

다양한 지질환경에서 지하수의 수리화학 및 자연방사성물질 산출특성

정찬호^{1*} · 이유진^{1*} · 이용천¹ · 김문수² · 김현구² · 김태승² · 조병욱³ · 최현영¹

¹대전대학교 건설안전방재공학과, ²국립환경과학원 토양지하수연구과, ³한국지질자원연구원

Hydrochemistry and Occurrences of Natural Radioactive Materials from Groundwater in Various Geological Environment

Chan Ho Jeong^{1*}, Yu Jin Lee^{1*}, Yong Cheon Lee¹, Moon Su Kim², Hyun Koo Kim², Tae Seong Kim²,
Byung Uk Jo³, and Hyeon Young Choi¹

¹Department of Construction Safety and Disaster Prevention Engineering, Daejeon University

²Soil and Groundwater Research Division, National Institute of Environmental Research

³Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

Received 2 December 2016; received in revised form 20 December 2016; accepted 27 December 2016

화강암, 화강편마암, 변성퇴적암류와 같이 다양한 지질환경에서 지하수내 자연방사성물질인 우라늄과 Rn-222의 산출특성에 대한 지하수의 수리화학적 영향, 지질과의 상관성, 단층대의 영향 등에 대해서 알아보려고 하였다. 이 연구를 위하여 영동지역을 대상으로 2차례에 걸쳐 지하수 49점, 지표수 4점을 채취하였다. 지하수내 우라늄과 지표 암석과의 상관성을 알아보기 위해 감마스펙트로메트리를 이용하여 40지점에서 지표방사능을 측정하였다. 지하수 화학적 유형은 Ca-HCO₃, Na-HCO₃, Ca-HCO₃(SO₄+NO₃) 등 3가지 유형을 보인다. 환경부 권고치인 우라늄 30 µg/L를 초과하는 지하수는 총 49지점 중 2점이며, Rn-222의 경우 미국 EPA 기준치인 148 Bq/L를 초과하는 지하수는 총 40지점 중 11점이다. 초과하는 지하수는 주로 화강편마암과 흑운모편마암 지질과 지질경계부에 분포한다. 지표방사능 세기와 지하수내 우라늄함량과는 뚜렷한 상관관계를 보이지 않는다. 아울러 N45°E 방향의 주향이동단층인 영동단층은 82°의 고경도로 상반에 해당되는 화강암 및 화강편마암지역에서 고함량의 우라늄과 Rn-222가 산출되며, 하반에 해당되는 퇴적암지역에는 고함량의 지하수가 확인되지 않는데, 이와 같은 뚜렷한 차이는 지질의 영향과 더불어 단층대가 방사성물질의 이동 및 확산을 차단시키는 역할에도 원인이 있을 것으로 추정된다.

주요어: 우라늄, 라돈-222, 지질경계, 수리화학, 단층, 지질

The purpose of this study is to analyze the relationship of hydrochemistry, geology, fault with occurrence of uranium and radon-222 from the groundwater in the Yeongdong area. In this study, 49 groundwater and 4 surface water samples collected in the study area were collected on two separate occasions. The surface radioactivities were measured at 40 points to know the relationship between the occurrence of uranium in groundwater and surface geology. The chemical composition of groundwater showed three types : Ca-HCO₃, Na-HCO₃ and Ca-HCO₃(SO₄, NO₃). Two groundwater of 49 samples exceeded the maximum contaminant levels of uranium, 30 µg/L, proposed by the Ministry of Environment of Korea and 11 groundwater of 40 samples for Rn-222 concentrations exceeded the 148 Bq/L maximum contaminant level of US EPA. Most of unsuitable groundwater are located in the geological boundary related with the biotite gneiss and the surface radioactivities of rock samples showed no relationship with groundwater geochemical constituents. The strike-slip fault, Yeongdong fault, is N45°E direction and the high concentrations of uranium in upper part of fault, consisted of granite and granitic gneiss are detected but in lower part, consisted of metamorphic sedimentary rock are not detected. It suggests that the natural radioactive concentrations are related with the geologic characteristics and the migration and diffusion of natural radioactive materials are affected by the fault.

Key words: Uranium, radon-222, geological boundary, hydrochemistry, fault, geology

*Corresponding authors: chjeong@dju.kr (C. H. Jeong), geoabby20@gmail.com (Y. J. Lee)

© 2016, The Korean Society of Engineering Geology

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 the original work is properly cited.

서 론

국내 음용수로 사용되는 지하수내 자연방사성물질 중 우라늄과 Rn-222의 산출은 Han and Park (1996)에 의하여 처음 알려진 후 전국을 대상으로 지하수내 고농도 자연방사성물질 산출에 대한 조사가 환경부 주관으로 단계별로 현재 까지 진행되어왔다(NIER, 1999, 2000, 2001, 2002; Jeong et al., 2011, 2012, 2013, 2015, 2016; Ju et al., 2013; Kim et al., 2014). 그동안 연구조사 결과 마을상수도, 간이 급수시설, 민방위비상용급수시설 등 다수의 지하수에서 미국 EPA 권고치인 우라늄 30 $\mu\text{g/L}$ 와 라돈 148 Bq/L 농도를 초과하는 것으로 보고되었다(Cho et al., 2006, 2008, 2009; Sung et al., 1999, 2000, 2001, 2002).

국외의 경우 1960년대 이후부터 지하수내 우라늄과 Rn-222의 조사를 시작하였으며, 높은 농도의 자연방사성물질은 화강암지역에서 산출되는 것으로 알려져 있다(Lowry et al., 1987, Wathern, 1987; Betcher et al., 1988; Cothem, 1990; Banks et al., 1998). 미국의 경우 우라늄, Rn-222 각각 30 $\mu\text{g/L}$, 148 Bq/L으로, 호주의 경우 각각 17 $\mu\text{g/L}$, 100 Bq/L로 음용수 수질기준을 정하였다. WHO와 캐나다의 경우 Rn-222의 수질기준은 없으며, 우라늄은 각각 30 $\mu\text{g/L}$, 20 $\mu\text{g/L}$ 이다. 유럽은 각국마다 조금씩 차이가 있으며 핀란드의 경우 우라늄, Rn-222 각각 100 $\mu\text{g/L}$, 300 Bq/L의 음용수 수질기준을 가지고 있다. 스웨덴, 노르웨이는 우라늄에 대한 수질기준은 없으며, Rn-222의 경우 각각 100~1000 Bq/L, 500 Bq/L의 수질기준을 가진다. 국내의 경우 미국 EPA 기준치를 사용하고 있다.

자연방사성물질이 함유되어 있는 광물들은 광물구조와 화학적 조성이 복잡하고, 지표로 노출된 경우 환경지시인자로서 지구과학 연구분야에서 널리 활용되어져 왔다(Langmuir et al., 1997; Finch and Murakami, 1999). 그러나 자연방사성물질은 주로 암석내 부성분으로 존재하기 때문에 함유도가 높지 않아 광물로서 이용되지 않는 것으로 보고되었으며, 광물들 중 5%만이 필수성분으로 자연방사성물질이 함유하고 있는 것으로 알려져 왔다(Park and Kim, 1998; Mandarino, 1999). 우라늄을 함유한 광물들은 현재 약 218종이며, 이 중 216종만이 국제광물협회(International Mineralogical Association, IMA)에서 공인하였다(Gaines et al., 1997).

자연방사성물질들은 대부분 지하수 음용으로 인하여 인체에 노출되며, 우라늄의 경우 전리방사성(ionizing radiation)에 의해 발암성, 돌연변이성 및 기형성의 부작용을 일으킬 수 있다고 보고되었다(CEPA, 2001; Shin et al., 2002). 라듐-226의 붕괴산물인 Rn-222는 가스형태로 존재하며 호흡으로 인해 인체에 노출될 경우 폐암 발생 가능성을 크게 증가시킬 수 있는 것으로 보고되었다. 라돈 가스는 대기와 토

양뿐만 아니라 지하수내에서도 용존하여 다량으로 존재하는 것으로 알려져 있다. 우라늄은 높은 이동성과 긴 반감기로 상대적으로 지하수내 다량으로 함유되어 있으며, 지하수내 우라늄의 전 세계적인 평균 농도는 0.1~10 $\mu\text{g/L}$ 으로 알려져 있다(Cowart and Osmond, 1980). 불활성기체인 Rn-222의 경우 3.8일의 반감기를 가지고 있어 지하수내 우라늄보다 이동성이 떨어지지만 관정주변에 직접적으로 지질의 영향을 받는 것으로 보고되었다(Michel, 1990). 특히 단층대에서 고농도의 라돈 함량을 보여 대수층 물질과 우라늄 사이에서의 지구화학적 반응도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Loomis, 1987; Lantot et al., 1985). 지하수내 방사성물질을 생성하는 1차적인 근원인 우라늄의 광물학적 정보와 존재형태는 지하수내 자연방사성물질의 물리화학적 거동특성을 파악하는데 유용한 정보를 제공할 수 있다(Choo, 2002)

본 연구에서는 영동지역 다양한 지질환경에서 지하수내 자연방사성물질인 우라늄과 Rn-222의 산출특성에 대한 지하수의 화학적 영향, 단층대, 지질과의 상관성을 알아보고자 하였다.

연구지역

연구지역은 충청북도 영동군 영동읍 주곡리, 임계리, 가리, 서송원리 일대이다(Fig. 1). 이 지역에는 다수의 농업용 지하수가 사용되고 있으며, 포도농사에 대부분 이용되고 있다. 연구지역 남동부의 지질은 선캠브리아기 화강편마암, 흑운모편마암이 대부분을 이루고, 일부분에 운모질 편암류가 분포하며, N45°E 방향의 영동단층이 발달되어 있다. 단층을 기준으로 상부지역인 북서지역은 중생대 백악기 영동층군 명륜동층의 퇴적암류가 분포한다(KIER, 1986).

운모질편암류는 조립질화강편마암 또는 주입편마암내에 포호암상으로 편마암류 엽리와 조화적으로 분포되며, 본 암류에는 녹회석편암, 녹리석견운모편암, 석영견운모편암 등이 포함된다. 흑운모편마암은 변성암이 대부분 흑운모편마암으로 되었으며, 일반적으로 조립질로서 사질암 및 이질기원으로 추정된다. 주 구성광물은 석영, 정장석, 사장석, 흑운모 및 백운모 등으로 되어있으며, 부성분으로 미량의 탄산염류 및 견운모 등이 있다. 영동단층대 부근 화강편마암은 입자가 미립 내지 중립으로 우백질이 우세하여 반화강암 내지 우백질화강암상을 보인다. 주 구성광물은 석영, 정장석, 미사장석 등 우백질로 되어있으며, 미량의 백운모가 있다. 영동층군 명륜동층은 대부분 적색 역암으로 구성되어 있으며, 그 외에 자색 또는 담갈색의 조립질 사암이나 이암이 렌즈상으로 협재되어 있다.

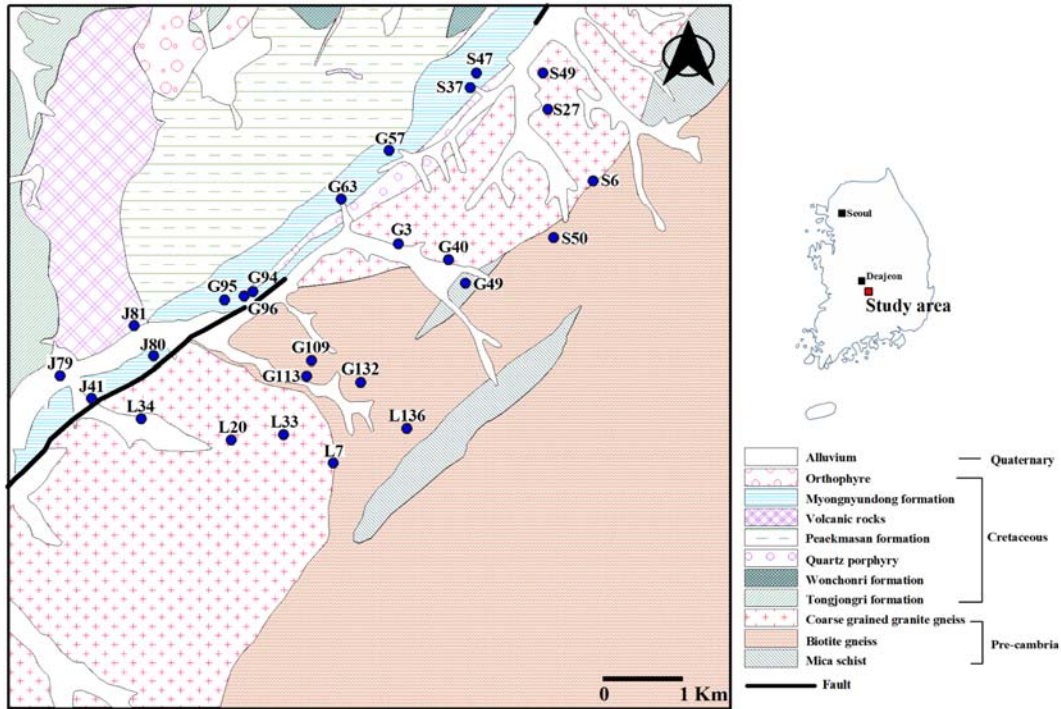


Fig. 1. Geologic map including sampling points of groundwater in study area.

