

## Visualization and contamination analysis for groundwater quality of CDEWSF<sup>†</sup> in Gwangju area using statistical method

Seoeun Jang<sup>★</sup>, Daehaeng Lee, Jongmin Kim, Haram Kim, Sukkyung Jeong,  
Seokjin Bae, and Youngwan Cho

*Health and Environment Research Institute of Gwangju, Gwangju 61986, Korea*

(Received February 23, 2018; Revised June 12, 2018; Accepted June 13, 2018)

## 통계적 기법을 이용한 광주지역 민방위비상급수용 지하수 수질 오염도 분석 및 시각화 연구

장서은<sup>★</sup> · 이대행 · 김종민 · 김하람 · 정숙경 · 배석진 · 조영관

광주광역시보건환경연구원

(2018. 2. 23. 접수, 2018. 6. 12. 수정, 2018. 6. 12. 승인)

**Abstract** In this study, groundwater quality data measured for 11 years from 2006 to 2016 were analyzed statistically for 101 civil defense emergency water supply facilities (CDEWSF) in the Gwangju area. The contamination level was quantified into four grades by using excess drinking water quality standards, average concentration analysis, and tendency analysis results for each facility. On the basis of this approach, the groundwater contamination degree of each item was evaluated according to land use status, installation year, depth, and geological distribution. The contamination grade ratios, which were obtained by analyzing three contamination indicators (water quality exceeded frequency, average concentration analysis, and trend analysis) for 15 items on statistically significant of civil defense emergency water was relatively high, in the order of Turbidity (51.5%) > Color (32.7%) > Nitrate nitrogen (28.7%) > Hardness (25.7%). As a result of the contamination grade analysis, except for the items of Turbidity, Color, and Nitrate nitrogen, the contamination levels were distributed in various degrees from “clean (0)” to “seriously contaminated (3).” Regarding the contamination grade of 12 items, 25% of the total were classified as “possibly contaminated (1),” and 75% were rated “clean (0).” The four items (Turbidity, Color, Nitrate nitrogen, and Hardness) for which contamination indication rate were evaluated as “high” by the were visualized on a contamination map.

**요약** 본 연구에서는 광주지역 민방위비상급수시설 101 개소를 대상으로 2006년부터 2016년까지 11년 동안 측정된 지하수 수질자료를 통계적으로 분석하였으며, 각 시설별로 먹는물 수질기준 초과횟수와 평균농도 분석 및 경향성 분석을 실시하고, 그 분석결과를 이용하여 4 개의 오염등급으로 구분하였다. 또

<sup>†</sup>CDEWSF : Civil defense emergency water supply facilities

<sup>★</sup> Corresponding author

Phone : +82-(0)62-613-7517 Fax : +82-(0)62-613-7619

E-mail : mycosmos11@korea.kr

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

한 이를 바탕으로 토지이용 현황별로 각 항목의 지하수 오염도를 평가하였다. 통계적으로 유의한 민방위 비상급수 15 개 항목에 대한 수질기준초과횟수, 평균농도분석, 경향성분석의 세가지 오염지시인자를 분석하여 합산한 결과 Turbidity (51.5 %) > Color (32.7 %) > Nitrate nitrogen (28.7 %) > Hardness (25.7 %) 순으로 오염 지시율이 상대적으로 높게 평가되었다. 오염등급 분석결과 안전(0)부터 오염심각(3)까지 오염등급이 다양하게 분포한 Turbidity, Color, Nitrate nitrogen의 3 개 항목을 제외하면 12 개 항목의 수질 오염등급은 전체의 25 %는 ‘오염가능한 등급(1)’으로, 75%는 ‘안전한 등급(0)’으로 평가되었다. QGIS를 이용하여 오염 지시율이 높게 평가된 4 개 항목(Turbidity, Color, Nitrate nitrogen, Hardness)은 오염지도에 작성하여 오염등급을 시각화하였다.

**Key words:** groundwater quality, contamination grade, statistical analysis, emergency water supply, visualization

## 1. 서 론

지하수는 지하에 존재하는 자원 중 빗물에 의한 재충전이 가능하여 지속적인 사용이 가능한 자원이다. 또한 기상변화와 외부 오염원에 영향을 많이 받는 지표수와 달리 수량과 수질이 안정적이며 안전하다는 장점을 지니고 있다. 그러나 무분별한 지하수 사용과 산업발달에 따른 지하수 오염은 심각한 상황에 이르고 있으며, 미래 후손에게 남겨줘야 할 소중한 수자원이므로 보호와 관리가 필요한 실정이다.<sup>1</sup>

1960년대 이후 경제개발 위주의 정책으로 상수원인 지표수의 수질이 악화되자 지하수의 중요성과 관리의 필요성을 인식하여 지하수를 체계적이고 효율적으로 개발하고 보호하도록 1993년 12월에 지하수법을 제정하였고, 1995년과 1997년에 현실에 맞게 대폭 개정하였다. 그러나 농업용수, 생활용수, 공업용수 등 지하수의 용도별 관리주체가 달라 일원화된 관리체계가 부족한 실정으로 지하수의 개발, 폐공, 정기적 수질검사, 사용신고 등에서 일관성 있는 관리가 되지 않음으로 인해 지하수의 오염이 우려되고 있다. 본 연구의 대상인 민방위비상급수는 비상 및 재난시 상수도 시설이 파괴되거나 갈수기 용수 부족시에 시민들에게 안정적으로 물을 공급하기 위한 시설로 행정안전부 소관으로 각 자치구에서 지정·관리 하고 있다.

광주지역의 지하수 대수층은 주로 화강암 저지대 분지로 형성되어 있으며, 동남부 무등산(1,187 m) 일대의 고지대가 지하수의 주요 함양원이다.<sup>2</sup> 광주광역시 White paper of environment (2016)에 의하면 광주 지역에 산재한 관정 수는 2015년 말 기준으로 약 11,614 개소이며,<sup>3</sup> 이 중 개발포기 또는 사용중단으로 방치된 폐공도 상당수에 달하는 것으로 추정된다. 폐공을 통한 각종 오염물질의 유입, 또는 생활하수가 도

심을 가로지르는 광주천에 유입되어 투수층을 통해 오염된 하천수가 지하로 유입됨으로서 지하수의 수질을 악화시키기도 한다. 그 중 광주지역 민방위비상급수 시설은 폐쇄와 신규지정으로 연도별로 변화가 있으나 180 개소이며, 이 중 먹는물 용도로 지정된 곳은 연도별 변화에 따라 90~101개소이다. 주변에서 손쉽게 접근할 수 있는 지하수인 민방위비상급수는 용도가 음용수이지만 대부분 생활용수로 사용하거나 비개방 시설이며, 시설의 노후화 등으로 수질이 악화된 시설은 시설개선이 필요하지만 예산 부족 또는 관정확보의 어려움으로 신규지정의 어려움으로 원활한 시설 관리가 어려운 실정이다.

