

괴산지역 지하수의 라돈 함량

조 병 옥*

한국지질자원연구원 지하수생태연구센터

Radon Concentrations in Groundwater of the Goesan Area, Korea

Byong-Wook Cho*

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

ABSTRACT

Radon concentrations were measured in 250 groundwater samples collected from the Goesan area where uraniferous black slate and granites abundantly occur in the formations. The measured radon levels ranged from 0.90 to 7,218.7 Bq/L with the median value of 54.3 Bq/L, similar to the value measured in the nationwide survey in 4,853 wells (52.1 Bq/L). The median value was highest in the Cretaceous granite area (390.0 Bq/L) while it was as low as 20.0~58.8 Bq/L in the Ogcheon meta-sedimentary rock areas. About 23.6% of the total samples exceeded the WHO guideline value of 100 Bq/L established in 2011. The exceeding rate was 69.0, 39.4, and 7.0~13.7% in the Cretaceous granite area, Jurassic granite area, and Ogcheon meta-sedimentary rock areas, respectively.

Key words : Groundwater, Radon, Concentration, Granite, Ogcheon meta-sedimentary rocks

1. 서 론

라돈(²²²Rn)은 가장 잘 알려진 천연방사성핵종 중 하나로서 우라늄(²³⁸U) 방사능계열에서 라듐(²²⁶Ra)의 방사능붕괴로 생긴다. 반감기가 3.82일에 불과한 라돈은 무색, 무취의 불활성기체이며 붕괴과정에서 알파입자를 발생한다. 라돈은 인간에게 피폭되는 방사선 양의 50% 이상을 차지하며 흡연에 이어 두 번째의 폐암 발병인자로 알려져 있다. 라돈 인체 위해성의 약 80%는 실내공기 중 라돈의 흡입에 기인하나(NRC, 1999), 지하수의 라돈도 음용시의 호흡과 섭취에 의해 인체에 폐암과 위암 발생 가능성을 높인다(USEPA, 1999). 이에 따라서 각 나라는 음용 지하수에 대한 라돈 함량에 대한 권고치(기준치)를 가지고 있는 경우가 많으나 지질분포, 지하수 이용 특성, 경제, 인문사회학적 환경 등에 따라서 권고치(기준치)는 다르다(NIER, 2008).

위와 같은 라돈의 잠재적 위험성 때문에 지하수의 라돈 연구가 급격히 늘어나고 있으며 주된 관심사는 지하수의

라돈 함량 정도와 지질과의 관련성이다(Abdallah et al., 2007). 이들의 연구 결과에 따르면 지하수의 라돈 함량은 지질과 관련성이 크며 화강암지역 지하수에서 라돈 함량이 높으며 화산암, 퇴적암지역 지하수의 라돈 함량은 낮은 것으로 보고되고 있다. 한국에서 지하수의 라돈 함량 조사는 1997년 대전지역 일부 지하수에서 미국 EPA의 권고치를 넘는 자연방사성물질이 검출되었다는 보도가 있던 후인 1999년부터 환경부에 의해서 전국적이고 체계적인 조사가 이루어졌다. 1999년부터 2002년까지 전국을 대상으로 한 615개 지하수에 대한 라돈함량 조사결과 최대치는 1,480 Bq/L, 평균과 중앙값은 각각 68.9 Bq/L, 34.0 Bq/L이고, 지하수의 라돈 함량 정도는 지질과 관계가 있는 것으로 알려졌다(Cho et al., 2007). 그러나 615 개의 지하수에 대한 라돈 함량 조사는 남한의 면적에 비해서 그 수가 너무 적으므로 환경부에 의해 '3차 지하수 중 자연방사성물질 함량실태 조사계획'이 수립되어 2008년부터 전국적인 실태조사와 함께 라돈 함량이 높을 것으로 예상되는 지역에 대한 정밀조사가 수행되고 있다.

*Corresponding author : cbw@kigam.re.kr

Received : 2017. 8. 3 Reviewed : 2017. 9. 14 Accepted : 2017. 9. 19

Discussion until : 2017. 12. 31

지금까지 국내에서 시, 군 지역을 대상으로 한 정밀조사의 사례로는 부산지역 439개 지하수에 대한 라돈 함량조사(Cho et al., 2004), 이천화강암지역 74개 지하수에 대한 라돈 함량조사(Cho et al., 2011), 단양지역 100개 지하수에 대한 라돈함량조사(Cho et al., 2013) 등이 있는데 지하수의 라돈 함량은 화강암지역 지하수에서 높은 것으로 나타났다. 본 연구는 암석내 우라늄 함량이 높은 것으로 알려진 탄질점판암이 협재된 흑색점판암과 지하수의 라돈 함량이 높은 것으로 알려진 화강암이 분포하고 있는 괴산군지역 지하수의 라돈 함량 파악에 있다. 이를 위하여 연구지역내 250개 지하수의 라돈 함량을 분석하여 지질별, 심도별 지하수의 라돈 함량 범위와 정도를 파악하고 이를 국내외에서 연구된 지하수의 라돈 함량과 비교하였다.

