

지하수 중 라듐-226의 분석방법 및 환경 특성에 관한 예비 연구

정도환¹ · 김문수¹ · 노회정¹ · 윤윤열² · 김동수¹ · 이영준¹ · 주병규¹ · 홍정기¹ · 김태승^{1*}

¹국립환경과학원

²한국지질자원연구원

A Preliminary Study for the Analytical Method and Environmental Characteristics of Radium-226 in Groundwater

Do Hwan Jeong¹ · Moon Su Kim¹ · Hoe-Jung Noh¹ · Yoon Yeol Yoon² · Dong Soo Kim¹
Young Joon Lee¹ · Byoung Kyu Ju¹ · Jung Ki Hong¹ · Tae Seung Kim^{1*}

¹National Institute of Environmental Research

²Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

ABSTRACT

²²⁶Ra in groundwater could be analyzed by various methods. LSC (liquid scintillation counter) is used to measure its activity of Ba co-precipitates with Hisafe III scintillation cocktail solution. Counting efficiency was obtained using NIST ²²⁶Ra standard solution in triplicate and calculated ²²⁶Ra concentration using the efficiency values. ²²⁶Ra values of 19 groundwaters having gross-α concentrations of more than 5 pCi/L ranged from ND (≤ 0.1 pCi/L) to 1.18 pCi/L. Geologic settings of the 19 areas are composed of granitic rocks of Pre-Cambrian and Jurassic and Cretaceous, gneiss (schist) of Pre-Cambrian, and volcanic rocks of Cretaceous. No relationship was shown among ²²⁶Ra concentrations and in-situ water quality data, and gross-α, uranium, radon concentrations.

Keywords : ²²⁶Ra, LSC, Gross-α, Uranium, Geologic setting

1. 서 론

음용수의 대부분을 지표수에 의존하고 있는 국내의 여건으로 인해 그동안 지하수에 대한 관심은 상대적으로 적었으며, 그중 자연방사성물질에 대한 관심은 다른 위해한 물질에 비해 상대적으로 낮았으나 최근 지하수 중 자연방사성물질에 대한 함유실태 조사 결과에 따라 국민의 건강과 관련하여 관심이 점점 높아지고 있다(김태승 외, 2007; 노회정 외, 2008). 지하수 중 방사성물질은 대부분 인위적인 요소에 의한 것이 아니라 지구의 탄생과 더불어 자연적으로 존재해 오고 있으며 인간에게 피폭되는 연간 방사성 양의 82%는 지질기원의 라듐과 우라늄, 라돈 등 자연방사성 핵종에 의한 것(Egidi, 1997)으로 대부분은 우라늄과 토륨의 붕괴과정에서 방출되며 ²³⁸U→²³⁴Th→²³⁴U→²³⁰Th→²²⁶Ra→²²²Rn→²⁰⁶Pb과 ²³²Th→²²⁸Ra→²²⁸Ac→²²⁸Th→

²²⁴Ra→²⁰⁸Pb의 순으로 붕괴되어진다(Zapczca and Szabo, 1986). 이들 중 라듐은 은백색 금속으로 주로 호흡과 물을 통해 인체에 유입되며 특히 뼈로 이동하여 유해영향을 일으키며 장기간 라듐에 노출되면 빈혈, 백내장, 치아손상과 골육종 등을 유발하고 수개월 후에는 대변과 소변을 통하여 배출된다(신동천 외, 2002; ANL, 2005).

지하수의 라듐 동위원소로는 라듐-226(반감기: 1,622년), 라듐-228(반감기: 5.75년), 라듐-224(반감기: 3.64일)가 있으며 이 중에서 라듐-226이 지배적인 동위원소이다(Almeida et al., 2004). 미국에서는 전알파가 5 pCi/L 이상인 경우 위해성 판단을 위하여 라듐-226과 228을 측정하도록 하였으나(USEPA, 2000), 그 후 전알파의 값에 관계없이 라듐을 측정하도록 하고 있으며 라듐-226과 228의 합이 5 pCi/L가 넘지 않도록 기준을 정하고 있다(USEPA, 2009).

