

기술노트

지하수 수질측정망 자료를 활용한 시간적 오염도 추이변화 분석

방사라 · 유근제 · 박준홍*

연세대학교 사회환경시스템공학부 토목환경공학과

Temporal Trend Analysis of Contamination using Groundwater Quality Monitoring Network Data

Sara Bang · Keunje Yoo · Joonhong Park*

School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University

(Received 11 November 2010, Revised 28 December 2010, Accepted 29 December 2010)

Abstract

Korea Groundwater Quality Monitoring Network is a database of annual groundwater quality survey results to prevent groundwater pollution. We estimated contamination index (CI) values for each type of land use, and analyzed temporal trends of pollutant concentration data in the Groundwater Quality Monitoring Network from 2001 to 2009. Among the pollutants considered in the database, the concentrations of nitrate and chloride were higher than their standards. In the case of nitrate, recreation parks, golf courses and general waste dumping regions showed increasing trends according to linear regression analysis, whereas industrial complexes and residential regions of urban and recreation parks showed increasing trends in the chloride concentration data. According to multiple variable linear regression analysis, EC, pH and topography were major factors influencing CI values. These results suggest that groundwater with a high CI value and increasing trend is vulnerable for potential contamination, which requires more careful groundwater pollution control.

keywords : Contaminant index, Groundwater pollution, Korea Groundwater Quality Monitoring Network, Nitrate, Trend analysis

1. 서론

지표수는 그 동안 경제성장 및 산업 활동, 생활용수 등에 필요한 용수로 공급되어 왔다. 하지만 지표수는 수질오염에 취약하며, 갈수기에 많은 양을 공급하기 어려운 단점을 가지고 있다. 이에 반해 지하수는 지표수 중심의 용수 공급 단점을 보완할 수 있는 대체수원이며 수질도 상대적으로 우수한 자원이다. 현재 이용 가능한 용수 부족으로 인해 지하수의 이용과 보전에 대한 관심이 점차 증가하고 있다(이사로와 김윤종, 1996). 또한 현재 전 세계적으로 이슈가 되고 있는 기후변화로 인해 수문시스템과 수자원분야에 대한 관심이 증가하고 있다. 2007년도 Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC) 보고에 의하면 향후 대체수자원으로 지하수 보존과 오염방지에 대한 필요성을 강조하고 있다(IPCC, 2007). 기후변화에 의한 지구 온도 변화와 강수량의 변화는 지하수의 수위, 수량 및 수질변화에 직접적인 영향을 미치고, 간접적으로 토지이용 및 토지관리, 농업활동 등 생산분야 및 주거환경 등에 영향을 미친다(Brouyere et al., 2004). 이러한 기후변화에 의한 영향 이외

에도 생활오폐수, 농약 및 화학비료, 오염유발시설 확산 등의 여러 가지 인위적인 요인들에 의해 지하수 수질이 지속적으로 위협받고 있다. 최근 들어 국내에서 다양한 차원의 오염 방지 대책이 수립되고 있으나 꾸준히 증가하는 지하수의 개발과 이용에 비교하여 볼 때 지하수 보존과 관리에 대한 노력은 여전히 미비한 실정으로 파악되고 있다(류성렬, 2000).

일찍이 지하수 보존 및 보호에 많은 관심을 가진 해외 선진 국가들에서는 국가에서 직접적으로 지하수를 관리하고 있다. 지하수를 보존하고 보호하기 위해 미국에서는 국가적으로 지하수 수질측정망을 설치하여 관리하고 있으며, 오염우려지역이나 오염취약지역에는 별도로 선정된 모니터링 시스템을 활용하여 산업활동 및 농업활동 등으로 인한 수질의 변화 가능성 및 오염물질 유입여부, 오염원 발생여부를 파악하고 있다(Brouyere et al., 2004). 미국에서는 국가지하수 수질측정망을 통하여 지하수 수질에 영향을 미치는 인자들에 대한 철저한 관리와 정책제시, 오염원인을 파악하기 위한 조사 계획 및 조사 지역 선정 등에 활용하고 있다(US EPA, 2001). 프랑스의 경우 지하수의 음용화를 위한 보전, 관리, 복원을 위한 예산이 연간 2조원 이상에 이르며(US EPA, 2001), 아일랜드의 경우 지속적인 지하수 모니터링을 통해 지하수 취약성 지도를 제공하고 있다. 또한

* To whom correspondence should be addressed.
parkj@yonsei.ac.kr

지하수 수질을 평가하고 수문 시스템의 오염물질의 이동과 예측을 위한 자료로 활용하고 있다(Williams and Monica, 2007).

국내 지하수 수질측정망은 전국의 지하수 수질현황과 수질변화 추세를 정기적으로 파악·관리하여 지하수의 수질을 보전하고, 정책 수립을 위한 기초 자료로 활용하기 위한 목적으로 지하수법 제18조제2항(수질오염의 측정) 및 지하수의 수질보전 등에 관한 규칙 제9조(수질측정망 설치 및 수질 오염실태 측정 계획의 수립·고시)에 근거하여 운영되고 있다. 수질측정망에는 우리나라 지질과 유역을 고려한 지하수 배정수질을 파악하고 지하수오염과 확산을 감시하기 위한 국가지하수 수질측정망과 각 지역 내의 오염원으로부터 지하수 오염감시와 수질파악을 운영목적으로 하는 지역지하수 수질측정망이 있다.

