

국내 마을상수도 지하수의 우라늄 함량

조병욱^{1*} · 김문수² · 김동수² · 황재홍³

¹한국지질자원연구원 지하수생태연구센터, ²국립환경과학원 토양지하수연구과, ³한국지질자원연구원 지질자원데이터센터

Uranium Levels in Groundwater of CGS (Community Groundwater System) of Korea

Byong-Wook Cho^{1*}, Moon-Su Kim², Dong-Su Kim² and Jae-Hong Hwang³

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

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

³Geoscience Data Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

(Received: 6 August 2018 / Revised: 31 October 2018 / Accepted: 5 November 2018)

The uranium concentrations were determined in groundwater collected from 3,820 community groundwater system (CGS) located in remote rural areas where access to the nationwide water work is not easy. The frequency distribution of uranium concentrations shows a lognormal distribution which is common in most radionuclide surveys. The measured maximum uranium concentration was 1,757.0 µg/L with an average of 6.46 µg/L and a median of 0.76 µg/L. When grouping the uranium concentration results of CGS into 10 geological units, the median uranium concentration was high (0.99-2.05 µg/L) in three granite areas, and low in sedimentary rocks areas and porous volcanic rocks areas (0.04-0.50 µg/L). Of the 3,820 samples, 3.8% are above the guideline value of 30 µg/L (WHO, 2011). On the other hand, the exceeding rates of JGRA and PGRA CGS are 8.5% and 7.5%, respectively. Therefore, attention should be paid for the development of new CGS along with the management of the existing CGS in JGRA and PGRA areas.

Key words : uranium, concentration, groundwater, community groundwater system

광역상수도의 이용이 어려운 농촌지역의 식수원으로 사용되고 있는 3,820개 마을상수도 지하수의 우라늄 함량을 분석하였다. 전체 마을상수도 지하수의 함량분포는 다수의 데이터가 낮은 농도 값의 범위에 치우쳐 있는 상태를 보였으며 최고 함량은 1,757.0 µg/L, 평균 함량은 6.46 µg/L, 중앙값은 0.76 µg/L로 나타났다. 3,820개 지하수의 우라늄 함량을 10개의 지질로 분류하면 3개 화강암지역 지하수의 우라늄 함량 중앙값이 높으며(0.99-2.05 µg/L), 퇴적암과 다공성화산암지역 지하수의 우라늄 함량 중앙값은 0.04-0.50 µg/L으로 낮았다. 전체 마을상수도 지하수의 우라늄 함량이 USEPA의 기준치인 30 µg/L를 초과하는 비율은 3.8%이나 류라기화강암과 선캠브리아기화강암지역의 초과율은 각각 8.5%, 7.5%나 되어 이 지역에서는 기존 마을상수도 지하수의 우라늄 관리와 함께 신규 마을상수도 지하수의 개발에 주의가 요구된다.

주요어 : 마을상수도, 우라늄, 함량, 초과율

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

자연방사성물질 중의 하나인 우라늄은 비중이 두 배 정도로 큰 금속으로서 지각 모든 암석에 1-4 mg/kg의 미량으로 존재한다(Hess *et al.*, 1985). 우라늄은 화강암과 같은 산성 화성암, 화강암 기원의 변성암, 셰일, 탄산염에서 그 함량이 높으며 현무암과 같은 염기성 암석에서 함량이 낮은 것으로 알려져 있다(Birke *et al.*, 2010). 우라늄의 주요 공급 광물은 우라니나이트, 피치블렌드, 케로타이트와 인산염광물(Phosphate), 갈탄 등과 모나자이트, 저어콘, 일메나이트, 녹염석과 같은 소량의 포획광물이다. 우라늄은 음용지하수에서 주요 관심 대상이 되는 성분중의 하나이다. 일정 함량 이상의 우라늄을 장기간 섭취시 인체에 유해할 수 있는데 우라늄의 반감기가 긴 특성상 방사성적 특성보다는 화학적 특성이 더 커서 신장 독성을 유발시킬 수 있다(Kurtio *et al.*, 2002). 지하수의 우라늄은 다른 자연방사성물질인 라돈과 달리 제거에 비용이 많이 들며 제거 후 부산물의 처리 문제도 있어서 신규 음용 지하수는 우라늄 함량이 낮은 지역 위주로 개발할 필요가 있다.

이러한 우라늄의 위해성 때문에 일부 국가에서는 지하수의 우라늄 함량조사를 1960년 말부터 시작하였다. 그 결과 지하수의 우라늄 함량은 지질과 관련성이 커서 화강암지역 지하수에서 우라늄 함량이 높은 것으로 알려져 있다(Asikainen and Kahlos, 1979; Dillon *et al.*, 1997)). 2001년 현재 핀란드와 노르웨이에서 우라늄 함량이 조사된 지하수 수는 각각 25,000, 4,000개 이상, 2007년 현재 스웨덴과 미국에서 우라늄 함량 조사가 이루어진 지하수 수는 각각 110,000, 200,000개 이상으로 알려져 있다(NIER, 2015). 지금까지 조사된 지하수의 우라늄 함량 최고치는 14,870 $\mu\text{g/L}$ 로 (Asikainen and Kahlos, 1979) 알려져 있다. 한편 광역적인 규모의 지하수의 우라늄 함량 조사 결과들에 의하면 미국 전체 3,541개 지하수의 우라늄 함량 중앙값은 0.52 $\mu\text{g/L}$ (USGS, 2011), 스위스 5,548개 지하수(일부는 지표수)의 우라늄 함량 중앙값은 0.77 $\mu\text{g/L}$ (Stalder *et al.*, 2012), 코소보 951개 지하수의 우라늄 함량 중앙값은 1.6 $\mu\text{g/L}$ (Berisha and Goessler, 2013) 등이다. 그러나 지질이 주로 화강암으로 이루어진 중국 다퉈유역 161개 지하수의 우라늄 함량 중앙값은 10.0 $\mu\text{g/L}$ (Wu *et al.*, 2014), 캐나다 마니토바주 남동부의 우라늄 함량 평균값은 115.3 $\mu\text{g/L}$ (Betcher *et al.*, 1988) 등으로 높게 나타남을 보였다.