지하수 수질특성과 관련된 연구는 지하수의 기원 해석, 다양한 통계분석 등을 이용한 수질특성에 관한 연구 등이 많이 수행되어 오고 있다.<sup>4</sup> 광주광역시의 지하수에 대한 수질 연구는 Sung (2001)에<sup>5</sup> 의하여 수행되었고, 지하수의 지화학적 특성 연구는 Park *et al.* (1999)와<sup>6</sup> Lee *et al.* (2002)에<sup>7</sup> 의해 보고된 바 있지만, 광주지역에서 지하수의 오염과 수질특성을 정량적으로 해석한 연구는 미비한 실정이다. 또한 민방위비상급수의 분기별 정기적 검사가 이루어지고 있으나 장기적인 평가가 이루어지지 않고 있다. 따라서 정도 관리가 확보된 장기적 수질 데이터를 활용하여 다각적인 통계적 분석과 해석을 통해 지하수 수질 특성을 규명하고 부적합 시설에 대한 개별적인 대책 마련에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 광주지역의 민방위비상급수로 이용되는 지하수의 11년간 수질검사 결과를 바탕으로 수질항목의 농도 변화를 통계적으로 분석하고, 다변량 통계 기법으로 각 시설별 먹는물 수질기준 초과횟수와 평균농도 분석, 경향성 분석의 3 가지 오염지시인자를 이용하여 오염등급을 정량화하고 시각화 하였으

며, 비상급수시설 주변 토지이용현황이나 설치연도별로 지하수 오염도를 분석하여 민방위비상급수의 수질 관리에 반영하고자 하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 조사대상 및 분석방법

본 연구에서는 데이터 확보와 접근이 비교적 용이한 광주지역의 먹는물 용도로 이용되고 있는 민방위비상급수시설로 지정된 101 개소의 지하수 수질측정 자료를 이용하였으며, Fig. 1에 분포를 나타내었다. 민방위비상급수의 수질분석은 먹는물공정시험기준에서<sup>8</sup> 규정된 46 개 항목의 방법에 의하였으며, 2006년부터 2016년까지 101 개 지점에 대해 한 지점당 최대 18회의 수질측정자료를 이용하여 통계적 방법을 통해 지하수 수질 특성을 분석하고 정량화 하였다.

### 2.2. 데이터 선정

본 연구에서 수집된 자료의 통계분석은 대표할 수 있는 수질 측정값을 선별하기 위해 각 지점마다 각 항목에 대해 SPSS (ver 2.0)를 이용한 BOX PLOT을 통해 극한 이상치를 제거 하였다. 광주지역 지하수의 오염정도를 평가하는 오염지수산출방법으로 환경부에서 2011년도에 보고한 지하수 오염원 정량적 관리 및 중속 생태환경 모델링 기술 개발에<sup>9,10</sup> 제시된 통계적 분석 방법을 적용하였다. 따라서 사전에 적용 적합 여부를 검증하기 위한 통계적 검증을 실시하였고, 전체지점

의 수질측정농도에 대해 항목별로 정규분포를 이루는지 알아보기 위해 Kolmogorov-Smirnov검정과 Shapiro-Wilk검정<sup>11</sup>을 실시하였다. 또한 46 개 항목 중 통계적 분석 대상 항목을 선정하기 위해 각 항목에 대해 평균, 표준편차 등 기술통계분석을 실시하였고, 각 급수시설 간의 수질 측정 농도의 차이가 있는지 알아보기 위해 정규분포의 제한을 받지 않는 Kruskal-Wallis검정<sup>12</sup> 실시하여 분석대상 항목을 선정하였다.

### 2.3. 오염등급 정량화를 위한 오염지수산출방법

광주지역의 민방위비상급수의 오염도를 정량화 하기 위해 각 시설에 대해 항목별로 먹는물 수질기준 초과횟수 조사와 평균농도분석, 경향성 분석을 실시하여 각 분석방법을 오염지수인자로 설정하였다.

수질기준초과횟수는 분석대상항목으로 선정된 항목에 대하여 먹는물 수질기준을 초과한 횟수를 조사하여 초과횟수가 1이상일 때 오염을 지시하는 것으로 하였다. 평균농도분석은 각 시설의 선정된 항목에 대해 측정된 농도의 평균과 표준편차를 계산하고 평균농도의 95% 신뢰구간(식 (1))을 계산하여 평균농도의 95% 신뢰구간의 상한선이 수질기준보다 높은 경우 오염을 지시하는 것으로 하였다.<sup>9,10</sup>

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

$\bar{X}$ 는 평균,  $\sigma$ 는 표준편차,  $n$ 은 측정횟수를 나타낸다. 통계적 방법을 이용한 경향성분석은 측정 자료가 정규분포로 제한되지 않는 모수적 기법으로 Mann-

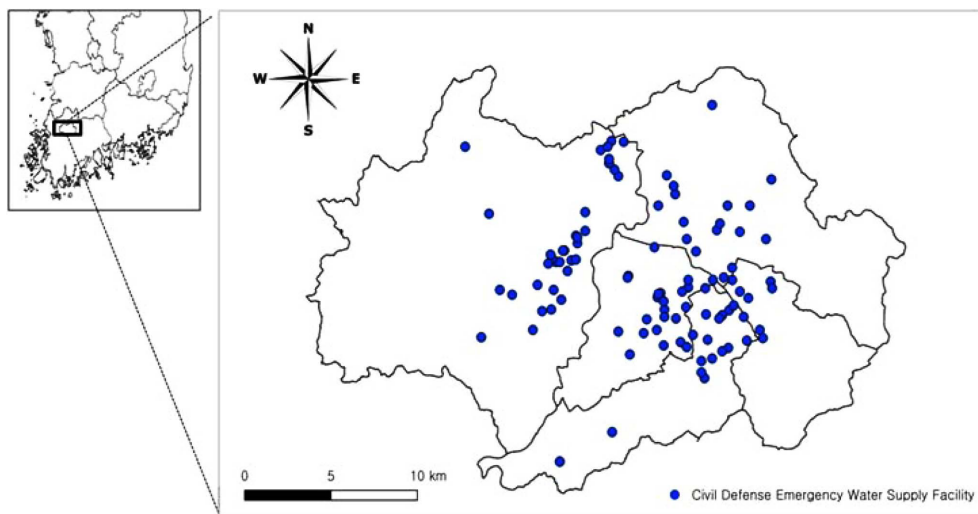


Fig. 1. Distribution of civil defense emergency water supply facility in Gwangju using QGIS (ver 2.14).

