

경북 영천지역 지하수의 지구화학 및 환경동위원소 연구

김건영^{1*} · 고용권¹ · 배대석¹ · 원종호² · 정도환³ · 최병영¹

¹한국원자력연구원, ²한국수자원공사, ³경북대학교

Geochemical and Environmental Isotope Study on the Groundwater from the Youngcheon Area, Gyeongbuk Province

Geon-Young Kim^{1*} · Yong Kwon Koh¹ · Dae Seok Bae¹ · Chong Ho Won²
Do-Hwan Jung³ · Byoung Young Choi¹

¹Korea Atomic Energy Research Institute

²Korea Water Resources Corporation

³Kyungpook National University

ABSTRACT

Geochemical and isotope studies on the groundwater system of the Youngcheon area were carried out. Most groundwaters belong to Ca-HCO₃ and Ca-SO₄ types and some groundwaters belong to Na-HCO₃ type. Geochemical characteristics of these groundwaters were mainly affected by their basement rocks around the boreholes. High SO₄ content of groundwater is the result of reaction with sulfate or sulfide minerals in the host rock. Ca was originated from the carbonate minerals in the sedimentary rock. After the groundwater was saturated with calcite, the Na-HCO₃ type groundwaters were evolved by the reaction with plagioclase for a relatively long residence time. This explanation was supported by low tritium contents of Na-HCO₃ type groundwaters. $\delta^{18}\text{O}$ and δD data indicate that the groundwaters are of meteoric water origin and there was no difference between the various types of waters. Groundwaters from the boreholes BH-1, BH-9 and BH-12 showed the geochemical and isotopic characteristics of deep groundwater. Most borehole groundwaters except them did not show the systematic geochemical variations with sampling depth indicating that the shallow and deep groundwaters were mixed with each other throughout the study area. The results of water quality analysis indicate that the study area is highly contaminated by the introduction of agricultural sewage.

Key words : Youngcheon, Groundwater geochemistry by depth, Isotope, Groundwater contamination

요 약 문

영천지역 지하수의 지구화학적 특성 연구를 수행하였다. 연구지역의 지하수는 Ca-HCO₃형에서부터 Ca-SO₄형까지의 영역에 해당하고 일부 시료는 Na-HCO₃형에 해당한다. 이들의 지구화학적 특성은 주로 시추공이 위치한 지역의 기반암에 의해 영향받았다. 국지적으로 퇴적암내의 황산염광물 및 황화광물과의 반응에 의하여 지하수내의 SO₄ 함량이 높은 지하수가 산출되며, Ca이온은 퇴적암내의 탄산염광물에서 유래되었다. Na-HCO₃형을 보이는 지하수는 초기에는 주로 방해석과의 반응에 의해 지하수내에 Ca 함량이 증가되었고, 방해석에 대해서 포화상태에 도달한 이후에는 주로 사장석과의 반응에 의해 지하수내 Na의 함량이 조절된 것으로 판단된다. 이와 같은 해석은 이들 지하수들의 낮은 삼중수소 함량으로 뒷받침된다. 수소 및 산소동위원소 분석결과에 의하면 연구지역 지하수는 모두 강수에서 기원하였으며 유형별로 명확히 구별되지 않는다. BH-1, BH-9, BH-12 지하수 수질은 화학적 및 동위원소적으로 심부지하수의 특성을 보여주며, 이들 시추공을 제외한 모든 시추공들에서 시료채취심도에 따른 지구화학적 및 동위원소 변화를 명확히 보여주지 않기 때문에 연구지역 전반에 걸쳐 천부지하수와 심부지하수의 혼합양

*Corresponding author : kimgy@kaeri.re.kr

원고접수일 : 2006. 2. 27 게재승인일 : 2007. 8. 22

질의 및 토의 : 2007. 10. 31 까지

상을 지시한다. 수질분석결과는 연구지역 전반에 걸쳐 농업활동에 의한 지하수 오염이 상당히 진행되고 있음을 알 수 있다.

주제어 : 영천, 심도별 지하수 지화학, 동위원소, 지하수 오염

1. 서 론

일반적으로 지하수의 수리화학적 특성은 지하수 부존 지역의 암석광물화학 및 지질 구조 등의 복합적인 지질학적 특성에 의해 영향을 받는다. 또한 지하심부의 암석 및 단열대 분포 특성에 따라 다양한 물-암석 반응을 거치면서 부존 심도에 따라 변화할 수 있다. 지역적으로는 주변 오염원에 의해 다양한 정도로 영향을 받기도 한다. 이에 관하여 최근 우리나라의 지하수에 관한 연구는 대부분 특정 연구지역의 지질 및 암종에 따른 지하수의 화학 및 다양한 동위원소분석 등을 중심으로 활발하게 이루어지고 있으며, 심부지하수의 생성과정 및 물-암석 반응관계에 대한 연구들도 활발히 수행되어 왔다(정찬호 외, 1995; 이종운 외, 1997; 윤성택 외, 1998; 이재영 외, 1998; Koh et al., 1998; 고용권 외, 2000, 2001; 김건영 외, 2000).

이 연구는 영천지역 지하수 기초조사의 일환으로 수행된 연구로서 연구지역내에 부존하는 여러 유형별 자연수(암반지하수 또는 심부 암반지하수, 충적층지하수, 천부지하수, 지표수, 강수)의 기원과 수리화학적 특성 및 진화양상, 그리고 그 상호관계를 규명하고자 하였다. 기존의 영천지역에 대한 연구로는 임하댐과 영천댐을 잇는 연장 33 km의 도수로 터널과 관련된 연구가 다수 수행된 바 있다(Koh, et al., 1998; 조병욱 외, 1999; 이병대 외, 2002). 그러나 이들의 연구범위가 도수터널내 혹은 터널 주변의 지하수시스템에 한정되었기 때문에, 실제 영천시 지역내에 분포하는 지하수에 대한 전반적인 수리지구화학적 특성은 보고된 바가 없다. 특히 영천시는 경상계 퇴적암 및 화산암과 화강암 등의 다양한 기반암으로 이루어져 있기 때문에, 지하수와 이들 암석 및 구성광물과의 반응에 의해 지하수화학이 영향받을 수 있다. 또한 연구지역 전반에 걸친 농작지역과 시 중심부의 생활주거지역때문에 인위적인 오염의 잠재성을 지니고 있으며 이들은 계절적인 강수량 변화에 의해 영향받을 수 있다. 이번 연구에서는 이처럼 연구지역의 지하수화학에 영향을 줄 수 있는 다양한 요소들에 대한 검토를 위해 연구지역의 유형별 자연수를 시기별, 심도별로 채수하고, 이들에 대하여 수리화학적 분석을 수행하였다.

2. 지형 및 지질 개요

연구지역의 지형은 서쪽으로 팔공산(1192.3 m)에서 시루봉(714.0 m), 은혜사에 이르는 NNE-SSW방향의 산계를 형성하고 있으며, 북쪽으로는 보현산(1124.4 m)을 중심으로 비교적 험준한 산세가 동서방향으로 이어져 있다. 동쪽방향으로는 비교적 완만하며 자호천 유역이 형성되어 있다. 연구지역의 지질개요는 한국자원연구소에서 발간된 안동(황재하 외, 1996) 및 부산 지질도폭 설명서(김동학 외, 1996)를 주로 인용하였다.

영천지역의 지질은 대부분 경상누층군으로 구성되어 있으며 경상계 퇴적암류는 지역적인 변화가 있긴 하지만 대체적으로 연녹색에서 흑회색계통의 세일, 석회암 및 사암으로 구성되어 있다. 하부로부터 하양층군에 속하는 후평동층, 점곡층, 사곡층, 춘산층 등의 퇴적암류가 주로 분포하며 이밖에 유천층군에 속하는 중성 및 염기성 화산암, 산성화산암, 안산암 및 안산암질 응회암 등이 분포한다. 이 중 후평동층의 하부는 적색미사질세일, 저색처트역 및 역암으로 구성된다. 상부는 조립 내지 세립사암, 미사암 및 미사질세일로 구성되고 세일은 저색을 띤다. 점곡층은 암회색 또는 녹회색사암과 세일의 호층으로 저색역암이나 역질사암 등이 협재하기도 한다. 사곡층은 주로 미사질세일 및 사암으로 구성되며 하위의 점곡층에 비하여 저색층이 협재됨이 특색이다. 춘산층은 주로 녹회색 내지 암회색 세일과 실트스톤으로 구성되고 담수성 석회암 또는 역암을 협재하며 하위의 사곡층과의 경계부에서는 적색층과 호층을 이룬다. 유천층군에 속하는 화산암류는 주로 연구지역의 북부에 분포하며 석영안산암질 내지 유문석영안산암질과, 유문암 및 유문암질 각력암으로 구성된다. 연구지역의 남부에는 안산암 및 안산암질 응회암이 분포하며 이 응회암의 기질은 회록색 내지 담록색을 띠며 사장석 입자를 다량 함유하는 것이 특징이다. 이밖에 백악기의 불국사 화강암류와 암맥들이 연구지역 전 지역에 걸쳐 산재하나 대부분 규모가 작다(Fig. 1). 연구지역의 지질구조의 주 분포방향은 연성전단대의 발달방향인 N70W 방향이 주로 발달 분포하고, 양산단층방향인 N20E 방향이 부수적으로 분포한다.

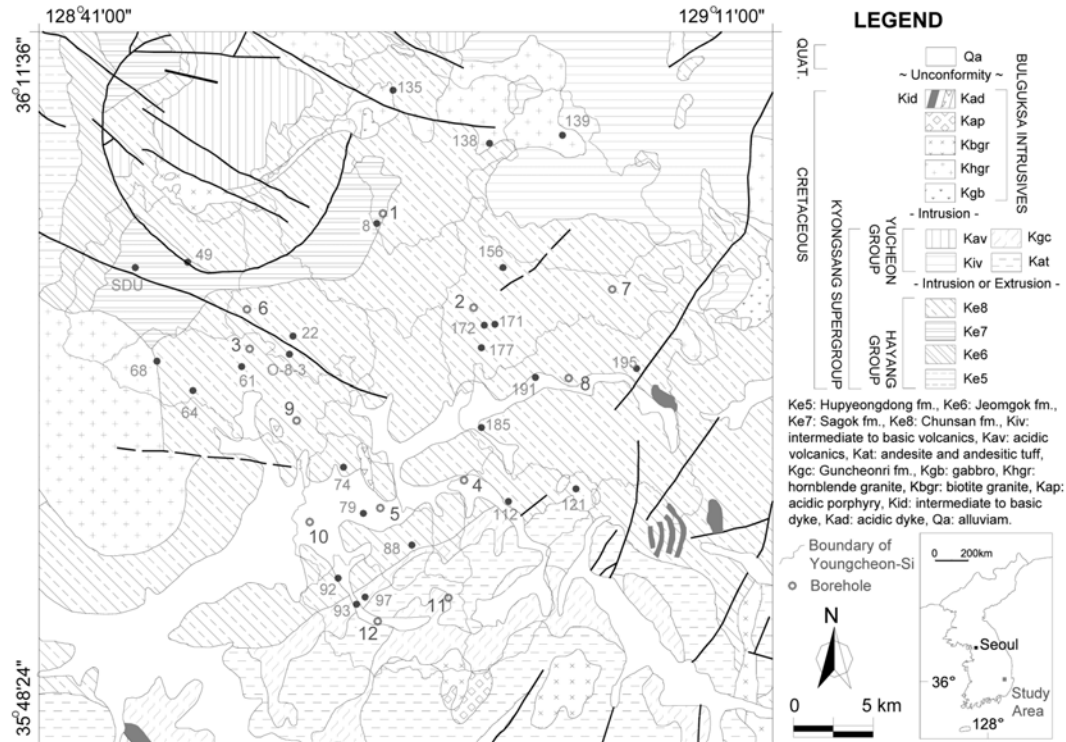


Fig. 1. Geologic map of the Youngcheon area. Sampling locations and fault system are also shown.

3. 시료채취 및 분석방법

영천지역에는 지하수 기초조사를 위하여 연구지역의 수문 순환계를 대표할 수 있는 총 12곳의 지역에 시추공(BH1~12)이 설치되어 있다(Fig. 1). 이 중 암반지하수가 10곳이며 충적층 지하수가 2곳이다. 각 시추공의 심도는 암반지하수의 경우 80~120 m의 심도로 작성되었으며 이 중 BH-3과 BH-5공은 시추완료후의 붕괴로 각각 32와 60 m의 심도를 갖는다. 2곳의 충적층 지하수는 10 m 내외의 심도로 작성되었다. 이들 시추공 지하수의 화학분석 및 환경동위원소 분석을 위하여 2001년 6월과 9월, 2회에 걸쳐 25-30 m 간격으로 심도별 채취를 수행하였으며 암반지하수 중 3곳을 선정하여 주변 지표수 3곳의 시료도 함께 채수하였다. 총 12곳의 시추공 중 4곳의 시추공에 대해서는 2001년 5월부터 11월 까지 7개월 동안 매 1개월마다 환경동위원소 분석을 위한 시료채취가 수행되었으며 이 경우에도 역시 25-30 m 간격으로 심도별 채취를 수행하였다. 이밖에 기존에 개발되어 있는 관정에서 26개소를 선정하여 화학분석 및 환경동위원소 분석을 위한 시료를 채수하였다. 이들의 심도는 대부분 5 m 이내로서(< 20 m) 천부지하수에 해당한다. 모든 암반 및 충적층지하수와 지표수, 천부지하수 16개소에 대하여는 수질분석

을 위한 시료채취도 수행되었다. 모든 심도별 시료채취시에는 나공상태에서 원하는 심도에 샘플러를 내린 후 지상에서 메신저를 하강시켜 상하뚜껑을 동시에 작동시켜 시료를 채취할 수 있는 Kemmerer water sampler(Model no. 304 SS)와 GRUNDFOS사의 Well Sampler(Model no. 1A106003)를 현장 상황에 따라 이용하였다. 앞으로 12곳의 시추공 지하수는 10곳의 암반지하수와 2곳의 충적층 지하수로 구분되고, 26곳의 기존관정 지하수는 천부지하수로 명칭한다.

