

문턱값과 추세분석을 이용한 지하수 수질관리체계 구축을 위한 연구

안현실¹ · 진성욱^{1*} · 이수재² · 현윤정² · 윤희성³ · 김락현⁴

¹전북대학교 지구환경과학과

²한국환경정책 · 평가연구원

³한국지질자원연구원

⁴한국환경공단 토양지하수처

Suggestion of a Groundwater Quality Management Framework Using Threshold Values and Trend Analysis

Hyeonsil An¹ · Sung-Wook Jeon^{1*} · Soo Jae Lee² · Yunjung Hyun² · Heesung Yoon³ · Rak-Hyeon Kim⁴

¹Department of Earth and Environmental Sciences, Chonbuk National University

²Korea Environment Institute

³Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

⁴Department of Soil and Groundwater, Korea Environment Corporation

ABSTRACT

Statistical trend analysis using the data from the National Groundwater Quality Monitoring Network (NGQMN) of Korea was conducted to establish a new groundwater quality management framework. Sen's test, a non-parametric statistical method for trend analysis, was used to determine the linear trend of the groundwater quality data. The analysis was conducted at different confidence levels (i.e., at 70, 80, 90, 95, and 99% confidence levels) for three of groundwater quality parameters, i.e., nitrate-nitrogen, chloride, and pH, which have sufficient time series of the NGQMN data between 2007 and 2013. The results showed that different trends can be determined for different depths even for the same monitoring site and the numbers of wells having significant trends vary with different confidence levels. The wells with increasing or decreasing trends were far less than the wells with no trend. Chloride had more wells with increasing trend than other parameters. On the other hand, nitrate-nitrogen had the most wells with increasing trend and concentration exceeding 75% of the threshold values (TVs). Based on the methodology used for this study, we suggest including groundwater TVs and trend analysis to evaluate groundwater quality and to establish an advanced groundwater quality management framework.

Key words : Groundwater quality management framework, National groundwater quality monitoring network, Threshold value, Trend analysis

1. 서 론

지하수의 이용과 개발이 지속적으로 증가함에 따라 수 자원으로서의 지하수의 중요성이 높아지면서 보다 더 체계적으로 지하수를 관리하기 위해서 국가적인 측면에서의 노력이 진행되고 있다. 현재 환경부에서는 전국 지하수의 수질현황과 수질변화 추세를 정기적으로 파악하고 관리하기 위한 목적으로 국가지하수수질측정망을 운영하고 있으

며, 축적된 자료는 지하수 수질 보전정책 수립을 위한 기초 자료 등 지하수수질관리체계의 개선을 위한 연구에 이용되고 있다(Ministry of Environment, 2013a). 환경부는 측정망으로부터 얻어진 지하수 수질 자료를 활용하여 물과 암석의 반응 등 지구화학적 반응과정에 의해 지질과 심도에 따라 달라지는 지하수의 수질특성을 분석하고 지하수수질전용측정망 자료의 추세분석을 통한 지하수 수질 상태 평가 및 관리등급 분류체계마련을 위한 연구를 수행하였다(Ministry of Environment, 2013b). 이를 토대로

*Corresponding author : sjeon@jbnu.ac.kr

Received : 2015. 10. 20 Reviewed : 2015. 12. 3 Accepted : 2015. 12. 4

Discussion until : 2016. 2. 29

국내 지하수의 수질특성에 맞는 과학적이고 선진화된 지하수 수질관리체계의 구축을 위해서 국내 배경수질을 반영한 오염물질별 지하수 수질관리 기준값의 마련과 통계적인 방법을 통한 지하수수질 평가에 관한 지속적인 연구가 필요하다.

지하수수질의 배경농도(background level, BL)와 관리 기준값인 문턱값(threshold value, TV)의 개념은 최근 유럽 여러 나라의 지하수 관리체계에 반영되어 국가별로 검토되고 있다. 유럽위원회는 물관리기본지침(Water Framework Directive, WFD)과 지하수 기본지침(Groundwater Directive, GWD)을 통해 유럽지역 지하수를 효과적으로 관리하기 위한 목적으로 인위적 영향이 거의 없거나 존재하지 않는 상태의 지하수체에서의 물질 농도로 정의되는 배경농도와 지하수수질의 화학적 상태를 평가할 수 있는 오염물질 별 기준인 문턱값 개념을 도입하였다(EC, 2000, 2006, 2008). 물관리기본지침과 지하수 기본지침에 근거하여 유럽위원회의 각 회원국들은 자체적으로 지하수수질의 배경농도를 산출하고, 배경농도와 수질 준거치(criteria value, CV)를 고려하여 각 지역의 지하수수질의 특성을 반영한 문턱값을 마련해야한다(EC, 2009). 또한 유럽위원회의 회원국들은 National Groundwater Quality Monitoring Networks (NGQMN)의 확대와 통계적인 방법을 이용한 지하수수질항목의 추세 평가를 통해 지하수수질을 지속적으로 감시하고 있다(Mendizabal et al., 2012). 이 때 오염물질의 농도가 지속적으로 증가하는 추세를 보이는 경우에는 문턱값에 도달하기 전에 추세를 역전시키기 위한 조치를 시행하여 수질악화의 진행을 방지하려는 노력을 하고 있다(EC, 2009).