연구방법

물 시료채취 및 현장수질측정

본 연구를 위하여 지하수는 49점, 지표수 4점으로 총 53 점 채취하였다. 지하수 시료 채취는 1차(2015년 7월 15~16 일)와 2차(2015년 09월 21~22일)로 나누어 두 차례에 걸쳐 수행하였다. 현장수질측정은 일정시간 양수 후 대기와의 접촉을 최소화 할 수 있는 조건에서 수소이온농도(pH), 산화 환원전위(ORP), 전기전도도(EC), 용존산소(DO), 중탄산이온(HCO₃⁻) 함량을 측정하였다. 중탄산이온(HCO₃⁻) 함량은 0.05N 농도의 HCl로 산중화적정법을 사용하였다.

지하수의 현장수질측정은 Orion 5 star 모델의 휴대용 측정기를 이용하였으며, 주요 양이온 및 음이온, 우라늄을 포함한 미량원소 분석을 위하여 원수를 0.45 μm 공극의 필터에 통과시켜 부유물질을 제거 한 후 폴리에틸렌 용기(60 mL)에 담았다. 용존 이온성분이 용기에 흡착 또는 침전을 방지하기 위하여 양이온 시료에는 적정량의 농질산을 첨가하여 pH 2이하로 유지하였다(Greenberg et al., 1992).

지하수 화학성분 및 라돈 분석

채취된 지하수 시료를 분석하기 전까지 4°C 이하에서 냉장 보관하였으며, 주요 양이온(Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Sr²⁺ Si, Fe) 및 우라늄을 포함한 미량원소는 한국기초과학지원연구원 오창센터의 원자흡광분광분석기(Unicam model 989, AAS), 유도결합 플라즈마 원자방출분광기(ICP-mass optima

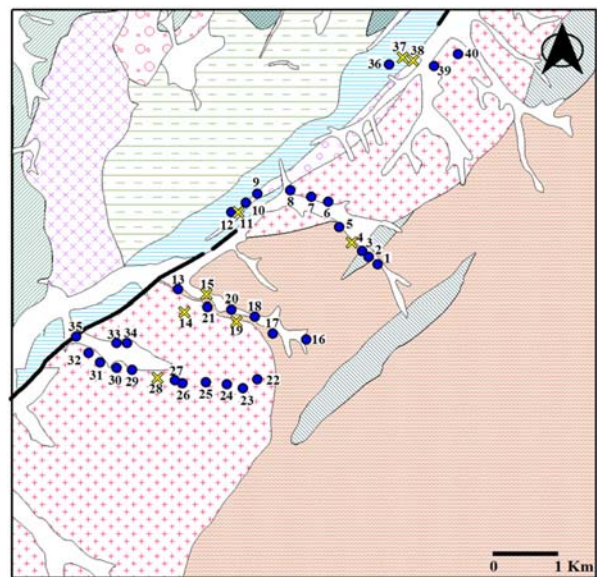


Fig 2. Measurement points of the surface radioactivities in the study area.

4300DV, ICP-AES), 유도결합 플라즈마질량분석기(Fison model PQ III, ICP-MS) 등의 장비로 분석하였다. 주요 음이온성분(F⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃²⁻)은 한국기초과학지원연구원 오창센터에서 유도결합 플라즈마 질량분석기(Inductively Coupled Plasma System, ICP System) 등의 장비로 분석하였다. 라돈가스를 분석하기 위해서 시료는 대기와의 접촉을 최대한 최소화 하여 22 mL 유리용기에 지하수 시료 15

mL와 액체섭광물질(Optiphase Hisafe 3) 5 mL를 첨가하여 5분 동안 충분히 혼합시킨 후, 한국기초과학지원연구원 오창센터에서 분석하였다.

지표방사능 측정

휴대용 감마스펙트로미터(Model GR-320 envi spec, SAIC detector)를 이용하여 지표암석 40개 지점에 대한 지표방사능세기를 측정하였다. 측정값은 총방사선세기(Tot, ppm)와 K (%), U (ppm), Th (ppm)의 성분으로 각각 환산하여 구하였다. Fig. 2에서 휴대용 감마스펙트로미터를 이용한 지표방사능세기 측정 지점을 보여준다.

수리지화학 특성

현장수질측정결과

지하수의 현장수질(pH, ORP, EC, DO)측정결과는 Table 1에 정리하였다. 시기별 질산염(NO₃)의 농도에 따른 현장수질 측정 자료의 특성을 보여주는 통계자료로 박스-휘스커도(Box-Whisker plot)를 심도와 지질에 따라 Fig. 3과 Fig. 4에서 각각 보여준다.

수소이온농도(pH)는 6.28~8.69의 범위로 시기별 큰 차이가 없으며, 산화환원전위(ORP) -40~253 mV의 범위로 일부

를 제외하고 대부분 산화환경으로 용존산소함량(0.89~9.49 mg/L) 범위의 잘 일치하여 강수의 침투와 지하수의 순환이 비교적 빠른 것으로 보인다. 전기전도도(EC)는 58.9~756 μS/cm의 범위로, 지하수별 큰 차이를 보인다. 이는 지질과의 연관성 특히 퇴적암의 영향과 지표부의 오염물질의 유입에 의해 전기전도도 값을 높이는 것으로 추정되며 자세한 내용은 후술된다.

지하수의 pH와 전기전도도의 특성과 심도와의 상관성을 알아보기 위해 대표적인 오염물질인 질산염(NO₃)의 자연상태의 최대농도를 10 mg/L로 가정하고, 그 이하의 함량을 갖는 지하수를 대상으로 보면, 심도가 깊어질수록 pH와 전기전도도는 증가하는 경향을 보이며, 산화환원전위와 용존산소량은 감소하는 경향을 보인다. 이러한 경향은 지하수의 심도에 따른 특성을 어느 정도 반영하는 것으로 보인다. 질산염 농도가 10 mg/L 이상인 지하수들은 전기전도도와 용존산소량이 심도별로 증가와 감소하는 경향을 각각 보인다. 반면에 pH와 산화환원전위는 심도별로 큰 특징을 보이지 않는다. 지질별로 구분하면 질산염이 10 mg/L 이상인 지하수들이 화강암 지질에서 전기전도도와 용존산소량이 가장 넓은 분포를 보인다. 따라서 지질의 영향보다는 심도에 따른 지표오염물질의 유입 등이 수리지화학 특성에 더 큰 영향을 미치는 것으로 보인다.

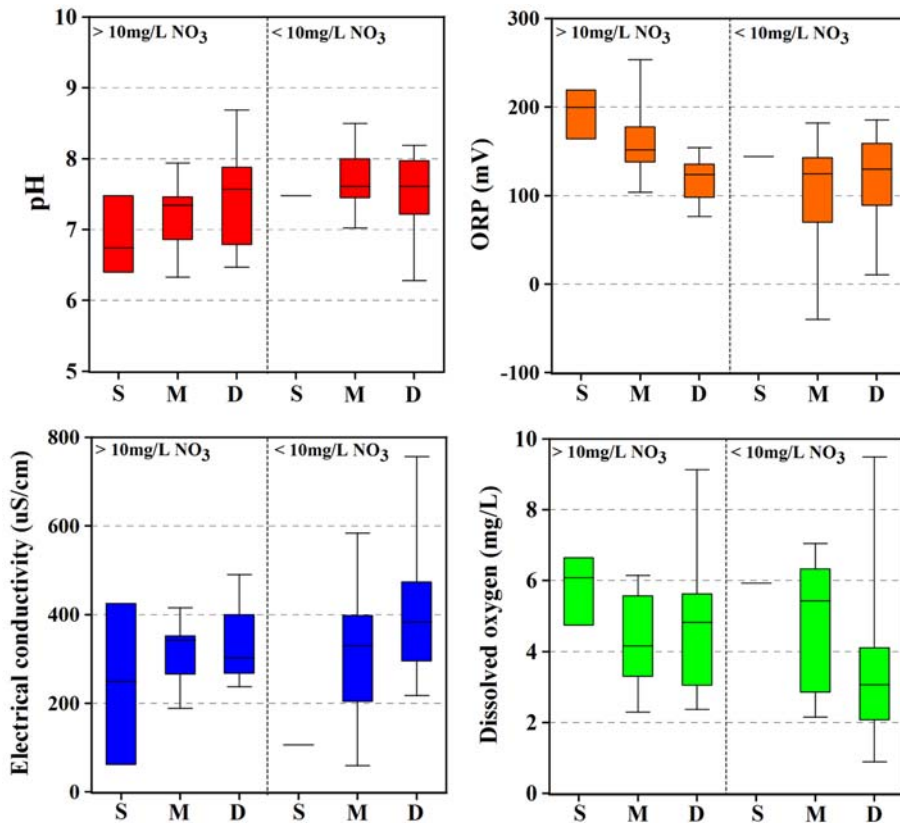


Fig. 3. Box-Whisker plots showing the statistical variations of pH, oxidation reduction potential (ORP), electrical conductivity, and dissolved oxygen content of groundwater samples according to NO₃ concentration and depth.

Table 1. Geochemical composition of groundwater and surface water samples in the yeongdong area. (unit : mg/L)

