

국내 음용지하수의 수리지화학 및 자연방사성물질 환경 특성

정도환 · 김문수 · 이영준*

국립환경과학원

Hydrogeochemical Characteristics and Natural Radionuclides in Groundwater for Drinking-water Supply in Korea

Do Hwan Jeong · Moon Su Kim · Young Joon Lee*

National Institute of Environmental Research.

ABSTRACT

A total of 247 samples were collected from groundwater being used for drinking-water supply, and hydrogeochemistry and radionuclide analysis were performed. In-situ analysis of groundwaters resulted in ranges of 13.7~25.1°C for temperature, 5.9~8.5 for pH, 33~591 mV for Eh, 66~820 $\mu\text{S}/\text{cm}$ for EC, and 0.2~9.4 mg/L for DO. Major cation and anion concentrations of groundwaters were in ranges of 0.5~227.6 for Na, 1.0~279.3 for Ca, 0.0~9.3 for K, 0.1~100.1 for Mg, 0.0~3.3 for F, 0.9~779.1 for Cl, 0.3~120.4 for SO_4 , 0.0~27.4 for $\text{NO}_3\text{-N}$, and 6~372 mg/L for HCO_3 . Uranium-238 and radon-222 concentrations were detected in ranges of N.D~131.1 $\mu\text{g}/\text{L}$ and 18~15,953 pCi/L, respectively. In case of some groundwaters exceeding USEPA MCL level (30 $\mu\text{g}/\text{L}$) for uranium concentration, their pH ranged from 6.8 to 8.0 and Eh showed a relatively low value(86~199 mV) compared to other areas. Most groundwaters belonged to Ca-(Na)- HCO_3 type, and groundwaters of metamorphic rock exhibited the highest concentration of Na, Mg, Ca, Cl, $\text{NO}_3\text{-N}$, U, and those of plutonic rock showed the highest concentration of HCO_3 , and Rn. Uranium and fluoride from granite areas did not show any correlation. However, uranium and bicarbonate displayed a positive relation of some areas in plutonic rocks($R^2=0.3896$).

Key words : Hydrogeochemistry, Radionuclide, Uranium and radon, Groundwater type

1. 서 론

음용수의 대부분을 지표수에 의존하고 있는 국내의 환경여건으로 인해 그동안 지하수는 상대적으로 관심의 대상에서 떨어져 있었다고 할 수 있다. 그러나 지표수의 오염증가로 인한 수돗물에 대한 불신, 지하수를 식수원으로 사용하고 있는 마을상수도 및 소규모 급수시설 등 지하수 이용 지역, 먹는샘물의 시판 등으로 인해서 지하수에 대한 관심이 증대되고 있으나 장시간 노출되면 우리의 경우 만성신장질환, 라돈의 경우는 실내 라돈과 연관하여 폐암 등의 질병을 유발할 가능성이 높은 자연방사성물질과 과도한 농업 및 축산 활동으로 인한 질산성질소 등의 지하수 오염이 환경문제로 부각되고 있는 상황이다(성익환

외, 1999; 김경호 외, 2002; 조병욱 외, 2006; 김태승 외, 2007).

미국을 비롯한 북유럽의 일부 선진국들은 이미 1960년 대부터 전알파 등 자연방사성물질에 대한 조사를 시작하였으며(USGS, 1962; Health Canada, 1968; Wrenn et al., 1975; Arvela et al., 1979; Hess et al., 1985) 자연방사성물질과 현장수질 및 주요 양음이온에 대한 연구도 수행하고 있는 실정이다(Langmuir, 1978; Wilhelm et al., 1997; Banks et al., 1998; Daniel, 2006; David et al., 2009). 국내의 경우 지하수의 수리지화학적 및 동위원소에 대한 연구는 지속적으로 수행되어 오고 있으나(이종운 외, 1997; 조병욱 외, 1998; 함세영 외, 1999; 고용권 외, 2000; 윤 옥 외, 2003; 김건영 외, 2007), 지하수 중 자연방사성물질과 현장수질, 주요 양음이온, 지질 등과의 관계에

*Corresponding author : d8joony@me.go.kr

원고접수일 : 2011. 7. 25 심사일 : 2011. 11. 23 게재승인일 : 2011. 12. 2
질의 및 토의 : 2012. 2. 29 까지

대하여 단편적으로 수행된 바 있으며 체계적인 특성 연구는 미흡한 실정이다(성익환 외, 1999; 조병욱 외, 2006; 김태승 외, 2007; 김문수 외, 2009).

이에 본 연구는 국내 음용으로 사용되는 지하수 247개소(Fig. 1)를 대상으로 현장수질, 주요 양음이온 등의 수리지화학적 자료와 우라늄, 라돈의 자연방사성물질과의 관계 및 암석에 따른 수리지화학적자료와 자연방사성물질에 대한 연구를 수행하였다.

2. 시험방법

2.1. 시료채취 및 전처리

지하수의 현장시료 채취, 보관방법, 분석은 국립환경과학원의 지하수 중 자연방사성물질 함유실태 조사 등에 제시된 시험방법(안)에 준하여 행하였다(김태승 외, 2007; 김문수 외, 2009). 우라늄과 양이온, 음이온 분석용 시료는 0.45 μm 막필터 한 후 125 mL Polyethylene bottle에 담았으며 우라늄과 양이온 시료에 대해서는 중금속의 공침과 흡착을 막기 위해 농질산 1 mL를 첨가하였다. 라돈 시료에 대해서는 현장에서 22 mL PE vial에 Optiphase Hisafe3 섬광용액 12 mL에 현장시료 8 mL를 첨가하여 5분간 잘 흔든 후 라돈과 딸핵종의 방사평형이 이루어진 3시간 후에 측정하였다.