모든 시료에 대하여 온도, 수소이온농도(pH), 산화-환원전위(Eh), 전기전도도(EC), 용존산소량(DO) 등의 물리화학적 특성자료를 Multi-parameter meter(Model Orion 1230)를 이용하여 현장에서 측정하였다. 시료의 주요 양이온 및 미량원소 함량은 한국기초과학지원연구원에서 유도결합플라즈마 방출분석기(ICP-AES, Shimadzu ICPS-11000 III)와 유도결합플라즈마질량분석기(ICP-MS, FISON PlasmaTrace)로 분석하였고 음이온은 한국원자력연구원내 이온 크로마토그래피(Dionex 500)를 이용하여 분석하였다. 산소 및 수소 안정동위원소 분석은 한국원자력연구원내 안정동위원소분석기(Model VG SIRA II 및 Micromass Optima)를 이용하였으며, 삼중수소(tritium)는 한국원자력연구원내 액체섬광계측기(Model Parkard Tricarb 2770TR/

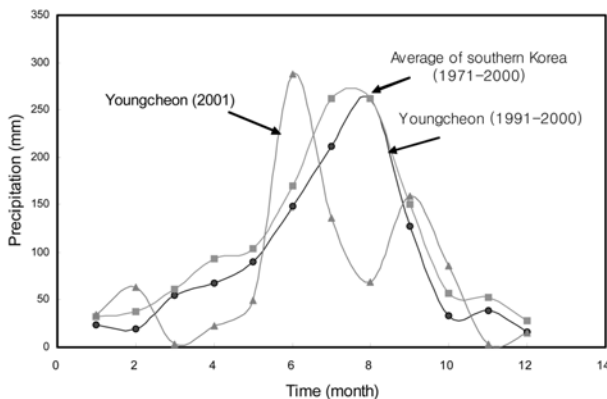


Fig. 2. Variations of monthly amount of precipitation.

SL)를 이용하여 분석하였다. 수질 분석은 경북 구미수질 분석소에서 먹는물 수질기준항목에 따라 분석하였다.

4. 결과 및 토의

4.1. 강수량

지하수의 수리지화학적 특성에 직접적으로 영향을 미칠 수 있는 영천지역의 강수량 변화를 고찰해 보았다. 영천 기상관측소의 관측자료를 토대로 과거 10여년간의 장기적인 강수량 변화를 살펴보면, 연구수행 직전 10년간 1991년~2000년 사이의 연평균 총강수량은 1,093 mm이며, 조사기간에 해당하는 2001년도의 총 강수량은 928.5 mm로서, 연구지역에서 10년 동안의 평균 강수량보다 약 160 mm 정도가 더 적다(www.kma.go.kr). 이는 또한 1971년부터 2000년까지의 우리나라 전체 평균강수량인 1,310 mm에 비해 380 mm나 적은 양이다. Fig. 2는 우리나라의 월별 평균강수량과 연구지역의 지난 10년간의 월별 평균강수량, 2001년의 월별 강수량을 도시한 결과이다. 연구지역의 지난 10년간의 월별 평균강수량변화는 우리나라 전체의 강수량 변화와 유사하게 7월과 8월에 집중적인 강수가 있었으나 2001년의 강수량변화는 예년과 달리 6월과 9월에 집중적으로 강수가 있었음을 알 수 있다. 영천지역의 2001년도 월별 강수량은 6월이 288 mm, 8월이 68.5 mm, 9월이 159 mm의 강수량을 기록하였다. 이번 연구를 위한 시추공의 심도별 시료채취기간은 6월 7일~13일, 9월 12일~13일로서, 이는 각각 장마기간 직전의 갈수기와 장마기간이 끝난 이후의 지하수 시료를 대표한다고 할 수 있다.

4.2. 현장수질 측정결과

영천지역의 조사대상 12개 시추공 지하수(10개의 암반

지하수와 2개의 충적층 지하수) 및 3개 지표수에 대한 6월 및 9월 심도별 채취시료에 대한 현장측정 및 화학분석결과를 Table 1에 나타내었다. 천부지하수에 해당하는 26개의 기존관정 지하수시료의 분석결과는 Table 2에 나타내었다.

대부분의 암반 지하수들은 pH가 6.4~8.1 범위의 값을 보인다. 시추공 및 주변 지표수에 대한 현장측정자료 중 pH 및 Eh값은 시료채취 시기에 따른 큰 차이를 보이지 않으나 전기전도도(EC) 값은 시추공에 따라 비교적 심한 변화를 보여주고 있다(Table 1). 용존산소량(DO)은 6월의 시료에 비해 9월에 채취된 시료에서 높은 값을 보인다. 시추공 주변 지표수의 경우에도 9월에 채취된 시료에서 현저하게 높은 용존산소량을 보인다. 이는 갈수기인 6월에 비해 9월은 장마기간을 지난 직후로 강수에 의해 영향 받은 결과로 해석될 수 있다. 특히 9월의 시료채취기간 직전인 9월 9일에 다량의 강수(76 mm/d)(www.kma.go.kr)가 있었으며, 따라서 이에 의해 시추공 전체에 걸쳐 지표수 및 천부지하수의 혼합이 일어나서 심도별 시료에서도 높은 용존산소량을 보여주는 것으로 사료된다. 그러나 전기전도도값에서는 강수에 의한 희석효과가 뚜렷이 나타나고 있지 않기 때문에 온도 변화에 따른 유기물 활동 정도에 의한 용존산소량의 변화가능성도 배제할 수 없다. 천부지하수의 경우 pH는 6.1~7.8로서 시추공지하수와 유사한 값을 보인다. 전기전도도값은 시추공지하수와 마찬가지로 관측공에 따라 비교적 심한 변화를 보여준다(Table 2). 현장측정결과를 전체적으로 도시하였을 경우 점진적인 물-암석 반응에 의한 pH의 증가에 따른 전기전도도의 증가경향(Hounsflow, 1995)을 보여주며 pH와 Eh의 관계에서는 뚜렷한 상관관계를 보여주지 않는다(Fig. 3).

4.3. 용존이온 분포특성

연구 지역의 자연수 속에 용존되어 있는 주요 이온들의 함량은 시추공 위치 및 시료채취 심도에 따라 변화가 심하다(Table 1). 미량원소로는 Fe, Mn, Sr, Li, B, Ba 등이 지역에 따라 함량 변화가 매우 크다. 중금속의 함량은 대체로 낮으나 Zn의 경우 지역에 따라 심한 차이를 보이면서 BH-5공에서는 최대 약 8 mg/L까지의 높은 함량을 보여 케이싱의 부식에 의한 영향 가능성을 지시한다. 전체적으로는 시추공 및 관정이 위치한 지역에 따라 용존이온이 상대적으로 심한 함량 차이를 보이고 있다. 특히 기존 관측공에서 채취된 천부지하수들은 비교적 서로 비슷한 용존이온 분포특성을 보이지만 시기별, 심도별로 채취한 10개 시추공의 암반지하수 경우는 Na(5.9~399.7 mg/L), Ca(8.6~291.5 mg/L), Mg(2.2~179.6 mg/L), Cl(3.0~

Table 1. Physicochemical data of water samples from the Youngcheon Area

Borehole No.	Sampling Date	Depth (m)	Temp. (°C)	pH	Eh (mV)	EC (μS/cm)	DO (mg/L)	TDS (mg/L)	Na/Ca (mol)	Na	K	Mg	Ca	SiO ₂	Cl	SO ₄	HCO ₃	NO ₃	F	Al	Fe	Mn	Sr	Li	B	Ti	Ni	Cu	Zn	Ba	Pb	
										Dissolved constituents of major elements (mg/L)										Dissolved constituents of minor elements (μg/L)												
Borehole Groundwater(Alluvium)																																
BH-2	01-6-14	5	16.4	6.4	512	196	0.0	146	0.74	7.4	8.6	4.0	17.4	12.3	5.2	18.3	54.6	17.1	0.52	11.6	29.0	3.8	127	0.2	47.7	0.65	0.28	0.92	86.4	71.6	2.14	
^a (10)	01-9-12	5	19.0	6.6	594	261	4.9	241	1.10	19.0	2.1	5.2	30.1	19.0	6.1	6.0	146.5	5.5	0.49	2.7	0.0	11.9	1373	15.4	106.1	0.39	2.48	1.20	1592.0	70.8	0.45	
BH-4	01-6-13	5	14.8	7.1	452	628	0.5	337	0.49	15.6	1.8	17.3	55.1	10.9	35.0	44.8	41.9	114.3	0.20	15.9	44.5	69.9	421	6.3	66.7	1.14	2.07	5.08	41.6	288.8	3.03	
(11)	01-9-12	5	17.6	6.7	458	663	5.0	528	0.52	22.8	2.3	25.5	76.0	13.7	43.9	20.1	253.2	69.7	0.09	26.0	28.9	11.3	480	3.8	47.0	1.28	5.19	1.07	14.6	108.0	6.51	
Borehole Groundwater(Basement rock)																																
BH-1	01-6-8	10	17.6	7.3	410	1049	0.0	831	1.18	62.9	1.6	49.8	92.8	19.4	21.0	292.7	269.3	16.9	0.07	0.3	42.0	50.1	4801	130.3	471.9	2.82	1.63	0.60	91.5	99.1	0.13	
(80)		40	17.5	7.0	367	1843	0.0	1466	1.61	139.4	2.6	88.6	150.8	19.9	21.2	666.2	357.5	11.4	0.00	<0.2	40.4	140.3	7855	271.5	857.2	6.55	2.85	1.24	94.0	58.2	0.10	
		70	17.5	6.7	815	3530	0.0	3178	2.56	374.8	6.0	114.9	254.9	20.7	23.9	879.0	1239.5	0.6	1.13	2.0	45.0	508.2	12315	736.8	2033.0	18.08	6.05	2.77	103.3	53.0	0.15	
	01-9-13	10	16.8	7.1	353	1202	5.0	1100	1.44	87.9	2.0	59.7	106.6	19.5	22.8	106.5	680.8	8.2	0.10	8.6	22.3	47.5	6020	165.9	484.6	4.96	9.55	2.27	70.1	60.7	0.14	
		40	16.5	6.9	330	1991	5.9	1858	1.90	181.9	3.2	100.5	167.2	20.4	22.9	194.4	1153.5	5.7	0.69	5.8	39.6	93.4	7852	303.5	870.3	6.81	8.05	2.16	84.8	33.0	0.11	
		70	17.0	6.8	317	3380	5.2	3642	2.39	399.7	6.6	179.6	291.5	21.8	25.8	331.5	2369.9	0.6	1.12	2.7	93.2	357.1	13473	724.4	2132.0	15.40	15.05	3.92	36.6	13.1	0.18	
BH-3	01-6-8	10	19.3	6.9	416	467	2.7	371	0.66	17.8	3.9	17.8	47.2	19.3	31.5	39.5	169.9	22.8	0.34	18.7	55.0	26.5	346	18.0	106.7	0.96	2.16	5.95	1137.0	190.4	0.56	
(60)		50	18.2	7.1	403	496	1.8	404	0.52	16.9	2.8	17.9	56.4	22.4	31.4	36.3	190.6	28.7	0.31	5.9	41.6	22.3	353	28.4	62.8	0.66	1.65	2.86	647.0	233.0	0.66	
	01-9-13	10	17.9	6.6	382	447	4.8	376	0.69	18.2	2.4	22.5	46.0	24.4	34.3	12.6	204.2	10.5	0.22	117.0	296.0	66.1	292	6.2	20.3	1.57	3.05	1.68	617.0	125.3	9.75	
		50	17.5	6.8	362	516	4.2	437	0.51	18.3	1.8	21.3	62.9	27.0	35.2	13.0	240.3	16.6	0.10	42.6	56.1	22.7	323	12.5	19.4	1.09	3.63	1.19	220.0	177.2	1.43	
BH-5	01-6-7	10	14.0	6.9	362	774	5.6	536	0.68	31.1	5.5	25.4	80.0	16.0	69.6	44.8	242.5	17.9	0.10	5.0	93.4	115.2	2769	9.7	99.6	0.76	3.79	2.10	8134.0	242.9	1.35	
(32)		50	15.1	7.1	344	736	4.2	615	0.69	34.6	4.8	27.6	87.2	16.4	78.1	48.6	294.3	19.7	0.10	6.8	71.1	123.3	3853	12.4	99.1	1.01	4.81	1.94	6179.0	232.5	0.60	
	01-9-12	10	16.5	7.1	413	824	2.9	688	0.65	37.5	4.8	32.5	100.5	16.7	95.2	17.8	371.1	6.1	0.12	17.0	35.9	48.8	5225	6.9	61.8	1.17	7.29	1.73	3017.0	168.5	2.97	
		50	16.0	7.0	391	868	4.9	707	0.66	39.5	4.4	34.0	103.9	16.4	98.4	18.2	379.7	6.4	0.10	10.5	3.8	40.9	5716	6.6	60.1	1.09	7.05	0.78	249.8	165.9	0.11	
BH-6	01-6-8	20	15.2	6.9	401	579	3.0	457	0.45	15.3	2.2	27.2	59.1	17.1	26.7	49.3	201.6	57.1	0.16	20.0	52.6	17.8	783	27.9	97.7	1.01	2.19	1.63	92.9	283.8	0.15	
(100)		40	15.3	7.0	408	581	1.1	456	0.49	17.7	1.9	27.2	62.6	18.1	25.9	38.8	213.1	49.0	0.12	41.8	41.9	24.6	1257	39.0	103.4	1.15	1.88	1.45	91.0	235.7	5.51	
		70	16.3	7.1	352	595	0.3	483	0.50	18.1	1.8	27.3	63.7	18.1	25.1	38.6	239.5	49.0	0.11	29.6	60.9	20.1	1636	41.7	113.8	1.10	2.11	1.62	95.2	213.4	0.45	
		95	16.6	7.3	362	619	0.2	506	0.48	18.6	1.6	27.5	67.7	17.7	25.8	37.5	255.1	51.5	0.13	33.1	<0.02	3.2	2731	39.5	121.2	1.41	2.10	1.63	6.4	126.8	<0.05	
	01-9-13	20	16.6	6.7	380	548	4.4	506	0.44	16.6	1.8	29.6	65.7	20.7	17.9	12.3	324.7	15.8	0.09	3.9	22.0	5.6	783	14.6	49.9	0.71	4.33	1.43	18.5	192.1	0.08	
		40	15.3	6.8	387	560	4.6	512	0.46	17.5	1.7	30.1	66.9	20.4	19.9	11.1	327.9	15.2	0.08	4.9	0.0	7.8	1092	16.2	52.9	0.64	4.51	1.20	12.4	175.6	0.05	
		70	15.6	6.8	358	584	5.7	517	0.46	17.8	1.6	30.0	68.1	20.4	19.2	10.9	331.4	16.1	0.14	5.1	26.0	5.4	1307	16.7	58.0	0.66	4.89	1.14	10.0	165.5	<0.05	
		95	16.2	7.0	363	617	4.7	545	0.44	18.4	1.6	30.1	73.2	20.5	20.1	10.5	353.5	14.6	0.10	4.5	37.0	4.3	1998	27.4	72.7	0.43	5.24	1.33	7.8	140.3	0.06	
BH-7	01-6-13	10	15.7	6.5	466	331	2.1	137	0.51	6.6	2.9	4.4	22.3	9.0	13.6	20.2	42.7	15.1	0.41	3.8	73.2	2.8	174	0.4	21.3	0.69	0.96	1.25	787.2	44.0	0.85	
(100)		40	15.3	6.4	496	334	1.7	115	0.57	5.9	2.9	3.5	18.3	7.8	13.7	21.6	24.8	15.8	0.40	8.8	107.8	4.6	143	1.1	21.9	0.59	0.83	0.99	931.9	40.3	1.09	
		70	15.2	6.8	500	376	0.3	464	0.74	31.2	1.6	5.9	73.7	17.9	8.7	61.6	254.3	7.7	0.93	14.3	<0.02	5.7	508	23.3	57.0	1.56	1.16	0.65	342.3	31.5	0.38	
		95	15.8	6.9	484	383	0.0	474	0.83	34.9	1.2	4.4	73.8	18.3	6.7	74.6	253.9	4.2	1.09	14.6	<0.02	5.1	537	29.2	67.2	1.62	1.11	0.67	236.8	24.9	0.16	
	01-9-12	10	19.5	6.5	399	223	2.9	178	0.52	7.6	3.1	5.5	25.3	13.2	6.7	3.7	105.8	6.6	0.48	8.5	0.0	3.9	178	0.4	16.5	0.35	2.26	1.76	1272.0	28.4	1.44	
		40	17.0	6.6	580	380	3.9	272	0.55	13.2	2.8	6.8	41.6	16.8	13.7	17.8	144.4	14.3	0.54	4.2	29.6	9.3	315	6.7	31.9	1.02	3.55	1.44	801.0	31.3	0.49	
		70	16.7	7.4	585	399	3.3	260	0.83	19.4	0.7	2.2	41.0	21.1	5.1	35.0	134.0	0.9	0.80	4.1	36.3	2.4	357	16.0	43.5	1.51	3.21	1.05	42.0	16.8	0.16	
		95	17.2	7.5	565	400	5.2	212	0.79	15.0	1.2	2.8	33.3	19.2	6.5	29.7	100.0	3.2	0.64	4.6	44.9	6.9	290	13.7	40.0	1.33	3.21	0.84	226.0	18.5	0.25	
BH-8	01-6-7	10	20.1	6.5	835	742	4.0	545	0.46	22.2	5.2	20.8	83.2	12.9	41.3	87.4	129.7	141.9	0.09	13.2	<0.02	20.5	665	3.0	115.7	2.07	2.61	3.22	76.2	236.2	0.50	
(80)		40	17.3	6.7	393	695	4.8	521	0.44	20.9	4.2	19.1	82.7	12.6	40.8	80.5	139.6	119.9	0.11	0.5	<0.02	7.5	854	3.1	108.2	1.51	2.09	1.83	83.5	216.5	0.06	
		70	17.7	7.3	381	667	3.0	513	0.48	24.2	3.0	16.1	87.2	13.7	32.2	67.6	213.6	53.2	0.12	1.2	<0.02	1.5	2618	16.5	75.1	1.48	2.23	1.05	11.4	83.5	0.09	
	01-9-12	10	22.8	6.4	613	382	3.2	178	0.60	7.8	4.9	7.5	22.6	15.4	15.6	15.5	66.6	21.3	0.05	3.4	69.2	3.8	203	0.6	66.9	0.86	2.92	3.31	107.2	114.8	0.27	
		40	19.6	6.6	565	388	4.4	287	0.57	14.9	4.5	6.3	45.3	14.2	15.4	15.3	152.7	17.9	0.30	2.1	87.3	4.7	388	1.0	66.8	0.82	3.22	2.34	102.0	101.1	0.18	
		70	19.8	6.9	495	527	2.6	360	0.50	15.8	4.7	12.5	55																			

