



Article

다변량 및 공간통계 분석을 이용한 강원 중서부 지역 지하수 내 라돈·우라늄 분포 특성

조구연¹, 박주연¹, 현혜지¹, 남안나¹, 최종한¹, 최은혜¹, 김병욱¹, 박충기¹, 홍은미^{2,*}

¹강원특별자치도 보건환경연구원

²강원대학교 환경학과

Multivariate and spatial statistical analysis of radon and uranium distribution in groundwater from the central-western region of Gangwon Province, Korea

Gu-Yeon Jo¹, Joo-yeon Park¹, Hye-ji Hyun¹, An-na Nam¹, Jong-han Choi¹, Eun-hye Choi¹, Byoung-ug Kim¹, Chung-ki Park¹, Eun-mi Hong^{2,*}

¹Gangwon Institute of Health and Environment, Gangwon Province, Chuncheon 24203, Republic of Korea

²Department of Environmental Science, Gangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea

Received: January 26, 2026 / Revised: March 23, 2026 / Accepted: April 6, 2026

*Corresponding author: +82-33-250-8571 / E-mail: eunmi.hong@kangwon.ac.kr

요약: 이번 연구는 강원특별자치도 춘천·홍천 지역의 지하수 249개 시료를 대상으로 라돈과 우라늄의 거동 특성을 통계적으로 규명하고자 하였다. 두 물질 모두 우편향 분포를 보였으며, 전반적으로 화강암 지역에서 높은 농도가 나타났다. 지질별 라돈 농도는 화강암 > 화성암 > 충적층 > 변성암 > 퇴적암의 순으로 나타났으며, 충적층의 비교적 높은 농도는 화강암과 인접하거나 선형으로 삽입된 공간적 배치의 영향을 반영하는 것으로 해석된다. 또한, 두 물질 모두 화강암과 인접한 지질 경계에서도 고농도가 확인되어 화강암과의 공간적 근접성이 영향 요인을 시사하였다. 한편 라돈 고농도 지점(≥ 148 Bq/L)의 약 77%는 중생대 화강암류 분포 지역에 집중되었으며, 라돈은 이들 화강암류에 수반되는 흑운모, 백운모, 저어콘, 인회석 등 우라늄 함유 광물로부터 기원한 지질학적 신호를 주로 반영하는 것으로 해석된다. Si 및 U와의 연관성 역시 이러한 지질 우세 구조를 뒷받침하였다. 아울러 라돈 148 Bq/L 이상 지점을 중심으로 한 공간군집성 분석에서는 고농도-고농도(High-High, HH) 군집이 확인되어 우선 관리가 필요한 위험 지역을 식별하였다. 반면 우라늄 고농도 지점(≥ 30 $\mu\text{g/L}$, 7개)은 일부 지점에 한정되어 나타났는데 이는 복운모화강암과 같이 우라늄 함량이 높은 암종이라 하더라도, 암종 자체만으로는 고농도 용존 우라늄으로 곧바로 이어지지 않음을 보여준다. 우라늄 농도는 암석의 공급 잠재력에 더해 산화환경, 중탄산염 농도, pH, 풍화 반응 등 수리지구화학적 조건이 함께 충족될 때 증가하는 것으로 해석된다. 종합하면, 라돈의 거동은 우라늄 함유 광물을 포함한 기원암, 주로 화강암의 분포와 그에 수반되는 공간 구조의 영향을 우선적으로 반영하는 반면, 우라늄은 이러한 지질학적 기반 위에서 수리지구화학적 조건이 충족될 때 선택적으로 이동·농축되는 것으로 해석된다.

주요어: 라돈, 우라늄, 지하수, 다변량 분석, 공간 군집성

ABSTRACT: This study statistically investigated the behavior of radon and uranium in 249 groundwater samples collected from the Chuncheon-Hongcheon area of Gangwon State, Korea. Both substances showed right-skewed distributions, and elevated concentrations were generally observed in granitic areas. Radon concentrations by lithology followed the order of granite > igneous rock > alluvium > metamorphic rock > sedimentary rock. The relatively high radon levels in alluvium were interpreted to reflect its spatial arrangement, as many alluvial deposits are adjacent to or linearly intercalated with granite bodies. In addition, elevated concentrations of both radionuclides were also identified near lithologic boundaries adjoining granite, suggesting that spatial proximity to granite is an important controlling factor. Approximately 77% of the high-radon sites (≥ 148 Bq/L) were concentrated in areas underlain by Mesozoic granitic rocks. Radon was interpreted to primarily reflect geological signals derived from uranium-bearing minerals associated with these granites, including biotite, muscovite, zircon, and apatite. Its associations with Si and U further supported this geology-dominant pattern. Spatial clustering analysis focusing on sites with radon concentrations ≥ 148 Bq/L identified high-high (HH) clusters, indicating priority areas for monitoring and management. In contrast,

high-uranium sites ($\geq 30 \mu\text{g/L}$; $n = 7$) were limited to only a few locations. This suggests that even in lithologies with high uranium contents, such as two-mica granite, lithology alone does not necessarily lead directly to high dissolved uranium concentrations in groundwater. Rather, uranium enrichment appears to occur only when the source potential of the host rock is accompanied by favorable hydrogeochemical conditions, such as oxidizing environments, bicarbonate availability, pH, and weathering reactions. Overall, radon behavior primarily reflects the distribution of source rocks containing uranium-bearing minerals, especially granite, together with their associated spatial structure, whereas uranium appears to be selectively mobilized and enriched only where suitable hydrogeochemical conditions are superimposed on this geological background.

Key words: radon, uranium, groundwater, multivariate analysis, spatial analysis

1. 서론

지하수는 대한민국을 비롯한 전 세계에서 인간 생활과 산업 활동에 핵심적인 수자원이다(UNESCO, 2022). 특히 강원특별자치도와 같이 산악지형이 발달한 지역은 지표수 가용성이 낮아 생활·농업·공업용수에서 지하수 의존도가 높다(Lee and Kwon, 2015). 2023년 기준 전국 상수도 보급률의 경우 97.8%로 집계되었으나, 강원특별자치도는 약 93.9% 수준으로(Kim and Han, 2024) 상대적으로 많은 주민이 음용·생활용수의 상당 부분을 지하수에 의존함을 시사한다. 그러나 지하수는 유역 내 지질학적 특성과 수리지화학적 조건에 따라 자연방사성 물질을 포함할 수 있으며, 이 중 라돈(Rn-222)과 우라늄(U)은 인체 위해도가 큰 대표적 물질로 알려져 있다(WHO, 2017). 라돈은 우라늄 붕괴 사슬에서 생성되는 무색·무취의 비활성 기체로 반감기가 약 3.82일이며 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)는 라돈을 인체 발암성 1군(Group 1)으로 분류한다(IARC, 2012). 우라늄은 지각에 자연적으로 존재하는 방사성 원소로, 산화 상태와 용존 화학종에 따라 지하수로 용출되며 장기 섭취 시 신장 독성 등 건강 영향이 나타나는 것으로 보고된다(EPA, 2000). 다만, 두 물질의 농도는 지질학적 배경 뿐 아니라 수리지화학적·물리적 조건에 따라 크게 달라질 수 있으므로, 지역별 자연방사성물질의 거동 특성과 이를 제어하는 요인을 정밀하게 규명할 필요가 있다.

특히, 이번 연구 대상지인 강원특별자치도 춘천시 전역 및 홍천군 대부분은 한반도 중앙부를 구성하는 경기육괴(Gyeonggi Massif)의 북부(northern Gyeonggi Massif)에 위치하며, 연구 지역에는 고원생대 기원의 화강암질 및 변성암류가 넓게 분포한다(Lee *et al.*, 2014). 이러한 지질학적 특성은 라돈 및 우라늄의 용출과 밀접히 관련되며, 지하수의 지화학적 환경에 따라 방사성 물질의 농도가 달라질 수 있다. 특히, 기체인 라돈은 심·천부 지하수 구조, 유량·체류시간, 환기 및 용존기체 교환 과정에 민감하게 반응하여 뚜렷한 공간·시간적 변동성을 보이는 것으로 보고된다(Banks *et al.*, 1998). 이러한 지질·수리지화학·유동 조건의 상호작용은 동일 지질 단위 내에서도 농도 변화를 크게 만드는 주요 요인으로 작용한다.

국내·외에서는 자연방사성 물질의 거동 특성을 규명하고자 지질학적 배경과 수리지화학적 인자가 라돈 및 우라늄 농도 변화에 미치는 영향을 중심으로 다양한 연구가 수행되어 왔다. 우라늄의 경우 지구화학적 반응을 이론적으로 규명한 Langmuir (1978)의 연구 및 영국의 화강암 대수층을 대상으로 수행된 Smedley *et al.* (2006)의 연구에서는 우라늄이 pH, Eh, HCO_3^- 조건의 변화에 매우 민감하게 반응하며, 알칼리성 환경에서 형성되는 U(VI)-탄산염 착이온의 안정화로 인해 용출과 이동성이 크게 증가하는 특성이 제시된 바 있다. 또한, 미국 메인주에서 진행된 연구에서는 우라늄과 라돈의 고농도 분포가 화강암 관입체 주변(5 km 이내)에 공간적으로 집중되며, 우라늄 분포는 pH, 방해석(calcite) 용해 및 산화·환원 조건의 영향을 받지만, 라돈은 동일한 수리지화학 인자에 의해 설명되기 어렵다는 점이 밝혀진 바 있다(Yang *et al.*, 2014). 한편, 스웨덴 지역 연구에서는 라돈이 우라늄·라듐 함량이 높은 화강암에서 고농도로 산출되며, 균열 발달 정도와 지하수 체류시간에 따라 농도 변동성이 크게 달라지는 것으로 보고된 바 있다(Skeppström and Olofsson, 2007).

국내에서도 지하수 중 자연방사성물질 거동이 지질과 수리지화학 조건에 의해 좌우된다는 점이 반복적으로 제시되어 왔다. 전국 규모 분석을 통해 라돈이 화성암 및 화성암과 변성암의 경계에서 높은 용출 특성을 보인다고 보고하였으며(Yun *et al.*, 2016), 용인 지역 연구(Cho *et al.*, 2019)에서는 라돈과 우라늄 농도가 편마암 지역보다 화강암 지역에서 더 높게 나타난 점으로 미루어 볼 때, 암상(lithology)이 두 핵종의 농도와 공간 분포를 제어하는 데 중요한 역할을 한다고 보고하였다. 우라늄의 경우 Hwang (2018)의 연구에서 동일한 화강암 내에서도 탄산염 농도, pH, 산화·환원 상태의 차이에 따라 용해도와 이동성이 크게 달라지므로 실제 우라늄 용출은 지질적 공급원뿐 아니라 국지적 지화학적 조건에 의해 결정된다는 점을 강조하였다. 또한 지질별 지하수 연구(Jeong *et al.*, 2016)에서도 우라늄은 pH, Eh, HCO_3^- 등 수리지화학 조건, 특히 산화적이고 약알칼리성인 탄산염 환경에 민감하게 반응하는 반면, 라돈은 대수층 내 균열, 공극 및 단층대를 통한 이동·확산 특성에 의해 농도 분포가 지배되는 것으로 보고하였다.

