

碩士學位論文

제주도 지하수의 고도별 · 지역별
수질특성

濟州大學校 大學院
環境工學科

姜 秉 男

110 515

2000年 12月

제주도 지하수의 고도별 · 지역별 수질특성

指導教授 李 容 斗

姜 秉 男

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2000年 12月

姜秉男의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 오 윤 근 印

委 員 감 상 규 印

委 員 이 용 두 印

濟州大學校 大學院

2000年 12月

Altitudinal and regional characteristics of groundwater quality in Cheju Island

Byoung-Nam Kang
(Supervised by Professor Yong-Doo Lee)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING

2000. 12.

THIS THESIS HAS BEEN EXAMINED AND APPROVED

DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

List of Figures

List of Tables

Summary

I. 서 론	1
II. 지역특성 및 이론적 고찰	4
1. 지형 및 지질특성	4
1) 지형	4
2) 지질	6
2. 수리 및 수문특성	9
1) 하천	10
2) 물수지 분석	11
3) 적정 개발량	12
3. 이론적 고찰	13
1) Piper diagram에 의한 수질유형 분류	13
2) 통계분석을 이용한 지하수 수질특성 해석	15
III. 연구방법	17
1. 시료채취 및 분석	17
2. 고도 및 지역 구분방법	18
3. 해석방법	19
1) Piper diagram에 의한 수질유형 분류	19
2) 통계분석을 이용한 지하수 수질특성 해석	20
IV. 결과 및 고찰	21

1. 고도별 수질특성	21
1) 물리·화학적 특성 및 용존물질의 함량분포	21
2) Piper diagram에 의한 수질특성	29
3) 상관분석(Correlation analysis)과 요인분석(Factor analysis)	34
2. 서귀포층의 분포상태에 따른 지역별 수질특성	39
1) 물리·화학적 특성 및 용존물질의 함량분포	39
2) Piper diagram에 의한 수질특성	44
3) 상관분석(Correlation analysis)과 요인분석(Factor analysis)	51
 V. 결 론	 58
 VI. 참고문헌	 60

List of Figures

Fig. 1. Index map of Cheju Island,	5
Fig. 2. Schematic diagram of groundwater in Cheju Island,	8
Fig. 3. Distribution of stream in the study area,	10
Fig. 4. Piper diagram for classifying groundwater quality	14
Fig. 5. Groundwater sampling site of Cheju Island,	17
Fig. 6. Map showing the division of Cheju Island,	19
Fig. 7. Piper diagram showing the chemical compositions of the groundwater samples under 50 m elevation in Cheju Island(above: dry season, below: rainy season),	30
Fig. 8. Piper diagram showing the chemical compositions of the groundwater samples from 51~100 m elevation in Cheju Island(above: dry season, below: rainy season),	32
Fig. 9. Piper diagram showing the chemical compositions of the groundwater samples above 101 m elevation in Cheju Island(above: dry season, below: rainy season),	33
Fig. 10. Piper diagram showing the chemical compositions of the groundwater samples in the eastern area of Cheju Island(above: dry season, below: rainy season),	46
Fig. 11. Piper diagram showing the chemical compositions of the groundwater samples in the western area of Cheju Island(above: dry season, below: rainy season),	47
Fig. 12. Piper diagram showing the chemical compositions of the groundwater samples in the southern area of Cheju Island(above: dry season, below: rainy season),	49
Fig. 13. Piper diagram showing the chemical compositions of the groundwater samples in the northern area of Cheju Island(above: dry season, below: rainy season),	50

List of Tables

Table 1. Sustainable yield of groundwater resources in Cheju Island	13
Table 2. The separation of water quality type	14
Table 3. Analytical item, equipment and method	18
Table 4. Physical and chemical components for groundwater samples by elevation groups in Cheju Island(dry season)	22
Table 5. Physical and chemical components for groundwater samples by elevation groups in Cheju Island(rainy season)	23
Table 6. Electrical conductivity(EC) with the kinds of water	24
Table 7. Matrix of correlation coefficients for the groundwater samples under 50m elevation in Cheju Island	35
Table 8. Factor matrix of compositional variables for the groundwater samples under 50 m elevation in Cheju Island	35
Table 9. Matrix of correlation coefficients for the groundwater samples from 51~100 m elevation in Cheju Island	37
Table 10. Factor matrix of compositional variables for the groundwater samples from 51~100 m elevation in Cheju Island	37
Table 11. Matrix of correlation coefficients for the groundwater samples above 101 m elevation in Cheju Island	38
Table 12. Factor matrix of compositional variables for the groundwater samples above 101 m elevation in Cheju Island	38
Table 13. Physical and chemical components for groundwater samples by regional groups in Cheju Island(dry season)	41
Table 14. Physical and chemical components for groundwater samples by regional groups in Cheju Island(rainy season)	42
Table 15. Matrix of correlation coefficients for the groundwater samples in the eastern area of Cheju Island	52
Table 16. Factor matrix of compositional variables of the groundwater sam-	

ples from the eastern area of Cheju Island	52
Table 17. Matrix of correlation coefficients for the groundwater samples in the western area of Cheju Island	53
Table 18. Factor matrix of compositional variables of the groundwater sam- ples from the western area of Cheju Island	53
Table 19. Matrix of correlation coefficients for the groundwater samples in the southern area of Cheju Island	55
Table 20. Factor matrix of compositional variables of the groundwater sam- ples from the southern area of Cheju Island	55
Table 21. Matrix of correlation coefficients for the groundwater samples in the northern area of Cheju Island	56
Table 22. Factor matrix of compositional variables of the groundwater sam- ples from the northern area of Cheju Island	56

Summary

Groundwater is the most important freshwater resources at Cheju Island and provide almost all of the drinking water needs at the present time.

In this study, samples was collected with twice from the 150 selected groundwater wells at Cheju Island in dry and rainy season considering the seasonal water quality variation. The purpose of this study was performed to evaluate the groundwater quality of Cheju Island with the elevation and area.

The results of this study were summarized as follows:

1. Major components of groundwater and the EC were represented that the dissolved solids amount of groundwater in the elevation below 50m region was increased than other regions. Because a contaminants of the ground flowed into the underground by precipitation, rainy season was higher dissolved solids than dry season.
2. According to piper diagram, cation belongs to Na^+K^+ type in dry season, anion belongs to Cl^- type in the elevation below 50m region and belongs to HCO_3^- type or partial Cl^- type in the elevation 51~100m region and belongs to HCO_3^- type in above 101m region. In rainy season, mostly cation belongs to Na^+K^+ type, anion belongs to Cl^- type.
3. Three factors were obtained from the results of factor analysis in the elevation below 50m region. Factor 1 was influenced by salt water, Factor 2 was represented by the characteristics of the hydraulic, and Factor 3 was influenced by artificial sources. Three factors were obtained from the results of factor analysis in the elevation 51~100m region. Factor 1 was

represented by TDS content, Factor 2 was represented by the characteristics of the hydraulic, and Factor 3 was influenced by artificial sources and the dissolution of rocks. Three factors were obtained from the results of factor analysis in above 101m region. Factor 1 was represented by TDS content and the influence of artificial sources, Factor 2 was represented by the dissolution of rocks, and Factor 3 was represented by the characteristics of the hydraulic.

4. According to piper diagram, all of the area cation belongs to Na^+K^+ type in dry and rainy season. In dry season, anion belongs to Cl^- type in eastern and western area and belongs to HCO_3^{3-} type in the southern area and belongs to HCO_3^{3-} type or partial Cl^- type in the northern area. In rainy season, anion mostly belongs to Cl^- type.

5. Two factors were obtained from the results of factor analysis in the eastern area. Factor 1 was influenced by salt water, Factor 2 was represented by the dissolution of rocks. Three factors were obtained from the results of factor analysis in the western area. Factor 1 was influenced by artificial sources, Factor 2 was represented by bicarbonate content, and Factor 3 was represented by the dissolution of rocks. Three factors were obtained from the results of factor analysis in the southern area. Factor 1 was influenced by artificial sources, Factor 2 was represented by the dissolution of rocks, Factor 3 was represented by calcium content. Two factors were obtained from the results of factor analysis in the northern area. Factor 1 was represented by TDS content, Factor 2 was influenced by artificial sources and was represented by the characteristics of the hydraulic.

I. 서론

물은 생명의 근원이며, 깨끗한 물은 건강한 삶을 위한 기본적인 요소이다. 또한 물은 농업, 수산업 및 공업의 기반이다. 그러나 오늘날 대규모로 진행되는 산업화는 물의 사용량을 급격히 증가시키고, 한편으로는 물을 오염시켜 사용가능한 물의 양을 격감시키고 있다. 그리고 산업화 과정에서 발생한 수질오염은 지표 상수원을 오염시키고 있으며 따라서 지표수만의 자원활용은 한계에 도달되어 있어 대체 수자원으로 지하수 개발이 확대되고 있다.

지하수는 수량과 수질면에서 지표수보다 안정성을 지니고 있기 때문에 음용수 및 농·공용수의 상수원으로서 역할이 중요시되고 있다. 전세계적으로 지하 800m 이내의 지하수 부존량은 지구전체 하천수량의 약 3,000배에 달하는 것으로 추정하고 있으나 분포상태가 고르지 못하여 현재 세계 인구의 1/3 정도가 물 부족 상태에 있다.

우리나라 지하수법 제2조에 의하면 지하수란 “지하의 지층이나 암석사이의 빈틈을 채우고 있는 물”로 정의하고 있는데, 이것은 토양 및 암석속의 포화 및 비포화상태에 있는 물을 모두 의미하는 포괄적 개념이다. 수문학적 또는 공학적 측면에서 “지하수는 지하의 투수성이 높고 지층 등에 포함된 사용 가능한 물”로 정의되기도 하고(선우, 1983), 또한 “토양과 지층에서 자유수면 아래에서 발생하는 포화된 지표 아래의 물”이라고도 정의하고 있다(Freeze, 1979). 그리고 자연동수구배하에서 상당한 양의 지하수를 통과시킬 수 있는 투수성과 지하수를 저수시킬 수 있는 충분한 양의 서로 연결된 공극을 가지고 있는 지층을 일반적으로 대수층(Aquifer)이라고 한다. 따라서 대수층이란 경제적으로 개발할 수 있는 정도의 다량의 지하수를 포함하고 있는 암석 및 지층이라 할 수 있다.

제주도의 용수이용은 1970년대 초반까지만 하더라도 해안 용천수와 봉천수에 의존하는 물이 귀한 지역이었다. 그러나 본격적인 먹는물, 생활용수의 개발이 1970년대 지하수 시범조사를 시작으로 지하수 개발이 이루어져 현재는 상수도 보급률이 99.9%에 이르는 등 양적인 측면에서의 물 문제가 해결이 되었다(이와강, 1999, 이, 2000).

1998년 12월말 현재 제주도 지하수 관정 현황은 4,118공(염지하수 601공 제외)이며, 이들 관정의 총 양수능력은 953,673 m^3/day 이며, 일평균 지하수 이용량은 188,792 m^3/day 이고, 이용률은 19.8%이다. 그러나 지하수 이용량은 연간 개념의 일평균 이용량으로 나타내어 계절별, 용도별로 이용량의 편차가 많이 나므로 실제 1일 이용량과는 많은 차이가 나타날 수 있다.

그리고 생활수준의 향상으로 용수의 수요가 급증하고 있는 추세이며, 가축사육두수의 증가, 골프장 개발 및 휴양시설의 증가에 따른 지하수 개발과 비료의 과다 시비 등에 의한 제주도 지하수 오염이 나타나 문제가 되고 있다(박과 이, 1997).

지하수 오염이란 지하수가 천연(자연)적으로 지니고 있는 물리적·화학적·생물학적·세균학적 특성이 상호 연관된 자연적·인위적 요인에 의하여 이용상 지장을 초래하거나 환경의 변화를 발생시키는 경우를 말하며 넓게는 자연적 또는 인위적으로 부패성 물질, 유독성 물질, 부유물질 등 이외의 이물질이 혼입되어 양수목적에 맞게 사용할 수 없는 상태를 말한다. 지하수는 유속이 느려 자연정화에 매우 오랜 기간이 소요되는데, 이는 지하수가 일단 오염되어 오염물질이 암석이나 토양에 흡착되거나 축적이 이루어진 경우 산소부족으로 지표수와는 달리 정상적인 정화과정이 일어나기 어렵기 때문이다. 또한 지하수는 유동이 비가시적이므로 오염 추정이 어려워 인위적 정화가 어렵다.

대부분의 용수를 지하수에 의존하고 있는 제주도에서 지하수를 적절히 사용하기 위해서는 수질특성을 살펴보는 것이 필수적이며 이와 관련한 연구로서는 송과 유(1998), 김(1998), 김(2000)이 제주도 동부지역 지하수의 염수화 규명에 관한 연구를 실시하였고, 고(1998)는 이온성분의 상관관계, 담·염수의 밀도차에 의한 수치모형실험을 통한 오염예측에 관한 연구를 하였다. 김 동(1995)은 제주도를 토지이용에 따른 5개 지역으로 구분을 하여 제주도의 수질특성을 살펴보고, 현(1996)은 질소동위원소를 이용하여 질산성질소로 오염된 지하수를 연구하였으며, 박(1997)은 제주도 용천수의 고도별에 따른 수리화학적 특성에 관한 연구를 실시하였다. 윤 동(1994)은 제주도 동·서부지역 지하수의 수질과 지질조사를 실시하여 동·서부지역의 지하수 부존특성의 차이점을 비교 분석하였으며, 고(1997)는 제주도의 지하수 부존특성과 서귀포층의 수문지질학적 관련성

에 관한 논문에서 지하수위 조사와 서귀포층과 지하수 부존형태와의 관계를 연구하였다. 그러나 제주도 전지역을 대상으로 수질을 비교, 분석한 사례는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 고도별·지역별 및 수문학적인 특성을 고려하여 건기와 우기로 구분하고 도식해법(piper diagram)과 통계적 기법을 이용하여 수질특성을 파악하는데 그 목적을 두었다.

II. 지역특성 및 이론적 고찰

1. 지형 및 지질특성

1) 지형

제주도는 육지로부터 140 km 떨어져 있는 한반도 남쪽에 위치한 화산섬으로서 제주도의 평면상의 모양은 장축의 길이가 약 74 km이고 단축의 길이가 약 32 km 인 타원체 모양을 하고 있으며, 중앙부에 해발고도 1,950 m인 한라산체가 있다. 한라산을 중심으로 동서사면은 매우 완만한 경사($3^{\circ}\sim 5^{\circ}$)를 이루고 있으나, 남북 방향에서는 약간 급한 경사(5° 내외)를 보인다. 전체 지형은 해발고도에 따라 200 m이하인 해안지역이 993 ㎢(54.3%), 200~600 m사이의 중산간지역이 589 ㎢(32.2%), 그리고 600 m이상에서 한라산 정상부근까지의 산악지역이 246 ㎢(13.5%)를 차지한다. 남북 양사면에는 대지상의 해안저지대와 중산간지대의 면적이 좁고 한라산체가 많은 부분을 차지한다(건설부, 1993)(Fig. 1).

소위 '오름'이라는 기생화산체가 도 전역에 368개가 분포하고 있으며, 장축방향의 배열이 우세하고 고산에서 사계리를 거쳐 서귀포에 이르는 해안을 따라서는 불연속적으로 분포하며, 신양리, 성산일출봉, 두산봉, 우도 등에도 분포하는데 이들 대부분은 화산력 또는 화산재로서 준고결 내지 미고결 상태이다. 북동해안과 협재리, 사계리 및 표선리 해안 일대에서는 사구(sand dune)가 발달되어 있다(제주도, 1994).

제주도는 토양의 대부분이 전형적인 화산회토의 특성을 지니고 있으며, 토양의 주된 모재는 현무암이며, 일부는 조면암 및 조면암질 안산암에서 유래된 것이다. 제주도 토양을 토색에 따라 분류하면 암갈색토, 농암갈색토, 흑색토, 갈색산림토로 구분할 수가 있다. 이 중에서 암갈색토는 비화산회토이며, 나머지 농암갈색토, 흑색토, 갈색산림토의 3개 유형은 화산회토이다. 해발 200 m이하의 해안지역에 분포하는 토양은 비화산회토인 암갈색토가 311.6 ㎢로서 암갈색토의

대부분이 해안지역에 분포하고 있다. 제주도의 평균 유효토심은 60 cm로서, 유효토심 50~75 cm 지역이 가장 넓은 610.2 ㎢가 분포하고 있으며, 제주도 총 면적의 33%에 이른다.

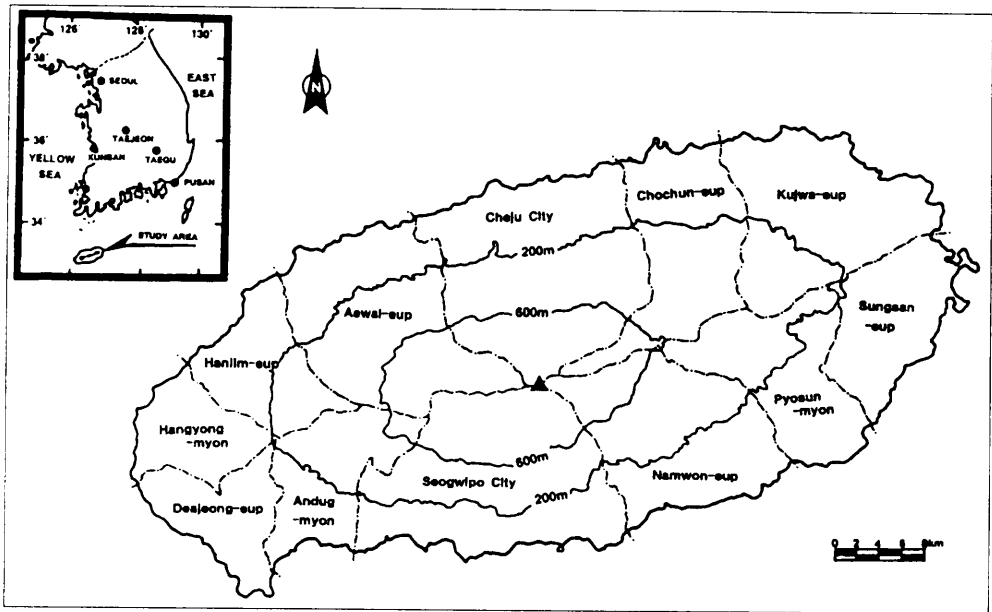


Fig. 1. Index map of Cheju Island.

제주도 토양의 물리적 특성은 다른 지역의 토양에 비해 토양의 전용적밀도가 낮다. 특히 흑색토와 갈색산림토의 밀도가 매우 낮는데 이 때문에 공극률이 높고, 풍식에 대한 저항이 낮으며, 투수성이 높아 강수의 하향침투가 빠르다. 화학적 특성은 모재인 현무암질 및 안산암질의 화산회토의 화학적인 특성과 제주 지역의 높은 강우량에 기인하여 토양의 수소이온농도가 5.0이상으로 비교적 높고, 염기포화도가 매우 낮으며, 자연비옥도가 낮고 또한 유효인산량이 매우 낮다. 따라서 토양의 배수능력이 좋아 오염물질이 용탈하기 쉬우며, 인산을 흡착·고정시키는 능력이 크므로 인산보다는 질소에 의한 오염가능성이 높은 특성을 지니고 있다.

2) 지질

제주도의 지표지질은 지표로부터 지하천부까지는 현무암질 내지 조면암질의 용암류와 화산쇄설층들이 대상구조로 발달하고, 그 하부에 서귀포 지역에서 일부 지표노출을 보이는 서귀포층이 북촌-표선선(고, 1997)의 동부를 제외한 도 전역의 지하에 광범위하게 분포한다. 또한 서귀포층 하부에는 미고결퇴적층이 층후 약 70~250 m로 분포하고, 그 하부에는 화산쇄설암류와 화강암으로 구성된 기반암이 분포한다. 따라서 기반암 상위를 구성하는 암층들은 수문지질학적 관점에서 크게 3대분 할 수 있는데, 현무암질 내지 조면암질의 용암류와 화산쇄설층들이 대상구조로 발달된 상부층으로, 그 하부의 서귀포층을 중간층으로, 미고결퇴적층을 심부층으로 구분할 수 있다.

