

통계분석에 의한 인천지역 지하수 수질특성 평가

조영민*, 김진하, 조혜린, 양해원, 박홍경, 박은경, 전미희, 성지홍, 권문주
인천보건환경연구원 수질보전과

Evaluation of Groundwater Quality Using Statistical Analysis in Incheon

Young-Min Cho*, Jin-Ha Kim, Hye-Rin Cho, Hae-Won Yang, Hong-Kyoung Park,
Eun-Kyoung Park, Mi-Hee Jeon, Ji-Hong Seong, Mun-Ju Kwon

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

Abstract

The purpose of the study is to analyze the characteristics and condition of the groundwater quality in Incheon area using the statistical method and to find a good way to access the solution for safe and manageable groundwater. In this study, groundwater quality data measured for 5 years from 2017 to 2021 were analyzed against 80 groundwater well, which showed different geological settings in Incheon area. The levels of groundwater contamination were quantified into four grades by using the number of excess drinking water quality standards, average concentration analysis, and tendency analysis. The contamination grade ratios, which were obtained by analyzing three contamination indicators, were relatively high in the order of NO_3^- -N (36.3%) > Turbidity (13.8%) > Cl^- (10.0%) > As (5%). The main four items for which contamination indicators rate were evaluated as high were visualized on a contamination map. As a result of factor analysis, the PC1 consisted of ion materials such as Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- and SO_4^{2-} (28.4%). PC2 was composed of Al, Fe and Mn (21.5%). PC3 with Rn, U and F^- (16.3%) had a relationship with geological conditions, and PC4 had only related to K^+ (10.6%). According to the cluster analysis (CA), the study area was classified with 3 groups. Group A showed that the ion materials had a wide influence on groundwater. Group B with Rn, U and F^- have been a high correlation with granite areas. Group C with heavy metals had a deep relationship with area such as urban and industrial complexes. The groundwater quality of the study area was relatively in good condition. But it had been affected by various pollutants such as total colony counts, NO_3^- -N, turbidity, etc. This study coupled with statistical analysis and the grade of groundwater contamination is expected to provide basic data for appropriate control and management for safe groundwater.

Key words : Groundwater quality, Statistical Analysis, Groundwater contamination grade

I. 서 론

산업화와 도시화에 따른 경제성장을 기반으로 상수도 보급이 빠르게 진행되어 식수원 대부분은 지표수로 충당되고 있다. 그러나 산업의 발전은 수질오염을 증가시켜 정수처리공정의 고도화를 통한 수돗물 공급이 요구되었고, 지난 수십 년간 지속된 수질오염사건으로 인해 수돗물에 대한 불신이 높은 상태에서 최근에는 적수 및 유충으로 인해 수돗물이 안전하지 못하다는 인식이 깊어져 있는 것이 현실이다. 또한 소득 증대로 인해 맛있고 건강한 물로 소비패턴의 변화는 먹는 샘물의 이용을 증가시켜 지하수의 효율적인 관리가 중요한 이슈가 되었다(환경부, 2020).

지하수법 제2조에 의한 지하수의 정의는 ‘지하의 지층이나 암석 사이의 빈틈을 채우고 있거나 흐르는 물’로 정의되어 있다. 지하수는 대부분 눈, 비, 우박 등이 땅으로 스며들어 형성되며, 땅 속 지하수는 다시 저지대에서 샘물로 솟아나거나 하천 및 바다로 유출되어 평형을 이룬다(이사로 등, 1996). 지하수는 지구상에 존재하는 담수의 총량 중 30.1 %를 차지하는 것으로 알려져 있고, 지표수는 담수 총량의 단 0.3 %에 불과하며, 빙하 및 적설 형태로 바로 이용할 수 없는 담수가 총량 중 69.6 %이다. 따라서 담수이면서 액상으로 존재하여 바로 이용할 수 있는 물의 99 %가 바로 지하수이며, 안정적인 식수원 확보를 위한 소중한 천연자원이다(국토교통부, 2011).

지하수는 빗물 등에 의하여 보충되므로 재생가능한 수자원이지만 채워지는 양보다 더 많은 지하수를 이용하여 지하수가 고갈되거나 지하수가 저장된 대수층이 오염되는 경우에는 중요한 수자원이 훼손될 뿐만 아니라 원상으로 회복시키기 어렵다. 지하수의 수질은 토양, 지질층, 지하수의 흐름과 같은 자연적인 기원과 토지의 이용특성, 개발현황, 산업화 및 도

시화에 따른 인위적인 오염원에 의해 영향을 받게 되는데, 지하수 오염은 지질특성에 따라 오염의 확산과정이 다를 뿐만 아니라 오염을 인지하기가 쉽지 않고, 오염이 인지되었을 경우에는 오염 진행이 상당히 이루어진 경우가 많다. 따라서 지하수 오염을 사전에 감지하고, 수질현황과 추세를 정기적으로 파악하여 관리하는 것이 무엇보다 중요하다(노병돈, 1995).

이에 국내에서는 지하수의 수질현황과 수질 변화 추세를 정기적으로 파악·관리하여 지하수의 수질을 보전하고 정책 수립을 위한 기초 자료로 활용하기 위해 지하수법 제18조제2항(수질오염의 측정) 및 지하수의 수질보전 등에 관한 규칙 제9조(수질측정망설치 및 수질오염 실태 측정 계획의 수립·고시)에 의해 전국에 지하수 수질측정망이 설치되어 운영되고 있으며(환경부, 2020), 민방위기본법 시행규칙 제15조(행정안전부, 2021) 및 민방위 업무지침 중 민방위비상급수시설(수질관리)에 의해 비상급수의 정기적인 검사가 이뤄지고 있다.

인천광역시의 지하수 이용 현황은 지하수공이 총 21,863개로 음용수, 생활용수, 농업용수, 공업용수로 사용되고 있으며, 대도시 중 지하수 의존도가 가장 높은 편이다. 인천지역은 다른 지역과 달리 해안가에 위치한 지리적 특성과 지하수 이용 빈도가 높은 섬들이 많아 해수유입의 영향을 받을 가능성이 높다. 또한 산업화에 따른 폐기물 및 생활하수 시설 등 외부 오염원에 의한 오염 개연성이 크기 때문에 지역별 오염원에 대한 파악이 무엇보다 중요하다(국가지하수정보센터, 2020).

본 연구에서는 다년간의 수질자료를 활용하여 인천지역 지하수의 광역적 오염특성과 수질에 영향을 주는 요인들을 파악하기 위해 수행되었다. 이를 위해 지질별 수질특성 조사 및 주요 오염물질의 시간별 오염도 추세를 통계학적으로 분석하고, 각 지점별 수질기준 초과횟수, 평균농도분석 및 경향성분석을 실시하여 수질오염등급 산정 및 수질오염지도로

시각화를 수행하였다. 또한 주성분분석 및 군집분석의 통계기법을 통해 지하수의 안전성 평가와 오염원별 지하수의 체계적인 관리를 위한 기초자료를 확보하여 지하수 수질보전에 기여하고자 하였다.

II. 실험방법

2.1. 연구대상 및 방법

지질에 따른 인천지역 지하수의 수질특성을 파악하기 위해 한국지질자원연구원(KIGAM)의 지질도(1 : 250,000)를 제공받아 6개 주요 지질층으로 분류하였고, 세분화된 지질층과 지역적 분포현황을 고려하여 인천지역을 대표할 수 있는 지하수 80개 지점을 선정하였다. 지질별 시료채취 지점은 (Fig. 1)과 같다.

