

# 전국 규모로 본 국내 지하수의 라돈 함량

조병욱\*

한국지질자원연구원 지하수연구센터, 책임연구원

## Radon Concentration in Groundwater of Korea

Byong-Wook Cho\*

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

### Abstract

Radon concentration was measured in a total of 5,453 groundwater samples from wells across Korea. The radon concentrations showed the values ranging from 0.1 Bq/L to 7,218.7 Bq/L, with a median of 48.8 Bq/L which is lower than those of other countries having similar geological conditions. The distribution of radon concentrations was lognormal. The median value is high in the granite areas (63.5-105.1 Bq/L) while it is low in the sedimentary rocks and Cheju volcanic area (16.0-20.3 Bq/L). When grouping the groundwater with well depth, the median radon value is high in weathering and/or upper bedrock zone (61.4 Bq/L) while it is low in alluvium and/or weathering zone (28.5 Bq/L). About 17.7% of the total samples exceeded 148 Bq/L of USEPA guideline value. The exceeding radon ratio more than 148 Bq/L in groundwater is highest in Jurassic granite area, however, the exceeding radon rates more than 300 Bq/L and 500 Bq/L are highest in CGRA area.

**Keywords:** Groundwater, radon, concentration, guideline value, Jurassic granite

### 초 록

국내 5,453개 지하수공에서 시료를 채취하고 라돈 함량을 분석하였다. 지하수의 라돈 함량은 0.1-7,218.7 Bq/L의 범위, 평균함량은 94.4 Bq/L, 중앙값은 48.8 Bq/L으로 비슷한 지질환경을 갖는 나라의 지하수의 라돈 함량에 비해서는 낮게 나타났다. 전체 지하수의 라돈 함량빈도 분포는 대수정규분포를 보였다. 10개 지질로 구분하면 지질별 지하수의 라돈 중앙값은 화강암에서 높고(63.5-105.1 Bq/L) 퇴적암과 제주화산암(PVOL)에서 낮았다(16.0-20.3 Bq/L). 심도별 지하수의 라돈 함량 중앙값은 풍화대 또는 기반암 상부 구간에서 61.4 Bq/L로 높았으며 충적층 구간에서는 28.5 Bq/L로 낮았다. 전체 지하수중 라돈 함량이 미국환경청(USEPA)의 제안치인 148 Bq/L를 넘는 비율은 17.7%이다. 지질별로 보아 지하수의 라돈 함량이 148 Bq/L를 초과하는 비율은 유라기화강암지역이 가장 높다. 그러나 지하수의 라돈 함량이 300 Bq/L, 500 Bq/L 이상인 비율은 백악기화강암(CGRA)지역이 가장 높다.

**주요어:** 지하수, 라돈, 함량, 제안치, 유라기화강암

### OPEN ACCESS

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

Received: 13 November, 2018

Revised: 7 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.

### 서론

라돈( $^{222}\text{Rn}$ )은 우라늄( $^{238}\text{U}$ ) 방사능계열에서 라듐( $^{226}\text{Ra}$ )의 방사능붕괴로 생기는 무색, 무취의 불활성 기체로 공기, 물, 암석으로부터 자연적으로 발생한다. 라돈은 붕괴하면서

(반감기는 약 3.82일) 알파입자를 발생시키기 때문에 일정 함량 이상의 라돈이 함유된 공기나 물을 장기간 흡입, 섭취 시 폐암과 위암 발생 가능성을 높인다(NRC, 1999; SSI, 1999). UNSCEAR(1988)에 의하면 라돈의 흡입에 의한 전체 노출에 대한 기여도는 50%로 보고되고 있다.

이와 같은 라돈의 인체 위해성 때문에 일부 나라에서는 일찍부터 지하수의 라돈 연구를 수행해 왔으며 그 결과에 따라서 제안치(기준치)를 설정하고 있다. 미국, 북유럽 등에서는 1960년대 말부터 전국적인 지하수 조사를 수행해 왔는데(NIER, 2012) 예를 들면 미국 전체 지하수에 대한 라돈 함량조사(USGS, 2011)를 들 수 있다. 1980년 말부터는 세계 각국에서 지하수의 라돈 함량에 대한 조사, 연구가 이루어지고 있는데 대표적인 나라로는 사우디아라비아, 폴란드, 루마니아, 대만 등이 있다. 그러나 각 나라의 전체 조사 시료수와 지하수의 라돈 함량에 대해서는 정확히 알려지지 않고 있다(Pinti et al., 2014). 국부적으로 조사된 결과로 조사 시료수를 추정하면 미국의 경우 2004년 현재 200,000개 이상, 스웨덴은 2002년 현재 110,000개 이상, 핀란드는 2001년 현재 25,000개 이상으로 알려져 있다(NIER, 2012). 최근까지 수행된 연구 결과에 따르면 지하수의 라돈 함량은 지질에 직접적인 영향을 받는 것으로 나타났는데 라돈의 함량이 높은 지질은 대부분 화강암, 화강편마암이며 화산암, 퇴적암지역 지하수의 라돈 함량은 낮은 것으로 알려져 있다(Loomis, 1987; King et al., 1982). 지금까지 보고된 지하수의 라돈 함량 최고치는 77,500 Bq/L이며(Salonen, 1994), 전세계 지하수의 라돈 평균함량은 183 Bq/L로 알려져 있다(NCRP, 1984).

