

주성분분석과 지구통계법을 이용한 제주도 지하수의 수리지화학 특성 연구

고경석¹ · 김용제¹ · 고동찬¹ · 이광식² · 이승구¹ · 강철희³ · 성현정¹ · 박원배⁴

¹한국지질자원연구원, ²한국기초과학지원연구원, ³충남삼보(주), ⁴제주발전연구원

Hydrogeochemical Characterization of Groundwater in Jeju Island using Principal Component Analysis and Geostatistics

Kyung-Seok Ko^{1*}, Yongje Kim¹, Dong-Chan Koh¹, Kwang-Sik Lee², Seung-Gu Lee¹,
Cheol-Hee Kang³, Hyun-Jeong Seong¹ and Won-Bae Park⁴

¹Korea Institute of Geoscience and Mineral Resource, Daejeon 305-350, Korea

²Korea Basic Science Institute, Daejeon 305-333, Korea

³Chungnam Sambo Co., Kongju 314-921, Korea

⁴Cheju Development Institute, Cheju 690-732, Korea

The purpose of the study is to analyze the hydrogeochemical characteristics by multivariate statistical method, to interpret the hydrogeochemical processes for the new variables calculated from principal components analysis (PCA), and to infer the groundwater flow and circulation mechanism by applying the geostatistical methods for each element and principal component. Chloride and nitrate are the most influencing components for groundwater quality, and the contents of NO₃ increased by the input of agricultural activities show the largest variation. The results of PCA, a multivariate statistical method, show that the first three principal components explain 73.9% of the total variance. PC1 indicates the increase of dissolved ions, PC2 is related with the dissolution of carbonate minerals and nitrate contamination, and PC3 shows the effect of cation exchange process and silicate mineral dissolution. From the results of experimental semivariogram, the components of groundwater are divided into two groups: one group includes electrical conductivity (EC), Cl, Na, and NO₃, and the other includes HCO₃, SiO₂, Ca, and Sr. The results for spatial distribution of groundwater components showed that EC, Cl, and Na increased with approaching the coastal line and nitrate has close relationship with the presence of agricultural land. These components are also correlated with the topographic features reflecting the groundwater recharge effect. The kriging analysis by using principal components shows that PC1 has the different spatial distribution of Cl, Na, and EC, possibly due to the influence of pH, Ca, Sr, and HCO₃ for PC1. It was considered that the linear anomaly zone of PC2 in western area was caused by the dissolution of carbonate mineral. Consequently, the application of multivariate and geostatistical methods for groundwater in the study area is very useful for determining the quantitative analysis of water quality data and the characteristics of spatial distribution.

Key words : multivariate statistical method, geostatistical methods, hydrogeochemical characteristics, semivariogram, groundwater recharge

본 연구는 다변량 통계분석을 이용하여 수리지화학적 특성을 분석하고, 주성분 분석을 통해 얻어진 변수를 설명하는 수리지화학적 과정에 대한 해석, 그리고 각 성분과 주성분을 이용한 공간정보에 대하여 지구통계법을 적용하여 연구지역 지하수의 유동 및 순환 과정을 해석하고자 하였다. 제주도 지하수의 수질에 가장 많이 영향을 미치는 성분은 Cl과 NO₃이었으며, 특히 농업활동에 의해 증가되는 NO₃는 지하수 성분 중 가장 큰 변동을 보여주었다. 다변량 통계분석법인 주성분 분석(PCA)에 의한 수리지화학적 특성 분석 결과, 초기 3개의 주성분은 전체 분산의 73.9%를 설명하였다. 주성분 1은 용존 이온의 증가를 나타내며, 주성분 2는 탄산염 광물의 용해와 질산염 오염의 영향, 주성분 3은 양이온 교환반응과 규산염광물의 용해과정을 지시한다. 실험적 반베리오그램 유형 분석 결과 지하수 성분은 크게 두 그룹으로 분류되며 각각의 그룹에는 EC, Cl, Na, NO₃와 HCO₃, SiO₂, Ca, Sr이 속한다. 지하수 성분의 공간분포

*Corresponding author: kyungsok@kigam.re.kr

특징을 조사한 결과, 전기전도도(EC), Cl, Na는 해수의 영향을 받는 해안가로 갈수록 증가하는 경향을 보여주며, NO₃는 농경지의 분포와 밀접한 상관관계를 가진다. 이들 성분은 또한 지형과도 상관성을 가지며 이는 지하수 함양과의 관련성을 나타낸다. 요인 크리깅 수행 결과 PC1은 Cl, Na, EC의 공간분포와는 다른 양상을 보여주는데 이는 pH, Ca, Sr, HCO₃가 PC1에 미치는 영향 때문인 것으로 분석되었다. 서부지역에서는 PC2의 이상대가 길게 나타나며 이는 탄산염 광물의 용해와 관련이 있는 것으로 사료된다. 이상의 결과로부터 연구지역 지하수에 대한 다변량 통계분석 및 지구통계 분석 기법의 적용은 수질에 대한 복합적 정보의 정량화와 공간 특성을 해석하는데 사용될 수 있다.

주요어 : 다변량 통계분석, 지구통계기법, 수리지화학적 특성, 반베리오그램, 지하수 함양

1. 서 언

지하수의 화학적 특성은 먹는물용, 농업용, 산업용 등 사용 용도를 결정하는데 있어 중요한 요인이다. 지하수의 수질은 기후, 토양 특성, 암종, 지하수의 순환 형태, 지형, 연안지역에서의 해수침투, 인간 활동 등을 포함하는 여러 요인에 의해 영향을 받는다. 따라서 지하수의 화학적 조성은 이러한 여러 가지 요인에 의한 영향을 복합적으로 나타내게 된다.

지하수의 수리지화학적 특징을 이용하여 지하수의 진화과정에 대한 특성을 해석함으로써 지하수의 순환과정을 해석하고자 하는 연구들이 활발하게 진행되어왔다(Pitkänen *et al.*, 1999; Sanchez-Martos *et al.*, 2002; Laaksoharju *et al.*, 1999). 그러나 이러한 연구들은 수리지화학적 특성에 대한 정성적인 분석에 그치고 있어 정량적인 해석에 대한 필요성이 강조되고 있다. 다변량 통계분석(multivariate statistical analysis)과 지구통계기법(geostatistical methods)은 지하수의 화학 성분 자료를 이용하여 반응과정과 오염의 영향을 정량적으로 해석하는 방법으로 이에 대한 연구들이 최근 들어 활발하게 이루어지고 있다(Reghunath *et al.*, 2002; Cerón *et al.*, 2000; Johannesson *et al.*, 1996). 지구통계 기법은 광산, 수리지질학, 기상학, 환경공학, 석유공학, 지리정보시스템(GIS) 등 다양한 분야에서 적용되어 사용되고 있다. 지하수 수위 분포 및 지층의 불균질 특성 분석, 환경시료 표본으로부터 오염물의 전파 및 이동의 분포 등이 그 적용 사례일 것이다. 지하수 수리지화학적 성분을 이용한 지구통계기법의 대표적 적용 사례는 Cerón *et al.*(2000)과 Pebesma and de Kwaads-teniet(1997)의 연구가 있다. Cerón *et al.*(2000)는 특히 수리지화학 정보를 다변량 통계 분석 방법 중 인자분석의 일종인 대응분석(correspondence analysis)을 수행하고, 이를 통해 얻어진 새로운 인자변수들을 이용하여 지하수 수질의 공간적 분포와 시간적 변화 특징을 연구하였다.

연구지역인 제주도는 먹는물의 대부분이 지하수에

의해 전적으로 의존하고 있는데 최근 들어 인구의 증가, 산업 발달 및 생활수준의 향상으로 용수의 수요가 급증하기 때문에 이에 대처하기 위하여 지하수의 보존 관리가 중요한 현안으로 부각되고 있다. 제주도 지역의 지질특성상 지표에 도달되는 강수는 투수율이 좋은 지층을 통과하여 지하수에 쉽게 함양되는 특징을 가지므로 오염에 매우 취약한 특징을 가지고 있다(송영철 등, 1999; 오윤근과 현익현, 1997; 우남철 등, 2001). 따라서 제주도 전 지역에 걸쳐 오염 현황을 조사하고 이에 미치는 영향이 분석되어 수자원의 보존관리에 대한 대책이 마련되어야 할 것으로 사료된다.

본 연구는 제주도의 수리지화학 자료를 다변량 통계법의 하나인 주성분 분석(Principal Components Analysis)과 베리오그램 및 크리깅과 같은 지구통계 기법을 이용하여 공간 분포 특징을 고찰하고, 지질, 지형 등 자연적인 특성과 인위적인 오염이 지하수 성분의 변화에 미치는 영향과의 상관관계의 분석을 통하여 지하수 순환의 특성을 살펴보는 것이 목적이다. 따라서 주성분분석과 지구통계기법을 이용한 지하수의 수리지화학 공간 정보 해석으로부터 연구지역 지하수의 순환시스템 해석에 적용하는 연구가 수행되었다.

2. 연구지역 기상 및 수리지질

기상청 관측자료(<http://www.kma.go.kr>)에 의하면 지난 30년간(1971-2000년) 제주, 서귀포 및 성산포에서 관측된 평균 기온 15.6°C, 연평균 강수량 1716 mm이며, 최근 4년(2001-2004년)에는 평균 기온 16.4°C, 평균강수량 1878 mm로 온도 상승과 강수량 증가 현상을 보여주었다. 이광식 등(2002)에 의하면 제주도 연평균 강수량은 약 1800 mm로 내륙지방에 비하여 약 600 mm 더 많음을 보고하였다. 또한 과거 30년간의 강수 관측기록을 보면 해발 1950 m인 한라산의 지형적 영향으로 인하여 1,839 km²의 작은 면적에도 불구하고 연평균 강수량의 편차가 매우 심하며 지역별로는 남부지역이 약 2,300 mm,

북부지역이 1,800, 동부지역이 2,000 mm, 그리고 서부지역이 1,300 mm 정도로 남부지역의 약 57%에 불과함을 보고하였다. 계절적으로는 5월에서 9월까지 5개월간 전체의 65.3%의 강수량을 차지함을 알 수 있었다.

연구지역인 제주도의 지질은 투수성이 매우 양호한 화산암과 퇴적암으로 구성되어 있다. 이중 현무암질 암석은 수많은 용암류(lava flows)와 쇄설성(pyroclastic) 암석으로 구성되며 현무암은 제주도 지표면의 대부분을 차지한다. 현무암은 매우 투수성이 크고 주요 대수층을 형성한다(Koh, 2005). 현무암질 암석 하부에는 패류화석층을 포함하여 응회질 성분이 우세한 역질사암, 사암, 사질사암 및 이암으로 구성되어 있는 서귀포층이 분포한다(고기원과 윤선, 1997). 서귀포층은 서귀포시 천지연폭포 서쪽 해안가에 유일하게 지상에 노출되어 있는 지층이다. 제주도 지하수의 함량지역인 중산간 지역(표고 200-600m)의 토양은 토양층의 깊이가 얇고 자갈함량이 10~35%로 많으며 점토 함량이 20% 이하인 것이 조사되었으며, 토양내의 투수속도가 6.0~2.5 cm/h로 일반 토양의 0.5 cm/h에 비하여 매우 큰 것으로 알려져 있다(송영철 등, 1999). 따라서 강수의 많은 부분이 쉽게 토양층을 통과하여 지하로 유입될 수 있는 조건을 가지고 있는 특징을 지니고 있다. 지하수의 흐름은 지형과 거의 일치하는 양상을 보여주나, 동쪽이 수위가 상대적으로 서쪽보다는 낮음이 보고되었다(제주도, 2000). 강수량이 동쪽이 서쪽보다 많음에도 수위가 낮은 이유는 지질특성에 기인하며, 고기원 등(2003)에 의하면 동부지역 일부에서는 서귀포층 상부에 유리쇄설성 각력암층이 두껍게 분포하여 담수지하수의 확산과 해수의 유입이 잘 일어날 수 있는 지질상태를 이루고 있음을 보고하였다.

