

지하수수질측정망 자료를 활용한 경남지역 지하수 수질: 배경수질전용측정망에 의한 심도·지질별 특성

차수연^{1,2}, 서양곤^{3,*}

¹경상대학교 융합과학기술대학원 생산기술공학과
52828 경남 진주시 진주대로 501

²경상남도보건환경연구원
52732 경남 진주시 월아산로 2026

³경상대학교 화학공학과/그린에너지융합연구소
52828 경남 진주시 진주대로 501

(2020년 1월 15일 접수; 2020년 2월 14일 수정본 접수; 2020년 2월 14일 채택)

Groundwater Quality in Gyeongnam Region Using Groundwater Quality Monitoring Data: Characteristics According to Depth and Geological Features by Background Water Quality Exclusive Monitoring Network

Suyeon Cha^{1,2}, and Yang Gon Seo^{3,*}

¹Department of Production Technology and Engineering, Graduate School of Convergence Science and Technology, Gyeongsang National University
501 Jinju-daero, Jinju-si, Gyeongnam 52828, Korea

²Gyeongsangnam-do Institute of Health and Environment
2026 Worasan-ro, Jinju-si, Gyeongnam 52732, Korea

³Department of Chemical Engineering/RIGET, Gyeongsang National University
501 Jinju-daero, Jinju-si, Gyeongnam 52828, Korea

(Received for review January 15, 2019; Revision received February 14, 2020; Accepted February 14, 2020)

요 약

본 연구에서는 경상남도 지역의 지하수 수질 특성을 파악하고 효과적인 지하수 관리를 위한 기초적인 자료를 제공하기 위하여 지하수수질측정망 자료를 이용하여 심도와 지질별로 분석하였다. 토양지하수정보시스템의 배경수질전용측정망을 통하여 2013년부터 2017년까지 5년 동안의 503 세트 자료를 수집하였다. 총대장균군과 몇 극소량 존재하는 항목 즉 수은, 페놀 등을 제외한 수질매개변수는 심도와 지질에 따라 유의하거나 아주 유의하였다. 심도가 깊어짐에 따라 pH와 전기전도도는 증가하였고, 수은, 용존산소 산화물 환원 전위, 비소, 총대장균군 그리고 탁도는 감소하였고, 먹는물 수질 부적합율은 낮아졌다. 양이온과 음이온의 농도 합은 쇠설성퇴적암에서 가장 높았고 변성암에서 가장 낮았다. 먹는물 수질 부적합율은 변성암에서 가장 높았고 쇠설성퇴적암, 미고결퇴적물, 그리고 관입화성암 순이었다. 상층관정과 쇠설성퇴적암의 일부 지점에서 외부 오염물질에 의한 오염의 가능성을 의미하는 Na-Cl 수질특성을 보였다.

주제어 : 지하수수질, 배경수질전용측정망, 심도, 지질 특성

Abstract : This study analyzed the groundwater quality according to the depth and geological features in Gyeongsangnam-do area using groundwater quality monitoring network data to grasp the groundwater quality characteristics and to provide basic data for policy making on efficient groundwater management. Five hundred and three data sets were acquired from background water quality exclusive monitoring network in soil groundwater information system for five years (2013 ~ 2017). Except for the total coliforms and tracer items such as mercury, phenol, and others, the parameters of water quality were significant or very significant, depending on depth and geological features. As the depth got deeper, the average value of pH and electrical conductivity

* 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.2020.26.1.39 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.

increased; water temperature, dissolved oxygen, oxide reduction potential, arsenic, total coliforms, and turbidity decreased; and total unfit rate for drinking water standards was lower. It was found that the sum of the positive and negative ions was the highest in the clastic sedimentary rock and the lowest in metamorphic rock. The total unfit rate for drinking water standards was the highest for metamorphic rocks, followed by clastic sedimentary rock and unconsolidated sediments and, finally, intrusive igneous rock with the lowest penetration. The Na-Cl water type, which indicated the possibility of contamination by external pollutants, appeared only at some points in shallow depths and in clastic sedimentary rocks.

Keywords : Groundwater quality, Background water quality exclusive monitoring network, Depth, Geological feature

1. 서론

지구상에 존재하는 물의 양은 약 14억 km³이고 이 중 염수가 97.5%를 차지하며, 담수는 2.5%에 해당된다. 담수 중 사람이 쉽게 사용할 수 있는 담수호 또는 지표수는 지구 전체 물의 0.01%에 불과하다. 우리나라는 물 공급을 주로 지표수에 의존하지만, 도시화와 산업화로 인한 인구증가 및 생활수준의 향상으로 용수 수요와 오염물질이 지속적으로 증가하여 지표수의 수질이 악화되고 있다. 또한, 지구온난화로 인한 극심한 홍수 및 가뭄의 발생 빈도가 증가하고 있어 국지적인 물 부족현상이 유발되고 있어 안정적인 수질과 수량을 확보할 수 있는 지하수가 대체 수원으로서 주목받고 있다[1,2]. 2016년 기준 우리나라 총 물 이용량은 372억 m³/년이고, 이 중 하천수는 122억 m³/년(32.8%), 댐 용수는 209억 m³/년(56.2%)으로 전체의 89.0%를 지표수로 공급하고 있으며, 지하수는 11%인 41억 m³/년을 공급하고 있다[3].

지하수는 대장균 등의 세균오염이 적고, 연중 온도 변화 및 수량의 급격한 변동이 없어 안정적이며, 지하에 부존된 자원 중에서 유일하게 재충전될 수 있는 자연자원으로 알려져 있다. 또한, 지하수가 땅속을 흐르는 동안 오염물질들이 자연정화되고, 지층내의 여러 물질들과 반응하여 무기물의 함량이 풍부해진다. 지하수는 개발에 넓은 땅을 필요로 하지 않고 저수지나 댐과 같은 시설이 불필요하여 비용측면에서도 경제적인 특징을 갖고 있다[4]. 우리나라의 지하수위는 강수량, 사용량 등에 따라 상승과 하강을 반복하며, 전반적인 수위 변동 경향은 1990년까지 소폭 하강하였고 이후 상승하고 있다[3]. 지하수 개발사업은 1960년대 후반부터 정부 주관의 농업용수 개발사업의 일환으로 시작된 이래 점차 그 이용도가 증가되었다. 근래에는 농업용수뿐만 아니라 생활용수, 공업용수의 공급에 이르기까지 용도에 따라 다양하게 개발 및 이용되고 있다. 그러나 개발위주 정책으로 지하수를 무분별하게 개발하면서 오염방지 시설의 미흡한 관리와 방치된 폐공 등의 문제를 발생시켰고, 이는 지하수 대수층의 기능저하와 수질 오염으로 이어졌다[5]. 2001년부터 2014년 지하수 수질측정망 자료를 분석한 결과 수질 초과 비율은 3.6~8.0%로서 소폭 증가하는 추세에 있다[3].

지하수는 지표수에 비해 환경변화에 대한 반응이 느리고, 자정능력이 약하기 때문에 일단 훼손되거나 오염이 진행되면 본래의 지하수 상태로 회복시키기 위해서 많은 시간과 비용이 소요된다. 이처럼 지하수 오염의 피해는 단기적으로는 나타나지 않지만 장기적으로 누적되어 작용함으로써 결국은 인

간의 건강상 피해와 생태계 파괴를 초래하게 된다. 따라서 지하수를 지속적이고 체계적으로 관측 및 관리하여 오염을 사전에 예방하여야 한다[6]. 이에 환경부는 지하수 수질모니터링의 중요성을 인식하고 1999년부터 지하수수질측정망을 운영하고 있다. 지하수수질측정망은 전국의 지하수 수질현황과 수질변화 추세를 정기적으로 파악·관리하여 지하수의 수질을 보전하고 정책수립을 위한 기초자료로 활용하기 위한 목적으로 운영된다.

본 연구에서는 토양지하수정보시스템(soil groundwater information system, SGIS)에서 공개한 5년간(2013년~2017년)의 지하수수질측정망의 배경수질전용측정망에 대한 자료를 토대로 경남지역 지하수의 심도별·지질별 수질특성을 다각적으로 분석하여 향후 수질특성을 고려한 효율적인 관리와 오염예방이 이루어질 수 있도록 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 지하수수질측정망

2.1. 지하수수질측정망 개요

우리나라는 지하수 수질현황 및 수질변화를 정기적으로 파악하기 위하여 「지하수법」 제18조(수질오염의 측정) 및 「지하수의 수질보전 등에 관한 규칙」 제9조(수질측정망 설치 및 수질오염실태 측정 계획의 수립·고시)를 근거로 지하수수질측정망을 운영하고 있다. 지하수수질측정망은 크게 국가지하수수질측정망과 지역지하수수질측정망으로 구분된다. 국가지하수수질측정망은 우리나라의 지질과 유역을 고려한 지하수 수질현황 및 특성을 파악하고, 산업단지 등 대규모 오염원으로부터 지하수 오염과 확산을 지속적으로 감시하는 역할을 담당한다. 지역지하수수질측정망은 지방자치단체 관할지역 내의 지하수오염감시와 수질파악을 기본 운영목적으로 하고, 국가지하수수질측정망을 보완하는 역할을 수행한다[7].

지하수수질측정망의 측정항목 및 측정빈도는 Table 1과 같다. 국가지하수수질측정망 중 지하수수질측정망은 측정망 설치 후 5년 단위로 62개의 전 항목에 대하여 연 4회(분기별 1회) 측정·분석하고, 이외의 기간은 기본항목, 개소별 관심항목 및 지하수후보물질에 대하여 연 4회(분기별 1회) 측정·분석한다. 관심항목이란 측정소 설치지역의 지질 또는 오염원과 관련된 항목 및 이전 측정에서 수질기준의 80%이상으로 검출된 항목을 뜻한다. 또 다른 국가지하수수질측정망인 타기관측정망(국가지하수관측망, 농촌지하수관리관측망)은 지하수 생활용수 20개 항목에 대해 연 2회(반기별 1회) 측정·분석한다. 지역지하수수질측정망도 지하수 생활용수 20개 항목

Table 1. Items and frequency of measurement for groundwater quality monitoring network

Monitoring		Items		Frequency
National groundwater quality monitoring network	Groundwater quality exclusive monitoring network	At 1, 6, 11 year after installation	69 items (General items, drink water items, etc.)	4 times /year
		Others	General items, concerned items and nominated items	
	Other agencies	Domestic water quality standard items (19) and EC		2 times /year
Local groundwater quality monitoring network		Domestic water quality standard items (19) and EC		2 times /year

에 대해 연 2회(반기별 1회) 측정·분석한다. 지하수수질측정망은 환경부에서 총괄 운영하며, 국립환경과학원에서 지하수 수질측정망 자료의 검증 및 통계분석을 담당한다. 세부수행기관으로 한국환경공단, 유역(지방)환경청, 지자체 등이 있는데, 배경수질전용측정망과 오염감시전용측정망은 한국환경공단에서 운영·관리한다. 국가지하수관측망은 국토교통부에서, 농촌지하수관리관측망은 농림축산식품부에서는 운영한다. 지역지하수수질측정망의 경우 오염우려지역은 유역(지방)환경청에서 운영하고, 일반지역은 시·도의 총괄하에 시·군·구에서 운영한다[7,8].

2.2. 지하수수질측정망 현황

2016년 말 기준 전국에 설치된 모든 지하수수질측정망은 2,755개소이다. 지하수수질측정망의 배경수질전용측정망과 오염감시전용측정망은 각각 전라남도(34개소)와 강원도(11개소)에서 가장 많았다. 타기관측정망인 국가지하수관측망과 농촌지하수관리관측망은 각각 경상북도(64개소)와 경기도(12개소)에서 가장 많이 설치되어 있었다. 지역지하수수질측정망의 오염우려지역측정망과 일반지역측정망은 모두 경기도에서 가장 많았고, 세종시에서 가장 적었다. 설치된 지하수 수질측정망의 총 개소수가 가장 많은 지역은 경기도(362개소)였고, 가장 적은 지역은 세종시(18개소)였다.

