

## 전남 고금도 지역 지하수의 수리지구화학

신인현<sup>1,\*</sup> · 박천영<sup>2</sup> · 안건상<sup>1</sup> · 정연중<sup>3</sup>

<sup>1</sup>조선대학교 지구과학과, 501-759 광주시 동구 서석동 375

<sup>2</sup>조선대학교 자원공학과, 501-759 광주시 동구 서석동 375

<sup>3</sup>한국기초과학지원연구원, 305-333 대전시 유성구 어은동 52

### Hydrogeochemistry of Groundwaters at the Gogum island area in Jeonnam, Korea

In-Hyun Shin<sup>1,\*</sup> · Cheon-Young Park<sup>2</sup> · Kun-Sang Ahan<sup>1</sup> · Youn-Joong Jeong<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth Sciences, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

<sup>2</sup>Department of Resource Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

<sup>3</sup>Isotope Research Team, Korea Basic Science Institute, Taejeon 305-333, Korea

**Abstract :** The object of this study is to investigate the contamination degree and the interpretation of sea water intrusion phenomena with hydrogeochemical and hydrogen-oxygen stable isotope of coastal aquifer in the Gogum area, Korea. The physical characteristics of groundwaters is the neutral pH condition and transitional Redox environments, and groundwater is affected by sea water & surface water. The chemical properties of groundwaters are showing an increase in contamination owing to the sea water intrusion, waste water from the surface and agricultural chemicals. In the case of chloride, 6 samples of the groundwater in the study area are in excess of the drinking water standard. The Piper diagram shows the contamination in GG-4 and 14 by sea water intrusion. GG-3, 7 and 13 dominate the Na-HCO<sub>3</sub> type water and regional (GG-14) is indicated to dominate the Na-Cl type water such as sea water. According to the SI (saturation index), sea water is oversaturated with respect to calcite and dolomite, GG-3, 14 and 18 are approaching the saturation state. The hydrogen-oxygen stable isotope ratio of groundwaters originates in the meteoric water, and groundwaters of GG-1, 5 and 14 display high oxygen isotope value due to surface water trespass and sea water intrusion. The result of this study, GG-14 is contaminated by sea water intrusion, groundwaters expected GG-3, 7 and 13 is in progress to artificial pollution and sea water intrusion.

**Keywords :** sea water intrusion, water type, hydrogen-oxygen isotope

**요약 :** 본 연구의 목적은 전라남도 완도군 고금도 지역 지하수의 수리지구화학과 수소-산소동위원소를 파악하여 해수 침투경로와 오염여부를 규명하는데 있다. 연구지역 지하수의 물리적인 특성은 중성과 전이환경에 속하며, 해수와 지표수의 영향을 받은 것으로 나타났다. 화학적인 특성에서도 해수의 침투, 육상의 오·폐수 및 농약이나 폐기물에 의해 오염이 진행되고 있다. 특히 지하수 중 여섯 지역에서 Cl은 먹는 샘물 기준치를 초과하는 것으로 나타났다. 파이퍼도에서 GG-4와 14지역은 해수의 침투로 오염되었으며, 수질유형을 구분하여 보면 GG-3, 7 및 13지역은 Na와 HCO<sub>3</sub>가 지배적이고, GG-14지역은 해수와 같이 Na와 Cl이 지배적으로 나타났다. 수리지구화학적 모델링 분석결과 해수의 방해석과 백운석 포화지수는 과포화상태이며, GG-3, 14 및 18지역에서 포화영역에 접근하고 있다. 수소-산소동위원소비에서 본 역 지하수의 기원은 순환수이며, GG-1, 5 및 14지역의 높은 산소동위원소는 지표수의 유입과 해수 침투에 의한 것이다. 본 연구결과 GG-14지역의 지하수는 해수의 침투에 의해 오염되어 있으며, GG-3, 7 및 13지역을 제외한 지하수들은 해수의 침투 및 인위적인 오염원에 의해 오염이 진행되고 있다.

**주요어 :** 해수침투, 수질유형, 수소-산소동위원소

## 서론

섬 지역의 생활용수는 주로 지하수에 의존하고 있으나, 용수의 부족에 따른 지하수의 과잉채수와 관리 소홀 등으로 인해 해수의 침투가 발생할 수 있다. 농어촌진흥공사는 제주도 지역과 신안군일부지역의 지하수에 해수가 침투한 것을 확인하고 해수침투에 대한 방지대책을 수립하기 위해 많은 노력을 기울이고 있다(한국지하수총람, 1996).

내륙지역에 대한 지하수 오염을 파악하기 위한 연구는 많이 발표되어 있으나 섬지역에 대한 연구는 김옥배와 박희열(1997) 그리고 윤정수와 박상운(1998) 등의 연구가 있고, 해안 인접지역에 대한 연구는 김천수 외(1997)와 함세영 외(1999)의 연구 등이 있을 뿐이다.

본 연구는 전남 완도군 고금도 지역의 지하수의 수리지구화학적 특성과 수소-산소 동위원소를 파악하여 고금도 지역 지하수의 오염여부를 규명코자 한다. 이를 위해 고금도 지역 지하수의 용존이온들의 함량 변화와 거동 특성을 파악하고, 지하수의 수질유형을 구분하며, 수리지구화학적인 모델링을 통해 용존이온과 지질매체와의 상호관련성을 파악하고자 한다. 또한 환경동위원소인 수소-산소 동위원소비를 구해 지하수의 기원 및 특성을 규명하여 본 연구지역 지하수들의 오염 여부와 해수 침투 등을 밝히고자 한다.

## 지형 및 지질 개요

연구지역은 행정구역상 전남 완도군 고금면으로 지리좌표상 북위 34° 22' 10"~34° 27' 40", 동경 126° 44' 50"~126° 52' 10"으로 한반도 남서쪽에 위치하며 폭이 약 10km, 길이가 약 8km인 작은 섬이다. 본 역은 지남산(264m), 덕암산(246m) 및 해발고도가 약 100~200m인 낮은 봉우리들로 이루어져 있다. 주변의 해안에는 많은 해안점토들이 분포하고 있으며, 현재도 방조제 공사로 인해 간척지화가 이루어지고 있다. 주민들은 주로 어업에 종사하며, 농산물은 쌀과 보리가 생산된다. 농업용수용 저수지가 있으나, 수자원이 부족하여 생활용수 및 농업용수는 지하수에 의존하고 있다. 고금도의 연평균 강우량은 1,700mm 내외로 비교적 비가 많고 따뜻한 기후에 속한다. 수계의 발달은 미약하여 소규모의 형태로 존재하며 저수지로 유입되거나 직접 바다로 유입되고 있다.

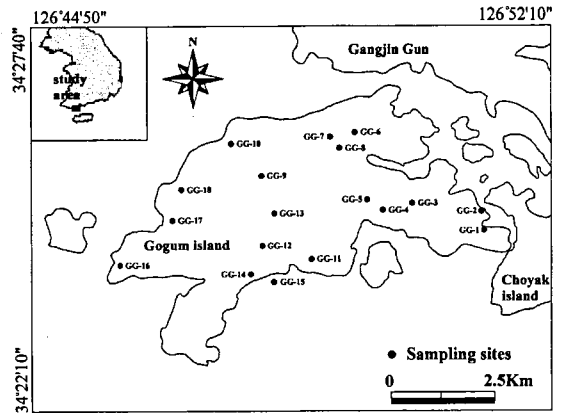


Fig. 1. Location map collected groundwater and seawater samples in the Gogum area.

