

인천지역 지하수의 위해성 평가 및 기능성미네랄 분포 연구

양해원*, 김보경, 김진하, 이다희, 이희수, 이정민, 이현주, 성지홍, 권문주
인천보건환경연구원 수질보전과

Risk Assessment and Functional Mineral Distribution of Groundwater in Incheon

Hae-Won Yang*, Bo-Kyung Kim, Jin-Ha Kim, Da-Hee Lee, Hee-Su Lee, Jung-Min Lee,
Hyun-Ju Lee, Ji-Hong Seong, Mun-Ju Kwon

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

Abstract

Groundwater is a water resource that is widely used in drinking, living, industrial, and agricultural water in our daily lives, but it is necessary to manage it safely and thoroughly in that it is difficult to restore if contaminated. The purpose of this study is to evaluate human risk by investigating the wide-area pollution characteristics of groundwater in Incheon, and to use it as basic data to supply groundwater as safe drinking water by finding out the distribution of functional minerals. The survey targets 80 drinking facilities among groundwater in Incheon, and 55 items, including general bacteria, have six functional minerals (Ge, V) and two natural radioactive substances (U, Rn). As a result, Most of the facilities were suitable for drinking. In addition, most of the 23 non-carcinogenic substances were rarely detected, the risk quotient of detected substances, F, As, Zn, TCE were 0.37, 0.12, 0.72, 0.58, respectively (Acceptable hazard quotient: 1). Most of the carcinogenic substances (8 species) were less than the allowable hazard (10^{-5}), but at some facilities, arsenic (As) and trichloroethylene (TCE) were found to be somewhat above the allowable hazard. The functional minerals Germanium(Ge) and vanadium(V) were rarely detected at all points. Overall, the groundwater in Incheon showed low level mineral, followed by $\text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{K}$, and was suitable for the recommended amount of mineral water intake in Korea. However, the need for to monitoring and studying for various pollutants has been observed.

Key words : Groundwater, Risk Assessment, Functional Mineral, Drinking waterer.

I. 서론

지하수는 우리 일상 속에서 음용, 생활, 공업, 농업 등에 다양하게 활용되는 수자원이다. 하지만 한번 오염되면 복원이 어렵다는 측면에서 안전하고 철저하게 관리해야 할 필요성이 크다. 경제성장에 따른 산업화와 도시화가 가속됨에 따라 상수도 공급망과 보급률이 증가하면서 식수원의 대부분은 수돗물 공급으로 이루어지지만 최근 적수 및 유충문제, 또는 그 밖에 수돗물에 대한 불신으로 인해 먹는 샘물의 이용 또한 증가하고 있는 추세이다.

결과적으로 먹는 샘물의 원수로 사용되는 지하수 수질의 안전하고 올바른 관리가 필수적인 상황에서 맛있고 건강한 물을 요구하는 소비심리까지 더해져 먹는물 수질기준을 만족하는 것은 물론 법적 기준이 마련되어 있지 않은 수질 감시항목의 검사확대, 인체에 유익한 미네랄 성분 함량 연구 등 다양한 노력이 이루어지고 있다. (환경부, 2020).

지하수는 빗물에 의해 보충되는 재생가능한 수자원이지만 과도한 사용으로 고갈되거나 대수층이 오염되는 경우에는 복원이 매우 어렵고 오염의 인지가 쉽지 않은 특성이 있어 사전에 관리하는 것이 중요하다.

우리나라에서는 지하수의 수질보전 등에 관한 규칙 제9조(수질측정망설치 및 수질오염 실태 측정 계획의 수립·고시)에 의거 전국 지하수 수질측정망이 운영되고 있고, 민방위법 시행규칙 제15조 및 민방위 업무지침에 따라 지하수를 수원으로 사용하는 민방위비상급수의 정기적인 수질 검사가 이루어지고 있다.

이와 같이 먹는물 관리법 및 지하수법 등에 의해 일반적인 오염물질들은 관리되고 있으나, 실제 음용시 인체에 해로운 정도나 이로온 정도를 나타내는 위해성 평가에 대한 인식은 미흡한 상태이다.

위해성 평가는 1980년 미국에서 제정한 환경

오염물질 방출에 관한 피해 방지(Superfund법)에 기초하며, EPA IRIS(Environmental Protection Agency Integrated Risk Information System)에서 다양한 화학물질의 유해성 자료를 구축함과 동시에 환경 전반에 걸쳐 인체에 악영향을 미치는 요인들에 대해 정량적인 위해성을 평가하는 방법이 제시되었다 (USEPA 1989, 1991a).