Table 1. Continued

Borehole No.	Sampling Date	Depth (m)	Temp. (°C)	pH	Eh (mV)	EC (μS/cm)	DO (mg/L)	TDS (mg/L)	Na/Ca (mol)	Na	K	Mg	Ca	SiO ₂	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	Al	Fe	Mn	Sr	Li	B	Ti	Ni	Cu	Zn	Ba	Pb	
										Dissolved constituents of major elements (mg/L)										Dissolved constituents of minor elements (μg/L)												
Borehole Groundwater(Basement rock)																																
BH-9 (100)	01-6-8	10	17.2	7.5	339	615	0.7	534	0.78	27.8	0.8	23.7	62.1	27.9	4.7	88.7	281.3	0.0	0.16	3.5	53.3	24.8	16434	47.3	271.0	1.53	0.95	0.65	108.7	39.6	0.06	
		40	17.2	7.5	373	610	0.5	521	0.78	27.7	0.7	24.1	61.7	28.3	4.6	89.0	268.3	0.0	0.16	0.6	54.1	20.0	16641	45.7	247.0	1.47	0.74	0.23	6.3	37.3	0.90	
		70	17.5	7.5	334	765	0.0	634	0.86	38.5	0.9	24.8	77.9	26.6	3.1	216.8	219.1	0.0	0.26	<0.2	<0.02	22.9	26296	58.2	359.0	2.90	1.09	0.44	4.6	21.3	0.65	
	01-9-13	95	17.9	7.5	709	790	0.0	673	0.90	42.1	1.0	25.0	81.5	25.8	3.0	236.6	231.3	0.0	0.29	18.5	106.9	25.6	26142	62.2	383.0	3.60	1.31	0.77	7.3	17.8	0.07	
		10	17.5	7.3	442	642	5.2	635	0.93	38.5	0.8	26.9	72.5	29.5	5.0	41.0	402.8	0.1	0.17	2.6	178.2	12.4	17773	20.2	129.4	1.65	3.56	0.61	6.7	32.6	0.09	
		40	17.0	7.3	385	658	5.7	644	0.94	40.1	0.8	26.6	74.1	28.7	4.9	44.7	403.5	0.0	0.17	2.8	204.0	12.2	20244	19.6	131.4	1.53	3.30	0.59	7.8	26.6	0.09	
		70	17.0	7.3	394	783	5.0	781	1.04	52.4	1.0	27.6	87.7	27.2	4.2	73.4	479.8	0.0	0.12	4.1	211.5	13.4	27518	24.0	185.0	2.79	4.31	0.57	6.1	16.6	0.06	
		95	17.3	7.3	366	843	5.9	826	1.07	59.0	1.1	28.0	96.6	27.0	3.3	98.3	488.3	0.0	0.34	3.5	265.3	14.8	23899	25.5	215.7	3.20	4.70	0.77	6.6	14.7	0.08	
		BH-10 (100)	15	17.0	7.4	376	910	4.6	648	0.55	31.2	1.5	30.0	98.8	21.3	80.3	32.8	237.2	114.5	0.10	2.1	<0.02	1.5	558	69.0	77.7	0.91	2.41	0.80	22.1	202.5	<0.05
			40	16.0	7.3	363	892	3.5	662	0.56	31.3	1.6	31.7	96.7	21.6	79.5	37.4	234.7	127.0	0.10	11.9	<0.02	2.0	698	71.0	71.0	1.09	9.09	1.18	15.6	175.8	<0.05
70	16.6		7.3	391	895	3.5	653	0.56	31.2	1.6	31.4	97.7	21.5	66.8	33.7	256.9	111.7	0.09	2.3	<0.02	1.0	724	73.4	65.7	1.03	2.60	0.88	8.5	170.8	<0.05		
95	16.9		7.3	393	902	5.9	661	0.56	31.2	1.7	31.3	97.8	21.8	70.8	35.8	252.8	117.1	0.06	13.5	<0.02	2.9	936	73.4	73.2	1.12	2.52	0.84	8.0	160.1	<0.05		
15	17.0		7.2	603	894	6.2	746	0.63	40.6	1.6	33.6	112.4	22.2	90.6	11.7	377.5	55.0	0.10	32.9	86.8	6.8	548	22.5	36.0	1.21	5.93	1.55	80.3	198.8	0.71		
BH-11 (80)	01-6-13	40	16.3	7.2	562	890	6.1	746	0.61	38.5	1.7	35.7	109.8	22.6	80.1	13.0	384.0	59.4	0.13	3.9	0.0	1.4	662	25.2	35.8	0.83	5.94	1.01	23.9	165.6	0.12	
		70	16.7	7.4	542	883	6.3	747	0.62	37.9	1.7	35.2	106.1	22.4	76.3	12.2	395.6	59.0	0.08	3.9	0.0	1.5	727	25.3	35.3	0.85	5.99	0.93	15.8	155.8	0.09	
		95	17.4	7.4	523	875	5.4	752	0.65	38.9	1.9	34.4	104.9	21.9	77.6	12.8	399.2	59.7	0.07	1.6	0.0	2.2	1057	26.1	39.2	0.77	6.13	0.99	12.6	134.4	0.08	
	01-9-13	10	16.4	7.7	455	373	0.0	418	0.60	22.2	1.0	11.1	64.3	22.8	20.3	9.1	245.7	20.8	0.41	15.9	<0.02	8.8	310	14.6	113.6	0.41	2.94	3.54	520.3	40.7	0.22	
		40	15.9	7.7	452	330	0.0	408	0.54	19.4	1.1	10.1	62.4	21.0	19.1	7.5	247.3	19.0	0.43	4.4	<0.02	34.8	333	14.4	149.9	0.31	1.65	0.75	452.9	53.5	<0.05	
		70	16.1	7.8	445	328	0.0	389	0.53	18.4	1.3	9.9	60.9	20.5	19.2	7.1	232.2	18.8	0.25	4.6	<0.02	38.5	394	14.8	200.2	0.34	1.69	0.33	182.9	74.8	<0.05	
		10	16.2	7.7	575	339	5.5	276	0.56	13.6	0.7	9.8	42.8	21.4	23.9	2.6	150.2	10.8	0.31	2.0	0.0	4.3	196	8.8	70.8	<0.2	2.90	0.68	120.1	17.5	0.17	
		40	16.0	7.7	501	337	5.3	274	0.52	12.9	0.7	9.1	42.7	21.2	22.9	2.6	150.5	10.3	0.31	5.1	0.0	4.9	207	9.1	87.2	<0.2	2.95	0.63	52.8	26.5	0.18	
		70	16.2	7.6	491	340	3.6	283	0.53	12.9	0.8	9.9	42.7	21.2	20.9	2.3	164.0	7.8	0.19	4.2	0.0	2.3	270	9.6	85.9	<0.2	3.14	0.61	20.8	133.7	<0.05	
		BH-12 (120)	01-6-7	10	19.2	8.0	352	951	0.0	680	30.35	175.6	2.7	6.0	10.1	16.1	23.0	72.2	371.0	0.0	0.79	1.3	<0.02	3.6	2824	730.0	3364.0	0.77	<0.2	0.21	1.6	20.9
40	17.9			8.0	343	951	0.0	681	30.46	178.6	2.7	6.0	10.2	15.8	24.2	76.3	363.5	0.0	0.82	4.3	32.2	3.1	2850	726.0	3399.0	0.99	<0.2	<0.2	4.8	18.4	<0.05	
80	18.0			8.0	348	953	0.4	688	30.37	178.8	2.7	6.1	10.3	16.0	24.4	77.1	369.1	0.0	0.83	<0.2	<0.02	2.2	2912	734.0	3419.0	0.72	<0.2	<0.2	2.5	16.7	0.12	
01-9-13	110		18.3	8.1	292	961	0.0	672	35.58	175.3	2.6	5.0	8.6	15.9	23.4	76.5	361.8	0.0	0.86	6.5	41.3	2.0	2480	747.0	3375.0	0.87	<0.2	0.22	4.6	16.3	<0.05	
	10		20.1	7.8	442	999	5.0	826	33.91	209.9	3.0	6.1	10.8	15.0	28.5	28.1	521.1	0.0	0.82	14.3	48.6	3.9	2603	427.4	3740.0	0.98	0.81	0.73	14.9	25.7	0.55	
	40		17.4	7.8	375	972	5.4	841	34.91	212.3	3.0	6.4	10.6	15.5	34.1	29.6	525.6	0.0	0.83	3.9	55.3	2.6	2654	433.1	3750.0	0.86	0.76	0.52	8.6	20.7	0.37	
	80		17.5	7.8	354	976	3.8	840	41.51	219.8	3.0	5.4	9.2	15.2	27.3	28.0	528.9	0.0	0.86	5.4	51.8	2.1	2351	449.1	3820.0	0.86	0.71	0.59	5.3	18.6	0.55	
	110		17.6	7.9	355	1035	3.5	864	37.98	223.7	3.0	6.0	10.3	15.1	27.2	29.4	545.3	0.0	0.92	4.5	55.8	2.5	2622	473.1	3992.0	0.88	0.84	0.43	4.7	18.8	0.45	
Surface Water																																
BH-6S	01-6-14		18.8	7.4	437	345	0.0	191	0.47	6.8	6.5	7.5	25.6	9.0	17.6	22.0	71.7	23.6	0.66	25.1	99.9	1.2	267	1.4	41.9	1.29	0.95	2.82	1.7	51.8	<0.05	
	01-9-13		22.9	7.8	362	335	5.0	266	0.42	9.4	5.3	11.9	38.6	10.7	13.9	8.0	157.0	10.7	0.38	24.6	<0.02	5.3	382	2.1	38.8	0.45	3.09	1.51	2.0	46.8	0.06	
BH-8S	01-6-13		18.3	7.1	474	310	1.5	349	0.90	24.8	3.4	9.4	47.8	7.7	18.1	27.4	197.3	12.4	0.42	28.6	22.6	17.2	366	3.6	47.6	1.11	0.70	1.42	13.1	75.0	0.84	
	01-9-12		23.6	6.9	575	282	4.4	224	0.70	12.5	3.6	8.0	31.4	11.4	11.5	6.8	133.4	4.4	0.35	3.4	<0.02	12.8	247	1.6	34.0	0.32	2.92	1.14	3.9	58.7	<0.05	
BH-12S	01-6-13		19.2	7.3	474	399	1.8	483	0.63	24.5	3.1	15.1	68.0	9.5	20.8	29.6	297.3	13.7	0.38	17.8	<0.02	22.3	541	4.5	180.8	1.23	1.09	1.71	26.1	57.1	0.06	
	01-9-13		20.9	7.7	411	346	3.1	297	0.66	15.6	3.5	12.1	41.1	10.4	12.6	7.5	191.1	2.2	0.33	14.4	<0.02	14.6	390	9.4	155.4	0.44	3.31	0.97	2.8	40.8	0.13	

