

고함량 자연방사성물질 우려지역에 대한 지하수 환경 특성 연구

정도환¹ · 엄익춘¹ · 윤정기¹ · 김문수¹ · 김영규² · 김태승^{1*}

¹국립환경과학원, ²경북대학교

Characteristics of Groundwater Environment in Highly Enriched Areas of Natural Radionuclides

Do Hwan Jeong¹ · Ig Chun Eom¹ · Jeong Ki Yoon¹ · Moon Su Kim¹
Yeong Kyoo Kim² · Tae Seung Kim^{1*}

¹National Institute of Environmental Research

²Department of Geology, Kyungpook National University

ABSTRACT

Groundwater sampling was performed at 38 wells where they are located in the areas with high uranium and radon (marked as A and B, respectively) concentrations, which were based on the previous research results. *In-situ* parameters (temperature, pH, EC, Eh, DO) and natural radionuclides (uranium and radon) were analyzed to figure out the characteristics of groundwater environments. *In-situ* data did not show any relations to natural radionuclide data, which could be caused by groundwater mixing, depths of wells, and geological settings, etc. But the highest radon well presented relatively low temperature value and the highest uranium well presented relatively low pH values. The highest uranium concentration ranging 1.14~188.19 µg/L showed in the area of A region consisted of Jurassic two-mica granite. The areas of Jurassic biotite granite and Cretaceous granite in the A region have the uranium concentrations ranging 0.10~49.78 µg/L and 0.36~3.01 µg/L, respectively. The uranium values from between wells of community water systems (CWSs) penetrating fractured bed-rock aquifers and personal boreholes settled in shallow aquifers near the wells of CWSs show big differences. It implies that the groundwaters of the two areas have evolved from different water-rock interaction paths that may be caused by various types of wells having different aquifers. High radon activities in the area of B region composed of Precambrian gneiss showed ranging from 6,770 to 64,688 pCi/L. Even though the wells are located in the same geological settings, their radon concentration presented different according to depth and distance.

Key word : Groundwater, Uranium, Radon, Geological setting, Depth

1. 서 론

음용수의 대부분을 지표수에 의존하고 있는 국내의 여건으로 인해 그동안 지하수에 대한 관심은 상대적으로 적었으며, 그중 방사성물질에 대한 관심은 다른 위해한 물질에 비해 상대적으로 낮았으나 최근 국민의 건강과 관련하여 지하수중 자연방사성 물질에 대한 관심이 점점 높아지고 있다. 지하수중 자연방사성물질은 인위적인 오염에 의한 것이 아니라, 지구 내부 암석에 존재하며 지구의 탄생과 더불어 자연적으로 존재해 오고 있으며 연간 방사성

양의 82%는 지질기원으로 자연방사성 핵종에 의한 것이다. 이러한 자연방사성물질에 장시간 노출되면 우리나라의 경우 만성신장질환, 라돈의 경우는 실내 라돈과 관련하여 폐암 등의 질병을 유발할 가능성이 높은 것으로 보고되고 있다(환경부, 1998).

국내의 경우 1996년에 국내 일부지역에 음용 지하수에 대한 방사성물질 검출이 보도된 후, 전국 일부 지역에 대해 국립환경과학원에서 실태조사를 실시하였다. 1차 실태조사(성익환 외, 1999; 2000; 2001; 2002)는 지질별로 분류하여 지하수에 대한 우라늄, 라돈, 전알과 등 자연방

*Corresponding author : tskim99@me.go.kr

원고접수일 : 2010. 2. 10 심사일 : 2010. 2. 11 게재승인일 : 2010. 11. 2
질의 및 토의 : 2011. 2. 28 까지

사성물질의 함유량 특성 조사를 하였으며, 2차 실태조사(조병욱 외, 2006)는 기존 고함량 지점과 마을상수도 등의 우라늄·라돈·전알과 함유량 특성 조사를 실시하였다. 2007년부터 2016년 까지 3차 지하수중 자연방사성물질 실태조사 계획이 수립되어 2007년도 초년도 조사와 시범정밀 조사가 실행되었으나(김태승 외, 2007), 외국에 비해 미흡한 실정이다(Banks et al., 1998; USGS, 2000, USGS, 2001).

과거 실태조사의 결과 지하수중 자연방사성물질이 지질에 따라 함량의 분포가 다르다는 것이 보고된 바 2006년 2차 실태조사시 우라늄 고함량으로 나타난 A(대전)지역과 라돈 고함량으로 나타난 B(춘천)지역을 선정하였다. 조사 지역 내 지하수에 대한 현장수질과 자연방사성물질을 분석하여 시대와 암석에 따른 지질 및 관정의 심도와 관정 사이의 거리에 따른 특성을 파악하여 지하수중 우라늄과 라돈 등 자연방사성물질에 대한 관리방안과 지하수 보전 대책의 과학적 근거 자료로 활용되는 것을 목적으로 하고 있다.