이 중 지역지하수 수질측정망은 2010년 현재 전국적으로 오염우려지역 781개소와 일반지역 1,241개소로 총 2,022개 지점에서 운영되고 있으며 오염우려지역은 지하수 오염의 의심되는 지역을 선정·지정하고, 각 지점의 토지이용 형태를 기준으로 13개의 오염원 유형으로 분류하고 있다(환경부, 2009). 지하수 수질측정망은 상·하반기 연2회 조사를 실시하여, 일반오염물질 5개항목(pH, 일반세균, 대장균군수, 질산성질소, 염소이온) 및 특정유해물질 15개 항목(카드뮴, 비소, 시안, 수은, 유기인, 페놀, 납, 6가크롬, 트리클로로에틸렌(TCE), 테트라클로로에틸렌(PCE), 1,1,1-트리클로로에탄(1,1,1-TCE), 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌)에 대한 분석을 수행하고 있다.

지하수 수질측정망을 이용한 국내의 선행연구에서는 특정 지역의 수질 특성 분석(김재광 등, 2007)과 지하수 수위와 수질에 의한 상대 수질변화(이호열, 2009) 및 오염취약성 평가를 위한 토지용도별 CI기법 및 변형DRASTIC 기법 등을 이용한 적용성 고찰이 연구되었다(김규범, 2008). 하지만 지하수 수질측정망 데이터를 활용한 지하수 수질의 연간 추이변화와 지하수 수질측정망의 오염도 및 오염에 영향을 미치는 이화학적 인자에 대한 연구는 상대적으로 다소 부족한 실정이다.

지하수 수질의 추이변화 및 그 인과관계를 분석하기 위해서는 정밀한 조사와 다양한 분석 기법이 필요하나, 본 연구에서는 기 조사된 지하수 수질측정망 데이터를 활용하여 통계적 기법으로 국토 전반에 걸친 지하수 수질의 광역적 오염 추이변화 및 오염도를 파악함으로써 지하수 수질측정망의 활용성을 모색하고자 하였다. 각 지역의 오염특성을 파악하기 위해 지하수 수질분석 결과와 토지이용 현황을 비교·분석하였고 지하수 수질 측정 지점의 상대적인 오염도를 평가하기 위해 지하수 수질측정망에서 측정된 수질항목들을 이용하여 CI(Contamination Index)를 계산하였다. 계산된 CI에 영향을 미치는 인자를 알아보기 위하여 이용 가능한 현장수질 측정항목(pH, EC, COD)과 토양의 물리적 인자(토양특성, 토양경사)를 이용하여 다중회귀분석을 실시하였다.

2. 연구방법

2.1. 지하수 수질측정망 데이터 선정

본 연구에서는 환경부 토양지하수정보시스템인 SGIS(<http://sgis.nier.go.kr>)에서 공개하는 지역지하수 수질측정망 데이터를 사용하였다. 일반적으로 지하수는 여름과 겨울에 의한 계절적인 변화에 민감하다(Fetter, 2003). 하지만 SGIS에서는 연 2회(춘계 4~5월, 추계 9~10월) 정기적으로 지하수 수질을 측정하므로 이용 가능한 데이터 접근에 한계가 있다. 기존 선행연구에서도 춘계, 추계 데이터를 이용하여 지하수 수질오염을 비교분석한 사례가 있었다(Passarella et al., 2002). 따라서 본 연구에서는 데이터 획득이 용이하고 지하수 수질오염 분석에 활용할 수 있는 춘계와 추계 데이터를 사용하였다. 전국의 일반지역에 비해 오염도가 높은 오염우려지역에 설치된 지하수 수질측정망 총 781개 지점 중 2001년도부터 2009년도까지 누락된 데이터가 없고, 동일 관정에서 측정된 281개 지점을 선정하였으며(Table 1), 지하수의 계절적 영향을 고려하기 위해 춘계 및 추계로 구분하여 측정된 총 5,058개의 데이터를 본 연구에 사용하였다. 수질측정망의 경우 시설폐지 및 토지용도 변경 등의 사유가 발생하면 측정지점을 변경하여 관측하고 있기 때문에, 본 연구에서는 신뢰성 있는 데이터를 확보하고자 동일지점에서 관측된 지점을 대상으로 선정하였다(Fig. 1).

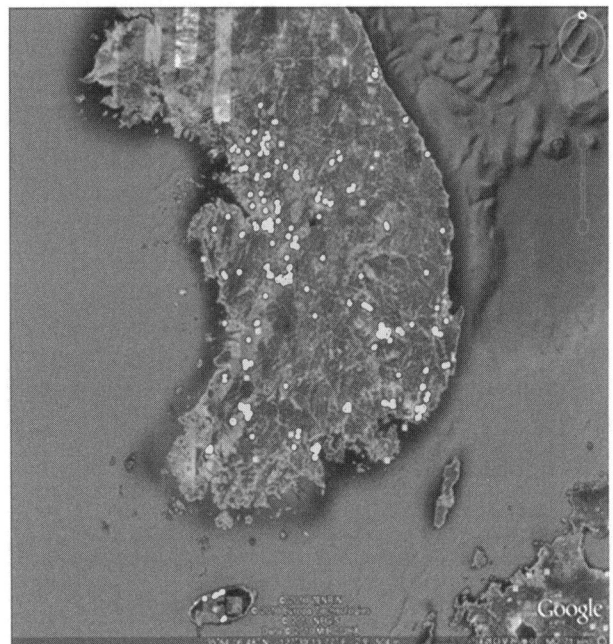


Fig. 1. Locations of highly possible groundwater pollutions.

