

## 지구통계 기법을 활용한 울진 지역 천부 지하수의 수질 및 수리지구화학 특성 해석

김남진<sup>1</sup> · 윤성택<sup>1\*</sup> · 김형수<sup>2</sup> · 정경문<sup>3</sup> · 김규범<sup>2</sup>

<sup>1</sup>고려대학교 지구환경과학과, <sup>2</sup>한국수자원공사, <sup>3</sup>(주)도화종합기술공사

## Geostatistical Interpretation of Water Quality and Hydrogeochemistry of Shallow Groundwater in the Uljin Area, Korea

Nam-Jin Kim<sup>1</sup>, Seong-Taek Yun<sup>1\*</sup>, Hyoung-Soo Kim<sup>2</sup>, Kyung-Moon Jung<sup>3</sup> and Gyoo-Bum Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth and Environ. Sci., Korea University, Seoul 136-701, Korea

<sup>2</sup>Korea Water Resources Corporation, Daejeon

<sup>3</sup>Dohwa Consulting Engineers Co., Seoul

We have collected hydrogeochemical data of shallow groundwaters in the Uljin area located at eastern coastal area of Korea. Geostatistical analysis (ANOVA test, cluster analysis, and factor analysis) of the collected data sets was performed, in order to evaluate both the spatial and/or temporal variation of water quality data and the groundwater contamination, as well as the principal reactions occurring in the aquifer. Results of the ANOVA test show that regional water chemistry are not significantly changed spatially in eight watersheds. However, some ions such as  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  show a meaningful watershed variation. Water chemistry variation according to sampling time (season) is not shown, except for  $\text{SO}_4^{2-}$ . The cluster analysis shows that significant water chemistry variation is explained by the distance from the coast. Factor analysis indicates that the water chemistry is changed according to various factors as follows: in the order of decreasing importance, water-rock interaction (mainly, carbonate dissolution), sea-salt spraying, and then contamination by fertilizers and agrochemicals.

**Key words:** Uljin, shallow groundwater, water quality and hydrogeochemistry, geostatistics, sea-salt spray

동해안 울진 지역 천부 지하수의 수리지구화학 자료에 대하여 지구통계 분석(이원배치 분산 분석, 군집 분석, 요인 분석)을 수행함으로써, 수질 자료와 오염 특성의 시간적·공간적 변화 양상을 규명하고 대수층에서 일어나는 주요 반응을 고찰하였다. 이원배치 분산 분석 결과, 광역적 수질 특성은 8개 수계분지를 따라 유의한 공간적 변화를 보여주지 않았으나, Ca,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  등 일부 이온종은 수계분지별로 의미 있는 변화를 나타내었다. 시료 채취시기에 따른 계절 변화는  $\text{SO}_4^{2-}$ 를 제외하고는 인지되지 않았다. 그러나 군집 분석 결과, 수리지구화학 특성의 변화는 해안으로부터의 거리에 따라 아주 잘 설명될 수 있음을 시사하였다. 요인 분석 결과, 연구 지역 천부 지하수의 수리지구화학 특성은 다양한 요인에 의해 지배됨을 확인하였다. 중요 순서로 그 요인을 나열하면, 1) 물-암석 반응(주로 탄산염 광물의 용해), 2) 바다에서 기원한 해염의 혼입, 3) 비료와 각종 농화학 약품에 의한 오염으로 밝혀졌다.

**주요어:** 울진, 천부 지하수, 수질 및 수리지구화학, 지구통계, 해염 혼입

### 1. 서 론

자연수의 수리지구화학 자료를 구성하는 여러 변수들(variables)은 매우 복잡해 보이지만 일반적으로는 서

로 밀접한 내적 상관성을 가지고 있다. 그러나, 도학적(graphical) 기법에 근거한 해석만으로는 그러한 상관성을 정량적으로 밝혀내기가 어렵다. 광역적이면서 특히 지하수 부존의 배경 특성이 다양한 경우에는 변수대 변수의 분석에 기초한 경향성(상관성)만을 가지고 지하수 수질의 공간적·시간적 변화 경향을 파악한다는

\*Corresponding author: styun@mail.korea.ac.kr

것은 지극히 어려우며 또한 소모적이다. 시·공간적으로 다양하고 복잡하게 변화하는 자연수의 수질 특성을 효과적으로 규명하기 위하여 외국에서는 지구통계(geostatistics) 기법을 활용한 연구가 활발히 진행되고 있으나(예: Rouhani, Wackernagel, 1990; Gustafsson, Larsson, 2000), 국내에서는 그러한 연구 사례가 많지 않다.

특히, 바다에 인접한 지역의 천부 지하수의 수질 특성은 수문/수리 환경, 지표 지질, 충적층의 물리화학적 특성, 토지 이용 현황 외에도 해안선으로부터의 거리에 따른 바다의 영향에 의하여 매우 복잡하게 변화한다. 본 연구에서는 바다에 인접한 울진 지역의 천부 지하수에 대하여 광역적인 수질 특성을 파악하고 아울러 수질 특성의 공간적 및 계절적 변화 양상을 고찰함으로써, 천부 지하수의 수질 및 수리지구화학 특성에 영향을 주는 여러 요인을 규명하고자 하였다. 이를 위하여, 도학적 기법을 이용한 해석으로부터 천부 대수층 내에서의 여러 수리지구화학 반응과 변화 경향, 오염물질의 유입 가능성 등을 살펴보는 한편, 아원배치 분산분석(two-way ANOVA test), 군집분석, 요인분석 등 다변량 지구통계 기법을 적용함으로써 천부 지하수 수질에 영향을 미치는 각 변수들 사이의 상관성을 종합적으로 해석하여 수질 특성의 변화 요인을 정량적으로 규명하였다.

## 2. 연구 지역의 자연 환경

본 연구의 범위는 동해(East Sea)에 인접한 경북 울진군 지역(면적 988.82 km<sup>2</sup>)이다(Fig. 1). 울진 지역의 서쪽은 태백산맥의 험준한 지형을 이루고 있으며, 이곳에서 발원한 하천들은 서북쪽에서 동해로 유입되고 있다. 따라서, 전형적으로 서고동저형의 지형 특징을 보인다. 동해로 유입되는 하천의 하류 충적지에는 도시 또는 촌락과 경작지가 발달하였다. 토지 이용 측면에서 보면, 임야(85.9%), 경작지(8.4%), 하천(2.3%)이 대부분을 차지한다. 광역적으로 지하수의 비점오염원으로 볼 수 있는 경작지는 논이 45.63%, 밭이 54.30%를 차지하고 있다(한국수자원공사, 1999).

울진 지역의 지질 구성은 매우 복잡하고 다양하다. 선캄브리아기 평해층군, 원남층군, 울리층군 및 화강편마암이 기반암을 이루고 있으며, 이들을 시대 미상의 화강편마암과 쥘라기 대보화강암이 관입하였다. 이 지층들의 상위에는 하양층군인 울연산층과 기송동층이 부정합 또는 단층 접촉의 관계로 놓여 있으며, 백악기

불국사화강암은 하양층군을 관입하였다. 이들 지층 위에는 비교적 저지대인 해안지역과 하천 및 계곡을 중심으로 제4기 충적층이 분포한다(국립지질조사소, 1963). 평해층군은 변성퇴적암으로서 연구 지역 남부에 소규모로 나타나며, 편마암 또는 편암으로 구성되는 원남층군과 울리층군이 이를 정합으로 덮고 있다. 선캄브리아기 최상위 지층인 화강편마암은 가장 광범위한 분포를 나타낸다. 쥘라기 대보화강암은 중동부 해안지역과 편마암 산출지역에 집중 분포한다. 한편, 연구 지역 서측의 고지에는 시대 미상의 석회암이 소규모로 분포하고 있다.

울진 지역 토양의 분포는 사질양토(sandy loam) 86.2%, 사질토 8.2%, 자갈 4.2%, 유기토 0.7%, 점토 0.5%의 면적비를 갖는다(한국토양조사사업기구, 1971; 한국수자원공사, 1999). 북서부의 산성화성암, 변성퇴적암, 편암 분포 구릉지에는 주로 적황색을 띠는 암쇄토 및 일부 퇴적도가 분포하여 전반적으로 토양 배수가 양호하다. 동부의 해안 근처에는 충적도가 우세한데, 이들은 환경사의 하천부지를 따라 분포하고 있고 자갈이 있는 모래질을 띄고 있어 비교적 배수가 양호하다. 울진 지역의 토양 배수능은 서북부 및 남서부의 일부 산악지역을 제외하고는 대체로 양호한 것으로 조사되었다(한국토양조사사업기구, 1971; 한국수자원공사, 1999).

울진 지역의 광역적인 지하 수문 순환계는 동고서저형 지형 특성 뿐 아니라 대규모 선구조에 의하여 지배되는 것으로 추정되는데, 1 내지 3 km 이상의 연장을 갖는 선구조는 NS-N20E 및 N40-60W 방향이 우세하다(한국수자원공사, 1999). 울진 지역의 연평균 강수량은 1,042 mm로서 전국 평균(1,274 mm) 보다는 낮으며, 6~8월에 강우량이 집중되는 전형적인 한반도 강우 패턴을 보이고 있다.

본 연구는 주로 충적층을 따라 산출되는 천부 지하수를 대상으로 하였기 때문에 울진 지역의 충적층에 대하여 자세히 기재하고자 한다. 울진 지역의 제4기 충적층은 내륙의 하상 또는 동부의 해안 저지대를 따라 분포하며, 주로 모래, 자갈, 점토로 구성되어 있다(한국수자원공사, 1999). 울진 지역 대부분의 하천은 왕피천, 평해 남대천 및 북면 남대천을 제외하고는 대부분 유역면적이 작고 유로 연장이 짧은 비교적 소규모의 하천이며(Fig. 1), 따라서 대부분 하상 경사가 급하여 홍수시 홍수량이 일시에 동해로 유출되는 경향이 있다. 충적층 두께는 일반적으로 하천 하류로 향할수록 두꺼워진다. 그 두께를 보면, 왕피천(13.6~40.1 m),

평해 남대천(하류: 6.3~41.7 m), 북면 남대천(하류: 6.5~32.0 m)을 따라 발달하는 충적층은 비교적 두꺼운 데 비하여, 나머지 하천, 즉 나곡천(9.4~18.0 m), 부구천(하류: 6.5~24.5 m), 광천(하류: 12.9~19.0 m), 매화천(하류: 3.7~27.9 m), 적산천(하류: 12.0~30.1 m), 황보천(5.5~29.0 m), 상률천(10.0~24.0 m)은 충적층 발

달이 상대적으로 미약하다(한국수자원공사, 1999).

