

## 제주도 용천수의 시·공간적 수질 변동 특성 연구 - 1999년부터 2020년까지 -

김미진 · 고은희 · 고창성 · 김민철 · 강봉래 · 박원배<sup>‡</sup>  
제주지하수연구센터

### A study on the characteristics of temporal and spatial water quality changes of spring water in Jeju island - from 1999 to 2020 -

Mijin Kim · Eun-Hee Koh · Chang-Seong Koh · Min-Chul Kim · Bong-Rae Kang · Won-Bae Park<sup>‡</sup>  
*Jeju Groundwater Research Center, Jeju 63147, Republic of Korea*

#### 요 약

과거 제주도의 주요 수자원이었던 용천수의 수질은 최근 각종 개발사업과 잠재오염원의 증가로 오염이 심화되고 있다. 이에 본 연구는 1999년부터 2020년까지 용천수의 장기간 수질 변동특성을 파악하였다. 이온 분석 결과, 고도가 낮아지면서 용천수 내 NO<sub>3</sub>-N과 Cl<sup>-</sup>이 증가하여 인위적 오염원과 해수의 영향을 받는 것으로 나타났다. 지난 22년간 NO<sub>3</sub>-N 농도는 남부지역에서 감소하는 경향이 나타나는 반면, 서부지역에서는 지속적으로 높게 유지되었다. 요인분석 결과, 용천수 수질에 영향을 주는 요인은 해수(요인 1)와 인위적 오염원(요인 2)으로, 요인 2의 점수는 동부와 서부지역에서 증가 양상으로 나타남에 따라 이온 분석보다 뚜렷한 수질 변화 경향을 얻을 수 있었다. 용천수 및 반경 1 km 이내 지하수의 평균 NO<sub>3</sub>-N 농도를 비교한 결과 용천수의 NO<sub>3</sub>-N 농도가 지하수에 비해 1999년에 1.4배, 2010년에 2.3배, 2014년에 0.9배, 2020년에 4.6배 높았다. 이에 따라, 지하수까지 오염이 확산되기 전에 용천수 수질 보호를 위해 토지 이용 및 오염원 관리, 지속적인 용천수 수질 모니터링이 필요하다고 판단된다.

**주요어:** 용천수, 질산염 오염, 해수 혼합, 요인 분석

**ABSTRACT:** Spring water, what used to be the most important water resource in Jeju Island has been polluted by industrial developments and the increase in anthropogenic activities. Therefore, this study aimed to understand characteristic changes in the spring water quality from 1999 to 2020. During those time the concentration of NO<sub>3</sub>-N was shown the highest in the western basin. The NO<sub>3</sub>-N levels in the southern basin were decreased over time due to reduction of the fertilizer uses resulted in a decrease in the agricultural area. The Cl<sup>-</sup> concentration was high in the eastern and the western basins where the basal groundwater is present. As a result of the factor analysis, two factors were classified into the effect of seawater (factor 1) and anthropogenic pollution (factor 2). Factor 1 scores in the eastern basin and factor 2 scores in the western basins were higher than those in other basins, which was similar to the results of NO<sub>3</sub>-N and Cl<sup>-</sup> analysis. However factor analysis has an advantage as quantifying 67.3 ~ 73.7% of the samples were affected by seawater and it is showing a clearer trend than the interpretation using the NO<sub>3</sub>-N concentration only. By comparing the water quality of spring water and groundwater within a radius 1 km of the spring, the average NO<sub>3</sub>-N concentration in spring water was higher than that its concentration in groundwater (1.4 times in 1999, 2.3 times in 2010, 0.9 times in 2014 and 4.6 times in 2020). It implies that the spring water responds relatively more sensitive to changes in the surface environment than groundwater. Accordingly, it is necessary to preserve the spring water through managing the land use and the pollution source as well as by monitoring the spring water quality continuously before the contamination spreads to the groundwater.

**Key words:** spring water, nitrate contamination, seawater mixing, factor analysis

<sup>‡</sup> Corresponding author: +82-64-729-0503, E-mail: [gwaterpark@jri.re.kr](mailto:gwaterpark@jri.re.kr)

## 1. 서론

대수층을 따라 흐르는 지하수가 암석이나 지층의 틈을 통해 지표면 밖으로 자연스럽게 솟아나는 것을 용천이라고 하며 솟아난 물을 용천수라 한다(Jeju-do, 1999a). 지하수 개발이 활발히 일어나기 전, 지표수가 거의 없는 제주도에서 용천수는 도민들의 식수이자 생활용수, 농업용수로서 중요한 역할을 하였다(Park and Ha, 2012). 하지만 1970년대 이후 지하수 개발이 시작되면서 현재 90% 이상을 지하수에 의존하며 용천수는 용수 공급 측면으로의 활용이 낮아져(7.5% 이용) 관심이 줄어들었다(JSSGP, 2018). 또한 각종 개발사업과 인간활동의 증가로 인해서 용천수의 수질 오염이 상당히 진행되고 있다(Jeju-do, 1999a; Lee et al., 2002; Jung et al., 2011). 2013~2014년 기간 중 제주도 전역의 용천수 전수조사 결과, 질산성질소( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) 농도가 먹는 물 기준(10 mg/L)을 초과하는 곳이 531개소 중 387개소(72.8%)로 나타났다(JSSGP, 2016). 또한 염소이온( $\text{Cl}^-$ ) 농도가 먹는 물 기준(250 mg/L)을 초과하는 경우는 543개소 중 173개소(31.9%)로 나타남에 따라 용천수의 수질 오염이 심각한 것으로 나타났다.

선행 연구에 따르면 제주도 용천수 중 산악지대에서는 화산암질 암석에서의 물-암석 반응이 우세한 반면, 농경지가 주로 분포하는 저지대 지역에서는  $\text{NO}_3\text{-N}$ 에 의한 오염이 주로 나타났다(Lee et al., 2002; Jung et al., 2010). 또한 해안지대에 위치한 대부분의 용천수에서는 해수의 영향이 나타나는 것으로 밝혀졌다. 특히 제주도 북서부 지역 용천수의  $\text{NO}_3\text{-N}$  오염 기원은 화학비료와 가축분뇨로 밝혀져, 지하수와 동일한 오염원의 영향을 받고 있음을 알 수 있다(Song et al., 2010).

지하수 및 용천수 수질 오염은 1980년대 이후 제주도 전역에서 삼림 면적이 감소하고 제주도 중산간까지 농경지와 도심지가 확장되는 등의 토지이용 변화 때문인 것으로 판단된다(Song et al., 2018). 특히 동부지역은 농경지 면적이 증가하면서 지하수의  $\text{NO}_3\text{-N}$  농도 또한 증가하는 양상이 나타났다(Koh et al., 2017a). 반면 동부와 서부지역에서는 하류지역 뿐만 아니라, 지하수 주 함양지역인 고도 200 m 이상의 중산간 지역에서도 지하수의  $\text{NO}_3\text{-N}$  농도 증가 추세가 보고되었다(Kim et al., 2018a).

투수성이 높은 제주도의 지질학적 특성으로 인해 용천수와 지하수의 수리적인 연결성은 매우 양호한 것으로 판단된다(Lee et al., 2002; Won et al., 2006; Jung et al., 2011). 이에 따라 토지이용 변화에 따른 지하수 수질의 장기적 변화 추이는 용천수에서도 유사하게 나타날 것으로 예상된다. 따라서, 본 연구에서는 1999~2020년(22년간)의 용천수 수질 자료를 활용하여 용천수 수질의 시·공간적인 변동 특성을 파악하였다. 이를 통해 지난 22년 동안 용천수 수질에 영향을 주는 요인 및 용천수와 인근 지하수의 장기간  $\text{NO}_3\text{-N}$  농도 변화를 비교하여, 인간 활동이 용천수와 지하수의 수질에 미치는 영향을 판단하였다.

## 2. 연구지역

### 2.1 지형 및 수문지질

제주도는 동-서 길이가 약 73 km, 남-북 길이는 약 33 km로 긴 타원의 형상을 이루는 섬으로, 면적은 약 1,847  $\text{km}^2$ 이다. 섬의 중앙에는 해발 1,950 m 높이의 한라산이 위치하고 있으며, 정상부를 기준으로 지표의 경사는 남-북 사면이 동-서 사면에 비해 급한 특징을 보인다(그림 1). 이와 같은 지형의 차이는 구성 지질에 따른 결과로서, 남-북 사면은 주로 점성이 높아 유동성이 낮은 조면암질 용암류로 이루어져 있는 반면, 동-서 사면은 점성이 낮은 현무암질 용암류가 분포하는데서 비롯되었다(Park et al., 1998).

제주도의 지질은 구성암석에 따라 하부로부터 기반암, U층, 서귀포층, 용암류층의 순으로 거시적인 층서를 이루고 있다(Koh, 1997; Won et al., 2006; Koh et al., 2013). 수문지질학적으로 대수층은 대체로 용암류층 내의 절리(joint), 클링커(clinker)층, 스킨리아(scoria)층처럼, 지층이 쪼개지거나 개별각력으로 구성돼 수리적 연결성이 양호한 구간을 따라 발달된다(Koh et al., 2017b). 대수층 하부에 저투수성의 치밀질 용암류, 토양층, 퇴적층이 위치할 때에는 부유대수층(perched aquifer)이 형성되며, 말단부가 지표로 이어진 경우 지하수가 지표 밖으로 솟아나와 용천수가 발생된다(Soulios, 2010). 이 밖에도 대수층이 하천, 요철지형의 오목지, 산기슭 등 급격한 지형변화가 있는 곳과 접해있을 때에도 형성되는 것으로 알려져 있다(Jeju-do, 1999a).

## 2.2 용천수 조사 연혁 및 분포 특성

Jeju-do (1999a)의 용천수 전수조사 결과에 따르면, 1999년도에는 제주도 전역에 911개소의 용천수가 분포하며 이 중에서 182개소의 용천수가 고갈 또는 멸실되었다고 보고하였다. 이후 2010년에 한국 지질자원연구원에서 30개소를 추가 조사하여 941개소의 용천수의 존재를 확인하였으며, 이 중에서 281개소가 고갈 또는 멸실되었다고 보고하였다 (KIGAM, 2011). 2013년도와 2014년도에 수행된 제주특별자치도의 용천수 전수조사 결과, 향토자료와 옛 문헌 등을 참고하여 총 1,025개소의 용천수의 존재를 확인하였다(JSSGP, 2016). 이 중 매립 또는 멸실된 270개소와 위치를 확인할 수 없는 94개소를 제외하고 661개소의 용천수를 보전·관리대상으로 선정하고 관리계획이 수립되었다.

