

음용 지하수 중 라돈 자연저감 특성

노회정 · 정도환 · 윤정기 · 김문수 · 주병규 · 전상호 · 김태승*
국립환경과학원

Natural Reduction Characteristics of Radon in Drinking Groundwater

Hoe Jung Noh · Do Hwan Jeong · Jeong Ki Yoon · Moon Su Kim
Byoung Kyu Ju · Sang Ho Jeon · Tae Seung Kim*
National Institute of Environmental Research

ABSTRACT

To investigate the natural reduction characteristics of radon with a short half-life (3.82 day) in drinking groundwater, we analyzed the changes of radon concentrations of groundwater, waters in storage tanks, and tap waters from the small-scale groundwater-supply systems (N = 301) by LSC (Liquid Scintillation Counter). We also analyzed the concentrations of uranium (half-life 4.5 billion years) in the waters by ICP/MS to compare with natural reduction of radon concentration. The radon concentrations of 68 groundwater-supply systems occupying 22.6% of the total samples exceeded the US EPA's Alternative Maximum Contaminant Level (AMCL : 4,000 pCi/L), with the average radon concentration of 7,316 pCi/L (groundwaters), 3,833 pCi/L (tank waters) and 3,407 pCi/L (tap waters). Compared to the radon levels of pumped groundwaters, those of tank and tap waters naturally reduced significantly down to about 50%. Especially, in case of 29 groundwater-supply systems with the groundwater radon concentrations of 4,000~6,000 pCi/L, average radon concentrations of the tank and tap waters naturally decreased down to the AMCL. Therefore this study implies that radon concentrations of drinking groundwater can be effectively reduced by sufficient storage and residence in tanks.

Key words : Radon, Natural reduction, Groundwater, Tank and tap water, AMCL

1. 서 론

음용수의 대부분을 지표수에 의존하고 있는 국내의 여건으로 인해 그동안 지하수에 대한 관심은 상대적으로 적었으며, 그중 자연방사성물질에 대한 관심은 다른 위험한 물질에 비해 상대적으로 낮았다. 그러나 '96년 국내 일부 지역에 음용 지하수에서 자연방사성물질 검출이 보도된 이후 자연방사성물질에 대한 조사가 시작되었으며(성익환 외, 1999; 2000; 2001; 2002), 국민의 건강과 관련하여 자연방사성물질인 우라늄, 라돈 등에 대한 관심이 점점 높아지고 있다.

라돈(Rn^{222})은 토양·암석 등에 존재하는 가장 잘 알려진 천연방사성핵종 중의 하나로 반감기가 3.82일인 무색, 무취의 불활성 기체로서, 우라늄(U^{238}) → 라듐(Ra^{226})의 방

사능붕괴로부터 생성되며(USEPA, 1999), 붕괴과정에서 알파입자를 발생한다. 또한 라돈은 인간에게 피폭되는 총 방사선 양의 50% 이상을 차지하고 있으며 흡연에 이어 두 번째의 폐암 발병 인자로 알려져 있다(신동천 외, 2002; 주승환과 제원목, 1995).

지구 내부 암석에 존재하는 자연방사성물질은 지하 내부의 균열을 따라서 지하수를 매개체로 지표로 상승한다. 따라서 지하수 중 자연방사성물질의 함량은 그 지역의 지질에 달려 있다고 할 수 있다. 특히 우리나라의 경우, 전국토의 50% 이상이 화강암 계통으로 이루어져 있어 지하수를 수원으로 사용하는 마을상수도 중 일부에서 라돈이 높은 농도로 함유될 수 있다(성익환 외, 1999; 2000; 2001; 2002; 조병욱 외, 2006). 이러한 지점에 대해서는 라돈의 저감이 필요한데, 저감 방법으로는 인위적인 방법

*Corresponding author : tskim99@korea.kr

원고접수일 : 2009. 12. 18 심사일 : 2009. 12. 18 게재승인일 : 2011. 1. 10
질의 및 토의 : 2011. 4. 30 까지