Sample ID.	Sampling Date (Y/M/D)	pH	ORP (mV)	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	DO	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Sr^{2+}	Fe	Si	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-	NO_3^-	F^-	E.N (%)	
G3(1)	15/07/15	7.47	123	767	4.11	76.1	13.1	34.7	6.33	0.25	0.00	13.9	213	69.0	23.3	34.8	0.31	3.15	
G3(2)	15/09/21	6.62	132	468	5.02	59.3	9.90	15.2	8.80	0.32	0.01	12.1	85.4	49.0	23.5	120	0.10	-3.61	
G40(1)	15/07/15	7.28	185	535	1.85	78.1	13.2	12.9	3.49	0.78	0.24	9.78	261	40.7	16.0	0.13	0.00	0.52	
G40(2)	15/09/21	7.22	127	441	9.49	65.2	12.1	21.5	1.44	1.14	0.01	10.0	241	38.5	11.8	0.12	0.08	1.30	
G49(1)	15/07/15	7.86	182	78.0	7.05	3.60	1.61	3.40	0.53	0.03	0.06	5.44	11.7	5.30	3.13	5.46	0.00	-0.59	
G49(2)	15/09/21	7.49	124	58.9	6.33	4.83	2.10	4.28	0.68	0.04	0.02	6.18	15.3	6.82	3.10	4.71	0.04	5.14	
G57(1)	15/07/15	6.40	216	62.0	6.53	3.01	0.71	4.46	2.83	0.02	0.05	8.57	15.2	5.12	5.06	0.72	0.00	-3.63	
G57(2)	15/09/21	7.48	144	106	5.93	8.52	1.46	13.3	1.80	0.17	0.01	11.7	51.9	4.59	5.40	3.90	0.10	0.38	
G63(1)	15/07/15	7.36	254	410	5.76	48.3	8.92	14.8	1.33	0.70	0.03	18.9	113	22.2	21.8	48.0	0.00	1.61	
G63(2)	15/09/21	7.22	156	352	4.16	49.7	8.83	14.9	1.45	0.70	0.01	19.3	119	20.2	22.1	58.6	0.03	-0.58	
G94(1)	15/07/15	7.04	121	258	6.01	21.9	4.93	11.6	4.70	0.15	0.03	7.17	46.5	17.6	19.7	31.4	0.00	-1.49	
G94(2)	15/09/21	6.47	146	237	9.13	26.9	6.11	11.4	4.63	0.21	0.04	7.31	39.7	19.8	22.2	32.4	0.02	5.31	
G95(1)	15/07/15	7.94	151	342	3.30	42.0	6.49	15.8	3.70	0.69	0.02	12.3	178	6.98	9.72	4.46	0.17	0.00	
G95(2)	15/09/21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G96(1)	15/07/15	7.34	52.0	204	6.09	17.1	3.97	11.0	3.20	0.14	0.05	6.70	31.8	14.1	22.0	25.2	0.00	-2.84	
G96(2)	15/09/21	6.67	156	266	3.16	29.2	6.55	11.1	6.25	0.17	0.01	7.42	76.3	24.8	21.5	36.8	0.03	-2.4	
G109(1)	15/07/15	8.05	-40.1	289	2.20	29.2	10.6	7.19	3.11	0.31	0.03	6.10	110	18.7	12.2	10.9	0.11	-0.08	
G109(2)	15/09/21	7.46	104	261	2.29	30.0	9.69	8.12	5.01	0.26	0.03	7.10	88.5	21.5	13.6	22.1	0.04	2.52	
G113(1)	15/07/15	7.50	84.6	372	5.55	25.1	18.7	15.9	2.02	0.12	0.03	13.3	90.5	17.2	31.7	50.0	0.00	-0.06	
G113(2)	15/09/21	6.86	177	348	4.67	27.4	20.2	16.3	1.34	0.12	0.02	13.5	115	15.3	38.3	59.0	0.04	-5.78	
G132(1)	15/07/15	8.19	10.3	464	5.53	13.9	5.13	85.0	1.74	0.69	0.02	7.53	272	4.94	5.02	0.00	2.11	1.65	
G132(2)	15/09/21	7.75	105	442	2.99	14.4	5.53	95.6	1.53	0.76	0.02	7.63	324	2.50	4.51	0.02	2.25	-1.08	
J41(1)	15/07/15	7.23	119	342	3.55	36.8	8.35	9.61	5.80	0.16	0.01	7.11	62.5	26.9	16.3	61.5	0.00	0.93	
J41(2)	15/09/21	6.33	220	289	3.71	33.8	8.24	9.75	8.15	0.32	0.01	7.20	91.5	27.5	14.6	51.5	0.02	-5.02	
J79(1)	15/07/15	7.06	219	425	6.64	39.6	9.55	14.1	10.4	0.30	0.03	6.96	41.6	37.8	20.9	102	0.00	-0.92	
J79(2)	15/09/21	6.42	184	353	5.62	38.6	9.35	15.3	10.4	0.29	0.06	6.69	45.8	44.3	22.7	95.8	0.03	-3.06	

Table 1. (continued) (unit : mg/L)

Sample ID.	Sampling Date (Y/M/D)	pH	ORP (mV)	EC (μS/cm)	DO	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Si ²⁺	Fe	Si	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	E.N (%)	
J80(1)	15/07/15	8.69	84.4	410	3.45	30.2	7.81	25.6	1.88	3.56	0.01	8.24	183	6.82	7.34	5.05	0.00	-1.64	
J80(2)	15/09/21	7.47	89.0	345	2.38	38.3	10.1	28.9	2.17	4.61	0.01	9.20	238	4.50	8.87	0.9	0.06	-2.46	
J81(1)	15/07/15	8.21	154	338	2.37	8.70	0.76	81.2	1.30	1.09	0.02	6.78	192	15.8	4.62	0.00	4.44	5.96	
J81(2)	15/09/21	8.17	139	408	3.14	8.37	0.72	89.7	1.28	1.11	0.01	6.91	259	15.9	4.91	0.0	4.61	-3.33	
L7(1)	15/07/16	7.56	97.9	249	3.05	28.8	9.90	9.08	1.79	0.22	0.01	13.9	121	14.9	6.27	5.37	0.00	2.58	
L7(2)	15/09/21	6.72	178	237	0.89	29.9	10.1	9.18	1.42	0.22	0.01	14.3	131	16.1	6.76	7.31	0.04	-0.62	
L20(1)	15/07/16	8.50	133	584	2.15	5.15	1.78	142	2.31	0.56	0.03	5.20	381	1.96	4.87	0.00	3.06	1.73	
L20(2)	15/09/22	8.00	70.0	429	2.86	13.9	4.06	89.8	1.77	0.62	0.01	7.85	247	10.7	9.40	0.05	1.92	4.63	
L33(1)	15/07/16	7.97	87.1	296	3.42	40.0	7.91	16.4	1.07	0.59	0.04	12.8	178	10.6	3.41	0.23	0.44	2.30	
L33(2)	15/09/22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L34(1)	15/07/16	7.91	140	333	4.04	42.8	6.84	17.7	1.47	0.30	0.01	10.8	121	20.6	11.9	34.4	0.25	3.08	
L34(2)	15/09/22	7.74	135	302	2.77	41.6	6.63	17.9	1.34	0.32	0.00	10.7	146	21.1	11.8	30.1	0.17	-3.05	
L136(1)	15/07/16	6.79	76.5	490	3.42	23.0	7.44	6.99	9.65	0.11	0.04	7.44	67.8	20.6	20.1	29.5	0.13	-5.54	
L136(2)	15/09/21	6.28	159	217	2.41	21.8	7.53	7.67	9.60	0.12	0.02	7.96	68.6	19.3	23.5	8.98	0.07	-1.01	
S6(1)	15/07/16	7.71	121	315	4.82	27.7	15.9	17.1	0.90	1.14	0.02	9.57	171	11.4	12.3	0.54	0.12	0.77	
S6(2)	15/09/22	7.90	132	302	2.08	29.2	15.6	18.7	0.85	1.25	0.01	9.62	183	10.9	13.4	0.51	0.08	-0.49	
S27(1)	15/07/16	7.72	125	385	5.31	60.9	12.5	13.5	1.50	1.88	0.20	9.05	219	20.0	8.14	0.19	0.16	5.05	
S27(2)	15/09/22	7.45	143	398	3.16	62.2	13.2	12.5	1.60	1.98	0.04	7.48	275	23.6	9.04	0.01	0.07	-4.78	
S37(1)	15/07/16	7.57	124	275	5.62	30.9	4.67	21.4	1.19	0.35	0.01	17.0	114	6.26	9.98	31.1	0.19	2.02	
S37(2)	15/09/22	7.88	132	266	5.46	32.9	4.92	21.3	1.12	0.36	0.00	17.9	131	5.74	11.2	40.7	0.15	-3.82	
S47(1)	15/07/16	7.34	138	415	6.15	59.6	8.41	15.0	1.91	0.63	0.02	18.4	102	25.7	20.9	70.2	0.00	5.30	
S47(2)	15/09/22	7.40	138	332	4.60	48.7	6.92	13.6	1.33	0.57	0.01	19.4	122	11.7	13.4	61.5	0.04	0.16	
S49(1)	15/07/16	7.48	164	145	4.75	13.0	3.70	6.13	2.46	0.08	0.01	6.81	28.0	12.4	7.10	22.1	0.00	0.38	
S49(2)	15/09/22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S50(1)	15/07/16	7.02	152	190	6.41	17.4	5.53	8.43	1.20	0.23	0.02	10.5	55.9	7.76	6.16	22.8	0.00	3.00	
S50(2)	15/09/22	7.47	147	189	5.57	21.3	7.65	8.29	1.00	0.24	0.00	10.3	79.3	4.84	5.65	21.1	0.05	4.47	

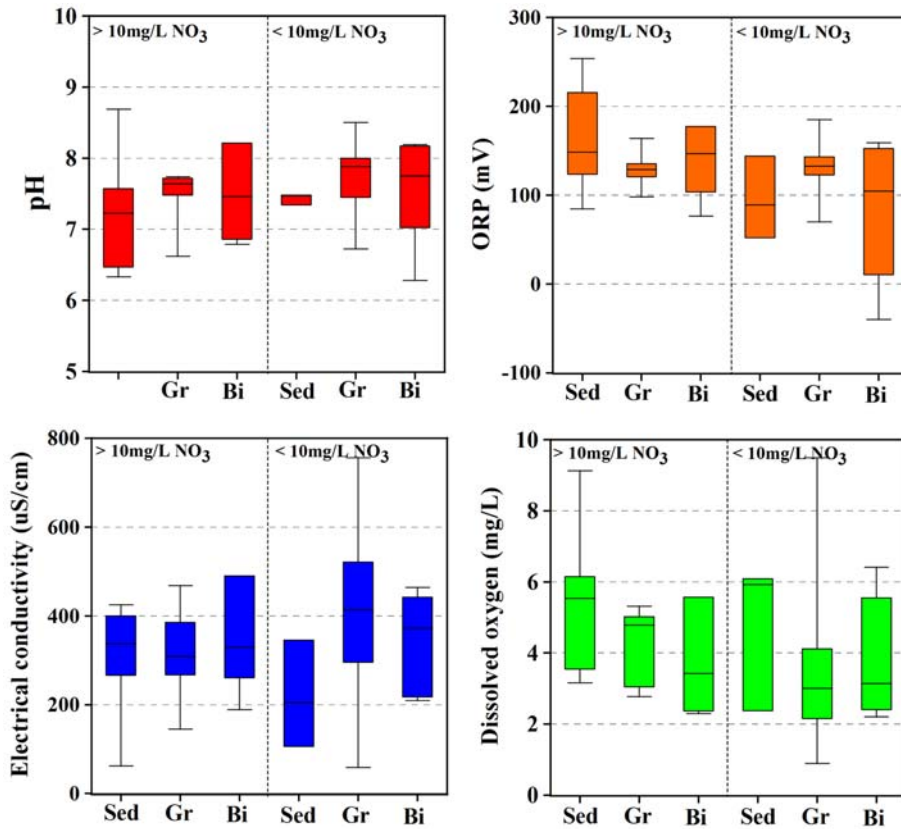


Fig 4. Box-Whisker plots showing the statistical variations of pH, oxidation reduction potential (ORP), electrical conductivity, and dissolved oxygen content of groundwater samples according to NO₃ concentration and geology (Sed: Sedimentary rock, Gr: Granite gneiss including 1 sample in volcanic rock, Bi: Biotite gneiss including 1 sample in schist).

주요 화학 성분

지하수의 주요 화학성분은 Table 1에서 보여주며, 화학성분에 대한 통계적 특성은 Fig. 5에서 통계분석 기법인 박스-휘스커도(Box-Whisker plot)로 보여준다. 연구지역지하수내 대표적인 생활환경 오염물질인 질산염(NO₃⁻)의 농도가 높아서 자연상태에서 기대할 수 있는 최대농도를 10 mg/L 이하로 가정하고, 이를 기준으로 이온농도를 지질별로 구분하여 제시하였다.

질산염의 농도가 10mg/L 이상인 지하수의 경우 Cl⁻, SO₄²⁻, K⁺, Mg²⁺의 농도가 10 mg/L 이하인 비교적 지표오염의 영향이 없는 지하수와 비교하면 상대적으로 높은 농도 범위를 보인다. 반면에 Na⁺, HCO₃⁻의 농도는 반대의 경향을 보인다. 따라서 지하수내 Cl⁻, SO₄²⁻, K⁺, Mg²⁺의 성분은 물-암석반응에 의한 공급뿐만 아니라 상당한 함량이 오염물질로부터 공급되었음을 지시한다. 이는 Fig. 6에서 보여주는 상관관계도에서 확인될 수 있다.