국내 지하수의 라돈 함량에 대한 체계적인 조사는 대전지역 일부 지하수의 자연방사성물질 함량이 외국의 음용기준치를 초과한다는 보도가 나온 후인 1999년부터 이루어졌다. 1999년부터 4년 동안 전국 615개 지하수에 대한 라돈함량 실태조사 결과 최대치는 1,480 Bq/L, 평균과 중앙값은 각각 68.9 Bq/L, 34.0 Bq/L이고, 지하수의 라돈 함량은 화강암지역 지하수에서 높은 것으로 알려졌다(Cho et al., 2007). 그러나 615개 지하수의 라돈 함량 조사 결과로 남한 전체 지하수의 라돈 함량을 해석하기에는 무리가 있어서 환경부에 의해 ‘3차 지하수 중 자연방사성물질 함량실태 조사계획’이 수립되었다. 이에 따라 2008년부터 전국적인 실태조사와 함께 지하수의 라돈 함량이 높을 것으로 예상되는 화강암 분포 면적의 비율이 높은 시군을 대상으로 한 정밀조사도 수행되고 있다. 한편 Yun et al.(2016)은 국내 1,051개 지하수의 라돈함량 분석 자료를 이용하여 라돈함량은 최대 2,393.2 Bq/l, 평균과 중앙값은 각각 181.5 Bq/L, 156.9 Bq/l로 보고하였다. 특정지역을 대상으로 한 조사로는 부산지역 439개 지하수에 대한 라돈 함량조사(Cho et al., 2004)가 있다.

지하수의 라돈은 자연발생적이며 일정 함량 이상의 지하수를 장기간 음용시에만 위암 발생 가능성을 높인다는 사실에도 불구하고 최근 국내에서는 침대 등 일반 생활용품에서 라돈을 발생시키는 광물이 사용되었다는 보도 이후 실내공기와 지하수의 라돈에 대한 과도한 불안감을 가지고 있다. 본 연구의 목적은 지금까지 분석된 5,453개 지하수의 라돈함량 자료를 이용하여 국내 지하수의 라돈 함량 분포, 지질별, 심도별 지하수의 라돈 함량 정도를 파악하고 이를 외국 지하수의 라돈 함량과 비교, 분석함에 그 목적이 있다.

## 연구방법

### 지질 분류

우리나라의 지질은 복잡한 편이고 전체의 절반 이상이 화강암, 화강편마암 등의 결정질암으로 구성되어 있지만 연구 목적에 따라 여러 가지로 분류될 수 있다. 지하수의 산출과 관련하여 우리나라 지질을 분류한 것으로는 전국을 8개의 수문지질단위로 구분한 것이 있다(KWRC, 1993). 본 연구에서의 지질분류는 모암과 지하수의 라돈함량과의 관계를 고려하여 3개 퇴적암, 2개 변성암, 3개 화강암, 2개 화산암의 10개로 구분하였다. 5,453개 지하수의 지질분류는 현

장에서 측정한 좌표를 1:1,000,000 수치지질도에 중첩시켜 이루어졌다.

3개 퇴적암은 사암, 규암, 셰일, 석회암 등으로 이루어진 고생대퇴적암(PSED), 사암, 셰일, 역암 등으로 구성된 중생대퇴적암(MSED), 미고결의 사암, 셰일, 역암, 이암이 존재하는 신생대퇴적암(CSED)이다. 변성암은 화강편마암, 편마암, 편암 등으로 구성된 선캄브리아기 변성암(PMET), 천매암, 편암, 석회암, 점판암 등 시대 미상의 변성퇴적암류로 구성된 옥천대변성암(OMET)이다. 화강암은 흑운모화강암, 복운모화강암, 화강편마암 등으로 구성된 선캄브리아기 화강암(PGRA), 지각 하부 물질의 부분용융으로부터 유래된 소위 S 타입의 흑운모화강암, 각섬석화강암 등으로 구성된 쥐라기화강암(JGRA), 맨틀기원인 소위 I 타입의 흑운모화강암과 일부 반력암, 섬록암, 암맥이 존재하는 백악기 화강암(CGRA)이다. 소규모로 나타나는 트라이아스기 화강암은 쥐라기화강암에, 신생대 화강암은 백악기화강암에 포함시켰다. 화산암은 주로 제4기 현무암으로 구성되며 지하수의 순환이 빠른 제주도의 다공질화산암(PVOL)과 백악기의 안산암, 유문암, 용결응회암, 퇴적암으로 구성되는 유천층군의 비다공질화산암(NVOL)으로 구분하였다(Fig. 1).

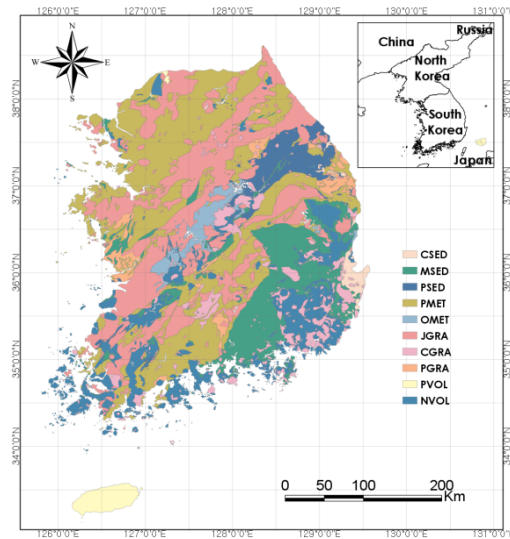


Fig. 1. Location map and simplified geological map of the area.

### 시료채취 및 분석

5,453개 시료는 1998년부터 2016년까지 채취되었으며 가능하면 일정 거리를 유지하여 시료의 대표성, 연속성 등을 확보하려고 하였으나 지하수공의 분포는 균등하지는 않다. 즉, 대도시지역을 제외한 인구밀집 정도가 높은 저지대는 시료 분포 밀도가 높고 인구밀집 정도가 낮은 산악지대는 낮다. 5,453개 지하수를 용도별로 분류하면 소규모수도시설이 3,821개로 전체의 대부분을 차지하며 음용수로 이용되는 생활용수는 910개, 일반 생활용수는 325개, 농업용수는 390개, 기타 7개였다(Fig. 2). 전체 지하수공 중에서 심도가 알려진 4,822개의 평균 심도는 106.4 m이다.

