

대전 화강암지역 지하수의 우라늄과 라돈 함량: 다른 화강암지역과의 비교

윤 옥¹ · 김문수² · 정도환³ · 황재홍⁴ · 조병욱^{1*}

¹한국지질자원연구원 지하수연구센터, 책임연구원

²국립환경과학원 토양지하수연구과, 환경연구관

³국립환경과학원 토양지하수연구과, 환경연구사

⁴한국지질자원연구원 지질자원데이터센터, 책임연구원

Uranium and Radon Concentrations in Groundwater of the Daejeon Granite Area: Comparison with Other Granite Areas

Uk Yun¹ · Moon Su Kim² · Do Hwan Jeong³ · Jae Hong Hwang⁴ · Byong Wook Cho^{4*}

¹Groundwater and Ecohydrology Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Principal Researcher

²Soil and Groundwater Research Division, National Institute of Environmental Research, Senior Researcher, Senior Researcher

³Soil and Groundwater Research Division, National Institute of Environmental Research, Environmental Researcher

⁴Geoscience Data Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Principal Researcher

Abstract

Uranium and radon concentrations in groundwater from 80 wells from Daejeon area were measured to determine the range of concentrations according to the geology. The median uranium content of groundwater was 11.14 $\mu\text{g/L}$ for the two-mica granite, 0.90 $\mu\text{g/L}$ for the biotite granite, and 0.47 $\mu\text{g/L}$ for the Ogcheon group. The median radon content of groundwaters was 114.3 Bq/L for the two-mica granite, 61.6 Bq/L for the biotite granite, and 42.2 Bq/L for the Ogcheon group, respectively. The uranium content of two-mica granite is 3.78 mg/kg, which is slightly higher than that of biotite granite 3.20 mg/kg. However, the uranium content in groundwater of two-mica granite groundwater is much higher than that of biotite granite. This can be explained by the fact that the two-mica granite is vulnerable to weathering than biotite granite, so uranium in mineral is easily leached into groundwater. The exceeding rate of samples having uranium content above 30 $\mu\text{g/L}$ in granite area was 23.8%, which is higher than that of 6.7% in Jurassic granite in Korea. On the other hand, the exceeding rate of samples having radon content above 148 Bq/L in granite area was 31.0% which is similar to that of Jurassic granite area of 31.7%.

Keywords: groundwater, uranium concentration, radon concentration, two-mica granite

초 록

대전지역의 지질별 지하수의 우라늄, 라돈함량을 파악하기 위하여 80개의 지하수를 채취하였다. 지질별 지하수의 우라늄 함량 중앙값은 복운모화강암지역은 11.14 $\mu\text{g/L}$, 흑운모화강암지역은 0.90 $\mu\text{g/L}$, 옥천층군은 0.47 $\mu\text{g/L}$ 으로 복운모화강암지역에서 월등히 높았다. 지질별 지하수의 라돈 함량 중앙값은 복운

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Byong Wook Cho
E-mail: cbw@kigam.re.kr

Received: 5 November, 2018

Revised: 8 December, 2018

Accepted: 13 December, 2018

© 2018 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/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

모화강암지역은 114.3 Bq/L, 흑운모 화강암지역은 61.6 Bq/L, 옥천층군은 42.2 Bq/L로 나타나 지질별 지하수의 우라늄 함량 차이만큼 현저하지는 않았다. 연구지역 북운모화강암의 우라늄 평균함량은 3.78 mg/kg으로 흑운모화강암의 3.20 mg/kg보다 약간 높지만 지하수의 우라늄 함량은 월등히 높다. 이는 북운모화강암은 흑운모화강암에 비하여 풍화에 약하여 광물내 우라늄이 지하수로 쉽게 용출되는 것으로 설명될 수 있으나 추가 연구가 필요하다. 지하수의 우라늄 함량에 비해서 북운모화강암과 흑운모화강암지역 지하수의 라돈 함량에 큰 차이가 없는 것은 북운모화강암지역은 풍화에 약하기 때문에 지하수내 라돈이 대기로 쉽게 빠져나가기 때문으로 판단된다. 연구지역 북운모화강암지역 지하수의 우라늄 함량이 30 µg/L를 초과하는 비율은 23.8%로 국내 유라기화강암의 초과율인 6.7%보다도 높으나 라돈함량이 148 Bq/L를 초과하는 비율은 31.0%로 국내 유라기화강암지역의 초과율인 31.7%와 비슷하다.

주요어: 지하수, 우라늄, 라돈, 함량, 북운모화강암

서론

우라늄은 자연계에서 미량원소로 나타나는 자연방사성물질의 하나로서 지하수의 우라늄은 독성물질로 간주된다. 우라늄은 반감기가 길기 때문에 화학적 독성이 방사성독성보다 6배나 더 크며(Kurttio et al., 2002; Milvy and Cothorn, 1990) 우라늄의 함량이 일정량 이상인 지하수를 장기간 음용시 신장 독성을 유발할 수 있다(WHO, 2011). 지하수내 우라늄의 기원은 일부 원자력발전소, 인산염비료, 광산채굴 등의 인위적인 요인에도 기인하나 대부분은 풍화에 의한 암석내 우라늄 함유 광물의 분리, 우라늄의 용출, 대수층내에서의 이동에 지배를 받는다(Riedel. and Kübeck, 2018).

라돈은 반감기가 3.82일인 무색, 무취의 불활성기체이다. 라돈은 우라늄(^{238}U) 방사능계열의 5번째 산물로서 토양이나 암석내의 라듐(^{226}Ra)의 방사능 붕괴로 생성된다. 반감기가 짧은 라돈은 붕괴시 알파입자를 발생시키는데 이를 흡입하거나 섭취하면 인체에 위해하다. 라돈은 인간에게 피폭되는 방사선 양의 50% 이상을 차지하며 라돈 위해성의 약 80%는 실내공기 중 라돈에 기인하나(NRC, 1999), 지하수의 라돈도 음용시의 호흡과 섭취에 의해 폐암과 위암 발생 가능성을 높인다(USEPA, 2009).