Table 2. Physicochemical data of shallow groundwater samples from the Youngcheon Area

Borehole	Sampling	Total	Temp.	pH	Eh	EC	DO	TDS	Na	K	Mg	Ca	SiO ₂	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	Al	Fe	Mn	Sr	Li	B	Ti	Ni	Cu	Zn	Ba	Pb
No.	Date	Depth(m)	(°C)	(mV)	(μS/cm)	(mg/L)	(mg/L)		Dissolved constituents of major elements (mg/L)										Dissolved constituents of minor elements (μg/L)											
8	01-7-10	4	22.8	6.5	433	417	3.6	281	13.6	26.7	9.4	27.0	17.0	16.9	8.7	138.8	22.0	0.41	59.5	<1.0	3.8	144.79	1.3	74.2	1.38	4.15	4.78	128.8	385	80.9
22	01-7-10	5	22.7	7.6	450	811	4.5	562	57.2	21.8	20.5	59.8	7.2	99.7	18.3	245.6	31.5	0.12	120.1	20.8	7.7	427.49	3.1	94.9	2.04	10.08	7.58	165.5	254	7.1
49	01-7-10	5	22.7	6.2	457	258	3.7	200	9.2	5.0	6.9	24.2	16.0	8.6	5.3	102.6	21.2	0.83	6.3	<1.0	1.9	196.74	0.7	21.5	0.69	1.65	3.39	12.0	39	3.6
61	01-7-10	12	22.6	6.2	474	523	3.4	379	13.7	16.7	13.5	51.7	21.5	22.2	11.3	227.7	0.0	0.17	50.6	31.2	6.1	446.38	3.2	178.0	2.15	4.78	7.80	182.3	472	13.0
64	01-11-21	5	10.9	6.8	395	159	7.2	156	8.3	0.7	4.7	14.3	25.8	4.3	5.4	78.1	6.1	0.40	1.3	0.0	0.1	7495	14.9	0.3	1.03	11.35	68.50	1.2	12	0.1
68	01-7-10	4	22.9	6.7	463	546	3.6	359	25.4	14.0	10.4	45.4	19.4	33.5	14.5	168.4	27.2	0.34	48.9	29.2	2.2	376.79	1.4	139.2	1.75	3.75	5.28	90.9	322	37.3
74	01-7-10	3	23.4	7.2	435	593	3.6	451	14.1	12.7	18.5	63.7	18.0	28.0	14.3	230.6	50.3	0.40	39.3	37.5	7.1	378.17	1.9	70.6	1.70	10.62	116.88	252.0	549	58.2
79	01-7-10	17	22.8	6.4	465	454	3.6	312	15.6	6.0	12.2	42.9	13.9	22.1	14.1	140.2	44.2	0.36	41.4	31.2	4.4	450.08	1.1	75.5	2.21	26.96	6.40	63.8	177	131.9
88	01-11-21	3	10.2	7.1	380	645	4.9	639	21.0	3.5	34.0	64.4	21.1	13.9	23.3	405.2	18.2	0.06	1.0	0.0	0.1	34120	47.3	0.5	<1.0	0.61	5.18	8.7	106	<0.01
92	01-7-10	4	23.4	7.1	436	426	3.4	356	10.3	23.3	6.6	49.4	20.2	14.1	7.9	193.6	29.5	0.43	49.7	42.5	8.9	211.23	2.1	72.6	1.51	4.25	8.65	82.6	208	93.6
93	01-11-21	10	11.2	6.6	391	576	5.6	450	20.7	1.3	20.3	60.5	15.1	28.3	62.2	175.1	61.9	0.17	0.8	0.0	0.2	4193	76.1	1.4	<1.0	2.54	14.19	8.1	94	0.1
97	01-7-10	2	23.3	7.2	435	241	3.9	167	7.9	1.7	6.9	24.9	4.4	5.6	5.4	55.6	54.0	0.63	53.5	<1.0	1.1	249.73	7.9	121.9	0.91	1.74	1.65	25.9	66	3.1
112	01-7-10	7	22.8	7.0	445	605	3.6	467	44.2	15.4	17.1	46.0	16.5	42.6	21.8	253.5	9.5	0.28	113.2	49.9	4.7	387.1	7.2	158.2	2.42	38.82	10.65	95.6	399	96.9
121	01-7-10	2	23.3	7.0	450	576	2.3	484	43.1	7.3	18.9	49.9	20.3	17.8	7.8	315.0	2.2	0.19	24.9	<1.0	1.8	1347.8	105.7	368.0	1.23	4.37	2.14	106.1	379	15.7
135	01-7-10	4	22.5	6.2	460	532	3.4	424	29.9	80.1	7.3	15.2	28.4	33.6	9.4	178.2	41.0	0.25	183.4	55.8	6.7	121.2	0.8	152.8	2.19	7.60	14.25	198.0	382	19.1
138	01-7-10	1	22.6	6.4	493	161	3.5	144	12.3	2.2	1.9	14.7	33.2	5.4	1.8	68.1	3.0	1.32	93.5	<1.0	3.1	70.868	13.5	66.1	0.88	4.15	4.63	151.7	182	25.3
139	01-7-10	2	22.4	6.4	473	47	3.9	55	4.1	0.8	0.8	4.9	15.1	1.9	1.1	25.0	0.3	0.61	109.1	103.8	11.0	33.973	0.6	43.3	4.60	2.19	6.32	167.4	143	40.9
156	01-7-10	4	22.7	6.1	494	246	3.9	186	8.3	4.2	6.6	23.6	19.9	9.4	8.0	92.6	12.3	0.47	52.9	<1.0	1.5	201.82	2.4	58.0	1.31	5.94	3.78	107.1	169	65.0
171	01-7-10	3	22.5	6.6	448	198	3.5	161	8.4	11.3	3.4	18.7	13.1	7.0	3.2	85.8	8.4	0.64	970.0	624.0	176.6	89.828	1.5	78.7	12.32	5.16	12.30	180.0	799	44.1
172	01-11-21	7	8.9	6.6	369	441	7.1	294	27.2	30.3	8.8	21.8	17.7	62.8	28.6	45.6	50.8	0.21	1.2	0.0	0.1	581	18.1	1.3	<1.0	0.71	1.36	10.7	120	<0.01
177	01-7-10	2	22.6	6.1	462	360	3.9	274	14.4	8.7	9.7	35.3	14.9	20.7	10.7	144.4	14.9	0.43	31.3	36.0	3.2	305.06	0.7	119.6	1.36	13.45	2.98	170.0	843	7.0
185	01-7-10	3	22.9	6.5	475	1018	2.7	638	33.8	17.1	26.1	85.0	27.6	55.3	26.7	365.4	0.2	0.08	14.4	<1.0	13.6	430.64	2.1	166.4	1.50	18.78	29.62	122.3	304	2.7
191	01-7-10	6	22.5	6.6	459	465	2.9	325	26.0	13.0	11.7	33.6	17.5	26.3	8.5	167.1	20.4	0.36	52.7	47.7	4.6	229.45	0.8	85.2	1.46	4.29	8.80	103.9	332	59.8
195	01-7-10	6	22.8	6.5	433	417	3.6	360	23.4	19.7	12.4	35.4	26.1	27.6	10.5	165.4	38.9	0.35	19.5	<1.0	0.9	365.68	1.1	48.2	1.20	4.93	2.54	59.3	136	48.9
0-8-3	01-11-21	5	9.9	6.4	383	429	6.2	323	11.2	12.1	11.7	44.6	17.5	25.4	35.0	107.1	55.6	0.26	1.0	0.0	0.1	2139	52.1	0.9	<1.0	0.69	1.36	8.4	97	<0.01
SDU	01-11-21	5	10.3	7.8	223	314	9.1	269	9.6	0.9	8.6	37.1	17.1	6.2	9.0	158.0	12.7	0.29	0.7	0.0	0.1	9675	18.8	1.5	1.31	4.34	144.60	22.3	244	0.2

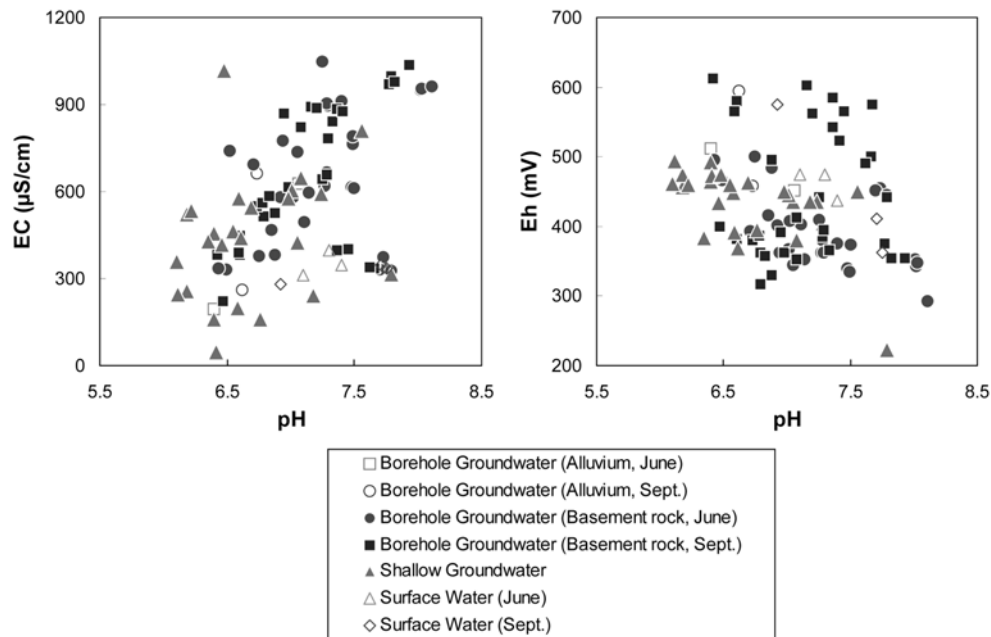


Fig. 3. Plots of pH versus A) electrical conductivity (EC) and B) Eh of water samples from the Yeongcheon area.

98.4 mg/L), SO_4 (2.3~879.0 mg/L) 등의 용존이온 함량변화가 매우 크다. 이는 시추공이 위치한 지역의 다양한 지질을 반영하는 것으로 해석할 수 있다. 또한 시추공 지하수의 경우, BH-9와 BH-12번공을 제외하고는, 인위적 오염의 지표인 NO_3 함량이 매우 높은 값(< 141.9 mg/L)을 보인다. 시추공뿐 아니라 기존 관측공에서 채취된 지하수의 경우도 대부분 높은 값을 보이고 있기 때문에(< 61.9 mg/L) 연구지역 전반에 걸쳐 농업활동에 의한 지하수 오염이 상당히 진행되고 있으며 국지적으로는 암반지하수도 인위적 오염의 영향을 받고 있는 것으로 판단된다. 충적층 지하수의 경우 분석된 시료수가 적기 때문에 비교에 다소 무리가 있으나 연구지역내에서는 지화학적으로 암반지하수와 구별하기 힘들다. 암반지하수로 시료가 채취된 시추공들은 이번 연구를 위하여 최근에 설치된 것들로서 케이싱 부설에 의한 영향의 가능성이 적기 때문에, 이러한 사실은 뒤에 설명할 심도별 변화가 거의 없다는 사실과 함께 영천지역은 연구지역 전반에 걸쳐 충적층 지하수와 암반지하수의 혼합양상을 보이고 있음을 지시한다.

암반지하수에 대하여 시료채취시기에 따른 변화를 살펴보면 NO_3 와 SO_4 함량에 있어서 9월에 채취한 시료가 6월에 채취한 시료에 비해 상대적으로 적은 함량을 보인다(Table 1). 이는 앞서 설명한 현장측정자료 중 용존산소 함량변화와 관련하여 9월 시료채취시기 직전의 강수에 의한 희석효과로 생각할 수 있다. 그러나 Na와 Ca의 상대

적 함량비를 포함하여 주요이온과 미량원소 등의 다른 용존이온들은 시료채취시기에 따른 함량변화가 거의 없거나 오히려 반대로 소량 증가하는 경향을 보여주기 때문에 강우에 의한 효과만으로는 이를 해석할 수 없다. NO_3 의 경우는 강우량의 변화뿐 아니라 탈질작용에 의해 NO_3 함량이 감소할 수 있다. 또한 농작물의 경작시기에 따른 비료 투입량의 감소로 9월의 낮은 NO_3 함량을 설명할 수도 있다. 지표수 역시 9월에 NO_3 함량이 현저히 낮아진 경향을 보이는 사실이 이러한 해석을 뒷받침해 준다. SO_4 의 경우는 기반암에 포함되어 있는 황화광물의 산화반응이나 석고(gypsum)와 같은 황산염 광물의 용해에 의해 증가될 수 있으며, 특히 갈수기에는 새로운 지하수의 함양없이 지역적인 황화광물의 산화반응이 충분히 일어나기 쉽기 때문에 6월의 낮은 용존산소량과 높은 SO_4 함량을 설명할 수 있다. 황화광물의 산화반응에 의해 지하수의 Fe 함량은 증가하고 pH값은 낮아져야 하지만, 지하수내 SO_4 함량에 따른 pH와 Fe 함량을 도시하였을 경우 이들간에는 뚜렷한 관계를 보이지 않는다(Fig. 4). 그러나 Ca 함량의 경우는 SO_4 함량 증가에 따라 비례적으로 증가하는 경향을 보여주어 지하수내 SO_4 의 기원으로서 황산염광물의 용해 가능성이 높음을 지시하지만 Ca 함량은 시기적 변화를 보여주지 않는다. 따라서 NO_3 와 SO_4 의 시기적 변화는 여러 다양한 요인들의 복합적인 작용에 의한 것으로 사료되며, 보다 명확한 기원규명을 위해서는 황동위원소 분석 등의 추가적인 연구가 필요하다.

