

부산지역 지하수의 방사성물질 조사연구

전대영[†] · 최유정 · 김시영 · 이승민 · 이경심 · 빈재훈
수질보전과

Study on the Radionuclides of Ground Waters in Busan

Dae-Young Jeon[†], You-Jung Choi, Si-young Kim, Sung-Min Lee,
Kyung-Sim Lee and Jae-Hun, Bin
Water Conservation Division

Abstract

This study was performed to research the characteristic of radionuclides of 80 groundwater monitoring networks in Busan. According to the research, average concentration of uranium was $4.33 \mu\text{g/L}$, maximum concentration of uranium was $171.55 \mu\text{g/L}$ among the 80 sampling sites. One sample exceeded the proposal standard of drinking water in USA in uranium ($30 \mu\text{g/L}$) and four samples exceeded the recommendatory value of WHO about uranium ($15 \mu\text{g/L}$). Radon and gross- α concentration of all samples were far less than the proposal standard of drinking water in USA. In this study, average concentration of radionuclides in underground water wasn't too high, but needed to control the concentration of them to prevent exposure to the people. And it needs to be taken measures in some sites with high concentration of uranium by closing the pipe line or etc through more studies.

Key Words : Radionuclides, Ground water, Uranium, Radon, Gross- α

서 론

음용수의 대부분을 지표수에 의존하고 있는 국내의 환경여건으로 인해 그동안 지하수의 방사성물질에 대한 문제는 사실 다른 화학물질에 비해서 상대적으로 관심의 대상에서 떨어져 있었다고 할 수 있다. 그러나 지표수의 오염 증가로 인한 수돗물에 대한 불신, 먹는샘물의 시판, 지하수 이용의 증가 등으로 인해서 지하수에 대한 관심이 증대되었고, 이에 따라 지하수에 함유되어 있는 방사성물질에 대한 환경문제가 부각되고 있는 상황이다¹⁾.

지하수를 많이 사용하는 미국이나 일부 선진국의 경우에는 먹는물 중의 라돈, 우라늄, 라듐과 같은 방사성 핵종에 대한 기준 및 제안치를 마련하고 있으나, 우리나라의 경우 아직 먹는물에 대한 기준이 전혀 없는 실정이며 이 가운데 1998년 대전지역의 지하수에서 방사성 물질인 우라늄이 검출되었다는 국립환경과학원(2000) 보고와 함께 국내에서도 방사성 물질이 새로운 관심이 대상이 되고 있다.

현재까지 수중의 방사성물질은 대부분 자연적인 오염에

의한 것이 많으며 인위적인 오염이 추가 되는 일반적인 오염물질과는 성격을 달리 한다. 따라서, 방사성물질에 대한 수질기준은 다른 오염물질과는 달리 기준이 아닌 제안치 수준이며, 일부 지하수를 많이 사용하는 선진국에 국한되어 있다. 그러나 자연적인 오염일지라도 먹는물 수질기준은 국민의 건강보호가 우선시 되어야 하기 때문에 각 국가의 특성에 맞는 기준치를 설정하여 그에 대한 적절한 관리가 필요하다.

우리나라의 경우 미국 EPA와 캐나다에서는 그 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. 우리나라에서는 먹는물 감시항목으로 상수원수에 대하여 년2회 실시하도록 되어있으며, 기준은 WHO와 미국 기준을 준용하고 있다. 미국의 먹는물 기준 중 라돈은 $4,000\text{pCi/L}$, 전알파는 15pCi/L 이다.

환경부에서는 1999~2002년 1차 실태조사로 우리나라의 대표적인 지질분포를 반영할 수 있는 지하수를 선정하여 우라늄·라돈·전알파 함유량 특성 조사를 하였으며, 2006

[†] Corresponding author. E-mail: jeon1st@korea.kr
Tel: +82-51-757-7504, Fax: +82-51-757-2879

년 2차 실태조사는 기존 고함량지점과 마을상수도 등의 우라늄·라돈·전알파 함유량 특성 조사를 실시하였다. 2007년부터 2016년 까지 3차 실태조사는 매년 150개소 이상 마을상수도 등을 대상으로 조사하고 있다. 그러나 부산지역 지하수에 대한 방사성물질 특성조사는 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 부산지역 지하수수질측정망 80개소 지하수중 우라늄·라돈·전알파에 대한 농도 분포와 방사성물질에 대한 일반적인 특성 및 외국의 먹는물 중 방사성물질에 대한 기준을 비교 검토하여 지하수 이용자들에게 보다 안전한 먹는물 공급 및 지하수중 방사성물질의 규제 기준과 관리방안 설정을 위한 기초적 자료를 제공하는 것을 목적으로 한다.

재료 및 방법

연구기간 및 대상

부산지역 지하수수질측정망 80개소를 대상으로 2008년 상반기(5~6월), 하반기(10~11월) 각 1회에 걸쳐 방사성 물질을 조사하였다. Fig.3에 시료채취지점을 나타내었으며, (Appendix 1 참조) Fig. 4에는 지하수수질측정망의 음용율을 나타내었다.



Fig. 4. Ratio of drinking of ground water monitoring network.



Fig. 3. Distribution of ground water monitoring network in Busan Area.

시약 및 시험기구

시약

222Rn 표준시료 제조를 위해서는 226Ra 표준선원(0.5 uCi, Isotope Products Laboratory, USA)을 사용하였으며, 우라늄 농도 측정을 위해서는 우라늄 표준용액 (Accustandard, USA, 1,000mg/L)을 사용하였다. 섬광액은 High Efficiency Mineral oil(Perkin-Elmer, USA)을 사용하였다.

