

제주도 용천수의 수리화학적 특성

Hydrochemical Characteristics of Spring Water in Cheju Island

윤정수(Jeung - Su Youn)* · 박상운(Sang - Woon Park)*

요 약 : 본 연구는 제주도 백록담 담수호에서 해안변 용천수에 이르는 고도별로 대표적인 55개 용천수에 대한 지역적 수질특성과 그 진화과정을 연구하였다. 조사지역 55개 용천수의 수질분석 결과 관음사물은 수소이온농도에서, 유수암천, 장수물, 덕지샘물, 신촌큰물, 영천사, 운량천, 하원동물, 동해물, 색달샘물, 안덕계곡, 화순큰물, 돛물, 화강물, 정금물은 주변 육상오염원들에 의해서, 삼양제3수원, 신촌큰물, 명법사, 서느렁물, 토산물, 정금물, 락지물, 애월하물, 고내물, 녹고물은 해수침입에 의해 오염이 진행중인 용천수들로 분류되었다. 용천수내의 전기전도도, pH, 질산성질소, 중탄산이온은 강수량이 많았을 때 그 농도가 증가하였으며, 나트륨, 염소이온, 황산이온은 강수량이 많았을 때 그 농도가 감소하였고, 칼륨과 마그네슘, 칼슘은 영향이 미미하였다. Piper의 삼각다이아그램을 통한 조사지역 용천수의 수질특성을 보면 고산지역은 Sodium or Potassium type과 bicarbonate type의 군을 이루었고, 중산간지역은 Sodium or Potassium type과 No dominant type의 군을 형성하였으며, 저지대지역은 No dominant type과 Sulfate or Nitrate type의 군을, 해안지역은 Sodium or Potassium type과 Chloride type 및 No dominant type의 복잡한 용천수군을 형성하고 있었다. 즉 제주도 용천수는 해발고도가 높은 고산 및 중산간지역에서는 bicarbonate type이 우세한 수질조성에서 저지대 및 해안지역으로 이동되면서 non-bicarbonate type 형태의 수질로 변질되어가고 있었다.

Abstract : This study purposes to elucidate the characteristics of local water quality and the evolutionary process of the spring water have been studied with the samples from 55 selected springs, from the coast region to the Baegrogdam, a caldera lake of Halla mountain in Cheju Island. Results of hydrochemical analyses in the 55 spring water show that Gwanseumsa is polluted with high hydrogen concentration, and spring waters from Yusuamchun, Jangsumul, Dukjisemmul, Sinch'onk'nmul, Youngchunsa, Wonyangchun, Harwontongmul, Dongheamul, Seakdalsengsu, Andukkyekok, Dotmul, Konmul, Harkangmul and Jungkeummul are polluted by the pollution sources from the surface surrounding ground. Spring waters of Samyang3suwon, Meungbusa, Semurungmul, Tosanmul, Jungkeummul, Kwakgimul, Aewolhamul, Konemul and Nokgornul are also polluted from the sea water intrusion. The electrical conductivity, pH and the concentration of nitrate nitrogen and bicarbonate increase when the precipitation increases, but the concentration of sodium, chloride and sulphate decrease when the precipitation increases. The concentrations of potassium, magnesium and calcium are nearly independent of the precipitation. Quality characteristics of spring water show complicated group of spring water through piper's trilinear diagram. The high mountain region consists of groups of sodium or potassium type and bicarbonate type; the middle mountain region consists of groups of sodium or potassium type and no dominant type; the low mountain consists of groups of no dominant type and sulfate or nitrate type; the coast region consists of groups of sodium or potassium type and chloride type or no dominant type. These characteristics indicate that the spring waters are changed from bicarbonate type in the high and middle mountain regions into non-bicarbonate type in the coastal region, as the precipitated waters flow downslope.

서 론

제주도의 지표면은 주로 투수성이 큰 현무암류로 구성되어 있어 육지에 비해 강수의 지하수 함양량이 대단히 큰 지역이다. 지표면에 내린 강수는 투수성이 큰 지질층을 통하여 지하로 침

투한 후 지하수를 형성하며, 수리지질적 특성에 의해 지하수 일부가 지표로 용출되어 용천수를 형성하고 있는 것으로 알려져 있다(최, 1988).

제주도 일원에서 확인된 용천수는 약 300개에 이르며, 해안변을 따라 180여개 이상의 용천수가 분포되어 있다(농어촌진흥공사, 1989). 일반적으로 용출량이 큰 용천수는 주로 남부지역에 위치하고 있다. 도내 산재된 용천수는 일종의 지하수로서 강수가 지하하부로 내려가다가 불투수층을 만나 지표로 나오는

*제주대학교 해양학과(Department of Oceanography, Cheju National University, 1 Ara-dong, Cheju city, Korea, 690-756)

어승생, 영실, 돈네코, 성판악, 선돌 등의 상위용출수(perched spring)와 지하하부로 침투한 지하수가 수리지질학적 구배를 따라 해안변으로 유동하여 해수면과 접하게 되어 용출하는 기저용출수(basal spring)로 구분할 수 있다(농어촌진흥공사, 1973; 이, 1992).

상위용출수는 용출량이 적고 간헐적이며 그 분포상태가 규칙적이지 못하나 상위에 오염원이 적어 수질이 양호한 용출수로 이루어져 있고, 기저용출수는 해안변에 위치하면서 지상의 인위적인 오염을 직·간접적으로 받고 있으며, 해수에 의한 수질변화가 두드러진 용출수로 이루어져 있다(choi, 1990). 그리고 정량적인 추산은 불가능하나 항공원격탐사 결과 서귀포시 숲섬부근, 신촌 및 삼양 부근에서 해저용출수도 일부 알려져 있다(이, 1992). 제주도 지하수 개발사업의 큰 성과는 제주도의 생활환경과 세계적인 관광지로 발돋움하는데 획기적인 발전을 가져왔으나 일부 해안지역과 인구 밀집지역 지하수원의 과다사용으로 인한 기존 용천수의 용출량의 현저한 감소 추세와 지하수오염의 증가 및 지하수의 고염분함량등 그 이용면에서 여러가지 문제가 대두되고 있다(고 등, 1992, 1993; 김 등, 1992; 김 등, 1994; 오 등, 1995; 유 등, 1986, 1989; 윤, 1994; 윤, 1986; 최 등 1989; 한, 1991). 따라서 본 연구는 고도별로 용천수의 수질특성을 파악하기 위하여 한라산 백록담 담수호에서 해안가 용천수에 이르기까지 고도별로 시수를 채취하고, 수질분석을 실시하여 배경 수질 성분들의 고도에 따른 수질의 오염정도 및 오염경로 그리고 지역적인 수질특성을 파악하는데 목적을 두었다.

연구지역의 개요

지형 및 지질

제주도의 지형은 해발고도와 경사도에 따라 해안가에서 해발고도 약 200 m까지의 해안저지대, 200~600 m 사이의 중산간지대, 그 이상에서 한라산 정상부근까지의 한라산체 등으로 구분되며, 남북 양사면에는 대지상의 해안저지대와 중산간지대의 면적이 좁고 한라산체가 많은 부분을 차지한다(건설부, 1993). 지질은 화산분출암인 현무암류, 조면암류, 조면질안산암류와 화산분출물 및 화성쇄설퇴적암, 사구등으로 구성되어 있고 이 밖에 노두로는 나타나지 않지만 화강암이 용회암내의 포획암으로 발견되며 감람석회석현무암의 분포가 시추 조사자료에서 확인되었다. 또한 제주시 사라봉 및 여러곳에서 화강암류가 발견되는 것으로 보아 중생대 화강암류가 본 도의 기저를 이루는 것으로 추정된다(한, 1991).

수계는 제주도의 지형 및 지질특성에 따라 특이한 양상을 나타낸다. 본 도의 하천은 대체로 한라산과 동서장축을 분수령으로 하여 약 60여개의 대소하천이 남류 또는 북류하며 본도의 동·서부지역에서는 하천의 발달이 극히 빈약하다(김, 1991).

하천 두부(head water)침식의 선단표고는 1,400~1,600 m 정도이며, 하천의 수원은 거의 모두가 용천수에 기원을 두고 있다. 대부분의 하천은 유로상에 발달된 투수층과 절리구조를 통하여 유수가 지하로 침투하여 건천을 이루고 있으며, 강우시 일시적으로 유량을 갖는 간헐천의 특성을 갖고 있다. 전기에도 물이 흐르는 하천으로는 북류천중 도근천, 산지천, 한림천이 있고

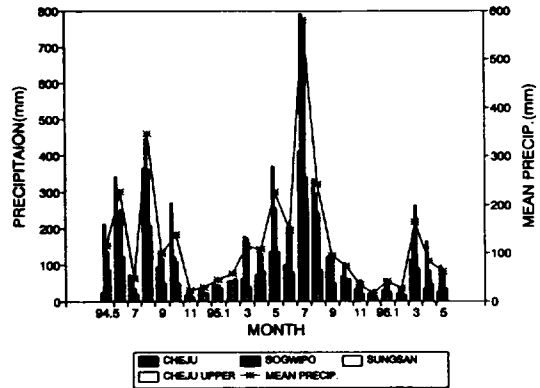


Figure 1. Monthly variation of precipitation from May, 1994 to May, 1996.

남류천으로는 중문천, 강정천, 창고천 등이 있으며 이들은 모두 하류지역 용천수에 그 수원을 두고 있다.

강수량

강수량은 용천수의 용출량에 가장 큰 영향을 주는 인자로 조사지역의 강수량은 제주, 고산 고층, 서귀포, 성산기상관측소에서 1994. 5~1996. 5월에 측정된 자료이다(기상청, 1994~1996). 조사기간동안의 강수량은 Figure 1과 같이 '95년 7월에 평균 581 mm로 최대 강수량을 보였고, '94년 6월, 8월, 95년 5월, 8월에 각각 226.4 mm, 345.3 mm, 224.7 mm, 240.7 mm로 다른 월에 비하여 많이 나타났으며, '95년 12월에 16.2 mm로 가장 적었고, '94년 11월, 12월, '95년 11월, '96년 2월에 각각 23.3 mm, 29.2 mm, 33.7 mm, 26.9 mm로 40 mm 미만이었으며, 특히 용출량 측정이 있었던 '95년 7월부터 '96년 5월사이 갈수기 기간에는 평균 29.6 mm의 강수량을 보여 조사지역 용천수의 용출량을 감소시키는데 큰 영향을 미쳤다.