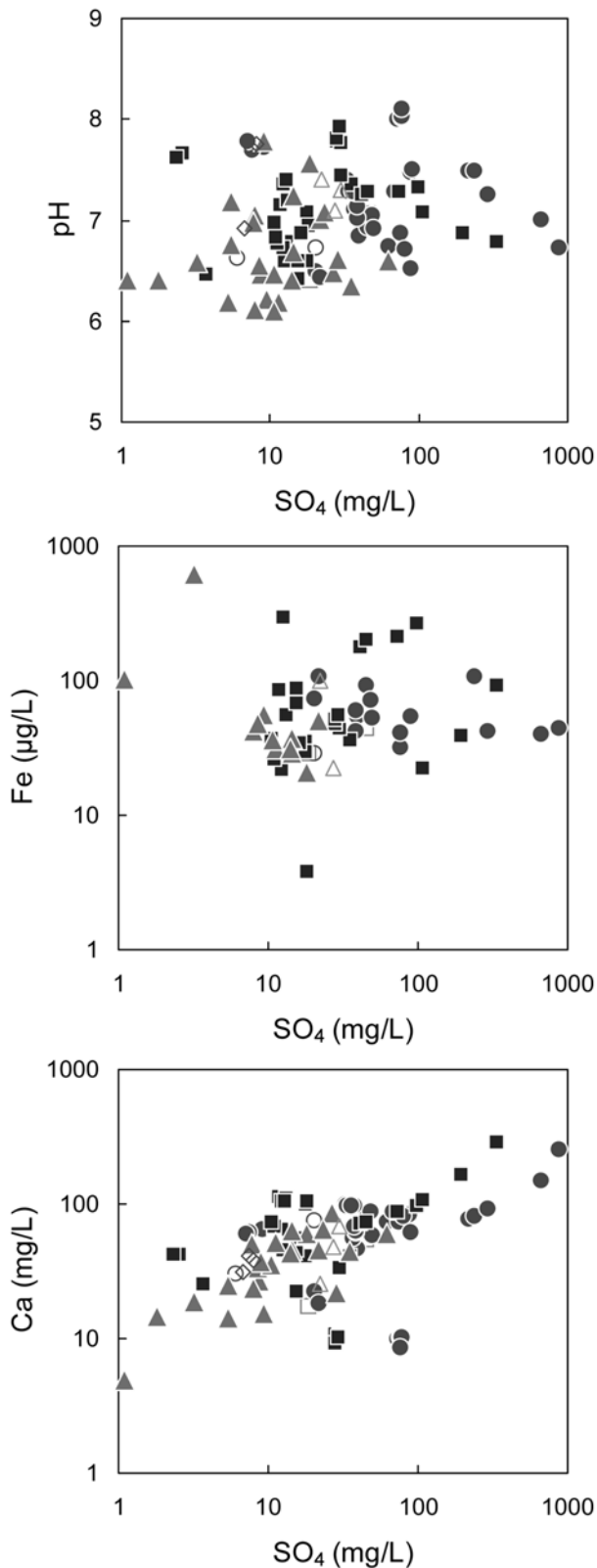


Fig. 4. Plots of SO_4 concentration versus pH, Fe and Ca concentrations of water samples from the Youngcheon area. Symbols are the same as in the Fig. 3.

4.4. 수질 유형

주요 용존 이온종을 대상으로 Piper's diagram을 도식하여 보면, 연구지역의 지하수는 Ca-HCO_3 형에서부터 Ca-SO_4 형까지의 영역에 속하며 일부 시료는 Na-HCO_3 형에 속함을 알 수 있다(Fig. 5). 연구지역이 대부분 경상계 퇴적암 지역에 속하기 때문에 Ca 이온은 경상계 퇴적암류 내의 탄산염광물에서 유래된 것으로 해석할 수 있으며 SO_4 함량이 높은 시료들은 시추공이 위치한 모암의 지질에 따라 황산염광물이나 황화광물과의 반응에 의하여 지하수의 SO_4 함량이 높아진 결과로 볼 수 있다. 12개의 시추공 중 Na 함량이 높은 시료들은 BH-1공과 BH-12공의 시료들이며 이 중 특히 BH-1공에서는 Ca와 SO_4 함량이 모두 높기 때문에 Na- HCO_3 형에 속하는 시료들은 BH-12공 시료들이다(Table 1). 이와 관련하여 시추공 주변의 지질을 살펴보면 대부분 시추공의 주변지질이 녹회색 내지 암회색 셰일과 실트스톤으로 구성되고 담수성 석회암 또는 역암을 협재하는 춘산층에 속하는데 비해 BH-1번공은 미사질셰일 및 사암으로 구성되며 저색층이 함유된 사곡층에 해당하며, BH-12번공의 경우 사장석 반정을 다량 함유한 중성 화산암지역에 해당한다. 즉, BH-1번과 BH-12번공의 상이한 지하수 화학특성은 기반암의 구성광물과 화학조성이 기타 다른 시추공들과 상이하기 때문인 것으로 판단된다. 특히 BH-1공에서의 높은 SO_4 함량은 저색층 셰일 등에 국지적으로 함유되어 있는 황산염광물의 용해에 의한 결과로 해석될 수 있으며 BH-12공에서의 높은 Na 함량 및 Na/Ca비는 화산암 기반암내의 사장석과의 반응에 의한 결과로 해석될 수 있다. 따라서 이들 지하수는 오랜 지하수 체류기간 동안 충분한 물-암석 반응을 겪었으며, 이는 뒤에 설명할 삼중수소 분석결과와 잘 일치한다. BH-1공과 BH-12공과는 달리 BH-9공의 경우에는 기반암이 춘산층에 속하지만 심부에서 채취된 시료에 대해 높은 Na/Ca 비율과 높은 SO_4 함량을 보이고 있다. BH-9공의 경우 춘산층내의 다른 시추공들과는 달리 나공 상태에서 피압에 의해 지하수가 넘쳐흐르는 자분정이기 때문에 시추공이 위치한 주변지질의 특성보다는 지하수 유동로의 특성을 반영하고 있는 것으로 판단되며 이 또한 뒤에 설명될 동위원소 분석결과와도 잘 일치한다.

4.5. 물-암석반응

연구지역 자연수내 여러 용존이온들의 함량을 물-암석 반응의 정도를 나타내는 변수인 총용존고체함량(TDS)을 기준으로 하여 Fig. 6에 도식하였다. 용존 양이온 중에서는 Na, Ca, Mg이온이 TDS와 정의 상관관계를 잘 보여

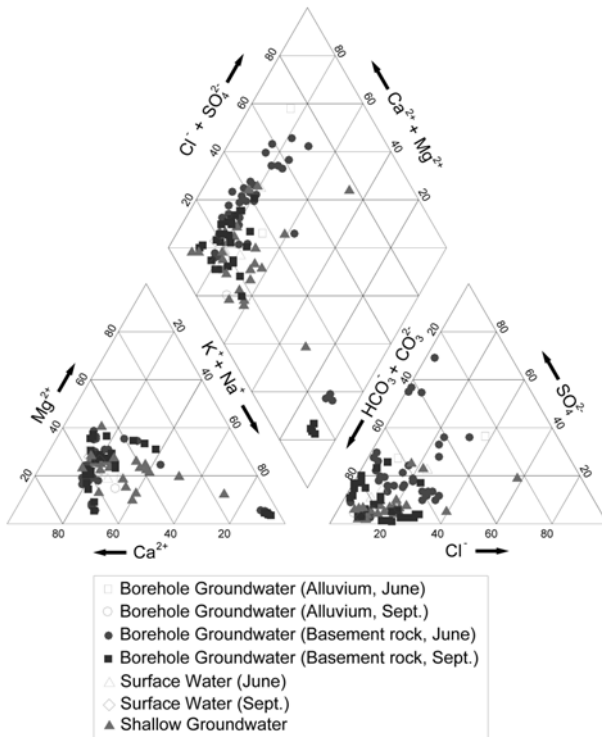
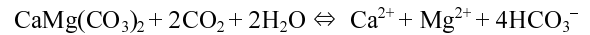
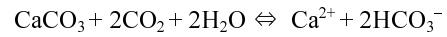


Fig. 5. Piper diagram for the water samples from the Youngcheon area.

준다. 일반적으로 지하수내 용존되어 있는 Ca의 기원은 주로 방해석이나 백운석 등의 탄산염광물의 용해, 퇴적암 암내에 존재하는 석고나 경석고, 또는 사장석의 용해로부터 기원하는 것으로 알려져 있다(Hounslow, 1995). 일반적으로 탄산염광물이 용해되면 다음과 같은 반응을 따른다(Appelo and Postma, 1994).



상기식을 근거로 하였을 때 방해석이나 돌로마이트의 용해에 의해 지하수의 Ca, Mg 및 HCO_3^- 함량이 높아지게 된다. 영천지역 지하수는 대부분 높은 Ca와 Mg 함량을 보이기 때문에 지하수내 Ca의 기원은 주로 퇴적암내 존재하는 탄산염광물의 용해로 판단되며, 또한 높은 SO_4 함량을 함께 보이는 일부 시료는 황산염광물의 용해에 의해서도 영향받았음을 알 수 있다. TDS와 정의 관계를 명확하게 보이고 있는 Mg 이온은 운모류의 용해로도 설명할 수 있지만 K 함량이 TDS의 증가에 따른 경향을 보이지 않는 것으로 보아 Mg는 운모류의 용해보다는 돌로마이트의 용해에 주로 기인한 것으로 보인다. 시료내 Na 함량은 시료채취지점에 따라 변화가 심하며 특히 12개 시

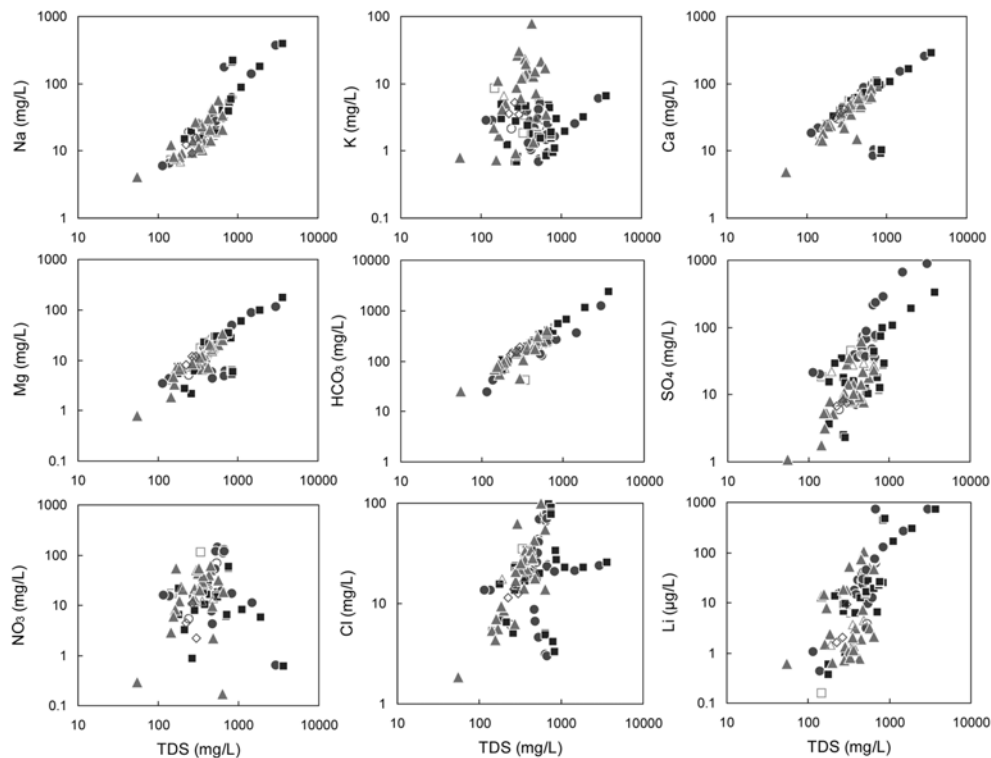


Fig. 6. Plots of TDS versus Na, K, Ca, Mg, HCO_3 , SO_4 , NO_3 , Sr and Li concentrations of water samples from the Youngcheon area. Symbols are the same as in the Fig. 3.

추공중 BH-1공과 BH-12공의 Na 함량이 높다. 비록 모암의 화학분석은 수행되지 않았지만 앞서 설명하였듯이 BH-1번공과 BH-12번공의 기반암이 다른 시추공들과 상이하며 다음에 설명할 동위원소 특성에서도 낮은 삼중수소 함량을 보이기 때문에 BH-1공과 BH-12공의 높은 Na 함량은 지하수의 오랜 체류시간 동안 모암내 사장석과의 반응에 기인함을 알 수 있다. 용존 음이온 중에서는 HCO_3^- 와 SO_4^{2-} 의 함량이 뚜렷이 높으며 TDS와의 상관관계도 잘 보여주고 있다. 이는 앞서 설명한 비와 같이 각각 퇴적암내의 탄산염광물 및 황화광물의 용해와 관련이 있는 것으로 사료된다. 결국 물-암석반응이 진행될수록 용존량이 체계적으로 증감하는 대표적인 이온종은 Ca, Na, Mg, HCO_3^- 및 SO_4^{2-} 이며, 이들 이온종의 상대적인 양적 변화는 시추공 주변 기반암의 화학조성 및 광물조성에 의해 영향받고 있음을 보여준다.

이상과 같은 용존이온들의 분포특성과 관련하여 퇴적암 구성광물의 용해에 대한 영향을 알아보기 위하여 방해석(calcite), 돌로마이트(dolomite), 석고(gypsum)의 포화지수를 SOLVEQ 프로그램(Reed, 1982)으로 계산하여 pH에 관해 도시하여 보았다(Fig. 7). 유형별 지하수시료들간의 뚜렷한 구분은 보여주지 않으나 석고에 대해서는 모든 자연수들이 불포화상태이며 뚜렷한 변화양상이 관찰되지 않음에 비해, 방해석과 돌로마이트에 대해서는 pH가 증가함에 따라 평형상태 및 과포화상태에 도달함을 알 수 있다. 이는 주로 방해석과의 반응에 의해 Ca가 기인했을 경우의 일반적인 현상이다(Kenoyer and Bowser, 1992). 따라서 영천지역 지하수가 주변암석과의 반응을 통해 진화하면서 주로 방해석이나 돌로마이트의 용해에 의해 지하수 내에 Ca와 Mg 이온 함량이 증가되었으며, 이들에 대해서 포화상태에 도달한 이후에는 주로 장석과의 반응에 의해 지하수내 Na의 함량이 조절된 것으로 판단된다. 동위원소에서 설명하겠지만 동일한 춘산층 퇴적암을 기반암으로 하는 시추공들 중, 삼중수소 함량이 가장 낮아서 주변암석과 가장 오랜기간의 물-암석반응이 진행되었음을 지시하는 시료인 BH-9번공 지하수의 Na/Ca 함량비가(0.78~1.07) 다른 시추공들의 지하수시료(0.44~0.83)보다 높다는 사실이 이러한 설명을 뒷받침한다.