시험기구

방사성 물질 측정을 위해서는 알파선과 베타선에 의한 펄스를 분리할 수 있는 파형분석(PSA) 기능을 가진 액체 섬광계수기(PerkinElmer, Quantulus 1220)를 사용하였다. 우라늄 측정을 위해서는 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP/MS, Agilent 7500)를 사용하였다¹¹⁾.

시험방법

표준시료의 제조

222Rn 표준시료는 226Ra 표준선원(373 Bq/mL) 일정량을 10mL의 증류수가 담긴 시료용기에 넣고 이 등이 사용한 방법과 같이 질소가스로 탈기시켜 용액에 존재하는 잔류 라돈기체를 완전히 제거한 후 섬광액 10mL를 첨가하여 조제하였다. 바탕선 시험을 위한 시료는 10mL의 증류수와 섬광액 10mL를 사용하여 조제하였다.

분석항목 및 분석방법

본 연구는 자연수중에 존재하며 인간건강에 대한 영향으로 문제시 되고 있는 방사성 물질인 라돈, 전알파, 라듐, 우라늄의 함량을 분석하였다.

방사성 물질 농도와의 상호관련성을 조사하기 위해 수질인자도 조사하였는데 무기금속류, 무기이온류, 전기전도도, 총용존고형물을 대상으로 분석하였다. 모든 분석방법은 먹는물 수질공정 시험방법, 수질오염 공정시험방법, 미국 EPA methods에 준하여 실시하였다.

우라늄 분석

우라늄 측정을 위해 시료는 0.45 μ m 여지를 사용하여 탁질을 제거한 후 pH 2.0으로 산 처리하였다. 제조한 우라늄 표준용액과 분석시료에 Internal STD 10 μ g/L를 혼합하여 검량선을 작성한 후 ICP/MS에 주입하여 측정하였다.

라돈 분석

라돈의 계측은 수용액 10mL를 전처리 없이 곧바로 자이렌계열 섬광용액 12mL와 혼합한 뒤 라돈의 알파선 딸핵종과의 방사평형을 위해 3시간 동안 방치한 후 분석하였다. 계측된 라돈 농도는 다음 식을 이용하여 계산하였다.

$$R_n = (cpms - cpmb) \times \exp \lambda \Delta t / V \times E \times 60 \quad (1)$$

- 여기서, cpms, cpmb : 시료, 백그라운드 측정수
- λ : 붕괴상수(0.182/d)
- t : 시료채취후 측정개시 시점까지의 경과시간(day)
- V : 시료량(L)
- E : Rn 측정효율

전알파 분석

100mL 시료를 먼저 0.45 μ m 여지에 거른 후 Teflon beaker에 넣어 가열판에서 끓였다. 증발 농축된 시료에 1N HCl 1mL 첨가하여 scintillation vial에 옮긴 후 19mL HiSafe III 첨가하여 측정하였다. 계측된 전알파 방사능은 다음식을 이용하여 계산하였다.

$$Gross \alpha = 1000 \times A / 2.22 \times E \alpha \times V \quad (2)$$

- 여기서, A : 알파 계수율(cpm)
- E α : 알파 계측효율
- V : 시료부피(mL)
- 2.22 : 방사능 환산계수

결과 및 고찰

방사성물질의 분포 특성

부산지역 지하수수질측정망 80개소의 방사성물질의 분석결과는 Appendix 2와 같다. Table 3에 80개소의 방사성물질 평균농도를 요약하여 나타내었으며, Table 4~6에는 방사성물질의 농도 분포를 나타내었다.

우라늄

Appendix 2, Table 3에 나타난 바와 같이 부산지역 지하수수질측정망 80개소에 대한 우라늄의 전체 평균농도는 4.33 μ g/L 이었고, 최대 평균농도는 171.55 μ g/L 이었다. 미국 먹는물 기준인 30 μ g/L을 초과한 곳은 1곳, WHO 권고기준인 15 μ g/L을 초과한 곳은 4곳으로 나타났다. 그 외 75곳은 미국 먹는물 기준과 WHO 권고기준 이내로 나타났다. 금정구 부곡3동이 평균 171.55 μ g/L로 가장 높았고, 기장군 기장읍 등 30개소에서 불검출로 나타났다.

Table 4에 나타난 바와 같이 우라늄 함량이 낮은 0.1 μ g/L 이하의 분포비율이 42.5%로 가장 높게 나타났다. 그러나 0.5 - 5 μ g/L 사이에 분포하는 비율도 57.5%로 나타났다. Fig. 5는 국립환경과학원에서 조사한 타지역 지하수중 우라늄의 함량 분포와 본 연구 조사결과를 비교하여 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 부산지역은 다른 지역에 비하여 우라늄 농도가 매우 높음을 알 수 있다. 이는 지하수의 우라늄 함량은 화강암 지하수에서 높게 검출되며¹⁾, 암석 자체의 우라늄 함량이 높기 때문인 것으로 보인다. 지하수중 우라늄 함량은 화강암지대에서 가장 높고, 화산암지대인 제주도에서 가장 낮아 향후 전국적인 지하수중 방사성물질 조사에는 화강암류 위주의 조사가 필요하다고 생각된다.

우라늄의 경우 미국 EPA와 캐나다에서는 그 기준 농도를 각각 30 μ g/L, 20 μ g/L로 규제하고 있다. 우라늄은 238U이 대부분이며 동위원소인 235U, 234U는 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. 우라늄의 독성은 방사선에 의한 영향과 화학적 독성으로 구분되는데 화학적 독성의 경우 농도가 높을 때 신장장애를 초래하는 것으로 보고되고 있다.

