

The Study of Radon and Uranium Distribution in the Groundwater at Regional Difference of Daejeon

Yoon Yeol Yoon* · Soo Young Cho · Kil Yong Lee · Yongje Kim
Groundwater & Geothermal Division, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources, 30
Gajeong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea
e-mail ; yvyoon@kigam.re.kr

대전지역별 지하수중의 우라늄, 라돈 농도준위 분포조사 연구

윤윤열* · 조수영 · 이길용 · 김용제
한국지질자원연구원 지하수지열연구부

(2005년 9월 7일 접수, 2006년 2월 15일 채택)

Abstract - To know radon and uranium concentration variations in groundwater with regional difference, groundwaters were sampled at five different Daejeon area. Seventy-five samples were analyzed and forty samples were collected twice at drying and after raining season to know surface water effect. The average radon and uranium concentration of five areas are 270.9 ± 152.3 Bq/L, 43.8 ± 23.5 $\mu\text{g/L}$ at Yusung-gu, 112.9 ± 65.8 Bq/L, 0.45 ± 0.23 $\mu\text{g/L}$ at Seo-gu, 41.3 ± 24.0 Bq/L, 4.9 ± 11.3 $\mu\text{g/L}$ at Dong-gu, 131.8 ± 99.5 Bq/L, 54.3 ± 127.5 $\mu\text{g/L}$ at Daeduk-gu and 44.0 ± 43.0 Bq/L, 8.1 ± 11.6 $\mu\text{g/L}$ at Jung-gu. The mean concentrations of analyzed samples to know surface water effect were ranged from 0.5 to 640 $\mu\text{g/L}$ for uranium and from 0.4 to 729 Bq/L for radon. The average concentration of radon and uranium after raining season were lower than those of drying season. The mean contents of radon and uranium at drying season were 253 ± 14 Bq/L, 63 ± 12.2 $\mu\text{g/L}$, and 195 ± 11 Bq/L, 45.4 ± 11.7 $\mu\text{g/L}$ after raining season.

Key words : groundwater, radon, uranium, Daejeon area.

요약 - 지역에 따른 지하수중의 라돈 과 우라늄의 농도차이를 알기 위하여 대전지역의 지하수를 분석하였다. 대전 5개 지역에서 사용하고 있는 75개 지하수를 채취하여 라돈 및 우라늄 농도를 분석하였다. 또한 우기 전·후로 40 개시료를 채취하여 지표수 유입에 따른 변화를 알고자 하였다. 지역에 따른 라돈 및 우라늄의 평균농도는 유성구에서는 270.9 ± 152.3 Bq/L, 43.8 ± 23.5 $\mu\text{g/L}$, 서구지역은 112.9 ± 65.8 Bq/L, 0.45 ± 0.23 $\mu\text{g/L}$, 동구지역의 경우는 41.3 ± 24.0 Bq/L, 4.9 ± 11.3 $\mu\text{g/L}$, 대덕구는 131.8 ± 99.5 Bq/L, 54.3 ± 127.5 $\mu\text{g/L}$ 그리고 중구는 44.0 ± 43.0 Bq/L, 8.1 ± 11.6 $\mu\text{g/L}$ 이었다. 또한 지표수의 영향을 관찰한 시료에서 우라늄 농도는 최소 0.5에서 최대 640 $\mu\text{g/L}$ 까지 나타나며 라돈의 경우 최소 0.4에서 최대 729 Bq/L 까지였으며 건기시 채취한 시료가 우기후 시료보다 높은 농도를 나타내었다. 건기시 라돈과 우라늄의 농도는 평균 253 ± 14 Bq/L, 63 ± 12.2 $\mu\text{g/L}$ 이었으며, 우기후는 195 ± 11 Bq/L, 45.4 ± 11.7 $\mu\text{g/L}$ 를 나타내었다.

