

국내 음용지하수중 전알파 특성 연구

정도환 · 이영준 · 주병규 · 노회정 · 유순주 · 김문수*

국립환경과학원

Study on Gross-alpha Characteristics of Groundwater for Drinking in Korea

Do Hwan Jeong · Young Joon Lee · Byoung Kyu Ju · Hoe Jung Noh · Soon Ju Yu · Moon Su Kim*

National Institute of Environmental Research,

ABSTRACT

Groundwaters were sampled from 730 wells being used for drinking purposes during 2007-2009. These samples were analysed using a gas-flow type GPC (Gas Proportional Counter) according to the USEPA method (900.0). We obtained a gross-alpha counting TDS (total dissolved solid) efficiency curve ($Y = 0.0017X^2 - 0.3122X + 19.165$, $X = \text{TDS}$, $Y = \text{efficiency}$, $R^2 = 0.9734$) using natural uranium standard to get gross α value of the samples. The gross alpha values ranged from MDA (minimum detectable activity) to 14.88 pCi/L and 429 samples showed values higher than MDA (< 0.9 pCi/L). Correlations of the uranium values with the total alpha values and the gross-alpha values indicate that uranium values have high impacts on gross-alpha values. Groundwater samples of study areas were classified into four regions according to the rock types; plutonic (granite) rock region (427 areas), metamorphic rock region (181 areas), sedimentary rock region (70 areas), volcanic rock region (52 areas). Groundwater of Cretaceous granite presented the highest gross-alpha value. Gross alpha in groundwaters showed no relationship with uranium in terms of the geological ages, rocks and minerals.

Keywords : Gross alpha, GPC, TDS efficiency curve, Groundwater, Geological age

1. 서 론

현재 자연계에 존재하는 천연 방사성 핵종은 우라늄계열(^{238}U series), 토륨계열(^{232}Th series), 악티늄계열(^{235}U series)이 존재하며 이중 전알파는 우라늄, 라듐, 라돈 등 모든 방사성핵종에서 방출되는 α 방사선의 총량에서 우라늄과 라돈의 방사성 함량을 빼 값을 의미한다(USEPA, 2002). 지하수 중 전알파 값은 방사성 물질 함유량에 대한 지표로 활용될 수 있으며, 미국은 발암 위험성을 고려하여 먹는물 중 전알파 15 pCi/L를 기준으로 설정하여 운영하고 있다(USEPA, 2002). 또한, 미국에서는 전알파가 5 pCi/L이상인 경우 위해성 판단을 위하여 라듐-226과 228을 측정하도록 하고 있으며 합이 5 pCi/L이 넘지 않도록 기준을 정하고 있다(USEPA, 2000; 2009).

미국을 비롯한 북유럽의 일부 선진국들은 이미 1960년대부터 전알파 등 자연방사성물질에 대한 조사와 연구를

수행하고 있다(USGS, 1962; Health Canada, 1968; Wrenn et al., 1975; Arvela et al., 1979; Hess et al., 1985; Troja et al., 1995; Salonen et al., 1997; Mkelinen et al., 1999; NHMRC, 2004; Semkow et al., 2004). 국내의 경우 1990년대 후반부터 실행해오고 있으나(성익환 외, 1999) 외국에 비해 전알파 등의 자연방사성물질에 대한 연구와 조사 개소수가 미흡한 실정이다.

이 연구의 목적은 국내에서 음용으로 사용하고 있는 지하수에 대해 미국 환경청에서 기준치로 정하고 있는 전알파에 대하여 증발건조를 이용한 gas-flow형 비례계수기를 이용하여 함량 값을 구하였다(USEPA, 2007). 또한 국내 일부 연구에서 자연방사성물질 중 우라늄과 라돈의 경우 지질(암석, 광물, 지질시대)과의 연관에 따라 함량에 차이에 보인다고 제시한 바(조병욱 외, 2006; 김태승 외, 2007) 있어서 본 연구에서는 전알파와 지질과의 연관성에 대해서도 연구하였다.

