

碩士學位論文

濟州道 湧泉水의 水文地質學的 特性과
保全方案 研究

指導教授 楊 城 基

濟州大學校 產業大學院

建設環境工學科

梁 八 珍

2000年 8月

濟州道 湧泉水의 水文地質學의 特性과 保全方案 研究

指導教授 楊 城 基

이 論文을 工學碩士學位 論文으로 提出함

2000년 8월 일

濟州大學校 產業大學院

建設環境工學科(土木工學)

梁 八 珍

梁八珍의 工學碩士學位 論文을 認准함

2000년 8월 일

委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

**A Study on a General Plan of the Preservations
and Hydrogeological Characteristics of the
Springs in Cheju Island**

Pal-Jin Yang

Supervised by Professor Sung - Kee Yang

2000. 8

Department of Construction and Environmental Engineering
Graduate School of Industry
Cheju National University

Abstract

The total number of springs in Cheju island is 755 excluding 156 springs, which stop functioning. There are 212 in East area, 174 in West area, 188 in South area, and 181 in North area.

According to springs distribution survey, 689 springs (91% of total) are located in lower area (200m above sea level), 45 springs in middle area (200-600m above sea level) and 21 springs in hillside (600m and higher above sea level). As you see, it is characterized that the more decreased the number of springs is, the higher sea level is.

The 682 springs (90% of total) are located at the contact of lava flows, 56 springs are at the joint clack, and 17 springs are at the loose sediment deposit.

According to the survey result of the discharge of 707 springs, the average a day 1,083,386m³, and the maximum a day is 1,608,342m³.

According to survey result on water quality, chemical elements are gradually reduced as closer to Mt. Halla. Furthermore the pollutants by man like Nitrate-N are found at lower area 200m above sea level.

The springs are used for portable water source, domestic life, and agriculture. However 355 springs (47% of total) are not used.

Springs are examined their history and environment, discharge and water quality to select to preserve. And now 453 springs are found out to be worthy of being preserved.

In order to preserve the springs, it is required that the work to preserve their origin, discharge and water quality should be carried out.

目 次

List of Tables	i
List of Figures	iv
I. 서론	1
II. 연구방법	5
III. 용천수의 용출특성에 따른 분류	9
1. 용출지점의 틈의 크기에 의한 용천	9
2. 지구중력에 의한 용천	10
3. 용출량에 따른 용천	11
4. 용출량의 변동과 지속성에 따른 용천	13
IV. 용천수 분포의 수문지질학적 특성과 이용현황	14
1. 제주도 용천수의 수문지질학적 특성	14
2. 용천수의 지리적 분포 특성	16
3. 용출량과 이용현황	24
V. 용천수의 수질특성과 보전방안	32
1. 용천수의 수질특성	32
2. 용천수의 보전방안	48
VI. 결론	58
참 고 문 헌	61
감사의 글	63

List of Tables

Table 1. Spring yield data of major springs in 1965	4
Table 2. Summary of field examination on springs	6
Table 3. General classification of springs	9
Table 4. Classification of springs according to yield per day	13
Table 5. Classification of spring types according to geological structure in Cheju Island	15
Table 6. Distribution of spring according to elevation	17
Table 7. Distribution of spring according to zone	17
Table 8. Major spring on high elevation zone	18
Table 9. Major springs on middle elevation zone	20
Table 10. Distribution of spring according to different districts and elevation	22
Table 11. Average and maximum spring yield according to district	24
Table 12. Average spring yield per each spring according to elevation and district	25
Table 13. Usage of springs Average spring yield according to usage	26
Table 14. List of springs developed for potable water source	28
Table 15. Conservation of springs according to different districts	29
Table 16. Major cause of damage on springs	30
Table 17. Facilities for usage and protection on springs	31
Table 18. Springs for water quality investigation according to different districts	33
Table 19. Average content of cations and anions of spring on different elevation	34
Table 20. Average chloride content on springs according to different zone	35
Table 21. Average chloride content on springs according to different zone	36
Table 21. Average chloride content on springs according to different zone	37
Table 22. Average nitrate content on springs according to different zone	38
Table 23. Average nitrate content of springs to different elevation	39
Table 24. Average sulphate content of springs according to different zone	40
Table 25. Average sodium content of springs according to different zone	42
Table 26. Average potassium content of springs according to different zone	44

Table 27. Average magnesium content of springs according to different zone	45
Table 28. Average calcium content of springs according to different zone	47
Table 29. Evaluation methods of springs for conservation	50
Table 30. Springs for conservation according to different zone	51
Table 31. Average spring yield for conservation according to different zone	51
Table 32. Average spring yield for conservation according to different zone and elevation	52
Table 33. Usage classification on spring for conservation	53
Table 34. Spring protection facilities for conservation	54

List of Tables

Fig. 1. Distribution of springs on GIS map Cheju Island.	7
Fig. 2. Location of springs for water quality investigation.	8
Fig. 3. General classifications for spring type(Fetter, 1994).	12
Fig. 4. Relationship between chloride, sulphate and sodium.	41
Fig. 5. Relationship between sodium, potassium and magnesium.	44
Fig. 6. Relationship between magnesium and calcium.	47
Fig. 7. Relationship between calcium and nitrate.	48

I. 서론

1. 연구배경 및 목적

용천수는 수문지질학적으로 땅속을 흐르던 지하수가 지표로 솟아나는 현상이기 때문에 용천수의 위치, 용출량의 계절적 변화, 용천수의 수질 등은 지하수의 순환체계 해석에 귀중한 정보로 활용 할 수 있다. 아울러, 용출지점의 지질구조는 지하수의 순환과 지질과의 관계를 규명하는데 열쇠가 되므로 지하수조사에 중요한 부분을 차지한다고 하겠다. 제주도의 해안과 중산간 및 산악지역 곳곳에는 지층 속을 흐르던 지하수가 지표와 연결된 지층이나 암석의 틈을 통해 솟아 나오는 용천수가 분포하고 있다. 이들 용천수는 상수도가 제대로 보급되지 않았던 1980년대 이전까지 식수원으로 뿐만 아니라 농업 및 생활용수로 널리 이용되어온 제주인의 생명수이었다. 따라서 제주도에서 물 이용의 시작은 용천수의 이용으로부터 시작되었다고 하여도 과언이 아닐 정도로 이들 용천수는 제주인들의 귀중한 수자원으로 최근까지도 이용되어져 왔다. 가뭄에도 마르지 않고 솟아나는 용천수가 있는 곳을 중심으로 마을이 형성되었고, 마을 사람들은 이 귀중한 생명수와도 같은 물을 소중히 다루고 공동으로 이용하는 방법을 자연스럽게 익히며 살아왔다. 제주도의 물 이용문화가 용천수에서 상수도로 바뀌면서 제주의 역사와 맥을 같이 해왔던 용천수의 이용과 보전에 대한 관심도가 점차 낮아지고, 각종 개발사업에 의해 매립되거나 훼손되는 사례가 발생하고 있다. 특히, 지금까지도 용천수의 정확한 개소 수를 비롯하여 위치도조차 작성이 안된 실정이기 때문에 용천수의 현황 파악이 시급한 실정이다. 따라서, 이 연구는 도서지역을 제외한 제주도 전지역에 분포하는 용천수의 용출위치·용천수의 이름·이용 및 보존상태와 수문지질학적 분포특성을 파악하고 효율적인 용천수의 보전방안을 마련하는데 목적이 있다.

2. 이전의 연구

제주도의 용천수에 대한 근대적인 조사·연구는 1937년부터 시작되었다. 1937년 일본중앙공업시험소의 室井渡 외 2인은 성읍, 송당, 모슬포에서 시추조사와 더불어 용천수 및 정호 63개소에 대한 수질조사를 실시하였고, 용천수 이용방안 등 수자원에 대한 개괄적인 조사를 수행하였다.

1963~1965년까지 국립지질조사소(현 한국자원연구소)는 당시 곤란을 겪고 있던 제주도의 물 문제를 해결하기 위하여 제주도 남부와 남동부지역에 대한 지하수원조사와 지질조사를 실시하였으며, 1965~1966년에는 (주)한국지하자원조사소가 제주도 전역에 걸쳐 전반적인 지질 및 지하수조사를 실시하였고(김옥준 외 7인, 1965; 김옥준 외 3인, 1966), 제주도산업기지 기초조사보고서(건설부, 1965)에서는 당시의 물 이용상황(용천수와 봉천수)과 용출량 측정 및 이용가능량과 취수방법 등에 대해 조사하였다. 특히, 이 보고서에서는 당시 개발되어 이용 중인 용천수는 18개소이고 개발·이용가치가 높은 28개의 용천수에 대한 용출량 측정(1965. 7~10)을 실시하였다(Table 1). 또한, 당시 이용 중인 봉천수는 338개소였으며, 식수원으로 이용되는 봉천수 28개소에 대해 용수 이용량과 저류지 상황에 대한 조사도 실시하였다. 제주도 고지대 용수 이용계획 조사보고서(건설부, 1965)에는 Y계곡물, 영실물, 선녀폭포, 성판악물, 성널샘 등 고지대에 위치한 용천수의 이용방안에 대해 조사하였으며, 이 결과를 근거로 어승생저수지를 비롯한 성판악 수원개발사업이 추진되게 되었다.

한국원자력연구소와 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency ; IAEA)는 1965~1969년까지 제주도의 수문환경에 대한 환경동위원소 연구를 공동으로 시행하였는데, 이 조사에 참여했던 이창군과 Davis는 연구결과를 3회에 걸쳐 보고한 바 있다. Davis 외 2인(1970)은 24개소(용천수 14개소, 관정 8개소, 하천 2개소)에서 채취된 시료에 대해 삼중수소·이중수소·산소 동위원소분석을 실시하고, 제주도 지하수의 평균 체류기간을 2~9년이라 밝힌 바 있다. 특히, 이들의 연구에서는 고지대에 위치한 용천수(선녀폭포물, 성널샘)의 평균 체류기간은 2~2.5년이고 중산간 지역의 용천수(산천단물, 선돌물)는 3~7.5년, 해안 용천

수(옹포, 금산물)는 8.5년인 것으로 제시하였다.

농업진흥공사는 1971. 8. 1~11. 30일까지 5회에 걸쳐 용천수 4개소(한림물, 녹나물, 월평물, 선반내물)에 대한 유량측정과 양수시험을 실시한 바 있다. 산업기지개발공사(1981)는 제주도 수자원개발에 관한 종합조사를 실시하는 과정에서 용천수에 대한 조사도 함께 실시하였는데, 당시 확인된 용천수는 모두 300개소이며 용출량은 746,000m³/일인 것으로 보고하였다.

정창조외 4인(1985), 정창조외 3인(1986) 및 안종성외 3인(1989)은 제주지역 지하수(관정) 및 용천수에 대하여 삼중수소(Tritium), 이중수소(Deuterium), 산소(Oxygen-18)의 환경동위원소를 이용한 연구를 실시하였다. 김종훈·안종성(1992)은 제주도 용천수의 수질화학적 특성과 삼중수소에 의한 연대측정 연구를 실시한 결과, 삼양과 중문 및 일파리 용천수의 평균 이동시간은 약 1.2개월이고, 제주시 외도동의 용천수는 5.6개월, 한경면 청수리 관정(심도 125m) 지하수의 경우는 약 4년인 것으로 나타났다. 또한, 용천수의 연령은 삼양·중문·일파리의 경우는 1.7년, 제주시 용담동의 용천수는 8.36년, 한경면 청수리의 관정 지하수는 28.9년인 것으로 제시하였다.

박상운(1996)은 도 일원 15개소에 대한 용출량 측정과 55개소에 대한 수질성분을 조사한 바 있으며, 김경찬(1996)은 서귀포지역 일대의 16개 용천수에 대한 수질특성을 조사한 바 있다. 고병련(1998)은 제주도 동부지역의 관정 32개소와 용천수 15개소에 대한 수질분석을 실시하고 수질조성 분포 특성과 해수침입에 따른 이온성분의 상관관계에 대해 연구한 바 있다. 제주일보사(고동수 기자)는 1996. 8~1998. 1월까지 도 일원 용천수와 봉천수 76개소에 대한 현지조사를 실시하고 용천수의 이용과 관련된 내력을 『제주도민의 옛 생명수를 찾아』라는 제목으로 연재한 바 있다.

Table 1. Spring yield data of major springs in 1965

지 역 별	용천수명	용 출 량 (m ³ /일)		
		최 대	최 소	평 균
제주시 도두동	오 래 물	5,840	4,371	5,071
제주시 외도동	절 물	2,367	1,918	2,143
애월읍 하귀리	미 수 물	1,270	962	1,070
애월읍 애월리	하 물	10,817	7,732	9,540
한림읍 진근동	외 다 리 물	15,379	13,824	14,506
한림읍 옹포리	마근물, 쌍계물, 너븐물, 조물	59,011	50,025	54,465
한경면 신창리	아 랫 새 물	431	420	429
조천읍 신촌리	큰 물	2,498	1,493	2,130
조천읍 조천리	큰 물	2,867	2,275	2,700
조천읍 함덕리	고 도 물	2,725	2,386	2,565
구좌읍 평대리	대 수 굴 물	883	471	699
대정읍 일파리	서 립 물	5,486	2,306	4,112
대정읍 일파리	절 간 앞 물	1,356	1,045	1,213
안덕면 사계리	큰 물	1,771	682	1,317
안덕면 창천리	남 당 물	57	25	48
서귀포시 상예동	대 왕 수 물	3,706	2,185	3,230
서귀포시 중문동	천 제 연 물	25,462	20,597	22,698
서귀포시 강정동	큰 강 정 물	36,789	34,102	35,280
성산읍 시홍리	큰 물	743	612	681
성산읍 오조리	안 카 름 물	643	438	542
성산읍 신산리	말 드 리 물	13,995	12,719	13,535
성산읍 신산리	분 드 리 물	3,229	2,000	2,771
표선면 토산리	세 미 물	460	292	382
남원읍 태홍리	개 말 물	3,764	3,159	3,616
남원읍 남원리	전 드 리 물	350	271	313
서귀포시 영천동	돈 내 코	3,587	2,953	3,246
서귀포시 호근동	속 골 물	4,130	3,018	3,530
서귀포시 법환동	조 이 통 물	5,258	4,369	4,890

자료) 제주도 산업지기초조사보고서, 1965

II. 연구방법

1. 기존자료 수집과 분석

용천수 현황조사를 효율적으로 추진하기 위하여 용천수와 관련된 각종 조사·연구보고서, 향토지(마을지), 일간신문, 지명 유래집, 학술논문 등을 수집하였고, 시·군과 도내 연구기관에 보유하고 있는 조사자료도 수집·정리하여 현장조사 시 참고자료로 활용하였다. 또한, 수집된 자료 중 용출량·수질·이용내력 등이 있는 자료를 선별하여 조사시점별, 조사기관별, 용천수별 과거의 현황을 정리하여 금번 조사결과와 비교 분석하였다.

2. 현장조사 및 수질분석

1) 현장조사

용천수에 대한 현장조사는 1998년 3월부터 1999년 10월까지 실시하여 Fig 1에 나타내었다. 현재 용출되고 있는 용천수는 물론 매립되어 버렸거나 훼손 또는 수량이 고갈된 용천수에 이르기까지 조사하였다. 현장조사에서는 용천수의 용출 위치·용천수명 등 일반 현황조사와 용출량조사, 전기전도도 및 수온측정 등 현장 수질조사, 수질성분조사를 하였다(Table 2).

용출량은 Marsh-McBirney사의 FLO-MATE(모델 2000) 유속계(측정범위:0.1 5~6m/sec, 오차한계: $\pm 2\%$)를 사용하여 측정하였고 전기전도도와 수온은 Orion Research사의 모델 115 (측정범위:0~199천 $\mu\text{moh}/\text{cm}$, 오차한계: $\pm 5\%$)제품을 사용하였다. 또한, 용출지점의 지질구조를 파악하기 위한 주변지역 지질조사도 함께 실시하였으며 특히, 1999년 7월~10월까지 많은 비가 내림으로서 과거에 용출

하지 않았던 용천수에서도 용출현상이 생겨나는 등 전반적인 용출량 증가현상이 발생하였기 때문에 1999년 9월~10월까지 1일 1,000톤 이상 용출하는 용천수에 대한 용출량 및 수온·전기전도도·총고형물질 함량 등에 대한 추가조사도 실시하였다. 1999년 5월 11~13일에는 백록샘을 비롯한 한라산 정상 주변에 분포하는 용천수에 대한 현장조사도 실시하였다.

Table 2. Summary of field examination on springs

(단위 : 개소)

조사 내 역		합 계	제주시	서귀포시	북제주군	남제주군
용출위치조사		911	142	168	398	203
용출량조사	1차	701	105	147	296	153
	2차	185	25	57	71	32
	3차	77	11	30	28	8
전기전도도 및 수온조사	1차	658	98	140	287	133
	2차	191	23	56	90	22
	3차	90	15	31	36	8
수질성분조사		389	40	104	131	114

2) 수질성분 분석

조사대상 용천수 중 수질성분 분석용 시료채취가 가능한 389개소의 용천수 (Fig. 2)에 대하여 칼슘(Ca^{2+}), 마그네슘(Mg^{2+}), 나트륨(Na^+), 칼륨(K^+), 염소이온(Cl^-), 황산(SO_4^{2-}), 중탄산염(HCO_3^-), 질산성질소(NO_3-N) 등의 수질성분을 분석하였다.

채수한 시료는 제주도보건환경연구원에서 standard method에 준하여 음이온 성분 중 Cl^- , NO_3-N , SO_4^{2-} 에 대해서는 Ion chromatography(DIONEX 500)을 이용하여 측정하였으며, HCO_3^- 은 자시약 bromocresol green을 사용하여 0.02N HCl으로 적정하여 정량화하였다. 양이온(Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+)에 대해서는 원자흡광광도계(GBC 908AA)를 이용하여 분석하였다.

