

碩士學位論文

제주도 동부지역 지하수의 염수화에
관한 연구



金 志 映

2000年 6月

제주도 동부지역 지하수의 염수화에 관한 연구

指導教授 吳 潤 根

金 志 映

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



金志映의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 이 용 두 印

委 員 조 은 일 印

委 員 오 윤 근 印

濟州大學校 大學院

2000年 6月

A Study on the Salinization of Groundwater in Eastern area of Cheju Island

Ji-Young Kim

(Supervised by professor Youn-Keun Oh)



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

DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

2000. 6.

목 차

Summary	1
I. 서론	2
II. 이론적 배경	4
1. 지하수 염수화의 원인	4
1) 자연적인 염지하수(Natural saline groundwater)	6
2) 암염의 용해(Halite-solution brine)	6
3) 해수침입(Sea-water intrusion)	7
2. 지하수 염수화의 원인조사방법	7
1) 주요이온조성비를 이용한 방법	7
2) Piper diagram을 이용한 방법	10
3) 방사능 동위원소 Tritium(^3H)을 이용한 방법	13
III. 재료 및 방법	16
1. 조사지역	16
2. 분석방법	18
1) 주요이온성분분석	18
2) Tritium(^3H)의 분석 방법	18
IV. 결과 및 고찰	20
1. 해수와 지하수의 주요이온조성비	20
1) 염소이온(Cl^-)과 주요이온과의 상관관계	20
2) 중탄산이온(Bicarbonate, HCO_3^-)	22
3) 칼슘(Calcium, Ca^{2+})과 마그네슘(Magnesium, Mg^{2+})	23
2. 조석에 따른 지하수 수질변화	25
1) D-28 관정의 수질변화	25
2) D-124 관정의 수질변화	27

3) Susan 3 관정의 수질변화	29
4) D-282 관정의 수질변화	31
3. Piper diagram을 이용한 지하수 수질특성	33
4. Tritium(³ H) 함량의 분석	38
V. 결론	41
VI. 참고문헌	43
감사의 말씀	46



List of Figures

Fig. 1. Presentation of chemical constituents piper diagram (a) (c) and classification scheme of hydrochemical facies (b), based on major-ion percentages(Krieger and Hendrickson, and other, 1960).	11
Fig. 2. Piper diagram of chemical composition of coastal saline water. Regional seawater intrusion is characterizes by ion exchange(a1) and mixing(a2), whereas local mixing of intruded seawater with fresh water along boreholes is characterized by simple mixing(b)(Richter and Kreitler, 1993).	12
Fig. 3 Sampling site on this study.	17
Fig. 4 Bivariate plots of major ions versus chloride for ground water from eastern area at Cheju island((a)Na ²⁺ /Cl ⁻ , (b)SO ₄ ²⁻ /Cl ⁻ , (c)Ca ²⁺ /Cl ⁻ , (d)Mg ²⁺ /Cl ⁻ , (e)K ⁺ /Cl ⁻).	22
Fig. 5 Bivariate plots of calcium ion and magnesium ion for each wells.	24
Fig. 6 Variation of major ions in accordance with tidal levels at D-28(in 1998(a), in 1999(b)).	26
Fig. 7 Variation of major ions in accordance with tidal levels at D-124 in 1998, 1999.	28
Fig. 8 Variation of major ions in accordance with tidal levels at Susan 3 in 1998, 1999.	30
Fig. 9 Variation of major ions in accordance with tidal levels at D-282 in 1998, 1999.	32
Fig. 10(a) Piper diagram of chemical composition of the study area in May, 1998 and 1999.	35
Fig. 10(b) Piper diagram of chemical composition of the study area in June, 1998 and 1999.	36
Fig. 10(c) Piper diagram of chemical composition of the study area in	

July, 1998 and 1999.37

Fig. 10(d) Piper diagram of chemical composition of the study area in
August, 1998 and 1999.38

Fig. 11 Variation of tritium level and chloride ion concentration
accordance with each well in Aug, Dec 1999.40



List of Tables

Table 1. Parameters used for identification of salinity sources (Richter and Kreitler, 1993).	6
Table 2. Tritium(^3H) concentration in precipitation at Daeduk area during 1987~1989.	14
Table 3. Tritium(^3H) concentration in precipitation at Cheju island during 4 months.	15
Table 4. Tritium(^3H) concentration include type of water at Cheju city.	15
Table 5. The data of well at each sampling sites	17
Table 6. Analytical item and Equipment.	18
Table 7. Classification with chloride-bicarbonate ratio.	23
Table 8. Calcium ion and magnesium ion concentration at studied area of each well.	24
Table 9. Average values of analyzed results at studied well D-28 in 1998, 1999.	27
Table 10. Average values of analyzed results at studied well D-124 in 1998, 1999.	29
Table 11. Average values of analyzed results at studied well Susan 3 in 1998, 1999.	31
Table 12. Average values of analyzed results at studied well D-282 in 1998, 1999.	33

Summary

According to the results of the groundwater quality investigation about 230 holes all over the country, the groundwater which was in excess of standard grows larger every year and closed holes increased to 23,457 holes in 1997 from 15,724 holes in 1996. This is the major reasons that water quality contamination, shortage of water quantity, increasing of salinity and so on.

There are 7 groundwater salinization sources which are considered as most important on a regional level. And among these the cheju island groundwater salinization sources are (1) halite solution, (2) natural saline groundwater, (3) sea-water intrusion.

The method of taking an isotopes is one of research methods of the origin of groundwater salinization and is used in so many studies because it has very high confidence. ^{18}O , ^2H , ^3H , ^{14}C and so on in an isotopes are frequently used in the method of them.

Consequently on this study we analyzed major ions and ^3H in groundwater, sea-water and rain of the eastern part of cheju island known as contaminated site from long time ago to examine the origin of groundwater salinization.

Relation ratios of the major ions versus chloride ion shows similar tendency to sea-water. This indicates that sea-water entered the groundwater layer.

And amount of ^3H in holes of the land side is higher than that of the sea side. Relation of chloride ion versus ^3H indicates negative character. Therefore we can think that the reason of groundwater salinization of this part is natural saline groundwater and halite solution by relation.

I. 서론

1970년대 들어 적극적으로 추진된 지하수 개발사업으로 이용이 가능하게 된 제주도의 풍부한 수자원은 1980년대 들어서 관광 관련시설, 감귤원, 비닐하우스 그리고 어류양식장 등의 용수 이용을 위한 소규모 지하수 관정시설의 개발이 급격하게 증가함에 따라 수량부족과 수질악화와 함께 빠른 속도로 오염되기 시작했다.

1998년말 제주도내 지하수 이용량은 총 4,176개공(염지하수공 623개소 제외)으로 711천m³/일의 지하수가 개발되어 지하수 함양량 4,093천m³/일의 41%, 지하수 적정개발량 1,689천m³/일의 42%에 달한다. 지역별로는 북제주군이 98년 12월 현재 657공으로 적정개발량의 33%인 232천m³/일, 남제주군이 1,641공으로 263천m³/일(40%), 제주시 지역이 868공에 143천m³/일(20%), 서귀포시지역이 1,010공에 73천m³/일(10%)로 나타났다(제주도, 1999).

제주도내 지하수 관정 중 1998년도에 용도전환 조치된 관정은 없었으나 1999년도에 5개소를 포함하여 지금까지 모두 34개공이 용도전환 조치되었으며, 이중 염소이온농도, 질산성질소농도가 먹는물 수질기준(각각 250mg/l 이하, 10mg/l 이하)을 초과하여 농업용 등 다른 용도로 전환된 지하수공은 94년 이후 98년까지 29개공에 이른다(농어촌진흥공사, 1999).

일반적인 지하수 염분증가 혹은 염수화의 잠재원인에는 자연적인 염지하수(natural saline groundwater), 암염의 용해(halite solution), 해수침입(sea-water intrusion), 가스나 유정에 의한 고염화(oil and field brine), 농지에서서의 유출(agricultural effluents), 염화확산(saline seep), 용설제에 의한 염화(road salt) 등 7가지가 있다(Richter et al., 1993). 이러한 염수화의 원인 중 제주도 지하수의 염수화 원인으로는 3가지 정도로 조사되고 있는데, 윤(1986)에 의해 조사된 암염의 용해(halite solution), 고(1991)의 연구에 의한 자연적인 염지하수(natural saline groundwater) 그리고 최(1986)에 의한 과잉양수로 인한 해수침입(Sea-water intrusion) 등을 주요 요인으로 들 수 있다.

이들 연구방법을 보면 대부분 지하수의 수질변화 특성, 해수와 주요 이온간의 상관관계를 비교한 방법 그리고 piper diagram을 이용한 방법이 있으며 그 외에 염수화 원인의 조사방법으로는 방사능 동위원소를 이

용한 방법이 있으나 국내에서 보다 국외에서 주로 사용되고 있다. 방사능 동위원소를 이용한 방법은 다년간의 분석결과의 누적을 통해 매우 신뢰도가 높은 것으로 증명되어진 방법으로 ^{18}O , ^2H , ^3H , ^{14}C 등의 동위원소가 주로 사용되고 있다. 동위원소를 이용한 지하수 연구는 국내에서는 1980년대 들어서 연구되고 있으며 소수의 연구자에 의하여 동위원소 ^{18}O , ^2H 을 수리수문과 지하수 염수화 원인 규명에 이용하고 있다. 그러나 동위원소 ^3H 을 이용한 지하수 염수화의 원인규명에 관한 연구는 미비한 실정이다.

따라서 본 연구는 제주도의 지하수 관정 중 염수화가 많이 진행된 제주도 동부지역의 지하수 관정에 대하여 염수화의 원인을 규명하기 위하여 조사방법으로는 주요이온간의 상관관계를 비교한 방법, piper diagram을 이용한 방법과 아울러 최근 지하수 염수화의 원인규명에 이용되고 있는 방사능 동위원소인 ^3H 을 이용하여 염수화 원인을 규명하는 것이 목적이다.



II. 이론적 배경

모든 자연수는 대기, 토양, 다른 용액과의 혼합 및 생물권과 암석권의 작용을 통해 여러 용존물질들을 함유하게 되고 그 결과로 권고치 이상의 총용존물질(TDS)을 함유하게 되기도 한다.

지하수 염수화(salinization) 즉, TDS의 증가는 가장 일반적인 형태의 수질오염이며, 그 영향으로는 물 속의 화학적 구성물중의 일부 구성물의 증가와 염수수준의 염분 증가를 들 수 있다. 그러므로 지하수 염수화란 물 속의 용존물질이나 콜로이드 상태 있는 총용존물질(TDS)이 증가를 의미한다.

1. 지하수 염수화의 원인

여러 연구자들의 연구 결과에 따르면 일반적인 지하수 염수화의 원인으로서는 크게 7가지를 들 수 있다.

자연적인 염지하수(Natural saline groundwater)에 의한 오염은 담수 대수층 아래에 존재하는 염지하수의 양수 등에 의해 담수와 염지하수가 혼합되거나 염지하수가 존재하는 대수층까지 관정을 시추하여 염지하수가 위로 이동하여 발생한다(Richter and Kreitler, 1993).

암염의 용해(Halite solution brine)에 의한 오염은 층 혹은 돔형으로 지하에 존재하거나 퇴적된 형태로 존재하던 암염이 강수의 통과 등 암염이 용해될 수 있는 조건에서 생기는 고염수가 지하수와 혼합되면서 발생한다(Johnson and other, 1997).