*Corresponding author : hyd009@me.go.kr

원고접수일 : 2011. 9. 27 심사일 : 2011. 10. 10 게재승인일 : 2011. 10. 11
질의 및 토의 : 2011. 12. 31 까지

2. 시험방법

2.1. 시료채취 및 전처리

2007년 9월부터 2009년 11월까지 음용으로 사용하는 지하수 공 730개소에서 시료를 채취하였으며(Fig. 1) 현장에서 지하수 시료 1L에 1 N HNO₃ 15 mL 첨가하였다. 각각의 시료들은 실험실에서 아래의 과정을 거쳐서 고형화 시켰으며 분석하였으며 분석 후에도 고형화된 시료의 무게에는 변화가 거의 없었다.

- 1) 200 ~ 300 mL의 물시료를 비이커에 취한 다음 15 ~ 20 mL가 될 때까지 heating기를 이용하여 100°C로 증발 시킨 후 25 mL 비이커에 옮긴다.
- 2) 젤 상태가 되기 전(5 mL)에 planchet에 옮긴 후 증발시킨다. 이때, planchet을 천천히 움직여 시료가 한 쪽으로 몰리는 것을 방지한다.

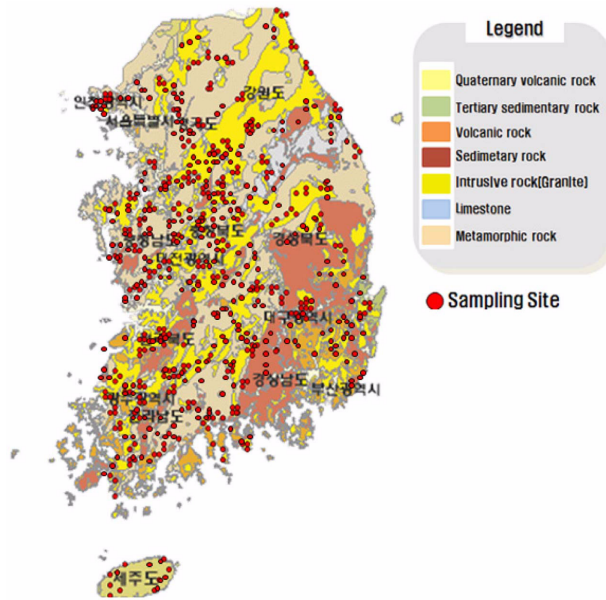


Fig. 1. Location and geologic map of the sampling site in this study.

- 3) 고형화된 시료는 105°C 오븐에서 2시간 이상 건조 시킨 후 데시케이터에서 72시간 이상 보관하여 습기를 완전히 제거한다.
- 4) planchet 시료의 총고용물(total dissolved solid; TDS) 양은 10 ~ 100 mg으로 한다.

2.2. 전알파(Gross α) 분석

전알파 분석법으로 기체비례계수관법(GPC)와 액체섬광계수법(LSC)이 이용되고 있다. 기체비례계수법의 음용수 중 Gross α/β 측정과 관련한 EPA법은 증발건조 시킨 시료를 gas-flow 형의 비례계수기로 측정하는 방법으로 인가 전압을 달리 함으로써 α/β 분리측정이 가능하고 감도가 우수한 장점을 가지고 있다(USEPA, 2007). 이에 본 연구에서는 기체계수비례기를 이용하여 전알파의 값을 구하였다.