이에 비해 우리나라의 위해성평가는 표준화된 지침이나 가이드라인이 미흡한 상태에서 시급성이 인정되는 물질 위주로 위해성평가를 실시하였고, 또한 위해성평가 결과를 정책에 반영하기 위한 연계수단이 부족한 상태였으나 (Gu et al., 2001), 2021년 국립환경과학원은 장기적인 관점에서 각 법령과 위해성 평가 수행기관 사이의 일관성있는 평가결과를 도출하고, 불필요한 해석상의 논쟁을 방지하기 위해서 「화학물질 위해성평가의 구체적 방법 등에 관한 규정」(국립환경과학원 고시 제2021-13호)를 제정하는 등 법적 기반을 마련하고 있다.

이러한 위해성 평가는 궁극적으로 허용할 수 있는 오염도의 수준을 결정하거나, 유해물질의 배출수준을 설정, 오염 정화에 대한 목표 설정 등 다양한 정책결정에 활용되고 있다 (Columbia Water Center, 2014).

그럼에도 불구하고 국내의 지하수 위해성평가는 선행연구가 거의 이루어지지 않은 실정으로, 이와 관련하여 본 연구는 인천지역 지하수의 오염특성을 광역적으로 조사하여 인체에 미치는 영향을 평가·수치화하고, 기능성 미네랄 분포 조사를 통해 안전한 음용수로 활용하기 위한 기초자료로 활용하고자 하였다.

또한 수질데이터의 다변량 통계분석을 실시하여 지하수 수질에 가장 영향이 큰 오염물질을 주성분으로 구분하고 각 오염요인들 간의 상관분석을 바탕으로 과학적이고 효과적인 수질관리 방안을 제시하고자 하였다.

II. 연구대상 및 방법

2.1. 조사대상 및 분석방법

광역적인 수질평가를 위해 인천광역시를 대표할 수 있는 지하수 이용시설 80개 지점을 선정하였으며, 먹는물 수질기준에 제시된 47 항목 및 게르마늄, 바나듐을 포함한 기능성 미네랄 6종, 라돈, 우라늄 등 자연방사성 물질 2종에 대하여 정밀조사를 진행하였다.

또한 위해성 평가 및 다변량 통계분석(SPSS, ver 12.0)을 위해 인천보건환경연구원에서 조사한 2017년 2월부터 2022년 12월까지의 동일지점 분석자료를 활용하였다.

일반 이화학적 분석은 먹는물 수질공정시험기준에 준하여 실험하였고, 위해성 평가에 사용한 물질별 독성계수 등은 미국환경보호청에서제 공하는 통합 리스크 정보시스템(EPA IRIS)를 참고하였으며, 국립환경과학원 고시 제2021-13호 「화학물질 위해성평가의 구체적 방법 등에 관한 규정」에 따라 평가하였다.

2.2. 시료채취 및 전처리

모든 시료는 지하수 관정에서 충분한 양수과정을 통해 안정화 시킨 후 채수되었으며, 즉시 4℃로 냉장보관되어 실험실로 운반 후 분석하였다.

벤젠 등 휘발성유기화합물 분석용 시료는 염산(1+1) 용액으로 pH를 산성으로 조절한 후 방해물질로 작용하는 잔류염소를 제거하기 위해 티오황산나트륨으로 전처리하였으며, Thermo社의 TSQ 9000(Purge&Trap, GC/MSMS)로 분석하였다.

나트륨 등의 이온성분 분석용 시료는 부유물질 제거를 위해 Membrane filter($\phi 0.2 \mu\text{m}$)에 여과하였으며, Thermo社의 Dionex ICS-5000EG(IC)로 분석하였다.

카드뮴 등의 중금속 분석용 시료는 Membrane filter($\phi 0.45 \mu\text{m}$)로 여과한 후 시료

100 mL 당 질산 1 mL를 넣어 전처리하였으며, Agilent社의 ICP-7900(ICP/MS)로 분석하였다.

자연방사성물질인 라돈은 기포발생에 주의하며 채수하였고, PE용기에 MaxLight 카테일 용액 12mL와 시료 8 mL를 혼합한 후 안정화 과정을 거쳐 Hidex社의 FI/300SL(Liquid scintillation counter)로 분석하였다.

2.3. 수질 위해성 평가

위해성에 대한 정의는 다양하게 나타나 있지만 일반적인 환경에서의 위해성(Risk)은 유해한 인자의 특정 농도나 특정 용량에 노출되었을 경우, 개인 또는 집단에 악영향을 줄 수 있는 결과의 발생 확률 또는 가능성으로 정의한다.

유사한 내용으로 유해성(Hazard)가 있으며, 유해성에 노출량(Exposure)이 고려되었을 경우 위해성으로 나타낼 수 있다.