제주도의 지표지질은 현무암류, 안산암류, 조면암류 등의 화산암류와 화산기원의 퇴적암류로 구성되어 있는데, 이중 현무암질 화산분출에 의해 형성된 용암류와 쇄설물 그리고 용암류의 유동에 의해 형성된 화산쇄설성 퇴적물이 대부분이다. 현무암은 보통 3 m내외의 암층으로 구성되어 있고 각 암층사이에 화산쇄설층이 협재되어 있다. 현무암 내에는 용암류의 유동과 냉각시 형성된 균열과 수직 절리가 발달하고 있어 강우의 수직유동을 쉽게 하고 있으며 화산쇄설층은 제주도 지하수의 이동통로 역할을 한다. 즉 지표에서 침투된 강수는 수리지질구조를 따라 서서히 하강하여 상부층 내에 형성된 저투수성 지층 상부에 저류되었다가 일부는 고여 있기도 하지만 바다로 향하는 동수구배를 따라 측방유동하여 지표로 용출되기도 하고 저투수성 지층이 끝나는 지점이나 저투수성 지층의 공극을 따라 다시 수직 유동하여 점차 지하 심부로 침투한다.

지하 심부로 침투한 강수는 저투수성 퇴적층인 중간층 또는 심부층과 만나는 접촉면 상위층에 저류되어 동수구배를 따라 내륙에서 바다쪽으로 측방 유동한다. 상부층의 지하수는 해안근처에서 해수와의 접촉에 의한 Ghyben-Herzberg 원리에 지배되는 담·염수 경계면을 형성하며 염수와의 접촉에 의한 희석과 해안 용출로 산출된다.

중간층인 서귀포층은 북촌-표선선의 동쪽을 제외한 제주도 전지역의 지하에 분포하는 지층으로 층후는 평균 약 100 m 정도를 보이고 본 도의 중심부에는 해

수면 상부 심도의 지하에 분포하나 해안선 근처에는 대부분 해수면 하부 지하에 분포하여 바다쪽으로 경사진 지층경사를 보인다. 본 지층은 일부지역(서귀포 천지연폭포 서쪽 해안절벽)에서만 노출되어 있고 대부분이 화산암류에 피복되어 지하에 분포하는데, 해성퇴적층으로 현무암질 화산활동에 의한 유리질 쇄설 암편이나 화산유리가 변질된 점토광물을 다량 함유하며, 암질은 역질사암, 사암, 이암, 세일 등으로 구성되어 있다.

중간층으로의 지하수 함양은 상부층을 유동하던 지하수가 제주도의 화산활동으로 형성된 구조선이나 측화산의 뿌리 또는 중간층의 저투수성 퇴적층의 공극을 통한 수직이동으로 이루어진다. 중간층은 지층자세가 대체로 해안으로 경사져 있고, 중간층내의 대수층이 저투수성 퇴적층으로 상·하가 피복되어 있다. 따라서 해안가 근처 바다쪽 지하에서 대수층 상위의 저투수성 지층이 해수침입을 억제하는 모암(cap rock)의 역할과 상부암층의 역할을 하여 대수층 아래의 저투수성 지층이 하부암층으로 작용하여 대수층의 바다쪽 말단부만이 해수와 접하는 피압대수층의 담·염수 경계면을 형성한다.

심부층은 지하 심부 시추조사에 의해 그 존재가 확인된 미고결퇴적층으로 본도 중심부에서는 해수면위 지하에 분포할 것으로 가정되나, 대부분 해수면 아래 지하 100 m내지 150 m의 심도에서 평균두께 약 150 m 정도로 분포하는 사질 퇴적층이다. 본 층 또한 중간층과 유사하게 대부분이 저투수성의 미고결 모래질미사층과 미사질모래층으로 구성되어 지하수의 부존과 유동이 불리한 지층이지만, 이들 저투수성 지층 사이에 투수성이 양호한 모래층이 수매 협재되어 피압대수층의 역할을 할 수 있다.

제주도는 현무암류, 조면암질 안산암류, 조면암류 등의 화산암류와 화성기원 퇴적암류로서 서귀포층, 성산층, 화순층, 신양리층과 기생화산 등으로 구성되어 있으며 이중 현무암이 대부분으로 전도의 90% 이상을 차지하며, 화산암류중 가장 투수성이 큰 암층은 장석감람석현무암(FOB)과 장석 휘석감람석현무암(FAOB)으로 보통 3 m내외의 암층으로 구성되며 각 암층간에는 화산 쇄설층을 협재하고 있다. 화산암층내의 주대수층은 용암류간에 협재한 화산쇄설층으로 충후는 화산암층의 약 20% 범위에 있으며, 화산암내에 발달한 균열, 절리 및 기타 조면암류는 투수성이 낮아 자체로서는 대수층으로서의 역할은 낮으나 암층간의 풍화면상

부 화산쇄설층은 좋은 대수층을 이루고 있다.

화산회나 응회암으로 이루어진 저투수성 화산쇄설물이나 주로 점토질로 구성된 고토양(Paleo-soil)은 지역에 따라 압층(Confining bed)내지 준대수층(Aquitard)을 이루며 이들은 제주도의 상위 및 부유 지하수 흐름에 영향을 미친다.

제주도 지하수의 부존형태는 지하지질구조, 지하수위 등의 요인에 따라 상위지하수, 기저지하수, 준기저지하수로 대별할 수 있다(Fig. 2).

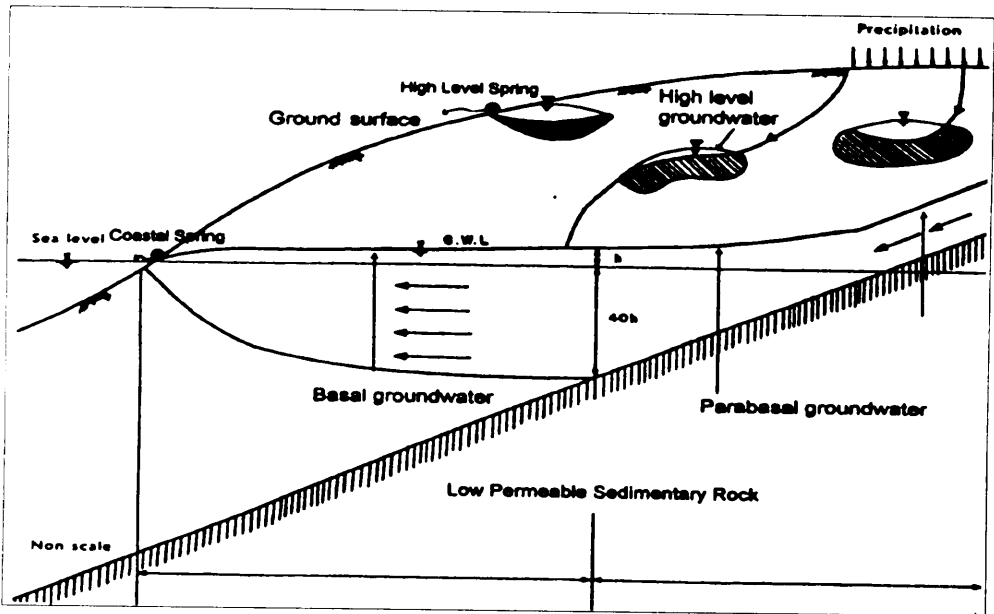


Fig. 2. Schematic diagram of groundwater in Cheju Island.

(1) 상위지하수(High level groundwater)

상위지하수란 비포화대 내의 치밀질 화산암류나 퇴적층 등의 저투수성 지층 상부를 따라 비교적 빠른 선형 유속으로 유동하거나 고여있는 있는 것으로서 부유지하수체(perched water)도 여기에 포함이 되어진다.

상위지하수는 제주도 전역에 고루 분포하고 있으나 중산간지역 및 고지대에 집중 편중되어 있다. 영실, 돈네코 입석 등지의 용천수들이 상위지하수가 지표

로 용출하고 있는 대표적인 예들이다.

상위지하수는 비포화대내의 다른 대수층과 수리적으로 연결되어 있지 않은 단속적인 지하수체이기 때문에 강우량에 따라 유량변화의 폭은 크지만, 해수와 직접 접촉하지 않으므로 수질은 비교적 양호한 편이다.

(2) 기저지하수(Basal groundwater)

기저지하수란 염수와 담수의 비중차에 의하여 담수가 염수 상부에 렌즈형태로 부존하는 즉, Ghyben-Herzberg원리에 의해 부존하는 지하수를 말한다.

담수체의 수축과 팽창, 그리고 조석의 영향에 의해 담수와 염수가 혼합된 점이대를 갖게 되는 데, 투수성이 높은 지질로 이루어진 지역에서는 점이대가 두껍게 발달한다. 점이대의 두께는 산악 및 중산간 지역에서는 얇고, 해안쪽으로 갈수록 두터워져 해안변 유출지점에서는 담수체 전층이 점이대로 형성된다.

기저지하수는 조천읍 북촌에서 남원에 이르는 동부지역 해안변을 따라 부존하고 있는 것이 확인되고 있으며, 내륙쪽으로는 분포범위는 아직까지 명확히 밝혀져 있지 않다.

(3) 준기저지하수(Parabasal groundwater)

준기저지하수란 지하에 저투수성 퇴적암층이 분포하고 있음으로 인하여 담수 지하수체가 해수와 직접 접하고 있지 않고, 통상적인 Ghyben-Herzberg비가 적용되지 않는 지하수체를 말한다.

준기저지하수는 저투수성 퇴적암층의 지하분포심도에 따라 상부 준기저지하수와 하부 준기저지하수로 구분할 수 있다. 상부준기저지하수의 경우, 지하수가 저투수성 퇴적암층의 상부면을 따라 빠른 선형유속으로 유동하므로, 풍수기와 갈수기 사이의 수위변동 폭이 크게 나타나고, 채수에 의한 수위강하량이 큰데 비해, 평균 채수량은 저조하다. 하부 준기저지하수는 서부 및 북부지역 해수면 하부에 광범위하게 부존하고 있고, 선형 유속이 느리기 때문에 수위변동의 폭도 적다.

2. 수리 및 수문특성

1) 하천

하천은 제주도의 지형 및 지질특성에 따라 특이한 양상을 보이는데, 대체로 한라산과 동서장축을 분수령으로 하여 약 60여개의 대소하천이 남류 또는 북류하며 본도의 동·서부지역에서는 하천의 발달이 극히 빈약하다(Fig. 3). 수계의 형성은 지면의 용암류의 종류, 용암류의 경계 및 지형경사도에 따라 영향을 받게된다. 특히 용암류의 경계와 용암터널이 함몰된 함몰지역은 한라산 정상에서 해안쪽을 향하여 수 십 km 길이로 깊게 V 자형 침식계곡을 따라 발달하는 것이 특징이다(박, 1997).

하천의 대부분은 유로상에 발달된 투수층과 절리구조를 통하여 유수가 지하로 침투하여 건천을 이루고 있으며, 강우시 일시적으로 유량을 갖는 간헐천의 특성을 갖고 있다. 건기에도 물이 흐르는 지속하천으로는 북류천중 도근천, 산지천, 한림천이 있고 남류천으로는 중문천, 강정천, 창고천 등이 있으나 이들 모두는 용천수에 그 수원을 두고 있다.

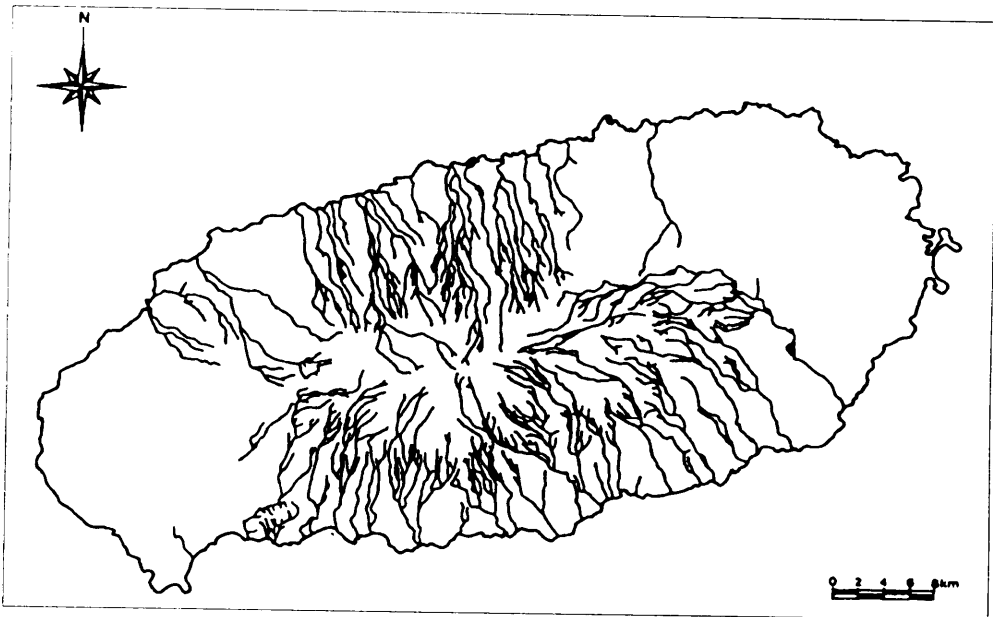


Fig.3. Distribution of stream in the study area.

제주도의 총 하천은 1,907.1 km로서, 유로연장이 20 km이상되는 하천은 창고천, 천미천, 가마천, 서도천, 그리고 한남동천 등 5개소 정도이다.

2) 물수지 분석

제주도는 전국 평균의 약 1.5배에 해당하는 많은 강우량(한국수자원공사, 1993)이 내리며, 투수성이 큰 현무암 때문에 강우는 쉽게 지하로 침투하여 대수층에서 지하담수체를 이룬 후 다시 하류구배 구간으로 서서히 이동하여 해안이나 해저에서 용천의 형태로 유출된다.

지하수 수문학적인 물수지 분석은 제반 수문인자를 평가하여 지하수 함양량을 추정하는 과정이다. 일반적으로 분석방법은 장기간에 걸친 평균적인 균형상태를 가정하여 실시하기 때문에 중간과정의 동적인 수문, 수리상태를 고려하지 못하는 결점이 있으나 계획단계에서 수자원의 지역적인 부존량을 파악하고 대수층의 초기 및 경계조건을 설정하는데 있어 필수적이다.

수문학적인 물수지 분석방법은 일정 수역내의 강우량과 직접유출, 증발산량 및 지하수 함양량간에 수문평형이 유지되며 다음 (1)식으로 표현이 된다.

$$I = P - DR - ET \pm IU \quad (1)$$

where, I = Infiltration(groundwater recharge)

P = Precipitation

DR = Direct Runoff

ET = Evapotranspiration

IU = Input and output from others watershed

유역면적의 우량 산정방법으로는 산술평균법, Thiessen가중법, 등우선법이 있으나 제주도와 같이 우량계의 분포가 고르지 않고 지형성 강우의 영향을 많이 받는 곳에서는 등우선법이 가장 적합한 방법이다(Boutwell et al, 1986). 여기서 사용한 강우량의 경우, 강우량 평균이 1,872 mm이지만 표고별 연평균 강우량

은 표고 200 m이하 지역이 1,625 mm, 표고 800 m 지역이 2,779 mm이다. 지역별로는 한라산을 기준으로 남동부 산악지역에 강우가 가장 많이 내리며 서부지역이 비교적 적은 강우를 보이고 있다(한국수자원공사, 1993).

중발산량은 최근 30년간의 일강우량 자료를 이용하여 토양수분평형법을 이용하여 계산하였다. 따라서 제주도 전역의 실제 중발산량은 693 mm로서 총 강수량의 37%에 해당한다.

하천유출은 지표면을 흘러서 유출되는 직접유출과 지하수의 배출에 기인하는 기저유출로 구성된다. 그러나 제주도의 경우, 투수성이 큰 수리지질 특성으로 인해 기저유출은 대부분 해안이나 해저의 용천형태로 유출이 되어진다. 하천유출은 50 mm이상 호우시에만 발생하며 유출기간도 연간 평균 4~5일에 불과하다. SCS방법을 이용한 간접적인 분석을 실시하여 제주도 북부지역의 개략적인 유출 규모를 결정하고 전체의 유출은 각 지역의 강우 및 자연조건과 토지이용 등의 자료로부터 유추하여 분석하였다. 이에 따라 각 수역별 유출율을 이용하여 제주도의 총 유출량을 산정한바 강수량의 18%에 해당하는 6.38억 m³이다. 참고로 하와이 제도의 유출 측정자료에 의하면 현무암류 분포지역에서 연평균 유출량은 0-15%이며 안산암질 분포지역이 유출율은 25%이다.

총강우량에서 직접유출과 중발산량을 뺀 수량은 지하수함양량이 된다. 이들은 지하로 침투하여 지하수가 되고 다시 대수층을 따라 하류구배구간으로 서서히 이류하여 바다로 유출이 된다.

따라서, 제주도의 지하수 함양량은 총 강수량(3,388백만 m³/년)의 44.1%에 해당하는 년평균 1,494백만 m³으로 하루 평균 4,093천 m³에 이르는 것으로 분석되고 있다. 이같은 지하수 함양율은 우리나라 내륙평균(18%) 및 하와이의 오후아섬(36%)보다 훨씬 높은 수치로 제주도가 투수성이 좋은 지질과 토양으로 이루어져 있음을 반영해 주고 있다(한국수자원공사, 1993).

3) 적정 개발량

제주도 지하수의 적정 개발량에 대해서는 1993년 한국수자원공사에 의해 최초로 제시되었다(Table 1). 지하수 자원의 보전·관리와 지역별 균형개발, 해수침

투 및 지하수위의 과다한 하강 등 지하수의 장애없이 이용 가능한 적정 개발 가능량은 연간 지하수 함양량 1,494백만 m^3 의 41%에 해당하는 616백만 m^3 인 것으로 제시되었다. 1일 지하수 개발·이용량은 1,689천 m^3 이며, 지역적으로 보면 동부지역이 737천 m^3/day , 서부지역 331천 m^3/day , 남부지역 286천 m^3/day , 그리고 북부지역이 335천 m^3/day 이다.

Table 1. Sustainable yield of groundwater resources in Cheju Island

Area	Recharge	Sustainable yield	Percentage(%)
Total	4,093	1,689	41
Northern	657	335	51
Southern	820	286	35
Western	570	331	58
Eastern	2,046	737	36

* Data : Korea Water Resources Corporation, 1993 (Unit : $10^3 \text{ m}^3/\text{day}$)

3. 이론적 고찰

1) Piper diagram에 의한 수질유형 분류

물의 용존물질은 3개의 양이온($\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Ca^{2+} , Mg^{2+})과 3개의 음이온(SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^-)로 구성되어 있는 것으로 생각하고 있으며, 이것은 본질적으로 Palmer(1962)의 분류이다. 최초의 분류는 Emmons와 Harrington(1913)과 Carreno(1915)에 나타나 있다.

Hill(1940)은 두 개의 삼각형과 그것에 끼인 다이어몬드형 도형으로 이를 표현하고, Langelier와 Ludrwig(1942)는 표준삼각지를 사용할 것을 제창하였다.