본 연구에서는 CANBERRA 사의 Tennelec™ Series 5를 분석기기로 사용하였으며 기기 보정은 Alpha Plateau 측정, Background 측정, Efficiency 측정의 순으로 하였다. Alpha Plateau 측정에서 Am-241을 이용하여 기기의 plateau slope와 동작전압을 구하였다. Background 측정을 위해 빈 planchet을 20분씩 5회 측정하여 구하였다. Efficiency 측정에서는 우라늄 표준 용액을 이용한 TDS 효율곡선을 구하여야 한다. TDS의 양을 달리한 6개의 planchet에 766 dpm으로 희석된 NIST 4321 우라늄 추적 용액 1 mL 떨어뜨린 후 10분씩 10회 분석하여 효율값을 측정하여 $Y = 0.0017X^2 - 0.3122X + 19.165$ ($X = \text{TDS}$, $Y = \text{efficiency}$), $R^2 = 0.9734$ 의 전알파의 TDS 효율곡선을 구하였다(Fig. 2(a)). 이 효율곡선으로 각 시료의 효율 값을 구하였으며 식 (1)을 이용하여 총 알파선의 함량을 계산한다. 이 값에서 우라늄과 라돈을 뺀 값을 전알파(gross alpha)라하며 식 (2)를 이용하여 구한다. 이때, 불활성 기체인 라돈은 짧은 반감기와 증발 및 건조의 과정에서 거의 소멸되므로 전알파의 측정에서 제외되어지며 우라늄의

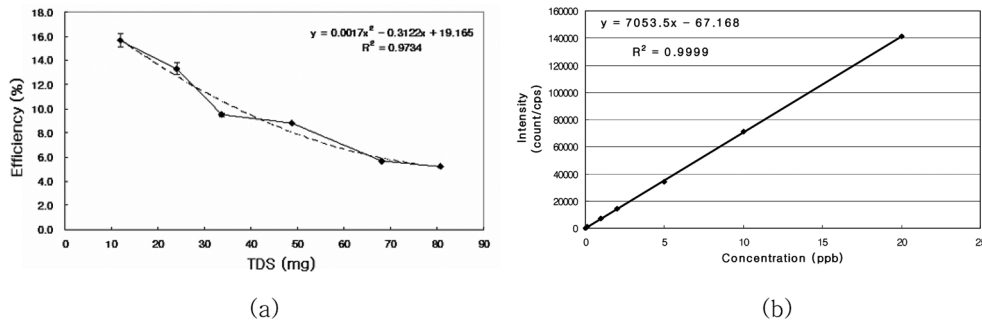


Fig. 2. TDS efficiency curve for gross-alpha efficiency values measurement and calibration curve for Uranium standard solution (0, 0.1, 1, 2, 5, 10, 20 μg/L).

화학적 함량 값을 방사성 값으로 전환하기 위해서 0.67을 곱하여 준다(노회정 외, 2008).

우라늄 분석은 국립환경과학원의 7500 Series ICP/MS(Agilent사)를 사용하였으며 검량선을 작성하여 분석하였고 Fig 2(b)는 검량식과 R²값을 보여주고 있다.

$$Total\ Alpha\ (pCi/L) = \frac{A \times 1000}{2.22 \times C \times V} \quad (1)$$

A : net alpha count rate

C : alpha efficiency factor, read form graph of efficiency vs mg of water solid per cm² of planchet area

V : volume of sample(mL)

2.22 : conversion factor from dpm/Ci

$$Gross\ Alpha\ (pCi/L) = Total\ Alpha - (U \times 0.67) \quad (2)$$

본 연구에 사용된 GPC(기체비례계수기)의 전알파 최소 검출한계(MDA, minimum detectable activity)는 식 (3)에 의해 계산하였으며 그 결과 0.9 pCi/L 미만으로 나타났다(Currie, 1968).

$$MDA = \frac{4.65 \times \sqrt{BKG_{\alpha}}}{2.22 \times \sqrt{T} \times E_{\alpha} \times V} \quad (3)$$

4.65 : paired observation constant

BKG_α : Background (cpm)

T : Count time (min)

E_α : Efficiency

V : volume of sample(L)