2. 연구지역의 수문지질

연구지역인 괴산군은 남한의 중심부에 위치하고 있다. 괴산군의 면적은 842.1 km²이고 지형은 남동쪽이 최고 해발고도 900 m 정도로 높고 북서쪽으로 갈수록 낮아져 최저 해발고도는 약 100 m 정도이다. 연구지역의 지질은 시대 미상의 옥천층군과 화강암으로 구분된다(Lee et al., 1996)(Fig. 1). 옥천층군은 구성 암질에 따라서 Og1, Og2, Og3로 구분된다. Og1은 괴산군의 북서부에 위치하며, 암갈색내지 암회색 사질기원의 운모편암 혹은 사질천매암으로 구성되며 규암 및 석회암이 협재한다. Og2는 연구지역의 중앙에 북서방향의 대상으로 분포하는데 주로 천매암, 점판암으로 이루어지며 국부적으로 함 우라늄 탄질세일도 협재한다. 일부 탄질점판암의 우라늄 함량은 평균 245 ppm(Kim, 1989), 360 ppm(Shin and Kim, 2011)으로 보고되고 있다. Og3은 주로 연구지역 중앙 우측에 분포하며 규암, 석회암, 화강암, 편마암, 암회색 천매암 등 다양한 종류의 역을 가지는 합역 변성퇴적암이다. 유라기 화강암(Jgr)은 연구지역 서북 일원에 걸쳐 분포하는 괴산 화강섬록암과 조립질 반상화강암으로 구성된다. 괴산화강섬록암은 전체적으로 조립질인 반상화강암에 비해서 중립질이고 각섬석, 흑운모 등 유색광물의 함량이 증가하는 반면에 석영의 양은 감소한다. 조립질 반상화강암의 주 구성광물은 장석, 석영, 흑운모이며 부성분광물로서 각섬석, kaolinite, 견운모 등을 갖는다. 남동 일원에 걸쳐 분포하는 백악기 화강암류(Kgr)는 흑운모화강암, 우백질 반상화강암 등의 화강암류와 화강반암으로 구성되는데 이들은 상호 점이적인 관계를 갖는다. 백악기 화강암류의 관입을

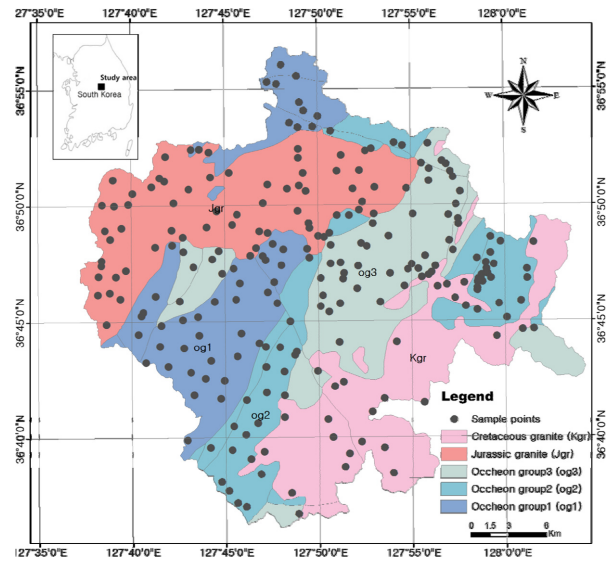


Fig. 1. Location and simplified geological map of the study area with sampling points.

받은 주변부의 변질퇴적암대는 광범하게 접촉변성작용 또는 교대변성작용을 받았음이 유라기 화강암류와는 다른 산출상이다(Lee and Kim, 1972).

연구지역의 지하수 산출은 지형과 지질을 반영하여 대부분 결정질암에서 산출된다. 즉, 층적층은 연구지역 북서부 저지대에서만 발달하고 있는데 두께는 10 m 미만으로 추정되고, 기반암 위의 풍화대 두께 역시 10 m 미만으로 추정된다. 연구에 이용된 250개 지하수공 중에서 심도가 알려진 247개 지하수공의 심도는 9~220 m 범위이며, 평균 심도는 82 m, 중앙값은 100 m이다. 지하수공의 심도를 고려할 때 대부분의 지하수는 기반암에서 산출된다고 볼 수 있으나 지하수공에 설치된 케이싱과 그라우팅의 정도에 따라서 천부지하수의 공내 유입을 배제할 수 없다. 지하수의 용도는 농업용이 53, 마을상수도용이 61, 개인 음용이 80, 생활용수가 52개였다. 지하수의 수질은 pH가 6.05~9.65(평균 7.33)이고 전기전도도는 26~833 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균 262 $\mu\text{S}/\text{cm}$)이다. 지하수의 용도별 수질에는 큰 차이가 없다. 지하수의 라돈 분석이 이루어진 250개 지하수의 지질분류는 1:1,000,000 전자지질도에서 추출한 지질도를 이용하였다.

3. 시료 채취와 분석

연구지역에서의 라돈분석용 시료 채취지점의 선정은 가능한 한 일정 거리인 2 km 마다 하나의 시료를 채취하여 시료의 대표성을 높이고자 하였다. 선정된 지하수공에 대

한 시료 채취는 주로 2012년 4-9월 사이에 이루어졌다. 시료채취시에는 지하수공의 심도와 좌표 등을 측정하였다.