국내에서 최초의 전국적인 지하수의 우라늄함량 조사는 1997년 대전지역 일부 지하수에서 미국 EPA의 권고치를 넘는 자연방사성물질이 검출되었다는 보도가 있던 후인 1999년에 이루어졌다. 1999년부터 2002년까지 전국을 대상으로 조사된 636개 지하수의 우라늄 함량 조사 결과 최대치는 402.0 $\mu\text{g/L}$, 평균과 중앙값은 각각 4.50 $\mu\text{g/L}$, 0.19 $\mu\text{g/L}$ 이고, 조사된 지하수의 우라늄 함량 정도는 지질과 관계가 있는 것으로 알려졌다(NIER, 2002). 이후 2006년에는 환경부에 의해서 전국을 대상으로 한 10개년 실태조사 계획이 수립되었고 이에 따라서 2007년부터 2016년까지 전국의 마을상수도들 중심으로 한 지하수의 우라늄 함량 조사가 수행되었다. 1999년부터 2015년까지 우라늄 함량이 조사된 지하수는 5,171 개이고 함량 범위는 검출한계 미만부터 3,607 $\mu\text{g/L}$, 평균 함량은 7.07 $\mu\text{g/L}$, 중앙값은 0.70 $\mu\text{g/L}$ 로 보고된 바 있다(NIER, 2016). 한편 1999년부터 2014년까지의 조사 결과 자료를 이용한 4,140개 지하수의 우라늄 함량은 0-3,607 $\mu\text{g/L}$ (평균 8.01 $\mu\text{g/L}$, 중앙값 0.70 $\mu\text{g/L}$)으로 보고되었으며(Shin *et al.*, 2015), 역시 2000년부터 2011년까지 조사된 1,013개 지하수 자료를 이용한 우라늄 함량은 검출한계 미만부터 2,297 $\mu\text{g/L}$ (평균 27.5 $\mu\text{g/L}$, 중앙값 1.1 $\mu\text{g/L}$)로 보고된 바 있다(Yun *et al.*, 2016).

그러나 위의 조사 결과들은 국내의 지질을 4-5개의 지질로 구분하였고 지하수의 심도별(천부와 심부), 용도별(음용, 농업, 생활) 구분이 없이 단지 국내 지하수의 전반에 대한 우라늄 함량을 기술하고 있다. 본 연구는 국내 농촌, 산악지역 주민들의 식수원으로 이용되고 있는 비교적 심도가 일정한 마을상수도 지하수의 우라늄 함량 특성을 파악하기 위하여 1999년부터 2016년까지 지하수를 원수로 사용하고 있는 3,820개 마을상수도에서 시료를 채취, 분석하고 지질과 관련하여 해석하였고 외국의 함량정도와 비교하였다.

2. 지질 분류

국내의 지질은 복잡한 편이지만 연구에 이용된 3,820개 마을상수도 지하수의 우라늄 함량을 지질과 관련시켜 해석하기 위하여 3개의 퇴적암, 2개의 변성암, 3개의 화강암, 2개의 화산암 등 총 10개 지질로 단순화하였다(Fig. 1). 3,820개 마을상수도의 지질분류는 현장 조사시 GPS (GPSmap 60CSx, Garmin)를 이용하여 측정된 좌표를 1:000,000 축적의 수치지질도에 중첩시켜서 이루어졌다.

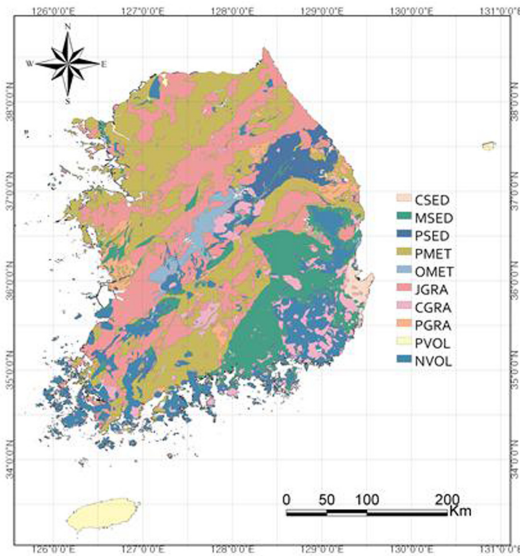


Fig. 1. A simplified geological map of the area (A brief description of the units is given in Table 1).

3개 퇴적암은 고생대퇴적암(PSED), 중생대퇴적암(MSED), 신생대퇴적암(CSED)으로 구분된다. PSED는 사암, 규암, 셰일, 석회암 등으로, MSED는 사암, 셰일, 역암 등으로, CSED는 고화정도가 불충분한 사암, 셰일, 역암, 니암 등으로 구성된다. 2개 변성암은 옥천대 변성암(OMET)과 선캠브리아기 변성암(PMET)으로 구분된다. 옥천대변성암(OMET)은 천매암, 편암, 석회암, 각섬암, 사암, 점판암 등 시대 미상의 변성퇴적암류로 구성되며 일부 점판암은 우라늄 함량이 360 mg/kg이나 되는 것으로 알려져 있다(Shin and Kim, 2011). 선캠브리아기 변성암(PMET)은 주로 화강편마암, 편마암으로 구성되며 일부 편암이 존재한다. 3개 화강암은 선캠브리아기화강암(PGRA), 쥐라기화강암(JGRA), 백