용천수는 대부분 지형 경사가 가파른 북측과 남측 사면 그리고 제주도 전체의 해안선을 따라 분포한다(JSSGP, 2016). 제주도 북측과 남측 사면에서는 주로 하천 벽면의 절리나 틈에서 대수층을 따라 흐르던 지하수가 용출되며 이는 전체 용천수의 62%이다(Won *et al.*, 2006; Park and Ha, 2012). 또한 해

안가의 용암류 말단부에서는 용암류 틈을 따라 흐르던 지하수가 용출되며(Jeju-do, 1999a; Won *et al.*, 2006) 전체 용천수 중 92.3%가 고도 200 m 이하의 저지대에 분포하고 있다. Jeju-do (1999a)는 701개소의 용천수에서 용출되는 총 유량이 1,083,363 m<sup>3</sup>/day라고 보고하였으며, 용천수 1개소 당 평균적으로 해안가와 한라산 고지대에서 많이 용출되고 중산간 지역에서 상대적으로 적게 용출되는 경향을 보였다(고도 50 m 이하 1,911 m<sup>3</sup>/day, 고도 50~200m: 345 m<sup>3</sup>/day, 고도 200~600 m: 615 m<sup>3</sup>/day, 고도 600 m 이상: 2,037 m<sup>3</sup>/day). 용천수를 지질학적으로 분류한 결과, 용암류 경계형이 74% 이상, 절리형과 사력층형이 각각 6.1%, 1.8% 순으로 나타났다(Jeju-do, 1999a).

## 3. 연구방법

### 3.1 용천수 및 지하수 수질자료 수집

시·공간적 용천수 수질의 변화를 파악하기 위해 과거 세 번의 용천수 수질조사 자료가 수집되었다. Jeju-do (1999a)의 1998년 2월부터 1999년 12월까지 389개소 용천수 조사 자료, KIGAM (2011)의 2010년 2월

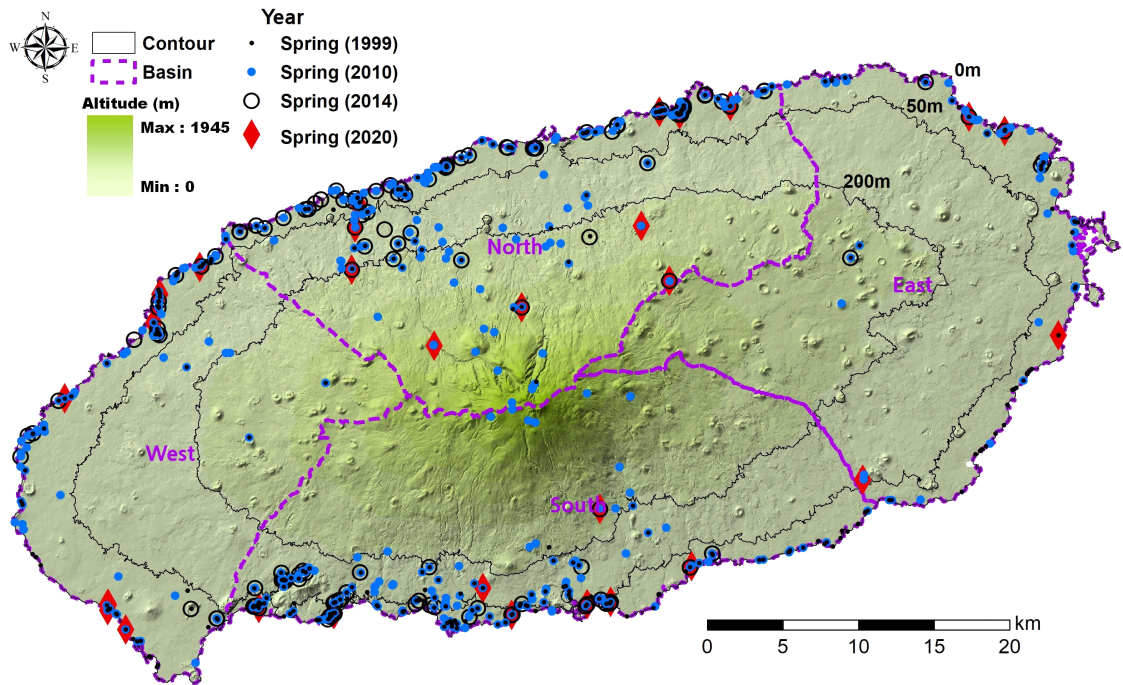


Fig. 1. Location of spring water samples.

**Table 1.** A number of spring water samples in each research year. The numbers in brackets indicate percentage.

Category		Altitude (m)			Basin			
Year	Total	≤ 50	50 ~ 100	200 <	Eastern	Northern	Southern	Western
1999	321	261 (81%)	14 (4%)	46 (14%)	45 (14%)	79 (25%)	131 (41%)	66 (21%)
2010	478	345 (72%)	48 (10%)	85 (18%)	52 (11%)	186 (39%)	150 (31%)	90 (19%)
2014	159	130 (82%)	8 (5%)	21 (13%)	6 (4%)	82 (52%)	55 (35%)	16 (10%)
2020	46	35 (76%)	8 (17%)	3 (7%)	4 (9%)	17 (37%)	14 (30%)	11 (24%)

부터 6월까지 546개소 용천수 조사 자료 및 JSSGP (2016)의 2013~2014년에 187개소 용천수 조사 자료이다. 각각의 자료는 조사연도에 따라 1999년, 2010년, 2014년으로 구분하였다. 분석된 수질항목은 pH, EC, NO<sub>3</sub>-N, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>이며 1999년도의 경우 pH와 EC 항목이, 2014년도의 경우 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>성분이 분석에서 제외되었다. 각 연도별 용천수 채수 위치는 그림 1에 나타내었다. 채수 연도별 용천수와 용천수 인근 지하수의 NO<sub>3</sub>-N 농도 차이를 비교 분석하기 위해, 제주특별자치도의 지하수 사후관리 및 연장신청을 위한 수질 분석 자료 중 1999년, 2010년, 2013, 2014년 및 2019년 자료를 사용하였다(표 2).

### 3.2 시료 채취 및 수질 분석

2020년 용천수 수질자료를 확보하기 위해서, 용출량이 10 m<sup>3</sup>/day 이상인 용천수 중에서 유역별, 고도별 분포를 고려하여 수질 분석 대상 용천수 42개소를 선정하였다(표 1; 그림 1). 선정된 42개소의 용천수를 대상으로 연 2회(1차: 7월 2일~15일; 2차: 9월 21일~24일) 수질 분석을 시행하였다. 현장 조사 시 측정된 수질항목은 수온, pH, 전기전도도(EC, Electrochemical Conductivity)이며 Orion Star A320 시리즈 휴대용 측정기(Thermo scientific)를 사용하였다. 음·양이온 농도는 제주대학교 생명과학기술혁신센터에서 분석하였는데 NO<sub>3</sub>-N, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>은 크로마토그래피(882 compact IC plus, Metrohm)로, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>은 적정시험법으로, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>는 ICP-OES (Optima 8300, Perkin Elmer)로 분석되었다.

과거 용천수 수질 자료(1999년, 2010년, 2014년)와 2020년에 수질을 분석한 자료에서 해수의 영향을 지나치게 받는 자료는 배제하기 위해 용천수의 Cl<sup>-</sup> 농도를 이용하여 해수 혼합비를 계산하였다. 이때 지하수와 해수 중 Cl<sup>-</sup>의 농도를 각각 8.8 mg/L (Jeju-do,

**Table 2.** Groundwater number within 1 km radius of spring water in research years.

Year	Eastern	Northern	Southern	Western	Total
1999	5	65	30	38	138
2010		12	26	7	45
2014	10	32	212	58	312
2020	7	27	9	4	47

2001), 19,400 mg/L (Kim *et al.*, 2001)이라 하고 아래의 물질수지식을 세웠다.

$$y = 1 - \frac{19400 - x}{19400 - 8.8} \quad (1)$$

식 (1)에서 y는 해수 혼합비, x는 용천수 중 Cl<sup>-</sup> 농도(mg/L)를 의미한다. 계산결과, 해수 혼합비가 10% 이상인 수질 자료는 분석에서 제외하였다. 또한, 주 양이온(Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>)과 주 음이온(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>)으로 전하균형오차(charge balance error)를 계산하여 오차범위 10% 이내의 자료만 사용하였다. 이에 따라 분석에 사용된 용천수는 1999년 320개소, 2010년 478개소, 2014년 159개소 및 2020년 36개소이다.

### 3.3 요인분석

요인분석은 여러 변수들 간의 관련성을 계산하고 변수들 간의 공통적인 요인을 추출하여 차수를 낮추는 방법이다(Kwahk, 2019). 요인분석은 다양하고 많은 변수들의 해석을 단순화 할 수 있기 때문에 수리지화학적 데이터를 활용하여 지하수 수질에 영향을 주는 대표적인 요인을 해석하는데 자주 사용되고 있다(Lee *et al.*, 2002; Ko *et al.*, 2005; Koh *et al.*, 2012). 변수 간의 상관관계가 높아야 분석을 수행하는데 의의가 있기 때문에 KMO 표본적합도(Kaiser-

