

## 부산지역 지하수 오염현황 분석을 위한 지구통계 기법의 응용

### Application of Geostatistical Methods for the Analysis of Groundwater Contamination in Pusan

정 상 용 (Sang Yong Chung)  
강 동 환 (Dong Hwan Kang)  
박 희 영 (Hee Young Park)  
심 병 완 (Byoung Wan Shim)

부경대학교 환경지질학과  
부경대학교 환경지질학과  
부경대학교 환경지질학과  
부경대학교 환경지질학과

#### 요약 / ABSTRACT

본 연구에서는 부산 지하수의 오염현황과 그 특성을 파악하기 위하여, pH, TS, KMnO<sub>4</sub>소비량, Cl, SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>-N 등에 대한 지구통계학적 분석을 실시하였다. 각 성분의 평균치는 pH가 7.2, TS는 336.4mg/l, KMnO<sub>4</sub> 소비량은 2.3mg/l, Cl은 44.3mg/l, SO<sub>4</sub>는 36.0mg/l, NO<sub>3</sub>-N은 4.6mg/l이다. pH의 음용수 기준치 초과 비율은 0.34%, TS는 2.27%, KMnO<sub>4</sub>소비량은 1.55%, Cl은 1.59%, SO<sub>4</sub>는 0.57%, 그리고 NO<sub>3</sub>-N은 3.7%이다. 따라서 성분별로 비교해 볼 때, pH의 음용수 기준치 초과비율이 가장 적고, NO<sub>3</sub>-N의 초과비율이 가장 크다. NO<sub>3</sub>-N이 가장 큰 이유는 부산지역이 도심지이기 때문에 생활하수나 자동차 배기가스에 의해 지하수가 많이 오염되어 있기 때문이다. 지구통계학적 분석기법인 정규크리깅을 이용하여 작성된 각 성분들의 등치선도 분석결과 오염에 관련된 높은 값들은 대부분 내륙에서 나타나고 있으며, 해안가에서는 일부 지역에서 산발적으로 나타나고 있다. 해수 침입과 직접 관련된 Cl 및 SO<sub>4</sub> 이온의 등치선도에서도 해안가의 특정 지점에서만 국부적으로 높은 값을 보여주고 있다. 또한 Cl 및 SO<sub>4</sub> 이온의 등치선도상에서 부산에 발달된 2개의 단층대(일광단층, 동래단층)와 관련된 방향성을 검토한 결과 특별한 연관성을 찾을 수 없었다. 따라서 부산지역이 해안가에 위치하고 있지만 지질특성상 전 해안선에 걸쳐 해수침입이 내륙쪽으로 깊이 발생되고 있지 않은 것으로 보인다. 부산지하수 오염의 주 원인은 해수에 의한 영향보다는 내륙에서 생활하수나 기타원인(자동차 배기가스, 오염된 하천수, 공장폐수, 폐기물 매립지의 침출수 등)에 의한 오염이 훨씬 큰 것으로 판단된다.

주요어: 지하수 오염, 음용수 기준치, 지구통계학적 분석, 정규크리깅, 등치선도, 지하수 오염원

The geostatistical analyses for the chemical components of pH, TS, KMnO<sub>4</sub> Demand, Cl, SO<sub>4</sub> and NO<sub>3</sub>-N are carried out to understand the groundwater contamination in Pusan. The average values of each component are 7.2 for pH, 336.4mg/l for TS, 2.3mg/l for KMnO<sub>4</sub> Demand, 44.3mg/l for Cl, 36.0mg/l for SO<sub>4</sub>, and 4.6mg/l for NO<sub>3</sub>-N. The ratios over the drinking standard of each component are 0.34% for pH, 2.27% for TS, 1.55% for KMnO<sub>4</sub> Demand, 1.59% for Cl, 0.57% for SO<sub>4</sub>, and 3.7% for NO<sub>3</sub>-N. The highest ratio of NO<sub>3</sub>-N results from the municipal sewage and exhaust gas of vehicles. The isopleth maps of 6 chemical components show that the high values of groundwater contamination come from the inland of Pusan, and that some high values appear at the coastal area. The isopleth maps of Cl and SO<sub>4</sub> related with seawater intrusion also show that the high values appear only at the particular coastal area, not at the whole area. On the isopleth maps of Cl and SO<sub>4</sub>, the anomalies of the concentration contours were compared with the directions of two large fault zones, the Ilkwang Fault and the Dongrae Fault. Apparently, they don't have the particular correlation. Therefore, it is concluded that the main source of groundwater contamination in Pusan is not the seawater, but the municipal sewage and other sources such as the exhaust gas of vehicles, the contaminated surface water, the waste water of factories, and the leachate of waste landfills.

**Key Words** : groundwater contamination, drinking standard of groundwater, geostatistical analysis, isopleth map, source of groundwater contamination

## 서 론

최근 들어 우리나라의 지하수 이용량은 지표수에 비하여 상대적으로 계속 증가하고 있다. 경제성장에 따른 생활용수, 공업용수 등의 사용량 증가뿐만 아니라, 농업용수에도 지하수가 많이 이용되고 있다. 지하수의 이용량이 급증함과 동시에, 여러가지 원인(생활하수, 자동차 배기가스, 공장폐수, 폐기물 매립장의 침출수 등)에 의한 지하수 오염도 계속 증가되고 있는 실정이다.

지하수 오염의 지역적인 현황과 특성을 파악하기 위해서는, 각 오염성분의 농도분포도(isopleth map of concentration)의 작성이 필수적이다. 특히 1 : 50,000 축척 이상의 수문지질도 작성과 같이 조사지역이 광역적이고 자료가 많은 경우에는 수작업에 의한 농도분포도 작성은 매우 어렵고, 또한 정밀성이 결여된다. 지하수 수질자료와 같이 공간상에 무작위로 분포하는 확률변수들의 효과적인 분석을 위하여 지구통계학적인 기법이 필요하다.

지구통계학적 기법은 공간상의 확률변수 자료들에 대하여 신뢰성 있는 분포도를 생산할 수 있기 때문에, 선진 외국에서 많이 이용하고 있다. Matheron(1969)에 의해서 개발된 Kriging은 최선의

불편추정자(best linear unbiased estimator)로서 불편의 조건(unbiased condition)과 최소의 분산조건(minimum estimation variance)을 갖는 강력한 통계학적 추정방법이다. Kriging은 원래 광상의 효과적인 개발을 위해 만들어 졌으나, 오늘날에는 공간상에 분포하는 거의 모든 자료에 이용되고 있다. 특히 지하수 연구(지하수위 분포도 작성, 대수층 상수 추정, 지하수 수질분포도 작성)에서 크리깅은 매우 중요한 역할을 하고 있다(Neuman, 1984).

본 연구에서는 지하수 수질환경이 열악한 부산 지역의 지하수 오염현황 분석을 위하여 지구통계 기법을 이용하였다. 부산은 해안가에 위치하고 있어서 기본적으로 해수에 의한 지하수 오염이 어느 정도 되어있으며, 공단과 폐기물 매립장, 생활하수 시설 등에 의하여도 지하수가 많이 오염되어 있는 실정이다. 부산시 행정구역도(Figure 1)에 의하면 부산시는 14개 구와 1개 군으로 구성되어 있으며, 부산지역에 분포하는 지하수공의 수는 약 7,900 여 개(건설교통부, 1997)이다. 건설교통부(1997) 자료에 의하면 부산은 우리나라 6 대도시중 지하수를 가장 많이 이용하고 있으며, 그 양은 약 6,680 만톤/년에 달한다.

