

연구논문

경기도 지하수 수질측정망의 수질특성에 관한 연구

서인숙[†] · 최양희 · 김태현 · 권상조 · 송진호 · 이현경 · 정선희 · 김채림 · 윤홍철 · 김태화
경기도보건환경연구원 먹는물검사팀

Water Quality Characteristics of the Gyeonggi-do Groundwater Quality Monitoring Network

Insuk Seo[†], Yanghee Choi, Taehyun Kim, Sangjo Guen, Jinho Song, Hyunkyung Lee, Seonhee Jung,
Chaelim Kim, Hongcheol Yoon and Taehwa Kim

Drinking Water Analysis Team, Gyeonggi-do Institute of Health and Environment, Gyeonggi-do, 16381, Korea

Received August 2, 2020 / Revised August 28, 2020 / Accepted September 14, 2020

In this study, a survey of the number of excess water quality standards, an average concentration analysis, and a trend analysis to calculate the grade of groundwater contamination using data from the groundwater quality monitoring network (GQMN) in Gyeonggi-do were conducted. A water pollution map of underground water was provided, and the water quality characteristics between analysis items and influencing factors were identified by statistical analysis. The indication contamination rate-the ratio of three determined contamination indicators-from high to low was Cl^- (31.2%) > NO_3^- -N (27.9%) > pH (20.8%) > Trichloroethylene (8.9%) > Arsenic (6.3%) > Tetrachloroethylene (1.5%). According to the contamination grade analysis, the 'clean grade (0)' was classified as less than 68.8% (Cl^-), the 'possibly contaminated grade (1)' was less than 30.1% (Cl^-), the 'contaminated grade (2)' was less than 7.1% (NO_3^- -N), and the 'seriously contaminated grade (3)' was classified as less than 1.9% (NO_3^- -N). A mean contamination index rank difference test was conducted for each influencing factor in highly contaminated areas, non-drinking facilities, unopened facilities, private facilities, industrial waters, and industrial areas that showed statistically significant differences.

Key words: Groundwater Quality Monitoring Network, Grade of groundwater contamination, Statistical analysis

1. 서 론

물은 인간과 모든 생물체에게 필요불가결한 물질로써 인간은 생활수준이 향상될수록 맛이 있고, 안전하고, 오염되지 않은 양질의 물을 마시려는 욕구를 가지고 있다. 지구상에는 바닷물을 제외한 담수 중에서 약 2.5% 정도만이 하천이나 호소의 형태로 지표에 존재하고, 97.5%는 지하수의 형태로 지하에 많은 양이 보존되어 있다. 지하수와 지표수의 근원은 강수로서 강수가 지표에 내린 후 일부는 지하로 침투하여 지하수가 되고, 나머지는 지표면을 따라 흘러내려가 하천이나 호수와 같은 지표수를 이룬다.¹⁾

지하수란 지하수법 제2조에 의하면 '지하의 지층이나 암석 사이의 빈틈을 채우고 있거나 흐르는 물'을 말하며 빗물 등에 의하여 채워지기 때문에 적절히 사용하면 지속적으로 재생 가능한 자원이지만, 채워지는 속도가 느리기 때문에 채워지는 양보다 많이 사용하거나 특정지역에 집중 이용하면 지하수위가 하강하고 고갈되며, 지하수가 오염되면 원상회복하기 위해 오랜 시간이 걸리고 많은 비용이 들어가기 때문에 사전에 오염 방지를 위해 노력해야 한다.

그래서 환경부는 지하수 오염을 사전에 예방하여 국민의 건강과 재산을 보호하고 지하수를 지속적이고 체계적으로 관리하기 위해 지하수 수질측정망을 운영하

[†]To whom correspondence should be addressed.

고 있다. 지하수 수질측정망은 전국 지하수 수질현황과 수질변화 추세를 정기적으로 파악하고 관리하기 위하여 국가나 지방자치단체가 운영 중인데, 우리나라 지질과 유역을 고려한 지하수 수질현황 및 특성을 파악하고 산업단지 등 대규모 오염원으로부터 지하수 오염과 확산을 지속적으로 감시하기 위한 국가지하수 수질측정망과 지방자치단체 관할 지역내 지하수 오염감시와 수질파악을 위한 지역지하수 수질측정망으로 분류된다. 이 중 1999년부터 운영된 지역 지하수 수질측정망은 오염우려지역과 일반지역으로 구분되는데, 공단지역, 저장탱크 주변, 매립지, 금속광산, 오염우려하천 등 오염원에 인접한 오염우려지역은 유역환경청에서, 그 외 도시농림·자연환경 보전·관리지역 등 일반지역은 지방자치단체에서 관리하고 있다.²⁾ 지하수 수질측정망 자료를 이용하여 지 등³⁾은 부산지역을, 이 등⁴⁾은 대구지역을, 김 등⁵⁾은 경기북부지역을 연구대상으로 지하수 수질측정망의 수질특성을 연구하였으며, 방 등⁶⁾은 지하수 수질측정망 자료를 활용한 시간적 오염도 추이변화에 대한 연구를 수행하였고, 윤 등⁷⁾은 전국 지하수 수질측정망 자료를 활용하여 통계적 분석방법으로 오염등급 정량화하고 평가하는 방법을 개발하였다.

현재 환경부는 매년 지하수 수질측정망 분석자료를 이용하여 매년 연보를 발행하는데 단순 초과율이나 평균값 위주로 지하수 수질을 평가하고 있어 다년간 수질측정자료를 활용한 장기적 수질오염도 평가 도입이 필요하다.

이에 윤 등⁷⁾은 실제 농도 측정값을 활용하지 않아 그 효율성을 검증하기가 어렵고, 가중값 결과 관련하여 주관적 요소가 많아 불확실성이 크며, 또한, 단일 시점에서의 농도값을 이용하여 농도의 시간적 경향성을 고려할 수 없다는 점에서 한계가 있었던 종래기술들의 문제점을 해결하여, 실제 현장의 농도 측정 자료를 이용하여 신뢰성을 높이는 동시에, 그러한 농도값의 시간적 경향성까지 모두 고려한 새로운 오염등급 정량화 및 지하수 수질등급 평가방법을 제시하였다.^{7,8)}

따라서 본 연구는 경기도내 지하수 수질측정망으로 각 지점별 수질기준 초과횟수 조사, 평균농도 분석 및 경향성 분석을 실시하여 지하수 수질오염등급을 산정하였고, 지하수 수질오염지도를 알기 쉽게 시각화 하였으며, 통계분석으로 분석 항목과 영향인자간의 수질특성을 파악하여 지하수 수질보전 및 정책수립을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구대상

본 연구는 경기도내 지하수 수질측정망의 수질특성을 파악하고자 2017년 기준으로 시·군에서 관리하는 일반지역 155개 지점과 한강유역환경청에서 관리하는 오염우려지역 114개 지점인 총 269개 지점을 연구대상으로 하였으며, 각 지점의 위치를 Fig. 1에 나타내었다.

