

연구논문

## 경기 동북부 지역 지하수의 수질특성 및 시계열 분석

김태욱 · 신현상<sup>†</sup>

서울과학기술대학교 국방융합과학대학원 에너지환경공학과

# Water Quality Characteristics and Time-series Analysis of Groundwater in Northeastern Gyeonggi Province

Tae-Wook Kim and Hyeon-Sang Shin<sup>†</sup>

Department of Energy and Environmental Engineering, Graduate School of National Defense Convergence Science, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, 01811, Korea

Received March 19, 2026 / Revised March 24, 2026 / Accepted March 26, 2026

This study investigated groundwater quality and pollution sources in the northeastern Gyeonggi region, specifically Pocheon, Gapyeong, and Yangpyeong. A total of 3,749 samples collected between January 2022 and December 2024 were analyzed for 15 drinking water quality parameters, including pH, major inorganic ions, and heavy metals. Piper diagram analysis indicated that Ca-HCO<sub>3</sub> (approximately 60%) and Ca-Mg-HCO<sub>3</sub> (approximately 30%) water types predominated, suggesting the presence of fresh groundwater. Statistical analyses using the Mann-Kendall test and Sen's slope estimator revealed significant increasing trends in nitrate-nitrogen across all three regions ( $p < 0.05$ ), with Pocheon exhibiting the highest rate of increase (0.020 mg/L/month). Pocheon also showed the highest concentrations of sulfate and chloride, attributed to intensive agricultural activities and urbanization. The NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N ratio indicated that 97.9% of samples exceeded 10, suggesting that chemical fertilizers are the dominant pollution source. This interpretation was supported by the Cl<sup>-</sup>/NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N mass ratio, with 62.1% of samples below 5. Overall, these findings provide a scientific basis for developing region-specific groundwater management strategies to ensure the safe use and conservation of groundwater in the upper Han River basin.

**Key words:** Groundwater quality, Drinking water quality standards, Time-series analysis, Heavy metal

### 1. 서 론

지하수는 전 세계 담수 자원의 약 30%를 차지하며, 특히 우리나라와 같이 지표수 자원이 제한적인 지역에서는 매우 중요한 수자원으로 활용되고 있다. 국내 지하수 이용량은 연간 약 37억 톤으로 전체 용수 공급량의 11.3%를 차지하고 있으며, 농업용수, 생활용수, 공업용수 등 다양한 용도로 이용되고 있다. 특히 농촌지역에서는 상수도 보급률이 상대적으로 낮아 지하수에 대한 의존도가 도시 지역보다 높은 실정이다.<sup>1)</sup> 먹는물 수질기준은 국민의 건강보호를 위한 최소한의 안전기준으로서, 지하수는 지표

수에 비해 오염물질의 이동이 느리고 오염 발생 시 정화가 어려운 특성을 가지고 있어 사전 예방적 관리가 매우 중요하다. 따라서 지역별 지하수 수질 특성을 정확히 파악하고, 오염물질의 검출 패턴과 농도 분포를 분석하여 효과적인 관리방안을 수립하는 것이 필요하다.

지하수의 수질 특성은 지질학적 배경과 수리지화학적 조건에 의해 결정되며, 이를 체계적으로 파악하는 것이 수질 관리의 출발점이 된다. 지하수의 화학적 유형은 Piper 다이어그램 등을 통해 분류할 수 있으며, 이를 통해 지하수의 순환 특성과 물-암석 반응 과정을 이해할 수 있다. 또한, 지질학적 특성에 기인한 자연적 오염물질의 문제도

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

Tel: 02-970-6625, Email: [hyuns@seoultech.ac.kr](mailto:hyuns@seoultech.ac.kr)

중요한 관심사이다. 비소, 불소 등의 자연기원 오염물질들은 지질 및 지하화학적 조건에 따라 지하수에 용출될 수 있으며, 이러한 물질들은 장기간 섭취시 인체에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 중금속류의 경우에도 자연적 배경농도와 인위적 오염원에 의한 농도 증가를 구분하여 평가하는 것이 필요하다. 특히 비소, 수은, 납, 카드뮴 등의 중금속은 극미량이라도 장기간 노출시 발암성, 신경독성, 생식독성 등 심각한 건강영향을 일으킬 수 있어 철저한 관리가 요구된다.

한편, 지하수 수질은 기후변화, 도시화, 농업활동 등 다양한 요인에 의해 시간에 따라 변화하므로, 장기적인 시계열 경향을 파악하는 것이 중요하다. 최근 들어 기후변화로 인한 강수패턴의 변화, 도시화 진행에 따른 불투수면적 증가, 산업활동 확대, 농업활동에서의 화학비료 및 농약 사용 증가 등으로 인해 지하수 오염 가능성이 지속적으로 증가하고 있다. 특히 질산성 질소와 같은 질소계 화합물의 지하수 오염은 전국적으로 심각한 문제가 되고 있으며, 이는 주로 농업활동에서 사용되는 질소계 비료, 축산폐수, 생활하수 등에서 기인하는 것으로 알려져 있다.<sup>3)</sup> 그러나 지하수 수질의 시·공간적 변화 특성과 오염원별 기여도를 정확히 파악하기 어려운 실정이다.<sup>4)</sup> 시계열 경향성 분석을 통해 수질항목의 증감 추세를 통계적으로 검증하고 변화율을 정량화함으로써, 향후 수질 악화 가능성을 사전에 예측하고 선제적 관리방안을 수립할 수 있다.

지하수 수질 관리에 있어 오염원의 정확한 규명은 효과적인 대응 전략 수립의 핵심이다. 경기 동북부 지역은 농업활동이 활발한 지역으로서 질소계 화합물, 특히 질산성 질소와 암모니아성 질소의 지하수 오염 가능성이 높다. 질산성 질소는 영유아에게 메트헤모글로빈혈증을 유발할 수 있는 독성물질로서, 세계보건기구(WHO)와 우리나라 먹는물 수질기준에서 엄격히 관리하고 있다. 따라서 이 지역의 지하수에서 질소계 화합물의 분포 특성과 오염원을 정확히 파악하는 것은 주민 건강보호를 위해 매우 중요하다.<sup>5)</sup> 질산성질소와 암모니아성질소의 비율 분석, 염소이온과 질산성질소의 상관관계 분석 등 화학적 지표를 활용한 오염원 추적 기법은 비용 효과적이면서도 오염원의 기원을 판별하는 데 유용한 수단이 될 수 있다.

경기도 동북부 지역인 포천시, 양평군, 가평군은 수도권 인구 집중과 산업화로 인한 개발압력이 증가하고 있는 지역이다. 이 지역은 한강 상류에 위치하여 수도권 주요 상수원인 팔당호와 소양강댐의 상류에 해당하므로, 이 지역의 지하수 수질은 하류 지역의 수질에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 또한, 이 지역들은 상당 부분이 농촌

지역으로 구성되어 있어 지하수를 생활용수 및 농업용수로 직접 이용하는 비율이 높아, 지하수 수질의 안전성 확보가 매우 중요한 과제로 대두되고 있다.<sup>2)</sup> 그러나 경기 동북부 지역의 지하수 수질 관리를 위해서는 체계적이고 지속적인 모니터링과 과학적 분석이 필수적이다.

따라서 본 연구는 경기 동북부 지역의 지하수에 대한 포괄적이고 체계적인 수질 분석을 통해 다음의 세 가지 핵심 목표를 달성하고자 한다. 첫째, 먹는물 수질기준 항목의 농도 분포와 Piper 다이어그램 분석을 통해 지역별 지하수의 수질 특성을 규명한다. 둘째, Mann-Kendall 비모수 검정과 Sen's slope 분석을 적용하여 주요 수질항목의 시계열 변화 경향을 파악한다. 셋째,  $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+-\text{N}$  비율 분석과  $\text{Cl}^-/\text{NO}_3^-/\text{N}$  질량비 분석을 통해 질소계 오염물질의 오염원을 규명한다. 이를 통해 지역별 차별화된 지하수 수질 관리방안 수립에 과학적 근거를 제공하고, 나아가 한강 상류지역의 수질보전에 기여하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 조사지역 및 시료채취 분석

본 연구의 조사 대상지역은 경기도 동북부에 위치한 포천시, 양평군, 가평군으로 Fig. 1에 나타내었다. 이 지역은 한강 상류에 위치하여 수도권 주요 상수원의 상류지역에 해당하며, 지질학적으로 선캄브리아기 편마암류, 중생대 화강암류, 그리고 제4기 충적층이 복합적으로 분포



Fig. 1. Location of the study area.

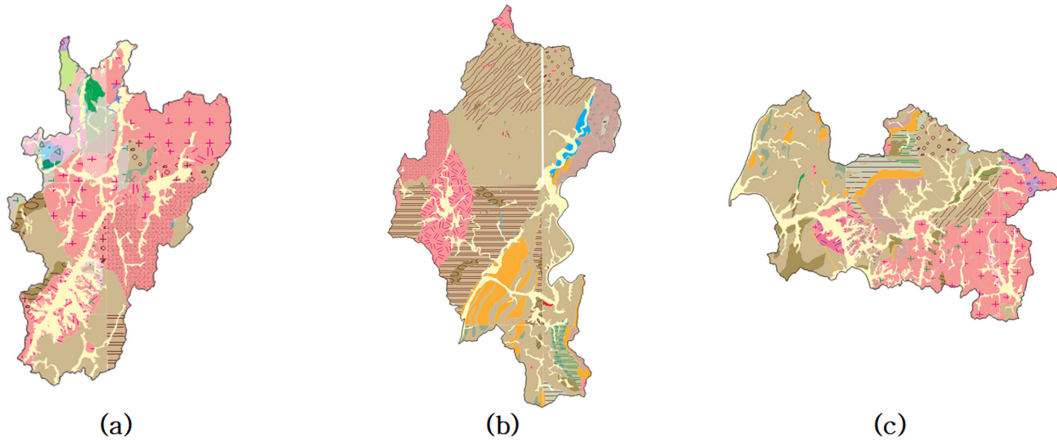


Fig. 2. Geological maps of the study regions: (a) Pocheon; (b) Gapyeong; (c) Yangpyeong.