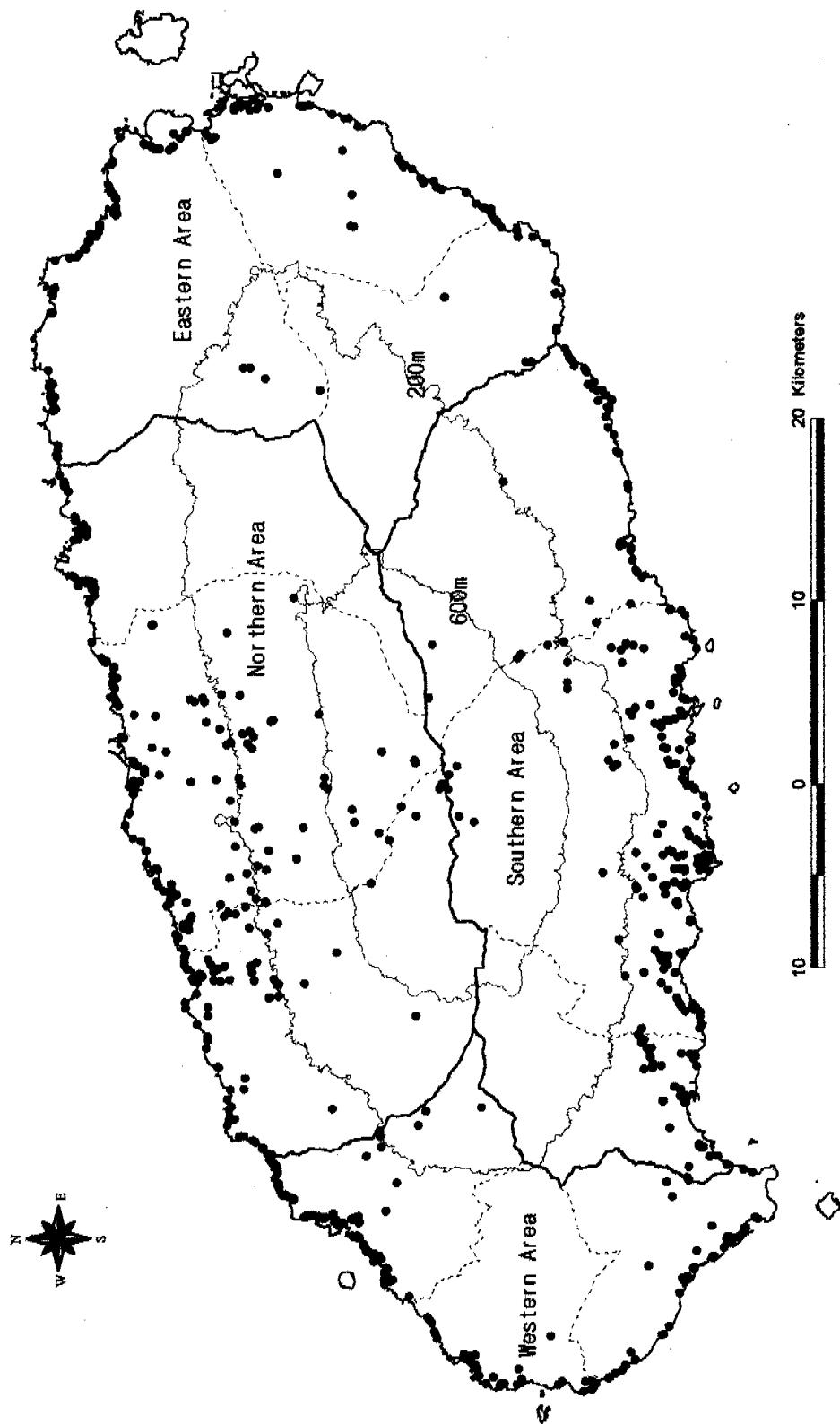


Fig. 1. Distribution of springs in Cheju Island.

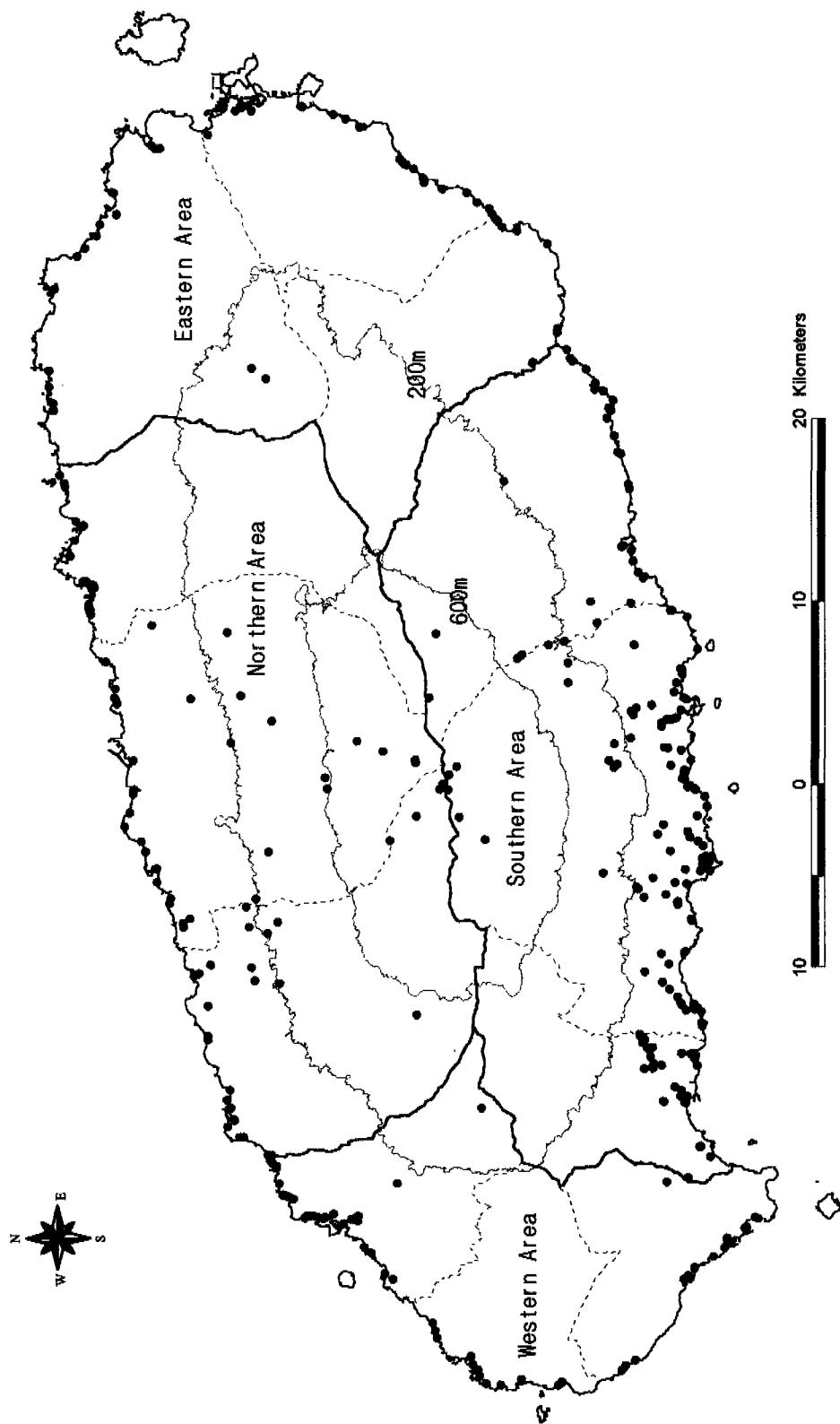


Fig. 2. Location of springs for water quality investigation

III. 용천수의 용출특성에 따른 분류

대수층을 따라 흐르는 지하수가 암석이나 지층의 틈을 통해 지표면으로 자연스럽게 솟아나는 지점을 용천(spring, 溢泉)이라 하고, 이 물을 용천수(湧泉水)라 한다. 용천수는 용출지점의 틈(공극)의 크기, 종력, 용출량 등에 따라 Table 3과 같이 분류할 수 있다.

Table 3. General classification of springs

구 분	유 형
용출지점의 틈의 크기에 의한 용천	<ul style="list-style-type: none">○ 누수 및 침투용천○ 균열용천○ 공동용천
지구중력에 의한 용천	<ul style="list-style-type: none">○ 중력용천<ul style="list-style-type: none">- 분지용천, 접촉용천, 피압용천, 파쇄 및 공동용천○ 피압용천<ul style="list-style-type: none">- 화산활동과 관련된 용천- 지하 심부에 연결된 파쇄대를 통한 용천
용출량에 의한 용천	<ul style="list-style-type: none">○ 제1급~제8급 용천
용출량의 변동에 의한 용천	<ul style="list-style-type: none">○ 균일용천○ 준변동용천○ 변동용천
용출량의 지속에 따른 용천	<ul style="list-style-type: none">○ 지속용천○ 간헐용천

1. 용출지점의 틈의 크기에 의한 용천

1) 누수 및 침투용천

대수층에 발달된 여러 지점으로부터 지하수가 용출되는 용천으로서 용출량이 비교적 소량이어서 누수용천이라 부른다.

2) 균열용천

비교적 큰 암석의 절리 및 파쇄대의 틈을 따라 지하수가 유출되는 용천으로서 큰 파쇄대를 통해서 지하수가 유출되는 경우를 파쇄대 용천이라 한다.

3) 공동용천

화산암이나 석회암 분포지역에서 용암터널과 용해공동과 같이 큰 공간을 통해 지하수가 유출되는 경우를 공동용천이라 한다.

2. 지구중력에 의한 용천

Bryan(1919)은 용천수를 비중력 용천(nongravitational forces springs)과 중력 용천(gravitational forces springs)으로 구분하였다. 비중력용천은 화산암과 관련된 화산성 용천 또는 지각의 매우 깊은 곳까지 연결된 파쇄대로부터 용출하는 열극용천(fissure springs)으로 나눌 수 있는데, 이들 용천수는 대부분 열수(熱水)의 특징을 지닌다. 중력 용천은 중력에 의한 압력으로 인해 지하수가 지표로 유출되는 용천으로서 다음과 같이 5가지 유형으로 세분된다.

1) 함몰형 용천(depression springs)

지하수면이 지형 경사가 급격히 변하는 지점에 노출되므로서 지하수가 지표로 유출되는 용천을 말하는데, 분지형 용천이라고도 한다.

2) 접촉형 용천(contact springs)

지하수가 투수성이 불량한 지층 상부를 따라 흐르다 지표면과 연결된 지층의 틈을 따라 용출하는 용천을 말한다.

3) 피압용천(artesian springs)

대수층 상부에 피복되어 있는 피압층(구속층; confining bed)에 생긴 공간이나 틈을 따라 압력을 받고 있던 지하수가 지표로 용출하는 용천을 말한다.

4) 불투수성 지층 용천(impermeable rock springs)

불투수성 지층의 파쇄대 또는 관 모양의 수로를 따라 지하수가 용출하는 경우를 말한다.

5) 관상 또는 파쇄대형 용천(tubular or fracture springs)

용암관 또는 용해수로, 불투수성 지층에 발달한 파쇄대와 대수층이 연결되어 있어 지하수가 지표로 용출하는 용천을 말한다.

또한, Fetter(1994)는 용천수의 유형을 다음과 같이 6가지로 구분하였다(Fig. 3).

- ① 함몰형 용천(depression springs)
- ② 접촉형 용천(contact springs)
- ③ 단층형 용천(fault springs)
- ④ 낙수구형 용천(sinkhole springs)
- ⑤ 절리형 용천(joint springs)
- ⑥ 파쇄대형 용천(fracture springs)

3. 용출량에 따른 용천

Meinzer(1923)는 용출되는 지하수의 양(용출량)에 따라 용천수를 Table 4와 같이 8가지 유형으로 구분하였다. 제주도에 분포하는 용천수를 Meinzer(1923)의 분류기준에 따라 분류한 결과, 1~2급 용천수는 없으며 4~6급에 해당하는 것이 84%를 차지하고 있어 용출규모가 중간 정도의 것들이 대부분임을 알 수 있다.

용천수의 용출량은 지하수 함양지역의 면적과 함양율에 따라 좌우된다. 연간 지하수 함양량이 많더라도 함양지역의 면적이 작을 경우에는 1일 1,000톤 이하의 수준에 머무르지만, 함양량이 많고 함양면적이 넓을 경우에는 대규모의 용출이 일어난다. 지질적으로는 화산암과 석회암 지대에 분포하는 용천수의 용출량이 대체로 많은 편이며, 화강암과 퇴적암지대의 경우는 7~8급에 해당하는 용천들이 많다.

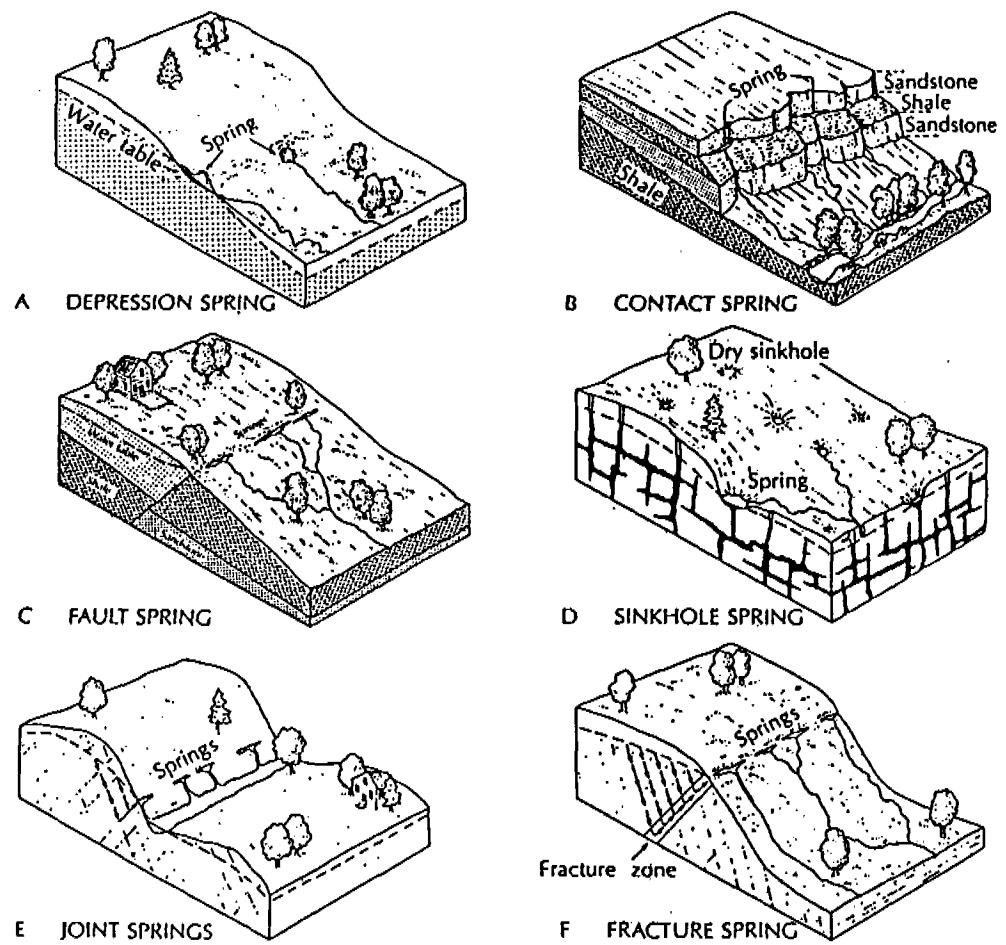


Fig. 3. General classifications for spring type(Fetter, 1994).

Table 4. Classification of springs according to yield per day

구 분	용 출 량 구 분		제주도 용천수	
	m ³ /초, ℓ/초	m ³ /일	개 소	평균용출량 (m ³ /일)
제 1 급	10m ³ /초 이상	864,000	-	-
제 2 급	1~10m ³ /초	86,400~864,000	-	-
제 3 급	0.1~1m ³ /초	8,640~86,400	35	14,174
제 4 급	10~100 ℓ/초	864~8,640	176	2,798
제 5 급	1~10 ℓ/초	86.4~864	278	327
제 6 급	0.1~1 ℓ/초	8.6~86.4	129	31
제 7 급	10~100mℓ/초	0.86~8.6	72	4
제 8 급	10mℓ/초 이하	0.0086~0.86	-	-

4. 용출량의 변동과 지속성에 따른 용천

용천수는 용출량의 변동에 따라 균일용천, 준변동 용천, 변동용천으로 구분할 수 있다. 용천수의 용출량 변동계수(variability)가 25% 이상이면 균일용천이라고 하고, 15~100% 정도일 때는 준변동 용천, 100% 이상이면 변동용천으로 분류한다.

$$\text{변동계수}(\alpha) = 100 \times \frac{a - b}{c}$$

여기서, a : 최대 용출량

b : 최소 용출량

c : 일정 기간의 평균 용출량이다.

또한, 용천수는 유출의 지속성에 따라서 지속용천과 간헐용천으로 구분한다. 간헐용천은 모두 변동용천에 해당하고, 지속용천은 균일용천 및 준변동용천에 해당한다.

