

원주지역 지하수의 자연방사성물질 우라늄과 라돈의 산출 특성과 수리지화학

이병대¹ · 조병욱¹ · 문희선^{2*} · 황재홍³

¹한국지질자원연구원 지하수연구소 책임연구원, ²한국지질자원연구원 지하수연구소 선임연구원,
³한국지질자원연구원 지질자원데이터센터 책임연구원

Hydrogeochemistry and Occurrences of Natural Radionuclides Uranium and Radon in Groundwater of Wonju Area

Byeongdae Lee¹ · Byung Uk Cho¹ · Hee Sun Moon^{2*} · Jae Hong Hwang³

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

²Senior Researcher, Groundwater Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

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

Abstract

We measured the concentrations of natural radionuclides (uranium and radon) and major elements in groundwater collected from forty wells located in Wonju area to investigate the hydrochemistry and the occurrence of these radionuclides. The range of electrical conductivity (EC) value in the study area was 73~400 $\mu\text{S}/\text{cm}$. In addition to the increase of EC value, the content of cations and anions also tends to increase. Uranium concentrations ranged from 0.06~50.5 $\mu\text{g}/\text{L}$ (median value, 1.55 $\mu\text{g}/\text{L}$) and radon concentrations ranged from 67~8,410 pCi/L (median value, 1,915 pCi/L). Uranium concentrations in 3 well, 7.5% of the samples, exceeded 30 $\mu\text{g}/\text{L}$, the maximum contaminant level (MCL) proposed by the US Environmental Protection Agency (EPA), based on the chemical toxicity of uranium. Radon concentrations in 9 wells, 22.5% of the samples, and 1 well, 2.2% of the samples, exceeded 4,000 pCi/L (AMCL of the US EPA) and 8,100 pCi/L (Finland's guideline level), respectively. Concentrations of uranium and radon related to geology of the study area showed the highest values in groundwater of the biotite granite area. Uranium and radon contents in the groundwater are comparatively low compared to those in other countries with similar geological settings. It is likely that the measured value was lower than the actual content due to the inflow of shallow groundwater by the lack of casing and grouting.

Keywords: groundwater, uranium, radon, geology, well

초 록

원주지역 지하수의 수리지화학 및 자연방사성물질인 우라늄과 라돈의 산출특성을 규명하기 위하여 40개 관정을 대상으로 시료를 채취하고 분석하였다. 연구지역 지하수의 EC는 최소 73에서 최대 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균 212 $\mu\text{S}/\text{cm}$)의 범위를 나타내고 있으며, EC의 증가와 더불어 주요 용존 양이온과 음이온의 함량도 증가하는 경향을 나타낸다. 우라늄 농도는 0.06~50.5 $\mu\text{g}/\text{L}$ (중앙값 1.55 $\mu\text{g}/\text{L}$)로 넓은 분포를 보여주고

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Hee Sun Moon
E-mail: hmoon@kigam.re.kr

Received: 15 November, 2019

Revised: 12 December, 2019

Accepted: 16 December, 2019

© 2019 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.

있으며, 라돈은 67~8,410 pCi/L (중앙값 1,915 pCi/L)의 범위를 나타내고 있다. 우라늄 농도에서 미국 EPA MCL 30 µg/L를 초과한 곳은 3개 소로 전체 시료수의 7.5%에 해당된다. 라돈의 경우, 미국 EPA AMCL(Alternative Maximum Contaminant Level) 4,000 pCi/L를 초과한 곳은 9개소로 전체 시료수의 22.5%이다. 이중 핀란드의 음용 제한치인 8,100 pCi/L를 초과하는 시료는 1개소이다. 연구지역에서 지질별 지하수의 우라늄과 라돈 농도는 흑운모화강암 지역의 지하수에서 가장 높다. 연구지역 지하수의 우라늄과 라돈 함량은 유사한 지질을 가지는 외국에 비하면 낮은 것으로 나타났다. 이는 우리나라 지하수 관정의 특성상 케이싱 및 그라우팅이 미비한 관정이 많으므로 천부 지하수의 공내 유입을 의심할 수 있다. 이러한 관정의 특성으로 인하여 실제 함량보다 낮게 검출되었을 가능성을 배제할 수 없다.

주요어: 지하수, 우라늄, 라돈, 지질, 관정

서론

근래 우리나라의 급속한 산업화에 따른 지표수의 양적인 부족과 오염으로 인해서 음용수로서 지하수에 대한 의존도가 점점 높아지고 있는 실정이다. 여기에 국민들의 생활수준과 건강에 대한 관심이 높아지면서 맑고 깨끗한 물에 대한 요구가 커지고, 상수 원수가 오염되고 수돗물에 대한 불신이 팽배되면서 지하수의 음용 수요가 증가하고 있다. 그러던 중 1998년 대전지역의 지하수에서 방사성물질인 우라늄이 검출되었다는 보도 후 지하수 중 방사성물질이 관심의 대상이 되었다. 이를 계기로 정부 차원에서 지하수 중 자연방사성물질 관리대책 수립의 필요성이 대두되었고, 전국적인 규모의 지하수 중 자연방사성물질 함량실태 및 원인조사가 국립환경과학원과 한국지질자원연구원에 의해 수행되었다.

지하수 중에 자연적으로 존재하는 우라늄을 비롯한 라돈, 라듐, 토륨 등과 같은 자연방사성물질은 암석 중에 미량으로 존재하는 방사성 핵종 광물들이 풍화나 변질작용에 의하여 분해된 후에, 지하수에 용존된 것이다. 우라늄의 자연붕괴 과정에서 방사선이 방출되면서 라돈, 라듐 등과 같은 여러 종류의 딸원소(daughter products)들이 생성되므로 지질학적으로는 모암 속에 존재하는 우라늄 광물의 함량과 이들의 용해도가 지하수 중의 방사성물질의 농도에 가장 큰 영향을 미친다(Langmuir, 1978, 1997; Ioannidou et al., 2011). 지하수 중의 우라늄은 암석 내의 함우라늄 광물의 용해에 기인되기도 하지만, 원자력 산업에서 배출되는 방사성 폐기물, 석탄 및 기타 연료의 연소, 그리고 우라늄을 함유한 인산염 비료의 사용과 같은 인간활동에 의해 기인되기도 한다(Spalding and Sackett, 1972; Birke et al., 2009). 우라늄은 반감기가 길기 때문에 우라늄의 인체 위해성은 방사성 독성보다는 중금속으로서의 화학적 독성이 문제가 된다. 라돈은 반감기가 3.82일에 불과한 무색 무취의 불활성기체이며, 인간에게 피폭되는 방사선 양의 50% 이상을 차지하며 폐암 발병인자로 알려져 있다(Cho et al., 2007). 그리고 물 속의 라돈 섭취는 주로 위장과 같은 여러 내부 장기의 종양 위험 증가와 관련이 있는 것으로 보고되었다(USEPA, 1999). 지하수 중 우라늄과 라돈에 대한 선진국의 조사는 대개 1960년대 말부터 시작되었으며, 조사 지점 수는 미국의 경우 200,000개, 스웨덴은 35,000개 이상이다(NIER, 2006). 외국의 연구결과에 의하면 화강암지역 지하수의 우라늄, 라돈 함량이 높은 것으로 보고되고 있다(Lowry et al., 1987; Wathen, 1987; Cothorn and Rebers, 1990; Banks et al., 1998)

지하수중 방사성물질에 대한 수질기준은 일반적인 오염물질과는 달리 기준이 아닌 제안치 수준이며, 지하수를 많이 사용하는 일부 국가에 국한되어 있다. 지하수내 방사성물질의 허용 농도는 미국 EPA(Environmental Protection Agency)의 경우 우라늄은 30 µg/L, 라돈은 4,000 pCi/L이다. 우리나라는 우라늄을 먹는물 감시항목으로 지정하고 상수원수에 대하여 2회 측정하도록 되어 있다.