본 연구는 지하수오염 상태 파악에 중요한 pH,



Fig. 1. Location map of the study area.

TS,  $\text{KMnO}_4$  소비량, Cl,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$  등의 지하수 수질에 대한 지구통계학적 연구로서, 부산시 지하수의 오염 상태 및 특성을 파악하는 데 기여할 뿐만 아니라, 앞으로 부산시 지하수의 보전 및 관리를 위한 기본계획 수립에도 중요한 역할을 할 수 있을 것이다.

### 지하수 수질오염 특성

본 연구에서는 1998년도에 부산보전환경연구원에서 분석된 981개의 지하수 수질자료 중에서, 지하수 오염과 직접 연관된 염소이온( $\text{Cl}^-$ ), 황산이온( $\text{SO}_4$ ), 질산성 질소( $\text{NO}_3\text{-N}$ ), 총체적인 오염의 평가에 이용되는 과망간산칼륨소비량(COD), 증발잔유물(TS)과 수소이온농도(pH) 등을 이용하였다. Table 1의 행정구역별 수질자료수에 의하면, 자료수가 100개 이상 되는 지역은 해운대구, 기장군, 수영구 등이며, 자료수가 10개 이하인 곳은 강서구, 동구, 사상구와 중구이다. Figure 2는 행정구역별로 수집된 수질 자료의 위치를 나타낸다.

Table 2에서는 행정구역별로 수질자료 통계치가 조사되어, 수질항목별 최소값과 최대값 그리고 구 전체의 평균값이 정리되어 있다. 부산시 전체적으

Table 1. The number of groundwater quality data at each district in Pusan.

District	Number of Data
Kangso-gu	3
Kumjung-gu	94
Kijang-gun	110
Nam-gu	48
Dong-gu	7
Dongnae-gu	84
Pusanjin-gu	55
Buk-gu	11
Sasang-gu	9
Saha-gu	72
So-gu	35
Suyong-gu	100
Yonje-gu	45
Youngdo-gu	28
Chung-gu	5
Haeundae-gu	275
Total	981

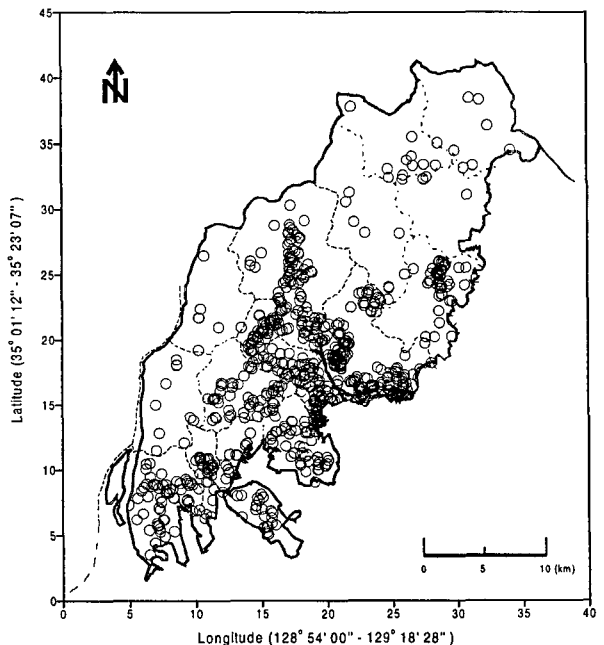


Fig. 2. Distribution of groundwater quality data.

로 볼 때, pH의 범위는 4.8~9.6이고, 평균치는 7.2이다. TS의 범위는 12~5,589mg/l이고, 평균치는 336.4mg/l이다. KMnO<sub>4</sub>소비량의 범위는 0~300.2mg/l이고, 평균치는 2.3mg/l이다. Cl의 범위는 1~528mg/l이고, 평균치는 44.3mg/l이다. SO<sub>4</sub>의 범위는 0~1136mg/l이며, 평균치는 36.0mg/l이다. NO<sub>3</sub>-N의 범위는 0~48.0mg/l이며, 평균치는 4.6mg/l이다.

KMnO<sub>4</sub>소비량, SO<sub>4</sub>와 NO<sub>3</sub>-N의 분석치가 0mg/l인 것은 부산보건환경연구원에서 사용한 분석기기의 측정한계에 의하여 소숫점 이하의 값들이 무시되어진 것에서 기인한다. 본 연구에서는 소숫점 이하의 정확한 값들을 알 수 없기 때문에 부산보건환경연구원에서 제공된 분석치들을 그대로 통계분석에 이용하였다.

Table 2. Statistics of groundwater quality data at each district in Pusan.

District	Component	pH	TS (mg/l)	KMnO <sub>4</sub> (mg/l)	Cl (mg/l)	SO <sub>4</sub> (mg/l)	NO <sub>3</sub> -N (mg/l)
	Statistics						
Kangso-gu	minimum	7.9	111	0.6	39	20	1.1
	maximum	8.3	390	35	45	45	1.5
	average	8.0	252	12.3	41	32	1.3
Kumjung-gu	minimum	4.8	12	0	1	0	0.1
	maximum	8.5	1706	99.5	437	422	21.9
	average	7.2	213	1.9	30	30	3.8
Kijang-gun	minimum	6.0	39	0	3	0	0
	maximum	8.5	1052	8.9	284	265	18.5
	average	7.5	207	1.0	31	27	2.7
Nam-gu	minimum	6.0	42	0	5	0	0
	maximum	8.4	867	16.6	218	69	20.8
	average	6.0	227	1.3	37	30	4.6
Dong-gu	minimum	6.4	93	0.3	4	0	0.4
	maximum	8.2	485	1.6	105	78	18.9
	average	7.4	321	0.7	56	39	6.4
Dongnae-gu	minimum	5.4	42	0	3	0	0
	maximum	8.4	1270	3.8	125	703	12.7
	average	7.0	241	0.7	30	43	4.3
Pusanjin-gu	minimum	6.4	36	0	2	0	0.3
	maximum	9.6	1760	10.5	141	1136	28.2
	average	7.4	283	1.2	35	65	5.5
Buk-gu	minimum	6.8	103	0.3	12	11	0
	maximum	7.5	394	8.1	135	103	8.8
	average	7.2	225	2.0	56	46.7	2.6
Sasang-gu	minimum	6.1	58	0.3	2	0	0
	maximum	8.4	487	14.2	47	91	8.2
	average	7.2	241	2.4	25	34.8	3.6

부산지역 지하수 오염현황 분석을 위한 지구통계 기법의 응용

(Continued)

District	Component	pH	TS (mg/ℓ)	KMnO <sub>4</sub> (mg/ℓ)	Cl (mg/ℓ)	SO <sub>4</sub> (mg/ℓ)	NO <sub>3</sub> -N (mg/ℓ)
	Statistics						
Saha-gu	minimum	7.0	85	0	9	0	0
	maximum	8.1	684	17.1	233	111	11.4
	average	7.0	276	1.2	46	36	5.2
So-gu	minimum	6.7	45	0	2	0	0
	maximum	8.2	641	1.6	198	87	48
	average	7.4	259	0.6	57	23	8.5
Suyong-gu	minimum	5.9	18	0.3	1	0	0.1
	maximum	8.3	742	16	349	82	16.1
	average	7.1	246	1.1	40	31.9	5.1
Yonje-gu	minimum	6.3	56	0.3	8	2	0.5
	maximum	8.4	1325	207	528	84	32
	average	7.0	244	5.7	50	25.3	5.7
Youngdo-gu	minimum	6.5	62	0	11	4	0
	maximum	8.2	780	4.4	277	141	23.3
	average	7.3	249	0.9	48	32	6.2
Chung-gu	minimum	6.7	274	0	30	48	0.3
	maximum	7.1	5589	2.8	215	61	7.7
	average	6.9	1703	1.1	92	54.5	5.2
Haeundae-gu	minimum	6.0	13	0	1	0	0
	maximum	8.3	662	300	400	210	14.4
	average	7.2	195	2.4	34	26	3.2
Sum	minimum	4.8	12	0	1	0	0
	maximum	9.6	5589	300.2	528	1136	48
	average	7.2	336.4	2.3	44.3	36.0	4.6

각 성분들의 히스토그램은 Figure 3에서 Figure 8까지에 도시되어 있다. pH는 정규분포를 이루고, TS는 정규분포에 가깝지만, KMnO<sub>4</sub>, Cl, SO<sub>4</sub>와

NO<sub>3</sub>-N은 정규분포를 이루지 못한다. 각 자료들의 통계분석 현황은 Table 3에 있다.

