

## 지구통계기법과 GIS를 이용한 연안지역 해수침투 분포 파악

최선영\* · 고와라\* · 윤왕중\*\* · 황세호\*\*\* · 강문경\*\*\*\*

### Analysis of the Distribution Pattern of Seawater Intrusion in Coastal Area using the Geostatistics and GIS

Sun-Young Choi\* · Wa-Ra Go\* · Wang-Jung Yoon\*\* · Se-Ho Hwang\*\*\* · Moon-Kyung Kang\*\*\*\*

#### 요 약

본 연구에서는 지구통계기법과 GIS를 이용하여 Cl<sup>-</sup> 농도 분포도를 작성하고 이를 통해 해수침투 분포 양상을 파악하였다. 분포도는 탐색적 공간자료 분석을 통해 자료의 분포 패턴을 파악한 후에 정규크리깅과 공동크리깅을 이용하여 작성하였다. 지구통계기법인 크리깅은 시·공간적인 자료의 분포특성과 상관관계를 이용하여 신뢰할 만한 결과를 제공한다. 공동크리깅의 이차변수는 상관분석을 통해 Cl<sup>-</sup>과의 상관성이 큰 TDS, Na<sup>+</sup>, Br<sup>-</sup>을 선정하였다. Cl<sup>-</sup> 농도 분포도를 분석한 결과 공동크리깅에 의한 분포도가 정규크리깅의 분포도보다 더욱 정밀하게 나타났으며, 전반적으로 이민촌 일대와 해안가 지역에서 높은 농도 이상대를 보이고 있음을 확인할 수 있었다.

**주요어** : 지구통계기법, 해수침투, 탐색적 공간자료 분석, 정규크리깅, 공동크리깅

**ABSTRACT** : Distribution pattern of seawater intrusion was analyzed from the spatial distribution map of chloride using the geostatistics and GIS analyses. The chloride distribution map made by kriging(ordinary kriging and co-kriging) after exploratory spatial data analysis. Kriging provides an advanced methodology which facilitates quantification of spatial features and enables spatial interpolation. TDS, Na<sup>+</sup>, Br<sup>-</sup> were selected as second parameters of co-kriging which is higher value of correlation coefficients between chloride and others

\* 전남대학교 지구시스템공학과 석사과정

\*\* 전남대학교 지구시스템공학과 교수

\*\*\* 한국지질자원연구원 지질환경재해연구부 선임연구원

\*\*\*\* 전남대학교 지구시스템공학과 박사과정

groundwater properties. Chloride concentration is highest in yeminchon and coastal area. And result in co-kriging was accurate than ordinary kriging.

**Keywords** : geostatistics, seawater intrusion, exploratory spatial data analysis, ordinary kriging, co-kriging

## 1. 서 론

현재 서-남해 연안지역에서는 대규모 간척사업으로 조성된 간척지의 염분제거 및 농업용수의 확보를 위한 무분별한 지하수 사용과 개발이 급증하고 있다. 이로 인해 내륙지하수의 염수화가 심화되면서 생활·공업·농업용수의 부족 및 농작물 수확감소 등의 피해가 증가하고 있다. 따라서 해수침투에 따른 피해 및 확산을 최소화하고 연안 지역의 지하수 취수정에 대한 체계적이고 장기적인 관리를 위해 정확한 해수침투의 분포양상을 파악할 필요가 있다.

우리나라에서는 대부분 물리탐사와 수질분석, 모니터링 등에 의하여 해수침투 조사가 이루어지고 있으나, 해수침투의 정밀한 분석을 위하여 조사에 적합한 통계적 해석은 아직 부족한 실정이다(심병완 외, 2002).

지질, 해양, 대기등의 지구과학분야에서 공간상에 분포하는 자료의 획득은 자료측정의 제한성이나 경제적인 이유로 충분한 자료를 확보할 수 없기 때문에 자료의 전반적인 공간적 분포 특성을 파악하기 위해서는 공간추정 기법을 이용하여 알려지지 않은 지점의 값을 예측해야 한다. 지구통계적 기법은 이러한 공간상 자료들의

특성을 분석하여 신뢰성 있는 정보를 예측하는 기법으로 한정된 표본자료로부터 오염물의 분포정도를 예측하거나 특정 원소의 지역적 분포특성을 분석하는 환경분야에서 많이 적용되고 있다.

