지질학회지 제 58권 제 1호, p. 101-116, (2022년 3월)
J. Geol. Soc. Korea, v. 58, no. 1, p. 101-116, (March 2022)
DOI http://dx.doi.org/10.14770/jgsk.2022.58.1.101

Check for updates

ISSN 0435-4036 (Print)
ISSN 2288-7377 (Online)

체계적인 지하수 수질 관리를 위한 국가지하수측정망의 질산성 질소와 염소 이온 자료에 대한 추세분석 평가

안현실[1] · 현윤정[2] · 이수재[2] · 김락현[3] · 조하경[4] · 진성욱[4,5,‡]
[1]K-water
[2]한국환경연구원
[3]한국환경공단 토양지하수처
[4]전북대학교 환경에너지융합학과
[5]전북대학교 지구환경과학과 & 지구환경시스템 연구소

Trend analysis for the nitrate-nitrogen and chloride data of the National Groundwater Quality Monitoring Network for systematic groundwater quality management

Hyeonsil An[1] · Yunjung Hyun[2] · Soo Jae Lee[2] · Rak-Hyeon Kim[3] · Hakyung Cho[4] · Sung-Wook Jeen[4,5,‡]
[1]K-water, Daejeon 34350, Republic of Korea
[2]Korea Environment Institute, Sejong 30147, Republic of Korea
[3]Department of Soil and Groundwater, Korea Environment Corporation, Incheon 22689, Republic of Korea
[4]Department of Environment and Energy, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Republic of Korea
[5]Department of Earth and Environmental Sciences & The Earth and Environmental Science System Research Center, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Republic of Korea

요 약

이번 연구에서는 체계적인 지하수 수질 관리를 위해서 2007년부터 2013년도까지의 지하수수질전용측정망 자료를 이용하여 질산성 질소(NO_3-N)와 염소 이온(Cl^-)를 대상으로 비모수적 통계분석방법인 Sen의 경향성 분석법을 이용하여 추세분석을 실시하였다. 개별 관측정의 심도별 추세분석 결과를 전국 분포도에 도시하였으며, 추세의 경향성과 함께 문턱값(threshold value)에 대한 정도로서 분류하였다. 분석한 총 234지점 중 '추세 없음'에 해당하는 지점은 질산성 질소와 염소 이온에서 각각 194지점과 163지점으로 대다수를 차지하였으며, 문턱값을 초과하는 지점은 질산성 질소와 염소 이온 항목에서 각각 17지점과 13지점으로 나타났다. 각 관정에서의 심도에 따른 추세분석 결과는 심도에 따라 경향성이 다르게 나타날 수 있으며, 이는 관측정이 설치된 지역의 지질 및 수리지질학적 특징과 밀접한 관련이 있음을 보여 주었다. 또한, 증가 추세가 나타나는 관측정들을 대상으로 추세의 기울기 및 현 시점의 농도와 문턱값과의 차이를 토대로 향후 문턱값에 도달하는 데까지 걸릴 시간을 계산하였다. 이번 연구결과는 오염이 진행되고 있는 지역에서 수질관리 대책을 수립하는데 도움을 줄 수 있으며, 통계적 방법에 의한 수질 예측에 대한 신뢰성 검증 등에도 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

주요어: 지하수 수질, 지하수수질전용측정망, Sen의 경향성 분석법, 문턱값, 추세분석

ABSTRACT: In this study, trend analysis was performed for the nitrate-nitrogen (NO_3-N) and chloride (Cl^-) data from the National Groundwater Quality Monitoring Network (NGQMN) of Korea during 2007 and 2013, using Sen's method, a non-parametric statistical analysis method, for systematic groundwater quality management. The results for individual monitoring wells with different depths were plotted on the national distribution map, and were classified based on the relative concentrations against threshold values (TVs) along with the trends. Of the

‡ Corresponding author: +82-63-270-3429, E-mail: sjeen@jbnu.ac.kr

total of 234 points analyzed, the points corresponding to 'no trend' accounted for the majority with 194 points and 163 points, and the points above TVs were 17 points and 13 points for nitrate-nitrogen and chloride, respectively. The results of the trend analysis according to the depth in each well showed that the trends can be different, and this is closely related to the geology and hydrogeological characteristics of the area where the monitoring well was installed. For monitoring wells showing an increasing trend, the time required to reach TVs in the future was calculated based on the trend slope and the difference between the present concentration and TV. This study can help to establish water quality management framework in areas where groundwater contamination is in progress, and to verify the reliability of water quality predictions by statistical analyses.

Key words: groundwater quality, National Groundwater Quality Monitoring Network, Sen's method, threshold value, trend analysis

1. 서 론

체계적인 지하수 수질 관리를 위해서는 수질 항목들에 대한 시간적 경향성을 파악하는 것이 중요하다. 예를 들어, 유럽연합(European Union, EU)의 물관리 기본지침(Water Framework Directive, WFD)과 지하수 기본지침(Groundwater Directive, GWD)은 각 회원국이 지하수 수질 오염농도의 추세를 파악하도록 요구하고 있으며(Mendizabal *et al*., 2012), 인위적 활동에 의한 영향으로 발생한 오염물질의 농도가 상승추세인 경우 이러한 추세를 역전시키기 위한 조치를 취하도록 하고 있다(EC, 2009). 추세역전 조치의 목적은 자연상태에서의 수질 변동성 확인과 잠재적 수질 악화 방지에 있으며, 이를 실행하기 위한 시작점 설정 시 지하수체(groundwater body)와 관련된 환경적 위해성, 환경적 목표, 지하수 수질기준 또는 (관리)문턱값(threshold value, TV)을 고려하도록 하고 있다. 추세역전의 시작점은 지하수 수질 기준 또는 문턱값의 백분율로 표현되는데, 일반적으로 오염물질의 농도가 관련 지하수 수질 기준 또는 문턱값의 75%에 도달했을 때를 시작점으로 설정한다(EC, 2009).

문턱값의 개념은 유럽연합의 Background cRiteria for the IDentification of Groundwater thrEsholds (BRIDGE) 사업에서 물관리 기본지침과 지하수 기본지침을 통해 유럽지역 지하수의 오염 및 악화를 전체적으로 관리하기 위해 지하수의 화학적 상태를 평가할 수 있는 오염물질별 기준을 설정하기 위해 도입되었다(EC, 2000, 2006, 2008). 각 회원국들은 자체적으로 지하수 수질의 배경농도(background level, BL)를 산출하고, 배경농도와 수질 준거치(criteria value, CV)를 고려하여 각 지역의 지하수 수질의 특성을 반영한 문턱값을 마련하도록 하고 있다(EC, 2009). 따라서 국내에서도 문턱값과 추세분석을 포함하는 새로운 지하수 수질 관리 체계로 전환하기 위해서는 시간의 경과에 따라 축적된 수질 데이터에 대한 경향성 분석이 필수적이다(An *et al*., 2015).

지하수 수질 항목의 경향성을 분석하기 위한 방법으로는 크게 모수적과 비모수적 분석법이 있다. 모수적 분석법은 모집단이 특정한 분포를 따른다는 가정 하에서 사용하는 통계법으로서, 정규분포를 가정하고 비교적 많은 자료와 등간격 자료가 필요하며, 결측자료나 특이값에 영향을 받는다. 반면, 비모수적 분석법은 모집단에 대한 분포형태를 가정할 수 없는 경우에 사용하는 통계법으로서, 실제 양적 관측값이 아닌 순위나 부호만을 사용하기 때문에 정규분포를 가정 할 수 없는 상황과 자료의 표본 수가 적을 때 사용하며, 결측자료나 특이값의 영향을 크게 받지 않는다.