Table 3. Basic statistics of six chemical components.

Component	pH	TS	KMnO <sub>4</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub> - N
Statistics						
Number of data	879	970	966	878	880	973
Maximum	9.6	5589	300.2	528	1136	48
Minimum	4.8	12	0	1	0	0
Mean	7.2	233	1.8	37	32	4.2
Median	7.2	201	0.6	29	23	3.4
Range	4.8	5577	300.2	527	1136	48
Variance	0.27	51637.78	163.21	1675.77	2806.53	16.31
Skewness	0.019	14.55	18.61	5.68	13.37	2.90
Kurtosis	0.563	322.94	384.87	48.58	247.03	19.09

Table 4에는 수질항목별, 행정구역별 음용수 기준치 초과건수가 정리되어 있다. 중구가 60.0%로 가장 많이 초과되어 있으나, 이 지역의 분석건수는 5개로 상당히 적기 때문에 이 비율이 중구의 전체 지하수를 반영하지는 않는다. 해운대구, 기장군, 수영구에서 100개 이상 분석되었으며, 음용수 기준치 초과비율은 각각 4.0%, 10.0%, 7.0%이다.

부산시 전체에서 pH의 음용수 기준치 초과 비율은 0.34%, TS 초과비율은 2.27%,  $KMnO_4$  초과비율은 1.55%, Cl 초과비율은 1.59%,  $SO_4$  초과비율은 0.57%, 그리고  $NO_3-N$  초과비율은 3.70%이다. 따라서 성분별로 비교해 볼 때, pH의 음용수 기준치 초과비율이 가장 적고  $NO_3-N$ 의 초과비율이 가장 크다. TS의 초과비율도 크지만, TS는 증발잔유물로

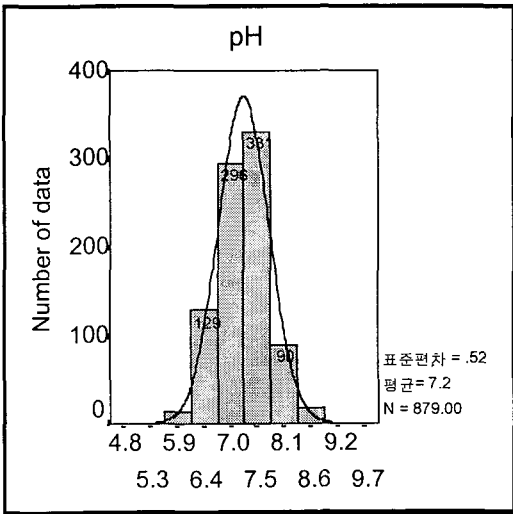


Fig. 3. Histogram of pH data.

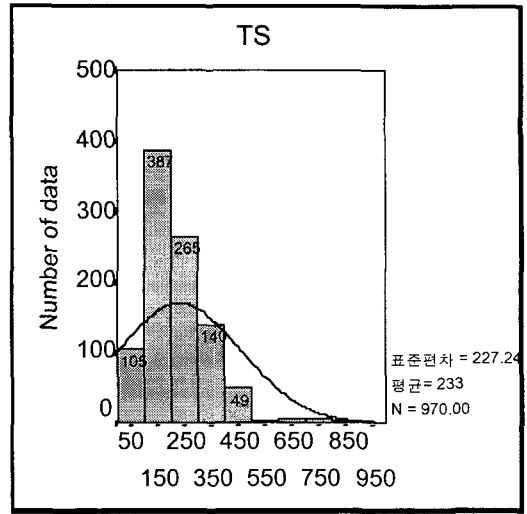


Fig. 4. Histogram of TS data.

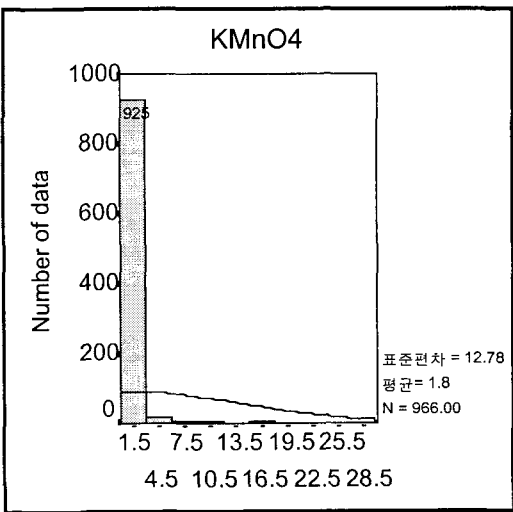


Fig. 5. Histogram of  $KMnO_4$  data.

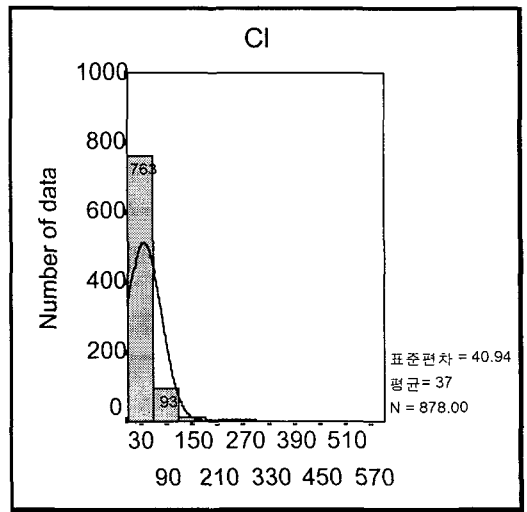


Fig. 6. Histogram of Cl data.

부산지역 지하수 오염현황 분석을 위한 지구통계 기법의 응용

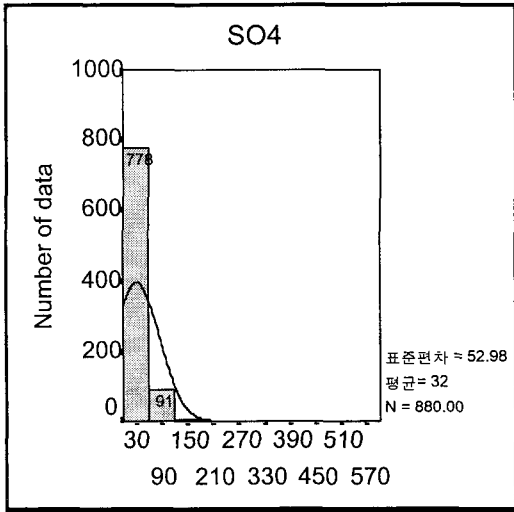


Fig. 7. Histogram of SO<sub>4</sub> data.