**Table 3.** Descriptive statistics of the hydrogeochemical parameters in each research year.

Year	1999						2010					
Component unit	Mean	Median	STDV*	Minimum	Maximum	n**	Mean	Median	STDV*	Minimum	Maximum	n**
Temperature °C	18.6	16.9	4.2	11.9	30.2	320	16.1	16.2	1.9	6.4	22.1	478
pH	Not measured						7.3	7.2	0.5	5.7	10.0	478
EC µS/cm	951.3	520.0	1102.2	41.8	7730.0	320	862.5	278.5	1247.1	12.4	7180.0	476
NO <sub>3</sub> -N mg/L	13.4	9.8	11.1	0.0	71.8	321	7.5	5.5	7.3	0.0	57.6	478
Ca <sup>2+</sup> mg/L	21.2	16.4	14.5	1.9	84.8	321	16.0	12.2	11.7	0.6	67.1	478
Mg <sup>2+</sup> mg/L	24.6	14.0	27.7	0.9	148.9	321	19.8	9.7	24.3	0.3	155.6	478
Na <sup>+</sup> mg/L	153.1	28.6	240.1	2.8	1276.0	321	130.2	21.9	219.4	1.8	1241.6	478
K <sup>+</sup> mg/L	9.4	5.6	9.7	0.4	64.4	321	6.0	3.4	6.9	0.2	38.4	478
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/L	46.5	44.7	17.3	5.2	176.5	321	46.3	43.5	22.9	2.7	199.0	472
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/L	38.5	11.0	56.8	1.0	324.0	321	42.4	15.2	62.9	0.4	493.3	478
Cl <sup>-</sup> mg/L	268.9	42.0	429.6	3.0	1887.0	321	236.4	33.8	411.5	1.9	1930.4	478
CBE*** (%)	-1.2	-1.3	3.5	-9.8	9.8	321	-2.4	-2.4	3.7	-9.8	9.5	472
Year	2014						2020					
Component unit	Mean	Median	STDV*	Minimum	Maximum	n**	Mean	Median	STDV*	Minimum	Maximum	n**
Temperature °C	15.8	15.6	1.4	12.6	24.5	151	16.1	16.2	1.3	12.6	18.9	46
pH	7.2	7.2	0.5	6.3	8.8	151	7.1	7.0	0.4	6.3	8.0	46
EC µS/cm	1278.5	289.0	2730.7	12.6	18600.0	150	480.3	233.6	976.7	55.7	5889.0	45
NO <sub>3</sub> -N mg/L	7.4	5.6	6.6	0.0	33.6	159	5.7	5.1	4.1	0.0	17.3	46
Ca <sup>2+</sup> mg/L	17.6	12.5	13.6	1.9	63.6	159	7.7	5.1	10.5	1.7	54.5	46
Mg <sup>2+</sup> mg/L	21.5	8.9	31.0	1.8	143.3	159	12.6	8.6	18.6	1.2	119.2	46
Na <sup>+</sup> mg/L	129.2	22.1	253.0	5.5	1106.6	159	57.3	14.0	169.5	5.2	1015.0	46
K <sup>+</sup> mg/L	7.5	3.9	9.0	0.6	39.8	159	13.5	12.0	12.0	0.6	56.2	46
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/L	Not measured						53.2	50.0	22.0	19.5	148.9	46
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/L	40.8	14.9	65.0	1.9	314.1	159	19.3	10.5	38.9	0.0	240.0	46
Cl <sup>-</sup> mg/L	209.7	27.3	417.9	4.7	1806.2	159	86.9	18.7	262.6	5.0	1577.0	46
CBE*** (%)	Not measured						-0.6	-1.3	4.4	-8.5	7.9	46

\*STDV: Standard deviation.

\*\*n: Number of sample.

\*\*\*CBE: Charge balance error.

Meyer-Olkin measure of sampling adequacy)를 계산하며 이 값이 1에 근접하면 요인분석이 적절하다고 판단한다(Kwahk, 2019). 1999년, 2010년, 2014년과 2020년에 분석된 용천수의 8가지 주요 음·양이온(NO<sub>3</sub>-N, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>)에 대해 SPSS 프로그램을 (IBM SPSS Statistics) 활용하여 요인분석을 수행하였으며, 요인해석이 용이하도록 VARIMAX 요인회전을 하였다. 2014년도의 경우, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 수질자료가 없으므로 이를 제외한 7개 음·양이온만으로 요인분석을 실시하였다. KMO 지표는 1999년 데이터의 경우 0.848, 2010년 데이

터의 경우 0.833, 2014년 데이터의 경우 0.864, 2020년 데이터의 경우 0.675로 본 연구 데이터는 요인분석에 적절하다고 판단하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 용천수의 수리지화학적 특성

조사 연도별 수온, pH, 전기전도도(EC) 및 주요 음·양이온의 단순 통계값을 표 3에 정리하였다. 조사 연도별 pH는 대부분의 용천수가 비슷한 값(평균 7.1 ~ 7.3)을 갖는다. EC의 경우 모든 연도에서 평균

(480.3 ~ 1,278.5  $\mu\text{s}/\text{cm}$ )값에 비해 표준편차가 976.7 ~ 2,730.7  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 으로 큰 폭의 EC 측정범위를 보아, 용천수의 수질이 자연적인 수질 진화 영향 이외에도 다양한 요인들로 인해 영향을 받고 있음이 예측된다 (Koh *et al.*, 2009; Jung *et al.*, 2010).

조사 연도별로 양이온 평균 농도는  $\text{Na}^+$ 가 57.3 ~ 153.1 mg/L로 가장 높고,  $\text{Mg}^{2+}$ (12.6 ~ 24.6 mg/L),  $\text{Ca}^{2+}$ (7.7 ~ 21.2 mg/L),  $\text{K}^+$ (6.0 ~ 13.5 mg/L) 순으로 높았다.  $\text{Na}^+$ 의 경우, 평균값이 중앙값에 비해서 4.1 ~ 6.0배 높게 나타났는데, 이는 일부 용천수에서 해수의 영향으로 고농도의  $\text{Na}^+$ 가 관측되었기 때문으로 사료된다. 2020년에는 다른 해와 달리  $\text{K}^+$ (13.5 mg/L)가  $\text{Mg}^{2+}$ (11.5 mg/L)보다 높게 나타났다.  $\text{K}^+$ 는

비료에 쓰이는 주요 성분 중 하나이며 특히 잎의 성장과 광합성 작용 등을 촉진한다(Pettigrew, 2008). JSSGP (2019)에서 고산리(전체 3,366필지, 814 ha)의 재배작물 및 시비량을 조사한 결과, 무(167 ha)와 브로콜리(80 ha)에  $\text{K}^+$ 비료를 각각 21,256 kg과 17,568 kg 시비하였다. 이는 노지감귤(17 ha, 1,250 kg)에 비해 각각 17배, 14배 많은 양이다. 최근 제주도의 농업형태가 과수원에서 밭작물 재배로 변화하고 있어  $\text{K}^+$ 의 시비량이 증가할 수 있음을 시사한다(Song *et al.*, 2018). 제주도 전역의 연도별 비료 판매 실적에서  $\text{K}^+$ 성분의 비료판매량이 2012년 7,298 ton에서 2018년 9,312 ton으로 27.6%가 증가하였다(JSSGP, 2019). Kim *et al.* (2018b) 또한 국내 비료 성분에서

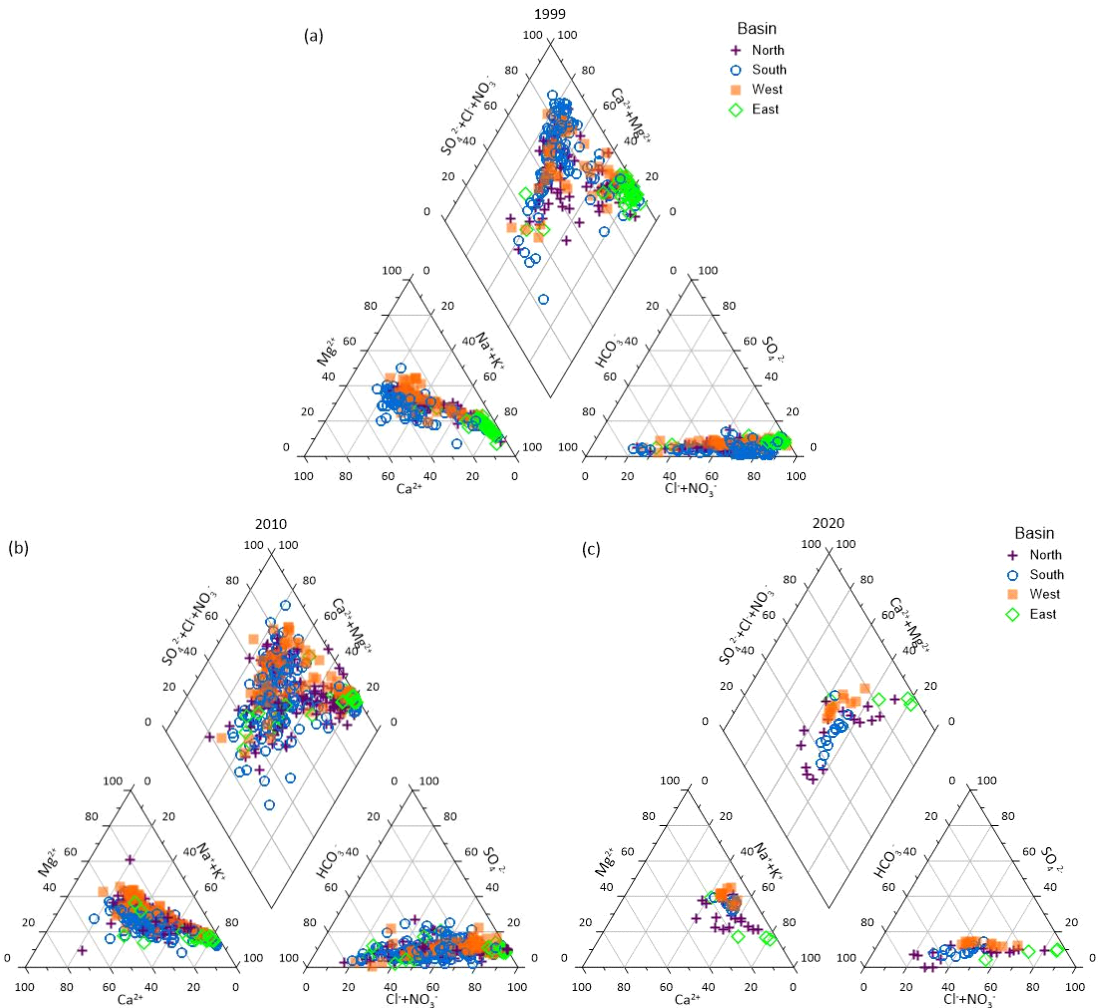


Fig. 2. Piper diagrams of major ion chemistry in regard to basins in (a) 1999, (b) 2010 and (c) 2020.

K<sup>+</sup>의 함량이 증가한다고 보고하여 화학비료 사용으로 인해 지하수로의 K<sup>+</sup> 유입이 증가하였을 것으로 추정된다.

