

경상남북도 지하수 중 자연방사성물질 우라늄과 라돈의 산출특징과 함량분포에 대한 수리지화학적 연구

조병욱¹ · 추창오² · 윤 옥¹ · 이병대¹ · 황재홍³ · 김문수^{4*}

¹한국지질자원연구원 지구환경연구본부, ²경북대학교 지질학과, ³한국지질자원연구원 국토지질연구본부,
⁴국립환경과학원 토양지하수연구과

Hydrogeochemical Characteristics, Occurrence, and Distribution of Natural Radioactive Materials (Uranium and Radon) in Groundwater of Gyeongnam and Gyeongbuk Provinces

Byong Wook Cho¹, Chang Oh Choo², Uk Yun¹, Byeong Dae Lee¹,
Jae Hong Hwang³, and Moon Su Kim^{4*}

¹Groundwater Department, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, Korea

²Department of Geology, Kyungpook National University, Daegu, Korea

³Geological Mapping Department, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon, Korea

⁴Soil and Groundwater Research Division, National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea

Received 5 December 2014; received in revised form 12 December 2014; accepted 16 December 2014

중생대 경상누층군(Gyeongsang Super Group)의 백악기 퇴적암과 화성암류가 분포하는 경상남북도 지역의 201개 지하수공을 대상으로 자연방사성물질인 우라늄과 라돈의 함량특징과 수리지질학적 관련성을 규명하였다. 이를 위하여 요인분석을 통하여 방사성물질과 주요 수질성분과의 상관성을 해석하였으며, 또한 이들의 함량분포와 지질을 고려하여 자연방사성물질의 함량분포도를 작성하였다. 경상남북도지역의 지하수는 대부분 Ca-Na-HCO₃가 우세한 유형을 보여 전형적인 칼슘-나트륨-중탄산형의 수리지화학적 특징을 보인다. 우라늄의 함량이 미국 EPA의 MCL 30 µg/L를 넘는 지점은 1개소, 라돈함량이 미국 EPA의 AMCL 4,000 pCi/L를 넘는 지점은 3개소였으며, 전알파의 함량이 15 pCi/L 또는 라듐함량이 5 pCi/L를 넘는 지점은 없었다. 우라늄의 함량범위는 0.02~53.7 µg/L, 평균 1.56 µg/L, 표준편차 4.3 µg/L이고, 중앙값은 0.47 µg/L로서 매우 낮다. 우라늄의 평균치는 신동층군 > 중생대 화강암 > 하양층군 > 유천층군 > 신생대 제3기 퇴적암의 순으로 높다. 전체지역의 라돈의 함량범위는 2~8,740 pCi/L, 평균 754, 중앙값 510, 표준편차는 907 pCi/L이다. 라돈의 평균치는 중생대 화강암 > 유천층군 > 신생대 제3기퇴적암 > 하양층군 > 신동층군의 순으로 높다. 경상남북도의 주요 지질 단위를 구분하여 요인분석을 실시한 결과, 우라늄과 라돈의 상관성은 매우 낮았으나, 우라늄과 라돈은 일부 중요 수질항목과 높은 상관관계를 보인다. 요인분석 결과에 의하면 특정한 요인이 자연방사성원소의 거동특성에 크게 영향을 주지 않으므로 이들은 다소 독립적인 거동특성을 하는 것으로 볼 수 있다. 광역적인 방사성물질 연구에서는 행정구역단위 외에도 주요 지질별로 구분하여 방사성원소의 함유특징을 해석할 필요가 있다.

주요어: 경상남북도, 지하수, 우라늄, 라돈, 요인분석

*Corresponding author: hydro009@korea.kr

© 2014, 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.

The occurrence, distribution, and hydrogeochemical characteristics of uranium and radon in groundwater within different lithologies in Gyeongnam and Gyeongbuk provinces were investigated. A total of 201 groundwater samples from sedimentary rocks taking a large portion of the geology and from igneous rocks taking a small portion of the geology were analyzed and examined using factor analysis. Their radionuclide levels were used to construct detailed concentration maps. The groundwater types, defined using a Piper diagram, are mainly Ca-HCO₃ with less Na-HCO₃. Among the samples, one site exceeds 30 µg/L of uranium (i.e., the maximum contaminant level of the USEPA) and three sites exceed 4,000 pCi/L of radon (i.e., the alternative maximum contaminant level). No samples were found to exceed the 15 pCi/L level of gross alpha or the 5 pCi/L level of radium. The concentration of uranium ranges from 0.02 to 53.7 µg/L, with a mean of 1.56 µg/L, a median of 0.47 µg/L, and a standard deviation of 4.3 µg/L. The mean concentrations of uranium for the different geological units increase in the following order: Shindong Group, Granites, Hayang Group, Yucheon Group, and Tertiary sedimentary rocks. The concentration of radon ranges from 2 to 8,740 pCi/L, with an mean of 754 pCi/L, a median of 510 pCi/L, and a standard deviation of 907 pCi/L. The mean radon concentrations for the investigated geological units increase in the following order: Granites, Yucheon Group, Tertiary sedimentary rocks, Hayang Group and Shindong Group. According to the factor analysis for each geological unit, uranium and radon behave independently of each other with no specific correlation. However, radionuclides show close relationships with some components. Regional investigations of radionuclides throughout the country require an integrated approach that considers the main lithological units as well as administrative districts.

Key words: Gyeongnam and Gyeongbuk provinces, groundwater, uranium, radon, factor analysis

서 언

지하수에 함유된 자연방사성물질 가운데서 주된 관심 대상은 우라늄과 라돈이다. 우라늄은 반감기가 매우 길기 때문에 방사성에 의한 위해성보다는 통상적인 중금속 원소가 가지는 독성자체 문제가 되는데, 고농도에 장기간 노출 시에는 신장에 영향을 주게 된다(US EPA, 2000, 2003). 반감기가 3.82일에 불과한 라돈은 무색, 무취의 불활성기체인데, 우라늄을 비롯한 주요 방사성원소의 붕괴과정에서 생성된다. 라돈은 자연에서 인간에게 피폭되는 방사선 양의 50% 이상을 차지하며, 흡연에 이어서 두 번째로 높은 폐암 발병인자로 잘 알려져 있으며, 실제적인 라돈의 위해성은 실내 공기 중의 라돈이 대부분을 차지한다(US EPA, 1999, 2012). 실내라돈의 유입은 지하수나 토양을 통해 라돈가스가 상승하는 과정에서 지반이나 건물의 틈새를 통하여 일어나는데, 지하수를 통한 유입량은 약 20%를 차지한다(Ju and Je, 1995). 지하수 중 라돈이 인체로 유입되는 경로는 실내 공기 중 라돈에 비하여 확실하지 않은데, 지하수를 음용함으로써 직접 체내로 라돈이 유입되기 보다는 지하수 사용 시에 공기 중으로 휘발, 확산되는 라돈가스를 흡입하기 쉽기 때문이다.

지하수 중 자연방사성물질 함량에 대한 조사는 일부 선진 외국의 경우, 1960년대 말부터 국가단위로 수행해 오고 있다. 각 나라의 면적, 지질, 인구 등에는 차이가 있지만, 2012년 현재 미국의 경우는 200,000개 이상,

스웨덴의 경우는 110,000개 이상, 핀란드의 경우 30,000개 이상의 지하수공에 대한 조사를 실시한 바 있다. 해외연구에 따르면 암질에 따라서 방사성물질의 함량은 차이를 보이는데, 화강암, 변성암, 퇴적암, 화산암의 순으로 우라늄과 라돈의 함량이 높다. 이러한 결과를 바탕으로 각 나라에서는 그 나라의 지질, 경제, 환경 등을 고려하여 지하수의 우라늄, 라돈함량에 대한 기준치(제한치) 설정 유무 등을 결정하고 있다(Skeppström and Olofsson, 2007).

국내에서의 전국적인 규모의 지하수 중 자연방사성물질 함량조사는 1999-2002년(1차)과 2006년(2차)에 한국지질자원연구원과 국립환경과학원에 의하여 수행된 바 있다. 이들 결과를 바탕으로 2007년부터 국립환경과학원에 의하여 전국의 마을상수도를 대상으로 지하수중 자연방사성물질의 함량분포와 실태조사가 이루어졌으며, 한국지질자원연구원에 의하여 2008년부터 현재까지 전국적 행정단위와 주요 지질단위와 더불어 고탍량 일부 지역에 대한 정밀조사가 수행된 바 있다(Cho et al., 2007, 2010, 2011, 2012; Jeong et al., 2011a, 2011b). 최근에는 전국단위의 조사의 일환으로 대전, 논산, 이천, 단양지역을 대상으로 우라늄과 라돈의 산출실태와 원인 연구가 수행된 바 있다(Cho et al., 2007, 2010, 2011, 2012, 2013; Jeong et al., 2012; Jeong et al., 2013). 전국단위의 지하수중 방사성물질의 함량분포 현황과 원인해석에 관해서 이 같은 연구가 꾸준히 수행되었지만, 조사된 지하수 공의 개수는 2012년 말 현재 약

3,500개에 불과하여 우리나라의 면적에 비해서 여전히 조사지점이 충분하지 않다. 따라서 일정 개수 이상의 지하수 조사결과를 바탕으로 가능한 빠른 시간 내에 국내 지하수의 우라늄과 라돈함량 기준치(제한치) 설정 유무를 결정할 필요가 있다.

본 연구에서는 중생대 경상누층군의 백악기 퇴적암과 화성암류가 주로 분포하는 경상남북도의 지하수공 201개를 대상으로 자연방사성물질인 우라늄과 라돈의 산출특징을 규명하고, 요인분석을 통하여 원인을 해석하였다. 또한 이들의 함량과 분포지를 근거로 자연방사성물질의 함량분포도를 작성하였다.

지질개요

경상남북도는 국내에서 퇴적암류가 가장 넓게 발달하는 곳으로서, 중생대 백악기~신생대 제3기에 걸쳐 형성된 경상누층군(Gyeongsang Supergroup)이 넓게 분포한다(Chough and Shon, 2010). 이 누층군은 역암, 사암, 셰일, 이회암 등의 호층으로 구성되는데, 하부에는 쇄설성 퇴적암류가 분포하며 상부에는 화산암류가 풍부하다. 지층의 형성환경과 암질특성에 따라서 하부에서부터 상부로 가면서 신동층군, 하양층군, 유천층군의 3개 층군(group)과 이들을 관입한 화강암류인 불국사 관입암군으로 세분된다(Chang, 1978, 1988).

신동층군은 영남육괴의 기반암에 접하면서 경상누층군의 최하부를 이루는 데, 지질시대는 전기 백악기에 속한다. 서쪽의 하부층에서 동쪽으로 가면서 낙동층, 하산동층, 진주층의 3개 층이 분포하며, 이들은 경상누층군의 하부층을 형성한다. 신동층군의 최하부층인 낙동층은 역암, 사암, 미사암, 셰일, 탄질셰일로 구성되며, 지층의 두께는 약 600 m에 이른다. 하산동층은 사암, 역암, 저색 미사암, 회색셰일로 구성되며, 저색층이 흔하게 협재되는 것이 특징인데, 지층의 두께는 700~1,400 m 범위이다. 진주층은 회색사암, 회색셰일, 역암으로 구성되나, 주로 암회색 셰일이 우세하며, 저색층은 협재되지 않는다. 지층의 두께는 750~1,200 m이다.

하양층군은 하성환경인 신동층군과 달리 경상퇴적본지가 본격적인 호수환경하에 놓이면서 형성된 층으로서 흔히 화산암이 협재된다. 하부로부터 상부로 가면서 칠곡층, 신라역암, 함안층, 진동층이 발달하는데, 하부층인 칠곡층은 사암, 셰일, 역암, 이암과 응회암으로 구성되며 저색층을 포함한다(Chang, 1978, 1988). 이 층에는 현무암질 화산력이 포함되며, 상부로 갈수록 그 함량이 증가

한다. 지층의 두께는 약 650 m이다. 신라역암층은 역암과 사암, 이암으로 구성되어 있으며, 주로 저색으로 구성되나 일부에는 회색이 나타난다. 특징적으로 많은 역을 포함하는데 역의 구성암은 현무암, 안산암이 주를 이루며, 화강암질암, 응회암, 처트 등의 역도 소량 포함된다. 이 층의 두께는 약 240 m이다. 함안층은 주로 저색셰일, 회색셰일, 실트암이 주된 암상을 이루는데, 응회질 사암, 이회암 및 역암이 협재된다. 지층의 두께는 약 800 m 내외이다. 진동층은 암회색셰일과 사암으로 구성되며, 지층의 두께는 약 1,500 m이다. 반야월층은 대구-영천 지역에서 널리 분포하는 데 진동층과 암상은 비슷하다.

유천층군은 화산활동 절정기에 형성된 것으로 안산암, 유문암질 석영안산암, 유문암, 석영안산암의 용암, 응회암, 용결응회암과 이에 협재된 퇴적암으로 구성되며, 하양층군의 침식면 위에 경사부정합으로 흔히 놓인다. 층후는 약 2,000 m이다(Chang, 1978, 1988).

불국사관입암군은 경상누층군을 관입한 화강암을 주로 하며, 암맥, 반려암, 섬록암 등이 소량 발달한다. 대구-영천 일원에서는 팔공산화강암으로 알려져 있다.

연구방법

현장조사

지하수공의 공간적인 분포와 지질특성을 고려하여 경상남북도와 울산광역시에 분포하는 마을상수도용 지하수공 201개소를 선정하고, 이들을 대상으로 우라늄과 라돈의 함량분포와 지하수의 수리지구화학적 특성을 해석하였다. 각 지역별 조사대상은 Table 1과 같이 울산광역시 13, 경남 96, 경북 92개이다.