현장에서의 라돈 분석용 시료 채취는 가능하면 지하수공에서 직접 이루어졌다. 즉, 지하수공에 설치된 펌프를 5-10분 가량 가동시켜 지하수공 내에 저장된 지하수량의 3-5배 이상을 배출시켜 지하 대수층의 수질을 대변함을 확인하였다(Barcelona et al., 1985). 그리고 지하수공의 토출관에 연결된 밸브에 호스를 연결하여 기포가 생기지 않도록 비이커에 지하수를 받은 다음 시료 8 ml를 채취하여 섬광용액(Optiphase HiSafe3)이 들어 있는 22 ml vial에 주입하였다. vial에는 12 ml의 섬광용액이 들어 있으며 8 ml의 지하수를 주입한 후에는 vial의 마개를 밀봉한 후 일정 시간 흔들어서 섬

광용액과 지하수가 골고루 섞이도록 하였다. 22 ml vial 표면에는 시료 채취시점과 실내 분석시점과의 시간 보정을 위하여 시료채취 시간을 기재하였다. 채취된 시료들은 가급적 48시간 내에 실험실로 운반하여 파형분석(Pulse shape analysis: PSA) 기능을 가진 액체섬광계수기(Quantulus 1220TM, Perkin-Elmer Co.)를 이용하여 최적 분석조건을 확립한 다음 분석하였다. PSA 준위 100에서 300분간 계측했을 때 검출 하한치는 약 0.12 Bq/L이다.

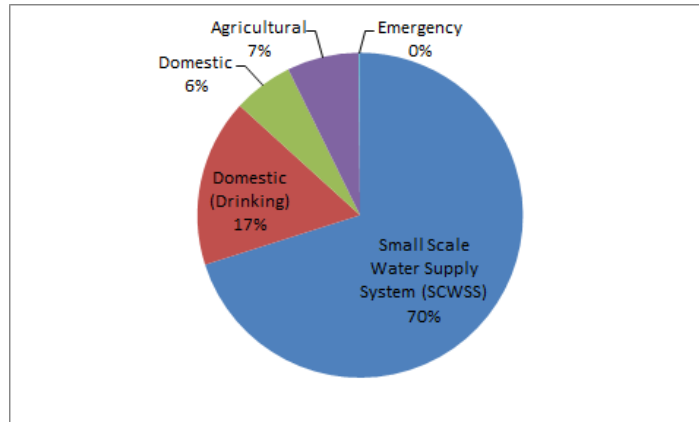


Fig. 2. The percentage of wells falling into different water use class.

## 결과 및 고찰

### 전체 지하수의 라돈 함량

5,453개 지하수의 라돈 함량은 0.1-7,218.7 Bq/L의 범위를 보였으며 평균함량은 94.4 Bq/L, 중앙값은 48.8 Bq/L이었다(Table 1). 5,453개 지하수의 라돈 함량빈도 분포(Fig. 3)는 지하수의 라돈 조사에서 전형적으로 나타나는 낮은 농도로 치우친 대수정규분포를 보인다. 5,453개 지하수중 최고 함량은 7,218.7 Bq/L이나 1,000 Bq/L 이상은 14개, 2,000

Table 1. Statistical analysis of the radon concentrations in the groundwater with respect to each geology.

Geology	Samples	Min.	Max.	Ave.	Med.	Stdev.
CSED	44	1.2	520.0	29.9	16.3	77.2
MSED	713	0.1	624.6	28.4	20.3	37.2
PSED	213	0.4	439.0	28.0	16.7	42.1
PRMET	1,497	0.1	2,393.5	94.7	52.5	135.0
OMET	305	0.9	865.8	68.3	40.7	107.1
CGRA	501	0.1	7,218.7	141.4	63.5	372.7
JGRA	1,539	0.1	1,635.9	143.0	105.1	140.0
PRGRA	104	0.4	499.1	95.6	65.3	94.8
PVOL	60	0.1	94.8	19.3	16.0	17.9
NVOL	477	0.3	1,081.2	46.9	26.1	73.4
Total	5,453	0.1	7,218.7	94.4	48.8	163.7

CSED: Cenozoic sedim. rocks, MSED: Masozoic sedim. rocks, PSED: Paleozoic sedim. rocks. PRMET: Precambrian metarm. rocks, OMET: Ogcheon metarm. rocks, CGRA; Cretaceous gr, JGRA: Jurassic gr, PRGRA: Precambrian gr, PVOL: Porous volcanic rocks, NVOL: Non porous volcanic rocks

Bq/L 이상은 2개에 불과하다. Table 1의 산술평균과 표준편차를 고려하면 대부분의 지하수는 0.1-300 Bq/L 범위 내에 위치한다. 이 값은 과거 전국 615개 지하수의 라돈 함량 평균값인 68.9 Bq/L, 중앙값 34.0 Bq/L (Cho et al., 2007)보다 높으며 전국 지하수 4,853개 지하수의 라돈함량(평균값 97.5 Bq/L, 중앙값 52.1 Bq/L) (NIER, 2016)과 비슷하다. 그러나 전국 1,051개 지하수의 라돈 평균값 181.5 Bq/L, 중앙값 156.9 Bq/L보다는(Yun et al., 2016) 낮은데 이는 1,051개 지하수는 라돈 함량이 높은 지역을 대상으로 조사한 결과를 바탕으로 한 연구이기 때문이다.

