

제주도 지하수 수질의 광역적 추세 특성 분석 - 염소 및 질산성질소를 대상으로 -

Regional Trend Analysis for Groundwater Quality in Jeju Island - Focusing on Chloride and Nitrate Concentrations-

김 규 범* / 김 지 욱** / 원 종 호*** / 고 기 원****

Kim, Gyoo Bum / Kim, Ji Wook / Won, Jong Ho / Koh, Gi Won

Abstract

Nitrate and chloride are the most common contaminants in groundwater and their concentrations increase easily due to fertilizer consumption and urbanization. The number of time series data for groundwater quality at a single site was not sufficient to analyze trends on Jeju Island. Therefore rectangle grids were drawn for the whole island and single grid was determined to be 500m×500m after considering similar stream density, homogeneous hydraulic coefficients, geologic features of volcanic rock and low topographic slopes. All data within each lattice were collected and arranged in time series order and analyzed using Sen's method. 10.6 % of the total lattices for chloride and 22.4% for nitrate showed upward trends from the early 1990's to the early 2000's. Especially, upward trends for nitrate concentration are distinct in the low mid-mountainous areas of western and southern watersheds. Many septic tanks and much domestic waste from the urbanization of the low mid-mountainous area have produced this upward trend. Additionally, the agricultural region has dramatically increased since the 1990's and this has led to an increase of fertilizer consumption and, as a result, nitrate concentration. Therefore, the target of any management plan for groundwater quality on Jeju Island needs to be focused on careful land use decisions in the mid-mountainous areas which are near Halla Mountain.

keywords : Groundwater, quality trend, nitrate, chloride, Sen's method

요 지

질산성질소와 염소이온은 지하수에서 흔히 나타나는 항목으로서 농약의 사용이나 도시화 등에 의하여 주로 발생한다. 일반적으로 동일 지점의 지하수 수질 자료는 관측망의 경우를 제외하고는 샘플의 수가 제한적이기 때문에 시계열 자료를 활용한 추세 평가에 한계가 있다. 본 연구에서는 제주도 수계의 분포 특성, 저지대의 낮은 지형 경사,

- * 한국수자원공사 국가지하수정보센터 차장 (미국 지질조사소 미시간 사무소)
Assistant Manager, National Groundwater Information Management and Service Center, KWATER, Daeduk-gu, Daejeon, 306-711, Korea (Michigan Water Science Center, U.S. Geological Survey, Lansing, MI, 48911, USA)
(e-mail: gbkim@kwater.or.kr)
- ** 한국수자원공사 조사기획처 차장
Assistant Manager, Department of Investigation and Planning, KWATER, Daeduk-gu, Daejeon, 306-711, Korea
- *** 한국수자원공사 조사기획처 부장
Manager, Department of Investigation and Planning, KWATER, Daeduk-gu, Daejeon, 306-711, Korea
- **** 제주특별자치도수자원본부 수자원연구실 실장
Manager, Water Resources Office of Jeju Special Self-Governing Province, Jocheon, Jeju, 695-811, Korea

수리적 특성 및 다공질 지질 특성 등을 고려하여 500m×500m 간격의 격자를 작성하고 격자내에 포함된 수질검사 자료를 모두 취합하여 시계열 데이터를 형성한 후 Sen의 방법을 활용한 수질 추세분석을 실시하였다. 염소이온 농도의 경우에는 추세평가 대상 격자의 10.6%, 질산성질소의 경우에는 22.4%가 1990년대 상반기에서 2000년대 초까지 상향 추세를 보이는 것으로 나타났다. 특히 질산성 질소의 상향 추세는 서부 및 남부의 하부 중산간 지역에 뚜렷하게 나타났다. 이와 같은 원인은 1990년대 이후의 중산간 인근 지역의 개발에 따른 도시화 등에 의하여 나타난 것으로 추정되었다. 본 연구 결과, 제주도 지역의 지하수 관리 정책은 중산간 지역의 수질 변화와 토지이용 변화 등을 충분히 고려하여 추진되어야 함을 알 수 있었다.

핵심용어 : 지하수, 수질추세, 질산성질소, 염소, Sen의 방법

1. 서론

일반적으로 지하수 수질은 다양한 영향 인자에 의하여 변화하게 된다. 이와 같은 영향 인자는 자연적인 인자와 인위적인 인자 등 2가지로 대분된다. 기후, 강수, 토양, 지질, 지하수 유동과 같은 자연적인 현상은 광역적인 지하수 수질의 변화를 초래하며, 토지이용, 자원개발, 농업활동, 산업화 및 도시화 등의 부산물은 인위적인 인자로서 지하수 수질에 영향을 미친다. 미국지질조사소(USGS)는 Lower Susquehanna Valley 지역의 연구를 통하여 지하수에 미치는 일반적인 오염물질을 연구한 바 있으며(Risser and Siwiec, 1996), 미국 환경청(US EPA)은 일반적인 지하수 오염 현상에 대한 원인을 종합적으로 평가한 바 있다(EPA, 1990, 1994).

질산성질소와 염소이온 농도는 지구상 대수층내 오염으로서 가장 흔히 나타나는 물질로서 오염원에 대한 많은 연구가 있었다. 왕성한 농업 활동은 지하수내로 영양소와 용존물질을 이동시키게 되는데, 고농도의 질산성질소 분포는 농업활동 및 석회암과 밀접한 관련이 있는 것으로 밝혀졌다(Freeze and Cherry, 1979; Reese, 1998). 또한, 정화조가 없는 가정이 많이 분포하는 지역에는 질산성질소와 염소의 가중으로 지하수 수질이 악화되기도 한다. 미국지질조사소는 질산성 질소가 2.0mg/L 및 인산염이 0.02mg/L 이상을 보이는 지역은 인간의 활동에 의하여 영향을 받은 것으로 설명하고 있으며, 특히 질산성 질소는 청색증, 빈혈 및 성장 장애 등의 치명적인 병을 발생시키는 인자로 주요 관리 대상이 된다(USGS, 1999). 농촌지역의 토지이용 특성은 농약, 생활폐기물, 동물 배설물 및 폐기물 등에 의하여 질산성 질소의 농도를 쉽게 증가시키는 역할을 하며(Wakida and Lerner, 2005), 특히 텍사스 지역의 연구 결과에 의하면 농업지역의 농경활동이 광역 범위의 질산성질소 오염의 주 원인으로 밝혀진 바 있다(Hudak, 2000). 또한, 염소이온 농도는 생활하수, 폐수처리시설,

동물 배출물 등에 의하여 증가된다(Canter and Knox, 1985; Kehew *et al.*, 1996; Hudak and Blanchard, 1997).

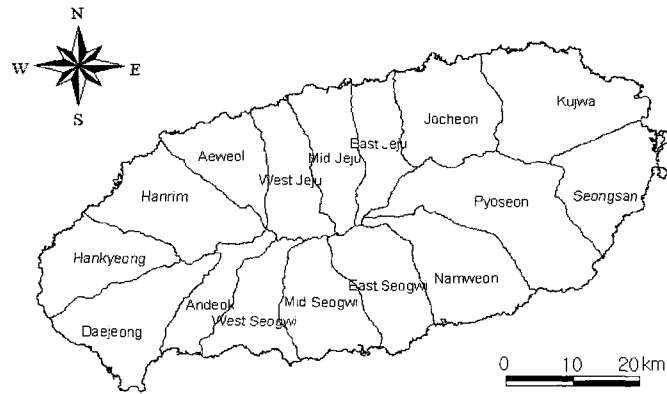
본 연구에서는 국내 최대 화산암 지역인 제주도 지역의 염소이온 농도 및 질산성 질소 농도에 있어서 광역적인 변화 특성을 규명하는데 목적을 두었다. 또한, 특성 규명을 위하여 비모수적 추세분석 기법인 Sen의 방법 및 GIS 기법을 활용하여 공간 특성을 표현하였다.

2. 연구 지역

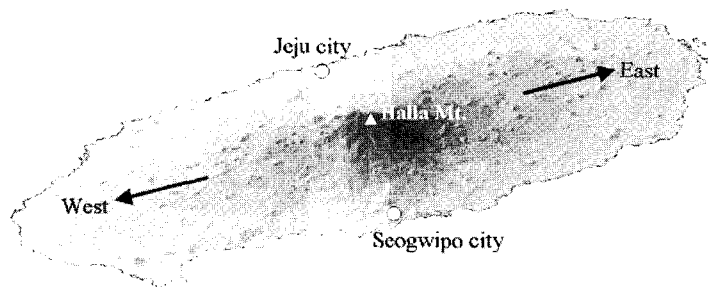
제주도는 한반도 남부에 위치하는 국내 최대의 섬으로서 면적이 약 1,828.3km²이며 동서방향으로 74km, 남북방향으로 32km의 규모로 구성되어 있다. 제주도는 동-북동 방향의 주향을 갖는 순상 화산암체로 구성되며 한라산을 중심으로 남북은 상대적인 급경사, 동서는 완경사 지형을 보이고 있다.

