

강화도의 지질별 지하수 중 자연방사성 물질의 특성

김익현¹ · 김문수^{1*} · 함세영² · 김현구¹ · 김동수¹ · 조성진¹ · 이현민¹ · 황종연¹ · 조훈제¹ · 박선화¹ · 정현미¹

¹국립환경과학원, ²부산대학교 지질환경과학과

Characteristics of Naturally Occurring Radioactive Materials in Groundwater from Aquifers Composed of Different Geological Settings in Ganghwa Island

Ikhyun Kim¹, MoonSu Kim^{1*}, Se-Yeong Hamm², Hyunkoo Kim¹, Dongsoo Kim¹, Seongjin Jo¹, Heonmin Lee¹, Jongyeon Hwang¹, Hunje Jo¹, Sunhwa Park¹ and Hyenmi Chung¹

¹National Institute of Environmental Research

²Dept. of Geological Sciences, Pusan National University

(Received: 5 February 2018 / Accepted: 27 February 2018)

Groundwaters in different rock types (Mesozoic granite, Precambrian gneiss, and schist) of Ganghwa island, Incheon City were characterized by using naturally occurring radioactive materials (NORM) and hydrogeochemical constituents. For the study, groundwater samples from 69 wells had been collected over eight years. Statistical methods were applied to relate hydrogeochemical components and NORM in the groundwater samples. The groundwater samples belonged to Ca(Na)-HCO₃ types. The uranium concentrations in three groundwater samples exceeded 30 ug/L of United States Environmental Protection Agency (US EPA) maximum contaminant level (MCL). The radon concentrations in 28 groundwater samples exceeded 4,000 pCi/L (picocuries per Liter) of US EPA alternative maximum contaminant level (AMCL). Gross-alpha in all the groundwater samples did not exceed 15 pCi/L of US EPA MCL. The average concentrations of uranium and radon in groundwater were the highest in granite area, and then gneiss, schist areas in order. In schist area, the correlation coefficient (*R*) between radon and HCO₃ is -0.40 and *R* between uranium and SO₄ is 0.54. In gneiss area, the *R* between radon and uranium is 0.55 and the *R* between uranium and SO₄ is 0.41. According to factor analysis, each geological area shows different chemical characteristics. The statistical analysis of whole groundwater resulted in nearly no significant relationship among uranium, radon and chemical constituents. Subsequently, more detailed studies on hydrogeological, geochemical, and geological characteristics related to NORM are required to better understand the behavior and fate of NORM.

Key words : naturally occurring radioactive materials, groundwater, geological setting, statistical analysis, factor analysis

인천시 강화도의 지질별(중생대 화강암, 선캄브리아 편마암, 편암) 지하수의 자연방사성 물질과 수리지화학 성분의 특성을 연구하였다. 이 연구를 위하여, 8년 동안 69개 관정에서 지하수 시료를 채수하였다. 통계 분석을 이용하여 지하수의 수리지화학 성분과 자연방사성 물질의 관계를 분석하였다. 연구 지역 지하수의 수질유형은 Ca(Na)-HCO₃ 형으로 나타났다. 우라늄은 3 개 지하수 시료에서 US EPA의 MCL(최대 오염 물질 수준)인 30 ug/L을 초과하였다. 라돈은 28개 지하수 시료에서 US EPA의 제안치인 AMCL(대체 최대 오염 물질 수준)인 4,000 pCi/L을 초과하였다. 모든 지하수 시료의 전알파(Gross-alpha)는 US EPA MCL인 15 pCi/L를 초과하지 않았다. 지하수에서의 우라늄과 라돈의 평균농도는 화강암에서 가장 높고, 그 다음으로 편마암, 편암의 순이다. 편암 지역의 라돈은 HCO₃와 -0.40, 우라늄은 SO₄ 과 0.54의 상관계수를 보였고, 편마암 지역의 경우 라돈은 우라늄과 0.55, 우라늄은 SO₄ 과 0.41의 상관계수를

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided original work is properly cited.

*Corresponding author: hyd009@korea.kr

보였다. 요인분석에 의하면, 지질별로 각각 다른 거동특성을 가진다. 전체 지하수의 통계 분석 결과, 우라늄과 라돈 그리고 지하화학 성분들 간에는 대체로 특이한 상관성을 나타내지 않았다. 자연방사성 물질의 거동과 운명을 보다 명확하게 이해하기 위해서는 자연방사성 물질의 수리지질학적, 지구화학적, 지질학적 특성에 대한 보다 상세한 연구가 요구된다.

주요어 : 자연방사성 물질, 지하수, 지질환경, 통계 분석, 요인분석

1. 서 론

지하수 내 우라늄과 라돈 등 자연방사성물질은 물-암석 상호작용에 의해 존재하게 된다. 라돈은 발암물질로서 섭취 시 폐암 발병률을 증가시킨다. 라돈 가스는 물이나 암석에서 쉽게 방출되어 사람에게 노출된다. 우라늄과 토륨의 방사성붕괴로 발생하는 라돈 동위원소는 ^{222}Rn , ^{220}Rn , ^{219}Rn 이 있다. 우라늄은 방사성 물질로써의 위험성보다는 중금속으로써 신장에 오랜 기간 축적되면 유해한 것으로 알려져 있다(WHO, 2011). 인간 활동 시, 신체 내·외부에 조사(照射)되는 방사능원소의 방사선량이 높을 경우 건강에 악영향을 미친다.

국외에서는 1960년대부터 미국이 약 20만개 이상의 지하수를 대상으로 자연방사성 물질을 연구하였고, 캐나다(15,000개 이상), 스웨덴(40,000개 이상), 핀란드(30,000개 이상) 등에서 자연방사성 물질을 연구하였다(USGS, 1962; Health Canada, 1968; Wrenn *et al.*, 1975; Arvela *et al.*, 1979; Hess *et al.*, 1985). 또한 이들의 연구결과에 의하면 자연방사성물질은 변성암, 퇴적암, 화산암 지역의 지하수보다 화강암 지역의 지하수에서 더 높은 함량을 가지는 것으로 보고되었다(Wathen, 1987; Wilhelm *et al.*, 1977; Cothorn and Rebers, 1990; Banks *et al.*, 1998; Bonotto, 2006; David *et al.*, 2009; 국립환경과학원, 2008).

국립환경과학원('99~'02, '06, '07, '08)은 지질 분포에 따라 지하수의 자연방사성 물질을 연구하였으며, 그 함량은 심성암(화강암 등)에서 가장 높고 변성암(화강편마암 등), 퇴적암, 화산암의 순으로 낮아지는 것으로 나타났다(국립환경과학원, 2009). 따라서 국내 각 지역의 지질별로 우라늄과 라돈의 분포가 다르다는 결과를 바탕으로 중장기적인 자연방사성 물질의 조사연구 및 관리방안을 마련할 필요가 있다. 그리고 환경부 국립환경과학원에서 운영 중인 토양지하수정보시스템(SGIS)에 조사된 자료의 데이터베이스(DB)를 구축 중에 있다.

본 연구는 강화도의 암종에 따른 지하수중 자연방사성물질(우라늄, 라돈, 전알파) 분포 특성을 파악하고, 자연방사성물질과 주요 용존이온의 수리지화학적 상관성을 규명하기 위한 것이다. 이를 위해 강화도 지하수의

현장 수질 측정, 주요 용존이온 분석, 자연방사성물질을 분석했다.

