

강화지역 지하수 수질특성 평가

조영민*, 조혜린, 이효정, 민성은, 유희중, 성지홍, 하현섭, 권문주
인천보건환경연구원 수질보전과

Evaluation of groundwater quality in Gangwha Island

Young-Min Cho*, Hye-Rin Cho, Hyo-Jung Lee, Seong-Eun Min, Hee-Jong Yoo*,
Ji-Hong Seong, Hyun-Sup Ha, Mun-Ju Kwon

Division of Water Quality Conservation, Incheon Research Institute of Public Health and Environment

Abstract

Naturally occurring radioactive materials(NORM) is widely distributed in groundwater of granite areas. To drink the groundwater containing NORM such as uranium and radon is highly harmful to human health. The aim of this study is to determine the characteristics of the groundwater quality with NORM and geostatistical analysis. Groundwater samples from 37 wells were collected and measured on 26 items of drinking water quality standards including radon and uranium in 2020. The average concentrations of uranium and radon in groundwater were the highest in granite area. Principal component analysis (PCA) showed that PC1 was highly enriched with Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- , Sr (40.6 %) strongly associated with soluble ion materials. Both PC2 with F^- , U, Gross alpha (20.3 %) and PC3 with Rn (8.5 %) was related to NORM. PC4 was enriched with Zn (7.0 %). Cluster analysis (CA) revealed three subgroups showing closely relationship between Na^+ and Cl^- of main soluble ion constituents in seawater. This study coupled with statistical analysis is expected to imply appropriate groundwater contamination control management for safety of drinking water.

Key words : Groundwater quality, Uranium, Radon, PCA, CA, NORM

I. 서론

물은 인간과 지구상에 존재하는 모든 생명체에 필수적인 물질이며, 가장 중요한 자연자원의 하나로써 그 일부가 우리 발밑으로 항상 흐르는 지하수의 존재를 종종 잊고 산다. 지하수는 지각을 구성하는 지표면 하부 퇴적물의 공극이나 암반의 파쇄면 내 존재하는 물을 의미하며, 천부 대수층에 존재하는 물 뿐만 아니라 토양수, 동토의 빙결된 물, 저투수 기저암반 내에 있는 물 등을 모두 포함한다.

지하수는 수량부족과 수질오염이 증가됨에 따라 천연자원으로서 지하수 보존과 오염방지에 더욱 관심을 기울여야 하는데, 최근 쓰레기 매립지와 가축전염병 발생에 따른 매몰지가 증가하여 지하수 오염을 유발하는 사례가 보고되고 있지만, 자연방사성물질의 검출 또한 증가되고 있다. 특히 지하 심층에 오염물질이 유입될 경우 오염회복에 수십~수백 년의 오랜 기간이 소요되고, 육안으로 오염 확인이 불가능하여 이동경로 파악이 곤란하고, 수질의 유지와 관리가 매우 어렵다.

지하수는 지하 대수층이나 공극을 따라 이동하므로 외부 오염에 비교적 안정적이지만, 한 번 오염에 노출될 경우 장기간 영향을 받게 되고, 수질은 지하수가 이동할 때 만나는 지질을 구성하는 광물들의 종류, 강수량, 온도 등의 영향을 받게 된다. 보통 빗물이 지하로 침투하여 대수층에 도달될 때까지 여과 및 분해 작용으로 오염피해는 감소된다. 하지만 물과 암석의 반응으로 인해 유해 성분이 자연적으로 지하수에 용해되어 인체 유해성분으로 검출될 수 있는데, 대표적인 물질로는 우라늄(U)과 라돈(Rn) 등과 같은 자연방사성물질이다. 이 성분은 인위적 오염이 아닌 특정 지층 내 구성성분이 물과 반응하여 자연적으로 존재하게 된다. 우라늄은 반감기가 매우 길기 때문에 방사성 물질의 위해정보다는 중금속

성분이 갖는 화학적 특성에 의해 신장에 축적되어 인체에 유해한 것으로 알려져 있으며, 라돈은 물속에 용해된 성분의 음용 또는 밀폐 공간에서 호흡 등으로 노출되어 암을 유발하는 발병인자로 간주된다.

미국을 비롯한 북유럽의 일부 선진국들은 이미 1960년대부터 자연방사성물질에 대한 조사와 연구를 수행하여 변성암, 퇴적암, 화산암의 지역보다 화강암지역에서 더 높은 함량을 보이는 것으로 조사되었고, 우리나라의 경우 1990년 후반부터 자연방사성물질에 대한 문제를 인식하기 시작하여 2000년도 중반에 국립환경과학원에서 지하수 중 자연방사성물질에 대한 오염실태조사가 조사되었다.

본 연구에서는 지층에 자연적으로 존재하는 자연방사성물질에 대해 타 지역에 비해 상수도 보급률이 낮고, 지하수 음용율이 다소 높은 강화지역의 음용지하수를 대상으로 지질 특성에 따른 지하수내 자연방사성물질(우라늄, 라돈, 전알파)의 분포 및 함유특성을 조사하고, 이온 및 중금속성분 분석자료를 함께 활용하여 다변량 통계기법을 통한 수질분포특성을 조사하여 지하수의 안전성 평가 및 체계적인 관리를 위한 기초자료를 확보하기 위해 수행되었다.

II. 실험방법

2.1 연구기간 및 대상

2020년 3월부터 10월까지 음용으로 사용하는 강화지역 지하수 37개 지점을 선정하여, 분기별로 자연방사성물질과 이온성분 및 중금속 물질의 특성을 분석하였다.

지역별 특성을 조사하기 위해 한국지질자원연구원(KIGAM)의 지질도(1: 250,000)를 이용하여 강화지역 지질을 세분화 하였고, 시료채취 지점을 (Fig. 1)에 나타냈다.