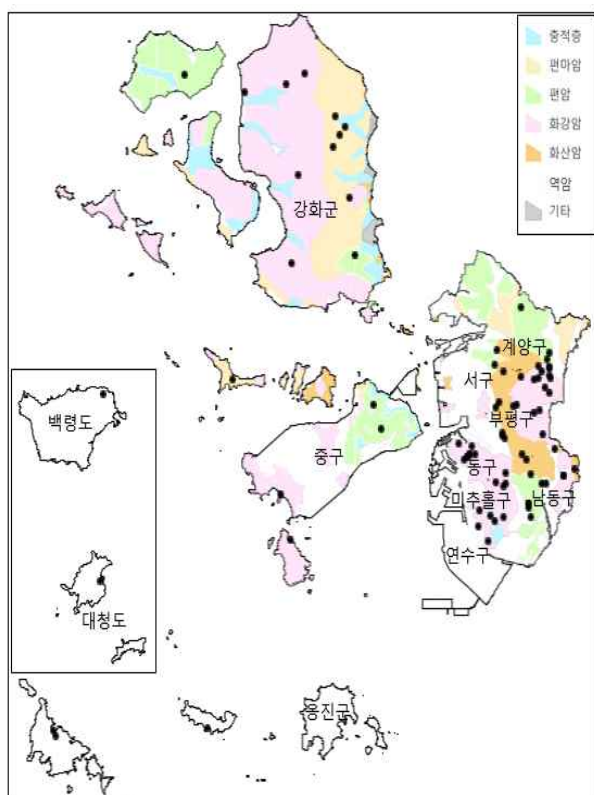


Fig. 1. Sampling sites on the geological map of the study area in Incheon.

2021년 2월부터 11월까지 먹는물수질기준 전항목(47항목)을 분석하여 지하수 오염현황을 조사하였고, 지하수의 주요 양이온 성분인 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 과 전기전도도 및 자연방사성물질인 라돈과 우라늄 분석을 통해 자연적인 기원에 따른 수질특성을 파악하였다.

추가적으로 2017년부터 2021년까지 5년간 인천보건환경연구원에서 분석한 1,290건의 지하수 결과를 수집, 다변량 통계분석(SPSS, ver 12.0)을 통해 분석항목과 영향인자 간 관계를 다각적으로 조사하였다. 또한 주요 오염물질의 시간에 따른 추이변화 분석을 실시하였고, 지하수 오염현황을 수치적으로 정량화하기 위해 빅데이터 처리 오픈프로그램인 R을 활용, 오염지수를 산출하여 측정 지점별 지하수 수질오염등급을 판정하였다. 수질오염등급 산정 결과, 오염도가 높다고 판단되는 항목에 대해서는 ArcGIS를 이용 인천지역 지질도에 중첩시켜 한눈에 알아볼 수 있도록 시각화하였다.

2.2. 시료채취 및 전처리

모든 시료 분석은 먹는물 공정시험기준 및 먹는물 감시항목 운영 등에 관한 고시를 준수하였다. 시료채취는 지하수를 충분히 양수 후 안정화 된 상태의 시료를 채취하였고, 냉장상태로 운반하여 분석할 때까지 냉장보관 하였다. 휘발성유기화합물 분석을 위해서는 염산(1+1) 용액으로 pH를 조절하고, 잔류염소를 제거하기 위해서 티오황산나트륨으로 처리하였다. 이온성분 분석을 위해서 0.2 μm 의 공극을 갖는 membrane filter에 시료를 여과하여 부유물질을 제거하였으며, 중금속성분 분석을 위해서는 0.45 μm 의 공극을 갖는 membrane filter에 시료를 여과한 후, 시료 100 mL 당 질산 1 mL를 넣어 전 처리 하였다. 휘발성유기화합물 분석에는 Thermo사의 TSQ 9000(퍼지·트랩 기체크로마토그래피 질량분석기), 이온성분 분석은 Thermo사의 Dionex ICS-5000+

EG(IC, 이온크로마토그래피), 중금속성분 분석은 Agilent사의 7900 ICP-MS(유도결합플라즈마 질량분석기)를 이용하였다.

자연방사성물질인 라돈은 휘발성이 강하기 때문에 시료 채취 시 주의가 필요한데, 기포가 발생되지 않도록 조심히 채수한 후 22 mL PE 용기에 MaxiLight 각테일 용액 12 mL와 지하수 8 mL를 첨가하여 천천히 흔들어 섞어줬다. 3시간 이상의 안정화 과정을 거친 후, 방사평형된 시료를 액체섬광계수기(LSC, liquid scintillation counter)를 이용하여 분석하였다.

2.3. 지하수 수질오염등급

2.3.1. 지하수 오염지시인자

인천지역 지하수의 오염도를 정량화하여 평가하기 위해서 각 항목별로 수질기준 초과횟수 조사방법, 평균농도 분석방법, 경향성 분석방법의 세 가지 분석방법을 실시하여 오염지시인자(Contamination indicator)를 산정하였으며, 분석항목과 영향인자간 수질특성을 파악하였다(서인숙 등, 2020).

(1) 수질기준 초과횟수 조사방법

수질기준 초과횟수 조사방법은 각 지점별 해당 항목의 측정농도가 먹는물수질기준을 초과한 횟수를 조사하는 방법이다. 본 연구에서는 비음용 지하수도 가장 엄격한 먹는물수질기준을 적용하여 초과횟수가 1회 이상이면 오염을 지시한 것으로 판정하였다.

(2) 평균농도 분석방법

평균농도 분석방법은 각 지점별 해당 항목 측정농도의 평균과 표준편차를 계산하여 평균농도의 95% 신뢰구간을 구하고(식 ①), 평균농도 신뢰구간의 상한선이 수질기준보다 높은 경우 오염을 지시한 것으로 판정하였으며, pH의 경우는 하한선이 수질기준보다 낮은 경우도 고려하였다(윤희성 등, 2012).

$$(\bar{X} - 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \bar{X} + 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}) \text{ ----- ①}$$

\bar{X} 는 측정농도 평균이며, σ 는 측정농도 표준편차, n 은 측정횟수를 나타낸다.

(3) 경향성 분석방법

수질기준 초과횟수 조사방법과 평균농도 분석방법이 과거의 오염도를 나타낸다면, 경향성 분석방법은 미래의 오염가능성을 예측하는 것이다. 통계분석 오픈프로그램인 R을 이용하여 비모수적 방법인 Sen의 경향성을 분석하였고, 시간에 따른 농도 기울기를 크기순으로 정리하여 중앙값의 95% 신뢰구간내 0이 포함되지 않고 증가하면 오염을 지시한 것으로 판정하였다(이진용 등 2006).

경향성 분석을 위해 각 시간 간격에 대한 지하수 농도의 기울기(Q)를 계산한다(식 ②).

$$Q = -Q = \frac{x_{i'} - x_i}{i' - i} \text{ ----- ②}$$

여기서, $x_{i'}$ 는 시간 i' 에서의 농도, x_i 는 시간 i 에서의 농도, i' 는 시간 i 이후의 시간을 나타낸다.

n 개의 농도 자료에 대하여 N' 개의 Q를 계산한다(식 ③).

$$N' = \frac{n(n-1)}{2} \text{ ----- ③}$$

Q를 크기순으로 정리하고, Q의 중앙값을 기울기 예측값(Q')으로 결정한다(식 ④).

$$Q' = Q_{[(N' + 1)/2]} = \frac{1}{2}(Q_{[N/2]} + Q_{\{[(N+2)/2]\}} \text{ ----- ④}$$

여기서, N' 는 홀수, N 은 짝수임
Mann-Kendall 통계값의 분산 추정값 VAR

(S)을 이용하여 신뢰구간을 결정한다(식 ⑤).

$$VAR(S) = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p-5)] \text{ --- ⑤}$$

여기서, n은 자료의 수, t_p 는 p번째 값의 반복 자료 수, q는 반복 자료가 존재하는 횟수를 나타낸다. 양측검증 Z 통계값 $Z_{1-\alpha/2}$ 의 값을 이용해서 오차 허용률 α 에 대한 신뢰구간 간격(C_α)을 구한다(식 ⑥).

$$C_\alpha = Z_{1-\alpha/2} \sqrt{VAR(S)} \text{ ----- ⑥}$$

95% 신뢰구간을 고려하여 $Z_{1-\alpha/2}$ 는 1.96을 이용하였고, 기울기의 신뢰구간 양끝 값에 대한 순위(M_1 , M_2)를 구한다(식 ⑦).

$$M_1 = \frac{N' - C_\alpha}{2}, \quad M_2 = \frac{N' - C_\alpha}{2} + 1 \text{ ----- ⑦}$$

M_1 과 M_2 에 대한 Q^* 를 구하고 95% 신뢰구간 내에 0이 포함되지 않고 농도기울기가 증가한다면 오염을 지시한 것으로 판정하였다. 이때 pH는 감소하는 경우에도 오염을 지시한 것으로 판정하였다.