분석항목은 생활용수 항목으로 일반오염물질 4개 항목인 수소이온농도(pH), 총대장균군(Total Coliforms), 질산성 질소(Nitrate Nitrogen, $\text{NO}_3\text{-N}$), 염소이온(Chloride, Cl)과 특정유해물질 15개 항목인 카드뮴(Cadmium, Cd), 비소(Arsenic, As), 시안(Cyanide), 수은(Mercury, Hg), 유기인(Organophosphorus), 페놀류(Phenols), 납(Lead, Pb), 크롬(Chromium, Cr), 트리클로로에틸렌(Trichloroethylene, TCE), 테트라클로로에틸렌(Tetrachloroethylene, PCE), 1,1,1-트리클로로에탄(1,1,1-Trichloroethane, 1,1,1-TCE), 벤젠(Benzene), 톨루엔(Toluene), 에틸벤젠(Ethylbenzene), 크실렌(Xylene)이다. 검사주기는 연 2회로 상·하반기 수질 측정된 자료는 토양지하수 정보시스템(<http://sgis.nier.go.kr>)에 입력되어 관리되고 있다. 본 연구에서는 토양지하수정보시스템에 공개되어 있는 2010년에서 2017년까지 최대 16회 수질측정 자료를 이용하였으며, 먹는물수질공정시험기준의 먹는물 수질기준을 적용하였다.²⁾

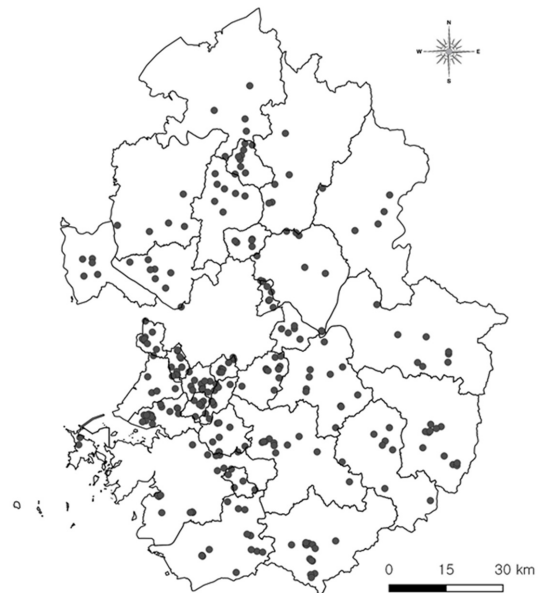


Fig. 1. Location map of the study area.

2.2. 연구방법

경기도내 지하수 수질측정망의 오염도를 정량화하고 평가하기 위해 윤 등과 환경부^{7,8)}의 연구에 제시된 세 가지 오염지시인자를 이용한 분석방법으로 수질오염등급 산정하였으며, 분석항목과 영향인자간의 수질특성을 파악하였다.

2.2.1. 수질기준 초과횟수 조사방법

수질기준 초과횟수 조사방법은 각 지점별로 해당 항목의 측정농도가 먹는물 수질기준을 초과한 횟수를 조사하는 방법이며, 본 연구에서는 가장 엄격한 기준을 적용하여 초과횟수가 1이상이면 오염을 지시한 것으로 판정하였다.

2.2.2. 평균농도 분석방법

평균농도 분석방법은 각 지점별 해당 항목 측정농도의 평균과 표준편차를 계산하여 평균농도의 95% 신뢰구간을 구하고(식 1), 평균농도 신뢰구간 상한선이 수질기준보다 높은 경우 오염을 지시한 것으로 판정하였다. pH는 그 반대의 경우도 고려하여야 한다.

$$\left(\bar{x} - 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \bar{x} + 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) \tag{1}$$

\bar{x} 는 측정농도 평균, σ 는 측정농도 표준편차, n 은 측정횟수를 나타낸다.

2.2.3. 경향성 분석방법

경향성 분석방법은 시간에 따른 농도의 경향성을 조사하기 위해 비모수적 분석방법인 Sen의 경향성 분석법을 이용하였으며, 시간에 따른 농도 기울기를 크기순으로 정리하여 중앙값의 95% 신뢰구간내 0이 포함되지 않고 증가하면 오염을 지시한 것으로 판정하였다.^{10,11)}

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

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

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

n 개의 농도 자료에 대하여 N 개의 Q를 계산한다(식 3).

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

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

$$Q' = Q_{[(N'+1)/2]} \quad N': \text{홀수}$$

$$= \frac{1}{2}(Q_{[N'/2]} + Q_{[(N'+2)/2]}) \quad N': \text{짝수} \tag{4}$$

Mann-Kendall 통계값의 분산 추정값 (VAR(S))을 이용해 신뢰구간을 결정한다(식 5).

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

여기서, n 은 자료의 수, t_p 는 p 번째 값의 반복 자료 수, q 는 반복 자료가 존재하는 횟수를 나타낸다.

양측검증 z 통계값 $z_{1-\alpha/2}$ 의 값을 이용해서 오차 허용률 α 에 대한 신뢰구간의 간격(c_α)을 구한다(식 6).

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

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

$$M_1 = \frac{N' - C_\alpha}{2}; M_2 = \frac{N' - C_\alpha}{2} + 1 \tag{7}$$

M_1 과 M_2 에 대한 Q'를 구하고 이 95% 신뢰구간 내에 0이 포함되지 않고 농도기울기가 증가한다면 오염을 지시한 것으로 판정하였다. 이때 pH는 감소하는 경우도 오염을 지시한 것으로 판정하였다.^{12,13)}

2.2.4. 지하수 수질오염등급 분류방법

장기적 수질오염실태 파악을 위해 세가지 분석방법

Table 1. Groundwater quality classification^{7,8)}

Number of methods indicating contamination	Contamination index*	Color	Water quality grade
0	0	Green	Clean
1	1	Yellow	Possibly contaminated
2	2	Orange	Contaminated
3	3	Red	Seriously contaminated

*Contamination index is expressed as the sum of the three methods

을 ‘오염지시인자(Contamination indicator)’로 정의하고, 각 오염지시인자가 오염을 지시하는 횟수의 합을 ‘오염지수 (Contamination index)’로 정의하며, 오염지수가 0 이면 ‘안전등급(Clean grade)’, 1이면 ‘오염가능등급(Possibly contaminated grade)’, 2이면 ‘오염등급(Contaminated grade)’, 3이면 ‘오염심각등급(Seriously contaminated grade)’의 네 가지 오염등급으로 분류하여 Table 1에 나타내었다. 이때 오염등급을 색으로 표현하여 시각화하였다.^{7,8)}

2.2.5. 수질오염지도 작성 및 오염도 통계분석

지하수 수질측정망의 각 지점별 산출된 수질오염등급을 색으로 표현하여 QGIS(ver. 2.18.28)를 이용해 경기도 유역도에 중첩시켜 시각적으로 한눈에 알아볼 수 있도록 나타내었다.^{14,15)}

그리고, 경기도내 지하수 수질측정망의 수질특성을 파악하기 위해서 각 지점의 오염등급을 평가하고 통계 처리 프로그램인 SPSS(ver. 18.0)를 활용하여 분석항목과 영향인자간의 상관성 및 평균차이 검정을 수행하였다. 정규성 검정을 수행하여 비정규분포일 경우 비모수적 방법을 이용한다. 2-독립 표본 비모수검정(Two-independent-samples tests)은 독립표본 T 검정에 대응하는 비모수적 검정방법으로 두 집단의 혼합순위의 평균을 비교하는 분석방법으로 검정유형은 Mann-Whitney의 U 검정(Mann-Whitney U test)을 사용하였고, 계산된 통계량의 근사유의확률(Asymptotic significance probability)이 유의수준이하이면 귀무가설이 기각되고 대립가설이 채택되어 평균의 차이가 있는 것으로 해석하며, 유의확률이 유의수준이상이면 귀무가설이 채택되고 대립가설이 기각되어 평균의 차이가 없는 것으로 해석한다.¹⁶⁾ K-독립 표본 비모수검정(Tests for several independent samples)은 일원배치 분산분석에 대응하는 비모수적 검정방법이며 세 개 이상의 집단에 대한 혼합순위의 평균을 비교할 때 사용하는 비모수적 방법으로 검정유형은 Kruskal-Wallis 검정(Kruskal-Wallis test)을 사용하였고, 계산된 통계량의 근사유의확률이 유의수준 이하이면 귀무가설이 기각되고 대립가설이 채택되어 평균의 차이가 있는 것으로 해석하며, 유의확률이 유의수준 이상이면 귀무가설이 채택되고 대립가설이 기각되어 평균의 차이가 없는 것으로 해석한다. 통계적 유의수준에서 평균차이가 발생하면 사후분석을 위해 2-독립 표본 비모수검정인 Mann-Whitney의 U 검정을 사용하여 두 집단씩 평균차이 검정을 수행하여야 하는데, 세 집