3. 연구방법 및 분석

3.1. 시료채취 및 분석방법

연구지역 지하수의 수리지화학학적 특성을 살펴보기 위하여 2002년 5월에서 2003년 2월에 걸쳐 123개의 조사공에 대하여 시료를 채취하여 분석을 실시하였다. 지하수 시료는 수리지화학학적 대표성을 확보하기 위하여 양수를 하면서 온도, 수소이온농도(pH)와 전기전도도(EC, electrical specific conductivity) 값들이 안정되었을 때 채취하였다. 온도, 수소이온농도(pH) 및 전기전도도(EC)는 현장에서 직접 측정하였으며, 알카리도는 Gran 적정법을 사용하여 분석하였다(Stumm and Morgan, 1996). 실내 분석을 위한 시료는 0.45

μm의 멤브레인 필터로 여과한 후 양이온은 농질산으로 산처리를 하였고 음이온은 냉장 보관하여 실험실로 운반되었다. 양이온 성분(Ca, Mg, Na, K, Mn, Fe, Al, Si, Sr)은 한국지질자원연구원의 초음파분무기(Ultrasonic nebuliser)가 장착된 유도결합플라즈마 원자방출분광분석기(Geoplasma, Jovin Ybon사, 프랑스)를 사용하여 분석하였으며, 음이온 성분(F, Cl, Br, PO₄, NO₂, NO₃, SO₄)은 이온크로마토그래피(DX-120, Dionex Co., 미국)를 이용하여 분석하였다.

3.2. 주성분 분석 (PCA)

주성분 분석(PCA)은 지하수의 화학조성을 평가하는데 있어 널리 사용되어왔다(Davis, 1986; Stezenbach *et al.*, 1999). 주성분 분석은 자료의 요약이나 선형 관계식을 통하여 차수(dimension)를 감소시켜 해석을 용이하게 하는데 그 목적을 가지고 있다. 주성분 분석은 여러 개의 양적 변수들 사이의 분산-공분산 관계를 이용하여 이 변수들의 선형 결합으로 표시되는 주성분을 찾고 이중에서 전체 분산을 설명하는데 중요한 m개(보통 2~3개)의 주성분으로 전체 변동(variance)의 대부분을 설명하고자 하는 다변량 통계분석법이다.

주성분 분석(PCA)에는 지하수 성분 분석자료인 pH, Na, K, Ca, Mg, SiO₂, Sr, Cl, NO₃, SO₄ 및 HCO₃가 변수로서 사용되었으며, 각 성분농도가 분석한계치(DL, detection limit) 이하의 자료는 DL/2의 값으로 환산하여 통계분석을 실시하였다(Stezenbach *et al.*, 1999). 주성분 분석(PCA)을 위해서는 통계 프로그램인 SAS[®]가 이용되었으며, 주성분 분석에 의하여 얻어진 주성분 점수(score)는 수리지화학적 특성 해석과 지구통계분석을 위한 공간자료로 이용되었다.

3.3. 지구통계기법

지구통계학(Geostatistics)은 공간적 또는 시간적으로 분포하는 물리화학적 현상이나 자료의 분석에 적용할 수 있는 통계의 한 분야이다. 따라서 시간적으로 또는 공간적으로 분포하는 자료를 수집하여 이들의 분포 특성과 상관관계를 분석하여 신뢰할만한 결론을 이끌어내는 방법을 연구하는 것이다. 공간 자료를 이용하여 미지의 값을 예측하기 위한 척도로 사용되는 것들에는 상관그램(correlogram), 공분산(covariance), 베리오그램(variogram) 등이 있는데, 본 연구에서는 이중 가장 흔히 사용되는 반베리오그램(semivariogram)을 사용하였다. 반베리오그램은 일정한 거리에 있는 자료들의 유사성을 나타내는 것으로 일정거리 h만큼 떨어진 두 자

료들간의 공간적인 의존도를 나타내는 척도이다(Journel and Huijbregts, 1978).

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

여기서 h 를 지연거리(lag distance) 또는 분리거리라 하며 두 자료 간에 떨어져 있는 거리를 말한다.

반베리오그램 모델링을 위해서는 문턱값(sill), 상관 거리(range), 모델 수식 및 너깃(nugget) 같은 인자들을 얻어내야 하며 각 용어에 대한 정의는 Cerón *et al.*(2000)에 잘 나타나 있다. 베리오그램의 종류에는 여러 가지가 있으나 대표적인 것들을 들면 선형(linear), 구형(spherical), 지수(exponential), 가우스(Gaussian), 및 너깃(nugget) 모델이 있으며, 각각의 모델들은 여러 문헌에 잘 나타나 있다(Kitanidis, 1997; Wackernagel, 1995; Deutsch and Journel, 1998).

공간자료의 처리기법으로 크리깅은 관심있는 지점에서 특성값을 이미 알고 있는 주위의 값들이 가중 선형

조합으로 예측하는 방법으로 그 가중치는 대개 예측오차를 최소로 하면서 그 추정식이 편향되지 않도록 결정한다. 이를 위해 공간적 상호관계를 나타내는 반베리오그램이 사용되며 분리거리에 따라 공분산이 계산되어진다. 본 연구에서는 정규크리깅(ordinary kriging)을 사용하였으며 이에 대한 자세한 설명은 Journel and Huijbregts(1978)에 잘 나타나 있다.

본 연구에서는 각 성분들과 주성분 분석에서 얻어진 주성분에 대한 베리오그램 및 크리깅 분석을 실시한 후 그들의 상호관계와 공간적 분포의 유사성 및 상이성에 따른 지하수의 수리지화학적 특성에 대한 해석을 시도하였다

4. 수리지화학적 특성

4.1. 지하수질의 통계 분석

연구지역에서 채취된 123개 지하수 시료의 위치와 분

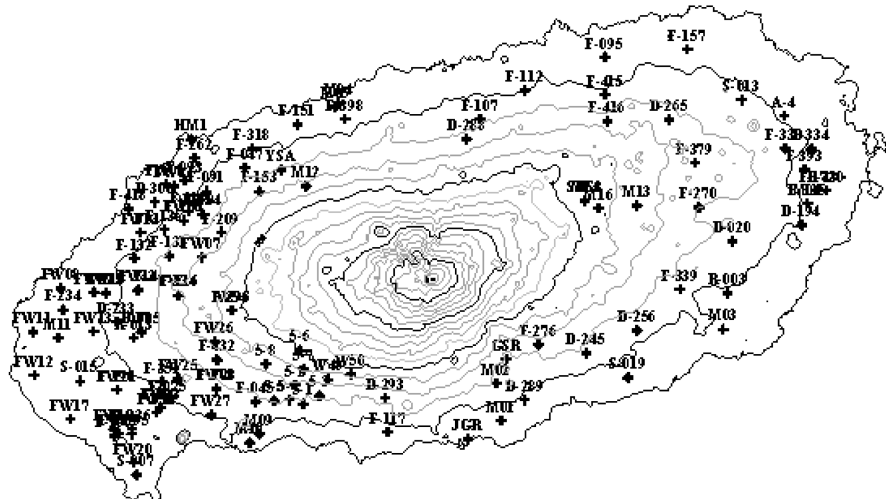


Fig. 1. Location map of groundwater sampling for hydrogeochemistry.

Table 1. The results of statistical analysis for hydrogeochemical components.

	pH	EC (uS/cm)	DO (mg/L)	CO ₂ (aq)	Ca	Mg	Na	K	Cl
Average	7.99	157.9	7.67	1.59	7.47	5.61	14.04	4.26	17.19
Std.	0.59	83.7	5.40	2.72	3.78	3.13	10.52	1.68	21.25
Median	7.93	136.0	8.97	0.77	6.62	4.79	11.20	3.87	11.29
Min.	6.24	57.0	<0.01	<0.01	0.28	0.10	3.97	1.49	4.00
Max.	10.50	682.0	34.50	21.98	22.10	18.50	79.50	11.00	157.50
	SO ₄	NO ₃	HCO ₃	CO ₃	F	PO ₄	SiO ₂	Fe	Sr
Average	4.21	18.46	42.10	0.43	0.20	0.29	39.00	9.0	66.6
Std.	3.59	18.72	22.20	1.17	0.79	0.24	6.80	8.8	46.0
Median	2.93	12.00	39.35	0.12	0.08	0.30	38.79	7.5	57.0
Min.	1.24	0.58	10.22	0.00	<0.01	<0.01	0.79	2.5	0.4
Max.	21.91	85.06	189.43	12.07	7.77	1.29	50.91	78.7	307.0

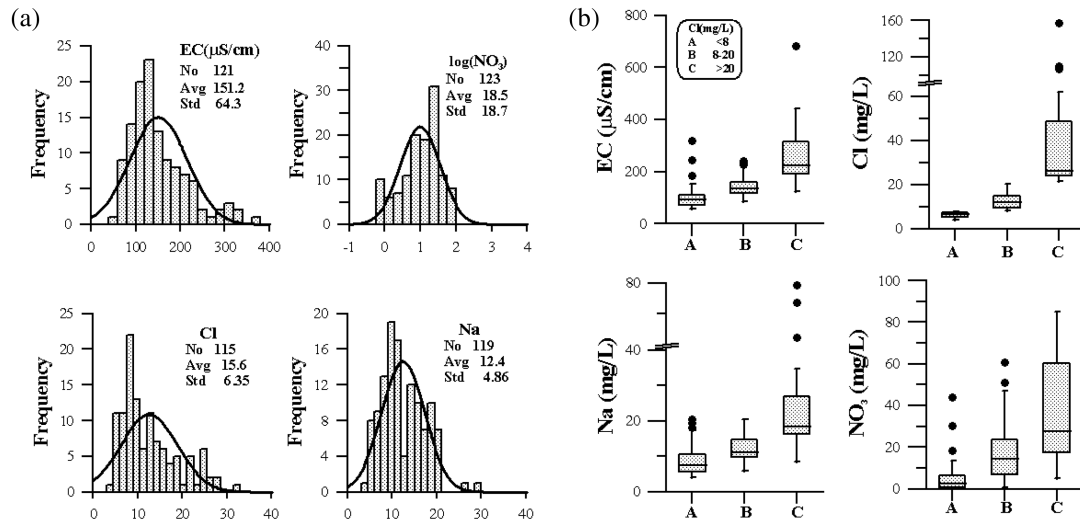


Fig. 2. (a) Histogram and (b) box-whisker plots of electrical conductivity (EC), Na, Cl, and NO₃ showing the distribution of components.