2.2. 시간적 추이변화의 통계분석

지하수 수질기준 초과지점이 다수 존재하는 오염물질을 선정한 후 해당 물질 농도의 시간에 따른 지하수 수질 추이변화를 분석하기 위하여 선형회귀분석을 사용하였다. 본 연구에서는 $y = ax + b$ (1)의 선형회귀 방정식을 사용하였으

Table 1. The numbers of groundwater quality sampling points and data for each land use type

Land use type ¹⁾	Number of point	Number of data
S : Agricultural region using agricultural water	12	216
N : Farm production complex	3	54
O : River and nearby region	18	324
F : Industrial complex	71	1278
P : General waste dumping region	26	468
I : Specification waste dumping region	9	162
K : Metallic mine region	9	162
B : Human waste treatment facility and nearby region	12	216
J : Public health investigation region	3	54
U : Recreation parks	17	306
G : Golf course and nearby region	16	288
C : Residential region of urban	75	1350
T : Storage tank and nearby region	10	180
Total	281	5058

1) Land use classification of location of groundwater quality monitoring network (Korea Ministry of Environment, 2009)

며, 여기서 a 는 기울기(추이)를 나타낸다.

데이터에 가장 적합한 기울기와 절편계수를 찾기 위해서 최소제곱법을 사용하였으며(정영해 등, 2000), 오차의 제곱합 SSE(Sum of Squares of Error)이 최소화되는 기울기와 절편 값을 도출하였다.

각 춘계, 추계의 연도별 추이변화는 회귀방정식의 기울기의 값이 0인 경우는 추이변화가 없고, 0과 차이를 나타내면 추이변화는 기울기의 크기와 같으며 추이변화의 방향은 기울기의 부호에 의해서 결정된다(과학기술부, 2007). 회귀방정식은 오차의 크기에 대한 정보를 제공하지 못하므로 독립변수와 종속변수의 선형의 관계를 설정할 수 있는 측정치로 결정계수(R^2)를 사용하였으며, 신뢰성을 확보하기 위하여 통계적으로 유의하다고 판단되는 결정계수가 0.5 이상인 회귀식의 기울기를 이용하여 오염물질의 추이변화를 확인하였다(강양석, 1996).

2.3. CI(Contamination index) 분석

CI기법은 자연농도의 상한값 또는 수질기준을 초과하는 오염인자의 값을 계산하여 오염의 정도를 나타내는 오염평가 기법이다(Backman et al., 1998). 이는 다양한 수질 항목에 대해 총괄적인 평가가 가능하며 물질의 지하수 수질분석 자료만으로 오염을 평가할 수 있는 장점이 있다.

$$CI = \sum_{i=1}^n C_{fi} \quad (2)$$

$$C_{fi} = \frac{C_{Ai}}{C_{Ni}} - 1 \quad (3)$$

n = 오염물질의 총 개수

i = 각 오염물질

C_{fi} = 각 오염물질에 의해 계산된 오염요소 값

C_{Ai} = 각 오염물질의 측정된 농도값

C_{Ni} = 각 오염물질의 자연농도 상한값

C_{Ni} 을 설정하고 C_{Ai} 과 비교 계산한 값인 C_{fi} 를 각 수질 항목별로 계산해 모두 합하게 되면 최종적으로 해당 지역의 오염지수를 평가할 수 있다. 본 연구에서는 기존 문헌을 참고하여 $\text{NO}_3\text{-N}$ 및 Cl^- 의 C_{Ni} 를 결정하였다. $\text{NO}_3\text{-N}$ 는 자연적 배경 농도로 알려진 2 mg/L(김경호 등, 2002), Cl^- 의 농도는 배경수질을 파악하기 위해 운영되는 국가지하수 수질측정망 수질자료로부터 계산된 임계값 17.21mg/L(김규범, 2008)을 이용하였다. 본 연구에서는 CI에 따른 토지 이용별 특성을 분석하기 위해 각 지점의 지하수 수질농도의 9년 평균값을 사용하였다.

2.4. 다중회귀분석을 통한 통계적 예측

다중회귀분석은 종속변수와 두 개 이상의 독립변수들 간의 함수 관계 분석을 통해 여러 개의 독립변수들로부터 종속변수 값의 변화에 대한 통계적 예측과, 종속변수에 영향을 미치는 각각의 독립변수들에 대한 설명이 가능하다. 본 연구에서는 다중회귀분석을 위해 변수 각각에 대하여 유의성을 검정하고 유의성이 없으면 모형에서 제거시켜 중요한 설명변수만을 선택하는 단계선택법을 사용하였다(박성현, 2002). 총괄적인 오염지수인 CI값에 영향을 미치는 인자를 알아보기 위하여 현장수질 측정항목인 pH(수소이온농도), EC(전기전도도), COD(화학적 산소요구량)과 농촌진흥청의 한국토양정보시스템(<http://asis.rda.go.kr>)에서 확보한 물리적 인자인 토양특성, 토양경사를 이용하여 다중회귀분석을 실시하였다. 토양특성은 미국 농무성법을 이용하여 모래·미사·점토 등의 함유비율에 의해 결정된 양질사토, 사양토, 양토, 미사질 양토, 식양토, 미사질식양토로 구분하였으며, 토양경사는 0~2%, 2~7%, 7~15%, 15~30%, 30~60%, 60~100%로 구분하였다.