염수화의 가장 흔한 원인 중의 하나인 해수 침입(Sea water intrusion)은 주로 인위적인 요인인 과잉양수 등에 의하여 발생하지만 자연적인 요인으로서 비피압 해안 대수층이 얇은 지형적인 요인이 원인이 되어 발생한다(Krieger and Hendrickson, 1960).

가스나 유정에 의한 고염수화(oil and field brine)는 국내에서는 찾아볼 수 없는 경우로서 주로 연안에서의 유전개발이 활발한 국외에서 흔히

찾아볼 수 있으며, 농지에서의 유출(Agricultural effluents)은 지표에서의 작물재배, 가축의 사육 등의 농작활동을 위해 살포된 비료가 지하수의 염도를 증가시키는 원인이 되어 발생하는 현상이다.

염화확산(Saline seep)이란 인위적인 오염원이 미치지 않는 지역에서 발견되는 염분 토양으로 일부분 혹은 대부분이 젖어 있으며 주로 하얀 소금 알갱이와 함께 발견되고 주변의 작물이나 풀의 성장은 중지되거나 사멸되어 있는데 강수의 요인으로 인하여 염수화가 발생한다(Bahls and Miller, 1975).

소금은 매우 효과적이며 유용한 용설제로 오랜 기간동안 사용되어졌으나 강과 하천 등 표층수와 토양 그리고 지하수의 오염과 같은 환경적인 부작용을 유발시켰는데 이러한 용설제의 살포가 염수화에 원인인 용설제에 의한 염화(road salt)이다(Field and others, 1973).

위에서 간략히 서술한 7가지의 지하수 염수화의 원인에 따른 여러 가지 종류의 분석 parameter를 Table 1에 나타내었으며, 이러한 7가지 지하수 염수화의 원인들 중에서 윤(1986), 고(1991), 최(1986) 등에 의해 제주도 지하수 염수화의 주요요인으로 추정되고 있는 자연적인 염지하수(Natural saline ground water), 압염의 용해(Halite-solution brine), 해수 침입(Sea water intrusion)에 대해 살펴보았다.

Table 1. Parameters used for identification of salinity sources (Richter and Kreitler, 1993).

Salinization sources	Parameter
Natural saline water	Cl, Br, I, ^{34}S , ^{18}O , D, Br/Cl, I/Cl, Mg/Cl, K/Cl, Ca/Cl, (Ca+Mg)/SO ₄ , Sr
Halite-solution brine	K/Na, Br/TDS, (Ca+Mg)/(Na+K), Na/Cl, Ca/Cl, Mg/Cl, Br/Cl, K/Cl, (Ca+Mg)/SO ₄ , I/Cl, ^{18}O /D, SO ₄ /(Na+K), SO ₄ /TDS, SO ₄ /Cl
Sea-water intrusion	Cl, Major ions(Piper), ^{14}C , ^3H , I/Cl, B, Ba, I, ^{18}O , ^2H , ^{13}C , Ca/Mg, Cl/SO ₄ , B/Cl, Ba/Cl, Br/Cl
Oil-field brines	Cl, Major ions, Na/Cl, Ca/Cl, Mg/Cl, SO ₄ /Cl, Br/Cl, I/Cl, Major ion ratios, Br, (Na+Cl)/TDS, Li/Br, Na/Br
Agricultural effluents	Cl, NO ₃ , Cl/NO ₃ , K, TDS
Saline seep	SO ₄ , Ca/Cl, Mg/Cl, SO ₄ /Cl, NO ₃
Road salt	Cl, Major ion ratios, Br/Cl

1) 자연적인 염지하수(Natural saline groundwater)

강우분포와 강우량, 증발산량과 지하수 함양량, 토양의 형태와 대수층의 구성물질, 체류시간과 흐름 속도 또는 유출지역의 특성 등에 의해 발생하는 염지하수가 담수 대수층 아래에 존재하여 관정시추시 이러한 염지하수의 혼합과 이동으로 인해 발생하는 자연적인 염지하수(natural saline groundwater)의 형성이 자연적인 요인인지 인위적인 요인인지 또는 기타 다른 요인에 의한 것인지를 규명하기 위해서는 Table 1에서 나타낸 바와 같이 주요이온, Br, I, 동위원소 ^{18}O , ^3H , ^{34}S , ^{14}C 등을 분석한 후 이들 각각의 이온과 Cl 과의 상관관계를 비교·분석하여 나타낸다.

2) 암염의 용해(Halite-solution brine)

대부분이 순수한 NaCl로 구성되어 있는 암염이 용해되어 있는 물의 주요 이온성분비를 비교하여 보면, Na⁺와 Cl⁻와의 관계는 다른 이온성분과의 관계에서는 볼 수 없는 일정한 비례관계를 나타내기 때문에 이와 같은 이온 조성비의 비교를 통해서 지하수 염수화 요인이 무엇인가를 규명해 볼 수 있다.

퇴적된 암염이 강수 등의 통과로 용해되어 발생하는 염수는 대부분이 순수한 NaCl로 다른 염지하수보다 일정한 화학조성을 가지는데, 이를 해석하기 위해 사용되는 parameter는 Table 1에서 보는 바와 같이 K/Na, Na/Cl, (Ca+Mg)/(Na+K), Ca/Cl, Mg/Cl, Br/Cl, K/Cl, I/Cl, 동위원소 ¹⁸O/D 등이 있다.

3) 해수침입(Sea-water intrusion)

대부분의 해안지역에서 발생되고 있는 해수침입(sea-water intrusion)은 해안 대수층에서의 과잉양수 이외에도 지형적인 조건에 의해 해안 대수층이 얇을 경우 바다쪽을 향하는 지하수의 흐름 내의 해수유동 등이 그 발생요인이 된다. 이러한 경우에는 다른 요인과의 판별을 위해서 Table 1에서 제시한 parameter인 Cl, I/Cl, I, Ca/Mg, Cl/SO₄, 동위원소 ¹³C, ¹⁴C, ³H, ²H, ¹⁸O를 사용한다.

농업활동 등에 의한 지표수와 지하수의 오염 즉, 농지에서의 유출(agricultural effluents)로 인한 염수화의 발생은 농사, 동물의 배설물 그리고 비료, 농약, 제초제와 같은 상업적인 화학물질 등에 의한 것으로 이러한 오염원들이 유입되면 TDS와 NO₃⁻ 등 주요이온성분함량의 상승을 가져오는데 이는 Cl⁻, NO₃⁻, Cl⁻/NO₃⁻, K⁺, TDS를 분석하여 해명할 수 있다.

2. 지하수 염수화의 원인조사방법

1) 주요이온조성비를 이용한 방법

담수에서의 주요이온이 Ca²⁺과 HCO₃⁻, SO₄²⁻ 인데 비해 해수의 주요 이온은 Na⁺과 Cl⁻으로 주요 이온성분부터가 매우 상이하어 Cl⁻과 Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, SO₄²⁻, HCO₃⁻, Br⁻, I⁻, Li⁺의 이온조성비는 둘 이상의 염수화의

원인에 의해 오염된 지하수 오염원을 판명하는데 사용되어 진다.

강수중의 농도는 내륙지방에서는 $1\text{mg}/\ell$ 미만을 나타내지만 해안에서는 $1\sim 20\text{mg}/\ell$ 정도의 범위를 보이는데 해염과 해풍 등은 연안지역의 지표수와 지하수에서 나타나는 높은 염분농도의 원인이 되며, 대부분의 지하수는 $0.001\text{mg}/\ell$ 에서 $1\text{mg}/\ell$ 정도의 Cl^- 를 함유하고 있다(U.S. Environmental Protection Agency, 1977).

Cl^- 농도는 수심이 깊을수록 그리고 함양지역으로부터 멀어져 해안에 가까울수록 증가하는데 해수에서의 Cl^- 농도는 약 $19,000\text{mg}/\ell$ 이상 검출된다. 특히 심층수와 가스나 오일과 함께 존재하는 지하수는 $100,000\text{mg}/\ell$ 를 초과하기도 한다.

지하수 중에 함유되어 있는 Cl^- 의 주요 발생원은 증발의 마지막 단계에서 나타나는 증발잔류물 중의 NaCl 용해, 침전된 주요 미량 침전물에 함유된 염수 등의 용해와 해수 침입이며, 인위적인 지하수 염수화 요인으로는 고속도로 용설제의 살포, 공장폐수, 생활하수 그리고 농업용수, 가스나 유정에 의한 염수 그리고 과일 양수에 의한 해수 침입 등이 있다.

자연적이든 인위적이든 물의 증발은 지표수와 지하수의 Cl^- 농도를 증가시키는데, 대부분의 지하수 염수화 과정의 직접적인 결과인 Cl^- 은 수질 악화를 판명하기 위한 요인으로 사용되고 있다(Bernd C. Richter and others, 1993). 그러므로 해수와 지하수의 상이한 주요이온성분비를 이용하여 그 상관관계를 비교함으로써 지하수 염수화의 원인을 해석할 수 있다.

HCO_3^- 은 지하수에 비교적 다량 함유되어 있는 반면에 해수 중에는 비교적 함유되어 있기 때문에 $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ 비를 염수화의 원인을 규명하는데 이용한다. HCO_3^- 농도는 지하수에서는 수백 mg/ℓ 로 높지만 가스나 오일에 의한 염수(oil and field brine)에서는 수십 mg/ℓ 로 낮게 나타나므로 $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ 를 비교하여 오염여부를 판단하고 다른 화학조성비의 비교와 함께 염수화 경향을 밝히는데 사용한다(Collins, 1969; Burnitt and others, 1963).

Ca^{2+} 은 지구상에 가장 흔한 금속물질로 대부분의 지하수에 주요이온으로 존재하고, 석회암, 퇴적암 그리고 퇴적사암으로 구성되어 있는 대수층내의 지하수에서는 Ca^{2+} 농도가 Cl^- 농도보다 매우 높게 나타나며, 해수의 영향을 받았을 때에는 이와 반대로 Cl^- 농도가 Ca^{2+} 농도보다 매우 높게 나타나기 때문에 $\text{Ca}^{2+}/\text{Cl}^-$ 의 변화를 사용하여 염수화 원인을 판명한다(Bernd

C. Richter and others, 1993).

대부분의 지하수에서 Mg^{2+} 농도는 Ca^{2+} 농도보다 낮고 해수에서 Ca^{2+} 의 3배 이상의 농도를 보인다(1,359mg/l Mg^{2+} vs. 410mg/l Ca^{2+} ; Goldberg and others, 1971). 그러므로 Mg^{2+}/Ca^{2+} 는 연안에 위치한 지하수 대수층에서의 해수침입을 구별하는데 유용하게 사용되어 지고 그외에도 Mg^{2+}/Na^+ , Mg^{2+}/K^+ , Mg^{2+}/SO_4^{2-} , Mg^{2+}/Cl 비를 염수화의 원인을 밝히는데 사용하며 Mg^{2+}/Ca^{2+} 의 이론비는 해수에서는 0.3정도를 나타내고 담수에서는 0.83을 나타낸다.