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

자료 및 방법

용천수의 수질분석을 위한 시료채취는 1994년 5월부터 11월까지와 1995년 3월부터 5월까지 10개월에 걸쳐 조사하였으며, 시료 채취장소는 한라산 백록담수호부터 해안변 용천수에 이르기까지 용천수가 분포하는 내륙지역과 해안지역을 중심으로 총 55개 지역에서 채수하였다(Figure 2). 용출수의 전기비전도도(SEC)와 pH는 현장에서 채수 즉시 측정하였고, 수질분석을 위해 시료는 11 폴리에틸렌 용기에 채수하고 냉장 보관하여 실험

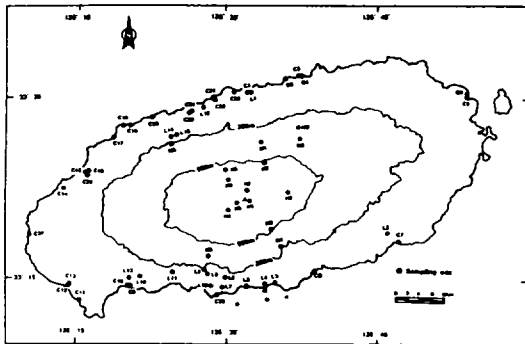


Figure 2. Study area and location of spring water sampling site.

실로 운반한 후 즉시 양이온성분(Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+})은 원자흡광광도계(PYE UNICAM SP9)로 각각 589.0 nm, 766.5 nm, 285.2 nm, 422.7 nm에서 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 衛生試驗法 注解에 준하여 분석하였다(환경처, 1991).

결과 및 고찰

용천수의 고도별 수질특성

본 연구에서는 한라산 정상울 중심으로 하여 고도에 따른 용출수의 수질특성을 규명하기 위하여 연구지역을 고산(高山)지역(600 m 이상), 중산간지역(200~600 m), 저지대지역(10~200 m), 해안지역(10 m 이하)으로 구분하여 이들 지역에서 각각 9개, 6개, 16개, 24개 등 총 55개 지점에서 시료를 채수하여 전기전도도, 수소이온농도, 나트륨, 칼륨, 마그네슘, 칼슘, 염소이온, 질산성질소, 황산이온, 중탄산이온 등 10개항목을 분석하였다(Figure 2, Table 1).

총고용물질(TDS)

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

연구지역 용천수내 TDS값은 평균 고산지역에서 35.3~66.4 ppm의 범위를 보이고, 백록담담수호인 경우 35 ppm으로 최저치를 나타냈으며, 관음사 용천수인 경우 79 ppm으로 최대치를 보였다(Table 1). 중산간지역은 평균 61.8~145.5 ppm의 범위를 보였으며, 원만사가 60 ppm으로 최저치를, 유수암천이 164 ppm으로 최대치를 나타냈고, 저지대지역은 평균 80.7~351.3 ppm의 범위로 강정수원인 66 ppm으로 최저치를, 화순 곤물이 414 ppm으로 최대치를 나타냈다. 해안지역은 평균 93.1~

3555.7 ppm의 범위로, 외도수원은 64 ppm으로 최저치를, 서느령물이 4651 ppm으로 최고치를 보였다.

전반적으로 고도가 낮아지면서 대수층에서 시간이 경과되고 오염물질이 유입되면서 TDS가 증가하는 것을 볼 수 있고 TDS값이 500 ppm을 초과하여 식수로 부적절한 지역은 총 55개 지역중 8개지역(삼양재3수원, 신촌큰물 1, 신촌큰물 2, 명법사, 서느령물, 토산물, 정금물, 고내물)으로 모두 해안지역에 위치하였다.

전기비전도도(SEC)

지하수 내에서의 SEC값은 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 SEC값은 대단히 낮으며 오염된 지하수나 해수가 침투된 지하수의 전기비전도도값은 대단히 높다(최, 1990; Barbara and Harry, 1984).

고산(高山)지역 용천수인 경우 SEC값은 평균 9.3~63.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 범위를 나타냈으며, 백록담 담수호에서가 9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 최저치를, 관음사 용천수에서가 85 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 최고치를 보였고, 관음사를 제외하고 전지역 용천수가 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이하의 낮은 값을 보였다. 중산간지역은 평균 55.5~201.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 범위로, 원만사 용천수가 53 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 최저치를, 유수암천이 234 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 최고치를 보였다. 저지대지역은 평균 88.5~558.6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 범위로, 강정수원인 경우 63 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 최저치를, 화순 곤물은 667 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 최고치를 보여, 이들 지역은 주변 육상오염원에 의해 오염이 진행되고 있음을 의미한다. 해안지역은 평균 109.9~6126.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 범위로 외도수원이 60 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 으로 최저치를, 서느령물이 8030 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 최고치를 보여 조석에 따라 해수가 기존 용출수지역으로 침입하고 있음을 의미한다(Table 1).

특히 해안지역에 위치하는 삼양재3수원지에 대한 7개월 동안 SEC 측정 결과 해수 차단막 공사가 진행되기 이전인 '94년 5월에 측정된 SEC값은 3,870 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이상이었던 것이 해수차단막이 설치된 후인 '94년 11월 이후에는 SEC값이 210 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 현저히 감소하였음을 알 수 있었다.

Figure 3은 조사지역 용천수의 전기비전도도와 강수량과의 관계를 보여주는 것이다. 조사지역 중 해안지역이 연구기간동안 SEC값이 가장 높았는데 반해 고산(高山)지역의 용천수가 전반적으로 가장 낮은 값을 보였다. 전반적으로 고산지역 및 해안지역 용천수인 경우 강수량의 정도에 따라 SEC값도 미미한 영향을 받으나 중산간지역 및 저지대지역 용천수인 경우는 강수량이 많을 때 SEC값도 증가하였고, 그 증가 경향도 고도가 낮은 지역 용천수에서가 큰 증가폭을 보였다. 이는 용천수 분포지역 지표면 오염물질들이 강수와 더불어 하향 침투하여 하류구배지역의 용천수를 오염시키고 있는 것으로 사료된다.

수소이온농도(pH)

수소이온 농도는 물이 산성, 염기성, 중성인가를 나타내는 인자로 사용되고, 수소이온(H^+)이 수산기이온(OH^-)보다 많을 때

제주도 용천수의 수리화학적 특성

Table 1. Concentration of TDS, SEC, pH, Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻-N and HCO₃⁻ in spring water

Station	Element	TDS (ppm)			SEC (μS/cm)			pH			Na ⁺ (ppm)		
		Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average
High (>600 m)	H1 Bacgrogdam	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 Wisoom	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 Öremok	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
Middle (200~600 m)	M1 Sanchundan	64	67	66.0	60	65	63.3	6.9	7.4	7.1	5.81	7.19	6.73
	M2 Myeongdoarm	77	83	80.9	82	93	88.7	7.2	7.6	7.4	6.61	6.86	6.74
	M3 Jealmul	81	89	85.2	89	103	96.2	7.5	7.8	7.6	7.84	8.51	8.19
	M4 Donneako	71	91	76.7	71	106	81.6	7.2	7.6	7.4	4.12	6.57	4.86
	M5 Wonmansa	60	64	61.8	53	59	55.5	6.6	6.8	6.7	5.19	5.51	5.32
	M6 Yusuarmchun	128	164	145.5	171	234	201.0	6.9	7.7	7.2	10.71	17.90	12.05
Low (10~200 m)	L1 Keumsansuwon	121	178	145.9	159	257	201.9	7.3	7.8	7.4	15.81	23.32	20.03
	L2 Youngchunsa	173	230	194.2	249	348	285.8	7.4	7.8	7.5	13.42	17.00	14.75
	L3 Jungbansuwon	82	109	90.8	91	137	105.8	6.7	7.4	7.0	5.87	8.07	6.79
	L4 Chunjiyön	6	110	97.2	98	140	117.2	7.4	7.7	7.5	5.95	7.35	6.64
	L5 Burhwansosmul	88	119	102.9	101	155	127.2	7.3	7.7	7.5	5.91	7.97	6.85
	L6 Woonyangchun	144	230	179.5	198	348	260.2	6.9	7.2	7.1	9.60	12.72	10.89
	L7 Kangjungsuwon	66	101	80.7	63	124	88.5	7.6	7.8	7.7	4.62	6.37	5.37
	L8 Bebhwas	111	147	128.2	142	203	170.9	7.0	7.5	7.3	9.58	15.20	10.96
	L9 Harwontongmul	259	381	340.6	399	610	540.1	6.6	7.1	6.9	19.92	22.40	21.62
	L10 Dongheumul	116	258	161.9	150	396	229.6	7.1	7.4	7.2	8.50	14.80	10.72
	L11 Saekdalsengsu	175	248	216.0	252	379	323.5	7.0	7.2	7.1	10.53	14.14	12.46
	L12 Andukkyekok	260	337	291.1	400	534	454.1	6.6	7.0	6.7	15.56	34.58	23.25
	L13 Donmul	296	414	351.3	463	667	558.6	6.7	7.4	7.0	19.34	26.80	24.04
	L14 Jangsumul	163	211	180.4	232	315	261.6	6.5	7.3	6.8	19.69	23.06	21.06
	L15 Kusumul	153	201	163.0	214	297	231.5	6.5	7.7	7.2	16.02	19.79	18.99
	L16 Dukjiscmmul	206	265	229.0	306	408	346	7.1	7.3	7.2	15.24	15.24	15.24
Coast (<10 m)	C1 Sanjimul	107	113	110.4	135	144	140.1	7.1	7.4	7.2	9.54	10.88	10.30
	C2 Samyang3suwon	151	2257	785.4	210	3870	1313.0	7.5	8.0	7.7	28.84	416.19	145.57
	C3 Sinch'onk'numul1	251	1497	701.7	384	2550	1167.5	7.5	7.9	7.7	34.78	351.60	149.30
	C4 Sinch'onk'numul2	316	1486	750.4	498	2530	1252.3	7.6	7.9	7.7	53.57	345.60	161.13
	C5 Meungbubsa	1868	2763	2245.0	3195	4750	3849.5	7.5	7.9	7.6	457.89	697.00	558.53
	C6 Semurungmul	1935	4651	3555.7	3310	8030	6126.9	7.5	7.9	7.6	484.21	1231.81	930.32
	C7 Tosanmul	318	720	531.0	501	1200	871.1	7.5	7.9	7.7	67.08	145.17	108.31
	C8 Gongchunpo	105	212	120.1	130	317	156.9	7.1	7.4	7.2	6.74	14.50	7.80
	C9 Dot mul	225	258	239.4	339	396	364.0	6.8	7.3	7.0	19.16	21.52	20.03
	C10 Harkangmul	233	273	248.7	353	423	380.6	6.7	7.4	6.9	21.84	25.14	23.09
	C11 Sineukmul	115	125	120.3	149	165	157.1	7.1	7.5	7.3	7.95	11.92	9.59
	C12 Serlimsuwon1	98	145	115.7	118	201	149.7	7.1	9.6	7.6	8.33	12.15	9.83
	C13 Serlimsuwon2	87	131	110.6	100	176	140.5	7.0	7.2	7.1	6.94	10.46	8.81
	C14 Jungkeummul	334	4127	2524.4	529	7120	4334.7	7.5	7.8	7.5	53.70	974.50	606.25
	C15 Hallimsuwon	125	151	139.1	165	210	189.6	7.7	8.2	7.8	11.48	12.27	11.92
	C16 Moondumul	146	177	161.3	202	256	228.6	7.4	7.6	7.5	11.98	13.20	12.45
	C17 Kwakgimul	186	834	379.8	271	1398	608.2	7.7	8.2	7.9	27.08	179.00	74.04
	C18 Aewolharmul	145	1469	417.7	201	2500	674.2	7.5	8.0	7.7	17.45	345.70	88.40
	C19 Konemul	121	2050	895.1	159	3510	1503.9	7.6	7.9	7.6	15.51	402.03	178.42
	C20 Nokgomul	115	556	238.4	148	915	362.8	7.5	7.8	7.6	9.96	109.80	38.18
	C21 Wcadosuwon	64	132	93.1	60	178	109.9	7.6	8.4	7.8	3.46	9.52	6.28
	C22 Kumungmul	86	108	95.4	97	136	114.2	7.3	7.6	7.4	5.75	7.13	6.42
	C23 Oleumul	125	490	238.4	165	799	362.2	7.3	7.5	7.3	8.37	86.77	34.21
	C24 Magünmul	109	149	129.3	138	207	173.3	7.2	7.6	7.4	9.60	11.22	10.46