1999년에는 지역지하수수질측정망인 오염우려지역측정망과 일반지역측정망만 운영되었고, 그 이후로 2005년에 국가지하수관측망, 2008년에 지하수수질전용측정망인 배경수질전용측정망과 오염감시전용측정망이 신규 운영되었다. 가장 마지막으로 농촌지하수관리관측망이 2010년부터 운영되었다. 연도별 운영대상의 개소를 살펴보면 오염우려지역측정망은 1999년부터 2017년까지 781개소로 변함없었고, 일반지역측정망은 960개소(1999년)에서 1,240개소(2017년)로 증가하였다. 타기관측정망인 국가지하수관측망은 293개소(2005년)에서 412개소(2017년)로 증가하였으며, 농촌지하수관리관측망은 2010년 처음 60개소로 설치된 이후 변함없었다. 오염감시전용측정망은 10개소(2008년)에서 64개소(2017년)로 6.4배 증가하였고, 배경수질전용측정망은 3개소(2008년)에서 198개소(2017년)로 약 66배 증가하였다[7].

2.3. 배경수질전용측정망

전국을 미고결퇴적물, 다공질화산암, 반고결퇴적암, 비다공질화산암, 관입화성암, 쇄설성퇴적암, 석회암, 변성암의 8개 주요지질에 따라 구분하고, 116개 중권역마다 분포하는 지질을 고려하여, 각 지질 단위별로 측정관심구역을 선정한다. 유역 내 지형 구배를 예측하여 지하수 흐름을 판단하고, 예상 지하수 흐름을 고려하여 최종적으로 상층(shallow), 중층(intermediate), 하층(deep)에 3개의 측정지점에 배경수질전용측정망을 설치한다[7]. 한편 오염감시전용측정망은 산업단지, 폐광산지역, 가축매몰지 등 대규모 오염원과 국가적 관리가 필요한 오염지역 주변에 측정지점을 선정한다.

3. 지역 특성 및 분석방법

3.1. 경남 지역 특성과 지하수 현황

경상남도의 동쪽에는 태백산맥의 여맥이 뻗어 있고, 중앙부에는 낙동강이 흐르며, 서쪽에는 비교적 험준한 소백산맥이 호남지방과 경계를 이루고 있다. 경상남도 대부분이 낙동강유역에 속하며, 서부지역은 섬진강 등이 일부 유역을 형성하고 있다. 국토교통부에서 구축한 수자원 단위지도에서 경상남도 지역을 편입하고 있는 유역은 낙동강, 낙동강남해, 섬진강, 회야·수영 등 4개 대권역과 16개 중권역이다. 서부지역인 산청군과 하동군지역은 지리산편마암복합체가 넓게 분포하고, 편마암복합체를 관입한 화강암지대가 거창군과 함양군에 분포한다. 중부인 의령군, 진주시, 함안군, 창녕군, 사천시, 합천군 지역에는 편마암복합체를 부정합으로 피복하고 있는 중생대의 쇄설성 퇴적암지역이 광범위하게 분포한다. 동부인 밀양시, 창원시, 김해시, 양산시 지역은 안산암, 반암류, 유문암을 포함하는 비다공질화산암과 화산쇄설암 그리고 화강암과 제4기 충적층이 비교적 복잡한 분포를 이루고 있다[8].

경상남도 지하수의 전체 시설수는 91,234개소이고 전체 이용량은 367,351천 m³/년이다. 지하수의 시설수는 창원시가 12,031개소로 경상남도 전체 개소수의 13.2%로 가장 많고, 통영시가 1,954개소(2.1%)로 가장 적다. 지하수 이용량은 창원시가 43,039천 m³/년으로 경상남도 전체 이용량의 11.7%로 가장 많고, 통영시가 4,621천 m³/년(1.3%)으로 가장 적게 이용하고 있다. 경상남도 지하수의 용도별 현황은 생활용수는

45,918개소의 시설에서 142,914천 m³/년을 이용하고 있어 전체 이용량의 38.9%를 차지하고, 공업용수는 1,613개소의 시설에서 16,716천 m³/년, 농업용수는 43,585개소의 시설에서 207,360천 m³/년을 사용하고 있는 것으로 나타났다. 이를 전국 현황과 비교하면 경상남도의 지하수 시설수는 전국 1,474,577개소의 5.9%에 해당되고, 지하수 이용량은 전국 4,070,820천 m³/년의 9.0%를 차지한다[8].

지하수의 유동 및 수질은 대수층이 분포되어 있는 심도와 지질에 의해 일차적으로 결정되므로, 본 연구에서는 심도별·지질별로 지하수 수질특성을 파악하고자 하였다. 배경수질전용측정망은 전국을 8개 수문지질에 따라 구분하고 116개 중권역마다 분포하는 지질을 고려하여 각 지질 단위별로 설치되며, 각 지점은 상층관정(충적층), 중층관정(풍화대층) 그리고 하층관정(암반층)으로 총 3개 심도의 관정으로 구성되어 있으므로 심도와 지질에 따른 수질특성을 분석하기에 적합한 자료이다[9,10]. 그러나 측정망 중에는 시설이 폐지되거나 토지용도 변경 등의 이유로 사용이 불가하여 일부 측정지점을 변경하는 일이 종종 발생하기 때문에 수질의 변화양상을 명확하게 파악할 수 없는 일이 생긴다. 따라서 본 연구에서는 시간적으로 장기간 동일지점에서 연속적으로 측정이 이루어져 수질의 특성과 변화를 정확히 검토할 수 있는 수질자료를 확보하고자 하였다. 따라서 심도와 지질이 지하수 수질에 미치는 영향을 파악하기 위해 토양지하수정보시스템을 통하여 경상남도에 설치되어 있는 배경수질전용측정망 중 27개 지점에서 최근 5년 동안 연 4회 측정·분석된 503개 수질자료를 수집하여 심도별·지질별 수질특성을 분석하였다[11].

3.2. 분석방법

3.2.1. 전하이온균형(charge balance error)

수질특성을 검토하기 위해 앞서 지하수수질전용측정망 수질자료의 적정성을 평가 하기 위한 전하이온균형(charge balance error, CBE)를 Equation (1)과 같이 계산하였다.

$$CBE(\%) = \frac{\sum(Cations.meq/L) - \sum(Anions.meq/L)}{\sum(Cations.meq/L) + \sum(Anions.meq/L)} \times 100 \quad (1)$$

3.2.2. 기술통계와 추론통계

통계학적 자료처리방법은 크게 기술통계(descriptive statistics)와 추론통계(inference statistics)로 분류될 수 있다. 기술통계 분석이란 자료의 특성을 가장 효과적으로 설명할 수 있는 요약치를 찾아내는 분석방법이다. 본 연구에서는 심도와 지질에 따라 수질자료의 항목별 평균(average)과 중앙값(median), 범위(range) 및 사분위수 범위(interquartile range, IQR), 표준편차(standard deviation) 등을 분석하여 수질특성을 확인하였다. 평균과 중앙값은 자료들의 집중경향(central tendency)을 나타내는 척도이고, 범위 및 사분위수 범위, 표준편차는 자료의 산포 정도를 나타내는 척도이므로 수질자료의 전체적인 경향성과 특징을 파악할 수 있다.

추론통계분석은 불확실성이 내포된 상황에서 주어진 자료

를 분석하여 현재의 상태나 미래의 현상을 예측하는 통계적 추측을 다루는 기법이다. 이때, 통계적 추론을 통하여 얻어진 추측이나 결론들은 어느 정도의 불확실성을 갖는데, 이 불확실성의 정도를 확률이라는 객관적 척도를 이용하여 표현하는 것이 추정(estimation)과 가설검정(hypothesis test)이다. 추정은 표본을 통해 모집단 특성이 어떠한가에 대해 추측하는 과정으로 표본의 평균계산을 통해 모집단의 평균을 추측하는 방법 등이 있다. 가설검정은 모집단의 실제 값이 얼마나 되는가에 대한 주장에 대해 표본이 가지고 있는 정보를 이용하여 가설의 옳고 그름을 판단하는 과정으로 흔히 분산분석(analysis of variance, ANOVA), t-test, 회귀분석 등이 사용된다. 본 연구에서는 샘플집단의 평균에 대해 귀무가설(null hypothesis)과 대립가설(alternative hypothesis)을 설정하고 가설의 합당성을 판정하는 방법인 분산 분석을 이용하여 수질특성의 차이가 통계적으로 유의미한지 검증하였다.

또 다른 통계분석 방법으로 상관분석(correlation analysis)을 이용하였다. 상관분석은 연속형 두 변수 간의 선형관계 정도를 검정하는 방법으로, 연속형 변수 간의 관련성을 파악할 수 있다. 상관분석의 결과는 상관계수(correlation coefficient) 또는 피어슨(Pearson) 상관계수로 표현되며, 본 연구에서는 배경수질전용측정망의 수질자료를 토대로 측정항목 간의 상관계수를 분석하여 상관관계를 정량적으로 검토하였다. 상관계수는 두 개의 특성 간의 선형관계 강도, 즉 두 변수가 얼마나 직선관계 인가를 나타내는 척도이며, -1과 1사이의 값을 가진다. 상관계수의 절댓값이 1에 가까울수록 두 변수 간 선형성이 크다고 할 수 있지만, 이는 두 변수의 선형관계의 강도를 나타내는 척도일 뿐, 두 변수의 특정한 관계를 알려주는 척도는 아니다[12].

3.2.3. 박스 도표 및 파이퍼 다이어그램

수질자료의 분포특성을 박스 도표(box plot)을 통해 나타내었다. 박스 도표란 중앙값과 제1사분위수(Q₁), 제3사분위수(Q₃) 및 두 극단값(최대값, 최소값)을 시각적으로 표현한 그림이다. 일반적으로 평균이나 표준편차와 같은 척도는 자료에 이상점이 있는 경우 심하게 왜곡될 가능성이 있는데, 박스 도표로 자료에 이상점이 포함되는지를 쉽게 판단할 수 있다[13]. 본 연구에서는 박스 도표에 평균값은 동그라미로, 먹는물 수질기준은 점선으로 표현하여 추가적으로 도시하였다.

주요 양이온과 음이온을 대상으로 파이퍼 다이어그램(piper diagram)을 도시하였다. 파이퍼 다이어그램은 지하수의 수질특성을 분석하기 위하여 piper에 의해서 1944년에 제안된 도식화 방법[14]으로, 주요 양이온(Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺)과 음이온(HCO₃⁻, CO₃²⁻, SO₄²⁻, Cl⁻)의 당량농도(equivalent concentration)의 상대적인 비율을 삼각형과 마름모 형태의 도표에 도시한 것이다. 왼쪽아래에 있는 삼각도표에는 양이온의 상대적 비율이 도시되고 오른쪽 아래에 있는 삼각도표에는 음이온의 상대적 비율이 도시된다. 그리고 중간 위쪽에 있는 마름모 도표에는 아래의 두 삼각도표의 바깥쪽 경계선과 나란한 선을 확장함으로써 양이온과 음이온의 상대비율이 합

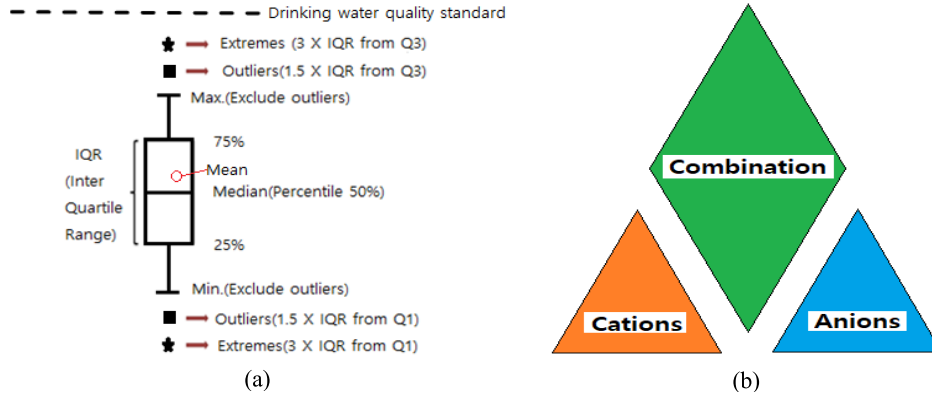


Figure 1. Structure of box plot (a) and piper diagram (b).

