

이천 화강암지역 지하수의 우라늄과 라돈 함량 특성

조병욱^{1*} · 추창오² · 김문수³ · 이영준³ · 윤욱¹ · 이병대¹

¹한국지질자원연구원 지구환경연구본부, ²안동대학교 지구환경과학과, ³국립환경과학원 토양지하수연구팀

Uranium and Radon Concentrations in Groundwater near the Icheon Granite

Byong-Wook Cho^{1*}, Chang-Oh Choo², Moon-Su Kim³, Young-Joon Lee³, Uk Yun¹, and Byeong-Dae Lee¹

¹Groundwater Department, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Korea

²Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Korea

³Soil and Groundwater Research Team, National Institute of Environmental Research, Korea

국내 화강암지역 지하수의 우라늄과 라돈 함량의 범위와 특성 파악을 위하여 이천지역 74개 지하수를 조사한 결과 우라늄 함량은 0.02~1,640.0 µg/L (중앙값 2.03 µg/L), 라돈 함량은 40~23,400 pCi/L (중앙값 4,649 pCi/L)으로 나타났다. 74개 지하수 중 8개인 10.8%에서 미국 EPA의 우라늄 기준치(30 µg/L)를 초과하였다. 라돈은 44개인 59.5%에서 미국의 음용 제안치(AMCL)인 4,000 pCi/L를 초과하였고 핀란드의 음용 제안치인 8,100 pCi/L를 초과하는 시료는 전체의 13.5%인 10개이다. U-HCO₃ (0.71), U-Ca (0.69), U-Li (0.45), U-Sr (0.43), U-F (0.42)를 제외하고는 우라늄(라돈)과 주요 성분간의 상관성은 없는 것으로 나타났다. 연구지역 지하수의 우라늄과 라돈 함량은 유사한 지질을 가지는 외국에 비교하면 낮은 것으로 나타났는데, 이는 천부 지하수의 공내 유입으로 인해서 실제 함량보다 낮게 검출되었을 가능성이 크다.

주요어 : 우라늄, 라돈, 함량, 기준치

Concentrations of uranium (U) and radon (Rn) were measured in groundwater from 74 wells in the Icheon area, with the aim of determining the range and distribution of concentrations in an area underlain by granite (in this case, the Icheon granite). U concentrations ranged from 0.02 to 1,640.0 µg/L (median value, 2.03 µg/L) and Rn concentrations ranged from 40 to 23,400 pCi/L (median value, 4,649 pCi/L). U concentrations in 10.8% of the samples exceeded 30 µg/L, which is the maximum contaminant level (MCL) proposed by the US Environmental Protection agency (EPA), based on the chemical toxicity of U. In addition, U concentrations in 59.5% and 13.5% of the samples exceeded 4,000 pCi/L (the Alternative MCL (AMCL) of the US EPA) and 8,100 pCi/L (Finland's guideline level), respectively. We found no significant correlations between U (Rn) and other constituents, except for U-HCO₃ (correlation coefficient of 0.71), U-Ca (0.69), U-Li (0.45), U-Sr (0.43), and U-F (0.42). U and Rn contents in the groundwater are low relative to those in areas in other countries with similar geological settings, possibly due to the inflow of shallow groundwater to the wells in the Icheon area.

Keywords : Uranium, Radon, Concentration, Maximum contaminant level (MCL)

서 론

암반 지하수의 전형적인 수질은 강우가 지표에 도달한 후 지하로 점차 이동하면서 발생하는 물-암석반응의 결과

이다. 빗물이 지하로 침투하여 대수층에 도달할 때까지 많은 시간이 걸릴 뿐더러 이동 중에 토양이나 암석을 통과하면서 여과, 희석, 분해 등으로 오염의 정도가 약해지기 때문에 점차 지표 오염원의 영향을 적게 받게 된다. 물

*Corresponding author: cbw@kigam.re.kr

이용 측면에서 지하수가 지표수보다 불리한 점은 한정된 수량과 개발시 상대적인 고비용 외에도 지하수가 지하 암석 대수층을 이동하는 과정 중에서 인체에 유해한 특정 성분들이 미량이나마 지하수에 용해될 수 있다는 점이다. 이들 성분은 암석의 종류에 따라서 다양한데, 대표적인 성분으로는 우라늄(U), 라돈(Rn), 비소(As), 불소(F), 셀레늄(Se) 등을 들 수 있다. 이들 성분의 함량은 지표수에 비하여 특정한 암석분포 지역의 지하수에서 높게 검출되는 경향이 있으므로 인위적인 오염원과는 확연히 구분된다.

우라늄과 라돈은 자연방사성물질중의 하나로서 이들의 인체 위해성은 지하수에 용해된 함량 정도에 따라서 달라진다. 우라늄은 반감기가 길기 때문에 우라늄의 인체 위해성은 방사성 독성보다는 중금속으로서의 화학적 독성이 문제가 된다. 라돈은 반감기가 3.82일에 불과한 무색 무취의 불활성 기체이며, 인간에게 피폭되는 방사선량의 50% 이상을 차지하며 폐암 발병인자로 알려져 있다. 지하수 중 우라늄과 라돈에 대한 선진국의 조사는 대개 1960년대 말부터 시작되었으며 조사지점의 수는 미국의 경우 200,000, 스웨덴의 경우 35,000개 이상이 된다(NIER, 2006). 외국의 연구결과에 의하면 화강암지역 지하수의 우라늄, 라돈 함량이 높은 것으로 보고되고 있다(Lowry et al., 1987; Wathen, 1987; Cothorn and Rebers, 1990; Banks et al., 1998).

국내 지하수의 자연방사성물질 함량에 대한 최초의 전국적인 규모의 조사는 1998년 6월 국내 일부 지하수의 우라늄 함량이 특정 국가(미국 EPA)의 기준치를 상회하였다고 보도된 이후인 1999년부터 꾸준히 이루어졌다. 즉, 1999년부터 2002년까지 및 2006년부터 2007년까지 지하수의 자연방사성물질 함량 실태조사가 국립환경과학원과 한국지질자원연구원에 의해서 이루어졌다. 이 조사결과에 따르면 측정 지점의 수는 700여 개에 불과하지만 우리나라와 유사한 지질 환경을 가지고 있는 외국의 지하수의 우라늄, 라돈 함량에 비해서 국내 지하수의 우라늄, 라돈 함량은 대체적으로 낮으며(NIER, 2002), 퇴적암이나 변성암지역 지하수에 비하여 화강암류 지역 지하수에서 우라늄과 라돈 함량이 높은 것으로 보고된 바 있다. 그러나 아직까지 화강암지역 지하수만을 대상으로 한 정밀한 조사 연구는 없는 실정이다.

본 연구는 전 지역의 지질이 화강암으로 이루어진 경기도 이천을 연구지역으로 선정하고 74개 지하수를 대상으로 현장 수질 측정, 우라늄과 라돈, 주요 성분 함량 분석, 우라늄, 라돈과 주요 성분과의 상관성 분석, 국내의 화강암지역 지하수의 우라늄, 라돈 함량과의 비교 등을 통

하여 국내 화강암지역 지하수에서의 우라늄과 라돈 함량 범위와 거동 특성을 파악함에 그 목적이 있다.

지 질

연구지역의 지질은 크게 기저부를 이루는 선캄브리아기의 경기편마암복합체, 이들을 관입하고 있는 쥬라기 대보화강암류로 구분되는데 95% 이상은 쥬라기 대보화강암류로 구성되어 있다(Geological and Mineral Institute of Korea, 1974, 1975; KIER, 1989a, 1989b). 쥬라기 대보화강암류는 크게 흑운모화강암, 복운모화강암, 반상화강암으로 구분된다(Fig. 1).