이처럼 대부분 선행연구는 자연방사성 물질의 지질학적·지화학적 영향 요인을 규명하기 위해 주로 다변량 통계 분석에 집중해 왔다. 그러나 지하수는 지하 유로를 따라 연속적으로 분포하는 매질이므로 인접 지점들이 유사한 수리 지질학적·지화학적 조건을 공유하기 쉽고, 이에 따라 동일 지질대 내부에서도 라돈과 우라늄 농도가 공간적으로 근접화되는 경향이 나타날 수 있다. 이는 자연방사성 물질의 분포가 본질적으로 공간적 의존성을 내포함을 의미하지만, 공간 구조를 정량적으로 고려한 해석에는 한계가 있었다.

이에 이번 연구는 지질학적 특성과 수리지화학적 조건 뿐만 아니라 공간 요인을 반영하여 라돈·우라늄의 거동 특성을 규명하고자 하였다. 이를 위해 지질·수질·공간 요인을 통합한 다변량 통계 기법을 적용하여 각 요인의 상호 관계와 지역별 변동성을 분석하였다. 이러한 접근을 통해 강원 중서부 지역 지하수의 방사성 물질 분포 특성을 다차원적으로 해석하고, 지역 맞춤형 수질 관리 및 예측모형 개발의 기초자료를 제공하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구 대상지역 지질

이번 연구는 강원특별자치도 중서부 권역에 해당하는 춘천시 전역(약 1,116 km²)과 홍천군 중 내면을 제외한 전

역(약 1,371 km²)을 대상으로 수행하였다. 연구지역은 지체구조상 경기육괴(Gyeonggi Massif) 북중부에서 동북부로 이어지는 구간에 위치하며, 서부·중북부에는 선캄브리아기 변성기반암이, 중부·중동부에는 이를 관입한 중생대 화강암질 심성암류가 우세하게 분포한다. 연구지역의 변성기반암은 용두리 편마암복합체가 주체를 이루며, 화강암질 편마암, 석영장석질 편마암, 석류석 편마암 및 흑운모편마암 등으로 세분된다(Son *et al.*, 1975). 용두리 편마암복합체는 전반적으로 석영·사장석·K-장석·흑운모를 대표 구성 광물로 하며, 암상에 따라 석류석이 수반된다(Kim *et al.*, 1974; Park *et al.*, 1974). 이 복합체 상위에는 의암층군이 부정합으로 놓이며, 그 세부 층서는 도폭에 따라 다소 상이하다. 또한 서부 일대의 남북 방향 구조는 주로 장락층군의 규암층 분포와 관련되며, 의암층군은 지역에 따라 분지상 내지 원형의 분포 양상을 보인다.

화강암질 심성암류는 크게 춘천분지권과 홍천권으로 구분된다. 춘천분지권에서는 춘천시 일대를 중심으로 흑운모 화강암인 춘천화강암이 남북 장축의 타원형 암주를 이루며 분포하고, 석영·사장석(oligoclase)·미사장석·퍼다이트와 흑운모를 주성분으로 하며 소량의 각섬석을 수반한다(Lee *et al.*, 1974). 이 암체의 북측 화천-내평-양구 방향에는 복운모화강암이 저반상 관입체로 넓게 발달하며, 미사장석·석영·사

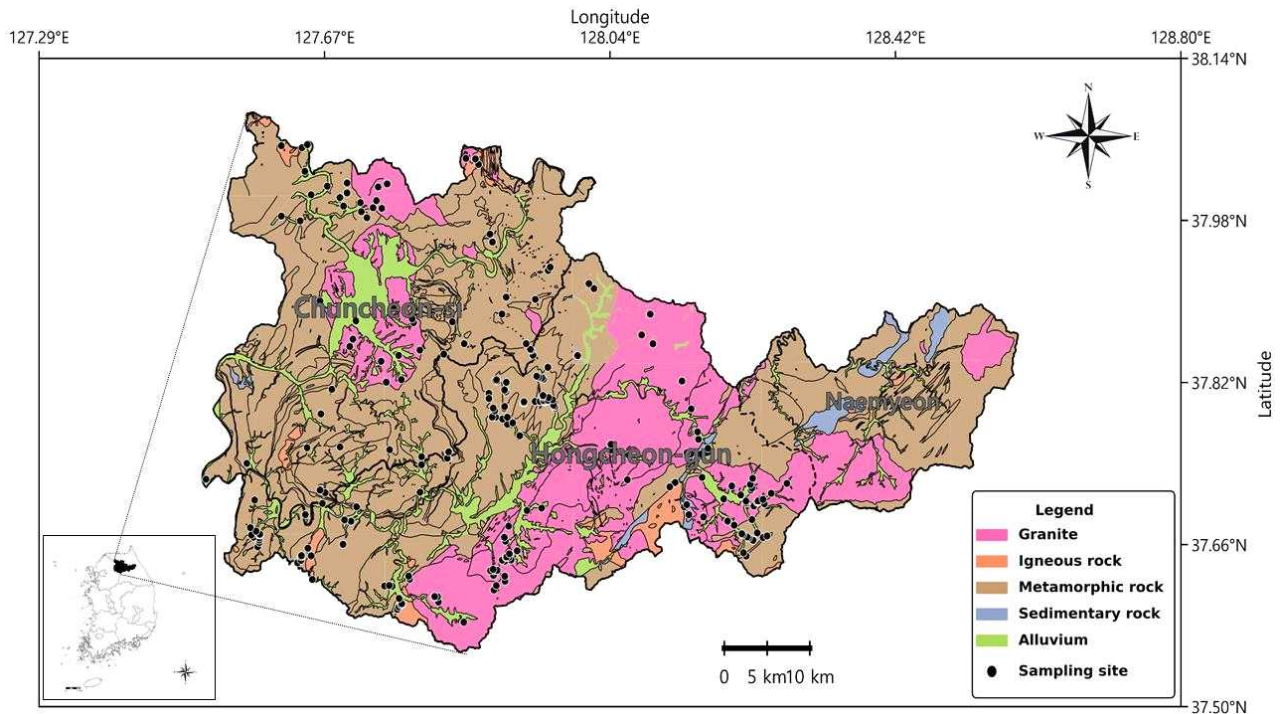


Fig. 1. Geological map of the study area showing the distribution of sampling sites. The geology was classified into five groups: granite, igneous rock, metamorphic rock, sedimentary rock, and alluvium. Black dots indicate groundwater sampling sites. Source: Based on the 1:50,000-scale geological maps published by the Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM).

Table 1. Internal quality control results for uranium and major ion measurements in 2023 and 2024.

	U	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ _N	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Si	F ⁻	
2023	Linearity (R ²)	1.0000	0.9999	0.9999	0.9999	0.9998	0.9998	0.9999	0.9990	0.9998	0.9999
	Accuracy (%)	95	103	104	99	103	102	105	90	103	104
	Precision (RSD, %)	1	0.8	0.7	0.4	0	0	0	0	1	1.5
	Reporting limit	0.1	0.4	0.1	2	(0.01)	(0.03)	(0.03)	(0.1)	(0.02)	0.15
2024	Linearity (R ²)	1.0000	0.9965	0.9935	0.9955	0.9990	0.9987	0.9991	0.9983	0.9980	0.9965
	Accuracy (%)	100	98	93	108	124	123	123	111	124	100
	Precision (RSD, %)	1	3.1	0.5	4.1	1	1	1	1	1	2.1
	Reporting limit	0.1	0.4	0.1	2	(0.01)	(0.03)	(0.03)	(0.1)	(0.02)	0.15

Note. U is presented in µg/L and all other analytes in mg/L. Values in parentheses indicate the quantitation limits specified in the official notification for bottled water standards and labeling criteria.

장석을 주성분으로 하고 백운모와 흑운모를 수반하며, 일부 지역에서는 미립의 석류석이 동반된다. 내평도폭에서는 이들 화강암류의 정확한 선후관계는 불분명하나, 기초사자료에 근거할 때 춘천화강암이 비교적 선행 관입한 것으로 추정하였다(Park *et al.*, 1974).

한편, 홍천군 일대에는 이와 공간적으로 구분되는 대보 화강암류가 발달하며, 연구지역 중부·북동부에 해당하는 자은·풍암·홍천 도폭을 중심으로 반상화강암이 우세하게 분포하고 흑운모화강암, 복운모화강암 및 호색 장석반상화강암이 수반된다. 자은도폭에서는 오대산 지역 화강암의 K-Ar 연령(148 Ma)을 근거로 이들 화강암류를 상부 쥐라기 대보화강암류에 대비하였고, 암체 간 점이적 경계에 근거하여 동원 마그마의 분화작용 산물로 해석하였다(Shin *et al.*, 1975). 반상화강암은 담홍색 K-장석 반정이 특징적이며, 석영·정장석·사장석을 주성분으로 하고 흑운모와 각섬석을 수반한다. 또한, 풍암-갑천 도폭의 중동부에서는 이들 화강암류와 더불어 호상편마암·흑운모편마암, 안산암류 및 백악기 퇴적암류가 함께 분포한다(Kang and Jin, 1972; Won *et al.*, 1989). 각 화강암류는 암상에 따라 스피, 인회석, 저어콘 등의 부성분 광물을 수반하며, 주성분 광물은 대체로 석영, 사장석·정장석·미사장석 등의 장석류와 흑운모로 구성된다. 일부 암체에서는 각섬석 또는 백운모가 수반되며, 이들 광물의 풍화와 물-암석 반응은 지하수 중 Ca²⁺, Na⁺, K⁺, Si 및 일부 F⁻의 공급에 기여할 수 있다.