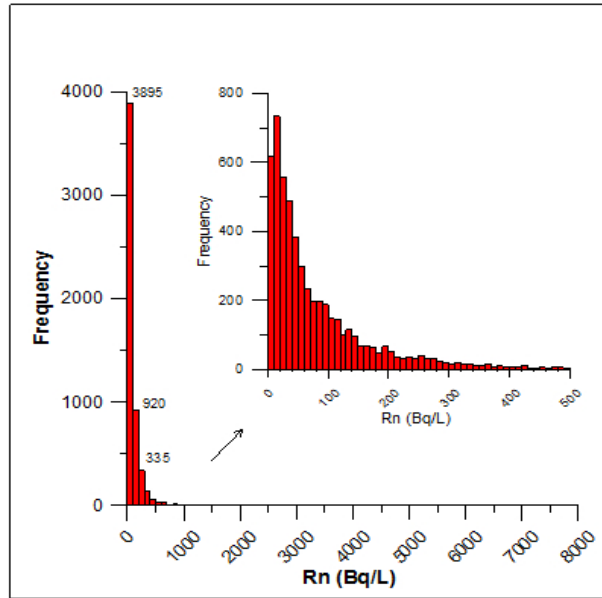


Fig. 3. Distribution diagrams of radon concentration in the groundwaters of the area.

국내 지하수의 라돈함량 최고치인 7,218.7 Bq/L와 평균함량은 94.4 Bq/L는 전세계 지하수의 라돈 함량 최고치인 77,500 Bq/L (Salonen, 1994)와 평균함량인 183 Bq/L (NCRP, 1984)에 비해서는 낮은 편이다. 일부 외국 지하수에서 검출된 라돈 함량 최고치는 스웨덴의 57,000 Bq/L (Morland et al., 1997), 노르웨이의 31,900 Bq/L (Banks et al., 1998), 미국의 59,200 Bq/L (Grave, 1989) 등으로(Table 2) 라돈 함량 최고치가 검출된 지질은 모두 화강암이다. 그러나 국내에서도 계속 조사를 수행하면 7,218.7 Bq/L보다 더 높은 라돈함량도 검출될 수 있을 것으로 예상된다. 한편 2016년 현재 국내 지하수의 라돈함량 조사 지점수는 5,453개로 외국의 조사 지점 수에 비해서는 아직 부족한 편이다.

Table 2. The sample numbers for radon analysis and the maximum radon values of other countries

Country	Sample	Rn (Bq/L)	
		Max.	Geo.
Korea	5,453 (2016)	7,218.7	Gr
Finland	25,000< (2001)	77,500 <sup>1)</sup>	Gr
Norway	4,000< (2001)	31,900 <sup>2)</sup>	Gr
Sweden	110,000< (2007)	57,000 <sup>3)</sup>	Gr
USA	200,000< (2007)	59,200 <sup>4)</sup>	Gr

1) Salonen and Hukkanen (1997), 2) Banks et al. (1998), 3) Akerblom and Lindgren (1997), 4) Grave (1989)

외국의 지역별 지하수의 라돈 함량에 대한 연구는 많으나 각 나라 전체 지하수의 라돈 함량에 대한 연구 결과는 잘 알려져 있지 않다(Pinti et al., 2014). 그러나 국내 지하수의 라돈 함량을 알려진 외국의 라돈 함량과 비교하면 Table 3 과 같다. 전반적으로 보아서 화강암과 편마암의 분포비율이 국내와 비슷하거나 높은 핀란드(평균 590 Bq/L) (Voutilainen, 2000), 노르웨이(평균 700 Bq/l) (Banks et al., 1998), 폴란드(Sudety Mountains) (평균 240.0 Bq/L) (Przylibski and Gorecka, 2014) 지하수의 라돈 함량은 국내 지하수보다 더 높고 국내보다 화강암과 편마암의 비율이 낮은 미국(중앙값 15.9 Bq/L) (USGS, 2011), 루마니아(Transylvania 지역) (10.4 Bq/L) (Cosma et al., 2008), 주로 퇴적암으로 이루어진 사우디아라비아(중앙값 4.5 Bq/L) (Althoyaib and El Taher, 2015)와 타이완(중앙값 2.2 Bq/L) (Han et al., 2004)은 더 낮다(Table 3). 한편 국내와 지질분포가 비슷한 브라질 지하수의 라돈 중앙값은 57.7 Bq/L (Goddy and Goddy, 2006)이다.

**Table 3.** Concentration ranges of radon in groundwater from various locations

Location	No. of samples	Range (Bq/L)	Mean (Bq/l)	Lithology	Reference
Brazil	205	<1.2-3,542	57.7 (geom.)	No dominant	Goddy and Goddy, 2006
Finland	6,600	-	590.0	Crystalline bedrock	Voutilainen et al., 2000
Norway	1,326	10-19,900	700.0	Crystalline bedrock	Banks et al., 1998b
Poland (Sudety Mountains)	1,000	0.2-1,645	240.0	Gneiss, schist, granite	Przylibski et al., 2014
Romania (Transylvania)	1,324	0.6-112.6	10.4 (med)	Metamorphic, sedimentary rocks	Cosma et al., 2008
Saudi Arabia	1,025	0.01-67.4	4.5	Sedimentary rocks	Althoyaib and El Taher, 2015
Taiwan	512	0.67-40.7	2.2 (med.)	Sedimentary rocks	Han et al., 2004
USA	3,877	?-8,139.1	15.9 (med.)	No dominant	USGS, 2011

