

## 지하수와 지표수에서의 라돈 및 우라늄의 실태 조사

오영미<sup>†</sup> · 이종복 · 신경진 · 김학철 · 이재희 · 황상철 · 정상기 · 이상태

한국수자원공사 수돗물분석연구센터

### The Study of Radon Activity and Uranium Concentration of Ground Water and Surface Water

Youngmi Oh<sup>†</sup> · Jongbok Lee · Kyungjin Shin · Hakchul Kim · Jaehye Lee · Sangchul Hwang · Sanggi Jung · Sangtae Lee

Water Analysis and Research Center, Korea Water Resources Corporation

(Received 25 August 2006, Accepted 18 January 2007)

#### Abstract

This paper reports the amount of <sup>222</sup>Rn and <sup>238</sup>U in 18 sites of ground water and 30 sites of surface water. The instrument used to count <sup>222</sup>Rn activity was the liquid scintillation counter (LSC) which could resolve  $\alpha$  and  $\beta$  radiations. And <sup>238</sup>U was analyzed by the inductively coupled plasma (ICP). Radon and Uranium were not detected in raw and treated water which were sampled in a water treatment plant. However, radon (<sup>222</sup>Rn) was high concentration in ground water from Jeon-la, Gang-won. So was uranium (<sup>238</sup>U) in case of ground water from Gang-won, Choong-chung. Radon (<sup>222</sup>Rn) activities were detected less than 15 pCi/L at 5 sampling points, 15~300 pCi/L at 7 sampling points, 300~4000 pCi/L at 6 sampling points. However, Radon (<sup>222</sup>Rn) activities of all ground water samples were less than 4,000 pCi/L, which was bellow American Alternative Maximum Contamination Level (AMCL). Uranium (<sup>238</sup>U) concentrations were less than 0.1  $\mu$ g/L at 5 sampling points, from 0.1  $\mu$ g/L to 20  $\mu$ g/L at 13 sampling points. Uranium was not detected in about 30% of the whole samples, but the concentration ranged from relatively low to high concentrations depending on the sampling point. The minimum detectable activity (MDA) of radon was 15 pCi/L, and the detection limit of uranium was 0.1  $\mu$ g/L.

keywords : Liquid Scintillation Counter (LSC), Radon, Uranium

### 1. 서론

수중의 방사성 물질은 핵실험 또는 핵폐기물 재이용과 같은 인위적인 오염원에 의한 것과 태고에 형성된 지하에 의한 자연적인 오염원에 의한 것으로 나눌 수 있다. 인위적인 오염원은 원자력 사고 등으로 야기된 고준위 방사능 물질이 대부분이며 이에 의한 인체 피해 및 영향에 대한 연구 결과는 많이 보고되어 왔다. 그러나, 먹는물이나 음식물을 통하여 저농도의 방사성 물질을 지속적으로 섭취하는 경우 인체 영향 및 그에 대한 기준은 아직 미비한 실정이다. 지하수를 많이 사용하는 미국이나 일부 선진국의 경우에는 먹는물 중의 라돈, 우라늄, 라듐과 같은 방사성 핵종에 대한 기준 및 제한치를 마련하고 있으나, 우리나라의 경우 아직 먹는물에 대한 기준이 전혀 없는 실정이며 이 가운데 1998년 대전지역의 지하수에서 방사성 물질인 우라늄이 검출되었다는 국립환경연구원(1999) 보고와 함께 국내에서도 방사성 물질이 새로운 관심의 대상이 되고 있다.

현재까지는 수중의 방사성물질은 대부분 자연적인 오염

에 의한 것이 많으며 인위적인 오염이 주가 되는 일반적인 오염물질과는 성격을 달리 한다. 따라서, 방사성 물질에 대한 수질 기준은 다른 오염물질과는 달리 기준이 아닌 제한치의 수준이며, 일부 지하수를 많이 사용하는 선진국에 국한되어 있다. 그러나, 자연적인 오염일지라도 먹는물 수질 기준은 국민의 건강보호가 우선시되어야 하기 때문에 각 국가의 특성에 맞는 기준치를 설정하여 그에 대한 적절한 관리가 필요하다.