Table 1. Uranium and radon concentrations of diverse rocks in South Korea and of groundwater in other countries

| | Rock type | Area (No. of sample) | U | Rn |
|--------------|--------------------------------------|---------------------------------------|----------------------|------------------------------|
| Rock | Meta-sedimentary rocks (Black shale) | Ogcheon (102) ¹⁾ | 294.0 ppm | - |
| | Granitic rocks | Songrisan granite (30) ²⁾ | 4.03 ppm | 1.35 pCi/g |
| | Sedimentary rocks | Yucheon group (11) ³⁾ | 1.49 ppm | 0.50 pCi/g |
| | Metamorphic rocks | Yulri formation (6) ⁴⁾ | 1.99 ppm | 0.67 pCi/g |
| Ground-water | Granite | Norway ⁵⁾ (163) | 16 µg/L (~750 µg/L) | 700 Bq/L (~19,900 Bq/L) |
| | | Pennsylvania, USA ⁶⁾ (116) | - | (49~1,300 pCi/L) |
| | Sedimentary rocks | Norway ⁵⁾ (30) | - | 22 Bq/L (~410 Bq/L) |
| | | Illinois, USA ⁷⁾ (116) | 1.3 µg/L (0~17 µg/L) | 267 pCi/L (< 80~1,300 pCi/L) |
| | Metamorphic rocks | Poland ⁸⁾ (654) | - | (0~92.5 Bq/L) |

¹⁾ Kim (1987), ²⁾ Sung et al. (2000), ³⁾ Sung et al. (2001), ⁴⁾ Hong et al. (2001), ⁵⁾ Frengstad (2000), Banks et al. (1998), ⁶⁾ USGS (2000), ⁷⁾ USGS (2001), ⁸⁾ Przylibski et al. (2004)

과 자연적인 방법이 있다. 폭기와 활성탄, 역삼투(RO) 등을 이용한 인위적인 방법을 사용하여 라돈을 저감시킬 경우 90% 이상의 저감효율을 보이니, 이에 따른 경제적인 비용이 수반된다(Huikuri et al., 1998; Kinner et al., 1988). 라돈의 고휘발성, 짧은 반감기 등의 특성으로 인하여 끓이거나 방치(정지), 교반 등의 자연저감방법으로 관리되어 질 수 있으나 현재 국내에서는 이에 대한 연구가 미비한 실정이다(조병욱 외, 2006).

따라서 본 연구에서는 지질, 사용인구 등을 고려하여 선정된 마을 상수도 301개소를 대상으로 원수, 물탱크수, 꼭지수 중 라돈 함량 분석을 통하여 라돈의 자연저감율과 그 특성을 조사하였다. 또한 라돈과의 비교를 위해 우라늄(반감기 44.6억년) 분석을 병행하였다.

2. 연구방법

2.1. 조사 지점 선정 및 지질 특성

국내의 연구 결과, 라돈과 우라늄의 함량은 다른 암석에 비해 화성암 계통의 화강암에서 높게 나타나는 것으로 알려져 있다(Table 1). 따라서 본 연구에서는 고함량이 우려되는 화강암, 화강편마암 지역 및 그 주변 지역을 중심으로 급수 인구 100인 이상인 시설 및 급수용량이 큰 지점을 우선적으로 고려하여 전국 12개 광역시·도, 96개 시·군·구의 마을상수도 301개소를 조사 대상 지점으로 선정하였다.

조사 대상 지점의 지질은 한국지질자원연구원의 1:50,000 및 1:250,000 지질도를 이용하여 확인하였는데 주로 시대미상, 쥐라기 및 백악기의 화강암과 선캠브리아기와 시대미상의 (화강)편마암이었으며, 퇴적암(경상도와

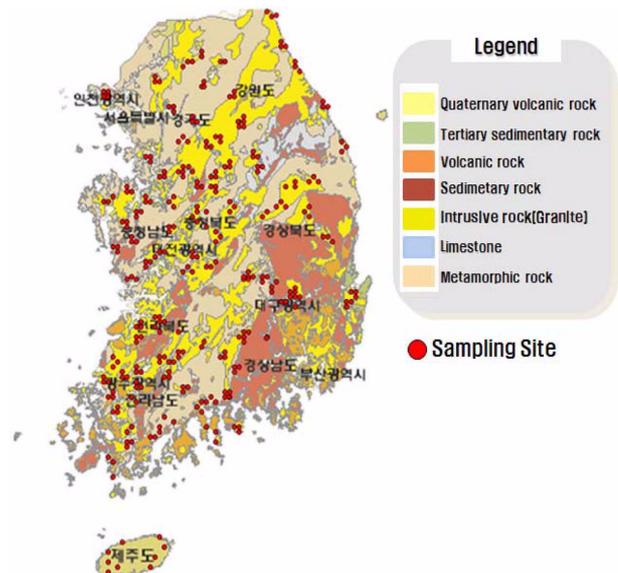


Fig. 1. Location map of the sampling site in this study.