제주도는 수리지질학적 특성과 지형적 특성에 근거하여 16개의 유역으로 구분되며 (Fig. 1), 하천의 총 연장은 1,907.1km에 이르며 하천밀도는 약 1.04km/km² 정도이다. 그러나, 유출 하천의 연장은 86.3km (4.5%), 개울이 626.5km (32.9%) 및 비유출 하천이 1,194.3km (62.6%)로서 평상시 하천 유출은 거의 없는 편이다. 제주도는 국내에서 강우량이 가장 많은 지역으로서, 연평균 강우량은 1,975mm 정도로서 육지의 평균 강우량 1,283mm의 1.5배에 이른다(제주도와 한국수자원공사, 2003).

과거 10년간의 토지용도 변화를 파악하기 위하여 1991년 및 2001년의 Landsat 위성영상 자료를 분석하였다 (Table 1). 위성 영상 처리를 위하여 전처리과정을 수행하여 기하보정, 방사보정 및 지형보정을 실시하였으며 기하보정된 자료를 이용하여 제주도에 대한 1991년 및 2001년의 토지피복도를 작성하였다. 본 과정에서는 10년간의 토지이용 변화를 파악하기 위하여 환경부에서 정한 7단계 분류체계를 이용하되 제주도 지형 특



(a)



(b)

Fig. 1. Watershed distribution (a) and 3-dimensional shaded topographic map (b) of Jeju Island

Table 1. Data for Landsat image processing

Landsat	Sensor	Date	Path/Row	Elevation/Azimuth
Landsat-5	TM	1991/12/02	115/37	28.5/149.8
Landsat-7	ETM+	2001/03/24	115/37	50.5/139.0

Table 2. Classification and change of land use in Jeju island

Region	Total (km ²)	Year	Water	Residential region	Forest	Grass land	Orchard	Cultivated region
Total	1,828.3	2001	3.3	109.8	626.6	540.2	184.6	363.8
		1991	3.5	78.6	788.5	427.1	206.4	324.2
Jeju city	254.7	2001	0.4	27.4	122.9	65.4	6.0	32.6
		1991	0.5	21.5	150.9	52.4	16.1	13.3
Seogwipo city	253.2	2001	0.2	16.6	103.1	51.6	51.1	30.6
		1991	0.4	5.0	127.0	38.5	59.1	23.2
Bukjeju gun	706.5	2001	1.4	45.2	250.0	224.2	36.0	149.7
		1991	1.4	37.7	325.9	158.4	39.4	143.7
Namjeju gun	613.9	2001	1.3	20.3	150.6	199.0	91.5	150.9
		1991	1.2	14.4	184.7	177.8	91.8	144.0

성상 초지와 삼림을 묶고 습지를 분류항목에서 제외하여 총 6단계로 구분하였다(Table 2). 표에서 보는 바와 같이 제주도는 최근 10년간 산림 및 과수원이 다소 감소한 반면에, 초지, 주거지역 및 경작지의 증가가 4개

시군 지역에서 뚜렷하게 나타났다. 주거지의 경우에는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 제주시 지역과 서귀포시 지역에서 매우 뚜렷한 증가세를 보이고 있다.

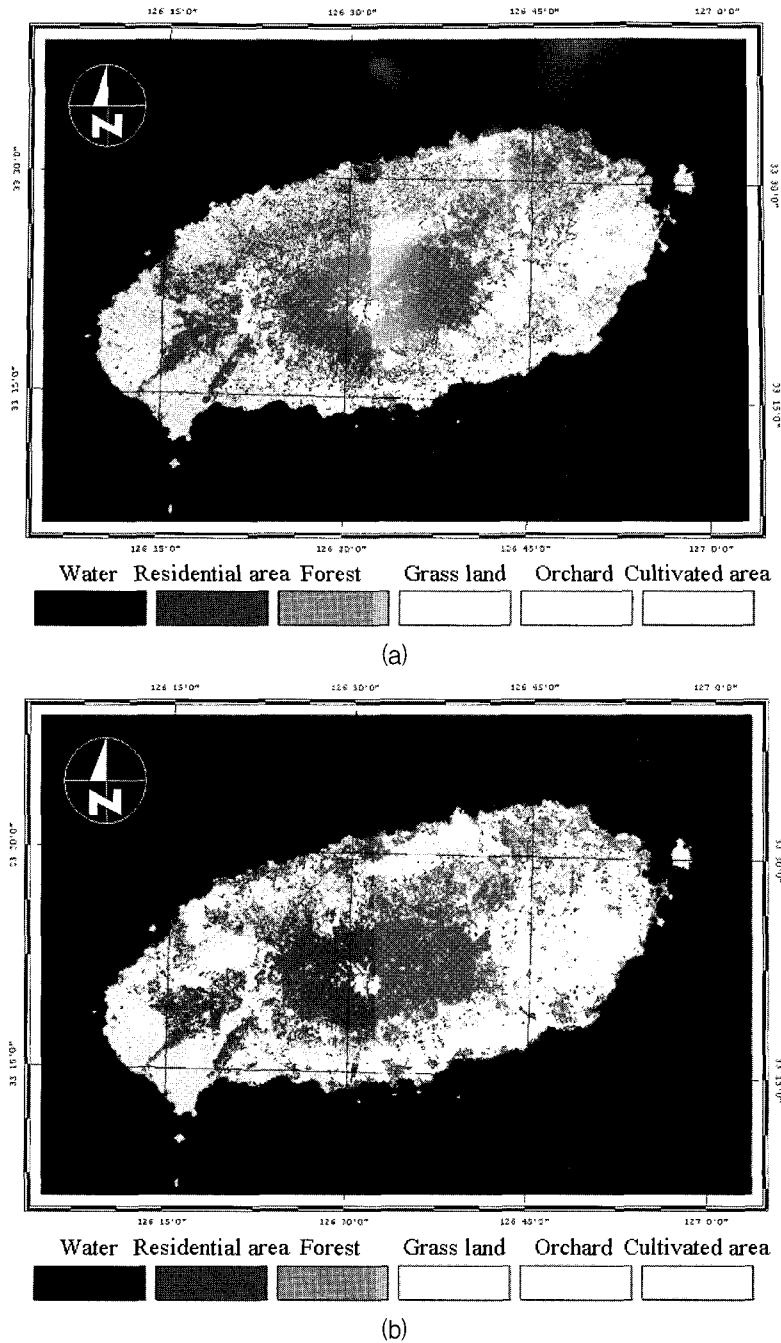


Fig. 2. Land use changes from 1991 (a) to 2001 (b) in Jeju Island

3. 수리지질 특성과 지하수 이용

제주도의 주대수층은 분출 시기가 다른 현무암층 사이에 존재하는 용암류 경계면과 클링커층으로서 냉각절리, 기공, 용암터널과 같은 1차 유효공극과 이후의 지각 활동에 의한 2차 유효 공극이 복합적으로 연계되어 발달하고 있다. 특히, 제주도 화산암류의 공극 특성은 0.02~0.36 범위로서 각 암석별 공극율은 표선리염기성현무암(PSB)과 중문화외이암(JTA)을 제외하고는 0.05~0.11로서 매우 유사한 특성을 보인다 (제주도, 한국수자원공사, 2003). 또한, 광역상수도 및 해수침투 감시 관측

망 88공의 자료를 토대로 수리상수에 대한 기본통계를 분석한 결과, 제주도 전체 평균으로 비양수량은 10,861.2m³/일, 투수량계수는 17,573m³/일, 수리전도도는 552.2m/일로서 지하수 유동과 부존에 유리한 조건을 갖고 있다(Table 3). 이와 같이 제주도의 화산암체는 일부 지역(서귀포 등 퇴적암류 분포지역)을 제외하고는 단일 암종으로 구성되어 물리적인 특성과 수리적 특성이 유사함을 알 수 있다.

해안지역(표고 200m 이하)의 지형적 특성은 지형경사가 5% 미만으로 매우 완만하며 중산간 지역(표고 200~600m)도 10% 미만으로 비교적 완만하게 분포한다.

Table 3. Mean values of hydraulic properties on Jeju Island

Basin	Contents	Specific capacity (m ² /day)	Transmissivity (m ² /day)	Hydraulic conductivity (m/day)
Total	No. of data	88	88	84
	Mean	10,876	17,573	552
North	No. of data	36	36	36
	Mean	11,237	17,033	358
South	No. of data	21	21	21
	Mean	9,061	19,147	637
East	No. of data	27	27	23
	Mean	11,561	17,725	839
West	No. of data	4	4	4
	Mean	12,536	13,141	199

이와 관련하여, 저지대의 평균 지하수위는 해수면과 거의 비슷하며 수두경사는 다수의 1, 2차 유효공극을 복합적으로 보유하고 있는 화산암체의 특성상 매우 완만한 변화를 보이고 있다. 각 소유역별 지하수의 등수위선의 간격은 남부일부 유역을 제외하고는 비교적 일정하고 큰 폭의 간격을 유지하고 있으며, 해안쪽 흐름을 주로 보이며 방사상으로 나타난다(원종호, 2004).

