C \left[\frac{3}{2} \cdot \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \cdot \frac{h^3}{a^3} \right] \quad (h \leq a) \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\gamma(h) = sill \quad (h > a) \quad (12)$$

여기서 CO 는 nugget, C 는 sill-nugget, a 는 반베리오그램의 상관성 범위, 그리고 h 는 자료들간의 거리이다.

지하수위 등고선도 및 유향 분석

연구지역의 지하수 유동분석을 위하여 크리깅과 코크리깅 모델을 적용하였다. 표고 및 지하수위 베

Table 3. Variogram parameters of elevation and groundwater level data.

Data	Model	Nugget	Sill	Range(m)
Elevation	spherical	0.0	2452.70	6.31 × 500
Groundwater Level	spherical	0.0	486.90	9.90 × 500
Elevation - Groundwater Level	spherical	0.0	496.13	9.86 × 500

리오그램 분석 결과 크리깅에서는 정규크리깅 모델이 적합하였다. 손불면의 관정 및 지형의 표고 자료는 Fig. 2에 있으며, 이것을 크리깅을 이용하여 작성한 지형등고선도가 Fig. 6이다. 크리깅에 의한 등고선도는 실제 지형보다 완만하게 나타나고 있으나, 산, 계곡, 평지, 해안선 등의 지형적 변화는 서로 일치한다. 크리깅 및 코크리깅 분석에 이용된 손불면 관정의 지하수위 자료분포는 Fig. 3에 있다. 조사지역 하부에서는 지하수위 자료가 비교적 많이 획득되었으나, 상부에서는 주로 산간지역이어서 지하수위 자료가 부족한 편이다.

지하수위 자료만을 정규크리깅에 적용하여 작성한 지하수위 등고선도가 Fig. 7이며, 지형의 표고와 지하수위 자료를 동시에 코크리깅에 적용하여 작성한 지하수위 등고선도가 Fig. 8이다. 크리깅과 코크리깅에 의해서 만들어진 지하수위 등고선도는 지형적인 변화가 큰 연구지역 상부에서 차이가 크고, 서해와 인접한 구릉이나 평지에서는 큰 차이가 없

다. 특히 월암산, 노쾌산 일대에서 큰 차이를 보여 주는데, Fig. 6의 표고 등고선도를 기준으로 Fig. 7과 Fig. 8의 지하수위 등고선도를 비교해 보면 코크리깅에 의한 지하수위 등고선도가 정밀성이 더 큰 것으로 나타났다.

연구지역에서의 지하수 유동분석을 위하여 크리깅과 코크리깅을 이용해서 만들어진 2 개의 지하수위 등고선도에서 지하수 유향을 각각 추정하여 표시하였다. 연구지역은 불균질·이방성 대수층으로 구성되어 있어서 지하수위 등고선도에서 지하수 유향을 정확히 추정할 수는 없다. 그러나, 지하수가 산지에서 계곡으로, 내륙에서 해안가로, 또 지하수위 등고선을 가로질러 이동한다는 일반적 지하수 유동특성을 고려하여 결정하였다. Fig. 7과 Fig. 8에서 추정된 지하수 유향을 비교해 볼 때, 산간지역의 지하수 유향은 약간 차이가 있지만 평지에서는 거의 같다. 크리깅과 코크리깅에 의해 작성된 지하수위 등고선도에서 손불면의 지하수 유동상태