흑운모화강암은 연구지역의 대부분을 차지한다. 본 암은 대체적으로 심한 풍화를 받아 낮은 지형을 이룬다. 주 구성광물은 석영, 장석, 흑운모 등이며 간혹 녹니석이 소량 함유되어 있다. 대월면에서는 부분적으로 복운모 화강암의 양상을 보여주며 페그마타이트 맥의 관입이 많은 것이 특징이다. 복운모 화강암은 이천시에 부분적으로 대상 분포하고 있다. 일반적으로 조립질이며 갈회색 또는 유백회색을 나타내고 있으며, 주 구성광물로는 석영,

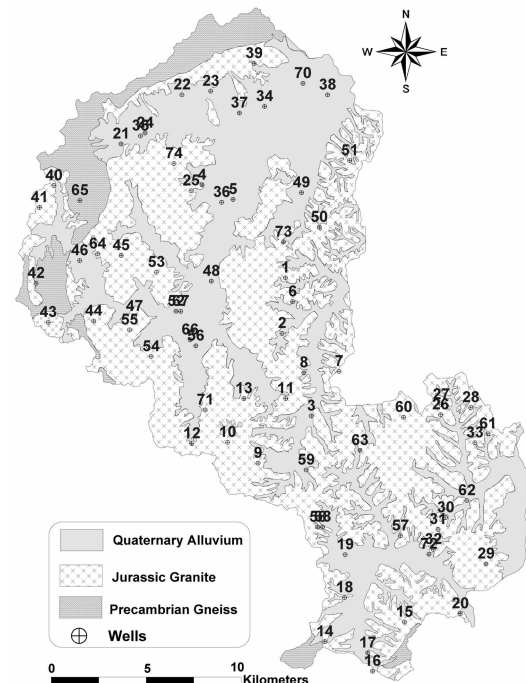


Fig. 1. Generalized geological map and location of samples in the Icheon area (Geological and Mineral Institute of Korea, 1974, 1975; KIER, 1989a, 1989b).

장석류, 소량의 흑운모, 세립질의 흑운모가 관찰되는 것이 특징이다. 반상화강암은 마장면 안평리, 호법면 매곡리, 동산리 일대에 압주상으로 관입된 형태를 보인다. 산상으로 보아 본 암은 흑운모화강암과 동일기원의 마그마의 분화과정에서 이루어진 것으로 추정된다. 주 구성광물은 장석, 석영, 흑운모로서 흑운모의 양이 흑운모 화강암보다 적고 대부분 조립질인 것이 본 암의 특징이다. 74개 지하수 시료중에서 well 15는 복운모화강암, well 47은 반상화강암지역에 위치하며, well 65는 흑운모화강암과 인접한 선캠브리아기의 경기편마암복합체에 위치한다.

연구방법

연구지역에서의 지하수 조사를 위하여 가능한 한 일정 거리를 유지하면서도 향후 지하수공의 보존성, 접근 용이성 등을 고려하여 총 74개 공이 선정되었다(Fig. 1). 74개 지하수 중 1에서 63은 2008년, 64에서 70은 2006년, 71에서 73은 1999년에 분석되었는데 시료 채취 시기는 지표수의 영향이 적은 4-6월 사이에 이루어졌다. 74개 지하수의 대부분은 소규모급수시설(음용)로 이용되고 있으며, 일부는 농업, 생활용으로 이용되고 있다.

선정된 지하수공에서의 시료채취는 5-10 분간의 양수를 거쳐서 지하수공이 관통한 대수층의 수질을 대변할 수 있도록 지하수의 수온과 수질이 안정을 이룬 후 채취하였다(Barcelona et al., 1985). 시료 채취시 수온, pH, EC,

Eh, DO, HCO₃ 등을 측정하고 0.45 μm 멤브레인 필터로 여과하였으며 양이온 분석용 시료는 현장에서 농질산으로 pH 2를 유지시킨 후 실험실로 운반하여 분석하였다. 우라늄을 비롯한 주요 양이온은 한국지질자원연구원에서 ICP-AES로, 주요 음이온은 이온크로마토그래피(IC)를 이용하여 분석하였다. 라돈은 휘발성 기체이고 폭기에 의해 대기로 쉽게 방출되기 때문에 라돈 분석용 시료 채취시에는 와류에 의한 인위적인 폭기가 일어나지 않도록 주의하였다. 채취된 8 ml의 지하수 시료는 12 ml의 설파용액(Optiphase HiSafe3)이 내재된 22 ml의 vial에 주입한 후 밀봉하고 흔들어서 지하수와 설파용액이 골고루 섞이도록 하였다. 채취된 지하수 시료는 빠른 시간 내에 한국지질자원연구원으로 운반한 후 α선과 β선 분리측정 기능을 가진 액체설파광계수기(Quantulus 1220TM, Perkin-Elmer Co.)로 분석하였다. PSA 준위 100에서 시료용액 8 ml에 대해 300분간 계측했을 때 검출 하한치는 3.3 pCi/L였다(NIER, 2006). 분석된 라돈 함량은 라돈의 반감기 3.82일을 고려하여 시료 채취와 분석 시간의 차이만큼 자연 붕괴 감소를 보정하였다.

결과 및 토의

우라늄과 라돈의 함량

연구지역 74개 지하수공에서 채취한 지하수 시료의 우라늄과 라돈 함량, 주요 성분과 현장 수질, 지하수공의

Table 1. Physicochemical properties of groundwater (concentrations as mg/L).

Well	Dep. (m)	U (μg/L)	Rn (pCi/L)	pH	EC (μS/cm)	Eh (mV)	K	Na	Ca	Mg	Cl	SO ₄	F	NO ₃	HCO ₃	Li	Sr	SiO ₂
1	115	1.26	5550	6.31	162	182	1.17	14.82	15.60	2.10	15.00	1.57	0.22	31.10	31.0	0.01	0.24	30.3
2	300	34.02	5670	6.47	362	250	1.26	26.94	36.80	3.75	32.80	8.44	0.35	58.80	64.8	0.02	0.59	31.4
3	100	4.26	12700	6.35	285	350	1.45	17.35	31.80	5.27	20.70	7.41	0.21	78.60	35.0	0.02	0.42	32.8
4	100	16.00	6770	6.72	293	183	1.00	19.86	32.80	3.53	20.00	18.20	0.41	14.80	85.0	0.04	0.25	28.3
5	120	3.82	1710	6.21	331	287	0.87	24.32	29.80	4.05	34.00	11.80	0.09	20.30	73.9	0.02	0.70	43.2
6	100	8.20	2230	6.47	220	250	0.58	13.41	22.50	2.29	7.48	4.10	0.39	10.80	75.6	0.04	0.23	32.4
7	100	2.32	4720	6.56	198	274	0.81	17.42	19.50	2.44	10.40	6.29	0.17	48.70	34.1	0.01	0.24	35.8
8	120	44.64	8090	7.17	95	313	0.34	10.52	10.50	0.52	2.08	1.34	1.01	5.46	46.7	0.01	0.10	29.0
9	100	0.62	4170	6.25	186	192	0.76	13.95	17.10	3.12	8.02	11.10	0.11	32.80	45.3	<0.01	0.26	30.1
10	100	92.71	4250	7.04	413	200	0.75	17.43	63.90	4.43	12.70	11.00	0.96	24.40	191.7	0.04	0.65	26.5
11	100	1.21	3640	6.34	253	263	1.72	19.06	22.50	2.97	13.30	1.67	0.18	67.60	41.5	0.02	0.43	31.6
12	120	2.53	6150	6.37	232	302	0.67	15.00	24.00	3.55	12.40	3.45	0.33	45.00	58.1	0.02	0.39	32.8
13	120	0.38	3060	6.34	230	173	0.96	21.98	15.90	2.28	12.60	0.19	0.07	65.50	26.7	<0.01	0.36	33.5
14	120	1.35	8690	6.65	244	240	1.33	14.88	19.60	5.71	11.90	7.13	0.10	42.10	52.3	0.02	0.19	32.2
15	100	5.63	5580	6.74	220	254	1.00	14.86	21.00	3.44	8.50	1.46	0.30	35.20	66.3	0.02	0.21	31.1
16	120	3.08	1420	7.70	218	248	0.77	12.96	19.30	4.22	9.06	6.32	1.42	24.40	27.6	0.01	0.22	23.8

Table 1. Continued.

