서울특별시 보건환경연구원보 제58권 (2022)
Report of S.I.H.E., 58:52-59 (2022)

서울지역 약수터 수질 및 자연방사성물질 분포 특성

먹는물분석팀

최인석 · 이지영 · 윤종철 · 노방식 · 강경화 · 김은숙 · 이만호 · 차영섭

Characteristics of Water Quality and Natural Radioactive Materials Distribution in Spring Water of Seoul Area

Drinking Water Analysis Team

In-seok Choi, Ji-young Lee, Jong-cheol Yoon, Bang-sik Roh, Kyung-hwa Kang, Eun-sook Kim, Man-ho Lee and Young-seop Cha

Abstract

This study used the analysis results of water quality from 2016 – 2022 and of natural radioactive elements from 2016 – 2018 to understand the characteristics of water quality and the distribution characteristics of uranium (U) and radon (Rn) in spring water in the Seoul area. Microbial criteria such as *total coliforms, Escherichia coli, total colony count,* and *Yersinia* accounted for 84.1% of the noncompliance rate of spring water quality standards, requiring active microbial management of spring water. Both uranium (U) and radon (Rn) are highly detected in granite areas and are affected by geological properties, and the correlation between uranium (U) and radon (Rn) is low. The fact that radon (Rn) concentrations are higher in natural spring water than in pumped groundwater is inferred to be the effect of the concentration reduction due to degassing during the pumping process. Uranium (U) was not associated with pH, and radon (Rn) was high at pH 7 or lower.

Key words : spring water, natural radioactive materials, uranium, radon

서 론

최근 코로나 확산과 더불어 건강과 삶의 질이라는 측면에 관심이 많아지고 여가활동의 증가로 인근 공원이나 산으로의 나들이가 많아지고 있다. 지표수의 오염과 수돗물에 대한 불신으로 먹는샘물 산업이 급성장하고 약수터 및 지하수의 음용률도 계속 증가하고 있다. 통계청의 2015년 인구총조사 중 식수사용 형태별 이용률을 보면 수돗물 이외의 이용률이 59%로 상당부분을 차지하고 있다. 이중 정수기 이용률이 31.4%로 높았고, 먹는샘물이 15.5%, 지하수, 약수, 샘물 이용률이 11.6%로 나타났다. 특히 지하수, 약수, 샘물이용 연령대를 보면 60대 이상에서 20.5%로 높게 나타났다(1). 이러한 이유로 약수터 및 지하수의 수질 및 안정성에 대한 국민의 관심이 증가하고 있으며 최근 일부 지역에서는 지하수 중 고농도의 라돈과 우라늄이 검출되어 지하수 중 자연방사능 물질이 새로운 환경문제로 이슈화되고 있다.

우라늄은 반감기가 길어 인체 위해성은 방사성 독성보다 중금속으로서의 화학적 독성이 문제가 되며, 장시간 섭취 시에는 만성 신장질환을 유발시킬 수 있다. 라돈은 반감기가 3.82일에 불과한 무색무취의 불활성 기체로서 인간에게 피폭되는 방사선양의 50% 이상을 차지하고 흡연 다음으로 높은 폐암 발병인자로 알려져 있다(2).

우리나라는 우라늄의 경우 2007년 10월 먹는물 수질감시항목으로 지정하고 지속적인 모니터링을 통해 2015년 11월 먹는샘물 및 먹는물공동시설 등의 먹는물수질기준에 우라늄을 추가하였다. 라돈은 2018년 먹는물수질감시항목으로 지정되어 모니터링하고 있다. 우라늄의 먹는물수질기준은 미국 EPA와 같이 30 ㎍/L로 규제하고 있고, 라돈은 미국 EPA 권고 제안치인 148 Bq/L을 감시기준으로 설정하여 관리하고 있다(3).

본 연구에서는 서울특별시 먹는샘물 등 안전관리계획에 따라 서울시내 먹는물공동시설을 대상으로 2/4분기에 먹는물수질기준 47개 전 항목의 정밀 수질검사를 실시하고 2016~2022년 7년간의 수질검사결과를 분석하여 먹는물공동시설의 수질특성을 파악하며, 2018년 라돈의 먹는물수질감시항목 지정과 관련하여 2016~2018년 3년간 자연방사성물질 중 먹는물수질기준 항목인 우라늄과 먹는물수질감시항목인 라돈의 함량실태를 기획 조사하여 먹는물공동시설의 수질관리를 위한 기초 자료를 제공하고자 하였다.