2.22 : conversion factor from dpm/Ci

3. 결과 및 고찰

3.1. 전알파 함량과 우라늄과의 관계

조사대상 730개소의 지하수중 전알파 함량(중앙) 값은 MDA ~ 14.88(1.16) pCi/L의 범위를 보였으며 평균값의 경우 우라늄 함량의 영향으로 MDA 값 이하로 나타났다. 전알파의 값들 중 MDA값 이하로 나타난 지점이 많이 나왔기 때문에 이들 값을 빼고 전알파가 검출된 지점은 429개소이며 이들의 함량범위는 0.90 ~ 14.88 pCi/L로 나타났다고 평균값과 중앙값은 각각 2.49, 1.86 pCi/L이었다 (Table 1).

Fig. 3은 총알파(Total alpha), 전알파(gross alpha)와 우라늄의 관계를 나타낸 것으로 총알파와 우라늄은 정의 관계를 보여주고 있지만, 전알파와 우라늄은 관계가 없는 것으로 보인다. 우라늄이 가장 높은 값(1757.00 μg/L)을 보인 지역의 지하수의 경우, 총알파 689.7 pCi/L의 값을

Table 1. Statistical values of Gross-alpha and Uranium concentration (n = 730)

Statistics	Gross-Alpha (pCi/L)						Uranium (μg/L)
	Total	> MDA* (n = 429)	Plutonic (granite) rocks	Metamorphic rocks	Sedimentary rocks	Volcanic rocks	
Min.	MDA*	0.90	MDA*	MDA*	MDA*	MDA*	ND.**
Max.	14.88	14.88	14.88	9.37	4.83	8.03	1757.00
Aver.	0.90	2.49	0.90	1.16	1.31	1.23	9.77
Med.	1.16	1.86	1.11	1.26	1.26	0.90	1.09

MDA* : minimum detectable activity (< 0.9 pCi/L)

ND.** : Not detect (≤ 0.01 μg/L)

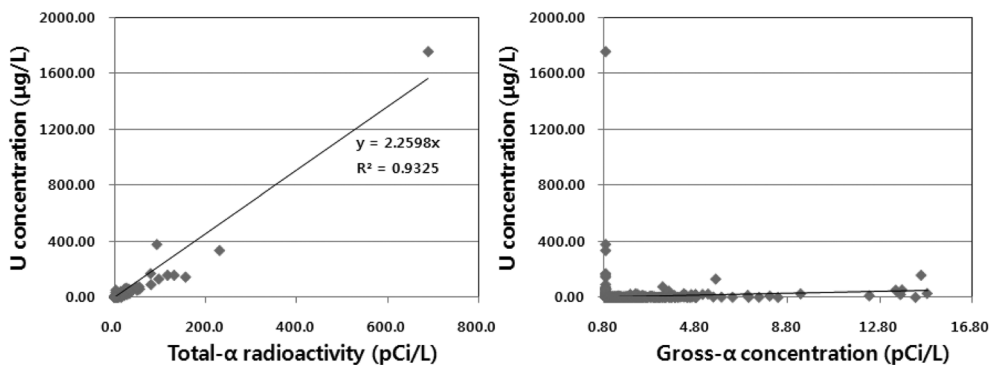


Fig. 3. Correlation of U vs total-α radioactivity and gross-α concentration.

보이고 있지만, 여기서 우리늄의 방사선량을 환산 값을 뺀 전알파의 경우 MDA 값 이하를 보이고 있다. 이와 같이 GPC에서 계산된 총알파의 값이 높은 함량을 보이더라도 우리늄의 함량이 높게 검출되면 계산식에 의해 전알파의 함량에 MDA 값 이하의 매우 낮은 값을 보이게 된다. 이를 통하여 볼 때 우리늄이 전알파의 함량에 큰 영향을 주는 것으로 사료되어진다.