2. 지질 및 수리지질

연구지역인 강화도의 중심부와 동부에는 흑운모편마암 및 화강편마암이 넓게 분포하며, 편암류는 강화도 남부 및 북부 양사면, 송해면 일대에 분포한다. 중생대 화성암류(화강암, 화산암)는 강화도 서부 일대에 분포하고 있다(Hwang *et al.*, 2005; Fig. 1). 경기육괴의 북서부에 위치하는 연구지역은 선캄브리아기 암석을 기반암으로 하고 이를 관입한 중생대 화성암류로 크게 나눌 수 있다. 선캄브리아기 암석은 경기변성암복합체의 흑운모편마암, 이를 부정합으로 덮는 편암류와 전체를 관입하는 화강편마암으로 구성된다. 중생대 화성

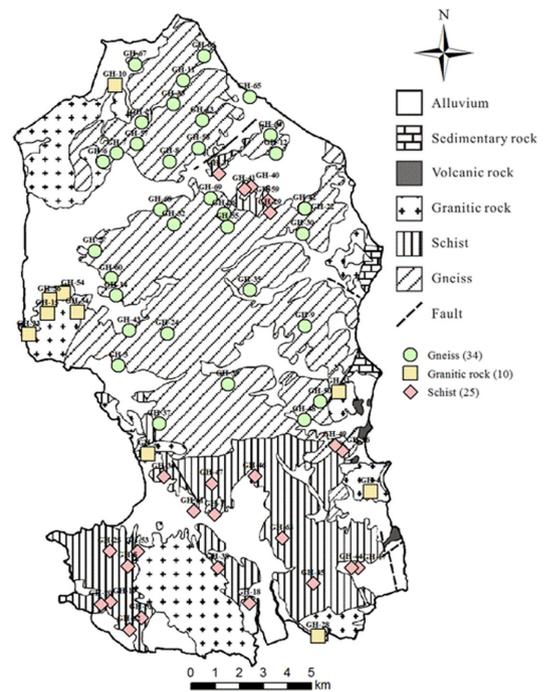


Fig. 1. Sampling sites on the geological map of the study area (Hwang *et al.*, 2005).

암류는 반상후운모화강암, 중립질후운모화강암, 각섬석 화강섬록암, 세립질후운모화강암 순서로 관입했다. 반상후운모화강암과 중립질후운모화강암은 쥐라기 대보 화강암에 속하며, 각섬석화강섬록암과 세립질후운모화강암은 백악기 불국사 화강암에 속한다. 그리고 이들을 산성 암맥류들이 관입하며, 이 모든 지층을 부정합으로 제4기 충적층이 피복한다.

본 연구에서는 먹는물로 이용되는 강화도 마을상수도 69개소의 지하수를 조사하였다. 암석에 따라 지하수 관정을 분류하면 화강암 지역 10개소, 편암 지역 25개소, 편마암 지역 34개소로 나타났다. 이를 지질시대에 따라 분류하면 선캄브리아기 59개소, 중생대 쥐라기 10개소로 나타났다. 모든 편마암과 편암 지역은 선캄브리아기이며, 모든 화강암 지역은 쥐라기이다.

3. 연구방법

3.1. 시료채취 및 전처리

연구대상 지역 마을상수도의 지하수 관정에서 물시료를 8년(08~15, 국립환경과학원)간 채취하였다. 지하수의 현장시료 채취, 보관방법, 분석은 국립환경과학원에서 발간한 지하수 중 자연방사성 물질 함유실태 조사 연구보고서에 제시된 시험방법(안)에 준하여 수행했다(국립환경과학원, 2008).

시료 채취 및 전처리는 모두 현장에서 진행했고, 충분히 양수 후 지하수가 안정화 된 후 시료를 채취했다. 지하수의 주요 양·음이온과 우라늄 분석을 위하여 0.45 μm 의 공극을 갖는 membrane filter에 시료를 여과하여 부유물질을 제거한 후 125 mL polyethylene bottle에 각각 담았다. 양이온과 우라늄 시료에는 용존이온의 흡착과 공침을 방지하고자 농질산 1 mL를 첨가했다. 라돈 분석용 시료는 22 mL PE 용기에 Optiphase Hisafe3 각테일 용액 12 mL와 지하수 시료 8 mL를 첨가하여 잘 흔들어 섞어줬다. 이 때 지하수 시료는 라돈의 휘발이 일어나지 않게 조심해서 채수하였다. 그 후 3시간동안 안정화 시킨 후 방사평형을 이룬 뒤에 분석했다. 전알과 시료는 1 L PE 채수통에 가득 채우고 1N 질산 15 mL를 첨가했다.

3.2. 현장 수질과 주요 수리지화학 성분 분석

현장수질은 지하수를 충분히 토출시켜 안정화한 후에 측정했다. 현장에서 측정한 수질항목은 온도, pH, 산화-환원전위(Eh), 전기전도도(EC), 용존산소(DO)와

중탄산(HCO_3)이다. 다항목수질측정기(Orion 5 star)를 이용해 측정했고, 중탄산(HCO_3)은 0.05 N의 HCl로 산중화적정법을 통해 구했다.

채취된 물 시료는 분석하기 전까지 0 ~ 4 °C에서 냉장 보관했다. 지하수의 특징 및 유형을 알아보기 위해 양·음이온 등 일반수질을 분석했다.

양이온 시료 분석은 Horiva & Yvon (Kyoto, Japan)사의 ULTIMA2 Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP-OES, 유도결합플라즈마 원자방출광도계), Varian사의 720-ES ICP-OES, 280 FS Atomic absorption spectroscopy (AAS, 원자 흡수 분광광도기)를 이용했다. 음이온은 Metrohm사의 850 Professional Ion Chromatography (IC, 이온크로마토그래피)를 이용했다.

3.3. 자연방사성물질 분석

3.3.1. 우라늄 분석

우라늄 분석은 Fluorometric법, inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS)법, Radiochemical 법, Laser Phosphorimetry법 등 여러 가지 방법으로 적용 가능하다. 국내의 경우 2015년에 환경부에서 먹는물의 우라늄 기준을 강화한 먹는물 수질기준 및 검사 등에 관한 규칙 일부개정령을 공포 시 우라늄은 ICP-MS법으로 분석토록 하였다. 따라서 본 연구의 우라늄 분석에는 Agilent사의 7500 Series ICP-MS(유도결합플라즈마 질량분석기)가 사용되었다.

3.3.2. 라돈 분석

United States Environmental Protection Agency (US EPA)는 액체섬광계수법과 De-emanation법을 물 중 라돈 분석법으로 제안했다. 이 방법 중 액체섬광계수법이 더 정밀하고 경제적이다(김동수, 2014). 따라서 본 연구의 라돈 분석 시, PerkinElmer사의 Wallac QuantulusTM 1229 Ultra low level liquid scintillation counter (ULL LSC, 액체섬광계수기)를 사용했다. 계측효율 값을 산정하기 위해 ^{226}Ra 표준선원용액(NIST SRM 4966)을 이용하였다. 효율측정을 위한 시료는 섬광용액 12 mL가 든 22 mL vial에 라돈을 완전히 제거한 증류수 8 mL와 ^{226}Ra 표준선원용액을 희석시킨 표준용액(14.35 Bq/g)을 넣은 후 밀봉하여 준비한다. 준비된 시료는 암소에서 약 25일 이상 방치하여, ^{226}Ra 와 ^{222}Rn 및 딸핵종들이 영속평형에 도달하도록 하면서 시간 경과에 따른 라돈의 방사능을 측정하였다.