중심어 : 대전지역 지하수, 라돈 방사능, 우라늄

서 론

지하수는 지각구성 원소들의 이동 및 재배치에

중요한 역할을 담당하므로 지하화학연구, 광물탐사 연구에 지하수중의 환경방사성동위원소측정기술이 유용한 수단이 될 경우가 많다[1]. 지하수에

존재하는 방사성동위원소는 대부분 자연계에 존재하는 우라늄, 토륨, 악티늄계 원소들로부터 기인된다. 그 중 대부분은 우라늄계에 의해 발생되며 자연방사선중 특히 우라늄과 라돈에 의한 피폭이 가장 많다. 우라늄을 섭취할 경우 뼈와 신장에 축적이 되어 건강에 위해를 끼치게 된다. 우라늄의 경우 방사능보다 화학적 위해성이 더 큰데 일반적으로 섭취한 우라늄의 약 5% 정도가 위장을 통해 혈류로 흡수가 된다고 ICRP에서 평가하였다[2,3]. 그리고 라돈의 경우 섭취를 통한 위해도는 호흡을 통한 위해도와 비슷하다는 평가가 있으며, 미국의 경우 폐암 환자중 지하수에 의해 발생된 실내 공기중의 라돈에 의해 약 1~7%가 발생된다는 보고가 있다[4]. 이러한 위해도에 대해 1976년 미국 EPA에서는 일반 음용수에 대한 환경방사성 동위원소에 대한 최대오염준위(MCL; Maximum Contamination Level)를 음용수규정(NIPDRW; the National Interim Primary Drinking Water Regulation)으로 정한바 있으며[5], 최근 2000년에 그동안 논란이 있어왔던 MCL에 대한 마지막 권고치를 제안하였다[6]. 국내의 경우 국지적으로 지하수를 음용수로 사용하는 곳이 있으나 미국의 경우 대부분의 지역에서 지하수를 음용수로 사용하고 있어 음용수에 대한 방사성 물질의 위해도를 평가하기 위해 USGS에서 1960-1970년대에 89,000 곳의 지하수에 대해 방사능물질에 대한 조사가 이루어졌다. 그러나 국내의 경우 최근 지하수중의 방사능물질에 대한 사회적 관심이 있어 전국적인 지질구조에 따른 자연방사능에 대한 조사가 이루어졌다[7].

최근 방사능에 대한 국민의 관심이 고조되어 있어 방사성폐기물 처분장건설을 반대하는 등 방사선에 대해 심각하게 반대의견을 내세우고 있으나 인류는 자연계에 존재하는 천연 동위원소 및 자연방사선에 노출되어 살아가고 있다. 그중 생활하수 또는 식수로 사용되고 있는 지하수에는 라돈과 우라늄이 포함되어 있고 지하수 주변의 지질매질의 종류에 따라서는 상당히 많은 양을 함유하는 경우도 있다[7,8]. 지하수 중의 방사능 농도는 지역적 특성이 뚜렷하므로 이를 음용수나 생활용수로 사용하는 경우 지역에 따라 방사선피폭 정도가 크게 달라질 수 있어 여러 지역에 대한 환경방사성동위원소들에 대한 분석이 시도되었다[9-18]. 라돈의 경우 지표수중의 함량은 낮으나 지하수에서는 지질환경에 따라 농도가 변한다. 화강암과 같은 산성 암층내에는 라듐함량이

높으므로 딸핵종인 라돈함량이 증가하나, 염기성인 석회석 또는 사암층에서는 상대적으로 낮은 함량을 나타낸다.

대전 지역은 우라늄 평균 함량이 약 250 $\mu\text{g/g}$ 정도로 비교적 높은 흑색철암이 많은 옥천계의 일부지역으로서, 지하수 중에 우라늄과 라돈의 함량이 높게 나타날 수 있는 지역이다. 이 지역의 지질은 시대미상의 변성퇴적암류와 이를 관입한 대보화강암으로 구성되어 있다. 대보화강암은 편상화강암, 흑운모화강암, 복운모화강암으로 세분된다. 편상화강암은 대전북서부와 동부에 분포하며, 흑운모화강암은 남부에, 복운모화강암은 전체화강암의 70%를 차지할 정도로 광범위하게 분포하는데, 편상화강암을 관입하며 흑운모화강암과는 점이적인 관계를 보인다. 이러한 화강암이 많이 분포하는 대전지역내 우라늄 함량은 편상화강암 지역이 $4.14 \pm 2.36 \text{ mg/kg}$, 흑운모화강암 지역이 $3.13 \pm 1.70 \text{ mg/kg}$, 복운모화강암 지역이 $1.72 \pm 0.69 \text{ mg/kg}$ 으로 편상화강암, 흑운모화강암, 복운모화강암 순으로 높게 나타난다[8]. 그러므로 현재 대전 지역에서는 지하수를 일부 식수로 사용하고 있어 심각한 인체 위해가 우려될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 대부분 화강암지대로 이루어진 대전지역의 5개 지역구의 지하수에 대한 방사능실태를 파악코자 대전 전 지역에서 사용하고 있는 75개 지하수를 분석하고 지표수의 영향을 평가하기 위하여 건기와 우기 후 2회에 걸쳐 40개 지역의 지하수 시료를 채취하여 지하수중 라돈 및 우라늄 함량분포를 조사하였다.

