

괴산지역 지하수의 우라늄 함량

조병욱*

한국지질자원연구원 지하수생태연구센터

Uranium Concentrations in Groundwater of the Goesan Area, Korea

Byong-Wook Cho*

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

(Received: 4 September 2017 / Revised: 13 October 2017 / Accepted: 18 October 2017)

Uranium concentration in groundwater of the Goesan area was anticipated high because the area contains Ogcheon metamorphic rock zone which partly includes coal bed bearing high uranium content and nearly half of the area is covered by granitic rocks. Groundwater samples collected from 250 wells in five lithology (Ogcheon meta-sandy rock zone (Og1), Ogcheon lower phyllite zone (Og2), Ogcheon pebble bearing phyllite zone (Og3), Jurassic granite (Jgr), Cretaceous granite (Kgr)), of the area were analyzed and equivalent uranium concentrations (e(U)) from 200 rocks near sampled wells were measured using portable gamma spectrometry. Higher median value of e(U) (8.2 mg/kg) was found on Kgr outcrops. The median e(U) value of Og2 was not as high as that of Kgr and similar to those of Jgr, Og1, and Og3 (3.05~3.90 mg/kg). The uranium level in groundwater of the area ranged from 0.01 to 293.0 $\mu\text{g/L}$ with a median value of 0.87 $\mu\text{g/L}$ which is similar to the national median uranium level of 0.74 $\mu\text{g/L}$. The uranium concentration was high in the samples from the Kgr (median 4.74 $\mu\text{g/L}$) and low samples from the Og1, Og2, and Og3 (median 0.35~0.74 $\mu\text{g/L}$). The percentage of total samples having uranium level above 30 $\mu\text{g/L}$ was 2.8%, on the other hand, that of Kgr is 20.7%, reflecting additional survey on the Kgr area is needed.

Key words : groundwater, uranium concentration, Jurassic granite (Jgr), Cretaceous granite (Kgr), Ogcheon metamorphic rock zone

괴산지역은 우라늄 함량이 높은 탄질점판암이 국부적으로 분포하고 있으며 화강암의 분포비율이 절반 정도나 되어 지하수의 우라늄 함량이 높을 것으로 예상되었다. 250개 지하수에서 우라늄 함량을 분석하였고 250개 지하수 중 200개 지점에서 암석내 우라늄 함량을 측정하였다. 연구지역의 지질을 5개 (옥천 변성사질암대 (Og1), 옥천 하부천매암대 (Og2), 옥천 함력천매암대 (Og3), 쥐라기화강암(Jgr), 백악기화강암(Kgr))으로 대분하면 암석의 우라늄 함량 중앙값은 Kgr에서 8.2 mg/kg으로 가장 높았으며 Og2의 우라늄 함량은 나머지 Jgr, Og1, Og3 (3.05~3.90 mg/kg)의 범위로 비슷하게 나타났다. 250개 지하수의 우라늄 함량 범위는 0.01~293.0 $\mu\text{g/L}$ (중앙값 0.87 $\mu\text{g/L}$)으로 국내 전체 지하수의 우라늄 중앙값 0.74 $\mu\text{g/L}$ 와 비슷한 것으로 나타났다. 지질별 지하수의 우라늄 함량은 Kgr이 4.74 $\mu\text{g/L}$ 으로 높고 Og1, Og2, Og3는 0.35~0.74 $\mu\text{g/L}$ 으로 낮게 나타났다. 전체 지하수의 WHO의 음용수 가이드라인 30 $\mu\text{g/L}$ 초과율은 국내 전체와 비슷한 2.8%이나 Kgr 지역의 초과율은 20.7%나 되어 추가 연구가 필요하다.

주요어 : 지하수, 우라늄 함량, 쥐라기화강암, 백악기화강암, 옥천변성대

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

*Corresponding author: cbw@kigam.re.kr

1. 서 론

우라늄은 지구가 생성된 이후부터 존재해온 자연방사성물질중의 하나로서 화강암, 셰일, 탄산염광물에서 높은 함량을 보인다(Turekian and Wedepohl, 1961). 암석이나 광물에 존재하는 우라늄은 지하 환경에 따라서 지하수에 용해되어 이동하는데 물속에서의 우라늄은 pH, ORP, 탄산염, 인산염, 바나듐산염, 불산염, 규산염 등에 규제를 받는다 (Langmuir, 1997). 지하수의 우라늄은 토양이나 암석의 풍화와 침식에도 기인하는데 모암으로부터 우라늄의 침출, 용해, 분산 등에 영향을 주는 요인으로서는 화학적 풍화와 침식, 지형적인 요소 등이 있다(Thivya *et al.*, 2015). 또한 지하수의 우라늄 함량은 위의 지구화학적 요소 뿐만 아니라 지질학적, 수리지질학적 요소들에 의하여 영향을 받는다(NIER, 1997).

우라늄은 인체에 위해한데 반감기가 길기 때문에 방사성 독성보다는 화학적 독성이 더 크다. 따라서 우라늄의 함량이 일정량 이상인 지하수를 장기간 섭취시 신장 독성을 유발할 수 있다(Kurttio *et al.*, 2002). 이에 따라 일부 국가에서는 1960년대 말부터 지하수의 우라늄 함량에 대한 실태조사가 이루어져 왔는데 그 함량은 화강암지역에서 높은 것으로 밝혀졌기 때문에(Dillon *et al.*, 1997) 최근에는 주로 화강암지역 지하수에 대한 정밀조사가 수행되고 있다. 외국의 정밀조사로는 핀란드 헬싱키의 화강암지역 308개 암반지하수의 우라늄 함량(Asikainen and Kahlos, 1979), 인도 남부 화강암지역 13개 천부 지하수의 우라늄 함량(Brindha and Elango, 2013), 캐나다 마니토바주 남동 지역 75개 지하수(Betcher *et al.*, 1988) 등 주로 화강암지역에 대해서 이루어졌다. 각 나라는 실태조사와 정밀조사 결과를 바탕으로 음용 지하수의 우라늄 함량에 대한 권고치(기준치)를 설정하였는데 그 권고치(기준치)는 지질분포, 우라늄 함량정도, 지하수 이용 특성

등에 따라서 다르다 (Table 1) (NIER, 2008).