2.2. 분석방법

채취된 지하수 시료는 휴대용 멀티 측정기(Orion multi

5 Star)를 이용하여 수온, pH, EC, Eh, DO 5개 항목을 현장에서 즉시 측정하였다. Si와 양이온 Na, Mg는 Horiva & Jobin사의 ULTIMA2 ICP-OES(유도결합플라즈마 원자 방출광도계)로, 양이온 K는 Agilent사의 7500 Series ICP-MS(유도결합플라즈마 질량분석기)로, 양이온 Ca는 Varian사의 280 FS AAS(원자 흡수 분광광도기)로 분석하였다(Standard Method, 2005; 김문수 외, 2009). 음이온 Cl, SO₄, NO₃, F는 Metrohm사의 850 Professional IC(이온크로마토그래피)로 분석하였으며 음이온 중 HCO₃의 경우는 이산화탄소의 용탈을 막기 위해 현장에서 산중화적정법을 사용하여 신속하게 측정하였다(김문수 외, 2009). 우라늄은 Agilent사의 7500 Series ICP-MS를 사용하여 기기 매 뉴얼에서 제공하는 최적의 조건으로 맞춘 후 검량선을 작성하여 분석하였으며 이때의 R²의 값은 0.9999로 안정된 결과를 보여주었다(김문수 외, 2009). 라돈은 국립환경과학원의 PerkinElmer사 Quantulus™ 1220 (LSC) 2대로 분석하였다. 라돈 함량 값을 얻기 위해 ²²⁶Ra표준선원용액(NIST SRM 4966)을 이용하여 측정효율을 구하였으며 재현성을 위해 3개의 시료를 만들었다(김용제 외, 2006; 김태승 외, 2007). 평균 측정효율은 각기기별로 88.87 ± 0.70, 89.57 ± 2.01%였다. 짧은 반감기(3.82일)로 인하여 표준물질이 없는 라돈의 경우 국내 분석 가능한 5개 기관에서 동시분석을 수행한 결과 서로 신뢰할만한 결과를 얻었다(노회정 외, 2008).

3. 결과 및 고찰

3.1. 현장수질, 주요 양음이온, 자연방사성물질 함량

지하수 원수 247개소에 대한 현장수질, 주요 양음이온 및 자연방사성물질에 대한 통계자료는 Table 1에 정리하였다. 온도 13.7~25.1(17.1)°C, pH 5.9~8.5(6.9), 산화-환원전위(Eh) 33~591(232) mV, 전기전도도(EC) 66~820(245) $\mu\text{S}/\text{cm}$, 용존산소(DO) 0.2~9.4(3.9) mg/L의 범위를 보였으며 대부분 국내 지하수와 비슷한 경향을 나타냈다(이종운 외, 1997; 함세영 외, 1999; 고용권 외, 2000; 김진영 외, 2007; 김문수 외, 2009). 이중 국내 기준치인 pH(5.8~8.5)를 초과한 지점은 없었다.

주요 양이온은 Na 0.9~227.6(16.9) mg/L, Ca 4.2~279.3(23.1) mg/L, K 0.2~9.3(1.9) mg/L, Mg 0.1~100.1(6.0) mg/L이며 음이온은 F 0.0~3.3(0.4) mg/L, Cl 1.8~779.1(19.9) mg/L, SO₄ 0.3~110.9(12.7) mg/L, NO₃-N 0.0~27.4(4.0) mg/L, HCO₃ 15.3~372.1(83) mg/L의 범위를 나타냈다. 이중 F, Cl, NO₃-N 농도는 일부 지하수에서 수질 기준을 초과하였다.

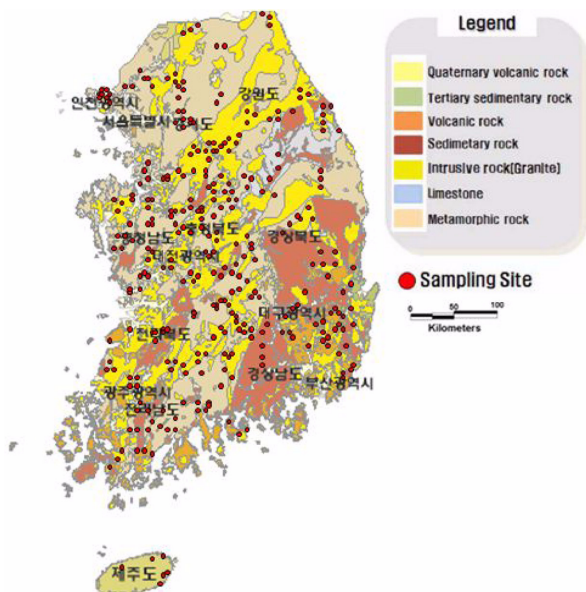


Fig. 1. Location map of the sampling site in this study.

Table 1. Statistical analysis results of various major ions and radionuclides(Rn and U) parameters (n = 247).

Variable	Statistics	Minium	Maxium	Average	Median	Kurtosis	Skewness
T (°C)		13.7	25.1	17.1	17.0	4.39	1.56
pH		5.9	8.5	6.9	6.9	-0.04	0.45
Eh (mV)		33	591	232	194	0.71	1.19
EC (μS/cm)		66	820	245	221	3.15	1.54
DO (mg/L)		0.2	9.4	3.9	4.0	-0.53	0.06
Si (mg/L)		0.4	25.1	11.7	11.4	0.08	0.29
Na (mg/L)		0.9	227.6	16.9	13.0	59.35	7.20
K (mg/L)		0.2	9.3	1.9	1.6	5.11	1.81
Mg (mg/L)		0.1	100.1	6.0	4.2	97.95	8.32
Ca (mg/L)		4.2	279.3	23.1	20.3	86.22	7.70
F (mg/L)		0.0	3.3	0.4	0.3	17.11	3.40
Cl (mg/L)		1.8	779.1	19.9	9.9	115.16	10.36
SO ₄ (mg/L)		0.3	110.9	12.7	9.1	15.85	3.42
NO ₃ -N (mg/L)		0.0	27.4	4.0	2.72	1.33	0.46
HCO ₃ (mg/L)		15.3	372.1	83.5	70.2	7.14	2.15
U (μg/L)		0.0	131.1	5.3	1.1	32.62	5.13
Rn-222 (pCi/L)		18	15,953	2,493	1596	6.01	2.10

자연방사성물질인 U-238과 Rn-222의 함량은 각각 N.D~131.1(5.3) μg/L, 18~15,953(2,493) pCi/L의 값으로 검출되었으며 미국의 우라늄 기준치(30 μg/L)를 초과한 지하수는 12개소와 라돈 제한치(4,000 pCi/L)를 초과한 지점은 48개소였다(USEPA, 2003).