석자료는 Fig. 1과 부록 A에 나타나 있다. 지하수 분석 자료에 대한 기술통계 분석 결과는 Table 1와 같다. pH는 6.24에서 10.5 사이의 분포를 보여주며 평균 7.99의 값을 가지며, Cl은 4.0에서 157.5 mg/L 사이의 값을 가지며 평균 농도는 17.2 mg/L이다. 축산폐수나 화학비료 등의 오염에 의해 지하수내 성분 증가가 예상되는 NO₃는 0.58~85.06 mg/L 사이이며 평균 18.46 mg/L이다. Cl과 NO₃는 상대표준편차(RSD)가 각각 124와 101%로 매우 큰 값을 보여주는데 이는 각각 해안지역 지하수의 해수 영향과 농경지 및 축산분뇨에 의한 질산염 성분의 영향으로 생각되었다.

주요 성분별 농도 분포를 알아보기 위하여 계급간 누적분포도(histogram)를 작성하였다(Fig. 2(a)). Na, Cl 및 전기전도도(EC)는 비교적 가우스 정규분포(Gaussian normal distribution)에 가까운 형태를 가지지만 약간 왼쪽으로 편향된 특징을 보여준다. 일반적으로 미량원소나 광화대, 오염에 의한 영향이 있을 경우 지하수에서 이들 성분들은 로그정규분포를 보여준다. 연구지역 지하수에서 비교적 높은 농도를 보여주는 NO₃는 로그정규분포를 보여주는데, 이는 질산염의 분포가 주로 농경활동에 의한 오염이 주된 인자임을 지시하는 것이다(Fig. 2(a)).

연구지역 지하수의 각 성분별 변화 특징을 관찰하기 위하여 비반응 성분인 Cl의 농도를 <8, 8-20, >20 mg/L로 크게 나누었으며, 이 3개의 그룹은 배경치와 이상치를 나타낼 수 있는 상위 및 하위 25%에 해당하

는 8과 20 mg/L의 값을 이용하여 분류한 것이다. Fig. 2(b)는 3개의 그룹에 따른 전기전도도(EC), Na, 및 NO₃의 분포를 box-whisker 도표를 이용하여 도시한 것이다. 화학비료에 의한 농경지나 축산폐수의 영향을 나타내는 NO₃의 경우 해수의 영향을 나타내는 Cl이 높은 곳에서 큰 값을 보여주는 경우가 많은데 이는 대부분의 농경지가 고도가 낮은 해안 쪽에 분포하기 때문인 것으로 사료된다. 그러나 해수 영향이 있는 곳에서 농경활동이 없거나 지하수의 연령이 오래된 경우에는 Cl이 높아도 NO₃는 낮은 값을 보여주는데 이는 질산염 환원작용 등에 의해 NO₃가 감소되어 나타나는 영향 때문인 것으로 사료된다(Koh *et al.*, 2005).

4.2. 용존이온성분의 기원

지하수의 수질 특성을 파악하기 위하여 123개 지하수 시료의 조성분석 결과를 파이퍼도에 도시하였다(Fig. 3(a)). Fig. 3(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 제주도 전 지역에서 채취된 지하수의 수질은 매우 다양한 유형을 보여준다. 육지지역과는 달리 배경 지하수 수질은 [Ca-HCO₃] 유형보다는 [(Na, K)-HCO₃] 유형이 우세하다가 해수의 영향과 질산염 오염의 증가로 인하여 [Na-(Cl+NO₃)]으로 변화됨을 알 수 있다. Fig. 3(a)의 파이퍼도는 일반적인 것과는 달리 Cl 대신 (Cl+NO₃)를 사용하였는데, 이는 연구지역 지하수내 질산염의 평균 농도가 전체 이온 성분의 9.2%를 차지하여 무시될 수 없는 양이며, 또한 두 성분은 일반적으로 해수나 농업

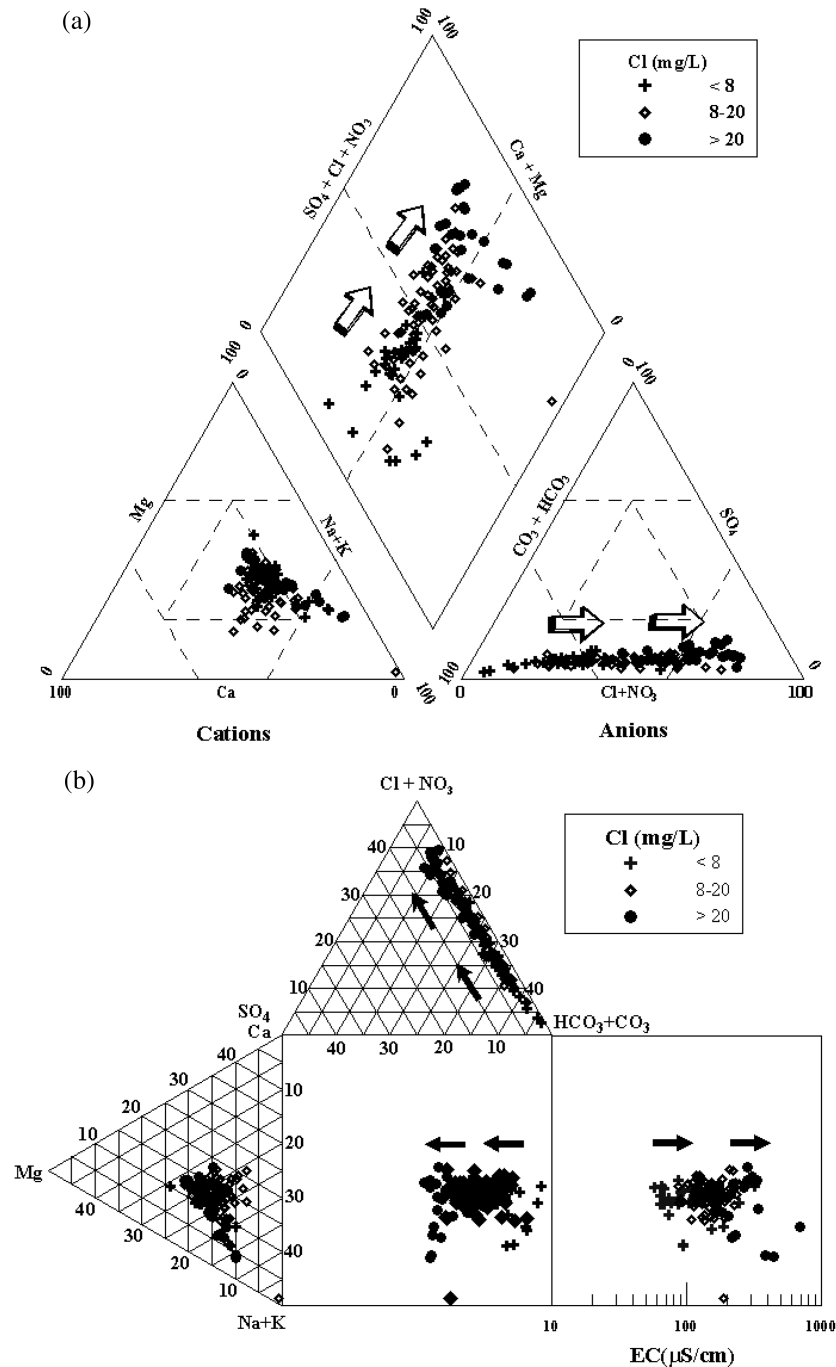


Fig. 3. (a) Piper and (b) Durov diagrams showing the hydrogeochemical evolution of groundwater.

활동에 의한 영향이 많을 경우 증가하는 양상을 보여 주기 때문이다.

듀로브도에서도 파이퍼도와 동일한 양상을 보여준다 (Fig. 3(b)). 지하수 수질은 양이온에 있어서는 성분 변

화의 특징이 명확하게 나타나지 않으나, 음이온은 용존이온의 증가에 따라 HCO_3 가 우세한 유형에서 $(\text{Cl}+\text{NO}_3)$ 유형으로 선형적으로 변화함을 알 수 있다. 파이퍼와 듀로브도에서 보여주는 $(\text{Cl}+\text{NO}_3)$ 변화 양상

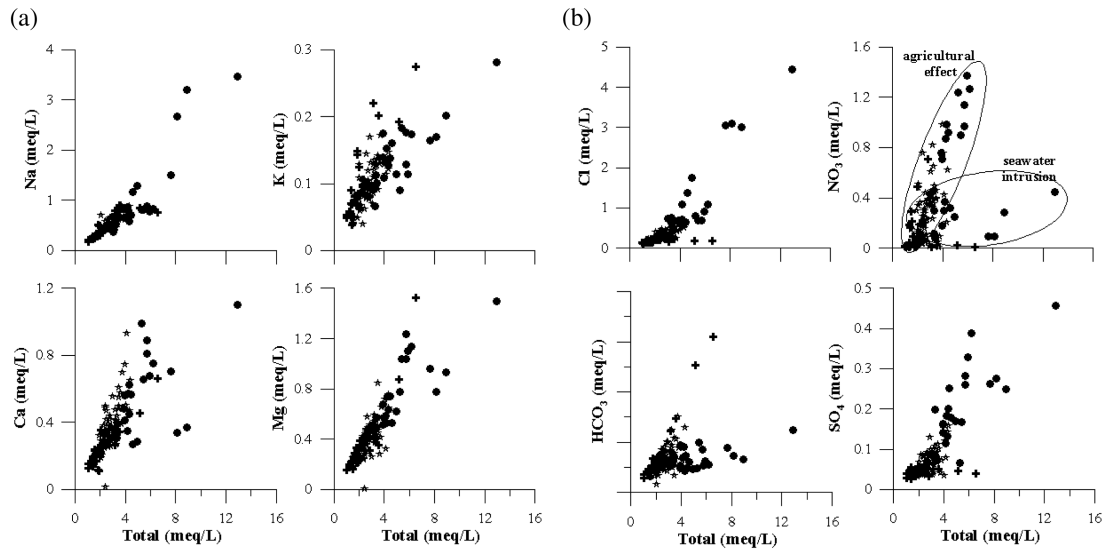


Fig. 4. Plots showing the contribution of individual components to total dissolved ions.

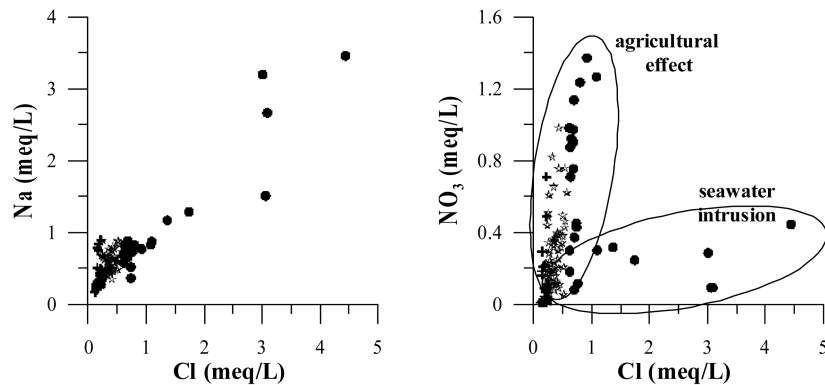


Fig. 5. Plots showing the different origin of Cl and NO_3 in groundwater.