단인 경우 세 번($t=3$)을 비교하게 되어 유의수준 5%에서는 유의수준을 $0.05/t$ 값으로 설정하고 유의확률이 이 값보다 작은 경우에 두 집단 간에 차이가 있는 것으로 해석한다.¹⁶⁾

3. 결과 및 고찰

3.1. 지하수 수질측정망 분석항목 기술통계 분석

본 연구는 토양지하수정보시스템에 공개되어 있는 2010년에서 2017년까지 최대 16회 수질측정 자료를 이용하여 기술통계분석 결과를 Table 2에 나타내었으며, 검출빈도가 10이하 이거나(Cd, Cyanide, Hg, Organophosphorus, Cr, Phenols, Pb), 검출(detection) 또는 불검출(non-detection)로 입력되어 수치화되지 않는 총대장균군을 제외한 11개 항목인 pH, $\text{NO}_3\text{-N}$, Cl⁻, As, TCE, PCE, 1,1,1-TCE, Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene을 분석 대상항목으로 선정하였으며 먹는물 수질기준을 적용하였다.

3.2. 오염등급 분류

Table 3은 특정 지하수 수질측정망의 오염등급을 산정하는 과정을 설명하기 위해 예시로 나타내었으며, 오염지시인자가 오염을 지시하지 않으면 ‘0’, 오염을 지시하면 ‘1’로 표시한다. pH는 수질기준 초과횟수 조사에서 초과되지 않았고, 평균농도 분석은 95% 신뢰구간 상한선의 수치가 6.9로 수질기준 이내이며, 경향성 분석 결과 농도기울기가 증가하지 않아서(no trend) 세가지 방법 모두 오염을 지시하지 않아 합산하였을 때 오염지수 0인 ‘안전등급(Clean grade)’으로 분류하였다. $\text{NO}_3\text{-N}$ 은 수질기준 초과횟수가 7회이며, 평균농도 10.7 mg/L로 먹는물 수질기준인 10 mg/L를 초과하였고, 경향성 분석에서 농도기울기가 증가하여서(up trend) 오염지수 3인 ‘오염심각등급(Seriously contaminated grade)’으로 분류하였다. Cl⁻은 수질기준을 초과하지 않았고, 평균농도 69.8 m/L로 먹는물 수질기준 250 mg/L보다 낮아 오염을 지시하지 않았지만, 경향성 분석에서는 농도기울기가 증가하여 오염지수 1인 ‘오염가능등급(Possibly contaminated grade)’으로 분류하였다.

세 가지 오염지시인자가 오염되었다고 판단한 지점의 비율인 오염지시율을 항목별로 산출하여 Table 4에 나타내었다. 전체 오염지시율은 Cl⁻(31.2%) > $\text{NO}_3\text{-N}$ (27.9%) > pH(20.8%) > TCE(8.9%) > As(6.3%) > PCE(1.5%) 순으로 오염지시율이 높았으며, 나머지는

Table 2. Statistical analysis results for the groundwater quality monitoring network in Gyeonggi-do

Item	Drinking standard	N	Minimum	Maximum	Mean	Standard Deviation	Detection Frequency	Selection of items ⁶⁾
pH	5.8~8.5	3904	5.2	10.1	7.0	0.6	3904	○
Total Coliforms ¹⁾	N.D./100 mL	3920	-	-	-	-	1431	×
NO ₃ ⁻ -N	10 mg/L below	3964	0.0	43.8	3.9	4.7	3735	○
Cl ⁻	250 mg/L below	3918	0.0	14,296.0	47.2	333.3	3869	○
As	0.01 mg/L below	3917	0.000	0.350	0.001	0.007	170	○
Cd	0.005 mg/L below	3913	0.000	0.004	0.000	0.000	7	×
Cyanide	0.01 mg/L below	3904	0.00	0.03	0.00	0.00	4	×
Hg	0.001 mg/L below	3916	0.000	0.001	0.000	0.000	2	×
Organophosphorus ²⁾	0.02, 0.06, 0.04 mg/L below respectively	3768	0.0000	0.0005	0.0000	0.0000	1	×
Cr	0.05 mg/L below	3815	0.00	0.02	0.00	0.00	2	×
Phenols	0.005 mg/L below	3910	0.000	0.044	0.000	0.001	7	×
Pb	0.01 mg/L below	3914	0.000	0.040	0.000	0.001	3	×
TCE ³⁾	0.03 mg/L below	3902	0.000	1.003	0.003	0.031	494	○
PCE ⁴⁾	0.01 mg/L below	3903	0.000	0.201	0.000	0.005	126	○
1,1,1-TCE ⁵⁾	0.1 mg/L below	3904	0.000	0.041	0.000	0.001	122	○
Benzene	0.01 mg/L below	3885	0.000	0.135	0.000	0.002	32	○
Toluene	0.7 mg/L below	3886	0.000	2.460	0.001	0.045	118	○
Ethylbenzene	0.3 mg/L below	3879	0.000	0.004	0.000	0.000	49	○
Xylene	0.5 mg/L below	3874	0.000	0.012	0.000	0.000	57	○

1) Total coliforms are excluded and expressed as detection and non-detection (N.D.);
 2) Diazinon, Parathion, Fenitrothion; 3) Trichloroethylene; 4) Tetrachloroethylene; 5) 1,1,1-Trichloroethane;
 6) ○: selection, ×: non-selection

Table 3. Examples of the groundwater quality classification process at location OH0201^{7,8)}

Item	pH	NO ₃ ⁻ -N	Cl ⁻
(a) Number of excess water quality standards	0 → 0	7 → 1	0 → 0
(b) Average concentration analysis	6.9 → under → 0	10.7 mg/L → over → 1	69.8 mg/L → under → 0
(c) Sen's trend analysis	no trend → 0	upward trend → 1	upward trend → 1
Number of indications (a + b + c)	0	3	1
Contamination index (a + b + c)	0	3	1
Water quality grade	Clean	Seriously contaminated	Possibly contaminated

1% 미만이었다.

각 오염지시인자별 주요 오염지시율을 살펴보면 수질기준 초과횟수 조사는 NO₃⁻-N(17.5%) > pH(11.2%) > TCE(7.8%) > As(5.9%) > Cl⁻(1.5%) 순으로 높았으며, 평균농도 분석은 NO₃⁻-N(8.9%) > TCE(4.5%) > As(2.2%) > pH(1.9%) > Cl⁻(1.1%) 순이며, 경향성 분석은 Cl⁻(30.5%) > NO₃⁻-N(12.3%) > pH(8.9%) > TCE(1.5%) 순으로 높게 나타났으며 윤 등²⁾의 연구결과와 유사한 경향을 보였다. 경향성 분석에서 오염지시율이 높은 항목 중 Cl⁻은 다른 오염인자보다 경향성 분석 오염지시율이

가장 높게 나타나 현재 수질농도는 낮아 안전하지만 시간 경과에 따라 증가할 가능성이 높으므로 향후 이들 지점과 항목에 대한 꾸준한 모니터링 및 관리대책이 수립되어야 할 것으로 사료된다.