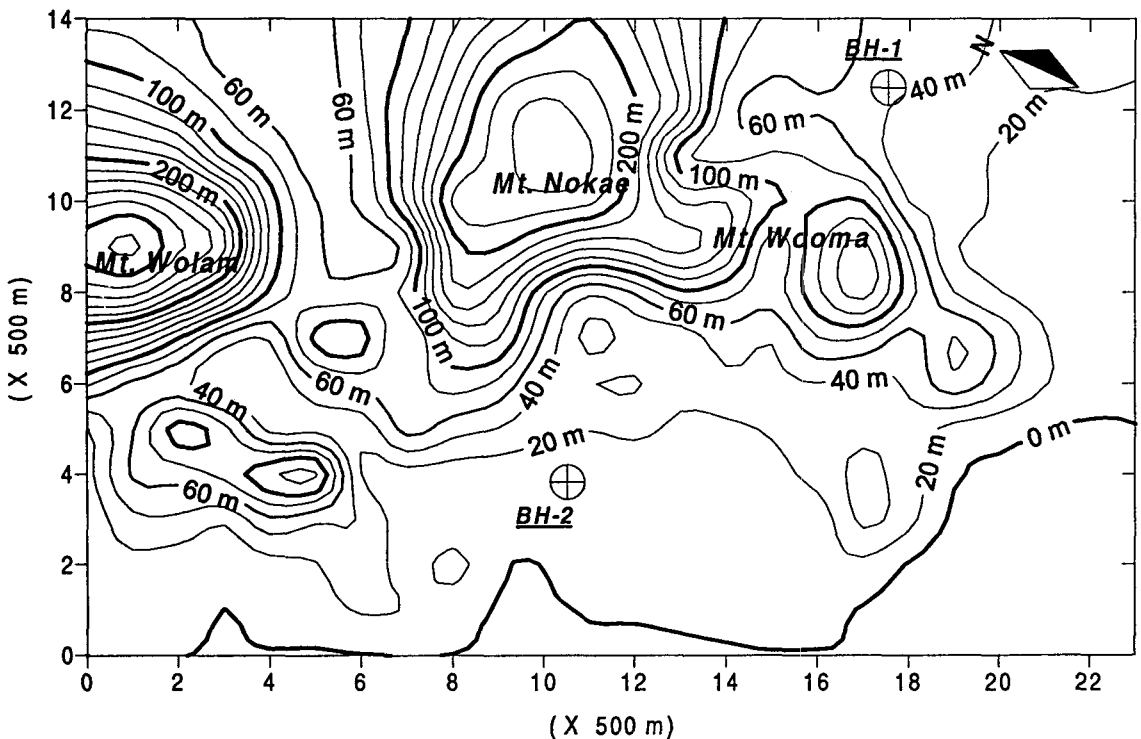


Fig. 6. Contour map of elevation using ordinary kriging.