계 도시되게 된다. 물의 특성을 시각적으로 표현하므로, 지하수의 수질유형을 한눈에 파악할 수 있어 유용하다. 또한 일반적으로 오염되지 않은 지하수의 화학적 특성은 주로 지질에 영향을 받으므로 주요 이온종의 함량비를 토대로 지구화학적 반응기작에 대한 정보와 화학조성상(chemical facies)을 알 수 있다[10]. 박스 도표와 파이퍼 다이어그램의 구조도는 Figure 1에 나타내었다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 배경수질전용측정망의 수질 특성

자연수에는 물의 용매 작용에 의해 다양한 용존물질이 존재하게 된다. 이들 용존물질은 대부분 이온형태로 존재하는 경우가 많으며, 전기적으로는 중성이 되어야 한다. 즉, 양이온의 합과 음이온의 합이 같아야 하며, Equation (1)에 따라 계산한 전하이온균형이 0.0이 되어야 함을 의미한다. 물 중에 존재하는 모든 이온을 파악하는 것은 불가능하나 몇 개의 주요 양이온과 음이온의 농도를 파악하면 대체로 충분하다. 만일 이온전하균형의 절댓값이 큰 경우에는 다른 성분이 더 있거나, 하나 또는 몇 개의 이온 분석이 잘못되었음을 의미한다. 본 연구에서는 주요 양이온으로 Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} 그리고 K^+ 을 선정하였고, 주요 음이온으로는 HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- 을 선정하여 분석하였다. 배경수질전용측정망의 자료에 대해 계산한 전하이온균형의 평균값이 2.6%로 나타나 이를 이용하여 본 연구를 수행하기에는 큰 문제가 없는 것으로 판단되었다.

배경수질전용측정망의 전체 수질특성을 분석한 결과는 Table 2에 나타내었다. pH의 평균값(범위)은 7.0 (5.2 ~ 8.9)으로 나타나 먹는물 수질기준을 만족하였다. 전기전도도(electrical conductivity, EC)의 평균값과 범위는 295 (55 ~ 747) $\mu s\ cm^{-1}$, 용존산소(DO)는 3.2 (0.0 ~ 9.9) $mg\ L^{-1}$ 였다. 산화환원전위(oxide reduction potential, ORP)는 67 (-308 ~ 458) mV, 수온은 16.5 (10.6 ~ 28.8) $^{\circ}C$ 로 각각 나타났다. 유해영양 무기물질인 카드뮴, 시안, 수은, 납, 크롬은 모두 불검출이었다. 유해영양 유기물질인 페놀, 1,1,1-트리클로로에탄, 테트라클로로에틸렌(tetrachloroethylene, PCE), 트리클로로에틸렌(trichloroethylene, TCE), 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌(xylene)은 대부분 불검

출이었고, 비소는 0.003 (0.000 ~ 0.025) $mg\ L^{-1}$ 로 나타나, 평균 농도가 먹는물 수질기준의 약 3/10 수준이었다.

양이온의 평균농도는 $Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+} > K^+$ 의 순이었고, 음이온의 평균농도는 $HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^- > NO_3^- > NO_3-N > CO_3^{2-}$ 의 순이었다. 총대장균군(total coliforms)과 탁도의 평균값과 범위는 각각 111/100 (0 ~ 7,900/100) mL^{-1} , 4.56 (0.02 ~ 260.00) NTU로 나타났다. 두 항목 모두 범위의 폭이 매우 넓었고, 평균값이 먹는물 수질기준을 초과하였다. 그러나 총대장균군과 탁도의 중앙값은 각각 0/100 mL^{-1} 와 0.50 NTU로 나타나, 먹는물 수질기준 이하였다. 이와 같이 평균값과 중앙값이 큰 차이를 보이는 것은 일부 측정값이 매우 높게 검출되어 치우침 정도 즉, 왜도(skewness)가 크기 때문이다[10]. 왜도는 Equation (2)와 같은 식으로 계산할 수 있으며 왜도가 0보다 작으면 음(negative)의 왜도로 긴 꼬리가 왼쪽에 있고, 0보다 크면 양(positive)의 왜도로 긴 꼬리가 오른쪽에 있으며, 0이면 좌우대칭분포를 갖는다. 또한 왜도의 절댓값이 클수록 분포의 비대칭 정도가 커진다[15].

$$\gamma = E\left[\left(\frac{X-\mu}{\sigma}\right)^3\right] \quad (2)$$

여기서 X 는 모집단 자료, μ 는 모집단의 평균, 그리고 σ 는 모집단의 표준편차를 각각 나타낸다.

배경수질전용측정망 수질자료의 왜도를 정량적으로 검토하기 위해 항목별 왜도를 분석한 결과는 Table 3에 나타내었다. 왜도의 절댓값이 3을 넘지 않을 경우 정규분포로 가정할 수 있다[14]. Table 3에서 보는 바와 같이 대부분 항목의 왜도가 0보다 커서 오른쪽으로 편중되어 분포하며, 3 이하로서 정규분포로 나타났다. 그러나 총대장균군(9.1), 탁도(8.4), 톨루엔(6.28), 자일렌(10.39), 그리고 탄산염이온(14.28)의 경우 왜도가 3보다 매우 크게 나타나 중앙값과 평균의 차이가 크고 오른쪽으로 많이 편중된 분포를 가질 것으로 예상되었다. 큰 왜도 값은 해수침입이나 외부 오염물질의 영향 등으로 인해 측정값이 매우 높게 검출된 이상치 때문이며, 자연적인 상태의 지하수 수질 특성을 왜곡할 가능성이 있다. 따라서 향후 지하수 수질특성 해석 시에는 이상치를 신중하게 검토해야

Table 2. The result of statistical analysis on data of background water quality exclusive monitoring network

Parameter	Drinking water quality standards	Mean	Standard deviation	Median	Minimum	Maximum
pH	5.8-8.5	7.0	0.6	7.0	5.2	8.9
Turbidity	1.00 NTU	4.56	21.20	0.50	0.02	260.00
EC	-	295	156	292	55	747
DO	-	3.2	2.7	2.6	0.0	9.9
ORP	-	67	114	82	-308	458
Temp	-	16.5	2.6	16.5	10.6	28.8
Na ⁺	-	21.1	25.0	12.4	3.0	144.6
K ⁺	-	2.1	1.6	1.6	0.3	12.2
Ca ²⁺	-	27.8	17.5	28.8	2.0	85.6
Mg ²⁺	-	8.4	6.9	6.4	0.4	39.0
Cl ⁻	250 mg L ⁻¹	9.7	8.2	6.7	0.0	73.4
SO ₄ ²⁻	200 mg L ⁻¹	13	12	10	0	62
HCO ₃ ⁻	-	140.4	84.6	132.0	14.0	389.0
CO ₃ ²⁻	-	0.0	0.2	0.0	0.0	2.7
NO ₃ ⁻	-	6.4	7.9	3.8	0.0	64.0
NO ₃ -N	10 mg L ⁻¹	1.4	1.8	0.9	0.0	14.5
Cd	0.005 mg L ⁻¹	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
As	0.01 mg L ⁻¹	0.003	0.006	0.000	0.000	0.025
Cyan	0.01 mg L ⁻¹	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Hg	0.001 mg L ⁻¹	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Pb	0.01 mg L ⁻¹	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cr	0.05 mg L ⁻¹	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Phenol	0.005 mg L ⁻¹	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Trichloroethylene	0.03 mg L ⁻¹	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Tetrachloroethylene	0.01 mg L ⁻¹	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1,1,1-Trichloroethane	0.1 mg L ⁻¹	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Benzene	0.01 mg L ⁻¹	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Toluene	0.7 mg L ⁻¹	0.000	0.002	0.000	0.000	0.011
Ethylbenzene	0.3 mg L ⁻¹	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Xylene	0.5 mg L ⁻¹	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
Total coliforms	ND*/100 mL ⁻¹	111	584	0	0	7900

* EC: electrical conductivity, DO: dissolved oxygen, ORP: oxide reduction potential
Temp: temperature, ND: not detected

Table 3. Skewness of measurement parameters

	pH	EC	DO	ORP	Temp	As	Toluene	Xylene	Total coliforms	Turbidity
skewness	0.03	0.61	0.59	-0.19	0.62	2.26	6.28	10.39	9.10	8.44

	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	NO ₃ ⁻	NO ₃ -N
skewness	2.81	2.24	0.58	1.57	2.72	2.03	0.61	14.28	2.67	2.66

할 것으로 생각된다[10].

4.2. 심도에 따른 수질 특성

4.2.1. 심도별 현장측정항목

심도별 수질특성을 파악하기 위해 현장측정항목(pH, Temp, EC, DO, ORP)에 대한 박스 도표(box plot)는 Figure 2에 나타

내었다. 심도에 따른 pH의 평균값은 상층, 중층 및 하층(별도의 언급이 없는 한 이하 동일한 순서대로 결과를 나열함)일 때 6.6, 7.0 그리고 7.4로 각각 나타나 하층으로 갈수록 pH의 평균값이 높아지고, 범위가 넓어지는 경향을 보였다. 유동하는 지하수가 결정질 암반의 규산염광물(K-장석, 사장석, 운모류 등)과 반응할 때 수소가 소모되기 때문에 심도가 깊어질수

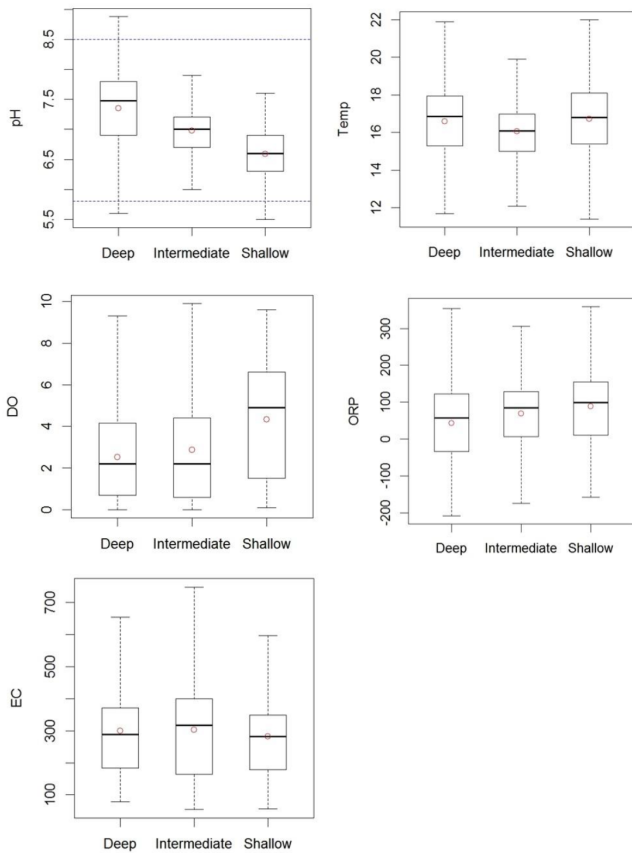


Figure 2. Box plots of field measurement according to depth.

록 지하수의 pH 값이 증가하는 것으로 생각된다[16]. 수온의 경우는 16.7, 16.1 그리고 16.6 °C로 나타났다. 심도에 따른 평균수온은 큰 차이를 나타내고 있지 않으나 수온의 변화 폭이 좁아지는 경향을 보였는데, 이는 하층으로 갈수록 지표온도의 영향을 적게 받기 때문으로 생각된다.

EC의 평균값은 141, 303 그리고 300 $\mu\text{s cm}^{-1}$ 로 나타나 중층과 하층에서 전기전도도가 증가하는 경향을 보였다. 따라서 깊이가 깊어질수록 수중에 전기를 전도할 수 있는 물질이 많이 함유되어 있다고 추측할 수 있다[17]. 일반적으로 오염되지 않은 물의 전기전도도는 50 ~ 500 $\mu\text{s cm}^{-1}$ 의 범위를 보이는데[10] 본 연구에서 모든 심도의 EC 평균값이 이 범위 이내에 있으므로 오염되지 않은 상태일 것으로 예상된다. DO의 평균값은 4.3, 2.9 그리고 2.5 mg L^{-1} 로 나타났다. 일반적으로 공기와 접촉할 수 있는 환경일수록 DO 농도가 높아진다. 따라서 깊이가 깊어질수록 공기와 접촉이 없어 평균 DO 농도가 감소하여, 혐기성 환경이 우세하였다. ORP의 평균값 역시 89, 69 그리고 43 mV로 나타나, 심도가 깊어질수록 평균 ORP 값이 감소하여, 환원환경이 우세하였다.