현장에서 지하수의 라돈함량 분석을 위한 시료채취는 지하수공(well head)에서 직접 이루어졌다. 즉, 지하수공에 설치된 펌프를 5~10분간 가동시킨 다음 지상의 저수조 또는 가정집으로 가기 전의 배출구에 호스를 연결하였다. 호스를 통하여 흐르는 지하수의 수온과 pH, 전기전도도 등의 현장수질이 안정됨을 확인한 후(Barcelona et al., 1985) 소량의 지하수가 흐르도록 조정하여 와류(turbulent flow)에 의한 일종의 폭기 현상으로 인해서 라돈 함량이 저감되지 않도록 주의 하면서 지하수 시료 8 ml를 채취하여 준비된 22 ml vial에 주입하였다. 22 ml의 vial에는 이미 12 ml의 설파용액(Optiphase HiSafe3)이 들어 있으며 8 ml의 지하수를 주입한 후에는 마개를 밀봉한 후 일정 시간 흔들어서 설파용액과 지하수가 골고루 섞이도록 하였다. 22 ml vial에는 향후 시료 채취시점과 실내 분석시점과의 시간 보정을 위하여 시료채취 시간을 기재하였다.

채취된 시료들은 가급적 48시간 내에 한국지질자원연구원 실험실로 운반하여 PSA 기능을 가진 액체설파계수기(Quantulus 1220TM, Perkin-Elmer Co.)로 분석하였다. ^{222}Rn 에 대한 계측효율을 구하기 위하여 ^{226}Ra 표준용액 8 mL를 취하여 설파용액 Hisafe3 12 mL과 잘 혼합한 후 PSA 준위 100에서 알파선의 총 피크영역에서 측정하였다. ^{222}Rn 및 그의 딸 핵종들이 시간이 경과하면서 ^{226}Ra 의 붕괴에 의해서 서서히 생성되는데 25일이 경과된 후에는 99% 이상 수용액 층에 존재하는 ^{226}Ra 과 방사평형에 도달하였고 이때의 계수율을 이용하여 얻은 ^{222}Rn 의 측정효율(ϵ)은 시료조제 후 방치 시간에 따른 ^{226}Ra 의 방사평형을 고려하였다. 바탕 시료는 초순수를 끓여서 라돈을 제거한 후에 알콘으로 세정한 설파용액을 혼합하여 만들어 사용하였으며, 실제 계측시료와 동일한 조건으로 초순수를 설파용액과 혼합하여 바탕 시료를 만들어서 5시간씩 계측하였다. 이 바탕 시료를 사용하여 실험과정에 의한 바탕

값을 얻어 계측효율 및 검출하한치를 얻는데 이용하였다. PSA 준위 100에서 시료용액 8 mL에 대해 300분 계측했을 때 알파선 총 피크영역에서의 검출하한치는 0.12 Bq/L 이었다(NIER, 2012).

4. 결과 및 고찰

4.1. 전체 지하수의 라돈 함량

연구지역에서 분석된 250개 지하수의 라돈 함량은 0.9~7,218.7 Bq/L의 범위를 보였으며 평균함량은 137.2 Bq/L, 중앙값은 54.3 Bq/L이었다(Table 1). 250개 지하수의 중앙값 54.3 Bq/L는 용인지역 100개 지하수의 중앙값 176.1 Bq/L(NIER, 2013), 이천지역 74개 지하수의 중앙값 172.0 Bq/L(Cho et al., 2011)에 비해서는 낮지만 김제지역 40개 지하수의 중앙값 66.8 Bq/L(NIER, 2010)와는 비슷하다. 그러나 단양지역 100개 지하수의 중앙값 18.7 Bq/L(NIER, 2011), 부산지역 439개 지하수의 0~300 Bq/L(70%가 50 Bq/L 이하)(Cho et al., 2004)에 비해서는 높다. 연구지역 지하수의 라돈 함량과 위 지역 지하수의 라돈 함량 차이는 대체로 화강암 분포비율 차이와 일치한다. 연구지역 지하수의 라돈 함량은 한국 전체에 대한 실태조사인 615개 지하수의 라돈함량 평균값 68.9 Bq/L, 중앙값 34.0 Bq/L(cho et al., 2007)보다는 높으며, 전국 4,853개 지하수의 라돈함량 평균값 97.5 Bq/L, 중앙값 52.1 Bq/L와 비슷하다(NIER, 2015). 이는 615개 지하수에는 전국적인 실태조사 결과이기 때문에 천부 지하수가 다수 포함되어 있어서 라돈 함량이 상대적으로 낮으며, 4,853개 지하수의 절반 이상은 지하수공의 평균 심도가 100 m 내외인 마을상수도 지하수가 포함되어 있기 때문에 상대적으로 라돈 함량이 높은 영향으로 해석된다.

연구지역에서 검출된 라돈함량 최고치인 7,218.7 Bq/L는 지금까지 한국에서 보고된 라돈 함량 최고치인 1,480.2 Bq/L(Cho et al., 2007)보다도 훨씬 높은 값이다. 물론 이 값은 핀란드의 라돈함량 최대치인 77,500 Bq/L

Table 1. Statistical analysis of the Rn concentrations (Bq/l) in the groundwater of each geology (Jgr: Jurassic gr, Kgr: Cretaceous gr, Og1: Ogcheon group 1, Og2: Ogcheon group 2, Og3: Ogcheon group 3)

	Jgr	Kgr	Og1	Og2	Og3	Total
N	61	29	52	51	57	250
Min.	3.3	18.9	5.2	1.9	0.9	0.9
Max.	523.9	7,218.7	128.4	927.6	349.6	7,218.7
Mean	107.8	651.9	60.4	68.6	38.2	137.2
Med.	84.0	390.0	58.8	30.1	20.0	54.3
Std. dev.	91.4	1,311.9	28.5	143.3	54.8	485.8