은 주로 해수와 질산염 오염에 기인하는 것으로 알려져 있다(Koh *et al.*, 2005; 윤정수와 박상운, 1998). 지하수가 함양지역에서 유출지역으로 이동함에 따라 물-암석 작용의 결과로 용존 성분이 증가하는 것이 일반적인 특징이다. 그러나 연구지역의 경우 지하수 흐름 속도가 상대적으로 내륙지역보다 빠르고 바다에 도달하는 시간이 짧기 때문에 기저지하수를 제외하면 물-암석 반응의 영향은 경작이나 해수와의 혼합에 의한 용존 성분의 증가에 비해 상대적으로 적을 것으로 사료된다.

총용존 성분에 대한 각각 성분의 관계를 살펴보면 양이온은 Na가 가장 우세하며, Ca, Mg, K, Na 모두 총용존성분량과 비교적 양의 선형 관계를 보여준다(Fig. 4). 양이온 성분의 증가는 물-암석 반응의 증가, 해수의

영향 및 경작활동이 복합적으로 발생되고 있음을 보여준다. 음이온 역시 양이온과 유사한 양상을 보여주나 NO_3 의 경우 총용존량의 증가에도 변화를 크게 보여주지 않는 지하수 시료들이 관찰된다. 이는 해수, 지질매체와의 반응에 의한 용존성분의 증가와 비료 사용에 따른 NO_3 의 영향이 동시에 일어나지 않기 때문이다. Cl과 Na, NO_3 의 관계를 살펴보면 Na와 Cl은 같이 증가하나 NO_3 와 Cl은 두 개의 서로 다른 경향을 보여주고 있다(Fig. 5). 전술한 바와 같이 해안주변 지하수 시료에서 Cl의 증가에도 NO_3 가 증가하지 않는 것은 토지이용과 지하수의 연령과 상관성이 있는 것으로 생각된다. 즉 해수와의 혼합에 의한 Cl의 증가에도 불구하고 경작활동이 없거나 지하수가 화학비료에 의한 질산염의 오염이 심하지 않았던 연령이 오래된 지하수는

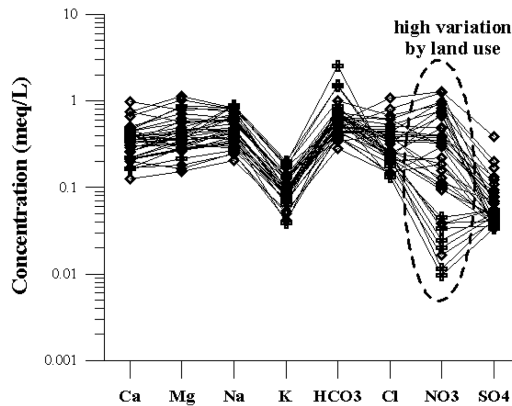


Fig. 6. Schöller diagram showing the large variation of NO_3^- .

질산염의 농도가 높지 않은 것으로 사료된다. 이러한 수질특성에 근거하여 보면 연구지역 지하수의 수질은 중산간지역에서 함양된 지하수가 물-암석 반응과 경작 활동의 영향을 받아 용존 성분과 질산염의 증가가 이루어지는 지화학적 진화과정을 겪으며 해안가에 도달 하면서 해수와의 혼합에 의해 염소이온 농도가 급격히 높아지는 특징을 보여줄 수 있다. 해안주변 해수 영향을 받는 지하수 시료를 제외하면 NO_3^- 는 제주도 지하수 성분 중 가장 큰 변동양상을 나타내며, 이는 경작활동에 의한 질산염 성분의 유입이 토지이용과 높은 상관관계를 가짐을 알 수 있다(Fig. 6). 연구지역 지하수의 각 성분별 변동양상과 유형은 Schöller 도에서 볼 수 있는 것처럼 NO_3^- 를 제외하면 뚜렷한 유형별 변화는 보여주지 않는다.

이상의 제주도 지하수의 수리지화학적 특성을 분석한 결과 크게 해수와의 혼합작용 및 농경지 이용이나 축산폐수의 영향을 나타내는 농업활동에 따른 질산염 성분이 수질에 가장 영향을 크게 미치는 것으로 조사되었다. 특히 질산염 성분은 농지이용에 따른 질소질 비료의 사용 증가로 인해 지하수의 수질을 저하시키는 주요한 원인이 됨을 알 수 있었으며, 이는 Koh(2005)의 연구 결과와도 일치한다.

5. 주성분 분석

지하수 성분간의 상호관계를 알기 위하여 상관분석을 통하여 상관계수를 구한 결과, Ca는 Mg(0.74), Sr(0.75)과 강한 양의 상관관계를 가진다. Cl은 Na(0.92)와 양의 상관관계를 가지나 NO_3^- (0.19)와는 상관관계를 보이지 않는다. 전술한 바와 같이 이는 두 성분의 증가가 다른 원인, 즉 해수와의 혼합과 농경지 이용에 따른 질소질 비료 성분이나 축산폐수의 지하수 침투에

의하여 다르게 나타남을 지시한다.

주성분 분석에 의해 얻어진 초기 3개의 주성분은 전체 분산의 73.9%를 설명하였다. 전체 분산(variance)의 44%를 설명하는 주성분 1(PC1)은 고유값이 4.84로 가장 높은 비율을 차지하고 있으며, 주성분 2와 3(PC2, PC3)은 각각 17.0, 13.0%를 설명하며 고유값은 1.86, 1.43이었다. 연구지역에 대한 주성분 분석 결과를 살펴 보면, 전체분산의 44% 설명하는 PC1은 Ca, Mg, Na, K, Cl, SO_4 에 대하여 높은 적재값(factor loading, >0.3)을 가지며 NO_3^- , HCO_3^- , Sr은 0.2-0.3 정도의 적재값을 가진다. SiO_2 에 대해서는 0.1 정도의 낮은 적재값을 가지며 pH에 대해서는 음의 적재값을 보여준다. 따라서 PC1은 물-암석 반응, 해수 및 농경지 영향이 모두 복합되어 나타나는 용존성분 총량에 의한 이온 성분의 증가를 지시한다. SiO_2 는 물-암석 반응에서 규산염 광물의 용해에 의해 증가될 수 있는데 연구지역의 경우 지하수 주요 용존 이온성분 중 변화가 가장 적다. 이는 제주도 지하수가 내륙에 비해 지질매체에서의 체류시간(residence time)이 상대적으로 짧아 물-암석 반응의 효과가 육지에 비해 상대적으로 적기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 전체 용존이온 성분의 총량을 나타내는 PC1에서 규산염광물의 용해에 의한 반응의 효과는 적은 것으로 생각된다. PC2는 pH, HCO_3^- , Sr이 높은 양의 적재값(>0.3)을 가지며 NO_3^- 는 높은 음의 적재값(<-0.3)을 가진다. Ca도 높지는 않지만 양의 적재값(~ 0.1)을 가지므로 PC2는 탄산염광물의 용해와 관련성이 있으며 농경지 오염에 대한 변수로는 음의 영향을 주고 있다. PC3는 Na, K, Cl, SiO_2 에 대해서는 높은 양의 적재값(>0.2)을 가지며, Ca, Sr 및 NO_3^- 에 대해서는 음의 적재값을 가진다. 지하수내 성분에서 Na와 K가 증가하고 Ca와 Sr이 감소하는 것은 양이온교환반응을 나타낸다. SiO_2 가 높은 양의 적재값을 보이는 것은 물-암석 반응의 증가를 의미하며, Cl이 높고 NO_3^- 가 낮은 이유는 지하수의 연령이 오래되어 질산염의 영향을 비교적 받지 않고 지질매체내에 머물러 있었거나 해안지역에서 해수와의 혼합에 의한 영향이 절대적으로 크기 때문이다. 따라서 PC3는 전체 분산의 13% 정도 밖에 설명하지 못하지만 지질매체와 지하수의 반응 과정을 나타내는 중요한 변수이다.

주성분들간의 상관관계를 살펴보기 위하여 PC1과 PC2, PC3를 Fig. 7에 도시하여 보았다. Fig. 7에서 PC1은 용존이온의 함량에 영향을 받음을 잘 보여주며, Cl이 20 mg/L 이상인 시료에서는 탄산염 광물의 용해에 대한 영향보다는 비료 사용에 의한 NO_3^- 의 영향이 많이

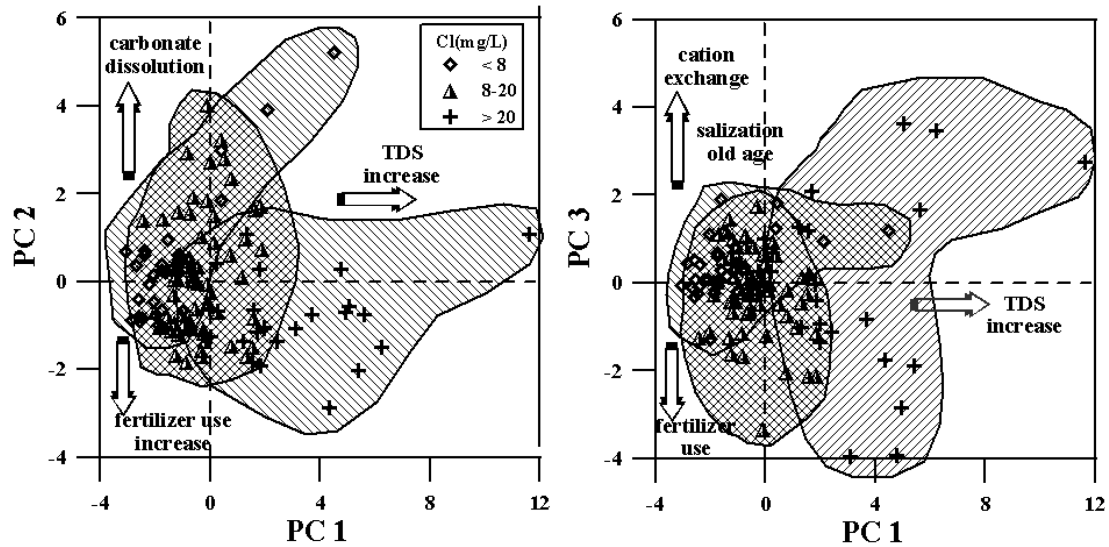


Fig. 7. Results of principal component analysis (PCA).

보여줄 수 있다. 이는 대부분 농경지가 저지대, 해안에 가까운 곳에 위치하고 있어 인간활동과 해수의 영향을 동시에 받는 것으로 생각된다. 탄산염 광물 용해 반응의 영향은 Cl의 농도가 20 mg/L 이하인 지하수 시료에서 주로 나타난다. PC1과 PC3의 관계에서 양이온 교환반응이나 규산염광물의 용해 등 지하수 암석 반응의 과정은 총용존성분의 함량 증가에 따라 커짐을 알 수 있다. PC3가 감소하는 것들은 PC2와 마찬가지로 비료의 영향이 크거나 상대적으로 해수의 영향을 많이 받아 SiO_2 가 감소된 경우 또는 이온 교환반응이 심하지 않은 경우일 것이다.