2. 지질개요

본 연구의 A와 B 조사 지역 지질은 1:50,000(한국지질자원연구원, 1965; 1974; 1977; 1980)과 1:250,000만 지질도(한국지질자원연구원, 1996)를 이용하여 지질시대별, 암석 및 광물에 따라 분류하였다. A 지역의 지질은 주로 시대미상, 유라기, 백악기 화강암으로 구성되어 있으며 B 지역의 지질은 선캠브리아기와 시대미상의 (화강)편마암, 편암, 화강암으로 이루어져 있다(Figs. 1, 2).

A 지역의 중심부의 많은 부분을 차지하고 있는 유라기 복운모화강암은 관입암으로써 육안으로는 중립 내지는 세립질이다. 구성광물로는 석영, 페타이트, 사장석, 미사장석 및 흑운모이고 소량의 백운모와 저어콘, 루틸 등을 협재하고 있으며 사장석의 경우 일부 알바이트화 되어 있다. A 지역의 북부 등의 일부 지역에 분포하는 유라기흑운모화강암도 관입암으로써 육안으로는 중립질이며 백운모를 포함하지 않는 것이 특징이다. B 지역의 선캠브리아기 편마암은 대부분 우백질 장석 흑운모반상편마암과 백운모 장석 편마암으로 이루어져 있으며 편암류들이 협재되어 있다.

3. 시료채취 및 분석

본 연구를 위해 선정된 마을상수도, 개인관정 등 A와 B 지역의 지하수공 38개 지점에 대한 시료채취는 2007년 9월~11월 사이에 수행하였으며 조사대상 지하수 공들은

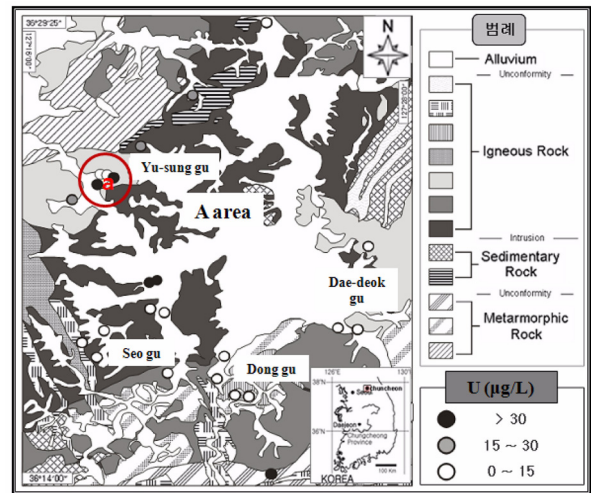


Fig. 1. Map of geologic setting with uranium concentrations in A area.

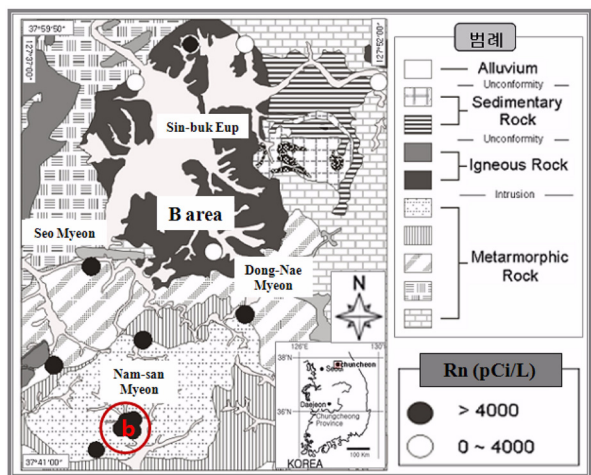


Fig. 2. Map of geologic setting with radon concentrations in B area.

3~5분 정도 배출하여 수온 등의 현장수질이 안정화된 후 채수하였으며 현재 음용 등을 목적으로 사용되고 있다.

