논산지역 지하수중 우라늄과 라돈의 수리지질학적 특성과 정밀함량분포

조병욱¹ · 김문수² · 김태승² · 한진석² · 윤 욱¹ · 이병대¹ · 황재홍³ · 추창오^{4*}

¹한국지질자원연구원 지구환경연구본부, ²국립환경과학원 토양지하수연구과,

³한국지질자원연구원 국토지질연구본부, ⁴경북대학교 지질학과

Hydrochemistry and Distribution of Uranium and Radon in Groundwater of the Nonsan Area

Byeong Wook Cho¹, Moon Su Kim², Tae Seung Kim², Jin Seok Han²,
Uk Yun¹, Byeong Dae Lee¹, Jae Hong Hwang³, and Chang Oh Choo^{4*}

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

²Soil and Groundwater Research Division, National Institute of Environmental Research, Korea

³Geological Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Korea

⁴Department of Geology, Kyungpook National University

논산지역 100개의 지하수공을 대상으로 자연방사성 원소인 우라늄과 라돈 함량을 분석하고, 지하수의 주요 수질특성항목과의 관련성을 검토하여 이들의 산출실태와 원인을 연구하였다. 또한 이를 바탕으로 방사성물질 정밀함량분포도를 작성하였다. 우라늄은 불검출에서부터 최대 378 µg/L까지 범위가 넓게 나타난다. 평균치는 8.57 µg/L, 표준편차 42.88 µg/L, 중앙값은 0.56 µg/L으로서 매우 낮다. 우라늄과 라돈의 상관계수는 0.42로서 약간 관련성이 있으나, 이들과 기타 수질항목들과는 거의 무관하다. 지하수의 우라늄함량 분포도를 살펴보면 우라늄 함량은 97%가 30 µg/L 이하의 값을 가지며, 30 µg/L 이상인 지점의 지질은 주로 화강암 또는 화강암과 변성암의 경계 부분이며, 옥천대지역 지하수의 우라늄 함량은 대부분 1 µg/L 이하로 낮게 나타났다. 논산지역 100개 지하수 전체의 라돈 함량은 128~9,140 pCi/L 범위, 평균 2,186 pCi/L, 표준편차 1,725 pCi/L, 중앙값은 1,805 pCi/L로 나타났다. 라돈 함량이 4,000 pCi/L 이상인 지역은 거의 주라기 화강암 지역에 있다. 전체적으로 라돈 함량이 높은 지역은 주라기 화강암지역이며, 낮은 지역은 퇴적암지역이다. 지하수중 방사성물질의 함량은 기본적으로 함우라늄광물을 배태하는 지질과 밀접한 관련을 가진다.

주요어 : 논산지역, 우라늄, 라돈, 지하수, 정밀함량분포도

A total of 100 groundwater samples were collected from the Nonsan area and the behaviors of uranium and radon as natural radionuclides were investigated with respect to other physicochemical components in the groundwater in order to understand their occurrence, properties, and origins. Radionuclide levels were used to construct detailed concentration maps. The concentration of uranium ranges from 0 to 378 µg/L, with an average of 8.57 µg/L, standard deviation of 42.88 µg/L, and median of 0.56 µg/L. The correlation coefficient between uranium and radon is 0.42, whereas these radionuclides show no relation with other physicochemical components in groundwater. It is noteworthy that the uranium level in most samples (97% of the samples) is less than 30 µg/L, where the bedrock of the aquifer is granite or complex rocks located along the boundary between granite and metamorphic rocks. In the Okcheon metamorphic belt, the uranium concentration of most groundwater is less than 1 µg/L. Radon levels varies from 128 to 9,140 pCi/L, with an average of 2,186 pCi/L, standard deviation of 1,725 pCi/L, and median of 1,805 pCi/L. High radon levels (> 4,000 pCi/L) are most common in regions of Jurassic granite, whereas low radon areas are found in regions of sedimentary rock. In conclusion, the distribution and occurrence of radionuclides are intimately related to the basic geological characteristics of the rocks in which the radiogenic minerals are primarily contained.

Key words : Nonsan area, Uranium, Radon, Groundwater, Detailed concentration maps

*Corresponding author: chooco@knu.ac.kr

© 2012, The Korean Society of Engineering Geology
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 언

지하수에서 우라늄과 라돈을 비롯한 자연방사성 물질이 함유되는 주 원인은 암석 속에 함유되어 있는 미량

의 함방사성 광물이 지하수에 용해되어 나타나는 자연적인 현상이며, 대부분은 그 농도가 매우 낮아서 자연적 배경치로 볼 수 있다. 그럼에도 지하수중 방사성물질의 함유정도나 거동특성 규명을 위해서는 전국단위의 지질에서의 현황파악과 장기간에 걸친 모니터링이 필수적이다. 또한 극미량으로 함유되며, 시료채취 단계에서부터 쉽게 영향을 받는 방사성물질의 지구화학적 거동특성과 지하수계(groundwater system)가 근본적으로 가지는 3차원적 유동의 복잡성 때문에 단순히 지하수 시료채취만으로써 이들의 함유특성을 해석하기에는 난점이 다수 존재하는 것이다. 이를 해결하기 위해서는 먼저 대수층의 특성을 충분한 고려한 상태에서 시료채취 과정의 체계화와 엄격한 분석의 품질관리(QA/QC)가 요구된다. 주요 선진국의 경우 1960년대 이후부터 광범위하고도 체계적인 연구가 수행되어 왔는데, 미국의 경우 200,000 개, 스웨덴의 경우 35,000 개 이상의 지하수공을 대상으로 방사성물질 분석이 이루어진 바 있다(NIER, 2006).