Table 1. Survey area coverage of the study regions

Survey area	Tracking area and classification
Pocheon	영중면(YJM), 가산면(GSM), 소홀읍(SHE), 내촌면(NCM), 일동면(LIDM), 영북면(YBM), 신북면(SBM), 군내면(GNM), 선단동(SDD), 동교동(DGD), 이동면(LDM), 설운동(SUD), 관인면(GIM), 어룡동(EYD), 자작동(JJD), 창수면(CSM), 화현면(HHM)
Gapyeong	가평읍(GPE), 북면(BM), 상면(SM), 설악면(SRM), 조종면(JJM), 청평면(CPM)
Yangpyeong	용문면(YMM), 옥천면(OCM), 청운면(CUM), 서종면(SJM), 강하면(GHM), 단월면(DWM), 개군면(GGM), 강상면(GSM), 양평읍(YPE), 양서면(YSM), 양동면(YDM), 지평면(JPM)

하는 특성을 가지고 있다. 다음의 Fig 2에 조사대상 지역의 지질도를 나타내었다. 연구지역의 총 면적은 약 2,068 km<sup>2</sup>이며, 이 중 포천시 826 km<sup>2</sup>, 양평군 877 km<sup>2</sup>, 가평군 843 km<sup>2</sup>로 구성된다. 경기 동북부 지역은 지질학적으로 다양한 암종이 분포하고 있어 지하수의 화학적 특성이 지역별로 상이할 가능성이 높다.

지하수 시료채취 지점은 각 시·군별로 지질 특성, 토지 이용 현황, 인구밀도 등을 고려하여 대표성을 확보할 수 있도록 선정하였다. 포천시, 양평군, 가평군 전체에 걸쳐 고르게 분포된 지하수 관측정을 대상으로 하였으며, 농촌 지역, 도시지역, 산간지역 등 다양한 환경조건을 반영하도록 하였다. 다음의 Table 1에 조사 대상 지역의 세부구역과 구분번호를 나타내었다.

포천, 가평, 양평 3개지역 내 읍면동 조사지점을 대상으로 2022년 1월부터 2024년 12월까지 주 1회 지하수를 채취하여 수질을 분석하였으며 해당 경기 동북부 3개 지역의 지하수에 대한 총 3,749개의 시료를 분석하였다.(가평군 939개, 양평군 1,203개, 포천시 1,607개). 수질분석 항목은 먹는물 수질기준에서 규정하고 있는 주요 항목들 중 지역적 특성과 오염가능성을 고려해 선정하였다. 일반 항목으로는 pH를 포함하였고, 무기물질로는 불소, 염소

이온, 질산성질소, 황산이온, 암모니아성질소를 선정하였다. 중금속류로는 비소, 수은, 납, 망간, 아연, 알루미늄, 카드뮴, 철, 구리 등 총 15개 항목을 먹는물수질시험공정기준에 따라 분석 하였다.

### 2.2. 지하수 수질 특성 분석

지하수의 수질 유형과 지화학적 특성을 파악하기 위해 Piper 다이어그램을 작성하였다. 주요 양이온(Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>+K<sup>+</sup>)과 음이온(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>+CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>)의 상대적 비율을 바탕으로 지하수 유형을 분류하였으며, 지역별, 지질별 수질 특성의 차이를 비교분석하였다.

Piper 다이어그램의 해석은 다음 기준에 따라 실시하였다. Ca-HCO<sub>3</sub> 유형(신선한 지하수, 탄산염 광물의 용해), Ca-SO<sub>4</sub> 유형(중간 정도의 체류시간, 황산염 광물의 영향), Na-HCO<sub>3</sub> 유형(장기간 체류, 이온교환 반응의 진행), Na-Cl 유형(해수 침입 또는 증발농축의 영향). 또한 각 수질 유형별로 총용존고형물(TDS) 농도와의 상관성을 분석하여 지하수의 진화 과정을 평가하였다.

### 2.3. 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.<sup>6)</sup> 두 분석법은 자료의 경향성을 평가하는 비모수 분석법 중 하나로 정규분포를 가정할 수 없는 경우에 사용하는 대표적인 수문시계열 통계 분석방법이다. 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.<sup>7)</sup> Mann-Kendall 검정법과 Sen's slope Mann-Kendall 비모수적 경향성 검정을 적용하여 장기적인 농도 변화 경향을 통계적으로 검증하였으며, Sen's slope 추정법을 사용하여 변화율을 정량화하였다.

### 2.3.1. Mann-Kendall 경향성 분석 개요

지하수 수질의 장기적 변화 경향을 파악하기 위해 2022년 1월부터 2024년 12월까지 36개월간의 데이터에 대해 Mann-Kendall 비모수 검정법과 Sen's slope 추정법을 적용하였다. Mann-Kendall 검정은 시계열 자료의 단조 증가 또는 감소 경향을 검정하는 비모수적 방법으로, 정규분포를 가정하지 않고 결측값이나 이상치에 강건한 특성을 가져 지하수 수질 자료의 경향성 분석에 적합하다.<sup>8,9)</sup> Mann-Kendall 검정의 기본 원리는 시계열 자료에서 임의의 두 시점  $i, j$  ( $i < j$ )에 대하여  $x_j > x_i$ 인 경우를 양의 기여도로,  $x_j < x_i$ 인 경우를 음의 기여도로 계산하여 전체적인 경향성을 판단하는 것이다. 2022년 1월 1차 샘플링 ( $i = 1$ ), 2022년 1월 2차 샘플링 ( $i = 2$ )의 값을 갖게 되며 해당 시점의 수질항목 농도값은  $x_i, x_j$ 가 된다. 먼저 검정 통계량  $S$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (1)$$

여기서  $\text{sgn}$ 은 부호함수이며  $S$ 값이 0보다 클 때 전체적으로 증가하는 경향을 나타내고 0보다 작을 때는 감소 경향, 0에 가까우면 뚜렷한 경향이 없다고 판단한다. 다음으로  $S$ 의 분산은 다음과 같이 계산된다.

$$\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18 \quad (2)$$

검정통계량  $S$ 값과  $S$ 의 분산을 도출하여 최종 표준화된

검정통계량  $Z$ 는 다음과 같이 계산한다.

$$Z = (S - 1) / \sqrt{\text{Var}(S)} \quad (S > 0 \text{인 경우}) \quad (3)$$

$$Z = (S + 1) / \sqrt{\text{Var}(S)} \quad (S < 0 \text{인 경우}) \quad (4)$$

$$Z = 0 \quad (S = 0 \text{인 경우}) \quad (5)$$

$S$ 의 부호에 따라 연속성 보정을 적용하여 산출하며,  $|Z| > 1.96$ 인 경우 5% 유의수준에서 통계적으로 유의한 경향성이 있는 것으로 판단하였다.  $p$ 값은 양측 검정을 적용하여  $p = 2 \times [1 - \Phi(|Z|)]$ 로 계산되며, 여기서  $\Phi$ 는 표준정규분포의 누적분포함수이다.

### 2.3.2. Sen's Slope 추정

경향성의 크기를 정량화하기 위해 Sen(1968)이 제안한 비모수적 기울기 추정법을 사용하였다. Sen's slope는 모든 가능한 데이터 쌍에 대한 기울기의 중앙값으로 정의되며, 다음과 같이 계산된다.

$$\beta_{ij} = (x_j - x_i) / (j - i) \quad (6)$$

모든  $i < j$ 에 대해 전체 기울기들을 크기순으로 정렬한 후 중앙값을 Sen's slope로 사용한다. 이 방법은 이상치에 효과적이며 경향성의 실제 변화율을 나타내는 신뢰성 있는 추정치를 얻을 수 있다.

## 2.4. 오염원 추정 및 위해성 평가

질산성질소와 암모니아성질소의 비율 분석을 통해 질소계 오염의 기원을 추정하였다.  $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+-\text{N}$  비율이 1 미만인 경우 생활하수나 축산폐수의 영향을, 1~10인 경우 농업활동의 영향을, 10 이상인 경우 화학비료의 직접적 영향을 받는 것으로 해석하였다. 또한, 염소이온과 질산성질소의 상관관계 분석을 통해 농업활동, 축산활동, 생활하수 등 인위적 오염원의 기여도를 평가하였다. 염소이온과 질산성질소의 상관관계를 평가하기 위해  $\text{Cl}^-/\text{NO}_3^- - \text{N}$  질량비를 계산하여 오염원을 판별하였다. 염소이온은 보존성 이온으로서 지하수 내에서 화학적 변화가 거의 일어나지 않아 오염원의 특성을 그대로 반영한다. 염소이온과 질산성질소의 질량비의 범위에 대한 기준을 제시하고 해당 기준을 바탕으로 오염원을 추정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 지하수의 pH 수질특성

세 지역의 지하수 pH는 모두 약알칼리성을 나타내었으며, 양평군(YP)이 평균 7.15로 가장 높고, 포천시(PC)가 6.96으로 상대적으로 낮은 값을 보였다. 가평군(GP)은 평균 7.01을 나타내었다. 중앙값의 경우 가평군 7.02, 양평군 7.12, 포천시 6.98로 평균값과 유사한 분포를 보여 정규분포에 가까운 특성을 나타내었다. 화강암과 편마암이 주로 분포하는 연구지역에서는 장석류의 풍화작용에 의해  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^{+}$ ,  $\text{K}^{+}$  등의 양이온이 공급되고, 이들이 대기 중  $\text{CO}_2$ 와 반응하여 중탄산이온( $\text{HCO}_3^{-}$ )을 형성함으로써 완충작용을 통해 약알칼리성 pH를 유지하게 되는 것으로 사료된다.<sup>10)</sup> pH 범위는 가평군 5.80-9.69, 양평군 5.86-10.06, 포천시 5.84-10.12로 전체적으로 넓은 분포를 보였으나, 대부분의 시료가 먹는물 수질기준(5.8-8.5) 범위 내에 포함되었다. pH 기준 초과율은 가평군 1.4%, 양평군 2.7%, 포천시 1.3%로 나타나 양평군에서 상대적으로 높은 초과율을 보였다. 일부 높은 pH(9.0 이상) 시료는 주로 심부 대수층이나 체류시간이 긴 지하수에서 관찰되었으며, 이는 규산염 광물의 장기간 풍화작용과 이온교환 반응의 결과로 해석된다.<sup>11)</sup> 다음의 Table 2에 각 지역 지하수의 pH 분석 결과를 나타내었다.