Kendall 방법과<sup>13,14</sup> Sen의 경향성 분석방법<sup>15</sup> 등이 있다. 본 연구에 적용한 민방위비상급수의 오염도를 판단하는데 있어 시간에 따른 농도의 경향성을 조사하기 위해 EU의 WFD(Water Framework Directives)와 미국 EPA에서도 공통적으로 제시하는 Mann-Kendall 방법과 Sen의 경향성 분석방법을 수행하였다.<sup>16</sup>

2.3.1. Mann-Kendal trend test

Mann-Kendall trend test는 수질과 하천유량 등 환경 자료의 경향성 분석시 널리 이용되는 기법으로 기본 원리는 각 관측값을 쌍으로 비교하여 증가(1), 감소(-1), 상등(0)의 값을 이용하는 것이다. 어떤 시점  $i(1 \leq i \leq n)$ 에서의 관측값을  $x_i$ 라고 하면  $N'$ 개의  $x_{i'}-x_i(i' > i)$  차분 쌍이 나온다. 이 차분의 부호를 계산하여 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\text{sgn}(x_{i'}-x_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } x_{i'}-x_i > 0 \\ 0 & \text{if } x_{i'}-x_i = 0 \\ -1 & \text{if } x_{i'}-x_i < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Mann-Kendall trend test는 다음과 같이 계산한다.<sup>17</sup>

$$S^* = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{i'=i+1}^n \text{sgn}(x_{i'}-x_i) \quad (3)$$

관측값의 수  $n$ 과 Mann-Kendall 통계량  $S^*$ 를 이용하여 증가하는 경향성이 없다는 가설(귀무가설  $S^* = 0$ )에 대한 확률을 구할 수 있다. 감소하는 경향성에 대해서는  $S^*$ 의 부호를 반대로 하여 구할 수 있다. 또한  $n > 10$ 인 경우에는 정규분포를 가정하고 다음과 같은 Gilbert (1987)의<sup>18</sup> 식을 이용한다.

$$Z = \begin{cases} \frac{S^* - 1}{[\text{var}(S^*)]^{1/2}} & \text{if } S^* > 0 \\ 0 & \\ \frac{S^* + 1}{[\text{var}(S^*)]^{1/2}} & \text{if } S^* < 0 \end{cases} \quad (4)$$

2.3.2. Sen's trend test

Sen (1968)은<sup>15</sup> 지하수 관측 자료에 사용하기 쉬운 비모수적 방법으로서 이상값 및 결측값이 있더라도 효과적인 분석이 가능하다. Sen's trend test를 하기 위해서는 먼저 기울기 추정값(slope estimate)을 구하며, 이를 이용하여 Sen의 경향성 추정자(estimator)를 얻을 수 있다.<sup>17,19</sup>

$$Q = \frac{x_{i'} - x_i}{i' - i} \quad (5)$$

위 식에서  $x_{i'}$ 와  $x_i$ 는 Mann-Kendall trend test와 같이 각 관측시점  $i'$ 와  $i$ 에서의 관측값이며,  $i'$ 는 관측된 순서이고  $i' > i$ 이다. 추정값  $N$ 은 관측값의 개수  $n$ 과 함께  $N = n(n-1)/2$ 로 나타낼 수 있다. 구해진  $Q$ 값은 그 크기에 따라 나열하되 식 (6)을 이용하여 중앙값(median)을 구한다.

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

$$S = Q_{[N'/2]} + Q_{[N'+1/2]} \quad (N': \text{짝수}) \quad (6)$$

가설검정을 하기 위해서는  $S$ 에 대한 분산값이 필요 한데, Gilbert (1987)은<sup>18</sup> 작은 수의 자료에 적용시킬 수 있는 Kendall(1975)의<sup>13</sup> 식을 수정하여 다음과 같은 분산 추정값을 구하는 식 (7)을 제시하였다.

$$\text{var}(S) = \frac{1}{18} \left[ n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right] \quad (7)$$

여기서  $t_p$ 는 서로 같은 관측값을 갖거나 관측되지 않은(non-detect) 관측값의 수를 뜻하며,  $q$ 는 이러한 경우의 수이다. 이들 값을 이용하면 다음과 같이 신뢰구간을 구할 수 있다.

$$M_1 = \frac{N' - Z_{1-a}[\text{var}(S)]^{1/2}}{2}$$

$$M_2 = \frac{N' + Z_{1-a}[\text{var}(S)]^{1/2}}{2} \quad (8)$$

여기서  $Z_{1-a}$ 는 정규분포의  $(1-a)100\%$ 지점이다. 경향성이 없다는 귀무가설(null hypothesis)에 대하여  $M_1$ 과  $M_2$ 에 해당되는  $Q$ 값이 0을 포함하지 않으면 귀무가설은 기각되어 경향성이 있다고 판단할 수 있다. 경향성 분석은 95%신뢰구간에 해당하는 결과를 이용하여 농도 기울기가 증가하다고 분석되는 경우 오염을 지시하는 것으로 판단하였다.

본 연구에서는 지하수 수질 등급을 평가하기 위해

Table 1. Groundwater quality classification standard by Ministry of Environment

Number of contamination indicators	Water quality grade
0	Clean
1	Possibly contaminated
2	Contaminated
3	Seriously contaminated

\*Groundwater quality classification standard was developed as quantitative source control technique and ecosystem interaction model for groundwater contamination by Ministry of Environment<sup>9,10</sup>

오염지시인자로서 환경부의 ‘지하수 오염원 정량적 관리 및 종속 생태환경 모델링 기술 개발’에<sup>9</sup> 제시된 통계적 분석방법을 본 연구에 적합하도록 적용하여 수질기준 초과횟수조사, 평균농도분석, 경향성분석의 세가지 방법을 분석하여 결과 Table 1과 같이 오염 지시수를 합산하여 수질 오염 등급을 평가하였다.

**2.4. 시각화 및 오염도분석**

국토지리정보원에서 제공하는 1:25,000 토지이용도를 이용하여 토지이용을 분석하고 토지이용분류는 토지이용현황도의 분류체계에 따라 농업지역(Agricultural area), 자연(Natural area), 공공지(Public area), 주거지역(Residential area), 수계(Water system), 교통지역(Traffic area), 공업지역(Industrial area), 기타(Etc)로 나타내어 총 8 개로 분류하여 QGIS (ver 2.14.)를 이용해 토지이용도를 나타내고 오염등급 산출결과를 나타내어 시각적으로 한눈에 알아볼 수 있도록 하였다.

