The Journal of Engineering Geology
pISSN : 1226-5268 eISSN : 2287-7169

Vol. 33, No. 4, December, 2023, pp. 587-598
https://doi.org/10.9720/kseg.2023.4.587

RESEARCH ARTICLE

괴산군 연풍면 일대 지하수 중 라돈 함량 분포와 변동

조병욱[1] · 조수영[2] · 오종현[3] · 이병대[1*]

[1]한국지질자원연구원 지하수환경연구센터 책임연구원
[2]한국지질자원연구원 지하수환경연구센터 책임기술원
[3]과학기술연합대학원대학교 지질과학 박사과정

Distribution and Change of Radon Concentration of Groundwater in the Area of Yeonpung-myeon, Goesan-gun, Korea

Byong-Wook Cho[1] · Soo-Young Cho[2] · Jong-Hyun Oh[3] · Byeong-Dae Lee[1*]

[1]Principal Researcher, Groundwater Environment Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources
[2]Principal Engineer, Groundwater Environment Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources
[3]Ph.D. Course, Geoloical Science, University of Science and Technology

Abstract

To assess the distribution and temporal changes in radon concentration within a region in Yeonpung-myeon, Goesan-gun, known for elevated groundwater radon levels, we conducted a series of analyses, measuring radon concentration and DTW (Depth to water table) at 2-month intervals over 12 cycles. The investigation covered 10 groundwater wells and one stream within the designated area. The groundwater in the central part of the region exhibited high radon concentrations, ranging from 37.0 to 2,675.2 Bq/L. Conversely, the peripheral zones displayed comparatively lower radon concentrations, ranging from 10.6 to 37.9 Bq/L. This variation is attributed to the presence of granite porphyry that intruded into the Okcheon Formation, forming a fracture zone and contributing to elevated radon levels in the central part. In contrast, the peripheral locations, located within the Okcheon Formation and away from the granite porphyry intrusion, demonstrated lower radon concentrations. The observed significant fluctuation in radon concentration in the central area is associated with its low-lying topography. The pronounced seasonal changes in groundwater levels contribute to the migration of shallow, low-radon groundwater into areas with higher radon concentrations, explaining the observed variations in radon levels within the central part of the studied area.

Keywords: groundwater, radon, concentration, granite porphyry, Okcheon Formation

초 록

지하수의 라돈 함량이 높은 것으로 알려진 연구지역 지하수의 라돈 함량분포와 시기별 함량변화를 파악하기 위하여 10개 지하수공과 1개 하천수를 대상으로 2개월 간격으로 12회에 걸쳐서 라돈 함량 분석과 DTW(Depth to water table)를 측정하였다. 연구지역 중앙에 위치한 지하수의 라돈 함량은 37.0~2,675.2 Bq/L로 높았으나 연구지역 외곽에서는 10.6~37.9 Bq/L로 낮았다. 연구지역 중앙에 위치한 지하수의 라돈 함량이 높은 것은 옥천층군을 관입한 화강반암과 이에 따른 파쇄대가 발달하였기 때문으로 해석된다.

OPEN ACCESS

***Corresponding author:** Byeong-Dae Lee
E-mail: blee@kigam.re.kr

Received: 27 November, 2023
Revised: 11 December, 2023
Accepted: 13 December, 2023

Ⓒ 2023 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.

연구지역 외곽에 위치한 지하수의 라돈 함량이 낮은 것은 화강반암 관입부로부터 떨어진 옥천층군에 위치하고 있기 때문으로 해석된다. 연구지역 중앙에 위치한 지하수의 라돈 함량 변화가 크게 일어나는 것은 연구지역 중앙이 저지대일 뿐만 아니라 계절별 지하수위 변화가 크게 일어나며 이로 인해 천부의 저 함량 라돈 지하수가 고 함량 라돈 지하수에 유입되기 때문으로 보인다.

주요어: 지하수, 라돈, 함량, 화강반암, 옥천층군

서 론

방사성핵종 중 하나인 라돈(Rn^{222})은 암석이나 토양 중의 모 핵종인 라듐(Ra^{226})의 방사성 붕괴로 발생하는 무색, 무취, 무미의 불활성 기체이다. 라돈 함량이 높은 지하수를 음용할 경우, 라돈은 약 3.83일로 짧은 반감기를 갖기에, 붕괴 중에 발생하는 알파입자로 인해 폐암과 위암 발병 가능성이 높다(NRC, 1999).

지하수의 라돈 함량은 일차적으로 모암의 우라늄과 라듐 함량에 지배를 받지만 지하수의 라돈 거동은 복잡하고 여러 요인에 의해 지배를 받기에(Scheib et al., 2013) 라돈 함량은 위치와 시기에 따라서 다를 수 있다. 지하수의 라돈 함량은 한 유역내의 라돈 함량이 다른 지하수체와의 혼합, 지하수의 체류 시간과 이동 거리, 지하수 함양률 등에 따라서도 영향을 받는다고 알려졌다(Przylibski and Żebrowski, 1999). 이에 따라 지하수 중 라돈 고 함량을 암석의 종류, 단층대의 파쇄 정도 등과 연관시켜 해석하고자 시도된 바도 있다(Andrews et al., 1989).

지하수 중 라돈 함량에 대한 연구는 1960년 대 말부터 일부 선진국을 중심으로 수행되어 왔다(NIER, 2012). 국내는 1990년 말부터 전국 지하수를 대상으로 한 함량 실태조사가 진행되었고(NIER, 1999), 2007년부터는 전국의 마을상수도와 라돈 함량이 높을 것으로 예측되는 지역을 대상으로 지하수 중 라돈 함량 정밀조사가 수행된 바 있다(NIER, 2008). 실태조사와 정밀조사시에는 라돈 함량의 정도를 해석하기 위해서 지하수공의 제원, 수질, 지질 등도 함께 조사되었다.

실태조사와 정밀조사 결과, 지하수 중 라돈 함량은 지질과 밀접한 관련이 있는 것으로 밝혀졌다. 지하수 중 라돈 함량은 쥬라기화강암지역에서 가장 높았고, 화강암 분포 비율이 큰 행정구역인 대전시, 포천시, 춘천시, 이천시, 괴산군, 김제시 등에서 높았다. 특히 괴산군내 백악기화강암류 분포 지역에서 조사된 지하수공의 75%는 라돈 함량 제안치(Alternative Maximum Contamination Level, AMCL) 148 Bq/L (USEPA, 1999)를 초과한 것으로 보고되었다(Cho, 2017a). 또, 심도별 라돈 함량은 풍화대 하부 부근 지하수에서 가장 높았고 충적층 지하수에서 가장 낮은 것으로 알려졌다(Cho, 2018). 그러나 상기 보고들은 지하수 중 라돈 함량에 대해 단 1회의 측정 결과로, 지하수 중 라돈 함량의 항상성이나 측정 시기별 변화 등에 관한 정보는 없었다.