충청북도 일부 지역)과 화산암(제주도 등)도 확인되었다 (Table 2, Fig. 1).

2.2. 시료 채취 및 분석

본 연구를 위해 전국 마을상수도 301개소 지하수 공에 대하여 2008년 4월~2008년 11월 동안 시료 채취를 수행하였다. 조사된 지하수 공들은 대부분 암반관정이며, 시료를 채취하기 전에 3~5분 정도 펌핑하여 전기전도도(EC) 등의 현장수질이 안정화된 후 채수하였다. 물탱크수는 마을의 물탱크에 저장된 지하수를 직접 채수하였으며, 꼭지수는 물탱크에서 배관을 따라 10~1,000 m 떨어진 각 가정집의 수도꼭지 3곳에서 채취하였다. 조사지점 301개소의 원수에서 물탱크까지의 평균 거리는 251 m이었으며,

Table 2. Local geologic setting of sampling sites (N = 301) in this study

| Geologic Age | | Rocks | Mark | Number of sampling sites |
|-------------------|------------------------|----------------------------|-------|--------------------------|
| Cenozoic (10) | Quaternary (9) | Volcanic rocks | Qv | 9 |
| | Tertiary (1) | Sedimentary rocks | Qs | 1 |
| Mesozoic (171) | Cretaceous (62) | Volcanic rocks | Ka | 8 |
| | | Sedimentary rocks | Ks | 11 |
| | | Granite porphyry | Kgp | 2 |
| | | Biotite granite | Kbgr | 20 |
| | | Granite-diorite | kgdp | 2 |
| | | Granite | Kgr | 19 |
| | Jurassic (109) | Sedimentary rocks | Js | 2 |
| | | Biotite granite | Jbgr | 38 |
| | | Two-mica granite | Jtmgr | 5 |
| | | Porphyritic granite | Jpgr | 10 |
| | | Hornblende-biotite granite | Jggr | 4 |
| | | Granite-diorite | Jgdi | 7 |
| | | Granite | Jgr | 43 |
| Paleozoic (9) | Sedimentary rocks | Ps | 5 | |
| | Limestone | ls | 4 | |
| Unknown (45) | Sedimentary rocks | s | 2 | |
| | Biotite granite | gdp | 3 | |
| | Granite | gr | 16 | |
| | Granitic gneiss | grgn | 10 | |
| | Gneiss | gn | 14 | |
| Pre-Cambrian (66) | Metasedimentary rocks | PCs | 4 | |
| | Granitic gneiss | PCkgrgn | 27 | |
| | Banded granitic gneiss | PCbgrgn | 22 | |
| | Gneiss | PCgn | 13 | |
| Total | | | | 301 |

물탱크에서 거리에 따라 3곳으로 분류한 꼭지수 A, B, C 까지의 평균 거리는 각각 224 m, 343 m, 469 m로서 각 꼭지수마다 약 120 m의 간격을 두고 시료를 채취하였다.

라돈 분석을 위해 22 mL 시료 용기에 지하수 시료 8 mL와 섬광용액(Optiphase Hisafe3) 12 mL를 첨가하여 5분 간 잘 흔들어 섞고 3시간 정도 안정화시킨 후 Quantulus™ 1220 LSC(PerkinElmer)를 사용하여 라돈의 방사성 세기를 측정하였다(김용제 외, 2006; 김태승 외, 2007). 또한 라돈 측정의 최적 조건을 결정하기 위하여 희석한 ²²⁶Ra 표준선원용액(NIST SRM 4966)을 넣은 섬광용액 3개를 제조한 후 약 25일 이상 암소에 방치하여 ²²⁶Ra와 ²²²Rn 및 딸핵종들이 연속평형에 도달하도록 하면서 시간 경과에 따른 라돈의 방사성 세기를 측정하였다(Fig. 2). 이 결과, 라돈의 평균 측정효율은 88.07±1.60%이었으며(Table