악기화강암(CGRA)으로 구분된다. PGRA는 흑운모화강암, 복운모화강암, 화강편마암 등으로 구성된다. JGRA는 퇴적기원의 마그마로부터 유래된 것으로 주로 흑운모화강암, 각섬석화강암 등으로 구성된다. JGRA에는 일부 트라이아스기 화강암이 포함된다. CGRA는 지하부 물질의 부분용융으로부터 유래된 것으로 알려져 있는데 주로 흑운모화강암으로 구성되며 일부 반려암, 섬록암, 암맥 존재한다. CGRA에는 일부 신생대 화강암이 포함된다. 그러나 화강암을 성분적으로 분류하면 복운모화강암지역 지하수의 우라늄 함량이 높으므로 연구 면적이 시, 군 정도로 적을 경우 화강암의 시기별 분류보다는 성분적 분류가 더 필요하다. 2개의 화산암 중에서 NVOL은 백악기의 안산암, 유문암, 용결응회암과 일부 퇴적암으로 구성되는 비다공성화산암이다. PVOL은 주로 제 4기 현무암으로 구성되며 암석 내 지하수의 순환이 빠른 특징을 가지고 있다(Table 1).

3. 시료채취와 분석

마을상수도는 광역상수도의 공급이 어려운 농촌지역이나 산간지역에 음용 및 생활용수를 공급하기 위하여 개발된 지하수이다. 2009년 현재 지하수를 원수로 하는 전국 마을상수도 수는 약 15,000개이고 1개 마을상수도당 급수인구는 107명, 평균 지하수 사용량은 약 61 m³/d 내외이다(MOE, 2010). 마을상수도에서 각 가정으로 지하수를 공급하는 과정은 다음과 같다. 먼저 심도 100 m 내외의 양수정이 있는데 이 양수정에는 보통 3-10 마력의 수중펌프가 설치되어 있다. 수중펌프의 가동으로 양수된 지하수는 대개 100-300 m³/d의 양수율로 1시간 정도 양수된다. 양수된 지하수는 배관을 거쳐서 양수정보다 높은 곳에 설치된 저수조(15-60 m³ 내외)에 저장된다. 저수조에 저장된 지하수는

Table 1. Descriptions of the 10 geological units

Unit	Age and lithology	Examples
CSED	Cenozoic sedimentary rocks	Sandstone, shale, conglomerate, mudstone
MSED	Mesozoic sedimentary rocks	Sandstone, shale, conglomerate, mudstone
PSED	Paleozoic sedimentary rocks	Sandstone, quartzite, shale, limestone
PMET	Pre Cambrian metamorphic rocks	Granitic gneiss, gneiss, schist
OMET	Ogcheon metamorphic rocks	Phyllite, schist, limestone, sandstone, slate
CGRA	Cretaceous granites	Biotite granite, gabbro, granodiorite
JGRA	Jurassic granites	Biotite granite, hornblende granite
PGRA	Pre Cambrian granites	Granite gneiss, biotite granite, two-mica granite
PVOL	Porous volcanic rocks	Basalt with sedimentary rocks
NVOL	Non-porous volcanic rocks	Andesite, rhyolite, tuff with sedimentary rocks

연결관을 통하여 중력배수로 각 가정으로 공급된다. 즉, 각 가정에서의 지속적인 지하수 사용으로 말미암아 저수조에 저장된 지하수가 일정량 이하로 줄어들면 저수조 내에 설치된 센서가 이를 감지하여 자동으로 양수정에 설치된 수중펌프를 가동시켜 다시 일정량의 지하수를 저수조에 채운다. 각 마을상수도에 따라서 차이가 있으나 양수정과 저수조 사이의 거리는 112-114 m, 저수조와 각 가정까지의 거리는 182-442 m 내외인 경우가 많다(No *et al.*, 2011). 3,820개 마을상수도 중심도가 알려진 1,976개 지하수공의 심도는 10-450 m 이고 95% 이상이 심도 50-200 m에 분포한다.

전체 15,000여 개 마을상수도 중에서 3,820개 지하수 시료 채취 대상의 선정은 시료의 대표성, 접근성, 기존 조사 마을상수도와의 거리 등을 고려하여 선정하였다. 마을상수도에서의 샘플링은 주로 2006년부터 2015년 사이에 이루어졌으며, 샘플링시에는 지하수의 현장수질 측정과 지하수공의 좌표 측정 등이 이루어졌다. 양수정에서의 지하수 시료 채취는 수중펌프를 5-10 분간 가동시켜 양수정 체적의 3배 이상 지하수를 배출시켜 채취되는 시료가 양수정이 관통한 대수층의 수질을 대변할 수 있을 때 즉, 배출되는 지하수의 수온과 현장 수질이 안정을 이룬 후 채취하였다(Barcelona *et al.*, 1985). 시료 채취시에는 0.45 µm 멤브린 필터로 여과하였고 pH 2를 유지하기 위하여 현장에서 농질산으로 처리하였다. 채취된 지하수 시료는 한국지질자원 연구원의 지질자원분석연구센터로 운반, ICP-MS (DRC-II, Perkin Elmer)로 분석하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 마을상수도 지하수의 우라늄 함량 특성

