

## 지하수수질측정망 자료를 활용한 경남 오염우려지역의 지하수 수질 특성

차수연<sup>1,2</sup>, 서양곤<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup>경상대학교 융합과학기술대학원 생산기술공학과  
52828 경남 진주시 진주대로 501  
<sup>2</sup>경상남도보건환경연구원  
52732 경남 진주시 월아산로 2026  
<sup>3</sup>경상대학교 화학공학과/그린에너지융합연구소  
52828 경남 진주시 진주대로 501

(2021년 5월 21일 접수; 2021년 5월 28일 수정본 접수; 2021년 6월 5일 채택)

## Groundwater Quality Characteristics of Pollution Concerned Area in Gyeongnam Using Groundwater Quality Monitoring Data

Suyeon Cha<sup>1,2</sup>, and Yang Gon Seo<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Production Technology and Engineering, Graduate School of Convergence Science and Technology, Gyeongsang National University  
501 Jinju-daero, Jinju-si, Gyeongnam 52828, Korea  
<sup>2</sup>Gyeongsangnam-do Institute of Health and Environment  
2026 Worasan-ro, Jinju-si, Gyeongnam 52732, Korea  
<sup>3</sup>Department of Chemical Engineering/RIGET, Gyeongsang National University  
501 Jinju-daero, Jinju-si, Gyeongnam 52828, Korea

(Received for review May 21, 2021; Revision received May 28, 2021; Accepted June 5, 2021)

### 요 약

본 연구에서는 경상남도 지역의 오염감시전용측정망의 5년간(2013~2017) 자료를 이용하여 주요오염원과 분기별 지하수 수질 특성을 분석하였다. 주요오염원은 산업단지지역, 광산·폐광산지역 및 하수처리시설로 구별하였다. 분석 항목은 현장측정 항목(수온, pH, 전기전도도, 용존산소, 산화물환원전위), 양이온 그리고 음이온이었다. 수온과 pH는 주요오염원에 따라 크게 변하지 않았다. 양이온과 음이온의 평균농도의 합은 산업단지지역에서 가장 높았고, 하수처리시설 그리고 광산·폐광산지역 순이었다. 산업단지지역에서는 전기전도도의 값이 가장 높았고, 용존산소의 값이 가장 낮았다. 산업단지지역은 나트륨이온이 가장 높은 구성비를 보인 반면 하수처리시설과 광산·폐광산지역에서는 칼슘이온이 가장 높은 값을 나타내었다. 모든 주요오염원에서 중탄산염의 농도가 가장 높게 나타났다. 수온, pH 그리고 양이온과 음이온의 농도는 분기마다 크게 다르지 않았다. 수질유형 중 Na-HCO<sub>3</sub> 유형이 가장 높은 비율을 차지하였으나, 외부 오염의 가능성이 높은 Na-Cl 유형도 오염감시전용측정망의 전체 자료 중 약 20%를 차지하였다.

주제어 : 지하수 수질, 오염감시전용측정망, 주요오염원, 분기

**Abstract :** This study analyzed the groundwater quality characteristics according to the main source of pollution and quarter (season) by using data from the pollution exclusive monitoring network in the Gyeongsangnam-do area for five years (2013-2017). The main source of pollution was the industrial complex areas, waste mines, and sewage treatment facilities. The analysis items were field measurement items (water temperature, pH, electrical conductivity, dissolved oxygen, oxide reduction potential), positive ions, and negative ions. Water temperature and pH did not vary significantly according to the main source of pollution. In industrial complex areas, the value of electrical conductivity was the highest, and dissolved oxygen value was the lowest. The mean concentration of positive and negative ions was the largest in industrial complex areas, followed by sewage treatment facilities and waste mines. It was shown that the concentration of sodium ion was the highest in industrial complex

\* To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: ygseo@gnu.ac.kr; Tel: +82-55-772-1785; Fax: +82-55-772-1789

doi: 10.7464/ksct.2021.27.2.174 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

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.

areas and calcium ion in waste mines and sewage treatment facilities. The concentration of bicarbonate ion was the highest in all main sources of pollution. Water temperature, pH, and concentrations of cations and anions did not vary significantly from quarter to quarter. Of the water quality types, the Na-HCO<sub>3</sub> type accounted for the highest proportion, but the Na-Cl type, which has a high possibility of external contamination, accounted for about 20% of the total data in the pollution exclusive monitoring network.

**Keywords** : Groundwater quality, Pollution exclusive monitoring network, Main pollution source, Quarter

## 1. 서 론

지구상의 물은 바닷물, 빙하, 호수, 지하수 등으로 이루어져 있고, 지하수는 바닷물을 제외한 담수의 약 30%를 차지하고 있다. 담수의 대부분을 차지하는 만년설 또는 빙하는 인류가 생활하는 공간과 먼 거리를 두고 있기 때문에 많은 나라들은 물의 공급원으로 지하수 자원에 의존하고 있다. 그러나 인구의 증가와 산업의 발전으로 인해 많은 지하수가 고갈되고 오염이 가중되고 있다. 이들 문제와 함께 지하수 자원의 지속적인 관리의 필요성이 대두되어 많은 나라에서는 지하수수질측정망(groundwater quality monitoring network)을 설치·운영하고 있다[1-6]. 우리나라에서는 적절한 지하수 개발·이용을 도모하고 지하수오염을 예방하여 공공의 복리증진과 국민경제의 발전에 이바지하기 위하여 1999년 12월에 「지하수법」이 제정되었다. 이법의 제3조 제1항에는 공적 자원인 지하수를 효율적으로 보전·관리함으로써 국민에게 양질의 지하수를 이용할 수 있도록 지하수에 관한 종합적인 계획을 수립하고 합리적인 시책을 마련해야 하는 것이 국가의 책무로 규정하고 있다. 이에 따라 지하수기본관리 계획이 1996년 12월에 수립되었으며 5년 주기로 수정과 보완을 거쳐 2017년 3차 지하수관리기본계획 수정이 발표되었다[7].