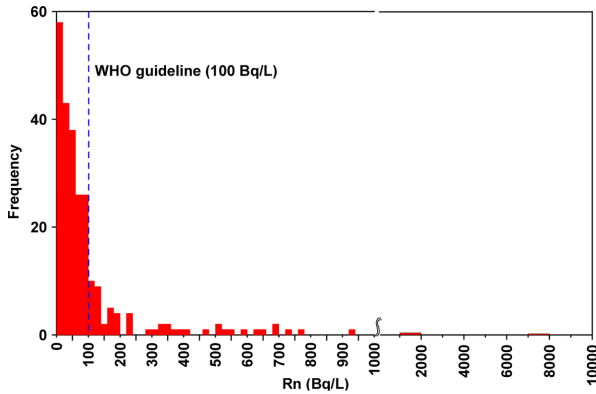


Fig. 2. Distribution diagram of radon concentration occurrence in the groundwaters of the area.

(Salonen and Hukkanen, 1997), 스웨덴의 57,000 Bq/L (Morland et al., 1997), 노르웨이의 31,900 Bq/L (Banks et al., 1998) 비해서는 낮다. 그러나 국내에서도 계속 조사를 수행하면 7,218.7 Bq/L보다 더 높은 라돈함량도 검출될 수 있을 것으로 예상된다. 외국 각 나라별 전체 지하수의 라돈 함량은 잘 알려져 있지 않아서 (Pinti et al., 2014) 연구지역 지하수의 라돈 함량과 비교하기는 어렵다. 괴산지역 지하수의 라돈 함량은 괴산지역과 화강암분포 비율이 비슷한 노르웨이의 결정질암 28개 지하수의 라돈 함량(중앙값 290 Bq/L) (Banks et al., 1995)보다는 낮으나 화강암 분포 비율이 연구지역보다 훨씬 낮은 사우디아라비아 중부의 77개 지하수의 0.89~35.4 Bq/L (Alabdul'aly, 1999)보다는 높다.

250개 지하수의 라돈 함량빈도 분포는 Fig. 2와 같은바 일반적인 지하수의 라돈 조사에서 흔히 나타나는 다수의 데이터가 낮은 농도 값의 범위에 치우쳐 있는 상태 (lognormal distribution) (Pinti et al., 2014)를 보인다. 최고 함량은 7,218.7 Bq/L이나 1,000 Bq/L 이상은 2개에 불과하다. 전체 시료의 23.6%인 59개가 WHO의 guideline인 100 Bq/L를 (WHO, 2011), 15.6%인 39개가 미국 EPA의 대체최고허용농도 (Alternative Maximum Contaminant Level, AMCL)인 148 Bq/L (USEPA, 1999)를 넘고 있다. 이와 같은 초과율은 한국 전체 지하수 4,853개의 16.9%가 148 Bq/L를 넘는 비율 (NIER, 2015)과 거의 같은 편이다. 연구지역 지질의 일부가 우리나라의 함량이 높은 탄질셰일 (평균 245 ppm (Kim, 1989), 360 ppm (Shin and Kim, 2011))이 협재하는 지층 (Og2)이고 지하수의 우리나라 함량이 높다고 알려진 화강암의 분포비율이 연구지역의 절반에 가깝지만 연구지역 지하수의 라돈 함량은 국내 전체 지하수의 라돈 함량과 비슷하다.

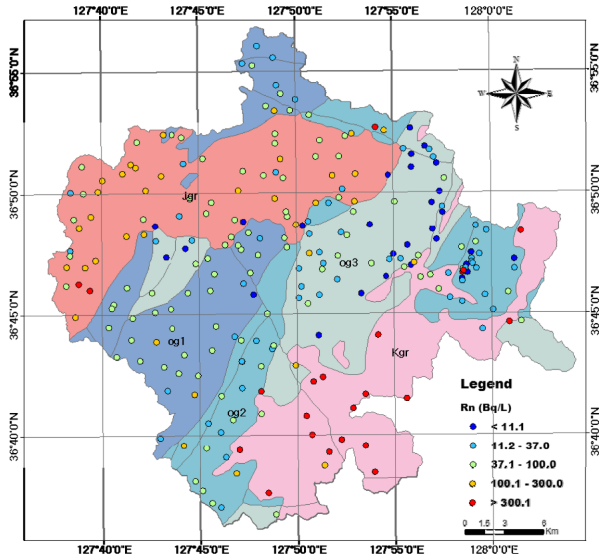


Fig. 3. Spatial distribution of groundwater radon levels on a simplified geological map of the area.