3.2. 조사지역 음용지하수의 전알파 함량과 지질과의 관계

국립환경과학원의 '06~'07년 함유실태 조사시 우리늄과 라돈 등 자연방사성물질의 함량은 지질과 밀접한 연관이 있다고 조사된 바(조병욱 외, 2006; 김태승 외, 2007) 있어 본 연구에서는 조사지점 730개소의 지하수에 대해 한국지질자원연구원의 1 : 50,000과 1 : 250,000만 지질도를 이용하여 지질(암석)에 의해 크게 4개 지역으로 분류하였다. 심성암(화강암) 지역의 지하수 공이 427개로 전체 조사 대상 중 58.5%로 가장 많은 부분을 차지하였으며 변성암지역 181개소 24.8%, 퇴적암지역 70개소 9.6%, 화산암지역 52개소 7.1%의 순으로 조사되었다(Table 2).

암석에 따른 지하수의 전알파 함량(중앙) 값을 보면, 심성암(화강암)지역 MDA ~ 14.88(1.11) pCi/L, 변성암지역 MDA ~ 9.37(1.26) pCi/L, 퇴적암지역 MDA ~ 4.83(1.26) pCi/L, 화산암지역 MDA ~ 8.03(MDA) pCi/L으로 검출되었으며 전알파 함량 값이 최고 높게 나온 지하수는 화강암 지역이었으며 암석에 따라 다양한 함량 값을 보여주고 있다.

국내 지질은 선캄브리아기에서부터 신생대 4기 화산암까지 다양한 지질시대와 암석·광물 분포를 보이고 있다 (Table 3). 연구 지역 730개의 지하수는 50~400 m의 심도를 보이는 암반 지하수라고 할 수 있으며, 이들 각각의 지질시대와 암석·광물에 따른 전알파 함량의 통계치는 Table 4에 나타내었고, 백악기 흑운모 화강암에서 14.88 pCi/L로 최고 높은 값으로 검출되었다.

Fig. 4는 과거 지하수중 자연방사성물질 실태조사시(조병욱 외, 2006; 김태승 외, 2007) 지질에 영향을 크게

받는다고 연구되어진 바 있으며, 이들 조사 결과 우리늄과 라돈이 높게 나타난 중생대 화강암(Jbgr, Jtmgr, Jgr, Jgdi, Kbgr, Kgr) 계통과 선캄브리아기와 시대미상의 편마암(PCbgrgn, PCgrgn, PCgn, grgn, gn) 위주로 전알파와

Table 3. Distribution of sampling sites with geologic age and rock types

Geologic age	Rock Type	Geologic symbol	Site No.
Cenozoic (22)	Quarternary (21) volcanic rock	Qv	21
	Tertiary(1) Sedimentary rock	Ts	1
Cretaceous (175)	Volcanic rock	Ka	31
	Sedimentary rock	Ks	32
	Granite porphyry	Kgp	19
	Biotite granite	Kbgr	49
	Hornblende	Khg	4
	Granodiorite	kgdp	7
	Granite	Kgr	33
Mesozoic (427)	Sedimentary rock	Js	4
	Biotite granite	Jbgr	96
Jurassic (250)	Two-mica granite	Jtmgr	14
	Granite porphyry	Jpgr	26
	Hornblende granite	Jhgr	11
	Granodiorite	Jgdi	13
	Granite	Jgr	86
Triassic(2)	Granite	Tgr	2
Paleozoic (22)	Sedimentary rock	Ps	6
	Limestone	ls	16
Unknown Age (113)	Sedimentary rock	s	6
	Granodiorite	gdi	5
	Granite	gr	58
	Granite gneiss	grgn	22
	Gneiss	gn	22
Precambrian (146)	Sedimentary rock	PCs	5
	Granite	PCgr	7
	Granite gneiss	PCgrgn	69
	Banded gneiss	PCbgrgn	33
	Gneiss	PCgn	32
Total			730

Table 2. Distribution as geologic setting of investigated study areas (n = 730)

