

## 심도 변화에 따른 흥해지역 지하수의 수리 지화학적 특성

윤 옥\* · 조병욱  
한국지질자원연구원

### Hydrogeochemical Characteristics of Groundwater on Well Depth Variation in the Heunghae Area, Korea

Uk Yun\* · Byong-Wook Cho

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

포항시 흥해읍 일대 지하수의 수리지화학적 특성을 파악하기 위하여, 지표수, 천부지하수 및 중간심도와 심부 지하수를 대상으로 수질 및 안정동위원소 분석을 수행하였다. 심도별 수질 유형은 지표수 및 천부지하수는 Ca-Cl, 중간심도는 Na-HCO<sub>3</sub>, 심부지하수는 Na-Cl형이 우세하게 나타난다. HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 및 SiO<sub>2</sub>의 기원은 천부 지하수의 경우 규산염 광물의 풍화에서, 심부 지하수는 탄산염 광물의 풍화에서 생성되었다. Ca 및 Mg 이온은 천부 및 심부 모두 석회석 및 백운석에서 기인한다. 천부 지하수의 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 기원은 황철석에서 기인하는 것으로 나타난다. 심도의 증가에 따라 pH 및 TDS는 증가하나, Eh 및 DO는 감소하는 경향을 보인다. 알칼리 금속(K, Na, Li)은 심부로 갈수록 농도가 증가하나, 알칼리 토금속(Mg, Ca) 및 Al은 천부로 갈수록 증가하는 양상을 보인다. 음이온인 할로젠 원소(F, Cl, Br) 및 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 농도도 심부로 갈수록 증가함을 보인다. 산소 및 수소 안정동위원소 평균값은 심부 지하수는 평균값: δ<sup>18</sup>O=-10.1 ‰, δD=-65.8 ‰, 중간심도는 평균값: δ<sup>18</sup>O=-8.9 ‰, δD=-59.6 ‰, 천부 지하수는 평균값: δ<sup>18</sup>O=-8.0 ‰, δD=-53.6 ‰, 지표수는 평균값: δ<sup>18</sup>O=-7.9 ‰, δD=-53.3 ‰의 값을 각각 보인다.

주요어: 안정동위원소, 지하수, 흥해

Chemical and isotopic analysis for stream water, shallow groundwater, intermediate groundwater and deep groundwater was carried out to grasp hydrogeochemical characteristics of groundwater in the Heunghae area, Pohang city. Water type of stream water and shallow groundwaters is typified as Ca-Cl type, intermediate groundwater is Na-HCO<sub>3</sub>, and deep groundwater is prominent in Na-Cl type. HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> and SiO<sub>2</sub> in shallow groundwater are originated from weathering of silicate minerals, whereas those of deep groundwaters are resulted from weathering of carbonate minerals. Ca and Mg ions in both shallow and deep groundwaters are resulted from weathering of calcite and dolomite. SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> in shallow groundwater is originated mainly from pyrite oxidation. As well depth increases, pH and TDS increase, but Eh and DO decrease. Alkali metal contents(K, Na, Li) increases as well depth increases, but alkali earth metal(Mg, Ca) and Al concentrations increase as well depth decreases. Anions, halogen elements(F, Cl, Br), and HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> contents increase as well depth increases. The average stable isotope value of the groundwater of each depth is as follows; deep groundwater: δ<sup>18</sup>O=-10.1 ‰, δD=-65.8 ‰, intermediate groundwater: δ<sup>18</sup>O=-8.9 ‰, δD=-59.6 ‰, shallow groundwater: δ<sup>18</sup>O=-8.0 ‰, δD=-53.6 ‰, surface water: δ<sup>18</sup>O=-7.9 ‰, δD=-53.3 ‰ respectively.

Key words: stable isotope, groundwater, Heunghae

\*Corresponding author : yunuk@kigam.re.kr

## 서 언

연구지역인 포항 일대는 지체구조적으로 환동해 알카리화산지구(Lee, 1977)에 속하며, 제3기 포항 분지의 서부에 해당한다(Fig. 1). 이 지역은 높은 지열에너지 가능성 때문에, 지질, 지화학, 지구물리 및 동위원소 특성이 여러 저자에 의해 연구되었다(엄상호외, 1964; 이광식과 정재일, 1997; 김형찬외, 1992; 문상호외, 2000; 송운호외, 2003; 송운호외, 2004). 이 지역에서 최초의 지열 연구는 영일 신평지구 온천조사(김형찬외, 1993)로서 3개 온천공(160-376 m) 시추 결과, 측정된 수온은 32.5-36.2°C 범위를 보였다. 평균 지하증온률은 47.0-97.5°C/km 로 한반도 평균 증온률인 26.7°C 보다 높아, 높은 지열 가능성을 나타낸 바 있으나, 심부 지열환경에 대한 연구는 미흡한 편이다. 이광식과 정재일(1997)에 의한 포항지역장우의 산소 동위원소 값은 -17.80~+0.07 ‰, 수소동위원소 조성은 -131.9~+7.7 ‰의 매우 넓은 범위의 변화를 보이며, 년가중평균값은  $\delta^{18}\text{O}$  값은 -9.46~-7.03 ‰,  $\delta\text{D}$  값은 -66.1~-32.8 ‰의 범위에서 변화한다고 하였다.

본 연구의 목적은 지하수의 심도별 수질 분석을 통한 수리지화학적 및 안정동위원소의 특성을 파악하여, 연구지역 지하수의 용존 이온의 특성 및 기원을 추적함에 있다. 조사대상 지하수는 포항시 흥해읍 성곡리 일대의 심도 4.5~1,503 m에 이르는 지하수와 지표수를 대상으로 채취하였는데, 심부지하수 6개, 중간 심도 지하수 6개, 용천수 2개를 포함한 천부 지하수 8개와 지표수 2개로 구성된다. 연구지역은 심부공인 D-2공을 중심으로 북위 36°03' 54" ~36°07' 28.9" 의 범위와 동경 129°16' 40" ~129°23' 22.4" 의 영역에 위치한다(Fig.1).

## 지질 및 지하수환경

연구지역은 제3기 에오세 석질응회암과 이를 관입한 흑운모 화강암과 결정질 응회암이 고결층을 이룬다. 본역 북동부 철포일대에 분포하는 결정질 응회암은 엄상호 외(1964), 김옥준 외(1968), 윤성효 외(1988)가 각각 다르게 기재하였으나, Shinata 외(1979)는 K-Ar전암 측정결과 44.7±1.1 Ma로써 제3기 에오세 중기임을 보고한 바 있다. 이후 본역에는 제3기 마이오세에 수회외 해침 및 해퇴를 받아 연일층군이 동-동남방향으로 퇴

적되었다. 연일층군은 천북역암을 최하위층으로 하여, 주로 사암 및 세일층으로 구성되어 있는 반고결 퇴적암층군으로 서측에서부터 동측으로 학림층, 흥해층, 이동층 및 두호층을 형성하여 총 층후가 1,000 m 이상인 것으로 보고되어 왔다(엄상호 외 1964; Hwang, 1993; Sohn 외 2001). 이정환 외(1960)의 시추자료에 의하면 연일층군 층후는 포항시 일원에서는 약 600~750m, 흥해 남부에서는 110 m로 알려져 있다. 송운호 외(2004)의 시추 자료(D-2 시료) 결과에 따르면, 흥해읍 성곡리에서 제3기 반고결이암이 심도 3~352 m 구간까지 분포하며, 화산력응의암은 352~425 m, 백악기 이암은 425~430 m, 460~470 m 및 505~525 m 구간에 총 두께 35 m로 협재되어 있다. 제3기 유문암은 430~460 m, 525~745 m 구간 등 심도 900 m까지에 총 두께 364 m로 분포하고, 백악기 사암 및 이암이 900 m부터 1,504 m 이상의 구간까지에 총 두께 604 m 이상으로 분포함이 밝혀졌다. 연구지역의 지형적 특징은 흥해를 중심으로 분지상태를 이루고, 서쪽은 수음산을 따라 북북동 방향의 험준한 지형을 이루나, 화산암과 퇴적암의 차별침식에 의하여 동부로 가면서 평탄한 구릉으로 바뀐다. 시료 채취공의 지질은 대부분이 흥해층에 속하나, I-15, I-16 및 용천수는 천북역암층, I-4 및 2개의 지표수는 학림층, S-2공은 이동층에 분포한다(Fig. 1). 학림 및 흥해층은 연일세일층 하부로서 유사한 지질로 구성된다. 연구 목적 편의상, 심부 지하수는 공심도 300 m 이상, 중간심도 지하수는 100~300 m 사이의 지하수공, 천부 지하수는 50 m 이하의 공심도에서 채취한 시료로 구분하였으나, 지하수공의 심도가 반드시 지하수의 심도를 반영하지는 못한다. 심부 지하수는 케이싱이 200 m 이상 설치되어 있으나, 중간심도 지하수는 케이싱 심도 여부를 파악할 수 없고 경우에 따라서는 천부지하수의 유입이 있을 것으로 사료되기 때문이다.