4.6. 심도별 변화특성

총 10곳의 암반층 지하수 시추공에 대해 심도별로 채취된 시료의 분석결과를 시료채취시기에 따른 현장측정자료, 이온함량변화 및 동위원소변화로 분리하여 각각 Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10에 도시하였다. 심도에 따른 지화학적 특

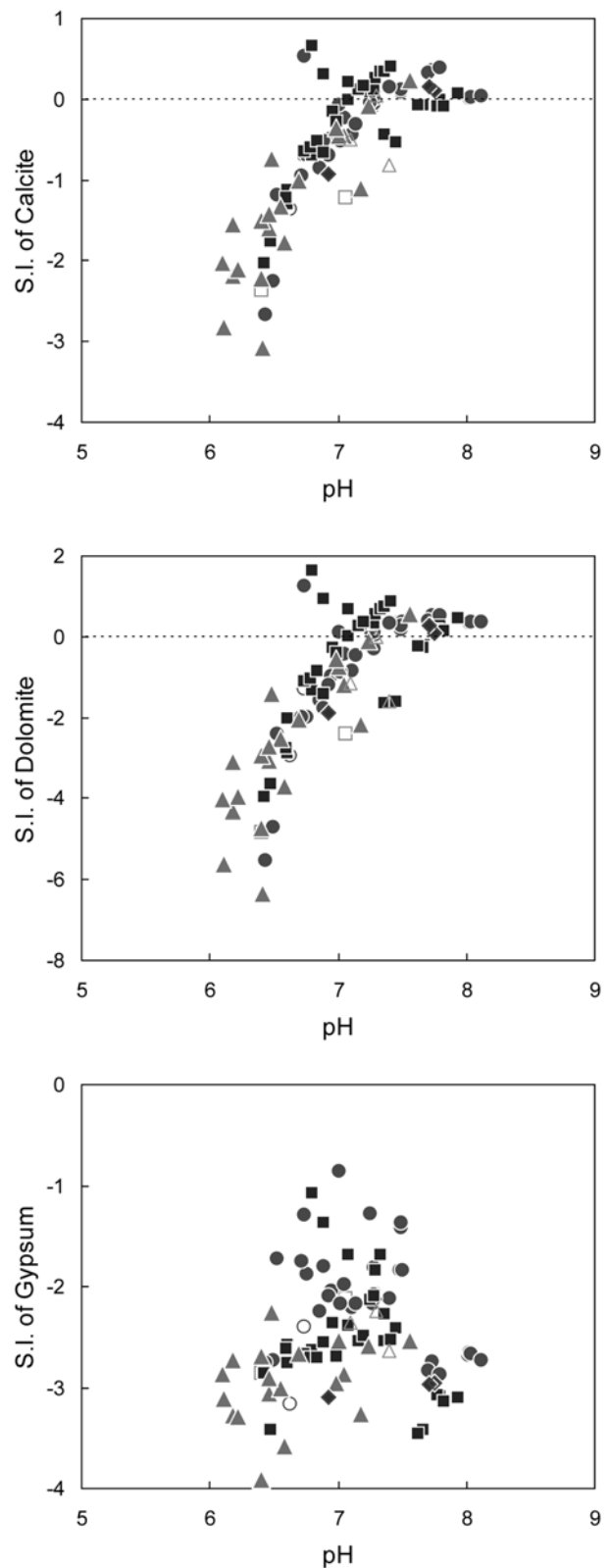


Fig. 7. Plots of pH versus saturation indices (S.I.) of calcite, dolomite and gypsum of the water samples from the Youngcheon area. Symbols are the same as in the Fig. 4.

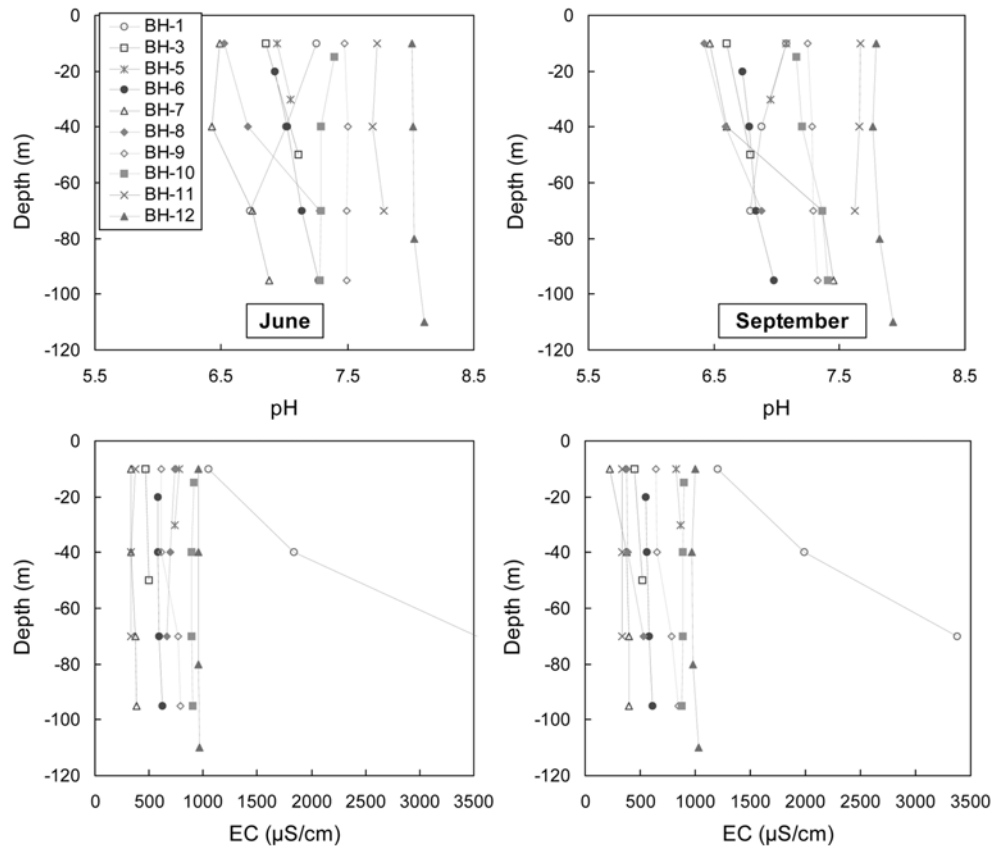


Fig. 8. Plots of pH and EC versus sampling depth (June and September).

성의 변화양상은 BH-8과 10번 공에서의 NO_3 함량 변화와 BH-7번 공에서의 삼중수소 함량 변화를 제외하고는 채수시기에 따른 차이를 보이지 않는다.

심도에 따른 현장측정자료의 변화를 살펴보면 대부분 시추공의 경우 심도증가에 따라 전기전도도와 pH값의 변화가 거의 없거나 약간의 증가경향을 보인다(Fig. 8). 심도에 따른 지하수내 각 용존이온들의 함량도 유사한 경향을 보인다(Fig. 9). 그러나 BH-1번공의 경우는 심도증가에 따라 전기전도도값이 급격히 증가하면서 pH는 감소하는 변화양상을 보인다(Table 1, Fig. 8). 따라서 대부분의 용존이온들의 함량 역시 심도에 따라 급격히 증가하고 있으며(Fig. 9), 삼중수소 및 산소동위원소값도 심도에 따라 감소하는 경향을 보여주고 있다(Fig. 10). 비록 BH-1공의 총 심도가 80 m에 불과하지만, BH-1공의 심도에 따른 변화양상은 각 채수심도별로 채취시간증가에 따른 물-암석반응의 진행정도차이 및 국지적으로 존재하는 황화광물과의 반응정도를 반영하고 있는 것으로 해석된다. BH-1공 이외의 다른 시추공에서는 심도에 따른 pH 및 용존이온의 증가경향을 보여주나 명확하지 않으며, 심도에 따른

동위원소 변화도 뚜렷한 경향을 보여주지 않는다. 따라서 이를 일반적인 물-암석 반응의 진행에 따른 지하수의 진화경향으로 해석하기에는 무리가 있다. 특히 지표 및 천부에서 유입되었을 NO_3 함량의 경우 BH-9와 12번공은 전 심도에 걸쳐 NO_3 를 함유하고 있지 않으며 BH-1, 7, 8번공은 심도에 따라 감소하고 있는 경향을 보여주지만 나머지 BH-3, 5, 6, 10, 11번공들은 심도증가에 따라 변화가 없거나 오히려 높은 NO_3 함량을 보여주고 있다(Table 1, Fig. 9). 따라서 이들 시추공지역에서의 화학특성의 불규칙한 심도별 변화는 천부지하수와 심부지하수간의 혼합가능성으로 해석하는 것이 타당한 것으로 사료된다.

채수시기에 따른 변화를 살펴보면 건기가 계속되던 6월에 채취된 시료와 우기가 지난 직후인 9월에 채취된 시료간에 시추공에 따라 일부 원소들의 증감이 있기는 하여도 현장측정자료, 용존이온, 동위원소 등의 전체적인 심도별 변화 경향은 동일하다. 단지 용존이온 중 NO_3 함량에 있어서 6월에 비해 9월이 전체적으로 상당히 줄어든 양상을 보이고 있다(Fig. 9). 이는 앞서 추론하였듯이 지하수내 NO_3 의 기원이 주로 비료와 축산폐수 등과 같은 인위적인

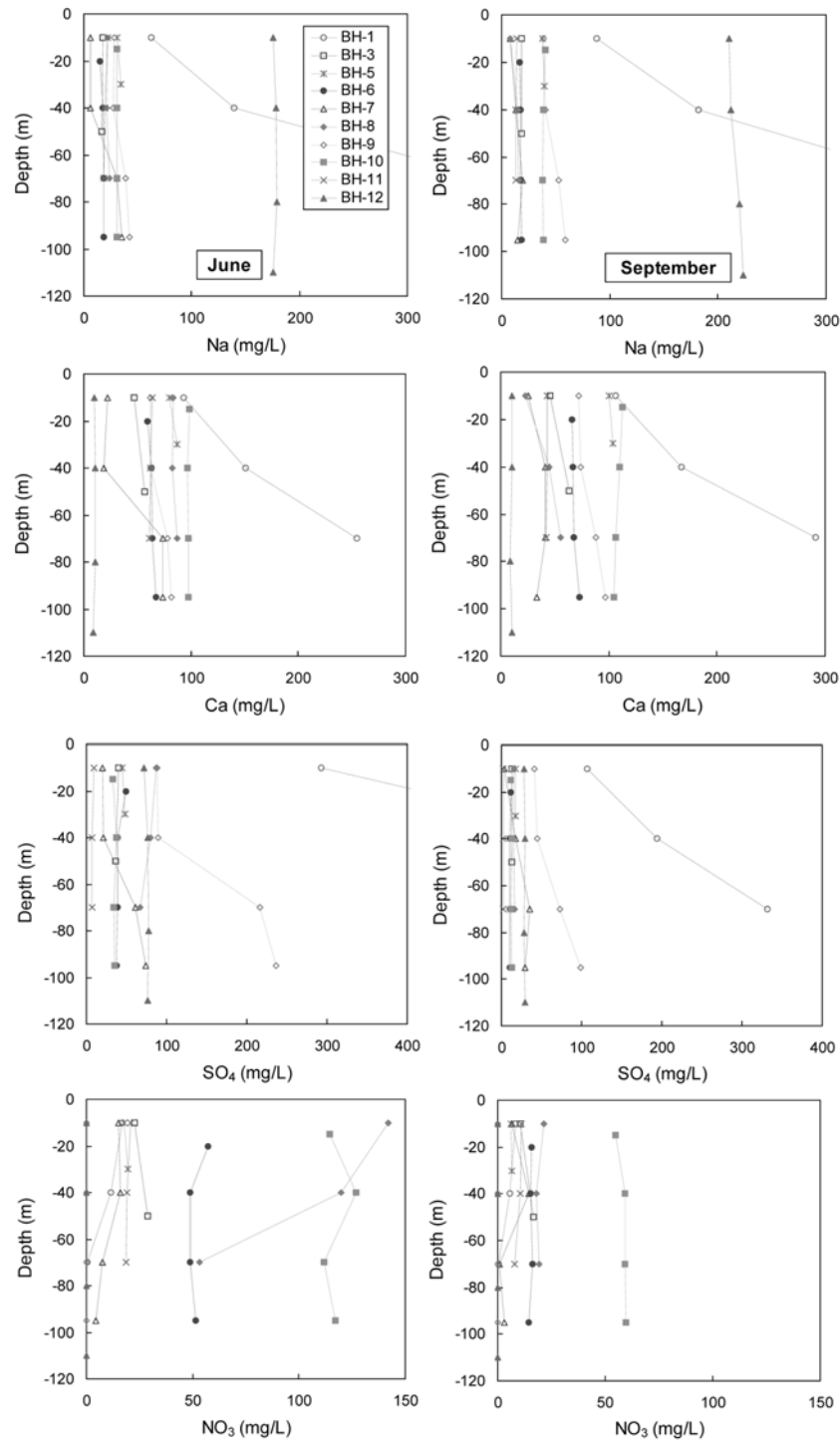


Fig. 9. Plots of Na, Ca, SO₄ and NO₃ concentrations versus sampling depth (June and September).

오염에 의한 것으로서 일반적으로 9월 이후에 비료사용량이 줄어들 뿐 아니라 9월 시료채취 직전까지 계속되던 강수 및 탈질작용 등에 의해 복합적으로 영향받은 것으로 판단된다.