#### 3.2. 지하수 화학 유형 분석

Piper 다이어그램 분석을 통한 지하수 화학 유형 분류 결과, 연구지역의 지하수는 주로  $\text{Ca-HCO}_3$  유형과  $\text{Ca-Mg-HCO}_3$  유형, 그리고  $\text{Na-HCO}_3$  유형으로 구분되었다. 이러한 수질 유형의 분포는 지질학적 배경과 지하수의 순환 특성을 반영하는 것으로 해석된다.

연구지역에서 가장 우세한 지하수 화학유형은  $\text{Ca-HCO}_3$  유형 지하수로 전체 시료의 약 60%를 차지하였다. 이 유형은 주로 화강암류와 편마암류 지역에서 나타나며, 장석과 운모류의 풍화작용에 의한  $\text{Ca}^{2+}$  이온의 공급과 대기 중  $\text{CO}_2$ 의 용해에 의한  $\text{HCO}_3^{-}$  이온의 형성으로 설명된다. 기존 연구에 따르면, 이러한 유형은 신선한 지하수의 전형적인 특성으로서 비교적 짧은 체류시간과 활발한 물

-암석 반응을 나타낸다. 연구지역에서 관찰된  $\text{Ca-HCO}_3$  유형 지하수의 TDS는 대부분 300 mg/L 이하로 나타나 양질의 지하수 특성을 보였다.<sup>12)</sup>

$\text{Ca-Mg-HCO}_3$  유형 지하수의 경우 주로 편마암류가 분포하는 지역에서 관찰되었으며, 전체의 약 30%를 차지하였다. 이 유형은 흑운모와 각섬석 등 철-마그네슘 규산염 광물의 풍화작용에 의해  $\text{Mg}^{2+}$  이온이 추가로 공급된 결과로 해석된다. 기존의 연구 결과에 따르면, 이러한 수질 유형은 변성암 지역에서 흔히 관찰되며,  $\text{Ca-HCO}_3$  유형보다 다소 긴 체류시간을 가지는 것으로 알려져 있다. 연구지역에서 이 유형의 지하수는 상대적으로 높은 경도를 나타내어 일부 지역에서 생활용수 사용 시 스케일 형성 가능성을 시사하였다.<sup>13)</sup>

$\text{Na-HCO}_3$  유형 지하수는 전체의 약 10%를 차지하였으며, 주로 충적층이나 깊은 심도의 지하수에서 관찰되었다. 이 유형은 장기간의 물-암석 반응에 의한 이온교환 과정의 결과로 형성되며,  $\text{Ca}^{2+}$ 와  $\text{Mg}^{2+}$  이온이 점토 광물에 흡착되고  $\text{Na}^{+}$  이온이 용액으로 방출되는 과정을 반영한다.<sup>14)</sup> 기존의 연구에서는 이러한 유형의 지하수가 심부 대수층이나 국지적인 체류공간에서 형성된다고 보고하였다.<sup>15)</sup> 연구지역에서  $\text{Na-HCO}_3$  유형 지하수는 상대적으로 높은 pH(7.5-8.5)와 낮은 경도를 특징으로 하였다.

연구지역의 지질학적 배경에 따른 수질 유형의 분포는 뚜렷한 차이를 보였다. 선캄브리아기 편마암류 지역에서는  $\text{Ca-Mg-HCO}_3$  유형이 우세하게 나타났으며, 이는 편마암에 포함된 철-마그네슘 규산염 광물의 풍화작용에 기인한다. 중생대 화강암류 지역에서는  $\text{Ca-HCO}_3$  유형이 주를 이루었으며, 이는 장석류의 풍화에 의한  $\text{Ca}^{2+}$  공급이 주요 원인으로 해석된다. 제4기 충적층 지역에서는  $\text{Na-HCO}_3$  유형의 비율이 상대적으로 높게 나타났다.

연구지역 지하수의 화학적 진화 과정은 Chebotarev sequence를 따르는 것으로 나타났다. 즉, 지하수 순환 초기 단계에서는  $\text{Ca-HCO}_3$  유형이 우세하고, 체류시간이 증가함에 따라  $\text{Ca-Mg-HCO}_3$  유형을 거쳐 최종적으로  $\text{Na-HCO}_3$  유형으로 진화하는 경향을 보였다. 이러한 진화 과정은 TDS의 증가와 함께 관찰되었으며,  $\text{Ca-HCO}_3$  유형에서 평균 250 mg/L,  $\text{Ca-Mg-HCO}_3$  유형에서 350 mg/L,  $\text{Na-HCO}_3$  유형에서 450 mg/L의 TDS를 나타내었다.

소수의 시료에서  $\text{Ca-SO}_4$  유형과  $\text{Na-Cl}$  유형이 관찰되었으나, 이는 전체의 3% 미만으로 국지적인 현상으로 판단된다.  $\text{Ca-SO}_4$  유형은 주로 황화광물의 산화작용이나 석고의 용해에 의해 형성되며, 일부 지역에서 관찰된 높은 황산이온 농도와 연관된다.  $\text{Na-Cl}$  유형은 극히 일부 지

Table 2. Groundwater pH results by region

Description	Gapyeong	YangPyeong	Pocheon
Average	7.01	7.15	7.05
Maximum	9.69	10.06	10.12
Minimum	5.80	5.86	5.90
Standard deviation	0.68	0.64	0.51

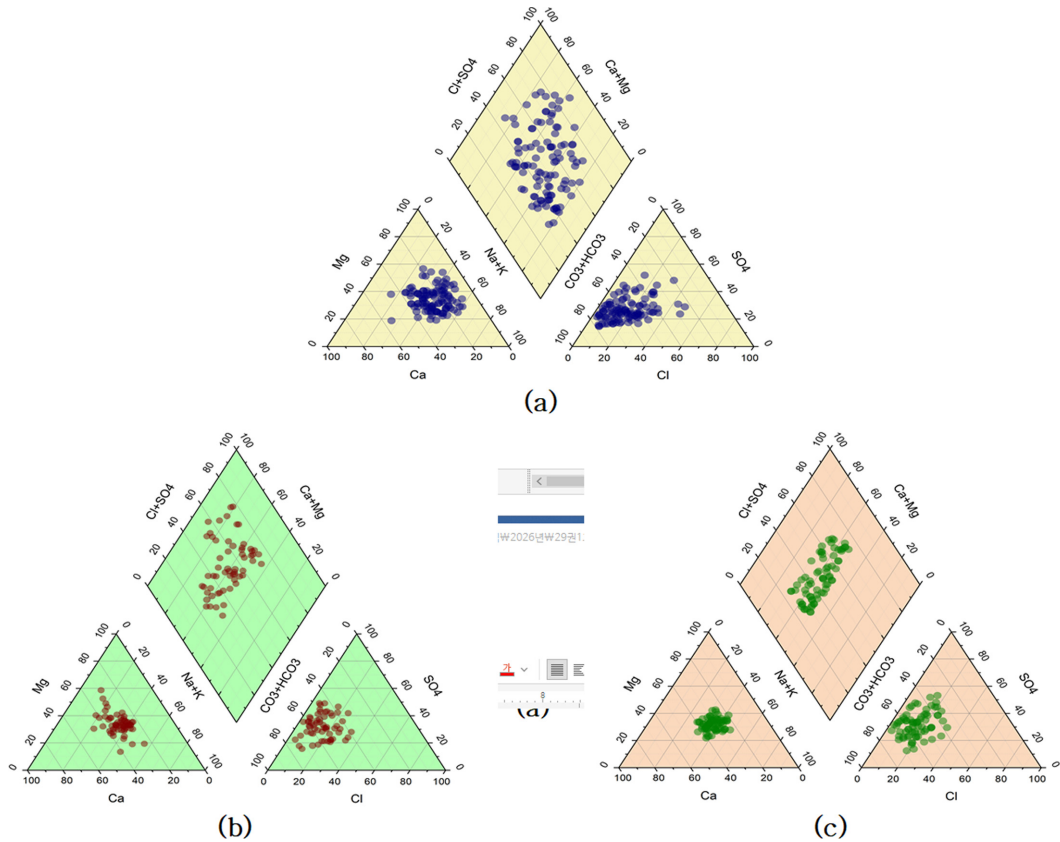


Fig. 3. Piper diagrams for the study regions: (a) Pocheon; (b) Gapyeong; (c) Yangpyeong.

역에서만 관찰되었으며, 이는 인위적 오염원의 영향이나 특수한 지질조건에 기인하는 것으로 추정된다.

또한, 중금속류 중 비소(As)는 포천시에서 평균 0.003 mg/L, 가평군 0.002 mg/L, 양평군 0.004 mg/L로 분석되었다. 대부분의 시료가 먹는물 수질기준(0.01 mg/L) 이하였으나, 양평군 일부 지점(4건, 0.3%)과 포천시 일부 지점(2건, 0.1%)에서 기준을 초과하는 사례가 확인되었다. 기준 초과 지점은 주로 편마암류 분포지역의 심부 관정에서 관찰되었으며, 이는 편마암에 포함된 비소 함유 광물의 환원적 용출에 기인하는 자연기원 오염으로 판단된다.