Fig. 6은 지하수내 NO₃의 함량에 따른 음이온들의 상관관계를 도시하였다. NO₃의 함량은 불소(F)와 중탄산(HCO₃)은 상관성을 보이지 않는 반면, SO₄와 Cl과는 정의 상관관계를 보여 불소와 중탄산은 대체적으로 물-암석 상호반응에

의한 공급으로 보여지며, SO₄와 Cl의 높은 농도는 NO₃와 함께 오염의 기원이 상당한 비중을 차지하는 것으로 보인다. 연구지역 과수원이 주를 이루어 농사에 사용된 질소비료 등의 오염물질이 지하수로 유입되었을 가능성이 크다.

음이온 중 F의 함량이 음용수 기준 1.50 mg/L를 초과하는 지점은 3개 지점(G-132, J-81, L-20)으로, 1차와 2차에 각각 2.11~4.44 mg/L의 농도와 1.92~4.61 mg/L의 농도를 보이며, 질산염과의 관계성을 보이지 않으며, 불소는 Na과 HCO₃의 농도와 높은 상관성을 보여준다. 특히 불소가 높은 지하수는 물-암석반응에 의해 편마암내 흑운모 등의 (OH⁻)를 치환한 불소(F)의 용해에 의하여 용출된 것으로 보이며, 이는 흑운모와 상당한 물-암석의 반응이 진행되었음을 지시한다.

Table 5에서는 수리화학성분 및 자연방사성물질 상관관계를 보여준다. K와 Cl, NO₃은 각각 0.49, 0.56으로 상관성을 보여, 이들 성분은 비료 등 지표오염물질에 의한 공급의 가능성을 시사한다. Na와 HCO₃, F와는 0.74, 0.88으로 비교적 높은 상관성을 보여 이는 물-암석 상호반응에 의한 자연적 기원의 영향을 시사한다.

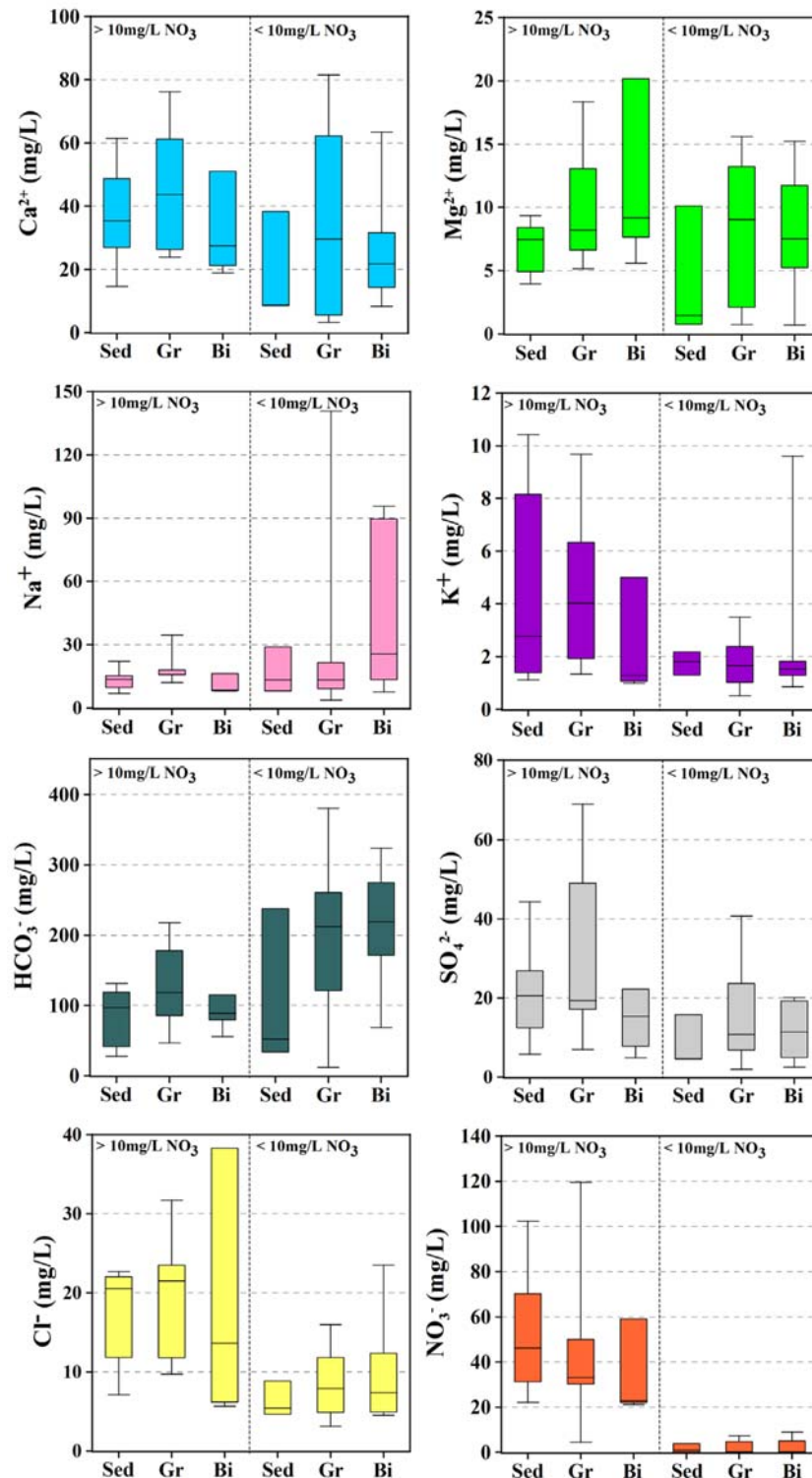


Fig 5. Box-Whisker plots showing the statistical variations of major ions in groundwater samples by NO₃ concentration and geology (Sed: Sedimentary rock, Gr: Granite Gneiss, Bi: Biotite Granite)

미량원소 성분

지하수내에 함유된 미량원소는 Li, B, Mn, Cu, Zn, Ba 등이 상대적으로 풍부하게 확인되었다(Table 2). 이들의 농도는 수십에서 수백 µg/L의 농도범위를 보인다. 우리나라

0.02~70.8 µg/L의 범위를 보이며, 미국 EPA 권고치인 30 µg/L 초과한 지점은 두 지점(S27(1), S27(2))이다. 우리나라를 포함한 미량원소는 뚜렷한 상관관계를 보이지 않으며, 우리나라와 관련된 자세한 내용은 후술된다.

Table 2. Minor and trace composition of groundwater samples collected in the study area (unit : µg/L)

Sample ID.	Sampling Date (Y/M/D)	Li	B	Al	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Rb	Mo	Sb	Cs	Ba	Pb	U
G3(1)	15/07/15	44.4	26.5	3.40	<0.5	0.31	19.4	0.23	1.07	3.37	24.3	<0.5	5.33	3.87	1.16	0.73	76.6	0.55	27.0
G3(2)	15/09/21	12.4	44.1	3.07	<0.5	0.56	6.86	0.16	0.92	3.68	78.7	<0.5	5.51	0.81	1.63	0.58	81.7	<0.1	1.79
G40(1)	15/07/15	11.0	12.4	2.71	<0.5	0.28	2.43	1.84	2.77	3.49	11.7	1.66	3.57	0.61	0.72	0.45	217	0.28	15.9
G40(2)	15/09/21	22.1	12.6	4.22	<0.5	0.43	125	0.79	1.52	1.96	13.1	1.57	2.95	1.20	0.39	0.39	227	<0.1	10.6
G49(1)	15/07/15	0.16	3.54	5.33	<0.5	0.26	0.65	<0.1	0.40	5.56	16.1	<0.5	0.48	0.05	<0.1	<0.1	4.29	0.22	0.04
G49(2)	15/09/21	0.48	14.3	6.14	<0.5	0.26	2.77	<0.1	0.52	2.91	22.4	<0.5	1.67	0.06	<0.1	<0.1	54.9	<0.1	0.02
G57(1)	15/07/15	0.45	4.38	15.6	<0.5	0.36	1.11	<0.1	0.71	4.32	29.8	<0.5	0.74	0.05	<0.1	<0.1	7.41	0.42	0.11
G57(2)	15/09/21	24.0	4.23	2.83	1.15	0.68	0.40	<0.1	0.51	2.57	11.6	3.04	0.99	1.17	<0.1	<0.1	43.1	<0.1	0.21
G63(1)	15/07/15	12.0	2.77	2.47	1.02	0.39	0.33	<0.1	0.40	2.39	32.5	<0.5	1.24	0.04	<0.1	0.38	122	0.18	0.14
G63(2)	15/09/21	12.3	2.49	3.44	<0.5	0.61	0.20	<0.1	0.37	1.52	9.27	<0.5	1.22	0.05	<0.1	0.35	114	<0.1	0.12
G94(1)	15/07/15	0.12	13.4	2.32	<0.5	0.24	0.16	<0.1	0.38	2.56	13.6	<0.5	1.92	0.16	<0.1	<0.1	40.9	0.21	0.02
G94(2)	15/09/21	0.31	3.18	4.22	<0.5	0.22	0.64	<0.1	0.40	2.45	18.4	<0.5	0.56	0.06	<0.1	<0.1	5.56	<0.1	0.15
G95(1)	15/07/15	23.8	5.45	2.83	1.66	0.39	0.23	<0.1	0.45	4.78	37.6	1.24	1.55	0.51	<0.1	0.57	112	0.46	1.49
G95(2)	15/09/21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G96(1)	15/07/15	0.19	8.38	2.90	<0.5	0.43	2.51	<0.1	0.58	3.10	45.8	<0.5	1.21	0.06	<0.1	<0.1	40.0	0.12	0.02
G96(2)	15/09/21	0.17	16.4	3.11	<0.5	0.28	0.53	<0.1	1.22	8.31	36.3	<0.5	2.43	0.18	<0.1	<0.1	50.8	0.45	0.02
G109(1)	15/07/15	2.21	7.96	5.44	<0.5	0.27	10.2	<0.1	0.40	3.25	25.1	<0.5	2.31	0.15	0.46	0.26	198	0.10	3.31
G109(2)	15/09/21	1.40	13.7	2.29	<0.5	0.30	4.33	<0.1	0.47	6.50	57.6	<0.5	2.73	0.09	0.28	0.29	189	<0.1	1.30
G113(1)	15/07/15	3.43	3.04	2.50	<0.5	1.29	0.67	<0.1	0.97	3.88	26.2	1.30	3.10	0.43	<0.1	0.39	32.1	0.19	3.89
G113(2)	15/09/21	3.69	3.25	2.40	<0.5	1.65	1.14	<0.1	1.58	4.28	26.2	1.46	3.08	0.46	<0.1	0.34	30.0	<0.1	3.48
G132(1)	15/07/15	70.4	22.9	3.19	<0.5	0.31	1.22	<0.1	0.34	6.30	10.9	<0.5	4.20	2.37	<0.1	0.62	159	0.24	1.67
G132(2)	15/09/21	80.4	27.8	2.23	<0.5	0.28	1.30	<0.1	<0.2	3.82	10.2	<0.5	4.22	1.91	<0.1	0.58	160	<0.1	1.55
J41(1)	15/07/15	1.92	18.0	2.13	<0.5	0.33	0.22	<0.1	0.89	18.3	53.3	<0.5	2.61	0.08	<0.1	0.58	189	0.79	0.09
J41(2)	15/09/21	1.60	24.6	4.19	<0.5	0.37	0.51	<0.1	6.00	373	442	<0.5	2.78	0.06	<0.1	0.54	164	4.84	0.08
J79(1)	15/07/15	0.30	40.8	2.38	<0.5	0.49	0.51	<0.1	0.73	2.25	25.7	<0.5	3.65	0.18	<0.1	<0.1	96.4	0.09	0.02
J79(2)	15/09/21	0.20	41.4	2.41	<0.5	0.32	3.04	<0.1	2.41	10.8	116	<0.5	2.89	0.07	<0.1	<0.1	88.3	<0.1	0.02

Table 2. (continued) (unit : µg/L)