연구방법

1. 연구대상

서울지역 먹는물공동시설에 대해 2016년부터 2022년까지 7년간 2016년 205개소, 2017년 142개소, 2018년 183개소, 2019년 162개소, 2020년 153개소, 2021년 189개소, 2022년 167개소 등 25개 자치구에서 의뢰한 시료에 대하여 정밀수질검사를 실시하였고, 특히 2018년 라돈의 먹는물공동시설 먹는물수질감시항목 지정과 관련하여 2016년부터 2018년까지 3년간 자연방사성물질인 우라늄과 라돈에 대해 기획 검사하였다. 약수터 폐쇄, 봄철 가뭄 등으로 채수가 불가한 지점은 제외하였다. 먹는물공동시설 수질검사는 2/4분기 정밀검사로 총대장균군 등 미생물 항목 4개, 납 등 건강상 유해 영향 무기물질 12개 항목, 페놀 등 건강상 유해 영향 유기물질 15개 항목, 경도 등 심미적 영향물질 16개 등 총 47항목을 먹는물수질공정시험기준에 따라 실시하였다(4).

2. 분석방법

우라늄(^{238}U)은 먹는물수질공정시험기준의 유도결합플라스마-질량분석법에 따라 ICP/MS(SPECTRO MS, Germany's SPECTRO) 장비를 사용하여 분석하였고, 라돈(^{222}Rn)은 환경부 자연방사성물질 관리지침에 따라 다음과 같이 분석하였다(5). 라돈

분석을 위해서 20 mL Teflon coated vial에 시료 8 mL와 섬광용액(MaxiLight, Hidex, Finland) 12 mL를 첨가하여 5분간 잘 흔들어 섞은 후 파형분석(Pulse Shape Analyzer, PSA) 기능을 가진 액체섬광계수기(300SL TDCR LSC, Hidex, Finland)로 라돈의 방사성 세기를 측정하였다. 액체섬광계수기는 시료 내의 알파선 및 베타선과 섬광체 간의 상호작용으로 발생한 섬광을 측정하여 시료 중의 방사능 농도를 구하는 방법이며, PSA 기능으로 알파선과 베타선에 의해 생성된 펄스의 형태 차이를 동시에 측정할 수 있다.

수질분석 결과를 이용하여 항목간 상관성 분석, 부적합 항목 특성 파악 등 수질 특성을 분석하였다. 상관성 분석을 위하여 SPSS(Statistical Package for Social Science) V22.0을 이용하여 Pearson 분석을 실시하였다.

결과 및 고찰

1. 약수터 수질 특성

2016년부터 2022년까지 7년간 1,201개소에 대한 2/4분기 먹는물공동시설의 정밀검사 결과 주요 오염물질을 Table 1에 나타내었다. 건강상 유해 영향 무기물질 중 비소는 평균과 최대값이 각각 0.0004 ㎎/L, 0.04 ㎎/L로 기준을 초과하는 지점이 있었고 2016년부터 검사하기 시작한 우라늄은 평균과 최대값이 각각 0.002 ㎎/L, 0.108 ㎎/L로 일부 지점이 기준을 초과하였다. 심미적 영향물질인 경도는 평균과 최대값이 각각 68.4 ㎎/L, 931 ㎎/L이었으며 과망간산칼륨소비량은 평균과 최대값이 각각 0.6 ㎎/L, 19.6 ㎎/L이었다. 알루미늄은 평균과 최대값이 각각 0.021 ㎎/L, 0.78 ㎎/L로 기준을 초과하는 지점이 매년 나타났다. 미생물인 일반세균은 평균과 최대값이 각각 73.3 CFU/mL, 13,000 CFU/mL으로 기준초과가 많음을 짐작할 수 있다. 이외에 건강상 유해 영향 유기물질인 휘발성화합물, 농약 성분 및 기타 항목은 검출되지 않았거나 기준농도보다 매우 낮은 농도로 검출되었다.