6. 지구통계학적 연구

제주도 지하수의 공간적 분포 특성을 알아보기 위하

여 지하수에 용해되어 있는 각 성분별로 반베리오그램을 계산하고 크리깅 분석을 수행하였다. 또한 공간적으로 분포하는 지하수의 수질특성을 해석하기 위하여 다변량 통계분석에서 얻어진 3개의 주성분들을 이용하여 베리오그램 분석과 요인 크리깅을 수행하였다.

6.1. 베리오그램 분석

지하수 성분과 주성분들에 대한 실험 및 이론 반베리오그램을 계산하기 위하여 VARIOWIN 소프트웨어를 사용하였다(Pannatier, 1996). Table 2는 실험 베리오그램으로부터 계산되어진 이론 베리오그램 모델링 결과이다.

모델링 결과는 각 성분별로 반베리오그램 모델이 물리적으로 의미를 가지는 상관거리(range) 값이 1.56에서 11.4 km로 매우 폭넓게 나타나며 크게 두 개의 그

Table 2. The modeling results of experimental semivariograms.

Group	Variable	Model	Nugget	Direction(°)	Range(m)	Sill	Anisotropy
A	EC	spherical	1553	0	10400	5840	1.0
	Na	spherical	21.6	70	3120	72	0.5
	Cl	spherical	88.2	6	1560	284	1.0
	NO_3	spherical	0.6	67	10920	13.4	0.63
B	HCO_3	spherical	108	89	3640	410	0.82
	SiO_2	spherical	8.82	27	11440	44.6	10.0
	Ca	spherical	3.2	90	10400	12.9	0.89
	Sr	spherical	805	0	10400	1610	1
PCs	PC1	spherical	1.58	5	7800	3.50	0.06
	PC2	spherical	0.48	31	7280	0.83	0.24
	PC3	spherical	0.11	110	5200	0.19	1

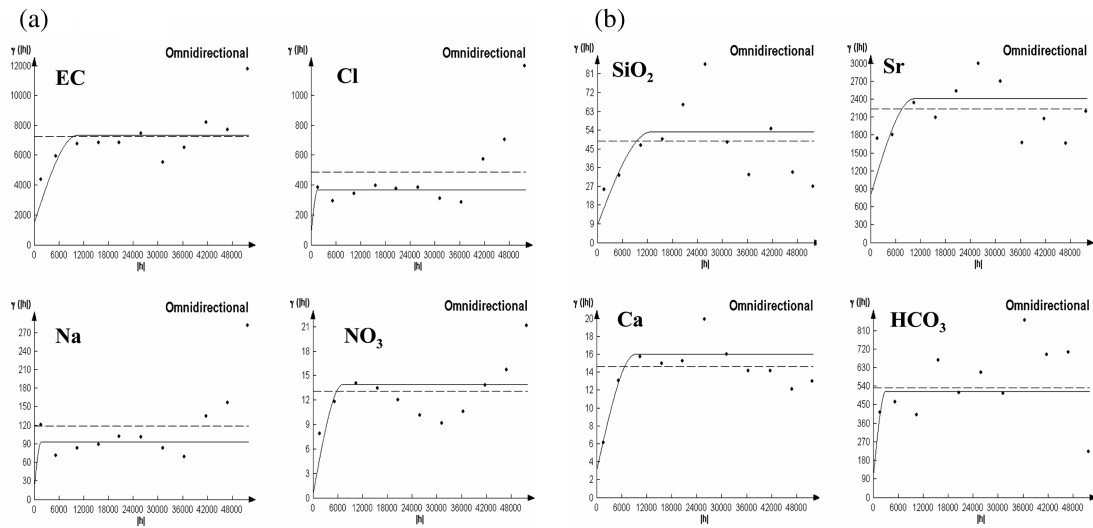


Fig. 8. Experimental and theoretical semivariograms of (a) Group A (EC, Cl, Na, and NO_3) and (b) Group B (SiO_2 , Sr, Ca, and HCO_3).

룹으로 나뉘어 진다. 그룹 A에 속하는 성분은 제주도 지역 지하수 조성에 가장 많은 영향을 미치는 EC, Cl, Na, NO_3 로써 실험 베리오그램 값이 27~30 km 사이에 공동 효과(hole effect)를 가지며 42 km 이후에 지속적으로 증가하는 양상을 보인다(Fig. 8(a)). 이는 연구지역의 횡단 거리가 약 75 km이고 한라산을 중심으로 해안가로 갈수록 이들 성분의 농도가 증가하기 때문이다. NO_3 는 경작지의 분포가 주로 저지대이고 해안에서 가깝기 때문에 유사한 양상을 보이는 것으로 사료된다.

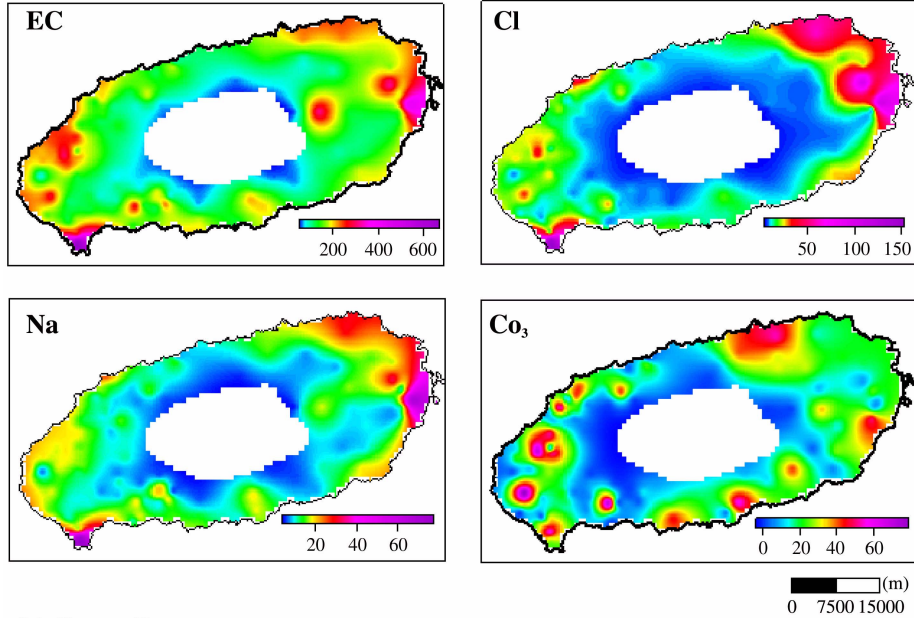
그룹 B에 속하는 성분들은 SiO_2 , Sr, Ca, HCO_3 로 27~30 km와 42~48 km에 두 개의 공동효과를 가지는 것들로 이들의 베리오그램은 그룹 A에 속하는 원소들보다 불규칙한 형태의 실험 반베리오그램을 가진다(Fig. 8(b)). 이들은 그룹 A에 속하는 원소들보다는 연구지역 지하수에서 공급원이 명확하지 않은 성분들이 존재하고 있기 때문에 공간적인 척도인 반베리오그램이 불규칙한 특징을 보여주는 것으로 사료된다.

주성분분석에서 얻어진 3개 주성분들의 반베리오그램 분석결과 5.2~8 km의 상관거리(range) 값을 가지며 공간적으로 비교적 유사한 특징을 보여준다. 3개 주성분에 대한 반베리오그램은 모두 2개의 공동효과를 가지며, 이론적 반베리오그램은 너깃(nugget)과 구형구조(spherical structure)를 결합한 모델로 구성되어 있다. 27~30 km 사이에 공동효과를 가지는 것은 지하수 성분별 반베리오그램의 결과와 유사하다.

6.2. 크리깅 분석

지하수 성분의 공간적 분포 특징을 알아보기 위하여 각 성분별 크리깅을 실시하여 지도를 작성하였다(Fig. 9). Fig. 9(a)는 베리오그램 분석에서 A 그룹으로 분류된 지하수 성분에 대한 크리깅 결과로서 전기전도도, Cl 및 Na는 동쪽과 서쪽 해안 주변부에서 높은 값을 가지며, 이는 담수지하수와 해수의 혼합에 의한 영향으로 생각된다. 특히 동부 지역에서 Na와 Cl이 높은 값을 보이며 이는 해수와의 혼합 현상에 의한 것임이 보고된 바 있다(제주도, 2000; 부성안과 정교철, 2000). 서부지역 대정수역내의 모슬포 지역에서의 높은 Na, Cl, EC 역시 해수와의 혼합에 의한 영향에 의한 것으로 조사되었다(우남철 등, 2001). 그러나 모슬포 지역의 EC 분포는 부분적으로 NO_3 의 영향도 중첩되어 나타난다. 제주도 지하수의 NO_3 의 분포는 농경지 이용과 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났으며, 특히 서부지역에서는 한림, 한경, 모슬 지역에서, 남부 지역에서는 서귀포 해안 주변과 안덕면, 동부 지역에서는 조촌읍과 송당 등에서 높은 질산염 값이 관측되며 이들 모두 농경지가 많은 저지대를 이루고 있음을 알 수 있다. Na, Cl, EC, 및 NO_3 성분의 분포는 지형과도 상당히 유사한 형태를 보이는데, 이는 지하수 함양이 표고가 높은 곳에서 이루어져 이동하면서 용존 성분이 증가하기 때문이다. Sr, Ca 및 HCO_3 의 농도 분포는 매우 유사한 특징을 보여주며 서부지역에서 비교적 높게 나타난다(Fig. 9(b)). 이들 성분의 증가는 탄산염광

(a) Group A



(b) Group B

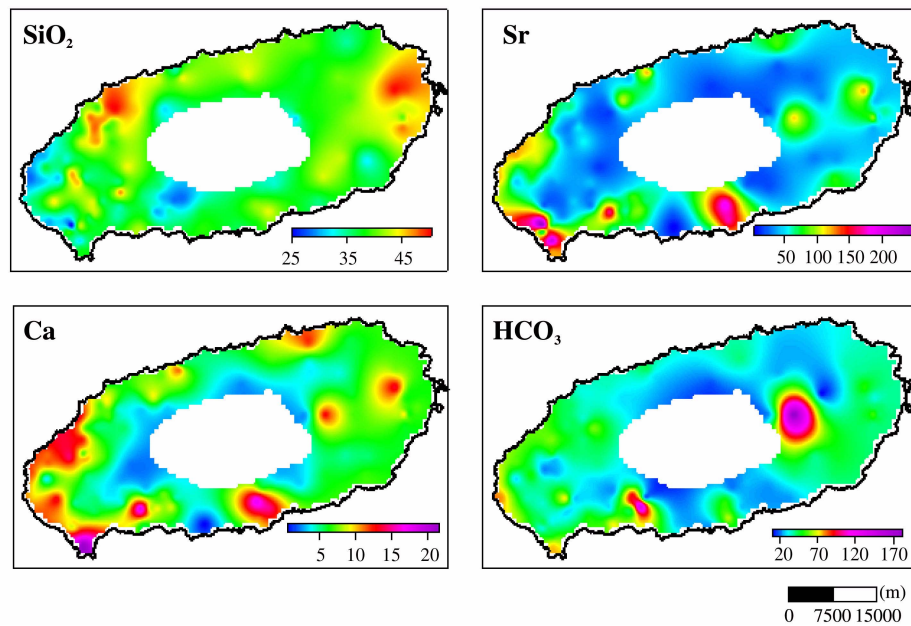


Fig. 9. Hydrogeochemical maps showing the spatial distribution of (a) Group A (EC, Cl, Na, and NO_3) and (b) Group B (SiO_2 , Sr, Ca, and HCO_3).