3. 연구결과 및 토의

3.1. 지하수 수질측정망 수질 현황

본 연구에서는 일반적으로 모든 지하수 수질측정망에서

Table 2. Statistics of groundwater quality data for each land use type

Land use	Statistics	NO ₃ -N (mg/L)		pH		Cl ⁻ (mg/L)		EC (μS/cm)		COD (mg/L)	
		Spring	Autumn	Spring	Autumn	Spring	Autumn	Spring	Autumn	Spring	Autumn
S	Minimum	0.1	0.0	5.3	6.0	0.1	1.2	6.5	6.6	0.1	0.2
	Maximum	60.4	63.6	8.2	8.1	251.0	211.0	986.0	1270.0	4.4	2.8
	Average	8.7	8.2	7.0	7.1	40.1	43.8	324.8	319.8	1.3	1.0
N	Minimum	0.1	0.1	6.5	6.6	2.1	2.4	90.0	100.0	0.1	0.1
	Maximum	17.8	17.5	8.2	8.3	26.1	26.0	725.0	699.0	1.3	0.6
	Average	5.3	5.7	7.4	7.3	12.1	14.5	194.6	190.8	0.4	0.3
O	Minimum	0.1	0.1	5.8	5.5	1.5	1.1	34.7	37.2	0.2	0.1
	Maximum	73.3	64.8	8.6	8.5	205.2	188.8	1410.0	1360.0	5.6	3.5
	Average	5.9	6.1	7.1	7.1	43.3	42.9	450.2	460.5	1.1	1.1
F	Minimum	0.0	0.0	5.8	5.8	0.1	0.8	3.4	1.0	0.1	0.1
	Maximum	39.4	39.9	8.5	8.4	893.7	558.5	2100.0	2300.0	4.7	4.7
	Average	4.4	4.0	7.0	7.0	39.2	40.2	359.2	362.6	1.0	1.0
P	Minimum	0.2	0.1	5.9	5.9	0.2	1.2	2.0	6.2	0.1	0.1
	Maximum	19.8	19.1	8.2	8.5	134.9	120.3	881.0	1400.0	2.4	5.4
	Average	5.2	5.4	7.1	7.0	26.4	29.2	309.1	318.5	0.8	0.8
I	Minimum	0.1	0.1	6.0	6.0	0.9	1.0	4.4	4.8	0.1	0.3
	Maximum	15.6	23.7	8.4	8.4	54.7	110.6	776.0	530.0	2.8	3.0
	Average	4.1	3.5	7.1	7.1	16.3	19.7	270.0	238.0	1.1	1.0
K	Minimum	0.1	0.2	6.1	6.1	0.7	1.5	30.0	12.4	0.2	0.1
	Maximum	28.7	18.8	8.7	8.7	193.6	55.2	817.0	739.0	3.6	1.9
	Average	4.5	4.3	7.2	7.1	17.0	14.7	248.5	244.4	1.0	0.8
B	Minimum	0.1	0.1	5.3	5.0	1.1	1.3	80.0	18.0	0.2	0.1
	Maximum	67.4	26.9	8.3	8.4	361.3	392.0	1200.0	1048.0	5.3	7.5
	Average	5.6	5.7	6.8	6.8	40.8	54.8	368.5	380.2	1.2	1.2
J	Minimum	0.1	0.0	6.0	5.6	1.5	4.2	68.0	50.0	0.3	0.2
	Maximum	41.4	16.1	8.4	8.0	47.6	48.0	492.0	468.0	3.1	1.8
	Average	6.6	5.3	6.9	6.8	15.9	17.9	233.7	288.4	1.1	1.0
U	Minimum	0.1	0.0	5.9	5.9	0.9	0.4	31.0	13.0	0.1	0.1
	Maximum	31.0	8.4	8.5	8.7	106.0	152.7	705.0	787.0	3.0	5.1
	Average	3.2	2.3	7.2	7.2	16.3	17.8	187.7	201.0	0.8	0.9
G	Minimum	0.0	0.2	5.9	5.6	0.2	1.7	6.0	5.7	0.1	0.1
	Maximum	18.4	34.0	8.2	8.5	83.4	44.4	711.0	593.0	2.4	2.1
	Average	3.4	3.7	7.0	6.9	17.5	15.6	207.3	216.3	0.8	0.8
C	Minimum	0.0	0.0	5.8	5.7	0.1	1.1	7.0	7.0	0.1	0.1
	Maximum	27.0	25.9	9.7	8.5	1338.3	818.0	3850.0	2544.0	9.5	8.8
	Average	4.1	4.2	7.1	7.1	48.5	49.4	442.2	447.4	1.2	1.1
T	Minimum	0.0	0.1	4.9	5.6	1.3	0.9	72.0	24.5	0.1	0.2
	Maximum	13.0	9.0	8.4	8.3	217.4	132.2	995.0	980.0	4.7	2.5
	Average	2.6	2.7	7.1	7.1	26.6	24.4	312.3	306.9	1.0	1.0

검출되는 수질측정항목 중 일반적인 오염을 지시하는 성분인 NO₃-N(질산성질소), Cl⁻(염소이온) 및 COD(화학적 산소요구량)과 현장측정항목인 pH(수소이온농도), EC(전기전도도)의 데이터를 이용하였다. 그 이외의 특정유해물질인 카드뮴, 비소, 시안, 수은, 유기인, 페놀, 납, 6가크롬, 트리클로로에틸렌(TCE), 테트라클로로에틸렌(PCE), 1,1,1-트리클로로에탄(1,1,1-TCE), 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌의 경우는 대부분이 불검출로 나타나 전국 수질오염특성을 분석하기에 적절하지 않아 추후 분석 대상에서 제외하였다. 수집된 수질자료의 토지이용별 오염물질의 특성을 파악하기 위

하여 각 수질항목별 최소값과 최대값 및 평균값을 정리하였다(Table 2). Table 3은 토지이용에 따른 지하수 수질기준을 초과하는 지하수질 항목의 건수 및 비율을 보여주고 있다.