4.2. 지질별 지하수의 라돈 함량

지하수의 라돈 함량은 모암의 지질에 크게 좌우된다. Fig. 3은 250개 지하수의 라돈 함량을 지질도와 함께 나타낸 것인데 지하수의 라돈 함량이 300 Bq/L 이상인 지하수는 대부분 Kgr 지역에 위치하며 100~300 Bq/L의 63%는 Jgr 지역에 위치한다. 변성퇴적암지역인 Og1, Og2, Og3 지역 지하수는 대부분 100 Bq/L 이하로 낮으며 OG1의 라돈 함량이 OG2, OG3에 비해서 상대적으로 높다. Og1, Og2, Og3에 위치한 고 라돈 지하수는 화강암 경계부에 위치해 있어서 이들은 지하의 화강암 관입에 따른 영향을 받았을 가능성이 있다 (Skeppstrom and Olofsson, 2007). 그 예로서 괴산군 청천면 덕평리 아래에 위치하는 지하수공의 라돈함량은 927.6 Bq/L인데 지표지질 분류상으로는 Og2에 속하나 Kgr과 인접해 있어서 지하 지질은 Kgr의 관입 영향을 받았을 수도 있다. 다른 예로는 연풍군 유희리에 위치한 심도 120 m의 지하수이다. 이 지하수공의 심도 50 m까지는 퇴적변성암으로 구성되어 지표지질은 Og2로 분류되나 심도 50 m 하부부터는 관입화강암류가 있음이 확인되었으며 (Kim, 2014) 심도별 지하수의 라돈 함량은 899~1,428 Bq/L 임이 보고된 바 있다 (NIER, 2012). 따라서 어느 지역 지하수의 라돈 함량해석을 위한 지질 분류시 비 화강암에 속하더라도 화강암 경계까지의 거리를 고려한 지질 분류 등의 신중한 접근이 요구된다.

연구지역의 지질별 지하수 시료수와 라돈함량 평균, 중간값, 최고값 등은 Table 1과 같다. 지질별 지하수의 라

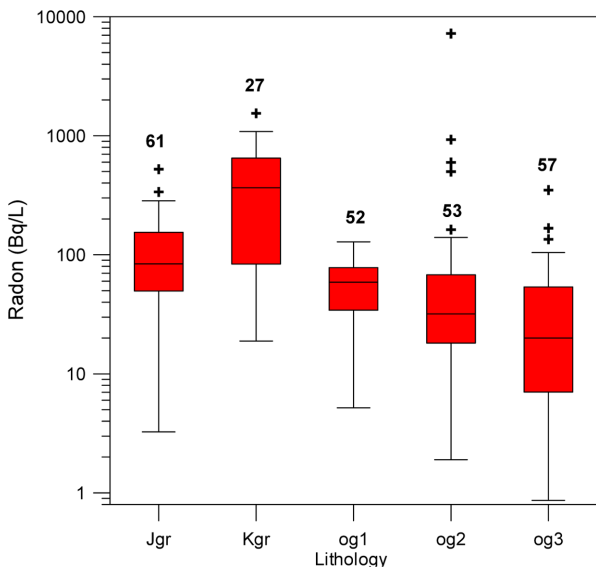


Fig. 4. Box plot showing radon concentration in the groundwater for each lithology.

돈 중앙값은 Kgr에서 390.0 Bq/L로 가장 높고, 다음으로 Jgr에서 84.0 Bq/L로 높다. Og1의 중앙값은 58.8 Bq/L, Og2는 30.1 Bq/L, Og3은 20.0 Bq/L로 가장 낮다. Og2 지하수의 라돈 평균값이 68.6 Bq/L로 높은 것은 Og2에서 채취된 51개의 시료 중 2개 시료의 라돈 함량이 500.6, 927.6 Bq/L로 높게 검출되었기 때문으로서 Og2의 중앙값은 30.1 Bq/L에 불과하다. 위와 같은 지질별 지하수의 라돈함량의 차이는 화강암과 결정질암지역 지하수의 라돈함량이 높고 퇴적암지역 지하수에서 낮다는 사실과 일치한다(Loomis, 1987; King et al., 1982). 특히 Og2의 일부 함우라늄 탄질세일에는 우라늄 함량이 294 ppm (Kim, 1987), 360 ppm(Shin and Kim, 2011)이나 되는 것으로 알려져 있으나 51개 지하수의 우라늄 함량은 0.02~21.5 µg/L(중앙값 0.54 µg/L)에 불과하다. Og2에 속하는 51개 지하수 중에서 함 우라늄 탄질세일이 존재하는 청천면 덕평리를 중심으로 한 21개 지하수의 라돈 함량 중앙값은 40.3 Bq/L로 Og2 전체의 라돈 중앙값 30.1 Bq/L와 큰 차이가 없다. Og1, Og2, Og3 지역 지하수의 라돈 함량이 Jgr, Kgr 지역보다 낮은 것은 Og1, Og2, Og3 지역 암석내 우라늄 함량이 Jgr, Kgr 지역보다 낮은 것과(NIER, 2012) 암석내 라돈이 지하수로 이동하는 균열의 발달 정도와 지하수 환경의 차이 등을 예상할 수 있다.

Fig. 4는 지질별 지하수의 라돈 함량 정도를 나타낸 것이다. 연구지역 화강암지역 중에서 Kgr 지역 지하수의 라돈 함량이 Jgr 지역 지하수의 라돈 함량보다 높은 것은 일차적으로 Kgr 지역의 지질은 Jgr 지역보다도 보다 산성

계통인 화강암류와 화강반암으로 구성되었기 때문에 판단된다(Lee et al., 1996). Kgr 지역 지하수의 라돈 평균 함량 651.9 Bq/L는 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), 미국 화강암지역(Maine) 지하수의 평균 함량 814.0 Bq/L(Hess et al., 1985) 등보다는 낮다. 한편 퇴적변성암인 Og1, Og2, Og3 지역 지하수의 라돈 함량은 브라질 전체 205개 지하수의 기하평균 57.7 Bq/L (Godoy and Godoy, 2006)과 비슷하고 유사한 지질환경을 가지는 호주 Richmond River catchment의 평균함량 4.9 Bq/L(Atkins et al., 2016), 캐나다 퀘벡주 St. Lawrence Lowland 198개 지하수의 8.6 Bq/L(Pinti et al., 2014) 등보다는 약간 높다. 전반적으로 보아서 각 나라 지하수의 라돈 함량은 지질에 좌우된다(Table 2).

