

## 서울시 먹는물 공동시설의 자연방사성물질 함량 분포 특성

먹는물분석팀

이지영 · 조혜윤 · 김예슬 · 박서희 · 김현정 · 전재식

### **Distribution of Natural Radioactive Materials in Spring Water in Seoul, Korea**

*Drinking Water Analysis Team*

**Ji-young Lee, Hae-yoon Cho, Yea-seul Kim,  
Seo-hee Park, Hyun-jung Kim and Jae-sik Jeon**

#### **Abstract**

Uranium and radon concentrations were measured in 195 spring waters in Seoul with the aim of determining their range and distribution. The U and Rn concentrations ranged from 0.01 to 46.9  $\mu\text{g/L}$  and 35 to 46,152 pCi/L, respectively. The U concentrations in 1.5% of the samples exceeded 30  $\mu\text{g/L}$ , the drinking water standard. The Rn concentrations exceeded 4,000 pCi/L (the United States Environmental Protection Agency's alternative maximum contaminant level) in 14.8% of the samples and 8,100 pCi/L (Finland's guideline level) 6.1% of the samples. The average U and Rn concentrations in spring waters with granite host rocks were higher than those in spring waters with metamorphic host rocks the U and Rn concentrations were therefore influenced by geology. Furthermore, the U and Rn levels were weakly positively correlated, and pH, electrical conductivity (EC), Ca, K, Na, Si, F, and Cl were positively correlated with U. Only F was positively correlated with Rn, while pH, EC, Ca, K, Mg,  $\text{SO}_4$ , and Cl were negatively correlated with Rn.  $\text{NO}_3\text{-N}$  was not correlated with either U or Rn. This study revealed that the average concentrations of radionuclides in spring waters are not too high, but should nonetheless be controlled to prevent exposure to humans.

**Key words** : Spring water, Uranium, Radon, Radionuclides, Granite

## 서 론

먹는물의 수원을 대부분 지표수에 의존하고 있는 우리나라의 환경특성으로 인해 방사성물질에 관한 문제는 그동안 다른 화학물질에 비해 상대적으로 관심의 대상에서 멀어져 있었던 것이 사실이다. 최근 지표수의 오염과 수돗물에 대한 불신으로 먹는샘물 산업이 급성장 추세에 있으며 지하수의 음용률은 계속 증가하고 있다. 이러한 이유로 지하수의 수질 및 안정성에 대한 국민들의 관심이 증가하고 있으며 최근 일부 지역에서는 지하수 중 고농도의 라돈과 우라늄이 검출되어 지하수에 함유되어 있는 방사능 문제가 새로운 환경문제로 이슈화되고 있다(1).

우라늄과 라돈은 자연방사성물질중의 하나로서 이들의 인체 위해성은 지하수에 용해된 함량 정도에 따라서 달라진다. 우라늄은 반감기가 길기 때문에 우라늄의 인체 위해성은 방사성 독성보다는 중금속으로서의 화학적 독성이 문제시 되며 장시간 섭취 시에는 만성신장질환을 유발시킬 수 있다. 라돈은 반감기가 3.82일에 불과한 무색무취의 불활성 기체로써, 인간에게 피폭되는 방사선량의 50% 이상을 차지하며 흡연 다음으로 높은 폐암 발병인자로 알려져 있다(2~4).

지하수를 많이 사용하는 미국이나 일부 선진국의 경우에는 라돈, 우라늄, 라듐과 같은 방사성 핵종에 대한 기준 및 제한치를 마련하고 있으나, 우리나라의 경우 라돈은 아직 먹는물에 대한 기준이 전혀 없는 실정이다. 우라늄의 경우 2007년 10월 먹는물 감시항목으로 지정하여 지속적인 모니터링을 통해 2015년 11월 먹는샘물 및 먹는물공동시설 등의 수질기준에 우라늄을 추가하였다. 미국 EPA와 캐나다에서는 우라늄 기준 농도를 각각 30  $\mu\text{g/L}$ , 20  $\mu\text{g/L}$ 로 규제하고 있으며, WHO에서는 먹는물 권고기준으로 15  $\mu\text{g/L}$ 이다(5~9). 우리나라에서도 미국과 마찬가지로 우라늄의 수질기준을 30  $\mu\text{g/L}$ 로 규제하고 있으며, 미국의 먹는물 기준 중 라돈은 4,000 pCi/L이다(10).

국내에서 지하수의 자연방사성물질에 대한 본격적인 조사는 1998년에 대전지역 지하수에서 우라늄이 검출된 이후 환경부에서는 1999~2002년 1차

실태 조사로 우리나라의 대표적인 지질 분포를 반영할 수 있는 지하수를 선정하여 지하수 중 자연방사성물질 실태조사를 실시하였으며, 2006년 2차 실태조사는 기존 고함량 지점과 마을상수도 등의 자연방사성물질 특성 조사를 실시하였다. 이후 전국 단위의 종합적이고 체계적인 조사와 중장기적인 관리대책이 필요하다고 판단하여 2007년부터 2016년까지 매년 150개소 이상 마을상수도 등을 대상으로 제 3차 지하수 중 자연방사성물질 함유실태 조사계획을 수립하여 시행 중이다(10). 그러나 현재까지 조사지점수는 1,000여개로 선진국에 비하여 그 수가 매우 적으며 국립환경과학원의 조사결과는 주로 마을상수도를 중심으로 조사가 이루어져 이를 통해 서울시내의 먹는물의 자연방사성물질의 함유실태를 파악하기는 어렵다(11).