### 3.3. 시계열 변화 경향성 분석

#### 3.3.1. 이온류 경향 분석결과

다음의 Fig. 4와 Fig. 5에 질산성 질소, 황산 이온, 염소 이온에 대한 조사 기간 농도변화 및 분석결과에 대한 결과를 나타내었으며 Fig. 6에 각 이온 항목에 대한 비교 그래프를 나타내었으며, Fig. 7에 Sen's Slope 결과를 나

타내었다. 시계열 경향성 분석은 이온류(질산성 질소, 염소이온, 황산이온)와 중금속류(망간, 철)에 대해 분석하였다. 불소의 경우 주로 지질학적 요인에 의해 결정되어 단기간 내 변화가 제한적이므로 경향성 분석을 수행하지 않았다. 또한, 기타 중금속류(납, 수은, 카드뮴 등)는 검출빈도가 낮고 농도 변화가 미미하여 경향성 분석에 적합하지 않았다. Table 3에 이온류에 대한 시계열 변화 경향성 분석 결과를 나타내었다.

#### 3.3.1.1. 질산성 질소(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)

지역별 질산성 질소의 조사기간 농도변화 분석 결과 포천시 평균 1.92 mg/L, 가평군 2.04 mg/L, 양평군 1.90 mg/L로 나타났다. 분석 최대농도는 가평군에서 4.91 mg/L로 가장 높았으며 분석 편차는 포천시, 가평군, 양평군 각각 0.60, 0.75, 0.54 mg/L로 확인되었다.

질산성 질소는 세 지역 모두에서 통계적으로 유의한 증가 경향을 나타내었다. 포천시에서 가장 높은 Z값(2.384,  $p = 0.017$ )과 Sen's slope(0.020 mg/L/월)를 보였으며, 이

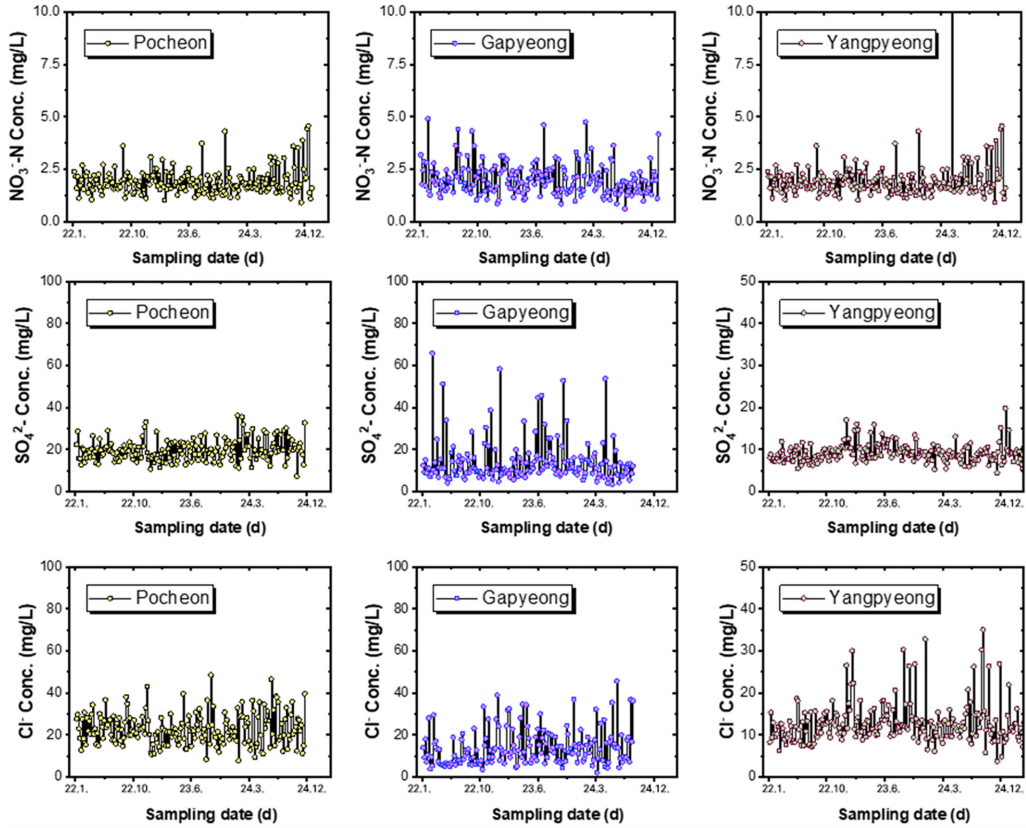


Fig. 4. Temporal variation in ion concentrations during the monitoring period.

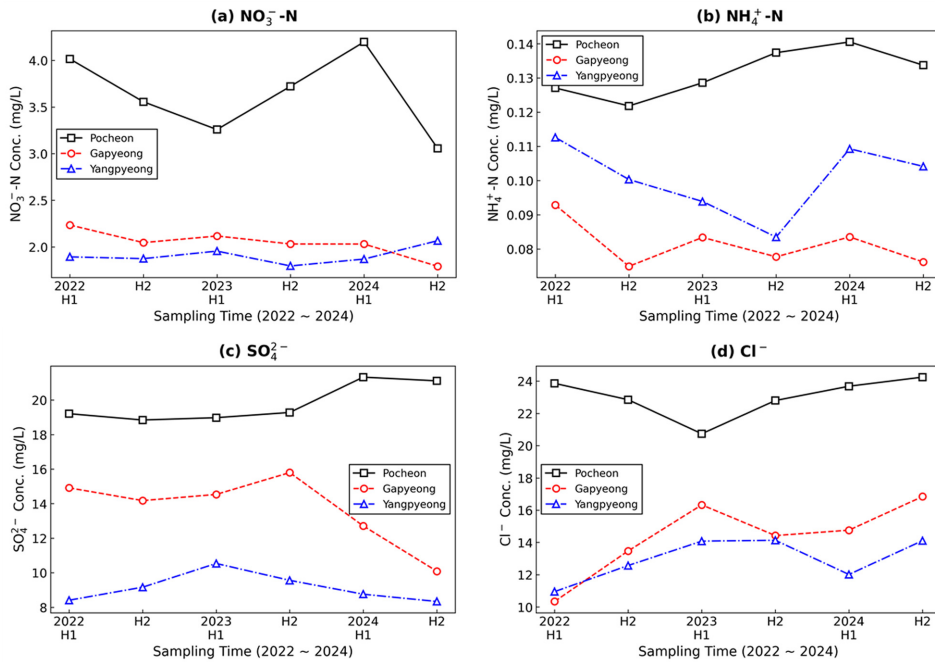


Fig. 5. Line plots of ion concentration changes during the monitoring period.

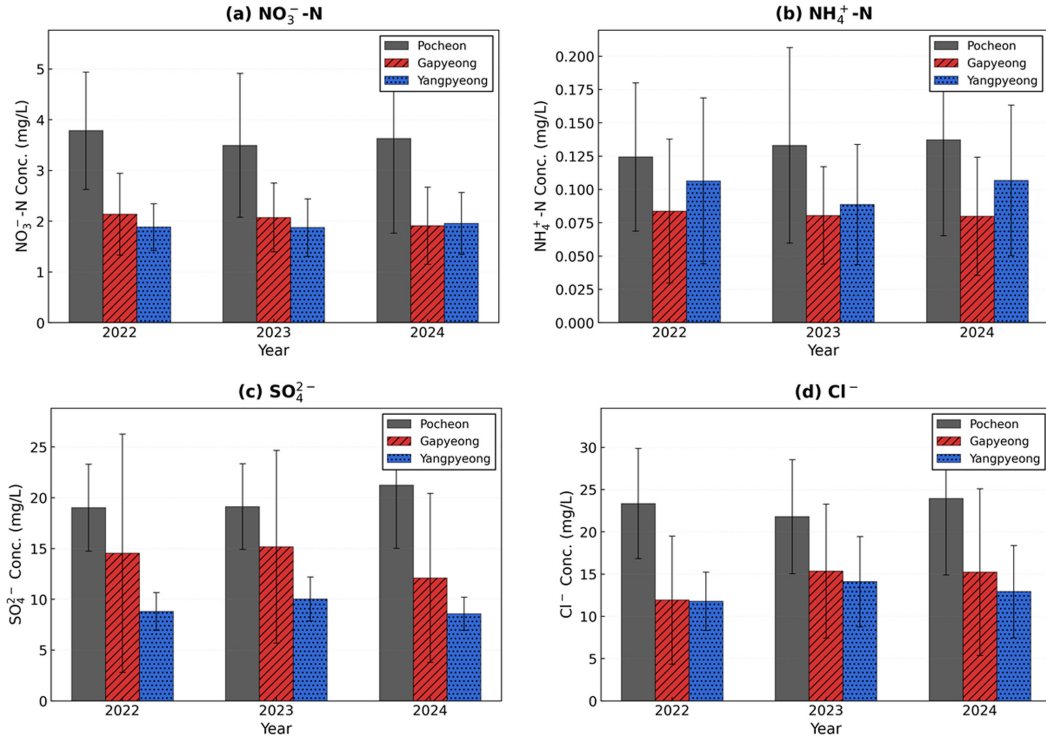


Fig. 6. Bar plots of ion concentration changes during the monitoring period.

Table 3. Mann-Kendall test and Sen's slope results for ions

Area	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N				SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>				Cl <sup>-</sup>			
	Z value	p Value	Sen's Slope	p < 0.05	Z value	p Value	Sen's Slope	p < 0.05	Z value	p Value	Sen's Slope	p < 0.05
Pocheon	2.384	0.017	0.020	Satisfied	0.259	0.796	0.013	Dissatisfied	1.457	0.139	0.080	Dissatisfied
Gapyeong	2.084	0.037	0.010	Satisfied	1.512	0.124	0.063	Dissatisfied	2.438	0.011	0.111	Satisfied
Yanpyeong	2.574	0.010	0.016	Satisfied	1.321	0.181	0.073	Dissatisfied	2.030	0.037	0.123	Satisfied

는 연간 약 0.24 mg/L의 증가율에 해당한다. 양평균은 Z=2.574 (p=0.010), Sen's slope = 0.016 mg/L/월로 두 번째로 높은 증가 경향을 보였고, 가평균은 Z=2.084 (p=0.037), Sen's slope = 0.010 mg/L/월로 상대적으로 완만한 증가 경향을 나타내었다.