일반적으로 지하수의 우라늄 함량은 낮은 편이며 그

함량 범위는 0.1-1 µg/L이다(Smedley *et al.*, 2005). 3,820개 마을상수도 지하수의 우라늄 함량을 분석한 결과는 Table 2에 나타나 있다. 전체 지하수의 우라늄 함량은 검출한계 미만부터 최고 1,757.0 µg/L의 넓은 범위를 보였으며 평균함량은 6.46 µg/L, 중앙값은 0.76 µg/L, 표준편차는 39.17 µg/L으로 나타났다. 이 함량은 1999-2002년 사이에 조사된 전국 636개 지하수의 우라늄 함량 평균값인 4.5 µg/L (중앙값 0.19 µg/L) (NIER, 2002)보다 높은 편이다. 이와 같은 우라늄 함량의 차이는 본 연구에 이용된 마을상수도 지하수공의 평균 심도는 116 m, 전체의 95%가 심도 50 m 이상 임에 비해서 636개 지하수공의 평균 심도는 65 m, 전체의 28%가 심도 20 m 미만인 층적층 또는 풍화대 지하수이기 때문으로 판단된다. 즉, 지하수의 산출 심도가 깊을수록 보다 Ca-HCO₃(SO₄)형의 알칼리에 가까워지고 수용성의 우라늄 착화물이 형성되기 때문에 해석된다(Lahermo *et al.*, 2001; Salonen, 1994). 한편 3,820개 마을상수도 지하수의 우라늄 함량은 1999년부터 2014년까지 전국을 대상으로 한 실태조사와 일부 정밀조사 결과 자료를 이용한 4,140개 지하수의 평균 우라늄 함량 8.01 µg/L, 중앙값 0.70 µg/L (Shin *et al.*, 2015)와 비슷하다. 그러나 2000년부터 2011년까지의 실태조사 결과물인 1,013개 지하수의 평균 우라늄 함량 27.5 µg/L, 중앙값 1.1 µg/L (Yun *et al.*, 2016)보다는 낮다. 이는 1,013개 마을상수도 지하수의 대부분은 화강암지역에 위치하기 때문에 일반 마을상수도보다 지하수의 우라늄 함량이 높았기 때문으로 판단된다.

국내 마을상수도 지하수의 우라늄 최고함량은 1,757.0 µg/L나 되지만 미국 Main 주의 10,299 µg/L (Cothorn and Rebers, 1990), 핀란드의 12,400 µg/L (Salonen and Hukkanen, 1997), 노르웨이의 2,000 µg/L

Table 2. Statistical analysis of the uranium concentrations (µg/L) in the CGS groundwaters from different geological units

Geology	Samples	Min.	Max.	Mean	Med.	Std. Dev.
CSED	37	0.01<	0.46	0.09	0.04	0.12
MSED	623	0.01<	78.4	1.36	0.50	4.37
PSED	136	0.01<	196.9	2.62	0.49	16.90
PMET	1,100	0.01<	563.6	6.46	0.73	31.83
OMET	113	0.01<	145.2	3.05	0.75	13.85
CGRA	350	0.01<	187.0	3.87	0.99	12.40
JGRA	977	0.01<	1,757.0	13.6	2.05	67.38
PGRA	67	0.01<	216.3	11.2	1.20	32.08
PVOL	43	0.03	1.37	0.14	0.06	0.23
NVOL	374	0.01<	158.6	1.60	0.27	9.10
Total	3,820	0.01<	1,757.0	6.46	0.76	39.15

Table 3. Uranium concentrations in groundwaters from various countries

Country	No. of samples	Range (µg/L)	Median (µg/L)	Lithology	Reference
Brazil	210	<0.01-7.5	1.2 ¹⁾	No dominant	Goddy and Goddy, 2006
Canada (Manitoba)	287	<0.02-2,020	10	Granite, gneiss	Betcher <i>et al.</i> , 1988
Finland	6,600	-	32.2 ¹⁾	Granite, gneiss	Voutilainen <i>et al.</i> , 2000
Germany	908	<0.01-16.0	0.17	No dominant	Birke <i>et al.</i> , 2010
Kosovo	951	0.01-166.0	1.6	No dominant	Berisha and Goessler, 2013
Swiss	5,548	0.05-92.02	0.77	Sedimentary rocks	Stalder <i>et al.</i> , 2012
USA	3,541	0.02-550.0	0.52	No dominant	USGS, 2011

¹⁾Mean

(Reimann *et al.*, 1996)에 비해서는 낮다. 외국의 지역별 지하수의 우라늄 함량에 대한 연구는 많으나 외국의 각 나라 전체 지하수의 우라늄 함량에 대한 연구 결과는 잘 알려져 있지 않고 화강암류 등의 지질 분포 비율의 차이, 연구에 이용된 지하수에 천부 지하수가 얼마나 많이 포함되어 있는지 등 때문에 각 나라간 지하수의 우라늄 함량을 비교하기는 쉽지 않다. 그러나 국내 마을상수도 지하수의 우라늄 함량을 외국의 알려진 광역적인 지하수의 우라늄 함량 조사결과와 비교하면 Table 3과 같다. 전반적으로 보아서 한국보다 화강암과 편마암의 비율이 높은 핀란드 6,600개 지하수의 우라늄 평균값은 32.2 µg/L (Voutilainen *et al.*, 2000), 캐나다 마니토바주 287개 지하수의 우라늄 중앙값 10.0 µg/L (Betcher, *et al.*, 1988) 등은 국내 마을상수도 지하수의 우라늄 함량보다 높다. 그러나 한국보다 화강암과 편마암의 비율이 낮은 브라질 210개 지하수의 우라늄 평균은 1.2 µg/L (Goddy and Goddy, 2006), 코소보 951개 지하수의 우라늄 중앙값은 1.6 µg/L (Berisha and Goessler, 2013), 스위스 5,548개 지하수(일부 지표수 포함)의 우라늄 중앙값은 0.77 µg/L (Stalder *et al.*, 2012), 미국 3,541개 지하수의 우라늄 중앙값은 0.52 µg/L (USGS, 2011)와 비슷하며 독일 908개 광천수의 우라늄 중앙값 0.17 µg/L보다는 높다 (Birke *et al.*, 2010) (Table 3).