음이온 평균 농도를 비교해보면, 모든 연도에서 Cl<sup>-</sup> 평균 농도가 86.9 ~ 268.9 mg/L로 다른 음이온 성분에 비해서 높게 관측되었다(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>: 46.3 ~ 53.2 mg/L, NO<sub>3</sub>-N: 5.7 ~ 13.4 mg/L, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>: 19.4 ~ 42.4 mg/L). 반면 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>는 평균과 중간값이 유사하게 나타났는데 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>는 대기 중의 CO<sub>2</sub>의 부분압과 표토층의 탄소동화작용 및 물-암석 반응(Kim and Ahn, 1992; Koh *et al.*, 2009; Jung *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2020)에 의해 주로 결정되어 농도의 변동폭이 크지 않은 것으로 판단된다. NO<sub>3</sub>-N 평균 농도는 각각 1999년에 12.6 mg/L이었다가 2010년에 7.5 mg/L, 2014년에 7.4 mg/L, 2020년에 5.7 mg/L로 점차 감소하는 추세를 보인다. NO<sub>3</sub>-N은 자연상태에서는 보통 3 mg/L (Cey *et al.*, 1999; Koh *et al.*, 2009)를 넘지 않지만 화학비료나 가축분뇨, 생활하수와 같은 인

위적 오염원에 의해 농도가 증가할 수 있다(Oh and Hyun, 1997; Choung *et al.*, 2004; Koh *et al.*, 2007). 지하수 중 질산염 농도 추세를 분석한 Kim *et al.* (2018a)의 연구에서도 인위적 활동의 영향으로 지하수 오염이 증가하고 있다고 보고하였다. 하지만 용천수의 NO<sub>3</sub>-N 평균 농도는 감소하는 것으로 나타나 유역별 양상, 요인분석, 인근 지하수 관정과의 비교를 추가적으로 분석하였다.

용존 이온 성분들의 함량 분포비를 보기 위해 그림 2에 1999년, 2010년, 2020년 이온 분석 결과를 파이퍼 다이어그램으로 표현하였다(piper, 1944). 연도별 용천수 수질 유형은 모두 비슷하게 나타났다. 양이온의 경우 혼합형에서 Na+K가 증가하는 양상을 보이는데 두 이온은 해수 중에 특히 많은 이온으로 해수의 영향을 받은 지하수에서 이러한 경향을 보이는 것으로 알려졌다(Ruiz *et al.*, 1990). 음이온의 경우 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>가 우세하였다가 Cl+NO<sub>3</sub>가 증가하는 양상을 보이는데, Ko *et al.* (2005)에서 제주도

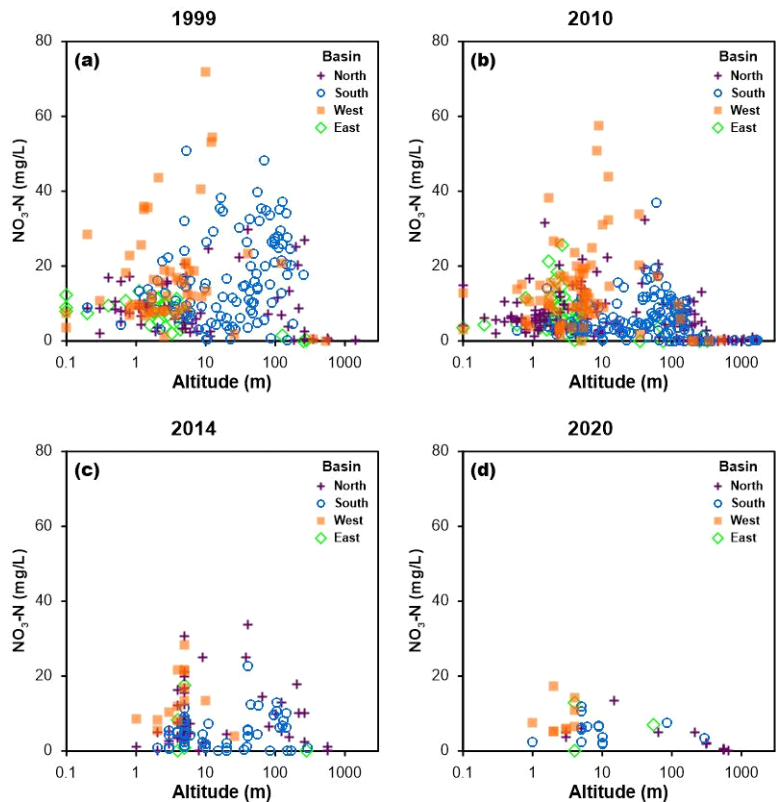


Fig. 3. Correlation of nitrate nitrogen with altitude (a) in 1999, (b) in 2010, (c) in 2014 and (d) in 2020. X (altitude) axis has log scale.

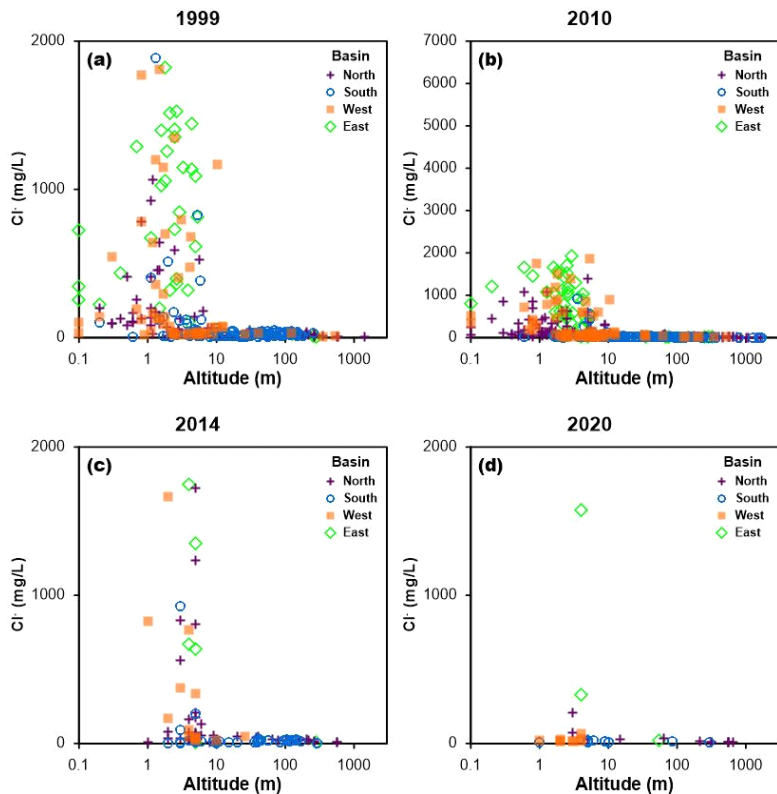
지하수의 수리화학적 특성이  $\text{HCO}_3^-$ 가 우세한 유형에서  $\text{Cl}^- + \text{NO}_3^-$ 가 우세한 유형으로 변화함을 보고한 것과 유사한 결과이다. 또한 Koh *et al.* (2012)은 제주도 서부지역 용천수와 지하수의 유동을 평가한 결과, 50 m 이하 고도에서 인위적 및 해수에 의한 영향으로 용천수 내  $\text{NO}_3^-$ -N과  $\text{Cl}^-$ 이 증가한다고 보고하였다. 본 연구에서  $\text{Cl}^-$ 과  $\text{NO}_3^-$ -N이 증가하는 까닭도 고도가 낮은 용천수일수록 해수 및 인위적인 오염원의 영향을 받기 때문으로 판단된다(그림 3, 4).

유역별 특성을 보면 동부유역에서  $\text{Cl}^- + \text{NO}_3^-$ 가 우세한 경향이 뚜렷하게 보이지만 시기적인 차이가 없어 자연적인 요인일 것으로 판단된다. 동부유역은 과거부터 지하수가 밀도차로 인해 해수 위에 떠있는 기저지하수 형태로 부존되어있기 때문에 해수의 영향을 특히 많이 받는다(Koh, 1997; Kim *et al.*, 2006). 또한 그림 1에서와 같이 고지대에서 용천수 시료가 적고 대부분 해안가에 있어 이러한 경향이 더욱 뚜렷한 것으로 보인다. 양이온 성분비를 다른 유역과

비교한 결과 동부유역은 해수 기원으로 판단되는  $\text{Na} + \text{K}$ 가 많은 반면 다른 유역은 혼합형에서  $\text{Na} + \text{K}$ 가 많아지는 형태로 진화하는 양상을 보이는 것도 동부유역이 해수에 의한 영향을 크게 받기 때문으로 판단된다.

**4.2 용천수  $\text{NO}_3^-$ -N과  $\text{Cl}^-$ 의 시·공간적 농도 변화**

제주도 대유역별  $\text{NO}_3^-$ -N 농도의 연도별 변화 양상을 파악하고자 박스 도표를 작성하였다(그림 5).  $\text{NO}_3^-$ -N은 동부유역에서 시기별로 거의 비슷한 농도 범위가 나타나는 반면, 북부유역에서는 다소 감소하는 경향과 남부유역에서 뚜렷한 감소 경향이 나타난다. 남부유역의 경우 최근 인구증가에 따라 시가지가 증가(1999년: 15.6%, 2010년: 15.0%, 2014년: 23.5%; 표 4) 및 농경지가 감소(1999년: 62.0%, 2010년: 60.1%, 2014년: 54.5%; 표 4)하고, 주로 재배하는 감귤의 경우 비료사용량이 많으면 잎이 변하거나 떨어지는 등의 문제가 발생하여 화학비료 사용량이 줄어들었



**Fig. 4.** Correlation of chloride ion with altitude (a) in 1999, (b) in 2010, (c) in 2014 and (d) in 2020. X (altitude) axis has log scale.

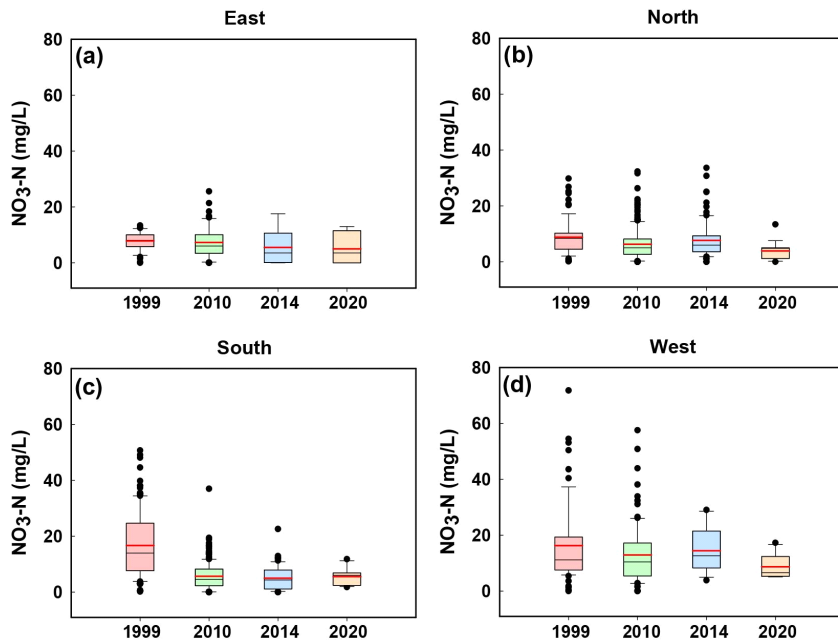


기 때문에 판단된다(MAF, 2001; JSSGP, 2018). 반면 서부유역은 다른 유역에 비해 NO<sub>3</sub>-N이 지속적으로 가장 높게 유지되고 있는데 이는 농경지 비율이 다른 유역보다 높은 것과 연관이 있다고 판단된다(동부: 34.3 ~ 51.4%, 북부: 37.7 ~ 41.7%, 남부: 54.5 ~ 62.0%, 서부 : 57.5 ~ 64.8%; 표 4).

