

수리지화학 특성과 분산 분석 및 경향성 분석을 이용한 농촌 지역 지하수 수질 변동 특성 분석

안효원^{1,2} · 하규철^{1,2} · 이은희¹ · 고경석^{1,2,*}

¹한국지질자원연구원 기후변화대응연구본부 지하수환경연구센터

²과학기술연합대학원대학교 지질과학전공

Analysis of groundwater quality variation characteristics using hydrogeochemical characteristics, ANOVA and trend analysis in rural areas

Hyowon An^{1,2} · Kyoochul Ha^{1,2} · Eunhee Lee¹ · Kyung-Seok Ko^{1,2,*}

¹Groundwater Environment Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea

²Geological Sciences, University of Science and Technology, Daejeon 34113, Republic of Korea

요 약

본 연구에서는 농촌 지역의 지속가능한 지하수 이용 및 적정 관리를 위해 수질 모니터링 자료를 활용하여 시공간적 변동 특성을 평가하였다. 이를 위해 연구지역의 20개 관정에 대하여 심도와 시기(연도별, 계절별)에 따른 수리지화학, 분산 분석(ANOVA) 및 경향성 분석을 수행하였다. 분산 분석 결과, 지하수 수질은 주요 성분(TDS, Ca, Mg, Na, K, Cl, NO₃, HCO₃, SO₄)에서 천부 지하수가 심부 지하수보다 상대적으로 높게 나타나 심도별 유의미한 차이($\alpha < 0.05$)를 보여주었다. 그러나, 시기(연도별 및 계절별)에 따른 수질 특성의 차이는 뚜렷하게 확인되지 않았다. Mann-Kendall과 Sen's slope 방법과 같은 비모수 경향성 분석 결과, 지하수 수질 성분 중 TDS, Ca, Mg, Na, Cl은 점차 감소하는 경향을 보여주었으며, 이는 2018년 가뭄 시 연구지역에 공급된 고염분 관개용수의 영향 감소와 관련된 것으로 보인다. 그러나, 관정 주변의 축사 및 인간 활동에 의한 영향을 받는 일부 관정(S2, D5)의 경우, 이들 성분의 농도가 지속적으로 증가하는 경향성을 나타내기도 하였다. 수리지화학 특성, 분산 분석과 경향성 분석을 통하여 연구지역 수질 성분 중 TDS, Ca, Mg, Na, Cl은 수질 변화를 모니터링할 수 있는 유용한 지시자로 이용될 수 있음을 알 수 있었다. 따라서, 향후 농촌 지역의 지하수 수질 악화의 사전 예방과 지속가능한 용수 공급을 위해 이러한 통계기법과 경향성 분석이 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

주요어: 수질 모니터링, 수리지화학, 분산 분석, 경향성 분석, 지시자

ABSTRACT: In this study, spatio-temporal variation characteristics were evaluated using groundwater quality monitoring data for sustainable groundwater use and appropriate management in rural areas. The hydrogeochemistry, analysis of variance (ANOVA), and trend analysis of Mann-Kendall test and Sen's slope analysis were applied to 20 groundwater wells in the study area. As a result of ANOVA, groundwater quality showed a significant difference ($\alpha < 0.05$) by depth as shallow groundwater was relatively higher than deep groundwater in major components (TDS, Ca, Mg, Na, K, Cl, NO₃, HCO₃, SO₄). However, differences in groundwater quality according to time (year and season) were not clearly identified. As a result of non-parametric trend analysis such as the Mann-Kendall and Sen's slope methods, TDS, Ca, Mg, Na, and Cl gradually decreased, which seems to be related to the decrease in the impact of high-salinity irrigation water supplied the drought in 2018. However, S2 and D5 showed a tendency for these components to increase, which is thought to be due to increased human activities and livestock sheds located around the tube wells. It was found that TDS, Ca, Mg, Na, and Cl can be used as useful indicators to monitor water quality changes from the groundwater hydrogeochemical characteristics, ANOVA,

*Corresponding author: +82-42-868-3162, E-mail: kyungsok@kigam.re.kr

and trend analysis studies of the study area. Therefore, it is thought that these statistical techniques and trend analysis can be usefully used for the prevention of deterioration of groundwater quality in rural areas and sustainable water supply in the future.

Key words: groundwater quality monitoring, hydrogeochemistry, ANOVA, trend analysis, indicators

1. 서론

최근 기후변화에 따라 수자원의 불안정성에 대한 문제가 더욱 심각해지고 있다. 기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC) 6차 보고서에 따르면, 가뭄 및 홍수와 같은 기상이변은 더욱 극심해지고 물 위기의 심각성 또한 더욱 증가할 것으로 전망하고 있다(IPCC, 2022). 따라서, 물 위기에 대응한 지속 가능하고 안정적인 수자원 확보의 중요성이 무엇보다도 강조되고 있다. 지하수는 담수 중에 가장 높은 비율을 차지하고 있으며 세계 인구의 50% 이상이 먹는 물로 이용하고 있고 농업용 관개용수로도 널리 이용되고 있다. 또한, 지하수는 강수와 증발과 같은 외부 변화에 직접적인 영향을 적게 받기 때문에 기후변화에 대응하는 안정적인 수자원으로써의 그 가치가 높아지고 있다(Jyrkama and Sykes, 2007). 그러나, 지하수는 일반적으로 매우 느린 유속을 지니고 있고, 지하의 대수층은 매우 복잡하게 얽혀 있으며 지표수와 상호작용 등 그 특성을 명확히 규명하기가 어렵다(Park *et al.*, 2007). 이러한 이유로 지하에 인간, 농경 및 산업 활동 등에 따라 수질 오염 물질이 유입되면 그 영향은 즉각적으로 파악하기가 어려우며 이들 성분은 오랜 시간에 걸쳐 대수층에 넓게 오염이 확산하게 된다. 지하수는 한번 오염되면 이를 회복시키는 것에는 많은 시간과 비용이 들기 때문에 지속적으로 지하수를 이용하기 위해서는 체계적으로 수질을 모니터링하고 평가하여 관리할 필요가 있다(Yoon *et al.*, 2012).

지하수, 지표수 등의 수질 관측 자료에 대한 경향성 분석은 기존 데이터를 바탕으로 일정 기간 수질의 변동성을 확인할 수 있고, 더 나아가 미래의 수질 변화 예측을 위해 중요한 평가 방법으로 알려져 있다(Ratnaningsih *et al.*, 2019; Mahmoodi *et al.*, 2021). 여러 가지 경향성 분석 기법 중 Mann-Kendall 검정과 Sen's slope 분석은 비모수 분석법으로써 결측 자료나 특이 값의 영향을 크게 받지 않는다는 장점을 가지고 있어 수질, 하천유량, 온도, 강수량 등 수리

기상학 분야에서 오래전부터 널리 이용되어 왔다(Yue *et al.*, 2002; An *et al.*, 2022). 해외 유수의 연구진들은 벨기에, 이탈리아, 인도, 말레이시아 등 국가의 지역별 지하수 추세 및 특성을 위해 위와 같은 방법들을 사용하여 연구들을 수행하였다(Batlle Aguilar *et al.*, 2007; Machiwal and Jah, 2015; Frollini *et al.*, 2021; Hashim *et al.*, 2021).

국내에서도 Mann-Kendall 검정법과 Sen's slope 분석법을 통한 지하수 인자들에 대한 경향성 분석이 수행되어 왔다. 이러한 연구들은 주로 전국을 대상으로 하여 국가지하수추정망 자료를 사용하였으며, 이를 바탕으로 지하수위와 수질 성분을 대표하는 전기전도도와 지하수 오염의 대표 성분인 질산성질소와 염소에 대한 경향성 분석이 수행되었다(Park *et al.*, 2011; Kaown *et al.*, 2012; An *et al.*, 2015; Jeon *et al.*, 2020a). 또한, 국내 지역별 수리지질 및 수질 특성을 파악하기 위한 연구들도 수행되었는데, Kim *et al.* (2018)는 제주도 장기 모니터링 자료를 사용한 질산성질소의 시공간적 변동 특성에 대해 평가, 그리고 Jeon *et al.* (2020b)은 충남 농촌 지역의 천부 지하수 수질 특성을 토양층의 화학 특성과 토지 이용도와 관련하여 분석·평가한 바 있다.

다양한 수리지질 특성, 토지이용의 변화, 오염원의 증가 등은 지역의 지하수 수질에 영향을 미치게 되므로 이에 대한 시공간적 변동 특성을 파악하는 것은 지하수 관리에 매우 중요할 것으로 보인다. 그러므로, 지하수 수질의 시간적 변동을 파악하기 위한 지역별 지하수 수질의 모니터링과 경향성 분석은 효율적이고 지속가능한 지하수 이용을 기반을 마련하는데 있어 중요하다. 농촌지역은 도시지역보다 상수도 보급률이 상대적으로 낮아 지하수 의존율이 높으며, 농업용으로 사용하는 지하수 이용량이 많을 뿐만 아니라 가뭄 등의 기후변화 요인에 매우 취약한 특징을 가지고 있기 때문에 수질 특성 및 경향성 분석을 통해 효율적인 지하수 관리 방안을 마련하는 것이 필요할 것으로 보인다. 그럼에도 불구하고 앞서 언급한 바와 같은 농촌지역에 대한 장기적인 수질 모

니터링이 잘 이루어지지 않기 때문에 변동 특성을 파악하기 위한 경향성 분석과 관련한 연구는 매우 적다. 현재까지 대부분의 지하수 수질 연구에서는 주로 오염과 관련된 특정 이온에만 초점을 맞추어 수행되었고, 수질의 경향성에 대한 분석을 통한 농촌지역 지하수의 관리에 대한 방안을 마련하는 연구는 많이 수행되지 못하였다.

본 연구에서는 전형적인 농촌지역인 충남 홍성군 양곡리와 신리 일대를 대상으로 장기간의 지하수 수질의 관측을 통해 인간 및 농경활동에 따른 지하수 심도별, 계절별 및 연도별 변동 특성을 알아보고자 하였다. 이를 위해 지하수 주요 성분에 대한 수리지화학적 특성을 평가하고 분산 분석(ANOVA)을 이용하여 여러 요인별로 유의미한 결과를 보이는지 통계적으로 유의미한 차이를 보이는지 비교하여 평가하였다. 또한, 장기간에 걸친 지하수 수질의 변화를 평가하기 위해 Mann-Kendall 검정법과 Sen's slope 분석법과 같은 경향성 분석을 이용하여 지하수 수질의 그 특성을 알아보고자 하였다. 지하수 수질에 대한 이들 분석 기법의 적용 평가는 지하수를 농업·생활용수로 많이 이용하는 농촌지역에서 지속가능한 지하수 수질 관리 방안을 마련하는데 도움이 될 것으로 생각된다.

2. 연구지역 및 방법

2.1 연구지역 개관

연구지역은 논과 밭의 농경 활동이 활발하게 이루어지는 국내의 전형적인 농촌 지역으로 충남 홍성군 서부면 양곡리와 신리에 위치하고 있다. 대상 지역의 전체 면적은 2.83 km²이며 산지로 둘러싸여 발달하는 북서-남동 방향과 남북 방향의 두 개의 주요 하천이 남쪽 하류부에서 합류되는 수계로 하나의 유역을 형성하고 있다(그림 1). 연구지역의 토지이용을 살펴보면, 산림 및 초지가 전체의 66.7%(1.89 km²)로 대부분이었으며 그 다음으로 논과 밭이 각각 0.495 km²(17.5%), 0.377 km²(13.3%)를 차지하였다(그림 2). 연구지역의 밭은 고추, 참깨, 대두, 호박 및 파 등 다양한 작물이 재배되고 있었으며, 축산 활동에 의한 오염 가능성이 있는 2개의 축사가 확인되었다(Ha *et al.*, 2021).