본 역의 지질은 화강암질 편마암을 기반으로하여 대부분의 지역이 유문암질 응회암과 안산암질 응회암으로 이루어져 있다.

## 시료 채취 및 분석 방법

시료는 전남 완도군 고금도에서 생활용수와 농업용수로 이용되는 천층지하수 17개와 고금도 주변 해역에서 해수 1개를 2001년 5월에 채취하였다(Fig. 1). 지하수의 시료채취는 30분 이상을 양수하여 산화환원전위값이 안정된 후 양이온, 음이온분석을 위한 시료는 수동펌프를 이용하여 0.45 $\mu$ m의 셀룰로우스 멤브레인 필터(cellulose membrane filter)를 이용하여 부유물질을 제거하고, 폴리에틸렌 용기에 채수하였다. 양이온 분석을 위한 시료는 시료용기 벽면에 흡착되는 것을 방지하기 위해 진한 질산을 가해 pH 2 이하로 조절하여 아이스박스 및 냉장고를 이용하여 보관하였다. 수소-산소동위원소분석시료는 대기와 접촉을 최대한 차단하여 채수하였다. 수소이온농도(pH), 산화환원전위(Eh), 용존산소량(DO), 전기전도도(EC) 및 염분도(NaCl)와 같은 물리적 특성은 현장에서 측정하였으며, 페놀프탈레인용액과 메틸레드-브롬크레졸그린 혼합용액을 이용하여 적정한 후 계산에 의해 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>를 구하였다(Jackson, 1993; Snoeyink and Jenkins, 1980).

양이온 화학분석은 한국기초과학지원연구원 동위원소분석팀에 의뢰하여 21개의 원소를 분석하였다. 이 중 Fe원소는 흑연로 원자 흡광 분광분석기(GFAAS, GF90PLUS)를 이용하였고, K은 원자 흡광 분광분석

기(AAS, Unicam989)로, Na, Mg 및 Ca는 유도결합 플라즈마 방출분광분석기(ICP-AES, ICP1000-III, Shimadzu)로, 그리고 Si, Sr, Al, Zn, Cr, Cu, Mn, Cd, Pb, Hg, As, Se, Mo, Sb, Ba 및 Ge원소들은 유도결합 플라즈마 질량분석기(ICP-MS, PQ3STE, Fisons)를 이용하여 분석하였다. 음이온인 F, Cl, NO<sub>2</sub>, Br, NO<sub>3</sub>, PO<sub>4</sub> 및 SO<sub>4</sub>는 서울대학교 자원공학과와 이온 크로마토그래피(IC, Dionex 500)를 이용하여 분석하였다.

수소와 산소동위원소의 분석시료는 대기와 접촉을 최대한 차단하여 채수하였으며, 한국기초과학지원연구원 동위원소분석팀의 질량분석기(VG ISOTECH PRISM II)로 수소와 산소동위원소비를 측정하였다. 산소동위원소는 H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>평형법(Epstein and Mayeda, 1953)으로 분석하였으며, 수소동위원소는 Coleman *et al.*(1982)와 Kendall and Coplen(1985)의 실험방법과 유사한 방법으로 약 3μl의 물시료를 아연와 함께 Pyrex glass breakseal에 모은 후 500°C에서 반응시켜 발생한 수소가스를 분석하였다. 측정값은 표준평균해수(SMOW)에 대한 천분불편차 δD(‰)와 δ<sup>18</sup>O(‰)로 나타냈으며, 분석정밀도는 δD는 ±1‰이고 δ<sup>18</sup>O는 ±0.1‰이었다.

### 지하수의 물리화학적 특성

#### 물리적인 특성

연구지역 지하수와 해수에 대한 물리화학적 특성을 분석한 결과와 국내 먹는물 기준치를 Table 1에 나타냈다.

고금도 지하수의 물리적인 특성을 파악하기 위해 수소이온농도(pH)-산화환원전위(Eh) 그리고 pH-전기전도도(EC)를 이용한 상관도를 Fig. 2에 도시하였다.

본 역 지하수의 pH는 5.73~7.45(평균 6.66)로 GG-2지역(pH 5.73)을 제외하고는 먹는물 수질 기준인 5.8~8.5 이내에 포함되는 중성으로 나타났다. Eh는 49~171mV(평균 112mV)로 전이환경에 해당된다. 일반적으로 Eh는 심도가 깊고 파쇄대가 발달되어 있지 않으면 지표수의 영향을 받지 않으나, 고금도 지하수의 경우 심도가 약 10~100m인 천층지하수이기 때문에 Eh의 값이 높게 나타났다. 또한 용존산소량(DO)은 4.11~6.92mg/l(평균 5.82mg/l)으로 높은 값을 보이는데, 이는 고금도 지하수가 지표수의 영향을 받은 것으로 생각된다.

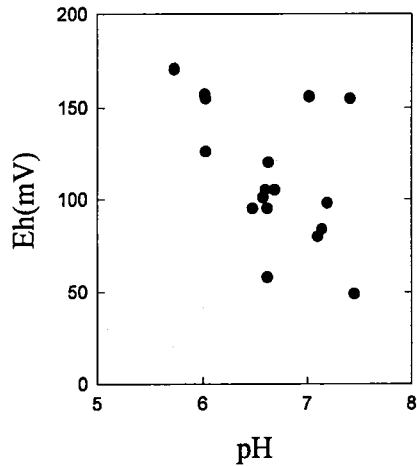


Fig. 2. pH vs Eh diagram groundwaters in the Gogum area.

연구지역의 EC는 고금도 주변 해수의 경우 45,600μS/cm로 대단히 높은 값을 보여주고 있으며, 지하수의 경우 117.5μS/cm~2,450μS/cm(평균 504.5 μS/cm)이다. 이와 같이 높은 EC값을 갖는 것은 지표상의 인위적인 오염물질이 지하수로 유입되었을 가능성과 해수의 침투가 발생했을 것으로 생각된다.

염분도(NaCl)는 해수(GG-15)에서 2.94%로 일반적인 해수의 값을 보이며, 지하수에서는 0.01~0.12%로 지역적으로 많은 편차를 보이는데, 염분도가 높은 지역(GG-14)은 해수의 침투에 의한 것으로 생각된다.

총용존고형물질(TDS)은 500ppm 이하이면 식수, 생활용수 및 공업용수로 사용할 수 있으나 1,000ppm 이상인 경우에는 물맛이 상당히 나쁘며 대부분의 경우 용수로서 적합하지 못하다(한정상, 1982). 본 역의 지하수에서 측정된 TDS함량은 58~1,240mg/l(평균 246.9mg/l)이며, GG-14지역의 경우 1,240mg/l로 용수로 사용하기에는 부적합하다.

#### 화학적인 특성

본 역 지하수의 pH와 용존이온(Na, Mg, K, Ca, Si, Sr, Mn 및 Zn)들과의 분포특성을 파악하기 위해 Fig. 3에 도시하였다.