지하수 중 방사성물질과 관련된 국내 연구로는 최근 방사성물질에 대한 관심이 커지면서 이와 관련된 많은 논문들이 보고되었다. Yun et al.(2018)은 대전 화강암지역 지하수의 우라늄과 라돈 함량에 대해 연구하였다. Cho et al.(2007, 2010, 2012, 2014, 2017)은 우리나라 전지역에 걸쳐 지하수 중의 자연방사성물질에 대한 농도 분포 및 지질특성에 따른 분포 특

성 등을 연구하였다. Jeon(2009)은 부산지역 지하수의 방사성물질 특성에 대하여 보고하였으며, Lee(2008)는 지하수내 우라늄과 라돈의 발생에 대한 연구와 방사성물질의 건강위해 및 저감방법에 대한 연구를 수행하였다. Han and Park(1996)은 대전지역 지하수에 함유된 우라늄 및 라돈의 함량에 대하여 보고하였다. 외국의 연구에서는 Adriano et al.(2016)은 프랑스의 Crau 연안대수층에서 지하수와 지표수의 상호작용을 연구하는데 라돈을 이용하였다. Singh et al.(2009)은 인도의 먹는물 시료에 대한 우라늄과 라돈 농도를 평가하였다. Godoy and Godoy(2006)는 브라질의 지하수 중 우라늄, 라돈, 라듐 농도에 대한 연구를 수행하였고, Choubey et al.(2005)은 히말라야 둔 계곡의 지하수내 라돈에 대한 연구를 수행하였다. Banks et al.(1998)은 노르웨이 기반암내 지하수의 방사성물질 특성에 대하여 보고하였다.

이 논문의 연구지역은 강원도 원주 지역으로 이 지역은 화강암, 변성암, 퇴적암 등의 다양한 지질로 구성되어 있다. 연구 지역은 상수도가 보급되지 않는 농촌지역이 많아 상수원수와 농업용수로서 지하수의 비중이 높은 지역이다. 금번 연구의 목적은 연구지역 지하수의 수질 및 우라늄과 라돈에 대한 농도분포를 파악하고 방사성물질의 특성을 밝히는 것이다.

지질

연구지역의 지질은 선캄브리아기 경기 편마암복합체, 오도비스기 석회암, 그리고 쥬라기 화강암으로 구성되어 있다 (Fig. 1; Won et al., 1974; Chi et al., 1989; Park et al., 1989; Koh et al., 2011).

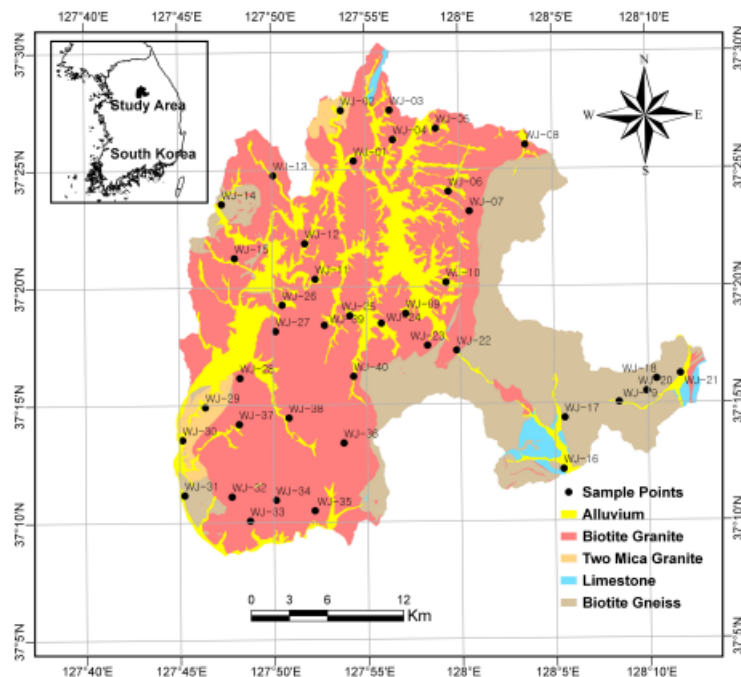


Fig. 1. Geological map showing major geologic units in the study area.

경기 편마암복합체는 연구지역 동남부에 분포하며 주로 흑운모편마암 및 백운모편마암으로 구성되어 있다. 흑운모편마암은 연구지역 기반을 이루고 있던 편암류들이 미그마타이트질화 또는 화강암화 된 것으로 편암과 석회석이 잔류물로 산재되어 있다. 백운모편마암은 사질인 퇴적암들이 미그마타이트질화 또는 화강암화 작용에 의해서 형성된 것으로 다량의 백운모를 함유하는 것이 특징이다.

오도비스기 석회암은 연구지역 동남부에 소규모로 분포하고 있으며 녹색 편암과 석회암이 호층을 이루고 있다. 녹색편암은 비교적 변성도가 낮으나 곳에 따라 천매암을 보이며 불순 석회암은 가끔 변성되어 석회규산염으로 분포하기도 한다.

쥬라기 화강암은 연구지역 서부의 전 지역에 걸쳐 광범위하게 분포하고 있으며 주로 흑운모화강암과 복운모화강암으로 구성되어 있다. 흑운모화강암은 중립 내지 조립으로 반상석리를 보여주며 주 구성광물은 장석, 정장석, 미사장석 및 흑운모이며, 부수광물로 인회석, 스피넬 및 저어콘 등이 있다. 복운모화강암은 세립 내지 중립의 완전질 암석으로 백운모와 흑운모의 양이 거의 비슷하며 백운모와 흑운모의 상대적 양에 따라 유백색 내지 유희백색을 띤다. 주 구성광물은 석영, 사장석, 정장석, 미사장석, 백운모, 흑운모이며 2차 변질광물로 점운모와 녹니석이 있다.

시료채취 측정방법

연구지역 지하수의 수리지화학적 특성과 자연방사성물질의 함량 분포와 산출 특성을 파악하기 위하여 40개소의 지하수 관정에서 시료를 채취하였다(Fig. 1). 시료 채취는 수질의 안정을 위해 10~20분 동안 양수공 체적의 약 3~5배를 양수하고, pH, EC, Eh, 수온 등이 안정된 후에 채취하였다(Barcelona et al., 1985). 시료 채취시 현장에서 pH, EC, Eh, 수온 등을 측정하고 0.45 μm 멤브레인 필터로 여과하였다. 우라늄을 비롯한 양이온 분석용 시료는 고순도의 농질산(65%)을 1 ml 첨가하여 pH를 2 이하로 유지시킨 후 실험실로 운반하여 분석하였다. 주요 양이온은 유도결합쌍원자방출분광분석기(ICP-AES)로, 주요 음이온은 이온크로마토그래피(IC)를 이용하여 분석하였다. 오차 범위는 상대오차 $\pm 5\%$ 이다. 라돈 측정용 시료는 22 mL 유리용기에 지하수 시료 8 mL와 섬광용액(Optiphase Hisafe3) 12 mL를 첨가하여 5분간 잘 흔들어 섞어 채취하였다. 채취된 지하수 시료는 한국지질자원연구원에서 α 선과 β 선 분리측정이 가능한 액체섬광계수기(Quantulus 1220TM, Perkin-Elmer)를 이용하여 분석하였다. 라돈의 측정효율은 ^{222}Rn 표준용액이 없는 관계로 모핵종인 ^{226}Ra 표준용액(NIST SRM 4966A)을 사용하여 3회 측정하였으며, 측정효율은 $95 \pm 4\%$ 이다.

결과 및 고찰

지하수의 수질특성

연구지역에서 측정된 40개 지하수의 현장수질과 주요 용존이온 및 우라늄, 라돈 분석 결과는 Table 1과 같다. 연구지역 지하수의 물-암석 반응과 지표 오염의 유입 정도를 파악하기 위하여 주요 용존이온과 EC와의 상관관계 및 오염지시 항목 간의 상관성을 파악하였다(Figs. 2, 3).