실 험

대전지역에서 사용되는 지하수 및 비상급수 시설로 개발된 지하수를 지역별로 동구 19개, 중구 22개, 서구 11개, 유성구 4개, 대덕구 19개 시료를 채취하였으며, 지표수 영향을 확인하기 위한 시료는 동구 1개, 중구 2개, 유성구 16개, 서구 13개 대덕구 8개 시료를 채취하였다. 시료를 채취한 대전 지역의 지질도를 fig. 1에 나타내었다.

라돈과 우라늄을 분석하기 위하여 실험실에서 확립한 표준 절차에 따라 시료를 채취하고 분석하였다[9]. 라돈분석을 위한 시료의 채취는 배수관에 차있는 지하수를 충분히 배출한 후 약 5 L 크기의 용기에 와류나 기포의 발생이 없도록 주의하여 받은 후 바로 측정용기인 20 ml EPA

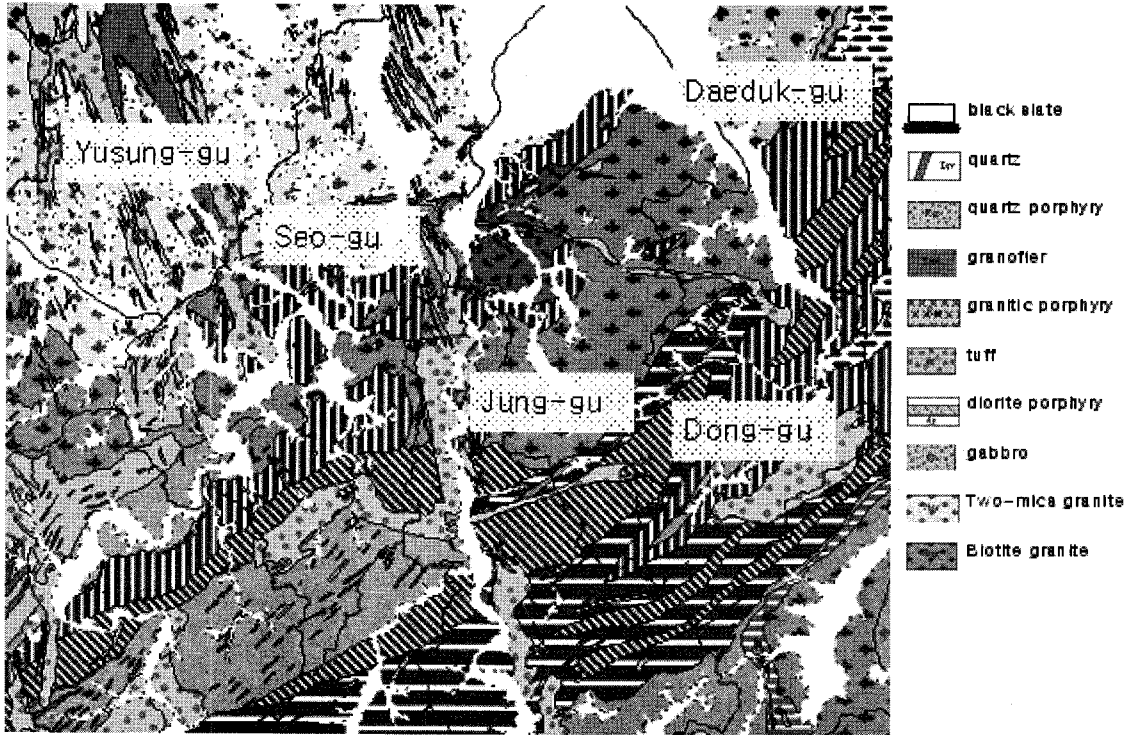


Fig. 1. Geological map of Daejeon area.