NO_3^- 함량은 유기폐수로부터의 오염을 밝히는데 널리 사용되고 있지만 Cl^- 농도는 높고 NO_3^- 농도는 낮게 나타날 경우에는 NO_3^- 농도가 낮은 염수인 가스나 유정에 의한 염수화, 암염에 의한 염수화 그리고 응설제에 의한 염수화로 판명할 수 있다(Kreitler and others, 1978; Kreitler, 1979).

K^+ 은 주로 장석과 점토 등에 함유되어 있는 금속의 유출을 통해서 지하수에 유입되고 광수폐수, 온천수에서 고농도의 K^+ 이 주로 발견되므로 K^+ 농도는 암염의 용해에 의한 염수에서는 매우 낮게 탄산염 대수층에서 유출되는 염수에서는 매우 높게 그리고 사암지역에서 배출되는 염수에서는 이들의 중간정도의 농도로 나타난다(Rittenhouse and others, 1969). 따라서 K^+ 농도나 K^+/Ca^{2+} , K^+/Mg^{2+} , K^+/SO_4^{2-} , K^+/Cl , K^+/Br 은 암염의 용해에 의한 염수화를 판명하기 위해 다른 이온조성비와 함께 사용되어 진다.

Na^+ 은 일반적으로 암염용해의 특성을 가진 염수에서는 0.65의 Na^+/Cl 비를 가스나 유정에 의한 염수에서는 0.60보다 낮은 구성비를 나타낸다(Leonard and Ward, 1962; Gogel, 1981; Richter and Kreitler, 1986).

대수층내에 가스나 유정에 의한 염수가 유입되면 수중의 Ca와 Na사이의 양이온 교환으로 인해 Na^+/Cl^- 비가 감소되는데 이러한 경우에 가스나 유정에 의한 염수는 대부분이 Na^+ 유형의 물이거나 Ca^{2+} 유형의 물로 나타난다. Na^+/Cl 비의 증가는 해수가 담수로 유입되었을 때 나타나므로 Na^+/Cl 비는 가스나 유정에 의한 염수와 암염에 의한 염수를 비교하는데 매우 유용하다(Custodio, 1987).

SO_4^{2-} 은 석회암과 황화철의 용해뿐만 아니라 화산활동, 화석연료의 연소, 공업활동과 광산의 채취활동 등에 의해서도 공급되어 지하수에서 비교적 높게 나타나고, 대부분의 고염수에서 저농도를 나타내기 때문에 SO_4/Cl 이나 SO_4/TDS 등 SO_4/X ($X=Cl, TDS, Ca+Mg$)의 조성비로 자연수와 고염

수 혼합의 해석에 자주 사용되어 진다(Craig, 1970).

해수에 의해 염수화가 진행된 지하수의 SO_4/Cl 비는 0.13의 일정한 비율을 나타내는데 이를 Dittomer's ratio라고 한다(山本莊毅, 1983).

2) Piper diagram을 이용한 방법

Piper diagram은 지하수의 유형분석과 서로 다른 유형의 지하수의 혼합, 양이온교환, 침식과 용해작용, 황산염환원 등의 관계를 분석하는데 사용된다. Fig. 1(a)~(c)의 하단에 있는 두 개의 삼각형 중 왼쪽은 주요양이온인 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Ca^{2+} , Mg^{2+} 의 농도(epm)를 백분율로 환산하여 나타내고, 오른쪽 삼각형은 주요음이온인 Cl^- , SO_4^{2-} , $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ 의 농도(epm)를 백분율로 환산하여 표시하며, 양이온과 음이온 삼각형에 표시한 점을 상부에 있는 다이아몬드형 그래프에 나타낸다.

Fig. 2는 Richter(1993) 등이 piper diagram을 이용하여 혼합과 이온교환을 분석한 것으로 (a1)은 어떤 지역에서 해수침입에 의하여 이온교환 특성을 나타낼 때이고, (a2)는 혼합 특성을 나타낼 때이며, (b)는 시추공을 따라 침입된 해수와 담수가 단순한 혼합 특성을 나타낼 때의 piper diagram을 나타낸 것이다. 이온교환은 대수층에서 Ca^{2+} 와 Na^+ 사이의 교환형태가 가장 뚜렷하며, 해수가 침입하여 Na가 대수층에 포화될 때까지 진행하며, 담수와 해수가 접하는 점이대의 전면(initial front)에서만 일어나며 그 후면(behind front)에서는 일어나지 않는다. Richter(1993) 등에 의하면 남부 캘리포니아에서는 나트륨이 포화되는 Cl 농도는 대략 1,000ppm 정도일 때 일어난다고 하였다.

이외에도 지하수와 물속에 용해되어 있는 주 양이온과 음이온 및 용해물질을 도식화하여 나타낼 수 있는 이온농도 다이어그램(ionic concentration diagram)에는 Bar chart, Pie chart, Radial diagram 및 Schoeller diagram 등이 있다.

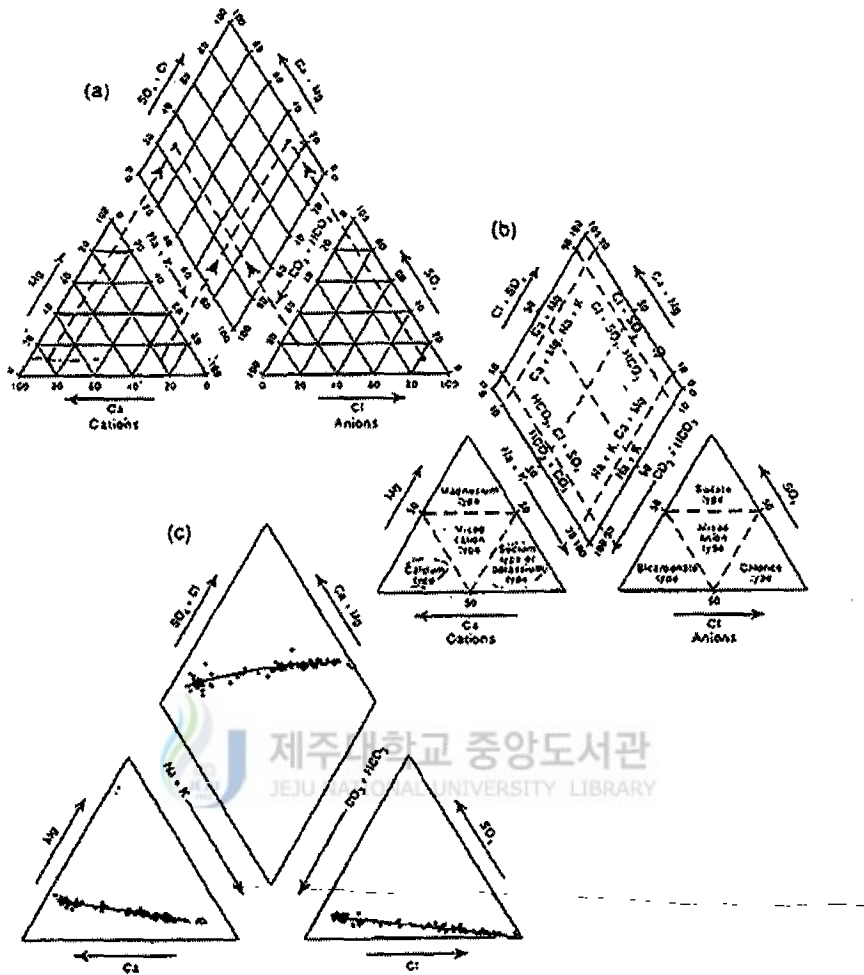


Fig. 1. Presentation of chemical constituents piper diagram (a) (c) and classification scheme of hydrochemical facies (b), based on major-ion percentages(Krieger and Hendrickson, and other, 1960).

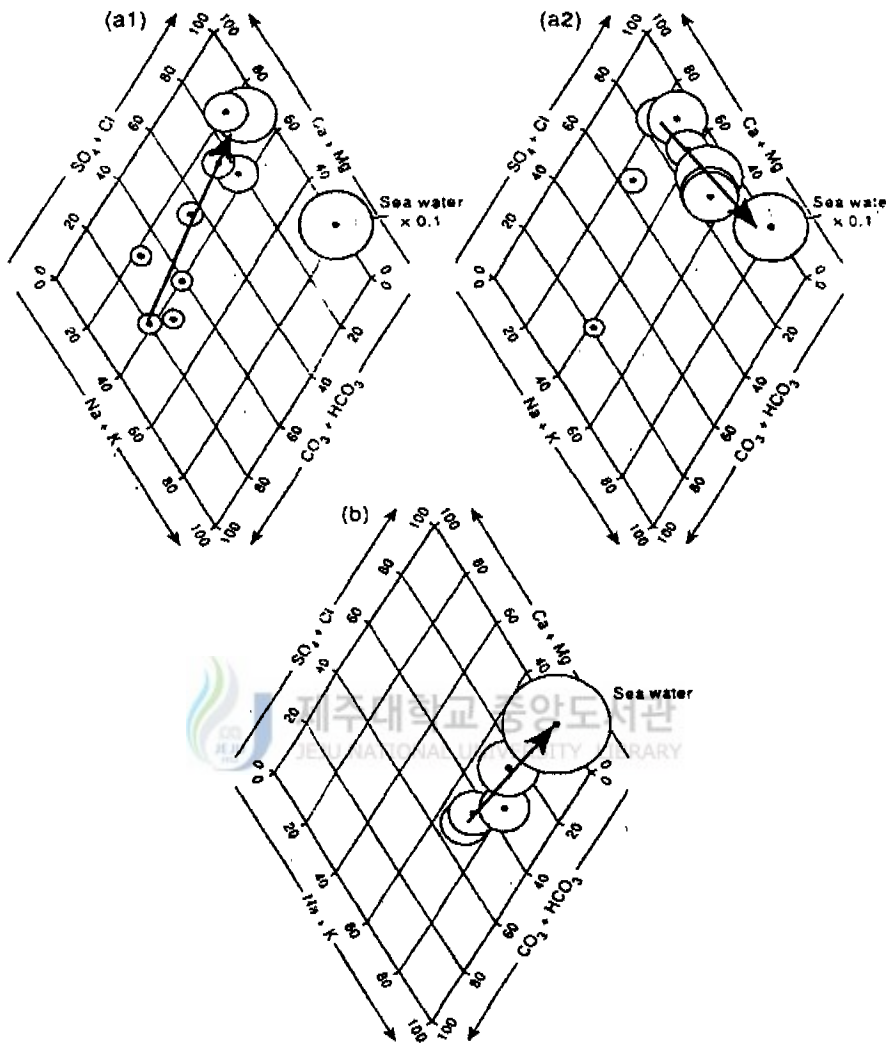


Fig. 2. Piper diagram of chemical composition of coastal saline water. Regional seawater intrusion is characterized by ion exchange(a1) and mixing(a2), whereas local mixing of intruded seawater with fresh water along boreholes is characterized by simple mixing(b)(Richter and Kreitler, 1993).

3) 방사능 동위원소 Tritium(^3H)을 이용한 방법

자연 중에 존재하는 동위원소함량의 측정에는 방사능 동위원소 측정법과 질량 분석법 등이 활용되고 있다. 물의 구성성분인 ^{18}O , ^2H , ^3H 의 함량을 분석하는 기술은 수자원 연구에 많이 이용되고 있는데, 주로 지하수의 함양원과 함양속도, 지하수계의 연구, 지하수의 이동과 순환, 지하수의 기원과 연대측정, 지하수의 하천수와의 관계, 지하수-해수의 혼합, 지하수의 오염원 추적, 물수지 계산, 폐기물에 의한 지하수 오염 연구 등에 광범위하게 이용되고 있다.