일반적으로 Na의 주요한 자연적 기원은 사장석 용해이며, 해수와 근접한 지역에서는 지하로 침투한 해수의 영향을 받아 높은 Na함량을 나타낼 수 있다. 본 역 지하수의 Na함량은 11.0~368mg/l(평균 52.9 mg/l)로 높은 값을 보이며, pH와는 정의 상관성을 보여준다. 최순학(1990)에 의하면 Na이온이 20mg/l 이

**Table 1.** Chemical and physical properties of groundwater and seawater samples in the Gogum area and limited values of drinking water.

Sample No. Element	GG-1	GG-2	GG-3	GG-4	GG-5	GG-6	GG-7	GG-8	GG-9	GG-10	GG-11	GG-12	GG-13	GG-14	GG-16	GG-17	GG-18	Mean	S.D.	sea water	D.W. limited	
Temp. (°C)	18.9	19.0	19.8	19.1	17.5	17.5	19.8	20.8	20.8	18.6	16.3	15.7	16.4	18.4	22.1	20.4	22.5	16.3	1.25	20.3		
pH	6.62	5.73	7.45	6.60	6.03	7.19	7.10	6.62	6.58	6.63	6.02	6.03	7.02	7.41	6.48	6.69	7.14	6.57	0.51	8.42	5.8-8.5	
EC (µS/cm)	981	499	305	212	543	231	145	130	140	178	339	117	237	2,450	306	715	1,047	504.5	578.1	45,600		
NaCl (%)	0.05	0.02	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.12	0.01	0.03	0.05	0.03	0.03	2.94		
TDS (mg/l)	478	244	150	107	267	113	72	64	69	89	166	58	115	1,240	114	346	505	246.9	291.7	22,760		
Eh (mV)	95	171	49	105	126	98	80	58	101	120	157	155	156	155	95	105	84	112.4	36.3	135		
DO (mg/l)	6.44	4.30	5.81	6.23	4.30	6.15	6.60	5.70	5.92	5.84	6.33	6.40	6.92	5.83	5.96	4.11	6.16	5.82	0.82	6.96		
Na (mg/l)	74.0	56.4	43.6	31.5	58.9	17.6	14.3	14.8	14.1	17.4	23.4	11.0	13.6	368	32.4	54.0	55.6	52.9	83.6	10,859		
Mg (mg/l)	34.7	13.2	5.62	4.59	18.2	2.3	1.64	1.93	2.54	2.48	10.9	2.82	10.3	57.2	10.7	18.3	22.7	12.9	14.6	1,247		
Si (mg/l)	11.2	15.4	8.08	15.9	12.1	15.2	18.1	17.6	13.8	14.7	10	11.9	20.2	8.54	13.4	17.1	13.4	13.9	3.38	0.34		
K (mg/l)	2.32	5.94	1.02	1.47	4.98	0.8	0.79	1.15	1.42	0.89	2.84	1.23	0.71	12.3	3.20	1.95	2.04	2.65	2.90	413		
Ca (mg/l)	99.5	31.4	29.0	13.8	31.5	39.9	21.9	13.2	14.6	24.3	34.9	11.9	31.6	44.8	13.9	86.4	104	38.0	29.8	390		
F (mg/l)	2.42	n/d	0.54	0.02	0.54	n/d	0.02	0.03	n/d	n/d	0.27	0.15	0.32	1.88	n/d	0.15	0.23	0.39	0.69	3.38	1.5	
Cl (mg/l)	211	245	43.6	77.5	240	50.3	24.7	25.7	33.2	43.6	60.1	17.2	30.4	1,063	80.4	224	413	169.7	256.3	17,164	250	
NO <sub>3</sub> (mg/l)	38.9	54.6	0.77	3.94	89.9	22.9	6.10	17.9	18.7	12.9	75.8	16.8	10.7	16.1	20.9	61.7	7.6	28.0	26.6	157.4	44.5	
PO <sub>4</sub> (mg/l)	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	
SO <sub>4</sub> (mg/l)	38.0	17.3	16.3	7.50	24.1	8.80	3.50	5.10	6.30	6.60	4.80	2.70	2.60	105	5.00	17.0	39.6	18.3	25.3	1.74	200	
HCO <sub>3</sub> (mg/l)	32.9	28.1	140.3	52.5	34.2	67.1	58.6	32.9	29.3	53.7	24.4	21.9	107.4	52.5	18.3	58.6	58.6	56.5	38.1	146.4		

Table 1. continued.

Element	Sample No.	GG-1	GG-2	GG-3	GG-4	GG-5	GG-6	GG-7	GG-8	GG-9	GG-10	GG-11	GG-12	GG-13	GG-14	GG-16	GG-17	GG-18	Mean	S.D.	sea water	D.W. limited
NO <sub>2</sub> (mg/l)		12.3	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	0.72	2.98	n/d	
Br (mg/l)		10.3	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	4.1	n/d	0.39	0.87	0.90	2.61	n/d	
Fe (mg/l)		n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	0.02	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	0.30
Sr (mg/l)		0.92	0.39	0.83	0.15	0.29	0.5	0.21	0.13	0.13	0.30	0.34	0.10	0.31	1.16	0.17	0.79	1.14	0.46	0.36	3.46	
Al (µg/l)		20.0	2.16	6.44	7.13	1.05	1.73	3.09	7.00	2.64	1.70	1.04	0.95	1.17	10.7	5.45	7.39	7.83	5.15	4.89	25.8	
Cr (µg/l)		1.28	0.38	0.61	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	0.67	n/d	0.48	n/d	3.43	5.72	2.21	1.85	1.89	6.18	
Mn (µg/l)		5.69	4.27	22.7	3.09	5.41	2.12	1.06	3.06	2.28	3.93	1.49	0.42	0.71	77.4	3.53	2.33	2.79	8.37	18.5	30.8	0.30
Cu (µg/l)		15.1	25.1	5.53	10.5	3.48	4.24	4.3	20.6	5.06	5.05	2.42	0.89	64.2	6.69	11.2	8.91	4.05	11.6	15.1	19.4	
Zn (µg/l)		55.9	61.7	8.99	38.1	111	17	26.9	205	156	16.6	9.41	4.94	75.5	9.883	142	104	128	649.6	2380	117	1.00
Ge (µg/l)		0.50	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	0.78	0.31	0.13	0.46	0.28	2.37	
As (µg/l)		n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	2.95	5.68	3.57	2.29	3.62	1.47	65.4	0.20
Se (µg/l)		n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	9.18	18.2	11.9	7.36	11.7	4.74	247	0.01
Mo (µg/l)		0.24	0.56	2.34	0.46	0.07	0.41	0.25	0.05	0.10	0.58	n/d	0.09	n/d	0.30	0.74	0.89	1.04	0.54	0.58	14.4	
Cd (µg/l)		0.12	0.32	n/d	0.05	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	2.85	0.31	0.12	0.14	0.56	1.02	0.41	0.01
Sb (µg/l)		n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	0.34	
Ba (µg/l)		119	262	128	29.3	145	18.6	3.50	7.12	28.5	9.36	101	11.2	4.21	55.7	211	154	39.6	78.1	79.9	12.2	
Hg (µg/l)		n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	n/d	0.001
Pb (µg/l)		1.18	1.63	0.48	0.99	0.24	0.18	1.07	0.22	0.18	0.48	0.49	0.13	0.7	1.47	0.99	0.87	0.39	0.69	0.47	1.71	0.05

n/d: not detected, S.D.: standard deviation, D.W. limited: drinking water limited