*Corresponding author : tskim99@korea.kr

원고접수일 : 2011. 11. 25 심사일 : 2012. 3. 7 게재승인일 : 2012. 3. 7
질의 및 토의 : 2012. 6. 30 까지

Table 1. Various ²²⁶Ra analytical methods in groundwaters

| Method | EPA903.0 ASTMD2460-07 SM7500-Ra B | EPA903.1 ASTMD3454-05 SM7500-Ra C | EPA904.0 SM7500-Ra D | SM7500-Ra E |
|------------------------|---|--|--|--|
| Analysis -article | Ra-223, Ra-224, Ra-226 | Ra-226 | Ra-228 (Ra-226) | Ra-224 |
| Analysis -principle | After coprecipitation, α coefficient easure | After coprecipitation, Rn-222 (daughter nuclide of Ra-226) measure | After coprecipitation, Ac-228 (daughter nuclide of Ra-228) measure | After coprecipitation, Pb-212 (daughter nuclide of Ra-224) measure |
| Analysis -equipment | Gas-flow proportional Counter (α counter) | Scintillation cell | Gas-flow proportional Counter (β counter) | High resolution germanium detector (HPGe) |

미국 등의 경우 라듐에 대한 시험방법을 가지고 있으며 이에 대해 Table 1에 정리하였다. 과거 라듐-226을 분석하기 위해 널리 쓰인 방법은 라듐방출법으로 이 방법은 Lucas cell 등의 섬광셀을 이용하는 간접정량법이며 정량성이 우수한 장점이 있지만 시료의 양이 많이 필요하고, 측정시 품질관리가 곤란한 단점이 있다(USEPA, 903.1; ASTM, 3454-05; SM, 7500-Ra C). 따라서 정량성은 우수하면서도 시간과 비용이 적게 드는 실험법이 요구된다. 외국의 경우 일부 연구에서 액체섬광계수기를 통한 라듐의 분석이 선행된 바 있으며(Cooper and Wilks, 1981; William and Tai, 1992) 우리나라의 경우도 지하수 중 라듐-226의 시험방법으로 기기 여건 등이 고려된 LSC(액체섬광계수법)에 관한 연구 사례가 있었다(조병욱 외, 2006; 노회정 외, 2008). LSC 분석방법은 시료에서 증발과 침전 등의 과정을 통하여 선택적으로 라듐-226을 추출한 후 섬광용액과 혼합하여 액체섬광계수기로 분석하는 방법으로 정량분석이 가능하며 기기의 분석이 쉬운 편이나, 여러 단계를 거치면서 라듐의 회수와 증식에 시간(약 25일 이상)이 걸리는 단점이 있다.

현재 국내에서는 일부 기관에서만 증발, 침전의 과정을 통한 액체섬광계수기와 지하수 시료를 Marinelli Beaker에 넣은 후 감마핵종분석기로 라듐-226에 대한 분석을 수행하고 있는 실정이다. 액체섬광계수법은 한국지질자원연구원과 국립환경과학원에서, 감마핵종분석법은 한국기초과학지원연구원에서 분석을 하고 있으며 향후 국립환경과학원에서도 감마핵종분석기를 사용하여 라듐을 분석할 예정으로 있다.

이에 본 연구는 라듐-226 분석에 대한 예비연구로써 여러 시험방법 중 기기여건 등을 고려하여 액체섬광계수기를 이용한 방법에 대한 연구를 수행하였다. 또한, 국내 지하수중 자연방사성물질의 실태조사시 전알과의 함량이 5

pCi/L가 넘는 곳에 대해 screening의 개념(USEPA, 2000; 조병욱 외, 2006)으로 라듐-226을 분석하였으며 지질, 현상수질항목과의 관계에 대해서도 알아보았다.

2. 시험방법

2.1. 시료 전처리 및 시험방법

본 연구에서는 기기 여건 등을 고려하여 다양한 라듐 분석방법 중에서 정량분석이 가능하며 기기분석이 비교적 간단한 액체섬광계수법을 선택하였다. 현장에서 채취한 지하수 시료에 대하여 아래에 기술된 단계를 거치면서 시료 중 라듐-226을 회수한 후 액체섬광계수기로 분석하였다(Cooper and Wilks, 1981; 조병욱 외, 2006; 노회정 외, 2008).