2.3.2. 지하수 수질오염등급 지도

과거의 오염현황부터 미래의 오염여부를 예측하여 장기적으로 지하수의 수질오염실태를 파악하기 위한 세 가지 분석방법을 오염지시인자로 정의하였으며, 각 오염지시인자가 오염을 지시하는 횟수의 총합을 오염지수(Contamination index)로 정의한다. 오염지수가 0이면 안전등급(Clean grade), 1이면 오염가능등급(Possibly contaminated grade), 2이면 오염등급(Contaminated grade), 3이면 오염심각등급(Seriously contaminated grade)의 네 가지 오염등급으로 분류하였고, 오염등급을 색으로 표현하여 Table 1에 나타냈다(윤희성 등,

2012). 수치화된 오염등급은 ArcGIS를 이용하여 인천지역 지질도에 중첩시켜 시각적으로 한눈에 알아볼 수 있도록 나타냈다.

Table 1. Groundwater quality classification

Contamination index	Color	Water quality grade
0	Green	Clean
1	Yellow	Possibly contaminated
2	Orange	Contaminated
3	Red	Seriously contaminated

2.4. 다변량 통계분석

2.4.1. 상관분석

상관분석은 자료들 간의 관계성을 파악하는 것으로 상관계수(Correlation coefficient, r)로 표시되는데, 두 변수사이의 관계성 정도와 방향을 함께 설명한다. 상관계수(r)의 부호(±)로부터 관련성의 방향에 대한 정보를 얻을 수 있는데, (+)값은 양의 상관관계, (-)값은 음의 상관관계를 나타내고, r의 값은 -1.0 ~ +1.0의 범위를 가지며, 절대값이 1에 가까울수록 강한 관계성을, 0에 가까울수록 관련성은 약하다는 것을 의미한다(박영옥 등, 2012).

2.4.2. 요인분석

요인분석(Factor analysis)은 변수들 간의 상호 연관성을 분석하여 이들 간의 공통적으로 작용하고 있는 내재된 요인을 추출하여 전체 자료를 대변할 수 있는 변수로 수를 줄이는 기법이다(허만형, 2001). 즉 상관관계가 높은 요인들이 가지고 있는 공통성을 중심으로 하나의 동질적인 요인으로 묶어주는 분석방법이다. 따라서 요인분석을 이용하면 여러 개의 변수 형태로 주어진 많은 정보를 몇 개의 핵심적인 내재 요인으로 축약하여 나타냄으로써 정보에 대한 이해와 추가분석을 용이하게 할 수 있다. 요인추출 모형으로는 PCA(Principle

Component Analysis)를 사용하였으며, 자료의 총분산을 분석하여 고유치(eigenvalues)를 얻어낸다. 고유치(eigenvalues)는 요인이 설명할 수 있는 변수들의 분산 크기를 나타내며, 고유치가 1보다 크다는 것은 하나의 요인이 변수 1개 이상의 분산을 설명해 준다는 것을 의미한다. 따라서 고유치 값이 1 이상인 경우를 기준으로 해서 요인수를 결정하게 된다. 분석 자료에 대한 요인분석 적합성을 평가하기 위하여 KMO(Kaiser-Meyer-Olkin)와 바틀렛의 구형성 검정(Bartlett's Test of sphericity)을 수행한다. KMO 값은 표준 적합도를 나타내는 값으로 0.5 이상이면 자료가 요인분석에 적합하다고 판단하며, 바틀렛의 구형성 검정은 변수간의 상관행렬이 단위행렬인지의 여부를 판단하여 요인분석의 사용이 적합한지를 보여준다. 각 요인의 요인 부하량(Factor loading)의 분산(Variance)을 최대화하기 위해 베리맥스 직각회전방식(Varimax orthogonal rotation)을 이용하였다(이훈영, 2006).

2.4.3. 군집분석

군집분석(Cluster analysis)은 다양한 특성을 지닌 대상들을 유사한 속성을 지닌 집단으로 그룹화 한 후, 각 집단의 성격을 파악함으로써 데이터 전체 구조에 대해 이해하는 분석 방법이다. 이번 연구에서는 군집형성에 있어 일반적으로 사용되고 정보의 손실량이 최소가 되도록 하는 Ward's method를 사용하였다. 이 방법은 대상 자료들의 유사성을 거리(distance)로 환산하기 위하여 모든 변수의 차이를 제곱하여 합산해 결정하는 유클리디안 제곱거리(Euclidean distance)를 이용하였으며, 거리 정보를 이용해서 서로 가까운 거리에 있는 것들끼리 그룹화한 후, 그 결과를 수형도(Tree dendrogram)로 작성하여 지점을 유형화하였다. 군집내의 자료는 서로 동질적인 군집을 만들 수 있고, 군집간의 자료는 서로 이질성이 최대화되도록 하는 집단 분류방법이다(장원경, 2005).

III. 결과 및 고찰

3.1. 지하수 수질 특성

3.1.1. 지하수 이용 현황

2021년 12월 기준 인천지역은 21,863개의 지하수가 등록되어 사용 중이며, 행정구역상 강화군이 12,557개로 가장 많고, 동구가 32개로 가장 적다. 지역별 지하수 현황은 (Fig. 2)와 같다.

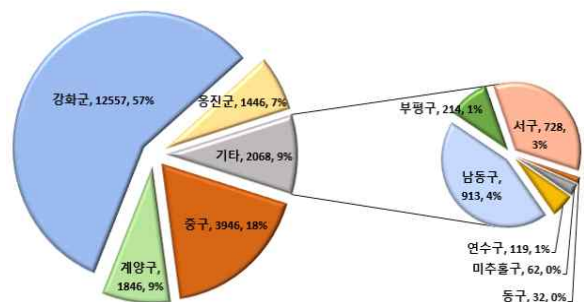


Fig. 2. Status of groundwater use by administrative district

용도별 지하수 현황은 음용수가 5,446개로 24.9%의 비율을 보였고, 비음용수는 75.1%이며, 이중 농·어업용수가 11,667개로 가장 많고, 공업용수가 78개로 가장 적었다. 용도별 지하수 현황은 (Table 2)에 나타냈다. 지하수 수질은 해당 지점 지하수의 이용용도 및 음용여부와 관계없이 가장 엄격한 먹는물수질기준을 적용하여 분석하였다.

Table 2. Status of groundwater use by usage

	음용 생활용수	비음용 생활용수	농·어업 용수	공업 용수	전체
지점 (개)	5,446	4,672	11,667	78	21,863
비율 (%)	24.9	21.4	53.4	0.3	100.0

3.1.2. 먹는물 전항목 분석결과

인천관내 지하수 80개 지점을 대상으로 2021년 2월부터 11월까지 230건의 먹는물수질기준 전항목(47항목) 분석 결과, 일부지점에서 일반세균, 탁도, 질산성질소가 먹는물수질기준 보다 높게 나타났으며 초과율은 (Fig. 3)과 같다. 초과율 순서는 일반세균, 탁도, 질산성질소 순으로 높았으며, 그 외 항목은 모두 먹는물 수질기준 이내로 미량 검출되거나 불검출 되었다.

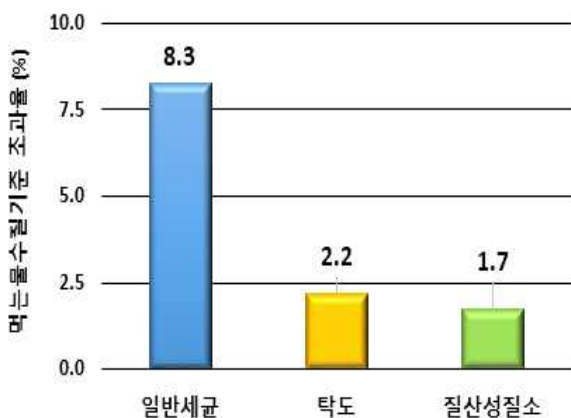


Fig. 3. The rate of drinking water quality standard exceeded in 2021.