### 지질별 지하수의 라돈 함량

지하수의 라돈 함량 정도는 지질과 밀접한 관계가 있다. 10개의 지질로 구분된 국내 전체 지하수의 라돈 함량에 대한 간단한 통계는 Table 1과 같다. 지질별 지하수의 라돈 중앙값은 화강암인 JGRA (105.1 Bq/L), PRGRA (65.3 Bq/L), CGRA (63.5 Bq/L) 순으로 높고 변성암인 PRMET와 OMET는 각각 52.5 Bq/L, 40.7 Bq/L이다. 한편 지하수의 유동이 활발한 제주화산암과(PVOL), 미고결퇴적층이 존재하는 신생대퇴적층, 석회암이 존재하는 고생대퇴적암지역 지하수의 라돈 함량 중앙값은 16.0-16.7 Bq/L로 가장 낮다. 10개 지질별 지하수의 라돈함량 차이는 일반적으로 퇴적암지역 지하수에서 라돈 함량이 낮고 화강암지역 지하수에서 높다는 연구결과와 일치한다(Loomis, 1987; King et al., 1982). Fig. 4는 5,453개 지하수의 라돈 농도를 5개의 계급으로 표시한 것이다. 서울, 인천을 비롯한 일부 대도시지역과 산악 지역에는 자료가 부족하지만 Fig. 1의 지질과 비교하면 지하수의 라돈 함량이 높은 지질은 화강암지역(JGRA, PRGRA, CGRA)과 PRMET지역이다.

Table 1에서 보는 바와 같이 화강암과 변성암지역 지하수의 라돈 함량에 큰 차이가 없는 것은 라돈은 지하수에 잘 용해되지만 반감기가 3.82일에 불과하여 짧은 거리밖에 이동하지 못하고 지하수내 라돈이 보다 쉽게 대기로 빠져나가기 때문에 판단된다. 또한 화강암의 경우 관입암이기 때문에 지표지질 상으로 보면 퇴적, 변성암으로 분류되지만 지하

심부로 내려갈수록 화강암으로 바뀌는 경우가 있기 때문이다(NIER, 2016). Table 1에서 화강암지역 지하수의 라돈 함량은 실제 함량보다 낮게 표시되었으며, 변성암지역 지하수의 라돈 함량은 실제 함량보다 높게 표시되었을 가능성이 크다. 따라서 지하수의 라돈 함량 해석을 위한 지질분류 시 화강암으로부터 일정거리(예를 들면 500 m) 내의 지역의 지질은 화강암에 포함시키는 방안 등을 고려해야 할 것이다.

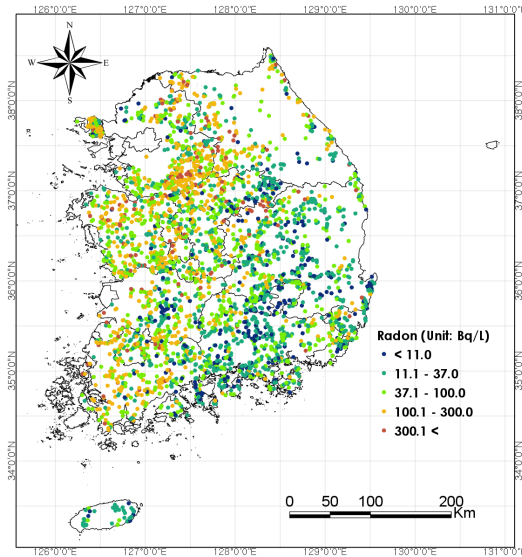


Fig. 4. Spatial distribution of groundwater radon levels on a simplified geological map of the area.

국내 화강암 중에서 JGRA 지역과 CGRA, PGRA 지역 지하수의 라돈 함량이 차이가 나는 것은 일차적으로 화강암의 기원에 기인하는 것으로 해석된다. 즉, JGRA는 지각물질 및 퇴적물질의 혼합에 기원하는 소위 S type의 화강암으로서 마그마의 분화작용에 의해 형성된 I-type의 PGRA, CGRA보다 암석내 우라늄 함량이 높은 것으로 알려져 있다(Hwang, 2013). 따라서 지하수의 우라늄 함량도 JGRA 지역 지하수에서 가장 높으며 이에 따라 라돈의 기원인 Ra-226의 함량도 JGRA 지역에서 높기 때문에 지하수의 라돈 함량도 JGRA 지역에서 높은 것으로 해석된다. 한편 JGRA 지역에는 복운모화강암이 다수 분포하는데 복운모화강암지역 지하수의 우라늄, 라돈 함량은 흑운모화강암 등에 비해서 높다고 보고되고 있기 때문에(Hwang, 2013) JGRA 지역 지하수의 라돈 함량 해석에 있어서 복운모화강암지역과 비복운모화강암지역으로 구분할 필요성이 있다.

국내 화강암지역 지하수의 라돈 함량을 외국의 화강암지역 지하수와 비교하면 대체로 낮은 편이다. 이러한 이유는 지하수공의 케이싱이나 그라우팅의 부실로 인해서 천부 지하수의 공내 유입 가능성이 크기 때문으로 볼 수 있다(Shin et al., 2016). 국내 지질별 지하수의 라돈 함량 중앙값은 JGRA 지역 지하수에서 105.1 Bq/L로 가장 높지만 외국 화강암 지역 지하수의 라돈 함량에 비해서는 낮다. 즉, 미국 Maine 화강암지역 지하수의 평균 함량 814.0 Bq/L (Hess et al., 1985), 스웨덴 화강암지역 지하수의 평균함량 905.0 Bq/L (Salonen and Hukkanen, 1997), 노르웨이 화강암지역 지하수의 평균함량 700 Bq/L (Banks et al., 1998), 핀란드 화강암지역 지하수의 평균함량 590.0 Bq/L (Voutilainen, 2000) 등보다는 낮다.