4.7. 동위원소 분석결과

영천 지역 물시료들에 대한 산소, 수소 및 삼중수소 동위원소 분석결과를 Table 3과 Table 4에 정리하였다. 시추공 지하수들과 이와 근접 지역의 지표수들(Table 3) 및

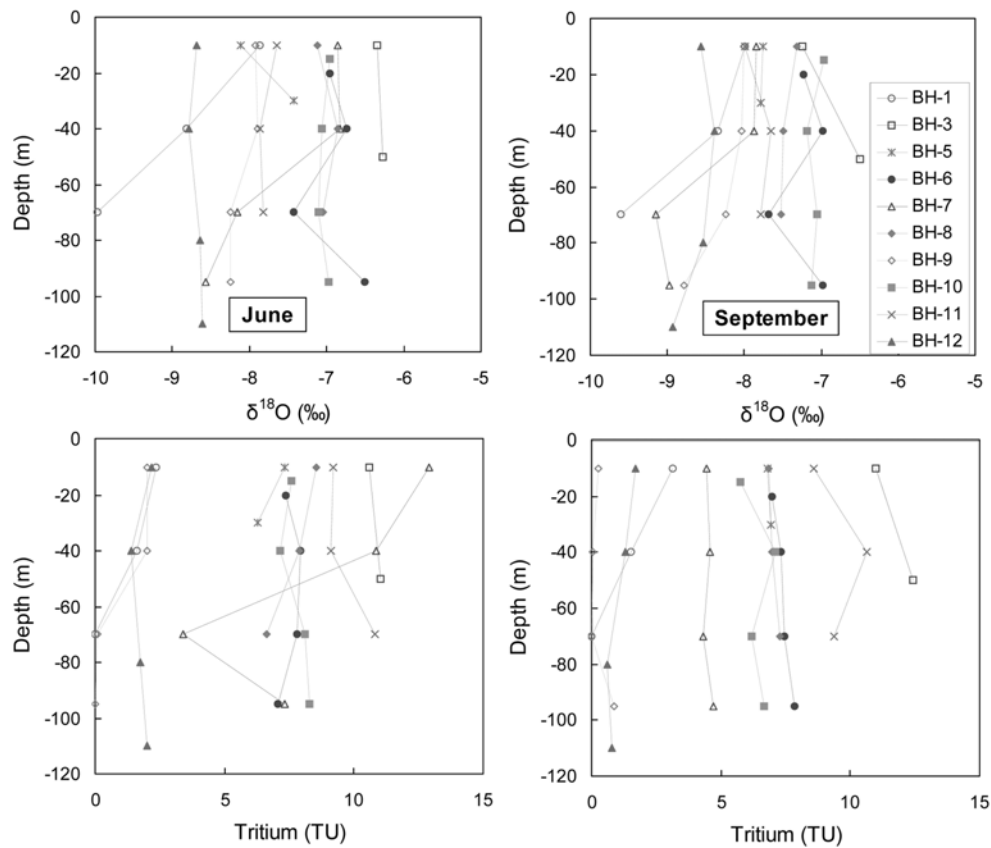


Fig. 10. Plots of $\delta^{18}\text{O}$, δD and tritium contents versus sampling depth (June and September).

천부지하수(Table 4)의 산소, 수소 안정동위원소조성은 매우 광범위한 범위를 보이며, 화학분석결과와 마찬가지로 충적층 지하수와 암반 지하수의 동위원소 값은 큰 차이를 보이지 않는다. 심도별 변화를 살펴보면 암반 지하수들 중 BH-1, 7, 8, 9번공에서 심도가 증가할수록 산소 및 수소 동위원소값이 낮아지는 경향을 보여주는 하나 명확하지는 않기 때문에(Table 3, Fig. 10), 이러한 경향이 지하수의 함양고도를 반영하고 있는 것으로 판단하기에는 다소 무리가 있다. 그러나 암반 지하수들 중 화학적으로 다른 시료들과 구별되었던 BH-1, 9, 12번공의 경우 동위원소 값에서도 다른 시료들과 차이가 남을 알 수 있다. 특히 이 시료들의 삼중수소값은 0TU에 가까운 값을 보이며 산소 안정동위원소 값도 다른 시료들에 비해 1~2‰ 정도 더 낮은 값을 갖는다. 따라서 천부지하수와 혼합양상을 보이는 다른 시추공지하수들과는 달리 이들 시추공 지하수는 일반적인 심부지하수의 지화학적 특성을 보여주고 있다.

영천 지역 자연수 시료들의 산소와 수소안정동위원소 분석값들을 Fig. 11에 나타냈다. Table 3과 4에 기재하지는 않았지만 12개 시추공지하수 및 강수에 대하여 2001

년 5월부터 11월까지 매일 시료채취를 수행하여 분석한 산소 및 수소동위원소값들을 함께 Fig. 11A에 도시하였다. 모든 시료들이 세계 강우 직선(Craig, 1961)에 평행하게 도시되어 이들이 모두 강우 기원임을 나타내고 있으며, 자연수 유형별 차이는 보이지 않는다. 시추공지하수 및 지표수들 중 6월과 9월 시료에 대하여서만 도시하였을 경우에도(Fig. 11B) 암반지하수, 충적층지하수, 지표수들의 값들이 서로 중첩되어 구분되지 않으며 시료채취시기별로도 명확히 구분되지 않는다(Table 3).

삼중수소에 대한 분석결과를 살펴보면(Table 3과 4), 지표수의 삼중수소 값은 5.0~9.5TU로 국내에서 일반적으로 나타나는 강우의 삼중수소 함량(~10TU) 범위에 해당하는 값을 보여준다(고용권 외, 1999). 충적층 지하수들(BH-2, BH-4)의 삼중수소 함량도 주변 지표수의 값과 큰 차이를 보이지 않고 있다. 천부지하수의 삼중수소 함량도 3.7~10.4TU로 지표수 및 충적층 지하수와 유사한 값들을 보인다. 따라서 이들 충적층 지하수와 천부지하수들은 관정 깊이가 매우 낮기 때문에 주변 지표수가 직접적으로 유입된 물인 것으로 생각할 수 있다. 암반 지하수들 역시

Table 3. Isotope compositions of the water samples from the Youngcheon area

Borehole No.	Sampling Date	Total depth (m)	Sampling depth (m)	δ ¹⁸ O (‰)	δD (‰)	Tritium (TU)	Sampling Date	Sampling depth (m)	δ ¹⁸ O (‰)	δD (‰)	Tritium (TU)
Borehole Groundwater (Alluvium)											
BH-2	01-6-14	10	5	-8.1	-58.9	6.1	01-9-12	5	-8.6	-63.1	3.9
BH-4	01-6-13	11	5	-7.4	-54.9	8.1	01-9-12	5	-7.4	-57.4	8.1
Borehole Groundwater (Basement rock)											
BH-1	01-6-8	80	10	-7.9	-58.3	2.3	01-9-13	10	-8.0	-59.3	3.1
			40	-8.8	-63.1	1.6		40	-8.3	-60.1	1.5
			70	-10.0	-69.3	0.0		70	-9.6	-70.1	0.0
BH-3	01-6-8	60	10	-6.4	-45.8	10.6	01-9-13	10	-7.3	-51.2	11.0
			50	-6.3	-51.0	11.0		50	-6.5	-52.1	12.4
BH-5	01-6-7	32	10	-8.1	-56.4	7.3	01-9-12	10	-7.8	-58.0	6.8
			30	-7.4	-48.5	6.3		30	-7.8	-55.1	7.0
BH-6	01-6-8	100	20	-7.0	-52.7	7.4	01-9-13	20	-7.2	-56.2	7.0
			40	-6.7	-50.3	7.9		40	-7.0	-56.9	7.3
			70	-7.4	-57.0	7.8		70	-7.7	-55.4	7.5
			95	-6.5	-51.7	7.1		95	-7.0	-52.4	7.8
BH-7	01-6-13	100	10	-6.9	-54.1	12.9	01-9-12	10	-7.9	-58.6	4.4
			40	-6.8	-51.9	10.9		40	-7.9	-61.8	4.6
			70	-8.2	-58.3	3.4		70	-9.2	-65.5	4.3
			95	-8.6	-59.4	7.3		95	-9.0	-64.4	4.7
BH-8	01-6-7	80	10	-7.1	-51.7	8.6	01-9-12	10	-7.3	-54.4	6.8
			40	-6.9	-51.3	7.9		40	-7.5	-55.8	7.0
			70	-7.1	-51.6	6.6		70	-7.5	-57.4	7.3
BH-9	01-6-8	100	10	-7.9	-56.2	2.0	01-9-13	10	-8.0	-59.4	0.3
			40	-7.9	-57.0	2.0		40	-8.0	-58.5	0.1
			70	-8.2	-60.0	0.1		70	-8.2	-60.1	0.0
			95	-8.3	-59.1	0.0		95	-8.8	-62.1	0.9
BH-10	01-6-7	100	15	-7.0	-51.8	7.6	01-9-13	15	-7.0	-51.7	5.8
			40	-7.1	-51.3	7.2		40	-7.2	-53.0	7.1
			70	-7.1	-51.4	8.1		70	-7.1	-52.2	6.2
			95	-7.0	-49.8	8.3		95	-7.1	-53.6	6.7
BH-11	01-6-13	80	10	-7.6	-54.5	9.2	01-9-13	10	-8.0	-56.6	8.6
			40	-7.9	-54.1	9.1		40	-7.7	-55.6	10.6
			70	-7.8	-55.9	10.8		70	-7.8	-56.0	9.4
BH-12	01-6-7	120	10	-8.7	-61.7	2.2	01-9-13	10	-8.6	-63.0	1.7
			40	-8.8	-61.2	1.4		40	-8.4	-61.8	1.3
			80	-8.6	-60.4	1.8		80	-8.5	-61.5	0.6
			110	-8.6	-61.7	2.0		110	-8.9	-62.9	0.8
Surface Water											
BH-6	01-6-14			-6.3	-51.8	8.4	01-9-13		-8.3	-59.1	6.3
BH-8	01-6-13			-6.7	-47.5	9.5	01-9-12		-8.0	-54.7	5.8
BH-12	01-6-13			-7.0	-50.9	8.3	01-9-13		-8.3	-54.7	5.0

BH-1, BH-9, BH-12공을 제외하고는 대부분의 지하수들은 3.4~12.9TU로 주변 지표수 및 천부지하수들과 유사하

게 높은 삼중수소 값을 보여준다. 암반 지하수들 중 BH-1, BH-9, BH-12 지하수들의 삼중수소 함량은 0.0~

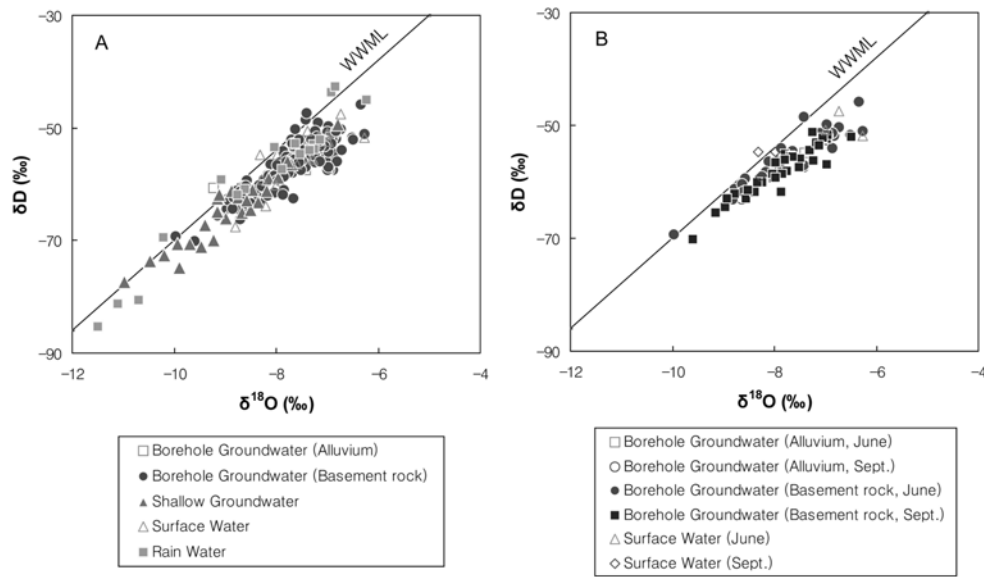


Fig. 11. δD versus $\delta^{18}O$ diagram for the water samples from the Youngcheon area.

Table 4. Isotope compositions of the shallow groundwater samples from the Youngcheon area

Borehole No.	Sampling Date	Total depth (m)	$\delta^{18}O$ (‰)	δD (‰)	Tritium (TU)
8	01-7-10	4	-9.0	-66.1	5.1
22	01-7-10	5	-8.5	-61.0	6.5
49	01-7-10	5	-9.9	-70.6	5.2
61	01-7-10	12	-9.2	-64.9	4.6
64	01-11-21	5	-8.9	-61.1	4.9
68	01-7-10	4	-9.5	-71.2	4.5
74	01-7-10	3	-8.7	-65.1	5.3
79	01-7-10	17	-8.2	-61.1	5.5
88	01-11-21	3	-7.8	-55.9	5.3
92	01-7-10	4	-11.0	-77.4	4.2
93	01-11-21	10	-6.8	-49.4	4.5
97	01-7-10	2	-9.4	-67.3	4.6
112	01-7-10	7	-8.4	-63.2	5.9
121	01-7-10	2	-8.1	-59.0	3.7
135	01-7-10	4	-10.2	-72.6	4.8
138	01-7-10	1	-9.2	-62.5	5.1
139	01-7-10	2	-10.5	-73.6	6.6
156	01-7-10	4	-9.7	-70.7	5.0
171	01-7-10	3	-9.9	-74.9	5.3
172	01-11-21	7	-7.7	-56.5	6.3
177	01-7-10	2	-8.5	-64.6	10.4
185	01-7-10	3	-8.7	-62.3	7.8
191	01-7-10	6	-9.2	-70.0	7.0
195	01-7-10	6	-8.6	-62.8	9.1
0-8-3	01-11-21	5	-8.0	-58.9	6.2
SDU	01-11-21	5	-9.1	-61.8	5.8

3.1TU로 다른 시료들에 비해 0TU에 가까운 값을 보여준다. 낮은 삼중수소 함량을 보이는 이들 암반 지하수들은 앞서 화학적 특성에서도 설명하였듯이 대수층의 기반암이 다르거나(BH-1, BH-12), 높은 피압에 의한 자분정(BH-9)으로서 다른 시추공 지하수들과는 상이한 지질구조 및 유동체계를 갖고 있는 것으로 판단된다. 이처럼 0TU에 가까운 값을 보이는 시료를 제외하고는 연구지역의 암반 지하수는 삼중수소 함량이 대부분 10TU 내외로 지표수 및 천부지하수와의 혼입양상을 보이고 있다.