Table 3. Average concentration of radionuclides of 80th groundwaters in Busan

		Average	Min	Max	SD
U ($\mu\text{g/L}$)	1st half	5.23	ND	191.30	25.28
	2nd half	4.36	ND	151.80	17.31
	Average	4.33	ND	171.55	19.48
Rn (pCi/L)	1st half	202	0	1916	370
	2nd half	138	0	1784	251
	Average	169	0	1850	292
Gross- α (pCi/L)	1st half	0.1	0	5.4	0.7
	2nd half	0.4	0	8.4	1.4
	Average	0.3	0	6.9	1.0

Table 4. Distribution of Uranium of 80th groundwaters in Busan

U ($\mu\text{g/L}$)	No of site	percentage(%)	accumulated %
0.1 이하	34	42.5	42.5
0.1 - 0.5	12	15.0	57.5
0.5 - 2	13	16.25	73.75
2 - 5	10	12.5	86.25
5 이상	11	13.75	100.0
계	80	100	100.0

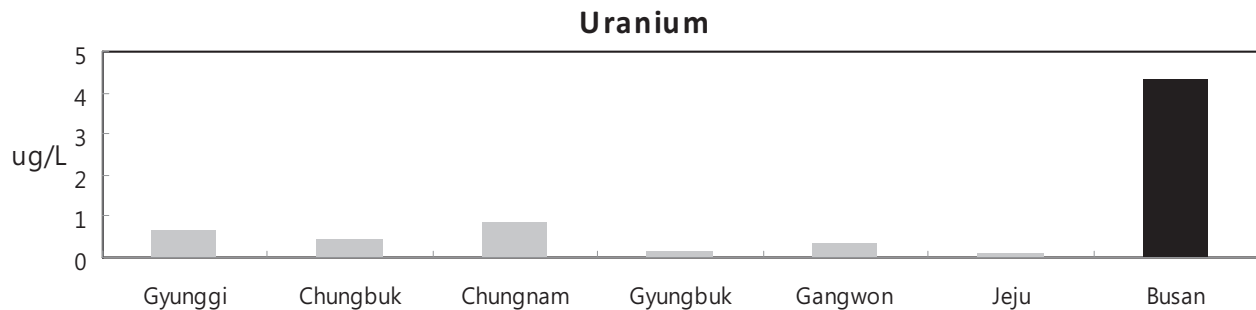


Fig. 5. Comparison with other region in Uranium concentration

라돈

Appendix 2, Table 3에 나타난 바와 같이 부산지역 지하수수질측정망 80개소에 대한 라돈의 전체 평균농도는 169 pCi/L이었고, 최대 평균농도는 1,850 pCi/L 이었다. 미국 먹는물 기준인 4,000 pCi/L와 WHO 권고기준인 2,700 pCi/L을 초과한 곳은 단 한곳도 없었다. 북구 급곡동에서 평균 1,850 pCi/L로 가장 높았고, 기장군 기장읍에서 11 pCi/L로 가장 낮게 나타났다. 국립환경과학원이 조사한 374개 시료에 대한 라돈의 평균 함량도 1,857 pCi/L으로 유사함을 보였다.

Table 5에 나타난 바와 같이 라돈 함량이 300 pCi/L

이하 분포하는 비율이 86.25%로 가장 높게 나타나 부산 지역 지하수수질측정망의 라돈 함량은 낮은 것을 알 수 있다. 지하수중 라돈 함량은 지질여건이 비슷한 다른 나라에 비해서 낮게 검출되고 있으며, 노르웨이의 경우 전체 지하수 시료중 14%가 13,650 pCi/L 이상이며, 핀란드의 경우 24,706 pCi/L에 이른다¹²⁾. Fig. 6은 국립환경과학원에서 조사한 타 지역 지하수중 라돈의 함량 분포와 본 연구 조사결과를 비교하여 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 부산지역은 다른 지역에 비하여 라돈 농도가 매우 낮음을 알 수 있다.

Table 6은 지표수, 천부 지하수, 심부 지하수, 라듐의

함량이 높은 심부 지하수 등의 라돈 함량의 분포를 나타낸 것인데, 본 조사결과가 심부 지하수의 라돈 함량 분포와 유사하다는 것을 보여준다.

한편 검출농도가 상대적으로 높은 라돈은 상반기(5~6월)가 하반기(10~11월)보다 상대적으로 농도가 높은 경향을 보였다. 이처럼 우라늄과 전알파의 함량과 달리 라돈의 함량이 민감하게 반응을 보이는 것은 라돈의 이동속도가 우라늄과 전알파에 비해서 상대적으로 빠르기 때문으로 판단된다¹¹⁾.

자연에 존재하는 라돈은 대부분 222Rn이며, 226Ra의 방사성 붕괴에서 생성된다. 물, 토양중의 라돈이 공기로 방출되어 호흡기로 흡입되거나 음용수 섭취시 소화기관을 통해 흡수되어 폐암, 위암을 유발하는 것으로 알려져 있다.

전알파

Appendix 2, Table 3에 나타난 바와 같이 부산지역 지하수수질측정망 80개소에 대한 전알파의 전체 평균농도는 0.3 pCi/L이었고 최대 평균농도는 6.9 pCi/L 이었다. 미국 먹는물 기준인 15 pCi/L와 WHO 권고기준인 13.5 pCi/L을 초과한 곳은 단 한곳도 없었다. 금정구 부곡3동에서 평균 6.9 pCi/L로 가장 높았고, 기장군 기장읍에서 11 pCi/L로 가장 낮게 나타났다. 중구 영주1동 등 69개소에서 불검출로 나타났다.