그 동안 국내 지하수에서 전국단위의 자연방사성 물질의 함량분포 및 원인에 관한 연구는 1999년을 기점으로 한국지질자원연구원과 국립환경과학원을 중심으로 활발하게 수행되어 왔다(NIER, 2000, 2002, 2006, and 2009; Cho et al., 2011). 이들 연구에 의하면 우리나라의 방사성물질의 농도는 우리나라와 유사한 지질환경을 가지는 외국의 지하수에 비하여 대체적으로 낮으며(NIER, 2002), 화강암질 암류 지역이 퇴적암이나 변성암류 분포지역에 비하여 높은 것으로 나타났다(Cho et al., 2007 and 2011). 이같은 결과는 외국의 방사성물질 함유 지하수의 연구사례와도 잘 일치하는 것으로서(Lowry et al., 1987; Wathenm, 1987; Cothorn and Rebers, 1990; Banks et al., 1998), 산성암류에서 방사성광물이 상대적으로 높게 함유되는 지질학적 요인과 밀접히 관련되기 때문이다.

본 연구에서는 논산지역에 분포하는 지하수 100개소를 대상으로 방사성물질의 함유정도를 분석하고, 이들의 거동특성을 검토하였다. 또한 이를 기반으로 단위지역에서의 우라늄과 라돈의 정밀함량분포도를 작성하였다.

지 질

논산지역의 지질은 시대미상의 편암 및 편마암을 기저로 하며 시대 미상의 옥천계 지층이 분포하며, 이를 중생대 유라기의 화강암류와 백악기의 석영반암이 관입하고 있으며, 이들을 제4기 충적층이 부정합으로 피복

하고 있다. 주요 지질은 지하수의 발달과 수질특성과 밀접히 관련되므로 대표적인 지질의 분포와 암질특징을 기술하면 다음과 같다.

최하부층인 시대미상의 편암 및 편마암은 공주도폭 지역에 주로 넓게 분포하는데 이들 공주 편마암체는 논산 지역의 서부에도 일부 분포한다. 본 층은 호상구조의 발달이 미약하며 규암이 협재되지 않고 엽리의 발달상태가 교란되어 있는 특징을 보인다. 노성면에서는 운모질 편암이 우세하게 분포한다. 편암은 석영, 사장석, 흑운모, 견운모의 광물조합을 특징적으로 이룬다. 그 외에 전기석, 인회석, 저어콘, 침정석 등의 부수광물을 수반한다.

옥천층군은 연구지역 동부에 북동-남서 주향방향으로 대상 분포하며 하부에 변성이질암층과 상부에 변성사질암층으로 구성된다. 변성이질암대는 암회색내지 흑색점판암의 흑색대와 회색내지 적회색 천매암의 비흑색대로 나누어진다. 흑색대는 석회암을 협재하기도 한다. 변성사질암층은 주로 규암 및 석영편암으로 이루어지며 현미경하에서 대부분 석영으로 구성되며 미량의 흑운모, 견운모, 녹니석이 수반된다.

유라기 화강암류는 본 역 서부-중부지역에서 넓게 대상으로 분포하는데, 조사지역 면적의 2/3 이상을 차지하고 있다. 주 구성광물은 석영, 사장석, 흑운모와 미사장석이고, 부성분 광물들은 견운모, 녹염석, 침정석, 저어콘, 인회석 및 소량의 불투명 광물로 구성된다.

백악기 석영반암은 풍화에 비교적 약한 화강암질암으로 넓게 분포하는데, 지형적으로는 대체로 저지대를 이루고, 김제평야를 비롯한 넓은 충적층이 발달해 있다. 최상부층인 충적층의 경우 노성천, 논산천, 석성천의 넓은 하안을 따라 넓게 발달하는데, 이들은 이토와 토사 및 자갈로 구성되며 주로 농경지로 널리 활용되고 있다. 이들은 풍화 침식에 비교적 약한 화강암류 지대에 넓게 발달하고 있다.

시료채취 및 수질분석

논산지역의 경우 비교적 다양한 지질로 구성되어 있으나, 크게 5개의 암상으로 구분하였다. 즉 이들은 선캄브리아기 변성암, 옥천계 변성암, 유라기 화강암, 백악기 퇴적암, 화산암으로 세분된다. 논산지역 지하수의 자연 방사성물질의 지구화학적 특성 파악을 위하여 100개 조사지점의 지하수공 심도, 양수량, 사용량 등의 수리지질학적 기본정보를 취득하고, 일반적인 지하수의 기본적인 주요 수질항목과 자연방사성물질 분석을 실시하였다

Table 1. Physicochemical properties of groundwater in the Nonsan area.