Table 1. Continued

Station	Element	K ⁺ (ppm)			Mg ²⁺ (ppm)			Ca ²⁺ (ppm)			Cl ⁻ (ppm)		
		Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average
High (>600 m)	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 Öremok	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 Gwancumsa	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
Middle (200~ 600 m)	M1 Sanchundan	2.00	2.51	2.34	0.21	0.30	0.24	1.20	1.60	1.45	7.74	10.82	9.50
	M2 Myeongdoarm	0.50	0.70	0.61	2.36	2.74	2.53	1.85	3.39	2.77	9.65	13.00	11.52
	M3 Jealmul	2.16	2.41	2.29	1.35	1.81	1.40	1.64	3.79	2.80	6.94	11.05	9.13
	M4 Donneako	1.11	2.10	1.41	1.48	3.69	2.13	1.94	3.84	2.83	4.29	12.81	6.64
	M5 Wonmansa	1.59	1.71	1.66	0.48	0.52	0.50	1.32	1.46	1.38	4.47	6.21	5.49
	M6 Yusuarmchun	4.84	6.32	5.48	4.53	5.64	5.09	6.02	7.86	7.50	16.13	19.67	17.47
Low (10~ 200 m)	L1 Keumsansuwon	2.77	3.60	3.13	3.98	6.17	4.91	2.30	7.15	4.43	15.33	34.33	23.65
	L2 Youngchunsa	1.77	2.32	2.01	8.58	11.32	9.59	5.47	11.91	9.52	21.32	29.07	24.06
	L3 Jungbangsuwon	1.11	2.07	1.45	1.99	3.08	2.32	2.71	5.90	3.71	8.44	9.47	8.89
	L4 Chunjiyön	1.35	2.03	1.89	1.85	3.36	2.56	3.59	5.98	4.59	7.12	10.84	10.10
	L5 Burhwansosmul	1.14	2.14	1.91	2.21	4.31	3.02	3.86	6.62	5.06	7.43	13.72	10.48
	L6 Woonyangchun	4.16	5.71	4.88	6.54	11.22	8.40	7.30	14.48	10.25	14.46	28.36	20.21
	L7 Kangjungsuwon	1.27	1.71	1.46	1.18	2.82	1.89	2.06	4.83	3.12	6.23	8.69	6.96
	L8 Behhwasa	1.01	6.15	2.89	3.14	10.26	4.67	5.88	10.19	7.92	10.62	13.36	12.02
	L9 Harwontongmul	2.26	2.92	2.71	17.44	28.25	21.89	24.04	52.80	36.96	32.96	50.01	43.38
	L10 Dongheumul	1.10	2.40	1.86	4.11	14.96	7.96	6.97	21.60	11.66	10.05	32.61	17.29
	L11 Saekdalsengsu	1.16	1.62	1.34	11.87	14.92	13.50	17.81	20.69	19.34	16.59	27.78	22.60
	L12 Andukkyekok	6.90	30.21	16.24	12.82	26.92	18.60	24.02	32.44	27.75	33.08	48.51	39.32
	L13 Donmul	5.43	12.15	9.05	11.40	18.92	14.75	15.08	38.56	26.94	18.08	55.30	35.82
	L14 Jangsumul	2.01	2.69	2.27	4.63	7.62	5.68	2.68	7.83	6.16	23.85	47.10	31.73
	L15 Kusumul	2.26	3.04	2.88	3.67	8.20	4.62	6.40	7.00	6.60	26.02	49.43	30.96
	L16 Dukjiseummul	2.56	2.56	2.56	10.70	10.70	10.70	12.34	12.34	12.34	29.07	29.07	29.07
Coast (<10m)	C1 Sanjimul	2.39	3.34	2.80	2.75	3.37	3.02	4.58	6.02	5.40	10.83	16.18	13.35
	C2 Samyang3suwon	3.40	25.80	10.20	3.99	87.80	28.96	1.60	28.60	9.87	23.59	1203.93	379.29
	C3 Sinch'onk'nmul1	3.44	15.58	7.83	9.89	46.20	23.63	6.80	36.82	17.45	62.18	703.33	304.86
	C4 Sinch'onk'nmul2	4.55	16.24	9.04	10.20	49.80	26.64	6.15	15.19	9.86	92.97	640.00	342.97
	C5 Meungbubsa	20.95	26.71	24.23	61.65	101.50	78.14	21.33	25.01	23.46	864.64	1740.74	1215.45
	C6 Semurungmul	20.80	47.43	35.91	66.40	174.08	130.94	20.00	65.11	49.53	1027.34	2420.09	1904.25
	C7 Tosanmul	4.58	6.64	5.67	8.55	27.60	18.61	5.39	19.87	13.04	117.18	309.52	218.75
	C8 Gongchunpo	0.13	13.22	2.11	3.42	5.85	3.77	5.84	11.05	6.59	8.23	53.78	14.71
	C9 Dot mul	2.01	4.70	3.09	9.62	13.42	12.43	13.10	20.98	17.03	30.61	32.02	31.23
	C10 Harkangmul	3.92	5.28	4.99	6.04	14.30	9.58	13.20	19.80	17.95	32.13	50.42	38.84
	C11 Sineukmul	1.79	3.93	2.83	3.06	4.72	3.79	3.20	5.63	4.49	11.65	19.31	13.93
	C12 Serlimsuwon1	1.50	3.37	2.28	2.51	5.17	3.66	2.47	6.26	3.96	7.65	22.79	13.25
	C13 Serlimsuwon2	1.94	3.81	2.76	1.99	4.41	3.35	0.67	5.87	3.57	6.48	19.46	13.07
	C14 Jungkeummul	5.10	66.50	33.25	12.90	157.50	95.28	9.40	59.00	38.68	90.76	2136.84	1291.61
	C15 Hallimsuwon	3.17	3.72	3.50	4.79	5.78	5.33	4.37	5.75	5.09	13.55	17.37	15.64
	C16 Moondumul	2.77	3.46	3.22	5.96	9.22	7.56	2.10	8.06	5.12	6.93	24.30	15.85
	C17 Kwakgimul	3.77	9.10	5.20	5.29	19.00	9.62	4.37	7.80	5.37	57.17	351.66	147.51
	C18 Aewolharmul	3.43	20.20	6.38	4.18	35.90	10.15	3.82	12.70	5.69	27.05	680.64	166.36
	C19 Konemul	2.72	27.46	12.75	2.74	47.12	20.85	2.30	23.54	10.69	18.94	975.55	373.52
	C20 Nokgomul	2.39	8.55	4.13	3.49	14.80	6.77	4.24	8.15	5.37	12.86	226.88	73.52
C21 Weadosuwon	0.56	2.62	1.54	1.35	4.61	2.66	1.77	6.65	3.82	5.32	13.02	8.98	
C22 Kumungmul	1.25	2.07	1.64	2.21	3.37	2.76	2.50	4.78	3.80	7.83	10.12	9.00	
C23 Oleamul	2.28	6.10	3.68	4.93	14.87	7.99	6.16	8.66	7.14	11.88	186.58	68.65	
C24 Magünmul	2.14	2.60	2.35	3.40	6.37	4.88	1.10	8.59	4.97	13.36	20.90	17.27	

제주도 용천수의 수리화학적 특성

Table 1. Continued

Station	Element	SO ₄ ²⁻ (ppm)			NO ₃ -N (ppm)			HCO ₃ ⁻ (ppm)		
		Min	Max	Average	Min	Max	Average	Min	Max	Average
High (>600 m)	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 Wisorm	0.00	0.30	0.10	0.00	0.09	0.04	4.44	4.57	4.49
	H4 Yunguil	0.00	2.32	0.41	0.16	0.30	0.24	15.26	18.69	17.53
	H5 Ōremok	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
Middle (200~ 600 m)	M1 Sanchundan	0.00	0.00	0.00	0.25	0.40	0.33	21.32	27.63	25.05
	M2 Myeongdoarm	0.30	1.89	1.24	1.42	2.90	2.36	21.05	29.48	25.98
	M3 Jealmul	1.12	6.66	2.85	0.62	1.00	0.86	31.84	39.74	36.45
	M4 Donneako	0.97	1.89	1.60	3.11	7.23	4.31	13.42	22.90	19.27
	M5 Wonmansa	0.00	1.90	0.43	0.09	0.12	0.10	7.90	23.95	19.42
	M6 Yusuarmchun	3.76	5.49	4.43	4.49	10.95	7.65	28.95	44.48	37.63
Low (10~ 200 m)	L1 Keumsansuwon	1.26	11.47	5.94	4.32	6.47	5.26	33.95	46.85	41.32
	L2 Youngchunsa	0.39	2.32	1.56	7.75	24.78	14.70	38.16	54.48	42.45
	L3 Jungbangsuwon	1.02	3.78	3.04	2.36	8.36	4.09	19.74	31.58	26.05
	L4 Chunjyon	1.40	2.69	2.06	2.08	7.29	4.80	20.00	37.63	25.95
	L5 Burhwansosmul	0.12	4.05	1.63	3.93	9.55	6.23	22.37	41.06	30.37
	L6 Woonyangchun	2.32	5.35	3.31	14.15	26.13	17.95	9.21	35.27	23.92
	L7 Kangjungsuwon	1.31	3.62	2.41	2.13	5.41	3.42	18.95	29.74	24.82
	L8 Bebhwas	1.46	4.96	3.02	7.97	8.18	8.06	30.53	47.64	37.69
	L9 Harwontongmul	0.30	1.89	1.10	13.19	40.83	31.67	11.05	36.58	24.50
	L10 Dongheamul	0.30	7.51	3.06	6.33	28.28	13.51	26.05	41.06	35.21
	L11 Saekdalsengsu	2.90	7.26	5.66	15.87	24.53	20.74	26.32	42.11	33.09
	L12 Andukkyekok	5.35	8.23	6.48	25.40	34.10	29.21	23.95	39.74	34.36
	L13 Donmul	7.68	23.07	14.10	28.45	44.18	33.65	30.27	43.42	37.23
	L14 Jangsumul	2.75	5.06	3.46	5.66	17.16	9.23	28.95	61.06	49.26
	L15 Kusimul	4.19	6.93	4.93	4.78	14.45	7.78	28.42	56.58	48.32
	L16 Dukjsemmul	8.05	9.07	8.40	15.64	18.42	16.82	36.84	40.79	38.95
Coast (<10 m)	C1 Sanjimul	3.47	6.01	4.77	2.37	4.61	3.13	32.11	43.95	38.29
	C2 Samyang3suwon	1.48	230.56	70.52	3.32	6.41	5.00	38.69	44.74	40.57
	C3 Sinch'onk'nmul1	12.12	130.85	60.84	6.60	10.11	8.10	36.06	48.42	41.00
	C4 Sinch'onk'nmul2	12.44	151.31	62.54	3.81	8.41	6.32	35.27	45.00	40.71
	C5 Meungbubsa	43.96	302.61	158.59	0.44	1.07	0.72	45.79	52.64	49.19
	C6 Sernurungmul	152.75	491.65	355.02	0.54	1.73	1.18	39.48	60.27	51.40
	C7 Tosanmul	19.09	45.85	33.22	3.08	6.97	5.20	42.11	48.42	45.08
	C8 Gongchunpo	0.86	2.73	1.13	5.79	9.36	7.24	26.05	29.21	27.58
	C9 Dot mul	3.47	7.80	6.33	18.70	30.18	22.48	34.48	43.95	39.88
	C10 Harkangmul	7.65	12.41	10.73	3.49	22.90	15.61	33.42	42.63	38.97
	C11 Sineukmul	2.32	7.25	4.75	3.85	6.64	5.13	30.79	42.37	36.53
	C12 Serlimsuwon1	2.43	11.83	6.53	1.80	7.46	4.40	32.11	42.90	36.25
	C13 Serlimsuwon2	3.50	6.23	4.86	2.49	6.09	4.36	29.21	39.74	34.81
	C14 Jungkeummul	28.40	304.05	177.43	2.30	10.67	7.80	50.00	58.16	54.36
	C15 Hallimsuwon	3.55	4.92	4.17	4.83	9.09	5.88	45.27	52.11	49.95
	C16 Moondumul	2.02	6.21	4.22	5.88	8.96	7.54	47.64	52.90	49.69
	C17 Kwakgimul	6.79	52.75	21.42	2.07	4.16	2.94	44.74	55.00	49.12
	C18 Aewolharmul	5.20	72.49	20.75	2.02	5.10	3.76	32.90	50.79	44.72
	C19 Konemul	5.06	129.82	55.80	0.57	1.89	1.27	44.48	45.79	45.16
	C20 Nokgomul	4.05	34.16	13.53	4.35	4.65	4.52	27.63	39.21	36.20
	C21 Weadosuwon	0.00	2.50	1.11	1.13	7.62	3.68	13.16	34.21	26.84
	C22 Kumungmul	2.18	4.96	3.43	2.46	6.00	4.20	26.32	30.53	27.95
	C23 Oleamul	2.90	25.78	10.53	2.80	6.53	4.29	39.74	56.85	46.19
	C24 Magūnmul	2.81	7.46	5.18	2.98	7.29	5.24	31.32	47.37	41.16