Table 7에 나타난 바와 같이 전알파 함량이 1 pCi/L 이하 분포하는 비율이 86.25%로 가장 높게 나타나 부산

지역 지하수수질측정망의 라돈 함량은 낮은 것을 알 수 있다. Fig. 7은 국립환경과학원에서 조사한 타 지역 지하수 중 전알파의 함량 분포와 본 연구 조사결과를 비교하여 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 부산지역은 강원도와 제주도를 제외하고는 다른 지역에 비하여 전알파 농도가 낮음을 알 수 있다.

전알파는 우라늄, 라듐, 라돈, 플루토늄 등 모든 방사성 핵종에서 방출되는 α -방사선을 말하는 것으로 방사성 물질이 얼마나 있는가에 대한 지표로서 자체의 위해성보다 라듐, 우라늄 등 α -방사선 방출원소의 조사지표로도 활용되고 있다¹⁴⁾.

**방사성물질 농도의 지질적 영향
구별 방사성물질 농도 분포**

Table 8과 Fig. 8~10에 나타난 바와 같이 우라늄은 금정구에서 가장 높게 나타났으며, 라돈은 강서구와 북구에서 높게 나타났으며, 전알파는 미미한 수준을 나타내었다. 우라늄의 경우 금정구외 수영구, 연제구, 부산진구, 사상구에서 평균 농도 이상을 나타내었으며, 라돈은 강서구와 북구외 부산진구, 금정구, 수영구에서 평균 농도 이상을 나타내었다. 부산진구, 연제구, 수영구 지역의 지질은 안산암 지질로 형성되어 있고 수영구 일부는 암회색 응회질 퇴적암이 분포하고 있다. 강서구 지사동, 녹산동 일원은 북서부에는 화산암류가 북동부와 남부에서는 화강암류가 분포한다. 따라서 이들 암질의 영향 때문인 것으로 사료된다.

Table 5. Distribution of Radon of 80th groundwaters in Busan

Rn (pCi/L)	No of site	percentage(%)	accumulated %
300 이하	69	86.25	86.25
300 - 1000	9	11.25	97.5
1000 - 2000	2	2.5	100.0
2000 - 4000	0	0.0	100.0
4000 이상	0	0.0	100.0
계	80	100	100.0

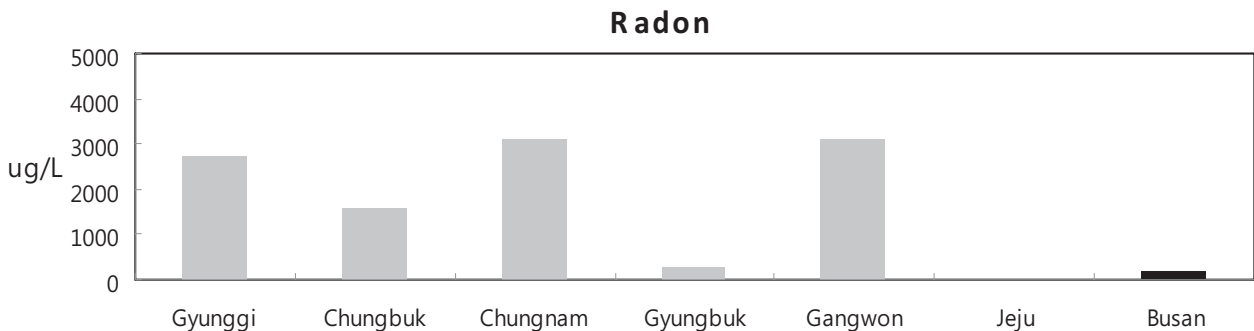


Fig. 6. Comparison with other region in Radon concentration

Table 6. Radon contents of waters

Type of water	Normal radon contents of waters
Surface water and rain water	<2
Groundwater in loose types earth	10 - 150
Water in excavated wells	10 - 400
Water in drilled wells	50 - 500
Water in wells drilled in rocks with low radium content	10 - 50
Water in wells drilled in rocks with high radium content	500 - 10,000

Table 7. Distribution of Gross- α of 80th groundwaters in Busan

Gross- α (pCi/L)	No of site	percentage(%)	accumulated %
1 이하	73	91.25	91.25
1 - 5	6	7.5	98.75
5 - 15	1	1.25	100.0
15 이상	0	0.0	100.0
계		100	100.0