Well	Dep. (m)	U ($\mu\text{g/L}$)	Rn (pCi/L)	pH	EC ($\mu\text{S/cm}$)	Eh (mV)	K	Na	Ca	Mg	Cl	SO ₄	F	NO ₃	HCO ₃	Li	Sr	SiO ₂
17	100	4.46	1400	6.97	272	253	1.37	16.27	27.50	7.23	16.70	11.40	0.39	1.23	118.9	0.03	0.34	26.3
18	120	7.30	7020	6.91	279	300	1.44	15.18	30.50	4.30	13.30	7.97	0.14	62.00	55.9	0.02	0.35	30.6
19	100	11.85	1700	7.76	248	283	0.50	13.75	27.50	2.22	8.83	2.37	1.74	40.10	67.4	0.01	0.28	23.8
20	75	3.17	2500	7.09	188	179	0.45	7.93	22.30	2.52	3.50	6.31	0.28	1.92	84.3	<0.01	0.14	24.0
21	80	1.23	20600	7.60	230	205	0.85	12.90	26.80	4.78	8.54	6.46	0.89	23.60	89.8	0.02	0.17	27.5
22	150	10.79	1170	8.15	165	129	0.45	9.01	24.40	1.49	2.61	8.45	0.63	3.74	79.5	<0.01	0.38	16.3
23	100	0.26	2110	7.05	139	246	0.53	13.70	11.70	2.26	5.91	2.81	0.20	21.50	46.9	0.01	0.09	35.4
24	100	0.52	40	6.81	150	170	0.74	13.63	12.90	1.96	11.10	2.61	0.19	26.20	34.0	0.02	0.10	29.7
25	120	57.94	8240	7.65	208	159	0.69	10.15	30.30	1.66	6.28	4.47	0.87	3.32	108.5	0.02	0.35	21.5
26	160	12.97	2490	7.84	143	191	0.50	8.46	30.30	1.52	3.31	3.95	0.83	3.87		0.01	0.30	21.4
27	200	17.76	3070	6.90	122	201	0.36	8.58	15.40	0.74	1.98	4.64	0.60	7.45	56.7	0.01	0.11	23.8
28	165	7.21	2850	6.89	131	246	0.65	9.79	16.30	0.98	3.05	5.51	0.45	6.65	61.3	0.02	0.11	26.4
29	120	0.25	2050	6.15	163	170	1.22	14.44	13.70	1.87	12.80	11.80	0.15	19.70	31.3	<0.01	0.12	18.8
30	120	1.74	5150	6.32	218	192	1.16	19.10	18.60	2.69	12.70	0.92	0.13	60.00	36.1	0.02	0.21	34.3
31	150	2.98	17000	6.51	244	167	1.09	22.89	18.50	2.58	22.10	5.75	0.09	56.50	32.6	<0.01	0.36	33.0
32	105	3.08	3890	7.22	124	161	0.89	11.31	10.40	1.69	6.37	2.29	0.26	15.30	39.3	<0.01	0.15	31.3
33	120	0.08	1360	6.62	61	159	0.40	10.68	2.13	0.30	2.44	0.56	0.09	9.16	23.1	<0.01	0.04	34.7
34	100	0.42	1200	6.20	227	181	1.82	22.65	16.40	2.48	37.30	0.23	0.02	13.60	48.6	<0.01	0.26	31.4
35	120	7.05	7590	6.72	177	178	0.68	14.01	18.40	1.95	10.00	2.31	0.49	31.70	46.9	0.01	0.20	31.9
36	320	61.53	3200	6.79	707	182	1.54	36.23	88.90	12.30	75.80	40.50	0.17	21.30	219.8	0.05	0.92	37.7
37	102	1.57	2840	7.20	203	225	0.62	16.46	19.00	3.30	11.60	8.52	0.17	31.30	55.2	0.01	0.16	31.5
38	160	3.89	6530	6.70	146	150	1.87	12.77	11.60	1.67	7.31	2.91	0.31	35.70	28.7	<0.01	0.15	30.5
39	120	0.49	5610	7.25	105	165	0.48	9.23	9.88	2.04	3.18	1.57	0.14	9.78	47.0	<0.01	0.08	29.8
40	80	0.15	6540	5.72	201	230	0.96	6.84	16.80	6.95	12.10	3.18	0.11	11.50	75.9	<0.01	0.21	27.9
41	100	2.82	7950	6.74	233	307	1.13	13.34	23.30	5.19	9.07	12.30	0.06	44.00	57.8	0.01	0.22	25.6
42	140	0.86	780	7.70	257	211	1.29	8.95	31.40	8.81	5.26	17.30	0.14	0.05	129.6	<0.01	0.91	21.4
43	150	1.27	2420	6.70	175	319	0.79	9.29	19.10	3.19	9.54	8.51	0.18	18.60	56.6	<0.01	0.11	21.3
44	120	0.13	12100	7.17	103	239	0.37	9.38	8.79	1.85	5.78	0.81	0.16	9.53	42.6	<0.01	0.08	29.4
45	100	11.99	23400	6.95	115	315	0.56	8.44	12.00	1.47	4.43	3.53	0.42	15.20	41.4	<0.01	0.07	24.8
46	100	1.15	3360	7.12	113	308	0.52	8.89	11.70	1.80	3.51	5.33	0.41	6.17	51.5	<0.01	0.09	26.4
47	120	14.52	7410	7.08	288	258	0.72	12.91	38.20	5.57	18.50	9.57	0.35	16.70	108.6	0.02	0.22	28.5
48	100	0.04	6840	6.42	274	50	1.53	20.13	18.80	3.53	31.00	17.50	0.09	0.71	51.3	<0.01	0.24	18.5
49	150	0.33	5100	6.65	94	215	0.91	13.04	4.36	0.75	4.43	0.79	0.02	14.50	33.5	<0.01	0.07	29.8
50	120	4.95	7810	7.12	190	283	0.67	13.34	21.50	2.05	11.30	1.36	0.82	38.80	43.2	0.03	0.25	33.0
51	120	5.42	6890	6.12	358	337	1.48	25.25	35.90	4.57	36.00	20.60	0.11	57.10	51.7	0.03	0.48	37.0
52	100	1.01	4240	6.44	253	333	2.07	17.46	26.50	4.34	15.80	19.10	0.12	40.10	88.7	0.02	0.33	32.2
53	160	10.15	6830	6.87	198	299	0.78	11.18	16.70	1.93	9.19	5.21	0.58	10.30	56.7	0.02	0.11	30.4
54	100	4.49	6850	6.95	131	241	1.17	9.02	13.30	2.08	5.30	4.73	0.39	15.70	46.7	<0.01	0.12	25.7
55	120	9.55	4690	7.23	159	315	0.88	9.41	18.50	2.29	4.70	6.91	0.33	23.80	51.9	0.01	0.10	24.2
56	200	0.52	3100	6.44	278	315	2.39	23.05	23.10	2.59	23.70	11.30	0.07	64.20	27.9	<0.01	0.40	33.3
57	120	1.13	4780	6.11	229	234	2.37	16.56	18.50	2.85	14.60	10.50	0.15	44.20	31.6	<0.01	0.19	28.0
58	120	0.35	6230	6.29	131	256	0.56	13.06	8.75	1.32	6.36	5.92	0.15	30.40	31.9	<0.01	0.09	24.7
59	120	0.59	2450	6.73	254	252	1.24	18.04	23.30	3.20	20.40	1.66	0.32	51.80	47.5	0.02	0.38	34.4
60	120	0.51	4780	6.74	100	267	0.77	15.17	11.50	1.73	8.10	1.31	0.32	39.50	29.9	0.01	0.14	36.2

Table 1. Continued.