- 1) 현장에서 채취한 지하수 1 L에 대해 1000 mL 비커에 옮긴 후 HCl을 첨가하여 pH 0~1로 조절한다.
- 2) 물 시료에 H₂SO₄을 10 mL 첨가한 후 80°C까지 가열한다. 약 1시간 정도 가열한 후 Ba carrier 10 mg(질량으로 환산한 Ba의 양)을 첨가하고 약 2시간 동안 80°C로 가열한 다음 ice/water bath에서 12시간 이상 침전시킨다.
- 3) 비커의 상층용액을 가만히 따른 후 침전물을 포함한 하층의 용액을 40 mL pyrex tube에 옮긴 후 3000 rpm으로 5분 동안 원심 분리한다.
- 4) 원심 분리한 tube의 상층용액을 버리고 남은 침전물에 탈이온수를 첨가하여 세게 혼든다. 상층 용액의 pH가 6~7이 될 때까지 원심 분리를 반복한다.
- 5) 상층용액의 pH가 6~7이 되면 상층용액을 버린 후 K₂CO₃ (50% w/w) 1 mL를 첨가한다.
- 6) 알콜램프를 이용하여 Tube 내의 물질이 thick slurry로 형성될 때까지 하층을 가열한 후 상온에서 식힌다.

- 7) Tube에 탈이온수를 첨가한 후 상층용액의 pH가 약 7이 될 때까지 원심 분리를 수회 반복한다.
- 8) pH가 약 7이 되면 상층의 용액을 버린 후 0.5 M HNO₃ 1 mL를 첨가하여 알콜램프로 가열하여 침전물을 건조시킨다.
- 9) 건조된 시료는 BaRa(NO₃)₂의 형태를 가지며, 이 시료를 8 mL 탈이온수를 사용하여 녹인 후 섬광용액 (Optiphase Hisafe 3) 12 mL가 첨가된 20 mL 계측용기(glass vial)로 옮긴 후 밀봉한다. 시료와 섬광용액이 잘 섞이도록 계측용기를 30회 이상 세게 흔들고 약 25일이 지난 후 ²²⁶Ra와 딸핵종들 간의 방사평형이 이루어지면 LSC(액체섬광계수기)로 측정한다.

현장수질항목과 우라늄, 라돈, 전알파에 대한 분석은 국립환경과학원의 시험방법에 준하여 분석하였다(조병욱 외, 2006; 김태승 외, 2007). 현장수질항목인 수온, pH, EC, Eh, DO는 휴대용 멀티 측정기(Orion multi 5 Star)를 이용하여 현장에서 수질이 안정화된 후 즉시 측정하였다. 우라늄은 Agilent사 7500 Series ICP-MS로 검량선을 작성하여 분석하였고 라돈은 PerkinElmer사 Quantulus™ 1220(LSC, Liquid Scintillation Counter)으로, 전알파는 CANBERRA 사의 Tennelec™ Series 5(GPC, Gas-flow proportional Counter)로 분석하였다.

2.2. ²²⁶Ra 표준선원을 사용한 측정효율과 라듐-226 분석

1 L의 증류수에 ²²⁶Ra 표준선원용액(NIST SRM 4966, 7.4 Bq/g) 1 g을 넣은 후, 위에서 제시한 라듐-226의 시험방법에 의해 ²²⁶Ra의 표준시료를 제조하였다. 이렇게 제조된 시료는 밀봉한 후 암소에서 약 25일 이상 방치하였으며, ²²⁶Ra과 딸핵종들(²²²Rn, ²¹⁴Po, ²¹⁸Po)이 영속평형에 도달 하도록 하면서 시간 경과에 따른 ²²⁶Ra의 방사능의 세기를 측정하였다(Fig. 1).

PSA(Pulse Shape Analysis) 준위 100에서 시간경과별로 총 피크영역(250~800ch)을 측정하였으며 10일이 지난 후에는 약 80% 이상, 20일이 지난 후에는 약 90% 이상, 25일이 지난 후에 딸핵종들이 ²²⁶Ra과 99% 이상 평형 상태에 도달했음을 알 수 있고, 이때의 계수율(cpm)과 ²²⁶Ra 표준선원용액의 dpm을 이용하여 측정효율(ε)을 계산하였다. 재현성을 위해 3개의 시료를 제조하였으며 각각의 측정효율 값을 얻은 후 평균값을 구하여 실제시료 측정효율 값으로 적용하였다(Table 2). 이렇게 얻은 측정효율 값을 바탕으로 식 (1)에 의해 ²²⁶Ra의 방사성세기를 계산하였다.