환경부는 「지하수법」 제18조 및 「지하수의 수질보전 등에 관한 규칙」 제9조에 따라 2008년부터 지하수수질측정망을 운영하고 있다. 지하수수질측정망은 크게 국가지하수수질측정망(national groundwater quality monitoring network)과 지역지하수수질측정망(regional groundwater quality monitoring network)으로 구분된다[8,9]. 국가지하수수질측정망은 우리나라의 지질과 유역을 고려한 지하수 배경수질 및 수질특성을 파악하고, 산업단지 등 대규모 오염원으로부터 지하수의 오염과 확산을 지속적으로 감시하는 역할을 담당한다. 한편 지역지하수수질측정망은 지방자치단체 관할 지역내의 지하수 오염감시와 수질파악을 기본 운영 목적으로 하고, 국가지하수수질측정망을 보완하는 역할을 수행한다. 배경수질전용측정망은 2018년 12월 기준으로 전국에 271개소 설치되어 있으며 유역·지질 단위 기준으로 오염원 영향이 없는 자연상태의 수질을 파악하고, 오염감시전용측정망은 80개소 설치되어 있고 산업단지, 폐광산 지역 등 대규모 오염원으로부터 수질 영향을 파악한다[9]. 지하수수질측정망은 환경부에서 총괄 운영하며 지하수수질전용측정망은 한국환경공단에서 운영·관리하며, 국립환경과학원에서 지하수수질측정망 자료의 검증 및 통계분석을 담당한다.

배경수질전용측정망은 오염의 영향이 없는 수질검사라고 한

다면 오염감시전용측정망은 대규모 오염물질의 오염 모니터링을 위한 수질검사에 목적이 있다. 배경수질전용측정망은 전국을 8개 주요 지질에 따라 구분하고 116개 중권역 마다 분포하는 지질을 고려하여 각 지질 단위별로 측정관심구역을 선정한다. 한편 오염감시전용측정망은 산업단지, 폐광산지역, 가축매몰지 등 대규모 오염원과 국가적 관리가 필요한 오염지역 주변에 측정지점을 설치 또는 기존 관정을 활용한다. 2016년 말 현재 경남에는 15개소에서 오염감시전용측정망이 설치되어 있고, 지역지하수수질측정망은 오염우려지역에 66개소가 설치되어 운영되고 있다. 오염우려지역 측정망은 지하수의 용도로써 공업, 농업 및 생활로 구분하고 음용여부도 구분하고 있다[8]. 한편 환경부는 2030년까지 배경수질전용측정망은 1,305개소와 오염감시전용측정망은 2,164개소를 포함하여 4,000개소의 국가지하수수질측정망을 확대 설치할 계획을 하고 있으며, 지역지하수수질측정망도 33,000개소를 설치하여 국가지하수수질측정망을 보조하도록 계획하고 있다. 또한 기존의 지하수측정(관측)망의 문제점들을 보완하고 효율적인 관리를 위해 기존의 지하수측정망들을 연계·통합관리하는 방안도 모색하고 있다[9].

지하수수질측정망 자료를 활용한 연구는 초기에는 측정망의 신뢰성, 현황 평가 및 개선을 위한 연구에 집중되었다[10,11]. 이후 지하수수질측정망 자료를 활용하여 본격적인 지하수의 수질 특성 분석이 이루어졌다[12-15]. 최근 Cha and Seo[16]는 배경수질전용측정망에 대한 자료를 토대로 경남지역 지하수의 심도별·지질별 수질특성을 분석한 결과, 상층관정과 쇠설퇴적암의 일부 지점에서 외부 오염물질에 의한 오염 가능성을 의미하는 Na-Cl 수질 특성을 보임을 보고하였다. 그러나 현재까지 지하수수질측정망의 자료를 활용한 전국단위 또는 지역 단위의 지하수수질 실태를 지속적으로 파악할 수 있는 자료가 부족하며, 특히 지역지하수수질측정망의 경우에는 개인관정을 대상으로 모니터링을 실시하고 있고 잦은 지점 변경으로 인해 지속적인 지하수수질 파악이 어려운 실정이다. 오염감시전용측정망의 경우 신규로 설치하여 오염원을 감시하였으나 지점 선정의 어려움으로 인해 공공관정을 활용하는 형태로 전환하여 지역지하수수질측정망 오염우려지역의 경우와 기능상 중복되고 있다[9].

경상남도에는 2019년 말 현재 약 10만 개소의 지하수가 있으며, 전국 사용량의 10%에 해당하는 약 2억9천만 톤의 지하수를 이용하고 있다[17]. 지하수의 수질은 유입되는 인위적 오염물질에 의해 큰 영향을 받으므로 지하수 수질관리 및 오염방지를 위하여 지하수 주변 오염원에 따른 수질특성을 파악할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 토양지하수정보시스템

(Soil Groundwater Information System, SGIS)에서 공개한 5년간 (2013년 ~ 2017년)의 국가지하수수질측정망의 오염감시수질전용측정망에 대한 자료[18] 중 경남지역의 동일 지점에서 연속적인 측정이 이루어진 15개 지점에 대한 자료들을 추출하였다. 경남지역 지하수의 주요오염원별과 분기별 수질특성을 분석하여 오염이 우려되는 지역의 지하수의 효율적인 관리와 오염예방이 이루어질 수 있도록 기초 자료를 제공하고자 한다. 본 연구에서 사용된 분석 방법에 대한 자세한 내용은 Cha and Seo [16]에 나타나 있다.

## 2. 결과 및 고찰

### 2.1. 오염감시전용측정망 자료

본 연구에서는 설치된 오염감시전용측정망 중 15개 지점에서 5년(2013 ~ 2017년) 동안 연 4회 측정된 268 세트(set)의 수질자료를 이용하여 주요오염원별과 분기별 수질특성을 분석하였다. 오염감시전용측정망의 경우, 주요오염원에 따라 광산·폐광산 지역, 산업단지지역, 기타오염원으로 분류되며, 기타오염원은 또 다시 축산/농업지역, 도시주거지역, 매립지, 하수처리설로 세분된다. 본 연구의 분석에 사용된 오염감시전용측정망 수질자료는 산업단지지역(Industrial) 145 세트, 광산·폐광산지역(Mine) 69 세트 그리고 하수처리시설(Sewage) 54 세트였고, 그 구성비를 Figure 1에 나타내었다. 분석 항목 중 이온 성분은 자연수에 존재하는 모든 이온 성분을 분석하는 것이 불가능하므로 주요 양이온과 음이온을 분석하고, 각 이온들의 합이 전기적인 중성 상태, 즉 전하이온균형이 0이 되는 경우 분석이 적절히 이루어졌음을 의미한다[16]. 이온 성분분석에서 주요 양이온으로  $Ca^{2+}$ ,  $Na^{+}$ ,  $Mg^{2+}$  그리고  $K^{+}$ 을 선정하였고, 주요 음이온으로는  $HCO_3^{-}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^{-}$ ,  $NO_3^{-}$ 을 선정하여 각 시료에 대한 전하이온균형을 Figure 2에 나타내었다. 전하이온균형의 평균값은 -7.9%로 나타나 배경수질전용측정망의 전하이온균형 값인 2.6% 보다 다소 높은 값이지만[16] 이를 이용하여 분석하기에는 큰 문제가 없을 것으로 생각된다. 일부 시료의 경우 전하이온균형이 10% 이상인 경우도 있었으나 이들 대부분은 해수 침입의 영향으로 다양한 이온종이 과도하게 부하되었거나 주변 농업활동 등의 영향으로 질산성질소와 같은 오염물이 유입되어 전하이온균형이 왜곡된 것으로 추정된다[19].