이중에서도 특히 지하수와 해수의 혼합 즉, 지하수 염수화를 해석하는 데에는 동위원소 ^{18}O , ^2H , ^3H , ^{13}C , ^{14}C , ^{34}S , ^{36}Cl 등이 주로 사용되는데, 자연적인 염지하수(natural saline groundwater)일 때는 ^{18}O , ^2H , ^{34}S , 암염의 용해(halite-solution brine)일 때는 $^{18}\text{O}/\text{D}$, 해수침입(sea-water intrusion)일 때는 ^{18}O , ^2H , ^3H , ^{13}C , ^{14}C 등이 사용되어 진다.

^{18}O 와 ^2H 는 지하수 함양원의 구별에 매우 유용하게 사용되어 왔는데, 중발에 의한 자연적인 지하수 염수화의 경우에 Cl^- 농도가 증가할수록 ^{18}O 과 ^2H 의 함량이 증가하는 경향을 보이며, 이는 지역에 따라서 그리고 물의 기원에 따라서 다르게 나타난다. 그리고 지하수와 염수가 혼합된 혼합수의 경우에는 수심에 따라 수심이 깊을수록 Cl^- 농도와 ^{18}O 함량은 정의 상관관계를 갖는다.

(1) Tritium(^3H)의 생성

대기기원물질인 ^3H 은 양성자, 전자, 다양한 핵 및 외부 우주로부터 온 핵입자 등의 우주선과 상호 작용에 의해 대기 상층부에서 기체와 함께 자연적으로 생성되거나 원자로 및 핵연료 개체의 공정에서 핵반응으로 만들어지고 있으며 생태계에는 총 3.0×10^7 Curies 정도가 자연계에서 생성되고 있다. 자연수중에 존재하는 ^3H 는 약 12.3년의 짧은 반감기를 갖고 있어 자연적으로 소멸되므로 그 생성과 소멸이 일정한 평형을 이루게 되며 정상적인 환경중에서 ^3H 의 농도는 일정히 유지된다(P. Fritz, 1980).

환경동위원소 ^3H 는 강수의 일부분으로 자연수에 유입되는데 유입농도가 계절별, 연도별로 변하고 방사능 붕괴 성질도 가지고 있어 물의 구성 동위원소로서 지하수 중에 용존하고 있는 화학성분처럼 주위의 물질과 반응해 변화하지 않고 물 자체로 이동하는 특성을 가지 있으므로 지하수 연대측정, 오염원 추적 및 지하수-해수 혼합에 대한 연구 등 지하수 연

구에 매우 유효하게 사용된다(P.Fritz and J.Ch.Fontes, 1980).

(2) 자연수의 Tritium(^3H) 함량

자연수 중의 ^3H 의 유입은 대부분이 강수에 의하여 지하수로의 ^3H 의 유입 또한 강수에 의해 이루어지고 있다.

우리나라에서 강수 중에 ^3H 함량을 조사한 내용을 Table 2에 나타내었다. 1987~1989년, 3년 동안의 대덕 지방 강수중의 ^3H 함량을 보면 3년간의 연평균 ^3H 함량은 11.50, 21.05, 12.34TU였다(김종훈 등, 1990). 또한 제주 지역의 강수중의 ^3H 의 함량은 Table 3에서와 같이 $12.1 \pm 0.43 \sim 17.4 \pm 0.44\text{TU}$ (Tritium Unit)를 보였고(정 등, 1984), 제주시의 지하수와 해수에서의 ^3H 의 함량을 Table 4에 나타내었다. 제주도 지역 해수중의 평균 ^3H 의 함량은 5.4TU로 지하수는 평균 14.5TU로 나타났는데 이는 안 등(1995)의 연구 결과와 동일하다.

국내 12개 지역의 지하수, 지표수, 해수 중의 연평균 ^3H 함량은 안 등(1995)의 연구결과에 의하면 해수중에서는 4~5TU를 나타냈고 지표수에서는 12~48TU를 나타냈으며, 지하수에서의 ^3H 함량분포는 13~29TU로 나타났다.

자연수 중의 ^3H 의 기원은 강수로서 모두 같다고 하겠으나 일반적으로 해수에서는 낮고 지하수 및 용천수 등에서는 비교적 높은 편이며 최근 내륙 담수에는 얼마간의 ^3H 이 존재한다(허 등, 1997).

^3H 함량은 일반적으로 해수에서는 낮고 지하수 및 용천수 등 담수에서는 비교적 높는데 담수 중의 ^3H 함량은 4~25TU정도로 ^3H 의 짧은 반감기와 담수의 비교적 짧은 체류시간을 고려하면 지표수에는 얼마간의 ^3H 이 존재하나 체류시간이 긴 심해수에서는 거의 0TU에 가깝기 때문에 해수와 지표수가 혼합되면 ^3H 함량은 낮아질 수밖에 없다(Custodio, 1987).

Table 2. Tritium(^3H) concentration in precipitation at Daeduk area during 1987~1989.

Year	1987	1988	1989
Tritium(TU)	11.5	21.05	12.34

Table 3. Tritium(^3H) concentration in precipitation at Cheju island during 4 months.

Month	Feb	April	May	June
Tritium (TU)	12.4±0.41	13.9±0.43	12.1±0.43	17.4±0.44

Table 4. Tritium(^3H) concentration include type of water at Cheju city(정 등, 1984).

Water	Sea Water	Groundwater
Tritium(TU)	5.4	14.5



III. 재료 및 방법

1. 조사지역

제주도 동부지역의 지하수 염수화에 대해 연구하기 위해 선정한 조사지역을 Fig. 3과 Table 5에 나타내었다.

조사관정이 위치한 지역은 남제주군 성산읍의 일부지역으로서 면적은 115.8km²로 제주도를 타원체로 보았을 때 타원체의 장축 동편에 해당한다. 연간 강수량은 1,840mm로 제주도 평균치인 1,872mm와 비슷하지만 함양률과 지하수공의 평균 비양수량은 높고, 도내 타 지역에 비해 지형 구배가 완만하므로 유출률은 낮다(제주도, 1999).

제주도 동부지역의 지하수는 자연수위가 평균 해수면 근처에 형성되어 있어 도내에서 수위가 가장 낮게 형성된 지역이고 기저지하수 부존지역으로서 조석에 의한 수위변동이 지배적인 조석지배형의 지하수라고 할 수 있다. 또한 조석의 영향에 비해 강우에 의한 수위상승은 최소치로 연간 수위변동 폭은 1m내외로 연중 안정된 상태를 유지하고 있다(고기원, 1993).

다른 지역과 비교할 때 조사지역은 투수성이 매우 양호한 지역으로 해안 부근의 지질은 모래토양이고 주요 지하수의 함양지역인 해발 100m이상의 지역에는 주로 목초지 및 임야가 많이 분포되어 있다.

조사관정의 선정은 제주도 동부지역 지하수 중 염도가 높은 관정 2개소(D-28, D-124)와 이 관정과 해안가로부터 일정 거리 떨어져 있는 관정 2개소(Susan3, D-282)를 선정하였다.

D-28 관정은 성산읍 고성리에 위치한 관정으로 지하수의 염소이온으로 인한 오염이 심하여 현재는 폐공되어 있으며, 해안으로부터 2,000m 떨어져 있다. D-124 관정은 성산읍 수산리에 위치하고 있으며 이 관정 역시 염소이온의 오염이 심각하게 되어 현재는 사용하지 않고 폐공관리되고 있고 해안으로부터 2,750m 떨어져 있다. Susan3 관정과 D-282 관정은 성산읍 수산리에 위치한 현재 사용중인 관정으로 각각 해안으로부터 5,400m와 7,600m 떨어져 있다. Susan3 관정의 주변에는 과수원이 위

치해 있으며 주거 지역과 가까이 접해 있는 반면에 D-282 관정은 도로
변에 위치해 있는데 주변에서는 과수원 재배와 밭농사가 행해지고 있다.

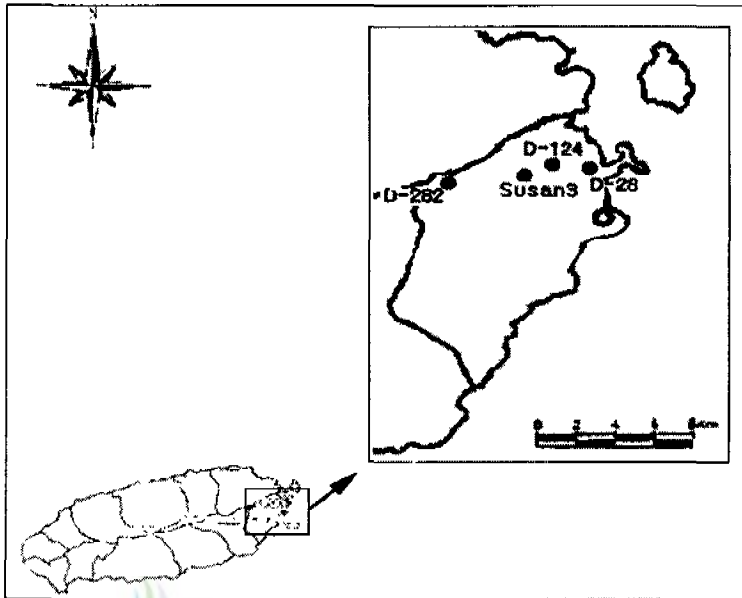


Fig. 3 Sampling site on this study.

Table 5. The data of well at each sampling sites (Unit: m)

Well No.	Location	Elevation	Depth	Natural water level	Dynamic water level	Distance from coast
D-28	Kosung	28.24	41.0	27.20	27.30	2,000
D-124	Susan	28.65	51.0	27.30	33.00	2,750
Susan 3	Susan	92.09	120.0	91.40	107.00	5,400
D-282	Susan	130.00	170.0	151.00	158.00	7,600

*제주도수자원종합개발계획수립 보고서(1996)

2. 분석방법

1) 주요이온성분분석

시료의 채수는 1998년과 1999년 건기인 5월부터 우기인 8월 사이에 대조기를 택하여 행하였고 1999년의 채수시에는 1998년의 조사에 의해 실험적으로 알게된 지하수가 유입된 해수에 의해 영향을 받을 때까지의 시간을 고려하여 채수하였으며, 폴리에틸렌 용기에 채수기를 사용하여 채수한 후 실험실로 운반하여 즉시 분석하였다.

분석 항목 중 수온, pH, 전기전도도는 현장에서 측정하였고 음이온인 Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- 은 Ion chromatography(Dionex-500, USA)를 사용하여 분석하였으며, HCO_3^- 는 중화적정법으로 분석하였다. 또한 양이온인 Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ 은 원자흡광광도계(GBC904AA)를 사용하여 분석하였다.

분석항목과 그에 따른 분석 방법 및 사용기기를 Table 6에 나타내었다.

Table 6. Analytical item and Equipment.