위와 같은 우라늄과 라돈의 인체 위해성 때문에 일부 국가에서는 1960년대 말부터 지하수의 우라늄, 라돈 함량을 조사해오고 있는데 화강암지역에서 그 함량이 높은 것으로 알려지고 있다(Dillon et al., 1997). 국내 지하수의 우라늄, 라돈 함량에 대한 최초의 전국적인 조사는 1998년 대전지역 일부 지하수에서 자연방사성물질 함량이 미국의 기준치를 넘었다는 보도 직후에 이루어졌다(NIER, 1999). 1999년부터 2002년의 4년 동안 조사된 결과 636개 지하수의 우라늄 함량 최대치는 402.0 µg/L, 평균과 중앙값은 각각 4.50 µg/L, 0.19 µg/L, 615개 지하수의 라돈 함량 최대치는 1,480.2 Bq/L, 평균과 중앙값은 각각 64.0 Bq/L, 34.9 Bq/L으로 나타났으며 지하수의 우라늄과 라돈 함량은 화강암지역에서 높은 것으로 알려졌다(NIER, 2002). 이에 따라서 2008년부터는 화강암의 분포비율이 높은 시, 군을 우선 조사대상 지역으로 한 지하수의 자연방사성물질 정밀조사가 이루어졌다. 주요 조사, 연구 내용으로는 이천지역 74개 지하수에 대한 우라늄과 라돈 함량연구(Cho et al., 2011), 논산지역 100개 지하수의 우라늄, 라돈 함량연구(Cho et al., 2012), 괴산지역 200개 지하수의 우라늄, 라돈 함량(NIER, 2012), 용인지역 100개 지하수의 우라늄, 라돈 함량(NIER, 2013) 등이 있다.

대전지역은 전체 면적의 약 70% 정도가 화강암으로 이루어져 있어서 지하수의 우라늄과 라돈함량이 높을 것으로 예상되는 지역이다. Han and Park(1996)에 따르면 대전시 유성구 일대 14개 지하수에서 분석된 지하수의 우라늄과 라돈 함량 최고치는 각각 1,092.5 µg/L, 381.4 Bq/L로 보고한 바 있다. 본 논문에서는 대전지역중에서도 주로 화강암지역 지하수의 우라늄과 라돈 함량 정도를 파악하고 이를 국내 다른 화강암지역 지하수의 우라늄, 라돈 함량과 비교, 함량 차이의 원인을 해석함에 그 목적이 있다.

연구지역의 지질

연구지역의 면적은 약 540 km²이다. 지질은 Table 1과 같이 구분되며 지체구조적으로는 남서부 옥천대의 중앙대에 위치한다. 하부로부터 선캄브리아기의 편마암, 시대미상의 옥천층군, 쥐라기 화강암류 및 백악기 반암으로 구성되며 이들 지층들을 제 4기 충적층이 부정합으로 피복하고 있다. 쥐라기 화강암은 흑운모화강암과 백운모화강암으로 구분된다 (Lee et al., 1980). 연구지역에서 채취된 80개 지하수 시료의 지질분류는 1:50,000 전자지질도에서 추출한 지질도를 이용

Table 1. Geological sequences of the study area

Quaternary		Alluvium		
		~ Unconformity ~		
Cretaceous		Porphyry		Bulguksa granite
		- Intrusion -		
		Two-mica granite		
		... Gradational ...		
Jurassic		Biotite granite		Daebo granite
		- Intrusion -		
		Hornblende granite		
		- Intrusion -		
		Munjiri formation		
		- Relation unknown -		
Age unknown		Hwanggangri formation		Ogcheon Group
		~ Unconformity ~		
		Changri formation		
		Majeonri formation		
		~ Unconformity ~		
Precambrian		Gneiss		Gyeonggi gneiss complex

1: Biotite granite, 2: Ogcheon group, 3: Porphyry, 4: Two-mica granite

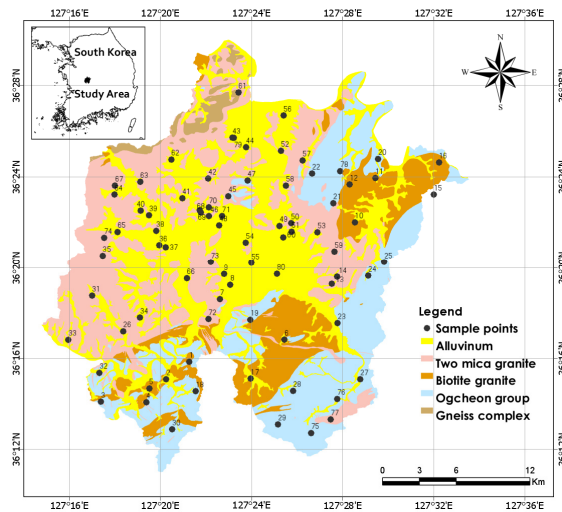


Fig. 1. Location and lithology map of the study area with sampling points.

하였다(Fig. 1). 80개 지하수 중 77개는 옥천층군(Og), 주라기 흑운모화강암(Jbgr), 주라기 복운모화강암(Jtgr)에 해당되는데 이들에 대해서 기술하면 다음과 같다.

옥천층군은 마전리층, 창리층, 황강리층, 문주리층으로 구성된다. 마전리층은 대전 동구와 서부 일대에 북동방향의 주향을 갖고 대상으로 분포하며 결정질 석회암, 석회질 슬레이트, 석회규산염암 등으로 구성된다. 창리층은 대전 남동부 일대에 분포하며 주로 점판암 및 천매암으로 구성된다. 황강리층은 대전 동구에 발달되며 주로 함력천매암으로 구성되며 부분적으로 퇴적상의 변화가 심하다. 문주리층은 대덕구 대청호 주변에 집중적으로 분포하며 녹색 천매암이 주 구성 암석이다.

주라기 흑운모화강암은 대전시 남부의 보문산을 중심으로 유성구 신봉동, 대덕구 용호동, 중구 보문산, 서구 구봉산 일대에 분포하며, 대전 중심부의 복운모화강암과는 점이적인 관계를 유지하며 선캄브리아기의 편마암류와 옥천층군을 관입하였다. 암상은 조립내지 중조립질이며 주로 중립질인 복운모화강암보다 더 조립질이며 백운모를 거의 함유하지 않는 것이 특징이다. 4개 암석 시료의 분석 결과 흑운모의 조성비는 0.74-7.52%이다(Park et al., 1977).

주라기 복운모화강암은 대전지역 중부와 서부에 걸쳐서 넓게 분포한다. 흑운모화강암과는 점이적이므로 흑운모화강암과 동 시기에 관입한 것으로 해석된다. 암상은 중립질이 우세하며 페그마타이트를 많이 함유하고 있고, 이에 따른 백운모 함량의 변화가 본 암의 특징이기도 하다. 백운모는 페그마타이트의 발달이 현저한 곳에서 입도가 커지면서 함량도 증가한다. 백운모보다 흑운모의 함량이 우세하며 백운모의 함량이 적은 곳은 흑운모화강암과 구분하기 힘들다. 4개 암석 시료의 분석 결과 흑운모 함량은 1.01-8.28%, 백운모의 함량은 0.05-2.50%이다(Park et al., 1977).