Well	Dep. (m)	U (μg/L)	Rn (pCi/L)	pH	EC (μS/cm)	Eh (mV)	K	Na	Ca	Mg	Cl	SO ₄	F	NO ₃	HCO ₃	Li	Sr	SiO ₂
61	40	0.08	3860	5.95	82	222	0.56	11.50	4.30	0.57	2.41	1.08	0.18	7.52	32.5	<0.01	0.05	34.29
62	40	0.02	1960	5.90	154	222	1.27	19.30	7.74	1.10	16.20	5.18	0.02	34.80	14.1	<0.01	0.12	29.31
63	30	0.03	4180	5.70	188	244	1.38	16.30	12.40	4.42	8.33	6.73	0.03	59.30	21.2	<0.01	0.20	29.54
64	100	0.64	3760	6.54	211	272	0.52	10.70	10.60	1.56	3.28	4.87	0.38	11.00	46.8			
65	100	0.06	974	6.54	211	272	0.91	6.49	12.40	3.64	4.56	3.97	0.27	10.20	51.2			
66	100	0.62	8900	6.47	124.3	269	0.86	9.67	9.28	1.08	4.40	0.59	0.33	16.20	35.1			
67	100	0.28	4500	6.30	285	273	1.51	16.10	18.50	3.16	15.40	13.80	0.25	35.80	33.7			
68	160	0.22	5480	5.57	148.8	265	0.50	13.00	7.62	1.14	5.44	6.31	0.28	26.50	21.2			
69	100	1640	9890	6.54	487	242	1.06	18.20	78.90	2.90	27.20	15.60	0.78	21.10	205.0			
70	100	6.45	1980	7.28	195.5	252	0.71	7.48	24.90	3.54	7.07	2.85	0.23	15.30	82.0			
71	20	0.05	4648	5.38	164	214												
72	150	0.60	4291	5.58	140	207												
73	100	51.10	4650	7.05	500	183												
74	90	322	11500	7.20	300	205												

심도 등은 Table 1과 같다. 74개 지하수공의 심도 범위는 30 m에서 320 m로 평균 심도는 121 m이다. 지하수의 수온은 심도 320 m, 160 m 지하수 시료를 제외하면 13.1~16.6 이고 pH는 5.38~8.15 범위로 약산성 내지 약알칼리를 보인다. EC는 61~707 μS/cm의 범위인데 대부분은 100~300 μS/cm의 범위에 든다. Eh는 1개 지하수 시료의 50 mV를 제외하면 129~350 mV이고, DO는 1.47~11.0 mg/L이다. 74개 지하수의 우라늄 함량은 최저 0.02 μg/L에서 최고 16,400 μg/L로서 상당히 넓은 범위를 보여 평균값은 34.25 μg/L이나, 중앙값은 2.03 μg/L에 불과하다. 74개 지하수의 라돈 함량은 최저 40 pCi/L에서 최고 23,400 pCi/L로 역시 넓은 범위를 보인다. 그러나 우라늄과는 달리 74개 지하수의 라돈 평균값(5,394 pCi/L)과 중앙값(4,649 pCi/L)에는 큰 차이가 없다. Table 2는 이들 74개 자료에 대한 간단한 통계자료이다.

지하수의 수질

연구지역 지하수의 우라늄과 라돈 함량 특성을 해석하기 위하여 74개 지하수에서 현장 수질과 함께 주요 성분과 Li, Sr을 분석하였다. 먼저 지하수의 EC와 주요 용

존 양이온과의 관계도를 보면 전반적으로 EC의 증가와 더불어 주요 용존 양이온(Na, K, Ca, Mg)의 함량도 증가하는 경향을 나타내어서(Fig. 2) 연구지역 지하수의 주요 용존 양이온 농도가 물-암석 반응에 의해서 증가한 것으로 해석된다. Na, K 이온의 경우 EC 증가와 더불어 증가하는 양상을 나타내나 Ca 이온에 비하여 상대적으로 함량이 낮은 특징을 나타내어 Ca-Mg 함유 광물의 용해가 연구지역 지하수의 수질을 결정하고 있는 것으로 판단된다(Fig. 2 (a), (b), (c), (d)).

주요 용존 음이온과 EC 등과의 관계는 Fig. 3과 같다. Cl 이온은 대체로 EC와 정의 상관관계를 나타내며(Fig. 3(a)). SO₄ 이온 농도도 EC와 정의 상관 관계를 나타내고 있는데 이는 황화 광물의 산화에 의한 증가로 해석될 수 있다(Fig. 3(b)). HCO₃ 이온 농도도 EC와 정의 상관 관계를 나타내어 사장석 또는 탄산염 광물의 용해로 해석될 수 있다(Fig. 3(c)). NO₃ 이온의 경우는 Cl, SO₄ 만큼의 상관 관계는 보여주지 않는다(Fig. 3(d)). Cl과 NO₃의 관계도에서 어느 정도 상관성이 있는 것으로 보아서 Cl 이온이 지표 오염의 영향을 받고 있는 것으로 판단된다. 그러나 일부 시료에서 NO₃보다 Cl가 부화되는 경향을 나타내고 있는데 이는 Cl 이온이 오염과는 상관없이 암석으로부터 기원하거나 보존성 이온으로서 함량 증가, NO₃ 이온의 탈질로 인하여 이와 같은 상관 관계가 나타났을 가능성이 있다(Fig. 4(a)). 한편 Ca 이온이 증가할수록 HCO₃ 이온이 증가하는 것으로 보아 역시 사장석이나 탄산염 광물의 용해가 지하수의 수질을 지배하는 반응

Table 2. Statistical summary of U (μg/L) and Rn (pCi/L) concentrations.

	Samples	Mean	Max.	Min.	Med.
U	74	34.25	1640.0	0.02	2.03
Rn	74	5,394	23,400	40	4,649

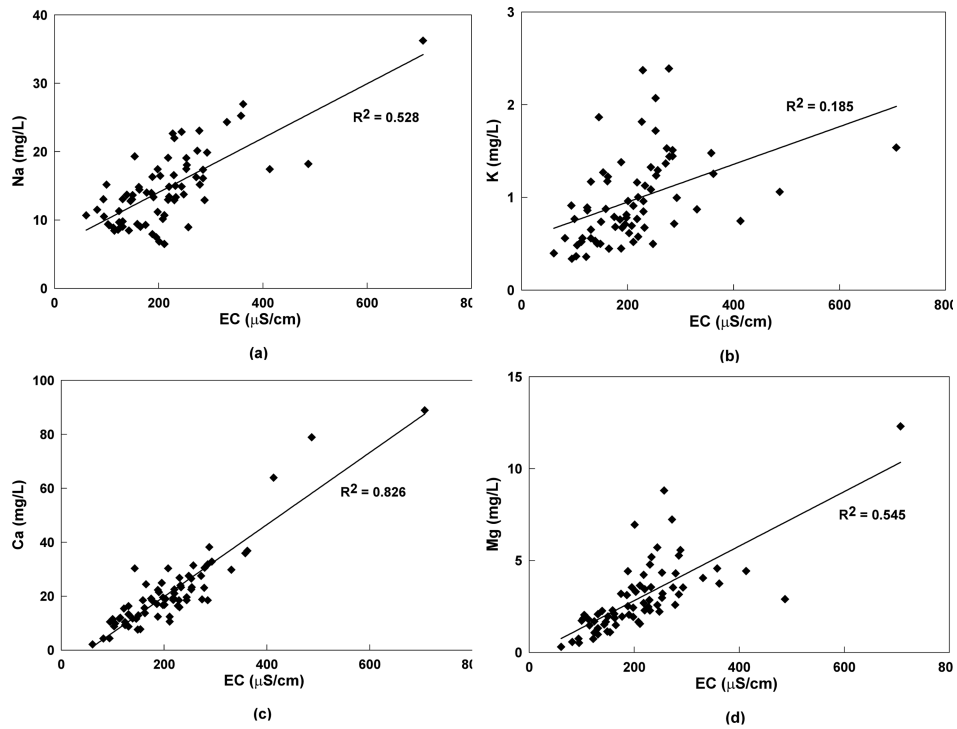


Fig. 2. Relationship between EC and the cations Na (a), K (b), Ca (c), and Mg (d).