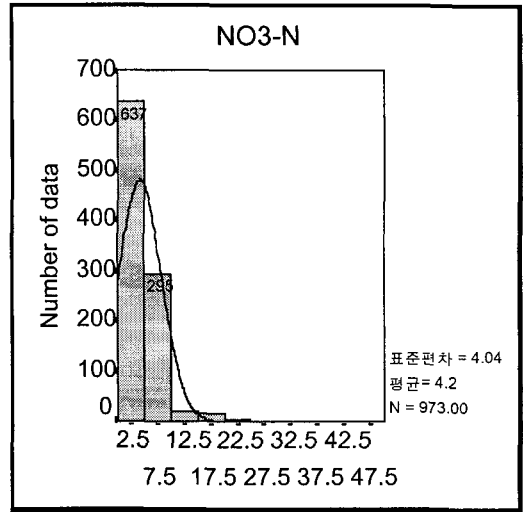


Fig. 8. Histogram of NO<sub>3</sub>-N data.

Table 4. The number of chemical components over the drinking standard of groundwater.

Component	pH	TS	KMnO <sub>4</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub> -N	total	ratio (%)
Drinking Standard	5.8~8.5	≤ 500 (mg/ℓ)	≤ 10 (mg/ℓ)	≤ 150 (mg/ℓ)	≤ 200 (mg/ℓ)	≤ 10 (mg/ℓ)		
Kangso-gu	0	0	1	0	0	0	1	33.33
Kumjung-gu	1	1	2	1	1	2	8	8.51
Kijang-gun	0	2	0	3	1	5	11	10.00
Nam-gu	0	1	2	1	0	1	5	10.42
Dong-gu	0	0	0	0	0	1	1	14.29
Dongnae-gu	1	1	0	0	1	1	4	4.76
Pusanjin-gu	1	4	1	0	1	5	12	21.82
Buk-gu	0	0	0	0	0	0	0	0.00
Sasang-gu	0	0	1	0	0	0	1	11.11
Saha-gu	0	2	1	1	0	6	10	13.89
So-gu	0	1	0	2	0	8	11	31.43
Suyong-gu	0	1	2	1	0	3	7	7.00
Yonje-gu	0	1	2	1	0	2	6	13.33
Youngdo-gu	0	2	0	1	0	1	4	14.29
Chung-gu	0	2	0	1	0	0	3	60.00
Haeundae-gu	0	4	3	2	1	1	11	4.00
Total	3	22	15	14	5	36	95	9.68
Number of Sample Data	879	970	966	878	880	973	981	
Ratio(%)	0.34	2.27	1.55	1.59	0.57	3.70	9.68	

서 전체 성분을 반영한다. 부산지하수에서 NO<sub>3</sub>-N의 오염이 큰 이유는 대도시이므로 생활하수와 자

동차 배기가스에 의한 영향이 크다는 것을 반영한다. Cl의 초과비율도 높은 편인데, 그 이유는 부산

이 바다에 인접하여 있으므로 해수에 의한 영향과 또한 일반 오염물질에 의한 것으로 보인다. 일반적으로 Cl 이온은 비반응성 물질이므로 지하매질과 반응하지 않고 계속 지하수에 축적되기 때문에, 오염되고 있는 지하수에서는 Cl 이온의 함량이 높아진다.

### 수질자료의 상관성 분석

부산지하수의 수질중 본 연구에서 조사된 pH, TS, KMnO<sub>4</sub>, Cl, SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>-N 등 6가지 성분들 상호간의 상관성을 파악하기 위하여 선형회귀분석(Linear Regression Analysis)을 실시하였다. 각 성분의 상관성 분석 결과가 Table 5에 있다. Cl과 TS, SO<sub>4</sub>와 TS의 상관계수가 0.65 이상으로 높게 나타났으며, 그 다음 NO<sub>3</sub>-N과 Cl의 상관계수가

0.251로서 약간의 상관성을 갖는다.

이상 수질자료의 상관성 분석에 의하면 Cl과 TS 그리고 SO<sub>4</sub>와 TS의 상관성이 상당히 큰 편이다. 따라서 부산지하수 수질에서 Cl과 SO<sub>4</sub>의 증가가 TS의 증가에 결정적인 영향을 주고 있기 때문에 Cl과 SO<sub>4</sub> 이온이 부산 지하수오염의 주요 역할을 하고 있는 것으로 추정된다. 그러나 Cl과 SO<sub>4</sub> 사이의 상관 계수가 낮기 때문에 부산에서 Cl과 SO<sub>4</sub>의 증가는 해수에 의한 영향보다는 생활하수나 기타의 원인에 더 큰 요인이 있는 것으로 판단된다. Cl과 SO<sub>4</sub>는 해수의 주성분으로서 그 성분함량이 보통 19,350mg/l와 2,710mg/l(Duxbury and Duxbury, 1991)인데, 지하수가 해수의 영향을 많이 받게된다면 Cl과 SO<sub>4</sub>의 상관성은 크게 나타나게 된다.

Table 5. Correlation coefficients of groundwater quality data.

Components	pH - TS	pH - KMnO <sub>4</sub>	Cl - SO <sub>4</sub>	Cl - TS	KMnO <sub>4</sub> - Cl	KMnO <sub>4</sub> - TS	SO <sub>4</sub> - KMnO <sub>4</sub>	SO <sub>4</sub> - TS	NO <sub>3</sub> -N - TS	NO <sub>3</sub> -N - Cl
Correlation Coefficient	-0.038	-0.038	0.190	0.679	0.034	0.059	0.009	0.652	0.182	0.251

### 지구통계학적 분석

연구지역에 산발적으로 분포하는 지하수 수질자료의 특성을 효과적으로 분석하기 위해서는 지구통계학의 대표적 기법인 크리깅(kriging)을 적용하여 수질항목별 등치선도(isopleth map of water quality)를 만드는 것이 필요하다.

국내에서 지구통계학을 수리지질학 분야에 이용한 연구는 아직 시작단계에 있다(정상용, 1993<sup>a</sup>, 1993<sup>b</sup>; 정상용과 이강근, 1995; 조웅현 등 1994; 장연수와 정상용 1997; 정상용 등, 1998; 정상용 등, 1999; 심병완 등, 2000). 지하수 수질현황 분석에 관한 연구는 대한광업진흥공사(1997)와 건설교통부·한국수자원공사(1998), 정상용 등(2000)이 있다. 외국에서는 지구통계학을 이용한 연구가 오래 전부터

활발히 이용되고 있다. 즉, 지하수 수질특성 분석 및 평가(Dalton and Upchurch, 1978, Rouhani & Hall, 1988, Bartier & Keller, 1996, Voudouris et al., 1997, Pacheco, 1998, Velasco & Verma, 1998)는 물론이고, 대수층상수의 분석(Yeh et al., 1983; Aboufirassi & Marino, 1984; Kitanidis & Vomvoris, 1983; Russo and Jury, 1987<sup>ab</sup>; Wen, 1994; Loaiciga et al., 1996), 지하수위 또는 수두경사의 분석(Aboufirassi & Marino, 1983; Neuman & Jacobson, 1984; Philip & Kitanidis, 1989), 지하수 유동분석(Neuman, 1984; Desbarats, 1994; Datta-Gupta et al., 1995; Jensen et al., 1996) 등에 널리 이용되고 있다.