Table 2는 2016년부터 2022년까지 먹는물수질기준의 부적합 항목을 나타내었다. 가장 많은 부적합 항목은 총대장균군으로 56.9%를 나타내었고 분원성대장균군(11.3%), 일반세균(9.6%), 여시니아(6.3%)의 순서로 미생물 항목이 전체 부적합율의 84.1%를 차지하였다. 이는 먹는물공동시설의 수원 자체가 지표수나 천층 지하수에 가깝고 심층 지하수보다는 외부로부터 미생물 오염원이 산재되어 있어 유입되기 쉽기 때문이다(6). 따라서 먹는물공동시설 수질관리에서 자외선 살균기 설치 등의 적극적인 미생물 관리가 필요하다. 기타 토양 및 암반에서 기인한 알루미늄, 비소, 우라늄 등의 중금속이

Table 1. Statistical summary of spring water quality from 2016 – 2022(n = 1,201, unit : mg/L)

	F^-	As	NH_4^+-N	NO_3^--N	Hardness	**$KMnO_4$	Al	Color	pH	Fe	Turbidity	Cl^-	SO_4^{2-}	U	Total colony
*Standards	1.5	0.01	0.5	10	1,000	10	0.2	5	4.5~9.5	0.3	1 NTU	250	250	0.03	100 CFU/mL
Mean	0.14	0.0004	0.004	2.86	68.4	0.57	0.021	0.25	6.6	0.01	0.18	16.92	16.14	0.002	73
Median	ND	ND	ND	2.40	46.0	0.40	ND	ND	6.5	ND	0.05	5.40	10.00	0.001	2
Max.	6.86	0.0400	2.250	34.70	931.0	19.60	0.780	26.00	8.9	1.01	33.00	817.20	240.00	0.108	13,000
Min.	ND	ND	ND	ND	3.0	ND	ND	ND	4.4	ND	ND	1.40	ND	ND	ND
S.D.	0.33	0.0026	0.065	2.21	69.6	1.05	0.069	1.22	0.6	0.04	1.25	43.47	17.47	0.007	591

*Standards : Spring water quality standards
**$KMnO_4$: Consumption of $KMnO_4$

Table 2. Noncompliance criteria (case) with spring water quality standards from 2016 – 2022

	Noncompliance criteria (case)	Noncompliance case (ratio)
Microorganism	*Total coliforms* (490), *Escherichia coli* (97), *Total colony count* (83), *Yersinia* (54)	724 (84.1%)
Inorganic material	As (19), U (18), NO_3^-N (6), F^- (5), NH_4^+-N (2), CN (1)	51 (5.9%)
Aestetic material	Al (37), Turbidity (22), Cl^- (9), Color (8), Fe (4), Consumption of $KMnO_4$ (3), Mn (2), pH (1)	86 (10.0%)

다음으로 높은 부적합율을 차지하였다.

2. 자연방사성물질의 함량 및 분포 특성

서울지역의 지질 특성은 Fig. 1과 같이 화강암 지역과 비화강암 지역으로 분류된다. 화강암 분포 지역은 주로 산악지대로서 Dome형을 이루고 있고, 편마암과 편암이 우세한 비화강암 지역은 주로 평지나 낮은 구릉지를 형성하고 있다(7).

서울지역 12개 구(도봉, 노원, 강북, 성북, 종로, 동대문, 중, 성동, 중랑, 은평, 서대문, 관악)의 지질은 화강암 계열(흑운모 화강암)이다. 2016년부터 2018년까지 3년간 서울시내 먹는물공동시설 164개소 417개 자료의 자연방사성물질 수질검사 결과를 Table 3에 나타내었다. 164개소 중 지역 지질이 화강암인 경우는 106개소, 비화강암반대는 58개소이다.