### 3. 시료 채취 및 분석

연구 대상 천부 지하수의 수질 변화를 계절적으로 고찰하기 위하여, 건기인 1997년 12월과 1998년 4월,

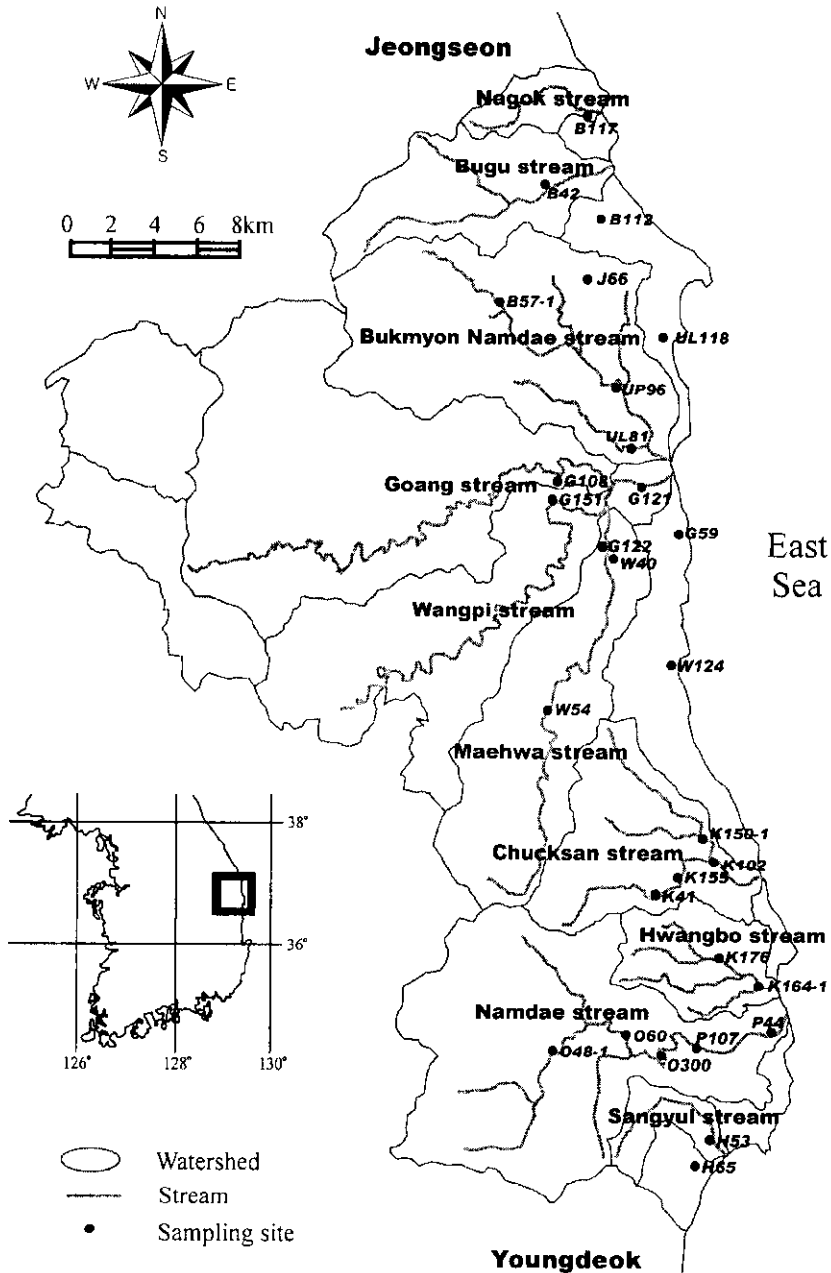


Fig. 1. Major watersheds and sampling sites of the Uljin area.

Table 1. Physicochemical data of shallow groundwaters from the Ujin area (sampling date: December 1997).

Sample no.	Surface geology	Distance <sup>1)</sup> (km)	Drilling G.W.L. <sup>2)</sup> depth (m)	Temp. (°C)	pH	EC <sup>3)</sup> (μS/cm)	Dissolved constituents (mg/l)											
							TDS <sup>4)</sup> (mg/l)	Na	K	Mg	Ca	SiO <sub>2</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	NO <sub>3</sub>	F	
B112	granitic gneiss	2.4	2.5	0.54	14.0	7.21	80	122.2	14.2	1.4	1.7	5.2	38.0	14.4	3.8	39.7	3.8	0.04
G108	granitic gneiss	5.6	100.0	artesian	15.0	7.20	200	226.9	15.3	1.9	4.7	24.2	55.4	8.1	6.9	109.8	0.3	0.36
G121	granitic gneiss	1.5	80.0	7.60	15.0	6.72	120	104.0	7.0	2.1	3.8	14.8	13.6	6.9	9.8	42.0	4.1	0.04
G122	limestone	3.3	70.0	22.50	16.0	7.21	400	383.6	16.9	1.9	13.4	74.8	15.8	48.9	13.4	177.0	21.4	0.08
G151	granitic gneiss	6.0	15.7	5.02	14.0	6.89	220	116.2	9.2	2.4	4.0	11.6	21.4	9.4	9.4	39.7	9.0	0.03
G59	biotite granite	0.4	3.0	1.80	14.0	7.05	180	231.4	32.4	1.1	5.9	20.4	30.1	52.4	12.7	70.2	6.1	0.12
H53	biotite-hornblende granite	2.7	4.8	1.00	10.0	7.32	150	197.7	19.3	3.5	7.1	28.9	17.0	31.3	25.9	39.7	24.9	0.05
H65	biotite-hornblende granite	1.1	5.5	2.55	12.0	7.21	200	227.8	14.0	3.4	7.1	41.1	20.5	14.1	39.6	75.0	10.8	2.23
K102	granitic gneiss	2.0	3.3	1.07	16.0	7.39	140	112.7	7.4	1.8	5.4	12.2	13.5	10.5	14.6	35.1	12.0	0.10
K150-1	banded biotite gneiss	2.3	5.0	0.92	14.0	7.20	130	134.9	9.8	1.9	5.5	16.3	15.7	10.7	10.7	58.0	6.2	0.09
K164-1	granitic gneiss	1.0	3.1	2.00	13.0	7.05	180	160.5	17.1	3.0	7.6	14.2	16.2	28.1	15.7	42.7	15.8	0.05
K176	banded biotite gneiss	2.8	3.4	0.08	15.0	7.15	80	104.1	8.0	1.6	4.4	10.1	16.5	7.9	12.5	36.6	6.4	0.06
K41	banded biotite gneiss	5.2	3.4	0.12	14.0	6.46	250	198.7	10.6	2.1	12.1	27.2	13.8	19.5	24.9	54.9	33.4	0.29
O48-1	biotite-hornblende granite	10.9	1.2	0.80	10.0	7.10	170	194.8	16.0	2.8	5.1	21.3	38.3	14.2	9.0	36.6	51.5	0.10
O60	banded biotite gneiss	7.9	6.6	2.31	9.0	6.89	110	116.1	8.6	1.5	2.9	15.0	14.0	8.9	13.4	45.8	6.0	0.15
P107	elastic sed. rock	4.0	7.3	0.80	13.0	7.31	120	141.1	9.0	2.4	4.3	19.0	15.6	11.5	14.7	42.7	21.7	0.04
P44	granitic gneiss	1.0	11.5	1.69	12.0	6.12	180	185.0	15.2	2.6	5.1	24.0	20.5	18.0	22.2	76.3	1.0	0.08
UL118	granitic gneiss	0.0	3.0	0.55	13.0	6.92	350	366.9	49.7	1.0	12.4	37.1	29.1	74.9	32.4	58.0	72.3	0.04
UL81	granitic gneiss	2.3	1.9	0.28	17.0	6.50	110	119.9	10.9	2.3	5.4	10.9	17.8	14.1	8.4	45.8	4.4	0.04
UP96	granitic gneiss	2.3	5.3	2.20	15.0	6.74	100	94.0	8.0	2.0	2.5	8.1	12.0	8.3	11.0	36.6	5.4	0.17
W124	granitic gneiss	0.3	2.7	0.95	10.0	7.10	250	232.9	38.8	4.6	9.6	25.7	14.4	65.3	23.0	44.0	7.3	0.14
W40	limestone	3.2	9.6	0.05	13.0	6.61	220	313.0	20.5	2.5	9.6	41.4	32.8	24.0	4.2	177.0	0.6	0.36
W54	granitic gneiss	6.4	3.7	2.00	8.0	7.25	60	78.9	6.2	1.1	2.7	8.2	11.4	5.3	7.9	33.6	2.4	0.09

1) distance from the coast, 2) ground water level, 3) electrical conductivity, 4) total dissolved solids

**Table 2.** Physicochemical data of shallow groundwaters from the Uijin area (sampling date: April 1998).

Sample no.	surface geology	Distance <sup>1)</sup> (km)	Drilling G.W.L. <sup>2)</sup> depth (m)	Temp. (°C)	pH	Eh (mV)	EC <sup>3)</sup> (μS/cm)	TDS <sup>4)</sup> (mg/l)	Dissolved constituents (mg/l)										
									Na	K	Mg	Ca	SiO <sub>2</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	NO <sub>3</sub>	F	
B112	granitic gneiss	2.4	2.5	0.64	11.5	7.23	82.5	113.1	93.6	11.0	1.4	1.7	4.9	35.9	8.4	1.5	28.7	0.0	0.01
B117	granitic gneiss	0.5	3.0	0.85	11.4	6.40	31.0	119.0	83.3	11.1	1.5	2.6	5.4	10.4	10.5	5.2	33.1	3.3	0.27
B57-1	banded biotite gneiss	8.0	1.0	0.05	11.4	5.70	70.1	75.6	62.9	5.4	0.6	1.3	5.8	17.8	6.5	8.2	16.3	1.0	0.03
H53	biotite-hornblende granite	2.7	4.8	1.16	12.3	5.29	207.0	387.0	252.9	23.8	2.1	9.1	35.6	14.7	22.4	17.0	100.7	27.4	0.01
H65	biotite-hornblende granite	1.1	5.5	3.25	12.4	6.35	273.3	189.0	154.1	7.4	1.9	3.6	23.8	12.7	6.9	16.8	77.5	2.9	0.56
J66	granitic gneiss	4.0	4.9	0.64	13.4	5.59	77.5	300.0	211.1	18.5	1.4	8.2	20.6	47.6	26.4	2.6	65.6	20.1	0.05
K102	granitic gneiss	2.0	3.3	1.28	12.0	6.26	40.5	143.0	98.0	6.7	2.0	5.1	12.0	12.2	8.7	10.2	31.4	9.5	0.15
K164-1	granitic gneiss	1.0	3.1	2.30	10.5	5.57	80.4	245.0	184.4	21.6	1.0	4.5	11.4	33.3	39.6	13.5	29.0	30.3	0.17
K41	banded biotite gneiss	5.2	3.4	0.20	13.2	5.57	80.4	230.0	174.3	11.7	8.4	7.7	13.0	18.1	8.4	5.3	82.0	19.7	0.03
O300	clastic sed. rock	5.8	8.7	3.63	8.5	6.54	24.5	118.7	84.6	5.7	1.0	2.2	10.8	11.1	6.5	5.0	38.9	3.4	0.06
O48-1	biotite-hornblende granite	10.9	1.2	0.40	13.6	6.24	41.4	225.0	174.2	11.7	1.6	4.9	21.2	35.1	11.3	7.0	33.5	47.9	0.09
O60	banded biotite gneiss	7.9	6.6	3.02	9.0	6.57	23.1	101.2	86.3	5.8	1.1	1.7	10.5	8.6	0.0	4.1	51.9	2.3	0.17
P107	clastic sed. rock	4.0	7.3	1.36	13.0	5.87	49.4	171.4	145.0	8.1	2.9	3.8	17.7	14.5	17.5	14.2	42.7	23.6	0.02
W124	granitic gneiss	0.3	2.7	1.59	9.1	6.11	49.2	226.0	153.6	21.6	2.4	5.7	13.4	12.1	23.1	9.6	52.8	12.7	0.07
W54	granitic gneiss	6.4	3.7	2.14	11.5	5.39	89.0	125.9	94.2	4.3	1.4	3.5	14.1	10.3	6.6	9.0	38.8	6.1	0.02