크리깅은 공간상에 분포하는 확률변수(random variables)들을 이용하여 자료가 없는 지점에서 값을 추정해내는 강력한 통계학적인 방법인데, 연구지역



의 수질분포 특성에 맞는 크리깅 모델을 개발하여 이용하여야 한다. 수질자료의 분포특성이 정상확률함수(nonstationary random functions)를 이룰 경우에는 정규크리깅(ordinary kriging)을 이용해서 수질농도 등치선도(isopleth map of concentrations)를 작성한다. 그러나 수질자료의 분포특성이 비정상확률함수(nonstationary random functions)를 나타낼 경우에는 만능크리깅(universal kriging)을 이용하여 정밀성이 큰 등치선도를 만들 수 있고, 수질자료의 공간상 분포특성은 베리오그램(variogram)에 의하여 파악할 수 있다.

본 연구에서 조사된 지하수 수질자료를 지구통계학적 분석에 이용하는데 있어서 지하수 수질자료 값이 지나치게 작거나 큰 값은 전체적인 자료의 특성을 왜곡시키게 되므로 베리오그램이나 등치선도 작성시 제외시켰다.

### 정규크리깅

크리깅은 최선의 선형 불편 추정자(BLUE: best linear unbiased estimator)이며, 그 공식은 다음과 같다.

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

여기서  $Z_i$ 는 공간상에 분포하는 표본자료의 값,  $\lambda_i$ 는  $Z_i$ 에 해당되는 가중치,  $Z_k^*$ 는 kriging에 의한 추정치이다.

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

크리깅의 불편조건은

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

여기서  $Z_v$ 는 미지의 참값이고,  $Z_k^*$ 는 추정치이다.

방정식 (2)로부터 가중치의 합은 1.0이 된다.

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

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 크리깅분산(kriging variance)이라고도 하며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_K^2 = E\{[Z_v - Z_k^*]^2\} = C(V, V) + \mu - \sum_{i=1}^n \lambda_i C(v_i, V) \quad (5)$$

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

### 베리오그램 분석

크리깅에 의한 자료 추정에는 표본자료의 공분산이 필요한데, 이것은 표본자료의 반베리오그램(semivariogram)으로부터 얻어진다. 즉,

$$C(h) = sill - \gamma(h) \quad (6)$$

여기서  $C(h)$ ,  $\gamma(h)$ 는 거리  $h$  만큼 떨어진 자료들간의 공분산과 반베리오그램이다.  $sill$ 은  $h$ 가 일정한 범위(range)를 넘어 반베리오그램의 상관성이 없어지면서 안정된 상태의 반베리오그램 값이다. 지하수 수질자료의 반베리오그램을 결정하기 위해서 Matheron(1963)의 베리오그램 산출공식을 이용하였다.

$$2\gamma(h) = E\{\sum [Z(x) - Z(x+h)]^2\} = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i+h)]^2 \quad (7)$$

여기서  $2\gamma(h)$ 는 베리오그램이고,  $\gamma(h)$ 는 반베리오그램이다.  $Z(x)$ 는 임의의 지점  $x$ 에 있는 자료의 값이며  $Z(x+h)$ 는  $Z(x)$ 에서  $h$ 만큼 떨어진 지점의 자료 값이다.  $N(h)$ 는 거리  $h$ 만큼 떨어진 한쌍의 실험자료  $z(x_i)$ 와  $z(x_i+h)$ 의 개수이다.

반베리오그램의 모델은  $sill$ 의 존재 유무에 따라 여러 가지 모델로 구분되어지나, 대부분의 지질관련 자료의 분석에는  $sill$ 을 갖는 경우의 모델을 많이 이용한다. 대표적인 3가지의 모델은 구상형모델(spherical model), 지수형모델(exponential model), 그리고 가우시안모델(Gaussian model)이다(Journel and Huijbregts, 1978).

부산의 지하수 수질자료에 적합한 베리오그램 모델을 결정하기 위하여 교차타당성시험(cross validation test; Davis, 1987)을 실시하였으며, 각 수질자료에 대한 베리오그램 상수를 비선형 최소자

승법(nonlinear least squares method)을 이용하여 결정하였다. KMnO<sub>4</sub>의 베리오그램은 지수형모델이 선정되었으며, 다른 수질자료들의 베리오그램은 모두 구상형모델이 결정되었다. 구상형 베리오그램과 지수형 베리오그램의 방정식은 다음과 같다.

① 구상형모델(Spherical model)

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[ 1.5 \frac{h}{a} - 0.5 \frac{h^3}{a^3} \right] \quad (h \leq a) \quad (8)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \quad (h > a) \quad (9)$$

여기서 C<sub>0</sub>는 nugget, C는 sill - nugget, a는 반베리오그램이 상관성을 갖는 범위, 그리고 h는 자

료들간의 거리이다.

② 지수형모델(Exponential model)

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[ 1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right] \quad (h \leq 3a) \quad (10)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \quad (h > 3a) \quad (11)$$

이 모델은 sill 값에 근사적으로 접근하며, 실질적인 반베리오그램의 범위 a'은 3a이다. 이 모델은 수문학과 관련된 자료에 널리 이용되고 있다.

미국환경청(U.S. EPA, 1998)에서 개발한 GEOPACK 소프트웨어를 이용하여 계산된 베리오그램 상수들은 Table 6에 있다.

Table 6. Variogram types and parameters of six chemical components.

Component	Model	Nugget	Sill	Range
pH	spherical	0.17	0.25	2.67
TS	spherical	1293.0	22664.0	3.45
KMnO <sub>4</sub>	exponential	2.0	2.78	5.28
Cl	spherical	1007.30	1713.95	2.11
SO <sub>4</sub>	spherical	583.97	786.93	13.73
NO <sub>3</sub> -N	spherical	12.12	19.96	26.22

### 지하수 수질 분포특성 분석

부산지역의 6개 지하수 수질자료의 베리오그램 분석결과 정상확률함수를 이루기 때문에 정규크리깅을 이용하여 각각의 수질 등치선도를 작성하였다.

Figure 9는 pH의 등치선도인데, 대체적으로 내륙에서 높은 값을 보여주고 일부(기장군, 수영구, 남구, 영도구, 사상구) 해안가 지역에서도 높은 값을 나타낸다. Figure 10은 TS의 등치선도인데, 대부분의 이상대가 내륙에 있으나 일부(해운대구, 수영구, 사하구, 영도구 등) 해안지역에서도 높은 값들이 나타난다. Figure 11은 KMnO<sub>4</sub> 소비량의 등치선도이다. 대부분의 이상대가 내륙에 있으나 일부(수영구, 남구, 사하구, 사상구) 해안지역에서도 높

은 값들이 나타난다. Figure 12는 Cl의 등치선도인데, 내륙에서 대부분의 이상대가 형성되어 있으나 일부(기장군, 해운대구, 남구, 중구, 영도구, 북구, 사하구) 해안지역에서도 높게 나타난다. Figure 13은 SO<sub>4</sub> 자료의 분포도인데 역시 내륙에서 대부분의 이상대가 나타나고 일부(기장군, 해운대구, 사상구, 사하구) 해안지역에서 높은 값을 보여준다. Figure 14는 1998년도 NO<sub>3</sub>-N의 등치선도이다. 내륙에서 대부분의 이상대가 나타나고 일부(해운대구, 수영구, 남구, 영도구, 사하구) 해안지역에서 높은 값을 보여준다.