지질 정보는 한국지질자원연구원의 1:50,000 지질도와 도폭설명서를 바탕으로 시료 채취 지점의 표층 암상에 따라 화강암, 화성암, 변성암, 퇴적암 및 충적층으로 대분류하였다(그림 1). 이때 충적층은 표층 분포 여부를 기준으로 구분하였으며, 충적층의 두께는 별도로 고려하지 않았다. 또한 연구지역 일부에는 석회암류가 분포하나, 시료 채취

관정(9개 지점)이 석회암 단독 분포지에 위치한 경우는 없고 모두 다른 변성암류와 협재된 형태로 나타나므로, 이번 연구에서는 이를 별도의 지질군으로 분리하지 않고 변성암군에 포함하였다. 한편 화성암군은 화강암을 제외한 암종에 위치한 관정으로 구성하였으며, 석영반암 6점, 섬록암 2점, 반려암 1점, 안산암 1점 등 총 10점이다.

2.2. 시료 분석 및 자료 전처리

이번 연구에서는 2023년부터 2024년까지 강원특별자치도 보건환경연구원에 의뢰된 총 249개의 개인 음용 지하수 시료(춘천 67개, 홍천 182개)를 채취하였고, 라돈 시료는 현장에서 포기(aeration)가 발생하지 않도록 채취하였다. 시료에 대해 라돈(Rn-222)과 우라늄(U)을 포함한 총 12개 수질 인자를 분석하였으며, 시료 채취 지점에 대한 지질 정보도 함께 수집하였다. 수질 분석은 「먹는물수질공정시험기준」 및 이에 준하는 수준의 공인 시험법에 따라 수행하였다. U, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺ 등 금속 원소 시료는 채수 후 별도의 여과 없이 4°C를 유지하여 실험실로 이송 후 질산으로 pH 2를 유지하여 유도결합플라즈마-원자방출분광법(Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry, ICP-OES)으로 분석하였으며, 우라늄(U)의 경우 유도결합플라즈마-질량분석법(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, ICP-MS)으로, 주요 음이온(Cl⁻, SO₄²⁻, F⁻, NO₃⁻_N)은 이온크로마토그래피(Ion Chromatography, IC)법으로 정량하였다. 라돈(Rn-222) 농도는 「먹는물 수질감시항목 운영 등에 관한 고시」에 따라 액체 섬광계수법(Liquid Scintillation Counting, LSC)으로 분석하였다. 분석 과정에서는 내부 정도관리(Internal Quality Control, IQC)를 실시하여 분석 결과의 정확성과 정밀성을 확보하였으며, 그 결과는 표 1에 제시하였다. 각 항목의 계산된 정량한계는 모두 해당 시험방법에서 제시한 정량한계 이내였다. 실

제 시험결과의 보고에는 「먹는물수질공정시험기준」에 따른 표시한계를 적용하였으며, 표 1의 미네랄 항목의 경우 괄호 안의 값은 「먹는샘물등의 기준과 규격 및 표시기준 고시」에 제시된 정량한계를 의미한다. 또한 pH는 매일 표준 용액을 이용하여 교정하였으며, 라돈의 경우 분석의 신뢰성을 확보하기 위하여 6개월마다 측정효율과 최소검출가능농도(Minimum detectable activity, MDA)를 산출하였다. 측정효율은 라듐(Ra-226) 표준용액의 α-피크영역 순계수율을 이용하여 평가하였고, MDA는 배경계수값, 시료량 및 분석시간을 반영하여 계산하였다. 2023-2024년 평가 결과, 평균 측정효율은 101%였으며 평균 최소검출가능농도는 0.23 Bq/L였다. 실제 시험결과의 보고는 시험방법에서 제시한 정량한계 2.0 Bq/L를 기준으로 하였다.

분석에 앞서 자료의 통계적 안정성을 확보하기 위해 전처리를 수행하였다. 이상치는 다양한 통계 해석 결과에 영향을 줄 수 있으므로(Heckert *et al.*, 2002), 라돈 농도 1,880 Bq/L의 이상치 시료 1건은 제외하였다. 또한 검출률이 50% 이하인 Cu^{2+} , Mn^{2+} , B, As 및 Fe^{2+} 항목과 우라늄 및 라돈과의 지구화학적 관련성이 낮은 $KMnO_4$ 소비량, 탁도(NTU), Al^{3+} 및 Zn^{2+} 항목은 분석에서 제외하였다. 결측값은 검출한계의 1/2 값으로 대체하였다(Antweiler and Taylor, 2008).

2.3. 다변량 및 공간 통계 분석

이번 연구에서는 Python 및 관련 오픈소스 라이브러리를 활용하여 다변량 및 공간 통계 분석을 수행하였으며 분석의 정밀도를 확보하기 위해 정준상관분석 및 공간회귀분석에 사용된 독립변수는 Z-점수 표준화를 적용하였다. 또한 기여도분해는 로그변환된 값으로 수행하였으며, 그 외 분석에는 원자료를 사용하였다.

2.3.1. 상관분석(Correlation Analysis)

라돈 및 우라늄 농도와 환경 인자 간의 관계를 평가하기 위해 피어슨 상관계수와 스피어만 순위상관계수를 병행하였다. 피어슨 상관은 두 변수 간 선형(linear) 관계의 강도를 정량화하는 데 적합한 반면(Pearson, 1896), 스피어만 상관은 자료의 비정규성·이상치 영향이 크거나 관계가 단조(monotonic) 형태로 나타날 때도 안정적으로 연관성을 평가할 수 있다(Spearman, 1904). 또한, 여러 수질·지질 변수가 동시에 작용하는 다변량 상호작용 구조를 규명하기 위해 라돈·우라늄 및 수질인자와 지질 간의 공변동 구조를 요약하는 정준상관분석(Canonical correlation analysis, CCA)을 적용하였다(Hotelling, 1936). 이를 통해 단일 변수 기반 해석의 한계를 보완하고 이후 기여도 분해 및 공간적 자기상관 분석에서 사용할 변수 집단의 구조적 타당성을 확보하

였다.

2.3.2. 기여도 분해(Variance Partitioning)

다수의 수질 변수는 암석-물 반응(규산염 풍화 등)에 의해 지질 조건을 반영하며 함께 변화할 수 있으므로, 지질 요인과 수질 요인의 설명력은 상호 중첩된 형태로 나타날 가능성이 높다. 또한 동일한 지질대내에서도 관정 위치에 따른 대수층 조건, 지하수 유동 경로 등으로 인해 농도가 광역적으로 변화할 수 있다. 이에 라돈 및 우라늄 농도(로그 변환)를 종속변수 Y 로 두고 수질 집단 W , 지질 집단 G , 공간 집단 S 의 기여도를 단독 효과(unique)와 중첩 효과(shared)로 분해하여 정량 평가하였다(Legendre, 2008). 라돈(또는 우라늄) 농도 Y 의 선형 모형은 식(1)과 같다.

$$Y = \beta_0 1 + X_W \beta_W + X_G \beta_G + X_S \beta_S + \epsilon \quad (1)$$

여기서, X_W , X_G , X_S 는 각각 수질, 지질, 공간(좌표) 설명 변수 행렬이며 β_0 는 절편, β_W , β_G , β_S 는 각 변수 집단의 회귀계수 벡터, ϵ 는 잔차항이다.

각 모형의 결정계수(R^2)는 다음과 같이 정의되며, 설명 변수 개수 증가에 따른 설명력의 과대추정을 보정하기 위해 보정결정계수(adjusted R^2)를 사용하였다(식 2). 기여도 분해를 위해 세 집단 W (수질), G (지질), S (공간)의 모든 조합에 대해 Adjusted R^2 을 산정하였다(식 3).

$$R_{adj}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n-1}{n-p-1} \quad (2)$$

$$R_W^2, R_G^2, R_S^2, R_{WG}^2, R_{WS}^2, R_{GS}^2, R_{WGS}^2 \quad (3)$$

여기서 n 은 표본수, p 는 (절편을 제외한) 설명변수 개수이다. 각 R^2 은 W , G , S 변수를 포함한 해당 조합 회귀모형의 R_{adj}^2 를 의미한다. 이후 세 집단의 기여도를 단독(unique) 효과와 공유(shared) 효과로 분해하였다. 먼저 각 집단의 고유 효과는 다른 두 집단을 통제된 상태에서 추가로 설명되는 분산으로 정의하였다.

$$\begin{aligned} [a] &= R_{WGS} - R_{GS}, & [b] &= R_{WGS} - R_{WS}, \\ [c] &= R_{WGS} - R_{WG} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $[a]$ 는 수질 집단(W)의 고유 효과, $[b]$ 는 지질 집단(G)의 고유효과 $[c]$ 는 공간 집단(S)의 고유 효과이다(식 4). 세 집단이 중첩되어 설명되는 공유 성분은 다음과 같이 정의된다(식 5).

$$[g] = R_W^2 + R_G^2 + R_S^2 - R_{WG}^2 - R_{WS}^2 - R_{GS}^2 + R_{WGS}^2 \quad (5)$$

또한, 두 집단 간 공유 성분은 다음과 같이 산정된다.

$$\begin{aligned} [d] &= (R_W^2 + R_G^2 - R_{WG}^2) - [g] \\ [e] &= (R_W^2 + R_S^2 - R_{WS}^2) - [g] \\ [f] &= (R_G^2 + R_S^2 - R_{GS}^2) - [g] \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $[d]$ 는 $W \cap G$ 의 공유 성분, $[e]$ 는 $W \cap S$ 의 공유 성분, $[f]$ 는 $G \cap S$ 의 공유 성분에 해당한다(식 6). 전체 설명력은 R_{WGS}^2 로 정의되며, 미설명 분산은 다음과 같다(식 7).

$$[h] = 1 - R_{WGS}^2 \quad (7)$$

따라서 기여도 분해로 도출된 성분은 다음의 관계를 만족한다(식 8).

$$\begin{aligned} R_{WGS}^2 &= [a] + [b] + [c] + [d] + [e] + [f] + [g], \\ 1 &= R_{WGS}^2 + [h] \end{aligned} \quad (8)$$

한편 이번 연구에서 공간 집단(S)은 관정 좌표(X, Y)로 구성하여 연구지역 내 광역적 공간 추세(large-scale spatial trend)를 반영하도록 정의하였다. 인접성 기반의 국지적 공간 자기상관 및 군집성은 후속 분석에서 별도로 평가하였다.

