

## 울산도시지역의 지하수 수질특성에 관한 연구

# A Study on Characteristics of Groundwater Qualities at the Ulsan Metropolitan City

김병운, 정상용, 조병욱\*, 윤 옥\*, 성익환\*, 심병완\*

부경대학교 환경지질학과, 한국지질자원연구원 지하수지열연구부\*  
(e-mail: k\_bw00@hotmail.com, chungsy@pknu.ac.kr)

### <요약문>

울산지역 수질특성에 관하여 연구하기 위해 228개 지점에서 수질성분 25개 항목을 분석하였다. 그 성분중 지하수 음용수 9개 수질성분(pH, EC, TDS, Cl, Mn, NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, F, Fe)에 관해 수질분포특성 및 오염도를 나타내기 위해 모수적 통계기법인 정규크리깅과 비모수적 통계기법인 지시크리깅 기법을 적용하였다. OK와 IK의 성분별 베리오그램 분석한 결과 OK의 경우 모든 수질성분은 구상형모델(Spherical model)로 선정되었으며, IK의 경우 pH, TDS, SO<sub>4</sub>, Cl, Mn, F, Fe 성분은 구상형모델로, EC는 지수형모델로, NO<sub>3</sub>는 선형모델로 선정되었다.

그 결과 정규크리깅의 경우 연구지역의 수질특성을 정량적 분포특성이 잘 나타났다. 특히 태화강, 인접한 남구일원과 중구일원, 북구의 북서 일원 그리고 동구의 방어동일원에서 수질성분 9개 성분들이 다소 높게 나타났다. 특히 EC, TDS 그리고 Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub> 성분이 높게 나타났다. 그리고 지시크리깅의 경우 정규크리깅과 비교하여 이상치가 크게 영향을 미칠 수 있는 통계학적인 오류를 보완하여 분석한 결과 울산지역 9개 성분 오염도는 EC>TDS>NO<sub>3</sub>>pH>Fe>Mn>Cl>SO<sub>4</sub>>F 순으로 오염특성이 나타났다.

주요어 : 정규크리깅, 지시크리깅, 지하수 수질, 등치선도, 오염도.

## 1. 서론

도시지역의 경우 산업화의 발달로 다양한 토지이용에 따른 오염원이 점진적으로 증가하며, 도시화는 지하수 충전율과 충전 메커니즘에 큰 변화를 야기하기 때문에 다양한 오염원이 대수층내로 유입되게 된다. 따라서 울산지역의 수질특성을 파악하기 위해 2002년에서 2003년에 걸쳐 228개 지점에서 수질성분 25개 항목을 분석하였다. 그 성분 중 지하수 음용수 9개 성분(pH, EC, TDS, Mn, Cl, NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, F, Fe)에 관해 수질특성분포 및 오염분포특성에 관해 모수적 통계기법인 정규크리깅과 비모수적 기법인 지시크리깅 분석을 실시하였다. 정규크리깅의 경우 모집단의 정규분포 가정이 만족되는 경우에는 좋은 추정치를 구할 수 있으나(정상용, 1999), 모집단의 분포가 정규분포와 다른 왜곡된 분포를 갖는 경우에는 오류를 범할 확률이 높다. 따라서 이러한 단점을 줄이기 위해 비모수적 통계기법인 지시크리깅을 이용하여 수질자료의 추정치를 구하였다. OK와 IK의 수질자료 측정 위치에 따라 특정지점의 이상치

(outlier)에 의한 영향성이 매우 크게 나타날 수 있으므로 적합한 값들을 적용하여 상호보완적인 분석을 하였다.