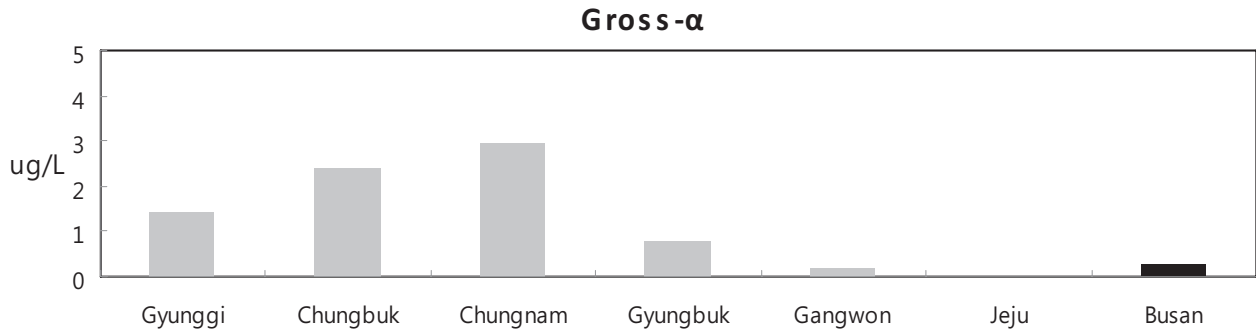


Fig. 7. Comparison with other region in Gross- α concentration

Table 8. Average concentration of radionuclides groundwaters by regional

	U ($\mu\text{g/L}$) Mean \pm SD	Rn (pCi/L) Mean \pm SD	Gross- α (pCi/L) Mean \pm SD
Jung-gu	3.37 \pm 3.78	38 \pm 25	ND
Seo-gu	0.14 \pm 0.21	28 \pm 8	0.1 \pm 0.3
Dong-gu	0.59 \pm 0.82	85 \pm 109	ND
Youngdo-gu	0.36 \pm 0.63	114 \pm 73	ND
Busanjin-gu	5.45 \pm 8.57	331 \pm 429	0.3 \pm 0.5
Dongrae-gu	2.19 \pm 2.84	152 \pm 119	ND
Nam-gu	0.05 \pm 0.12	42 \pm 24	ND
Buk-gu	1.61 \pm 3.12	518 \pm 775	1.3 \pm 1.9
Haeundae-gu	1.43 \pm 1.01	113 \pm 78	ND
Saha-gu	0.48 \pm 0.89	118 \pm 93	0.2 \pm 0.4
Gumjung-gu	34.90 \pm 76.39	276 \pm 367	1.4 \pm 3.1
Gangseo-gu	0.63 \pm 0.97	531 \pm 436	1.0 \pm 0.9
Yonje-gu	5.82 \pm 8.30	33 \pm 8	ND
Suyoung-gu	7.80 \pm 10.60	200 \pm 154	0.1 \pm 0.2
Sasang-gu	4.51 \pm 3.53	85 \pm 23	ND
Gijang-gun	ND	38 \pm 22	ND