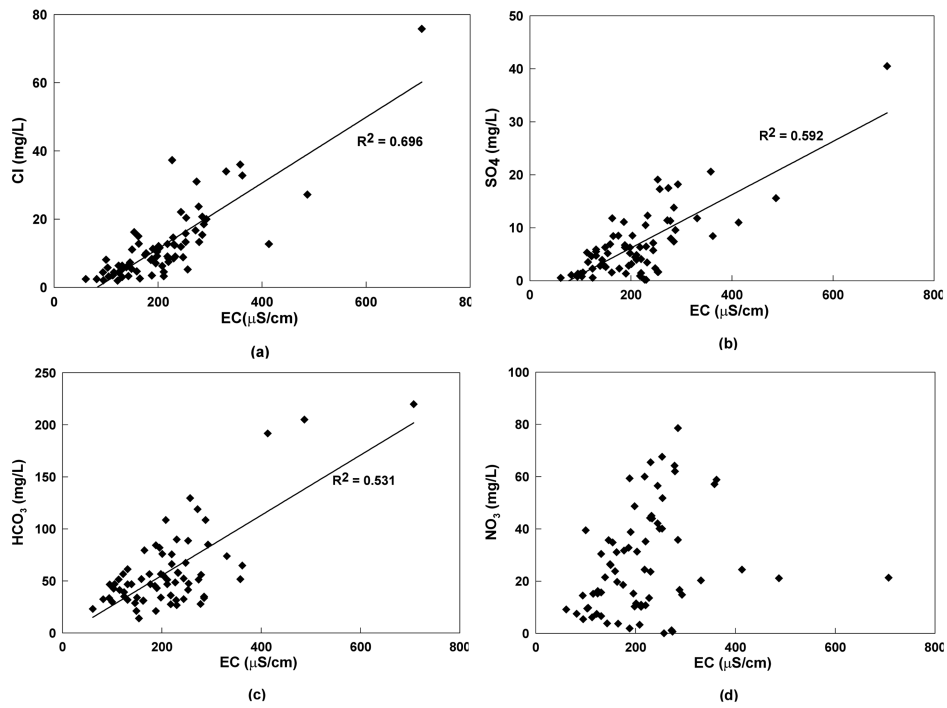


Fig. 3. Relationship between EC and the major anions Cl (a), SO_4 (b), HCO_3 (c), and NO_3 (d).

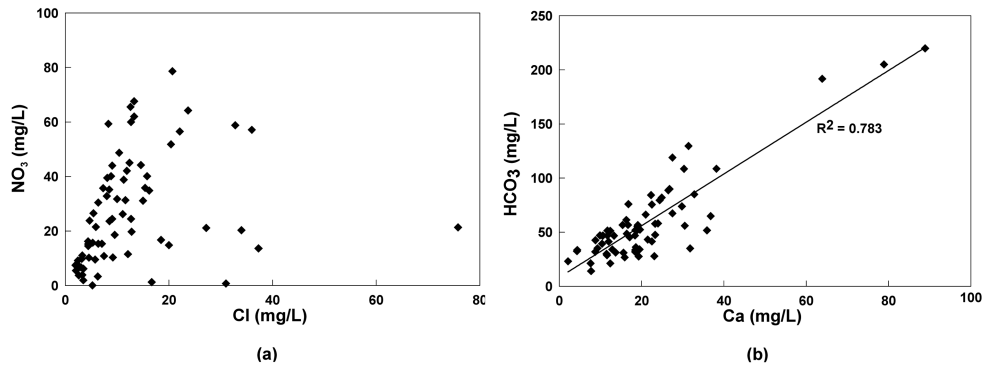


Fig. 4. Relationship between Cl and NO₃ (a) and between Ca and SO₄ (b).

으로 판단된다(Fig. 4(b)).

주요 양이온, 음이온과 EC의 관계, Ca-HCO₃, Na-Cl, NO₃의 함량 등으로 볼 때 연구지역 지하수의 수질은 지질 즉, 물-암석반응에 의해서 지배를 받고 있으나 천부 지하수의 유입도 일어나고 있음을 유추할 수 있다.

지하수의 우라늄과 라돈함량 분포특징

이천지역 74개 지하수 시료의 우라늄 평균 함량은 34.25 µg/L이고 최소 0.02 µg/L에서 최대 1,640 µg/L까지 나타냈다(Table 2). 우라늄 함량 최대값 1,640 µg/L은 대전시 서구 갈마동의 3,607 µg/L (NIER, 2006)에 이어 국내에서 두 번째로 높은 값으로 간주된다. 연구지역 지하수의 우라늄 중앙값 2.03 µg/L는 이천지역과 마찬가지로 대부분이 화강암지역으로 이루어진 안성지역 40개 지하수의 1.24 µg/L, 여주지역 40개 지하수의 3.46 µg/L, 포천지역 40개 지하수의 1.33 µg/L(NIER, 2009)와 비슷하나, 대전지역 93개 지하수의 4.43 µg/L (Cho et al, 2010b) 보다는 낮다. 연구지역 74개 지하수의 평균값 (34.25 µg/L)과 중앙값(2.03 µg/L)의 차이가 크고 왜도가 크게 나타나는 것은, 히스토그램(Fig. 5)에서 확인할 수 있는 바와 같이, 분석결과 값이 낮은 값으로 치우쳐 있기 때문이다. 이와 같이 같은 화강암지역이라도 일부 지하수에서 우라늄 함량이 높은 이유는 수리화학적 환경, 우라늄광물의 산출 특성과 존재 형태에 의해 우라늄광물이 용해되는 정도가 다양한 현상과 관련이 있기 때문으로 해석된다(Choo, 2002). 예를 들면 같은 화강암지역에 위치하며 지하수의 우라늄 함량이 287 µg/L, 356 µg/L로 높게 검출된 지점으로부터 불과 100-400 m 떨어진 지하수의 우라늄 함량이 1-6 µg/L로 낮게 보고된 바 있다 (NIER, 2000).

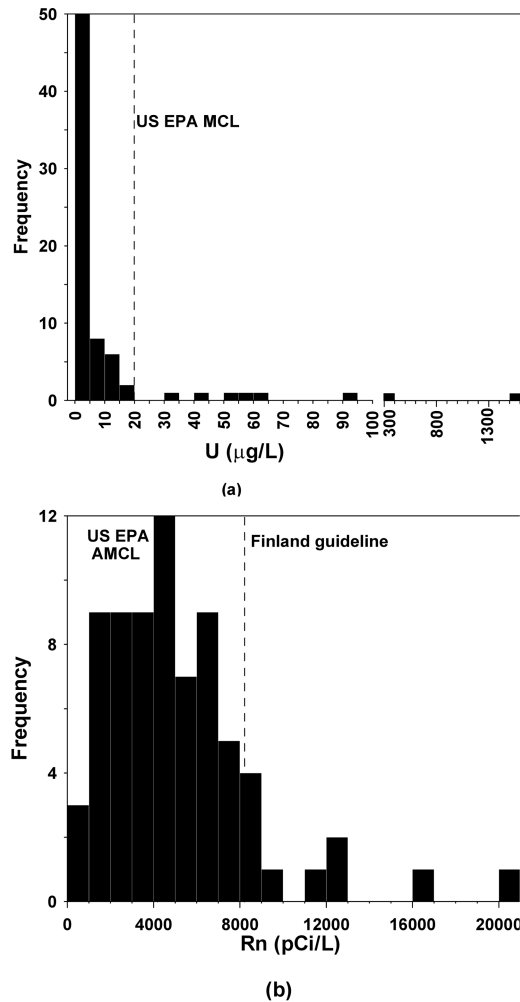


Fig. 5. Histograms of U (a) and Rn (b) concentrations in 74 groundwater samples.