우라늄 분석을 위해 채취한 물 시료는 셀룰로스막필터(0.45 µm)와 진공펌프를 이용하여 물 속에 존재하는 부유물질을 제거한 후 125 mL시료 용기에 담았으며 유기 작용, 금속 이온들의 침전이나 용기내의 흡착을 방지하기 위해 현장에서 농질산(HNO₃)을 첨가하여 pH를 2 이하로 유지하였다. 우라늄 분석은 국립환경과학원의 7500 Series ICP/MS(Agilent사)를 사용하였으며 Plasma Condition, Ion Lenses, Q-Pole Parameters, Detector Parameters 등에 대해 Tuning을 통하여 기기제작사에서 제공하는 매뉴얼에 따른 기기분석의 최적 조건으로 조정 한 후 검량선을 작성하여 분석하였다. 검량선의 R²의 값은 0.9999로 안정

된 결과를 보여주었다(국립환경과학원, 2007). 라돈 분석을 위해서는 22 mL 시료 용기에 지하수 시료 8 mL와 섬광용액(Optiphase Hisafe3) 12 mL를 첨가하여 5분간 잘 흔들어 섞은 후 3시간 정도 안정화 시킨 후 국립환경과학원의 PerkinElmer사 Quantulus™ 1220 (LSC)로 분석하였다. 라돈 함량 값을 얻기 위해 ²²⁶Ra 표준선원용액(NIST SRM 4966)을 이용하여 측정효율을 구하였으며 재현성을 위해 3개의 시료를 만들었다(김용제 외, 2006; 김태승 외, 2007). 평균 측정효율은 90.2 ± 0.84%였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 국내 · 암석에 따른 자연방사성물질 함량

국립환경과학원의 실태조사 결과, 지하수중 자연방사성 물질의 함량은 지질에 따라 함량의 차이가 있다고 보고되어진 바 국내의 암석과 지하수에 따른 우라늄과 라돈의 함량을 Table 1에 나타냈다. 국내 암석 중 우라늄은 화강암과 옥천계변성퇴적암의 흑색셰일에서 라돈은 화강암 계

통과 변성암에서 높은 함량을 보였다(Kim, 1987; 성익환 외, 2000; 2001; 홍영국 · 홍세선, 2001).

4.2. 조사 지역 지하수의 현장수질

휴대용 멀티 측정기(Orion multi 5 Star, HORIBA water quality monitor)를 이용하여 지하수의 수질이 안정화된 후 수온, pH, 전기전도도(EC), 산화-환원 전위(Eh), 용존 산소(DO) 등을 현장에서 측정하였다. 38개 지하수 시료에 대한 현장 측정 자료는 Table 2에 항목별로 기술되어 있다.

라돈의 경우 불활성 기체로서 온도의 증가에 따라 용해도가 감소하는 것으로 알려져 있으며(Wilhelm et al., 1977), 우라늄의 경우 중성 및 알카리성 pH의 범위에서는 상당한 양의 우라늄이 탄산염 화합물 상태로 수용액에 잔류하는데 비해서 산성의 낮은 pH에서는 용존 우라늄의 농도가 높은 경향을 나타낸다(Langmuir, 1980). 본 연구 지역들의 지하수공 심도 차이와 지하수 관정 주변 지질(화강암, 화강편마암, 퇴적암, 화산암 등)의 차이로 인하여

Table 1. Uranium and radon concentrations of diverse rocks in South Korea and groundwater in other countries

Rock type		Area (No. of sample)	U	Rn
Rock	Meta-sedimentary rocks (Black shale)	Ogcheon (102) ¹⁾	294.0 ppm	-
	Granite rocks	Songrisan granite (30) ²⁾	4.03 ppm	1.35 pCi/g
	Sedimentary rocks	Yucheon group (11) ³⁾	1.49 ppm	0.50 pCi/g
	Metamorphic rocks	Yulri formation (6) ⁴⁾	1.99 ppm	0.67 pCi/g
Ground-water	Granite	Norway ⁵⁾ (163)	16 mg/L (~750 mg/L)	700 Bq/L (~19,900 Bq/L)
		Pennsylvania, USA ⁶⁾ (116)	-	(49~1,300 pCi/L)
	Sedimentary rocks	Norway ⁵⁾ (30)	-	22 Bq/L (~410 Bq/L)
		Illinois, USA ⁷⁾ (116)	1.3 mg/L (0~17 mg/L)	267 pCi/L (< 80~1,300 pCi/L)
	Metamorphic rocks	Poland ⁸⁾ (654)	-	(0~92.5 Bq/L)

1) Kim(1987) 2) NIER(2000) 3) NIER(2001) 4) Hong et al.(2001) 5) Frengstad(2000), Banks(1998), 6) USGS(2000), 7) USGS(2001b) 8) Tadeusz et al(2004)