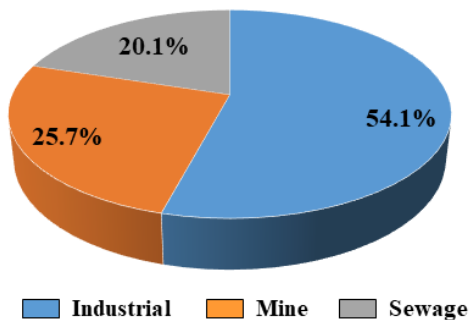


Figure 1. Composition of analysis sample according to main pollution source.

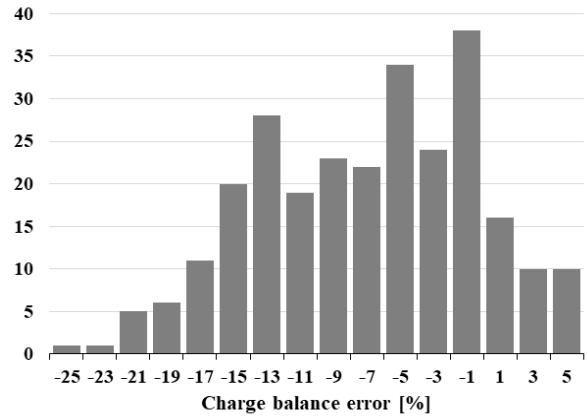


Figure 2. Histogram of charge balance error on pollution exclusive monitoring network.

### 2.2. 주요오염원에 따른 수질특성

#### 2.2.1. 현장측정 항목

지하수수질의 현장측정항목은 pH, 수온, 전기전도도(electrical conductivity, EC) 용존산소(DO) 및 산화물환원전위(oxide reduction potential, ORP)이다. 주요오염원에 따른 pH의 평균값은 산업단지일 때 6.9, 광산·폐광산일 때 7.1, 하수처리시설일 때 6.8로 나타났다. pH의 평균값은 오염원별로 큰 차이가 없이 중성을 나타내었고, 산업단지일 때 pH의 범위가 5.5 ~ 8.2로 가장 넓었다. 수온의 평균값은 산업단지일 때 18.4 °C, 광산·폐광산일 때 17.2 °C, 하수처리시설일 때 18.3 °C로 나타났으며, 역시 오염원 별로 큰 차이를 나타내지 않았다. EC의 평균값( $\mu S cm^{-1}$ )은 산업단지일 때 570, 광산·폐광산일 때 460, 하수처리시설일 때 528였다. EC의 경우 오염항목은 아니지만 지하수 내 이온 용해도에 의하여 영향을 받으므로 간접적인 오염 확인인자로 활용이 가능하다. 따라서 산업단지일 때의 평균값이 광산·폐광산일 때 보다 크므로, 산업단지 지하수가 광산·폐광산 지하수 보다 오염정도가 클 것으로 예상된다. 분석 자료에서  $1,000 \mu S cm^{-1}$  이상의 매우 높은 측정값들은 산업단지일 때만 나타났다.

DO의 평균농도( $mg L^{-1}$ )는 산업단지일 때 1.9, 광산·폐광산일 때 3.3, 하수처리시설일 때 1.9로 나타났다. 일반적으로 유기물이 많은 오염원일수록 DO 농도가 낮는데, 유기물 등이 산화작용에 의해 분해될 때 산소를 소모하기 때문이다. 이결과는 광산·폐광산에 비해 평균농도가 낮은 산업단지와 하수처리시설에 더 많은 유기오염물질이 존재할 것으로 추측된다. ORP의 평균값은 산업단지일 때 49 mV, 광산·폐광산일 때 121 mV, 하수처리시설일 때 50 mV로 나타났다. 광산·폐광산일 때 평균값이 산업단지이나 하수처리시설일 때 보다 약 2.4배 정도 크기 때문에, 상대적으로 산화환경이 우세할 것으로 예상된다.

#### 2.2.2. 양이온

주요오염원에 따른 양이온의 농도분포와 구성비를 Figure 3에 나타내었다. 양이온의 합은 산업단지일 때 가장 크고 하수처리시설과 광산·폐광산의 순으로 나타났다. 양이온의 평균농도는 산업단지일 때  $Na^{+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^{+}$ 의 순인 반면, 광산·폐

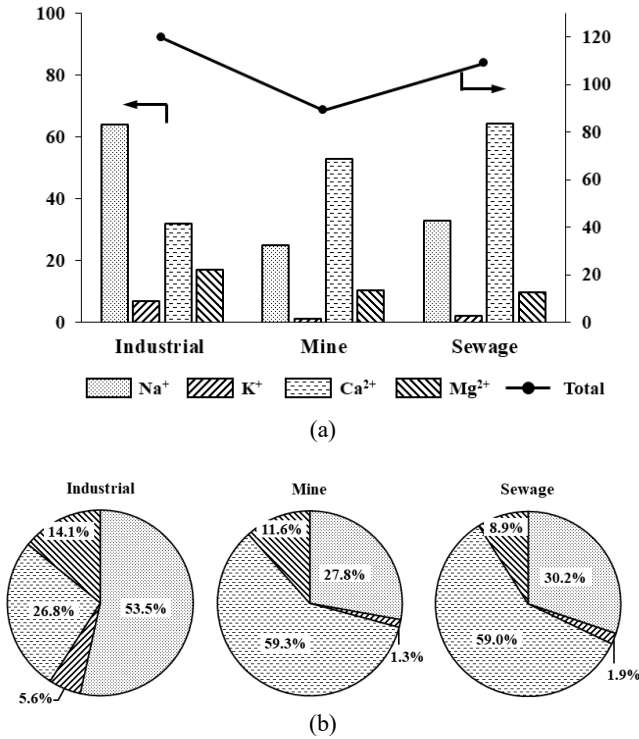


Figure 3. Concentration distribution (a) and composition (b) of cations according to pollution source.