2.3.3. 공간 군집성 분석(Spatial Autocorrelation and Clustering Analysis)

지하수 내 성분 농도는 공간적으로 인접한 관정들에서 유사한 값이 나타날 가능성이 있으며, 이는 대수층의 연결성과 지역적 수리지질·지화학 조건의 공유에 의해 강화될 수 있다(Brella *et al.*, 2023; Jahan *et al.*, 2025). 이러한 공간 구조를 정량적으로 진단하기 위해 공간 자기상관성을 공간 자기상관 지수(Moran's I)로 검정하는 방법이 제시되어 왔는데(Moran, 1950; Cliff and Ord, 1981), 실제로 Jahan *et al.* (2025)은 충청남도 2,349개 관정 자료에 전역 Moran's I 기반 공간자기상관 분석과 인접 관정 기여도 분해를 적용하여, 질산염 변동성의 약 38~40%가 인접 관정의 영향으로 설명될 수 있음을 제시하였다. 이는 지하수 오염이 개별 관정 단위의 독립적 현상이라기보다 수리학적 연결성을 통해 지역 규모로 나타날 수 있음을 시사하였다. 질산염은 인위적 기원의 용존 오염물질로서 라돈·우라늄과 화학적 거동 특성이 상이하나, 공간적 자기상관 분석은 특

정 물질의 반응기작 자체보다 관측 농도자료에 나타나는 공간적 군집성과 자기상관성을 평가하는 데 목적이 있으므로 동일하게 적용될 수 있다. 이에 라돈·우라늄 농도의 공간적 군집성을 평가하기 위해 전역 Moran's I를 적용하였으며, 관정 간 공간적 연결성을 반영하기 위한 공간 가중치 행렬은 관측 지점의 불균등 분포로 인한 고립 지점 문제를 완화하기 위해 K-최근접이웃(KNN) 방식으로 구성하였다. 전역 Moran's I 통계량은 식(9)와 같이 산정하였다.

$$I = \frac{n}{\sum_i \sum_j w_{ij}} \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (9)$$

여기서 x_i 와 x_j 는 각각 i, j 지점에서의 라돈 또는 우라늄 농도, \bar{x} 는 전체 평균, w_{ij} 는 공간 가중치 행렬의 요소, n 은 관측 지점의 수를 의미한다. 통계적 유의성 평가는 순열 검정(permutation test)을 통해 수행하였다. 전역 Moran's I 분석은 연구 지역 전반에 자기상관성이 존재하는지 검정하는 데 목적이 있으나, 특정 지역에서 나타나는 국지적 공간 군집(local clustering)의 위치를 식별하는 데에는 한계가 있다. 이에 이번 연구에서는 고농도 관정들이 군집해 있는 관리 대상 지역을 식별하기 위해 국지적 공간 자기상관 분석(Local Indicators of Spatial Association, LISA)을 추가로 적용하였다.

Local Moran's I는 각 관정을 중심으로 인접 관정들과의 공간적 연관성을 평가함으로써, 고농도-고농도(High-High, HH), 저농도-저농도(Low-Low, LL) 군집뿐만 아니라 고농도-저농도(High-Low, HL), 저농도-고농도(Low-High, LH)와 같은 공간적 이상치(outlier)를 구분할 수 있다(Anselin, 1995). Local Moran's I는 식(10)과 같다.

$$I_i = (x_i - \bar{x}) \sum_j w_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (10)$$

여기서 I_i 는 i 지점에서의 국지적 Moran's I 값이며, 나머지 기호는 전역 Moran's I와 동일한 의미를 갖는다. 통계적 유의성은 각 관정별로 순열 검정을 통해 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 지하수 중 라돈·우라늄 분포 및 거동 특성

지하수의 라돈, 우라늄 및 수질의 통계학적 분석 결과는 표 2와 같다. 라돈 농도는 2.0 ~ 591.6 Bq/L (평균 68.5 Bq/L, 표준편차(1σ , $N=249$) 85.0 Bq/L, 중앙값 33.2 Bq/L)의 넓은 분포 범위를 보였다. 이러한 농도 수준은 전국 615개 지하수를 분석한 Cho *et al.*, (2007)의 연구(평균 68.9 Bq/L,

Table 2. Descriptive statistics of groundwater Rn-222 (Bq/L), U ($\mu\text{g/L}$), and water-quality parameters by geology (others: mg/L).

Geology	Rn-222	U	pH	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ _N	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Si	F ⁻	
Total (N=249)	Min ~	2.0~	0.1~	5.9~	0.4~	0.1~	2~	0.58~	0.03~	1.71~	0.21~	3.63~	0.15~
	Max	591.6	69.0	9.6	129.3	25.6	53	72.22	19.68	87.35	8.45	18.07	15.08
	Avg	68.5	2.5	7.2	8.8	3.5	9	17.37	3.90	11.57	1.27	8.05	0.57
	(Med.) ± SD	(33.2) ±84.9	(0.2) ±7.9	(7.1) ±0.6	(3.8) ±15.7	(2.3) ±4.1	(8) ±7	(16.07) ±10.03	(3.37)± 2.79	(7.81) ±11.90	(0.93)± 1.16	(7.61)± 2.70	(0.15)± 1.43
Granite (N=59, A)	Min ~	2.0~	0.1~	5.9~	0.4~	0.1~	2~	3.01~	0.09~	2.36~	0.26~	4.02~	0.15~
	Max	591.6	69.0	8.3	46.9	25.6	30	47.50	11.93	45.89	5.15	17.72	4.52
	Avg	149.7	4.3	7.1	8.9	4.7	7	18.48	3.05	10.97	0.92	10.04	0.41
	(Med.) ± SD	(119.2) ±118.5	(0.90) ±10.9	(7.1) ±0.5	(6.4) ±9.4	(2.4) ±5.3	(5) ±6	(16.73) ±10.88	(2.28) ±2.52	(8.26) ±8.71	(0.67) ±0.78	(9.46) ±3.31	(0.18) ±0.74
igneous rock (N=10, B)	Min ~	32.7~	0.1~	6.1~	1.3~	0.1~	3~	0.62~	0.88~	5.16~	0.42~	6.43~	0.15~
	Max	134.3	58.7	8.7	129.3	9.9	16	46.56	8.23	50.84	4.75	11.84	2.81
	Avg	77.4	1.6	7.5	16.8	3.2	8	16.44	3.84	14.71	1.25	8.66	0.76
	(Med.) ± SD	(85.4) ±30.6	(0.1) ±6.3	(7.5) ±0.8	(3.35) ±37.6	(3.1) ±2.7	(8) ±4	(13.93) ±12.80	(3.32) ±2.17	(8.28) ±13.54	(0.79) ±1.27	(8.15) ±1.53	(0.18) ±1.01
Meta morphitic rock (N=104, C)	Min ~	2.0~	0.1~	5.9~	0.4~	0.1~	2~	0.69~	ND~	1.71~	0.21~	4.45~	0.15~
	Max	322.5	58.7	9.6	119.9	22.6	53	72.22	19.22	73.23	7.19	18.07	15.08
	Avg	39.4	1.6	7.3	7.9	2.4	10	16.84	4.11	11.22	1.19	7.57	0.71
	(Med.) ± SD	(20.2) ±55.0	(0.1) ±6.3	(7.2) ±0.7	(2.6) ±17.7	(1.4) ±3.6	(8) ±7	(15.38) ±10.14	(3.50) ±2.94	(6.73) ±12.85	(0.98) ±0.97	(7.23) ±2.23	(0.003) ±1.85
Sedi mentary rock (N=4, D)	Min ~	12.4~	0.1~	7.3~	0.9~	0.8~	5~	7.83~	1.15~	3.70~	0.22~	4.71~	0.15~
	Max	23.6	0.6	8.3	2.0	2.2	11	23.56	8.20	26.48	0.99	7.25	2.16
	Avg	17.0	0.3	7.6	1.5	1.2	7	16.07	3.24	12.72	0.52	6.06	0.66
	(Med.) ± SD	(16.2) ±4.8	(0.3) ±0.2	(7.4) ±0.4	(1.5) ±0.5	(0.9) ±0.6	(6) ±2	(16.44) ±5.75	(2.00) ±2.60	(10.35) ±9.45	(0.44) ±0.29	(6.14) ±0.97	(0.24) ±0.87
Alluvium (N=72, E)	Min ~	2.0~	0.1~	6.0~	0.6~	0.1~	2~	0.58~	0.26~	2.79~	0.32~	4.69~	0.15~
	Max	142.3	36.7	9.3	76.0	15.8	44	48.55	19.68	87.35	8.45	12.66	15.08
	Avg	45.8	2.5	7.1	9.3	4.2	9	17.44	4.28	87.35	1.72	7.95	1.10
	(Med.) ± SD	(30.6) ±39.9	(0.02) ±7.4	(7.0) ±0.7	(6.3) ±10.7	(3.6) ±3.2	(9) ±7	(16.39) ±8.70	(4.00)± 2.68	(8.58) ±12.07	(1.12) ±1.49	(7.81) ±1.88	(0.260) ±2.48

Note: Geology groups are shown with sample size (N) and codes (A-E).

중양값 34.0 Bq/L)와는 유사하나, Cho (2018)의 전국 규모 (5,453개) 연구에서의 결과(평균 94.4 Bq/L, 중양값 52.1 Bq/L)보다는 다소 낮은 수치이다. 이는 이번 연구 지역 내 화강암 분포 비율(약 23.7%)이 전국 평균(약 28.2%)보다 상대적으로 낮기 때문으로 해석된다. 지질별 라돈 농도를 비교한 결과, 화강암 지대에서 가장 뚜렷한 고농도 특성이 관찰되었다. 화강암 지역의 라돈 농도는 2.0~591.6 Bq/L (평균 149.7 Bq/L, 중양값 119.2 Bq/L)로 전체 지질군 가운데 가장 높은 수준을 보였다. 중양값 기준에서도 화강암(A) > 화성암(B) > 층적층(E) > 변성암(C) > 퇴적암(D) 순으로 나타나, 지질학적 배경이 라돈 용출의 일차적 영향 요인임을 확인하였다. 그러나 연구지역 층적층의 경우 선형으로 화강암 내 포함되어 있거나 화강암과 인접해 있다. 이러한 공간적 배치는 층적층의 상대적으로 높은 라돈 농도가 인접한 화강암으로부터 확산 효과를 부분적으로 반영한 결과의 가능성을 나타낸다.

우라늄 농도는 0.1~69 $\mu\text{g/L}$ (평균 2.5 $\mu\text{g/L}$, 표준편차(1 σ , N=249) 7.9 $\mu\text{g/L}$, 중양값 0.2 $\mu\text{g/L}$)으로 화강암 지질에서는 최고값과 함께 가장 높은 중양값(0.9 $\mu\text{g/L}$)이 관찰되었다. 국내 1,013개 지하수를 대상으로 수행된 연구(Yun *et al.*, 2016)에서 우라늄 농도는 0~2,297 $\mu\text{g/L}$ (평균 27.5 $\mu\text{g/L}$, 중양값 1.1 $\mu\text{g/L}$)로 보고되어, 중양값 기준으로는 이번 연구지역과 유사한 저농도 분포 특성을 보였다. 그러나 이번 연구에서는 우라늄 농도가 30 $\mu\text{g/L}$ 이상인 고농도 관정의 비율이 2.8%로, 국내 1,013개 지하수 연구에서 보고된 12.7%에 비해 낮아 평균이 낮은 것으로 해석된다. 한편 이천 쥐라기 화강암 지역 74개 지하수 연구(Cho *et al.*, 2011)에서 우라늄 농도는 0.02~1,640 $\mu\text{g/L}$ (평균 56.8 $\mu\text{g/L}$, 중양값 2.03 $\mu\text{g/L}$)로 비교적 높은 중양값을 보였으나 이는 화강암 지역을 대상으로 한 연구이기 때문이다.