Sample No.	D (m)	T	pH	EC	Eh	DO	Rn	U	K	Na	Ca	Mg	SiO ₂	Sr	F	Cl	NO ₃	SO ₄	HCO ₃
Total (100)																			
Max	280	17.9	9.54	2010.0	392.0	10.90	9140	378.0	36.20	510.0	98.80	54.50	63.50	1.40	0.58	6.59	326.0	174.0	109.0
Min	10	12.6	5.58	79.0	-76.0	1.52	128	0.04	0.21	3.25	1.57	0.06	7.89	0.03	0.05	0.03	1.75	0.10	0.2
Avg	110	15.3	6.85	291.1	257.1	7.07	2186	8.57	2.35	23.51	25.65	5.64	26.44	0.25	0.33	0.41	25.76	28.97	12.0
Med	120	15.4	6.80	222.5	277.5	7.38	1805	0.56	1.33	12.45	21.70	4.25	27.20	0.18	0.35	0.16	12.45	20.30	8.4
Std	61	1.0	0.60	275.1	84.9	1.94	1725	42.88	4.09	56.75	14.81	6.49	10.44	0.24	0.26	0.91	43.81	28.42	14.5
Jr Gr (66)																			
Max	240	17.9	7.60	2010.0	384.0	10.90	7650	165.0	36.20	510.0	57.60	54.50	63.50	1.29	2.45	326.0	174.0	109.0	957.7
Min	10	13.4	5.58	79.0	-76.00	2.43	240.0	0.03	0.43	6.92	2.10	1.06	8.47	0.07	0.03	2.82	0.04	0.05	19.8
Avg	107	15.6	6.64	325.7	252.33	7.33	2439.99	5.65	2.75	30.39	24.21	6.40	30.95	0.30	0.30	33.08	33.40	12.42	81.9
Med	120	15.7	6.70	232.5	277.50	7.79	2070.0	0.60	1.44	14.15	21.50	4.72	31.40	0.21	0.15	18.90	25.40	7.65	58.0
Std	64	0.9	0.42	319.5	84.79	1.81	1711.49	21.05	4.95	68.62	12.20	7.61	9.07	0.22	0.41	51.03	31.76	17.16	121.6
OC Met (24)																			
Max	280	16.2	9.50	370.0	392.00	9.20	4250.0	5.62	4.16	18.70	60.20	8.26	21.80	0.28	5.83	20.00	41.20	23.60	152.5
Min	20	12.6	5.85	98.3	-11.00	1.92	127.97	0.05	0.21	3.25	3.60	0.08	7.89	0.03	0.05	2.83	0.04	1.66	18.3
Avg	117	14.6	7.28	187.9	278.9	6.52	1384	0.61	1.60	6.47	26.26	3.46	15.01	0.11	0.50	7.12	13.48	10.17	76.5
Med	120	14.5	7.32	160.4	295.3	6.95	955	0.30	1.24	5.82	21.35	2.97	14.65	0.09	0.21	6.07	10.80	10.30	67.1
Std	59	0.9	0.64	71.5	84.7	1.93	1089	1.14	0.97	3.23	13.76	1.99	4.14	0.08	1.16	4.39	11.26	5.16	36.7
PC Met (5)																			
Max	120	15.9	7.19	309.0	308.0	9.18	9140	378.0	2.14	12.70	40.90	10.00	27.60	0.16	0.95	19.70	18.60	20.40	143.4
Min	60	14.9	6.65	117.0	176.0	1.52	1250	0.37	1.11	7.52	9.37	2.37	21.60	0.07	0.10	6.88	4.97	3.31	33.6
Avg	79	15.3	6.87	222.0	254.8	6.86	3678	76.23	1.51	9.61	25.83	5.97	24.56	0.11	0.30	12.54	11.12	9.99	90.0
Med	60	15.4	6.75	117.0	261.0	9.18	3420	0.37	1.11	9.04	9.37	2.37	24.00	0.08	0.11	6.88	16.30	3.31	33.6
Std	24	0.4	0.25	74.7	50.9	3.13	3165	168.69	0.45	1.92	12.50	2.79	2.17	0.04	0.37	4.71	6.07	6.52	39.9
Cre Sedim. (3)																			
Max	150	17.4	6.95	873.0	302.0	6.89	1910	15.30	3.38	52.70	98.80	13.80	41.70	1.40	0.22	105.0	65.10	37.90	228.8
Min	20	15.4	6.66	330.0	245.0	4.52	590	1.18	1.22	10.20	29.70	5.81	20.20	0.08	0.05	18.80	34.80	3.59	85.4
Avg	89	16.4	6.77	522.0	266.3	5.85	1233	6.07	2.05	26.03	61.60	9.28	29.20	0.62	0.13	51.27	45.57	18.86	148.9
Med	98	16.4	6.71	363.0	252.0	6.14	1200	1.72	1.54	15.20	56.30	8.23	25.70	0.37	0.13	30.00	36.80	15.10	132.7
Volcanics (2)																			
Max	180	14.9	9.54	230.0	273.0	10.30	1240	1.82	0.80	44.30	21.80	0.68	15.80	0.55	6.59	3.05	3.88	15.0	88.45
Min	100	14.4	7.39	192.1	20.0	5.01	990	0.06	0.34	19.30	1.57	0.06	14.30	0.03	0.76	1.75	0.04	7.0	82.35
Avg	140	14.7	8.47	211.1	146.5	7.66	1115	0.94	0.57	31.80	11.69	0.37	15.05	0.29	3.68	2.40	1.96	11.0	85.4

(Table 1). 자연방사성물질의 경우 U, Rn, 전알파(²²⁶Ra)은 필요시 분석)를 분석하였으며, 일반 수질항목의 경우 현장에서 수온(T), 전기전도도(EC), 산화환원전위(Eh), 용존산소(DO), 중탄산(HCO₃), CO₃를 측정하였으며, 실내에서 ICP-AES, IC를 이용하여 Na, K, Ca, Mg, SiO₂, F, B, Sr, NO₃, SO₄ 등을 분석하였다. 라돈은 쉽게 휘발하므로 폭기가 일어나지 않도록 주의할 기를 채수를 하여, 곧 바로 밀봉하였다. 우라늄은 산처리없이 채취하고 ICP-MS로써 분석하였다.

정밀함량분포도를 작성하기 위하여 분석치와 시료지점을 고려하여 지질별, 농도별로 구분하였다. 셀 기반 표

현의 경우는 일반적으로 시료채취 지역에 대한 보간(interpolation)을 사용한다. 지화학, 오염 모델링과 같은 다양한 분야에서 사용되는 강력한 통계학적 보간 방법인 Kriging은 시료채취지점 간의 거리와 방향이 표면의 변화를 설명할 수 있는 공간 상관성을 반영한다고 전제한다. Kriging은 데이터에서 거리의 상관성 또는 방향성이 파악되는 경우에 가장 적합하다. IDW와 Spline은 유사성 또는 유연성을 기반으로 샘플에서 표면을 생성하는 결정론적 방법이다. 그러나, Spline의 표면은 정확하게 각 샘플 포인트를 지나는 반면에, IDW의 표면은 시료채취 지점을 지나지 않는다. 본 조사 연구에서 이러

한 보간법들을 적용하기에는 우선 행정경계 지역이 아닌 보간의 영역이 되는 사각형 지역의 시료채취가 필요하며, 아울러 많은 개수의 시료채취 지점이 필요하다.