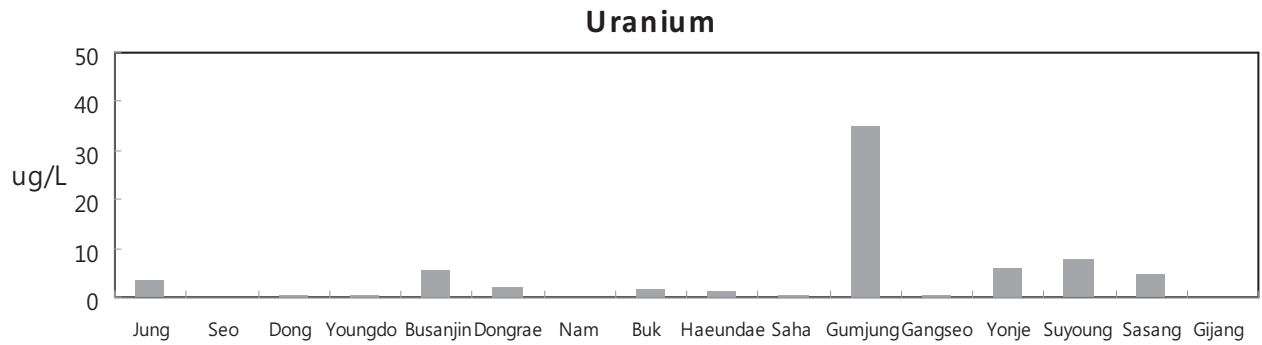


Fig. 8. Distribution of Uranium of groundwaters by regional

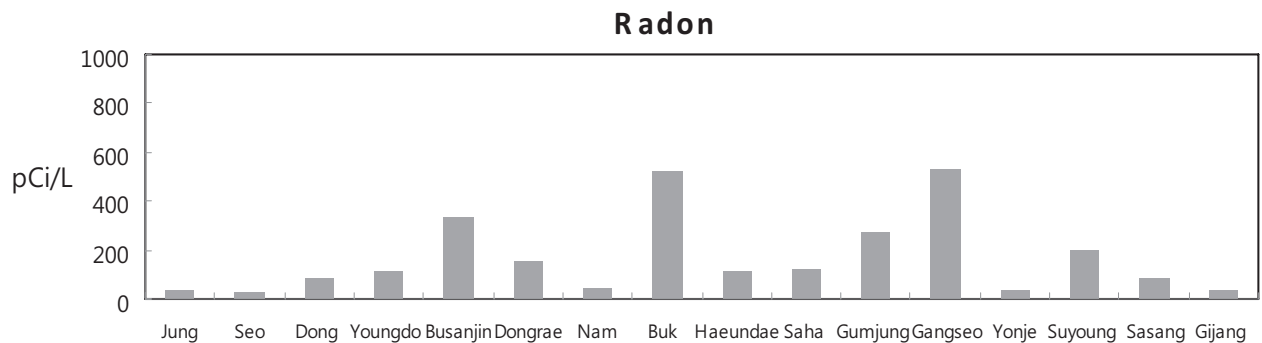


Fig. 9. Distribution of Radon of groundwaters by regional

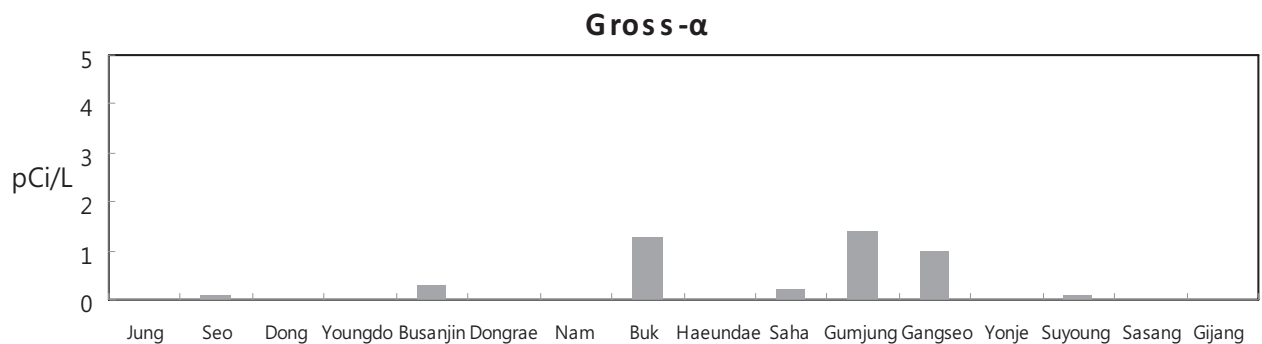


Fig. 10. Distribution of Gross-α of groundwaters by regional

방사성물질 초과지역 지질특성

미국 먹는물 기준인 30 $\mu\text{g/L}$ 을 초과한 곳은 금정구 부곡3동으로 상하반기 평균농도는 171.55 $\mu\text{g/L}$ 로 나타났다. Fig. 12에서 보는 바와 같이 금정산 주변 지역은 다양한 화강암지질로 구성되어 있다. 화강암 지역에서 우라늄

함량이 높은 편인데, 특히 부곡3동의 지질은 미문상화강암 지역으로 국립환경연구원 결과¹⁾에 따르면 미문상화강암의 우라늄 함량은 평균 3ppm으로 우라늄 농도가 높기 때문에 주변 지하수에 영향을 미친 것으로 사료된다.

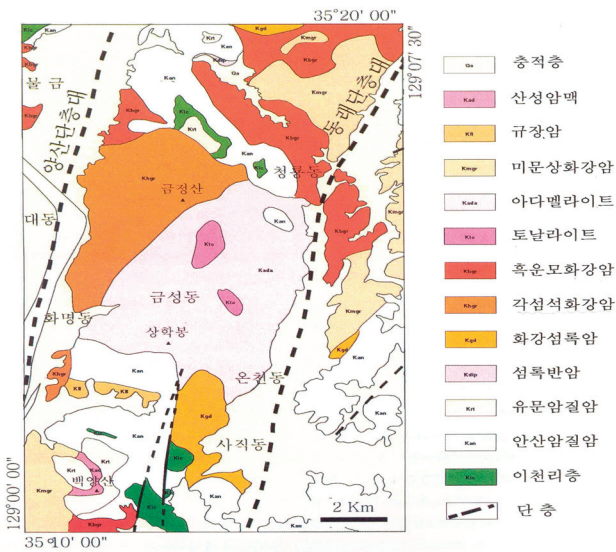


Fig. 11. Geologic map of Geumjung Mountain area.

방사성물질간 상관관계

부산지역 지하수수질측정망의 방사성물질과의 상관관계는 Table 9에 나타내었다. U와 Rn의 경우 상관성은 낮으나 유효성은 높게 나타났으며, U과 전알파, 라돈과 전알파는 상관성도 높으며 유효성도 높게 나타났다.

방사성물질과 무기물질간 상관관계

부산지역 지하수수질측정망의 방사성물질과 무기물질과의 상관관계는 Table 10에 나타내었다. pH와 라돈, pH와 전알파는 상관성은 낮으나 유효성은 높게 나타났다. 방사성물질과 무기물질과의 상관관계는 pH의 경우 다소 상관성은 있으나 염소이온과 비소는 상관성이 낮은 것으로 나타났다.

Table 9. Pearson Correlation coefficients between radionuclides

		U	Rn	Gross- α
U	Pearson Correlation	1	0.334**	0.771**
	Sig. (2-tailed)		0.002	0.000
Rn	Pearson Correlation	0.334**	1	0.779**
	Sig. (2-tailed)	0.002		0.000
Gross- α	Pearson Correlation	0.771**	0.779**	1
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000	

** ; Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

먹는 샘물 중 우라늄 농도 비교

먹는샘물도 지하수임에는 틀림이 없으나 일반 지하수와의 차이점은 지하수공의 심도가 깊고 천부지하수의 유입방지를 위한 케이싱 등의 처리가 잘 되어있다는 점이다. 먹는샘물의 제조수입업체는 2005년 12월말 현재 70개소이나 본 연구에서는 19개 제품수에 대해서만 먹는물 감시항목인 우라늄 함량을 조사하였다. Table 11에 조사가 이루어진 19개 먹는샘물을 나타내었으며, Table 12, Fig. 13에는 먹는샘물의 우라늄 함량 분포를 나타내었다. 본 연구의 지하수수질측정망 결과와 비교하면 일부 먹는샘물의 제품수를 제외하고는 본 연구 결과가 다소 높음을 알 수 있다. 전체적으로 볼 때 지하수중의 방사성물질의 함량은 지질의 영향을 받고 있는 것으로 볼 수 있다. 즉, 산성계열인 화강암류에서 높게 검출되며, 염기성암인 제주도 현무암에서 가장 낮게 나타난다¹⁴⁾. 또한 지하수중의 방사성물질의 함량은 여러 요인들의 복합적인 작용에 의해 결정된다고 할 수 있다.