1) distance from the coast, 2) ground water level, 3) electrical conductivity, 4) total dissolved solids

**Table 3.** Physicochemical data of shallow groundwaters from the Uijin area (sampling date: July 1998).

Sample no.	Surface geology	Distance <sup>1)</sup> (km)	Drilling depth (m)	G.W.L. <sup>2)</sup> (m)	Temp. (°C)	pH	EC <sup>3)</sup> (µS/cm)	TDS <sup>4)</sup> (mg/l)	Dissolved constituents (mg/l)										
									Na	K	Mg	Ca	SiO <sub>2</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	NO <sub>3</sub>	F	
B112	granitic gneiss	2.4	2.5	0.43	16.4	6.17	200	59.1	5.4	2.3	1.2	3.3	17.3	7.2	4.5	15.3	2.4	0.15	
B117	granitic gneiss	0.5	3.0	0.40	17.8	7.13	160	67.2	14.2	1.8	3.0	6.1	11.2	13.9	6.2	6.1	4.4	0.31	
B42	granitic gneiss	3.8	5.7	3.05	17.5	6.62	130	137.6	9.9	2.3	4.4	18.2	15.5	11.0	27.7	36.6	11.7	0.30	
B57-1	banded biotite gneiss	8.0	1.0	0.05	18.0	6.99	90	54.6	5.5	0.7	1.2	4.9	18.8	6.8	5.9	9.8	0.8	0.27	
G151	granitic gneiss	6.0	15.7	5.23	15.0	6.66	150	121.5	6.0	1.1	4.4	12.5	19.0	8.6	7.2	61.0	1.6	0.13	
G59	biotite granite	0.4	3.0	1.61	17.5	6.67	250	346.5	42.0	2.0	14.7	31.5	26.5	68.1	23.6	48.8	89.1	0.16	
H53	biotite-hornblende granite	2.7	4.8	0.90	19.1	6.91	370	140.0	9.8	1.8	4.6	17.3	13.0	17.8	12.0	48.8	14.8	0.05	
H65	biotite-hornblende granite	1.1	5.5	2.17	18.7	6.77	290	154.4	7.9	1.4	4.6	19.5	14.7	16.6	10.8	70.2	8.8	0.05	
J66	granitic gneiss	4.0	4.9	0.74	18.5	6.94	280	247.2	22.8	1.7	8.9	21.8	46.1	43.7	4.5	58.0	39.5	0.11	
K102	granitic gneiss	2.0	3.3	1.15	19.8	6.71	150	120.1	7.9	1.6	5.6	12.5	14.6	14.2	12.9	39.7	11.1	0.07	
K150-1	banded biotite gneiss	2.3	5.0	0.99	18.0	6.36	130	116.9	10.3	2.2	4.2	12.3	16.5	19.4	6.9	42.7	2.4	0.06	
K164-1	biotite-hornblende granite	1.0	3.1	1.69	17.5	6.53	230	189.0	12.5	1.6	5.2	21.3	34.2	16.5	9.8	36.6	51.1	0.14	
K176	banded biotite gneiss	2.8	3.4	0.06	18.4	6.46	90	85.4	6.7	1.1	2.8	7.4	13.2	10.7	12.1	15.3	15.9	0.11	
K41	banded biotite gneiss	5.2	3.4	0.07	16.5	6.93	280	151.5	9.1	5.3	6.6	14.0	15.3	26.0	15.3	30.5	29.1	0.19	
O300	clastic sed. rock	5.8	8.7	3.32	18.8	6.96	200	208.5	11.0	1.5	7.1	26.8	16.5	20.3	11.8	83.0	30.5	0.09	
O48-1	biotite-hornblende granite	10.9	1.2	0.42	17.0	6.47	230	160.6	21.5	1.1	4.1	9.2	34.2	29.8	9.9	39.7	10.9	0.26	
O60	banded biotite gneiss	7.9	6.6	2.70	19.7	7.32	110	112.0	7.1	1.2	2.7	14.0	14.9	8.4	7.7	48.8	7.1	0.16	
P107	clastic sed. rock	4.0	7.3	1.07	18.9	7.26	150	162.9	8.4	1.8	4.9	20.6	13.5	16.8	11.9	58.0	27.0	0.04	
P44	granitic gneiss	1.0	11.5	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	139.4	7.8	1.3	4.2	18.1	14.1	13.7	9.9	61.0	9.1	0.07	
UL118	granitic gneiss	0.0	3.0	0.45	18.2	6.72	440	362.4	49.7	1.1	10.7	27.5	31.1	57.2	22.0	85.4	77.6	0.05	
UP96	granitic gneiss	2.3	5.3	2.20	17.5	6.34	170	234.3	27.6	5.3	8.2	17.4	33.1	42.1	7.3	43.9	49.2	0.20	
W124	granitic gneiss	0.3	2.7	1.59	22.0	6.87	190	181.3	13.0	1.6	5.6	23.5	14.8	21.1	9.3	73.2	19.0	0.20	
W40	limestone	3.2	9.6	0.10	18.4	6.87	240	150.6	9.9	1.1	5.5	20.4	13.1	17.7	6.0	73.2	3.5	0.21	
W54	granitic gneiss	6.4	3.7	2.25	18.4	6.20	200	110.5	6.1	2.1	5.5	19.7	11.8	10.7	11.9	22.9	19.9	0.05	

1) distance from the coast, 2) ground water level, 3) electrical conductivity, 4) total dissolved solids

Table 4. Physicochemical data of shallow groundwaters from the Ujin area (sampling date: September 1998).

Sample no.	Surface geology	Distance <sup>1)</sup> (km)	Drilling depth (m)	G.W.L. <sup>2)</sup> (m)	Temp. (°C)	pH	EC <sup>3)</sup> ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	TDS <sup>4)</sup> (mg/l)	Dissolved constituents (mg/l)									
									Na	K	Mg	Ca	SiO <sub>2</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	NO <sub>3</sub>	F
B112	granitic gneiss	2.4	2.5	0.60	18.0	6.52	230	98.9	19.5	1.2	2.2	5.2	27.0	25.1	4.6	12.2	1.8	0.07
B117	granitic gneiss	0.5	3.0	0.11	19.0	7.11	140	132.5	22.9	3.2	3.8	7.9	11.4	11.3	4.8	58.0	8.9	0.48
B42	granitic gneiss	3.8	5.7	3.88	18.0	6.32	220	131.6	12.0	2.6	4.1	17.5	15.0	10.3	18.7	39.7	11.5	0.31
B57-1	banded biotite gneiss	8.0	1.0	0.05	18.0	6.73	80	44.9	5.3	0.7	0.6	2.5	18.0	4.3	3.9	9.2	0.3	0.04
G151	granitic gneiss	6.0	15.7	5.48	18.0	6.58	120	115.9	6.6	1.1	4.5	13.5	18.1	6.8	6.0	58.0	1.2	0.13
G59	biotite granite	0.4	3.0	2.03	18.0	6.51	290	300.1	47.5	2.2	14.1	30.0	25.5	71.6	23.0	36.6	49.5	0.16
H53	biotite-hornblende granite	2.7	4.8	1.01	19.0	6.35	610	162.1	12.3	2.5	5.4	21.5	13.9	13.7	10.8	67.1	14.8	0.06
H65	biotite-hornblende granite	1.1	5.5	2.82	18.0	6.57	410	136.2	9.5	1.4	4.1	18.0	14.9	12.0	8.8	61.0	6.4	0.05
J66	granitic gneiss	4.0	4.9	0.63	19.0	6.78	200	242.1	24.4	2.0	9.1	23.6	44.0	40.1	4.3	54.9	39.6	0.10
K102	granitic gneiss	2.0	3.3	1.20	19.0	6.57	130	124.8	9.5	1.8	5.5	13.0	14.4	10.5	9.8	48.8	11.5	0.05
K150-1	banded biotite gneiss	2.3	5.0	1.08	18.0	6.98	110	104.4	7.8	1.4	3.8	11.7	13.2	8.4	5.4	48.8	3.7	0.21
K164-1	granitic gneiss	1.0	3.1	1.96	18.0	6.34	240	199.3	26.1	1.3	4.8	11.5	33.5	23.8	13.6	64.1	20.4	0.22
K176	banded biotite gneiss	2.8	3.4	0.15	19.0	6.72	110	69.0	8.1	1.1	2.1	5.7	14.1	7.3	8.1	19.5	2.9	0.08
K41	banded biotite gneiss	5.2	3.4	0.27	17.0	6.59	470	126.2	14.3	7.3	5.1	3.5	25.7	10.8	14.5	30.5	14.4	0.06
O48-1	biotite-hornblende granite	10.9	1.2	0.41	18.0	6.63	250	207.8	17.5	2.5	5.9	23.2	30.4	15.9	9.5	39.7	63.0	0.11
O60	banded biotite gneiss	7.9	6.6	3.81	20.0	7.11	140	69.6	7.9	0.9	1.0	4.0	26.8	5.5	4.3	18.3	0.8	0.15
P107	clastic sed. rock	4.0	7.3	1.23	20.0	7.02	140	137.6	9.5	2.2	4.0	17.3	14.9	8.3	8.4	54.9	17.9	0.02
P44	granitic gneiss	1.0	11.5	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	119.6	8.4	1.3	3.5	15.3	14.5	8.9	7.1	54.9	5.6	0.06
UL118	granitic gneiss	0.0	3.0	0.70	19.0	6.81	470	321.2	58.6	1.2	12.7	23.5	32.5	49.0	21.8	39.7	82.3	0.05
UL81	granitic gneiss	2.3	1.9	0.33	21.0	6.81	130	97.7	9.4	2.0	3.4	7.3	14.9	10.3	4.8	42.7	2.8	0.06
UP96	granitic gneiss	2.3	5.3	2.66	19.0	6.52	130	217.7	28.0	5.6	7.6	16.5	31.0	38.4	6.3	36.6	47.5	0.21
W124	granitic gneiss	0.3	2.7	0.61	20.0	6.71	150	178.2	14.6	1.9	5.1	22.0	22.9	15.3	8.4	64.1	23.7	0.19
W40	limestone	3.2	9.6	0.22	19.0	6.83	290	172.0	14.9	1.5	5.7	21.5	15.1	10.2	6.2	88.5	8.2	0.24
W54	granitic gneiss	6.4	3.7	2.34	17.0	6.65	130	83.8	5.2	1.5	2.1	7.8	14.7	3.6	4.0	39.7	5.1	0.03

1) distance from the coast, 2) ground water level, 3) electrical conductivity, 4) total dissolved solids

우기인 1998년 7월과 9월의 4회에 걸쳐 현장 조사 및 시료 채취를 수행되었다. 주로 충적층 분포 지역에 선정된 25개 시료 채취 지점(Fig. 1)에서 총 83개의 천부 지하수 시료를 획득하였다. 지하수의 채취 심도는 모두 지표로부터 40 m 이내이며, 지하수 채취는 펌프를 이용한 충분한 양수 후에 표준 방법(APHA *et al.*, 1995)에 따라 진행하였다.