제주도내 지하수 관정은 총 5,113개로서, 2003년 기준 지하수 이용량은 약 115백만m³/년(32만m³/일)에 이른다. 생활용으로 사용하는 지하수 이용량은 1,492개 관정에서 약 22만m³/일로서 전체의 약 70%를 차지하고, 공업용은 193개 관정에서 약 1만m³/일, 농업용은 3,166개 관정에서 약 8만m³/일이며 기타 먹는샘물 등으로 이용 된다(제주도, 한국수자원공사, 2003).

4. 데이터 및 분석 기법

제주도 광역수자원본부의 지하수 데이터베이스에 포함된 제주도 전역 대상의 총 1,369개 관정으로부터 5,829건의 지하수 수질분석 데이터를 취득하였다. 수질 분석 자료는 1989년부터 2002년까지 분석된 자료로 구성되어 있다. 본 대용량의 자료를 활용하여 제주도 수질의 전반적 통계 특성을 평가하는 데는 어려움이 없으나, 각 관정별 수질분석 자료는 평균 4.3건에 불과하여 수질의 변동특성을 통계적으로 판단하기에는 다소 부족한 개수이다. 따라서, 본 연구에서는 수질 샘플의 개수를 증가시키고 특정 지점의 수리적 왜곡 특성을 완화하기 위하여 격자 개념을 도입하였다. 이는 제주도 저지대의 수리적 특성과 지하수위 변화 등이 비교적 균질하고 지하수 유동방향이 해안쪽으로 완만하게 일정한 점을 고려하였다. 제주도 전역을 대상으로 등간격의 격자를 구성하고 격자내에 포함된 수질 분석 샘플을 취합한 후 각 격자에서의 수질 추세 특성을 분석

하였다(Fig. 3).

제주도 전역에 총 7,361개의 500m×500m 간격의 격자가 ArcView3.2 GIS Software를 활용하여 구성되었으며, 각 격자내의 지하수 수질분석자료의 개수는 약 8~30개에 해당되어 추세분석이 가능하게 되었다(Gibbons, 1994). 국내 지하수 수질검사의 항목중 일반적으로 인지되지 않는 회귀원소 및 중금속 등을 제외하고 흔히 검출되는 염소이온 농도와 질산성질소를 분석 대상으로 하였다.

지하수 수질의 변화를 분석하기 위한 방법으로는, 그래프에 의한 방법, 모수적 방법으로서 회귀분석과 ARIMA 분석, 비모수적 방법으로서 Sen의 방법 및 Mann-Kendall 방법 등 다양하다. 각 방법들은 시계열 데이터의 특성에 따라 장단점이 있으며, 다수의 연속적 시계열 데이터에 대한 추세 분석시에는 모수적 방법이 적절하나 제한된 개수의 시계열 데이터를 활용하는 경우는 비모수적 방법이 사용된다. 본 연구에서는 시계열 데이터에 이상값, 결측값 및 비인지값 등이 존재하더라도 최종 결과에 영향을 미치지 않는 비모수적 방법인 Sen의 방법을 사용하였다.

Sen's 추세추정자(Sen's Trend Estimator)를 계산하기 위하여, N' 경사추정자(N' slope estimator)인 Q 를 각각의 관측정에 대하여 구하여야 한다.

$$Q = \frac{x_i' - x_i}{i' - i} \tag{1}$$

여기에서, x_i' 및 x_i 는 관측 시점 i' 및 i 에서의 측정 농도를 말한다. 이 경우 $i' > i$ 이며, N' 는 $i' > i$ 인 데이터 쌍의 개수이다. Q 에 대한 N' 값들의 중앙값은 Sen's 추세추정자라고 한다. 관측 시점 당 한 개의 측정값이 있는 경우에는,

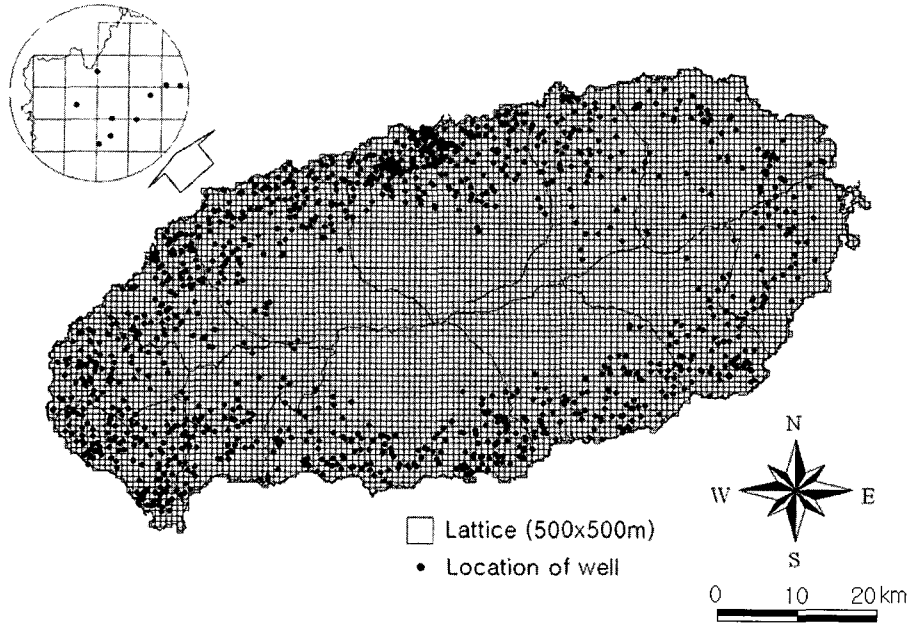


Fig. 3. Lattices (500m×500m) and the location of groundwater wells used for analyzing the groundwater quality features

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

이 되고, 여기에서 n 은 관측 시점의 개수를 의미한다. Q 의 중앙값(여기에서는 S 라고 함)을 얻기 위하여, Q 의 N' 값들은 가장 작은 값에서부터 가장 큰 값으로 나열된다(즉, $Q_1 \leq Q_2 \leq \dots \leq Q_{n-1} \leq Q_n$ 이 된다). 또한, 중앙기울기(Median slope)는 다음과 같이 계산된다.

$$S = Q_{[(N'+1)/2]} \quad \text{if } N' \text{ is odd} \quad (3)$$

$$S = \frac{Q_{[N'/2]} + Q_{[(N'+2)/2]}}{2} \quad (4)$$

if N' is even

0의 기울기를 갖는 Null 가정을 검증하기 위하여(이는 추세성이 없는 것을 의미함), 실제 기울기에 대한 낮은 쪽의 $(1-\alpha)100\%$ 신뢰구간을 계산한다. 신뢰구간을 계산하기 위하여 다음 S 의 분산 추정치를 사용한다 (Kendall(1975).

$$\begin{aligned} \text{var}(S) & \quad (5) \\ &= \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right] \end{aligned}$$

여기에서, q 는 동일 값으로 구성된 값의 개수를 의미하며, t_p 는 동일한 값들의 수를 의미한다. 근사 정규 이론의 하한 신뢰구간은 Q 의 M_1 번째의 가장 큰 값이 된다.

여기에서 M_1 은,

$$M_1 = \frac{N' - Z_{1-\alpha} [\text{var}(S)]^{1/2}}{2} \quad (6)$$

이다. 또한 상한 신뢰구간 M_2 는

$$M_2 = \frac{N' + Z_{1-\alpha} [\text{var}(S)]^{1/2}}{2} \quad (7)$$

이다.

이상 M_1 및 M_2 는 상기에서 순서대로 나열된 관측 값의 순서를 의미하며 하부의 M_1 및 상부의 M_2 번째 관측값 사이에 나타난 추정자가 0인 경우는 추세가 없고, 0이 아닌 경우는 추세를 보이는 것으로 판단한다 (Gibbons, 1994).

5. 분석 결과

5.1 공간적 수질 분포 특성

분석에 사용된 전체 수질 자료의 일반적 통계를 살펴보면, 염소이온 농도의 경우에는 약 25.2mg/L에 표준편차 124.0mg/L, 질산성질소는 약 5.1mg/L에 표준편차 31.7mg/L를 보인다. 관정의 심도와 농도의 관계를 보면 전반적으로 관정의 심도가 깊을수록 두 성분의 농도가 감소하고 있으나, 약 200~400m 깊이의 관정에서도 수질기준에 근접하거나 초과하는 농도가 나타나고 있다

(Fig. 4). 관정의 설치 표고와의 관계를 보면, 표고가 높을수록 두 성분의 농도가 일반적으로 낮아짐을 알 수 있는데, 이는 상류지역에 오염원이 상대적으로 적은데 기인한다고 볼 수 있으나 제주도 기반암의 다공질 특성으로 인하여 표고가 높을수록 지하수위 심도가 깊게 분포하는 데에도 그 원인이 있다 하겠다. 그러나, 일부 하부 중산간 지역(약 200~300m 표고)의 관정에서는 깊은 지하수위를 보이는 경우에도 고농도가 나타남을 알 수 있어 이에 대한 향후 추가적인 원인 규명이 필요하다 하겠다(Fig. 5).