Item	Analytical equipment and method
pH	pH meter(Orion model 250A)
Conductivity	ATI Orion model 128
Cation Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}	Atomic absorption spectrophotometer (AA-6701, Japan)
Anion Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}	Ion chromatography(Dionex-500, USA)
HCO_3^-	0.02N H_2SO_4 titrated method

2) Tritium(^3H)의 분석 방법

환경동위원소 ^3H 은 1999년 8월과 12월에 채수한 각 관정의 시료와 강수 및 해수 시료를 일본큐슈환경관리협회에 의뢰하여 액체섬광계수기를 이용하여 분석하였다.

(1) 시료의 전처리

모든 시료는 증류하여 염을 제거한 후 400g을 취하여 전기분해 장치로 농축하는 동안에 전극의 부식을 방지하기 위하여 0.4% Na_2O_2 를 가하여 알칼리로 하였다.

(2) Tritium(^3H)의 농축

전 처리된 시료는 전기분해 장치를 이용하여 20g까지 농축한 후 시료를 전기분해 할 때에는 $-1\sim 0^\circ\text{C}$ 로 유지하여 ^3H 의 증발을 방지하고 결빙을 방지하기 위해서 냉동조내에 10% ethylene glycol을 첨가하였다.

시료량이 처음 400g일 때에는 전류는 3.5mA, 전압은 15V로 낮추었고, 다시 시료량이 100g정도로 줄어들었을 때는 전류는 2mA, 전압은 3V로 유지하였다. 400g의 시료가 20g으로 농축되는 데에는 약 300시간 정도가 소요되었다.

^3H 함량을 이미 알고 있는 1개의 삼중수소수(tritiated water (754.1cpm/g))를 다른 시료와 동일하게 처리하여 회수율과 농축계수를 계산하였다.

시료의 농축이 완료된 후 KMnO_4 를 가하여 건조될 때까지 다시 증류를 실시하였다.

(3) Tritium(^3H)의 계측

^3H 농축 및 증류가 완료된 시료를 계측병에 10ml 취하여 여기에 Ready Gel을 10ml 가하여 액체 섬광 계수기(Quantulus Oy Wallac, Finland)로 계측하였다. 이때 계측 효율은 ^3H 표준 물질로 구하였다. 검출한계는 0.1~1TU에서 측정값에 약 10%의 오차를 가진다.

IV. 결과 및 고찰

1. 해수와 지하수의 주요이온조성비

1) 염소이온(Cl^-)과 주요이온과의 상관관계

각 조사관정의 지하수와 해수의 Cl^- 과 주요이온과의 화학성분조성의 상관관계를 Fig. 4에 나타냈다. 각 그림의 우측 상위의 점은 조사지역인 제주도 동부지역 성산 해수의 화학성분조성을 나타낸 것이며 그 이외의 점들은 각 관정에서의 화학성분조성을 나타낸 것이다.

각 관정들과 해수에서의 Cl^- 농도와 주요이온성분과의 상관관계를 보면 조사지역 해수와 연장선상에 위치하였으며, D-28과 D-124관정에서의 각 이온과의 화학성분조성은 Susan 3, D-282관정과 해수 사이에 위치하였다.

Cl^- 과 Na^+ 의 화학조성성분을 비교하여 나타낸 Fig. 4의 (a)에서 염수화가 진행된 관정과 그렇지 않은 관정과의 그룹화를 볼 수 있다. 염수화가 진행된 D-28과 D-124관정은 해수의 화학성분조성보다 아래에 위치하고 있고, 염수화가 없는 Susan 3과 D-282관정은 염수화가 진행된 관정의 조성보다 아래에 위치하였다. Na^+ 과 Cl^- 은 해수 중에 다량 함유되어 있는 화학성분이므로 해수가 지하수 중에 유입시에는 이 두 이온은 양의 상관관계를 가지며 증가하게 된다. Figure 4의 (a)에 나타낸 각 관정들의 Na^+/Cl^- 비는 암염용해의 특성을 가진 염수에서의 비인 0.65와 가스나 유정(油井)에 의한 염수에서의 비인 0.60보다 높게 나타났고, 염수화된 관정인 D-28과 D-124관정에서의 0.70~2.36을 나타냈다. 이러한 결과로부터 D-28과 D-124관정의 염수화의 원인은 해수침입으로 사료되었다.

SO_4^{2-} 과 Cl^- 과의 상관관계를 Fig. 4의 (b)에 나타내었다. Cl^- 농도가 조사관정 중에서 가장 높게 나타난 D-28관정에서의 SO_4^{2-} 과 Cl^- 과의 상관관계는 증가추세로 나타났다. D-124관정은 Cl^- 과 SO_4^{2-} 농도의 분석결과는 두 이온에서 모두 높게 나타났으나 D-28관정에서와 같이 일정한 증가추세로 나타나지 않고 다양하게 분산된 형태로 나타났다. SO_4^{2-} 농도의 증가는 석회암과 황화철 등의 용해에 의해서 이루어지는데 D-124관정을 포함한 조사지역의 지질구조는 현무암류를 보이고 있어 지질적인 특성에 의한 것은

아닌 것으로 사료되고 자연적인 염지하수나 암염의 용해액에서의 SO_4^{2-} 농도는 화학적 변환으로 인해 저농도를 나타내므로 자연적인 염지하수도 원인이 될 수가 없다. 따라서 D-124관정에서의 Cl 과 SO_4^{2-} 농도의 변화는 좀더 관측이 필요하다고 사료된다.

염수화 현상이 없는 Susan 3과 D-282관정은 비교적 SO_4^{2-} 농도가 낮게 나타났고 Cl 과 일정한 상관관계를 나타내지는 않았다.

조사관정에서의 Ca^{2+} 과 Cl 과의 상관관계를 나타낸 Fig. 4의 (c)에서도 염수화가 진행된 D-28과 D-124관정에서는 분석결과가 해수의 분석결과쪽을 향하는 증가추세를 나타냈으나 Susan 3과 D-282관정에서의 분석결과에는 $\text{Ca}^{2+}/\text{Cl}^-$ 비에 대한 일정한 상관관계를 찾아볼 수 없었다.

Mg^{2+} 과 Cl 과의 상관관계는 Fig. 4의 (a)에서 나타낸 바와 같이 그룹화를 보였고 염수화된 관정인 D-28과 D-124관정에서의 Mg^{2+} 과 Cl^- 이 함께 증가하며 해수의 화학조성과 유사한 추세를 나타냈다.

K^+ 과 Cl 의 상관관계를 도시한 Fig. 4의 (e)를 보면 염수화된 관정인 D-28과 D-124관정은 일정한 증가추세로 상관관계를 나타내고 있는 반면에 Susan 3과 D-282관정은 다양한 분석결과가 나타났으며 특히 Susan 3관정에서는 역의 상관관계를 나타내고 있었다.

Susan 3관정의 Cl 과 주요이온과의 비교를 보면, 염수화가 없는 또 다른 관정인 D-282관정과 유사한 조성비를 나타내고는 있지만 D-282관정보다는 Cl 농도의 함량도 높고 주요이온들의 농도도 비교적 높게 나타났다. 이러한 결과로부터 Susan 3관정은 염수화가 진행된 D-28과 D-124관정보다 염수화의 진행도는 늦으나 분석결과로 보아 Susan 3관정에서도 염수화가 진행중인 것으로 추정되어 이 관정에 대한 정기적인 장기관측과 관정의 관리가 필요할 것으로 사료된다.

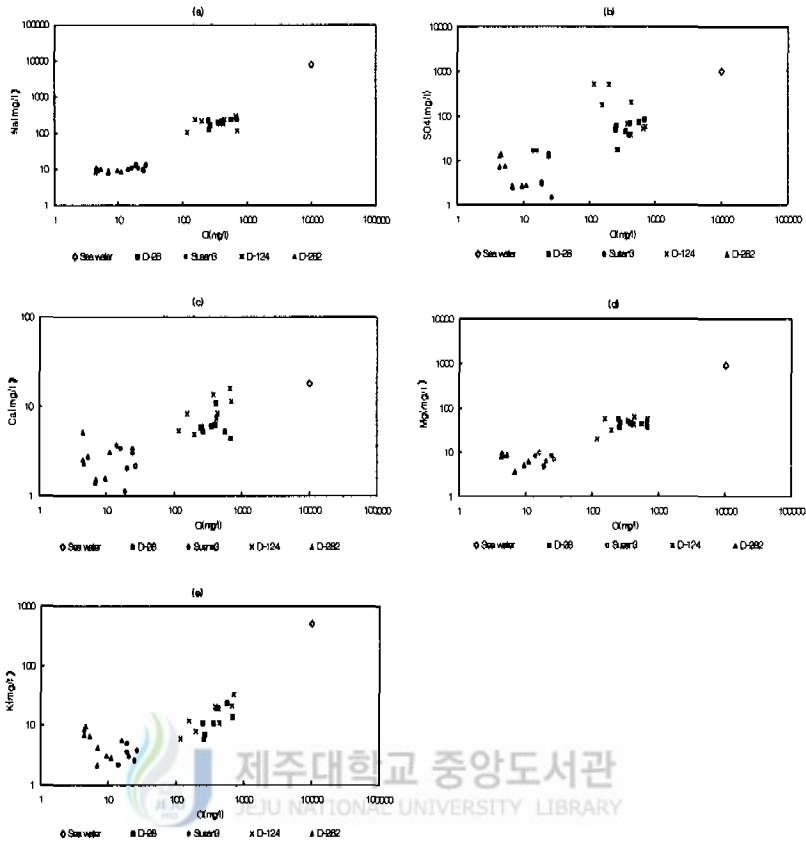


Fig. 4 Bivariate plots of major ions versus chloride for groundwater from eastern area at Cheju island((a)Na²⁺/Cl⁻, (b)SO₄²⁻/Cl⁻, (c)Ca²⁺/Cl⁻, (d)Mg²⁺/Cl⁻, (e)K⁺/Cl⁻).

2) 중탄산이온(Bicarbonate, HCO₃⁻)

연구 대상지역에서 조사기간 동안 분석한 Cl⁻/HCO₃⁻ 비를 Table 7에 나타내었다. Table 7에서 보는 바와 같이 연구대상 지역에서 Cl⁻/HCO₃⁻ 비가 0.5 이하로서 해수침입이 안된 관정은 해안으로부터 7.6km에 위치한 D-28 2 관정이며, 이 관정은 현재 음용수와 농업용수로 사용되고 있다. Susan 3 관정도 현재 사용중인 지하수 관정으로 해안으로부터는 5.4km 떨어져 있으며, Cl⁻/HCO₃⁻ 비는 0.5~1.7의 범위를 나타내었는데 가뭄이 계속되었던 1999년 5, 6월의 경우 각각 1.5, 1.7의 값을 나타내어 이 기간을 제외한 나머지 기간에 slightly ivaded(Cl⁻/HCO₃⁻=0.5~1.3)에 속하였지만 Cl⁻/HCO₃⁻

비가 1.7로 높게 나타나는 것으로 보아 앞으로 Susan 3 관정에 대한 수질 변화의 관측이 계속되어야 할 것으로 사료된다.

해안에서부터 2.75km내로 비교적 해안으로부터 가까운 곳에 위치하고 있는 D-124관정은 2.8~12.6의 범위를 보였고 D-28관정은 7.3~22.1범위의 높은 값을 나타내었다. 이 두 관정 중 특히 D-28 관정은 Cl/HCO_3^- 비가 매우 높아 해수침입으로 인한 염수화가 상당히 진행된 것으로 사료된다.