현장에서는 외부 및 공기와의 접촉을 피하기 위하여 특수 제작한 flow cell 내에서 온도, pH, 산화환원전위(Eh), 전기전도도(EC)를 측정하였으며, 산 적정을 통하여 알칼리도(alkalinity)를 측정하였다. flow cell을 통과해 나오는 물 시료는 곧바로 0.45  $\mu\text{m}$  셀룰로스 질산염 막필터를 통과시켜 부유물질을 제거하였으며, 양이온 분석용 시료에 대해서는 산처리를 추가하였다. 현장에서는 분석용 시료와 아울러 공시료(blank) 및 중복 시료(duplicate)를 준비하였으며, 모든 시료의 보관에서는 드라이아이스를 이용하여 냉장 상태를 유지하였다.

주요 용존 이온의 화학분석은 고려대학교 전략광물자원연구센터 내 '지하수 및 토양환경분석연구실'의 ICP-AES(Perkin Elmer Model XL3000)와 IC(Dionex Model 120)를 이용하여 수행하였다. 자료 처리 과정에서 투입된 이온 함량 자료는 측정값의 재현성과 측정 한계 및 전하균형(Friz, 1994)을 고려한 세심한 QA/

QC 하에서 분석된 것이다. 계절별 채수 시료의 현장측정 및 화학분석 결과는 Tables 1~4에 정리하였다.

#### 4. 연구 결과 및 토의

##### 4.1. 수질 유형의 공간적 변화 특성

울진 지역 천부 지하수의 수질/수리지구화학 자료로부터 수질 유형과 수질/수리지구화학적 진화 양상을 전반적으로 살펴보기 위하여 파이퍼 다이어그램을 도시하였다(Fig. 2). 점시된 각 자료는 동일 지점에서 계절별로 채수된 시료(대부분 4개)의 평균값(arithmetic mean)을 바탕으로 한 결과이다.

수질 유형의 변화 양상을 보면, 대체적으로  $\text{Ca-HCO}_3$  유형으로부터  $\text{Na-Cl}$  유형에 걸쳐 비교적 넓게 분포함을 알 수 있다(Fig. 2). 이러한 변화를 채수 지점들의 공간적 분포와 연관지어 살펴보면,  $\text{Na-Cl}$  유형에 근접한 시료의 대부분은 연구 지역 동부의 해안에 인접한 시료임을 확인할 수 있다. 한편, 주요 음이온 중  $\text{NO}_3^-$ 의 함량이 비교적 높으므로(Tables 1~4)  $\text{NO}_3^-$  함량을  $\text{Cl}$  함량에 더하여 다이어그램을 도시하여 보면(Fig. 2의 우측 그림), 음이온 구성에 있어  $\text{Cl}+\text{NO}_3^-$ 의 상대 함량이 증가해가는 경향이 뚜렷하다. 특히,  $\text{Cl}+\text{NO}_3^-$  측에 근접하여 점시되는 시료들은 대부분 하

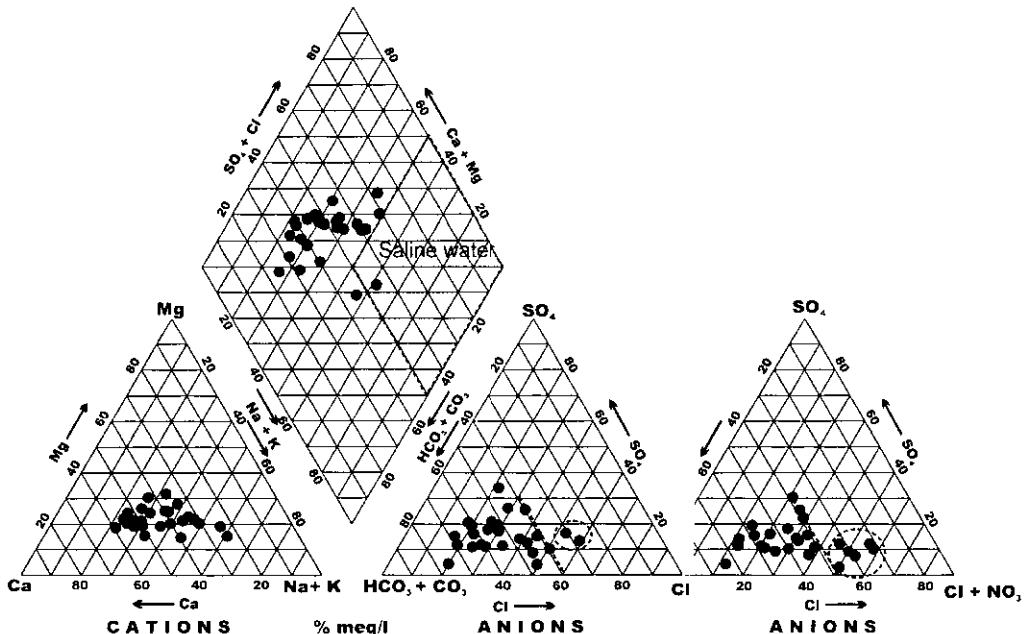


Fig. 2. Piper diagram showing the chemistry of alluvium groundwaters in the Uljin area. Each plot represents the mean value of four seasonal samples from each sampling site.



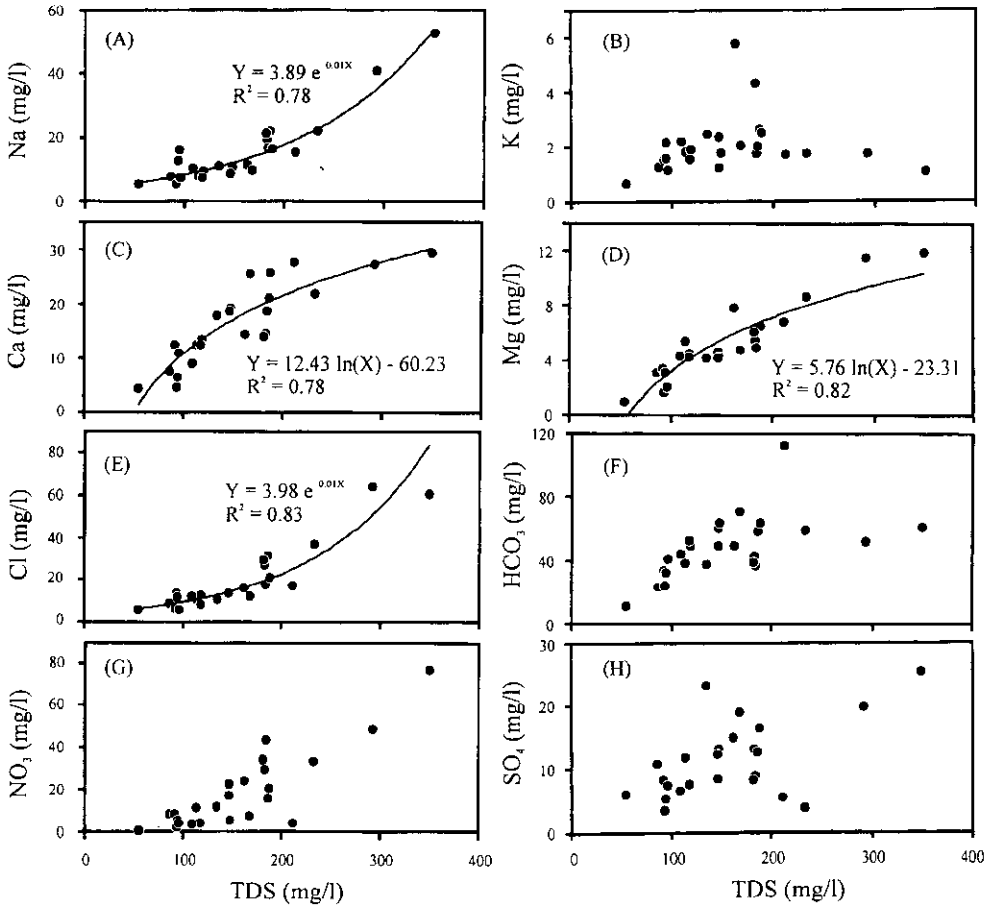


Fig. 3. Major ions versus TDS concentration diagrams of alluvium groundwaters in the Uljin area. Each plot represents the mean value of four seasonal samples from each sampling site.

천 유역 중 하류(동부 또는 남동부)에 위치한다. 앞 절에서 기재한 바와 같이, 이러한 하류 지역은 경작지가 집중 분포하고 인구가 밀집된 해안 지역에 해당한다. 따라서, 해안 지역에 가까워질수록 천부 지하수의  $\text{NO}_3$  및  $\text{Cl}$  유입이 점증하고 있음을 유추할 수 있다.

상류로부터 하류를 향한 지하수 유동 중에는 지질 매체(암석 또는 충적층)와의 물-암석 반응이 수반된다. 이러한 반응의 정도와 지하수의 상대적인 체류시간을 효과적으로 반영하는 수질 변수인 TDS(total dissolved solids)와 주요 용존 이온 함량 사이의 관계를 적절한 상관관계 함수와 더불어 Fig. 3에 도시하였다. Fig. 2에서와 마찬가지로 각 점들은 채수 지점별 4계절 농도의 산술평균값으로 도시하였다.

Fig. 3을 살펴보면, TDS의 함량 증가와 더불어 Na와  $\text{Cl}$ 의 농도가 아주 양호한 상관 관계를 보여준다. 특히, 높은 Na 및  $\text{Cl}$  함량에 의해 높은 TDS 함량을

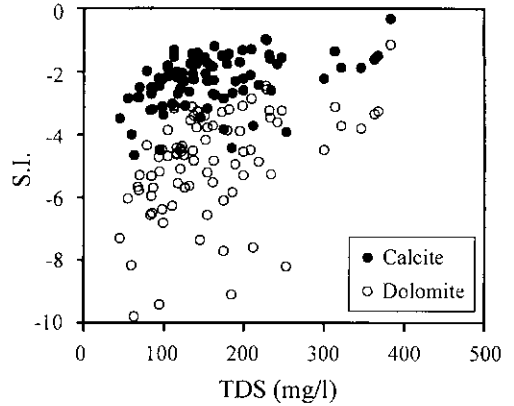
보이는 시료들은 해안에 가까이 위치하며, 따라서 이들은 후술하겠지만 바다의 영향을 강하게 시사한다. 양이온 중 Ca와 Mg의 농도는 TDS 함량과 좋은 상관성을 보여주지만, TDS가 높은 쪽에서는 그 농도 증가가 둔화되는 경향이 있다. 이러한 경향은 Fig. 4에 도시한 바와 같이 TDS가 높아지면서 탄산염광물에 대하여 포화 조건에 가까워짐과 관련되는 것으로 판단된다.