IV. 용천수 분포의 수문지질학적 특성과 이용현황

1. 제주도 용천수의 수문지질학적 특성

용천수가 제주도의 여러 곳에 분포하고 있는 가장 큰 이유 중의 하나는 강우량이 많을 뿐만 아니라, 제주도가 용암과 투수성이 매우 좋은 화산쇄설물이 겹겹이 쌓인 지질구조를 이루고 있기 때문이라고 할 수 있다. 용암류(熔岩流, lava flows)란 폭발성이 비교적 높지 않은 화산으로부터 분출된 녹아 있는 암석(熔融岩)이 하천의 흐름과 같이 지형경사가 높은 곳에서 낮은 쪽으로 흘러가는 흐름을 일컫는 말이다. 용암류는 지형이 낮은 골짜기를 따라 흐르는 관계로 광범위한 지역을 완전히 피복하지는 못하며, 대체적으로 손가락 모양의 흐름지형을 형성한다. 따라서, 동일시기에 분출한 용암류라도 공간적으로 불연속적으로 분포를 함으로 용암의 흐름에 따른 지형변화가 생겨난다. 일단 용암지형이 형성되고 나면 다음에 용암류가 피복 할 때까지(휴지기)는 침식과 퇴적작용이 진행됨으로서 용암류 사이에는 투수성이 낮거나 투수성이 좋은 지층이 형성되어 지하수의 흐름이 제어를 받게된다.

제주도 용천수의 용출 위치는 지형의 변화와 밀접한 관계가 있다. 지형의 변화는 용암류의 불연속적인 분포, 하천의 발달, 분식구(오름)의 형성, 침식·퇴적작용, 화산 및 지진활동에 수반된 지질구조적인 운동 등 여러 가지 요인에 의해 생겨날 수 있다.

대부분의 용천수들은 하천의 절벽이나 벼랑, 요철지형의 오목지(凹地), 산기슭 등에 위치하고 있는데, 이는 중력의 지배를 받으며 유동하던 지하수가 지형변화로 인하여 지하수면이 지표로 노출됨으로서 생겨나는 현상이다.

일반적으로 화산암 분포지역에서 하천은 주로 용암류 경계부분을 따라 발달하는 것으로 알려져 있다. 용암류 경계부분은 풍화나 침식에 약한 클린커(clinker)층으로 이루어져 있거나 균열·절리가 발달하기 때문에 유수(流水)의 작용에 의

해 비교적 쉽게 침식되는 부분이라 할 수 있다. 이와 같은 용암류 경계부분에 계속적인 침식이 진행되고 연약한 부분들이 떨어져 나감으로서 깊은 침식계곡(하천)이 형성되는데 만일, 계곡의 양쪽 벽에 대수층이 존재하는 경우에는 지하수가 계곡으로 유출하게 된다. 이러한 유형의 대표적인 용천수로는 열안지물·등새미물·천아계곡물·Y계곡물·돈내코물 등을 들 수 있다.

한편, 용천수는 분석구(오름)의 기슭이나 침식면에서 용출하기도 한다. 분석구에 침투한 빗물이 지형경사를 따라 흐르다가 기슭이나 중앙부에 생겨난 침식면에서 용출되기도 하는데, 이러한 용천수들은 용출량이 수십 톤에 불과한 소규모의 것들이 대부분이며, 강우량에 따라 용출량의 변화도 심하게 일어난다. 이 유형의 대표적인 용천수로는 구좌읍 송당리의 올로래기물, 거슨새미, 돌오름물과 제주시의 명도암물, 절물 등을 꼽을 수 있다.

제주도 용천수는 용출지점의 지질구조에 따라 크게 용암류경계형, 절리형, 사력층형으로 구분할 수 있다(Table 5). 「용암류경계형」이란 용암류가 서로 접촉하는 경계면 또는 가장자리나 용암류의 말단부를 따라 용출하는 용천수를 말하며, 「절리형」이란 용암에 발달한 수직절리의 틈이나 파쇄대를 따라 용출하는 경우이고, 「사력층형」은 미고결 또는 준고결 사력층의 공극에 저류된 지하수가 지형변화 지점 또는 오목지를 따라 용출하는 용천수를 말한다.

Table 5. Classification of spring types according to geological structure in Cheju Island

(단위 : 개소)

지역별	합계	용암류경계형	사력층형	절리형
합계	755	682	17	56
동부지역	212	191	4	17
서부지역	174	153	4	17
남부지역	188	176	3	9
북부지역	181	162	6	13

* 동부지역(구좌읍·성산읍·표선면), 서부지역(한림읍·한경면·대정읍)
남부지역(안덕면·서귀포시·남원읍), 북부지역(애월읍·제주시·조천읍)

Table 5에 제시되어 있는 바와 같이, 제주도에 분포하는 용천수의 90.3%인 682개소가 용암류 경계형이며 사력층형은 17개소(2.3%), 절리형은 56개소(7.4%)로 분류되었다.

즉, 제주도의 대부분의 용천수는 용암류 경계면이나 말단부에서 용출하고 있으며 특히, 용암류의 가장자리인 해안선을 따라 용천수들이 집중적으로 위치하고 있어 지하수가 전반적으로 한라산 쪽에서 해안방향으로 유동하고 있음을 잘 보여주고 있다. 아울러, 내륙 쪽에 분포하는 용천수들은 현무암보다는 조면암류 분포지역에 많이 분포하고 있는데, 이는 조면암류용암류가 지니는 성분함량에 따른 물리적 특성에 기인한 지형 변화를 반영하는 것으로 해석된다.

2. 용천수의 지리적 분포 특성

1) 분포개요

제주도의 용천수는 해발 1,682.6m(방아샘)의 한라산 백록담 기슭에서부터 해안가에 이르기까지 여러 곳에 분포하고 있다. 용천수 표고별 분포현황(Table 6)에서 알 수 있듯이 해발 200m 이상의 중산간 및 산악지역에는 전체 용천수의 약 9%에 해당하는 66개소만이 분포하고 있으며, 나머지는 해안가의 저지대에 편중되어 분포하고 있어 해안선에서 한라산 쪽을 향해 표고가 증가할수록 용천수의 개소수가 현저히 감소하는 경향을 잘 보여주고 있다(Fig. 1).

용천수의 분포상태를 보면, 지형경사 완만하고 현무암질 용암류가 대지상으로 분포하는 동·서부 지역의 중산간 지역에는 10개소에 지나지 않고 있는 반면, 조면암과 조면질현무암류가 주로 분포하고 지형경사가 급한 남·북 지역의 중산간 및 고지대지역에 용천수들이 편중된 모습을 보여주고 있다. 특히, 남·북 사면에 분포하는 용천수들은 주로 하천변이나 그 주변 지역에 위치하는데 비하여 동·서부지역에서는 분석구(오름)의 주변이나 기슭에서 용출하고 있다. 또한, 북부지역에서는 외도천, 한천, 산지천, 화북천을 중심으로 용천수들이 발달하고 있으며,

남부지역의 경우는 동홍천과 효례천을 따라 분포하는 양상을 보여주고 있다.

Table 6. Distribution of spring according to elevation

(단위 : 개소)

구 분	계	5m 이하	5 ~ 10m	10 ~ 50m	50 ~ 100m	100 ~ 200m	200 ~ 300m	300 ~ 400m	400 ~ 600m	600 ~ 1,000m	1,000 ~ 1,500m	1,500m 이상
합 계	755	421	63	85	58	62	26	11	8	8	6	7
동부지역	212	182	10	3	7	4	3	1	1	1		
서부지역	174	124	26	13	2	5	2	1	1			
남부지역	188	44	10	50	37	29	6	6			2	4
북부지역	181	71	17	19	12	24	15	3	6	7	4	3

2) 표고별 분포특성

제주도의 용천수는 그 분포위치에 따라 크게 저지대 용천수, 중산간지대 용천수, 그리고 고지대 용천수로 구분할 수 있다. 저지대 용천수는 해발 200m 이하의 저지대에 분포하고 있는 것이고, 중산간지대 용천수는 해발 200~600m 사이 지역에 분포하는 것이며, 고지대 용천수는 해발 600m 이상 지역에 분포하고 있는 것을 말하는데 지역별 분포상황은 Table 7과 같다.

Table 7. Distribution of spring according to zone

(단위 : 개소수)

지 역 별	합 계	저지대	중산간지대	고지대
합 계	755	689(91%)	45(6%)	21(3%)
동부지역	212	206	5	1
서부지역	174	170	4	-
남부지역	188	170	12	6
북부지역	181	143	24	14

저지대 용천수는 전체 용천수의 91%에 해당하는 689개소이고 중산간 지대에는 전체의 6%에 해당하는 45개소가 분포하고 있으며, 해발 600m 이상의 고지대에는 21개소(2.3%)가 분포하고 있다. 이들 용천수를 전술한 지대별로 나누어 그 특징을 살펴보면 다음과 같다.

(1) 고지대 용천수

고지대 용천수는 해발 1,682.6m의 백록담 기슭에 위치한 방아샘을 비롯하여 모두 21개소이다. 이들 용천수를 표고별로 세분해 살펴보면, 해발 600~1,000m 사이 지역에는 관음사물, 천아계곡물, 선녀폭포, 성널샘, Y계곡물 등 8개소가 분포하고, 해발 1,000~1,500m 사이 지역에는 어승생물, 영실계곡물, 원점비물, 사라약수, 사제비물 등 6개소이며, 해발 1,500m 이상 지역에는 용진각물, 영실물, 오름약수, 백록샘, 방아샘 등 7개소이다(Table 8).

이들 용천수 대부분은 고지대에 위치하는 관계로 함양지역 면적이 협소하고 지형경사가 급하여 벗물이 땅속으로 침투한 후 용출하기 까지 2년(Davis 외 2인, 1970) 정도 밖에 걸리지 않기 때문에 용존성분 함량이 지극히 낮을 뿐만 아니라, 강우량에 따른 용출량의 변동도 비교적 심한 편이다. 고지대 용천수는 표고가 증가할수록 용출량·전기전도도·수온이 점진적으로 감소하는 경향을 나타낸다 (Table 8).

용출량이 1일 1,000m³ 이상 되는 용천수는 영실물, 용진굴물, 고망궤왓물, Y계곡물, 성널샘 선녀폭포, 등 6개소 정도에 지나지 않으며, 나머지는 5m³~500m³/일 범위의 소규모의 것들이다. 고지대 용천수 중 영실물과 Y계곡물을 제외한 대부분의 것들은 분석구(오름)의 기슭이나 하천변, 또는 지형이 급격히 변하는 용암류 말단부 등에서 용출하고 있다.

Table 8. Major spring on high elevation zone

용천수 명	표 고 (m)	용출량 (m ³ /일)	전기전도도 (μ moh/cm)	수온 (°C)
방아샘	1,682.6	10	11.5	11.2
백록샘	1,674.2	210	15	9.8

Table 8. continued

용천수명	표고 (m)	용출량 (m ³ /일)	전기전도도 (μ moh/cm)	수온 (°C)
윗세물	1,667.9	50	20.2	7.6
노루샘	1,665.7	30	15.3	6.7
오름약수	1,628.8	50	16.5	9.7
영실물	1,555	2,000	39.7	10.3
용진각물	1,507.1	360	28.8	17.1
용진굴물	1,418.1	4,000	41.8	12
사제비물	1,399.7	500	18.1	10.5
사라악약수	1,283.3	500	78.9	11.8
원점비물	1,099	12	29.9	12.5
어승생물	1,088.6	10	71.6	6.6
영실계곡물	1,064.9	699	29.5	8.7
이도사물	899.6	50	37.1	13.4
고망궤왓물	837.7	5,000	34.5	12.7
Y계곡물	829.1	22,500	37.2	12.6
성널샘	801.5	3,500	18.5	15.2
선녀폭포물	748.5	2,835	-	-
천아계곡물(1)	650	400	37	13.2
천아계곡물(2)	650	5	37	13.2
관음사물	603.6	60	38	13.2

(2) 중산간지대 용천수

해발 200~600m 사이의 중산간 지역에는 모두 45개의 용천수가 분포하고 있다. 이들 용천수를 표고별로 세분해 보면, 해발 200~300m 사이 지역에는 유수암천(애월읍 유수암리)을 비롯하여 26개소가 분포하고 있으며, 해발 300~400m 사이에는 산천단물(제주시 아라동) 등 11개소, 해발 400~600m 사이에는 열안지물(제주시 오라동) 등 8개소가 분포하고 있다. 중산간지대 주요 용천수에 대한 현장측정 결과 고지대 용천수의 경우처럼 전기전도도, 수온이 표고가 높아질수록 전반적으로 감소하는 경향을 나타낸다(Table 9).

Table 9. Major springs on middle elevation zone

용천수명	표고 (m)	평균 용출량 (m ³ /일)	평균 전기전도도 (μ mohs/cm)	평균 수온 (°C)
유수암천	216.7	500	221	15.7
천등약수	232.3	7,966	50.6	14.8
속개물	234.4	10	35.7	15
설새미물	250.5	200	81.7	14.7
올로래기물	252.1	40	74.5	17.1
선물	264.5	300	88.9	14.8
동새미물	265.8	718	106.9	15.8
독지새미	269.8	10	78.9	13.3
산물남서시물	280.2	20	56.95	18.7
거순새미물	282.2	230	55.6	14.5
광대물(방애물)	283.8	10	76.3	13.7
돈내코물	289.4	7,333	61.0	14.4
돌오름물	295.4	5	51.3	13.4
절곡지물	302.4	300	47.1	18.25
산물이맹이동산물	306.1	150	57.5	16.2
중어니케물	316.6	10	70	16.2
명도암물	317.3	101	94.7	14.3
포겟단물	334.4	26	43.6	18.6
산천단물(1)	351.2	415	55.5	14.1
선돌물(1)	363.2	4,566	36.2	14.9
홍골약수물	524.9	20	84.1	13.8
열안지물	561.0	500	47.9	12.7
동이물	568.2	50	47	12.8
절물	569.4	30	99.9	12
가매왓물	583.0	200	42.6	12.3

(3) 저지대 용천수

해발 200m 이하의 저지대에는 전체 용천수의 91%에 해당하는 689개소가 분포하고 있다. 지역별 분포상황을 보면, 동부지역에 206개소(30%), 서부지역에

170개소(24.5%) 남부지역과 북부지역에 각각 170개소(24.5%), 143개소(21%)가 분포하고 있다.

저지대 용천수는 제주도의 전 해안선을 따라 분포하고 있는 것처럼 보이지만 자세히 살펴보면 다음과 같은 몇 가지 특징을 발견할 수가 있다. 그 첫째는 제주도의 해안선 중에서도 화산쇄설성 퇴적층이 분포하는 용수·고산·상모·화순·서귀포·성산포 등의 지역에는 용천수가 발달하지 않거나 있어도 규모가 작은 것들이 분포하고 있다는 것이다. 둘째는 용암류의 두께가 매우 두껍거나 용암대지를 이루고 있는 두모리·신도리·하효동·위미리·표선리·온평리·신양리·월정리·김녕리·신엄리 등 지역의 해안가에는 용천수가 발달하지 않고 있다. 셋째는 해안가에 분포하는 용천수들 대부분은 요철지형(凹凸)이나 지형변화가 급한 벼랑 또는 절벽의 바닥면에서 용출하고 있다. 넷째, 제주도 지하수의 주 흐름방향은 한라산에서 바다 쪽을 향하고 있는데 반하여 바다 쪽에서 한라산 방향으로 흐르는 소위 「거스란물」이라 불리우는 「역수(逆水)」 형태의 용천수도 일부 지역에서 찾아볼 수 있다. 이와 같은 용천수의 분포상태는 제주도의 지형발달과 지질분포, 그리고 지하수의 유동패턴을 잘 반영해 주고 있는 것으로 해석된다.

3) 지역별 분포특성

용천수 분포현황을 시·군별로 보면, 북제주군이 317개소(42%)로 가장 많고 남제주군이 176개소(23%)이며, 제주시와 서귀포시에는 각각 113개소(15%)와 149개소(20%)가 분포하고 있다(Table 10).

이들 용천수 중 해발 5m이하의 해안선 부근지역에 위치한 것은 모두 421개소로 전체의 56%를 차지하고 있는데 지역별로 보면, 북제주군 227개소(54%), 남제주군 115개소(27%), 제주시 44개소(11%), 서귀포시 35개소(8%)로서 북제주군과 남제주군 지역이 제주시와 서귀포시보다 월등히 많다. 또한, 해발 5~10m 사이 지역에 분포하는 63개소 역시 북제주군(30개소)과 남제주군(14개소) 지역에 편중되어 있다.

그러나 해발 10~50m 사이 지역에는 85개소가 분포하고 있는데, 서귀포시 지역에 전체의 51%인 43개소가 분포하고 있으며, 북제주군 지역에 18개소, 남제주

군에 15개소씩 분포하고 있다. 해발 50~100m 지역의 경우 58개소가 분포하고 있는데, 이 중 30개소는 서귀포시 지역에 분포하고 있고, 제주시 지역에 7개소, 북제주군과 남제주군 지역에 각각 13개소와 8개소가 분포하고 있다. 또한, 해발 100~200m 지역(62개소)의 용천수는, 어느 특정지역에 편중됨이 없이 고른 분포를 보이고 있다. 시·군별 용천수 분포상황을 좀더 자세히 서술하면 다음과 같다.

Table 10. Distribution of spring according to different districts and elevation

(단위 : 개소)

시군	읍면	계	5m 이하	5 ~ 10m	10 ~ 50m	50 ~ 100m	100 ~ 200m	200 ~ 300m	300 ~ 400m	400 ~ 600m	600 ~ 1,000m	1,000 ~ 1,500m	1,500 m 이상
합계		755	421	63	85	58	62	26	11	8	8	6	7
제주시		113	44	11	9	7	14	11	3	6	4	3	1
서귀포시		149	35	8	43	30	16	6	6			1	4
북제주군	소계	317	227	30	18	8	15	9	2	2	3	1	2
	구좌읍	61	53	4				3	1				
	조천읍	64	63		1								
	애월읍	82	36	6	10	7	11	4		2	3	1	2
	한림읍	74	55	10	1	1	4	2	1				
	한경면	36	20	10	6								
남제주군	소계	176	115	14	15	13	17				1	1	
	성산읍	40	35		1	2	2						
	남원읍	35	24	5	1	1	2				1	1	
	표선면	15	9	2		3	1						
	대정읍	39	34	1	4								
	안덕면	47	13	6	9	7	12						

(1) 제주시

제주시 지역에는 한라산 정상부의 용진각물(해발 1,507m)에서부터 해안가에 이르기까지 모두 113개의 용천수가 분포하고 있다. 이들 용천수 중 해발 5m이하

의 해안선 부근지역에 44개소(39%)가 분포하고 있으며, 해발 5~300m 사이지역은 대체로 고른 분포를 보이고 있다. 특히 해발 200m이상 지역에 위치한 것이 28개소(25%)로 고지대 용천수가 발달하고 있음을 보이고 있다.