따라서 본 연구에서는 서울시내 먹는물공동시설 195개소의 라돈 및 우라늄 함량실태를 파악하고 지질별 자연방사성물질 분포특성 및 주요 양음이온 등의 수리화학적 자료와 자연방사성물질과의 관계를 조사하여 먹는물의 안전한 급수환경 조성 및 방사성물질의 규제기준과 관리방안 설정을 위한 기초적 자료를 제공하고자 하였다.

## 연구방법

### 1. 연구대상

2016년도 서울시내 먹는물공동시설 중 각 자치구에서 서울시보건환경연구원에 수질분석 의뢰된 195개 시료를 대상으로 하였다. 그림 1에 시료채취지점을 나타내었다.

### 2. 분석방법

본 실험은 먹는물 수질공정시험기준(환경부, 2015)과 환경부 자연방사성물질 관리지침에 따라 분석하였다(12).

### 3. 자연방사성물질 분석

우라늄 측정을 위해 시료는 0.45  $\mu\text{m}$  여지를 사용하여 물속에 존재하는 부유물질을 제거한 후

질산(99.999%)을 첨가하여 pH를 2 이하로 유지하였다. 우라늄 분석은 ICP/MS(SPECTRO MS, SPECTRO, Germany)를 사용하여 분석하였다. 라돈 분석을 위해서는 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 시료내의 알파선 및 베타선과 섬광체간의 상호작용으로 발생한 섬광을 측정하여 시료중의 방사능 농도를 구하는 방법이며, PSA기능으로 알파선과 베타선에 의해 생성된 펄스의 형태 차이를 동시에 측정할 수 있다. 그림 2는 PSA기능으로 알파선과 베타선이 분리된 모습이다.



Fig. 1. Location map of the sampling site in this study.

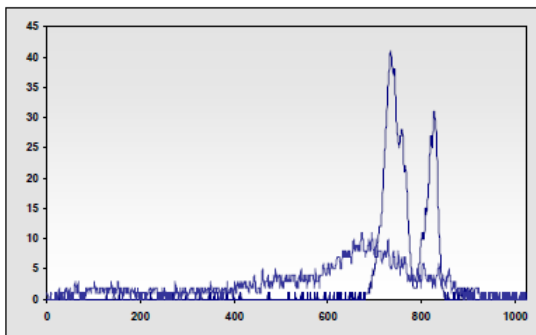


Fig. 2. Alpha and beta separation by PSA.

## 2) 주요 수리화학적 성분 분석

Na, K, Ca, Mg, SiO<sub>2</sub> 과 같은 양이온은 유도 결합플라즈마(Leeman lab-US/DRE ICP, Leeman, USA)로, F, Cl, NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub> 등의 음이온은 이온크로마토그래피(Metrohm 940, Metrohm, Switzerland)를 이용하여 분석하였다. pH와 전기전도도는 멀티측정기(Orion 3Star, Thermo, USA)를 이용하여 측정하였다.

## 3) 통계분석

지질분류에 따라 각 자연방사성물질의 평균농도가 차이가 있는지와 자연방사성물질과 주요수리화학적성분들과의 상관성 분석을 위하여 SPSS (Statistical Package for Social Science) V22.0을 이용하여 유의성 검증을 하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 먹는물공동시설의 우라늄과 라돈 함량 및 분포특성

#### 1) 우라늄

표 1에 나타난 바와 같이 서울시내 먹는물공동시설 195개소에 대한 우라늄의 농도범위는 0.01 ~ 46.9  $\mu\text{g/L}$ 이고, 평균농도는 2.84  $\mu\text{g/L}$ , 중앙값은 1.40  $\mu\text{g/L}$ 로 나타났으며, 총 195개 조사지점 중 수질기준 30  $\mu\text{g/L}$ 을 초과하는 지점은 3곳으로 나타났다. Y구에서 46.9  $\mu\text{g/L}$ 로 가장 높았고, W구와 J구에서 각각 1지점이 수질기준을 초과했다.