한편, 충적층 특성에 따라 천부 지하수의 수질/수리지구화학 특성이 상이한지를 검토하여 보았다. 앞서 기재한 바와 같이 충적층의 발달이 유로 연장과 충적층 두께의 측면에서 양호하고 주변 경작지의 면적이 상대적으로 넓은 왕피천, 북면 남대천, 평해 남대천 유역을 하나의 그룹으로 묶고, 충적층 발달이 다소 미약한 나곡천, 부구천, 광천, 매화천, 척산천, 황보천, 상류천 유역을 또 다른 그룹으로 나누어 고찰한 결과는 Fig. 5와 같다. TDS 농도에 따른 주요 용존 이온의 분포와

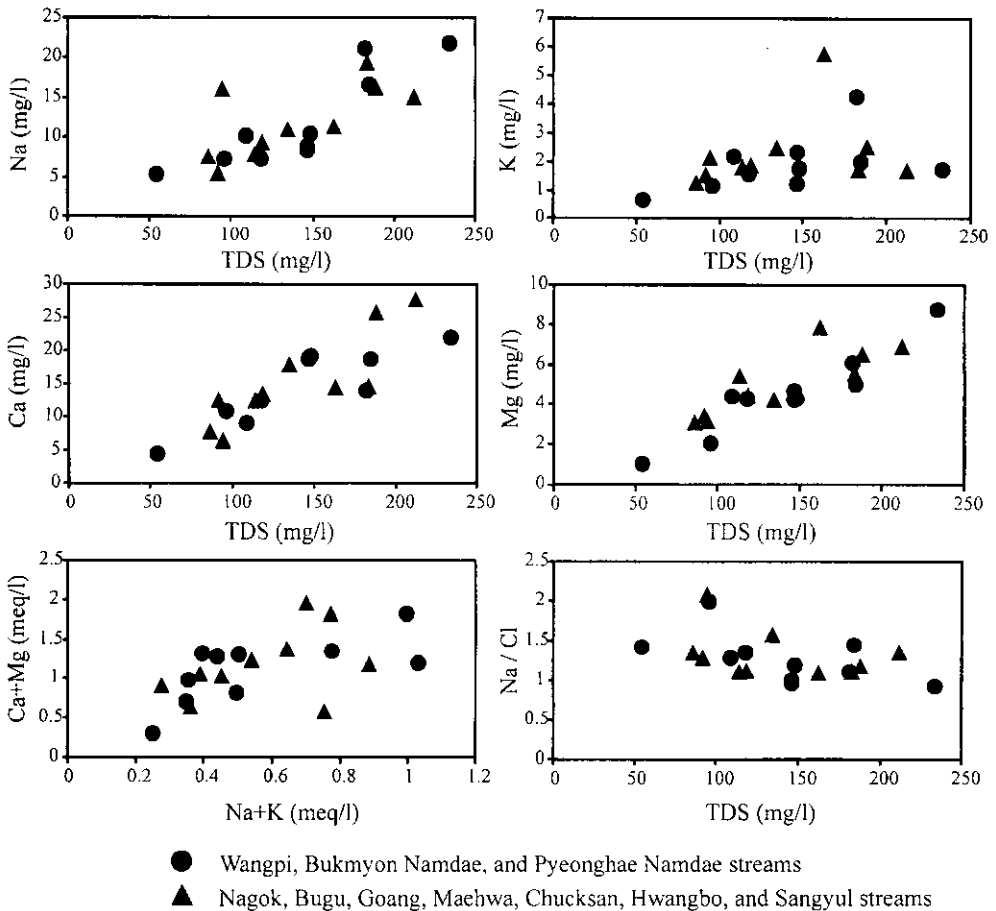
상대 함량비는 층적층 특성별로 뚜렷한 차이가 나타나지 않는다. 따라서, 층적층 두께와 경각지 면적으로 구별하여 표현된 층적층 특성은 울진 지역 천부 지하수의 화학성에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

**4.2. 지질 매체-물 반응 및 수질 특성의 계절적 변화**

자연적 요인, 특히 지질 매체(암석 또는 토양)-물 반응은 지하수의 수질 형성에 있어 기본적으로 중요하며, 따라서 이를 파악하여야만 인위적 요인(오염)에 의한 수질 변화의 정도를 효과적으로 파악할 수 있다. 다양한 지질 매체에 존재하는 탄산염 광물(특히 방해석)은 특히 높은 용해성으로 인하여 지하수(특히 천부 지하수)의 수질 형성에 절대적인 영향을 미치는 것으로 잘 알려져 있다(Rosen, Jones, 1998). 울진 지역 천부 지하수의 경우에도, 그 수질 특성은 층적층 지질



**Fig. 4.** The relationship between TDS concentration and the saturation index (S.I.) of calcite and dolomite for shallow groundwaters in the Uljin area.



**Fig. 5.** Major cations versus TDS concentration diagrams of alluvium groundwaters in the Uljin area, showing the variation of water quality in terms of different watersheds. Each plot represents the mean value of four seasonal samples from each sampling site.

매체의 구성에 상관없이 일차적으로는 탄산염 용해반응에 의해 조절되고 있음은 분명하다. 특히, Ca-HCO<sub>3</sub> 유형의 지하수에 있어서 TDS와 높은 상관관계를 보이는 Ca와 Mg(Fig. 3)의 대부분은 Fig. 4에서 지시하는 바와 같이 탄산염 광물의 용해 결과로 해석된다.

울진 지역의 하천 충적층 중 규모에 있어 대표성을 갖고 또한 상류(충진지역)로부터 하류(배수지역)에 걸쳐 여러 시료가 채취·분석된 평해 남대천 지역의 충적층 지하수에 대하여 주요 용존 이온 함량의 공간적 변화를 고찰하여 보았다. Fig. 6은 해안으로부터의 거리(즉, 지하수 유동의 상류 근접도)에 따라 채수된 지하수의 계절별 수질 특성 변화를 나타내고 있다. 대부분의 경우 양이온 중에는 Ca가, 음이온 중에는 HCO<sub>3</sub>가 양적으로 가장 우세한 이온종으로 나타나고 있어, 전반적으로 탄산염 광물의 용해가 수질 특성을 지배하고 있음을 명확히 지시한다. 또한, 이들 두 이온종은 공간적 및 계절적으로 가장 큰 함량 변화를 나타내었다. 아울러, 고정된 각 채수 지점에서의 수질 특성의 변화를 계절별로 살펴보면, 매우 불규칙한 변화를 보임을 알 수 있다. 아마도, 이러한 불규칙한 변화는 충적층의 높은 투수성 및 비교적 얇은 심도와 관련하여 강우의 침투 및 충진과 배수가 매우 빠르게 일어나기 때문일 것이다. 충적층 내에서의 지하수의 체류 시간이 짧은 경우에는 평형에 도달할 정도의 충분한 지질매체-물 반응은 기대하기 어려우며, 따라서 지하수의 수질/수리지구화학 특성은 탄산염 광물-물 반응 외에도 희석, 증발산, 오염 물질의 유입 등 여러 복잡한 요인들에 의하여 불규칙하게 변화하는 것으로 판단된다.

### 4.3. 오염의 영향

인위적인 오염을 특징적으로 지시하는 것으로 알려진 NO<sub>3</sub> 이온은 TDS가 높은 일부 지점에서 농도가 다소 높아지는 경향( $r^2=0.42$ )이 있다(Fig. 3). 분석된 NO<sub>3</sub> 함량(Tables 1~4)을 국내 지하수 수질기준(생활용수 및 농업용수=20 mg/l NO<sub>3</sub>-N, 공업용수=40 mg/l NO<sub>3</sub>-N) 및 먹는물 수질 기준(10 mg/l NO<sub>3</sub>-N)과 비교하여 보면, 총 83개의 분석 시료 중 11개 시료(13%)에서 먹는물 수질 기준을 초과하였으며, 이들의 대부분은 특히 건기에 채수한 경우였다(예: UL118, G59, O48-1, K164-1, UP96). 7월에 채수한 G59 시료는 농업용수로도 적합하지 않은 높은 NO<sub>3</sub> 함량(89.08 mg/l)을 나타내었다. NO<sub>3</sub> 함량이 수질기준을 초과하는 시료는 O48-1을 제외하고는 대부분 해안에 근접한 하류 지역의 것들이다.

해수의 NO<sub>3</sub> 절대함량은 매우 낮고 해안가 대기 중 에어로졸의 NO<sub>3</sub> 함량 역시 매우 낮으므로(Goldberg *et al.*, 1971), 울진 지역 하류 유역 지하수에서 일부 발견되는 높은 NO<sub>3</sub> 함량은 바다의 영향과는 무관한 것으로 판단된다. 따라서, 하류에 집중된 농업활동 및 주거활동과 더불어 요소 비료((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>) 또는 오폐수가 지하수계로 유입되어 산화된 결과로 생각된다.

### 4.4. 바다의 영향

연구 대상 지하수의 TDS 함량을 증가시키고 있는 주요 요인의 하나인 Na<sup>+</sup>이온의 기원으로는 지질매체(충적층과 암반)내 Na 함유 규산염광물(주로 사장석)의 용해와 바다의 영향을 생각할 수 있다. 그러나, TDS 함량과 SiO<sub>2</sub>(aq)의 상관성이 매우 낮은 것( $r^2=0.16$ )으로 보아 규산염광물의 용해는 Na 농도를 증가시키는 요인으로서 중요하지 않은 것으로 판단된다. 반면, Na 이온과 Cl 이온의 높은 농도 상관성( $r^2=0.70$ ) 및 해수의 값에 근접하는 Na/Cl 농도비는 울진 지역 지하수 수질의 형성에 있어 바다의 영향이 큼을 지시해준다. 아울러, Na와 Cl 이온 함량의 공간적 변화를 살펴보면, 해안으로부터의 직선 거리가 1 km 이내에 있는 시료에서 높은 함량을 보이며, 거리가 증가함에 따라 상대적으로 낮은 농도를 보이고 있다(Fig. 7A, B).

연안 지역 지하수의 수질에 바다의 영향(즉, 해수 성분의 유입)이 나타나는 요인으로는 첫째, 과도한 지하수 사용에 따라 대수층으로 해수가 직접 유입되는 현상(소위 '해수침투'), 둘째, 바닷물의 증발 또는 파도에 의한 물리적 교란 후 대기를 통하여 빗물 또는 해염(sea salt)의 형태로 유입되는 현상으로 나누어 볼 수 있다.

과도한 지하수 사용으로 인한 연안 지역의 해수침투는 외국에서는 여러 연구자에 의해 연구된 바 있다(예: Richter *et al.*, 1993). 이러한 경우에 지하수의 TDS 함량은 해수의 값(태평양 북위 40도 근처에서 약 33,600 mg/l; Custodio, 1987)에 근접하게 된다. 본 연구 대상 지하수의 경우에는 얇은 관정 심도(40 m 이내)를 갖기 때문에 단순히 염수-담수 경계선(Ghyben-Herzberg interface)의 공간적 분포성을 고려해 보면, 대수층을 통한 직접적인 해수침투는 어려울 것이다. 특히, 연구된 천부 지하수의 EC 값(60~610  $\mu$ S/cm) 및 TDS 함량(44.9~384.4 mg/l)은 해수침투의 결과로 보기에는 너무 낮은 값들이다.