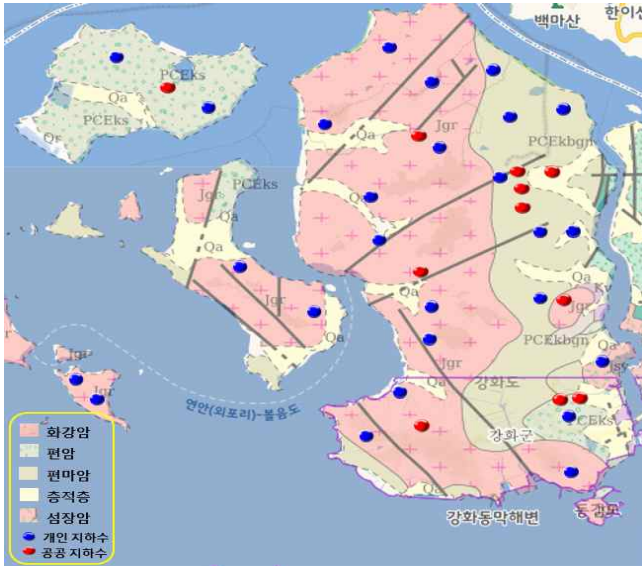


Fig. 1. Sampling sites on the geological map of the study area in Gangwha.

2.2 시료채취 및 전처리

시료채취는 지하수를 충분히 양수 후 안정화 된 상태의 시료를 채취하였으며, 냉장상태로 운반하고, 분석 할 때 까지 냉장보관 하였다. 라돈 및 전알파의 전처리는 모두 현장에서 진행하였으며 시료 분석은 먹는물 공정시험기준 및 먹는물 감시항목 운영 등에 관한 고시를 준수하였다. 이온성분 분석을 위해 0.2 μm 의 공극을 갖는 membrane filter에 시료를 여과하여 부유물질을 제거하였으며, 중금속물질 분석을 위해서 0.45 μm 의 공극을 갖는 membrane filter에 시료를 여과한 후 시료 100 mL 당 질산 1 mL를 넣어 전처리하였다. 시료는 분석하기 전까지 0 $^{\circ}\text{C}$ ~ 4 $^{\circ}\text{C}$ 에서 냉장 보관하였으며 이온성분 분석은 Thermo사의 Dionex ICS-5000⁺ EG(IC, 이온크로마토그래피)를, 중금속물질은 Agilent사의 7900 ICP-MS(유도결합플라즈마 질량분석기)를 이용하였다.

라돈은 휘발성이 강하기 때문에 시료 채취시 주의가 필요한데, 기포가 발생되지 않도록 조심히 채수한 후 22 mL PE 용기에

MaxiLight 각테일 용액 12 mL와 지하수 8 mL를 첨가하여 천천히 잘 흔들어 섞어줬다. 그 후 3시간동안 안정화 시킨 후 방사평형을 이룬 뒤 분석했다. 전알파 시료는 1 L PE 채수통에 가득 채우고 1 N 질산 15 mL를 첨가한 후 증발시켜 고형물을 회수하였고, 전알파 분석을 위한 AquaLight 각테일 용액과 혼합 후 3일 간 안정화 시켜서 방사평형이 이룬 뒤 분석했다.

2.3 자연방사성물질 분석

2.3.1 우라늄 분석

우라늄은 은빛이 나는 광물질(radioactivity metal)로써 바위나 토양, 환경전반에 분포하며, 일반적으로 화강암>변성암>퇴적암>화산암 지역 지하수 순으로 함량이 높다. 음식 등을 통한 우라늄의 평균 섭취량은 약 2 $\mu\text{g/day}$ 이며, 신진대사작용으로 섭취량과 유사한 양이 배출된다. 우라늄의 인체에 가장 큰 위해는 방사성 독성보다 화학적 독성에 의한 신장독성으로 알려져 있으며 반감기는 45억년으로 매우 길며, 처리방법은 이온교환, 역삼투, 고도 응집/여과 등이 있다.

2015년에 환경부에서 먹는물의 우라늄 기준을 강화한 먹는물 수질기준 및 검사 등에 관한 규칙 일부개정령을 통해 우라늄은 ICP-MS법으로 분석토록 하였다. 따라서 본 연구의 우라늄 분석에는 0.45 μm 의 공극을 갖는 membrane filter에 시료를 여과한 후 시료 100 mL당 질량분석기용 고순도 질산 1 mL를 넣어 분해한 후 Agilent사의 7900 ICP-MS(유도결합플라즈마 질량분석기)를 사용하였다.

2.3.2 라돈 분석

라돈은 공기, 물, 토양 등 자연계에 널리 존재하는 무색(無色), 무취(無臭), 무미(無味)의 기체상태 자연방사성물질로서 지하수에는 화강암 > 변성암 > 중생대화산암 > 퇴적암 > 신

생태화산암지역 순으로 함유량이 높다. 호흡, 음용, 샤워 등 다양한 경로로 인체에 유입될 수 있으나, 라돈은 휘발성이 커서(반감기 3.82 일), 일반적으로 음용에 의한 위해도는 호흡에 의한 위해도보다 낮다. 라돈의 인체 위해는 암을 유발하는 발암물질이며, 처리방법은 폭기, 활성탄, 정치 등이 있다.

분석 시료는 MaxiLight 각테일 용액과 반응시킨 후 3시간 이상 암소에서 안정화하여 라돈 농도가 영속평형에 도달하도록 하였으며, HIDEX사의 300SL LSC(액체섬광계수기)를 이용하였다.