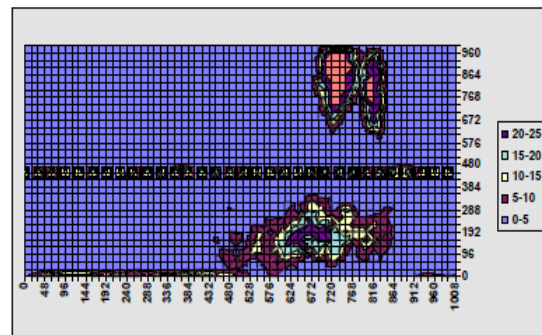


표 2에 나타난 바와 같이 우라늄 함량이 낮은 3.0  $\mu\text{g/L}$  이하의 분포비율이 81.5%로 분석결과 값이 낮은 값으로 치우쳐져 있음을 알 수 있고, 평균값이 중앙값과 비교했을 때 크게 나타난 것은 3개 초과지점 시료에 의한 것으로 사료된다.

그림 3은 국립환경과학원에서 2007~2009년 조사한 타 지역 지하수 중 우라늄의 함량분포와 본 조사결과를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 지하수의 우라늄 함량은 경기도가 25.7  $\mu\text{g/L}$ 로 평균값이 가장 높고, 충북이 2.45  $\mu\text{g/L}$ 로 중앙값이 가장 높았다. 서울시내 먹는물 공동시설 우라늄 평균값은 제주, 전남에 이어 낮은 수준을 나타냈으며, 중앙값의 경우 충북, 전북

에 이어 중간 수준으로 나타났다. 제 4기 현무암으로 이루어져 있는 제주도(평균값 0.08  $\mu\text{g/L}$ , 중앙값 0.05  $\mu\text{g/L}$ )의 지하수는 가장 낮은 함량을 보이고, 중생대 화강암이 많이 분포하는 경기, 충북, 전북의 지하수에서는 다른 지역에 비하여 높은 함량을 나타내 지질에 따라 함량의 차이가 나타남을 보여주었다(11).

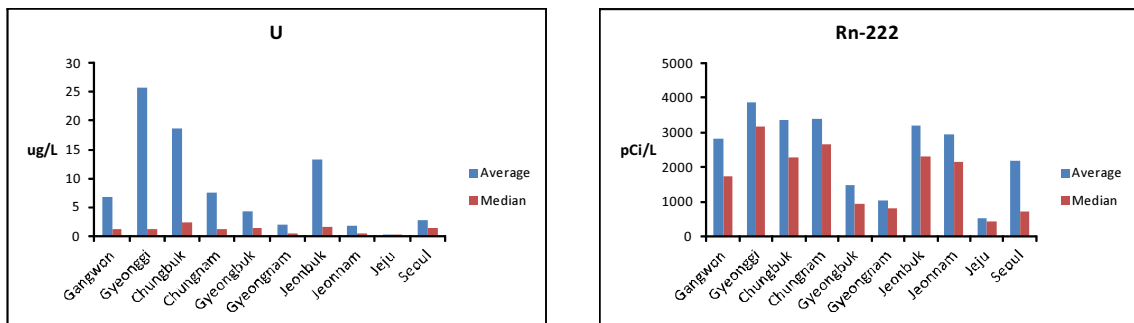
우라늄의 경우 미국 EPA와 캐나다에서는 그 기준 농도를 각각 30  $\mu\text{g/L}$ , 20  $\mu\text{g/L}$ 로 규제하고 있다. 우라늄은  $^{238}\text{U}$ 이 대부분이며, 동위원소인  $^{235}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ 는 각각 0.72%, 0.0054%에 불과하다고 한다. 자연계에서 우라늄은 화강암과 여러 가지 광상에서 폭넓게 나타나는데, 비교적 반응성이

**Table 1.** Statistical summary of uranium and radon concentrations of spring water in Seoul

	Average	Median	Min.	Max.	S.D.
U( $\mu\text{g/L}$ )	2.84	1.40	0.01	46.9	6.813
Rn-222(pCi/L)	2193.2	700	35	46152	5486.911

**Table 2.** Distribution of uranium of spring water in Seoul

U( $\mu\text{g/L}$ )	No of site	Percentage(%)	Accumulated(%)
3.0 >	159	81.5	81.5
3.0~9.9	27	13.9	95.4
10.0~19.9	4	2.1	97.5
20.0~29.9	2	1.0	98.5
30.0 <	3	1.5	100.0



**Fig. 3.** Comparison with other region in uranium and radon concentrations.

높아서 여러 원소들과 결합하여 다양한 복합물을 형성한다. 우라늄의 독성은 방사선에 의한 영향과 화학적 독성으로 구분되는데 화학적 독성의 경우 농도가 높을 때 신장장애를 초래하는 것으로 보고 되고 있다(13).