Age	Pre-cambrian	Unknown -Age	Paleozoic	Mesozoic	Cenozoic
Granite (427)	5	63	-	359	-
Metamorphic rock (181)	136	44	-	1	-
Sedimentary rock (70)	5	6	22	36	1
Volcanic rock (52)	-	-	-	31	21

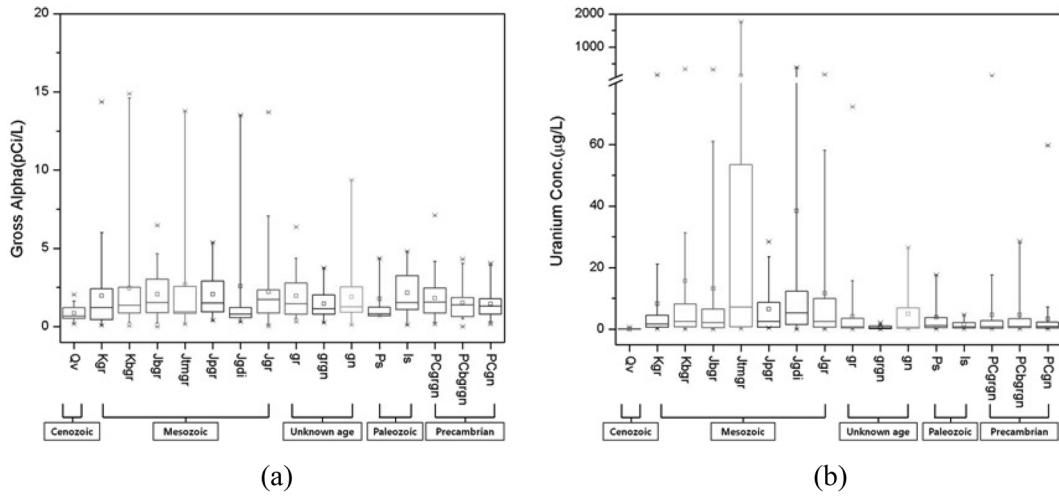


Fig. 4. Distribution of gross-α concentration (a) and uranium concentration (b) as primary geologic age and geology (rock and mineral).

Table 4. Statistics values of gross-α concentration with geologic age and rock, mineral (n = 730, unit = pCi / L)

Age	PCgn	PCbgrgn	PCgrgn	PCgr	PCs	gn	grgn	gr	gdi	s
No.	32	33	69	7	5	22	22	58	5	6
Min.	MDA	MDA	MDA	MDA	MDA	MDA	MDA	MDA	MDA	MDA
Max.	4.04	4.30	7.11	5.58	4.83	9.37	3.74	6.36	5.11	3.45
Ave.	1.11	MDA	1.60	1.28	2.14	0.90	MDA	1.37	2.38	1.81
Med.	1.23	1.05	1.49	MDA	1.27	1.22	0.96	1.17	2.01	1.5

Age	Pls	Ps	Tgr	Jgr	Jgdi	Jhgr	Jpgr	Jtmgr	Jbgr	JS
No.	16	6	2	86	13	11	26	14	96	4
Min.	MDA	MDA	MDA	MDA	MDA	MDA	MDA	MDA	MDA	MDA
Max.	4.79	4.36	MDA	13.71	13.51	6.41	5.35	13.78	6.47	1.94
Ave.	1.84	MDA	MDA	MDA	MDA	1.37	MDA	MDA	MDA	1.03
Med.	1.48	MDA	MDA	1.25	MDA	1.14	0.93	MDA	1.23	1.41

Age	Kgr	Kgdp	Kbgr	Kgg	Kgp	Ks	Ka	Ts	Qv
No.	33	7	49	4	19	32	31	1	21
Min.	MDA	MDA	MDA	MDA	MDA	MDA	MDA	3.23	MDA
Max.	14.37	3.77	14.88	1.29	4.20	3.67	8.03	3.23	2.04
Ave.	1.42	1.33	1.24	MDA	1.42	0.90	1.65	3.23	MDA
Med.	1.07	1.55	1.02	MDA	1.03	1.23	1.08	3.23	MDA