비모수적 분석법 중 Mann-Kendall 검정법(Mann-Kendall test)은 수질, 하천유량, 온도, 강수량 등 수리기상학 분야에서 추세를 분석하기 위해 널리 이용되는 기법으로, 자료가 선형적인 증감추세를 보이거나 단조로운 증가형태일 경우에 추세파악이 가능하다(Yue *et al*., 2002). 일반적으로 Mann-Kendall 검정법의 분석 정확도는 추세의 정도와 입력자료 수에 비례하며, 자료의 분산 정도에 반비례하는 것으로 알려져 있다. Sen의 경향성 분석법(Sen's method)은 모집단에 대한 분포 형태를 가정할 수 없는 경우에 사용하는 비모수적 통계방법 중 하나로서 선형의 추세를 가정하여 기울기를 계산하고 실제 값들의 구간별로 산출된 기울기 값들의 서열을 이용하기 때문에 특이값이나 결측값의 영향을 적게 받는다(Salmi *et al*., 2002). 이러한 비모수적 수질추세 분석법은

지하수 수질 경향성을 파악하기 위한 방법론으로 많이 사용되어 왔으며(EPA, Ireland, 2010; Ducci *et al*., 2019; Frollini *et al*., 2021), 최근에 국내에서도 적용되고 있는 사례가 늘고 있다(Lee *et al*., 2006; Kim *et al*., 2010; Yoon *et al*., 2012; Jeon *et al*., 2020).

한편, 심도에 따라 대수층의 상태와 지화학적 조건이 다를 수 있으며 이에 따라 같은 수질 항목에 대해서도 다른 경향성을 보일 수 있다. 따라서 수질 관리 방안도 심도별로 달리 수립되어야 할 수 있는데 실제 관측정에 대한 심도별 추세분석은 이러한 대응에 대한 근거를 제공할 수 있다. 국내의 경우 지하수 관측망에 심도별로 수질분석을 하고 있는 관측정이 있으나 심도별 수질자료의 시간적 경향성에 대한 연구는 현재까지 드문 상황이다.

이번 연구에서는 전국 규모의 지하수수질측정망을 대상으로 지하수 수질항목 중 추세분석을 위한 충분한 가용 데이터가 있는 항목에 대해 비모수적 통계분석법인 Sen의 경향성 분석법을 이용하여 추세분석을 실시하고, 이를 토대로 향후 지하수 수질 관리방안 마련을 위한 기초자료를 제공하고자 하였다. 또한 지역적 대수층의 특성에 따라 심도별로 다른 추세를 보이는 관측정들을 예시함으로써 심도별 지하수 관리의 중요성을 환기하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 지하수 수질 관측자료

이번 연구에서는 2007년부터 2013년도까지의 지하수수질전용측정망에 대한 질산성 질소(NO_3-N), 염소 이온(Cl^-), 수소이온농도(pH)의 3가지 분석항목에 대해 개별 측정관측정의 심도별, 항목별 추세분석을 실시하였다. 지하수수질전용측정망은 배경수질전용측정망과 오염감시전용측정망으로 구성되는데, 현재는 "국가지하수측정망"으로 명칭이 변경되었다. 이번 연구에서는 자료 획득 당시의 명칭인 "지하수수질전용측정망"을 그대로 사용하고자 한다. 배경수질전용측정망은 지질 및 유역을 고려한 지하수 배경수질 및 수질특성을 파악하기 위해 전국을 미고결퇴적물, 반고결퇴적암, 쇄설성퇴적암, 석회암, 비다공질화산암, 다공질화산암, 관입화성암, 변성암 등의 8개 주요 수문지질로 구분하여 각 지질단위별로 설치되었으며, 오염감시측정망은 지하수 오염 및 확산을 지속적으로 감시하기 위해 산업단지, 폐광산지역 등 대규모 오염원과 국가적 관리가 필요한 오염지역 주변에 설치되었다(Ministry of Environment, 2013). 그림 1은 2013년 당시 설치되어 있는 지하수수질전용측정망 총 113개 관측정(294

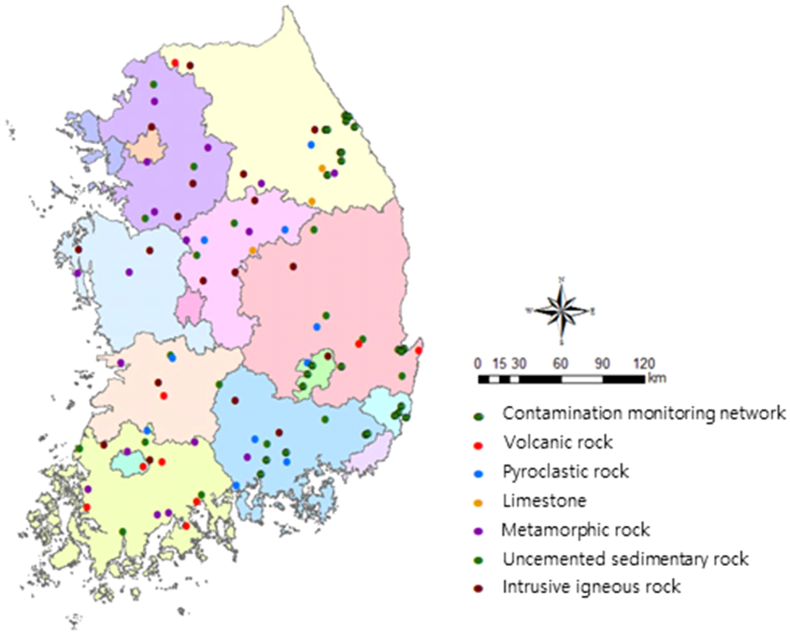

Fig. 1. Location map of the National Groundwater Quality Monitoring Network (NGQMN) of Korea.

지점)의 분포를 보여준다. 여기서 지점수는 각 관측정에 심도별로 설치된 지점까지를 고려한 숫자이다. 이 중 지질단위별로 구분한 배경수질전용측정망은 74개 관측정(222지점)이며, 오염감시전용측정망은 39개 관측정(72지점)이다.

지하수수질전용측정망 자료는 매년 1, 2, 3, 4분기에, 최대 3개의 심도에서 얻어진다. 이번 연구에서의 추세분석은 2007년부터 2013년까지의 분기별 자료를 이용하였으며, 총 113개 관측정(294지점) 중 심도의 구분이 없는 관측정과 추세분석을 위한 통계적 기법에 요구되는 최소 데이터의 개수를 만족하지 못하는 28개 관측정(60지점)을 제외한 85개 관측정(234지점)의 자료를 이용하였다. 85개 관측정의 심도별 지점 수는 심도 1, 2, 3에서 각각 85, 85, 64지점이며, 이번 논문에서 표기한 심도 1, 2, 3은 지표면으로부터 각각 7.5-19.5 m, 23-47 m, 70-150 m 깊이에 해당된다.

2.2 추세분석을 위한 통계적 기법

이번 연구에서의 Sen의 경향성 분석법을 이용한 추세분석은 다음과 같은 계산식을 이용하여 이루어졌다(Yoon *et al*., 2012; An *et al*., 2015). 먼저 시간에 따른 농도의 변화를 (1)과 같은 선형의 방정식으로 가정한다.

$$X(t) = Qt + B \tag{1}$$

여기서 $X(t)$는 시간 t에서의 분석항목의 농도, Q는 농도추세의 기울기, 그리고 B는 상수를 나타낸다. 수질항목의 농도가 식 (1)과 같이 선형의 추세를 따른다고 가정한 후, 모든 자료들 간의 기울기(Q)를 계산한다.

$$Q = \frac{x_{i'} - x_i}{i' - i} \tag{2}$$

이 때 i'는 i이후의 시간, $x_{i'}$는 i'시간에서의 농도, x_i는 i시간에서의 농도를 나타낸다. 이를 통해 N'개의 Q가 계산된다.

$$N' = \frac{n(n-1)}{2} \tag{3}$$

여기서 n은 자료의 개수이다. 이어서, N'개의 Q를 크기순으로 정렬하고, 중앙값을 기울기 예측값(Q')으로 결정한다.

$$Q' = \begin{cases} Q_{[(N'+1)/2]} & \text{if } N' : \text{홀수} \\ \frac{1}{2}\left(Q_{[N'/2]} - Q_{[(N'+2)/2]}\right) & \text{if } N' : \text{짝수} \end{cases} \tag{4}$$

다음에는, Q'가 신뢰구간 내에서 경향성이 인정되는지 확인하기 위해서 Mann-Kendall 검정법의 통계추정치 S의 분산 값인 $VAR(S)$를 이용하여 신뢰구간 간격 C_α를 계산한다.

