The Journal of Engineering Geology, Vol.12, No.4, December, 2002. pp.439-457

크리깅 기법을 이용한 금정산-백양산 일대 용천수의 물리화학적 성분의 공간적 분포 특성 연구

Study on Spatial Characteristics of Physicochemical Components of Spring Water in Mts. Geumjeong and Baekyang Area Using Kriging

함 세 영 (Se-Yeong Hamm)	부산대학교 지질학과
정 재 열 (Jae-Yeol Cheong)	부산대학교 지질학과
류 상 민 (Sang Min Ryu)	부산대학교 지질학과
강 래 수 (Lae Soo Kang)	부산대학교 지질학과

요 약 / ABSTRACT

금정산-백양산 일원에 분포하는 60개소의 용천수와 6개소의 지하수에 대하여 9개 물리화학적 성분(온도, pH, Eh, EC, TDS, DO, 염분농도, 알칼리도, 용출량)을 측정하였다. 용천수의 pH는 5.06~8.38, 알칼리도는 7.93~102.21mg/l, EC는 9.5~270μS/cm, Eh는 64.2~685.9mV, DO는 4.57~12.13mg/l, 용출량은 4.26~182.2㎖/s이다. 물리화학적 성분들의 통계적인 특성을 알기 위하여 일반통계분석을 실시하였으며 물리화학적 성분들간의 상관성을 분석하였다. 또한 용천수와 지하수의 물리화학적 성분을 비교하였다. DO, pH, Eh, EC, 알칼리도, 용출량의 공간적인 분포 특성을 알기 위하여 크리깅이 수행되었으며, 계산된 값을 성분들간의 공간적인 분포 비교를 위하여 표준화시켰다. 표준화된 값을 이용한 물리화학적 성분의 등치선도를 작성하여 각각의 성분의 이상대를 파악하였으며 서로 다른 성분들의 이상대를 비교 검토하였다.

주요어 : 금정산, 백양산, 용천수, 물리화학적 성분, 크리깅, 표준화 기법

Spring waters at 60 sites and groundwaters at 6 wells in Mts. Geumjeong and Baekyang area were investigated for measuring nine physicochemical components (temperature, pH, Eh, EC, TDS, DO, salinity, alkalinity and discharge rate). The pH of spring waters ranges from 5.06 to 8.38, alkalinity from 7.93 to 102.21 mg/l, electrical conductance from 9.5 to 270 μS/cm, Eh from 64.2 to 685.9 mV, DO from 4.57 to 12.13 mg/l, and the discharge rate from 4.26 to 182.2 ㎖/s. General statistics was carried out to analyze statistical characteristics of those components. To compare the components with one another, regression analyses were carried out. And the components

of spring waters were compared to those of groundwaters. Kriging was used to estimate the spatial variation of DO, pH, Eh, EC, alkalinity and discharge rate in the study area. The kriged isopleth maps were made using normalized kriged values to find anomalies of the physicochemical components and to compare anomalies of different components.

Key Words : Mt. Geumjeong, Mt. Baekyang, spring water, physicochemical component, kriging, normalizing

서 론

우리나라에는 자연적으로 용출되는 약수가 전국적으로 광범위하게 분포한다. 약수는 전문적인 용어로는 용천수 또는 샘물로서, 지하수가 지층이나 균열대 또는 단층대를 통과하면서 자연적으로 불순물이 걸러지고 암석과 반응하여 인간에게 유용한 무기물이 물 속에 용해되어 땅 위로 솟아 나오는 것이다. 우리나라에서는 과거부터 많은 사람들이 약수를 음용하여 왔다. 과거에는 지표에 오염원이 별로 없었으므로 약수를 끓이지 않은 상태로 음용하여도 별 문제가 없었으나, 지금은 주변 환경의 오염으로 인하여 약수에서 일반세균, 대장균, 질산성 질소 등이 검출되는 사례가 증가하고 있다. 그럼에도 불구하고 여전히 많은 사람들이 약수를 음용하고 있다.

우리나라의 약수는 비교적 천부 순환을 거쳐 암석과의 반응 시간이 짧아서 용존물질의 농도가 높지 않은 것과 특별히 탄산가스의 용존 함량이 높은 탄산수로 분류될 수 있다. 이 중 탄산약수로 알려진 몇 몇 유명한 약수 이외에도 실제로 약수로 알려진 곳은 대부분이 탄산가스의 용존함량이 높은 탄산수(CO_2-rich water)로 산출되고 있다(김건영 외, 2001). 국내에서는 주로 충남북일원, 경상북도 북부지역, 강원도 지역 등에서 탄산을 다량으로 함유하는 탄산약수가 산출되고 있으며, 서울의 천호동, 울릉도에서도 탄산약수가 산출되고 있다. 외국의 경우 이와 같은 탄산수와 유사한 유형의 지하수에 대한 체계적인 연구가 활발히 수행되고 있고 (Griesshaber et al., 1992; Caboi et al., 1993; Mayo and Muller, 1997; Schofield and Jankowski, 1998; Stober and Bucherm, 1999) 국내에서는 일부 지역에 대한 지화학적 연구(염병우, 1993; Choi, 1998; Yun et al., 1998; 정찬호, 정기영, 1999; 정찬호, 이진국, 2000) 및 동위원소 추적자를 이용한 탄산수 생성에 관한 연구(고용권 외, 1999a; 고용권 외, 1999b; 고용권 외, 1999c; 고용권 외, 2000; 윤정아, 김규한, 2000) 부산 금정산-백양산일대의 지하수, 지열수, 용천수의 지화학적 특성 비교 연구(함세영 외, 2000) 등이 있다.

지구통계학적 방법은 지질학적 성질의 공간적인 특성을 파악하는 방법으로 국내외에서 널리 쓰이고 있다. 외국에서는 대수층상수의 분석(Yeh et al., 1983; Aboufirassi and Marino, 1984; Kitanidis and Vomvoris, 1983; Russo and Jury, 1987a; Russo and Jury, 1987b; Wen, 1994; Loaiciga et al., 1996), 지하수위 또는 수리경사의 분석(Aboufirassi and Marino, 1983; Neuman and Jacobson, 1984; Philip and Kitanidis, 1989), 지하수 유동분석(Neuman, 1984; Desbarats, 1994; Datta-Gupta et al., 1995; Jensen et al., 1996), 지하수 수질특성 분석(Dalton and Upchurch, 1978; Rouhani and Hall, 1988; Pacheco, 1998) 등에 지구통계학적 방법이 널리 이용되고 있다. 한편, 국내에서도 지하수 연구에 지구통계학적 방법을 적용한 사례가 다수 있다(정상용, 1993a; 정상용, 1993b; 정상용, 이강근, 1995; 정상용 외, 1999; 정상용 외, 2000; 조웅현 외, 1994; 장연수, 정상용, 1997).

금정산(해발 801.5m)-백양산(해발 641.5m) 일대에는 약 70여개소의 약수가 용출하고 있다. 금정산-백양산 일대의 약수는 용존물질의 함량

이 낮고 특별한 물질이 용해되어 있지는 않지만 많은 부산시민이 애용하고 있다. 또한 금정산은 등산코스로서도 많은 부산 시민들이 즐겨 찾는 산이다. 그러나, 환경오염의 잠재성이 높아지면서 금정산-백양산 지역 약수의 오염 취약성도 점점 높아지고 있다. 금정산의 가장 높은 봉우리인 고당봉(해발 801.5m)은 부산일원에서 가장 높다. 금정산의 동쪽 자락 약 2.5km 지점에는 동래온천이 위치하고 있고, 금정산의 고당봉 동쪽 약 1.5km지점에는 경상남도의 3대 사찰 중 하나인 범어사가 자리잡고 있다. 또한 금정산 정상 부근에는 길이 1.7km, 성벽 높이 1.5 ~ 3m의 우리나라 산성 중에서 가장 규모가 큰 금정산성이 위치하고 있으며 금정산성내에는 산성마을(행정구역상으로는 금성동)이 위치하고 있다. 금정산성 성벽을 따라서 동서남북에는 각각 동문, 서문, 남문, 북문이 자리잡고 있다.