국내 지하수의 우라늄 함량에 대한 전국적인 조사는 1999년부터 2002년의 4년 동안 이루어졌는데 636개 지하수의 우라늄 함량 최대치는 402.0 $\mu\text{g/L}$, 평균과 중앙값은 각각 4.50 $\mu\text{g/L}$, 0.19 $\mu\text{g/L}$ 이고, 지하수의 우라늄 함량은 화강암지역에서 높은 것으로 알려졌다(NIER, 2002). 그러나 636개 시료로 남한 전체 지하수의 우라늄 함량을 설명하기로는 부족하므로 2007년부터 추가 조사가 수행되었으며 아울러 지하수의 우라늄 함량이 높을 것으로 예상되는 시, 군 지역에 대해서는 정밀조사가 수행하고 있다. 국내에서 수행된 정밀조사의 사례로는 대전지역 68개 지하수(NIER, 2008), 이천화강암지역 74개 지하수(Cho *et al.*, 2011), 단양지역 100개 지하수에 대한 우라늄 함량조사(Cho *et al.*, 2013) 등이 있는데 지하수의 우라늄 함량은 화강암지역 지하수에서 높은 것으로 나타났다.

연구지역인 괴산군에는 우라늄 함량이 높은 것으로 알려진 탄질점판암이 국부적으로 분포하고 있어서 과거부터 암석내 우라늄 함량과 성인에 대한 많은 연구가 있어 왔다(Kim, 1989; Shin and Kim, 2011). 또한 연구지역은 화강암의 분포비율이 절반 가까이 되어서 지하수의 우라늄 함량이 높을 것으로도 예상된다. 본 연구는 괴산지역 지하수의 우라늄 함량 특성을 파악함에 있다. 이를 위하여 250개 지하수의 우라늄 함량을 분석하였고 200개 지하수에 대해서는 암석내 우라늄 함량을 측정하였다. 지하수의 우라늄 함량은 지질별, 심도별로 구분하여 함량 범위와 정도를 파악하였고 이를 국내외에서 연구된 지하수의 우라늄 함량과 비교하였다.

2. 지형 및 지질

연구지역의 지형은 북서쪽은 경사가 완만하나 남동쪽은 급하다. 지형고도는 100~900 m로 고도차가 큰데 남동쪽이 900 m 정도로 높고 북서쪽으로 갈수록 낮아진다. 연구지역은 시대 미상의 옥천층군이 북북동 방향으로 대상 분포하며, 옥천층군의 북쪽 경계선을 따라서 쥬라기 화강암이(Jgr), 남쪽 경계선을 따라서 백악기 화강암이(Kgr) 분포한다(Lee *et al.*, 1996) (Fig. 1). 옥천층군의 범위와 성격에 대해서는 문제점이 있으나 본 연구에서는 옥천층군을 Og1, Og2, Og3의 3개의 지질로 분류하였다. Og1은 연구지역의 북서부에 분포하며, 암갈색내지 암회색의 사질기원의 운모편암 혹은 사질천매암으로 구성된다. Og2는 천매암, 점판암으로

Table 1. International standards (guidelines) for uranium in drinking water

Countries	U ($\mu\text{g/L}$)	References
USA	30	USEPA, 2009
Canada	20	Health Canada, 2017
Sweden	15	NFA, 2005
Australia	17	NHMRC, 2015
New Zealand	20	MH, 2008
India	60	AERB, 2004
WHO	30	WHO, 2011

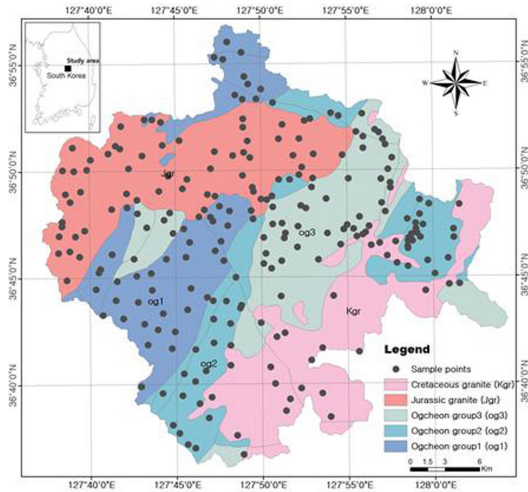


Fig. 1. Location and simplified geological map of the study area with groundwater sampling points.

이루어지며 문주리층의 흑색이암에는 국부적으로 함우라늄 탄질셰일이 협재한다. 과거 청천면 덕평리 일대에서는 우라늄 탐사가 실시된 바 있다. Og3는 황강리층, 이원리층으로 명명된 지층으로 다양한 종류의 역을 가지는 함역변성퇴적암이다. 연구지역 서북 일원에 걸쳐 분포하는 Jgr은 중립질의 괴산화강암과 조립질의 반상화강암으로 구성된다. 연구지역의 남동부에 걸쳐 분포하는 Kgr은 거정질의 흑운모화강암, 조립질의 우백질 반상화강암 등의 화강암류와 세립질의 화강반암으로 구성된다. Jgr의 관입 부근과는 달리 Kgr의 주변부는 접촉변성작용 또는 고대변성작용을 광범위하게 받았다(Lee and Kim, 1972).