4.2.2. 심도별 양이온 및 음이온

지하수에 존재하는 주요 양이온(Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})과 음이온(Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^-)의 심도별 농도분포는 Figure 3에 나타내었다. Na^+ 의 평균농도(범위, Figure 3에 나타나 있

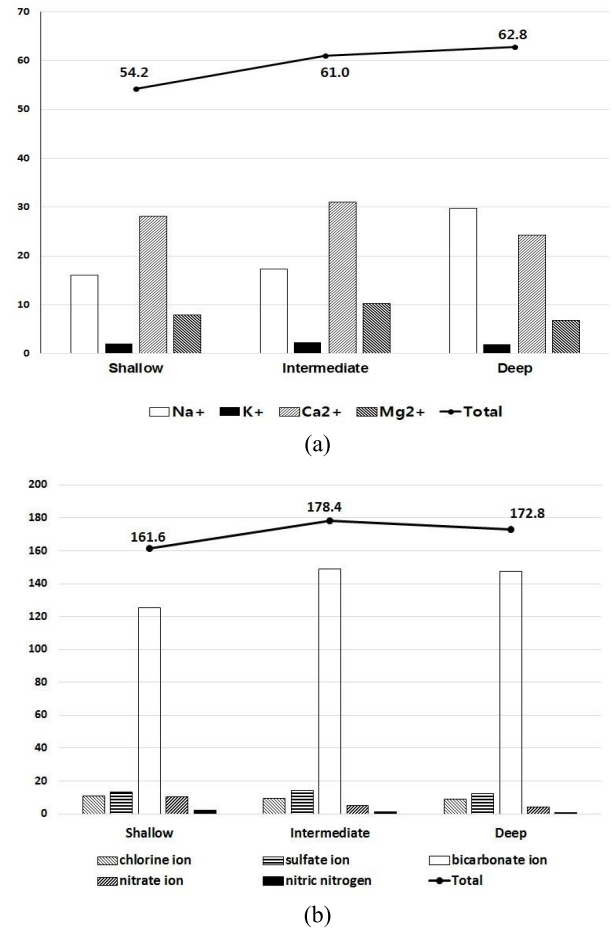


Figure 3. Concentration distribution of cations (a) and anions (b) according to depth.

지 않음)는 상층, 중층 그리고 하층일 때 16.1(3.6 ~ 95.3), 17.3(3.1 ~ 97.3) 그리고 29.7(3.0 ~ 144.6) mg L^{-1} 로 각각 나타나 심도가 깊어질수록 평균농도가 증가하였다. 국내 화강암 지역의 Na^+ 농도는 심도가 깊어지면서 증가하는 경향을 보이는 것으로 보고된 바 있다[18]. K^+ 의 평균농도는 2.0(0.4 ~ 9.6), 2.3(0.3 ~ 12.2) 그리고 1.9(0.3 ~ 12.2) mg L^{-1} 로 나타났다. 중부 평균농도가 다소 높았으나, 심도별로 큰 차이는 없었다.

일반적으로 지하수의 심도가 깊어질수록 방해석이 포화 또는 과포화상태에 있게 되어 용존 Ca^{2+} 가 방해석을 형성하면서 감소하고, 반면 상층지점에서는 퇴적 토양 속에 함유된 탄산염광물의 영향으로 Ca^{2+} 의 농도가 높아진다[16,19]. Ca^{2+} 의 평균농도는 28.1(2.0 ~ 84.0), 31.1(2.7 ~ 83.1) 그리고 24.3(5.7 ~ 85.6) mg L^{-1} 로 나타나 평균농도가 중층까지는 증가하다가 하층으로 더 깊어질 때 감소하는 경향을 보였다. 따라서 중층의 깊이까지 퇴적 토양의 영향이 있으며, 하층 이상의 깊이에서 칼슘이온이 방해석을 형성하는 것으로 보인다. Mg^{2+} 는 칼슘과 유사한 경향을 보였는데, 평균농도는 심도에 따라 8.0(0.8 ~ 30.6), 10.3(0.4 ~ 39.0) 그리고 6.9(1.0 ~ 31.4) mg L^{-1} 로 나타났다. 평균농도는 중층의 깊이까지 증가하다가, 하층으로 더 깊어질수록 감소하는 경향을 보였다. 심도별 양이온

의 함은 하층에서 62.8 mg L⁻¹로 가장 컸고 중층, 상층의 순으로 나타났다. 양이온의 구성비는 상층과 중층에서는 Ca²⁺ > Na⁺ > Mg²⁺ > K⁺의 순으로 같았고, 하층일 때는 Na⁺ > Ca²⁺ > Mg²⁺ > K⁺의 순이었다. 하층의 경우 Na⁺성분이 전체의 47.3%를 차지하여 중층에 비해 약 19%p 정도 높게 나타났다.

Cl⁻의 평균농도는 10.8(2.1 ~ 73.4), 9.4(0.0 ~ 52.8) 그리고 8.8(1.4 ~ 52.9) mg L⁻¹로 각각 나타났다. 심도가 깊어질수록 평균농도가 감소하여, 중층일 때 평균농도가 상층일 때 보다 약 18%p 정도 낮았다. 일반적으로 상층의 높은 Cl⁻ 농도는 인위적인 물질의 영향을 나타내고, 하층의 높은 Cl⁻ 농도는 해수의 영향을 반영한다. 또한 자연 상태의 지하수는 10 mg L⁻¹ 정도의 Cl⁻을 갖고 있다[20]. 본 연구에서 Cl⁻ 평균농도는 모든 심도에서 10 mg L⁻¹ 이하였으므로 인위적인 물질이나 해수의 영향이 없는 것으로 판단된다. NO₃⁻, NO₃-N 및 SO₄²⁻의 평균농도는 심도가 깊어질수록 낮아지는 경향을 보였고, 특히 NO₃⁻와 NO₃-N의 하층일 때 평균농도는 상층일 때 보다 약 60%p 정도 낮았다. 지하수가 지하 깊숙이 이동할수록 다양한 산화반응에 의해 산소가 소모되므로 심도가 깊어질수록 혐기성 환경이 우세하게 되어, 질소산화물과 황산화물질의 환원 반응이 일어나 질소산화물 및 황산화물이 감소하기 때문이다[10].

HCO₃⁻의 평균농도는 125.2(14.0 ~ 353.9), 148.7(17.0 ~ 389.0) 그리고 147.3(31.0 ~ 385.0) mg L⁻¹로 나타나 심도가 깊어질수록 평균농도가 증가하였다. HCO₃⁻는 보통 토양이나 대부분의 지질 매체에 흔하게 분포하고 있는 탄산염광물(carbonate mineral)에서 용해되어 나온다. 특히 탄산염광물은 다른 광물에 비해서 물-암석반응을 통해 쉽게 용해되기 때문에 HCO₃⁻이 지하수 수질에 미치는 영향이 크다고 할 수 있다. 대기 중의 이산화탄소는 지하수와 반응하여 pH를 변화시키고, 이때의 pH에 따라 탄산염광물의 용해도와 중탄산염이온의 농도가 결정되어 수질 특성이 변화된다[21]. 심도가 깊어질수록 pH의 평균값이 증가하였고, HCO₃⁻의 평균농도 또한 증가하였다. 음이온의 함은 중층과 하층에서 각각 178.4 및 172.8 mg L⁻¹로 비슷한 수준이었고 상층에서 161.6 mg L⁻¹로 가장 낮았다. 모든 심도에서 음이온의 구성비는 HCO₃⁻ > SO₄²⁻ > Cl⁻ > NO₃⁻ > NO₃-N의 순으로 같았다. HCO₃⁻의 심도별 구성비는 상층에서 77.5%, 중층에서 83.4%, 하층에서 85.2%로 깊이가 깊어질수록 비율이 증가하는 반면 나머지 음이온들의 경우 심도가 깊어짐에 따라 구성비가 감소하는 것으로 나타났다.

4.2.3. 심도별 비소, 총대장균군 그리고 탁도

비소, 총대장균군 그리고 탁도의 심도별 박스 도표는 Figure 4에 나타내었다. 비소의 평균농도는 상층, 중층 그리고 상층일 때 0.001, 0.003 그리고 0.004 mg L⁻¹로 나타나 심도가 깊어질수록 평균농도가 증가하였다. 비소의 경우, 일반적으로 3가(arsenite)와 5가(arsenate)의 형태로 존재하며 3가 비소는 환원 및 혐기성 환경에서, 5가 비소는 산화 및 호기성 환경에서 우세하게 존재한다. 특히 비소는 황철석(pyrite)이나 유비철석(arsenopyrite)에서 용출되기도 하는데, 산화상태에서

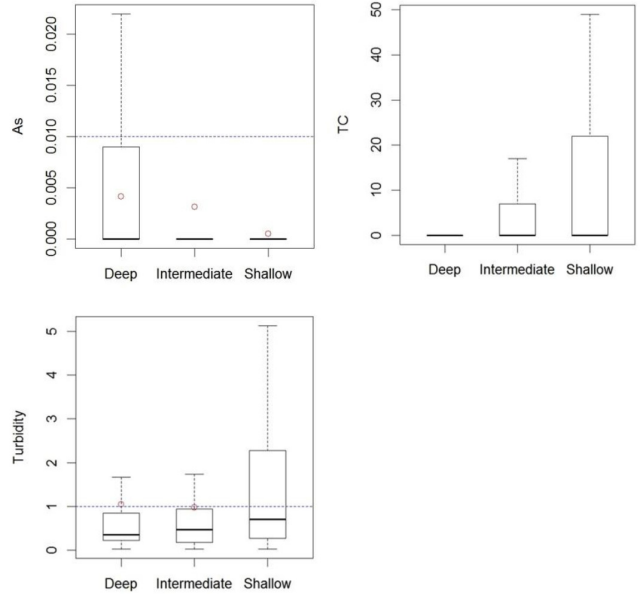


Figure 4. Box plots of As, total coliforms and turbidity according to depth.

주로 철에 흡착되어 있다가 철이 환원되어 용해될 때 함께 용출된다. 따라서 환원환경에서 비소가 고농도로 검출되기도 한다[10]. 총대장균군의 심도별 평균값은 127/100, 133/100 그리고 73/100 mL⁻¹로 나타났고 심도가 깊어질수록 평균값이 감소하였다. 지하수가 아래로 침투 할수록 자연의 여과과정인 세사층(fine sand)을 통과하게 되고 이때 세균이 부착되기 때문에 그 수가 감소하는 것으로 보인다[20]. 탁도의 심도별 평균값은 11.63, 0.97 그리고 1.05 NTU로 나타났다. 상층일 때 평균값이 중층 및 하층일 때 보다 약 11~12배 정도 크게 나타나므로 상층지역이 하층지역 보다 외부 오염물질로부터 더 큰 영향을 받는다고 추정할 수 있다. 상층일 때 평균값은 먹는물 수질기준(1.00 NTU)을 약 11배 초과하였으나, 중층 및 하층일 때 평균값은 수질기준을 만족하였다.