결과 및 토의

지하수의 수질특성

수온

전체 논산지역의 수온(T)은 12.6~17.9°C 범위이고 평균 수온은 15.3°C이다(Table 1). 천부지하수의 수온은 대기에 의해 직접적인 영향을 받기 때문에 계절별로 항상 일정하지는 않다. 주라기 화강암지역 지하수의 수온은 13.4~17.9°C 범위이고, 평균 수온은 15.6°C이다. 옥천계 변성암지역 지하수의 수온은 12.6~16.2°C, 평균수온은 14.6°C이다. 선크브라아기 변성암지역 지하수의 수온은 14.9~15.9°C, 평균 수온은 15.3°C이다.

pH

전체 지하수의 pH 범위는 5.6~9.5이고 평균은 6.8인데, 약산성에서부터 알칼리성 수질까지 나타나 일반적인 지하수의 산출특징에 비하여 그 범위가 비교적 넓은 것을 알 수 있다(Table 1). 주라기 화강암 지하수의 경우 5.6~7.6, 평균은 6.6로서 낮은 편이다. 옥천계 변성암 지하수의 경우 5.9~9.5로서 범위가 넓으며, 평균은 7.3이다. 선크브라아기 변성암지역 지하수의 pH 범위는 6.7~7.2, 평균은 6.9이다.

전기전도도 (EC)

전체 지하수의 EC 범위는 79~2,010 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로서 상당히 넓은데, 지하수의 산출특성에 따라서 용존이온의 함량에 차이가 있다(Table 1). EC의 평균은 291 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로서 중앙값(median) 223 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 보다 높게 나타나, EC 값이 높은 지하수공들의 수치범위가 편차가 큼을 보인다. 표준편차는 275 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에 이르러 넓은 범위에 걸친 지하수의 수질특성을 보여준다. 주라기 화강암 지하수의 경우 79~2,010 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 범위로 매우 넓으며, 평균은 326 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이다. 옥천계 변성암 지하수는 EC는 98~370 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 범위, 평균은 326 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이다.

산화환원전위(Eh)

전체적으로는 -76~392 mV 범위이고, 평균은 257 mV을 보인다. 일부 지하수는 비교적 환원환경 상태에 놓여 있으나, 대부분의 지하수는 낮은 산화환경에 있다. 우라

늄이온은 환원환경에서는 안정한 4가의 형태를 취하며, 산화환경에서는 용해되어 6가로 산화되어 지하수에 용존되거나, 이동하기 때문에 우라늄원소의 이동특성에 중요한 요소이다(Langmuir, 1997). 주라기 화강암 지하수의 경우 -76~384 mV 범위, 평균은 252 mV이고, 옥천계 변성암 지하수의 경우 -11~279 mV 범위를 보인다.

용존산소(DO)

전체는 1.5~10.9 mg/L로서 비교적 넓은 범위를 보이며, 평균은 7.1 mg/L이다. 중앙값은 7.4 mg/L, 표준편차는 1.9 mg/L로 비교적 좁은 범위에 지하수가 밀집되어 있다. 논산지역 지하수는 지표수에 비하여 약간 낮은 용존산소값을 보이는데, 이는 일반적인 지하수의 특성을 잘 반영하고 있다. 특히 일부 낮은 용존산소값은 산소와 접촉하기 어려운 환경인 지하심부나, 산소가 결핍된 환원환경과 밀접히 관련된다. 주라기 화강암 지하수의 경우 2.4~10.9 mg/L 범위이고, 평균은 7.3 mg/L이다. 옥천계 변성암 지하수는 1.9~9.2 mg/L 범위, 평균은 7.2 mg/L을 보인다.

지하수공 심도

전체 논산지역 지하수공의 심도는 10~280 m 범위이며, 평균 심도는 110.1 m, 표준편차는 61 m로서 지하수공의 심도는 비교적 깊다(Table 1). 이는 주로 심부의 암반지하수를 중점적으로 조사하였으나, 지하수의 자연방사성물질의 독특한 거동과 산출특성을 파악하기 위하여 천부지하수인 개인생활용, 농업용 지하수가 일부 포함된 다양한 지하수공을 대상으로 조사하였기 때문이다.

주라기 화강암 지하수의 경우 지하수공의 심도는 10~240 m 범위이며, 평균 심도는 107 m, 표준편차는 64 m로서 지하수공의 심도는 비교적 깊다. 옥천계 변성암 지역 지하수공의 경우 20~280 m 범위이고, 평균심도는 117 m, 표준편차는 59 m이다. 지하수공의 심도는 대수층의 실제 심도와 밀접한 상관성은 없는 요소이다. 그러나 일반적으로 지하수공의 심도가 깊을수록 심부의 지하수가 배출될 가능성이 높기 때문에 지하수의 수질특성 분석시 지하수공의 심도를 가능하면 고려할 필요가 있다.

수질유형

지하수의 수질유형을 분석하기 위하여 Piper 다이어그램에 도시하였다. 이를 위하여 주요 8개 양이온, 음이온을 당량비로 환산하였으며, 이를 백분율로 변환한 후에, Piper 다이어그램을 작성하였다(Fig. 1).

Fig. 1. Groundwater types plotted on a Piper diagram. Jr Gr: Jurassic granite, OC Met: Okcheon metamorphic rocks, PC Met: Precambrian metamorphic rocks, Cre Sed: Cretaceous sedimentary rocks, Volcanics: Volcanic rocks.