지하수의 우라늄 분석을 위해 시료가 채취된 250개 중 247개 지하수공의 심도는 9~220 m (평균 심도 82 m)이다. 250개 지하수의 대부분은 음용 목적으로 이용되고 있으며 나머지 지하수는 농업, 생활용수로 이용되고 있다. 250개 지하수의 지질분류는 1:1,000,000 전자지질도에서 추출한 지질도를 이용하였는데 현장에서 측정된 좌표를 추출된 지질도에 중첩시켜서 250개 지하수의 지질을 Og1, Og2, Og3, Jgr, Kgr로 분류하였다(Fig. 1).

3. 연구방법

연구지역에서의 시료채취 지하수공의 선정은 괴산군 지하수시설관리대장을 참고하였다. 250개 지하수는 시

료의 대표성, 연속성 등을 고려하여 선정하였다. 시료채취는 2008년부터 2015년 사이에 이루어졌으나 250개 시료의 대부분인 212개는 2012년에 이루어졌다. 현장에서의 시료채취는 지하수공(well head)에서 이루어졌는데 지하수공에 설치된 펌프를 가동시킨 다음 양수된 지하수가 지상의 저수조 또는 가정집으로 가기 전 배출구에 호스를 연결하여 지하수를 흐르게 하였다. 일정시간 양수하여 지하수의 수온, pH 등 현장 수질이 안정됨을 확인한 후 시료를 채취하였다(Barcelona *et al.*, 1985). 시료채취시는 0.45 μm 멤브레인 필터로 여과하였으며 현장에서 농질산으로 pH 2를 유지시킨 다음 한국지질자원연구원의 지질자원분석연구센터로 운반하여 ICP-MS (DRC-II, Perkin Elmer)로 분석하였다.

지하수의 우라늄 함량은 1차적으로 모암의 우라늄 함량에 지배를 받는다. 연구지역 암석의 우라늄 함량(e(U))을 추정하기 위하여 휴대용 감마레이 스펙트로메트리를 이용하였다. 감마레이의 주 공급원은 암석내 포타슘 40 (⁴⁰K), 우라늄 238 (²³⁸U), 토륨 232 (²³²Th)의 붕괴이다. 감마레이 스펙트로메트리 측정 방법은 암석(풍화대)내의 이들 원소로부터 방출되는 감마선을 감지하여 K, e(U), Th의 함량을 측정하는 것이다. 측정 지점은 지하수 시료를 채취한 지하수공의 암석 노두에서 프로우브(probe)를 암석 노두에 직각으로 밀착시킨 다음 300초간 측정하였다. 만일 지하수공의 암석 노두가 없을 경우 주변으로 이동하였으나 가능하면 지하수공 가까이에서 측정하였다. 측정에 이용된 휴대용 감마레이 스펙트로메터는 portable gamma ray spectrometer (GR-320A envi SPEC device, SAIC)였는데 암석의 우라늄 강도를 농도로 환산한 우라늄의 등가 함량(e(U)) 측정 자료 200개를 획득하였다. GR-320A에 의한 측정치의 오차 범위는 0.1% 내외이다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 지질별 암석내 우라늄 함량

감마선 방사능 측정방법 중의 하나인 현장 감마선 측정은 야의 지질조사, 지구구조조사, 지화학조사, 광물 탐사, 농업, 환경조사 등에 흔히 이용된다(IAEA, 2003). 연구지역 암석의 우라늄 함량을 파악하기 위하여 지하수 시료가 채취된 250개 지하수 중 200개 지점에서 e(U)를 측정하였는 바 빈도 분포는 Fig. 2와 같다. 전체적으로 함량이 낮은 쪽으로 치우친 log normal distribution을 보이나 지하수의 라돈, 우라늄 함량 빈도 분포보다는 보다 정규분포에 가깝다.

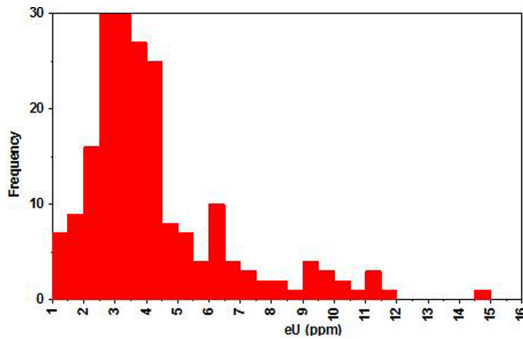


Fig. 2. Distribution diagram of uranium concentration (e(U)) occurrence in the rocks of the area.

연구지역 5개 지질의 암석에서 측정된 e(U)에 대한 통계는 Table 2와 같으며 이를 Box-plot으로 나타낸 것은 Fig. 3과 같다. 전체적으로 보아 200개 지점 암석의 우라늄 함량은 1.1~14.9 mg/kg (평균 4.31 mg/kg)으로 세계 지각의 우라늄 평균인 2.7 mg/kg보다 높다(Siegel and Bryan, 2004). 최고 함량은 Og2의 14.9 mg/kg이나 암석내 우라늄 함량이 가장 높은 지질은 Kgr로서

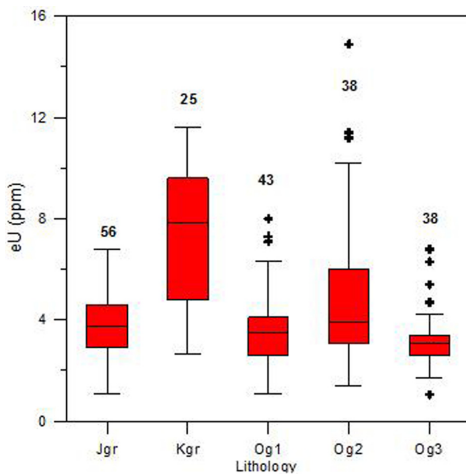


Fig. 3. Box plot showing uranium concentration (e(U)) for each geology.