한편, 라돈과 우라늄 고농도 지점의 공간적 분포를 지질과 대비한 결과 라돈은 화강암 지질에 뚜렷한 편중을 보인

Table 3. Results of Pearson correlation analysis.

	Rn-222	U	pH	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ _N	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Si	F ⁻
Rn-222	1											
U	0.29	1										
pH	-0.08	0.10	1									
Cl ⁻	-0.04	-0.00	-0.30	1								
NO ₃ ⁻ _N	0.06	-0.09	-0.48	0.31	1							
SO ₄ ²⁻	-0.19	0.08	0.09	0.10	0.15	1						
Ca ²⁺	-0.02	0.19	-0.08	0.44	0.32	0.36	1					
Mg ²⁺	-0.19	-0.02	-0.16	0.32	0.27	0.42	0.58	1				
Na ⁺	-0.07	0.09	0.38	0.24	-0.07	0.41	0.18	0.19	1			
K ⁺	-0.19	-0.13	-0.43	0.45	0.41	0.22	0.24	0.41	0.12	1		
Si	0.51	0.12	-0.13	-0.02	0.10	-0.20	0.10	-0.02	-0.09	-0.25	1	
F ⁻	-0.06	0.08	0.56	-0.07	-0.23	0.21	-0.10	-0.15	0.59	-0.12	-0.09	1

반면 우라늄은 상대적으로 분산된 분포 특성을 나타냈다. 감시항목 라돈 기준인 148 Bq/L 이상 라돈 고농도 지점은 31개 중 24개(약 77.4%)가, 흑운모화강암(12지점), 복운모 화강암(7지점), 반상화강암(5지점)에 집중적으로 확인되었으며 나머지 7개 지점은 변성암(편마암) 지질에서 확인되었다. 반면, 우라늄 기준인 30 µg/L 이상 고농도 지점은 7개이며, 충적층에서 4개 지점, 화강암에서 2개 지점, 변성암(편마암)에서 1개 지점이 확인되었다. 라돈은 이들 화강암류에 공통적으로 수반되는 흑운모, 백운모, 저어콘, 인회석 등 우라늄 함유 광물이 우라늄 및 그 붕괴계열 원소의 주요 공급원으로 작용할 수 있음을 시사하며, 이러한 화강암류의 지질학적 신호를 주로 반영함을 보인다. 변성암(편마암) 지역의 라돈 고농도 7개 지점은 화강암과의 거리에 따라 두 가지 양상으로 구분된다. 화강암으로부터 500 m 이내에 위치한 1개 지점은 화강암과의 접촉대 또는 영향권 내에 있어 화강암 기원 방사성핵종의 직접적인 공급이 가능하다. 반면, 약 8~10 km 이상 이격된 의암층군(동산층·창촌리층) 등의 지점은 화강암으로부터의 직접 공급보다는 변성암(편마암) 자체에 포함된 방사성원소 함량 또는 지하수 유동 경로를 통한 영향의 가능성을 보여준다. 우라늄 고농도 지점에서는 암상 및 화강암과의 거리에 따라 상이한 특성이 나타난다. 흑운모화강암으로부터 약 100 m 이내에 위치한 충적층 2개 지점(245, 246번)은 인근 화강암의 영향으로 해석되며, 거리와 농도 간 직접적 인과관계가 성립한다. 반면, 화강암으로부터 약 13 km 이상 이격된 충적층 지점(67, 65번)은 화강암과의 직접적 연관성이 낮으며, 수계 상류부의 화강암 분포, 충적층 내 점토광물에 의한 우라늄 흡착·농축, 또는 지표수 유입에 의한 누적 가능성 등 복합적 원인을 추가로 검토할 필요가 있다.

라돈과 우라늄이 동시에 고농도로 나타난 지점은 3개로 확인되었다(64, 68, 247번). 68번 지점(춘천시 신동면, 흑운모화강암·춘천화강암, 중생대 쥐라기)과 247번 지점(홍천군 서석면, 복운모화강암, 시대미상)은 화강암이 직접 분포하는 지역으로, 지질학적 공급원과 수리지화학적 조건이 동시에 충족된 결과로 해석된다. 64번 지점(춘천시 동산면, 의암층군 동산층 안구상편마암, 선캄브리아)은 춘천화강암으로부터 약 8 km, 홍천군 흑운모화강암으로부터 10 km 이상 이격되어 있음에도 양 항목이 동시 고농도를 보이는 사례로, 편마암(변성암) 자체의 방사성원소 함량 또는 지하수 유동 경로를 통한 복합적 기여 가능성을 시사한다. 이와 같이 라돈·우라늄 동시 고농도 지점은 전체 분석 대상 중 소수에 불과하며, 이는 두 원소의 거동을 지배하는 조건이 서로 다름이 다시 확인된다. 라돈은 주로 화강암 분포 지역에서 우세하게 나타난 반면, 우라늄은 동일한 화강암 지역에서도 항상 고농도로 나타나지 않았다. 특히, 복운모화강암은 S-type의 과알루미네질 고분화 암상으로서 높은 우라늄 함량, 낮은 Th/U ratio 및 용해성 우라늄 광물의 산출과 관련되어 우라늄의 유효한 공급원으로 작용할 가능성이 있다(Hwang, 2018). 그러나 이러한 지질학적 잠재성이 곧바로 용존 우라늄의 고농도로 연결되지는 않았다. 이는 우라늄의 고농도 출현이 지질학적 공급원뿐 아니라 개별 지점의 수리지화학적 조건이 함께 충족될 때 제한적으로 나타남을 시사한다.

종합하면, 라돈은 주로 지질 및 인접 화강암체의 공간적 영향에 더 민감하게 반응하는 반면, 우라늄은 지질학적 공급원 위에 수리지화학적 조건이 추가로 충족될 때 제한적으로 고농도화되는 것으로 해석된다. 이러한 차이를 보다 구체적으로 검토하기 위해 다음 절에서는 주요 수질 인자와 라돈·우라늄 농도 간의 상관분석을 수행하였다.

Table 4. Results of Spearman Correlation Analysis.

	Rn-222	U	pH	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ _N	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Si	F ⁻
Rn-222	1											
U	0.42	1										
pH	-0.14	0.32	1									
Cl ⁻	0.03	-0.07	-0.44	1								
NO ₃ ⁻ _N	0.14	-0.31	-0.57	0.51	1							
SO ₄ ²⁻	-0.20	0.13	0.02	0.36	0.04	1						
Ca ²⁺	0.03	0.37	-0.02	0.34	0.16	0.45	1					
Mg ²⁺	-0.15	0.02	-0.23	0.47	0.23	0.50	0.62	1				
Na ⁺	0.05	0.29	0.12	0.46	-0.02	0.35	0.43	0.41	1			
K ⁺	-0.23	-0.13	-0.37	0.53	0.33	0.45	0.37	0.61	0.27	1		
Si	0.41	0.25	0.03	-0.05	-0.05	-0.22	0.12	-0.05	0.13	-0.30	1	
F ⁻	0.09	0.45	0.50	-0.16	-0.42	0.16	0.03	-0.15	0.41	-0.21	-0.00	1

3.2. 자연방사성물질과 환경변수간 상관 및 다변량 분석 결과

라돈(Rn-222) 및 우라늄(U)과 수질 인자 간의 피어슨 상관분석 결과는 표 3과 같다. 라돈은 Si ($r=0.51$, $p<0.0001$) 및 U ($r=0.29$, $p<0.0001$)과 양의 상관관을 보였다. 이는 라돈이 화학반응을 하지 않는 비활성 기체라는 점에서, 우라늄과 공통의 기원암 또는 우라늄 함유 광물과 연관된 지질학적 배경의 영향을 반영한 결과로 해석된다. 반면 우라늄은 다른 수질 인자와 뚜렷한 선형 상관관을 보이지 않았다. 스피어만 상관분석 결과, 라돈이 U ($r_s=0.42$)와 Si ($r_s=0.41$)와 유의한 상관성을 보였으며, 우라늄의 경우 pH ($r_s=0.32$), Ca²⁺ ($r_s=0.37$), Na⁺ ($r_s=0.29$), Si ($r_s=0.25$), F⁻ ($r_s=0.45$)와 단조적 양의 유의한 상관관을 나타냈다(표 4). 이는 우라늄의 거동이 단일 인자에 의해 선형적으로 제어되기보다, 산화적 지하수 환경에서의 용존화와 물-암석 반응의 진전에 따라 복합적으로 조절됨을 시사한다. 우선 pH와의 양의 상관관은 중성 내지 약알칼리 조건(pH 7~9)에서 지하수 내 탄산이온 활동도가 높아지면서 우라늄이 우라닐-탄산염 복합체로 안정화되어 용존 이동성이 증가하는 경향을 반영하는 것으로 해석된다. 이러한 복합체 형성은 광물 표면에 대한 우라늄의 흡착을 억제하는 효과도 동반하므로, pH 상승은 우라늄의 용출뿐 아니라 지하수 내 체류와 이동을 함께 촉진하는 조건으로 작용하는 것으로 보여진다. Ca²⁺과의 양의 상관 역시 이러한 해석과 연결되는데, 지하수에서 Ca²⁺의 증가는 대체로 탄산염 광물의 용해 또는 Ca²⁺함유 규산염의 풍화와 연관되며, 동시에 HCO₃⁻이 풍부한 조건에서는 칼슘-우라닐-탄산염 복합체 형성을 통해 우라늄의 용존 이동성이 더욱 커질 수 있다. 연구지역의 흑운모화강암(춘천화강암)과 대보화강암류에는 사장석이 공통적으로 주요 광물로 포함되며, 이들 사장석의 가수분해는 Ca²⁺과 HCO₃⁻

을 공급하는 중요한 물-암석 반응 경로로 작용했을 가능성이 있다. 비록 이번 연구에서는 HCO₃⁻을 직접 분석하지 않았으나, Ca²⁺과 pH가 함께 우라늄과 양의 관계를 보인 점은 탄산염 완충계가 우라늄 이동에 기여했을 가능성을 시사한다.