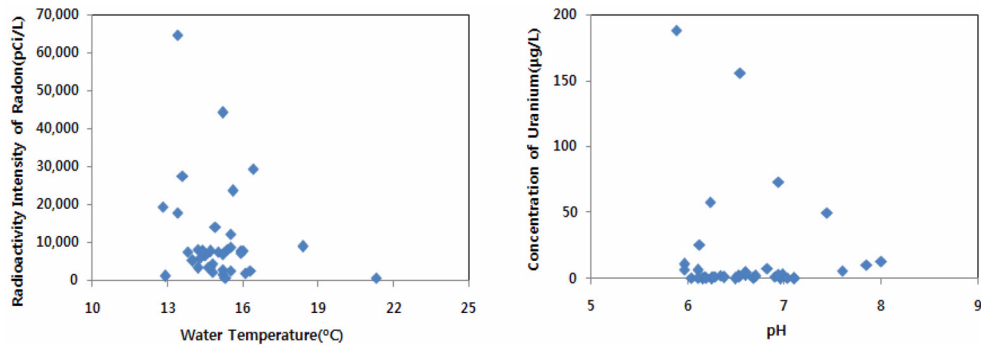


Fig. 3. Plots of Temp. (°C) versus radon concentration (pCi/L) and pH versus uranium concentration (µg/L) of the groundwaters in the study area.

Table 2. *In-situ* and natural radionuclide data of the groundwaters in the study areas

Sample no.	Sampling date	Depth (m)	T (°C)	pH	Eh (mV)	EC (μS/cm)	DO (mg/L)	Uranium (μg/L)	Radon (pCi/L)
<i>Uranium-rich groundwaters (A areas)</i>									
A-1	2007-09-19	50	18.4	6.94	150	260	8.4	73.18	9022
A-2	2007-09-19	85	16.0	5.96	223	210	9.1	10.93	7856
A-3	2007-09-19	50	16.4	6.23	228	220	5.3	57.80	29484
A-4	2007-09-19	128	15.9	6.54	199	400	6.8	156.38	7240
A-5	2007-11-05	100	14.2	7.60	222	93	8.3	6.06	8124
A-6	2007-11-05	100	14.3	7.85	204	112	7.4	10.61	6090
A-7	2007-11-05	100	14.8	8.00	195	150	7.7	13.37	4570
A-8	2007-11-06	50	14.4	6.60	174	290	5.4	4.45	7632
A-9	2007-11-06	100	14.0	6.68	197	230	8.4	1.32	5304
A-10	2007-11-06	30	15.4	5.96	213	290	7.1	6.72	8238
A-11	2007-11-06	100	15.2	6.12	196	280	7.0	25.56	44213
A-12	2007-11-06	30	15.5	6.34	183	300	8.7	2.55	8772
A-13	2007-11-06	30	15.5	6.26	67	280	5.5	1.14	12243
A-14	2007-11-06	30	14.7	5.88	232	390	7.6	188.19	7711
A-15	2007-11-07	100	14.7	6.11	202	200	5.6	0.45	3555
A-16	2007-11-07	100	16.1	6.53	193	250	3.7	1.50	1949
A-17	2007-11-07	100	15.2	6.96	158	220	7.5	0.10	1713
A-18	2007-11-07	100	15.2	6.70	152	290	4.6	1.80	6947
A-19	2007-11-07	100	14.2	6.49	171	200	7.7	0.19	3394
A-20	2007-11-08	150	15.6	7.44	101	460	3.3	49.78	23663
A-21	2007-11-08	100	14.6	6.19	136	500	3.6	0.36	3463
A-22	2007-11-08	160	15.5	6.38	131	380	6.9	0.88	2648
A-23	2007-11-08	150	16.3	6.94	112	370	8.0	3.01	2592
A-24	2007-11-08	80	15.3	7.03	136	140	9.1	0.42	704
<i>Radon-rich groundwaters (B areas)</i>									
B-1	2007-09-12	120	14.8	6.82	186	210	10.2	7.76	2241
B-2	2007-11-14	185	14.5	6.68	188	230	6.5	0.23	6770
B-3	2007-09-12	200	15.2	6.98	212	110	9.6	2.82	2884
B-4	2007-11-15	155	15.0	6.90	196	160	7.3	1.58	7560
B-5	2007-11-15	125	12.9	7.10	178	150	7.6	0.07	1265
B-6	2007-09-12	170	21.3	6.25	219	90	6.0	0.06	693
B-7	2007-11-14	150	13.4	6.53	121	170	8.3	1.98	17864
B-8	2007-11-15	150	14.4	6.60	180	270	6.0	2.89	7711
B-9	2007-11-14	100	13.8	7.10	110	160	7.9	0.65	7697
B-10	2007-11-14	170	14.9	6.28	135	120	6.9	1.46	14150
B-11	2007-11-14	150	13.6	6.18	260	150	6.5	1.65	27566
B-12	2007-11-14	150	13.4	6.04	151	160	5.5	0.58	64688
B-13	2007-11-14	–	12.8	6.10	268	130	9.0	6.28	19341
B-14	2007-11-14	15	15.9	6.15	240	171	6.0	0.14	7949

온도와 pH 자료는 자연방사성물질과 큰 상관관계($r=0.2$)를 보여주고 있지 않지만, 라돈이 최고 함량을 보이는 지점은 낮은 온도를 가지고 있으며 우라늄이 최고 함량을 보이는 지점은 비교적 낮은 pH를 보이고 있다(Fig. 3).