연구지역 지하수의 EC는 최소 73에서 최대 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (평균 212 $\mu\text{S}/\text{cm}$)의 범위를 나타내고 있다. 연구지역 지하수의 경우 EC의 증가와 더불어 주요 용존 양이온(Na, K, Ca, Mg)의 함량도 증가하는 경향을 나타낸다(Fig. 2a, 2b, 2c, 2d). 따라서 주요 용존 양이온의 경우, 물-암석 반응의 진행에 의해서 증가한 것으로 볼 수 있다. Na 이온의 경우 EC 증가와 더불어 증가하는 양상을 나타내나(Fig. 2a), Ca 이온에 비하여 상대적으로 함량이 낮은 특징을 나타내고 있다. K 이온의 경우 Na, Ca, Mg 이온에 비하여 함량도 낮고 증가 경향이 다른 양이온에 비하여 뚜렷하지 않다(Fig. 2b). 주요 용존 양이온 중에서 Ca 이온과 Mg 이온의 증가가 두드러져, 원주지역에서 채취된 지하수의 경우 주로 Ca-Mg 탄산염 광물의 용해가 지하수의 수질을 결정하고 있는 것으로 판단된다(Fig. 2c, 2d). Ca 이온과 HCO_3^- 이온의 관계에서도 Ca 이온이 증가할수록 HCO_3^- 이온이 증가하는 것으로 보아서 탄산염 광물의 용해가 지하수의 수질을 지배하는 반응으로 판단된다(Fig. 2e).

조암광물인 사장석과 K-장석의 풍화에 의하여 Na, K, Ca 이온이 증가할 수 있으며, Na와 Ca 고용체인 사장석의 풍화는 사장석의 Na, Ca 비율에 따라 지하수의 Na, Ca 이온 함량과 더불어 SiO₂ 함량을 증가시킬 수 있다. 원주지역 지하수의 SiO₂ 함량은 EC와 크게 상관관계를 나타내지 않는다(Fig. 2f). 따라서 원주지역의 지하수 수질은 규산염광물(사장석 등)의 풍화보다는 탄산염광물의 풍화에 더 큰 영향을 받고 있는 것으로 해석된다.

Table 1. Physiochemical properties of groundwater samples from Wonju area. Unit is mg/L unless noted otherwise

Sample	U (µg/L)	Rn 222 (pCi/L)	pH	EC (µS/cm)	Eh (mV)	T (°C)	K	Na	Ca	Mg	Cl	SO ₄	F	NO ₃	HCO ₃	SiO ₂	Geology
WJ-01	1.58	660	7.3	154	215	14.2	0.42	9.40	17.70	3.34	2.56	1.88	0.23	6.90	79.61	27.6	Biotite granite
WJ-02	3.59	1,610	6.1	130	269	14.8	1.61	6.21	11.10	1.59	9.24	6.62	0.23	16.50	19.83	12.6	Two mica granite
WJ-03	4.44	910	7.8	325	225	14.9	0.62	8.77	50.20	5.81	8.91	10.50	0.15	11.40	159.52	20.1	Biotite granite
WJ-04	1.49	1,290	6.7	243	236	13.5	0.89	12.10	27.20	5.14	11.40	14.30	0.13	30.30	69.54	28.0	Biotite granite
WJ-05	3.82	250	6.9	289	224	15.3	1.83	14.80	36.00	4.84	8.73	5.71	0.79	0.63	153.42	25.2	Biotite granite
WJ-06	2.77	2,300	7.5	230	254	13.9	0.80	9.44	29.60	4.54	9.25	5.25	0.13	21.80	90.89	27.2	Biotite granite
WJ-07	2.16	2,140	6.8	181	264	14.8	1.63	9.15	21.30	3.19	6.48	10.70	0.12	10.20	72.59	26.7	Biotite granite
WJ-08	32.80	250	8.3	380	193	23.1	2.19	46.00	33.20	3.75	9.95	11.30	2.46	0.46	198.86	11.1	Biotite granite
WJ-09	10.40	4,670	6.6	400	275	14.7	2.39	19.80	49.40	7.22	34.70	16.90	0.34	17.20	134.20	27.2	Biotite granite
WJ-10	0.51	810	6.5	229	313	14.8	2.55	11.80	25.10	4.73	12.90	13.20	0.19	11.50	79.00	20.1	Biotite granite
WJ-11	4.72	8,410	6.7	284	317	14.4	1.55	15.20	31.40	5.85	14.20	12.60	0.21	30.30	93.64	26.1	Biotite granite
WJ-12	7.99	760	7.3	297	274	14.1	0.42	14.30	37.90	6.22	11.50	7.02	1.07	6.24	143.05	18.1	Biotite granite
WJ-13	50.50	4,080	7.9	275	252	14.3	0.53	8.44	47.20	1.04	13.30	10.00	0.53	11.50	117.43	16.5	Biotite granite
WJ-14	0.42	410	6.8	160	200	13.7	1.24	12.90	15.60	1.97	10.60	6.94	1.56	0.55	60.39	12.4	Biotite gneiss
WJ-15	0.32	6,620	6.4	82	302	14.5	0.33	5.27	7.21	1.34	4.13	4.66	0.05	7.87	21.96	15.9	Biotite granite
WJ-16	0.34	570	8.0	191	206	12.5	0.80	1.48	28.70	7.16	1.42	5.35	0.06	7.44	109.19	12.3	Biotite gneiss
WJ-17	1.18	2,680	7.6	178	264	12.5	1.25	3.35	29.70	1.67	2.34	8.12	0.24	6.97	87.84	10.8	Biotite gneiss
WJ-18	0.51	540	7.9	214	271	12.2	0.44	1.86	29.80	8.28	1.68	5.69	0.06	6.50	118.95	8.7	Limestone
WJ-19	0.06	920	6.5	285	297	12.7	8.10	4.87	29.10	5.93	14.00	8.11	0.02	86.00	25.01	10.7	Biotite gneiss
WJ-20	1.39	1,200	7.9	132	258	16.0	0.51	6.07	17.30	1.66	3.20	7.02	0.19	4.88	60.39	13.9	Biotite gneiss
WJ-21	0.23	480	7.7	194	273	13.3	0.86	2.43	31.90	2.15	3.20	6.00	0.06	15.80	85.40	11.3	Limestone
WJ-22	0.80	1,090	7.6	270	285	14.0	2.74	8.14	30.60	7.30	21.00	12.70	0.12	16.40	78.69	18.2	Biotite granite
WJ-23	0.54	2,520	6.7	267	184	15.0	2.98	9.46	28.40	8.19	9.88	13.50	0.06	14.50	108.28	17.6	Biotite granite
WJ-24	0.36	2,540	7.0	247	271	15.4	1.71	9.81	28.80	5.80	13.00	11.00	0.06	21.80	85.40	23.5	Biotite granite
WJ-25	34.80	2,320	7.5	265	258	18.7	1.53	20.00	27.00	5.64	5.62	8.81	2.13	5.20	134.81	14.6	Biotite granite
WJ-26	12.60	5,400	6.6	338	278	13.9	1.37	15.40	40.30	10.90	9.76	11.80	0.21	12.10	170.80	31.7	Biotite granite
WJ-27	7.44	71	7.6	179	201	13.9	0.67	7.43	25.90	2.28	2.20	6.43	0.25	8.06	87.54	17.4	Biotite granite
WJ-28	0.96	4,440	7.4	125	281	13.2	0.83	5.78	13.40	2.66	2.46	5.41	0.18	12.70	45.75	18.7	Biotite granite
WJ-29	0.10	2,380	6.5	221	313	13.3	0.63	16.00	19.40	3.11	17.80	0.78	0.11	40.50	43.92	34.0	Two mica granite
WJ-30	0.06	980	6.5	185	57	14.7	0.55	5.76	16.10	3.74	5.00	8.53	0.13	5.38	62.53	26.5	Two mica granite
WJ-31	3.47	3,490	7.9	185	237	14.6	0.97	12.60	22.00	2.36	1.75	6.05	1.65	0.81	99.13	20.9	Biotite gneiss
WJ-32	0.53	67	7.0	78	273	13.6	0.57	5.24	8.55	0.72	2.48	4.91	0.30	3.39	30.20	15.9	Biotite gneiss
WJ-33	0.11	390	6.3	111	288	14.2	0.42	5.46	11.60	1.38	3.33	5.63	0.12	13.10	33.55	15.9	Biotite granite
WJ-34	6.36	1,690	8.3	146	260	14.6	0.38	8.38	20.90	0.46	1.96	7.02	1.23	3.18	68.63	19.8	Biotite granite
WJ-35	14.90	4,640	7.4	162	247	14.5	0.89	10.70	16.60	1.85	5.94	4.59	1.33	20.50	50.33	26.3	Biotite granite
WJ-36	2.74	2,670	7.9	212	269	14.3	0.46	15.40	22.50	3.78	6.96	5.40	1.40	6.39	101.26	18.7	Biotite granite
WJ-37	2.35	7,410	6.7	161	284	13.9	0.79	9.23	17.70	2.18	6.24	9.53	0.30	19.40	46.36	25.0	Biotite granite
WJ-38	1.61	3,070	6.6	233	302	14.9	0.73	19.90	24.50	2.27	9.60	11.50	1.86	16.10	86.01	28.9	Biotite granite
WJ-39	1.51	4,880	7.0	73	232	14.2	0.49	4.97	7.60	0.86	2.10	4.18	0.37	4.57	27.15	15.2	Biotite granite
WJ-40	0.31	2,660	6.3	188	329	14.0	2.23	9.85	19.30	2.79	13.70	8.31	0.13	14.90	54.29	12.7	Biotite granite