우라늄의 경우 미국의 환경보호청(USEPA)과 캐나다에서는 그 기준 농도를 각각 30  $\mu$ g/L와 20  $\mu$ g/L로 규제하고 있다. 우라늄은 <sup>238</sup>U이 대부분이며 동위원소인 <sup>235</sup>U, <sup>234</sup>U는 Greenwood 등(1984)에 의하면 각각 0.72%, 0.0054%에 불과하다고 한다. 자연계에서 우라늄은 화강암과 여러 가지 광상에서 폭넓게 나타나는데, 비교적 반응성이 높아서 여러 원소들과 결합하여 다양한 복합물을 형성한다. Touche 등(1987)에 의하면 우라늄의 섭취는 먹는물로 약 3.7  $\mu$ g/day, 음식물로 약 1.1  $\mu$ g/day이며, 섭취된 우라늄은 3% 미만만이 흡수되고 나머지는 배출된다고 보고되었다. 우라늄의 독성은 방사선에 의한 영향과 화학적 독성으로 구분된다. Leggett(1989)에 따르면 우라늄의 화학적 독성은 농도가 높

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.

oym@kwater.or.kr

을 경우(0.2 mg/L 이상) 신장장애를 초래하는 것으로 보고되고 있다.

자연에 존재하는 방사성 라돈은 대부분  $^{222}\text{Rn}$ 이며, 이는  $^{226}\text{Ra}$ 의 방사성 붕괴과정에서 생성된다. 반감기는 3.82일로써 짧은 반감기 때문에 라돈의 딸원소는 라돈 모원소와 방사성 평형에 빠르게 도달되며, 토양에서 라듐으로부터 형성된 대부분의 라돈은 그대로 지구상에 잔류하게 된다.  $^{222}\text{Rn}$ 은 무색, 무취, 무미의 기체이며 물에 대한 용해도가 높다. 따라서, 지하수에 많은 양이 포함되어 있을 수 있다. Andrews 등(1989)의 연구에 따르면 지하수내 라돈함량은 지하수 유동체계의 대수층 암석의 균열폭과 관련되는 경우가 흔하다고 보고되고 있다. 박 등(2004)에 의하면 지하수에 녹아 있는 방사성 라돈은 탈기되어 공기중의 방사능 농도를 높이며 음용수로 사용할 때 인체로 유입되어 폐나 특정 장기에 침착하여 일정 부위에 방사선 피폭을 주는 것으로 보고되고 있다.

본 연구에서는 먹는물 중의 방사성물질의 분포실태조사를 위하여 전국의 지표수 및 지하수에 대하여 라돈( $^{222}\text{Rn}$ )과 우라늄( $^{238}\text{U}$ ) 측정을 실시하였다. 라돈은 파형분석(Pulse Shape analysis, PSA) 기능을 가진 액체섬광계수기를 사용하였으며, 우라늄은 유도결합플라즈마 질량분석기를 사용하였다. 우라늄 분석은 필요한 원소만 화학적으로 분리하여 측정하는 방법도 있으나 분리 과정이 복잡하고 측정감도에 문제가 있어 현재는 질량분석기를 이용한 방법이 가장 일반적으로 사용되고 있다(Date et al., 1989).

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 시약

$^{222}\text{Rn}$  표준시료를 제조를 위해서는  $^{226}\text{Ra}$  표준선원(0.2  $\mu\text{Ci}$ , Isotope Products Laboratory, USA)을 사용하였으며, 우라늄 농도 측정을 위해서는 우라늄 표준용액(Accustandard, USA, 1,000 mg/L)을 사용하였다. 질산은 반도체급용의 질산(Dongwoo Fine-Chem Co., Korea, 68~71%)을 사용하였으며, 섬광액은 High Efficiency Mineral Oil<sup>TM</sup> (Perkin-Elmer, USA)을 사용하였다.

### 2.2. 시험기구

라돈( $^{222}\text{Rn}$ ) 측정을 위해서는 알파선과 베타선에 의한 펄스를 분리할 수 있는 파형분석(PSA) 기능을 가진 액체섬광계수기(Tri-Carb 3170 TR/SL, Packard, USA)를 사용하였다. 우라늄( $^{238}\text{U}$ ) 측정을 위해서는 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP/MS, Elan 6000, Perkin Elmer, USA)를 사용하였으며 표준용액 제조시 희석을 위한 무게 측정은 화학저울(XS 205, Mettler Toledo, USA)을 사용하였다.