## 시료채취 및 분석

2005년 5월에 총 18개의 지하수공(D2는 일 양수량을 기준으로 3개(D-2(200 m<sup>3</sup>/d), D-2(250 m<sup>3</sup>/d), D-2(300 m<sup>3</sup>/d) 시료로 나눔)과 지표수 2개(Fig. 1)로부터 시료를 채취하였다. 시료 채수는 수질안정을 위하여 10~20분 동안 양수공 체적의 약 3~5배를 양수한 후(Barcelona et al., 1985) 이루어졌다. 주요 양이온 및 음이온 분석용 시료들은 여과(0.45 μm) 후 각 1L씩 채취하였으며, 양이온 시료의 경우는 농질산(65%) 1 ml를 첨가하였다. 모든

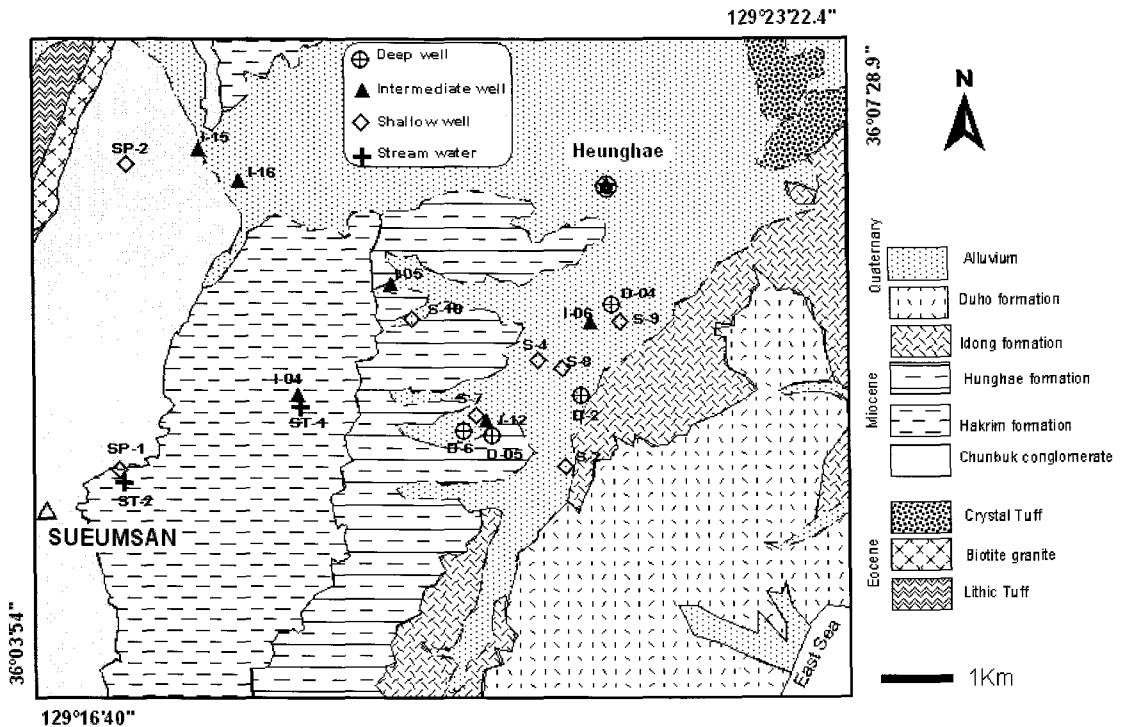


Fig. 1. Geological map and sampling sites of the Heunghae area.

시료는 분석 전까지 4°C로 보관하였다. 수온, pH, Eh, EC 값은 휴대용 측정기(SK1250MC, HM-12P TOA, CM-14P TOA)를 이용하여 현장에서 측정하였다. 알칼리도는 0.0239 N의 황산으로 현장에서 적정하였다.

수질분석은 15개의 주요 성분( $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $SiO_2$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $HCO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ , Fe, Al, F, Br, B, Li)을 대상으로 수행되었다. 양이온중 Na, K, Fe, Mn은 원자흡수분광광도계(AAS)를 이용하여 분석하였으며, 기기분석한계는 0.005 ppm이다. Ca, Mg, T-SiO<sub>2</sub>, Li 및 B는 유도결합플라즈마 원자방출분광광도계(ICP-AES)를 이용하였으며, 기기분석한계는 0.002, 0.002, 0.012, 0.002, 0.002 ppm이다. 음이온의 경우 이온크로마토그래피(Dionex 300)에 의해 분석되었으며, 기기분석한계는 Br은 0.08 ppm, 그 외 성분은 0.05 ppm이다. 수소 및 산소안정동위원소 비 값은 국제 표준시료인 SMOW에 비교 정량하였으며, 측정 오차는 수소의 경우 ±2%이고, 산소는 ±0.07%이다. 작업표준시료는 미국 Oztech 회사제품인 Oztech-744(O=+25.06%), Oztech-349H(H=-82.96%)를 사용하였다. 모든 분석은 한국지질자원연구원에서 수행되었다.

## 결과 및 해석

### 현장수질 및 주요이온 현황

채취된 22개 시료에 대한 현장 측정 및 화학분석 및 안정동위원소분석 결과는 Table 1, 2, 3 및 Fig. 2, 3, 4에 도시하였다. 22개 지하수 시료의 수온은 심부지하수의 경우 28.5~48.2°C, 중간심도 지하수는 14.6~26.0°C, 천부지하수는 9.3~14.9°C, 지표수는 11.5~14.6°C의 범위를 나타낸다. pH 값은 심부지하수의 경우 7.7~8.5, 중간지하수는 6.8~8.3, 천부지하수는 4.9~7.8, 지표수는 6.2~7.7의 범위를 나타내어, 지하수의 경우 심부로 갈수록 pH값이 높아지는 경향을 보인다. 전기전도도(EC)는 심부지하수의 경우 1,671~4,610  $\mu S/cm$ , 중간지하수는 181~1,686  $\mu S/cm$ , 천부지하수는 92~825  $\mu S/cm$ , 지표수의 경우는 187~338  $\mu S/cm$ 의 범위를 보여, 심부로 갈수록 EC값이 높아진다. Eh 값은 심부지하수의 경우 모두 음의 값인 -188~-3 mV, 중간지하수는 -152~61 mV, 천부지하수는 -119~286 mV, 지표수의 경우는 3~66 mV의 범위를 보여, 심부로 갈수록 환원환경이 유지됨을 보인다.