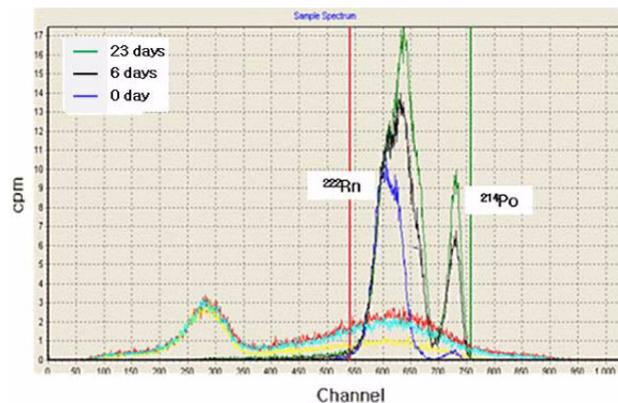


Fig. 2. Spectrum variation of the ²²⁶Ra standard solution with the elapsed time after spiking of samples.

3), 측정효율과 방사성 세기, 분석 시간 등을 이용하여 식 1)에 의해 라돈 함량을 구하였다.

Table 3. Measurement efficiency of ²²²Rn using ²²⁶Ra standard solution

| Std. No. | Efficiency(%) |
|----------|---------------|
| 1 | 86.25 |
| 2 | 88.68 |
| 3 | 89.27 |
| Average | 88.07 ± 1.60 |

$$Rn(dpm/L) = \frac{(Rn)_{total}}{V_s} = \frac{CR}{V_s \cdot \epsilon} \cdot e^{-\lambda_{Rn} T_D} \quad (1)$$

여기서, $V_s(L)$ = volume of sample, ϵ = efficiency, CR = count rate(cpm), λ_{Rn} = constant of radon, T_D = elapsed time (day).

우라늄 분석을 위해 채취한 시료는 셀룰로오스 막필터(0.45 μm)와 진공펌프를 이용하여 부유 물질을 제거한 후 125 mL 시료 용기에 담았으며, 유기 작용, 금속 이온들의 침전이나 용기내의 흡착을 방지하기 위해 현장에서 진한 질산(HNO₃)을 첨가하여 pH를 2 이하로 유지한 후 ICP/MS(HP 7500 Series)로 분석하였다. 이때 기기검출한계는 0.01 μg/L이었다(김태승 외, 2007).

3. 결과 및 고찰

3.1. 지하수 중 원수, 물탱크수, 꼭지수의 라돈과 우라늄 함량

마을상수도 301개소의 라돈 함량 범위는 원수의 경우 3~22,059(평균 2,815) pCi/L이었으며, 이중 미국 환경청의

제안치(AMCL: 4000 pCi/L)의 범위를 초과한 지점은 22.6%(68개소)로 나타났다. 또한 물탱크수 및 꼭지수 A, B, C의 함량 범위는 각각 13~9,381(평균 1,639) pCi/L, 1~8,302(평균 1,549) pCi/L, 5~8,437(평균 1,510) pCi/L, 6~12,362(평균 1,506) pCi/L이었다(Table 4).

우라늄 농도 범위는 원수의 경우 불검출~1,757(평균 14.09) μg/L이었고, 물탱크와 꼭지수 A, B, C의 농도 범위는 각각 불검출~1,443(평균 10.41) μg/L, 불검출~2,107(평균 12.92) μg/L, 불검출~1,764(평균 11.76) μg/L, 불검출~1,391(평균 10.19) μg/L이었다(Table 5).

위에서 보듯이 우라늄은 원수 대비 물탱크수와 꼭지수의 농도에 큰 변화가 없었으나, 라돈의 경우는 원수와 비교하여 물탱크수와 꼭지수에서 각각 약 40% 이상의 감소를 보이는 것으로 나타나 지하수 중 라돈의 자연저감이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

3.2. 라돈의 자연저감

물탱크수와 꼭지수에서 원수 대비 약 40% 이상의 자연저감을 보인 결과와 과거실태조사 결과를(조병욱 외, 2006) 바탕으로 조사된 마을상수도 301개소 중 미국 환경청의 먹는물 제안치(AMCL: 4000 pCi/L)를 초과한 지점 68개소를 6,000 pCi/L 이상(N = 39)과 4,000~6,000 pCi/L(N = 29)로 나누어서 원수에 대한 물탱크와 꼭지수 A, B, C에 대한 라돈의 자연저감에 대해 알아보았다.