ICP/MS의 기기조건과 측정조건은 Table 1과 같다.

## 2.3. 실험방법

### 2.3.1. 표준시료의 제조

$^{222}\text{Rn}$  표준시료는  $^{226}\text{Ra}$  표준선원(373 Bq/mL) 일정량을

**Table 1.** Optimized operating condition of ICP/MS

Model	Elan 6000 (Perkin elmer)
Nebulizer gas flow	0.92 mL/min
ICP RF power	1050 kW
Torch type	Demountable torch
Nebulizer type	Glass concentric nebulizer
Spray chamber	Cyclonic spray chamber
Pump rate	25 rpm

10 mL의 증류수가 담긴 시료 용기(scintillation vial)에 넣고 이 등(2001)이 사용한 방법과 같이 질소가스로 탈기시켜 용액에 존재하는 잔류 라돈( $^{222}\text{Rn}$ ) 기체를 완전히 제거한 후 섬광액(High Efficiency Mineral Oil<sup>TM</sup>, PerkinElmer, USA) 10 mL를 첨가하여 조제하였다. 바탕선 시험을 위한 시료는 10 mL의 증류수와 섬광액 10 mL만을 사용하여 조제하였다. 시료용기는 20 mL 용량의 폴리에틸렌 용기를 사용하였다.

파형분석 값 측정의 표준시료는 Collé 등(1990)과 같이  $^{226}\text{Ra}$  표준선원과 최적 섬광액을 사용하여 조제하였다. 최적섬광액은 Barnett 등(1992)과 같이 High Efficiency Mineral Oil<sup>TM</sup>을 사용하였으며  $^{226}\text{Ra}$  표준선원과 최적 섬광액을 각각 10 mL씩 분취하여 20 mL 시료 용기에 담아 25 일정도 방치하여 분석에 필요한 라돈( $^{222}\text{Rn}$ )가스를 충분히 발생시켜 준비하였다.

우라늄( $^{238}\text{U}$ ) 표준용액은 표준원액(1,000 mg/L Uranium, Accustandard, USA)을 사용하여 2% 질산으로 희석하여 조제하였다. 검정곡선의 작성시에는 시료내의 우라늄( $^{238}\text{U}$ ) 함량을 고려하여 적당한 범위의 표준용액을 조제하였으며 최소 3개 이상의 표준용액을 사용하여 검정곡선을 작성하였다. 검정곡선의 범위를 초과하여 측정된 시료에 대해서는 시료를 2% 질산으로 희석하여 재시험하였으며, 희석은 화학저울을 사용한 중량법으로 하였다. 시료용기는 분석물질이 용출 또는 소모되지 않는 50 mL 폴리에틸렌 용기를 사용하였다.

### 2.3.2. 시료 채취

시료는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 전국의 30개 정수장원·정수 및 18개 지하수를 대상으로 하였다.(대문자로 표기된 지역은 정수장 원·정수 채수지점을 소문자로 표기된 지점은 지하수 채수 지점을 나타낸다.) 지표수인 정수장원·정수는 수계별로 선별하였으며, 지하수는 지역별로 댐 및 정수장 주변의 화강암지대의 지하수를 대상으로 하였다.

#### 1) 라돈( $^{222}\text{Rn}$ ) 분석용 시료 채취

라돈( $^{222}\text{Rn}$ ) 분석용 시료 채취시 와류나 기포의 발생, 공기 중 장시간 노출이 라돈( $^{222}\text{Rn}$ )의 손실을 야기하여 측정값의 정확성이 떨어지는 결과를 초래할 수 있으므로 세심한 주의를 기울여야 한다.