앞서 언급한 바와 같이 연구지역은 하천이 짧고 수계 면적이 작아 가뭄 등에 따른 물 공급이 원활하지 않으며, 두 개 소유역의 합류부에 소규모 저수지가 있지만 이를 이용한 농업용 관개용수와 생활용수(상수도 포함) 공급에 한계를 보이고 있었다. 이와 같은 이유로 대상 지역이 2018년 극심한 가뭄을 겪었을

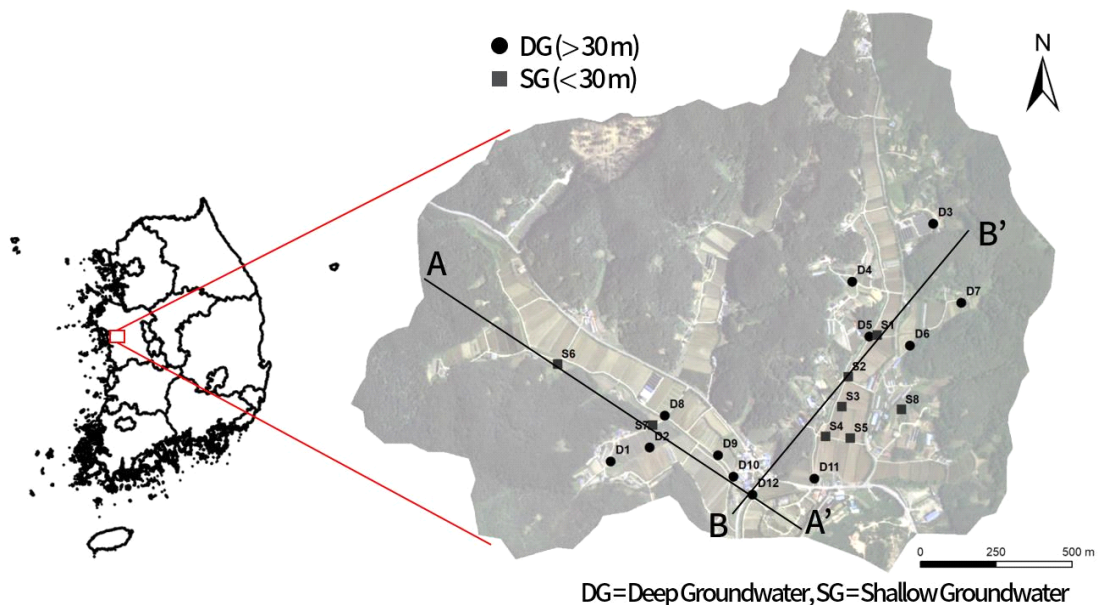


Fig. 1. Location of the study area and distribution of stream and groundwater wells.

때, 하천수와 지하수로 가뭄 해결이 어려운 상황에 처하였으며, 이를 해결하기 위해서 3~4 km 정도 떨어진 홍성호의 용수를 사용하여 관개용수를 공급하기도 하였다. 그런데, 해수의 영향을 받는 홍성호는 염분 농도가 높아 실제 연구지역에 공급된 관개용수의 전기전도도(EC)도 2,100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 가 넘어 농경 활동과 주변 지하수와 지표수의 염도를 증가시키기도 하였다(KIGAM, 2019).

연구지역의 지질은 서편에는 해성 환경의 사암으로 이루어진 데본기 태안층군, 중심부에는 중생대 대동누층군의 육상 환경의 사암과 일부 변성 천매암으로 이루어진 남포층군이 주로 분포하고 있다. 동쪽부에는 트라이아스기의 복운모화강암과 엽리상화강암과 중심부 단층 경계부의 동편에 주라기 화강암이 남북 방향으로 분포하였다. 또한, 충적층은 주로 신생대 제4기 충적층이 부정합으로 덮고 있었다(KIGAM, 2021). 연구지역 두 개의 소유역에 대한 지층의 수직 분포 특성을 알아보기 위하여 지질 및 시추조사 자료를 수집하여 그림 1의 AA'와 BB'의 축선에 대한 주상도를 작성하였다(그림 3a). 그림 3a에서 볼 수 있는 바와 같이, 상부층은 주로 토양(모래 등)의

다공성 매질로 구성된 충적층으로 지표에서 1.8~4.3 m (평균 두께 3.47 m)이며, 충적층 하부에는 1.8~14.0 m (평균 두께 3.89 m) 깊이에 풍화대(사암, 화강암 등), 그리고 최하부에는 기반암(화강암, 천매암 등)이 2.8~14.0 m 깊이에서 나타나고 있다.

2.2 지하수 시료 채취 및 분석

연구지역 지하수의 심도와 시간에 따른 수질의 변화를 관측하기 위하여 총 20개 관정에 대한 시료를 채취하여 분석을 수행하였다(그림 1). 연구지역 지하수 수질의 지표 오염원의 영향에 따른 특징을 살펴보기 위하여, 대상 지하수 관정을 심도 30 m를 기준으로 천부 8개소와 심부 12개소로 구분하였다(그림 3b). 연구지역의 지하수 관정들을 천부와 심부로 명확하게 구분하기는 어렵지만, 풍화대의 깊이가 대략 10 m 정도이고 개발된 관정의 스크린이 대부분 전체 구간에 걸쳐 있는 점을 고려하여 본 연구에서는 심도 30 m 정도를 기준으로 천부와 심부 지하수 관정을 구분하였다. Kim *et al.* (2008)의 논산지역 지하수에 관한 연구에서도 이와 같이 충적층과 풍화대가 주로 분포하는 천부 지하수의 특징을 나타낼

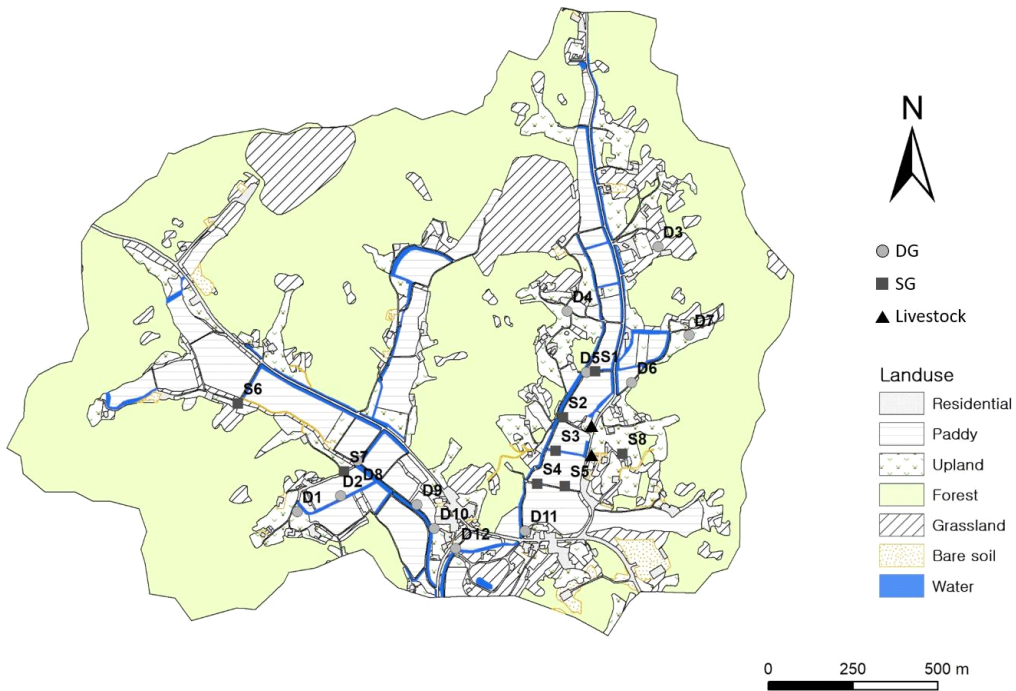


Fig. 2. Land use map of study area.

수 있는 심도 기준으로 30 m를 제시하고 암반지하수와 비교하여 질산성질소의 오염 특성을 평가한 바 있다. 또한 지하수 수질의 시간에 따른 변화 추세를 분석하고 평가하기 위하여, 총 8회(2019.07.~2022.09., 2회/년)에 걸쳐 지하수 시료를 채취하고 분석하여 그 특징을 규명하고자 하였다.

대부분의 천부 지하수공은 관정에 펌프가 설치되어 있지 않아 휴대용 수중펌프(Submersible Plastic pump, Eijkelkamp Co.)를 사용하여 지하수 시료를 채취하였으며, 심부 지하수공은 기존 펌프 시설을 이용하여 시료를 채취하였다. 지하수 시료의 채취는 오염에 의한 영향을 최소화하고 대표성을 갖는 시료를 확보하기 위하여 초기에는 지하수를 충분히 양수하여 퍼징한 후 현장 수질을 측정하여 온도(T), 수소이온농도(pH), 전기전도도(EC), 산화환원전위(Eh), 용존산소(DO)가 안정된 후에 시료를 채취하였다. 지하수 시료 채취를 위한 용기와 현장 수질 분석 장비는 채취하고자 하는 대상 관정의 지하수를 이용하여 3

회 이상 세척한 후 사용하였으며, 대기와 접촉을 최소화하여 미생물 활동, 광물 침전 등에 따른 수질의 변화가 발생하지 않도록 하였다. 이후 채취된 지하수 시료는 아이스박스에 냉장 보관하여 가능한 빠른 시간 내에 실험실로 운반하였다. 주요 양이온과 미량 성분의 분석을 위한 지하수 시료는 0.45 µm 셀룰로스 맴브레인 필터로 여과하였으며, 주요 양이온을 위한 시료는 흡착 및 이온의 침전 등에 따른 농도 감소 효과를 제거하고자 농질산을 10 ml당 한 방울씩 첨가하여 pH 2 이하로 만들어 주었다.

채취된 지하수는 주요 양이온(Ca, Mg, Na, K, SiO₂, Cl, NO₃, SO₄)과 알칼리도에 대하여 분석을 수행하였다. 주요 양이온은 유도결합플라즈마분광분석기(ICP-OES, Optima 7300 DV, Perkin Elmer), 음이온은 이온크로마토그래피(IC, Dionex Aquion, Thermo Fisher), 그리고 알칼리도는 자동적정기(Auto titrator, T50, Mettler Toledo)를 이용하였다. 지하수의 이온 분석 결과는 전하균형오차(CBE, %)를 계산하여 일

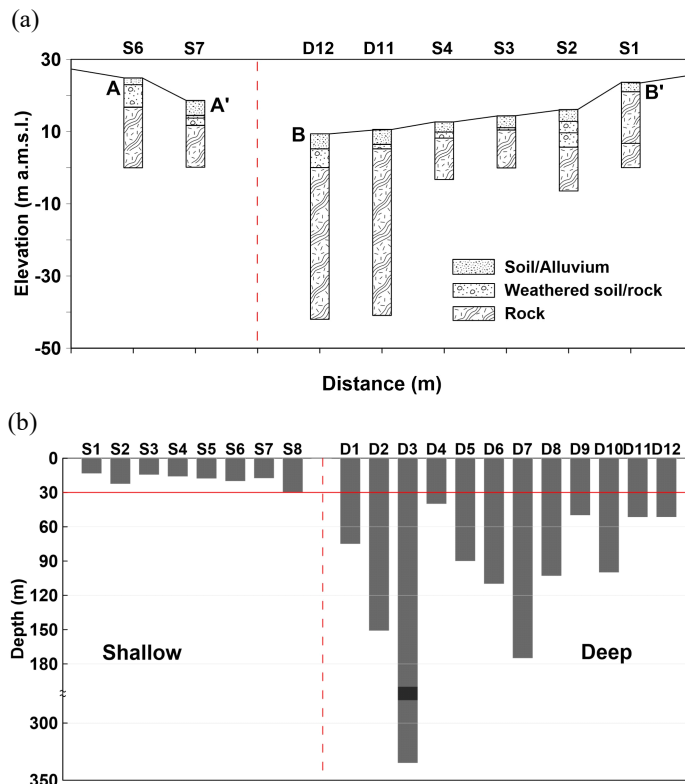


Fig. 3. (a) Stratigraphic cross sections of A-A' and B-B' and (b) classification of shallow and deep wells by depth of the wells in the study area.

부 몇 개의 시료(<10%)를 제외하고는 모두 5% 이내의 신뢰성 높은 분석 결과를 확보하였다.