현장에서 자연방사성물질 함량 분석용 및 수질특성분석용 지하수시료를 각각 채취하였으며, 각 지하수공의 정보도 함께 취득하여 향후 D/B 구축과 지하수 중 자연방사성물질 함량 해석에 이용하였다. 현장에서 취득한 지하수공 자료는 현장수질, 지하수위, 양수량, 수위강하량, 지하수공의 심도, 굴착년도, 지하수 사용량, 좌표, 사용목적, 사용인구 등이다.

주요 수리화학적 성분 분석

기본 수리화학 항목인 수온, 전기전도도, 산화환원전위, 용존산소, 중탄산, CO₂ 등은 충분히 지하수를 배출시켜, 수질이 안정화 된 후에 현장에서 직접 측정하였다. 양이온 분석용 시료는 0.45 μm 멤브레인 필터를 통과시킨 후 산 처리하였으며, 음이온 분석용 시료는 필터

Table 1. Groundwater wells investigated in this study that are used for potable water supply in Gyeongnam and Gyeongbuk provinces.

Ulsan metro		Gyeongnam Province		Gyeongbuk Province	
East-gu	1	Kimhae	1	Andong	3
North-gu	1	Tongyoung	1	Chilgok	3
Ulju-gun	11	Yangsan	1	Bonghwa	1
		Namhae	3	Gyeongju	7
		Hadong	1	Pohang	10
		Changwon	12	Youngcheon	8
		Sacheon	14	Gunwi	12
		Euryeong	14	Eiseong	15
		Haman	13	Goryeong	13
		Hapcheon	14	Seongju	10
		Goseong	13	Gyeongsan	7
		Geoje	7	Youngyang	3
		Changnyeong	3		
Total	13		96		92

후 산처리없이 채취하였다. 주요 성분의 화학분석시 Na, K, Ca, Mg, SiO₂, B, Sr과 같은 양이온은 유도결합플라즈마(ICP-AES), F, Cl, NO₃, SO₄ 등의 음이온은 이온크로마토그래피(IC)를 이용하여 분석하였다. 주요 성분인 Na, K, Ca, Mg, Cl, SO₄, HCO₃을 Piper 다이어그램에 도시하여 지하수의 수질유형을 파악하였으며, 주요 성분들 간의 수리지화학적 특징을 통하여 자연방사성물질과의 관련성을 검토하였다. 통계프로그램인 SPSS (v.19)을 이용하여 요인분석(factor analysis)을 실시하여 주요 성분들 간의 상관계수와 주요 요인을 추출하였으며, 이를 통하여 자연방사성물질 우라늄, 라돈과 주요 수질성분들 간의 성인적 관련성과 거동특성을 해석하였다.

자연방사성물질 분석

지하수의 우라늄과 라돈 함량은 한국지질자원연구원에서 분석하였고 전알파, 라듐 분석은 한국기초과학지원연구원에서 분석하였다. 라돈의 경우 10개 시료에 대해서 한국지질자원연구원, 국립환경과학원, 한국기초지원연구원, 3개 기관에서 분석신뢰도의 검증차원에서 교차 분석을 실시하였다.

우라늄 분석

ICP-MS 분석용 지하수 시료는 시료 채취시 0.45 µm 멤브레인(membrane filter)로 여과하고 강산을 첨가하여 용액을 안정화시켜 놓았기 때문에 별도의 전처리 없이 ICP/MS용 표준용액을 사용하여 검량선을 얻고 이를 이

용하여 지하수 시료의 우라늄 함량을 구하였다. 우라늄 정량치가 50 µg/L 이상인 시료는 희석하여 정량분석 하였다. 분석에 사용된 ICP-MS 장치는 DR-II(Perkin Elmer)이었으며 검량선 작성에 사용된 표준시료는 Accustandard사의 ICP-MS용 혼합표준용액(10 µg/mL) 및 우라늄 단일표준용액 1,000 µg/mL을 측정시료의 매트릭스 농도수준 정도까지 탈 이온화수로 묽혀 함께 사용했으며, 최종 산 농도는 1%v/v HNO₃로 하였다. 또한 표준물질 중 우라늄 원소에 대한 표준검량선을 각 농도의 표준용액 측정값을 통하여 작성한 결과 검량선의 R² 값이 1과 0.999로 매우 안정된 결과를 보여 주었다.

라돈 분석

Rn에 대한 계측효율을 구하기 위하여 ²²⁶Ra 표준용액 8 mL를 취하여 섬광용액 Hisafe3 12 mL와 잘 혼합한 후 PSA 준위 100에서 알파선의 총 피크영역에서 측정하였다. 초기 값은 시료 제조 후 바로 측정된 값을 이용하였다. 바탕시료는 초순수를 끓여서 라돈을 제거한 후에 아르곤으로 세정한 섬광액을 혼합하여 만들어 사용하였으며, 실제 계측시료와 동일한 조건으로 초순수를 섬광용액과 혼합하여 바탕 시료를 만들어서 5시간씩 계측하였다. 이 바탕 시료를 사용하여 실험과정에 의한 바탕값을 얻어 계측효율 및 검출 하한치를 얻는데 이용하였다. PSA 준위 100에서 시료용액 8 mL에 대해 300 분 계측했을 때 알파선 총 피크영역에서의 검출하한치는 0.12 Bq/L이었다.

Table 2. Maximum, mean, median, and standard deviation for the physicochemical properties of groundwater. Unless otherwise noted, the unit is mg/L.

	T (°C)	pH	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Eh (mV)	DO	K	Na	Ca	Mg	SiO ₂	Sr	F	Cl	NO ₃	SO ₄	HCO ₃	
Total (N=200)	maximum	21.9	8.82	1373	299	11.1	54.60	162.00	358.00	57.90	11.60	2.72	123.00	72.20	615.00	353.8	
	minimum	13.2	5.70	58	-116	0.4	0.13	4.43	1.32	0.09	0.05	0.04	1.37	0.06	1.47	25.9	
	mean	17.5	7.48	387	183	5.0	1.29	23.47	43.75	9.91	22.82	1.28	0.25	16.23	10.91	50.70	135.8
	median	17.5	7.49	357	192	4.9	0.80	14.60	34.65	7.54	21.20	0.45	0.13	10.80	7.16	22.15	120.5
	standard deviation	1.5	0.42	208	58	2.4	3.87	24.30	37.43	8.61	8.15	1.98	0.35	18.07	10.70	84.76	67.6
Shindong Group (N=47)	maximum	20.7	8.75	775.00	294.00	9.04	5.69	136.00	91.40	33.10	44.70	5.76	1.06	78.40	32.70	124.00	308.1
	minimum	15.2	6.66	58.00	-10.00	0.40	0.26	4.43	3.58	1.20	7.94	0.06	0.05	1.37	0.06	1.47	27.5
	mean	17.1	7.59	372.72	191.47	4.70	1.14	24.48	36.90	10.15	19.01	1.00	0.21	14.40	8.56	23.87	161.5
	median	17.2	7.55	373.00	192.00	4.95	1.00	14.30	34.60	8.03	17.50	0.77	0.13	10.60	5.56	17.40	157.1
	standard deviation	1.1	0.41	164.64	64.24	2.56	0.83	27.75	21.01	7.58	6.91	1.00	0.22	13.33	8.56	25.75	69.0
Hayang Group (N=11)	maximum	17.8	8.82	1373	275	10.70	54.60	162.00	358.00	57.90	11.60	2.72	119.00	72.20	615.00	323.3	
	minimum	13.2	5.70	101	2	0.70	0.19	5.80	7.98	0.47	9.43	0.05	0.04	3.20	0.06	2.53	32.0
	mean	17.7	7.48	429	183	4.80	1.56	23.45	53.07	11.26	22.18	1.73	0.27	15.43	11.40	73.80	138.5
	median	17.6	7.50	402	194	4.64	0.82	15.60	44.70	8.64	21.00	0.60	0.13	11.80	8.06	33.60	125.1
	standard deviation	1.5	0.40	229	46	2.33	5.15	22.19	44.96	9.32	7.82	2.44	0.41	15.03	10.86	106.69	65.1
Yucheon Group (N=17)	maximum	19.8	8.14	700	261	9.20	2.22	34.50	77.30	34.30	44.90	2.49	0.89	104.00	44.10	68.30	353.8
	minimum	16.5	6.55	103	23	3.20	0.13	6.71	10.20	0.59	18.60	0.07	0.05	5.72	0.29	3.68	42.7
	mean	17.8	7.27	314	190	6.15	0.84	16.07	34.93	7.97	27.84	0.43	0.22	23.51	11.85	23.57	105.5
	median	17.9	7.15	256	199	6.10	0.67	13.40	27.60	5.56	28.20	0.16	0.12	10.40	6.95	15.80	83.9
	standard deviation	1.1	0.45	176	60	1.77	0.51	8.78	21.08	9.20	8.10	0.62	0.24	25.97	12.11	20.77	79.9
Mesozoic Gran- ites (N=21)	maximum	20.5	8.40	786	299	11.10	1.54	143.00	53.60	13.90	48.60	1.84	1.41	123.00	358.00	57.90	58.80
	minimum	15.2	6.45	99	-116	1.50	0.20	7.58	7.05	0.13	20.00	0.05	0.05	2.22	1.32	0.09	7.94
	mean	17.6	7.33	263	173	5.80	0.69	21.87	21.77	5.00	29.56	0.27	0.30	18.36	43.75	9.91	22.82
	median	17.8	7.35	233	177	5.20	0.64	12.30	18.10	4.29	29.30	0.16	0.14	8.86	34.65	7.54	21.20
	standard deviation	1.4	0.52	156	87	2.54	0.37	29.11	11.59	3.39	6.72	0.39	0.38	31.08	37.43	8.61	8.15
Tertiary Sedimen- tary Rocks (N=4)	maximum	21.5	8.35	480	148	8.80	1.25	94.20	27.00	6.57	34.70	0.13	0.23	38.00	-	45.20	173.85
	minimum	14.6	7.14	220	75	2.10	0.50	10.10	1.32	0.09	18.70	0.06	0.14	6.46	-	5.31	99.13
	mean	17.8	7.49	342	116	5.38	0.80	53.15	16.08	2.96	24.88	0.10	0.18	18.29	-	28.13	138.01
	median	17.6	7.24	334	121	5.30	0.72	54.15	18.00	2.58	23.05	0.10	0.18	14.35	-	31.00	139.54
	standard deviation	3.4	0.57	109	31	3.05	0.33	41.33	12.14	3.10	7.42	0.04	0.04	13.66	-	18.70	40.63

전알파 방사능 분석

사용기기는 저준위 액체섬광형 방사능분석기(ultra low level liquid scintillation counter, LSC) Model : Quantalus 1220 (PerkinElmer LAS, Inc.)을 이용하였다. Uranium standard를 이용하여 시료와 동일 방법으로 표준시료를 제작하여, α/β 분리 모드 PSA level을 결정하였으며, 동일 표준시료는 측정시 각 측정의 측정효율을 얻는데 이용하였다.

요인분석

우라늄, 라돈과 주요 수질 성분 간 의미있는 상관성을 도출하기 위하여 다중성분들간 요인분석(factor analysis)을 통하여 상관성 분석을 실시하였다. 또한 공통성을 추출한 다음에 요인적재값을 구하였으며, 요인을 추출한 후, 이들을 회전공간에 나타내어 자연방사성물질과 주요 수질항목간의 관련성을 검토, 분석하였다. 요인분석은 변수들 간의 상관관계(interdependence)를 이용하여 서로 유사한 변수들끼리 묶어 주는 방법이다. 요인분석은 서로 상관되는 변수들 사이의 복잡한 구조를 행렬로 나타내어 행렬의 조작을 통하여 주요 변수들 간의 변동성과 주요 인자들을 추출한다. 공통분산 이외의 오차분산(error variance)과 고유분산(variable specific variance)을 모두 포함시켜 분석하게 되기 때문에 상관관계 행렬은 대각선이 1(unit)이 된다. 본 연구에서는 Varimax 직각회전방식을 사용하였는데, 이는 하나의 요인에 높이 적재되는 변수의 수를 줄여서 요인의 해석에 중점을 준 방식이다.

결과 및 토의

지하수의 수리지화학적 특성

pH

경상도지역 전체 pH의 범위는 5.70~8.82이고, 평균은 7.48인데, 약산성에서부터 알칼리성까지 다양하게 나타나 일반적인 국내 지하수의 수리지화학적 특징에 비하여 비교적 범위가 넓다. 중앙값은 7.48이고, 표준편차는 0.42로 나타나 평균치를 중심으로 골고루 분포한다.

신동충군 지하수의 pH 범위는 6.66~8.85이고, 평균 7.59, 표준편차는 0.41이다. 하양충군 지하수의 pH의 범위는 5.7~8.82로서 범위가 넓으며, 평균은 7.48이고, 표준편차는 0.4이다. 유천충군 지하수의 경우 pH의 범위는 6.55~8.14이며, 평균 7.27, 표준편차는 0.45이다. 평균적인 pH는 타 지질에 비하여 낮다. 중생대 화강암 지

하수의 경우 pH의 범위는 6.45~8.4이며, 평균 7.33, 표준편차는 0.52이다. 신생대 제3기 퇴적암 지하수의 경우 pH의 범위는 7.14~8.35이고 평균 7.49, 표준편차는 0.57이다.

Eh

경상도지역 전체 Eh의 범위는 -116~299이고, 평균은 183인데, 일반적인 국내 지하수의 수질특징에 비하여 비교적 범위가 넓다. 중앙값은 192이고, 표준편차는 58로 나타나 평균치를 중심으로 골고루 분포한다.

신동충군 지하수의 Eh 범위는 -10~294이고, 평균 191.5, 표준편차는 64.2이고, 하양충군 지하수의 Eh 범위는 2~275이고, 평균은 183이고, 표준편차는 46이다. 유천충군 지하수의 경우 Eh의 범위는 23~261이며, 평균 190, 표준편차는 66이다. 중생대 화강암 지하수의 경우 Eh의 범위는 -116~299이며, 평균 173, 표준편차는 87이다. 신생대 제3기 퇴적암 지하수의 경우 Eh의 범위는 75~148이고 평균 121 표준편차는 31이다.