국내에서는 유럽 지역의 지하수 기준설정 방법을 토대로 향후 우리나라 지하수 수질의 배경농도를 반영한 지하수 수질기준 설정체계를 마련하기 위한 연구를 수행하였으며(Nam et al., 2013), 일반오염물질에 대한 지하수 수질기준 설정체계의 마련을 위해 유럽 각 지역의 지하수 문턱값 산출방법을 분석하였다(An et al., 2014). 또한 Yea et al.(2014)은 먹는물 수질기준 항목을 대상으로 배경농도 산정방법을 비교·분석하고 배경농도를 제시하여 지역별 지하수 수질상태 평가 및 오염 평가기준을 마련하고자 하였으며, Kim et al.(2015)은 주요수리지질학적 단위에서의 질산성질소에 대한 국내 배경농도와 문턱값을 산정하는 방법론을 제시하였다. 통계적 분석을 통한 지하수수질추정망자료의 추세분석에 대한 국내 연구로는 Kim et al.(2010)이 오염위험지역에 설치된 지하수수질추정망의 자료에 Sen의 분석법을 적용하여 국내 지하수 수질현황

과 추세특성을 분석하기 위한 연구를 수행하였고, Yoon et al.(2012)은 지하수수질추정망의 항목별 오염도를 정량화하기 위한 방법으로 Sen의 분석법을 활용한 경향성 분석을 포함한 지하수 수질평가 방법을 제안하고 적용하였다. 하지만 유럽위원회의 지하수 수질관리정책처럼 국내 지하수의 지화학적 특성을 반영한 문턱값의 적용과 국가 지하수수질추정망 자료의 통계적인 분석을 통한 수질변화 추세를 함께 고려한 지하수 수질평가체계에 관한 연구는 아직 수행되지 않았다. 따라서 국내 지하수의 배경농도를 반영한 문턱값과 통계적인 기법을 통한 추세분석을 함께 반영하는 지하수 수질평가체계에 대한 연구 및 검토가 필요하다. 본 연구에서는 국내 지하수수질추정망 자료에 추세분석을 적용하여 새로운 수질 평가체계의 방법론을 제시하고 국내 지하수 수질의 문턱값과 추세분석의 개념을 토대로 한 지하수 수질관리체계를 제안하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. 지하수 수질자료

본 연구에 이용된 지하수수질전용추정망은 우리나라의 지질 및 유역을 고려한 지하수 배경수질 및 수질특성을 파악하기 위한 배경수질전용추정망과 산업단지 등 대규모 오염원으로부터 지하수 오염 및 확산을 지속적으로 감시하기 위한 오염감시전용 추정망으로 구성된다(Ministry of Environment, 2013a). 배경수질전용추정망은 전국을 미고결퇴적물, 다공질화산암, 반고결퇴적암, 비다공질화산암, 관입화성암, 쇄설성퇴적암, 석회암, 변성암 등의 지하수관리 기본계획에 명시된 8개 주요 수문지질로 구분하여 각 지질단위별 추정지점에 설치되었으며 오염감시추정망은 산업단지 폐광산지역 등 대규모 오염원과 국가적 관리가 필요한 오염지역 주변에 설치되었다(Ministry of Environment, 2013a). 추정망의 각 개소는 서로 다른 심도에 위치한 2지점 또는 3지점의 관측정을 가지므로 각 개소에서 심도에 따른 지하수수질의 평가가 가능하다. 관측정의 심도는 크게 3가지 깊이로 구분되며 본 연구에서 표기한 심도 1, 2, 3은 지표면으로부터 각각 7.5-19.5 m, 23-47 m, 70-150 m 깊이에 해당한다. 지하수 수질추정항목은 2007년과 2012년에 설치된 지점의 경우 현장추정항목 및 주요음이온을 포함한 기본항목과 먹는물수질기준 항목 등 전 항목(67개 항목)이며, 이외 기간에는 기본항목과 개소별 지질 또는 오염원과 관련된 수질항목과 전년도 수질기준 대비 80% 이상 검출된 개소별 관심항목이다(Ministry of Environment, 2013a). Fig. 1은 2013년을 기준으로

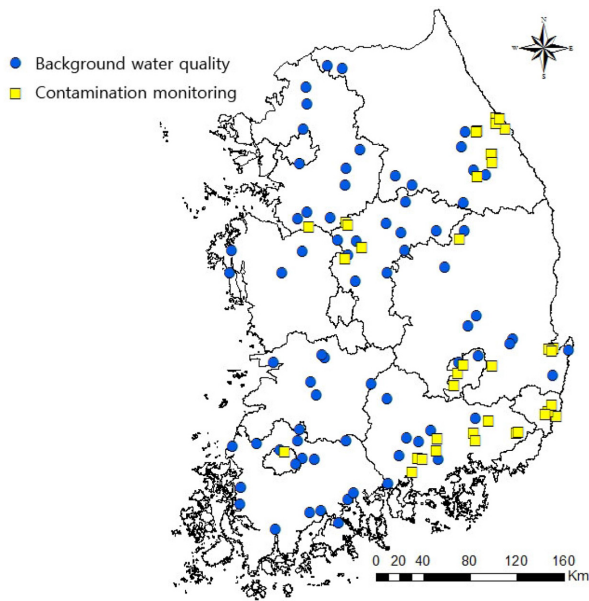


Fig. 1. Location map of the National Groundwater Quality Monitoring Network (NGQMN) of Korea.