광산과 하수처리시설일 때는  $Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+} > K^+$ 의 순으로 나타났다.  $Na^+$ 의 평균농도는 산업단지일 때  $63.9 \text{ mg L}^{-1}$ 으로 가장 높았고 광산·폐광산일 때 보다 약 2.3배 높게 나타났는데 이는 공업용 폐수의 영향으로 추정된다. 일반적으로 지하수에 존재하는 나트륨이온은 공업용 폐수, 생활하수, 제빙염(road salt) 및 해수 등에서 기인하기 때문이다. 나트륨의 농도가 높은 지하수는 심장기관, 고혈압 등의 질환이 있는 사람에게 해롭고, 농업용수로도 적합하지 않다. 나트륨 함량이 많은 지하수를 사용한 토양은 습윤 상태에서 매우 끈적하여 투수성이 불량해지며, 건조 상태에서는 딱딱하게 굳어져 경작하기 어렵기 때문이다. 나트륨의 국내 수질기준은 없으나 지하수에는  $10 \sim 100 \text{ mg L}^{-1}$  정도가 보통이며, 농업용수로는  $69 \text{ mg L}^{-1}$  이하, 음용수로는  $170 \text{ mg L}^{-1}$  이하를 적합한 것으로 알려져 있다 [20,21]. 분석결과  $60 \text{ mg L}^{-1}$ 을 초과한 경우는 산업단지와 하수처리시설에서 각각 54건과 1건으로 나타났고, 광산·폐광산에서는 없었다.  $170 \text{ mg L}^{-1}$ 을 초과한 경우는 산업단지에서만 11건으로 나타나 산업단지 자료의 약 8%에 해당하였다. 또한 심미적 영향을 고려하여 설정된 나트륨의 WHO 및 일본의 음용수 기준인  $200 \text{ mg L}^{-1}$ 를 초과하는 경우는 2건으로 분석되었는데, 모두 산업단지에서 나타났다[21].

$Ca^{2+}$ 의 평균농도는 하수처리시설일 때  $64.1 \text{ mg L}^{-1}$ 으로 가장 높았고, 산업단지일 때 보다 약 2배 높은 값이었다. 칼슘이온은 생활하수, 제설제( $CaCl_2$ ) 등에서 유래된다. 칼슘은 보일러 안쪽에 끼는 물때와 온수난방시설의 침전물 형성의 주원인이다. 자연 상태의 지하수는  $10 \sim 100 \text{ mg L}^{-1}$  정도의 칼슘을 가지며 이 정도의 농도는 인체나 동물에게 해가 없는 것으로 알려져 있

다.  $100 \text{ mg L}^{-1}$ 을 초과하는 경우는 하수처리시설에서 분석 자료의 약 28%에 해당하는 15건이고 광산·폐광산에서 2건으로 총 17건이었다. 심미적 영향을 고려한 칼슘의 영국 기준인  $250 \text{ mg L}^{-1}$ 를 초과하는 경우는 없었다.

$Mg^{2+}$ 의 평균농도는 산업단지지역일 때  $16.9 \text{ mg L}^{-1}$ 로 하수처리시설일 때 보다 약 1.7배 높게 나타났다. 마그네슘이온은 유기물 분해, 화학비료, 염수 등에서 기인되는데 산업단지에서 생산되는 화학비료 성분의 영향으로 추측된다. 일반적으로 지하수에 녹아있는 마그네슘의 농도는  $1 \sim 40 \text{ mg L}^{-1}$  정도인데,  $40 \text{ mg L}^{-1}$ 를 초과하는 경우는 산업단지에서만 17건으로 자료의 12%에 해당하였다. 마그네슘의 영국기준은  $50 \text{ mg L}^{-1}$ 이며, 이를 초과한 경우는 산업단지에서만 나타났고, 모두 17건이었다.

주로 비료 및 폐수에서 발생하는  $K^+$ 의 평균농도는 산업단지일 때  $6.7 \text{ mg L}^{-1}$ 으로 광산·폐광산일 때 보다 약 5.6배 높은 값이었다. 칼륨이온은 혈액 및 체액의 산·알칼리 평형을 올바르게 유지시켜 체내조직이 산성화되는 것을 방지하며 근육수축에 필요한 미네랄이므로 심장기능, 특히 심장맥박을 정상으로 유지시킨다. 그러나 칼륨이 과잉으로 존재할 경우 혈액 투석 환자는 혈중 칼륨의 농도 상승으로 위험한 상태에 빠질 수도 있다. 칼륨의 국내 수질기준은 없으나 일반적으로 정상적인 지하수의 칼륨 농도는  $5 \text{ mg L}^{-1}$  미만인데, 산업단지에서 62건, 하수처리시설에서 3건이  $5 \text{ mg L}^{-1}$  이상이었다. 또한 칼륨의 영국 수질기준인  $12 \text{ mg L}^{-1}$ 를 초과하는 경우는 산업단지지역에서 29건이 나타났고, 나머지 오염원에서는 없었다.

### 2.2.3. 음이온

주요염원에 따른 음이온의 농도분포와 구성비는 Figure 4에 나타내었다. 음이온의 평균농도 합은 지하수의 전기적인 중성 상태를 고려하면 양이온의 농도와 같은 경향을 나타낼 것임을 쉽게 알 수 있다. 음이온의 평균농도는 모든 오염원에서  $HCO_3^- > SO_4^{2-} \geq Cl^- > NO_3^- > NO_3-N$ 의 순이었고, 광산·폐광산에서만  $SO_4^{2-}$ 와  $Cl^-$ 의 평균농도가 거의 같았다. 일반적으로  $Cl^-$ 이  $SO_4^{2-}$ 보다 많으면 오염이 발생한 것으로 추측하는데[21] 광산·폐광산의 경우  $Cl^-$ 와  $SO_4^{2-}$ 가 같은 양으로 나타나므로, 약간의 오염이 있을 것으로 추측된다.  $HCO_3^-$ 의 오염원별 구성비를 살펴보면 산업단지일 때 가장 높고 하수처리시설, 광산·폐광산의 순이었고, 전체 음이온 중에서 57 ~ 67%의 높은 비율을 차지하고 있다.  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $NO_3-N$ 의 비율은 광산·폐광산일 때 가장 높았고 산업단지, 하수처리시설의 순이었다. 반면  $SO_4^{2-}$ 의 구성비는 하수처리시설일 때 가장 높았고 산업단지, 광산·폐광산의 순이었으며, 하수처리시설일 때 구성비는 산업단지와 광산·폐광산일 때 보다 약 1.7배 정도 높은 값이었다.