EC

경상도지역 전체 EC의 범위는 58~1,373이고, 평균은 387로 다양하게 나타나 일반적인 국내 지하수의 수질특징에 비하여 비교적 범위가 넓다. 중앙값은 357이고, 표준편차는 208로 나타나 평균치를 중심으로 골고루 분포한다. 그러나 1,000이 넘는 경우 광산배수 또는 염수기원이 아니라면 지하수가 오염되어야 가능한 수치이다.

신동충군 지하수의 EC 범위는 58~775이고, 평균 373, 표준편차는 164이다. 하양충군 지하수의 EC의 범위는 101~1373으로서 범위가 넓으며, 평균은 429이고, 표준편차는 165이다. 유천충군 지하수의 경우 EC의 범위는 103~700이며, 평균 314, 표준편차는 176이다. 중생대 화강암 지하수의 경우 EC의 범위는 99~768이며, 평균 263, 표준편차는 156이다. 신생대 제3기 퇴적암 지하수의 경우 EC의 범위는 220~480이고 평균 342, 표준편차는 109이다.

HCO₃

경상도지역 전체 HCO₃의 범위는 25.9~353.8이고, 평균은 135.8이다. 중앙값은 120.5이고, 표준편차는 67.6으로 나타나 평균치를 중심으로 골고루 분포한다.

신동충군 지하수의 HCO₃ 범위는 27.5~308.1이고, 평균 161.5, 표준편차는 69이다. 하양충군 지하수의 HCO₃의 범위는 32~323.3으로서 범위가 넓으며, 평균은

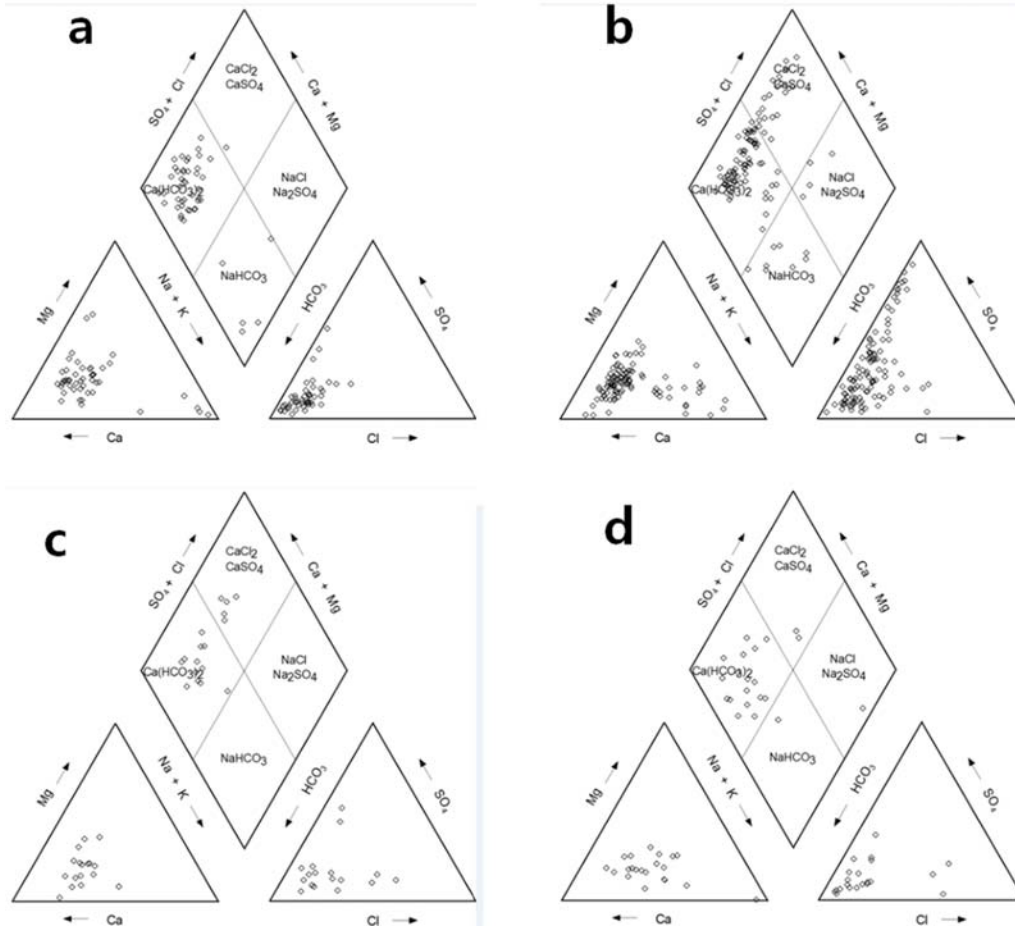


Fig. 1. Groundwater types plotted on Piper diagrams. (a) Shindong Group, (b) Hayang Group, (c) Yucheon Group, (d) Mesozoic Granites.

138.5이고, 표준편차는 65.1이다. 유천층군 지하수의 경우 HCO_3 의 범위는 42.7~353.8이며, 평균 105.5, 표준편차는 79.9이다. 중생대 화강암 지하수의 경우 HCO_3 의 범위는 7.94~58.8이며, 평균 22.8, 표준편차는 78.15이다. 신생대 제3기 퇴적암 지하수의 경우 HCO_3 의 범위는 99.13~173.85이고 평균 138.01, 표준편차는 40.63이다.

수리화학 유형

지하수의 수리화학 유형을 해석하기 위하여 파이퍼(Piper) 다이어그램에 주요 성분을 도시하였다(Fig. 1). 이를 위하여 주요 8개 양이온, 음이온을 당량비로 환산하였으며, 이를 백분율로 변환한 후에, 파이퍼 다이어그램을 작성하였다.

신동층군의 경우 대부분의 지하수는 Ca-HCO_3 가 우세한 유형을 보여 칼슘-중탄산형의 지하수의 특징을 가진다. 일부 지하수에서는 Na-HCO_3 가 나타나며, 음이온은 HCO_3 이 가장 풍부하며, SO_4 는 Cl 에 비하여 넓은 범위를 보인다(Fig. 1a).

하양층군 지하수의 경우 전체적으로 Ca-HCO_3 가 우세한 유형을 보여 칼슘-중탄산형의 지하수의 특징을 보인다(Fig. 1b). 그러나 $\text{Ca-SO}_4(\text{Cl})$ 정도 상당히 나타나는데, 이는 퇴적암류에서 혼한 탄산염, 황화광물에 기인하는 것으로 볼 수 있다. 그 외에도 일부 지하수에서는 Na-HCO_3 나 $\text{Na-SO}_4(\text{Cl})$ 가 나타나는 경우도 있다. 음이온은 HCO_3 이 가장 우세하며, SO_4 도 상당히 넓은 범위로 나타난다. 하양층군 지하수는 양이온과 음이온의 함량비에 따라서 타 지질에 비하여 다양한 수질유형을

보이는 것이 특징적이다. 특히 양이온 Ca, Mg, Na, K의 비는 매우 다양하게 나타난다. 이와 같은 수질유형은 하양층군 특유의 퇴적암의 특성에 기인하는 바가 크다. 즉 하양층군의 경우 퇴적암에 Ca, Mg, 탄산염, 황화물을 다수 함유하고 있으며, 호수 퇴적층이 축적작용을 받아 다양한 이차광물을 형성하고 있다. 따라서 하양층군 지하수의 특성은 이러한 지질특성과도 잘 부합하고 있다.

유천층군 지하수는 Ca-HCO₃가 우세한 유형을 보여 칼슘-중탄산형의 지하수의 특징을 가진다. 그 다음으로는 Ca-SO₄(Cl) 형이 우세한데, 이는 화산암의 특성을 잘 반영한다(Fig. 1c).

중생대 화강암 지하수의 수질화학 유형은 대부분 Ca-HCO₃가 우세한 유형을 보여 칼슘-중탄산형의 지하수의 특징을 가진다(Fig. 1d). 이는 화강암의 지질특성을 잘 반영한다. 그 외에 Na-HCO₃, Ca-SO₄(Cl), Na-SO₄(Cl) 형이 일부 나타난다. 양이온은 Ca외에도 Na, Mg의 비율에 따라서 다양한 범위로 나타난다. 음이온은 HCO₃이 가장 풍부하고, 그 외에 Cl의 범위가 넓게 나타난다.

그 외 신생대 제3기 퇴적암 지하수의 수리지화학 유형은 Ca-HCO₃과 Na-HCO₃ 유형으로 나타나 칼슘, 나트륨-중탄산형의 지하수의 특징을 보여주고 있고, 음이온은 중탄산이 가장 풍부하다.

수리지화학 특성과 물-암석반응

경상남북도 지하수의 경우 심도가 깊어질수록 대체로 pH는 증가함을 보인다. 심부일수록 물-암석이 충분히 경과, 진행되는데 수소이온이 암석, 광물에 흡착되어 가수분해 반응을 하기 때문에 pH가 증가하게 된다. 그럼에도 EC는 pH에 따라서 반드시 비례하는 경향을 나타내지 않는데, pH가 증가하면서 풍부해진 성분들이 지하수중에서 과포화도에 도달하면 다시 침전이 되기 때문이다. 지하수는 심부로 가면서 산소와 점차 격리되는 환경이 되므로 pH가 증가할수록 Eh가 감소해야 하지만, 이들 간 확실한 경향성은 쉽게 인지되지 않는다. EC는 중탄산같은 고함량인 일부 성분과 비례관계를 보인다. 그럼에도 전체적으로 보면 경상남북도 지하수중 자연방사성물질의 거동특성은 매우 복합적이며, 심도, pH, Eh 및 주요 지하수의 수질성분과의 관련성도 거의 없는 것으로 나타났다. 그러므로 단순회귀분석이나, 일대일 비례식을 통하여서는 거동특성, 경향성을 파악하기 어려운 점이 있다. 따라서 다중회귀분석이나 요인분석 등을 통한 통계적 접근이 필요하다.

자연방사성물질의 함량

경상남북도 201개 지역 지하수의 우라늄과 라돈 함량 중앙값은 각각 0.72 µg/L, 510 pCi/L으로 낮은 함량을 보여 퇴적암이 우세한 지질특성을 잘 반영하고 있다. 이 지역 201개 지하수의 우라늄 함량이 30 µg/L를 넘는 곳은 1개, 라돈함량이 4,000 pCi/L를 넘는 곳은 3개이며, 전알파의 함량이 15 pCi/L 나 라듐함량이 5 pCi/L를 넘는 곳은 없었다. 위 4개 지점에 대한 중복추가조사 결과에서 우라늄은 30 µg/L 미만으로 나타났으며, 라돈은 2곳에서 4,000 pCi/L (시료번호 KB78는 6,265 pCi/L, WS5는 5,575 pCi/L)를 초과한다.

우라늄

경상남북도 지하수내 우라늄의 함량은 0.02~53.7 µg/L까지 범위가 넓게 나타난다(Table 3). 평균 1.56 µg/L, 표준편차 4.3 µg/L이고 중앙값은 0.47 µg/L로서 매우 낮다. 이처럼 중앙값이 매우 낮은 이유는 일부 고함량 지역의 수치 때문인데, 이들이 전체 지하수의 산출평균값에 큰 영향을 주기 때문이다. 그러므로 한, 두 지점을 제외한다면 경상남북도의 지하수에서 우라늄의 수치는 매우 낮다고 볼 수 있다. 지질별로 산출특징을 살펴보면 다음과 같다(Fig. 2).

신동층군 지하수에서 우라늄은 0.03~53.7 µg/L 범위, 평균 2.61 µg/L, 표준편차 7.84 µg/L, 중앙값 0.74 µg/L를 보인다. 이곳에서도 일부 고농도 지점의 수치가 전체 지하수의 산출평균에 큰 영향력을 미치기 때문에 평균값이 중앙값의 3배이며, 표준편차는 중앙값의 10배에 이른다. 이는 일부 고농도 지하수를 제외하면, 대부분 매우 낮은 범위에 집중됨을 의미한다. 이 같은 현상은 Box-Whisker 도표에서도 잘 확인된다. 신동층군은 백악기의 대표적인 쇄설성 퇴적암임에도 경상남북도의 조사 지역 중 우라늄의 함량이 가장 높은 곳이 존재하므로, 이에 관한 정밀원인조사가 필요하다.

하양층군 지하수에서는 0.02~10.4 µg/L 범위, 평균 1.17, 표준편차 1.75, 중앙값은 0.43 µg/L이다. 이 또한 일부를 제외하면 전체적으로 우라늄의 농도가 매우 낮음을 지시한다.

화산암인 유천층군 지하수의 경우 우라늄의 농도는 0.02~0.82 µg/L 범위, 평균 0.24 µg/L, 표준편차는 0.21 µg/L, 중앙값은 0.19 µg/L로서 나타나는데, 전반적으로 우라늄의 함량분포는 매우 낮음을 알 수 있다. 이는 화산암 특유의 지질과 관련되는 것으로 해석된다.

중생대 화강암지역 지하수에서 우라늄의 농도는

Table 3. Concentrations of radionuclides in groundwater of Gyeongnam and Gyeongbuk provinces.