본 연구는 정밀조사에서 보고된 우리나라 지하수 중 라돈 함량이 가장 높았던 지점에서 장기간에 걸쳐 모니터링하고, 시기별 지하수 중 라돈 함량의 공간적 분포와 변화 등을 파악하는 것이다.

연구지역

연구지역의 위치는 충북 괴산군 연풍면 유하리 일대이다. 2012년 지하수 중 자연방사성물질조사에서 이 일대 지하수공 중 하나에서 우라늄과 라돈 함량이 높게 검출되었다. 당시 검출된 지하수 중 우라늄 함량은 302 μg/L이고, 라돈 함량은 7,217.9 Bq/L로 현재까지 국내에 보고된 라돈 함량 중 최고치이다(NIER, 2012).

연구지역의 지형은 남서에서 북동 방향으로 발달한 골짜기이다. 골짜기를 따라서 폭이 100 m, 길이가 약 1.8 km인 충적층이 형성되어 있다. 남서쪽 충적층의 고도는 약 200 m이고 북동쪽 충적층 고도는 약 220 m이다. 충적층을 가로지르는 소하천은 북동에서 남서 방향으로 흘러 본류인 쌍천에 유입된다(Fig. 1). 소하천의 일부 구간은 하천 주변에 자분정

(artesian well)이 있는 전형적인 이득하천(gaining stream)이다.

연구지역 일대를 포함한 주변의 지질은 고생대 후기 오르도비스기 옥천층군의 화전리층(og2), 백악기 화성암류, 그리고 이들을 관입한 암맥으로 구분된다. 화전리층의 주 구성은 암회색점판암과 흑색석회규산염암으로 이들 대부분은 규화작용을 비롯한 교대작용을 받았다. 화전리층은 화강암류의 관입으로 광범위하게 접촉변성작용 또는 교대작용을 받은 것으로 보고되었다. 백악기 화성암류는 주로 화강반암(kgp)으로, 암상은 세립질이고 일부에서 석영반암 및 반화강암이 혼재한다. 암맥은 산성 및 염기성 암맥으로 이들의 주 구성은 석영반암, 반화강암 내지 화강반암이다(Lee and Kim, 1972).

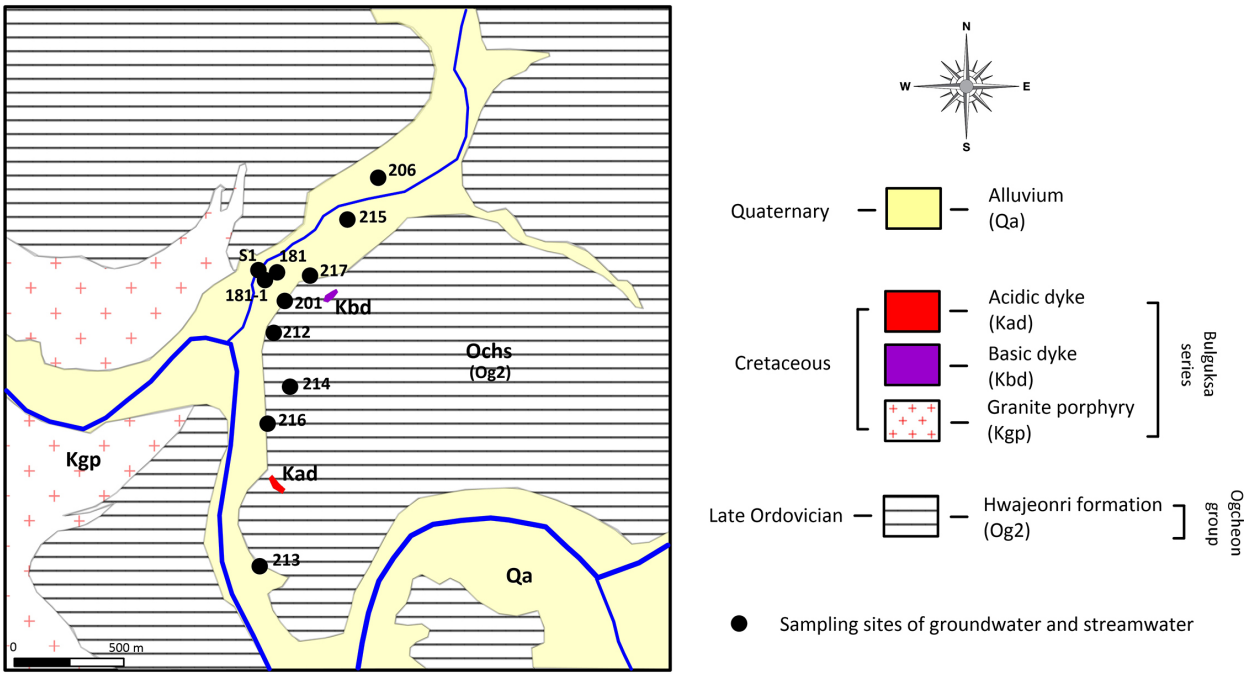

Fig. 1. Ggeological map of the study area with location of sampled wells and stream.

연구방법

시료채취 및 분석

라돈 함량분석을 위해 정기적으로 시료 채취가 이루어진 10개 지하수공 중 1개는 지하지질 파악을 위해 심도 120 m까지 굴착된 시험시추공(181-1)으로서 공경은 3"이다. 나머지 9개 지하수공들은 농업용과 생활용으로 사용되고 있으며 공경은 8", 심도는 50~104 m이다. 시료채취 시기는 강우가 지하수의 라돈 농도에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 강우 후 적어도 3일 이상 지난 뒤 이루어졌다. 지하수 시료채취 기간은 2018년 3월부터 2020년 1월까지이며, 시료채취 간격은 2개월 단위이다. 시료채취는 총 12회이나, 현장 사정상 10개 지하수공 중 4개는 12회를 채우지 못했다. 즉, 4개 지하수공 중 2개는 11회, 2개는 각각 6회와 3회만 시료채취를 수행하였다. 지하수공의 제원은 Table 1과 같다.