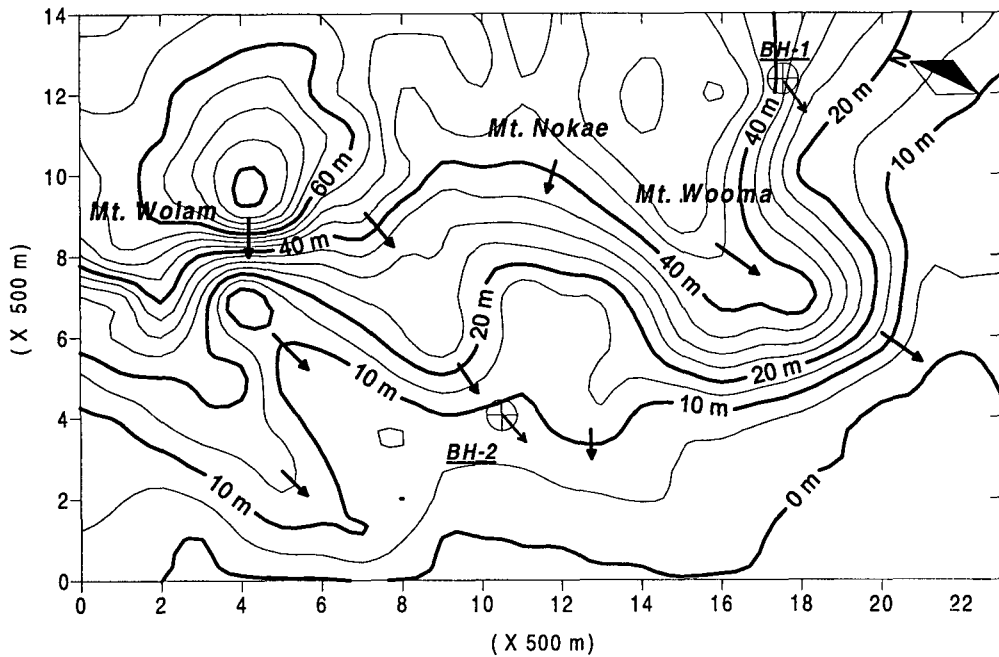


Fig. 7. Contour map of groundwater level using ordinary kriging(Arrows indicate estimated groundwater flow directions, but arrows at two boreholes indicate measured groundwater flow directions).

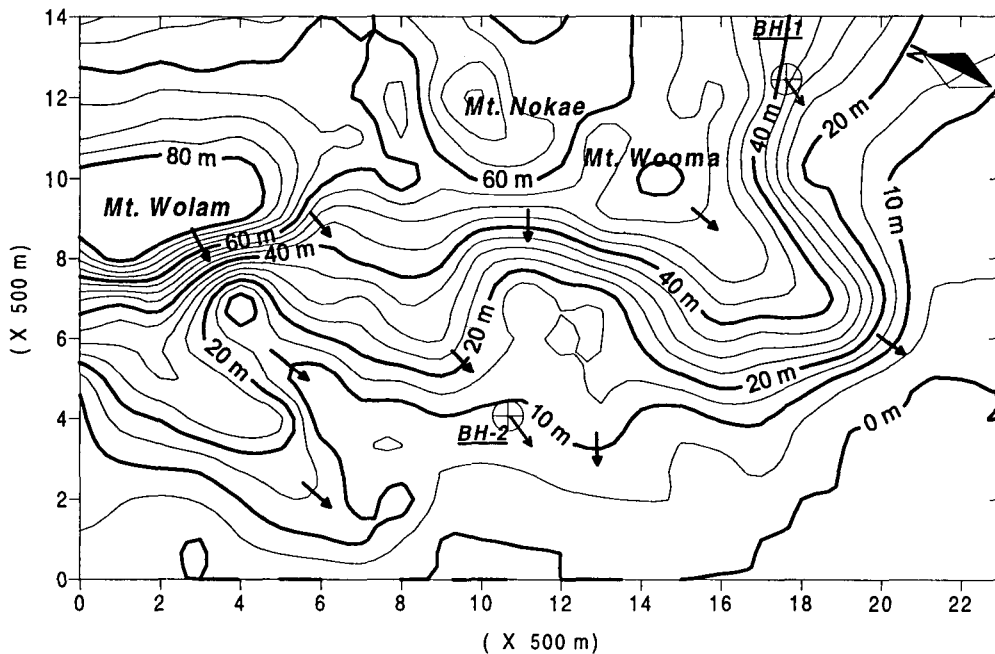


Fig. 8. Contour map of groundwater level using cokriging(Arrows indicate estimated groundwater flow directions, but arrows at two boreholes indicate measured groundwater flow directions).

를 검토해보면 크게 3가지 유동방향을 갖는다. 즉, 손불면의 북서쪽에 위치하는 월암산 일대에서 서해 쪽으로, 손불면 중앙의 노쾌산 일대에서 서해쪽으로, 그리고 우마산 일대의 구릉에서 서해쪽으로 각각 유동한다.

크리깅과 코크리깅에 의하여 작성된 지하수위 등고선도에 의하면 250m 이상의 산간지역(월암산, 노쾌산 일대)이 지하수 함양지역의 역할을 하고 있으며, 이곳에서 서해에 인접한 지역으로 지하수가 배출되고 있다. 따라서 해안에 인접한 평야지역에서는 지하수가 비교적 풍부하며, 자연지하수위도 지표면하 5m 범위 이내에 존재한다(대한광업진흥공사, 1997). 그러나 이 지역에서는 해수침입의 우려가 있기 때문에 심도가 얕은 관정의 개발이 요구되어진다.