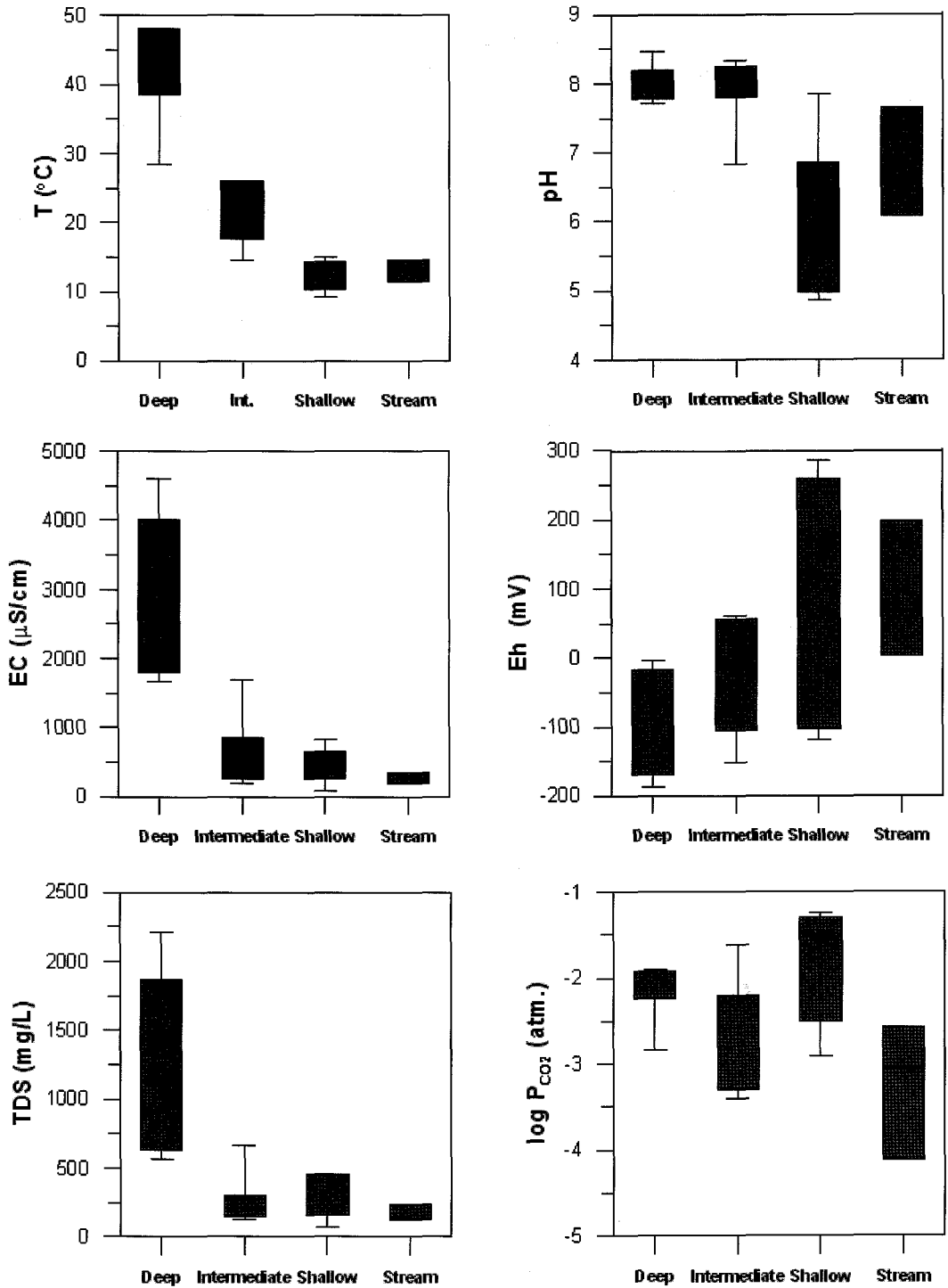


Fig. 2. Box-Whisper diagram showing physicochemical components and well depth in the Heunghae area.

Table 1. Physiochemical data of groundwater and stream water from the Heunghae area.

Sample No	Well Depth(m)	T (°C)	pH	EC ( $\mu S/cm$ )	Eh (mV)	DO (mg/L)	TDS <sup>1)</sup> (mg/L)	Log Pco <sub>2</sub> <sup>2)</sup> (atm.)
Deep groundwater								
D-4	303	28.5	8.5	1671	-16	7	662	-2.84
D-5	490	38.6	8.1	1806	-3	0.7	571	-2.13
D-6	570	40	8.2	1936	-30	1.8	631	-2.24
D-2(200 m <sup>3</sup> /d)	1,504	48.1	7.7	4610	-164	1.1	2208	-1.90
D-2(250 m <sup>3</sup> /d)	1,504	48.2	7.8	4000	-188	0.9	1864	-1.92
D-2(300 m <sup>3</sup> /d)	1,504	47.9	7.9	3550	-169	1.3	1580	-2.00
Intermediate groundwater								
I-4	170	19.1	8.1	850	61	1.9	262	-2.50
I-5	150		7.8	794	55	2	300	-2.21
I-6	250	26	8.1	1686	-105	1.4	667	-2.50
I-12	170	14.6	6.8	566	-152	1.8	304	-1.61
I-15	150	17.9	8.3	181	-73	4	119	-3.40
I-16	146	17.7	8.3	262	-51	1.3	142	-3.30
Shallow groundwater								
S-2	6.3	11.6	5.0	334	259	2.8	220	-1.30
S-4	4.5	9.3	4.9	662	286	3.7	454	-1.33
S-7	5.3	10.3	6.0	427	107	6	284	-1.86
S-8	5.9	13	5.5	664	193	0.6	460	-1.74
S-9	20	14.2	6.9	497	-119	1	234	-1.38
S-10	40	14.9	6.7	825	-33	1.8	412	-1.24
SP-1	0	13.2	7.8	261	-104	2.2	158	-2.92
SP-2	0	13	6.7	92	135	9.3	74	-2.50
Stream water								
ST-1		14.6	6.9	206	66	9.8	137	-3.04
ST-2		11.5	7.7	187	3	10.3	121	-4.11

<sup>1)</sup> total dissolved solids, calculated from computer code AQUACHEM;

<sup>2)</sup> calculated from alkalinity and pH data, using computer code PHREEQC.

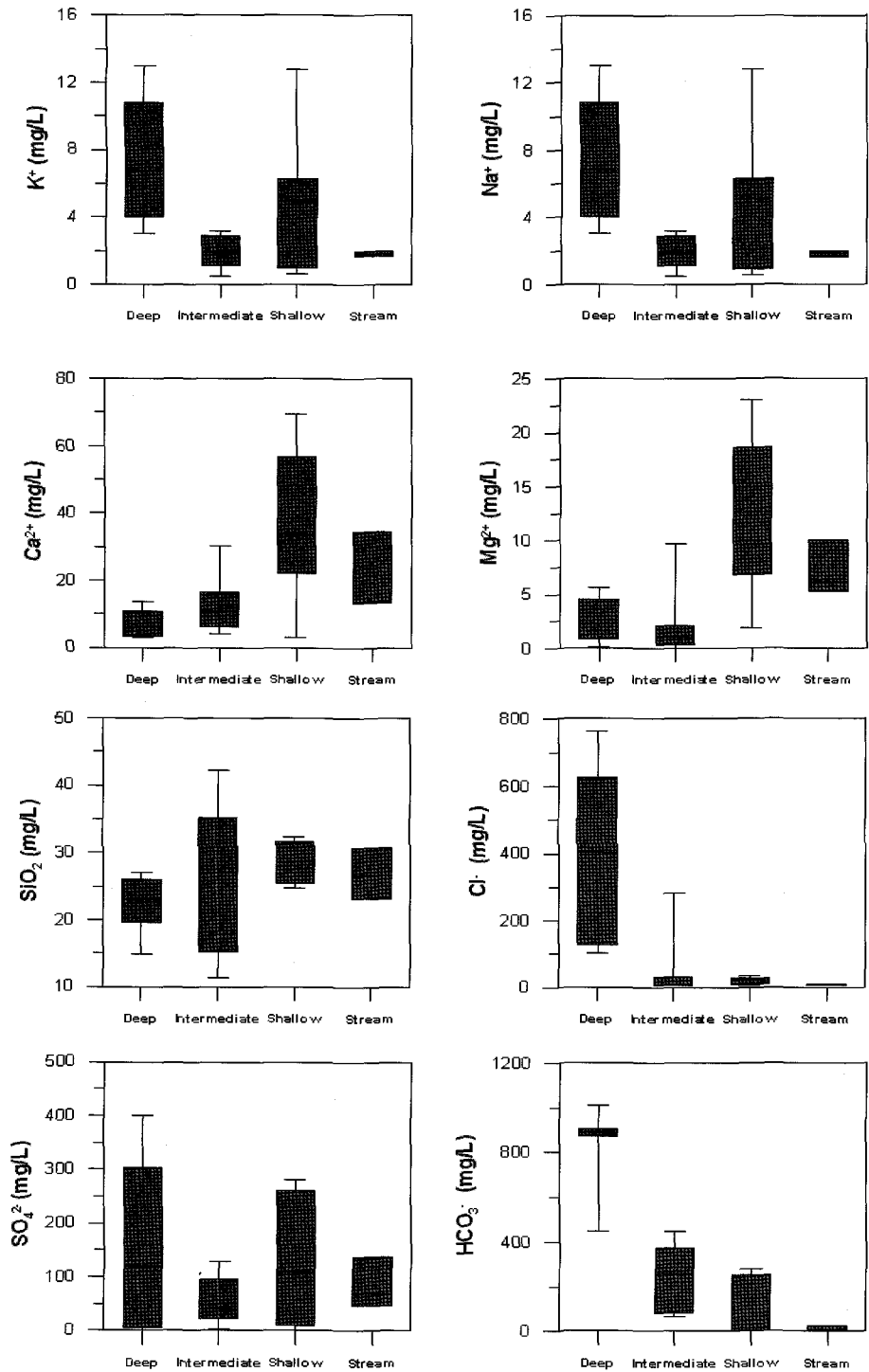


Fig. 3. Box-Whisper diagram showing major elements contents and well depth in Heunghae area.