지구통계적 기법 중 대표적인 기법인 크리깅(kriging)은 최적 선형 불편 추정자(best linear unbiased estimator, BLUE)로서 베리오그램(variogram)을 통해 자료의 공간적 상호관계와 연속성을 파악하여 미지의 값을 예측하는 통계학적 추정방법이다. 크리깅은 공간을 기반으로 분석이 수행되어지므로 보다 명확한 공간적 특성을 규명하기 위해서는 지리참조를 통해 실제계를 더욱 정확히 표현하고 다양한 종류의 자료를 통합·분석할 수 있는 GIS의 공간분석이 함께 이루어져야 한다. 외국에서는 GIS와 지구통계학을 연계한 연구가 활발히 진행되고 있다(Mcbrath et al., 2003; Watson et al., 2001; Zhang and McGrath, 2003; Zhu et al., 2001).

본 연구에서는 GIS의 통계적 공간분석기법을 이용하여 전라남도 영광군 백수읍 일대에서 조사된 수질분석자료의 물리·화학적 수질 분석자료 중 해수침투에 직접적인 영향을 미치는 요소에 대해 공간적 상호관계를 파악하고 이에 대해 분포도를 작성하여 공간적 변화 양상을 규명하였다.

## 2. 연구 개요 및 이론

### 2.1 연구 개요

본 연구 대상지역은 전라남도 영광군 백수읍 일대의 임해지역으로 대부분은 농지가 발달한 평야지대이고 서쪽으로는 바다와 접해 있으며 북동부와 남동부에는 최고 300m 이상인 산지 지형이 분포하고 있다. 또한 중앙부에 분포한 농지는 간척사업에 의한 것임이 탐문조사에 의해 확인되었다(한국지질자원연구원보고서, 2003). [Figure 1]은 지하수 시료를 채취한 관정의 위치를 나타낸 연구지역 지형도이다. 대부분의 관정은 40m 이하의 충적층 지하수에 해당하며 시료채취는 지하수면에서 10m 깊이에서 실시하였다(한국지질자원연구원보고서, 2003).

본 연구에서 사용된 자료는 한국지질자원연구소의 자연재해방재기술개발사업보고서의 2001~2002년간 68개의 관정에서 5회에 걸쳐 채취한 지하수 수질분석 자료로 이 중 CI에 대한 공간적 분석을 수행하였다. CI은 해수의 염분 중 가장 많은 비율(55.0%)을 차지하고 있으며, 비반응성 물질 중 하나이므로 지금까지의 해수 침투여부에 관한 추적자료 활용되어 왔다(Richter et al., 1993). 따라서 본 연구에서는 CI의 분포를 통해 해수침투의 공간적 변화 양상을 파악하였다. CI의 공간자료는 불연속적으로 존재하는 포인트 형태의 자료이므로 연속적인 변화 양상을 파악하기 위해서는 자료를 획득하지 못한 지점의 값을 예측하는 공간추정 기법을 이용

해야 한다. 본 연구에서는 지구통계학의 크리깅 기법 중 정규크리깅(ordinary kriging)과 공동크리깅(co-kriging)을 이용하여 CI의 정량적 분포도를 작성하고 이를 비교·분석하였다.

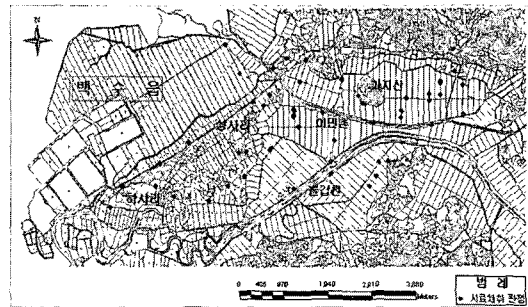


Figure 1. Geomorphic map showing groundwater sample site from the study area.

