

한라산 지역 용천수의 수리지화학적 특성

윤정수·박상운

제주대학교 해양과학대학 해양학과

Hydrogeochemical Characteristics of Spring Water in Halla Mountain Region, Cheju Island

Jeung-Su Youn · Sang-Woon Park

Department of Oceanography Cheju National University,
Cheju-do 690-756, Korea

Abstract: The purpose of this study is to elucidate the characteristic of this study is of altitudinal variation of water quality for nine representative springs in the Halla mountain region. The evolutionary processes of the spring water also have been studied. Results of hydrogeochemical analyses show that Gwaneumsa spring is very high in pH. The spring waters from Yungsil, Namguksunwon, Sungpanark, Oremok and Gwaneumsa which springs situated lower than 1000m in altitude are relatively high concentrations in chloride, sulphate, nitrate nitrogen and sodium ions, indicating that they are affected by surrounding pollution sources.

The concentrations of bicarbonate, sulphate and hydrogen ions in spring waters increase when the precipitation increases, whereas the concentrations of nitrate nitrogen, chloride and calcium ions decrease with increasing amounts of precipitation. The magnesium, sodium and electrical conductivity are nearly independent of the precipitation. The spring waters in the Halla mountain region belong to the groups of sodium or potassium type and bicarbonate type, except the Baegrodam and Wiseorm spring water.

Key words: Halla mountain region, spring water, altitudinal water quality, Cheju Island

요약: 본 연구는 한라산 지역에 분포하는 대표적인 9개 용천수에 대한 고도별 수질특성과 그 진화과정을 연구하였다. 조사 지역 9개 용천수의 수질분석결과 관음사용천수는 수소이온 농도에서 비정상적인 수질특성을 보였다. 해발고도 1000m 이하에 위치하는 영실, 남국선원, 성판악, 어리목 및 관음사용천수에서는 염소이온, 황산이온, 질산성질소 및 나트륨이온 함량이 높아 주변 육상오염원에 의해 오염이 진행 중인 용천수로 분류된다.

중탄산이온, 황산이온 및 수소이온 농도는 강수량이 많았을 때 그 농도가 증가하였으며, 염소이온, 칼슘이온 및 질산성질소 농도는 강수량이 많았을 때 그 농도가 감소하였고, 마그네슘이온, 나트륨이온 및 전기비전도도 농도는 강수량의 영향이 미미하였다. 한라산 용천수는 백록담 담수와 윗세오름용천수를 제외한 전 용천수가 나트륨 또는 칼륨형(sodium or potassium type)과 중탄산형(bicarbonate type)의 용천수군으로 구분된다.

주요어: 한라산 지역, 용천수, 고도별수질, 제주도

서론

한라산은 우리 나라 남한의 최고봉(1950m)으로서 다양한 동·식물의 서식 및 수려한 경관으로 인해서 국립공원 및 천연보호구역(천연기념물 182호)으로 지정되어 보호되고 있다. 한라산 국립공원은 표고 600~1,950m

에 이르는 고산지대로서 표고에 따른 기후대의 수직분포가 뚜렷하여 온대 및 한대의 기후특성을 갖고 있다. 한라산의 지표면은 주로 투수성이 큰 현무암류와 미고결 화산쇄설층으로 구성되어 있어 강수의 지하 함량이 대단히 큰 지역이다.

지표면에 내린 강수는 투수성이 큰 지층을 통하여 지

하로 침투한 후 지하수를 형성하며, 수리지질적 특성에 의해 지하수 일부가 지표로 용출되어 용천수를 형성하고 있는 것으로 알려져 있다(최순학, 1988). 도내 산재된 용천수는 일종의 지하수로서 강수가 지하 하부로 내려가다가 불투수층을 만나 지표로 나오는 어승생, 영실, 돈네코, 성판악, 백록담, 선돌 등의 상위용출수(perched spring)와 지하 하부로 침투한 지하수가 수리지질학적 구배를 따라 해안면으로 유동하여 해수면과 접하게 되어 용출하는 기저용출수(basal spring)로 구분할 수 있다(농어촌진흥공사, 1973; 이태섭, 1992).

상위용출수는 용출량이 적고 간헐적이며 그 분포상태가 규칙적이지 못하나 상위에 오염원이 적어 수질이 양호한 용출수로 이루어져 있고, 기저용출수는 해안면에 위치하면서 지상의 인위적인 오염을 직·간접적으로 받고 있으며, 해수에 의한 수질변화가 두드러진 용천수군으로 알려져 있다(Choi, 1990). 그러나 한라산 탐방객의 지속적인 증가에 따른 한라산지역의 훼손범위가 급속히 확장되는 추세일 뿐만 아니라 백록담 담수가 갈수기때 완전히 유출되어 분화구의 바닥면이 노출됨으로 천연기념물로서의 경관이 상실되는 등 그 이용면에서 여러 가지 문제가 대두되고 있다. 따라서 본 연구는 현재까지 조사 연구된 바 없는 한라산 국립공원 주변 용천수의 수질분석을 실시하여 배경수질 성분들의 지역에 따른 수질특성 및 오염 정도를 파악하는데 목적을 두었다.

연구 지역의 개요

지형 및 지질

한라산은 백록담을 정점으로 하여 동·서 사면은 완만한 경사를 이루고 있으나 남북방향에서는 급한사면을 갖는다. 전반적으로 한라산 화산체는 순상화산에서 볼 수 있는 아스피테형화산이라고 할 수 있다. 한라산의 지형은 유년기 지형에 속하며 침식의 정도가 낮으므로 침식의 영향보다는 약 98회 이상에 걸친 화산분출과 그에 수반하거나 그 후에 있었던 용기작용과 밀접한 관계를 갖고 있다(김옥준, 1969).

한라산의 수계는 백록담을 정점으로 하여 원추상을 이루고 있어 방사상 수계를 나타낸다. 그러나 남북양측 사면에 비하여 경사가 완만하고 긴 사면이 동서의 장축

방향에 넓은 용암대지가 분수령을 이루는 관계로 동·서 사면에는 수계의 발달이 빈약하다. 따라서 많은 하천들은 남류하거나 북류하는 것이 보통이다. 한라산 북서 및 북측 사면에 발달하는 계곡으로서는 탐라계곡, 팔머리계곡, Y계곡 등을 들 수 있으며, 남측 및 남서 사면에 발달하는 계곡으로서는 효돈천계곡, 수악계곡, 영실계곡 등을 들 수가 있다. 하천의 하도를 결정짓는 요소로서는 화산열곡, 용암동굴의 붕괴, 유수의 침식작용 및 지하수의 방향 등을 들 수 있는데, 이러한 독특한 화산지형상의 특징과 하상에 발달한 열곡 및 절리구조를 통하여 유수가 지하로 침투하므로 대부분의 하천은 건천을 이루고 있으며, 강우시 일시적으로 유량을 갖는 간헐천의 특성을 갖고 있다. 건기에도 물이 흐르는 하천은 Y계곡천과 영실천이 있으며 이들은 모두 주변지역의 용천수에 수원을 두고 있다(김천수, 1992).