3,820개 지하수의 우라늄 함량빈도 분포(Fig. 2)는 일반적인 지하수의 우라늄 조사에서 흔히 나타나는 다수의 데이터가 낮은 농도 값의 범위에 치우쳐 있는 상태(lognormal distribution) (Pinti *et al.*, 2014)를 보인다. Table 3의 각 나라 지하수의 우라늄 함량 범위와 중앙값과 본 연구의 함량범위와 중앙값과의 비교에서도 국내 마을상수도 지하수의 우라늄 함량 분포는 상당히 낮은 쪽으로 치우쳐 있음을 알 수 있다. 따라서 마을상수도 지하수의 우라늄 최고 함량은 1,757.0 µg/L

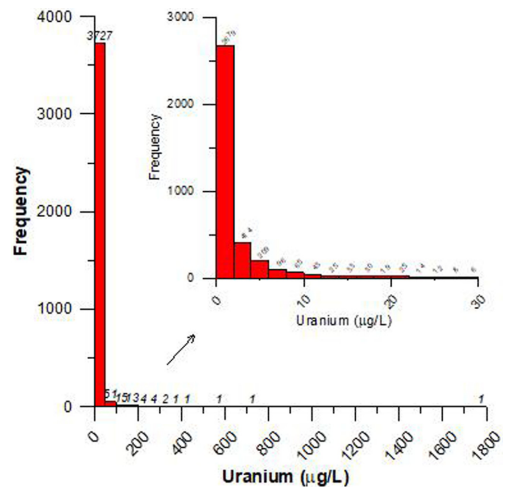


Fig. 2. Histograms showing the distribution of uranium concentrations of the 3,820 CGS.

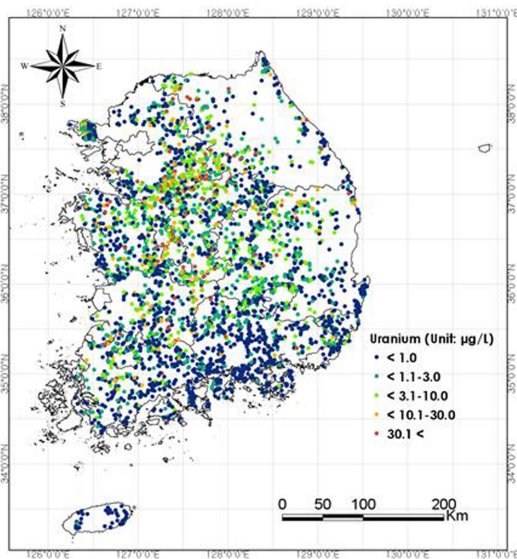
이고 평균함량은 6.46 µg/L이나 되지만 우라늄 함량이 5.0 µg/L 이상은 전체의 15.5%, 30 µg/L 이상은 3.8%, 100 µg/L 이상은 1.1%에 불과하다(Table 4).

4.2. 지질별 마을상수도 지하수의 우라늄 함량

한국의 지질은 복잡하지만 지질별 마을상수도 지하수의 우라늄 함량 특성을 파악하기 위하여 10개의 지질로 단순화시켰다. 10개 지질에서 우라늄 함량 분석을 위해 채취된 지하수 시료 수는 대체로 10개 지질의 분포 면적에 비례한다. 따라서 분포 면적이 적은 CSED, PVOL 지역의 시료 수는 각각 37, 43개에 불과하다(Table 2). 10개 지질 중 CSED와 PVOL 지역은 나머지 8개 지질에 비해서 우라늄 함량 변화가 적은 편인데 이는 화강암의 관입이 거의 없는 비교적 균질한 암석으로 구성되어 있으며 지하수의 이동 속도가 빠르기 때문으로 판단된다. 3,820개 마을상수도 지하수의

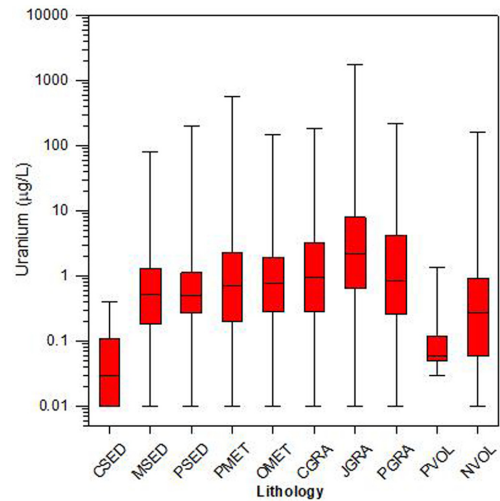
Table 4. Uranium concentrations in groundwaters from various countries

Geology	Samples	1.0<	1.0-5.0	5.01-30.0	30.01-100.0	100.0<
CSED	37	37	0	0	0	0
MSED	623	431	170	19	3	0
PSED	136	100	29	4	2	1
PMET	1,100	626	322	109	29	14
OMET	113	68	35	9	0	1
CGRA	350	176	116	53	4	1
JGRA	977	326	340	228	60	23
PGRA	67	31	18	13	3	2
PVOL	43	42	1	0	0	0
NVOL	374	287	72	13	1	1
Total	3,820	2,124	1,103	448	102	43

**Fig. 3.** Spatial distribution of uranium concentrations from 3,820 CGS groundwaters.

우라늄 함량분포는 Fig. 3과 같은바 우라늄 함량이 높은 마을상수도는 주로 화강암지역에 위치한다(Fig. 1).