Table 7. Classification with chloride-bicarbonate ratio.

Classification	Cl/HCO_3^- ratio	Well No.	Distance from coast (Elevation)
No invaded	< 0.5	D-282	above 2.8km (above 88m)
Slightly invaded	0.5~1.3	Susan3	2.2~5.4km (33~70m)
Moderate invaded	1.3~2.8	D-124	2.5~2.7km (40~41m)
Serious invaded	> 2.8	D-28, D-124	coast~2.75km (0~57m)

3) 칼슘(Calcium, Ca^{2+})과 마그네슘(Magnesium, Mg^{2+})

Mg^{2+} 과 Ca^{2+} 의 분석결과를 Table 8에 나타내었고 이 분석결과를 Mg^{2+}/Ca^{2+} 비로 하여 Fig. 5에 나타내었다.

Figure 5에 나타낸 바와 같이 염수화된 관정인 D-28과 D-124 관정에서의 Ca^{2+} 과 Mg^{2+} 농도는 높은 값으로 나타났으며, 염수화되지 않은 Susan 3과 D-282 관정에서의 Ca^{2+} 과 Mg^{2+} 의 농도는 비교적 낮게 나타났다.

해수 중의 Mg^{2+} 의 농도는 Ca^{2+} 의 3배 이상 높게 나타나는데 조사지역 해수에서의 Mg^{2+}/Ca^{2+} 비는 4.758로 일반적인 해수의 화학성분조성의 농도를 통해서 본 5.488보다는 비교적 낮게 나타났고, D-28관정과 D-124관정에서는 비교적 높은 10 이상의 수치를 보였으며 Susan 3관정과 D-282관정에서는 3.075~6.851의 Mg^{2+}/Ca^{2+} 비를 보였다.

비보존성 물질인 Ca^{2+} 과 Mg^{2+} 이 D-28과 D-124 관정에서 높게 나타난 이유는 해수의 영향이라고 추정할 수 있겠는데, 이는 Ca^{2+} 과 Mg^{2+} 이 해수

중에 다량 용존되어 있기 때문이다.

Table 8. Calcium ion and magnesium ion concentration at studied area of each well. (unit : mg/l)

Item	Well No.	1998				1999			
		May	June	July	Aug	May	June	July	Aug
Ca ²⁺	D-28	-	5.295	4.405	6.265	5.912	5.244	6.051	5.809
	D-124	13.650	11.484	15.948	7.408	8.301	8.506	5.312	4.897
	Susan3	2.051	1.134	0.955	2.189	3.042	3.378	3.443	3.661
	D-282	3.075	1.533	1.433	1.579	2.765	5.177	2.346	2.570
Mg ²⁺	D-28	-	43.151	37.666	42.738	36.750	45.985	49.473	54.762
	D-124	45.118	56.140	49.293	42.285	55.102	61.871	19.775	31.355
	Susan3	6.426	4.660	4.946	6.981	8.566	8.423	9.686	8.431
	D-282	6.083	3.562	3.512	5.145	8.851	9.552	8.816	7.765

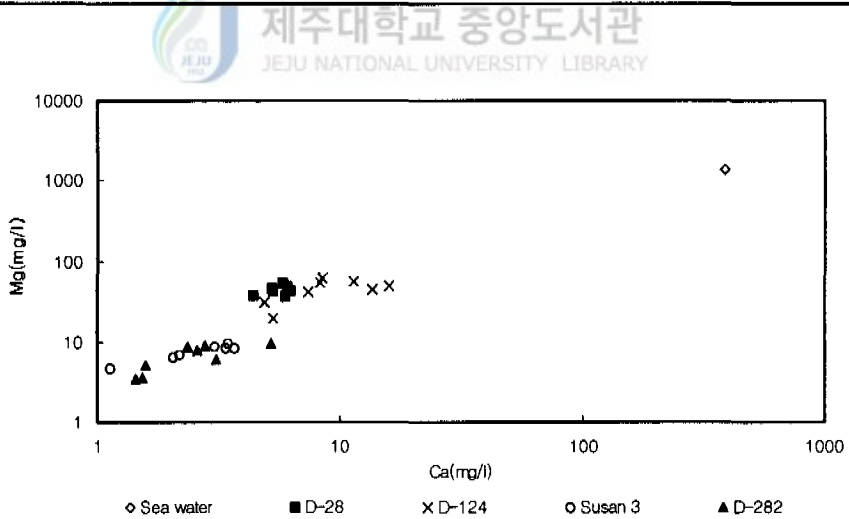


Fig. 5 Bivariate plots of calcium ion and magnesium ion for each wells.

2. 조석에 따른 지하수 수질변화

1998년과 1999년 5월부터 8월까지의 각 관정에서의 조석에 따른 지하수 수질변화를 Fig. 6~9에 나타내었고 그 분석결과를 Table 9~12에 나타내었다.

1998년에는 조석에 따라 실험을 행한 것이 아니므로 한달에 1회 실험을 행하였기 때문에 고조시와 저조시를 비교하여 나타낼 수는 없었으나 1999년에는 연안으로 유입되는 해수가 지하수에 영향을 줄 때까지의 시간을 고려하여 조석에 따른 수질변화를 나타내었다.

1) D-28 관정의 수질변화

1998년 5월부터 8월까지의 조석에 따른 수질 변화는 Fig. 6(a)에 1999년의 분석결과는 Fig. 6(b)에 나타내었고 Table 9에 그 분석 결과를 나타내었다.

D-28관정에서 1998년도 5월에서 8월까지 매월 1회 분석한 결과를 조석과 함께 Fig. 6(a)에 나타내었는데 1998년에 행한 실험에는 해수로부터 지하수가 영향을 받을 때까지의 시간을 고려하지 않았기 때문에 조석의 고·저조시와 Cl^- , SO_4^{2-} 등 해수의 주요구성이온의 농도를 비교하여 볼 수는 없겠으나 실험결과 영향을 받을 때까지의 시간이 관정에 따라 차이는 있으나 2시간 정도임을 고려하여 살펴보면, D-28관정의 Cl^- 과 SO_4^{2-} 그리고 Na^+ 의 농도를 보았을 때 조석에 영향을 크게 받고 있음을 알 수가 있다.

1999년(Fig. 6(b))의 조석에 따른 주요이온성분변화를 관측한 결과는 Cl^- 과 Na^+ , SO_4^{2-} 농도는 조석과의 상관관계가 조사대상관정 중에서 가장 높게 나타났다. 그리고 육상기원물질이라 할 수 있는 NO_3^- 의 함량은 Fig. 6(a)에서는 거의 변화가 없었으나 Fig. 6(b)에서는 주요이온들과 다른 역의 상관성을 보였다.

분석결과의 평균값을 나타낸 Table 9를 보면 1998년의 주요이온구성성분농도가 Cl^- 농도를 포함하여 전체적으로 1999년도보다 높게 나타났고 월별로 보면 5월과 8월의 성분농도는 비슷한데 반해 6월과 7월은 농도에 변화를 보여 1999년의 농도가 낮게 나타났는데 이러한 분석결과의 원인은 1999년에 강수량이 1998년보다 월등히 많기 때문인 것으로 추정된다. 1998

년의 5월부터 8월까지 4개월 동안의 총강수량은 1,050.9mm인데 반해 1999년의 총강수량은 1,365.1mm로 300mm 이상의 차이를 보이고 있어 1998년과 1999년의 성분함량의 차이는 강수량에 의한 것으로 사료된다.

따라서 Fig. 6(a), (b)와 Table 9에 의한 D-28관정의 조석에 따른 수질변화의 분석결과로부터 D-28관정은 조석에 매우 큰 영향을 받는 관정으로 나타났고 해수와 화학적 조성성분비비교에서 관정내 지하수수질분석의 결과도 해수와 유사한 화학적 성분비를 보이는 것으로 나타나 D-28관정의 염수화는 해수의 침입에 의한 것으로 사료되어 진다.

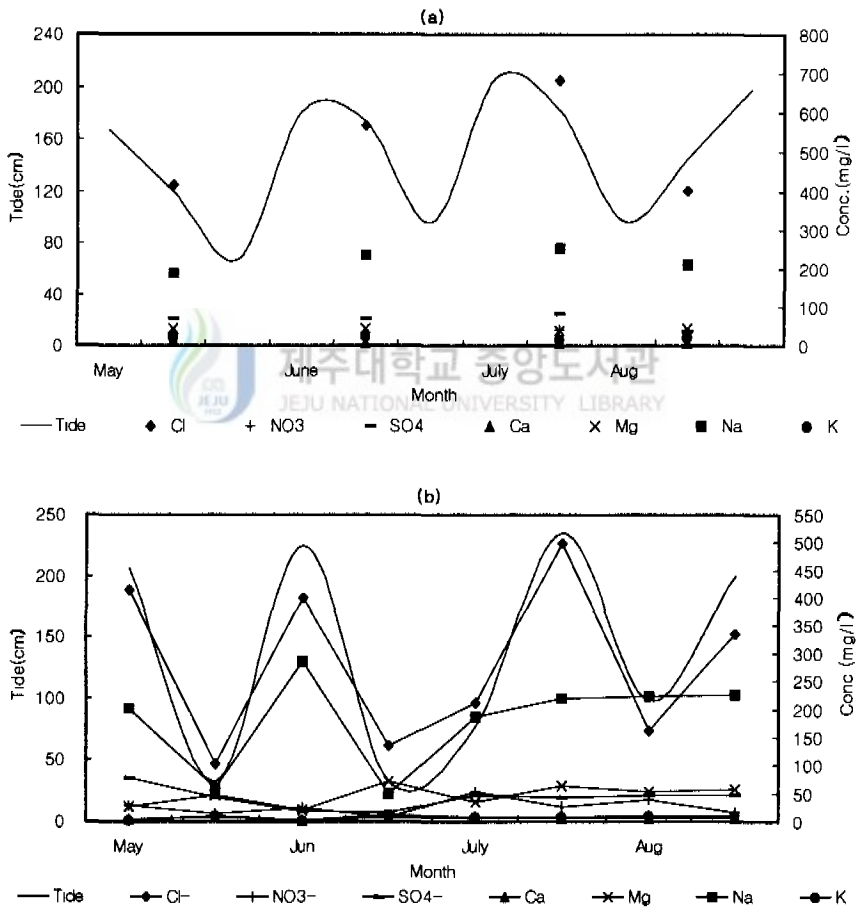


Fig. 6 Variation of major ions in accordance with tidal levels at D-28(in 1998(a), in 1999(b)).

Table 9. Average values of analyzed results at studied well D-28 in 1998, 1999. (unit : mg/l)

Year	1998				1999			
Month	May	June	July	Aug	May	June	July	Aug
Item								
Cl	415.76	538.40	684.05	400.26	258.60	267.90	354.62	248.07
NO ₃	29.89	32.2	41.25	23.84	21.28	17.19	39.80	28.07
SO ₄ ⁻	69.54	70.9	81.98	38.27	60.06	17.73	44.99	47.90
Ca ²⁺	10.81	5.29	4.40	6.27	5.91	5.24	6.05	5.81
Mg ²⁺	42.93	43.15	37.67	42.74	36.75	45.99	49.47	54.76
Na ⁺	187.8	235.7	251.5	209.8	130.1	167.2	203.1	225.2
K ⁺	19.56	23.64	13.90	19.13	15.78	5.85	7.01	10.95

2) D-124 관정의 수질변화

D-124 관정에서의 1998년 5월부터 8월까지의 조석에 따른 수질 변화는 Fig. 7(a)에 1999년의 분석결과는 Fig. 7(b)에 나타내었고 Table 10에 분석 결과를 나타내었다.