일반세균의 먹는물수질기준(100 CFU/ml) 초과율은 8.3 %(19건), 농도범위는 불검출 ~ 550 CFU/ml(평균 35.8 CFU/ml)로, 이중 16건은 비음용 생활용수였다. 일반세균은 소독되지 않은 자연환경에서 상시존재하며, 그 자체로는 인체 내에서 직접 병을 일으키지 않지만 지나치게 많으면 배탈과 설사를 유발할 가능성이 있다. 일반세균의 경우 대부분 관정의 위생관리 부실 및 여러 사람이 이용하면서 수도꼭지 주변에서 발생하는 경우가 많기 때문에 주기적인 위생관리로 해결할 수 있으며, 미생물 항목 중 병원성오염의 우려가 있는 총대장균군과 분원성대장균군은 검출되지 않아 별도의 소독처리 시설은 필요하지 않았다.

탁도의 먹는물수질기준(1 NTU) 초과율은 2.2 %(5건), 농도범위는 0.07 ~ 8.32 NTU(평균 0.63 NTU)로 탁도는 인체에 직접적인 해는 없으나 심미적 불쾌감과 물 맛이 좋지 않을 수 있다. 동절기 사용하지 않던 펌프를 봄철에 가동하면서 일시적으로 높아지는 경향을 보이고 있어 충분히 배수 후 이용하는 것이 필요하다.

질산성질소의 먹는물수질기준(10 mg/L) 초과율은 1.7 %(4건), 농도범위는 불검출 ~ 33.3 mg/L(평균 3.8 mg/L)로, 고농도의 질산성질소를 포함한 지하수를 음용시 유아에게 청색증(Blue baby)을 유발하는 것으로 알려져 있다. 질산성질소는 질소화합물이 부패, 발효, 산화 등의 과정을 거쳐 생성되는 물질로 생활하수, 공장폐수, 무기비료, 자동차 배기가스 등 다양한 오염원에 의해 발생된다. 질산성질소가 먹는물수질기준을 초과한 4개 지점은 모두 비음용 생활용수로 음용수로 사용하는 사용하지 않으며, 이중 3개 지점은 생활용수 기준(20 mg/L) 보다 낮았다. 생활용수 기준보다 높은 1개 지점은 이온교환수지 등의 수질저감장치 설치 후 사용하는 것이 바람직하다.

Table 4. Concentration of the ionic components.
(Unit : mg/L)

	수질기준	평균	범위
Na ⁺	-	24.1	1.2 ~ 81.3
K ⁺	-	2.2	불검출 ~ 23.5
Mg ²⁺	-	8.1	불검출 ~ 29.9
Ca ²⁺	-	41.5	0.1 ~ 148.2
F ⁻	1.5	0.15	불검출 ~ 1.34
Cl ⁻	250	48.1	1.1 ~ 214.9
SO ₄ ²⁻	200	23.6	0.1 ~ 161.8

(Table 4)는 주요 이온성분의 농도를 나타냈다. 국내의 여러 선행연구에 의하면 지하수의 주된 양이온 물질은 주로 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ 의 함량 순위를 나타내는데(이중운 등, 1997), 인천지역 지하수 역시 평균농도가 $\text{Ca}^{2+}(41.5 \text{ mg/L}) > \text{Na}^+(24.1 \text{ mg/L}) > \text{Mg}^{2+}(8.1 \text{ mg/L}) > \text{K}^+(2.2 \text{ mg/L})$ 의 분포 순서를 나타냈다. 음이온 중에서는 불소 불검출 ~ 1.34 mg/L, 염소이온 1.1 mg/L ~ 214.9 mg/L, 황산이온 0.1 ~ 161.8 mg/L의 범위로 먹는물수질 기준 보다 낮게 조사되었다.

주요 중금속성분에 대한 평균농도는 구리 0.018 mg/L, 아연 0.082 mg/L, 망간 0.015 mg/L, 크롬 0.001 mg/L, 철 0.037 mg/L이며, 중금속류 중 검출빈도가 높은 항목은 아연 > 구리 > 철 순으로, 먹는물수질 기준을 초과한 항목은 없었다. (Table 5)는 평균농도가 표시한계 미만인 납, 비소, 셀레늄, 카드뮴, 알루미늄, 수은 등을 제외한 중금속성분의 평균농도를 나타냈다. 중금속류는 대부분 매우 낮은 농도로 존재하여 조사 지점의 중금속에 대한 지하수 수질은 매우 양호한 상태이다.

Table 5. Concentration of the heavy metals.
(Unit : mg/L)

	수질기준	평균	범위
구리	1	0.018	불검출 ~ 0.572
아연	3	0.082	불검출 ~ 0.620
망간	0.3	0.015	불검출 ~ 0.173
크롬	0.05	0.001	불검출 ~ 0.026
철	0.3	0.037	불검출 ~ 0.298

3.1.3. 자연방사성물질 분포 특성

우라늄, 라돈과 같은 자연방사성물질은 암석 중에 미량으로 존재하는 방사성 핵종 광물

들이 풍화나 변질작용에 의해 분해되어 지하수에 용존하게 된다. 특히 우라늄은 자연붕괴 과정에서 방사선이 방출되면서 라돈과 같은 딸원소(daughter products)들이 생성되므로 지질학적으로는 모암 속에 존재하는 우라늄 광물의 함량과 이들의 용해도가 지하수 중의 방사성물질 농도에 가장 큰 영향을 미친다(Langmuir, 1997). 인천지역 80개 지점의 지질별 자연방사성물질 조사 결과, 화강암 지질층은 타 지질층에 비해 우라늄 농도는 평균 2.3배, 라돈 농도는 평균 1.6배 높게 나타났으며, 그 결과를 (Table 6)에 요약하였다.

Table 6. Concentration of the naturally occurring radioactive materials.

	라돈		우라늄	
	범위	평균	범위	평균
화강암지질 (38지점)	0 ~ 284.2	52.0	0 ~ 0.0299	0.0029
그 외지질 (42지점)	0 ~ 146.6	31.6	0 ~ 0.0065	0.0013
수질기준	148 (Bq/L) (감시항목기준)		0.03 (mg/L) (염지하수 등 적용)	

우라늄의 먹는물수질기준은 0.03 mg/L이며, 화강암 지질층 38개 지점의 우라늄 농도는 불검출 ~ 0.0299 mg/L (평균 0.0029 mg/L), 그 외 지질층 42개 지점의 농도는 불검출 ~ 0.0065 mg/L (평균 0.0013 mg/L)로 기준을 초과한 지점은 없었다. 화강암 지질층의 일부지점에서는 수질기준에 근접한 지점도 있었지만, 대부분 지점은 매우 낮은 농도를 나타냈다. 라돈은 무색, 무미, 무취의 불활성 기체로 비교적 물에 잘 용해되는 특성 때문에 지하수에 존재할 가능성이 높다. 반감기가 3.82일로 짧아 자연 상태에서 쉽게 없어지지만 라돈이 지속적으로 생성될 경우 높은 농도가 나오기도 한다. 현재 먹는물 감시항목으로 지정되어 있으며, 먹는물 감시기준은 148 Bq/L이다. 조

사대상지점의 라돈 농도는 화강암 지질층에서 불검출 ~ 284.2 Bq/L(평균 52.0 Bq/L), 그 외 지질층에서는 불검출 ~ 146.6 Bq/L(평균 31.6 Bq/L)로 나타나 화강암지역의 일부지점에서는 먹는물 감시항목 기준보다 높게 조사되었다.

3.2. 지역별 지질특성

지각을 구성하는 암석은 오랜 시간에 걸쳐 마그마활동, 침식, 운반, 퇴적, 고화, 변성과 같은 과정을 거쳐 생성되고 파괴되는데, 현재의 한반도는 고생대 말 남반구에 위치한 곤드와나 대륙에서 떨어져 나온 중한지괴와 남중국지괴가 북반구로 이동하면서 중생대에 서로 충돌하여 형성되었으며, 인천지역은 경기지괴에 해당된다.