Sample ID.	Sampling Date (Y/M/D)	Li	B	Al	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Rb	Mo	Sb	Cs	Ba	Pb	U
J80(1)	15/07/15	210	53.8	3.56	<0.5	0.22	7.24	<0.1	0.21	1.31	3.60	<0.5	0.93	3.77	<0.1	0.30	182	0.15	0.14
J80(2)	15/09/21	63.2	8.46	5.10	3.99	0.31	0.85	<0.1	0.33	4.12	28.7	4.84	1.72	0.11	<0.1	1.11	741	0.21	2.48
J81(1)	15/07/15	61.6	9.53	2.57	3.62	0.30	0.37	<0.1	0.27	3.28	20.6	4.16	1.84	0.21	0.20	1.12	638	0.16	2.74
J81(2)	15/09/21	211	54.1	3.73	<0.5	0.32	7.79	<0.1	<0.2	4.74	5.05	<0.5	0.88	3.57	<0.1	<0.1	168	0.50	0.14
L7(1)	15/07/16	15.2	14.1	2.54	<0.5	0.26	0.89	<0.1	0.67	7.79	68.0	3.14	3.07	0.22	0.38	0.35	59.5	0.35	12.5
L7(2)	15/09/21	16.1	14.1	4.69	<0.5	0.24	0.71	<0.1	0.42	7.97	32.3	3.06	2.99	0.22	0.34	0.34	57.6	0.27	11.9
L20(1)	15/07/16	151	97.4	7.10	<0.5	0.18	0.76	<0.1	0.17	0.22	2.17	0.98	5.43	1.38	<0.1	0.89	211	0.05	2.65
L20(2)	15/09/22	90.5	57.4	2.83	<0.5	0.18	2.27	<0.1	<0.2	0.50	6.33	1.51	4.60	2.03	<0.1	0.78	264	<0.1	4.49
L33(1)	15/07/16	19.1	7.90	3.42	<0.5	0.28	19.1	<0.1	0.53	0.43	40.2	4.60	3.02	1.68	<0.1	0.43	141	0.28	3.93
L33(2)	15/09/22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L34(1)	15/07/16	12.4	14.7	1.95	<0.5	0.19	0.63	<0.1	0.14	0.35	15.3	3.30	3.32	0.49	<0.1	0.34	190	0.04	7.37
L34(2)	15/09/22	13.9	15.5	4.21	<0.5	0.34	0.26	<0.1	<0.2	0.98	12.4	3.87	3.00	0.61	<0.1	0.29	189	<0.1	6.82
L136(1)	15/07/16	0.40	16.2	4.67	<0.5	0.60	44.8	0.24	2.61	22.1	226	<0.5	4.38	0.08	<0.1	<0.1	59.3	1.39	0.07
L136(2)	15/09/21	0.34	16.3	5.57	<0.5	0.32	11.4	0.41	2.73	5.43	53.8	<0.5	3.88	0.06	<0.1	<0.1	50.7	0.39	0.07
S6(1)	15/07/16	12.4	4.94	4.67	<0.5	0.21	14.6	<0.1	0.44	3.58	13.9	6.00	1.74	1.02	0.25	0.38	132	0.62	6.25
S6(2)	15/09/22	13.2	4.86	3.34	<0.5	0.24	13.9	<0.1	<0.2	0.30	8.66	6.31	1.67	1.00	0.30	0.35	131	<0.1	5.03
S27(1)	15/07/16	16.4	9.43	4.41	<0.5	0.29	61.7	0.63	2.12	7.34	30.0	9.14	2.27	5.93	0.19	0.20	323	1.05	62.6
S27(2)	15/09/22	16.0	9.62	1.49	<0.5	0.32	68.7	0.60	1.93	0.29	19.7	1.46	2.30	6.64	1.04	0.22	350	<0.1	70.8
S37(1)	15/07/16	37.6	4.33	3.46	3.78	1.15	3.19	<0.1	0.59	4.59	19.2	5.74	0.88	0.57	<0.1	0.58	48.4	0.16	0.49
S37(2)	15/09/22	39.1	5.44	8.12	4.15	1.60	0.17	<0.1	0.33	2.09	7.52	7.35	0.77	0.90	<0.1	0.56	47.8	<0.1	0.31
S47(1)	15/07/16	11.8	15.7	13.5	2.17	1.59	70.3	0.30	3.38	23.8	127	1.50	1.39	0.09	<0.1	0.93	187	2.20	0.17
S47(2)	15/09/22	12.8	4.41	4.18	2.88	1.34	0.35	<0.1	2.51	7.10	117	1.98	1.14	0.09	<0.1	0.77	107	<0.1	0.19
S49(1)	15/07/16	0.20	10.2	2.72	<0.5	0.30	0.34	<0.1	1.06	17.7	27.0	<0.5	0.94	0.06	<0.1	<0.1	21.9	0.82	0.09
S49(2)	15/09/22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S50(1)	15/07/16	3.17	6.57	13.4	<0.5	0.50	1.27	<0.1	2.06	12.2	112	6.79	1.54	0.37	<0.1	0.25	56.7	1.39	1.12
S50(2)	15/09/22	5.36	4.21	3.15	<0.5	0.55	0.12	<0.1	0.44	0.32	23.6	9.84	1.21	0.92	0.28	0.20	40.7	<0.1	8.03

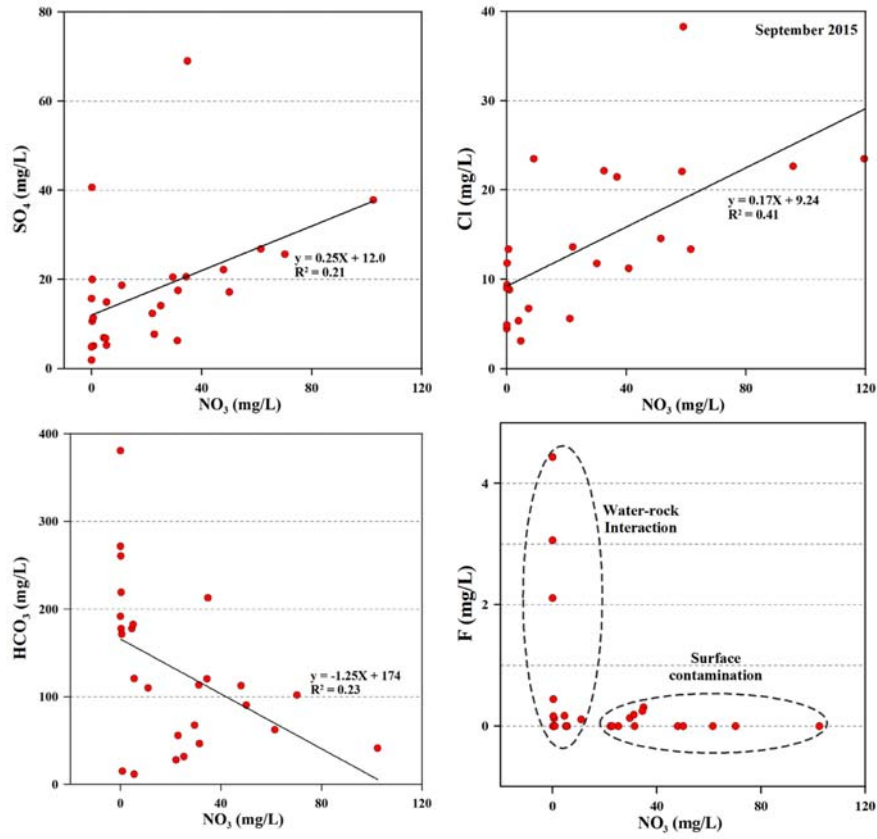


Fig. 6. Variation in major anion as a function of NO_3 content in groundwater samples.

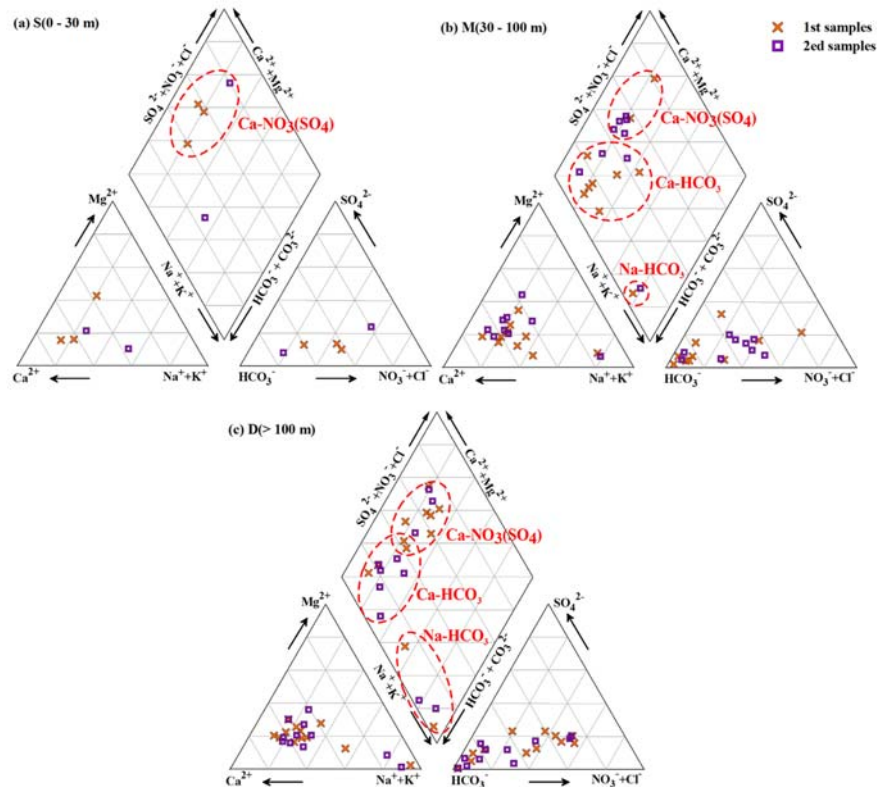


Fig. 7. Trilinear plot showing the chemical types of groundwater according to the depth.

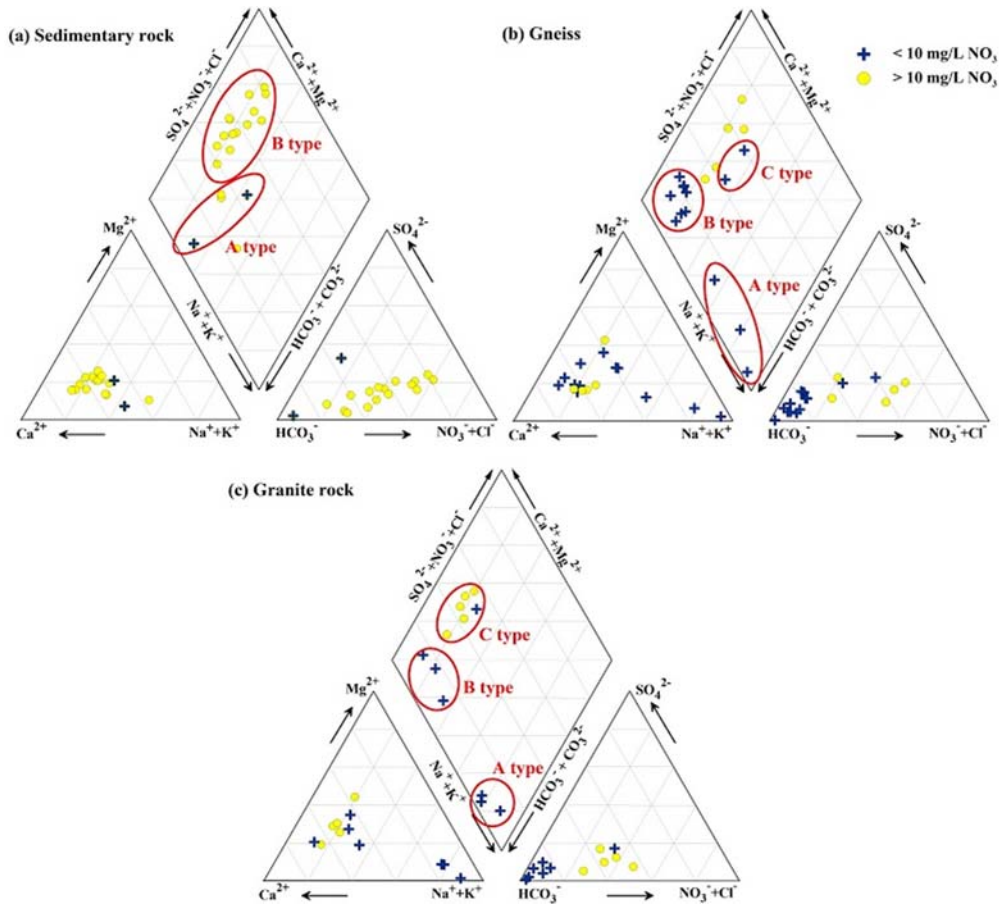


Fig. 8. Trilinear plot showing the chemical types of groundwater by geology.