지하수의 경우 채취공의 깊이가 다양하며, 지하수의 양수 시간이 다르므로 기존의 저수 탱크에 양정된 지하수를 시료로 채취하거나 배수관에 차 있던 지하수를 바로 채취하는 경우 수중에 용존되어 있던 라돈( $^{222}\text{Rn}$ )이 손실되어 오

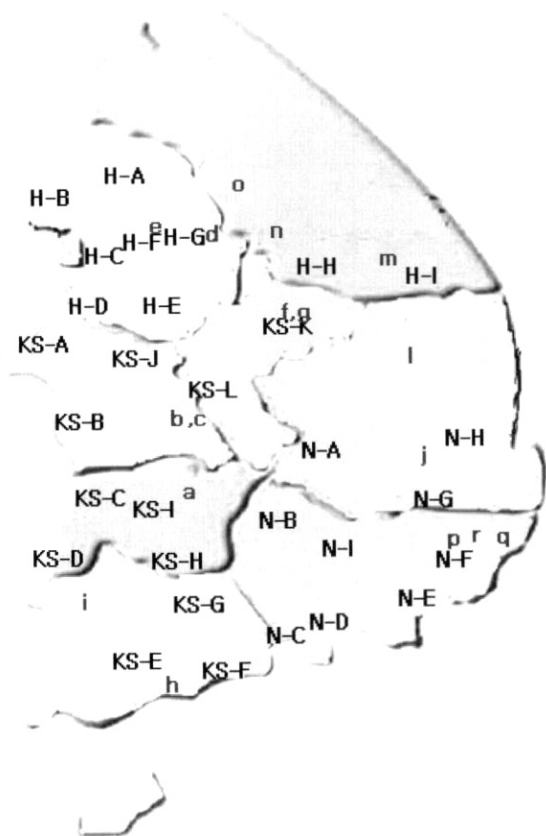


Fig. 1. Map of sampling sites.  
 (a capital letter : raw& treatment water sampling sites,  
 a small letter : ground water sampling sites)

차를 유발할 염려가 있다. 따라서, 시료 채취 전 채취공의 위치 및 양수이력을 확인한 다음, 적절한 시간 동안 관내에 차 있을지도 모르는 지하수를 채취공에 가장 인접한 밸브를 통하여 폐기하고, 1 L의 채수용기에 와류나 기포가 생기지 않도록 주의의 기울여 지하수를 채수하였다. 지표수의 경우 기포발생기(aerator)를 제거하고 30분 이상 물을 틀어 배수한 다음 채수용기에 와류나 기포가 생기지 않도록 주의하여 받아 채수용기에서 시료 10 mL를 취하여 섭광용액 10 mL가 이미 들어있는 폴리에틸렌 용기에 주입하였다.

2) 우라늄(<sup>238</sup>U) 분석용 시료채취

시료의 오염을 방지하기 위해 폴리에틸렌 재질의 용기를 사용하여 시료 1 L당 질산(1+1) 3 mL를 넣어 pH 2 이하로 하였다. 산성화나 채수시의 오염을 최소화하기 위해 기본 채수량은 2 L로 하였으며, 산성화된 시료는 4°C에서 보관함을 원칙으로 하며 채수 시 냉장 보관하여 실험실로 운반하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 라돈(<sup>222</sup>Rn) 계수를 측정

시료의 라돈(<sup>222</sup>Rn) 계수를 측정은 액체섭광계수기를 사용하여였으며 섭광용액을 사용한 <sup>222</sup>Rn의 추출효율과 계측기

의 계측효율을 포함한 라돈(<sup>222</sup>Rn)의 검출 효율은 255%로 측정되었다. 검출하한치는 5회에 걸쳐 공시료의 백그라운드 측정의 평균값(3.4108 cpm), 시료량 0.01 L, 측정시간 100 분, 측정효율 2.55를 Currie식에 적용한 결과 15 pCi/L로 기기 성능을 먼저 확인하였다.

시료채취 방법에 따라 채취한 시료를 섭광액 10 mL가 들어 있는 20 mL 용기에 섭광액과 1:1의 비율로 혼합한 후 <sup>222</sup>Rn과 그 딸핵종(<sup>218</sup>Po, <sup>214</sup>Po)과의 방사평형을 위해 액체섭광계수기 내부에 3시간 동안 보관한 후 측정하였다.