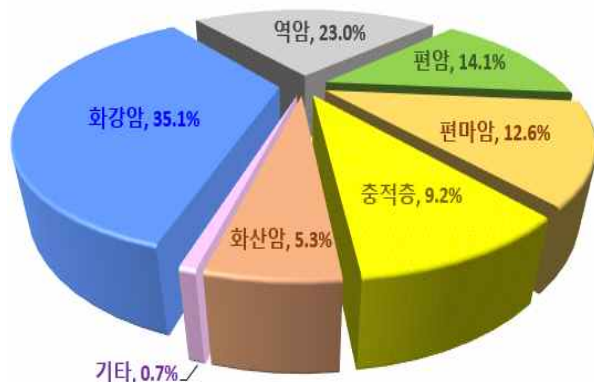


Fig. 4. Distribution of different geological settings in Incheon.

한국지질자원연구원(KIGAM)의 1 : 250,000 지질도를 이용하여 인천지역의 지질별 면적 분포비율을 분류한 결과는 (Fig. 4)와 같다. 인천지역은 화강암(35.1 %), 역암(23.0 %), 편암(14.1 %), 편마암(12.6 %), 중적층(9.2 %), 화산암(5.3 %), 기타(0.7 %)로 구성되며, 화강암이 주 지질층으로 나타났다. 인천지역은 해안지역 개발로 인한 매립지 비율이 높은 특징을 가지고 있는데, 지질도에서는 매립지로 분류되나 실제 지하수 관정은 지하 50 ~ 100m 이

상 깊게 존재하므로 흙, 모래, 자갈로 구성된 역암에 해당된다고 볼 수 있다.

인천지역의 시대별 지질분포는 선캄브리아기 26.7 %, 쥐라기 35.6 %, 백악기 5.5 %, 신생대 제4기 32.2 %의 비율을 보이고 있으며, 고생대에 해당되는 화강암 및 화산암은 주로 지대가 높은 산지 지형을 형성하고 있고, 선캄브리아기에 해당되는 편암과 편마암은 구릉성 지형을 이루고 있다. 지역적으로 서구는 산성암, 부평구는 충적층, 남동구는 편암과 편마암이 우세한 편이며, 인천 전 지역은 화강암이 넓게 분포되어 있다.

3.3. 지하수 수질등급 평가

3.3.1. 지하수 오염등급 분류

본 연구에서 지하수 오염등급 분류 시, 평균값, 표준편차, 최대값 등이 대부분 불검출이거나 맛, 냄새, 미생물 항목과 같이 수치화 할 수 없는 항목은 오염등급에서 제외하였다.

수질기준 초과횟수 조사방법, 평균농도 분석방법, 경향성 분석방법의 세가지 오염지시인자를 분석하여 합산한 결과를 (Table 7)과 같이 오염지시율로 나타냈다. 전체 오염지시율은 질산성질소(36.3 %) > 탁도(13.7 %) > 염소이온(10.0 %) 순으로 오염지시율이 높았으며, 그 외 항목은 5 % 이하였다.

각 오염지시인자별 주요 오염지시율을 살펴보면, 수질기준 초과횟수 조사는 질산성질소(15.0 %) > 탁도(10.0 %) > 라돈(3.8 %) > TCE(2.5 %)순, 평균농도 분석은 질산성질소(12.5 %) > 우라늄(3.8 %) > TCE(2.5 %) > 탁도 및 라돈(1.3 %)순, 경향성 분석은 염소이온(10.0 %) > 질산성질소(8.8 %) > 비소(5.0 %) > Fe 및 정도(3.8 %) > 탁도와 구리(2.5 %) 순으로 나타났다. 질산성질소는 세 가지 오염지시인자가 모두 높게 조사되어 현재 오염이 진행되고 있으며, 향후 지하수 오염 가능성이 높아 집중 관리가 필요하다.

Table 7. The rate of contamination indication for three statistical analysis

(Unit : %)

Statistical analysis	Cl ⁻	라돈	Fe	탁도	우라늄	Cu	경도	NO ₃ ⁻	비소	TCE
Number of excess water quality standards	0.0	3.8	0.0	10.0	0.0	0.0	0.0	15.0	0.0	2.5
Analysis of average concentration	0.0	1.2	0.0	1.2	3.8	0.0	0.0	12.5	0.0	2.5
Trend analysis	10.0	0.0	3.8	2.5	0.0	2.5	3.8	8.8	5.0	0.0
Total	10.0	5.0	3.8	13.7	3.8	2.5	3.8	36.3	5.0	5.0

(Fig. 5)에는 세 가지 오염지시인자를 이용하여 인천지역 지하수 80개 지점에 대한 항목별 지하수 오염등급 분포도를 나타냈다. 여기서 전체 오염지시율이 2 % 미만은 제외하였다. 지하수 안전등급이 낮아 오염도가 높은 10개 항목의 오염등급을 분석한 결과, 오염심각등급(Seriously Contaminated)은 없었으며, 오염등급

(Contaminated)은 질산성질소, 탁도, 라돈, TCE의 4항목에서 1 ~ 11.0 %의 범위를 보였고, 오염가능등급(Possibly Contaminated)은 TCE를 제외한 9개 항목에서 2 ~ 13 %의 범위, 안전등급(Clean)은 10개 항목에서 76 ~ 98 %범위로 대부분 안전등급에 해당되어 지하수 수질은 양호한 것으로 조사되었다.

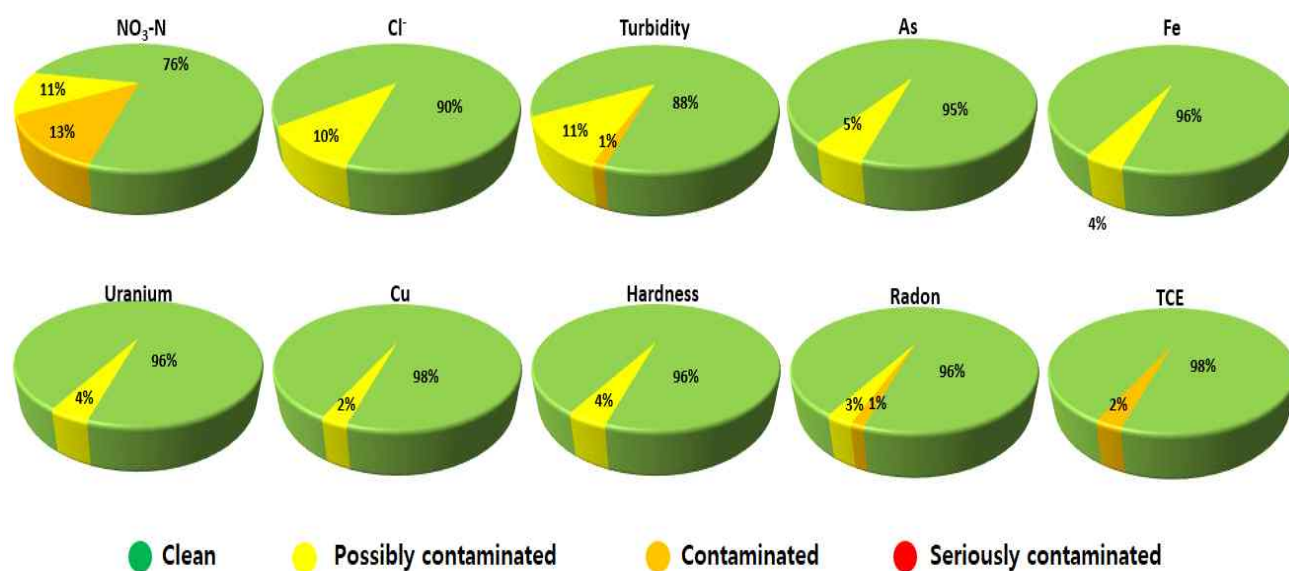


Fig. 5. Classification of contamination grades of groundwater quality

3.3.2. 지하수 수질오염지도

(Fig. 6)에는 지하수 오염등급 분포도에서 오염지시율이 높은 질산성질소, 염소이온, 탁도,

비소에 대해서 4단계 오염등급으로 분류한 결과를 ArcGIS를 이용하여 인천지역 지질도와 중첩시켜 알기 쉽게 표현하였다.