## 2) 라돈

표 1에 나타난 바와 같이 서울시내 먹는물공동 시설 195개소에 대한 라돈의 농도범위는 35~46,152 pCi/L이고, 평균농도는 2,193.2 pCi/L, 중앙값은 700 pCi/L로 나타났으며, 총 195개 조사 지점 중 미국 EPA의 제안치 4,000 pCi/L을 초과하는 지점은 29곳으로 나타났다. E구에서 7 지점이 제안치를 초과하였고, I구 6 지점, C구 4 지점 등의 순으로 나타났다. 표 3에 나타난 바와 같이 우라늄과는 달리 라돈의 경우는 미국 EPA 제안치 4,000 pCi/L를 초과하는 지점은 14.8%로 나타났으며, 핀란드의 음용 제안치인 8,100 pCi/L를 초과하는 지점은 전체의 6.1%인 12개소인 것으로 나타났다. 라돈 함량이 300 pCi/L 이하 분포하는 비율이 86.3%로 나타난 부산지역 지하수 수질측정망의 라돈 함량 보다는 서울시내 먹는물공동 시설의 라돈함량은 다소 높은 것을 알 수 있다(13). 서울시내 먹는물 공동시설의 라돈 함량은 지질여건이 비슷한 다른 나라에 비해서 낮게 검출되고 있으며, 노르웨이의 경우 전체 지하수 시료 중 14%가 13,650 pCi/L 이상이며, 핀란드의 경우 24,706 pCi/L에 이른다(18).

그림 3에 나타난 바와 같이 지하수의 라돈 함량은 경기도에서 평균값 3,875 pCi/L과 중앙값

3,162 pCi/L로 가장 높게 나타났고, 퇴적암이 우세한 경북과 경남의 중앙값은 각각 952 pCi/L, 801 pCi/L로 낮게 나타났다. 서울시내 먹는물 공동시설의 라돈 평균값은 경기, 충남, 충북, 전북, 전남, 강원 보다는 낮고 경북, 경남, 제주보다는 높게 나타났다. 반면에 중앙값은 제주에 이어 두 번째로 낮은 수준으로 나타났다(11). 이와 같이 지역에 따라 지하수의 우라늄과 라돈의 함량에 차이가 있는 것은 과거 지하수의 방사성물질의 실태 조사 결과와도 일치한다(3, 4, 10).

자연에 존재하는 라돈의 대부분은  $^{222}\text{Rn}$ 이며,  $^{226}\text{Ra}$ 의 방사성 붕괴에서 생성된다. 물, 토양중의 라돈이 공기로 방출되어 호흡기로 흡입되거나 음용수 섭취시 소화기관을 통해 흡수되어, 폐암, 위암을 유발하는 것으로 알려져 있다(10, 13).

## 2. 지질에 따른 우라늄과 라돈함량

국립환경과학원의 실태조사 결과, 지하수중 자연방사성물질의 함량은 지질에 따라 함량의 차이가 있다고 보고되어진 바 있으며, 국내외 암석과 지하수에 따른 우라늄과 라돈 함량을 조사한 보고에 따르면 우라늄은 화강암과 옥천계변성퇴적암의 흑색셰일에서, 라돈은 화강암계통과 변성암에서 높은 함량을 보인다고 하였다(3, 14, 17~20).

서울지역의 지형은 크게 2가지 형태로 분류된다. 화강암 분포지역은 주로 산악지대로서 Dome형을 이루고 있고, 변성암인 편마암, 편암의 분포 지역은 주로 평지나 낮은 구릉지를 형성하고 있다(15). 아래 그림 4에 서울시 지질도를 나타내었으며, 관내 12개 구(도봉, 노원, 강북, 성북, 종로,

**Table 3.** Distribution of radon of spring water in Seoul

Rn-222(pCi/L)	No of site	Percentage(%)	Accumulated(%)
300 >	51	26.2	26.2
300~1,000	63	32.3	58.5
1,001~4,000	52	26.7	85.2
4,001~8,100	17	8.7	93.9
8,100 <	12	6.1	100.0

동대문, 중, 성동, 중랑, 은평, 서대문, 관악)의 지질이 화강암계열(흑운모화강암)이다. 서울시내 먹는물공동시설 195개소 중 화강암계열의 지점수는 122개소이며, 변성암계열은 73개소로 나타났다. 그림 5에 나타난 바와 같이 화강암지역의 우라늄의 함량범위는 0.01~46.9  $\mu\text{g/L}$ , 평균 3.28  $\mu\text{g/L}$ , 중앙값은 1.2  $\mu\text{g/L}$ 로 나타났다. 변성암지역의 우라늄 함량범위는 0.01~12.1  $\mu\text{g/L}$ , 평균 2.11  $\mu\text{g/L}$ , 중앙값은 1.8  $\mu\text{g/L}$ 로 평균값은 화강암지역에서 더 높게 나타났으나, 중앙값은 변성암지역이 더 높았다. 수질기준인 30  $\mu\text{g/L}$ 를 넘는 지점도 3곳 모두 화강암지역에서 나타났다.