6가지 성분들의 농도 등치선도 분석 결과 오염에 관련된 높은 값들은 대부분 내륙에서 나타나고 있으며, 해안가에서는 일부 지역에서 산발적으로 나타나고 있다. 해수 침입과 직접 관련된 수질은 Cl과 SO<sub>4</sub> 이온인데, 이들의 분포에서도 해안가의

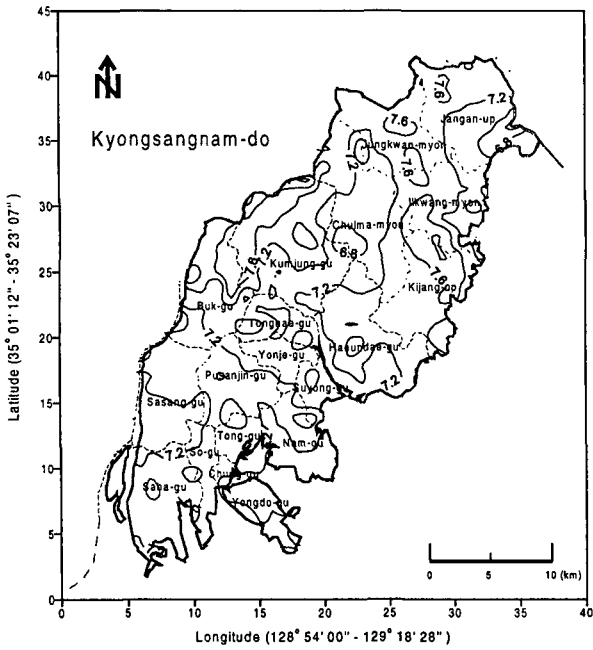


Fig. 9. Isopleth map of pH by ordinary kriging.

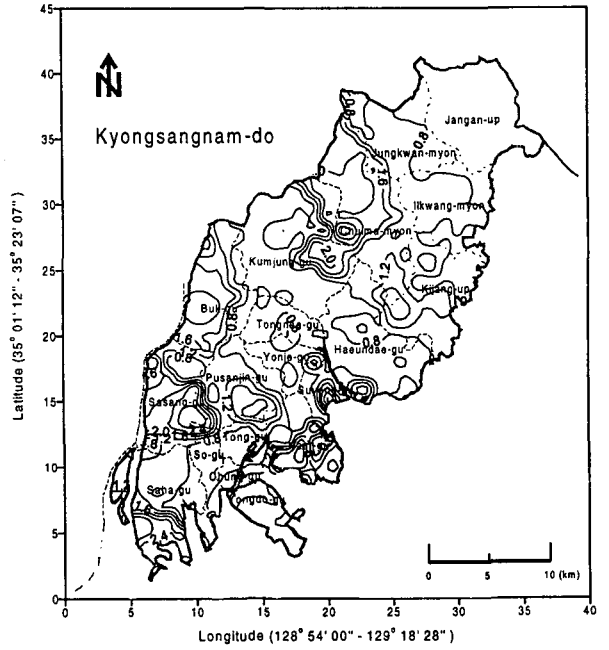


Fig. 11. Isopleth map of  $\text{KMnO}_4$  by ordinary kriging.

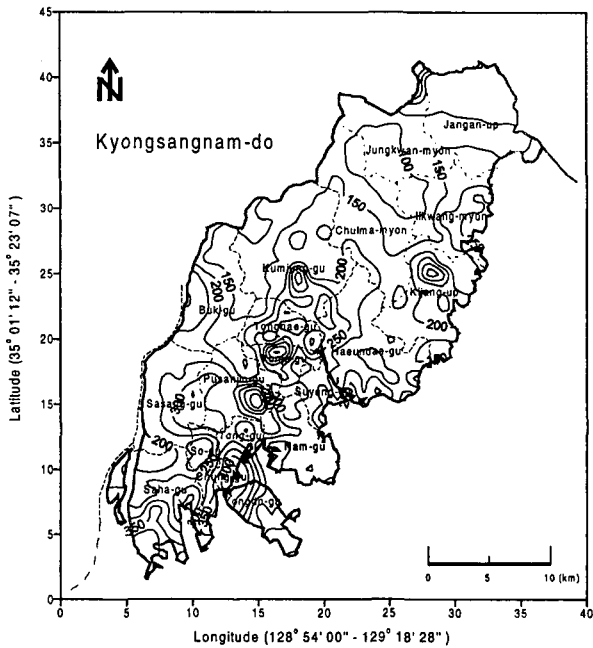


Fig. 10. Isopleth map of TS by ordinary kriging.

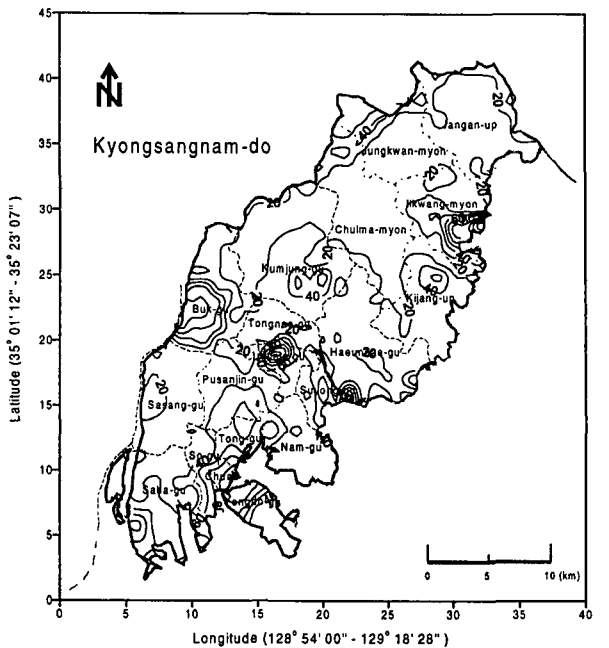


Fig. 12. Isopleth map of Cl by ordinary kriging.

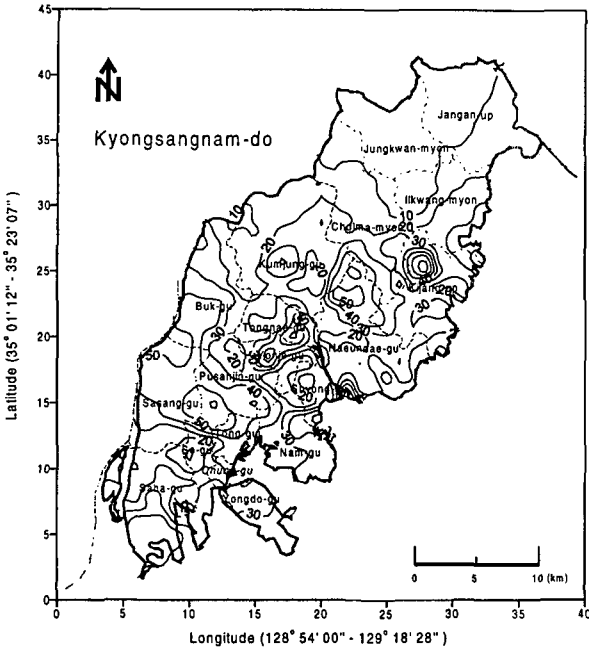


Fig. 13. Isopleth map of  $SO_4$  by ordinary kriging.