봄철 일시적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 동절기 사용이 중지되었던 펌프를 봄에 가동하면서 충분히 배수하지 않고 사용하여 관내 퇴적물에 영향을 받은 것으로 사료된다.

염소이온의 오염가능등급은 10.0 %인 8개 지점, 안전등급은 90.0 %인 72개 지점이며, 오염등급 및 오염심각등급은 없었다. 염소이온은 현재 먹는물수질기준보다 낮아 안전하지만 경향성 분석결과 오염지시율이 가장 높게 나타나 향후 증가할 가능성이 높으므로 꾸준한 모니터링 및 관리대책이 수립되어야 할 것이다.

비소는 오염가능등급이 5.0 %인 4개 지점, 안전등급은 93.8 %인 76개 지점으로 조사되었다. 다만 오염가능등급으로 분류된 4개 지점은

모두 경향성 분석법으로는 증가 경향을 보이고 있으나 농도 자체는 먹는물 표시한계 (0.005 mg/L)보다 낮은 수준에서 증가 경향성을 보이고 있어 실제 오염 우려는 매우 낮은 편이다.

3.4. 다변량 통계분석에 의한 지하수 수질 특성 분석

조사지역의 지하수 수질을 종합적으로 파악하기 위해 먹는물전항목(47항목)과 자연방사성물질(우라늄, 라돈), 주요 양이온성분(Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})의 농도를 측정하였고, 다변량 통계분석을 이용하여 분석항목 간 상호작용 및 수질에 영향을 미치는 요인을 추출하여 지하수 수질특성을 심층적으로 분석하였다.

Table 8. Pearson correlation coefficients of groundwater quality parameter.

parameter	Cl^-	SO_4^{2-}	Al	Rn	Fe	Mn	U	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	F^-
Cl^-	1											
SO_4^{2-}	0.497**	1										
Al	-0.013	-0.024	1									
Rn	0.114	-0.004	0.229**	1								
Fe	0.132*	0.072	0.563**	0.207**	1							
Mn	0.183**	0.104	0.651**	0.313**	0.498**	1						
U	0.121**	0.039	0.193**	0.445**	0.108	0.183**	1					
Na^+	0.593**	0.618**	0.155	0.137	0.265**	0.225*	0.209*	1				
K^+	0.116	0.298**	0.078	-0.120	0.197*	0.053	0.067	0.410**	1			
Mg^{2+}	0.594**	0.616**	0.007	0.017	0.143	0.272**	-0.018	0.504**	0.289**	1		
Ca^{2+}	0.829**	0.610**	0.032	0.058	0.123	0.252**	0.319**	0.535**	0.192*	0.671**	1	
F^-	0.027	-0.015	-0.019	0.447**	-0.016	-0.002	0.754**	0.192*	0.213*	-0.096	0.137	1

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

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

3.4.1. 주요 수질인자 간 상관성 분석

(Table 8)은 지하수 중에서 주요 성분들의 상호간 상관성을 보여주고 있다. 지하수의 주요 양이온인 Ca^{2+} , Mg^{2+} 은 유의수준 0.01이하에서 높은 양의 상관성(0.671)을 보여주는데, 이는 지하수의 수질이 Ca-Mg 탄산염광물에 의해 주도적으로 결정된다는 것을 보여준다. 양이온 중에서 K^+ 이온은 지하수 중에서 가장 낮은 함량을 보이는데, K^+ 이온은 점토 등에 쉽게 흡착되기 때문에 다른 양이온보다 낮은 농도로 존재하는 것으로 보인다. 황산이온 및 염소이온은 Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 와 같은 양이온들과 유의수준 0.01이하에서 매우 높은 양의 상관성(0.593-0.829)을 보였다. 황산이온은 주로 지질에서 기원하는 물질이고, 염소이온은 생활하수, 가정하수 등에서 발생되어 주로 도시화된 지역의 특성을 보여줄 뿐 아니라 바다에 인접하여 있는 지리적 특성에 따라 해수 유입에 의한 영향을 나타내기도 한다.

자연방사성물질 상관성 분석결과, 우라늄과 라돈은 유의수준 0.01이하에서 양의 상관성(0.445)을 보였으며, 우라늄-불소(0.754), 우라늄-알루미늄(0.193), 우라늄-망간(0.183), 라돈-불소(0.447), 라돈-망간(0.313), 라돈-철(0.207)을 보였으며, 그 외 물질과는 별다른 상관성

을 보이지 않았다.

불소는 이온성 물질들과는 별다른 유의성을 나타내지 않았는데, 방사성물질인 우라늄 및 라돈과는 유의수준 0.01이하에서 양의 상관성을 보였다. 특히 우라늄-불소는(0.754) 매우 높은 상관성을 나타내고 있으며, 라돈과도(0.447) 높은 상관성을 보였다.

3.4.2. 주성분 분석을 활용한 수질특성 분석

인천지역 지하수 수질에 영향을 미치는 요인을 규명하기 위해 요인분석(Factor Analysis)을 실시하였으며, 자료가 요인분석에 적합한지 평가하기 위해서 KMO(Kaiser-Meyer-Olkin)와 Bartlett의 구형성 검정(Bartlett's test of sphericity)을 실시하였다.

KMO와 Bartlett의 구형성 검정은 분석하는 자료가 요인분석에 적합한지를 판단하는 기준이 된다. KMO값은 표준 적합도를 나타내며, 그 값이 0.5 이상이면 자료가 요인분석에 적합하다고 보는데, 분석 결과 0.608로 변수들의 선정이 적절한 것으로 판단된다. Bartlett의 구형성 검정은 변수간의 상관행렬이 단위행렬인지의 여부를 판단하는 검정으로 유의확률이 0.000이므로 요인분석의 사용이 적합하였으며, 그 결과는 (Table 9)와 같다.

Table 9. The result of KMO and Bartlett's Test

Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy		.608
Bartlett's Test of sphericity	Approx. Chi-square	753,388
	degree of freedom	66
	significance	.000

요인분석의 요인추출 방식은 주성분 분석(principal component analysis : PCA)을 사용하였다. 주성분 분석은 원래 변수들이 가지고

있던 정보 손실을 최소화하면서 상관관계가 높은 변수들을 묶어 대표할 수 있는 새로운 요인을 찾아내는 것이다. 기여도가 높은 인자

들을 효율적으로 추출하기 위해서 고유값(eigenvalue)이 1이상인 값을 기준으로 공통요인을 추출하였으며, 초기의 요인부하량(factor loading) 행렬로는 요인의 의미를 해석하기 어

려워 각 요인들의 변수를 명확하게 반영하기 위해 요인부하량이 갖는 분산제곱을 최대화시켜 요인을 회전시키는 베리맥스(varimax)법을 이용하였다.

Table 10. The results of PCA for groundwater quality

Parameter	Principal Component			
	PC1	PC2	PC3	PC4
Cl ⁻	0.858	0.056	0.171	-0.119
SO ₄ ²⁻	0.763	-0.008	-0.070	0.261
Al	-0.043	0.909	0.088	0.035
라돈	0.054	0.315	0.505	-0.319
Fe	0.082	0.788	-0.032	0.231
Mn	0.192	0.884	0.041	-0.096
우라늄	0.123	0.165	0.860	-0.019
Na ⁺	0.693	0.177	0.178	0.394
K ⁺	0.188	0.068	0.085	0.907
Mg ²⁺	0.831	0.100	-0.171	0.112
Ca ²⁺	0.903	0.044	0.180	-0.039
F ⁻	-0.006	-0.109	0.903	0.195
Eigenvalue	3.40	2.58	1.96	1.28
Variance(%)	28.4	21.5	16.3	10.6
Cumulative variance(%)	28.4	49.9	65.2	76.8

주성분 분석 결과 4개의 요인으로 요약되었으며, (Table 10)에 그 결과를 나타냈다. 4개 주성분이 전체데이터 변이 중 76.8 % 설명력을 보인 가운데, 제1성분(Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻) 28.4 %, 제2성분(Al, Fe, Mn) 21.5 %, 제3성분(라돈, 우라늄, F⁻) 16.3 %, 제4성분(K⁺) 10.6 %가 통계적으로 유의한 발생원으로 추정

되었다.