3.2. 지질에 따른 주요 이온들과 방사성물질의 함량

본 연구에 조사된 지하수 주변의 지질을 암석에 따라 4개의 유형으로 분류하면 심성암(화강암) 126개소, 변성암 76개소, 퇴적암 24개소, 화산암 21개소로 나눌 수 있다. 각각의 암석별 주요 양음이온, 우라늄, 라돈의 농도는 Table

2에 나타났다.

각 암석별 주요 이온들은 국내의 일반 지하수들과 유사한 함량 값을 보이고 있으며(이종운 외, 1997; 고용권 외, 2000; 김건영 외, 2007; 김문수 외, 2009) 변성암(편마암) 지역 지하수에서 Na, Mg, Ca, Cl, NO₃-N이 심성암(화강암) 지역 지하수에서 HCO₃이 가장 높은 농도로 나타났다. 우라늄은 변성암 지역 지하수에서 131.1 μg/L, 라돈은 화강암 지역에서 15,963 pCi/L로 최고 농도가 나타났지만 평균적으로 심성암(화강암), 변성암, 퇴적암, 화산암의 순으로 우라늄과 라돈이 검출되고 있다. 이는 미국 North Carolina주 117개소 지하수 분석 결과인 화강암, 편마암,

Table 2. Statistical analysis results of major ions according to rock type(n = 247).

(a) Igneous rocks

Statistics	Plutonic(granite) rocks(n = 126)						Volcanic rocks(n = 21)					
Variable	Minium	Maxium	Average	Median	Kurtosis	Skewness	Minium	Maxium	Average	Median	Kurtosis	Skewness
Na (mg/L)	4.2	175.7	16.1	13.2	70.08	7.56	8.6	43.2	17.0	14.4	3.03	1.73
K (mg/L)	0.2	9.3	1.7	1.4	12.39	2.60	0.4	4.9	2.0	1.2	-1.07	0.56
Mg (mg/L)	0.1	14.0	4.7	3.8	0.35	1.01	0.3	17.2	5.0	4.9	6.23	1.96
Ca (mg/L)	4.9	56.3	20.8	19.8	1.42	1.10	4.2	35.5	17.1	15.2	-0.90	0.38
F (mg/L)	0.0	3.3	0.4	0.3	14.77	3.30	0.0	0.8	0.3	0.2	0.00	1.06
Cl (mg/L)	1.8	140.3	14.7	9.8	23.15	4.37	3.1	66.6	16.4	8.3	2.72	1.89
SO ₄ (mg/L)	0.3	110.9	10.9	8.2	31.80	5.05	1.9	61.3	14.1	7.2	2.71	1.84
NO ₃ -N (mg/L)	0.1	18.8	4.2	2.9	3.46	1.70	0.0	12.9	2.9	1.8	3.30	1.72
HCO ₃ (mg/L)	15.3	372.1	77.9	70.2	15.12	2.97	39.7	119.0	73.4	67.1	-0.50	0.53
U (μg/L)	0.0	76.0	7.6	1.7	8.86	3.03	0.0	4.3	0.9	0.2	2.19	1.71
Rn-222 (pCi/L)	18	15,953	3,190	2,351	4.28	1.83	95	3,152	945	724	1.36	1.24

Table 2. Continued.

(b) Metamorphic and sedimentary rocks

Variable	Metamorphic rocks(n=76)						Sedimentary rocks(n=21)					
	Minium	Maxium	Average	Median	Kurtosis	Skewness	Minium	Maxium	Average	Median	Kurtosis	Skewness
Na (mg/L)	4.1	227.6	18.1	11.3	35.10	5.86	0.9	63.3	16.9	12.8	2.85	1.66
K (mg/L)	0.6	6.7	2.1	1.8	2.38	1.52	0.2	6.8	2.0	1.5	2.26	1.50
Mg (mg/L)	0.7	100.1	7.7	4.9	47.76	6.38	0.4	26.0	8.7	6.8	-0.07	0.89
Ca (mg/L)	6.1	279.3	25.8	20.0	46.47	6.35	5.0	72.7	32.2	25.6	-0.40	0.80
F (mg/L)	0.0	1.1	0.3	0.3	1.61	1.31	0.0	2.3	0.3	0.2	10.49	3.04
Cl (mg/L)	2.0	779.1	30.8	10.2	38.36	6.17	2.2	59.7	15.9	9.3	2.09	1.72
SO ₄ (mg/L)	1.5	63.6	14.0	10.6	4.75	2.15	1.7	71.8	16.6	12.4	7.18	2.33
NO ₃ -N (mg/L)	0.1	27.4	4.3	2.7	8.52	2.48	0.0	13.0	3.7	2.2	0.74	1.40
HCO ₃ (mg/L)	15.3	280.6	80.3	70.2	6.40	2.11	24.4	247.1	131.7	134.2	-0.91	0.18
U (μg/L)	0.0	131.1	3.9	0.6	60.58	7.50	0.1	8.6	1.7	0.9	5.07	2.24
Rn-222 (pCi/L)	31	9,721	2,152	1,370	2.49	1.57	69	5,666	1,261	887	5.65	2.14

변성퇴적암, 변성화산암의 순서와 비슷한 경향을 보이고 있다(David et al., 2009). 또한 변성암과 화강암 지역 지하수에서 우라늄과 라돈의 평균값과 중앙값이 차이가 있고 왜도와 첨도 값이 큰 이유는 이들 지역에서 대부분이 낮은 값을 보이고 있지만 일부 지하수에서 기준치와 제안치를 초과한 높은 값이 나타나기 때문으로 사료된다.