Fig. 2는 세 가지 분석방법을 이용하여 경기도 지하수 수질측정망 269개 지점의 오염등급을 산정하여 항목별 지하수 오염등급 분포도를 나타내었다. 이때 전체 오염지시율이 1%미만을 제외한 6개 항목에 대한 오염등급을 분석한 결과 전체 조사지점 중 ‘안전등급(0, Green)’은 68.8%이상(Cl⁻), ‘오염가능등급(1, Yellow)’은

Table 4. Rate of contamination indication for three statistical analyses

[%]

Statistical analysis	pH	NO ₃ ⁻ -N	Cl ⁻	As	TCE	PCE	1,1,1-TCE	Benzene	Toluene	Ethylbenzene	Xylene
Number of excess water quality standards	11.2	17.5	1.5	5.9	7.8	1.1	0.0	0.4	0.7	0.0	0.0
Analysis of average concentration	1.9	8.9	1.1	2.2	4.5	0.4	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0
Sen's trend analysis	8.9	12.3	30.5	0.4	1.5	0.4	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0
Total	20.8	27.9	31.2	6.3	8.9	1.5	0.7	0.4	0.7	0.0	0.0

(a) Total area.



(b) General area.



(c) Contamination Concerned Area.



● Clean ● Possibly contaminated ● Contaminated ● Seriously contaminated

Fig. 2. Classification of contamination grades of the Gyeonggi-do groundwater quality monitoring network: (a) Total area, (b) General area, and (c) Contamination Concerned Area.

최대 30.1%이내(Cl⁻), ‘오염등급(2, Orange)’은 최대 7.1% 이내(NO₃⁻-N), ‘오염심각등급(3, Red)’은 최대 1.9%이내(NO₃⁻-N)로 평가되었다. 오염등급이 끌고루 분포되어 있는 항목은 pH, NO₃⁻-N, Cl⁻, TCE이며, 오염우려지역이 일반지역보다 오염등급이 높은 경향을 보인다.

3.3. 지하수 수질오염지도

Fig. 3은 각 지점별 오염지시율이 높고 오염등급에서 ‘안전등급’이 낮은 주요 6개 항목인 pH, NO₃⁻-N, Cl⁻, TCE, As, PCE에 대한 오염등급을 QGIS(ver. 2.18)를 이용해 경기도 유역도에 중첩시켜 시각적으로 한눈에 알아볼 수 있도록 나타내었다.

pH의 ‘안전등급’은 전체 269개 지점 중 79.2%인 213개 지점이며, ‘오염가능등급’은 18.2%인 49개 지점, ‘오염등급’은 1.9%인 5개 지점, ‘오염심각등급’은 0.7%인 2개 지점이었다. NO₃⁻-N ‘안전등급’은 72.1%인 194개 지점이며, ‘오염가능등급’은 19.0%인 51개 지점,

‘오염등급’은 7.1%인 19개 지점, ‘오염심각등급’은 1.9%인 5개 지점이었다. Cl⁻의 ‘안전등급’은 68.8%인 185개 지점이며, ‘오염가능등급’은 30.1%인 81개 지점, ‘오염등급’은 0.4%인 1개 지점, ‘오염심각등급’은 0.7%인 2개 지점이었다. TCE의 ‘안전등급’은 91.1%인 245개 지점이며, ‘오염가능등급’은 4.5%인 12개 지점, ‘오염등급’은 4.1%인 11개 지점, ‘오염심각등급’은 0.4%인 1개 지점이었다. As의 ‘안전등급’은 93.7%인 252개 지점이며, ‘오염가능등급’은 4.1%인 11개 지점, ‘오염등급’은 2.2%인 6개 지점이며, ‘오염심각등급’은 없었다. 그리고 PCE의 ‘안전등급’은 98.5%인 265개 지점이며, ‘오염가능등급’은 1.1%인 3개 지점, ‘오염등급’은 0.4%인 1개 지점, ‘오염심각등급’은 없었다.

3.4. 분석항목과 영향인자간 상관분석

각 지점별 분석항목의 수질오염등급과 영향인자간의

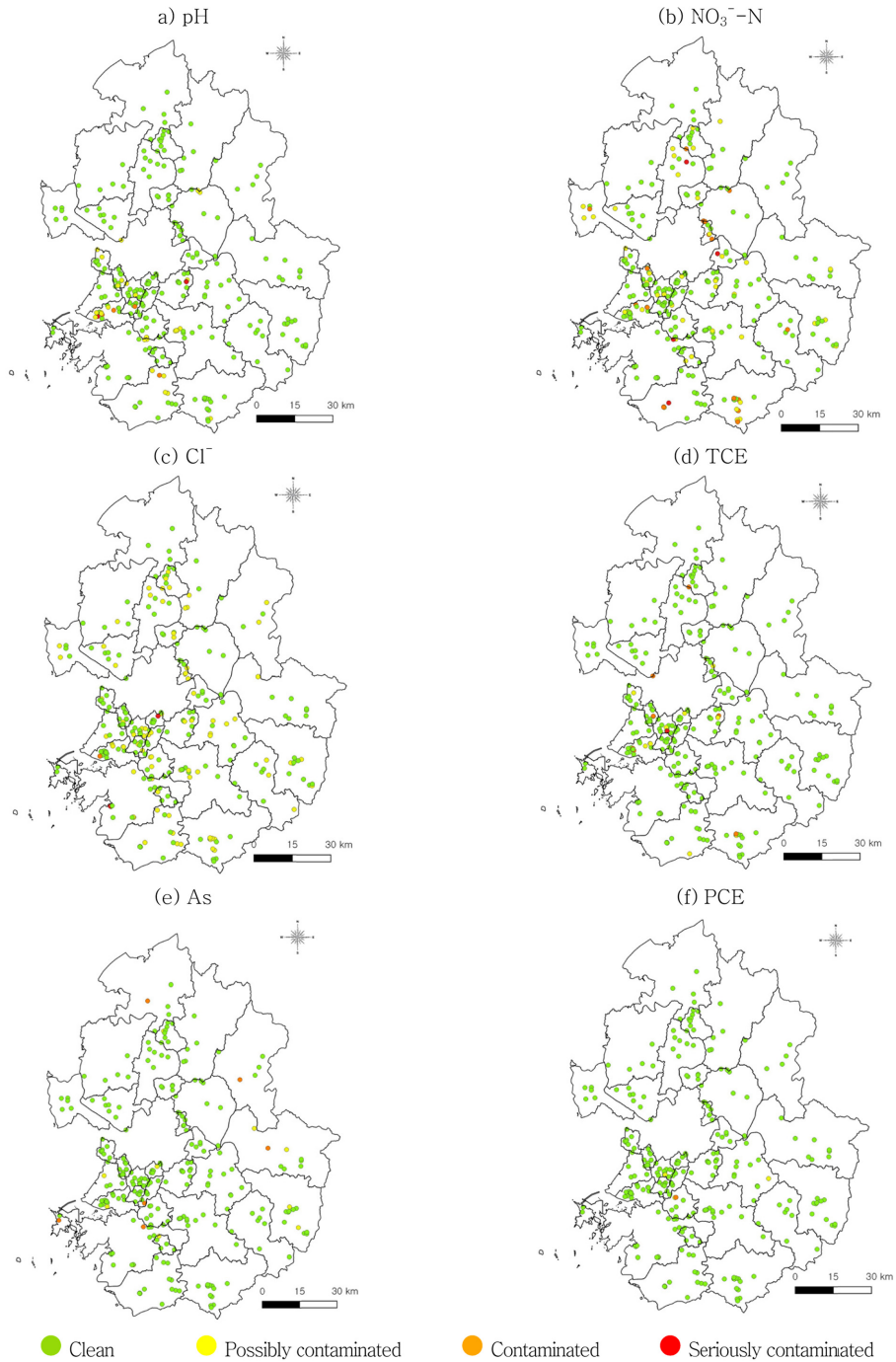


Fig. 3. Map of groundwater contamination grade in Gyeonggi-do from 2010-2017.