2.3.3 전알파 분석

전알파는 우라늄과 라돈을 제외한 라듐, 플루토늄, 토륨 등의 방사성핵종에서 방출되는 α -방사선으로 옥천계변성암 > 화강암 > 퇴적암 > 변성암 > 화산암 지하수 등의 순으로 함유량이 높다. 위해성 및 독성은 자체의 위해성보다는 우라늄과 라돈을 제외한 α -방사선을 방출하는 방사성물질의 존재여부를 스크리닝하는 잣대로 그 의미가 있다. 처리방법으로는 역삼투 등이 있다.

미국은 발암 위험성을 고려하여 먹는물 중 전알파 값을 15 pCi/L로 기준을 설정하여 운

영하고 있으며, 5 pCi/L를 초과할 경우 각각의 방사성 물질을 분석하도록 규정하고 있다.

전알파 분석을 위해 International Organization for Standardization(ISO)에서 제시한 증발법을 이용하여 시료를 증발시킨 후 농축된 시료를 각테일용액과 혼합하여 HIDEX사의 300SL LSC(액체섬광계수기)를 사용하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1 지하수 수질현황

3.1.1. 지하수 이용 현황

강화지역은 2020년 10월 기준 12,361개의 지하수가 등록되어 사용 중이며 행정구역상 인구수에 비례하여 강화읍 지하수가 1,752개로 가장 많고, 서도면이 200개로 가장 적다. 지역별 지하수 현황은 (Fig. 2)와 같다. 용도별 지하수는 농·어업용수가 7,633개로 가장 많고, 공업용수가 39개로 낮았다. 상수도 보급의 확대에 수돗물과 지하수를 혼용하여 음용하면서 음용 생활용수는 2,916개로 23.6 %의 비율을 보였다. 용도별 지하수 현황은 (Table 1)에 나타났다.

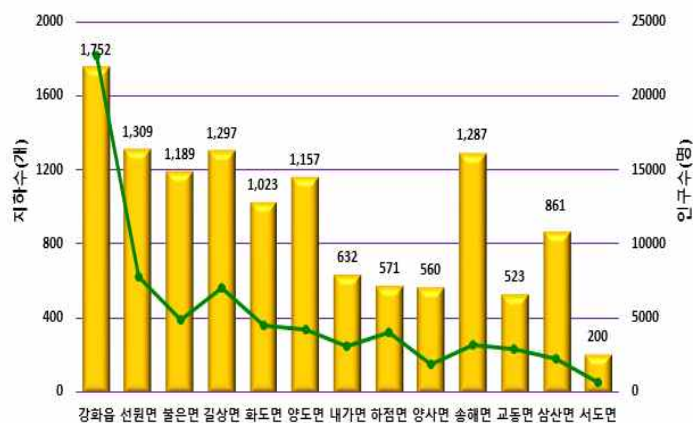


Fig. 2. Status of groundwater use by administrative district in Gangwha.

Table 1. Status of groundwater use by usage in Gangwha.

	음용 생활용수	비음용 생활용수	농·어업용수	공업용수	전체
지점(개)	2,916	1,773	7,633	39	12,361
비율(%)	23.6	14.3	61.8	0.3	100.0

Table 2. Average concentration and the maximum and the minimum of the ionic components.

(Unit : mg/L)

	평균	최소	최대	수질기준
Na ⁺	13.9	0.6	44.8	-
K ⁺	2.2	0.1	15.6	-
Mg ²⁺	4.1	0.0	15.7	-
Ca ²⁺	19.3	0.1	50.7	-
F ⁻	0.02	0.00	0.57	1.50
Cl ⁻	22.0	0.5	79.5	250.0
SO ₄ ²⁻	10	0	54	200
NO ₃ ⁻	23.7	0.0	80.6	-
HCO ₃ ⁻	40.3	2.5	133.8	-

3.1.2 이온성분 분포 특성

조사지역의 수질을 파악하기 위해 자연방사성물질, 중금속물질과 이온성분의 농도를 측정하였고, 다변량 통계분석을 이용하여 분석항목의 상호작용 및 수질에 영향을 미치는 요인을 추출하여 조사지역의 수질특성을 파악하였다.

(Table 2)는 이온성분의 평균값을 나타냈다. 전 지점에서 불소는 불검출 ~ 0.57 mg/L,

염소이온은 0.5 mg/L ~ 79.5 mg/L, 황산이온은 불검출 ~ 54 mg/L의 범위로 검출되어 먹는물 수질기준 보다 낮게 조사되었다.

이온성분의 검출 비율은 (Fig. 3)과 같다. 양이온성분은 칼슘, 나트륨이 전체의 84 %로 높은 비율을 보였으며 마그네슘과 칼륨 순으로 조사되었고, 음이온성분은 중탄산이온이 42 %로 가장 높았으며, 질산, 염소, 황산이온의 순으로 나타나 먹는샘물 제품수와

동일한 비율을 보였다.

3.1.3 중금속물질 분포 특성

강화지역 37개 조사지점을 분기별로 유도결합플라즈마 질량분석기로 중금속물질을 분석한 결과, 지하수 수질의 평균농도는 동 0.009 mg/L, 아연 0.121 mg/L, 망간 0.010 mg/L, 리튬 0.004 mg/L, 스트론튬 0.221

mg/L이며, 먹는물 수질기준을 초과한 항목은 없었다. (Table 3)은 평균농도가 표시한 계 미만인 납, 비소, 셀레늄, 크롬, 카드뮴, 철, 알루미늄을 제외한 중금속물질의 평균 농도를 나타냈다. 대부분 매우 낮은 농도로 존재하여 조사지점의 중금속에 대한 지하수 수질은 매우 양호한 상태이다.