## 2. 본 론

### 2.1. 정규크리깅(OK)과 지시크리깅(IK) 이론

정규크리깅의 기본적 전제조건은 변수들의 공간적 특성이 베리오그램에 의해 정의된 것이다(Journel, 1978). 베리오그램  $r(h)$ 은 확률변수  $z(x)$ 의 이산된 자료 값들인  $z(x_i)$ 와 같다.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [I(x_i + h) - z(x_i)]^2$$

지시크리깅 과정에서 오염농도  $z(x)$ 값이 지시 코드인  $I(x, z_c)$ 가 처음으로 변환되었다(Kai-Wei Juang and Dar-Yuan Lee, 1998). 여기서  $z_c$ (threshold 값)는:

$$I(x, z_c) = \begin{cases} 1, & \text{if } z(x) \leq z_c \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

지시크리깅 반베리오그램은 변형된 자료를 이용한 농도  $c$ 에 의해 계산된 것이다. 식(1)에서,  $z(x) \leq z_c$ 는  $x$ 지점이 "safe"를 의미하며,  $z(x) > z_c$ 는  $x$ 지점이 "harzadrous"를 의미한다. 따라서 공간적 구조는 반베리오그램에 의해 식(2)와 같다.

$$\gamma_1(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [I(x_i + h, z_c) - i(x_i, z_c)]^2 \quad (2)$$

여기서  $r_1(h)$ 는 지시코드의 반베리오그램이며,  $N(h)$ 는 거리간격  $h$ 에서  $I(x, z_c)$ 의 자료쌍들이다. 비샘플된 지점  $x_0$ 에서  $z(x) \leq z_c$ 의 조건 확률을 추정하기 위해 사용된 선형 추정자는 식(3)과 같다.

$$\text{Prob}^* [z(x_0) \leq z_c | (n), I_0] = \sum \lambda_i (I(x_i, z_c)) + (1 - \sum \lambda_i) I_0 \quad (3)$$

여기서  $\lambda_i$ 은 샘플위치  $x_i$ 의  $I(x, z_c)$ 와 관련한 가중치,  $(n)$ 은 지시코드  $I(x, z_c)$ 로 구성된 정보 셀(set)이며, 여기서  $i$ 는 1, 2, ...,  $n$ , 그리고  $I_0$  지시코드들의 안전평균이다.

### 2.2. 베리오그램 분석

각 수질성분별 자료들에 대한 일반통계분석을 이용한 결과 정규분포를 이루기 위해 대수변환(log normal transform)과 루트변환(Square root transform)을 하여 이론상의 정규분포함수에 가장 가깝게 접근하여 분석하였다.

정규크리깅은 수질특성 분포도를 작성하였으며, 단일지시크리깅은 각 수질성분별 제한 값을 음용수 기준치로 적용하여 "safe"를 0으로 "harzadrous"를 1으로, 자료값들을 [0, 1]사이의 값으로 변환하여 오염분포도를 작성하였다(M. Van Meirvenne, 2001). 여기서 pH는 5.8~8.5 사이의 값, EC는 일반수 50~500mg/l인 500mg/l, TDS는 500mg/l(미국 EPA 기준치), NO<sub>3</sub>은 10mg/l, SO<sub>4</sub>은 200mg/l, Cl은 250mg/l, Mn은 0.3mg/l, F는 1.5mg/l, Fe는 0.3mg/l의 값이 주어졌다.

OK와 IK의 성분별 베리오그램 분석을 실시하였으며, 그 결과 OK의 경우 모든 수질성분은 구상형모델(Spherical model)로 선정되었으며, IK의 경우 pH, TDS, SO<sub>4</sub>, Cl, Mn, F, Fe 성분은 구상형모델로, EC는 지수형모델로, NO<sub>3</sub>는 선형모델로 선정되었다.

### 2.3. 수질성분별 분포도와 오염분포도

OK와 IK 분석으로 선정된 베리오그램 모델을 적용하여 각 성분별 추정치를 이용하여 작성된 수질 분포도와 오염분포도가 모사되었다. Fig. 1의 pH는 대체적으로 6.5~7.4 범위를 보이며, Fig. 2의 오염분포도는 중구 1개 지점, 북구 6개 지점, 동구 2개 지점에서 오염이 나타났다. Fig. 3의 EC는 태화강과 인접한 남구일원에서 500~31,000 $\mu\text{m}/\text{cm}$ , 중구, 북구 그리고 동구에서 500~790 $\mu\text{m}/\text{cm}$ 로, Fig. 4의 오염 분포도는 남구일원, 북구(북-서), 동구의 방어동과 학성동일대 오염이 나타났다.