4.3. 우라늄과 라돈 함량

본 조사지역 우라늄(중양값)의 함량분포는 0.06~188.19 μg/L이었으며 주라키화강암에서 높은 함량을 보였다. 라돈(중양값)의 함량분포는 693~64,688(7596) pCi/L이었으

Table 3. Statistical values of *In-situ* and natural radionuclide data of the groundwaters <n = 38(A : 24, B : 14)>

Statistics	T (°C)		pH		EC (μS/cm)		Eh (mV)		DO (mg/L)		Uranium (μg/L)		Radon (pCi/L)	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Min.	12.8	14.0	6.0	5.9	90	93	110	67	5.5	3.3	0.10	0.06	705	693
Max.	21.3	18.4	7.1	8.0	270	500	268	232	10.2	9.1	188.19	7.76	44,213	64,688
Aver.	14.7	15.3	6.6	6.7	163	272	189	174	7.4	6.8	25.70	2.01	9,047	13,455
Med.	15.3	14.5	6.5	6.6	188	187	270	160	7.3	7.1	3.73	1.52	7,094	7,704

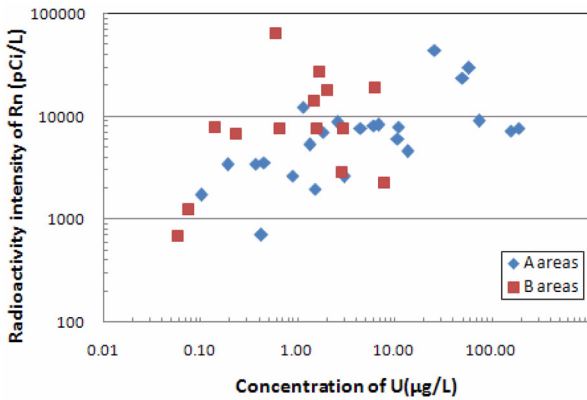


Fig. 4. Correlation of Uranium concentration and Radon concentration (pCi/L).

며 화강편마암에서 높은 함량을 보였다. A와 B 각각에 대한 우라늄(중앙값)과 라돈(중앙값) 함량분포를 보면, 0.10~188.19(3.73) μg/L, 705~44,213(7,094) pCi/L과 0.06~7.76(1.52) μg/L, 693~64,688(7,704) pCi/L이었다(Table 2). 우라늄의 미국 환경청 기준치(30 μg/L)를 초과한 지점은 A 지역은 20.8%(5/24개소)가 검출되었으나 B 지역은 나타나지 않았으며 라돈의 미국 환경 제안치(4,000 pCi/L)를 초과한 지역은 A 지역 66.7%(16/24개소), B 지역 71.4%(10/14개소)로 나타났다. A 지역의 우라늄 통계자료의 평균값이 중앙값과 비교했을 때 크게 나타난 것은 5개 초과지점시료에 의한 것으로 사료된다(Table 3).

Fig. 4는 우라늄의 함량과 라돈 방사능세기와의 관계를 도시한 것으로서 뚜렷한 상관성($r = 0.228$)은 보여주지 못했다. 주로 결정질 암반으로 이루어진 노르웨이의 경우는 0.58의 상관관계를 보여주었지만(Frengstad, 2000), 본 연구에서는 다양하게 나타나는 지질, 지하수공 심도와 지하수공 체원 등의 차이로 인하여 뚜렷한 상관관계를 보여주지 못한 것으로 사료되어진다.

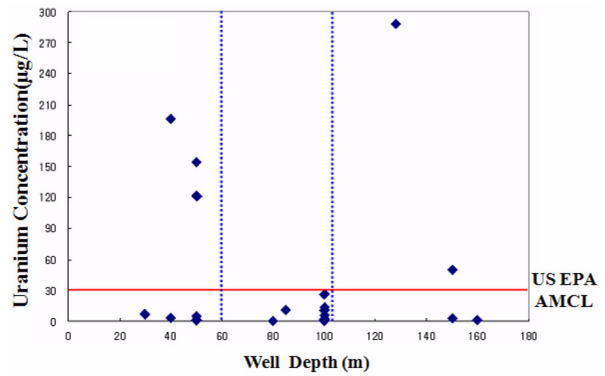


Fig. 5. Plots of uranium concentrations versus well depths in A area.