한라산의 지질은 한라산현무암, 한라산조면암, 백록담현무암, 화산쇄설층으로 구성되어 있다. 백록담의 구성암석은 크게 두 종류로 구성되어 있다. 즉, 남서면측은 한라산조면암으로 이루어져 있으며, 북동면측은 백록담현무암으로 이루어져 있다. 이러한 상이한 두 종류의 암석분포로 볼 때 한라산 정상에 큰 돛 모양의 한라산조면암이 화구를 메꾸었다가 그후 백록담 현무암이 돛구조의 일부를 부수면서 현무암이 분출되어 남서쪽에 먼저 분출한 한라산조면암과 북동쪽에 후기에 분출한 백록담현무암이 웅덩이를 생성시켜 백록담 분화구가 형성된 것으로 추정하고 있다(Lee, 1982).

강수량

제주도의 연평균 강수량은 1,300~1,600mm로서 우리나라의 연평균 강수량에 비해서 200mm 이상 많은 편이며 여름철에 집중되고 있다. 특히 표고 700~800m 지역에서 3,008mm, 1,100m 고지에서 3,500mm의 강수량이 관측되고 있다(건설부, 1993).

겨울철의 적설량은 표고에 따른 증가가 심하여 고지대의 적설기는 11월에 시작되어 다음해 5월까지 지속되며 적설심도는 1m를 초과하는 경우가 많다.

강수량은 용천수의 용출량에 가장 큰 영향을 주는 인자로 조사지역의 강수량은 제주, 고산고층, 서귀포, 성산기상관측소에서 1994. 5~1996. 5월에 측정된 자료이다(기상청, 1994~1996). 조사기간 동안의 강수량은 Fig. 1과 같이 '95년 7월에 평균 581mm로 최대 강수량을

보였고, '94년 6월, 8월, 95년 5월, 8월에 각각 226.4mm, 345.3mm, 224.7mm, 240.7mm로 다른 월에 비하여 많이 나타났으며, '95년 12월에 16.2mm로 가장 적었고, '94년 11월, 12월, '95년 11월, '96년 2월에 각각 23.3mm, 29.2mm, 33.7mm, 26.9mm로 40mm미만이었으며, '95년 7월부터 '96년 5월 사이는 평균 29.6mm의 강수량을 보여 조사지역 용천수의 용출량을 감소시키는 데 큰 영향을 미쳤다.

1994년 5월부터 1996년 5월까지 2년 1월 동안 강수량의 분포를 보면 제주지역이 2,920.0mm(월평균 116.8mm), 서귀포지역이 4,057.9mm(월평균 162.3mm), 성산포 지역이 3,761.4mm(월평균 150.5mm), 고산고층 지역이 1,792.2mm(월평균 71.7mm)로 서귀포 지역이 최대를 보였고, 고산고층에서 최저를 보였으며, 제주 전체 평균 강수량은 3,133.4mm(월평균 125.3mm)를 보였다.

시료채취 및 분석방법

한라산 국립공원 주변지역에 분포하는 용천수의 시료채취는 1994년 5월부터 11월까지와 1995년 3월부터 5월까지 10개월에 걸쳐 이루어졌다. 용천수 시료채취

장소는 백록담 분화구담수, 용진각대피소, 윗세오름, 영실계곡, 어리목계곡, 천왕사, 관음사, 성판악, 남국선원으로 9개지역에서 채수하였다(Fig 2).

용출수의 전기비전도도(EC)와 pH는 현장에서 채수 즉시 측정하였고, 수질분석을 위해 시료는 1l 폴리에틸렌 용기에 채수하고 냉장 보관하여 실험실로 운반한 후 즉시 양이온성분(Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+})은 원자흡광광도계(PYE UNICAM SP9)로 각각 589.0nm, 766.5nm, 285.2nm, 422.7nm에서 분석하였고, 음이온 중 Cl^- 은 More법(질산은 적정법), NO_3^- -N는 살리실산나트륨법, SO_4^{2-} 는 Ion Chromatography(DX 100)를 이용하여 분석하였으며, HCO_3^- 은 위생시험법 주해에 준하여 분석하였다(환경처, 1991).

분석결과 및 고찰

한라산 용천수의 수질특성

본 연구에서는 한라산지역(표고 600m 이상)에 분포하는 용천수의 수질특성을 파악하기 위하여 한라산 지역에 분포하는 대표적인 9개 용천수 지역에서 시료를 채수하여 전기비전도도, 수소이온농도, 나트륨, 칼륨, 마

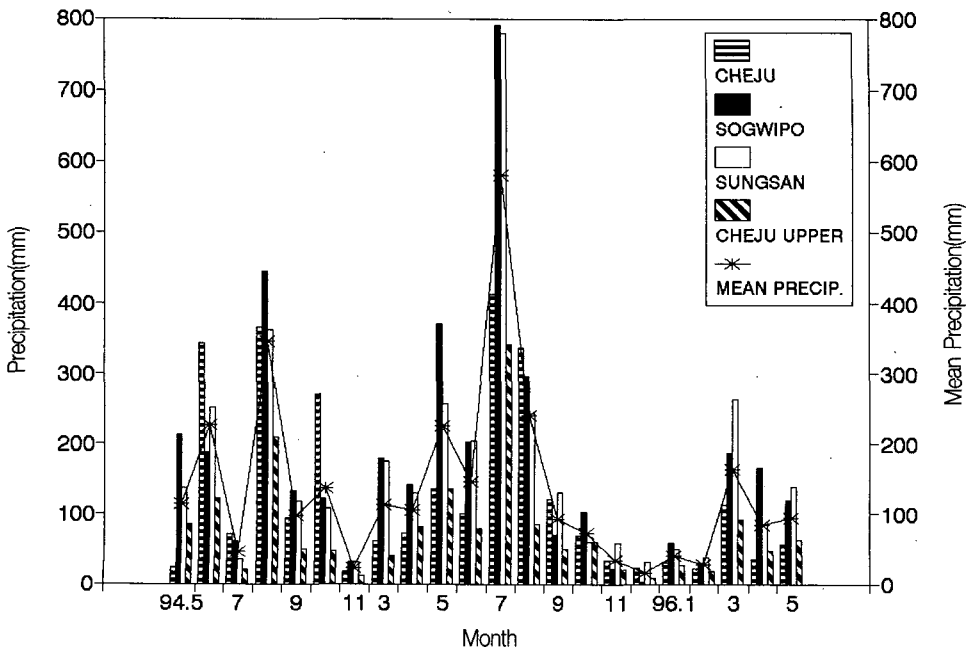


Fig. 1. Monthly variation of precipitation from May, 1994 to May, 1996.