Piper(1994)는 약간의 수정을 가한 삼각도를 제안하였는데 이 도법은 현재 일본, 미국에서는 많이 쓰이고 있다. 이는 즉 하단의 두 개의 삼각형 중 왼쪽은 주 양이온인 나트륨과 칼륨, 칼슘과 마그네슘의 농도(epm)를 백분율로 환산하여 나타내며 오른쪽 삼각형은 주음이온인 염소이온, 황산이온, 중탄산이온과 탄산

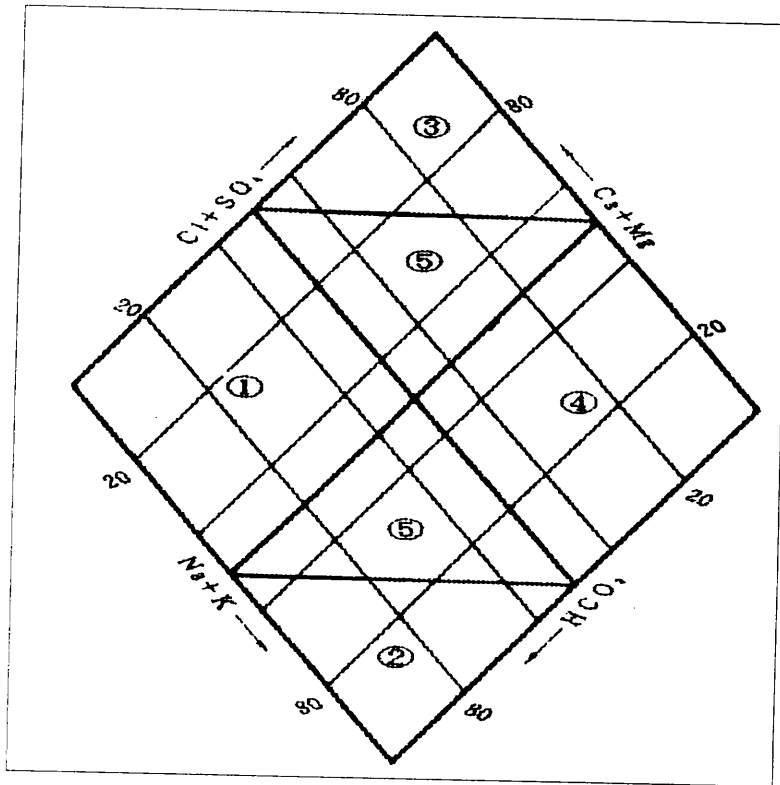


Fig. 4. Piper diagram for classifying groundwater quality.

Table 2. The separation of water quality type

Water type	Evaluation	Decision
① Calcium bicarbonate ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$)	Groundwater of limestone Representative groundwater	General groundwater
② Sodium bicarbonate (NaHCO_3)	Fixed groundwater related to a fault and fractured zone	Deep groundwater
③ Calcium chloride Calcium sulphate (CaCl_2 , CaSO_4)	Not general groundwater but hot spring and mineral water	Hot spring groundwater
④ Sodium chloride (NaCl)	Seawater or contaminated ground- water by seawater	Seawater or Brine
⑤ Mixing type ①~④'s medium.	Infiltrated water, Free ground- water or traditional drift water	Infiltrated water, Free groundwater

이온의 농도(epm)를 역시 백분율로 환산하여 표시하고 다음으로 양이온과 음이온 삼각형에 표시한 점을 상부에 있는 다이아몬드형 그래프에 나타낸다. 미국에서는 Piper가 처음으로 제창한 것처럼 성분의 총량을 어느 직경 또는 반경을 갖는 원으로 도시하고 있으나 일본에서는 이 표현을 사용하지 않는다(시료가 많으면 원이 중복되어서 잘 보이지 않게 된다).

Piper diagram은 분석결과를 고찰하는 데 아주 뛰어나다. 이는 수질의 차이와 유사를 잘 강조하나 농도는 표현되지 않으며, 지하수의 유형분석과 서로 다른 유형의 지하수의 혼합, 양이온교환 등의 관계를 분석하는데 사용한다(Fig. 4, Table 2).

이외에도 지하수에 용해되어 있는 주 양이온과 음이온의 조성을 파악하여 수질유형을 분류할 수 있는 방법에는 농도에 의한 표시법과 백분율에 의한 표시법이 있다. 농도에 의한 표시법에는 막대그래프법, 대수조성법, 방사벡터법, 그리고 stiff diagram 등이 있다. 백분율에 의한 표시법에는 위에서 설명한 piper diagram과 누적백분율법, pie diagram, 방사축법 등이 있다.

2) 통계분석을 이용한 지하수 수질특성 해석

상관분석이란 두 변수간에 상관관계가 존재하는지를 파악하고, 두 연속변수의 '선형'상관계수를 나타내는 기법이다. 통계학적인 측면에서 상관도란 선형적 상관도를 말하는 것으로서 이는 두 변수의 변수값이 산점도상의 직선을 중심으로 분포되어 있는 정도를 나타낸다. 연속변인인 경우에 상관계수가 의미가 있으며, 상관계수는 단지 두 변수의 선형 관계의 정도를 나타낼 뿐이며 2차, 3차 관계가 있는데도 불구하고 상관계수는 상관이 없는 것으로 나타나는 경우가 많다. 만약 한 변수가 다른 변수와 정확하게 선형관계가 있으면 상관계수는 1 또는 -1이다. 즉 상관계수의 절대값이 1이면 모든 관측값이 정확하게 직선상에 나타난다. 이와는 달리 상관계수가 0에 가까우면 관측값이 직선상에서 이탈하여 원형의 형태로 퍼지게 되는데 이는 즉 한 변수로 다른 한 변수를 전혀 예측할 수 없다는 것을 의미한다.

단일 독립변수와 단일 종속변수간의 인과관계를 파악하고자 할 때 일변량통계

분석(univariate statistical analysis)을 적용한다. 이러한 일변량통계분석은 개개의 요인들이 서로 상호작용을 하지 않은 상태에서 연구하고자 하는 변수에만 작용한다고 가정하였을 때에만 문제가 제기되지 않는다.

그러나 현실에서는 요인들간의 상호작용이 존재하며 연구하고자 하는 변수 또한 요인들에게 영향을 주는 경우가 많다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 다변량통계분석(multivariate statistical analysis)을 사용한다. 다변량통계분석은 차원을 줄이고 많은 수의 변수를 최소한의 정보손실을 유지하면서 가능한 적은 수의 변수로 줄여서 분석하는 방법이다.

이러한 다변량통계분석 방법중의 하나인 요인분석은 변수들간의 상관관계를 이용하여 서로 유사한 변수들끼리 분류하여 몇 개의 공통된 집단으로 만들어 줌으로서 자료의 복잡성을 줄이고 몇 개의 요인으로 정보를 요약하거나, 요인으로 묶이지 않는 변수들을 제거함으로써 신뢰도가 낮은 변수들을 선별해 내기 위해 이용되는 자료의 통계처리 방법이다. 요인분석은 구체적으로 다음과 같은 목적으로 이용되어질 수 있다.

첫째, 변수들을 축소한다. 여러개의 관련있는 변수들이 하나의 요인으로 묶여 지므로 많은 변수들이 적은 수의 요인으로 줄어든다.

둘째로는 불필요한 변수들을 제거한다. 요인에 포함되지 않거나 포함되더라도 중요도가 낮은 변수를 찾을 수 있으므로 불필요한 변수가 제거된다.

그리고 셋째로 변수들의 특성을 파악한다. 관련된 변수들이 묶여져 요인을 이루고 이들 요인들은 상호 독립적인 특성을 가지게 되므로 변수들의 특성이 밝혀지게 된다.

이러한 목적으로 사용되는 요인분석은 변수들의 공통인자의 수를 결정하는 것이 중요한데 일반적으로 적당한 수의 요인의 수를 결정하기 위해서는 고유값(eigenvalue), 공통분산치(communality) 및 누적기여율(cumulative percentage) 등을 고려하여 결정한다. 또한 요인들의 해석을 돕기 위하여 인자축의 회전(factor rotation)이 가능한데 회전방법에는 직교회전(orthogonal rotation)과 비직교회전(oblique rotation)이 있다. 직교회전은 요인간에 독립성을 유지하도록 추출된 요인들이 서로 직교가 되도록 인자를 회전시키는 방법으로서 여러 가지 회전방법이 개발되고 있지만 베리맥스(varimax)법이 널리 사용되고 있다.

수온, pH 및 전기전도도 등의 물리적 특성을 현장에서 채수 즉시 측정을 하였다. 알칼리도 측정은 현장에서 지시약(페놀프탈레인 용액 및 메틸오렌지-브롬크레졸그린 혼합용액)을 이용하여 산중화 적정한 후 계산에 의해 HCO_3^- 함량을 얻었다.

Table 3은 채취한 지하수 시료의 분석항목과 측정기기 및 방법을 나타낸 것이다.

Table 3. Analytical items, equipment and method

Items	Analytical equipment and method
pH	pH meter(Orion 701A)
EC	Electrical Conductivity meter(ATI Orion 128)
Na^+	Atomic Absorption Spectrophotometer(AA-6701)
Ca^{2+}	Atomic Absorption Spectrophotometer(AA-6701)
Mg^{2+}	Atomic Absorption Spectrophotometer(AA-6701)
K^+	Atomic Absorption Spectrophotometer(AA-6701)
HCO_3^-	Titration method
SO_4^{2-}	Ion Chromatograph(DX-100)
Cl^-	Ion Chromatograph(DX-100)
NO_3^-	Ion Chromatograph(DX-100)

2. 고도 및 지역 구분방법

제주도 지하수의 수질특성을 좀 더 세부적으로 살펴보기 위해서 고도에 따라 해안지역을 대표할 수 있는 해발 0~50 m, 시가지화 된 51~100 m, 그리고 경작지 및 산림지역인 101 m이상의 3가지로 나누어서 각 지역의 수질특성을 살펴보았다.

그리고 제주도 지역별 구분은 서귀포층의 지하분포 상태를 고려하여 Fig. 6과 같이 동부, 서부, 남부, 북부의 4개의 지역으로 구분하였다(고, 1997).

북촌-표선 선의 동쪽에 해당하는 동부지역에는 서귀포층은 분포하고 있지 않으며, 해수면 하 평균 115 m까지 화산암류가 분포하고 있다. 그리고 서부지역은 서귀포층은 해수면 하 평균 40~60 m에서부터 분포하고 있다. 남부지역은 서귀포층이 해수면 상부에 분포하고 있으며, 표고가 높아질수록 그 분포심도도 높아지는 경향을 나타내고 있다. 북부지역은 표고 약 200 m이하 지역의 경우 서귀포층은 해수면 하 약 40~50 m에서부터 포착되고 있으며, 표고 200 m를 지나면서 해수면 상부에 위치하고 있다.

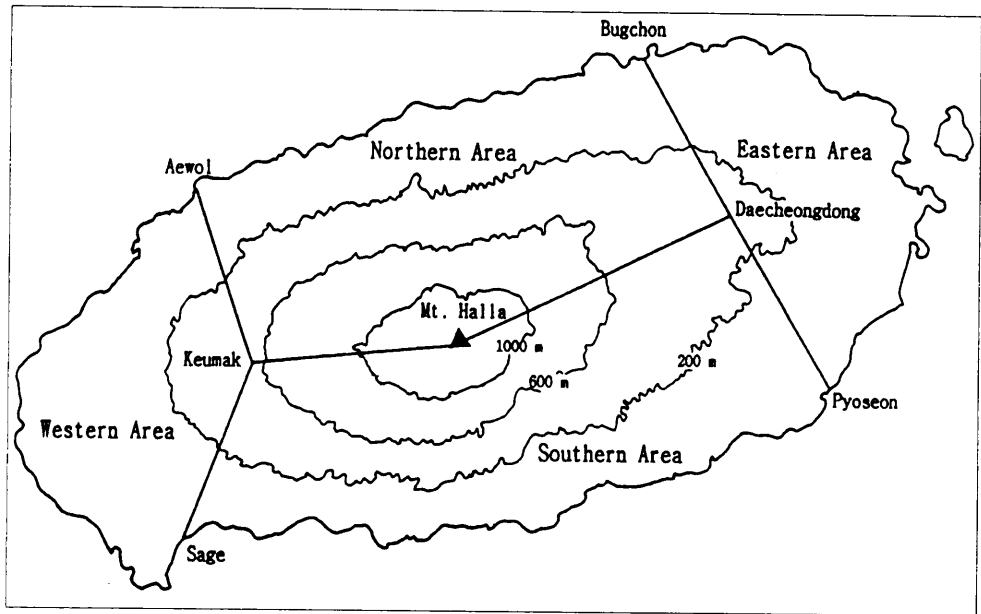


Fig. 6. Map showing the division of Cheju Island.

3. 해석방법

1) Piper diagram에 의한 수질유형 분류

지하수 수질의 화학적 분석결과를 표로 나타낼 경우 많은 양의 자료를 쉽게 파악하기가 어렵다는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완한 것이 그래프로서, 이것은 분석결과를 비교하고 원하는 목적에 적합하도록 유사점과 차이점을 강조할 수 있으며, 또한 지하수내의 여러 구성 물질들과 화학 반응들을 검증하는데 유용하게 사용되어진다. 여기서는 화학적 분석 결과를 나타내기 위하여 가장 많이 사용되고 있는 도시화 방법들 중에 piper diagram을 이용하였다.

2) 통계분석을 이용한 지하수 수질특성 해석

많은 양의 분석 자료들을 바탕으로 얻어진 정보로부터 합리적이고 논리적인 판단을 내릴 수 있는 방법인 통계적 분석을 통하여 변수들간의 인과관계를 확인하는데 적용될 수 있다. 여기에서는 전체변수들 속에 잠재되어 있는 요인들을 파악하기 위하여 다변량통계분석 방법중의 하나인 요인분석을 실시하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 고도별 수질특성

1) 물리·화학적 특성 및 용존물질의 함량분포

계절적인 수질변화를 고려하여 건기와 우기에 제주도 지하수 시료를 채취하였고, 이를 분석하여 정량화한 결과 값들을 고도별로 구분하여 Table 4와 5에 각각 나타내었다.

(1) 수소이온농도(pH)

대부분의 지하수 pH는 4에서 9사이에 있으며 습지지역의 하천수에서는 5~6.5, 건조지역에서는 7~8정도이다. 산성토양수는 pH가 4보다 적고 해수의 pH는 보통 8.1에서 8.3에 속한다(최, 1990). 일반적으로 지하수에서 pH값은 용해된 탄산염이나 탄산가스의 양에 의해서 달라지는데 지하수내에 탄산가스가 용해되어 있으면 산성을 띠게 되며 이에 비해 알칼리염인 칼슘 및 마그네슘의 탄산염이 지하수 속에 용해되어 있는 경우에는 용존탄산가스 경우만큼 pH값이 저하되지는 않는다. 지하수 오염문제를 다루는 데 있어서 pH는 다음과 같은 2가지 이유로 매우 중요한 인자로 여기게 되는데 첫째는 생명체가 존재할 수 있는 pH의 범위는 대체적으로 6~9사이이고 둘째로는 수용성 상태로 존재 할 수 있는 화학물질은 그 pH에 따라 좌우가 되기 때문이다(한, 1998).

건기에 시료의 pH는 평균 7.59이며, 최소, 최대값은 각각 6.49, 8.72이다. 그리고 우기시에는 평균 7.55로 나타났으며 최소, 최대값은 6.56과 8.73으로 나타나고 있고, 거의 비슷한 pH의 범위값을 보이고 있다.

(2) 전기전도도(Electrical Conductivity: EC)

전기전도도는 오염물질의 이온강도를 나타내는 수질인자로서 물에 용해되어 있는 용질의 총량(TDS)을 나타낸다. 일반적으로 전기전도도는 염류의 함량에 따라 증가하기 때문에 온도와 마찬가지로 현장에서 측정되어지는 인자이다. 비오

Table 4. Physical and chemical components for groundwater samples by elevation groups in Cheju Isalnd(dry season)

Elevation	Temp. (°C)	pH	EC (μ S/cm)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	
50m under groundwater	Mean	15.84	7.34	269.97	16.83	4.34	2.13	7.16	32.73	14.92	24.13	32.15
	Median	15.85	7.38	232.00	14.61	4.09	.76	5.92	29.00	11.61	23.86	33.28
	Std.dev.	1.43	.35	171.03	10.59	2.30	6.84	5.86	14.85	11.20	14.55	14.90
	Min.	13.00	6.58	85.00	6.06	2.03	.04	1.12	12.50	3.68	.66	4.13
	Max.	18.90	8.27	1082.00	56.61	15.42	45.62	33.10	85.00	54.11	79.73	63.45
51 ~100m groundwater	Mean	15.83	7.63	211.90	18.38	4.03	.71	5.22	30.37	11.06	20.24	21.15
	Median	15.50	7.69	166.00	9.62	3.25	.44	3.71	26.00	6.60	15.67	20.07
	Std.dev.	1.47	.39	120.25	32.24	3.46	.84	4.48	15.13	8.28	15.15	14.37
	Min.	13.20	6.81	82.00	5.09	1.06	.00	.00	18.00	3.99	.61	2.43
	Max.	20.00	8.72	589.00	222.60	21.20	3.62	22.05	96.75	39.99	68.95	60.22
101m above groundwater	Mean	15.27	7.76	118.11	8.44	2.75	.34	2.01	27.56	5.25	7.99	9.79
	Median	15.00	7.80	105.00	7.69	2.60	.22	1.51	25.00	4.72	5.40	6.02
	Std.dev.	1.23	.38	52.05	3.48	1.35	.60	1.79	10.97	1.96	6.30	10.90
	Min.	13.70	6.49	42.00	3.66	.63	.00	.33	14.00	2.96	.95	.93
	Max.	19.10	8.72	286.00	17.55	7.76	4.44	8.56	71.75	14.06	25.73	48.19
* Temp: Temperature EC: Electrical Conductivity Std. dev.: Standard deviation												

Table 5. Physical and chemical components for groundwater samples by elevation groups in Cheju Isalnd(rainy season)

Elevation	Temp. (°C)	pH	EC (μ S/cm)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	
50m under groundwater	Mean	17.29	7.41	309.69	21.39	5.62	5.72	7.04	34.60	34.97	98.12	65.40
	Median	17.00	7.38	280.00	19.20	4.07	2.94	5.27	27.15	27.43	92.71	72.84
	Std. dev.	1.08	.44	177.41	11.77	6.52	11.49	8.43	24.27	32.70	55.59	31.73
	Min.	15.00	6.66	89.00	8.22	.29	.23	1.10	11.40	5.46	5.08	9.70
	Max.	20.30	8.58	1770.00	211.46	38.24	75.41	50.72	166.16	179.23	305.47	171.77
51 ~100m groundwater	Mean	16.88	7.58	229.30	17.51	3.58	2.68	5.06	30.97	19.61	75.37	64.46
	Median	17.00	7.61	206.00	16.48	3.50	1.31	5.10	24.97	15.57	67.09	68.23
	Std. dev.	1.15	.47	110.26	6.50	1.90	5.02	1.62	18.83	14.51	49.31	30.94
	Min.	14.00	6.56	88.00	8.03	.28	.14	2.19	9.77	4.54	14.92	9.46
	Max.	19.50	8.66	656.00	35.05	9.96	32.17	10.14	104.26	58.80	219.77	143.61
101m above groundwater	Mean	16.52	7.69	134.80	11.25	2.91	1.02	3.17	27.08	8.58	34.93	30.67
	Median	16.50	7.70	117.00	10.77	2.80	.37	3.66	24.97	6.40	26.88	20.35
	Std. dev.	1.26	.43	79.20	4.81	.99	1.75	2.06	8.59	7.45	24.89	30.51
	Min.	14.00	6.82	40.00	1.54	1.44	.01	.11	14.12	3.52	10.01	.44
	Max.	22.00	8.73	408.00	28.25	6.99	8.55	10.48	58.64	42.34	126.67	116.72
* Temp: Temperature EC: Electrical Conductivity Std. dev.: Standard deviation												

염 지하수는 전기전도도가 매우 낮으나 오염된 지하수는 다량의 용존물질과 염류를 함유하고 있어 비오염 지하수에 비해 전기전도도가 매우 높으며 오염정도가 클수록 전기전도도 값은 증가한다. 그리고 전기전도도는 온도가 1℃ 증가함에 따라 약 2%씩 증가한다고 알려져 있다(최, 1990). Table 6에는 물의 종류에 따른 전기전도도를 나타내었다.

Table 6. Electrical conductivity(EC) with the kinds of water

Kinds of water	Hem(1995)	Cleary(1990)
	EC($\mu\text{S/cm}$)	
Pure water(distilled water)	0.05	0.5 ~ 2
Snowmelt	2~42	
Fresh water		50 ~ 500
Mineralizing water		500 ~ 1,000
Industrial wastewater		10,000 >
Seawater	41,500 >	
Brine	225,000	

고(1998)는 전기전도도가 600 $\mu\text{S/cm}$ 를 전후 할 경우에 해수 침입에 의한 염분화의 가능성을 추정하고 있다. 건기에 채취한 지하수에서 50 m이하 지역의 EC는 평균 269 $\mu\text{S/cm}$ 이고 최고값이 1,082 $\mu\text{S/cm}$ 를 보이고 있다. 51~100 m 지역에서는 평균 211 $\mu\text{S/cm}$ 이고 101 m이상의 지역은 EC가 평균 118 $\mu\text{S/cm}$ 로 나타났다. 표고가 높은 곳으로 갈수록 전기전도도 값이 점차로 줄어드는 경향을 보이고 있으며 100 $\mu\text{S/cm}$ 미만의 관정도 25개 관측되었다.