2.3 지하수 수질의 통계적 비교 및 경향성 분석

2.3.1 분산 분석(ANOVA)

분산 분석(ANOVA, analysis of variance)은 두 개 또는 그 이상의 집단 간 차이를 구분하는 통계적 분석 방법으로 표본들이 같은 분포를 가지고 있는가를 검정하는 것이다. 즉, 독립변수를 몇 개의 범주로 나누고 각 수준에 따라 나누어진 집단 간 평균의 유의미한 차이를 통계적으로 검정하는 것이다. 본 연구의 분산 분석을 위해 사용된 지하수 수질 항목은 모두 10가지 항목(TDS, Ca, Mg, Na, K, SiO₂, HCO₃, Cl, NO₃, SO₄)이며, 신뢰구간 95% 하에서 통계적으로 유의한 값을 추출하도록 하였다.

본 연구에서는 관정의 심도와 시간(연도 및 계절)에 따라 지하수 수질의 차이가 나타나는지 비교하기 위하여 다음과 같은 3가지 귀무가설을 적용하여 분산 분석(ANOVA)을 수행하였다. 첫 번째 가설은 ‘지하수 전체 수질 항목 분석 결과는 심도에 따라 두 집단은 통계적으로 동일하다’이며, 전체 지하수 수질 자료를 심도 기준으로 분류하여 비교하고자 하였다. 두 번째 가설은 ‘지하수 전체 수질 항목 분석 결과는 연도별 같은 계절에 대하여 통계적으로 동일하다’이다. 이를 위해 연도별로 동일 또는 유사 시기(계절)의 3회 수질 분석(2019년 10월, 2021년 9월, 2022년 9월) 결과 비교를 위한 분산 분석을 수행하였으며, 2020년의 경우에는 동일 시기의 자료가 없어 비교 분석 대상에서 제외하였다. 마지막 세 번째 가설은 ‘지하수 전체 수질 항목 분석 결과는 계절에 따라 통계적으로 동일하다’로서 이 귀무가설은 계절별로 유의미한 차이가 있는지를 알아보기 위한 것이다. 본 연구에서는 2022년 4월과 9월의 분석 자료를 이용하여 계절별 차이를 비교하는 분산 분석(ANOVA)을 수행하였다.

2.3.2 경향성 분석

지하수의 시간에 따른 수질 변화를 평가하는 방법으로 경향성 분석이 흔히 이용되고 있으며, Mann-Kendall 비모수 검정법과 Sen's 경향성 분석법이 대표적인 방법으로 알려져 있다(Frollini *et al.*, 2021; An *et al.*, 2022). Mann-Kendall 검정법과 Sen's slope

분석법은 자료의 경향성을 평가하는 비모수 분석법 중 하나로 정규분포를 가정할 수 없는 경우에 사용하는 대표적인 통계적 방법이다. Mann-Kendall 검정법은 경향성의 증가 또는 감소 추세의 여부만을 파악할 수 있기에, 선형 추세의 기울기를 계산할 수 있는 Sen's 경향성 분석과 주로 같이 사용된다. 또한, 이들 방법은 결측 자료나 특이 값의 영향을 크게 받지 않는다는 장점을 가지고 있어 자료의 연속성이 부족하거나 결측 자료가 흔한 지하수 수질 자료의 경향성 분석에 유용하게 이용되고 있다(Yue *et al.*, 2002; An *et al.*, 2022). 본 연구에서는 추세분석을 위해 핀란드 기상연구소의 연구자들에 의해 개발되고 오픈 소스로 제공되고 있는 MAKESENS 프로그램을 사용하였다(Salmi *et al.*, 2002).

Mann-Kendall 검정법은 관측값의 순위 또는 부호만을 이용하여 경향성을 분석하는 방법으로 Mann (1945)에 의해 처음으로 제안되고 Kendall (1975)의 추가적인 연구를 통해 개선되었으며, 아래 식(1)의 지시자 함수(sgn: sign or indicator function)를 통해 계산할 수 있다. 이때, 어떤 시점 i ($1 \leq i \leq n$)에서의 관측값을 X_i 라고 하면 관측값 X_i 는 n 개가 되며, $sgn(X_j - X_i)$ 은 자료 간의 차이를 증가(1), 감소(-1), 상등(0)으로 표현하고 식 (2)를 통해 추정 통계치 S 를 도출한다.

$$sgn(X_j - X_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } X_j - X_i > 0 \\ 0 & \text{if } X_j - X_i = 0 \\ -1 & \text{if } X_j - X_i < 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n sgn(X_j - X_i) \quad (2)$$

Mann-Kendall 검정법은 자료의 개수에 따라 계산 과정이 다소 다르며, 위에서 제시된 방법은 자료의 개수가 10개 미만일 때 사용할 수 있다(Salmi *et al.*, 2002). 본 연구에서는 2019년부터 2022년까지 8회의 수질 분석 자료를 확보하였기 때문에, 이 방법을 이용하여 각 수질 성분에 대한 경향성 분석을 수행하였다.

Sen's 경향성 분석법은 시간에 따른 농도 값의 변화 추세를 선형 방정식으로 가정하며, 식(3)과 같이 나타낼 수 있다. 이때, $f(t)$ 는 시간 t 에서의 농도, Q

는 추세의 기울기, 그리고 B 는 상수이다. 식(3)에서 추세의 기울기는 식(4)와 같이 모든 자료 쌍에 대해 기울기를 계산하게 된다.

$$f(t) = Qt + B \quad (3)$$

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \quad (j > k) \quad (4)$$

이때 x_j 와 x_k 는 각각 j , k 번째에서의 농도 값을 나타내며, x_j 가 n 개이면 모두 $N = n(n-1)/2$ 개의 Q_i 의 기울기 값을 얻을 수 있다. 마찬가지로 B 는 $X_i - Qt_i$ 로 나타낼 수 있고, N 개의 B 값 중 중앙값이 최종 B 가 된다(Sirois, 1998).

3. 연구 결과 및 토의

3.1 지하수 수리지화학 특성

2019년 7월부터 2022년 9월까지 총 8회에 걸쳐 채취되고 분석된 연구지역 지하수의 수질 분석 결과에 대한 각 성분별 기본 통계 자료(범위, 평균값, 중간값 및 표준편차)는 표 1에 정리하여 나타내었다. 현장 수질 인자인 수소이온농도(pH), 용존산소(DO), 산화환원전위(Eh)는 시기별로 큰 차이를 보이지는 않았으나, 온도(T)는 여름철 강수의 영향이 반영되는 7~10월 시기에는 상대적으로 1~2°C가 높은 특징을 나타내었다. 2019년 7월의 전기전도도(EC)는 염도가 높은 홍성호 관개의 영향으로 연구 기간 중 가장 높은 값(평균 620 $\mu\text{S}/\text{cm}$)을 보여주었으나, 이후 점차 낮아져 평균 386~456 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 비교적 안정적인 값을 나타내었다. 총용존고체(TDS)와 주요 양이온인 Ca, Mg, Na, Cl의 평균값은 각각 224~352 mg/L, 38.1~57.4 mg/L, 10.9~15.6 mg/L, 19.7~37.9 mg/L, 40.4~102.0 mg/L이었으며, 전기전도도와 같이 2019년 7월의 값이 상대적으로 가장 높은 값을 나타내었다. 특히, Na와 Cl의 경우, 2019년 7월과 2022년 9월을 비교하였을 때, 평균은 37.9 mg/L에서 20.6 mg/L, 102.0 mg/L에서 46.9 mg/L로 약 50% 정도 농도가 감소하였으며, 표준편차도 4배 이상의 차이를 보여주었다. 시기별 성분의 함량을 비교하였을 때, 상대적으로 큰 표준편차는 서로 다른 프로세스에 의한 영향이 지하수의 화학적 특성을 변화시킨 것이라고 해석하였다(Atikul Islam *et al.*, 2017). 연구지역 지

하수의 주요 이온 성분들의 급격한 감소는 2019년 이전에 일시적인 외부의 유입원에 따른 영향으로 파악되며, 이는 앞서 언급한 바와 같이 2018년 가뭄 시 관개용수로 공급되었던 염도가 높은 홍성호의 영향이 주원인인 것으로 추정된다. 염소(Cl)를 제외한 음이온인 HCO_3^- , NO_3^- , SO_4^{2-} 와 SiO_2 의 평균값의 범위는 각각 128~169 mg/L, 10.9~14.0 mg/L, 14.8~22.3 mg/L, 12.7~16.1 mg/L이었으며, 이들 성분은 주요 양이온과 총용존고체(TDS)는 달리 시기별로 큰 차이를 보이지는 않았다.

연구지역 지하수 수질 성분 간의 상호 관계를 알아보기 위하여 상관분석을 수행하고 피어슨 상관계수(Pearson's correlation coefficient) 계산 결과를 표 2에 나타내었다. 지하수에 용존된 성분의 총량을 나타내는 총용존고체(TDS)는 주요 양이온인 Ca(0.85), Mg(0.90), Na(0.87), K(0.88)와 음이온인 HCO_3^- (0.64), Cl(0.92)와 높은 상관성을 나타내었다. Ca는 Mg(0.84)와 HCO_3^- (0.85)와 상관성이 높으며, Cl(0.64)과도 비교적 높은 상관계수를 나타내었다. 해수의 영향, 농경 및 인간 활동에 의해 일반적으로 증가하는 Na와 Cl은 0.92의 높은 상관계수를 보여주어 이들의 밀접한 관련성을 확인할 수 있었다. 따라서, TDS, Na, Ca, Mg, Cl, HCO_3^- 등이 연구지역의 지하수 수리지화학을 지배하는 주요 성분임을 확인할 수 있었다.

연구지역 수질 유형의 특성 및 변화는 지하수 환경에 영향을 미치는 다양한 오염 요인과 농경 및 축산 활동 등에 의해 나타날 수 있으며, 일반적으로 파이퍼다이어그램을 이용하여 확인할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 2019년 7월과 10월과 2022년 4월과 9월의 지하수 수질 분석에 대한 파이퍼다이어그램을 도시하여 수질 유형의 특성과 변화를 알아보고자 하였다(그림 4). 그림 4의 파이퍼다이어그램에서 볼 수 있는 바와 같이, 총 6가지 수질 유형인 CaCl(I), CaHCO_3 (II), Mixed CaMgCl(III), Mixed CaNaHCO₃(IV), NaHCO₃(V), NaCl(VI) 중 연구 기간 초기인 2019년 7월에는 4가지 수질유형(I, II, III, VI)이 다양하게 나타났으나, 마지막 시료 채취 시기인 2022년 9월에는 대부분 CaHCO_3 (II)가 지배적이었으며 일부 Mixed CaMgCl(III)가 확인되었다. 수질 유형의 차이가 뚜렷하게 나타나는 2019년 7월과 10월에 천부 지하수인 S6, S7는 CaCl(I)을 나타내었으며, 홍성호로부터 공급된 관개용수의 영향이 가장 큰 것으

Table 1. Statistical summary of groundwater quality parameters from 2019 to 2022.