**Table 2.** Chemical data of groundwater and stream water from the Heunghae area.

Sample No	Dissolved constituents (mg/L)														
	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SiO <sub>2</sub> (aq)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	F	Al <sup>3+</sup>	B <sup>3+</sup>	Br <sup>-</sup>	Li <sup>+</sup>	Fe (total)
Deep groundwater															
D-4	3.0	353.0	3.5	0.1	276.0	0.7	448.3	14.8	BDL	3.1	0.0	0.9	1.0	0.3	0.1
D-5	4.0	424.0	3.9	0.9	102.0	3.8	883.5	19.6	1.0	4.3	0.1	1.1	0.4	0.3	0.0
D-6	4.2	460.0	3.2	1.0	126.0	7.0	1006.7	20.1	0.2	4.6	0.0	1.2	0.4	0.3	0.0
D-2(200 m <sup>3</sup> /d)	13.0	976.0	13.7	5.6	763.0	401.0	871.5	27.1	BDL	3.5	0.0	2.2	1.7	0.8	0.0
D-2(250 m <sup>3</sup> /d)	10.8	877.0	10.9	4.5	623.0	304.0	901.5	26.0	BDL	3.9	0.0	2.0	1.4	0.7	0.0
D-2(300 m <sup>3</sup> /d)	9.4	766.0	8.9	3.6	525.0	233.0	895.5	25.8	BDL	4.2	0.0	1.8	1.1	0.6	0.0
Intermediate groundwater															
I-4	1.9	177.0	8.4	0.3	8.0	35.4	371.8	27.8	2.1	0.6	0.0	0.6	BDL	0.2	0.0
I-5	1.9	171.0	6.2	0.0	9.6	95.0	362.1	11.4	3.3	0.8	0.0	0.5	BDL	0.3	0.2
I-6	3.2	350.0	4.3	0.4	280.0	3.0	448.7	15.3	BDL	3.2	0.0	0.9	0.9	0.4	0.3
I-12	2.9	50.1	30.4	9.6	29.4	128.0	145.8	26.3	BDL	0.2	0.0	0.1	0.1	0.1	26.4
I-15	0.5	20.2	13.0	2.1	6.7	22.9	67.1	42.3	BDL	0.3	0.0	0.0	BDL	0.0	0.0
I-16	1.1	32.8	16.4	1.5	8.6	42.8	83.8	35.2	1.4	0.3	0.0	0.0	BDL	0.1	0.0
Shallow groundwater															
S-2	6.3	19.3	23.5	9.0	21.8	101.0	3.9	25.4	12.3	0.4	0.4	0.0	BDL	0.0	0.0
S-4	4.8	46.7	49.7	18.6	19.2	280.0	3.2	28.8	1.6	0.4	3.4	0.1	BDL	0.1	0.6
S-7	5.1	14.1	44.3	10.6	26.7	117.0	10.9	24.7	30.1	0.3	0.4	0.0	BDL	0.0	0.0
S-8	12.8	32.4	56.8	23.1	34.8	260.0	5.1	27.6	11.8	0.4	0.5	0.1	BDL	0.1	0.0
S-9	2.4	66.1	22.0	8.2	28.6	0.3	253.7	31.4	BDL	0.4	0.0	0.1	0.2	0.1	21.2
S-10	6.2	84.4	69.3	10.2	14.8	173.0	279.5	32.3	0.1	0.5	0.0	0.2	BDL	0.3	0.1
SP-1	1.0	16.3	22.6	6.8	8.4	50.7	68.5	31.6	BDL	0.3	0.0	0.2	BDL	0.1	0.6
SP-2	0.6	8.0	3.0	1.8	6.0	9.7	11.4	28.6	12.6	0.2	0.0	0.0	BDL	0.0	0.0
Stream water															
ST-1	1.9	9.4	13.4	5.3	7.3	68.1	5.4	26.7	4.2	0.3	0.5	0.0	BDL	0.0	0.1
ST-2	1.7	8.7	13.6	6.1	7.6	46.5	23.8	23.1	7.2	0.3	0.0	0.0	BDL	0.0	0.0

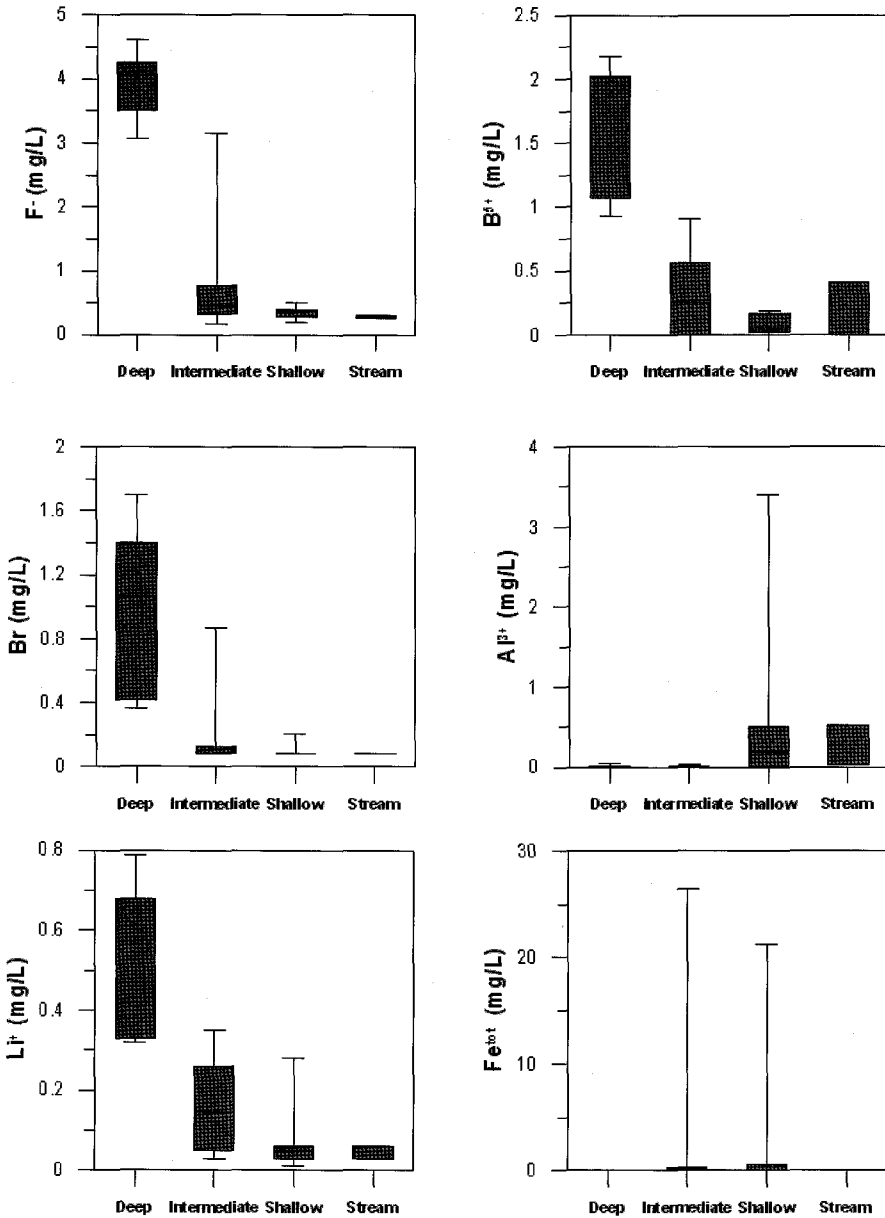


Fig. 4. Box-Whisper diagram showing trace elements contents and well depth in Heunghae area.