우기에서의 EC 값은 50 m이하 지역에서는 평균 309 $\mu\text{S/cm}$ 이고 51~100 m 지역은 229 $\mu\text{S/cm}$ 으로 나타났다. 그리고 고도 101 m이상의 지역에서는 EC가 134 $\mu\text{S/cm}$ 를 보이고 있다. 제주도 지하수의 평균 EC 값은 500 $\mu\text{S/cm}$ 이하이고 Cleary(1990)에 의해 분류하면 fresh water에 속하는 것으로 나타났다.

고도가 낮은 저지대에서가 높은 EC 값을 보이고 있는데, 이는 자연동수구배에 따라 지하수가 이동하면서 용존물질과 오염물질이 혼입이 되어 저지대의 지하수로 유입이 되어 나타난 것으로 추정할 수가 있다. 그리고 우기 때의 지하수에서

가 건기때 보다 모든 지역에서 EC 값이 높게 나타났으며 이는 강우에 의해 지표의 오염물질과 용존물질이 지하로 유입이 되어 나타난 결과라고 볼 수가 있다.

(3) 양이온(Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})

① 나트륨(Na^+): 나트륨 이온은 수용성으로서 토양이나 암석내에서 빠져나와 용해되는데 이것의 가장 중요한 자연적 기원은 조암광물인 사장석의 비조화용해 (incongruent solution)이다. 이외에 해수와 근접한 지역에서는 지하로 침투한 해수의 영향을 받거나 해수로 비산된 염성분이 강하하여 지표수 및 지하수에서 높은 나트륨이온의 함량이 나타날 수 있다. 그리고 NaHCO_3 나 Na_2CO_3 를 다량 포함한 지하수는 pH가 약 9이상에 이르며, 우리나라 먹는물 수질기준으로는 설정되어 있지 않으나 WHO, 일본 등 대부분 나라의 허용기준치는 150~200 mg/L이하로 정하고 있다(오 등, 1995).

건기에 나트륨이온의 함량은 표고 50 m이하 지역에서가 평균 16.83 mg/L이고, 표고 51~100 m 지역은 18.38 mg/L, 그리고 표고 101 m이상 지역에서는평균 8.44 mg/L로 나타났다. 우기에서는 표고 50 m이하 지역에서 평균 21.39 mg/L, 표고 51~100 m 지역은 17.51 mg/L, 그리고 표고 101 m이상에서는 11.25 mg/L를 보이고 있다. 이는 자연적 기원의 광물용해 외에 해수의 영향을 받아 나트륨 이온의 농도가 다른 지역보다 표고가 낮은 저지대에서 더 높게 나타난 것으로 보인다.

② 칼륨(K^+): 물 속에 용존된 무기물질의 일종으로 물 속으로 공급되는 칼륨 이온의 자연적 기원으로서는 조암광물 중의 카리장석 또는 운모류 등의 용해를 들 수 있다. 이 외에 칼륨이온은 비료의 주 구성요소이므로 농업활동이 활발해짐에 따라 인공적으로 지하수내로 유입이 될 수 있다(이 등, 1997). 정상적인 지하수는 일반적으로 5 mg/L 미만의 값을 가지고 있으나 그 이상의 값을 보이게 되면 일단 오염의 가능성이 있다. 즉 해수의 침입에 의한 것이나 농약이나 폐기물에 의해 오염된 것이다(최, 1989). 칼륨이온은 우리나라 먹는물 수질기준으로는 설정되어 있지 않으나 영국, 프랑스 등지에서는 수질기준을 12 mg/L 이하로 정해놓고 있다(오 등, 1995).

칼륨이온의 농도는 표고 50 m이하 지역에서 건기에는 평균 4.34 mg/L, 표고 51~100 m 지역 4.03 mg/L, 그리고 표고 101 m이상 지역이 2.75 mg/L로 나타났

다. 그리고 우기에서의 농도는 표고 50 m이하에서 평균 5.62 mg/L, 표고 51~100m 지역 3.58 mg/L, 그리고 표고 101 m이상 지역이 2.91 mg/L를 보이고 있다. 대부분의 지역에서 평균 5 mg/L 이상을 보이지 않으며 우기에서의 농도가 약간 높게 나타나고 있다.

③ 칼슘(Ca^{2+}): 칼슘이온은 방해석, 백운석, 석고 등의 조화용해(congruent solution) 또는 칼슘을 포함하는 규산염광물의 비조화용해(incongruent solution)에 의해 물 속으로 공급된다. 칼슘을 먹는물 수질기준을 정하여 관리하는 나라는 거의 없으며, 독일에서는 400 mg/L 이하로 규제하고 있으며, 또한 일본에서는 맛있는 물의 수질기준에 경도로서 10~100 mg/L 이하로 규정하고 있다. 우리나라 먹는물 수질기준에는 경도로서 300 mg/L 이하로 규정하고 있다.

칼슘이온의 함량은 건기때 표고 50 m이하 지역에서 평균 2.13 mg/L, 표고 51~100 m 지역은 0.71 mg/L, 그리고 표고 101 m이상에서는 0.34 mg/L를 보이고 있다. 그리고 우기에서는 표고 50 m이하에서가 평균 5.72 mg/L를 나타내고 있으며, 51~100 m에서는 2.68 mg/L를, 그리고 표고 101 m이상의 지역에서는 평균 1.02 mg/L를 보이고 있다.

④ 마그네슘(Mg^{2+}): 용존 마그네슘 이온의 중요한 자연적 기원으로는 백운석 또는 마그네슘을 포함한 방해석 등의 용해 및 마그네슘-산화광물이나 규산염광물에 용해에 의한 것이 일반적인 것으로 여겨진다. 우리나라 먹는물 수질기준으로는 설정되어 있지 않으나 영국, 프랑스, 독일 등의 수질기준에는 50 mg/L이하로 정하고 있다.

마그네슘 이온의 농도를 살펴보면 표고 50 m이하 지역에서 평균 7.16 mg/L, 표고 51~100 m 지역은 5.22 mg/L, 그리고 표고 101m이상의 지역은 2.01 mg/L로 나타나고 있으며, 우기에서는 표고 50 m이하 지역에서 평균 7.04 mg/L, 표고 51~100 m 지역은 5.06 mg/L, 그리고 표고 101m이상의 지역은 3.07 mg/L를 보이고 있다. 마그네슘이온의 농도는 건기와 우기에서 비슷한 농도의 범위를 보이고 있으며 풍수기에서가 조금 높은 것으로 나타나 있다.

(4) 음이온(HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^-)

① 중탄산이온(HCO_3^-): 중탄산 이온은 용해된 탄산가스(CO_2)에 의해 지하수 내에서 용존상태로 존재한다. 즉 용해된 탄산가스가 석회암이나 백운암과 접촉

할 때에는 이들 암석 내에 포함된 칼슘 및 마그네슘 성분과 반응하여 중탄산염으로 변한다. 그리고 중탄산 이온은 pH 약 8.35를 기준으로 하여 그 이상에서는 pH가 증가할수록 CO_3^{2-} 형태로 존재하는 양이 많아진다.

건기 때의 중탄산이온의 평균 농도는 표고 50 m이하 지역은 32.73 mg/L, 표고 51~100m 지역에서는 30.37 mg/L, 그리고 표고 101 m이상 지역은 중탄산이온의 농도가 평균 27.56 mg/L로 나타나 있다. 그리고 우기에서는 표고 50 m이하 지역에서 34.60 mg/L, 51~100 m 지역에서는 30.97 mg/L, 그리고 표고 101 m이상의 지역은 중탄산 이온의 함량이 27.08 mg/L를 보이고 있다. 건기와 우기에서의 변화는 거의 보이지를 않고 있으며 고지대에서 저지대 즉 해안가로 갈수록 점차 중탄산 이온이 증가하는 경향을 보이고 있다.

② 황산이온(SO_4^{2-}): 지하수내의 황산이온은 주로 황화광물의 산화작용 및 용해에 의하여 존재하게 된다. 그리고 해안인접 지역에서는 염소이온과 마찬가지로 해수에 의한 영향에 의해 황산이온이 높아 질 수가 있다. 지하수내에 황산마그네슘이나 황산나트륨염이 상당량 함유되어 있으면 쏘는 맛을 내며, 이러한 물을 장기간 마시는 경우 설사를 일으키는 것으로 알려져 있다. 우리나라 먹는물 수질기준에는 황산이온을 200 mg/L이하로 규정하고 있다.

건기에서의 황산이온의 평균 농도는 표고 50 m이하 지역이 14.92 mg/L, 표고 51~100 m 지역에서 11.06 mg/L, 표고 101 m이상의 지역에서는 5.25 mg/L로 나타나고 있다. 우기에서는 표고 50 m이하 지역에서 34.97 mg/L, 표고 51~100 m에서 19.61 mg/L, 그리고 표고 101 m이상의 지역에서 8.58 mg/L의 농도를 보이고 있다. 우기에서 고도가 내려갈수록 황산이온의 농도가 현저히 증가하는 것을 볼 수가 있는데 이는 광물이 용해되어 자연적으로 존재하는 농도이외에 해안 저지대 지역에서 해수의 영향으로 인해 농도가 높아진 것으로 볼 수가 있다.

③ 염소이온(Cl^-): 염소이온은 산업용 폐수, 하수, 동물의 배설물 및 제설제 등으로 인해 지하수로 유입이 된다. 상업비료는 KCl의 형태로 염소를 함유하고 있다. 특히 염소는 산업용제나 농약 제조용 할로겐 유기화합물의 성분으로 사용이 되며, 농약처럼 의도적이거나 누출이나 유출사고에 의해 지하수로 유입된다(한, 1998). 그리고 해안에 근접한 지역에서는 해수의 영향을 받아서 염소이온 농도가 상당히 높게 된다. 우리나라 먹는물 수질기준은 염소이온 농도가

250 mg/L이하로 규정하고 있다.

건기에서 표고별로 염소이온의 농도를 살펴보면 표고 50 m이하 지역이 평균 24.13 mg/L, 표고 51~100 m 지역은 20.24 mg/L, 그리고 표고 101 m이상 지역에서는 7.99 mg/L를 보이고 있다. 우기에서는 표고 50 m이하 지역에서 평균 염소이온 농도가 98.12 mg/L로 나타났고, 표고 51~100 m 지역은 75.37 mg/L, 그리고 표고 101 m이상 지역에서는 34.93 mg/L의 농도를 보이고 있다. 우기에서의 염소이온농도가 3개의 관정을 제외하고 기준치이하로 나타나고 있으나 건기에서 보다는 상당히 높은 농도를 보이고 있는데, 이는 강우에 의해 오염물질의 유입으로 인한 영향으로 추정된다.

④ 질산이온(NO_3^-): 대부분의 경우 질산이온은 자연적인 지질매체와의 반응에 의한 것이라기보다 유기물의 부식, 생활하수나 축산 폐기물 등의 오염에 의하여 물 속에 존재하게 된다. 즉, 질산이온의 기원은 모두 지표로부터 비롯된 것으로 볼 수가 있으며 심부지하수로 갈수록 희석작용을 비롯하여 음이온 교환반응, 식물 및 미생물에 의한 소모 등에 의하여 그 함량이 감소하게 된다(이 등, 1997). 질산염의 농도가 45 mg/L이상인 물은 유아에게 청색증을 일으키기 때문에 가정용수로는 사용할 수가 없으며, 이러한 독성효과는 유아들에게 무기력과 졸음증을 일으키게 한다. 통상 질산염의 먹는물 수질기준은 45 mg/L인데, 이를 질산성 질소($\text{NO}_3\text{-N}$)로 환산하면 10 mg/L에 해당한다. 그리고 농업용수 기준은 질산성 질소로 20 mg/L이하로 되어있다.

고도에 따른 질산이온의 농도를 살펴보면 건기에서 표고 50 m이하 지역이 평균 32.15 mg/L로 나타났으며, 표고 51~100 m 지역에서는 21.15 mg/L의 값을 보이고 표고 101 m이상의 지역은 평균 질산이온의 농도가 9.79 mg/L로 나타났다. 우기에서의 평균 질산이온의 농도는 표고 50 m이하에서가 65.40 mg/L, 표고 51~100 m에서는 64.46 mg/L, 그리고 표고 101 m이상의 지역은 30.67 mg/L로 나타났다. 건기보다 우기에서가 질산이온의 농도가 상당히 높은 것을 알 수가 있는데 이는 지표의 오염물질이 강우와 함께 지하로 유입이 되어 나타난 결과로 볼 수가 있다. 그리고 표고 50 m이하 지역과 51~100 m 지역에서는 평균 질산이온 농도가 먹는 물 기준치를 초과한 것으로 나타나 있다.

2) Piper diagram에 의한 수질특성

(1) 표고 50 m이하 지역

Fig. 7은 표고 50 m이하 지역에서 건기와 우기에 채취한 지하수 시료들에 대하여 양이온과 음이온의 농도를 당량으로 환산하여 piper diagram을 작성한 것이다. 건기에서의 piper diagram에서는 양이온은 Na+K 형태를 보이고 있으며 음이온은 Cl 형태와 HCO_3 형태로 나타나고 있다. 구좌와 성산지역의 일부 지하수를 제외한 대부분의 지하수 유형은 중간형태의 지하수로 볼 수가 있다. 해안저지대의 지하수일수록 위쪽(혼합형)으로 이동하고 있으며 일부는 우측(NaCl 형태)으로도 이동을 하고있다.

우기에서는 대부분의 지하수에서 양이온은 Na+K 형태를 보이고 있으며 음이온은 Cl 형태를 나타내어 수질유형은 비탄산나트륨 형태를 보이고 있다. 그리고 해안 인접지역의 지하수일수록 해수의 영향을 많이 받는 것으로 나타나고 있다.

(2) 표고 51~100 m이하 지역

Fig. 8은 제주도 표고 51~100 m 사이에 위치한 지하수 관정을 대상으로 하여 piper diagram을 도시한 것이다. 건기에서의 piper diagram을 보면 양이온은 Na+K 형태를 보이고 있으며 음이온은 HCO_3 형태와 Cl 형태를 나타내고 있다. 표고 51~100 m 사이의 지하수의 수질유형은 중간 형태의 자유지하수로 볼 수가 있으며, 북부와 남부지역 지하수 일부는 탄산나트륨 형태의 수질유형을 보이고 있다. 그리고 표고가 낮아질수록 대부분이 위(혼합형)로 이동하는 것을 볼 수가 있다. 우기에서 양이온은 Na+K 형태를 대부분 보이고 있으며, 음이온은 Cl 형태를 나타내고 있다. 이는 염소이온이 상당히 높은 것에 기인하며 수질유형은 대부분이 비탄산나트륨(NaCl) 형태를 보이고 있다.

(3) 표고 101 m이상 지역

제주도 해발 101 m 이상에 위치한 지하수 관정을 대상으로 한 piper diagram을 Fig. 9에 나타내었다. 건기에서 양이온은 Na+K 형태의 군을 이루고 있고, 음이온은 HCO_3 형태를 나타내고 있다. 표고가 낮아질수록 탄산나트륨의 수질유형에서 중간형태의 수질유형으로 이동하고 있다.

우기에서의 piper diagram은 양이온의 대부분이 Na+K 형태를 보이며 음이온

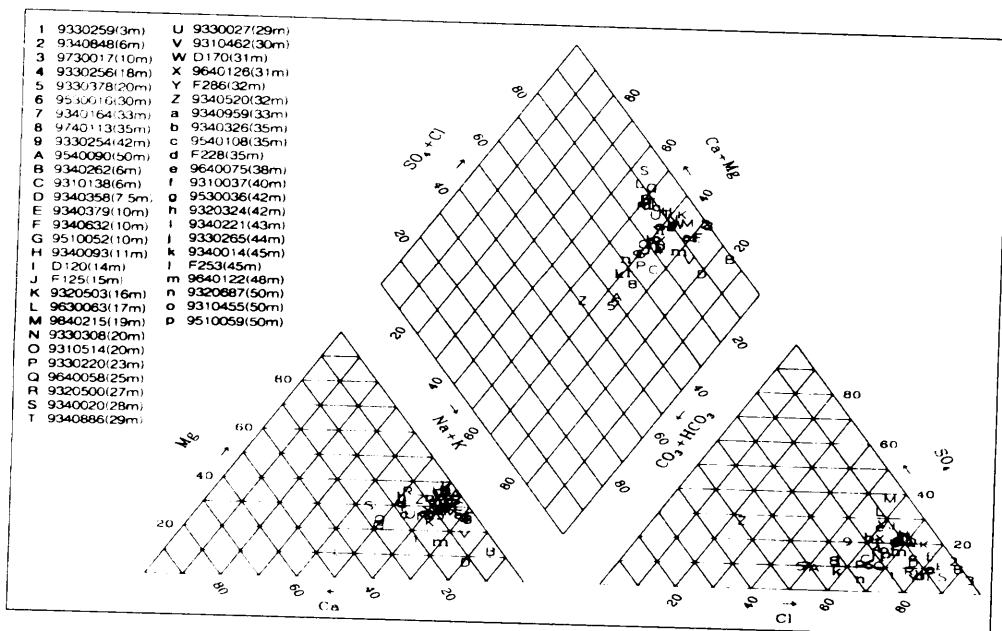
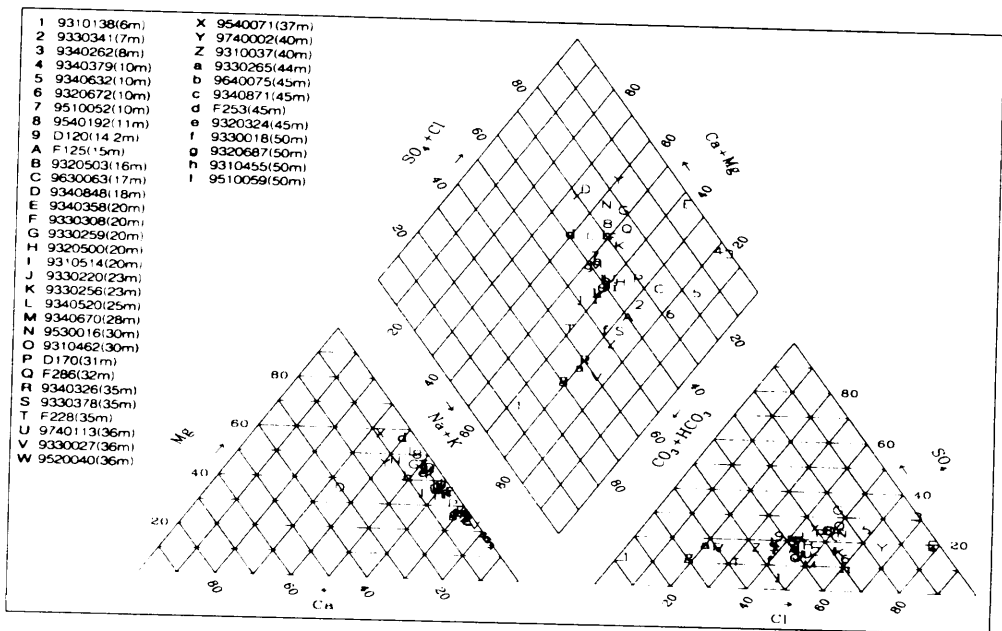


Fig. 7. Piper diagram showing the chemical compositions of the groundwater samples under 50m elevation in Cheju Island (above: dry season, below: rainy season).

은 C1 형태를 보이고 있다. 이 지역의 지하수는 표고가 낮아질수록 우측으로 조금씩 이동이 되어가는 경향을 보이고 있으며 대부분의 지하수 수질유형이 중간 형태의 지하수를 보이고 있다.