(2) 서귀포시

한라산 남쪽사면에 위치한 있는 서귀포시 지역 내에는 모두 149개의 용천수가 분포하고 있다. 서귀포시 지역의 용천수 분포는 타 시·군에 비해 좀 색다른 특징을 보여주고 있다. 즉, 해발 10m 이하 지역에는 전체의 29%에 불과한 43개소가 분포하고 있으나 해발 10~100m 지역에는 전체의 49%에 이르는 73개소가 분포하고 있어 상위용천수가 발달하고 있음을 잘 보여주고 있다. 이와 같은 현상은 이 지역이 점성이 높은 용암류에서 비롯된 암석들로 이루어져 있어 지형경사가 급할 뿐만 아니라, 지형변화도 심하고 크고 작은 하천들이 발달하고 있는데서 비롯되는 것으로 해석된다.

(3) 북제주군

제주시를 중심으로 동쪽과 서쪽에 위치한 북제주군지역에는 4개시·군중 가장 많은 317개소의 용천수가 분포하고 있다. 읍면별 분포상황을 보면, 북제주군의 동부지역인 조천읍과 구좌읍에는 각각 64개소와 61개소가 분포하고 있으나 대부분 해발 5m 이하의 해안가에 밀집되어 있다.

또한, 북제주군의 서부지역에 위치한 한림읍과 애월읍 지역이 각각 74개소와 82개소로서 전체의 49%를 차지하고 있으며, 환경면은 36개소로 5개 읍면 중 용천수개소수가 가장 적다.

(4) 남제주군

서귀포시를 중심으로 동쪽과 서쪽지역에 위치하고 있는 남제주군 지역에는 모두 176개소의 용천수가 분포하고 있다. 읍면별 분포상황을 보면, 안덕면 지역이 47개소로 가장 많으며, 표선면 지역은 15개소로 가장 적고, 대정읍과 남원읍 및 성산읍 지역은 각각 39개소, 35개소, 40개소를 나타내고 있다. 또한, 남제주군 지

역의 경우도 용천수 대부분이 해안가에 밀집되는 특징을 보여주고 있으나 예외적으로 안덕면 지역의 경우는 해안가에서 비교적 멀리 떨어진 해발 5~200m 지역에 34개소(47개소의 72%)의 용천수가 분포하고 있다.

3. 용출량과 이용현황

1) 용출량 현황

용출량 측정이 가능한 용천수 707개소에 대해 용출량을 측정한 결과, 평균 용출량은 총 1,083,363m³/일이며 최대 용출량은 1,608,342m³/일이다.

평균 용출량을 지역별로 보면, 4개 시·군 중 북제주군 지역이 367,161m³/일로 가장 많고, 제주시와 서귀포시 지역은 각각 288,118m³/일과 272,032m³/일인 반면, 남제주군 지역은 156,052m³/일로서 용출량이 가장 작은 것으로 조사되었다(Table 11).

Table 11. Average and maximum spring yield according to district

시 군	측정개소	평균용출량 (m ³ /일)	최대용출량 (m ³ /일)	용출량변동량 (m ³ /일)
합 계	707	1,083,363	1,608,342	524,979
제 주 시	105	288,118	417,607	129,489
서귀포시	147	272,032	421,509	149,477
북제주군	소 계	301	367,161	523,405
	구좌읍	59	66,588	107,582
	조천읍	62	87,635	130,488
	애월읍	75	97,763	127,728
	한림읍	70	96,130	129,629
	한경면	35	19,044	27,978
남제주군	소 계	154	156,052	245,821
	남원읍	32	46,753	93,750
	성산읍	35	35,366	49,198
	표선면	14	4,544	8,894
	대정읍	32	39,924	53,345
	안덕면	41	29,465	40,634
				11,169

한편, 전체 용천수의 용출량변동량(최대 용출량 - 평균 용출량)은 524,979m³/일로서 평균 용출량의 48%에 해당하여 강우량에 따른 용출량의 변동폭이 매우 큰 것으로 조사되었다. 용출량 변동을 지역별로 보면 제주시 129,489m³/일, 서귀포시 149,477m³/일, 북제주군 156,244m³/일, 남제주군 89,769m³/일로 나타나 서귀포시와 남제주군지역에 분포하는 용천수들의 평균 용출량에 대한 용출량 변동폭은 55~58% 수준이며, 제주시와 북제주군 지역의 경우는 43~45% 수준인 것으로 분석되었다(Table 11).

표고별 용천수 평균용출량 변화를 보면(Table 12), 대체적으로 해안지역에서 산악 쪽으로 향함에 따라 감소하는 경향을 보여주고 있으나 해발 600~1,000m 사이에는 용출량이 많은 일부 용천수(Y계곡물, 영실물 등)로 인하여 용출량이 많게 나타내고 있다. 그리고 서귀포시 지역의 경우 해발 10~50m 사이에 용출량이 많게 나타내고 있는 것은 상위용천수가 발달한 것으로 해석된다.

Table 12. Average spring yield per each spring according to elevation and district
(단위 : m³/일)

표고(m)	합계		제주시		서귀포시		북제주군		남제주군	
	개소	용출량	개소	용출량	개소	용출량	개소	용출량	개소	용출량
합 계	707	1,083,363	105	288,118	147	272,032	301	367,161	154	156,052
5m 이하	385	612,978	37	152,724	34	69,549	215	288,409	99	102,295
5~10m	61	149,932	10	43,534	8	8,450	30	69,175	13	28,772
10~50m	81	213,126	9	51,589	42	138,796	18	5,165	12	17,576
50~100m	55	26,800	7	872	30	23,293	7	1,651	11	985
100~200m	62	12,562	14	1,179	16	8,389	15	571	17	2,424
200~300m	24	18,288	11	1,800	6	15,453	7	1,035		
300~400m	18	6,020	3	817	6	5,153	1	50		
400~600m	8	890	6	840			2	50		
600~1,000m	8	34,337	4	30,382			3	455	1	3,500
1,000~1,500m	6	5,721	3	4,022	1	699	1	500	1	500
1,500m 이상	7	2,710	1	360	4	2,250	2	100		

2) 용천수 이용현황

(1) 이용현황

Table 13은 용천수의 용도별 이용현황 및 이용실태를 나타낸 것이다. 755개 소 중 수량고갈·주변 훼손된 45개소를 제외한 710개소의 이용현황을 보면, 상수원으로 이용되는 용천수가 26개소이고, 생활용 221개소(31%), 농업 및 생활겸용 19개소, 농업용 105개소(15%), 기타용도 4개소이며 이용하지 않는 것은 335개소로 47%를 차지하고 있다. 결국, 710개소 중 375개소(53%)가 이용되고 있는 것으로 조사되었다.

Table 13. Usage of springs Average spring yield according to usage

(단위 : m³/일)

용도별	합계		제주시		서귀포시		북제주군		남제주군	
	개소	용출량	개소	용출량	개소	용출량	개소	용출량	개소	용출량
합계	755	1,083,363	113	288,118	149	272,032	317	367,161	176	156,052
상수원	26	256,829	10	153,504	10	60,925	4	21,400	2	21,000
생활용	221	344,022	30	18,420	35	88,374	116	195,827	40	41,401
생활/농업용	19	83,679	11	72,743	7	10,586		-	1	350
농업용	105	128,565	19	8,391	46	79,157	36	33,491	4	7,526
기타(수산용)	4	3,257		-		-	3	2,757	1	500
미 이용	335	251,777	39	35,050	49	32,641	139	111,621	108	72,465
주변훼손	18	15,235	1	10	1	350	11	2,065	5	12,810
고갈	27		3		1		8		15	

지역별 용천수의 이용실태를 살펴보면, 상수원으로 이용되는 용천수는 제주시와 서귀포시에 편중(20개소)되어 있고 생활용은 북제주군 지역이 116개소로 가장 많으며, 농업용은 서귀포시와 북제주군 지역이 82개소이다. 또한, 미 이용 용천수

는 북제주군과 남제주군 지역(247개소)에 편중되어 있으며, 제주시와 서귀포시에는 각각 39개소와 49개소인 것으로 조사되었다.

용도별 평균 용출량을 보면, 상수원용 용천수가 257천 m^3 /일이고, 생활용 344천 m^3 /일, 농업용 129천 m^3 /일, 생활 및 농업용 84천 m^3 /일, 수산용 3천 m^3 /일이다. 그리고, 미 이용 중인 용천수의 용출량은 252 m^3 /일로서 전체 용출량 1,083천 m^3 /일의 23%를 차지하고 있다. 결론적으로 전체 용출량 중 816천 m^3 /일이 상수원을 비롯한 생활·농업용 등의 용도로 이용되고 있는데, 이 양은 실제로 이용되고 있는 수량이 아니라, 해당 용천수들의 평균 용출량이다.

(2) 상수원

상수원으로 용천수를 이용하기 위한 용천수 개발은 1953년 금산수원을 시작으로 활발하게 추진되어 강정천, 이호, 외도, 삼양, 옹포, 정방, 돈내코, 서홍, 서림, 선돌, 어승생(Y계곡 및 구구곡) 성판악 등 16개소의 수원지에서 26개소의 용천수가 상수원으로 개발되어 있다. 용천수 상수원은 1998년 말 현재 총 16개소에 196,400 m^3 /일의 시설용량을 갖추어 1일 평균 102,595 m^3 을 먹는 물로 공급하고 있는데, 이미 개발된 용천수 상수원의 시설용량은 용천수 전체 평균 용출량의 약 18% 정도이다. 또한, 이들 26개소 용천수는 제주도 상수도 전체 시설용량(1998년 말 341,350 m^3 /일)의 58%를 차지하고 있을 뿐 아니라, 전체 급수량(1998년 말 172,414 m^3 /일)의 60%를 차지하고 있어 아직까지도 용천수 수원의 비중이 여전히 높은 실정이다(Table 14).

지역별로 보면, 제주시지역은 금산수원을 비롯하여 삼양·이호·외도·어승생 등 5개소에 118,950 m^3 /일이 개발되어 있고, 서귀포시 지역에는 강정·정방수원 등 7개소에 42,050 m^3 /일이 개발되어 있어 용천수를 이용한 상수원은 주로 제주시와 서귀포시에 편중되어 있음을 알 수 있다. 특히, 제주시의 경우에는 용천수 상수원이 상수도 시설용량(1998년 말 172,850 m^3 /일)의 69%를 차지하고 있다. 북제주군과 남제주군의 경우, 용천수 상수원은 각각 1개소와 3개소로서 제주시와 서귀포시에 비해 개소 수는 적지만 넓은 지역에 급수되고 있어 이들 지역도 상수원을 용천수에 의존하는 실정이다.

Table 14. List of springs developed for potable water source

시군별	수원지명	용천수명	평균용출량 (m ³ /일)	시설용량 (m ³ /일)	급수량 (m ³ /일)
합계	16개소	26개소	256,829	196,400	102,595
제주시	어승생	Y계곡물, 선녀폭포물 천아계곡물	25,735	21,450	13,329
	외 도	진소물, 검은소물, 나라소물	45,950	14,000	6,380
	이 호	큰물	11,033	10,000	7,262
	삼 양	우무수물, 가막잣지물, 가물개물	51,262	55,000	23,436
	금 산	금산물	19,924	18,500	12,253
	강 정	큰냇물1, 2, 악근냇물	34,075	33,000	23,300
서귀포시	돈내코	돈내코물	7,333	800	825
	정 방	정방물	9,050	4,200	2,088
	서 흥	가시머리물	300	1,000	481
	중 문	천재연물	2,300	1,200	1,074
	상 예	대왕수	3,000	1,700	1,282
	호 근	절꼭지물	300	150	132
	옹 포	조물, 월계수물, 막은물	21,000	20,000	7,003
남제주군	성판악	성널샘	3,500	200	-
	선 둘	선둘물	4,567	200	-
	서 립	서립물	17,500	15,000	3,750

(3) 용천수 보존상태

본 조사가 실시하기 이전까지는 용천수의 위치·개소 수·보존상태 등에 대한 자료가 매우 미흡한 상태였을 뿐만 아니라, 용천수의 관리실태가 제대로 파악이 안된 실정이었다. 그러나 이번에 용천수 현황조사가 실시되어 용천수와 관련된 여러 가지 현황이 파악되었으며, 용천수의 보전·관리에 중요한 기초자료가 축적되는 성과를 이룩할 수 있었다.

현황조사 결과, 조사대상 911개소의 용천수 중 637개소는 보존상태가 양호하

지만 118개소는 수량이 부족하거나 수량고갈·주변훼손 등 보존이 제대로 되어 있지 않은 것으로 파악되었다(Table 15). 특히, 매립 등으로 위치가 멸실된 용천수가 156개소에 이르고 있음은 그 동안 용천수의 보전에 대한 관심도가 낮았음을 반영하는 것이라 하겠다.

Table 15. Conservation of springs according to different districts

시·군	합계	양호	수량부족	수량고갈	주변훼손	위치멸실
합계	911	637 (70%)	74 (8%)	26 (3%)	18 (2%)	156 (17%)
제주시	142	96	13	3	1	29
서귀포시	168	134	13	1	1	19
북제주군	398	268	31	7	11	81
남제주군	203	139	17	15	5	27

시·군별로 보면, 서귀포시 지역이 용천수 보존상태가 가장 양호(80%)하고 나머지 지역은 해당 지역 용천수의 67~68%정도가 양호한 것으로 파악되었다. 특히, 위치멸실 용천수는 북제주군 지역이 81개소(52%)로 가장 많은 것으로 조사되었다.

한편, 과거에 비해 용출량이 부족한 용천수는 모두 74개소로 조사되었다. 이들 용천수는 대부분 해발 200m 이하지역에 위치하고 있는데, 제주시와 서귀포시 지역이 각각 13개소이고 북제주군은 31개로 가장 많으며, 남제주군은 17개소이다.

용천수의 용출량 감소는 어느 한 가지 원인에 의해 발생하기보다는 몇 가지 요인이 복합적인 영향의 결과에 기인한다고 할 수 있는데, 다음과 같은 요인을 생각해 볼 수 있다. 첫째, 용천수 상류지역에서의 지하수 관정 개발이다. 하류 쪽으로 흘러가는 지하수를 상류지역에서 관정을 통해 인위적으로 끌어올려 이용함으로서 하류지역 용천수의 용출량 감소를 일으킬 수 있다. 그러나 이 같은 현상은 지하수 관정의 개발심도, 주 대수층의 깊이 및 지하수 저류능력, 지하수 채수량과 같은 요인에 따라 용출량에 미치는 영향의 정도는 달라질 수 있다. 일례로 제주시 금산 및 삼양수원, 서귀포시 강정수원, 북제주군의 옹포수원, 남제주군의

서림수원 등은 현재 용출량이 상수원 개발 당시와 큰 차이를 나타내고 있지 않음은 전술한 사항을 반영해주는 좋은 예라 할 수 있다. 둘째, 지하수 관정의 시공방법이다. 관정을 시공할 때, 지하수위 상부에 발달하는 소위 「상위지하수」 대수층을 불투수성 재료로 잘 차단시키지 않은 경우에는 상위지하수가 관정 속으로 유입됨으로서 하류로 흘러가던 지하수가 중간에서 차단되기 때문에 용출량 감소를 초래할 수 있다. 이 같은 현상은 대부분 얕은 층을 따라 흐르는 소위 주수지하수(perched water)로부터 용출하는 용천수에서 생겨날 수 있는데, 이 경우에는 관정안에서 지하수가 떨어지는 소리를 들을 수 있다. 셋째, 용천수 상류지역의 도시화이다. 빗물이 침투가 이루어지던 지역이 도시화의 진행으로 아스팔트 및 콘크리트에 의해 포장(불투수성)됨으로서 지하로 침투되는 빗물 양보다 유출량이 많아지게 된다. 용천수 상류지역의 도시화는 지하수 함양량을 감소시켜 용출량의 감소를 초래하는 주요 원인이 될 수 있다.

용천수의 주요 훼손원인은 해안매립·도로확장·건물신축 등인 것으로 파악되었다(Table 16). 위치가 없어져버린 156개 용천수의 훼손 원인을 유형별로 보면, 해안매립에 의한 것이 61개소로 전체의 39%를 차지하였으며 도로확장에 의한 것은 51개소(33%), 건물신축 22개소(14%), 경지정리 12개소(8%), 구획정리 및 기타 유형이 10개소로 조사되었다.

Table 16. Major cause of damage on springs

시군	합계	해안매립	도로확장	건물신축	경지정리	구획정리	기타
합계	156	61	51	22	12	3	7
제주시	29	4	13	6	1	3	2
서귀포시	19	3	5	7	3		1
북제주군	81	45	23	4	6		3
남제주군	27	9	10	5	2		1

(4) 용천수 보호 및 이용시설

용천수를 보호하고 이용하기 위해 집수조, 둘담 울타리, 콘크리트 구조물 등의

시설들이 만들어져 있는데, 수량고갈 용천수를 제외한 729개 용천수 중 61%는
집수 및 보호시설이 설치되어 있으나 나머지 281개소(39%)는 별다른 시설이 없
는 상태이다(Table 17).