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

여기서, q는 같은 값을 갖는 데이터를 묶은 그룹의 수를 나타내며, t_p는 p번째 데이터와 같은 값을 갖는 데이터의 개수를 말한다. 신뢰구간 간격 C_α는 식 (6)으로 표현된다.

$$C_\alpha = Z_{1-\alpha/2} \times \sqrt{VAR(S)} \tag{6}$$

이 때, 95% 신뢰수준을 고려할 경우 $Z_{1-\alpha/2}$=1.96이다. 그 다음에 신뢰구간의 양 끝값에 대한 순위인 M_1와 M_2를 구한다.

$$M_1 = \frac{N' - C\alpha}{2} \ , \ M_2 = \frac{N' + C\alpha}{2} + 1 \tag{7}$$

여기서 구해진 M_1, M_2에서의 Q는 각각 신뢰구간의 최소, 최대 기울기인 $Q_{\min}$, $Q_{\max}$이며, $Q_{\min}$, $Q_{\max}$ 값 사이에서 0의 존재유무를 확인하여 경향성을 판단한다. 만일 $Q_{\min}$, $Q_{\max}$사이에 0이 포함되지 않으면 경향성이 인정되지만, $Q_{\min}$, $Q_{\max}$사이에 0을 포함한다면 경향성이 없다고 판단한다. 결과적으로, 95% 신뢰수준에서 기울기가 양의 값을 나타내면 '증가 추세(increasing trend)', 기울기가 음의 값을 나타내면 '감소 추세(decreasing trend)', 그리고 신뢰구간 내에 0이 포함되면 모두 '추세 없음(no trend)'으로 표시하였다.

결정된 추세는 국내 지하수 수질의 특성을 반영

Table 1. Background levels (BLs) and threshold values (TVs) for groundwater quality parameters of Korea (Korea Environment Institute, 2013).

Parameter	Criteria value (CV, mg/L)		Depth*	Background level (BL, mg/L)**	Threshold value (TV, mg/L)**	
	Residential water	Drinking water			Residential water	Drinking water
NO_3-N	20	10	Whole	2.4	11.2	6.2
			1	2.5	11.3	6.3
			2	2.5	11.3	6.3
			3	2.2	11.1	6.1
Cl^-	250	250	Whole	75.7	162.9	162.9
			1	85.0	167.5	167.5
			2	78.8	164.4	164.4
			3	98.7	174.3	174.4

* Whole: 7.5-150 m, 1: 7.5-19.5 m, 2: 23-47 m, and 3: 70-150 m.
** BLs and TVs are tentative and could be changed.

Table 2. The results of the trend analysis, classified based on the threshold values (TVs) for groundwater quality parameters.

Parameter	Depth	Number of monitoring wells tested	Number of monitoring wells analyzed						
			≥ TV			< TV			
			Increasing trend	Decreasing trend	No trend	Increasing trend		Decreasing trend	No trend
						≥ 75% of TV	< 75% of TV		
NO_3-N	1	85	1	0	4	1	7	9	63
	2	85	0	1	6	1	2	5	70
	3	64	1	1	3	1	4	6	48
Cl^-	1	85	1	0	1	0	13	12	58
	2	85	2	2	2	0	11	12	56
	3	64	3	0	2	0	9	6	44

한 문턱값(Korea Environment Institute, 2013; 표 1)에 대한 초과 여부로 다시 분류되었다. 수질 항목 중 질산성 질소와 염소 이온은 생활용수 기준 문턱값을 적용하였으며, 수소이온농도는 산출된 문턱값이 없으므로 본 논문에서는 질산성 질소와 염소 이온 결과만을 제시하였다. 분석결과 중 증가하는 추세의 경우 오염 진행의 정도를 세분하기 위해 유럽연합에서의 추세역전 시작점의 기준값(EC, 2009)인 문턱값의 75%를 기준으로 재분류하였다. 따라서 최종적인 경향성 분석결과는 '문턱값을 초과하며 증가 추세', '문턱값을 초과하나 감소 추세', '문턱값을 초과하나 추세 없음', '문턱값을 초과하지 않으나 문턱값의 75% 이상에서 증가 추세', '문턱값을 초과하지 않으나 문턱값의 75% 미만에서 증가 추세', '문턱값을 초과하지 않으며 감소 추세', 그리고 '문턱값을 초과하지 않으며 추세 없음'으로 분류하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 심도별 추세분석 결과의 공간적 분포

추세분석 결과 총 234지점 중 '추세 없음'으로 판단된 곳은 질산성 질소와 염소 이온의 각 항목에서 각각 194지점과 163지점으로 대부분을 차지하였다(표 2). '증가 추세'는 질산성 질소와 염소 이온 각 항목에서 각각 18지점과 39지점에서 나타났으며, 심도별로는 두 항목 모두 심도 1에서 '증가 추세'가

가장 많이 나타났다. 문턱값을 초과하는 지점은 질산성 질소와 염소 이온 항목에서 각각 17지점, 13지점이었으며, 심도별로는 두 항목 모두 심도 2에서 가장 많은 지점이 문턱값을 초과하였다. 문턱값을 초과하지 않으나 '증가 추세'에 해당하는 지점은 질산성 질소와 염소 이온에서 각각 16지점과 33지점으로 염소 이온에서 더 많았으나, '증가 추세' 중 추세 역전조치가 고려되어야하는 문턱값의 75%를 넘어선 지점은 염소 이온에서는 존재하지 않았고 질산성 질소에서는 3지점이었다. 이러한 심도별 추세분석 결과를 각 관정의 실제 위치에 도시하여 항목별 심도별 추세분포도를 작성하였다. 질산성 질소의 추세 분포도는 그림 2와 같으며, 염소 이온의 추세 분포도는 그림 3과 같다.

그림 2에서 질산성 질소의 문턱값을 초과하며 '증가 추세' 해당하는 지역은 강원도 PCYC-관측정 심도 1과 강원도 PCHG-관측정 심도 3이다. 두 관측지점에서 문턱값 초과와 '증가 추세'를 보이는 것은 주변 농업 단지 및 축산 활동의 영향으로 보인다. 한편, 강원도 JSYS-관측정 심도 1과 경기도 PTLC-관측정 심도 3은 문턱값을 초과하지 않으나 75%를 넘어선 '증가 추세'를 보인다. JSYS-관측정에서는 농

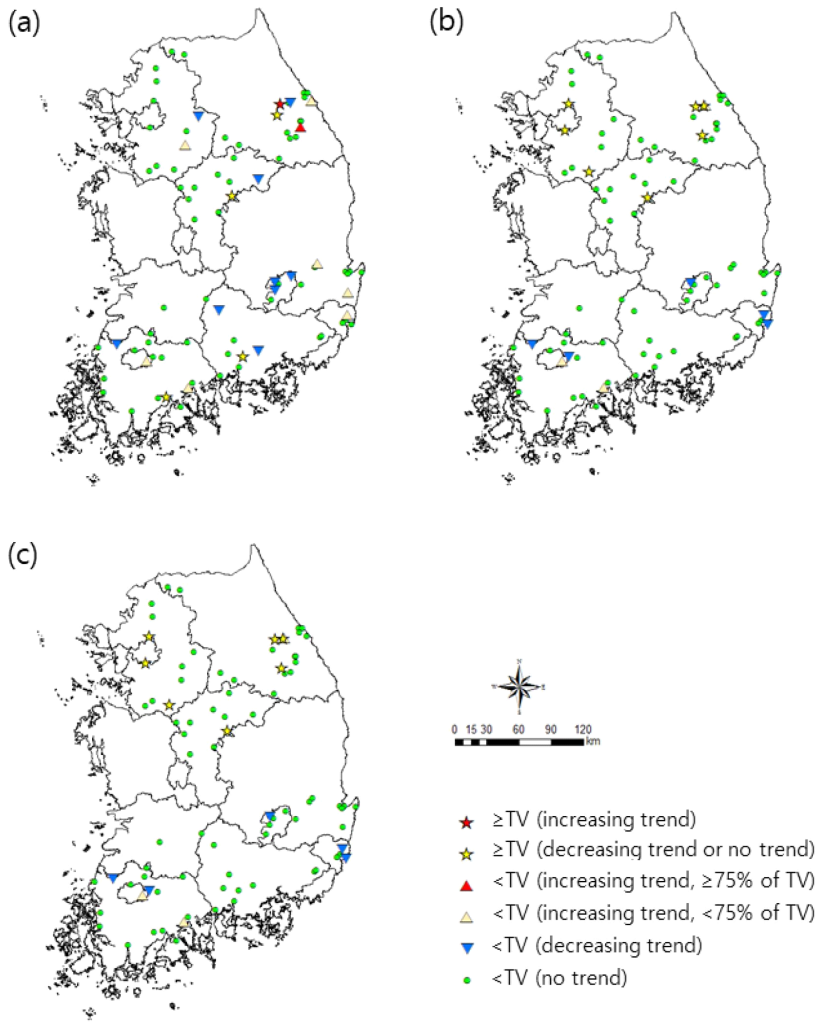

Fig. 2. Results of the trend analysis for NO_3-N, showing monitoring wells with ≥TV (increasing trend), ≥TV (decreasing trend or no trend), <TV (increasing trend, ≥75% of TV), <TV (increasing trend, <75% of TV), <TV (decreasing trend), and <TV (no trend): a) depth 1, b) depth 2, and c) depth 3.