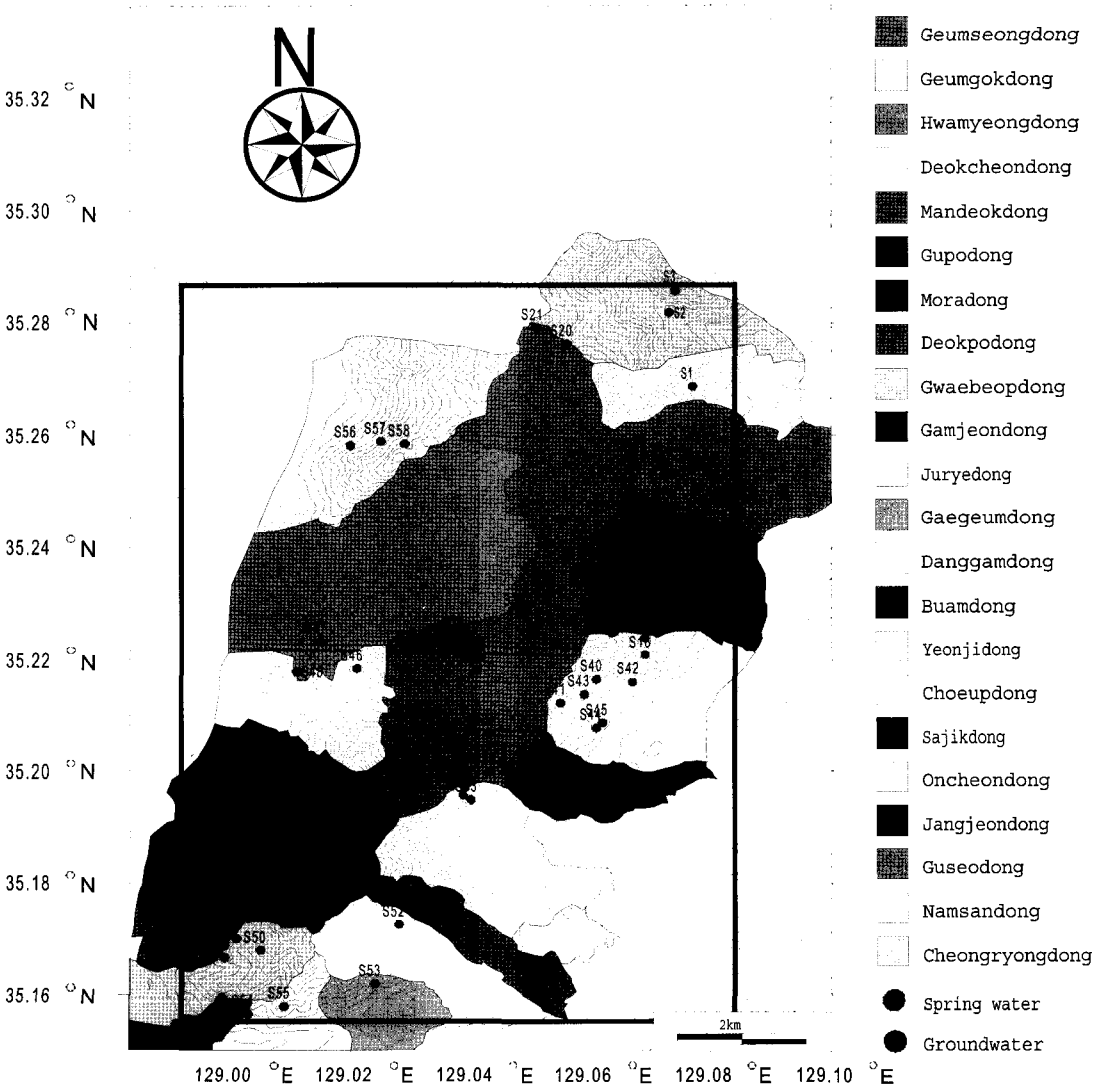

Fig. 1. Sites of spring waters and groundwaters in the study area.

금정산성의 연대를 정확히 알 수는 없으나 신라시대에 남해안과 낙동강 하류를 통한 왜구의 침입을 막기 위하여 쌓은 것으로 추정된다(금성동 청년회, 2001).

본 연구의 목적은 금정산-백양산 일대에 분포하는 약수터 중 60개소(S1, S3-1, S4-2, S5, S7~S19, S21, S23~S47, S50, S52~S55, S57~S69)와 심도 100m 내외의 지하수공 6개소(G2, G4-1, G20, G22, G48, G49)의 물리화학적 성분(수온, pH, 전기전도도, 총고용물질, 염도, Eh, DO, 알칼리도, 용출량)의 지역적인 분포 특성을 알아내고자 하는데 있다. 연구지역은 금정산-백양산 일대로서 행정구역상으로 21개동(금성동, 금곡동, 화명동, 덕천동, 만덕동, 구포동, 모라동, 덕포동, 괘법동, 감전동, 주례동, 개금동, 당감동, 부암동, 초읍동, 사직동, 온천동, 장전동, 구서동, 남산동, 청룡동)을 포함한다(Fig. 1). 지하수공의 물리화학적 성분은 약수의 물리화학적 성분과 비교하기 위해서 측정하였다. 물리화학적 성분의 공간적 분포 특성 파악을 위하여 크리깅과 표준화기법을 이용하였다. 이하에서는 약수대신에 용천수로 통일하기로 한다.

연구 내용 및 방법

2001년 1월 11일부터 2001년 1월 19일까지 금정산-백양산 일대의 단층 파쇄대 또는 균열대를 따라서 용출하는 용천수 60개소(S1, S3-1, S4-2, S5, S7~S19, S21, S23~S47, S50, S52~S55, S57~S69)와 심도 100m 내외의 지하수공 6개소(G2, G4-1, G20, G22, G48, G49)에 대하여 수온, pH, EC(전기전도도), TDS(총고용물질), 염분농도, Eh(산화-환원전위), DO(용존산소), 알칼리도, 용출량을 측정하였다. 수온은 디지털 온도계(Sato사 Model SK-1250MC), pH는 휴대용 pH미터(Orion사 Model 250A), EC, TDS, 염분농도는 휴대용 전기전도도미터(Orion사 Model 115), DO는 휴대용 용존산소미터(Orion사 Model 810) Eh는 pH미터에 Orion사의 산화-환원 전극을 끼워서 측정하였다. 그리고 알칼리도(HCO_3^-, CO_3^{2-})는 메틸오렌지와 페놀프탈레인을 이용한 산-중화 적정법을 이용하였다.

용천수의 시료 번호는 용천수는 S, 지하수는 G를 머리숫자로 하고 그 뒤에 일련번호를 기재하였다(Fig. 1).

지질 및 수리지질

연구지역의 지질(Fig. 2)은 하부로부터 백악기 퇴적암류인 이천리층, 유천층군 안산암질 화산암류, 불국사 화강암류, 이들을 관입하고 있는 신생대 염기성 암맥 그리고 제4기 충적층으로 구성되어 있다(손치무 외, 1978; 손문 외, 2002). 연구 지역의 중앙으로는 북북동-남남서 방향의 동래단층이 지나는데 충적층으로 피복되어 있어서 지표에서 단층의 증거를 찾을 수는 없으나, 인공위성사진에서는 선구조가 뚜렷이 나타나고 있다(성익환 외, 1999). 또한 금정산줄기의 서편에는 양산단층이 역시 북북동-남남서 방향으로 달리고 있다.

이천리층은 금정산 줄기 북측의 금정구 청룡동에 소규모로 분포하고, 백양산 부근의 초읍동, 부암동, 연지동에 걸쳐서 소규모로 분포한다. 안산암질 화산암류는 주로 치밀 견고한 암편질 응회암이 대부분이며 부분적으로 용암류와 응회질 퇴적암이 협재된다(손치무 외, 1978). 안산암질 화산암류는 금정산의 남측 경계 부근인 덕천동, 만덕동 일원과 백양산 북측 구포동 일원 그리고 연지동 일원에 분포하며, 금정산 줄기의 북측 경계부인 양산시 다방동과 동면 석산리, 금산리 일원에도 비교적 큰 규모로 분포한다. 동래단층의 동측인 동래구 부곡동, 금사동, 안락동, 명륜동, 명장동 일원과 연제구 배산(해발 254.9m) 일원에도 안산암질 화산암류가 분포하고 있다. 불국사화강암류는 금정산의 중앙부와 백양산의 남부에 분포하고 있으며, 연구지역에서 가장 넓은 지역을 차지한다.

염기성 암맥들은 백악기말의 화강암류를 관입하고 있어서 그 관입 시기가 신생대인 것으로 판단되며 금정산 중앙부의 남북방향 단층대를 따라 암맥군을 형성하고 있다. 염기성 암맥은 Fig. 2에는 도시되어 있지 않으며, 손문 외(2002)의 논문에 제시되어 있다.

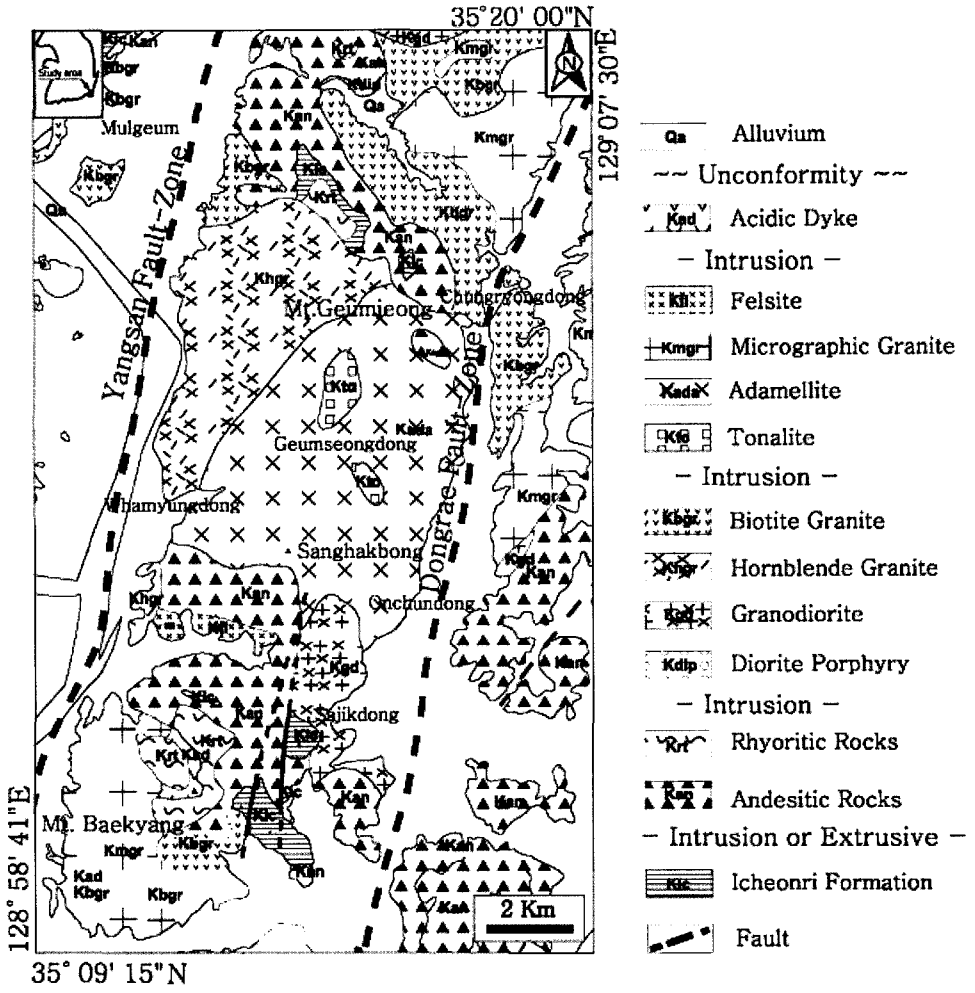

Fig. 2. Geological map of the study area (Son et al., 1978)