3.3. 현장수질 자료 및 자연방사성물질과의 관계

라돈은 불활성 기체로 온도의 증가에 따라 용해도가 감소하는 것으로 알려져 있다(Wilhelm et al., 1997). 조사된 247개소 지하수의 수온과 라돈방사능 농도와의 상관관계를 심도와 지역에 따라 Fig. 2(A)에 도시했으나, 큰 특성을 보이지는 않고 있으며($R^2=0.003$) P-value 값은 0.05 이하를 보였다. Langmuir(1978)는 pH와 우라늄 광물의 용해도에 대하여 언급한 바 있으며 이에 본 연구에서 조사된 247개소 지하수의 심도에 따라 pH와 우라늄의 상관관계를 Fig. 2(A)에 도시한 결과 큰 상관성을 보이고 있지 않았지만($R^2=0.0185$) P-value 값은 0.05 이하를 보였다. 지역과 암석에 따라 도시한 결과에서는 우라늄 농도의 기준이 초과된 지점의 경우 심성암(화강암)이 대부분으로 나타났으며 이 암석의 지하수에서는 pH가 중성에서 약알카리성을 나타내고 있으며 pH의 증가에 따른 우라늄이 증가하는 경향을 보이고 있다(Fig. 2(B)). 또한 국내 다양한 암석과 지질시대 중에서 중생대 화강암과 선캄브리아기 변성암이 주로 분포하는 경기, 충남, 전북, 전남 지역에서 퇴적암과 화산암이 분포하는 경남, 제주 지역에 비하여 우라늄과 라돈의 함량이 높게 검출되었다(Fig. 2).

지하수의 이온함량을 알 수 있는 전기전도도(EC), 산화

-환원 전위(Eh)와 라돈, 우라늄의 관계를 도시한 결과 큰 상관성을 보이지 않았으며 유의확률값(P-value)은 0.05이하로 나타났다. 우라늄의 경우 Eh 값이 200 mV 이하의 값에서 기준치를 초과하는 지점들이 나타났다(Fig. 3).

3.4. 주요 양음이온의 특성과 자연방사성물질과의 관계

주요 양음이온의 함량에 대한 통계자료는 표 3에 나타내었다. 일부 해안지역 또는 석회암지역에서는 Cl과 Ca, Mg가 다른 지역에 비하여 높게 검출되었으며, 인위적 오염의 지표인 질산성질소의 경우 국내 기준치를 초과한 일부 지점이 나타났다.

주요이온들의 상대적인 함량을 나타내는 piper diagram에 분석된 결과를 도시한 결과, 대부분의 지하수는 Ca-(Na)-HCO₃ type을 보였다(Fig. 4). 정찬호 외(1997)에 의하면 일반적으로 화강암과 화강편마암 대수층의 진화단계는 초기단계에서는 Ca-(Na)-HCO₃ type에서 시작하여 점차 진화 과정을 거치면서 Na-Ca-HCO₃ type과 Na-HCO₃ type으로 되는 경향을 보인다고 하였다. 일부 해안지역에서 지하수는 Na+K-Cl type, 고생대 조선계 석회암과 백운암 지역 지하수는 Ca-Mg-HCO₃ type으로 산출되었다.

Fig. 5와 6은 주요 양음이온과 자연방사성물질과의 관계를 도시한 것이다. 우라늄과 라돈의 자연방사성물질과 주요 양 · 음이온들은 대체로 정규분포하고 있지만 상관성은 크게 없는 것으로 보이나 서로 비슷한 양상을 띠고 있다. HCO₃의 경우 우라늄의 값이 20 μg/L보다 높게 나타난 심성암(화강암) 지역에서 다른 지역($R^2=0.024$)에 비하여 정의 관계($R^2=0.3896$)를 나타내기도 하였다(Fig. 6). 또한, 불소는 화강암 지역에서 지하수공의 심도가 깊