12 mL의 섭취용액에 ^{226}Ra 표준용액 8 mL를 취한 시료들에 대해서, Pulse Shape Analysis (PSA) 준위 100에서 시간경과별로 총 피크영역을 측정하였으며 23일이 지난 후에 딸핵종들이 ^{226}Ra 과 99% 이상 평형 상태에 도달했음을 알 수 있고, 이때의 계수율을 이용하여 얻은 ^{222}Rn 의 측정효율(ϵ)은 시료제조 후 방치시간에 따른 ^{226}Ra 의 방사평형을 고려하여 식 (1)에 의해 계산하였다(Kim *et al.*, 2006). 3개의 제조 시료에 대해 각각의 측정효율 값을 얻은 후 평균값을 구하여 실제시료 측정효율 값으로 적용했다.

$$\epsilon = \frac{R^* - R_0}{A_s(1 - e^{-\lambda t}) \times 60} \quad (1)$$

λ : ^{222}Rn 붕괴상수(0.182/일)

t : 채취 시부터 측정시간까지의 경과시간(일)

A_s : 표준선원의 방사능(Bq)

R^* : α -선의 총 피크영역 계수율(cpm)

R_0 : α -선의 총 피크영역에서의 백그라운드 계수율(cpm)

라돈의 방사능 세기는 식 (2)로 계산된다.

$$Rn(dpm/L) = \frac{(Rn)_t}{V_s} = \frac{CR}{V_s \cdot \epsilon} \cdot e^{-\lambda_{Rn} T_D} \quad (2)$$

V_s : 시료의 부피 (L)

$(Rn)_t$: 라돈의 계측수

ϵ : 측정효율

CR : 계수율 (cpm)

λ_{Rn} : 라돈의 붕괴상수

T_D : 시료채취 후 계측개시 시점까지의 경과시간 (day)

3.3.3. 전알파 분석

전알파 분석법에는 gas-flow proportional counter (GPC, 기체흐름비례계수기법)과 액체섬광계수법이 이용된다. 본 연구에서는 전알파 분석을 위해 기체비례계수기법을 이용했다. 기체비례계수기법의 물 중 Gross α/β 측정에 관한 US EPA분석법(EPA 900.0)은 증발-건조시킨 시료를 gas-flow 형의 비례계수기로 측정하는 방법으로 시료분석에 장시간이 소요되는 등의 단점을 가지고 있다. 하지만 인가전압을 달리 함으로써 α/β 분리측정이 가능하고 감도가 우세한 장점을 가지고 있다(김동수, 2014). 전알파는 현장에서 채취한 시료 1L를 Total Dissolved Solution (TDS)가 10 ~ 100 mg 사이에 오도록 적당량 분취한 후 planchet에 증발-농축하

여 방사평형을 위한 안정화를 거친 뒤에 CANBERRA사의 TennelecTM Series 5 XLB를 이용해 분석했다.

계측효율 값을 산정하기 위해 TDS의 양을 10 ~ 100 mg사이의 임의의 값으로 조절시키면서 변화시켰다. 표준용액은 NIST 4321 우라늄 추적자용액이며, TDS 용 시료에 766 dpm으로 희석한 표준용액을 1 mL씩 떨어뜨렸다. 총 6개의 각각 다른 TDS를 갖는 측정용 planchet에 대해 20분씩 5회 반복하여 효율곡선을 구하였다. 계측된 알파의 계측수를 얻어 다음과 같은 정량식 (3)에 의해 방사능을 계산하였으며 전알파의 최소검출한계(minimum detectable activity, MDA)는 식 (4)에 의해 계산했다(Currie, 1968; 국립환경과학원, 2008; Jeong *et al.*, 2011).

$$A(pCi/L) = \frac{A \times 1000}{2.22 \times C \times V} \quad (3)$$

A : 총 알파 계수율

C : 알파 효율 계수 (플란켓의 cm^2 면적 당 고형물 mg의 효율 그래프 판독)

V : 시료의 부피(mL)

2.22 : dpm/Ci 환산 계수

$$MDA(pCi/L) = \frac{4.65 \times \sqrt{BKG_\alpha}}{2.22 \times \sqrt{T} \times E_\alpha \times V} \quad (4)$$

4.65 : 쌍 관찰 상수

BKG_α : 백그라운드 계수 (cpm)

T : 계측시간 (min)

E_α : 측정효율

V : 시료의 부피 (L)

2.22 : dpm/Ci 환산 계수

4. 연구결과

4.1. 현장수질 항목결과 및 주요 수리지화학성분

본 연구의 지하수 시료의 현장 수질 항목 결과 및 주요 수리지화학성분에 대한 통계자료는 Table 1에 정리했다.

파이퍼 다이어그램 (Piper diagram)에 주요 성분을 도시하여 지하수의 수질유형을 해석한 결과(Fig. 2), 연구 지역의 지하수는 전체적으로 Ca(Na)-HCO₃ 유형의 지하수의 특징을 보인다. Na는 넓은 범위에서 나타나며, 음이온은 HCO₃이 가장 풍부하며, SO₄는 Cl에 비

Table 1. Statistical charts of in-situ groundwater qualities, major anion and cation of groundwater based on rock types

<A: Granitic Rock> (mg/L)					
n = 10	Min.	Max.	Avg.	Med.	Stdev.
Temp.(°C)	14.0	17.1	15.3	15.4	1.1
pH	6.2	7.4	6.8	6.8	0.3
Eh(mV)	196	347	246	238	42
EC(μS/cm)	82	820	245	195	212
DO(mg/L)	3.3	6.4	4.7	4.8	1.0
Si	9.2	30.5	14.4	12.9	6.8
Na	3.8	26.2	11.9	9.1	8.2
K	0.2	5.0	2.1	1.5	1.5
Mg	0.0	5.4	2.6	2.5	1.5
Ca	9.5	56.3	22.1	16.9	14.0
F	0.1	1.3	0.4	0.3	0.4
Cl	4.1	87.5	21.6	12.0	25.0
SO ₄	1.2	15.0	7.2	7.2	4.7
NO ₃	2.8	27.0	11.7	9.6	8.2
HCO ₃	30.5	91.5	60.7	61.0	19.8
<B: Schist> (mg/L)					
n = 10	Min.	Max.	Avg.	Med.	Stdev.
Temp.(°C)	12.6	15.6	14.2	14.2	0.7
pH	6.5	7.9	6.9	6.8	0.4
Eh(mV)	154	370	246	261	52
EC(μS/cm)	110	567	257	241	106
DO(mg/L)	1.4	6.5	4.3	4.2	1.5
Si	1.2	20.3	10.4	9.7	4.2
Na	1.7	23.6	10.2	9.9	5.2
K	0.1	4.7	2.2	2.4	1.3
Mg	0.3	14.5	5.2	4.3	3.3
Ca	2.1	43.0	23.3	22.4	10.0
F	0.0	0.9	0.1	0.1	0.2
Cl	2.9	41.5	15.6	15.0	10.3
SO ₄	0.2	17.9	6.6	5.3	5.0
NO ₃	0.4	81.1	25.8	24.6	23.1
HCO ₃	9.2	115.9	67.7	73.2	23.0
<C: Gneiss> (mg/L)					
n = 10	Min.	Max.	Avg.	Med.	Stdev.
Temp.(°C)	11.7	19.4	14.7	14.3	1.6
pH	6.3	7.9	6.9	6.8	0.4
Eh(mV)	103	591	254	227	113
EC(μS/cm)	68	635	240	212	137
DO(mg/L)	1.4	6.5	4.1	4.3	1.5
Si	7.0	22.3	11.5	11.3	3.2
Na	2.8	25.9	11.2	10.2	5.7
K	0.1	7.4	2.4	1.8	1.6
Mg	0.3	22.3	3.9	2.5	4.0
Ca	6.3	52.9	21.1	19.6	10.8
F	0.0	1.6	0.3	0.3	0.3
Cl	2.7	39.9	14.4	11.3	10.9
SO ₄	2.5	38.9	9.9	8.4	7.9
NO ₃	1.4	41.9	14.0	14.0	10.8
HCO ₃	24.0	198.3	71.3	64.1	35.5