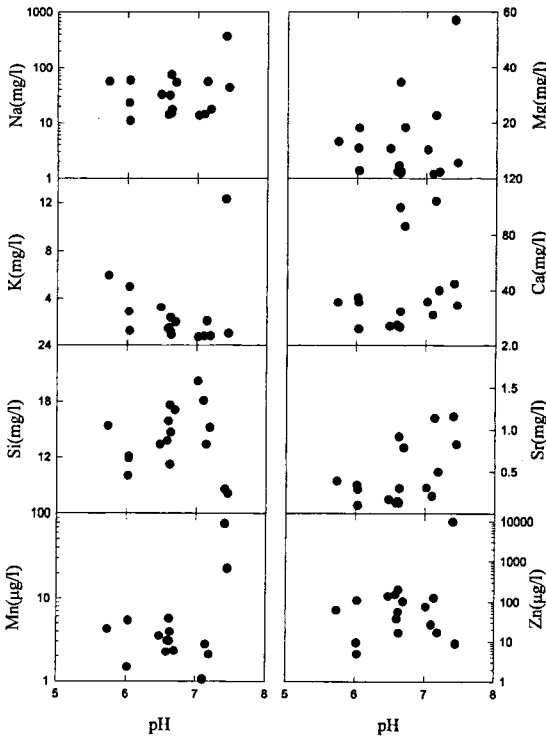


Fig. 3. pH vs cations for groundwater samples in the Gogum area.

상을 포함하는 지하수는 해수와 혼합되었거나 육상 오·폐수에 의해 오염되었을 것으로 언급한 바 있는데, 본 역에서 지하수 중 Na함량이 20mg/l 이상을 보이는 지역은 10개 지역으로 이는 해수와 육상 오·폐수에 의한 오염이 높음을 보여준다.

Ca는 방해석, 백운석, 석고, 사장석, 각섬석, 휘석, 녹염석, 녹리석 등의 용해로 유래되는데(이종운 외, 1997; Rosen and Jones, 1998), 본 역 지하수의 Ca함량은 11.9~104mg/l(평균 38.0mg/l)로 나타난다. GG-18지역은 농업용수로 개발된 지하수로 본 역 지하수 중 Ca가 104mg/l로 가장 높은 값을 나타내며, 염분도에서도 0.05%의 값을 보여준다.

각섬석, 녹리석과 흑운모 등의 용해로 유래되는 것으로 알려진(함세영 외, 1999) Mg함량은 1.64~57.2 mg/l(평균 12.9mg/l)이며, pH와는 정의 상관성으로 다른 원소들과 유사한 경향을 보여주었다.

K는 pH와 부의 상관성을 갖으며, 함량은 0.71~12.3mg/l(평균 2.65mg/l)로 낮게 나타났다. 지하수에 K이 낮게 나타나는 이유는 K-장석의 용해속도가 느리고 용해된 K이 점토광물 등에 흡착되었던 결과로

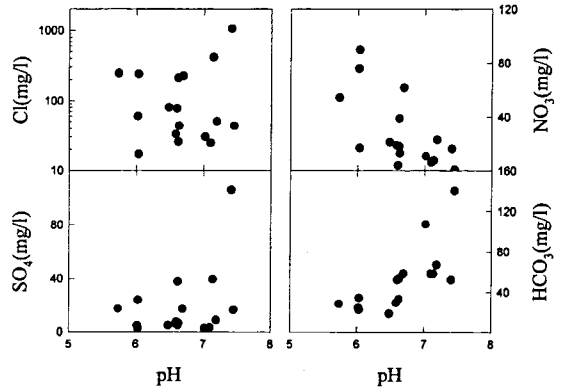


Fig. 4. pH vs anions for groundwater samples in the Gogum area.

생각된다. K원소는 정상적인 지하수에서는 일반적으로 5ppm 미만의 값을 보이며, 그 이상의 값은 일단 오염의 가능성, 즉 해수의 침투, 농약이나 폐기물에 의해 오염된 것으로 보고 있다(최순학과 김영기, 1989). 본 역 지하수 중 K는 GG-2와 14지역에서 5.94mg/l와 12.3mg/l로 높게 나타났다.

지하수의 용존이온 중 음이온(Cl, NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub> 및 HCO<sub>3</sub>)과 pH와의 상관성을 파악하기 위한 상관도(Fig. 4)를 도시하였다. 일반적으로 Cl의 함량은 지하심부에서 높게 나타나며, 그 원인은 과거 염수에 의한 침입에서 유래되거나, 내부적 기원으로서 규산염 광물(흑운모, 각섬석 등)의 수화반응 및 유체포유물의 유출 등에서 유래한다(Edmunds *et al.*, 1985; Nordstrom, *et al.*, 1985; Nordstrom *et al.*, 1989; 이종운 외, 1997). 고금도 주변 해수(GG-15)의 Cl함량은 17,164mg/l이며, 지하수에서의 Cl함량은 17.2~1,063mg/l(평균 169.6mg/l)로, pH와는 뚜렷한 상관성을 보이지 않는다. 본역 지하수의 Cl 함량이 증가하는 것은 내부적 기원이나 지하수 심도와 관련되기보다는 해수의 침투에 의해 것으로 생각된다. 국내 지하수 먹는샘물 기준값인 150mg/l와 비교하면 본 역의 지하수 중 GG-1, 2, 5, 14, 17 및 18지역에서 기준치 이상의 값을 보이나, 이들 지역의 지하수는 현재에도 생활용수와 농업용수로 이용되고 있다.

질산염(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)은 대부분 생활하수와 축산 폐기물의 오염에 의해 생성된다. 지하수 중에 질산염이 다량으로 들어 있을 때 그 원인으로는 오염된 지표수가 유입되어 지하수가 오염되었거나, 지표의 토양속에 농축되었던 질산염이 강수와 함께 지하 대수층으로 침

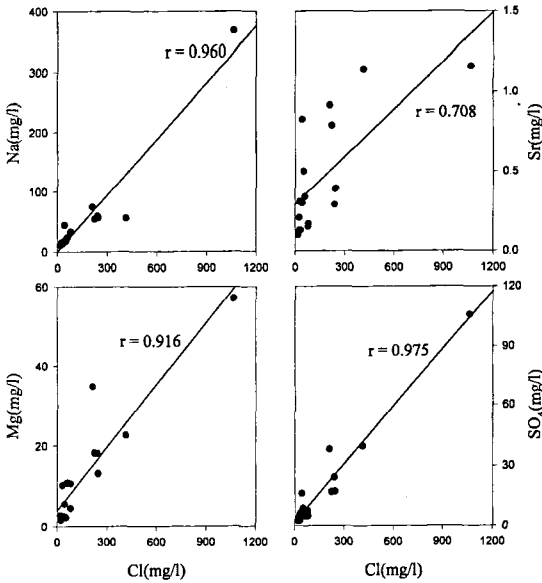


Fig. 5. Relation between Cl and other elements (Na, Sr, Mg and SO<sub>4</sub>).

투하여 지하수를 오염시키는 경우이다(윤순강, 1994; 한정상, 1982). 고금도 지하수의 질산염은 pH와 음의 상관성을 보이며, 함량은 0.77~89.9mg/l(평균 51.2 mg/l)로 먹는 물 기준치의 NO<sub>3</sub>-N(10mg/l)를 질산염으로 환산한 약 44.5mg/l보다 높게 나타났다. 특히 GG-5, 11 및 17지역에서 각각 89.9, 75.8 그리고 61.7mg/l로 높아 지표수에 의한 인위적인 오염이 진행되고 있음을 보여준다.