3.2.1. 라돈 함량 6,000 pCi/L 이상인 마을상수도 라돈의 함량이 6,000 pCi/L 이상인 마을상수도 39개소

Table 4. Radon concentrations in groundwaters, tank waters and tap waters

| | Groundwater (pCi/L) | Tank water (pCi/L) | Tap water A (pCi/L) | Tap water B (pCi/L) | Tap water C (pCi/L) |
|---------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Min. | 3 | 13 | 1 | 5 | 6 |
| Max. | 22,059 | 9,381 | 8,302 | 8,437 | 12,362 |
| Average | 2,815 | 1,639 | 1,549 | 1,510 | 1,506 |
| Median | 1,802 | 1,090 | 1,027 | 896 | 976 |

Table 5. Uranium concentrations in groundwaters, tank waters and tap waters

| | Groundwater (pCi/L) | Tank water (pCi/L) | Tap water A (pCi/L) | Tap water B (pCi/L) | Tap water C (pCi/L) |
|---------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Min. | ND* | ND* | ND* | ND* | ND* |
| Max. | 1,757.00 | 1,443.00 | 2,107.00 | 1,764.00 | 1,391.00 |
| Average | 14.09 | 10.41 | 12.72 | 11.76 | 10.19 |
| Median | 1.04 | 1.00 | 0.92 | 0.97 | 0.85 |

* ND(Not detected) ≤ 0.01 μg/L

Table 6. The average radon and uranium concentrations, and the estimated natural reduction rates (%) in the sites with 4,000~6,000 pCi/L (N = 29) and > 6,000 pCi/L (N = 39)

| 4,000~6,000 pCi/L (N = 29) | | | | | > 6,000 pCi/L (N = 39) | | | | |
|----------------------------|------------|----------|---------------|--------------------|------------------------|------------|----------|---------------|--------------------|
| Sample | Rn (pCi/L) | U (µg/L) | Distance* (m) | Reduction rate (%) | Sample | Rn (pCi/L) | U (µg/L) | Distance* (m) | Reduction rate (%) |
| Groundwater | 4,936 | 10.81 | 112 | - | Groundwater | 9,086 | 55.67 | 114 | - |
| Tank water | 2,341 | 8.24 | 0 | 52.6 | Tank water | 4,952 | 46.46 | 0 | 45.5 |
| Average Tap water A | 2,291 | 9.45 | 242 | 53.6 | Average Tap water A | 4,381 | 43.17 | 182 | 51.8 |
| Tap water B | 2,233 | 9.18 | 329 | 54.8 | Tap water B | 4,113 | 38.16 | 282 | 54.7 |
| Tap water C | 2,292 | 9.14 | 442 | 53.6 | Tap water C | 4,250 | 42.29 | 362 | 53.2 |

*Average distance from the tank site.

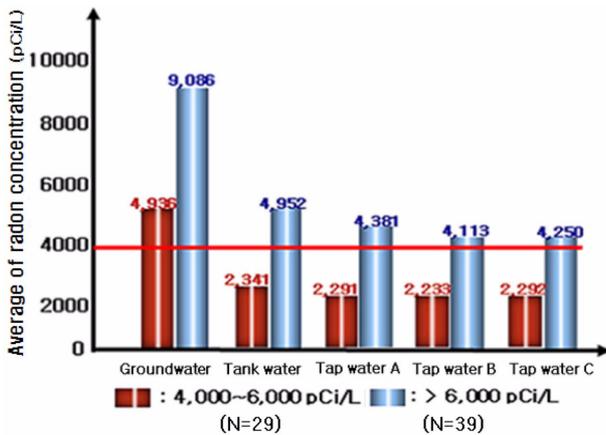


Fig. 3. Average radon concentrations in tank waters and tap waters from groundwaters with high concentrations of radon.