연구과정은 [Figure 2]와 같다. 시료를 채취한 관정의 위치를 공간자료로 구축하고 이에 해당하는 수질분석자료를 속성자료로 하여 공간 데이터베이스(spatial database)를 구축하였다. 크리깅을 실시하기 전에 자료의 분포패턴을 확인하기 위하여 탐색적 공간자료 분석(exploratory spatial data analysis, ESDA)을 실시하였고, 이 분석을 바탕으로 이론적 베리오그램(theoretical semivariogram)을 모델링하였다. 베리오그램 인자를 이용하여 크리깅 가중치를 결정한 다음 크리깅(kriging)을 이용하여 알려지지 않은 지점의 값을 예측하여 분포도를 작성하였다. 자료의 일반적 통계분석과 상관분석은 Microsoft Excel과 SAS 8.1을 이용하였으며, 탐색적 공간자료 분석과 지구통계기법을 이용한 분포도 작성은 ArcGIS 8.1의 Geostatistical Analyst Extension을 이용하였다.

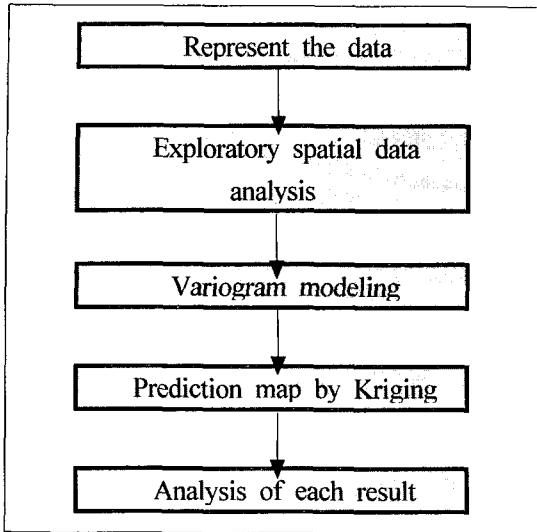


Figure 2. Flowchart of approaches for this study.

## 2.2 지구통계학

지구통계학은 공간상에 분포하는 자료 (regionalized variable)의 분포 특성과 상관 관계를 분석하여 알려지지 않은 지점에서의 값을 예측해 낼 수 있는 기법이다. 지구통계적 기법을 적용하기 위해서는 자료들간의 공간적 상호관계의 파악이 선행되어야 하고 이는 베리오그램(variogram)<sup>1)</sup>을 통해서 가능하다. 베리오그램은 일정한 거리에 있는 자료들의 유사성을 나타내는 척도로 일정거리 h만큼 떨어진 두 자료들간의 차이를 제공한 것의 기댓값으로 다음과 같이 표현한다.

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= \frac{1}{2} E[(z(x) - z(x+h))^2] \\ &= \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [z(x_i) - z(x_i+h)]^2 \end{aligned}$$

여기에서  $h$ 는 분리거리(lag distance)이며,  $n$ 은  $h$ 에 의해 분리된 자료쌍의 개수를 의미한다. 실험적 베리오그램은 각각의 분리거리에 속하는 자료쌍들의 베리오그램 값의 평균과 거리의 평균으로 도시된다. 다음으로 실험적 베리오그램을 대표할 이론적 베리오그램을 모델링한다. 이론적 베리오그램 인자는 공분산과 크리깅 가중치를 계산하는데 이용된다. 베리오그램 인자는 문턱값(sill), 상관거리(range), 모델수식, 너깃(nugget)이 있다. 문턱값은 분리거리가 증가하여 자료값들이 아무런 상관관계를 나타내지 않을 때의 반베리오그램(semi-variogram) 값을 의미한다. 상관거리는 자료들이 상관관계를 보이는 최대분리거리로 이는 분산에 해당한다. 상관거리 이상에서는 자료들간의 상관관계가 나타나지 않기 때문에 크리깅에 적용하는데 의미가 없다. 이론적으로 분리거리가 0이면 베리오그램 값은 0이 되지만 실제 실험적 베리오그램을 대표하는 이론적 베리오그램에서는 분리거리 0에서 베리오그램 값이 0이 아닌 상수 값을 나타내게 되는데 이 때의 베리오그램 값을 너깃이라 한다. 너깃이 나타나는 원인은 짧은 분리거리에서 나타나는 자료의 불확실성 때문으로 넓게 분포한 자료를 이용하여 가까운 거리에서의 자료의 특성을 찾으려는 한계로 인해 불확실성이 커진다(최종근, 2002).

크리깅은 최적선형불편추정식(best linear unbiased estimator, BLUE)으로 크리깅 추정식이 편향되지 않는 제약조건<sup>2)</sup>하에 오차

1) 정확하게 말하면 반베리오그램(semi-variogram)이지만 이 연구에서는 베리오그램(variogram)이라 지칭함.