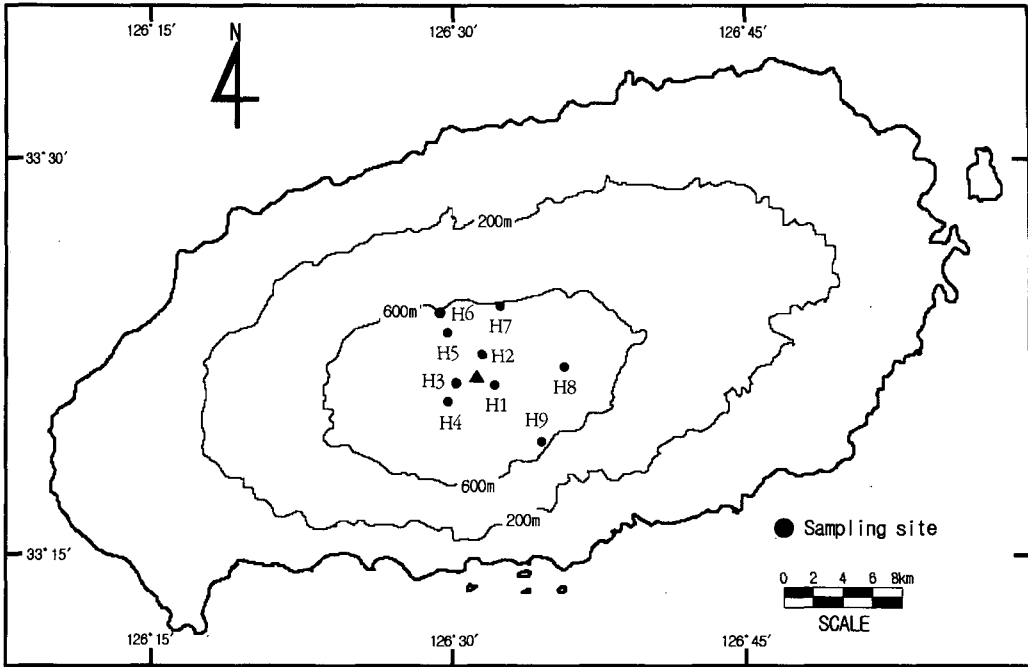


Fig. 2. Location of spring water sampling site in the Halla mountain region. H1, Baegrogdam; H2, Yongjingak; H3, Yiseorm; H4, Yungsil; H5, Oremok; H6, Chunwangsa; H7, Gwaneumsa; H8, Sungnealorm; H9, Namguksunwon.

그네슘, 칼슘, 염소이온, 질산성질소, 황산이온, 중탄산이온 등 10개 항목을 분석하였다(Fig. 2, Table 1).

총고용물질

총고용물(TDS)을 다량 포함하고 있는 물은 목적에 따라 그 사용이 불가능할 때가 많다. 예를 들면 고용물이 500ppm 이하이면 식수, 생활용수 및 공업용수로서 사용할 수 있으나, 1,000ppm 이상인 경우에는 물맛이 상당히 나쁘며 대부분의 경우 용수로서 적합하지 못하다(한정상, 1982). 빗물은 TDS가 매우 적어 보통 50ppm 이하이나 대수층에서 시간이 경과되거나 오염물질이 유입되면 TDS는 증가한다(최순학, 1990; Barbara and Harry, 1984).

한라산지역 용천수내 TDS값은 평균 35.3~66.4ppm 범위를 보이고, 백록담담수인 경우 35ppm으로 최저치를 나타냈으며, 관음사 용천수인 경우 79ppm으로 최대치를 보였다(Table 1). 백록담 담수호(1,940m)에서 윗세오름(1,650m), 용진각(1,610m), 영실(1,260m), 관음사(610m) 등 평균고도가 낮아지는 용천수에서 전반적으로 TDS값이 증가하는 경향을 보였으며, TDS값이 500

ppm을 초과하여 식수로 부적절한 지역은 없었다.

전기비전도도

지하수내에서의 전기비전도도(EC)값은 용해되어 있는 고용물의 성분 및 함량에 따라 그 값이 달라진다. 그러므로 화학적으로 순수한 물은 그 전기비전도도가 매우 낮은 물이며 많은 고형물의 혼합으로 이온이 많이 존재하면 전기비전도도는 높아진다. 빗물의 EC값은 대단히 낮으며 오염된 지하수나 해수가 침투된 지하수의 전기비전도도값은 대단히 높다(최순학, 1990; Barbara and Harry, 1984).

한라산 지역 용천수인 경우 EC값은 평균 9.3~63.8 μ S/cm의 범위를 나타냈으며, 백록담 담수호가 9 μ S/cm로 최저치를, 관음사 용천수가 85 μ S/cm로 최고치를 보였고, 관음사물을 제외하고 전지역 용천수가 50 μ S/cm 이하의 낮은 값을 보였다.

수소이온농도

수소이온농도(pH)는 물이 산성, 염기성, 중성인가를 나타내는 인자로 사용되고, 수소이온(H⁺)이 수산기이

온(OH⁻)보다 많을 때는 산성작용을 나타내어 금속물질을 부식시키는 역할을 한다(최순학, 1990; Acker and Bricher, 1992). 연구지역 용천수의 pH값은 평균 5.8~9.3의 범위로 백록담담수가 5.8로 최저치를, 관음사물이

10.1로 최고치를 보여 EC값의 변화와 유사한 경향을 보였다(Table 1).

최순학(1990)에 의하면 대부분의 지하수의 pH는 4에서 9 사이에 있고 먹는 물 수질기준은 5.8~8.5이며, 습

Table 1. TDS, EC and pH values and concentrations of Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻-N and HCO₃⁻ in the spring water.

Sample No.		Element	TDS(ppm)			EC(μS/cm)			pH			Na ⁺ (ppm)		
			Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Avg.
Halla-san region	H1	Baegrogdam	35	36	35.3	9	10	9.3	5.8	5.8	5.8	0.53	0.55	0.54
	H2	Yongjingak	44	45	44.3	25	27	25.7	7.4	7.6	7.5	2.05	2.11	2.08
	H3	Wiseorm	41	41	41.0	19	20	19.7	6.1	6.3	6.2	1.98	2.01	2.00
	H4	Yungsil	53	56	54.4	41	45	43.2	7.2	7.6	7.3	2.60	2.85	2.72
	H5	Oremok	53	55	53.6	40	44	41.7	7.4	7.7	7.5	2.68	3.20	2.98
	H6	Chunwangsa	52	55	53.4	39	44	41.2	6.9	7.4	7.2	2.74	3.84	3.21
	H7	Gwaneumsa	57	79	66.4	48	85	63.8	8.7	10.1	9.3	4.00	5.08	4.46
	H8	Sungpanark	51	56	54.0	37	46	42.3	7.1	7.3	7.1	3.42	3.75	3.65
	H9	Namguksunwon	44	52	46.5	24	38	29.2	6.5	7.1	6.7	1.78	2.20	2.04

Sample No.		Element	K ⁺ (ppm)			Mg ²⁺ (ppm)			Ca ²⁺ (ppm)			Cl ⁻ (ppm)		
			Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Avg.
Halla-san region	H1	Baegrogdam	0.11	0.15	0.13	0.25	0.28	0.26	0.25	0.27	0.26	1.29	1.33	1.31
	H2	Yongjingak	0.70	0.80	0.75	0.44	0.47	0.45	0.51	0.55	0.53	3.59	3.68	3.63
	H3	Wiseorm	0.25	0.28	0.27	0.55	0.60	0.58	0.47	0.49	0.48	2.77	2.79	2.78
	H4	Yungsil	0.45	0.89	0.64	0.37	1.33	0.87	1.28	2.43	2.03	1.18	5.98	4.11
	H5	Oremok	0.17	1.04	0.56	0.70	0.94	0.83	1.13	1.65	1.34	2.32	5.31	4.13
	H6	Chunwangsa	0.34	1.10	0.83	0.34	0.91	0.59	0.75	1.50	1.08	2.41	7.09	4.30
	H7	Gwaneumsa	1.16	1.64	1.43	0.56	0.76	0.65	1.46	5.37	3.12	3.65	7.32	5.20
	H8	Sungpanark	0.43	1.48	1.07	0.12	0.52	0.36	0.04	1.62	0.98	1.97	4.61	3.28
	H9	Namguksunwon	0.03	0.50	0.20	0.20	0.45	0.29	0.99	3.22	1.82	2.90	3.06	3.01