의 원수 중 평균 라돈 함량은 9,086 pCi/L이었고, 물탱크수와 꼭지수 A, B, C는 각각 4,952 pCi/L, 4,381 pCi/L, 4,113 pCi/L, 4,250 pCi/L이었다. 이 지점들의 경우 원수에서 물탱크까지의 평균거리는 약 110 m 정도 떨어져 있었으며, 물탱크와 꼭지수 A, B, C까지의 평균거리는 각각 182 m, 282 m, 362 m이며 꼭지수들 상호간에는 약 100 m 간격으로 떨어져 있었다. 원수에서 물탱크로 이동하면서 라돈의 평균 자연저감율은 약 46%이었고, 물탱크에서 꼭지수로 이동하면서 약 50%까지 감소하였으나 꼭지수의 평균 라돈 함량은 여전히 미국 제안치(USEPA, 2000; 2003)를 초과하는 것으로 나타났다(Table 6, Fig. 3).

3.2.2. 라돈 함량 4,000~6,000 pCi/L인 마을상수도

라돈의 함량이 4,000~6,000 pCi/L인 마을상수도 29개소의 원수 중 평균 라돈 함량은 4,936 pCi/L이었고, 물탱크수와 꼭지수 A, B, C는 각각 2,341 pCi/L, 2,291 pCi/L,

2,233 pCi/L, 2,292 pCi/L이었다. 이 지점들의 경우 원수에서 물탱크까지의 평균거리는 약 110 m 정도 떨어져 있었으며, 물탱크와 꼭지수 A, B, C까지의 평균거리는 각각 242 m, 329 m, 442 m로 꼭지수들 상호간에는 약 100 m의 간격으로 떨어져 있었다. 원수 대비 물탱크수와 꼭지수 중 라돈의 평균 자연저감율은 원수와의 거리 간격에 관계없이 약 50%를 상회하는 수준으로, 물탱크수와 꼭지수의 평균 라돈 함량은 미국의 제안치 이내 감소한 것으로 나타났다(Table 6, Fig. 3).

위와 같이 전국 단위의 마을상수도 중 원수의 라돈 함량이 미국의 제안치를 초과하는 마을상수도를 대상으로 라돈의 자연저감 특성을 조사한 결과, 현재 국내에서 운영되는 마을상수도 시스템에서 지하수 중 라돈의 자연저감율은 약 50% 정도로 나타났으며, 원수의 라돈 함량 정도와는 큰 상관성을 보이지 않았다.

4. 결 론

고휘발성, 짧은 반감기 등에 의한 라돈의 자연저감 특성을 조사하기 위하여 국내 음용 지하수 중 마을상수도 301개소의 원수, 물탱크수 및 꼭지수를 채취하여 라돈 분석을 수행하였으며, 긴 반감기를 가진 우라늄 또한 병행 분석하였다.

마을상수도 301개소에 대한 원수, 물탱크수 및 꼭지수의 분석 결과, 우라늄은 원수 대비 물탱크수와 꼭지수의 농도에 큰 변화가 없었으나, 라돈의 경우 원수와 비교하여 물탱크수와 꼭지수에서 평균적으로 각각 약 40% 이상의 농도 감소를 보이는 것으로 나타나 지하수 중 라돈의 자연저감이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

마을상수도 301개소 중 미국 환경청의 먹는물 중 라돈

제한치를 초과한 68개소를 대상으로 라돈의 자연저감효율에 대해 조사한 결과, 원수 대비 물탱크수와 꼭지수에서 약 50%의 자연저감을 보이고 있었으나, 원수의 라돈 함량 정도와 자연저감효율 간에는 큰 상관성을 보이지 않았다. 따라서 음용 지하수 중 라돈 함량의 자연저감기법 적용은 우선적으로 원수의 라돈 함량 정도에 따라 고려해야 할 것으로 판단된다.

우리나라의 지질 특성상 지하수 중 라돈의 함량이 높게 존재할 수 있어 이에 대한 관리 방안이 시급한 실정이다. 본 연구 결과를 통하여 지하수 원수 중 라돈 함량에 따라 음용 지하수를 대상으로 인위적인 저감시설 없이 자연저감 특성을 이용한 라돈 관리의 가능성을 확인하였으며, 이는 소규모로 운영되는 마을상수도, 소규모급수시설 등을 대상으로 경제성을 고려한 수질 관리 운영이 가능함을 지시한다. 앞으로 원수에서 물탱크까지의 관로 길이, 물탱크 용량, 자연 폭기를 유도하는 원수의 물탱크 유입방법 등 라돈의 자연저감을 증가시킬 수 있는 음용지하수 시설 설계 등에 관한 추가적인 연구가 수행될 예정이다.