지하수의 수리화학적 유형

화학성분을 파이퍼도에 도시하면 지하수의 화학적 유형은 Na-HCO₃ 유형, Ca-HCO₃ 유형, Ca-NO₃(SO₄) 유형에 걸쳐 분포한다. 지하수의 주요 화학성분에 대한 파이퍼도는 심도와 지질별로 Fig. 7과 Fig. 8에서 각각 보여준다.

파이퍼도상에서 심도에 의한 화학적 유형은 비교적 뚜렷하여 100 m 이상 심부지하수는 Ca-HCO₃ 유형과 Na-HCO₃ 유형을 주로 보이는 반면 심도가 얇은 30 m 이하의 충적층 지하수는 대부분 Ca-NO₃(SO₄) 유형에 분포한다. 30-100 m의 중간심도의 지하수는 Ca-HCO₃ 유형에서 Ca-NO₃(SO₄) 유형까지 분포한다. 따라서 천층 지하수일수록 지표오염물질의 노출정도를 비교적 뚜렷하게 보여준다(Fig. 7).

파이퍼도에서 지질에 의한 화학적 유형은 퇴적암 지질에서는 크게 2개의 그룹으로 나눌 수 있으며, A 유형은 Ca-HCO₃, B 유형은 Ca-NO₃(SO₄)을 보여준다. 화강편마암 및 흑운모편마암 지질은 질산염이 10 mg/L를 초과하는 지하수만 비교하였으며, 크게 3개의 그룹으로 분류할 수 있다. A 유형은 Na-HCO₃, B 유형은 Ca-HCO₃, C 유형은 Ca-NO₃(SO₄)을 보여준다. 퇴적암지질의 경우 B 유형은 질산염 등에 의한 오염이 상당히 진행된 것으로 보여준다. B 유형을

보이는 화강암 및 편마암은 전형적인 Ca-HCO₃의 유형을 보이며, C 유형은 물-암석반응에 의한 영향과 오염의 영향을 모두 반영하는 수리화학적분을 보여준다(Fig. 8).

자연방사성물질 산출

지하수내 자연방사성물질

지하수내 자연방사성물질인 Rn-222와 우라늄의 산출농도에 대한 통계자료는 시기에 따라 심도별 및 지질별로 구분하여 Fig. 9과 Fig. 10에서 박스-휘스커도로 각각 보여준다. 1차 조사에서 지하수내 우라늄은 SS-27 시료에서 최고 62.6 µg/L의 농도를 보이고, GR-3, GR-40 지하수에서는 27 µg/L와 15.9 µg/L의 농도를 각각 보였다. 2차 조사에서 지하수내 우라늄은 SS-27 시료 1곳에서만 미국 EPA 권고치인 30 µg/L을 초과하는 70.8 µg/L을 보였다.

Rn-222는 20개 지하수 시료에 대해서 분석하였다. 미국 EPA 권고치인 148 Bq/L를 초과하는 지하수는 1차와 2차 시기에 각각 5점과 6점으로 최대 861 Bq/L과 621 Bq/L을 보여주었다. 우라늄과 Rn-222의 분석자료는 Table 3에 정리하였다. 우라늄과 Rn-222의 시기별 농도분포를 보여주는 버블

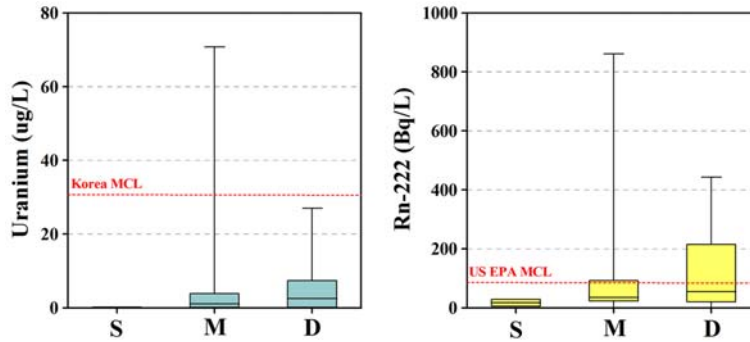


Fig. 9. Box-Whisker plots showing the statistical distribution of uranium and radon-222 contents of groundwater by depth. US EPA MCL: Maximum Contaminant Level for drinking water suggested by US EPA.

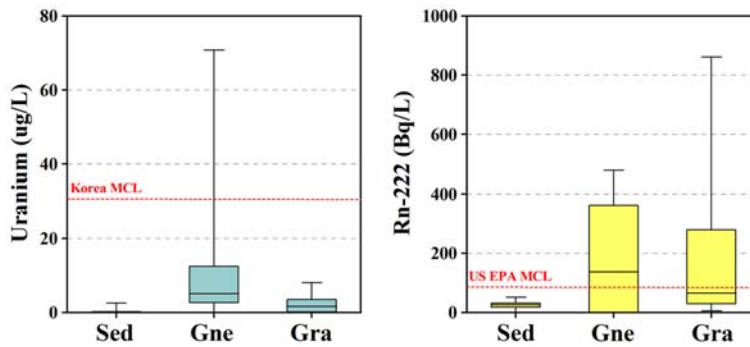


Fig. 10. Box-Whisker plots showing the statistical distribution of uranium and radon-222 contents of groundwater by geology. US EPA MCL: Maximum Contaminant Level for drinking water suggested by US EPA.

Table 3. Concentrations of uranium and radon-222 of groundwater and surface water samples

Sample ID	Depth (m)	Sampling date (15/07/15~16)		Sampling date (15/09/21~22)	
		Rn-222 (Bq/L)	U ($\mu\text{g/L}$)	Rn-222 (Bq/L)	U ($\mu\text{g/L}$)
GR-3	130	215	27.0	78.4	1.79
GR-40	110	289	15.9	443	10.6
GR-49	70	0.37	0.04	0.74	0.02
GR-57	20	5.55	0.11		0.21
GR-63	70	23.3	0.14	17.4	0.12
GR-94	150	27.7	0.02	31.1	0.15
GR-95	40	51.1	1.49	-	-
GR-96	50	35.9	0.02	34.4	0.02
GR-109	40	34.0	3.31	-	1.30
GR-113	45	861	3.89	621	3.48
GR-132	100	279	1.67	186	1.55
JG-41	80	-	0.09	25.9	0.08
JG-79	25	28.9	0.02	-	0.02
JG-80	120	0.74	0.14	14.4	2.48
JG-81	120	8.14	2.74	4.81	0.14
LG-07	100	-	12.5	362	11.9
LG-20	80	-	2.65	479	4.49
LG-33	140	-	3.93	-	-
LG-34	150	-	7.37	147	6.82
LG-136	100	31.8	0.07	30.0	0.07
SS-06	167	192	6.25	107	5.03
SS-27	70	127	62.6	91.8	70.8
SS-37	100	29.2	0.49	20.4	0.31
SS-47	42	26.6	0.17	22.9	0.19
SS-49	20	-	0.09	-	-
SS-50	60	67.7	1.12	64.7	8.03

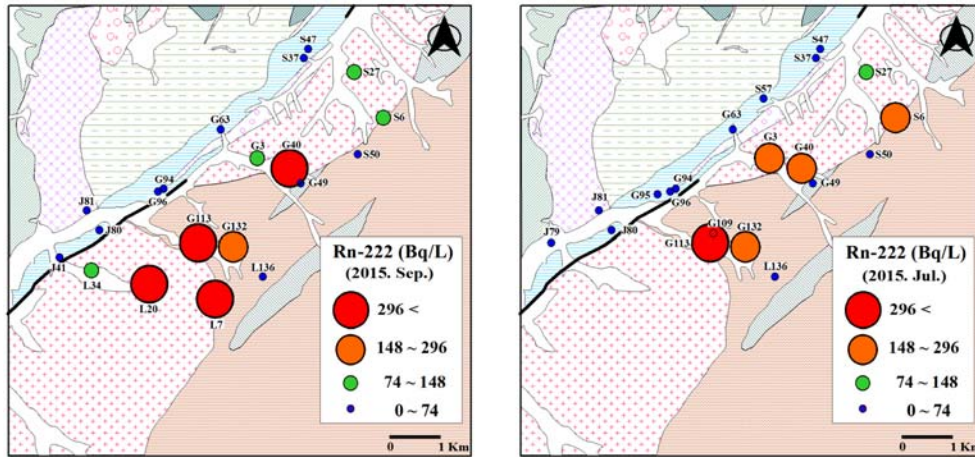


Fig. 11. Bubble maps showing the distribution of radon-222 content of groundwater.

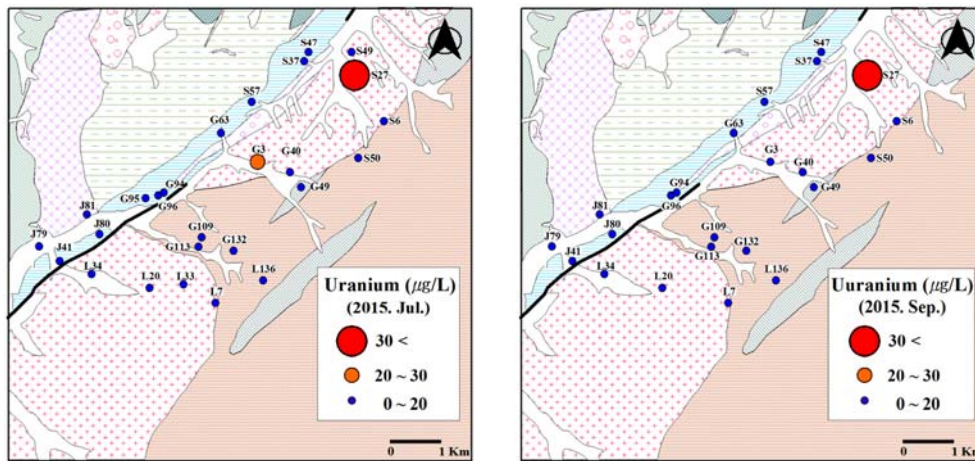


Fig. 12. Bubble maps showing the distribution of uranium concentrations of groundwater.

다이아그램은 Fig. 11과 Fig. 12에서 보여주며, 고탐량 라돈-222는 주로 화강편마암과 지질경계부분(화강편마암에서 흑운모편마암)에서 높은 농도를 보인다.

Rn-222는 우라늄의 붕괴산물로서 불활성기체이므로 암석내 근원지로부터 발생 후 암반의 틈을 통해 확산이 자유로워 비교적 넓게 확산되어 지하수내에서 용해되는 것으로 보인다. 지하수내 대부분의 우라늄은 암석내 함유된 무기성분이 지하수와 직접적인 화학적 반응에 의해서만 용해되어 지하수로 용출되며 지하수내에서 우라늄의 거동은 지하수의 수소이온농도, 산화환원전위, 화학성분에 지배를 받는다(Jeong et al., 1997). Rn-222와 우라늄의 상관관계는 Table 5에서와 같이 상관지수가 0.07로 거의 상관성이 없음을 보여준다.

지표방사성 세기

지하수의 우라늄 및 Rn-222의 일차적인 기원은 암석(토

양)내 함유된 자연방사성물질의 붕괴와 지하수내 용해에 의해 산출된다. 지표방사능 세기와 지하수내 자연방사성물질 함량과의 상관성을 알아보기 위하여 감마스펙트로메트리를 이용하여 지하수공 주변 암석에 지표방사능 세기를 직접 측정하였다. 지표 감마방사능량을 측정하여 U, Th, K의 함량으로 환산한 값은 Table 4와 같다.