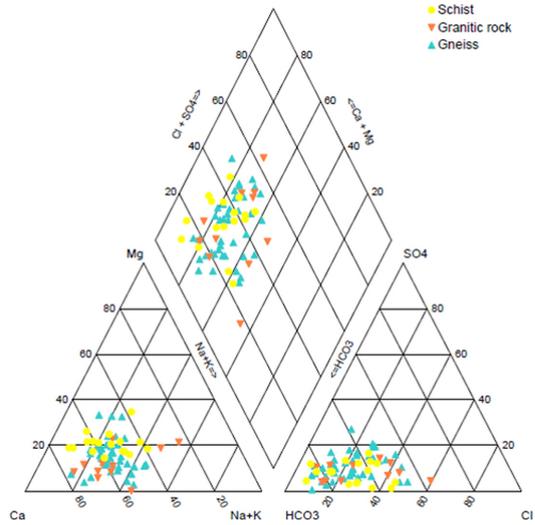


Fig. 2. Various groundwater types on the piper diagram.

해 좁은 범위를 보인다. 편암 지역의 지하수의 경우 화강암과 편마암 지역에 비해서 Mg이 더 풍부한 것이 특징이다.

4.2. 자연방사성물질의 함량

4.2.1. 우라늄

본 연구 지역 지하수의 우라늄 함량에 대한 통계자료는 Table 2에 정리했다. 전체 지하수의 우라늄 함량은 0~72.21 μg/L (평균 5.64 μg/L, 중앙값 1.08 μg/L)의 범위를 보인다. 일부 지하수의 우라늄 함량이 상대적으로 높게 검출되어 중앙값에 비하여 평균값이 높게 나타났다. 우라늄의 먹는 물 수질기준인 30 μg/L 을 넘는 지하수는 3개소로 나타났다(Fig. 3). 암질별로 각각 북운모화강암 지역 1개소, 흑운모화강암 지역 1개소, 흑운모 편암 지역 1개소이다.

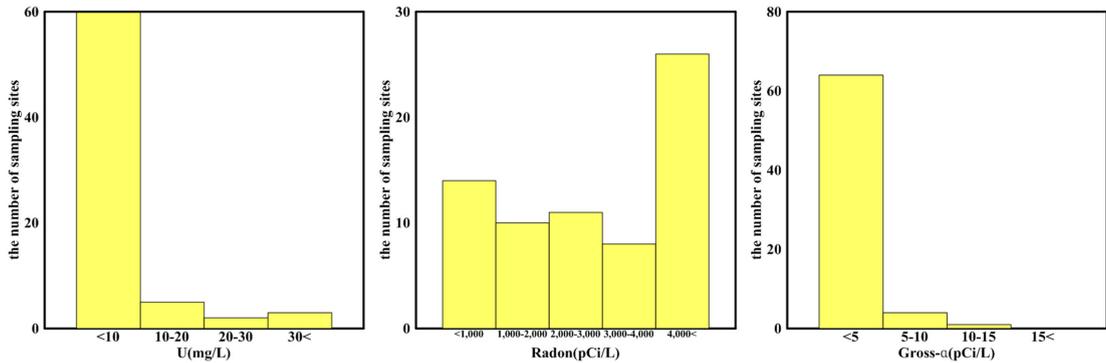
화강암 지역 지하수의 우라늄 함량은 0.13~49.18 μg/L (평균 10.59 μg/L, 중앙값 2.84 μg/L), 편암 지역은 0~72.21 μg/L (평균 4.79 μg/L, 중앙값 0.59 μg/L), 편마암지역은 0.09~28.78 μg/L (평균 4.82 μg/L, 중앙값 1.81 μg/L)의 범위로 각각 분석됐다. 편암 지역에서 검출된 우라늄 함량의 범위가 가장 넓으나 평균값과 중앙값은 화강암 지역이 가장 높고 편마암, 편암 지역 순으로 높게 나타났다. 일부 고농도 지하수를 제외하면, 대부분 매우 낮은 범위에 집중되어 있다.

Dahlkamp(2013)는 암종별 평균 우라늄 농도는 화강암, 편마암, 퇴적암 순서로 높다고 발표하였다. 이는 본

Table 2. Statistics of uranium values in groundwater based on the rock types

	Total (n=69, µg/L)	Granitic rock (n=10, µg/L)	Schist (n=25, µg/L)	Gneiss (n=34, µg/L)
Min.	ND	0.13	ND	0.09
Max.	72.21	49.18	72.21	28.78
Avg.	5.64	10.59	4.79	4.82
Med.	1.08	2.84	0.59	1.81
Stdev.	12.2	17.3	14.7	7.6

※ N.D. : not detected, less than 0.01 µg/L

**Fig. 3.** Bar charts of uranium, radon, gross-α concentrations distributions.

연구지역의 지하수 중 우라늄 평균 농도의 높은 순서와 일치한다.

4.2.2 라돈

연구지역 지하수의 라돈 함량에 대한 통계자료는 Table 3에 정리했다. 전체 지하수의 라돈 함량은 167~16,600 pCi/L (평균 3,581 pCi/L, 중앙값 2,996 pCi/L)의 범위를 보인다. 일부 지하수의 라돈 함량이 상대적으로 높게 검출되어 중앙값에 비하여 평균값이 높게 나타났다. 미국 EPA에서 제안한 라돈의 alternative maximum contaminant level (AMCL)값 4,000 pCi/L을 넘는 지하수는 26개소로 나타났다(Fig. 3). 암석별로 각각 흑운모편암 지역 3개소, 화강편암 지역 11개소, 각섬석화강암 지역 1개소 복운모화강암 지역

1개소, 흑운모화강암 지역 4개소, 백운모편암 지역 2개소, 흑운모편암 지역 3개소, 석영편암 지역 1개소이다.