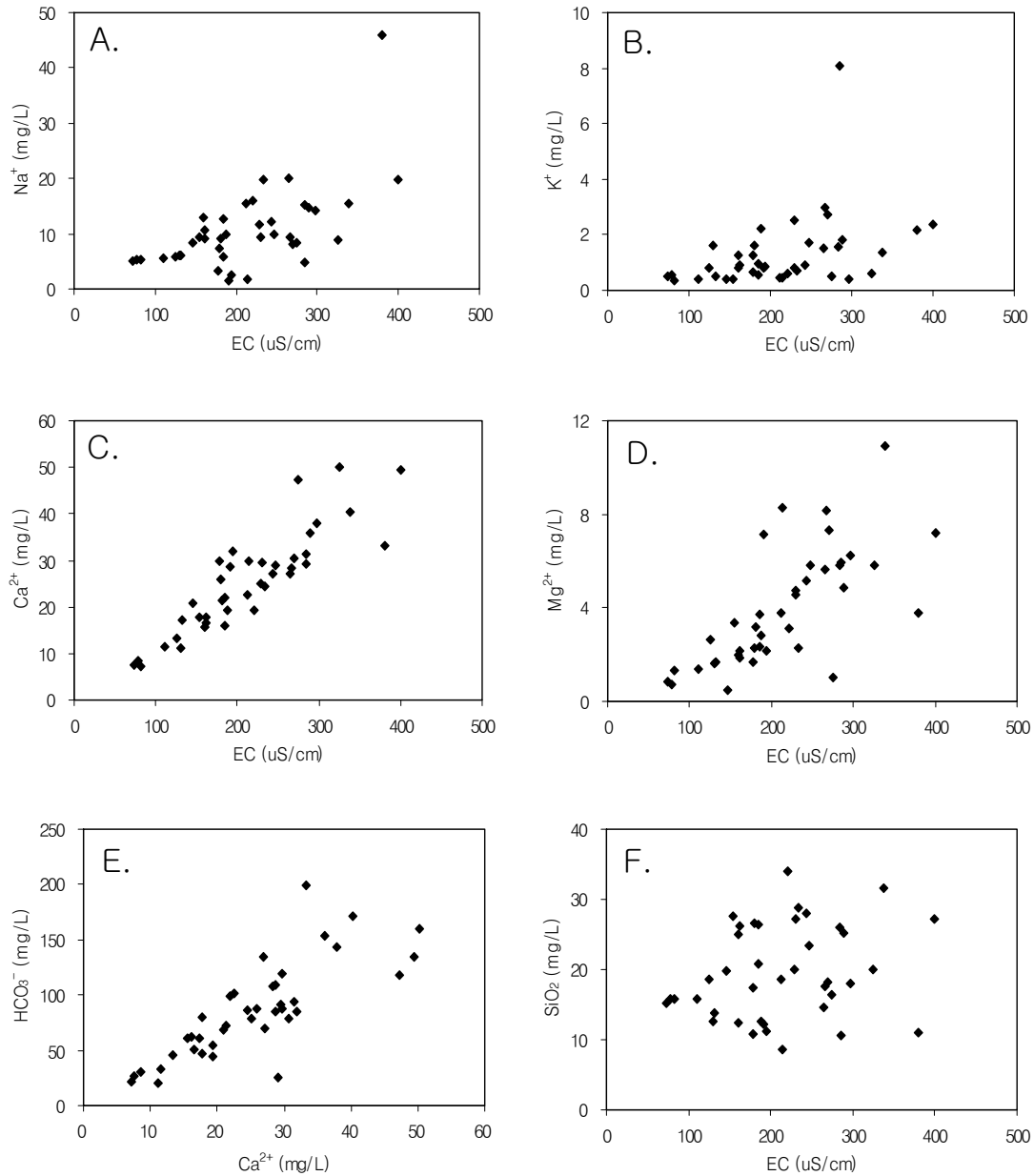


Fig. 2. Relationship between EC and the cations Na (A), K (B), Ca (C), Mg (D), SiO₂ (F), and Ca-HCO₃ (E).

주요 용존 음이온과 EC와의 상관관계 및 이온 항목간의 상관성을 Fig. 3에 도시하였다. Cl 이온과 SO₄ 이온은 대체로 EC와 정의 상관관계를 나타내고 있다(Fig. 3a, 3b). Cl 이온은 Na 이온과 정의 상관관계를 나타내어 Cl 이온의 기원이 Na 이온과 연관되어 있음을 알 수 있다(Fig. 3c). 한편 NO₃ 이온도 Cl 이온의 증가와 더불어 증가하는 양상을 나타낸다(Fig. 3d). NO₃ 이온은 지표의 오염원으로부터 기원하는 이온종으로 알려져 있으므로 이 지역의 지하수는 지표 환경의 영향을 받고 있다고 생각할 수 있다.

불소(F) 이온의 경우 Ca 이온과 특별한 상관관계를 나타내지 않는다(Fig. 3e). F 이온은 화강암 지역이나 변성암 지역에서 흑운모, 형석, 각섬석 등으로부터 유래되는 대표적인 지질기원 물질이다.