Table 17. Facilities for usage and protection on springs

(단위 : 개소)

시 군	합 계	집수/보호시설	보호시설	없음	고갈
합 계	755	232	216	281	26
제 주 시	113	38	44	28	3
서귀포시	149	43	53	52	1
북제주군	317	108	95	107	7
남제주군	176	43	24	94	15

최근 들어 여러 마을에서는 용천수를 보호하기 위한 콘크리트 구조물이나 울
타리 등의 시설을 만들고 있다. 대표적인 예로서는 제주시 도두동의 「오래물」
및 「마구물」, 영평동의 「수수물」, 봉개동의 「명도암물」, 서귀포시 동홍동의
「지장샘」 등을 들 수 있다. 그러나, 이와 같은 시설들은 용출지점만 남겨두고
그 주변지역을 돌이나 콘크리트로 단장하는 경우가 많아 지질구조나 원래의 모
습을 관찰할 수 없는 실정이다.

V. 용천수의 수질특성과 보전방안

1. 용천수의 수질특성

1) 수질개요

용천수와 지하수를 포함하는 자연수는 양이온의 나트륨(Na^+), 칼륨(K^+), 칼슘(Ca^{2+}), 마그네슘(Mg^{2+})과 음이온의 염소(Cl^-), 중탄산염(HCO_3^-), 황산(SO_4^{2-}), 탄산(CO_3^{2-})의 8가지 성분이 대부분을 차지하며, 이들 이온들의 조성비 차이에 의하여 수질특성이 규정된다. 따라서, 이들 8가지 이온성분을 자연수의 주요 성분이라고 한다. 주요 성분 이외에도 여러 가지 미량성분이 함유되어 있지만 함유량이 극히 미량이기 때문에 통상적으로 자연수의 수질특성을 파악에는 주요 성분에 대한 분석 값을 이용하고 있다.

제주도는 면적이 전국의 1% 정도 밖에 되지 않는 작은 섬이지만 지질구조의 복잡성과 지리적 위치로 인하여 지하수의 부존특성, 강수량 및 토양분포 등 수문지질 여건이 내륙지역과는 상당한 차이를 나타낼 뿐만 아니라, 제주도내에서도 지역별로 차이를 나타내기 때문에 지하수 및 용천수의 수질특성을 서술함에 있어서는 이와 같은 제반 상황을 고려하여야 한다. 따라서, 이 글에서는 용천수의 수질성분 분석결과를 동부지역(구좌읍·성산읍·표선면), 서부지역(한림읍·환경면·대정읍), 남부지역(안덕면·서귀포시·남원읍), 북부지역(애월읍·제주시·조천읍)의 4개 지역으로 구분하고, 그 각각의 지역을 다시 표고별로 세분하여 분석한 결과를 근거로 수질특성을 서술하였다.

용천수의 수질현황과 특성을 파악하기 위해 실시된 389개(제주시 40개소, 서귀포시 104개소, 북제주군 131개소, 남제주군 114개소)의 용천수에 대한 음·양이온 성분에 대해 조사대상 용천수의 지역별 및 표고별 현황은 Table 18에 나타내었다. 지역별로는 동부지역 52개소, 서부지역 69개소, 남부지역 168개소, 북부지

역 100개소이며, 표고별로는 남부와 북부지역은 해안에서부터 한라산 고지대까지 고르게 분포되어 있으나 동부 및 서부지역은 중산간 지역과 고지대에 용천수가 없기 때문에 표고 50m 이하의 해안저지대 지역에 편중되어 있다(Fig. 2).

Table 18. Springs for water quality investigation according to different districts
(단위 : 개소)

표고(m)	합 계	동부	서부	남부	북부
합 계	389	52	69	168	100
5m 이하	202	47	53	44	58
5~10m	41	3	9	18	11
10~50m	52		5	42	5
50~100m	24			23	1
100~200m	32		1	24	7
200~300m	12	2		5	5
300~400m	8		1	5	2
400~600m	3				3
600~1,000m	3			1	2
1,000~1,500m	5			2	3
1,500m 이상	7			4	3

조사대상 용천수의 표고별 음·양이온 성분의 평균치를 Table 19에 제시하였다. 표에 제시되어 있는 바와 같이, 대체적으로 염소이온을 비롯한 음·양이온 성분들은 해안가에서 한라산 쪽으로 표고가 증가할수록 농도의 감소가 뚜렷한 편이지만 염소(Cl^-)·황산(SO_4^{2-})·나트륨(Na^{2+})·칼륨(K^+)·마그네슘이온(Mg^{2+})은 해발 10m를 기점으로 농도의 변화가 급격하게 나타나며, 질산성질소($\text{NO}_3^- \text{N}$)·중탄산염(HCO_3^-)·칼슘(Ca^{2+})은 해발 300m를 기점으로 농도의 변화가 일어나고 있다.

특히, 중탄산염을 제외한 성분들은 해발 300m 이상지역에 위치한 용천수에서 강우의 조성에 가까운 농도를 보이고 있어 진화가 거의 진행되지 않은 지하수가

용출하는 것으로 해석된다. 이 같은 현상은 지하수의 순환속도가 매우 빠르기 때문에 지층 내에서 물-암석상호반응이 거의 이루어지지 않고 있음을 의미하는 것이다. 이와는 반대로 염소·황산·나트륨·마그네슘이온 성분들이 해발 10m 이하에 위치한 용천수들에서 높게 나타나는 것은 해수와의 혼합 영향인 것으로 보이며, 질산성질소와 칼슘이온의 증가는 인위적인 물질의 침투에 의한 영향으로 판단된다. 그러나, 해발 10m 이하지역에 위치한 용천수일지라도 모두 해수의 영향을 받는 것은 아니다. 즉, 해발 10m 이하지역에 위치한 용천수(243개) 중 염소이온이 50mg/l 이하의 농도를 나타내는 것이 72개소(30%)나 되고, 먹는 물 수질 기준 이하(250mg/l)의 농도를 보이는 것이 134개소(55%)로 분석되어 지하수 부존형태와 용출지점의 위치에 따라 염소이온의 농도가 큰 차이를 나타내는 것으로 해석된다(Table 21).

Table 19. Average content of cations and anions of spring on different elevation

표고(m)	Cl^-	NO_3-N	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Na^{2+}	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}
5m 이하	625.3	11.1	89.2	51.3	359.2	17.4	47.0	26.8
5~10m	246.1	14.6	39.9	46.3	149.6	9.0	25.5	22.0
10~50m	50.4	16.6	10.0	48.7	29.8	4.0	12.8	21.4
50~100m	24.6	22.0	4.5	38.6	17.6	5.3	11.4	23.0
100~200m	25.9	17.7	5.3	38.5	15.2	4.6	10.5	21.9
200~300m	13.8	6.6	3.1	32.1	9.4	3.2	5.4	11.5
300~400m	7.3	0.5	1.5	25.1	4.8	1.0	0.9	2.1
400~600m	8.6	0.2	1.0	25.3	5.5	1.0	2.0	3.7
600~1,000m	3.6	0.1	1.6	20.7	2.8	0.7	0.9	2.0
1,000~1,500m	5.0	0.1	1.2	19.8	3.2	0.8	0.8	2.0
1,500m 이상	2.5	0.1	1.2	13.8	1.9	0.4	0.4	1.1

특히, 중탄산염을 제외한 성분들은 해발 300m 이상지역에 위치한 용천수에서 강우의 조성에 가까운 농도를 보이고 있어 진화가 거의 진행되지 않은 지하수가

용출하는 것으로 해석된다. 이 같은 현상은 지하수의 순환속도가 매우 빠르기 때문에 지층 내에서 물-암석 상호반응이 거의 이루어지지 않고 있음을 의미하는 것으로 해석된다.

2) 성분별 분포특성

(1) 염소이온(Cl⁻)

염소이온은 음이온으로서 해수 중에 약 19,000ppm이 포함되어 있다. 아울러, 강수에도 염소이온은 포함되어 있는데, 미국의 경우 내륙지방에 내리는 강수에는 평균 1ppm의 농도를 나타내나 해안 부근지역에서는 약 6ppm이 포함되어 있는 것으로 알려져 있다(Todd, 1976). Todd(1976)는 지하수 중의 염분농도가 높을 수 있는 원인으로서 ① 해수의 침입 ② 과거 지질시대 동안에 대수층으로 침투한 해수의 존재 ③ 지층 내에 암염층의 존재 ④ 초호 또는 폐쇄된 습지의 증발작용에 의한 염의 농축 ⑤ 농업용수로 사용한 물의 지하로 재침투 ⑥ 인위적인 염의 폐기 등을 제시한 바 있다.

Table 20. Average chloride content on springs according to different zone

(단위 : mg/l)

표고(m)	동 부		서 부		남 부		북 부	
	개소	평균함량	개소	평균함량	개소	평균함량	개소	평균함량
합 계	52	1034.2	69	639.0	168	74.6	100	303.5
5이하	47	1080.4	53	797.0	44	191.8	58	428.5
5-10	3	994.6	9	44.2	18	95.7	11	453.4
10-50			5	282.8	42	25.3	5	29.2
50-100			-		23	25.0	1	15.0
100-200			1	29.0	24	26.1	7	25.0
200-300	2	8.5	-		5	9.6	5	20.2
300-400			1	6.0	5	5.6	2	12.5
400-600			-		-		3	8.6
600-1,000			-		1	4.0	2	3.5
1,000-1,500			-		2	7.0	3	3.6
1,500이상			-		4	2.7	3	2.3

지역별 용천수의 염소이온 평균함량을 보면(Table 20), 동부지역이 1,034.2mg/l로서 가장 높고 남부지역이 74.6mg/l로서 최저치를 보였다. 또한, 서부지역은 639mg/l이고 북부지역은 303.5mg/l로서 지하수 부존형태와 비교적 잘 일치하는 경향을 보여주고 있다. 즉, 상위지하수가 부존하는 남부지역은 지하수체가 해수와 접촉하지 않기 때문에 염소이온의 함량이 낮은 반면, 기저지하수 부존지역인 동부지역은 담·염수의 접촉이 이루어짐으로서 염소이온의 농도가 높게 나타나고 있다.

Table 21. Average chloride content on springs according to different zone and elevation

(단위 : mg/l)

표고 (m)	전체 평균	동부지역		서부지역			남부지역			북부지역			
		구좌	성산	표선	한경	한림	대정	안덕	서귀포시	남원	애월	제주시	조천
1m 이하	645.5	2,221	448.2	812.1	1,827	1,041	334.1	-	43.6	398.0	186.5	292.2	794.3
1~2m	617.4	1,108	1,310	-	-	630.8	473.0	-	64.5	612.0	231.0	345.1	333.8
2~3m	601.6	1,266	831.7	362.0	1,748	146.0	35.5	509.0	97.3	17.0	67.5	13.0	229.6
3~5m	593.5	1,203	274.0	1,088.	1,884	677.0	15.0	37.0	24.0	109.0	21.0	750.0	135.0
5~7m	296.7	714	1,556	-	40.0	44.5	-	33.3	47.0	255.6	248.3	14.5	1,354
7~10m	42.3	-	-	-	69.0	24.0	-	-	22.5	63.0	64	43.5	-
10~20m	83.8	-	-	-	71.0	1.170	-	28.1	17.3	-	39.0	9.0	-
20m이상	20.3	8.5	-	-	-	17.5	31.0	31.5	19.9	6.0	20.7	11.7	-

표고에 따른 염소이온의 함량은 지역에 따라 큰 차이를 나타내고 있다(Table 21). 즉, 서귀포시 지역은 표고 1m 이하에 위치하는 용천수들에서도 염소이온이 100mg/l 이하의 낮은 값을 보이고, 제주시·애월·남원·대정 지역은 표고 2m 지점에 경계로, 한경·한림·안덕 지역은 표고 5m를 기점으로 염소이온의 농도가 현저히 낮아지고 있다. 그러나, 조천·구좌·성산·표선 지역의 경우는 표고 5~7m에 위치한 용천수들에서도 714~1,556mg/l의 높은 값을 보이고 있어 전술

한 지역과는 대조를 보이고 있다. 이와 같은 결과를 근거로 해안가에 위치한 용천수들의 해수영향을 받는 지점을 구분해 보면, 동부지역은 표고 20m 지점에 위치한 용천수들까지도 해수의 영향을 받고 있으며, 서부지역은 대체로 표고 5m 이하인 것으로 해석된다. 또한, 남부지역은 표고 2m 이하이며 북부지역은 표고 7m를 경계로 해수의 영향권이 구분될 수 있는 것으로 보인다.

Table 21. Average chloride content on springs according to different zone and elevation

(단위 : mg/l)

표고 (m)	전체 평균	동부지역			서부지역			남부지역			북부지역		
		구좌	성산	표선	한경	한림	대정	안덕	서귀포시	남원	애월	제주시	조천
1m 이하	645.5	2,221	448.2	812.1	1,827	1,041	334.1	-	43.6	398.0	186.5	292.2	794.3
1~2m	617.4	1,108	1,310	-	-	630.8	473.0	-	64.5	612.0	231.0	345.1	333.8
2~3m	601.6	1,266	831.7	362.0	1,748	146.0	35.5	509.0	97.3	17.0	67.5	13.0	229.6
3~5m	593.5	1,203	274.0	1,088.	1,884	677.0	15.0	37.0	24.0	109.0	21.0	750.0	135.0
5~7m	296.7	714	1,556	-	40.0	44.5	-	33.3	47.0	255.6	248.3	14.5	1,354
7~10m	42.3	-	-	-	69.0	24.0	-	-	22.5	63.0	64	43.5	-
10~20m	83.8	-	-	-	71.0	1.170	-	28.1	17.3	-	39.0	9.0	-
20m이상	20.3	8.5	-	-	-	17.5	31.0	31.5	19.9	6.0	20.7	11.7	-

(2) 질산성질소($\text{NO}_3\text{-N}$)

일반적으로 질산성질소는 화학비료, 축산시설의 분뇨 및 폐수, 생활하수, 부패된 음식물 등으로부터 생겨나는 유기성 질소로부터 유래되는 물질이다. 이러한 오염원으로부터 발생한 유기질소의 변환과 운명은 지하로 침투하는 질소의 형태와 다양한 생물학적인 변환에 따라 좌우되는데, 대체로 유기질소는 $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$ 순의 변환과정을 거친다. 따라서, 지하수와 용천수 중의 질산성질소 농도는 오염원으로부터 거리가 멀어질수록 점진적으로 증가하는 현상을 나타내어 오염원에서 떨어진 하류 쪽에서 높은 함량을 나타낸다.

지역별 질산성질소 평균함량을 보면, 남부와 서부지역은 15.2~16.1mg/l로 높은 반면, 동부와 북부지역은 7.9~8.2mg/l로 남부와 서부지역의 절반 수준을 보이고 있다(Table 22). 동부지역을 제외한 서부·남부·북부지역의 경우, 표고 10m 이하지역 용천수의 질산성질소 함량이 표고 10~200m 사이 지역에 위치한 용천수들보다 낮은 값을 나타내고 있음은 매우 특이한 현상이다. 이러한 현상은 표고 10~200m 사이에 위치한 용천수들이 비교적 얕은 지층 속을 흐르는 지하수로부터 용출하고 있을 뿐만아니라, 이 지역이 농업활동을 비롯한 토지이용이 집중되는 곳에 위치하고 있기 때문에 화학비료와 생활하수 및 축산폐수 등에 의한 영향을 받는데서 비롯되는 것으로 해석된다.

Table 22. Average nitrate content on springs according to different zone

(단위 : mg/l)

표고(m)	동 부		서 부		남 부		북 부	
	개소	평균함량	개소	평균함량	개소	평균함량	개소	평균함량
합 계	52	8.2	69	16.1	168	15.2	100	7.9
5이하	47	8.5	53	13.5	44	14.9	58	8.1
5-10	3	9.1	9	17.9	18	16.9	11	9.7
10-50			5	43.1	42	13.5	5	16.0
50-100					23	22.6	1	7.2
100-200			1	20.8	24	20.1	7	8.9
200-300	2	0.1			5	4.2	5	11.7
300-400			1	0.4	5	0.2	2	1.3
400-600							3	0.2
600-1,000					1	0.0	2	0.1
1,000-1,500					2	0.2	3	0.1
1,500이상					4	0.1	3	0.1

또한, 이 지역에 위치한 용천수들은 개소 당 평균 용출량이 표고 10m 이하 지역의 용천수보다 작아 물리적 희석작용도 미약하기 때문에 질산성질소의 함량이

높은 것으로 해석된다. 아울러, 표고 200m를 기점으로 질산성 질소의 평균함량 변화가 뚜렷하게 나타나고 있다(Table 23). 즉, 표고 200m 이하 지역에서는 11.1~22.0mg/ℓ의 높은 값을 보이지만, 이 지점을 지나면서부터는 10mg/ℓ 이하의 함량치를 보이고 있어 용천수의 인위적 오염이 발생하는 내륙 쪽 상한은 표고 200m인 것으로 해석된다.

Table 23. Average nitrate content of springs to different elevation

표고별 (m)	전체		5mg/ℓ 이하		5~10mg/ℓ		10~20mg/ℓ		20~40mg/ℓ		40mg/ℓ 이상	
	개수	평균	개수	평균	개수	평균	개수	평균	개수	평균	개수	평균
계	389		90		116		108		65		10	
5m 이하	202	11.1	27	3.5	94	7.8	64	13.6	13	27.8	4	46.9
5~10m	41	14.6	5	3.1	11	7.6	16	14.5	7	25.2	2	45.5
10~50m	52	16.6	14	2.5	7	7.5	13	13.0	15	28.5	3	59.8
50~100m	24	22.0	2	2.7	2	6.4	8	15.5	11	30.6	1	48.1
100~200m	32	17.7	8	1.5	1	6.8	6	15.0	17	26.9		
200~300m	12	6.6	8	0.8	1	8.7	1	17.7	2	23.5		
300~400m	8	0.5	8	0.5								
400~600m	3	0.2	3	0.2								
600~1,000m	3	0.1	3	0.1								
1,000~1,500m	5	0.1	5	0.1								
1,500m 이상	7	0.1	7	0.1								

조사대상 389개 용천수의 질산성질소 함량분포를 보면, 5mg/ℓ 이하의 용천수가 23%(90개소)이고, 5~10mg/ℓ 사이의 것은 30%(116개소)로서 먹는물 수질기준에 적합한 용천수가 전체 조사대상의 53%(206개소)이다. 또한, 10~20mg/ℓ의 것은 108개소(28%)이고, 20~40mg/ℓ 범위의 농도를 갖는 것은 65개소(17%)로 생활·농업·공업용수 수질기준에 적합한 용천수가 173개소(45%)인 것으로 분석되었다(Table 23). 따라서, 조사대상 389개소 용천수 중 용도별 수질기준을 초과한

것은 10개소(3%)로서 용천수의 수질이 현재까지는 비교적 양호한 것으로 나타났다.