Sample No.		Element	SO ₄ ²⁻ (ppm)			NO ₃ ⁻ -N(ppm)			HCO ₃ ⁻ (ppm)		
			Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Avg.
Halla-san region	H1	Baegrogdam	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.84	1.88	1.87
	H2	Yongjingak	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.04	6.44	6.58	6.53
	H3	Wiseorm	0.00	0.30	0.10	0.00	0.09	0.04	4.44	4.57	4.49
	H4	Yungsil	0.00	2.32	0.41	0.16	0.30	0.24	15.26	18.69	17.53
	H5	Oremok	0.00	0.00	0.00	0.11	0.19	0.14	14.47	21.32	18.11
	H6	Chunwangsa	0.00	1.60	0.41	0.00	0.32	0.08	0.41	18.16	11.81
	H7	Gwaneumsa	0.63	2.57	1.83	0.34	0.50	0.43	15.53	28.95	22.03
	H8	Sungpanark	0.00	2.17	1.08	0.00	0.80	0.20	13.42	21.32	17.61
	H9	Namguksunwon	0.00	2.46	0.39	0.05	0.13	0.08	5.79	18.16	11.82

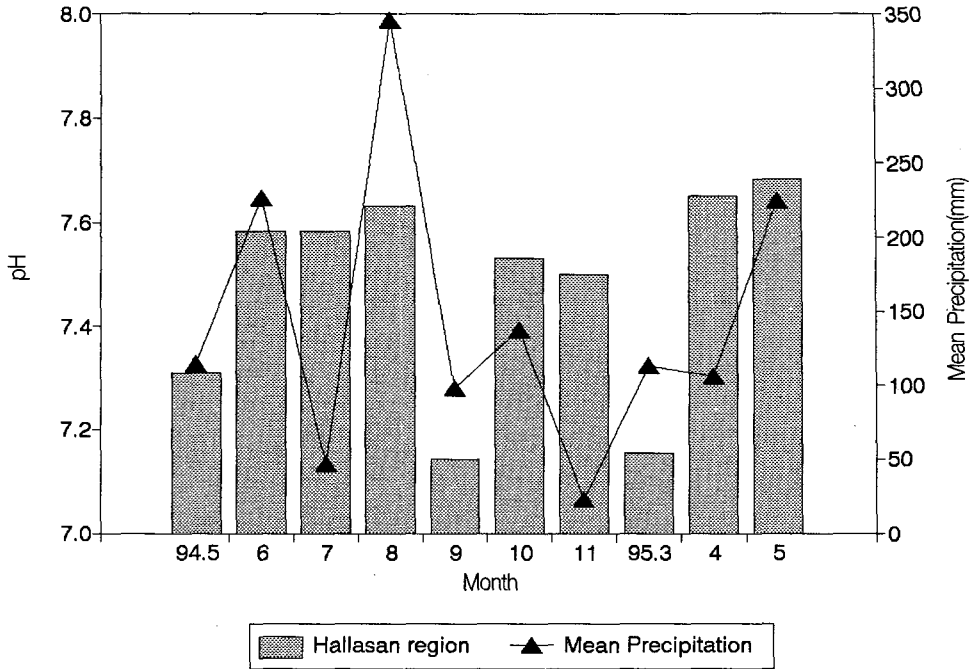


Fig. 3. The variation of pH of spring waters with respect to monthly precipitation.

윤지역에서의 하천수 5~6.5이고 건조지역에서는 7~8이며 산성토양수는 4보다 적고, 바닷물의 pH는 8.1에서 8.3에 속한다 하였는데, 관음사 용천수는 '94년 7월 8.7을 제외하고는 전 조사기간에 걸쳐 pH값이 10을 초과하는등 비정상적으로 강한 알칼리성을 띠었다. 한정상(1982)에 의하면 용천수 주변 식물들의 광합성작용, 낙엽의 침전에 따른 부패 등의 요인에 의해서도 pH가 높아진다고 하였는데, 본 지역이 금번에 분석한 용천수가 순환작용이 미미한 저수지의 물로써 상기 요인인 것으로 판단된다.

Fig. 3은 조사지역 용천수의 강수량에 따른 수소이온 농도의 변화경향을 보여주는 것이다. Fig. 3에서 보듯와 같이 '94년 6월~8월과 '95년 4월~5월에 높게 나타나는데, 따라서 강수량이 많고 식물성장이 활발한 여름과 봄에 높은 농도를 보여줄을 알 수 있다.

나트륨

나트륨(Na⁺)은 수용성으로서 토양이나 암석내에서 빠져나와 용해되는 데, 이들은 정호(井戶)에 공매작용(plugging)과 피카현상을 일으키는 것으로 알려져 있다. 또한 NaHCO₃나 Na₂CO₃를 다량 포함한 지하수는 pH가

약 9 이상에 이른다(한정상, 1982). 우리 나라 먹는 물수질기준으로는 설정되어 있지 않으나 WHO, 일본 등 대부분 나라의 허용기준치는 150~200ppm 이하로 정하고 있다(오순미 등, 1995).

한라산지역 용천수의 나트륨 함량은 평균 0.54~4.46ppm의 범위로 백록담담수에서 0.53ppm으로 최저치를, 관음사물이 5.08ppm으로 최고치를 보였으나, 전 조사지역 용천수의 나트륨 함량치가 평균 2.63ppm 이하로 양호한 수질을 보였다(Table 1).

고도별 용천수내 나트륨 함량치는 남국선원 용천수를 제외하고는 해발고도가 낮은지역에 위치하는 용천수일수록 순차적으로 용천수에서 나트륨 농도가 증가하는 경향을 보였다.

칼륨

칼륨(K⁺)은 물속에 용존된 무기물질의 일종으로 우리 나라 먹는물 수질기준으로는 설정되어 있지 않으나 EEC, 영국, 프랑스 등의 대부분 나라에서 수질기준 12ppm이하로 정하고 있으며(오순미 등, 1995), 정상적인 지하수는 일반적으로 5ppm 미만의 값을 갖고 있으나 그 이상의 값이 나오면 일단 오염의 가능성, 즉 해

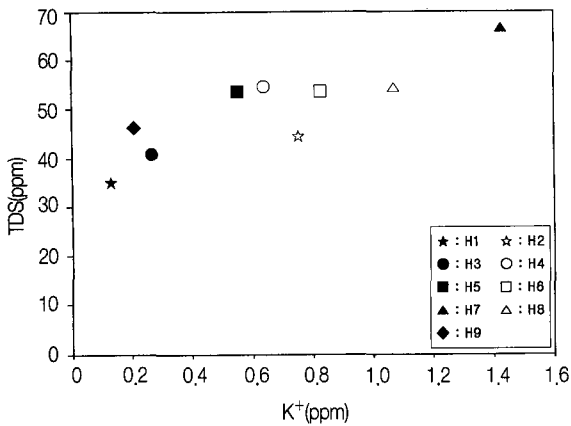


Fig. 4. Total dissolved solids(TDS) versus potassium content diagram. H1, Baegrogdam; H2, Yongjingak; H3, Yiseorm; H4, Yungsil; H5, Oremok; H6, Chunwangsa; H7, Gwaneumsa; H8, Sungnealorm; H9, Namguksunwon

수의 침입에 의한 것이나 농약이나 폐기물에 의해 오염된 것으로 보고있다(최순학 등, 1989).