연구지역에서 지질별 지하수의 라돈 함량이 100 Bq/L를 넘는 비율은 Kgr 지역은 69.0%, Jgr 지역은 39.4%이나, Og1, Og2, Og3 지역은 각각 7.7, 13.7, 7.1%에 불과하다(Table 3). 특히 Kgr 지역의 경우 전체 지하수의 65.5%가 핀란드의 음용 기준치인 300 Bq/L(SSI, 1999)를 넘어 연구지역 Kgr 화강암내 우라늄 함량, 지하수 환경 등 라돈 함량이 높은 원인에 대한 연구가 필요하다.

4.3. 지하수공의 심도와 라돈 함량

지하의 암석에서 생성된 라돈은 암석내 발달한 간극의 지하수를 통하여 지표로 상승하기 때문에 지하수의 산출 심도에 따라서 라돈 함량이 달라질 수 있다. 연구지역 지하수의 심도별 라돈 함량 정도를 파악하기 위하여 3개의 심도 구간으로 구분하였다. 3개 심도 구간은 충적층+풍화대(<15.0 m), 풍화대+암반층(15.1~30.0 m), 암반층(30.1 m<)이다(Table 4). 물론 굴진심도가 얇은 지하수공의 경우는 주 대수층을 충적층 또는 풍화대로 보아도 무방하다. 그러나 굴진심도가 깊은 지하수공이더라도 케이싱이나 그라우팅이 부실하면 충적층이나 풍화대 지하수가 유입되어 라돈 농도가 희석되기 때문에(Prasad et al., 2009) 암반층 지하수의 라돈 함량을 대변하지 못한다는 문제점이 존재하기도 한다.

Table 4에서 보는 바와 같이 심도 구간별 지하수의 라돈 함량은 풍화대 또는 기반암 상부에 위치한 심도 구간 15.1-30.0 m에서 라돈의 중앙값이 74.0 Bq/L로 가장 높고, 다음으로는 암반층인 심도 30.1 m 이상 구간의 중앙값이 54.3 Bq/L이고, 충적층 또는 풍화대 구간인 심도 15 m 미

Table 2. Range of published radon concentrations in groundwater from various locations

Location	No. of samples	Range (Bq/L)	Mean (Bq/l)	Lithology	Reference
Australia	88	0.14-20.3	4.9	Sedimentary rocks	Atkins et al., 2016
Brazil	205	<1.2-3,542	57.7 (geom.)	No dominant	Goddy and Goddy, 2006
Canada	198	0.2-310	8.6	Sedimentary rocks	Pinti et al., 2014
China	89	0-49.0	6.0	Sedimentary rocks	Wu et al., 2014
Finland	6,600	-	590.0	Crystalline bedrock	Voutilainen, 2000
Norway	1,326	10-19,900	700.0	Crystalline bedrock	Banks et al., 1998
Poland	1,000	0.2-1,645	240.0	Gneiss, schist, granite	Przylibski et al., 2004
Saudi Arabia	1,025	0.01-67.4	4.5	Sedimentary rocks	Althoyaib and El Taher, 2015
Sweden	-	-	905.0	Crystalline bedrock	Salonen and Hukkanen, 1997
Taiwan	512	0.67-40.7	2.2 (med.)	Sedimentary rocks	Han et al., 2004
USA, Maine	136	-	814.0	Granite zone	Hess, 1985

Table 3. Distribution of the Rn concentrations in the groundwater from each geology

Rn (Bq/L)	Jgr		Kgr		Og1		Og2		Og3		Total	
	No.	%	No.	%	No.	%	No.	%	No.	%	No.	%
<11.1	4	6.5	0	0	1	1.9	6	11.8	20	35.1	31	12.4
11.2-37.0	6	9.8	3	10.3	12	23.1	23	45.1	19	33.3	88	35.2
37.1-100	27	44.3	6	20.7	35	67.3	15	29.4	14	24.6	72	28.8
100.1-300.0	22	36.1	1	3.5	4	7.7	5	9.8	3	5.3	35	14.0
300.1<	2	3.3	19	65.5	0	0.0	2	3.9	1	1.7	24	9.6
Total	61	100	29	100	52	100	51	100	57	100	250	100

Table 4. Statistical analysis of the Rn concentrations (Bq/L) in the groundwater with well depth

	15 m>	15.1-30.0 m	30.1 m<
N	10	35	202
Min.	0.9	8.5	1.9
Max.	96.2	553.5	7,218.7
Mean	35.5	109.4	148.3
Med.	26.6	74.0	54.3
Std dev	30.4	136.1	536.9

만 지하수의 중앙값은 26.6 Bq/L로 가장 낮다. 이와 같은 현상은 지하 심부의 지하수일수록 물-암석반응이 길어져 라돈의 함량이 높으나 지하 암석으로부터 방출된 라돈은 지하수나 균열을 따라서 지표로 상승하기 때문에 풍화대 또는 기반암 상부 구간 지하수의 라돈 함량이 높다고 해석된다. 풍화대나 충전층 지하수는 암반층 지하수에 비해서 라돈이 대기중으로 쉽게 방출되며(Vesterbacka, 2005), 지표수의 유입으로 인한 희석 효과 등 때문에 라돈 함량이 낮아지기 때문으로 해석된다. 위와 같은 대수층 구간 별 지하수의 라돈 함량은 국내 615개 지하수의 대수층별 지하수의 라돈함량에서 풍화대+암반층 지하수의 라돈 함량이 높은 결과와도 일치한다(Cho et al., 2007).