화강암지역에서 라돈의 함량 범위는 59~23,173 pCi/L, 평균 2,831.9 pCi/L, 중앙값은 1,374 pCi/L

이다. 변성암지역의 라돈함량범위는 35~46152 pCi/L, 평균은 1,125.8 pCi/L, 중앙값은 353 pCi/L로 나타났다. 화강암지역이 변성암지역보다 라돈 평균값이 2배 이상 높게 검출되었다. 라돈 최고치는 변성암지역인 D구에서 나타났지만, 미국 EPA 제안치 4,000 pCi/L를 초과하는 28곳은 모두 화강암지역에서 나타났다. 중생대 화강암지역에서 평균값 및 중앙값 모두 높게 나타남으로써 일반적인 우리나라 화강암질 지하수의 특성과 잘 일치한다. 정도환 등(16)이 국내 지하수를 암석 유형에 따라 크게 4개 유형으로 분류하여 조사한 결과에 따르면, 우라늄은 변성암 지역에서 131.1  $\mu\text{g/L}$ , 라돈은 화강암지역에서 15,963 pCi/L로 최고 농도가 나타났지만, 평균적으로 화강암, 변성

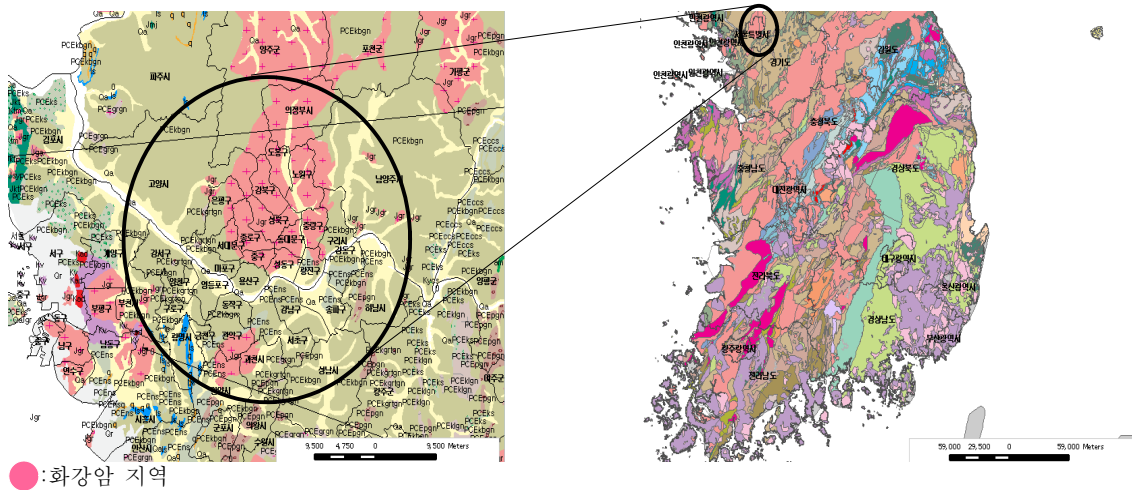


Fig. 4. Geological map in the Seoul area.

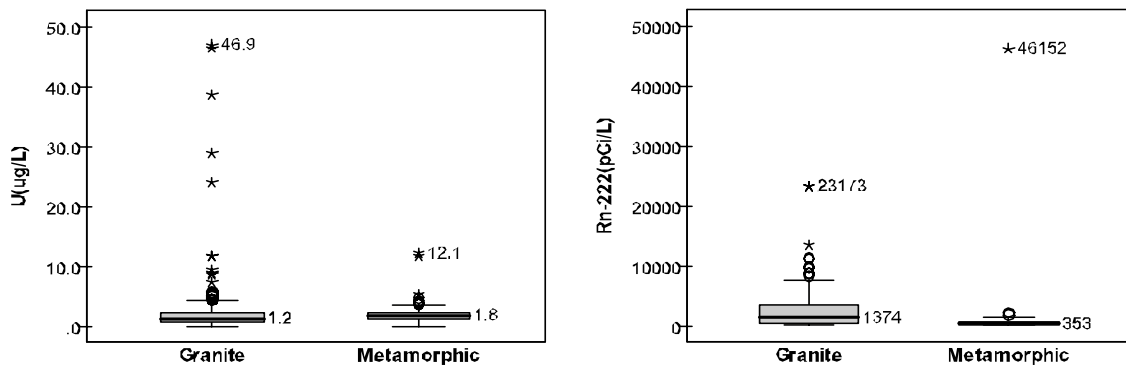


Fig. 5. Box plots of uranium and radon concentrations with geology.

암, 퇴적암, 화산암의 순서로 우라늄과 라돈이 검출되고 있다고 하였는데 본 조사결과도 이와 일치함을 알 수 있다.

지질분류에 따라 각 자연방사성물질의 평균농도의 차이가 있는지를 알아보기 위해 데이터에 대한 통계분석을 수행하였다. 전체 표본에 대한 정규성 가정을 검토한 결과 Shapiro-Wilk값이 라돈과 우라늄 모두 0.05보다 작게 나타나 정규성을 만족하지 않는 것으로 나타났다. 정규분포를 만족하지 않으므로 비모수 검정인 독립표본 Mann-Whitney U검정을 실시한 결과, 95% 신뢰수준에서 p-value가 우라늄 0.013, 라돈 0.000으로 모두 0.05보다 작게 나타남으로써 우라늄과 라돈 모두 지질에 따른 평균 농도의 차이가 있는 것을 확인 할 수 있었다.