분산을 최소로 하는 가중치를 구하고 이들 가중치를 이용하여 알려진 값들의 선형조합으로 미지의 값을 예측하는 기법이다. 크리깅과 오차분산<sup>3)</sup>을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$z_0^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i$$

$$\sigma_{SK}^2 = E[(z_0 - z_0^*)^2]$$

공동크리깅은 두 가지 이상 여러변수의 선형조합을 사용하여 주변수를 예측하는 기법이다. 공동크리깅의 일반식은 다음과 같다.

$$z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i + \sum_{j=1}^{n_s} \sum_{k=1}^{m_j} \lambda_{jk} u_j(x_{jk})$$

$z$ 는 주변수,  $n$ 은 주변수 자료의 총 개수,  $n_s$ 는 이차변수의 총 개수,  $\lambda$ 는 가중치,  $x$ 는 각 자료의 위치를 나타낸다. 이러한 공동크리깅을 사용함으로써 주변수 예측값의 불확실성을 줄일 수 있다.

### 3. 통계적 공간자료 분석

#### 3.1 Cl과 다른 요소간의 상관 분석

Cl을 주변수로 하는 공동크리깅(co-kriging)의 이차변수의 선정을 위해 Cl과 다른 수질 자료와의 상관관계를 살펴보았다. Cl과의 상관관계수가 0.9 이상인 강한 선형적 상관관계를 갖는 요소로는 EC, TDS, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>,

Mg<sup>2+</sup>, Br<sup>-</sup>으로 나타났다. 반면에 DO와 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>는 음의 상관성을 보여주고 있다 (<Table 1>). 본 연구에서 공동크리깅 이차변수는 0.9 이상의 강한 상관관계를 갖는 변수 중 TDS와 Na<sup>+</sup>, Br<sup>-</sup>을 선택하였다. TDS는 총고용물질로 물속에 녹아 있는 용존 물질이나 콜로이드 상태로 있는 물질의 총합으로 TDS의 함량에 따라 담수(fresh water), 기수(brackish water), 해수(saline water), 고염수(brine)로 분류되며 해수에서 Cl<sup>-</sup>의 평균 농도는 19,000mg/l이다. Na<sup>+</sup>은 염분에 가장 많이 함유된 양이온으로 해수 성분 중 Na<sup>+</sup>의 평균농도는 10,760mg/l이다. Br<sup>-</sup>은 Cl<sup>-</sup>과 화학적 특성이 유사하며 두 원소 모두 비반응성 물질이기 때문에 산화환원반응에 참여하지 않을 뿐만 아니라 대수층 매체에 흡착되지 않는다. 따라서 이 두 물질은 추적자로 이용된다.

Table 1. Coefficient constants of chloride and the other properties.

Component	Cl <sup>-</sup>
pH	0.06
EC	0.93
DO	-0.28
TDS	0.99
Na <sup>+</sup>	0.92
Ca <sup>2+</sup>	0.78
K <sup>+</sup>	0.90
Mg <sup>2+</sup>	0.95
Cl <sup>-</sup>	1.00
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.15
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.73
Br <sup>-</sup>	0.91
Fe <sup>3+</sup>	0.77

2) 크리깅 추정식이 편향되지 않으려면 가중치의 합이 1이 되어야 한다.

3) 오차분산은 크리깅 분산이라고도 하며, 크리깅 표준편차를 통해 예측값의 불확실성을 파악할 수 있다. 크리깅 표준편차는 실제값에 가까울수록 작다.

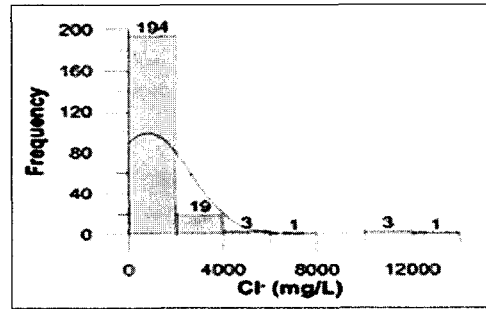
### 3.2 탐색적 공간자료 분석

탐색적 공간자료 분석(exploratory spatial data analysis, ESDA)은 자료에 크리깅(kriging) 기법을 적용하기 전에 실행하는 기본적인 통계 절차로 자료의 경험적 분포 패턴을 파악하기 위해 실시한다.