통상적인 위해성 평가방법은 유해성 확인, 용량·반응평가, 노출평가, 위해성 결정의 순서로 이루어지며, 가장 첫 번째 단계인 유해성 확인은 인체에 악영향을 미치는 물리적, 화학적, 생물학적 인자를 확인하는 단계이다.

두 번째 단계인 용량·반응평가는 사람이 유해물질의 특정한 용량에 노출되었을 경우에 유해한 영향이 발생할 확률을 결정하는 단계이며, 인체에 대한 역치(threshold)를 통하여 발암성과 비발암성으로 구분하여 평가한다(전용택 등, 2007).

발암성 물질의 독성은 발암잠재력(Carcinogenic Potency Factor, CPF), 단위 위해도 추정치(Unit risk estimate, UR), 또는 발암 기울기 인자(Cancer Slope Factor, CSF)로 나타내기도 한다.

이것은 하루에 체중 1 kg 당 1 mg만큼 유해 인자에 노출되었을 경우 증가하는 발암의 확률을 의미한다.

발암성 물질에 대한 용량·반응평가는 매우 낮은 농도에서도 인체에 유해한 영향을 미칠 가능성이 존재한다는 비역치(non-threshold)의 개념이 기반되며, 반대로 비발암성 물질의 경우는

역치(threshold) 용량 이상으로 노출되어야만 인체에 유해한 영향을 미친다는 개념으로서, 이는 특정 용량 이하에 노출될 경우 인체에 유해하지 않다는 가정을 전제로 두고 있다.

이러한 비발암성 물질에 대한 한계수준 혹은 무독성량(NOAEL)과 최소독성량(LOAEL)을 결정하는 것은 매우 중요하며, 일반적으로 다양한 실험과 연구를 통해 제시된 값을 사용하지만, NOAEL값을 결정할 수 없을 경우 식(1),(2)과 같이 이론적 값인 독성참고치(RfC, RfD)를 사용하기도 한다.

$$\text{흡입 참고치}(RfC) = \frac{NOAEL \text{ or } LOAEL(mg/m^3)}{\text{불확실성상수}(UF) \times \text{수정상수}(MF)} \quad \text{식(1)}$$

$$\text{섭취 참고치}(RfD) = \frac{NOAEL \text{ or } LOAEL(mg/m^3)}{\text{불확실성상수}(UF) \times \text{수정상수}(MF)} \quad \text{식(2)}$$

** UF(Uncertainty Factor) : generally 3, 10

MF(Modifying Factor) : generally 0.1 ~ 10

세 번째 단계인 노출평가는 어떠한 집단이 특정 상황에 노출되어 있는 환경정보를 결정하는 단계로 노출 강도와 빈도, 기간, 노출경로 등이 고려되는 단계이다.

정확한 인체 노출량을 결정하기 위해서는 직접적인 측정 등의 개인감시 방법이 있으나 보통의 경우는 식(3), (4)를 이용한 가상 시나리오를 통해 노출량을 추정하는 방법을 사용한다.

$$ADD = \frac{(C \times IR \times ED)}{(BW \times AT)} \quad \text{식(3)}$$

$$LADD = \frac{(C \times IR \times ED)}{(BW \times LT)} \quad \text{식(4)}$$

마지막 단계인 위해도 결정단계에서는 발암 위해도 및 비발암 위해도를 산출하게 되며 식(5),(6)을 통해 결정된다.

발암 위해도는 10^{-5} 의 위해도를 초과하면 허용 가능한 수준을 넘어서는 것으로 판단하고, 10^{-4} 을 초과할 경우 법적 규제가 필요한 수준으로 평가한다.

비발암 위해도는 1을 기준으로 초과할 경우

유해성이 발생할 가능성을 나타내며, 1 이하인 경우 발생가능성이 없음을 의미한다.

Table 1.에는 위해성 평가에 사용된 변수들을 나타내었다.

Table 1. Parameters of Risk Assessment

Parameters		Unit
ADD	Average Daily Dose (일일평균용량)	mg/kg · day
LADD	Lifetime Average Daily Dose (평생 일일평균용량)	mg/kg · day
C	Concentration (오염농도)	mg/L
IR	Inhalation Rate (섭취량)	L/day
ED	Exposure Duration (노출기간)	day
BW	Body Weight (체중)	kg
AT, LT	Average Time, Life Time (평균수명, 전체수명)	year

2.4. 다변량 통계분석

최근까지 다변량 통계분석방법은 다양한 수질의 특성을 평가하기 위해 많은 연구에 활용되었다.