설치되어있는 지하수수질전용측정망의 총 113개소(294지점)의 분포를 보여주며, 이 중 배경수질전용측정망은 74개소(222지점)이며 오염감시전용측정망은 39개소(72지점)이다.

본 연구에서는 지하수수질전용측정망의 2007년부터 2013년까지의 분기별 자료를 이용하였으며 총 113개소(294지점) 중 추세분석을 위한 통계적 기법에 요구되는 최소데이터의 개수를 만족하지 못하는 28개소(70지점)의 측정망을 제외한 85개소(234지점)의 자료를 이용하였다. 85개소의 심도별 지점 수는 심도 1, 2, 3에서 각각 85, 85, 64지점이다. 추세분석을 수행할 지하수 수질항목의 선정은 추세분석을 위한 충분한 가용 데이터를 갖는지의 여부로 판단하였으며, 질산성질소($\text{NO}_3\text{-N}$), 염소이온(Cl^-), 수소이온농도(pH)를 분석항목으로 선정하였다.

2.2. 통계적 방법

지하수수질의 추세분석을 위한 통계적 방법은 지하수수질전용측정망 자료의 특성을 고려하였다. 연구대상 지하수수질 자료는 개수가 불충분한 경우가 많으며 충분하더라도 수질자료의 특성상 모집단이 정규분포를 가지는지의 여부는 불확실하다. 또한 검출한계 이하로 측정되어 결측자료로 취급되거나 이상치를 보이는 특이값이 다수 존재한다. 본 연구에서 사용된 Sen의 경향성 분석법은 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). Sen의 경향성 분석법은 국·내외 지하수 수질추세 분석을 위한 연구에 많이 이용되어왔다. 유럽위원회 회원국인 Ireland는 지하수체에 존재하는 오염물의 농도가 지속적인 증가 혹은 감소 추세를 보이는지 평가하기 위하여 추세 증가 또는 감소 여부를 판별하는 Mann-Kendall 검정법과 선형 추세의 기울기를 계산하는 Sen의 경향성 분석법을 이용하였다(EPA, Ireland, 2010). 국내에서도 지하수수질의 시간에 따른 변화를 관찰하기 위해 Sen의 경향성 분석이 수행된 바 있다(Lee et al., 2006; Yoon et al., 2012). 이를 토대로 본 연구에서도 Sen의 경향성 분석법을 활용하여 국내 지하수수질전용측정망 자료에 대한 추세분석을 실시하였다.

추세분석을 위한 Sen의 경향성 분석법은 다음과 같이 시행된다. 먼저 시간에 따른 농도의 변화추세를 식 (1)과 같은 선형의 방정식으로 가정한다.

$$X(t) = Qt + B \quad (1)$$

이 때, $X(t)$ 는 시간에서의 농도, Q 는 추세의 기울기, 그리고 B 는 상수이다.

그 다음, 지하수 개별 수질항목의 농도가 식 (1)과 같이 선형의 추세를 따른다고 가정하고 모든 자료들 간의 기울기(Q)를 계산한다.

$$Q = \frac{x_i - x_{i'}}{i' - i} \quad (2)$$

여기서 i' 는 i 이후의 시간을 나타내고, x_i 는 i 시간에서의 농도, $x_{i'}$ 는 i' 시간에서의 농도이다. 위와 같은 계산을 통해 N' 개의 Q 가 계산된다.

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

이 때, n 은 자료의 개수이다.

그리고 난 후, N' 개의 Q 를 크기순으로 정렬하고 중앙값을 기울기 예측 값(Q')으로 결정한다.

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

그 다음, Q' 가 신뢰구간 내에서 경향성이 인정되는지 확인하기 위해 Mann-Kendall 검정법의 통계추정치 S 의

분산 값인 $VAR(S)$ 를 이용하여 신뢰구간 간격 C_α 를 계산한다.

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

이 때, q 는 같은 값을 갖는 데이터를 묶은 그룹의 수이고, t_p 는 p 번째 데이터와 같은 값을 갖는 데이터의 개수이다. 신뢰구간 간격 C_α 는 식 (6)으로 표현된다.