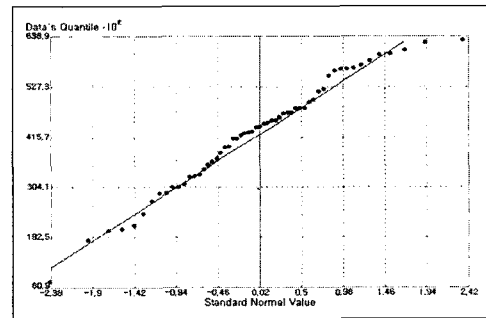
본 연구에서는 크리깅에 적용할  $Cl^-$ , TDS,  $Na^+$ ,  $Br^-$ 에 대한 히스토그램(histogram), 분위수 대조도(quantile-quantile plot, Q-Q Plot), 경향분석(trend analysis)을 실시하여 공간적 특성을 파악하였다. 대표적으로  $Cl^-$ 에 대한 탐색적 공간분석 결과를 [Figure 3]에 나타내었다.  $Cl^-$ 에 대한 히스토그램은 모두 왼쪽으로 심하게 치우친 양성왜도(positive skewness)를 가지고 있다([Figure 3(a)]). 왜도는 각각  $Cl^-$  4.4, TDS 3.8,  $Na^+$  3.5 그리고  $Br^-$  4.6으로 분포가 왼쪽으로 치우쳐 있으며,  $Br^-$ 의 경우가 가장 큰 왜도를 보이는 것으로 나타났다. 이런 값을 그대로 크리깅에 이용하게 되면 편향된 결과를 초래할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 자료를 자연대수로 변환하여 정규화시키고 그 값을 크리깅에 이용하였다. 자연대수로 변환시킨 자료의 정규화 정도를 파악하기 위해 분위수 대조도 분석을 실시하였다.

([Figure 3(b)]). 자연에서 연계 되는 지구물리학적 자료는 지질구조나 층서구조의 영향으로 일정한 방향성을 나타내는 경우가 있다.(최중근, 2002). 각 자료의 방향성을 평가하기 위해 경향분석을 실시하였다([Figure 3(c)]).  $Cl^-$ , TDS,  $Na^+$ 은 North-South 방향과 West-East 방향에서 뚜렷한 2차 곡선의 경향을 보이고 있다. 반면  $Br^-$ 의 경우에는 경향선은 기울기가 거의 0에 가까워 자료가

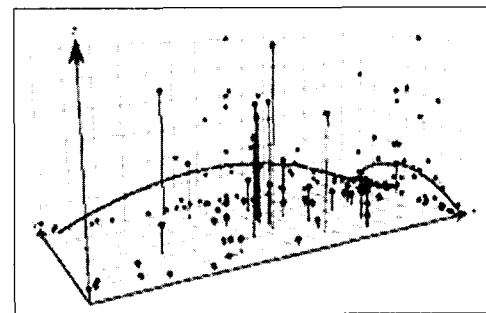
North-South 방향으로는 경향을 보이지 않았으며, North-West와 South-East 방향에서 뚜렷한 2차 곡선 경향을 보였다. 이러한 경향 분석을 통해 자료의 이방성을 확인하고 그 경향을 제거한 뒤 크리깅을 실시하였다.



(a) Histogram



(b) Q-Q Plot



(c) Trend Analysis

[Figure 3] Exploratory spatial data analysis of chloride.

Table 2. General statistics of the principal properties for seawater intrusion.

	N	Range	Mean	Median	Std. Dev	Skewness	Kurtosis
Cl-	244	18~12,689	782.8	143.5	1707.1	4.4	22.8
TDS	221	78~22,118	1,925	776	3,174	3.8	16.8
Na+	244	7.2~5,600	478.4	96	940	3.5	12.9
Br-	244	0~69.5	3.8	0.497	9.6	4.6	23.7

#### 4. 해수침투 분포 파악

크리깅을 실시하기 전 자료들의 공간적 구조를 파악하고 크리깅 가중치를 구하기 위한 입력변수를 얻기 위해 이론적 베리오그램(theoretical variogram)을 모델링하였다. 공동크리깅의 경우 1개의 주변수(Cl-)와 3개의 이차변수(TDS, Na+, Br-)에 대한 각각의 이론적 베리오그램을 모델링해야 한다. Cl-에 대한 이론적 베리오그램은 [Figure 4]와 같다. Cl-의 이론적 베리오그램의 모델은 구형모델(spherical model)을 사용하였고, 이를 실험적 베리오그램에 적용하여 모델링한 결과 문턱값(sill)은 0.846, 상관거리(range)는 1075, 너깃(nugget)은 0.551이 되고([Figure 4]), 구형모델 수식은 다음과 같다.