지하수유동 측정 및 분석

지구통계학적 기법을 이용하여 만들어진 지하수위 등고선도로부터 추정된 지하수 유향의 적정성을 검토하기 위하여, 시추공내에 지하수 유동측정기를 삽입하여 공내 지하수의 유향과 유속을 측정하였다. 이용된 기기는 미국 KVA Analytical Systems (1996)에서 최근 개발한 Groundwater Flowmeter System 모델 200 GeoFlo^R이다. 이 기기는 공내 지하수의 유향과 평균유속을 동시에 측정한다. 전극에 있는 4쌍의 온도계가 열원(heat source)주위에 2개씩 짝지어져 서로 반대편에 위치하며, 열원에서 열이 발생되면 온도가 상승하는 방향으로 물이 유동한다. 유향을 설정하기 위하여 1번 온도계가 항상 자북(magnetic north)방향에 위치한다.

연구지역의 지하수 유동상태를 측정하기 위하여 2개의 시추공 BH-1과 BH-2가 개발되었다. BH-1은 해발 40m 정도의 내륙에 위치하며, BH-2는 해발 8m 정도의 해안쪽 평야에 위치한다. 2개 지점 모두 풍화대가 깊은 관계로 케이싱이 깊게 설치되어, 지하수 유동측정이 BH-1에서 2개 지점, BH-2에서 1개 지점에서만 실시되었다. 각 시추공에서 측정된 지하수유량, 유속 및 유향은 Table 4에 정리되어 있으며, 유향의 단위는 자북에서 시계방향으로 벌어진 각도(°MN)를 나타낸다.

BH-1과 BH-2에서 측정된 지하수 유향은 모두

남남서~남서서 방향으로 나타났으며, Fig. 7과 Fig. 8의 지하수위 등고선도에서 추정된 2개 시추공에서의 유향도 모두 남서방향으로 판단된다. 연구지역은 불균질·이방성 대수층으로 구성되어 있어서 지하수위 등고선도상에서 정확한 지하수 유향을 추정할 수는 없지만, 전반적으로 연구지역에서 추정된 지하수 유향은 실측된 지하수 유향과 대체적으로 일치되는 것으로 보인다. 금번 조사에서는 시험시추가 2개 지점에서만 이루어져서 크리깅을 이용한 지하수 유향과 지하수 유동측정기에 의한 유향을 여러 곳에서 비교하지는 못하였지만, 불균질 이방성·대수층에서의 지하수 유동분석에 지구통계학적 기법이 실효성을 갖는 것으로 사료된다.

Table 4. Flow velocities and directions of groundwater, and dimensions of two boreholes.

Borehole	BH-1		BH-2
Measured Depth(m)	32.0	34.5	38.6
Flow Velocity(ft/day)	1.7	2.6	1.4
Flow Direction(°MN)	215.5 (SSW)	229.0 (SWW)	205.2 (SSW)
Diameter(inch)	6		6
Casing(m)	21		32
Borehole Depth(m)	50		50
Water Level below Surface(m)	4.8		1.4
Geology	Granitic Gneiss		Granitic Gneiss

결 론

1. 전남 함평군 손불면지역에서 조사된 지하수위 평균은 14.71m, 중앙값은 6.0m이며, 조사된 표고의 평균은 34.75m, 중앙값이 12.59m이다. 따라서 이 지역의 지하수위는 평균적으로 지표면하 20m 정도이지만, 중앙값을 기준으로할 때는 지표면하 6~7m 정도이다. 손불면의 지하수위와 지형 표고자료의

회귀분석 결과 선형적인 관계가 있는 것으로 판명되어, 지하수위 등고선도 작성에 코크리깅모델의 필요성이 나타났다.

2. 베리오그램 분석결과 지형의 표고와 지하수위는 모두 구상형모델이 적합하고, 표고와 지하수위의 교차베리오그램도 구상형모델이 적합하다.