Parameter	Month-year	Jul-19	Oct-19	May-20	Dec-20	Mar-21	Sep-21	Apr-22	Sep-22
T ¹	Range	14.0-21.7	14.9-21.2	12.1-16.6	14.1-17.1	11.4-15.8	14.4-19.0	8.1-15.6	14.8-19.0
	Mean	17.3	17.8	14.0	15.3	14.5	16.0	13.4	16.4
	Median	16.3	17.0	14.4	15.2	14.6	15.5	14.4	16.0
	SD	2.1	2.4	1.3	0.7	1.0	1.3	2.2	1.3
pH ²	Range	6.2-8.2	6.2-8.1	6.1-8.1	6.2-8.2	6.2-8.3	6.0-8.3	5.7-8.8	6.1-8.3
	Mean	7.1	7.1	7.0	7.3	7.2	7.1	6.9	7.1
	Median	7.0	7.0	6.8	7.3	7.2	7.0	6.8	7.0
	SD	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.6
DO	Range	0.0-9.8	1.3-8.1	0.1-7.7	0.1-8.8	0.0-6.4	0.0-8.5	0.0-8.0	0.0-10.2
	Mean	4.05	4.09	3.09	3.53	2.77	3.26	2.31	3.24
	Median	4.2	3.6	2.7	3.6	2.0	2.9	1.0	2.0
	SD	3.1	2.0	2.4	2.3	2.5	3.0	2.5	3.0
EC ³	Range	164-2630	160-1361	201-853	224-868	158-836	157-966	151-900	143-951
	Mean	620	444	456	405	386	430	404	427
	Median	510	336	381	330	329	405	350	377
	SD	538	286	206	204	196	220	217	233
Eh ⁴	Range	-83-327	-320-247	-268-281	-223-253	-427-253	-262-233	-151-262	-179-321
	Mean	138	135	109	63	84	76	102	77
	Median	167	202	166	98	130	116	147	151
	SD	107	149	159	131	157	136	129	156
Ca	Range	12.9-127.8	12.9-91.6	14.3-92.2	9.1-90.7	12.7-88.1	12.3-84.0	14.0-90.6	12.0-92.1
	Mean	57.4	45.9	41.8	38.1	40.6	41.2	38.5	42.8
	Median	56.9	34.3	38.1	31.7	30.8	40.4	28.7	33.8
	SD	31.3	24.1	19.9	21.2	22.5	20.0	21.8	23.3
Mg	Range	4.9-47.1	4.7-25.6	4.0-22.9	4.2-21.6	5.5-23.7	4.5-24.2	5.0-27.1	4.3-26.7
	Mean	15.6	12.2	12.2	10.9	11.0	11.0	11.8	11.7
	Median	14.7	10.8	11.7	9.3	8.6	10.2	10.4	9.8
	SD	9.5	6.0	5.6	4.8	5.2	5.0	6.3	6.3
Na	Range	6.2-320.6	7.1-136.6	7.0-72.1	6.4-74.7	7.4-64.5	7.2-43.2	6.3-56.1	6.6-44.7
	Mean	37.9	26.7	22.6	21.7	20.9	19.7	20.8	20.6
	Median	18.9	17.2	18.1	16.1	17.0	15.7	16.0	17.8
	SD	68.1	29.3	15.5	16.1	13.8	11.0	13.8	12.7
K	Range	0.8-27.6	0.9-14.0	0.8-9.8	0.8-7.9	0.9-4.9	1.1-6.4	1.0-7.5	0.8-6.7
	Mean	4.6	3.7	2.7	2.8	2.4	2.8	2.8	2.8
	Median	2.6	2.6	2.1	2.2	2.2	2.1	2.2	2.5
	SD	5.8	3.1	2.2	1.7	1.2	1.7	1.8	1.7
SiO ₂ (aq)	Range	3.5-25.3	2.7-24.4	1.1-22.2	0.7-23.5	4.4-27.6	6.5-23.7	0.0-24.1	1.8-22.9
	Mean	16.1	15.5	14.2	14.5	15.7	15.9	12.7	13.4
	Median	16.1	15.9	14.5	14.8	15.5	15.8	12.2	13.3
	SD	5.4	4.6	5.4	5.1	4.8	4.0	5.6	4.9
HCO ₃	Range	59-399	33-326	60-338	43-359	57-374	46-306	52-316	39-315
	Mean	169	144	137	148	147	138	128	138
	Median	153	120	126	124	125	124	115	117
	SD	84.5	77.3	68.0	78.3	81.7	66.6	68.2	74.1
Cl	Range	7.3-735.5	7.3-303.3	7.67-136.7	7.1-124.4	7.35-136.7	10.1-153.8	7.02-135.1	9.15-153.8
	Mean	102.0	64.2	58.4	40.4	42.3	46.8	45.7	46.9
	Median	56.5	29.7	42.8	27.8	30.1	41.9	34.5	36.6
	SD	163.0	80.3	44.0	33.1	33.5	36.4	35.8	40.3
NO ₃	Range	0.0-60.5	0.0-55.3	0.0-53.6	0.0-55.9	0.0-65.3	0.0-59.6	0.0-61.8	0.0-87.2
	Mean	11.9	12.2	10.9	11.0	13.4	12.7	12.9	14.0
	Median	2.7	4.0	2.7	1.7	3.8	3.9	3.2	6.5
	SD	18.8	18.8	16.1	17.7	19.6	18.2	18.6	22.8
SO ₄	Range	3.2-77.7	4.5-48.6	0.7-59.0	1.0-43.4	2.8-44.1	0.7-54.4	1.8-104.0	0.0-68.4
	Mean	22.3	16.5	17.4	14.8	15.6	15.9	17.8	15.6
	Median	17.8	12.9	14.4	11.7	12.8	13.5	13.5	13.5
	SD	18.6	12.1	13.4	10.4	11.8	12.3	21.7	14.9
TDS	Range	87-1409	100-709	104-447	107-451	95-454	93-449	93-453	87-508
	Mean	352	268	250	229	235	224	226	237
	Median	321	206	225	201	196	210	203	195
	SD	284	154	104	109	107	96	106	120

*The units of all parameters are in mg/L except; ¹T (°C), ²pH (-), ³EC (µS/cm), ⁴Eh (mv).

Table 2. The results of correlation analysis between groundwater quality components.

Parameter	Ca	Mg	Na	K	SiO ₂	HCO ₃	Cl	NO ₃	SO ₄	TDS
Ca	1.00									
Mg	0.84	1.00								
Na	0.51	0.65	1.00							
K	0.58	0.73	0.91	1.00						
SiO ₂	-0.01	-0.15	-0.28	-0.30	1.00					
HCO ₃	0.85	0.64	0.35	0.40	-0.02	1.00				
Cl	0.64	0.82	0.92	0.87	-0.25	0.36	1.00			
NO ₃	-0.20	-0.09	-0.21	-0.12	0.38	-0.36	-0.22	1.00		
SO ₄	0.43	0.37	0.52	0.57	-0.20	0.23	0.44	-0.10	1.00	
TDS	0.85	0.90	0.87	0.88	-0.14	0.64	0.92	-0.15	0.55	1.00

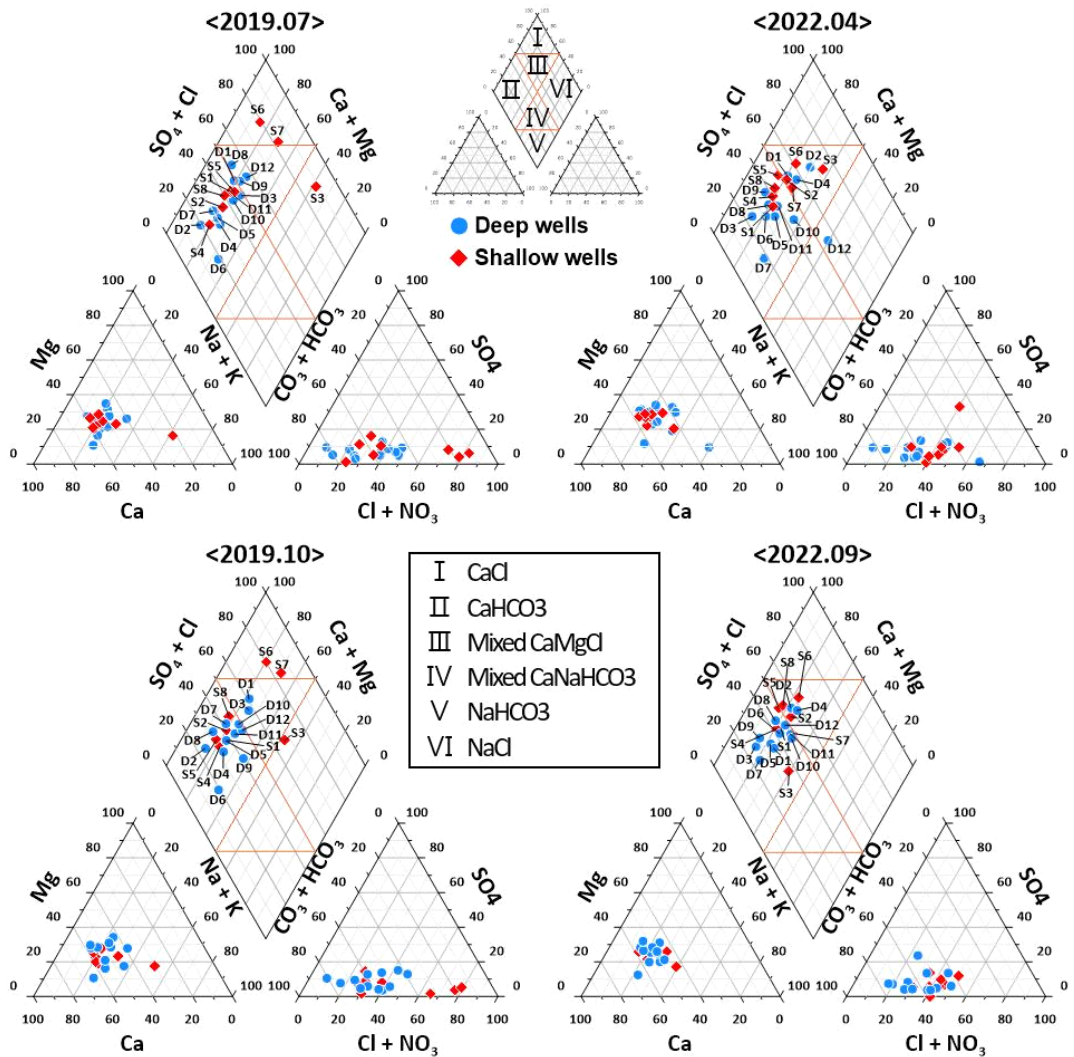


Fig. 4. Piper diagrams of groundwater samples analyzed during the study period.

로 보이는 S3 관정은 NaCl(VI) 유형으로 확인되었다. 이는 전술한 바와 같이 2018년에 연구지역에 해수 영향을 받는 홍성호로부터 공급된 관개용수와 같은 외부 요인이 지하수, 특히 천부 지하수에 유입되어 나타나는 것으로 보이며 연구 기간 동안 시간의 경과에 따라 점차 희석되어 그 영향이 줄어들고 있는 것으로 사료 된다.

3.2 토지이용에 따른 지하수 질산염 오염

지하수의 질산염은 가장 흔히 나타나는 오염물질로써 이전에는 유아의 청색증이 주로 인간 건강에 영향을 미치는 것으로 알려졌으나, 최근에는 임신 초기에 아기의 선천적 신경관 결손 유발 및 갑상선 질환과 대장암의 위험성을 증가시키는 발암성 특징도 가지는 것으로 보고되고 있다(Kleinjans *et al.*, 1991; Canter, 1997; Ward *et al.*, 2018). 따라서, 세계보건기구(WHO)와 우리나라에서도 질산성 질소의 먹는 물 수질기준을 10 mg/L 미만으로 제한하고 있다.

연구지역 지하수 질산염 농도에 영향을 많이 미치는 질소 성분을 포함하는 비료, 거름 등은 지표의 농경지, 거주지 등의 지표 토지이용에 좌우되는 것으로 예상된다. 또한, 이러한 오염물질의 지하 침투에 따른 질소 변환 과정과 밀접한 상관성을 보이는 것으로 생각된다. 따라서, 본 연구에서는 연구지역 지하수 관정이 분포하는 토지이용의 특성과 관정의 심도에 따른 질산염 성분의 분포 특성을 평가하여 보았다. 그림 5는 연구지역에 가장 많은 토지이용의 형태인 논과 밭으로 나누어 질산성 질소에 대한 박스도를 나타낸 것이다. 그림 5에서 볼 수 있는 바와

같이 2019~2022년까지 총 8차 시기에 대하여 대부분 논 지역의 지하수보다 밭 지역의 지하수에서 상대적으로 높은 질산성 질소가 관찰되었다. 이러한 논과 밭의 토지이용의 차이에 따른 지하수 질산염의 농도 차이는 일반적으로 흔히 나타나는 특징으로 알려져 있다. 논에서는 탈질에 의해 지하수의 질산성 질소의 농도가 감소할 수 있으며, 또한 논에 투입되는 비료량은 밭보다 상대적으로 적고 상부 점토층은 투수성이 좋지 않아 지하 침투의 영향이 적게 나타난 것으로 추정된다(Kim *et al.*, 2008). 이에 반해, 밭은 비료의 투입량이 논보다 상대적으로 많고 작물을 키우기 위해 투수성이 좋은 환경을 유지하기 때문에 질소 성분이 지하수 침투가 증가하여 지하수 질산염의 영향이 증가한 것으로 판단된다.