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

이 때, 95% 신뢰수준을 고려할 경우 $Z_{1-\alpha/2} = 1.96$ 이다. 그 다음에 신뢰구간의 양 끝 값에 대한 순위인 M_1 과 M_2 를 구한다.

$$M_1 = \frac{N'-C_\alpha}{2}, M_2 = \frac{N'-C_\alpha}{2} + 1 \quad (7)$$

구해진 M_1, M_2 에서의 Q 는 각 각 신뢰구간의 최소, 최대 기울기인 Q_{\min}, Q_{\max} 이며, Q_{\min}, Q_{\max} 값 사이에서 0의 존재유무를 확인하여 경향성을 판단한다. 즉, 만약 Q_{\min}, Q_{\max} 사이에 0이 포함되지 않으면 경향성이 인정되지만 Q_{\min}, Q_{\max} 사이에 0을 포함한다면 경향성이 없다고 판단한다.

본 연구에서는 70%, 80%, 90%, 95%, 그리고 99% 신뢰수준에 따른 추세분석을 수행하였으며, 본 논문에서 보여주는 결과는 특별한 언급이 없는 경우 95%의 신뢰수준을 고려한 추세분석의 결과를 바탕으로 한다.

2.3. 추세분석 결과의 분류

개소별, 심도별 및 수질항목별로 분류된 지하수수질전용 측정망 자료는 Sen의 경향성분석법을 통해 95% 신뢰수준에서 ‘증가 추세(Increasing trend)’, ‘감소 추세(Decreasing trend)’, ‘추세 없음(No trend)’으로 결정되었다. 결정된 추세는 국내 지하수수질의 특성을 반영한 문턱값에 대한 초과 여부로 다시 분류되었다. 적용된 문턱값은 배경수질전용 측정망 자료를 통해 산출된 국내 지하수 배경농도를 고려한 수질관리 기준값이며(Korea Environment Institute, 2013), 질산성질소와 염소이온에 대해 각 각 심도별로 제시된다(Table 1). 수질 항목 중 질산성질소와 염소이온은 생활용수 기준 문턱값을 적용하였으며, 수소이온농도는 산출된 문턱값이 없으므로 생활용수 수질기준 값인 5.8(하한)과 8.5(상한)을 대신 적용하여 초과여부를 판단하였다. 또한 질산성질소와 염소이온에 대해서는 증가하는 추세의 경우 오염 진행의 정도를 세분하기 위해 문턱값의 75%를 기준으로 재분류하였는데, 문턱값의 75%에 해당하는 시점은 유럽에서 추세역전조치의 시행 시점이며 본 연구에서 제시하는 지하수 수질관리체계에서 ‘좋은 상태(Good status)’의 지하수수질을 유지하기 위해 ‘증가 추세’를 보이는 지하수에 추세역전이 권고되는 시점이다. 최종적으로 지하수수질은 ‘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 분류되었다.

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

Parameter	Criteria value (CV)		Depth*	Background level (BL)**	Threshold value (TV)**	
	Residential water	Drinking water			Residential water	Drinking water
NO ₃ -N	20 mg/L	10 mg/L	whole	2.40	11.20	6.20
			1	2.50	11.25	6.25
			2	2.50	11.25	6.25
			3	2.20	11.10	6.10
Cl ⁻	250 mg/L	250 mg/L	whole	75.70	162.85	162.85
			1	84.99	167.50	167.50
			2	78.80	164.40	164.40
			3	98.69	174.35	174.35
pH	5.8-8.5	5.8-8.5	whole	8.02		
			1	8.09		
			2	8.09		
			3	7.90		

*whole: 7.5-150 m, 1: 7.5-19.5 m, 2: 23-47 m, 3: 70-150 m

**BLs and TVs are tentative and could be changed

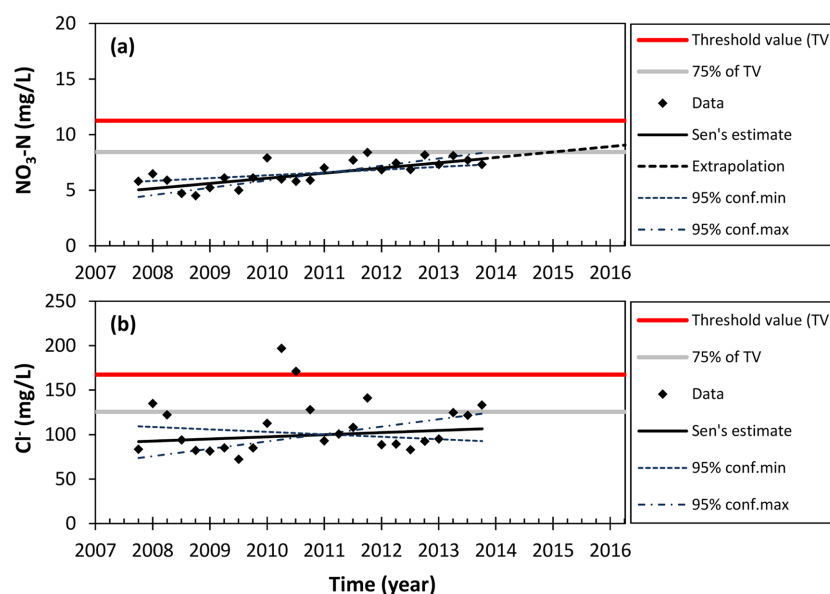


Fig. 2. An example of the trend analysis for groundwater quality parameters: (a) NO₃-N at XX-0008 and (b) Cl⁻ at △△-0001.