물의 용해 작용에 의해 공급되는데 서부지역의 경우 서귀포층과 관계가 있는 것으로 사료된다. 동부지역에서 나타나는 이상대의 분포에 대해서는 명확하게 밝혀진 바 없다. SiO_2 의 농도는 제주도 전역에 걸쳐 큰 차

이를 보이지는 않으나 성산과 한림 일대에서 이상대를 보여준다. SiO_2 는 지열대와 상관되어 높은 농도를 나타내지만 현재 조사된 결과에 의하면 지열 이상대의 존재는 나타나지 않는다.

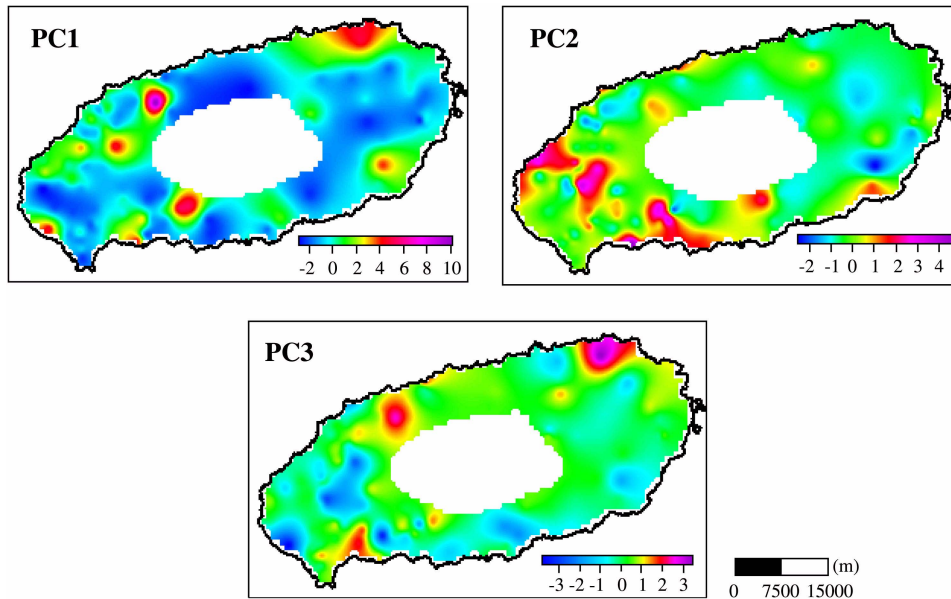


Fig. 10. Maps of three principal components calculated from principal components analysis (PCA).

6.3. 주성분분석 결과의 크리깅 분석

주성분 분석에서 얻어진 주성분들을 사용하여 크리깅 분석 결과는 Fig. 10에 나타나 있다. 앞의 주성분 분석 결과에서 언급한 바와 같이 PC1은 지하수 용존 이온 성분의 증가를 지시하는 인자이다. 그런데 Cl, Na, EC의 공간분포 특징과 달리 성산 지역의 경우 PC1이 낮은 값을 보여주는데 이는 PC1에 감소 요인으로 작용하는 pH와 다른 지역보다 상대적으로 낮은 Ca, HCO_3 , Sr에 기인한다. PC1의 공간 분포는 지형과도 유사한 양상을 보여준다.

PC2는 탄산염광물의 용해에 대하여 양의 효과를 가지며 질산염 비료 성분의 오염에는 음의 영향을 받는다. PC2는 서부지역에서만 이상대가 관측되며 이는 서부지역에 분포하는 서귀포층의 탄산염광물이나 패류 성분의 용해에 의한 것으로 생각되나 이를 입증하기 위해서는 정확한 조사가 요구된다. PC3은 양이온 교환반응을 부분적으로 지시하는데 해수 침투가 일어나는 동부지역에서 이상대가 관측된다. 서귀포 지역에서 관측되는 낮은 PC3 값은 높은 Ca, Sr, NO_3 농도에 기인한다.

7. 결 론

지하수의 수리지화학적 특성과 공간적 분포 특징은 지하수 유동 및 순환 기작뿐만 아니라 수질 보전과 관리대책 수립에 기초적인 정보를 제공한다. 본 연구는

지하수의 수리지화학적 특성을 분석하여 대수층의 지하수 수질에 영향을 미치는 주요 인자를 찾아내고, 다변량 통계분석을 사용하여 주성분이 가지는 수리지화학적 과정을 해석하여 연구지역 지하수의 수리지화학적 특성에 대한 정성 및 정량적 모델을 제공하였다. 아울러 각 성분별 공간분포를 수리지화학적 특성의 상관관계로 밝혀내었으며, 또한 주성분분석을 통해 얻어진 주요 주성분들을 이용한 크리깅을 통해 수리지화학적 과정의 공간적 특성을 분석하였다. 수리지화학적 특성, 주성분 분석 및 지구통계 분석에 의해 얻어진 연구지역 제주도 대수층의 주요한 물리지화학적 특징을 살펴보면 다음과 같다.

제주도 지하수의 조성에 가장 영향을 많이 미치는 성분은 Cl과 NO_3 이며, 이는 농경활동에 따른 질산염 오염과 해수와의 혼합작용에 의한 대수층 지하수 수리지화학적 특성을 결정하는 주요한 기작임을 지시한다. 다변량 통계분석방법인 주성분 분석(PCA)에 의한 수리지화학적 특성 분석 결과 초기 3개의 주성분은 전체 분산의 73.9%를 설명한다. 주성분 1은 용존이온의 증가를 나타내며, 주성분 2는 탄산염 광물의 용해와 질산염 오염의 효과를 동시에 가지며, 주성분 3은 양이온 교환반응과 규산염광물의 용해과정을 지시한다.

지구통계학적 분석결과 반베리오그램의 상관거리는 성분별로 커다란 차이를 보여주며, 실험적 반베리오그램 유형 분석 결과, 지하수 성분은 크게 두 그룹, 즉 EC,

Cl, Na, 및 NO_3 를 포함하는 그룹 그리고 HCO_3 , SiO_2 , Ca, 및 Sr이 속한 그룹으로 나누어진다. 지하수 성분별 공간분포는 전기전도도(EC), Cl, Na는 해수의 영향을 받는 해안가로 갈수록 증가하는 경향을 보여주며, NO_3 는 농경지의 분포와 밀접한 상관관계를 가진다. 이들 성분은 또한 지형과도 상관성을 가지는데 이는 지하수 함양의 특성을 반영하는 것으로 사료된다. 주성분 분석에 의한 주성분들의 크리깅 분석 결과 PC1은 Cl, Na, 및 EC의 성분과는 약간 다른 양상을 보여주는데 이는 pH, Ca, Sr, 및 HCO_3 의 영향에 기인한다. 서부지역에서는 PC2의 이상대가 길게 나타나며 이는 탄산염 광물의 용해와 관련이 있는 것으로 사료된다.

이상의 결과로부터 제주도 지하수에 대한 다변량 통계분석 및 지구통계 분석 기법의 적용은 수질에 대한 복합적 정보의 정량화와 공간 특성을 해석할 수 있는 좋은 방법이 될 수 있음을 확인하였다.

사 사

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 3-2-2)에 의해 수행되었습니다. 본 논문에 대한 세심한 심사 및 조언을 하여 주신 제주도 광역수자원관리본부 고기원 박사님 그리고 익명의 심사위원님께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- 고기원, 박윤석, 박원배, 문덕철 (2003) 제주도 동부지역의 수문지질에 관한 연구(II). 한국지하수토양환경학회 춘계학술대회 논문집, p. 67-72.
- 고기원, 윤선 (1997) 제주도 서귀포층의 지하분포상태. 대한지하수환경학회 · 연세대학교 지하수토양환경연구소 “지하수의 환경친화적 · 지속가능한 개발 정책”에 관한 추계학술심포지움.
- 부성안, 정교철 (2000) 제주도 동부권역 담지하수 대수층에서의 염수침입. 지질공학, v. 10, p. 115-130.
- 송영철, 고용구, 유장길 (1999) $\delta^{15}\text{N}$ 을 이용한 제주도 지하수 중의 질산염 오염원 조사. 대한지하수환경학회지, v. 6, p. 107-110.
- 오윤근, 현익현 (1997) $\delta^{15}\text{N}$ 값을 이용한 제주도 지하수중의 질산성 질소 오염원추정에 관한 연구. 대한지하수환경학회지, v. 4, p. 1-4.
- 우남칠, 김형돈, 이광식, 박원배, 고기원, 문영석 (2001) 지하수 수질관측에 의한 제주도 대정수역의 지하수계 및 오염특성 분석. 자연환경지질학회지, v. 34, p. 485-498.
- 윤정수, 박상운 (1998) 제주도 용천수의 수리지화학적 특성. 대한지하수환경학회지, v. 5, p. 66-79.
- 이광식, 고동찬, 이대하, 박원배 (2002) 제주도 강수의 동위원소 조성의 시공간적 분포: 지하수 함양에의 응용. 지질학회지, v. 38, p. 151-161.