해안과의 거리가 2,750m 떨어져 있는 D-124 관정에서의 조석에 따른 주요구성성분농도를 보면, 1998년의 분석결과를 나타낸 Fig. 7(a)에서 Cl 과 Na⁺의 농도는 D-28관정의 1998년의 분석결과에서와 같이 높게 나타났으나 SO₄²⁻ 농도는 낮게 나타났다. 그리고 1999년의 분석결과를 나타낸 Fig. 7(b)를 보면 해수의 주요구성성분인 Cl, Na⁺, SO₄²⁻농도와 조석과의 상관관계가 D-28관정에서와 같이 정의 상관관계로 상관성이 높은 것으로 나타났으며, NO₃의 함량은 주요이온들과는 조석에 따른 역의 상관성을 보였다.

D-124관정에서의 수질변화의 형태가 조석에 따른다는 것은 D-28관정과 동일하지만 NO₃⁻의 농도가 D-124관정에서는 높게 나타나고 있다는 점이 다른데 이는 D-28관정과 염수화 원인은 동일하지만 기타 주변환경에 따른 차이로 인한 것으로 추정된다. SO₄²⁻농도는 Land(1987)에 의하면 심층수일 수록 SO₄²⁻농도가 높게 나타난다고 하였으므로 수심 40m에서 채수한 D-28관정보다 50m에서 채수한 D-124관정에서 높은 농도의 SO₄²⁻이 분석되는 것이 타당하며, NO₃⁻농도가 높은 것은 하수 등의 유입에 의한 현상으로 사

료된다.

주요이온성분의 분석결과를 평균값으로 하여 나타낸 Table 10을 보면 Cl 농도는 강수량이 적었던 1998년에 높게 나타났고 이외의 다른 이온의 분석결과는 D-28관정에서와 유사하게 나타났으나 Na⁺은 1999년에 더 높게 나타났다. 이러한 결과는 염수화의 원인이 해수침입일 경우에 Cl 과 Na⁺이 비례하여 함께 증가한다는 여러 연구결과(Howard and other, 1980;Benerd and other, 1993;고, 1997;김, 1998 등)와 다른 것으로 이 결과에 대해서는 문헌고찰과 실험 등에 의한 연구가 있어야 할 것으로 사료된다.

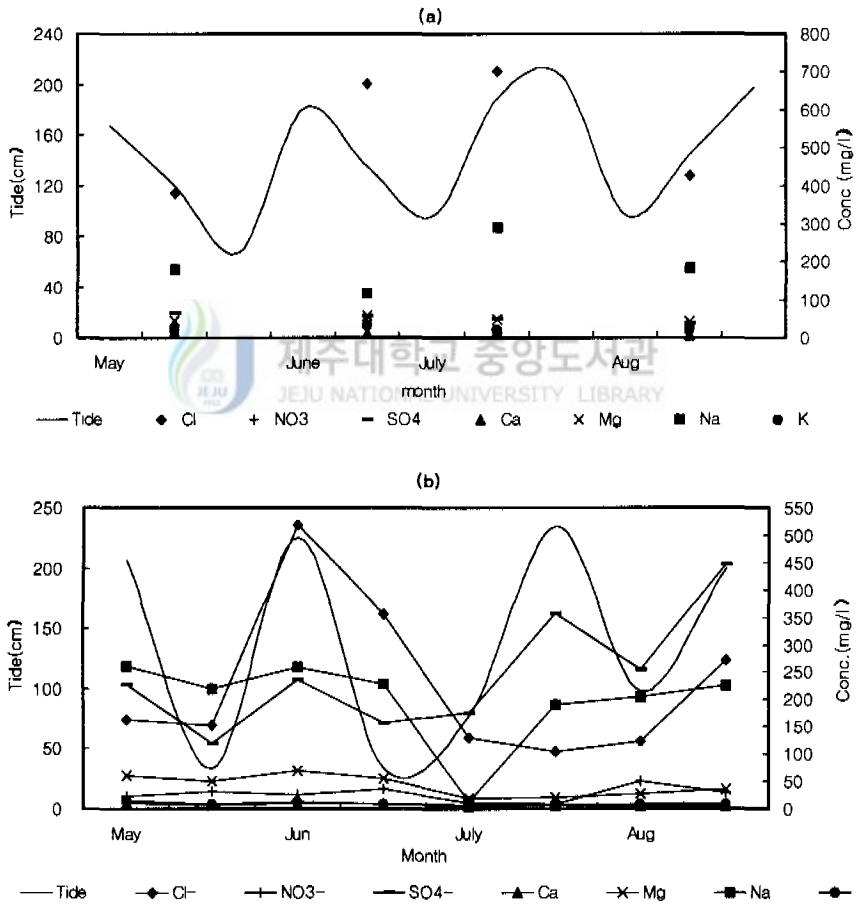


Fig. 7 Variation of major ions in accordance with tidal levels at D-124 in 1998, 1999.

Table 10. Average values of analyzed results at studied well D-124 in 1998, 1999. (unit : mg/l)

Year Month Item	1998				1999			
	May	June	July	Aug	May	June	July	Aug
Cl	381.43	667.9	700.6	426.2	157.00	436.87	117.72	197.54
NO ₃	30.29	36.30	11.30	23.36	28.08	29.77	10.10	39.67
SO ₄ ⁻	65.65	58.20	51.45	37.47	173.29	196.08	516.33	501.57
Ca ²⁺	13.65	11.48	15.95	7.41	8.30	8.51	5.31	4.90
Mg ²⁺	45.12	56.14	49.29	42.28	55.10	61.87	19.78	31.36
Na ⁺	179.5	115.9	291.2	182.5	240.5	242.9	101.4	216.2
K ⁺	20.76	33.22	20.93	19.18	11.79	10.77	5.89	7.95

3) Susan 3 관정의 수질변화

조석에 따른 Susan 3 관정에서의 지하수수질변화를 1998년 6월부터 8월까지를 Fig. 8(a)에 1999년 5월부터 8월까지를 Fig. 8(b)에 나타내었으며, Table 11에 분석결과를 나타내었다.

1998년 5월에는 Susan 3관정에서 채수하지 않았기 때문에 6월부터 8월까지의 분석결과를 Fig. 8(a)에 나타내었다. Susan 3관정에서의 Cl⁻은 조석에 따른 변화를 보이며 Table 11에서 나타낸 바와 같이 19.05~27.21mg/l로 낮은 농도를 보였다. 그러나 1999년 이 관정에서의 Cl⁻농도는 74.25~104.61mg/l로 크게 증가하였으며 Cl 뿐만 아니라 다른 이온의 농도도 크게 증가하여 나타났는데 이러한 분석결과를 강수량 부족에 따른 양수량의 증가로 인한 일시적인 현상으로 해석해볼 수 있겠다. 1998년 1월부터 4월까지의 총강수량을 1999년과 비교해 보면 약 320mm 정도의 차이를 보였다. 또한 1999년의 분석결과인 Table 11을 보면 Susan 3관정의 Cl⁻농도가 고농도로 나타난 시기가 건기인 5, 6월에 해당되고 강수량이 크게 증가한 7월 이후에는 Cl⁻농도가 낮아지고 있는 것으로 보아 가뭄이 계속되는 동안 Susan 3관정에서는 과잉양수로 인해 지하수 함양량이 크게 줄어들어 해수에 의한 염수화가 일시적으로 나타난 것으로 보인다.

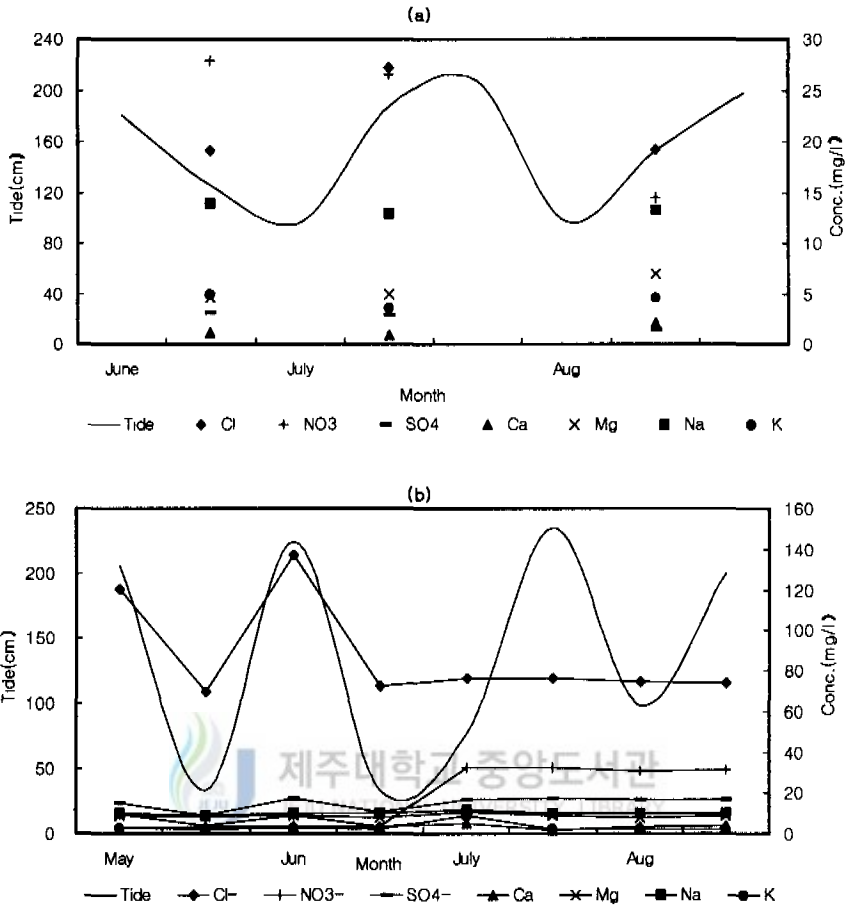


Fig. 8 Variation of major ions in accordance with tidal levels at Susan 3 in 1998, 1999.

Table 11. Average values of analyzed results at studied well Susan 3 in 1998, 1999. (unit : mg/l)

Year Month Item	1998				1999			
	May	June	July	Aug	May	June	July	Aug
Cl ⁻	-	19.05	27.21	19.18	94.66	104.61	76.30	74.25
NO ₃ ⁻	-	27.90	26.55	14.52	6.69	6.38	32.43	31.10
SO ₄ ⁻	-	3.20	2.97	1.48	12.21	14.05	17.06	16.93
Ca ²⁺	-	1.13	0.95	2.19	3.04	3.38	3.44	3.66
Mg ²⁺	-	4.66	4.96	6.98	8.57	8.42	9.69	8.43
Na ⁺	-	14.0	12.9	13.2	9.5	10.0	11.0	9.9
K ⁺	-	4.99	3.59	4.57	2.61	2.59	5.49	2.20

4) D-282 관정의 수질변화

D-282 관정에서의 조석에 따른 주요이온성분변화를 Fig. 9에 나타내었는데 1998년 5월부터 8월까지의 성분변화는 Fig. 9(a)에 나타내었고 1999년 5월부터 8월까지의 성분변화는 Fig. 9(b)에 나타내었다. 그리고 이러한 성분 분석의 결과를 Table 12에 나타내었다.