Table 2. An example of the trend analysis for the individual well

Parameter	NO ₃ -N	Cl ⁻
Location code	XX-0008	△△-0001
Type of monitoring site	Contamination monitoring	Contamination monitoring
Gradient	Sen's estimate	0.46
(mg/L/year)	95% conf. min	0.25
	95% conf. max	0.66
Trend	Increasing trend	No trend

3. 결 과

3.1. 추세분석 결과

추세분석의 결과는 Fig. 2에 예시된 것처럼 실제 측정값과 Sen의 경향성분석법을 통해 얻어진 추세선, 경향성의 인정여부를 보여주는 95% 신뢰수준에서의 최소와 최대 기울기, 그리고 본 연구에서 적용한 지하수수질의 관리기준 값인 문턱값 및 문턱값의 75%를 포함한다. Fig. 2(a)는 오염감시전용측정망 중 XX-0008지점(심도 2)에서 2007년 4분기부터 2013년 4분기까지의 질산성질소 농도에 대한 추세분석 결과를 보여준다. 추세는 95% 신뢰수준에서 양의 값으로 경향성이 인정되어 '증가 추세'로 판단되었다(Table 2). 또한 추세선의 현재시점(2013년 4분기)의 농도는 7.82 mg/L로 질산성질소 심도 2의 문턱값인 11.25 mg/L를 초과하지 않은 상태이며 문턱값의 69%에 해당하여 결과적으로 '문턱값을 초과하지 않으나 문턱값의 75% 미만에서 증가 추세'로 판단된다. 또한 현 추세에 따르면 지하수수질의 예방적 보전을 위한 조치의 시행

이 권고되는 문턱값의 75%에 다다른 시점은 2015년으로 예상할 수 있다. Fig. 2(b)는 오염감시전용측정망 중 △△-0001지점(심도 1)에서 2007년 4분기부터 2013년 4분기까지의 염소이온 농도에 대한 추세분석 결과이다. 95% 신뢰구간에서 경향성이 인정되지 않아 '추세 없음'의 경향성을 가지며(Table 2), 염소이온 심도 1의 문턱값인 167.50 mg/L를 초과하지 않아 '문턱값을 초과하지 않으며 추세 없음'으로 판단되었다.

본 연구에서는 신뢰수준에 따른 경향성의 인정여부를 살펴보기 위해 70%, 80%, 90%, 95%, 그리고 99% 신뢰수준에 따른 Sen의 경향성 분석을 수행하였다. 결과는 신뢰수준에 따라 지하수 수질항목 농도의 추세가 다르게 평가되어 신뢰수준이 70%에서 99%로 증가할수록 '증가 추세' 또는 '감소 추세'를 보이는 지점은 감소하고 '추세 없음'으로 평가되는 지점은 증가함을 보여주었다. Fig. 3과 Table 3은 90%, 95%, 99% 신뢰수준에 따른 경향성 인정여부를 비교한 예시로 ◇◇-0012지점(심도 3)에서 2007년 4분기부터 2013년 4분기까지의 염소이온 농도에

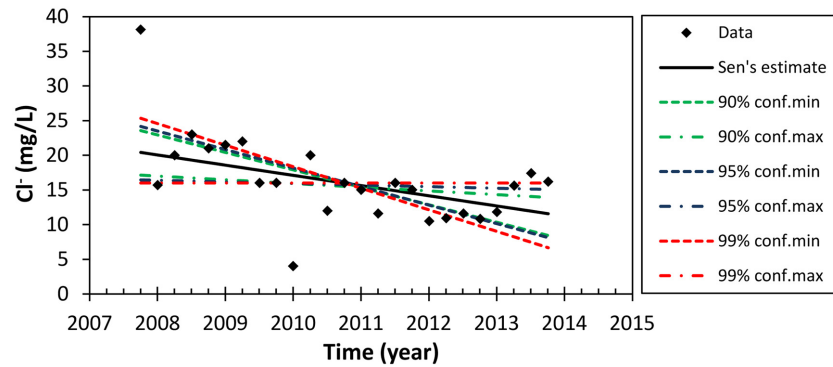


Fig. 3. An example of the trend analysis with different confidence levels (Cl^- at $\diamond\diamond$ -0012).