### 3. 우라늄 및 라돈함량과 주요 수리화학적 성분들의 상관관계

현장수질 및 주요 양음이온의 함량에 대한 통계 자료는 표 4에 나타내었다. pH 5.3~8.1(중앙값 6.4), 전기전도도(EC) 41.5~1249(127.2)  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 의 범위를 보였으며, 국내 기준치인 pH(5.8~8.5)를 초과한 지점은 없었다. 주요 양이온은 Si

0.0~20.8(10.3) mg/L, Na 0.2~51.2(9.1) mg/L, K 0.2~101.1(11.6) mg/L, Mg 0.0~19.0(1.8) mg/L, Ca 0.0~105.8(11.4) mg/L이며, 음이온은 F 0.0~1.2(0.2) mg/L, Cl 2.0~344.1(5.7) mg/L, SO<sub>4</sub> 0.0~20.8(10.1) mg/L, NO<sub>3</sub>-N 0.0~10.9(2.8) mg/L의 범위를 나타냈다. 이 중 Cl과 NO<sub>3</sub>-N의 경우 국내 기준치(Cl : 250 mg/L, NO<sub>3</sub>-N 10 mg/L)를 초과한 지점이 각각 1개소로 나타났다.

서울시내 먹는물 공동시설 195개소의 우라늄 및 라돈 함량과 물리화학적 수질성분과의 상관관계를 표 5에 나타내었다. 우라늄과 라돈간의 관계를 보면, 0.01유의수준에서 상관관계가 유의한 것으로 나타났으며, 상관계수는 0.23으로 약한 양의 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 부산지역 지하수 수질측정망 80개소를 대상으로 한 연구에서는 우라늄과 라돈간에 0.01유의수준에서 상관관계가 유의한 것으로 나타났으며, 상관계수는 0.334로 나타났다(13). 그림 6에 지질별로 우라늄과 라돈과의 상관관계를 산점도로 나타내 본 결과, 화강암지역에서는 우라늄과 라돈이 양의 상관관계를 나타내었고, 변성암지역에서는 결정계수(R<sup>2</sup>)가 0.0129로

**Table 4.** Statistical summary of the physicochemical properties of spring water

	Average	Median	Min.	Max.	S.D.
pH	6.4	6.4	5.3	8.1	0.47
EC( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	174.6	127.2	41.5	1249.0	143.94
Si(mg/L)	10.3	10.3	0.0	20.8	3.46
Na(mg/L)	10.0	9.1	0.2	51.2	6.36
K(mg/L)	15.8	11.6	0.0	101.1	14.16
Mg(mg/L)	2.9	1.8	0.0	19.0	2.80
Ca(mg/L)	15.7	11.4	0.0	105.8	14.45
F(mg/L)	0.2	0.2	0.0	1.2	0.21
Cl(mg/L)	14.5	5.7	2.0	344.1	30.22
SO <sub>4</sub> (mg/L)	14.2	10.1	0.0	20.8	3.46
NO <sub>3</sub> -N(mg/L)	3.3	2.8	0.0	10.9	2.11

화강암지역 0.0094보다 높으나 음의 상관관계를 보이는 것으로 나타났다.

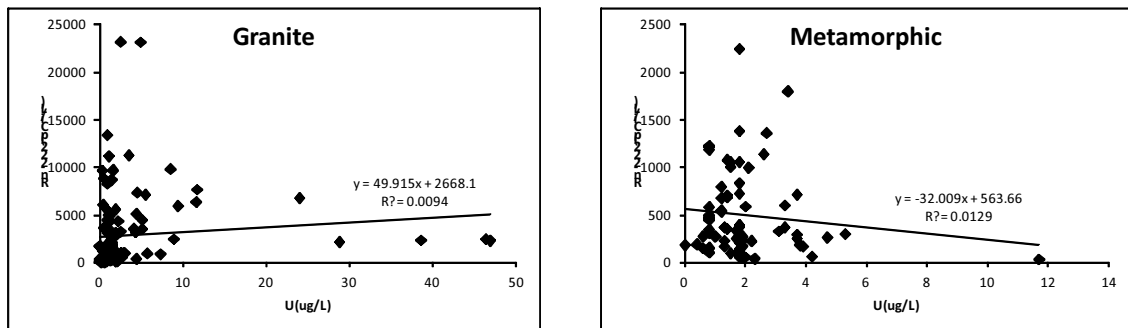
우라늄과 주요 수질성분과의 상관성을 보면, 우라늄은 pH, EC, Na, Ca, K, Si, Cl, F와 유의성이 확인되었으며, 각각의 상관계수는 pH : 0.264, EC : 0.251, Na : 0.196, Ca : 0.242, K : 0.243, Si : 0.200, Cl : 0.215, F : 0.213으로 약한 양의 상관관을 보였다. 그 외 Mg 및 SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>-N 등의