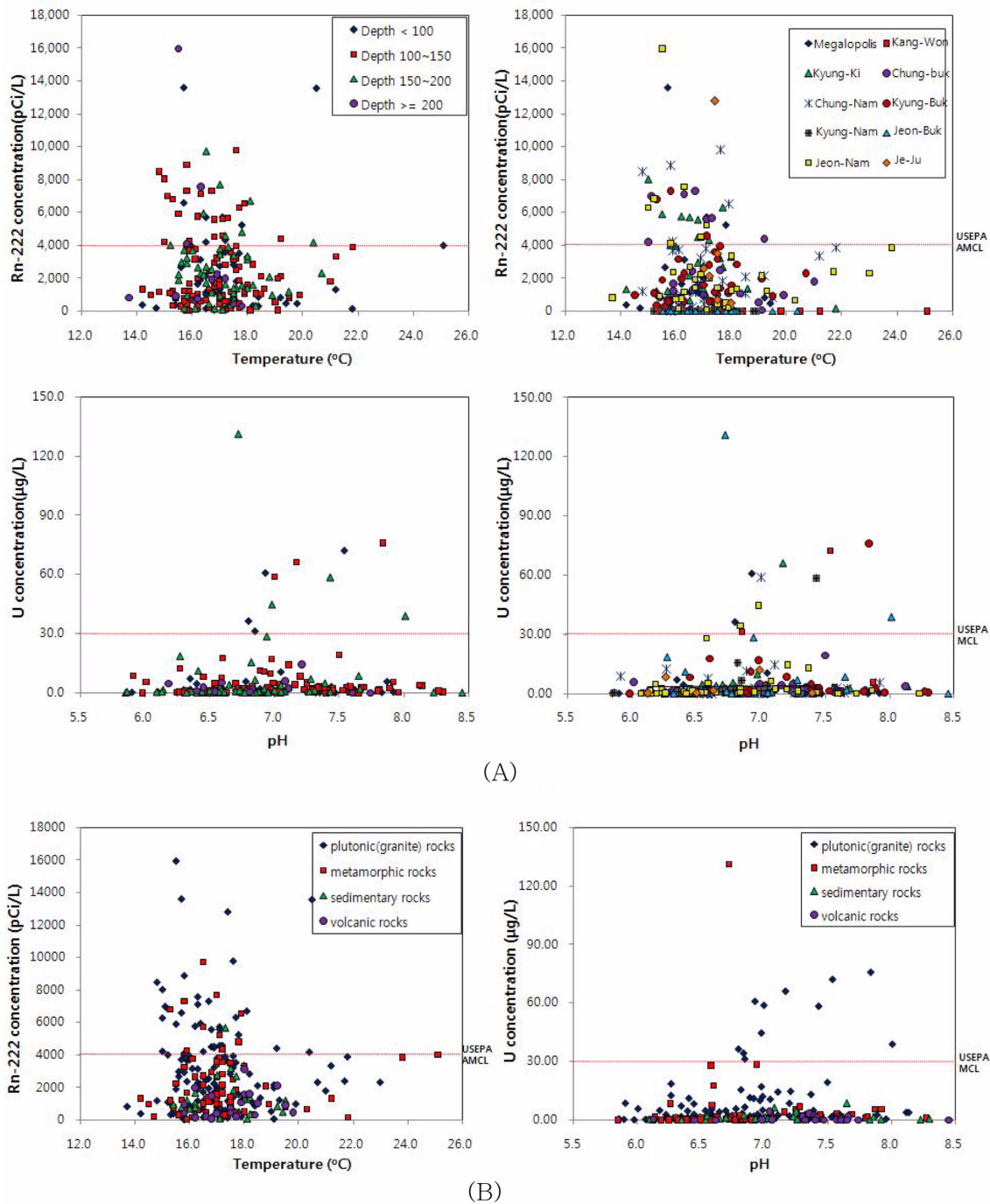


Fig 2. Plots of *in-situ* parameters versus radionuclides(Rn-222, U-238) data of the groundwaters in the study area(A: depth and Province, B: rock type).

이질수록 함량 값이 증가한다고 알려져 있으며(추창오 외, 2008) 우리나라의 경우 화강암 지역에서 다른 암석에 비하여 높은 함량을 보인다고 보고된 바 있다(성익환 외, 2002; 조병욱 외, 2006; 김태승 외, 2007; 노희정 외, 2008). 이에

본 연구에서 화강암 지역에서 조사된 지하수의 불소와 우라늄 농도를 비교한 결과 큰 상관성을 보이지는 않았으며 P-value 값은 0.05미만으로 나타났다. 또한, 우리나라의 초과 지점은 불소 농도가 대부분 1.5 mg/L이하에서 나타났다

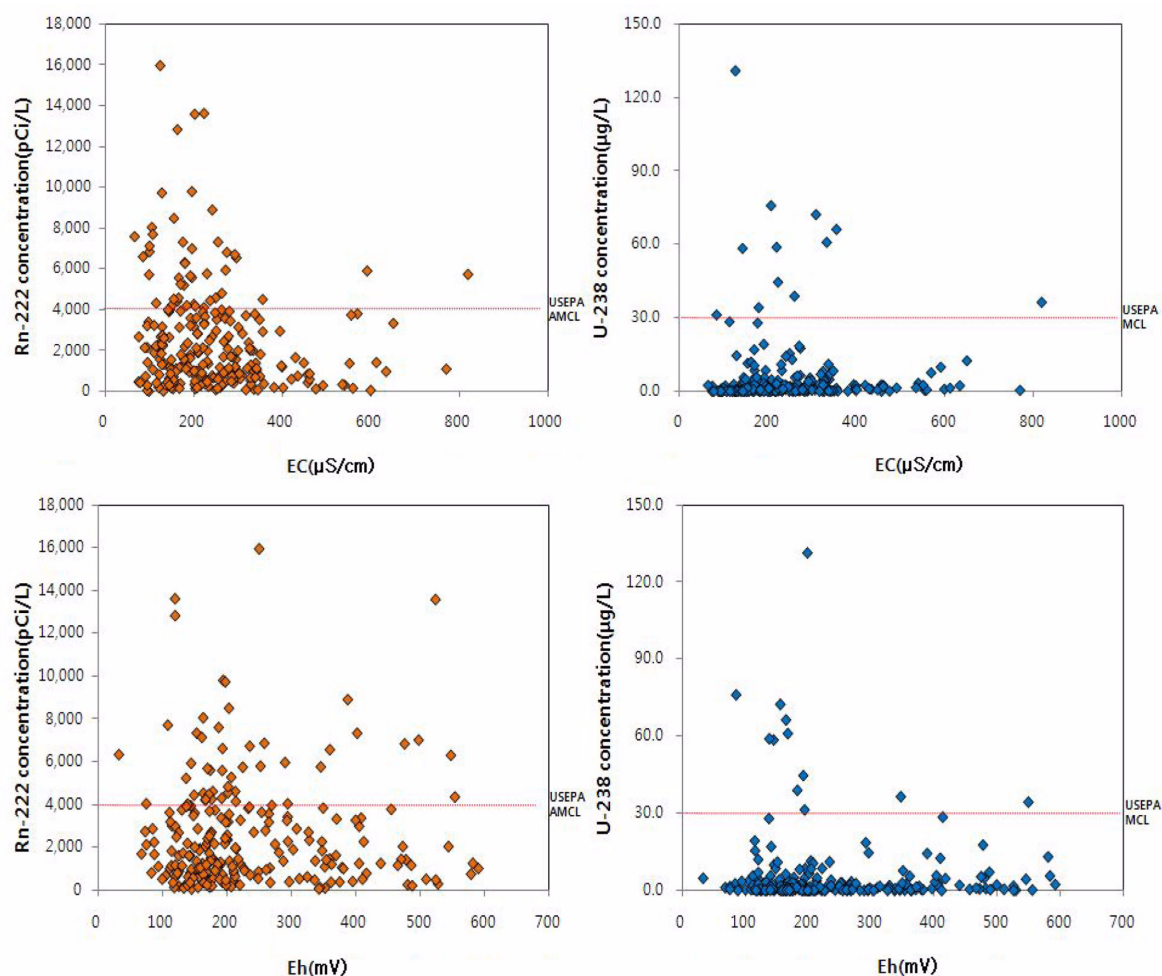


Fig. 3. Plots of *in-situ* parameters (EC, Eh) versus radionuclides(Rn-222, U) data of the groundwaters in the study area.