황화광물의 산화작용과 용해에 의해서 또는 대기 중의 SO<sub>2</sub>로부터 유래하는 SO<sub>4</sub>와 탄산염광물에서 많이 용해되는 HCO<sub>3</sub>도 pH와 정의 상관성을 보인다.

Taylor and McLennan(1985)가 발표한 해수에 의한 염수화를 파악할 수 있는 인자들 중 Na, Sr, Mg 및 SO<sub>4</sub>와 해수의 특성을 잘 나타내는 Cl의 관계도를 Fig. 5에 도시하였다. Cl와 주성분원소인 Na, Mg 그리고 SO<sub>4</sub>와의 상관계수값은 각각 0.96, 0.916 그리고 0.975로 매우 높은 상관성을 보여 이들 원소들이 해수 침투를 파악하는데 좋은 지시자의 역할을 할 것으로 생각되며, 미량원소인 Sr도 0.708로 비교적 높은 상관성을 가지고 있다.

### 지하수의 수질특성

본 역 지하수의 주요 양이온(Na, K, Ca 및 Mg)과

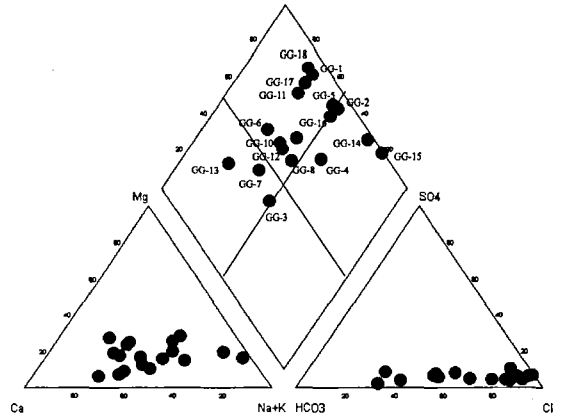


Fig. 6. Piper diagram for groundwater and seawater samples in the Gogum area (Piper, 1994).

음이온(Cl, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>)의 함량비를 이용하여 수리화학적 유형을 파악하기 위해 파이퍼도(Piper, 1944)를 Fig. 6에 도시하였다.

양이온에서는 Mg가 음이온에서는 SO<sub>4</sub>의 변화가 가장 적게 나타나고 있다. 양이온과 음이온의 분포를 함께 도시한 부분에서는 GG-3, 7 및 13지역이 carbonate hardness 안정영역에 속하며, GG-4, 14 그리고 해수시료는 noncarbonate alkali 안정영역에 해당되고, 나머지 시료들은 carbonate alkali 안정영역에 속한다. 이러한 분포경향을 김옥배와 박희열(1997)이 제안한 해수 침입경로와 같은 방법으로 시료들을 구분할 수 있다.

(A)

(B)

GG-3, 7, 13⇒GG-1, 2, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 16, 17, 18⇒GG-4, 14

Richter and Kreitler(1993)에 의하면 (A)과정을 지하수대의 지질매체 표면이 해수 중의 Na로 포화되기 전의 이온교환반응으로, (B)과정은 지질매체가 Na로 포화된 후 지질매체에서 Ca가 해리되지 않고 Na함량 비만 증가하는 혼합상태의 경우이다. 음이온의 경우도 (A)과정을 거치면서 Cl의 함량비가 뚜렷하게 증가하였으며, 이러한 과정은 GG-3, 7 및 13지역을 제외한 지역에서 해수의 침투현상이 진행되고 있으며, GG-4와 14지역은 해수에 의해 오염된 것으로 나타났다.

본 역 지하수의 수질유형을 구분한 결과는 Table 2에 나타났다. 일반적인 지하수에서는 중탄산과 황산이온이 지배적인 음이온인 반면, 해수가 침투한 지역

**Table 2.** Water type for groundwater and seawater samples in the Gogum area.

Sample No.	Water type	Sample No.	Water type
GG-1	Ca(Na-Mg)-Cl	GG-10	Ca(Na)-Cl(HCO <sub>3</sub> )
GG-2	Na(Ca)-Cl	GG-11	Ca(Na-Mg)-Cl
GG-3	Na(Ca)-HCO <sub>3</sub> (Cl)	GG-12	Ca(Na-Mg)-Cl(HCO <sub>3</sub> )
GG-4	Na(Ca)-Cl(HCO <sub>3</sub> )	GG-13	Ca(Mg-Na)-HCO <sub>3</sub> (Cl)
GG-5	Na(Ca-Mg)-Cl	GG-14	Na-Cl
GG-6	Ca(Na)-Cl(HCO <sub>3</sub> )	GG-15	Na-Cl
GG-7	Ca(Na)-HCO <sub>3</sub> (Cl)	GG-16	Na(Mg-Ca)-Cl
GG-8	Ca(Na)-Cl(HCO <sub>3</sub> )	GG-17	Ca(Na)-Cl(HCO <sub>3</sub> )
GG-9	Ca(Na)-Cl(HCO <sub>3</sub> )	GG-18	Ca(Na)-Cl(HCO <sub>3</sub> )

**Table 3.** Saturation indices of some minerals in the Gogum area.

Sample No.	Mineral name									
	Albite	Anorthite	Barite	Calcite	Dolomite	Gibbsite	Gypsum	Halite	Kaolinite	Quartz
GG-1	-3.87	-7.46	0.07	-1.46	-3.18	-0.60	-1.92	-6.39	-0.10	0.37
GG-2	-4.55	-9.60	0.22	-2.86	-5.90	-0.70	-2.63	-6.42	-0.02	0.51
GG-3	-3.05	-5.19	-0.61	-0.43	-1.37	0.04	-2.62	-7.27	0.89	0.22
GG-4	-2.99	-6.35	-0.96	-2.01	-4.30	0.19	-3.22	-7.15	1.79	0.52
GG-5	-5.94	-12.2	0.10	-2.51	-5.07	-2.11	-2.50	-6.41	-3.02	0.43
GG-6	-3.40	-6.30	-1.11	-0.89	-2.84	-0.52	-2.73	-7.59	0.36	0.53
GG-7	-3.02	-5.67	-2.20	-1.23	-3.38	-0.16	-3.32	-7.98	1.19	0.57
GG-8	-3.10	-5.93	-1.72	-2.15	-4.93	0.27	-3.35	-7.95	2.01	0.54
GG-9	-3.91	-7.04	-1.04	-2.21	-4.96	-0.16	-3.23	-7.86	0.93	0.43
GG-10	-3.95	-7.43	-1.50	-1.72	-4.25	-0.45	-3.02	-7.65	0.45	0.50
GG-11	-6.09	-11.4	-0.64	-2.58	-5.50	-1.62	-3.07	-7.39	-2.20	0.37
GG-12	-5.86	-11.1	-1.70	-3.03	-6.53	-1.32	-3.65	-8.23	-1.43	0.45
GG-13	-2.50	-4.87	-2.28	-0.96	-2.22	0.30	-3.36	-7.92	2.24	0.65
GG-14	-1.90	-4.90	0.03	-0.95	-1.59	0.24	-1.97	-5.03	1.36	0.27
GG-15	-3.82	-5.44	-0.33	0.89	2.58	-0.10	-0.80	-2.54	-1.99	-1.09
GG-16	-3.33	-6.46	-0.35	-2.54	-4.97	0.21	-3.41	-7.13	1.64	0.40
GG-17	-2.53	-5.13	-0.72	-1.16	-2.77	0.27	-2.28	-6.49	1.98	0.53
GG-18	-2.41	-4.22	-0.46	-0.63	-1.69	0.27	-1.90	-6.23	1.75	0.39

에서는 염소이온이 지배적인 음이온 원소이다(김옥배와 박희열, 1977).