상관성을 파악하기 위하여, 먼저 Kolmogorov-Smirnov 정규성 검정과 Shapiro-Wilk 정규성 검정을 수행한 결과 유의확률이 0.00으로 유의수준 0.05보다 작아 모집단의 분포는 정규분포를 따르지 않으므로 비모수적 상

관분석방법인 Spearman의 순위상관계수로 상관분석 수행하였으며 그 결과를 Table 5에 나타내었다.¹⁶⁾ 영향인자는 지역(Area), 사용용도(Purpose of use), 토지이용(Land use), 관정 개방유무 (Opening of facilities), 관

Table 5. Spearman's rank correlation coefficients of test items

Item	Area	Purpose	Land use	Opening of facilities	Management	Geological stratum	pH	NO ₃ -N	Cl	As	TCE	PCE	1,1,1-TCE	Benzene	Toluene
Area	1														
Purpose	0.085	1													
Land use	-0.018	0.128*	1												
Opening of facilities	0.283**	0.508**	0.065	1											
Management	0.283**	0.439**	0.070	0.827**	1										
Geological stratum	0.055	-0.037	-0.157*	0.040	0.043	1									
pH	0.029	0.188**	-0.142*	0.064	0.076	-0.122*	1								
NO ₃ -N	-0.107	0.139*	0.045	0.097	0.046	-0.011	-0.062	1							
Cl	0.062	0.138*	-0.014	0.084	0.088	-0.020	-0.046	0.139*	1						
As	0.049	-0.016	-0.129*	0.040	-0.018	0.108	-0.021	-0.130*	-0.069	1					
TCE	0.068	0.252**	0.100	0.126*	0.134*	0.038	0.175**	0.135*	0.015	-0.031	1				
PCE	0.000	0.094	0.064	0.081	0.084	-0.064	0.010	-0.014	0.049	-0.032	0.078	1			
1,1,1-TCE	0.000	0.121*	0.059	0.057	0.059	0.030	0.059	0.121*	-0.058	-0.022	0.295**	0.346**	1		
Benzene	0.000	0.021	0.041	0.040	0.042	0.043	0.115	0.085	-0.041	-0.016	0.204**	-0.008	-0.005	1	
Toluene	-0.070	0.075	-0.017	0.057	0.059	-0.010	-0.044	-0.053	-0.058	0.163**	-0.027	-0.011	-0.007	-0.005	1

** Correlation is significant at the 0.01 level

* Correlation is significant at the 0.05 level

리주체(Management), 지질(geological stratum)별로 수행하였다.

지역(Area)은 일반지역과 오염우려지역으로 구분하여 지역별 분석항목간 상관관계를 통계분석한 결과 지역별로는 뚜렷한 상관성을 나타내지 않았다. 음용수, 생활용수, 공업용수, 농업용수로 나누어지는 지하수 용도(Purpose)와 분석항목간 상관분석을 수행한 결과 TCE의 상관계수가 0.252로 유의한 상관관계였으며, 그 외는 상관성이 없는 것으로 나타났다. 토지이용별 분류는 국토지리정보원과 국토부 토지이용규제정보시스템을 이용하여 농업, 자연초지, 임목지 등은 농업지역으로, 상업지, 교통지역, 공공지는 상업지역으로, 공업시설 등은 공업지역으로, 그 외는 주거지역으로 분류하였다.¹⁷⁾ 그러나 토지이용과 분석항목간은 뚜렷한 상관성을 나타내지 않았다. 그리고 관정 개방 유무에 따라 개방과 미개방으로 분류하여 분석항목간 상관분석을 수행한 결과와 지질을 퇴적암, 변성암, 화성암으로 분류하여 상관분석을 수행하였지만 뚜렷한 상관성을 나타내지 않았다. 따라서 향후 현장조사를 통한 토지이용실태나 암반구조 특성에 대한 조사를 통해 상관성에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다. 분석항목간 상관성을 살펴보면 TCE는 1,1,1-TCE, Benzene의 상관계수가 각각 0.295, 0.204로 유의한 상관관계를 나타내었으며,

PCE는 1,1,1-TCE와 상관계수 0.346으로 유의한 상관관계로 나타났다.

3.5. 영향인자별 평균오염지수 비교분석

전지점에 대한 항목별 평균오염지수를 Fig. 4에 나타내었다. NO₃-N이 0.39로 가장 높았으며, Cl, pH, TCE, As 순으로 높았으며, 그 외 항목은 거의 0이거나 0에 근접하였다. 이는 윤 등⁷⁾의 연구 결과와 일치하였다.

전체 지점에 대한 항목별 오염지수를 구하고 각 영향인자별로 분류하여 통계적으로 유의한 차이가 있는지를 알아보기 위하여 비모수적 방법인 2-독립 표본 비모수검정과 K-독립 표본 비모수검정을 수행하여 지하

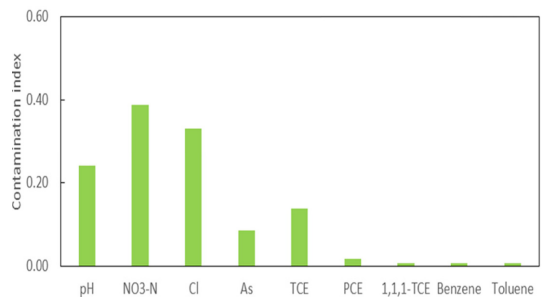


Fig. 4. Average contamination index of the analyzed items.

Table 6. Mann-Whitney test results of analysis items by area

Item	Mean rank		Sum of ranks		Mann-Whitney U	Wilcoxon W	Z	p*
	General area (N = 155)	Contamination concerned area (N = 114)	General area (N = 155)	Contamination concerned Area (N = 114)				
pH	123.23	151.00	19101.0	17214.0	7011.0	19101.0	-4.101	0.000
NO ₃ ⁻ -N	125.77	147.55	19494.0	16821.0	7404.0	19494.0	-2.888	0.004
Cl ⁻	129.90	141.94	20134.0	16181.0	8044.0	20134.0	-1.559	0.119
As	138.71	129.96	21499.5	14815.5	8260.5	14815.5	-2.161	0.031
TCE	124.66	149.06	19322.0	16993.0	7232.0	19322.0	-5.143	0.000
PCE	133.00	137.72	20615.0	15700.0	8525.0	20615.0	-2.345	0.019
1,1,1-TCE	134.00	136.36	20770.0	15545.0	8680.0	20770.0	-1.652	0.099
Benzene	134.50	135.68	20847.5	15467.5	8757.5	20847.5	-1.166	0.244
Toluene	135.74	134.00	21039.0	15276.0	8721.0	15276.0	-1.215	0.224

*p: Asymptotic significance probability

수 수질측정망의 수질특성 파악하였다.