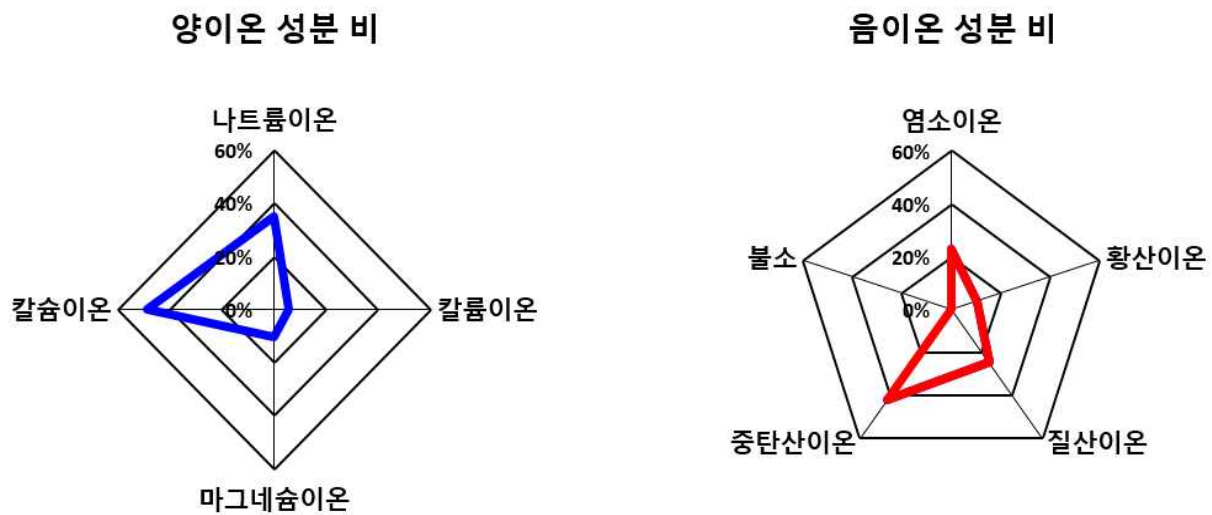


Fig. 3. Ratio of the ionic components.

Table 3. Average concentration and the maximum and the minimum of the heavy metals.

(Unit : mg/L)

	평균	최소	최대	수질기준
동	0.009	0.000	0.072	1
아연	0.121	0.000	2.658	3
망간	0.010	0.000	0.229	0.3
리튬	0.004	0.000	0.016	-
스트론튬	0.221	0.001	0.588	4

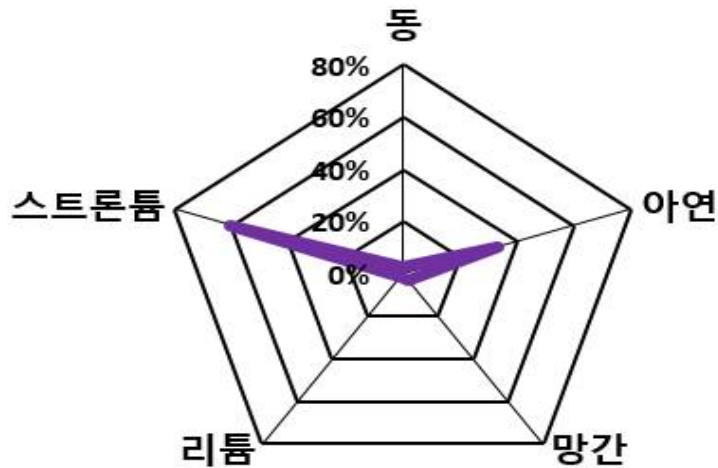


Fig. 4. Ratio of the the heavy metals.

(Fig. 4)는 중금속 성분의 검출 비율을 나타냈다. 대부분 매우 낮은 농도로 존재하기 때문에 평균농도 0.221 mg/L의 스트론튬이 61 %로 가장 높은 비율을 보였고, 아연이 33 %로 두 물질이 전체 94 %를 나타냈다. 많은 사람들이 스트론튬을 우라늄과 플루토늄의 핵 분열에서 생성되는 위험한 방사성 원소 스트론튬(^{90}Sr)으로 생각하지만 천연상태의 스트론튬(^{84}Sr , ^{86}Sr , ^{87}Sr , ^{88}Sr)은 방사성 원소가 아니며, 반응성이 크기 때문에 천연 상태에서는 화합물로만 존재하고 천창석(SrSO_4)이나 스트론티아나이트(SrCO_3)이 주된 스트론튬 광물이다. 스트론튬은 칼슘과 화학적으로 유사하며 과다 축적이 되면 골격 성장장애 및 피부에 염증을 일으킬 수 있다. 아연은 공공지하수 1개 지점에서 최대값이 2.658 mg/L으로 수질기준에 근접했는데, 이는 지질에 의한 원인이 아니라 지하수 배관에서 아연의 용출이 원인된 것으로 보인다.

로 보인다.

3.1.4 자연방사성물질 분포 특성

최근 일부 지역에서 지하수 중 자연방사성 물질에 대한 문제가 빈번하게 보도되면서 국민의 건강과 관련하여 관심이 점점 높아지고 있다. 지하수중 자연방사성물질은 말 그대로 인위적인 요소에 의한 오염이 아니라 우라늄, 라듐, 토륨 등과 같은 자연방사성물질이 암석 중에 미량으로 존재하여 풍화나 변질작용으로 분해되어 자연적으로 지하수에 용존하여 영향을 주는 것이다. 광물 속에 존재하는 함유량과 이들의 용해도가 지하수의 자연방사성물질 농도를 결정하므로 지질구조와 밀접한 관련이 있으며, 일반적으로 우라늄과 라돈 농도는 화강암, 편마암, 퇴적암 순서로 높다고 알려져 있다(Dahlkamp, 2013). 본 연구 지역의 자연방사성물질(우라늄, 라돈, 전알파)에 대한 결과는 (Table 4)에 정리하였다.

Table 4. Average concentration and the maximum and the minimum of the naturally occurring radioactive materials.