<sup>222</sup>Rn 농도산출은 Hohorst 등(1995)이 사용한 계산식을 사용하였다.

$$Rn = \frac{(cpm_s - cpm_b) \times \exp^{\lambda \cdot \Delta t}}{V \times E \times 60}$$

- 여기서, Rn : 시료내 Rn 함량 (Bq/L)
- cpm<sub>s</sub>, cpm<sub>b</sub> : 시료, 백그라운드의 측정수
- λ : 붕괴상수 (0.182/d)
- t : 시료 채취 후 측정 개시 시점까지의 경과시간 (day)
- V : 시료량 (L)
- E : <sup>222</sup>Rn 측정효율

3.2. 우라늄(<sup>238</sup>U) 농도 측정

시료 분석전에 일일 성능점검을 수행하여 기기조건을 확인한 후 적절한 검정곡선을 작성하여 시료를 분석하였으며 우라늄(<sup>238</sup>U)의 검출한계는 0.1 μg/L이었다.

3.3. 라돈(<sup>222</sup>Rn)과 우라늄(<sup>238</sup>U)의 측정 결과

Table 2에서 보는 바와 같이 지표수를 취수원으로 하는 정수장 원·정수의 라돈(<sup>222</sup>Rn) 및 우라늄(<sup>238</sup>U) 측정결과 검출한계(15 pCi/L, 0.1 μg/L)이하로 불검출되었다.

그러나 지하수의 경우 일부 높은 농도로 측정되는 지역이 있었다. 라돈(<sup>222</sup>Rn)의 경우 전라북도 지역의 a 지점, 강원도 지역의 m 지점, n 지점등에서 높은 농도로 검출되었다(Fig. 2). 측정된 지하수의 라돈(<sup>222</sup>Rn) 분포를 보면 산술평균이 683.5 pCi/L, 기하학적평균이 338.3 pCi/L를 나타냈다. 방사능 농도 분포를 보면 검출한계 15 pCi/L 이하의 곳이 5개 지점, 15~300 pCi/L인 지점이 7곳, 300~4000 pCi/L 이하가 되는 곳이 6곳이었다. 그러나, 이는 전체의 67%가 미국의 최대오염허용농도(maximum contaminant level, MCL) 이하이며, 미국의 잠정기준(alternative maximum contamination level)인 4000 pCi/L보다 훨씬 낮은 분포를 나타냄을 알 수 있었다. 우라늄(<sup>238</sup>U)의 경우에는 산술평균이 2.13 μg/L, 기하적 평균이 0.56 μg/L를 나타냈다. 농도 분포는 검출한계 0.1 μg/L 이하의 곳이 5개 지점, 0.1~2.13 μg/L 이하의 곳이 7개 지점, 2.13~20 μg/L 이하의 농도로 분포하는 지점이 6곳이었다.