지하수 시료는 지하수공 내에 설치된 수중펌프를 이용해 지하수공 체적의 3~5배 이상을 양수하여 대수층의 수질이 반영되도록 온도, 수소이온농도(pH), 전기전도도(EC), 용존산소(DO) 등 현장 수질의 안정화(Barcelona et al., 1985)를 확인 후 채수하였다. 시험시추공은 자분정이므로 지하수를 바로 채수하였고, 자분하지 않는 특정 시기는 지하수면 아래 3~5 m 내외 지점에서 시료채취기를 이용해 채수하였다.

지하로부터 하천으로 유입되는 기저유출(baseflow) 지하수의 라돈 함량을 추정하기 위해, 자분정으로부터 근접한 하천 지점(S1)에서 하천수를 채수하였다. 시료채취 간격은 지하수 시료채취 기간 및 간격과 동일한 12회였다. 1회(2019.1)에 한정해서 하천수 모니터링 지점(S1)으로부터 약 70 m 떨어진 상류(S2)와 하류(S3) 지점에서도 시료채취를 하였다.

라돈 분석용 시료채취는 2 mL의 섬광용액(Optiphase HiSafe3)이 채워진 22 mL 바이알(vial)을 사용하였다. 와류(tubulent flow)로 인한 인위적인 폭기(aeration)는 라돈 저감을 일으키므로, 채수 시 기포가 발생하지 않도록 채수 밸브를 조절하여 22 mL 바이알에 8 mL를 채수하였다. 채수 후 바이알을 흔들어 섬광용액과 지하수가 충분히 섞이도록 하였다. 바이알의 라벨에는 시료명과 더불어 채취 시간을 기재하여 채취로부터 분석 사이의 시간 경과로 인한 라돈의 감소를 보정할 수 있도록 하였다.

라돈 함량은 시료채취 후 48시간 내 한국지질자원연구원의 액체섬광계수기(Quantulus 1220TM, Perkin-Elmer Co.)를 이용해 최적 분석조건을 확립한 후 분석하였다. 채취된 시료들은 PSA(Pulse shape analysis) 준위 100에서 시료용액 8 mL에 대해 300분간 계측했을 때 라돈 검출 하한치는 0.12 Bq/L였다(NIER, 2012).

Table 1. Information on groundwater wells and stream where water samples were periodically collected

Well no.	X	Y	Depth (m)	Radius (mm)	Use object	Remarks
181	36.77997	127.97584	80	100	Domestic	Groundwater
181-1	36.77978	127.97517	120	38	Observation	Groundwater
201	36.77889	127.97639	100	100	Agriculture	Groundwater
206	36.78457	127.98132	50	100	Agriculture	Groundwater
212	36.77772	127.97596	104	100	Agriculture	Groundwater
213	36.76717	127.97510	80	100	Domestic	Groundwater
214	36.77538	127.97644	75	100	Agriculture	Groundwater
215	36.78283	127.98045	80	100	Agriculture	Groundwater
216	36.77388	127.97513	100	100	Agriculture	Groundwater
217	36.77980	127.97796	100	100	Agriculture	Groundwater
S1	36.78023	127.97505	-	-	-	Stream water

DTW 측정

지하수 중 라돈 함량과 지하수위와의 관계를 파악하기 위하여 시료채취 시 DTW(Depth to water table)도 측정하였다. DTW는 각 지하수공 외부 케이싱 상단에서 지하수면(water table)까지의 거리이다. DTW 측정은 OTT Hydronet Contact Gauge(KL 010)을 이용하여 측정하였다.

10개 지하수공 중에서 2개 지하수공에서는 간헐적으로 자분이 일어나 DTW를 측정하지 못하였다. 2개 자분 지하수공 중에서 수중펌프가 설치되어 있지 않아서 자분량 측정이 가능한 지하수공(181-1)에서는 베일러로 일정량의 지하수를 배출시킨 다음 다시 자분시까지의 시간을 측정하여 자분량을 산정하였다.

결과 및 고찰

연구지역 지하수의 라돈 함량 분포

2012년 괴산지역 지하수 중 자연방사성물질 함량 정밀조사 시 라돈 최고함량은 지하수공 201의 7,217.9 Bq/L이다. 이 함량은 국내 지하수의 평균 라돈 함량인 94.4 Bq/L (Cho et al., 2018)의 76.5배이다. 또한 지하수공 201과 인접한 지하수공 181의 라돈 함량도 1,025.2 Bq/L로 높게 검출된 바 있다. 라돈 함량이 높게 검출된 지하수공 201, 181 주변 지하수의 라돈 함량 분포 파악을 위하여 이들 지하수공을 중심으로 남서-북동 방향에 위치한 8개의 지하수공과 1개 지점의 하천수에 대하여 2개월 간격으로 총 12회에 걸쳐서 라돈 함량을 분석하였다(Table 2).

10개 지하수공에서 12회의 라돈 함량 분석 결과 최저 10.6 Bq/L에서 최고 2,675.2 Bq/L의 넓은 범위를 보였다. 최고함량인 2,675.2 Bq/L은 국내 지하수 평균 라돈 함량(94.4 Bq/L)의 약 28배에 해당된다. 한편 지하수공 201에서 분석된 최고 라돈 함량은 2018년 9월의 1,207.4 Bq/L로 2012년 정밀조사시에 분석된 7,217.9 Bq/L의 약 1/6 정도로 낮다. 전반적으로 지하수의 라돈 함량은 연구지역의 중앙을 중심으로 높고 남서-북동으로 갈수록 함량이 낮음을 보인다(Table 2). 즉, 지하수의 라돈 함량은 연구지역 중앙에 위치한 지하수공 181, 181-1, 201, 212, 217 등에서 높게 나타나는데 최저와 최고 함량은 181-1에서 기록된 37.0 Bq/L와 2,675.2 Bq/L이다. 반면에 연구지역 외곽에 위치한 지하수공 206, 213, 214, 215, 216 라돈 함량은 10.6 Bq/L에서 37.9 Bq/L의 범위에 불과하다. 연구지역 중앙에 위치하는 지하수공의 라돈 최고함량은 국내 라돈 제안치와 미국 EPA의 제안치인 148 Bq/L (USEPA, 1999)의 18.1배에 해당하는 반면 연구지역 외곽에 위치한 지하수의 라돈 최고함량은 148 Bq/L의 0.26배에 불과하다. 한편 연구지역 중앙에 위치한 지하수공 181-1에 인접한 하천수의 라돈 함량은 1.1 Bq/L에서 18.3 Bq/L의 범위이다.