*MDA : minimum detectable activity (< 0.9 pCi/L)

우라늄에 대한 함량 분포를 나타낸 것이다. 우라늄은 중생대 류라기 북운모화강암(Jtmgr), 흑운모화강암(Jbgr), 화강섬록암(Jgdi)과 백악기 흑운모화강암(Kbgr), 선캄브리아기 호상(화강)편마암(PCbgrgn) 지역의 지하수에서 미국 환경청의 기준치(30 µg/L)보다 높게 나타났으며 중생대 화강암 계통의 지하수에서 다른 지질시대의 암석(광물)에 비하여 지하수와 비교해서 현저히 높은 우라늄 함량 값을

나타냈다. 이에 반하여 지하수중 전알파의 함량 값은 다른 지질시대의 암석·광물일지라도 우라늄의 분포와는 다르게 나타났다. 고생대 석회암과 선캄브리아기 편마암 지역의 지하수는 류라기 화강암 지역의 지하수에 비해 우라늄의 함량은 작은 값들을 보이고 있지만, 전알파의 경우는 비슷한 값들과 양상을 보이고 있다. 이와 같은 결과에 의해서 지질시대와 암석(광물)에 따라서 지하수중 자연방

사성물질인 우라늄의 경우는 큰 영향을 받았지만, 전알파는 큰 영향이 없는 것으로 사료된다. 지하수 중 지질시대와 암석(광물)에 따른 전알파 값의 차이를 정확히 알기 위해서는 추후 암석에 대한 분석이 필요할 것으로 사료되어 진다.

4. 결 론

2007년 9월 ~ 2009년 11월 사이에 음용으로 사용하는 지하수 730개소에 대해 시료채취를 하였으며 기체비례계 수기로 측정하였다. 기기 보정은 Alpha Plateau 측정, Background 측정, Efficiency 측정의 순으로 하였으며 전알파의 효율 값 도출을 위해 우라늄 추적자 표준용액을 사용하여 TDS 값에 따른 전알파 효율곡선을 구하였다.

조사대상 730개소의 지하수중 전알파 함량(중앙) 값은 MDA ~ 14.88(1.16) pCi/L을 보였다. 이 중 MDA 이상 검출된 지점은 429개소이며 이들의 함량범위는 0.90 ~ 14.88 pCi/L로 나타났고 평균값과 중앙값은 각각 2.49, 1.86 pCi/L이었다.

특히 총알파와 우라늄, 전알파와 우라늄의 관계에서 우라늄의 함량이 높으면 총알파의 값은 크게 나타났지만, 전알파의 경우는 다르게 나타났다.

조사지역의 지하수는 암석에 따라 크게 4개의 암석으로 분류할 수 있었으며 각 암석별 지하수의 전알파 함량(중앙) 값은 심성암(화강암)지역 MDA ~ 14.88(1.11) pCi/L, 변성암지역 MDA ~ 9.37(1.26) pCi/L, 퇴적암지역 MDA ~ 4.83(1.26) pCi/L, 화산암지역 MDA ~ 8.03(< 0.9) pCi/L으로 화강암지역에서 최고 함량 값이 나타났다. 지하수중 전알파는 지질시대와 암석·광물 관점에서는 우라늄과는 관계가 없음을 보여준다.

사 사

이 연구는 국립환경과학원 지하수환경영향평가 중 '지하수 중 방사성물질 함유실태 조사' 연구사업의 일환으로 수행되었다.

참 고 문 헌

김문수, 유순주, 김동호, 윤정기, 노희정, 정혜성, 정동일, 정도환, 주병규, 임태숙, 박이훈, 홍상규, 2009, 지하수 중 자연방사성물질 함유실태 조사(III), p. 227.