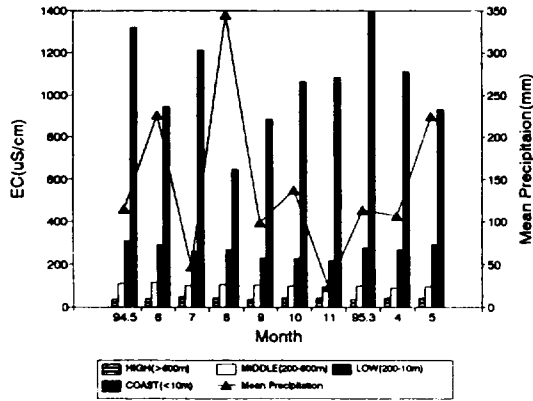


Figure 3. Monthly variation of electrical conductivity cause to precipitation.

는 산성작용을 나타내어 금속물질용 부식시키는 역할을 한다 (최, 1990; Acker and Bricher, 1992). 연구지역 용천수의 pH값은 고산지역에서 평균 5.8~9.3의 범위로 백록담 담수가 5.8로 최저치를, 관음사물이 10.1로 최고치를 보여 SEC값의 변화와 유사한 경향을 보였다. 중산간지역은 평균 6.7~7.6으로 원만사가 6.6으로 최저치를, 절물이 7.8로 최고치를 보였고, 저지대지역은 평균 6.7~7.7로 장수물과 구시물이 6.6으로 최저치를, 금산수원과 강정수원이 7.8로 최고치를 보여 하류지역에 분포하는 용천수에서 대체로 pH값이 높았으며, 해안지역은 평균 6.9~7.9로 하강물이 6.7로 최저치를, 서림수원이 9.6으로 최고치를 보였다(Table 1). 최(1990)에 의하면 대부분의 지하수의 pH는 4에서 9 사이에 있고 먹는물 수질기준은 5.6~8.2이며, 습지지역에서의 하천수는 5~6.5이고 건조지역에서는 7~8이며 산성도양수는 4보다 적고, 바닷물의 pH는 8.1에서 8.3에 속한다 하였는데, 관음사 용천수는 '94년 7월 8.7를 제외하고는 pH 변화폭이 9.1~10.1, 해안변에 위치하는 서림수원은 '95년 6월에 9.6, 한림수원은 '94년 7~9월에 8.1, 외도수원은 '94년 8월에 8.4등 pH값이 6월부터 9월사이 8.1을 초과하는등 비정상적으로 비교적 강한 알칼리성을 띠는데, 이들 지역의 공통성은 용천수 유출이 차단된 저수지들로써 물의 순환이 미미하기 때문으로 사료된다. 한(1982)에 의하면 용천수 주변 식물들의 광합성작용, 낙엽의 침전에 따른 부패 등의 요인에 의해서도 pH가 높아진다 하였는데, 본 지역도 상기 요인인 것으로 판단된다.

나트륨(Na⁺)

나트륨은 수용성으로서 토양이나 암석내에서 빠져나와 용해되는데, 이들은 정호(井戶)에 공매작용(plugging)과 피각현상을 일으키는 것으로 알려져 있다. 또한 NaHCO₃나 Na₂CO₃를 다량 포함한 지하수는 pH가 약 9이상에 이른다(한, 1982). 우리나라 먹는물 수질기준으로는 설정되어 있지 않으나 WHO, 일본 등 대부분 나라의 허용기준치는 150~200 ppm 이하로 정하고 있다(오 등, 1995). 연구지역 용천수의 나트륨 함량은 고산

(高山)지역인 경우 평균 0.54~4.46 ppm의 범위로 백록담담수에서 0.53 ppm으로 최저치를, 관음사물이 5.08 ppm으로 최고치를 보였다. 중산간 지역은 평균 4.86~12.05 ppm의 범위로 돈네코 수원이 4.12 ppm으로 최저치를, 유수암천이 17.90 ppm으로 최고치를 보였고, 저지대지역은 평균 5.37~24.04 ppm의 범위로 강정수원이 4.62 ppm으로 최저치를, 돌물이 26.80 ppm으로 최고치를 보였다. 해안지역은 평균 6.28~930.32 ppm으로 외도수원이 3.46 ppm으로 최저치를, 서느령물이 1231.81 ppm으로 최고치를 보였다(Table 1).

따라서 고산지역, 중산간지역 및 저지대지역 용천수인 경우 나트륨 함량이 최고 24.04 ppm 이하를 나타내고 있어 양호한 수질을 보였으나, 해안지역 용천수 중 삼양제3수원, 신촌큰물 1, 2, 토산물, 고내물인 경우는 100 ppm을 넘고, 명법사(558.83 ppm), 서느령물(930.32 ppm), 정금물(606.25 ppm)의 경우는 허용기준치를 상당히 초과된 용천수로 나타났으며, 이들 중 북서부지역에 위치하는 정금물과 고내물을 제외하고는 해수침입이 되고 있는 제주도 동부지역에 위치하고 있다.

Figure 4는 조사지역 용천수의 강수량과 나트륨이온과의 관계를 보여주는 것이다. 전 조사기간에 해안지역 용천수에서 나트륨이온 함량이 높게 나타났고, '95년 3월에 최저치를 '94년 8월에 최저치를 보였다. 즉 고도가 낮아지는 용천수에서 나트륨 농도가 점차 증가하다 해안지역 용천수에서 급격히 증가하는 경향을 보였고 대체로 강수량이 많았을 때 활발한 화학작용으로 인한 나트륨 농도는 낮아지는 경향을 보여준다.

Figure 5는 총고용물질(TDS)에서 나트륨이온이 차지하는 정도를 나타내는 것으로서 해수의 영향에 의해 높은 나트륨 함량을 갖는 시료와 낮은 함량을 갖는 시료가 명확히 구분되는 것을 볼 수 있다. 조사지역 용천수의 나트륨 함량은 광지물(C17), 에월하물(C18), 토산물(C7), 삼양제3수원(C2), 신촌큰물1(C3), 신촌큰물2(C4), 고내물(C19), 명법사(C5), 정금물(C14), 서느령물(C6)의 순으로 증가하고 있어 이들 용천수는 모두가 해수의 영향을 받는 지역으로 TDS의 상당부분을 차지하고 있음을 알 수 있다. 최(1990)에 의하면 나트륨이온

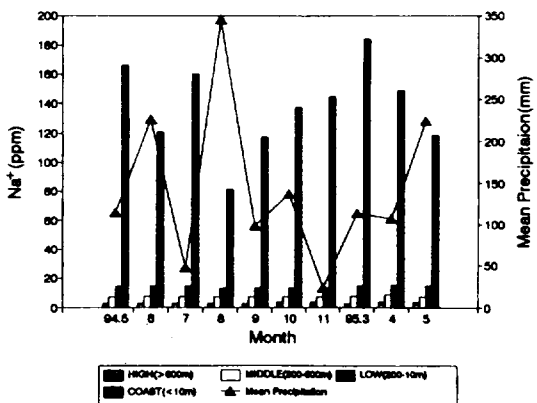


Figure 4. Monthly variation of sodium concentration cause to precipitation.

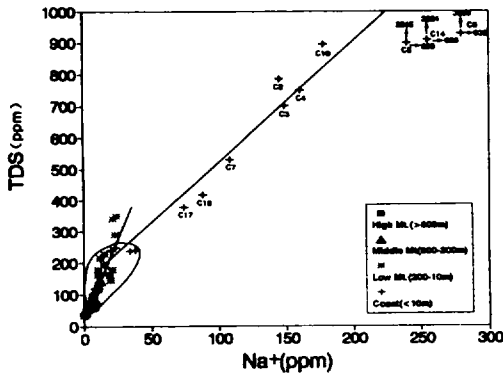


Figure 5. Graph of total dissolved solids (TDS) against sodium content.

이 20 ppm 이상을 포함하는 시료들은 지하수가 해수와 혼합되거나 육상 오·폐수에 의해 오염되었다 하였는데, 본 연구지역 중 저지대의 용천수인 하원통물, 안덕계곡, 돌물, 장수물은 나트륨 함유량이 20 ppm을 초과하고 있어 이들 용천수는 해수에 의한 오염보다는 육상 오·폐수에 의해 오염되고 있는 것으로 사료된다.