일반적으로 지하수 수질은 시료 채취 심도에 의하여 농도 차이가 발생할 수 있으므로 시료채취 심도가 중요한 역할을 담당한다. 그러나, 본 연구에서는 펌프 설치 심도에 대한 정보 부족으로 시료 채취 심도에 따른 농도 영향 평가는 수행하지 못하였다. 그러나, Fig. 5에서 보는 바와 같이 표고 약 300m 지역까지는 지하수위가 고지대로 가면서 점점 깊어져서 해안 표고와 유사하거나 약간 높은 정도를 보이고 있어 이 심도 이하에 펌프가 설치되어 있는 점을 고려한다면 시료 채취 심도는 그 이하로 간주할 수 있다. 이들 지하수위 깊이는 평균 약 78.4m로서 비교적 깊고, 표준편차가 약 54.1m 정도로 넓은 범위를 보인다.

일반적으로 염소이온 농도는 물과 암석의 반응에 의하여 자연적으로 나타나기도 하며, 도시지역의 경우에

는 산업체의 폐수, 하수 및 제설제 등에서 기원하고 농촌지역은 동물의 배설물 및 농약의 사용 등에 의하여 나타나며 국내 먹는물 수질 기준은 250mg/L이다. 제주도 염소이온 농도는 도시의 형성 및 염수 침입 등으로 해안 지역에서 높게 나타났으며 특히 성산 유역(114.1mg/L), 표선 유역(75.5mg/L), 구좌 유역(64.7mg/L)에서 고농도를 보이며 동서귀 유역(9.9mg/L)이 가장 낮은 농도를 보인다(Fig. 6).

질산성 질소는 대부분 인간 활동에 의하여 주로 발생되며 분뇨, 질소비료 등 지표의 오염원에 의해 발생한다. 우리나라의 경우 먹는물 수질 기준은 10mg/L이며, 제주도는 한경 유역이 7.6mg/L로 가장 높으며 안덕 유역과 구좌 유역이 약 2.8mg/L로 가장 낮은 분포를 보인다(Fig. 7). 질산성 질소의 분포는 고도별, 지역별로 큰 편차를 보이는데, 해안저지대는 먹는물 수질 기준을 초과하는 경우가 다수 있다. 한편, 제주도 서부지역의 질산성 질소의 주 원인은 화학비료와 축산폐수로 밝혀진 바 있다(강봉래 등, 2002).

5.2 시계열적 수질 분포 특성

일반적인 수질의 농도는 수질 시료의 채취 시기, 강우 발생 여부, 비료 살포 여부, 시료 채취 관정간의 관계 등에 의하여 영향을 받을 수 있어 결과 해석시 유의해야 한다. 그러나, 본 연구에서는 그 목적상 광역적 추

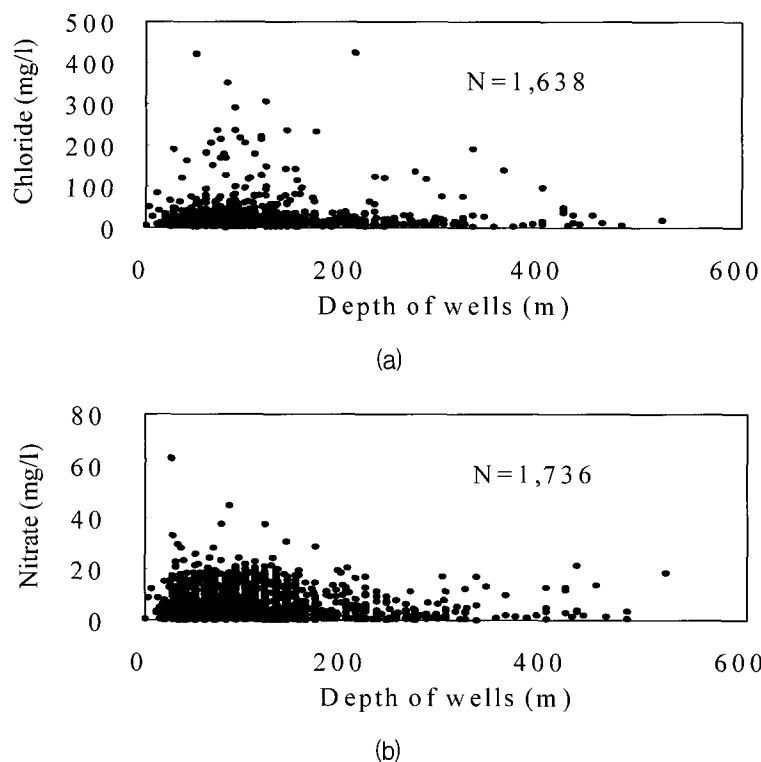


Fig. 4. Scatter plots for the depths of wells and two components (chloride (a) and nitrate (b)).

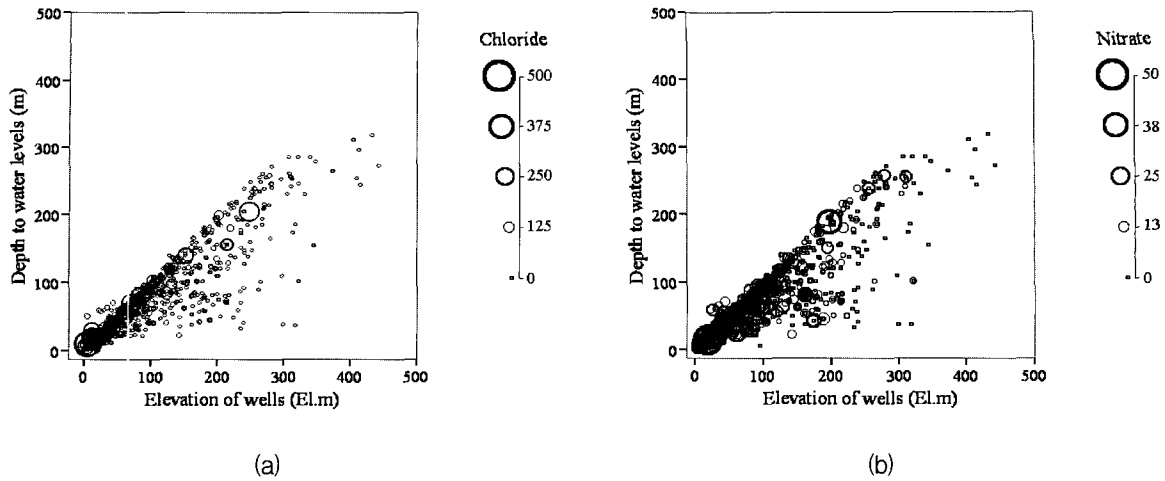


Fig. 5. Scatter plots for the depths to water levels and the elevations of wells for chloride (a) and nitrate (b) (Number of wells: 2,298 for chloride and 2,314 for nitrate)