김태승, 박중겸, 엄익춘, 윤정기, 정도환, 강기철, 윤대근, 권지철,

2007, 지하수 중 방사성물질 함유실태 조사(I), 국립환경과학원, p. 155.

노희정, 김태승, 박중겸, 윤정기, 김문수, 정일록, 정도환, 주병규, 전상호, 심영은, 백용욱, 2008, 지하수 중 자연방사성물질 함유실태 조사(II), 국립환경과학원, p. 195.

성익환, 김대업, 우형주, 조병욱, 박중권, 이한영, 정강섭, 윤윤열, 조수영, 이용주, 이병대, 김통권, 김경수, 추창오, 신동천, 1999, 지하수 중 방사성물질 함유실태에 관한 조사연구(I), 국립환경과학원, p. 338.

성익환, 조병욱, 김대업, 김건한, 박덕원, 박중권, 윤윤열, 이봉주, 이병대, 이종철, 임현철, 정강섭, 조수영, 홍영국, 장우석, 양재하, 신동천, 한인섭, 2002, 지하수 중 방사성물질 함유실태에 관한 조사연구(IV), 국립환경과학원, p. 357.

조병욱, 김건한, 김연기, 성익환, 안주성, 윤욱, 윤윤열, 이길용, 이병대, 이홍진, 임현철, 조수영, 홍영국, 2006, 지하수 중 방사성물질 함유실태 조사, 국립환경과학원, p. 200.

한국지질자원연구원, 1:50,000 한국지질도.

한국지질자원연구원, 1:250,000 한국지질도.

Arvela, H., Blomqvist, L., and Mustonen, R., 1979, In Situ External Environmental Gamma Ray measurements, In: Studies on Environmental Radioactivity in Finland 1976-1977, Report STL-A 26, Helsinki; Institute of Radiation Protection.

Currie, L. A., 1968, Limits for Qualitative Detection and Quantitative Determination, *Anal. Chem.*, **40**, 586-593.

Health Canada, 1968, The Guidelines for Canadian Drinking Water Quality and the Guideline Technical Documents.

Hess, C.T., Michel, J., Horton, T.R., and Coniglio, W.A., 1985, The occurrence of radioactivity in public water supplies in the United States, *Health Physics*, **48**, 553-586.

Mäkeläinen, I., Salonen, L., Huikuri, P., and Arvela, H., 1999, "Dose from drinking water in Finland". In Nordic Society of Radiation Protection, Proceedings of the 12th ordinary meeting Skagern, Denmark., **8**, 23-27.

NHMRC, 2004, Australian drinking water guidelines 6, National Health and Medical Research Council.

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. Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **226**(1-2), 67-74.

Semkow, T.M., Bari, A., Parekh, P.P., Haines, D.K., Gao, H., Bolden, A.N., Dahms, K.S., Scarpitta, S.C., Thern, R.E., and Velazquez, S., 2004, Experimental investigation of mass efficiency curve for alpha radioactivity counting using a gas-proportional detector, *Applied Radiation and Isotopes*, **60**, 879-886.

Troja, S. O. A. CRO and Picouet, P., 1995, Alpha and Beta Dose-Rate Determination Using a Gas Proportional Counter,

Radiation Measurements, **24**(3), 297-308.

US EPA, 2000, National Primary Drinking Water Regulation; Radionuclides; Final Rule.

USEPA, 2002, Radionuclides in Drinking Water: A Small Entity Compliance Guide, 815-R-02-001, <http://www.epa.gov/safewater>.

USEPA, 2007, Method 900.0 Gross Alpha and Gross Beta Radioactivity in Drinking Water.

USEPA, 2009, National Primary Drinking Water Regulation MCL Booklet.

USGS, 1962, Data on uranium and radium in groundwater in the USA, Professional Paper No. 426.

Wrenn, W.M., Spitz, H., and Och, C.N., 1975, "Design of a continuous digital output environmental radon monitor." IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-22, 645.