칼륨(K⁺)

칼륨은 물속에 용존된 무기물질의 일종으로 우리나라 먹는물 수질기준으로는 설정되어 있지 않으나 EEC, 영국, 프랑스 등의 대부분 나라에서 수질기준 12 ppm 이하로 정하고 있으며(오동, 1995), 정상적인 지하수는 일반적으로 5 ppm 미만의 값을 갖고 있으나 그 이상의 값이 나오면 일단 오염의 가능성, 즉 해수의 침입에 의한 것이나 농약이나 폐기물에 의해 오염된 것으로 보고 있다(최와 김, 1989).

연구지역 용천수의 칼륨 함량은 고산(高山)지역에서 평균 0.13~1.43 ppm의 범위로 남국선원이 0.03 ppm으로 최저치를, 관음사물이 1.64 ppm으로 최고치를 보이나 이들 모두 기준치를 훨씬 못미치고 있어 양호한 수질을 보였다.

중산간지역인 경우 평균 0.61~5.48 ppm의 범위로 이들중 명도암물이 0.50 ppm으로 최저치를, 유수암천이 6.32 ppm으로 최고치를 보여 유수암천을 제외하고는 모두가 양호한 수질을 보였다. 유수암천은 '94년 5월과 8월을 제외하고 전 측정기간동안 5 ppm 이상 보여 상부지역의 축산 및 양돈·양계장에서 배출되는 폐수 및 주변마을의 생활하수 등에 의해 오염이 진행되고 있음을 알 수 있었다. 저지대지역인 경우 그 변화범위가 평균 1.34~16.24 ppm으로 이 중 법화사 용천수가 1.01 ppm으로 최저치를, 안덕계곡 용천수가 30.21 ppm으로 최고치를 보였다. 조사지역 중 기준치를 항상 초과한 지역은 안덕계곡(16.24 ppm), 돌물(9.05 ppm) 두 지역 뿐이었으나, 운량천과 법화사 물인 경우도 5 ppm 이상일 때가 각각 5월과 6월에 여러 번 검출되어 이들 지역도 주변 오 폐수로부터 오염이 진행중인 곳으로 사료된다. 해안지역인 경우 평균 1.54~35.91 ppm의 범위를 보여, 이들 중 공천포가 0.13 ppm으로 최저치를, 정금

물이 66.50 ppm으로 최고치를 보였다. 5 ppm 이상인 지역은 삼양제3수원지(10.20 ppm), 신촌큰물1(7.83 ppm), 신촌큰물2(9.04 ppm), 명법사물(24.23ppm), 서느렁물(35.91 ppm), 토산물(5.67 ppm), 정금물(33.25 ppm), 광지물(5.20 ppm), 애월하물(6.38 ppm), 고내물(12.75 ppm) 등 10개지역으로 해안지역의 용천수는 대부분 해수에 의해 오염된 지역임이 확인되었다. 그러나 녹고물과 오래물은 5월을 제외하고는 칼륨 함유량이 각각 4.13 ppm, 3.68 ppm으로 기준치 이하를 보였다 (Table 1). 따라서 조사지역 용천수 중 5 ppm를 초과한 지역의 비율을 보면 고산지역은 기준치를 초과한 용천수는 없었고, 중산간지역은 1지역(1.8%), 저지대지역은 4지역(7.3%), 해안지역은 13지역(23.6%)으로 전체 55개 조사지역중 18지역(32.7%)으로 용천수가 각종 오·폐수 등에 의해 오염이 되었거나 진행중임을 알 수 있었고 이런 현상은 고도가 낮은 지역에 위치하는 용천수일수록 오염정도가 많이 진행되었음을 알 수 있었다.

마그네슘(Mg²⁺) 및 칼슘(Ca²⁺)

최와 김(1989)은 정상적인 지하수는 Ca>Mg의 관계를 나타내며, Mg>Ca의 관계를 보이면 일단 해수침입의 가능성을 생각할 수 있다 하였다.

마그네슘은 고산(高山)지역 용천수에서 평균 0.26~0.87 ppm의 범위로 성판악이 0.12 ppm으로 최저치를, 영실이 1.33 ppm으로 최고치를 보였고, 칼슘은 평균 0.26~3.12 ppm의 범위로 성판악이 0.04 ppm으로 최저치를, 관음사가 5.37 ppm으로 최고치를 보여 백록담 담수를 제외하고 정상적인 지하수 형태인 Ca>Mg의 관계를 보였다. 중산간지역은 마그네슘이 평균 0.24~5.09 ppm의 범위로 산천단이 0.21 ppm으로 최저치를, 유수암천이 5.64 ppm으로 최고치를 보였고, 칼슘은 평균 1.38~7.50 ppm으로 산천단이 1.20 ppm으로 최저치를, 유수암천이 7.86 ppm으로 최고치를 보여, 전지역 용천수가 모두 정상적인 지하수 형태인 Ca>Mg의 관계를 나타냈다. 저지대지역은 마그네슘이 평균 1.89~21.89 ppm으로 강정수원이 1.18 ppm으로 최저치를, 하원통물이 28.25 ppm으로 최고치를 보였고, 칼슘은 평균 3.12~36.96 ppm으로 강정수원이 2.06 ppm으로 최저치를, 하원통물이 52.80 ppm으로 최고치를 보여, 금산수원과 영천사를 제외하고 정상적인 지하수 형태를 나타냈다. 해안지역은 마그네슘이 평균 2.66~130.94 ppm으로 외도수원이 1.35 ppm으로 최저치를, 서느렁물이 174.08 ppm으로 최고치를 보였고, 칼슘은 평균 3.80~49.53 ppm으로 막은물이 1.10 ppm으로 최저치를, 서느렁물이 65.11 ppm으로 최고치를 보여 산지물, 공천포, 시냇물, 서림수원1, 서림수원2, 외도수원, 구멍물, 막은물만이 정상적인 지하수 형태를 보이고, 나머지 16개지역은 Ca<Mg 관계를 보이고 있다(Table 1).

Figure 6은 총고용물질(TDS)과 칼슘이온 사이의 관계를 나타낸 것으로서 칼슘이온은 해수영향권인 해안지역과 저지대지역이 서로 다른 경향을 보이고 있다. 즉 해수영향권인 해안지역에서 TDS와 칼슘과의 관계 경사도는 급한 반면 육상오염권인 저지대 지역은 상대적으로 경사도가 완만한 경향을 보여주는 것이 특징이다.

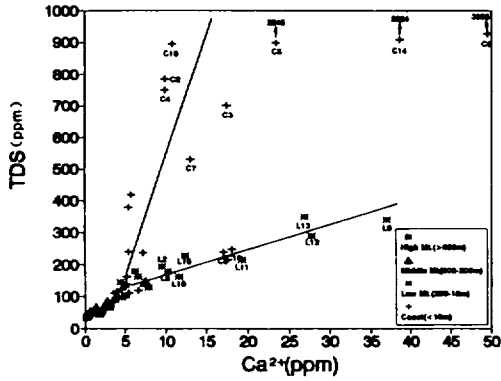


Figure 6. Graph of total dissolved solids (TDS) against calcium content.

염소이온(Cl⁻) 및 황산이온(SO₄²⁻)

일반적으로 자연의 지하수에는 보통 10 ppm 내외의 Cl을 함유하고 있는 것이 통상적이고 해수에서는 평균 19,000 ppm의 높은 값을 갖는다(Garrels and Mackenzie, 1967). 본 도 동부 신양 앞바다에서의 해수중의 Cl값은 19,250 ppm으로 상기와 거의 동일한 값을 갖고 있다(최, 1990). 또한 본 도 강수에서의 Cl값은 3.4 ppm에서 8.8 ppm의 범위를 보이나 보통의 강수는 8 ppm 내외인 것으로 알려졌다(최와 김, 1989).

염소이온은 고산(高山)지역 용천수에서 평균 1.31~5.20 ppm의 범위를 나타냈으며, 이들 중 백록담 담수가 1.29 ppm으로 최저치를, 관음사물이 7.32 ppm으로 최고치를 보이며, 백록담 담수와 뒷세오름 용천수인 경우 염소 함유량이 2.7 ppm 이하로 분석되어 최와 김(1989)의 연구결과와는 다소 차이를 보이나 수질이 극히 양호한 특성을 보여준다. 황산이온은 고산지역에서 평균 0.00~1.83 ppm의 범위를 나타냈으며, 성판악 용천수를 포함한 대부분 불검출되었고 관음사물에서 2.57 ppm으로 최저치였고, 절물이 6.66 ppm으로 최고치를 보였다. 저지대 지역 용천수에서 염소이온은 평균 6.96~43.38 ppm의 범위를 나타냈으며, 이들 중 강정수원이 6.23 ppm으로 최저치를, 곤물이 55.30 ppm으로 최고치를 보였다. 용천수내 황산이온의 평균 함유량은 1.10~14.10 ppm을 나타냈으며, 이들 중 법사용천수가 0.12 ppm으로 최저치를, 곤물이 23.07 ppm으로 최고치를 보였다. 해안지역 용천수인 경우 염소이온이 평균 8.98~1904.25 ppm의 범위를 나타냈으며, 이들 중 외도수원이 5.32 ppm으로 최저치를, 서느령물이 2420.09 ppm으로 최고치를 보였다. 용천수내 황산이온의 평균 함유범위는 0.00~355.02 ppm을 나타냈으며, 이들 중 외도수원에서 불검출되었고, 서느령물이 491.65 ppm으로 최고치를 보였다. 조사지역 용천수 중 먹는물 수질기준인 염소이온이 150 ppm을 초과한 지역은 삼양제3수원, 신촌큰물 1, 신촌큰물 2, 서느령물, 애월하물, 명법사 용천수, 정금물, 토산물, 고내물, 광지물, 녹고물, 오래물등 12곳으로 이들 용천수는 모두 해안지역에 위치하고 있으며 이 지역에서 황산이온도 역시 높은수치를 보여 이지역 용천수들은 해수침입으로 인한 오염이 진행되고 있음을 알 수 있었다(Table 1).

Figure 7은 조사지역 용천수의 총고용물질(TDS)에서 염소이온이 차지하는 정도를 나타내는 것이다. 용천수내의 염소이온인 경우 전술한 나트륨이온과 유사한 경향을 보여 해수침입 영향에 의한 높은 염소 함량을 갖는 용천수와 낮은 함량을 갖는 용천수가 명확히 구분되는 것을 볼 수 있다. 용천수에 Cl⁻ 함유량이 150 ppm을 초과하는 지역은 광지물(C17), 애월하물(C18), 토산물(C7), 신촌큰물1(C3), 신촌큰물2(C4), 삼양제3수원(C2), 고내물(C19), 명법사(C5), 정금물(C14), 서느령물(C6) 등 10여 곳으로 이들은 모두 만조시 해수와 접하다 간조시 용출되는 해안 용천수들로서 이들은 해수침입에 영향을 받는 용천수이다.