Kim *et al.* (2015)는 국가지하수측정망의 수질특성에 대한 연구에서 인위적 오염성분의 영향을 나타내는 질산성 질소의 농도를 3 mg/L 이상이라고 분석한 바 있다. 따라서, 이번 연구에서도 지하수 질산성 질소 3 mg/L를 기준으로 지하수 관정의 심도별로 그 특징을 살펴본 결과, 천부 지하수 3개소(S5, S6, S8), 심부 지하수 5개소(D1, D3, D4, D6, D10)의 관정에서 인위적인 오염에 의한 영향으로 보이는 높은 질산성 질소 농도가 관찰되었다(그림 6). 이들 관정 중 S5를 제외하고 모두 토지이용이 밭으로 분류되었다. An *et al.* (2022)는 질산성 질소 농도의 증가 추세를 주변 농업 단지와 축산 활동에 의한 영향으로 분석한 바 있는데, 이와 마찬가지로 연구지역 해당 관정들의 높은 질산성 질소 농도는 주변의 인간 및 농경 활동(거주지 또는 소규모 과수원 등)에

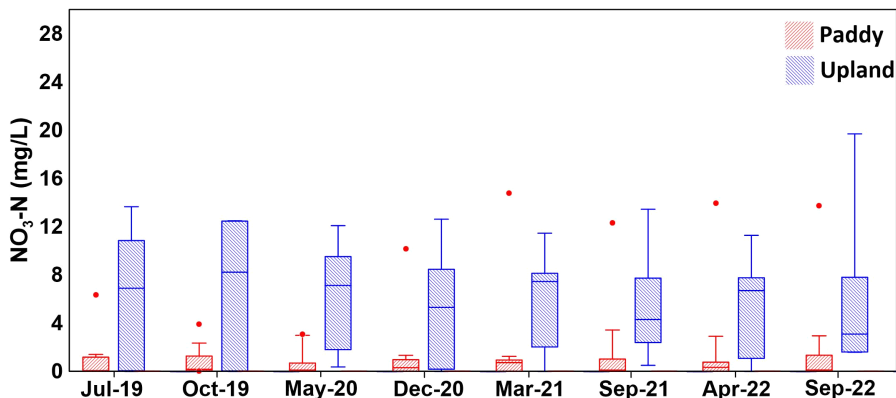


Fig. 5. Variation of NO₃-N during the monitoring period by land use.

의한 오염원의 영향이 주된 원인으로 파악된다. 일부 관정에서는 특정 시기를 기점으로 급격히 오르거나 감소하는 경향을 보이기도 하였는데, 이는 관정이 위치한 지점의 토지이용 변화 등에 기인한 것으로 여겨진다. 예를 들어, D3 관정은 3차 시기(2020년 5월)를 기점으로 질산성 질소가 6.90~8.24 mg/L에서 2.40 mg/L 이하로 급격하게 낮아졌는데, 이는 D3의 토지 이용이 질산성 질소의 발생 가능성이 높은 밭에서 초지로 변화된 것과 관련이 있을 것으로 생각된다. 이와는 달리 D4 관정은 2차 시기인 2019년 10월까지 질산성 질소가 0.05 mg/L 이하로 검출되다가 3차 시기인 2020년 5월부터는 7.14 mg/L 이상의 비교적 높은 농도의 질산성 질소가 검출되고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 S5 관정의 경우에도 4차 시기인 2020년 12월부터 먹는물 수질기준인 10 mg/L를 초과하여 10.17~14.76 mg/L의 높은 질산성 질소를 나타내었다.

3.3 분산 분석(ANOVA)을 이용한 지하수 심도별 및 시기별 특성 비교

지하수 수질 특성은 계절(건기와 우기)과 시간의 변화에 따라 달라질 수 있으며 지하수 환경의 깊이에 따라서도 차이가 발생할 수 있다(Cha and Seo, 2020). 금번 연구에서는 이러한 지하수 수질의 변화가 시간(계절, 연도)과 관정의 깊이에 따라서 달라지는지를 지하수 성분별 박스도를 이용하여 비교하고 분산 분석(ANOVA)과 같은 통계적 방법으로 검증

하고자 하였다.

그림 7은 시간의 변화 즉 연도별 변화 추이와 계절별 차이에 대한 천부와 심부 지하수의 10개 성분(TDS, Ca, Mg, Na, K, SiO₂, HCO₃, Cl, NO₃, SO₄)에 대한 수질 분석 결과를 성분별로 박스도에 도시하여 비교한 것이고, 표 3은 각 그룹 간의 평균 및 중간값을 나타낸 것이다. 그림 7a는 2019~2022년 가을철(9~10월)에 3차례에 걸쳐 수행된 10개 성분에 대한 분석 결과를 나타낸 것으로 해마다 성분별 변동 폭은 다소 차이가 있으나 연구기간 동안 개별 성분의 변화 추이는 크게 보이지 않음을 알 수 있었다. 다만, 천부 관정의 경우 질산염의 평균 농도는 연별 3.3, 4.2, 5.1 mg/L로 소폭 증가하는 경향을 나타내며 해수의 영향을 특징적으로 보여주는 Cl의 평균 농도는 2019년에 106.2 mg/L, 2021~2022년에 63.8~67.1 mg/L의 큰 폭으로 하강하는 것을 알 수 있었다. 전체적으로는 모든 성분에서 천부 지하수가 심부 지하수보다 상대적으로 높은 평균 및 중간값 농도를 보여주었다. 그림 7b는 2022년 4월과 9월의 계절별 수질 특성을 비교한 결과를 보여주는 것이다. 그림 7b에서 볼 수 있는 바와 같이 천부와 심부 지하수 모두에서 계절에 따른 수질의 큰 차이는 나타나지 않았고, 평균 농도 및 중간값 또한 유사한 값을 나타내었다(표 3). 다만, 앞서 그림 7a에서도 알 수 있는 것처럼 천부 지하수는 심부 지하수에 비해 대부분 성분의 농도가 상대적으로 높고 범위도 더 폭 넓게 나타났으며, 이는 천부 지하수가 지표의 농경

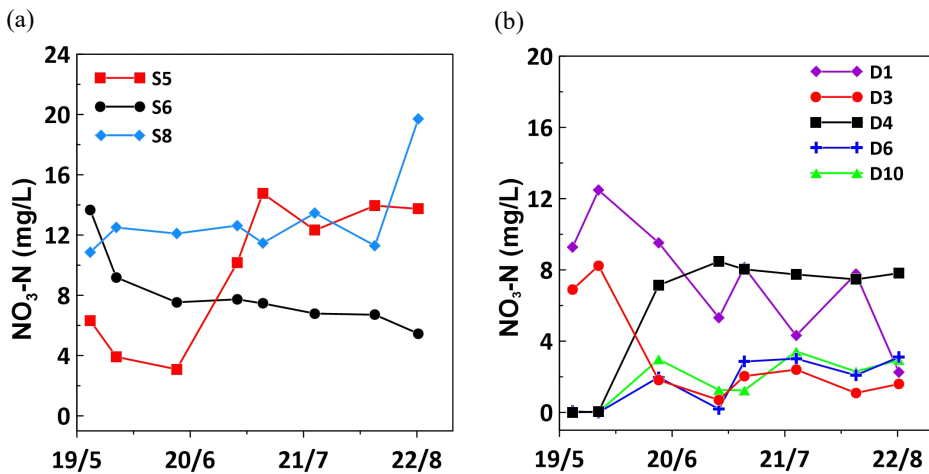


Fig. 6. Changes in NO₃-N over time. (a) shallow groundwater, (b) deep groundwater.

활동과 오염원에 의해 쉽게 영향을 받기 때문으로 사료된다.

앞서 수질 성분에 대한 박스도를 통해 고찰한 계절별, 연도별 및 심도별 지하수 수질의 차이가 통계적으로 유의한지 평가하기 위하여 분산 분석(ANOVA)을 수행하였다. 표 4는 연구 방법에서 제시된 분산 분석을 위한 3개 귀무가설에 대한 분산 분석(신뢰수준 95%)의 결과를 나타낸 것이다. 표 4에서 O는 P-value가 0.05 보다 큰 것으로 해당 귀무가설이 신뢰수준 95% 내에서 유의하다는 것을 나타내며 X는 P-value가 0.05 보다 작아 해당 귀무가설이 유의하지 않은 것을 나타낸다. 첫 번째 가설인 천부와 심부 지하수 두 그룹의 수질 성분이 동일하다는 가설에 대해서는 SiO₂를 제외하고 나머지 9개 성분(TDS, Ca, Mg, Na, K, HCO₃, Cl, NO₃, SO₄)에서 모두 다르지 않다는 귀무가설의 기각, 즉 천부와 심부 지하수 수

질은 다르다는 결론을 얻을 수 있었다. 이는 앞서 박스도(그림 7)의 결과와 거의 부합하는 것으로 천부 지하수가 심부 지하수보다 상대적으로 지하수 수질에 변화를 유발하는 농경 및 인간 활동 등에 의한 오염물질이나 영양염 성분의 유입이 활발하게 발생하기 때문인 것으로 보인다. 반면, 같은 계절에 대한 연도별 수질 성분은 표 4에서 볼 수 있는 바와 같이 2019년 10월, 2021년 9월 및 2022년 9월의 지하수 수질 결과가 서로 같다는 두 번째 귀무가설이 채택되어 연도별 차이가 존재하지 않는다는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 2022년 4월과 9월의 계절별 수질에 차이가 없다는 세 번째 귀무가설도 채택되어 연구지역에서 계절별 지하수 수질의 차이가 보이지 않는다는 결론을 얻었고, 이러한 결과들은 신뢰수준 90%에서의 분산 분석에서도 동일한 결과를 나타냈다.

따라서, 박스도와 분산 분석(ANOVA)를 이용한 지

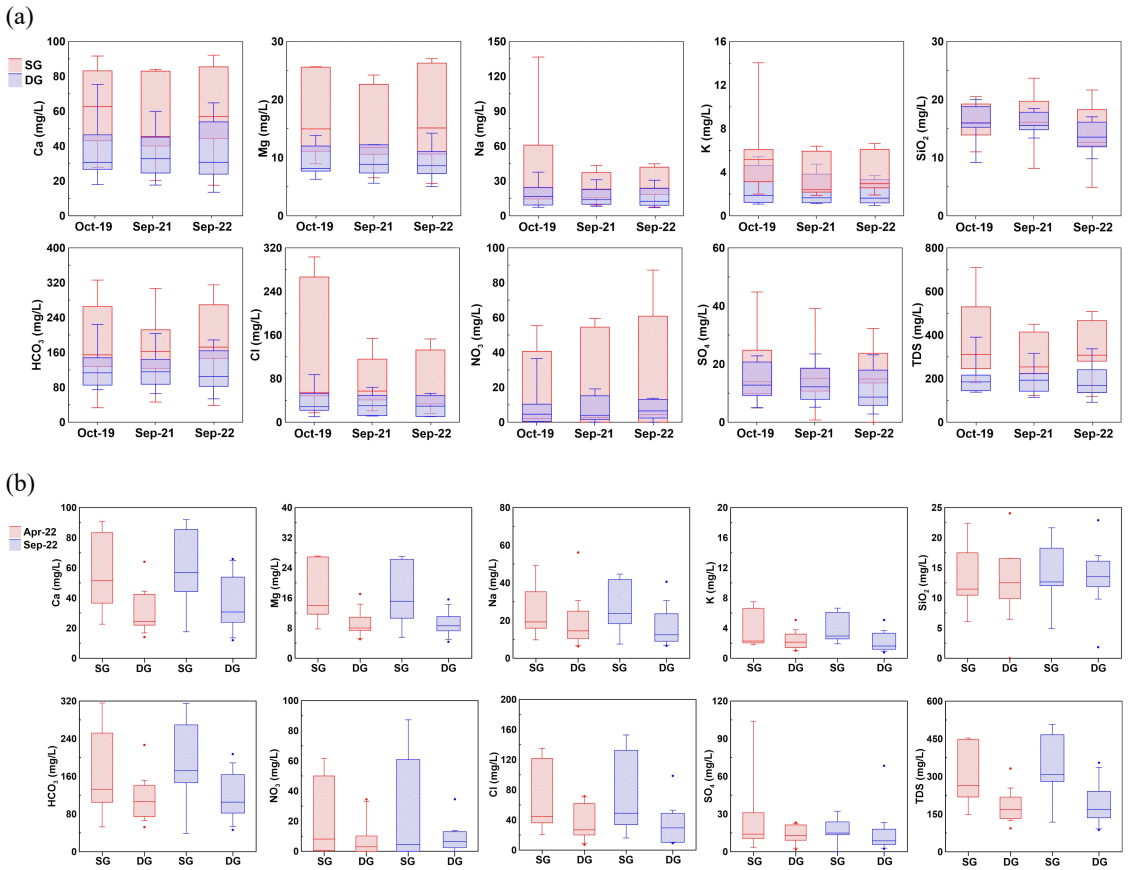


Fig. 7. (a) Seasonal and (b) annual comparison of groundwater quality using box plots.