연구지역 용천수의 칼륨함량은 평균 0.13~1.43ppm의 범위로 남국선원이 0.03ppm으로 최저치를, 관음사물이 1.64ppm으로 최고치를 보이나 이들 모두 기준치를 훨씬 못미치고 있어 양호한 수질을 보였다.

Fig. 4는 총고형물질(TDS)에서 칼륨이온이 차지하는 정도를 나타낸 것으로서 TDS와 칼륨함량과의 관계는 비교적 정의 상관관계를 보인다. 즉, 고도가 낮아지면서 TDS값과 칼륨농도는 순차적으로 증가하는 경향을 보여주는데 이는 백록담 담수가 지하로 침투하여 고산지대를 걸쳐 저지대지역으로 유동되면서 점진적인 수/압 반응에 따라 그 수질특성도 점차 변질되고 있음을 의미한다.

마그네슘 및 칼슘

최순학 등(1989)은 정상적인 지하수는 $Ca^{2+} > Mg^{2+}$ 의 관계를 나타내며, $Mg^{2+} > Ca^{2+}$ 의 관계를 보이면 일단 해수침입의 가능성을 생각할 수 있다 하였다.

조사지역 용천수에서 마그네슘(Mg^{2+}) 함량은 평균 0.26~0.87ppm의 범위로 성판악이 0.12ppm으로 최저치를, 영실이 1.33ppm으로 최고치를 보였고, 칼슘(Ca^{2+})은 평균 0.26~3.12ppm의 범위로 성판악이 0.04ppm으로 최저치를, 관음사가 5.37ppm으로 최고치

를 보여 백록담 담수를 제외하고 정상적인 지하수 형태인 $Ca^{2+} > Mg^{2+}$ 의 관계를 보였다(Table 1). 한편 강수량과 용천수내 마그네슘함량과의 관계는 그 변화폭이 미미하였으나 칼슘인 경우 강수량이 증가하면 칼슘농도는 감소하는 경향을 보였다.

염소이온 및 황산이온

일반적으로 자연의 지하수에는 보통 10ppm 내외의 염소이온(Cl^-) 농도를 함유하고 있는 것이 통상적이고 해수에서는 평균 19,000ppm의 높은 값을 갖는다(Garrels and Mackenzie, 1967). 제주도 동부 신양 앞바다에서의 해수 중의 염소이온 농도값은 19,250ppm으로 상기와 거의 동일한 값을 갖고 있다(최순학, 1990). 또한 제주도 강수에서의 염소이온 농도값은 3.4ppm에서 8.8ppm의 범위를 보이나 보통의 강수는 8ppm 내외인 것으로 알려졌다(최순학 등, 1989).

조사지역 용천수에서 염소이온의 평균함량은 1.31~5.20ppm의 범위를 나타냈으며, 이들 중 백록담 담수가 1.29ppm으로 최저치를, 관음사물이 7.32ppm으로 최고치를 보이며, 백록담담수와 윗세오름 용천수인 경우 염소 함유량이 2.7ppm 이하로 분석되어 최순학 등(1989)의 연구결과와는 다소 차이를 보이나 수질이 극히 양호한 특성을 보여준다. 황산이온(SO_4^{2-})의 함량은 평균 0.00~1.83ppm의 범위를 나타냈으며, 백록담 담수, 용진각, 어리목 용천수에서 불검출되었고 관음사물에서 2.57ppm으로 최고치를 보였다.

강수량과 조사지역 용천수내 이들 두 원소 함량과의 관계를 보면 염소이온인 경우 Fig. 5에서 보는 바와 같이 강수량이 증가하면 희석작용에 의한 용천수내 염소이온 농도가 감소하는 경향을 보였으며, 황산이온인 경우 Fig. 6에서와 같이 장마기간인 8월달에 용천수내 황산이온 농도가 급격히 증가하는 경향을 보였는데 이는 지표면에 있는 오염물질들이 강수와 함께 지하로 침투하기 때문인 것으로 사료된다.

질산성질소

지하수내에 질산성질소($NO_3^- - N$)가 다량으로 들어 있을 때에는 첫째로 오염된 지표수가 유입하여 지하수가 오염되었거나 또는 지표의 토양 속에 농축되었던 질산염이 강수와 함께 지하 대수층으로 침투하여 지하수를 오염시키는 것으로 알려졌다(윤순강, 1994; 한정

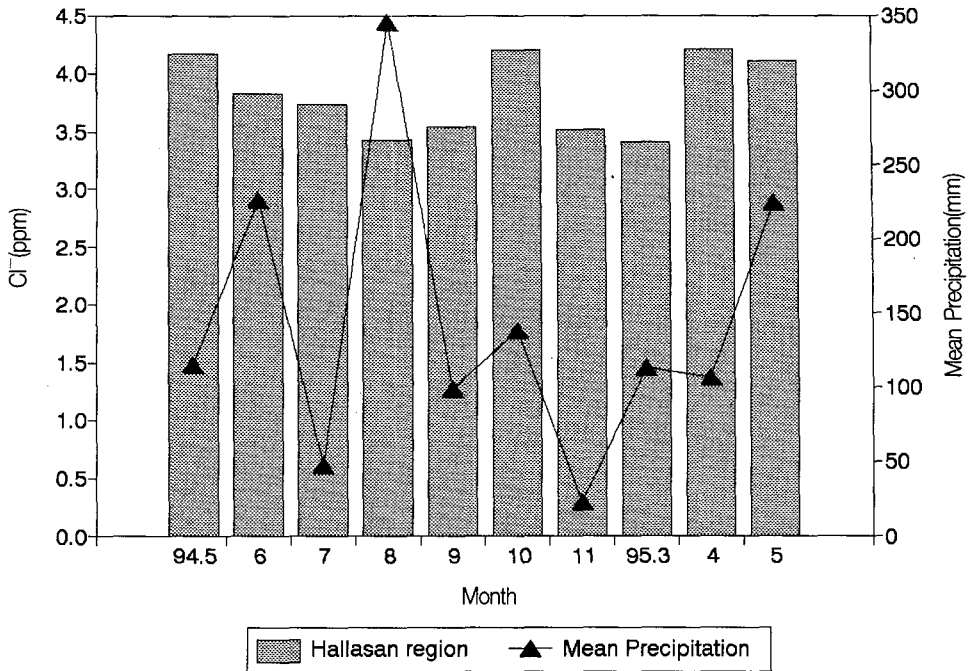


Fig. 5. The variation of chloride ion concentration in spring water with respect to monthly precipitation.

상, 1982). 즉, 일반적으로 NO_3^- 가 지하수에서 높게 검출되는 원인으로서는 축산시설의 분뇨 및 오·폐수, 유기질 비료 및 퇴비, 정화조의 누출, 질소질 화학비료, 생활하수 및 부패된 음식물 등으로부터 생겨나는 유기질 질소가 강수와 함께 지하로 침투됨으로써 비롯되는 것으로 알려져 있다. 이러한 오염원으로부터 발생한 유기질소의 변환과 운명은 지하로 침투하는 질소의 형태와 다양한 생물학적 변환에 따라 좌우되는 데 대체로 유기질소는 $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$ 순의 변환과정을 밟는다. 따라서 지하수 중의 NO_3^- 농도는 오염원으로부터 거리가 멀어질수록 점진적으로 증가하는 현상을 나타내어 하류구배의 지하수에서 높은 농도의 NO_3^- 가 검출되게 된다(Aller *et al.*, 1987; Junge, 1963).