한편  $NO_3-N$ 의 평균농도는 광산·폐광산일 때 가장 높았는데, 하수처리시설일 때 보다 3.5배 높은 값이었다. 일반적으로 질산성질소는 무기비료, 부패한 동식물, 생활하수, 공장폐수 등에서 배출되고, 수중의 질산염 농도 증가는 대개 질소비료의 사용과 연관이 깊다. 또한 토양에 흡착되기 어렵고 가용성이므로 지하수에 존재할 가능성이 크고, 휘발되지 않아 식물과 생물체

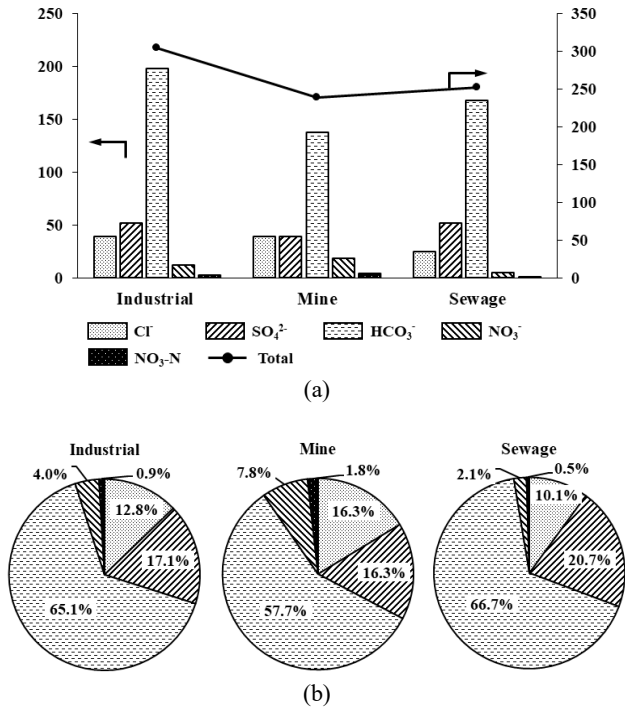


Figure 4. Concentration distribution (a) and composition (b) of anions according to pollution source.

에 의해 이용될 때까지 잔류하기 쉽다. 질산성질소는 생체 내에서 환원균에 의해 아질산염으로 환원되어 혈액 중의 헤모글로빈과 반응하여 산소운반기능이 없는 혈색소인 메트헤모글로빈을 생성 하는데, 농도가 10 mg L<sup>-1</sup> 이상이면 유아(특히 생후 3개월 이하)에게 청색증(Methemoglobinemia)을 유발한다. 이에 따라 WHO에서는 고농도의 질산성질소(22 mg L<sup>-1</sup> 이상)를 함유하는 물을 유아식에 금지하고 있다[23,24]. NO<sub>3</sub><sup>-</sup>는 질산성질소와 유사한 거동을 보여주는데, 평균농도는 광산·폐광산일 때 가장 높았고, 하수처리시설보다 약 3.5배 큰 값이었다.

SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 평균농도는 하수처리시설일 때 81 mg L<sup>-1</sup>으로 광산·폐광산일 때 보다 약 2배 높게 나타났다. 일반적으로 황산이온은 생활하수나 제련소와 펄프 공장의 폐수, 유기물이 미생물에 의해서 분해되는 과정 등에서 발생한다. 평균농도는 미생물 분해과정이 활발한 하수처리시설과 공장폐수가 배출되는 산업단지에서 상대적으로 높았다. 황산이온은 인체에 미치는 독성이 가장 적은 음이온이지만 다량으로 섭취 시 설사·탈수·위장관 자극 등의 증상이 있으며, 특히 황산마그네슘이 600 mg L<sup>-1</sup> 이상의 농도일 때 설사를 일으키는 것으로 알려져 있다[23,24].

Cl<sup>-</sup>의 평균농도는 산업단지과 광산·폐광산일 때 39.0 mg L<sup>-1</sup>으로 하수처리시설일 때 보다 약 1.5배 높게 나타났다. 염소이온은 생활하수, 축산폐수, 산업폐수, 동물의 배설물, 무기비료, 해수의 침투 및 풍속염, 도로의 제설작업 등으로부터 배출된다. 염화물은 체내에서 가장 풍부한 음이온염이며, 염화물의 90 ~ 95%는 소변으로 배설되어 인간에게 미치는 독성이 거의 없다. 염소이온은 양이온들과 결합하여 세포외액의 삼투작용에 기여하지만, 농도가 4,000 mg L<sup>-1</sup> 이상일 때는 심장병 환자에게 유해하다[23-25]. 또한 염소이온은 비반응성 물질로 대수

층 내에서 수리지질학적 영향에 의해 침전·흡착되거나 산화·환원되지 않고, 미생물에 의한 분해도 거의 나타나지 않으므로 다양한 환경 추적자로 사용된다. 자연 상태의 지하수는 10 mg L<sup>-1</sup>정도의 염소이온을 갖는 것으로 알려져 있는데[23], 산업단지에서 143건, 광산·폐광산에서 49건, 하수처리시설에서 51건으로 측정치의 대부분이 10 mg L<sup>-1</sup>를 초과하는 것으로 나타났다. 모든 오염원의 평균농도가 10 mg L<sup>-1</sup> 보다 약 2.5 ~ 4배 정도 높게 나타나므로 인위적인 오염의 영향이 있는 것으로 생각된다.

### 2.3. 분기에 따른 수질특성

#### 2.3.1. 현장측정 항목

오염감시전용측정망은 분기 1회(연 4회) 측정·분석되므로, 이를 통해 분기(계절)에 따른 지하수 수질특성을 분석하였다. 분기에 따른 pH의 평균값은 6.8 ~ 7.0으로 분기에 따른 큰 차이가 없었다. ORP의 평균값은 1분기일 때 86 mV, 2분기일 때 60 mV, 3분기일 때 80 mV, 4분기일 때 51 mV로 나타났다. 평균값이 4분기일 때 가장 작으므로, 이때 환원환경이 가장 우세할 것으로 예상된다. 수온의 평균값은 1분기일 때 18.1 °C, 2분기일 때 19.0 °C, 3분기일 때 18.9 °C, 4분기일 때 16.3 °C로 분기별로 큰 차이를 나타내지 않았다. 우리나라는 사계절이 뚜렷하여 계절에 따라 기온이 변하면서 지표온도의 변화가 나타나고 이것이 지하수의 수온에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 그러나 기온변화가 수온변화에 영향을 미치는 속도는 관정의 심도나 주변 지형 등에 따라 다양하게 나타나므로 추후 장기적인 모니터링의 결과를 심층 분석할 필요가 있다.

EC의 평균값은 분기에 따라 큰 차이가 없었지만, 1분기일 때 559 μS cm<sup>-1</sup>으로 다소 높게 나타났다. 높은 EC 값은 용존이온들의 유입을 의미하는데, 1분기의 상대적으로 높은 평균값은 봄철 농업활동에서 기인하는 것으로 추측된다. 즉 3월과 4월에 분뇨와 비료의 살포정도가 가장 크므로, 이들의 침출수가 지하수 내로 많이 유입되어 EC 값이 증가하는 것이다[26]. 또한 일반적으로 오염되지 않은 물의 전기전도도는 50 ~ 500 μS cm<sup>-1</sup>의 범위를 보이는데[19] 분석결과 모든 분기의 평균값이 500 μS cm<sup>-1</sup> 보다 다소 크게 나타나므로, 오염물질의 유입이 있을 것으로 예상된다.