용존산소(DO)의 경우는 심부지하수의 경우 0.7~7.0 mg/L, 중간지하수는 1.3~4.0 mg/L, 천부지하수는 0.3~9.3 mg/L, 지표수의 경우는 9.8~10.3 mg/L의 범위를 보여, 심부로 갈수록 용존산소량이 작아지는 경향을 보인다. CO<sub>2</sub>의 분압은 심부 및 천부 지하수에서 높게 나타난다.

알카리 금속(K, Na, Li)은 반응성이 크므로 심부로 갈수록 농도가 증가하는 양상을 보인다. K<sup>+</sup>의 농도 범위는 심부지하수의 경우 3.0~13.0 mg/L, 중간지하수는 0.5~3.2 mg/L, 천부지하수는 0.6~12.8 mg/L, 지표수는 1.7~1.9 mg/L를 보여 심부로 갈수록 K<sup>+</sup>의 농도가 증가하고 있다. Na<sup>+</sup>의 농도 범위는 심부지하수의 경우



353~976 mg/L, 중간지하수는 20.2~350 mg/L, 천부지하수는 7.9~84.4 mg/L, 지표수는 8.7~9.4 mg/L를 보여 심부로 갈수록 Na<sup>+</sup>의 농도가 증가하고 있다. Li<sup>+</sup>의 농도 범위는 심부지하수의 경우 0.32~0.79 mg/L, 중간지하수는 0.03~0.35 mg/L, 천부지하수는 0.01~0.28 mg/L, 지표수는 0.03~0.03 mg/L를 보여 심부로 갈수록 Li<sup>+</sup>의 농도가 증가하고 있다.

알칼리 토금속(Mg, Ca) 및 3가 이온인(Al)은 토양에 풍부하여 천부로 갈수록 증가하는 양상을 보인다. Ca<sup>2+</sup>의 농도 범위는 심부지하수의 경우 3.2~13.7 mg/L, 중간지하수는 4.3~30.4 mg/L, 천부지하수는 3.0~69.3 mg/L, 지표수는 13.4~34.6 mg/L를 보여 천부로 갈수록 Ca<sup>2+</sup>의 농도가 증가하고 있다. Mg<sup>2+</sup>의 농도 범위는 심부지하수의 경우 0.05~5.59 mg/L, 중간지하수는 0.03~9.64 mg/L, 천부지하수는 1.82~23.10 mg/L, 지표수는 5.31~10.0 mg/L를 보여 천부로 갈수록 Mg<sup>2+</sup>의 농도가 증가하고 있다. Al<sup>3+</sup>의 농도는 심부지하수의 경우 0.01~0.05 mg/L, 중간지하수는 0.00~0.02 mg/L, 천부지하수는 0.00~3.41 mg/L, 지표수는 0.02~0.52 mg/L를 보여 천부로 갈수록 Al<sup>3+</sup>의 농도가 증가하고 있다.

할로젠 원소(F, Cl, Br)는 심부로 갈수록 농도가 증가하는 양상을 보인다. Cl<sup>-</sup>의 농도 범위는 심부지하수의 경우 102.0~763.0 mg/L, 중간지하수는 6.7~280.0 mg/L, 천부지하수는 6.0~34.8 mg/L, 지표수는 7.3~8.4 mg/L를 보여 심부로 갈수록 Cl<sup>-</sup>의 농도가 증가하고 있다. F<sup>-</sup>의 농도 범위는 심부지하수의 경우 3.06~4.62 mg/L, 중간지하수는 0.17~3.15 mg/L, 천부지하수는 0.20~0.51 mg/L, 지표수는 0.26~0.31 mg/L를 보여 심부로 갈수록 F<sup>-</sup>의 농도가 증가하고 있다. Br<sup>-</sup>의 농도 범위는 심부지하수의 경우 0.37~1.70 mg/L, 중간지하수는 2개, 천부지하수는 1개의 시료를 제외하고는 검출한계 이하인 0.08 mg/L를 보인다. HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 농도는 심부지하수의 경우 448.3~1006.7 mg/L, 중간지하수는 67.1~448.7 mg/L, 천부지하수는 3.2~279.5 mg/L, 지표수는 2.7~23.8 mg/L를 보여 심부로 갈수록 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 농도가 증가하고 있다. SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 농도는 심부지하수의 경우 0.7~401.0 mg/L, 중간지하수는 3.0~128.0 mg/L, 천부지하수는 0.3~280.0 mg/L, 지표수는 46.5~138.0 mg/L를 보여 지하수의 심도보다는 지질에 영향을 받는 것으로 나타난다. NO<sub>3</sub><sup>-</sup>는 심부 및 중간 지하수에는 거의 검출되지 않고 일부 천부 지하수 및 지표수에서만 검출되어, 심부 및 중간 심도 지하수는 인위적인 오염이 되지 않았음을 나

타낸다.

산소 및 수소 안정동위원소

강우의 산소 및 수소 안정동위원소 (<sup>2</sup>H/<sup>1</sup>H 및 <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O, 각각) 비는 지리적인 위치 및 기후환경에 따라 다른 특성을 보인다. 세계적인 규모로, 강우의 안정동위원소 비는 δ<sup>2</sup>H = 8δ<sup>18</sup>O + 10라는 천수곡선을 형성하는 것으로 알려진다. 산소 및 수소 안정동위원소 비에서, 바다물의 동위원소비(V-SMOW)는 0‰으로 이용된다. 산소 및 수소 안정동위원소 값은 지하에 침투전 또는 침투동안 거의 변하지 않는다. 그러나 물이 증발함에 따라 잔류부분의 산소 및 수소 안정동위원소 비는 증가하여, 잔류용액은 천수곡선에서 벗어난다. 강우의 동위원소 함량에 영향을 끼치는 다른 요소는 계절변이, 고도, 위도, 강우량 등으로 알려져 있다.

연구지역의 지하수 및 지표수의 δ<sup>18</sup>O 및 δD 값은 심부 지하수의 경우 -10.2 ~ -10.3 ‰, -67.4 ~ -64.4 ‰, 중간 심도는 -6.0 ~ -10.0 ‰, -42.7 ~ -68.2 ‰, 천부 지하수는 -6.8 ~ -9.1 ‰, -48.1 ~ -59.6 ‰, 지표수는 -7.8 ~ -8.6 ‰, -54.8 ~ -49.5 ‰의 범위를 각각 보이며, 심도별 뚜렷한 차이를 보이며 구분된다(Fig. 5). 이러한 동위원소 분석 결과는 풍기지역 심부 지하수의 분석결과(평균값: δ

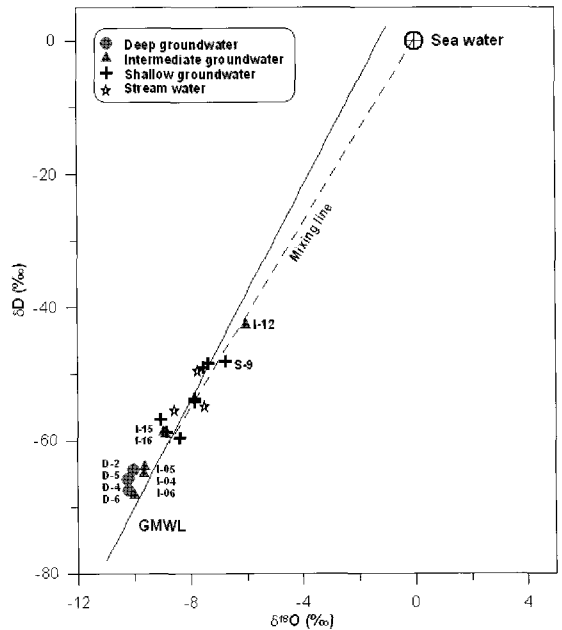


Fig. 5. Stable oxygen and hydrogen isotope compositions of Heunghae water samples.

Table 3. Hydrogen and oxygen stable isotope data of groundwater and stream water samples from Heunghae area.