화강암 지역 지하수의 라돈 함량은 942~8,074 pCi/L (평균 4,795 pCi/L, 중앙값 5,046 pCi/L), 편암 지역은 167~8,067 pCi/L (평균 2,611 pCi/L, 중앙값 1,627 pCi/L), 편마암 지역은 191~16,600 pCi/L (평균 3,938 pCi/L, 중앙값 3,082 pCi/L)의 범위로 나타났다. 우라늄의 경우와는 다르게 편마암 지역에서 라돈 함량의 범위가 가장 넓으나, 평균값과 중앙값은 화강암 지역이 가장 높고 편마암, 편암 지역 순으로 높게 나타났다. 이는 우라늄 함량 순서와 동일하다.

4.2.3. 전알파

연구지역 지하수의 전알파 함량에 대한 통계자료는

Table 3. Statistics of radon values in groundwater based on the rock types

	Total (n=69, pCi/L)	Granitic rock (n=10, pCi/L)	Schist (n=25, pCi/L)	Gneiss (n=34, pCi/L)
Min.	167	942	167	191
Max.	16,600	8,074	8,067	16,600
Avg.	3,581	4,795	2,611	3,938
Med.	2,996	5,046	1,627	3,082
Stdev.	2,874	2,319	2,272	3,242

Table 4. Statistics of gross- α values in groundwater based on the rock types

	Total (n=69, pCi/L)	Granitic rock (n=10, pCi/L)	Schist (n=25, pCi/L)	Gneiss (n=34, pCi/L)
Min.	ND	ND	ND	ND
Max.	13.71	4.18	13.71	7.07
Avg.	1.78	1.55	1.64	1.96
Med.	1.20	1.28	0.76	1.71
Stdev.	2.4	1.7	3.0	2.0

※ N.D. : not detected, less than MDA 0.5 pCi/L

Table 4에 정리했다. 전체 지하수의 전알과 함량은 0~13.71 pCi/L (평균 1.78 pCi/L, 중앙값 1.20 pCi/L)의 범위를 보인다. 일부 지하수의 전알과 함량이 상대적으로 높게 검출되어 중앙값에 비하여 평균값이 높게 나타났다. 미국 EPA 전알과 수질기준 maximum contaminant level (MCL)값 15 pCi/L 을 넘는 지하수는 없었다(Fig. 3).

화강암 지역 지하수의 전알과 함량은 0~4.18 pCi/L (평균 1.55 pCi/L, 중앙값 1.28 pCi/L), 편암 지역은 0~13.71 pCi/L (평균 1.64 pCi/L, 중앙값 0.76 pCi/L), 편마암 지역은 0~7.07 pCi/L (평균 1.96 pCi/L, 중앙값 1.71 pCi/L)로 분석됐다. 편암 지역에서 검출된 전알과 함량의 범위가 가장 넓으나, 평균값은 편마암 지역

이 가장 높고 편암, 화강암 지역 순으로 높게 나타났고, 중앙값은 편마암, 화강암, 편암 지역 순으로 높다.

4.3. 암종별 지역적인 자연방사성물질 분포 특성

본 연구에서 측정된 지하수의 함량과 지리적 분포를 이용해 우라늄과 라돈의 함량분포도를 작성했다(Fig. 4). 연구 지역 지하수의 우라늄 함량분포도를 살펴보면, 우라늄 함량의 95.7%가 30 $\mu\text{g/L}$ 이하의 값을 보이며, 14.5%의 비율로 10 $\mu\text{g/L}$ 이상의 값을 가진다. 5 $\mu\text{g/L}$ 이상의 우라늄 함량을 가지는 지하수의 위치가 강화도 북부에서 서부까지 외곽을 따라 나타나는 것이 특징이다.

연구 지역 지하수의 라돈 함량분포도에서는 라돈 함량의 62.3%가 4,000 pCi/L 이하의 값을 보여 우라늄

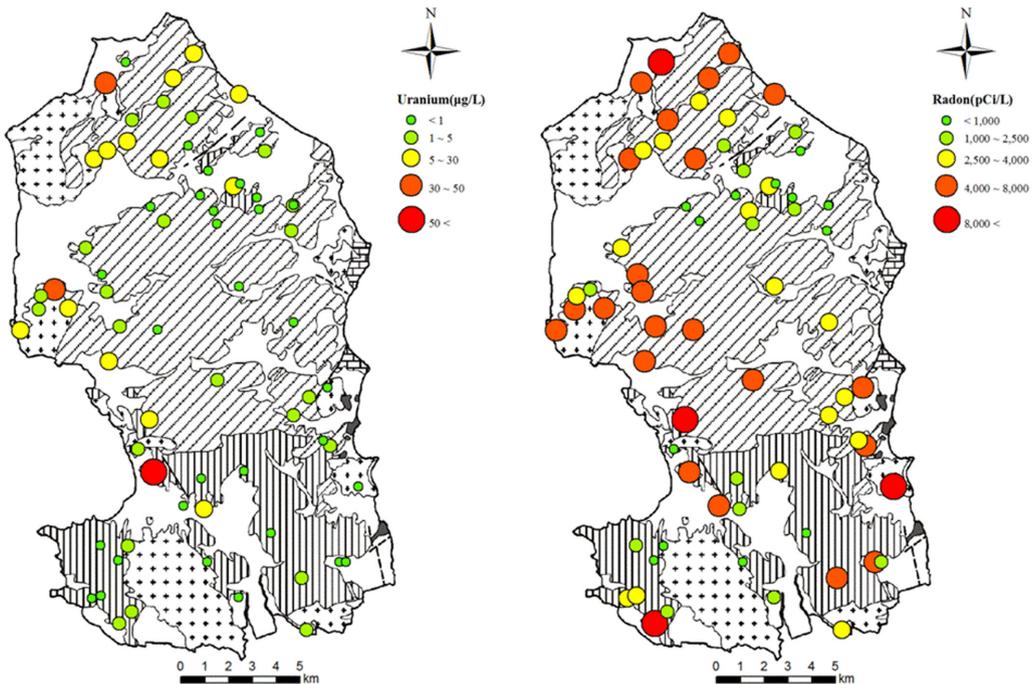


Fig. 4. Bubble plots showing uranium and radon concentrations in the study area.

Table 5. Correlation matrix of components from groundwater in the study area

	Rn	U	pH	Eh	EC	DO	Si	Na	K	Mg	Ca	F	Cl	SO ₄	HCO ₃
Rn	1.00														
U	0.25	1.00													
pH	-0.16	-0.03	1.00												
Eh	-0.01	0.08	0.10	1.00											
EC	-0.04	0.21	0.03	0.44	1.00										
DO	0.00	0.06	-0.05	-0.02	-0.01	1.00									
Si	0.06	0.04	-0.23	-0.02	0.02	0.11	1.00								
Na	0.05	0.17	-0.24	0.26	0.50	-0.06	0.40	1.00							
K	-0.27	0.03	-0.05	0.03	0.18	0.23	0.36	0.04	1.00						
Mg	-0.27	-0.05	0.01	0.41	0.55	-0.18	-0.07	0.44	0.21	1.00					
Ca	-0.19	0.33	0.14	0.24	0.64	-0.06	0.18	0.51	0.37	0.62	1.00				
F	0.29	0.32	0.16	0.09	0.18	0.01	0.08	0.13	-0.10	-0.27	0.09	1.00			
Cl	-0.06	0.25	-0.22	0.17	0.75	0.15	0.25	0.67	0.19	0.47	0.74	0.17	1.00		
SO ₄	-0.02	0.33	-0.12	0.21	0.27	-0.17	0.22	0.46	0.34	0.24	0.50	0.03	0.28	1.00	
HCO ₃	-0.28	0.07	0.31	0.35	0.43	-0.32	0.07	0.45	0.26	0.62	0.71	-0.02	0.37	0.48	1.00

함량에 비해 제안치를 넘은 지하수의 비율이 비교적 높다. 4,000 pCi/L 이상의 라돈 함량을 가지는 지하수의 위치는 강화도 외곽지역에 주로 분포되어 있다. 이는 5 µg/L 이상의 우라늄 함량을 가지는 지하수의 위치를 포함한다.