DO는 일반적으로 공기 중의 산소에서 공급되며, 1 기압 25 °C에서 순수 용존산소 농도는 8 ~ 9 mg L<sup>-1</sup>이다. 하지만 지표의 물이 지하로 침투할 때 토양과 비포화대에서 미생물의 호흡과 유기물의 분해 등으로 용존산소가 소모된 후 대수층에 도달하기 때문에 지하수의 용존산소 농도는 지표수의 농도보다 낮아지게 된다[26]. DO의 평균농도는 2분기일 때 가장 높고 1분기일 때 가장 낮았다. 이는 2분기일 때는 장마 등으로 강우량이 많기 때문에 지하수로 유입되는 빗물과 지표수가 증가하게 되고, 이때 유입된 빗물과 지표수의 영향으로 2분기의 평균 농도가 비교적 높게 나타나는 것으로 추정된다. 1분기일 때는 봄철 농사일로 분뇨와 비료의 살포가 많아 이들의 성분은 지하수로 유입되는 양이 증가하게 된다. 이로 인해 유기물의 산화와

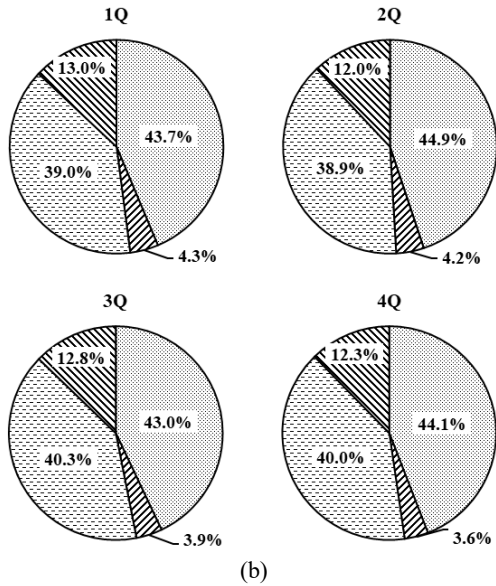
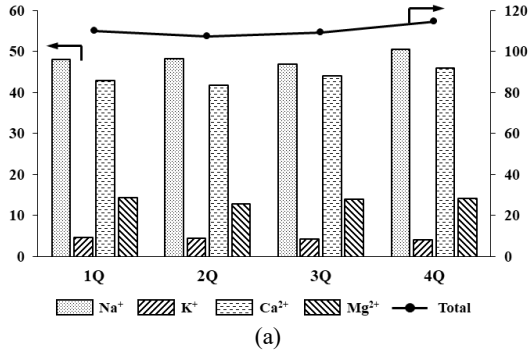


Figure 5. Concentration distribution (a) and composition (b) of cations according to quarter.

미생물의 분해활동이 활발해져 용존산소를 더 많이 소모하므로 1분기의 평균농도가 낮게 나타난 것으로 추측된다.

### 2.3.2. 양이온과 음이온

Figure 5와 Figure 6에 분기별 양이온 및 음이온의 농도분포와 구성비를 각각 나타내었다. 분기별 양이온의 합이 크게 다르지 않아 연중 양이온의 함량이 일정할 것으로 예상된다. 양이온의 구성비는 모든 분기에서 Na<sup>+</sup>이 43 ~ 45%로 가장 높게 나타났고, 양이온의 구성비는 분기에 따른 차이가 거의 없었다. Na<sup>+</sup>과 Ca<sup>2+</sup>이 양이온의 약 85%를 차지하는 것으로 나타났다. 음이온 역시 양이온과 마찬가지로 분기에 따른 변화가 미미하였다. 이는 연중 산업활동이 일정하거나 지하수의 경우 이온들이 한 번 침투하여 오염되면 제거가 어렵다는 것을 의미한다. 음이온의 평균농도는 모든 분기에서 HCO<sub>3</sub><sup>2-</sup> > SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > Cl<sup>-</sup> > NO<sub>3</sub><sup>-</sup> > NO<sub>3</sub>-N의 순으로 같았다. HCO<sub>3</sub><sup>2-</sup>은 음이온의 약 62%를 차지하고 있다. 해수의 영향을 받지 않은 일반 지하수에서는 대체로 HCO<sub>3</sub><sup>2-</sup>이 우세한 성분이고 4분기일 때 평균농도가 가장 높았다. 이는 지하수 내 탈질 미생물의 활발한 작용에 따른 탈질반응의 결과로 판단된다. 탈질반응은 환원환경에서 탈질 미생물이 탄소를 에너지원으로 사용할 때 전자 공여체로 질

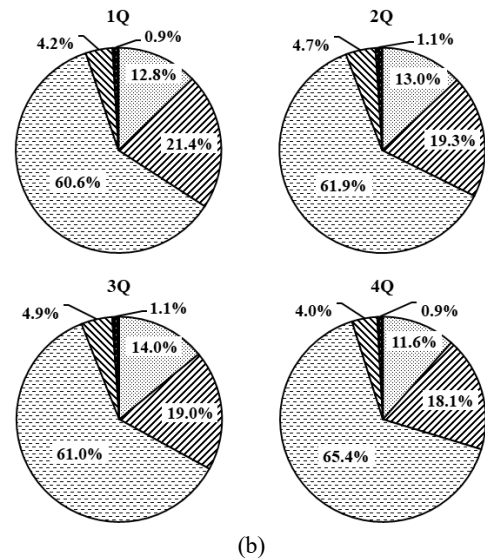
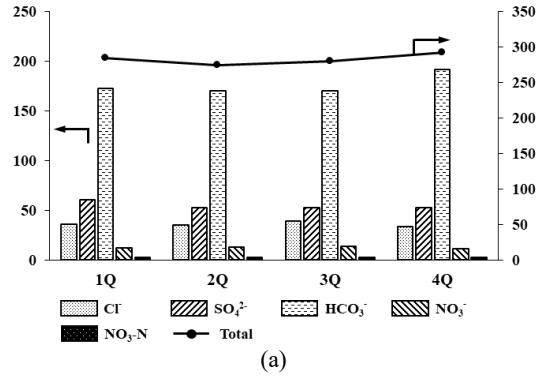


Figure 6. Concentration distribution (a) and composition (b) of anions according to quarter.