Sample No	TM Coordinate		stable isotope value(‰)	
	X <sup>TM</sup>	Y <sup>TM</sup>	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta\text{D}$
D-02	231407	287583	-10.0	-64.4
D-04	231814	288732	-10.3	-65.9
D-05	230311	287132	-10.2	-65.6
D-06	229972	287204	-10.2	-67.4
I-04	227940	287601	-9.6	-65.0
I-05	229058	288977	-9.6	-64.0
I-06	231516	288531	-10.0	-68.2
I-12	230242	287291	-6.0	-42.7
I-15	226747	290616	-8.9	-59.1
I-16	227216	290236	-9.0	-58.8
S-02	231183	286722	-7.8	-53.7
S-04	230902	288041	-7.4	-48.3
S-07	230112	287340	-7.9	-54.2
S-08	231146	287936	-7.5	-49.0
S-09	231902	288513	-6.8	-48.1
S-10	229365	288542	-8.4	-59.6
SP-01	225759	286680	-9.1	-56.9
SP-02	225847	290461	-8.8	-58.8
ST-01	227945	287581	-8.6	-55.4
ST-02	225760	286681	-7.5	-54.8

$\delta^{18}\text{O}=-10.7\%$ ,  $\delta\text{D}=-79.3\%$ )보다는 약간 무거운 값을 보인다(윤성택외 1998). 모든 시료는 Craig(1961)의 순환수선(MWL) 위나 약간 밑에 도시되어, 강우로부터 기인함을 나타낸다. 이광식과 장병욱(1994)은 중수소 과잉을 나타내는 d 값에 의하여 여름철 강우( $d < \sim 10$ )와 다른 계절(봄, 가을, 겨울) 강우( $d > \sim 10$ )가 비교적 잘 구분된다고 하였다. 본 역에서 심부 지하수는 d 값이 12.1~16.3을 보이나, 중간 및 천부 지하수는 d 값이 5.5~12.9 등 다양함을 보여 각 지하수공에 따라 충전 시기를 달리하는 것으로 해석된다.

지하수의 산소-수소 동위원소 조성 특성은 강우의 충전 장소에 대한 정보를 제공해 준다. 즉 고도가 높을수록 강우지역의 평균기온은 낮아지며 강우의 동위원소 성분도가 가벼워진다.  $\delta^{18}\text{O}$ 의 경우 고도 100 m당 -0.15~-0.5‰,  $\delta\text{D}$ 는 -1~-4‰ 정도 가벼워진다. 이를 고도효과라 한다(Clark and Fritz, 1997). 김규한과 Nakai(1988)에 따르면 국내의 경우 충전 고도가 100 m 상승함에 따라 산소동위원소비는 0.19‰, 수소동위원소비는 1.18‰

의 비율로 감소한다고 보고한바 있다. 안정동위원소 연구결과를 볼 때, 본역의 심부 지하수는 가장 가벼운 천부 지하수인 SP1시료( $\delta^{18}\text{O}=-9.1\%$ ,  $\delta\text{D}=-56.9\%$ )보다  $\delta^{18}\text{O}$ 는 약 1‰,  $\delta\text{D}$ 는 8% 정도가 가벼워 이를 근거로 심부 지하수의 함양고도를 추정하면 지형적으로 최소 500 m 이상이 높은 지역에서 충전되거나, 온도가 낮은 기후의 시기에 충전된 것으로 추정할 수 있다.

대부분의 천부 지하수는  $\delta^{18}\text{O}$ 값이 -6.8와 -9.1‰ 사이에 있다. 이러한 값의 범위는 포항지역의 현재 강수의 값과 비슷하다(이광식과 정재일, 1997). 홍해지역 지표수, 천부 및 중간과 심부 지하수는 모두 순환수선 근방에 도시되어 강우기원으로 생성된 것으로 해석된다.

#### 수질특성 및 유형

지하수의 수질 유형은 주요 양이온 및 음이온의 상대적인 당량 백분율에 따라 Ca-HCO<sub>3</sub>, Ca-Cl, Na-HCO<sub>3</sub>, Na-Cl형의 4가지로 분류할 수 있다. 양이온은 (Na<sup>+</sup>

를 이룬다.

대수층 심도별 수질 특성 분석

지하수내 용존하는 각 이온들의 농도 비를 이용하여, 심도별 지하수의 화학조성에 기여하는 조암광물 및 환경을 추정할 수 있다. 규산염 광물의 풍화에 의해 생성되는 SiO<sub>2</sub>와 규산염 및 탄산염 광물의 용해에 의해 생성되는 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>는, 그 몰비의 정도에 의하여 모암의 기원이 탄산염 광물인지 규산염광물인지를 구별하는데 이용된다. Fig. 7a에 따르면 모든 심부 지하수 및 중간심도 지하수중 I-4, I-5 및 I-6 지하수 시료는 탄산염 광물의 풍화에서 기인하나, 대부분의 천부 지하수 및 지표수와 I-15 및 I-16은 규산염 광물의 풍화에서 기인하는 것으로 나타나, 본역 심부 지하수의 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 기원은 탄산염 광물의 풍화에서 기인하는 것으로 해석된다.

Na<sup>+</sup>는 지하수의 주성분으로서 암석중의 조암광물 및 해수에 풍부하게 존재하는 양이온이다. Na<sup>+</sup>의 기원으로는 주로 사장석 특히 알바이트의 용해 및 해수로서, 해수에는 평균 10,770 mg/L 이상이 존재하고 있다. K<sup>+</sup>는 주로 규산염 광물중 알카리 장석류와 운모류의 풍화작용에 의해 지하수에 농집된다. 일반적으로 K+함량은 Na 및 Ca에 비하여 매우 낮은 값을 나타내는데, 이는 장석류의 용해속도 차이에 기인한다. 일반적으로 규산염 광물의 풍화초기에는 사장석보다 카리장석이 더 큰 영향을 미쳐, Na 및 Ca의 용탈이 K<sup>+</sup> 이온의 용탈보다 선행되는 것으로 보고되고 있다(Nesbitt and Young, 1984). Fig. 7b와 같이 Na<sup>+</sup>+K<sup>+</sup>-Cl<sup>-</sup>에 대한 SiO<sub>2</sub>비가 1 이하이면 양이온 교환반응에 의한 것이며, 1과 2사이 이면 알바이트 풍화로 기인하며, 그 비가 2 이상이면 황로마그네시안 광물의 풍화에 의해서 야기되나, 본역에서는 일부 천부 지하수 및 하천수를 제외하고는 전시료가 양이온 교환에 의해서 생성되는 것으로 해석된다.

Fig. 7c는 모든 심부 지하수와 중간심도 지하수중 I-4, I-5 및 I-6 지하수 시료는 Na<sup>+</sup> 및 K<sup>+</sup> 이온의 기원이 사장석의 풍화에 의하여 생성되지 않았다는 것을 보여준다. 그러나 대부분의 천부 지하수 및 일부 중간심도 지하수는 사장석의 풍화에 의하여 발생하였다는 것을 나타낸다. Fig. 7d는 Na<sup>+</sup>+Cl<sup>-</sup>와 Na<sup>+</sup>이온의 mmol 농도비로서 모든 물 시료에서 Na<sup>+</sup> 이온이 암염이외의 다른 기원인 즉 알바이트 및 이온교환에 의하여 생성되는 것으로 나타난다.

Fig. 7e는 본역에서 산출되는 지하수 및 지표수의 Ca<sup>2+</sup> 및 Mg<sup>2+</sup> 이온은 모두 석회석 및 백운석의 풍화에서

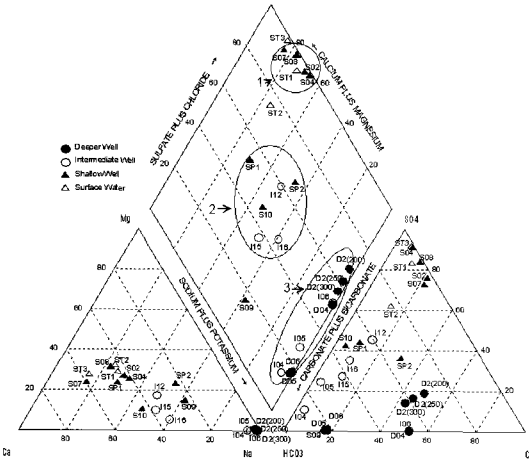


Fig. 6. Piper triangular diagram of the waters from the Heunghae area(%meq/L).

K<sup>+</sup>)과 (Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup>)을 비교하여 전자가 우세하면 Na형, 후자가 우세하면 Ca형으로 분류하고, 음이온은 (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> + CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)와 (Cl<sup>-</sup> + SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> + NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)의 당량 백분율을 비교하여 전자가 우세하면 HCO<sub>3</sub>형, 후자가 우세하면 Cl형으로 분류하였다. 연구지역 지하수 및 지표수의 수질유형을 파악하기 위하여, 심부 지하수, 중간지하수, 천부 지하수 및 지표수를 분류하여 Fig.6과 같이 piper 다이나그램에 도시하였다.