Cl<sup>-</sup>의 농도 변화를 보면, 동부유역이 다른 유역에 비해 가장 높게 유지되며 서부유역이 비교적 높고 북부와 남부는 거의 비슷하게 낮게 유지된다(그림 6). 이러한 지역적 차이는 서귀포층 분포에 따라 달라지는 제주도 지하수 부존 특성과 관련있다고 판단된다(Koh, 1997; Won *et al.*, 2006). 동부유역은 해

**Table 4.** Land use proportion within 400 m radius of spring water in (a) Eastern, (b) Northern, (c) Southern and (d) Western basins in three research years.

Basin	Year	Urban	Agricultural	Grass	Forest	Water	Etc.
Eastern	1999	27.2%	48.2%	10.2%	12.0%	0.9%	1.6%
	2010	24.5%	51.4%	7.9%	11.5%	1.3%	3.4%
	2014	21.8%	34.3%	14.3%	25.9%	2.7%	1.0%
Northern	1999	31.5%	37.9%	9.1%	20.2%	0.8%	0.5%
	2010	31.1%	41.7%	7.8%	17.1%	0.5%	1.9%
	2014	48.5%	37.7%	5.1%	5.2%	0.4%	3.2%
Southern	1999	15.6%	62.0%	4.2%	16.8%	0.9%	0.6%
	2010	15.0%	60.1%	9.4%	13.5%	0.4%	1.6%
	2014	23.5%	54.5%	7.7%	7.4%	1.0%	5.9%
Western	1999	27.2%	57.5%	7.5%	6.6%	0.5%	0.8%
	2010	24.6%	59.7%	6.0%	7.4%	0.3%	2.0%
	2014	25.4%	64.8%	4.3%	4.9%	0.2%	0.5%



**Fig. 5.** Box and whisker plots of nitrate nitrogen in respective research year (a) in Eastern, (b) in Western, (c) in Southern and (d) in Northern basin. The bold and red lines indicate mean value.

안가에서 저투수층 역할을 하는 서귀포층이 다른 유역에 비해 해수면보다 낮은 심도에 분포함에 따라 기저지하수가 넓게 부존한다. 기저지하수는 담수지하수체가 해수와의 밀도 차이로 해수 위에 렌즈형태로 떠받쳐진 형태로 해수의 영향을 많이 받는다. 그리고 서부유역도 일부 해안지역에 기저지하수가 부존하나 동부에 비해 해수의 영향을 비교적 덜 받는 편이다. 반면 북부와 남부유역은 난투수층인 서귀포층이 다른 유역에 비해 높은 심도에 분포하며 해수의 영향을 별로 받지 않는 준기저 및 상위지하수가 부존한다. 이러한 지하수 부존 특성으로 인해 동부와 서부 유역에서 다른 유역에 비해 Cl<sup>-</sup>의 농도가 높은 경향이 나타난다. 동부유역에서 다른 조사 시기에 비해 2014년도에 큰 폭의 Cl<sup>-</sup> 농도 분포가 나타났는데 이는 해당 시기에 조수 간만의 영향을 크게 받거나, 해안가에 인접한 용천수 조사 비율이 더 높아 해수의 혼합이 우세했기 때문으로 판단된다.

용천수 수질 변화를 분석한 본 연구와 지하수 수질 경향을 분석한 Koh *et al.* (2017a) 연구 결과를 비교하여 지하수와 용천수 수질 변동 특성을 평가하였다. Koh *et al.* (2017a)에서 NO<sub>3</sub>-N의 경우, 동부와 서부유역은 증가, 남부와 북부유역은 감소하는 경향

이 우세하였다. 이는 토지 이용 변화와 비교하였을 때, 동부와 서부는 농경지가 증가하는 반면, 남부와 북부는 시가지가 증가하여 화학비료의 사용량이 줄어들었기 때문이라고 판단하였다. 본 연구에서는 용천수의 NO<sub>3</sub>-N 농도가 장기적으로 증가 추세를 보이는 유역은 없었지만 농경지가 감소하는 남부유역에서 NO<sub>3</sub>-N 농도가 감소하는 경향과 비슷하다. Cl<sup>-</sup>은 뚜렷한 증감 추세가 나타나지 않았는데, 이는 용천수와 해수가 혼합되는 것이 매우 오래전부터 일어났던 현상이기 때문으로 판단된다. 본 연구에서 용천수의 최대값이 1,930.4 mg/L로 지하수(763.4 mg/L, Koh *et al.*, 2017a)에서보다 매우 높은 것도 해안가 용천수에서 해수와 혼합이 쉽게 이루어지기 때문으로 판단된다.

### 4.3 요인분석 결과

주요 음·양이온에 대해 요인분석을 수행한 결과를 표 5에 제시하였다. 각 인자들의 공통성 점수(communalities)는 각 인자들의 분산을 공통요인이 어느 정도의 비율로 설명하는지를 보여준다. 0에서 1 사이의 값을 갖고 1에 가까울수록 공통 요인에 의해 설명된다고 할 수 있다. 일반적으로 0.5 이상이면

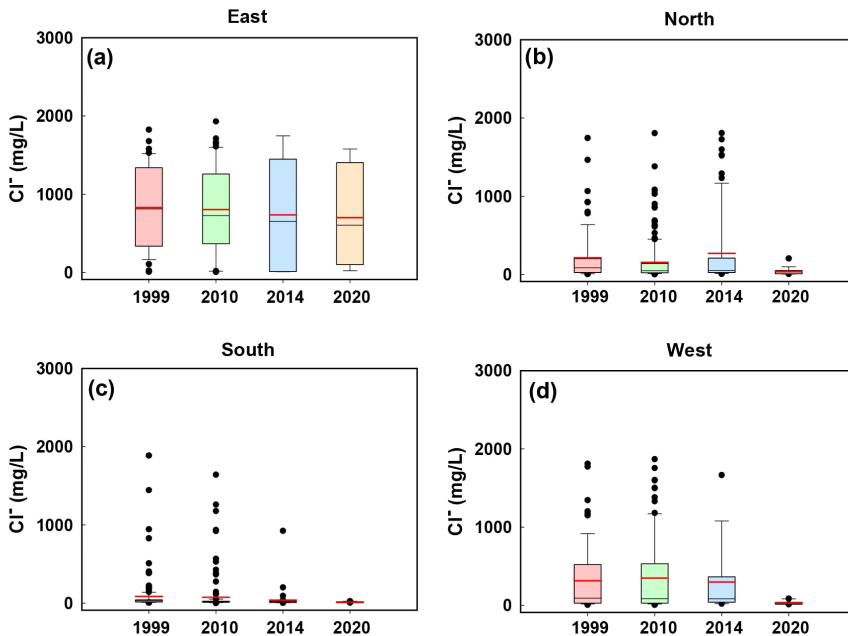


Fig. 6. Box and whisker plots of chloride ion in respective research year (a) in Eastern, (b) in Western, (c) in Southern and (d) in Northern basin. The bold and red lines indicate mean value.

**Table 5.** Varimax rotated factor loadings and communalities for chemical components of spring water in each research year.

Year	1999			2010			2014			2020		
	Factor 1	Factor 2	Communalities	Factor 1	Factor 2	Communalities	Factor 1	Factor 2	Communalities	Factor 1	Factor 2	Communalities
NO <sub>3</sub> -N	-0.257	0.905	0.885	-0.055	0.885	0.786	-0.011	0.933	0.882	-0.259	0.917	0.909
Ca <sup>2+</sup>	0.488	0.841	0.946	0.571	0.792	0.953	0.743	0.626	0.948	0.841	0.295	0.794
Mg <sup>2+</sup>	0.933	0.303	0.963	0.946	0.284	0.976	0.983	0.170	0.996	0.969	0.185	0.973
Na <sup>+</sup>	0.989	0.091	0.986	0.989	0.098	0.987	0.999	0.035	0.999	0.992	0.005	0.985
K <sup>+</sup>	0.958	0.154	0.941	0.908	0.168	0.852	0.971	0.093	0.961	0.350	0.703	0.616
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.283	0.507	0.337	0.198	0.779	0.647				0.583	0.649	0.761
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.984	0.130	0.986	0.968	0.187	0.973	0.838	0.110	0.721	0.982	0.131	0.981
Cl <sup>-</sup>	0.989	0.096	0.988	0.988	0.092	0.985	0.998	0.051	0.998	0.992	0.028	0.985
Eigenvalue	5.423	1.609		5.523	1.636		5.156	1.316		5.381	1.623	
%of variance	67.8	20.1		69.0	20.4		73.7	18.8		67.3	20.3	

그 인자가 요인분석하기에 적절하다고 판단한다. 1999년에 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>(0.337)를 제외하고 모두 0.5 이상이므로 각 이온 성분들은 요인분석 변수로 적절하다고 판단된다. 고유값(eigenvalue)은 추출된 요인이 설명하는 분산의 양을 나타낸다. 고유값이 1보다 작은 요인은 원래의 변수 분산이 다른 요인으로 설명할 수 있는 1개 변수의 분산보다 작기 때문에 요인으로서 의미가 없다. 모든 연도에서 두 개의 요인에 대한 고유값이 1보다 커서 두 요인 모두 활용 가능함을 알 수 있다. 특히 요인 1은 5.381 ~ 5.523로 높아 요인으로 설명하는 것이 단일 성분으로 설명하는 것보다 매우 유리하다고 할 수 있다.