### 심도별 지하수의 라돈 함량

일반적으로는 지하에서 생성된 라돈 가스는 암반내 균열이나 지하수를 통하여 지표로 상승하기 때문에 지하 심부 보다는 지표에 가까이 올수록 함량이 증가한다. 지하수의 산출심도별 라돈 함량을 파악하기 위하여 전체 5,453개 지하수공중에서 심도가 알려진 4,823개 지하수공의 심도를 15 m 이하(충적층+풍화대), 15.1-30.0 m(풍화대+암반층), 30.1-50.0 m(암반층), 50.1 m 이상(암반층)으로 구분하였다. 물론 지하수공의 심도가 깊다고 해서 산출되는 지하수는 지하 심부에서만 산출되는 것은 아니나 심도가 얕은 지하수보다는 보다 심부의 지하수가 산출될 가능성은 커진다. 또한 심도가 깊은 지하수공이라고 하더라도 케이싱이나 그라우팅 등의 기능이 약하면 천부지하수의 공내 유입을 차단하는 효과가 적어져서 라돈 농도가 희석되어(Prasad et al., 2009) 심부 지하수의 라돈 함량을 대변하지 못하는 문제가 있다.

위와 같은 문제점이 있음에도 불구하고 4,823개 지하수를 심도별로 4개 그룹으로 분류하여 라돈 함량을 정리한 결과는 Table 4와 같다. 지하수공의 심도별 라돈 함량이 가장 높은 구간은 풍화대 또는 기반암 상부 구간인 심도 15.1-30.0 m(중앙값이 61.40 Bq/L)이고 다음으로는 암반층 중에서도 얕은 심도인 30.1-50.0 m의 53.2 Bq/L이며 가장 낮은 구간은 충적층 또는 풍화대 구간인 심도 15 m 이하인 28.5 Bq/L이다. 심도 15 m 이하 구간 지하수의 라돈함량이 가장 낮은 이유는 다른 심도 구간에 비해서 공극률이 크며 지하수의 이동이 활발하기 때문으로 해석된다(Morland et al., 1997). 이와 같은 심도별 지하수의 라돈 함량분포는 충적층 또는 풍화대 구간을 제외한 암반내 지하수의 라돈 함량은 균열의 발달과 관계가 있으며 대체로 심도가 깊을수록 라돈 농도가 감소한다는 사실과 일치한다(Cook, 1999). 본 연구의 4,823개 지하수의 산출 구간별 라돈 함량은 국내 615개 지하수의 대수층별 지하수의 라돈함량(Cho et al., 2007), 괴산지역 247개 지하수의 심도별 라돈함량 결과와도 일치한다(Cho, 2017).

**Table 4.** Statistical analysis of the radon concentrations in the groundwater with well depth

	15 m>	15.1-30 m	30.1-50 m	50.1 m<
N	142	271	206	4,204
Min.	0.37	0.90	0.10	0.09
Max.	1,480.4	928.4	1,086.0	7,218.7
Mean	64.0	104.1	118.2	94.0
Med.	28.5	61.4	53.2	48.5
Stdev.	152.6	134.3	170.13	170.4

### 제안치 초과율과 초과 지하수의 관리

외국 여러 나라에서는 라돈의 인체 위해성 때문에 음용수의 라돈함량 제안치(기준치)를 가지고 있는 경우가 많은데 각 나라의 제안치(기준치)는 대체로 그 나라 지하수의 함량 정도에 따라서 결정되는 경향이 있다(NIER, 2016). 예를 들어 국내보다 결정질암의 비율이 높고 따라서 지하수의 라돈 함량이 높은 노르웨이와 핀란드의 음용수의 라돈함량 제안치는 각각 500 Bq/L, 300 Bq/L이나(SSl, 1999), 지하수의 라돈 함량이 낮은 편인 호주는 100 Bq/L이고(NHMRC, 2015), 미국의 경우는 대체허용농도(Alternative maximum contaminant level)로서 148 Bq/L이며(USEPA, 1999), WHO는 2008년 제안치로서 100 Bq/L를 설정했으나(WHO, 2008) 2011년에 폐기하였다(Table 5). 아직까지 국내 음용수의 라돈에 대한 제안치는 없으나 최근 USEPA의 제안치인 148 Bq/L을 감시항목 기준으로 제안할 가능성이 크다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 국내 지하수의 라돈 함량 빈도분포는 대부분의 지하수가 라돈 함량이 낮은 쪽으로 치우쳐



있다. 따라서 국내 지하수의 라돈 함량은 평균이 94.4 Bq/L이지만 중앙값은 48.8 Bq/L로 낮으며 전체 지하수의 라돈 함량이 100 Bq/L를 넘는 비율은 28.5%이며 USEPA의 제안치인 148 Bq/L를 넘는 비율은 17.7%로 줄어든다. 한편 핀란드의 제안치인 300 Bq/L를 넘는 비율은 5.6%이고 노르웨이의 제안치(actional level)인 500 Bq/L를 넘는 비율은 2.0%이다(Table 6).

**Table 5.** International radon guidance levels (Bq/L) for drinking water

Australia <sup>1)</sup>	EURATOM <sup>2)</sup>	USA <sup>3)</sup>	Finland <sup>4)</sup>	Norway <sup>4)</sup>	WHO <sup>5)</sup>
100	100-1,000	148 <sup>a</sup>	300 <sup>a</sup>	500	100

1) NHMRC (2015), 2) EURATOM (2013), 3) USEPA (1999), 4) SSI, 5) WHO (2008)

<sup>a</sup>alternative maximum contaminant level (AMCL)

**Table 6.** Distribution of the radon concentrations in the groundwater from each geology

Geology	Samples	11.1Bq/L>	11.2-50.0 Bq/L	50.1-148.0 Bq/L	148.1-300.0 Bq/L<	300.1-500.0 Bq/L	500.1 Bq/L<
CSGD	44	14	27	2	0	0	1
MSED	713	177	449	81	4	1	1
PSED	213	61	128	21	2	1	0
PRMET	1,497	118	603	515	188	46	27
OMET	305	37	142	100	16	5	5
CGRA	501	46	162	185	56	24	28
JGRA	1,539	70	311	639	365	111	43
PRGRA	104	11	30	43	14	6	0
PVOL	60	18	38	4	0	0	0
NVOL	477	108	229	118	18	2	2
Total	5,453	660	2,119	1,708	633	196	107