사 사

이 연구는 국립환경과학원 ‘지하수 중 방사성물질 함유실태 조사(II)’ 연구(2008-67-1017)의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

김용제, 조수영, 윤윤열, 이길용, 2006, 극 저준위 액체섬광계수기를 이용한 지하수 중 라돈(²²²Rn) 측정법 연구, *지하수토양환경*, **11**(5), 59-66.

김태승, 박종겸, 엄익춘, 윤정기, 정도환, 강기철, 윤대근, 권지철, 2007, 지하수 중 방사성물질 함유실태 조사(I), 국립환경과학원, p. 155.

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, 김대업, 우형주, 정강섭, 조병욱, 이병대, 홍영국, 박중권, 윤욱, 이봉주, 김용제, 윤윤열, 조수영, 이인호, 추창오, 김정숙, 심형숙, 신동천, 장태우, 2000, 지하수 중 방사성물질 함유실태에 관한 조사연구(II), 국립환경과학원, p. 323.

성익환, 조병욱, 우형주, 김대업, 김건한, 박중권, 홍영국, 이병대, 윤욱, 이봉주, 이종철, 윤윤열, 김용제, 정강섭, 조수영, 신동천, 장

태우, 유명진, 2001, 지하수 중 방사성물질 함유실태에 관한 조사연구(III), 국립환경과학원, p. 388.

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.

신동천, 김예신, 문지영, 박화성, 김진용, 박선구, 2002, 지하수 중 자연방사성물질의 위해성 관리에 대한 고찰, *한국환경독성학회*, **7**(4), 273-284.

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

주승환, 제원목, 1995, 라돈방시능과 생활환경, 계측문화사, 288 p.

홍영국, 홍세선, 2001, 국내 일부기반암의 유해 방사성 U, Th, K 함량연구, 2001대한자원환경지질학회, 한국지원공학회, 한국지구물리탐사학회, 대한지질학회총계 공동학술발표회, p. 341-343.

한국지질자원연구원, 1:50,000 한국지질도.

한국지질자원연구원, 1:250,000 한국지질도.

Banks, D., Frengstad, B., Midtgard, A.K., Krog, J.R., and Strand, T., 1998, The chemistry of Norwegian groundwaters: I. The distribution of radon, major and minor elements in 1604 crystalline bedrock groundwaters, *Science of the Total Environment*, **222**, 71-91.

Frengstad, B., 2000, The chemistry of Norwegian groundwater III. The distribution of trace elements in 476 crystalline bedrock groundwaters, as analysed by ICP-MS techniques, *Science of the Total environment*, **246**, 21-40.

Huikuri, P., Salonen, L., and Raff, O., 1998, Removal of natural radionuclides from drinking water by point of entry reverse osmosis, *Desalination*, **119**, 235-239.

Kim, J.H., 1987, Caledonian Ogcheon Orogeny of Korea with special eference to the Ogcheon uraniferous marine black slate. KIGAM report.

Kinner, N.E., Schell, G., Quern, P., and Lessard, C., 1988, Radon removal from drinking water using granular activated carbon, packed tower aeration and diffused bubble aeration techniques.

Przylibski, T.A., Mamont-Ciesla, K., Kusy, M., Dorda, J., and Kozłowska, B., 2004, Radon concentrations in groundwaters of the Polish part of the Sudety Mountains (SW Poland), *Journal of Environmental Radioactivity*, **75**, 193-209.

USEPA, 1999, National primary drinking water regulations; Radon-222 Proposed rule, Federal Register, **64**(211), FR 59246.

USEPA, 2000, National primary drinking water regulations; Radon-222, Federal Register, **64**(211).

USEPA, 2003, National primary drinking water standards, Office of Water, EPA 816-F-03-016.

USGS, 2000, Naturally occurring radionuclides in the ground water of southeastern Pennsylvania, USGS Fact Sheet 012-00.

USGS, 2001, Uranium and radon in ground water in the Lower Illinois River Basin, Water-Resources Investigation Report 01-4056.