	평균	최소	최대	수질기준
우라늄 (mg/L)	0.0007	0.0000	0.0220	0.0300
라돈 (Bq/L)	78.0	0.0	353.9	148 ¹⁾
전알파 (pCi/L)	1.2	0.0	12.1	15 ²⁾

1) 먹는물 감시항목 기준

2) 미국 환경청 기준(국내 기준 없음)

우라늄은 자연적으로 존재하는 방사성동위원소 중 가장 무거운 원소로 대부분 ^{238}U 형태로 존재하며 일정함량 이상의 우라늄을 장기간 섭취시 인체에 유해할 수 있다. ^{238}U 의 반감기는 약 45억년으로 매우 길기 때문에 방사능 독성보다는 화학적으로 신장에 독성을 준다. 우라늄의 먹는물 수질기준은 0.03 mg/L이며, 조사지점의 우라늄 농도는 불검출 ~ 0.022 mg/L (평균 0.0007 mg/L)로 기준을 초과한 지점은 없었으며 대부분 매우 낮은 수준을 보였다.

라돈은 반감기가 3.82일로 짧은 무색, 무취의 불활성 기체로 비교적 물에 잘 용해되기 때문에 지하수에 존재한다. 반감기가 짧지만 라돈이 지속적으로 생성될 경우 높은 농도가 나오기도 한다. 현재 먹는물 감시항목으로 지정되어 있으며, 감시기준은 148 Bq/L이다. 조사 대상의 라돈 농도는 불검출 ~ 353.9 Bq/L (평균 78.0 Bq/L)로 6개 지점이 먹는물 감시항목 기준보다 높았다.

음용수 중 전알파는 우라늄과 라돈을 제외한 모든 알파입자의 합을 말하며, 미국 환경청의 기준치는 15 pCi/L이다. 방사성 핵종은

알파붕괴를 하면 질량수 4와 원자번호 2가 감소하면서 딸핵종과 알파입자를 방출하기 때문에 전알파는 방사성물질의 존재여부를 스크리닝 하는 의미가 있다. 전알파 값이 높다는 것이 반드시 우라늄과 라돈의 농도가 높다는 것을 뜻하지는 않으며, 방사능 물질의 존재 가능성을 보여준다. 조사 지점의 전알파 농도는 불검출 ~ 12.1 pCi/L(평균 1.2 pCi/L)로 미국 환경청의 가이드라인 15 pCi/L를 초과하는 지점은 없었다.

3.2. 지역별 지질특성

한국지질자원연구원(KIGAM)의 1 : 250,000 지질도를 이용하여 면적 비율로 지질을 분류한 결과는 (Fig. 5)와 같다. 강화지역은 화강암(51.3 %), 편마암(29.8 %), 편암(10.8 %), 층적층(7.5 %), 섬장암(0.6 %)으로 구성되며, 화강암과 편마암이 전체의 81.1 %를 나타내 주 지질층으로 조사되었다. 강화도 서부 및 삼산면, 주문도는 화강암, 동부는 편마암, 교동면은 편암이 넓게 분포하고 있으며, 일부 층적층과 섬장암으로 구성되는 특징을 보였다.



Fig. 5. Distribution of different geological settings in Gangwha.

3.3. 지질분포에 따른 자연방사성물질 함량 분석

(Table 5)에는 한국지질자원연구원(KIGAM)의 1 : 250,000 지질도를 이용하여 강화지역을 5개의 지질을 세분화하여 지질별 자연방사성물질의 평균 농도를 나타냈다. 조사 지점의 우라늄 농도는 불검출 ~ 0.0220 mg/L(평균 0.0007 mg/L)이며, 화강암 지역은 불검출 ~ 0.0220 mg/L(평균 0.0012 mg/L), 편마암 지역은 불검출 ~ 0.0005 mg/L(평균 0.0001 mg/L), 편암 지역은 불검출 ~ 0.0008 mg/L(평균 0.0003 mg/L), 충적층 지역은 불검출 ~ 0.0005 mg/L(평균 0.0001 mg/L), 섬강암 지역은 불검출 ~ 0.0008 mg/L(평균 0.0030 mg/L)의 범위로 각각 분석됐다. 화강암과 섬강암 지역의 우라늄 평균 농도가 편마암, 편암, 충적층 보다 상대적으로 높았다.

라돈 농도는 불검출 ~ 353.9 Bq/L(평균 78.0 Bq/L)이며, 지질별로는 화강암 지역은 불검출 ~ 353.9 Bq/L(평균 112.8 Bq/L), 편마암 지역은 3.6 Bq/L ~ 69.6 Bq/L(평균 35.2 Bq/L), 편암

지역은 불검출 ~ 285.3 Bq/L(평균 62.5 Bq/L), 충적층 지역은 불검출 ~ 88.9 Bq/L(평균 53.3 Bq/L), 섬강암 지역은 불검출 ~ 64.3 Bq/L(평균 24.7 Bq/L)의 범위로 각각 분석됐다. 라돈은 화강암 지대와 높은 상관성을 보이며, 화강암 > 편암 > 충적층 > 편마암 > 섬강암으로 순으로 조사되었다. 전알파 농도는 불검출 ~ 12.1 pCi/L(평균 1.2 pCi/L)로 화강암 및 섬강암이 다른 지질보다 상대적으로 높았지만, 지질별 평균농도가 모두 2.0 pCi/L 이하의 매우 낮은 농도로 지질에 따른 특징은 보이지 않았다.