vial에 채수하여 공기중 노출에 의한 손실이 없도록 하였다. 채집한 시료는 하루안에 실험실로 운반한 다음 라돈 추출용 섬광용액(톨루엔에 나프탈렌, PBBO를 녹인 용액)을 1.5 ml 첨가하여 라돈을 유기용매로 추출한다. 추출된 섬광용액 1 ml를 측정용 borosilicate tube 판에 옮긴 후 알파전용 액체섬광계수기인 PERALS분광기로 라돈의 알파방사능을 측정하였다. 그리고 우라늄 분석은 1 L PE 채수병에 지하수 시료를 채수하여 바로 1 N 질산용액 15 ml를 첨가하여 용액의 pH를 1로 맞추어준 다음 시료를 실험실로 운반하여 0.45 μm 필터로 걸러준 후 ICP/MS(VG PQ-II, VG, England)로 분석하였다.

결과 및 고찰

지하수중의 우라늄은 거의 극미량으로 존재하나 물-암석반응에 의해 경우에 따라 수 $\mu\text{g/L}$ ~수백 $\mu\text{g/L}$ 까지 나타나기도 한다. 또한 암석내에 존재하는 우라늄의 딸핵종인 라돈은 확산에 의해 지하수에 용해되므로 그 함량이 암석에 따라 변화가 크다. 물속의 우라늄함량은 지질학적, 수리지질학적인 요소들인 온도, 산화환원전위, pH, 다

른 용존성분들의 활동도, 기체의 분압, 용해속도, 지질매체의 수리전도도등에 의해 영향을 받는다. 대전지역의 지질을 나타낸 fig. 1에서 보면 대부분의 지질이 화강암으로 이루어져 있으며, 이런 화강암 지대 지하수들에서는 라돈의 함량이 높게 나타난다는 보고가 있다[17,18]. 대전지역은 유성구와 서구 지역은 복운모화강암, 중구는 흑운모화강암, 대덕구는 편마성 화강암이 대부분을 차지하는 지질학적 특성을 가지고 있다. 이러한 지질학적 특성을 가진 대전 지역구별 지하수 중의 라돈 및 우라늄의 평균 함량은 유성구에서는 270.9 ± 152.3 Bq/L, 43.8 ± 23.5 $\mu\text{g/L}$, 서구지역은 112.9 ± 65.8 Bq/L, 0.45 ± 0.23 $\mu\text{g/L}$, 동구지역의 경우는 41.3 ± 24.0 Bq/L, 4.9 ± 11.3 $\mu\text{g/L}$, 대덕구는 131.8 ± 99.5 Bq/L, 54.3 ± 127.5 $\mu\text{g/L}$ 그리고 중구는 44.0 ± 43.0 Bq/L, 8.1 ± 11.6 $\mu\text{g/L}$ 이었다. 이상의 결과를 보면 지역적으로 우라늄 및 라돈의 함량이 크게 다르다. 동구와 중구는 비교적 낮고, 온천지역인 유성구의 경우 타 지역에 비해 함량이 높게 나타나는데 이는 지하수의 순환중 심부에서 가열된 열화 지하수의 생성이 원인으로 설명하고 있다[19]. 대전지역 지하수에서 측정된 라돈의 방사능은 5개 지역을 제외하고 미국 EPA에서 1976년 제안된 권고치인 11.1 Bq/L를 넘었다[5]. 최

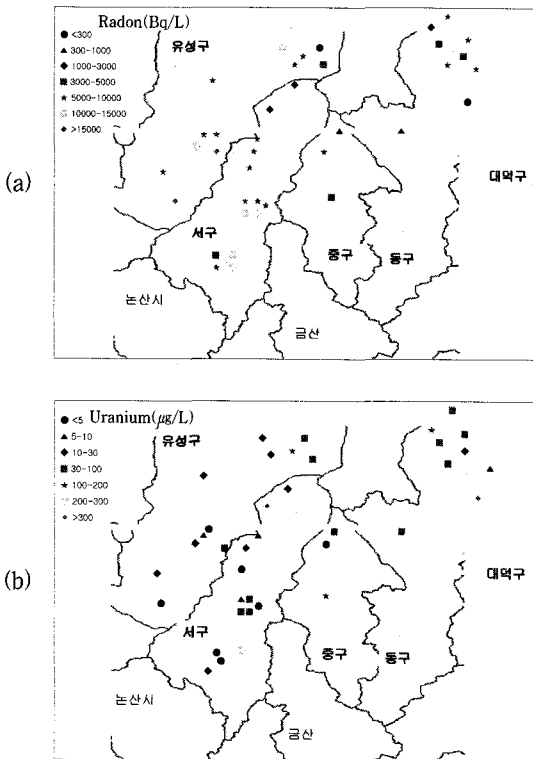


Fig. 2. The concentration distributions of ^{222}Rn and U in the groundwater at Daejeon area.