우라늄은 ^{238}U이 대부분이며, 동위원소인 ^{235}U, ^{234}U는 각각 0.72%, 0.0054%에 불과하다고 한다. 화강암 지역 우라늄의 함량 범위는 0.0~101.6 ㎍/L(평균 2.6 ㎍/L)로 나타났지만, 비화강암 지역 우라늄 함량 범위는 0.0~29.7 ㎍/L(평균 1.5 ㎍/L)였다. 국

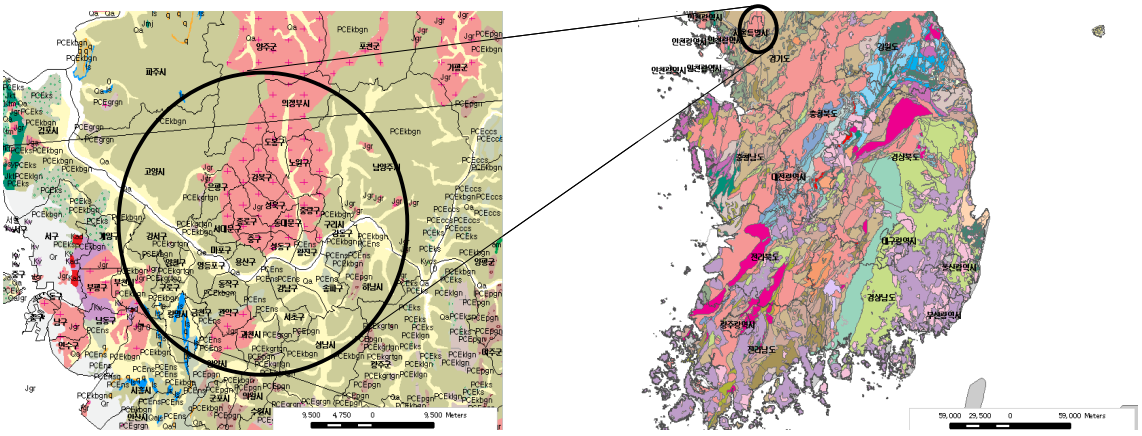

Fig. 1. Geological map in Seoul of Korea.

Table 3. Geological distribution of uranium and radon in spring water from 2016 – 2018

	No. of data	U (㎍/L)					^{222}Rn (Bq/L)				
		Mean	Median	Min.	Max.	〉30.0	Mean	Median	Min.	Max.	〉148
Granite	280	2.6	0.8	0	101.6	3	106.4	48.4	0	857.4	71
Non-Granite	137	1.5	0.6	0	29.7	0	80.2	13.7	0.9	2478.4	5

립환경과학원에서 2007~2009년 조사한 전국 지하수의 우라늄 평균 농도는 0.08 ~ 25.7 ㎍/L으로 화강암지대의 경기도가 가장 높았고 현무암지대의 제주도가 가장 낮았으며, 서울지역은 제주, 전남에 이어 낮은 수준을 나타내었다(8). 먹는물수질기준인 30 ㎍/L를 넘는 3개 지점은 모두 화강암 지역에서 나타났다.

화강암 지역에서 라돈의 함량 범위는 0~857.4 Bq/L(평균 106.4 Bq/L)이고 비화강암 지역의 라돈 함량 범위는 0.9~2478.4 Bq/L(평균 80.2 Bq/L)로 나타났다. 이는 화강암지대가 많은 경기도의 평균 143.4 Bq/L(중앙값 117.0 Bq/L)와 충남의 평균 125.7 Bq/L(중앙값 98.5 Bq/L)보다 낮고 퇴적암이 많은 경북의 평균 55.1 Bq/L(중앙값 35.2 Bq/L)과 경남의 평균 37.9 Bq/L(중앙값 29.6 Bq/L)보다 높은 수준이다(8). 우리나라 먹는물수질감시기준인 148 Bq/L를 초과하는 지점은 화강암 지역에서 71개, 비화강암 지역에서 5개로 나타났다.

지질(화강암/비화강암)에 따른 자연방사성물질의 평균 농도 차이를 확인하기 위해 통계분석을 수행하였다. 비모수 검정인 독립표본 Mann-Whitney U 검정 결과 95% 신뢰수준에서 우라늄(p=0.003)과 라돈(p=0.000) 모두 화강암 지질의 영향을 받는 것으로 나타났다. 윤 등(9)의 국내 지질별 지하수내 자연방사성물질을 조사한 연구에서도 다른 자연방사성물질에 비해 라돈이 지질에 상대적으로 크게 영향을 받는 것으로 분석되었고, 오 등(10)의 토양 연구에서도 우라늄은 지질과 상관관계가 있는 것으로 나타났다.