금정산의 기반암 지하수는 금정산의 정상부에 위치하고 있으며 지형적으로 분지 형태를 보이는 금정산성마을을 통하여 주로 함양되는 것으로 나타난다. 금정산성 마을 부근에는 북북동 내지 남북방향의 단층(금성동단층)과 동북동 방향의 단층들이 교차하고 있어서 지표수가 지하로 쉽게 유입될 수 있는 지질구조가 나타난다(손문 외, 2002). 또한 금정산성 마을은 지표수계가 모이는 곳이다. 금정산성 마을 분지에서 함양된 지하수는 동북동방향의 단층들을 따라 동래구 및 금정구의 저지대쪽으로 흐르는 것으로 판단된다. 금정산을 중심으로 동측과 서측의 지하수 함양율을 보면, 동측의 함양율이 더 높을 것으로 판단된다. 이는 금정산 동측의 균열빈도가 더 높으며, 지하수 유출량은 서쪽이 동쪽보다 크기 때문이다. 용천수도 금정산의 서측보다 동측에서 더 많이 나타나고 있음을 볼 수 있다(Fig. 1)

용천은 화강암지역에서 많이 분포하고 있으며, 안산암질암지역에는 상대적으로 적게 분포

한다. 이는 안산암질암의 분포면적이 작은데도 그 원인이 있으나 그 보다 더 큰 원인은 균열대가 화강암지역에 더 많이 발달되어 있기 때문으로 판단된다. 용천수의 분포지점을 보면, 노두의 절리를 따라서 나오는 것을 관찰할 수 있으며, 어떤 경우는 시멘트로 용출지점을 밀봉하여 직접 확인이 불가능한 곳도 있다. 한편, 금정산에 개발된 100m 심도 내외의 지하수공의 지하수에 대해서도 용천수와 비교하기 위하여 물리화학적 성분을 측정하였다.

일반통계분석

용천수와 지하수의 각 성분별(수온, pH, EC (전기전도도), TDS(총고용물질), 염분농도, Eh (산화-환원전위), DO(용존산소), 알칼리도, 용출량)로 최소값, 최대값, 평균값, 중앙값, 표준편차, 분산, 왜도, 첨도를 구하였다(Table 1, Table 2).

용천수의 온도는 1.0~13.9℃의 범위(평균온도 7.87℃, 중앙값 8.2℃)를 보이는데 낮은 온도는 측정시기(2001년 1월) 기온의 영향을 받고 있는 것으로 보인다(Table 1). 평균값과 중앙값은 큰 차이를 보이지 않는다. 왜도는 음의 값을 보이지만 거의 0에 가깝다. 첨도는 음의 값을 보이면서 정규분포보다 약간 평평한 형태를 보인다. 온도분포는 대수정규분포보다는 정규분포에 더 가깝다. 지하수의 온도는 3.2~15.7℃의 범위(평균온도 10.4℃, 중앙값 11.4℃)로서 용천수의 온도보다는 높게 나타난다(Table 2). 이는 지하수 시료는 지하 100m 정도에서 나오는 것이고 용천수는 지표로 자연용출되는 것이므로 기온의 영향을 상대적으로 더 많이 받기 때문이다. 왜도는 음의 값을 보이나 0에 가깝고, 첨도는 양의 값을 보이면서 정규분포보다 약간 평평한 형태를 보인다.

용천수의 pH의 범위는 5.06~8.38(평균값 6.49, 중앙값 6.56)을 보인다. 평균값과 중앙값은

Table 1. General statistics of the physicochemical components of spring water.

Statis. / Data	Min. Value	Max. Value	Mean	Median	Std. Dev.	Sample Variance	Skewness	Kurtosis
Temp. (℃)	1.00	13.90	7.87	8.20	3.04	9.25	-0.24	-0.50
ln(T)	0.00	2.63	1.96	2.10	0.53	0.29	-1.82	4.41
pH	5.06	8.38	6.49	6.56	0.58	0.34	0.35	2.45
ln(pH)	1.62	2.13	1.87	1.88	0.09	0.01	-0.16	1.88
Eh (mV)	64.20	685.90	290.37	292.85	68.53	4696.29	2.66	20.12
ln(Eh)	4.16	6.53	5.64	5.68	0.26	0.07	-2.70	20.41
EC (uS/cm)	9.50	270.00	89.45	83.30	44.49	1979.04	1.17	-1.18
ln(EC)	2.25	5.60	4.36	4.42	0.58	0.33	-1.18	2.90
TDS (mg/l)	4.00	128.00	41.37	38.50	20.83	433.90	1.25	3.76
ln(TDS)	1.39	4.85	3.58	3.65	0.59	0.34	-1.27	3.34
DO(mg/l)	4.57	12.13	7.65	7.93	1.70	2.90	0.10	-0.15
ln(DO)	1.52	2.50	2.01	2.07	0.23	0.05	-0.42	-0.43
Alkalinity	7.93	102.21	35.21	31.43	17.81	317.36	1.01	1.85
ln(Alkalinity)	2.07	4.63	3.43	3.45	0.52	0.27	-0.24	-0.49
Discharge (ml/sec)	4.26	182.19	53.10	32.10	45.57	2076.74	1.25	0.81
ln(Discharge)	1.45	5.21	3.61	3.47	0.89	0.79	-0.09	-0.50

Table 2. General statistics of the physicochemical components of groundwater.

Statis. / Data	Min. Value	Max. Value	Mean	Median	Std. Dev.	Sample Variance	Skewness	Kurtosis
Temp. (℃)	3.20	15.70	10.37	11.40	4.29	18.44	-0.81	0.96
ln(T)	1.16	2.75	2.23	2.43	0.57	0.32	-1.71	3.21
pH	5.69	7.39	6.73	6.81	0.63	0.40	-0.79	0.10
ln(pH)	1.74	2.00	1.90	1.92	0.10	0.01	-0.94	0.51
Eh (mV)	171.60	311.00	232.83	230.75	51.15	2616.35	0.42	-0.42
ln(Eh)	5.15	5.74	5.43	5.44	0.22	0.05	0.06	-0.84
EC (uS/cm)	25.60	252.00	109.17	78.95	79.86	6377.73	1.34	1.84
ln(EC)	3.24	5.53	4.46	4.37	0.77	0.59	-0.32	0.96
TDS (mg/l)	12.00	118.00	55.17	45.00	38.14	1454.57	0.86	0.29
ln(TDS)	2.48	4.77	3.78	3.78	0.80	0.64	-0.59	0.41
DO(mg/l)	4.51	10.90	7.72	6.96	2.45	5.99	0.32	-1.17
ln(DO)	1.51	2.39	2.00	1.94	0.33	0.11	-0.22	-0.34
Alkalinity	36.00	104.95	71.80	80.55	26.60	707.45	-0.45	-1.27
ln(Alkalinity)	3.58	4.65	4.21	4.39	0.43	0.18	-0.80	-1.30

큰 차이를 보이지 않는다. 왜도와 첨도는 각각 0.35와 2.45로서 양의 값을 보인다. 왜도가 양인 것은 평균치보다 적은 자료값들이 큰 것들에 비해 더 많다는 것을 의미하며, 음인 것은 그 반대의 경우를 의미한다(Carr, 1995). pH 분포는 정규분포보다는 대수정규분포에 더 가깝다 (Fig. 3). 지하수의 pH는 5.69~7.39(평균값 6.73, 중앙값 6.81)를 보인다. 평균값과 중앙값은 큰 차이를 보이지 않는다. 왜도는 음의 값을 보이고, 첨도는 양의 값을 보이지만 정규분포에 가까운 형태를 나타낸다.

용천수의 Eh의 범위는 64.2~685.9mV(평균값 290.4mV, 중앙값 292.9mV)이다. 왜도와 첨도는 둘 다 양의 값을 보이고, 특히 첨도는 20.12로 큰 편이어서 빈도분포가 뾰족한 형태를 보인다. Eh 분포는 정규분포보다는 대수정규분포에 더 가깝다. 지하수의 Eh의 범위는 171.6~311.0mV(평균값 232.8mV, 중앙값 230.8mV)이다. 왜도는 0.42로서 양의 값을 보이고 첨도는 -0.42로서 음의 값을 보인다.