(3) 황산이온(SO_4^{2-})

자연계에 있어서 황산은 주로 황 광석의 산화로부터 유래된다. 광산폐수의 영향을 받지 않는 지역에 부존하는 자연수(지하수 포함) 중에는 대체로 300mg/l 이하의 황산이온이 포함되어 있다. 황산이온의 농도가 250mg/l 정도이면 공업용수로 이용하기가 곤란하며, 500mg/l 정도가 되면 쓴맛을 나타내고, 1,000mg/l 가 포함된 물을 마시면 설사를 일으킬 수 있다(Todd, 1976). 또한, 황산이온은 화산으로부터 유래되기도 하지만, 일반적으로 지하수 중에 포함된 황산이온은 유기물의 분해에 의한 것이며, 환원성 지하수에서는 메탄에 의해 황화수소로 분해되기 때문에 적은 농도를 나타낸다.

Table 24. Average sulphate content of springs according to different zone

(단위 : mg/l)

표고(m)	동 부		서 부		남 부		북 부	
	개소	평균함량	개소	평균함량	개소	평균함량	개소	평균함량
합 계	52	138.6	69	98.1	168	12.5	100	44.6
5이하	47	144.4	53	120.9	44	29.6	58	60.7
5-10	3	138.3	9	14.1	18	15.4	11	74.4
10-50			5	45.4	42	6.0	5	8.0
50-100					23	4.3	1	11.0
100-200			1	7.0	24	5.7	7	3.5
200-300	2	2.0			5	1.8	5	5.0
300-400			1	2.0	5	1.4	2	1.5
400-600							3	1.0
600-1,000					1	2.0	2	1.5
1,000-1,500					2	1.5	3	1.0
1,500이상					4	1.2	3	1.3

조사대상 용천수의 평균 황산이온 함량을 지역별로 보면, 동부지역이 138.6mg/l로 가장 높고, 남부지역은 12.5mg/l로 최저치를 나타냈다. 또한, 서부지역의 용천수에서는 98.1mg/l이고 북부지역의 경우는 44.6mg/l를 보여 지역별 함량 차이가 심한 편이다. 황산이온의 경우도 대체로 표고 10m를 경계로 농도의 뚜렷한 변화를 보여주고 있어 앞에서 언급한 염소이온의 분포경향과 일치하고 있다 (Table 24, Fig. 4).

염소이온과 황산 및 나트륨이온과의 상관관계를 보면, 염소이온이 증가함에 따라 황산과 나트륨이온도 비례적으로 증가하는 경향을 보인다(Fig. 4). 특히, 염소이온 농도가 100mg/l 이하에서는 이들 이온성분의 증가가 미약하지만 100mg/l를 초과하면서 부터는 뚜렷한 증가추세를 나타내고 있어 해안지역 용천수들 대부분은 해수의 영향을 많이 받고있는 것으로 해석된다.

염소이온과 황산 및 나트륨이온과의 상관관계를 보면, 염소이온이 증가함에 따라 황산과 나트륨이온도 비례적으로 증가하는 경향을 보인다(Fig. 4). 특히, 염소이온 농도가 100mg/l 이하에서는 이들 이온성분의 증가가 미약하지만 100mg/l를 초과하면서 부터는 뚜렷한 증가추세를 나타내고 있어 해안지역 용천수들 대부분은 해수의 영향을 많이 받고있는 것으로 해석된다.

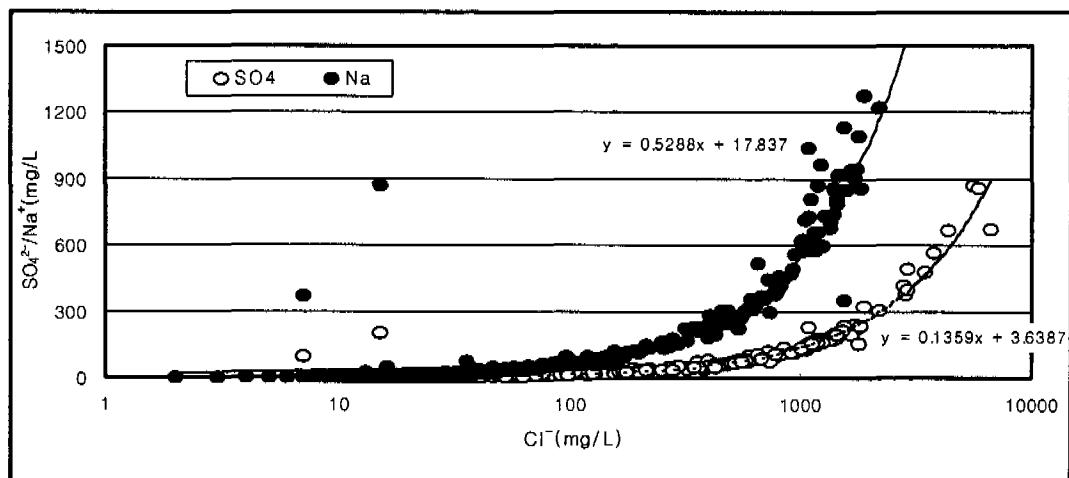


Fig. 4. Relationship between chloride, sulphate and sodium.

(4) 나트륨이온(Na⁺)

자연수 중의 나트륨은 장석, 점토광물, 중발암과 같은 암석이 변질 또는 풍화 작용으로부터 유래되지만 제주도와 같이 바다로 둘러싸인 도서지역에서는 해수의 영향에 의해 지하수 중의 나트륨 농도가 높을 수 있다. 또한, 생활하수 및 공업·축산폐수의 지하침투에 의해서도 나트륨의 농도는 증가할 수 있다. 일반적으로 자연수 중의 나트륨이온의 농도는 200mg/l 이하이며 해수에는 약 10,000mg/l 가 용존 되어있다. 또한, 나트륨과 칼륨이온의 농도가 50mg/l 이상이면 부유물질의 응집현상을 일으키는 것으로 알려져 있다(Todd, 1976).

제주도 지하수(관정)의 나트륨이온 평균농도는 $12.08 \pm 13.15 \text{mg/l}$ (상공자원부, 1994)로서 화강암 또는 화강편마암이 분포하는 강원도 태백산 일대 지표수 중의 평균치($4.89 \pm 2.64 \text{mg/l}$)보다 훨씬 높은 것으로 조사된 바 있는데, 이러한 현상은 제주도가 Na₂O 함량이 5~6% 되는 알카리 계열의 화산암으로 구성되어 있고, 사면이 바다로 둘러싸인 도서지역인데서 비롯되는 것으로 해석된다.

Table 25. Average sodium content of springs according to different zone

(단위 : mg/l)

표고(m)	동 부		서 부		남 부		북 부	
	개소	평균함량	개소	평균함량	개소	평균함량	개소	평균함량
합 계	52	565.2	69	372.2	168	45.5	100	186.3
5이하	47	601.3	53	465.7	44	115.7	58	250.4
5-10	3	372.4	9	25.3	18	55.7	11	344.1
10-50			5	150.1	42	16.8	5	18.4
50-100					23	17.9	1	12.4
100-200			1	16.8	24	15.2	7	14.9
200-300	2	6.6			5	6.8	5	13.2
300-400			1	5.3	5	3.8	2	7.2
400-600							3	5.5
600-1,000					1	2.7	2	2.9
1,000-1,500					2	4.4	3	2.4
1,500이상					4	1.8	3	2.0

지역별 용천수의 평균 나트륨이온의 함량을 보면, 염소이온 및 황산이온의 함량분포 경향과 대체로 일치하고 있다(Table 25). 즉, 동부지역이 565.2mg/l 로 가장 높고 남부지역은 45.5mg/l 로 최저치를 나타내고 있다. 또한, 서부지역은 372.2mg/l 이고 북부지역은 186.3mg/l 를 나타내며, 대체로 표고 10m 이하지역에 위치한 용천수들에서 나트륨 이온함량이 높은 편이다(Fig. 4).

(5) 칼륨이온(K^+)

칼륨이온도 나트륨이온의 경우처럼 암석의 변질 또는 풍화작용으로부터 자연수에 용존되는 것이 일반적인 현상이나 생활하수 등 각종 오·폐수 및 농업용비료(카리비료)로부터도 유입될 수 있다. 특히, 제주도의 경우에는 해상에 위치한 도서지역이기 때문에 해수에 의한 영향도 무시할 수 없다. 일반적으로 자연수내에 용존되어 있는 칼륨이온은 10mg/l 이하이며, 해수에는 평균 380mg/l 가 용존되어 있다.

제주도 지하수(관정) 중의 칼륨이온의 함량은 평균 $4.39 \pm 1.58\text{mg/l}$ 인 것으로 보고된 바 있다(상공자원부, 1994).

조사대상 용천수의 지역별 평균 칼륨이온의 함량을 보면, 동부와 서부지역은 각각 25.7mg/l 과 18.4mg/l 를 나타내어 일반적인 자연수 수준을 초과하고 있으나 남부와 북부지역은 5.0mg/l 과 9.8mg/l 를 나타내어 자연수에 가깝거나 그 보다 낮은 값을 보이고 있다. 그러나, 표고별 분포를 보면, 동부지역은 표고 10m 이내 지역에 위치한 용천수들에서도 25.5mg/l 의 높은 값을 나타내는 반면 북부지역은 표고 10m 이하에서 $12.7\sim 14.7\text{mg/l}$, 남부지역은 평균 해수면 근처에 위치한 용천수에서도 10mg/l 이하의 낮은 값을 보이고 있어 지역별 함량의 변화가 비교적 심한 편이다(Table 26).

나트륨이온과 칼륨이온과의 상관관계를 보면(Fig 5), 나트륨이온 농도가 100mg/l 이하에서 칼륨이온은 10mg/l 정도를 나타내지만 이 수준을 초과하면서부터는 칼륨이온의 농도가 나트륨이온과 비례적으로 증가하는 뚜렷한 경향을 보여주고 있다. 이러한 현상은 나트륨이온이 100mg/l 이하의 값을 보이는 용천수들은 해수의 영향보다는 암석-물과의 반응 또는 인위적인 물질의 영향을 받고 있기

때문인 것으로 해석된다.

Table 26. Average potassium content of springs according to different zone

(단위 : mg/l)

표고(m)	동 부		서 부		남 부		북 부	
	개소	평균함량	개소	평균함량	개소	평균함량	개소	평균함량
합 계	52	25.7	69	18.4	168	5.0	100	9.8
5이하	47	26.8	53	22.3	44	7.9	58	12.7
5~10	3	25.5	9	5.1	18	4.7	11	14.7
10~50			5	7.9	42	3.6	5	2.8
50~100					23	5.3	1	4.9
100~200			1	3.9	24	5.2	7	2.6
200~300	2	0.9			5	1.5	5	5.8
300~400			1	0.7	5	0.8	2	1.6
400~600							3	1.0
600~1,000					1	0.8	2	0.7
1,000~1,500					2	1.2	3	0.6
1,500이상					4	0.5	3	0.4

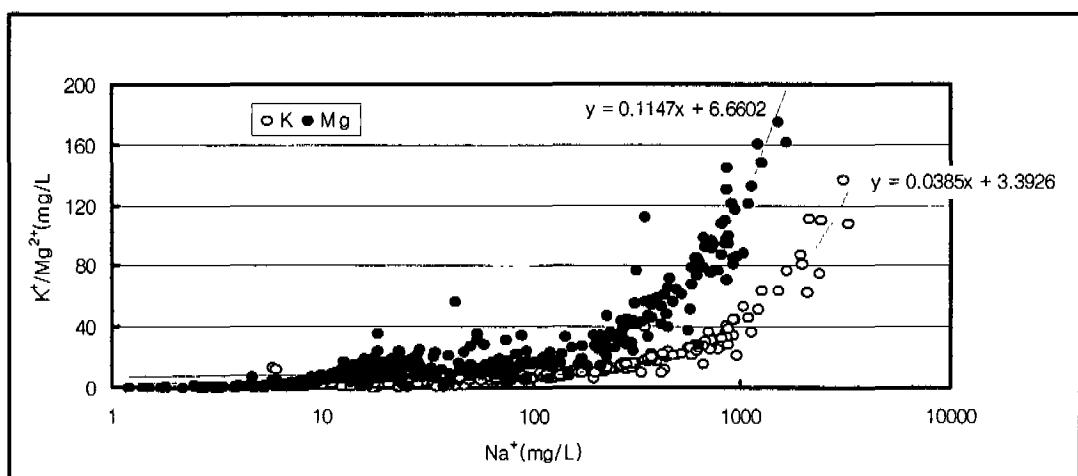


Fig. 5. Relationship between sodium, potassium and magnesium.

(6) 마그네슘이온(Mg^{2+})

일반적으로 지하수 중의 마그네슘이온의 농도는 50mg/l 정도이며, 해수에는 $1,000\text{mg/l}$ 이상의 농도를 나타낸다(Todd, 1976). 제주도는 섬 전체가 알카리계열의 현무암과 조면암으로 구성되어 있을 뿐만 아니라, 마그네슘을 다량 함유한 현무암이 넓은 면적을 차지하고 있어 이들 암석의 풍화에 의해 지하수(용천수)에 마그네슘이 용존될 수 있는 호조건을 지니고 있다. 제주도 지하수(관정)의 마그네슘 평균 함량은 $6.28 \pm 4.15\text{mg/l}$ (상공자원부, 1994)로서 강원도 정선군 일대 지표수의 평균치($5.35 \pm 5.49\text{mg/l}$)보다 높은 값을 보이고 있어 지하수의 수질이 구성지질과 밀접한 관련성이 있음을 보여주고 있다.

Table 27. Average magnesium content of springs according to different zone

(단위 : mg/l)

표고(m)	동 부		서 부		남 부		북 부	
	개소	평균함량	개소	평균함량	개소	평균함량	개소	평균함량
합 계	52	69.5	69	54.6	168	11.7	100	25.5
5이하	47	71.7	53	64.2	44	18.3	58	33.1
5-10	3	80.0	9	14.6	18	13.1	11	39.9
10-50			5	42.9	42	9.1	5	14.3
50-100					23	11.6	1	6.3
100-200			1	16.5	24	10.8	7	8.5
200-300	2	2.3			5	3.9	5	8.1
300-400			1	2.2	5	0.1	2	2.3
400-600							3	2.0
600-1,000					1	0.6	2	1.1
1,000-1,500					2	1.1	3	0.6
1,500이상					4	0.4	3	0.4

Table 27은 제주도 용천수의 지역별 마그네슘이온의 평균 농도를 나타낸 것이다. 마그네슘이온의 평균농도를 보면 동부와 서부는 $54.6 \sim 69.5\text{mg/l}$ 이고, 남부

는 11.7mg/l , 북부는 25.5mg/l 를 나타내어 남부지역 용천수에서 최저치를 보이고 있다. 표고에 따른 변화를 보면, 대체적으로 표고 10m를 기점으로 농도의 변화가 일어나고 있지만 북부와 남부지역에서는 특이한 양상을 보이고 있다. 즉, 남부지역의 경우 표고 200m 이하지역에서는 대체로 10mg/l 의 농도를 보이지만 그 이상에서는 1mg/l 이하의 낮은 함량을 나타내고 있다. 그렇지만, 북부지역은 표고 300m 지점을 경계로 농도의 변화가 나타나며 표고 300m 이상의 지역에서도 남부지역보다는 높은 $1\sim 2\text{mg/l}$ 의 함량치를 보여주고 있어 지하수 순환속도가 남부지역이 북부지역보다 빠르게 일어나고 있는 것으로 해석된다.

(7) 칼슘이온(Ca^{2+})

일반적으로 지하수 중에 용존되어 있는 칼슘이온의 농도는 100mg/l 이하이며 해수에는 평균 412mg/l 가 용존되어 있다. 제주도 지하수(관정)의 평균 칼슘이온 농도는 $8.07\pm 4.97\text{mg/l}$ (상공자원부, 1994)로 조사된 바 있다. 조사대상 용천수의 평균 칼슘이온함량은 서부지역이 36.3mg/l 로 가장 높았고 북부지역이 16.3mg/l 로 최저치를 나타냈다(Table 28). 또한, 동부지역은 32.4mg/l 이고 남부지역은 18.1mg/l 이다. 남부와 북부지역 용천수의 표고에 따른 칼슘이온 함량변화를 보면, 앞에서 언급한 마그네슘이온의 변화에서처럼 북부지역이 고지대 용천수에서도 비교적 높은 값을 보이고 있다. 칼슘이온과 마그네슘이온과의 상관관계를 보면(Fig. 6), 대체적으로 칼슘이온함량이 증가함에 따라 마그네슘이온도 증가하는 관계를 보여주고 있으나 마그네슘이온농도가 10mg/l 를 기점으로 칼슘이온의 농도가 ① 급격히 증가하는 유형과 ② 완만한 증가를 보이는 유형으로 구분되고 있다. 이와 같은 현상은 마그네슘이온과 칼슘이온농도가 각각 10mg/l 이상 되는 용천수들이 지표의 영향을 받는 정도가 차이가 있음을 보여주는 것으로 해석된다.