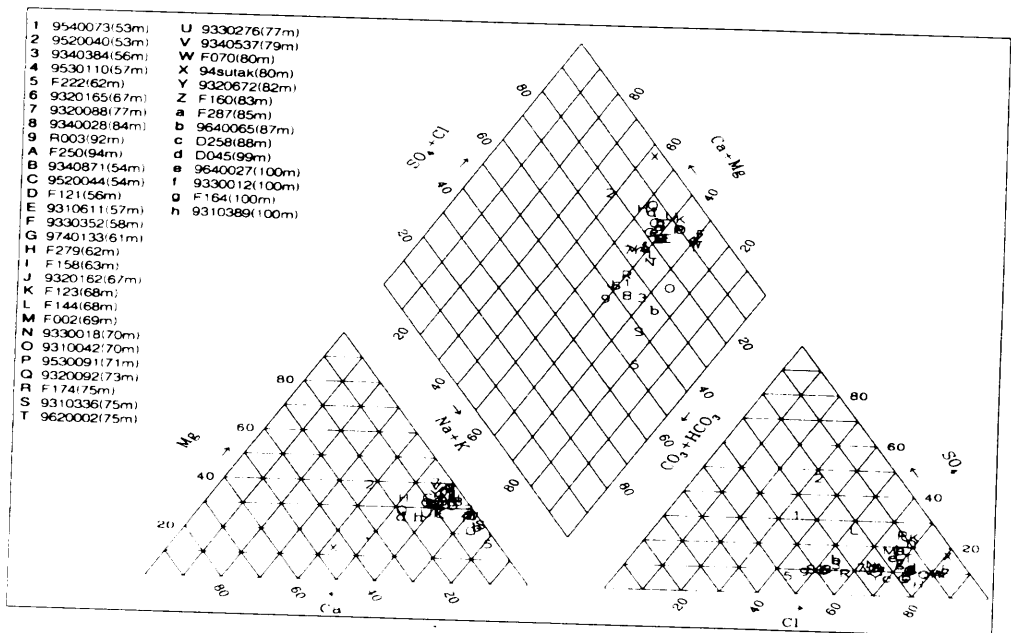
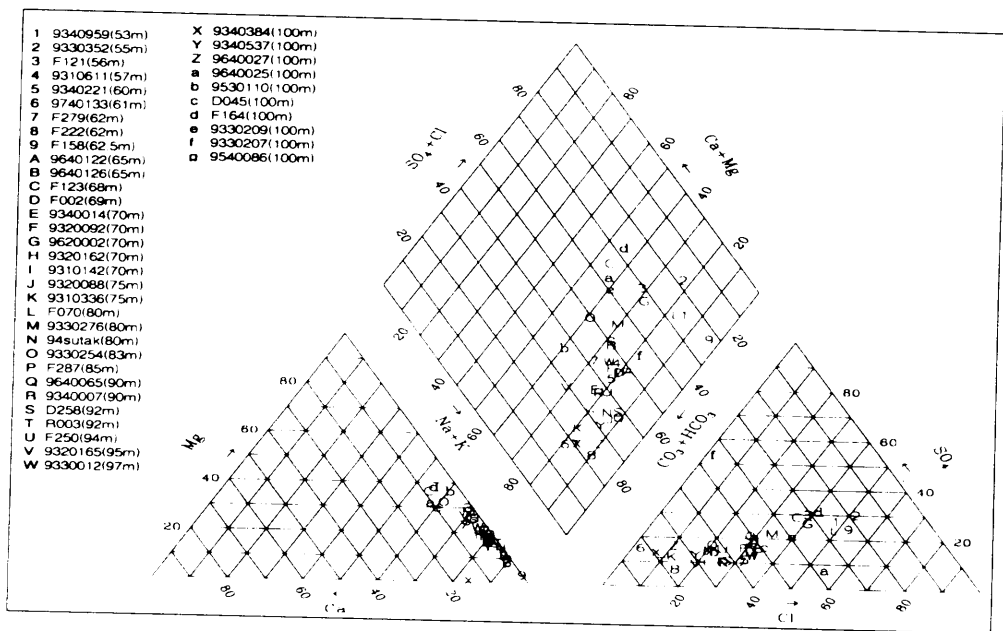


Fig. 8. Piper diagram showing the chemical compositions of the groundwater samples from 51~100 m elevation in Cheju Island (above: dry season, below: rainy season).

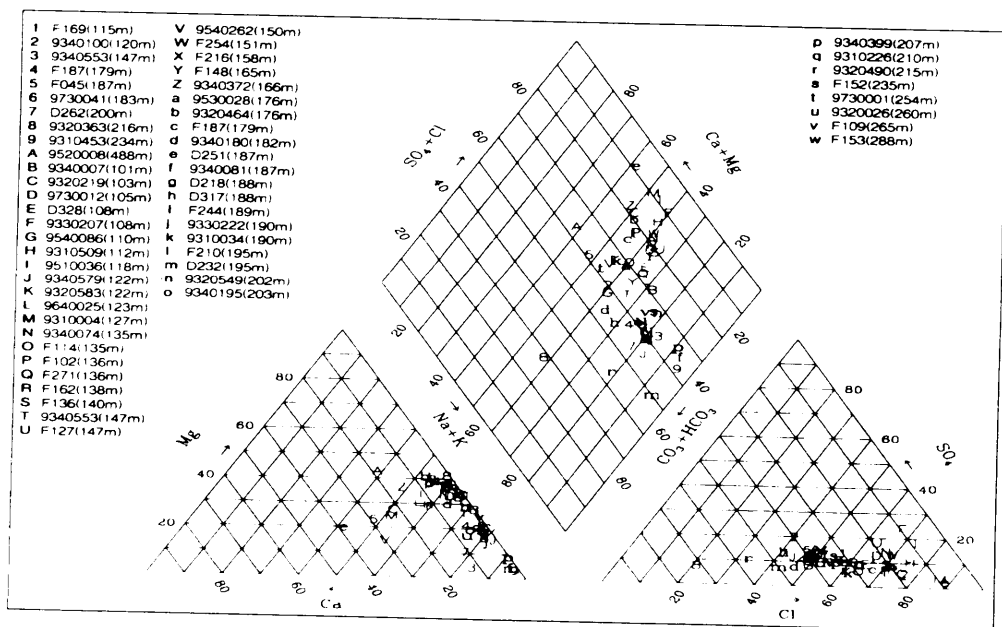
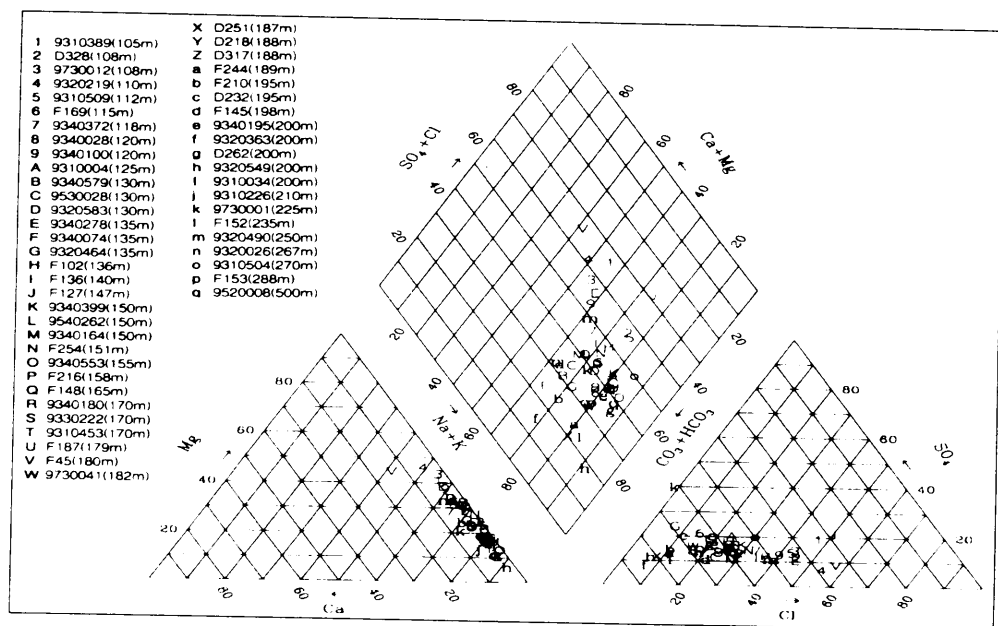


Fig. 9. Piper diagram showing the chemical compositions of the groundwater samples above 101 m elevation in Cheju Island (above: dry season, below: rainy season).

3) 상관분석(Correlation analysis)과 요인분석(Factor analysis)

요인분석(factor analysis)은 많은 변수의 상호관련성을 소수의 기본적인 요인(factor)로 집약하는 방법의 하나로 전체변수에 공통적인 요인이 있다고 가정하고 이 요인을 찾아내어 각 변수가 어느 정도 영향을 받고 있는지 그 정도를 산출하기도 하고 그 집단의 특성이 무엇인지를 기술하려는 통계분석방법이다(원과 정, 1998). 요인분석은 보통 많은 수의 변수들로부터 상관분석을 바탕으로 하여 각 변수들에 내재되어 있는 공통 요인들을 묶어낸다.

제주도의 지하수가 나타내는 수질특성이 어떠한 잠재요인에 의해 영향을 받는 것인지를 알아보기 위하여 표고별로 구분을 하여 요인분석을 실시하였다. 요인분석을 실시하기 위하여 사용된 통계프로그램은 windows용 한글 SPSS(7.5 version)이며, 요인분석에 사용된 자료는 건기에 비해 각 성분의 농도가 증가된 우기의 조사 결과를 대상으로만 행하였고 요인분석에 앞서 자료의 왜도(skewness)를 제거하기 위하여 로그변환을 실시하였다. 여기에 사용된 변수로는 지하수의 주성분인 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- 외에 EC, 그리고 지하수 수질에 영향을 줄 수 있는 각 지하수 관정의 표고와 관정에서 해안선과의 거리도 변수로 포함시켰다. 요인추출 방법으로는 데이터의 총분산을 이용하여 가장 널리 사용되고 있는 주성분 분석(Principal component analysis; PCA) 방법을 사용하였다. 요인수 결정은 고유값(eigenvalue)이 1이상인 것으로 하였고, 요인의 해석방법으로서 요인들간에 독립성을 유지하면서 서로 직교가 되도록 회전시키는 varimax 직각회전방식을 택하였다.

(1) 표고 50 m이하 지역

제주도 표고 50 m이하 지역에서의 수질특성에 영향을 미치는 요인들을 알아보고자 먼저 상관분석을 실시하였다(Table 7). EC와는 대부분의 이온들이 높은 상관성을 보이고 있고 특히 나트륨이온과 염소이온에 0.942, 0.931로서 상관성이 높게 나타났다. 그리고 질산이온과 중탄산이온은 EC와는 0.442와 0.492로 높지 않은 상관성을 보이며 나트륨이온은 마그네슘과 염소이온과 높은 상관관계를 이루고 있다. 염소이온은 나트륨이온과 황산이온에 0.897과 0.871로 높은 상관성을 보이고 있다. 이는 염소이온, 나트륨이온, 황산이온이 같은 기원에서 유래된

Table 7. Matrix of correlation coefficients for the groundwater samples under 50 m elevation in Cheju Island

	EC	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	Elev- ation	Dist- ance
EC	1.000										
Na ⁺	.942	1.000									
K ⁺	.508	.535	1.000								
Ca ²⁺	.731	.651	.460	1.000							
Mg ²⁺	.875	.915	.438	.597	1.000						
HCO ₃ ⁻	.442	.536	.468	.413	.446	1.000					
SO ₄ ²⁻	.854	.787	.449	.604	.646	.535	1.000				
Cl ⁻	.931	.897	.462	.632	.790	.432	.871	1.000			
NO ₃ ⁻	.492	.252	.195	.465	.215	-.124	.435	.413	1.000		
Elev- ation	-.478	-.472	-.401	-.335	-.321	-.171	-.524	-.495	-.208	1.000	
Dist- ance	-.297	-.315	-.274	-.258	-.229	-.142	-.231	-.296	-.047	.730	1.000

Table 8. Factor matrix for the compositional variables of the groundwater samples under 50 m elevation in Cheju Island

Variable	Communality	Rotated loading matrix		
		F1	F2	F3
Na ⁺	.912	.930		
EC	.963	.928		
Cl ⁻	.874	.884		
Mg ²⁺	.772	.874		
SO ₄ ²⁻	.789	.845		
Ca ²⁺	.627	.736		
HCO ₃ ⁻	.768	.669		
K ⁺	.459	.581		-.566
Distance	.871		.926	
Elevation	.875		.877	
NO ₃ ⁻	.854			.862
Eigenvalue		5.527	1.938	1.300
% of variation		50.244	17.617	11.822
Cummulative %		50.244	67.860	79.682

* Factor loadings less than 0.400 are excluded.

것으로 볼 수가 있다. 그리고 표고와 해안선과의 거리에 대한 각 용존이온의 상관성은 낮은 음의 상관성을 보이고 있다. Table 8은 제주도 지역 표고 50 m이하에 위치한 지하수에 대하여 요인분석의 결과를 나타낸 것이다. 대부분의 이온들이 높은 분산을 이루고 있으나, 칼륨이온은 45%정도 밖에 추출이 되지 못하였다. 요인은 3개가 추출되었으며, 요인 1에는 Na^+ , EC, Cl^- , K^+ , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , Mg^{2+} , HCO_3^- 의 함량으로 대표되어지며 이 변수들에 의해 설명할 수 있는 분산의 양은 50.2%이다. 이러한 요인 1은 TDS의 함량으로 볼 수가 있으며 이런 물질의 기원은 염수에 의한 영향이라 볼 수가 있다. 요인 2에는 표고, 해안선과의 거리로 나타낼 수 있으며 이는 수리학적 특성으로 볼 수가 있다. 요인 3에는 NO_3^- 의 함량으로 대표되어지는데, 이는 인위적 오염의 영향을 나타낸 것으로 볼 수가 있다. 추출되어진 3개의 요인으로 설명되어질 수 있는 분산의 양은 전체의 80% 정도이다.

(2) 표고 51~100 m 지역

Table 9와 10에는 제주도 표고 51~100 m 지역에 위치하고 있는 지하수에 대해 상관분석과 요인분석을 실시한 결과를 나타낸 것이다.

EC와의 상관성은 나트륨이온과 마그네슘, 황산이온, 그리고 염소이온이 각각 0.831, 0.714, 0.803, 0.863으로 좋은 상관관계를 이루고 있음을 알 수가 있다. 나트륨이온은 염소이온과 황산이온과의 상관성이 있는 것으로 나타났으며, 질산이온은 다른 이온들과는 거의 상관성이 없는 것을 볼 수가 있다. 요인분석 결과, 요인이 3개가 추출이 되었고, 요인 1에는 Na^+ , EC, Cl^- , K^+ , SO_4^{2-} , Mg^{2+} 의 함량으로 대표되어지고 전체 설명되어질 수 있는 분산은 40% 정도이다. 요인 2에는 표고와 해안선과의 거리로서 나타나며 설명되어질 수 있는 분산은 16%이며, 요인 3에는 NO_3^- , Ca^{2+} , HCO_3^- 의 함량으로 대별되어지며 설명되어질 수 있는 15% 정도이다. 요인 1은 TDS 함량으로 대별되어지며 이 또한 오염의 영향을 나타낸 것이라 볼 수가 있다. 요인 2는 수리학적 특성으로 볼 수가 있으며, 요인 3은 인위적 오염물질, 물-암석의 용해반응으로 볼 수가 있다.

(3) 표고 101 m이상 지역

제주도 표고 101 m이상 지역에 위치한 지하수 수질에 영향을 미치는 요인들을 알아보기 위하여 상관분석과 요인분석을 실시하였다(Table 11, 12).

Table 9. Matrix of correlation coefficients for the groundwater samples from 51~100 m elevation in Cheju Island

	EC	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	Elev- ation	Dist- ance
EC	1.000										
Na ⁺	.831	1.000									
K ⁺	.541	.526	1.000								
Ca ²⁺	.244	.112	.103	1.000							
Mg ²⁺	.714	.539	.736	.064	1.000						
HCO ₃ ⁻	-.005	.345	.341	-.264	.153	1.000					
SO ₄ ²⁻	.803	.687	.483	.106	.471	.053	1.000				
Cl ⁻	.863	.760	.385	.151	.566	-.008	.770	1.000			
NO ₃ ⁻	.617	.260	.175	.156	.525	-.375	.367	.348	1.000		
Elev- ation	-.140	-.195	-.202	.100	-.165	.005	-.075	-.060	-.080	1.000	
Dist- ance	-.141	-.181	-.224	.005	-.359	-.169	.197	-.034	-.243	.442	1.000

Table 10. Factor matrix for the compositional variables of the groundwater samples from 51~100 m elevation in Cheju Island

Variable	Communality	Rotated loading matrix		
		F1	F2	F3
EC	.961	.923		
Na ⁺	.802	.881		
SO ₄ ²⁻	.814	.870		
Cl ⁻	.793	.866		
Mg ²⁺	.728	.727	-.440	
K ⁺	.625	.687		
Distance	.795		.891	
Elevation	.496		.701	
HCO ₃ ⁻	.832			-.870
NO ₃ ⁻	.726			.691
Ca ²⁺	.285			-.505
Eigenvalue		4.373	1.770	1.714
% of variation		39.751	16.095	15.578
Cummulative %		39.751	55.846	71.424

* Factor loadings less than 0.400 are excluded.

Table 11. Matrix of correlation coefficients for the groundwater samples above 101 m elevation in Cheju Island

	EC	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	Elev- ation	Dist- ance
EC	1.000										
Na ⁺	.845	1.000									
K ⁺	.600	.744	1.000								
Ca ²⁺	-.123	-.063	.098	1.000							
Mg ²⁺	.582	.496	.267	-.193	1.000						
HCO ₃ ⁻	.182	.439	.392	-.025	.053	1.000					
SO ₄ ²⁻	.500	.543	.643	-.148	.332	.205	1.000				
Cl ⁻	.888	.794	.567	-.108	.594	-.007	.536	1.000			
NO ₃ ⁻	.789	.640	.326	-.356	.577	-.080	.411	.815	1.000		
Elev- ation	-.479	-.616	-.346	.020	-.386	-.182	-.360	-.482	-.498	1.000	
Dist- ance	-.299	-.206	-.012	.048	-.168	-.210	.221	-.194	-.205	.298	1.000

Table 12. Factor matrix for the compositional variables of the groundwater samples above 101 m elevation in Cheju Island

Variable	Communality	Rotated loading matrix		
		F1	F2	F3
Cl ⁻	.860	.924		
EC	.860	.921		
NO ₃ ⁻	.871	.879		
Na ⁺	.907	.864	.400	
Mg ²⁺	.544	.709		
Elevation	.499	-.634		
SO ₄ ²⁻	.765	.614		.581
K ⁺	.820	.609	.582	
HCO ₃ ⁻	.668		.787	
Ca ²⁺	.288		.464	
Distance	.855			.880
Eigenvalue		5.029	1.585	1.323
% of variation		45.717	14.407	12.028
Cummulative %		45.717	60.124	72.152

* Factor loadings less than 0.400 are excluded.

전기전도도는 나트륨이온, 염소이온, 질산이온과 각각 0.845, 0.888, 0.789의 상관관계를 보이고, 염소이온은 나트륨이온과 0.794, 질산이온과 0.815의 상관관계를 나타내고 있다. 요인분석 결과, 요인이 3개가 추출이 되었으며, 요인 1에는 염소이온, 전기전도도, 질산이온, 나트륨이온, 마그네슘이온, 황산이온, 칼륨이온, 그리고 표고로서 대표되어지며, 이로서 설명되어지는 분산의 양은 45% 정도이다. 염소이온, 질산이온, 황산이온은 오염에 의한 영향으로 볼 수가 있고, 칼륨과 마그네슘은 암석의 용해로 볼 수가 있다. 요인 2는 중탄산이온, 칼슘이온의 함량으로 대표되어지며 14%의 분산의 양을 지니고 있다. 이것은 물-암석의 용해반응으로 나타낼 수가 있다. 요인 3은 해안선과의 거리로 나타났다.

2. 서귀포층의 분포상태에 따른 지역별 수질특성

1) 물리·화학적 특성 및 용존물질의 함량분포

제주도 지하수의 건기와 우기에 채취한 시료들을 가지고서 정량화한 후 각 지역별로 구분을 하여 물리적 성질 및 용존이온 함량의 기술통계량 값을 Table 13과 14에 나타내었다.