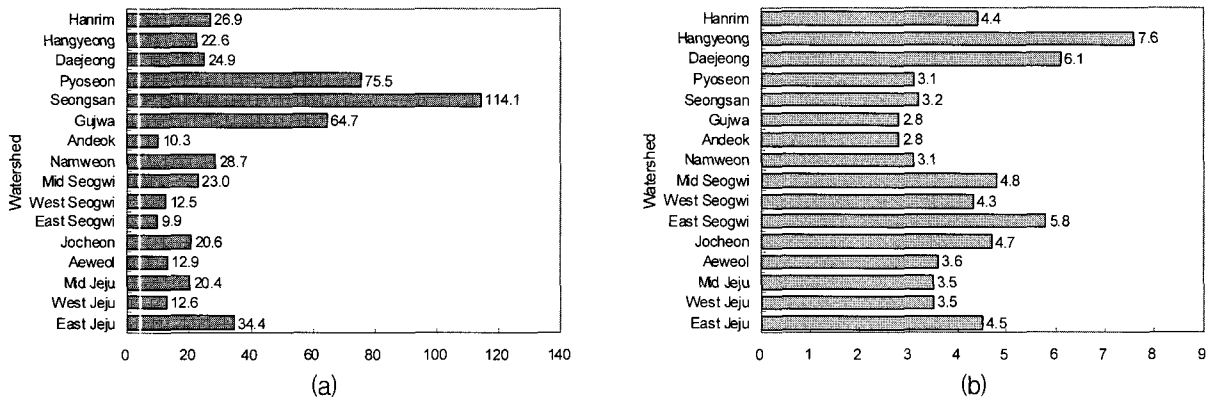


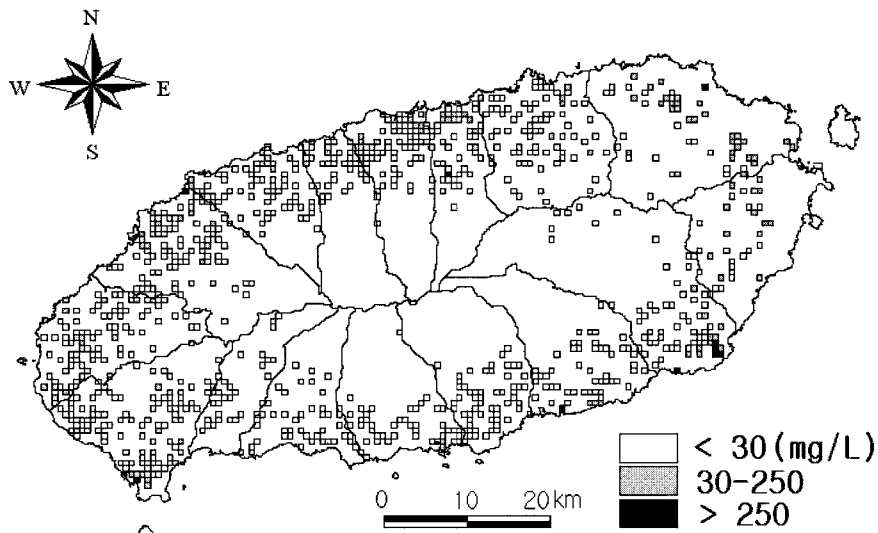
Fig. 6. Mean values of chloride (a) and nitrate (b) concentrations for each watershed (unit: mg/L)

세 특성을 파악하는데 주안점을 두어 각 시료 채취 지점의 제반 영향 인자에 대한 정밀 검토는 수행하지 않았다. 그러나, 전체 자료를 대상으로 두 성분 농도의 월 평균 자료를 활용하여 시계열적 변화를 검토한 결과, Fig. 8에서 보는 바와 같이 호우기에 농도가 약간 높고 갈수기에 약간 떨어지는 것을 볼 수 있으나 이 값이 각 연도별 및 해당 월에 따라서 증가하거나 감소하는 특성을 보이지는 않는 것으로 나타났다. 즉, 제주도 전역의 평균적 개념에서의 염소이온 및 질산성 질소 농도에 대한 연도별 추세 특성은 큰 변화가 없는 것으로 보인다. 한편, 각 월별 시료채취 건수도 5월이 가장 많은 914건, 12월이 가장 적은 352건 등으로서 비교적 균질하며, 연도 변화에 따른 월별 시료채취 시점의 급격한 변화는 보이지 않고 있다.

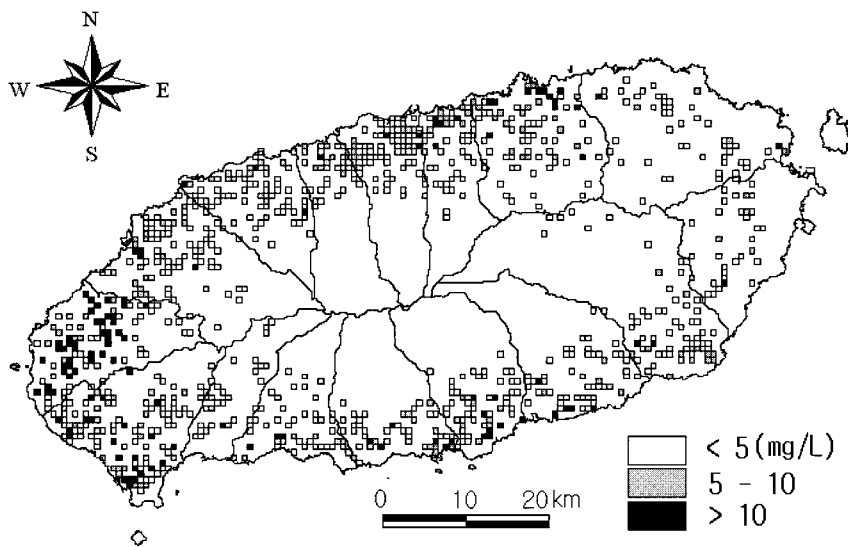
북부, 동부, 남부 및 서부지역을 대상으로 염소이온 농도와 질산성 질소 농도의 증가 정도를 시각적으로 파악하기 위하여 시계열 도표를 작성하였으며 이 중에서

대표적인 증가 현상을 보이는 4개 격자를 선정하여 수록하였다(Fig. 9). Table 4는 Sen의 방법에 의한 염소이온과 질산성 질소의 각 격자별 추세 분석 결과를 나타낸 것으로서, 염소이온의 경우에는 추세 분석에 사용된 총 161개의 격자 중에서 하향 추세를 보이는 것이 전체의 21.7%인 35개 격자, 상향추세는 10.6%인 17개 격자로서 비교적 안정적인 추세 특성을 보이고 있다. 질산성 질소의 경우에는 총 165개의 격자를 대상으로 추세분석이 이루어졌으며 하향추세는 4.8%인 8개 격자, 상향추세는 22.4%인 37개 격자에서 나타나 상향 추세가 하향추세보다 우세함을 알 수 있다.

제주도 지질은 투수성이 매우 양호하여 강우시 상부의 오염물질이 하부로 이동하여 순간적인 농도를 증가시키게 되고 강우가 멈춘 후에는 농도가 급격히 떨어지는 특성을 보일 수 있기 때문에, 질산성 질소를 대상으로 시료 채취 시기와 강우량과의 관계를 검토해 보았다. 질산성 질소가 증가 추세를 보인 37개 격자를 대상



(a)



(b)

Fig. 7. Lattice distribution for the average concentrations of chloride (a) and nitrate (b)

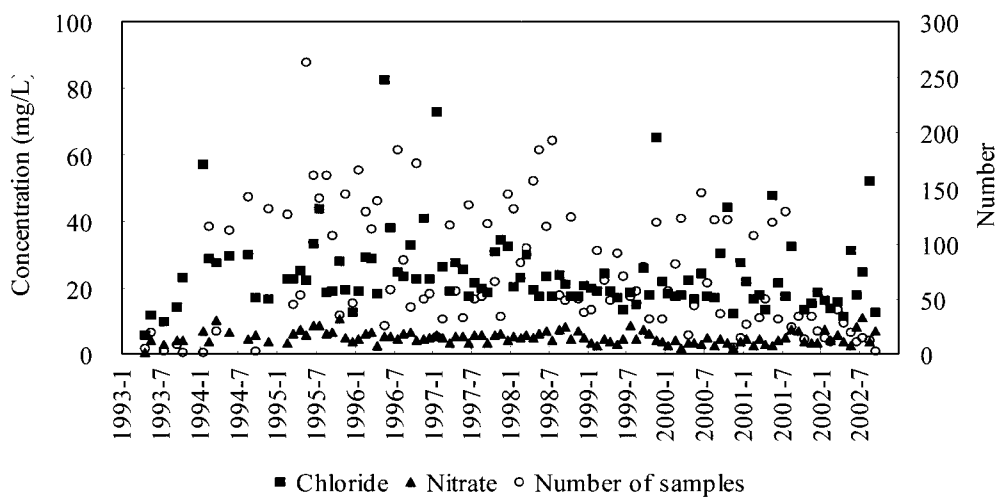
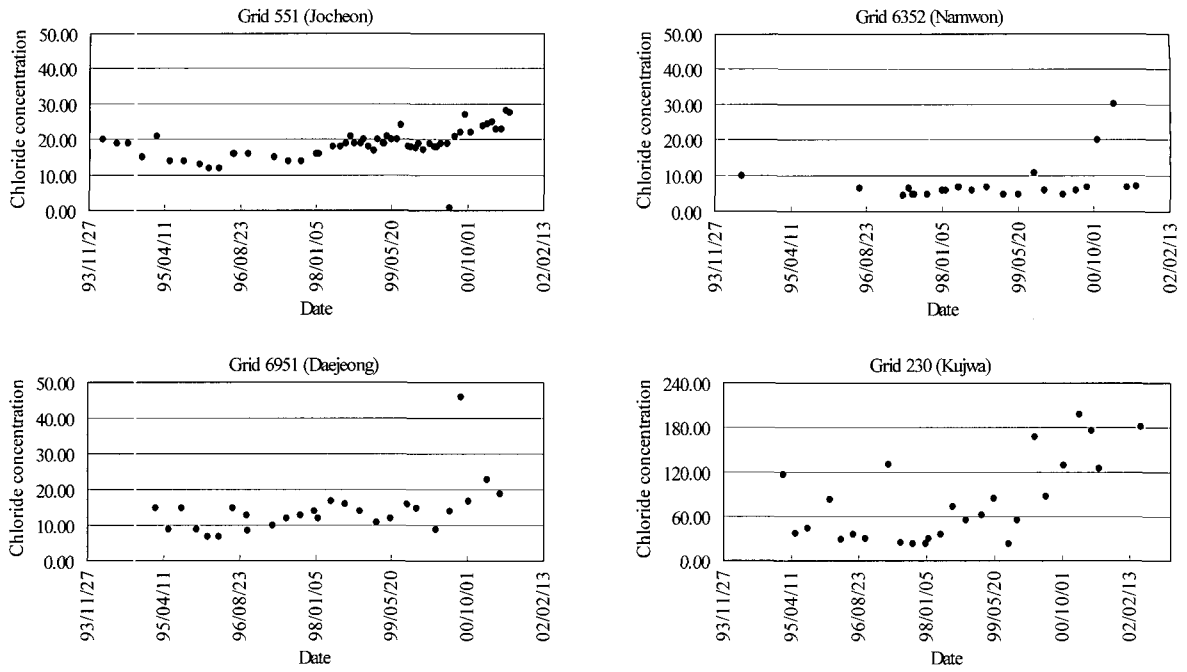
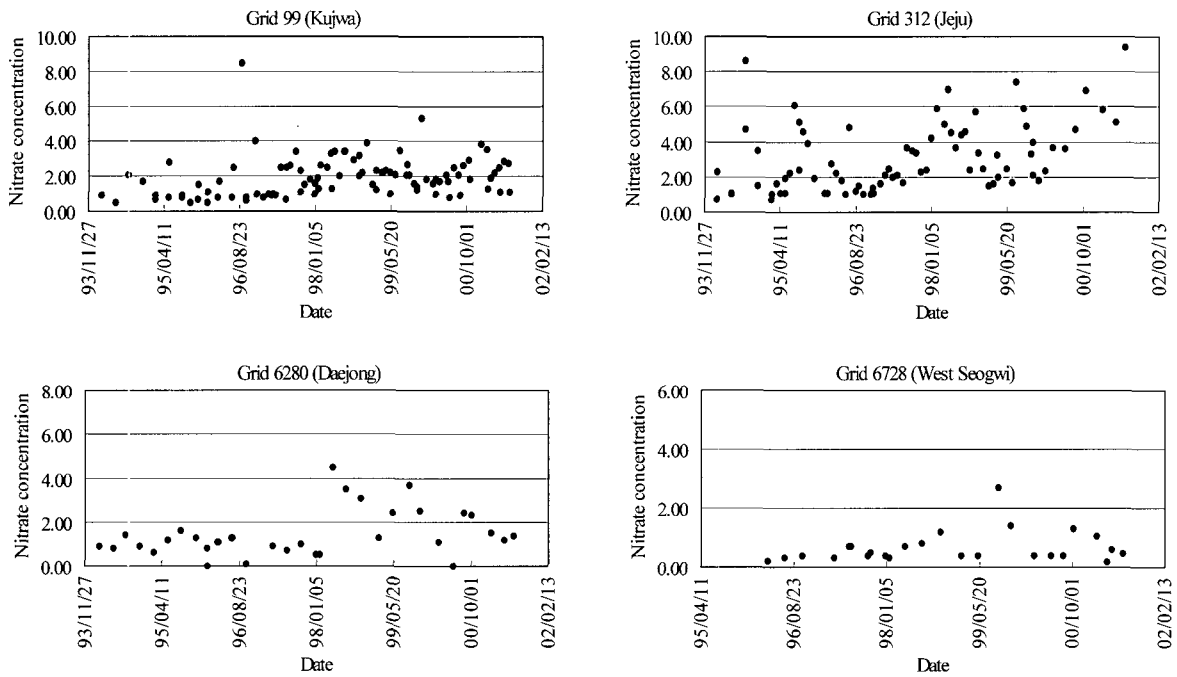