근 환경부에서 전국 지하수에 대한 라돈 농도를 조사하여 잠정 권고치를 111 Bq/L로 정하였는데 [20] 분석된 대전 지역 지하수의 약 25 % 이상이 권고치를 초과하고 있었으며, 유성구와 대덕구의 경우 대부분 환경부 권고치를 초과하고 있다. 또한 우라늄의 경우 약 15 % 이상의 시료에서 미국 EPA 권고치인 30 $\mu\text{g/L}$ 이상 함유하고 있었다. 대전 5개지역구중 동구와 중구의 경우 라돈 및 우라늄의 함량이 대체로 적게 나타나는데 동구는 지질학적으로 화강암지대가 아닌 점판암 지역이며, 중구는 흑운모 화강암 지역으로 이러한 지질학적 특색이 라돈과 우라늄이 쉽게 용해되지 않아 낮은 농도를 나타내는 것으로 생각된다. 이러한 지질학적 특색은 각 암석 종류별 라돈 및 우라늄 농도 분포를 조사한 결과[7]와 잘 일치하고 있다.

지표수의 영향을 관찰하기 위하여 40 곳 지하수를 상반기인 4월과 하반기 10월에 시료를 채취하여 우라늄 및 라돈의 함량분포를 분석한 결과를 그림 2와 3에 나타내었다. 시료채취 지역이 적은 중구와 동구를 제외한 우라늄과 라돈의 경

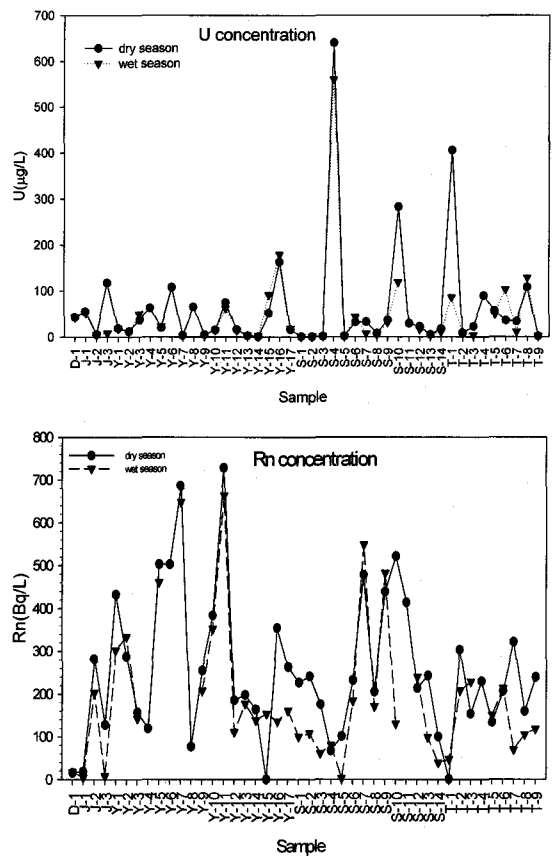


Fig. 3. U and ^{222}Rn concentrations after dry and wet season at Daejeon groundwater.

우 상반기에는 서구지역 지하수에서는 0.7~640 $\mu\text{g/L}$ 와 67~522 Bq/L, 유성구 지역에서 0.5~163 $\mu\text{g/L}$ 와 0.4~728 Bq/L, 대덕구는 1.5~406 $\mu\text{g/L}$ 와 1.1~322 Bq/L 범위를 나타내었다. 그리고 하반기 우라늄 및 라돈의 함량분포는 서구지역에서 0.6~560 $\mu\text{g/L}$ 와 2.8~548 Bq/L, 유성구는 2.7~179 $\mu\text{g/L}$ 와 111~662 Bq/L, 대덕구는 2.2~103 $\mu\text{g/L}$ 와 47~229 Bq/L를 나타내어 대체로 건기인 상반기에 비해 우기 후 채취한 하반기 시료에서 약간 낮은 함량값을 나타내었다. 각 지역적으로 보면 유성구에서는 약 10 % 정도의 시료가 건기시 높은 값을 나타내었으나 서구와 대덕구의 경우 약 50 %의 시료가 건기시 높은 값을 나타내어 이 지역의 지하수들은 지표수의 영향을 쉽게 받는 것으로 여겨진다. 지하수들 중 특히 J-3과 T-7 시료의 경우 상반기에 비해 하반기의 경우 우라늄과 라돈의 함량이 거의 1/10 이상 줄어들어 지표수의 영향을 많이 받는 지하수임을 알 수 있었다. 40개 지역의 우라늄과 라돈 함량에 대한