이를 3개의 집단으로 분류하면 1집단은 Ca-Cl 유형으로 여기에는 지표수 및 천부 지하수가 해당된다. 2집단은 중간형으로 중간심도 지하수가 여기에 속하며, Na-HCO<sub>3</sub>, Na-Cl형이다. Na-HCO<sub>3</sub>형에서는 일반적으로 수온이 높게 나타난다. 3집단 수질유형은 심부지하수로서, Na-Cl 및 Na-HCO<sub>3</sub>유형으로 가장 높은 수온을 나타낸다. 양이온은 2가 이온인 Ca, Mg보다 1가 이온인 Na 및 K의 농도가 증가할수록 온도가 상승한다. 음이온의 경우 2가 이온인 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>보다 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 및 Cl<sup>-</sup> 농도가 증가할수록 수온이 상승한다. D-4와 I-6 지하수간의 거리는 300 m 떨어져 있고, 심부지하수와 중간심도 지하수로 구분되었지만, 동일한 위치와 동일한 지하수 유형(Na-Cl)에 접시되어 하나의 대수층임을 추정할 수 있다. D-4 시료에서 360 m 떨어져 있는 S-9 천부 지하수는 Na-HCO<sub>3</sub> 유형으로 나타나지만, 2집단과 3집단 사이에 접시되어 이들과 서로 관련이 있음을 파악할 수 있다. D-5와 D-6간의 거리는 330 m나 되지만 Na-HCO<sub>3</sub> 유형이며 거의 동일한 성분을 나타낸다. 그러나 인접한 I-12 및 S-7 시료는 각기 2집단 및 1집단에 속하여 서로 대조

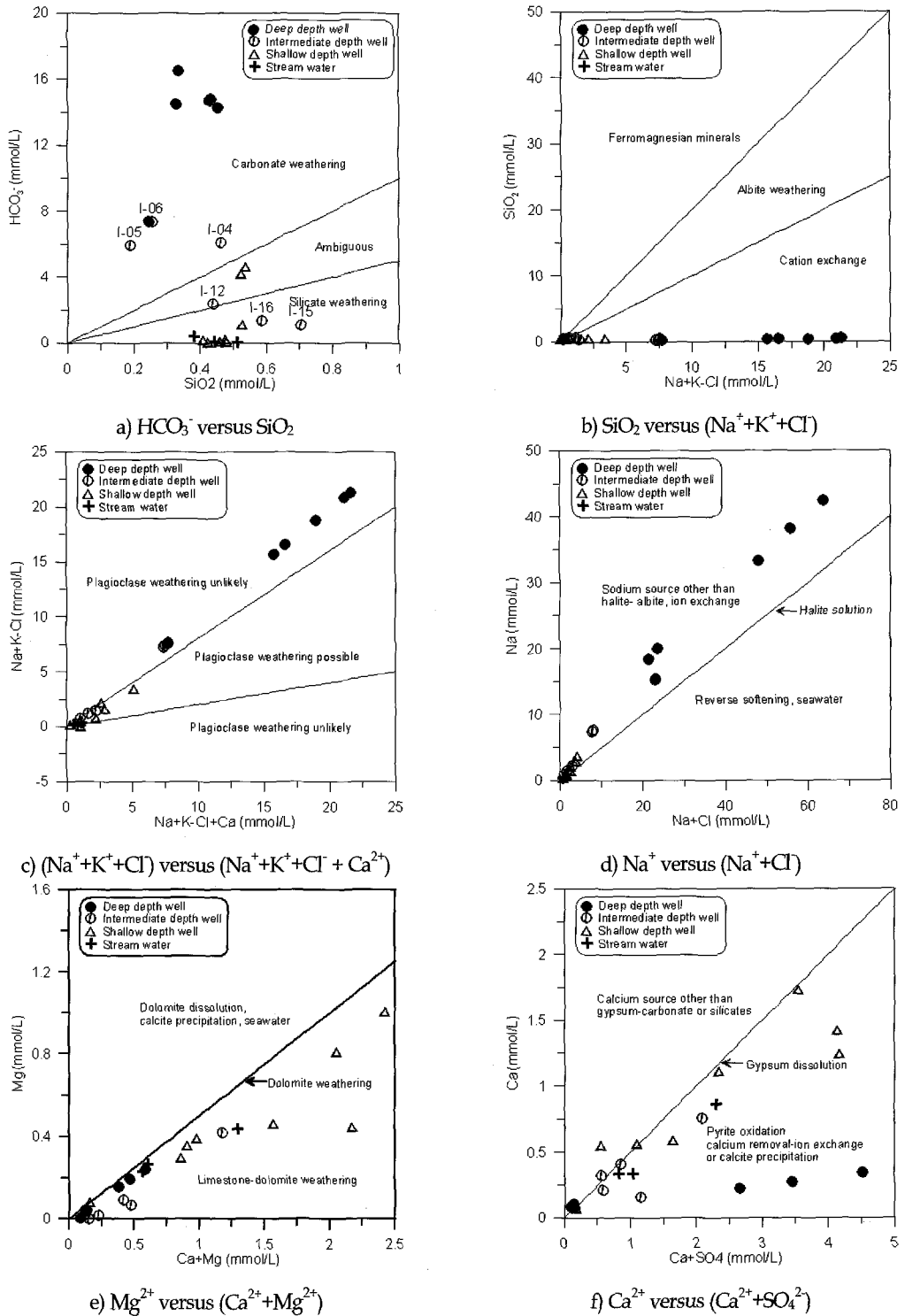


Fig. 7. Bivariate diagram of various ion concentration in the water samples of the Heunghae area.

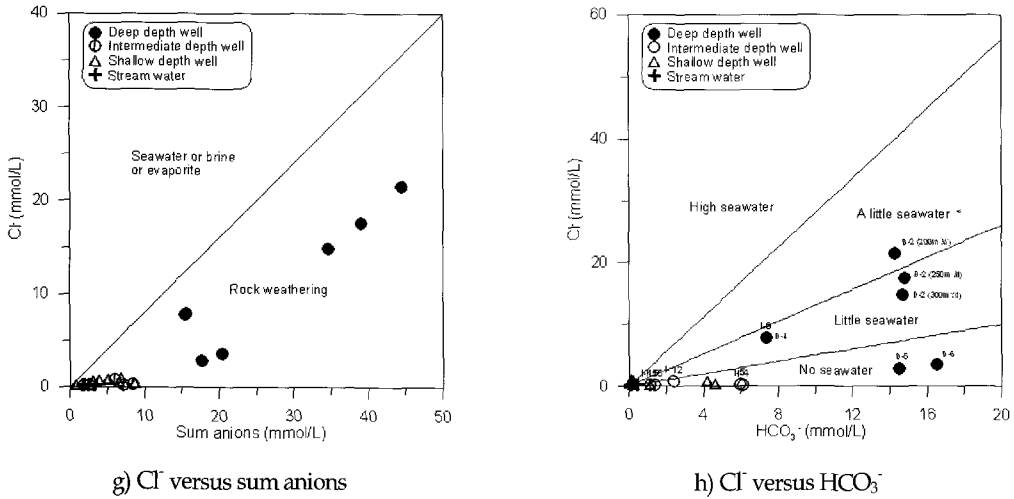


Fig. 7. Bivariate diagram of various ion concentration in the water samples of the Heunghae area.

기인하는 것을 보여준다.

Fig. 7f는 본역에서 일부 지표수를 제외하고는 모든  $Ca^{2+}$  및  $SO_4^{2-}$  기원이 석고용해 또는  $Ca^{2+}$ 가 제거되는 반응인 이온 교환반응이나 방해석의 침전에서 기인함을 보여준다. 그러나 천부 지하수중  $SO_4^{2-}$  이온의 농도가 높으며, pH가 5.5 이하인 S2, S4, S8는  $SO_4^{2-}$  기원이 황철석에서 기인함을 나타낸다.

Fig. 7g는  $Cl^-$  이온의 기원을 파악하기 위하여 음이온의 총합과 염소이온의 비를 도시한 것이다. 음이온과 염소이온의 비가 0.8 이상이면 해수나 염수의 영향을 받은 것이고, 0.8이하이면 암석이 풍화된 것이다. 본역의 모든 물은 암석이 풍화되어 생성된 것으로 해석된다.