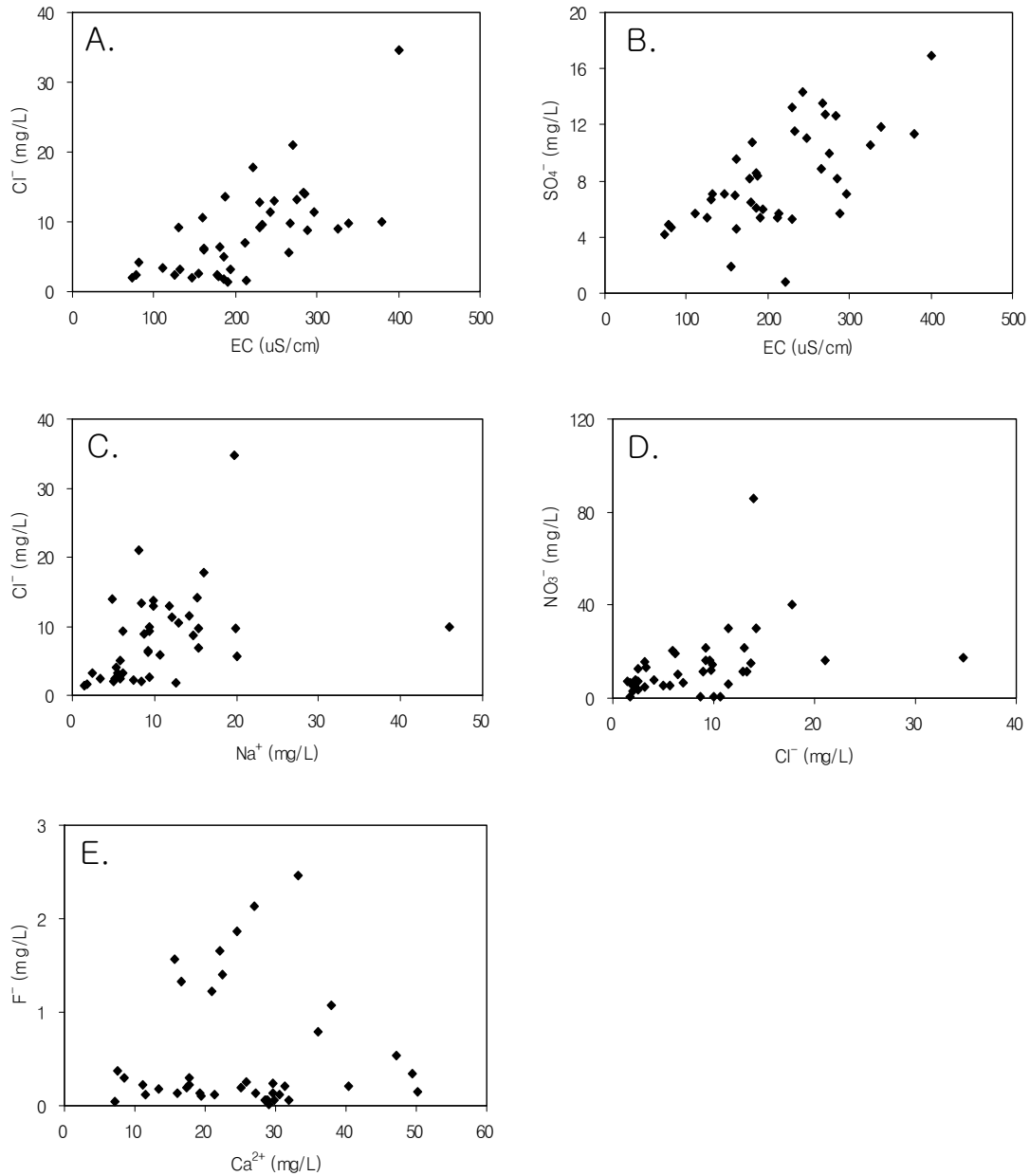


Fig. 3. Relationship between EC and the anions Cl (A), SO₄ (B), and Na-Cl (C), Cl-NO₃ (D), Ca-F (E).

지하수의 우라늄과 라돈함량 분포 특징

연구지역 40개의 지하수 관정 용도는 음용지하수 21개공, 농업용수 14개, 개인생활용수 5개이다. 이중 음용지하수공은 개인 음용 지하수공 8개, 소규모급수시설 9개, 마을상수도 4개의 총 21개 공이다.

연구지역 지하수 시료의 우라늄 농도는 0.06~50.5 µg/L의 범위를 나타내고 있다(Table 1). 평균 농도는 5.57 µg/L (Table 2)로 전국 지하수의 우라늄 평균 농도(NIER, 2002)인 4.50 µg/L보다 높은 편이다. 미국 EPA MCL인 30 µg/L를 초과한 곳은 WJ-08(32.8 µg/L, 개인생활), WJ-13(50.5 µg/L, 개인생활), WJ-25 (34.8 µg/L, 개인생활)로 3개소이며, 전체 시료수의 7.5%에 해당된다. 이는 전국 지하수 우라늄의 EPA MCL 초과율인 2.8%에 비해 높은 편이다. 하지만 연구지

역 우라늄 농도는 85%가 10 $\mu\text{g/L}$ 이하로 대부분 지하수가 Lowry et al.(1987)이 보고한 자연상태의 우라늄 농도 값인 0.1~10 $\mu\text{g/L}$ 을 나타내고 있다. Table 2에서 평균농도와 중앙값의 차이가 크고 왜도가 3.06으로 양의 값을 보인다. 중앙값은 1.55 $\mu\text{g/L}$ 로 평균 농도보다 매우 낮아 우라늄 함량의 통계적 분포가 낮은 값으로 크게 치우쳐 있다는 것을 알 수 있다 (Fig. 4a).

Table 2. Statistical summary of uranium and radon concentrations in groundwater

	U ($\mu\text{g/L}$)	Rn (pCi/L)
Average	5.57	2,357
Std.	10.58	2,100.24
Median	1.55	1,915
Min.	0.06	67
Max.	50.50	8,410
Skew.	3.06	1.20

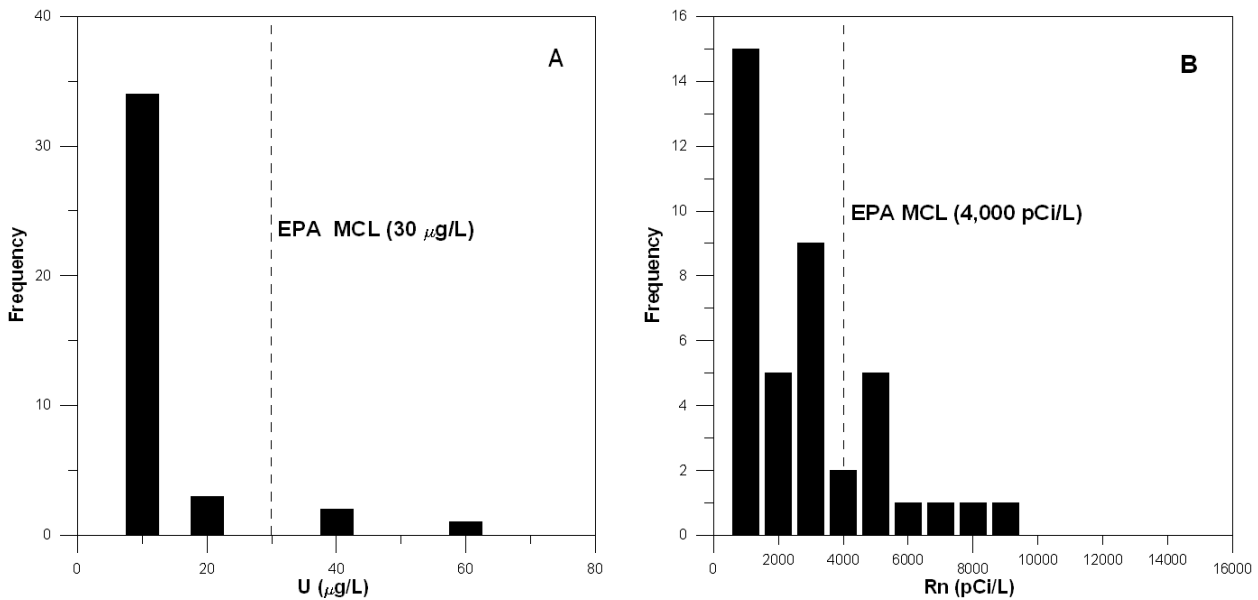


Fig. 4. Histogram of uranium and radon concentrations in groundwater.

라돈의 농도와 통계자료는 Table 1과 2에 제시하였고, 함량분포는 Fig. 4b에 도시하였다. 시료 채취시 라돈은 가스상태로 존재하므로 시료 채취, 보관 및 시료 준비과정에서 약간의 손실 가능성이 있기 때문에 측정된 농도 값은 실제 농도 값보다 낮을 것으로 판단된다.