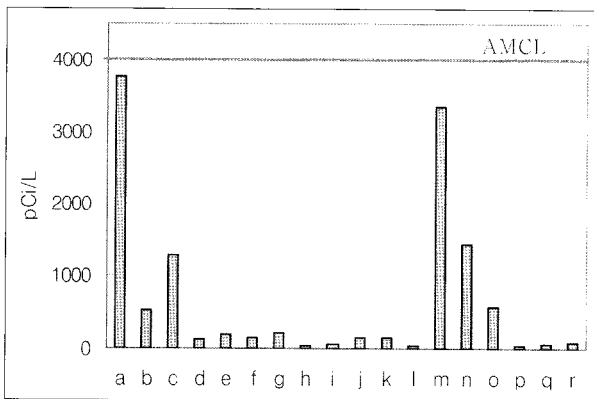
3.4. 고찰

실험결과 지표수인 정수장 원·정수의 라돈(<sup>222</sup>Rn) 및 우

**Table 2.** Radon activity & Uranium concentration of raw water & treated water (ND: Not Detectable)

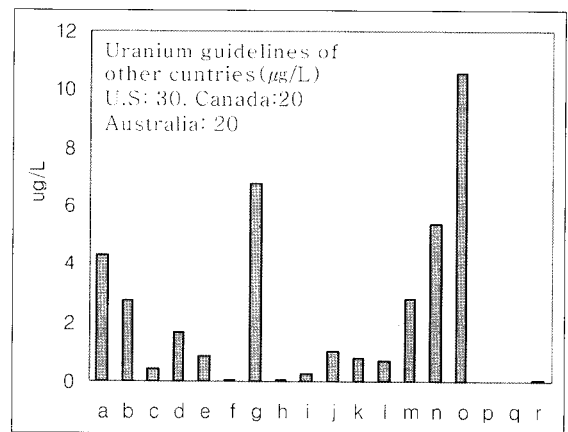
Area	Sampling site	Sample	Radon (pCi/L)	Uranium (µg/L)	Area	Sampling site	Sample	Radon (pCi/L)	Uranium (µg/L)
Hangang	H-A	R.W	N.D	N.D	Geumgang/Seomjin gang	KS-G	R.W	N.D	N.D
		T.W	N.D	N.D			T.W	N.D	N.D
	H-B	R.W	N.D	N.D		KS-H	R.W	N.D	N.D
		T.W	N.D	N.D			T.W	N.D	N.D
	H-C	R.W	N.D	N.D		KS-I	R.W	N.D	N.D
		T.W	N.D	N.D			T.W	N.D	N.D
	H-D	R.W	N.D	N.D		KS-J	R.W	N.D	N.D
		T.W	N.D	N.D			T.W	N.D	N.D
	H-E	R.W	N.D	N.D		KS-K	R.W	N.D	N.D
		T.W	N.D	N.D			T.W	N.D	N.D
	H-F	R.W	N.D	N.D		KS-L	R.W	N.D	N.D
		T.W	N.D	N.D			T.W	N.D	N.D
	H-G	R.W	N.D	N.D		NA-A	R.W	N.D	N.D
		T.W	N.D	N.D			T.W	N.D	N.D
	H-H	R.W	N.D	N.D		NA-B	R.W	N.D	N.D
		T.W	N.D	N.D			T.W	N.D	N.D
	H-I	R.W	N.D	N.D		NA-C	R.W	N.D	N.D
		T.W	N.D	N.D			T.W	N.D	N.D
Geumgang/Seomjin gang	KS-A	R.W	N.D	N.D	Nakdong gang	NA-D	R.W	N.D	N.D
		KS-B	N.D	N.D			T.W	N.D	N.D
	KS-B	R.W	N.D	N.D		NA-E	R.W	N.D	N.D
		KS-D	N.D	N.D			T.W	N.D	N.D
	KS-C	R.W	N.D	N.D		NA-F	R.W	N.D	N.D
		T.W	N.D	N.D			T.W	N.D	N.D
	KS-D	R.W	N.D	N.D		NA-G	R.W	N.D	N.D
		T.W	N.D	N.D			T.W	N.D	N.D
	KS-E	R.W	N.D	N.D		NA-H	R.W	N.D	N.D
		T.W	N.D	N.D			T.W	N.D	N.D
	KS-F	R.W	N.D	N.D		NA-I	R.W	N.D	N.D
		T.W	N.D	N.D			T.W	N.D	N.D

(Minimum Detectable Activity of <sup>222</sup>Rn: 15 pCi/L, Detection limit of <sup>238</sup>U: 0.1 µg/L)



**Fig. 2.** Radon activity of ground water.

라늄(<sup>238</sup>U)은 불검출되었다. 이는 지하수와 달리 지표수는 지각과의 오랜 접촉의 기회가 없기 때문인 것으로 추측되며, 지표수의 자연 방사성물질에 대한 안전성을 다시 한번 확인할 수 있었다. 지하수의 우라늄(<sup>238</sup>U)은 강원도 지역의 o 지점, 충청북도 지역의 g 지점, 강원도 지역의 n 지점이 다른 지점보다 높은 농도로 검출되었다(Fig. 3). 강원



**Fig. 3.** Uranium concentration of ground water.

도 지역의 o, n 지점의 경우 라돈(<sup>222</sup>Rn)과 우라늄(<sup>238</sup>U) 모두 다른 지점에 비해 높은 수치를 보였다. 이는 <sup>222</sup>Rn이 <sup>238</sup>U의 붕괴 과정 중에 생성되기 때문으로 유추해 볼 수 있다. 그러나, 지하수 채취 지점의 지각은 모두 화강암 지대로 같은 지질 조건을 보였으나 지점에 따른 농도 분포의

차이를 보이는 것은  $^{222}\text{Rn}$ 과  $^{238}\text{U}$ 이 지리적인 조건 이외에도 수리역학적 조건 등에 의해서 수층의 농도 분포에 많은 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 지하수 시료에 대한 평균값은 대부분 지역의 우라늄 및 라돈의 검출농도가 낮은 로그정규분포의 형태를 취하기 때문에 기하학적 평균값을 적용하는 것이 타당하다고 사료된다.