수질유형으로 구분한 결과는 GG-3, 7 및 13시료가 Na와 HCO<sub>3</sub>가 주성분으로 나타나며, HCO<sub>3</sub>가 우세한 것은 사장석의 용해나 CO가스의 영향에 의한 것으로 생각된다. GG-14의 경우는 해수(GG-15)와 같은 유형인 Na-Cl로 나타나 해수의 침투가 있음을 보여 준다. 이들 수질유형의 결과도 파이퍼도와 유사한 결과를 보여, 다수 지역에서 해수 침투가 이루어지고 있음을 보여준다.

### 열역학적 고찰

특정 화학반응, 즉 조암광물의 용해/침전 반응의

가능성을 검토하고자 수리지구화학적 모델링 프로그램인 WATEQ4F(Hounslow, 1995; Nordstrom *et al.*, 1990)를 이용하여 광물의 포화지수(saturation index)를 계산하였다. 물-암석반응 모델링은 각 광물의 포화도와 이론적인 광물 상평형 관계를 이용하여 지하수의 용존성분을 이해하기 위한 것이다(Parkhurst, 1995). 고금지역의 지하수에서 분석된 물리화학적 원소들을 이용하여 광물들의 포화지수를 구하였으며, 이들 광물의 포화지수는 Table 3에 나타났다.

이들 광물의 포화지수와 화학원소들의 상관성을 알아보기 위해 Ca, Al, Cl 및 Si 등의 원소들과 도시하였다(Fig. 7). 방해석(CaCO<sub>3</sub>), 백운석(CaMg(CO<sub>3</sub>)), 스트론튬석(SrCO<sub>3</sub>) 등과 같은 광물은 해수침투에 의한 염수화를 파악할 수 있는 인자들(Ca, Mg 및 Sr)을



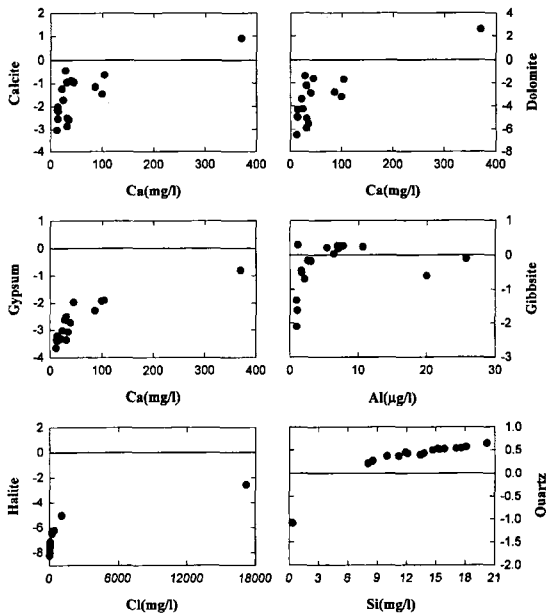


Fig. 7. Saturation index vs element diagrams for groundwater and seawater samples in the Gogum area.

포함하고 있기 때문에 해수침투가 진행된다면 이들 광물들이 포화상태로 나타난다(김옥배와 김희열, 1997). 방해석에 대한 해수의 포화지수는 0.89로 과포화상태이며, GG-3과 18지역 지하수는 -0.43과 -0.63으로 포화영역에 접근하고 있다. 지하수에서 나타난 평균 포화지수는 -1.72로 나타나 Ca함량이 증가할수록 포화영역으로 이동된다. 백운석에 대한 해수는 2.57로 과포화 되어 있으며, 지하수에서는 GG-3, 14 및 18지역에서 각각 -1.37, -1.59 및 -1.69로 포화영역에 접근한다. 지하수에서 이들 광물들은 Ca와 Mg들의 함량이 증가할수록 포화영역으로 접근하며, 이 같은 변화양상은 지하수에서 해수의 침투를 지시하는 원소들의 함량 값이 증가할수록 방해석과 백운석과 같은 광물들이 포화되거나 침전가능성이 높음을 보여준다. 암염의 경우 지하수와 해수 모두 불포화영역으로 나타나며 Cl의 함량이 증가할수록 포화지수가 증가한다. 석영의 포화지수는 규산염광물 Si의 용해에 의해 영

향을 받는데, 지하수에서는 과포화영역으로 나타났다.

### 수소와 산소동위원소

부존 지하수의 기원과 충진 특성을 규명하기 위해 물의  $\delta D$ 와  $\delta^{18}O$ 를 이용하는데 이들 원소는 지하수 중의 용존이온과의 반응이 일어나지 않으므로 지하수 유입지의 차이와 거동현상을 파악하는데 중요한 역할을 한다. 해양에서 증발된 수증기는 내륙으로 이동하면서 동위원소 분별작용(fractionation)을 거친다. 이러한 과정으로 수증기는 해수에 비해 가벼운 동위원소들로 구성되어 강수를 형성하고, 이 과정이 계속 진행되면서 대륙의 지형 및 온도변화에 따라 지표수 및 지하수에 다양한 동위원소가 분포된다(김규한, 1991).

본 역의 지하수시료 중 현장에서 측정된 염분도를 기준으로 7개의 시료와 해수를 대상으로 한 수소-산소동위원소비를 구하였으며 측정결과는 Table 4에 나타났다.

수소-산소동위원소비와 지구순환수선(global meteoric water line; Craig, 1961)과의 관계는 Fig. 8에 도시하였다. 7개의 지하수시료에 대한  $\delta^{18}O$ 은 -6.4~-7.0‰로,  $\delta D$ 는 -43~-46‰로 나타났다. 또한 고금도 주변 해수는  $\delta^{18}O$ 은 -0.1‰,  $\delta D$ 는 -3‰였다. 해수는 순환수선상의 오른쪽에 점시되어 산소들이 무거운 쪽으로 편이 되어져 있다. 지하수 시료들은 그래프 좌측하단에 집중되어 도시되며, 지하수의 수소-산소동위원소비는  $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$ 의 순환수선 상에 도시되어 본 역 지하수의 기원은 순환수였음을 보여준다. 그러나 이들 지하수 시료를 만들 도시하면, 순환수의 기울기보다 낮은 4.04의 값을 보인다. 이는 우리나라에 강우를 가져오는 계절적인 특징에 의해 순환수의 기울기인 d값이 겨울에는 높고(>10), 여름에는 낮아지는(<10)(김규한, 1991) 계절적인 영향과 동위원소 조성 중 강우에 따른 우량효과(amount effect)를 반영하는 것으로 생각된다. GG-1, 5 및 14지역의 지하수들은 다른 지역의 시료들보다 산소동위원소 조성이

Table 4. Hydrogen and oxygen isotopic compositions of seawater and groundwater samples in the Gogum area.