이러한 증가 경향은 연구지역의 농업활동 증가와 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다. 특히 포천시의 경우 시설농업과 축산업이 지속적으로 확대되고 있어 질소계 오염원의 부하량이 증가하고 있으며, 이는 지하수로의 질산성질소 침투량 증가로 이어지고 있다. 이러한 증가 경향은 연구지역의 농업활동 특성 및 계절적 요인과 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다. 각 지역의 시설재배지에서 비료 투입으로 작물 흡수량을 초과하는 잉여 질소가 토양에 축적될 수 있으며 축적된 잔류 질소는 강우기(6~9

월)에 집중적으로 용탈되어 지하수로 침투하게 되어 특히 침투량이 급증하면서 질산성질소의 지하수 이동이 가속화될 수 있다. 또한, 겨울철(12~2월)에는 강수량 감소에 따른 지하수 함양량 저하와 증발농축 효과로 인해 오히려 지하수 내 질산성질소 농도가 상대적으로 높게 유지되는 계절적 패턴이 확인되었다. 기존의 연구에서도 경기북부 지역의 농업지대에서 유사한 질산성질소 증가 경향이 보고된 바 있으며, 특히 비료 사용량과 지하수 질산성질소 농도 간의 양의 상관관계가 확인된 바 있다.<sup>16)</sup>

포천시의 경우 현재 증가 추세(0.020 mg/L/월)가 지속될 경우 5~7년 내에 상당수 지역에서 먹는물 수질기준(10 mg/L)을 초과할 위험이 있어, 농업 및 축산 분야의 비점오염원에 대한 선제적 관리가 시급한 상황이다. 양평균은 농업오염과 생활오염이 복합적으로 작용하는 특성을 보

이므로 통합적 오염원 관리 접근이 필요하며, 가평군은 현재 양호한 수질을 유지하고 있으나 관광개발 확대에 따른 잠재적 오염 위험을 사전에 예방하는 관리 전략이 요구된다.

### 3.3.1.2. 염소 이온(Cl<sup>-</sup>)

지역별 염소 이온의 조사기간 농도변화 분석 결과 포천시 평균 23.7 mg/L, 가평군 15.1 mg/L, 양평군 13.0 mg/L로 나타났다. 조사기간 포천시에서 46.6 mg/L로 최대치가 분석되었으며 지역별 분석 표준편차는 포천시, 가평군, 양평군 각각 8.7, 9.4, 5.8 mg/L로 확인되었다.

염소이온의 경우 일부 지역에서 통계적으로 유의한 증가 경향을 나타내었다. 가평군에서 가장 뚜렷한 증가 경향( $Z=2.438$ ,  $p=0.011$ )을 보였으며, Sen's slope는 0.111 mg/L/월로 연간 약 1.33 mg/L의 증가율에 해당한다. 양평군 역시 유의한 증가 경향( $Z=2.030$ ,  $p=0.037$ )을 보였으나 포천시에서는 통계적 유의성을 보이지 않았다( $Z=1.457$ ,  $p=0.139$ ).

염소이온의 증가 경향은 강우에 의한 희석효과에도 불구하고 관찰된 것으로, 이는 지역 내 염소계 오염원의 지속적인 증가를 나타낸다. 주요 오염원으로는 도로 제설용 염화나트륨 사용 증가, 생활하수 및 축산폐수의 영향, 그리고 일부 지역에서의 해수 침입 가능성을 고려할 수 있다. 특히 가평군과 양평군에서 관찰된 증가 경향은 관광객 증가에 따른 생활폐수 부하량 증가와 관련이 있을 것으로 추정된다.

계절적 변동 패턴 분석 결과, 여름철(6-9월) 강우기에는 희석효과로 인해 농도가 감소하고, 겨울철(12-2월)에는 증발농축과 제설제 사용으로 인해 농도가 증가하는 전형적인 패턴을 보였다. 그러나 장기적인 증가 추세는 이러한 계절적 변동을 상회하여 나타나고 있어 근본적인 오염원 관리가 필요할 것으로 사료된다. 또한, 포천시의 염소이온 농도는 가평군 및 양평군에 비해 높은 분포를 나타내었다. 이는 포천시가 세 지역 중 도시화와 인구밀도가 가장 높아 생활하수 발생량이 많고, 도로연장 및 교통량이 많아 겨울철 제설제(NaCl, CaCl<sub>2</sub>) 사용량이 상대적으로 많은 것에 기인하는 것으로 판단된다. 또한, 집약적 농업활동에서 사용되는 염화칼륨(KCl) 등 염소 함유 비료의 영향도 복합적으로 작용한 것으로 사료된다.

결과적으로 가평군과 양평군에서의 염소이온 증가 경향은 관광산업 발달에 따른 생활폐수 부하량 증가와 밀접한 관련이 있을 것으로 추정되며, 포천시에서는 통계적 유의성은 없었으나 강우에 의한 희석효과가 실질적인 증

가 추세를 상쇄하고 있을 가능성이 있어 지속적인 모니터링이 필요하다고 판단된다.

### 3.3.1.3. 황산 이온(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)

지역별 황산 이온의 조사기간 농도변화 분석 결과 포천시 평균 19.7 mg/L, 가평군 14.2 mg/L, 양평군 9.2 mg/L로 나타났다. 조사기간 가평군에서 46.8 mg/L로 최대치가 분석되었으며 지역별 분석 표준편차는 포천시, 가평군, 양평군 각각 5.0, 10.2, 2.0 mg/L로 확인되었다.

황산이온의 경우 모든 지역에서 통계적으로 유의한 경향성을 보이지 않았다( $p > 0.05$ ). 가평군( $Z=1.512$ ,  $p=0.124$ )과 양평군( $Z=1.321$ ,  $p=0.181$ )에서 약간의 증가 경향을 보였으나 통계적 유의성은 없었으며, 포천시에서는 거의 변화가 없었다( $Z=0.259$ ,  $p=0.796$ ).

황산이온의 안정적인 농도 유지는 주로 지질학적 요인에 기인하는 것으로 해석된다. 연구지역의 화강암과 편마암에는 황화광물의 함량이 상대적으로 낮아 자연적인 황산이온 공급이 제한적이며, 대기오염원으로부터의 황산염 침적도 과거에 비해 감소하고 있는 추세이다. 또한 강우에 의한 희석효과와 토양 내 흡착작용이 농도 변화를 완충하는 역할을 하고 있는 것으로 판단된다.

Sen's slope 분석 결과, 가평군 0.063 mg/L/월, 양평군 0.073 mg/L/월, 포천시 0.013 mg/L/월로 나타나 미미한 수준의 변화율을 보였다. 포천시의 황산이온 농도는 다른 지역에 비해 높게 나타났다. 이는 포천시 일대에 분포하는 화강암류에 포함된 황철석(FeS<sub>2</sub>)의 산화작용에 의한 자연적 황산이온 공급과, 과인산석회 및 황산칼륨 등 황산염 함유 비료의 사용이 복합적으로 기여한 결과로 해석된다. 그러나 세 지역 모두 통계적으로 유의한 경향성을 보이지 않았다는 점에서 이러한 농도 차이는 단기적 오염 부하 증가보다는 지질학적 배경농도의 차이와 기존 농업활동의 누적 효과가 반영된 것으로 판단된다.

### 3.3.1.4. 암모니아성 질소(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)

지역별 암모니아성 질소의 조사기간 농도변화 분석 결과 포천시 평균 0.132 mg/L, 가평군 0.081 mg/L, 양평군 0.101 mg/L로 나타났다. 분석 최대농도는 포천시에서 0.460 mg/L로 가장 높았으며 분석 표준편차는 포천시, 가평군, 양평군 각각 0.067, 0.045, 0.055 mg/L로 확인되었다. 전체적으로 대부분의 시료가 먹는물 수질기준(0.5 mg/L) 이하의 낮은 농도를 나타내어 검출한계 부근에서 분포하는 특성을 보였다.

암모니아성 질소는 세 지역 모두에서 통계적으로 유의

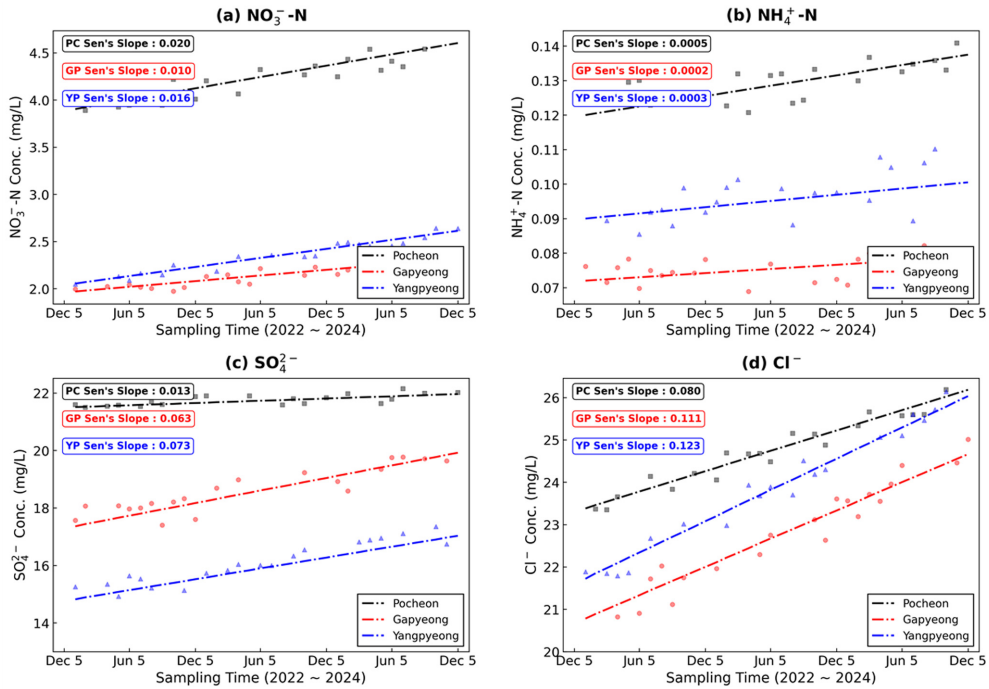


Fig. 7. Sen's slope estimates for ions.