환경 중의 통계분석법은 상관분석, 요인분석, 회귀분석 등 다양한 기법이 있으며, 이러한 통계분석은 복잡한 수질특성을 평가하고 해석하는데 유용한 방법이다.

통계분석을 통해 얻어진 결과를 해석함으로써 수질의 주된 오염인자를 합리적으로 산출하고 효과적인 수질 관리 방안을 마련할 수 있다.

2.4.1. 상관성분석

상관성분석(correlation analysis)은 두 개 이상의 변수 사이에 존재하는 상관관계의 밀접한 정도를 측정하는 통계기법이며, 가장 보편적인 상관성분석 기법으로는 피어슨, 스피어만 방법이 있다.

통계분석의 결과는 이러한 상관계수 (correlation coefficient, r)로 표현하며, 해당 값의 ±부호를 통해 관련성의 방향을 알 수 있다.

(+)값은 양의 상관성, (-)값은 음의 상관성을 나타내고 -1.0 ~ +1.0 사이의 값을 가진다.

결과의 해석으로 해당 값은 부호에 상관없이 절대값 1을 기준으로 이에 가까울수록 높은 상관성을 나타내며, 0에 가까울수록 낮은 상관성을 갖는 것으로 해석한다(김준하 등, 2018).

2.4.2. 주성분분석

복잡한 구조의 빅데이터를 분석하는 방법은 해석이 어렵고 일반화시키는데 한계가 있다.

이러한 고차원적인 빅데이터를 저차원으로 축소하여 직관적인 해석이 가능하도록 하는 차원축소기법을 요인분석이라고 하며, 대표적으로는 주성분분석(PCA, Principal Component Analysis)이 있다.

또한 여러 변수들 간의 공통요인을 추출하고 이러한 변수들을 전체적으로 대변할 수 있도록 축약하여 다양한 변수들이 존재하는 환경 중에서 많이 활용되는 통계기법이다.

사용되는 통계자료의 총분산을 통해 고유치(eigenvalues)를 산출하는데 이는 각 변수들이 설명할 수 있는 분산의 크기를 의미하며, 주성분의 개수를 결정하는 요인수를 나타낸다.

통계분석의 적합성을 검토하기 위해 KMO(Kaiser-Meyer-Olkin)와 바틀렛 구형성 검정(Bartlett's Test of sphericity)을 실시하는데 일반적인 경우는 보다 구체적인 검토방법인 KMO 검정을 실시한다.

KMO값은 최소값 0.5를 기준으로 1에 가까울수록 분석결과가 적합한 것을 나타내고, 0.5이하의 경우 해당 주성분분석이 적합하지 않음을 의미한다.

또한 해당 변수들을 설명할 수 있는 분산(Variance)을 최대로 하는 통계기법인 베리맥스 직각회전방식(Varimax orthogonal rotation)은 통계분석결과의 적합성을 증가시키기 위해 사용한다(이훈영, 2006).

2.4.3. 군집분석

군집분석(cluster analysis)은 다양한 특성을

지닌 요인들을 유사한 속성끼리 그룹화하여 각 집단의 성격을 해석하고, 시각화하여 전체 통계를 해석하는 기법이다(장원정, 2005).

이러한 군집통계분석은 일반적으로 요인들간 거리를 유사성으로 환산하도록하는 유클리디안 제곱거리 방법을 이용하고, 해당 결과를 덴드로그램으로 시각화하는 Ward's methods를 사용한다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 먹는물 수질기준 및 위해성 평가결과

먹는물 수질기준에 의거한 법정항목 분석결과, 전체 분석건수 317건 중 19건이 기준 부적합으로서 6.0 %수준으로 나타났다. 주요 부적합 요인은 일반세균 및 총대장균군 등의 미생물 항목이었고, 유기오염물질 및 휘발성유기화합물 등은 모두 적합으로 평가되었다.

또한 하절기에 미생물 부적합률이 증가하였는데, 지하수 관정에 설치된 UV소독시설의 정상화 및 시료채수 과정에서의 오염요인 등을 배제한다면 전반적인 수질상태는 양호한 것으로 조사되었다.

또한 자연방사성물질인 라돈은 먹는물 수질기준 148 Bq/L 대비 최소 불검출 ~ 최대 127.7 Bq/L, 우라늄의 경우 먹는물 수질기준 0.03 mg/L 대비 최소 불검출 ~ 최대 0.0267 mg/L로 조사되어 음용에 적합한 것으로 평가되었다.