3. 깊이(펌핑유무)에 따른 자연방사성물질의 농도 특성

깊이에 따른 자연방사성물질의 상관관계를 알아보고자 화강암반 지역의 약수터 106개 지점을 대상으로 펌핑 유무에 따른 자연방사성물질의 농도 차이를 알아보았다. 먹는물공동시설은 자연적으로 흐르는 물을 탱크시설에 저장하여 이용하는 시설과 관정을 통해 지하대수층에서 지하수를 끌어 올려 이용하는 시설이 있다. 국내 연구에 따르면 지하 깊이에 따라 라돈 가스의 농도가 증가되는 것이 확인된 바 있으며, 이를 근거로 기반암에 가까울수록 자연방사성물질의 농도는 높을 것으로 예측하였다. 화강암반 지역의 약수터 106개 지점 280개 자료를 대상으로 자연유출 지하수와 지하대수층에서 펌핑을 통해 끌어올린 지하수의 자연방사성물질 농도 차이를 알아보았다.

Table 4에 나타낸 바와 같이 우라늄의 평균 농도는 자연 용출수가 1.9 ㎍/L, 양수 지하수가 3.5 ㎍/L로 나타났으나 통계적으로 유의한 차이는 없었다(p=0.804). 반면 라돈의 평균 농도는 자연 용출수가 126.4 Bq/L, 양수 지하수가 80.8 Bq/L로 자연 용출수가 높았으며 통계적으로도 차이가 있는 것으로 나타났다(p=0.002). 라돈의 경우 양수 지하수가 자연 용출수에 비해 농도가 낮은 것은 양수 과정에서 탈기 효과에 의한 농도 감소의 영향으로 판단된다.

Table 4. Distribution of uranium and radon by depth in spring water from 2016 - 2018

	U (㎍/L)					^{222}Rn (Bq/L)				
	Mean	Median	Min.	Max.	S.D.	Mean	Median	Min.	Max.	S.D.
Pumping (n=127)	3.5	0.7	0	101.6	10.3	80.8	36.8	0	718.4	107.5
Non-pumping (n=153)	1.9	0.9	0	49.4	4.9	126.4	67.3	1.3	857.4	155.1

4. 상관성 분석

(1) 우라늄과 라돈의 상관관계

서울시내 약수터 전체의 우라늄과 라돈의 상관관계를 확인해보았다. Fig. 2와 같이 전 지역의 약수터보다는 화강암반 지하수대에서 라돈과 우라늄의 상관성이 높게 나타났지만 전반적으로 라돈과 우라늄은 상관성이 낮은 것으로 나타났다. 이러한 원인은 여러 요인이 복합적으로 작용하기 때문인데 예를 들어 파쇄대의 경우 라돈의 감소가 예상되며, 과거에 착정한 지하수공의 경우 천부지하수가 유입될 가능성도 있기 때문이다. 조 등은 지하수내 우라늄과 라돈 농도가 높은 것은 화학적 조건보다는 대수층 파쇄정도와 지하수 유동량과 같은 물리적 요소가 더 큰 작용을 한다고 한 바 있다(11). 또한 화강암반대에서 자연방사성물질의 고농도지점이 일치하지 않는 경우가 많아, 별도의 모니터링이 필요하다고 사료된다. 그리고 화강암반 지역에서 자연용출수와 양수 지하수로 나누어 각각의 라돈과 우라늄의 상관성을 살펴보면 자연 용출수(r=0.419)와 양수 지하수(r=0.392)가 유의미한 차이를 보이지 않았다. 이는 두 성분의 지화학적 거동의 차이, 지하수 유동 통로의 개방성 등 여러 요인 등을 고려한 추가적인 조사가 필요하다(11).

(2) 자연방사성물질과 pH와의 상관관계

Langmuir는 우라늄의 경우 중성 및 알칼리성 pH의 범위에서 상당한 양의 우라늄이 탄산염 착물 상태로 수용액에 잔류하는데 비해 산성의 낮은 pH에서는 단순 용존 상태의 우라늄의 농도가 높은 경향을 나타낸다고 언급한 바 있다(12). 본 연구에서 조사된 417개 자료의 pH와 자연방사성물질과의 관계를 확인한 결과 Fig. 3과 같이 우라늄은 pH에 따른 관련성이 나타나지 않았으나, 라돈은 주로