Sample No	Sites	Geology	U	Rn	Gross Alpha
			($\mu\text{g/L}$)	(pCi/L)	
KN01	Gyeongnam Kimhae	Yucheon Group	0.47	2,570	1.53
KN02	Gyeongnam Tongyeong	Yucheon Group	0.22	1,430	0.46
KN04	Gyeongnam Yangsan	Yucheon Group	0.2	4,010	0.22
KN05	Gyeongnam Namhae	Shindong Group	0.15	1,690	0.21
KN06	Gyeongnam Namhae	Shindong Group	1.06	780	0.2>
KN07	Gyeongnam Namhae	Shindong Group	0.07	610	0.2>
KN08	Gyeongnam Hadong	Shindong Group	0.27	1,020	0.2>
KN09	Gyeongnam Changwon	Mesozoic Granites	18.8	301	0.2>
KN10	Gyeongnam Changwon	Hayang Group	2.11	179	0.2>
KN11	Gyeongnam Changwon	Hayang Group	0.24	303	0.24
KN12	Gyeongnam Changwon	Hayang Group	0.43	2,561	0.62
KN13	Gyeongnam Changwon	Hayang Group	0.79	1,084	0.63
KN14	Gyeongnam Changwon	Hayang Group	0.09	1,975	0.2>
KN15	Gyeongnam Changwon	Hayang Group	0.59	430	0.36
KN16	Gyeongnam Changwon	Hayang Group	0.28	158	0.35
KN17	Gyeongnam Changwon	Hayang Group	0.88	102	1.04
KN18	Gyeongnam Changwon	Hayang Group	0.53	680	0.63
KN19	Gyeongnam Changwon	Hayang Group	0.26	1,281	0.22
KN20	Gyeongnam Changwon	Hayang Group	0.57	1,190	0.42
KN21	Gyeongnam Sacheon	Hayang Group	0.11	210	0.2>
KN22	Gyeongnam Sacheon	Hayang Group	0.06	270	0.2>
KN23	Gyeongnam Sacheon	Hayang Group	0.32	420	0.31
KN24	Gyeongnam Sacheon	Hayang Group	0.06	740	0.2>
KN25	Gyeongnam Sacheon	Hayang Group	0.79	160	0.55
KN26	Gyeongnam Sacheon	Hayang Group	0.22	280	0.2>
KN27	Gyeongnam Sacheon	Hayang Group	0.31	131	0.39
KN28	Gyeongnam Sacheon	Hayang Group	0.18	830	0.2>
KN29	Gyeongnam Sacheon	Hayang Group	0.29	550	0.73
KN30	Gyeongnam Sacheon	Hayang Group	0.54	760	0.56
KN31	Gyeongnam Sacheon	Shindong Group	0.04	458	0.2>
KN32	Gyeongnam Sacheon	Shindong Group	0.03	180	0.2>
KN33	Gyeongnam Euryeong	Hayang Group	0.07	470	0.2>
KN34	Gyeongnam Euryeong	Yucheon Group	0.22	330	0.39
KN35	Gyeongnam Euryeong	Hayang Group	0.06	410	0.34
KN36	Gyeongnam Euryeong	Hayang Group	0.66	47	0.54
KN37	Gyeongnam Euryeong	Shindong Group	0.07	120	0.2>
KN38	Gyeongnam Euryeong	Shindong Group	0.1	250	0.27
KN39	Gyeongnam Euryeong	Hayang Group	0.5	310	0.70
KN40	Gyeongnam Euryeong	Hayang Group	0.32	390	0.51
KN41	Gyeongnam Euryeong	Hayang Group	0.16	400	0.35
KN42	Gyeongnam Euryeong	Hayang Group	1.25	520	2.52

Table 3. Continued.

Sample No	Sites	Geology	U	Rn	Gross Alpha
			($\mu\text{g/L}$)	(pCi/L)	
KN43	Gyeongnam Euryeong	Hayang Group	0.23	170	0.35
KN44	Gyeongnam Euryeong	Hayang Group	0.52	730	0.84
KN45	Gyeongnam Euryeong	Hayang Group	<0.02	210	0.2>
KN46	Gyeongnam Euryeong	Mesozoic Granites	0.29	230	0.43
KN47	Gyeongnam Haman	Hayang Group	0.35	46	0.2>
KN48	Gyeongnam Haman	Hayang Group	0.68	890	0.69
KN49	Gyeongnam Haman	Hayang Group	0.69	380	0.25
KN50	Gyeongnam Haman	Hayang Group	0.26	1,010	0.2>
KN51	Gyeongnam Haman	Hayang Group	0.96	837	0.2>
KN52	Gyeongnam Haman	Hayang Group	1.01	200	0.90
KN53	Gyeongnam Haman	Hayang Group	0.12	420	0.44
KN54	Gyeongnam Haman	Hayang Group	0.25	730	0.2>
KN55	Gyeongnam Haman	Hayang Group	0.49	1,080	0.69
KN56	Gyeongnam Haman	Hayang Group	1.13	1,480	1.41
KN57	Gyeongnam Haman	Hayang Group	0.85	970	1.24
KN58	Gyeongnam Haman	Hayang Group	5.06	710	0.69
KN59	Gyeongnam Haman	Hayang Group	0.16	760	0.20
KN60	Gyeongnam Hapcheon	Hayang Group	0.07	240	0.30
KN61	Gyeongnam Hapcheon	Shindong Group	0.33	89	1.07
KN62	Gyeongnam Hapcheon	Shindong Group	0.75	640	0.80
KN63	Gyeongnam Hapcheon	Shindong Group	0.23	2	0.69
KN64	Gyeongnam Hapcheon	Shindong Group	0.3	360	0.65
KN65	Gyeongnam Hapcheon	Shindong Group	2.98	2,770	0.77
KN66	Gyeongnam Hapcheon	Mesozoic Granites	0.76	580	0.2>
KN67	Gyeongnam Hapcheon	Shindong Group	0.04	4	0.2>
KN68	Gyeongnam Hapcheon	Shindong Group	2.11	570	0.2>
KN69	Gyeongnam Hapcheon	Shindong Group	0.6	420	0.50
KN70	Gyeongnam Hapcheon	Shindong Group	0.1	490	0.2>
KN71	Gyeongnam Hapcheon	Shindong Group	0.08	320	0.2>
KN72	Gyeongnam Hapcheon	Shindong Group	0.17	430	0.48
KN73	Gyeongnam Hapcheon	Hayang Group	0.4	410	0.2>
KN74	Gyeongnam Goseong	Hayang Group	0.24	500	0.2>
KN75	Gyeongnam Goseong	Mesozoic Granites	0.12	940	0.63
KN76	Gyeongnam Goseong	Hayang Group	0.3	1,060	2.09
KN77	Gyeongnam Goseong	Hayang Group	0.11	730	1.00
KN78	Gyeongnam Goseong	Hayang Group	0.55	1,390	3.09
KN79	Gyeongnam Goseong	Hayang Group	0.21	410	0.97
KN81	Gyeongnam Goseong	Mesozoic Granites	0.29	1,150	0.2>
KN82	Gyeongnam Goseong	Hayang Group	0.24	240	0.2>
KN83	Gyeongnam Goseong	Hayang Group	0.33	270	1.96
KN84	Gyeongnam Goseong	Hayang Group	0.03	2,200	0.29
KN85	Gyeongnam Goseong	Hayang Group	0.06	1,320	0.2>

Table 3. Continued.

Sample No	Sites	Geology	U	Rn	Gross Alpha
			($\mu\text{g/L}$)	(pCi/L)	
KN86	Gyeongnam Goseong	Yucheon Group	0.3	570	0.64
KN87	Gyeongnam Geoje	Yucheon Group	<0.02	200	0.2>
KN88	Gyeongnam Geoje	Yucheon Group	0.19	750	0.2>
KN89	Gyeongnam Geoje	Mesozoic Granites	0.82	310	1.02
KN90	Gyeongnam Geoje	Yucheon Group	0.03	380	0.2>
KN91	Gyeongnam Geoje	Yucheon Group	0.13	2,440	5.91
KN92	Gyeongnam Geoje	Yucheon Group	0.08	840	0.39
KN93	Gyeongnam Geoje	Yucheon Group	0.25	2,820	1.27
KN94	Gyeongnam Changnyeong	Yucheon Group	0.6	454	3.63
KN95	Gyeongnam Changnyeong	Mesozoic Granites	0.66	600	0.2>
KN96	Gyeongnam Changnyeong	Hayang Group	1.15	2,044	0.2>
KN97	Gyeongnam Sacheon	Hayang Group	0.32	470	0.32
KN98	Gyeongnam Sacheon	Hayang Group	<0.02	1,220	0.2>
KB01	Gyeongbuk Andong	Shindong Group	5.41	814	1.36
KB02	Gyeongbuk Chilgok	Hayang Group	2.11	390	0.2>
KB03	Gyeongbuk Chilgok	Hayang Group	4.1	280	0.51
KB04	Gyeongbuk Chilgok	Hayang Group	5.86	1,140	1.98
KB05	Gyeongbuk Bonghwa	Hayang Group	10.4	1,390	5.91
KB06	Gyeongbuk Gyeongju	Yucheon Group	0.26	260	0.2>
KB07	Gyeongbuk Gyeongju	Yucheon Group	0.17	660	0.2>
KB08	Gyeongbuk Gyeongju	Yucheon Group	0.39	480	0.2>
KB09	Gyeongbuk Gyeongju	Yucheon Group	0.4	270	0.21
KB12	Gyeongbuk Gyeongju	Hayang Group	0.4	180	0.2>
KB13	Gyeongbuk Gyeongju	Mesozoic Granites	1.04	1,550	0.21
KB15	Gyeongbuk Gyeongju	Hayang Group	1.86	600	0.2>
KB16	Gyeongbuk Pohang	Mesozoic Granites	<0.02	48	0.2>
KB17	Gyeongbuk Pohang	Tertiary Sedimentary	<0.02	1,140	0.2>
KB18	Gyeongbuk Pohang	Tertiary Sedimentary	<0.02	97	0.2>
KB19	Gyeongbuk Pohang	Mesozoic Granites	0.52	760	0.2>
KB20	Gyeongbuk Pohang	Tertiary Sedimentary	0.04	660	0.2>
KB21	Gyeongbuk Pohang	Tertiary Sedimentary	0.2	880	0.39
KB22	Gyeongbuk Pohang	Hayang Group	0.12	500	0.36
KB24	Gyeongbuk Pohang	Mesozoic Granites	<0.02	1,600	0.2>
KB25	Gyeongbuk Pohang	Mesozoic Granites	0.22	700	0.82
KB26	Gyeongbuk Youngcheon	Hayang Group	1.53	920	0.86
KB27	Gyeongbuk Youngcheon	Hayang Group	1.16	1,010	1.40
KB28	Gyeongbuk Youngcheon	Mesozoic Granites	1.54	1,280	4.23
KB29	Gyeongbuk Youngcheon	Hayang Group	4.52	550	2.27
KB30	Gyeongbuk Youngcheon	Hayang Group	4.34	233	5.27
KB31	Gyeongbuk Euseong	Hayang Group	4.3	1,410	5.41
KB32	Gyeongbuk Youngcheon	Hayang Group	1.41	230	2.15

Table 3. Continued.

Sample No	Sites	Geology	U	Rn	Gross Alpha
			($\mu\text{g/L}$)	(pCi/L)	
KB33	Gyeongbuk Youngcheon	Mesozoic Granites	0.05	66	0.22
KB34	Gyeongbuk Youngcheon	Yucheon Group	0.49	182	0.37
KB36	Gyeongbuk Gunwie	Shindong Group	2.61	680	0.2>
KB37	Gyeongbuk Gunwie	Shindong Group	0.27	610	0.2>
KB38	Gyeongbuk Gunwie	Shindong Group	8.14	690	0.2>
KB39	Gyeongbuk Gunwie	Hayang Group	0.98	130	0.86
KB40	Gyeongbuk Gunwie	Hayang Group	0.06	690	0.24
KB41	Gyeongbuk Gunwie	Hayang Group	1.79	51	0.79
KB42	Gyeongbuk Gunwie	Hayang Group	0.41	73	0.45
KB43	Gyeongbuk Gunwie	Hayang Group	<0.02	260	0.2>
KB44	Gyeongbuk Gunwie	Hayang Group	<0.02	220	0.2>
KB45	Gyeongbuk Gunwie)	Hayang Group	1.54	720	1.97
KB46	Gyeongbuk Gunwie	Hayang Group	0.25	810	0.53
KB47	Gyeongbuk Gunwie	Hayang Group	0.07	440	0.25
KB48	Gyeongbuk Eiseong	Hayang Group	2.93	410	0.63
KB49	Gyeongbuk Eiseong	Hayang Group	4.81	570	1.97
KB50	Gyeongbuk Eiseong	Hayang Group	1.26	172	1.25
KB51	Gyeongbuk Eiseong	Hayang Group	0.51	1,510	0.96
KB52	Gyeongbuk Eiseong	Hayang Group	6.61	386	9.16
KB53	Gyeongbuk Eiseong	Hayang Group	1.29	1,300	0.93
KB54	Gyeongbuk Eiseong	Shindong Group	53.7	890	0.2>
KB55	Gyeongbuk Eiseong	Shindong Group	3.34	400	0.56
KB56	Gyeongbuk Eiseong	Hayang Group	1.19	490	1.00
KB57	Gyeongbuk Eiseong	Shindong Group	3.75	570	0.48
KB58	Gyeongbuk Eiseong	Shindong Group	3.66	260	0.34
KB59	Gyeongbuk Eiseong	Shindong Group	2.88	360	3.76
KB60	Gyeongbuk Eiseong	Shindong Group	5.32	580	0.92
KB61	Gyeongbuk Eiseong	Hayang Group	5.48	1,050	1.62
KB62	Gyeongbuk Eiseong	Hayang Group	0.37	878	1.75
KB63	Gyeongbuk Goryeong	Shindong Group	0.73	953	0.31
KB64	Gyeongbuk Goryeong	Shindong Group	3.11	690	0.71
KB65	Gyeongbuk Goryeong	Mesozoic Granites	2.63	870	0.2>
KB66	Gyeongbuk Goryeong	Shindong Group	0.57	446	0.32
KB67	Gyeongbuk Goryeong	Shindong Group	0.74	503	0.60
KB68	Gyeongbuk Goryeong	Shindong Group	0.03	165	0.2>
KB69	Gyeongbuk Goryeong	Shindong Group	0.13	216	0.2>
KB70	Gyeongbuk Goryeong	Shindong Group	1.22	153	0.68
KB71	Gyeongbuk Goryeong	Shindong Group	0.4	295	0.33
KB72	Gyeongbuk Goryeong	Shindong Group	1.25	182	0.76
KB73	Gyeongbuk Goryeong	Shindong Group	1.2	3	0.2>
KB74	Gyeongbuk Goryeong	Mesozoic Granites	8.88	2,180	0.2>

Table 3. Continued.