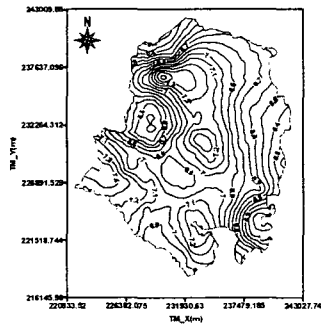


Fig. 1. Isopleth map of pH.

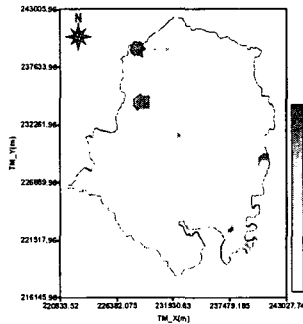


Fig. 2. Pollution level of pH.

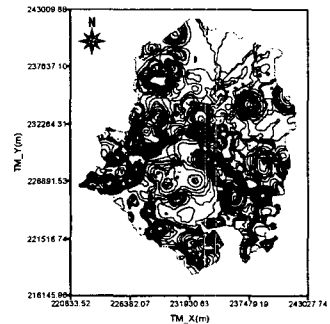


Fig. 3. Isopleth map of EC.

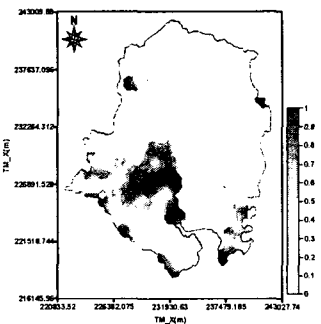


Fig. 4. Pollution level of EC.

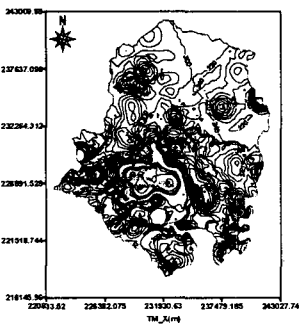


Fig. 5. Isopleth map of TDS.

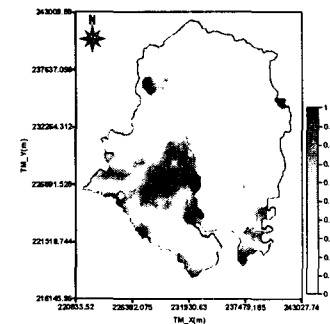


Fig. 6. Pollution level of TDS.

Fig. 5와 6의 TDS는 EC와 선형적인 상관성을 가지고 있기 때문에 EC와 유사한 분포특성을 보였다. Fig. 7의  $\text{NO}_3$ 는 국부적으로 남구일원에서 20~98mg/l, 북구 15~72mg/l, 동구 18~56mg/l로 나타났으며, Fig. 8의 오염분포도는 대체적으로 광범위하게 타나났다. Fig. 9의  $\text{SO}_4$ 는 50mg/l 이하의 분포특성이 나타났으며, Fig. 10의 오염분포도에서 남구 4개 지점과 북구 1개 지점, 동구 1개 지점에서 오염이 나타났다. Fig. 11의 Cl은 남구일원에서 120~350mg/l 사이의 국부적인 범위로, 중구는 15~60mg/l, 북구는 12~25mg/l, 동구는 20~60mg/l로 나타났으며, Fig. 12의 오염분포도에서는 남구 5개 지점, 중구 1개 지점, 북구 1개 지점에서 오염이 나타났다.

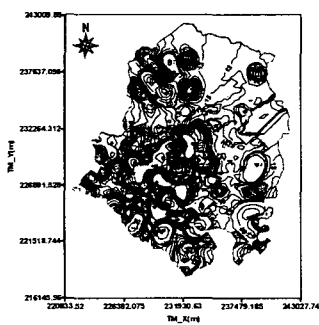


Fig. 7. Isopleth map of  $\text{NO}_3$ .