Table 2. Bi-monthly measured radon concentration (Bq/L) of 10 groundwaters and 1 stream water over 2 years

Date	181	181-1	201	206	212	213	214	215	216	217	S1	S2	S3
2018.3	223.8	1,508.1	789.9	10.6	154.2	21.3	15.0	-	-	-	3.1	-	-
2018.5	337.5	2,675.2	1,112.8	17.6	349.2	29.0	31.6	23.7	19.4	-	5.3	-	-
2018.7	401.4	2,212.2	838.5	18.1	623.7	21.7	21.3	23.7	21.2	-	3.5	-	-
2018.9	459.7	1,537.5	1,207.4	19.8	463.9	27.2	31.8	24.8	16.8	-	2.0	-	-
2018.11	390.2	784.1	732.4	13.9	331.6	27.2	30.5	-	24.1	-	3.9	-	-
2019.1	176.4	2,141.6	955.1	13.5	299.8	27.8	36.8	-	24.0	-	7.4	3.8	5.0
2019.3	167.3	1,933.1	643.6	-	245.9	19.4	26.7	-	20.9	47.1	6.7	-	-
2019.5	270.5	377.1	1,162.7	15.5	724.9	28.9	31.2	-	37.9	2,127.7	8.4	-	-
2019.7	842.3	37.0	1,002.9	15.2	593.7	21.6	37.8	-	28.9	1,088.8	18.3	-	-
2019.9	175.6	1,402.1	973.7	12.2	443.0	21.2	29.4	-	25.3	195.4	4.0	-	-
2019.11	986.0	73.5	959.7	11.3	267.0	20.2	25.8	-	15.2	128.4	1.1	-	-
2020.1	189.9	2,020.1	719.3	14.3	225.1	16.7	18.3	-	22.5	41.8	3.0	-	-

Fig. 2는 12회의 라돈 함량이 분석된 자료 중에서(Table 2) 대표적으로 2019년 5월에 분석된 지하수의 라돈 함량분포를 나타낸 것이다. 연구지역 중앙에 위치한 지하수공 181, 181-1, 201, 212의 라돈 함량은 각각 337.5 Bq/L, 2,675.2 Bq/L, 1,112.8 Bq/L, 349.2 Bq/L로 높다. 이러한 라돈 함량은 노르웨이 화강암지역 지하수의 평균 라돈 함량 700 Bq/L (Banks et al., 1998), 미국 Maine 주 화강암지역 지하수의 평균 라돈 함량인 814 Bq/L (Hess et al., 1985)와 비슷하다. 반면에 연구

지역 외곽에 위치한 지하수공 206, 213, 214, 215, 216의 라돈 함량은 각각 17.6 Bq/L, 29.0 Bq/L, 31.6 Bq/L, 23.7 Bq/L, 19.4 Bq/L에 불과하여 중앙에 위치한 지하수공의 라돈 함량과는 큰 차이를 보인다. Table 1에서 보는 바와 같이 조사 대상 지하수공들의 굴착심도가 50~120 m의 범위로 큰 차이가 없음에도 불구하고 연구지역 중앙과 외곽지역 지하수공의 라돈 함량에 차이가 큰 것은 지하수에 방사성핵종을 공급하는 매질과 지하수 유동과 관련된 매질 구조의 차이에서 기인하리라 추정된다.

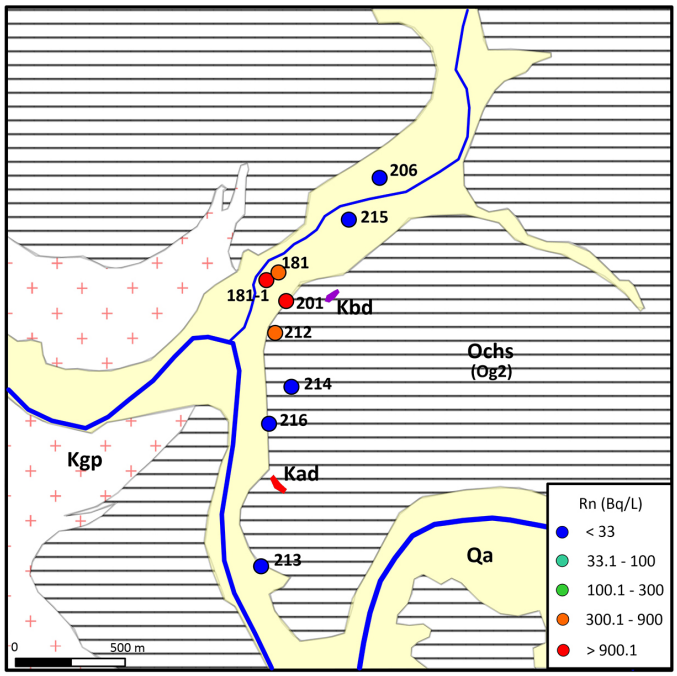

Fig. 2. Distribution of groundwater radon levels of the area (May 2019).

지질, 지질경계선과 지하수의 라돈 함량

반감기가 매우 짧은 라돈(Rn^{222})은 우라늄(U^{238}) 방사능 계열 중 하나인 라듐(Ra^{226})의 방사성 붕괴로부터 생성되는 라듐의 딸핵종이다. 우라늄은 암석별로 함량이 다르기에 지질은 라돈의 근원과 분포를 결정짓는 가장 중요한 요소 중 하나로 알려졌다(Scheib et al., 2013). 국내는 일반적으로 화강암질 매질에서 지하수 중 라돈 함량이 높으며, 퇴적암이나 변성퇴적암을 매질로 하는 지하수 중 라돈 함량은 낮은 것으로 보고되었다(Cho et al., 2018).

연구지역을 대표하는 지하수의 매질은 변성퇴적암인 옥천층군 화전리층(og2)과 백악기 화강암(Kgr)이다. 등가우라늄 함량 e(U)는 화전리층에서 평균 4.87 mg/kg이고, 화강암에서 평균 7.46 mg/kg이다(Cho, 2017b). 연구지역 10개 지하수공이 위치한 지질은 모두 화전리층이지만(Fig. 1), 10개 지하수공의 평균 라돈 함량은 14.9~1,335.6 Bq/L 범위로 큰 차이를 보이는데(Table 3), 연구지역의 가운데 위치한 지하수공의 평균 라돈 함량이 가장자리 것보다 월등히 높다(Fig. 2).