즉, ① 유형은 용천수 주변 또는 상류지역에 위치한 오염원의 영향을 비교적 빠르게 받는 얇은 지층 속을 흐르는 지하수가 용출하는 용천수인 것으로 해석되며, ② 유형은 깊은 지층 속을 흐르는 지하수로부터 용출하는 용천수로서 지표상의 오염물질 영향을 느리게 받거나 거의 받지 않는 용천수인 것으로 보인다.

Table 28. Average calcium content of springs according to different zone

(단위 : mg/l)

표고(m)	동 부		서 부		남 부		북 부	
	개소	평균함량	개소	평균함량	개소	평균함량	개소	평균함량
합 계	52	32.4	69	36.3	168	18.1	100	16.3
5이하	47	33.2	53	38.3	44	17.8	58	17.7
5-10	3	38.9	9	21.6	18	17.5	11	25.0
10-50			5	50.4	42	17.8	5	23.5
50-100					23	23.6	1	9.8
100-200			1	19.6	24	24.2	7	14.3
200-300	2	3.9			5	12.0	5	14.0
300-400			1	6.2	5	0.9	2	3.1
400-600							3	3.7
600-1,000					1	1.6	2	2.2
1,000-1,500					2	2.6	3	1.6
1,500이상					4	1.1	3	1.2

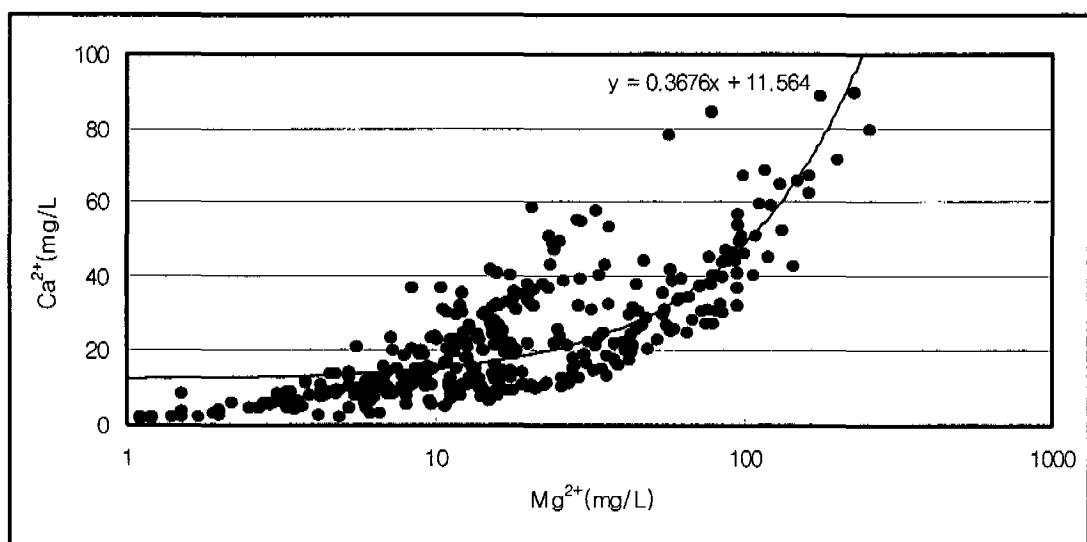


Fig. 6. Relationship between magnesium and calcium.

이와 같은 현상은 질산성질소와 칼슘이온과의 상관관계에서도 잘 보여주고 있다 (Fig. 7). 즉, 칼슘이온은 질산성질소의 농도가 증가함에 따라 높아지는 경향을 뚜렷하게 보여주고 있다. 오염되지 않은 천연수의 질산성질소 함량 수준(3mg/l)에서도 칼슘의 농도가 10mg/l 이상까지 꾸준한 증가를 나타나는 용천수들은 자연적인 암석-물과의 상호작용에 의해 칼슘이온이 용존되는 것으로 생각되며, 질산성질소가 3mg/l 를 넘어서면서 칼슘이온이 급격히 증가하는 현상은 인위적인 오염물질의 영향을 받기 때문인 것으로 해석된다.

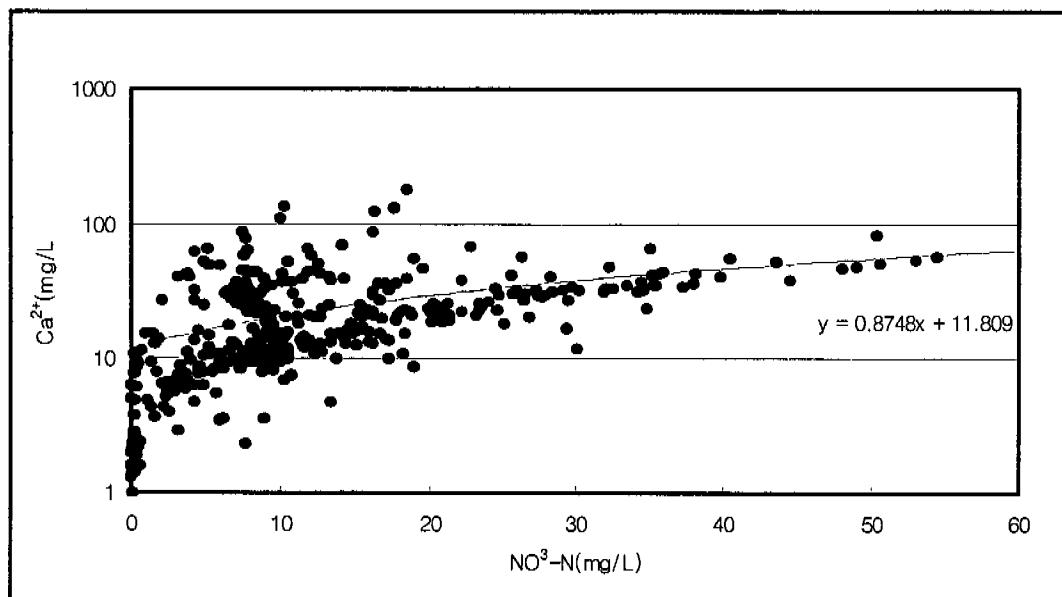


Fig. 7. Relationship between calcium and nitrate.

2. 용천수의 보전방안

1) 보전대상 용천수의 선정

제주도의 용천수는 제주의 물을 대표하는 상징성을 지니고 있다. 곧, 제주의

역사는 용천수로부터 시작되었고 용천수를 중심으로 마을이 형성되었으며, 용천수가 끊임없이 흐르고 있기에 제주의 역사는 단절되지 않고 이어져 내려왔다. 따라서, 용천수는 제주인의 혈통과 문화를 계승시켜온 생명수라 하여도 지나침이 없을 것이다. 때늦은 감은 있지만 지금부터라도 보전가치가 있는 용천수를 선정해 더 이상 훼손되지 않도록 관리하는 적극적인 용천수 보전대책이 요구되고 있다.

일본의 경우, 전국을 대표하는 명수 100곳(명수백선)을 선정해 특별관리하고 있다. 전국의 하천, 폭포, 용천수, 지하수 중에서 100개가 선정되었는데, 이 중 용천수가 차지하는 비율은 77%이고 지하수(정호)까지 합하면 82%에 이르고 있다. 일본의 명수백선 선정 기준은 다음과 같다(지하수 정책 연구회, 1994).

- ① 수질, 수량, 주변 환경 등이 양호한 물
- ② 지역 주민 등에 의한 보존활동이 잘 이루어지고 있는 물
- ③ 규모(용출량, 면적 등)
- ④ 역사성(古事, 由來)
- ⑤ 회소성, 특이성, 저명도(著名度) 등이다.

즉, 일본의 명수백선은 위의 5가지 사항을 만족시키고 주변 환경이 잘 보존되어 있어 사람들이 즐겨 찾는 물이라 할 수 있다. 명수백선으로 선정된 용천수는 하천의 흐름을 유지시키거나 연못을 이루거나, 혹은 공동의 음용수·목욕·세탁장 등으로 이용되는 것들로 이루어져 있다.

제주도에는 지방문화재로 지정·보존해야 할 정도로 역사적·학술적 보존가치가 매우 높은 용천수에서부터 보존가치가 낮은 것까지 다양하게 분포하고 있다. 용천수의 용출위치를 비롯하여 주변 환경여건·용출량·수질 등을 고려할 때, 용천수 모두를 보존한다는 것은 현실적으로 불가능하므로 보전대상 용천수를 선정하고, 이를 중점적으로 관리하는 것이 필요할 것이다. 따라서, 보전대상 용천수를 선정하기 위해 역사성·환경성·용출량·수질의 4가지 분야를 정하고, 그 각각에 대해 3~4가지 평가항목을 만들어 0~3점씩 부여하는 방식에 의거 조사된 755개 용천수를 다음과 같이 평가하였다(Table 29).

Table 29. Evaluation methods of springs for conservation

평가분야	점수	평 가 항 목
합 계	12	14가지
역사성	3	과거 용천수 개발·이용과 관련된 역사적 기록 또는 유래가 있거나 주민의 식수원 등으로 이용되었던 용천수
	2	역사적 기록은 없으나 주민의 식수원·목욕·세탁용 등으로 이용되었던 용천수
	1	역사적 기록도 없고 거의 이용되지 않았던 용천수
환경성	3	주변의 자연환경이 깨끗하거나 보호시설이 잘 만들어져 있고, 비교적 청결한 상태로 관리되고 있는 용천수
	2	주변 자연환경이 비교적 좋지 않고 용천수 보호시설은 만들어져 있으나 관리가 잘 안되고 있는 용천수
	1	주변 자연환경이 불량하고 보호시설을 갖추기 어려운 용천수
용출량	3	1일 평균 용출량이 5,000m ³ 이상 되는 용천수
	2	1일 평균 용출량이 1,000~5,000m ³ 범위의 용천수
	1	1일 평균 용출량이 1~1,000m ³ 범위의 용천수
	0	용출위치가 매립되거나 수량이 고갈된 용천수
수 질	3	평균 전기전도도가 500 μ mhos/cm 이하의 용천수
	2	평균 전기전도도가 500~1,000 μ mhos/cm 범위의 용천수
	1	평균 전기전도도가 1,000~2,000 μ mhos/cm 범위의 용천수
	0	평균 전기전도도가 2,000 μ mhos/cm 이상 되는 용천수

2) 보전대상 용천수의 현황

전술한 평가방법에 의해 755개 용천수 모두를 평가하고, 총점 6점까지의 용천수를 보전대상 용천수로 선정하였다. 평가결과, 보전대상 용천수는 모두 453개로 집계되었는데, 이것은 수량이 고갈된 용천수를 제외한 전체 용천수(729개소)의 62%에 해당하는 것이다. 편리상 총점이 12점인 용천수를 1등급으로 분류하였고 11점을 2등급, 10점을 3등급, 9점을 4등급, 8점을 5등급, 7점을 6등급, 6점을 7등급으로 각각 분류하였다(Table 30). 등급별로 보면, 5등급과 6등급이 각각 123개

소와 115개소로 전체의 52.5%를 차지하며(238개소), 1등급~4등급은 29%(129개소), 7등급은 19%(86개소)이다. 시·군별로 보면, 북제주군 지역이 159개소로 가장 많으며 서귀포시 125개소, 제주시와 남제주군이 각각 84개소와 85개소이다.

Table 30. Springs for conservation according to different zone

(단위 : 개소)

시군	합계	1등급	2등급	3등급	4등급	5등급	6등급	7등급
합계	453	11	22	38	58	123	115	86
제주시	84	3	9	8	12	25	16	11
서귀포시	125	5	9	20	18	36	24	13
북제주군	159	3	1	7	18	42	43	45
남제주군	85		3	3	10	20	32	17

보전대상 용천수의 평균 용출량은 전체 평균 용출량($1,083,363\text{m}^3/\text{일}$)의 88%에 해당하는 $953,394\text{m}^3/\text{일}$ 인데 등급별로 보면, 3등급에 해당하는 용천수가 $257,837\text{m}^3/\text{일}$ 로 가장 많고, 2등급과 3등급이 각각 $165,101\text{m}^3/\text{일}$ 과 $166,556\text{m}^3/\text{일}$ 을 차지하여 1~3등급 용천수가 전체의 62%를 차지하고 있다(Table 31). 지역별로는 제주시·서귀포시·북제주군이 $264\sim286\text{천 m}^3/\text{일}$ 범위이고, 남제주군은 $125\text{천 m}^3/\text{일}$ 정도이다.

Table 31. Average spring yield for conservation according to different zone

(단위 : 개소, $\text{m}^3/\text{일}$)

시군	합계	1등급	2등급	3등급	4등급	5등급	6등급	7등급
합계	953,394	165,101	166,556	257,837	110,730	12,3571	74,762	54,838
제주시	286,585	51,242	91,445	89,951	8,338	39,628	3,540	2,440
서귀포시	264,875	65,586	43,848	91,255	18,310	26,051	15,785	4,040
북제주군	276,249	48,273	2,462	52,051	70,046	29,262	34,410	39,743
남제주군	125,685		28,800	24,578	14,036	28,630	21,027	8,615

보전대상 용천수의 표고별 평균 용출량을 보면(Table 32), 표고 10m 이하 지역이 647천 m³/일로 67.8%를 차지하고 있으며, 표고 10~200m 사이지역은 238천 m³/일, 표고 200~600m의 중산간 지역은 25천 m³/일, 표고 600m 이상의 고지대는 42천 m³/일이다.

Table 32. Average spring yield for conservation according to different zone and elevation

(단위 : m³/일)

표고(m)	합계	제주시	서귀포시	북제주군	남제주군
합계	953,394	286,585	264,875	276,249	125,685
5m 이하	484,365	151,316	65,319	182,264	85,466
5~10m	163,023	43,474	6,310	84,525	28,713
10~50m	198,981	51,573	138,156	5,133	4,120
50~100m	26,736	866	23,255	1,641	974
100~200m	12,464	1,163	8,383	505	2,411
200~300m	18,133	1,758	15,350	1,025	
300~400m	6,019	816	5,153	50	
400~600m	890	840		50	
600~1000m	34,350	30,395		455	3,500
1000~1500m	5,721	4,022	699	500	500
1500m 이상	2,710	360	2,250	100	

보전대상 용천수의 용도별 현황을 보면(Table 33), 상수원으로 이용되고 있는 26개의 용천수를 비롯하여 생활용이 166개소, 생활 및 농업용이 19개소이고, 농업용은 84개소이다. 또한, 현재 이용되지 않고 있는 용천수도 155개소가 포함되어 있다.

Table 33. Usage classification on spring for conservation

(단위 : 개소)

등급별	합계	상수원	생활용	생활/ 농업용	농업용	기타 (수산용)	미이용
합계	453	26	166	19	84	3	155
1등급	11	6	1	1	2		1
2등급	22	10	5	5	1		1
3등급	38	6	16	6	6		4
4등급	58	2	27	4	14		11
5등급	123	2	55	2	31		33
6등급	115		42	1	15		57
7등급	86		20		15	3	48

3) 용천수의 보전방안

근래 들어 인적이 한적한 곳에서 솟아나는 용천수를 약수터로 이용하는 사람들이 부쩍 늘어나고 있을 뿐만 아니라, 담수욕장이나 농업용수로 이용되는 용천수들도 꾸준히 늘어나고 있는 추세이다. 용천수 보전방안이라 함은 용천수의 원형을 보존하고, 용출량과 수질을 보전하며, 용천수의 주변 환경을 청결하게 유지하는데 필요한 시책이라 할 수 있다. 결국, 용천수 보전방안은 지하수의 보전방안과 동일한 맥락에서 검토되어야 할 성격이기 때문에 용천수의 원형을 보전하기 위한 방안과 수량 및 수질을 보전하기 위한 방안으로는 다음과 같다.

(1) 용천수의 원형 보전

• 보호시설 및 안내문 설치

각종 개발사업에 의해 용천수가 매립되거나 훼손되는 것을 방지하고, 용천수를 찾는 일반인들의 이해를 돋기 위해서는 용천수 보호시설을 만들거나 정비함과 아울러, 용천수에 대한 안내문을 설치하는 것이 필요하다.

보전대상 용천수로 선정된 453개의 용천수 중 보호시설이 이미 만들어져 있는

것은 325개소(72%)이나 보호시설이 없는 것도 128개소에 이르고 있어 이들에 대한 보호시설이 시급히 만들어져야 할 것이다(Table 34).

Table 34. Spring protection facilities for conservation

(단위 : 개소)

시 군	합 계	집수/보호시설	보호시설	없 음
합 계	453	194	131	128
제 주 시	84	37	28	19
서귀포시	125	41	44	40
북제주군	159	78	47	34
남제주군	85	38	12	35

그러나, 보호시설은 주변 자연환경과의 조화를 이를 수 있도록 전문적인 검토 과정을 거친 후 시행되어야 하며, 보호시설 설치 시에는 용출지점의 원형이 훼손되지 않도록 각별히 유의해야 한다. 또한, 용천수의 일반현황(이름·표고·용출량)과 역사성 및 이용내력 등과 함께 수질상태 등을 기록한 안내문을 설치하여 용천수에 대한 일반인들의 이해는 물론 지역 주민들이 자긍심을 갖을 수 있도록 하는 것이 필요하다.