사에 사용된 비료 및 민가에서 배출되는 질산성 질소에 의한 영향으로 보이며, PTLC-관측정의 경우 산업단지에 의한 영향인 것으로 판단된다.

염소 이온의 추세분석에서, 문턱값을 초과하며 '증가 추세'를 보이는 곳은 해안가 지역으로, 경상북도 PHYI-관측정 심도 1, 강원도 PCHG-관측정 심도 2, 경상북도 PHCR-관측정 심도 2, 경상북도 PHGR-관측정 심도 3, 전라남도 SCGR-관측정 심도 3, 전라남도 MAIS-관측정 심도 3이 해당된다(그림 3). 이들 관측정에서의 염소 이온 증가 추세는 해수의 영향으로 인해 토양 또는 암반층 내에 누적된 염분 때문인 것으로 판단된다.

3.2 심도별 추세분석의 개별 관측정 예시

추세분석 결과 중 심도별로 다른 추세를 보이는 사례를 질산성 질소와 염소 이온에 대해 각각 한 관측정씩 추세분석 결과를 도시하였다(그림 4, 5). 각 그림에서 시계열에 따라 관측된 농도와 함께 추세분석 결과로 얻어진 기울기와 신뢰구간을 고려한 기울기를 도시하였다.

그림 4는 오염감시측정망 중 하나인 강원도 PCHG-관측정에서의 질산성 질소의 심도별 추세결과를 보여준다. 관측정이 설치된 지역은 축산 및 농업단지 지역으로 질산성 질소 오염이 우려되는 지역이다. 질산성 질소 농도의 추세가 심도별로 다르게 나타나

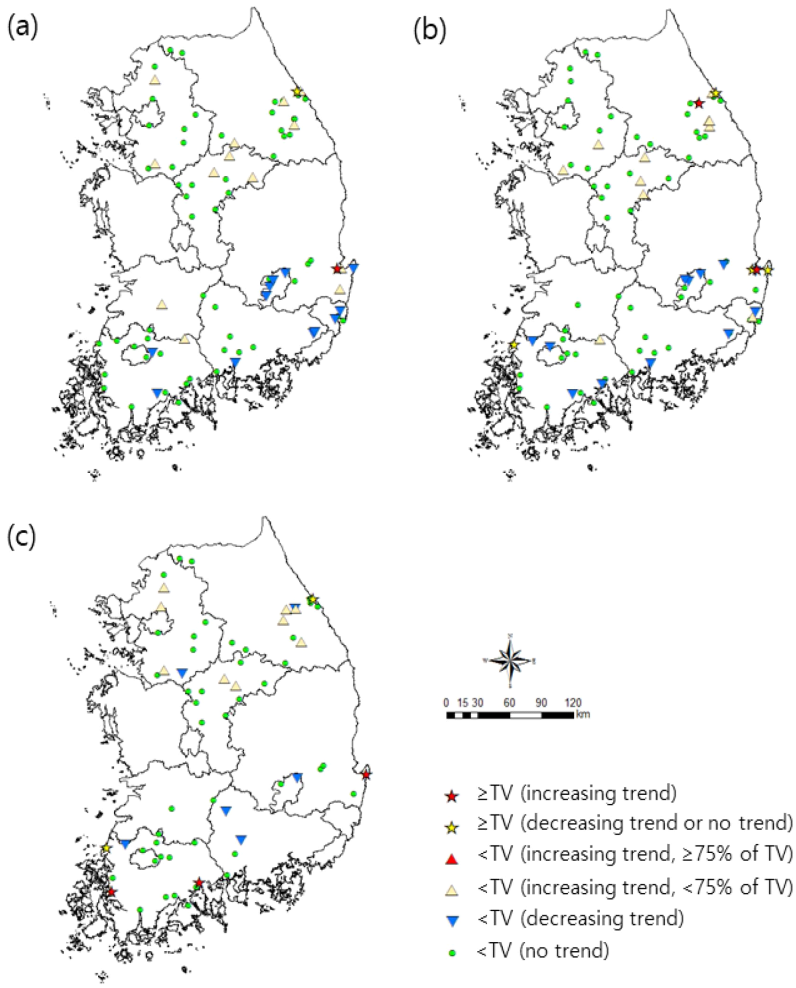

Fig. 3. Results of the trend analysis for Cl^-, showing monitoring wells with ≥TV (increasing trend), ≥TV (decreasing trend or no trend), <TV (increasing trend, ≥75% of TV), <TV (increasing trend, <75% of TV), <TV (decreasing trend), and <TV (no trend): a) depth 1, b) depth 2, and c) depth 3.

는데, 심도 2와 3에서는 증가하는 추세를 나타내는 반면, 심도 1에서는 오히려 감소하는 추세를 보인다. 일반적으로 질산성 질소의 오염이 발생한 지역에서 대수층내 유기물이 풍부할 때 산소의 공급이 적어지는 깊은 심도에서 탈질과정에 따른 질산성 질소의 농도 변화가 관찰되기도 하나, 이 관측정의 경우 심도에 따른 산화-환원 조건과 관련된 변화는 관찰되지 않았다.

이 관측정이 위치한 지역은 중생대 쥐라기 심성암류(대보화강암)를 기반암으로 하고, 상부에 풍화

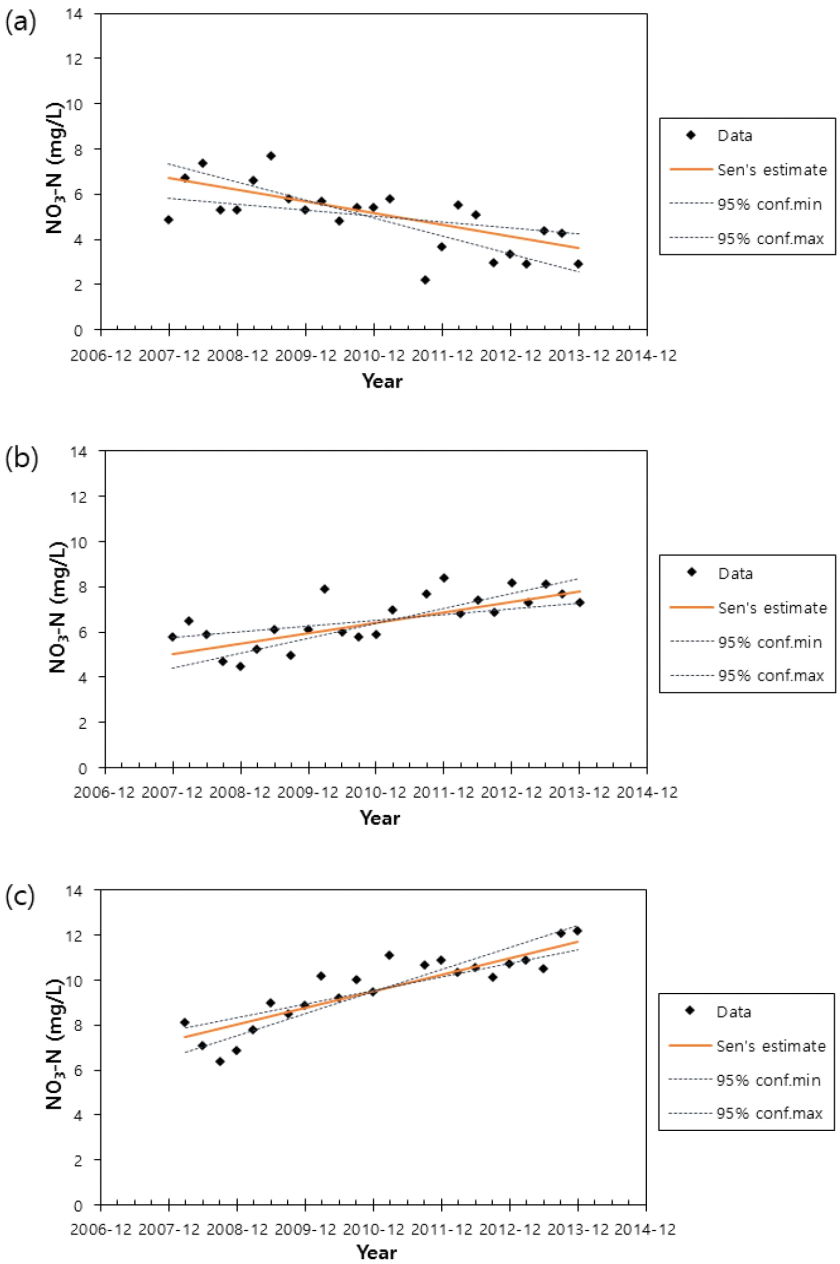

Fig. 4. Results of the trend analysis for NO_3-N at PCHG-monitoring well in Gangwon-do: a) depth 1, b) depth 2, and c) depth 3.