성분과는 상관성이 나타나지 않았다. 라돈과 주요 수질성분과의 상관성을 보면, 라돈은 pH, EC, Ca, Mg, K, SO<sub>4</sub>, Cl, F 성분에서 유의성이 확인되었으며, 상관계수는 F : 0.260으로 불소와만 양의 상관관을 보였고, pH, EC, Ca, Mg, K, SO<sub>4</sub>, Cl과는 음의 상관관을 보이는 것으로 나타났다. 그 외 나머지 Na, Si, NO<sub>3</sub>-N 등과는 라돈과의 상관성이 나타나지 않았다. 국내 음용지하수의 방사성

**Table 5. Spearman correlation coefficients of the radionuclides and physicochemical properties**

	pH	EC	Rn-222	U	Na	Ca	Mg	K	Si	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub> -N	Cl	F
pH	1.000												
EC	0.295**	1.000											
Rn-222	-0.347**	-0.250**	1.000										
U	0.264**	0.251**	0.230**	1.000									
Na	0.107	0.712**	-0.025	0.196**	1.000								
Ca	0.259**	0.785**	-0.173*	0.242**	0.832**	1.000							
Mg	0.239**	0.723**	-0.313**	0.076	0.698**	0.870**	1.000						
K	0.258**	0.789**	-0.175*	0.243**	0.832**	0.999**	0.873**	1.000					
Si	-0.006	0.408**	0.109	0.200	0.702**	0.526**	0.343**	0.523**	1.000				
SO <sub>4</sub>	0.264**	0.671**	-0.183**	0.087	0.625**	0.651**	0.581**	0.654**	0.331**	1.000			
NO <sub>3</sub> -N	-0.035	0.482**	0.054	-0.117	0.511**	0.459**	0.457**	0.461**	0.338**	0.410**	1.000		
Cl	0.262**	0.699**	-0.152*	0.215**	0.581**	0.540**	0.503**	0.546**	0.266**	0.686**	0.445**	1.000	
F	-0.031	-0.080	0.260**	0.213**	-0.045	-0.071	-0.074	-0.071	-0.061	0.048	-0.012	0.045	1.000

\*\* : p<0.01(2-tailed), \* : p<0.05(2-tailed)



**Fig. 6. Relationship between uranium vs radon concentrations in spring water with geology.**



물질을 조사한 연구에서도 pH의 증가에 따라 우라늄이 증가하는 경향을 보이고 있다고 한 바 있으며(11, 16), 노르웨이의 1,604여개의 지하수공을 조사한 연구에서도 라돈은 불소와 상관성이 높고 화강암질에서 높다고 한 바 있다(18).

## 결론

서울시내 먹는물 공동시설의 우라늄과 라돈 함량의 범위와 특성을 파악하기 위하여 18개 구청에서 의뢰된 195개소를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 먹는물 공동시설 195개소의 우라늄 함량은 0.01~46.9  $\mu\text{g/L}$ , 평균 2.84  $\mu\text{g/L}$ , 중앙값 1.4  $\mu\text{g/L}$ 이며, 라돈 함량은 35~46,152 pCi/L, 평균 2193.2 pCi/L, 중앙값은 700 pCi/L로 나타났다. 우라늄 함량이 수질기준인 30  $\mu\text{g/L}$ 를 넘는 지점은 3개소인 1.5%로 나타났고, 라돈은 미국 EPA 제안치인 4,000 pCi/L를 넘는 지점이 29개소(14.8%), 핀란드의 음용 제안치인 8,100 pCi/L를 초과하는 지점은 전체의 6.1%인 12개소인 것으로 나타났다. 우라늄과 라돈의 평균값과 중앙값이 차이가 있는 것은 이들 지역에서 대부분이 낮은 값을 보이고 있지만 일부 지역에서 기준치와 제안치를 초과한 높은 값이 나타나기 때문으로 판단된다.
2. 서울지역의 지형은 크게 화강암지역과 변성암지역으로 분류할 수 있는데, 우라늄의 평균치는 화강암지역 3.28  $\mu\text{g/L}$ , 변성암지역 2.11  $\mu\text{g/L}$ 이고, 라돈의 평균치는 화강암지역 2831.9 pCi/L, 변성암지역 1,125.8 pCi/L로 화강암지역에서 우라늄과 라돈 모두 높게 검출되었다. 수질기준 및 미국 EPA 제안치를 초과하는 지점도 우라늄 3개소, 라돈은 D구 1곳을 제외한 28개소 모두 화강암지역인 것으로 나타났다. 또한 지질분류에 따른 자연방사성물질의 평균농도가 차이가 있는지를 비교한 결과 우라늄과 라돈 모두 p-value가 0.05보다 낮게 나타나 우라늄과 라돈농도는 지질에 상대적으로 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