Table 3. An example of the trend analysis, showing different trends with different confidence levels (Cl^- at $\diamond\diamond$ -0012)

Confidence level (%)	Gradient (mg/L/year)			Trend
	Sen's estimate	min	max	
90	-1.47	-2.52	-0.54	Decreasing trend
95	-1.47	-2.67	-0.23	Decreasing trend
99	-1.47	-3.11	0.00	No Trend

Table 4. 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						
			$\geq \text{TV}^*$			$< \text{TV}$			
			Increasing trend	Decreasing trend	no trend	Increasing trend		Decreasing trend	No trend
$\text{NO}_3\text{-N}$	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
pH	1	85	0	0	8	5		2	70
	2	85	1	0	4	1		1	78
	3	64	0	0	2	1		2	59

*In case of pH, groundwater quality standard for residential water was used

대한 추세분석 결과를 보여준다. Sen의 경향성분석법을 통해 얻어진 추세선의 기울기는 -1.47 mg/L/year 로 음의 경향성을 보였다. 이 때 90%와 95%의 신뢰수준에서는 신뢰구간 양 끝의 최대 최소 기울기가 모두 음의 값으로 경향성이 인정되어 '감소 추세'로 판단되었지만 99%의 신뢰수준을 적용할 경우에는 경향성이 인정되지 않아 '추세 없음'으로 판단되었다(Table 3). 따라서 지하수수질관리체계의 통계적 방법을 이용한 지하수 수질항목의 추세 평가에는 적절한 신뢰수준의 설정이 필요함을 보여준다.

3.2. 추세분석에 따른 수질 분류

Table 4는 지하수 수질항목별로 추세분석을 통해 얻어진 수질의 경향성과 문턱값을 기준으로 지하수수질측정망의 지점을 분류한 결과이다. Sen의 경향성분석 결과, 질산성질소, 염소이온, 수소이온농도의 각 항목에서 심도의 구분 없이 총 234지점 중 뚜렷한 증가나 감소의 추세를 보이지 않고 신뢰구간 내에서 경향성이 인정되지 않아 '추세 없음'으로 판단된 곳은 각각 194지점, 163지점, 221지점으로 대부분을 차지했다. 지속적인 오염을 지시하는

‘증가 추세’는 질산성질소, 염소이온 항목에서 총 234지점 중 각각 18지점, 39지점에서 나타났으며, 심도별로는 두 항목 모두 천부에 해당하는 심도 1에서 ‘증가 추세’가 가장 많이 나타났다. 한편 수질항목별로 적용된 문턱값을 초과하는 지점은 질산성질소와 염소이온 항목에서 각각 17지점, 13지점이며, 심도별로는 두 항목 모두 심도 2에서 가장 많은 지점이 문턱값을 초과하는 것으로 나타났다. 문턱값을 초과하지 않으나 지속적인 오염의 진행을 지시하는 ‘증가 추세’에 해당하는 지점은 질산성질소와 염소이온에서 각각 16지점, 33지점으로 염소이온에서 더 많았으나, ‘증가 추세’ 중 추세 역전조치가 고려되어야하는 문턱값의 75%를 넘어선 지점은 염소이온에서는 존재하지 않았고 질산성질소에서는 3지점이 해당되었다. 이는 추세를 통한 지하수수질의 평가 시 단순한 증가 추세의 여부뿐만 아니라 문턱값을 기준으로 증가하는 추세의 현재시점의 농도를 고려하여 경향성의 정도를 구분해야함을 보여준다.

3.3. 지하수 수질관리체계 제안

기존의 지하수 수질상태 평가 및 관리등급 분류체계에서는 단순히 지하수수질기준의 초과여부로 지하수수질을 평가하였으나 국내 지하수수질의 특성에 맞는 지하수수질 관리를 위해서는 유럽의 여러 국가와 같이 배경농도를 반

영한 지하수수질관리기준인 문턱값과 지하수 수질의 추세를 함께 고려한 새로운 지하수 수질관리체계안의 마련이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 지하수수질전용측정망 자료를 적용하여 제시한 방법론을 토대로 새로운 지하수 수질관리체계를 제안하고자 하였다. Fig. 4는 본 연구에서 제안하는 추세분석 및 문턱값을 활용한 지하수 수질관리 체계안을 수립하는데 있어 필요한 자료의 분석과 분류에 대한 흐름도를 나타낸다. 지하수 수질의 평가절차는 크게 추세분석 과정을 통해 평가된 추세와 수질항목별 문턱값을 기준으로 분류하는 과정을 포함한다. 추세분석의 절차에서는 통계적 추세분석기법에 적용하기 위한 적절한 시계열 조건과 신뢰구간 설정이 요구된다. 제안된 시계열 조건은 최소 6년과 최대 15년이며 신뢰수준은 95%로 유럽의 추세분석 시 요구되는 시계열 기간 조건과 신뢰수준을 기준으로 삼았다(EC, 2009; EPA, Ireland, 2010). 추세분석의 결과는 ‘증가 추세’, ‘감소 추세’, ‘추세 없음’으로 나타나며, 각 결과는 해당 지하수수질이 ‘오염 진행’, ‘회복 진행’, ‘변화 없음’의 상태로 대별될 수 있다. 평가된 추세는 문턱값을 기준으로 초과와 미초과로 분류하고 ‘증가 추세’의 경우에는 문턱값의 75%를 기준으로 재분류하여 오염 진행의 정도를 구분한다. 위의 절차를 바탕으로 본 연구에서는 지하수수질의 등급체계 및 조치사항을 제안하고자 하였다(Fig. 5). 지하수수질은 일차적으로 문턱