각 이온 성분들과 요인의 상관성을 설명해주는 적재값(factor loading)을 보면 요인 1에 대해 높은 적재값을 보이는 성분은 Mg<sup>2+</sup>(0.933 ~ 0.983), Na<sup>+</sup>(0.989 ~ 0.999), SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>(0.838 ~ 0.984), Cl<sup>-</sup>(0.988 ~ 0.998)으로 나타났다(그림 7). 이들은 해수에 함유량이 많은 이온들(Ruiz *et al.*, 1990)로, 요인 1은 해수에 의한 영향을 나타낸다. 요인 2에 대해 높은 적재값을 보이는 성분은 공통적으로 NO<sub>3</sub>-N(0.885 ~ 0.933)이며 화학비료 및 가축분뇨 등의 인위적 오염으로 높아질 수 있는 성분으로, 요인 2는 인위적 오염을 나타낸다. 이러한 두 가지 요인의 영향은 Lee *et al.* (2002)의 1999년도 제주도 전역에 위치한 용천수 수질성분에 대한 요인분석 결과와도 일치하며, 20여 년이 지났음에도 용천수 수질 변동특성을 설명하는 요인에 변화가 없음을 알 수 있다. %분산(% of variance)은 전체 시료에 대해 각 요인으로 설명할 수

있는 시료의 비율을 설명한다. 조사 연도별 요인 1의 %분산을 보면 67.3 ~ 73.7%이며 요인 2는 18.8 ~ 20.4%의 %분산값을 나타내 용천수 시료는 주로 요인 1로 설명된다는 것을 알 수 있다. 즉 용천수 시료의 대부분이 해수에 의한 영향을 받는 것을 알 수 있다.

요인 2의 경우 1999년, 2010년, 2014년에 NO<sub>3</sub>-N과 함께 Ca<sup>2+</sup>가 다소 높은 적재값(0.626 ~ 0.841)을 보이는데 이는 산성화된 토양을 개선하기 위해 뿌리는 석회질 비료의 영향일 수 있다(Lee *et al.*, 2002; Choung *et al.*, 2004). 반면 2020년에는 요인 2에서 K<sup>+</sup>가 높은 적재값(0.703)을 보이는데 이는 앞서 설명하였듯이 K<sup>+</sup>성분의 비료 사용량이 늘어났기 때문일 것으로 판단된다.

제주도에서 지하수의 화학적 성분을 변화시키는 요인은 해수의 영향, 비료 또는 가축분뇨와 같은 인위적 오염, 물-암석 반응을 들 수 있다(Ko *et al.*, 2005; Koh *et al.*, 2009; Jung *et al.*, 2010). 이번 요인분석의 결과 요인 1이 해수의 영향, 요인 2가 인위적 오염의 영향으로 구분이 되었지만 물-암석 반응의 인자는 구분되지 않았다. 이는 용천수와 지하수의 평균 체류시간이 각각 6년과 19년으로 용천수에서 물-암석 반응이 일어나는 시간이 지하수보다 비교적 짧기 때문이다(Jeju-do, 2001). 또한 Jeju-do (1999b)는 제주도 지하수의 물 순환과정을 파악하기 위해 주요 이온과 동위원소 분석을 수행하였는데, 용천수의 음·양이온의 증가는 해수에 의해 기인되며 토양이나 암석과의 반응에 의한 공급이 거의 없다고 보고하였다. 이는 용천수의 체류시간이 짧기 때문에

물-암석 반응으로 유래할 수 있는 이온 성분들의 농도가 적은 것으로 사료된다(Kazemi *et al.*, 2006). 제주도의 고도 170 m 이상 지하수 및 용천수의 여러 이온 성분들에 대해 요인분석을 실시한 Koh *et al.* (2009)에 따르면 물-암석 반응과 관련이 있는 대표적인 인자는  $\text{HCO}_3^-$ 와  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ 이었는데 본 연구에서  $\text{HCO}_3^-$  외 다른 인자는 해수와의 혼합에 더 강한 상관성을 보여 물-암석 반응에 의한 요인은 나타나지 않은 것으로 사료된다.

변수들에 대한 가중치와 성분의 표준화값의 선형 결합을 계산한 값을 요인점수(factor score)라 하며 각 시료들이 요인 1과 요인 2로 얼마나 설명 되는지를 보여준다. 그림 8과 그림 9는 유역별로 시기에 따른 요인점수 분포를 box plot으로 작성한 것이다. 요인 1의 영향을 가장 크게 받는 유역은 동부유역이며 이는 기저지하수가 부존하여 해수의 영향을 크게 받는 동부지역의 특성을 보여준다고 할 수 있다. 그리

고 준기저 및 상위지하수가 부존하는 북부와 남부유역은 요인 1의 점수가 가장 낮은 경향을 보인다. 동부유역에서 2020년에 요인 1 점수 분포가 유독 높은 까닭은 시료수가 다른 연도들에 비해 적으며, 고도가 54 m 이하의 해안가에 근접한 시료만 채취하여 해수에 의한 영향이 강하게 반영되었기 때문으로 판단된다(그림 1). 동부지역의 경우, 그림 6의  $\text{Cl}^-$  농도만을 고려하였을 때보다 요인분석 결과, 연도별 변화 경향이 더욱 뚜렷하게 나타난다.

요인 2에 대한 점수 분포는 동부유역과 서부유역에서 증가하는 경향을 보이며 특히 서부유역의 점수 분포는 다른 유역에 비해 가장 높게 나타났다. 북부유역에서는 2014년까지 증가하다가 2020년에 줄어드는 반면, 남부유역에서는 2014년까지 감소하다가 2020년에 증가하였다.  $\text{NO}_3\text{-N}$  농도보다 증가하고 감소하는 경향이 더욱 뚜렷하게 나타남을 볼 수 있다. 동부와 서부유역은 요인분석 결과 화학비료와

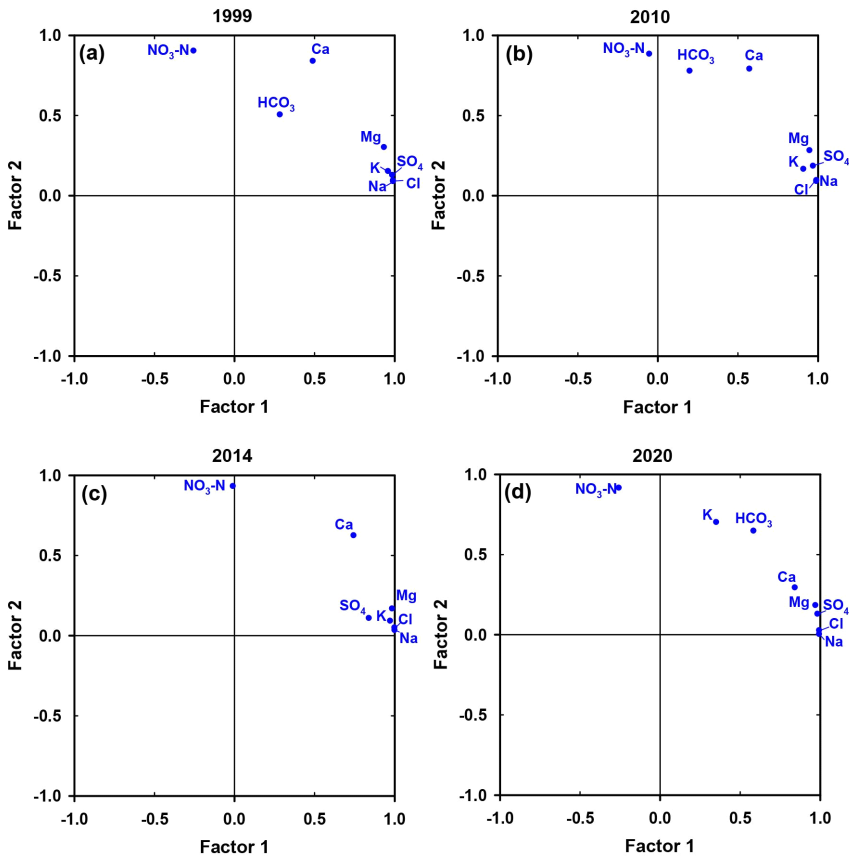


Fig. 7. Varimax-rotated loading plot of the factor analysis (a) in 1999, (b) in 2010, (c) in 2014 and (d) in 2020.

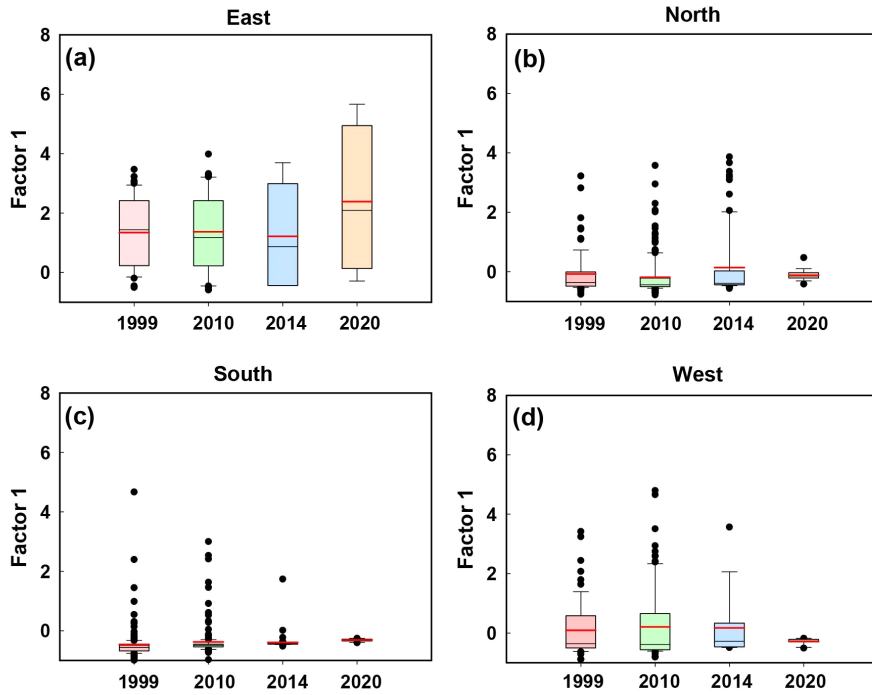


Fig. 8. Box plots of factor 1 score in respective research year (a) in Eastern, (b) in Western, (c) in Southern and (d) in Northern basin. The bold and red lines indicate mean value.