5. 결 론

함우리남층이 협재하는 옥천층군(Og2)과 화강암이 분포하여 지하수의 라돈 함량이 높을 것으로 예상되는 연구지역 250개 지하수의 라돈 함량은 0.90~7,218.7 Bq/L(중앙값 54.3 Bq/L)의 범위로 나타나 4,853개 한국 지하수의 라돈 함량(중앙값 52.1 Bq/L)과 비슷하게 나타났다. 검출된 라돈함량 최고치인 7,218.7 Bq/L는 지금까지 한국에서 보고된 라돈 함량 최고치인 1,480.2 Bq/L보다 높다. 지하수의 라돈 함량 빈도 분포는 다수의 데이터가 낮은 농도 값의 범위에 치우쳐 있는 상태(lognormal distribution)을 보인다. 연구지역 지하수의 라돈 함량은 용인(중앙값 176.1 Bq/L), 이천지역(중앙값 172.0 Bq/L)에 비해서는 낮으나, 단양지역(중앙값 18.7 Bq/L), 부산지역(0~300 Bq/L)에 비해서는 높다. 5개로 구분된 지질 중 지하수의 라돈 함량이 가장 높은 지하수는 Kgr(중앙값 390.0 Bq/L)이었으며 Og2의 라돈 중앙값은 30.1 Bq/L로 낮게 나타났다. Og1, Og2, Og3 지역 일부 지하수에서 고품량 라돈이 검출되어 라돈 함량해석을 위한 지하수의 지질 분류시 비화강암에 속하더라도 화강암의 관입을 고려한 지질 분류가 필요하다. Kgr 지역의 라돈 함량은 노르웨이, 핀란드,

스웨덴, 미국 메인주의 화강암지역보다는 낮고 Og1, Og2, Og3 지역의 라돈 함량은 유사한 지질을 갖는 사우디아라비아, 캐나다, 중국, 대만보다 높은 것으로 나타났다. 전체 지하수는 23.6%가 WHO의 guideline인 100 Bq/L를 넘지만 Kgr 지역 지하수의 경우 69.0%가 100 Bq/L를 넘으며 핀란드의 음용수 권고치인 300 Bq/L를 넘는 비율도 65.5%가 되어서 화강암내 우라늄 함량, 지하수 환경 등 라돈 함량이 높은 원인에 대한 연구가 필요하다. 지하수 공을 3개의 심도 구간으로 나누었을 때 라돈 함량은 풍화대+암반층 지하수(15.1~30.0 m)에서 가장 높고 층적층+풍화대 지하수(<15.0 m)에서 낮게 나타났다.

사 사

본 연구는 2015년 국립환경과학원의 ‘지하수 중 자연방사성물질 함유실태 조사: NIER-SP2015-386’와 한국지질자원연구원의 2016년 ‘복합 인공함양기법을 이용한 지하수 확보활용기술 개발: GP2015-014-2016(2)’의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

Abdallah, S.M., Habib, R.R., Nuwayhid, R.Y., Chatila, M., and Katul, G., 2007, Radon measurements in well and spring water in Lebanon, *Radia. Meas.*, **42**(2), 298-303.

Alabdula'aly, A.I., 1999, Occurrence of radon in the central region groundwater of Saudi Arabia, *J. Environ. Radioact.*, **44**, 85-95.

Althoyaib, S.S. and El-Taher, A., 2015, Natural radioactivity measurements in groundwater from Al-Jawa, Saudi Arabia, *J. Radioanal. Nucl., Chem.*, **304**, 547-552.

Atkins, M.L., Santos, I.R., Perkins, A., and Maher, D.T., 2016, Dissolved radon and uranium in groundwater in a potential coal seam gas development region (Richmond River Catchment, Australia), *J. Environ. Radioact.*, **154**, 83-92.

Banks, D., Royset, O., Strand, T., and Skarphagen, H., 1995, Radioelement (U, Th, Rn) concentrations in Norwegian bedrock groundwaters, *Environ. Geol.*, **25**, 165-180.

Banks, D., Frengstad, B., Midtgard, A.K., Krog, J.R., and Strand, T., 1998, The chemistry of Norwegian groundwaters: I The distribution of radon, major and minor elements in 1,604 crystalline bedrock groundwaters. *Total Environ.*, **222**, 71-91.

Barcelona, M.J., Gibb, J.P., Helfrich, J.A., and Garske, E.E., 1985, Practical guide for groundwater sampling, SWS Contract Report, 374 p.

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, *J. Korea Soc. Groundw. Environ.*, **12**(4), 98-104.

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, *J. Eng. Geol.*, **21**(3), 259-269.

Cho, B.W., Kim, M.S., Kim, T.S., Yun, U., Lee, B.D., Hwang, J.H., and Choo C.O., 2013, Characteristics of occurrence and distribution of natural radioactive materials, uranium and radon in groundwater of the Danyang area, *J. Eng. Geol.*, **23**(4), 477-491.