전체 지하수의 라돈함량이 148 Bq/L를 초과하는 비율은 17.7%이지만 지질별로 구분하면 차이가 크다. 지하수의 라돈 함량이 148 Bq/L를 초과하는 비율이 가장 높은 지질은 JGRA지역의 33.7%이고 다음으로는 CGRA와 PRGRA지역 지하수의 21.6%, 19.2%이다. 변성암인 PRMET과 OMET지역 지하수의 라돈 함량이 148 Bq/L를 초과하는 비율은 각각 17.4%, 8.5%이다. NVOL지역의 초과율은 4.6%이고 3개 퇴적암지역의 초과율은 0.8-2.3%이며 제주도화산암 (PVOL)지역 지하수 중 라돈 함량이 148 Bq/L를 초과하는 지하수는 없었다. 한편 핀란드 음용수 기준치인 300 Bq/L를 초과하는 비율은 CGRA지역 지하수에서 가장 높아 10.4%이고 다음으로는 JGRA지역의 10.0%, PRGRA지역의 5.8%이다. 변성암인 PRMET와 OMET지역 지하수의 300 Bq/L 초과율은 각각 4.9%, 3.3%이다. 노르웨이의 제안치 (actional level)인 500 Bq/L를 초과하는 비율은 CGRA지역 지하수가 5.6%로 JGRA 지역(2.8%)의 2배가 넘는다. PRMET와 OMET지역의 500 Bq/L 초과율은 각각 1.8, 1.6%이다. 한편 1,000 Bq/L를 넘는 지하수는 14개인데 이중 6개가 CGRA지역에 위치한다. 지질별 지하수의 라돈의 함량은 JGRA 지역 지하수에서 높으며 이는 일차적으로 지하수 내 우라늄 함량이 높은 것으로 설명이 되지만 고함량 라돈 지하수만을 보면 CGRA지역 지하수가 더 높는데 이에 대해서는 추가 연구가 필요하다.

외국의 음용 지하수 중 라돈의 관리는 주로 공공급수시설을 대상으로 하고 있으며 개인 지하수의 고함량 라돈에 대

해서는 개인이 저감 후 사용토록 권고하고 있다. 현재 국내에는 지하수를 원수로 이용하는 소규모수도시설이 약 15,000개가 있다. 소규모수도시설은 취수정에서 각 가정의 꼭지수로 이동하는 과정 중에 저수조에서의 정치, 폭기 효과 때문에 약 26.5%의 자연저감이 발생한다고 보고되고 있다(Yun, 2017). 만일 26.5%의 자연저감율을 소규모수도시설에 적용하면 꼭지수에서의 라돈 함량이 148 Bq/L를 초과하는 비율은 17.7%에서 13.2%로 낮아지기 때문에 148 Bq/L를 약간 상회하는 소규모수도시설에서는 저수조에 폭기시설 설치 등으로 라돈을 저감시키기보다는 저수조에서의 정치 등에 의한 자연적인 라돈 저감효과를 적극적으로 이용할 필요가 있다. 148 Bq/L를 크게 초과하는 소규모수도시설에 대해서는 초과 정도와 급수 인구에 따라서 폭기, 활성탄 등의 방법으로 저감 후 이용하는 방안을 수립해야 할 것으로 판단된다. 일반 개인 지하수의 라돈 함량이 높은 경우에는 함량정도에 따라서 끓인 후 음용, 활성탄 이용, 저수조나 일정 시간 경과 후 이용 등의 방안을 수립할 필요가 있다.

## 결론

5,453개 지하수의 라돈 함량을 분석하여 국내 지하수의 함량 특성을 파악하였다. 전체 지하수의 라돈 함량빈도 분포는 대수정규분포를 보였으며 평균함량은 94.4 Bq/L, 중앙값은 48.8 Bq/L으로 국내와 비슷한 지질분포를 갖는 나라에 비해서 낮은 편이다. 국내 지질을 10개로 나누었을 때 퇴적암과 제주도화산암지역에서 낮으며, 화강암, 특히 주라기화강암지역에서 높다. 그러나 주라기화강암지역 지하수의 라돈 함량은 외국 화강암지역 지하수의 라돈 함량에 비해서 낮다. 심도가 알려진 지하수공을 4개 심도 구간으로 나누었을 때 라돈 함량이 가장 높은 구간은 풍화대 또는 기반암 상부 구간이고 가장 낮은 구간은 충적층 또는 풍화대 구간으로 나타났다. 전체 지하수의 라돈 함량이 USEPA의 제안치인 148 Bq/L를 넘는 비율은 17.7%이고 10개 지질 중 초과율이 높은 지질은 화강암지역이고 낮은 지역은 퇴적암이며 제주도화산암지역은 초과하는 지하수가 없었다. 148 Bq/L를 초과하는 비율은 주라기화강암지역이 가장 높았으나 300 Bq/L, 500 Bq/L 이상인 고함량 지하수의 비율은 CGRA 지역에서 월등히 높아서 이에 대한 연구가 필요하다. 소규모수도시설 중 지하수의 라돈 함량이 제안치를 넘는 경우 라돈함량 정도와 지하수 사용량 등에 따라서 자연저감, 폭기 등으로 라돈 함량을 저감시켜야 한다. 국내의 지질의 복잡성과 면적, 인구를 고려할 때 외국에 비해서 아직까지 라돈분석 시료가 부족하기 때문에 일부 대도시지역과 산악지역을 중심으로 한 추가조사가 필요하다.