산염을 사용하면서 질산염이 환원되어 질소가스가 되기 때문으로 생각된다[26]. 일반적으로 지하수 내 환원환경이 우세할수록 탈질 미생물이 활발하게 작용한다. 산화·환원환경의 지시인자로 ORP가 대표적이며, 분석결과 4분기일 때 ORP의 평균값이 가장 낮아 환원환경이 상대적으로 우세하였다. 즉 4분기일 때 탈질 미생물의 활동도 증가 조건과 잘 부합하기 때문에 HCO<sub>3</sub><sup>2-</sup>이 증가한 것으로 추정된다.

### 2.4. 수질유형 분석

주요염원별 수질유형에 대한 파이퍼 다이어그램을 Figure 7에 나타내었다. 오염의 영향을 의미하는 Na-Cl 유형의 비율이 산업단지일 때 26.9%로 가장 높았고, 하수처리시설일 때 24.1%, 광산·폐광산일 때 7.2%로 나타나 산업단지의 오염도가 다른 오염원에 비해 상대적으로 클 것으로 예상되었다. 한편 산업단지는 Na-HCO<sub>3</sub> 유형이 53.1%로 가장 높았고, 광산·폐광산과 하수처리시설은 Ca-HCO<sub>3</sub> 유형이 가장 높은 비율을 보였다. 분기에 따른 수질유형 중 Na-HCO<sub>3</sub> 유형은 모든 분기에 가장 높은 비율을 나타내었다. Na-Cl 유형은 1분기와 2분기가 23 ~ 27%로 3분기와 4분기의 18.7% 보다 높게 나타났다. 한편 광물용해 등의 영향을 나타내는데 Ca-HCO<sub>3</sub> 유형의 비율은 3분

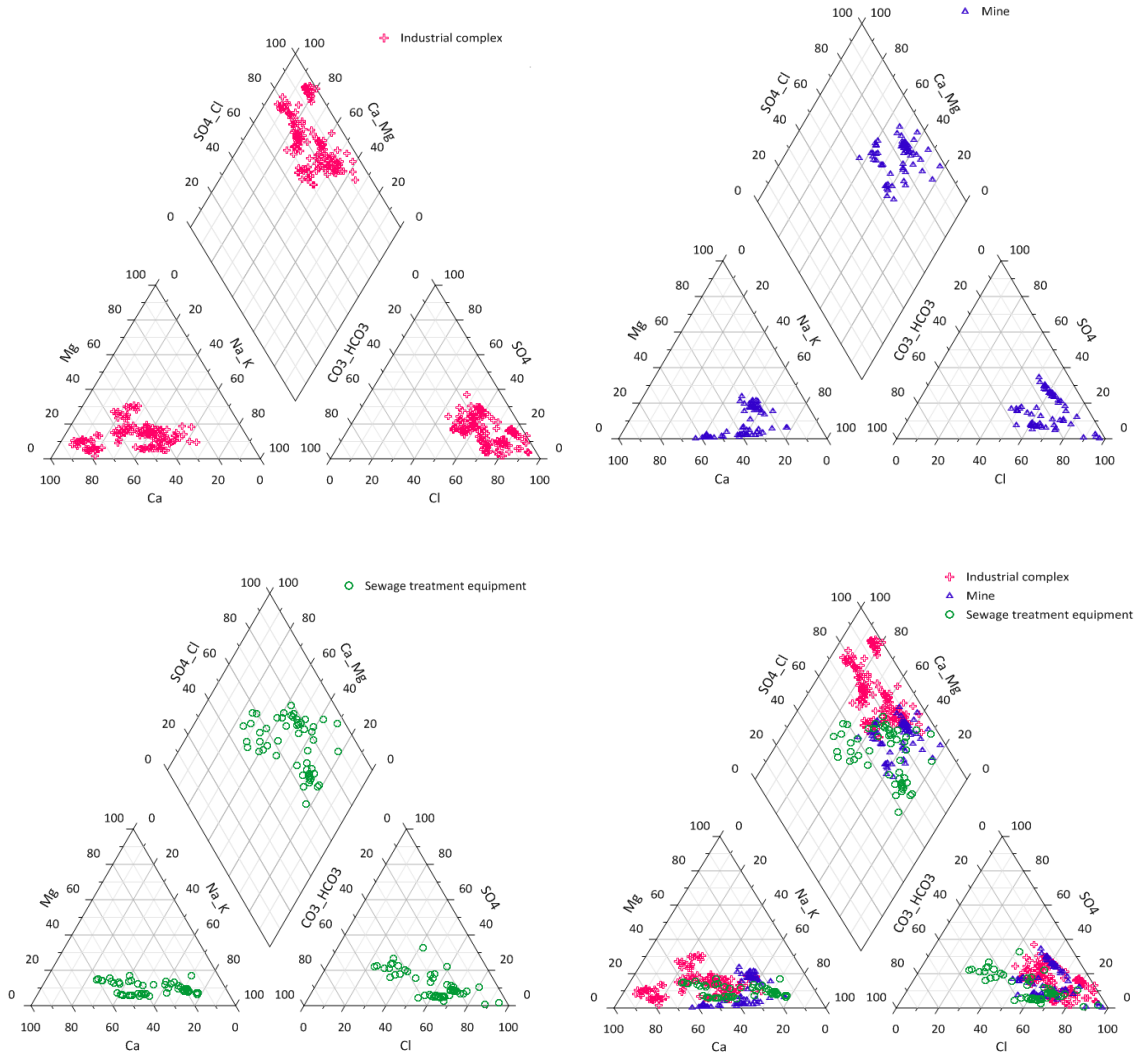


Figure 7. Piper diagram according to main pollution source.

기에서 가장 높았다. 또한 오염감시전용측정망의 전체적인 수질유형 중 Na-Cl 유형이 약 20%를 차지하였는데, 배경수질전용 측정망의 Na-Cl 유형이 0.4%인 것과 비교하면 50배 이상 높았다. 따라서 오염 감시전용측정망 지하수의 경우 외부 오염 물질에 의한 영향을 받는 것으로 추측할 수 있다. 현재 거의 모든 지하수가 동일한 방법으로 관리되고 있으나, 지하수 수질은 심도 및 지질[16]과 주요염원 및 분기에 따라 다양한 특성을 보이고 있으므로 각 지하수 고유의 수질특성을 고려한 맞춤형 관리와 오염예방이 필요할 것으로 생각된다.