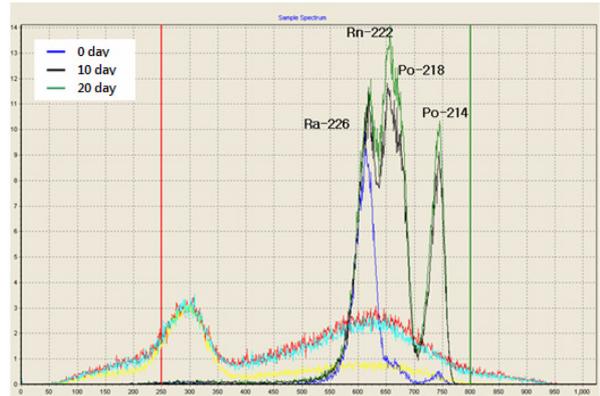


Fig. 1. Spectrum variation of the ²²⁶Ra standard solution with the elapsed time after spiking of samples.

Table 2. Measurement efficiency using ²²⁶Ra standard solution

| Std. No. | Eff(%) -2008 | Eff(%) -2009 | Eff(%) -2010 |
|----------|--------------|--------------|--------------|
| 1 | 83.40 | 66.05 | 94.23 |
| 2 | 78.03 | 67.75 | 89.75 |
| 3 | 81.77 | 59.94 | 102.01 |
| Average | 81.07 ± 2.75 | 64.58 ± 4.11 | 95.33 ± 6.20 |

$$Ra^{226}(Bq/L) = \frac{CR \cdot V_{OT} \cdot 1000}{V_{OC} \cdot F_r \cdot V_s} \tag{1}$$

CR : cpm (LSC)

V_{OT} (ml) : 추출섬광액의 총부피

V_s (ml) : 초기 시료의 부피

V_{OC} (ml) : 계측에 사용된 섬광액의 부피,

F_r : 화학적회수율

3. 결과 및 고찰

3.1. 지하수의 라듐-226 함량 및 지질과의 관계

2008년부터 2010년까지 측정된 지하수의 자연방사성물질 함량 실태조사 929개소 중 전알파의 함량이 5 pCi/L가 넘는 19개소에 대해 라듐-226 분석을 수행하였으며 라듐-226의 함량은 ND(≤ 0.1 pCi/L)~1.26 pCi/L의 범위를 보였다(Table 3). 그 결과 라듐-226의 함량이 5 pCi/L를 넘는 지점은 하나도 없었다.

미국의 North Carolina 지역 117개소 지하수내 라듐 등 자연방사성물질과 지질과의 연관성에 대한 결과에 의하면 편마암, 변성퇴적암, 변성화산암에 비하여 화강암에서 더 높은 함량을 보인다고 하였다(David et al., 2008). 본 연구에서 조사된 전알파의 함량이 5 pCi/L를 넘는 지하수 19개소는 국내의 다양한 지질 중 선캠브리아기, 유