일반지역과 오염우려지역으로 분류하여 지역에 따라 분석항목 오염지수에 차이가 있는지를 비교하기 위해 비모수 검정법인 Mann-Whitney 검정(Mann-Whitney U test)을 수행하였으며, 그 결과를 Table 6에 나타내었으며, 혼합순위의 평균값(Mean rank)과 순위합(Sum of ranks), Mann-Whitney 검정 통계량(U), Wilcoxon의 순위합 통계량(W)과 이 값을 표준화시킨 Z값, 근사유의확률(Asymptotic significance probability, p)을 산출하였다. pH, NO₃⁻-N, TCE, PCE의 오염지수 평균순위는 오염우려지역이 일반지역보다 높았으며, 유의수준 5%내에서 근사 유의확률(p)은 0.000, 0.004, 0.000, 0.019이며 유의수준이하로 나타나 통계적으로 유의하여 오염우려지역이 일반지역보다 오염지수가 높다고 평가할 수 있다. 반면에 As의 평균순위는 일반지역이 더 높았

으며 유의수준 5%내에서 근사유의확률(p)이 0.031로 통계적으로 유의한 차이를 나타냈다. 나머지 항목은 유의확률이 유의수준보다 높아 통계적으로 유의하지 않았다. 윤 등⁷⁾의 연구결과에서도 오염우려지역에서 이들 항목의 오염지수가 높게 나타나는 경향을 보였다.

음용여부별로 음용과 비음용으로 분류하여 분석항목 오염지수에 차이가 있는지를 검정한 결과를 Table 7에 나타내었다. 검정결과 pH, NO₃⁻-N, TCE의 오염지수 평균순위는 비음용수가 음용수보다 높았으며, 유의수준 5%내에서 근사유의확률(p)은 0.047, 0.012, 0.000이며 유의수준이하로 나타나 통계적으로 유의하여서 비음용수가 음용수보다 오염지수가 높다고 평가할 수 있다. 그 외 항목은 유의확률이 유의수준보다 높아 통계적으로 유의한 차이가 없었다.

시설개방유무에 따라 개방과 미개방으로 분류하여 분

Table 7. Mann-Whitney test results of analysis items by drinking status

Item	Mean rank		Sum of ranks		Mann-Whitney U	Wilcoxon W	Z	p*
	Drinking (N = 106)	Non-drinking (N = 163)	Drinking (N = 106)	Non-drinking (N = 163)				
pH	126.77	140.35	13438.0	22877.0	7767.0	13438.0	-1.983	0.047
NO ₃ ⁻ -N	123.42	142.53	13082.5	23232.5	7411.5	13082.5	-2.505	0.012
Cl ⁻	128.13	139.47	13582.0	22733.0	7911.0	13582.0	-1.451	0.147
As	134.18	135.53	14223.5	22091.5	8552.5	14223.5	-0.329	0.742
TCE	124.32	141.94	13178.0	23137.0	7507.0	13178.0	-3.673	0.000
PCE	134.26	135.48	14232.0	22083.0	8561.0	14232.0	-0.597	0.551
1,1,1-TCE	134.00	135.65	14204.0	22111.0	8533.0	14204.0	-1.143	0.253
Benzene	134.50	135.33	14257.0	22058.0	8586.0	14257.0	-0.806	0.420
Toluene	134.00	135.65	14204.0	22111.0	8533.0	14204.0	-1.143	0.253

*p: Asymptotic significance probability

Table 8. Mann-Whitney test results of analysis items by opening of facilities

Item	Mean rank		Sum of ranks		Mann-Whitney U	Wilcoxon W	Z	p*
	Open (N = 82)	Non-open (N = 187)	Open (N = 82)	Non-open (N = 187)				
pH	129.70	137.33	10635.0	25680.0	7232.0	10635.0	-1.050	0.294
NO ₃ ⁻ -N	126.10	138.90	10340.0	25975.0	6937.0	10340.0	-1.581	0.114
Cl ⁻	127.06	138.48	10419.0	25896.0	7016.0	10419.0	-1.377	0.168
As	133.02	135.87	10907.5	25407.5	7504.5	10907.5	-0.656	0.512
TCE	127.70	138.20	10471.5	25843.5	7068.5	10471.5	-2.061	0.039
PCE	133.00	135.88	10906.0	25409.0	7503.0	10906.0	-1.332	0.183
1,1,1-TCE	134.00	135.44	10988.0	25327.0	7585.0	10988.0	-0.938	0.348
Benzene	134.50	135.22	11029.0	25286.0	7626.0	11029.0	-0.662	0.508
Toluene	134.00	135.44	10988.0	25327.00	7585.0	10988.0	-0.938	0.348

*p: Asymptotic significance probability

석항목 오염지수의 평균순위가 차이 검정 결과를 Table 8에 나타내었다. 검정결과 TCE의 오염지수 평균순위는 미개방시설이 개방시설보다 높았으며, 평균차이 검정결과 유의수준 5%내에서 근사유의확률(p)은 0.039로 유의수준보다 낮아 통계적으로 유의한 차이가 있었다. 따라서 TCE의 평균순위는 미개방시설이 개방시설에 비해 높았다. 그 외 항목은 유의확률이 유의수준보다 높아 통계적으로 유의한 차이가 없었다.

시설관리주체에 따라 공공기관과 민간기관으로 분류하여 분석항목 오염지수의 평균순위 차이검정 결과를 Table 9에 나타내었다. 혼합순위의 평균값과 순위합은 모두 민간기관이 공공기관보다 높은 경향이였다. 평균차이 검정결과 TCE의 오염지수 평균순위는 민간기관이 공공기관보다 높았으며, 평균차이 검정결과 유의수준 5%내에서 근사유의확률(p)이 0.028로 유의수준보다

낮아 통계적으로 유의한 차이가 있었다. 그 외 항목의 유의확률은 유의수준보다 높아 통계적으로 유의한 차이가 없었다. 따라서 시설관리주체에 따른 분석항목 평균차이는 TCE만 민간기관이 공공기관보다 높은 차이를 보이며, 다른 항목은 뚜렷한 차이를 나타내지 않는다.

지하수 사용용도를 음용수, 생활용수, 공업용수, 농업용수로 분류하여 사용용도에 따라 분석항목 오염지수의 평균순위 차이를 검증하기 위해 검정유형은 Kruskal-Wallis의 H 검정(Kruskal-Wallis test)을 사용하여 K-독립 표본 비모수검정을 실시한 결과를 Table 10에 나타내었다. 유의수준 5%내에서 유의확률이 유의수준이하일 때 사후분석(Post hoc test)을 위해 검정유형은 Mann-Whitney의 U 검정(Mann-Whitney U test)을 사용하여 2-독립 표본 비모수검정을 수행하여 서로 다른 두 집단씩 평균순위를 비교하였다.

Table 9. Mann-Whitney test results of analysis items by management status

Item	Mean rank		Sum of ranks		Mann-Whitney U	Wilcoxon W	Z	p*
	Public (N = 86)	Private (N = 183)	Public (N = 86)	Private (N = 183)				
pH	128.95	137.84	11090.0	25225.0	7349.0	11090.0	-1.239	0.215
NO ₃ ⁻ -N	130.87	136.94	11255.0	25060.0	7514.0	11255.0	-0.759	0.448
Cl ⁻	127.02	138.75	10924.0	25391.0	7183.0	10924.0	-1.433	0.152
As	135.87	134.59	11685.0	24630.0	7794.0	24630.0	-0.299	0.765
TCE	127.48	138.53	10963.5	25351.5	7222.5	10963.5	-2.198	0.028
PCE	133.00	135.94	11438.0	24877.0	7697.0	11438.0	-1.379	0.168
1,1,1-TCE	134.00	135.47	11524.0	24791.0	7783.0	11524.0	-0.971	0.331
Benzene	134.50	135.23	11567.0	24748.0	7826.0	11567.0	-0.686	0.493
Toluene	134.00	135.47	11524.0	24791.0	7783.0	11524.0	-0.971	0.331