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 \left[ 1.5 \left( \frac{h}{a} \right) - 0.5 \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right], & \text{for } h \leq a \\ C_0, & \text{for } h > a \end{cases}$$

$C_0$ : 문턱값,  $a$ : 상관거리,  $h$ : 분리거리

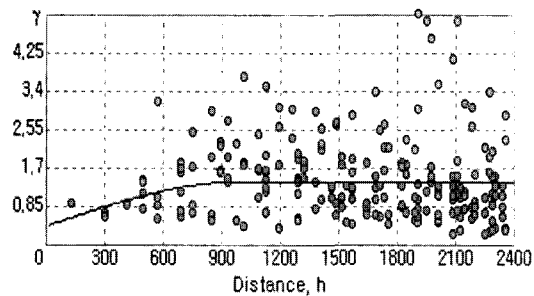


Figure 4. The empirical variogram of chloride.

TDS, Na+, Br-에 대한 베리오그램 모델과 인자는 <Table 3>에 나타내었다. 이렇게 이론적 베리오그램에 구한 인자와 수식은 크리깅 가중치를 계산하는데 사용된다.

Table 3. The empirical variogram model and parameters.

Component	Model	Nugget	Partial Sill	Range
Cl-	Spherical	0.55	0.84	1075.0
TDS	Spherical	0.39	0.32	1416.4
Na+	Spherical	0.70	0.75	1182.4
Br-	Spherical	0.94	1.36	1217.2

공동크리깅을 이용하여  $Cl^-$ 을 주변수로 하고 TDS,  $Na^+$ ,  $Br^-$ 을 이차변수로 정하여  $Cl^-$ 의 분포도를 작성하고 이를 정규크리깅을 이용하여 작성한  $Cl^-$  분포도와 비교하였다. 공동크리깅은 정보를 추가적으로 이용하여 주변수를 예측함으로써 불확실성을 줄이고, 더욱 정밀한 예측을 할 수 있다. 교차검증(cross validation)<sup>4)</sup>을 통해 정규크리깅과 공동크리깅의 타당성 검증을 하였다(Figure 7). [Figure 7]의 X축은 본래의  $Cl^-$ (참값)이고 Y축은 교차검증을 통해 얻어진 값(예측값)이다. 두 크리깅에 대한 교차검증 결과 참값이 작은 부분에서는 주어진 자료의 참값과 예측값이 기울기가 1인 직선의 양편에 고르게 존재하지만 참값이 높은 부분에서는 예측값이 낮게 나타남을 확인할 수 있다. 그리고 공동크리깅의 회귀선 기울기(0.71)가 정규크리깅의 회귀선 기울기(0.41)보다 1에 더

가깝다는 사실을 통해 공동크리깅에 의한 예측이 더욱 정밀하다고 할 수 있으며, 두 분포도에서도 이를 확인할 수 있다 ([Figure 5],[Figure 6]).

두 분포도는 전반적으로 연구지역의 중앙부인 이민촌 일대와 서해와 접해 있는 지역에서 높은 이상분포를 보이고 있다. 일반적으로  $Cl^-$ 의 농도가  $1,000mg/l$  이상인 경우 염수(saline water)로 분류되며, 이민촌 일대 관정과 서해 인접 평야지대 관정의  $Cl^-$  농도는 대부분이  $1,000mg/l$  이상인 것으로 나타났다. 특히 이민촌 일대 관정 중 일부는  $5,000mg/l$  이상의 높은 값을 보이고 있다. 이민촌 일대는 내륙지역이기 때문에 해수의 직접적인 영향이라기보다는 간접적인 영향, 즉 간척사업에 의해 이미 존재하고 있는 해수 성분과 지하수의 반응에 의해 염수화가 진행된 것으로 사료된다.