Table 3. Distribution of U and Rn concentrations in groundwater throughout the study area.

U ($\mu\text{g/L}$)	No. (%)	Rn (pCi/l)	No. (%)
1.0 >	27 (36.5)	300 >	1 (1.3)
1.01-5.0	23 (31.1)	300-1000	2 (2.7)
5.01-30.0	16 (21.6)	1001-4000	27 (36.5)
30.01-100.0	6 (8.1)	4001-8100	33 (44.6)
100.0 <	2 (2.7)	8100 <	11 (14.9)
Total	74 (100)	Total	74 (100)

이천지역 74개 지하수의 우라늄 함량을 계급별로 나누어 보면 전체의 27개 시료(36.5%)가 $1 \mu\text{g/L}$ 이하로 나타났으며, 23개 시료(31.1%)가 $1.0\text{--}5.0 \mu\text{g/L}$ 으로 나타났다 (Table 3). 전체의 10.8%인 8개가 미국 EPA의 수질기준 ($30 \mu\text{g/L}$)을 초과하는데 이 수치는 국내 249개 심성암지역 지하수의 수질 기준치 초과율 7.6%보다는 높으나(NIER, 2002) 대전지역 93개 지하수의 20.4%(Cho et al, 2010(b))에 비하면 낮다. 전반적으로 우라늄 함량은 $60 \mu\text{g/L}$ 미만이나 일부 지하수에서는 $322 \mu\text{g/L}$ 또는 $1,640 \mu\text{g/L}$ 이나 검출되어 이들 지하수에 대한 광물학적, 수리화학적 연구가 필요하다.

이천지역 74개 지하수 시료의 라돈의 평균 함량은 $5,394 \text{ pCi/L}$ 이고 최소 함량은 심도 20 m 지하수공에서의 40 pCi/L 이고 최고 함량은 심도 100 m 지하수공에서의 $23,400 \text{ pCi/L}$ 이다(Table 1, 2). 라돈의 최고값 $23,400 \text{ pCi/L}$ 는 지금까지 알려진 국내 최고치 $45,010 \text{ pCi/L}$ 보다는 낮다(NIER, 2002). 이천지역 지하수의 라돈 평균 함량은 비슷한 지질환경을 가지고 있는 안성지역의 $3,305 \text{ pCi/L}$, 여주지역의 $3,339 \text{ pCi/L}$, 포천지역의 $4,079 \text{ pCi/L}$ (NIER, 2009)보다 약간 높으며 중앙값도 $4,649 \text{ pCi/L}$ 로서 안성지역의 $2,410 \text{ pCi/L}$, 여주지역의 $2,900 \text{ pCi/L}$, 포천지역의 $2,665 \text{ pCi/L}$ 보다 높다. 같은 화강암의 타 지역들에 비해서 연구지역 지하수의 라돈 평균값과 중앙값에 차이가 적은 것은 앞에서 언급한 바와 같이 연구지역의 대부분이 화강암이고 따라서 천부 지하수의 산출에 중요한 층적층과 풍화대의 두께가 두껍고 일정하기 때문으로 판단된다. 라돈 함량분포 역시 우라늄 분포보다는 그 정도가 덜하지만 히스토그램 상에서 낮은 값으로 치우쳐 있다 (Fig. 5).

이천지역 74개 지하수의 라돈 함량을 계급별로 나누어 보면 전체의 4%인 3개만이 $1,000 \text{ pCi/L}$ 이하이고 전체의 59.5%인 44개 지하수가 미국의 음용 제한치(AMCL)인 $4,000 \text{ pCi/L}$ 를 초과하였다. 이러한 초과 비율은 249개

심성암지역 지하수의 초과비율인 18.1%보다 월등히 높으며(NIER, 2002) 대전지역의 83개 지하수의 23.0%에 (Cho et al., 2010b) 비해서도 높다. 이렇게 초과비율이 높은 것은 위에서 설명한 바와 같이 화강암분포 비율이 95% 이상으로 높기 때문으로 판단된다. 연구지역의 라돈 함량이 높은 지하수의 대부분은 마을상수도로 이용되고 있어서 라돈저감 조치가 필요하다. 그러나 국내 5개 마을상수도의 자연 저감율이 $26.0\text{--}45.6\%$ 인 점(Cho et al., 2010a)을 고려하면 초과 지하수의 절반 정도는 별도의 라돈 저감시설을 설치하지 않더라도 $4,000 \text{ pCi/L}$ 이하로 낮아질 것으로 판단된다. 한편 핀란드의 음용 제한치인 $8,100 \text{ pCi/L}$ 를 초과하는 시료는 전체의 13.5%인 10개이다.

외국의 화강암지역 지하수의 우라늄과 라돈함량

연구지역 지하수의 우라늄 함량은 유사한 지질을 가지는 외국 지하수의 함량보다 낮은 편이다. 즉, 미국 New Hampshire Fitzwillian granite의 30개 지하수의 우라늄 함량은 $7\text{--}81 \mu\text{g/L}$ (중앙값 $27 \mu\text{g/L}$), Sunapee granite의 29개 지하수의 $0\text{--}120 \mu\text{g/L}$ (중앙값 $59 \mu\text{g/L}$), Main Waldoboro granite의 24개 지하수의 $2\text{--}1,050 \mu\text{g/L}$ (중앙값 $42 \mu\text{g/L}$), Segago granite의 28개 지하수의 $43\text{--}2,700 \mu\text{g/L}$ (중앙값 $43 \mu\text{g/L}$)에 비해서 낮은 편이다(Wathen, 1987). 연구지역 지하수의 우라늄 최고치도 외국의 최고치와 비교하면 낮은 편이다. 즉 핀란드의 최고치 $12,400 \mu\text{g/L}$ (Salonen and Hukkanen, 1997), 미국 Main의 최고치 $10,299 \mu\text{g/L}$ (Cothorn and Rebers, 1990) 등에 비해서 낮은 편이다(Table 4).

연구지역 지하수의 라돈 평균함량도 외국의 화강암지역

Table 4. Maximum U and Rn concentrations in groundwater from several countries.

Country	Sample	U ($\mu\text{g/L}$)		Rn (pCi/L)	
		Max.	Geology	Max.	Geology
Korea (Icheon)	74	1,640	Granite	23,400	Granite
Finland ¹⁾	$25,000 <$	12,400	Granite	2,094,825	Granite
Norway	$4,000 <$	$2,000^2)$	Granite	$862,257^3)$	Granite
Sweden	$35,000 <$	-	-	$1,540,710^4)$	Granite
Canada ⁵⁾ (Manitoba)	287	2,020	Granite	$371,270^6)$	Gneiss Granite
USA	$200,000 <$	$10,299^6)$	Granite	$1,600,176^7)$	Granite

¹⁾Salonen and Hukkanen, 1997, ²⁾Frengstad et al., 2000

³⁾Banks et al., 1998, ⁴⁾Morland et al., 1997, ⁵⁾Betcher et al., 1987, ⁶⁾Cothorn and Rebers, 1990, ⁷⁾Lowry et al., 1987

지하수와 비교하면 낮은 편이다. 즉, 미국 California 화강암지역 98개 지하수의 4,243 pCi/L, South Carolina의 22개 지하수의 8,100 pCi/L와는 비슷하나, North Carolina 22개 지하수의 10,500 pCi/L, Maine의 136개 지하수의 22,100 pCi/L에 비해서는 낮다(Cothem and Rebers, 1990). 우리나라와 지질 여건이 비슷한 노르웨이의 경우는 전체 지하수 시료의 14%가 500 Bq/L(13,515 pCi/L) 이상이고, 특히 선캄브리아기의 Iddefjord 화강암 지역 지하수는 전체의 70%가 500 Bq/L를 넘고 있으며(Morland et al., 1997), 핀란드 지하수의 평균 라돈 함량은 24,706 pCi/L이다(Salonen and Hukkanen, 1997). 연구지역 지하수의 라돈 최고치는 외국의 지하수중 라돈 함량 최고치에 비해 상당히 낮은 편이다. 즉 핀란드의 2,094,825 pCi/L (Salonen and Hukkanen, 1997), 스웨덴의 1,540,710 pCi/L (Morland et al., 1997)와 비교하면 상당히 낮은 편이다 (Table 4).