3.4. 다변량 통계분석에 의한 지하수 유해요인 분석

3.4.1 주요 수질인자간 상관성 분석

(Table 6)에서는 지하수 중에서 주요 성분인 이온성물질 9항목(Na^{2+} , K^{+} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , F^{-} , Cl^{-} , SO_4^{2-} , NO_3^{-} , HCO_3^{-}) 중금속 물질(스트론튬) 및 자연방사성물질(우라늄 및 라돈) 상호간 상관성을 보여주고 있다. F^{-} 를 제외한 모든 이온

성 물질은 물-암석 접촉반응에 의해 상호간 높은 양의 상관성을 보였으며, 특히 (Ca-Mg) 은 (0.805^{**})로 가장 높았다. 이는 지하수의 수질이 지질의 구성물질 중에서 주로 Ca-Mg 탄산염 광물에 의해 주도적으로 결정 된다는 것을 의미한다.

염소이온은 지표 오염의 영향이나 암석 내 유기물의 부식 등에 의해 증가할 수 있는데, 조사지점(Na-Cl)은 강한 양의 상관성(0.820^{**}) 보였고, 또한 (Na-NO₃) 역시 높은 양의 상관성(0.631^{**}) 보인 것으로 나타나, Na⁺이온의 기원 암석인 사장석의 용해에 의해 지화학적 영향은 물론 지표오염에 의해 일부 증가한 것으로 추정된다. 자연방사성물질 상관성 분석결과, 우라늄과 라돈 상호간 비교적 약한 양의

상관성(0.239^{**})을 보였으며, 우라늄-불소(0.862^{**}), 우라늄-칼슘(0.235^{**}), 우라늄-스트론튬(0.240^{**}), 라돈-불소(0.192^{**})를 보였으며, 그 외 물질과는 별다른 상관성을 보이지 않았다.

특히, 불소는 대부분 이온성 물질과는 유의한 상관성을 보이지 않았으나, 우라늄과는 높은 양의 상관성(0.862^{**})을 보였는데, 불소의 기원은 형석(CaF₂)의 용해와 운모류, 각섬석류, 인회석[Ca₅(Cl, F, OH)(PO₄)₃] 등의 용해반응이나 흑운모 풍화등에 의해 증가할 가능성이 있는 것으로 알려져 있다(정찬호 등, 1997). 불소이온은 형석의 용해침전 반응의 평형상태에 따라서 Ca²⁺ 이온과 음의 상관성을 보이나 연구대상 지역에서는 약한 양의 상관성(0.278^{**})을 보였다.

Table 5. Average concentration of the the naturally occurring radioactive materials by different geological settings.

항목	화강암	편마암	편암	층적층	섬장암
우라늄 (mg/L)	0.0012	0.0001	0.0003	0.0001	0.0008
라돈 (Bq/L)	112.8	35.2	62.5	53.3	24.7
전알파 (pCi/L)	1.6	0.7	0.8	0.6	1.4

Table 6. Pearson correlation coefficients of water quality parameter.

Parameter	Na ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	Sr	U	Rn
Na ²⁺	1											
K ⁺	0.583 **	1										
Mg ²⁺	0.732 **	0.714 **	1									
Ca ²⁺	0.714 **	0.487 **	0.805 **	1								
F ⁻	0.004	0.178 *	0.072	0.278 **	1							
Cl ⁻	0.820 **	0.362 **	0.644 **	0.707 **	-0.07 0	1						
SO ₄ ²⁻	0.778 **	0.664 **	0.743 **	0.615 **	0.133	0.600 **	1					
NO ₃ ⁻	0.631 **	0.287 **	0.476 **	0.480 **	-0.15 5	0.501 **	0.358 **	1				
HCO ₃ ⁻	0.295 **	0.497 **	0.633 **	0.665 **	0.557 **	0.179 *	0.408 *	0.048	1			
Sr	0.683 **	0.299 **	0.638 **	0.804 **	0.218 **	0.688 **	0.507 **	0.565 **	0.505**	1		
U	-0.09 9	-0.05 8	-0.06 0	0.235 **	0.862 **	-0.08 9	-0.01 3	-0.15 7	-0.157	0.240 **	1	
Rn	0.019	-0.13 4	-0.17 7*	-0.02 6	0.192 *	-0.09 0	-0.04 9	0.054	0.054	-0.00 3	0.239 **	1

* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

3.4.2 주성분 분석을 활용한 수질특성 분석

주성분 분석(principal component analysis : PCA)은 수질해석에 기여도가 높은 인자들을 효과적으로 추출하기 위해 주성분을 이용해 고유값(eigenvalue)이 1이상인 값을 기준으로 공통요인을 추출한다. 초기의 요인부하량(factor loading) 행렬로는 요인의 의미를 해석하기 어려워 변수의 의미를 명확히 하기 위해

서 요인부하량이 갖는 분산제공이 최대화 되도록 요인을 회전시키는 베리맥스(varimax)법을 이용하였다.

(Table 7)은 주성분분석에 의해 고유값이 1 이상인 값을 기준으로 추출된 요인(factor)을 보여주고 있다. 4개 주성분이 전체데이터의 변이 중 77.4 % 설명력을 보인 가운데, 제1성분 40.6%(Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻,

HCO₃⁻, Sr), 제2성분 20.3%(F⁻, U, Gross alpha), 제3성분 8.5%(Rn) 및 제4성분 7.0%(Zn) 등이 통계적으로 유의한 발생원으로 추정되었다.

지하수에 가장 주도적인 영향을 미치는 제1요인(이온성 물질 그룹)의 특징은 상관성이 가장 큰 Ca²⁺, Mg²⁺ 이온은 탄산염 광물 용해 등 물-암석 반응의 정도를 간접적으로 지시하는 인자들이다.

제2성분은 U, F, 전알파가 상관성을 보였으며 우라늄은 화강암 지역에서 주로 높게 검출되며 중탄산농도와는 약한 반비례를 보이는 것으로 알려져 있다. 지하수내 용존 우라늄 농도는 모암의 우라늄 함량과 존재 형태, 지하수의 산화환원 환경, 중탄산이온, 불소, 인산염의 농도에 영향을 받는 것으로 알려져 있다(STUK, 2005).