Fig. 8. Trends of the average monthly concentrations for chloride and nitrate



(a)



(b)

Fig. 9. Examples of time series plots of chloride (a) and nitrate (b) concentrations with upward trends for four representative grids.

Table 4. Result of trend analysis for chloride and nitrate using Sen's method

Items	Contents	Total	Downward trend	No trend	Upward trend
Chloride	Number of lattice	161	35	109	17
	Percent(%)	100.0	21.7	67.7	10.6
Nitrate	Number of lattice	165	8	120	37
	Percent(%)	100.0	4.8	72.7	22.4

으로 시료 채취 당일의 강우량과 농도, 시료 채취 이전의 3일간의 누적 강우량과 농도를 비교해 보았다. 제주도내 4개 기상관측소로부터 수집된 강우량은 로그 변환을 실시하여 정규화 하였으며, 로그 변환된 강우량과 질산성 질소의 Pearson 상관계수를 각 격자별로 산정한 결과 Fig. 10에서 보는 바와 같이 격자에 따라 +0.6 에서 -0.9 정도의 범위를 보이는 것으로 나타났다. 여기에서 당일 강우량과의 상관계수가 +1과 -1의 값을 보인 경우는 시료 채취 총 기간 중 강우가 2번 정도에 불과한 경우로서 표본의 수가 적어 의미를 부여하기 어렵다. 또한, 본 분석 결과는 강우량이 0인 경우는 제외된 것으로서, 무강우시에도 농도가 높게 나타나는 경우가 있기 때문에 무강우를 고려한다면 상관성은 더 낮아질 것으로 예상된다. 한편, 격자에 따라 3일간 누적강우량인 경우가 당일 강우량인 경우보다 상관계수가 높게 나타나는 경우가 있어 강우 후 지표 오염물의 순간적인 지하 침투로 인한 농도 증가로 판단할 수 있으나, 그 반대의 경우도 다수 존재하고 있어 단순한 상관성을 보이는 않는다. 또한, 전체적으로 당일 강우량과 질산성 질소 농도와의 관계는 평균 -0.127, 3일 누적 강우량과의 관계는 평균 -0.014의 음의 Pearson 상관계수를 보이고 있어 농도 증가 추세를 보이는 지역에서 강우 후 오염물질의 침투에 따른 질산성 질소 농도의 일시적 증가는 거의 없음을 알 수 있다.

Fig. 11은 각 격자에서의 염소이온 농도에 대한 추세 분석 결과로서, 동부의 표선유역, 서부의 한경유역 및 대정 유역, 남부의 중서귀 및 동서귀 유역, 북부의 조천 유역 등이 농도가 증가하는 것으로 나타났다 (Fig. 12). 전체적으로 지형 특성 및 표고 등에 따른 상향추세 특

성은 보이지 않고 있으며 이는 농경지(경작지, 굴 농장 등)의 증가에도 불구하고 염소이온 농도의 변화는 미미함을 알 수 있다. 특히, 동부지역에서 염소이온 농도의 증가가 나타나지 않는 것은 과거 10여년간 해수 침투와 급격한 도시 형성이 거의 없었음을 보여준다.

지하수에 있어서 농화학물의 영향은 호우지역, 과다 농경지역, 물의 하향 침투가 우세한 투수성 토양 지역 등에서 뚜렷이 나타난다(EPA, 1999). 제주도의 기반암은 파쇄대 및 공극 등으로 높은 투수성을 갖고 있을 뿐 아니라 강우량이 매우 많은 지역이므로, 농업경제 활동에 의하여 지하수 오염이 쉽게 발생할 수 있는 여건을 갖고 있다. 지하수내의 질산성 질소는 영양소와 살충제에 의하여 잘 나타나므로 인간 활동 및 농업 활동에 따른 영향 여부의 지시자로서 사용되며, 고경석 등(2005)는 제주도의 질산성 질소는 일반적으로 토지이용과 가축 및 질소비료에 의한 농업활동 등에 의하여 영향을 받은 것으로 연구한 바 있다.

Fig. 11 및 Fig. 12에서 보는 바와 같이, 대정유역, 동서귀유역, 중서귀유역, 서서귀유역, 안덕 유역 및 남원 유역의 표고 100~250m 지역에서 질산성 질소 농도의 상향 추세가 잘 나타나고 있다. 이와 같은 현상은 과거 10여년간 토지이용 변화 및 오염원의 발생에 따라 상류 지역 오염이 증가되었을 가능성을 시사한다.