- 제주도 (2000) 제주도 지하수보전 · 관리계획수립 조사. 588p.
- Cerón, J.C., Jiménez-Espionosa, R., and Pulido-Bosch, A. (2000) Numerical analysis of hydrogeochemical data: a case study(Alto Guadalentin, southeast Spain). Appl. Geochem., v. 15, p. 1053-1067.
- Davis, J.C. (1986) Statistical and data analysis in geology. Wiley, 2nd ed., New York.
- Deutsch, C.V. and Journel, A.G. (1998) GSLIB: Geostatistical software library and user's guide. Oxford University Press, 2nd ed., New York.
- Johannesson, K.H., Stezenbach, K.J., Kreamer, D.K., and Hodge, V.F. (1996) Multivariate statistical analysis of arsenic and selenium concentrations in groundwaters from south-central Nevada and Death Valley, California. J. Hydrol., v. 178, p. 181-204.
- Journel, A.G. and Huijbregts, Ch J. (1978) Mining geostatistics. Academic Press, London.
- Kitanidis, P.K. (1997) Introduction to geostatistics: Applications to hydrogeology. Cambridge University Press, New York.
- Koh, D.-C. (2005) Characterization of hydrogeochemistry and flow dynamics of ground water using environmental tracers in Jeju volcanic island. Ph.D. Thesis, Seoul National University.
- Koh, D.-C., Chang, H.W., Lee, K.-S., Ko, K.S., Kim, Y., and Park, W.B. (2005) Hydrogeochemistry and environmental isotopes of groundwater in Jeju volcanic island, Korea: Implications for nitrate contamination. Hydrol. Process., in press.
- Laaksoharju, M., Tullborg, E.-L., Wikberg, P., Wallin, B., and Smellie, J. (1999) Hydrogeochemical conditions and evolution at the Åspo HRL, Sweden. Appl. Geochem., v. 14, p. 835-859.
- Pannatier, Y. (1996) VARIOWIN: Software for spatial data analysis in 2D. Springer-Verlag, New York, 91p.
- Pebesma, E.J. and de Kwaadsteniet, J.W. (1997) Mapping groundwater quality in the Netherlands. J. Hydrol., v. 200, p. 364-386.
- Pitkänen, P., Löfman, J., Koskinen, L., Leino-Forsman, H., and Snellman, M. (1999) Application of mass-balance and flow simulation calculations to interpretation of mixing at Åspo, Sweden. Appl. Geochem., v. 14, p. 893-905.
- Reghunath, R., Sreedhara Murthy, T. R., and Raghavan, B. R. (2002) The utility of multivariate statistical techniques in hydrogeochemical studies: an example from Karnataka, India. Water Res., v. 36, p. 2437-2442.
- Sanchez-Martos, F., Pulido-Bosch, A., Molina-Sanchez, L., and Vallejos-Izquierdo, A. (2002) Identification of the origin of salinization in groundwater using minor ions (Lower Andarax, Southeast Spain). Sci. Total Env., v. 297, p. 43-58.
- Stezenbach, K.J., Farnham, I.M., Hodge, V.F., and Johannesson, K.H. (1999) Using multivariate statistical analysis of groundwater major cation and trace element concentration to evaluate groundwater flow in a regional aquifer. Hydrol. Process., v. 13, p. 2655-2673.
- Stumm, W. and Morgan, J.J. (1996) Aquatic chemistry. Wiley, 3rd ed., New York.
- Wackernagel, H. (1995) Multivariate geostatistics: An introduction with applications. Springer, 3rd ed., Heidelberg.

Appendix A. The location of wells and the results of hydrochemical analyses of groundwater.

조사공	조사공 좌표	Temp	pH	EC	DO	Ca	Mg	Na	K	SiO ₂	Cl	SO ₄	NO ₃	HCO ₃	Sr
	X(m) Y(m)	°C	μS/cm	mg/L											μg/L
5-1	145988 24817	16.8	7.66	117.0	9.8	7.7	4.3	8.9	1.5	30.4	8.1	2.2	6.6	43.1	92
5-2	145300 26400	18.8	8.69	186.0	7.0	6.9	4.2	20.5	7.9	33.9	7.7	2.4	1.5	89.4	71
5-3	147329 25501	19.5	7.95	245.0	8.0	9.2	10.6	19.4	7.5	34.5	6.3	2.2	1.2	154.9	94
5-4	144859 25143	17.4	8.79	128.0	8.4	9.4	3.4	10.7	3.5	30.2	8.8	1.8	6.1	46.4	61
5-5	143583 25102	18.4	7.89	125.0	9.4	8.4	4.2	9.7	2.5	36.6	8.6	1.7	2.1	52.5	78
5-6	145731 29236	15.9	7.80	90.0	9.9	4.4	4.0	6.5	3.2	35.1	4.7	1.6	0.6	41.0	53
5-7	146010 27670	18.7	8.66	189.0	8.2	7.8	5.1	20.5	6.8	30.2	8.5	2.0	0.7	92.2	88
5-8	142891 28104	15.2	8.19	77.0	10.5	3.3	2.6	6.1	2.8	35.4	6.7	2.6	2.8	23.1	50
A-4	185812 48670	16.0	7.90	164.5	0.00	7.9	6.0	16.4	4.4	47.3	22.0	3.7	18.6	39.2	52
D-020	181520 38259	15.9	8.48	108.5	0.00	7.0	3.7	9.9	3.7	41.7	7.0	2.0	13.5	47.6	49
D-194	187243 39602	15.8	7.62	124.1	0.00	6.2	5.7	10.5	3.4	48.0	11.3	2.0	50.9	40.6	39
D-233	130517 31620	15.4	7.12	233.0	14.60	9.6	10.3	17.2	5.6	48.3	14.4	4.4	24.8	20.6	59
D-236	131800 22763	15.0	7.18	172.0	8.90	8.9	6.7	13.6	5.1	44.7	17.7	5.1	30.6	30.3	57
D-245	169415 29017	15.5	7.83	64.1	0.00	3.4	2.2	5.6	2.0	37.8	5.2	1.6	11.5	22.9	20
D-256	173649 30896	16.4	8.35	109.5	0.00	6.0	3.7	11.0	3.2	43.7	7.9	1.6	44.1	41.3	38
D-265	176286 48331	14.5	8.17	89.7	0.00	4.2	3.3	7.5	2.7	41.1	8.8	2.5	30.0	26.2	23
D-288	159525 46693	14.2	7.86	63.5	0.00	2.5	1.9	4.7	2.1	38.1	5.2	1.9	1.0	17.2	15
D-289	164341 25156	17.1	7.71	205.0	0.00	15.0	7.0	14.1	5.1	44.3	15.4	1.6	60.9	27.3	125
D-293	152782 25282	16.4	8.01	67.0	0.00	4.0	2.0	5.7	1.6	37.1	5.0	2.0	18.3	24.2	26
D-300	133694 41527	15.5	7.60	175.0	30.40	9.0	7.8	13.3	5.0	48.3	21.6	9.7	60.9	44.3	52
D-305	132585 30730	12.1	7.73	149.0	11.00	5.2	5.1	15.1	3.8	41.1	16.0	6.3	24.4	26.0	46
F-033	136492 40738	15.6	8.07	148.0	11.11	7.5	5.6	12.5	5.2	46.6	12.4	3.1	21.8	38.2	39
F-045	142066 24978	16.6	7.10	282.0	9.17	19.8	9.5	18.9	3.5	37.4	28.4	3.1	76.6	29.3	178
F-047	141167 44353	15.2	7.74	113.0	34.50	5.3	4.7	8.2	3.3	45.0	9.4	2.1	11.5	33.5	27
F-075	134811 25173	14.6	7.93	129.0	10.30	5.8	4.6	10.7	3.7	43.0	16.8	4.2	19.6	29.2	36
F-091	137996 42392	15.3	7.79	107.0	9.91	4.5	4.3	9.0	3.3	50.9	9.6	1.9	7.9	35.3	25
F-093	136165 43319	15.7	7.59	206.0	10.23	10.1	8.7	14.6	5.1	48.6	18.9	5.8	47.0	39.3	58
F-095	170955 53515	15.3	7.80	222.0	0.00	12.5	9.0	16.5	5.1	40.4	22.2	6.3	54.2	26.1	87
F-107	160632 48362	14.8	7.64	91.8	10.80	4.2	3.4	7.7	3.2	44.3	7.7	2.2	5.8	27.2	26
F-112	164370 50759	16.1	8.57	147.2	0.00	7.2	4.5	14.8	5.0	41.1	12.2	3.3	40.6	41.4	45
F-117	152991 22508	16.8	8.76	186.0	0.00	0.3	0.1	13.4	4.1	39.0	15.4	2.3	46.8	28.6	0
F-131	134893 37077	15.5	7.69	158.0	9.31	6.6	7.2	13.7	5.3	47.3	12.2	3.8	20.3	48.7	32
F-132	132036 36850	15.8	7.24	264.0	8.73	13.1	12.6	18.5	7.2	43.7	24.1	8.0	55.9	60.6	93
F-134	135655 33803	14.9	8.16	153.0	10.02	7.1	6.5	11.1	4.3	43.4	17.7	4.8	23.6	40.8	36
F-135	129640 33981	15.3	7.37	314.0	10.39	15.1	13.8	19.1	6.8	39.7	38.4	18.7	78.5	33.8	105
F-136	134505 39242	15.8	7.61	130.0	20.40	5.1	5.5	11.1	3.6	48.9	13.3	3.3	9.7	41.8	28
F-151	145534 47948	17.2	8.34	111.0	5.94	7.1	3.2	9.0	4.9	43.7	7.9	2.7	2.4	35.0	39
F-153	142359 42384	15.5	8.24	86.0	9.75	3.4	3.5	6.9	3.2	44.7	7.9	1.9	2.4	32.4	17
F-157	177804 54181	15.5	7.89	231.0	0.00	5.7	7.6	29.6	4.5	34.5	61.8	8.1	15.3	28.4	46
F-172	188572 42502	15.7	7.87	379.0	10.30	6.8	9.4	61.3	6.7	43.4	109.6	13.2	5.8	44.5	63
F-196	130328 22142	15.3	7.13	139.0	10.11	7.1	5.2	10.4	3.9	41.7	13.7	4.5	23.1	27.2	38

Appendix A. (continue).