Na⁺과 F⁻의 양의 상관관은 물-암석 반응의 진전과 체류시간 증가를 반영하는 지표로 해석될 수 있다. Na⁺ 농도의 증가는 일반적으로 사장석의 풍화와 이온교환 반응에 의해 설명된다. 연구지역의 화강암류 및 변성암(편마암류)에는 사장석이 공통적으로 주요 조암광물로 포함되며, K-장석 또한 다수의 암상에서 함께 산출된다. 따라서 장석류의 풍화 과정에서 방출된 Na⁺이 농도 증가에 기여할 수 있다. 한편, F⁻의 공급원은 암종에 따라 다소 차이가 있을 수 있으나, 연구지역의 흑운모화강암(춘천화강암), 반상화강암 및 흑운모화강암에서는 흑운모와 경우에 따라 각섬석, 복운모화강암에서는 백운모와 흑운모가 주요한 불소 함유 광물로 작용할 가능성이 있다. 또한, 이들 암석에 공통적으로 수반되는 부성분 광물인 인회석 역시 F⁻의 잠재적 공급원으로 고려될 수 있다. 따라서 우라늄이 Na⁺ 및 F⁻와 함께 증가하는 경향은, 물-암석 반응이 진행된 지하수에서 규산염 광물의 풍화 진전과 함께 우라늄의 용출 가능성이 함께 높아졌음을 의미한다.

Si와의 양의 상관 역시 규산염 광물의 풍화가 진행된 지하수일수록 우라늄 용출 가능성이 함께 증가함을 보여준다. 연구 지역에 분포하는 흑운모화강암, 복운모화강암, 반상화강암 모두 석영과 장석류(미사장석·정장석·사장석)를 주성분으로 하고 있어, 규산염 풍화에 의한 Si 공급 체계는 암종에 무관하게 공통적으로 작동하며, 이것이 Si와 우라늄의 상관성이 암종을 가리지 않고 관찰되는 배경으로 이해된다. 즉, 우라늄은 특정 암상 자체의 영향만으로 설명되기

보다는 우라늄을 함유한 기원암의 존재 하에서 규산염 풍화, 탄산염 완충계, 이온교환 및 착화합물 형성 등 복합적인 수리지화학 작용에 의해 농도가 조절된 것으로 해석된다.

정준상관분석(CCA)을 통해 라돈·우라늄 집단과 수질 인자 집단 간의 다변량 상관 구조를 분석한 결과는 그림 2와 같다. 첫 번째 정준변량에서는 Si (0.91)가 높은 적재량을 보여 라돈과 밀접하게 연결되었다. 두 번째 정준변량에서는 Ca^{2+} (0.64), SO_4^{2-} (0.39), pH (0.37), Na^+ (0.34), F⁻ (0.31)가 주요 변수로 작용하며 우라늄과의 높은 연관성을 보였다(그림 2a). 정준상관계수는 각각 0.57과 0.32로, 모두 0.05 수준에서 유의하였다. 지질 집단과의 추가 분석에서는 정준상관계수가 0.54와 0.05로 나타났으며, 역시 통계적으로 유의하였다(그림 2b). 첫 번째 정준변량에서는 화강암(A, 0.98)이 가장 높은 적재량을 보이며 라돈(0.999)과 강한 연관성을 나타냈다. 이는 화강암이라는 하나의 범주로 처리되었으나, 실제로는 춘천분지의 흑운모화강암과 춘천 북부의 복운모화강암, 그리고 홍천군 일대의 반상화강암·흑운모화강암 등 복수의 암종이 포함된다. 이들 화강암류는 암상에 따라 스피린, 인회석, 저어콘, 모나자이트 등의 우라늄 함유 구성분 광물을 수반하는 것으로 보고되며, 이러한 광물학적 배경이 라돈과의 강한 연관성에 일부 기여했을 가능성이 있다. 이와 같이 화강암에서 라돈 농도가 상대적으로 높게 관찰되는 것은 기존 연구 결과와도 일치한다(Guisepppe, 2006; Cho *et al.*, 2012). 반면, 두 번째 정준변량에서는 우라늄(0.97)과 총적층 E (0.84)가 같은 방향성

을 보였으나, 해당 축의 정준상관계수가 약 0.05 수준으로 매우 낮아 지질과 우라늄 간의 선형적 관계를 해석하기에는 통계적 근거가 충분하지 않았다.

상관분석 결과를 종합하면, 라돈은 비활성 기체로서 우라늄·Si 및 화강암과의 상관을 통해 동일한 기원암, 즉 주로 화강암의 영향을 강하게 반영하는 것으로 나타났다. 이는 라돈이 지질학적 배경, 특히 화강암을 포함한 우라늄 함유 기원암의 특성을 반영함을 의미한다. 반면 우라늄은 기원암으로부터 유래하지만, 지하수 내 농도는 pH, 탄산염계 및 물-암석 반응 등 수리지화학적 조건의 영향을 더 크게 받는 것으로 다시 한번 해석된다. 그러나, 지질에서 공급된 신호는 실제 지하수 환경에서 pH, 산화환원 조건, 탄산염 농도, 경도, 체류시간과 같은 여러 수리지화학적 과정에 의해 변화되고, 이러한 변화는 수질 변수에 반영된다(Appello and Postma, 2005; Nikolopoulos *et al.*, 2009; Skierszkan *et al.*, 2020). 따라서 두 요인의 독립적 영향과 공유된 영향을 구분하여 해석할 필요가 있으며, 이를 위해 기여도 분해(variance partitioning)를 적용하여 자연방사성 물질 변동을 결정하는 요인을 보다 정밀하게 규명하고자 하였다.

3.3. 자연방사성물질 변동 요인 및 공간자기상관 해석

라돈·우라늄 농도 변동 요인을 정량적으로 평가하기 위해, 로그 변환된 농도를 대상으로 수질(W), 지질(G), 공간(S) 요인을 포함한 기여도 분해 분석을 수행하였다(표 5). 먼저, 상관분석에서 라돈과 강한 상관을 보인 수질 변수인

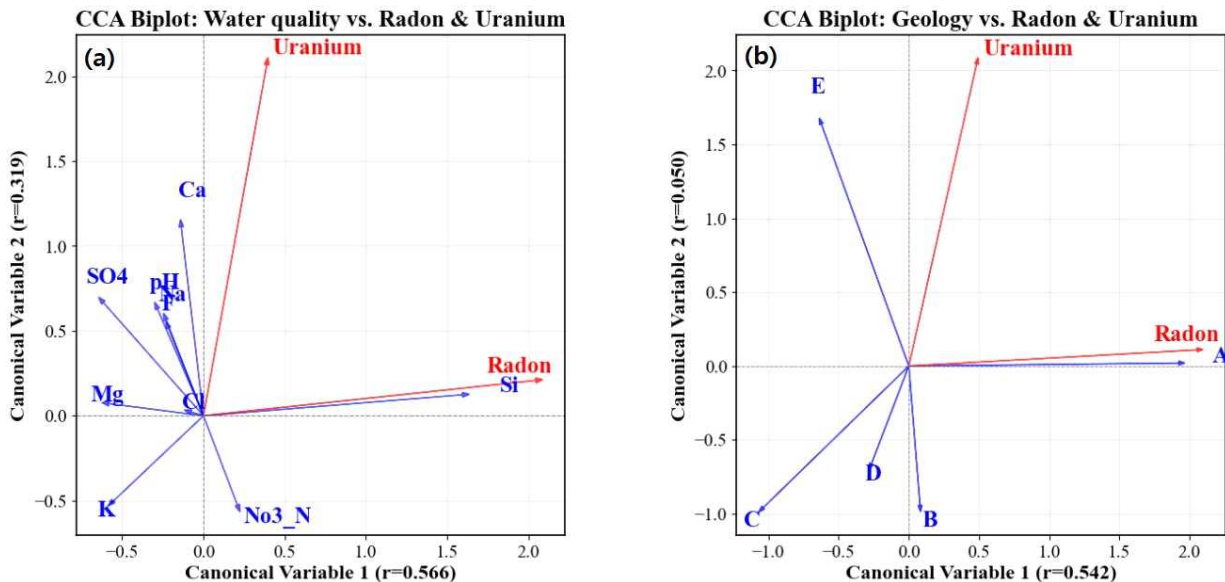


Fig. 2. Canonical correlation analysis (CCA) biplots showing the relationships of radon and uranium with (a) water-quality variables and (b) geological groups. In panel (b), A = granite, B = igneous rock, C = metamorphic rock, D = sedimentary rock, and E = alluvium. Red arrows indicate response variables (radon and uranium), whereas blue arrows indicate explanatory variables.

Table 5. Variance partitioning results for Radon and Uranium (log-scale).

Component	Radon (%), $R^2 = 0.42$	Uranium (%), $R^2 = 0.36$
Unique effects		
Water unique	13.9	32.8
Geology unique	7.0	-0.4
Space unique	2.4	-0.5
Shared effects		
Water \cap Geology	14.7	3.7
Water \cap Space	1.0	0.3
Geology \cap Space	1.9	0.0
All shared	1.0	0.5
Unexplained	58.0	63.6

Notes: Unique effects indicate the independent contribution of each variable set to the total explained variance, whereas Shared effects indicate the proportion of variance jointly explained by two variable sets. Geology includes lithological variables, Hydrochemistry includes physicochemical water-quality variables, and Space includes spatial factors based on sampling coordinates.

Si와 U는 각각 규산염 풍화 진행도와 기원암 우라늄 함량을 반영하는 지질 지시자적 성격을 동시에 가진다는 점에 유의할 필요가 있다. 따라서 이들 변수가 포함된 수질 효과는 순수한 수리지화학적 제어의 결과라기보다, 지질 신호가 수질 변수를 통해 매개되어 나타난 효과로 해석하는 것이 적절하다. 이러한 전제 하에 기여도 분해 결과를 살펴보면, 라돈은 전체 변동의 약 42%($R^2=0.42$)가 설명되었으며, 수질-지질 공유 효과(14.7%)가 단일 요인 중 가장 크게 나타났다. 수질 단독 효과(13.9%)와 지질 단독 효과(7.0%)가 각각 산출되었으나, 앞서 언급한 매개 구조를 고려하면 이 수질-지질 공유 효과는 실질적으로 분리되기 어려운 지질-수질 통합 신호의 반영으로 볼 수 있다. 공간 단독 효과(2.4%)는 제한적으로, 광역 단위의 연속적 농도 구배는 라돈 변동의 주요 요인이 아님을 확인하였다. 반면 우라늄은 전체 변동의 약 36%($R^2=0.36$)가 설명되었으며, 수질 단독 효과(32.8%)가 우세하며 지질 및 공간의 독립효과는 사실상 0에 가까웠다. 공유효과 합계 역시 약 4-5% 수준에 머물렀다. 라돈과 다르게, 우라늄에서는 수질 변수의 단독효과가 지질 신호의 매개로 설명되기 어렵다. 상관분석 결과를 참조하면, pH, F⁻, Ca²⁺, Na⁺ 등 우라늄과 상관을 보인 수질 변수들은 단순한 지질 지시자가 아니라 탄산염 완충계, 착화합물 형성, 이온교환 등 실질적인 수리지화학 반응을 반영하기 때문이다. 즉 우라늄에서 지질 단독효과가 사실상 0에 가까운 것은, 지질이 공급원으로서 작동하지 않아서 아니라 동일한 지질 환경 내에서도 국지적 수리지화학 조건의 충족 여부가 농도를 결정하는 충분조건으로 작용하기 때문으로 해석된다.