3. 정규크리깅과 코크리깅을 이용하여 작성된 지하수위 등고선도는 월암산과 노쾌산 일대의 산간지역에서 차이가 크고, 서해에 인접한 구릉이나 평지에서는 큰 차이가 없다. 표고 등고선도를 기준으로 2개의 지하수위 분포도를 비교해 보면 코크리깅에 의한 것이 정밀성이 더 큰 것으로 나타났다.

4. 정규크리깅과 코크리깅에 의해 작성된 지하수위 등고선도상에서 손불면의 지하수 유동상태를 검토해보면, 지형이 높은 산간지역에서 서해바다에 인접한 평야지역으로 지하수가 유동하고 있다. 즉, 손불면의 북서쪽에 위치하는 월암산 일대에서 서해쪽으로, 손불면 중앙의 노쾌산 일대에서 서해쪽으로, 그리고 우마산 일대의 구릉에서 서해쪽으로 각각 유동한다.

5. 해안에 인접한 평야지역에서는 지하수가 비교적 풍부하며, 지하수위도 지표면하 5m 범위 이내에 분포한다. 그러나 이 지역에서는 해수침입의 우려가 있기 때문에 심도가 얇은 관정의 개발이 요구되어진다.

6. 지하수 유동측정기에 의한 지하수 유량 측정은 과업 여건상 2개공에서 수행되었지만, 측정된 지하수공내의 유량은 정규크리깅과 코크리깅의 지하수위 등고선도에서 추정된 지하수 유량과 대체로 일치하고 있다. 따라서, 불균질 이방성·대수층에서의 지하수 유동분석에 지구통계학적 기법이 실효성을 갖는 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 대한광업진흥공사와 부경대학교기성회의 연구지원(1997년도)에 의한 연구결과이다. 연

구비를 지원해준 두 기관에 감사하며, 본 논문의 심사에서 유익한 의견을 제시한 익명의 심사자와 한국수자원공사 수자원연구소의 김형수 박사님께 감사의 말씀을 드린다. 아울러 본 연구 수행에 필요한 지하수 유동측정기를 빌려준 지오택컨설파트(주)에게도 감사한다.

참 고 문 헌

- 건설교통부, 1998, 지하수 현황분석 기법연구 보고서, 94p.
- 대한광업진흥공사, 1997, 불균질·이방성 대수층의 지하수 유동분석 기술연구, 153p.
- 장연수, 정상용, 1997, 비균질성을 고려한 해성점토 매립장의 수리전도도 추정과 오염이동 특성, 지반공학, 13, 1, 85-100.
- 정상용, 1993a, 지하수위분포 추정을 위한 Universal Kriging, 1. k 계의 고유 확률함수, 지질공학, 3, 1, 39-49.
- 정상용, 1993b, 지하수위분포 추정을 위한 Universal Kriging, 2.제한적 최대우도법, 지질공학, 3, 1, 51-61.
- 정상용, 이강근, 1995, 난지도 매립지 일대의 지하수위 분포 추정을 위한 복합크리깅의 응용, 지하수환경, 2, 2, 58-63.
- 조웅현, 박영기, 김환홍, 1994, Kriging 기법과 수치모형에 의한 이안지구 대수층의 투수량 계수, 지하수환경, 1, 2, 113-120.
- Aboufirassi, M., and Marino, M.A., 1983, Kriging of Water Levels in the Souss Aquifer, Mathematical Geology, 15, 4, 537-551.
- Aboufirassi, M., and Marino, M.A., 1984, Cokriging of Aquifer Transmissivities from Field Measurement of Transmissivity and Specific Capacity, Mathematical Geology, 16, 1, 19-35.
- Datta-Gupta, A., and Lake, L.W., and Pope, G.A., 1995, Characterizing Heterogeneous Permeable Media with Spatial Statistics and Tracer Data Using Sequential Simulated Annealing, Mathematical Geology, 27, 6, 763-788.
- Davis, B.M., 1987, Uses and Abuses of