연구지역 지하수의 라돈 농도는 67~8,410 pCi/L의 범위를 나타낸다. 평균 농도는 2,357 pCi/L (중앙값 1,915 pCi/L)로 전국 지하수의 라돈 평균 농도(Cho et al., 2007)인 1,862 pCi/L보다 높은 편이다. 평균농도와 중앙값의 차이가 크지 않고 왜도 역시 1.2로 크지 않으며, 라돈 함량의 통계적 분포가 높은 값에서 낮은 값까지 비교적 고르게 분포되어 있다는 것을 알 수 있다(Fig. 4b). EPA AMCL 4,000 pCi/L를 초과한 곳은 WJ-09: 4,670 pCi/L, WJ-11: 8,410 pCi/L, WJ-13: 4,080 pCi/L, WJ-15: 6,620 pCi/L, WJ-26: 5,400 pCi/L, WJ-28: 4,400 pCi/L, WJ-35: 4,640 pCi/L, WJ-37: 7,410 pCi/L, WJ-39:

4,880 pCi/L 등 9개소로 전체 시료수의 22.5%이다. 이는 전국 지하수 라돈의 EPA AMCL 초과율인 12.2% (NIER, 2002) 보다 높다. 그러나 EPA AMCL 4,000 pCi/L를 초과한 9개소 중 핀란드의 음용 제안치인 8,100 pCi/L를 초과하는 시료는 WJ-11: 8,410 pCi/L 한군데 밖에 없다. 이는 연구지역 라돈 농도가 우리나라와 지질여건이 비슷한 노르웨이나 핀란드에 비해서 아주 낮은 편이라는 것을 나타내고 있다.

미국 EPA AMCL을 초과한 9개소를 용도별로 분류해보면 소규모급수시설 3개소(WJ-09, WJ-11, WJ-37), 마을상수도 2개소(WJ-28, WJ-39), 개인음용 2개소(WJ-13, WJ-15)로 음용수가 7개이고 농업용수가 2개(WJ-26, WJ-35)이다. 이중 음용수의 평균 농도는 6,071 pCi/L, 농업용수의 평균 농도는 5,020 pCi/L로 음용수의 라돈 농도가 높은 편이다. 이는 음용수 지하수 관정의 경우 농업용 지하수 관정에 비하여 케이싱 및 그라우팅이 좀 더 완벽하게 시공되어 있어 천부 지하수의 공내 유입이 차단된 결과로 해석된다. 한편 라돈의 반감기가 3.82일로 매우 짧은 점을 고려하면 라돈 농도가 높은 WJ-09, WJ-11, WJ-13, WJ-15 WJ-26, WJ-28, WJ-35, WJ-37, WJ-39의 9개소는 지하수 공급원이 이 지역에서 멀지않은 곳에 존재한다는 것을 의미한다(Han and Park, 1996). 우리나라 마을상수도 지하수의 라돈 자연저감율이 25.6~45.6%인 점을 고려하면(Cho et al., 2010), EPA AMCL을 초과한 지하수 관정도 간단한 폭기시설이나 정치로 EPA AMCL 값인 4,000 pCi/L 이하로 저감시킬 수 있을 것으로 고려된다.

Fig. 5는 연구지역 지하수의 우라늄의 농도와 라돈 농도와의 상관성을 도시한 그림으로 양자간의 상관성은 미약한 편이다. 우라늄의 농도와 라돈 농도사이에는 상관성이 클 것으로 예상되나 연구지역에서 양자 사이의 상관성은 미약하다. 이와 같은 현상은 라돈이 가스 상태로 존재하기 때문에 시료 채취 과정에서 탈기되어 실제 농도와 차이가 있을 수 있다. 또한 반감기가 3.82일로 짧기 때문에 지하수 공급원으로부터의 거리와 지하수의 이동 속도 등에 영향을 받을 것으로 판단된다(Han and Park, 1996).

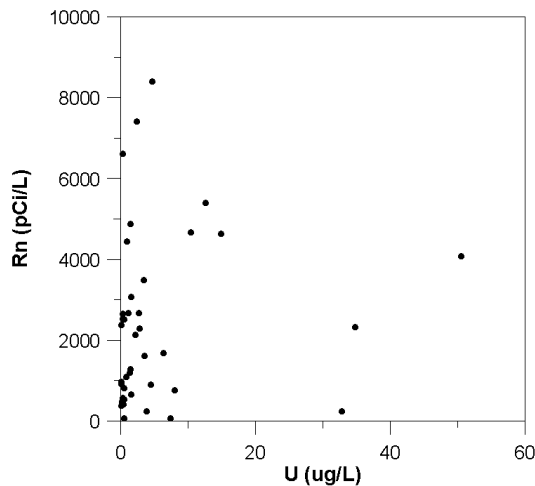


Fig. 5. Relationship between uranium and radon in the Wonju area.

방사성물질과 지질과의 상관관계

지하수내 방사성물질의 산출과 분포는 일차적으로 그 지역의 지질 및 물과 암석의 지화학적 반응에 의해 결정된다. 연구지역 지하수의 방사성물질 특성을 파악하기 위하여 시료 채취지점을 지질별로 구분하였다. 지질은 주라기 흑운화강암(Jbgr), 주라기 복운모화강암(Jtgr), 선캠브리아기 흑운모편마암(PCbgn), 석회암(Ls)으로 구분하였다. 각 지질별 시료수는 주라기 흑운화강암 28개, 주라기 복운모화강암 3개, 선캠브리아기 흑운모편마암 7개, 석회암 2개이다. 연구지역 지하

수의 우라늄, 라돈에 대한 지질별 통계 분석자료는 Table 3에 정리하였고, 지질별 통계 분포는 Fig. 6에 box plot으로 도시하였다.

Table 3. Statistical analysis of the uranium and radon concentrations for each geology

Geology (samples)		Jbgr (28)	Jtgr (3)	PCbgn (7)	Limestone (2)
U ($\mu\text{g/L}$)	Mean	7.53	1.25	1.06	0.37
	Med.	2.55	0.10	0.53	0.37
	Min.	0.11	0.06	0.06	0.23
	Max.	50.50	3.59	3.47	0.51
Rn (pCi/L)	Mean	2,820	1,656	1,334	510
	Med.	2,420	1,610	920	510
	Min.	71	980	67	480
	Max.	8,410	2,380	3,490	540

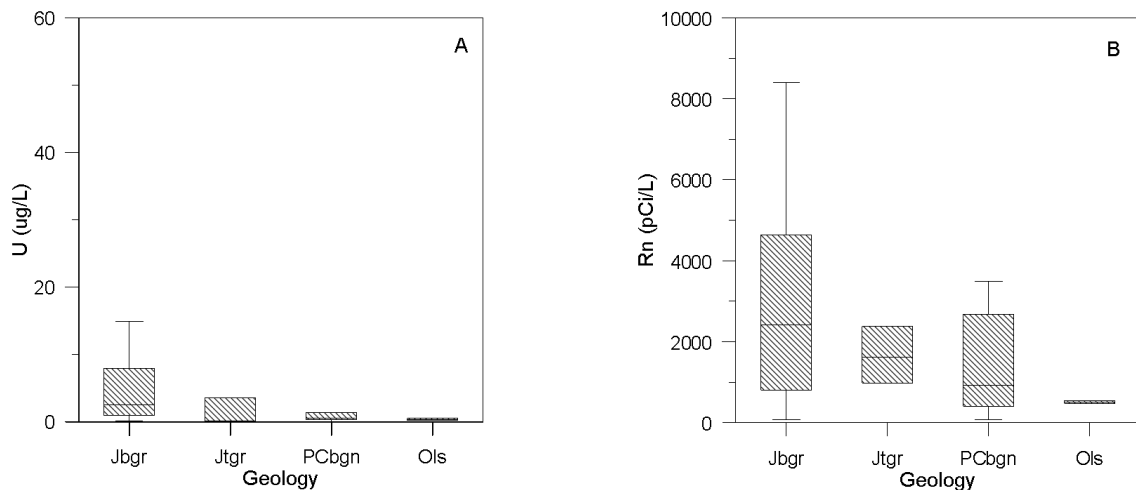


Fig. 6. Box-and-whisker plots showing statistical variations of uranium and radon related to geology.