Table 10. Pearson Correlation coefficients of radionuclides and inorganic matter

		U	Rn	Gross- α	pH	Cl	As
U	Pearson Correlation	1	0.334**	0.771**	0.028	0.210	-0.016
	Sig. (2-tailed)		0.002	0.000	0.802	0.061	0.887
Rn	Pearson Correlation	0.334**	1	0.779**	-0.340**	-0.086	-0.087
	Sig. (2-tailed)	0.002		0.000	0.002	0.450	0.443
Gross- α	Pearson Correlation	0.771**	0.779**	1	-0.229*	0.083	-0.079
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000		0.041	0.463	0.487
pH	Pearson Correlation	0.028	-0.340**	-0.229*	1	0.057	0.289**
	Sig. (2-tailed)	0.802	0.002	0.041		0.613	0.009
Cl	Pearson Correlation	0.210	-0.086	0.083	0.057	1	0.004
	Sig. (2-tailed)	0.061	0.450	0.463	0.613		0.974
As	Pearson Correlation	-0.016	-0.087	-0.079	0.289**	0.004	1
	Sig. (2-tailed)	0.887	0.443	0.487	0.009	0.974	

** ; Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

* ; Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Table 11. Object of natural mineral water

No	Product	Source of water	Date of manufacture
1	B 샘플	강원도 평창군	2009.10.21 [§]
2	O 샘플	강원도 횡성군	2008.10.29
3	Y	강원도 홍천군 약물산	2010.8.20 [§]
4	D 샘플	경기도 연천군	2009.10.23 [§]
5	S	충청북도 청원군	2009.10.16 [§]
6	P 샘플	충북 괴산	2009.10.8 [§]
7	H 샘플	충북 청원군	2009.10.23 [§]
8	M 샘플	충청북도 청원군	2009.10.14 [§]
9	S	전남 담양군	2009.10.29 [§]
10	J	전남 구례군	2009.10.17 [§]
11	W	경남 산청군	2008.4.22 [§]
12	I	경남 합천군	2009.11.16 [§]
13	P	경남 하동군	2009.10.2 [§]
14	S	경남 밀양	2008.10.23
15	U 샘플	울산 울주군	2009.4.16 [§]
16	S	제주특별자치도 제주시	2010.10.15 [§]
17	G 샘플	금강산 온정리 동석동	2008.8.5
18	B	프랑스 오베른	2008.2.29
19	E	프랑스 에비앙	2008.7.10

§ date of distribution

Table 12. Distribution of Uranium concentration in the natural mineral water

U ($\mu\text{g/L}$)	No of site	percentage(%)	accumulated %
0.1 이하	4	21.05	21.05
0.1 - 0.5	1	5.3	26.35
0.5 - 2	4	21.05	47.4
2 - 5	8	42.1	89.5
5 이상	2	10.5	100.0
계	19	100	100.0

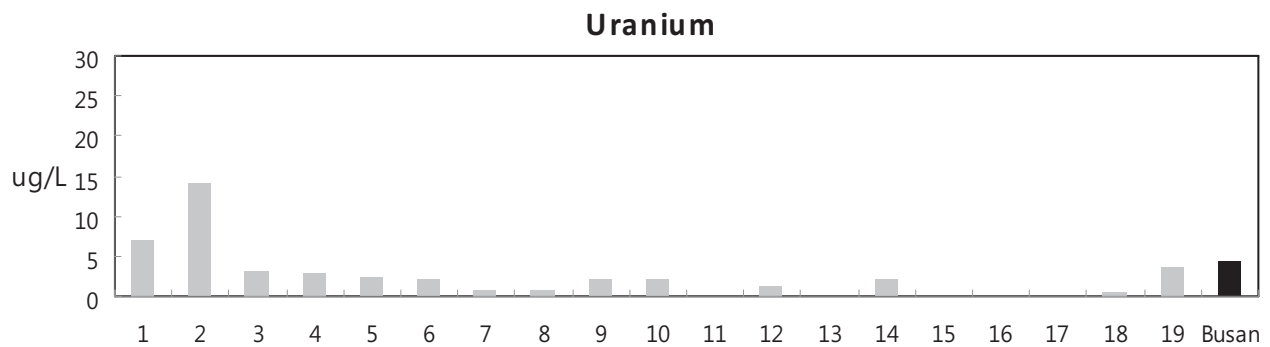


Fig. 12. Comparison of radionuclides with mineral water

Table 13. Radionuclides standard of drinking water in various nations

	USA	WHO**	Canada**	Australia**	Europe
U ($\mu\text{g/L}$)	30	15	20	20	-
Rn (pCi/L)	4,000*	2,700	-	2,700	Sweden 2,700 - 27,000 Finland 8,100 Norway 13,500**
Gross- α (pCi/L)	15	13.5	2.7	13.5	-

* ; proposal standard of drinking water(AMCL, reduction program)

** ; guideline or recommendatory value

외국의 방사성물질 기준과 비교

우리나라 먹는물 수질기준에는 방사성물질에 대한 기준을 정하고 있지 않다. 다만 우라늄에 대해서는 감시항목으로 지정되어 있으며 미국과 WHO의 먹는물 수질기준(권고치)을 적용하고 있다. 외국의 먹는물 수질기준¹⁵⁾은 Table 13에 나타내었으며, 미국과 WHO의 먹는물 수질기준(권고치)에 적용한 우라늄의 부적합 현황은 Table 14, 15와 같다. 캐나다와 오스트레일리아의 경우 보다 더 엄격하며, 스칸디나비아 국가에서는 라돈에 대해서만 설정되어 있다.