잔류토와 제4기 충적층이 존재한다. 한국환경공단의 관측정 설치 시의 시추조사 결과, 최상부의 풍화잔류토층은 화강암의 풍화잔류토층으로 지표면으로부터 13.2 m의 두께로 분포하며, 구성성분은 실트, 세립~조립질 모래 및 약간 풍화된 암편으로 구성된다. 바로 아래 풍화암층은 화강암의 풍화암층으로 지표면으로부터 13.2 m부터 확인되며, 7.3 m의 두께로 분포한다. 가장 아래 기반암층은 풍화대층 하부 20.5 m부터 30.5 m까지이며, 암종은 화강암으로 색조는 암갈색, 암녹색, 암회색, 담홍색, 회백색

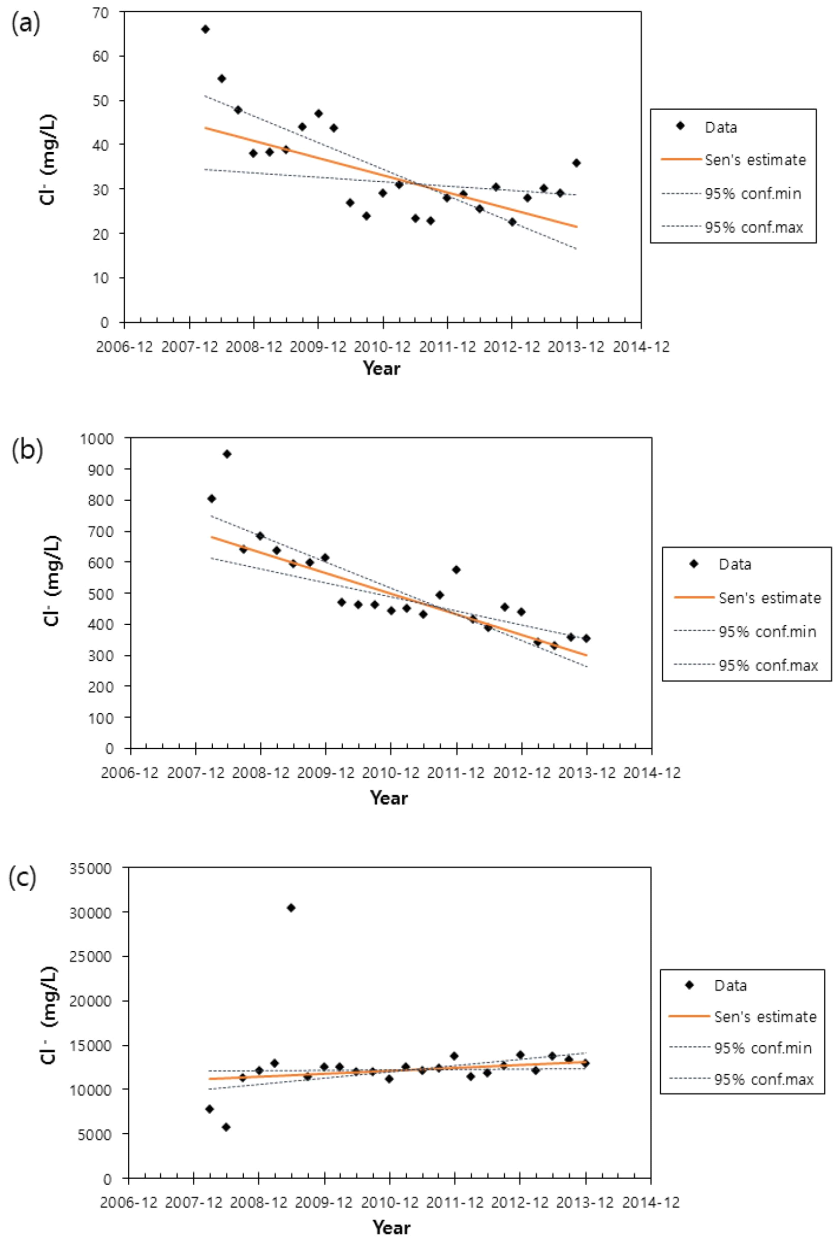

Fig. 5. Results of the trend analysis for Cl^- at PHGR-monitoring well in Gyeongsangbuk-do: a) depth 1, b) depth 2, and c) depth 3. Note that scales for the concentrations are different for each figure. One point in depth 3 appears to be an outlier.

으로 다양하게 나타난다. 특히 23.8~27.4 m 구간은 지하수에 의한 변질대를 수반하며 시추 시 누수를 확인하여 주요 지하수 유출 예상구간으로 추정되었다. 또한 전기비저항 탐사 결과, 시추조사 지점은 비저항 분포가 급변하는 지점으로 단층파쇄대 인접부에 위치하여 다수의 파쇄대가 수반될 것으로 추정되었고, 심도 25 m 내외에서 대수층이 발달되어 있을 것으로 판단되었다. 따라서 이 관측정에서의 심도별 질산성 질소의 추세분석 결과와 수리지질학적 특성을 볼 때, 이 지역에서의 농업활동에 따른 질산성 질소의 유입이 대수층 하부의 단열파쇄대와의 연결성과 관련되어 있을 것으로 추정된다.

염소 이온의 심도별 추세분석 사례로서, 그림 5는 경상북도 PHGR-관측정에서의 염소 이온의 심도별 추세결과를 보여준다. 이 관측정은 배경수질측정망 중 하나로서 비다공질화산암 지역에 위치하고 있다. 해안 인근지역으로 염소 이온의 농도가 15,000 mg/L에 이를 정도로 타 지역과 비교하여 상당히 높게 나타난다(심도 1<심도 2<심도 3). 추세분석 결과는 염소 이온 농도가 심도 1, 2에서는 낮아지는 반면, 심도 3에서는 크게 증가하는 추세를 보인다.

한국환경공단의 관측정 자료에 따르면 이 관측정이 위치하고 있는 지역은 중생대 백악기 불국사관입암류에 속하는 화강암, 신생대 제3기 연일층군의 화산암류 및 이들 지층을 부정합으로 피복하는 제4기 충적층으로 구성되어 있다. 기반암의 암종은 안산암질암이며, 암질은 암녹색 및 암회색의 치밀한 기질(matrix)에 장석반정을 다수 수반하고 있는 반상조직의 특징을 나타낸다. 시추조사 결과, 최상부 매립층은 지표면으로부터 3.3 m의 두께로 분포하며, 구성성분은 점토, 자갈로 확인되었다. 바로 아래 퇴적층인 모래자갈층은 매립층 하부 3.3 m부터 확인되며, 12.6 m의 두께로 분포한다. 구성성분은 중~세립질 모래 및 자갈과 부분적으로 패각이 소량 협재되어 있다. 그 아래 풍화대층은 풍화잔류토층으로 모래자갈층 하부 15.9 m부터 확인되며, 3.5 m의 두께로 분포한다. 구성성분은 중~세립질 모래 및 약간 풍화된 암편으로 확인된다. 가장 아래 기반암층은 풍화잔류토층 하부 19.4 m부터 확인되며, 80.0 m까지 시추조사가 이루어졌다. 시추조사를 통하여 심도 80 m 내에서 지하수 유출 예상구간은 총 9개로 확인되었으며, 주로 24.6~80.0 m에 구간으로 파쇄대가 발달되어 있으며, 풍화대 협재 및 산화철 착색현상을 수반하고 있는 것으로 조사되었다. 전기비저항 탐사 결과와 시추조사 결과를 종합할 때 측정망 설치지점 주변에는 습윤대 및 파쇄대가 발달되어있고, 시추 작업 과정에서 누수 현상 등 지질 이상대가 확인되었다. 따라서 양호한 천부 대수층 및 심부 대수층이 발달되어 있을 것으로 추정되었다.