Table 3. Radionuclides and *In-situ* data for groundwaters in the study areas

| Sample No. | data (year) | Ra-226 (pCi/L) | U (µg/L) | Rn (pCi/L) | Gross-α (pCi/L) | T (°C) | pH | Eh (mV) | EC (µS/cm) | DO (mg/L) | Geology |
|------------|-------------|----------------|----------|------------|-----------------|--------|------|---------|------------|-----------|------------------------------|
| Ra-1 | 2008 | 0.49 | 19.90 | 1,909 | 13.71 | 15.3 | 7.13 | 275 | 242 | 4.10 | Jurassic granite |
| Ra-2 | 2010 | ND* | 1.35 | 1,229 | 8.06 | 15.0 | 7.20 | 213 | 167 | 4.32 | Cretaceous andesite |
| Ra-3 | 2008 | 0.26 | 11.31 | 5,395 | 12.36 | 17.0 | 7.11 | 217 | 190 | 2.20 | Jurassic granite |
| Ra-4 | 2010 | 1.18 | 1.57 | 1,525 | 7.66 | 12.9 | 6.80 | 435 | 236 | 3.80 | Pre-Cambrian banded gneiss |
| Ra-5 | 2008 | ND* | 53.36 | 7,446 | 13.78 | 17.0 | 6.89 | 156 | 212 | 5.70 | Jurassic two-mica granite |
| Ra-6 | 2009 | 0.65 | 158.30 | 14,801 | 14.61 | 18.1 | 7.30 | 230 | 269 | 2.90 | Cretaceous biotite granite |
| Ra-7 | 2008 | ND* | 27.76 | 19,773 | 14.88 | 16.5 | 6.85 | 126 | 150 | 3.30 | Cretaceous biotite granite |
| Ra-8 | 2009 | 0.57 | 2.07 | 3,536 | 5.93 | 17.7 | 6.60 | 266 | 252 | 2.76 | Cretaceous biotite granite |
| Ra-9 | 2010 | ND* | 1.78 | 3,937 | 6.58 | 15.4 | 7.44 | 179 | 257 | 3.24 | Pre-Cambrian granitic gneiss |
| Ra-10 | 2009 | 0.21 | 2.71 | 3,178 | 5.58 | 17.8 | 7.47 | 115 | 232 | 1.07 | Pre-Cambrian granite |
| Ra-11 | 2009 | 0.23 | 0.54 | 2,273 | 7.11 | 17.5 | 7.31 | 130 | 237 | 1.15 | Unknown banded gneiss |
| Ra-12 | 2010 | 0.12 | 0.08 | 3,334 | 6.76 | 15.1 | 6.70 | 100 | 134 | 5.90 | Pre-Cambrian schist |
| Ra-13 | 2010 | 0.16 | 10.25 | 3,405 | 10.31 | 14.7 | 6.60 | 454 | 746 | 5.30 | Cretaceous granite-diorite |
| Ra-14 | 2008 | 0.35 | 51.32 | 2,824 | 13.51 | 19.6 | 7.15 | 246 | 382 | 1.80 | Jurassic granite-diorite |
| Ra-15 | 2009 | 0.91 | 1.10 | 5,425 | 6.41 | 18.3 | 7.76 | 118 | 287 | 0.65 | Jurassic hornblende granite |
| Ra-16 | 2008 | ND* | 0.62 | 324 | 14.37 | 19.9 | 7.13 | 159 | 162.3 | 3.70 | Cretaceous andesite |
| Ra-17 | 2009 | 0.34 | 9.70 | 29,222 | 8.03 | 17.1 | 6.62 | 130 | 267 | 2.01 | Cretaceous volcanic rock |
| Ra-18 | 2009 | ND* | 1.23 | 2,139 | 7.56 | 19.2 | 7.41 | 181 | 206 | 3.48 | Cretaceous rhyolite |
| Ra-19 | 2010 | 1.26 | 0.19 | 1,244 | 6.12 | 16.1 | 6.32 | 110 | 143 | 7.25 | Jurassic biotite granite |

ND*: ≤ 0.1 pCi/L

라기, 백악기의 화강암류와 선캠브리아기 편마암(편암) 및 백악기 화산암류 등 일부 지질에서만 나타났으며 이들 중 라듐-226이 검출된 곳은 13개소였다. 조사된 지하수중 유라기 흑운모화강암에서 라듐-226의 최고 함량인 1.26 pCi/L이 나타났으며 유라기와 백악기, 선캠브리아기 화강암과 선캠브리아기 편마암지역 지하수에서 라듐-226이 검출되었으나, 화산암 계통인 안산암과 유문암에서는 전알파의 함량이 5 pCi/L가 넘었으나 라듐-226은 검출되지 않았다. 국내의 다양한 지질과 라듐-226의 상관 관계를 알기 위해서는 추후 더 많은 분석과 지질과의 연관성에 대한 연구가 필요할 것으로 사료되어 진다.

3.2. 라듐-226과 현장수질자료, 자연방사성물질과의 관계

조사된 지하수 19개소에 대한 자연방사성물질과 현장수질에 대한 분석 결과는 Table 3에 나타내었다. 자연방사성물질 함량은 우라늄 0.19~158.30(평균값: 18.69) µg/L, 라돈 324~29,222(평균값: 5,943) pCi/L, 전알파 5.58~14.88(평균값: 9.65) pCi/L를 보였으며 과학원의 실태조사 929개소의 우라늄(9.18 µg/L)과 라돈(2,617 pCi/L)의 평균값에 비하여 높은 값을 보였다(노회정 외, 2008; 김문수 외, 2009; 2010). 현장수질 항목들은 온도 12.9~19.9°C(평균값: 16.9), pH 6.3~7.8(평균값: 7.0), Eh 100~454

mV(평균값: 202), EC 134~746 µS/cm(평균값: 251), DO 0.65~7.25 mg/L(평균값: 3.40)로 나타났으며 국내 일반적인 지하수와 비슷한 경향을 보였다(이종운 외, 1997; 함세영 외, 1999; 고용권 외, 2000; 김건영 외, 2007; 김문수 외, 2009).