또한 본 연구에서 전체시설에 대한 오염등급산출 결과를 바탕으로 식 (9)와 같이 오염지시수를 시설수로 나눈 값에 통계적으로 적용한 수질초과횟수, 평균농도분석, 경향성분석의 3 가지 오염지시수를 반영한 백분율로 오염도 분석을 실시하였다. 토지이용, 설치연도, 심도별로 더 구체적인 지하수 수질특성을 알아보았다.

$$\left\{ \frac{\text{오염지시수}}{\text{시설수}} \times \frac{1}{3} \times 100 \right\} (\%) \tag{9}$$

**3. 결과 및 고찰**

**3.1. 분석대상항목 선정을 위한 기술통계분석**

분석대상항목을 선정하기 위해 광주지역 민방위비상급수에 대한 수질측정항목인 46 개 항목에 대하여 기술통계분석을 수행하였다. Table 2에 나타난 바와 같이 각 항목의 평균값, 표준편차, 최대값, 최소값이 대부분 불검출이거나, 냄새 등과 같이 수치화 할수 없는 항목 등 26 개 항목은 분석대상에서 제외하였다. 또한 Kolmogorov-Smirnov검정과 Shapiro-Wilk검정 결과 대부분 유의확률 0.05이하로 정규분포를 이루지 않음으로 판단하였다. 이는 오염등급산출을 위한 세가지 분석방법 중 경향성 분석방법이 비모수적 방법으로서 Mann-Kendall 방법와<sup>13,14</sup> Sen의 경향성 분석방법<sup>15</sup>이 연구대상에 대한 분석방법으로 적합하다는 것을 시사해준다.

앞서 기술통계분석에서 제외된 항목 이외에 나머지 20 개 항목에 대하여 급수시설별로 수질측정항목의 평균값의 차이가 있는지 알아보기 위해 비모수적 방법인 Kruscal-wallis 검정을 실시한 결과를 Table 3에 나타내었다. 그 결과 Ammonium nitrogen과 AI은 유의확률 0.05이상으로 민방위비상급수의 각 지점의 수질측정농도 값이 평균적 차이가 거의 없어 수질 오염도를 평가하는데 의미가 없어 제외하였고, 나머지 항목들의 수질측정농도 유의확률 0.05 이하로 각 지점의 수질측정농도가 유의한 차이가 있음을 판단할 수 있다. 본 연구에서는 소독 등의 방법으로 개선할 수 있는 미생물분야의 항목은 분석대상에서 제외하였다. 따라서 101 개의 민방위비상급수 시료에 대해 15 개 항목(F, As, Nitrate nitrogen, B, Hardness, Comsumption of KMnO<sub>4</sub>, Cu, Color, pH, Zn, Cl<sup>-</sup>, Fe, Mn, Turbidity, Sulfate)을 수질초과횟수분석, 평균농도초과횟수, 경향성 분석을 실시하여 오염지시수를 합산하여 오염등급을 판단하였다.

**3.2. 오염등급분류**

오염등급분류를 위한 전체지점 중 오염을 지시한 지점의 항목별 비율을 수질기준 초과횟수조사, 평균농도분석, 경향성분석의 세 가지 방법으로 수행한 결과와 오염지시수를 합산한 결과를 Table 4와 같이 오염지시율로 나타내었다. 세가지 오염지시인자를 분석하여 합산한 결과 Turbidity (51.5 %) > Color (32.7 %) > Nitrate nitrogen (28.7 %) > Hardness (25.7 %) 순으로 오염 지시율이 상대적으로 높게 평가되었다. 수질기준초과횟수는 오염지시인자인 15 개 항목의 수질기준 초과횟수조사와 평균농도분석결과 Turbidity, Color, Nitrate nitrogen의 순으로 오염 지시율이 높았고, 경향성분석 결과 Hardness, Cl<sup>-</sup>, Sulfate의 순으로 10%이상의 오염 지시율을 보였다. 경향성 분석 결과의 오염지시율은 Hardness (25.7%) > Cl<sup>-</sup> (24.8%) > Sulfate (19.8%) > pH (11.9%) 순으로 높게 나타났다. 이러한 수질분석결과를 이용하여 15 개 항목에 대한 101 개 지점의 오염등급을 결정하였다. Fig. 2는 전체급수시설에 대한 각 항목의 오염등급 분포로 민방위비상급수시설 101 개소를 대상으로 민방위비상급수의 오염등급 분석결과 Table 1의 기준에 의한 오염등급이 (0)~(3)까지 다양하게 분포한 Turbidity, Color, Nitrate nitrogen의 3 개 항목을 제외하면 12 개 항목에 대한 오염등급을 평가한 결과 전 시설 중 ‘오염된 등급(2)’이 최대 4% 이내, ‘오염가능한 등급(1)’이 최대 26% 이내로, 74% 이상이

Table 2. The result of statistical analysis for groundwater quality of CDEWSF in Gwangju

Item	Drinking standard (below)	Mean	Standard Deviation	Dispersion	Minimum value	Maximum value	Selection of analysis items
Total Colony Counts <sup>a)</sup>	100 CFU/mL	99	20	716	0	22000	× <sup>c)</sup>
Total Coliforms <sup>a)</sup>	0/100 mL	-	-	-	-	-	×
Fecal Coliforms <sup>a)</sup>	0/100 mL	-	-	-	-	-	×
Pb	0.01 mg/L	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	×
F	1.5 mg/L	0.07	0.00	0.19	0.00	3.00	○ <sup>d)</sup>
As	0.01 mg/L	0.004	0.002	0.090	0.000	2.500	○
Se	0.01 mg/L	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	×
Hg	0.001 mg/L	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	×
Cyanide	0.01 mg/L	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	×
Cr <sup>6+</sup>	0.05 mg/L	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	×
Ammonium nitrogen	0.5 mg/L	0.00	0.00	0.03	0.00	0.46	×
Nitrate nitrogen	10 mg/L	3.7	0.1	3.0	0.0	17.9	○
Cd	0.005 mg/L	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	×
B	1 mg/L	0.00	0.00	0.01	0.00	0.06	○
Phenols	0.005 mg/L	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	×
Diazinon	0.02 mg/L	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0017	×
Parathion	0.06 mg/L	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0010	×
Fenitrothion	0.04 mg/L	0.0000	0.0000	0.0006	0.0000	0.0150	×
Carbaryl	0.07 mg/L	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008	×
1,1,1-Trichloroethane	0.1 mg/L	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	×
Tetrachloroethylene	0.01 mg/L	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	×
Trichloroethylene	0.03 mg/L	0.000	0.000	0.003	0.000	0.054	×
Dichloromethane	0.02 mg/L	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	×
Benzene	0.01 mg/L	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009	×
Toluene	0.7 mg/L	0.000	0.000	0.001	0.000	0.029	×
Ethylbenzene	0.3 mg/L	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008	×
Xylene	0.5 mg/L	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	×
1,1-Dichloroethylene	0.03 mg/L	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	×
Tetrachlorocarbon	0.002 mg/L	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008	×
1,2-dibromo-3-chloropropane	0.003 mg/L	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	×
Hardness	1000 mg/L	123.7	2.024	71.855	0	341	○
Consumption of KMnO <sub>4</sub>	10 mg/L	1.5	0.1	5.3	0.0	146.0	○
Odor <sup>b)</sup>	No odors	-	-	-	-	-	×
Taste <sup>b)</sup>	No taste	-	-	-	-	-	×
Cu	1.0 mg/L	0.030	0.003	0.101	0.000	1.873	○
Color	5 degree	2	0	10	0	191	○
Anionic surfactants	0.5 mg/L	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	×
pH	5.8 ~ 8.5	7.1	0.0	0.6	5.9	10.9	○
Zn	3 mg/L	0.129	0.020	0.712	0.000	13.503	○
Cl <sup>-</sup>	250 mg/L	30.4	0.7	24.5	0.0	428.0	○
Fe	0.3 mg/L	0.02	0.00	0.07	0.00	1.00	○
Mn	0.3 mg/L	0.0278	0.007	0.248	0.000	4.011	○
Turbidity	1 NTU	0.71	0.10	3.45	0.00	77.30	○
Sulfate	200 mg/L	14	0	12	0	68	○
Al	0.2 mg/L	0.00	0.00	0.01	0.00	0.14	×
1,4-Dioxane	0.05 mg/L	0.000	0.000	0.001	0.000	0.024	×