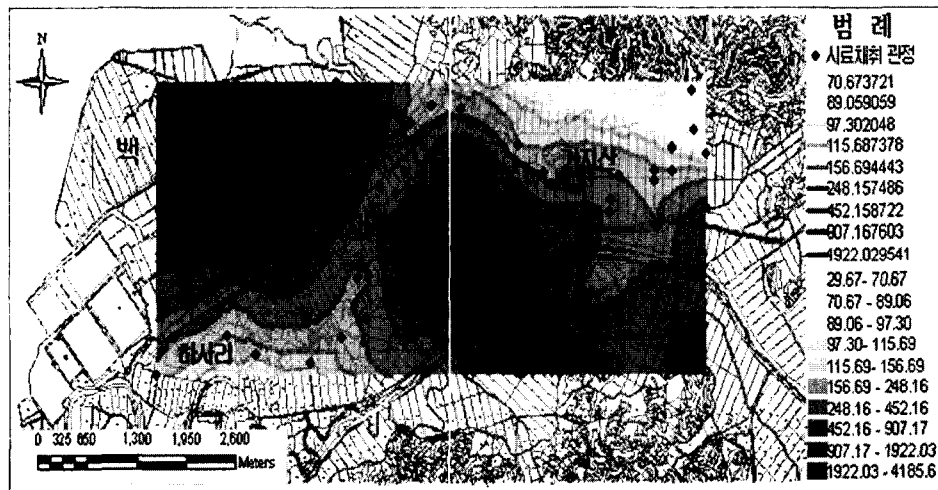


Figure 5. Prediction map of the chloride using ordinary kriging.

4) 교차검증은 크리깅을 통하여 예측된 자료만을 이용하여 역으로 본래의 값을 예측함으로써 크리깅 방법의 타당성을 검증하는 기술이다.



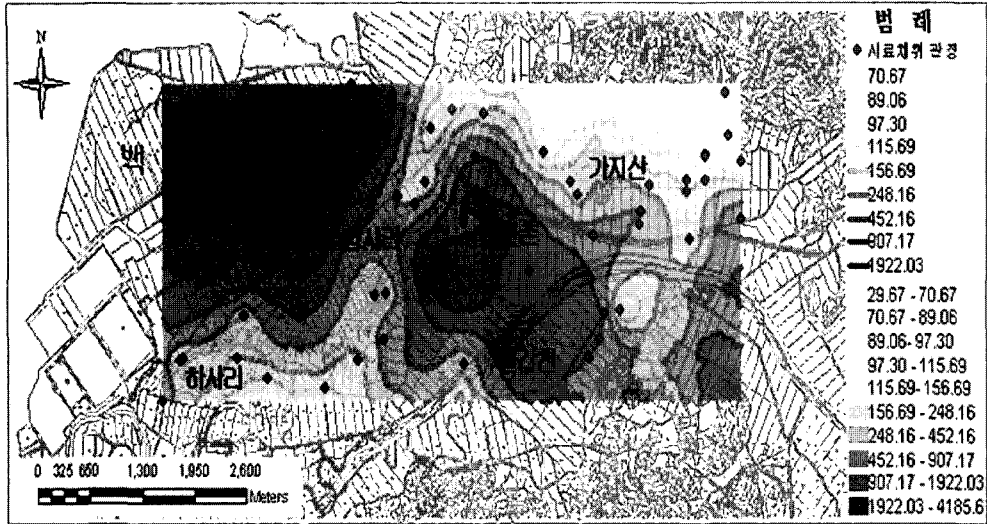


Figure 6. Prediction map of the chloride using co-kriging.

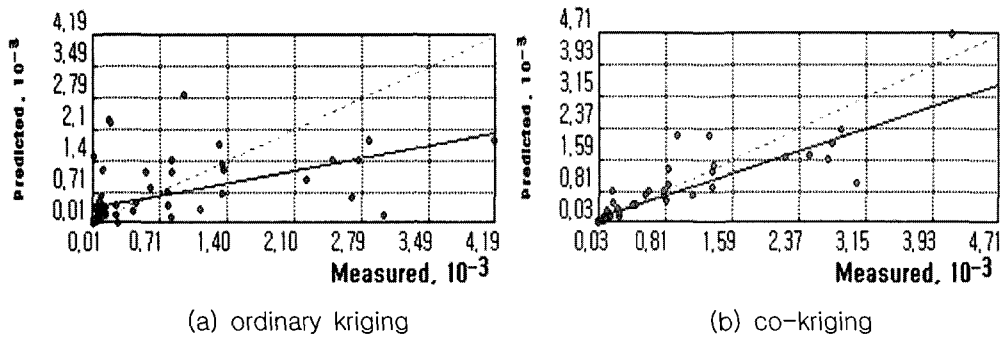


Figure 7. Cross validation for a results of ordinary kriging and co-kriging.