Table 3. Mean and median of groundwater quality parameters over group of time and depth.

Parameter	Month-year		Oct-19	Sep-21	Apr-22	Sep-22
Ca	Mean	SG	60.0	50.3	52.6	55.4
		DG	36.5	35.2	29.1	34.4
	Median	SG	62.6	45.4	51.4	56.9
		DG	30.6	32.7	24.4	30.7
Mg	Mean	SG	16.2	14.0	16.1	15.8
		DG	9.6	9.0	9.0	9.0
	Median	SG	14.9	11.7	14.0	15.1
		DG	8.1	8.9	8.0	8.6
Na	Mean	SG	39.4	24.9	24.4	27.0
		DG	18.2	16.2	18.4	16.3
	Median	SG	24.2	22.9	19.3	23.8
		DG	16.6	13.9	14.5	12.5
K	Mean	SG	5.4	3.5	3.6	3.8
		DG	2.6	2.3	2.3	2.2
	Median	SG	5.2	2.4	2.3	2.9
		DG	1.9	1.6	2.1	1.6
SiO ₂ (aq)	Mean	SG	15.9	16.4	13.1	13.5
		DG	15.3	15.6	12.4	13.4
	Median	SG	16.1	16.1	11.5	12.7
		DG	15.9	15.5	12.5	13.5
HCO ₃	Mean	SG	172.9	165.3	155.8	177.1
		DG	124.5	120.0	110.0	112.5
	Median	SG	154.6	162.1	132.5	172.3
		DG	113.3	115.6	106.2	105.3
Cl	Mean	SG	106.2	66.3	63.8	67.1
		DG	36.2	33.9	33.6	33.4
	Median	SG	54.7	57.1	44.4	48.8
		DG	28.5	30.3	26.9	29.5
NO ₃ -N	Mean	SG	3.3	4.2	4.5	5.1
		DG	2.4	2.0	1.9	1.9
	Median	SG	0.5	0.6	1.8	1.0
		DG	1.0	0.9	0.7	1.5
SO ₄	Mean	SG	17.4	16.0	25.6	16.2
		DG	15.8	15.9	12.7	15.2
	Median	SG	13.9	15.1	14.0	14.9
		DG	12.8	12.2	12.8	8.6
TDS	Mean	SG	361.6	275.3	296.1	311.4
		DG	206.1	190.1	180.1	187.5
	Median	SG	310.7	253.5	263.4	307.3
		DG	184.9	192.7	167.6	168.3

Table 4. The results of ANOVA for groundwater quality data in the study area.

	Depth	Year			Season		
		Oct-19 = Sep-21 = Sep-22			Apr-22 = Sep-22		
		SG = DG (P ¹)	All (P)	SG (P)	DG (P)	All (P)	SG (P)
Ca	X ² (0.00)	O(0.80)	O(0.72)	O(0.96)	O(0.55)	O(0.83)	O(0.44)
Mg	X(0.00)	O(0.80)	O(0.79)	O(0.89)	O(0.96)	O(0.94)	O(0.99)
Na	X(0.00)	O(0.47)	O(0.51)	O(0.87)	O(0.96)	O(0.71)	O(0.68)
K	X(0.00)	O(0.33)	O(0.31)	O(0.81)	O(0.98)	O(0.84)	O(0.82)
SiO ₂	O ³ (0.56)	O(0.18)	O(0.39)	O(0.47)	O(0.65)	O(0.87)	O(0.68)
HCO ₃	X(0.00)	O(0.96)	O(0.96)	O(0.86)	O(0.66)	O(0.64)	O(0.90)
Cl	X(0.00)	O(0.53)	O(0.50)	O(0.96)	O(0.92)	O(0.89)	O(0.99)
NO ₃	X(0.00)	O(0.96)	O(0.85)	O(0.91)	O(0.86)	O(0.85)	O(1.00)
SO ₄	X(0.00)	O(0.98)	O(0.96)	O(0.99)	O(0.71)	O(0.45)	O(0.65)
TDS	X(0.00)	O(0.52)	O(0.50)	O(0.84)	O(0.77)	O(0.81)	O(0.82)

*Statistical analysis in 95 % confidence interval;
P¹ : P-value; X² : no meaningful; O³ : meaningful

하수 수질의 동일 시기에 대한 연도별, 계절별 및 심도(심부와 천부) 지하수에 대한 비교 분석을 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 연구지역의 지하수는 초기에 해수의 영향을 일부 받았으나 연도별 및 계절별로는 큰 차이를 보여주지 않는 것으로 보이나, 지하수 심도에 따라서는 수질의 차이가 뚜렷하게 나타남을 알 수 있었다. 연구지역 지하수가 이렇게 시기별로 수질의 차이를 크게 보이지 않는 것은 수질 오염의 변화를 유발하는 비닐하우스, 축사 등이 그다지 많지 않고 토지이용의 변화가 크게 발생하지 않기 때문으로 보인다. 다만, 농경 활동에 직접적으로 영향을 받는 천부 지하수는 심부 지하수보다 상대적으로 수질의 변화가 높게 나타난다는 점은 확인할 수 있었다.

3.4 비모수 분석법을 이용한 지하수 수질의 경향성 분석

연구 기간(2019~2022년) 동안 총 8회에 걸쳐 분석된 지하수 수질 자료를 이용하여 성분별로 경향성 분석을 수행하였다. 본 연구에서는 연구 방법에 기술한 바와 같이 Mann-Kendall 검정법과 Sen's 경향성 분석법을 이용하여 연구지역 내 총 20개 관정의 10개 수질 항목에 대한 경향성 분석을 실시하였다.

Mann-Kendall 검정법은 분석 대상 수질 성분의 농도가 지속적으로 증가 또는 감소의 추세를 보이는

지의 여부만을 판단하는 방법으로 연구지역 지하수에 적용한 평가 결과는 표 5에 나타나 있다. 표 5에서 볼 수 있는 바와 같이 모든 관정에 대해 증가 혹은 감소의 추세를 보이지는 않는 것으로 평가되었다. 그러나, 전반적으로 천부 지하수에서 심부 지하수보다 증감의 경향성을 더 잘 보여주었다. Mann-Kendall 경향성 분석 결과, 1개 이상 항목에서 증감의 경향성이 나타나는 관정은 모두 13개소(천부 5개(S2, S3, S4, S6, S7), 심부 8개(D1~D7, D10)이었으며, 경향성이 뚜렷하게 관찰되는 수질 성분(증감 관정수)은 TDS(+2/-7), Ca(+2/-5), Mg(+2/-3), Na(+1/-6)와 Cl(+4/-3)이며, 이외에 HCO₃(+1/-2), NO₃(+1/-2), SO₄(+1/-2), SiO₂(+0/-3)에서도 일부 경향성이 확인되었다. 관정별의 경우, S2, D5는 TDS, Ca, Cl에서 공통적인 상승 추세를 나타냈고, 그 외 S2는 Mg, Na에서 상승 추세, D5는 K, HCO₃에서 상승 추세를 확인하였다. S3, S6, S7, D1, D4, D6는 대부분 TDS, Ca, Mg Na에서 공통적인 하강 추세를 나타냈고, 천부 관정(S3, S6, S7)에서는 추가적인 Cl의 하강 추세, 그 외 일부 관정(S4, S6, S7, D1, D4, D6, D7)에서 K, HCO₃, NO₃, SO₄, SiO₂ 등의 하강 추세를 확인하였다. 반면, 천부 관정인 S1, S5, S8과 심부 관정인 D8, D9, D11, D12는 모든 수질 성분에서 경향성이 나타나지 않았다.

Mann-Kendall 검정법을 이용한 경향성 분석으로부터 증감의 경향성을 잘 보여주는 지하수 관정을 10

Table 5. Result of trend analysis according to the Mann-Kendall test.

Group	Name	TDS	Ca	Mg	Na	K	Cl	HCO ₃	NO ₃	SO ₄	SiO ₂
SG	S1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	S2	▲	▲	▲	▲	-	▲	-	-	-	-
	S3	▽	-	-	▽	▽	▽	-	-	-	-
	S4	-	-	▲	-	-	▲	-	-	▽	-
	S5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	S6	▽	▽	▽	▽	-	▽	-	▽	-	▽
	S7	▽	▽	▽	▽	-	▽	-	-	-	-
	S8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DG	D1	▽	▽	▽	▽	-	-	▽	▽	-	-
	D2	-	-	-	-	-	▲	-	-	-	-
	D3	▽	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	D4	▽	▽	-	▽	-	-	▽	-	-	▽
	D5	▲	▲	-	-	▲	▲	▲	-	-	-
	D6	▽	▽	-	▽	-	-	-	▲	▽	-
	D7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	▽
	D8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	D9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	D10	-	-	-	-	-	-	-	-	▲	-
	D11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	D12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

*▲ (increasing), ▽ (decreasing), Statistical analysis in 95% Confidence interval

개소(천부 S2, S3, S4, S6, S7; 심부 D1, D2, D4, D5, D6)를 선택하여 7개 수질 성분(TDS, Ca, Mg, Na, Cl, HCO₃, NO₃)에 대한 Sen's slope 분석을 실시하였으며, 그 결과는 그림 8에 나타나 있다. 그림 8에서 5개 항목(TDS, Ca, Mg, Na, Cl)에 대하여 6개 관정(S3, S6, S7, D1, D4, D6)은 대체로 하강 추세를 나타내었으나, 2개 관정(S2, D5)은 상승 추세를 보여주었다(그림 8). 감소 경향성을 보여주는 관정들은 대체로 초기에 높았다가 점차 안정화되어 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있는데, 이는 일시적인 외부 유입원(홍성호 해수 영향)에 영향을 받아 이온의 농도가 급격하게 증가했다가 희석되어 감소되고 안정화되는 것에 기인하는 것으로 판단된다. 따라서, 2018년의 농업용수 관개에 따른 지하수의 해수에 대한 영향은 2020년을 지나면서 현저히 감소하여 2022년에는 이의 영향이 거의 나타나지 않았다. 아울러 이러한 현상은 심부 지하수보다 천부 지하수에서 더욱 두드러졌다. Lee *et al.* (2021)은 농업용 지하수 사용 증가에 따른 영향을 전기전도도(EC)와 pH 등과 같은 인자들로 그

영향을 평가하였는데, 본 연구에서는 연구지역의 지하수 수질 변화에 대한 경향성을 지시할 수 있는 성분으로 TDS, Ca, Mg, Na, Cl이 이용될 수 있음을 알 수 있었다. 또한, 질산염 오염의 변동 특성에서도 확인된 3개(S6, D1, D6) 관정에 대한 Sen's slope 분석 결과도 증감의 경향성이 뚜렷하게 나타남을 알 수 있었다.