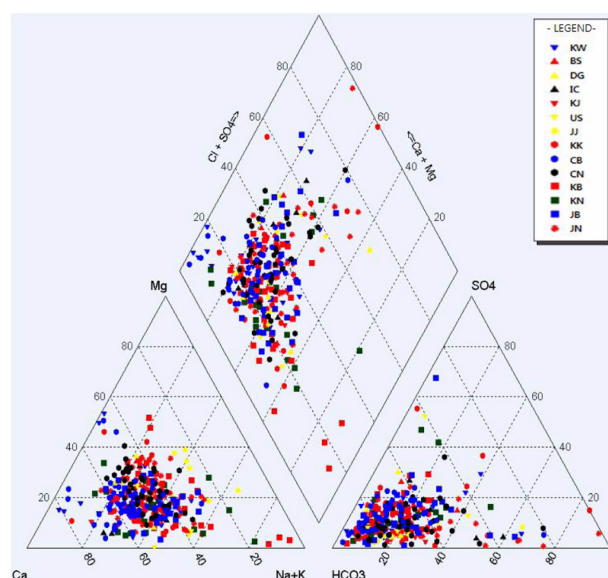


Fig. 4. Piper diagram of major ions for groundwater type.

다(Fig. 7).

향후 자연방사성물질과 주요 양음이온과의 관계를 더 자세히 알기 위해서는 암석(광물)과 지질시대 등과의 연관성에 대한 연구가 더 필요할 것으로 사료된다.

4. 결 론

음용으로 이용되고 있는 지하수 247개소에 대해 2009년 3월~2009년 12월까지 시료채취 및 현장항목측정, 주요양음이온, 자연방사성물질(우라늄, 라돈)에 대한 분석과 연구를 수행하였다.

현장항목의 측정값은 온도 13.7~25.1(17.1)°C, pH 5.9~8.5(6.9), 산화-환원전위(Eh) 33~591(232) mV, 전기전도도(EC) 66~820(245) μ S/cm, 용존산소(DO) 0.2~9.4 (3.9) mg/L의 범위를 주요 양 · 음이온의 함량은 Na 0.5~227.6(17.2), Ca 1.0~279.3(22.7), K 0.0~9.3(1.8), Mg 0.1~100.1

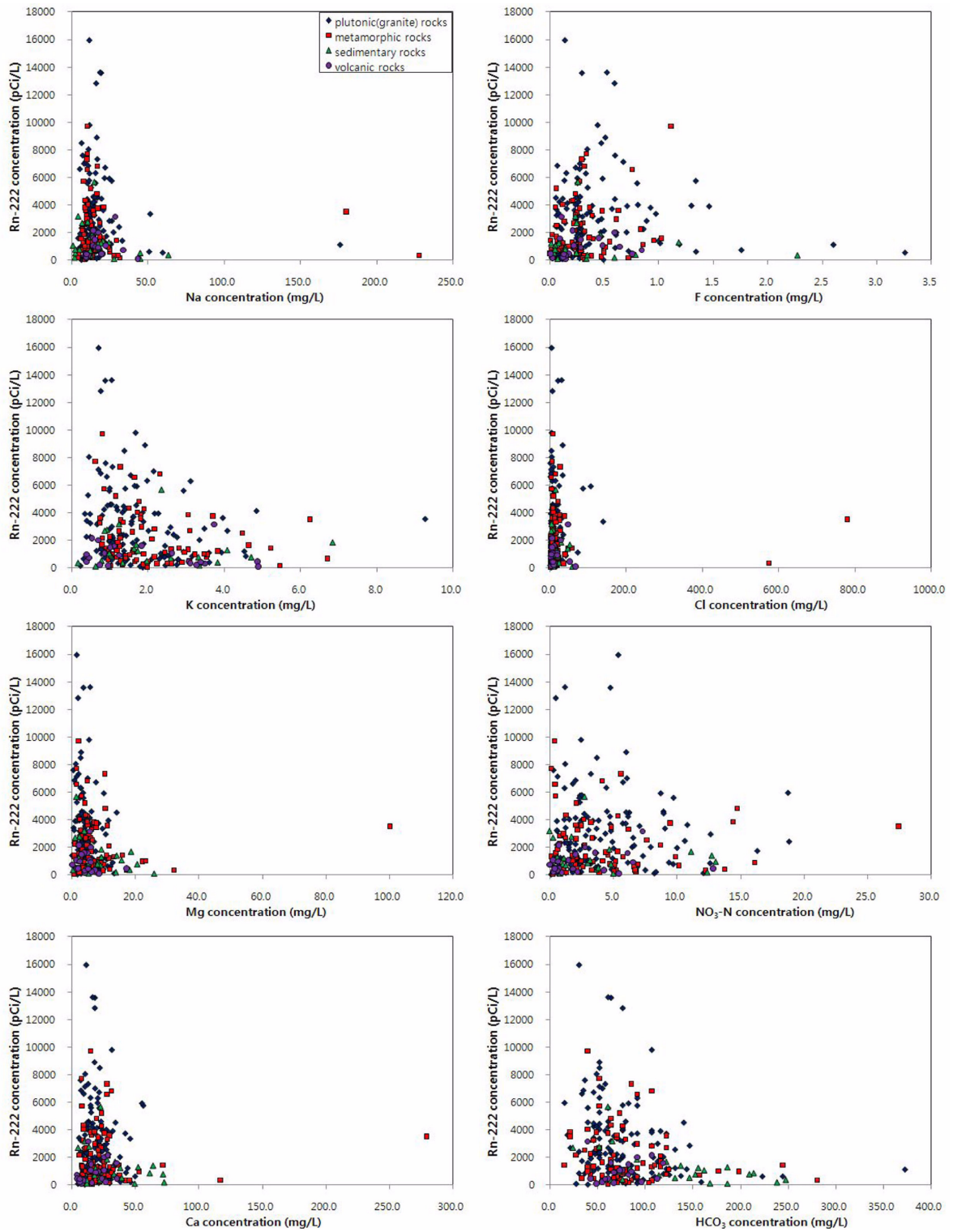


Fig. 5. Plots of major ion(Na, K, Mg, Ca, F, Cl, NO₃-N, HCO₃) versus Rn-222 data of the groundwaters in the study area.

(17.1), F 0.0~3.3(0.4), Cl 0.9~779.1(19.8), SO₄ 0.3~120.4 (12.7), NO₃-N 0.0~27.4(4.2), HCO₃ 6~372(87) mg/L의 범위를 보였다.