#### 4. 결론

액체섬광계수기와 유도결합 플라즈마 질량분석기를 사용하여 지하수와 지표수 중의 라돈( $^{222}\text{Rn}$ )과 우라늄( $^{238}\text{U}$ )을 분석한 결과는 다음과 같다.

라돈( $^{222}\text{Rn}$ ) 및 우라늄( $^{238}\text{U}$ ) 실태조사 결과 원·정수의 라돈( $^{222}\text{Rn}$ )과 우라늄( $^{238}\text{U}$ ) 농도 모두 검출한계 이하로 불검출되었다. 지하수의 경우에는 지점에 따라 높은 라돈( $^{222}\text{Rn}$ )과 우라늄( $^{238}\text{U}$ ) 농도를 보였다. 지하수의 라돈( $^{222}\text{Rn}$ ) 분포는 미국의 수질기준(maximum contamination level)인 300 pCi/L 이하인 곳이 67%였으며, 시료 채취지점 모두 미국의 잠정기준(alternative maximum contamination level)인 4000 pCi/L 이하의 방사능 분포를 보였다. 지하수의 우라늄( $^{238}\text{U}$ )의 경우 검출한계 이하로 불검출된 곳이 30% 정도였으며 농도가 검출된 곳의 경우에도 외국의 수질기준인 20~30  $\mu\text{g/L}$ 보다 훨씬 낮은 농도였다.

#### 참고문헌

국립환경연구원, 지하수 방사성물질 함유실태에 관한 조사 연구 (1999).  
박선규, 임연택, 외국에서의 지하수 중 방사성물질 관리에

- 대한 고찰(II), *한국물환경학회지*, **20**(2), pp. 93-103 (2004).  
이명호, 조영현, 최근식, 이창우, 신현상, 저준위 액체섬광계수기와 파형분석을 이용한 수용액중 라돈-222 및 라돈-226의 분석법 연구, *분석과학회지*, **14**, pp. 64-71 (2001).  
Andrews, J. N., Ford, D. J., Hussain, N., Trivedi, D. and Youngman, M. J., Natural Radioelement Solution by Circulating Groundwaters in the Stripa Granite, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **53**, pp. 1791-1802 (1989).  
Barnett, J. M. and Mcklycen, J. W., The Measurement of  $^{222}\text{Rn}$  in Drinkig Water by Low-level Liquid Scintillation Counting, *J. Radioanal. Nucl. che. Art*, **161**, p. 357 (1992).  
Collé, R., Hutchinson, J. M. R. and Unterweger, M. P., The NIST Primary  $^{222}\text{Rn}$  Measurement System, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol., USA*, **95**, pp. 155-156 (1990).  
Currie, L., *Anal. Chem.*, **40**, pp. 586-590 (1968).  
Date, A. R. and Gray, A. L., Applications of ICP-MS, Blackie, Glasgow, UK (1989).  
Greenwood, N. N. and Earnshaw, A., Chemistry of the Elements, Oxford, Pergamon Press (1984).  
Hohorst, F. A., Huntley, M. W. and Hantenstein, S. D., Determination of Radium in Water, *INEL-95/0546* (1995).  
La Touche, Y. D., Willis, D. L. and Dawydiak, O. L., Absorption and Biokinetics of U in Rats Following and Oral Administration of Uranyl Nitrate Solution, *Health Physics*, **53**(2), pp. 147-162 (1987).  
Leggett, R. W., The Behavior and Chemical Toxicity of U in the Kidney: A Reassessment, *Health Physics*, **57**(3), pp. 365-383 (1989).  
McDowell, W. J. and McDowell, B. L., The growth if a Radioanalytical Method: Alpha Liquid Scintillation Spectrometry. In Liquid Scintillation Spectrometry, Noakes, J. E., Schönjpf, F. and Polach, H. A., Eds, p. 193, Radiocarbon, Arizona (1992).