Sen's 경향성 분석 결과에 따라 경향성을 지시하는 주요 5개 성분에 대하여 증가 또는 감소의 경향을 잘 보여주는 천부와 심부 지하수 관정 8개를 선택하여 그림 9에 나타내었다. 그림 9a에서 볼 수 있듯이, 천부 지하수(S3, S6, S7)에서는 그 기울기가 초기에 급격하게 감소했다가 완만해지는 특성을 보이지만 심부 지하수(D1, D4, D6)에서는 천부 지하수에 비해 기울기가 완만하게 변화함을 알 수 있다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 천부 지하수가 외부 환경의 변화 요인에 민감하게 반응하기 때문으로 판단된다. 증가 추세를 보이는 두 개의 관정(S2, D5)의 변동 요인은 명확하게 파악하기는 어렵지만, 주변의 점

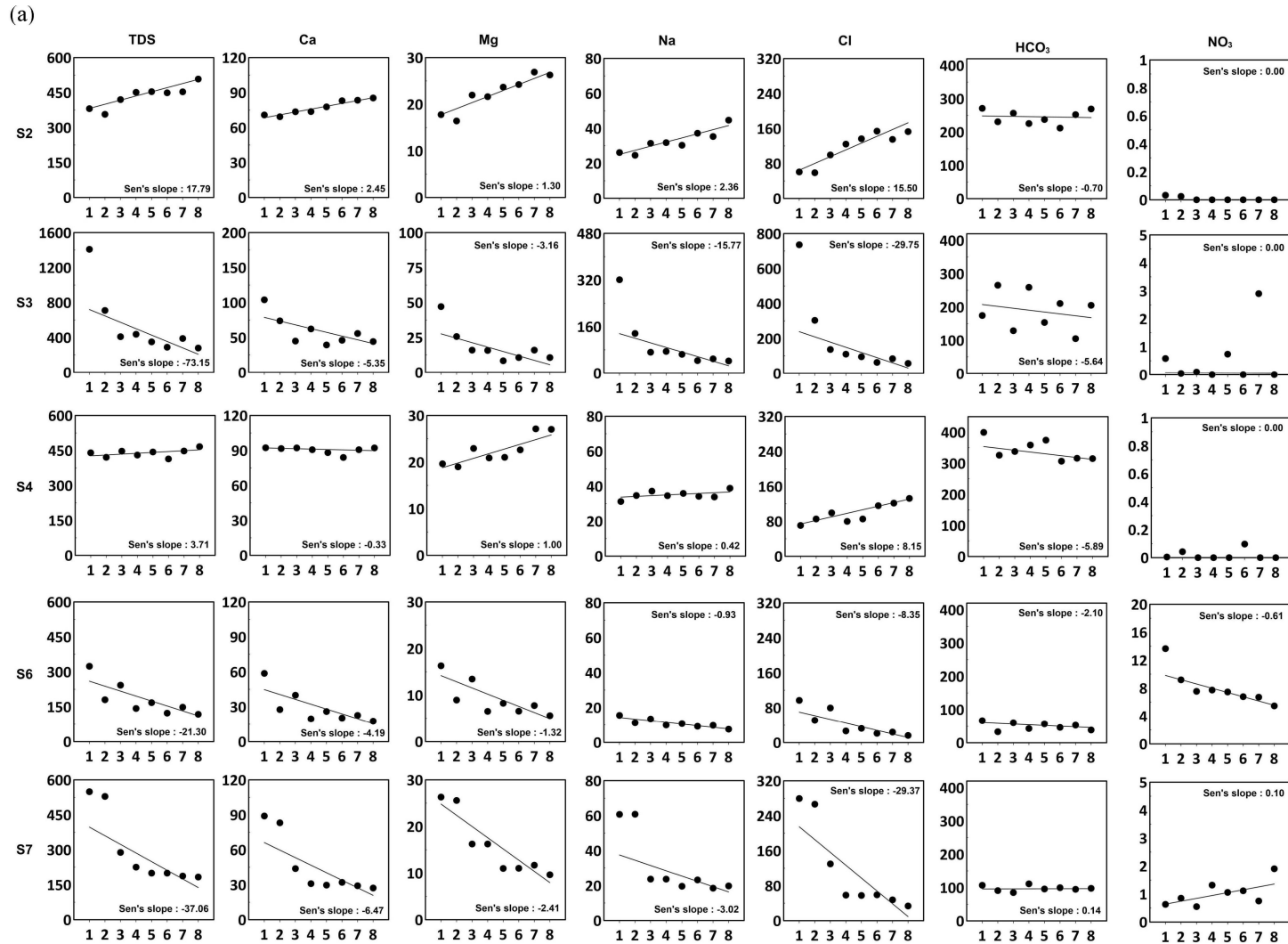


Fig. 8. The results of Sen's slope analysis; X is sample numbers, Y is Sen's estimate. The trend of (a) shallow groundwater wells, (b) deep groundwater wells.

(b)

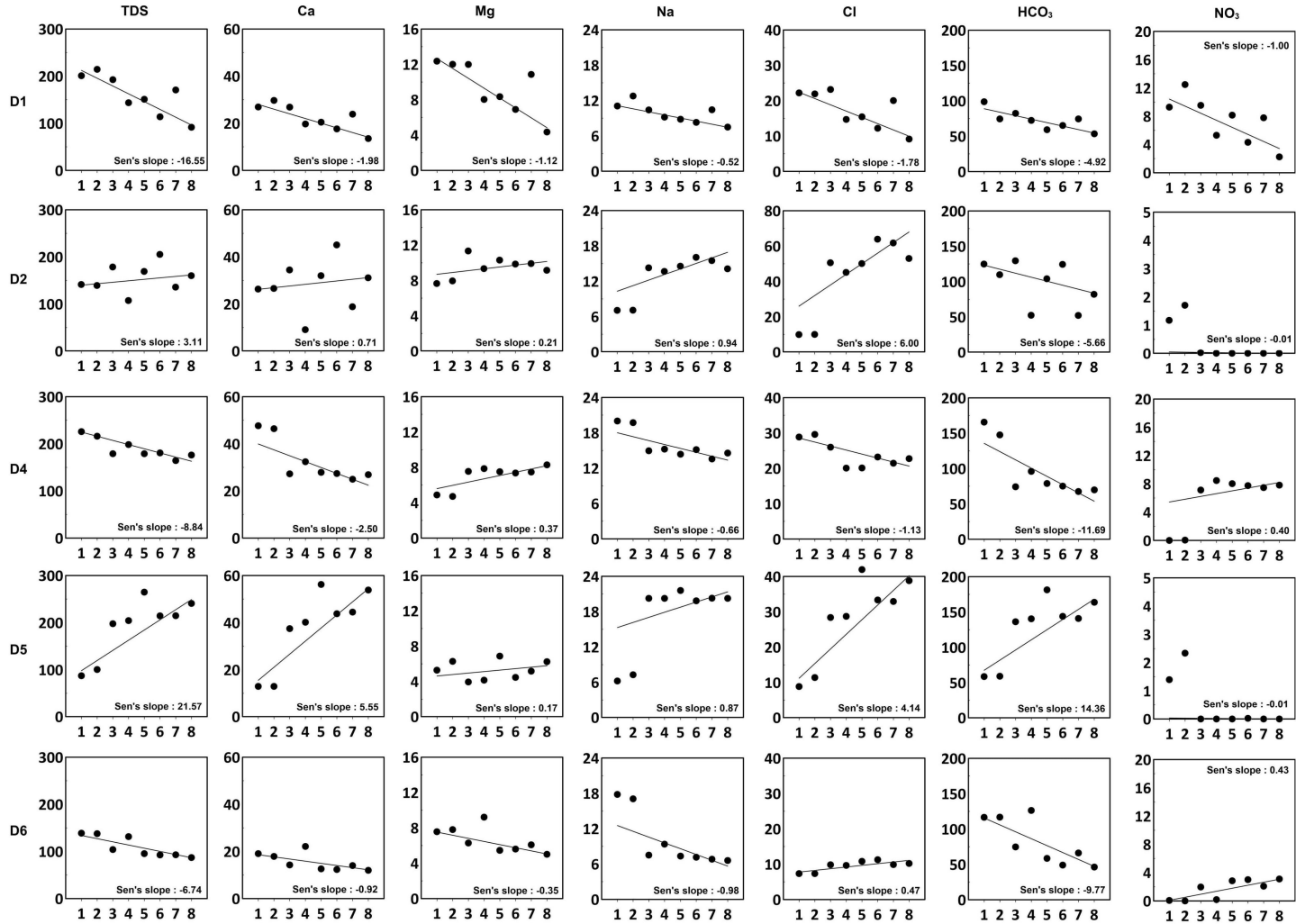


Fig. 8. continued.

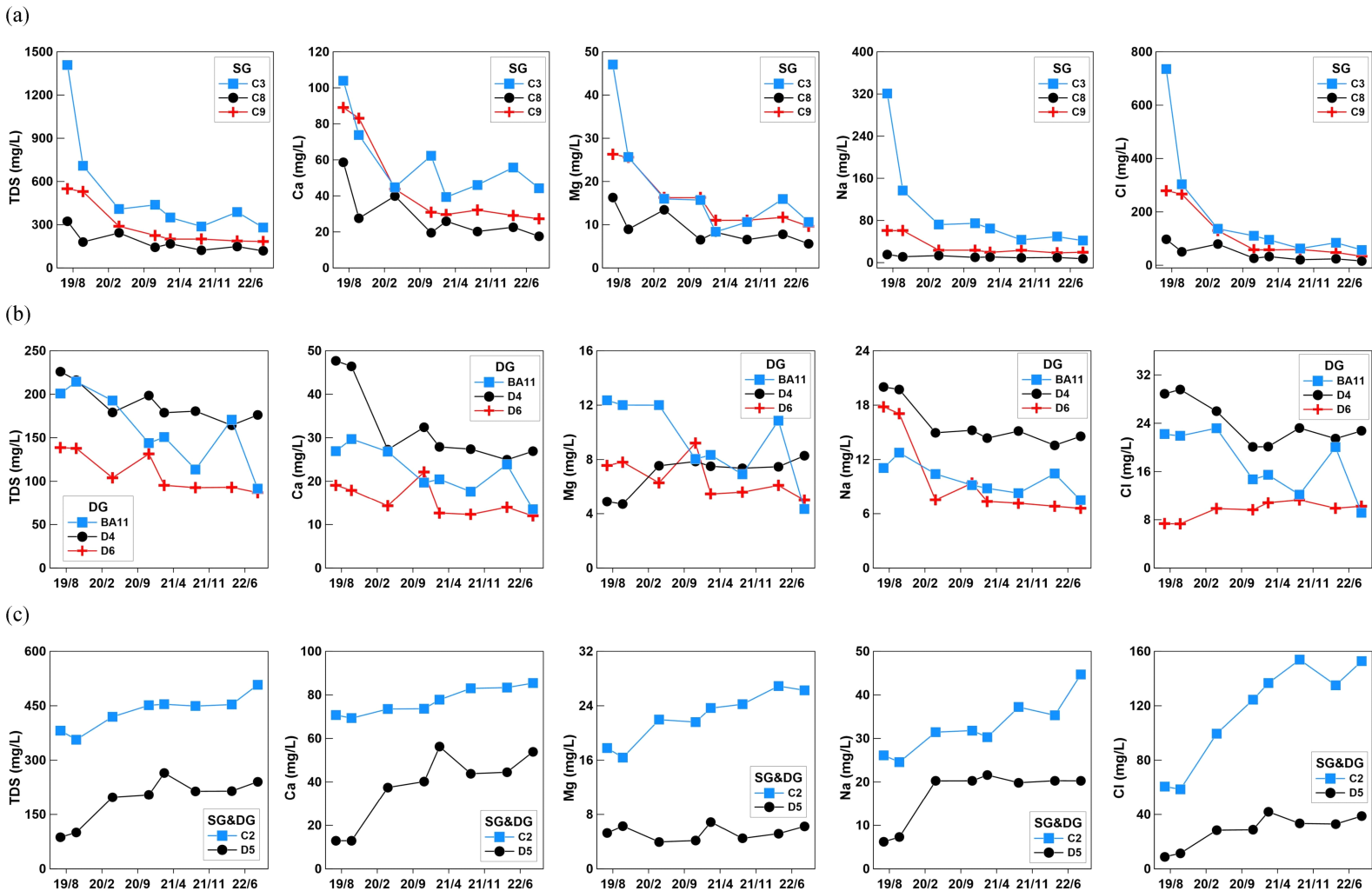


Fig. 9. Characteristics of changes in groundwater composition over time. (a) Shallow groundwater showing a decreasing trend, (b) deep groundwater showing a decreasing trend, (c) groundwater showing an increasing trend.

오염원(축사) 및 비점오염원(밭, 과수원 등 경작지)에 의한 영향이 지속적으로 영향을 주고 있는 것으로 보인다. 실제로 S2 근처에는 축사가 있어 오염원의 주원인으로 추정되고 있다. D5의 경우에는 TDS, Ca, Na 성분이 2019년 초기에는 현저히 낮은 값을 보이다가 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다는데, 이는 일정 시기 이후부터 관정 주변에서 특별한 토지이용 변화 등에 따른 오염의 요인에 의한 것으로 파악된다.