- Cross-Validation in Geostatistics, *Mathematical Geology*, 19, 3, 241-248.
- Desbarats, A.J., 1994, Spatial Averaging of Hydraulic Conductivity Under Radial Flow Conditions, *Mathematical Geology*, 26, 1, 1-22.
- Hoeksema, R.J, Clapp, R.B., Thomas, A.L., Hunley, A.E., Farrow, N.D., and Dearstone, K.C., 1989, Cokriging Model for Estimation of Water Table Elevation, *Water Resources Research*, 25, 3, 429-438.
- Jensen, J.L., Corbett, P.W.M., Pickup, G.E., and Ringrose, P.E., 1996, Permeability Semivariograms, Geological Structure, and Flow Performance, *Mathematical Geology*, 28, 4, 419-436.
- Journel, A.G., and Huijbregts, C.H.J., 1978, *Mining Geostatistics*, Academic Press, 600p.
- Kitanidis, P.A., and Vomvoris, E.G., 1983, A Geostatistical Approach to the Inverse Problems in Groundwater Modeling (Steady State) and One-Dimensional Simulations, *Water Resources Research*, 19, 3, 677-690.
- KVA ANALYTICAL SYSTEMS, 1996, *Groundwater Flow System, Operation and Maintenance Manual, Model 200 GeoFlo^R*.
- Loaiciga, H.A., Leipnik, R.B., Hudak, P.F., and Marino, M.A., 1996, 1-, 2-, and 3-Dimensional Effective Conductivity of Aquifers, *Mathematical Geology*, 28, 5, 563-584.
- Matheron, G., 1969, *Le Krigeage Univesal*, Cah. Centre Morphol, Math. 1.
- Matheron, G., 1971, *The Theory of Regionalized Variables and Its Applications*, Cah. Centre de Geostatistique, Fontainebleau, France.
- McDonald M.G., and Harbaugh A.W., 1988, *A Modular Three-Dimensional Finite Difference Groundwater Flow Model*, Techniques of Water Resources Investigations of the United States Geological Survey.
- Myers, D.E., 1982, Matrix Formulation of Co-Kriging, *Mathematical Geology*, 14, 3, 249-257.
- Neuman, S.P., 1984, Role of Geostatistics in Subsurface Hydrology, *Geostatistics for Natural Resources Characterization, Parts 2*, edited by G. Verly et al., 287-816.
- Neuman, S.P., and Jacobson, E., 1984, Analysis of Nonintrinsic Spatial Variability by Residual Kriging with Application to Regional Groundwater Levels, *Mathematical Geology*, 16, 1, 19-35.
- Philip, R.D., and Kitanidis, P.K., 1989, Geostatistical Estimation of Hydraulic Head Gradients, *Groundwater*, 27, 6, 855-865.
- Russo, R., and Jury, W., 1987a, A Theoretical Study of the Estimation of the Correlation Scale in Spatially Variable Fields, 1. Stationary Fields, *Water Resources Research*, 23, 7, 1257-1268.
- Russo, R., and Jury, W., 1987b, A theoretical Study of the Estimation of the Correlation Scale in Spatially Variable Fields, 2. Nonstationary Fields, *Water Resources Research*, 23, 7, 1269-1279.
- Yeh, W.W-G., Yoon, Y.S., and Lee, K.S., 1983, Aquifer Parameter Identification with Kriging and Optimum Parameterization, *Water Resources Research*, 19, 1, 677-690.
- Wen, X.-H., 1994, Estimation of Statistical Parameters for Censored Lognormal Hydraulic Conductivity Measurements, *Mathematical Geology*, 26, 6, 717-732.

정상용
 부경대학교 지구환경과학부
 608-737, 부산시 남구 대연 3동 599-1
 Tel : 051-620-6235
 Fax : 051-628-6432
 e-mail : sychung@dolphin.pknu.ac.kr

유인걸, 윤명재, 권해우, 허선희

불균질·이방성 대수층의 지하수 유동분석에 지구통계기법의 응용

대한광업진흥공사 자원탐사처

156-010, 서울특별시 동작구 신대방동 686-48

Tel : 02-840-5749

Fax : 02-833-0565