<sup>a)</sup>Microorganisms that could be improved by disinfection were excluded from the analysis.

<sup>b)</sup>Odor and Taste were not expressed in numerical form and were excluded from the analysis items.

<sup>c)</sup>Non selection

<sup>d)</sup>Selection

Table 3. The result of kruskal-wallis test for the water quality analysis item

Variable	*Total Colony Counts	*Total Coliforms	*Fecal Coliforms	F	As	Ammonium nitrogen	Nitrate nitrogen	B	Hardness	Consumption of KMnO <sub>4</sub>
chi-square	148.988	141.992	76.017	427.469	417.490	51.373	348.063	190.553	378.006	45.709
P	0.000	0.000	0.636	0.000	0.000	0.996	0.000	0.000	0.000	0.000

Variable	Cu	Color	pH	Zn	Cl <sup>-</sup>	Fe	Mn	Turbidity	Sulfate	Al
chi-square	339.876	158.280	234.015	243.417	389.260	153.964	376.828	252.598	480.811	151.690
P	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.999

Collective variable : Watering place, n=101

\*Microorganisms that could be improved by disinfection were excluded from the analysis. If the p-value > 0.05, it was judged that there was a significant difference in the mean and excluded from the analysis items.

Table 4. The rate of contamination indication for three statistical analyses items unit : %

Statistical analysis	F	As	Nitrate nitrogen	B	Hardness	Consumption of KMnO <sub>4</sub>	Cu	Color	pH	Zn	Cl <sup>-</sup>	Fe	Mn	Turbidity	Sulfate
Water quality exceeded frequency	1.0	1.0	12.9	0.0	0.0	0.0	0.0	20.8	1.0	2.0	0.0	4.0	5.0	25.7	0.0
Average concentration analysis	0.0	2.0	5.0	0.0	0.0	0.0	1.0	11.9	5.0	5.0	0.0	3.0	3.0	19.8	0.0
Trend Analysis	0.0	0.0	10.9	1.0	25.7	3.0	3.0	2.0	11.9	7.9	24.8	0.0	1.0	5.9	19.8
Total	1.0	3.0	28.7	1.0	25.7	3.0	4.0	32.7	17.8	14.9	24.8	6.9	8.9	51.5	19.8

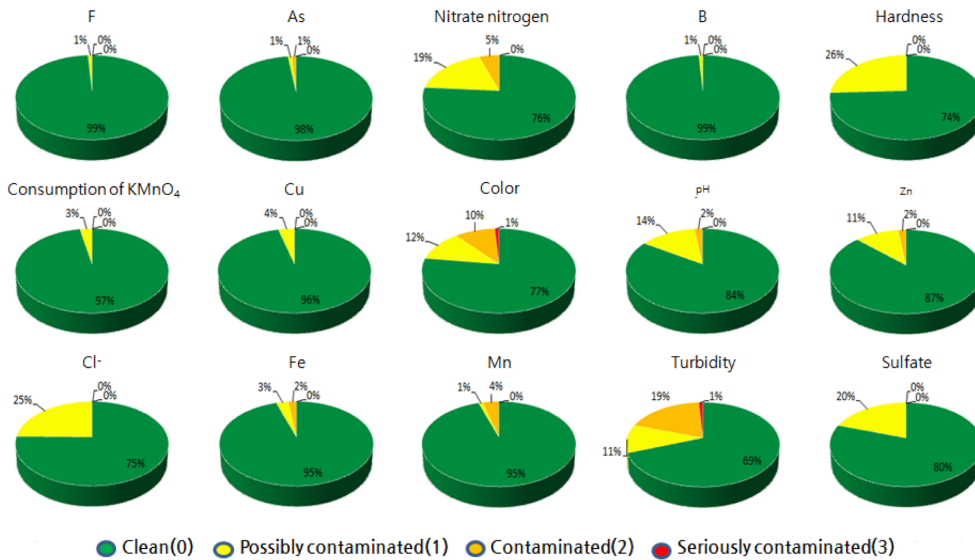


Fig. 2. Classification of groundwater quality each item.

‘안전한 등급(0)’으로 평가되었다.

3.3. 시각화 및 오염도 분석

Table 4에서 3 가지 오염지시인자 분석결과를 합산한 오염 지시율이 높게 평가되고, Fig. 2에서 오염등급분포에서 ‘안전’한 등급이 가장 낮게 분포한 항목인

Table 5. The result of contamination ratio by (a) Using land, Installation year (c) Depth (d) Geological stratum unit : % (a)

Area	F	As	Nitrate nitrogen	B	Hardness	Consumption of KMnO <sub>4</sub>	Cu	Color	pH	Zn	Cl <sup>-</sup>	Fe	Mn	Turbidity	Sulfate	Total
A	1.3	4.0	9.3	0.0	8.0	1.3	2.7	16.0	6.7	2.7	6.7	5.3	4.0	20.0	5.3	7.2
C	0.0	0.0	5.1	0.0	9.0	1.3	0.0	7.7	5.1	5.1	9.0	2.6	2.6	14.1	7.7	5.6
I	0.0	0.0	6.7	0.0	0.0	0.0	6.7	26.7	0.0	13.3	0.0	0.0	13.3	26.7	13.3	7.1
R	0.0	0.0	12.6	0.7	9.6	0.7	0.7	9.6	6.7	5.2	9.6	0.7	1.5	16.3	5.9	5.8