연구지역의 지하수에 대한 경향성 분석은 외부 오염원의 유입이나 농경 활동의 증가 등이 지하수 수질에 얼마나 지속적으로 영향을 미치는지를 평가할 수 있는 수단으로 활용될 수 있을 것이다. 또한, 이러한 영향을 평가하는데 TDS, Ca, Mg, Na, Cl 등이 유용한 지시자 성분으로 이용될 수 있을 것이다. 다만, 이러한 지시자는 지하수 수질 환경에 영향을 미치는 오염 요인이 무엇인지를 분석하여 평가하는 것이 전제될 필요성이 있다.

4. 결론

연구지역에 대한 지하수 수질 모니터링을 수행한 결과, 주요 용존 성분들(TDS, Ca, Mg, Na, Cl)이 가장 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이와 같은 지하수 수질 변화의 주요 원인은 2018년 가뭄 시 염도가 높은 홍성호로부터 일시적으로 공급된 관개 용수와 지속적인 농경 활동의 영향에 의한 것으로 사료되며, 홍성호 관개용수의 영향은 이후 점차 줄어들고 있으며 현재는 거의 나타나지 않고 있었다. 연구지역의 질산성 질소는 전체 20개 관정 중 8개(40%) 관정에서 인위적인 오염에 의한 영향이 나타났으며, 연구기간 동안 4개(20%) 관정에서 먹는 물 수질기준을 초과하였다. 이러한 질산성 질소의 특징은 심도보다는 토지 이용과의 연관성이 높았으며, 논 지역보다는 밭 지역에서 질산성 질소 농도가 우세하였다. 이는 논 지역에서의 탈질 작용에 의한 질산염의 제거 및 밭 지역의 좋은 투수성으로 인해 농경활동(비료 등)에 의해 지하수로 유입되는 질소 성분의 영향으로 여겨진다.

연구지역 지하수 수질의 변화에 영향을 미치는 요인을 알아보기 위하여 심도별, 계절별 및 연도별 수질 분석 결과를 평가하였다. 수리지화학적 특성을 고찰한 결과, 지하수 관정들은 심도에 따라 수질 변화

가 뚜렷한 차이를 보여주었으며 천부 지하수가 심부 지하수보다 대부분 성분들의 농도가 상대적으로 높았다. 이러한 특성은 분산 분석(ANOVA)에 의해서도 확인되었으며, SiO₂를 제외한 9가지(TDS, Ca, Mg, Na, K, HCO₃, Cl, NO₃, SO₄) 성분에서 수질의 차이가 유의하다는 것을 확인할 수 있었다. 이는 천부 지하수가 지표의 농경 활동 및 기타 오염원과 같은 주변 환경에 노출되어 쉽게 영향을 받는 것으로 보인다. 그러나, 시간(계절별·연도별)에 따른 지하수 수질은 연구기간 동안 큰 차이를 보이지 않았고, 통계적으로 유의미한 결과가 도출되지 않았다.

지하수 수질의 장기간 변화 분석을 위한 비모수 추세분석법인 Mann-Kendall 검정과 Sen's slope 분석을 수행한 결과, 전체 20개 지하수 관정 중 10개의 관정(50%, 천부 5개와 심부 5개)에서 증가 또는 감소의 경향성을 보여주었다. 성분별로는 TDS, Ca, Mg, Na, Cl에서 증감의 경향성이 두드러졌으며, K, HCO₃, NO₃, SO₄, SiO₂에서는 미비한 경향성이 나타났다. 감소 경향성을 보이는 대부분의 천부 관정들은 초기에 높은 농도를 보이다가 점차 안정화 되어 일정하게 유지되며 이는 앞서 언급한 홍성호 관개의 영향이 점차 줄어드는 것과 관계가 있는 것으로 보인다. 경향성 분석을 통한 연구 결과, 연구지역의 지하수는 현재는 매우 안정적인 수질을 유지하며 큰 변화 요인은 없는 것으로 보인다.

연구지역의 지하수 수질의 장기 분석 결과를 이용한 수리지화학적 특성 평가, 분산 분석 및 경향성 분석 기법은 농촌 지역의 지하수 수질의 변화를 평가하고 예측하는데 유용한 수단으로 활용될 수 있을 것으로 보인다. 특히, 분산 분석과 경향성 분석에서 TDS, Ca, Mg, Na, Cl 등은 지하수의 변화를 확인할 수 있었던 유용한 지시자로 활용될 수 있음을 확인할 수 있었다. 따라서, 향후 이러한 기법들을 활용하여 지하수 수질의 악화를 사전 예방하고 깨끗한 지하수 환경과 용수 공급을 가능하게 할 수 있을 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 재원으로 환경산업기술원의 2022년 수요대응형 물공급 서비스사업의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- An, H.S., Hyun, Y.J., Lee, S.J., Kim, R.H., Cho, H.K. and Jeon, S.W., 2022, Trend analysis for the nitrate-nitrogen and chloride data of the National Groundwater Quality Monitoring Network for systematic groundwater quality management. *Journal of the Geological Society of Korea*, 58, 101-116 (in Korean with English abstract).
- An, H.S., Jeon, S.W., Lee, S.J., Hyun, Y.J., Yoon, H.S. and Kim, R.H., 2015, Suggestion of a groundwater quality management framework using threshold values and trend analysis. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 20, 112-120 (in Korean with English abstract).
- Atikul Islam, M., Zahid, A., Rahman, M.M., Rahman, M.S., Islam, M.J., Akter, Y., Shammi, M., Bodrud-Doza, M. and Roy, B., 2017, Investigation of groundwater quality and its suitability for drinking and agricultural use in the south central part of the coastal region in Bangladesh. *Exposure and Health*, 9, 27-41.
- Battle Aguilar, J., Urban, P., Dassargues, A. and Brouyère, S., 2007, Identification of groundwater quality trends in a chalk aquifer threatened by intensive agriculture in Belgium. *Hydrogeology Journal*, 15, 1615-1627.
- Canter, L.W., 1997, Nitrates in groundwater. Lewis publishers, Boca Raton, USA, 15-18.
- Cha, S.Y. and Seo, Y.G., 2020, 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 Technology*, 26, 39-54.
- Frollini, E., Preziosi, E., Calace, N., Guerra, M., Guyennon, N., Marcaccio, M., Menichetti, S., Romano, E. and Ghergo, S., 2021, Groundwater quality trend and trend reversal assessment in the European Water Framework Directive context: an example with nitrates in Italy. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 22092-22104.
- Ha, K.C., Lee, E.H., An, H.W., Kim, S.H., Park, C.H., Kim, G.B. and Ko, K.S., 2021, Evaluation of seasonal groundwater quality changes associated with groundwater pumping and level fluctuations in an agricultural area, Korea. *Water*, 13, <https://doi.org/10.3390/w13010051>.
- Hashim, M., Nayan, N., Setyowati, D.L., Said, Z.M., Mahat, H. and Saleh, Y., 2021, Analysis of water quality trends using the Mann-Kendall test and Sen's estimator of slope in a tropical river basin. *Pollution*, 7, 933-942.
- IPCC, 2022, *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jeon, C.H., Roza, M., Lee, J.Y., Kim, H.J., Kim, C.S., Kim, B.R., Kim, J.W., Kim, R.H. and Lee, S.W., 2020a, Countrywide groundwater quality trend and suitability for use in key sectors of Korea. *Water*, 12, <https://doi.org/10.3390/w12041193>.
- Jeon, H.T., Hamm, S.Y., Choi, E.G., Kim, H.K., Kim, M.S., Park, K.H. and Lim, W.R., 2020b, Chemical characteristics of shallow groundwater in an agricultural district of Hyogyo-ri, area, Chungnam Province. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 41, 630-646 (in Korean with English abstract).
- Jyrkama, M.I. and Sykes, J.F., 2007, The impact of climate change on spatially varying groundwater recharge in the grand river watershed (Ontario). *Journal of Hydrology*, 338, 237-250.
- Kaown, D., Hyun, Y., Bae, G.O., Oh, C.W. and Lee, K.K., 2012, Evaluation of spatio-temporal trends of groundwater quality in different land uses using Kendall test. *Geosciences Journal*, 16, 65-75.
- Kendall, M.G., 1975, Rank correlation methods. Charles Griffin, London, 202 p.
- KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), KRC (Korea Rural Community Corporation), GeoGreen21, 2019, Annual performance and plan for well network system technology development against drought: environmental technology development project. KIGAM, Daejeon, Korea.
- KIGAM (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources), KRC (Korea Rural Community Corporation), GeoGreen21, 2021, Annual performance and plan for well network system technology development against drought: environmental technology development project. KIGAM, Daejeon, Korea.
- Kim, E.Y., Koh, D.C., Ko, K.S. and Yeo, I.W., 2008, Prediction of nitrate contamination of groundwater in the Northern Nonsan area using multiple regression analysis. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 13, 57-73 (in Korean with English abstract).
- Kim, H.R., Oh, J.S., Do, H.K., Lee, K.J., Hyun, I.H., Oh, S.S., Kam, S.K. and Yun, S.T., 2018, Spatial-temporal variations of nitrate levels in groundwater of Jeju Island, Korea: evaluation of long-term (1993-2015) monitoring data. *Economic and Environmental Geology*, 51, 15-26 (in Korean with English abstract).
- Kim, K.H., Yun, S.T., Kim, H.K. and Kim, J.W., 2015, Determination of natural backgrounds and thresholds of nitrate in South Korean groundwater using model-based statistical approaches. *Journal of Geochemical Exploration*, 148, 196-205.
- Kleinjans, J.C., Albering, H.J., Marx, A., van Maanen, J.M., van Agen, B., ten Hoor, F., Swaen, G.M. and Mertens, P.L., 1991, Nitrate contamination of drinking water: Evaluation of genotoxic risk in human populations. *Environmental Health Perspectives*, 94, 189-193.
- Lee, J.Y., Cha, J.H. and Raza, M., 2021, Groundwater development, use, and its quality in Korea: tasks for sus-

- tainable use. *Water Policy*, 23, 1375-1387.
- Machiwal, D. and Jha, M.K., 2015, Identifying sources of groundwater contamination in a hard-rock aquifer system using multivariate statistical analyses and GIS-based geostatistical modeling techniques. *Journal of Hydrology*, 4, 80-110.
- Mahmoodi, N., Osati, K., Salajegheh, A. and Saravi, M.M., 2021, Trend in river water quality: tracking the overall impacts of climate change and human activities on water quality in the Dez River Basin. *Journal of Water and Health*, 19, 159-173.
- Mann, H., 1945, Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13, 245-259.
- Park, J.K., Kim, R.H., Lee, J.Y., Choi, D.H. and Kim, T.D., 2007, Evaluation of status of groundwater quality monitoring network of Korea: implications for improvement. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 12, 92-99 (in Korean with English abstract).
- Park, Y.C., Jo, Y.J. and Lee, J.Y., 2011, Trends of groundwater data from the Korean National groundwater monitoring stations: indication of any change?. *Geosciences Journal*, 15, 105-114.
- Ratnaningsih, D., Nasution, E.L., Wardhani, N.T., Pitalokasari, O.D. and Fauzi, R., 2019, Water pollution trends in Ciliwung River based on water quality parameter. *IOP Conference Series: Earth Environmental Science*, 407, doi:10.1088/1755-1315/407/1/012006.
- Salmi, T., Maatta, A., Anttila, P., Ruoho-Airola, T. and Amnell, T., 2002, Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates - The excel template application MAKESENS. *Ilmatieteen laitos*.
- Sirois, A., 1998, A Brief and Biased Overview of Time Series Analysis or How to Find that Evasive Trend. In WMO report No. 133: WMO/EMEP workshop on Advanced Statistical methods and their Application to Air Quality Data sets.
- Ward, M.H., Jones, R.R., Brender, J.D., de Kok, T.M., Weyer, P.J., Nolan, B.T., Villanueva, C.M. and van Breda, S.G., 2018, Drinking water nitrate and human health: an updated review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15, 1557.
- Yoon, H.S., Bae, G.O. and Lee, K.K., 2012, Quantification and evaluation of groundwater quality grade by using statistical approaches. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 17, 23-32 (in Korean with English abstract).
- Yue, S., Pilon, P. and Cavadias, G., 2002, Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology*, 259, 254-271.

Received : December 29, 2022

Revised : January 24, 2023

Accepted : January 25, 2023