옥천계 변성암의 경우 대부분 Ca-HCO_3 가 우세한 유형을 보여 칼슘-중탄산형의 지하수의 특징을 가진다. 주라기 화강암 지역의 지하수는 주요 양이온인 Na, K, Ca가 다양한 범위에서 포함되며, 음이온의 경우 HCO_3 , Cl이 상당히 넓은 범위로 포함된다. 논산지역의 경우 주라기 화강암 지하수에서 가장 넓은 범위에 걸쳐 다양한 수질유형이 나타난다. 선캄브리아기 변성암과 백악기 퇴적암 지역 지하수에서는 주로 Ca-HCO_3 의 수질유형을 보여준다.

자연방사성물질 함량특성

우라늄

우라늄은 불검출에서부터 최대 $378 \mu\text{g/L}$ 까지 범위가 넓게 나타난다. 평균치는 $8.57 \mu\text{g/L}$, 표준편차 $42.88 \mu\text{g/L}$, 중앙값은 $0.56 \mu\text{g/L}$ 으로서 매우 낮다(Table 1). 이처럼 매우 낮은 중앙값이 나타나는 이유는 일부 고함량 지역의 수치가 대부분의 지하수의 값에 산술적으로 큰 영향을 주기 때문인 것이다. 따라서 표준편차가 평균치를 훨씬 상회한다. 그러므로 한, 두 지점을 제외하면 논산지역 대부분의 지하수에서 우라늄의 수치는 매우 낮

다고 볼 수 있다. 주요 지질별로 살펴보면 다음과 같다.

주라기 화강암 지하수에서는 $0.03 \sim 165.00 \mu\text{g/L}$ 범위, 평균은 $5.65 \mu\text{g/L}$, 표준편차 $21.05 \mu\text{g/L}$, 중앙값은 $0.60 \mu\text{g/L}$ 인데 이는 일부 고농도 지점의 수치가 미량함량인 대부분의 지하수와 합산한 후 산술평균 계산시에 큰 영향력을 발휘하기 때문에 나타난 결과이다. 고농도 지점을 제외하면, 대체로 일정한 범위에서 데이터가 분산된다.

옥천계 변성암 지하수에서는 $0.05 \sim 5.62 \mu\text{g/L}$ 범위이고 평균 함량은 $0.61 \mu\text{g/L}$, 표준편차 $1.14 \mu\text{g/L}$, 중앙값은 $0.30 \mu\text{g/L}$ 이다. 선캄브리아기 변성암 지하수의 경우 지하수 데이터는 5개에 불과하지만, 고농도 지하수가 포함되기 때문에 전체적인 산술평균에 큰 변수로 작용하고 있다. 이 지하수에는 $0.37 \sim 378.0 \mu\text{g/L}$ 범위, 평균은 $76.23 \mu\text{g/L}$, 중앙값은 $0.37 \mu\text{g/L}$, 표준편차는 $168.69 \mu\text{g/L}$ 에 이른다. 그러나 $378.0 \mu\text{g/L}$ 로 검출된 지하수의 지표 지질은 선캄브리아기 변성암지역에 위치해 있지만 화강암지역과 경계 부분에 위치하고 있어서 지하 심부로 내려가면 지질이 화강암일 또는 화강암 관입의 영향을 받았을 가능성이 있다. 백악기 퇴적암 지하수는 $1.18 \sim 15.30 \mu\text{g/L}$ 범위, 평균은 $6.07 \mu\text{g/L}$ 이다. 화산암지하수는

Fig. 2. Uranium concentration ($\mu\text{g/L}$) with respect to geology.

2개소 뿐인데, 이들은 각각 $0.06 \mu\text{g/L}$, $1.82 \mu\text{g/L}$ 이고, 평균은 $0.94 \mu\text{g/L}$ 이다.

Fig. 2는 우라늄의 최대값, 평균값을 나타낸 것으로 선캄브리아기 변성암에서 가장 높다. 그러나 이는 시료 수가 상대적으로 매우 적으며, 일부 시료에서만 고농도로 검출되기 때문에 이들을 포함한 상태에서 지질별로 단순평균을 비교하여 지질에 따른 함량특성을 판단하는 것은 무리가 있다.

화강암지역과 선캄브리아기 변성암지역 지하수에서 우라늄이 $100 \mu\text{g/L}$ 이상의 고농도로 산출되는 경우 이들은 평균적인 암질에 함유되어 있던 방사성물질로부터 유래한다고 보기에는 어렵다. 왜냐하면 소수 시료에서만 높게 나타나기 때문에 이들은 보통 암종에서 일반적인 현상이라기보다는 국부적으로 나타나는 비이상치(anomaly)로 간주하는 것이 타당하다. 우라늄 고농도 지하수의 경우 한 시료의 값이 다른 지하수의 값에 큰 영향력을 미치기 때문에 본 조사에서는 고농도 범위 시료를 제외하고, 대부분의 지하수의 우라늄 농도인 $50 \mu\text{g/L}$ 이하의 범위에서 비교하였다(Fig. 3). 우라늄 농도와 공의 심도, pH간의 관련성을 보면 주요 지질암상에 따라서 다양한 분포특성을 보여준다(Fig. 3). 특히 화강암

Fig. 3. Uranium concentration ($\mu\text{g/L}$) with respect to depth and pH.

지역에서 우라늄의 농도는 pH, 심도가 증가할수록 증가하는 양상을 보인다. 또한 우라늄 농도와 Eh는 화강암 지역에서 비교적 선형적인 비례관계가 나타나는 반면에 우라늄 농도와 중탄산의 상관성은 화강암 지역에서 약간 반비례하는 것으로 나타났다(Fig. 4).