연구지역 쥬라기 흑운모화강암 지하수의 우라늄 농도는 0.11~50.5 $\mu\text{g/L}$ 로 다른 암석들에 비해 넓은 분포를 보여주고 있다. 흑운모화강암 지역의 평균 농도와 중앙값은 7.53 $\mu\text{g/L}$ 와 2.55 $\mu\text{g/L}$ 이다. 이는 우리나라 화강암지역 지하수의 평균 우라늄 농도 10.53 $\mu\text{g/L}$, 중앙값 0.34 $\mu\text{g/L}$ 과 비교하면 평균 농도는 낮고 중앙값은 높은 편이다. EPA MCL을 초과하는 WJ-08, WJ-13, WJ-25 지하수 역시 쥬라기 흑운모화강암지역에 위치하고 있다. 석회암 지역의 경우 시료수가 2개인 관계로 비교하기가 어렵기는 하지만 우라늄 농도가 각각 0.23 $\mu\text{g/L}$, 0.51 $\mu\text{g/L}$ 로 연구지역의 지질중에서 가장 낮은 값을 나타내고 있다. 평균 농도 역시 0.37 $\mu\text{g/L}$ 로 4개 지질중에서 가장 낮다. 쥬라기 복운모화강암과 선캠브리아기 흑운모편마암 지하수의 우라늄 농도는 각각 0.06~3.59 $\mu\text{g/L}$ (평균 농도: 1.25 $\mu\text{g/L}$), 0.06~3.47 $\mu\text{g/L}$ (평균 농도: 1.06 $\mu\text{g/L}$)로 거의 비슷한 농도 범위를 나타낸다.

이상과 같이 연구지역에서 지질별 지하수의 우라늄 농도는 쥬라기 흑운모화강암 지역의 지하수에서 가장 높다. 일반적으로 암석 내의 우라늄 함량은 화강암에 비해 옥천계 변성암이나 선캠브리아기 변성암 등 변성암에서 높은 것으로 보고되

어 있다(Choo, 2002). 그런데 연구지역의 경우, 화강암지역 지하수에서 변성암지역 지하수보다 높게 검출된다. 이는 화강암지역 지하수의 지화학적 조건이 변성암지역의 지하수보다 우라늄의 용해도가 높을 것으로 판단된다. 우라늄이 지하수나 하천수에 부화되는 정도는 수리지화학적 환경과 밀접한 관련성이 있다, 우라늄은 화강암과 같이 산화환경에서 지하수에 쉽게 용해되는 것으로 알려져 있다(Zapeczka and Szabo, 1986). 우라늄은 환원환경에서는 불용성의 특성을 가지므로 환원 환경이 우세한 지역에서 우라늄이 쉽게 용해될 가능성은 적다(Langmuir, 1997). 연구지역의 선캠브리아기 변성암의 경우 환원환경에 유리한 수리지화학적 요소와 탄소와 같은 유기화합물체의 우라늄 흡착 등으로 인하여 지하수에는 우라늄이 낮게 검출되는 것으로 판단된다.

연구지역 지질별 지하수의 라돈 농도는 쥬라기 흑운모화강암 지역에서 71~8,410 pCi/L 범위로 평균 농도 2,820 pCi/L, 중앙값 2,420 pCi/L이다. 연구지역 흑운모화강암 지하수의 평균농도 2,820 pCi/L은 우리나라 화강암 지하수의 라돈 평균 농도 2,595 pCi/L (Cho et al., 2007)와 거의 비슷한 값을 보여주고 있다. 복운모화강암 지역의 지하수는 980~2,280 pCi/L 범위를 나타내며, 평균 1,656 pCi/L, 중앙값 1,610 pCi/L이다. 선캠브리아기 흑운모편마암은 67~3,490 pCi/L 범위로 평균 1,334 pCi/L, 중앙값 920 pCi/L이다. 석회암지역은 480~540 pCi/L 범위로 평균값과 중앙값은 510 pCi/L이다. 석회암 지역의 경우, 시료수가 2개인 관계로 평균값과 중앙값의 의미는 크게 없다. 연구지역에서 EPA AMCL을 초과하는 WJ-09, WJ-11, WJ-13, WJ-15, WJ-26, WJ-28, WJ-35, WJ-37, WJ-39 등 9개 시료의 지질 역시 모두 흑운모화강암이다.

이상에서 살펴본 바에 따르면 연구지역의 지질에 따른 라돈 함량의 최대치는 쥬라기 흑운모화강암 > 선캠브리아기 변성암 > 쥬라기 복운모화강암 > 석회암 순으로 높고, 평균치는 쥬라기 흑운모화강암 > 쥬라기 복운모화강암 > 선캠브리아기 변성암 > 석회암 순으로 높다(Table 3). 이와 같이 연구지역 지질별 지하수의 라돈 함량은 흑운모화강암 지하수에서 높고 변성암이나 석회암지역 지하수에서 낮다는 기존 연구와 일치한다(Wathen, 1987; Cothorn and Rebers, 1990; Banks et al., 1998; Cho et al., 2007). 라돈 역시 우라늄과 마찬가지로 화강암지역 지하수의 9개 시료만이 EPA AMCL을 초과하고 변성암과 퇴적암지역의 지하수에서는 EPA AMCL을 초과하는 시료가 없다. 그러나 연구지역의 화강암지역 지하수의 라돈 평균 농도인 2,820 pCi/L는 스웨덴 화강암지역 지하수의 라돈 평균 농도 24,462 pCi/L (Salonen and Hukkanen, 1997), 노르웨이 화강암지역 지하수의 평균 농도 18,921 pCi/L (Banks et al., 1998), 핀란드 화강암지역 지하수의 평균 농도 24,706 pCi/L (Salonen and Hukkanen, 1997), 미국 화강암지역 지하수의 평균 농도 8,000 pCi/L (Cothorn and Rebers, 1990)보다 매우 낮다.

이와 같이 우리나라 지하수의 우라늄과 라돈 함량은 유사한 지질을 가지는 스웨덴, 노르웨이, 핀란드, 미국 등 외국에 비해 낮은 농도를 나타내고 있다. 낮은 원인에 대해서는 비교할 수 있는 자료의 부족으로 단적으로 해석하기는 어렵지만 몇 가지 사항을 추론해볼 수 있다. 첫째, 지하수 대수층 환경의 차이로 스웨덴, 노르웨이, 핀란드, 미국의 경우 우리나라에 비해 우라늄이 지하수에 더 쉽게 용해될 수 있는 산화환경에 놓여 있을 수 있다. 둘째, 화강암내 미세균열 발달 정도의 차이를 생각할 수 있다. 화강암과 같은 화성암에서는 결정화작용, 냉각, 풍화 과정 중 미세균열의 발달에 따라 라돈의 확산이 일어날 수 있으며, 이는 화강암과 같은 결정질암 내 지하수의 라돈 함량은 균열의 발달과 밀접한 관계가 있다(Cook et al., 1999; Abdulrahman, 2014). 따라서 스웨덴, 노르웨이, 핀란드, 미국의 화강암지역의 지하수 환경은 우리나라에 비해 파쇄대나 균열발달이 더 양호한 대수층일 가능성이 높다. 마지막으로 지하수 관정 설계 제원의 차이를 고려할 수 있다. 우리나라 지하수 관정의 특성상 케이싱 및 그라우팅이 미비한 관정이 많으므로 천부 지하수의 공내 유입을 의심할 수 있다. 이러한 관정의 특성으로 인하여 실제 함량보다 낮게 검출되었을 가능성을 배제할 수 없다. 이상의 세가지 추론중에서 우리나라의 지하수 관정 굴착 관행을 고려하며 지하수 관정 설계 제원으로 인하여 연구지역 지하수의 우라늄과 라돈 함량이 외국에 비해 더 낮을 수 있을 것으로 판단된다.

결론

연구지역 지하수의 우라늄과 라돈의 산출 특성과 수리지화학적 특성을 파악하기 위하여 40개 지하수 시료에 대하여 우라늄, 라돈, 주요 성분 함량을 분석하였다. 40개 지하수의 우라늄 함량은 0.06~50.5 µg/L의 범위를 나타내고 있으며, 평균값 5.57 µg/L, 중앙값 1.55 µg/L이다. 라돈 함량은 67~8,410 pCi/L의 범위이고, 평균값 2,357 pCi/L, 중앙값 1,915 pCi/L이다. 우라늄 함량에서 평균값과 중앙값의 차이가 비교적 크게 나타나는데, 이는 연구지역 지하수의 수리지화학적 환경, 우라늄 광물의 산출특성과 존재형태에 따라 우라늄 광물의 용해정도가 다르기 때문으로 해석된다. 라돈의 평균값과 중앙값의 차이가 우라늄에 비해 상대적으로 적은 것은 연구지역 지하수 관정이 위치한 지점의 층적층과 풍화대의 심도가 비교적 깊고 일정하기 때문으로 판단된다. 연구지역 지하수의 우라늄 및 라돈 농도를 지질별로 살펴보면 주라기 화강암 > 선캠브리아기 변성암 > 석회암의 순으로, 화강암지역의 지하수에서 가장 높고 석회암지역 지하수에서 낮다.