더구나, 해수침투가 일어나는 경우, 해수-담수 경계

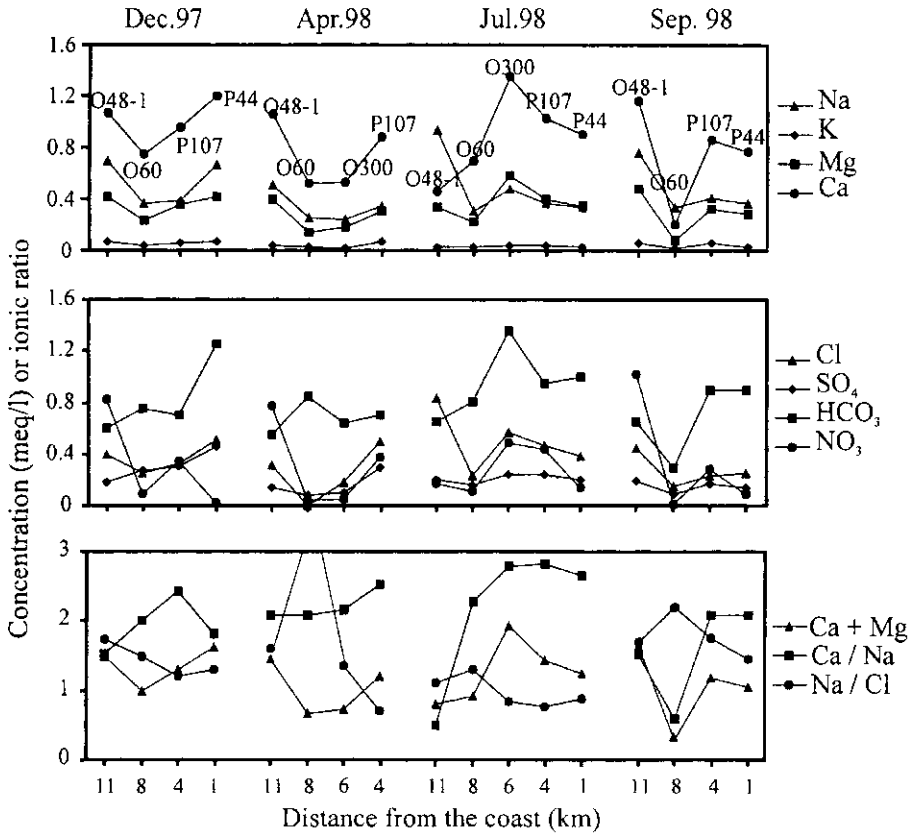


Fig. 6. Temporal/spatial hydrochemical changes of alluvium groundwaters sampled along the Pyconghae Namdae stream.

선의 전단부(front)에서는 흔히 Na 이온이 지질 매체의 구성물질에 흡착되거나 Ca 이온과 이온교환하면서 그 농도는 감소(즉, Ca/Na 농도비는 증가)하게 된다(예: Nadler *et al.*, 1981; Magaritz *et al.*, 1985; Drever, 1988; Richter *et al.*, 1993). 그러나 Fig. 7C에서 보면, 해안에 인접한 지역에서 Ca/Na 농도비가 증가하는 양상을 볼 수 없으며, 따라서 이 경향은 연구 지역 지하수의 경우에 직접적인 해수침투의 영향이 없다는 또 다른 증거로 볼 수 있다.

따라서, 울진 지역 천부 지하수에서 인지되는 해수 성분의 유입은 이동하는 대기로부터의 해염의 영향이라고 볼 수 있다. 해염 또는 해무(sea spray)는 용액 상태의 미세한 방울 또는 증발된 입자의 형태로 이동되어 해안 인접 지역의 토양 또는 자연수의 특성에 영향을 주는 것으로 알려져 있다. Whipkey *et al.*(2000)은 해안에서 50 m 떨어진 하와이 지역에서 탄산염을 포함하는 토양층 중의 양이온의 기원에 대한 연구를 수행하였는데, 일탈성(labile) Sr 및 Ca는 해무 형태의

해양성 에어로졸로부터 각각 83% 및 2/3이 기원한다고 보고하였다. 네덜란드 빗물의 Cl 함량에 관한 연구에 따르면, 해염(sea salt)이 빗물에 씻김(washing out)에 따라 해안 인접지역의 강우에서는 30 mg/l의 Cl이, 200~400 km 떨어진 지역에서는 2 mg/l의 Cl이 나타나게 되며 그 함량은 거리 증가에 따라 지수함수적으로 감소한다고 보고된 바 있다(Ridder, 1978; Appelo, Postma, 1994). 건성침적(dry deposition) 형태의 해염의 영향도 많은 논문에서 보고된 바 있는데, Cheng *et al.*(2000)에 따르면 해안 지역 대기 중의 총부유입자(total suspended particles, TSP) 중에는 Na와 Cl로 구성되는 해염에 의한 조성이 전체의 60%를 차지하며 그 다음으로는 SO<sub>4</sub>와 NO<sub>3</sub>가 각각 23%와 9%를 구성한다고 하였다. 최근 Gustafsson, Franzen(2000)이 스웨덴 남부에서 1회의 광풍 후 소나무 잎에 퇴적된 이온 함량을 연구한 결과를 보면, 바다로부터 10 km 이내에서는 최고 1400 mg/m<sup>2</sup>의 Na와 2600 mg/m<sup>2</sup>의 Cl이 퇴적되며 거리가 증가할수록 이온

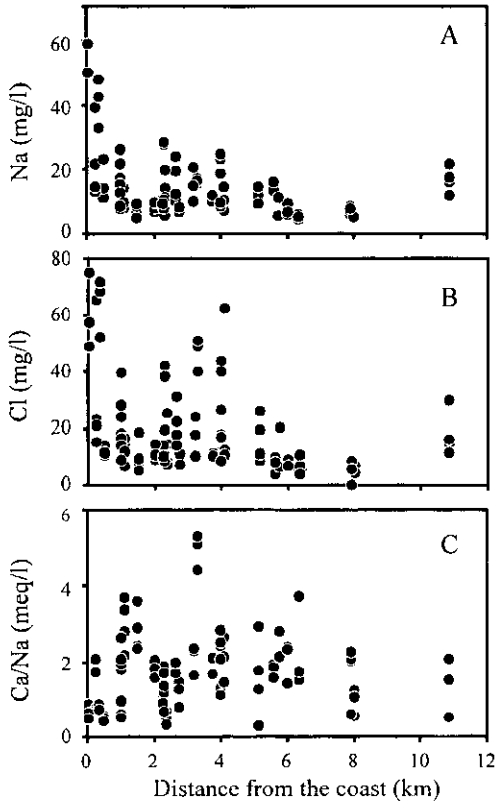


Fig. 7. Spatial changes of Na and Cl concentrations and Ca/Na ionic ratio in alluvium groundwaters in the Uljin area, in terms of distance from the coast.

퇴적물의 함량은 로그함수의 회귀식을 보이며 급격히 감소한다고 하였다.

울진 지역의 천부 지하수, 특히 바다에 가까운 지역의 지하수에서도 대기를 통하여 이동한 해염이 바람에 의한 건성집적 또는 에어졸로부터의 습식집적(wet deposition)의 형태로 강하하면서 지하수의 수질에 영향을 미치고 있는 것으로 생각된다. 이에 대해서는 뒷부분에서 다시 논의할 것이다.

4.5. 지구통계학적 해석: 수질/수리지구화학 변화의 정량적 고찰

앞 절에서는 주로 수리지구화학 자료에 대한 도화적(graphical) 고찰을 통하여 수질/수리화학 특성 및 다양한 요인의 가능성을 고찰하여 보았다. 본 절에서는 이러한 요인들을 정량적으로 고찰해 보고자 지구통계학적 해석(예: Yun et al., 2000)을 시도하였다.

이원배치 분산분석(two-way ANOVA test): 울진 지역 천부 지하수 시료(83개)의 물리화학적 자료에 대

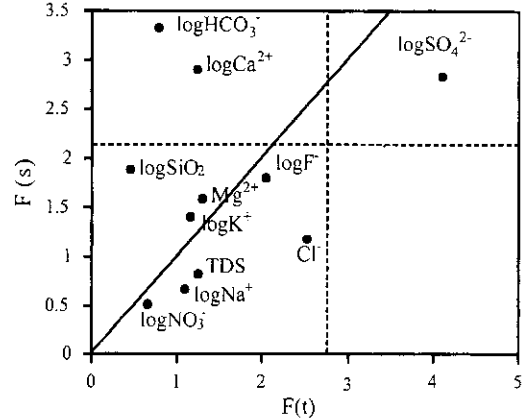


Fig. 8. Results of two-way ANOVA test. Spatial factor represents the variation in relation to different watersheds, and the temporal factor represents the seasonal variation.

하여 이원배치 분산분석을 수행하였다. 그 목적은, 첫째, 지하수의 수질/수리지구화학 특성이 통계적 관점에서 시간적(Ft; 채수 시기, 즉 계절별) 또는 공간적(Fs; 채수 지점, 즉 주요 수계분지별)으로 의미있는(significant) 변화를 하는지를 검토하고, 둘째, 그 변화양상이 유의하다면 특히 어떠한 이온종에 대하여 그러한 변화를 보이는지를 파악하는 것이다. 이를 위하여, 시간적 집단은 계절별 채수가 이루어진 4개 집단으로, 공간적 집단은 8개의 수계분지(watersheds)로 나누었다. 시간적 집단에 관한 귀무가설은 '4계절의 시료집단이 통계적으로 어떠한 변화양상을 보이지 않고 모두 동일하다'는 가설이며, 대립가설은 '적어도 하나의 계절 집단은 상이한 특성을 보인다'는 것이다. 공간적 8개 집단에 관해서도 비슷한 귀무가설과 대립가설을 설정하였다.

이러한 가설을 바탕으로 분산분석을 실시하여 각 물리화학적 자료에 대하여 시간 및 공간 집단의 변화에 대한 F값(즉, F(t) 및 F(s))을 도출하였으며, 시간적 변화 및 공간적 변화에 관한 유의성을 논의할 수 있는 임계값은 자유도를 이용하여 5% 유의수준에서 각각 F(t)=2.72 및 F(s)=2.13으로 도출되었다(Fig. 8). 분석 결과를 보면, 시간 및 공간적으로 모두 유의한 변화를 보인 것은 SO<sub>4</sub> 이온이며, 8개 수계 집단에 대하여 유의한 공간적 변화만을 보인 것은 HCO<sub>3</sub> 및 Ca 이온이었다. 나머지 대부분의 이온종은 시간 및 공간적으로 불규칙한 변화를 갖는 것으로 파악되었다.

특히 HCO<sub>3</sub> 및 Ca가 수계별 군집에 따라 공간적으로 의미 있는 변화를 보인다는 사실은, 앞에서도 기제

**Table 5.** Surface geology of watersheds in the Uljin area.

Watershed	Lithology
Nagok stream	Precambrian metamorphic rocks (Wonnam Formation)
Bugu stream	Precambrian granitic gneiss
Bukmyon Namdae stream	Precambrian granitic gneiss
Goang, Wangpi, & Maehwa streams	Precambrian granitic gneiss, Jurassic granite
Chucksan stream	Precambrian metamorphic rocks (Wonnam Formation), Precambrian granitic gneiss
Hwangbo stream	Precambrian metamorphic rocks (Wonnam Formation), Precambrian granitic gneiss
Pyeonghae Namdae stream	Precambrian metamorphic rocks (Pyeonghae Formation), Cretaceous sedimentary rocks, limestone, Jurassic granite
Sangyul stream	Cretaceous sedimentary rocks, Jurassic granite

한 바와 같이, 천부 지하수의 수질은 일차적으로 탄산염광물의 용해반응에 의해 많은 영향을 받음을 의미한다. 울진 지역의 경우, 8개 주요 수계별로 수계 지질(watershed geology) 특성이 조금씩 상이한데(Table 5), 이러한 지질 배경의 차이는 탄산염 광물의 존재량과 용해성의 차이와 관계가 있을 것으로 생각된다.