Fig. 7h는  $Cl^-$  이온과  $HCO_3^-$  이온의 비를 도시한 것이다.  $Cl^-$  이온과  $HCO_3^-$  이온의 비가 0.5이하이면 해수의 영향은 전혀 없고, 0.5~1.3인 경우 약간의 영향을 받은 것이며, 1.3~2.8인 경우 보통 정도로 오염된 것으로 Revelle(1941)는 보고하였다. 본 역에서는 대부분의 천부 및 중간심도 지하수와 D-5 및 D-6 심부 지하수는 해수의 영향을 전혀 받지 않은 것으로 나타나, D-2(200  $m^3/d$ )는 약간, D-4 및 I-6 와 D-2(250  $m^3/d$ , 300  $m^3/d$ )는 거의 영향을 받지 않았음을 나타낸다.

### 결론

본역 지하수는 천부에서 심부로 순환함에 따라

Ca-Cl 유형에서 Na- $HCO_3$ , Na-Cl 유형으로 진화한다. 심도의 증가에 따라, pH 및 TDS는 증가하며, Eh 및 DO는 감소하는 경향을 보인다. 알카리 금속(K, Na, Li)은 심부로 갈수록 농도가 증가하는 양상을 보이나, 알카리 토금속(Mg, Ca) 및 Al은 천부로 갈수록 증가하는 양상을 보인다. 음이온인 할로젠 원소(F, Cl, Br) 및  $HCO_3^-$ 의 농도는 심부로 갈수록 증가하는 양상을 보인다. 반면  $SO_4^{2-}$ 의 농도는 지하수 심도별로 다양하게 나타나 지질에 영향을 받는 것으로 나타났다.  $NO_3^-$ 는 일부 지표수 및 천부 지하수에서만 검출되어, 이의 인위적 오염을 반영한다.

연구지역 지표수, 천부, 중간, 심부 지하수의  $Cl^- / HCO_3^-$ ,  $(Na^+ + Cl^-) / Na^+$ , Cl/음이온합의 mmol 비를 종합적으로 고려할 때, 해수의 직접적인 영향을 받고 있는 것으로 나타난다. 연구지역의 지하수중의  $HCO_3^-$  및  $SiO_2$ 의 기원은 천부 지하수에서는 규산염 광물의 풍화에서, 심부 지하수에서는 탄산염 광물의 풍화에서 생성되었다. Na 및 K이온의 기원은 심부 지하수에서는 사장석 풍화외의 원인, 천부 지하수는 사장석 풍화에 의해서 발생한다. Ca 및 Mg 이온은 모두 석회석 및 백운석에서 기인한다. 천부 지하수의  $SiO_2$  기원은 황철석에서 기인하며, 그 외 지하수는 Ca를 소모하는 반응인 이온 교환반응이나 방해석의 침전이 일어난다.

산소 및 수소 안정동위원소 분석 연구에 의하면, 심부 지하수의  $\delta^{18}O$  및  $\delta D$ 의 평균값은 -10.1 ‰, -65.8 ‰

%, 중간심도는 -8.9 %, -59.6 %, 천부는 -8.0 %, -53.6 %, 지표수는 -7.9 %, -53.3 %의 값을 각각 보인다. 심부 지하수는 천부지하수에 비해  $\delta^{18}\text{O}$ 는 약 2 %,  $\delta\text{D}$ 는 10 % 정도의 차이를 보이며, 뚜렷이 구분된다. 본역의 지하수는 모두 순환수선 위에 도시되어, 강우에서 기원하였으며, 심부 지하수는 천부 지하수보다 지형 고도가 높은 지역에서 충전되어 먼 거리를 유동하였을 것으로 추정된다.

## 사 사

이 연구는 한국지질자원연구원 (과제명: 지하수 시스템 통합 해석 기술 개발(2))에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 김규한, Nakai, N., 1988, 남한의 지하수 및 강수의 안정동위원소 조성, 지질학회지, 24, 37-46.
- 김옥준, 윤선, 길영준, 1968, 한국지질도(1:50,000) 청하도폭, 국립지질조사소, 16p.
- 김형찬, 임정웅, 강필중, 1992, 영일 신광 지구 온천 종합 조사 보고서, 한국자원연구소
- 온천조사보고서, 92-5(No. 87), 159p.
- 문상호, 이철우, 성기성, 김용제, 2000, 포항(성곡) 지구 온천공 조사 보고서, 한국자원연구소, 온천공조사보고서, 2000-2(No. 273), 62p.
- 송윤호외 27인, 2003, 심부지열에너지 개발사업, 일반-03(연차)-01, 한국지질자원연구원, 85p.
- 송윤호외 31인, 2004, 심부지열에너지 개발사업, 일반-04(연차)-01, 한국지질자원연구원, 226p.
- 엄상호, 이동우, 박봉순, 1964, 한국지질도(1:50,000) 포항도폭, 국립지질조사소, 21p.
- 윤성택, 채기탁, 고용권, 김상렬, 최병역, 이병호, 김성용, 1998, 풍기지역 지하수의 수리지구화학 및 환경안정동위원소 특성연구. 지하수환경학회, 5, 177-191.
- 윤성호, 1988, 포항분지 북부(칠포-월포 일원)에 분포하는 화산암류에 대한 암석학적 층서학적 연구. 광산지질, 21, 117-129.
- 이광식, 장병욱, 1994, 우리나라 대전과 서울지역 강수의 안정동위원소 성분. 지질학회지 30, 475-481.
- 이광식, 정재일, 1997, 포항강수의 안정동위원소 조성 변화. 자원환경지질 30, 321-325.
- 이정환, 엄상호, 김종수, 1967, 포항천연가스후보지구 지질 및 물리탐사종합보고. 국립지질조사소, 44p.
- Barcelona, M.J., Gibb, J.P., Helfrich, J.A. and Garske, E.E., 1985, Practical guide for groundwater sampling. SWS Contract Report 374, 94p.
- Cotecchia V., Tazioli, G.S. and Magri, G., 1974, Isotope measurements in research on seawater intrusion in the carbonate aquifer of the Salentine Peninsular, southern Itali. In: Isotope technique in groundwater hydrology, I. IAEA, Vienna, 441-463.
- Gonfiantini, R., Dincer, T., and Derekoy, A.m., 1974, Environmental isotope hydrology in the Hodna-Algeria region. In: isotope techniques in groundwater hydrology, 1. IAEA, Vienna, 293-316.
- Hwang, I.G., 1993, Fan-delta systems in the Pohang basin(Miocene), SE Korea, PhD Thesis, Seoul Nat'l Univ. 97p.
- Kramer, J.R., 1968, Mineral-water equilibria in silicate weathering XXIII. Int. Geol. Cong. Vol.6, pp.149-160.
- Lee, H.S., 1977, Chemical composition of petrographic assemblage of igneous and related rocks in south Korea, J. Korea. Inst. Mining Geol., 10, 75-92.
- Nesbitt, H. W. and Young, G. M., 1984, Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic consideration, geochem, cosmochim, Acta, 48, 1523-1534.
- Payne, B.R., 1976, Environmental isotope as a hydrogeological tool. Arbistag. "Isotope in der Natur" Gera, Zri-Mitt., 5, 177-179.
- R. Revelle, 1941, Criteria for recognition of seawater in groundwater: Trans. Amer. Geophysical Union, Vol. 22, 593-597.
- Shibata, K., Uchita, S. and Nakagawa, T., 1979, K-Ar age result 1. Bull. Geol. Surv. Japan, 30, 675-696.
- Sohn Y. K., Rhee, C.W., and Sohn, H., 2001, Revised stratigraphy and reinterpretation of the Miocene Pohang basinfills, SE Korea: sequence development in response to tectonic and eustasy in a back-arc basin margin, Sedimentary Geology, 143, 265-285.
- Tardy, Y., 1971, Characterization of the principal weathering types by the geochemistry of waters from some European and African crystalline

massif. Chem. Geol., Vol.7, 253-271.

투 고 일	2005년	10월	12일
심 사 일	2005년	10월	13일
심사완료일	2005년	11월	29일

조병욱

한국지질자원연구원 지하수지열연구부  
305-350, 대전광역시 유성구 가정동 30

Tel: 042-868-3083

Fax: 042-861-9719

e-mail: cbw@kigam.re.kr

---

윤욱

한국지질자원연구원 지하수지열연구부  
305-350, 대전광역시 유성구 가정동 30

Tel: 042-868-3118

Fax: 042-861-9719

e-mail: yunuk@kigam.re.kr