Table 5는 염소이온과 질산성 질소 농도의 추세 변동 패턴이 표고에 따라 어떤 차이가 있는가를 T-test를 통하여 분석한 결과이다. 염소이온 농도의 경우, 모든 추세(상향, 하향 및 무변동)들이 표고에 따라 차이가 없어 제주 전역에 걸쳐 지역에 따라 비슷한 변화 특성을 보이고 있음을 알 수 있다. 질산성 질소의 경우에는 추세

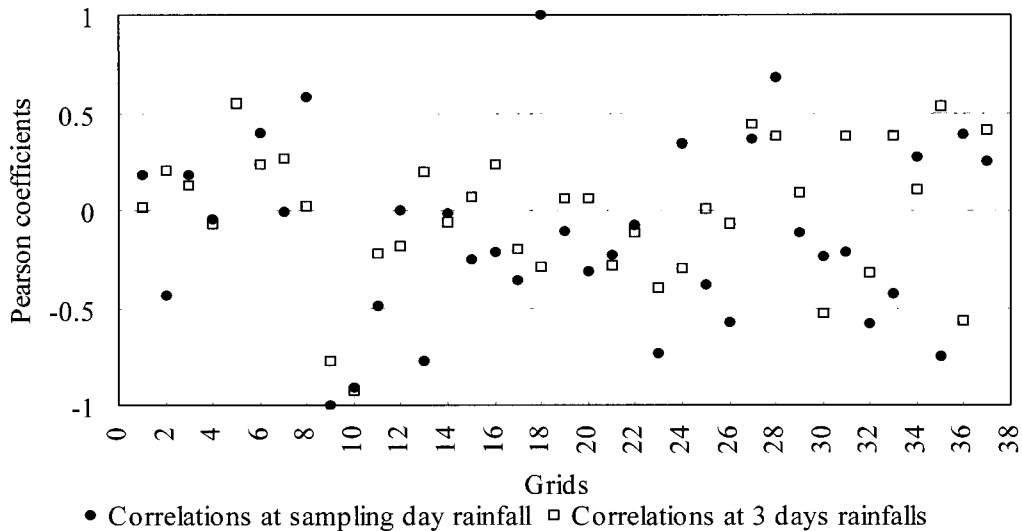


Fig. 10. Distributions of Pearson correlation coefficients between rainfalls and nitrate concentrations

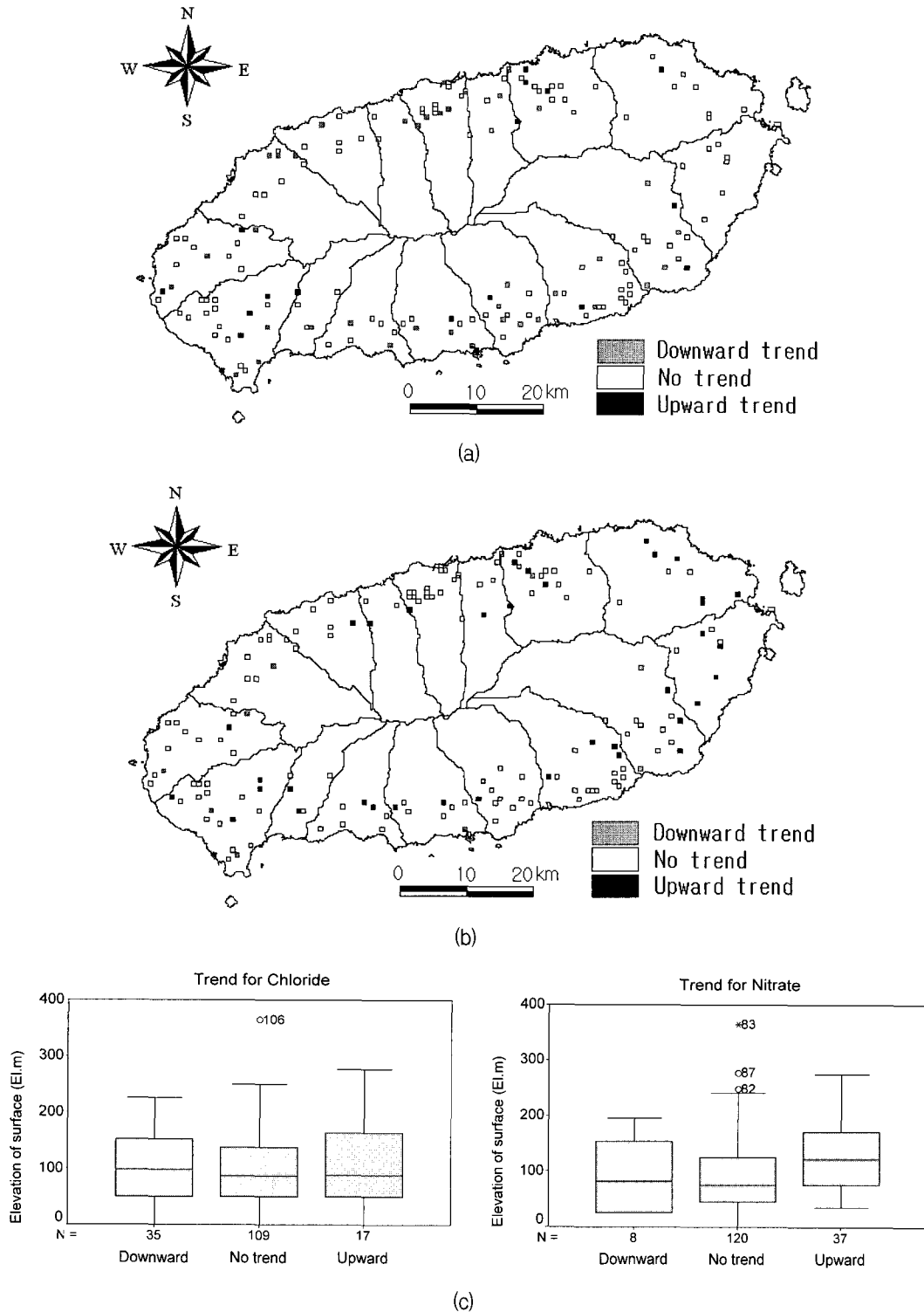
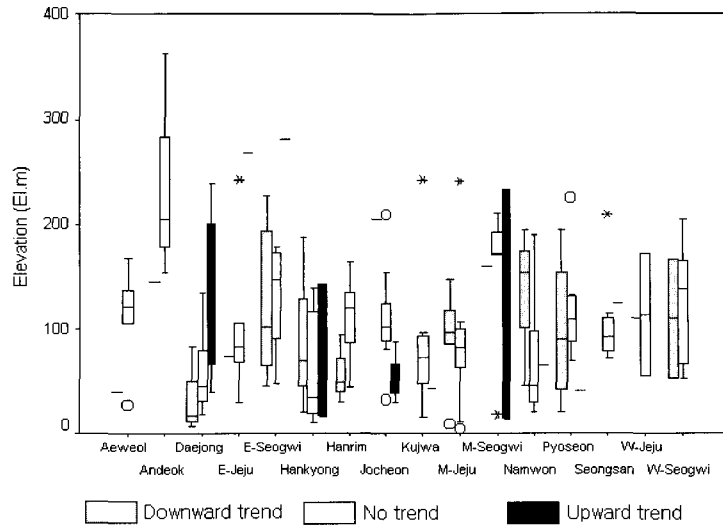


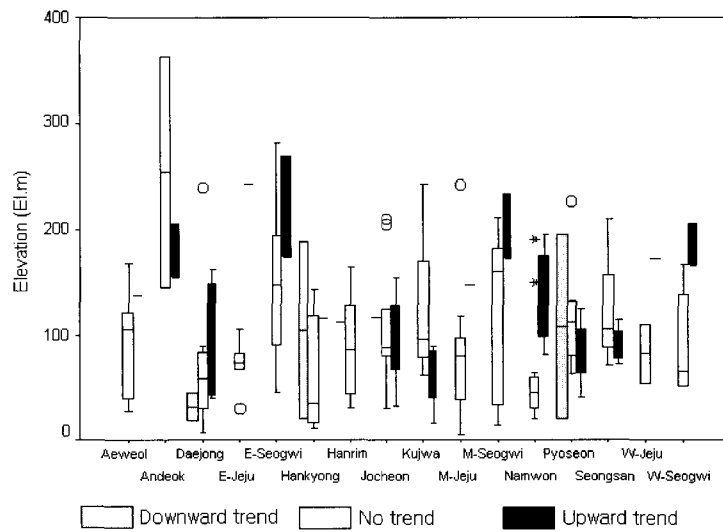
Fig. 11. Lattice distribution maps for the trends of chloride (a) and nitrate (b) concentrations and the box plots for trend patterns (c)

변동 없음과 상향추세 특성간에는 표고에 따라 유의수준 0.05에서 차이가 있음을 알 수 있으며, 이는 하부 중산간 지역에서의 질산성질소 농도 변화가 뚜렷하였음을 나타낸다. Fig. 13은 조천유역과 동계주유역에서의 오염

원 분포의 변화와 수질추세 특성을 동시에 표기한 예로서, 1990년대 이후에 가축 사육 목장, 저장 탱크, 쓰레기 매립시설 및 정화조 등이 다수 설치되었음을 알 수 있다(제주도, 한국수자원공사, 2003).



(a)



(b)

Fig. 12. Box plots of the concentrations of chloride (a) and nitrate (b) for 16 watersheds

Table 5. Result of T-test for the trends of chloride and nitrate according to the elevations of wells

Items	Between two groups	Equality of variance by Levene's test		T-test result for equality of means		
		F	Sig. ^{a)}	T	Sig.(2-sided)	Judgment
Chloride	Downward/No trend	0.121	0.729	0.206	0.837	X
	No trend/Upward	6.605	0.011	-0.727	0.476	X
	Downward/Upward	4.747	0.034	-0.579	0.568	X
Nitrate	Downward/No trend	0.414	0.521	-0.082	0.935	X
	No trend/Upward	0.000	1.000	-2.532	0.012	O
	Downward/Upward	0.516	0.477	-1.320	0.194	X

a) If significance level is below 0.05, the hypothesis of equal variance is rejected.