시료채취 및 분석

연구지역에서는 총 80개의 지하수 시료가 채취되었는데 주로 2008년에 채취되었고 일부는 2006년과 2009년에도 채취되었다. 전체 시료중 42개는 복운모화강암지역에서 채취되었고 흑운모화강암지역에서 18개, 옥천층군에서 17개, 백악기의 반암류에서는 3개가 채취되었다(Fig. 1). 시료채취 대상 지하수공은 시료의 대표성, 연속성 등을 고려하여 가능하면 일정거리를 유지하도록 선정하였다. 연구에 이용된 80개 지하수공의 심도는 15-250 m 범위이며, 평균 심도는 112.7 m로 대부분의 지하수는 기반암에서 산출되는 것으로 볼 수 있으나 지하수공의 설계에 따라서 천부지하수의 공내 유입도 배제할 수는 없다. 지하수의 용도는 대부분이 음용 또는 생활용수로 이용된다. 지하수의 수질은 pH가 6.00-8.20(평균 6.93)이고 전기전도도는 86-720 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균 271 $\mu\text{S}/\text{cm}$)이다.

현장에서의 시료채취는 지하수공에 설치된 수증펌프를 5-10분 가량 가동시켜 지하수공내에 저장된(wellbore storage) 지하수량의 3-5배 이상을 배출시킨 다음 수온, pH 등 현장 수질이 안정됨을 확인한 다음 이루어졌다(Barcelona et al., 1985). 우라늄의 분석을 위해서는 채취된 시료를 0.45 μm 멤브레인 필터로 여과한 후 농질산을 가하여 pH 2로 유지시켰다. 채취된 시료들은 한국지질자원연구원 지질자원분석연구센터로 운반하여 ICP-MS (DRC-II, Perkin Elmer)로 우라늄 함량을 분석하였다.

라돈 분석용 시료 채취는 기포 발생(일종의 폭기현상)으로 인한 라돈 저감이 일어나지 않도록 주의하였다. 즉, 지하수공에 연결된 호스를 통하여 기포가 발생하지 않도록 소량의 지하수가 흐르도록 조정된 후 지하수 시료 8 ml를 채취하여 12 ml의 설파용액(Optiphase HiSafe3)이 들어 있는 22 ml vial에 주입하였다. vial에 지하수를 주입한 후에는 1분 정도 흔들어 설파용액과 지하수가 골고루 섞이도록 하였다. 실내 분석시간과 채취시간과의 보정을 위하여 vial에는 시료채취 시간을 기재하였다. 채취된 시료들은 한국지질자원연구원으로 운반하여 파형분석(Pulse shape analysis: PSA) 기능을 가진 액체설파계수기(Quantulus 1220TM, Perkin-Elmer Co.)로 분석하였는데 PSA 준위 100에서 300분간 측했을 때 검출

하한치는 약 0.12 Bq/L이다.

지하수의 우라늄과 라돈 함량은 모암의 우라늄 함량과 밀접한 관계가 있기 때문에 감마레이 스펙트로메트리를 이용하여 주로 화강암으로 이루어진 유성구 일대 암석의 우라늄 함량(e(U))을 측정하였다. 감마레이 스펙트로메트리 측정 방법은 암석(풍화대)내의 우라늄으로부터 방출되는 감마선을 감지하여 e(U) 함량을 측정하는 것이다. 유성구 일대는 풍화정도가 심하기 때문에 암석 노두 발견이 어려워서 45개소만 측정하였다. 측정 방법은 가능하면 지하수의 우라늄과 라돈 분석이 이루어진 지하수공 인접 암석 노두에 프로브(probe)를 직각으로 밀착시키고 300초간 측정하였다. e(U) 함량 측정에 이용된 기기는 portable gamma ray spectrometer (GR-320A envi SPEC device, SAIC)였는데 측정 오차 범위는 0.1% 내외이다.

결과 및 고찰

지하수의 우라늄 함량

연구지역 80개 지하수의 우라늄, 라돈 함량과 함께 현장 수질이 측정된 결과는 Table 2와 같은 바 지하수의 우라늄 함량 분포는 지하수의 자연방사성물질 조사에서 흔히 나타나는 대부분의 데이터가 낮은 농도 범위에 치우쳐 있는 상태를 보인다(Fig. 2). 80개 지하수의 우라늄 함량은 검출한계 미만인 0.01 $\mu\text{g/L}$ 에서 최고 3,607.0 $\mu\text{g/L}$ 의 넓은 분포를 보였고 평균 함량은 61.90 $\mu\text{g/L}$ 이나 중앙값은 3.46 $\mu\text{g/L}$ 이었다. 연구지역 지하수의 우라늄 최고치 3,607.0 $\mu\text{g/L}$ 은 지금까지 알려진 국내 지하수의 우라늄 함량 중 최고치이다.

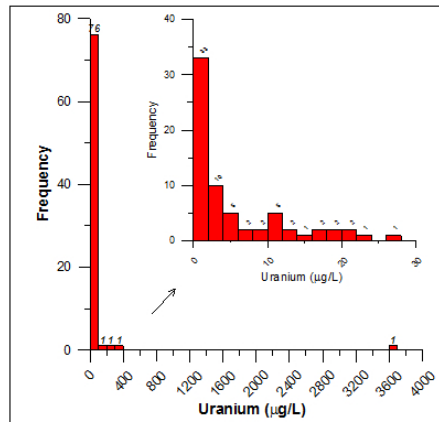


Fig. 2. Distribution diagram of uranium concentration occurrence in the groundwaters of the study area.