Sample No	Sites	Geology	U	Rn	Gross Alpha
			($\mu\text{g/L}$)	(pCi/L)	
KB75	Gyeongbuk Goryeong	Mesozoic Granites	1.33	1,490	0.2>
KB76	Gyeongbuk Seongju	Shindong Group	1.71	290	0.2>
KB77	Gyeongbuk Seongju	Mesozoic Granites	3.63	1,350	0.2>
KB78	Gyeongbuk Seongju	Precambrian Gneiss	7.39	6,030	0.2>
KB79	Gyeongbuk Seongju	Shindong Group	0.53	460	0.54
KB80	Gyeongbuk Seongju	Shindong Group	7.66	510	0.2>
KB81	Gyeongbuk Seongju	Shindong Group	2.09	380	1.00
KB82	Gyeongbuk Seongju	Shindong Group	1.03	250	0.51
KB83	Gyeongbuk Seongju	Shindong Group	0.57	130	0.22
KB84	Gyeongbuk Seongju	Shindong Group	4.27	1,270	0.53
KB85	Gyeongbuk Seongju	Shindong Group	1.36	140	0.69
KB86	Gyeongbuk Gyeongsan	Mesozoic Granites	0.99	1,410	0.23
KB87	Gyeongbuk Gyeongsan	Hayang Group	0.34	39	0.57
KB88	Gyeongbuk Gyeongsan	Hayang Group	0.6	131	0.70
KB89	Gyeongbuk Gyeongsan	Mesozoic Granites	4	1,470	0.2>
KB90	Gyeongbuk Gyeongsan	Hayang Group	2.18	380	1.44
KB91	Gyeongbuk Gyeongsan	Hayang Group	0.51	1,350	0.36
KB92	Gyeongbuk Gyeongsan	Hayang Group	0.05	437	0.2>
KB93	Gyeongbuk Youngyang	Hayang Group	1.61	680	0.2>
KB94	Gyeongbuk Youngyang	Hayang Group	4.37	1,440	4.56
KB95	Gyeongbuk Youngyang	Hayang Group	4.21	945	0.2>
KB201	Gyeongbuk Andong	Hayang Group	1.79	42	0.70
KB202	Gyeongbuk Andong	Hayang Group	3.15	600	1.48
WS01	Gyeongnam Ulsan	Hayang Group	<0.02	710	0.2>
WS02	Gyeongnam Ulsan	Hayang Group	<0.02	110	0.2>
WS03	Gyeongnam Ulsan	Hayang Group	0.36	300	0.2>
WS04	Gyeongnam Ulsan	Hayang Group	0.45	850	1.34
WS05	Gyeongnam Ulsan	Mesozoic Granites	0.23	8740	1.21
WS06	Gyeongnam Ulsan	Hayang Group	3.6	410	1.82
WS07	Gyeongnam Ulsan	Hayang Group	0.14	480	1.17
WS08	Gyeongnam Ulsan	Hayang Group	0.18	720	0.32
WS09	Gyeongnam Ulsan	Hayang Group	1.05	1750	0.66
WS10	Gyeongnam Ulsan	Hayang Group	0.3	530	0.59
WS11	Gyeongnam Ulsan	Hayang Group	0.47	490	0.57
WS13	Gyeongnam Ulsan	Hayang Group	0.35	610	1.04
WS14	Gyeongnam Ulsan	Hayang Group	0.08	480	0.2>

0.02~18.8 $\mu\text{g/L}$ 범위, 평균 2.29 $\mu\text{g/L}$, 표준편차는 4.32 $\mu\text{g/L}$, 중앙값은 0.52 $\mu\text{g/L}$ 이다. 이 지역 화강암의 경우 일부 지점에서 우라늄의 함량이 조금 높지만, 타 지역 화강암류에 비하면 낮은 편이다.

신생대 제3기 퇴적암지역 지하수는 0.02~0.2 $\mu\text{g/L}$ 범

위, 평균은 0.07 $\mu\text{g/L}$, 중앙값은 0.03 $\mu\text{g/L}$, 표준편차는 0.09 $\mu\text{g/L}$ 이다. 이 암중 분포지역의 지하수에는 우라늄의 함량은 매우 낮으므로, 근원암 자체에는 함우라늄 광물이 거의 존재하지 않은 것으로 볼 수 있다.

한편 선캄브리아기 편마암(N=1)에서는 7.39 $\mu\text{g/L}$ 를

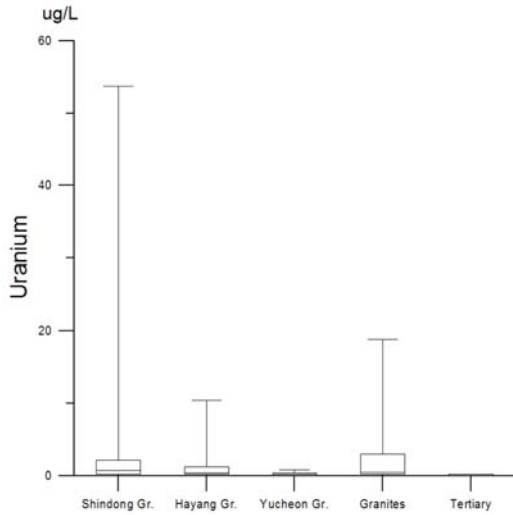


Fig. 2. Box and whisker plots of uranium concentration ($\mu\text{g/L}$) with geology.

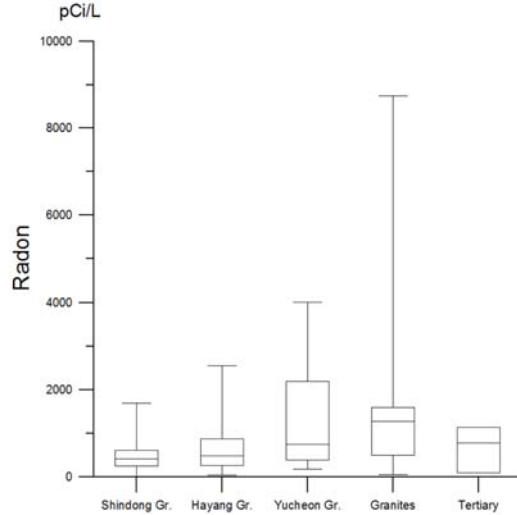


Fig. 3. Box and whisker plots of radon concentration (pCi/L) with geology.

보여 타 암질에 비하여 우라늄 농도가 낮지는 않다.

이상에서 살펴본 바에 따르면, 우라늄의 최대치는 신동층군 > 중생대 화강암 > 하양층군 > 유천층군 > 제3기 퇴적암의 순으로 높고, 우라늄의 평균치는 신동층군 > 중생대 화강암 > 하양층군 > 유천층군 > 신생대 제3기 퇴적암의 순으로 높다.

지하수중 우라늄의 거동은 pH와 Eh에 크게 영향을 받게 되는데 이는 물-암석 반응이 진행됨에 따라서 우라늄의 용해도나 우라늄화합물의 화학적 존재형태 (chemical species)가 변하기 때문이다. 본 연구지역에서는 이들 간의 관련성을 검토한 결과, 높은 상관성은 관찰되지 않는다.

라돈

전체지역의 라돈은 2~8,740 pCi/L 범위, 평균 754, 중앙값 510, 표준편차는 907 pCi/L이다. 각 지질별로 함량분포 특징을 살펴보면 다음과 같다.

신동층군 지하수에서는 2~1,690 pCi/L 범위로서 비교적 낮게 나타난다. 평균 469 pCi/L, 중앙값 420 pCi/L, 표준편차 333 pCi/L이다.

하양층군 지하수에서는 39~2,561 pCi/L 범위로서 비교적 낮은 편이다. 평균 621 pCi/L, 중앙값 462 pCi/L, 표준편차는 462 pCi/L이다. 일부 고함량 지하수가 전체 평균값에 영향을 크게 미치는 것으로 나타났다.

유천층군 지하수에서는 180~4,010 pCi/L 범위로 신동

층군과 하양층군에 비하면 조금 더 높게 나타난다. 평균 1,210 pCi/L, 중앙값은 750 pCi/L, 표준편차 1,088 pCi/L이다. 유천층군에서도 하양층군과 마찬가지로 일부 고함량 지하수가 전체 평균값에 크게 영향을 주는 것으로 나타났다. 이 같은 현상은 Box-Whisker 도표에서도 함량범위의 이 같은 특징이 잘 드러난다.

중생대 화강암지역 지하수에서 라돈의 함량범위는 48~8,740 pCi/L인데, 라돈최고치가 이 암종에서 나타난다는 점은 흥미롭다. 라돈의 평균은 1,488 pCi/L, 중앙값은 1,280 pCi/L, 표준편차는 1,844 pCi/L이다. 여타 퇴적암에 비하여 중생대 화강암 지역 지하수에서 라돈의 최대치와 평균치가 가장 높다. 이는 일반적인 우리나라 화강암질 지하수의 특성과 잘 일치한다.

신생대 제3기 퇴적암지역 지하수에서는 97~1,140 pCi/L 범위, 평균은 694이다. 중앙값은 770 pCi/L, 표준편차는 444 pCi/L이다.

한편 선캄브리아기 편마암에서는 6,030 pCi/L로서 다소 높게 나타난다. 이곳에서 우라늄의 함량은 7.39 $\mu\text{g/L}$ 로 조금 높게 나타난다는 점은 이들이 서로 연관성이 있음을 암시한다. 그러나 시료수가 1개에 불과하여 의미있는 해석은 어렵다.

이상에서 살펴본 바에 따르면, 라돈의 최대치는 중생대 화강암 > 유천층군 > 하양층군 > 신동층군 > 제3기 퇴적암의 순으로 높다(Fig. 3). 라돈 평균치는 중생대 화강암 > 유천층군 > 신생대 제3기 퇴적암 > 하양층군 > 신동

층군의 순으로 높다.

라돈은 지하수 중에 용존되더라도 폭기, 지하수의 유동, 반감기 등에 의하여 쉽게 그 농도가 변하게 되므로, 지하수에 용해된 후에 다양한 화합물로 존재하는 우라늄과는 거동특성이 밀접하지 않는 것으로 판단된다.

전알파

지하수의 전알파는 불검출에서부터 최대 9.16 pCi/L (시료 KB52) 범위로 나타나, 201개 지하수에서 전알파의 함량이 15 pCi/L를 넘는 시료는 없다. 전알파의 함량이 5 pCi/L 이상인 경북의 4개 지하수(시료 KB5, KB30, KB31, KB52)로 나타났다.

요인분석에 의한 주요 성분들의 상관성

경상남북도 전체 지하수에 대한 요인분석

경상남북도는 다양한 지질로 구성되는데, 크게 3개 암상으로 구분된다. 즉 백악기 퇴적암류, 중생대 화강암류, 신생대 제3기 퇴적암으로 구성된다. 이들은 각각의 지질특성에 따라 고유한 수질특성과 방사성 물질의 함량 분포를 보여준다. 본 연구에서는 먼저 경상남북도 201개소 시료 중에서, 특정성분(중탄산) 분석치가 누락된 경우를 제외한 195개 시료를 대상으로 통계분석을 실시하였다. 분석치가 누락된 시료들은 백악기 하양층군에 속하는데, 하양층군의 시료수(N=111)가 가장 많아 전체 통계분석에 미치는 영향은 무시할 만하다. 상관관계 계산

은 변수간 상관관계 행렬을 산출함으로써 이루어지며, 변수간의 상호관련성을 파악하는데 이 상관관계 행렬이 요인분석의 입력자료가 된다.

상관행렬에 의하면 우라늄과 라돈은 서로 상관성을 보이지 않으며, 이들과 높은 상관계수를 가지는 수질성분들도 관찰되지 않는다(Table 4). 라돈은 SiO₂와는 상관계수 0.337을 보여 여타 수질항목들 가운데서 가장 높은 관련성을 나타낸다. 그러나 이 경우도 이들이 서로 밀접한 관련이 있다고는 볼 수 없는 수준이다. 그러나 일부 수질성분들은 서로 높은 상관관계를 보이기도 한다. 예를 들면 EC-SO₄ (0.734), EC-HCO₃ (0.615)는 높은 상관성을 보이며 그 외에도 EC는 Na, Ca, Mg, Sr, Cl 등과도 상관성이 있는 것으로 나타나 이들 성분이 지하수중 주요 이온의 함량을 차지하여 전기전도도에 기여하는 것으로 볼 수 있다. 그 외에 Na-F (0.43), Ca-SO₄ (0.716), Ca-Mg (0.628), Ca-Sr (0.511), Mg-Sr (0.589), Ca-Mg (0.628), Ca-SO₄ (0.716), Mg-HCO₃ (0.633), Mg-HCO₃ (0.653) 등이 비교적 높은 상관성을 보여준다. 이들은 양이온과 음이온간 짝이온 결합, 등가이온의 치환관계, 또는 특정한 암질에서의 물-암석반응에 의한 특징을 잘 보여준다.