4.4. 자연방사성 물질과 주요 성분들의 상관성

4.4.1. 강화도 전체 지하수에 대한 요인분석

본 연구에서는 방사성물질의 상관성과 거동특성을 알아내기 위해 통계 분석을 통하여 그 특징을 알아보았다. 전체 지하수 관정에 대한 분석과 지질별로 세분화하여 편암류, 편마암류 지역에 대한 분석을 했다. 화강암류 지역의 경우 시료의 수가 적어 통계분석을 실시하기에는 적절치 않아 제외했다. IBM SPSS Statistics를 이용하여 주성분들 간의 상관계수와 회전된 성분행렬을 구했다. 회전된 성분행렬을 구하기 위한 요인추출 방법은 주성분 분석이며, Kaiser 정규화가 있는 베리맥스법에 의한 회전방법을 이용했다. 상관행렬 표에서는 ±0.4 이상으로 비교적 높은 상관계수는 굵게 표시했다. 회전된 성분행렬 표에서는 계수표시를 크기순으로 정렬한 후 각 요인에 해당하는 계수를 굵게 표시했다. 상관행렬에 의하면 우라늄과 라돈의 상관계수는 0.25로써 서로 큰 상관성을 보이지 않고 이들과 높은 상관계수를 가지는 수질성분도 보이지 않는다(Table 5).

7 회 반복계산에서 요인회전이 수렴된 성분행렬에 의하면, 요인1에는 EC, Cl, Mg, Ca, Na, HCO₃, Eh 가 영향을 주로 받으며 거동 특성이 유사하다. 요인2에는 K, Si 와 SO₄가 영향을 주로 받으며 거동 특성이 유

Table 6. Rotated component matrix in groundwater from the study area

	Factor				
	1	2	3	4	5
EC	.873	.033	.150	-.002	-.089
Cl	.805	.218	.156	.302	-.195
Mg	.780	.059	-.393	-.035	.216
Ca	.756	.465	.121	-.127	.142
Na	.647	.191	.163	.476	.207
HCO ₃	.608	.347	-.091	-.306	.498
Eh	.564	-.142	.048	-.143	.084
K	.098	.827	-.162	-.081	-.182
Si	-.023	.603	.133	.462	-.041
SO ₄	.275	.563	.212	.134	.500
F	.075	-.047	.794	-.145	-.085
U	.160	.187	.700	-.009	.048
Rn	-.143	-.316	.599	.348	.050
pH	.031	-.017	.104	-.877	.052
DO	-.005	.192	.054	.029	-.871

사하다. 그러나 우라늄과 라돈은 요인 1과 요인 2 에 영향을 받지 않는 것을 보여주며 F와 거동특성이 유사함을 요인 3에서 볼 수 있다(Table 6).

국내 선행연구 결과에 따르면 우라늄 농도와 pH, 침도, 산화·환원전위는 화강암 지역에서 비교적 선형적인 비례관계가 나타나는 반면, 우라늄 농도와 HCO₃의 상관성은 약간 반비례한다. 라돈의 함량은 다른 성분들과 큰 상관관계를 나타내지 않는다(Cho *et al.*, 2011, 2012, 2013). 그러나 노르웨이의 1,603여개 지하수 관정의 경우 라돈은 불소와 상관성이 높은 것으로 나타났다(Bank *et al.*, 1998). 이는 라돈이 비활성기체로

Table 7. Correlation matrix of components from groundwater in the schist area

	Rn	U	pH	Eh	EC	DO	Si	Na	K	Mg	Ca	F	Cl	SO ₄	HCO ₃
Rn	1.00														
U	0.17	1.00													
pH	-0.11	-0.26	1.00												
Eh	0.03	0.10	-0.35	1.00											
EC	0.32	0.14	-0.12	-0.10	1.00										
DO	0.17	0.19	-0.08	-0.12	0.04	1.00									
Si	0.00	0.13	-0.28	0.00	-0.22	-0.06	1.00								
Na	-0.01	0.15	-0.52	0.13	0.17	-0.31	0.46	1.00							
K	-0.07	0.34	-0.21	-0.31	0.11	0.17	0.55	0.22	1.00						
Mg	-0.19	0.03	-0.19	-0.03	0.38	-0.21	-0.16	0.34	0.24	1.00					
Ca	-0.17	0.24	-0.04	-0.23	0.28	-0.11	0.23	0.34	0.57	0.65	1.00				
F	-0.04	0.10	-0.04	0.11	-0.01	-0.11	0.24	0.46	-0.06	-0.28	0.04	1.00			
Cl	-0.05	0.10	-0.50	-0.13	0.50	0.07	0.17	0.54	0.43	0.64	0.66	-0.01	1.00		
SO ₄	-0.07	0.54	-0.19	0.05	0.08	-0.27	0.42	0.47	0.45	0.11	0.46	0.40	0.21	1.00	
HCO ₃	-0.40	-0.03	0.20	-0.30	-0.15	-0.41	0.05	0.14	0.20	0.40	0.66	-0.05	0.24	0.39	1.00

화학적 반응성이 없으나 전기음성도가 큰 불소나 염소와 반응해 RnF₂ 와 같은 화합물을 생성하기 때문인 것으로 판단된다. 지하수내 용존 우라늄 농도는 모암의 우라늄 함량과 존재 형태, 지하수의 산화환원 환경, 중탄산 이온, 불소, 인산염 등의 농도에 영향을 받지만, 지하수의 라돈 농도는 지하수의 주요 수질 성분과 관계가 낮다(STUK, 2005). 그러나 일부 외국의 연구 사례에서는 지하수 중의 우라늄과 라돈 간에 정비례의 상관관계가 있다(Asikainen and Kahlos, 1979).

4.4.2. 편암 지역의 요인분석

편암 지역의 지하수에 대한 상관행렬 결과에서 우라늄은 SO₄와 비교적 높은 상관계수를 보여준다. 라돈은 우라늄을 포함한 주요 성분들과 의미 있는 상관성을 보인 않지만, HCO₃와 음의 상관계수를 보인다(Table 7).

10 회 반복계산에서 요인회전이 수렴된 성분행렬에 의하면, 요인1에는 Cl, Mg, Ca, EC 가 영향을 주로 받으며 거동 특성이 유사하다. 요인2에는 EC, Rn, HCO₃ 가 영향을 주로 받으며 거동 특성이 유사하다. 그러나 우라늄은 요인 1과 요인 2 에 영향을 받지 않는 것을 보여주며 SO₄와 거동특성이 유사함을 요인 5에서 볼 수 있다(Table 8).