용천수의 EC는 9.5~270μS/cm(평균값 89.5 μS/cm, 중앙값 83.3μS/cm)이다. 왜도는 양의 값 그리고 첨도는 음의 값을 보인다. EC는 정규분포보다는 대수정규분포에 가까운 형태를 보인다. 지하수의 EC는 25.6~252μS/cm(평균값 109.2μS/cm, 중앙값 79.0μS/cm)이다. 왜도와 첨도는 둘 다 양의 값을 보인다.

용천수의 TDS는 4~128mg/l(평균값 41.4mg/l, 중앙값 38.5mg/l)이다. 왜도와 첨도는 둘 다 양의 값을 보인다. TDS는 정규분포보다는 대수정규분포에 가까운 형태를 보인다. 지하수의 TDS는 12~118mg/l(평균값 55.2mg/l, 중앙값 45.0mg/l)이다. 왜도와 첨도는 둘 다 양의 값을 보인다. 일반적으로 EC와 TDS는 서로 직선적인 정비례관계를 나타낸다. 본 연구지역에서도 EC와 TDS는 비슷한 빈도분포 형태를 보인다.

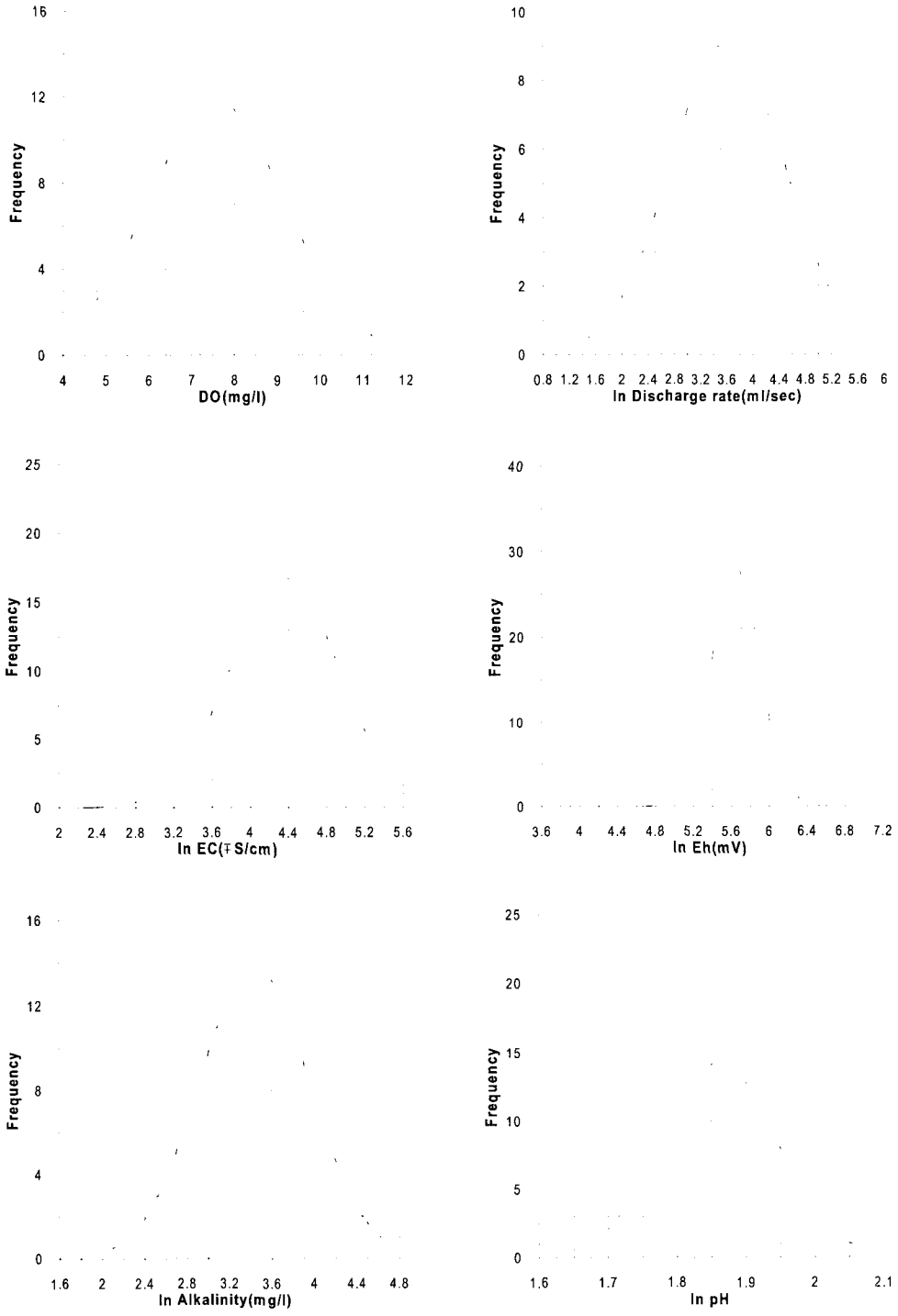

Fig. 3. Frequency distribution of the physicochemical components.

용천수의 DO의 범위는 4.57~12.13mg/l(평균값 7.65mg/l, 중앙값 7.93mg/l)이다. 왜도는 양의 값 그리고 첨도는 음의 값을 보인다. DO는 대부분의 다른 성분들과는 달리 대수정규분포보다는 정규분포에 보다 더 가까운 형태를 보인다. 지하수의 DO의 범위는 4.51~10.9mg/l(평균값 7.72mg/l, 중앙값 6.96mg/l)이다. 왜도는 양의 값 그리고 첨도는 음의 값을 보인다.

용천수의 알칼리도는 7.93~102.21mg/l(평균값 35.21mg/l, 중앙값 31.43mg/l)이다. 왜도와 첨도는 각각 1.01, 1.85로서 양의 값을 보인다. 알칼리도는 정규분포보다는 대수정규분포에 좀 더 가까운 형태를 보인다. 지하수의 알칼리도는 36.00~104.95mg/l(평균값 71.80mg/l, 중앙값 80.55mg/l)이다. 왜도와 첨도는 각각 -0.45, -1.27로서 음의 값을 나타낸다.

용천수의 용출량은 40개소에서 측정되었다. 용출량은 수도꼭지를 통하여 용출되는 지점에서는 측정하지 않았다. 용출량의 범위는 4.26㎖/s(368ℓ/day)~182.2㎖/s(15,742ℓ/day)이다. 이와 같이 용천수의 용출량은 지점에 따라 큰 차이를 보인다. 왜도와 첨도는 각각 1.25, 0.81로서 양의 값을 나타낸다. 용출량은 정규분포보다는 대수정규분포에 더 가까운 형태를 보인다.

염도는 모든 지점에서 0 또는 0에 근접한 값을 보이기 때문에 일반통계분석을 실시하지 않았다.

위에서 알 수 있는 바와 같이, 자료의 제한성이나 측정오차 등으로 인해서 완전한 확률변수(random variable)가 될 수 없기 때문이며, 자료들의 분포가 완전한 정규분포를 이루지 못하는 것이 일반적인 경향이다. 상기 물리화학적 성분들의 빈도 분포를 보면, 수온과 DO를 제외한 성

Table 3. Matrix of correlation coefficients among physicochemical components.

Component	ln pH	ln Eh	ln EC	ln TDS	ln Sal.	DO	ln Alkalinity	ln Discharge	ln Surface elevation
ln pH	1								
ln Eh	0.1275	1							
ln EC	0.0951	-0.0442	1						
ln TDS	0.1100	-0.0402	0.9981	1					
ln Sal.	-0.0180	-0.1369	0.6772	0.6713	1				
DO	0.4476	-0.0707	-0.1241	-0.1068	-0.1368	1			
ln Alkalinity	-0.0633	-0.1038	0.3378	0.3421	0.4795	-0.1331	1		
ln Discharge	-0.0663	0.0910	0.0348	0.0323	0.2665	-0.0418	0.1356	1	
ln Surface elevation	0.0483	0.0137	-0.3210	-0.3107	-0.3418	0.0930	-0.1689	-0.1353	1

분들은 정규분포 보다는 대수정규분포에 좀더 가깝게 나타난다.

성분들간의 상관성을 살펴보면, EC와 TDS간의 상관계수가 0.9981로서 가장 높게 나타난다(Table 3). 이와 같이 EC와 TDS간의 높은 상관성은 EC와 TDS가 정비례 관계를 가지는 성질 때문이기도 하지만 TDS를 전기전도도미터로 측정하여 측정기에 내장된 상관식에 의해서 TDS를 산정하였기 때문이기도 하다. 염분농도도 전기전도도미터로 측정하였기 때문에 염분농도와 EC 그리고 염분농도와 TDS 간의 상관계수는 비교적 높게 나타나는 것은 정상적인 결과이다.