3.0~11.6 mg/kg (중앙값 8.2 mg/kg)이고 가장 낮은 지질은 Og3로서 1.7~6.8 mg/kg (중앙값 3.05 mg/kg)이다. Og1, Og2, Jgr의 우라늄 함량 중앙값은 각각 3.50, 3.90, 3.75 mg/kg으로 서로 비슷하다. Jgr의 우라늄 함량 평균값 3.81 mg/kg은 주라기화강암인 남원 화강암의 4.00 mg/kg과 비슷하나 연구지역 Kgr의 우라늄 함량의 평균값 7.46 mg/kg은 Kgr인 속리산화강암의 4.03 mg/kg 보다 높다(Hong, 1983). Kgr 지역이 Jgr 지역보다 우라늄 함량이 더 높은 것은 Kgr 지역이 보다 산성계통인 암석으로 구성되었기 때문으로 판단된다(Lee *et al.*, 1996). 이와 같은 지질별 우라늄 함량은 일반적으로 화강암내의 우라늄 함량이 퇴적암보다 높은 것으로 보고되고 있는 것과(Dias *et al.*, 2016) 일치한다.

지질의 일부가 우라늄의 함량이 높은 탄질세일(평균 294 mg/kg (Kim, 1989), 360 mg/kg (Shin and Kim, 2011))이 협재하는 Og2의 암석내 우라늄 함량은 1.40~14.90 mg/kg (중앙값 3.90 mg/kg)에 불과하다. 암석내 우라늄 함량이 높을 것으로 예상되었던 Og2의 우라늄 함량이 낮은 것은 함 우라늄 탄질세일층은 Og2에 국부적으로 분포하며 층후도 20~40 m에 밖에 되지 않으며 평균 우라늄 함량이 6 mg/kg인 흑색점판암(Shin and Kim, 2011)이 Og2 전체 면적에서 차지하는 비율이 높지 않기 때문으로 판단된다.

4.2. 전체 지하수의 우라늄 함량

연구지역 250개 지하수의 우라늄 함량은 0.01~293.0 µg/L의 범위를 보였으며 평균함량은 5.29 µg/L, 중앙값은 0.86 µg/L이었다(Table 3). 연구지역에서 검출된 우라늄 최고치인 293.0 µg/L는 지금까지 한국에서 보고된 우라늄 함량 최고치인 3,670 µg/L (NIER, 2008)보다는 낮다. 250개 지하수의 우라늄 함량 중앙값 0.86 µg/L는 용인지역 100개 지하수의 중앙값 2.24 µg/L (NIER, 2013), 이천지역 74개 지하수의 중앙값 2.03 µg/L (Cho *et al.*, 2011)에 비해서는 낮고 단양, 논산지역 100개 지하수의 중앙값인 0.65 µg/L, 0.56 µg/L (NIER,

Table 2. Statistical analysis of the uranium (e(U)) concentrations (mg/kg) in each geology

	Jgr	Kgr	Og1	Og2	Og3	Total
N	56	25	43	38	38	200
Min.	1.1	3.0	1.1	1.4	1.7	1.1
Max.	6.8	11.6	8.0	14.9	6.8	14.9
Mean	3.81	7.46	3.60	4.87	3.26	4.31
Med.	3.75	8.20	3.50	3.90	3.05	3.70
Std. dev.	1.48	2.63	1.45	3.06	1.05	2.35

Table 3. Statistical analysis of the uranium concentrations ($\mu\text{g/L}$) in the groundwater from each geology

	Jgr	Kgr	Og1	Og2	Og3	Total
N	61	29	52	51	57	250
Min.	0.02	0.21	0.02	0.02	0.01	0.01
Max.	32.10	293.00	16.40	21.50	4.63	293.00
Mean	4.36	29.24	1.09	1.75	1.11	5.29
Med.	2.33	4.74	0.35	0.54	0.74	0.86
Std. dev.	5.66	63.27	2.94	4.02	1.11	23.25

2011)와 비슷하다. 연구지역 250개 지하수의 우라늄 함량은 남한 615개 지하수의 우라늄 중앙값 $0.19 \mu\text{g/L}$ (NIER, 2002)보다는 높으나 전국 5,171개 지하수의 우라늄함량 중앙값 $0.74 \mu\text{g/L}$ 와 비슷하다(NIER, 2016). 615개 지하수의 우라늄 함량이 연구지역 지하수보다 낮은 것은 천부 지하수가 다수 포함되어 있는 반면 5,171개 지하수의 우라늄 함량이 연구지역 지하수와 비슷한 것은 평균 심도가 100 m 내외인 마을상수도 지하수가 절반 가까이 포함되어 있기 때문으로 판단된다.

외국 각 나라 전체 지하수의 우라늄 함량은 잘 알려져 있지 않아서 연구지역 지하수의 우라늄 함량과 단순 비교하기는 어렵다. 연구지역 지하수의 우라늄 함량은 Cypriot의 81개 지하수의 우라늄 함량인 $0.1 \sim 40.0 \mu\text{g/L}$ (Charalambous *et al.*, 2013)보다는 높으나 미국 전역 3,541개 지하수의 우라늄 중앙값 $0.52 \mu\text{g/L}$ (USGS, 2011), 스위스 5,548개 지하수(일부는 지표수)의 중앙값 $0.77 \mu\text{g/L}$ (Stalder *et al.*, 2012)와 비슷하다. 그러나 중국 다둥지역 151개 지하수의 중앙값 $10 \mu\text{g/L}$ (Wu *et al.*, 2014), 핀란드의 288개 암반관정의 중앙값인 $1.5 \mu\text{g/L}$ (Vesterbacka *et al.*, 2005), 코소보 지하수의 우라늄 함량 $1.6 \mu\text{g/L}$ (Berisha and Goessler, 2013) 보다는 낮다.