4.2.4. 심도별 수질유형

파이퍼 다이어그램은 이온종별 함량비를 고려하여 표시한 영역에 따라 주된 지구화학적 반응기작을 해석하는데, 과정이 다소 복잡하여 연구자의 주관적인 판단이 해석에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 지하수 수질유형을 보다 간단명료하게 검토하기 위하여 용존 성분의 당량농도 합을 비교하였다. 즉 양이온은 (Na⁺ + K⁺)와 (Ca²⁺ + Mg²⁺)의 당량 백분율을 비교하여 전자가 우세하면 Na형, 후자가 우세하면 Ca형으로 분류하고, 음이온은 (HCO₃⁻ + CO₃²⁻)와 (Cl⁻ + SO₄²⁻)의 당량 백분율을 비교하여 전자가 우세하면 HCO₃형, 후자가 우세하면 Cl형으로 분류하여, 총 4가지(Na-Cl, Na-HCO₃, Ca-Cl, Ca-HCO₃)의 수질 유형으로 나눌 수 있다[16,20]. 심도별 파이퍼 다이어그램은 Figure 5에 나타내었다. 배경수질전용측정망의 전체적인 수질 유형은 Na-Cl 유형 2개(0.4%), Na-HCO₃ 유형 63개(12.5%), Ca-Cl 유형 11개(2.2%), Ca-HCO₃ 유형 427개(84.9%)로 나타났

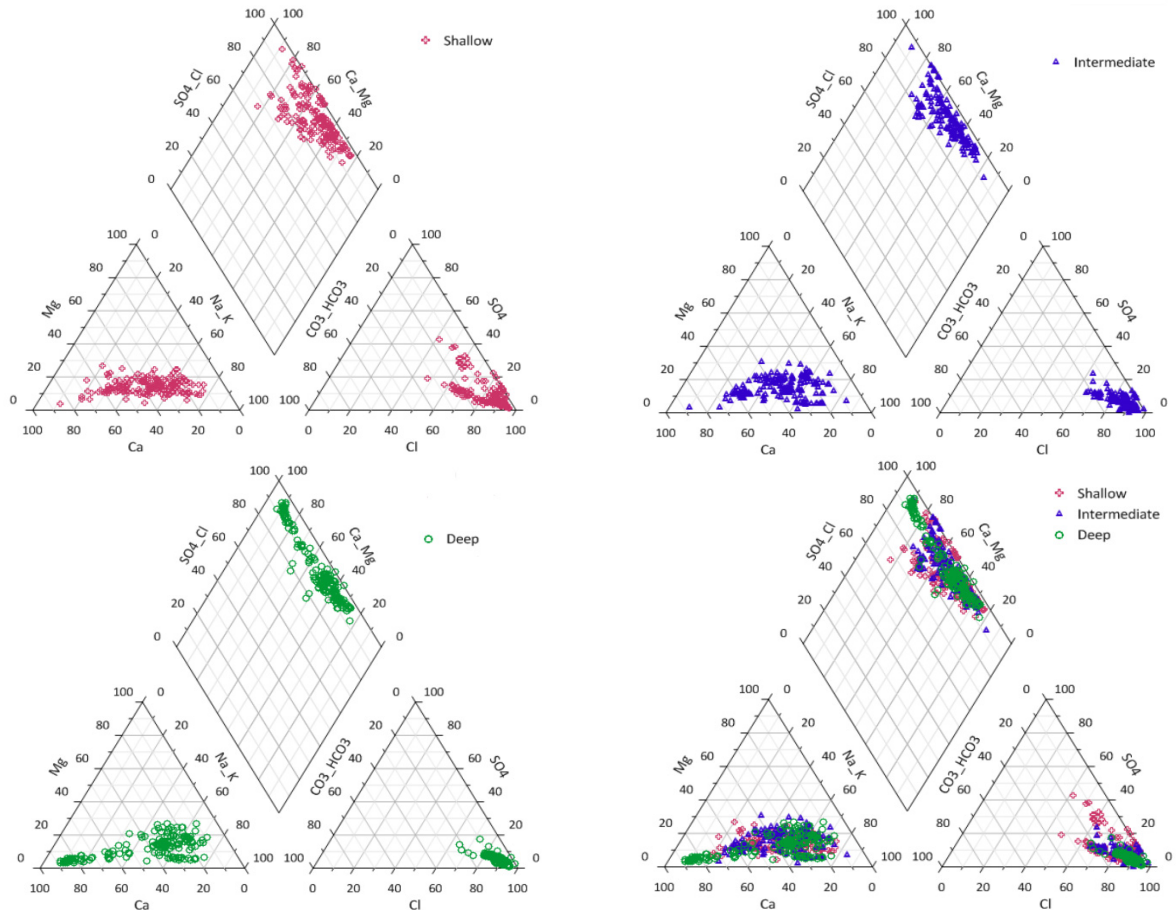


Figure 5. Piper diagram according to depth.

다. 이를 심도별로 살펴보면, 상층일 때 전체 168개 중 2개(1.2%)가 Na-Cl 유형이었고, Na-HCO₃ 유형 9개(5.4%), Ca-Cl 유형 11개(6.5%), Ca-HCO₃ 유형 146개(86.9%)로 나타났다. 중층일 때 전체 167개 중 11개(6.6%)가 Na-HCO₃ 유형이었고, 156개(93.4%)가 Ca-HCO₃ 유형이었다. 하층일 때는 전체 168개 중 43개(25.6%)가 Na-HCO₃ 유형이었고, 125개(74.4%)가 Ca-HCO₃ 유형으로 나타났다. 중층과 하층에서는 두 가지 수질 유형만 보였고, Ca-HCO₃의 비율이 매우 높았다.

일반적으로 자연 기원의 지하수는 반응속도가 상대적으로 매우 빠른 방해석(CaCO₃), 백운석(CaMg(CO₃)₂), 석고(CaSO₄·2H₂O)의 용해로 인해 Ca-HCO₃ 유형이 우세하며, 물-암석반응에 따라 Ca²⁺가 Na⁺로 치환되는 이온반응의 영향으로 점진적으로 Na-HCO₃ 유형이 우세하게 된다. 이론적으로 pH 5인 환경에서 1 mm 직경의 광물질이 용해되는데 걸리는 시간은 방해석, 석고 등은 0.1년 이내, 백운석이 1.6년 정도인 반면, 조장석(NaAlSi₃O₈)은 575,000년, 석영은 34,000,000 년이 소요되는 것으로 알려져 있다[10]. 상층일 때 Na-HCO₃ 유형이 5.4%에 불과하였으나, 중층과 하층일 때는 Na-HCO₃ 유형이 각각 6.6%, 25.6%로 증가하였다. 이는 상층에서 하층으로 지하수가 유동하면서 체류시간이 길어지게 되고 이에 따라 물-암석반응이 계속적으로 진행된 결과로 판단된다. 또한 상층에서 중층으로 깊어질 때 지하수의 Ca-HCO₃ 유형이 93.4%가

지 증가한 것은 외부 오염물질의 영향을 받을 때 나타나는 Cl⁻ 또는 SO₄²⁻가 우세한 유형이 사라졌기 때문으로 추측된다. 광물용해 등의 영향을 받은 지하수의 유형은 Na-HCO₃ 유형과 Ca-HCO₃ 유형에 속하는 경우가 많으며, 지하수가 인위적인 오염의 영향을 받고 있을 때는 Na-Cl 유형으로 나타난다[15]. 본 연구에서 Na-Cl의 수질유형은 상층에서만 나타나므로 상층이 하층에 비해 외부의 오염에 노출되기 쉬울 것으로 추측된다.

4.3. 지질에 따른 수질 특성

4.3.1. 분석 지역의 지질 특성

일반적으로 지하수 수질은 대수층이 포함되어 있는 지질의 광물과 물의 상호반응에 의해 크게 영향을 받기 때문에 지질에 따른 수질특성을 파악할 필요가 있다. 우리나라의 지질은 그 종류와 형성시기에 따라 8개의 수문 지질단위로 분류되는데, 본 연구에서는 쇄설성퇴적암(clastic sedimentary rock)이 169개(33.6%)로 가장 많았고, 미고결퇴적물(unconsolidated sediments) 168개(33.4%), 관입화성암(intrusive igneous rock) 111개(22.1%), 변성암(metamorphic rock) 55개(10.9%)로 조사되어 총 네 종류의 지질로 구분되었다.

지질별 수리지질학적 특성을 살펴보면 쇄설성퇴적암은 신기퇴적암을 이루는 암상 중의 하나이고, 속성작용을 적게 받

아 1차 공극의 발달이 양호한 편이며, 한반도 전체 암석의 약 1.5%에 불과하다. 대수층은 암상자체의 공극인 1차 공극과 단열대인 2차 공극을 따라 발달되어 있어 하루 10~2,000 m³/일의 지하수 산출량을 가진다. 미고결퇴적물은 충적층 대수층으로 전 국토면적의 약 28%를 점유하고 있으며, 주로 큰 강이나 하천변, 또는 골짜기 및 평야지대를 따라 분포되어 있다. 투수 계수는 5~200 m/일이고 지하수 산출량은 100~3,000 m³/일로 풍부한 편이다. 그러나 지하수 수위가 지표면에 가깝게 상승되어 있어 지표수 및 지표면의 오염원에 의한 영향을 받을 가능성도 높다. 관입화성암은 전 국토에 걸쳐 분포하여, 국토면적의 약 19%를 점유하고 있다. 주로 석영, 장석, 운모 등으로 구성되어 있으며, 지하심부에서 결정화된 심성암으로 1차 공극의 발달이 미약하다. 반면 수평 및 수직 절리나 단층 등의 단열대로 이루어진 2차 공극을 따라 지하수가 흐르고 있으며 하루 5~50 m³/일 정도의 지하수를 산출하고, 지하수의 유동이 원활하지 않는 것으로 나타난다. 변성암은 기존의 화성암이나 퇴적암이 높은 압력과 온도 등의 변성작용을 받아 생성되는 암석으로 1차 공극의 발달이 미흡하다. 남한 전역에 걸쳐 분포되어 있으며, 암상자체의 공극률이 낮아 지하수의 흐름이 주로 단열대의 규모와 분포에 의존하고 있으며, 지하수 산출량은 50~500 m³/일 정도로 남한의 수문지질단위 중 가장 적고, 지하수의 유동 역시 느린 것으로 나타난다[22].

4.3.2. 지질별 현장측정항목

지질에 따른 현장수질항목(pH, EC, DO, ORP)의 박스 도표를 Figure 6에 나타내었다. pH의 평균값은 관입화성암, 미고결퇴적물, 변성암 그리고 쇄설성퇴적암(별도의 언급이 없는 한 이하 동일한 순서대로 결과를 나열함)일 때 6.9, 7.2, 6.7 그리고 6.9로 각각 나타났다. 평균값은 변성암일 때 다소 낮았지만, 지질별로 큰 차이가 없었다. 지질별 EC의 평균값은 256, 261, 196 그리고 386 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 로 각각 나타났다. 쇄설성퇴적암일 때 평균값이 변성암일 때 보다 약 2배 정도 컸는데, 일반적으로 퇴적암이 주로 분포하는 지역의 지하수에는 용해성 물질이나 미량원소의 함량이 높아 전기전도도가 큰 것으로 알려져 있다[10]. DO는 3.2, 3.7, 1.4 그리고 3.5 mg L⁻¹로 나타났다. 변성암일 때 평균값이 다른 지질에 비해 2~3배 작아서 비교적 혐기성 환경에 가까웠으며, 나머지 지질들의 평균값은 서로 큰 차이가 없었다. ORP의 평균값 역시 107, 45, 22 그리고 77 mV 로 나타났다. 변성암일 때 평균값이 가장 작으므로, 나머지 지질에 비해 환원환경이 우세할 것으로 예상된다.

4.3.3. 지질별 양이온 및 음이온

양이온(Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺)과 음이온(Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, NO₃⁻ 등)의 지질별 농도분포를 Figure 7에 나타내었다. Na⁺은 알칼리성 금속에 속하며 자연 상태 지하수에 비교적 많이 용해되어 있다. 지하수에 용해되어 있는 Na⁺ 대부분은 사장석이 풍화되어 방출한 것이고, 점토광물 또는 암염과 같은 증발

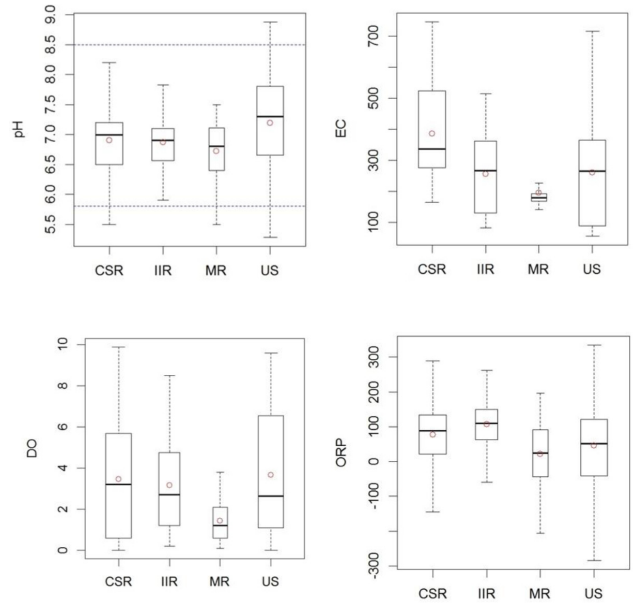


Figure 6. Box plots of field measurement according to geological features.