한라산지역 용천수의 질산성질소 함량은 평균 0.00 ~ 0.43ppm의 범위를 나타냈으나, 백록담 담수, 용진각 용천수, 윗세오름 용천수에서 불검출 되었고, 관음사물이 0.43ppm으로 최고치를 보이나 조사지역 용천수 모두가 양호한 수질을 형성하고 있다(Table 1). Fig. 7은 조사지역 용천수의 강수량과 질산성질소 함량과의 관계를 보여주는 것이다. 조사기간 동안 강수량이 최대

인 '94년 8월달보다 강수량이 최소인 11월에 용천수내 질산성질소 농도가 최고치를 보였다. 이는 Johnson 등 (1976)에 의하면 농경지인 경우 일반적으로 여름철에 토양 중의 질산성질소가 식물에 많이 이용되기 때문에 식물들이 소비하는 관계로 지하수중에 여름철에 그 농도가 낮지만 작물들이 자라지 않는 겨울철에는 토양층에 높은 농도의 질산성질소가 함유하는 경향이 있다고 보고한 연구결과와도 잘 일치하고 있다. Fig. 8은 조사지역 용천수의 총고형물질(TDS)에서 질산성질소 이온이 차지하는 정도를 나타내는 것으로서 일부 몇지역(남국선원 용천수, 천왕사 용천수)을 제외하면 고도에 따른 TDS와 질산성질소 함량과는 비교적 좋은 양의 상관관계를 보여주고 있다. 즉, 고지대지역의 용천수인 백록담담수(1,940m), 윗세오름 용천수(1,650m), 용진각 용천수(1,610m)인 경우 용천수내 총고형물질량 중 질산성질소가 차지하는 함량은 미미한 반면, 고도가 점차 낮아지는 영실 용천수(1,260m), 성판악용천수(780m), 관음사물(610m)에서 총고형물질량 중 질산성질소가 많은 부분을 차지하고 있음을 알 수 있다. 이는 상류지역의 각종 오염원으로부터 만들어진 암모니아성 질소가 강수와 함께 지하로 침투하여 시간이 지남에 따라

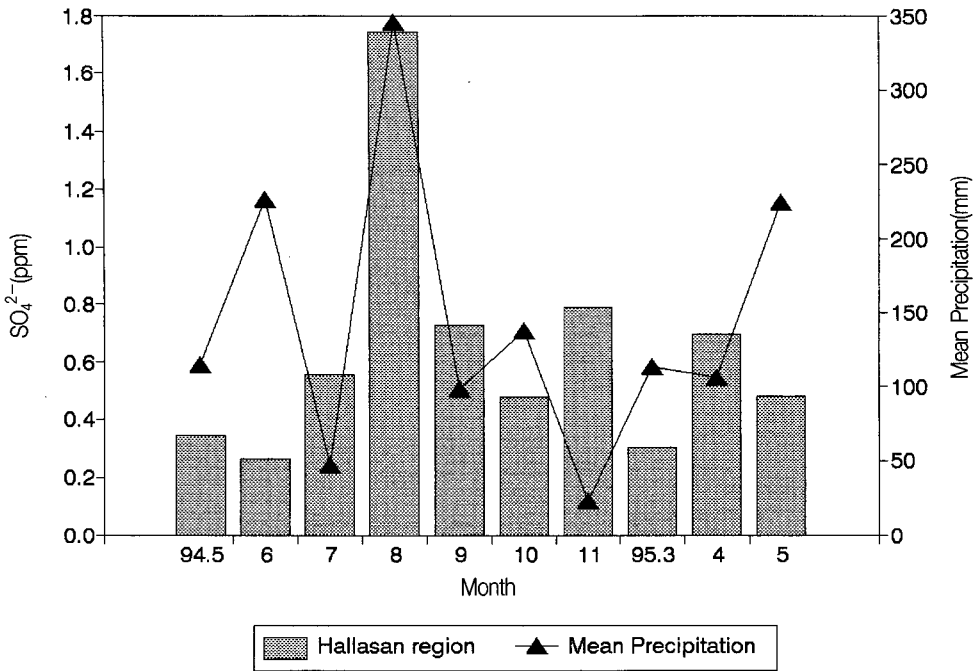


Fig. 6. The variation of sulphate ion concentration in spring water with respect to monthly precipitation.

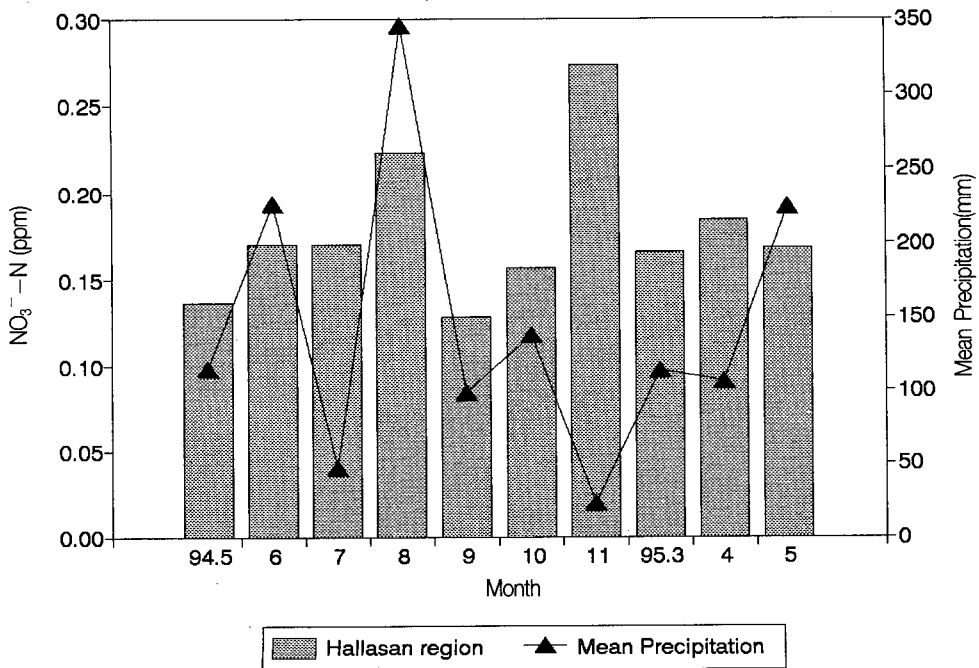


Fig. 7. The variation of nitrate ion concentration in spring water with respect to monthly precipitation.

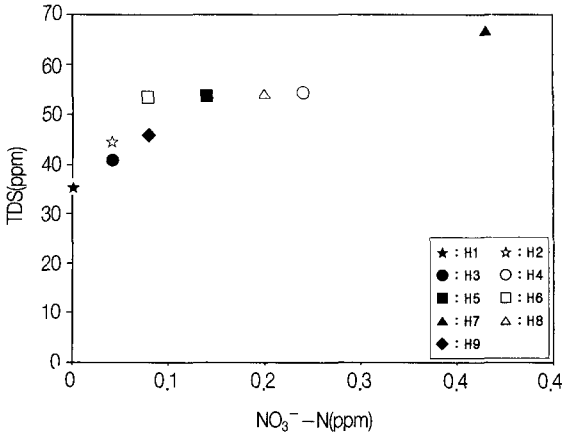


Fig. 8. Total dissolved solids(TDS) versus nitrate content diagram. H1, Baegrogdam; H2, Yongjingak; H3, Yiseorm; H4, Yungsil; H5, Oremok; H6, Chunwangsa; H7, Gwaneumsa; H8, Sungnealom; H9, Namguksunwon

질산성질소로 변환되어 하류지역의 용천수에서 높게 나타나는 것으로 해석할 수 있다.