연구지역 지하수의 우라늄 함량을 지질로 구분하면 복운모화강암지역 지하수에서 월등히 높게 나타난다(Table 3, Fig. 3). 우라늄 함량 최고치인 3,607.0 $\mu\text{g/L}$ 이 복운모화강암지역에서 검출되었고 지하수의 우라늄 함량 중앙값도 11.14 $\mu\text{g/L}$ 이나 되는데 이 값은 과거 연구지역 복운모화강암지역을 중심으로 채취된 14개 지하수의 우라늄 중앙값인 11.8 $\mu\text{g/L}$ 가 거의 같다(Han and Park, 1996). 연구지역 지하수의 우라늄 함량이 화강암중에서도 특히 복운모화강암지역에서 높게 나타나는 것은 복운모화강암의 광물내 우라늄 함량이 높으며 또한 우라늄 광물이 쉽게 용해되어 나오기 때문이다(Cothern and Rebers, 1990). 복운모화강암지역 지하수의 우라늄함량 중앙값은 국내 1,562개 주라기화강암과 229개 백악기화강암 지역 지하수의 우라늄 중앙값인 1.37 $\mu\text{g/L}$, 0.79 $\mu\text{g/L}$ 보다도(NIER, 2016) 훨씬 더 높다. 또한 복운모화강암지역 지하수

Table 2. Physicochemical properties of 80 groundwater samples in the study area

ID	Dep. (m)	U (µg/L)	Rn (Bq/L)	pH	EC (µS/cm)	ORP (mv)	DO (mg/L)	Geo.	ID	Dep. (m)	U (µg/L)	Rn (Bq/L)	pH	EC (µS/cm)	ORP (mv)	DO (mg/L)	Geo.
1	36	0.05	115.5	6.10	128	237		1	41	150	2.96	599.3	6.23	422	210	7.0	4
2	120	53.89	86.9	7.77	310	88	5.8	1	42	200	12.42	299.7	6.84	137	231	8.4	4
3	120	0.96	54.0	6.74	124	120	6.8	1	43	100	4.64	258.6	6.10	274	284	6.0	4
4	150	3.16	37.4	7.62	258	123	8.8	1	44	150	20.25	373.7	6.50	383	319	7.9	4
5	120	0.26	131.0	6.01	104	127	8.9	1	45	130	0.22	115.8	6.13	153	326	9.2	4
6	120	0.43	84.7	7.18	98	189	9.5	1	46	100	8.46	92.5	6.77	164	321	9.3	4
7	120	1.01	77.3	6.91	203	165	9.4	1	47	100	6.48	112.8	6.64	187	320	8.3	4
8	150	0.07	29.6	6.42	554	170	8.5	1	48	130	35.97	71.4	7.07	219	305	7.3	4
9	120	32.50	58.5	7.70	297	132	7.3	1	49	250	34.11	101.8	6.27	238	330	5.4	4
10	120	2.73	49.2	6.35	432	148	6.9	1	50	150	5.96	120.2	6.90	262	294	4.0	4
11	80	3.73	29.2	7.40	259	143	4.0	1	51	200	11.28	643.7	7.06	184	300	5.4	4
12	80	0.42	64.7	7.25	222	145	6.7	1	52	144	139.2	532.7	8.19	186	273	6.5	4
13	80	8.82	222.3	6.70	165	141	8.9	1	53	150	58.81	115.8	6.80	254	335	8.6	4
14	124	0.60	5.9	7.55	322	175	6.4	1	54	120	2.59	74.4	6.65	195	183	9.4	4
15	160	0.42	117.6	6.37	422	194	5.2	1	55	120	47.09	60.3	6.83	231	182	6.0	4
16	120	0.85	33.3	6.30	285	130	7.0	1	56	100	3.12	116.2	6.64	414	180	7.2	4
17	70	1.25	758.4	6.66	237	145	7.8	1	57	120	10.03	125.8	6.62	375	173	7.5	4
18	25	0.01	35.5	6.66	171	280	6.6	1	58	150	7.21	48.8	7.76	388	138	7.8	4
19	120	0.46	142.8	7.32	125	97	9.1	2	59	80	18.67	266.7	6.42	412	171	5.1	4
20	137	3.43	61.4	7.64	225	208	7.3	2	60	174	26.65	55.5	6.96	720	131	6.1	4
21	100	0.35	28.9	8.01	207	133	8.0	2	61	120	3.38	22.9	7.03	334	148	5.3	4
22	120	0.25	23.3	6.80	161	135	8.8	2	62	120	15.83	62.9	6.95	501	158	8.1	4
23	120	11.09	109.9	7.60	214	155	8.9	2	63	120	23.54	111.7	7.13	444	134	7.1	4
24	200	0.36	40.0	6.00	616	135	5.7	2	64	120	10.82	286.7	6.94	146	110	9.1	4
25	70	0.76	42.2	7.00	365	180	4.3	2	65	120	3.49	286.8	6.40	386	176	4.6	4
26	120	5.31	5.2	7.70	701	16	5.1	2	66	70	1.74	62.9	7.45	270	166	5.6	4
27	110	0.47	360.0	6.35	322	312	7.9	2	67	115	4.43	37.0	6.80	364	156	9.6	4
28	50	0.39	5.9	7.49	280	185	7.0	2	68	90	0.44	133.9	6.30	221	136	9.8	4
29	25	1.03	53.3	7.63	305	255	7.1	2	69	120	0.61	138.0	6.88	120	177	7.9	4
30	15	0.24	30.7	7.73	176	275	5.4	2	70	127	254.2	83.6	7.51	287	159	8.0	4
31	77	3.61	19.6	8.20	235	195	2.5	2	71	120	16.61	103.2	6.44	200	167	6.3	4
32	70	0.42	42.9	7.39	175	241	-	2	72	150	18.76	90.3	7.37	232	120	8.8	4
33	50	1.00	105.3	6.32	338	202	-	2	73	30	0.75	54.8	6.43	482	250	7.2	4
34	15	4.36	1480.2	6.45	195	164	-	2	74	120	11.00	179.8	6.74	215	181	5.8	4
35	100	0.04	21.1	7.31	154	150	-	2	75	160	58.30	20.0	7.17	178	232	5.2	4
36	120	13.35	129.5	8.00	117	240	8.0	3	76	40	0.72	106.5	6.32	183	266	3.9	4
37	110	0.34	49.9	7.05	100	310	8.4	3	77	150	78.21	421.8	6.27	208	262	5.1	4
38	80	0.13	195.3	6.74	122	315	8.3	3	78	191	17.56	407.0	6.25	178	263	5.0	4
39	98	0.75	101.1	6.92	182	221	-	4	79	134	311.6	447.7	7.55	204	160	4.3	4
40	150	20.70	87.0	6.58	525	202	-	4	80	180	3607.0	850.9	7.35	447	198	3.3	4

의 우라늄 함량은 국내 다른 화강암지역 지하수의 우라늄 함량보다도 높다. 즉, 류라기 흑운모화강암지역에 위치하는 이 천 74개 지하수의 중앙값인 2.03 µg/L (Cho et al., 2011), 논산 66개 지하수의 중앙값인 0.60 µg/L (Cho et al., 2012), 괴산 57개 지하수 중앙값인 0.78 µg/L (NIER, 2012), 용인 73개 지하수의 중앙값인 4.53 µg/L (NIER, 2013)보다도 높다. 연구 지역 흑운모화강암지역 지하수의 우라늄 중앙값은 0.90 µg/L으로 국내 백악기화강암지역 지하수의 우라늄 중앙값인 0.79 µg/L보다(NIER, 2016) 약간 높다. 한편 17개 옥천층군 지하수의 우라늄 중앙값은 0.47 µg/L이다(Table 3).