라돈

논산지역 100개 지하수 전체의 라돈 함량은 $128 \sim 9,140 \text{ pCi/L}$ 범위, 평균은 $2,186 \text{ pCi/L}$, 중앙값은 $1,805 \text{ pCi/L}$, 표준편차는 $1,725 \text{ pCi/L}$ 로 나타난다. 주라기 화강암지역과 선캄브리아기 변성암지역 지하수에서 비교적 높게 나타난다.

주라기 화강암 지하수에서는 $240 \sim 7,650 \text{ pCi/L}$ 범위, 평균은 $2,439 \text{ pCi/L}$, 표준편차는 $1,711 \text{ pCi/L}$, 중앙값은 $2,070 \text{ pCi/L}$ 이다. 이 지역도 마찬가지로 일부 고농도 지하수의 수치가 산술평균 계산시에 큰 영향력을 발휘하기 때문에 평균치가 높다.

옥천계 변성암 지하수의 라돈 함량은 $128 \sim 4,250 \text{ pCi/L}$ 범위, 평균은 $1,384 \text{ pCi/L}$, 표준편차는 $1,089 \text{ pCi/L}$, 중앙값은 995 pCi/L 이고, 선캄브리아기 변성암 지하수의

Fig. 4. Uranium concentration ($\mu\text{g/L}$) with respect to Eh and HCO_3 .

Fig. 5. Radon concentration (pCi/L) with respect to geology.

경우 1,250~9,140 pCi/L 범위, 평균은 3,678 pCi/L, 표준편차는 3,165 pCi/L, 중앙값은 3,420 pCi/L이다.

백악기 퇴적암 지하수의 함량은 590~1910 pCi/L 범위, 평균 함량은 1,233 pCi/L이다. 2개소인 화산암지하수는 각각 990 pCi/L, 1,240 pCi/L이고, 평균은 1,115 pCi/L이다.

Fig. 5는 논산지역 지하수의 라돈의 최대값과 평균값을 나타낸 것으로 선캄브리아기 변성암에서 가장 높고, 그 다음으로 화강암 지역에서 높다. 선캄브리아기 변성암에서 라돈 함량이 높은 것은 NS46 시료(우라늄, 378.0 $\mu\text{g/L}$, 라돈 9,140 pCi/L) 때문이다. 라돈의 함량은 심도, pH, Eh, 중탄산과는 의미있는 수준의 상관관계를 나타내지 않는다(Figs. 6 and 7). 그 중에서도 라돈의 함량은 Eh가 증가할수록 화강암지역과 옥천계 변성암 지역에서만 약간 정비례하여 증가하는 경향을 보인다.

우라늄과 라돈과의 상관성

Fig. 8에 의하면 우라늄 농도가 10 $\mu\text{g/L}$ 이하의 범위에서는 화강암지역을 제외하면 우라늄과 라돈의 함량은 상관성을 찾기 어려우며, 지하수공의 심도, pH, Eh, 및 주요 지하수의 수질성분과의 관련성도 거의 없는 것으로 나타났다. 방사성물질의 거동특성은 매우 복잡적이

Fig. 6. Radon concentration (pCi/L) with respect to depth and pH.

Fig. 7. Radon concentration (pCi/L) with respect to Eh and HCO_3 .

Fig. 8. Relationship between uranium concentration ($\mu\text{g/L}$) and radon concentration (pCi/L). The lower part shows data for uranium concentrations of $< 50 \mu\text{g/L}$.

Table 2. Correlation matrix of components in the Nonsan area (N = 100).

	pH	EC	Eh	DO	Rn	U	K	Na	Ca	Mg	SiO_2	Sr	F	Cl	NO_3	SO_4	HCO_3
pH	1.00	-.078	-.254	.002	-.223	.054	-.111	.046	-.133	-.183	-.389	-.299	.661	-.118	-.405	-.117	.128
EC	-.078	1.00	-.587	-.311	-.131	-.009	.574	.896	.277	.714	.227	.357	-.028	.941	.163	.439	.837
Eh	-.254	-.587	1.00	.318	.305	.026	-.478	-.546	.089	-.516	-.196	-.033	-.451	-.565	.112	-.329	-.471
DO	.002	-.311	.318	1.00	.069	-.003	-.195	-.294	-.026	-.248	.023	-.033	-.118	-.278	.299	-.301	-.344
Rn	-.223	-.131	.305	.069	1.00	.418	-.143	-.080	-.138	-.145	.196	.025	-.127	-.113	.132	-.149	-.153
U	.054	-.009	.026	-.003	.418	1.00	-.050	-.023	.077	-.021	-.031	-.037	.067	-.032	-.067	-.027	.029
K	-.111	.574	-.478	-.195	-.143	-.050	1.00	.373	.036	.894	.023	.037	-.062	.571	-.024	.669	.369
Na	.046	.896	-.546	-.294	-.080	-.023	.373	1.00	-.042	.455	.160	.119	.081	.834	-.030	.182	.911
Ca	-.133	.277	.089	-.026	-.138	.077	.036	-.042	1.00	.202	-.017	.637	-.290	.187	.478	.298	.136
Mg	-.183	.714	-.516	-.248	-.145	-.021	.894	.455	.202	1.00	.195	.241	-.115	.706	.106	.678	.454
SiO_2	-.389	.227	-.196	.023	.196	-.031	.160	-.017	-.017	.195	1.00	.383	-.158	.360	.335	-.124	-.031
Sr	-.299	.357	-.033	-.033	.025	-.037	.037	.119	.637	.241	.383	1.00	-.124	.352	.769	.243	.036
F	.661	-.028	-.451	-.118	-.127	.067	-.062	.081	-.290	-.115	-.158	-.124	1.00	-.046	-.224	-.018	.011
Cl	-.118	.941	-.565	-.278	-.113	-.032	.571	.834	.187	.706	.360	.352	-.046	1.00	.186	.330	.685
NO_3	-.405	.163	.112	.299	.132	-.067	-.024	-.030	.478	.106	.335	.769	-.224	.186	1.00	-.017	-.187
SO_4	-.117	.439	-.329	-.301	-.149	-.027	.669	.182	.298	.678	-.124	.243	-.018	.330	-.017	1.00	.246
HCO_3	.128	.837	-.471	-.344	-.153	.029	.369	.911	.136	.454	-.031	.036	.011	.685	-.187	.246	1.00