13개 지하수의 라듐-226 함량과 현장수질자료 5개 항목(온도, pH, Eh, EC, DO)과의 관계를 도시한 결과 큰 상관성을 보인 항목은 없었다(Fig. 2). Bonotto(2004)의 연구 결과 라듐-226과 라돈-222와의 관계는 $r=0.42$ 를 보였다. 그러나 본 연구에서는 라듐과 자연방사성물질(전알파, 우라늄, 라돈)과의 관계를 도시한 결과 상관성이 나타나지 않았으나(Fig. 3(a), (b), (c)) 라듐의 함량은 높고 우라늄과 라돈의 함량은 비교적 적게 나타난 일부 지점을 빼면 라듐 함량과 우라늄, 라듐과 전알파 함량 사이에 유의한 상관성을 보이기도 하였다(Fig. 3(d), (e), (f)). 그러나 분석 시료의 수가 매우 작아서 상관성을 판단하기에는 부족한 것으로 사료된다.

이 연구는 라듐-226에 대한 분석과 그 결과의 해석에 대한 예비연구로써 국내 일부 지하수(13개소)에서만 분석된 라듐-226으로 지질과 현장수질항목, 자연방사성물질 등과의 상관관계를 살펴 본 바 시료의 수가 매우 작아서 라듐의 특성을 연구하기에는 어려움이 있는바 향후 더 많

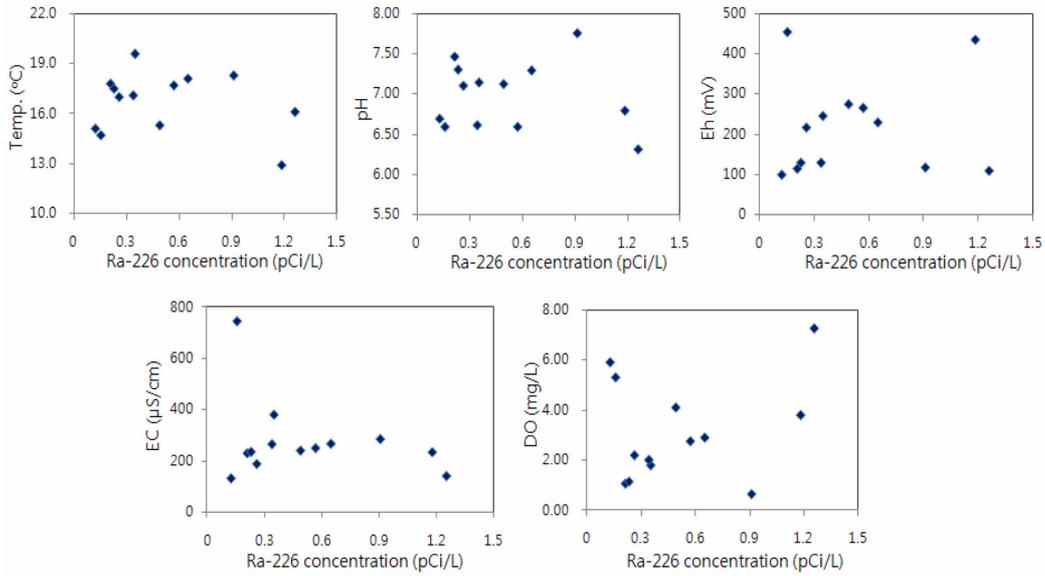


Fig. 2. Plots of Ra-226 versus in-situ water quality (Temp, pH, Eh, EC, DO) in groundwaters.