위에서와 같이 연구지역 지하수의 우라늄과 라돈함량을 국내 화강암지역과 비교하면 우라늄 함량은 비슷하나 라돈의 함량은 약간 높은 것으로 나타났으나 외국의 화강암지역 지하수와 비교하면 낮은 것으로 나타났다. 그러나 Table 1에서 보는 바와 같이 연구지역의 지질이 화강암

지역임에도 불구하고 지하수의 수질이 탄산염에 의해 지배를 받으며, 질산성질소의 농도가 높다는 사실은 지표수나 천부지하수의 유입이 활발함을 의미한다. 따라서 연구지역 지하수의 우라늄과 라돈 함량은 천부 지하수의 유입으로 인하여 실제보다 낮게 검출되었을 가능성이 크기 때문에 화강암지역 지하수의 정확한 우라늄과 라돈 함량을 파악하기 위해서는 지표수나 천부지하수의 공내 유입이 거의 없는 지하수공(예를 들면 온천공)을 대상으로 한 함량 파악이 필요하다고 판단된다.

지하수의 우라늄, 라돈함량과 다른 요인들과의 상관관계

지하수의 우라늄 함량은 모암의 우라늄 함량, 지하수의 산화-환원환경과 우라늄광물의 존재형태, 지하수에 용존된 중탄산염, 불소, 인산염 등의 농도에 영향을 받으나 지하수의 라돈 함량은 지하수의 수질과 관계가 없는 것으로 알려져 있다(STUK, 2005). 74개 지하수의 우라늄, 라돈 함량과 지하수의 물리화학적 수질과, 지하수공의 심도 등과의 상관관계를 분석한 결과 지하수의 우라늄과 라돈의 상관계수는 0.18로 낮게 나타났다(Fig. 6(a)). 대부분의 지하수에서는 우라늄과 라돈의 상관관계가 낮으나 일

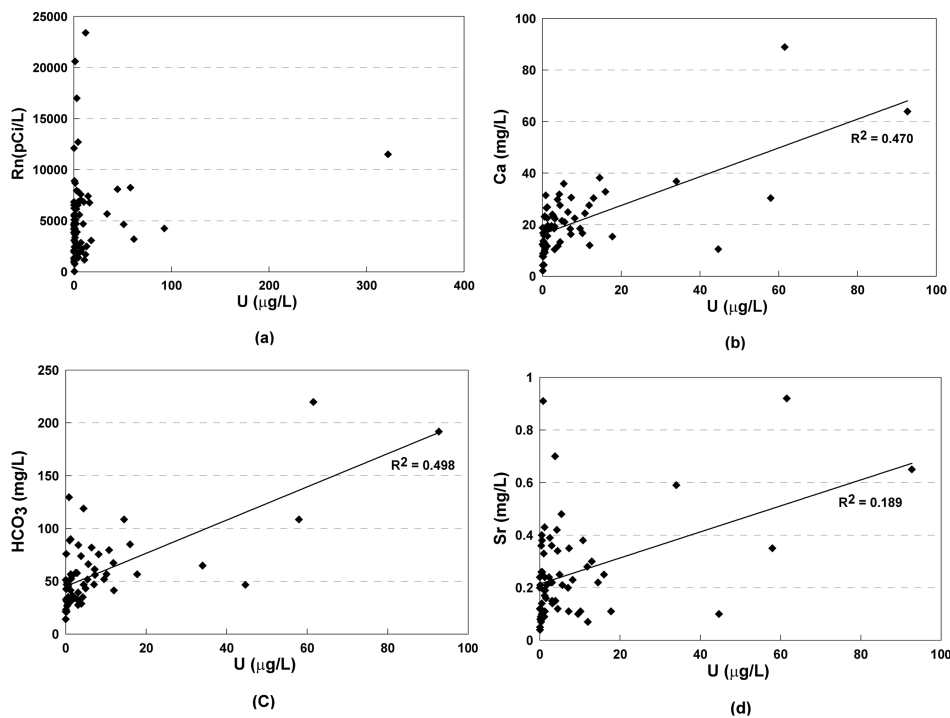


Fig. 6. Relationship between U and each of Rn (a), Ca (b), HCO₃ (c), and Sr (d).

부 지하수에서는 정의 상관관계가 있는 것으로 알려져 있으며(Asikainen and Kahlos, 1979), 노르웨이의 476개 암반 지하수의 우라늄과 라돈의 로그 상관계수는 0.74로 알려져 있다(Frengstad et al., 2000). 이천지역의 경우 우라늄과 주요 성분간의 상관관계를 보면 HCO_3 (0.71), Ca (0.69)와 비교적 높은 상관계수를 나타내는데(Fig. 6(b), (c)), 이는 앞에서 설명한 바와 같이 화강암지역 지하수에서의 사장석이나 탄산염의 용해로 설명될 수 있다(Lee et al., 1997). 즉 물-암석반응을 통하여 초기에는 사장석이 용해되는데, 점차 지하수에 Ca 함량이 증가할수록 과포화 상태에 도달하게 된다. 이때 Ca는 단순한 형태의 탄산염으로 포화, 침전되어 지하수로부터 제거된다. 그런 다음에 물-암석반응이 지속되면 침전한 탄산염은 다시 용해되므로 지하수 중에 Ca가 풍부해 지며, 이와 짝 이온인 탄산이온도 증가하게 된다. 따라서 지하수에는 Ca-중탄산염이 부화될 수 있다. 이 밖에도 우라늄과 상관성이 있는 주요 성분들은 Li (0.45), Sr (0.43) (Fig. 6(d)), F (0.42)의 순인데, 이들 성분은 화강암지역에서 비교적 풍부하므로 이들 분포지역의 지하수에서 비교적 높게 나타나는 것으로 알려져 있다. 위와 같은 연구지역 지하수의 우라늄과 주요 성분 간의 상관관계는 미국 북서부지역의 빙퇴석과 기반암 지하수의 우라늄과 성분 간의 상관관계와 유사하다(USDI and USGS, 2007). 한편 연구지역 지하수의 라돈과 다른 요인들과의 상관계수는 위에서 설명한 바와 같이 낮아서 ± 0.15 미만을 나타낸다.

연구지역 지하수의 우라늄, 라돈과 지하수의 성분, 심도 등과의 상관관계는 전반적으로 관계가 약하거나 없는 것으로 나타났다. 이의 원인으로는 지하 균열대수층의 발달 정도, 우라늄과 라돈의 지화학적 특징에 의한 것일 수도 있으나 천부 지하수의 공내 유입으로 인해서 우라늄과 라돈 농도의 희석, 지하수 성분의 변화 때문일 가능성도 크다. 지하수의 우라늄과 라돈 함량은 모암의 우라늄광물 함량, 지하수 환경, 특정 용존성분의 함량 등 여러 요인에 영향을 받는다. 그 외에도, 지하수의 우라늄과 라돈 함량은 강우나 천부지하수의 유입에 의해서 희석될 수 있다(Cho et al., 2010b). 즉 지하수 중에서 질산성질소와 염소간의 함량 증가 상관성은 물-암석반응에 의한 것 이라기 보다는 외부기원 오염물의 유입가능성을 뒷받침한다.