### 3. 결론

주요염원에 따른 항목별 평균값을 분석한 결과 pH와 수온은 오염원에 따라 큰 차이가 없었고, EC는 산업단지지역일 때 가장 높고, 광산·폐광산지역일 때 가장 낮았다. DO는 산업단지와 하수처리시설일 때 낮으나 ORP는 광산·폐광산지역일 때 가장 높았다. 양·음이온 평균농도의 경우  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ 는 산업단지일 때  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ 는 하수처리시설일 때,  $\text{Cl}^-$ ,

$\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ 는 광산·폐광산지역일 때 가장 높았다. 양·음이온의 합은 산업단지지역일 때 가장 높았으며, 하수처리시설, 광산·폐광산지역의 순이었다. 분기에 따른 항목별 평균값을 분석한 결과 pH 및 수온은 분기별 차이가 크지 않았고, ORP는 4분기일 때 가장 낮았다. 1분기일 때 EC가 가장 높고, DO는 가장 낮았다. 양이온 및 음이온의 평균농도는 분기별로 큰 차이가 없었다. 수질유형 중 Na- $\text{HCO}_3^-$  유형이 가장 높은 비율을 차지하였다. Na-Cl 유형은 주요염원별에서는 산업단지에서 가장 높았고, 분기별로는 1분기에 가장 높았다. 외부 오염의 가능성이 높은 Na-Cl 유형은 오염감시전용측정망의 전체 자료 중 약 20%를 차지하였다.

### References

- Loaiciga, H. A., Charbeneau, R. J., Everett, L. G., Fogg, G. E., Hobbs, B. F., and Rouhani, S., "Review of Ground-water Quality Monitoring Network Design," *J. Hydraulic Eng.*, **118**(1), 11-37 (1992).

2. Frapporti, G., Vriend, S. P., and van Gaans, P. F. M., "Hydrogeochemistry of the Shallow Dutch Groundwater: Interpretation of the National Groundwater Quality Monitoring Network," *Water Resour. Res.*, **29**(9), 2993-3004 (1993).
3. Reijnders, H. F. R., van Drecht, G., Prins, H. F., and Boumans, L. J. M., "The Quality of the Groundwater in the Netherlands," *J. Hydrology*, **207**(3-4), 179-188 (1998).
4. Dawoud, M. A., "Design of National Groundwater Quality Monitoring Network in Egypt," *Environ. Monit. Assess.*, **96**(1), 99-118 (2004).
5. Jousma, G., and Roelofsen, F. J., "World-wide Inventory on Groundwater Monitoring," International Groundwater Resources Assessment Centre Report GP 2004-1 (2004).
6. Dauhney, C. J., Raiber, M., Moreau-Fournier, M., Morgenstern, U., and van der Raaij, R., "Use of Hierarchical Cluster Analysis to Assess the Representativeness of a Baseline Groundwater Quality Monitoring Network: Comparison of New Zealand's National and Regional Groundwater Monitoring Programs," *Hydrogeol. J.*, **20**(1), 185-200 (2012).
7. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "Groundwater Management Basic Plan Revision (2017~2026)," (2017).
8. Ministry of Environment, "Groundwater Quality Monitoring Network and Water Pollution Measurement Plan," (2017).
9. Ministry of Environment, "Study on Establishment and Operation of Integrated National Groundwater Measurement (Observation) Network," (2019).
10. Kim, N. J., Cho, M. J., and Woo N. C., "Developing a National Groundwater- Monitoring Network in Korea," *Hydrogeol. J.*, **3**(4) 89-94 (1995).
11. Park, J. K., Kim, R. H., Lee, J. Y., Choi, D. H., and Kim, T. D., "Evaluation of Status of Groundwater Quality Monitoring Network of Korea: Implications for Improvement," *J. Soil Groundwater Environ.*, **12**(6), 92-99 (2007).
12. Lee, J. Y., Yi, M. J., Yoo, Y. K., Ahn, K. H., Kim, G. B., and Won J. H., "A Review of the National Groundwater Monitoring Network in Korea," *Hydrol. Process.*, **21**(7), 907-919 (2007).
13. Lee, J. Y., and Kwon, K. D., "Current Status of Groundwater Monitoring Networks in Korea," *Water*, **8**(4) 168 (2016).
14. Choi, B. Y., Yun, S. T., Kim, K. H., Kim, J. W., Kim, H. M., Koh, Y. K., "Hydrogeochemical Interpretation of South Korean Groundwater Monitoring Data Using Self-Organizing Maps," *J. Geochem. Explor.*, **137**, 73-84 (2014).
15. Bang, S., Yoo, K., and Park, J., "Temporal Trend Analysis of Contamination Using Groundwater Quality Monitoring Network Data," *J. Korean Soc. Water Quality*, **27**(1), 120-128 (2011).
16. Cha, S., and Seo, Y. G., "Groundwater Quality in Gyeongnam Region Using Groundwater Quality Monitoring Data: Characteristics According to Depth and Geological Features by Background Water Quality Exclusive Monitoring Network," *Clean Technol.*, **26**(1) 39-54 (2020).
17. Ministry of Environment, "2020 Groundwater Annular Report," (2020).
18. <http://sgis.nier.go.kr/> (accessed Jun. 2019).
19. Seo, Y. G., "A Study on Geochemical Characteristics and Statistical Interpretations of Groundwater using Long-Term Groundwater Monitoring Data," Ph. D. Dissertation, The University of Suwon (2015).
20. Han, S. W., Kim, B. J., and Lee, G. J., "Study on the Quality of Ground Water in Kyungbuk Region 2: Study on the State of Ground Water by the Depth," *J. Ind. Technol.*, **3**(1), 434-437 (2000).
21. Kim, J. K., Kwon, K. A., Byeon, J. H., Park, J. H., Park, H. G., and Lim, Y. J., "Characteristic Analysis of Water Quality from Groundwater Monitoring Network in the North Area of Gyeonggi-do," *J. KIHE*, **20**, 207-214 (2007).
22. Yang, K. H., "The Comparative Assessment on Characteristics of Ground Water Pollution Through the Best Selection of Background Area," MS Thesis, Inha University (2011).
23. Han, S. W., Yang, D. S., and Kim, B. J., "A Study on the Quality of Ground Water in Kyungbuk Region 4: The Characteristics of Groundwater by Rock Types," *J. Ind. Technol.*, **5**(1), 713-718 (2002).
24. Ministry of Environment and National Institute of Environmental Research, "Explanation of Standards of Drinking Water Quality,"(2017).
25. Kim, G., Choi, D., Yoon, P., and Kim K., "Trends of Groundwater Quality in the Areas with a High Possibility of Pollution," *J. Kor. Geo-Environ. Soc.*, **11**(3), 5-16 (2010).
26. Lee, E. J., Woo, N. C., Lee, B. S., and Kim, Y. B., "Variation in Nitrate Contamination of Shallow Groundwater in a Farmland in Gyeonggi-do, Korea," *Econ. Environ. Geol.*, **41**(4) 393-403 (2008).