Table 14. Number of excess USA standard in U

	1st half	2nd half	Average
No. of samples	63	80	72
No. of excess standard	1	1	1
Percentage(%)	1.6	1.3	1.4

Table 15. Number of excess WHO recommendatory value in U

	1st half	2nd half	Average
No. of samples	63	80	72
No. of excess standard	5	4	5
Percentage(%)	7.9	5.0	6.9

먹는물의 방사성물질 관리대책

자연방사능이라도 장기간 섭취시 우려되는 국민건강상 위해를 예방하기 위하여 관리대책 마련 필요성 제기된다. 단기 대책으로는 첫째, 고함량 마을상수도는 저감조치 후 사용 또는 음용중단토록 조치한다. 우라늄 고함량 지점은 잠정폐쇄 후 재조사하여 계속사용 여부 결정 및 대체수원 개발 등의 대책을 추진하여야 하며, 라돈은 끓이거나 방치, 폭기 등의 방법으로 쉽게 저감된다. 둘째, 방사성물질 관리 제도 마련이 시급하다. 고함량 지하수 관리메뉴얼 마련 및 먹는샘물 등 원수 개발단계에서부터 규제방안 마련 등이

필요하다¹⁵⁾. 중장기 대책으로는 첫째, 먹는물 수질기준 마련이다. 주요 선진국의 방사성물질 관리 정책방향 등을 참고하여 물질별 기준 설정방안을 적극 검토하여야 하며, 둘째, 감시·관리를 위한 인프라 확충으로 장비·인력·예산 확보 및 공정시험방법 마련 등이 있으며 셋째, 장기 실태조사를 통한 자료 축적이 요구된다. 전국적인 함량 분포도 및 고함량지역 상세정보 DB 구축, 고함량 우려지역에서의 관정 개발 지침 등 마련해야 할 것으로 판단된다.

결 론

본 연구에서는 부산지역 지하수수질측정망 80개소를 대상으로 방사성물질의 특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 우라늄의 전체 평균농도는 $4.33 \mu\text{g/L}$ 이었고, 최대 평균농도는 $171.55 \mu\text{g/L}$ 이었다. 미국 먹는물 기준인 $30 \mu\text{g/L}$ 을 초과한 곳은 1곳, WHO 권고기준인 $15 \mu\text{g/L}$ 을 초과한 곳은 4곳으로 나타났다.
2. 라돈의 전체 평균농도는 169 pCi/L 이었고, 최대 평균농도는 $1,850 \text{ pCi/L}$ 이었다. 미국 먹는물 기준인 $4,000 \text{ pCi/L}$ 와 WHO 권고기준인 $2,700 \text{ pCi/L}$ 을 초과한 곳은 단 한곳도 없었다.
3. 전알파의 전체 평균농도는 0.3 pCi/L 이었고 최대 평균농도는 6.9 pCi/L 로 다른 방사성물질에 비하여 미미한 수준으로 나타났다.
4. 구별 방사성물질 농도분포는 우라늄은 금정구에서 가장 높게 나타났으며, 라돈은 강서구와 북구에서 높게 나타났다. 이는 지질의 영향 때문인 것으로 사료된다.
5. 방사성물질간의 상관관계는 유효성이 높게 나타났으며, 방사성물질과 무기물질과의 상관관계는 pH의 경우 다소 상관성은 있으나 염소이온과 비소는 상관성이 낮은 것으로 나타났다.
6. 먹는샘물과 본 연구의 지하수수질측정망 우라늄 결과를

비교하면 일부 먹는샘물의 제곱수를 제외하고는 먹는샘물보다 다소 높게 나타났다. 이는 지하수중의 방사성물질의 함량은 지질의 영향을 받고 있기 때문인 것으로 추정된다.

7. 본 연구결과 지하수중에서 방사성물질의 평균 농도는 낮은 편이지만 미량이나마 검출되는 바 국민건강상 위해를 예방하기 위하여 먹는물 수질기준 등 관리대책 마련의 필요성이 요구된다. 또한 우라늄이 고농도로 검출되는 일부 지점에 대해서는 정밀한 검토를 거쳐 폐공 조치 등 적절한 조치가 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 국립환경연구원, 지하수중 방사성물질 함유실태에 관한 조사연구, pp37-168(1999)
2. 오영미 등, 지하수와 지표수에서의 라돈 및 우라늄의 실태조사, Journal of Korean Society on Water Quality, Vol.23. pp201-205(2007)
3. RADNET, Information about Source points of Anthropogenic Radioactivity, (1996)
4. 박선구 등, 외국에서의 지하수중 방사성물질 관리에 대한 고찰(I), Journal of Korean Society on Water Quality, Vol.19. No.6, pp585-597(2003)
5. David, W. Oxtoby and Norman, H. Nachtrieb, Principle of modern chemistry, Saunder College Publishing, 2nd edition, pp443-478(1990)
6. 국립환경연구원, 환경자료집, pp719-726(1999)
7. Dahlkamp, F. J. Geological appraisal of the Key Lake U-Ni deposits, norther Saskatchewan. Econ. Geol., 73, B216-B225(1978)
8. 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, pp1791-1802(1989)
9. Gascoyne, M. High levels of uranium and radum in groundwaters at Canada's underground research laboratory, Lac Bonnet, Manitoba, Canada. Appl. Geochem., 4, pp577-591(1989)
10. 유숙진 등, 부산시 지하수의 수질특성에 관한 연구, 부산광역시 보건환경연구원보 제13권(II), pp90-136(2003)
11. 박흥기, 수계중의 방사성물질 분포실태조사, 부산광역시 상수도사업본부 수질연구소(2007)
12. Morland, G., et al., The hydrogeochemistry of Norwegian bedrock groundwater-selected parameters(pH, F, Rn, U, Th, Na, Ca) in samples from Vestfold and Hordaland, Norway, NGU Bull, Vol. 432, pp103-117(1997)
13. 국립환경연구원, 지하수중 방사성물질 함유실태에 관한 조사연구(3), pp66-119(2001)
14. 국립환경연구원, 지하수중 방사성물질 함유실태조사(I), pp22-44(2007)
15. 환경부, 보도자료(2007)