(1) pH

건기때의 동부지역의 지하수 평균 pH는 7.70이고, 서부지역은 7.50, 남부지역은 7.57, 북부지역은 7.65로 나타났다. 우기에는 동부지역이 pH가 평균 7.60, 서부지역이 7.43, 남부지역 7.60, 그리고 북부지역이 7.55로 나타났다. 각 지역에서의 pH 값은 비슷한 양상을 보이고 있으며, 건기와 우기에 큰 변화의 차이는 보이지 않으며, 전체적인 pH의 범위는 6.62~8.73 이다.

(2) 전기전도도

순수한 물에서는 EC의 값이 상당히 낮은데 반해 용존물질의 함유와 오염물질이 유입됨에 따라 높아진다(Table 6).

건기에 EC 값은 동부지역에서 평균 309.85 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 를 보이고 있으며, 서부지역

이 243.19 $\mu\text{S/cm}$, 남부지역과 북부지역이 각각 164.43, 158.23 $\mu\text{S/cm}$ 의 값을 나타내고 있다.

우기에 각 지역별로의 평균 EC 값은 동부지역이 389.86 $\mu\text{S/cm}$, 서부지역 294.22 $\mu\text{S/cm}$, 남부지역 193.23 $\mu\text{S/cm}$, 그리고 북부지역이 188.40 $\mu\text{S/cm}$ 을 나타내고 있다. 건기와 우기 모두 동부지역의 평균 EC 값이 가장 높게 나타나고 있는데, 이는 동부지역의 해안저지대에서 높은 EC 값을 보이고 있는데 기인하며, 서부지역은 우기에 많은 오염물질의 유입에 따라 전기전도도 값이 높게 나타나고 있다.

(3) 양이온(Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})

① 나트륨(Na^+): 제주도의 동부지역 지하수에서 건기에는 해안인접 지역에서 200 mg/L이상의 고농도를 보이며, 그 외 지역에서는 10~20 mg/L의 범위를 나타내었다. 우기에는 평균 농도가 38.92 mg/L를 보이고 있으며 건기때와 마찬가지로 해안저지대에서는 200 mg/L이상의 높은 농도를 나타내고 있다. 서부지역은 건기에 평균 13.80 mg/L의 농도를 나타내고 있고, 우기에는 이보다 조금 높은 18.45 mg/L의 농도를 보이고 있다. 남부지역에서 나트륨 이온의 함량분포는 건기에 평균 11.16 mg/L를 보이고 우기에는 14.24 mg/L의 농도를 나타내고 있는데 타 지역에 비해 약간 낮은 농도를 보이며, 표고가 높아짐에 따라 나트륨이온은 점차 감소하는 경향을 보이고 있다. 북부지역은 평균 나트륨이온 농도가 건기에 11.34 mg/L, 우기에는 15.47 mg/L를 나타냈다. 타 지역과 마찬가지로 표고가 높아짐에 따라 나트륨이온의 농도가 감소함을 보이고 있다. 이는 일반적인 자연적 기원의 광물용해에 따른 나트륨이온이 지하수로 유입되는 것 외에 해수 또는 해무의 영향에 의해 나트륨이온의 농도가 표고가 낮은 저지대에 높게 분포하는 것으로 볼 수가 있다.

② 칼륨(K^+): 동부지역의 지하수에서 칼륨이온의 함량은 건기에서 평균 5.59 mg/L의 농도를 보이고 서부지역은 4.12 mg/L, 그리고 남부지역과 북부지역은 각각 3.12 mg/L, 3.35 mg/L을 나타내었다. 우기에는 동부지역 7.20 mg/L, 서부지역 4.03mg/L, 남부지역 3.38 mg/L, 그리고 북부지역이 3.13 mg/L의 농도를 보이고 있다. 칼륨이온은 비료의 주 구성요소이므로 농업활동에 따라 인공적으로 물속으로 유입이 될 수가 있고 또는 해수침입에 의해 농도가 높아질 수가 있으며

Table 13. Physical and chemical components for groundwater samples by regional groups in Cheju Isalnd(dry season)

	Temp. (°C)	pH	EC (μS/cm)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
Eastern area groundwater	Mean	15.08	7.70	309.85	37.54	5.59	3.98	32.98	16.59	33.64	15.88
	Median	15.00	7.75	201.00	11.40	3.36	.44	30.00	7.05	22.26	8.86
	Std.dev.	.80	.34	267.49	58.45	5.84	12.51	13.37	15.41	23.25	16.19
	Min.	14.00	7.02	114.00	5.69	2.04	.13	21.50	4.67	3.29	2.32
	Max.	16.60	8.15	1082.00	222.60	21.20	45.62	74.25	54.11	79.73	61.09
Western area groundwater	Mean	15.53	7.50	243.19	13.80	4.12	1.11	31.71	14.12	22.07	30.51
	Median	15.30	7.59	219.00	14.14	4.25	.53	29.75	12.44	23.32	33.87
	Std.dev.	1.29	.44	119.93	5.02	1.01	1.38	9.74	7.80	10.86	16.53
	Min.	13.20	6.87	88.00	7.28	2.11	.02	18.75	4.36	3.37	2.59
	Max.	18.90	8.65	610.00	27.69	6.64	6.32	65.25	30.78	51.10	63.45
Southern area groundwater	Mean	16.04	7.57	164.43	11.16	3.12	.65	28.89	7.15	12.15	18.50
	Median	16.00	7.59	138.70	7.74	2.36	.29	23.75	4.61	6.29	14.86
	Std.dev.	1.70	.44	105.83	9.09	2.57	1.04	16.56	7.16	12.08	15.25
	Min.	13.00	6.49	42.00	3.66	.63	.00	12.50	3.63	.61	.93
	Max.	20.00	8.72	520.00	56.61	16.31	5.64	96.75	39.79	57.22	60.22
Northern area groundwater	Mean	15.36	7.65	158.23	11.34	3.35	.46	29.31	8.51	13.43	15.48
	Median	15.30	7.69	127.92	8.94	3.18	.34	26.37	6.04	8.17	13.41
	Std.dev.	1.00	.34	90.23	6.93	1.30	.53	12.73	6.44	10.19	13.48
	Min.	13.70	6.62	59.00	4.91	.99	.00	14.00	2.96	2.32	.96
	Max.	17.80	8.27	418.00	35.64	7.53	3.22	85.00	35.26	42.69	52.81
* Temp: Temperature EC: Electrical Conductivity Std. dev.: Standard deviation											

Table 14. Physical and chemical components for groundwater samples by regional groups in Cheju Isalnd(rainy season)

	Temp. (°C)	pH	EC (μ S/cm)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)
Eastern area groundwater	Mean	16.91	7.60	389.86	38.92	7.20	2.48	30.16	39.83	116.71	53.49
	Median	16.70	7.60	180.00	19.30	3.21	.47	29.80	10.61	81.48	45.36
	Std.dev.	.71	.35	507.11	58.80	10.79	4.85	5.58	66.39	85.85	43.01
	Min.	15.80	6.80	88.00	11.14	2.33	.04	23.89	5.28	29.11	14.71
	Max.	18.00	8.40	1770.00	211.46	38.24	75.41	41.81	179.23	305.47	171.77
Western area groundwater	Mean	17.23	7.43	294.22	18.45	4.03	3.82	30.759	34.87	89.36	72.35
	Median	17.10	7.39	280.50	18.44	4.05	2.20	27.15	28.81	84.72	74.48
	Std.dev.	1.47	.42	141.11	5.15	1.01	5.36	10.77	20.97	44.21	33.78
	Min.	14.00	6.66	94.00	10.46	.23	.07	18.46	5.16	14.92	9.46
	Max.	20.30	8.41	790.00	37.12	6.99	27.06	79.28	79.23	198.76	143.92
Southern area groundwater	Mean	16.98	7.60	193.23	14.24	3.38	2.34	28.75	10.82	50.38	50.14
	Median	16.90	7.49	179.50	13.65	2.89	1.05	22.80	6.42	40.11	49.60
	Std.dev.	1.19	.58	103.69	6.49	1.92	2.62	18.79	12.91	37.23	32.44
	Min.	14.00	6.56	40.00	1.54	.29	.09	10.86	3.52	5.08	.44
	Max.	22.00	8.73	521.00	32.96	9.96	11.28	104.26	82.80	191.36	119.64
Northern area groundwater	Mean	16.54	7.55	188.40	15.47	3.13	2.37	33.171	19.20	59.32	37.53
	Median	16.25	7.60	139.00	13.57	3.12	.64	26.87	9.47	39.99	35.58
	Std.dev.	1.13	.35	129.52	8.96	1.20	5.25	23.94	21.09	48.34	33.28
	Min.	14.90	6.59	60.00	4.41	.28	.01	9.77	4.05	14.06	.50
	Max.	20.00	8.16	656.00	43.74	6.55	32.17	166.16	100.19	183.03	143.61

* Temp: Temperature EC: Electrical Conductivity Std. dev.: Standard deviation

일반적으로 5 mg/L 미만의 값을 가지고 있다. 동부지역을 제외한 각 지역의 농도는 5 mg/L를 넘지 않으며 전반적으로 거의 비슷한 함량을 보이고 있다. 동부지역은 평균 칼슘이온의 농도가 5 mg/L 이상을 나타내고 있으며 이는 해수에 의한 영향으로 볼 수가 있다.

③ 칼슘(Ca^{2+}): 건기시 동부지역 지하수의 칼슘이온 평균 농도는 3.98 mg/L, 서부지역이 1.11 mg/L, 남부지역 0.65 mg/L, 그리고 북부지역이 0.46 mg/L를 나타내고 있으며, 우기에서는 동부지역이 2.48 mg/L, 서부지역은 3.82mg/L 그리고 남부지역과 북부지역은 각각 2.34mg/L, 2.37mg/L을 나타냈다. 동부지역을 제외한 각 지역의 농도는 2~3mg/L의 범위를 보이고 있으며 전반적으로 거의 비슷한 값을 보이고 있다.

④ 마그네슘(Mg^{2+}): 제주도 동부지역 지하수의 마그네슘이온 함량은 건기에서 평균 8.09 mg/L의 농도를 보이며, 우기에는 10.07 mg/L를 나타내고 있다. 이는 다른 지역보다 2배정도 높은 값을 나타내며, 이런 이유로서는 광물적 기원보다는 해수영향으로 인해 마그네슘이 더 높게 나타난 것으로 볼 수가 있으며, 서부지역은 5.08mg/L 그리고 남부지역과 북부지역은 각각 4.51mg/L, 3.74mg/L을 나타냈다.

(4) 음이온(HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^-)

① 중탄산이온(HCO_3^-): 건기와 우기에 동부지역의 중탄산이온의 함량은 평균 32.98과 30.19 mg/L로 나타났고, 서부지역은 31.76, 30.75 mg/L, 남부지역은 28.89, 28.75 mg/L, 그리고 북부지역은 29.31, 33.17 mg/L의 농도를 보이고 있다. 각 지역이 거의 동일한 값의 분포를 보이고 있으며, 채취시기에 따른 차이도 별로 없는 것을 알 수가 있다. 그러나 각 지역에서 중탄산이온의 함량은 고지대에서 저지대 즉 해안가로 갈수록 점차 중탄산이온이 증가하는 경향을 보이고 있다.

② 황산이온(SO_4^{2-}): 황산이온의 기원은 황화광물의 용해에 의해 존재하며, 또한 해안 인접지역은 해수에 의한 영향으로 농도가 높아질 수가 있으며, 해수 중의 황산이온의 농도는 2,700 mg/L(김, 1998)이다. 조사대상공중 동부지역 15개 관정의 황산이온 함량은 건기에 평균 16.59 mg/L와 우기에 39.83 mg/L의 농도를 보이며, 서부지역은 14.12, 34.87 mg/L를 나타내고 있으며, 남부지역은

7.15, 10.82 mg/L, 그리고 북부지역은 8.51, 19.20 mg/L를 보이고 있다. 동부지역이 고도가 내려갈수록 황산이온의 농도가 현저히 증가하는 것을 볼 수가 있는데 이는 광물이 용해되어 자연적으로 존재하는 농도이외에 해수의 영향으로 인해 황산이온의 농도가 많이 함유된 것으로 볼 수가 있다.

③ 염소이온(Cl^-): 동부지역의 평균 염소이온 함량은 건기에는 33.64 mg/L, 우기에는 116.71 mg/L를 나타내었다. 서부지역은 22.07 mg/L와 89.36 mg/L를 나타내며, 남부지역은 12.15 mg/L, 50.38 mg/L을 보이고 있으며, 그리고 북부지역에서는 염소이온 농도가 평균 13.43 mg/L와 59.32 mg/L로 나타났다. 건기에는 동부지역의 염소이온의 농도가 높게 나타나고 있으며 특히 표고가 낮아짐에 따라 농도의 차가 현저한 것은 해수의 직접적인 영향으로 볼 수가 있다. 서부, 북부, 남부지역은 동부지역보다 낮은 농도를 보이면서, 동부지역과는 다른 특성을 보이고 있다. 그러나 우기에는 동부지역 외 다른 지역에서도 높은 염소이온 농도를 보이고 있으며, 이는 동부지역이 해수에 의한 영향에 의해 염소이온 농도가 높아지는 반면에 타 지역은 염소이온이 해수가 아닌 오염물질의 기원으로 지하수에 유입이 되어 이러한 결과가 나온 것이라 볼 수가 있다.

④ 질산이온(NO_3^-): 건기시 동부지역의 질산이온 함량은 평균 15.88 mg/L, 53.49 mg/L를 보이며, 서부지역은 30.51 mg/L와 72.35 mg/L의 농도를 보이고 있다. 남부지역에서는 질산이온의 농도가 평균 18.50 mg/L, 50.14 mg/L를 보이며, 북부지역은 15.48 mg/L, 33.28 mg/L로 나타났다. 질산이온은 다른 이온성분과는 달리 서부지역에서 건기와 우기 모두 가장 높게 나타났고, 그 다음이 남부지역으로 나타났다. 이러한 원인은 서부지역의 경우 농경지에서 과다한 질소질 비료의 사용(송 등, 1999)과 중·소규모의 양돈장으로부터 배출되는 오폐수와 축산 부산물을 이용한 유기질 퇴비 등에 함유된 질소성분들이 강우시 투수성 지질구조를 통하여 빗물과 함께 지하수체로 유입이 됨으로서 나타나는 것으로 볼 수가 있다. 남부지역의 경우는 지하수가 상위지하수로서 강우에 의해 지하수가 지배되므로 지표오염 물질이 강우와 함께 유입이 됨으로서 나타난 결과라고 추정할 수가 있다.

2) Piper diagram에 의한 수질특성

(1) 동부지역(Eastern area)

Fig. 10은 건기와 우기 때 제주도 동부지역에서 채취한 지하수 시료들을 사용하여 양이온과 음이온의 농도를 당량으로 환산하여 piper diagram에 도시한 것이다. 건기에서는 양이온이 Na+K 형태의 군을 이루고 있으며, 음이온은 Cl 형태를 보이고 있다. 표고가 높은 지하수에서는 중간형태의 수질유형을 보이며 나머지 지하수에서는 비탄산나트륨(NaCl) 형태로 나타났다.

우기에서는 양이온이 Na+K 형태, 음이온은 Cl 형태로 나타났다. 그리고 점차 표고가 낮아지고 해안지대로 갈수록 TDS 농도도 높아졌으며, 대부분의 지하수가 piper diagram 우측중앙에 밀집되어 있으며 따라서 수질유형은 비탄산나트륨(NaCl) 형태로 나타났다. 건기와 우기에 piper diagram을 통한 제주도 동부지역의 지하수 수질유형의 형태는 비탄산나트륨(NaCl) 형태로 나타났고, 동부 해안 인접지역 및 표고가 낮은 지역의 지하수에서는 해수의 영향을 받고 있음을 알 수가 있다.

(2) 서부지역(Western area)

Fig. 11은 제주도 서부지역의 지하수를 piper diagram에 도시화한 것으로서, 건기에서 양이온은 Na+K 형태를 보이고 있다. 음이온은 Cl 형태와 HCO_3 형태를 함께 보이고 있다. 건기 때의 서부지역은 수질유형이 중간형태로 나타났으며, 일반적인 자유 지하수로 볼 수 있다.

우기에서의 수질유형은 양이온이 Na+K 형태로 나타났으며, 음이온은 Cl 형태로 나타났다. 서부지역은 동부지역에 비해 TDS 농도가 작고, 표고가 높은 지역의 지하수 수질유형은 중간형태의 수질유형을 보이고 있다. 그러나 해안지역으로 갈수록 TDS 농도가 크며 음이온이 점차 Cl 형태를 이루고 있는 것을 보여주고 있다. 그리고 표고가 낮아질수록 중간형태에서 점차적으로 우측으로 이동하는 것을 나타내고 있다.

(3) 남부지역(Southern area)

Fig. 12는 제주도 남부지역의 지하수 시료의 이온성분을 토대로 하여 작성한 piper diagram이다. 건기에서 양이온은 Na+K 형태를 보이고 있으며, 음이온은 HCO_3 형태와 Cl 형태를 나타내고 있다. 수질유형은 탄산나트륨형태, 중간형태, 그리고 비탄산나트륨형태의 여러 가지 지하수 유형이 나타나며, 표고가 낮아짐

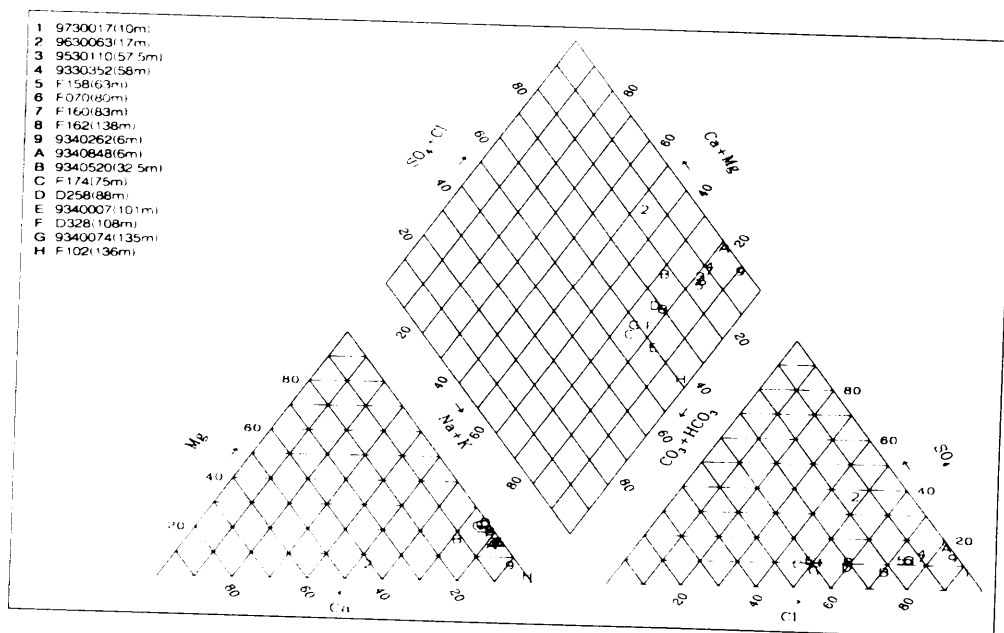
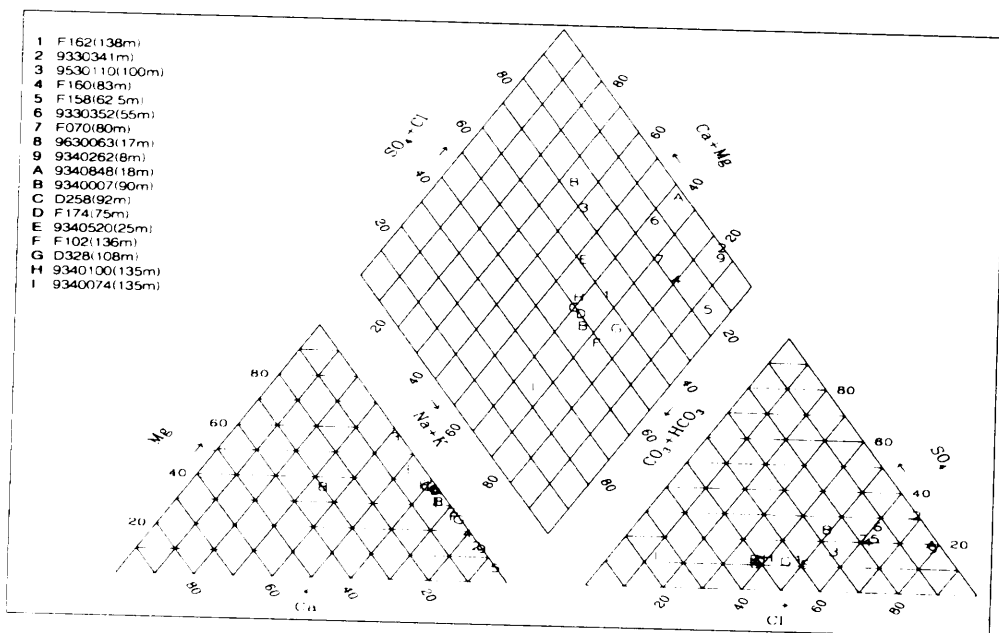


Fig. 10. Piper diagram showing the chemical compositions of the groundwater samples in the eastern area of Cheju Island (above: dry season, below: rainy season).