5. 결 론

국내 화강암지역 지하수의 우라늄과 라돈 함량의 범위와 특성을 파악하기 위하여 경기도 이천지역 74개 지하

수의 우라늄, 라돈, 주요 성분 함량을 분석하였다. 74개 지하수의 우라늄 함량은 0.02~1,640 $\mu\text{g/L}$ (중앙값 2.03 $\mu\text{g/L}$), 라돈 함량은 40~23,400 pCi/L (중앙값 4,649 pCi/L)이다. 74개 지하수의 우라늄의 평균값(34.25 $\mu\text{g/L}$)과 중앙값(2.03 $\mu\text{g/L}$)의 차이가 큰 것은 일부 지하수에서 수리화학적 환경, 우라늄광물의 산출 특성과 존재 형태에 의해 우라늄광물이 용해되는 정도와 관련이 있기 때문으로 해석되며, 지하수의 라돈의 평균값과 중앙값에 차이가 작은 것은 충적층과 풍화대의 두께가 두껍고 일정하기 때문으로 판단된다. 74개 지하수에서 우라늄은 8개인 10.8%가 미국 EPA의 수질기준(30 $\mu\text{g/L}$)을 초과하는 것으로 나타났다. 라돈은 44개인 59.5%가 미국의 음용 제한치(AMCL)인 4,000 pCi/L를 초과하였으나 핀란드의 음용 제한치인 8,100 pCi/L를 초과하는 시료는 전체의 13.5%인 10개이다. 본 연구지역 지하수의 우라늄과 라돈 함량은 유사한 지질을 가지는 외국에 비교하면 낮은 것으로 나타났으나 천부 지하수의 공내 유입으로 인해서 실제 함량보다 낮게 검출되었을 가능성이 크기 때문에 천부 지하수의 공내 유입이 거의 없는 지하수를 대상으로 한 연구가 필요하다.

사 사

이 연구는 국립환경과학원의 연구과제인 '지하수 중 자연방사성물질 정밀조사(11)'의 지원에 의해서 이루어졌습니다.

참고문헌

- Asikainen, M. and Kahlos, H., 1979, Anomalously high concentration of uranium, radium and radon in water from drilled wells in the Helsinki region, *Geochimica et Cosmochimica Acta* 43, 1681-1686.
- Banks, D., Frengstad, B., Midtgard, A.K., Krog, J.R., and Strand, T., 1998, The chemistry of Norwegian groundwaters: The distribution of radon, major and minor elements in 1604 crystalline bedrock groundwaters, *Science of the Total environment*, 222, 71-91.
- Barcelona, M.J., Gibb, J.P., Helfrich, J.A., and Garske, E.E., 1985, Practical guide for groundwater sampling, SWS Contract Report 374, 94.
- Betcher, R. N., 1987, Uranium in groundwater of south-eastern Manitoba, Canada. *Canadian J. Earth Science*, 25, 2089-2103.
- Cho, B.W., Sung, I.H., Cho, S.Y., Park, and S.K., 2007, A preliminary investigation of radon concentrations in groundwater of South Korea. *Journal of Soil and Groundwater Env.*, 15, 98-104.
- Cho, B.W., Yun, U., and Choo, C.O., 2010a, Natural radon removal efficiency of small-scale water supply

- system, Journal of Korean Society of Environ. Eng., 43, 33-42.
- Cho, B.W., Yun, U., and Choo, C.O., 2010b, Uranium and radon concentration in groundwater of the Taejeon area, Korea, 38th International Association of Hydrogeologists Conference, 61-62.
- Choo, C.O., 2002, Characteristics of uraniferous minerals in Daebo granite and significance of mineral species, Journal of Mineral Soc. Korea, 15, 11-21.
- Cothorn, C.R. and Rebers, P.A., 1990, Radon, radium and uranium in drinking water, Lewis publishers, 283p.
- Frengstad, B., Midtgard, A.K., Banks, D., Krog, R.K., Siewers, U., 2000, The chemistry of Norwegian groundwater. The distribution of trace elements in 476 crystalline bedrock groundwaters, as analyzed by ICP-MS techniques, Science of the Total environment, 246, 21-40.
- Geological and Mineral Institute of Korea, 1975, Geological report of the Yeoo sheet (1:50,000), 12p.
- Geological and Mineral Institute of Korea, 1974, Geological report of the Icheon sheet (1:50,000), 15p.
- KIER, 1989a, Geological report of the Ansong sheet (1:50,000), 18p.
- KIER, 1989b, Geological report of the Changhown sheet (1:50,000), 17p.
- Lee, J.U., Chon, H.T., and John, Y.W., 1997, Geochemical characteristics of groundwater in Korea with different aquifer geology and temperature-comparative study with granitic groundwater. Journal of Soil and Groundwater Env., 4, 212-222.
- Lowry, J.D., Hoxie, D.C., and Moreau, E., 1987, Extreme levels of ^{222}Rn and U in a private water supply, Proceedings of the NWWA conference, 363-375.
- Morland, G., Reimann, C., Strand, T., Skarphagen, H., Banks, D., Bjorvatn, K., Hall, G.E.M., and Siewers, U., 1997, The hydrogeochemistry of Norwegian bedrock groundwater-selected parameters (pH, F, Th, U, Th, Na, Ca) in samples from Vestfold and Hordaland, Norway, NGU Bull, 432, 103-117.
- NIER, 2000, Study on the radionuclides concentrations in the groundwater (2). NIER Report, 323p.
- NIER, 2002, Study on the radionuclides concentrations in the groundwater (V), NIER Report, 357p.
- NIER, 2006, Study on the radionuclide concentration in the groundwater, NIER Report, 200p.
- NIER, 2009, A detailed study of the radionuclide concentration in the groundwater (II), NIER Report, 273p.
- Salonen, L. and Hukkanen, H., 1997, Advantages of low-background liquid scintillation alpha-spectrometry and pulse shape analysis in measuring radon, uranium and radium-226 in groundwater samples, J. Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 226, 67-74.
- STUK, 2005, ^{238}U -series radionuclides in Finnish groundwater-based drinking water and effective doses, STUK-A123, 94p.
- USDI and USGS, 2007, Occurrence of uranium and radon in glacial and bedrock aquifers in the northern United States, 1993-2003, scientific investigation report 2007-5037, 85p.
- Wathen, J.B., 1987, The effect of uranium sitting in two-mica granites on uranium concentrations and radon activity in groundwater, Proceedings of the NWWA conference, 31-45p.
-
- 2011년 8월 17일 원고접수, 2011년 9월 19일 게재승인
- 조병욱**
한국지질자원연구원 지구환경연구본부
305-350 대전광역시 유성구 과학로 92
Tel: 042 868-3083
E-mail: cbw@kigam.re.kr
- 추창오**
안동대학교 지구환경과학과
760-749 경북 안동시 송천동 388
Tel: 054 820-7735
E-mail: mineralogy@paran.com
- 김문수**
국립환경과학원 토양지하수연구팀
인천시 서구 난지로 184
Tel: 032 560-7907
E-mail: hyd009@korea.kr
- 이영준**
국립환경과학원 토양지하수연구팀
인천시 서구 난지로 184
Tel: 032 560-8360
E-mail: d8joony@korea.kr
- 윤 욱**
한국지질자원연구원 지구환경연구본부
305-350 대전광역시 유성구 과학로 92
Tel: 042 868-3118
E-mail: yunuk@kigam.re.kr
- 이병대**
한국지질자원연구원 지구환경연구본부
305-350 대전광역시 유성구 과학로 92
Tel: 042 868-3088
E-mail: blee@kigam.re.kr