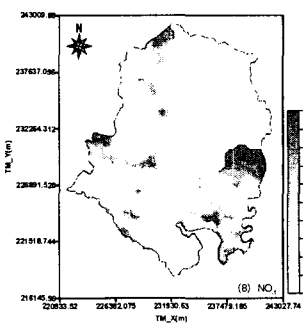


Fig. 8. Pollution level of  $\text{NO}_3$ .

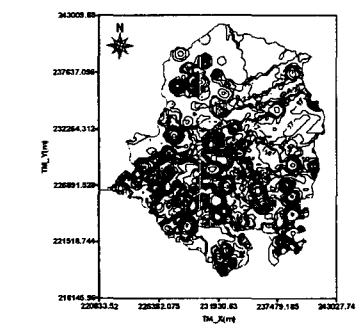


Fig. 9. Isopleth map of  $\text{SO}_4$ .

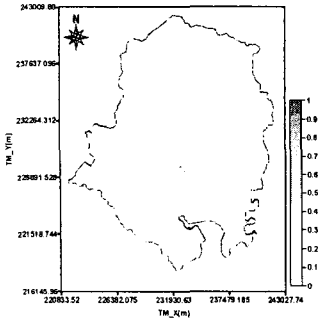


Fig. 10. Pollution level of SO4.

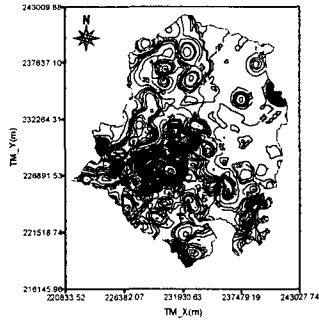


Fig. 11. Isopleth map of Cl .

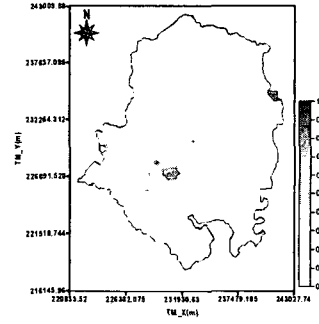


Fig. 12. Pollution level of Cl.

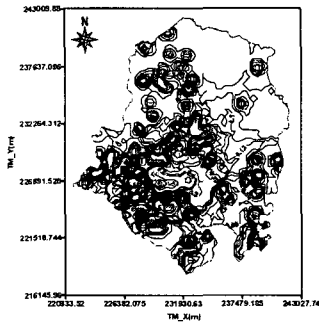


Fig. 13. Isopleth map of Mn.

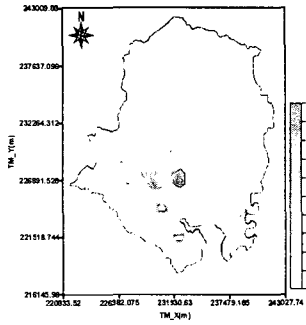


Fig. 14. Pollution level of Mn.

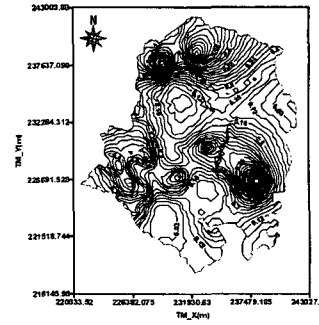


Fig. 15. Isopleth map of F.

Fig. 13의 Mn은 남구일원에서 0.3~9.4mg/l, 그 외 지역에서 0.01~2mg/l 이하의 분포특성이 나타났으며, Fig. 14의 오염분포도에서 남구일원의 넓은 지점을 포함한 5개 지점, 중구 1개 지점, 북구 1개 지점, 동구 1개 지점에서 오염이 나타났다. Fig. 15의 F는 남구 0.12~0.24mg/l, 중구 0.2~0.38mg/l, 북구 0.08~0.6mg/l, 동구 0.18~0.45mg/l로 나타났으며, Fig. 16의 오염분포도에서는 중구 1개 지점, 북구 2개 지점, 동구 1개 지점에서 오염이 나타났다. Fig. 17의 Fe는 남구일원 0.5~3.5mg/l, 중구 0.1~0.65mg/l, 북구 0.12~0.25mg/l, 동구 0.6~0.7mg/l로 나타났으며, Fig. 18의 오염분포도에서는 남구의 광범위한 지점을 비롯한 5개 지점, 중구 4개 지점, 북구 3개 지점, 동구 4개 지점에서 오염이 나타났다.