위해성 평가 중 발암성 평가는 비소(As), 벤젠(Benzene)을 포함한 8종에 대하여 진행하였으며, 발암성 위해도를 결정하기 위하여 EPA와 WHO에서 권고하고 있는 10^{-5} (100,000명당 1명이 암에 걸릴 확률)을 허용위해도(acceptable risk)로 설정하여 이를 초과하였을 경우 위해성이 있을 가능성이 있는 것으로 판단하였고, 10^{-4} 을 법적인 규제가 필요하다고 판단되는 수준으로 평가하였다.

Table 1.에는 본 연구에 사용된 위해성평가 변수값을 나타내었다.

Table 2.에는 주요 항목에 대한 수질 위해성 평가 결과를 나타내었다.

평가결과, 비소 및 트리클로로에틸렌의 경우 일부 지점에서 허용위해도를 상회하는 것으로 조사되었으나, 농도는 비소는 법적규제기준 대비 42 % 수준, 트리클로로에틸렌은 10 % 수준으로 안전한 것으로 평가되었다.

비발암성 평가는 불소(F), 우라늄(U), 아연(Zn)등을 포함한 24종에 대하여 진행하였고, 비발암성 위해지수(Hazard quotient) ‘1’ 을 기준으로 이를 초과하는 경우 인체에 유해한 영향이 발생할 가능성이 있으며, 1 미만은 유해한 영향을 나타낼 가능성이 낮은 것으로 평가하였다.

평가결과, 대부분은 위해지수 0으로 ‘매우 안전’ 한 것으로 나타났으나, 불소는 위해기준의 33 %, 트리클로로에틸렌은 45 %, 아연은 30 % 수준으로 조사되었다.

결과적으로 모든 평가항목이 기준위해지수 또는 법적규제기준 이내로 조사되어 전반적인 지하수 수질은 매우 안전한 것으로 판단할 수 있으나, 일부 유해한 영향을 일으킬 수 있는 항목들이 추출됨으로서 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 평가되었다.

Table 2. Parameters used in Evaluation.

parameters	Unit	The value used in this study
LADD	mg/kg/day	-
ADD	mg/kg/day	-
SF(Oral)	per mg/kg/day	Referenced in IRIS
RfD	mg/kg/day	Referenced in IRIS
ED	year	30
BW	kg	64.2
LT	day	83.5
EF	day/year	365
IR	L/day	1.5

Table 3. Risk Assessment Results in this study.

No.	parameters	Items	Results		Criteria
			Average	Maximum	
1	Non-cancer	불소	0.0245	0.3272	Hazard quotient 1
2		비소	0.0099	0.0944	
3		우라늄	0.0049	0.0568	
4		디클로로메탄	0.0000	0.0016	
5		트리클로로에틸렌	0.0172	0.4461	
6		아연	0.0150	0.3015	
7		망간	0.0024	0.0970	
8	Cancer	비소	4.4×10^{-6}	4.2×10^{-5}	Acceptable Risk 10^{-5} Legal management criteria 10^{-4}
9		1,4-다이옥산	5.1×10^{-8}	9.5×10^{-7}	
10		벤젠	7.5×10^{-9}	2.8×10^{-8}	
11		사염화탄소	0	0	
12		테트라클로로에틸렌	1.6×10^{-10}	1.1×10^{-8}	
13		트리클로로에틸렌	3.9×10^{-7}	1.0×10^{-5}	
14		디클로로메탄	4.4×10^{-10}	2.0×10^{-8}	
15		시안	2.2×10^{-9}	1.3×10^{-8}	

3.2. 기능성미네랄 평가결과

먹는물에서 미네랄성분은 매우 적은 양이 존재하지만 건강기능성 및 생체조절작용 등에 영향을 미치는 주요 성분이다. 또한 그 함량에 따라 물맛에 영향을 주고 부족하거나 과량으로 존재할 시 여러 질병을 일으킬 수 있다.

특히 지하수에서 수질을 결정하는 중요한 미네랄 성분은 지질학적 특징에서 기원하는 나트륨(Na), 마그네슘(Mg), 칼슘(Ca), 칼륨(K) 등이 있고, 그 외 무기미네랄로서 게르마늄(Ge)과 바나듐(V)이 있다.

하지만, 국내에서는 이를 관리하는 법적 농도기준이 없으며, 권고기준으로 제시하고 있어 건강성에 대한 정확한 평가가 어렵기 때문에 국내외 기준 모두 준용하여 평가를 실시하였다.

Fig. 1.에 인천광역시 지하수 중 총 미네랄 농도 및 지역적 분포 특성을 나타내었다.