지표 방사성(우라늄, 토륨, 칼륨, 총방사성세기)등의 함량은 U는 1.5~21.5 ppm의 범위를 보이고, Th는 4.8~48.7 ppm의 범위를 보이며, K는 1.3~5.9%의 범위를 보인다. 총 지표방사성은 9.1~54.7 ppm의 범위를 보인다. 지표방사성 함량분포에 대한 버블다이아그램은 Fig. 13에서 보여준다. 고농도 자연방사성물질과 지표방사성세기는 뚜렷한 상관성을 보여주지는 않는다.

고함량 자연방사성물질과 지질 및 단층대의 상관성

우라늄은 자연방사성물질 중 가장 무거운 원소이며, 높은

이동성과 긴 반감기(44억 6,800만년) 때문에 비교적 지하수 내 높게 검출된다. 지하수내 우라늄의 주요 산화 상태는 4⁺와 6⁺이며, 용해된 우라늄은 대부분 착이온을 형성하며 가장 안정한 형태는 우라닐이온(UO₂)이다. ‘UO₂²⁺ + CO₃²⁻ (or HCO₃⁻) → (UO₂CO₃)⁰ or (UO₂HCO₃)⁺’이와 같은 탄산염착물의 형태가 우라늄이 인체에 유입되는 가장 흔한 형태이며, pH에 따라 매우 다양한 화학종을 형성한다. 중성 및 알칼리에서는 우라닐이온, 우라닐탄산염화합물로 형성되며, 산성에서는 우라닐이온이 많이 형성된다. 따라서 지하수내 고함량 우라늄은 중탄산(HCO₃) 함량이 높고, 산화환경이며, 약알칼리성의 pH의 조건을 가지며, 이때 우라늄의 형태는 우라닐탄산염화합물의 형태로의 용존 가능성을 보인다.

Rn-222는 라듐-226(반감기 1,600년)의 자연방사붕괴로부터 생성되며, 유일한 불활성(inert) 기체이다. 따라서 화학반응을 일으키지 않고 지하수내 대수층 균열 또는 공극, 단층대를 통하여 쉽게 이동할 수 있으며, 붕괴되어 소멸되기 전까지 지하수에 용해되거나 지표면으로 방출된다.

연구지역 지하수내 지질별 Rn-222와 우라늄의 함량분포를 Fig. 11와 Fig. 12에 도시하였다. Rn-222는 미국 EPA 권고치인 148 Bq/L를 초과하는 지점들은 주로 화강편마암과 지질경계부에서 높은 농도를 보인다. 우라늄은 환경부 권고치인 30 µg/L를 초과하는 지점은 화강편마암에 위치되어 있으나, 시기별 뚜렷한 특징을 보이지는 않는다. 지하수내 Rn-222와 우라늄 같은 자연방사성물질들은 특정한 인위적인 오염이 없는 지역에서는 흑운모 암석내 포획된 저어콘, 모자나이트 등 소량광물들의 용해에 의해 기원되는 것으로 알려져 있다. 대수층의 지질특성에 따라 지하수내 자연방사성물질의 산출은 다양하며, 이는 저어콘, 모자나이트 등 자연방사성원소를 함유한 광물의 산출과 밀접히 관련되기 때문이다(Jeong et al., 2011, 2012, 2013; Kim et al., 2014).

연구지역 지하수내 우라늄은 환경부의 기준치를 초과하는 지하수는 2점으로, 두 지점 모두 화강편마암 지질에 위치되어 있다. 화강편마암, 흑운모편마암, 명륜동층 세 지질에 대하여 pH, HCO₃, ORP값을 비교해본 결과, 화강편마암에서 약알칼리성, 높은 중탄산함량, 산화환경 조건을 잘 보여주어 다른 지질과 비교하여 고농도 우라늄의 산출과의 연관성을 시사한다.

연구지역 지하수내 Rn-222 함량은 미국 EPA 권고치를 초과하는 지하수는 6점이며, 흑운모편마암과 화강편마암지질에서 중간심도(42~100 m)와 심부심도(100~167 m)에서 고농도를 보여준다. 이는 얕은 심도의 지하수공에서보다는 깊은 심도의 지하수내에 고농도의 Rn-222가 산출된다.

본 연구지역에서는 N45°E 방향의 영동단층의 상반에 해당되는 화강암 및 화강편마암에서만 자연방사성물질인 Rn-222와 우라늄이 높은 농도로 산출되며, 하반에 해당된 퇴적암층에서는 확인되지 않는다(Fig. 11, 12). 영동단층은 약

Table 4. Surface radioactivity detected at soil and rock surface

Measurement points	Radioactivity			
	Total(ppm)	K(%)	U(ppm)	Th(ppm)
YD-1	19.7	3.50	4.00	12.1
YD-2	34.5	4.50	6.90	27.8
YD-3	30.1	4.60	5.80	22.1
YD-4	40.9	5.00	9.90	33.1
YD-5	33.0	4.00	8.20	27.8
YD-6	26.9	3.60	5.70	23.5
YD-7	33.9	4.80	7.40	27.0
YD-8	17.9	2.80	3.40	15.9
YD-9	29.9	4.50	4.20	25.4
YD-10	28.2	4.10	8.20	16.7
YD-11	18.0	4.40	2.70	4.80
YD-12	9.1	1.30	2.10	10.0
YD-13	21.0	3.30	2.70	19.2
YD-14	54.7	5.90	21.5	29.4
YD-15	31.0	4.90	7.10	18.3
YD-16	19.0	2.70	4.20	16.3
YD-17	21.1	3.10	5.20	15.7
YD-18	36.3	4.30	8.40	30.2
YD-19	32.1	3.70	6.50	31.5
YD-20	32.8	5.00	4.60	28.0
YD-21	34.1	5.40	7.70	21.0
YD-22	15.6	1.60	5.20	13.4
YD-23	26.8	3.40	6.60	22.5
YD-24	26.7	3.60	10.1	11.3
YD-25	12.2	1.70	4.00	9.30
YD-26	36.8	3.90	11.2	30.8
YD-27	29.2	3.60	9.70	18.8
YD-28	23.5	3.40	4.70	20.2
YD-29	50.3	4.60	13.4	48.7
YD-30	38.9	4.50	11.3	30.5
YD-31	24.8	3.50	5.80	18.5
YD-32	28.1	3.60	9.70	16.4
YD-33	13.7	2.70	2.40	8.90
YD-34	32.2	4.40	9.50	19.9
YD-35	26.7	4.10	3.80	22.3
YD-36	17.4	2.90	2.60	16.1
YD-37	16.4	3.60	1.50	13.8
YD-38	30.2	4.60	7.90	18.2
YD-39	32.3	4.40	4.90	29.2
YD-40	25.8	4.40	5.40	15.1

82° 고경사로 화강편마암 및 흑운모편마암에서 생성된 우라늄 및 라돈가스가 단층을 가로질러 이동 및 확산되지 못하고 단층이 하나의 경계조건의 역할을 기대할 수 있으나 추

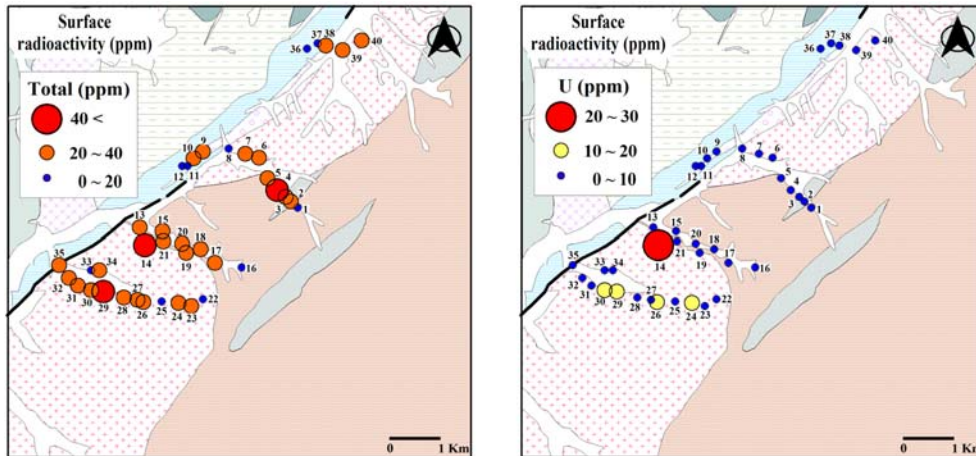


Fig. 13. Bubble map showing the radioactivities on the rock and soil surface.

Table 5. The correlation coefficients among the chemical parameters of groundwater samples

	U	Rn-222	pH	ORP	EC	DO	Ca	Mg	Na	K	Sr	Fe	Si	HCO ₃	SO ₄	Cl	NO ₃	F
U	1.00																	
Rn-222	0.07	1.00																
pH	0.09	-0.17	1.00															
ORP	-0.01	0.00	-0.47	1.00														
EC	0.26	0.20	0.22	-0.15	1.00													
DO	-0.11	-0.16	-0.26	0.18	-0.25	1.00												
Ca	0.49	0.12	-0.15	0.13	0.56	-0.02	1.00											
Mg	0.37	0.59	-0.17	-0.04	0.37	-0.12	0.59	1.00										
Na	-0.07	0.08	0.53	-0.22	0.48	-0.28	-0.31	-0.32	1.00									
K	-0.14	-0.06	-0.61	0.17	0.22	-0.02	0.17	0.08	-0.20	1.00								
Sr	0.29	0.16	0.37	-0.18	0.25	-0.23	0.23	0.18	0.17	-0.24	1.00							
Fe	0.44	0.00	-0.05	0.11	0.14	-0.01	0.32	0.18	-0.11	0.04	0.09	1.00						
Si	-0.03	0.06	-0.03	0.19	0.12	0.08	0.45	0.26	-0.23	-0.30	-0.05	-0.17	1.00					
HCO ₃	0.38	0.29	0.56	-0.25	0.67	-0.43	0.22	0.14	0.74	-0.33	0.51	0.15	-0.03	1.00				
SO ₄	0.24	0.11	-0.40	0.20	0.55	0.06	0.70	0.41	-0.21	0.60	-0.15	0.18	0.06	-0.05	1.00			
Cl	-0.10	0.26	-0.53	0.14	0.29	0.15	0.37	0.57	-0.31	0.49	-0.24	0.02	0.24	-0.30	0.54	1.00		
NO ₃	-0.24	-0.01	-0.48	0.30	0.17	0.27	0.33	0.22	-0.29	0.56	-0.31	-0.16	0.31	-0.46	0.53	0.67	1.00	
F	-0.08	-0.07	0.48	-0.14	0.30	-0.28	-0.39	-0.43	0.88	-0.20	0.10	-0.09	-0.28	0.57	-0.20	-0.36	-0.32	1.00

후 단층과 관련한 더 많은 연구와 정보가 밝혀진 후 자세한 해석이 가능할 것이다.

결론

영동지역 자연방사성물질 중 고함량의 우라늄과 라돈-222의 상관성에 대하여, 수리화학적 영향, 지질 및 단층대와의 상관성에 대한 연구를 종합하면 다음과 같다.

(1) 충북 영동지역 지하수의 수리화학적 특성은 Ca-HCO₃, Na-HCO₃, Ca-NO₃(SO₄)의 유형을 보여준다. 환경부의 우

라늄 권고치인 30 µg/L를 초과하는 지하수는 Ca-HCO₃ 유형에 집중되며, Rn-222의 미국 EPA 기준치인 148 Bq/L를 초과하는 지하수와 화학적 유형과의 관계는 명확하지 않다. 연구지역내 지하수 일부는 비료사용 등으로 K, NO₃의 오염을 보여준다.

(2) 상관관계 분석 결과, 우라늄과 Rn-222 산출의 상관성은 거의 보여주지 않는다. 화학성분으로는 Na과 HCO₃, F 사이에 비교적 높은 상관성을 보여주며, 물-암석 반응에 의한 상관성을 지시한다.