연구지역 내 10개 지하수공 중에서 181-1 시험시추공을 제외하고는 나공 범위, 케이싱 심도, 그라우팅 정도 등과 같은 제원이 명확하지 않다. 농업용과 생활용으로 개발된 9개 지하수공은 동일한 공경과 50~104 m의 굴착 심도임(Table 1)을 고려한다면, 9개 지하수공의 제원은 나공의 범위만 다를 뿐 케이싱 심도 및 그라우팅 정도는 비슷할 것으로 추정된다. 그러므로 이들 지하수공으로의 천부지하수의 유입조건은 유사할 것으로 판단된다. 따라서 각 지하공의 라돈 함량의 차이는 지하수공이 위치한 매질이나 매질 구조로부터 기인한 것으로 유추할 수 있다.

지하수 중 라돈 함량은 지하매질이 화강암이거나 화강암 관입에 영향을 받은 경계부 또는 화강암과 접촉된 부근의 매질에서 높은 것으로 보고되었다(Skeppstrom and Olofsson, 2007; Cho, 2017b). 또한, uranium vein mineralization은 일반적으로 화강암 접촉부에서 2 km 범위까지 일어나는 것으로 보고되었다(Scheib et al., 2013). 10개 지하수공이 모두 화전리층 위에 분포하지만, 연구지역 가운데 위치한 지하수공 181, 181-1, 201, 212, 217 등 5개와 연구지역 가장자리에 위치한 지하수공 206, 213, 214, 215, 216 등 5개 지하수공의 라돈 함량에 큰 차이가 나는 것은 화전리층에 관입한 화강암체와의 접촉 또는 근접거리 정도에서 기인한 것으로 판단된다.

지질에 의해 달라진 지하수 중 라돈 함량이 하천수에 미치는 영향은 하천 경로를 따라 검토될 수 있다. 2019년 1월 건기에 상류(S2), 중류(S1) 및 하류(S3)로 나눠 약 70 m 간격을 두고 하천에서 채수한 시료는 채취기간이 건기이기에 지하로부터 하천에 공급되는 기저유출(baseflow)이 대부분이다. S1, S2 및 S3의 라돈 함량은 각각 7.4 Bq/L, 3.8 Bq/L 및 5.0 Bq/L이다. 연구지역 가운데 위치한 지하수공 181-1과 인접한 하천수 S1에서 라돈 함량이 가장 높고, 다음은 하류(S3), 상류(S2)의 순이다(Table 2). 이 결과로부터 소하천 하류의 라돈 함량은 높은 라돈 함량을 갖는 지하수가 하천 중류에서 유입되어 상류의 낮은 라돈 함량을 가지는 하천수와 혼합된 결과로 추정할 수 있다. 이러한 하천수의 위치별 라돈 함량 변화는 지하수 중 라돈 함량이 연구지역 가운데 위치한 지하수공에서 높고, 가장자리에 위치한 지하수공에서 낮은 것과 유사하다.

Table 3. Statiscal analysis on radon concentrations (Bq/L) of 10 groundwaters and 1 stream water

Date	181	181-1	201	206	212	213	214	215	216	217	S
N	12	12	12	11	12	12	12	3	11	6	12
Min.	167.3	37.0	643.6	10.6	154.2	16.7	15.0	23.7	15.2	41.8	1.1
Max.	986.0	2,675.2	1,207.4	19.8	724.9	29.0	37.8	24.8	37.9	2,127.7	18.3
Mean	389.9	1,335.6	955.6	14.9	380.2	24.0	28.9	24.4	22.9	604.9	5.4
Med.	337.5	1,508.1	973.7	14.6	349.2	27.2	31.2	24.8	22.5	195.4	4.0
Std. dev.	268.9	846.8	197.1	3.1	164.6	4.3	6.7	0.6	6.5	845.7	4.7

고함량 라돈 지하수 지역의 지하지질

고함량 라돈 지하수 지역의 지하지질은 시험시추공(181-1)의 시추코어 자료(NIER, 2012)를 이용하였다. 시추코어 자료에 의하면 지표에서 심도 5.2 m까지는 매립층, 실트질 모래, 풍화토, 잔자갈 등으로 구성된다. 심도 5.2~50 m는 화전리층(og2)으로 탄산염암, 석회규산염암 및 석회질을 소량 포함하는 흑색점판암이다. 심도 50~120 m는 담회색과 담홍색의 백악기화강암(화강반암)이다. 파쇄구간은 흑색점판암의 경우 1.3~3.3 m인 3개 조의 파쇄대가, 화강암의 경우 0.5~10.1 m인 4개 조의 파쇄대가 확인된다. 특히, 71.9~82.0 m 구간은 코아회수율(RQD)이 9%일 정도로 심하게 풍화된 파쇄대가 존재한다(Kim et al., 2014). 연구지역의 중앙지점은 지표지질(심도 5.2~50 m)이 화전리층이지만, 심부지질(심도 50 m 이상)은 화강반암이다.

시추코아의 등가우라늄함량 e(U)는 화전리층과 화강반암의 접촉구간인 심도 37.2 m, 46.2 m, 59.0 m 및 63.0 m에서 각각 2.86 mg/kg, 2.53 mg/kg, 1.73 mg/kg 및 1.24 mg/kg이고, 화강반암 구간인 심도 70.0 m, 88.2 m 및 102.8 m 등에서 7.43 mg/kg, 14.8 mg/kg 및 12.3 mg/kg이다(Kim et al., 2014). 시추코아에서 확인한 화전리층의 등가우라늄함량은 괴산군에 분포하는 화전리층의 38개 지점에서 확인된 등가우라늄함량의 중앙값 3.90 mg/kg보다 낮지만, 시추코아에서 확인한 화강반암의 등가우라늄함량은 괴산군 백악기화강암 25개 지점에서 확인한 등가우라늄함량의 중앙값 8.20 mg/kg보다 높다(Cho, 2017b). 라돈은 우라늄의 방사성 붕괴 산물 중 하나이기에, 우라늄 함량이 높은 매질에서 라돈 함량도 높다.

시험시추공(181-1)의 심도 71.9~82.0 m 구간처럼 심한 파쇄대를 갖는 지질구조는 화강암의 파쇄 균열 벽면으로부터 방출된 라돈이 파쇄대를 따라 유동하는 지하수에 의해 쉽게 이동할 수 있는 통로가 될 수 있다(Akerblom and Lindgren, 1997; Skeppstrom and Olofsson, 2007).