4.4. 지질과 심도에 따른 조사 지역 자연방사성물질의 특성

4.4.1 A지역

A 지역은 총면적 539.78 km²이며 국립환경과학원의 실태조사시(성익환 외, 1999; 2000; 2001; 2002; 2006) 우라늄이 고함량으로 검출된 지역을 중심으로 24개 지점을 선정하였으며 대부분 중생대 유라기, 백악기 화강암이나 그 인접 지역에 위치하고 있다(Fig. 1). 이 지역은 과거 조사결과와 같이 기반암이 중생대 화강암 계통인 지하수에서 높은 우라늄 함량이 검출되었으나, 같은 화강암 계통으로 구성되어져 있더라도 관입 시기와 광물 구성 성분에 따라서 지하수의 우라늄 함량에서 차이를 보였다. 유라기복운모화강암에서 가장 높은 지하수내 우라늄 함량(1.14~188.19, 중앙값: 10.8 μg/L)을 보였으며 유라기후운모화강암(0.10~49.78, 중앙값: 0.98 μg/L), 백악기화강암(0.36~3.01 중앙값 : 0.65 μg/L) 순으로 검출되었다.

Fig. 5는 심도와 우라늄 농도의 관계를 도시한 것으로 50 m 이하 심도를 가지는 관정과 100 m 이상의 심도를 가지는 지하수에서 우라늄의 초과 지점이 나타났다. 국립환경과학원의 대전지역 우라늄 초과지점의 시추코어 암석

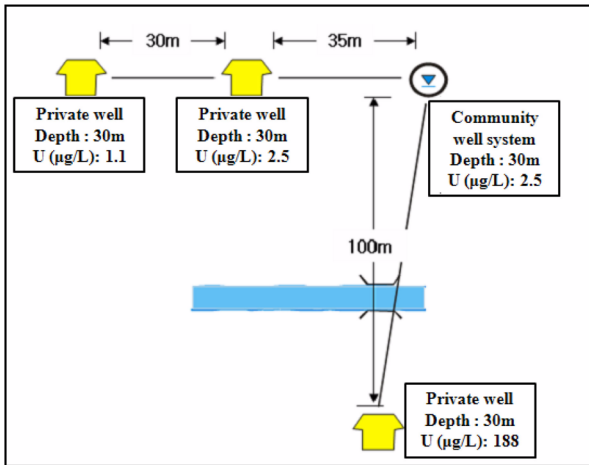


Fig. 6. Correlation of among community water systems and adjacent personal groundwaters.

박편에 대한 연구 결과(조병욱 외, 2009) 방사성광물을 확인한 한 바 있으며 이를 통하여 초과 지점들의 경우 방사성광물과 지하수의 반응을 통하여 함량 값이 높게 나타나는 것으로 사료되어진다.

A 지역 중 우라늄이 높게 나온 마을상수도와 그 주변의 개인관정을 선택(Fig 1. ㉠ 지역)하여 인접지점간의 우라늄 함량분포 추이와 지질, 심도 및 거리 따른 해석을 하고자 하였다. Fig 6은 ㉠ 지역에 대해 나타낸 것으로 같은 중생대 화강암을 가지는 조사지점들 간 우라늄 함량과 지하수공 심도, 지하수공들 간의 거리를 도시한 것으로 128 m의 지하수공 심도를 가진 마을상수는 미국 기준치(30 µg/L)를 초과한 156 µg/L의 우라늄 함량 값을 보이나 30~60 m의 거리를 가진 바로 인접한 30 m의 지하수공 심도를 가지는 두 개의 개인 충전관정은 상대적으로 매우 낮은 1.1과 2.5 µg/L의 우라늄 함량 값을 보이고 있다. 이와 같이 같은 지질을 가진 지역이라도 지하수 관정의 개발 심도 차이에 의해 광물의 조성이 다르게 나타날 수 있으며 이 결과 물-암석(광물) 반응이 다르게 진화 될 수 있으며 서로 우라늄 농도를 가질 수 있다고 사료되어진다(노희정 외, 2008). 그러나 마을상수도 관정에서 100 m 가량 떨어진 30 m의 심도를 가진 개인관정의 경우는 마을상수도 지점과 비슷하게 높은 우라늄 함량을 가지고 있다. 이는 마을상수도와 개인관정은 사이에 거리의 차이는 있으나 대수층 내 기반암의 광물구조가 서로 비슷한 것으로 사료되어지며 향후에 양수 시험 및 지하수 시추를 통한 코어의 정밀한 광물 성분 분석 등의 체계적인 연구가 필요할 것으로 판단되어진다.