3.2. 지하수 수질 오염 특성

본 연구에서는 지역지하수 수질측정망 데이터를 이용하였으므로 지역특성에 의한 오염만을 구분하여 분석하였다. 각 오염물질의 특성을 토지이용별로 살펴보면, 평균값은 NO₃-N의 경우 S(전용농업용수사용지역)에서, Cl⁻의 경우 C(도시주거지역)에서 가장 높게 나타났으며, 최대값은 NO₃-N의

Table 3. The numbers of components over the Groundwater Quality Standards¹⁾

Land use \ Component	NO ₃ -N	pH	Cl ⁻	COD	Total	Ratio (%) ²⁾ (by land use)
S	65	1	1	0	67	31.02
N	14	0	0	0	14	25.93
O	40	3	0	0	43	13.27
F	129	5	24	0	158	12.36
P	46	2	0	0	48	10.26
I	11	0	0	0	11	6.79
K	25	2	0	0	27	16.67
B	24	5	7	1	37	17.13
J	11	1	0	0	12	22.22
U	6	2	0	0	8	2.61
G	17	3	0	0	20	6.94
C	119	21	25	7	172	12.74
T	1	2	0	0	3	1.67
Sum	508	47	57	8	620	12.26
Ratio (%) ³⁾ (by chemical component)	10.04	0.93	1.13	0.16	12.26	

¹⁾ Groundwater Quality Standards - NO₃-N: ≤10(mg/L), pH: 5.8~8.5, Cl⁻: ≤250(mg/L), COD: ≤6(mg/L)

²⁾ Ratio of the samples exceeded standards by land use type

³⁾ Ratio of the samples exceeded standards by chemical component

경우 O(오염우려하천지역)에서, Cl⁻의 경우 C(도시주거지역)에서 매우 높은 농도를 보인다(Table 2). pH와 COD의 경우는 수질기준인 5.8~8.5의 범위, 6 mg/L를 초과하는 비율이 낮게 나타나지만, C(도시주거지역)에서 다소 높은 특성을 보였다. EC는 오염분석항목은 아니지만 지하수 내 이온 용해도에 의하여 영향을 받으므로 간접적인 오염 확인 인자로 활용이 가능하다. EC의 경우 O(오염우려하천지역), F(공단지역), B(분뇨처리장인근지역) 및 C(도시주거지역)에서 1000 S/cm 이상의 이상값을 보이고 있으며, 이 지역들은 NO₃-N 및 Cl⁻의 초과비율이 상대적으로 높은 지역이다.

토지이용에 따른 지하수 수질기준 초과 수질항목 건수를 보면 NO₃-N의 초과율이 10.04%로 가장 높았으며, Cl⁻의 초과비율은 1.13%, pH의 초과비율은 0.93%, COD의 초과비율은 0.16%이다(Table 3).

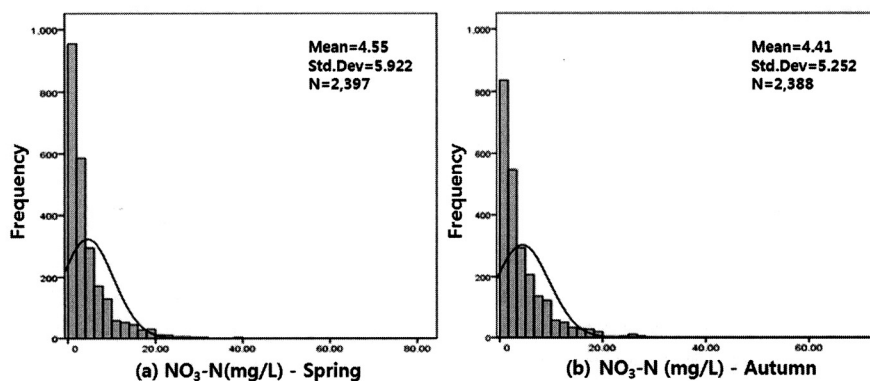
NO₃-N과 Cl⁻은 대표적인 지하수 오염 지표물질로써 자연적 기원을 보이기도 하지만 NO₃-N의 경우, 일반적으로 질소화합물 등이 지하수로 유입되면서 질산화, 탈질 등 산

화-환원과정을 거치면서 생성되며 농업활동, 생활 오폐수 및 공장폐수 등의 다양한 오염원에 의하여 증가하게 된다. Cl⁻은 염소화합물의 용해로부터 생성되며 특히, 해수에 의한 침투, 가정하수, 폐수 및 분뇨에 의한 증가를 보인다.

지하수 수질기준 초과지점의 토지이용을 보면 F(공단지역)과 C(도시주거지역) 및 B(분뇨처리장인근지역)은 NO₃-N, Cl⁻ 등 복합적인 오염물질의 기준 초과 현상을 보이며, S(전용농업용수사용지역)은 NO₃-N의 초과비율을 보인다.

F(공단지역)과 C(도시주거지역)은 주로 도시화된 지역으로 하·폐수에 포함된 질소화합물과 염소화합물에 의한 영향으로 높은 농도를 나타내는 것으로 판단된다. B(분뇨처리장인근지역)은 분뇨의 유기물질에 포함된 단백질이 부패할 때 발생하는 질소가 물속의 산소와 접촉하면서 다량으로 생성되는 NO₃-N과, 분뇨로 배설되는 염화물로 인한 Cl⁻이 수질기준 초과와 주 오염원인을 알 수 있다(김은영, 2008).

이는 토지이용과 오염물질 사이의 상관관계를 보여주고 있다. NO₃-N과 Cl⁻의 춘계·추계 히스토그램을 보면 일부지

**Fig. 2.** Histogram of NO₃-N data. (a) spring, (b) Autumn

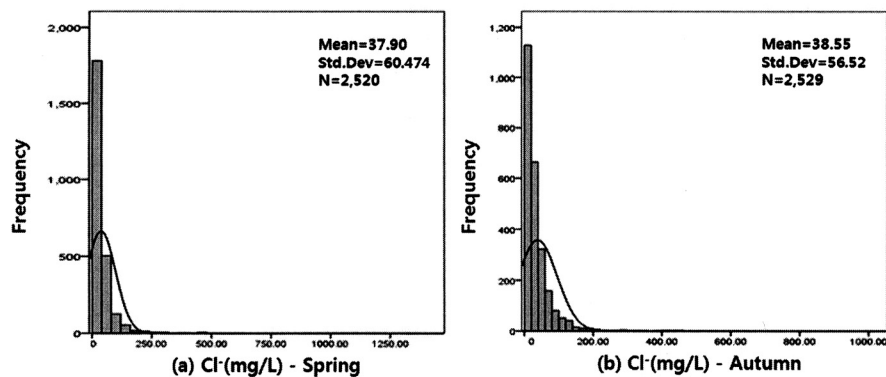


Fig. 3. Histogram of Cl^- data. (a) spring, (b) Autumn

역의 고농도 시료들에 의하여 정규분포를 이루지 못하는 것을 알 수 있다(Fig. 2, Fig. 3).