지하수에 주도적인 영향을 미치는 제1요인 성분(이온성분)은 Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻으로 상관성이 큰 Ca²⁺, Mg²⁺이온은 탄산염 광물 용해 등 물-암석 반응의 정도를 지시하는 인자이며, 음이온인 Cl⁻, SO₄²⁻와 밀접한 연관성을 보여주고 있다.

제2요인 성분(금속류)은 Al, Fe, Mn과 같은 금속류 성분으로 토양 및 암석에서 지하수에 용출되는 특성을 보여주고 있다.

제3요인 성분은 불소와 자연방사성 물질인 우라늄과 라돈과의 관련성으로 화강암 지대의 지하수에서 불소, 우라늄, 라돈이 높게 나타나는 것으로 해석된다.

제4요인 성분인 K^+ 는 다른 양이온보다 지하수에서 낮은 농도를 보이고 있는데, 이는 K^+ 이온이 토양에 쉽게 흡착되는 특성 때문에 독립적인 양상을 나타내는 것으로 판단된다.

3.4.3. 군집분석을 활용한 수질유사성 분석

(Fig. 7)은 지하수의 주요 이온성분, 중금속 및 자연방사성물질 등 총 20항목의 수질인자

를 그룹별로 분류한 군집분석 덴드로그램을 보여주고 있다. 인천지역 지하수는 이온성분이 지하수 전반에 영향을 미치고 있으며, 지역적으로는 도시 및 공단지역에서 금속류 그룹에 영향을 받는 것으로 조사되었다. 또한 지질별로는 화강암 지질층에서 불소와 우라늄 및 라돈이 높은 상관성을 보여주고 있다. 이는 화강암 지질층에서 자연방사성물질이 타 지질층에 비해 자연적으로 많이 발생하는 특징이 있고, 불소의 기원이 형석(CaF_2)에 기인하는데(환경부, 2002), 화강암은 석영 및 형석을 많이 포함하고 있기 때문에 불소가 지하수에 용출되어 우라늄 및 라돈과 높은 상관성을 보여주는 지질학적 특성으로 판단된다.

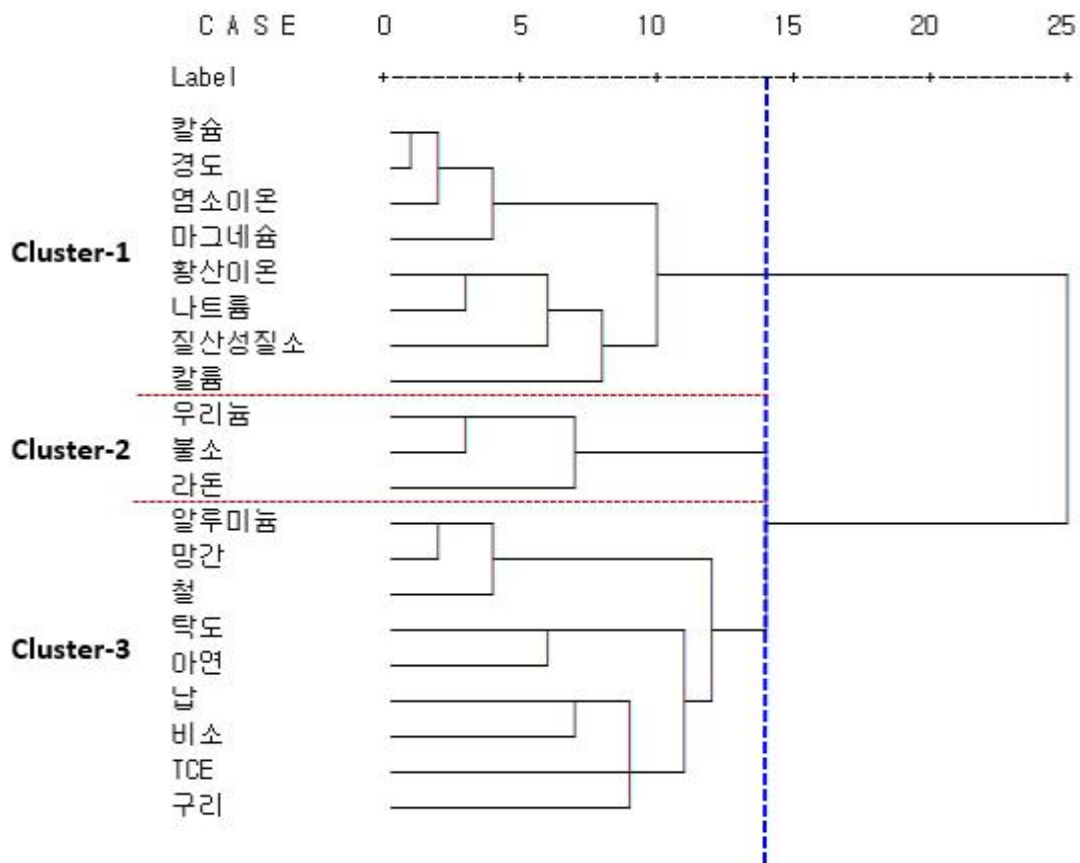


Fig. 7. Dendrogram using Ward's method of hierarchical analysis for groundwater quality

IV. 결 론

본 연구는 2017년부터 2021년까지 5년간 인천 지역 음용 및 비음용 지하수 80개 지점을 대상으로 총 1,290건에 대해 지질특성 및 시간경과에 따른 먹는물수질기준 전항목, 이온성분, 자연방사성물질을 통계학적으로 분석하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 조사대상 지하수는 일반세균, 탁도, 질산성 질소에 영향을 받는 것으로 조사되었으며, 먹는물수질기준 적용시 초과율은 일반세균(8.3 %), 탁도(2.2 %), 질산성질소(1.7 %)이고, 그 외 항목은 모두 먹는물수질기준 이내로 미량 검출되거나 불검출 되었다.
2. 세 가지 오염지시인자를 이용한 오염등급 분포 결과, 질산성질소(안전등급 76 %, 오염가능등급 13 %, 오염등급 11 %), 탁도(안전등급 88 %, 오염가능등급 11 %, 오염등급 1 %), 염소이온(안전등급 90 %, 오염가능등급 10 %) 순으로 조사되었으며, 그 외 항목들은 안전등급이 96 % 이상을 보여 수질은 양호한 것으로 조사되었다.
3. 오염지수가 비교적 높은 질산성질소, 탁도, 염소이온 등에 대해 4단계 오염등급으로 분류한 후 ArcGIS를 이용하여 인천지역 지질도에 중첩시켜 지도상에 알기 쉽게 표현한 결과, 질산성질소 농도 분포는 공단지역 및 농업지역이 다른 지역보다 오염도가 높았고, 탁도는 지역적 특징보다는 봄철 증가하는 계절적 경향을 보였으며, 염소이온은 현재 먹는물수질기준보다 낮은 농도를 나타내고 있지만, 시간에 따른 경향성 분석결과 양의 상관관계가 높아 향후 증가할 가능성이 있으므로 주기적인 모니터링이 필요할 것으로 판단된다.
4. 수질성분 상관성 분석결과, 지하수 수질은

모든 지질층에서 지질의 주요 구성성분인 Ca-Mg 탄산염 광물에 지배적인 영향을 받는 것으로 조사되었다.