며, 특정성분과 높은 상관성을 가지지 않는다고 판단할 수 있다. 그러므로 단순회귀 분석이나, 일대일 비례식을 통하여서는 거동특성, 경향성을 파악하기 어려운 점이 있다. 따라서 다중회귀분석, 요인분석 등을 통한 통계적

접근이 필요하다고 본다.

논산지역 지하수 시료 100개 전체를 대상으로 상관계수를 분석한 결과, 우라늄과 라돈간의 상관계수는 0.42를 보여 약간의 관련성만 있음을 보여준다(Table 2). 그

Fig. 9. Uranium concentration map of the Nonsan area, along with geology and concentration levels.

외에 이들은 어떤 수질항목 성분과도 무관한데, 이는 주요 지질별로 구분하지 않고 상관분석을 실시할 경우 주요 암질에 따라서 특징적인 관련성이 상당히 희석됨을 나타낸다. 따라서 향후 주요 암질별, 수질특성별로 상관성을 검토할 필요가 있다.

이처럼 우라늄과 라돈의 상관성은 단순히 지질특성, 대수층의 발달, 근원물인 방사성광물의 존재 형태 등이 중요하므로(Choo, 2002), 이에 관한 검증이나 확인작업도 필요하다. 예를 들면 고농도 지역을 대상으로 수행된 연구에서도 우라늄과 라돈의 상관성은 복잡한 것으로 나타났는데, 시추코어 내 우라늄 함량이 특징적으로 높지 않은 조건에서 지하수내 우라늄과 라돈-222 농도가 높은 것은 화학적 조건보다는 대수층 파쇄대의 파쇄정도와 지하수 유동량과 같은 물리적 요소가 더 큰 작용을 한 것으로 보인다(Jeong et al., 2012). 이와 반대로, 창원지역 고농도 지역 시추공 연구에 의하면 지하수내 라돈가스의 함량은 우라늄 농도와 대체로 비례하므로 우라늄의 붕괴와 관련된 것으로 설명된 바 있다(Jeong et al., 2011).

정밀함량 분포도

본 연구에서는 측정지점의 함량과 지리적 분포를 이용하여 방사성물질의 함량분포도를 작성하였다. 논산지역의 면적은 총 552.43 km²인데, 지질분포 등을 고려하여 선캄브리아기 변성암류(PCEks), 옥천계 변성퇴적암류(og), 류라기 화강암류(Jgr), 백악기 화산암류(Kjr), 백악기 퇴적암류(Kk2), 충적층(Qa)으로 단순화 시켜서 분

류하였다.

본 연구에서 기본도로는 지형도 중 행정경계도와 지질도를 사용하였다. 행정경계는 면 단위로 라벨링(labelling)하였고 지질도는 1:250,000 지질도를 최대한 단순화시켜 화성암, 변성암, 퇴적암, 옥천계로 분류하였다. 지질도상의 암석들 중 화성암은 지하수의 자연방사성물질 함량이 높은 화강암과 지하수의 자연방사성물질 함량이 낮은 비화강암으로 구분하였다. 화강암은 분포면적이 넓기 때문에 시대나 주 광물을 기준으로 세분하였다. 조사지역 지하수의 자연방사성 물질은 라돈, 우라늄, 전알파, 라듐이었으나 전알파와 라듐 함량은 검출한계 미만의 비율이 높아서 우라늄과 라돈에 대한 함량분포도만 작성하였다.

자연방사성 물질의 함량등급은 우리나라 지하수의 우라늄과 라돈함량 분포 정도와 외국의 제안치 등을 고려하여 우라늄은 1 μg/L 이하, 1~5 μg/L, 5~30 μg/L, 30~100 μg/L, 100 μg/L 이상으로 등급화하였고, 라돈은 300 pCi/L 이하, 300~1000 pCi/L, 1,000~4,000 pCi/L, 4,000~8,100 pCi/L, 8,100 pCi 이상으로 등급화하였다. 이번 함량분포도 제작은 논산을 대상으로 한 라돈과 우라늄이다.

이 지역 지하수의 우라늄함량 분포도를 살펴보면 우라늄 함량은 97%가 30 μg/L 이하의 값을 가지며, 불과 3% 만이 30 μg/L 이상 값을 가진다(Fig. 9). 가장 높은 값을 가지고 있는 지점은 시료번호 NS46이 378 μg/L, NS59가 165 μg/L, 그리고 NS37이 40.7 μg/L의 값을 갖는다. 30 μg/L 이상인 지점의 지질은 주로 화강암 또

Fig. 10. Radon concentration map of the Nonsan area, alongwith geology and concentration levels.

는 화강암과 변성암의 경계 부분이며, 옥천대지역 지하수의 우라늄 함량은 대부분 $1 \mu\text{g/L}$ 이하로 낮게 나타났다.

지하수의 라돈함량 분포도를 살펴보면 이는 우라늄에 비하여 지질과 더 밀접하게 관련된다(Fig. 10). 라돈 함량이 가장 높은 지역이 우라늄함량이 가장 높은 nonsan 북부의 시료NS46 지점이다. 라돈 함량이 4,000 pCi/L 이상인 지역은 거의 주라기 화강암 지역에 있으며, 한 지역만이 옥천대에 위치하고 있다. 전체적으로 라돈 함량이 높은 지역은 주라기 화강암지역이며, 낮은 지역은 퇴적암지역이다. 이같은 분포양상은 방사성광물이 산출되는 대수층 모암의 지질과의 관련성을 잘 반영하고 있다.