3.3. 시간적 추이변화의 통계분석

$\text{NO}_3\text{-N}$ 의 경우 대부분의 지역이 $\text{NO}_3\text{-N}$ 에 대한 농도 변동 추이를 보이고 있지 않으나, 춘계에 U(유원지 및 공원)과 G(골프장 지역), 추계에는 U(유원지 및 공원)과 P(일반 폐기물 매립지역)에서 상대적으로 높은 증가추이를 보이고 있다(Table 4). 이는 많은 유동인구로 인한 쓰레기 및 하수로 유원지의 오염과 골프장에서 쓰이는 질소비료와 농약의 영향 및 폐기물의 침출수 유출로 인한 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 증가추이를 보이는 것이라 판단된다. O(오염우려하천지역)의 경우 다른 지역에 비해 상대적으로 높은 감소추이를 보이고 있어 수질이 개선되고 있음을 알 수 있다. U(유원지 및 공원), C(도시주거지역)의 경우 증가추이와 감소 추이가 함께 나타나는 양극화된 양상을 보이고 있다.

Cl^- 은 춘계의 경우 F(공단지역)과 C(도시주거지역) 및 U(유원지 및 공원)에서 각각 2.8%, 4.2%, 5.9%의 증가추이를 나타나고 있으나, 추계의 경우 7%, 14.7%, 11.8%로 춘계에 비해 상대적으로 높은 증가추이를 보이고 있다(Table 5). 일반적으로 염소이온은 비반응성 물질로 지하매질과 반응하지 않고 계속 지하수에 축적되기 때문에, 오염되고 있는 지하수에서의 염소이온의 증가 현상을 설명할 수 있다(정상용 등, 2000).

따라서 이와 같은 지역에 대한 세밀한 분석과 관리가 필요하며, 지역별로 수질오염의 편차를 나타내고 있으므로, 지역별 특성을 설명할 수 없는 지점과 S(전용농업용수사용지역) 및 B(분뇨처리장인근지역)과 같이 증감추이를 보이지 않으면서 오염도가 높아 지속적인 오염에 노출된 것으로 판단되는 지역에 대한 원인 규명을 위한 정밀조사가 필요할 것이라 판단된다.

3.4. CI를 이용한 총체적 오염지수 평가

본 연구에서는 주 오염물질로 판단되는 $\text{NO}_3\text{-N}$ 과 Cl^- 의 농도를 이용한 복합적인 지하수 오염지수를 평가하기 위하여 CI(Contamination index)기법을 적용하였다. 이를 위해 이용 가능한 지하수질 측정항목 자료로부터의 CI값을 계산하였다. CI를 통해 각 지하수 수질측정 지점의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 과 Cl^- 으로 인한 평균적인 오염도를 확인할 수 있다. CI에 대한 오염도 및 오염 취약성을 평가하기 위해서는 기준 값이 필요하다. Edet and Offiong (2002)의 연구에서는 CI가 0보다 작은 경우는 인위적 오염에 의한 영향이 낮고, CI가 0~3인 경우는 중간정도의 오염, CI가 3보다 큰 경우 높은 지하수 오염에 해당한다고 언급하고 있다. 또한 Dragon (2007)의 연구에서는, CI가 7이상인 경우에는 아주 심한 오염에 해당한다고 연구한 바 있다. 본 연구에서 토지이용도별로 계산된 CI값을 보면 모든 지역에서 0보다 큰 값을 나타내고 있으며, 특히 S(전용농업용수사용지역)과 B(분뇨처

Table 4. Trends of $\text{NO}_3\text{-N}$ data

Land use type	Number of point	Spring				Autumn			
		Number of sample data	Ratio of upward trend (%)	Number of sample data	Ratio of downward trend (%)	Number of sample data	Ratio of upward trend (%)	Number of sample data	Ratio of downward trend (%)
O	18	None	None	3	16.7	1	5.6	3	16.7
F	71	None	None	2	2.8	2	2.8	None	None
P	26	None	None	2	7.7	3	11.5	2	7.7
B	12	None	None	1	8.3	1	8.3	None	None
U	17	2	11.8	5	29.4	3	17.6	4	23.5
G	16	2	12.5	2	12.5	None	None	4	25.0
C	75	4	5.3	3	4.0	3	4.0	4	5.3
T	10	1	10.0	None	None	None	None	1	10.0
Total	281	9	3.20	18	6.41	13	4.63	18	6.41

Table 5. Trends of Cl^- data

Land use type	Number of point	Spring				Autumn			
		Number of sample data	Ratio of upward trend (%)	Number of sample data	Ratio of downward trend (%)	Number of sample data	Ratio of upward trend (%)	Number of sample data	Ratio of downward trend (%)
S	12	1	8.3	1	8.3	1	8.3	2	16.7
N	3	None	None	None	None	2	66.7	None	None
O	18	None	None	None	None	2	11.1	3	16.7
F	71	2	2.8	3	4.2	5	7.0	1	1.4
P	26	None	None	None	None	2	7.7	None	None
I	9	None	None	1	11.1	None	None	1	11.1
K	9	None	None	1	11.1	None	None	1	11.1
B	12	None	None	1	8.3	1	8.3	None	None
U	17	1	5.9	None	None	2	11.8	None	None
G	16	None	None	1	6.3	None	None	None	None
C	75	3	4.0	3	4.0	11	14.7	5	6.7
T	10	None	None	None	None	2	20.0	None	None
Total	281	7	2.49	11	3.91	28	9.96	13	4.63