5. 지하수 수질에 영향을 미치는 주성분 분석 결과, 4개의 주성분이 전체 76.8 %의 설명력을 보였으며, 제1성분 28.4 %(Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-}), 제2성분 21.5 %(Al , Fe , Mn), 제3성분 16.3 % (라돈, 우라늄, F^-) 및 제4성분 10.6 %(K^+) 등이 통계적으로 유의한 요인으로 추정되었다. 제1요인 및 제2요인은 물과 암석과의 반응에 따른 이온성분과 중금속 성분의 영향과 관련이 높으며, 제3요인은 지질특성에 따른 영향, 제4요인은 독립적인 양상을 보였다.
6. 수질항목 간 유사성에 대한 군집분석 결과, 수질인자는 3개 유사그룹으로 분류되는데, 제1그룹은 물-암석반응에 의해 지하수 전반에 영향을 미치는 이온 성분, 제2그룹은 지질학적 특성에 의한 특정 지질층(화강암)에서 높은 연관성을 보이는 불소와 우라늄 및 라돈 성분, 제3그룹은 지역적 특성에 의한 도시 및 공단지역 주변에서 높게 나타나는 금속류 성분들로 조사되었다.

본 연구를 통해 다년간의 분석 자료를 지질 특성 및 시간경과에 따른 통계 분석으로 종합적인 해석이 가능하였고, 수질 현황을 수치적으로 정량화하였으며, 이를 쉽게 알아 볼 수 있도록 지하수 오염지도로 시각화하였다. 또한 오염이 반복되는 지점은 환경개선방안 안내 및 용도전환을 통해 효율적인 지하수 관리방안을 제시하였다. 지하수는 한번 오염이 되면 수질을 정화하는데 오랜 시간이 소요되므로, 오염원 차단이 가장 중요하며 향후 오염지수가 높은 질산성질소 및 염소이온에 대해 지속적인 수질 모니터링을 수행해야 할 것으로 사료된다.

V. 참고문헌

1. 국가지하수정보센터 <http://www.gims.go.kr>
2. 국토교통부 (2011). 수자원장기종합계획, 3-18.
3. 김규범, 최두형, 윤필선, 김기영 (2010). 국내 오염우려지역의 지하수 수질 추세 특성, 한국지반환경공학회, 11(3), 5-16.
4. 김재광, 권경안, 변주형, 박진호, 박현구, 임윤정 (2007). 경기북부지역 지하수 수질측정망에 대한 수질특성 연구, 경기도보건환경연구원보, 20, 207-214.
5. 김지영, 배용수, 박진호, 손영금, 오조교 (2018). QGIS를 이용한 토양오염지도 작성에 관한 연구, 경기도보건환경연구원보, 31, 323-332.
6. 노병돈 (1995). 결정암에서의 지하수 유동 특성 파악, 대한광업진흥공사, vol. 58, 206-222.
7. 박준홍, 방사라, 유근제 (2011). 지하수 수질 측정망 자료를 활용한 시간적 오염도 추이 변화 분석, Journal of Korean Society on Water Quality, 27(1), 120-128.
8. 박영옥, 신지은, 이부일, 황현식, 이석훈 (2012). SPSS를 활용한 통계자료분석.
9. 서인숙, 김태현, 권상조, 송진호, 이현경, 정선희, 김채림, 윤홍철, 박경수, 박현구 (2020). 경기도 지하수수질측정망의 수질특성에 관한 연구, 한국환경분석학회, 23(3), 141-154.
10. 윤희성, 배광옥, 이강근 (2012). 통계적 분석 방법을 이용한 국가지하수수질측정망의 오염등급 정량화 및 평가, 한국지하수토양환경학회 17(1), 22-32.
11. 이사로, 김윤중 (1996). DRASTIC SYSTEM을 이용한 지하수 오염 가능성 및 위험 분석 연구, The Journal of GIS Association of Korea, 4(1), 1-11.
12. 이진용, 이명재, 안경환, 원종호, 문상호, 조민조 (2006). 국가 지하수관측소 지하수위 전기전도도 및 수온자료에 대한 모수적 비모수적 변동 경향성 분석, 한국지하수토양환경학회 11(2), 56-57.
13. 이훈영 (2006). 이훈영의 SPSS를 이용한 데이터 분석, 337-338.
14. 장원경 (2005). SPSS 12.0을 이용한 자료분석의 이해와 응용, 318-322.
15. 장서은, 이대행, 김종민, 김하람, 정숙경, 배석진, 조영관 (2018). 통계적 기법을 이용한 광주지역 민방위비상급수용 지하수 수질 오염도 분석 및 시각화 연구, 한국분석과학회지, 31(3), 122-133.
16. 지화성, 조갑제, 정경원, 김주인, 이경심 (2013). 다변량 통계분석을 이용한 부산지역 지하수 수질측정망의 수질 특성, 부산보건환경연구원 보고서, 23(1), 160-175.
17. 최현미, 이진용 (2009). 제주도 지하수 관측망 수위에 대한 모수 및 비모수 변동경향 분석, 한국지하수토양환경학회14(5), 41-50.
18. 토양지하수정보시스템 <http://sgis.nier.go.kr>
19. 환경부(2002), 지하수관리기본계획
20. 환경부 (2020), 지하수수질측정망 설치 및 수질오염실태 측정계획
21. 환경부 (2011), 지하수 오염원 정량적 관리 및 종속 생태환경 모델링 기술 개발, 29-39.
22. 환경부 (2020), 지하수조사연보, 3-8.
23. 허만형 (2001). 통계분석론, 555-556.
24. Babiker I.S., Mohamed, A. A., Mohamed, Hiyama, T., and Kato, K. (2005). A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan, Sci. Total Environ., 345(1-3), 127-140.
25. Backman, B., Bodis, D., Lahermo, P., Rapant, S., and Tarvainen, T. (1998). Application of a groundwater contamination index in Finland and Slovakia, Environ. Geol., 36

- (1-2), 55-64.
26. Brouyere, S., Carabin, G., and Dassargues, A. (2004). Climate change impactss on groundwater resources : modelled deficits in a chalky aquifer, Geer basin, Belgium. *Hydrogeology Journal*, 12, 123-134.
 27. Dragon, K. (2007). Application of a ground-water contamination index to assessment of confined aquifer vulnerability. *Ground-water Vulnerability Assessment and Mapping*, Andrzej J. Witkowski, Andrzej Kowalczyk, Jaroslav Vrba, Taylor and Francis, London, 87-93.
 28. Edet, A. E. and Offiong, O. E. (2002). Evaluation of water quality pollution indices for heavy metal contamination monitoring. A study case from Akpabuyo-Odukpani area, Lower Cross River Basin, *GeoJournal*, 57, 295-304.
 29. Langmuir, D. (1997). *Aqueous Environmen-tal Geochemistry*, Prentice Hall, 600p.
 30. Lee, J. Y., Moon, S. H., and Lee, K. K. (2007). Determining the condition of groundwater in evaluating the need for corrective measures: a case for the national groundwater-monitoring network in South Korea, *Hydrogeol. J.*, 16(1), 123-137.
 31. Mendoza, J. A. and Barmen, G. (2006). Assessment of groundwater vulnerability in the Rio Artiguas basin, Nicaragua, *Environ. Geol.*, 50(4), 569-580.
 32. Park, S. H., Cho, S. S. and Kim, S. S. (2005). SPSS(ver. 12.0). Datasolution, Seoul. p. 519.
 33. Rapant, S., Raposova, M., Bodis, D., Marsina, K., and Slaninka, I. (1999). Environmental-geochemical mapping program in the Slovak Republic, *J. Geochem. Explor.*, 66(1-2), 151-158.
 34. Sinan M. and Razack, M. (2009). An extension to the DRASTIC model to assess groundwater vulnerability to pollution: application to the Haouz aquifer of Marrakech (Morocco), *Environ. Geol.*, 57(2), 349-363.
 35. Wen, X., Wu, J., and Si, J. (2009). A GIS-based DRASTIC model for assessing shallow groundwater vulnerability in the Zhangye Basin, northwestern China, *Environ. Geol.*, 57(6), 1435-1442.
 36. Williams, N. H. and Monica, L. (2007). Ireland at risk Possible implications for groundwater resources of climate change, *Geological Survey of Ireland*, 1-18.