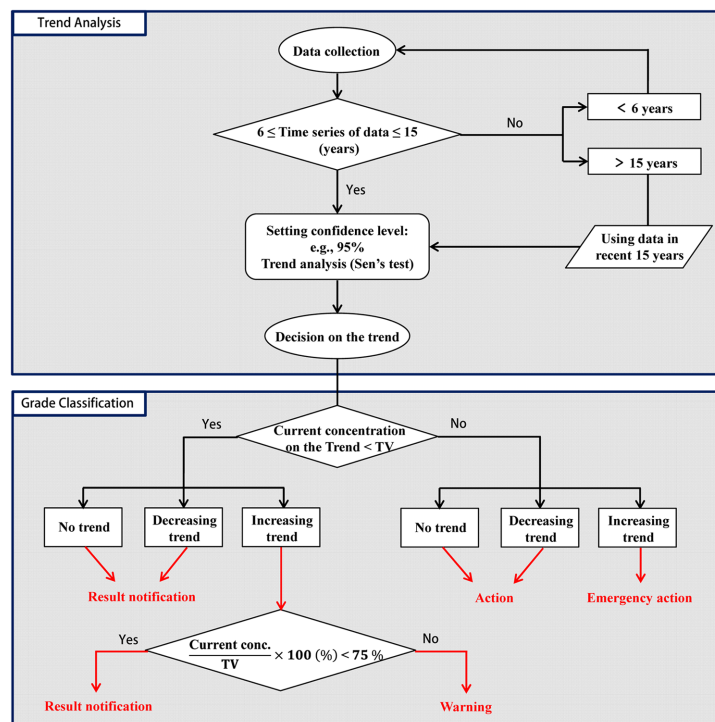


Fig. 4. Suggested flow chart for the trend analysis and grade classification for the groundwater quality management framework.

Groundwater quality	Trend	Corrective measure	
		User	Government
Poor	Increasing trend	Emergency action	Restoration program (Step 2)
	Decreasing trend	Action	Restoration program (Step 1)
	No trend		
Good	Increasing trend	$\geq 75\%$ of TV	Warning
		$< 75\%$ of TV	Result notification
	Decreasing trend	Result notification	Monitoring (Step 1)
	No trend	Result notification	Monitoring (Step 1)

Fig. 5. Suggested groundwater quality management framework.

값을 기준으로 ‘나쁨(Poor)’과 ‘좋음(Good)’으로 나뉘고 지하수수질의 추세에 따라 등급화되어 각 각 ‘사용자(User)’와 ‘국가(Government)’ 차원의 조치사항을 갖는다. ‘사용자’의 조치사항으로는 문턱값을 초과하지 않으면서 ‘감소 추세’나 ‘추세 없음’일 경우는 ‘결과 통보(Result notification)’가 요구되고, ‘증가 추세’이지만 문턱값의 75% 미만일 경우도 ‘결과 통보(Result notification)’가 요구되나 ‘증가 추세’이면서 문턱값의 75% 이상일 경우는 ‘경고(Warning)’단계의 수행이 요구된다. 또한 문턱값보다 높으면서 ‘감소 추세’나 ‘추세 없음’일 경우는 ‘조치(Action)’, 그리고 문턱값보다 높으면서 ‘증가 추세’일 경우에는 ‘긴급 조치(Emergency action)’명령이 내려진다. ‘국가’차원에서는 각각의 등급에 대해 ‘감시 1단계(Monitoring Step 1)’, ‘감시 2단계(Monitoring Step 2)’, ‘추세역전(Trend reversal)’, ‘복구 프로그램 1단계(Restoration program Step 1)’, ‘복구 프로그램 2단계(Restoration program Step 2)’의 실행이 요구된다(Fig. 5). 이러한 국내 지하수 배경농도와 추세를 반영한 지하수 수질 관리체계안은 지하수수질의 보다 과학적이고 효과적인 평가 및 관리에 기여할 것으로 생각된다.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 국내 지하수수질전용측정망 자료를 활용하여 추세분석을 실시하였고 추세분석 결과와 국내 지하수수질의 배경농도를 반영한 문턱값을 토대로 새로운 지하수수질의 평가 및 관리 체계를 제안하였다. 연구 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

1) Sen의 경향성분석법을 통한 추세분석 결과, 본 연구

에서 평가한 총 234지점 중 95% 신뢰수준에서 ‘추세 없음’에 해당하는 지점은 질산성질소, 염소이온, 수소이온농도에서 각각 194지점, 163지점, 221지점으로, ‘증가 추세’ 또는 ‘감소 추세’를 보이는 지점에 비해 많은 수를 차지했다. 또한 70%, 80%, 90%, 95%, 그리고 99% 신뢰수준에 따른 추세분석 결과를 비교한 결과 신뢰수준이 70%에서 99%로 증가할수록 경향성이 인정되기 어려워져 ‘추세 없음’으로 평가되는 지점이 증가하였다. 이는 통계적 방법을 통해 지하수수질의 추세를 분석할 경우 적절한 신뢰수준의 설정이 필요하다는 것을 보여준다.