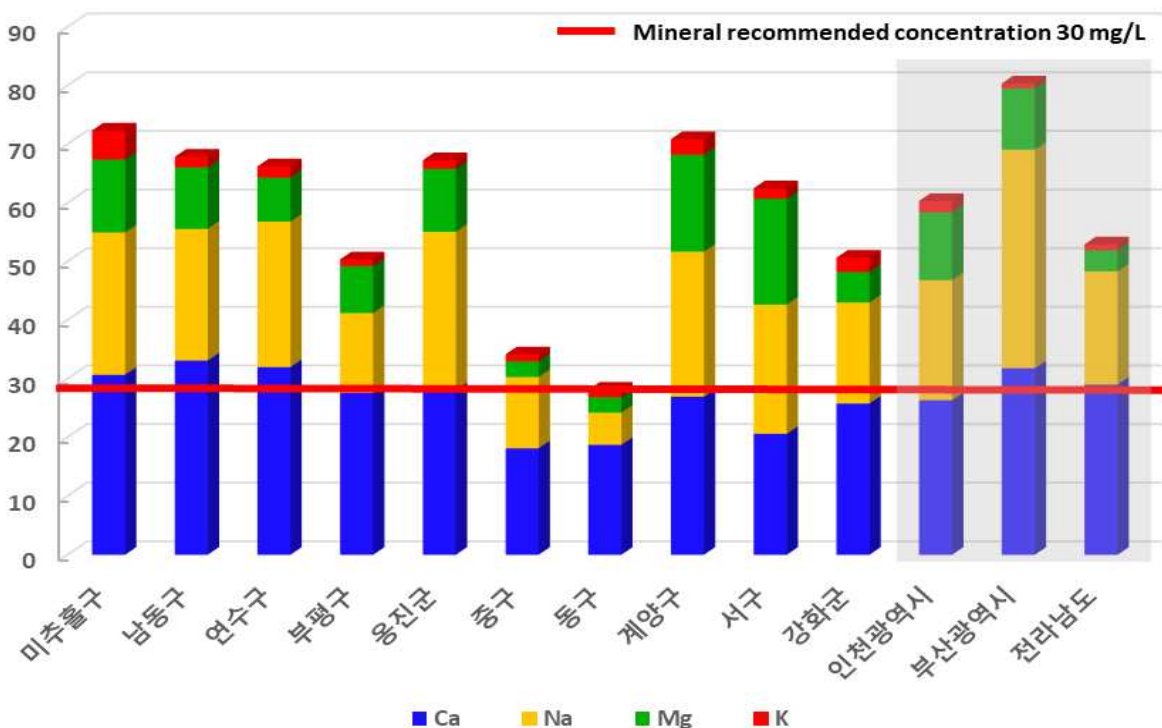
평가결과, 모든 조사대상이 세계보건기구(WHO), 유럽경제공동체(EEC)에서 제시한 국외 기준에 만족하는 것으로 나타났다.

또한 지역별 미네랄 함량은 해당 지각의 구성 등에 따라 다소 차이가 있는 것으로 조사되었으나 전반적인 미네랄 농도 수준은 칼슘(26.35 mg/L) > 나트륨(20.50 mg/L) > 마그네슘(11.56 mg/L) > 칼륨(1.93 mg/L) 순으로 조사되었다.

인천지역 지하수는 국내 한국수자원공사(K-water)에서 제시한 「먹는물 중 미네랄 섭취 권고 수준」에 적합한 것으로 평가되었으며, 총 미네랄 함량 60.34 mg/L로 저농도(low) 미네랄수로 구분되었다.

기능성 미네랄로 알려진 게르마늄(Ge)과 바나듐(V)은 거의 검출되지 않았는데, 이는 국내에 일부 전남지역과 제주특별시에서 미량 검출될 뿐 인천을 포함한 기타 지역에서는 모두 검출되지 않는 것으로 평가된 바 있다.

Fig. 1. The mineral concentration of groundwater in Incheon.



3.3. 다변량 통계분석 결과

3.3.1. 상관성 분석(correlation analysis)

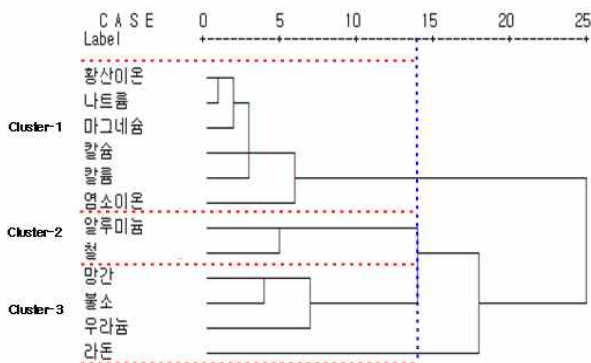
Table 4.에 주요 항목별 상관성 분석결과를 나타내었다.