공통성을 추출한 결과, 의미있는 요인은 6개가 추출되었지만, 설명된 총분산(total variance explained)과 적재값(loadings)으로 판단하면 주로 요인 1, 요인 2에 의존함을 알 수 있다(Table 5). 그렇지만 가장 높은 요인

Table 4. Correlation matrix of components in groundwater of Gyeongnam and Gyeongbuk provinces.

	pH	EC	Eh	DO	Rn	U	K	Na	Ca	Mg	SiO ₂	Sr	F	Cl	SO ₄	HCO ₃
pH	1.000	.115	-.195	-.131	-.311	.038	-.064	.285	-.015	.029	-.263	.087	.234	.016	.040	.220
EC	.115	1.000	-.183	-.371	-.116	.121	-.008	.520	.577	.533	-.248	.573	.192	.400	.734	.615
Eh	-.195	-.183	1.000	.221	-.024	-.049	.113	-.245	-.055	-.073	-.004	-.142	-.148	-.138	-.140	-.093
DO	-.131	-.371	.221	1.000	.000	-.205	.005	-.225	-.265	-.273	.260	-.299	-.181	-.127	-.270	-.378
Rn	-.311	-.116	-.024	.000	1.000	.065	-.030	-.120	-.060	-.124	.337	-.058	.126	-.007	-.065	-.177
U	.038	.121	-.049	-.205	.065	1.000	.015	.030	.111	.109	-.083	.121	-.013	.068	.011	.266
K	-.064	-.008	.113	.005	-.030	.015	1.000	.006	-.008	-.014	-.041	-.028	.010	.176	.002	-.004
Na	.285	.520	-.245	-.225	-.120	.030	.006	1.000	.188	.212	-.250	.312	.430	.366	.344	.395
Ca	-.015	.577	-.055	-.265	-.060	.111	-.008	.188	1.000	.628	-.122	.511	.125	.088	.716	.285
Mg	.029	.533	-.073	-.273	-.124	.109	-.014	.212	.628	1.000	-.255	.589	-.062	.130	.387	.653
SiO ₂	-.263	-.248	-.004	.260	.337	-.083	-.041	-.250	-.122	-.255	1.000	-.287	.007	.007	-.117	-.332
Sr	.087	.573	-.142	-.299	-.058	.121	-.028	.312	.511	.589	-.287	1.000	.125	.154	.479	.447
F	.234	.192	-.148	-.181	.126	-.013	.010	.430	.125	-.062	.007	.125	1.000	-.051	.260	.057
Cl	.016	.400	-.138	-.127	-.007	.068	.176	.366	.088	.130	.007	.154	-.051	1.000	-.005	.180
SO ₄ 2	.040	.734	-.140	-.270	-.065	.011	.002	.344	.716	.387	-.117	.479	.260	-.005	1.000	.182
HCO ₃	.220	.615	-.093	-.378	-.177	.266	-.004	.395	.285	.653	-.332	.447	.057	.180	.182	1.000

Table 5. Total variance explained and loadings of components in groundwater of Gyeongnam and Gyeonbuk provinces (n = 195).

Components	Initial eigenvalue			Extraction sums of squares loadings			Rotation sums of squares loadings		
	Total	Variance %	Cumulative %	Total	Variance %	Cumulative %	Total	Variance %	Cumulative %
1	4.502	28.136	28.136	4.502	28.136	28.136	3.555	22.221	22.221
2	1.659	10.371	38.507	1.659	10.371	38.507	1.824	11.401	33.622
3	1.539	9.619	48.126	1.539	9.619	48.126	1.600	10.003	43.625
4	1.305	8.154	56.280	1.305	8.154	56.280	1.550	9.689	53.314
5	1.192	7.450	63.730	1.192	7.450	63.730	1.503	9.396	62.710
6	1.013	6.330	70.059	1.013	6.330	70.059	1.176	7.349	70.059
7	.824	5.148	75.207						
8	.768	4.797	80.004						
9	.687	4.297	84.301						
10	.609	3.807	88.107						
11	.538	3.362	91.470						
12	.448	2.803	94.273						
13	.404	2.523	96.795						
14	.311	1.945	98.741						
15	.154	.960	99.701						
16	.048	.299	100.000						

1의 경우도 적재량이 28.14% 불과하며, 대표적인 이들 요인의 적재값 합도 38.52%에 불과하여 전체적인 기여도는 여전히 낮은 편이다. 이는 경상남북도 지하수에서 주요 성분들에 대하여 절대적 우위에 놓인 특정한 요인은 존재하지 않으며, 여러 요인들이 복합적으로 작용하는 것을 지시한다.

이로 볼 때, 조사지역 전체를 대상으로 통계분석할 때에는 특정한 성분들 간에 영향력이 다소 낮게 나타남을 알 수 있다. 이는 여러 유형의 지질을 구분하지 않고 전체적으로 단순히 요인분석을 하게 되면 암질별 지하수의 특성이 충분히 드러나지 않기 때문이다. 주요 암질 별로 구분하여 요인분석을 실시한 결과는 다음과 같다.

신동충균 지하수의 요인분석

신동충균에 대한 요인분석결과, 우라늄은 Ca와 비교적 높은 상관계수(0.493)를 보여주나, 그외 성분들은 방사성 원소들과 높은 상관성은 없는 것으로 나타났다 (Table 6). 그러나 일부 성분들은 물-암석반응에 의한 특징을 보여주는데, pH는 F (0.547), Na (0.403)와 상관성이 있으며, Na는 F와 높은 상관계수(0.831)를 보인다. Ca는 Mg, SO₄, HCO₃와도 높은 상관계수를 보여준다. 그 외에도 Sr-SO₄, Cl-HCO₃ 등도 상관성이 높다. 공통

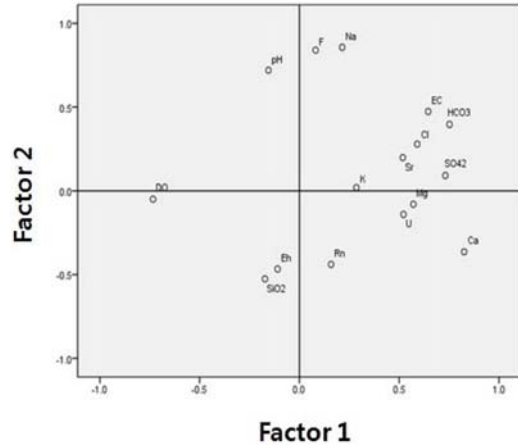


Fig. 4. Factor analysis of geochemical components in groundwater of the Shindong Group.

성을 추출한 결과, 의미있는 요인은 5개가 추출되었지만, 설명된 총분산(total variance explained)과 적재값(loadings)으로 판단하면 주로 요인 1, 요인 2에 의존함을 알 수 있다(Table 7). 그렇지만 가장 높은 요인 1의 경우도 적재량이 28.95% 불과하며, 대표적인 이들 2요인의 적재값 합도 46.82%에 불과하여 전체적인 기여도

Table 6. Correlation matrix of groundwater components for each geological unit.

Shindong Group	Hayang Group	Yucheon Group	Granites
pH-Na(0.403)	EC-Na(0.533)	pH-Rn(-0.707)	pH-DO(-0.472)
pH-F(0.547)	EC-Ca(0.587)	pH-F(0.428)	pH-K(-0.522)
EC-DO(-0.437)	EC-Mg(0.539)	EC-Na(0.930)	EC-K(0.451)
EC-Na(0.512)	EC-Sr(0.598)	EC-Ca(0.965)	EC-Na(-0.728)
EC-Cl(0.519)	EC-SO ₄ (0.808)	EC-Mg(0.785)	EC-Ca(0.758)
EC-SO ₄ (0.435)	Na-Mg(0.464)	EC-Sr(0.755)	EC-Mg(0.904)
EC-HCO ₃ (0.645)	Na-Sr(0.465)	EC-Cl(0.636)	EC-Sr(0.779)
DO-Ca(-0.500)	Na-F(0.505)	EC-SO ₄ (0.640)	EC-Cl(0.760)
DO-SO ₄ (-0.551)	Na-SO ₄ (0.491)	EC-HCO ₃ (0.814)	EC-HCO ₃ (0.714)
DO-HCO ₃ (-0.527)	Ca-Sr(0.479)	Eh-DO(0.448)	Eh-DO(0.589)
Na-F(0.831)	Ca-SO ₄ (0.713)	DO-K(-.550)	Eh-Mg(-0.477)
Na-Cl(0.519)	Mg-Sr(.629)	K-SiO ₂ (-0.434)	Eh-SO ₄ (-0.672)
Na-HCO ₃ (0.495)	Mg-SO ₄ (0.414)	Na-Ca(0.858)	DO-SO ₄ (-0.626)
Ca-Mg(0.454)	Mg-HCO ₃ (0.637)	Na-Mg(0.748)	DO-HCO ₃ (-0.486)
Ca-SO ₄ (0.642)	Sr-SO ₄ (0.433)	Na-Sr(0.853)	K-Na(0.467)
Ca-HCO ₃ (0.544)	Sr-HCO ₃ (0.508)	Na-Cl(0.632)	K-Mg(0.571)
Sr-SO ₄ (0.641)		Na-SO ₄ (0.589)	K-Sr(0.403)
Cl-HCO ₃ (0.484)	U-Mg(0.432)	Na-HCO ₃ (0.769)	K-Cl(0.600)
	U-Sr(0.465)	Ca-Mg(0.630)	Na-Mg(0.605)
U-Ca(0.493)	U-HCO₃(0.559)	Ca-Sr(0.607)	Na-Sr(0.797)
		Ca-Cl(0.707)	Na-Cl(0.822)
		Ca-SO ₄ (0.663)	Ca-Mg(0.642)
		Ca-HCO ₃ (0.688)	Ca-SO ₄ (0.426)
		Mg-Sr(0.827)	Ca-SO ₄ (0.869)
		Mg-SO ₄ (0.550)	Mg-Sr(0.687)
		Mg-HCO ₃ (0.965)	Mg-Cl(0.731)
		SiO ₂ -Sr(-0.436)	Mg-SO ₄ (0.423)
		SiO ₂ -F(0.483)	Mg-HCO ₃ (0.609)
		Sr-SO ₄ (0.538)	SiO ₂ -F(0.506)
		Sr-HCO ₃ (0.806)	Sr-Cl(0.937)
		SO ₄ -HCO ₃ (0.600)	
		U-Na(0.756)	U-pH(0.533)
		U-Ca(0.701)	U-EC(-0.405)
		U-Mg(0.428)	U-K(-0.408)
		U-Sr(0.482)	U-Mg(-0.440)
		U-Cl(0.727)	Rn-SiO₂(0.690)
		U-HCO₃(0.491)	Rn-F(0.532)
		U-EC(0.705)	
		U-Eh(-0.450)	
		Rn-EC(-0.406)	
		Rn-Ca(-0.442)	
		Rn-Mg(-0.406)	
		Rn-SiO₂(0.587)	
		Rn-HCO₃(-0.445)	

는 낮은 편이다. 이는 경상남북도 지하수에서 주요 성분들에 대하여 절대적 우위에 놓인 특정한 요인은 존재하지 않으며, 여러 요인들이 복합적으로 작용하는 것으로 나타난다. 요인을 회전공간에 나타낸 결과에 의하면 우리나라는 요인 1에 약간 영향을 받으면서 Mg와 거동특성이 유사함을 보여준다(Fig. 4). 그러나 라돈의 경우 우리나라와 거동특성은 다르며, 요인 2에 약간 영향을 받지만

특정한 성분과의 거동특성은 확인되지 않는다. 그렇지만 주요 수질성분들은 요인 1에 영향을 받는 경우가 흔하며, 물-암석반응에 의해서 유사한 거동특성을 보여준다.

하양층군 지하수의 요인분석

하양층군은 시료수가 가장 많은 지질인데, 우리나라는 HCO₃(0.559), Sr(0.465), Mg(0.432)와 비교적 높은 상

Table 7. Total variance explained and loadings of components in groundwater of the Shindong Group.

Components	Initial eigenvalue			Extraction sums of squares loadings			Rotation sums of squares loadings		
	Total	Variance %	Cumulative %	Total	Variance %	Cumulative %	Total	Variance %	Cumulative %
1	4.632	28.950	28.950	4.632	28.950	28.950	3.151	19.692	19.692
2	2.860	17.874	46.824	2.860	17.874	46.824	2.644	16.522	36.214
3	1.509	9.432	56.256	1.509	9.432	56.256	2.261	14.129	50.343
4	1.285	8.033	64.289	1.285	8.033	64.289	2.088	13.049	63.391
5	1.161	7.256	71.545	1.161	7.256	71.545	1.305	8.153	71.545
6	.914	5.712	77.257						
7	.871	5.445	82.701						
8	.696	4.352	87.053						
9	.597	3.732	90.785						
10	.472	2.951	93.735						
11	.304	1.899	95.634						
12	.272	1.698	97.332						
13	.218	1.365	98.697						
14	.118	.741	99.437						
15	.087	.541	99.979						
16	.003	.021	100.000						

* Extraction method : Principal component analysis

관계수를 보여준다. 라돈은 우라늄이나 주요 수질성분들과 의미있는 상관성은 없는 것으로 나타났다(Table 6). 그러나 일부 성분들은 물-암석반응에 의한 특징을 보여준다. EC는 SO₄와 높은 상관계수(0.808)를 보여주며, 그외에 Na, Ca, Mg, Sr, HCO₃ 등과도 높은 상관계수를 나타낸다. Na는 Mg, Sr, F, Cl과 높은 상관계수를 보여주며, Ca는 SO₄와 높은 상관계수(0.713)를 보여주며 Sr과도 높은 상관성을 나타낸다. Mg는 Sr, HCO₃, SO₄와 높은 상관계수를 보여주며, Sr은 SO₄, HCO₃와 높은 상관계수를 나타낸다. 하양층군 지하수의 경우 Ca, Mg와 탄산염이 포함된 퇴적암류 지역이 다수이므로 2가 양이온과 중탄산, 황산이온이 높은 상관성을 보여준다. 이는 셰일과 사암위주의 퇴적암의 속성작용에서 흔히 나타나는 탄산염, 황산염의 형성과 관련되기 때문이다. 물-암석 반응의 결과 Ca, Mg와 탄산염이 포함된 퇴적암류 지역에서 2가 양이온과 중탄산, 황산이온이 높은 상관성을 보여준다.