조사공	조사공 좌표	Temp	pH	EC	DO	Ca	Mg	Na	K	SiO ₂	Cl	SO ₄	NO ₃	HCO ₃	Sr
	X(m) Y(m)	°C		μS/cm											μg/L
F-203	138817 26070	15.0	7.73	94.0	10.09	4.3	3.4	8.1	3.0	40.4	14.4	3.3	7.0	31.2	27
F-209	139213 39022	18.2	8.44	136.0	8.69	5.6	4.8	15.6	6.6	44.7	8.1	2.4	2.6	62.0	33
F-234	126098 32599	17.3	7.90	211.0	4.20	11.4	6.4	18.1	6.0	38.1	24.9	8.8	23.1	54.9	70
F-243	132317 34205	16.3	7.80	224.0	9.72	11.3	9.0	16.1	5.4	37.1	23.0	12.1	57.2	29.3	59
F-254	137643 40509	15.7	7.62	112.0	9.14	5.1	4.3	8.5	3.5	44.3	9.7	2.4	11.0	34.1	30
F-260	136104 39971	15.2	8.34	116.0	9.51	5.5	4.5	9.5	4.0	44.7	9.4	2.4	6.9	45.1	29
F-262	136991 45193	15.3	7.51	200.0	9.48	8.2	8.3	15.1	5.5	48.6	22.5	7.9	44.0	33.2	48
F-270	178751 41065	15.3	7.90	124.0	0.00	6.9	6.3	9.2	2.7	42.0	9.4	1.8	37.7	49.1	57
F-276	165465 29695	15.4	7.56	65.1	0.00	3.9	2.2	5.3	1.5	33.5	4.9	1.2	10.1	26.6	22
F-287	134176 24482	14.5	7.82	118.0	10.32	5.4	4.2	10.5	3.7	42.7	14.8	3.9	15.7	28.9	31
F-290	130574 25975	13.7	7.97	112.0	10.21	5.0	4.1	10.5	3.8	45.0	11.1	4.0	12.0	34.5	28
F-295	131781 22326	15.5	7.75	165.0	7.90	10.0	5.5	14.3	5.4	40.7	19.1	5.4	28.8	39.9	136
F-296	140053 32550	16.5	8.44	93.0	7.89	2.2	2.5	11.4	5.6	44.7	7.3	2.2	0.9	40.2	13
F-314	132513 39007	17.0	8.68	128.0	7.68	6.3	4.8	12.4	4.1	45.7	13.1	3.2	6.8	49.9	44
F-318	141776 45912	15.2	7.60	148.0	9.45	7.5	6.2	10.2	3.6	44.7	13.7	3.9	22.7	35.6	45
F-333	185875 45937	15.4	7.24	338.0	9.30	14.1	11.7	34.7	6.5	50.9	108.5	12.6	5.8	53.9	130
F-334	188042 45910	15.4	7.32	201.0	9.87	7.0	7.1	20.1	5.1	49.3	38.8	5.5	18.7	42.0	45
F-335	187734 41410	15.7	7.73	167.0	9.40	6.2	6.1	16.7	3.7	45.0	27.0	4.0	7.2	42.8	45
F-339	177198 34288	14.8	7.68	94.0	9.80	4.8	3.8	7.3	2.7	43.0	7.5	2.1	2.2	39.0	28
F-351	134314 26683	14.4	7.88	125.0	10.50	5.4	4.7	10.5	3.8	44.3	12.6	3.9	21.8	76.2	28
F-353	133853 24096	14.6	7.68	130.0	10.16	6.0	4.7	11.0	3.8	42.4	15.2	3.9	18.6	30.6	34
F-379	178418 44759	15.7	10.50	160.0	0.00	5.8	4.2	16.1	4.3	39.7	8.2	1.8	8.9	10.2	31
F-393	187508 44235	15.4	7.85	172.0	9.90	6.3	6.1	8.4	3.6	44.3	26.1	4.2	26.7	31.4	39
F-398	149443 48398	16.0	7.19	154.0	8.35	8.8	5.6	11.5	3.0	44.7	12.4	3.4	21.4	31.2	65
F-415	171005 50425	14.3	8.06	86.4	0.00	4.0	3.0	7.1	2.5	37.4	7.9	2.3	30.5	25.1	21
F-416	171171 48204	14.5	8.04	87.9	0.00	3.8	3.0	7.6	2.3	37.4	8.8	2.5	31.5	25.2	24
F-418	131542 40932	18.0	7.75	242.0	26.20	14.0	8.0	18.4	5.3	37.1	14.9	3.5	5.7	54.4	93
F-430	189342 42477	15.9	6.73	442.0	10.00	7.5	11.3	73.5	7.9	43.7	106.7	11.9	17.7	40.7	67
F-432	138860 28466	14.9	8.47	107.0	8.75	4.3	3.0	11.2	5.0	48.3	10.7	2.1	8.1	29.0	27
FW01	134646 43043	15.9	8.30	141.0	9.0	7.5	6.0	10.8	4.1	39.6	10.7	3.1	14.1	42.9	62
FW02	135274 42834	15.8	8.31	128.0	9.6	6.7	5.4	10.4	4.0	38.8	9.6	2.7	9.5	43.7	67
FW03	132513 39007	17.7	8.42	157.0	6.8	8.3	6.6	14.3	4.3	38.1	12.5	3.8	14.4	50.0	88
FW04	137643 40509	16.7	8.23	114.0	9.0	5.3	4.7	10.1	4.2	39.9	7.2	2.1	4.5	45.7	63
FW05	136109 39968	15.7	8.38	112.0	9.1	5.7	5.0	9.6	3.8	38.6	8.0	2.0	6.4	42.6	61
FW07	137589 36963	15.1	8.12	113.0	9.4	5.3	4.7	8.0	3.2	38.8	7.1	1.9	4.6	40.4	58
FW08	125925 34385	17.0	7.72	209.0	0.8	11.2	6.9	19.0	4.3	30.4	22.1	6.7	11.3	57.0	120
FW09	128676 34064	15.6	8.78	228.0	7.8	13.0	9.2	16.9	4.7	36.0	20.3	7.6	38.6	45.5	100
FW10	129640 33981	15.7	7.51	331.0	9.4	16.2	15.0	19.8	6.9	32.4	24.7	13.6	70.5	32.3	149
FW11	123628 30760	18.3	8.94	191.0	1.7	11.5	3.5	20.2	5.1	27.6	18.3	4.9	3.4	64.5	115
FW12	123721 27215	18.8	8.25	223.0	0.9	9.5	7.9	20.4	5.8	35.6	18.2	6.9	12.8	78.7	92
FW13	128615 30817	17.2	8.82	168.0	3.2	8.3	5.1	17.8	4.4	30.0	15.8	4.3	6.9	53.7	79
FW14	132311 34212	16.7	8.86	129.0	7.9	5.5	4.2	14.1	5.7	36.4	9.8	2.6	3.7	48.8	62

Appendix A. (continue).

조사공	조사공 좌표		Temp	pH	EC	DO	Ca	Mg	Na	K	SiO ₂	Cl	SO ₄	NO ₃	HCO ₃	Sr
	X(m)	Y(m)	°C	μS/cm	mg/L											μg/L
FW15	132585	30730	14.0	8.01	136.0	9.2	5.1	4.9	13.7	3.8	34.3	11.8	4.2	12.0	37.1	74
FW16	135655	33803	15.2	8.44	117.0	9.8	5.9	5.1	9.0	3.6	38.1	8.6	2.5	7.4	39.9	63
FW17	126712	23559	18.2	8.88	151.0	3.1	11.1	3.2	15.5	3.9	30.0	9.7	4.8	1.2	60.3	156
FW18	130301	22717	15.0	9.18	124.0	7.4	10.0	2.9	10.6	3.3	24.2	8.1	2.9	2.3	46.4	307
FW19	130670	22360	15.2	9.21	123.0	7.5	9.7	3.0	10.9	3.7	24.0	8.2	2.7	4.2	43.8	155
FW20	131950	19970	17.4	7.23	304.0	8.5	17.8	12.6	20.4	5.0	30.6	24.3	12.5	60.4	52.6	231
FW21	130574	25975	14.1	8.29	103.0	9.4	4.6	3.9	9.1	3.3	36.9	7.6	2.8	5.0	34.5	47
FW22	133853	24096	15.1	8.18	129.0	9.1	6.4	4.7	11.1	3.9	34.5	12.8	2.9	11.6	32.5	67
FW23	134176	24482	14.9	7.93	138.0	9.2	6.5	5.3	11.4	3.9	35.1	15.2	3.3	12.3	30.6	71
FW25	135664	26885	14.9	8.28	87.0	9.2	3.9	3.1	7.0	2.9	35.4	6.7	2.0	5.6	28.5	48
FW26	138660	29940	15.6	8.670	73.0	8.9	2.7	2.6	6.4	3.5	34.5	5.0	1.5	0.7	28.6	47
FW27	138365	23905	16.7	8.92	139.0	6.4	8.3	3.6	15.0	4.7	34.5	9.3	2.0	5.5	51.6	89
FW28	138817	26070	15.5	7.76	138.0	9.6	7.0	5.8	10.6	3.6	34.3	9.4	2.0	17.4	37.8	78
GSR	162819	28525	15.1	6.24	101.0	8.60	6.5	2.6	8.6	1.9	35.8	9.6	1.6	18.6	20.2	102
HM1	136737	46692	14.8	7.83	215.0	11.90	5.5	6.4	26.9	6.3	47.6	48.5	8.6	19.7	36.8	29
JGR	159662	21912	16.0	6.48	117.0	9.80	6.6	3.1	9.1	2.6	35.8	11.9	4.1	22.6	20.7	67
M01	162378	23453	17.3	8.57	174.0	2.2	11.0	4.8	17.7	5.0	38.6	12.4	3.5	4.8	66.0	172
M02	161960	26529	18.0	8.51	219.0	4.4	18.7	4.0	18.9	4.4	41.6	18.8	3.8	26.5	54.1	196
M03	180754	30984	16.1	7.95	185.0	9.1	6.9	6.9	18.5	3.9	36.9	24.8	3.9	5.0	43.4	82
M04	148898	49742	15.2	8.07	94.0	9.1	5.0	4.0	7.4	2.8	36.0	6.0	1.7	1.4	39.7	61
M05	148659	49413	17.0	7.42	183.0	6.5	12.2	5.7	14.6	3.6	31.7	14.3	3.3	24.4	47.8	145
M06	187729	41406	17.8	8.53	164.0	6.1	9.6	4.8	16.3	4.7	39.2	13.4	3.0	7.2	57.3	105
M09	142353	22312	19.3	8.31	152.0	7.5	5.3	5.1	18.1	8.6	42.6	5.6	2.4	0.6	75.3	62
M10	141554	21623	16.0	7.50	131.0	8.3	6.7	7.0	9.2	3.3	42.6	8.4	2.0	3.8	55.4	79
M11	125690	30289	14.0	8.35	67.0	9.0	3.0	2.4	5.3	2.3	30.6	5.1	1.7	0.8	25.4	43
M12	146236	42818	14.4	8.43	74.0	9.7	3.5	2.7	6.0	2.7	31.3	5.3	1.7	0.8	28.8	52
M13	173632	41203	16.1	8.06	319.0	7.4	13.2	18.5	17.4	10.7	38.6	6.2	1.9	0.6	189.4	119
M14	169307	41626	14.6	8.90	57.0	8.4	3.1	1.9	4.0	1.9	31.1	4.0	1.3	0.6	21.5	40
M16	170450	41024	17	8.48	94.0	6.98	2.3	2.7	11.8	5.8	37.1	5.4	1.9	0.6	39.7	45
R-003	181122	33993	15.0	7.95	113.9	0.00	5.2	4.4	9.1	3.2	31.7	8.4	1.6	27.3	47.6	34
R-013	131959	30282	13.4	8.41	124.0	4.71	6.2	5.1	12.0	2.6	46.3	26.1	9.6	28.0	34.2	35
S-007	132174	18931	19.0	8.25	682.0	1.45	22.1	18.2	79.5	11.0	37.8	157.5	21.9	27.6	75.5	127
S-013	182312	49976	16.0	8.05	155.7	0.00	7.5	5.8	14.6	5.0	41.4	17.3	3.2	21.2	36.9	45
S-015	127504	26694	15.5	7.24	283.0	10.87	13.6	13.4	17.7	4.5	45.7	32.5	15.8	85.1	38.3	76
S-019	172873	26983	15.3	7.14	110.4	0.00	6.4	3.9	7.6	3.3	35.1	9.0	2.5	21.3	23.2	41
SDS3	169312	41638	14.2	8.16	67.0	9.93	3.0	2.3	5.8	2.3	36.8	7.5	2.3	1.1	24.3	14
W48	148095	26827	15.6	7.08	86.0	9.1	4.7	3.1	5.7	2.0	28.5	6.2	1.8	13.1	20.0	67
W50	149924	27265	15.3	7.10	86.0	9.7	4.4	3.1	5.9	2.0	28.1	8.2	1.9	9.2	19.3	65
W54	140053	32550	15.9	7.76	135.0	9.2	7.8	5.9	9.8	3.1	37.3	9.6	2.0	15.0	40.6	80
YSA	144172	44188	14.5	7.32	190.0	8.10	9.6	6.2	15.1	6.8	41.4	24.2	7.7	46.8	28.9	111