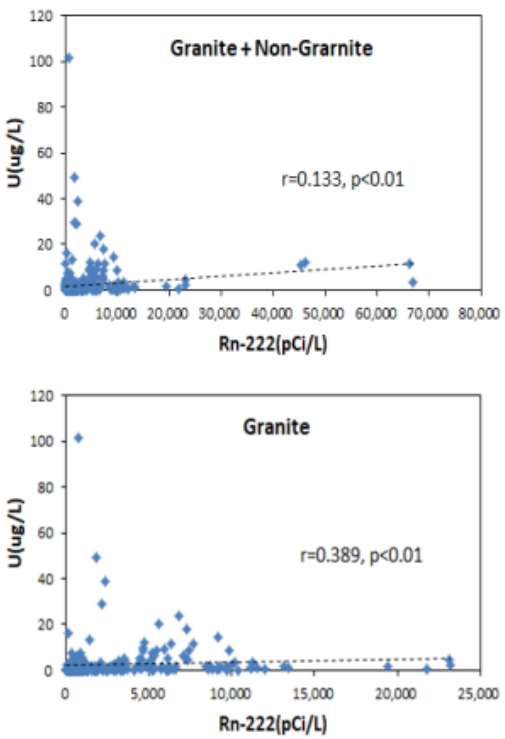

Fig. 2. Relationship between U and ^{222}Rn concentration in spring water.

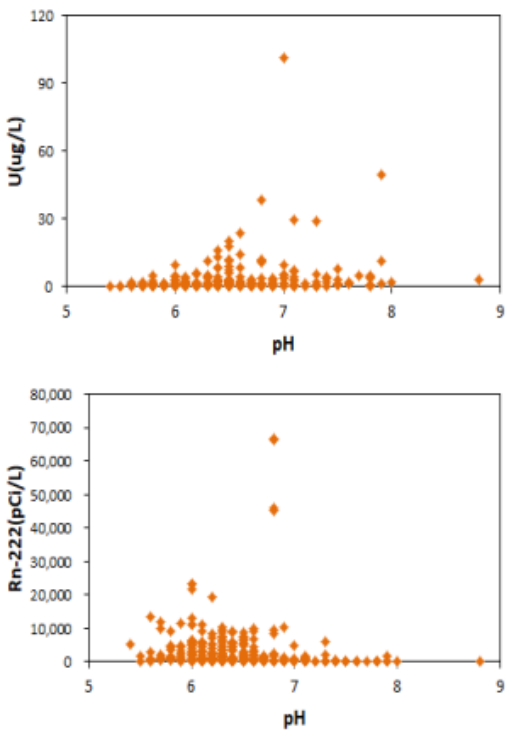

Fig. 3. pH parameter versus radionuclides (U, ^{222}Rn) data of the spring water.

pH 7 이하인 지점에서 많이 나타났다. 이에 대해서는 향후 수지화학 자료와의 연계 해석이 필요하다.