3. 우라늄 및 라돈함량과 다른 주요 수리화학적분들과의 상관관계를 살펴본 결과 우라늄과 라돈 간에는 약한 양의 상관성이 나타났으며( $R=0.23$ ), 우라늄은 pH, EC 및 Ca, K, Na, Si, Cl, F 등의 성분과 상관관계가 유의한 것으로 나타났고, Mg 및  $\text{SO}_4$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ 와는 상관성이 나타나지 않았다. 라돈은 불소 성분하고만 양의 상관관계를 보였고, pH, EC, Ca, Mg, K,  $\text{SO}_4$ , Cl과는 음의 상관을 보이는 것으로 나타났다. 그 외 나머지 Na, Si,  $\text{NO}_3\text{-N}$  등과는 라돈과의 상관성이 나타나지 않았다.
4. 본 연구결과 먹는물 공동시설에서 자연방사성물질의 평균 농도는 기준치 이내이지만, 먹는물 수질기준 및 미국 EPA 제안치를 초과하는 시설이 검출되는 바 국민건강상 위해를 예방하고 보다 안전한 먹는물 공급을 위해서는 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 여겨진다. 또한 우라늄이 고농도로 검출되는 일부 지점에 대해서는 정밀한 검토를 거쳐 폐공 조치 등 적절한 조치가 필요할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 신동천, 김예신, 문지영, 박화성, 김진용, 박선구 : 지하수 중 자연방사성물질의 위해성 관리에 대한 고찰. 환경독성학회지, 17(4):273~284, 2002.
2. 성익환, 김대업, 우형주, 조병욱, 박중권, 이한영, 정강섭, 윤윤열, 조수영, 이용주, 이병대, 김통권, 김경수, 추창오, 신동천 : 지하수중 방사성물질함유실태에 관한 조사연구(I). 국립환경연구원, p.338, 1999.
3. 성익환, 김대업, 우형주, 정강섭, 조병욱, 이병대, 홍영국, 박중권, 윤욱, 이봉주, 김용제, 윤윤열, 조수영, 이인호, 추창오, 김정숙, 심형숙, 신동천, 장태우 : 지하수중 방사성물질함유실태에 관한 조사연구(II). 국립환경연구원, p.323, 2001.
4. 조병욱, 김건환, 김연기, 성익환, 안주성, 윤욱, 윤윤열, 이길용, 이병대, 이홍진, 임현철, 조수영, 홍영국 : 지하수중 방사성물질함유실태

- 태 조사. 국립환경연구원, p.200, 2006.
5. USEPA : National Primary Drinking Water Regulations, Radionuclides, Final Rule. 2000.
  6. WHO : Guidelene for Uranium in Drinking Water. 1993b
  7. Health Canada : Uranium in Drinking Water. 1999b
  8. Health Canada : Summary of Guidelines for Canadian Drinking Water Quality. 2001
  9. 박선구, 임연택 : 외국에서의 지하수 중 방사성물질 관리에 대한 고찰(II). 한국물환경학회지, 20:93~103, 2004.
  10. 김태승, 박종겸, 엄익춘, 윤정기, 정도환, 강기철, 윤대근, 권지철 : 지하수중 방사성물질 함유실태 조사(I). 국립환경연구원, p.155, 2007.
  11. 정도환, 김문수, 주병규, 김태승: 지역별 지하수중 우라늄과 라돈의 함량 분포특성. 지하수토양환경학회지, 16(6):143~149, 2011.
  12. 환경부 : 지하수 중 자연방사성물질 검출지역 관리지침. 2014.
  13. 전대영, 부산지역 지하수의 방사성물질 특성. 한국지하수토양환경학회지, 14(5):51~61, 2009.
  14. 정도환, 엄익춘, 윤정기, 김문수, 김영규, 김태승 : 고함량 자연방사성물질 우려지역에 대한 지하수 환경 특성 연구. 한국지하수토양환경학회지, 15(6):9~16, 2010.
  15. 이재영, 김종빈, 이명호, 문희성, 조우리 : 서울시 지하수 중 우라늄 및 라돈관리를 위한 타당성 연구. 서울녹색환경지원센터, p.69, 2013.
  16. 정도환, 김문수, 이영준 : 국내 음용지하수의 수리지화학 및 자연 방사성물질 환경특성. 지하수토양환경학회지, 16(6):133~142, 2011.
  17. Morland, G : The hydrogeochemistry of Norwegian bedrock groundwater-selected parameters(pH, F, Rn, U, Th, Na, Ca) in samples from Vestfold and Hordaland, Norway. NGU Bull, 432:103~117, 1997.
  18. Banks, D, Frengstad, B, Midtgard, AK, Krog, JR and Strand, T : The distribution of radon, major and minor elements in 1604 crystalline bedrock groundwaters. The Science of the Total Environment, 222:71~91, 1998.
  19. Banks, D : The chemistry of 72 groundwaters form Quaternary sedimentary aquifers. The Science of the Total Environment, p.93~105, 1998.
  20. Frengstad, B : The distribution of trace elements in 476 crystalline bedrock groundwaters, as analysed by ICP-MS techniques. The Science of the Total Environment, 246:21~40, 2000.