Table 6. The results of CI (Contamination Index)

Land use	NO ₃ -N		Cl ⁻		Cl
	(C _{Ni} = 3 mg/L)		(C _{Ni} = 17.21 mg/L)		
	C _{Ai}	C _{fi}	C _{Ai}	C _{fi}	
S	8.06	3.03	40.52	1.35	4.38
N	5.43	1.71	12.89	-0.25	1.46
O	5.71	1.86	42.49	1.47	3.32
F	3.89	0.94	45.00	1.61	2.56
P	5.15	1.57	27.49	0.60	2.17
I	3.40	0.70	19.22	0.12	0.82
K	4.32	1.16	15.99	-0.07	1.09
B	5.39	1.70	47.34	1.75	3.45
J	5.63	1.81	16.29	-0.05	1.76
U	2.61	0.30	16.46	-0.04	0.26
G	3.42	0.71	16.27	-0.05	0.65
C	3.86	0.93	51.00	1.96	2.89
T	2.63	0.32	25.52	0.48	0.80

리장인근지역), O(오염우려하천지역)에서 3이상의 큰 오염도를 나타낸다. S(전용농업용수사용지역)의 경우 $\text{NO}_3\text{-N}$ 에 의해 계산된 높은 C_{fi} 값을 나타내어 질소비료에 사용이 큰 것으로 판단되며, B(분뇨처리장인근지역)의 경우, 분뇨에 포함되어 있는 염화물과 질소순환 과정에서 발생하는 $\text{NO}_3\text{-N}$ 에 의한 복합적인 영향으로 판단된다(Table 6). 따라서 CI가 높은 지역에 대한 오염원과 오염물질 유입여부를 파악하기 위한 지속적인 모니터링이 필요하다.

3.5. 다중회귀분석

다중회귀분석 결과 선정된 모형의 수정결정계수(Adj. R^2)는 약 46%의 설명력을 보이며, 유의확률(p-value)은 모두 0.000으로 통계적으로 유의하다(Table 7). 단계선택법에 의해 회귀 모형에 진입된 변수인 EC, pH 및 토양경사의 유의확률(p-value)은 0.05이하 수준으로 유의함을 확인할 수 있다. 다중공선성을 평가하는 인자인 VIF는 모두 1에 가까운 값을 나타내어 다중공선성의 영향이 존재하지 않는 것으로 판단된다. t값을 이용하여 독립변수의 기여도를 평가한 결과, EC, pH, 토양경사의 순으로 CI에 대한 설명력이 큰 것을 알 수 있었으며, 이 중 EC는 CI에 양의 상관관계를 나타내고 있는데 총체적인 오염지수인 CI가 증가함에 따라 지하수 중 이온성물질도 증가하였기 때문이라 판단된다. pH가 CI와 음의 관계를 보이는 이유는 질산화과정(nitrification)에서 생성되는 수소이온에 의해 질산성 질소 농도가 높은 지하수에서는 pH가 감소하기 때문이다(김은영 등, 2008). 또한 CI에 영향을 미치는 토양경사는 양의 상관관계를 나타내고 있다. 이는 직접유출량을 증가시켜 지표의 오염물질이 흘러가게 하거나 지하수의 함양량을 증가시켜 오염물질의 지하수 침투를 용이하게 한다(함세영 등, 2004). 토양경사가 0~2%일 때는 강우나 지표오염물질이 흘러가지 못하기 때문에 지하로 침투하기에 가장 좋은 조건이며, 반대로 토양경사가 18%이상일 때는 지표유출량이 크고 따라서 지표오염물질이 지하로 침투할 가능성이 낮아지기 때문이다. 다중회귀분석의 회귀식은 (4)와 같다.

Table 7. The result of multiple regression analysis

Input variables					Model summary		
Name	Coefficient	t	p	VIF	Adj. R^2	F	p
Constant	21.102	6.465	0.000		0.463	81.512	0.000
pH	-3.177	-6.960	0.000	1.021			
EC	0.008	13.079	0.000	1.097			
Topography (T)	0.180	2.071	0.039	1.098			

$$CI = 21.102 - 3.177pH + 0.008EC + 0.180T \quad (4)$$

다중회귀분석의 결과, EC, pH의 현장수질측정항목과 토양경사의 물리적 인자가 지하수의 총체적인 오염지수인 CI 예측에 대한 자료를 제공할 수 있음을 보여준다.

4. 결론

본 연구에서는 현재 국내 오염우려지역의 지하수 수질측정망의 데이터를 이용하여 일반적인 오염물질인 NO_3-N , Cl^- 및 COD, 그리고 현장측정항목인 pH, EC의 토지이용별 수질 현황을 파악하였고 지하수 오염의 주 항목인 NO_3-N 와 Cl^- 에 대한 추이변화를 분석하였다. F(공단지역)과 C(도시주거지역)은 지하수 수질오염이 추이변화를 보이며 오염도가 높은 지역으로 나타나고 있으나, S(전농농업용수사용지역), B(분뇨처리장인근지역)은 지하수 수질오염이 추이변화를 보이지는 않으나 고농도의 질산성질소 오염이 나타났다. 각 지역의 NO_3-N 와 Cl^- 에 의한 상대적인 오염지수를 평가하기 위해 CI분석을 적용한 결과, 모든 지역의 CI값이 0 이상으로 나타나 전 지점의 지하수가 인위적 오염물질에 의한 영향을 받고 있는 것을 확인하였다. 또한 CI값에 영향을 미치는 인자를 알아보기 위한 다중회귀분석 결과, EC, pH, 토양경사의 인자들이 CI값에 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 이와 같은 인자들이 개별관정에 대한 정보를 제공하여 지하수 오염도를 예측하는데 중요한 자료임을 확인할 수 있었다.