A:Agricultural area, C:Commercial area, I:Industrial area, R:Residential area

(b) unit : %

Installation Year	F	As	Nitrate nitrogen	B	Hardness	Consumption of KMnO <sub>4</sub>	Cu	Color	pH	Zn	Cl <sup>-</sup>	Fe	Mn	Turbidity	Sulfate	Total
1980s	0.0	1.7	10.0	0.0	6.7	3.3	0.0	11.7	5.0	6.7	10.0	1.7	3.3	18.3	6.7	6.6
1990s	0.8	1.6	12.2	0.0	10.6	0.8	0.8	13.8	8.9	3.3	11.4	2.4	2.4	20.3	8.1	7.1
2000s	0.0	0.0	9.3	1.3	12.0	0.0	4.0	2.7	4.0	2.7	5.3	0.0	2.7	6.7	5.3	4.7
2010s	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	33.3	0.0	14.3	4.8	14.3	9.5	38.1	4.8	8.3

(c) unit : %

Depth(m)	F	As	Nitrate nitrogen	B	Hardness	Consumption of KMnO <sub>4</sub>	Cu	Color	pH	Zn	Cl <sup>-</sup>	Fe	Mn	Turbidity	Sulfate	Total
100 or less	0.0	0.0	11.1	0.0	8.9	0.0	0.7	12.6	6.7	7.4	6.7	2.2	1.5	20.7	8.1	6.4
100~200	1.0	2.1	9.4	1.0	10.4	1.0	2.1	10.4	8.3	4.2	12.5	2.1	5.2	17.7	7.3	7.1
200~300	0.0	3.7	11.1	0.0	11.1	3.7	3.7	11.1	3.7	0.0	11.1	0.0	7.4	11.1	7.4	6.7
300 or more	0.0	0.0	0.0	0.0	8.3	8.3	0.0	16.7	0.0	0.0	8.3	0.0	0.0	16.7	0.0	5.6

(d) unit : %

Geological stratum	F	As	Nitrate nitrogen	B	Hardness	Consumption of KMnO <sub>4</sub>	Cu	Color	pH	Zn	Cl <sup>-</sup>	Fe	Mn	Turbidity	Sulfate	Total
All	1.1	0.0	5.6	0.0	5.6	2.2	0.0	16.7	4.4	4.4	6.7	5.6	5.6	22.2	7.8	6.6
Sob	0.0	0.0	9.1	0.0	9.1	0.0	3.0	15.2	0.0	6.1	6.1	3.0	6.1	12.1	6.1	5.5
Aci	0.0	0.0	11.1	0.0	22.2	0.0	0.0	0.0	11.1	0.0	22.2	0.0	0.0	11.1	0.0	6.7
Dae	0.0	1.9	11.7	0.6	9.3	0.6	1.9	8.6	7.4	4.3	8.0	0.6	1.2	14.2	6.2	5.8

All:Alluvium, Sob:Sobaeksan gneiss complex granite gneiss, Aci:Acidic granites, Dae:Daebo intrusive granite

Turbidity, Color, Nitrate nitrogen, Hardness에 대한 민방위비상급수의 오염등급을 QGIS (ver 2.14.)를 이용하여 광주광역시 지도에 토지이용도와 함께 시각적으로 한눈에 알아볼 수 있도록 나타내었다.

Fig. 3에 나타난 바와 같이 Color, Hardness, Nitrate nitrogen의 오염등급이 시가지를 중심으로 높게 분포하고 있으며 광주천 주변을 중심으로 두드러지게 나타나는 것을 알 수 있다.

토지이용별, 설치연도, 심도, 지질 분포에 따른 민방위비상급수의 오염도 관계를 파악하기 위해 식(9)와 같이 오염도를 계산할 결과를 Table 5에 나타내었다. Table 5(a)는 토지이용에 따른 지하수의 오염 특성을 구체적으로 알아보기 위해 민방위비상급수시설의 위치를 실제 현장조사와 국토지리정보원에서 제공하는

토지이용도를 이용하여 농업, 자연초지, 임목지 등은 농업지역으로 상업지, 교통지역, 공공지는 상업지역으로, 공업시설 등은 공업지역으로 농업지역, 상업지역, 공업지역, 주거지역으로 분류하여 토지이용에 따른 오염도를 분석한 결과이다. 토지이용에 따른 오염도를 계산한 결과 수질오염의 지표로 이용되는 Nitrate nitrogen의 오염도는 주거지역(12.6%) > 농업지역(9.3%) > 공업지역(6.7%) > 상업지역(5.1%)순으로 높았다. 주거지역과 농업지역에서 오염도가 높은 것은 주로 생활하수, 농업에서 이용되는 비료의 영향을 받은 결과로 해석할 수 있다. 물-암석 반응에 의한 자연적인 기원보다는 하수, 제설제, 산업용폐수 및 동물의 배설물 등으로 인해 지하수를 유입되는 Cl<sup>-</sup>은 주거지역(9.6%) > 상업지역(9.0%) > 농업지역(6.7%)순으로 외부의 오

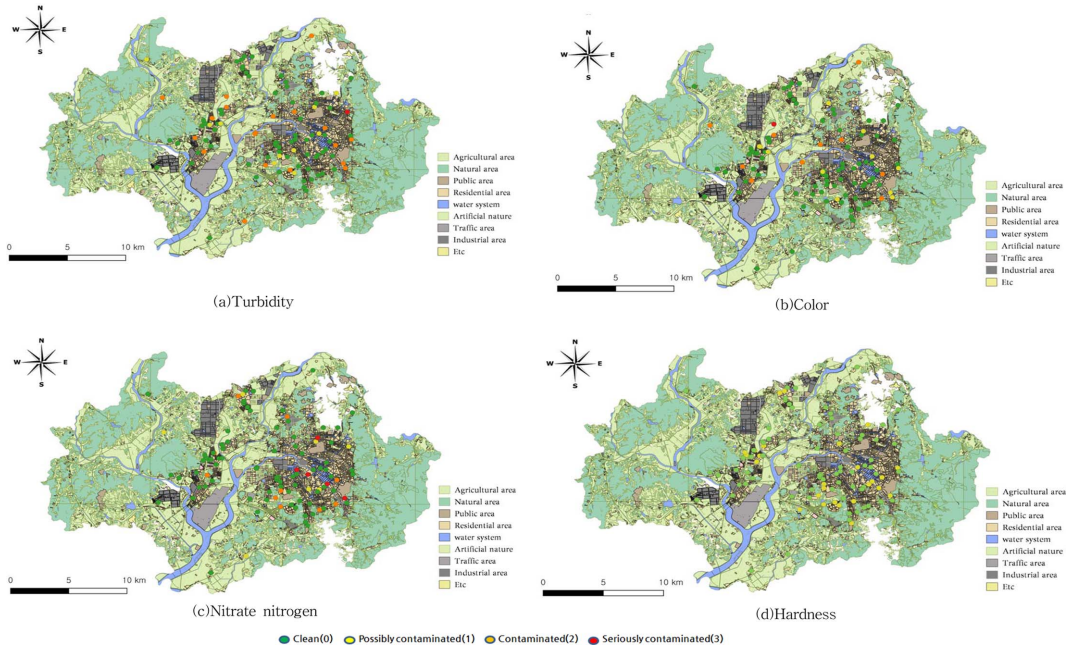


Fig. 3. The map showing the water contamination grade of the: (a) Turbidity, (b) Color, (c) Nitrate nitrogen, (d) Hardness.