종합하면, 라돈은 고농도 지점의 화강암 집중 분포(3.1

절)와 정준상관분석에서의 화강암 적재량 우세(3.2절)를 통해 화강암의 직접적 영향이 일관되게 확인되며, 기여도 분해에서는 이 지질 신호가 Si-U 등 수질 변수에 부분적으로 매개됨으로써 수질-지질 공유효과 (14.7%)가 단일 최대 요인으로 나타나는 구조로 정량화된다. 즉, 라돈 거동은 화강암이라는 지질 공급원의 직접적 영향을 1차적 기반으로 하되, 그 신호가 규산염 풍화 및 기원암을 반영하는 수질 변수에 부분적으로 매개되어 표현되는 지질 우세 구조로 요약된다. 반면, 우라늄은 지질이 필요조건으로 작동하는 가운데 수리지화학적 조건이 충분조건으로 기능하는 수질 우세 구조를 보인다. 이러한 두 원소 간 거동 차이는 고농도 분포 패턴(3.1절), 상관분석(3.2절), 기여도 분해(3.3절)의 세 분석에서 일관되게 확인되며, 각 분석이 동일한 결론을 서로 다른 방법으로 지지하는 구조를 이룬다.

이러한 결과를 바탕으로 공간 군집성을 추가적으로 검토한 결과, 전역 Moran's I 분석($K=10$, permutation=999)에서 라돈은 0.258, 우라늄은 0.052로 모두 양(+)의 공간적 자기상관을 보였다. 각 통계량은 각각 $p = 0.001$ 과 $p = 0.031$ 로 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의하였으며, 이는 두 물질의 농도가 무작위하게 분포하지 않고 인접 지점 간에 유사한 농도가 군집을 이루는 경향이 있음을 의미하지만 우라늄의 Moran's I 값(0.052)은 라돈(0.258)에 비해 상대적으로 낮아 군집성 강도는 제한적인 것으로 나타났다. 전역 Moran's I 분석을 통해 확인된 군집성의 실제 공간적 분포 양상을 파악하기 위해 라돈 농도에 대해 Local Moran's I 분석($k=10$, permutation=999)을 추가로 수행하였다. 반면 우라늄은 전역 Moran's I 분석에서 공간적 자기상관성이 미약하게 나타났으며, 30 $\mu\text{g/L}$ 이상 고농도 시료

수도 7개에 불과하여 우라늄에 대해서는 Local Moran's I 분석을 별도로 수행하지 않았다. 고농도 기준값(148 Bq/L)을 초과하는 라돈 HH (high-high) 군집(≥ 148 Bq/L, $n=11$)은 주로 연구 지역 남부 및 북서부 일부에 분포하였다(그림 3). 이러한 결과는 해당 지역이 라돈 고농도 노출 위험이 국지적으로 집중된 구간임을 시사하며, 지하수 이용 실태를 고려할 때 지속적인 수질 모니터링 및 관리가 우선적으로 요구되는 대상 지역으로 판단된다.

라돈의 공간 군집성(spatial clustering)을 정량적이고 명시적으로 분석한 연구는 국내외에서 극히 제한적이다. 그럼에도 여러 연구에서 라돈은 지질 단위별로 농도 차이를 보이며, 우라늄은 국소적 지화학 조건에 민감하게 반응한다는 결과가 반복적으로 보고되어 왔다. 국내 연구로는 논산 지역 100개 지하수공을 대상으로 라돈 분포가 화강암대에서의 고농도 양상을 보고한 반면, 우라늄은 지화학적 환경 변화에 따라 변동성을 보였다(Cho *et al.*, 2012). 해외에서도 인도 Punjab 지역 연구(Bala *et al.*, 2022)에서 우라늄 농도가 지질보다는 pH·탄산염(HCO_3^-)·전기전도도(electrical conductivity, EC) 등 지화학적 조건 변화에 민감하게 반응하고, 스웨덴 연구(Guiseppe, 2006)에서는 라돈 농도는 지질 단위

에 따라 구조적으로 차이를 보이며, 특히 화강암 및 변성암 지대에서 일관되게 높은 라돈 농도가 보고되는 등 공간패턴을 보였다. 이러한 연구들은 라돈이 지질 배경에 따른 공간적 패턴을 보이며, 우라늄은 국소적인 수리지화학·광물학적 요인에 의해 제어된다는 점에서는 이번 연구의 결과와 일관된 경향을 나타낸다. 그러나 기존 연구와 이번 연구 모두 라돈·우라늄 기원 지질인 화강암 지질영향을 제외했을 때에도 독립적인 공간자기상관이 추가로 존재하는지에 대한 규명은 하지 못했다는 한계를 가진다.

4. 결론

이번 연구는 강원특별자치도 일원의 지하수를 대상으로 라돈-222, 우라늄의 거동 특성을 규명하고자 하였다. 두 물질 모두 일부 고농도 시료의 존재로 인해 평균값과 중앙값 간의 차이가 크게 나타나는 우편경사 분포를 보였다. 지질별 비교에서 라돈 농도는 화강암(중앙값 119.2 Bq/L) > 화성암 > 층적층 > 변성암 > 퇴적암의 순으로 나타나 화강암 지질이 라돈 용출의 일차적 영향 요인임을 확인하였다. 화강암에 선형으로 삽입되거나 인접한 층적층에서 상대적으로 높은 라돈 농도와 화강암 인접 지질에서도 고농도 지점

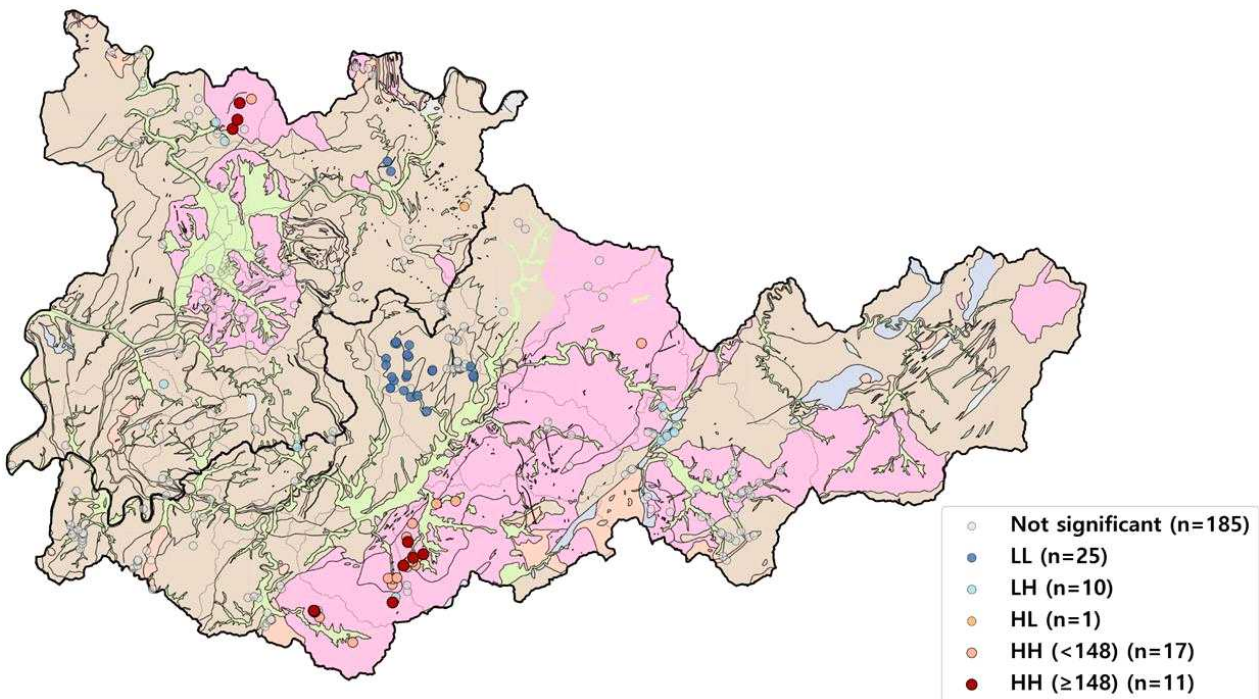


Fig. 3. Local Moran's I (LISA, Local Indicators of Spatial Association) map for groundwater radon. HH (high-high) clusters indicate high-radon sites surrounded by neighboring high-radon sites, representing significant local hotspots, whereas LL (low-low) clusters indicate low-radon sites surrounded by low-radon neighbors. HL (high-low) clusters represent high-radon spatial outliers located among low-radon neighbors, and LH (low-high) clusters represent low-radon spatial outliers located among high-radon neighbors. Non-significant indicates sites without statistically significant local spatial autocorrelation. n indicates the number of samples. Red symbols indicate samples with radon concentrations exceeding 148 Bq/L.

이 확인된다는 점은 암상 자체의 방사성원소 함량뿐 아니라 화강암과의 공간적 구조 및 인접성이 라돈 농도 분포를 결정하는 요인임을 시사한다. 상관 및 다변량 분석에서 라돈은 Si, U 및 화강암과의 강한 연관성을 통해 지질학적 배경을 반영하였으며 기여도 분해 결과는 라돈 농도 변동이 지질 신호가 수질 변수를 통해 매개되어 표현된 지질 우세 구조를 반영함을 의미한다. 또한, 공간군집성 분석에서 라돈은 우라늄보다 뚜렷한 공간적 자기상관과 HH 군집(≥ 148 Bq/L, $n=11$)이 연구지역 남부와 북서부에 집중 분포한 것을 확인하였으며 라돈 분포가 지질학적 배경과 공간적 구조의 복합적 영향을 받는 것으로 나타났다.