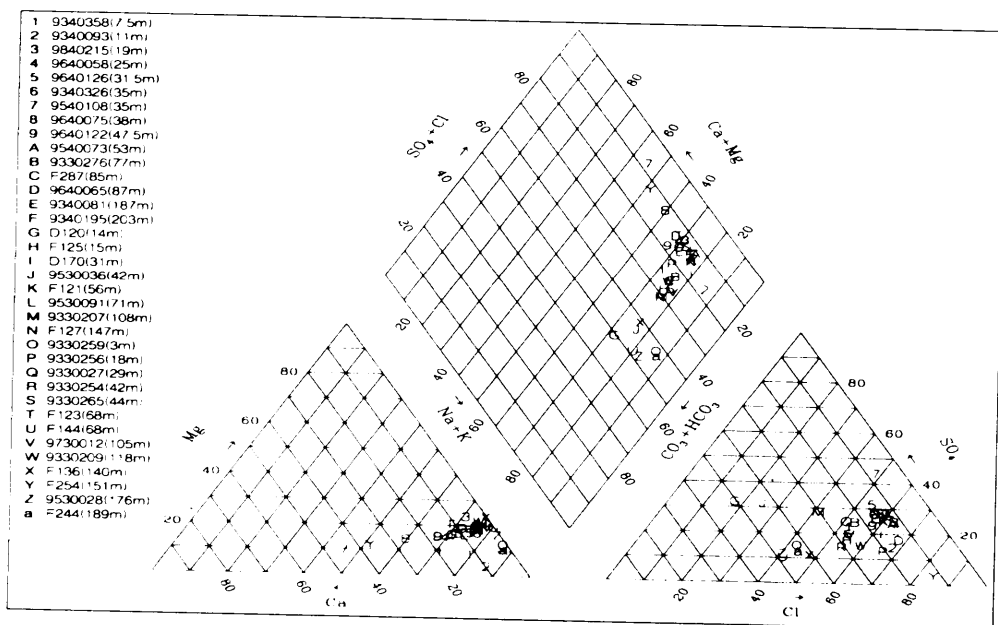
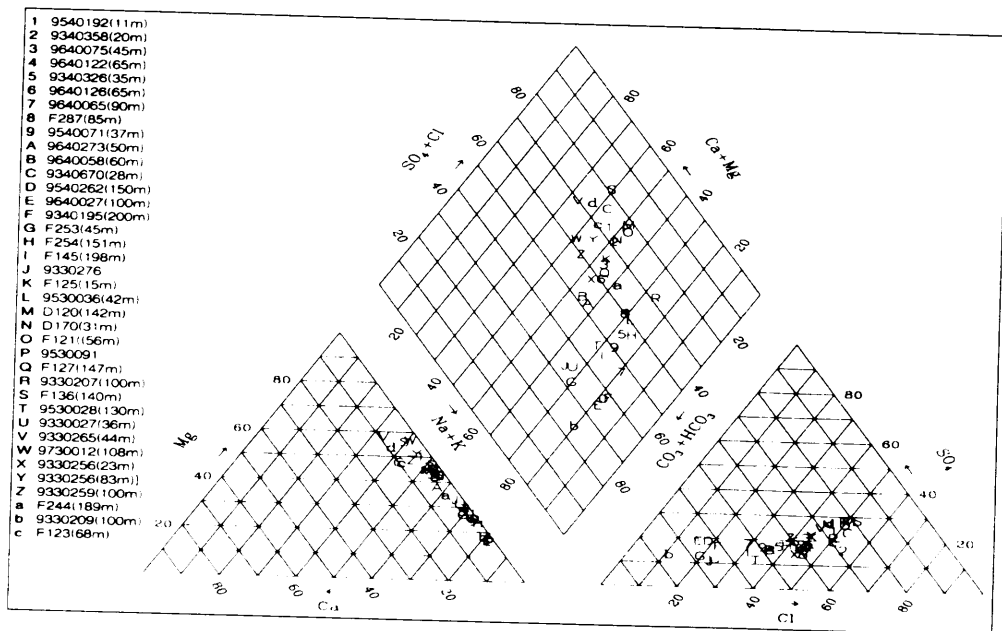


Fig. 11. Piper diagram showing the chemical compositions of the groundwater samples in the western area of Cheju Island (above: dry season, below: rainy season).

에 따라 밑에서 중앙으로 이동하는 것을 볼 수가 있다.

우기 때의 남부지역 지하수의 수질유형은 양이온이 Na+K 형태, 음이온은 Cl 형태를 보이고 있다. 수질유형은 중간형태 및 비탄산나트륨(NaCl)형태를 보이고 있다.

(4) 북부지역(Northern area)

Fig. 13은 건기와 우기 때 제주도 북부지역 지하수를 piper diagram에 도시한 것이다. 건기 때 양이온은 Na+K 형태이며, 음이온은 HCO_3 형태와 중간형태를 보이고 있다. 그리고 표고가 올라갈수록 음이온이 HCO_3 형태를 이루고 있으며, 수질유형은 대부분이 중간형태의 자유지하수로 볼 수 있다.

우기시 제주도 북부지역 지하수 수질유형은 양이온이 Na+K 형태, 음이온은 대부분 Cl 형태를 보이고 있다. 지하수의 수질유형은 중간형태의 수질유형과 해안 지역으로 갈수록 해수에 영향을 받은 비탄산나트륨(NaCl)형태의 지하수 수질유형으로 나타나고 있다.

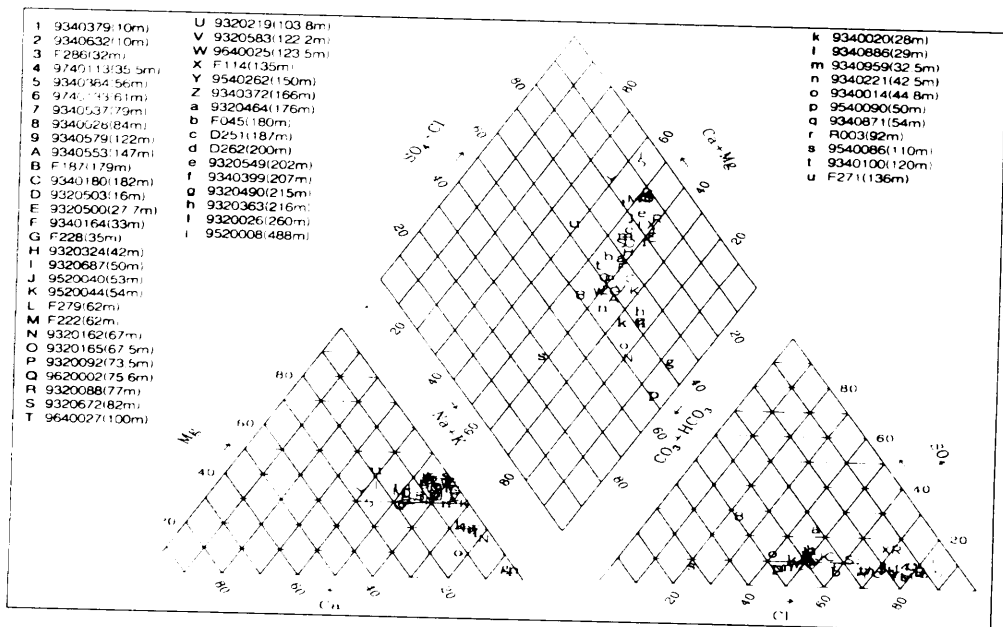
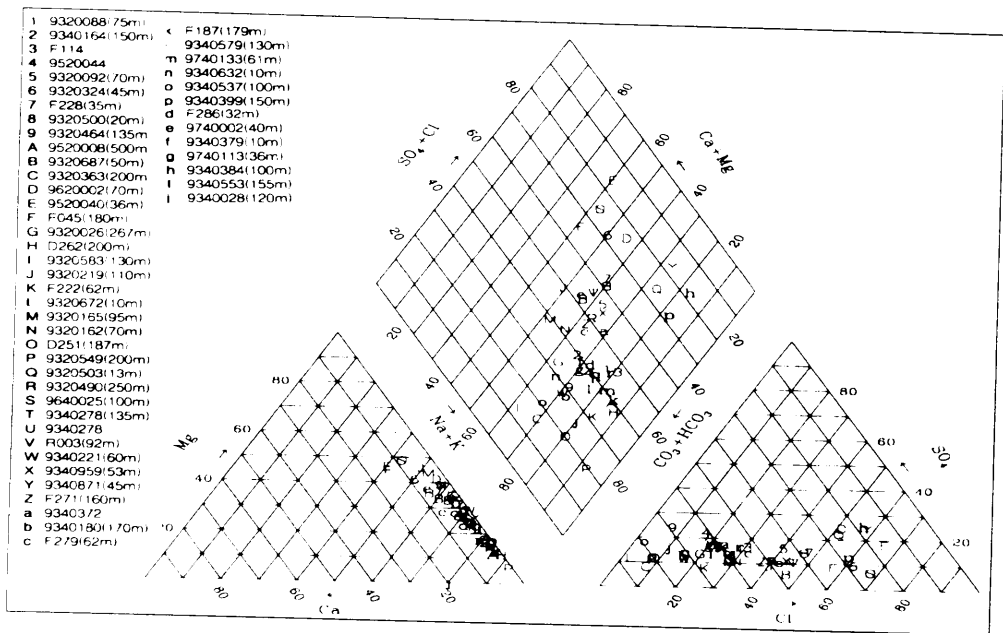


Fig. 12. Piper diagram showing the chemical compositions of the groundwater samples in the southern area of Cheju Island (above: dry season, below: rainy season).

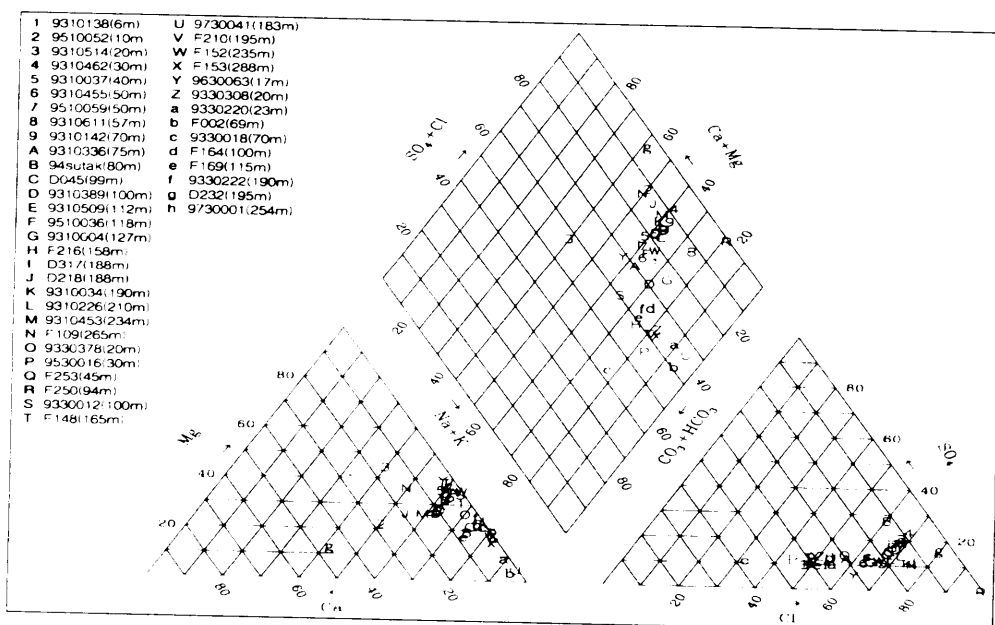
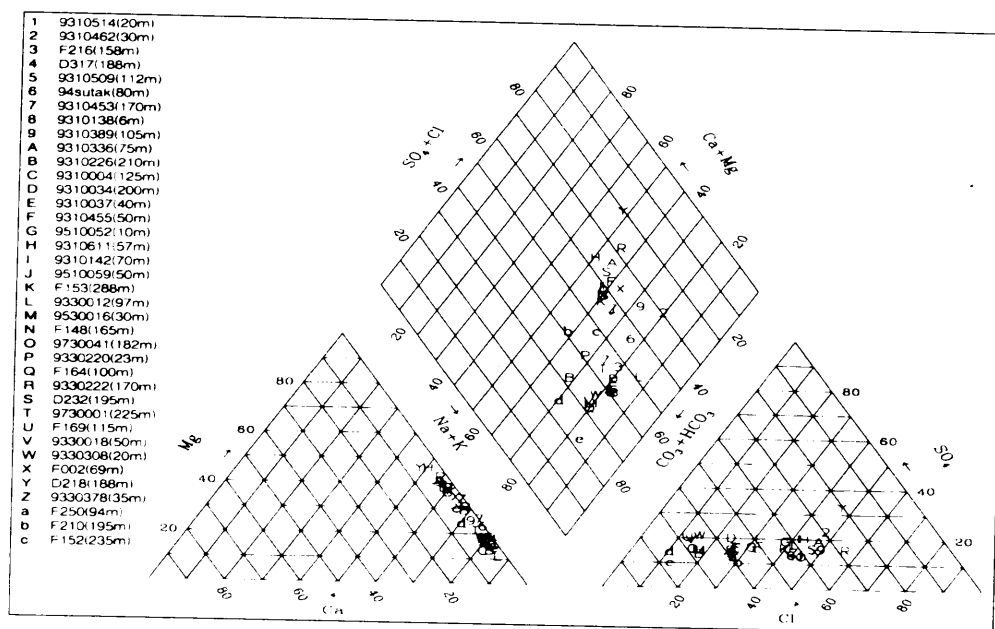


Fig. 13. Piper diagram showing the chemical compositions of the groundwater samples in the northern area of Cheju Island (above: dry season, below: rainy season).

3) 상관분석(Correlation analysis)과 요인분석(Factor analysis)

(1) 동부지역

제주도 동부지역 지하수 수질에 영향을 미치는 요인을 알아보기 위하여 상관분석과 요인분석을 수행하였다. Table 15는 상관분석을 실시하여 나타낸 결과로서 용존이온과 전기전도도 사이에서 상관성이 높게 나타났다. 특히 나트륨이온과 0.935, 칼륨이온과 0.985, 마그네슘이온 0.991, 황산이온 0.995, 염소이온과 0.977로 높은 상관관계를 보이고 있다. 이는 해수의 조성성분과 유사한 경향을 보이고 있다. 그리고 표고와 해안과의 거리에 대한 용존이온과의 관계가 강한 음의 상관성을 보이고 있는데서도 알 수가 있다. 요인분석을 실시한 결과(Table 16), 질산이온을 제외한 용존이온이 높게 추출이 되었고, 요인은 2개로 추출되었다. 요인 1에는 표고, 해안선과의 거리, 염소이온, 마그네슘이온, 황산이온, 전기전도도, 칼륨이온, 나트륨이온, 질산이온의 함량으로 대표되어지며 제주도 동부지역 지하수에 영향을 미치는 요인으로서 해수에 의한 것으로 볼 수가 있다. 요인 1로서 설명되어질 수 있는 분산의 양은 58%이다. 요인 2에는 칼슘이온과 중탄산이온의 함량으로 대표되어지며, 이는 물-암석의 용해반응으로 볼 수가 있다. 전체 설명할 수 있는 분산의 양은 28%이다.

(2) 서부지역

Table 17과 18은 제주도 서부지역의 수질에 영향을 미치는 잠재요인들을 파악해 보기 위하여 실시한 상관분석과 요인분석의 결과들이다.

전기전도도와 상관성은 나트륨이온이 0.824, 황산이온이 0.740, 염소이온이 0.920, 그리고 질산이온이 0.899로 높은 상관관계를 유지하고 있다. 나트륨이온이 염소이온과 0.830으로 높은 상관성을 보이고 또한 염소이온은 질산이온과도 0.818로 강한 양의 상관관계를 가지고 있다. 중탄산이온의 상관관계는 다른 이온들과 상관성이 거의 없는 것으로 보아 독자적인 거동을 하고 있는 것으로 보인다. Table 18은 각 변수들의 상관분석을 바탕으로 하여 나타낸 요인분석의 결과이다. 마그네슘이온을 제외한 변수들이 높은 분산의 양을 나타내었고, 요인은 3개가 추출이 되었다. 요인 1은 전기전도도, 염소이온, 나트륨이온, 질산이온, 황산이온, 표고, 칼륨이온, 해안선과의 거리, 마그네슘이온으로 대표되어지며

Table 15. Matrix of correlation coefficients for the groundwater samples in the eastern area of Cheju Island

	EC	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	Elev- ation	Dist- ance
EC	1.000										
Na ⁺	.935	1.000									
K ⁺	.985	.911	1.000								
Ca ²⁺	.623	.522	.595	1.000							
Mg ²⁺	.991	.918	.982	.600	1.000						
HCO ₃ ⁻	.681	.525	.640	.866	.685	1.000					
SO ₄ ²⁻	.995	.946	.985	.590	.984	.630	1.000				
Cl ⁻	.977	.925	.962	.534	.964	.563	.979	1.000			
NO ₃ ⁻	.657	.567	.646	.519	.697	.554	.615	.656	1.000		
Elev- ation	-.775	-.677	-.739	-.343	-.813	-.467	-.758	-.794	-.706	1.000	
Dist- ance	-.747	-.663	-.698	-.317	-.784	-.424	-.724	-.776	-.783	.971	1.000

Table 16. Factor matrix for the compositional variables of the groundwater samples from the eastern area of Cheju Island

Variable	Communality	Rotated loading matrix	
		F1	F2
Distance	.858	-.924	
Elevation	.855	-.918	
Cl ⁻	.939	.880	.407
Mg ²⁺	.977	.853	.499
SO ₄ ²⁻	.941	.833	.496
EC	.968	.830	.529
K ⁺	.926	.814	.514
Na ⁺	.826	.801	.430
NO ₃ ⁻	.583	.686	
Ca ²⁺	.911		.934
HCO ₃ ⁻	.867		.883
Eigenvalue		6.479	3.172
% of variation		58.902	28.833
Cummulative %		58.902	87.736

* Factor loadings less than 0.400 are excluded.

Table 17. Matrix of correlation coefficients for the groundwater samples in the western area of Cheju Island

	EC	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	Elev- ation	Dist- ance
EC	1.000										
Na ⁺	.824	1.000									
K ⁺	.618	.641	1.000								
Ca ²⁺	.283	.172	.036	1.000							
Mg ²⁺	.484	.524	.379	-.061	1.000						
HCO ₃ ⁻	.089	.262	-.056	.168	.098	1.000					
SO ₄ ²⁻	.740	.709	.482	-.027	.458	.214	1.000				
Cl ⁻	.920	.830	.552	.213	.411	.087	.727	1.000			
NO ₃ ⁻	.899	.694	.615	-.026	.476	-.118	.670	.818	1.000		
Elev- ation	-.539	-.553	-.360	.205	-.182	-.250	-.759	-.518	-.523	1.000	
Dist- ance	-.479	-.464	-.287	-.012	-.088	-.409	-.496	-.456	-.406	.774	1.000

Table 18. Factor matrix for the compositional variables of the groundwater samples from the western area of Cheju Island

Variable	Communality	Rotated loading matrix		
		F1	F2	F3
EC	.940	.935		
Cl ⁻	.855	.900		
Na ⁺	.828	.895		
NO ₃ ⁻	.857	.863		
SO ₄ ²⁻	.772	.859		
Elevation	.885	-.729	.493	
K ⁺	.572	.687		
Distance	.781	-.625	.623	
Mg ²⁺	.394	.543		
HCO ₃ ⁻	.718		-.716	.406
Ca ²⁺	.886			.930
Eigenvalue		5.706	1.511	1.272
% of variation		51.874	13.735	11.561
Cummulative %		51.874	65.609	77.170

* Factor loadings less than 0.400 are excluded.