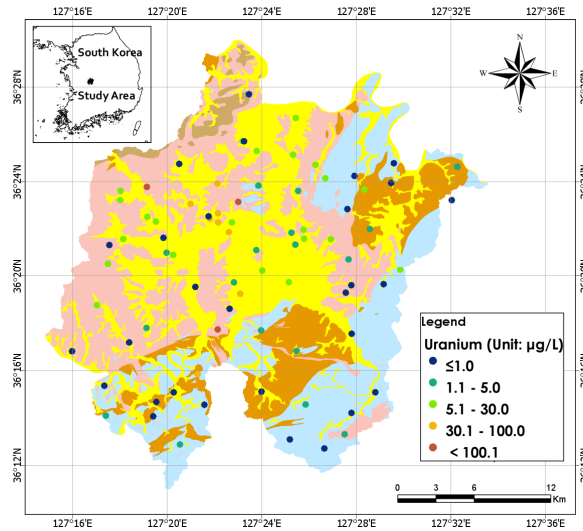


Fig. 3. Spatial distribution of uranium concentrations in groundwater on a simplified geological map of the study area.

Table 3. Statistical analysis of the uranium concentrations in the groundwater of each geology

Lithology	N	Min.	Max.	Mean	Med.	Std. dev.
Porphyry	3	0.13	13.35	4.61	0.34	7.57
Biotite Gr	18	0.01	53.89	6.17	0.90	14.12
Two-mica Gr	42	0.22	3607.0	117.06	11.14	555.2
Ogcheon group	17	0.04	11.09	1.97	0.47	2.88
Total	80	0.01	3607.0	63.44	3.46	404.03

지하수의 우라늄 함량은 모암의 풍화, 물-암석 반응뿐만 아니라 지하수의 현장 수질 및 각 성분들의 함량정도에 의해서도 영향을 받으나(Hollocher and Yuskaitis, 1993) 연구지역 지하수의 우라늄과 수질항목간의 상관관계가 높은 항목은 존재하지 않는다. 또한 복운모화강암, 흑운모화강암, 옥천층군지역 지하수의 심도와 pH, ORP, DO 값에는 차이가 없다(Table 2). 지하수내 우라늄과 주요 화학적 매개변수와의 상관관계가 모자라는 것은 지하수의 지화학적 환경이 우라늄 농도를 조절하는데 있어서 이들 매개 변수들이 극히 제한된 역할만 하였기 때문이라고 추정된다.

80개 지하수중에서 WHO의 제안치이자(WHO, 2011) 미국 EPA의 기준치(USEPA, 2009)인 30 µg/L를 넘는 비율은 14.6%로 국내 4,136개 지하수의 우라늄 함량이 30 µg/L를 넘는 비율인 3.9%보다(NIER, 2016) 높고 100 µg/L를 넘는 비율도 4.9%에 달한다. 지질별로 구분하면 연구지역 복운모화강암지역 지하수의 우라늄 함량이 30 µg/L를 초과하는 비율은 23.8%나 되고 100 µg/L를 초과하는 비율도 9.5%나 되어 국내 류라기화강암지역 1,562개 지하수와 백악기화강암지역 229개 지하수의 우라늄 함량이 30 µg/L를 초과하는 비율인 6.7%, 1.3%보다도(NIER, 2016) 월등히 높다. 한편 연구지역 18개 흑운모화강암지역 지하수에서 우라늄 함량이 30 µg/L를 넘는 시료는 2개에 불과하고 옥천층군에서는 30 µg/L를 넘는 지하수가 없다(Tables 2 and 3).

지하수의 라돈 함량

80개 지하수의 라돈 함량 분포도 대부분의 데이터가 낮은 농도 범위에 치우쳐 있는 상태를 보인다(Fig. 4). 80개 지하수

의 라돈 함량은 최저 5.2 Bq/L부터 최고 1,480.2 Bq/L까지 넓은 함량 분포를 보는데 평균 함량은 165.3 Bq/L이고 중앙값은 91.4 Bq/L이다(Table 4).

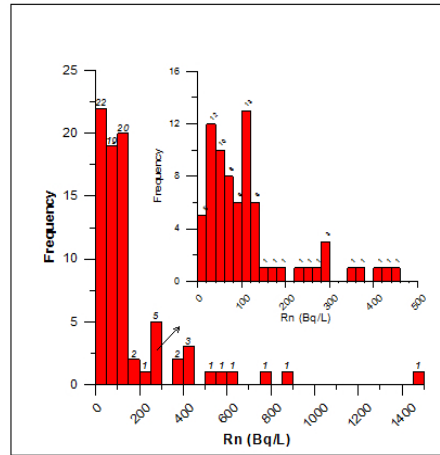


Fig. 4. Distribution diagram of radon concentration occurrence in the groundwaters of the study area.

Table 4. Statistical analysis of the radon concentrations in the groundwater of each geology.

Lithology	N	Min.	Max.	Mean	Med.	Std. dev.
Porphyry	3	49.9	195.3	124.9	129.5	72.8
Biotite Gr	18	5.9	758.4	110.6	61.6	169.4
Two-mica Gr	42	20.0	850.9	197.2	114.3	191.0
Ogcheon group	17	5.2	1480.2	151.3	42.2	352.7
Total	80	5.2	1480.2	165.3	91.4	227.5

우라늄 함량 분포와 마찬가지로 고 라돈 지하수는 복운모화강암지역에 분포한다(Fig. 5). 복운모화강암지역 지하수의 라돈함량 중앙값은 114.3 Bq/L로 흑운모화강암지역의 61.6 Bq/L, 옥천층군지역의 42.2 Bq/L보다 높다(Table 4). 복운모화강암지역 지하수의 라돈함량 중앙값은 유라기 흑운모화강암지역에 위치하는 이천 74개 지하수의 중앙값인 172.0 Bq/L (Cho et al., 2011), 용인 73개 지하수의 중앙값인 240.0 Bq/L보다 낮고 (NIER, 2013), 논산 66개 지하수의 중앙값인 76.6 Bq/L (Cho et al., 2012), 괴산 57개 지하수의 중앙값인 55.5 Bq/L보다 높고 (NIER, 2012) 높다. 연구지역 복운모화강암지역 지하수의 라돈함량 중앙값 114.3 Bq/L는 국내 1,546개 유라기화강암지역과 229개 백악기화강암지역 지하수의 중앙값인 96.9 Bq/L, 53.6 Bq/L보다 (NIER, 2016) 높다.