알칼리도와 용출량의 상관성은 높지는 않지만 양의 상관성을 보인다. 용천의 지표 해발고도와 물리화학적 성분들과의 상관성을 보면, 상관성이 높지는 않지만 대체로 일반적인 경향성에 따른다는 것을 알 수 있다. EC는 지표 해발고도와 음의 상관성을 가진다. 일반적으로 함양지역에서 함양된 지하수가 지하로 흘러서 심도가 깊어질수록 암석과의 반응에 의하여 지하수 중의 용존물질의 농도가 높아지고 따라서 EC값도 커진다. 이러한 일반적인 경향성에 따라서 연구지역에서도 해발고도가 낮을수록 EC값이 높다는 것을 지시한다. EC와 용천의 해발고도 간의 상관성이 낮은 이유는 EC값이 해발고도보다는 지하수 유로나 지질에 더 크게 좌우됨을 암시한다. EC와 TDS는 정비례 관계에 있으므로 TDS와 지표 해발고도의 상관성도 음으로 나타난다. 용천의 해발고도와 알칼리도 간의 상관성도 음으로 나타난다. 이는 EC나 TDS의 경우와 유사한 이유로 설명될 수 있다. 용천의 해발고도와 용출량간에는 약한 음의 상관성이 나타나며, 이는 용천의 해발고도가 낮아질수록 용출량이 많아진다는 것을 지시한다. 그러나, 용천의 해발고도와 용출량간의 낮은 상관계수는 용천의 용출량이 수리지질학적 요인(지하수 유로의 길이와 단면적, 수두경사, 수리전도도)에 의해서 더 크게 지배됨을 암시한다.

물리화학적 성분의 공간적 분포 특성

이론적인 배경

지질학적인 자료들의 공간적인 특성을 나타내는 데는 지구통계학적인 방법을 동원한다. 크리깅은 공간상에 분포하는 확률변수(random variables)들을 이용하여 자료가 없는 지점의 값을 추정해내는 강력한 지구통계학적인 방법으로서 많이 이용되고 있다. 크리깅은 원래 남아공화국의 광산공학자인 Krige가 광상 평가를 위해 통계적 기법으로 적용한 것인데(Krige, 1951), 이 후에 Matheron (1969)이 지구통계학적 기법으로 발전시켰다. 크리깅은 최적 선형 불편추정자(Best Linear Unbiased Estimator, BLUE)를 제공해주는 방법이다. 크리깅 공식은

$$Z^{*}_{p} = \sum_{j=1}^{n} W_j Z_j \qquad (1)$$

과 같다. 여기서 Z_j는 공간상의 자료 값, W_j는 Z_j에 적용되는 가중치, Z^{*}_{p}는 크리깅에 의한 p점의 추정값이다. 크리깅의 가중치는 추정값이 불편(unbiased)이고, 추정분산(estimation)이 최소가 되도록 결정되어야 한다. 따라서 크리깅을 하기 이전에 자료의 확률분포(random distribution)를 검정하기 위하여 정규분포 여부를 판단하여야 한다. 크리깅계는

$$\sum_{j=1}^{n} W_j \gamma(h_{ji}) - \mu = \gamma(h_{jp}) \qquad \forall i = 1, \ldots n \qquad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{n} W_j = 1 \qquad (3)$$

여기서 μ는 라그랑쥬 변수(Lagrangian parameter), W_j는 점 j 에서의 가중치, $\gamma(h_{ji})$는 거리 h만큼 떨어진 점 j와 점 i의 반베리오그램, $\gamma(h_{jp})$는 거리 h만큼 떨어진 점 j와 추정값이 구해질 점 p의 반베리오그램이다. 베리오그램은 공간상에 분포하는 두 자료간의 분산이며, 공간상에 분포하는 자료의 공간적 연속성은 반베리오그램으로 나타낸다(Davis, 1986). 반베리오그램은 공간상에 분포하는 임의의 두 자료간의 차이의 분산이다.

크리깅은 조건에 따라 정규크리깅(ordinary kriging), 코크리깅(cokriging), 만능크리깅(universal kriging) 등이 있다. 반베리오그램(semivariogram)에

서 자료의 특성이 정상적(stationary)인 경우는 공분산이 두 점간의 거리만의 함수라는 가정을 포함하며(조웅현 외, 1994), 공간상에서 상관성이 없어지는 자료간의 거리에서 반베리오그램의 최적곡선이 수렴한다(정상용, 1993a). 이 경우에는 정규크리깅을 하게 된다. 그러나 거리에 따라 반베리오그램이 증가하거나 감소하는 비정상 확률함수(nonstationary random function)를 이루는 경우에는 원칙적으로 만능크리깅을 이용하여 자료의 공간적 분포를 구하여야 하지만, 크리깅 분석시 큰 오차를 발생시키지 않는 경우에는 정상확률함수로 가정하여 분석하기도 한다.

(2)식에서 알 수 있는 바와 같이 크리깅을 하기 위해서는 반베리오그램을 구하여야 한다. 반베리오그램은

$$2\gamma(h) = E\{\sum[Z(x)-Z(x+h)]^2\} \quad (4)$$

와 같다. 여기서 γ(h) 는 반베리오그램이다. Z(x)는 임의의 지점 x에 있는 자료의 값이며 Z(x+h)는 Z(x)에서 h만큼 떨어진 지점의 자료값이다. 반베리오그램에는 구상형 모델, 지수형 모델, 가우스 모델 그리고 선형모델이 있다. 이렇게 하여 반베리오그램의 모델이 결정되면, (2)식과 (3)식에 의해서 가중치 W_i가 구해지고, 이를 (1)식에 대입하면 p점의 추정값 Z^*_p가 구해진다. 본 연구에서는 지구통계 소프트웨어인 GS+(Gamma Design Software Ver. 5.15)를 이용하여 반베리오그램을 구하였다.

동일한 지역에 대해서 여러 가지 다른 성분의 자료들을 크리깅하였을 때, 서로 다른 성분들 간의 상대적인 비교를 위해서는 구해진 자료들을 동일한 기준으로 표준화할 필요성이 있다. 서로 다른 성분들을 표준화한 자료값 Z_s는

$$Z_s = \frac{Z_i - \overline{Z}}{s} \quad (5)$$

와 같다(Davis, 1986; Hong and Rosen, 2001). 여기서, Z_i는 자료값, $\overline{Z}$는 평균값, s는 표준편차이다.

크리깅의 적용

앞에서 살펴본 바와 같이(Table 1), 물리화학적 성분들은 정규분포를 보이지 않는다. 그러나, 크리깅은 최적 선형 불편추정자이기 때문에 자료가 꼭 정규분포를 나타낼 필요는 없다. 따라서, 대수정규분포보다는 정규분포에 더 가까운 빈도분포를 보이는 DO를 제외한, pH, EC, Eh, 알칼리도, 용출량에 대해서는 대수값을 사용하여 크리깅을 수행하였다. 물리화학적 성분들의 빈도분포가 정규분포 또는 대수정규분포에 가까우므로 정규크리깅을 적용하였다. 정규크리깅 기법을 이용하여 DO, pH, Eh, EC, 알칼리도, 용출량에 대해 반베리오그램을 구한 결과, DO, Eh, EC는 가우시안 모델에 적합한 것으로 나타났으며, 용출량은 구상형 모델, pH와 알칼리도는 지수형 모델에 적합한 것으로 나타났다(Fig. 4, Table 4). 반베리오그램은 결정계수(r^2)와 잔차제곱의 합(RSS, Residual

Table 4. Semivariogram parameters of the physicochemical components.

Physicochemical component	Model	Nugget	Sill	Range(m)	r^2	RSS
ln pH	Exponential	0.0059	0.0149	16240	0.470	1.75E-5
ln Eh	Gaussian	0.0387	0.1454	9890	0.901	6.30E-4
ln Discharge rate	Spherical	0.0750	0.8110	800	0.008	0.112
DO	Gaussian	1.4280	3.5050	3550	0.881	0.605
ln Alkalinity	Exponential	0.0380	0.2780	310	0.163	2.53E-3
ln EC	Gaussian	0.2580	1.5770	22230	0.864	0.0117

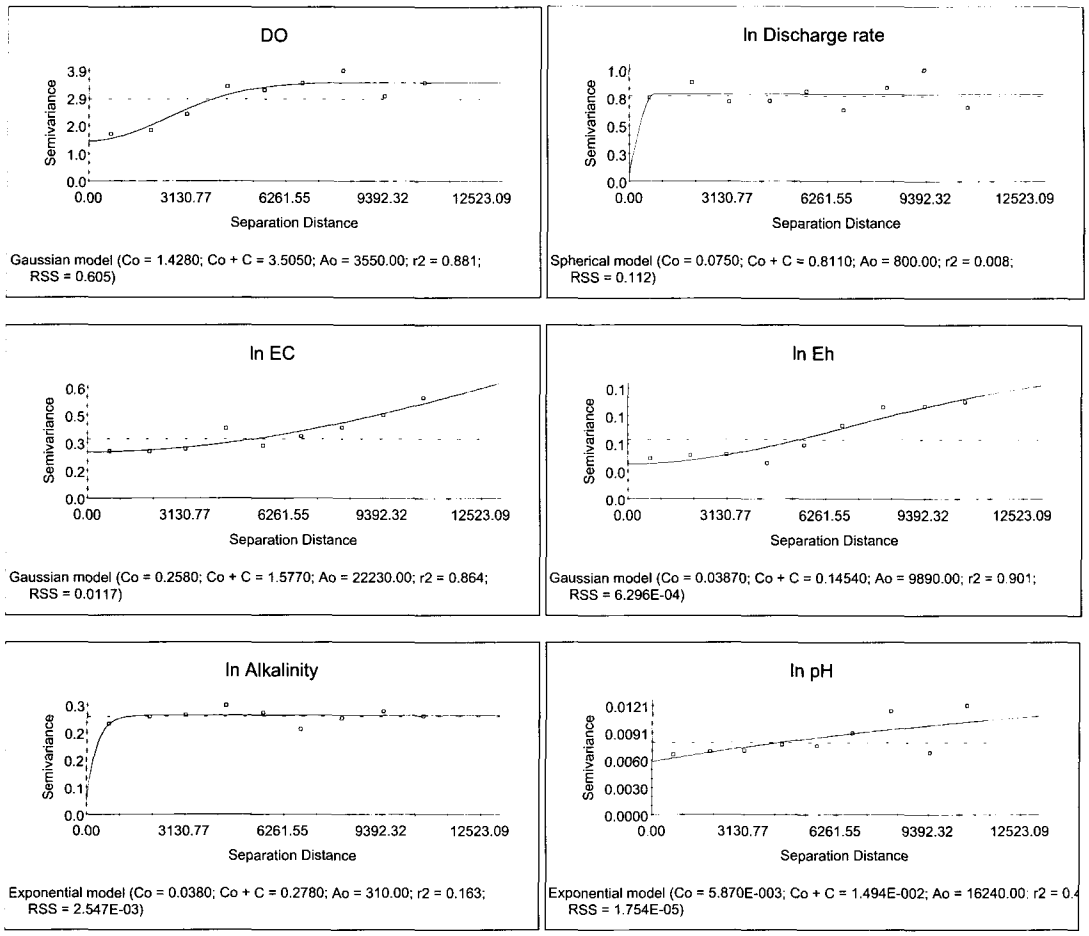

Fig. 4. Semivariogram of DO, discharge rate, EC, Eh, pH and alkalinity.