Sample No.	D	$^{18}O$	Sample No.	D	$^{18}O$
GG-1	-44	-6.5	GG-14	-44	-6.4
GG-5	-44	-6.5	GG-15	-3	-0.1
GG-8	-43	-6.6	GG-17	-45	-6.8
GG-11	-43	-6.5	GG-18	-46	-7.0

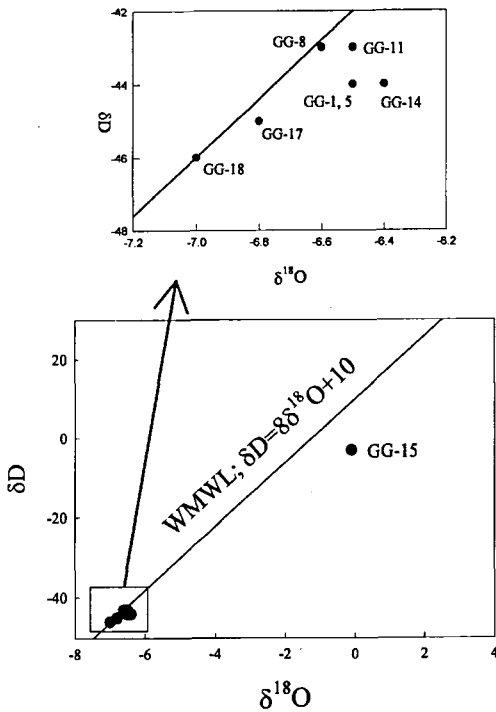


Fig. 8. The relation of hydrogen-oxygen Isotopes for groundwater and seawater samples in the Gogum area.

부화되어 있는데, GG-1과 14지역은 해안에 가장 근접하여 위치하고 있으며, GG-5지역은 간척지 옆에 위치하고 있다. 일반적으로 지하수에서 나타나는 산소의 편이현상은 물-암석 상호반응과 열수(온천수)에 의해 산소 동위원소값이 순환수에 비해 무거운 쪽으로 편이하는 현상(Sheppard, 1984)을 나타낸다. GG-1, 5 및 14지역의 지하수들은 천층지하수로 순환수의 체류시간이 짧아 물-암석 반응에 의한 영향으로 높은 산소동위원소 조성의 부화를 해석하기에는 무리가 있다. 이들 지역의 화학분석 결과에서도 해수에 의한 영향을 지시하고 있어, 인위적인 오염보다 해수의 침투에 의한 해수의 혼합에 의한 현상으로 생각된다.

물의 동위원소 분별은 온도에 크게 영향을 받기 때문에 강수의 동위원소 성분은 위도효과, 고도효과, 우량효과, 대륙효과 및 모세관효과 등으로 구분할 수 있다. 일반적으로 우리나라에서 고도효과에 의한 동위원소 조성의 변화율은  $\delta^2\text{H}$ 는 1~4‰/100m이며,  $\delta^{18}\text{O}$ 은 0.15~0.5‰/100m의 범위를 갖는다(Kim & Nakai, 1988). 고금도는 국내에서 낮은 위도지역에 속해 위도효과에 의한 동위원소 분별이 이루어져 다른 지역의 동위원소보다 무거운 동위원소를 가진 것으로 생각된다. 본 역 지하수에서 분석된 수소-산소 동위원소비가 위도효과에 따른 동위원소 분별이 일어났는지를 확인하고자 기존의 동위원소 연구결과와 비교하여 보았다. 기존의 연구결과는 윤성택 등(1998), 최석원 등(1998) 및 김옥배와 박희열(1997) 등이 발표한 지하수의 수소-산소동위원소비와 본 역에서 얻어진 수소-산소동위원소비를 Fig. 9에 도시하였으며, 이들 지역에 대한 위도와 분석결과를 Table 5에 나타냈다.

김규환과 中井信之(1988)는 남한 순환수(meteoric water)의 동위원소 조성은  $\delta^{18}\text{O} = -5.2 \sim -10.3\text{‰}$ ,  $\delta\text{D} = -39.5 \sim -72.7\text{‰}$ 에 속한다고 하였다. 북위 36° 35'에 위치한 풍기지역은 위도상 가장 높은 곳에 위치하고 있어, 수소-산소동위원소비의 평균값이 각각 -66.9와 -9.2‰로 나타났다. 연구지역은 위도상 가장 낮은 34° 25'으로 풍기지역과는 약 2°의 차이를 보이며  $\delta\text{D}$ 의 평균값은 -44.1‰로  $\delta^{18}\text{O}$ 은 -6.61‰로 나타났다. Craig(1961)에 의하면 순환수의 위도에 따른 수소-산소동위원소값의 변화는 극지방으로 갈수록 수소와 산소동위원소값이 낮아지고 적도지방으로 갈수록 무거운 동위원소들이 존재한다고 하였다. 고금도의 지하수는 저위도로서 다른 지역의 지하수에 비해 무거운 동위원소로 이루어져 있으며, 풍기지역의 지하수가 발표된 연구결과 중 가장 고위도에 위치하여 가장 가벼운 동위원소로 이루어져 있다. 이러한 동위원소 분별은 위도효과에 의한 영향으로 뚜렷

Table 5. Statistic data of hydrogen and oxygen isotopic compositions of groundwater and latitude in the study and the other studies area.

Station	mean of D	mean of $^{18}\text{O}$	latitude
Pungki shallow groundwater	-66.9	-9.20	3635
Pungki deep groundwater	-79.3	-10.7	3635
Kongju-daekeum groundwater	-57.3	-7.80	3627
Wi-Do groundwater	-49.0	-7.48	3535
Gogum groundwater	-44.1	-6.61	3425

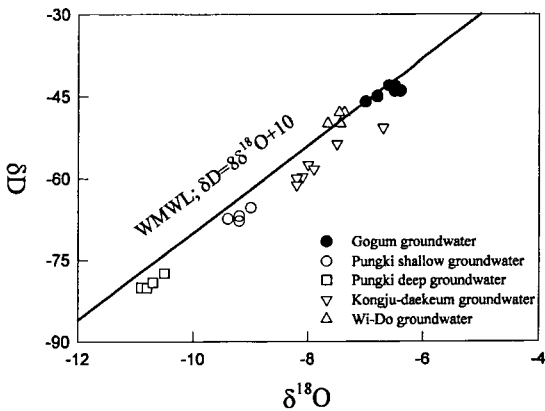


Fig. 9. Diagram of latitude and altitude effects for hydrogen-oxygen isotopes in the study and the other area.

하게 구별되며, 같은 위도상의 풍기지역 지하수에서 천층과 심층의 지하수로 구분되어 나타나는 분별효과는 고도효과에 의한 것이다.