10개 지질 중에서 우라늄 함량 중앙값은 화강암인 JGRA 지역에서 2.05 µg/L로 가장 높다(Table 2, Fig. 4). JGRA 다음으로 우라늄 함량 중앙값이 높은 지질은 PGRA의 1.20 µg/L, CGRA의 0.99 µg/L이다. 주로 화강편마암, 편마암, 편암으로 구성된 PMET의 우라늄 중앙값은 0.75 µg/L이다. 한편 일부 암석내 우라늄 함량이 360 mg/kg이나 되는(Shin and Kim, 2011) OMET 지역의 우라늄 함량 중앙값은 0.75 µg/L로 전체 마을상수도의 중앙값과 비슷한 것으로 나타났다. 이는 옥천대변성암내 함 우라늄층이 일부에 불과하며

**Fig. 4.** Box plot showing uranium concentration for each geological unit.

함 우라늄층내에서도 환원환경에 유리한 수질환경과 탄소 유기화합물의 우라늄 흡착 등에 의하여 지하수에는 우라늄 함량이 낮게 검출되는 것으로 추정된다(Choo, 2002; Hwang, 2010). CSED 지역 마을상수도 지하수의 우라늄 함량 중앙값(0.04 µg/L)은 같은 퇴적암지역인 MSED, PSED의 중앙값(0.50, 0.49 µg/L)보다 낮는데 이는 CSED 지역에는 미고결 퇴적암이 포함되어 있어서 물-암석 반응시간이 상대적으로 짧기 때문으로 해석된다. PVOL 지역 마을상수도 지하수의 우라늄 함량 중앙값도 0.06 µg/L으로 낮는데 이는 PVOL의 주 암석인 현무암이 염기성 암석이며 현무암층 내 발달한 scoria층 등의 대수층의 평균 투수량계수가 202 m²/d로 (Choi, 1999) 크기 때문으로 해석된다. 이와 같은 지질별 지하수의 우라늄 함량의 차이는 일반적으로 화

Table 5. International uranium guidance levels ($\mu\text{g/L}$) for drinking water

Australia ¹⁾	Canada ²⁾	India ³⁾	Sweden ⁴⁾	USA ⁵⁾	WHO ⁶⁾
17	20	60	15	30	30

¹⁾NHMRC (2015), ²⁾Health Canada (2014), ³⁾AERB (2004), ⁴⁾NFA (2005), ⁵⁾USEPA (2009), ⁶⁾WHO (2011)

강압과 결정질암지역 지하수의 우라늄 함량이 높고 퇴적암지역 지하수의 라돈 함량이 낮다는 사실과 일치한다 (Cothorn and Robers, 1990).

마을상수도 지하수의 우라늄 함량은 화강암지역에서 높지만 특히 JGRA 지역의 우라늄 함량 중앙값은 2.05 $\mu\text{g/L}$ 로 같은 화강암인 PGRA, CGRA 지역의 1.20, 0.99 $\mu\text{g/L}$ 보다 높다. 비록 CGRA, JGRA, PGEA 지역 암석의 우라늄 함량에 대한 충분한 자료는 없지만 JGRA 지역의 우라늄 함량이 CGEA와 PGRA 지역의 우라늄 함량보다 높은 일차적인 원인은 JGRA 지역의 암석내 우라늄 함량이 CGRA, PGRA 지역 암석내 우라늄 함량보다 높기 때문으로 추정된다. 예를 들면 괴산군 CGRA 지역의 지하수의 우라늄 함량 중앙값은 4.74 $\mu\text{g/L}$ 로 JGRA 지역 지하수의 우라늄 함량 중앙값은 2.33 $\mu\text{g/L}$ 보다 높는데 이의 주요 원인으로는 CGRA 지역 화강암내 우라늄 함량 중앙값(8.2 mg/kg)이 JGRA 지역 화강암의 중앙값(3.65 mg/kg)보다 높은 것으로 연구된 바 있다(Cho, 2017). 따라서 국내 전체적으로 볼 때는 JGRA 지역 지하수의 우라늄 함량이 가장 높지만 지역적으로는 화강암의 우라늄 함량, 지하수 환경 특성 등에 따라서 CGRA, PGRA 지역 지하수의 우라늄 함량이 JGRA 지역보다 더 높을 수 있다. JGRA 지역 마을상수도 지하수의 우라늄 함량 중앙값은 2.05 $\mu\text{g/L}$ 로 10개 지질 중에서 가장 높다. 그러나 핀란드 헬싱키지역 308개 지하수의 우라늄 중앙값 16.0 $\mu\text{g/L}$ (Asikainen and Kahlos, 1979), 캐나다 마니토바주 287개 지하수의 우라늄 중앙값 10.0 $\mu\text{g/L}$ (Betcher, *et al.*, 1988)와 비교하면 JGRA 지역 마을상수도 지하수의 우라늄 함량은 낮은 편이다.

퇴적암인 MSED, PSED 지역과 화산암인 NVOL 지역 마을상수도 지하수 중 일부는 우라늄 함량이 30 $\mu\text{g/L}$ 를 넘는다(Table 4). 물론 튀니지 Jerba Island의 경우 우라늄 함량이 높은 해수침투의 영향으로 인해서 퇴적암지역 지하수의 우라늄, 라돈 함량이 높게 나타나는 경우도 있다 (Telahigue *et al.*, 2018). 그러나 퇴적암, 화산암지역 마을상수도 지하수에서 우라늄 함량이 높게 검출되는 것은 이들 지하수공의 지표지질이 지질도상에서는 퇴적암, 화산암으로 구분되지만 실제 지하수공이 관통한 지하 하부는 화강암 관입의 영향을 받았을

가능성이 크거나 (Skeppstrom and Olofsson, 2007), 지하수공이 관통한 지하 하부에서 관입화강암이 나타나기 때문으로 볼 수 있다(Cho, 2017).