중탄산이온

조사지역 용천수의 중탄산이온(HCO_3^-) 함유량은 평균 1.87~22.03ppm의 범위를 나타냈으며, 천왕사 용천수가 0.41ppm으로 최저치를, 관음사 용천수가 28.95ppm으로 최고치를 보였다.

Choi(1992)에 의하면 자연의 지하수는 TDS와 HCO_3^- 와의 상관관계를 통하여 지하수 순환과정의 자연적인 진화과정을 고찰해 해주며 강수로부터 자연의 지하수로의 진화순서가 일직선상에 놓여있게 된다 하였다. 즉, 자연의 지하수가 우수와 기저지하수를 형성하는 과정이 시간이 경과됨에 따라 HCO_3^- 와 TDS가 증가되면서 어떤 직선상의 진화경향을 나타내주고 있는 반면에 그 직선 밖에 위치하는 group은 1단계 오염 및 해수가 침입되었음을 보여준다 하였다. 또한 지하수가 토양내부에 존재하면서 이들 모임의 구성광물과 반응하여 시간이 경과됨에 따라 처음과는 다른 양상의 수질로 변화한다 하였다.

Fig. 9는 조사지역 용천수의 TDS와 HCO_3^- 와의 상관관계를 나타내 주는 그림으로서 연구대상 용천수들은 대체로 강수로부터 자연의 지하수로의 진화순서가 일직선상 주위에 놓여 있음을 보여주고 있다. 즉, 표고 1,600m 이상에 분포하는 용천수들(백록담 담수, 윗세오

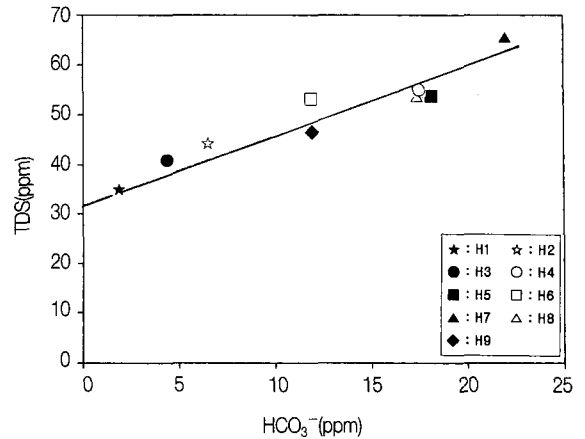


Fig. 9. Total dissolved solids(TDS) versus bicarbonate content diagram. H1, Baegrogdam; H2, Yongjingak; H3, Yiseorm; H4, Yungsil; H5, Oremok; H6, Chunwangsa; H7, Gwaneumsa; H8, Sungnealom; H9, Namguksunwon

름 용천수, 용진각 용천수)은 HCO_3^- 함유량이 1.87~6.53ppm의 범위와 TDS값이 35.3~44.3ppm 사이에 있는 반면, 표고 1000m 이하에 분포하는 용천수들(어리목 용천수, 성판악 용천수, 천왕사 용천수, 관음사물, 남국선원 용천수)은 HCO_3^- 함유량이 11.81~22.03ppm 범위와 TDS값이 46.5~66.4ppm 범위로 강수가 지하수로 함양되어 토양내에 존재하면서 이들 모임의 구성광물과 반응하여 시간이 경과함에 따라 처음과는 다른 양상의 수질로 변화함을 보여주고 있다. 또한 최순학(1992)에 의하면 지하수의 지화학적 순환과정에서 TDS에 대한 HCO_3^- 의 값이 적으면 보다 젊은 지하수군이다 하였다. 따라서 본 연구결과 Fig. 9에서 보는 바와 같이 한라산지역 용천수인 경우 TDS에 대한 HCO_3^- 값이 22ppm 이하에서 일직선상에 놓여 있어 젊은 용천수군으로 분류되고, 윤정수 등(1998)에 의하면 한라산 고산지역(12.42ppm)에서 중산간 지역(27.30ppm), 저지대 지역(34.59ppm), 해안 지역(41.32ppm)으로 향함에 따라 HCO_3^- 값이 점차 증가하는 보다 오래된 용천수군으로 분류되었다.

파이퍼다이어그램에 의한 용천수의 수문학적 분류

용천수에 대한 수질분석 결과를 종합해 Piper의 삼각다이어그램(trilinear diagram)을 작도하였다(Piper, 1994; Fig. 10). 각 지역의 용천수들의 수질형태를 보면, 양이온도는 조사지역 9개 용천수 중 6개 지역(용진각,

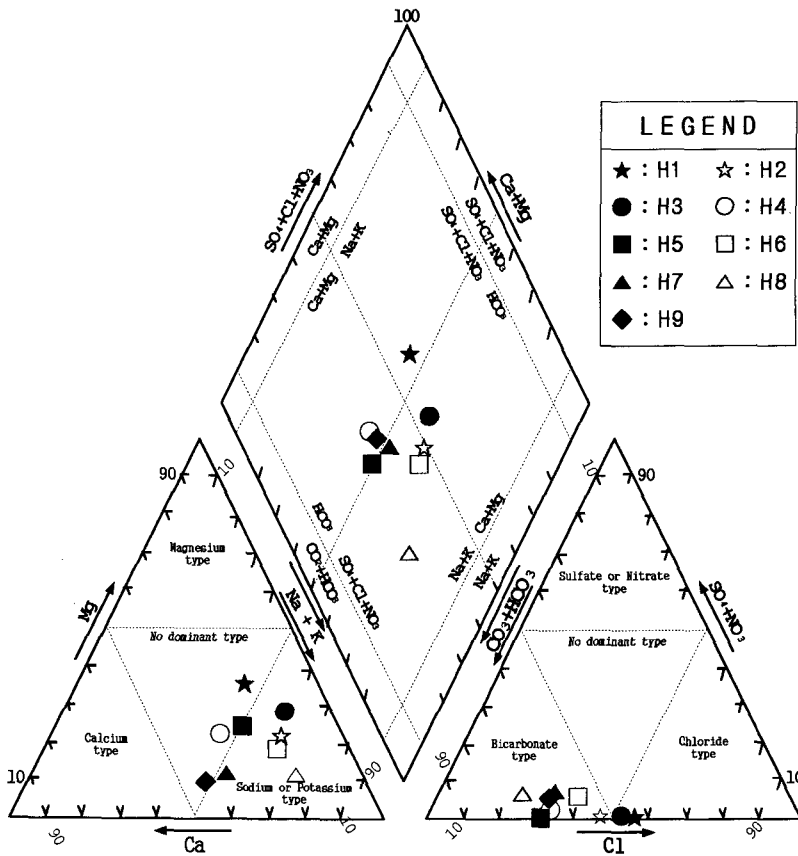


Fig. 10. Trilinear diagram showing the chemistry of spring water in the Halla mountain region. H1, Baegrogdam; H2, Yongjingak; H3, Yiseorm; H4, Yungsil; H5, Oremok; H6, Chunwangsa; H7, Gwaneumsa; H8, Sungnealorm; H9, Namguksunwon

윗세오름, 어리목, 천왕사, 관음사, 성판악)이 Na+K(Sodium or Potassium type)의 군을 이루었고, 백록담 담수와 탐방객이 많고 표고가 낮은 지역에 위치하는 2개 지역(영실, 남국선원)의 용천수는 동질성(No dominant type)의 군을 형성하였다(Fig. 10).