질산성질소(NO₃⁻-N)

지하수속에 질산성질소가 다량으로 들어 있을 때에는 첫째로 오염된 지표수가 유입하여 지하수가 오염되었거나 또는 지표의 토양속에 농축되었던 질산염이 강수와 함께 지하 대수층으로 침투하여 지하수를 오염시키는 것으로 알려졌다(윤, 1994; 한, 1982). 즉 일반적으로 NO₃⁻가 지하수에서 높게 검출되는 원인으로서는 축산시설의 분뇨 및 오·폐수, 유기질 비료 및 퇴비, 정화조의 누출, 질소질 화학비료, 생활하수 및 부패된 음식물 등으로 부터 생겨나는 유기질 질소가 강수와 함께 지하로 침투됨으로써 비롯되는 것으로 알려져 있다. 이러한 오염원으로 부터 발생한 유기질소의 변환과 운명은 지하로 침투하는 질소의 형태와 다양한 생물학적 변환에 따라 좌우되는데 대체로 유기질소는 NH₄⁺ → NO₂⁻ → NO₃⁻ 순의 변환과정을 밟는다. 따라서 지하수 중의 NO₃⁻ 농도는 오염원으로부터 거리가 멀어질수록 점진적으로 증가하는 현상을 나타내어 하류구배의 지하수에서 높은 농도의 NO₃⁻가 검출되게 된다(Aller et al., 1987; Junge, 1963).

고산지구 용천수인 경우 함유량이 평균 0.00~0.43 ppm의 범위를 나타냈으나, 백록담 담수, 어리목 용천수, 뒷세오름 용천수 등에서 불검출 되었고, 성판악이 0.80 ppm으로 최고치를 보이나 이곳 용천수 모두가 양호한 수질을 형성하고 있다. 중산간지역은 평균 0.10~7.65 ppm으로 원만사가 0.09 ppm으로 최저치

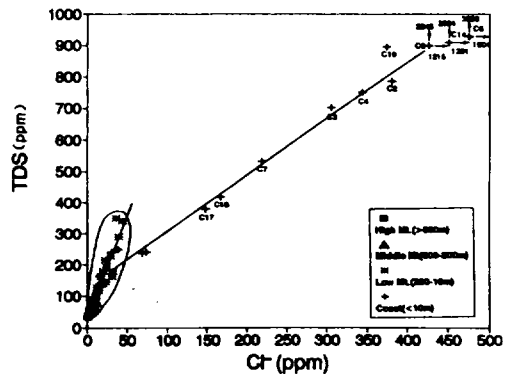


Figure 7. Graph of total dissolved solids (TDS) against chloride content.

를, 유수암천이 10.95 ppm으로 최고치를 보여 이곳 역시 양호한 수질을 나타냈으나 유수암천인 경우 상류구배지역에 대단위 양계 및 축산단지 및 마을등 오염원이 있는 관계로 '94년 5월과 '95년 6월에 먹는물 수질기준치를 초과하여 식수로 사용할 수 없을 정도로 오염된 경우도 있었다. 돈네코수원도 상류구배지역에 쓰레기매립장 및 공동묘지 등이 있는 관계로 오염이 진행중에 있었다. 저지대지역은 그 함량범위가 평균 3.42~33.65 ppm으로 이들 중 천지연물이 2.08 ppm으로 최저치를, 화순 끈물이 44.18 ppm으로 최고치를 보였다. 이곳 16개 조사지역 중 강정수원지, 천지연물, 정방용천수 등 3개지역을 제외하고 거의 전 용천수가 질산성질소 함유량이 5 ppm 이상을 나타내어 이곳 용천수들도 오염이 진행중임을 알 수 있었고, 이들중 먹는물수질기준 10 ppm을 초과한 용천수는 영천사 용천수(24.78 ppm), 운량천(26.13 ppm), 하원통물(40.83 ppm), 동해물(28.28 ppm), 색달생수(24.53 ppm), 안덕계곡 용천수(34.10 ppm), 화순끈물(44.18 ppm) 등 9개지역이었다. 해안지역인 경우 그 함량치가 평균 0.72~22.48 ppm을 나타냈으며, 명법사 용천수가 0.44 ppm으로 최저치를, 화순 끈물이 30.18 ppm으로 최고치를 보였다. 이들 중 질산성질소가 10 ppm을 초과한 지역은 신촌큰물 1(10.11 ppm), 돛물(30.18 ppm), 하강물(22.90 ppm), 정금물(10.67 ppm) 등 24개 지역중 4지역에 불과했다. 특히 해수영향이 크게 미치는 지역의 용천수에서 질산성질소 함유량이 상대적으로 농도가 낮았으나 예외적으로 신촌큰물 1, 2와 정금물은 해수의 영향을 상당히 받으면서도 질산성질소가 높게 검출되었는데 이들 용천수는 천층에서 용출하는 용천수로서 지표의 많은 양의 육상 오염물질들이 공급되고 있음을 의미한다(Table 1).

Figure 8은 조사지역 용천수의 강수량과 질산성질소와의 관계를 보여주는 것이다. 전 조사기간에 걸쳐 저지대의 용천수에서 그 함유량이 낮게 나타났으며 94년 5월에 최대값을 11월에 최소값을 보였다. Johnson 등(1976)에 의하면 농경지인 경우 일반적으로 여름철에 토양중의 질산성질소가 작물에 많이 이용되기 때문에 식물들이 소비하는 관계로 지하수중에 여름철

에 그 농도가 낮지만 작물들이 자라지 않는 겨울철에는 토양층에 높은 농도의 질산성질소가 함유하는 경향이 있다고 하였다. Figure 8에서와 같이 연구지역 용천수들은 강수량이 적은 가을철보다 강수량이 많은 늦봄에서 여름철에 질산성질소의 농도가 더욱 높은 농도를 보이는데 이는 제주도 저지대 대부분의 지역이 많은 감귤원과 경작지가 밀집되어 있어 2월 이후 사용한 비료와 기타 퇴비등이 강우와 함께 지하로 유입되어 저지대 지하수를 오염시키고 있는 것으로 사료된다. 또한 강수량과 질산성질소 농도사이의 관계를 보면 고산지역과 중산간지역의 용천수인 경우는 강수량에 미미한 영향을 보이나 저지대지역 용천수인 경우는 강수량이 증가하면 질산성질소 농도도 증가하는 경향을 보여 상류구배구간의 오염원으로부터 만들어진 암모니아성질소가 강수와 함께 지하로 침투하여 시간이 지남에 따라 질산성질소로 되어 하류지역의 용천수에서 높게 나타나는 특성을 보였다.

Figure 9는 조사지역 용천수의 총용물질(TDS)에서 질산성질소 이온이 차지하는 정도를 나타내는 것으로서 질산성질소 농도가 해안지역과 저지대지역의 용천수인 경우 서로 다른 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 특히 저지대 용천수인 경우 낮은 총용물질량 중 질산성질소가 차지하는 양이 상당히 많아 저지대용천수는 총용물질을 질산성질소가 대부분 차지하고 있음을 알 수 있다. 먹는물 수질기준(10 ppm)을 초과한 지역은 저지대지역인 경우 동해물(L10), 영천사(L2), 덕지샘물(L16), 운량천(L6), 색달생수(L11), 안덕계곡(L12), 하원통물(L9), 끈물(L13) 등 총 8곳 이었고, 해안지역인 경우 하강물(C10), 돛물(C9) 등 2곳 이었으며 또한 수질오염이 급속히 진행중인 곳은 총 8곳으로 중산간지구가 1곳(유수암천(M6)), 저지대지구가 3곳(구시물(L15), 장수물(L14), 법화사(L8)), 해안지구가 4곳(신촌큰물 1(C3), 공천포(C8), 정금물(C14), 문두물(C16))이었다. 조사지역 55개지역중 5 ppm 이상 검출된 지역은 36개 지역으로 전체의 65%의 용천수가 오염이 진행중이거나 오염된 지역으로 밝혀졌다.

중탄산이온(HCO³⁻)

Choi(1990)에 의하면 자연의 지하수는 TDS와 HCO₃와의

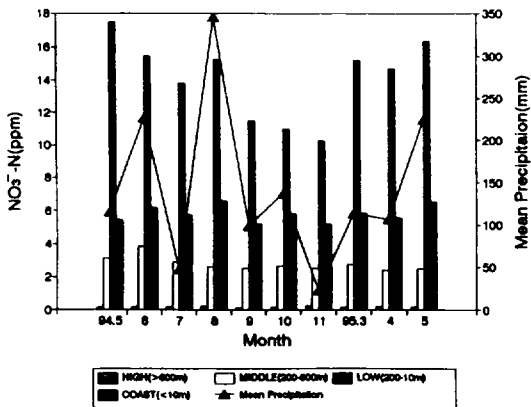


Figure 8. Monthly variaion of nitrate concentration cause to precipitation

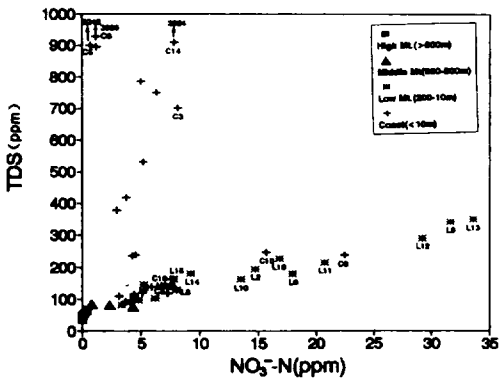


Figure 9. Graph of total dissolved solids (TDS) against nitrate content.

상관관계를 통하여 지하수 순환과정의 자연적인 진화과정을 고찰해 주며 강수로부터 자연의 지하수로의 진화순서가 일직선상에 놓여있게 된다 하였다. 즉 자연의 지하수가 우수와 기저지하수를 형성하는 과정이 시간이 경과됨에 따라 HCO₃와 TDS가 증가되면서 어떤 직선상의 진화경향을 나타내주고 있는 반면에 그 직선밖에서 위치하는 group은 1단계 오염 및 해수가 침입되었음을 보여준다 하였다. 또한 지하수가 토양내부에 존재하면서 이들 모양의 구성광물과 반응하여 시간이 경과됨에 따라 처음과는 다른 양상의 수질로 변화한다 하였다.

Figure 10은 조사지역 용천수의 TDS와 HCO₃와의 상관관계를 나타내 주는 그림으로서 연구대상 용천수들은 대체로 강수로부터 자연의 지하수로서 그 진화순서가 일직선상 주위에 놓여 있음을 보여주고 있다. 즉 고산지역 및 중산간지역 용천수들은 직선상에 놓여 있는 반면 저지대지역과 일부 해안지역 용천수들은 HCO₃ 함유량이 25 ppm~50 ppm 범위와 TDS값이 200 ppm~400 ppm 사이에 있는 직선밖의 또다른 하나의 group을 형성하고 있는데 이들은 1단계 오염이 진행중인 용천수임을 의미한다. 해안지역 일부 용천수들도 HCO₃ 함유량이 40 ppm~60 ppm 범위와 TDS값이 400 ppm이상으로 직선밖의 또다른 하나의 group을 형성하고 있는데 이 또한 전술한 바와같이 이들 용천수는 해수가 침입하여 오염된 용천수군임을 알 수 있다.