4.3. 마을상수도 지하수의 우라늄 제안치(기준치) 초과율

외국의 여러 나라에서는 음용수의 우라늄 제안치(기준치)를 가지고 있는 경우가 많은데 대체로 15~60 $\mu\text{g/L}$ 의 범위이다. 즉, 스웨덴의 제안치(Proposed value)는 15 $\mu\text{g/L}$ 이고(NFA, 2005), 캐나다의 기준치(MAC; Maximum Acceptable Concentration)는 20 $\mu\text{g/L}$ (Health Canada, 2014), 미국의 기준치(MCL; Maximum Contaminant Level)는 30 $\mu\text{g/L}$ (USEPA, 2009), WHO의 제안치(Provisional guideline value)는 30 $\mu\text{g/L}$ (WHO, 2011), 인도의 제안치(Threshold value)는 60 $\mu\text{g/L}$ 이다 (AERB, 2004) (Table 5). 현재 국내 음용수의 우라늄 기준은 감시항목으로서 30 $\mu\text{g/L}$ 이 설정되어 있다. 3,820개 마을상수도 지하수의 우라늄 함량이 30 $\mu\text{g/L}$ 를 초과하는 비율은 3.8%이고, 100 $\mu\text{g/L}$ 를 초과하는 비율은 1.1%로 낮아진다. 전체 마을상수도 지하수의 우라늄 함량 평균값이 6.46 $\mu\text{g/L}$ 임에 비해서 30 $\mu\text{g/L}$, 100 $\mu\text{g/L}$ 를 초과하는 비율이 다른 나라에 비해서 상대적으로 낮은 것은 상당수의 데이터가 낮은 농도 값의 범위에 치우쳐 있는 상태(lognormal distribution)이기 때문이다. 예를 들면 코소보 951개 지하수의 우라늄 함량 범위는 0.01-166 $\mu\text{g/L}$, 평균값은 5.0 $\mu\text{g/L}$ 이지만 중앙값은 1.6 $\mu\text{g/L}$ 이고 30 $\mu\text{g/L}$ 을 넘는 비율은 2.6%나 된다(Table 3).

우라늄 함량이 30 $\mu\text{g/L}$ 를 초과하는 비율은 3.8%이나 마을상수도 지하수를 지질별로 구분하면 초과율에는 큰 차이가 있다. CSED 지역 37개 마을상수도 지하수는 모두 우라늄 함량이 1 $\mu\text{g/L}$ 이하로 낮다. 이는 이 지역이 신생대의 미고결퇴적물이 상당수 포함되어 있어서 암석 자체의 우라늄 함량이 낮고 물-암석 반응이 약할뿐더러 지하수의 이동 속도가 빠르기 때문으로 해석된다. PVOL 지역도 우라늄 함량이 낮아서 43개 마을상수도 지하수 중 1개만이 1.01-5.0 $\mu\text{g/L}$ 에 속하고 나머지 42개는 모두 1 $\mu\text{g/L}$ 이하이다. 이는 이 지역의 모암이 염기성 암석이며 대수층내 지하수의 이동

속도가 빠르기 때문에 해석된다(Choi, 1999). 지하수의 우라늄 함량이 30 $\mu\text{g/L}$ 를 초과하는 비율이 가장 높은 지역은 화강암지역인 JGRA와 PGRA 지역으로서 각각 8.5%, 7.5%나 된다. 그러나 같은 화강암인 CGRA 지역의 초과율은 1.4%에 불과하여 변성암인 PMET 지역의 3.9%는 물론 PSED 지역의 2.2%보다도 낮게 나타난다. CGRA 지역 350개 마을상수도 지하수의 중앙값이 0.99 $\mu\text{g/L}$ 로 PMET의 중앙값 0.75 $\mu\text{g/L}$ 보다도 높은데도 불구하고 30 $\mu\text{g/L}$ 을 초과하는 비율이 오히려 낮은 것은 CGRA 지역 마을상수도 지하수의 우라늄 함량분포는 JGRA, PGRA, PMET 지역보다 log-normal distribution 정도가 덜하기 때문으로 해석된다(Table 2). 한편 MSED와 NVOL 지역 마을상수도 지하수의 30 $\mu\text{g/L}$ 초과율은 0.5%로 낮다. 따라서 화강암인 JGRA, PGRA 지역에서는 기존 마을상수도 지하수의 우라늄 관리와 함께 신규 마을상수도 지하수의 개발에 주의가 요구된다.

5. Conclusion

국내 마을상수도 지하수의 우라늄 함량 범위와 지질별 함량 특성을 파악하기 위하여 3,820개의 시료에 대한 우라늄 함량을 분석한 결과 검출한계 미만부터 최고 1,757.0 $\mu\text{g/L}$ (중앙값 0.76 $\mu\text{g/L}$) 범위로 국내와 비슷한 지질환경을 가지는 나라 지하수의 우라늄 함량에 비해서는 낮게 나타났다. 지하수의 우라늄 함량변동 분포는 일반적인 지하수의 우라늄 조사에서 흔히 나타나는 다수의 데이터가 낮은 농도 값의 범위에 치우쳐 있는 상태 (lognormal distribution)를 보여 외국의 비슷한 함량 분포를 가지는 지하수에 비해서 중앙값과 WHO의 제안치인 30 $\mu\text{g/L}$ 를 초과하는 비율이 상대적으로 낮은 편이다. 마을상수도 지하수의 지질을 10개의 지질로 단순화시켰을 때 지하수의 우라늄 함량은 화강암인 JGRA, PGRA 지역에서 가장 높았으며 다음으로는 변성암이며 퇴적암과 화산암지역에서는 낮게 검출되었다. 화강암지역 지하수에서 우라늄 함량이 가장 높지만 외국의 화강암지역 지하수와 비교하면 낮은 편이다. WHO의 제안치인 30 $\mu\text{g/L}$ 초과 비율은 화강암지역 중에서도 JGRA와 PGRA 지역에서 높았으며 변성암인 PMET 지역은 전국 평균과 비슷하며 CGRA 지역은 전국 평균보다도 낮은 것으로 나타났다. 한편 퇴적암인 CSED, MSED, PSED, 화산암류인 PVOL과 NVOL, 옥천변성암(OMET) 지역에서는 30 $\mu\text{g/L}$ 초과하는 마을상수도 지하수가 거의 없었다. 마을상수도 지

하수의 우라늄은 라돈과 달리 제거에 비용이 많이 들며 제거 후 부산물의 처리 문제도 있기 때문에 JGRA, PGRA 지역에서 신규 마을상수도 개발시에는 우라늄 함량이 낮은 지하수를 개발함이 필요하다.