Table 4. Mann-Kendall test and Sen's slope results for metals

Area	Mn				Fe			
	Z value	p Value	Sen's Slope	p < 0.05	Z value	p Value	Sen's Slope	p < 0.05
Pocheon	-0.422	0.673	$-0.28 \times 10^{-4}$	Satisfied	0.913	0.359	$1.22 \times 10^{-4}$	Dissatisfied
Gapyeong	2.520	0.009	$1.09 \times 10^{-4}$	Satisfied	0.558	0.576	$0.39 \times 10^{-4}$	Dissatisfied
Yanpyeong	0.504	0.614	$0.34 \times 10^{-4}$	Satisfied	2.111	0.030	$2.43 \times 10^{-4}$	Dissatisfied

한 경향성을 보이지 않았다( $p > 0.05$ ). 포천시( $Z = 0.487$ ,  $p = 0.626$ ), 가평군( $Z = 0.215$ ,  $p = 0.830$ ), 양평군( $Z = 0.312$ ,  $p = 0.755$ ) 모두  $|Z| < 1.96$ 으로 유의수준 5%를 만족하지 못하였다. Sen's slope 분석 결과에서도 포천시 0.0005 mg/L/월, 가평군 0.0002 mg/L/월, 양평군 0.0003 mg/L/월로 나타나 실질적으로 변화가 없는 것으로 확인되었다.

암모니아성 질소의 농도가 전반적으로 매우 낮고 경시적 변화가 없는 것은 연구지역 지하수 환경이 호기적 조건을 유지하고 있어 질산화(nitrification) 과정이 충분히 진행되고 있음을 의미한다. 즉, 유기성 질소 및 암모니아성 질소가 토양 내 질산화 미생물에 의해 최종 산화 생성물인  $\text{NO}_3^-$ -N으로 전환되어 지하수에 도달하기 때문에, 암모니아성 질소는 낮은 농도를 유지하고 질산성 질소가 높게 검출되는 전형적인 패턴을 나타낸 것이다. 이러한 결과는 앞서 3.3절의  $\text{NO}_3^-$ -N/ $\text{NH}_4^+$ -N 비율 분석에서 전체 시료의 97.9%가 비율 10 이상을 나타낸 것과도

일치한다.

### 3.3.2. 중금속 검출현황 분석

#### 3.3.2.1. 망간(Mn)

조사기간 중 지역별 망간의 농도변화 분석결과 포천시 평균 0.021 mg/L, 가평군 0.0054 mg/L, 양평군 0.022 mg/L로 나타났다. 지역별 최대농도는 포천시 0.26 mg/L, 가평군 0.067 mg/L, 양평군 0.26 mg/L로 가장 확인되었으며 표준편차는 포천시, 가평군, 양평군 각각 0.035, 0.011, 0.035 mg/L로 확인되었다.

망간의 경우 지역별로 상이한 경향성을 나타내었다. 가평군에서만 통계적으로 유의한 증가 경향( $Z = 2.520$ ,  $p = 0.009$ )을 보였으며, Sen's slope는 0.000109 mg/L/월로 연간 약 0.0013 mg/L의 증가율에 해당한다. 양평군과 포천시에서는 통계적으로 유의한 경향성을 보이지 않았다.

가평군에서의 망간 농도 증가는 여러 요인이 복합적으로 작용한 결과로 해석된다. 망간은 자연기원 중금속의 대

표적인 예로서, 지하수 환경에서 산화-환원 조건에 따라 용해도가 크게 변한다.  $Mn^{4+}$  상태의 망간 산화물은 환원 환경에서  $Mn^{2+}$ 로 환원되어 용해도가 급격히 증가하며, 이는 지하수 pH와 용존산소 농도에 직접적으로 영향을 받는다.<sup>17)</sup>

가평군에서 관찰된 증가 경향의 구체적인 원인을 규명하기 위해서는 지하수위 변동, 산화-환원 전위(Eh), 용존산소(DO) 등의 추가 자료 분석이 필요하다. 일반적으로 망간 농도 증가는 지하수 환경의 환원성 증가, 지하수 체류시간 증가로 인한 물-암석 반응 시간 증가, 토양 및 대수층 내 pH 변화에 따른 망간 이동성 증가, 유기물 분해에 따른 국지적 환원환경 조성 등의 근거로 설명된다.

특히 가평군 지역의 지질학적 특성을 고려할 때, 편마암과 화강암에 포함된 흑운모, 각섬석 등 철-마그네슘 규산염 광물의 풍화작용이 망간 공급의 주요 원인으로 추정된다. 이러한 광물들은 미량의 망간을 함유하고 있으며, 장기간의 화학적 풍화작용을 통해 지하수로 망간을 공급할 수 있다.<sup>18)</sup> 이에 가평군에서의 망간 증가는 다른 지역과 차별화되는 특성으로, 주로 자연적 요인에 기인하는 것으로 추정되나 지하수 환경 변화에 대한 민감한 지표로서 지속적인 모니터링이 필요하다고 판단된다.

3.3.2.2. 철(Fe)

조사기간 중 지역별 철의 농도변화 분석결과 포천시 평균 0.020 mg/L, 가평군 0.010 mg/L, 양평군 0.020 mg/L로 나타났다. 지역별 최대농도는 포천시 0.26 mg/L, 가평군 0.05 mg/L, 양평군 0.25 mg/L로 가장 확인되었으며 표준편차는 포천시, 가평군, 양평군 각각 0.027, 0.008, 0.025 mg/L로 확인되었다.

철의 경우 양평군에서만 통계적으로 유의한 증가 경향 ( $Z=2.111, p=0.030$ )을 보였으며, Sen's slope는 0.000243 mg/L/월로 연간 약 0.003 mg/L의 증가율을 나타내었다. 가평군과 포천시에서는 통계적으로 유의한 경향성을 보이지 않았다.

양평군에서의 철 농도 증가는 해당 지역의 지질학적 특

성과 관련이 있는 것으로 추정된다. 양평군 일대에는 철을 함유한 편마암류와 화강암류가 넓게 분포하고 있으며, 최근 개발활동 증가로 인한 지하수 흐름 변화가 철 함유 광물과의 접촉시간을 증가시켰을 가능성이 있다. 또한 농업활동에서 사용되는 철계 비료의 영향도 부분적으로 기여했을 것으로 판단된다.

철의 지하수 농도는 pH, Eh(산화-환원 전위), 용존산소 농도에 매우 민감하게 반응한다.  $Fe^{3+}$  상태의 철은 중성 pH에서 불용성이지만, 환원 환경에서  $Fe^{2+}$ 로 환원되면 용해도가 크게 증가한다.<sup>19)</sup> 양평군에서 관찰된 철 농도 증가는 지하수 환경의 환원성 증가나 체류시간 증가와 관련이 있을 것으로 해석된다.

양평군에서만 유의한 증가 경향이 관찰된 것은 최근 개발활동 증가에 따른 지하수 환경의 점진적인 환원성 증가나 지하수 흐름 변화와 관련이 있을 것으로 판단되며, 이에 대한 추가적인 Eh 및 DO 모니터링을 통한 원인 규명이 필요하다.

3.4. 오염원 추정 및 위해성 평가 결과

3.4.1. 질소계 오염물질의 기원 추정

질산성질소와 암모니아성질소의 비율을 분석하여 질소계 오염의 기원을 추정하였다.  $NO_3^- - N/NH_4^+ - N$  비율은 지하수 내 질소계 오염물질의 산화 정도를 반영하는 지표로서, 호기적 환경에서 질산화(nitrification)가 충분히 진행될수록 높은 값을 나타낸다. 본 연구에서는 Kendall et al.(2007)<sup>24)</sup>이 제시한 기준을 참고하여,  $NO_3^- - N/NH_4^+ - N$  비율이 1 미만인 경우 가축분뇨 퇴비 및 유기성 폐기물의 농지 사용 후 질산화가 불완전한 상태의 유기성 질소원 영향을, 1~10인 경우 유기질 비료(퇴비)와 화학비료가 복합적으로 사용되는 일반 농업활동의 영향을, 10 이상인 경우 화학비료(질산염 비료)의 직접적 영향을 받는 것으로 분류하였다. 지역별 지하수의  $NO_3^- - N/NH_4^+ - N$  비율 분석 결과를 Table 5에 나타내었다.

분석 결과, 연구지역 전체의 97.9%가  $NO_3^- - N/NH_4^+ - N$  비율 10 이상을 나타내어 화학비료의 직접적 영향이 압

Table 5.  $NO_3^- - N/NH_4^+ - N$  ratio results by region

Area	Number of samples analyzed	$NO_3^- - N/NH_4^+ - N$ Ratio		
		< 1 (Sewage or livestock wastewater)	1 - 10 (Agricultural activities)	> 10 (Chemical fertilizer)
Gapyeong	939	4 (0.4%)	17 (1.8%)	918 (97.8%)
Yanpyeong	1,203	0 (0%)	21 (1.7%)	1182(98.3%)
Pocheon	1,607	11 (0.7%)	26 (1.6%)	1570 (97.7%)
Total	3,749	15 (0.4%)	64 (1.7%)	3670 (97.9%)

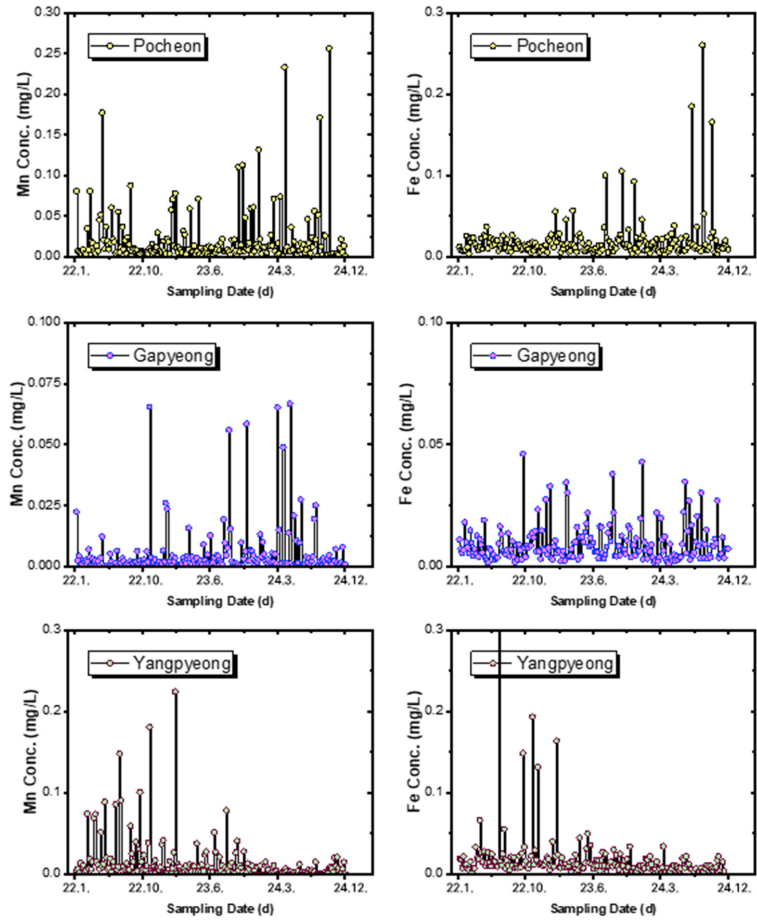


Fig. 8. Temporal variation in metal concentrations during the monitoring period.