250개 지하수의 우라늄 함량빈도 분포는 일반적인 지하수의 우라늄 조사에서 나타나는 다수의 데이터가 낮은 농도 값의 범위에 치우쳐 있는 상태(lognormal distribution)를 보인다(Fig. 4). 최고 함량은 $293.0 \mu\text{g/L}$

이나 WHO의 음용수 가이드라인이자 US EPA의 기준치인 $30 \mu\text{g/L}$ 를 넘는 비율은 7개(전체의 2.8%)에 불과하다. 연구지역 지하수의 $30 \mu\text{g/L}$ 초과율 2.8%(Table 4)는 한국 전체 지하수 5,171개의 초과율 4%(NIER, 2016), 미국 3,541개 지하수의 초과율 4%(USGS, 2011)보다는 낮고 스위스 5,548개 지하수(일부는 지표수)의 초과율 0.3%보다는 높다(Stalder *et al.*, 2012). 연구지역에는 암석내 우라늄의 함량이 높은 탄질세일(평균 함량 360 mg/kg (Shin and Kim, 2011))이 협재하는 지층(Og2)이 있고 지하수의 우라늄 함량이 높다고 알려진 화강암이 분포하지만 지하수의 우라늄 함량은 국내 전체 지하수의 우라늄 함량과 비슷한 수준으로 나타났다.

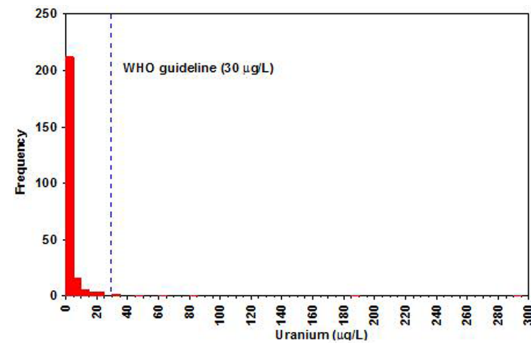


Fig. 4. Distribution diagram of uranium concentration occurrence in the groundwaters of the area.

Table 4. Distribution of the uranium concentrations in the groundwater from each geology

U ($\mu\text{g/L}$)	Jgr		Kgr		Og1		Og2		Og3		Total	
	No.	%	No.	%	No.	%	No.	%	No.	%	No.	%
< 1.0	19	31.1	7	24.1	42	80.8	31	60.8	35	61.4	134	53.6
1.1-3.0	19	31.1	1	3.4	8	15.4	14	27.5	17	29.8	59	23.6
3.1-10.0	16	26.2	11	37.9	2	3.8	4	7.8	5	8.8	38	15.2
10.1-30.0	6	9.8	4	13.8	0	0.0	2	3.9	0	0.0	14	4.8
30.1 <	1	1.6	6	20.7	0	0.0	0	0.0	0	0.0	7	2.8
Total	61	100	29	100	52	100	51	100	57	100	250	100

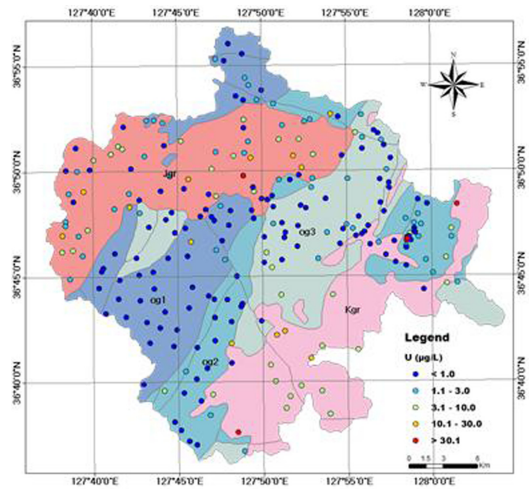


Fig. 5. Spatial distribution of uranium levels in groundwater on a simplified geological map of the area.

4.3. 지질별 지하수의 우라늄 함량

지하수의 우라늄 함량은 모암의 지질에 크게 좌우된다. Fig. 5는 250개 지하수의 우라늄 함량 정도를 5개의 등급으로 나누어 지질도와 함께 나타낸 것이다. 지하수의 우라늄 함량이 30 µg/L를 넘는 시료는 7개인데 이 중 6개는 Kgr 지역에 위치한다. 우라늄 함량이 3~30 µg/L인 지하수의 대부분은 Kgr과 Jgr 지역에 위치하며 Og1, Og2, Og3 지역 지하수는 대부분 3 µg/L 이하에 해당되어 일반적으로 알려진 화강암지역 지하수의 우라늄 함량이 높고 퇴적변성암지역 지하수의 우라늄 함량은 낮다는 사실과 일치한다.