## 사사

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

## References

- Akerblom, G. and Lindgren, J., 1997, Mapping of groundwater radon potential, *European Geologist*, 5, 13-22.
- Althoyaib, S. S., El-Taher, A., 2015, Natural radioactivity measurements in groundwater from Al-Jawa, Saudi Arabia, *Journal of Radioanalytical Nuclear Chemistry*, 304, 547-552.
- 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 1,604 crystalline bedrock groundwaters, *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., 2017, 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., Sung, I. H., Cho, S. Y., Park, S. K., 2007, A preliminary investigation of radon concentrations in groundwater of South Korea, *Journal of the Korean Society of Groundwater Environment*, 12(4), 98-104 (in Korean with English abstract).
- Cho, J. S., Ahn, J. K., Jim, H. Ch., Lee, D. W., 2004, Radon concentrations in groundwater in Busan measured with a liquid scintillation counter method, *Journal of Environmental Radioactivity* 78, 105-112.
- Cook, P. G., Love, A. J. and Dighton, J. C., 1999, Inferring groundwater flow in fractured rock from dissolved radon, *Ground Water*, 37(4), 606-610.
- Cosma, C., Moldovan, M., Dicu, T. and Kovacs, T., 2008, Radon in water from Transylvania (Romania), *Radiation Measurements*, 43, 1423-1428.
- EURATOM (European Atomic Energy Community), 2013, Council Directive 2013/51/EURATOM of 22 October 2013 Laying Down Requirements for the Protection of the Health of the General Public with Regard to Radioactive Substances in Water Intended for Human Consumption.
- Godoy, J. M. and Godoy, M. L., 2006, Natural radioactivity in Brazilian groundwater, *Journal of Environmental Radioactivity*, 85, 71-83.
- Graves, B., 1989, Radon, radium, and other radioactivity in ground water, Lewis Publishers Inc., Chelsea.
- Han, Y. L., Tom Kuo, M. C., Fan, K. C., Chiang, C. J., and Lee, Y. P., 2004, Radon distribution in groundwater of Taiwan, *Hydrogeology Journal*, 2006, 14, 173-179.
- Hess, C. T., Michel, T. R., Horton, T. R., Orichard, H. M., and Coniglo, W. A., 1985, The occurrence of radiocativity in public water supplies in the United States, *Health Physics*, 48(5), 553-586.
- 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).
- King, P. T., Michel, J., and Moore, W. S., 1982, Ground water geochemistry of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{220}\text{Rn}$ , *Geochimica et Cosmochemica Acta*, 46, 1173-1182.
- KWRC (Korea Water Resources Corporation), 1993, Groundwater resources of Korea, KWRC-93-GR-1, 342p.
- Loomis, D. P., 1987, Radon-222 concentration and aquifer lithology in North Carolina, *Ground Water Monitoring Review*, 7(2), 33-39.
- 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, Th, U, Th, Na, Ca) in samples from Vestfold and Hordaland, Norway, *NGU Bull*, 432, 103-117.
- NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements), 1984, Exposures from the uranium series with emphasis on radon and its daughters, NCRP report no. 77.
- NHMRC (National Health and Medical Research Council), 2015, Australian Drinking Water Guidelines 6, Version 3.1
- NIER (National Institute of Environmental Research), 2012, Study on the naturally occurring radionuclides in groundwater of Korea (12), KIGAM, 245p (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.

- Pinti, D. L., Retailleau, S., Barnetche, D., Moreira, F., Mortiz, A. M., Larocque, M., Gelin, Y., Lefebvre, R., Helie, J. F., Valadez, A., 2014,  $^{222}\text{Rn}$  activity in groundwater of the St. Lawrence Lowlands, Quebec, eastern Canada: relation with local geology and health hazard, *Journal of Environmental Radioactivity*, 136, 206-217.
- Prasad, Y., Prasad, G., Choubey, V. M. and Ramola, R. C., 2009, Geohydrological control on radon availability in groundwater, *Radiation Measurements*, 44, 122-126.
- Przylibski, T. A. and Gorecka, J., 2014,  $^{222}\text{Rn}$  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.
- 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, *Journal of Radioanalytical Nuclear Chemistry*, 226(1), 67-74.
- Salonen, L., 1994,  $^{238}\text{U}$  series radionuclides as a source of increased radioactivity in ground water originating from Finnish bedrock, In *Proceedings of IAHS Helsinki Conference, "Future Groundwater Resources at Risk,"* International association of hydrologists scientific publication, 222, 71-84.
- Shin, W. S., Oh J. S., Choung, S. W., Cho, B. W., Lee K. S., Yun, U., Woo, N. C. and Kim, H. K., 2016, Distribution and potential health risk of groundwater uranium in Korea, *Chemosphere*, 163, 108-115.
- SSI (Swedish Radiation Protection Institute), 1999, Radon legislation and national guidelines.
- UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), 1988, Sources, effects and risks of ionizing radiation, Report to the General Assembly, United Nations, New York, 24-79.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency), 1999, National primary drinking water regulations; radon-222 proposed rule, *Federal Register*, 64(211), FR 59246.
- USGS (United States Geological Survey), 2011, Trace elements and radon in groundwater across the United States, 1992-2003, National water-quality assessment program, U.S. Geological Survey, scientific investigations report 2011-5059, 115p.
- Voutilainen, A., Mäkeläinen, I., Huikuri, P., Salonen, L., 2000, Radon atlas of wells drilled into bedrock in Finland, STUK-A171, Helsinki: Säteilyturvakeskus.
- WHO (World Health Organization), 2008, Guidelines for drinking-water quality 3rd edition, Vol. 1 Recommendations, Geneva.
- Yun, U., Kim, T. S., Kim, H. K., Kim M. S., Cho, S. Y., Choo, C. O. and Cho, B. W., 2017, Natural radon reduction rate of the community groundwater system in South Korea, *Applied Radiation and Isotopes*, 126, 23-25.