4.4.3. 편마암 지역의 요인분석

편마암 지역의 지하수에 대한 상관행렬 결과에서 우라늄은 라돈과 SO₄가 비교적 높은 상관계수를 보여준다(Table 9).

7 회 반복계산에서 요인회전이 수렴된 성분행렬에 의

Table 8. Rotated component matrix in groundwater in the schist area

	Factor					
	1	2	3	4	5	6
Cl	.882	.057	.312	.045	-.015	-.088
Mg	.863	-.287	-.142	-.135	.042	-.086
Ca	.706	-.319	.217	.088	.355	.279
EC	.659	.543	-.261	.101	.097	.131
Rn	-.004	.754	-.099	.077	.111	.026
HCO ₃	.331	-.741	-.023	.120	.193	.362
Si	-.065	-.091	.828	.328	.090	-.078
K	.339	-.052	.721	-.129	.376	.218
F	-.169	.123	.120	.816	.102	.006
Na	.465	-.039	.328	.656	.021	-.331
DO	-.115	.514	.324	-.544	.070	.062
U	.045	.188	.104	-.044	.900	-.159
SO ₄	.153	-.210	.240	.496	.710	.001
Eh	-.158	-.035	-.228	.100	.118	-.836
pH	-.345	-.187	-.384	-.039	-.053	.725

하면, 요인 1에는 Mg, EC, Na, HCO₃, Cl, Ca, Eh 가 영향을 주로 받으며 거동 특성이 유사하다. 요인 2에는 U, Rn 이 영향을 주로 받으며 거동 특성이 유사하다(Table 10).

5. 결론 및 토의

강화도 지하수 중 자연방사성물질과 수리지화학적 특성 및 상관성을 연구한 결과는 다음과 같다.

화강암 지역 지하수의 온도는 평균 15.3 °C, pH는 평

Table 9. Correlation matrix of components from groundwater in the gneiss area

	Rn	U	pH	Eh	EC	DO	Si	Na	K	Mg	Ca	F	Cl	SO ₄	HCO ₃
Rn	1.00														
U	0.55	1.00													
pH	-0.11	-0.02	1.00												
Eh	-0.05	0.04	0.26	1.00											
EC	-0.21	0.05	0.14	0.60	1.00										
DO	-0.07	-0.25	-0.04	-0.03	-0.24	1.00									
Si	0.04	-0.03	-0.20	-0.04	0.03	0.19	1.00								
Na	-0.01	0.21	0.01	0.31	0.52	-0.07	0.33	1.00							
K	-0.36	-0.28	-0.01	0.13	0.34	0.26	0.20	0.04	1.00						
Mg	-0.25	-0.04	0.12	0.59	0.80	-0.18	0.09	0.61	0.29	1.00					
Ca	-0.21	0.25	0.24	0.36	0.67	-0.22	0.11	0.59	0.39	0.74	1.00				
F	0.36	0.09	0.30	0.00	-0.04	-0.05	-0.10	-0.13	-0.19	-0.19	-0.16	1.00			
Cl	-0.20	0.14	-0.13	0.22	0.70	-0.03	0.17	0.70	0.29	0.69	0.74	-0.22	1.00		
SO ₄	-0.04	0.41	-0.07	0.24	0.37	-0.15	0.04	0.44	0.34	0.34	0.64	-0.14	0.42	1.00	
HCO ₃	-0.26	0.04	0.39	0.49	0.63	-0.33	0.08	0.60	0.34	0.76	0.79	-0.12	0.50	0.49	1.00

Table 10. Rotated component matrix in groundwater in the gneiss area

	Factor				
	1	2	3	4	5
Mg	.915	-.172	.076	.006	-.041
EC	.849	-.100	.134	.091	-.076
Na	.796	.247	.036	-.183	.201
HCO ₃	.789	-.117	.324	.190	-.171
Cl	.768	.021	.228	-.314	.124
Ca	.765	.036	.525	.013	-.091
Eh	.622	-.063	-.028	.388	-.010
U	.083	.844	.263	-.056	-.198
Rn	-.170	.831	-.171	.134	.106
SO ₄	.367	.274	.771	-.131	-.093
K	.162	-.453	.677	.036	.347
pH	.154	-.122	.061	.808	-.175
F	-.131	.363	-.158	.679	.077
DO	-.258	-.219	.103	.092	.751
Si	.210	.116	-.057	-.230	.730

균 6.8, EC는 평균 245 $\mu\text{S}/\text{cm}$, Eh는 평균 246 mV, DO는 평균 4.7 mg/L로 나타났다. 편암 지역 지하수의 온도는 평균 14.2 $^{\circ}\text{C}$, pH는 평균 6.9, EC는 평균 257 $\mu\text{S}/\text{cm}$, Eh는 평균 246 mV, DO는 평균 4.3 mg/L로 나타났다. 편암 지역 지하수의 온도는 평균 14.7 $^{\circ}\text{C}$, pH는 평균 6.9, EC는 평균 240 $\mu\text{S}/\text{cm}$, Eh는 평균 254 mV, DO는 평균 4.1 mg/L로 나타났다. 연구지역의 지하수 수질유형은 대체로 Ca(Na)-HCO₃ 형으로 나타났다.

전체 지하수의 우라늄 함량은 평균 5.64 $\mu\text{g}/\text{L}$ 로 나타났다. 우라늄의 먹는 물 수질기준인 30 $\mu\text{g}/\text{L}$ 을 넘는

지하수는 3개소로 나타났다. 화강암 지역 지하수의 우라늄 함량은 평균 10.59 $\mu\text{g}/\text{L}$, 편암 지역은 평균 4.79 $\mu\text{g}/\text{L}$, 편암지역은 평균 4.82 $\mu\text{g}/\text{L}$ 로 각각 분석됐다. 라돈 함량은 평균 3,581 pCi/L로 나타났다. 미국 EPA에서 제한한 라돈의 AMCL값 (4,000 pCi/L)을 넘는 지하수 관정은 26개로 나타났다. 화강암 지역 지하수의 라돈 함량은 평균 4,795 pCi/L, 편암 지역은 평균 2,611 pCi/L, 편암 지역은 평균 3,938 pCi/L로 각각 분석됐다. 전알과 함량은 평균 1.78 pCi/L로 나타났다. 미국 EPA의 전알과 수질기준 MCL값 (15 pCi/L)을 넘는 지하수는 없었다.

연구 지역 지하수의 우라늄함량 분포도에서 5 $\mu\text{g}/\text{L}$ 이상의 우라늄 함량을 가지는 지하수의 위치가 강화도 북부에서 서부까지 외곽을 따라 나타나는 것이 특징이다. 라돈 함량 분포도에서는 4,000 pCi/L 이상의 라돈 함량을 가지는 지하수의 위치는 강화도 외곽지역에 주로 분포되어 있다. 이는 5 $\mu\text{g}/\text{L}$ 이상의 우라늄 함량을 가지는 지하수의 위치를 포함한다.