자연방사성물질인 U-238과 Rn-222의 함량은 각각 N.D~131.1(5.3) μ g/L, 18~15,953(2,493) pCi/L의 값으로 검출되었으며 일부 지하수는 미국의 우라늄 기준치(30 μ g/

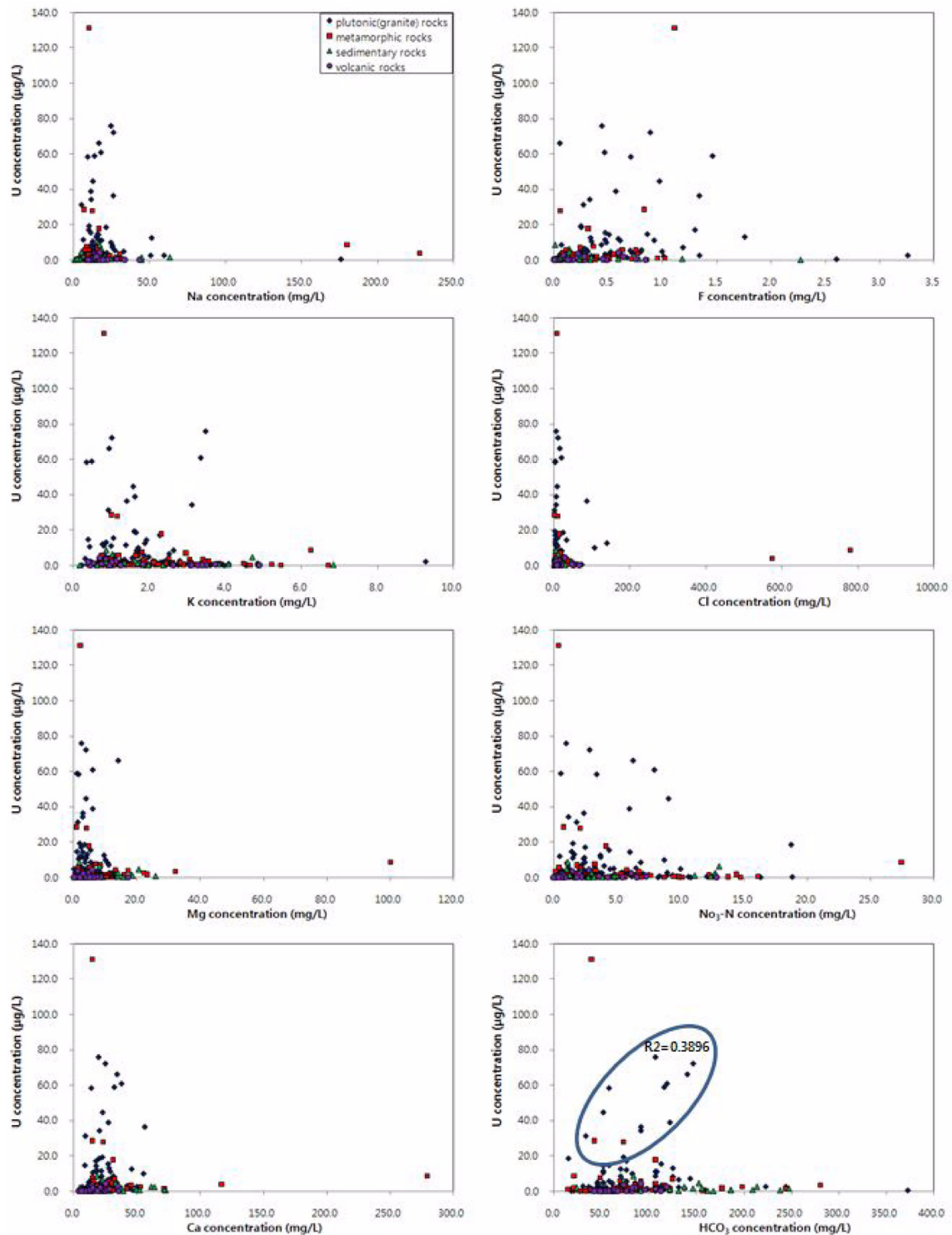


Fig. 6. Plots of major ion(Na, K, Mg, Ca, F, Cl, NO₃-N, HCO₃) versus U data of the groundwaters in the study area.

L)와 라돈 제안치(4,000 pCi/L)를 초과하였다.

우리늪은 변성암(화강편마암) 지역 지하수에서 라돈은 화강암지역 지하수에서 최고 농도가 검출 되었으며 경기,

충남, 전북, 전남 지역에서 다른 지역에 비하여 우리늪과 라돈의 함량이 높게 검출되었다. 조사된 247개소 지하수의 수온과 라돈방사능 농도는 상관관계를 보이지는 않았

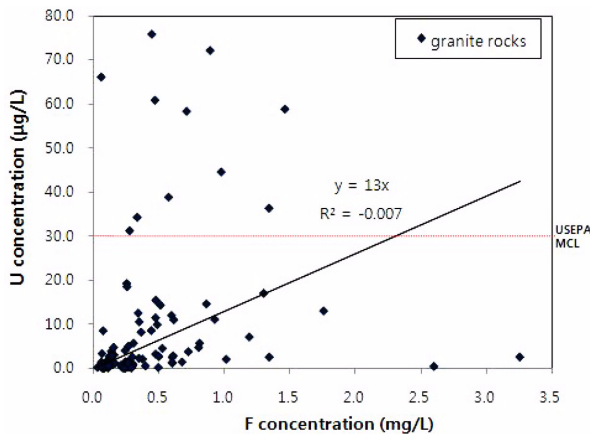


Fig. 7. Correlation of F versus U data for groundwaters in the study area.

으나 우라늄 농도의 기준이 초과된 지점의 경우 pH가 6.8에서 8.0을 띄고 있으며 Eh가 200 mV 이하의 값을 보였다.