이 관측정 주변지역 20개 관정에서의 수질분석 결과는, 전기전도도가 112~700 μS/cm의 분포를 보이며 이 중 6개 관정이 500 μS/cm 이상으로 측정되었는데, 이는 주변지역이 해안이라 해수의 영향을 받은 것으로 판단되었다. 또한 수질유형 중 Ca-Cl 유형은 설치관정 하류에 위치하고 특히 해안과 가깝게 위치하였다. 따라서, 이 관측정에서 심도가 깊어질수록 염소 이온의 농도가 증가하며 심도 3에서 상승추세가 나타나는 것은 해안과 인접한 지역에서 대수층 심부의 파쇄대를 중심으로 해수침투의 영향이 나타나고 있기 때문인 것으로 추정된다.

위의 두 관측정 사례에서 볼 수 있듯이 개별 수질항목의 수질특성과 추세의 경향성은 그 관측정이 위치하고 있는 지역의 오염원의 분포, 그리고 대수층의 지질 및 수리지질학적인 특성과 밀접한 관련이 있는 것을 알 수 있다. 또한 이러한 특성이 수질 항목의 경향성에 있어 심도에 따라 달리 영향을 줄 수 있음을 명확히 보여주고 있다. 따라서 수질 항목의 시간적인 경향성 판단과 이를 바탕으로 하는 수질관리체계 구축에 있어 지역적인 지질 및 수리지질학적 특성 평가와 함께 심도별로 수질특성을 분석하는 것이 중요함을 잘 예시하고 있다.

3.3 증가 추세의 경향성 유형 및 예상 추세분포

추세분석 결과, 증가 추세일 경우는 통계적으로 오염을 지시하는 것으로 판단된다. 따라서 증가하는 추세를 보일 경우에는 현재 시점의 농도가 어느 정도의 위험 수준에 도달하였는지 우선적으로 파악해야 한다. 또한 같은 위험수준에 도달했더라도 추세가 상승하는 속도에 따라 추세역전의 시행시점이나 대처시간이 달라질 수 있기 때문에 효과적인 지하수 수질 관리를 위해서는 증가 추세에 대한 추가적인 분석이 필요하다.

이번 연구에서는 증가 추세의 기울기에 대한 통계적인 분석과 현재시점 농도의 TV에 대한 백분율

Table 3. Summary of statistics for the slopes of increasing trends for NO_3-N and Cl^-.

	NO_3-N			Cl^-		
Mean	0.9	Percentile		19.4	Percentile	
Standard error	0.3			9.0		
Median	0.5	10 P	0.09	2.4	10 P	0.5
Standard deviation	1.3	20 P	0.2	56.1	20 P	0.9
Variance	1.8	30 P	0.2	3222.0	30 P	1.1
Kurtosis	10.3	40 P	0.3	28.5	40 P	1.8
Skewness	3.1	50 P	0.5	5.1	50 P	2.4
Range	5.6	60 P	0.6	335.5	60 P	4.1
Minimum	0.02	70 P	0.7	0.3	70 P	9.9
Maximum	5.6	80 P	0.9	335.7	80 P	17.8
Sum	15.2	90 P	3.0	738.1	90 P	33.2

Unit: mg/L/year.

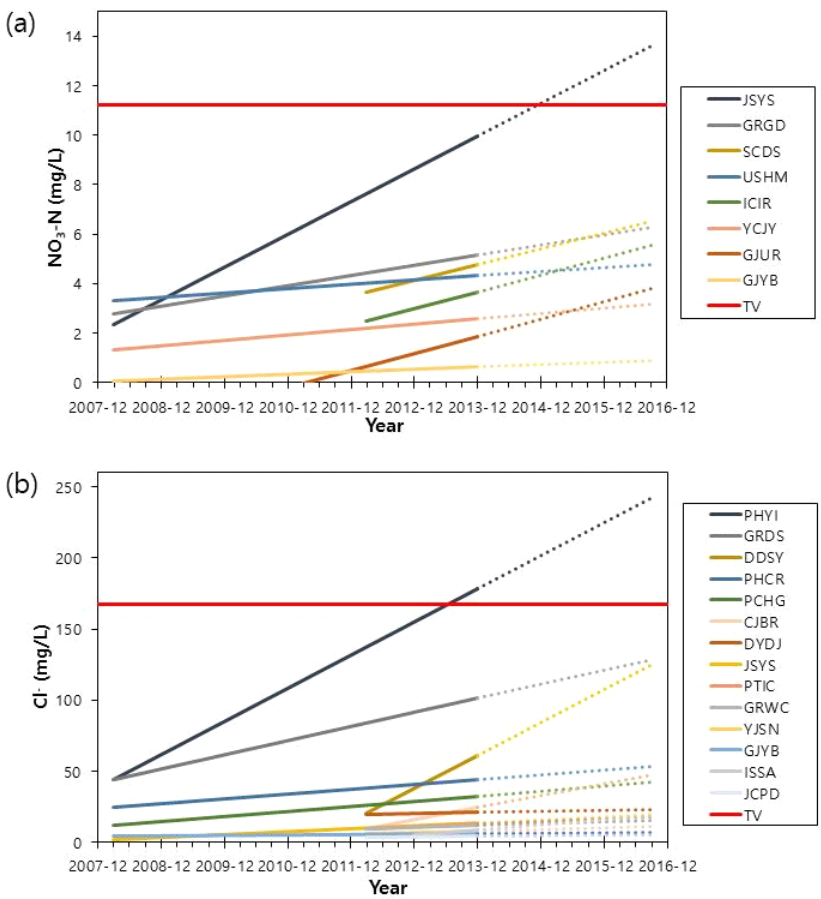

Fig. 6. Slopes of increasing trends for (a) NO_3-N and (b) Cl^- at depth 1. TV represents the threshold value and the dashed lines represent the predicted concentrations after year 2013. Depth 1 represents the shallowest depth at each monitoring well, which corresponds to 7.5-19.5 m from the surface.

Table 4. Summary of trend analysis for monitoring wells with increasing trends for NO_3-N and Cl^- at depth 1.

Monitoring well	[Present concentration/TV] × 100 (%)	Increasing rate (mg/L/year)	Time to reach TV (year)
	NO_3-N		
JSYS	88	1.3	1.0
GRGD	46	0.4	14.7
SCDS	42	0.6	10.2
USHM	38	0.2	40.1
ICJR	33	0.7	11.1
YCJY	23	0.2	39.8
GJUR	17	0.7	13.4
GJYB	6	0.1	112.3
	Cl^-		
PHYI	106	23.4	Already exceeded
GRDS	60	9.9	6.7
DDSY	36	23.2	4.6
PHCR	26	3.4	36.0
PCHG	19	3.6	37.9
CJBR	15	8.5	16.9
DYDJ	13	0.8	183.7
JSYS	8	2.0	76.1
PTIC	8	1.8	86.1
GRWC	7	1.2	127.5
YJSN	5	1.1	143.6
GJYB	3	0.3	607.7
ISSA	5	3.7	42.8
JCPD	3	0.4	376.7

을 구하여 수질 항목별 경향성의 유형을 살펴보았으며, 증가 추세에 있는 관측정에서의 TV와 현재농도의 차이(mg/L)를 증가율(mg/L/year)로 나누어 TV 도달까지 남은 시간(year)을 계산하였다. 증가 추세의 기울기에 대한 통계적인 분석은 심도별로 구분하지 않고, 심도 1, 2, 3에서 증가추세를 나타내는 모든 관정을 합하여 수행하였다. 표 3은 질산성 질소와 염소 이온 증가추세 관측정에서의 기울기 통계 요약을 보여준다. 질산성 질소의 증가추세 기울기의 평균은 0.9 mg/L/year, 중앙값 0.5 mg/L/year, 표준편차는 1.3 mg/L/year, 최소값 0.02 mg/L/year, 그리고 최대값은 5.6 mg/L/year이었다. 염소 이온의 경우 증가추세 기울기의 평균은 19.4 mg/L/year, 중앙값 2.4 mg/L/year, 표준편차는 56.1 mg/L/year, 최소값 0.3 mg/L/year, 그리고 최대값은 335.7 mg/L/year이었다.