Sum of Square)을 고려하여 결정하였다(Fig. 4).

반베리오그램의 변수는 sill, nugget, 범위(range)가 있다. 유효범위(effective range)는 공분산이 소멸하는 거리 즉, 공간적인 의존성이 나타나는 범위를 말한다. 구상형 모델과 선형 모델의 범위는 유효범위와 동일하지만, 지수형 모델의 유효 범위는 범위의 3배이고, 가우시안 모델의 유효범위는 범위의 $\sqrt{3}$배이다. 각 성분의 반베리오그램의 변수는 Table 4에 제시되어 있다. pH의 유효범위는 48,720m로서 매우 크며, EC와 Eh의 유효범위도 크게 나타난다. 따라서, pH, EC, Eh의 경우에는 넓은 범위까지 측정값들 간의 연관성이 있다는 것을 지시한다. 한편 알칼리도와 용출량의 경우에는 공간적인 연관성의 거리가 짧다는 것을 지시한다. 이는 용천수의 용출량과 알칼리도가 지역적인 균열의 발달 상태에 따라 영향을 받고 있다는 것과 관련될 것이다. 균열의 발달상태와 용천수의 용출량 및 알칼리도의 관계는 향후 더 깊이 있게 다루어져야 할 것이다.

크리깅에 의한 공간적인 분포 특성

반베리오그램을 근거로 pH, EC, Eh, DO, 알칼리도, 용출량에 대한 정규크리깅을 수행하여 Fig. 1의 굵은 사각형 지역에 대하여 공간적인 분포도를 작성하였다(Fig. 5). pH의 경우 청룡동, 남산동, 구서동, 모라동, 덕포동, 괘법동, 주례동, 당감

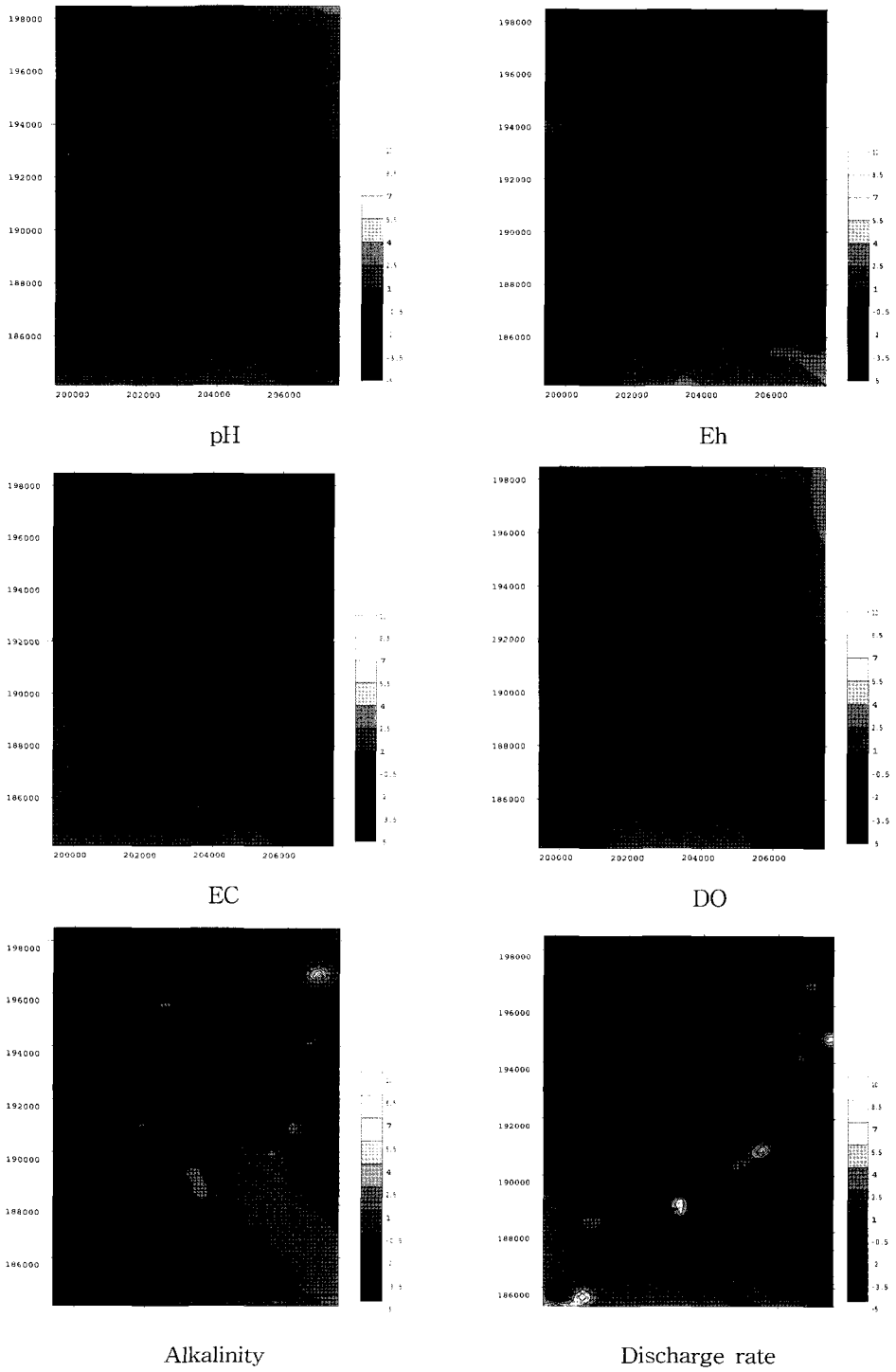

Fig. 5. Spatial anomaly of the physicochemical components.

동, 개금동에서 고 이상대가 나타나고, 저 이상대는 금곡동, 화명동, 만덕동, 사직동, 온천동, 장전동일대에서 나타난다. pH의 값이 낮다는 것은 용천수의 지하 체재시간이 짧거나 혹은 용천수 유로의 길이가 짧다는 것을 지시한다. 따라서 연구지역의 북동쪽과 남서쪽에 분포하는 용천수의 경우에는 지하 순환 경로가 길고 북서쪽과 동쪽에 분포하는 용천수의 경우에는 순환 경로가 짧다는 것을 암시한다.

Eh는 당감동, 부암동에서는 높게, 모라동, 덕천동, 구포동, 덕포동, 괘법동, 감전동에서는 낮게 나타난다. 양의 Eh값은 산화환경을 나타낸다. 심부 지하수계에서는 일반적으로 Eh가 낮고 함양지역 부근에서는 Eh가 높다. 지하수가 대수층을 통과하면서 용존산소는 환원물질들과 접하게 되어 화학적으로 환원 상태가 되고, 결과적으로 Eh가 낮아진다. 따라서 연구지역의 남서쪽에 분포하는 용천수의 순환 길이가 길다는 것을 그리고 남동쪽에 분포하는 용천수의 순환 길이가 짧다는 것을 암시한다.

EC는 덕천동, 구포동, 모라동, 괘법동, 감전동, 주례동에서 고 이상대를, 장전동, 금성동, 청룡동, 남산동, 구서동에서 저 이상대를 보인다. EC는 용존이온의 농도가 높을수록 높아지는 경향성을 가진다. 용존이온의 농도는 자연상태에서는 물-광물반응 정도에 좌우된다. 따라서, 연구지역의 남서쪽에 위치하는 용천수는 물-광물반응 정도가 높다는 것을 그리고 북동쪽에 위치하는 용천수는 상대적으로 물-광물반응 정도가 낮다는 것을 암시한다.

DO는 청룡동, 남산동에서 고 이상대를 보이고, 금곡동, 화명동, 금성동, 덕천동에서 저 이상대를 보인다. 높은 DO값은 산소를 소모하는 유기물 등이 비포화대 내의 다른 지역에 비해 작음을 암시한다. 일반적으로 지하로 침투하는 물 속에 들어있던 용존산소가 불포화대를 거쳐서 포화대로 침투할 때, 대부분의 용존산소는 유기물과 반응하여 소모된다. 이런 원인으로 설명하면 연구지역의 북동쪽인 청룡동, 남산동의 용천수는 상대적으로 유기물과의 반응정도가 낮았음을 암시하고 있으며, 연구지역의 북서쪽인 금곡동, 화명동의 용천수는 유기물과의 반응정도가 높았음을 암시한다.