주요 양음이온을 파이퍼도에 도시한 결과 대부분의 지하수는 Ca-(Na)-HCO₃ type을 보였다. 자연방사성물질과 주요 양·음이온들과의 상관성은 크게 없는 것으로 나타났다. 하지만 우라늄과 HCO₃의 경우 우라늄이 20 µg/L보다 높게 나타난 화강암 일부 지역에서 정의 관계($R^2=0.3896$)를 나타내기도 하였다. 또한, 깊은 심도의 화강암에서 높은 값을 나타내는 불소와 우라늄의 경우에도 상관성을 나타내지는 않았다. 향후 암석(광물)과 지질시대 등과의 연관성에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

사 사

이 연구는 국립환경과학원 ‘지하수 중 방사성물질 함유 실태 조사(Ⅲ)’ 연구(2009-61-1117)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

고용권, 김천수, 배대석, 이동익, 2000, 문경지역 심부지하수의 수리지화학 및 환경동위원소 연구, *자원환경지질*, **33**(6), 469-489.
 김건영, 고용권, 배대석, 원종호, 정도환, 최병영, 2007, 경북 영천 지역 지하수의 지구화학 및 환경동위원소 연구, *지하수토양환경*, **12**(4), 32-50.
 김경호, 윤성택, 채기탁, 최병영, 김순오, 김강주, 김형수, 이철우, 2002, 금강 권역 충적층 지하수의 질산염 오염: 질산성 질소의 기원과 거동 고찰 및 안전한 용수 공급을 위한 제언, *지질공학*, **12**(4), 471-484.

김문수, 유순주, 김동호, 윤정기, 노희정, 정혜성, 정동일, 정도환, 주병규, 임태숙, 박이훈, 홍상규, 2009, 지하수 중 자연방사성물질 함유실태 조사(Ⅲ), 국립환경과학원, p. 227.

김용제, 조수영, 윤윤열, 이길용, 2006, 극저준위 액체심판계수기를 이용한 지하수 중 라돈(²²²Rn) 측정법 등 연구, *지하수토양환경*, **11**(5), 59-66.

김태승, 박종겸, 엄익춘, 윤정기, 정도환, 강기철, 윤대근, 권지철, 2007, 지하수 중 방사성물질 함유실태 조사(Ⅰ), 국립환경과학원, p. 155.

노희정, 김태승, 박종겸, 윤정기, 김문수, 정일록, 정도환, 주병규, 전상호, 심영은, 백용옥, 2008, 지하수 중 방사성물질 함유실태 조사(Ⅱ), 국립환경과학원, p. 195.

성익환, 김대업, 우형주, 조병욱, 박중권, 이한영, 정강섭, 윤윤열, 조수영, 이용주, 이병대, 김통권, 김경수, 추창오, 신동천, 1999, 지하수 중 방사성물질 함유실태에 관한 조사연구(Ⅰ), 국립환경과학원, p. 338.

성익환, 조병욱, 김대업, 김건한, 박덕원, 박중권, 윤윤열, 이봉주, 이병대, 이종철, 임현철, 정강섭, 조수영, 홍영국, 장우석, 양재하, 신동천, 한인섭, 2002, 지하수 중 방사성물질 함유실태에 관한 조사연구(Ⅳ), 국립환경과학원, p. 357.

윤 옥, 지세정, 소철섭, 2003, 광주천 인근 천부 지하수의 수리지화학 및 안정동위원소 특성, *자원환경지질*, **36**(6), 441-455.

이종운, 전효택, 전용원, 1997, 국내 화강암질내 심부지하수의 지구화학적 특성, *대한지하수환경학회지*, **4**(4), 199-211.

정찬호, 김통권, 김천수, 김수진, 1997, 편마암-물 상호반응에 의한 지하수의 지화학적 특성과 생성기원, *지질공학*, **10**(1), 33-44.

조병욱, 김건한, 김연기, 성익환, 안주성, 윤옥, 윤윤열, 이길용, 이병대, 이홍진, 임현철, 조수영, 홍영국, 2006, 지하수 중 방사성물질 함유실태 조사, 국립환경과학원, p. 200.

조병욱, 성익환, 추창오, 이병대, 김통권, 1998, 대보화강암과 불국사화강암지역 먹는샘물의 수리지화학적 특성, *지질공학*, **8**(3), 247-259.

추창오, 김종태, 정일문, 김남원, 정교철, 2008, 화강암지역 지하수 수질의 특징과 불소원인에 관한 물-암석반응 연구, *지질공학*, **18**(1), 103-115.

함세영, 조명희, 성익환, 이병대, 조병욱, 심형수, 1999, 부산남부 지역 지하수와 서북부지역 지하수의 수리지화학적 특성 비교, *대한지하수환경학회지*, **6**(3), 140-151.

Arvela H., Blomqvist L., Mustonen R., 1979, In Situ External Environmental Gamma Ray measurements, In: *Studies on Environmental Radioactivity in Finland 1976-1977*, Report STL-A 26, Helsinki; Institute of Radiation Protection.

Banks D., Bjørn F., Aase K. M., Jan R. K., Terje S., 1998, The chemistry of Norwegian groundwaters : I. The distribution of radon, major and minor elements in 1604 crystalline bedrock groundwaters, *The Science of the Total Environment*, **222**, 71-91.

David S. Vinson., Avner Vengosh., Daniella Hirschfeld., Gary S.

- Dwyer., 2009, Relationships between radium and radon occurrence and hydrochemistry in fresh groundwater from fractured crystalline rocks, North Carolina (USA), *Chemical Geology*, **260**, 159-171.
- Daniel Marcos Bonotto., 2006, Hydro(radio)chemical relationships in the giant Guarani aquifer, Brazil., *Journal of Hydrology*, **323**, 353-386.
- Health Canada, 1968, The Guidelines for Canadian Drinking Water Quality and the Guideline Technical Documents.
- Hess C. T., Michel J., Horton, T. R. and Coniglio W. A., 1985, The occurrence of radioactivity in public water supplies in the United States, *Health Physics*, **48**, 553-586.
- Langmuir D., 1978, Uranium solution-mineral equilibria at low temperatures with applications to sedimentary ore deposits, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **42**, 547-569.
- Standard Method, 21st Edition, 2005.
- USEPA, 2003, National primary drinking water standards, Office of Water, EPA 816-F-03-016.
- USGS, 1962, Data on uranium and radium in groundwater in the USA, Professional Paper No. 426.
- Wilhelm E., Battino R., and Wilcox R. J., 1977, Low-pressure Solubility of Gases in Liquid Water, *Chem. Revs*, **77**(2), 219-262.
- Wrenn W. M., Spitz, H., Och C. N., 1975, "Design of a continuous digital output environmental radon monitor." IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-22, 645.