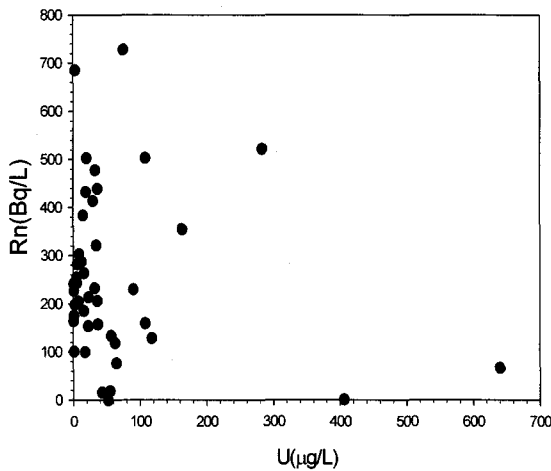


Fig. 4. Concentration correlation between U and ^{222}Rn in groundwater of Daejeon area.

상관성을 그림 4에 나타내었다. 그림에서 나타나듯이 우라늄의 함량이 높다고 라돈의 함량이 높게 나타나지를 않는다. 우라늄 함량이 640 $\mu\text{g/L}$ 로 제일 높게 나타난 S-4 지하수의 경우 라돈은 약 74 Bq/L 밖에 되지 않았다. 반면 라돈의 함량이 703 Bq/L로 제일 높은 Y-7의 경우 우라늄 함량은 약 3 $\mu\text{g/L}$ 밖에 되지 않았다. 이는 지하수 중의 라돈의 함량은 지하수 주변의 암석과 연관이 있어 대부분의 라돈은 지하수 중의 우라늄의 붕괴에 의한 것이 아닌 주변 암석으로 확산되어 지하수에 용해됨을 알 수가 있다.

결 론

대전 5개 지역구의 75개 지하수 시료를 채취하여 우라늄과 라돈을 분석한 결과 유성구에서는 270.9 ± 152.3 Bq/L, 43.8 ± 23.5 $\mu\text{g/L}$, 서구지역은 112.9 ± 65.8 Bq/L, 0.45 ± 0.23 $\mu\text{g/L}$, 동구지역의 경우는 41.3 ± 24.0 Bq/L, 4.9 ± 11.3 $\mu\text{g/L}$, 대덕구는 131.8 ± 99.5 Bq/L, 54.3 ± 127.5 $\mu\text{g/L}$ 그리고 중구는 44.0 ± 43.0 Bq/L, 8.1 ± 11.6 $\mu\text{g/L}$ 이었다. 이 결과는 전국 암석별 지하수 중의 라돈 및 우라늄 분석 결과[7]와 비교해보면 농도가 가장 높은 심성암 지질대보다 유성구와 중구의 우라늄 함량이 4배 이상 높으며, 라돈의 경우는 서구와 대덕구는 비슷하며 유성구는 약 3배가 높았다. 이상의 결과에서 약 25 %가 넘는 지역이 환경부에서 제시한 라돈 권고치인 111 Bq/L 이상의 라돈 방사능을 나타내었으며, 우라늄의 경우 약 15 % 이상의 지

역이 미국 EPA 제한 권고치인 30 $\mu\text{g/L}$ 이상을 함유하였다. 또한 지표수의 영향을 확인하기 위해 건기와 우기 후 채취한 각 지역별 지하수에서는 건기시 라돈과 우라늄의 농도는 평균 253 ± 14 Bq/L, 63 ± 12.2 $\mu\text{g/L}$ 이었으며, 우기후는 195 ± 11 Bq/L, 45.4 ± 11.7 $\mu\text{g/L}$ 를 나타내어 대부분의 지하수가 우기 후 낮은 함량을 나타내었다. 각 지역 중 유성구는 약 10 % 정도의 지역에서 건기시 높은 함량을 나타내었으나, 서구와 대덕구의 경우에는 약 50 %의 지하수가 건기시 높은 함량을 나타내어 이 지역의 지하수들이 쉽게 지표수의 영향을 받는 것으로 여겨진다.