각 수질항목의 심도별 증가 추세 유형을 한눈에 보기 위해 증가 추세를 보이는 개별 관정들의 추세선을 그림에 도시하였다(그림 6). 또한 심도별, 항목별 TV를 고려한 현재시점 농도의 백분율, 증가율, 그리고 TV 도달까지 남은시간을 계산하여 표에 나타내었다(표 4). 예시로서, 그림 6a는 심도 1에서 질산성 질소에 대하여 증가 추세를 보이는 개별 관정들의 추세선을 도시한 것이며, 그림 6b는 심도 1에서 염소 이온에 대하여 증가 추세를 보이는 개별 관정들의 추세선을 도시한 것이다.

위에서의 계산을 토대로 증가하는 추세의 경향성을 이용하여 향후 오염수준을 예측한 결과를 추세분

포도에 도시하였다. 그림 7과 그림 8은 질산성 질소와 염소 이온에 대해 증가 추세를 나타내는 관측정에서 현재의 추세로 증가할 경우 10년 후의 변화를 예상한 그림이다. 즉, 추세분석 결과에서 TV 도달까지 남은시간이 10년 이하였던 관정은 10년 후에 TV를 초과하게 되고, 나머지 관정은 TV 미초과 상태로 수질항목의 농도가 TV에 점점 가까워지게 된다. 그림에서 현재 TV 미초과인 상태로 감소 추세와 추세 없음을 나타내는 관정은 제외하고 TV 초과 관정과 TV를 미초과하더라도 증가하는 추세를 보이는 관정만을 도시하였다.

그림 7은 질산성 질소의 현재로부터(2013년 기준) 10년 후의 심도별 추세분포를 예측한 결과로서, 강원도 PCYC-관측정 심도 1은 현재와 10년 후 모두 '증가추세'를 보이며 문턱값을 초과한다. 강원도 JSYS-관측정 심도 1의 경우 현재 문턱값 미만이나 75% 이상의 '증가추세'를 보여 10년 후에는 문턱값 초과를 보인다(그림 7a). 강원도 PCHG-관측정 심도 2는 현재 문턱값의 75% 미만이나 '증가추세'를 보이고 있어 10년 후에는 문턱값을 초과한다(그림 7b). 강원도 PCHG-관측정 심도 3은 현재와 10년 후 모두 '증가추세'를 보이며 문턱값을 초과하며, 경기도 PTIC-관측정 심도 3의 경우 현재 문턱값의 75%를 초과한 '증가추세'로 10년 후에는 문턱값 초과를 보인다(그림 7c).

그림 8은 염소 이온의 현재로부터 10년 후의 심도별 추세분포 예측 결과이다. 그림 8a에서 경상도 PHYI-관측정 심도 1은 현재와 10년 후 모두 '증가추세'를 보이며 문턱값을 초과한다. 경기도 DDSY-관측정 심도 1, 강원도 GRDS-관측정 심도 1은 현재 문턱값의 75% 미만이나 '증가추세'를 보이고 있어 10년 후에는 문턱값을 초과한다. 그림 8b에서 강원도 PCHG-관측정 심도 2, 경상도 PHCL-관측정 심도 2는 현재와 10년 후 모두 '증가추세'와 문턱값 초

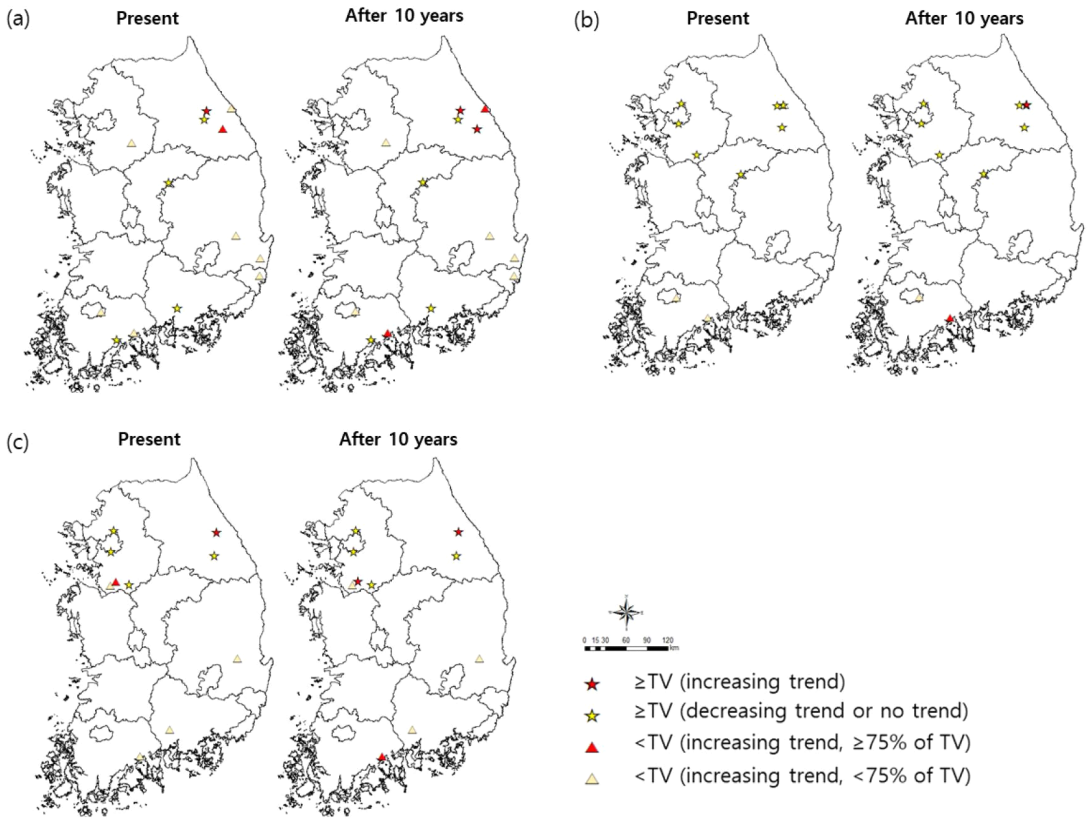

Fig. 7. Prediction of NO_3-N concentration after 10 years from year 2013 (present): a) depth 1, b) depth 2, and c) depth 3.

과를 보이고 있다. 경기도 ICJL-관측정 심도 2는 현재 문턱값의 75% 미만이나 '증가추세'를 보이고 있어 10년 후에는 문턱값을 초과한다. 그림 8c에서 경상도 PHGR-관측정 심도 3, 전라도 SCGR-관측정 심도 3, 전라도 MAIS-관측정 심도 3은 현재와 10년 후 모두 '증가추세'와 문턱값 초과를 보인다. 반면, 강원도 PCHG-관측정 심도 3, 경기도 DDSY-관측정 심도 3, 경기도 UJHW-관측정 심도 3은 현재 문턱값의 75% 미만이나 '증가추세'를 보여 10년 후에는 문턱값을 초과한다.

이와 같이 추세분석을 토대로 향후 수질 항목의 예상농도를 추정하는 것은 선형적인 관계를 가정하고 다른 여러 가지 수리지질학적 변수를 감안하지 않은 단순한 형태의 농도 예측이라고 할 수 있으나, 오염이 증가하는 경향성을 보이는 지역에서 오염수질에 대한 대응방안 수립에 도움을 줄 수 있으며, 향후 예측된 농도와 실측값과의 비교를 통해 통계적 수질분석 경향성 분석 결과에 대한 신뢰도 검증에 활용될 수 있다고 판단된다.

4. 결 론

이번 연구에서는 문턱값과 추세분석을 기반으로 하는 새로운 지하수 수질관리체계를 수립하는데 활용될 수 있도록 2007년-2013년 사이의 분기별 지하수수질전용측정망 자료를 이용하여 개별 관정의 항목별 심도별 수질 자료에 대한 추세분석을 실시하였다. 통계분석 방법 중 비모수 방법인 Sen의 경향성 분석법을 이용하여 장기추세 분석 방법의 적용성을 평가하였으며, 수질 항목 중 경향성 분석에 충분한 자료가 있는 질산성 질소와 염소 이온에 대한 심도별 추세분석을 실시하였다.