*p: Asymptotic significance probability

Table 10. Kruskal-Wallistest results of analysis items by purpose of use

Item	Purpose of use	N	Mean rank	Chi-square (χ^2)	<i>p</i> *	Post hoc test
pH	Drinking water (a)	106	126.77	13.569	0.004	c, d > a
	Living water (b)	106	131.25			
	Industrial water (c)	47	153.47			
	Agricultural water (d)	10	175.20			
NO ₃ ⁻ -N	Drinking water (a)	106	123.42	7.238	0.065	-
	Living water (b)	106	141.92			
	Industrial water (c)	47	147.28			
	Agricultural water (d)	10	126.70			
Cl ⁻	Drinking water (a)	106	128.13	7.166	0.067	-
	Living water (b)	106	131.44			
	Industrial water (c)	47	153.30			
	Agricultural water (d)	10	159.50			
As	Drinking water (a)	106	134.18	1.937	0.586	-
	Living water (b)	106	137.91			
	Industrial water (c)	47	132.10			
	Agricultural water (d)	10	126.50			
TCE	Drinking water (a)	106	124.32	25.676	0.000	c > b > a
	Living water (b)	106	136.77			
	Industrial water (c)	47	157.65			
	Agricultural water (d)	10	123.00			
PCE	Drinking water (a)	106	134.26	9.647	0.022	c > b
	Living water (b)	106	133.00			
	Industrial water (c)	47	141.60			
	Agricultural water (d)	10	133.00			
1,1,1-TCE	Drinking water (a)	106	134.00	9.482	0.024	-
	Living water (b)	106	134.00			
	Industrial water (c)	47	139.72			
	Agricultural water (d)	10	134.00			
Benzene	Drinking water (a)	106	134.50	1.538	0.674	-
	Living water (b)	106	135.77			
	Industrial water (c)	47	134.50			
	Agricultural water (d)	10	134.50			
Toluene	Drinking water (a)	106	134.00	2.139	0.544	-
	Living water (b)	106	135.27			
	Industrial water (c)	47	136.86			
	Agricultural water (d)	10	134.00			

**p*: Asymptotic significance probability

사용용도별 pH, TCE, PCE, 1,1,1-TCE의 평균순위는 유의수준 5%내에서 근사유의확률(*p*)이 각각 0.004, 0.000, 0.022, 0.024로 유의수준보다 낮아 통계적으로 유의한 차이가 있었다. 그래서 Mann-Whitney의 U 검정으로 사후분석을 실시한 결과 pH의 오염지수 평균순위는 농업용수와 공업용수가 음용수보다 높았으며, TCE는 공업용수, 생활용수, 음용수순으로 높았고, PCE는 공

업용수가 생활용수에 비해 높았지만, 1,1,1-TCE는 뚜렷한 차이를 나타내지 않았다. 그 외 항목은 유의확률이 유의수준보다 높아 통계적으로 유의한 차이가 없었다.

토지이용에 따라 농업지역, 상업지역, 공업지역, 거주지역으로 분류하여 분석항목 오염지수의 평균순위가 통계적으로 유의한 차이가 있는지 알아보기 위해 K-독립표본 비모수검정을 수행한 결과를 Table 11에 나타내

Table 11. Kruskal-Wallis test results of analysis items by land use

Item	Purpose of use	N	Mean rank	Chi-square (χ^2)	<i>p</i> *	Post hoc test
pH	Agricultural area (a)	112	141.64	13.118	0.004	a, b, c > d
	Business area (b)	52	132.19			
	Industrial area (c)	41	150.68			
	Residential area (d)	64	115.61			
NO ₃ ⁻ -N	Agricultural area (a)	112	132.25	1.108	0.775	-
	Business area (b)	52	131.95			
	Industrial area (c)	41	142.74			
	Residential area (d)	64	137.34			
Cl ⁻	Agricultural area (a)	112	137.32	5.922	0.115	-
	Business area (b)	52	121.95			
	Industrial area (c)	41	152.39			
	Residential area (d)	64	130.41			
As	Agricultural area (a)	112	138.62	5.799	0.122	-
	Business area (b)	52	139.31			
	Industrial area (c)	41	129.71			
	Residential area (d)	64	128.55			
TCE	Agricultural area (a)	112	129.99	39.554	0.000	c > a, d
	Business area (b)	52	125.47			
	Industrial area (c)	41	169.55			
	Residential area (d)	64	129.38			
PCE	Agricultural area (a)	112	133.00	12.219	0.007	c > a
	Business area (b)	52	135.58			
	Industrial area (c)	41	142.85			
	Residential area (d)	64	133.00			
1,1,1-TCE	Agricultural area (a)	112	134.00	11.164	0.011	-
	Business area (b)	52	134.00			
	Industrial area (c)	41	140.56			
	Residential area (d)	64	134.00			
Benzene	Agricultural area (a)	112	134.50	5.561	0.135	-
	Business area (b)	52	134.50			
	Industrial area (c)	41	137.78			
	Residential area (d)	64	134.50			
Toluene	Agricultural area (a)	112	135.20	2.491	0.477	-
	Business area (b)	52	134.00			
	Industrial area (c)	41	137.28			
	Residential area (d)	64	134.00			

**p*: Asymptotic significance probability

었다. 토지이용별 pH, TCE, PCE, 1,1,1-TCE의 평균순위는 유의수준 5%에서 근사유의확률(*p*)이 각각 0.004, 0.000, 0.007, 0.011인 유의수준이하로 통계적으로 유의한 차이를 보였다. Mann-Whitney의 U 검정으로 사후분석을 실시한 결과 pH의 오염지수 평균순위는 농업·상업·공업지역이 거주지역보다 높았으며, TCE는 공업지역이 농업·거주지역보다 높았다. 그리고 PCE는 공업지

역이 농업지역에 비해 높았지만, 1,1,1-TCE는 사후분석에서 뚜렷한 차이가 없었다. 그 외 항목은 유의확률이 유의수준보다 높아 통계적으로 유의한 차이가 없었다.

지질에 따라 퇴적암, 변성암, 화성암으로 분류하여 분석항목 오염지수의 평균순위가 통계적으로 유의한 차이가 있는지 검정한 결과를 Table 12에 나타내었다. 지질별 pH, As의 평균순위는 유의수준 5%내에서 근사유의

Table 12. Kruskal-Wallis test results of analysis items by geological stratum

Item	Purpose of use	N	Mean rank	Chi-square (χ^2)	<i>p</i> *	Post hoc test
pH	sedimentary rock (a)	139	139.43	7.235	0.027	a, b > c
	metamorphic rock (b)	90	137.69			
	igneous rock (c)	40	113.55			
NO ₃ ⁻ -N	sedimentary rock (a)	139	137.92	4.581	0.101	-
	metamorphic rock (b)	90	124.79			
	igneous rock (c)	40	147.81			
Cl ⁻	sedimentary rock (a)	139	136.66	0.334	0.846	-
	metamorphic rock (b)	90	131.89			
	igneous rock (c)	40	136.23			
As	sedimentary rock (a)	139	130.47	7.953	0.019	b > a
	metamorphic rock (b)	90	142.86			
	igneous rock (c)	40	133.07			
TCE	sedimentary rock (a)	139	134.63	2.547	0.280	-
	metamorphic rock (b)	90	131.82			
	igneous rock (c)	40	143.43			
PCE	sedimentary rock (a)	139	135.91	1.119	0.571	-
	metamorphic rock (b)	90	134.49			
	igneous rock (c)	40	133.00			
1,1,1-TCE	sedimentary rock (a)	139	134.97	2.339	0.311	-
	metamorphic rock (b)	90	134.00			
	igneous rock (c)	40	137.36			
Benzene	sedimentary rock (a)	139	134.50	1.989	0.370	-
	metamorphic rock (b)	90	135.99			
	igneous rock (c)	40	134.50			
Toluene	sedimentary rock (a)	139	134.97	0.464	0.793	-
	metamorphic rock (b)	90	135.49			
	igneous rock (c)	40	134.00			