연구지역 지하수의 우라늄과 라돈 함량이 유사한 지질을 가지는 외국에 비하면 낮지만 이는 케이싱 및 그라우팅이 미비로 천부 지하수의 공내 유입 가능성이 높다. 따라서 지하수의 우라늄 및 라돈 산출특성을 좀더 명확하게 파악하기 위해서는 차폐장치가 완벽하게 설치된 지하수 관정을 대상으로 한 연구가 필요하다.

사사

이 연구는 한국지질자원연구원 주요사업(과제번호 19-3411)의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Abdulrahman, I.A., 2014, Occurrence of radon in groundwater of Saudi Arabia, *Journal of Environmental Radioactivity*, 138, 186-191.
- Adriano, M., Bach, T.N., Olivier, B., 2016, Using radon-222 to study coastal groundwater/surface-water interaction in the Crau coastal aquifer (southeastern France), *Hydrogeology Journal*, 24(7), 1775-1789.
- Banks, D., Frengstad, B., Midtgard, A.K., Krog, J.R., Strand, T., 1998, The chemistry of Norwegian groundwaters: I. The distribution of radon, major and minor elements in 1604 crystalline bedrock groundwaters, *Science of The Total Environment*, 222(1-2), 71-91.
- Barcelona, M.J., Gibb, J.P., Helfrich, J.A., Garske, E.E., 1985, Practical guide for groundwater sampling, SWS Contract Report 374, 94p.
- Birke, M., Rauch, U., Lorenz, H., 2009, Uranium in stream and mineral water of the Federal Republic of Germany, *Environmental Geochemistry and Health*, 31(6), 693-706.
- Chi, J.M., Yoon, S., Lee, C.J., 1989, Geological map of Korea (1:50,000), Munmak Sheet, Korea Institute of Energy and Resources.
- Cho, B.W., Choo, C.O., Yun, U., Lee, B.D., Hwang, J.H., Kim, M.S., 2014, Hydrogeochemical characteristics, occurrence, and distribution of natural radioactive materials (uranium and radon) in groundwater of Gyeongnam and Gyeongbuk provinces, *The Journal of Engineering Geology*, 24(4), 551-574 (in Korean with English abstract).
- Cho, B.W., Kim, M.S., Kim, H.G., Hwang, J.H., Cho, S.Y., Choo, C.O., 2017, Hydrogeochemical characterization of natural radionuclides uranium and radon in groundwater, Jeonnam province, *The Journal of Engineering Geology*, 27(4), 501-511 (in Korean with English abstract).

- Cho, B.W., Kim, M.S., Kim, T.S., Han, J.S., Yun, U., Lee, B.D., Hwang, J.H., Choo, C.O., 2012, Hydrochemistry and distribution of uranium and radon in groundwater of the Nonsan area, *The Journal of Engineering Geology*, 22(4), 427-437 (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 Soil and Groundwater Environment*, 12(5), 98-104 (in Korean with English abstract).
- Cho, B.W., Yun, U., Choo, C.O., 2010, Natural radon removal efficiency of small-scale water supply system, *Economic and Environmental Geology*, 43(1), 33-42 (in Korean with English abstract).
- Choo, C.O., 2002, Characteristics of uraniumiferous minerals in daebo granite and significance of mineral species, *Journal of the Mineralogical Society of Korea*, 15(1), 11-21 (in Korean with English abstract).
- Choubey, V.M., Bartarya, S.K., Ramola, R.C., 2005, Radon variations in an active landslide zone along the Pindar river, in Chamoli district, Garhwal Lesser Himalaya, India, *Environmental Geology*, 47(6), 745-750.
- Cook, P.G., Love, A.J., Dighton, J.C., 1999, Inferring groundwater flow in fractured rock from dissolved radon, *Ground Water*, 37(4), 606-610.
- Cothorn, C.R., Rebers, P.A., 1990, Radon, radium and uranium in drinking water, Lewis Publishers, 286p.
- Godoy, J.M., Godoy, M.L., 2006, Natural radioactivity in Brazilian groundwater, *Journal of Environmental Radioactivity* 85(1), 71-83.
- Han, J.H., Park, K.H., 1996, Abundances of uranium and radon in groundwater of Taejeon area, *The Korean Society of Economic and Environmental Geology*, 29(5), 589-595 (in Korean with English abstract).
- Ioannidou, A., Samaropoulos, I., Efstathiou, M., Pashalidis, I., 2011, Uranium in ground water samples of northern Greece, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 289(2), 551-555.
- Jeon, D.Y., 2009, Radionuclides of groundwaters in Busan, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 14(5), 51-61 (in Korean with English abstract).
- Koh, H.J., Kim, S.W., Lee, S.R., 2011, Geological map of Korea (1:50,000), Anheungri Sheet, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources.
- Langmuir, D., 1978, Uranium solution-mineral equilibria at low temperatures with applications to sedimentary ore deposits, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42(6), 547-569.
- Langmuir, D., 1997, Radon-222 concentration and aquifer lithology in North Carolina, *Groundwater Monitoring Review*, 7(2), 33-39.
- Lee, J.Y., 2008, A review on occurrence, health risk and mitigation measure of uranium, radium and radon in groundwater, *The Geological Society of Korea*, 44, 341-352 (in Korean with English abstract).
- Lowry, J.D., Hoxie, D.C., Moreau, E., 1987, Extreme levels of ^{222}Rn and U in a private water supply, *Proceedings of the NWWA Conference*, 363-375.
- NIER, 2002, Study on the radionuclide concentration in the groundwater (V), NIER Report, 357p.
- NIER, 2006, Study on the radionuclide concentration in the groundwater, NIER Report, 200p.
- Park, B.K., Chang, H.W., Woo, Y.K., 1989, Geological map of Korea (1:50,000), Wonju Sheet, Korea Institute of Energy and Resources.
- Salonen, L., Hukkanen, H., 1997, Advantages of lowbackground liquid scintillation alphaspectrometry and pulse shape analysis in measuring radon, uranium, and radium-226 in groundwater samples, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 226, 67-74.
- Singh, J., Singh, H., Singh, S., Bajwa, B.S., 2009, Estimation of uranium and radon concentration in some drinking water samples of Upper Siwaliks, India, *Environmental Monitoring and Assessment*, 154(1-4), 15-22.
- Spalding, R.F., Sackett, W.M., 1972, Uranium in runoff from the Gulf of Mexico distributive province: anomalous concentrations, *Science* 175(4022), 629-631.

- USEPA (United States Environmental Protection Agency), 1999, Radon in drinking water health risk reduction and cost analysis, Washington, Federal Register, 64, 9559-9599.
- Wathen, J.B., 1987, The effect of uranium sitting in two-mica granites on uranium concentrations and radon activity in groundwater, Proceedings of NWWA Conference, 31-45.
- Won, C.K., Yu, H.S., Lee, Y.C., Kim, J.J., 1974, Geological map of Korea (1:50,000), Sinlim Sheet, Geological and Mineral Institute of Korea.
- Yun, U., Kim, M.S., Jeong, D.H., Hwang, J.H., Cho, B.W., 2018, Uranium and radon concentrations in groundwater of the Daejeon granite area: Comparison with other granite areas, The Journal of Engineering Geology, 28(4), 631-643 (in Korean with English abstract).
- Zapeczka, O.S., Szabo, Z., 1986, Natural radioactivity in groundwater - a review, National Water Summary 1986-Hydrologic Event and Ground-Water Quality, U.S.G.S. Water-Supply Paper 2325, 50-57.