요인분석을 위하여 공통성을 추출한 결과, 의미있는 요인은 6개가 추출되었지만, 설명된 총분산(total variance explained)과 적재값(loadings)으로 판단하면 주로 요인 1, 요인 2에 의존함을 알 수 있다(Table 8). 가장 높은 요인 1의 경우도 적재량이 30.13%이며, 대표적인 이들

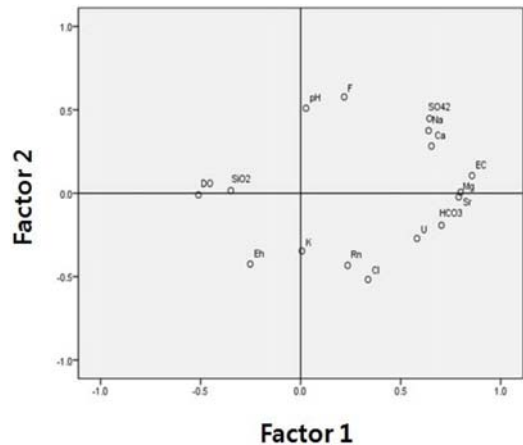


Fig. 5. Factor analysis of geochemical components in groundwater of the Hayang Group.

2요인의 적재값 합도 41.49%에 불과하여 전체적인 기여도는 여전히 낮은 편이다. 이는 하양층군 지하수에서는 주요 성분들의 거동특성을 결정하는 강력한 요인은 존재하지 않으며, 여러 요인들이 복합적으로 작용하는 것으로 볼 수 있다. 요인을 회전공간에 나타낸 결과에 의하면 우라늄은 요인 1에 영향을 받으면서 HCO₃와 거동특성이 유사함을 보여준다(Fig. 5). 그러나 라돈의 경우

Table 8. Total variance explained and loadings of components in groundwater of the Hayang Group.

Components	Initial eigenvalue			Extraction sums of squares loadings			Rotation sums of squares loadings		
	Total	Variance %	Cumulative %	Total	Variance %	Cumulative %	Total	Variance %	Cumulative %
1	4.820	30.127	30.127	4.820	30.127	30.127	3.187	19.919	19.919
2	1.818	11.360	41.487	1.818	11.360	41.487	2.706	16.910	36.830
3	1.477	9.229	50.716	1.477	9.229	50.716	1.484	9.273	46.102
4	1.264	7.897	58.614	1.264	7.897	58.614	1.475	9.217	55.319
5	1.163	7.267	65.880	1.163	7.267	65.880	1.404	8.778	64.097
6	1.016	6.347	72.228	1.016	6.347	72.228	1.301	8.131	72.228
7	.819	5.121	77.348						
8	.704	4.401	81.749						
9	.694	4.339	86.088						
10	.529	3.305	89.393						
11	.500	3.123	92.516						
12	.433	2.709	95.225						
13	.349	2.183	97.408						
14	.298	1.860	99.268						
15	.103	.644	99.912						
16	.014	.088	100.000						

* Extraction method : Principal component analysis

우라늄과 거동특성은 다르며, 요인 2에 약간 영향을 받는데, Cl과 거동특성이 비슷하다. Ca, Na, SO₄는 요인 1에 영향을 더 받는데 이들이 거동특성은 비슷하게 나타난다. Sr, Mg, EC는 요인 1에 크게 영향을 받으며 거동특성은 비슷함을 알 수 있다.

유천층군 지하수의 요인분석

유천층군은 화산암류로 구성되는데 타지질에 비하여 우라늄은 여러 성분들과 높은 상관계수를 나타낸다. 예를 들면 우라늄은 Na (0.756), Cl (0.727), EC (0.705), Ca(0.701)와 매우 높은 상관계수를 보여주며, 그 외에도 HCO₃ (0.491), Sr (0.482), Mg (0.425)와 비교적 높은 상관계수를 나타낸다(Table 6). 또한 우라늄은 Eh와는 음의 상관관계(-0.45)를 보인다. 이는 심부에서 물-암석반응의 결과로 인한 것임을 지시한다.

라돈은 우라늄과 상관성은 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나 라돈은 여러 성분들과 높은 상관계수를 보이는데, pH (-0.707), EC (-0.406), Ca (-0.442), Mg (-0.406), HCO₃와는 음의 상관계수(-0.445)를 나타내며, SiO₂와는 양의 상관계수를 보인다. pH는 라돈과 F와 상관성이 있으며, EC는 우라늄, 라돈 외에도 Na, Ca, Mg, Sr, Cl, SO₄, HCO₃ 등과 상관성이 높다. Na는 Ca, Mg, Sr, Cl, SO₄, HCO₃와 상관성이 높으며, Ca는

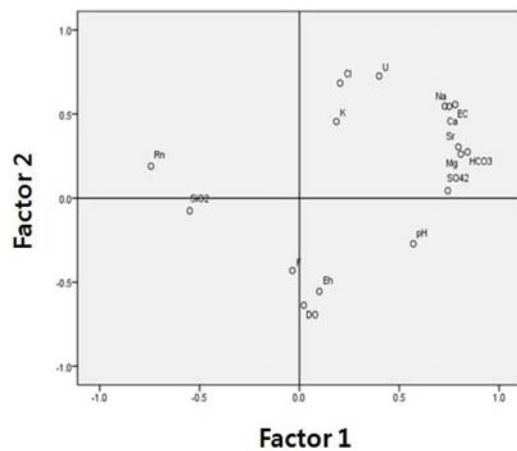


Fig. 6. Factor analysis of geochemical components in groundwater of the Yucheon Group.

Mg, Sr, Cl, SO₄, HCO₃와 상관성이 높다. SiO₂는 Sr, F와 상관성이 있으며, SO₄와 HCO₃도 서로 높은 상관성이 있는 것으로 나타났다. 주요 수질성분들은 화산암 지역에서의 물-암석반응과 관련되어 높은 상관성이 있음을 보여준다.

요인을 추출하여 회전공간에 나타낸 결과에 의하면 우라늄은 요인 1에 영향을 받으며 Cl과 거동특성이 약간 비슷하지만 밀접하게 관련된 것 아니다(Fig. 6). 라돈

은 요인 2에 반대로 영향을 받지만 특정한 기타 성분들과 유사한 거동특성을 보이지는 않는다. 그 외의 여러 성분들은 요인 1과 요인 2에 주로 영향을 받는다. 여러 수질성분들은 물-암석반응에 의한 거동특성을 잘 나타낸다.

화강암류 지하수의 요인분석

우라늄은 여러 성분들과 높은 상관계수를 보인다. 예를 들면 우라늄은 pH와 약간 높은 상관계수(0.533)나타내며, K(-0.408), EC(-0.405), Mg(-0.440)과는 약간 높은 음의 상관계수를 보여주지만, 그 외의 성분들과는 상관성이 거의 없다(Table 6).

라돈과 우라늄과의 상관성은 거의 없는 것으로 나타났다. 라돈은 SiO₂와 F와는 비교적 높은 상관계수를 보인다. pH는 우라늄 외에도 DO, K와는 음의 상관계수를 보인다. K는 Na, Ca, Mg, Sr, Cl과 상관성이 높으며, Na는 Ca, Sr, Cl과 상관성이 있으며, Ca는 Mg, SO₄, HCO₃와 상관성이 높다. 특히 Sr과 Cl은 상관계수(0.937)가 가장 높다. EC는 우라늄 외에도 Mg, Sr, Cl, Ca, Na, HCO₃, K와도 높은 상관성을 보여준다. Eh는 SO₄, DO, Mg 등과도 상관성이 높다. 화강암 지역의 지하수중 주요 수질성분들은 물-암석반응과 관련되어 있음을 보여준다. 특히 장석류와 운모류와 관련된 성분들간에 상관성이 높게 나타난다.

요인을 추출하여 회전공간에 나타낸 결과에 의하면 우라늄은 요인 1과 요인 2에 음의 영향을 약간 받으며,

라돈과는 무관하게 거동한다(Fig. 7). 라돈은 요인 2에 어느 정도 영향을 받지만 여타 성분들과 밀접한 거동특성은 보여주지 않는다. 그러나 대부분의 주요 수질성분들은 주로 요인 1에 영향을 받는데 거동특성도 비슷하게 나타난다. 예를 들면 K와 SO₄는 비슷한 거동특성을 보여주며, Ca, HCO₃, Na, Cl은 요인 1에 영향을 주로 받으면서 거동특성도 유사함을 보인다.

암질에 따른 함량분포

본 연구에서는 측정지점의 함량과 지리적 분포를 이

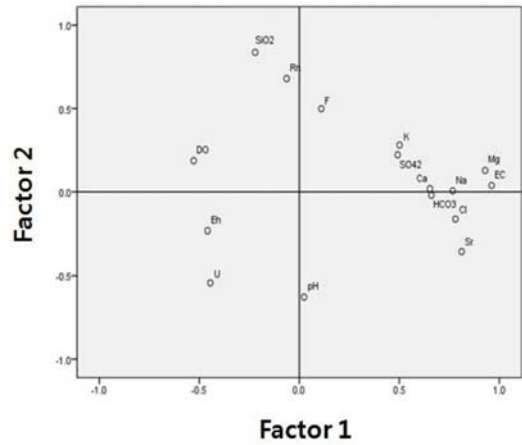


Fig. 7. Factor analysis of geochemical components in groundwater of the Mesozoic Granites.

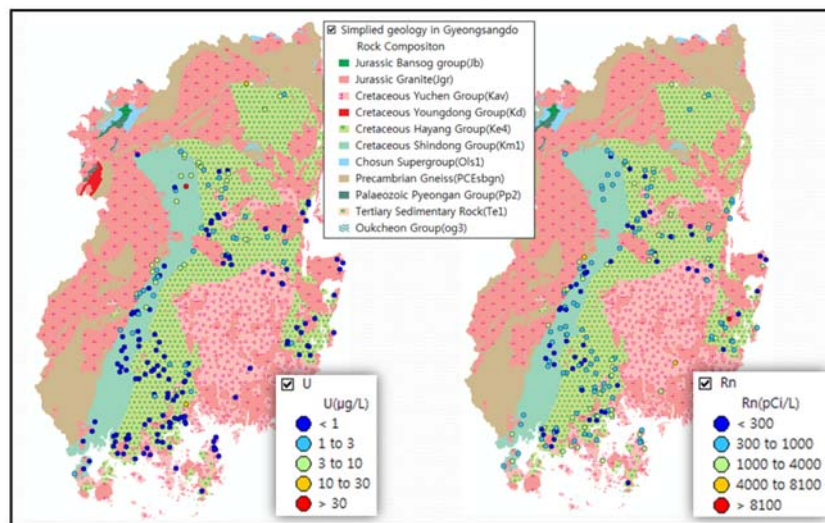


Fig. 8. Uranium and radon distributions in Gyeongsang provinces with respect to geology.

용하여 자연방사성물질의 함량분포도를 작성하였다(Fig. 8). 이 같은 함량분포도는 논산일대와 단양지역의 지하수를 대상으로도 작성된 바 있다(Cho et al., 2012, 2013). 최초로 선정된 자연방사성물질은 라돈, 우라늄, 전알파, 라듐이었으나, 본 연구지역에서 전알파와 라듐 함량은 검출한계 미만의 비율이 높아서 제외시켰으며, 우라늄과 라돈의 함량분포도만 작성하였다. 자연방사성물질의 함량등급은 우리나라 지하수의 우라늄과 라돈함량 분포 정도와 외국의 제안치 등을 고려하였지만, 경상남북도의 지하수중 방사성물질 중에서 특히 우라늄의 함량은 타 지역에 비하여 상당히 낮게 나타났기 때문에 등급을 보다 하향조정하여 세분화하였다. 즉 우라늄은 1 µg/L 이하, 1~3 µg/L, 3~10 µg/L, 10~30 µg/L, 30µg/L 이상으로 등급화하였고, 라돈은 300 pCi/L 이하, 300~1000 pCi/L, 1,000~4,000 pCi/L, 4,000~8,100 pCi/L, 및 8,100 pCi 이상으로 등급화하였다. 또한 지질에 따른 함량분포와 지리적 위치에 근거하여 함량의 수준을 버블플롯(bubble plot)을 이용하여 작성하였다(Fig. 9). 우라늄의 경우, 경북 중앙서부에 위치하는 신동층군의 한 지점에서 가장 높게 나타났으나, 대부분의 신동층군에서는 낮게 산출된다. 라돈은 울산지역 한곳에서 가장 높으며, 신동층군을 제외하면 경남 동부지역에서 대체로 높게 나타난다. 이는 주요 단층대가 잘 발달하는 경남 동부지역에서 라돈이 단층대를 따라 유동할 가능성을 암시한다.

자연방사성 물질의 산출과 분포특징

지금까지 수행된 3,000 여개의 지하수공의 분석결과

와 논산, 단양, 이천, 용인 일대의 지하수중 이들의 산출 실태와 원인을 연구한 결과에 의하면(Cho et al., 2011, 2012, 2013), 우라늄 농도와 pH, 심도, Eh는 화강암 지역에서 비교적 선형적인 비례관계가 나타난다. 반면에 우라늄의 농도와 중탄산이온의 상관성은 화강암 지역에서 약간 반비례하며, 라돈은 화강암지역과 변성암지역 지하수에서 비교적 높게 나타난다. 그러나 라돈의 함량은 심도, 중탄산이온, pH와는 의미 있는 수준의 상관관계를 나타내지 않는다. 예로, 단양지역 지하수의 경우 라돈의 함량은 퇴적암 지역 지하수에서 라돈의 함량은 상당히 낮으며, 일반적으로 화강암의 경우 우라늄의 함량은 화강암체의 연변부에서 높게 나타난다(Cho et al., 2013).