연구지역 지질별 지하수의 라돈 함량이 지하수의 우라늄 함량만큼 큰 차이가 나지 않는 것은 라돈은 지하수에 잘 용해되지만 반감기가 3.82일에 불과하여 짧은 거리밖에 이동하지 못하지만 우라늄은 지하수 환경에 따라서 근원암으로부터 멀리 이동할 수 있기 때문으로 설명된다(Atkins et al, 2016). 또한 연구지역 복운모화강암지역은 열수변질대와 화강암맥의 발달 등으로 인해서(Hwang, 2013) 흑운모화강암이나 옥천층군보다 풍화에 약하고 이로 인해 풍화대의 두께가 더 두꺼워 지하수내 라돈이 보다 쉽게 대기로 빠져나가기 때문으로도 해석될 수도 있다(Morland et al., 1997; Przylibski and Gorecka, 2014). 이에 따라 전체 80개 지하수중 우라늄 함량이 비이상적으로 높은 3,607 µg/L 시료를 제외하면 지하수의 우라늄과 라돈과의 상관성은 거의 없다(Fig. 6).

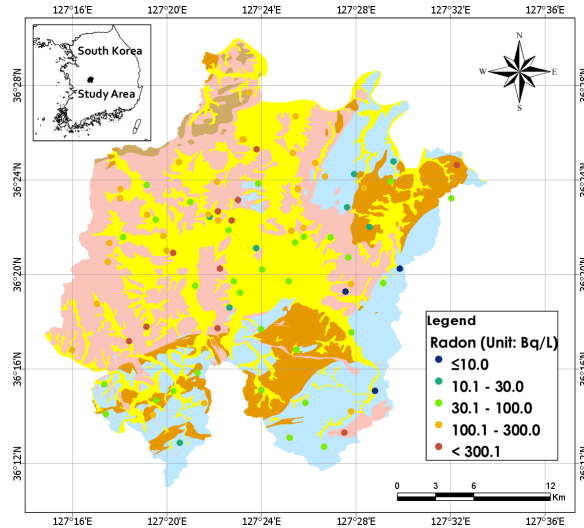


Fig. 5. Spatial distribution of groundwater radon levels on a simplified geological map of the study area.

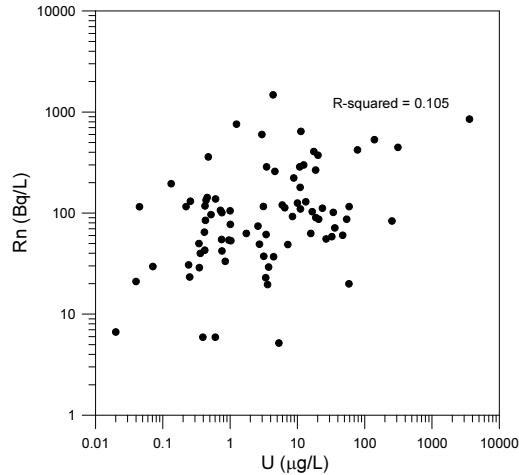


Fig. 6. Relationship between U and Rn concentrations in groundwater of the study area.

지하수의 라돈함량 중앙값이 가장 높은 지질은 백악기 반암의 129.5 Bq/L이나 시료가 단지 3개에 불과하다. 80개 지하수 중 라돈 함량이 가장 높은 지하수는 옥천층군에 속하는 시료번호 36의 1,480.2 Bq/L이나 지하수의 우라늄 함량은 4.36 $\mu\text{g/L}$ 로 낮다. 시료번호 36이 옥천층군에 속하면서도 지하수의 라돈 함량이 높은 것은 인접한 백악기 반암의 영향으로 보인다(Lee et al., 1980). 시료 36과 유사한 사례로 화강암에 인접한 퇴적변성암에 위치한 지하수에서 고함량의 우라늄, 라돈이 검출된 연구도 있다(Cho, 2017). 한편 지하수의 우라늄 함량이 3,607.0 $\mu\text{g/L}$ 나 되는 시료 80의 라돈 함량은 850.9 Bq/L로 높다.

80개 지하수중 미국 EPA의 제안치(Alternative Maximum Contaminant Level: AMCL)인 148 Bq/L (USEPA, 2009)를 넘는 비율은 23.2%로서 국내 4,120개 지하수의 라돈 함량이 148 Bq/L를 초과하는 비율인 18.9% (NIER, 2016)보다 약간 높다. 지질별로 구분하면 복운모화강암지역 지하수의 라돈 함량이 148 Bq/L를 초과하는 비율은 31.0%로 국내 1,546개 주라기화강암지역 지하수의 라돈 함량 초과율인 31.7% (NIER, 2016)와 비슷하다. 한편 흑운모화강암지역 지하수의 라돈 함량이 148 Bq/L를 초과하는 비율은 11.1%로 국내 229개 백악기화강암지역 지하수 라돈 함량이 148 Bq/L를 초과하는 비율인 22.7% (NIER, 2016)보다 낮다.

지질별 암석과 지하수의 우라늄 함량

연구지역의 지질별 지하수의 우라늄 함량을 해석하기 위하여 지하수의 우라늄 함량이 높게 검출된 대전시 유성구 일대 45개 지점 암석 노두에서 e(U) 함량을 측정하였다(NIER, 2008). 45개 암석내 우라늄 함량 빈도 분포는 지하수의 우라늄, 라돈 함량 빈도 분포와는 달리 정규분포에 가깝다(Fig. 7). 45개 암석의 우라늄 함량은 1.2~10.5 mg/kg이고 평균 함량은 3.66 mg/kg로 대전 49개 유라기화강암의 우라늄 평균 함량으로 알려진 7.2 mg/kg보다(Hwang, 2013) 낮으며 화강암의 평균 함량인 5.0 mg/kg보다도(Siegel and Bryan, 2003) 낮다.

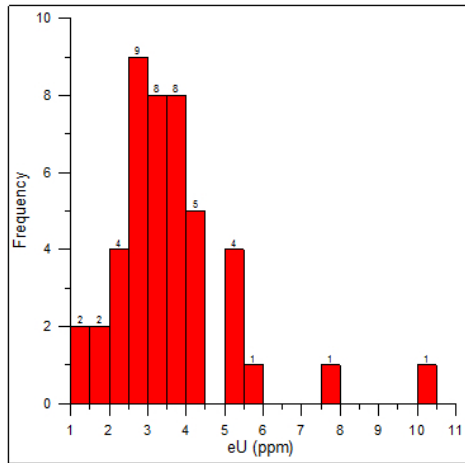


Fig. 7. Distribution diagram of uranium (e(U)) concentration occurrence in the granite of the study area.