한편, 대부분의 이온종의 농도가 수계 집단의 변화에 따라 유의한 변화양상을 보이지 못한 일차적인 이유로서는, 지질 매체 내에서의 천부 지하수의 체류시간이 짧기 때문에 탄산염 광물 외 다른 광물(특히, 규산염 광물)의 충분한 용해를 유도하지 못하였고 따라서 수계별 지질 특성을 충분히 반영하지 못하였기 때문으로 판단된다. 아울러, 본 연구지역은 수계별로 지질 구성이 단순하지 않고 복잡하기 때문이기도 할 것이다. 참고로, 25개의 지하수 채수지점 중에는 선캠브리아기 화강편마암 지역에 12개 장소가 편중되어 있고, 기타 주라기 화강암 지역 6개소, 백악기 퇴적암류와 선캠브리아기 변성암류 지역이 각각 3개소, 석회암 지역 1개소가 분포한다. 향후에는 지질과 수질 특성의 상관성에 대하여 보다 정량적·체계적인 고찰을 시도

할 예정이다.

이상에서 살펴본 바와 같이, 공간적 수질 변화에 있어 주요 수계별 구분이 큰 의미가 없으므로, 다른 기준에 따라 시료를 군집화 한 후 그 특징을 다시 살펴보기로 하였다.

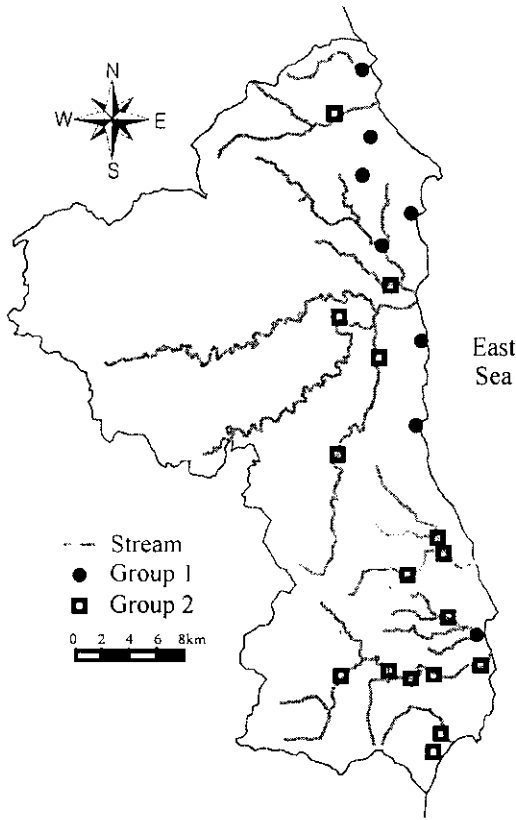
**군집분석(cluster analysis)**: 다른 기준에 입각하여 시료를 집단화할 필요성에 따라, 이온종들의 농도 변수에 대하여 시료간의 차이를 제공하여 합산하는 유클리디안 거리(squared Euclidean distance) 방식을 바탕으로 시료들을 다시 유사 집단화하였다. 앞서 살펴본 바와 같이, 시료들이 TDS의 증가에 따라 집단화되는 경향성을 보이므로 TDS(mmol/l 단위)에 대하여 보정한 10개 물리화학적 특성 자료(변수)를 이용하여 총 83개의 시료에 대하여 집단간 평균결합방식(average linkage between groups)을 이용한 군집분석을 실시하였다.

군집분석 결과 3개의 군집으로 분류되었는데, 첫 번째 그룹에는 23개, 두 번째 그룹에는 51개, 세 번째 그룹에는 9개의 시료가 해당되었다. 이 중 덴드로그램(dendrogram) 상에서 군집 내 시료간 인접도가 크지

**Table 6.** Mean and range of physicochemical data of two group waters divided by cluster analysis.

Group (Cluster)	Distance <sup>1)</sup> (km)	Concentration (mg/l)											
		pH	Na	K	Ca	Mg	SiO <sub>2</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	NO <sub>3</sub>	F	TDS
Mean	1.3	6.5	23.6	1.2	9.2	5.6	10.1	19.2	2.7	20.1	7.9	0.3	204.2
I Min.	0.0	5.6	10.6	0.3	5.1	3.5	4.0	3.5	0.6	7.9	1.1	0.0	62.9
I Max.	4.0	7.1	33.5	2.8	19.5	7.7	22.8	30.7	6.6	50.1	17.7	1.0	366.9
Mean	3.8	6.4	15.0	1.7	14.1	6.8	9.8	12.6	4.1	28.4	7.5	0.2	141.9
II Min.	0.3	5.3	9.8	0.9	8.6	4.8	4.5	6.1	0.7	14.0	0.1	0.0	69.0
II Max.	10.9	7.4	23.3	4.1	20.9	11.9	16.3	22.4	10.4	44.1	23.2	0.6	313.0

<sup>1)</sup>distance from the coast



**Fig. 9.** Distribution of two water groups in the Uljin area. The grouping of water is based on cluster analysis. See also the text for detailed explanation.

않은(즉, 시료간의 개별성이 강하여 상관관계가 낮은) 세 번째 그룹을 제외하고 첫 번째 및 두 번째 그룹에 대한 일련의 분석을 수행하였다.

분류된 첫 번째 및 두 번째 집단에 대한 기초 통계량을 Table 6에 정리하였으며, Fig. 9에는 그룹별로 구분된 시료들의 채취 지점(분포)을 도시하였다. 이를 보면, 첫 번째 집단과 두 번째 집단은 우선 해변으로부터의 거리에 근거하여 뚜렷이 구분됨을 알 수 있다. 해변으로부터 가까운 거리(0.0~4.0 km, 평균 1.3 km)에 위치하는 시료들로 구성되는 첫 번째 집단은 두 번째 집단에 비하여 Na(평균 23.6 mg/l) 및 Cl(평균 19.2 mg/l)의 농도가 현저히 높음을 알 수 있다.

**요인분석(R-mode factor analysis):** 군집분석에 의하여 도출된 두 집단에 대하여 각 집단의 수질 특성에 영향을 주는 요인이 무엇인지를 고찰하기 위하여 요인 분석을 실시하였다. 아울러, 요인분석의 결과를 앞서 설명한 바 있는 도학적 해석 결과와 상호 비교함으로써 다변량 통계기법의 적용 타당성을 검증하고자 하였다. 우선 83개 시료에 대하여 획득된 물리화학 자료(변수)들이 정규분포(normal distribution)하는지를 검증하였으며, 이때 정규분포를 이루지 않는 경우에는 로그 정규분포화(log normalization) 한 후 변수로 사용하였다. 이렇게 처리된 변수들을 이용하여 상관관계행렬로부터 주성분 분석(principal component analysis; PCA)에 따라 요인을 추출하였으며, 이를 베리맥스회전(varimax rotation)을 사용하여 회전시킨 후 해석하였다. 도출된 결과의 유의도(p)는 <0.05이다.

해안에 인접한 시료들로 구성되는 첫 번째 집단(23개)에 대한 요인분석 결과를 Table 7 및 Table 8에 정리하였다. Table 7의 상관관계 행렬을 살펴보면, 특히 K 및 F 이온의 함량과 pH는 다른 변수들과의 상관관계가 희박한 반면, Na-Cl, Na-TDS, Cl-TDS 등과 Ca(Mg)-TDS 등은 비교적 높은 상관관계를 보임을 알

**Table 7.** Correlation matrix for group I waters.

	logNa	logK	Mg	logCa	Cl	logSiO <sub>2</sub>	logSO <sub>4</sub>	logNO <sub>3</sub>	logTDS	logHCO <sub>3</sub>	logF	pH
logNa	1.00											
logK	0.25	1.00										
Mg	0.82	0.24	1.00									
logCa	0.63	0.22	0.86	1.00								
Cl	0.88	0.16	0.89	0.77	1.00							
logSiO <sub>2</sub>	0.53	-0.10	0.49	0.44	0.53	1.00						
logSO <sub>4</sub>	0.55	-0.09	0.56	0.56	0.66	0.06	1.00					
logNO <sub>3</sub>	0.81	0.26	0.85	0.73	0.74	0.64	0.39	1.00				
logTDS	0.85	0.21	0.89	0.90	0.86	0.64	0.57	0.88	1.00			
logHCO <sub>3</sub>	0.29	0.10	0.38	0.65	0.27	0.25	0.22	0.43	0.63	1.00		
logF	-0.20	0.46	-0.29	-0.19	-0.30	-0.37	-0.11	-0.15	-0.20	0.02	1.00	
pH	0.40	0.28	0.27	0.23	0.32	-0.15	0.19	0.14	0.22	0.04	0.25	1.00

**Table 8.** Rotated component matrix for group I waters.

	Component		
	1	2	3
logNa	0.57	0.72	0.01
logK	0.27	0.06	0.80
Mg	0.67	0.66	-0.04
logCa	0.75	0.50	0.05
Cl	0.55	0.78	-0.11
logSiO <sub>2</sub>	0.74	0.04	-0.40
logSO <sub>4</sub>	0.13	0.78	-0.13
logNO <sub>3</sub>	0.81	0.42	0.02
logTDS	0.84	0.53	-0.01
logHCO <sub>3</sub>	0.72	-0.03	0.18
logF	-0.16	-0.16	0.83
pH	-0.14	0.63	0.49
eigen value	4.19	3.32	1.79
% variance	34.87	27.66	14.92

수 있다. Table 8의 회전된 요인 행렬을 살펴보면, 전체 분산의 34.87%의 설명력을 지니는 요인(component) 1에서는 TDS와 함께 SiO<sub>2</sub>, Ca, Mg, HCO<sub>3</sub>가 높은 양(+의) 요인점수(factor loading)를 나타내었다. NO<sub>3</sub>의 요인점수도 비교적 크게 나왔으나, 이를 제외한 수질변수들은 주로 지질 매체-물 반응의 결과로 해석된다.

한편, 첫 번째 집단에 대하여 27.66%의 설명력을 지니는 요인 2에서는 Mg와 더불어 특히 Na, Cl, SO<sub>4</sub>, pH가 높은 요인점수를 지니고 있는데, 이 사실은 앞서 설명한 바와 같이 바다로부터의 해염(sea salt) 또는 해무(sea spray)의 영향을 지시하는 것으로 해석된다. 여기서 SO<sub>4</sub>의 경우에는 바다에서 기원하는 디메틸황(dimethyl sulfide, DMS)의 영향도 일부 반영할 것으로 생각된다. 하지만 바다에서 기원하는 DMS의

**Table 10.** Rotated component matrix for group II waters.

	Component		
	1	2	3
logNa	0.70	0.30	0.46
logK	0.31	0.69	0.18
Mg	0.80	0.34	0.03
Cl	0.71	0.48	0.09
logHCO <sub>3</sub>	0.85	-0.43	0.01
logNO <sub>3</sub>	0.02	0.76	0.27
logSiO <sub>2</sub>	0.25	0.05	0.92
logSO <sub>4</sub>	0.20	0.82	-0.33
logTDS	0.87	0.25	0.39
logCa	0.85	0.21	0.21
eigen value	4.05	2.44	1.49
% variance	40.49	24.46	14.86

농도가 수십 내지 수백 ng/m<sup>3</sup>로 작으므로, 역시 해염 입자에 의한 영향이 우세한 것으로 생각된다(Formenti *et al.*, 1999). 요약하면, 해염 또는 해무로부터 기원한 상당량의 에어로졸은 바람을 따라 내륙으로 이동한 후 지표 퇴적 또는 강우에 의한 하강을 통하여 천부 지하수, 특히 해안으로부터 4.0 km(평균 1.3 km; Table 6) 이내에 위치하는 천부 지하수의 수질 특성을 변화시키고 있는 것으로 해석된다.