에서 Eh가 증가할수록 약간 정비례하여 증가한다. 그러나 라돈의 함량은 심도, 중탄산, pH와는 의미있는 수준의 상관관계를 나타내지 않는다. nonsan지역 지하수 시료 100개 전체를 대상으로 상관계수를 분석한 결과, 우라늄과 라돈간의 상관계수는 0.42를 보여 약간의 관련성이 있음을 보여준다. 그 외에 이들은 어떤 수질항목 성분과도 무관하게 나타났다. nonsan지역 100개 지하수를 기반으로 국내 최초의 정밀방사성물질의 함량분포도를 작성하였다. 방사성물질의 함량분포는 대수층의 지질에 따라 다양한데, 이는 방사성 광물의 산출정도와 밀접히 관련되기 때문이다.

결 론

옥천계 변성암의 경우 대부분 Ca-HCO_3 가 우세한 유형을 보여 칼슘-중탄산형의 지하수의 특징을 가진다. 우라늄은 불검출에서부터 최대 $378 \mu\text{g/L}$ 까지 범위가 넓게 나타난다. 평균치는 $8.57 \mu\text{g/L}$, 표준편차 $42.88 \mu\text{g/L}$, 중앙값은 $0.56 \mu\text{g/L}$ 으로서 매우 낮다. 우라늄 농도와 pH, 심도, Eh는 화강암 지역에서 비교적 선형적인 비례관계가 나타났다. 반면에 우라늄 농도와 중탄산의 상관성은 화강암 지역에서 약간 반비례하는 것으로 나타났다. nonsan지역 100개 지하수 전체의 라돈 함량은 128~9,140 pCi/L 범위, 평균은 2,186 pCi/L, 중앙값은 1,805 pCi/L, 표준편차는 1,725 pCi/L로 나타난다. 주라기 화강암지역과 선캄브리아기 변성암지역 지하수에서 비교적 높게 나타난다. 라돈의 함량은 화강암지역, 옥천계 변성암 지역

사 사

이 연구는 국립환경과학원의 연구과제인 '지하수 중 자연방사성물질 정밀조사연구(2012)'의 지원에 의해서 이루어졌습니다.

참 고 문 헌

- 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.
- Cho, B. W., Choo, C. O., Kim, M. S., Lee, Y. J., Yun, U., and Lee, B. D., 2011, Uranium and radon concentrations in groundwater near the Icheon Granite, The Journal of Engineering Geology, 21, 259-269 (In Korean with English abstract).

- Cho, B. W., Sung, I. H., Cho, S. Y., and Park, S. K., 2007, A preliminary investigation of radon concentrations in groundwater of South Korea, *Journal of Soil and Groundwater Env.*, 15, 98-104.
- Choo, C. O., 2002, Characteristics of uraniferous minerals in Daebog granite and significance of mineral species, *Journal of Mineral Soc. Korea*, 15, 11-21 (In Korean with English abstract).
- Cothern, C. R. and Rebers, P. A., 1990, Radon, radium and uranium in drinking water, Lewis publishers, 283p.
- Jeong, C. H., Kim, D. W., Kim, M. S., Lee, Y. J., Kim, T. S., Han, J. S., and Cho, B. W., 2012, Occurrence of natural radioactive materials in borehole groundwater and rock core in the Icheon Area, *The Journal of Engineering Geology*, 22, 95-111 (In Korean with English abstract).
- Jeong, C. H., Kim, M. S., Lee, Y. J., Han, J. S., Jang, H. G., and Cho, B. W., 2011, Hydrochemistry and occurrence of natural radioactive materials within borehole groundwater in the Cheongwon Area, *The Journal of Engineering Geology*, 21, 163-178 (In Korean with English abstract).
- Langmuir, D., 1997, *Aqueous Environmental Geochemistry*, Prentice Hall, 600p.
- 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.
- NIER, 2000, Study on the radionuclide concentrations in the groundwater (2), NIER Report, 323p (In Korean with English abstract).
- NIER, 2002, Study on the radionuclide concentrations in the groundwater (V), NIER Report, 357p (In Korean with English abstract).
- NIER, 2006, Study on the radionuclide concentration in the groundwater, NIER Report, 200p (In Korean with English abstract).
- NIER, 2009, A detailed study of the radionuclide concentration in the groundwater (II), NIER Report, 273p (In Korean with English abstract).
- 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.

원고접수일 : 2012년 12월 4일
수정본채택 : 2012년 12월 19일
게재확정일 : 2012년 12월 21일

조병욱

한국지질자원연구원 지구환경연구본부
305-350 대전광역시 유성구 과학로 92
Tel: 042-868-3083
E-mail: cbw@kigam.re.kr

김문수

국립환경과학원 토양지하수연구과
인천광역시 서구 난지로 184
Tel: 032-560-7907
E-mail: hydro009@korea.kr

김태승

국립환경과학원 토양지하수연구과
인천광역시 서구 난지로 184
Tel: 032-560-8360
E-mail: tskim99@korea.kr

한진석

국립환경과학원 토양지하수연구과
인천광역시 서구 난지로 184
Tel: 032-560-8300
E-mail: nierhan@me.go.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

황재홍

한국지질자원연구원 국토지질연구본부
305-350 대전광역시 유성구 과학로 92
Tel: 042-868-3058
E-mail: hwangjh@kigam.re.kr

추창오

경북대학교 지질학과
702-701 대구광역시 북구 산격동
Tel: 010-6656-3582
E-mail: chooco@knu.ac.kr