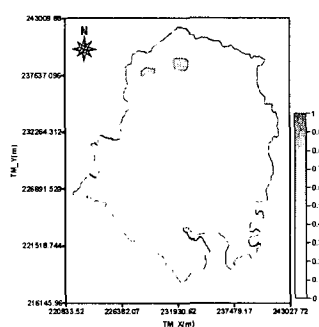


Fig. 16. Pollution level of F.

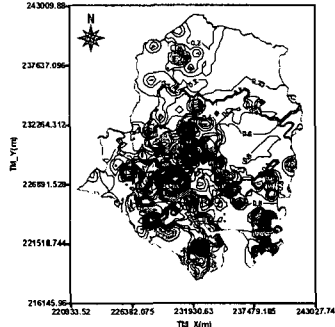


Fig. 17. Isopleth map of Fe.

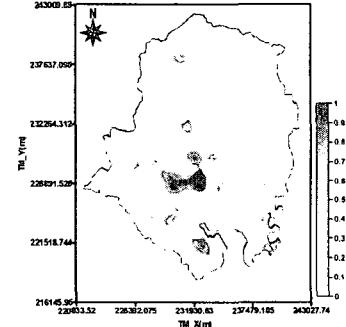


Fig. 18. Pollution level of Fe.

### 3. 결론

각 수질성분(pH, EC, TDS, Cl, Mn, NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, F, Fe)에 대하여 모수적 통계기법인 정규크리깅과 비모수적 통계기법인 지시크리깅 기법을 적용하였다. 정규크리깅의 경우 연구지역의 수질특성을 정량적

분포특성이 잘 나타났다. 특히 태화강, 인접한 남구일원과 중구일원, 북구의 경우 북서 일원 그리고 동구의 방어동일원에서 수질성분 9개 성분들이 다소 높게 나타났다. 그리고 도심지 생활하수에 기인하는 NO<sub>3</sub> 성분은 오염이 증가함에 따라 NO<sub>3</sub> 성분이 증가하는 것으로 판단되었다. 태화강과 인접한 남구일원의 경우 pH, F 그리고 NO<sub>3</sub> 성분을 제외한 6개 수질성분에서 다른 지역에 비해 다소 수질성분들이 높게 나타났다. 특히 EC, TDS 그리고 Cl-성분 함량이 매우 높게 나타났으며, 그러한 원인은 해수침입에 의한 현상과 과거 이 지역에 일어났던 해수침입 또는 충적층에 있던 울산 제4기 해성점토층 및 잔류해수(Residual saltwater)에 따른 영향으로 판단된다. 그리고 지시크리깅의 경우 정구크리깅과 비교하여 이상치가 크게 영향을 미칠 수 있는 통계학적인 오류를 보완하여 분석한 결과 울산지역 9개 성분 오염도는 EC≥TDS>NO<sub>3</sub>>pH>Fe>Mn>Cl>SO<sub>4</sub>>F 순으로 오염특성이 나타났다.

## 참고문헌

- 정상용, 유인걸, 윤명재, 권해우, 허선희, 1999, 불균질·이방성 대수층의 지하수 유동분석에 지구 통계기법의 응용, 지질공학회지, 9(2), p.147-159.
- Isaaks, E.H., Srivastava, R.M., 1989. Applied Geostatistics. Oxford Univ. Press, New York.
- O. Marinoni, 2003, Improving geological models using a combined ordinary-indicator kriging approach, Engineering Geology, 69, p.37~45.
- M. Van Meirvenne, P. Goovaerts, 2001, Evaluating the probability of exceeding a sitespecific soil cadmium contamination threshold, Geoderma 102, p.75~100.