상관성 분석결과, 염소이온(Cl^-), 황산이온(SO_4^{2-}), 나트륨(Na^+), 칼륨(K^+), 마그네슘(Mg^{2+}), 칼슘(Ca^{2+})의 이온성분과 라돈(Rn), 우라늄(U)의 자연방사성 물질에 대한 상관관계가 높게 나타났다.

염소이온과 황산이온의 경우 주요 오염요인은 생활 및 가정하수에서 기인하고, 나트륨, 칼륨, 마그네슘, 칼슘 등의 양이온 성분과 라돈, 우라늄의 자연방사성물질은 지질 용출에 의해 지하수로 유입되는 것으로 알려져 있다.

따라서 인천지역 지하수 수질은 하수 등의 외부 유입과 지질구성요소에 의해 지배적으로 결정됨을 알 수 있다.

Fig. 3. Results of cluster analysis.



3.3.2. 군집분석(cluster analysis)

Fig. 3.에는 지하수 수질의 군집분석 결과를 나타내었다.

군집분석으로 지하수 수질을 지배하는 요인을 시각화한 결과, 크게 3가지 군집으로 분류되었으며, 상관성 분석결과와 마찬가지로 제1그룹은 지하수 전반에 영향을 미치는 이온류, 제2그룹은 도시 하수 공단 폐수 등 외부에서 유입되는 금속류, 제3그룹은 지질학적 특성에 따른 자연방사성류로 분석되었다.

3.3.3. 주성분분석(principal component analysis)

Table 5.에 주성분분석에 대한 결과를 나타내었다.

주성분 분석결과, 해당 통계분석으로 지하수 수질을 평가하는 정확도(Variance)는 67.2 % 수준으로서, 주성분 그룹은 3가지로 나타났다.

그 중 가장 많은 분산을 나타내는 성분인 제1주성분에 따라 지하수 수질을 결정하는 주된 요인은 염소이온, 황산이온 등의 이온성 물질과 지각 구성성분인 나트륨, 칼륨, 마그네슘 등으로 평가되었다.

Table 4. Results of correlation analysis.

r	Cl^-	SO_4^{2-}	Al	Rn	Fe	Mn	U	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	F^-
Cl^-	1											
SO_4^{2-}	0.589**	1										
Al	0.060	0.033	1									
Rn	0.093*	0.049	0.440**	1								
Fe	0.027	0.083*	0.663**	0.619**	1							
Mn	0.025	0.088*	0.477**	0.271**	0.462**	1						
U	0.063	0.034	0.136**	0.511**	0.054	0.218**	1					
Na^+	0.574**	0.893**	0.035	0.079*	0.089*	0.082*	0.022	1				
K^+	0.296**	0.429**	0.109**	0.020	0.150**	0.036	-0.105**	0.490**	1			
Mg^{2+}	0.500**	0.607**	0.162**	0.018	0.099*	0.113**	-0.036	0.694**	0.327**	1		
Ca^{2+}	0.698**	0.627**	0.060	0.018	-0.003	-0.029	-0.012	0.638**	0.299**	0.566**	1	
F^-	0.023	0.095*	0.203**	0.316**	0.075	0.298**	0.520**	0.080*	-0.091*	0.102**	0.103**	1

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

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

Table 5. Results of principal components analysis.

Parameter	Principal Components		
	PC1	PC2	PC3
Cl ⁻	0.774	-0.018	0.088
SO ₄ ²⁻	0.888	0.028	0.046
Al	0.050	0.841	0.043
Rn	0.023	0.644	0.472
Fe	0.043	0.913	-0.062
Mn	0.035	0.653	0.209
U	-0.014	0.128	0.868
Na ⁺	0.913	0.047	0.021
K ⁺	0.544	0.196	-0.301
Mg ²⁺	0.782	0.098	-0.008
Ca ²⁺	0.824	-0.067	0.071
F ⁻	0.073	0.142	0.802
Eigenvalue	3.908	2.716	1.443
Variance(%)	32.567	22.635	12.026
Cumulative variance(%)	32.567	55.202	67.227

IV. 결론

○ 인천지역 지하수는 먹는물 수질기준 대비 대부분 적합한 것으로 평가되었고, 법적 근거에 의거, 주기적으로 관리되는 시설로서 이화학적 문제점은 나타나지 않았다.

○ 하절기 일시적으로 부적합이 발생하는 시설은 주로 미생물항목에 의한 것으로, 일시적인 수질턴오버 및 UV살균 등 소독시설의 관리 미숙으로 발생하였을 것으로 판단된다.