## 5. 결 론

지구통계적 기법은 공간자료에 대한 분석기법이기에 때문에 지리참조를 통해 실세계를 더욱 정확히 표현할 수 있는 GIS와 연계될 경우 분석적 우위성을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 보다 정확한 해수침투

분포를 파악하기 위하여 크리깅과 GIS를 이용하여 CI의 공간적 분포도를 작성하였다. 크리깅은 자료간의 공간적 상호관계를 기반으로 미지의 값을 예측하는 기법이므로 크리깅을 실시하기 전에 탐색적 공간분석을 실시하여 각각의 경험적 분포 패턴을 파악하였다. 히스토그램 분석 결과 모두 왜도를 나타내고 있으며 이를 그

대로 사용하였을 경우 왜곡된 크리깅 결과를 도출할 수 있기 때문에 자연대수로 변환하였다. 또한 경향분석을 통해 자료가 지닌 일정 방향의 경향성을 확인하여 크리깅을 실시하기 전 이를 제거하였다. 또한  $Cl^-$  농도 분포도의 정밀성을 높이기 위해 주변수를  $Cl^-$ 로 하고 이차변수를 TDS,  $Na^+$ ,  $Br^-$ 으로 하여 공동크리깅을 실시하였다. 그 결과 정규크리깅과 공동크리깅을 통해 작성된  $Cl^-$  농도 분포도는 거의 비슷한 양상을 보이지만 교차검증을 통해서 공동크리깅을 이용한 분포도가 더욱 정밀하게 나타남을 확인할 수 있었다.  $Cl^-$  농도는 해안 인접지역과 연구 중앙부인 이민촌 일대에서 높게 나타났다. 이민촌 일대는 바다와 접해 있지 않기 때문에 현재 직접적인 해수영향을 받고 있다기보다는 간척사업으로 축적층에 잔존한 해양성 퇴적물에 의한 영향으로 사료된다.

GIS를 기반으로 크리깅을 이용하여 작성된 분포도는 지하수 관정개발 및 관리의 기본 자료로 활용할 수 있으며 더욱 정확한 해수침투 분포 파악 및 특성규명을 위해서는 투수계수분포 파악과 지질특성 및 지구물리탐사 자료와의 통합적 분석이 함께 이루어져야 할 것이다.

## 참고문헌

심병완, 정상용, 김희준, 성익환, 김병우, 2002, 지구물리탐사자료의 지구통계학적 분석에 의한 부산 동남해안 지역의 해수 침투 특성, 한국지하수토양환경학회지, Vol.7, No.3, pp. 3-17.  
 최종근, 2002, 공간정보 모델링: 크리깅과 최적

화 기법, 구미서관.  
 한국지질자원연구원, 2003, 해수침투 평가, 예측 및 방지기술 개발, 한국지질자원연구원, 자연재해방재기술개발사업 연구보고서.  
 McGrath, D., Zhang, C. and Carton, O.T., 2003, Geostatistical analyses and hazard assessment on soil lead in Silvermines area, Ireland, Environmental Pollution, 127, pp 239-248.  
 Rechter, B.C., and Kreitler, C.W., 1993, Geochemical Techniques for Identifying Sources of Ground-Water Salinization. CRC Press, Inc, p 258.  
 Watson, W. D., Ruppert, L. F., Bragg, L. J. and Tewalt, S. J., 2001, A geostatistical approach to predicting sulfur content in the Pittsburgh coal bed, International Journal of Coal Geology, 48, pp 1-22.  
 Zhang, C. and McGrath, D., 2003, Geostatistical and GIS analyses on soil organic carbon concentrations in grassland of southeastern Ireland from two different periods, Geoderma, pp 1-15.  
 Zhu, H. C., Charlet, J. M. and Poffijn, A., 2001, Radon risk mapping in southern Belgium: an application of geostatistical and GIS techniques, The science of the Total Environment, 272, pp 203-210.