추세역전 시점의 결정을 위한 문턱값 적용 및 추세의 경향성에 따른 분류를 실시한 결과, 분석한 총 234지점 중 95% 신뢰수준에서 '추세 없음'에 해당하는 지점은 질산성 질소와 염소 이온에서 각각 194

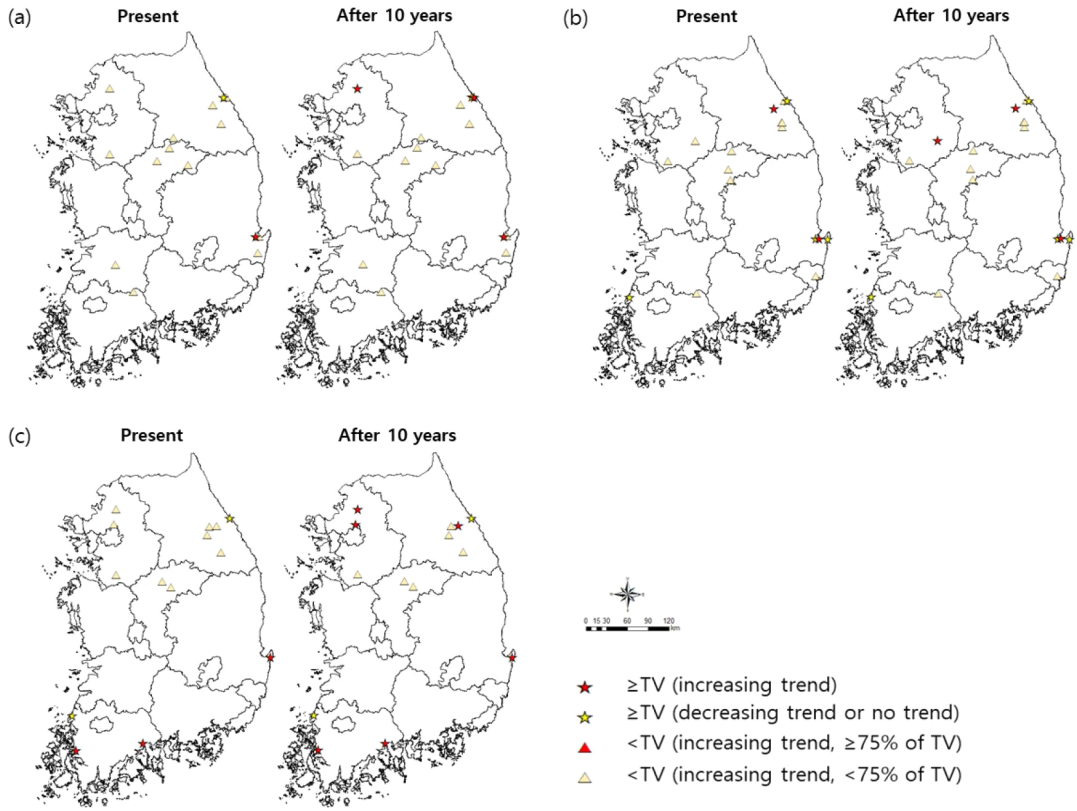

Fig. 8. Prediction of Cl^- concentration after 10 years from year 2013 (present): a) depth 1, b) depth 2, and c) depth 3.

지점과 163지점으로 '증가 추세' 또는 '감소 추세'를 보이는 지점에 비해 많은 수를 차지했다. 또한 문턱값을 초과하는 지점은 질산성 질소와 염소 이온 항목에서 각각 17지점, 13지점이며, 심도별로는 두 항목 모두 심도 2에서 가장 많은 지점이 문턱값을 초과하는 것으로 나타났다.

각 관측정에서의 심도에 따른 추세분석 결과는 심도에 따라 경향성이 다르게 나타날 수 있으며, 이는 관측정이 설치된 지역의 지질 및 수리지질학적 특징과 밀접한 관련이 있음을 보여 주었다. 따라서 지하수수질의 평가 시, 지하수 수질항목에 대한 심도별 고려가 필요하며 대상 지역에 대한 면밀한 수리지질학적 평가가 중요함을 보여준다. 또한, 증가 추세가 나타나는 관측정들을 대상으로 추세의 기울기와 현 시점의 농도 및 TV 값과의 차이를 토대로 향후 TV에 도달하는 데까지 걸릴 시간을 계산할 수 있었으며, 전국적인 분포도를 작성하는데 활용할 수 있었다.

연구 결과를 토대로 수질 자료에 대한 선형적인 경향성만으로 향후 농도를 예측하는 것은 과도하게 통계분석 결과를 추종하는 결과를 초래할 수 있으나, 이러한 추세분석 결과는 오염이 진행되고 있는 지역에서 수질관리에 대한 경고 및 수질관리 대책을 수립하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다. 또한 이번 연구결과는 통계적 방법에 의한 수질 예측에 대한 신뢰성 검증 등에도 폭넓게 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 국립환경과학원의 연구용역과제「지하수 배경농도 설정 및 수질기준 운영 개선을 위한 연구(II)」를 수행하는 한국환경연구원의 연구비 지원(2014-079)과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다 (NRF-2019R1A2C1086667).

REFERENCES

An, H., Jeen, S.-W., Lee, S.J., Hyun, Y., Yoon, H. and Kim, R.-H., 2015, Suggestion of a groundwater quality management framework using threshold values and trend analysis. Journal of Soli and Groundwater Environment, 20, 112-120 (in Korean with English abstract).

Ducci, D., Morte, R.D., Mottola, A., Onorati, G. and Pugliano, G., 2019, Nitrate trends in groundwater of the Campania region (southern Italy). Environmental Science and Pollution Research, 26, 2120-2131.

EC, 2000, Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for the community action in the field of water policy.

EC, 2006, Directive 2006/118/EC of the European Parliament and of the Council of 12 December 2006 on the protection of groundwater against pollution and deterioration.

EC, 2008, Directive 2008/32/EC of the European Parliament and of the Council of 11 March 2008 amending directive 2000/60/EC establishing a framework for community action in the field of water policy, as regards the implementing powers conferred on the commission.

EC, 2009, Common implementation strategy for the water framework directive (2000/60/EC). Guidance document No. 18, Guidance on groundwater status and trend assessment.

EPA, Ireland, 2010, Methodology for establishing groundwater threshold values and the assessment of chemical and quantitative status of groundwater, including an assessment of pollution trends and trend reversal.

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.

Jeon, C., Raza, M., Lee, J.-Y., Kim, H., Kim, C.-S., Kim, B., Kim, J.-W., Kim, R.-H. and Lee, S.-W., 2020, Countrywide groundwater quality trend and suitability for use in key sectors of Korea. Water, 12, 1193, https://doi.org/10.3390/w12041193.

Kim, G.-B., Choi, D.-H., Yoon, P.-S. and Kim, K.-Y., 2010, Trends of groundwater quality in the areas with a high possibility of pollution. Journal of the Korean Geoenvironmental Society, 11, 5-16 (in Korean with English abstract).

Korea Environment Institute, 2013, A Study on the Determination of Background Levels in Groundwater and Improvement of Groundwater Quality Standards (I).

Lee, J.-Y., Yi, M.-J., Lee, J.-M., Ahn, K.-H., Won, J.-H., Moon, S.-H. and Cho, M.-J., 2006, Parametric and nonparametric trend analysis of groundwater data obtained from national groundwater monitoring station. Journal of Soil and Groundwater Environment, 11, 56-67 (in Korean with English abstract).

Mendizabal, I., Baggelaar, P.K. and Stuyfzand, P.J., 2012,

Hydrochemical trends for public supply well fields in the Netherlands (1898-2008), natural backgrounds and upscaling to groundwater bodies. Journal of Hydrology, 450, 279-292.

Ministry of Environment, 2013, Establishment of Groundwater Quality Monitoring Networks and Groundwater Monitoring Plan.

Salmi, T., Määttä, A., Antilla, P., Ruoho-Ariola, T. and Amnell, T., 2002, Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates MAKESENS-The Excel template application. Finnish Meteorological Institute, Helsinki.

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, 22-32 (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 : November 24, 2021
Revised : December 18, 2021
Accepted : December 21, 2021