영천 지역 지하수 및 지표수 시료들의 삼중수소 함량에 대하여 산소동위원소 조성 및 TDS와의 상관관계를 Fig. 12에 도시하였다. 영천 지역 지하수시료들은 BH-1, BH-9, BH-12 공을 제외하고는 지화학적으로 천부지하수의 혼입양상을 보이지만 전체적으로는 삼중수소 함량과 산소동위원소값이 정의 상관관계를 보이면서 삼중수소 함량이 감소함에 따라 상대적으로 긴 체류시간 동안의 물-암석반응에 의해 TDS값이 증가하는 일반적인 경향을 잘 보여주고 있다. 아울러 앞서 용존이온 분포특성과 물-암석반응에서 살펴본 바와 같이 $Na-HCO_3$ 유형의 지하수의 기원을 알아보기 위해 삼중수소 함량에 대한 $1/Na$ 함량 및 Na/Ca 비를 도시하여 보았다 (Fig. 13). Fig. 13에서 보면 삼중수소 함량이 줄어들수록, 즉 지하수-암석 반응기간이 길수록 Na 함량이 높아지고 있음을 보여준다. Na/Ca 비에 대한 삼중수소 함량 변화를 살펴보면 삼중수소 함량이 감소하면서 Na/Ca 비는 일정한 값을 보이다가 삼중수소값이 0TU에 가까워지면서 Na/Ca 비가 급격히 증가함을 보여준

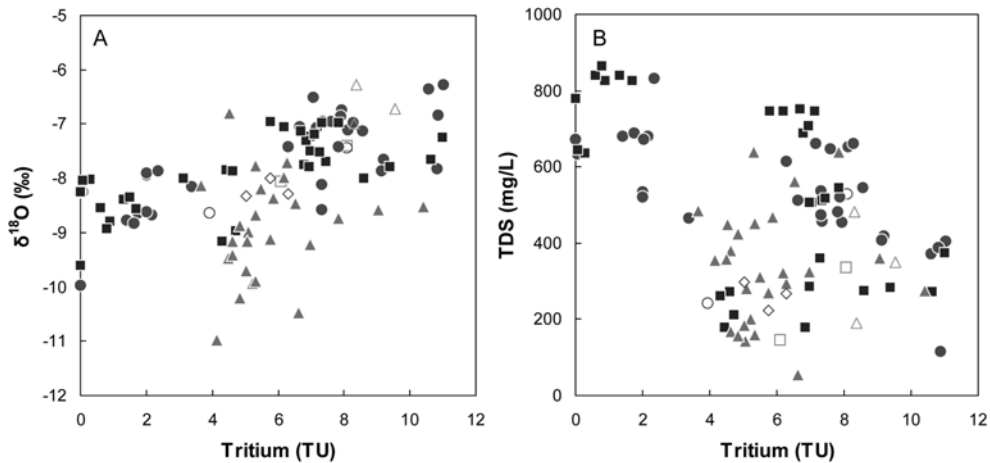


Fig. 12. Plot of tritium versus $\delta^{18}\text{O}$ and TDS for the water samples from the Youngcheon area. Symbols are the same as in the Fig. 3.

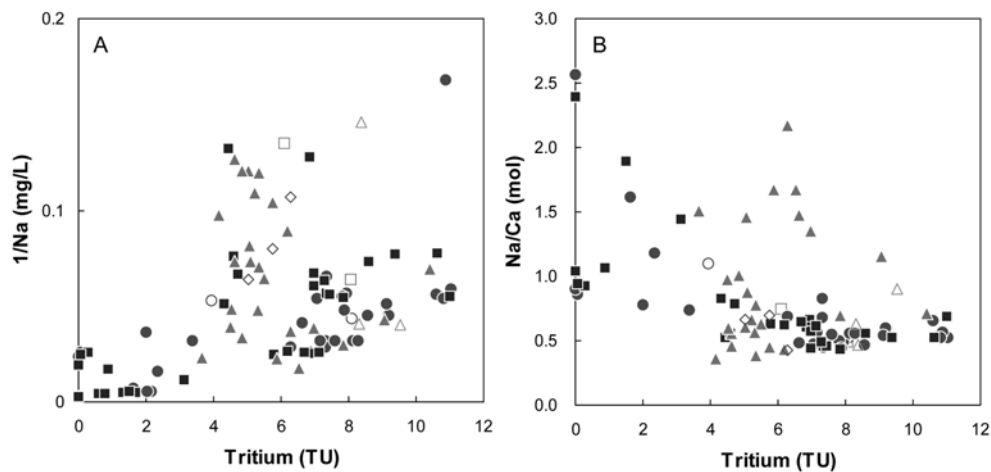


Fig. 13. Plot of tritium versus Na/Ca ratio and 1/Na concentration for the water samples from the Youngcheon area. Symbols are the same as in the Fig. 3.

다(Fig. 13B). 그래프에서 시추공지하수시료의 분석결과만 고려하였을 경우 이런 경향은 더욱 명확해진다. 이는 앞서 연구지역 지하수의 방해석에 대한 포화지수에 대하여 살펴보았듯이, 지하수와 모암과의 반응초기에는 탄산염광물과 사장석의 반응에 의해 Ca와 Na가 함께 용해되다가 반응이 계속 진행되면서 방해석에 대한 포화상태에 이르러서는 지하수내의 Ca 함량이 조절되지만 Na는 계속 용해되어 상대적으로 Na의 함량이 증가하게 된 것으로 해석된다. 따라서 연구지역의 높은 Na 함량을 보이는 지하수는 오랜 기간 동안의 물-암석 반응에 의한 진화 결과임을 지시한다.

4.8. 음용수 기준 적용 결과

영천 지역 지하수 및 지표수들 중 총 31개 시료(충적층

지하수 2곳, 암반 지하수 10곳, 관측공 지하수 10곳, 대수성공 지하수 6곳, 지표수 3곳)의 수질분석결과를 먹는 물 수질기준 불합격 항목에 대하여 Table 5에 요약하였다. 분석된 31개 시료 모두 기준부적합 판정을 받았으며, 총 48개의 분석항목 중 기준초과로 나타난 항목들에 대한 순위는 일반세균(총 28곳) > 대장균군(총 13곳) > 질산성질소 > (총 10곳) > 중발잔류물(총 7곳) > 탁도(총 6곳) > 경도(총 4곳) > 아연(총 2곳) > 황산이온(총 1곳) = 수소이온농도(총 1곳) 순으로서 주로 인위적인 오염에 의한 항목에서 불합격률이 높음을 알 수 있다.

일반세균 항목의 경우 불합격률이 높기도 하지만 적합 판정을 받은 3개 시료를 제외한 28개의 시료들의 평균 함량은 2,123 CFU/ml로서 기준치를 평균 21배나 초과하고 있다. 또한 각 시료유형별로 일반세균의 평균값을 구

Table 5. Summary of the results of water quality analysis for the drinking water

No.	Total Colony Counts			Total Coliforms		NO ₃ -N		TSS		Turbidity		Hardness		Zn		pH		SO ₄ ⁻		Average #
	<100 CFU/mL			(-)/50 mL		< 10 mg/L		< 500 mg/L		< 1 NTU		< 300 mg/L		< 1 mg/L		5.8-8.5		<200 mg/L		
	² No.	3#	%	#	%	#	%	#	%	#	%	#	%	#	%	#	%	#	%	
Borehole Groundwater (Alluvium)	2	2	100.0	1	50.0	1	50.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	2.0
Borehole Groundwater (Basement rock)	10	10	100.0	6	60.0	2	20.0	5	50.0	4	40.0	3	30.0	2	20.0	0	0.0	1	10.0	3.3
Shallow Groundwater	16	13	81.3	5	31.3	7	43.8	2	12.5	2	12.5	1	6.3	0	0.0	0	0.0	0	0.0	1.9
Surface Water	3	3	100.0	1	33.3	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	1	33.3	0	0.0	1.7
Total & Average	31	28	90.3	13	41.9	10	32.3	7	22.6	6	19.4	4	12.9	2	6.5	1	3.2	1	3.2	2.3

¹TSS : Total suspended solid, ²No. : number of analysis, ³# number of disqualification

해본 결과, 총적층 지하수는 4,250 CFU/ml로 기준치를 약 43배 초과하며, 암반 지하수는 3,367 CFU/ml로 약 34배, 지표수는 1,133 CFU/ml로 약 11배, 천부지하수는 1,184 CFU/ml로 약 12배로서 총적층 지하수 > 암반지하수 > 천부지하수 > 지표수 순으로 초과하고 있다. 대장균 항목 및 질산성 질소의 경우에도 전체 불합격률이 각각 약 42% 및 32%에 달한다. 또한 각 유형별 물시료들에 대한 기준을 초과한 항목들의 평균수가 암반지하수는 총 3.3개 항목, 총적층지하수 총 2.0개 항목, 천부지하수 총 1.9개 항목, 지표수 1.7개 항목으로 지표환경보다 오히려 암반지하수가 가장 많은 항목에서 기준치를 초과하고 있는 사실은 연구지역의 오염정도가 천부환경에 그치지 않고 있음을 지시한다.

5. 결 론

영천지역의 유형별 자연수를 시기별, 심도별로 채수하고, 이들에 대하여 지화학적 분석 및 해석을 수행한 결과는 다음과 같다.

연구지역에 부존하는 자연수의 지화학적 특성은 유형별(암반지하수, 총적층지하수, 천부지하수, 지표수) 특성을 보이는 것이 아니라 시추공이 위치한 지역의 다양한 지질에 따른 특성을 보이고 있다. 또한 연구지역 전반에 걸쳐 농업활동에 의한 지하수 오염이 상당히 진행되고 있으며 국지적으로는 암반지하수도 인위적 오염의 영향을 받고 있는 것으로 판단된다.

영천지역 지하수는 Na-HCO₃형에 속하는 BH-12공을

제외하고는 Ca-HCO₃형에서부터 Ca-SO₄형까지의 영역에 속한다. Ca이온은 퇴적암류내의 탄산염광물에서 유래된 것으로 해석할 수 있으며, 높은 SO₄ 함량은 시추공이 위치한 모암의 지질에 따라 황산염광물이나 황화광물과의 반응에 기인한다. 높은 Na/Ca비를 보여주는 BH-1, BH-9, BH-12공의 경우는 이들 지하수가 상대적으로 긴 체류 시간 동안 물-암석 반응에 의해 진화하였으며, 초기에는 주로 방해석이나 돌로마이트와의 반응에 의해 지하수내에 Ca와 Mg 이온 함량이 증가되었고, 이들에 대해서 포화상태에 도달한 이후에는 주로 사장석과의 반응에 의해 지하수내 Na의 함량이 조절된 것으로 판단된다. 이와 같은 해석은 이들 시추공지하수들의 낮은 삼중수소 함량으로 뒷받침된다.

심도에 따른 지화학적 특성의 변화를 살펴보면 채수시기에 따른 변화는 관찰할 수 없었으며 현장측정자료, 용존이온, 동위원소 등의 전체적인 심도별 변화 경향은 시추공에 따라 거의 없거나 매우 불규칙하다. 이는 지화학적으로 심부지하수의 특성을 명확히 보여주는 BH-1, BH-9, BH-12시추공을 제외하고는 연구지역 자연수들이 지화학적으로 천층지하수와 심부지하수를 구별하기 힘들다는 사실과 함께 연구지역 전반에 걸쳐 총적층 지하수와 암반 지하수의 혼합양상을 보이고 있음을 지시한다.

산소 및 수소안정동위원소분석 결과는 연구지역 지하수는 모두 강수 기원임을 지시하며, 화학적으로 구별되었던 암반 지하수들(BH-1, BH-9, BH-12)은 동위원소적으로도 구별되어 일반적으로 지하수가 물-암석 반응에 의해 진화해나가는 진화경로를 따르고 있지만 이들 이외의 암반 지

하수들은 채수시기별 혹은 심도에 따른 동위원소조성의 변화특성을 보여주지 않는다.

사 사

이 논문은 과학기술부의 원자력기술개발사업의 일환으로 수행되었으며 일부 과학기술부의 국제공동연구사업의 지원을 받았음을 밝힌다.

참 고 문 헌

- 고용권, 배대석, 김천수, 김건영, 1999, 포항 및 대전지역 강수의 삼중수소 함량, *지하수환경*, **6**, 126-132.
- 고용권, 김천수, 배대석, 이동익, 2000, 문경지역 심부지하수의 수리화학 및 환경동위원소 연구, *자원환경지질*, **33**, 469-489.
- 고용권, 김경수, 배대석, 김천수, 한경원, 2001, 여수 북동부 화산암 지역 사추공 지하수의 지화학 특성, *자원환경지질*, **34**, 255-269.
- 김건영, 고용권, 김천수, 배대석, 박맹언, 2000, 유성지역 지열수의 지구화학적 특성 연구, *지하수환경*, **7**, 32-46.
- 김동학, 황재하, 박기화, 송교용, 1998, 부산지질도폭설명서 (1:250,000), 한국자원연구소, 과학기술처, p. 62.
- 윤성택, 채기탁, 고용권, 김상렬, 최병영, 이병호, 김성용, 1998, 풍기지역 지하수의 수리지구화학 및 환경동위원소 특성연구, *지하수환경*, **5**, 177-191.
- 이병대, 추창오, 이인호, 정교철, 함세영, 조병욱, 2002, 영천댐 도수터널내 지하수 유출구간의 불연속성 단열 특성 및 단열 프랙탈 차원, *지질공학*, **12**, 333-344.
- 이재영, 김철호, 이인호, 고인석, 1998, 고령지역 지하수에 대한 지화학적 연구, *지하수환경*, **5**, 162-170.
- 이종운, 전효택, 전용원, 1997, 국내 화강암질암내 심부지하수의 지구화학적 특성, *지하수환경*, **4**, 199-211.
- 정찬호, 고용권, 김수진, 김천수, 1995, 삼광광산 편마암에서의 수리지구화학 및 물-암석 상호반응, *지질학회지*, **31**, 91-105.
- 조병욱, 성익환, 이병대, 추창오, 김통권, 이인호, 최경국, 김정숙, 1999, 터널내 구간별 지하수 유입량 산정방법: 유속계의 이용, *자원환경지질*, **32**, 661-667.
- 황재하, 김동학, 조등룡, 송교영, 1996, 안동지질도폭설명서 (1:250,000), 한국자원연구소, 과학기술처, p. 67.
- Appelo, C.A.J. and Postma, D., 1994, *Geochemistry, Groundwater and Pollution*, Balkema, Rotterdam, p. 536.
- Craig, H., 1961, Isotopic variations in meteoric water, *Science*, **133**, 1702-1703.
- Hounslow, A.W., 1995, *Water Quality Data: Analysis and Interpretation*, Lewis Publishers, New York, p. 397.
- Internet Web Site : www.kma.go.kr
- Kenoyer, G.J. and Bowser, C.J., 1992, Groundwater chemical evolution in a sandy silicate aquifer in Northern Wisconsin: 2. Reaction modeling, *Water Resour. Res.*, **28**, 591-600.
- Koh, Y.K., Kim, C.S., Bae, D.S., and Yun, S.T., 1998, Geochemical modeling of groundwater in granitic terrain: the Yeongcheon area, *Jour. Korean Soc. Groundwater Environ.*, **5**, 192-202.
- Reed, M.H., 1982, Calculation of multicomponent chemical equilibria and reaction processes in systems involving minerals, gases and an aqueous phase, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **46**, 513-528.