• 용천수 정화활동의 전개

제주도 전체적으로 볼 때 용천수를 이용하는 사람들이 감소함에 따라 용천수 보전에 대한 관심도도 점차 낮아져 가고 있는 실정이다. 특히, 여름철에는 용천수 이용시설을 비롯한 그 주변에 대한 청소 등 정화활동이 비교적 잘 이루어지는 편이나 그 외의 시기에는 관리가 소홀한 편이다. 용출지점에 각종 쓰레기들이 쌓이고, 토사가 퇴적되어 용출지점이 막히는 현상도 일부 용천수들에서 찾아 볼 수 있으며, 어떤 경우에는 과거에 시설해 놓았던 돌담 올타리가 쓰레기를 버리는 장소로 둔갑해버린 사례도 목격할 수 있다. 또한, 잡초를 제거하지 않은 상태로 수년간 방치해 온 결과, 용천수 주변이 가시넝쿨과 잡초가 무성하여 여름철 모기의 번식장소로 변해버린 곳도 찾아 볼 수 있다. 용천수의 주변 환경이 깨끗

하게 정돈되고, 청결한 상태로 관리되지 않는 한 사람들은 용천수와 친숙해질 수 없을 뿐만 아니라, 깨끗한 수질을 보장할 수도 없다. 용천수의 보전은 우선적으로 용천수의 주변 환경을 정화하는 일부터 시작되어야 한다. 용천수 정화는 마을 주민들이 주체가 되고 제주도내 각급 행정기관과 단체 및 기업체가 『1사 1용천수 관리』라는 차원에서 협력하는 공감대의 조성이 필요하다. 아울러, 마을마다 가칭 『용천수 정화위원회』를 결성하여 “내 고장 용천수는 우리가 보존한다”는 슬로건 아래 적극적인 용천수 보전운동이 요구되고 있다.

(2) 수량 및 수질보전

• 지하수 함양량의 증대

용천수는 땅속으로 침투한 빗물이 지하수가 되어 수리경사를 따라 하류지역으로 이동하다 지표의 열린 틈을 따라 솟아나는 지하수이기 때문에 용출량은 강수량과 함양지역의 면적에 절대적으로 지배를 받는다. 신시가지 조성, 구획정리, 도로개발 등 각종 개발사업이 진행으로 초지·농지 등이 콘크리트 또는 아스팔트로 포장됨으로서 빗물이 지하로 침투할 수 있는 면적이 점차 줄어들고 있다. 또한, 비닐하우스 및 유리온실 등 시설원예 농가의 증가와 배수개선사업에 의한 인공하천의 조성 등도 빗물을 바다로 일시적으로 유출시켜버리고 있다. 이와 같은 현상은 곧, 지하수 함양량의 감소를 초래하여 용출량의 감소를 일으킬 수 있는 가장 큰 요인으로 작용 할 수 있다. 아울러, 지하수 함양량의 감소는 기저지하수 부존지역에서는 담·염수 경계면이 내륙 쪽으로 이동하는 현상을 발생시킬 수 있는데, 이 같은 현상이 일어나는 경우, 해안가에 위치한 용천수들은 염분함량이 높아져 용수로 이용할 수 없게 된다.

지하수 함양량을 증대시키는 방안으로는 비닐하우스 및 유리온실 시설지역에 우수 주입공의 설치(예: 일본 구마모토시), 도심지 대형빌딩의 옥상에 내리는 빗물을 지하로 침투시키기 위한 시설의 설치(예: 일본 동경시), 골프장 저류지 시설의 확대, 하천 저류지 건설, 저수지 건설 등 여러 가지 방안을 생각할 수 있으나 제주도의 수문지질 여건에 어떠한 방식이 적합한지에 대하여는 충분한 조사와

연구가 선행되어야 할 것이다.

• 지하수 관정의 철저한 시공

지하수를 이용하는 대부분의 주민들은 지하수 관정의 측정 및 시공·우물자재 설치·동력장치 등에 대한 기술적인 내용을 잘 모르기 때문에 관정개발이 개발업체의 임의대로 진행될 수 있다. 아울러, 지하수 개발업체 또한 전문적인 기술과 각종 측정 장비를 보유하지 못하고 있는 실정이다. 따라서, 지하수관정의 개발·이용시설 공사가 완료될 때까지 공사의 전반적인 사항에 대하여 전문기관이나 업체로 하여금 공사감리를 실시하도록 하여 부실시공을 방지하여야 한다.

• 용천수의 수질보전

대부분의 용천수는 해안가에 위치하고 있어 상류지역의 시설물이나 토지이용으로 인한 영향을 받을 수밖에 없는 실정이다. 또한, 하수처리 시설이 없는 마을의 중심이나 하류에 위치한 용천수들은 마을에서 발생하는 생활하수의 영향을 직·간접으로 받을 수밖에 없는 상태이다. 특히, 해안가에 위치한 용천수들은 바닷물의 간·만조에 따라 바닷물과 혼합되어 높은 염분농도를 나타내는 경우도 많다. 더구나, 최근 국립해양조사원과 국립수산진흥원이 발표한 바에 의하면, 제주도의 해수면은 해수면 관측이 시작된 1964년 이후 매년 평균 0.44cm 정도씩 상승하여 1998년 현재 15cm가 상승하였다고 한다. 이 같은 현상이 계속 진행되는 경우에는 해안가에 위치한 많은 용천수들이 해수면 상승에 따른 바닷물의 침입으로 해수에 잠기거나 염분농도가 높아져 이용이 불가능 할 가능성이 높다.

이와 같은 현실적인 제약성과 어려움에도 불구하고 용천수의 수질을 보전하기 위한 노력은 지속되어야 할 것이다. 즉, 지하수의 오염원이 되고 있는 오폐수 배출업소에 대한 관리 강화와 더불어 축산폐수 및 생활하수 처리시설을 확충하여 오·폐수가 지하로 침투되지 못하도록 해야 한다. 특히, 개별법령에서 규제할 수 없는 소규모 오염원(예: 시설 하우스용 소규모 유류탱크 및 저장시설 등)에 대한 정기적인 점검을 실시함과 아울러, 최소한의 오염방지시설이라도 갖추도록 하여야 한다. 최근 도내 지하수의 주된 오염물질로 대두되고 있는 질산성질소는 화

학비료가 그 원인이 되고 있는 것으로 밝혀지고 있기 때문에 주민을 대상으로 화학비료의 적량 사용을 지속적으로 계몽하여 한다. 또한, 농약의 과다사용에 따른 지하수 오염을 규명하기 위한 체계적인 조사·연구도 미흡한 실정이기 때문에 이에 대한 조사가 시급히 이루어져 농약사용에 따른 적절한 지하수 및 용천 수의 수질 보전 대책이 세워져야 할 것이다.

VI. 결론

본 연구는 제주도 전역에 분포하고 있는 용천수의 위치·용천수의 이름·이용 및 보전상태, 용천수의 수질특성 및 용출지점의 지질구조 등 용천수와 관련된 제반 수문지질학적 특성을 파악하고, 이의 합리적인 보전방안을 강구하기 위한 연구로서 주요 연구결과를 종합하면 다음과 같다.

1. 제주도에 분포하고 있는 용천수는 동부지역 212개소, 서부지역 174개소, 남부지역 188개소, 북부지역 181개소로 총 755개소로 조사되었으며, 지질구조에 따른 용천수의 유형을 분류할 경우 제주도에 분포하는 용천수의 90%인 682개소가 용암류경계형이며 절리형은 56개소(7%), 사력층형은 17개소(3%)로 분류할 수 있다. 표고별 용천수 분포는 분포 위치에 따라 크게 저지대 용천수(해발 200m 이하), 중산간지대 용천수(200m~600m), 고지대 용천수(600m 이상)로 구분할 수 있으며, 저지대 용천수는 전체 용천수의 689개소(91%)이고 중산간지대 용천수는 45개소(6%)가 분포하고 있으며 해발 600m 이상의 고지대 용천수는 21개소(2%)가 분포하고 있다. 또한, 지역별 용천수 현황을 보면 북제주군이 317개소(42%)로 가장 많고 남제주군이 176개소(23%), 제주시와 서귀포시에는 각각 113개소(15%)와 149개소(20%)가 분포하고 있다.
2. 용천수의 용출량 조사는 755개소 중 용출량 측정이 가능한 707개소에 대해 용출량을 측정한 결과, 평균 용출량은 총 1,083,363m³/일이며 최대 용출량은 1,608,342m³/일로 조사되었으며, 지역별로 보면 북제주군 지역이 367,161m³/일로 가장 많고 제주시와 서귀포시 지역은 각각 288,118m³/일과 272,032m³/일인 반면 남제주군 지역은 156,052m³/일로서 용출량이 가장 작은 것으로 조사되었다. 용천수의 용출량 변동량(최대 용출량 - 평균 용출량)은 524,979m³/일로서 평균 용출량의 48%에 해당하여 강우량에 따른 용출량 변동폭이 매우 큰 것으로 분석되었다.
3. 용천수의 용도별 이용 현황은 755개소 중 수량고갈·주변훼손된 45개소를 제

외한 710개소 용천수를 대상으로 조사한 결과 상수원으로 이용되는 용천수가 26개소, 생활용이 221개소(31%), 농업 및 생활겸용이 19개소, 농업용이 105개소(15%)이며 이용하지 않는 것은 355개소로 47%를 차지하고 있는 것으로 조사되었다. 지역별 용천수의 이용실태를 살펴보면 상수원으로 이용되는 용천수는 제주시와 서귀포시에 편중(20개소)되어 있고, 생활용은 북제주군 지역이 116개소로 가장 많으며 농업용은 서귀포시와 북제주군 지역이 82개소로 조사되었다.

4. 용천수의 보존상태를 조사한 결과 조사대상 911개소의 용천수중 637개소는 양호하지만 118개소는 수량이 부족하거나 수량고갈·위치멸실 등 보존이 제대로 되어 있지 않은 것으로 파악되었으며, 특히 매립 등으로 위치가 멸실된 용천수가 156개소로 조사되었다. 용천수의 용출량이 감소 요인은 첫째, 용천수 상류 지역에서의 지하수 관정 개발, 둘째, 지하수 관정의 시공방법, 셋째, 용천수 상류지역의 도시화 등에 기인한 것으로 사료된다.
5. 용천수의 수질현황과 특성을 표고별로 살펴보면 염소이온을 비롯한 음·양이온 성분들은 해안가에서 한라산 쪽으로 표고가 증가할수록 농도의 감소가 뚜렷한 편이지만 Cl^- · SO_4^{2-} · Na^{2+} · K^+ · Mg^{2+} 은 해발 10m를 기점으로 농도의 변화가 급격하게 나타나며, NO_3-N · HCO_3^- · Ca^{2+} 은 해발 300m를 기점으로 농도의 변화가 일어나고 있다. 특히, 중단산염을 제외한 성분들은 해발 300m 이상 지역에 위치한 용천수에서 강우의 조성에 가까운 농도를 보이고 있어 진화가 거의 진행되지 않은 지하수가 용출하는 것으로 해석된다. 또한, 표고 200m를 기점으로 질산성 질소의 평균함량 변화가 뚜렷하게 나타나고 있다. 즉, 표고 200m 이하 지역에서는 11.1~22.0mg/l의 높은 값을 보이지만, 이 지점을 지나면서 부터는 10mg/l 이하의 함량치를 보이고 있어 용천수의 인위적 오염이 발생하는 내륙 쪽 상한은 표고 200m인 것으로 해석된다.
6. 용천수를 보존하기 위해서는 보전대상 용천수를 선정하고 이를 중점적으로 관리한 것이 필요하다. 따라서, 보전대상 용천수를 선정하기 위해 역사성·환경성·용출량·수질의 4가지 분야를 정하고, 그 각각에 대해 3~4가지 평가항목을 만들어 점수를 부여하는 방식에 의거 보전대상 용천수를 1~7등급으로 분류한 결과 보전대상 용천수는 453개소로 집계되었다. 등급별로 보면, 5등급과

6등급이 각각 123개소와 115개소로 전체의 53%를 차지하며(238개소), 1등급~4등급은 28%(129개소), 7등급은 19%(86개소)이다. 용천수 보전방안은 용천수의 원형을 보존하고, 용출량과 수질을 보전하며, 용천수의 주변환경을 청결하게 유지하는데 필요한 시책이라 할 수 있다. 최근 도내 지하수의 주된 오염물질로 대두되고 있는 질산성질소는 화학비료가 그 원인이 되고 있는 것으로 밝혀지고 있기 때문에 주민을 대상으로 화학비료의 적량 사용을 지속적으로 계몽하여 한다. 또한, 농약의 과다사용에 따른 지하수 오염을 규명하기 위한 체계적인 조사·연구도 미흡한 실정이기 때문에 이에 대한 조사가 시급히 이루어져 농약사용에 따른 적절한 지하수 및 용천수의 수질 보전 대책이 세워져야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 건설부, 1965, 제주도 고지대 용수 이용계획 조사 보고서, p.1~119.
- 건설부, 1965, 제주도 산업지기초조사 보고서, p.1~143
- 건설부, 1965, 제주도 지하수 탐색 지질조사 보고서
- 건설부, 1966, 제주도 한림지역 공장 분산을 위한 지하수원 탐색 지질조사보고서, p.21~33.
- 건설부, 제주도, 한국수자원공사, 1993, 제주도 수자원 종합개발계획수립 보고서
- 고기원, 1997, 제주도의 지하수 부존특성과 서귀포층의 수문지질학적관련성, 부산대학교 대학원 박사학위논문, p. 1~325
- 고기원, 문영석, 강봉래, 송시태, 박윤석, 1998, 제주도의 용천수 분포와 용출유형에 관한 연구(1)-제주시 및 애월읍지역에 대하여-, 대한지질학회 학술발표회 초록집, p. 25~26
- 김경찬, 1996, 제주도 서귀포지역 용천수의 수질특성에 관한 연구, 한국교원대학교 대학원석사학위논문, p.1~47
- 김종훈, 안종성, 1992, 제주도 용천수의 수질화학적 특성과 연대측정에 관한 연구, 한국화학학회지 제36권 제5호, p. 727~737
- 남기영, 1966, 제주도의 지질과 지하수. 국립지질조사소 지하수원 조사보고서 제3호, p.109~137.
- 남기영, 1966, 화산암지역 지하수의 특징(제주도를 중심으로), 지질·광산 제3권, p.16~23.
- 남기영, 김동숙, 1965, 제주도 남동부 지구의 지하수원 국립지질조사소 지하수원조사보고서 제2호, p.33~64.
- 농립수산부, 농업진흥공사, 1971, 제주도 지하수보고서, p.1~382.
- 농립수산부, 제주도, 농업진흥공사, 1989, 제주도 지하수장기계발계획조사 보고서, p.396.
- 박상운, 1996, 제주도 용천수의 수량변화와 수리화학적 연구, 제주대학교 대학원, 석사학위논문, p.1~115.
- 박준범, 1994, 제주도 화산암의 지화학적 진화, 연세대학교 대학원 박사학위논문, p.1~303.
- 산업기지개발공사, 1981, 제주도 수자원개발 종합보고서, p.1~388.
- 상공자원부, 1994, 제주도 지열자원탐사 및 최적활용 방안 연구(I). 931K101-113API, p.1~235.

- 서해길, 조한익, 남기영, 1964, 제주도 남부 지하수원 국립지질조사소 지하수원조사보고 제1호
p.77~95.
- 室井渡, 塚本正夫, 配野松雄, 1938, 제주도 수원조사 개보(공업용수조사 제4보). 일본중앙시험소
17-11, p.1~38.
- 안종성, 유장걸, 정창조, 송성준, 1989, 동위원소를 이용한 제주지역 수자원에 관한 연구
(IV), 제주대학교 방사능이용연구소 연구보고 제4집, p.35~59.
- 안종성, 한정상, 이정호, 정창조, 유장걸, 1984, 동위원소를 이용한 제주지역 수자원에
관한 연구. 수문학회지 제17권 p.72~79.
- 정창조, 박양문, 유장걸, 유기중, 안종성, 1985, 동위원소를 이용한 제주지역 수자원에
관한 연구, 제주대학교 방사능이용연구소 연구보고 제1호, p.33~46.
- 정창조, 유장걸, 안종성, 송성준. 1986, 동위원소를 이용한 제주지역 수자원에 관한 연구,
제주대학교 방사능이용연구소 연구보고 제2집, p.29~44.
- 제주도, 1998, 제주·애월도 폭 지질보고서, p.1~290
- 濟州島勢要覽, 1939(昭和14年), p.143~154
- 제주일보, 제주도민의 옛 생명수를 찾아(1996. 4. 8~1998. 1. 15)
- 한국동력자원연구소, 1990, 제주도 수자원의 특성과 수질오염 연구(II),
KR-90-(B)-10
- 한정상, 1998, 지하수 환경과 오염, 박영사, p.55~61
- 홍성목역, 1999, 제주도, p.231~239
- Bryan, K., 1919, Classification of springs, Jour. Geology, vol. 27, p.522~561
- Davis, G. H., Lee, C. K., Bradley, E. and Payne, B. R., 1970, Geohydrologic
interpretation of a volcanic island from environmental isotopes, Jour Water
Resources Research, Vol. 6, p. 99~109
- Fetter, C. W., 1994, Applied Hydrogeology(Third Edition), Macmillian College
Publishing Company, New York, p.288~290
- Todd, D. K., 1980, Groundwater hydrology, second edition, John Wiley & Sons, p.47~50

감사의 글

본 논문이 완성되기까지 부족한 저를 정성으로 지도하시고 격려하여 주신 양성기 교수님께 진심으로 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

그리고 논문을 심사하면서 부족한 점을 보완토록 지도와 조언을 하여주신 김남형 교수님, 박상렬 교수님과 또한 성공적인 대학원 생활을 마치도록 항상 많은 지도와 격려를 해주신 남정만 교수님, 이병걸 교수님께 감사의 말씀을 드립니다.

특히 어려운 여건 속에서도 현장조사 및 자료정리, 수질분석 등 많은 도움을 준 제주도수자원개발사업소 고기원 박사, 강봉래, 문영석, 박윤석 등 연구원과 여러 직원들 및 제주도보건환경연구원 관계자들과 제주발전연구원 박원배 연구원에게 고마운 마음을 전합니다.

이 논문은 이들과 같이 저를 아끼고 도와주신 많은 분들이 있었기에 결실을 맺을 수 있었습니다. 거듭 진심으로 감사의 말씀을 드리며 기쁨을 함께 하고자 합니다.

끝으로 오늘의 결실을 맺기까지 항상 사랑과 정성으로 도와준 사랑하는 아내와 아이들(원호, 은영, 원석)에게 이 기쁨을 나누고자 합니다.