퇴적물에서 나온 것도 있다[23]. 지질별 Na⁺의 평균농도(범위)는 13.5 (3.8~31.8)일 때 22.8 (3.1~113.5), 11.8 (6.7~48.5) 그리고 27.3 (3.0~144.6) mg L⁻¹로 각각 나타났다. K⁺은 암석 중 알칼리 장석이나 운모 광물에서 용해되며, 일반적인 지하수의 K⁺ 농도는 5 mg L⁻¹ 미만이다[16,20]. 지질별 K⁺의 평균농도는 2.1, 1.6, 1.4 그리고 2.7 mg L⁻¹로 모든 지질에서 평균농도가 5 mg L⁻¹ 미만으로 나타나 지하수가 오염되지 않은 상태일 것으로 추정된다.

Ca²⁺은 방해석(CaCO₃), 석고(CaSO₄·2H₂O), 경고석(CaSO₄) 또는 백운석(CaMg(CO₃)₂) 등의 조화용해 또는 Ca²⁺을 포함하는 규산염광물의 비조화용해에 의해 고령석이 형성될 때 나온다. Ca²⁺은 석회암질 퇴적암층에서 높은 함량을 보이며, 화강암분포지역에서의 Ca²⁺의 공급은 사장석의 풍화작용에 주로 지배된다[10,20]. Ca²⁺의 지질별 평균농도는 25.8(2.9~84.0), 23.7(2.0~47.4), 17.7(6.6~52.9) 그리고 36.5(8.9~85.6) mg L⁻¹였다. Mg²⁺는 주로 퇴적암의 백운암, 화성암의 감람석, 흑운모 그리고 변성암인 사문석 및 활석 등에서 용해된다. 또한 일부의 석회암은 미량의 Mg²⁺를 포함하고 있기 때문에 이들이 풍화함에 따라 마그네슘을 방출하기도 한다. 일반적인 지하수에 녹아있는 Mg²⁺의 농도는 1~40 mg L⁻¹ 정도이다[20,24]. Mg²⁺의 지질별 평균농도는 6.9(0.4~30.7), 5.2(0.8~20.6), 5.0(3.3~9.8) 그리고 13.6(2.6~39.0) mg L⁻¹였고, 모든 지질의 평균값이 1~40 mg L⁻¹의 범위 내로 나타나 지하수가 오염되지 않은 상태일 것으로 추정된다.

양이온의 함은 쇄설성퇴적암 > 미고결퇴적물 > 관입화성암 > 변성암의 순이었고 쇄설성퇴적암일 때 양이온 함이 변성암일 때 보다 약 2.3배 많았다. 퇴적암 지역은 일부 이온들이 파괴될 정도의 고열, 고압조건에서 발생하는 화산활동 및 변성작용이 많지 않아 지하수 산출에 유리하고 상대적으로 많은 양의 이온을 함유하고 있다고 알려져 있다. 흔히 결정질

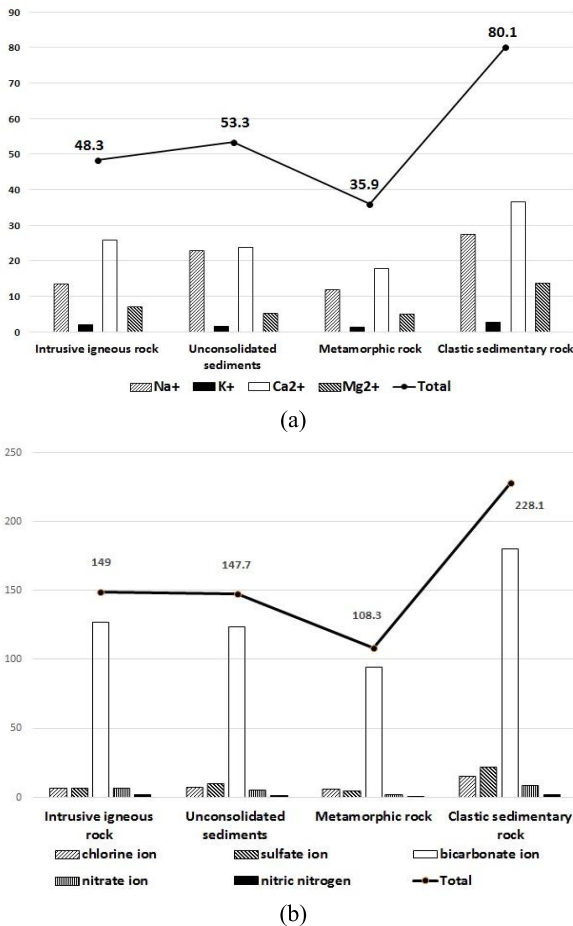


Figure 7. Concentration distribution of cations (a) and anions (b) according to geological features.

암으로 불리는 관입화성암(화강암)과 변성암 지역의 미네랄 함량(Na⁺, Mg²⁺, K⁺, Ca²⁺농도의 합)은 39.56 mg L⁻¹라고 보고된 바 있다[1,18]. 본 연구에서는 관입화성암의 양이온 합이 48.3 mg L⁻¹로 1.2배 정도 컸고, 변성암은 35.9 mg L⁻¹로 약간 작았지만 전반적으로 잘 일치하고 있다. 지질별 Na⁺의 구성비는 미고결퇴적물에서 가장 높고 관입화성암에서 가장 낮았으며, Ca²⁺과 K⁺의 구성비는 관입화성암에서 가장 높고 미고결퇴적물에서 가장 낮았다. 또한 Mg²⁺의 구성비는 쇄설성퇴적암에서 가장 높고 미고결퇴적물에서 가장 낮게 나타나, 양이온의 구성비는 지질에 따라 차이가 있었다. 그러나 양이온의 평균농도는 모든 지질에서 Ca²⁺ > Na⁺ > Mg²⁺ > K⁺의 순으로 적었다.

SO₄²⁻의 자연적 기원은 석고, 경석고 등의 황산염광물이며, 황철석, 자류철석, 황동석 등의 황화광물의 산화작용에서도 유래된다. 또한 유기물이 미생물에 의해서 분해되는 과정에서 형성되기도 한다[16,25]. 지질에 따른 SO₄²⁻의 평균농도는 7(0~37), 10(0~21), 5(2~9) 그리고 22(0~62) mg L⁻¹였다. 일반적으로 화성암이나 변성암에서 SO₄²⁻의 농도는 100 mg L⁻¹ 보다 낮게 나타난다고 보고되는데[13,26], 모든 지질에서 평균농도가 100 mg L⁻¹ 보다 낮게 나타났다. 지하수 내의 Cl⁻은 자연적으로는 염수, 규산염광물(흑운모 및 각섬석) 등의 수화

반응, 유체포유물에서의 유출 등으로부터 기인된다[27]. Cl⁻의 평균농도는 6.9(0.9~18.2), 7.1(0.0~19.8), 6.0(3.3~10.2) 그리고 15.2(2.7~73.4) mg L⁻¹로 나타났다. HCO₃⁻의 평균농도는 127.1(34.0~355.1), 123.9(14.0~308.0), 94.4(63.0~220.0) 그리고 180.5(20.1~389.0) mg L⁻¹로 나타났다. 쇄설성퇴적암일 때 평균농도가 가장 컸는데, 변성암일 때 보다 약 2배 정도 높은 값이었다. NO₃⁻의 평균농도는 6.5(0.0~44.5), 5.5(0.0~24.2), 2.4(0.0~10.9) 그리고 8.5(0.0~64.0) mg L⁻¹였다. NO₃-N의 기원은 대기 중 NO_x 성분이 강수에 용해되는 것과 토양 유기물로부터 유입되는 것 등이 있다[10,26]. NO₃-N의 평균농도는 1.5(0.0~10.0), 1.2(0.0~5.5), 0.5(0.0~2.5) 그리고 1.9(0.0~14.5) mg L⁻¹로 나타났다. 질산성질소가 다량 검출될 때는 인위적인 오염물질의 영향으로 볼 수 있는데[17], 분석결과 지질별 평균농도는 모두 먹는물 수질기준(10 mg L⁻¹)이하의 작은 값이므로, 오염물질 보다는 주로 자연적인 기작에 의하여 유래된 것으로 판단된다.

음이온의 합 역시 양이온과 같은 쇄설성퇴적암 > 미고결퇴적물 > 관입화성암 > 변성암의 순으로 나타났다. 변성암 지역의 음이온의 합이 쇄설성퇴적암 보다 약 2배가량 작았다. 변성암 지역은 고열, 고압조건에서 발생하는 화산활동 및 변성작용이 많기 때문에 일부 이온들이 파괴되어 상대적으로 적은 양을 함유하고 있는 것으로 알려져 있다[1]. Cl⁻의 지질별 구성비율을 살펴보면 쇄설성퇴적암일 때 가장 높고 관입화성암일 때 가장 낮았다. SO₄²⁻의 비율은 쇄설성퇴적암일 때 가장 높고 변성암일 때 가장 낮았으며, HCO₃⁻의 비율은 변성암일 때 가장 높고 쇄설성퇴적암일 때 가장 낮았다. NO₃⁻와 NO₃-N의 비율은 관입화성암일 때 가장 높고 변성암일 때 가장 낮게 나타나 음이온의 구성비는 지질별로 차이가 있었다. 음이온의 평균농도는 변성암에서 HCO₃⁻ > Cl⁻ > SO₄²⁻ > NO₃⁻ > NO₃-N의 순인 반면, 나머지 지질에서는 HCO₃⁻ > SO₄²⁻ > Cl⁻ > NO₃⁻ > NO₃-N으로 나타나, 변성암일 때만 염소이온의 평균농도가 황산이온보다 높았다.

4.3.4. 지질별 비소, 총대장균군 및 탁도

비소의 평균농도는 0.03(0.000~0.016), 0.009(0.000~0.025), 0.000(0.000~0.006) 그리고 0.000(0.000~0.002) mg L⁻¹였다. 일반적으로 국내에서 비소가 많이 검출되는 지질은 편암이나 편마암 등 변성암 지역이다. 주변 광화대에서 열수변질을 받아 생성된 황철석이 환원환경에서 비소를 용출시켰을 가능성이 높기 때문이다[10]. 그러나 본 연구에서는 미고결퇴적물일 때 평균농도(0.009 mg L⁻¹)와 최대값(0.025 mg L⁻¹)이 가장 컸는데, 다른 지질에 비해 미고결퇴적물의 pH가 상대적으로 높기 때문으로 추정된다. 산화철의 표면전하는 pH가 증가함에 따라 점차 음의 전하로 바뀌기 때문에, 흡착된 비소가 탈착하게 된다. 따라서 지하수의 pH가 높은 지역에서는 흡착된 비소가 탈착되어 높은 비소 농도를 보이게 된다[28,29]. 총대장균군은 쇄설성퇴적암일 때 가장 컸는데, 관입화성암일 때 보다 약 10배 정도 큰 값이었다. 탁도는 변성암일 때 미고결퇴적물일 때 보다 약 34배 정도 큰 값을 나타냈을 뿐만 아니라