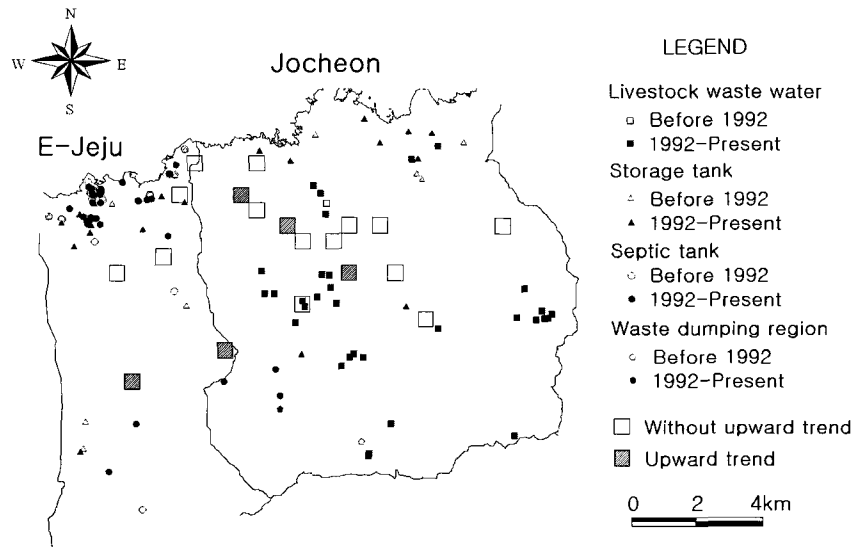


Fig. 13. Distribution of point pollution sources and trends of nitrate concentration in the northern watersheds (East-Jeju and Jocheon)

5.3 해석의 한계 및 문제점

본 연구는 제주도 전역을 대상으로 광역적인 측면에서의 염소이온 농도와 질산성질소 농도의 변화를 평가한 것으로서, 격자별 추가적인 시료 채취와 오염원조사 및 수리수문학적인 연계 분석 등을 통한 최근 자료를 이용한 보완이 이루어진다면 보다 개선된 결과가 도출될 수 있을 것으로 본다. 일반적으로 수질 시료의 채취 및 분석 과정에서 다양한 인자가 결과에 영향을 미칠 수 있기 때문에 수질자료의 해석에는 한계성을 갖는다. 즉, 시료 채취 시점의 균질성, 채취 방법의 동질성, 시계열 분석을 위한 채취 시기의 주기성, 동일한 심도에서의 시료 채취 여부, 계절적인 영향 및 강우의 영향 등 매우 다양한 인자가 수질 분석 결과에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 기존에 분석된 수질 자료를 최대한 수집, 활용하여 수행한 결과로서 상기와 같은 문제점이 모두 파악되어 분석시 고려된 것은 아니다. 또한, 추세 분석에 사용된 최종 수질 자료는 2002년 상반기 이전의 자료로서 본 해석결과가 현재 시점의 추세 특성과는 상이함을 밝힌다.

6. 결론 및 건의

본 연구는 그 동안 특정 기간의 수질 특성 연구의 범위에서 벗어나 시계열적 분석의 중요성 및 필요성을 제기한 기초적인 연구로서, 향후 예측 가능한 수질 및 오염원 정책을 수립하는데 필요한 과거 데이터의 분석 및 활용 방법을 제시하였다. 제주도 지역의 염소이온 및

질산성질소 농도의 변화 추세 분석을 위하여, 중산간 아래 지역의 수리경사가 매우 완만한 점을 고려하여 등간격의 격자를 구성하여 데이터 건수를 증가시켰으며, 제한된 데이터의 한계를 극복하고자 비모수적 방법인 Sen의 방법을 활용하고 이들 데이터를 GIS 기법을 적용하여 구현함으로써 시각화 시켰다.

염소이온과 질산성 질소의 농도에 있어서 제주도 전역의 평균적인 개념에서의 뚜렷한 증가 현상은 나타나지 않고 있으나, 질산성질소의 경우에는 수질이 양호한 하부 중산간 지역에서도 증가 추세가 나타나는 바 중산간 지역의 오염원 및 수질 관리의 필요성이 있다 하겠다. 그러나, 본 분석 결과가 수질 자료 특성이 지표 오염원, 불규칙한 강우 특성, 다양한 지하수 유동성, 계절적인 요인 등에 의하여 영향을 받을 수 있다는 점을 고려한다면 통계로 설명할 수 없는 자연 현상에 대한 한계는 있을 것으로 본다. 그러나, 앞에서 검토한 바와 같이 시료 채취 시점의 강우 여부와 월별 및 연도별 등에 따라 농도의 변화가 뚜렷하지 않은 점을 감안한다면 본 연구 결과는 광역적인 해석에 의미가 있을 것으로 판단되며, 향후 오염원에 대한 보다 정밀한 조사, 대용량의 수질 데이터 확보 및 수리수문 특성 규명 등이 병행된다면 보다 정밀한 분석과 보완이 가능할 것으로 기대한다.

감사의 글

본 논문이 보다 개선될 수 있도록 좋은 의견을 주신 세 분의 심사위원님에게 감사의 말씀을 드립니다. 아울

리, 본 연구 결과의 일부는 “제주도 수문지질 및 지하수 자원 종합조사(III)” 사업의 성과를 활용하였음을 밝힙니다.

참 고 문 헌

- 강봉래, 박윤석, 고기원, 허목 (2002). “동위원소를 이용한 제주도 서부지역 지하수의 질산성질소 오염원 연구.” **한국지하수토양환경학회 2002년도 총회 및 춘계학술발표회**, 지하수토양환경학회, pp. 137-140.
- 고경석, 김용제, 고동찬, 이광식, 이승구, 강철희, 성현정, 박원배 (2005). “주성분분석과 지구통계법을 이용한 제주도 지하수의 수리지화학 특성 연구.” **자원환경지질**, 제38권 제4호, pp. 435-450.
- 원종호 (2004). “**제주도 지하수자원에 대한 수리지질학적 평가 및 물수지 분석 연구.**” 박사학위 논문, 서울대학교, p. 208.
- 제주도, 한국수자원공사 (2003). 제주도 수문지질 및 지하수자원 종합조사(III). 제주도, p. 425.
- Canter, L.W., and R. C. Knox (1985). *Septic tank system effects on ground water quality*, Lewis Publishers. Chelsea, MI, p. 360.
- EPA (1990). *Handbook: Ground water volume 1: Groundwater and contamination*, EPA/625/6-90/016a, U.S. Environmental Protection Agency, Washington D.C., p. 144.
- EPA (1994). *Handbook: Ground water and wellhead protection*, EPA/625/R-94/001, U.S. Environmental Protection Agency, Washington D.C., p. 269
- EPA (1999). *Safe drinking water act, Section 1429, Groundwater report to congress*, EPA-816-R-99-106, U.S. Environmental Protection Agency, Washington D.C., p.56.
- Freeze, R.A., and J.A. Cherry (1979), *Groundwater*, Prentice-Hall Inc, p. 604.
- Gibbons, R.D. (1994). *Statistical methods for groundwater monitoring*, John Wiley and Sons, New York, p. 304.
- Hudak, P.F. (2000). “Regional trends in nitrate content of Texas groundwater.” *Journal of Hydrology*, Vol. 228, pp. 37-47.
- Hudak, P.F., and S. Blanchard (1997). “Land use and groundwater quality in the trinity group outcrop of North-Central Texas, USA.” *Environment International*, Vol. 23, No. 4, pp. 507-517.
- Kehew, A.E., Straw, W.T., Steinmann, W.K., Barrese, P.G., Passarella, G., and W. Peng (1996). “Groundwater quality and flow in a shallow glaciofluvial aquifer impacted by agricultural contamination.” *Ground Water*, Vol. 34, No. 3, pp. 491-500.
- Kendall, M.G. (1975). *Rank correlation methods. 4th edition*, Charles Griffin, London, p. 272.
- Reese, S.O. (1998). *Summary of groundwater quality monitoring data (1985-1997) from Pennsylvania's ambient and fixed station network (FSN) monitoring program: Selected groundwater basins in southwestern, south-central and southeastern Pennsylvania. DEP publication 3800-BK-DEP2246*, <http://www.dep.state.pa.us>.
- Risser, D.W., and S.F. Siwec (1996). *Water quality assessment of the lower Susquehanna river basin: Pennsylvania and Maryland: Environmental setting. U.S. Geological Survey Water Resources Investigation Report 94-4245*, U.S. Geological Survey, p. 70.
- USGS (1999). *The quality of our nation's water - nutrients and pesticides. U.S. Geological Survey Circular 1225*, U.S. Geological Survey, p. 82.
- Wakida, F.D. (2005). : “erner DN. Non-agricultural sources of groundwater nitrate: a review and case study.” *Water research*, Vol. 39, pp. 3-16.

(논문번호:07-12/접수:2007.02.02/심사완료:2007.06.21)