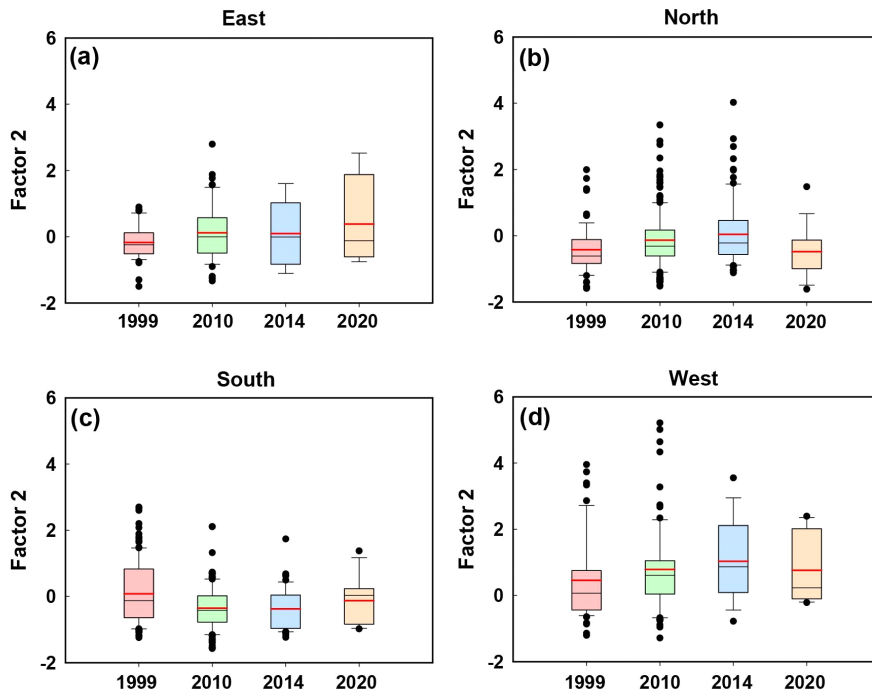


Fig. 9. Box plots of factor 2 score in respective research year (a) in Eastern, (b) in Western, (c) in Southern and (d) in Northern basin. The bold and red lines indicate mean value.

가축분뇨를 비롯한 인위적 오염에 의한 영향을 크게 받고 있음을 분명히 알 수 있다. 이는 지하수 수질 경향을 파악한 Koh *et al.* (2017a)과의 결과와도 유사하며 NO<sub>3</sub>-N만을 두고 판단하는 것보다 요인분석 결과가 해석에 더 유리함을 알 수 있다. 요인 2의 지역별 경향에서 북부는 증가하는 추세이고, 남부는 감소하는 추세이었다가, 2020년도에는 각각 북부는 감소되고 남부는 증가하여 향후 수질 변동 특성을 지속적으로 모니터링할 필요가 있다고 판단된다.

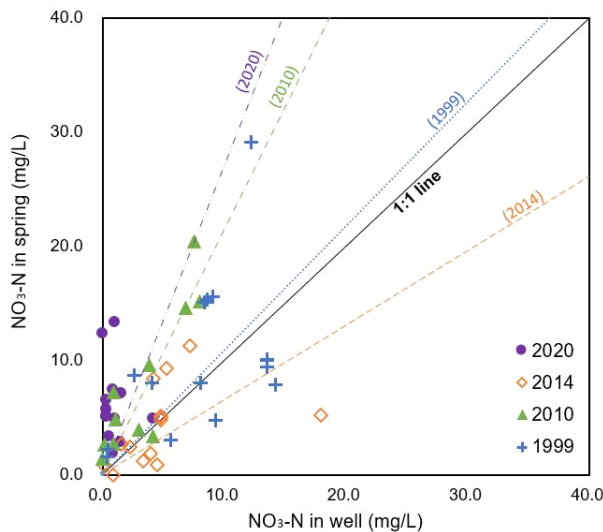
본 연구에서 활용한 용천수 수질 분석 자료는 연도별로 시료의 개수가 차이가 나서 단순히 이온성분의 변화만을 비교하였을 때 오염의 경향을 판단하기가 어려웠다. 그러나 요인분석을 수행한 결과 각 요인에 영향을 받는 정도가 더욱 분명히 드러나 시료가 적은 경우에도 그 경향을 판단하기 유리하였다. 이온성분 변화와 비교·고찰한 결과, 동부유역은 해수의 영향을 크게 받는 특성을 보이며 남부유역은 해수에 의한 영향을 가장 적게 받는 것으로 판단된다. 서부와 동부는 인위적인 오염이 다른 지역보다 우세하며 특히 서부는 요인 2에 대한 결과가 높아 오염원 관리가 필요하다고 사료된다.

**4.4 용천수 오염취약성: 지하수와 비교**

그림 10은 조사 연도별 용천수와 반경 1 km 이내 지하수에서의 NO<sub>3</sub>-N 농도의 관계를 보여주는 그림

이다. 공간적으로 동일한 지역에 대해서만 연도별 추세를 파악하기 위해 2020년 조사 위치와 중복되는 42개소의 용천수에 대해서만 비교하였다. 지하수 수질은 용천수 반경 1 km 이내에 있는 지하수 우물에서 조사연도 및 직전 연도의 수질자료를 이용하였으며 데이터가 두 개 이상일 경우 평균을 계산하였다. 1999년부터 2020년까지 조사 대상에 있는 지하수 우물의 평균 NO<sub>3</sub>-N 농도는 1999년 7.3 mg/L, 2010년 3.4 mg/L, 2014년 4.8 mg/L, 2020년 1.2 mg/L로 나타났다. 하지만 용천수는 2014년을 제외하고 지하수보다 높은 NO<sub>3</sub>-N 평균 농도가 나타나고 있다(1999년 9.9 mg/L, 2010년 7.8 mg/L, 2014년 4.2 mg/L, 2020년 5.4 mg/L). 연도별 추세선의 기울기는 2014년을 제외하고 1보다 크게 나타남에 따라, 용천수가 인근 지하수보다 NO<sub>3</sub>-N 오염이 더욱 진행되는 것으로 판단된다. 2014년의 경우, 신촌리 지하수 관정 1개소에서 고농도의 NO<sub>3</sub>-N이 측정되었는데, 2010년과 2020년에는 해당 지역에 수질 자료가 없어서 장기적인 추세가 반영되지 못한 것으로 판단된다. 용천수의 수질 변화 추세를 파악하기 위해서는 동일 용천수를 대상으로 지속적인 수질 모니터링이 필요하다고 사료된다.

지하수와 용천수의 NO<sub>3</sub>-N을 비교하는 것은 지하수 수질을 예측하는데 의미가 있다. Jung *et al.* (2016)은 토지 이용과 토양 종류, 지형과 같은 공간 변수에



**Fig. 10.** Comparison of nitrate nitrogen between spring and well. A solid line is 1:1 line and dotted lines are trend lines in each research year.

따른 질산성질소 농도를 예측하는 방안을 제시하였는데, 이러한 변수에 대해 지하수보다 용천수가 오염에 비교적 민감하게 반응하는 결과가 나타났다. 그 까닭은 지하수는 우물 안에서 여러 대수층의 지하수가 혼합되고 높은 고도에서 함양된 심부지하수는 지표 환경에 영향을 크게 받지 않지만, 용천수는 지하수보다 지표면에 더 가깝게 위치하여 지표 환경 변화에 민감하게 반응할 수 있기 때문이다. 이는 제주도 가 토양층이 얇고 투수성이 우수한 화산암류로 이루어져 있어 그 영향이 가증될 것이라 판단된다. 동위원소 분석 결과 용천수가 지하수보다 연령이 짧은 것도 용천수가 지표 환경 변화에 빠르게 반응할 수 있음을 시사한다(Davis, 1986; Kim and Ahn, 1992; Jeju-do, 2001).

이처럼 용천수는 지하수에 비해 토지이용 변화와 같은 지표 환경 변화에 더욱 민감하게 반응하며 오염에 취약하다는 것을 알 수 있다. 그러나 지하수가 토지이용 변화에 안전하다는 것은 아니며 오염된 지하수가 깊은 대수층으로 혼입된다면 지하수계 전체적으로 오염이 확산될 수 있음을 시사한다. 제주도에 지하수를 개발할 때 그라우팅을 하여 지표의 오염원을 일시적으로 막고 있긴 하지만(Kim *et al.*, 2020) 현재와 같은 토지이용을 지속한다면 지하수계에 대한 오염에 취약할 것으로 판단된다. 따라서, 토지이용을 비롯한 오염원 관리 제도를 마련하여 제주도의 유일한 수자원인 지하수를 보전하는 것이 필요하다(Koh, D.C. *et al.*, 2007; Koh, E.H. *et al.*, 2017a). 이 때 용천수는 지하수보다 연령이 짧고 지표 환경 변화에 민감하게 변화하여 지하수 수질이 어떻게 변화될지 미리 보여주는 지표로서 역할을 할 수 있다. 또한, 용천수 수질 보전을 위해 토지 이용 및 오염원 관리, 지속적인 용천수 수질 모니터링이 필요하다.

## 5. 결론

최근 지하수의 NO<sub>3</sub>-N 및 Cl<sup>-</sup>의 증가 추세가 보고되고 있으며 용천수의 수질 악화 또한 우려가 되는 상황이다. 이에 본 연구는 과거 수질자료 수집과 현장 수질 조사를 통해, 1999년부터 2020년까지 22년간의 용천수 수질의 시·공간적 변동특성을 파악하고자 하였다.

수리지화학적 분석 결과 연도별 용천수 수질 유형은 모두 비슷하게 나타났다. 양이온의 경우 해수의 영향으로 혼합형에서 Na<sup>+</sup>와 K<sup>+</sup>가 증가하는 양상을 보였으며 음이온의 경우 인위적 및 해수의 영향으로 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>가 우세하다가 NO<sub>3</sub>-N과 Cl<sup>-</sup>이 증가하는 것으로 나타났다. 유역별 NO<sub>3</sub>-N 농도는 남부에서 뚜렷한 감소 경향이 나타났는데, 이는 시가지 증가 및 과수원에서 화학비료 사용량의 감소 때문인 것으로 추정된다. 그리고 서부유역은 다른 유역에 비해 NO<sub>3</sub>-N이 지속적으로 높게 나타났다. Cl<sup>-</sup>은 동부유역이 가장 높게 유지되고 서부유역이 비교적 높은 경향을 보이는데, 이는 동부유역과 일부 서부유역이 기저지하수가 부존하여 해수의 영향을 받기 때문으로 사료된다.

요인분석 결과 22년 동안 용천수 수질에 영향을 주는 요인은 해수(요인 1)와 인위적 오염(요인 2)으로 구분이 되었다. 유역별로는 동부유역에서 해수 영향(요인 1)이 비교적 높고 인위적 오염에 의한 영향(요인 2)은 동부 유역과 서부유역이 증가하는 경향으로 나타났다. 이를 통해 이온 분석에서보다 뚜렷한 장기적 변화 경향을 얻을 수 있었다.