**p*: Asymptotic significance probability

확률(*p*)이 각각 0.027, 0.019로 통계적으로 유의한 차이가 있었다. 사후분석 결과 pH의 오염지수 평균순위는 퇴적암과 변성암이 화성암보다 높았으며, As는 변성암이 퇴적암에 비해 높았다. 그 외 항목은 유의확률이 유의수준보다 높아서 통계적으로 유의한 차이가 없었다. 향후 암반구조 특성에 대한 조사로 수질과의 상관성 및 인과관계에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

경기도 지하수 수질측정망의 장기간 수질특성을 파악하기 위하여 통계적 분석방법을 이용하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 세 가지 오염지시인자가 오염되었다고 판단한 지점의 비율인 오염지시율은 Cl⁻(31.2%)>NO₃⁻-

- N>(27.9%)>pH(20.8%)>TCE(8.9%)>As(6.3%)>PCE(1.5%) 순으로 높았으며, 나머지는 1% 이하였다. 분석항목간 상관성을 살펴보면 TCE는 1,1,1-TCE, Benzene의 상관계수가 각각 0.295, 0.204으로 유의한 상관관계를 나타내었으며, PCE는 1,1,1-TCE와 상관계수 0.346으로 유의한 상관관계를 나타냈다. 그리고 오염지시율이 높고 오염등급이 고티루분포하는 주요 6개 항목인 pH, NO₃⁻-N, Cl⁻, TCE, As, PCE에 대한 각 지점별 오염등급을 QGIS를 이용하여 지하수 수질오염지도를 작성하여 시각적으로 한눈에 알아볼 수 있도록 나타내었다.
2. 지하수 수질오염등급은 전지점 중 ‘안전등급(0)’은 68.8%이상(Cl⁻), ‘오염가능등급(1)’은 최대 30.1%이내(Cl⁻), ‘오염등급(2)’은 최대 7.1%이내(NO₃⁻-N), ‘오염심각등급(3)’은 최대 1.9% 이내(NO₃⁻-N)로 평

가되었으며 일반지역보다 오염우려지역의 오염등급이 높은 경향을 나타내었다.

3. 전지점에 대한 항목별 평균오염지수는 NO_3^- -N, Cl⁻, pH, TCE, As순으로 높았으며, 각 영향인자별로 오염지수의 차이를 비교하기 위해 비모수 검정법인 Mann-Whitney의 U 검정을 사용하여 평균순위 차이검정을 실시한 결과 지역별로는 pH, NO_3^- -N, TCE, PCE의 오염지수 평균순위는 오염우려지역이 일반지역보다 높았지만, As는 일반지역이 높게 나타났다. 음용여부별로는 pH, NO_3^- -N, TCE의 오염지수 평균순위는 비음용수가 음용수보다 높았으며, 시설개방유무별로는 TCE의 오염지수 평균순위는 미개방시설이 개방시설보다 높았고, 시설관리주체별로도 TCE의 오염지수 평균순위는 민간기관이 공공기관보다 높았다.
4. 영향인자가 세 집단이상일때 오염지수의 차이를 비교하기 위해 비모수 검정방법인 Kruskal-Wallis의 H 검정을 수행하였고 사후분석법으로 Mann-Whitney의 U 검정을 사용하여 평균순위 차이검정을 실시한 결과 사용용도별로는 pH의 오염지수 평균순위는 농업용수와 공업용수가 음용수보다 높았으며, TCE는 공업용수, 생활용수, 음용수순으로 높았고, PCE는 공업용수가 생활용수에 비해 높았다. 토지이용별 pH의 오염지수 평균순위는 농업·상업·공업지역이 거주지역보다 높았으며, TCE는 공업지역이 농업·거주지역보다 높았고, PCE는 공업지역이 농업지역에 비해 높았다. 지질별로는 pH의 오염지수 평균순위는 퇴적암과 변성암이 화성암보다 높았으며, As는 변성암이 퇴적암에 비해 높았다.
5. 경기도내 지하수수질측정망의 전지점에 대한 통계분석 결과 오염도가 높은 영향인자는 오염우려지역, 미개방시설, 민간기관, 공업용수, 공업지역이었다. 따라서 이들 영향인자와 지질, 토지이용현황 등 환경조건과의 인과관계에 대한 추가 연구를 수행하여 적극적인 관리방안이 마련되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국립환경과학원의 지원사업(2019-01-03-001)으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 한정상, “지하수 환경과 오염”, 2000, 2판, 1-7, 박영사.
2. 환경부, “지하수 수질측정망 설치 및 수질오염실태 측정계획”, 2017.
3. 지화성, 조갑제, 정경원, 김주인, 이정심, “다변량 통계 분석을 이용한 부산지역 지하수 수질측정망의 수질 특성”, *부산광역시보건환경연구원보*, 2013, 23(1), 160-175.
4. 이순진, 박민숙, 정윤숙, 정연옥, 윤호석, 윤현숙, “대구 지역 지하수 수질측정망의 수질특성분석”, *한국물환경학회·대한상하수도학회 공동총회학술발표회 논문집*, 2006, 1143-1152.
5. 김재광, 권경안, 변주형, 박진호, 박현구, 임윤정, “경기 북부지역 지하수 수질측정망에 대한 수질특성 연구”, *경기도보건환경연구원보*, 2007, 20, 207-214.
6. 방사라, 유근재, 박준홍, “지하수 수질측정망 자료를 활용한 시간적 오염도 추이변화분석”, *한국물환경학회*, 2011, 27(1), 120-128.
7. 윤희성, 배광욱, 이강근, “통계적 분석 방법을 이용한 국가지하수 수질측정망의 오염등급 정량화 및 평가”, *한국지하수도양환경학회*, 2012, 17(1), 22-32.
8. 환경부, “지하수 오염원 정량적 관리 및 중속 생태환경 모델링 기술 개발”, 2011, 29-39.
9. 환경부, 토양지하수종합정보시스템(<http://sgis.nier.go.kr/>), March, 2019.
10. 최현미, 이진용, “제주도 지하수 관측망 수위에 대한 모수 및 비모수 변동경향 분석”, *한국지하수도양환경학회*, 2009, 14(5), 41-50.
11. 이진용, 이명재, 안경환, 원종호, 문상호, 조민조, “국가 지하수관측소 지하수위, 전기전도도 및 수온자료에 대한 모수적 및 비모수적 변동 경향성 분석”, *한국지하수도양환경학회*, 2006, 11(2), 56-67.
12. P. K. Sen, “Estimate of the regression coefficient based on Kendall’s tau”, *J. Am. Stat. Assoc.*, 1968, 63, 1379-1389.
13. G. Maurice, and S. D. Kendall, “Rank correlation methods”, 1955, 196, Hafner Publishing Company, New York, NY.
14. 김지영, 배용수, 박진호, 손영금, 오조교, “QGIS를 이용한 토양오염지도 작성에 관한 연구”, *경기도보건환경연구원보*, 2018, 31, 323-332.
15. QGIS(2.18.28), <https://www.qgis.org/ko/site>, June, 2019.
16. 서의훈, “SPSS 24를 이용한 통계분석”, 2020, 제1판2쇄, 102-105, 412-423, 자유아카데미.
17. 장서은, 이대행, 김종민, 김하람, 정숙경, 배석진, 조영관, “통계적 기법을 이용한 광주지역 민방위비상급수용 지하수 수질 오염도 분석 및 시각화 연구”, *한국분석과학회지*, 2018, 31(3), 122-133.