Table 7. The results of PCA for ground water from the study area.

Parameter	PCs			
	PC1	PC2	PC3	PC4
Na ⁺	0.869	-0.290	0.200	-0.062
K ⁺	0.684	-0.080	-0.403	-0.300
Mg ²⁺	0.899	-0.154	-0.239	-0.030
Ca ²⁺	0.914	0.122	0.042	0.118
F ⁻	0.257	0.874	-0.060	-0.132
Cl ⁻	0.772	-0.307	0.232	0.121
SO ₄ ²⁻	0.801	-0.158	-0.142	-0.166
NO ₃ ⁻	0.578	-0.346	0.456	0.098
HCO ₃ ⁻	0.640	0.494	-0.356	-0.108
Zn	0.111	-0.012	-0.423	0.855
Sr	0.821	0.063	0.265	0.156
U	0.152	0.912	0.110	0.015
Rn	-0.049	0.316	0.611	0.052
Gross Alpha	0.250	0.731	0.141	0.167
Eigenvalue	5.69	2.85	1.33	1.00
Variance(%)	40.6	20.3	8.5	7.0
Cumulative variance(%)	40.6	60.9	70.4	77.4

3.4.3 군집분석을 활용한 지역별 수질유사성 분석

(Fig. 6)은 지하수 주요 이온성물질, 중금속 및 자연방사성물질 등 총 14항목 수질인자를 그룹별로 분류한 군집분석의 덴드로그램을 보여주고 있다. 수질인자는 3개 유사그룹으로

분류되었으며, 제1그룹은 자연방사성물질과 불소, 제2그룹은 독립적인 거동을 보인 아연, 제3그룹은 용해성물질과 스트론튬이 함께 분류되었으며, 특히 용해성 물질중 주요 해수성 분으로 알려진 염소이온과 나트륨은 밀접한 연관성을 보였다.

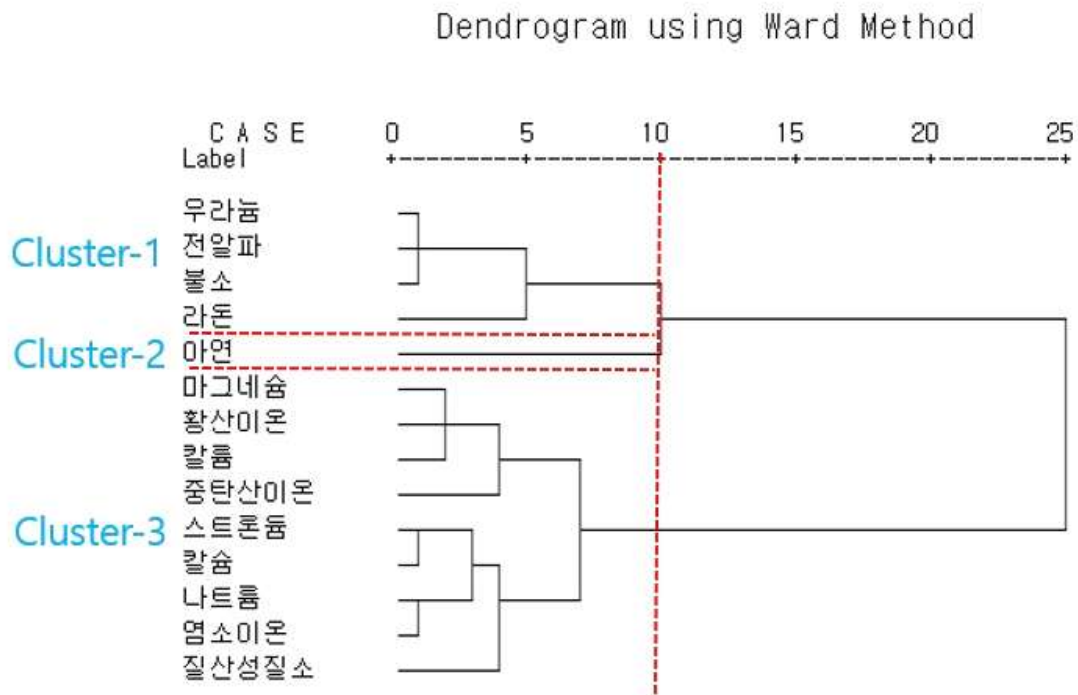


Fig. 6. Dendrogram using Ward's method of hierarchical analysis for ground water quality and naturally radioactive materials.

IV. 결 론

본 연구는 상수도 보급률이 타지역 보다 낮으면서 음용율이 다소 높은 강화지역 음용 지하수 37지점을 대상으로 지하수 중 자연방사성물질의 분포특성과 이온 및 중금속 성분 등을 조사하여 지질특성에 따른 수질특성 분석하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 강화지역은 2019년 12월 현재 12,361개의 지하수정이 생활용수로 사용 중이며, 이중 23.6 %가 음용수로 사용 중인데, 조사대상 지하수는 이온 및 중금속 성분 등 모두 먹는물수질기준을 만족하며 양호한 상태로 나타났다.
2. 한국지질자원연구원(KIGAM)의 지질도 (1:250,000)를 이용하여 지역별 지질을 구

분하였는데, 화강암(51.3 %)과 편마암(29.8 %)이 전체의 81.1 %를 차지하는 주 지질층으로 나타났고, 편암, 충적층, 섬강암 순으로 조사되었다. 지역적으로는 강화도 서쪽지역은 화강암, 동쪽은 편마암 지역으로 이분되어 분포하는 것으로 조사되었다.