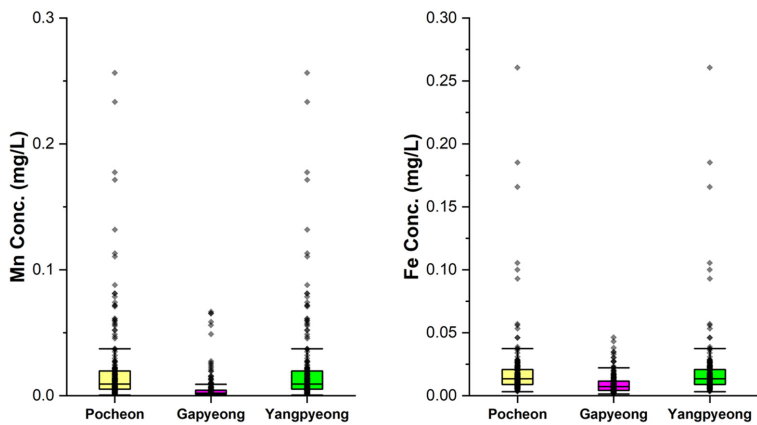


Fig. 9. Box plots of metal concentration changes during the monitoring period.

도적으로 우세함을 확인하였다. 가평군이 98.3%로 가장 높은 비율을 보였으며, 포천시 97.8%, 양평군 97.7% 순으로 조사되었다. 생활하수나 축산폐수의 영향(비율 < 1)

을 받는 시료는 전체의 0.4%에 불과하였으며, 농업활동의 복합적 영향(비율 1-10)을 받는 시료도 1.7%로 매우 낮았다.

이러한 결과는 연구지역의 질산성질소 오염이 주로 화학비료 사용에 기인함을 명확히 보여준다. 특히 포천시의 경우 집약적 시설농업과 노지재배에서의 과다 시비가 주요 원인으로 판단된다. 암모니아성질소가 대부분 검출한계 미만으로 나타나고 질산성질소가 높게 검출되는 것은, 호기성 조건의 지하수 환경에서 질산화 과정이 완료되어 최종 생성물인 질산염 형태로 존재하기 때문이다.

$\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+-\text{N}$  비율이 1 미만을 나타낸 15개 지점은 주로 축산농가 인근(500 m 이내) 또는 소규모 마을의 오수처리시설 주변에 위치하였다. 이들 지점에서는 질산성질소 농도도 상대적으로 높았으며, 염소이온 농도도 함께 증가하는 경향을 보여 유기성 폐수의 직접적 영향을 나타내었다.

$\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+-\text{N}$  비율이 1-10을 나타낸 64개 지점은 농경지와 축산지역이 혼재된 지역에 분포하였으며, 화학비료 시비와 가축분뇨 퇴비 사용이 복합적으로 영향을 미치는 것으로 판단되었다. 이들 지점은 주로 하천변 충적층 지역에 위치하여 지표 오염원의 영향을 상대적으로 많이 받는 특성을 보였다.

3.4.2. 염소이온-질산성질소 상관관계 분석

염소이온과 질산성질소의 상관관계 분석은 두 가지 접근법을 사용하였다. 첫째, Pearson 상관계수 분석을 통해 두 오염물질 간의 선형적 관계를 정량화하였다. Pearson 상관계수(r)는 -1에서 +1 사이의 값을 가지며,  $|r| < 0.3$ 은 약한 상관관계,  $0.3 \leq |r| < 0.7$ 은 중간 정도의 상관관계,  $|r| \geq 0.7$ 은 강한 상관관계로 해석된다. 통계적 유의성은  $p < 0.05$  수준에서 평가하였다.

둘째, 염소이온/질산성질소 질량비( $\text{Cl}^-/\text{NO}_3^--\text{N}$ )를 이용한 오염원 구분 방법을 적용하였다. 이 방법은 서로 다른 오염원이 특정한  $\text{Cl}^-/\text{NO}_3^--\text{N}$  비율을 나타낸다는 원리에 기반한다(Panno et al., 2006). 화학비료(특히 질산염 비료)는 질소 함량이 높고 염소 함량이 낮아 낮은 비율(< 5)을 나타내며, 생활하수나 축산폐수는 염소 함량이 상대적으로 높아 높은 비율(> 15)을 보인다. 중간 범위(5-15)는 복합적 오염원의 영향을 지시한다.

Table 6. Pearson correlation results between  $\text{Cl}^-$  and  $\text{NO}_3^--\text{N}$  by region

Area	Pearson correlation coefficient (r)	p-value
Gapyeong	0.52	< 0.001
Yanpyeong	0.58	< 0.001
Pocheon	0.47	< 0.001
Total	0.51	< 0.001

염소이온과 질산성질소의 상관관계 분석을 통해 인위적 오염원의 기여도를 평가한 결과 염소이온은 보존성 이온으로서 생활하수, 축산폐수, 화학비료(염화칼륨) 등 다양한 오염원에 공통적으로 포함되어 있어 오염원 추적자로 활용될 수 있다. 조사지역 지하수의 염소이온-질산성질소의 상관관계 분석 결과를 Table 6에 나타내었다. 분석 결과 모든 지역에서 염소이온과 질산성질소 간에 통계적으로 유의한 양의 상관관계( $r = 0.47-0.58$ ,  $p < 0.001$ )가 확인되었다. 이는 두 오염물질이 공통적인 인위적 오염원의 영향을 받고 있음을 시사한다. 양평군에서 가장 높은 상관계수( $r = 0.58$ )를 보여, 생활하수와 농업활동의 복합적 영향이 더 뚜렷함을 나타내었다.

염소이온 대비 질산성질소의 질량비( $\text{Cl}^-/\text{NO}_3^--\text{N}$ )를 분석하여 오염원을 보다 세밀하게 구분하였다. 이 비율은 각 오염원이 가지는 고유한 화학적 조성을 반영하며, 일정 기준으로 해석하였다.

Wakida and Lerner(2005)는 영국의 도시 지하수 연구에서  $\text{Cl}^-/\text{NO}_3^--\text{N}$  비율이 생활하수 오염을 지시하는 유용한 지표임을 확인하였으며, 생활하수 영향을 받는 지하수에서는 이 비율이 일반적으로 5 이상을 나타낸다고 보고하였다. Böhlke(2002)는 질산염 오염원 추적 연구에서 화학비료 기원의 질산염은 낮은  $\text{Cl}^-/\text{NO}_3^-$  비율을, 유기성 폐기물 기원은 높은 비율을 나타낸다는 것을 동위원소 분석과 함께 확인하였다.

국내 연구로는 경기도 농촌지역 지하수에서  $\text{Cl}^-/\text{NO}_3^--\text{N}$  비율을 이용한 오염원 판별을 시도하였으며, 비율 5 미만은 화학비료, 5-10은 복합 오염, 10 이상은 축산 또는 생활하수의 영향으로 해석할 수 있다고 제시하였다.<sup>20)</sup> 또

Table 7.  $\text{Cl}^-/\text{NO}_3^--\text{N}$  ratio results by region

Area	Number of samples analyzed	$\text{Cl}^-/\text{NO}_3^--\text{N}$		
		< 5	5-15	> 15
Gapyeong	939	598 (63.7%)	287 (30.6%)	54 (5.8%)
Yanpyeong	1,203	725 (60.3%)	381 (31.7%)	97 (8.1%)
Pocheon	1,607	1005 (62.5%)	392 (24.4%)	210 (13.1%)
Total	3,749	2328 (62.1%)	1060 (28.3%)	361 (9.6%)

다른 연구에서도 충청지역 지하수 연구에서 유사한 기준을 적용하여 오염원 판별의 유효성을 확인하였다.<sup>21)</sup>

이에 따라 본 연구에서는  $Cl^-/NO_3^- - N$  비율이 5이하 일 경우 화학비료, 특히 질산염 비료 위주의 오염. 질소 함량이 높고 염소 함량이 낮은 비료 사용의 영향으로 해석하였고  $Cl^-/NO_3^- - N$  비율이 5-15인 경우 화학비료와 생활계 오염원의 복합적 영향으로 농업지역 내 생활하수나 축산활동의 부분적 영향에 의한 것으로 판단하였다.  $Cl^-/NO_3^- - N$  이 15보다 큰 경우 생활하수 또는 축산폐수의 직접적 영향, 유기성 폐수에 포함된 고농도 염소이온의 영향으로 판단하였다. 다음의 Table 7에  $Cl^-/NO_3^- - N$  분석 결과를 나타내었다.