용천수 및 반경 1 km 이내에 있는 지하수의 수질을 비교한 결과 연도별 지하수의 평균 NO<sub>3</sub>-N 농도는 1.2 ~ 7.3 mg/L 이었으나 용천수의 평균 NO<sub>3</sub>-N 농도는 4.2 ~ 9.9 mg/L로 지하수보다 높게 나타났다. 이는 용천수의 유동 경로가 지표와 가까워 지표 환경 변화에 비교적 민감하게 반응하기 때문으로 판단된다. 용천수에서 나타나는 오염이 지하수까지 확산되기 전에 토지 이용 및 오염원의 관리와 지속적인 용천수 수질 모니터링이 필요하다고 판단된다.

## 감사의 글

이 연구는 제주특별자치도 물정책과에서 의뢰한 ‘용천수 전수조사 및 가치 보전·활용 방안 마련’과제로 수행되었으며, 지하수 수질 자료를 제공해준 물정책과 담당 주무관님에게 감사를 표합니다.

## REFERENCES

Cey, E.E., Rudolph, D.L., Aravena, R. and Parkin, G., 1999, Role of the riparian zone in controlling the dis-

- tribution and fate of agricultural nitrogen near a small stream in southern Ontario. *Journal of Contaminant Hydrology*, 37, 45-67.
- Choung, S.W., Woo, N.C. and Lee, K.S., 2004, Temporal & spatial variations of groundwater quality in Hanlim, Jeju island. *Journal of the Geological society of Korea*, 40, 537-558 (in Korean with English abstract).
- Davis, J.C., 1986, *Statistical and data analysis in geology*. Wiley, 2<sup>nd</sup> ed., New York.
- Jeju-do, 1999a, *Water of Jeju*, Spring. 392 p (in Korean).
- Jeju-do, 1999b, *Investigation of groundwater circulation system in Jeju Island*. 446 p (in Korean).
- Jeju-do, 2001, *Report on the overall investigation of hydrogeology and the groundwater resources in Jeju Island (I)*. 378 p (in Korean).
- JSSGP (Jeju Special Self-Governing Province), 2016, *Management plan of springs in Jeju island*. 182 p (in Korean).
- JSSGP (Jeju Special Self-Governing Province), 2018, *Water resources management comprehensive plan*. k-water, 328 p (in Korean).
- JSSGP (Jeju Special Self-Governing Province), 2019, *Study on groundwater waterquality improvement and pollution control*. JSSGP and Jeju Research Institute, Jeju, 453 p (in Korean).
- Jung, Y.-Y., Koh, D.-C., Kang, B.R., Ko, K.-S. and Yu, Y.-J., 2011, Prediction of seasonal nitrate concentration in springs on the southern slope of Jeju island using multiple linear regression of geographic spatial data. *Economic and Environmental Geology*, 44, 135-152 (in Korean with English abstract).
- Jung, Y.-Y., Koh, D.-C., Park, W.-B. and Ha, K., 2016, Evaluation of multiple regression models using spatial variables to predict nitrate concentrations in volcanic aquifers. *Hydrological Processes*, 30, 663-675.
- Jung, Y.-Y., Koh, D.-C., Yu, Y.-J. and Ko, K.-S., 2010, Analysis of groundwater flow systems for springs in the southern slope of Jeju using hydrogeochemical parameter. *Journal of the Geological Society of Korea*, 46, 253-273 (in Korean with English abstract).
- Kazemi, G.A., Jay, H.L. and Pierre, P., 2006, *Groundwater age*. John Wiley & Sons, 325 p.
- KIGAM, 2011, *Assessment of the sustainable yield on groundwater in Jeju and discovery of the functional groundwater*. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 564 p (in Korean).
- Kim, H.-R., Oh, J., Do, H.-K., Lee, K.-J., Hyun, I.-H., Oh, S.-S., Kam, S.-K. and Yun, S.-T., 2018a, Spatial-temporal variations of nitrate levels in groundwater of Jeju Island, Korea: Evaluation of long term (1993-2015) monitoring data. *Economic and Environmental Geology*, 51, 15-26 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.-H. and Ahn, J.-S., 1992, Water chemistry and age dating of springwater in Cheju island. *Journal of the Korean Chemistry Society*, 35, 727-736 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.-Y., Oh, Y.-K. and Ryu, S.-P., 2001, Study on the salinization in groundwater of the eastern area on Cheju Island. *Journal of the Korean Environmental Sciences Society*, 10, 47-58 (in Korean with English abstract).
- Kim, K.-Y., Seong, H., Kim, T., Park, K.-H., Woo, N.-C., Park, Y.-S., Koh, G.-W. and Park, W.-B., 2006, Tidal effects on variations of fresh-saltwater interface and groundwater flow in a multilayered coastal aquifer on a volcanic island (Jeju Island, Korea). *Journal of Hydrology*, 330, 525-542.
- Kim, M., Kang, B., Cho, H.N., Choi, S.O., Yang, W.-S. and Park, W., 2020, Application and assesment of regrouting method for improperly constructed wells in Jeju Island, *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 25, 43-51 (in Korean with English abstract).
- Kim, M.-S., Kim, S.-C., Yun, S.-G., Park, S.-J. and Lee, C.-H., 2018b, Quality characteristics of commercial organic fertilizers circulated. *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, 26, 21-28 (in Korean with English abstract).
- Ko, K.-S., Kim, Y., Koh, D.-C., Lee, K.S., Lee, S.G., Kang, C.H., Seong, H.J. and Park, W.B., 2005, Hydrogeochemical characterization of groundwater in Jeju island using principal component analysis and geostatistics. *Economic and Environmental Geology*, 38, 435-450 (in Korean with English abstract).
- Koh, D.-C., Chae, G.-T., Kang, B.-R., Koh, G.-W. and Park, K.-H., 2009, Baseline geochemical characteristics of groundwater in the mountainous area of Jeju Island, South Korea: Implications for degree of mineralization and nitrate contamination. *Journal of Hydrology*, 376, 81-93.
- Koh, D.-C., Ha, K., Lee, K.S., Yoon, Y.Y. and Ko, K.S., 2012, Flow paths and mixing properties of groundwater using hydrogeochemistry and environmental tracers in the southwestern area of Jeju volcanic island. *Journal of Hydrology*, 432, 61-74.
- Koh, D.-C., Ko, K.-S., Kim, Y., Lee, S.-G. and Chang, H.-W., 2007, Effect of agricultural land use on the chemistry of groundwater from basaltic aquifers, Jeju Island, South Korea. *Hydrogeology Journal*, 15, 727-743.
- Koh, E.H., Lee, S.H., Kaown, D., Moon, H.S., Lee, E., Lee, K.K. and Kang, B.R., 2017a, Impacts of land use change and groundwater management on long-term nitrate-nitrogen and chloride trends in groundwater of Jeju Island, Korea. *Environment and Earth Science*, 76, 176.



- Koh, G.W., 1997, Characteristics of the groundwater and hydrogeologic implications of the Seoguipo Formation in Cheju Island. Ph.D. thesis, Pusan National University, Pusan, 126-161 (in Korean with English abstract).
- Koh, G.W., Park, J.B., Kang, B.R., Kim, G.P. and Moon, D.C., 2013, Volcanism in Jeju Island. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 209-230 (in Korean with English abstract).
- Koh, G.W., Park, J.B., Shon, Y.G. and Yoon, S.H., 2017b, Geologic logging guidebook of drilling core of Jeju Island. Jeju province development cooperation, 293 p.
- Kwahk, K.Y., 2019, Statistical data analysis with SPSS. Chungnam, Seoul, 780 p (in Korean).
- Lee, B.D., Jeong, C.H., Lee, Y.C., Lee, Y.J., Yang, J.H., Choo, C.O., Jang, H.W., Oh, Y.H. and Hong, J.W., 2020, Statistical analysis and thermodynamic equilibrium modeling for chemical composition of groundwater and spring water at Jeju island, South Korea. *Water*, 12, 777.
- Lee, B.J., Moon, S.H., Park, K.H., Koh, D. and Koh, K.W., 2002, Hydrogeochemical characteristics of the spring waters in Jeju. *Journal of the Geological Society of Korea*, 38, 421-439 (in Korean with English abstract).
- MAF (Ministry of Agriculture and Forestry), 2001, Studies on improvement of soil environment and investigation for unnormal defoliation in citrus orchards. MAF, 65 p (in Korean with English abstract).
- Oh, Y.-K. and Hyun, I.-H., 1997, Estimation of Nitrate-nitrogen Contamination Sources in Cheju Island Groundwater using  $\delta^{15}\text{N}$  Values. *Journal of Korea Society of Groundwater Environment*, 4, 1-4.
- Park, K.H., Lee, B.J., Cho, D.L., Kim, J.C., Lee, S.R., Choi, H.I., Hwang, J.H., Song, G.Y., Choi, B.Y., Cho, B.U. and Kim, Y.B., 1998, Geologic report of the Jeju-Aewol Sheet (1:50,000). Korea Institute Geology, Mining and Materials, Taejon, 290 p (in Korean with English abstract).
- Park, W.B. and Ha, K., 2012, Spring water and water culture on Jeju island. *Ground water*, 50, 159-165.
- Pettigrew, W.P., 2008, Potassium influences on yield and quality production for maize, wheat, soybean and cotton. *Physiologia Plantarum*, 133, 670-681.
- Piper, A.M., 1944, A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 25, 914-928.
- Ruiz, F., Gomis, V. and Blasco, P., 1990, Application of factor analysis to the hydrogeochemical study of a coastal aquifer. *Journal of Hydrology*, 119, 169-177.
- Song, S.-H., Myoung, W.-H., An, J.-G., Jang, J.-S., Baek, J.-H. and Jung, C.-Y., 2018, Estimation of regional future agricultural water demand in Jeju Island considering land use change. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 23, 92-105 (in Korean with English abstract).
- Song, S.J., Park, W.B. and Kang, B.R., 2010, Identification of sources of nitrate contamination to groundwater in the north-western part of Jeju-do using multi-isotope analysis. *Journal of Radiation Industry*, 4, 185-194.
- Soulios, G., 2010, Springs (classification, function, capturing). *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 43, 196-215.
- Won, J.H., Lee, J.Y., Kim, J.W. and Koh, G.W., 2006, Groundwater occurrence on Jeju Island, Korea. *Hydrogeology Journal*, 14, 532-547.

---

Received : October 6, 2021

Revised : December 8, 2021

Accepted : December 13, 2021