사 사

본 연구는 2015년 국립환경과학원의 '지하수 중 자연 방사성물질 함유실태 조사: NIER-RP2016-324'와 한국 지질자원연구원의 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.
- Birke, M., Rauch, U., Lorenz, H. and Kringel, R. (2010) Distribution of uranium in German bottled and tap water, *J. Geochem. Explor.*, v.107, p.272-282.
- Cho, B.W. (2017) Uranium concentrations in groundwater of the Goesan area, Korea, *J. Korean Soc. Eng. Geol.*, v.50, p.353-361.
- Choi, B.S. (1999) Determination of aquifer characteristics from specific capacity data of wells in Cheju Island (in Korean with English abstract). *J. Korea Soc. Groundw. Environ.*, v.16, p.180-187.
- Choo, C.O. (2002) Characteristics of uraniferous minerals in Daebog granite and significance of mineral species, *J. Mineral Soc. Korea*, v.15, p.11-21.
- Cothorn, C.R. and Rebers, P.A. (1990), Radium and uranium in drinking water, Lewis Publishers, Inc, Chelsea, Michigan, p.286.
- 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.
- Godoy, J.M. and Godoy, M.L. (2006) Natural radioactivity in Brazilian groundwater. *J. Environ. Radioact.*, v.85, p.71-83.
- Health Canada (2014) Guidelines for Canadian Drinking Water Quality—Summary Table. Water and Air Quality Bureau, Healthy Environments and Consumer

- Safety Branch, Health Canada, Ottawa, Ontario.
- Hess, C.T., Michel, J., Horton, T.R., Prechard, H.M. and Coniglio, W.A. (1985) The occurrence of radioactivity in public water supplies in the United States, *Health Phys.*, v.48, p.553-586.
- Hwang, J. (2010) Hydrochemistry of groundwater in the uraniumiferous sedimentary rocks of the Ogcheon belt, Republic of Korea, *J. Korean Earth Sci. Soc.*, v.31, p.205-213.
- Kurtio, P., Auvinen, A., Salonen, L., Saha, H., Pekkanen, J., Mäkeläinen, S., Väisänen, S., Penttilä, I. and Komulainen, H. (2002) Renal effects of uranium in drinking water, *J. Environ. Health Perspect.*, v.110, p.337-342.
- Lahermo, P., Tarvainen, T., Hatakka, T., Huikuri, P., Ilmasti, M., Juntunen, R., Karhu, J., Kortelainen, N., Nikkarinen, M. and Väisänen, U. (2001) Chemical composition of well water in Finland-main results of the 'one thousand wells' project. Geological Survey of Finland, Current Research 1999-2000, special paper 31 p.57-76
- MOE (Ministry of Environment), 2010. Status of Community Groundwater System in 2009.
- 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 (2002) Study on the radionuclide concentrations in the groundwater (IV), KIGAM, 357p.
- 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 radionuclides in groundwater, KIGAM, 213p.
- Noh, H.J., Jeong, D.H., Yoon, J.K., Kim, M.S., Ju, B.K., Jeon, S.S. and Kim, T.S. (2011) Natural reduction characteristics of radon in drinking groundwater. *J. Korea Soc. Groundw. Environ.*, v.16, 12-18.
- 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) ²²²Rn activity in groundwater of the St. Lawrence Lowlands, Quebec, eastern Canada: relation with local geology and health hazard. *J. Environ. Radioact.*, v.136, p.206-217.
- Reimann, C., Hall, GEM, Siewers, U. (1996) Radon, fluoride and 62 elements as determined by ICP-MS in 45 Norwegian hard rock groundwater samples, *Sci. Total. Environ.* v.192, p.1-19.
- 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. Radio-analytical and Nuclear Chemistry*, v.226, 967-74.
- Salonen L. (1994) ²³⁸U 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.
- Shin, W.S., Oh, J.S., Choung, S.W., Cho, B.W., Lee, K.S., Woo, N.C. and Kim, H.K. (2016) Distribution and potential health risk of groundwater uranium in Korea, *Chemosphere*, v.163, p.108-115.
- Smedley, P.L., Smith, B., Abesser C. and Lapworth, D. (2005) Uranium occurrence and behavior in British groundwater, British Geological Survey (Report number: CR/06050N)
- 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.
- Telahigue, F., Agoubi, B., Soudid, F. and Kharroubi, A. (2018) Groundwater chemistry and radon-222 distribution in Jerba island, Tunisia. *Environ. Radioact.*, v.182, p.74-84.
- 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.
- Voutilainen, A., Mäkeläinen, I., Huikuri, P. and Salonen, L. (2000) Radon atlas of wells drilled into bedrock in Finland. STUK-A171. Helsinki: Säteilyturvakeskus.
- 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.
- Yun, S.W., Lee, J.Y. and Park, Y.C. (2016) Occurrence of radionuclides in groundwater of Korea according to the geological condition, *J. Korean Soc. Eng. Geol.*, v.26, p.71-78.