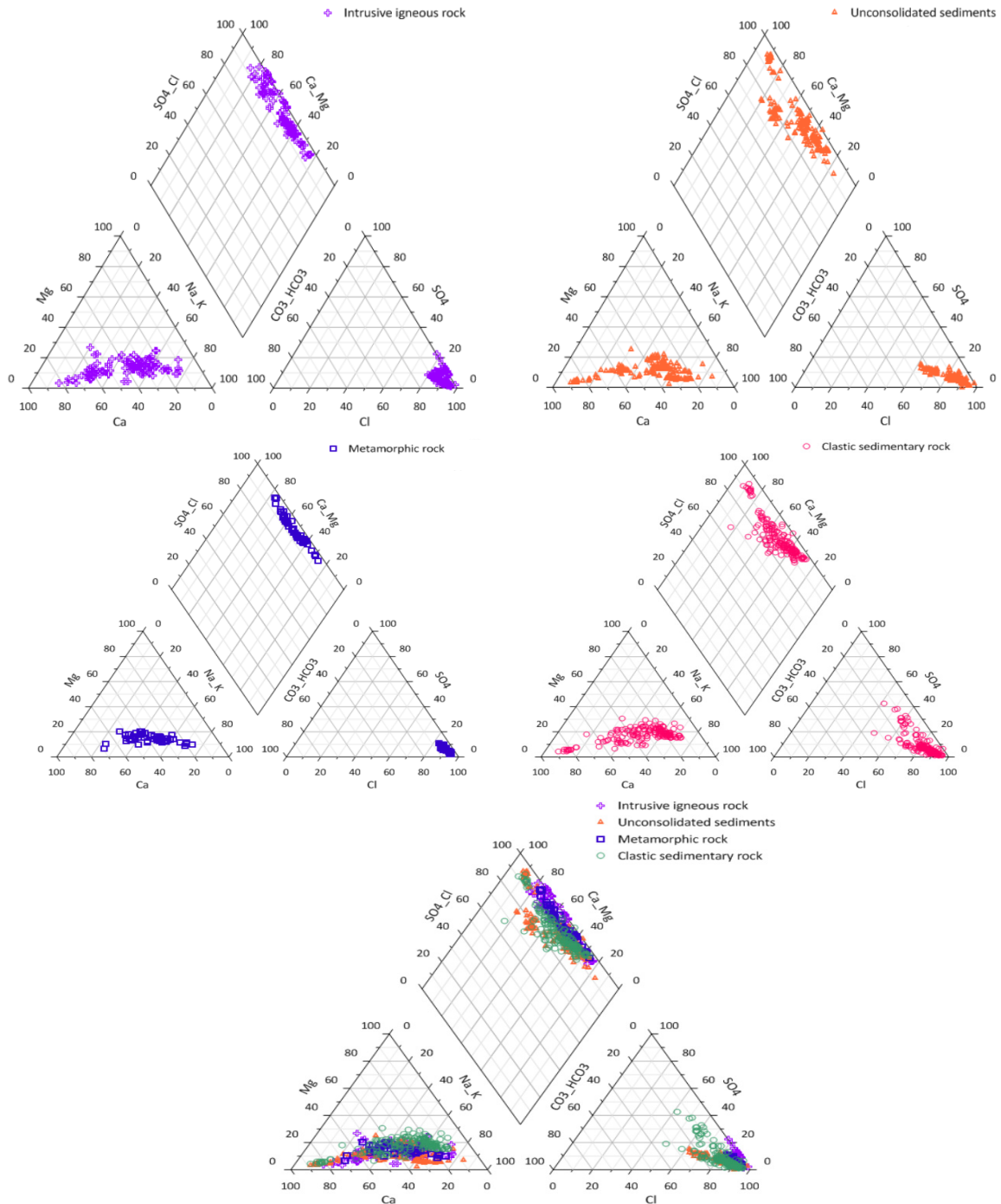


Figure 8. Piper diagram according to geological features.

또한 평균값과 중앙값의 차이가 아주 컸다. 이를 통해 변성암의 측정값 중에 외부 오염물질의 유입 등으로부터 기인된 이상치가 존재 할 것으로 예상된다.

4.3.5. 지질별 수질유형

지질별 파이퍼 다이어그램은 Figure 8에 나타내었다. 지질에 따른 수질유형을 살펴보면 관입화성암일 때 전체 111개 중 19개(17.1%)가 Na-HCO₃ 유형이었고, Ca-HCO₃ 유형이 92개(82.9%)였다. 미고결퇴적물일 때 전체 168개 중 28개(16.7%)

가 Na-HCO₃ 유형이었고, 140개(83.3%)가 Ca-HCO₃ 유형으로 나타났다. 변성암일 때 전체 55개 중 2개(3.6%)가 Na-HCO₃ 유형이었고, 53개(96.4%)가 Ca-HCO₃ 유형이었다. 쇄설성퇴적암일 때 전체 169개 중 2개(1.2%)가 Na-Cl 유형이었고, Na-HCO₃ 유형 14개(8.3%), Ca-Cl 유형 11개(6.5%), Ca-HCO₃ 유형 142개(84.0%)로 나타났다. 관입화성암, 미고결퇴적물, 변성암일 때 두 가지의 수질유형을 보였고, Ca-HCO₃의 비율이 높게 나타났다. 반면 쇄설성퇴적암일 때는 세 가지의 수질유형이 나타나 상대적으로 더 다양한 수질유형을 보였다. 또한 오

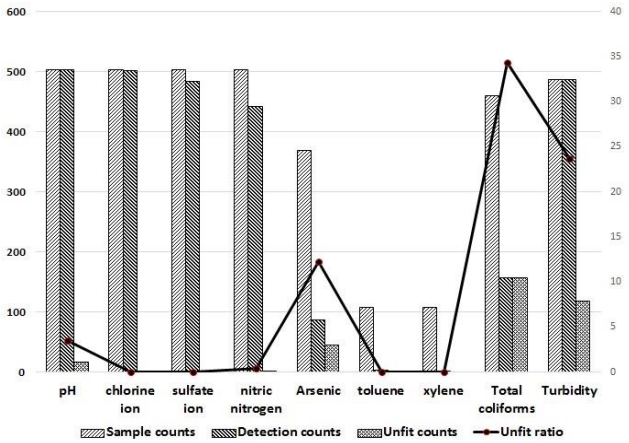


Figure 9. Analysis results of unfit sample in background water quality exclusive monitoring network with drinking water quality standards.

염물질의 영향을 암시하는 Na-Cl 유형은 쇄설성퇴적암일 때만 나타났다[10,16].

4.4. 부적합율을 이용한 수질특성

먹는물 수질기준 20개 항목의 부적합 현황을 분석한 결과의 일부를 Figure 9에 나타내었다. pH는 503개의 시료를 분석하여 17개(5.8 미만 14개, 8.5 초과 3개)가 부적합이었고, 탁도는 488개의 시료를 분석하여 119개가 부적합이었다. 염소이온과 황산이온은 각각 503개의 시료를 분석하였고, 모두 먹는물 수질기준을 모두 만족하였다. 질산성질소는 503개를 분석하여 2개가 부적합이었다. 비소는 370개의 시료를 분석하여 45개가 부적합이었고, 총대장균군은 461개를 분석하여 158개가 부적합이었다. 나머지 항목에서는 수질기준에 부적합인 시료가 없었다. 배경수질전용측정망 전체 수질자료에 대하여 측정항목별 먹는물 수질기준 부적합율은 총대장균군이 34.3%로 가장 높았고 탁도(23.7%), 비소(12.2%), pH (3.4%), 질산성질소(0.4%)의 순이었다.

4.4.1. 심도별 부적합율

pH의 부적합율은 상층, 중층 그리고 하층일 때 각각 3.6%, 3.0%, 그리고 3.6%로 심도별로 큰 차이가 없었다. 총대장균군의 부적합율은 49.9%, 28.8% 그리고 24.7%였고, 탁도의 부적합율은 35.0%, 23.5%, 그리고 14.7%로 각각 나타났다. 총대장균군과 탁도의 경우 부적합율이 상층일 때 가장 크고 중층과 하층으로 갈수록 낮아졌다. 질산성질소의 부적합율은 상층일 때 1.2%였고 중층과 하층일 때 0.0%로 나타나 상층일 때만 부적합이 나타났다. 따라서 총대장균군, 탁도, 질산성질소의 부적합은 주로 외부에서 유입된 오염물질에 의해 야기되는 것으로 추측된다. 비소의 부적합율은 0.8%, 15.4%, 그리고 20.3%로 각각 나타나 하층일 때 부적합율이 가장 높았다. 심도가 깊을수록 pH가 높고 ORP이 낮아서 비소의 용출이 증가하기 때문이다. 심도별 총 부적합율은 상층이 19.8%로 가장 크고 중층이 15.4%, 하층이 14.5%로 나타나 심도가 얕을

수록 부적합율이 높아졌다. 지표와 가까울수록 외부 오염물질의 영향을 많이 받기 때문으로 추정된다[19,20].

4.4.2. 지질별 부적합율

pH의 부적합율은 변성암일 때 5.5%, 미고결퇴적물과 쇄설성퇴적암일 때 3.6%, 관입화성암일 때 1.8%로 나타나, 변성암일 때 부적합율이 관입화성암일 때 보다 약 3배 가량 높았다. 질산성질소의 부적합율은 쇄설성퇴적암일 때 1.2%였고 나머지 지질에서는 0.0%으로 나타났다. 비소의 부적합율은 미고결퇴적물일 때 46.3%, 관입화성암일 때 12.1%였고, 변성암과 쇄설성퇴적암에서는 부적합인 자료가 없었다. 일반적으로 비소의 농도는 관입화성암일 때 높는데, 미고결퇴적물일 때의 부적합율이 관입화성암일 때 보다 약 4배 높게 나타났다. 이는 미고결퇴적물의 pH 값이 상대적으로 높아서 비소의 용출이 증가하기 때문으로 추정된다[28,29]. 총대장균군의 부적합율은 관입화성암, 미고결퇴적물, 변성암 그리고 쇄설성퇴적암일 때 23.2, 24.4, 38.2 그리고 47.3%로 각각 나타나 쇄설성퇴적암일 때 부적합율이 가장 높았다. 탁도의 부적합율은 29.6, 13.1, 48.1 그리고 25.8%로 나타나, 변성암일 때 부적합율이 미고결퇴적물일 때 보다 약 3.7배 높았다. 지질별 총 부적합율은 변성암일 때 18.0%로 가장 높았고 쇄설성퇴적암 15.5%, 미고결퇴적물 13.1%의 순이었고 관입화성암에서 12.5%로 가장 낮았다.

4.5. 통계적 기법을 활용한 수질특성

4.5.1. 상관계수

상관관계 분석은 하나의 변수가 다른 변수와 관련성이 있는지, 있다면 어느 정도의 관련성이 있는지를 알아보기 위한 분석기법이다. 일반적으로 두 변수간의 상관계수의 절대값이 1.0이면 완전한 상관관계, 0.90이면 매우 높은 상관관계, 0.70 ~ 0.80이면 높은 상관관계, 0.50 ~ 0.60이면 보통의 상관관계, 0.40이하면 약한 상관관계가 있다고 할 수 있다[30]. 배경수질전용측정망의 측정항목들 간의 상관계수를 Table 4에 나타내었다. 본 연구에서 수은, 페놀 등과 같이 전체 측정치가 거의 불검출로 나타나 상관계수의 의미가 없는 항목들은 분석에서 제외하였다. 전기전도도의 경우 HCO₃⁻과 0.88의 상관계수를 나타내어 아주 높은 상관성을 가지며, SO₄²⁻과 0.74의 상관계수를 나타내어 높은 상관관계가 있다. 그 외에도 Mg²⁺, Ca²⁺, Na⁺과도 각각 0.69, 0.65, 0.6의 상관계수, Cl⁻ 및 K⁺과는 0.54, 0.41의 상관계수를 보였다. 즉 전기전도도는 거의 모든 양·음이온과 상관관계가 존재하였는데, 전기전도도가 지하수 내 이온 용해도에 의해 영향을 받기 때문으로 추정된다. 또한 화학종간 상관관계가 높을 수밖에 없는 NO₃-N과 NO₃⁻의 상관계수가 1.0으로 나타났다. 이를 통해 본 연구에서 이용한 수질자료의 신뢰도가 높음을 확인할 수 있다. HCO₃⁻은 Ca²⁺ 및 Mg²⁺와의 상관계수가 모두 0.73이었고, Ca²⁺과 Mg²⁺의 상관계수가 0.76으로 나타나 세 이온은 서로 상관성이 높은 것으로 분석되었다. 이는 방해석(calcite)의 용해 때문으로 추측되며, 물 - 암석 상호반응에 의한 자연적 기원의 영향을

Table 4. Correlation coefficients between measurement parameters

	pH	EC	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
DO									
Na ⁺		0.63							
K ⁺		0.41							
Ca ²⁺		0.65							
Mg ²⁺		0.69			0.76				
Cl ⁻		0.54	0.52			0.55			
SO ₄ ²⁻		0.74	0.50		0.55	0.77	0.72		
HCO ₃ ⁻		0.88	0.64	0.42	0.73	0.73	0.43	0.65	
NO ₃ -N									1.00
As	0.40								