2) 각 개소의 심도에 따른 추세분석 결과, 지하수수질은 심도에 따라 경향성이 다르게 나타날 수 있음을 보여주었다. 따라서 지하수수질의 평가 시, 지하수 수질항목에 대한 심도별 고려가 필요하며 향후 개설될 지하수수질측정망의 경우 각 개소에서 심도별 설치가 필수적으로 검토되어야 함을 나타낸다.

3) 문턱값을 초과하지 않으나 지속적으로 증가하는 추세를 보이는 지점은 질산성질소와 염소이온에서 각각 16지점, 33지점으로 염소이온이 더 많았으나, 추세 역전을 위한 권고 시점인 문턱값의 75%를 넘어선 지점은 염소이온에서는 존재하지 않지만 질산성질소의 경우 3지점이 해당되었다. 따라서 추세분석 결과를 지하수 수질관리체계에 활용하는데 있어 수질기준 값에 대해 증가하는 추세의 경향성의 정도를 함께 고려해야한다. 한편 수소이온의 경우에는 수질기준의 상한과 하한이 존재하여 문턱값의 개념이 모호하므로 본 연구에서는 농도의 추세에 대한 경향성만을 판단하였다. 수소이온의 경우 향후 문턱값을 고려한 지하수 수질관리체계 적용을 위해서는 추가적인 검토가 필요하다고 판단된다.

4) 증가하는 추세를 갖는 지하수의 경우에는 지하수수질오염을 미리 예방하기 위해 문턱값을 초과하기 전, 예를 들어 문턱값의 75%에 다다를 경우 추세역전을 위한 조치를 제안하였다. 문턱값의 75%는 유럽위원회의 추세역전 체계를 따른 것이며 우리나라 지하수수질의 관리 수준과 경제성을 고려한 적절한 추세역전시행시점의 선정이 필요할 것으로 판단된다.

이상에서 살펴본 바와 같이 본 연구는 추세분석 및 문턱값이 반영된 지하수수질관리체계 수립을 위해 실제 국내 지하수수질측정망자료에서의 적용성을 검토했다는데 의의가 있으며, 향후 보다 체계화되고 선진화된 지하수수질 평가 및 관리체계 마련을 위한 연구에 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 나아가 기존의 단순한 지하수수질기준의 초과여부에 따른 규제 관리제 형태의 지하수 수질 관리체계와는 별도로 환경기준과 같이 목표 관리제 측면의 새로운 지하수 수질 관리체계를 구축할 수 있는 기반을 제공한다는 데 그 의의가 있다.

사 사

본 연구는 국립환경과학원의 연구용역과제 「지하수 배경농도 설정 및 수질기준 운영 개선을 위한 연구(II)」를 수행하는 한국환경정책평가연구원의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 또한 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2014R1A1A2058040)과 한국환경산업기술원(KEITI)의 “CO₂ 저장 환경관리기술개발사업(과제번호 : 2014001810003)”의 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- An, Y.-J., Nam, S.-H., and Jeong, S.-W., 2014, Establishment of non-drinking groundwater quality standards: general contamination substances, *J. Soil Groundw. Environ.*, **19**(6), 24-29.
- EC, 2000, Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for 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.
- Korea Environment Institute, 2013, A Study on the Determination of Background Levels in Groundwater and Improvement of Groundwater Quality Standards (I).
- 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, *J. Geochem. Explor.*, **148**, 196-205.
- 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, *J. Korea Geo-Environ. Soc.*, **11**(3), 5-16.
- 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 non-parametric trend analysis of groundwater data obtained from national groundwater monitoring stations, *J. Soil Groundw. Environ.*, **11**(2), 56-67.
- 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, *J. Hydrol.*, 450-451, 279-292.
- Ministry of Environment, 2013a, Establishment of Groundwater Quality Monitoring Networks and Groundwater Monitoring Plan.
- Ministry of Environment, 2013b, Groundwater Quality Measurement Network Operating Result.
- Nam, S.H., Lee, W.M., Jeong, S.W., Kim, H.J., Kim, H.K., Kim, T.S., and An, Y.J., 2013, Comparative study of groundwater threshold values in European Commission and member states for improving management of groundwater quality in Korea, *J. Soil Groundw. Environ.*, **18**(3), 23-32.
- Salmi, T., Määtä, 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 -the Excel template application MAKESENS, Finnish Meteorological Institute, Helsinki.
- Yea, Y.D., Seo, Y.G., Kim, R.H., Cho, D.J., Kim, K.-S., and Cho, W.-S., 2014, A study on estimating background concentration of groundwater for water quality assessment in non-water supply district, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, **28**(3), 345-358.
- Yoon, H.S., Bae, G.O., and Lee, K.K., 2012, Quantification and evaluation of groundwater quality grade by using statistical approaches, *J. Soil Groundw. Environ.*, **17**(1), 22-32.