Cho, J.S., Ahn, J.K., Jim, H.Ch., and Lee, D.W., 2004, Radon concentrations in groundwater in Busan measured with a liquid scintillation counter method, *J. Environ. Radioact.*, **78**, 105-112.

Godoy, J.M. and Godoy, M.L., 2006, Natural radioactivity in Brazilian groundwater, *J. Environ. Radioact.*, **85**, 71-83.

Han, Y.L., Tom Kuo, M.C., Fan, K.C., Chiang, C.J., and Lee, Y.P., 2004, Radon distribution in groundwater of Taiwan, *Hydrog. J.*, **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.

Kim, J.H., 1989, Geochemistry and genesis of the Guryongsan (Ogcheon) uraniferous black slate, *J. Kor. Inst. Min. Geol.*, **22**(1), 35-63.

Kim, M.S., Yang J.H., Geong, C.H., Kim, H.K., Kim, D.W., and Cho, B.W., 2014, Geochemical origins and occurrences of Natural radioactive materials in borehole groundwater in the Goesan area, *J. Eng. Geol.*, **24**(4), 535-550.

King, P.T., Michel, J., and Moore, W.S., 1982, Ground water geochemistry of ²²⁸Ra, ²²⁶Ra and ²²⁰Rn, *Geochim. et Cosmoche. Acta*, **46**, 1173-1182.

Lee, B.J., Kim, D.H., Choi, H.I., Kee, W.S., and Park, K.H., 1996, The geological map of the Daejeon sheet (1:250,000), Korea Institute of Geology, Mining and Materials.

Lee, C.H. and Kim, J.H., 1972, The geological map of Goesan sheet, Geological survey of Korea.

Loomis, D.P., 1987, Radon-222 concentration and aquifer lithology in North Carolina, *Ground Water Monit. Rev.*, **7**(2), 33-39.

Morland, G., Reimann, C., Strand, T., Skarphagen, H., Banks, D., Bjorvatn, K., Hall, E.M., and Siewers, U., 1997, The hydro-geochemistry 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.

National Research Council, 1999, Risk assessment of radon in drinking water, National Academies press, Washington.

- NIER, 2008, Studies on the naturally occurring radionuclides in groundwater of Korea (I) KIGAM report, 293 p.
- NIER, 2010, Occurrences of radionuclides in groundwater of the 4 high potential areas (10), KIGAM Report, 251 p.
- NIER, 2011, Study on the naturally occurring radionuclides in groundwater of the two high potential areas (11), KIGAM report, 253 p.
- NIER, 2012, Study on the naturally occurring radionuclides in groundwater of high potential area, NIER-SP2012-373, 245 p.
- NIER, 2013, Studies on the naturally occurring radionuclides in groundwater of the Youngin high potential area, NIER-SP2013-416, 220 p.
- NIER, 2015, Studies on the naturally occurring radionuclides in groundwater in the multi-geologic areas (15), NIER-SP2015-386, 203 p.
- Pinti, D.L., Retailleau, S., Barnetche, D., Moreira, F., Mortiz, A.M., Larocque, M., Gelinat, Y., Lefebvre, R., Helie, J.F., and Valadez, A., 2014, ^{222}Rn activity in groundwater of the St. Lawrence Lowlands, Quebec, eastern Canada: relation with local geology and health hazard, *J. Environ. Radioact.*, **136**, 206-217.
- Prasad, Y., Prasad, G., Choubey, V.M., and Ramola, R.C., 2009, Geohydrological control on radon availability in groundwater, *Radia. Meas.*, **44**, 122-126.
- Przylibski, T.A., Mamont-Ciesla, K., Kusyk, M., Dorda, J., and Kozłowska, B., 2004, Radon concentrations in groundwaters of the Polish part of the Sudety Mountains (SW Poland), *Environ. Radioact.*, **75**, 193-209.
- Salonen, L. and Hukkanen, H., 1997, Advantages of low-background liquid scintillation alpha-spectrometry and pulse shape analysis in measuring radon, uranium, and radium-226 in groundwater samples, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **226**(1), 67-74.
- Shin, D.B. and Kim, S.J., 2011, Geochemical characteristics of black slate and coaly slate from the uranium deposit in Deokpyeong area, *Econo. Environm. Geol.*, **44**(5), 373-386.
- Skeppstrom, K. and Olofsson, B., 2007, Uranium and radon in groundwater, *European Water*, **17/18**, 51-62.
- SSI, 1999, Radon legislation and national guidelines, Swedish Radiation Protection Institute.
- USEPA, 1999, Proposed radon in drinking water rule, Office of Water, EPA 815-F-99-006.
- Vesterbacka, P., Mkelinen, I. and Arvela, H., 2005, Natural radioactivity in drinking water in private wells in Finland, *J. Radia. Prot. Dosim.*, **113**(2), 223-232.
- Voutilainen, A., Mkelinen, I., Huikuri, P., and Salonen, L., 2000, Radon atlas of wells drilled into bedrock in Finland, STUK-A171, Helsinki: Steilyturvakeskus.
- WHO, 2011, Guidelines for drinking water quality. Chapter 9. Radiological aspects, 4th edition. World Health Organization, Geneva.
- Wu, Y.Y., Ma, Y.Z., Cui, H.X., Liu J.X., Sun Y.R., Shang, B., and Su, X., 2014, Radon concentrations in drinking water in Beijing City, China and contribution to radiation dose, *Inter. J. Environ. Res. Pub. Health.*, **11**, 11121-11131.