전체의 51%정도를 설명할 수가 있다. 염소이온, 질산이온, 황산이온은 오염의 영향을 지시하고, 특히 표고, 해안선과의 거리가 음의 관계를 나타내므로 해안 인접지역에 더욱 더 오염이 심한 것으로 볼 수가 있다. 그리고 서부지역은 농경지와 축산시설에서 나오는 오염물질에 의한 오염으로 추정되어 질 수가 있다. 요인 2는 중탄산이온의 함량으로 대별되어지고 요인 3은 칼슘과 중탄산이온의 함량으로 나타낼 수가 있으며 이는 물-암석반응이라고 볼 수가 있다.

(3) 남부지역

제주도 남부지역 지하수 수질에 영향을 미치는 요인을 파악하고자 상관분석과 요인분석을 실시하였다.

Table 19는 남부지역 지하수 성분들에 대한 상관분석을 나타낸 결과로서 전기전도도에 대한 각 변수들의 상관관계는 나트륨이온이 0.857, 염소이온이 0.832, 질산이온이 0.733로 비교적 높은 상관성을 보이며 다른 변수들과는 0.6정도의 상관성을 보이고 있다. 나트륨이온은 칼륨이온, 칼슘이온, 염소이온과의 상관성이 0.712, 0.713, 0.714로 나타났다. 염소이온은 나트륨이온과 황산이온과의 상관성이 0.714, 0.668로 중간정도의 상관관계를 보이고 있다. Table 20은 남부지역 지하수에 영향을 미치는 잠재요인을 파악하기 위하여 실시한 요인분석의 결과이다. 3개의 요인이 추출되었으며, 이 요인들이 전체 설명할 수 있는 분산의 양은 75%이다. 요인 1은 전기전도도, 염소이온, 나트륨이온, 질산이온, 마그네슘이온, 표고, 해안선과의 거리, 황산이온, 칼륨이온으로 대표되어지며 요인 1을 가지고 설명할 수 있는 분산의 양은 51%이다. 이는 오염의 영향을 지시하며, 요인 2는 칼륨이온과 중탄산이온의 함량으로 나타나며, 암석의 반응으로 볼 수가 있다. 요인 3은 칼슘이온의 함량으로 나타났고 전체 분산에 대한 기여율은 10%정도이다.

(4) 북부지역

Table 21, 22는 제주도 북부지역 지하수 성분에 영향을 미치는 변수들에 대하여 상관분석과 요인분석을 수행하여 나타낸 결과이다.

전기전도도와 상관관계는 나트륨이온이 0.913, 황산이온이 0.914, 염소이온이 0.963, 질산이온이 0.820으로 높은 상관관계를 보이고 있다. 나트륨이온은 황산이온과 0.832, 염소이온과 0.869의 강한 양의 상관관계를 가지고 있으며, 중탄

Table 19. Matrix of correlation coefficients the groundwater samples in the southern area of Cheju Island

	EC	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	Elev- ation	Dist- ance
EC	1.000										
Na ⁺	.857	1.000									
K ⁺	.645	.712	1.000								
Ca ²⁺	.226	.086	.140	1.000							
Mg ²⁺	.696	.713	.634	.125	1.000						
HCO ₃ ⁻	.125	.414	.415	-.124	.205	1.000					
SO ₄ ²⁻	.650	.569	.617	-.049	.418	.194	1.000				
Cl ⁻	.832	.714	.507	.143	.596	.001	.668	1.000			
NO ₃ ⁻	.733	.589	.318	.002	.620	-.257	.314	.636	1.000		
Elev- ation	-.601	-.691	-.508	-.166	-.552	-.047	-.459	-.517	-.567	1.000	
Dist- ance	-.630	-.607	-.470	-.166	-.475	-.119	-.427	-.549	-.456	.711	1.000

Table 20. Factor matrix for the compositional variables of the groundwater samples from the southern area of Cheju Island

Variable	Communality	Rotated loading matrix		
		F1	F2	F3
EC	.876	.926		
Cl ⁻	.745	.862		
Na ⁺	.870	.857		
NO ₃ ⁻	.844	.819	-.402	
Mg ²⁺	.637	.776		
Elevation	.628	-.770		
Distance	.570	-.717		
SO ₄ ²⁻	.583	.679		
K ⁺	.755	.659		
HCO ₃ ⁻	.881		.555	
Ca ²⁺	.947		.934	
Eigenvalue		5.620	1.619	.967
% of variation		51.087	14.714	9.980
Cummulative %		51.087	65.802	75.782

* Factor loadings less than 0.400 are excluded.

Table 21. Matrix of correlation coefficients for the groundwater samples in the northern area of Cheju Island

	EC	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	Elev- ation	Dist- ance
EC	1.000										
Na ⁺	.913	1.000									
K ⁺	.690	.798	1.000								
Ca ²⁺	-.394	-.423	-.298	1.000							
Mg ²⁺	.630	.530	.371	-.392	1.000						
HCO ₃ ⁻	.608	.772	.683	-.086	.329	1.000					
SO ₄ ²⁻	.914	.832	.587	-.245	.518	.627	1.000				
Cl ⁻	.963	.869	.615	-.393	.631	.610	.944	1.000			
NO ₃ ⁻	.820	.692	.456	-.594	.603	.280	.689	.823	1.000		
Elev- ation	-.727	-.699	-.494	.523	-.561	-.422	-.671	-.708	-.756	1.000	
Dist- ance	-.752	-.716	-.529	.481	-.614	-.482	-.673	-.724	-.745	.950	1.000

Table 22. Factor matrix for the compositional variables of the groundwater samples from the northern area of Cheju Island

Variable	Communality	Rotated loading matrix	
		F1	F2
HCO ₃ ⁻	.812	.901	
Na ⁺	.923	.842	
K ⁺	.678	.793	.462
SO ₄ ²⁻	.824	.787	
EC	.924	.757	.452
Cl ⁻	.894	.736	.592
NO ₃ ⁻	.845		.594
Ca ²⁺	.632		.844
Distance	.797	-.424	-.794
Elevation	.796	-.477	-.785
Mg ²⁺	.539		-.755
Eigenvalue		4.532	.658
% of variation		41.201	4.130
Cummulative %		41.201	37.549
			78.749

* Factor loadings less than 0.400 are excluded.

산이온과도 0.772의 비교적 높은 상관성을 보이고 있다. 질산이온은 염소이온과 0.823의 높은 상관관계를 보이고 있다. 요인분석을 실시한 결과 요인이 2개가 추출되었다. 요인 1에는 중탄산이온, 나트륨이온, 칼륨이온, 황산이온, 전기전도도, 염소이온의 함량으로 나타나며 이 요인에 의해 설명되어질 수 있는 분산의 양은 41%이고, 이는 TDS 함량으로 나타낼 수가 있다. 요인 2에는 질산이온, 칼슘이온, 마그네슘이온, 표고와 해안선과의 거리로 나타났다. 질산이온은 인위적 오염의 영향을 지시하며, 표고와 해안선과의 거리는 수리학적 특성으로 볼 수가 있다. 요인 2에 의해 설명될 수 있는 분산의 양은 37%이다.

V. 결론

제주도 전역에 분포한 지하수 관정 150공을 대상으로 건기와 우기 2회에 걸쳐 수질분석을 실시하여 고도와 지역에 따른 수질특성의 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 제주도 지하수 주요 성분과 EC는 해발 50m이하 지역에서의 지하수가 다른 지역보다 용존물질 함량이 높게 나타나고 있다. 그리고 우기에서가 건기 때보다 많은 용존이온의 함량분포를 보이고 있는데 이는 강우시 지표상의 오염물질이 지하로 유입된 결과라 판단되어 진다.
2. 고도별 지하수 수질유형은 건기에서는 양이온이 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 형태를 이루고 있으며, 음이온은 표고 50 m이하 지역에서 Cl^- 형태, 51~100 m 지역은 HCO_3^- 형태와 일부 Cl^- 형태, 그리고 해발 101 m이상의 지역에서는 HCO_3^- 형태를 나타내고 있다. 우기에서는 대부분이 양이온은 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 형태, 음이온은 Cl^- 형태를 보이고 있다.
3. 요인분석 결과 50 m이하 지역에서는 요인이 3개가 추출이 되었으며 요인 1은 해수 영향, 요인 2는 수리학적 특성, 요인 3은 인위적 오염물질로 나타났다. 표고 51~100 m 지역에서는 요인 1은 TDS 함량, 요인 2는 수리학적 특성, 요인 3은 인위적 오염물질, 물-암석의 용해반응으로 나타났다. 표고 100 m이상 지역에서는 요인 1에 TDS 함량, 인위적 오염물질 요인 2는 물-암석의 용해반응, 그리고 요인 3은 수리학적 특성으로 볼 수가 있다.
4. 제주도 지역별 지하수 수질 유형은 건기와 우기에서 양이온은 각 지역 모두 $\text{Na} + \text{K}$ 형태를 보이며, 건기에서 음이온은 동부지역과 서부지역이 Cl^- 형태, 남부 지역은 HCO_3^- 형태, 그리고 북부지역은 HCO_3^- 형태와 일부 Cl^- 형태를 보이고 있다. 우기에서 음이온은 대부분이 Cl^- 형태를 보이고 있다.
5. 요인분석을 통한 지역별 수질특성을 살펴보면 동부지역은 요인 1에 해수에 의한 영향, 요인 2는 물-암석의 용해반응으로 나타났다. 서부지역은 요인 1에

인위적 오염물질의 영향, 요인 2는 중탄산의 함량으로, 요인 3은 물-암석의 반응으로 나타났다. 남부지역은 요인 1에 인위적 오염의 영향, 요인 2에는 물-암석의 반응, 요인 3은 칼슘이온의 함량으로 나타났고, 북부지역은 요인 1은 TDS 함량, 요인 2는 인위적 오염물질의 영향, 수리학적 특성으로 나타났다.

VI. 참고문헌

- Brunet, R.C., K.B. Astin, 1999, Spatio-temporal variation in some physical and chemical parameters over a 25year period in the catchment of the river Adour, *J. Hydrology*, 220, 209~221.
- 제주도 환경보전기본계획, 1999, 제주도.
- 제주도, 1997, 제주도 중산간지역 종합조사, pp.69~74.
- 최순학, 김영기, 1989, 제주도 지하수의 수질특성, *지질학회지*, 25(3), 230~238.
- 최순학, 1990, 제주도 수자원의 특성과 수질오염 연구(III), 과학기술원, pp.1~57.
- 최순학, 1992, 제주도와 OHAU도의 지질구조 및 수자원의 특성, *지질공학회지*, 2(1), 70~91.
- David, R., G. Pyne, 1995 Groundwater recharge and wells, Lewis Publishers, pp.169~183.
- Evans, C.D., T.D. Davies, P.J. Wigington Jr., M. Tranter, W.A. Kretser, 1996, Use of factor analysis to investigate processes controlling the chemical composition of four streams in the Adirondack Mountains, New York, *J. Hydrology*, 185, 297~316.
- 한정상, 1998, 지하수환경과 오염, 박영사, pp. 512~538.
- 한정상, 1994, 제주도 지하수 자원의 보호전략에 관한 연구, *지질학회지*, 30(3), 325~340.
- Holaw, F., R. Dutter, 1999, Geostatistical study of precipitation series in Austria: time and space, *J. Hydrology*, 219, 70~82.
- Hounslow, W., 1995, Water Quality Data, Lewis Publishers, pp.82~102.
- 현익현, 1996, 질산성질소로 오염된 지하수의 오염원에 관한 연구, 제주대학교 석사학위논문, 88pp.
- Join, Jean-Lambert., Jean Coudray, Kevin Longworth, 1997, Using principal components analysis and Na/Cl ratios to trace groundwater circulation in a volcanic island: the example of Reunion, *J. Hydrology*, 190, 1~18.
- 전홍석, 이재훈, 고광백, 1998, 환경통계학, 동화기술, pp.34~42.
- 정대연, 1994, 사회통계학, 백산서당, pp.637~693.
- 정상용, 이강근, 1998, 풍기 지역 지하수의 수리지구화학 및 환경동위원소 특

- 성 연구, 대한지하수환경학회지, 5(4), 177~192.
- 정영해, 이계오, 김철웅, 김순홍, 1999, 예제로 배우는 통계강의 및 자료분석: 윈도우즈용 SPSS, 무진문화사, pp.311~322.
- 김경훈, 1998, 제주도 동부지역의 지하수 염수화에 대한 이화학적 특성, 제주대학교 석사학위논문 pp.14~16.
- 김기영, 전명식, 1997, 다변량 통계 자료 분석, 자유아카데미, pp.166~180.
- 김지영, 2000, 제주도 동부지역 지하수의 염수화에 관한 연구, 제주대학교 석사학위논문 pp.4~18.
- 고기원, 1997, 제주도 지하수 부존특성과 서귀포층의 수문지질학적 관련성, 부산대학교 박사학위논문 pp. 15~18.
- 고병련, 1998, 지하수 수질 및 오염예측모델에 관한 연구, 영남대학교 박사학위논문 pp. 73~77.
- 건설부, 1993, 제주도 수자원 종합개발계획수립보고서
- 권병두, 이희순, 1997, 화산섬의 지구물리학적 및 환경지질학적 특성 비교연구: 제주도과 하와이제도, 한국지구과학회지, 18(3), 217~237.
- 이용두, 강병남, 1999, 제주도 지하수의 강수량 변화에 따른 수질특성, 한국토양환경학회 추계학술발표회, 48~49.
- 이용두, 2000, 제주도 지하수질과 오염원, 일본수환경학회, 328.
- 이인호, 이재영, 김동권, 1997 대구시 지하수의 수질에 대한 지질학적 연구, 자원지질환경학회지, 30(4), 327~340.
- 이종운, 전효택, 전용원, 1997, 국내 화강암질내 심부지하수의 지구화학적 특성, 대한지하수환경학회지, 4(4), 199~211.
- 이종운, 전효택, 전용운, 1997, 대수층 지질 및 온도에 따른 국내 지하수의 지구화학적 특징 - 화강암질내 지하수와의 비교연구, 대한지하수환경학회지, 4(4), 212~222.
- Lihua Xiong, Shenglian Guo, 1999, A two-parameter monthly water balance model and its application, *J. Hydrology*, 216, 111~123.
- Long, A.J., R.G. Derickson, 1999, Linear systems analysis in a Karst aquifer, *J. Hydrology*, 219, 206~217.
- Marcus Laaksoharju, Christina Skarman, Erik Skarman, 1999, Multivariate mixing and mass balance(M3) Calculations, a new tool for decoding hydrogeochemical information, *Applied Geochemistry*, 14, 861~871.
- Michael Manga, 1999, On the timescales characterizing groundwater discharge at springs, *J. Hydrology*, 219, 56~69.

- Molent, J., P.Davy, C. Gascuel-Oudoux, P. Durand, 1999, Study of three subsurface hydrologic systems based on spectral and analysis of time series, *J. Hydrology*, 222, 152~164.
- Ochsenkuhn, K.M., J. Kontoyannakos, M. Ochsenkuhn-Petropulu, 1997, A new approach to a hydrochemical study of groundwater flow, *J. Hydrology*, 194, 64~75.
- 오순미, 김길성, 김세라, 김태현, 송영철, 강태조, 김성홍, 고찬옥, 1995, 제주도내 샘터의 수질조사, 제주도보건환경연구원보, 6, pp.81~99.
- 박남식, 이용두, 1997, 중-동 제주 수역의 지하수개발로 인한 해수침투, 대한지하수환경학회지, 4(1), 5~13.
- 박상운, 1996, 제주도 용천수의 우량 변화와 수리화학적 특성, 제주대학교 석사학위논문, pp.73~75.
- 박창근, 1996, 우리나라 지하수개발 가능량 추정, 대한지하수환경학회지, 4(4) 15~20.
- Pionke, H.B., W.J. Gburek, R.R. Schnabel, A.N. Sharples, G.F. Elwinger, 1999, Seasonal flow, nutrient concentrations and loading pattern in stream flow draining an agricultural hill-land watershed, *J. Hydrology*, 220, 62~73.
- Reijnders, H.F.R., G. van Drecht, H.F. Prins, L.J.M. Boumans, 1998 The quality of the groundwater in the Netherlands, *J. Hydrology*, 207, 179~188.
- Ruan, H., T.H. Illangasekare, 1999, Estimation of relative hydraulic conductivity of sandy soils based on a sheet flow model, *J. Hydrology*, 219, 83~93.
- 서혜영, 김규한, 1997, 한강수계분지내의 하천수의 지구화학적 특성, 대한지하수환경학회지, 4(3), 130~143.
- Soki Yamamoto, 1997, 지하수 조사법, 동화기술 pp.602~611.
- 송성준, 유장걸, 1998, 제주 자연수의 환경동위원소 함량과 이화학적 수질특성과 관계, 지하수질 환경보전연구회, 제주대 환경연구소 국제학술심포지

- 업, pp.83~110.
- Stanislaw Weglarczyk, 1998, The interdependence and applicability of some statistical quality measures for hydrological models, *J. Hydrology*, 206, 98~103.
- Stigter, T.Y., S.P.J. van Ooijen, V.E.A. Post, C.A.J. Appelo, 1998, A hydrogeological and hydrochemical explanation of the groundwater composition under irrigated land in a Mediterranean environment, Algarve, Portugal, *J. Hydrology*, 208, 262~279.
- Tomas Thierfelder, 1999, The role of catchment hydrology in the characterization of water quality in glacial/boreal lakes, *J. Hydrology*, 216, 1~16.
- Vekerdy, Z., A.M.J. Meijerink, 1998, Statistical and analytical study of the propagation of flood-induced groundwater rise in an alluvial aquifer, *J. Hydrology*, 205, 112~125.
- Verdin, K.L., J.P. Verdin, 1999, A topological system for delineation and codification of the Earth's river basins, *J. Hydrology*, 218, 1~12.
- 원태연, 정성원, 1998, 한글 SPSS 통계조사 분석, 고려정보산업, pp.362~370.
- 윤선, 고기원, 박원배, 1994, 제주도 서귀포층의 지하분포 상태와 지하수 부존 특성과의 관계, 제주대학교 수자원연구회 학술심포지엄, pp.97~132.

감사의 글

본 논문이 완성이 되기까지 끊임없는 가르침과 격려를 아끼지 않으신 이용두 교수님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 부족한 논문을 세심히 검토해 주신 오윤근 교수님과 감상규 교수님께 고마움을 전합니다. 또한, 학위과정 동안 많은 가르침을 주셨던 허목 교수님, 허철구 교수님, 이기호 교수님, 조은일 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

대학원 생활동안 충고와 용기를 저에게 주셨던 김창영 선생님, 박용이 선생님, 류성필 선생님, 한지용 선생님, 문상희 선생님, 양순미 선생님께 고마움을 전하며, 직장생활을 하면서도 많은 도움을 주시고 이번에 좋은 결실을 맺으신 김길성 선생님, 학위과정 동안 어려움을 같이 나누었던 김병현, 강춘희, 강진영, 송희경 선생님께 더 좋은 앞날이 펼쳐지길 기원하겠습니다. 그리고 이제 막 새로운 연구를 시작하는 도현, 대경, 광진, 창산, 기봉, 승규, 정연, 효정 학형들에게도 좋은 결과를 기원하며 지면을 빌어 고마움을 전합니다.

실험실 생활동안 많은 도움을 주었던 고민철, 김현희 선생님께 감사드리고, 같이 실험을 해 주었던 지은, 세진, 태전, 영민 후배들과 굿은 일도 마다않고 도와주었던 현옥, 우석, 원홍, 순영 후배들에게도 고마움을 전합니다.

저를 아끼고 보살펴 주었던 형님과 저를 키워주셨고 사랑과 정성으로 이 자리에 있기까지 이끌어주신 어머님께 이 조그마한 결실을 바칩니다.