염물질의 영향을 받았을 가능성이 높았을 것으로 추정되며, 공업지역에서는 주로 Cu, Zn, Mn 등 중금속의 오염도가 높은 것을 알 수 있었다. Table 5(b)의 민방위비상급수시설 설치연도에 따른 오염도는 Nitrate nitrogen과 Cl<sup>-</sup>이 1990년대 > 1980년대 > 2000년대 > 2010년대순으로 높았으며 항목 전체적인 오염도는 2010년대(8.3%) > 1990년대(7.1%) > 1980년대(6.6%) > 2000년대(4.7%)에 설치한 순으로 오염도가 높게 나타났다. 2010년대 전체 오염도는 Color, Zn, Turbidity, Mn, Fe의 오염도가 높은 영향을 받은 것으로 추측할 수 있다. Table 5(c)의 심도에 따른 오염도 산출결과는 Nitrate nitrogen, Cu, Zn, Fe, Mn, Sulfate 등 300 m 이상에서 오염도가 나타나지 않았고 전체항목에 대한 오염도는 100~200 m이하(7.1%) > 200~300 m이하(6.7%) > 100 m이하(6.4%) > 300 m이상에서(5.6%)순으로 오염도가 높게 나타났다. 이에 관정이 깊을수록 Turbidity와 Color의 수질을 개선하면 관정이 깊을수록 수질 등급이 ‘안전’함을 알 수 있다. Table 5(d)와 같이 한국지질자원연구원에 자료를 검색한 결과 민방위비상급수시설 101 개소 지점의 지질은 충적층, 소백산편마암복합체화강편마암, 산성화강암류, 대보관입암류화강암류로 확인되었다. 지질에 따른 오염도를 산출한 결과 Nitrate nitrogen는 대보관입암류화강암류(11.7%) > 산성화강암류(11.1%) > 소백산편마암복합체화강편마

암(9.1%) > 충적층(5.6%)순으로 Zn은 소백산편마암복합체화강편마암(6.1%)>충적층(4.4%) > 대보관입암류화강암류(4.3%) > 산성화강암류(0.0%) 순으로 철은 충적층(3.0%) > 소백산편마암복합체화강편마암(6.1%) > 대보관입암류화강암류(0.6%) > 산성화강암류(0.0%) 순으로 오염도가 높은 것을 알 수 있었다. 위 오염도 분석 결과를 바탕으로 수질분석항목과 조사한 영향인자들 간의 상관분석을 수행하여 Table 6에 나타냈다. 지하수의 심도와 생산량은 Consumption of KMnO<sub>4</sub>와 유의확률이 각각 0.297과 -0.315로 유의한 상관관계가 있는 것으로 나타났고, 지질은 Hardness, Cl<sup>-</sup>, Fe과 유의확률이 0.329, 0.296, -0.312로 유의한 것으로 나타났다. 그 외 뚜렷한 상관관계는 나타나지 않았다.

#### 4. 결론

민방위비상급수시설 101 개소를 통계적 방법으로 선정된 12 개 항목의 수질 오염등급을 분석한 결과 전체 시설 중 ‘오염된 등급(2)’이 최대 4% 이내, ‘오염가능한 등급(1)’이 최대 26% 이내로, 74% 이상이 ‘안전한 등급(0)’으로 평가되었다. 그리고 3 개 항목(Turbidity, Color, Nitrate nitrogen)은 안전(0)부터 오염심각(3)까지 오염등급이 다양하게 나타났다. 오염등급 산출결과를 토대로 오염 지시율이 높게 평가된 4 개

Table 6. The correlation coefficients of the well foundation and test items in the drinking groundwater

Item	F	Nitrate nitrogen	B	Hardness	Consumption of KMnO <sub>4</sub>	Cu	Color	pH	Zn	Cl <sup>-</sup>	Fe	Mn	Turbidity	Sulfate	Total	Subject	Installation Year	Depth	Yield	Geological stratum	Using land	Opening of Facilities		
F	1.000																							
Nitrate nitrogen	-0.076	1.000																						
B	-0.017	-0.076	1.000																					
Hardness	-0.087	0.119	0.198	1.000																				
Consumption of KMnO <sub>4</sub>	-0.025	-0.108	-0.025	-0.124	1.000																			
Cu	-0.035	0.265*	-0.035	-0.179	-0.051	1.000																		
Color	0.233	-0.128	-0.086	-0.120	0.105	-0.012	1.000																	
pH	0.235	0.150	-0.070	0.201	-0.099	-0.143	0.147	1.000																
Zn	-0.044	0.043	-0.044	-0.105	-0.063	-0.091	0.028	-0.052	1.000															
Cl <sup>-</sup>	-0.080	0.269*	-0.080	0.258*	0.096	-0.165	-0.167	0.140	-0.083	1.000														
Fe	0.577**	-0.134	-0.030	-0.153	-0.043	-0.062	0.436**	0.060	0.173	-0.141	1.000													
Mn	0.399**	-0.047	-0.040	-0.067	0.285*	0.164	0.559**	0.114	0.095	-0.046	0.478**	1.000												
Turbidity	0.178	-0.059	-0.109	-0.073	0.050	-0.076	0.726**	0.121	0.329*	-0.149	0.314*	0.413**	1.000											
Sulfate	-0.063	0.136	-0.063	0.250	-0.090	0.044	-0.076	0.096	0.117	0.100	-0.111	-0.146	-0.024	1.000										
Total	0.210	0.355**	-0.062	0.226	0.150	0.070	0.612**	0.339**	0.308*	0.241	0.333**	0.478**	0.680**	0.253	1.000									
subject	0.017	-0.024	0.165	-0.192	0.024	0.091	0.171	-0.224	0.060	-0.084	0.146	0.038	0.239	-0.026	0.078	1.000								
Installation Year	0.008	-0.090	0.093	0.115	-0.204	0.204	-0.002	-0.081	-0.046	-0.048	0.234	0.083	-0.001	-0.041	0.033	0.318*	1.000							
depth	0.062	-0.078	0.086	0.020	0.297*	0.134	0.022	0.058	-0.230	0.227	-0.094	0.219	-0.114	-0.117	0.057	-0.266*	0.108	1.000						
yield	0.205	0.129	-0.070	0.047	-0.315*	-0.080	-0.219	-0.061	0.076	-0.227	-0.028	-0.125	-0.150	0.080	-0.263*	-0.224	-0.455**	-0.278*	1.000					
geological stratum	-0.177	0.091	0.062	0.329*	-0.253	0.225	-0.088	0.118	-0.038	0.296*	-0.312*	-0.095	-0.070	-0.091	0.113	-0.089	0.171	0.241	-0.141	1.000				
Using land	-0.190	-0.220	-0.025	-0.051	0.094	-0.087	0.025	-0.135	0.026	-0.043	-0.138	0.002	0.034	0.101	-0.101	0.098	-0.041	0.062	-0.046	-0.217	1.000			
Opening of Facilities	0.177	0.000	-0.098	-0.262*	0.056	-0.060	0.115	-0.229	0.101	-0.135	0.147	0.022	0.073	0.008	0.015	0.019	-0.291*	0.022	0.256	-0.242	-0.016	1.000		