또한 최(1992)에 의하면 지하수의 지화학적 순환과정에서 TDS에 대한 HCO₃의 값이 적으면 보다 젊은 지하수군이라 하였다. 따라서 본 연구결과도 Figure 10에서 보는 바와같이 고산지역 용천수인 경우 TDS에 대한 HCO₃값이 22 ppm 이하에서 일직선상에 놓여 있어 젊은 용천수군으로 분류되고, 중산간지역(19 ppm~38 ppm), 저지대지역(25 ppm~48 ppm), 해안지역(28 ppm~50 ppm)으로 순차적으로 보다 늙은(older) 용천수군으로 분류되었다.

고산지역 용천수의 중탄산이온 함유량은 평균 1.87~22.03 ppm의 범위를 나타냈으며, 천왕사 용천수가 0.41 ppm으로 최저치를, 관음사 용천수가 28.95 ppm으로 최고치를 보였다. 중산간지역은 평균 19.27~37.63 ppm의 범위로 원만사 용천수가 7.90 ppm으로 최저치를, 유수암천이 44.48 ppm으로 최고

치를 보여, 전반적으로 고도가 낮아지면서 용천수중에 중탄산이온의 함량이 점차로 증가하는 경향을 볼 수 있었다. 저지대지역은 평균 23.92~49.26 ppm의 범위로 이들 중 윤량천이 9.21 ppm으로 최저치를, 장수물이 61.06 ppm으로 최고치를 보였다. 해안지역은 평균 26.84~54.36 ppm의 범위로, 이들 중 외도수원이 13.16 ppm으로 최저치를, 정금물이 58.16 ppm으로 최고치를 보였다(Table 1). 외도수원인 경우 해안지역에 위치하면서도 중탄산이온 함량이 적고 TDS와 HCO₃ 상관관계에서 직선상에 위치하며, 주변지역 용천수는 TDS값이 고농도인데 반해 그 값이 100 ppm 이하로 양호한 수질특성 등을 종합하여 볼 때 외도천의 근원수원은 강수가 지하로 함양된 후 빠른속도로 해안지역에 위치한 외도수원으로 이동되고 있음을 보여주고 있다.

Figure 11은 조사지역 용천수의 강수량과 중탄산이온과의 관계를 보여주는 것이다. 전 조사기간에 걸쳐 해안지역 용천수가 강수량에 관계없이 높게 나타났고, 고산지역 용천수에서는 '94년 7월에 가장 높은 함량을 보이고 '94년 5월에 가장 낮은 함량을 보였으며 강수량과의 관계를 보면 전체적으로 풍수기에 높은 함량을 보이고, 갈수기에 낮은 함량을 보였다.

Trilinear Diagram에 의한 용천수의 수문학적 분류

용천수에 대한 수질분석 결과를 종합해 Piper의 삼각다이어그램(trilinear diagram)을 작도하였다(Piper, 1944; Figure 12). 각 지역 용천수들의 수질형태를 보면, 양이온도는 고산지역 9개 지역 용천수 중 6개 지역(용진각, 뽕새오름, 어리목, 천왕사, 관음사, 성판악)이 Na+K(Sodium or Potassium type)의 군을 이루었고, 3개 지역(백록담, 담수, 영실, 남곡수원)은 동질성(No dominant type)의 군을 형성하였다(Figure 12). 중산간지역은 6개 지역 용천수 중 3개 지역(산천단, 절물, 원만사)이 Na+K의 군을 이루었고, 3개 지역(명도암, 돈네코, 유수암천)이 동질성의 군을 형성하였다. 반면 육상오염이 많이 진행된 저지대지역 용천수인 경우는 16개 지역 중 3개 지역(금산수원, 장수물, 구시물)만이 Na+K형태의 군을 이루고 그 나머지 13개 지역 용천수는 동질성의 군을 형성하고 있어 오염이 진행됨으로 해서 수질

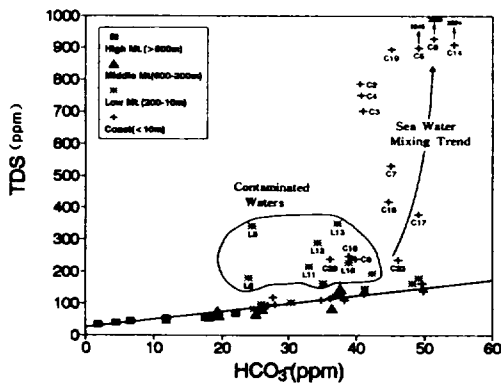


Figure 10. Graph of total dissolved solids (TDS) against bicarbonate content showing evolutionary and mixing trends.

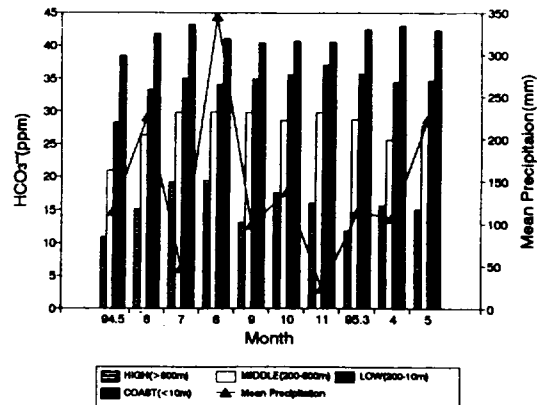


Figure 11. Monthly variation of bicarbonate concentration cause to precipitation.

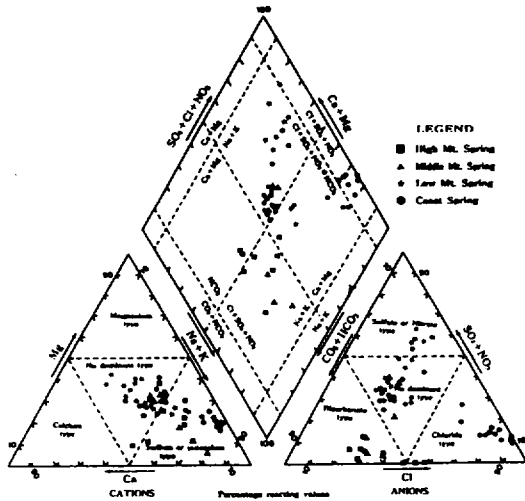


Figure 12. Trilinear diagram for representing analyses of Cheju-do spring water quality.

특성들이 동질화 되어가고 있음을 알 수 있었다. 해수침입의 영향권인 해안지역 용천수는 총 24개 지역중 50%가 넘는 14개 지역이 Na+K 형태의 군을 이루었고, 10개 지역(공천포, 돛물, 하강물, 시냇물, 서림수원, 한림수원, 문두물, 외도수원, 금산수원, 막은물)이 동질성의 군을 형성하고 있어 해수침입에 의한 Na+K 형태의 군을 이루고 있음을 확인할 수 있었다. 음이온도는 고산지역 용천수 9개 지역에서 7개 지역이 HCO₃+CO₃ (bicarbonate type) 형태의 군을 이루었고, 2개 지역(백록담 담수, 뒷세오름)이 Cl (Chloride type) 형태의 군을 형성하였다. 중산간지역 용천수는 6개 지역 중 3개 지역(산천담, 절물, 원만사)이 bicarbonate type의 군을 이루었으며, 3개 지역(명도암, 돈내코, 유수암천)이 동질성의 군을 형성하였다. 육상오염원에 의해 오염이 많이 진행된 저지대지역 용천수인 경우 16개 조사지역 중 수질이 양호한 곳에 나타나는 bicarbonate type의 군은 한곳도 없었고, 5개 지역(운랑천, 색달생수, 안덕계곡, 덕지샘물, 곤물)이 육상오염의 주요형태인 SO₄+NO₃ (Sulfate or Nitrate type) 군을 이루었고, 그 나머지 11개 지역이 동질성의 군을 형성하고 있어 오염된 용천수들이 많이 분포함을 알 수 있었다. 해수침입의 영향권인 해안지역 용천수는 총 24개 지역중 50%에 해당하는 12개 지역(삼양재3수원, 신촌큰물 1, 신촌큰물 2, 명법사, 서느렁물, 토산물, 정금물, 깎지물, 애월하물, 고내물, 녹고물, 오래물)이 Chloride type의 군을 이루었고, 13개 지역이 동질성의 군을 형성하였으며 1개 지역(돛물)은 Sulfate or Nitrate type의 군을 이루고 있어 해안지역 용천수들은 대부분 해수침입으로 인한 주로 Chloride type 및 동질성(No dominant type)의 군을 형성하고 있음을 알 수 있었다.

즉 양이온도인 경우 고산지역의 용천수에서 Sodium or Potassium type의 형태를 갖는 용천수가 중산간지역을 걸쳐 저지대지역으로 해발고도가 낮아지면서 그 수질특성이 동질성 형태로 변화되고, 해안지역에서는 이들이 다시 Sodium or Potassium

type의 형태의 용천수로 변화되고 있음을 확인할 수 있었다. 음이온도도 역시 고산지역 용천수에서 bicarbonate의 형태를 갖는 용천수가 중산간지역을 걸쳐 저지대지역으로 고도가 낮은 지역에 위치하는 용천수로 이동되면서 동질성 형태를 거쳐 Sulfate or Nitrate type의 용천수 형태로 변질되고 있음을 알 수 있었고, 이는 다시 해안지역에서는 Chloride type의 용천수로 변질되고 있음을 알 수 있었다.

양이온과 음이온을 합성한 합성도에서도 상기의 결과들을 잘 보여주고 있는데(Figure 12), 고산지역 및 중산간지역의 용천수는 HCO₃+CO₃(bicarbonate type)가 우세한 수질특성을 갖는데 반해, 고도가 낮은 저지대지역 및 해안지역으로 이동되면서 용천수는 SO₄+Cl+NO₃(non-bicarbonate type) 형태의 수질특성으로 변질되어 가고 있음을 알 수 있었다.

결론

연구지역 용천수내 TDS값은 고산지역에서 평균 35.3~66.4 ppm, 중산간지역은 61.8~145.5 ppm, 저지대지역은 80.7~351.3 ppm, 해안지역은 93.1~355.7 ppm으로 고도가 낮아지면서 대수층에서 시간이 경과되고 오염물질이 유입되면서 TDS가 증가하는 것을 볼 수 있고 TDS값이 500 ppm을 초과하여 식수로 부적절한 지역은 총 55개 지역중 8개지역으로 모두 해안지역에 위치한다.

SEC값은 고산지역에서 평균 9.3~63.8 μS/cm, 중산간지역은 55.5~201.0 μS/cm, 저지대지역은 88.5~558.6 μS/cm, 해안지역은 109.9~6126.9 μS/cm로 고도가 낮아지면서 그 값이 증가함을 보였고, 전기비전도도와 강수량의 관계를 보면 고산지역 및 해안지역은 강수량의 영향에 따라 SEC가 미미한 영향을 받으나 중산간 및 저지대지역은 강수량이 많을 때 SEC값이 증가 하였다.