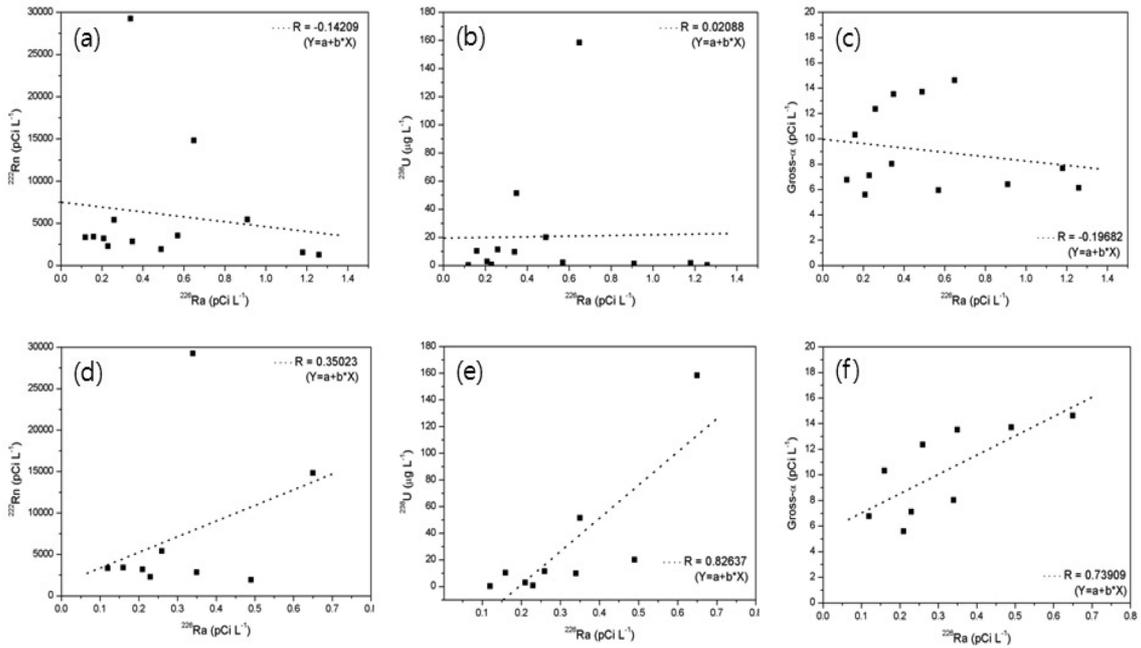


Fig. 3. Plots of Ra-226 versus radionuclides (Gross-α, U-238, Rn-222) in groundwaters.

은 지역과 지하수에 대한 라듐의 분석이 필요할 것으로 사료된다. 이를 위하여 향후 국립환경과학원의 Marinelli Beaker를 사용하는 감마핵종분석기와 본 연구에서 사용되어진 액체섬광계수기간의 비교연구가 수행될 것이며 이를 통하여 국내 라듐 분석방법에 대한 좋은 방향을 제시할 것으로 사료되어진다.

4. 결 론

지하수의 라듐-226에 대한 시험방법과 특성에 대한 예비 연구로써 다양한 라듐-226 분석방법 중 기기 여건 등을 고려하여 정량분석이 가능하고 실험이 비교적 간단한 액체섬광계수법을 이용하였다. ²²⁶Ra 표준선원을 이용하여 계측효율을 구하였으며 이를 통하여 라듐-226을 계산하였

다. 지하수 중 자연방사성물질 함량이 조사된 929개소 중 전알파의 함량이 5 pCi/L가 넘는 지점 19개소에 대한 라듐-226 함량은 ND(≤ 0.1 pCi/L) ~ 1.18 pCi/L의 범위를 보였으며 이들 중 라듐-226이 검출된 곳은 13개소였다. 이들이 위치한 지질은 대부분이 선캠브리아기, 쥬라기, 백악기의 화강암류와 선캠브리아기 편마암(편암)이었다. 지하수의 라듐-226 함량과 현상수질자료, 자연방사성물질 사이에는 상관성이 없는 것으로 나타나나 라듐의 함량은 높고 우라늄과 라돈의 함량은 비교적 적게 나타난 일부 지점을 빼면 상관성을 보이기도 하였다.

사 사

이 연구는 국립환경과학원의 3차 ‘지하수 중 방사성물질 함유실태 조사’ 연구(2007~2016) 계획의 일환으로 수행되었다.