결 론

서울시내 먹는물공동시설의 수질 특성 및 우라늄과 라돈 함량 특성을 파악하기 위하여 2016년부터 2022년까지의 2/4분기 정밀 수질검사 결과와 2016년부터 2018년까지 3년 동안 164개소 417개 자연방사성물질 시료를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 서울시내 먹는물공동시설의 먹는물수질기준을 초과한 항목은 총대장균군이 56.9%로 가장 많은 비중을 차지하였고, 분원성대장균군(11.3%), 일반세균(9.6%), 여시니아(6.3%)의 순서로 미생물 항목이 전체 부적합율의 84.1%를 차지하였다. 이는 약수터의 수원이 지표수나 천층 지하수에 가깝고 외부로부터 미생물 오염원이 쉽게 유입되기 때문이다. 따라서 먹는물공동시설의 수질관리를 위해서는 자외선살균기 설치 등의 적극적인 미생물 관리가 필요하다.
2. 서울지역을 크게 화강암 지역과 비화강암 지역으로 나누어 조사한 결과 화강암 분포지역의 우라늄 평균 농도는 2.6㎍/L인 반면, 비화강암 분포지역에서는 1.5 ㎍/L이었다. 먹는물수질기준인 30 ㎍/L를 초과하는 지점도 모두 화강암 분포지역에서 나타났다. 화강암 분포지역의 라돈 평균 농도는 106.4 Bq/L, 비화강암 분포지역은 80.2 Bq/L로서 화강암 지역에서 우라늄과 라돈 모두 높게 검출되었다. 먹는물수질감시기준(148 Bq/L)을 초과하는 지점은 화강암 지역에서 71개, 비화강암 지역에서 5개로 나타났다. 지질에 따른 자연방사성물질의 평균 농도 차이를 비교한 결과, 우라늄과 라돈 모두 p<0.05로서 지질 특성(화강암 분포지역)에 영향을 받는 것으로 나타났다.
3. 채수 심도(펌핑 유무)에 따른 농도 변화를 확인하기 위하여 화강암 분포지역 106개 지점 280개 지하수 자료를 대상으로 양수 유무에 따라 자연방사성물질의 평균 농도에 차이가 있는지를 확인하였다. 라돈의 경우 자연 용출수의 평균 농도가 유의하게 더 높은 것으로 나타났으나, 우라늄의 경우는 유의한 차이가 없었다(p=0.804). 라돈은 휘발성이 있어 양수 과정에서 발생하는 탈기 효과에 의한 농도 감소의 영향으로 판단된다.
4. 먹는물공동시설의 자연방사성물질간의 상관관계를 조사한 결과 서울 전체보다는 화강암 반지역의 라돈과 우라늄의 상관성이 높게 나타났지만, 전반적으로 라돈과 우라늄은 상관성이 낮은 것으로 나타났다. 또한 고농도가 나타나는 경우 두 물질이 일치하지 않는 경우가 많아 별도의 모니터링이 필요하다고 사료된다.
5. pH가 높을수록 우라늄이 탄산염 화합물 상태로 수용액에 잔류하는데 비해 산성의 낮은 pH에서는 용존 우라늄의 농도가 높은 경향을 나타낸다. 조사 결과 pH와 자연방사성물질 간 유의성을 통계적으로 확인할 수는 없었으나, 산점도 상에서 우라늄과 라돈이 최고 함량을 보이는 지점은 비교적 7 이하의 낮은 pH임을 확인하였다.

참고문헌

1. 통계청 : 인구총조사 식수의 사용형태별 가구, 2015.
2. 이지영, 조혜윤, 김예슬, 박서희, 김현정, 전재식 : 서울시 먹는물 공동시설의 자연방사성물질 함량 분포 특성. 서울특별시 보건환경연구원보,

52:270~279, 2016.
3. 환경부 : 먹는물 수질감시항목 운영 등에 관한 고시, 2022.
4. 환경부 : 먹는물 수질공정시험기준, 2022.
5. 환경부 : 지하수 중 자연방사성물질 검출지역 관리지침, 2014.
6. 윤종철, 김예슬, 조혜윤, 최현숙, 이지영, 박진아, 김현정, 이목영 : 서울지역 먹는물공동시설 수질특성 연구. 서울특별시 보건환경연구원보, 54:245~251, 2018.
7. 이재영, 김종빈, 이명호, 문희성, 조우리 : 서울시 지하수 중 우라늄 및 라돈관리를 위한 타당성 연구. 서울녹색환경지원센터, p.69, 2013.
8. 정도환, 엄익춘, 윤정기, 김문수, 김영규, 김태승 : 고함량 자연방사성물질 우려지역에 대한 지하수 환경 특성 연구. 한국지하수토양환경학회지, 15(6):9~16, 2010.
9. 윤상웅, 이진용, 박유헐 : 국내 지질별 지하수내 자연방사성물질의 산출 특성. The Journal of Engineering Geology(Korea), Vol.26. No. 1:71~78. 2016.
10. 오달영, 김장열, 서민정, 신규진, 하광태, 이상미, 김교붕, 전재식 : 서울지역 토양중 우라늄 238 농도의 분포 연구. 서울특별시 보건환경연구원보, 50:264~272, 2014.
11. 조병욱, 추창오, 윤 욱, 이병대, 황재홍, 김문수 : 경상남북도 지하수 중 자연방사성물질 우라늄과 라돈의 산출 특성과 함량분포에 대한 수리지화학적 연구. The Journal of Engineering Geology(Korea), Vol.24. No. 4:551~574. 2014.
12. Langmui D., Uranium solution-mineral equilibria at low temperatures with applications to sedimentary ore deposits, Geochim, Cosmochim. Acta, 42:547~569, 1978.