시험시추공(181-1)의 심도 10 m, 25 m, 35 m, 45 m, 55 m, 65 m, 90 m 및 110 m 등 7개의 지점에서 더블 패커(double packer)를 이용한 지하수 중 라돈 함량 결과(NIER, 2012)는 903.1~1,428.0 Bq/L 범위이다(Table 4). 그런데 등가우라늄 함량이 낮은 화전리층 구간(심도 5.6~50 m)에 속하는 4개 구간 지하수의 라돈 함량은 1,200 Bq/L 이상을 보인다. 이 함량은 괴산지역 화전리층 51개 지하수공의 라돈 함량 중앙값인 30.1 Bq/L (Cho, 2017a)과 연구지역 가장자리에 위치한 5개 지하수의 라돈 함량 10.6~37.9 Bq/L 범위와 대비되는 높은 값이다. 더구나 시험시추공 하부의 화강반암 구간보다 상부로 갈수록 지하수 중 라돈 함량이 증가하는 추세는 라돈 함량이 조사지점의 방출량만을 의미하지 않음을 보여준다. 이것은 주 대수층이 화강반암이지만 화전리층과 그 하부의 화강반암에서 발달한 7개 조의 파쇄대가 직 · 간접적으로 연결되어 있고, 라돈 방출이 높은 화강반암을 매질로 하는 지하수가 피압에 의해 자분하기에, 화강반암 구간이 아닌 상부의 화전리층 구간 지하수의 라돈 함량이 높은 것으로 해석된다.

Table 4. Groundwater radon concentrations by depth in well 181-1

Depth (m)	Rn (Bq/L)
10	1,428.0
25	1,311.1
35	1,231.2
45	1,247.1
55	1,308.5
65	1,278.6
90	899.0
110	903.1

계절별 지하수의 라돈함량 변화

지하수의 라돈 함량은 여러 요인에 의해서 규제를 받기 때문에 일정하지 않고 측정시간별, 계절별 달라질 수 있다(Erlandsson et al., 2001). 지하수의 함양률은 계절별 강수량에 따라서 변하며 이에 따라 지하수위도 달라질 수 있다. 지하수의 함량률 변화는 지하수의 라돈 함량에 변화를 줄 수도 있을 것으로 예상되어(Perrier et al., 2009) 라돈 함량 분석용 시료 채취 시 지하수공의 수위 변화(DTW)를 관측하였다.

시료채취와 더불어 측정된 DTW는 연구지역 가운데와 가장자리 지하수공으로 대비된다. 연구지역 가운데 지하수공인 181, 181-1 및 201의 평균 DTW는 각각 1.33 m, 0.42 m 및 1.90 m로 매우 낮고, 연구지역 가장자리 남서쪽과 북동쪽 지하수공인 214, 206의 평균 DTW는 각각 7.47 m와 16.29 m로 깊다. 연구지역 중앙 지하수공의 DTW가 낮은 이유는 지형적으로 소하천에 인접한 저지대로, 이들의 대수층은 지하수공 181-1처럼 파쇄대가 발달해 있고 피압 상태에 놓여 있기 때문으로 판단된다. 서로 인접한 지하수공 181과 181-1의 DTW 차이는 지하수공 181은 지하수를 생활용수로 사용하고 있기에 나타난 현상으로 해석된다. 참고로 7개 농업용 지하수공은 주로 농번기에 활용되며, 생활용 2개 지하수공은 주로 여름에 사용량이 많다.

시기별 지하수위 변화를 나타낸 것이 Fig. 3이다. Fig. 3에서 연구지역 가운데 지하수공인 181, 181-1 및 201의 DTW 변

화가 연구지역 가장자리 지하수공인 206, 214 및 216보다 훨씬 크다. 지하수공 181, 181-1의 자분시의 DTW를 편의상 0 m로 보았지만 실제로는 DTW가 음의 값(-) 일 것이기 때문에 지하수공 181, 181-1의 DTW 변화폭은 실제로는 더 클 것이다. 한편, 시기별 지하수 중 라돈 함량의 변화를 나타낸 것이 Fig. 4이다. DTW 변화와 마찬가지로, 전반적으로 연구지역 가운데 위치한 지하수공의 라돈 함량 변화폭이 연구지역 가장자리 지하수공보다 크다. 라돈 함량의 변화폭이 가장 큰 지하수공은 181-1과 217인데 라돈 함량 최대값은 최소값의 50~80배 정도이다. 참고로, 스웨덴 남부 Söderåsen 지역에서 2여 년 동안 14회 측정된 지하수 중 라돈 함량의 변화 범위는 235~358 Bq/L로 최대값은 최소값의 1.5배 정도이다(Erlandsson et al., 2001).

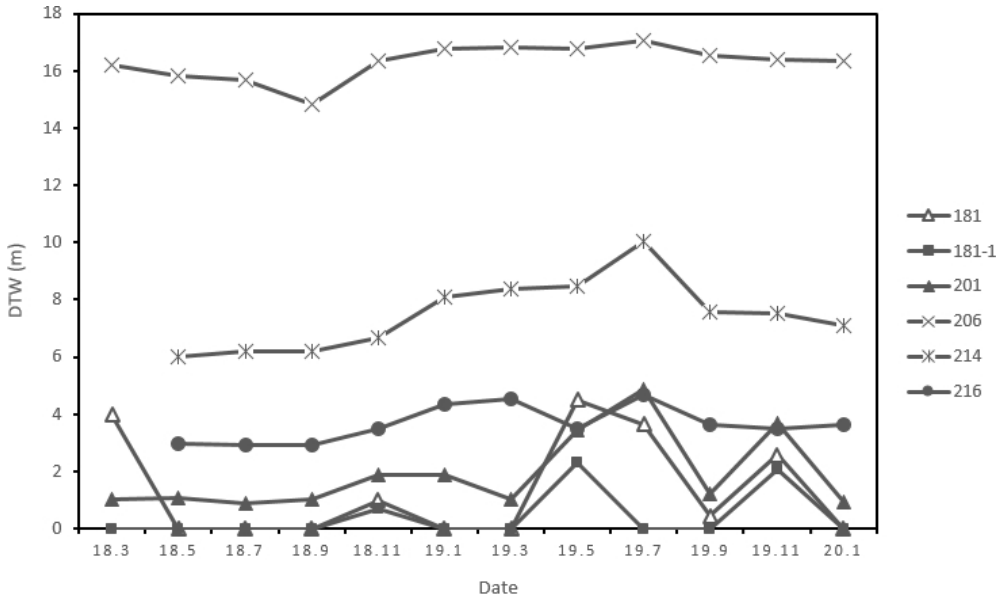

Fig. 3. Bi-monthly DTW variations in three wells located in the central part (181, 181-1, 201) and three wells located on the peripheral parts of the area (206, 214, 216).