4.4.2. B지역

B 지역은 총면적 1,116.35 km²이며 국립환경과학원의 실태조사시(조병욱 외, 2006) 라돈이 고함량으로 검출된 지역을 중심으로 14개 지점을 선정하였으며 조사지점의 분포는 중생대 선캠브리아기와 슈라기의 편마암과 화강암에 위치하고 있다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 지하수의 라돈함량은 기초사의 결과와 유사하게 변성암(metamorphic rock)인 선캠브리아기 편마암(gneiss, 6,770~64,688 pCi/L) 지역에서 높게 검출되었으며 화강암 지역 내 마을상수도 4개소는 같은 지질과 100 m 이상의 비슷한 심도를 가졌더라도 수 km 이상의 거리 차이에 따라 라돈 함량(1,265~7,560 pCi/L)이 다르게 나타났다.

또한, 인접지역 지하수내 라돈의 함량변화 추이를 살펴 보기 위해 과거조사에서 라돈의 함량이 높게 나온 마을상수도 지역을 중심으로(Fig 2. ㉡ 지역) 연구하였다. 이 지역은 라돈이 높게 나타나 폭기 시설이 설치된 마을상수도 1개소와 약 200 m 정도 떨어진 인접 마을상수도 1개소 및 150 m 정도 떨어진 개인용 충전관정 1개소로 구성되어 있다. 심도 150 m를 가진 마을상수도 2개소에서는 높은 라돈 함량(27,566~64,688 pCi/L)이 검출되었으나 심도 15 m인 개인용 충전관정 지점은 마을상수도에 비해 낮은 라돈 함량(7,949 pCi/L)을 보였다. 우라늄과 같이 심도에 따른 라돈도 함량의 차이를 보였지만, 휘발성기체이며 짧은 반감기(3.82일)를 가지고 있는 라돈 특성 고려와 심도와 거리에 따른 체계적인 연구가 필요할 것으로 사료되어진다. 향후 심도와 거리, 지질에 따른 자연방사성물질의 원인과 진화를 알기위하여 우라늄과 라돈 등이 고함량으로 나타난 지역들에 대해 암석별 시추코어를 통한 분석 및 노블가스 분석, 양수시험 등이 필요하다고 사료되어진다.

5. 결 론

국립환경과학원의 함유 실태조사의 결과를 바탕으로 우라늄이 고함량으로 나타난 A지역 24개 지점과 라돈이 고함량으로 나타난 B지역 14개 지점에 대한 온도 등 현장수질 분석, 우라늄과 라돈의 자연방사성물질 함량 분석을 통하여 지질 및 지하수공 심도, 지하수공들 간의 거리에 따른 특성을 파악하였다.

온도와 pH의 경우 자연방사성물질과의 큰 상관관계(r=0.2)를 보여주고 있지 않지만, 라돈이 최고 함량을 보이는 지점은 낮은 온도를 가지고 있으며 우라늄이 최고 함량을 보이는 지점은 비교적 낮은 pH를 보이고 있다.

A와 B 지역 지하수의 현장수질자료와 자연방사성물질

사이에서는 뚜렷한 상관관계를 보여주지 않았으며 우라늄(중양값)과 라돈(중양값)의 함량은 A 지역 0.10~188.19 (3.73) µg/L, 705~44,213(7,094) pCi/L이며 B 지역 0.06~7.76(1.52) µg/L, 693~64,688(7,704) pCi/L으로 검출되었다.

A 지역 중 주라기복운모화강암에서 가장 높은 지하수 내 우라늄 함량을 보였으며 주라기흑운모화강암, 백악기 화강암 순으로 검출되었다. 같은 화강암 지질을 가진 마을상수도와 매우 인접한 개인관정에서는 지하수공의 심도 차이에 의해 매우 큰 우라늄의 농도차이를 보였지만, 거리가 100 m 이상 떨어진 개인관정에서는 심도에 따른 우라늄 농도 차이가 없었다. 이는 자연방사성물질의 함량의 차이는 지하수공 심도에 따른 암석과 광물에 많은 영향을 받는 것으로 사료되어진다.

B 지역의 라돈의 함량은 기초사 결과와 유사하게 선캠 브리아기 편마암(6,770~64,688 pCi/L)지역에서 높게 검출되었으며 화강암 지역 내 마을상수도 4개소는 수 km 이상의 거리 차이에 따라 라돈 함량(1,265~7,560 pCi/L)이 다르게 나타났다. 서로 인접한 150 m의 같은 심도를 가진 마을상수도 2개소에서는 높은 라돈 함량(27,566~64,688 pCi/L)이 검출되었으나 심도 15 m인 개인용 층적 관정 지점은 낮은 라돈 함량(7,949 pCi/L)을 보였다. 라돈도 심도에 따른 함량의 차이를 보였지만, 휘발성기체이며 짧은 반감기(3.82일)를 가지고 있는 라돈 특성 고려와 심도와 거리에 따른 체계적인 연구가 필요할 것으로 사료 되어진다.