분석 결과 전체의 62.1%가  $Cl^-/NO_3^- - N$  비율 5 미만을 나타내어 화학비료가 주요 오염원임을 재확인하였다. 비율 5-15를 보이는 28.3%의 시료는 화학비료와 생활계 오염원의 복합적 영향을, 비율 15 이상을 보이는 9.6%의 시료는 생활하수나 축산폐수의 직접적 영향을 받는 것으로 판단되었다. 비율 15 이상을 나타낸 361개 시료는 주로 마을 단위 오수처리시설 주변, 축산농가 인근(반경 500 m 이내), 그리고 소규모 음식점이나 숙박시설이 밀집된 관광지 인근에 위치하였다. 이들 지점에서는 염소이온 농도가 평균 68.3 mg/L로 전체 평균(28.4 mg/L)보다 2.4배 높았으며, 동시에 질산성질소 농도도 평균 4.8 mg/L로 높게 나타나 유기성 폐수의 질산화 과정을 거친 오염 특성을 보였다.

#### 3.4.3. 경기 동북부 지역 지하수의 오염원 추정 및 위해성 평가

본 연구에서 수행한  $NO_3^- - N/NH_4^+ - N$  비율 분석과  $Cl^-/NO_3^- - N$  질량비 분석은 경기 동북부 지역 지하수의 질소계 오염원을 규명하는 데 일관된 결과를 제공하였다.  $NO_3^- - N/NH_4^+ - N$  비율 분석에서 전체 시료의 97.9%가 비율 10 이상을 나타내어 화학비료의 지배적 영향을 보였으며,  $Cl^-/NO_3^- - N$  질량비 분석에서도 62.1%가 비율 5 미만으로 이를 재확인하였다. 두 독립적 방법이 동일한 결론을 도출함으로써 분석 결과의 신뢰성이 확보되었다.

$Cl^-/NO_3^- - N$  비율이 5-15인 시료(31.3%)는 화학비료와 생활계 오염원의 복합 영향을, 15 이상인 시료(8.5%)는 생활하수나 축산폐수의 직접적 영향을 받는 것으로 판단되었다. 그러나 지하수 내 질산화 과정이 원래 오염원 신호를 변화시킬 수 있어, 생활하수와 축산폐수를 명확히 구분하기는 어려웠다.

복합 오염을 나타내는 28.3%의 시료는 주로 농경지 내

소규모 취락이 산재한 지역이나 농업지역 인근 도로변에서 확인되었다. 이러한 지역은 단일 관리 대책으로는 효과적인 수질 개선이 어려우므로, 농업 비점오염 관리와 생활하수 처리 개선을 동시에 추진하는 통합적 접근이 필요하다.

본 연구에서 적용한 화학적 비율 분석 방법은 비용 효과적이고 신속한 오염원 추적 기법으로서 유용하나, 여러 오염원이 혼합된 경우 정확한 기여도를 정량화하기 어렵고, 지하수 내 생지화학적 변환 과정이 원래의 오염원 신호를 변화시킬 수 있다는 한계를 가진다. 보다 정확한 오염원 판별을 위해서는 질산염 동위원소 분석( $\delta^{15}N$ ,  $\delta^{18}O$ )과 같은 추가 연구가 필요하다고 사료된다.

## 4. 결 론

본 연구는 경기 동북부 지역(포천시, 가평군, 양평군)의 지하수에 대해 2022년 1월부터 2024년 12월까지 3년간 총 3,749개 시료의 종합적인 수질 분석을 수행하였다.

수질 특성 분석 결과, 세 지역의 지하수는 약알칼리성의  $Ca-HCO_3$  및  $Ca-Mg-HCO_3$  유형이 우세하여 신선한 지하수의 특성을 나타내었으며, Chebotarev sequence에 따른 화학적 진화 과정이 확인되었다.

시계열 경향성 분석 결과, 세 지역 모두에서 질산성질소의 통계적으로 유의한 증가 경향이 확인되어 농업활동에 의한 오염 부하가 지속적으로 증가하고 있음을 나타내었다. 지역별로는 포천시가 집약적 농업과 도시화의 복합 영향으로 가장 높은 이온 농도와 증가율을 보였고, 가평군은 현재 가장 양호한 수질이나 망간 증가 경향이 관찰되었으며, 양평군은 염소이온과 철의 증가 경향에서 관광산업 발달에 따른 생활오염 부하 증가가 확인되었다.

오염원 규명 결과,  $NO_3^- - N/NH_4^+ - N$  비율 분석과  $Cl^-/NO_3^- - N$  질량비 분석이 일관되게 화학비료를 주요 오염원으로 지목하였으며, 일부 지역에서는 생활하수 및 가축분뇨 퇴비의 복합적 영향이 확인되었다.

결과를 종합하면, 경기 동북부 지역 지하수의 효과적인 관리를 위해 다음과 같은 정책적 시사점을 제시할 수 있다. 첫째, 질산성질소 증가 추세의 확산을 방지하기 위해 농업활동에서의 적정 시비량 관리와 가축분뇨 퇴비의 농지 시용량에 대한 지역 단위 규제 강화가 필요하다. 둘째, 비소 및 질산성질소의 먹는물 수질기준 초과 지점에 대해서는 대체 수원 확보와 정수처리시설 설치를 포함한 음용수 안전관리 체계의 강화가 요구된다. 셋째, 관광산업이 발달한 가평군·양평군 지역에서는 소규모 하수처리시

설의 처리효율 개선과 비점오염원 저감 대책이 병행되어야 한다. 마지막으로, 본 연구에서 적용한 화학적 비율 분석의 한계를 보완하기 위해 질산염 동위원소 분석 등 후속 연구를 통한 오염원의 정밀한 정량적 기여도 평가가 필요하다.

## 감사의 글

이 연구는 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다.(NRF-2020R1A6A1A03042742)

## 참고문헌

1. T. Gleeson, K. M. Befus, S. Jasechko, E. Luijendijk, and M. B. Cardenas, "The global volume and distribution of modern groundwater", *Nature Geoscience*, **2016**, 9(2), 161-167.
2. J. Y. Lee and S. H. Song, "Groundwater chemistry and ionic ratios in a western coastal aquifer of Buan, Korea: Implication for seawater intrusion", *Geosciences Journal*, **2007**, 21(2), 259-270.
3. G. Busico, N. Kazakis, E. Cuoco, N. Colombani, D. Tedesco, K. Voudouris, and M. Mastrocicco, "A novel hybrid method of specific vulnerability to anthropogenic pollution using multivariate statistical and regression analyses", *Water Research*, **2020**, 171, 115386.
4. J. Podgorski and M. Berg, "Global threat of arsenic in groundwater", *Science*, **2020**, 368(6493), 845-850.
5. M. H. Ward, R. R. Jones, J. D. Brender, T. M. de Kok, P. J. Weyer, B. T. Nolan, C. M. Villanueva, and S. G. van Breda, "Drinking water nitrate and human health: An updated review", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **2018**, 15(7), 1557.
6. E. Frollini, E. Preziosi, N. Calace, M. Guerra, and M. Ghinassi, "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*, **2021**, 28(17), 22092-22104.
7. S. Swain, S. K. Mishra, A. Pandey, and P. Kalura, "Spatiotemporal assessment of precipitation variability, seasonality, and extreme characteristics over a Himalayan catchment", *Theoretical and Applied Climatology*, **2022**, 147(1), 817-833.
8. H. B. Mann, "Nonparametric tests against trend", *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, **1945**, 13(3), 245-259.
9. M. G. Kendall, "Rank correlation methods", **1975**, 4th edition, Charles Griffin, London, UK.
10. J. I. Drever, "The geochemistry of natural waters: Surface and groundwater environments", **1997**, 3rd edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA.
11. N. Adimalla and A. K. Taloor, "Hydrogeochemical investigation of groundwater quality in the hard rock terrain of South India using geographic information system (GIS) and groundwater quality index (GWQI) techniques", *Groundwater for Sustainable Development*, **2020**, 10, 100288.
12. M. Kumar, A. Ramanathan, and A. K. Keshari, "Understanding the extent of interactions between groundwater and surface water through major ion chemistry and multivariate statistical techniques", *Hydrological Processes*, **2009**, 23(2), 297-310.
13. L. Peiyue, Q. Hui, and W. Jianhua, "Hydrochemical formation mechanisms and quality assessment of groundwater with improved TOPSIS method in Pengyang County, Northwest China", *Journal of Chemistry*, **2011**, 8(3), 1164-1173.
14. R. A. Freeze and J. A. Cherry, "Groundwater", **1979**, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
15. K. H. Kim, S. T. Yun, S. S. Park, Y. Joo, and T. S. Kim, "Model-based clustering of hydrochemical data to demarcate natural versus human-induced composition: Application in namhan river watershed, South Korea", *Environmental Earth Sciences*, **2019**, 78(14), 1-14.
16. P. L. Smedley and D. G. Kinniburgh, "A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters", *Applied Geochemistry*, **2002**, 17(5), 517-568.
17. J. Xiao, Z. Jin, and J. Wang, "Hydrochemistry and source apportionment of boron, sulfate, and nitrate in the Fen River, a typical loess covered area in the eastern Chinese Loess Plateau", *Environmental Research*, **2022**, 206, 112570.
18. P. Li, J. Wu, and H. Qian, "Hydrochemical appraisal of groundwater quality for drinking and irrigation purposes and the major influencing factors: A case study in and around Hua County, China", *Arabian Journal of Geosciences*, **2016**, 9(1), 15.
19. W. Stumm and J. J. Morgan, "Aquatic chemistry: Chemical equilibria and rates in natural waters", **1996**, Wiley-Interscience, New York, USA.
20. K. Kim, N. Rajmohan, H. J. Kim, G. S. Hwang, and M. J. Cho, "Assessment of groundwater chemistry in a coastal region (Kunsan, Korea) having complex contaminant sources: A stoichiometric approach", *Environmental Geology*, **2004**, 46(6), 763-774.
21. H. Yoon, Y. Kim, K. Ha, S. H. Lee, and G. P. Kim, "Comparative evaluation of ANN- and SVM-time series models for predicting freshwater-saltwater interface fluctuations", *Water*, **2017**, 9(5), 323.