우리나라의 대부분의 지하수에서는 우라늄과 라돈의 상관관계가 낮으나, 외국의 일부 지하수에서는 이들 간에는 정비례 상관관계가 있는 것으로 알려져 있다(Asikainen and Kahlos, 1979). 지하수의 우라늄 함량은 모암의 우라늄 함량, 지하수의 산화-환원환경과 우라늄 광물의 존재형태, 지하수에 용존된 중탄산염, 불소, 인산염 등의 농도에 영향을 받으나, 지하수의 라돈 함량은 지하수의 주요 수질성분과 관계가 낮다(STUK, 2005). 스위스의 음용지하수의 경우 우라늄의 함량은 암질에 좌우되지만 여전히 지하수의 유동측면에서 명확한 해석은 어렵다(Stalder et al., 2012). 그러나 노르웨이의 1603여 개 지하수공의 경우, 라돈은 불소와 상관성이 높고, 화강암질암에서 특히 높은 것이 특징이다(Bank et al., 1998). 국내의 경우 우라늄과 라돈의 상관성은 이번 연구결과를 포함하여 낮거나, 일관성이 다소 결여되어 있

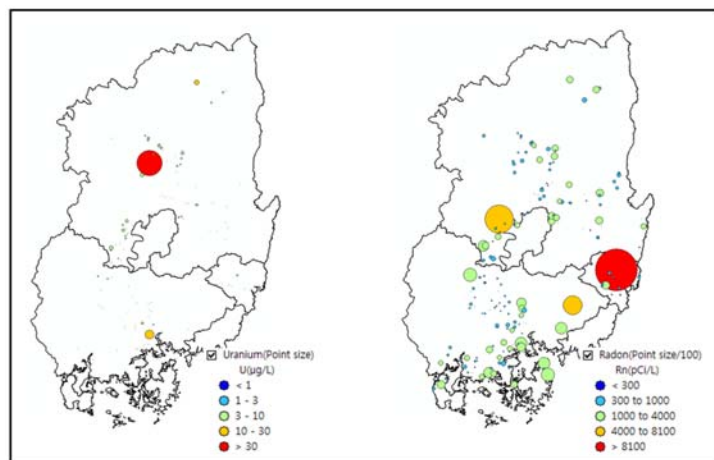


Fig. 9. Bubble charts showing the distribution of uranium and radon concentrations in Gyeongsang provinces.

는데, 이는 여러 요인이 복합적으로 작용하기 때문이다. 예를 들면 파쇄대의 경우 라돈의 감소가 예상되므로 우라늄과 상관성이 낮을 수 있으며 과거에 착정된 지하수 공의 경우 그라우팅불량으로 천부지하수가 유입될 가능성이 있다. 또한 우라늄 광화대나 우라늄 고함량인 지역은 국부적인 현상이므로 특정한 지질 전반에 걸쳐 높고 보기가 어렵다(Cho et al., 2011). 다만 그 동안 연구 결과에 의하면 화강암질 분포지역의 지하수에서 우라늄이 높고, 퇴적암 분포지역지하수에서 낮다는 점은 분명한 사실이다(NIER, 2000, 2002, 2006, 2009; Cho et al., 2011).

우라늄 광물이 용해된 후 이동하여 침전되는 메커니즘과 화학적 거동특성은 복잡하다(Langmuir, 1978, 1997; Murphy and Shock, 1999). 특히 우라늄광화대를 제외하면, 보통의 암석내에서 방사성원소의 함유량이 낮으며, 함방사성 광물의 종류와 결정학적 특징을 파악하는 것은 쉽지 않다. 그 이유는 일반적인 암석에서 우라늄광물은 수 μm 크기의 미립자로 산출되거나, 부정분광물에 치환되어 있어 극소량으로 포함되어 있을 뿐만 아니라, 우라늄광물의 화학조성이 복잡하고 다양한 지질환경에서 생성되기 때문이다(Burns and Finch, 1999; Choo, 2002; Jeong et al., 2012). 고함량 지하수공 인근에 새로운 시추공을 착정하고 지하수내 자연방사성물질의 산출특징과 암석화학적 상관관계를 평가한 연구사례(Jeong et al., 2011a, 2011b, 2012, 2013)에 의하면, 시추공 코어시료 내 우라늄과 토륨의 함량은 특별히 높지 않았으며, 우라늄을 함유하는 광물로는 K-장석, 흑운모에 포획된 모나자이트, 일메나이트, 인회석에서 구성원소를 치환하여 존재하는 것으로 보인다. 특히 시추코어 내 우라늄 함량이 특징적으로 높지 않은 조건에서 지하수내 우라늄과 라돈 농도가 높은 것은 화학적 조건보다는 대수층 파쇄정도와 지하수 유동량과 같은 물리적 요소가 더 큰 작용을 한 것으로 보인다(Jeong et al., 2013). 경상남북도 지하수에서 우라늄과 라돈은 서로 거동특성이 무관하며, 일부 수질성분과는 상관성이 높는데 이는 각 지질요소가 다양하기 때문이다. 특히 우라늄과 라돈의 상관성이 낮은 점은 그동안 여러 지역에서 수행된 연구결과와 비슷하다.

국내 지하수에서 우라늄과 라돈의 음용제한치를 설정하기 위하여서는 자연방사성물질의 거동특성, 이들과 주요 수질성분과의 관련성 규명이 선결되어야 한다. 이를 위해서는 범국가차원에서 전국 행정단위와 지질단위를 대상으로 장기간에 걸친 지속적인 연구가 필요한데, 특

히 광역지질도에서 구분하기 어려운 암질의 세분화가 필요하다. 또한 광화대의 발달양상 파악, 및 방사성물질의 산출특징과 용해특성에 관한 암석학적, 광물학적 연구가 보완적으로 필요하다. 특히 행정구역 단위로 구분한 실태조사의 경우 방사성물질의 분포파악은 용이하지만, 이들의 함유원인과 방사성물질의 근원지인 지질과의 관련성 해석에는 많은 어려움이 따른다. 그러므로 본 연구에서처럼 행정구역단위 외에도 주요 지질별로 구분하여 방사성원소의 함유특징을 해석할 필요가 있다.

결 론

경상남북도 201개 지하수의 수리지화학적 유형은 대부분 Ca-Na-HCO₃가 우세한 유형을 보여 전형적인 칼슘-나트륨-중탄산형의 수리지화학적 특징을 나타낸다. 우라늄 함량이 30 $\mu\text{g/L}$ 를 넘는 지점은 1개소, 라돈함량이 4,000 pCi/L를 넘는 지점은 3개소, 전알파의 함량이 15 pCi/L, 라듐함량이 5 pCi/L를 넘는 지점은 없었다. 우라늄의 함량은 0.02~53.7 $\mu\text{g/L}$ 범위, 평균 1.56 $\mu\text{g/L}$, 표준편차 4.3 $\mu\text{g/L}$ 이고 중앙값은 0.47 $\mu\text{g/L}$ 로서 매우 낮다. 우라늄의 평균치는 신동충군 > 중생대 화강암 > 하양충군 > 유천충군 > 신생대 제3기 퇴적암의 순으로 높다. 전체지역의 라돈은 2~8,740 pCi/L 범위, 평균 754, 중앙값 510, 표준편차는 907 pCi/L이다. 라돈 평균치는 중생대 화강암 > 유천충군 > 신생대 제3기퇴적암 > 하양충군 > 신동충군의 순으로 높다. 주요 지질단위를 구분하여 요인분석을 실시한 결과 우라늄과 라돈은 상관성이 낮았으며, 우라늄과 라돈은 일부 중요 수질항목과 높은 상관관계를 보인다. 광역적인 방사성물질 연구에서는 행정구역단위 외에도 주요 지질별로 구분하여 방사성원소의 함유특징을 해석할 필요가 있다.

사 사

이 논문은 국립환경과학원의 수탁연구과제인 ‘지질별 지하수 중 자연방사성물질 정밀조사 연구(NIER-SP2013-416)’의 일환으로 이루어졌습니다.

References

- 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*, 43(10), 1681-1686.

- Banks, D., Frengstad, B., Midtgard, A. K., Krog, J. R., and Strand, T., 1998, The chemistry of Norwegian groundwaters: The distribution of radon, major and minor elements in 1604 crystalline bedrock groundwaters, *Science of the Total Environment*, 222, 71-91.
- Burns, P. C. and Finch, R., 1999, Uranium: mineralogy, geochemistry and the environment, *Reviews in Mineralogy*, Mineralogical Society of America, Washington, 38, 679p.
- Chang, K. H., 1978, Late Mesozoic stratigraphy, sedimentation and tectonics of southeastern Korea (II), *Journal of the Geological Society of Korea*, 14(3), 120-135 (in Korean with English abstract).
- Chang, K. H., 1988, Cretaceous stratigraphy and paleo-current analysis of Kyongsang Basin, Korea, *Journal of the Geological Society of Korea*, 24(3), 194-205.
- 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(3), 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*, 22(4), 427-437 (In Korean with English abstract).
- Cho, B. W., Kim, M. S., Kim, T. S., Yun, U., 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*, 23(4), 477-491.
- 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(5), 98-104 (In Korean with English abstract).
- Cho, B. W., Yun, U., and Choo, C. O., 2010, Uranium and radon concentration in groundwater of the Taejeon area, Korea, 38th International Association of Hydrogeologists Conference, 61-62.
- Choo, C. O., 2002, Characteristics of uraniumiferous minerals in Daebo granite and significance of mineral species, *Journal of Mineral Society, Korea*, 15(1), 11-21 (In Korean with English abstract).
- Chough, S. K. and Sohn, Y. K., 2010, Tectonic and sedimentary evolution of a Cretaceous continental arc-backarc system, in the Korean peninsula: New view, *Earth-Science Reviews*, 101(3-4), 225-249.
- Jeong, C. H., Kim, M. S., Lee, Y. J., Han, J. S., Jang, H. G. and Cho, B. W., 2011a, Hydrochemistry and occurrence of natural radioactive materials within borehole groundwater in the Cheongwon area, *The Journal of Engineering Geology*, 21(2), 163-178 (In Korean with English abstract).
- Jeong, C. H., Kim, D. W., Kim, M. S., Lee, Y. J., Kim, T. S., Han, J. S., and Cho, 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., Ryu, K. S., Kim, M. S., Kim, T. S., Han, J. S., and Cho, B. W., 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, D. H., Kim, M. S., Ju, B. K., and Kim, T. S., 2011b, Distribution characteristics of uranium and radon concentration in groundwaters of provinces in Korea, *Soil and Groundwater Environment*, 16(6), 143-149 (In Korean with English abstract).
- Ju, S. H. and Je, W. M., 1995, *Radon Radioactivity and Life Environments*, Gyecheukmoonhwasa, 288p (in Korean).
- Langmuir, D., 1978, Uranium solution-mineral equilibria at low temperatures with applications to sedimentary ore deposits, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42(6), 547-569.
- Langmuir, D., 1997, *Aqueous Environmental Geochemistry*, Prentice Hall, 600p.
- Murphy, W. M. and Schock, E. L., 1999, Environmental aqueous geochemistry of actinides, Uranium: Mineralogy, Geochemistry and the Environment, *Reviews in Mineralogy*, Mineralogical Society of America, *Reviews in Mineralogy*, 38, 221-253.
- NIER, 2000, Study on the radionuclides concentrations in the groundwater (II), NIER Report, 323p (in Korean).
- NIER, 2002, Study on the radionuclides concentrations in the groundwater (V), NIER Report, 357p (in Korean).
- NIER, 2006, Study on the radionuclide concentration in the groundwater, NIER Report, 200p (in Korean).
- NIER, 2009, A detailed study of the radionuclide concentration in the groundwater (II), NIER Report, 273p (in Korean).
- Skeppström, K. and Olofsson, B., 2007, Uranium and radon in groundwater: An overview of the problem, *European Water*, 17(18), 51-61.
- Stalder, E., Blanc, A., Haldimann, M., and Dudler, V., 2012, Occurrence of uranium in Swiss drinking water, *Chemosphere*, 86(6), 672-679.
- STUK, 2005, 238U-series radionuclides in Finnish groundwater-based drinking water and effective doses, STUK-A123, 94p.
- US EPA, 1999, National primary drinking water regulation; Radon 222, proposed rule, *Federal Register*, 64, 211p.
- US EPA, 2000, National primary drinking water regulation; radionuclides, Final Report Radon 222, proposed rule, *Federal Register*, 64, 211p.
- US EPA, 2003, National primary drinking water standards, Office of Water, EPA 816-F-03-016. 6p.
- US EPA, 2012, Report to Congress: Radon in Drinking

Water Regulations, EPA-815-R-12-002, 34p.

조병욱

한국지질자원연구원 지구환경연구본부
305-350 대전광역시 유성구 과학로 92
Tel: 042-868-3083
E-mail: cbw@kigam.re.kr

추창오

경북대학교 지질학과
702-701 대구광역시 북구 산격동
Tel: 010-6656-3582
E-mail: chooco@knu.ac.kr

윤 욱

한국지질자원연구원 지구환경연구본부
305-350 대전광역시 유성구 과학로 92
Tel: 042-868-3118
E-mail: yunuk@kigam.re.kr

이병대

한국지질자원연구원 지구환경연구본부
305-350 대전광역시 유성구 과학로 92
Tel: 042-868-3088
E-mail: blee@kigam.re.kr

황재홍

한국지질자원연구원 국토지질연구본부
305-350 대전광역시 유성구 과학로 92
Tel: 042-868-3058
E-mail: hwangjh@kigam.re.kr

김문수

국립환경과학원 토양지하수연구과
인천광역시 서구 환경로 42(종합환경연구단지)
Tel: 032-560-7907
E-mail: hydro009@korea.kr