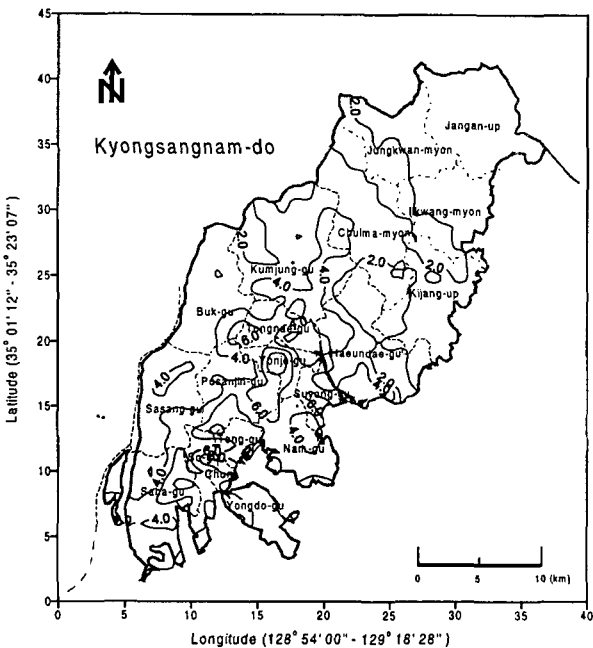


Fig. 14. Isopleth map of  $NO_3-N$  by ordinary kriging.

특정 지점에서만 국부적으로 높은 값을 보여주고 있다. 따라서 부산지역이 해안가에 위치하고 있지만 전 해안선에 걸쳐 해수침입이 내륙쪽으로 깊이 발생되고 있지 않는 것으로 판단된다. 그 이유는 부산 해안지역의 지질이 주로 백악기 경상계의 퇴적암류, 유문암질암, 응회암류, 안산암질암과 불국사 화강암류로 구성(손치무 등, 1978; 장태우 등, 1983<sup>a</sup>; 장태우 등, 1983<sup>b</sup>)되어 있는데, 이들은 대부분 결절질 암석으로 투수성이 작아서 해수 침투가 용이하지 않기 때문이다. 일부 지하수공에서 나타나는 국부적인 해수침입현상은 해안가에 개발된 지하수공에서 과도한 양수에 의하여 Ghyben-Hertzberg의 경계선 하부의 해수가 지하수에 유입된 결과로 보인다.

내륙으로의 해수 유입은 단층대를 통하여 일어날 수도 있다. 부산에 발달된 단층대는 기장군 일광면에서 해운대구의 동쪽으로 발달된 일광단층과 금정구, 동래구 및 부산진구 등의 부산시 중심을 통과하는 동래단층이 있다(손치무 등, 1978). 이들 단층들은 모두 북북동 방향이며, 해안을 통과하고 있다. 그러나 Figure 12의 Cl 이온 등치선도와 Figure 13의  $SO_4$  이온 등치선도상에서 두 단층대에 관련된 방향성이 나타나지 않는다. 따라서 이들 단층대 역시 현재는 투수성이 매우 낮은 상태이어서 해수침입의 경로 역할을 하고 있지 않는 것으로 판단된다.

따라서 부산지하수 오염의 주 원인은 해수나 지질 및 지질구조에 의한 영향보다는 내륙에서 생활하수, 자동차 배기가스, 오염된 하천수, 공장폐수, 폐기물 매립지에서 발생하는 침출수 등에 의한 오염이 훨씬 큰 것으로 판단된다. 이러한 오염원들은 우리나라 대도시에서 발생하는 일반적인 것들이다. 부산지역에서 생활하수, 자동차 배기가스와 오염하천수는 비점오염원으로서 오염지역이 넓은 편이며, 공장도 사하구와 사상구에 밀집되어 있으나 금정구, 해운대구와 기장군 등에도 분포하고 있어서 공장지대에서 발생하는 폐수에 의한 지하수오염도 적지는 않을 것으로 판단된다. 그러나 폐기물 매립지는 일부 지역(화명동, 석대동, 생곡 등)에 한정되어 있기 때문에 소수의 점오염원 역할을 하고 있다.

## 결 론

본 연구의 결론은 다음과 같다.

1) 통계분석에 이용된 지하수 수질자료는 981개이며, 분석항목은 pH, TS,  $\text{KMnO}_4$  소비량, Cl,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$  등의 6개이다. 각 성분의 평균치는 pH가 7.2, TS는  $336.4\text{mg}/\ell$ ,  $\text{KMnO}_4$  소비량은  $2.3\text{mg}/\ell$ , Cl은  $44.3\text{mg}/\ell$ ,  $\text{SO}_4$ 는  $36.0\text{mg}/\ell$ , 그리고  $\text{NO}_3\text{-N}$ 은  $4.6\text{mg}/\ell$ 이다.

2) 부산시 전체에서 pH의 음용수 기준치 초과 비율은 0.34%, TS 초과비율은 2.27%,  $\text{KMnO}_4$  초과 비율은 1.55%, Cl 초과비율은 1.59%,  $\text{SO}_4$  초과비율은 0.57%, 그리고  $\text{NO}_3\text{-N}$  초과비율은 3.7%이다. 따라서 성분별로 비교해 볼 때, pH의 음용수 기준치 초과비율이 가장 적고,  $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 초과비율이 가장 크다. 여러 가지 오염성분 중에서  $\text{NO}_3\text{-N}$ 이 가장 큰 비율을 차지하는 것은 부산 지하수의 주 오염원이 생활하수나 자동차 배기가스라는 것을 나타낸다.

3) 6가지 지하수 수질자료에 대한 베리오그램은 구상형모델과 지수형모델이 선정되었으며, 이들 수질자료가 정상확률함수를 이루기 때문에 지구통계 기법 중에서 비교적 단순한 정규크리깅이 수질자료의 등치선도작성에 이용되었다.

4) 6가지 지하수 수질성분들의 등치선도 분석결과에 의하면 부산지역이 해안가에 위치하고 있지만 전 해안선에 걸쳐 해수침입이 내륙쪽으로 깊이 발생되고 있지는 않다. 일부 지하수공에서 나타나는 국부적인 해수침입현상은 해안가에 개발된 지하수공에서 과도한 양수에 의하여 Ghyben-Hertzberg 경계선 하부의 해수가 지하수에 유입된 결과로 판단된다. Cl 이온의 등치선도와  $\text{SO}_4$  이온의 등치선도상에서 부산에 발달된 2개의 단층대(일광단층, 동래단층)와 관련된 방향성을 검토한 결과 특별한 연관성을 찾을 수 없었다.

5) 따라서 부산지하수는 해수나 지질 및 지질구조에 의한 영향보다는 내륙에서 생활하수나 기타원인(자동차 배기가스, 오염된 하천수, 공장폐수, 폐기물 매립지의 침출수 등)에 의한 오염이 훨씬 큰 것으로 판단된다.

## 사 사

이 논문은 1998년 한국학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었으며, 연구비를 지원해준 한국학술진흥재단에 감사한다.