연구지역의 고 우라늄 지하수는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 주로 Kgr과 퇴적변성암과의 경계 부근에 위치하고 있다. 따라서 지하수의 우라늄 함량 해석을 위한 지질 분류시 지표지질상으로는 비 화강암으로 분류되더라도 지하로 내려가면 화강암의 관입 영향으로 지하수의 우라늄과 라돈 함량이 높을 수 있기 때문에 (Skeppström and Olofsson, 2007) 화강암 경계까지의 거리를 고려한 지질 분류 등의 접근이 필요하다. 괴산군 청천면 덕평리에 위치하는 지하수공의 우라늄 함량은 21.5 µg/L으로서 Og2의 51개 지하수 중 최고치이나 이 지하수공은 Kgr과 인접해 있어서 지하 지질은 화강암의 관입 영향을 받았을 수도 있다. 다른 예로는 연풍군 유하리의 심도 120 m의 지하수공이다. 이 지하수공은 Kgr 경계부에 위치하고 있는데 지표지질상으로는 Og2로 분류되는 지하수공이다. 시추코아 자료에 의하면 심도 50 m까지는 퇴적변성암(Og2)으로 구성되나

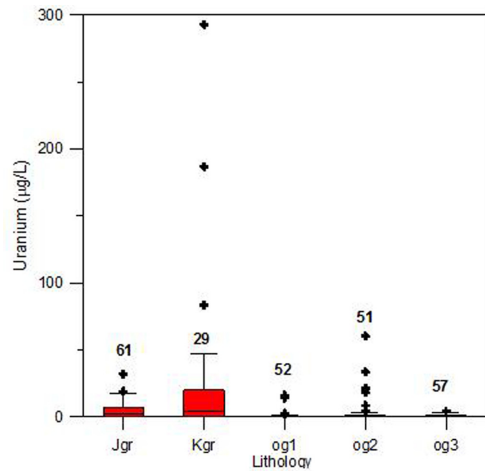


Fig. 6. Box plot showing uranium concentration in the groundwaters for each geology.

심도 50 m 하부부터는 관입 화강암류(Kgr)가 있음이 확인되어 본 연구에서는 Kgr로 분류하였다. 이 지하수공의 심도별 지하수의 우라늄 함량은 72.5~113.7 µg/L 임이 보고된 바 있다(NIER, 2012).

연구지역의 지질별 지하수 시료수와 우라늄 함량 평균, 중간값, 최고값 등은 Table 3과 같고 Fig. 6은 지질별 지하수의 우라늄 함량 정도를 Box-plot로 나타낸 것이다. 지질별 지하수의 우라늄 중앙값은 Kgr에서 4.74 µg/L로 가장 높고, 다음으로는 Jgr에서 2.33 µg/L로 높다. Og1의 중앙값은 0.35 µg/L, Og2는 0.54 µg/L, Og3은 0.74 µg/L로 낮다. 그러나 Table 2에서 보는 바와 같이 Og1, Og2, Og3의 암석내 우라늄 중앙값은 Jgr과 비슷하며 Kgr의 약 절반이나 되지만 지하수의 우라늄 중앙값은 Jgr의 20%, Kgr의 10%에 불과하다. 이는 화강암과 결정질암지역 지하수의 우라늄 함량이 높고 퇴적암변성지역 지하수에서 낮다는 일반적인 사실(Loomis, 1987)과 일치한다. 옥천대 퇴적암 지하수의 우라늄 함량이 화강암지역보다 낮은 것은 옥천대 퇴적변성암 지역에서는 환원환경이 유리하고 탄소 유기 화합물의 우라늄 흡착 등에 의하여 지하수 내 우라늄 함량이 낮게 검출되기 때문으로 설명될 수 있다(NIER, 2001). 옥천대 퇴적변성암지역 지하수의 우라늄 함량이 화강암지역보다 낮은 또 다른 설명으로는 일반적으로 암반 지하수의 수질형이 Ca-HCO₃(SO₄)에서 보다 알칼리성의 Na-HCO₃(SO₄) 형으로 바뀌는 환경에서 암석내 우라늄이 지하수에 쉽게 용해되는 것을(Salonen, 1994) 들 수 있다. 연구지역의 지질별 지하수의 수질형

은 Og1, Og2, Og3는 Ca(Mg)-HCO₃(Cl)이나 Jgr은 Ca(Mg,Na)-HCO₃(Cl), Kgr은 Ca(Na)-HCO₃(Cl) 형이다 (NIER, 2012). 그러나 5개 지질간 지하수의 우라늄 함량을 규제하는 요소의 평균값에는 큰 차이가 없는 것으로 나타나 이의 원인에 대한 연구가 필요하다. 즉, 5개 지질 지하수의 평균 pH는 7.11~7.36, ORP는 190~224 mV, HCO₃는 74.5~107.1 mg/L, F는 0.3~0.87 mg/L, SiO₂는 19.1~22.8 mg/L이다(NIER, 2012).

Kgr 지역 지하수의 우라늄 함량은 5개 지질 중에서 가장 높다(평균 29.24 µg/L). 이 함량은 전국 229개 Kgr 지역 지하수의 우라늄 평균인 3.85 µg/L (NIER, 2015) 보다는 높고, 13개 인도 남부 화강암지역 천부 지하수의 0.2~118.4 µg/L (평균 18.5 µg/L) (Brindha and Elango, 2013)와 비슷하며, 핀란드 헬싱키의 화강암 지역 308개 암반지하수의 우라늄 함량 1~14,870 µg/L (평균 240 µg/L) (Asikainen and Kahlos, 1979), 캐나다 마니토바주 남동부의 화강암지역 75개 지하수의 0.19~2,020 µg/L (평균 115.3 µg/L) (Betcher *et al.*, 1988)보다는 낮다. 전국 Kgr과 Jgr 지역 지하수의 우라늄 함량이 30 µg/L를 넘는 초과율이 각각 1.31%, 6.72%이(NIER, 2015)나 연구지역의 Kgr의 초과율은 20.7%로 나타나 이에 대한 추가 연구가 필요하다. 한편 Jgr의 초과율은 1.6%이고, Og1, Og2, Og3에서 30 µg/L를 넘는 지하수는 없다(Table 4).