### 결론

1. 연구지역 지하수의 물리적인 특성(pH, Eh, EC, DO, NaCl 및 TDS)을 종합한 결과 중성과 전이환경에 속하며, 해수와 지표수의 영향을 받은 것으로 나타났다. 특히 GG-14지역의 지하수는 해수의 침투에 의해 용수로 사용하기에는 부적합하다.
2. 지하수의 화학적인 특성에 의하면 해수의 침투, 육상의 오·폐수 및 농약이나 폐기물에 의해 오염이 진행되고 있으며, 지하수 중 GG-1, 2, 5, 14, 17 및 18지역에서 Cl이 먹는샘물 기준치를 초과하는 것으로 나타났다.
3. 파이퍼도에 의하면 GG-4와 14지역은 해수의 침투에 의해 오염되었으며, GG-3, 7 및 13지역을 제외한 지하수에서도 해수침투 현상이 진행되고 있다. 수질 유형을 구분한 결과 GG-3, 7 및 13지역은 Na와 HCO<sub>3</sub>가 지배적이고 GG-14는 해수와 같이 Na와 Cl이 지배적이다.
4. 수리지구화학적 모델링을 통한 방해석과 백운석의 포화지수에 나타나는 해수의 포화지수는 과포화 상태이며, GG-3, 14 및 18지역에서 포화영역에 접근하는 것으로 나타났다.
5. 수소-산소동위원소비에서 나타난 본 역 지하수의 기원은 순환수이며, GG-1, 5 및 14지역의 높은

산소동위원소 조성은 물-암석의 상호반응보다 해수의 침투에 의한 해수 혼합의 결과로 생각된다.

6. 본 연구결과 GG-14지역의 지하수는 해수의 침투에 의해 오염되어 있으며, GG-3, 7 및 13지역을 제외한 지하수들도 해수의 침투와 인위적인 오염원에 의한 오염이 진행되고 있음을 보여주었다. 따라서 해수침투가 있는 지하수는 폐공처리 등으로 오염의 확산을 방지하여야 하고, 오염이 진행되고 있는 지하수들은 오염차수벽설치와 과잉양수방지 등으로 오염을 미연에 방지해야 할 것으로 생각된다.

### 사사

이 연구는 2000년도 조선대학교 학술연구비에 의하여 수행되었으며, 연구비를 지원하여 주신 조선대학교에 감사드립니다.

### 참고문헌

김규한, 1991, 동위원소 지질학, 대우학술총서 자연과학 74, 민음사, 552 p.  
 김규한, 中井信之, 1988, 남한의 지하수 및 강수의 안정동위원소 조성, 지질학회, 24, 37-46.  
 김옥배, 박희열, 1997, 해수침투에 의한 지하수 수질오염 판별을 위한 환경지구화학적 연구, 한국자원공학회, 34(5), 548-558.  
 김천수, 김경수, 배대석, 송승호, 1997, 임해지역 주변에서의 해수침투특성, 대한지하수환경학회, 4(2), 61-72.  
 윤성택, 채기탁, 고용권, 김상렬, 최병영, 이병호, 김성용, 1998, 풍기지역 지하수의 수리지구화학적 및 환경동위원소 특성 연구, 대한지하수환경학회, 5(4), 177-191.  
 윤순강, 1994, 요소와 축산노에서 유래한 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 및 동반 양이온의 토양 중 행동, 서울대학 박사학위논문.  
 윤정수, 박상운, 1998, 제주도 용천수의 수리지구화학적 특성, 대한지하수환경학회, 5(2), 66-79.  
 이종운, 전효택, 전용원, 1997, 국내 화강암질내 심부지하수의 지구화학적 특성, 대한지하수환경학회, 4(4), 199-211.  
 최석원, 이찬희, 정현채, 1998, 공주대금 광산 주변에 분포하는 토양과 지하수의 환경지구화학적 특성, 한국지구과학회, 19(5), 549-564.  
 최순학, 1990, 제주도 수자원의 특성과 수질오염 연구(II), 과학기술원, KR-90-(B)-10, 1-57.  
 최순학, 김영기, 1989, 제주도 지하수의 수질특성, 대한지질학회지, 25(3), 230-238.  
 한국지하수총람, 1996, 농어촌진흥공사, 1087 p.  
 한정상, 1982, 지하수학개론, 박영사, 511 p.  
 함세영, 조명희, 성익환, 이병대, 조병욱, 심형수, 1999, 부산 남부지역 지하수와 서북부지역 지하수의 수리지구화학적

- 특성비교, 대한지하수환경학회, 6(3), 140-151.
- Coleman, M.L., Shepherd, T.J., Durham, J.J., Rouse, J.E., and Moore, G.R., 1982, Reduction of water with zinc for hydrogen isotope analysis, *Analytical Chemistry*, 54, 993-995.
- Craig, H., 1961, Isotopic variations in meteoric waters, *Sciences*, 1702-1703.
- Edmunds, W.M., Kay, R.L., and McCartney, R.A., 1985, Origin of saline groundwaters in the Carnmenellis granite (Cornwall, England): natural processes and reaction during hot dry rock reservoir circulation. *Chemical Geology*, 49, 287-301.
- Epstein, S. and Mayeda, T.K., 1953, Variations of the O18/O16 ratio in natural waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 4, 213-224.
- Hounslow, A.W., 1995, *Water quality data*, CRC press, 397 p.
- Jackson, G.B., 1993, *Applied water and spent water chemistry-a laboratory manual*-. Van Nostrand Reinhold, 688 p.
- Kendall, C. and Coplen, T.B., 1985, Multisample conversion of water to hydrogen by zinc for stable isotope determination, *Analytical Chemistry*, 57, 1438-1440.
- Kim, K.H. and Nakai, N., 1988, Isotope compositions of precipitations and groundwaters in South Korea, *Journal of the Geological Society of Korea*, 24, 39-46.
- Nordstrom, D.K., Andrews, J.N., Carlsson, L., Fontes, J. Ch., Fritz, P., Moser, H., and Olsson, T., 1985, Hydrogeological and hydrogechemical investigations in boreholes-final report of the phase I geochemical investigations of the Stripa groundwaters. Technical Report STRIPA Project, Stockholm 85-06.
- Nordstrom, D.K., Ball, J.W., and Donahoe, R.J., 1989, Groundwater chemistry and water-rock interactions at Stripa, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53, 1727-1740.
- Nordstrom, D.K., Plummer, L.N., Langmuir, Donald, Busenberg, Eurybiades, May, H.M., Jones, B.F., and Parkhurst, D.L., 1990, Revised chemical equilibrium data for major water-mineral reactions and their limitations, in Melchior, D.C., and Bassett, R.L., eds, *Chemical modeling in aqueous systems II*: Washington, D.C., American Chemical Society Symposium Series 416, 398-413.
- Parkhurst, D.L., 1995, User's guide to PHREEQC-A computer program for speciation, reaction-path, advective-transport and inverse geochemical calculations report 95-4227, 135-143.
- Piper, A.M., 1944, A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses: *American Geophysical Union, Transaction*, 5, 914-923.
- Richter, B.C. and Kreitler, C.W., 1993, *Geochemical techniques for identifying sources of groundwater salinization*, CRC press, 258 p.
- Rosen, M. and Jones, S., 1998, Controls on the chemical composition of groundwater from alluvial aquifers in the Wanaka and Wakatipu basin, Central Otago, New Zealand, *Hydrogeology Journal*, 6, 264-281.
- Sheppard, S.M.F., 1984, Isotopic geothermometry, In: Lagache, M. (ed.) *Thermometric et barometric geologiques*, Soc. Fr. Mineral Cristallogr., 349-412.
- Snoeyink, V.L. and Jenkins, D., 1980, *Water chemistry*, John wiley & sons, 463 p.
- Taylor, S.R. and McLennan, S.M., 1985, *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell Scientific Publ., Oxford, England, 312 p.

---

2002년 1월 29일 원고 접수  
2002년 6월 19일 수정원고 접수  
2002년 7월 20일 원고 채택