(3) 연구지역 지하수내 우라늄의 농도는 0.02~70.8 µg/L의

범위를 보이며, Rn-222는 0.37~861 Bq/L의 범위를 보인다. 지하수내 환경부 우라늄 권고치를 초과하는 지점들은 총 49점 중 2점이며, 화강편마암지질에 분포하고 있다. Rn-222는 미국 EPA 기준치인 148 Bq/L를 초과하는 지하수는 총 40지점 중 11지점이며, 대부분 화강편마암 및 흑운모편마암에 분포되어 있다. 특히 중간심도(30~100 m)와 깊은 심도(100~167 m)에서 높은 라돈-222의 농도를 보인다.

(4) 지하수내 우라늄과 Rn-222의 산출은 지질경계부에 비교적 집중되나, 단층대의 상관성은 뚜렷하지 않다. 지표방사능세기와 우라늄 산출과의 상관성도 뚜렷하지 않다.

(5) 연구지역 중심부에 N45°E 방향의 영동단층을 기준으로 상반에 해당되는 화강암과 화강편마암지역에서만 높은 농도의 우라늄과 Rn-222이 산출되며, 하반에 해당되는 퇴적암층에서는 확인되지 않는다. 이는 단층대가 약 82°의 고경사를 가지고 있어 화강암과 화강편마암 지질에서 생성된 우라늄 및 라돈가스의 확산과 이동을 막는 경계조건의 역할 등에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

References

- Banks, D., Frengstad, B., Midtgard, A. K., Krog, J. R., and Strand, T., 1998, The chemistry of Norwegian groundwater: I. the distribution of radon, major and minor elements in 1604 crystalline bedrock groundwaters. *Science of the Total Environment*, 222(1), 71-91.
- Betcher, R. N., Gascoyne, M., and Brown, D., 1988, Uranium in groundwaters of southeastern Manitoba, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 25(12), 2089-2103.
- CEPA (California Environmental Protection Agency), 2001, Public health goals for uranium in drinking water. CEPA, California, 30p.
- Choo, C. O., 2002, Characteristics of uraniferous minerals in Daebo granite and significance of mineral species, *Journal of Mineralogical Society of Korea*, 15(1), 11-21 (in Korean with English abstract).
- Cho, B. W., Jeong, C. H., and Han, I. S., 2009, A detail study on the occurrence of radioactive materials in groundwater (II), NIER, 273p (in Korean with English abstract).
- Cho, B. W., Kim, K. H., Kim, Y. K., Sung, I. H., Ahn, J. S., Yun, U., Yoon, Y. Y., Lee, K. Y., Lee, B. D., Chon, C. M., Cho, S. Y., Chae, G. T., Choi, B. I., Hong, Y. K., Baek, S. G., Ryu, S. W., and Jeong, C. H., 2008, A detail study on the occurrence of radioactive materials in groundwater (I), NIER, 293p.
- Cho, B. W., Kim, K. H., Kim, Y. K., Sung, I. H., Ahn, J. S., Yun, U., Yoon, Y. Y., Lee, K. Y., Lee, B. D., Lee, H. J., Im, H. C., Cho, S. Y., and Hong, K. Y., 2006, A study on the occurrence of radioactive materials in groundwater, NIER, 200p (in Korean with English abstract).
- Cothern, C. R., 1990, Radon, radium and uranium in drinking water, CRC Press.
- Cowart, J. B. and Osmond, J. K., 1980, Uranium isotopes in Groundwater as a Prospecting Technique. US Dept. Energy Report, GJBX 119, 112p.
- EPA, 2012, Report to Congress: Radon in Drinking Water Regulations, EPA 815-R-12-002, 34p.
- Finch, R. J. and Murakami, T., 1999, Systematic and paragenesis of uranium minerals. In *Uranium: Mineralogy, Geochemistry, and the Environment: Reviews in Mineralogy*, 38(1), 91-180.
- Gaines, R. V., Skinner, H. C., Foord, E. E., Mason, B., Rosenzweig, A., King, V. T., and Dowty, E., 1997, Dana's new mineralogy, Eighth edition, New York, John Wiley & Sons, 1872p.
- Greenberg, A. E., Clesceri, L. S., and Eaton, A. D., 1992, Standard methods for the examination of water and waste water, The American Public Health Association, Washington DC, 4-55.
- Han, J. H. and Park, K. H., 1996, Abundances of uranium and radon in groundwater of Taejeon area, the Korean Society of Economic and Environmental Geology, 29(5), 589-595 (in Korean with English abstract).
- Jeong, C. H., Kim, C. S., Kim, T. K., and Kim, S. J., 1997, Reaction path modelling on geochemical evolution of groundwater and formation of secondary minerals in water-gneiss reaction system, *The Journal of Mineralogical Society of Korea*, 10(1), 33-44 (in Korean with English abstract).
- Jeong, C. H., Kim, D. W., Kim, M. S., Lee, Y. J., Kim, T. S., Han, J. S., and Jo, B. W., 2012, Occurrence of natural radioactive materials in borehole groundwater and rock core in the Icheon area, *The Journal of Engineering Geology*, 22(1), 95-111 (in Korean with English abstract).
- Jeong, C. H., Kim, M. S., Lee, Y. J., Han, J. H., Jang, H. G., and Jo, B. U., 2011, Hydrochemistry and occurrence of natural radioactive materials within borehole groundwater in the Cheonwon area, *The Journal of Engineering Geology*, 21(2), 163-178 (in Korean with English abstract).
- Jeong, C. H., Ryu, K. S., Kim, M. S., Kim, T. S., Han, J. S., and Jo, B. U., 2013, Geochemical occurrence of uranium and radon-222 in groundwater at test borehole site in the Daejeon area, *The Journal of Engineering Geology*, 23(2), 171-186 (in Korean with English abstract).
- Jeong, C. H., Yang, J. H., Lee, Y. J., Lee, Y. C., Choi, H. Y., Kim, M. S., Kim, H. K., Kim, T. S., and Jo, B. U., 2015, Occurrences of uranium and radon-222 from groundwaters in various geological environment in the hoengseong area, *The Journal of Engineering Geology*, 25(4), 557-576 (in Korean with English abstract).
- Jeong, C. H., Yan, J. H., Lee, Y. C., Lee, Y. J., Choi, H. Y., Kim, M. S., Kim, H. K., Kim, T. S., and Jo, B. U., 2016, Occur-

- rence Characteristics of Uranium and Radon-222 in Groundwater at ○○ Village, Yongin Area, The Journal of Engineering Geology, 26(2), 261-276 (in Korean with English abstract).
- Ju, B. K., Kim, M. S., Jeong, D. H., Hong, J. K., Kim, D. S., Noh, D. J., Yoon, J. K., and Kim, T. S., 2013, Environment characteristics of naturally occurring radioactive materials (^{238}U , ^{222}Rn) concentration in drinking groundwaters of metamorphic rock areas; Korea, Journal of Soil and Groundwater Environment, 18(3), 82-92 (in Korean with English abstract).
- Kim, M. S., Yang, J. H., Jeong, C. H., Kim, H. K., Kim, D. W., and Jo, B. U., 2014, Geochemical origins and occurrences of natural radioactive materials in borehole groundwater in the Goesan area, The Journal of Engineering Geology, 24(4), 535-550 (in Korean with English abstract).
- KIER(Korea Institute of Energy and Resources Seoul Korea), 1986, Geological report of the Yongdong sheet(scale 1:50,000).
- Langcot, E. M., Tolman, A. L., and Loisel, M., 1985, Hydrogeochemistry of radon in ground water. The Second Annual Eastern Regional Ground Water Conference, Portland, Maine, July 16-18, 66-85 p.
- Langmuir, D., Hall, P., and Drever, J., 1997, Environmental geochemistry, Prentice Hall, New Jersey.
- Loomis, L. P., 1997, Radon-222 concentration and aquifer lithology in North Carolina. Ground Water Monitoring Review, 7, 33-39.
- Lowry, J. D., Hoxie, D. C., and Moreau, E., 1987, iExtreme levels of 222 Rn and U in a private water supplyî Radon, radium, and other radioactivity in ground water: Hydrogeologic impact and application to indoor airborne contamination, Lewis Publisher, Chelsea, MI.
- Mandarino, M. J., 1999, Fleischer's glossary of mineral species, Minerlogical Record Incorporated Tucson, Arizona.
- Michel, J., 1990, Relationship of radium and radon with geological formations. In: Cothorn, C. R. and Revers, P.A. (eds.), Radon, Radium and Uranium in Drinking Water. Lewis Publishers, Inc., Michigan, 83-96.
- NIER (National Institute of Environmental Research), 1999, Study on the radionuclides concentration in groundwater (I).
- NIER (National Institute of Environmental Research), 2000, Study on the radionuclides concentration in groundwater (II).
- NIER (National Institute of Environmental Research), 2001, Study on the radionuclides concentration in groundwater (III).
- NIER (National Institute of Environmental Research), 2002, Study on the radionuclides concentration in groundwater (IV).
- Park, M. E. and Kim, G. S., 1998, Geochemical of uranium and thorium deposits from the Kyemyeongsan pegmatite, The Korean Society of Economic and Environmental Geology, 31, 365-374 (in Korean with English abstract).
- Shin, D. C., Kim, Y. S., Moon, J. Y., Park, H. S., Kim, J. Y., and Park, S. K., 2002, A review on the hazard of radioactive materials in groundwater, Journal of Environmental Toxicology Society of Korea, 17, 273-384 (in Korean with English abstract).
- Sung, I. H., Cho, B. W., Kim, D. O., Kim, K. H., Park, D. W., Park, J. K., Yoon, Y. Y., Lee, B. J., Lee, B. D., Lee J. C., Im, H. C., Chung, K. S., Cho, S. Y., Hong, Y. K., Jang, W. S., Yang, J. H., Shin, D. C., and Han, I. S., 2002, A study on the occurrence of radioactive materials in groundwater (IV), NIER, 357p (in Korean with English abstract).
- Sung, I. H., Cho, B. W., Woo, H. J., Kim, D. O., Kim, K. H., Park, J. K., Hong, Y. K., Lee, B. D., Yun, U., Lee, B. J., Lee, J. C., Yoon, Y. Y., Kim, Y. J., Chung, K. S., Cho, S. Y., Shin, D. C., Chang, T. W., and Yu, M. J., 2001, A study on the occurrence of radioactive materials in groundwater(III), NIER, 388p (in Korean with English abstract).
- Sung, I. H., Kim, D. O., Woo, H. J., Cho, B. W., Park, J. K., Lee, H. Y., Chung, K. S., Yoon, Y. Y., Cho, S. Y., Lee, Y. J., Lee, B. D., Kim, T. K., Kim, K. S., Choo, C. O., and Shin, D. C., 1999, A study on the occurrence of radioactive materials in groundwater (I), NIER, 338p (in Korean with English abstract).
- Wathen, J. B., 1987, The effect of uranium siting in two-mica granites on uranium concentrations and radon activity in ground water. Radon, radium, and other radioactivity in groundwater, Proceedings of the NWWA conference.

정찬호

대전대학교 건설안전방재공학과
대전광역시 동구 대학로 62
Tel: 042-280-2573
E-mail: chjeong@dju.kr

이유진

대전대학교 건설안전방재학과
대전광역시 동구 대학로 62
Tel: 042-280-2577
E-mail: geoabby20@gmail.com

이용천

대전대학교 건설안전방재공학과
대전광역시 동구 대학로 62
Tel: 042-280-2577
E-mail: dydcjs159@naver.com

최현영

대전대학교 건설안전방재공학과
대전광역시 동구 대학로 62
Tel: 042-280-2577
E-mail: dhdh3158@naver.com

김문수

국립환경과학원 토양지하수연구과
인천시 서구 환경로 42(경서동 종합환경연구단지)
Tel: 032-560-7907
E-mail: hyd009@korea.kr

김현구

국립환경과학원 토양지하수연구과
인천시 서구 환경로 42(경서동 종합환경연구단지)
Tel: 032-560-7924
E-mail: khk228@korea.kr

김태승

국립환경과학원 토양지하수연구과
인천시 서구 환경로 42(경서동 종합환경연구단지)
Tel: 032-560-8360
E-mail: tskim99@korea.kr

조병욱

한국지질자원연구원 환경지질연구본부
대전광역시 유성구 과학로 92
Tel: 042-868-3083
E-mail: cbw@kigam.re.kr