용천수내 pH값은 고산지역에서 평균 5.8~9.3, 중산간지역은 6.7~7.6, 저지대지역은 6.7~7.7, 해안지역은 6.9~7.9으로 pH 범위는 5.8~10.1로 약산성에서 약알칼리까지 다양하다.

나트륨 함량은 고산지역인 경우 평균 0.54~4.46 ppm, 중산간지역은 4.86~12.05 ppm, 저지대지역은 5.37~24.04 ppm, 해안지역은 6.28~930.32 ppm의 범위를 보여 고도가 낮아지면서 그 농도가 점차 증가하다 해안지역 용천수에서 급격히 증가하는 경향을 보였다.

칼륨 함량은 고산지역인 경우 평균 0.13~1.43 ppm, 중산간지역은 0.61~5.48 ppm, 저지대지역은 1.34~16.24 ppm, 해안지역은 1.54~35.91 ppm의 범위를 보였으며, 전체 55개 조사지역중 18개지역의 용천수가 각종 오염원으로부터 오염되고 있었다.

연구지역 용천수내 마그네슘 및 칼슘 함량은 고산지역에서 각각 평균 0.26~0.87 ppm, 0.26~3.12 ppm, 중산간지역은 0.24~5.09 ppm, 1.38~7.50 ppm, 저지대지역은 1.89~21.89 ppm, 3.12~36.96 ppm, 해안지역은 2.66~130.94 ppm, 3.80~49.53 ppm으로 영실, 산천담, 유수암천, 산지물, 공천포, 시냇물, 서림수원, 외도수원, 구멍물, 막은물만이 정상적인 지하수 형태인 Ca>Mg의 관계를 보이고 그외지역은 Ca<Mg관계를 보여 이들

이 해수 및 주변 오 폐수에 의해 오염이 되고 있음을 알 수 있었다.

용천수내 염소이온과 황산이온의 함량범위는 고산지역에서 각각 평균 1.31~5.20 ppm, 0.00~1.83 ppm, 중산간지역은 5.49~17.47 ppm, 0.00~4.43 ppm, 저지대지역은 6.96~43.38 ppm, 1.10~14.10 ppm, 해안지역은 8.98~1904.25 ppm, 0.00~355.02 ppm으로 해안지역 용천수에서가 높은 함량을 나타냈고, 반면 고산지역 용천수에서는 낮은 함량을 보이며 해발고도가 낮은 지역의 용천수일수록 순차적으로 이들 두 이온의 농도가 증가하다 해안지역 용천수에서는 그 함량치가 빠른 증가경향을 보였다.

질산성질소는 고산지역이 평균 0.00~0.43 ppm, 중산간지역은 0.10~7.65 ppm, 저지대지역은 3.42~33.65 ppm, 해안지역은 0.72~22.48 ppm으로, 먹는물 수질기준을 초과한 용천수는 전체 55개 조사지역중 12개 지역이었다. 강수량과 질산성질소 농도사이 관계에서는 고산지역과 중산간지역의 용천수인 경우는 강수량에 미미한 영향을 보이나 저지대지역 용천수인 경우는 강수량이 증가하면 질산성질소 농도도 증가하는 경향을 보여 상류구배간의 오염원으로부터 만들어진 암모니아성질소가 강수와 함께 지하로 침투하여 시간이 지남에 따라 질산성질소로 되어 하류지역의 용천수에서 높게 나타나는 특성을 보였다.

중탄산은 고산지역에서 평균 1.87~22.03 ppm, 중산간지역은 19.27~37.63 ppm, 저지대지역은 23.92~49.26 ppm, 해안지역은 26.84~54.36 ppm의 범위를 보여 고도가 낮아지면서 용천수중에 중탄산이온의 함량이 점차로 증가하는 경향을 보였다. 조사지역 용천수의 TDS와 HCO₃와의 상관관계를 보면 고산지역 및 중산간지역 용천수들은 직선상에 놓여 있는 반면 저지대지역과 일부 해안지역 용천수들은 HCO₃ 함유량이 25 ppm~50 ppm 범위와 TDS값이 200 ppm~400 ppm 사이에 있는 직선밖의 또다른 하나의 group을 형성하고 있는데 이들은 1단계 오염이 진행중인 용천수임을 알 수 있었다. 해안지역 일부 용천수들도 HCO₃ 함유량이 40 ppm~60 ppm 범위와 TDS값이 400 ppm 이상으로 직선밖의 또다른 하나의 group을 형성하고 있는데 이들 용천수는 해수가 침입하여 오염된 용천수군임을 알 수 있다. 고산지역 용천수인 경우 TDS에 대한 HCO₃값이 22 ppm 이하에서 일직선상에 놓여 있어 깊은 용천수군으로 분류되고, 중산간지역(19 ppm~38 ppm), 저지대지역(25 ppm~48 ppm), 해안지역(28 ppm~50 ppm)으로 순차적으로 보다 높은 용천수군으로 분류되었다.

고도별 용천수의 양이온 수질형태는 고산지역은 Sodium or Potassium type의 형태를 갖는 용천수가 중산간지역을 걸쳐 저지대지역으로 해발고도가 낮아지면서 그 수질특성이 동질성 형태로 변화되고, 해안지역에서는 이들이 다시 Sodium or Potassium type의 형태의 용천수로 변화되고 있음을 확인할 수 있었다. 음이온도 역시 고산지역 용천수에서 bicarbonate의 형태를 갖는 용천수가 중산간지역을 걸쳐 저지대지역으로 고도가 낮은지역에 위치하는 용천수로 이동되면서 동질성 형태를 거쳐 Sulfate or Nitrate type의 용천수 형태로 변질되고 있음을 알 수 있었고, 이는 다시 해안지역에서는 Chloride type의 용출수로 변질되고 있음을 알 수 있었다. 즉 고산지역 및 중산간지역의

용천수는 HCO₃+CO₃(bicarbonate type)가 우세한 수질특성을 갖는데 반해, 고도가 낮은 저지대지역 및 해안지역으로 이동되면서 용천수는 SO₄+Cl+NO₃(non-bicarbonate type) 형태의 수질특성으로 변질되어 가고 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

- 건설부, 제주도, 한국수자원공사, 1993, 제주도 수자원종합개발 계획 수립보고서, p. II-7
- 고기원, 고용구, 김성홍, 오상실, 박원배, 윤 선, 1992, 제주도 동부지역의 지하지질구조와 지하수위 변동 및 수질특성에 관한 연구, 제주도 보건환경연구원보, 3, p. 15-43.
- 고기원, 박원배, 윤정수, 고용구, 김성홍, 신승중, 송영철, 윤선, 1993, 제주도 동 서부지역의 지하수 부존형태와 수질특성에 관한 연구, 제주도 보건환경연구원보, 4, p. 191-222.
- 기상청, 1994-1995, 기상연보, p. 122-202.
- 김성홍, 송영철, 오순미, 김길성, 김태현, 김세라, 고평임, 고용구, 1994, 제주도내 상수도의 수질에 관한 조사연구, 제주도보건환경연구원보, 5, p. 141-174.
- 김옥준, 1969, 제주도 수자원의 특수성과 개발 방안, 광산지질학회지, 2(1), p. 71-80.
- 김홍훈, 안중성, 1992, 제주도 용천수의 수질화학적 특성과 연대측정에 관한 연구, 대한화학회지, 36(5), p. 727-736.
- 김천수, 1992, 제주도 지하수 환경의 오염취약성, 대한광산 지질학회 제8회 학술강연, p. 13-28.
- 농어촌진흥공사, 1973, 제주도와 OAHU도의 지하수, p. 43-162.
- 농어촌진흥공사, 1989, 제주도 지하수 장기개발계획조사보고서, p. 63-124.
- 오순미, 김길성, 김세라, 김태현, 송영철, 강태조, 강지아, 성홍, 고한옥, 1995, 제주도내 샘터의 수질조사, 제주도보건환경연구원보, 6, p. 81-99.
- 유장길, 정창조, 안중성, 송성준, 1986, 동위원소를 이용한 제주지역 수자원에 관한연구, 제주대학교 방사능이용연구소 연구보고, 2, p. 29-42.
- 유장길, 안중성, 정창조, 송성준, 1989, 동위원소를 이용한 제주지역 수자원에 관한 연구, 제주대학교 방사능이용연구소 연구보고, 4, p. 35~56.
- 윤순강, 1994, 요소와 축산뇨에서 유래한 NO₃-N 및 동반 양이온의 토양 중 행동, 서울대학 박사학위 논문.
- 윤정수, 1986, 제주도 동부지역 지하수의 고염도 요인에 관한연구, 제주도 연구, 3, p. 43-53.
- 윤정수, 박상운, 1994, 제주도 지하수의 개발현황과 지역별 수위 및 수질변화 특성, 제주도연구, 11, p. 175-232.
- 윤정수, 박상운, 1994, 제주도 지하수의 지역별 수질 특성과 수위변화, 제주대학교 해양연구소 연구보고, 18, p. 59-83.
- 이기화, 1992, 제주도의 담수-해수간의 유체동력학적 평형, 대한지질학회지, 28(6), p. 649-664.
- 이태섭, 1992, 해안지대 지하수자원 조사를 위한 항공원격탐사, 제주도 수자원의 보전과 이용, p.7.
- 최순학, 1988, 제주도의 형성과 지하수특성, 제주도연구회, 5, p. 59-78.
- 최순학, 1990, 제주도 수자원의 특성과 수질오염 연구(II), 과학기술원, KR-90-(B)-10, p. 1-57.

제주도 용천수의 수리화학적 특성

- 최순학, 김영기, 1989, 제주도 지하수의 수질특성. 대한지질학회지, 25(3), p. 230-238.
- 최순학, 1992, 제주도 지하수자원의 보존과 개발방향, 제주대 환경연구소 심포지엄, p. 27-44.
- 한정상, 1982, 지하수학개론, 박영사, p. 1-511.
- 환경처, 1991, 수질환경오염 공경시험법.
- 한정상, 1991, 제주도 환경보전 종합대책 수질오염 방지장기계획을 중심으로, 환경처, p. 71-230.
- Acker, J. G. and Bricker, O. P., 1992, The influence of pH on biotite dissolution and alteration kinetics at low temperature, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56, p. 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, p. 455-475.
- Barbara, A. D. and Harry, I. N., 1984, Relationships between groundwater silica, total dissolved solids, and specific electrical conductivity, *Groundwater* Vol. 22(1), p. 80-85.
- Choi, S. H., 1990, Hydrogeological and hydro-chemical characteristics of groundwater in Cheju Island, Thesis for the Degree of Doctor of Science, Kyung-pook National University, p. 1-169.
- Garrels, R. M. and F. T. MacKenzie. 1967, Origin of the chemical compositions of some springs and lakes, *Equilibrium Concepts in Natural Water Systems*, ed. R. F. Gould. American Chemical Society Publications, Washington, D.C., p.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; p. 386-396.
- Junge, C. E., 1963, Air chemistry and radio-activity, New York Academic press, p. 38-389.
- Piper, A. M., 1944, A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses, *Trans. Amer. Geophysical Union*, v. 25, p. 914-928.