3. 자연방사성물질인 우라늄과 라돈은 타 지질(0.0003 mg/L, 43.9 Bq/L)에 비해 화강암 지질(0.0012 mg/L, 112.8 Bq/L)에서 상대적으로 높게 검출되었는데, 특히 라돈 농도는 화강암 지질에 크게 영향을 받기 때문에 향후 화강암지역 위주로 집중적인 추가 조사가 필요할 것으로 판단된다. 또한 라돈 농도가 높은 지하수에 대해서는 라돈의 효율적인 관리 및 저감 방안에 대한 안내를 실시하였으며, 향후 화강암 지역의 지하수 개발 시 라돈의 영향이나 피해를 감소시키기 위해 물탱크의 설치가 요구된다.
4. 수질성분의 상관성 분석결과, 이온성 물질은 물-암석 접촉반응에 의해 상호간 높은 상관성을 보였는데, 지하수의 수질은 지질의 주요 구성성분인 Ca-Mg 탄산염 광물에 의해 영향을 받은 것으로 조사되었다.
5. 주성분에 대한 분석결과, 4개의 주성분이 전체 77.4 % 설명력을 보인 가운데, 제1성분 40.6 %(Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- , Sr), 제2성분 20.3 %(F^- , U, Gross alpha), 제3성분 8.5 % (Rn) 및 제4성분 7.0 % (Zn) 등이 통계적으로 유의한 발생원으로 추정되었지만, 라돈의 경우 다른 지질특성에 기인하는 것으로 판단된다.
6. 수질항목 간 유사성에 대한 군집분석 결과, 용해성 물질중 주요 해수성분으로 알려진 염소이온과 나트륨은 매우 높은 상관성을 보였다.
7. 본 연구를 통해 지하수 수질특성과 자연방사성물질을 종합적으로 해석할 수 있는 새로운 분석방법론을 제시할 수 있었고,

향후 시료채취 장소 및 시간을 보다 더 다양화 한다면 광역적인 지하수 수질특성을 해석할 수 있을 것이다.

향후 인천지역 지하수 수질오염물질의 시계열 추세분석을 실시하여 시민들이 쉽게 알아볼 수 있도록 지하수 오염지도를 작성하고, 통계분석을 활용해 지역별 수질 유사성 및 광역적 오염요인을 해석해 지하수 수질관리 가이드라인을 제공할 계획이다.

V. 참고문헌

1. 김익현, 김문수, 함세영, 김현구, 김동수, 조성진, 이헌민, 황종영, 조훈제, 박선화, 정현미 (2018). 강화도의 지질별 지하수 중 자연방사성 물질의 특성, 대한자원환경지질학회, 51(1), 27-28.
2. 노병돈 (1995). 결정암에서의 지하수 유동 특성 파악, 대한광업진흥공사, 58, 206-222.
3. 국립환경과학원, 2010, 지하수 중 방사성물질에 관한 정밀조사.
4. 이민성 (1978). 옥천계 함우라늄 주변에 관입 분포하는 화강암류의 지구화학, 지질학회지, 113-119.
5. 환경부, 2018, 먹는물수질공정시험기준
6. 정도환, 김문수, 이영준 (2011). 국내 음용지하수의 수리지화학 및 자연방사성물질 환경 특성, 한국지하수토양학회지, 16(6), 133-142.
7. Ohta. R, Shima. K, Takayanagi. T (1986). What quality analysis of the Mikawa bay by principal component analysis, Water and waste, 22, 1118-1121.
8. Shin, S. K, Park, C. K, Song, K. O (1998). Evaluation of water quality using principal component analysis in the Nakdong river estuary, J. of Korean Env. Sci, 7(2), 171-176.

9. Arvela, H., Blomqvist, L. and Mustonen, R. (1979). In Situ External Environmental Gamma Ray measurements, In: Studies on Environmental Radioactivity in Finland 1976-1977, Report STL-A 26, Helsinki; Institute of Radiation Protection.
10. Banks D., Bjørn F., Aase K.M., Jan R.K. and Terje, S. (1998). The chemistry of Norwegian groundwaters : I. The distribution of radon, major and minor elements in 1604 crystalline bedrock groundwaters, The Science of the Total Environment, 222, 1-71.
11. David, S.V., Avner, V., Daniella, H. and Gary, S.D. (2009). Relationships between radium and radon occurrence and hydrochemistry in fresh groundwater from fractured crystalline rocks, North Carolina (USA), Chemical Geology, 260, 159-171.
12. Hwang, J.H., Kihm, Y.H. (2005). Geology Report of the GanghwaOnsuri Sheet. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 4-7.
13. Jeong, D.H., Lee, Y.J., Ju, B.K., Noh, H.J., Yu, S.J., Kim, M.S. (2011). Study on Gross-alpha Characteristics of Groundwater for Drinking in Korea. Journal of KoSSGE, 16, 67-73.
14. Kim, D.S. (2014). A study on characteristics hydrogeochemistry and naturally occurring radioactive materials in groundwater in domestic sedimentary rock area. master's thesis, Pukyong National University, 13-17.
15. National Institute of Environmental Research (2013). Study on Naturally Occurring Radioactive Materials (N.O.R.M) in Groundwater in South Korea ('13) (NIER-RP2013-384), National Institute of Environmental, 161-183.
16. STUK (2005). ²³⁸U-series radionuclides in Finnish groundwater-based drinking water and effective doses. STUK-A123, 94.
17. World Health Organization, 2011, Guidelines for Drinking-water Quality, fourth edition., WHO Library Cataloguing-in-Publication Data, 204-206
18. 정찬호, 김천수, 김통권, 김수진 (1997). 편마암-물 반응계에서 지하수의 지화학적인 진화 및 이차광물 생성에 관한 반응경로 모델링, 한국광물학회지, 제10권, 제1호, p34-44.