\*Significant at  $\alpha < 0.05$   
 \*\*Significant at  $\alpha < 0.01$

항목(Turbidity, Color, Nitrate nitrogen, Hardness)에 대한 QGIS를 이용하여 오염지도를 작성한 결과 오염이 심각하다고 평가된 시설의 위치를 한눈에 알아볼 수는 있었지만 어떤 오염인자와 상관관계가 있는지 파악은 어려운 단계이다. 민방위비상급수시설 위치를 지역에 따라 농업지역, 상업지역, 공업지역, 주거지역의 형태로 나누어 오염도를 나타낸 결과 수질오염의 지표로 이용되는 Nitrate nitrogen의 오염도는 주거지역과 농업지역에서 높게 나온 것으로 보아 생활하수, 농업에서 이용되는 비료의 영향을 받은 결과로 추정되며, 공업지역은 주로 Cu, Zn, Mn 등 중금속의 오염도가 높았다. 시설설치연도에 따른 오염도는 Nitrate nitrogen과  $Cl^-$ 이 최근에 설치한 시설일수록 대체적으로 오염도가 낮은 경향을 나타냈다. 심도별로 나누어 구분하였을 때 대체적으로 심도가 깊을수록 오염도가 낮게 나왔고 300 m 이상에서 Color, Turbidity, Hardness, Consumption of  $KMnO_4$ 을 제외한 나머지 항목의 오염도는 나타나지 않았다. 위 분석결과로 수질에 대한 분석결과가 심도, 지질 등 오염영향 인자 간에 어떤 상관관계가 있는지 명확히 규명하기는 어려웠다. 또한 광주광역시 내 지하수의 관정의 수가 2015년 말 기준으로 11,614 개소에<sup>3)</sup> 이르는데 그 중 101 개소에 대한 연구로 분석결과를 단정 짓기에는 수질등급을 과소평가하거나 과대평가할 가능성이 높다. 이러한 한계에도 불구하고 대표성 있는 지하수에 대한 지속적인 데이터 관리 및 지속적인 모니터링을 통해 본 연구에서 사용한 통계적 비교방법과 시각적 그래프를 함께 이용하고, 수질변화를 분석하고 비교 가능한 자료가 충분히 존재한다면 특정지점과 지점사이에서의 수질변화 파악이나 특정연도의 수질변화 파악 등 지하수의 지속적인 이용 및 수질보호와 민방위비상급수시설의 신규지정 등 시설관리의 과학적 근거자료로서 다양하게 적용 가능할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 2017년 환경부 환경분야 시험검사의 국제적 적합성 기반구축사업과 광주광역시 보건환경연구원 연구역량강화 사업의 지원으로 수행하였습니다.

### References

1. Korea Environment Institute, 'Comparative Study for the Ground Water Management by Its Geologic Condition', 2006.
2. U. Yun, S. J. Chi, and C. S. SO, *Economic and Environmental Geology*, **36**(6), 441-455 (2003).
3. Environment White Paper, Gwangju Metropolitan City, 2016.
4. S. Y. Nam, 'A Study on Hydrogeochemical Interpretation of Longterm Groundwater Data Based on Various Statistical Method', Masters dissertation, Kyungpook National University Korea, Daegu, 2014.
5. I. H. Sung, 'Study on the Groundwater Remediation of the Kwangju Area', Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2001.
6. C. Y. Park, I. H. Shin, K. S. Ahn, C. S. Lee, Y. J. Jeong, and N. C. Choi, *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **20**(3), 266-276 (1999).
7. I. H. Lee, B. W. Cho, B. D. Lee, I. H. Sung, and Y. S. Lim, *J. Soil Groundw. Environ.*, **7**(3), 115-132 (2002).
8. The Ministry of Environment, The Official Test Method of Drinking-Water. Korea, 2015.
9. G. G. Lee, Development of Quantitative Source Control Technique and Ecosystem Interaction Model for Groundwater Contamination, Gwacheon, Ministry of Environment (2011).
10. H. S. Yoon, G. O. Bae, and K. K. Lee, 2012, *J. Soil Groundw. Environ.*, **17**(1), 22-32 (2012).
11. S. S. Shapiro and M. B. Wilk, *Biometrika*, **52**(3/4), 591-611 (1965).
12. W. H. Kruskal, W. A. Wallis, *J. Am. Stat. Assoc.*, **47**, 583-621 (1952).
13. H. B. Mann, *Non-Parametric Test against Trend. Econometrica*, **13**, 245-259 (1945).
14. M. G. Kendall, Rank Correlation Methods, Charles Griffin, London (1975).
15. P. K. Sen, *J. Amer. Stat. Assoc.*, **63**, 1379-1389 (1968).
16. M. Craig, D. Daly, Methodology for establishing groundwater threshold values and the assessment of chemical and quantitative status of groundwater, including an assessment of pollution trends and trend reversal, Wexford, Ireland, Environmental Protection Agency (2010).
17. T. Salmi, A. Maatta, P. Anttila, T. Ruoho-Airola, and T. Amnell, Detecting Trends of Annual Values of Atmospheric Pollutants by The Mann-Kendall Test

- and Sen's Slope Estimates The Excel Template Application Makesens, Finnish Meteorological Institute, Helsinki (2002).
18. R. O. Gilbert, Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring, Van Nostrand Rienhold Company, Inc., New York (1987).
19. J. Y. Lee, M. J. Yi, J. M. Lee, K. H. Ahn, J. H. Won, S. H. Moon, and M. J. Cho, *J. Soil Groundw. Environ.*, **11**(2) 56-67 (2006).