내륙 쪽(해안으로부터의 거리 : 0.3~10.9 km, 평균 3.8 km; Table 6)에 위치한 두 번째 군집(n=51)에 관한 상관관계 행렬 및 요인분석 결과를 각각 Table 9 및 Table 10에 정리하였다. Table 10의 추출된 요인을 살펴보면, 전체분산의 40.49%의 설명력을 지니는 요인(component) 1에서는 TDS 증가와 관련한 변수로서 Ca, Mg, HCO<sub>3</sub>가 높은 요인점수(0.8 이상)를 나타냄으로써 지질 매체 중 탄산염광물의 용해반응이 중요한 수질 변화요인임을 확인하여 주었다. 그러나, Na 및

**Table 9.** Correlation matrix for group II waters.

	logNa	logK	Mg	Cl	logHCO <sub>3</sub>	logNO <sub>3</sub>	logSiO <sub>2</sub>	logSO <sub>4</sub>	logTDS	logCa
logNa	1.00									
logK	0.53	1.00								
Mg	0.62	0.45	1.00							
Cl	0.70	0.58	0.71	1.00						
logHCO <sub>3</sub>	0.46	0.02	0.47	0.34	1.00					
logNO <sub>3</sub>	0.29	0.36	0.29	0.32	-0.24	1.00				
logSiO <sub>2</sub>	0.58	0.27	0.27	0.27	0.19	0.20	1.00			
logSO <sub>4</sub>	0.26	0.49	0.37	0.42	-0.17	0.46	-0.13	1.00		
logTDS	0.83	0.46	0.77	0.74	0.66	0.38	0.59	0.27	1.00	
logCa	0.67	0.35	0.70	0.62	0.65	0.36	0.41	0.31	0.93	1.00



Cl도 비교적 높은 판별점수(0.7 정도)를 나타내는 것으로 보아 두 번째 군집으로 분류된 일부 시료 중에는 해염의 영향을 배제할 수 없음을 시사해준다. 24.46%의 설명력을 나타낸 요인 2에서는 K, NO<sub>3</sub> 및 SO<sub>4</sub>가 높은 판별점수를 갖는데, 이들은 농업 및 기타 인간활동에 의한 인위적 영향을 반영하는 것으로 해석된다.

## 5. 결 론

울진 지역에 부존하는 심도 40m 이내의 천부 지하수(25개소에서 계절별로 총 83개 시료를 획득)를 대상으로 수질 및 수리지구화학 연구를 수행하였다. 연구 결과는 다음과 같다.

1. 취득된 자료에 관한 광역적이고도 정성적인 해석을 통하여, 연구 지역 지하수의 수질 특성은 모두 일차적으로는 탄산염 광물(특히 방해석)의 조화적 용해반응에 의해 지배됨을 확인하였다. 이에 따라, 해안에 인접한 일부 지역을 제외하고는 대부분의 지하수는 Ca-HCO<sub>3</sub> 유형의 수질 특성을 보여준다. 주요 수계별 지질 특성 단위 및 구분은 수질 특성 형성에 직접적이고 중요한 영향을 주지 못하고 있는데, 이는 유동 속도가 빠른 천부 지하수의 특성 때문에 탄산염 광물을 제외한 기타 광물(특히 규산염 광물)의 충분한 용해를 유도하지 못하기 때문으로 해석된다.

2. 연구 지역 지하수의 수질을 지배하는 두 번째 요인은 주로 경작활동과 관련된 것으로 보여지는 질산염(NO<sub>3</sub>) 오염이다. 질산염 오염은 주요 수계의 배수 지역(하류)에 해당되는 연안 지역으로 갈수록 점차 심화되는 경향을 보여주었는데, 이는 하천 총적층의 규모(면적과 심도) 증가와 더불어 경작활동이 증가하면서 오염 부하량이 증가하기 때문으로 생각된다. 이러한 경향은 파이퍼 다이어그램 상에서도 잘 나타나는데, 상류에서의 Ca-HCO<sub>3</sub> 유형의 지하수는 중·하류로 가면서 Na-Cl-(NO<sub>3</sub>)-HCO<sub>3</sub> 유형으로 점변하는 특성을 보여주었다.

3. 수질 특성 형성의 세 번째 요인으로서 바다로부터의 해염과 해무의 유입이 확인되었다. 이는 해안으로 근접할수록 Na와 Cl의 함량이 증가되는 현상으로 나타난다. 이러한 변화는 특징적으로 바다에 가까운 지역에서 인지되는데, UL118, W124, G59 시료에서 뚜렷하게 나타나 이들 시료의 수질 유형은 전형적인 Na-Cl 유형이었다. 따라서, 연안 지역 지하수의 수질 특성 해석에 있어서는 자연적인 물-암석 반응 및 오염 영향 외에도 해염의 유입 효과를 세심히 고려해야 할 것이다.

4. 5% 유의수준 하에서 물리화학 자료를 이용한 이원배치 분산분석을 수행하여 광역적인 수질 특성 변화를 검토한 결과, 채수 시기에 따른 계절 변화를 보여준 이온종은 오직 SO<sub>4</sub>였으며, 수계분지별로 검토된 공간 변화를 보여준 수질 항목은 Ca, HCO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub> 뿐이었다. 따라서, 연구 지역 천부 지하수의 수질 특성은 계절 변화 및 수계분지에 따라 뚜렷하게 변화하지 않음을 알 수 있다.

5. 시간 및 공간(수계분지별) 요인을 무시하고 수질 자료의 통계적 연관성에 입각한 군집분석을 수행한 결과, 해안으로부터의 거리와 Na 및 Cl 함량으로 구분되는 2개의 시료 군집이 도출되었다. 즉, 해무의 유입 영향이 수질 그룹을 나누는데 중요한 요인임을 알 수 있었다.

6. 두 군집에 대한 요인분석(p<0.05)을 각기 수행하여 수질 변화 요인을 보다 구체적으로 검토하였다. 해안에 가까우면서(평균 수평거리 1.3 km; 최대 2.3~4.0 km) 비교적 높은 Na 및 Cl 함량(각각 평균 23.6 및 19.2 mg/l)으로 특성화되는 첫 번째 군집(23개 시료 해당)의 수질 특성은 탄산염 광물의 용해에 의한 1차 요인(약 35%의 분산을 설명) 외에도 해염의 유입 요인(약 28%의 설명력)으로 설명되었다. 반면, 해안에서 먼 거리(평균 3.8 km)에서 채수되었고 낮은 함량의 Na(평균 15.0 mg/l)와 Cl(평균 12.6 mg/l)을 나타낸 두 번째 군집의 수질 특성은 탄산염 광물의 용해, 일부 해무의 영향, 경작활동에 기인한 오염물질 유입 등으로 설명되었다.

## 사 사

이 논문은 한국수자원공사와 전략광물자원연구센터의 지원 및 부분적으로는 학술진흥재단의 연구비 지원(KRF-2000-DP0437)에 의하여 연구되었다. 논문을 심사해주신 두 심사위원의 건설적 비평과 조언에 감사드린다.

## 참고문헌

- 국립지질조사소 (1963) 한국지질도 1:50,000: 울진 도폭(sheet 7024-IV), 23p. 및 평해 도폭(sheet 7024-II), 28p.
- 한국수자원공사 (1999) 울진 지역 지하수 기초조사보고서.
- 한국도양조사사업기구 (1971) 장성, 죽변, 울진, 현동, 평해 개략도양도.
- Abu-Jaber, N.S., El Aloosy A.S. and Jawad Ali, A. (1997) Determination of aquifer susceptibility to pollution

- using statistical analysis, *Environmental Geology*, v. 31, p. 94-106.
- APHA, AWWA and WPCF (1995) Standard method for the determination of water and waste water, 19th ed., APHA publication.
- Appelo, C.A.J. and Postma, D. (1994) *Geochemistry, groundwater and pollution*, A.A. Balkema, Rotterdam, 536p.
- Cheng, Z.L., Lam, K.S., Chan, L.Y., Wang, T. and Cheng, K.K. (2000) Chemical characteristics of aerosols at coastal station in Hong Kong. I. Seasonal variation of major ions, halogens and mineral dusts between 1995 and 1996. *Atmospheric Environment*, v. 34, p. 2771-2783.
- Custodio, E. (1987) Hydrogeochemistry and tracers. In: Custodio, E. (Ed.), *Groundwater problems in coastal areas: study and reports in hydrology*, no. 45, UNESCO, p. 213-269.
- Drever, J.I. (1998) *The geochemistry of natural waters*, 2nd ed., Prentice Hall, 437p.
- Formenti, P., Piketh, S.J. and Annegarn, H.J. (1999) Detection of non-sea salt sulfate aerosol at a remote coastal site in South Africa: A PIXE study. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 150, p. 332-338.
- Friz, S.J. (1994) A survey of charge-balance errors on published analyses of ground and surface waters. *Groundwater*, v. 32, p. 539-546.
- Goldberg, E.D., Brocker, W.S., Gross, M.G. and Turekian, K.K. (1971) Marine chemistry. In: *Radioactivity in the marine environment*, Washington D.C., National Academy of Science, p. 137-146.
- Gustafsson, M.E.R. and Franzen, L.G. (2000) Inland transport of marine aerosols in southern Sweden. *Atmospheric Environment*, v. 34, p. 313-325.
- Gustafsson, M.E.R. and Larsson, E.H. (2000) Spatial and temporal of chloride deposition in Southern Sweden. *Water, Air, and Soil Pollution*, v. 124, p. 345-369.
- Magaritz, Mordeckai and Luzier, J.E. (1985) Water-rock interactions and seawater-freshwater mixing effect in the coastal dune aquifer, Cocos Bay, Oregon. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 49, p. 2515-2525.
- Nadler, A., Magaritz, M. and Mazar, E. (1981) Chemical reactions of seawater with rocks and freshwater experimental and field observations on brackish waters in Israel. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 44, p. 879-886.
- Richter, B.C., Kreitler, C.W. and Bledsoe, B.E. (1993) Geochemical techniques for identifying sources of groundwater salinization. C.K. Smoley, 258p.
- Ridder, T.B. (1978) On the chemistry of precipitation (in Dutch). *Royal Met. Inst. Rep.* 78-4, 45p.
- Rosen, H. and Jones, S. (1998) Controls on the chemical composition of groundwater from alluvial aquifer in the Wanaka and Wakatipu basins, Central Otago, New Zealand. *Hydrogeology Journal*, v. 6, p. 264-281.
- Rouhani, S. and Wackernagel, H. (1990) Multivariate geostatistical approach to space-time data analysis. *Water Resources Research*, v. 26, p. 585-591.
- Whipkey, C.E., Capo, R.C., Chadwick, O.A. and Stewart, B.W. (2000) The importance of sea spray to the cation budget of a coastal Hawaiian soil: a strontium isotope approach. *Chemical Geology*, v. 168, p. 37-48.
- Yun, S.T., Choi, B.Y. and Lee, P.K. (2000) Distribution of heavy metals (Cr, Cu, Zn, Pb, Cd, As) in roadside sediments, Seoul metropolitan city, Korea. *Environmental Technology*, v. 21, p. 989-1000.

---

2001년 1월 17일 원고접수, 2001년 3월 30일 게재승인.