참 고 문 헌

- 고용권, 김천수, 배대석, 이동익, 2000, 문경지역 심부지하수의 수리화학 및 환경동위원소 연구, 지하수토양환경, **33**(6), 469-489.
- 김건영, 고용권, 배대석, 원종호, 정도환, 최병영, 2007, 경북 영천 지역 지하수의 지구화학 및 환경동위원소 연구, 지하수토양환경, **12**(4), 32-50.
- 김문수, 유순주, 김동호, 윤정기, 노회정, 정혜성, 정동일, 정도환, 주병규, 임태숙, 박이훈, 홍상규, 2009, 지하수 중 자연방사성물질 함유실태 조사(III), 국립환경과학원, p. 227.
- 김문수, 이영준, 유순주, 김동호, 노회정, 김혜진, 정혜성, 유지영, 한진석, 정동일, 정도환, 주병규, 박이훈, 홍정기, 장미진, 2010, 지하수 중 자연방사성물질 함유실태 조사연구('10), 국립환경과학원, p. 179.
- 김태승, 박종겸, 엄익춘, 윤정기, 정도환, 강기철, 윤대근, 권지철, 2007, 지하수 중 방사성물질 함유실태 조사(I), 국립환경과학원, p. 155.
- 노회정, 김태승, 박종겸, 윤정기, 김문수, 정일록, 정도환, 주병규, 전상호, 심영은, 백용욱, 2008, 지하수 중 방사성물질 함유실태 조사(II), 국립환경과학원, p. 195.
- 신동천, 김예신, 문지영, 박화성, 김진용, 박선구, 2002, 지하수 중 자연방사성물질의 위해성 관리에 대한 고찰, 한국환경독성학회지, **17**, 273-284.
- 이종운, 전효택, 전용원, 1997, 국내 화강암질내 심부지하수의 지구화학적 특성, 지하수토양환경, **4**(4), 199-211.
- 조병욱, 김건한, 김연기, 성익환, 안주성, 윤욱, 윤윤열, 이길용, 이병대, 이홍진, 임현철, 조수영, 홍영국, 2006, 지하수 중 방사성물질 함유실태 조사, 국립환경과학원, p. 200.
- 합세영, 조명희, 성익환, 이병대, 조병욱, 심형수, (1999) 부산남부지역 지하수와 서북부지역 지하수의 수리화학적 특성 비교, 지하수토양환경, **6**(3), 140-151.
- Almeida R.M.R., Lauia D.C., Ferreira A.C., and Sracek O., 2004, Groundwater radon, radium and uranium concentrations in Região dos Lagos, Rio de Janeiro State, Brazil., *Journal of Environmental Radioactivity*, **73**, 323-334.
- ANL (Argonne National Laboratory), 2005, radium Human Health Fact Sheet, August 205, ANL.
- ASTM, 1997, D3454-05, Standard Test Method for Radium-226 in Water.
- ASTM, 2000, D2460-97 Standard Test Method for Alpha-Particle-Emitting Isotopes of Radium in Water.
- Cooper M. B. and Wilks M. J., 1981, An analytical method for Radium(^{226}Ra) in environmental samples by the use of liquid scintillation counting, ARL/TR040, ISSN 0157-1400.
- David S. Vinson, Avner Vengosh, Daniella Hirschfeld, Gary S. Dwyer., 2008, Relationships between radium and radon occurrence and hydrochemistry in fresh groundwater from fractured crystalline rocks, North Carolina (USA), *Chemical Geology*, **260**, 159-171.
- Bonotto, D.M., 2004, Doses from ^{226}Ra , ^{226}Ra , and ^{226}Ra in groundwater from Guarani aquifer, South America, *Journal of Environmental Radioactivity*, **76**, 319-335.
- Egidi P., 1997, Introduction to naturally occurring radioactive material, 42nd Annual Meeting of the Health Physics Society, p. 48.
- Standard Method, 21st Edition, 2005, SM7500-Ra B, C, D, E.
- USEPA, 1980, Method 903.1 Radium-226 in Drinking Water (Radon Emanation Technique).
- USEPA, 1980, Method 904.0 Prescribed procedures for measurement of radioactivity in drinking water.
- USEPA, 2000, National Primary Drinking Water Regulation; Radionuclides; Final Rule.
- USEPA, 2009, National Primary Drinking Water Regulation MCL Booklet.
- William C. Burnett, and Wei Chieh. Tai, 1992, Determination of Radium in natural Waters by cy Liquid Scintillation, *Anal. Chem*, **64**, 1691-1697.
- Zapezca O.S. and Szabo Z., 1986, A physiologically based assessment of human exposure to radon released from groundwater, *Chemosphere*, **54**, 639-645.