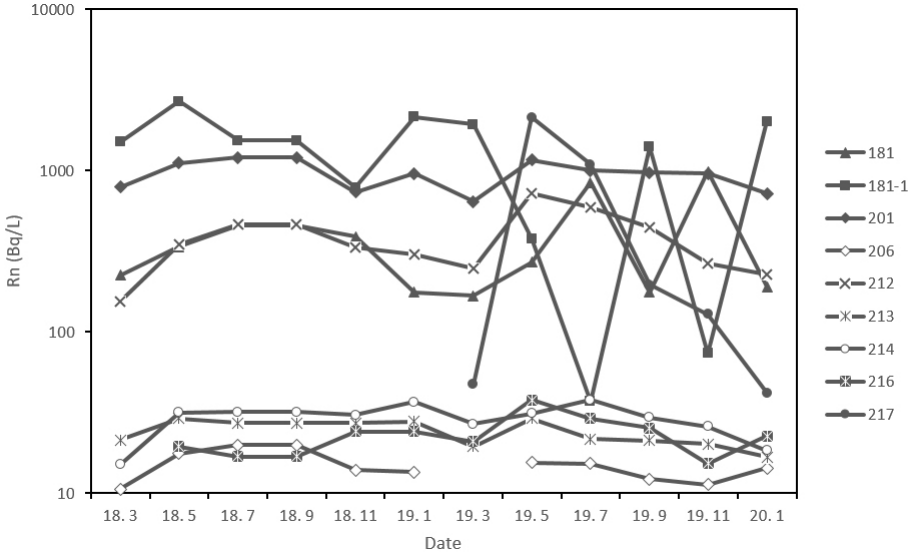

Fig. 4. Bi-monthly groundwater radon level variations in nine wells in the study area.

한편, 자분정 181-1의 자분량과 라돈 함량을 검토한 것이 Fig. 5인데 파쇄대로 유입되는 지하수 함양량의 감소에 따른 자분이 멈춘 시기에 라돈 함량도 낮아지는 경향을 보인다. 지하수공 181-1의 제원은 케이싱이 없이 120 m까지 나공 상태이다. 이로부터 유추할 때, 라돈 방출이 높은 화강반암의 파쇄대로 공급되는 지하수량이 줄어들 경우, 라돈 방출이 적은 화전리층을 매질로 하는 천층 지하수가 쉽게 유입되어 라돈 함량이 희석된 결과로 추정된다. 지하수공 181-1에서 2019년 5, 7, 9월 측정된 라돈 함량은 각각 377.1, 37.0, 73.5 Bq/L을 보인다(Table 2와 Table 5).

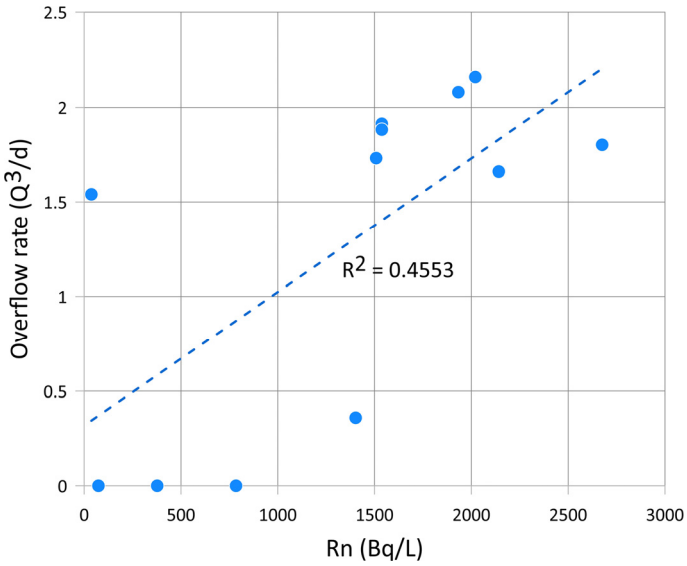

Fig. 5. Relationship between radon level and groundwater overflow rate in well 181-1.

Table 5. DTW of 9 wells measured at 2-month intervals for 2 years

Date	181	181-1	201	206	212	213	214	215	216	217
2018.3	3.98	Overflow	1	16.2	4.72	-	-	-	-	-
2018.5	Overflow	Overflow	1.05	15.8	4.46	-	6.01	-	2.95	-
2018.7	Overflow	Overflow	0.88	15.67	5.57	-	6.2	9.11	2.92	-
2018.9	Overflow	Overflow	1	14.82	4.34	-	6.17	8.89	2.93	-
2018.11	0.99	0.7	1.86	16.33	5.04	-	6.66	-	3.5	-
2019.1	Overflow	Overflow	1.86	16.77	3.49	-	8.09	-	4.36	-
2019.3	Overflow	Overflow	1.01	16.82	5.17	-	8.39	-	4.55	4.79
2019.5	4.49	2.3	3.45	16.78	6.85	-	8.46	-	3.5	-
2019.7	3.64	Overflow	4.87	17.05	6.64	-	10.04	-	4.67	8.77
2019.9	0.44	Overflow	1.22	16.54	5.11	-	7.59	-	3.62	5.11
2019.11	2.58	2.07	3.69	16.39	5.27	-	7.51	-	3.47	7.15
2020.1	0	Overflow	0.92	16.36	5.09	-	7.1	-	3.65	4.52

한편 181, 181-1보다 하천으로부터 더 멀리 떨어져 있고 지형고도도 더 높으며 따라서 화강반암과 화전리층(og2) 경계로부터 더 멀리 떨어져 있어서 피압 현상이 없는 지하수공 206의 라돈 함량은 DTW가 클수록 더 높은 라돈 함량을 보여주고 있다. 이는 지하수공 206으로 유입되는 천부 지하수의 함량이 적을수록 라돈 함량이 높음을 지시한다(Fig. 6). 따라서

지하수공의 라돈 함량은 지하수 함양률(자분율)과 지하수위(DTW) 변동, 하천과의 거리, 케이싱의 상태 등에 따라서 달라질 수 있음을 보인다(Perrier et al., 2009).

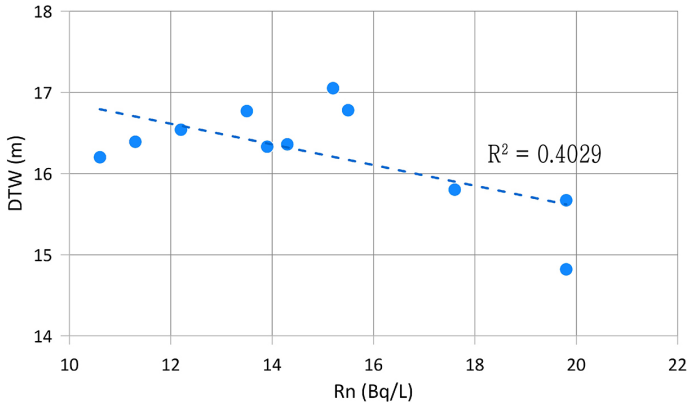

Fig. 6. Relationship between groundwater radon level and DTW in well 206.