알칼리도는 남산동에서 높게 나타나고, 만덕동, 모라동에서 낮게 나타난다. 알칼리도는 이산화탄소 함량에 크게 영향을 받는다. 그리고, 이산화탄소 함량은 토양과 지하 천부에서 높게 나타나므로 연구지역의 북동쪽에 위치하는 용천수의 순환깊이가 얕다는 것을 암시한다. 반대로 연구지역의 남서쪽과 만덕동에 위치하는 용천수의 순환깊이는 상대적으로 깊다는 것을 암시한다.

용천수의 용출량은 온천동, 구서동, 초읍동에서는 높고, 화명동, 구포동, 만덕동에서는 낮다. 용천수의 용출량은 대체로 연구지역의 동편에서는 높고 서편에서는 낮은 경향성을 보인다. 이는 연구지역의 동편에서는 지하 함양률이 크고, 서편에서는 지하 함양률이 낮음을 암시한다. 한편 지표수 유출은 금정산의 동쪽 보다 서쪽 계곡을 따라 더 많이 일어난다.

결론 및 토의

금정산-백양산일대의 용천수 60개소에 대하여 물리화학적 성분(수온, pH, EC(전기전도도), TDS(총고용물질), 염분농도, Eh(산화-환원전위), DO(용존산소), 알칼리도, 용출량)을 현장에서 측정하였으며, 일반통계 분석과 지구통계 분석(크리깅)을 이용하여 이 성분들의 특성과 공간적인 분포를 연구하였다. 또한 용천수의 물리화학적 성분을 6개 지하수공의 시료와 비교하였다. 지하수의 시료수가 제한적이어서 측정된 값이 금정산-백양산 전체 지하수를 대표한다고 단정지을 수는 없으나, 지하수와 용천수의 물리화학적 성분을 비교 분석하는 것은 의미가 있다고 볼 수 있다. 금정산일원의 지하수는 크게 남북방향과 동북동방향의 단층대 및 균열대에 지배를 받고 있다. 또한 용천수 분포 개수 및 용출량은 금정산의 서측보다는 동측에서 더 많으며 이는 동측에 균열대가 더 많이 발달되어 있는 것(손문 외, 2002)과 관련된다.

용천수의 온도는 1.0~13.9℃로서 지하수의 온도(3.2~15.7℃)와 비교하였을 때 상대적으로 기온의 영향을 더 많이 받고 있는 것으로 나타난다. 용천수의 pH(5.06~8.38)는 지하수의 pH(5.69~7.39)와 큰 차이를 보이지 않는다. 용천수의 Eh의 범위는 64.2~685.9mV로서 지하수의 Eh 범위(171.6~

311.0mV)보다 훨씬 넓게 나타난다. 이는 용천수가 지표의 영향을 상대적으로 더 많이 받고 있기 때문으로 보인다. 용천수의 EC(9.5~270μS/cm)와 지하수의 EC(25.6~252μS/cm)는 서로 큰 차이를 보이지 않는다. 용천수의 TDS(4~128mg/l)와 지하수의 TDS(12~118mg/l)도 서로 비슷하게 나타난다. 이는 EC와 TDS는 서로 직선적인 정비례관계를 가지는 일반적인 경향성 때문이다. 용천수의 DO(4.57~12.13mg/l)와 지하수의 DO(4.51~10.9mg/l)도 비슷한 범위를 보인다. 용천수의 알칼리도는 7.93~102.21mg/l, 지하수의 알칼리도는 36.00~104.95mg/l로서 지하수의 알칼리도가 약간 더 크게 나타난다. 용천수의 용출량은 4.26㎖/s(368ℓ/day)~182.2㎖/s(15,742ℓ/day)이다. 이와 같이 용천수의 용출량이 지점에 따라 큰 차이를 보이는 이유는 용천 분포지점의 유동성 균열의 발달상태가 서로 다르기 때문이다.

성분들간의 상관성을 살펴보면, EC와 TDS간의 상관계수가 0.9981로서 가장 높으며 이는 EC와 TDS가 정비례 관계를 가지는 일반적인 성질로 볼 때 당연한 결과이다. 알칼리도와 용출량의 상관성은 높지는 않지만 양의 상관성을 보인다. 용천의 해발고도와 물리화학적 성분들과의 상관성을 보면, 상관성이 높지는 않지만 대체로 일반적인 경향성에 따른다는 것을 알 수 있다. EC와 용천의 해발고도는 비교적 낮은 음의 상관성을 가지지만, 함양지역보다 배출지역의 지하수의 EC값이 높다는 일반적인 경향성과 대체로 일치한다. 용천의 해발고도와 알칼리도간의 상관성도 음으로 나타난다. 이는 EC나 TDS의 경우와 유사한 이유로 설명될 수 있다. 용천의 해발고도와 용출량간에는 약한 음의 상관성을 나타나며, 이는 용천의 해발고도가 낮아질수록 용출량이 많아진다는 것을 지시한다.

본 연구지역에서는 물리화학적 성분들의 빈도분포가 완전한 정규분포 또는 대수정규분포를 보이지는 않으나, 수온과 DO는 정규분포 그리고 pH, EC, TDS, Eh, 알칼리도, 용출량은 대수정규분포에 좀더 가깝게 나타난다. 따라서, 정규분포에 가까운 성분은 측정값을 이용하고, 대수정규분포에 가까운 성분은 자연로그값을 취하여 정규크리깅을 수행하였다. 반베리오그램을 구한 결과, DO, Eh, EC는 가우시안 모델에 적합한 것으로 나타났으며, 용출량은 구상형 모델, pH와 알칼리도는 지수형 모델에 적합한 것으로 나타났다.

각 성분별로 크리깅한 계산값을 표준화하여 등치선도를 작성하였다. pH값의 분포도를 보면 연구지역의 북동쪽과 남서쪽에서는 용천수의 pH값이 높으며 지하 순환 경로가 길고, 북서쪽과 동쪽에서는 용천수의 pH값이 낮으며 순환 경로가 짧다는 것을 암시한다. Eh 분포도에 의하면 연구지역의 남서쪽에 분포하는 용천수의 Eh는 낮아서 순환 길이가 길다는 것을 그리고 남동쪽에 분포하는 용천수의 Eh는 높아서 순환 길이가 짧다는 것을 암시한다. EC 분포도를 보면 연구지역의 남서쪽에 위치하는 용천수의 EC는 높아서 물-광물 반응 정도가 높다는 것을 그리고 북동쪽에 위치하는 용천수의 EC는 낮아서 상대적으로 물-광물 반응 정도가 낮다는 것을 암시한다. DO 분포도를 보면, 연구지역의 북동쪽의 용천수의 DO는 높아서 상대적으로 유기물과의 반응정도가 낮았음을 암시하고 있으며, 연구지역의 북서쪽의 용천수의 DO는 낮아서 유기물과의 반응정도가 높았음을 암시한다. 알칼리도 분포도를 보면, 연구지역 북동쪽의 용천수의 알칼리도가 높아서 순환깊이가 얕다는 것을 암시하고 연구지역 남서쪽과 만덕동의 용천수의 알칼리도가 낮아서 순환깊이가 상대적으로 깊다는 것을 암시한다. 용천수의 용출량 분포도에 의하면, 대체로 연구지역의 동편에서는 용출량이 높고 서편에서는 낮은 경향성을 보인다. 이는 연구지역의 동편에서는 지하 함양률이 크고 서편에서는 지하 함양률이 낮음을 암시한다.

용천수의 물리화학적 성분의 공간적인 분포는 크게 지질학적인 요인, 지형적인 요인, 기상적인 요인 그리고 인위적인 요인에 의해서 지배될 것이다. 본 연구지역은 인위적인 오염의 영향이 비교적 작은 지역이고, 연구 면적상으로 볼 때 기상적인 영향에 의한 차이는 크지 않을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구지역에서는 주로 지질학적인 요인과 지형적인 요인이 큰 비중을 차지할 것이다. 지질학적인 요인으로는 암질과 균열 발달 상태가 중요한 요인이며, 지형적인 요인으로는 해발고도가 있다. 본 연구지역은 주로 화강암류와 안산암질암으로 구성되어 있으며, 주로 남북방향과

동북동 방향의 구조대가 발달되어 있어서 이들 구조대와 용천의 분포가 연관을 가질 것이다. 그러나, 용천과 균열대의 발달 상태의 연관성에 대해서는 향후에 상세한 연구가 이루어져야 할 것이다. 안산암질암지역(덕천동, 화명동, 만덕동 일대)과 화강암류 지역에 분포하는 용천의 물리화학적 성분의 차이는 크게 나타나지 않는다. 그러나, 지질학적 요인에 의한 용천수의 물리화학적 성분 특성은 앞으로 더 연구되어야 할 것이다. 아울러서, 물리화학적 성분과 용존이온 농도간의 관련성도 본 연구에는 포함되지 않았다. 본 연구 자료와 2000년의 자료(Kim, 2001)간의 물리화학적 성분의 시간적인 변동성을 살펴본 결과, 다소간의 시간적인 변동성이 나타나지만 보다 장기간의 자료를 가지고 해석하여야 물리화학적 성분의 시간적인 변화양상을 이해할 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호: R05-2001-000-00249-0) 지원으로 수행되었으며, 연구를 지원해주신 한국과학재단에 감사드린다.