전체 지하수에 대한 상관행렬 결과에 의하면, 우라늄과 라돈의 상관계수는 전체 지하수에서 0.246으로써 낮다. 이들과 높은 상관계수를 가지는 수질성분도 없다. 그러나 회전된 성분행렬에서는 우라늄, 라돈 그리고 불소가 거동특성이 유사한 것으로 나타났다. 세부 암종별로 구분한 결과는 다르게 나타났다. 편암 지역의 지하수에 대한 상관행렬 결과에서 라돈은 HCO₃ 과 -0.40, 우라늄은 SO₄ 과 0.54의 상관계수를 보였으며, 회전된 성분행렬에서 라돈과 HCO₃ 그리고 우라늄과 SO₄ 의 거동특성 또한 유사한 것으로 나타났다. 편

마암 지역의 지하수에 대한 상관행렬 결과에서 우라늄은 라돈의 상관계수가 0.55로 비교적 높게 나타났으며, SO_4 과 0.41의 상관계수를 보였다. 회전된 성분행렬 결과에서는 우라늄과 라돈의 거동특성이 유사한 것으로 나타났다.

암종(화강암, 편마암, 편암)과 관련한 지하수의 자연방사성물질의 특성과 수리지화학적 특성을 분석한 결과, 지하수 수질유형이 유사함에도 불구하고 요인분석 결과는 전체 지하수와 각 암종별 지하수가 서로 다른 것은 암종과 지하수 자연방사성물질 함량 간에 연관성이 있기 때문인 것으로 판단된다. 하지만 다소 부족한 시료수로 도출한 요인분석 결과만으로 우라늄과 라돈의 복잡한 거동특성과 연구지역의 자연방사성 특성을 명확하게 규정하기는 어렵다. 따라서 본 연구지역의 자연방사성 특성을 규명하기 위해서는 앞으로 더 많은 지하수 관정 조사와 더불어 암석학적, 광물학적, 지질학적, 수리수문학적 연구를 종합적으로 수행하여야 할 것이다.

사 사

본 연구는 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2016-01-01-074).

References

- 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.
- Asikainen, M. and Kahlos, H. (1979) Anomalously high concentration of uranium, radium and radon in water from drilled wells in the Helsinki region. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v.43, p.1681-1686.
- Banks D., Bjørn F., Aase K.M., Jan R.K. and Terje, S. (1998) The chemistry of Norwegian groundwaters : I. The distribution of radon, major and minor elements in 1604 crystalline bedrock groundwaters. *The Science of the Total Environment*, v.222, p.71-1.
- Bonotto, D.M. (2006) Hydro(radio)chemical relationships in the giant Guarani aquifer, Brazil. *Journal of Hydrology*, v.323, p.353-386.
- Cho, B.W., Choo, C.O., Kim, M.S., Lee, Y.J., Yun, U. and Lee, B.D. (2011) Uranium and radon concentrations in groundwater near the Icheon Granite. *The Journal of Engineering Geology*, v.21, p.259-269. (In Korean with English abstract).
- Cho, B.W., Kim, M.S., Kim, T.S., Han, J.S., Yun, U., Lee, B.D., Hang, J.H. and Choo, C.O. (2012) Hydrochemistry and distribution of uranium and radon in groundwater of the Nonsan area. *The Journal of Engineering Geology*, v.22, p.427-437. (In Korean with English abstract).
- Cho, B.W., Kim, M.S., Kim, T.S., Uk Yun, Lee, B.D., Hwang, J.H., and Choo, C.O. (2013) Characteristics of Occurrence and Distribution of Natural Radioactive Materials, Uranium and Radon in Groundwater of the Danyang Area. *The Journal of Engineering Geology*, v.23, p.477-491.
- Cothern, C.R. and Rebers, P.A. (1990) Radon, radium and uranium in drinking water. Lewis publishers, p.283.
- Currie, L.A. (1968) Limits for qualitative detection and quantitative determination. Application to radiochemistry. *Analytical chemistry*, v.40, p.586-593.
- Dahlkamp, F.J. (1993) Uranium ore deposits. Springer Science & Business Media., p.25-30.
- David, S.V., Avner, V., Daniella, H. and Gary, S.D. (2009) Relationships between radium and radon occurrence and hydrochemistry in fresh groundwater from fractured crystalline rocks, North Carolina (USA). *Chemical Geology*, v.260, p.159-171.
- Health Canada (1968) The Guidelines for Canadian Drinking Water Quality and the Guideline Technical Documents.
- Hess, C.T., Michel, J., Horton, T.R., Prichard, H.M. and Coniglio W.A. (1985) The occurrence of radioactivity in public water supplies in the United States. *Health Physics*, v.48, p.553-586.
- Hwang, J.H. and Kihm, Y.H. (2005) Geology Report of the Ganghwa-Onsuri Sheet. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, p.4-7.
- Jeong, D.H., Lee, Y.J., Ju, B.K., Noh, H.J., Yu, S.J. and Kim, M.S. (2011) Study on Gross-alpha Characteristics of Groundwater for Drinking in Korea. *Journal of KoSSGE*, v.16, p.67-73.
- Kim, D.S. (2014) A study on characteristics hydrogeochemistry and naturally occurring radioactive materials in groundwater in domestic sedimentary rock area. master's thesis, Pukyong National University, p.13-17.
- Kim, Y.J., Cho, S.Y., Yoon, Y.Y. and Lee, K.Y. (2006) Optimal Method of Radon Analysis in Groundwater using Ultra Low-Level Liquid Scintillation Counter. *Journal of KoSSGE*, v.11, p.59-66.
- National Institute of Environmental Research (2008) An investigation of natural radionuclide levels in groundwater(II) (NIER No. 2008-67-1017), p.15, p.113.
- National Institute of Environmental Research (2009) An investigation of natural radionuclide levels in groundwater(III) (NIER No. 2009-61-1117), p.22, P.74-75.
- National Institute of Environmental Research (2010) An Investigation on Natural Radioactivity Levels in Groundwater('10) (NIER No. 2010-47-1222), p.163-174.
- National Institute of Environmental Research (2011) Study on Naturally Occurring Radioactive Materials (N.O.R.M) in Groundwater in South Korea ('11) (NIER-RP2011-1401), p.172-185.
- National Institute of Environmental Research (2012) Study on Naturally Occurring Radioactive Materials (N.O.R.M) in Groundwater in South Korea ('12) (NIER-RP2012-196), p.121-144.
- National Institute of Environmental Research (2013)

- Study on Naturally Occurring Radioactive Materials (N.O.R.M) in Groundwater in South Korea ('13) (NIER-RP2013-384), p.161-183.
- National Institute of Environmental Research (2014) Study on Naturally Occurring Radioactive Materials (N.O.R.M) in Groundwater in South Korea ('14) (NIER-RP2014-383), p.246-290.
- National Institute of Environmental Research (2015) Study on Naturally Occurring Radioactive Materials (N.O.R.M) in Groundwater in South Korea ('15) (NIER-RP2015-388), p.169-189.
- STUK (2005) 238U-series radionuclides in Finnish groundwater-based drinking water and effective doses. STUK-A123, p.94.
- USGS (1962) Data on uranium and radium in groundwater in the USA. Professional Paper No. 426.
- Wathen, J.B. (1987) The effect of uranium sitting in two-mica granites on uranium concentrations and radon activity in groundwater. Proceedings of the NWWA conference, p.31-45.
- World Health Organization (2011) Guidelines for Drinking-water Quality, fourth edition., WHO Library Cataloguing-in-Publication Data, p.204-206
- Wilhelm, E., Battino, R. and Wilcox, R.J. (1977) Low-pressure Solubility of Gases in liquid water
- 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, p.645.