지속적인 지하수 수질측정망의 운영에도 불구하고 오염우려지역의 지하수 오염은 지속적인 증가추이를 보여 인위적 오염물질의 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 따라서 보다 선진화된 지하수 수질관리 대책이 필요하다. 또한 지하수 수질 관측 자료에 대한 단순한 결과 해석뿐 아니라 오염도가 높은 지역 및 추이변화를 나타내는 지역의 오염 원인을 파악하기 위한 더욱 세밀한 관측 및 분석이 수행되어야 할 것이다. 추후 보다 유효한 데이터가 확보되면 본 연구에서 수행한 CI분석 기법과 영향인자에 대한 정밀한 분석이 가능할 것이며, 각 지역별 오염지수 평가 및 오염도 지도화가 가능하여 지하수 수질 보전 정책이 보다 체계화되고, 지하수 수질의 효율적 관리가 가능할 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 환경부 토양지하수오염방지기술사업(GAIA Project, 과제번호 173-091-006)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 강양석(1996). 사회현상분석도전, 나남.
과학기술부(2007). 기후변화에 의한 수자원 영향평가 체계 구축. 1-9-2.
김경호, 윤성택, 채기탁, 최병영, 김순오, 김강주, 김형수, 이철우(2002). 금강 권역 총적층 지하수의 질산염 오염: 질산성

- 질소의 기원과 거동 고찰 및 안전한 용수 공급을 위한 제언. *The Journal of Engineering Geology*, **12**(4), pp. 471-484.
김규범(2008). 지하수 오염취약성 평가 기법 동향과 국내 적용성 고찰. *한국지하수토양환경학회지*, **13**(6), pp. 1-16.
김은영(2008). 수리지질학 및 수리지구화학 인자의 다변량 통계 분석을 이용한 논산 북부 지역 지하수의 질산성 질소 오염 평가. 석사학위논문, 전남대학교.
김은영, 고동찬, 고정석, 여인옥(2008). 다중 회귀 분석을 이용한 논산 북부 지역 지하수의 질산성 질소 오염 예측. *한국지하수토양환경학회지*, **13**(5), pp. 57-73.
김재광, 권경안, 변주형, 박진호, 박현구, 임윤정(2007). 경기 북부지역 지하수 수질측정망의 수질특성 분석. *보건환경 연구원보*, **20**, pp. 207-214.
류성렬(2000). GIS를 이용한 무주 지역의 지하수 오염위협성 평가. 석사학위논문, 연세대학교.
박성현(2002). 한글SPSS, 데이터솔루션.
이사로, 김윤종(1996). DRASTIC SYSTEM을 이용한 지하수 오염 가능성 및 위험 분석 연구. *The Journal of GIS Association of Korea*, **4**(1), pp. 1-11.
이호열(2009). 영산강유역 수질측정망 운영 및 활용 현황. *한국수자원학회지*, **42**(3), pp. 17-23.
정상용, 강동환, 박희영, 심병완(2000). 부산지역 지하수 오염현황 분석을 위한 지구통계 기법의 응용. *The Journal of Engineering Geology*, **10**(3), pp. 247-261.
정영해, 김순홍, 이계오, 김철웅(2000). 통계학EXCEL, 광주 사회조사연구소.
한국토양정보시스템(2010). <http://asis.rda.go.kr/>.
함세영, 정재열, 김무진, 김인수, 황한석(2004). DRASTIC과 지하수 수질에 의한 창원시 지하수 오염취약성 평가. *자원환경지질*, **37**(6), pp. 631-645.
환경부(2009). 2008년 지하수 수질측정망 운영결과. 11-1480000-000800-10.
환경부 토양지하수정보시스템(2010). <http://sgis.nier.go.kr/>.
Backman, B., Bodiš, D., Lahermo, P., Rapant, S., and Tarvainen, T. (1998). Application of a groundwater contamination index in Finland and Slovakia. *Environmental Geology*, **36**(1-2), pp. 55-64.
Brouyere, S., Carabin, G., and Dassargues, A. (2004). Climate change impacts on groundwater resources: modelled deficits in a chalky aquifer, Geer basin, Belgium. *Hydrogeology Journal*, **12**, pp. 123-134.
Dragon, K. (2007). Application of a groundwater contamination index to assessment of confined aquifer vulnerability. *Groundwater Vulnerability Assessment and Mapping*, Andrzej J. Witkowski, Andrzej Kowalczyk, Jaroslav Vrba (eds.), Taylor and Francis, London, pp. 87-93.
Edet, A. E. and Offiong, O. E. (2002). Evaluation of water quality pollution indices for heavy metal contamination monitoring. A study case from Akpabuyo-Odukpani area, Lower Cross River Basin (southeastern Nigeria), *GeoJournal*, **57**, pp. 295-304.
Fetter, C. W. (2003). *지하수학*, Σ시그마프레스(주).
IPCC (2007). The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, pp. 1-996.

- Passarella, G., Vurro, M., D'agostino, V., Giuliano, G., and Barcelona, M. J. (2002). A Probabilistic Methodology to Assess the Risk of Groundwater Quality Degradation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 79, pp. 57-74.
- US EPA (2001). South Dakota's Ground Water Quality Monitoring Network Project Completion Report Section 319 Non-point Source Pollution Program. C9998185-95. pp. 1-22.
- Williams, N. H. and Monica, L. (2007). Ireland at risk - Possible implications for groundwater resources of climate change. *Geological Survey of Ireland*, pp. 1-18.