참 고 문 헌

고용권, 김천수, 배대석, 김건영, 정형재, 1999a, 초정지역 탄산수의 지구화학적 연구 I: 수리화학, 지하수환경, 6권, 159-170.

고용권, 김천수, 배대석, 최현수, 1999b, 초정지역 탄산수의 지구화학적 연구II: 동위원소, 지하수환경, 6권, 171-179.

고용권, 윤성택, 김천수, 최현수, 김건영, 1999c, 중원지역 탄산수의 지구화학적 진화, 자원환경지질, 32권, 469-483.

고용권, 김천수, 최현수, 박맹언, 배대석, 2000, 강원도지역 탄산약수의 지화학적 연구, 지하수환경, 7권, 73-88.

금성동 청년회, 2001, 금정산성, 57p.

김건영, 고용권, 배대석, 김천수, 박맹언, 2001, 경상지역 신촌 탄산약수의 지화학적 및 동위원소 특성, 자원환경지질, 34권, 1호, 70-88.

성익환, 이병대, 조병욱, 류충렬, 김경수, 이춘오, 이봉주, 임현철, 지세정, 김용욱, 성기성, 박덕원, 이대하, 김중렬, 현혜자, 김유성, 1999, 한국고속철도건설공단 금정터널 지하수 유동체계 분석 및 동래온천지역영향평가, 한국자원연구소.

손치무, 이상만, 김영기, 김상욱, 김형식, 1978, 동래·월내도폭(1:50000) 및 설명서, 자원개발연구소.

손문, 함세영, 김인수, 이융희, 정훈, 류춘길, 송원경, 2002, 부산시 금정산 일원의 지하수 유동 해석을 위한 단열계 분석, 지질공학, 12권, 3호, 305-317.

염병우, 1993, 화강암내의 부존하는 지열수에 대한 환경수리지구화학적 연구: 포천, 고성, 예산 및 중원지역을 중심으로, 박사학위논문, 서울대학교.

윤정아, 김규한, 2000, 남한 탄산수의 지구화학적 특성과 안정동위원소 조성, 지하수환경, 7권, 3호, 116~124.

장연수, 정상용, 1997, 비균질성을 고려한 해성점토 매립장의 수리전도도 추정과 오염이동 특성, 지반공학, 13권, 1호, 85-100.

정상용, 1993a, 지하수위 분포 추정을 위한 Universal Kriging, 1, k계의 고유 확률함수, 지질공학, 3권, 1호, 39-49.

정상용, 1993b, 지하수위 분포 추정을 위한 Universal Kriging, 2, 제한적 최대우도법, 지질공학, 3권, 1호, 51-61.

정상용, 이강근, 1995, 난지도 매립지 일대의 지하수의 분포 추정을 위한 복합크리깅의 응용, 지하수환경, 2권, 2호, 28-63.

정상용, 유인걸, 윤명재, 권해우, 허선희, 1999, 불균질·이방성 대수층의 지하수 유동분석에 지구통계기법의 응용, 지질공학, 9권, 2호, 147-159.

정상용, 심병완, 김규범, 2000, 영산강·섬진강 유역의 지하수 데이터베이스 자료에 대한 지구통계학적 분석, 지질공학, 10권, 2호, 131-142.

조웅현, 박영기, 김환흥, 1994, Kriging 기법과 수치모형에 의한 이안지구 대수층의 투수

량 계수, 지하수환경, 1권, 2호, 113-120.

정찬호, 정기영, 1999, 경북 청송지역 달기 탄산약수의 지화학적 수질특성과 생성기원, 자원환경지질, 32권, 455-468.

정찬호, 이진국, 2000, 경상계 퇴적암에서 산출되는 탄산 지하수의 지화학적 특성과 생성기원, 지질공학, 10권, 51-62.

함세영, 조명희, 황진연, 김진섭, 성익환, 이병대, 2000, 부산 금정산-백양산 일대 용천수, 지하수 및 지열수의 지화학적 특성, 한국환경과학회지, 9권, 3호, 229-239.

Aboufirassi, M., and Marino, M.A., 1984, Cokriging of Aquifer Transmissivities from Field Measurement of Transmissivity and Specific Capacity, Mathematical Gelolgy, v. 16, n. 1, 19-35.

Aboufirassi, M., and Marino, M.A., 1983, Kriging of Water Levels in the Souss Aquifer, Mathematical Gelolgy, v. 15, n. 4, 537-551.

Caboi, R., Cidu, R., Fanfani, L. and Zuddas, P., 1993, Geochemistry of the hige PCO_2 waters in Longudro, Sardina, Italy, Appl. Geochem, v. 8, 153-160.

Carr, J.R., 1995, Numerical Analysis for the geological Sciences, Prentice Hall, 592p.

Choi, H.S, 1998, Hydrogeochmical and environmental isotopic studies of the carbonate-type groundwaters in the Jungwon and Munkyeong Areas. Unpub, Ms. Thesis, Korea Univ., 113p.

Dalton, M.G., and Upchurch, S.G., 1978, Interpretation of hydrochemical facies by factor analysis, Ground Water, v. 16, n. 4, 228-233.

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, v. 27, n. 6, 763-788.

Davis, J.C., 1986, Statistics and Data Analysis in Geology, second edition, John Willey & Sons, Inc.

Desbarats, A. J., 1994, Spatial Averaging of Hydraulic Conductivity Under Radial Flow Conditions, Mathematical Geology, v. 26, n. 1, 1-22.

Griesshaber, E., O'Nions, R.K., Oxburgh, E.R., 1992, Helium and carbon isotope systematics crustal fluids from the Eifel, the Rhine Graben and Black Forest, F. R. G., Chem. Geol., v. 99, 213-235.

Hong, Y.-S. and Rosen, M.R., 2001, Intelligent characterisation and diagnosis of the groundwater quality in an urban fractured-rock aquifer using an artificial neural network, Urban Water, v. 3, 193-204.

Jensen, J.L., Corbett, P.W.M., Pickup, G.E., and Ringross, P.E., 1996, Permeability Semivariograms, Geological Structure, and Flow Performance, Mathematical Geology, v. 28, n. 4, 419-439.

Kim, MS, 2001, Hydrogeological characteristics of crystalline rocks in Mt. Geumjeong and Baekyang area, Pusan, Korea, master thesis, Pusan National University, 199p.

Krige, D.G., 1951, A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand, Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa, 52, 119-139.

Kitanidis, P.A., and Vomvoris, E.G., 1983, A Geostatistical Approach to the Inverse Problems in Groundwater Modeling (Steady State) and One-Dimentional Simulations, Water Resources Research, v. 19, n. 3, 677-690.

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, v. 28, n. 5, 563-584.

Matheron, G., 1969, Le Krigeage Universal, Cah. Centre Morphol. Math., 1.

Mayo, A.L. and Muller, A.B., 1997, Low temperature diagenetic-metamorphic and magmatic contributions of external CO_2 gas to a shallow groundwater system, J. Hydrol., v. 197, 286-304.

Neuman, S.P., 1984, Role of Geostatistical 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, v. 16, n. 1, 19-35.

Pacheco, F., 1998, Application of correspondence analysis in the assessment of groundwater chemistry, Mathematical Geology, v. 30, n. 2, 129-162.

Philip, R.D., and Kitanidis, P.K., 1989, Geostatistical Estimation of Hydraulic Head Gradients, Groundwater, v. 27, n. 6, 855-865.

Rouhani, S. and Hall, T., 1988, Geostatistical schemes for groundwater sampling, J. of Hydrology, v. 103, 85-102.

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, v. 23, n. 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, v. 23, n. 7, 1269-1279.

Schofield, S. and Jankowski, J., 1998, The origin of sodium-bicarbonate groundwaters in a fractured aquifer experiencing magmatic carbon dioxide degassing, In; Arehart and Hulston(Eds.), The Ballimore region, central New South Wales, Australia, Proceeding of the 9th International Symposium on Water-rock Interaction WRI-9/Taipo/NewZealand, 271-274.

Stober, I. and Bucher, K, 1999. Deep groundwater in the crystalline basement of the Black Forest Region. Appl. Geochem., v. 14, 237-254.

Wen, X.-H., 1994, Estimation of Statistical Parameters for Censored Lognormal Hydraulic Conductivity Measurements, Mathematical Geology, v. 23, n. 6, 717- 732.

Yeh, W.W-G., Yoon, Y.S., and Lee, K.S., 1983, Aquifer Parameter Identification with Kriging and Optimum Parameterization, Water Resources Research, v. 19, n. 1, 677-690.

Yun, S.T., Koh, Y.K., Choi, H.S., Youm, S.J. and So, C.S., 1998, Geochemistry of geothermal waters in Korea: Environmental isotope and hydrochemical characteristics. II. Jungwon and Munkyeong areas, Econ. Environ. Geol., v. 31, 201-213.

투 고 일 2002년 10월 23일
심 사 일 2002년 10월 24일
심사완료일 2002년 12월 2일

함세영
부산대학교 지질학과
609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지
Tel: 051-510-2252
e-mail : hsy@pusan.ac.kr

정재열
부산대학교 지질학과
609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지
Tel: 051-510-3451
e-mail : jjy@pusan.ac.kr

크리깅 기법을 이용한 금정산-백양산 일대 용천수의 물리화학적 성분의 공간적 분포 특성 연구

류상민
부산대학교 지질학과
609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지
Tel: 051-510-3451
e-mail : lavaguy@pusan.ac.kr

강래수
부산대학교 지질학과
609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지
Tel: 051-510-3451
e-mail : atlas21c@pusan.ac.kr