우라늄의 경우 화강암 지질에서 가장 높은 중앙값($0.9 \mu\text{g/L}$)이 관찰되었으나, 복운모화강암과 같은 고잠재 우라늄 암종의 지질학적 잠재성이 곧바로 고농도 용존 우라늄으로 이어지지 않는다는 동질한 화강암 분포 지역 내에서도 농도 변동성이 크게 나타났다. 또한, 우라늄은 pH, Ca^{2+} , F⁻ 등과의 상관을 통해 탄산염 완충계와 물-암석 반응 등 수리지화학적 조건에 민감하게 반응하는 것으로 확인되었으며, 기여도 분해 분석에서도 수질 단독효과가 지배적으로 나타났다. 이는 지질이 우라늄 산출의 필요조건으로 작용하는 반면, 실제 용존 우라늄의 이동과 농축은 수리지화학적 환경이 충분조건으로 기능하는 수질 우세 구조임을 시사한다.

종합적으로, 라돈의 거동은 화강암에서 주 분포라는 지질학적 특성과 함께 화강암과의 공간적 구조, 근접성 및 공간 군집성에 의해 복합적으로 제어되며, 우라늄은 지질 기반 위에서 pH, 탄산염계, 산화환원 조건 등 국지적 수리지화학적 환경이 복합적으로 충족될 때에만 제한적으로 고농도 변동이 결정되는 것으로 나타났다. 이러한 두 원소 간 거동 차이는 향후 지역 맞춤형 지하수 관리 및 위해지도 기반 모니터링 전략 수립 시 지질·수질·공간 요인의 상호작용을 통합적으로 고려하는 접근이 필요함을 시사한다.

다만 이번 연구는 몇 가지 한계를 지닌다. 연구지역 내 시료 분포가 불균질하여 공간 분석 결과의 일반화에 제약이 있다. 공간통계 결과 라돈이 유의한 공간적 군집성을 보였으나, 이는 지질 구분을 세분화한 상태에서 검증된 결과가 아니므로, 화강암 외의 다른 지질대에서도 동일한 군집 패턴이 나타나는지 여부를 확인하지 못하였다. 따라서 향후 표본 밀도의 보강과 더불어 지질 단위별 공간 군집성 검증을 통해 라돈의 공간 구조를 보다 체계적으로 규명할 필요가 있다.

감사의 글

본 논문은 기후에너지환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원(과제번호: NIER-2025-01-03-002)을 받아 수행하였습니다.

REFERENCES

- Anselin, L., 1995, Local indicators of spatial association—LISA. *Geographical Analysis*, 27, 93-115.
- Antweiler, R.C. and Taylor, H.E., 2008, Evaluation of statistical treatments of left-censored environmental data using coincident uncensored data sets: I. Summary statistics. *Environmental Science & Technology*, 42, 3732-3738.
- Appelo, C.A.J. and Postma, D., 2005, *Geochemistry, Groundwater and Pollution*, 2nd ed. A.A. Balkema Publishers, Leiden, 649 p.
- Bala, R., Karanveer and Das, D., 2022, Occurrence and behaviour of uranium in the groundwater and potential health risk associated in semi-arid region of Punjab, India. *Groundwater for Sustainable Development*, 17, 100731.
- 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.
- Brella, D., Belkhir, L., Tiri, A., Salhi, H., Lakouas, F.E., Nouibet, R., Amrane, A., Merdoud, R. and Mouni, L., 2023, Identification of the groundwater quality and potential noncarcinogenic health risk assessment of nitrate in the groundwater of El Milia Plain, Kebir Rhumel Basin, Algeria. *Hydrology*, 10, 171.
- Cho, B.W., 2018, Radon concentration in groundwater of Korea. *The Journal of Engineering Geology*, 28, 661-672 (in Korean with English abstract).
- 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*, 21, 259-269 (in Korean with English abstract).
- Cho, B.W., Kim, M.S., Kim, T.S., Han, J.S., Yun, U., Lee, B.D., Hwang, 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*, 22, 427-437 (in Korean with English abstract).
- Cho, B.W., Sung, I.H., Cho, S.Y. and Park, S.K., 2007, A preliminary investigation of radon concentrations in groundwater of South Korea. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 12, 98-104 (in Korean with English abstract).
- Cho, S.Y., Koo, M.-H., Cho, B.W., Jung, Y.-Y. and Oh, Y.H., 2019, Factors controlling the spatial and temporal variability in groundwater ^{222}Rn and U levels. *Water*, 11, 1796.
- Cliff, A.D. and Ord, J.K., 1981, *Spatial Processes: Models & Applications*. Pion, London, 266 p.
- Guissepe, V.E., 2006, Radon in Ground Water: A Study of the Measurement and Release of Waterborne Radon and Modeling of Radon Variation in Bedrock Wells. Ph.D. thesis, University of Maine, Orono, Maine, USA.
- Heckert, N.A., Filliben, J.J., Croarkin, C.M., Hembree, B., Guthrie, W.F., Tobias, P. and Prinz, J., 2002, Handbook 151: NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA.
- Hotelling, H., 1936, Relations between two sets of variates. *Biometrika*, 28, 321-377.

- Hwang, J., 2018, Geological review on the distribution and source of uraniumiferous groundwater in South Korea. *The Journal of Engineering Geology*, 28, 593-603 (in Korean with English abstract).
- International Agency for Research on Cancer, 2012, IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Volume 100D: Radiation. International Agency for Research on Cancer, Lyon, 341 p.
- Jahan, A.A., Jeong, D.H., Youn, J.U., Lee, T.K. and Kim, M., 2025, Multi-scale variance partitioning reveals hidden regional connectivity in groundwater contamination: Implications for drinking water security. *Water Research X*, 29, 100409.
- Jeong, C.H., Lee, Y.J., Lee, Y.C., Kim, M.S., Kim, H.K., Kim, T.S., Jo, B.U. and Choi, H.Y., 2016, Hydrochemistry and occurrences of natural radioactive materials from groundwater in various geological environment. *The Journal of Engineering Geology*, 26, 531-549 (in Korean with English abstract).
- Kang, P.J. and Jin, M.S., 1972, Geological report of the Pungam sheet (1:50,000). Geological Survey of Korea, 62 p.
- Kim, M.-S. and Han, Y.-H., 2024, Policy Directions for Promoting the Water Industry in Gangwon Special Self-Governing Province. Gangwon Research Institute, Chuncheon, 19 p.
- Kim, O.J., Kim, S.U., Yoo, B.H. and Park, B.K., 1974, Geological report of the Gapyeong sheet (1:50,000). Institute of Geology and Mineral Resources, 47 p.
- Langmuir, D., 1978, Uranium solution-mineral equilibria at low temperatures with applications to sedimentary ore deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42, 547-569.
- Lee, B.C., Oh, C.W., Yengkhom, K.S. and Yi, K., 2014, Paleoproterozoic magmatic and metamorphic events in the Hongcheon area, southern margin of the Northern Gyeonggi Massif in the Korean Peninsula, and their links to the Paleoproterozoic orogeny in the North China Craton. *Precambrian Research*, 248, 17-38.
- Lee, D.S., Nam, K.S., Lee, H.Y. and Yang, S.Y., 1974, Geological report of the Chuncheon sheet (1:50,000). Institute of Geology and Mineral Resources, 55 p.
- Lee, J.-Y. and Kwon, K.-D., 2015, Groundwater resources in Gangwon Province: Tasks and perspectives responding to droughts. *Journal of the Geological Society of Korea*, 51, 585-595 (in Korean with English abstract).
- Legendre, P., 2008, Studying beta diversity: Ecological variation partitioning by multiple regression and canonical analysis. *Journal of Plant Ecology*, 1, 3-8.
- Moran, P.A.P., 1950, Notes on continuous stochastic phenomena. *Biometrika*, 37, 17-23.
- Nikolopoulos, D., Vogianis, E. and Louizi, A., 2009, Radon concentration of waters in Greece and Cyprus. *Geophysical Research Abstracts*, 11, EGU2009-3786.
- Pearson, K., 1896, Mathematical contributions to the theory of evolution. III. Regression, heredity, and panmixia. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, 187, 253-318.
- Park, H.I., Jang, K.H., Ji, J.M. and Ko, I.S., 1974, Geological report of the Naepyeong sheet (1:50,000). Institute of Geology and Mineral Resources, 49 p.
- Shin, B.W., Hong, M.S., Lee, Y.D. and Park, B.S., 1975, Geological report of the Jaecin sheet (1:50,000). Institute of Geology and Mineral Resources, 42 p.
- Skeppström, K. and Olofsson, B., 2007, Uranium and radon in groundwater: An overview of the problem. *European Water*, 17/18, 51-62.
- Skierszkan, E.K., Dockrey, J.W., Mayer, K.U., Bondici, V.F., McBeth, J.M. and Beckie, R.D., 2020, Geochemical controls on uranium release from neutral-pH rock drainage produced by weathering of granite, gneiss, and schist. *Minerals*, 10, 1104.
- Smedley, P.L., Smith, B., Abesser, C. and Lapworth, D., 2006, Uranium Occurrence and Behaviour in British Groundwater. British Geological Survey Commissioned Report, CR/06/050N, Keyworth, Nottingham, 60 p.
- Son, C.M., Kim, Y.K., Kim, S.W. and Kim, H.S., 1975, Geological report of the Hongcheon sheet (1:50,000). Institute of Geology and Mineral Resources, 63 p.
- Spearman, C., 1904, The proof and measurement of association between two things. *The American Journal of Psychology*, 15, 72-101.
- UNESCO, 2022, The United Nations World Water Development Report 2022: Groundwater: Making the Invisible Visible. UNESCO, Paris.
- U.S. Environmental Protection Agency, 2000, National primary drinking water regulations; radionuclides; final rule. *Federal Register*, 65, 76708-76753.
- Won, J.K., Ji, J.M., Jeong, J.G., Lee, M.W. and Kim, W.S., 1989, Geological report of the Gapcheon sheet (1:50,000). Korea Institute of Energy and Resources, 55 p.
- World Health Organization, 2017, Guidelines for Drinking-water Quality: Fourth Edition Incorporating the First Addendum. World Health Organization, Geneva.
- Yang, Q., Smitherman, P., Hess, C.T., Culbertson, C.W., Marvinney, R.G., Smith, A.E. and Zheng, Y., 2014, Uranium and radon in private bedrock well water in Maine: Geospatial analysis at two scales. *Environmental Science & Technology*, 48, 4298-4306.
- Yun, S.W., Lee, J.Y. and Park, Y.C., 2016, Occurrence of radionuclides in groundwater of Korea according to the geological condition. *The Journal of Engineering Geology*, 26, 71-78 (in Korean with English abstract).