음이온도는 한라산지역 용출수 9개 지역 중 7개 지역이 수질특성이 양호한 곳에 나타나는 $\text{HCO}_3 + \text{CO}_3$ (bicarbonate type) 형태의 군을 이루었고, 2개 지역(백록담 담수, 윗세오름 용천수)이 Cl(Chloride type) 형태의 군을 형성하였다. 양이온과 음이온을 합성한 합성도에서도 상기의 결과들을 잘 보여주고 있는데(Fig. 10), 한라산지역 용천수 중 백록담담수와 윗세오름용천수를 제외한 대부분의 용천수에서 $\text{HCO}_3 + \text{CO}_3$ (bicarbonate type)가 우세한 수질특성을 보여주고 있다.

결론

1. 조사지역 용천수내 TDS값은 평균 35.3~66.4ppm의 범위를 보이고, 백록담 담수에서 평균고도가 낮아지면서 TDS 값이 점차 증가하는 경향을 보였다. 용천수내 pH 값은 5.8~9.3의 범위로 백록담 담수가 5.8로 최저치를, 관음사물이 10.1로 최고치를 보여 관음사 용천수가 강한 알칼리성을 띠는 비정상적인 수질특성을 보였다.
2. 용천수내 나트륨함량은 평균 2.63ppm 이하로 양호한 수질을 보이나 백록담 담수에서 해발고도가 낮아지는 용천수에서 나트륨 농도가 점차로 증가하였다. 연구지역 용천수의 칼륨 함량은 평균 0.13~1.43ppm으로 먹는 물 기준치를 훨씬 못미치는 양호한 수질을 보였다. 용천수내 마그네슘 및 칼슘 함량

- 은 평균 각각 0.54ppm, 1.29ppm의 값을 보이고, 백록담 담수를 제외하고는 전 용천수에서 정상적인 지하수 형태인 $Ca > Mg$ 의 관계를 보였다.
3. 용천수내 염소이온 및 황산이온 함량은 평균 각각 3.53ppm, 0.47ppm의 값으로 극히 양호한 수질특성을 보였고, 풍수기 동안에 용천수내 황산이온 농도가 급격히 증가하였다.
 4. 조사지역 용천수의 질산성질소 함량은 평균 0.13ppm이나 백록담 담수, 용진각, 윗세오름 용천수에서는 불검출 되었고 관음사물이 0.43ppm으로 최고치를 보이나 전 조사지역 용천수 모두가 양호한 수질을 형성하고 있다. 용천수내 중탄산 이온 함량은 평균 12.42ppm이며, 천왕사 용천수가 0.41ppm으로 최저치를, 관음사물이 28.95ppm으로 최고치를 보였다. 한라산지역 용천수는 TDS에 대한 HCO_3 의 관계에서 중탄산이온 농도가 22ppm 이하에서 일직 선상에 놓이는 젊은 용천수군으로 분류된다.
 5. 한라산 용천수는 백록담 담수와 윗세오름 용천수를 제외한 전 용천수가 $HCO_3 + CO_3$ (bicarbonate type)군의 수질특성을 보였다.

참고문헌

- 건설부, 제주도, 한국수자원공사, 1993, 제주도 수자원종합개발계획 수립보고서. II-7.
- 기상청, 1994~1995, 기상연보. 122-202.
- 김옥준, 1969, 제주도 수자원의 특수성과 개발 방안. 광산지질학회지, 2(1), 71-80.
- 김천수, 1992, 제주도 지하수 환경의 오염취약성. 대한광산지질학회 제8회학술강연, 13-28.
- 농어촌진흥공사, 1973, 제주도와 OAHU도의 지하수. 43-162.
- 농어촌진흥공사, 1989, 제주도 지하수 장기개발계획 조사보고서. 63-124.
- 오순미, 김길성, 김세라, 김태훈, 송영철, 강태조, 강지아, 김성홍, 고찬옥, 1995, 제주도내 샘터의 수질 조사. 제주도보건환경연구원보, 6, 81-99.
- 윤순강, 1994, 요소와 축산뇨에서 유래한 $NO_3 - -N$ 및 동반 양이온의 토양 중 행동. 서울대학박사학위 논문.
- 윤정수, 박상운, 1998, 제주도 용천수의 수리화학적 특성. 대한지하수환경학회지, 5(2), 66-79.
- 이태섭, 1992, 해안지대 지하수자원 조사를 위한 항공원격탐사. 제주도 수자원의 보전과 이용, 7-9.
- 최순학, 1988, 제주도의 형성과 지하수특성. 제주도연구회, 5, 59-78.
- 최순학, 김영기, 1989, 제주도 지하수의 수질특성. 대한지질학회지, 25(3), 230-238.
- 최순학, 1990, 제주도 수자원의 특성과 수질오염 연구(II). 과학기술원, KR-90-(B)-10, 1-57.
- 최순학, 1992, 제주도 지하수자원의 보전과 개발방향. 제주대 환경연구소 심포지엄, 27-44.
- 한정상, 1982, 지하수학개론. 박영사, 1-511.
- 한정상, 1991, 제주도 환경보전 종합대책수질오염방지 장기 계획을 중심으로. 환경처, 71-230.
- 환경처, 1991, 수질환경오염 공정시험법.
- Acker, J.G. and Bricker, O.P., 1992, The influence of pH on biotite dis-solution and alteration kinetics at low temperature. Geochim. Cosmochim. Acta, 56, 3073-3092.
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J.H., Petty, R.J., and Hackett, G., 1987, Drastic; A standardized system for evaluating groundwater pollution using hydrogeologic setting. U. S. Environment Protection Agency, 455-475.
- Barbara, A.D. and Harry, I.N., 1984, Relationships between groundwater silica, Total dissolved solids, and specific electrical conductivity. Groundwater, 22(1), 80-85.
- Choi, S.H., 1990, Hydrogeological and hydrochemical characteristics of groundwater in Cheju Island. Thesis for the Degree of Doctor of Science, Kyungpook National University, 1-169.
- Garrels, R.M. and MacKenzie, F.T., 1967, Origin of the chemical compositions of some springs and lakes, Equilibrium Concepts in Natural Water Systems, ed. Gould, R.F., American Chemical Society Publications, Washington, D.C., 89.
- Johnson, A.H., Bouldin, D.R., Goyette, E.A. and Hedges, A.M., 1976, Nitrate dynamics in Fall Creek, New York. J. Environ. Qual., 5, 386-396.
- Junge, C.E., 1963, Air chemistry and radioactivity. New York Academic Press, 38-389.
- Lee, M.W., 1982, Petrology and geochemistry of Cheju volcanic island Korea. The science reports of the Tohoku University, Series III, 15, 180-184.
- Piper, A.M., 1944, A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. Trans. Amer. Geophysical Union, 25, 914-928.