Table 5. Statistical analysis of the e(U) concentrations in the rock of each geology.

Lithology	N	Min.	Max.	Mean	Med.	Std. dev.
Porphyry	4	2.6	3.8	3.38	3.7	0.54
Biotite Gr	9	1.8	5.5	3.2	2.8	1.26
Two-mica Gr	32	1.2	10.5	3.78	3.35	1.81
Total	45	1.2	10.5	3.66	3.4	1.64

지질별로 보면 32개 복운모화강암의 우라늄 평균 함량은 3.78 mg/kg으로 9개 흑운모화강암의 평균 함량인 3.20 mg/kg보다도 약간 높다. 한편 4개 반암의 평균 우라늄 함량은 3.38 mg/kg이다(Table 5). 연구지역 복운모화강암의 우라늄 평균 함량 3.78 mg/kg은 김제지역 흑운모화강암의 평균값인 5.1 mg/kg, 용인지역 73개 흑운모화강암의 평균인 5.6 mg/kg, 청원지역 40개 흑운모화강암의 평균인 5.1 mg/kg (NIER, 2011; NIER, 2013)보다는 낮다. 그러나 김제, 용인, 청원 흑운모화강암지역 지하수의 우라늄 함량(중양값)은 각각 0.31 µg/L, 4.53 µg/L, 1.80 µg/L으로 연구지역 복운모화강암 지하수의 함량보다 낮다. 한편 괴산지역 백악기화강암과 유라기화강암은 거의 같은 암석인 반상화강암으로 이루어져 있는데 백악기화강암의 우라늄 평균 함량은 7.46 mg/L로 유라기화강암의 평균 함량 3.81 mg/k의 약 2배이며 지하수의 우라늄 함량 중양값도 각각 4.74 µg/L와 2.33 µg/L로 약 2배의 차이를 보인다(Cho, 2017).

복운모화강암, 흑운모화강암, 옥천층군지역 지하수의 심도와 pH, ORP, DO 값에 차이가 없으며(Table 2) 복운모화강암과 흑운모화강암의 암석내 우라늄 평균함량은 각각 3.78 mg/kg, 3.20 mg/kg으로 큰 차이가 없음에도 불구하고 지하수의 우라늄 함량 중양값은 각각 11.2 µg/L, 0.90 µg/L로 차이가 크다(Table 5). 이는 복운모화강암지역은 흑운모화강암

지역에 비하여 열수변질대 등의 발달로 인해서(Hwang, 2013) 풍화에 약하여 우라늄을 포함하고 있는 광물이 모암으로부터 쉽게 분리되어 지하수로 쉽게 용출될 수도 있기 때문에 판단된다(Cothern and Rebers, 1990; Riedel and Kübeck, 2018). 이럴 경우 규산염광물의 풍화로 인해서 지하수의 중탄산염이 증가하기 때문에 지하수의 우라늄 함량과 중탄산염과는 상관관계가 높아야 하나(Thivya et al., 2016) 42개 복운모화강암지역 지하수의 우라늄과 중탄산염의 상관계수는 0.32로 높지는 않다. 또한 연구지역 복운모화강암과 흑운모화강암의 관계는 점이적이기 때문에(Park et al., 1977) 흑운모화강암보다 백운모화강암의 풍화가 더 잘 일어나며 이로 인해 우라늄을 포함하는 광물이 쉽게 분리되어 지하수로 용해되어 복운모화강암지역 지하수의 우라늄 함량이 월등히 높다는 것에 대해서는 보다 심도 있는 연구가 필요하다. 연구지역 복운모화강암지역 지하수의 우라늄 함량이 높은 다른 설명으로는 복운모화강암내의 화강암맥과 열수변질대의 우라늄이 상대 때문으로도 연구되고 있다(Hwang, 2013). 복운모화강암지역 지하수의 우라늄 함량이 높은 또 다른 설명으로는 부 성분광물이 빠져나간 용해동공이나 용해조직이 흔하게 관찰되는 것으로 보아 복운모화강암내 우라늄 광물의 산출특징과 존재 형태 때문으로 볼 수 있다(Choo, 2002).

연구지역 복운모화강암지역에 위치하는 지하수의 라돈 함량은 흑운모화강암지역 지하수보다 높으나 국내 다른 흑운모화강암지역 지하수의 라돈 함량과 비슷하다. 그러나 복운모화강암지역 지하수의 우라늄 함량은 흑운모화강암지역 지하수에 비해서 월등히 높게 검출되고 있으며 이의 주 원인은 풍화에 의한 우라늄광물의 분리와 용해(Cothern and Rebers, 1990; Riedel and Kübeck, 2018), 화강암맥과 열수변질대의 우라늄 이상대의 존재(Hwang, 2013), 복운모화강암내 우라늄 광물의 산출특징과 존재 형태(Choo, 2002) 등을 제시했으나 추가 연구가 필요하다. 아울러 연구지역을 제외한 국내 복운모화강암지역 지하수의 우라늄 함량도 높은지에 대해서도 연구가 필요하다.

결론

대전 화강암지역 지하수의 우라늄, 라돈 함량 범위와 특성을 파악하기 위하여 80개 지하수에 대해 함량을 분석하고 이를 복운모화강암, 흑운모화강암, 옥천층군으로 구분하였다. 지하수의 우라늄 함량은 복운모화강암지역 지하수에서 월등히 높게 나타났으며 국내 류라기화강암과 백악기화강암지역 지하수보다도 크게 높은 것으로 나타났다. 그러나 흑운모화강암지역 지하수의 우라늄 함량은 국내 류라기화강암지역 지하수보다 낮으며 백악기화강암지역 지하수와 비슷한 함량을 보였다. 연구지역 복운모화강암의 우라늄 함량은 국내 화강암의 우라늄 함량보다 약간 낮거나 비슷하지만 지하수의 우라늄 함량은 오히려 더 높다. 복운모화강암지역 지하수의 라돈 함량은 흑운모화강암지역 지하수의 약 2배 정도로서 우라늄 만큼 큰 차이를 보이지 않는다. 연구지역 복운모화강암지역 지하수의 우라늄 함량이 30 $\mu\text{g/L}$ 를 초과하는 비율은 국내 류라기화강암지역의 3-4배이나 흑운모화강암지역 지하수의 초과율은 비슷하다. 복운모화강암지역 지하수의 라돈함량이 148 Bq/L를 초과하는 비율은 국내 류라기화강암지역의 초과율과 비슷하며 흑운모화강암지역 지하수의 라돈 함량이 148 Bq/L를 초과하는 비율은 복운모화강암지역의 30%에 불과하다.