4.4. 지하수공의 심도와 우라늄 함량

지하수의 산출심도에 따라서 단열 구조, 지하수환경 등이 달라지기 때문에 우라늄 함량이 달라질 수 있다. 연구지역 지하수의 산출심도와 우라늄 함량과의 관계를 파악하기 위하여 심도가 알려진 247개 지하수를 3개의 심도 구간(대수층)으로 구분하였다. 3개의 심도 구간은 충적층+풍화대 (<15.0 m), 풍화대+암반층 (15.1~30.0 m), 암반층 (30.1 m<)의 3개의 그룹이다 (Table 5). 굴진심도가 얇은 지하수공은 충적층(풍화대)

대수층으로 볼 수 있다. 그러나 굴진심도가 깊더라도 지표수나 천부 지하수의 공해 유입을 차단하는 시설이 부실하면 우라늄의 농도가 희석되기 때문에(Prasad *et al.*, 2009) 실제보다 우라늄 함량이 낮게 검출되는 문제가 있다.

3개 심도 구간별 지하수의 우라늄 함량은 암반층인 심도 30.1 m 이상 구간의 중앙값이 1.05 µg/L로 가장 높고, 풍화대 또는 기반암 상부에 위치한 심도 구간 15.1~30.0 m에서 0.41 µg/L이고, 충적층 또는 풍화대 구간인 심도 15 m 미만 지하수의 중앙값은 0.18 µg/L로 가장 낮다(Table 5). 이와 같은 결과는 핀란드 암반지하수의 우라늄 함량이 천부지하수의 약 8배에 달하며(Vesterbacka *et al.*, 2005), 369개 국내 지하수의 대수층 구간별 지하수의 우라늄 함량이 암반층 지하수에서 가장 높은 결과와도 일치한다(NIER, 2002).

5. 결 론

함 우라늄층이 국부적으로 존재하고 화강암 분포비율이 전체의 절반인 연구지역 지하수의 우라늄 함량은 0.01~293.0 µg/L으로 국내 전체 지하수의 우라늄 함량과 비슷한 것으로 나타났다. 연구지역의 지질을 5개로 구분하면 암석의 우라늄 함량은 Kgr에서 가장 높았으며 나머지 Jgr, Og1, Og2, Og3의 우라늄 함량은 Kgr의 절반 정도로 낮았다. 지질별 지하수의 우라늄 함량 중앙값도 Kgr에서 4.74 µg/L로 가장 높고 다음으로는 Jgr의 2.33 µg/L, Og1, Og2, Og3는 0.35~0.74 µg/L로 비슷하게 나타났다. Og2의 일부 지층에서 우라늄 함량이 높은 것으로 알려졌지만 본 연구에서는 Og2의 중앙값이 3.0 mg/kg 정도로 낮았으며 지하수의 우라늄 함량도 중앙값 0.54 µg/L 정도로 낮았는데 이의 원인으로는 Og2 내의 함우라늄층의 분포가 제한적인 점과 Og2의 지하 환경이 환원환경이 유리하고 탄소 유기화합물의 우라늄 흡착 등에 의하여 지하수 내 우라늄 함량이 낮게 검출되기 때문으로 해석된다. Kgr 지역 지하수의 우라늄 함량이 국내 Kgr 지역 지하수의 우라늄 함량보다 높은 것은 일차적으로 모암내 우라늄 함량이 2배 정도 더 높기 때문으로 판단된다. 심도별 지하수의 우라늄 함량(중앙값)은 심도 30.1 m 이상인 암반층 지하수에서 가장 높는데 심도 15.0 m 미만인 천부지하수의 약 6배이다. 연구지역 전체 지하수의 우라늄 함량이 WHO의 음용수 가이드라인인 30 µg/L을 초과하는 비율은 국내 전체 지하수와 약간 높다. 그

Table 5. Statistical analysis of the uranium concentrations (µg/L) in the groundwater of the area with well depth

	15 m>	15.1-30 m	30.0 m<
N	10	35	202
Min.	0.01	0.04	0.00
Max.	1.37	5.20	293.00
Mean	0.33	1.09	6.33
Med.	0.18	0.41	1.05
Std. dev.	0.41	1.40	25.76

리나 Kgr 지역 지하수의 30 µg/L 초과율은 국내 전체 Kgr 지역보다 훨씬 높은 20.7%나 되어 추가 연구가 필요하다.