Table 5. Summary of ANOVA test on measurement parameters

Parameters	Depth				Geological features			
	F test value	P-value	F critical value	Level of significance	F test value	P-value	F critical value	Level of significance
pH	82.139	1.429E-31	4.648	0.01	12.566	6.232E-08	3.821	0.01
EC	0.949	0.388	3.014	0.05	38.427	2.346E-22	3.821	0.01
DO	23.690	1.480E-10	4.648	0.01	11.007	5.220E-07	3.821	0.01
ORP	6.809	0.001	4.648	0.01	10.340	1.300E-06	3.821	0.01
Temp	3.285	0.038	3.014	0.05	5.220	0.001	3.821	0.01
Na ⁺	16.240	1.468E-07	4.648	0.01	10.299	1.375E-06	3.821	0.01
K ⁺	2.898	0.0561	3.014	0.05	16.342	3.814E-10	3.821	0.01
Ca ²⁺	6.473	0.0017	4.648	0.01	27.401	2.033E-16	3.821	0.01
Mg ²⁺	11.246	1.670E-05	4.648	0.01	71.606	1.581E-38	3.821	0.01
Cl ⁻	2.770	0.064	3.014	0.05	49.882	3.281E-28	3.821	0.01
SO ₄ ²⁻	0.447	0.640	3.014	0.05	77.841	2.561E-41	3.821	0.01
HCO ₃ ⁻	4.138	0.017	3.014	0.05	23.995	1.607E-14	3.821	0.01
NO ₃ ⁻	36.056	2.357E-15	4.648	0.01	9.947	2.226E-06	3.821	0.01
NO ₃ -N	36.172	2.130E-15	4.648	0.01	9.879	2.445E-06	3.821	0.01
As	13.178	2.973E-06	4.663	0.01	64.993	1.040E-33	3.836	0.01
total coliforms	0.492	0.612	3.015	0.05	2.260	0.081	2.624	0.05
turbidity	14.378	8.584E-07	4.649	0.01	18.637	1.866E-11	3.822	0.01

암시한다. 이 외에도 HCO₃⁻은 SO₄²⁻ 및 Na⁺과 각각 0.65, 0.64의 상관계수, Cl⁻ 및 K⁺과 각각 0.43, 0.42의 상관계수를 나타내어 다양한 이온과 상관성이 존재하는 것으로 분석되었다. Cl⁻과 SO₄²⁻간의 상관계수는 0.72로 나타나 서로 높은 상관관계가 있는 것으로 보인다. 그 외에도 pH와 비소의 상관계수가 0.40으로 나타나 다소 상관성이 있는 것으로 분석되었다.

4.5.2. 분산분석

본 연구에서 지하수의 수질특성은 심도 및 지질에 따라 차이가 있는 것으로 나타났다. 따라서 이에 대한 정량적인 판단을 위해 분산분석을 활용하여 통계학적으로 유의미한 차이를 갖는지를 확인하였다. 분산분석은 2개 이상의 샘플집단 간 평균 차이를 검증하는데 활용이 되며[12], 그 결과는 Table

5에 나타내었다. 배경수질전용측정망의 수질자료를 이용한 심도별 일원배치 분산분석 결과는 pH, DO, ORP, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, NO₃⁻, NO₃-N, 비소, 탁도는 모두 F 검정값이 F 기각치보다 크고, p-값이 유의수준 0.01보다 작았다. 따라서 심도별로 측정치의 차이가 없다는 귀무가설이 기각되며, 99% 신뢰수준에서 심도에 따른 측정값의 평균이 모두 통계적으로 유의미한 차이를 갖는 것으로 볼 수 있다. 수온과 HCO₃⁻은 유의수준 0.05에서 F 검정값이 F 기각치보다 커 신뢰수준 95%에서 심도에 따른 차이가 유의한 것으로 나타났다. 나머지 측정항목들은 0.05의 유의수준에서 F 검정값이 F 기각치보다 작고, p-값이 유의수준보다 크게 나타나 심도별로 평균의 차이가 없다는 귀무가설이 기각되지 못하였다. 지질별 ANOVA분석 결과 총대장균군을 제외한 16개 항목은 유의수준 0.01에

서 F 검정값이 F 기각치보다 크게 나타나 99% 신뢰수준에서 통계적으로 유의미한 차이가 있었다. 그러나 총대장균군의 경우 0.05의 유의수준에서 p-값이 유의수준보다 크게 나타나 귀무가설이 기각되지 못하여 값의 평균이 지질별로 유의한 차이가 있다고 할 수 없었다.

5. 결론

경상남도내 지하수의 수질특성을 파악하고, 효율적인 지하수관리 정책수립을 위한 기초자료를 제공하기 위하여 5년간 (2013년~2017년)의 경남지역 지하수수질전용측정망 중 배경수질전용측정망 자료를 토대로 심도별·지질별 수질을 분석한 결과 심도가 깊어짐에 따라 pH와 전기전도도(EC)의 평균값은 증가하였고, 수온, DO, 산화물환원전위(ORP), 비소, 총대장균군, 그리고 탁도는 감소하였다. 양·음이온 평균농도의 경우 Na^+ 는 증가, Ca^{2+} 와 Mg^{2+} 는 감소, K^+ 는 심도에 따른 큰 차이가 없었고, HCO_3^- 는 증가하나, 나머지 음이온들은 감소하였다. 양·음이온의 농도 합은 심도가 깊어질수록 증가하였으나 총 부적합율은 심도가 깊을수록 낮았다. 한편 pH는 지질별로 큰 차이가 없었고, EC는 쇄설성퇴적암일 때 가장 크고, DO는 변성암일 때 가장 작았다. ORP는 관입화성암일 때 가장 크고 변성암일 때 가장 작았으며, 비소는 미고결퇴적물일 때 가장 컸다. 총대장균군과 탁도는 각각 쇄설성퇴적암과 변성암일 때 가장 컸다. 양·음이온의 평균농도는 쇄설성퇴적암일 때 가장 높고, 변성암일 때 가장 낮았으며, 양·음이온의 농도 합은 쇄설성퇴적암 > 미고결퇴적물 > 관입화성암 > 변성암의 순이었다. 부적합율은 pH와 탁도는 변성암일 때 가장 높았고, 질산성질소와 총대장균군은 쇄설성퇴적암일 때, 비소는 미고결퇴적물일 때 가장 높았다. 총 부적합율은 변성암 > 쇄설성퇴적암 > 미고결퇴적물 > 관입화성암의 순이었다. 전기전도도와 주요 양·음이온의 상관계수가 0.6에서 0.9로 높게 나타났고, HCO_3^- 와 Ca^{2+} , Mg^{2+} 은 서로 간의 상관계수가 0.70 이상으로 나타나 높은 상관관계를 보였다. pH, DO, ORP, Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NO_3^- , NO_3^- -N, 비소, 탁도는 심도와 지질별에 따라 매우 유의하였으며, 수온과 HCO_3^- 는 유의하였다.

References

- Kim, J. H., Ryoo, R. N., Lee, J. S., Song, D. S., Lee, Y. J., and Jeon, H. B., "Study on Major Mineral Distribution Characteristics in Groundwater in South Korea," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **38**(10), 566-573 (2016).
- Yun, S. W., Kim, Y. S., Kim, D. H., Kim, H. C., Shin, M. C., Park, J. Y., Kim, H. J., and Lee, J. Y., "Comparative study on Water Level Fluctuation and Recharge Characteristic in Groundwaters of Urban and Rural Areas in Gangwon Province," *J. Geol. Soc. Korea*, **49**(4), 503-516 (2013).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Water Resources Long-Term Comprehensive Plan (2001~2020) Third Revised Plan (2016).
- Bang, S. W., and Jung, J. H., "The Study on the Quality Standards of Groundwater in Korea in Comparing to the Developed Countries," *J. Environ. Policy*, **4**(2), 57-82 (2005).
- 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: Implication for Improvement," *J. Soil Groundwater Environ.*, **12**(6), 92-99 (2007).
- Bang, S. R., Yoo, K. J., and Park, J. H., "Temporal Trend Analysis of Contamination Using Groundwater Quality Monitoring Network Data," *J. Korean Soc. Water Quality*, **27**(1), 120-128 (2011).
- Ministry of Environment, "Groundwater Quality Monitoring Network and Water Pollution Measurement Plan," (2017).
- Korea Rural Community Corporation, Gyeongnam Regional Headquarter, "Gyeongsangnam-do Groundwater Management Plan Report," (2015).
- Kim, K. S., "Arsenic Concentration Characteristics of Groundwater Using Groundwater Quality Monitoring Data," Ph. D. Dissertation, Kyungbook National University (2018).
- 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).
- <http://sgis.nier.go.kr/> (accessed Jun. 2019).
- Bea, D. S., Lee, N. Y., Kwon, H. M., Cha, M. S., Yoon, W. Y., Kim, M. S., and Lee, M. K., "Statistical Theory and Applications," Chungmungak, Seoul (2009).
- Huh, M. H., and Lee, Y. G., "Skew Normal Boxplot and Outliers," *Commun. Korean Stat. Soc.*, **19**(4), 591-595 (2012).
- Piper, A. M., "A Graphic Procedure in the Geochemical Interpretation of Water Analyses," *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, **25**(6), 914-923 (1944).
- Hong, C. S., and Sung, J. H., "Bivariate Skewness, Kurtosis and Surface Plot," *J. Korean Data Inform. Sci. Soc.*, **28**(5), 959-970 (2017).
- Yang, K. H., "The Comparative Assessment on Characteristics of Ground Water Pollution Through the Best Selection of Background Area," MS Thesis, Inha University (2011).
- 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).
- Choo, C. O., Kim, J. T., Chung, I. M., Kim, N. W., and Jeong, G. C., "Geochemical Aspects of Groundwater in Granite Area and the Origin of Fluoride with Emphasis on the Water-Rock Interaction," *J. Eng., Geol.*, **18**(1), 103-115 (2008).
- Yun, U., and Cho, B. W., "Hydrogeochemical Characteristics of Groundwater on Well Depth Variation in the Heunghae Area, Korea," *J. Eng. Geol.*, **15**(4), 391-405 (2005).
- 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).
21. Oxtoby, D. W., Gillis, H. P., and Butler, L. J., “Principles of Modern Chemistry,” 8th ed., Cengage Learning, Boston (2016).
 22. Moon, Y. R., and Roo, E. H., “Comparative Study for the Ground Water Management Based on Geological Condition,” Korea Environment Institute Report WO-06 (2006).
 23. Jeong, C. H., Lee, Y. J., Lee, Y. C., Kim, M. S., Kim, H. K., Kim, T. S., Jo, B. U., and Choi, H. Y., “Hydrochemical and Occurrences of Natural Radioactive Materials from Groundwater in Various Geological Environment,” *J. Eng. Geol.*, **26**(4), 531-549 (2016).
 24. 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. of KIHE*, **20**, 207-214 (2007)
 25. Keller, E. A., “Environmental geology,” 9th ed., Prentice Hall, New Jersey (2000).
 26. Park, H. R., Kim, M. K., and Hong, S. P., “Nitrate Contamination Characteristics of Groundwater – A Case Study in Okcheon Area,” *J. Environ. Impact Assess.*, **24**(1) 87-98 (2015).
 27. Nordstrom, D. K., Ball, J. W., Donahoe, R. J., and Whitemore, D., “Groundwater Chemistry and Water-rock Interactions at Stripa,” *Geochimica Et Cosmochimica Acta.*, **53**(8), 1727-1740 (1989).
 28. Ahn, J. S., Ko, K. S., and Chen, C. M., “Arsenic Occurrence in Groundwater of Korea,” *J. Soil Groundwater Environ.*, **12**(5), 64-72, (2007).
 29. Park, M., E., Sung, K. Y., Lee M., Lee, P. K., and Kim M. C., “Effects of pH-Eh on Natural Attenuation of Soil Contaminated by Arsenic in the Dalchen Mine Area, Ulsan, Korea,” *Econ. Envir. Geol.*, **38**(5), 513-523 (2005).
 30. Kim, J. T., Park, S. J., Kang, M. A., Choo, C. O., and Jeong, G. C., “Analysis on Statistical Relationship between Groundwater Quality and Geology,” *J. Eng. Geol.*, **17**(3), 445-453 (2007).