참고문헌

1. A. Varhegyi, I. Baranyi, I. Gerzson, G. Somogyi, J. Hakl, I. Hunyadi, "Application of underwater radon measurements in geology", *Inter. J. Radiat. Appl. Instr. Part D*, 15 609-612 (1988)
2. ICRP, "Limits for Intakes of Radionuclides by workers", New York, Pergamon Press, 1979.
3. Y.S. Kim, H.S. Park, J.Y. Kim, S.K. Park, B.W. Cho, I.W. Sung, D.C. Shin, "Health risk assessment for uranium in Korean groundwater", *J. Environ. Radioact.*, 77(1), 77-8 (2004).
4. C.R. Cothorn, W.L. Lappenbush, J. Michel, "Drinking water contribution to natural background", *Health Physics*, 50, 33-39 (1986).
5. National Interim Primary Drinking Water Regulations, EPA-57019-79-003, 1976.
6. 40 CFR Parts 9, 141, and 142 National Primary Drinking Water Regulations; Radionuclides; Final Rule, EPA 2000.
7. 성익환, "지하수중 방사성물질 함유실태에 관한 조사연구IV", 국립환경연구원, 2002.2. "Radon, Radium and Uranium in Drinking Water", C. Richard Cothorn, Paul A. Rebers ed., Lewis Publishers, Inc., 1990.
8. 김종환, 박중권, 고상모, "옥천충군의 지질과 광상", 한국자원연구소 KR-95(B)-4, 과학기술처, 1995.
9. 우형주, 윤윤열, 조수영, "지질시료 분석 체계 및 정도관리시스템 개발; 토양, 수질중라돈 및

- 천연방사능 분석법 및 체계화연구”, 한국자원 연구소 KR-96(T)-17, 과학기술처, 1996.
10. D. Amrani, D.E. Cherouati, M.E.H. Cherchali, "Groundwater radon measurements in Algeria", *J. Environ. Radioact.*, 51 173-180 (2000).
 11. M.H. Lee, G.S. Choi, Y.H. Cho, C.W. Lee, H.S. Shin, "Concentrations and activity ratios of uranium isotopes in the groundwater of the Okchun Belt in Korea", *J. Environ. Radioact.*, 57 105-116 (2001)
 12. W. Zhuo, T. Iida, X. Yang, "Occurrence of ^{222}Rn , ^{226}Ra , ^{228}Ra and U in groundwater in Fujian Province, China", *J. Environ. Radioact.*, 53 111-120 (2001).
 13. N. Zouridakis, K.M. Ochsenkühn, A. Savidou, "Determination of uranium and radon in potable water samples", *J. Environ. Radioact.*, 61 225-232 (2002).
 14. V.M. Choubey, S.K. Bartarya, R.C. Ramola, "Radon in groundwater of eastern Doon valley, Outer Himalaya", *Radiation Measurements*, 36 401-405 (2003).
 15. R.M.R. Almeida, D.C. Laueia, A.C. Ferreira, O. Sracek, "Groundwater radon, radium and uranium concentrations in Região dos Lagos, Rio de Janeiro State, Brazil", *J. Environ. Radioact.*, 73 323-334 (2004).
 16. L.S. Cho, J.K. Ahn, H.C. Kim, D.W. Lee, "Radon concentrations in groundwater in Busan measured with a liquid scintillation counter method", *J. Environ. Radioact.*, 75 105-112 (2004).
 17. M.E. Dillon, G.L. Carter, R. Arora, B. Kahn, "Radon concentrations in groundwater of Georgia piedmont", *Health Physics*, 60 229-236 (1991).
 18. D. Otswana, A.O. Mustapha, "Measurement of ^{222}Rn concentration in Kenyan groundwater", *Health Physics*, 74(1) 91-95 (1998).
 19. 김건영, 고용권, 김천수, 배대석, 박맹언, "유성 지역 지열수의 지구화학적 특성연구", *지하수 환경학회지*, 7(1), 32-46 (2000)
 20. 2004 환경백서, 환경부2004.