결 론

지하수의 라돈 함량이 높은 것으로 알려진 연구지역의 라돈 함량 분포와 함량 변화 특성을 파악하기 위하여 10개 지하수공과 1개 하천수에서 2년에 걸쳐 2개월 간격으로 12번의 라돈 함량 분석, 지하수공의 DTW(Depth to water table)와 자분량을 측정하였다.

옥천층군의 화전리층에 위치하고 있는 10개 지하수공의 심도 등의 제원은 비슷하다. 그러나 연구지역 중앙과 외곽에 위치한 지하수공의 라돈 최고함량은 각각 2,675.2 Bq/L, 37.9 Bq/L로서 위치에 따른 지하수공의 라돈 함량에 큰 차이를 보이는데 이는 지질, 지질구조 차이에 기인한 것으로 판단된다. 연구지역 중앙의 지표지질은 화전리층이지만 지하지질은 백악기 화강반암 관입 또는 접촉부와 가까운 지역으로 라돈의 기원인 암석 내 우라늄 함량이 높다. 또한 연구지역 중앙은 접촉부의 특성상 화강반암 내에 파쇄대가 발달하여 암석 내 균열을 통한 라돈의 방출이 용이하고 지하수의 유동이 활발하기 때문에 지하수의 라돈 함량이 높은 것으로 해석된다. 연구지역 지하수공의 DTW는 파쇄대가 발달하여 피압대수층의 성격을 보이는 중앙부는 낮고 파쇄대로부터 멀어지는 외곽으로 갈수록 깊어진다. 연구지역 중앙 일대는 지하수의 유동이 활발하기 때문에 외곽지역보다 DTW 변화가 크다. 연구지역 중앙 일대 지하수의 라돈 함량 변화가 외곽에 위치한 지하수보다 큰 것은 계절별 지하수 함양률 변화에 따른 DTW 변화가 크기 때문으로 해석된다. 10개 지하수공 중에서 연구지역 중앙에 위치한 2개 지하수공의 라돈 함량 변화는 최대 함량과 최소 함량의 차가 50~80배에 이르는데 이는 라돈 함량이 높은 심부 기원의 지하수에 라돈 함량이 낮은 천부 지하수가 유입되기 때문으로 보인다. 따라서 천부 지하수의 유입을 막는 케이싱, 그라우팅 정도가 지하수의 라돈 함량 변화에 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 기본과제인 ‘국내 기반암 잠재적 유해원소 통합관리 및 유해성 평가 과제(23-3121)’의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

Akerblom, G., Lindgren, J., 1997, Mapping of groundwater radon potential, European Geologists, 5, 13-22.

Andrews, J.N., Ford, D.J., Hussain, N., Trivedi, D., Youngman, M.J., 1989, Natural radioelement solution by circulating groundwaters in the Stripa granite, Geochimica et Cosmochimica Acta, 53(8), 1791-1802.

Banks, D., Frengstad, B., Midtgard, A.K., Krog, J.R., Strand, T., 1998, The chemistry of Norwegian groundwaters: I. 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., Garske, E.E., 1985, Practical guide for groundwater sampling, SWS Contract Report, 374p.

Cho, B.W., 2017a, Radon concentrations in groundwater of the Goesan area, Korea, Journal of Engineering Geology, 22(5), 63-70 (in Korean with English abstract).

Cho, B.W., 2017b, Uranium concentrations in groundwater of the Goesan area, Korea, The Korean Society of Economic and Environmental Geology, 50, 353-361 (in Korean with English abstract).

Cho, B.W., 2018, Radon concentration in groundwater of Korea, Journal of Engineering Geology, 28(4), 661-672 (in Korean with English abstract).

Erlandsson, B., Jakobsson, B., Jönsson, G., 2001, Studies of the radon concentration in drinking water from the horst Söderåsen in Southern Sweden, Journal of Environmental Radioactivity, 53(2), 145-154.

Hess, C.T., Michel, T.R., Horton, T.R., Orichard, H.M., Coniglo, W.A., 1985, The occurrence of radioativity in public water supplies in the United States, Health Physics, 48(5), 553-586.

Kim, M.S., Yang, J.H., Jeong, C.H., Kim, H.K., Kim, D.W., Jo, B.U., 2014, Geochemical origins and occurrences of natural radioactive materials in borehole groundwater in the Goesan area, Journal of Engineering Geology, 24(4), 535-550 (in Korean with English abstract).

Lee, C.H., Kim, J.H., 1972, The geological map of Goesan sheet, Geological Survey of Korea, 22p.

NIER (National Institute of Environmental Research), 1999, Study on the radionuclides concentrations in groundwater, KIGAM Report, 338p (in Korean with English abstract).

NIER (National Institute of Environmental Research), 2008, Study on the radionuclides concentrations in the groundwater (I), KIGAM Report, 293p (in Korean with English abstract).

NIER (National Institute of Environmental Research), 2012, Study on the naturally occurring radionuclides concentrations in groundwater of high potential area, KIGAM Report, 245p (in Korean with English abstract).

NRC (National Research Council), 1999, Risk assessment of radon in drinking water, National Academies Press, Washington DC, 296p.

Perrier, F., Richon, P., Sabroux, J.C., 2009, Temporal variations of radon concentration in the saturated soil of Alpine grassland: The role of groundwater flow, Science of The Total Environment, 407, 2361-2371.

Przylibski, T.A., Żebrowski, A., 1999, Origin of radon in medicinal waters of Lądek Zdrój (Sudety Mountains, SW Poland), Journal of Environmental Radioactivity, 46(1), 121-129.

Scheib, C., Appleton, J.D., Miles, J.C.H., Hodgkinson, E., 2013, Geological controls on radon potential in England, Proceedings of the Geologists' Association, 124(6), 910-928.

Skeppstrom, K., Olofsson, B., 2007, Uranium and radon in groundwater, European Water, 17/18, 51-62.

USEPA (United States Environmental Protection Agency), 1999, National primary drinking water regulations; radon-222 proposed rule, Federal Register, 64(211), FR 59246.