## 참 고 문 헌

- 건설교통부, 1997, 지하수 조사년보.
- 건설교통부·한국수자원공사, 1998, 지하수 현황분석 기법 연구.
- 대한광업진흥공사, 1997, 불균질·이방성 대수층의 지하수 유동분석 기술연구.
- 손치무, 이상만, 김상욱, 김형식, 1978, 동래·월내도폭, 자원개발연구소.
- 심병완, 정상용, 강동환, 김규범, 박희영, 2000, 영산강·섬진강 유역의 지하수 데이터베이스 자료에 대한 지구통계학적 분석, 지질공학회지, 제10권 제2호, pp.131-142.
- 장태우, 강필중, 박석환, 황상구, 이동우, 1983<sup>a</sup>, 부산도폭, 한국동력자원연구소.
- 장태우, 강필중, 박석환, 황상구, 이동우, 1983<sup>b</sup>, 가덕도폭, 한국동력자원연구소.
- 장연수, 정상용, 1997, 비균질성을 고려한 해성점토 매립장의 수리전도도 추정과 오염이동 특성, 지반공학, 13(1), p.85-100.
- 정상용, 1993<sup>a</sup>, 지하수위분포 추정을 위한 Universal Kriging, 1, k 계의 고유확률 함수, 지질공학회지, 제3권 제1호, p. 39-49.
- 정상용, 1993<sup>b</sup>, 지하수위분포 추정을 위한 Universal Kriging, 1, 제한적 최대우도법, 지질공학회지, 제3권 제1호, p. 51-61.
- 정상용, 이강근, 1995, 난지도 매립지 일대의 지하수위 분포 추정을 위한 복합크리깅의 응용, 지하수환경, 2(2), p. 58-63.
- 정상용, 권해우, 허선희, 1997, 불균질·이방성 대수층의 지하수 유동분석 기술연구, 대한광업진흥공사, 광진 97-2, 153 pp.
- 정상용, 유인걸, 윤명재, 권해우, 허선희, 1998, 지하수수질분포특성 파악을 위한 지구통계학적 연구, 대한자원환경지질학회·(사)대한지하수환경

- 학회 1998년도 공동학술발표회 발표 논문 요약  
집.
- 정상용, 유인걸, 윤명재, 권해우, 허선희, 1999, 불균  
질이방성 대수층의 지하수 유동분석에 지구통  
계기법의 응용, 지질공학회지, 제9권 제2호, pp.  
147-159.
- 정상용, 심병완, 강동환, 김규범, 박희영, 2000, 지구  
통계 기법을 이용한 영산강·섬진강 유역 의  
지하수 수질 특성 연구, 지하수환경, 제7권 제2  
호, 게재예정.
- 조웅현, 박영기, 김환홍, 1994, Kriging 기법과 수치  
모형에 의한 이안지구 대수층의 투수량 계수,  
지하수환경, 1(2), p.113-120.
- Aboufirassi, M., and M. A. Marino, 1983, Kriging  
of Water Levels in the Souss Aquifer,  
Morocco, *Math. Geol.*, 15(4), p. 537-551.
- Aboufirassi, M., and M. A. Marino, 1984,  
Cokriging of Aquifer Transmissivities from  
Field Measurement of Transmissivity and  
Specific Capacity, *Mathematical Geology*, 16(1),  
p.19-35.
- Bartier, P., and Keller, C., 1996, Interpolation for  
Geochemical Surface Reconstruction Incorporation  
Topographic Catchment Delineations,  
*Mathematical Geology*, 28(3), p.253-274.
- Dalton, M.G., and Upchurch, S.G., 1978, Interpreta-  
tion of Hydrochemical Facies by Factor  
Analysis, *Ground Water*, v.16, no.4, p.228-  
233.
- Datta-Gupta, A., and L. W. Lake, and G. A.  
Pope, 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), p.241-248.
- Desbarats, A. J., 1994, Spatial Averaging of  
Hydraulic Conductivity Under Radial Flow  
Conditions, 26(1), p.1-22.
- Duxbury, A. C., and Duxbury, A. B., 1991, An  
Introduction to the World's Oceans, 3rd.  
edition, Wim. C. Brown Publishers p.143-144.
- Jensen, J. L., P. W. M. Corbett, G. E. Pickup,  
and P. S. Ringrose, 1996, Permeability  
Semivariograms, Geological Structure, and  
Flow Performance, *Mathematical Geology*,  
28(4), p.419-436.
- Journel, A. G., and CH. J. Huijbregts, 1978,  
*Mining Geostatistics*, 600p., Academic Press.
- Kitanidis, P. A., and E. G. Vomvoris, 1983, A  
Geostatistical Approach to the Inverse  
Problems in Groundwater Modeling (Steady  
State) and One-Dimensional Simulations,  
*Water Resources Research*, 19(3), p. 677-690.
- Kitanidis, P. K., and R. D., Philip, 1989,  
Geostatistical Estimation of Hydraulic Head  
Gradients, *Groundwater*, 27(6), p. 855-865.
- Loaiciga, H. A., R. B. Leipnik, P. F. Hudak, and  
M. A. Marino, 1996, 1-, 2-, and 3-Dimensional  
Effective Conductivity of Aquifers, *Math.  
Geol.*, 28(5), p.563-584.
- Matheron, G., 1969, *Le Krigeage Univesal*, Cah.  
Ceatre Marphol, Math.,1
- Neuman, S. P., 1984, Role of Geostatistics in  
Subsurface Hydrology, *Geostatistics for  
Natural Resources Characterization*, Parts 2,  
edited by G. Verly et al., p.287-816.
- Neuman, S. P., and E. Jacobson, 1984, Analysis  
of Nonintrinsic Spatial Variability by  
Residual Kriging with Application to  
Regional Groundwater Levels, *Mathematical  
Geology*, 16(1), p.19-35.
- Pacheco, F., 1998, Application of Correspondence  
Analysis in the Assessment of Groundwater  
Chemistry, *Mathematical Geology*, 30(2), p.  
129-162.
- Philip, R. D., and P. A. Kitanidis, 1989,  
Geostatistical Estimation of Hydraulic  
Gradients, *Groundwater*, 27(6), p.855-865.
- Rouhani, S., and Hall, T., 1988, Geostatistical

- Schemes for Groundwater Sampling, *J. of Hydrology*, 103, 85-102.
- Russo, R., and W. Jury, 1987<sup>a</sup>, A theoretical Study of the Estimation of the Correlation Scale in Spatially Variable Fields, 1. Stationary Fields, *Water Resources Research*, 23(7), p.1257-1268.
- Russo, R., and W. Jury, 1987<sup>b</sup>, A theoretical Study of the Estimation of the Correlation Scale in Spatially Variable Fields, 2. Non-stationary Fields, *Water Resources Research*, 23(7), p.1269-1279.
- U.S. EPA., 1998, GEOPACK(Version 1.0e), Geostatistical Software System.
- Velasco, F., and Verma, S., 1998, Importance of Skewness and Kurtosis Statistical Tests for Outlier Detection and Elimination in Evaluation of Geochemical Reference Materials, *Mathematical Geology*, 30(1), p. 109-128.
- Voudouris, K., Lambrakis, N. Papatheothorou, G., and Daskalaki, P., 1997, An Application of Factor Analysis for the Study of the Hydrogeological Conditions in Plio-Pleistocene Aquifers of NW Achaia(NW Peloponnesus, Greece), *Mathematical Geology*, 29(1), p.43-60.
- Wen, X.-H., 1994, Estimation of Statistical Parameters for Censored Lognormal Hydraulic Conductivity Measurements, 26(6), p.717-732.
- 
- 정상용  
부경대학교 환경지질과학과  
608-737, 부산시 남구 대연3동 599-1  
Tel : 051-620-6235  
Fax : 051-628-6432  
e-mail : sychung@dolphin.pknu.ac.kr
- 강동환  
부경대학교 환경지질과학과  
608-737, 부산시 남구 대연3동 599-1  
Tel : 051-620-6235  
Fax : 051-628-6432  
e-mail : ak1k1k1@hanmail.net
- 박희영  
한국전력 원자력환경기술원  
305-335, 대전시 유성구 궁동 405-8  
Tel : 042-870-0368  
e-mail : dogo214@hanmail.net
- 심병완  
부경대학교 환경지질과학과  
608-737, 부산시 남구 대연3동 599-1  
Tel : 051-620-6235  
Fax : 051-628-6432  
e-mail : bwshim@mail1.pknu.ac.kr