사 사

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

References

- AERB (Atomic Energy Regulatory Board) (2004) Directive for limit on uranium in drinking water, India. Mumbai: Atomic Energy Regulatory Board.
- Asikainen, M. and Kahlos, H. (1979) Anomalously high concentrations of uranium, radium and radon in water from drilled wells in the Helsinki region, *Geochim. et Cosmochem. Acta*, v.43, p.1681-1686.
- Barcelona, M.J., Gibb, J.P., Helfrich, J.A. and Garske, E.E. (1985) Practical guide for groundwater sampling, SWS Contract Report, 374p.
- Betcher, R.N., Gascoyne, M. and Brown D. (1988) Uranium in groundwaters of southeastern Manitoba, Canada, *Can. J. Earth Sci.*, v.25, p.2089-2103.
- Berisha, F. and Goessler, W. (2013) Uranium in Kosovo's drinking water, *Chemosphere*, v.93, p.2165-2170.
- Brindha, K. and Elango, L. (2013) Occurrence of uranium in groundwater of a shallow granitic aquifer and its suitability for domestic use in southern India, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, v.295, p.357-367.
- Charalambous, C., Aletrari, M., Piera, P., Nicolaidou-Kanari, P., Edtsthiou, M. and Pasahlidis, I. (2013) Uranium levels in Cypriot groundwater samples determined by ICP-MS and α -spectroscopy, *J. Environ. Radioact.*, v.116, p.187-192.
- 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. Korean Soc. Eng. Geol.*, v.21, p.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. Korean Soc. Eng. Geol.*, v.23, p.477-491.
- Dias F., Lima, M., Sanjurjo-Sanchez J. and Alves, C. (2016) Analysis of spectra from portable handheld gamma-ray spectrometry for terrain comparative assessment, *J. Environ. Radioact.*, v.154, p.93-100.
- Dillon, M.E., Carter, G.L., Arra, R. and Kahn, B. (1997) Radon concentrations in groundwater of Georgia piedmont, *Health Phys.*, v.60, p.229-236.
- Health Canada (2017) Guidelines for Canadian Drinking Water Quality—Summary Table. Water and Air Quality Bureau, Healthy Environments and Consumer Safety Branch, Health Canada, Ottawa, Ontario.
- Hong, Y.K. (1983) Petrology and geochemistry of Jurassic and Cretaceous granites, South Korea, Unpublished PhD thesis, University of London, 365p.
- IAEA (International Atomic Energy Agency) (2003) Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, Technical report series, n° 1363, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- Kim, J.H. (1989) Geochemistry and genesis of the Guryongsan (Ogcheon) uraniumiferous black slate, *J. Korean Inst. Min. Geol.*, v.22, 35-63p.
- 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, *J. Environ. Health Perspect.*, v.110, p.337-342.
- Langmuir, D. (1997) Aqueous environmental geochemistry, Prentice Hall, Inc., New Jersey, 512p.
- 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, 59p.
- Lee, C.H. and Kim, J.H. (1972) The geological map of Goesan sheet, Geological survey of Korea, 22p.
- Loomis, D.P. (1987) Radon-222 concentration and aquifer lithology in North Carolina, *J. Ground Water Monit. Rev.* v.7, p.33-39.
- MH (Manatu Hauora) (2008) Drinking-water Standards for New Zealand 2005 (Revised 2008), Wellington, Ministry of Health.
- NFA (National Food Administration) (2005) A risk assessment of uranium in drinking water (Svensson, K., Darnerud, P.O. and Skerfving, S.), Livsmedelsverket, National Food Administration of Sweden, Rapport 10-2005, 32p.
- NHMRC (National Health and Medical Research) (2015) Australian Drinking Water Guidelines 6, National Health and Medical Research Council. Version 3.1.
- NIER (National Institute of Environmental Research) (1997) Study on the radionuclide concentrations in groundwater, KIGAM, 338p.
- NIER (2001) Study on the radionuclide concentrations in the groundwater (III), KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), 388p.
- NIER (2002) Study on the radionuclide concentrations in the groundwater (IV), KIGAM, 357p.
- NIER (2008) Studies on the naturally occurring radionuclides in groundwater of Korea (I) KIGAM, 293p.
- NIER (2011) Study on the naturally occurring radionuclides in groundwater of the two high potential areas (11), KIGAM, 253p.
- NIER (2012) Study on the naturally occurring radionuclides in groundwater of high potential area, KIGAM, NIER-SP2012-373, 245p.
- NIER (2013) Studies on the naturally occurring radionuclides in groundwater of the Youngin high potential area, KIGAM, NIER-SP2013-416, 220p.
- NIER (2015) Studies on the naturally occurring radionuclides in groundwater in the multi-geologic areas (15), KIGAM, NIER-SP2015-386, 203p.
- NIER (2016) Studies on the naturally occurring radio-

- nuclides in groundwater, Unpublished KIGAM report, 213p.
- Prasad, Y., Prasad, G., Choubey, V.M. and Ramola, R.C. (2009) Geohydrological control on radon availability in groundwater, *Radiat. Meas.*, v.44, p.122-126.
- Salonen, L. (1994) ^{238}U series radionuclides as a source of increased radioactivity in groundwater originating from Finnish bedrock, future groundwater resources at risk, *IAHS Proceeding and Reports*, n.222, p.71-84.
- Shin, D.B. and Kim, S.J. (2011) Geochemical characteristics of black slate and coaly slate from the uranium deposit in Deokpyeong area, *Econ. Environ. Geol.*, v.44, p.373-386.
- Siegel, M.D. and Bryan, C.R. (2004) Environmental geochemistry of radioactive contamination, *treatise on geochemistry*, p.205-261.
- Skeppström, K. and Olofsson, B. (2007) Uranium and radon in groundwater, *European Water*, 17/18, p.51-62.
- Stalder, E., Blanc, A., Haldimann, M. and Dudler, V. (2012) Occurrence of uranium in Swiss drinking water, *Chemosphere*, v.86, p.672-679.
- Thivya, C., Chidambaram, S., Thilagavathi, R., Keesari, T., Rao, M.S., Prasanna, M.V. and Nepolian, M. (2015) Occurrence of high uranium and radon in hard rock aquifers of South India – Evaluating the temporal and spatial trends, *J. Groundwater Sust. Dev.*, v.1, p.68-77.
- Turekian, K.K. and Wedepohl, K.H. (1961) Distribution of the elements in some major units of the earth crust, *Geol. Soc. Am. Bul.*, v.72, p.175-191.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency) (2009) National Primary Drinking Water Regulations.
- 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.
- Vesterbacka, P., Mäkeläinen, I. and Arvela, H. (2005) Natural radioactivity in drinking water in private wells in Finland, *Radiat. Prot. Dosimetry*, v.113, p.223-232.
- WHO (World Health Organization) (2011) Guidelines for drinking water quality. Chapter 9. Radiological aspects, 4th edition. World Health Organization, Geneva.
- Wu, Y., Wang, Y. and Xie, X. (2014) Occurrence, behavior and distribution of high levels of uranium in shallow groundwater at Datong basin, northern China, *Sci. Total Environ.*, v.472, p.809-817.