사 사

이 연구는 국립환경과학원 지하수환경연구사업인 '지하수 중 방사성물질 함유실태 조사(I); 연구(2007-87-943)의 일환으로 수행되었다.

참 고 문 헌

김용제, 조수영, 윤윤열, 이길용, 2006, 극저준위 액체섬광계수기를 이용한 지하수 중 라돈(²²²Rn) 측정법 등 연구, 지하수토양환경학회, 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, 백용욱, 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, 김대업, 우형주, 정강섭, 조병욱, 이병대, 홍영국, 박중권, 윤욱, 이봉주, 김용제, 윤윤열, 조수영, 이인호, 추창오, 김정숙, 심형숙, 신동천, 장태우, 2000, 지하수 중 방사성물질 함유실태에 관한 조사연구(II), 국립환경과학원, p. 323.
 성익환, 조병욱, 우형주, 김대업, 김건한, 박중권, 홍영국, 이병대, 윤욱, 이봉주, 이종철, 윤윤열, 김용제, 정강섭, 조수영, 신동천, 장태우, 유명진, 2001, 지하수 중 방사성물질 함유실태에 관한 조사연구(III), 국립환경과학원, p. 388.
 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.
 조병욱, 김건한, 김연기, 성익환, 안주성, 윤욱, 윤윤열, 이길용, 이병대, 이홍진, 임현철, 조수영, 홍영국, 2006, 지하수 중 방사성물질 함유실태 조사, 국립환경과학원, p. 200.
 조병욱, 김건한, 김연기, 성익환, 안주성, 윤욱, 윤윤열, 이길용, 이병대, 전철민, 조수영, 채기탁, 최병인, 홍영국, 백승균, 류시원, 2008, 지하수 중 방사성물질 정밀조사(I), 국립환경과학원, p. 293.
 조병욱, 정찬호, 한인섭 2009, 지하수 중 방사성물질 정밀조사(II), 국립환경과학원, p. 273.
 환경부, 1998, 세계보건기구(WHO) 먹는 물 수질 지침서.
 홍영국, 1997, 대전시 지역 라돈 지화학연구, 자원환경지질, 30(1), 51-60.
 홍영국, 홍세선, 2001, 국내 일부 기반암의 유해방사성 U, Th, K 함량연구, 대한자원환경지질.
 학회 2001년도 춘계 공동학술발표회, p. 341-343.
 한국지질자원연구원, 1965, 1:50,000 가평지질도.
 한국지질자원연구원, 1974, 1:50,000 춘천지질도.
 한국지질자원연구원, 1977, 1:50,000 유성지질도.
 한국지질자원연구원, 1980, 1:50,000 대전지질도.
 한국지질자원연구원, 1996, 1:250,000 대전지질도.
 Banks, D., Frengstad, B., Midtgard, A.K., Krog, J.R., and Strand, T., 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.
 Banks, D., 1998, The chemistry of Norwegian groundwaters: II. The chemistry of 72 groundwaters from Quaternary sedimentary aquifers., *The science of the Environment*, 93-105.
 Frengstad B., 2000, The chemistry of Norwegian groundwater III. The distribution of trace elements in 476 crystalline bedrock groundwaters, as analysed by ICP-MS techniques, *Total environment*, 246, 21-40.

Kim, J.H., 1987, Caledonian Orogeny of Korea with special reference to the Orogenic uraniumiferous marine black slate. KIGAM report.

Langmuir, D. and Herman, J. S., 1980, mobility of thorium in natural waters at low temperatures. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **44**, 1753-1766.

Almeida, R.M.R., Lauria, D.C., Ferreira, A.C., and Sracek, O., 2004, Groundwater radon, radium and uranium concentrations in Regiao dos Lagos, Rio de Janeiro State, Brazil, *Journal of Environmental Radioactivity*, **73**, 323-334.

Tadeusz Andrzej Przylibski, Kalina Mamont-Cie la, Monika Kusyk, Jerzy Dorda, and Beata Kozowska, 2004, Radon concentrations in groundwaters of the Polish part of the Sudety

Mountains (SW Poland), *Journal of Environmental Radioactivity*, **75**, 193-209.

USEPA, 2003, National primary drinking water standards, Office of Water, EPA 816-F-03-016.

USGS, 2000, Naturally occurring radionuclides in the ground water of southeastern Pennsylvania, USGS Fact Sheet 012-00.

USGS, 2001, Uranium and radon in ground water in the Lower Illinois River Basin, Water-Resources Investigation report 01-4056.

Wilhelm, E., Battino, R., and Wilcox, R.J., 1977, Low-pressure Solubility of Gases in Liquid Water, *Chem. Revs.*, **77**(2), 219-262.