사사

본 연구는 2016년 국립환경과학원의 '지하수 중 자연방사성물질 함유실태 조사: NIER-RP2016-324'와 한국지질자원 연구원의 2016년 '복합 인공함양기법을 이용한 지하수 확보·활용기술 개발: GP2015-014-2016(2)'의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Atkins, M. L., Santos, I. R., Perkins, A. and Mather, D. T., 2016, Dissolved radon and uranium in groundwater in a potential coal seam gas development region (Richmond River Catchment, Australia), *Journal of Environmental Radioactivity*, 154, 83-92.
- Barcelona, M. J., Gibb, J. P., Helfrich, J. A., Garske, E. E., 1985, Practical guide for groundwater sampling, SWS Contract Report, 374p.
- Cho, B. W., Choo, C. O., Kim, M. S., Lee, Y. J., Yun, U., Lee, B. D., 2011, Uranium and radon concentrations in groundwater near the Icheon granite, *Journal of Engineering Geology*, 21(3), 259-269 (in Korean with English abstract).
- Cho, B. W., Kim, M. S., Kim, T. S., Han, J. S., Yun, U., Lee, B. D., Hwang, J. H., Choo, C. O., 2012, Hydrochemistry and distribution of uranium and radon in groundwater of the Nonsan area, *Journal of Engineering Geology*, 22(4), 427-437 (in Korean with English abstract).
- Cho, B. W., 2017, Uranium concentrations in groundwater of the Goesan area, Korea, *Journal of Engineering Geology*, 21(3), 259-269 (in Korean with English abstract).
- Choo, C. O., 2002, Characteristics of uraniferous minerals in Daebo granite and significance of mineral species, *Journal of Mineral Society of Korea*, 15(1), 11-21.
- Cothorn, C. R. and Rebers, P. A., 1990, Radon, radium and uranium in drinking water, Lewis publishers, Inc., 283p.
- Dillon, M. E., Carter, G. L., Arra, R., Kahn, B., 1997, Radon concentrations in groundwater of Georgia piedmont, *Health Physics*, 60(2), 229-236.
- Han, J. H. and Park, K. H., 1996, Abundances of uranium and radon in groundwater of Taejeon area, *Economic and Environmental Geology*, 29(5), 589-595 (in Korean with English abstract).
- Hollocher, K. and Yuskaitis, A., 1993, Chemical composition of surface and high-uranium well water, Lake Sunapee area, New Hampshire: *Northeastern Geology*, 15(2), 159-169.
- Hwang, J., 2013, Occurrence of U-minerals and sources of U in groundwater in Daebo granite, Daejeon area, *Journal of Engineering Geology*, 23(4), 399-407 (in Korean with English abstract).
- Kurttio, P., Auvinen, A., Salonen, L., Saha, H., Pekkanen, J., Mäkeläinen, S., Vaisanen, S., Penttilä, I. and Komulainen, H., 2002, Renal effects of uranium in drinking water, *Journal of Environmental Health Perspectives*, 110(4), 337-342.
- Lee, S. M., Kim, H. S., Na, K. C., 1980, Geological map of Daejeon sheet, KIGAM.
- Milvy, P. and Cothorn, R., 1990, Scientific background for the development of regulations for radionuclides in drinking water, Lewis Publishers, Chelsea, Michigan, USA
- Morland, G., Reimann, C., Strand, T., Skarphagen, H., Banks, D., Bjorvatn, K., Hall, E. M., Siewers, U., 1997, The hydrogeochemistry of Norwegian bedrock groundwater-selected parameters (pH, F, Rn, U, Th, Na, Ca) in samples from Vestfold and Hordaland, Norway, *NGU Bull*, 432, 103-117.
- NIER (National Institute of Environmental Research), 1999, Study on the radionuclide concentrations in groundwater, KIGAM, 338p (in Korean with English abstract).
- NIER, 2002, Study on the radionuclide concentrations in the groundwater (IV), KIGAM, 357p (in Korean with English abstract).
- NIER, 2008, Studies on the naturally occurring radionuclides in groundwater of Korea (I) KIGAM, 293p (in Korean with English abstract).
- NIER, 2011, Studies on the naturally occurring radionuclides in groundwater of the two high potential areas (11) KIGAM, 253p (in Korean with English abstract).
- NIER, 2012, Study on the naturally occurring radionuclides in groundwater of Korea (12), KIGAM, 245p (in Korean with

English abstract).

- NIER, 2013, Studies on the naturally occurring radionuclides in groundwater of the Youngin high potential area, KIGAM, NIER-SP2013-416, 220p (in Korean with English abstract).
- NIER, 2016, Studies on the naturally occurring radionuclides in groundwater, NIER-RP2016-324, 213p (in Korean with English abstract).
- NRC (National Research Council), 1999, Risk assessment of radon in drinking water, National Academies press, Washington.
- Park, H. I., Lee, J. D. and Cheong, J. G., 1977, Geological map of Yuseong sheet, KIGAM.
- Przylibski, T. A., and Gorecka, J., 2014, ^{222}Rn activity concentration differences in groundwaters of three Variscan granitoid massifs in the Sudetes (NE Bohemian Massif, SW Poland, Journal of Environmental Radioactivity, 134, 43-53.
- Riedel, T. and Kübeck, C., 2018, Uranium in groundwater-A synopsis based on a large hydrogeochemical data set, Water Research, 129, 29-38.
- Siegel, M. D. and Bryan, C. R., 2003, Environmental geochemistry of radioactive contamination, Treatise on Geochemistry, 9, 205-262.
- Thivya, C., Chidambaram, S., Keesari, T., Prasanna, M. V., Thilagavathi, R., Adithya V. S. and Singaraja, C., 2016, Lithological and hydrochemical controls on distribution and speciation of uranium in groundwaters of hard-rock granitic aquifers of Madurai district, Tamil Nadu (India), Environmental Geochemical Health, 38, 497-509.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency), 2009, National Primary Drinking Water Regulations.
- WHO (World Health Organization), 2011, Guidelines for drinking water quality. Chapter 9, Radiological aspects, 4th edition, World Health Organization, Geneva.