○ 지하수 수질 위해성 평가 중 비발암성 평가 결과는 위해지수 1을 기준, 모든 지점에서 ‘매우 안전’ 즉, 유해를 일으킬 가능성 없음으로 평가되었다.

○ 발암성 평가에서 비소(As)와 트리클로로에틸렌(TCE)이 허용위해도(10^{-5})를 간헐적으로 상회하였으나, 법적 규제기준(10^{-4})의 42 % 수준이며, 그 밖의 오염물질은 거의 불검출로 ‘매우 안전’ 한 상태로 평가되었다.

○ 인천지역 지하수는 총 미네랄 60.34 mg/L의 저농도 미네랄수이며, 국제 미네랄 기준을 ‘모두 만족’, 일부 지점에서 나트륨이 다소 높게 검출, 해수 및 염수가 유입될 수 있는 지리적 특성으로 판단되었다.

○ 과학적 수질관리방안 연구를 위한 통계분석 결과, 가정하수 및 공장 폐수의 지하수 유입에 기인하는 염소, 황산이온간 높은 상관성을 나타내며, 전반적인 지하수 수질은 이온류, 금속류, 자연방사성류의 3그룹이 지배적인 영향을 나타내었다.

○ 주성분 분석에 따른 지하수 수질 평가 정확성은 67.2 % 수준이며, 특히 제1주성분으로 나타난 염소이온, 황산이온, 나트륨, 마그네슘, 칼슘, 불소의 농도가 수질에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 평가되었다.

○ 따라서, 인천지역 지하수는 전반적으로 인체에 매우 안전한 상태인 것으로 나타났으나, 일부 수용성 중금속 및 휘발성 유기화합물은 지속적으로 모니터링해야할 필요성이 나타났으며, 인체에 유익한 기능성 미네랄(게르마늄, 바

나뭇잎)은 존재하지 않지만, 국제적 기준에 적합한 상태로 관리되고 있는 것으로 평가되었다.

○ 통계분석 결과를 통해 지하수를 효과적으로 관리하기 위해서는 지배적인 영향을 나타내는 염소이온, 황산이온 및 나트륨, 칼륨 등의 지각 구성성분 농도 구성이 중요한 것으로 조사되었다.

○ 또한, 인천지역의 지리적 특징에 따라 해수 및 염수 등의 영향을 받아 나트륨 농도가 광역적으로 높게 조사된 바, 음용을 위해 직접 이용 시 권고 수준 이상의 나트륨 섭취 우려가 있어 역삼투(RO) 등의 수처리 공정 설치 등의 필요성이 요구되었다.

○ 이 물질들을 오염지시인자로 활용하여 거동을 분석함으로써 전반적인 지하수 수질을 시공간적으로 예측 가능할 것으로 판단되었고, 효과적인 수질관리방안을 마련하는 근거자료가 될 것으로 사료된다.

V. 참고문헌

1. 환경부 (2020). 지하수 수질측정망 설치 및 수질오염실태 측정계획
2. USEPA (1989). Risk assessment guidance for superfund volume I: Human health evaluation manual (Part A).
3. USEPA (1991a). Risk assessment guidance for superfund volume I: Human health evaluation manual (Part B, development of risk-based preliminary remediation goals).
4. Gu, J.M., Kim, K.s., Dong, J.I., Park, Y.H., Bae, W.g., Yang, J.W., Teom, I.T., Yoon, S.P., Lee, J.Y., Lee, J.S., Jang, Y.Y., Jung, J.C., Choi, S.I., Hwang, K.Y., Hwang, J.S., (2001). Soil environmental engineering. pp.148-175.
5. Columbia Water Center (2014), Risk assessment for water quality of a river using QUAL2E model, Journal of wetlands Research, Vol. 16, pp.441-450.
6. 환경부 (2021), 화학물질 위해성평가의 구체적인 방법 등에 관한 규정.
7. 김준하, 김범조, 정희원, 신소라 (2018). 환경 통계 및 데이터 분석, 180-203.
8. 이훈영 (2006). 이훈영의 SPSS를 이용한 데이터 분석, 337-338.
9. 장원경 (2005). SPSS 12.0을 이용한 자료분석의 이해와 응용, 318-322.
10. 국립환경과학원 (2012). 위해성평가의 대상 물질 선정기준, 절차 및 방법 등에 대한 지침
11. 강승혜, 김기태 (2021). 강원도 횡성지역의 지하수 수질 모니터링 및 인체 위해성 평가, 한국환경보건학회지, 47(4), 356-365.
12. USEPA (1986). Guidelines for carcinogen risk assessment.
13. USEPA (1997). Exposure factors handbook.
14. USEPA. IRIS(Integrated Risk Information System), <http://www.epa.gov/iris/>