1998년 D-282관정에서의 주요이온성분변화를 보면 Cl⁻농도에 비해 Na⁺의 농도가 높게 나타났으며 NO₃의 농도는 타관정에 비하여 비교적 낮게 나타났음을 Fig. 9(a)에서 볼 수 있다. 1999년의 주요이온성분변화를 나타낸 Fig. 9(b)에서도 Cl⁻농도에 비해 Na⁺의 농도가 높게 나타났고 NO₃⁻의 농도는 낮게 나타나고 있었으나 SO₄²⁻농도는 7, 8월에 매우 높게 나타났다. 그리고 Cl⁻과 Na⁺농도의 변화도 1998년과 1999년 6월까지 조석에 따른 변화를 보였으나 7, 8월에는 매우 다른 형태를 나타냈다. 특히 Cl⁻과 Na⁺농도는 1999년 5, 6월에 비해 낮아졌는데 이는 집중된 강수에 의한 것으로 사료되어 진다. SO₄²⁻농도는 심층수에서 높게 나타나거나(Land, 1987) 암석의 용해에 의해서 증가되는데 D-282관정은 현재 사용중인 관정으로 펌프에 의하여 양수되며 기반암은 험무암류로 이루어져 있으므로 이 두가지의 경우 모두에 해당되지 않는다. 따라서 D-282관정에서의 SO₄²⁻농도의 증가에 대해서는 문헌고찰과 실험 등으로 좀더 연구가 이루어져야 할 것으로 사료

되어 진다.

따라서 D-282 관정은 Fig. 9의 (a)와 (b)로부터 조사관정 중 가장 Cl 농도가 낮은 관정으로 고·저조시의 농도변화는 보이지만 12mg/l 미만의 낮은 농도를 나타내며, Na⁺ 농도가 Cl 농도에 비해 높은 이유는 NO₃⁻ 농도가 높게 나타난 것으로 보아 인위적인 오염에 의한 것으로 추정된다.

이와같은 분석결과로부터 D-282관정은 염수화가 없는 관정으로 나타났으나 NO₃ 농도의 함량변화를 보았을 때 지하수함양시에 비료 등에 의한 인위적인 오염이 발생할 수 있는 관정으로 사료되어 진다.

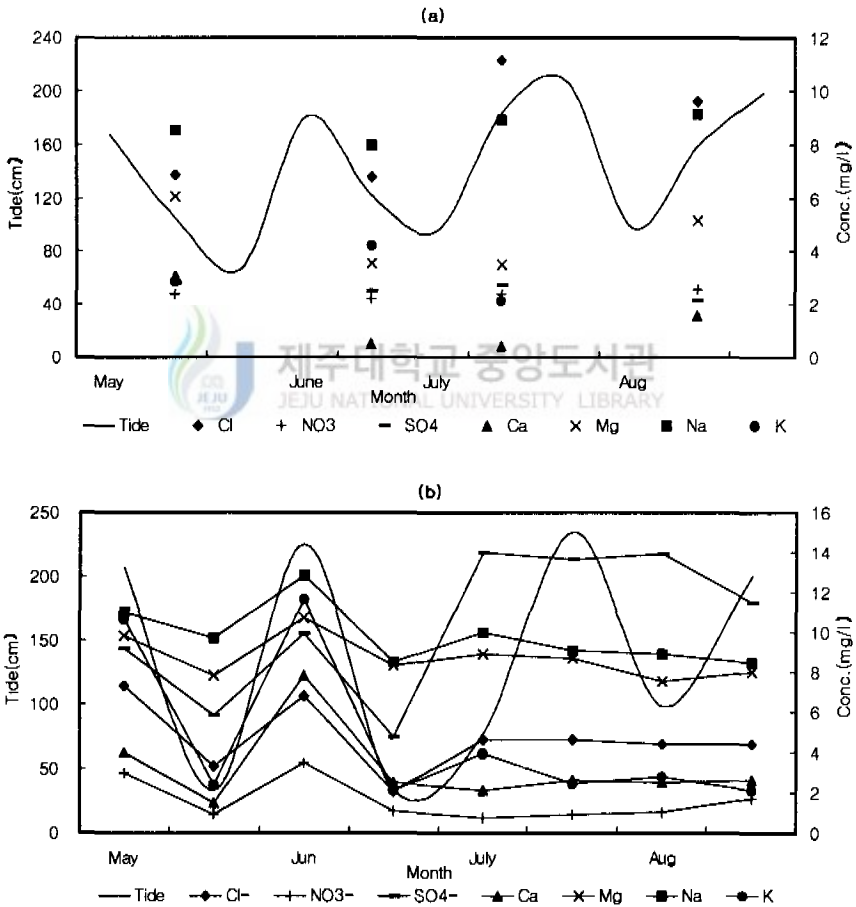


Fig. 9 Variation of major ions in accordance with tidal levels at D-282 in 1998, 1999.

Table 12. Average values of analyzed results at studied well D-282 in 1998, 1999. (Unit : mg/l)

Year Month Item	1998				1999			
	May	June	July	Aug	May	June	July	Aug
Cl	6.87	6.79	11.15	9.59	5.30	4.45	4.62	4.41
NO ₃ ⁻	2.38	2.20	2.40	2.56	6.69	6.38	32.43	31.10
SO ₄	2.83	2.50	2.72	2.17	12.21	14.05	17.06	16.93
Ca ²⁺	3.08	0.53	0.43	1.58	2.77	5.18	2.35	2.57
Mg ²⁺	6.08	3.56	3.51	5.15	8.85	9.55	8.82	7.77
Na ⁺	8.6	8.0	8.9	9.2	10.4	10.7	9.5	8.7
K ⁺	2.86	4.21	2.14	-	6.55	6.89	9.54	8.66

3. Piper diagram을 이용한 지하수 수질특성

1998년과 1999년의 5월에서 8월까지의 각 관정들간의 이온조성비를 piper diagram으로 하여 Fig. 10(a)~(d)에 나타내었다.

1998년과 1999년 5월의 실험결과를 Fig. 10(a)에 piper diagram으로 나타내었다. 건기인 5월은 지하수의 양수량이 급격히 증가하는 시기이므로 D-282관정을 제외한 3개의 관정에 담수와 해수의 혼합특성을 나타내고 있다. 해안으로부터 5.4km 떨어져 있는 Susan 3관정은 5월의 분석결과 1회를 제외하고 높은 Cl 농도를 보이면서 해수와의 혼합특성을 보이고 있었는데, 이는 가뭄으로 인한 일시적인 현상으로 추정된다.

Fig. 10(b)는 1998년과 1999년의 6월의 분석결과를 piper diagram으로 나타낸 것이다. 5월의 결과와 동일한 형태로 D-282관정을 제외한 3개의 관정에서 해수와의 혼합형태를 보였는데, D-28관정과 D-124관정은 현재 폐공 관리되고 있는 관정임에도 불구하고 해수와의 혼합특성을 나타냈으며, Susan 3관정은 계속되는 가뭄으로 인한 과잉양수로 인한 일시적인 염수화로 추정된다.

그러므로 Fig. 10(a), (b)로 보아 D-28과 D-124 관정은 piper diagram의 분석 결과에서 담수와 해수의 단순한 혼합특성이 일어날 때의 형태를 나타내고 있었다.

Fig. 10(c)는 1998년과 1999년의 7월의 분석결과를 나타낸 것으로 앞서 Fig. 10(a)와 (b)의 piper diagram과는 조금 다른 형태를 보이고 있다.

D-28관정과 D-124관정은 5, 6월과 같은 형태인 염수와의 혼합형태를 나타냈고, Susan 3관정은 해수가 시추공을 통해 유입되었을 때의 단순한 혼합형태를 나타냈다.

Fig. 10(d)는 1998년과 1999년 8월의 분석결과를 piper diagram에 나타낸 것이다. 4개의 관정 모두가 앞의 7월의 분석결과와 동일한 형태를 나타내고 있으며 Susan 3관정은 충분한 강수의 함양으로 인해 해수와의 혼합특성은 보이지 않고 단순한 시추공내로의 해수유입의 형태를 나타냈다.

7월과 8월의 많은 강수에도 불구하고 Susan 3관정에 일시적으로 나타난 것으로 추정되는 해수와의 혼합특성형태와 유입형태를 계속하여 나타내는 것으로 보아 이 관정에 대한 염수화 여부의 지속적인 관측이 필요할 것으로 사료된다.



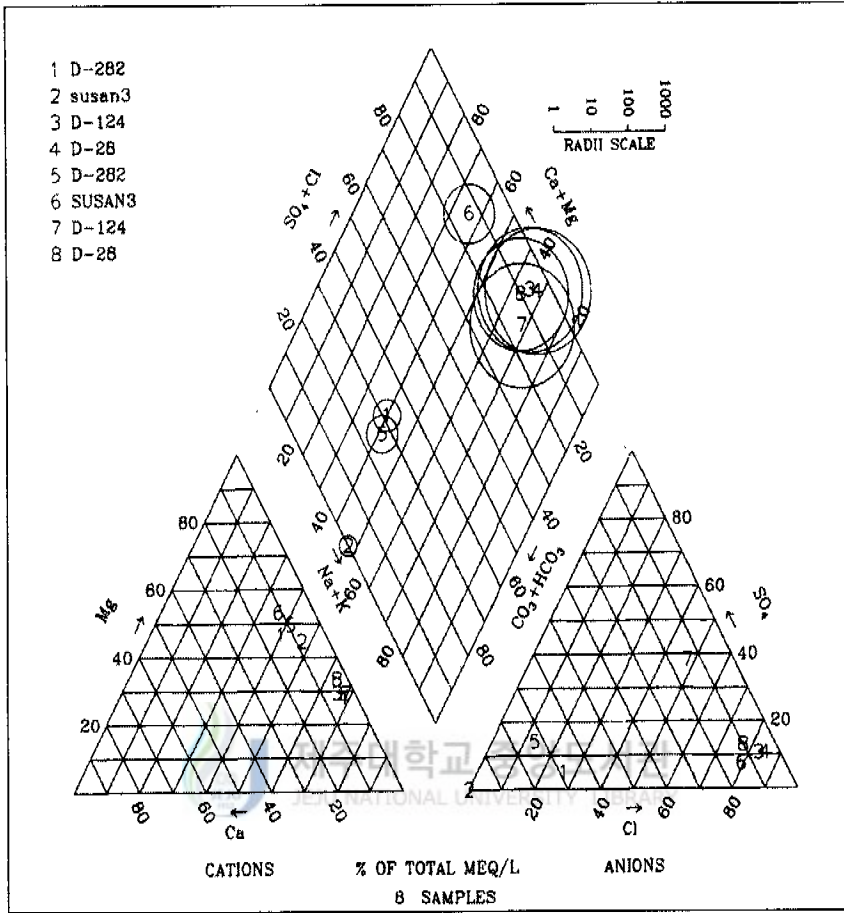


Fig. 10(a) Piper diagram of chemical composition of the study area in May, 1998 and 1999.

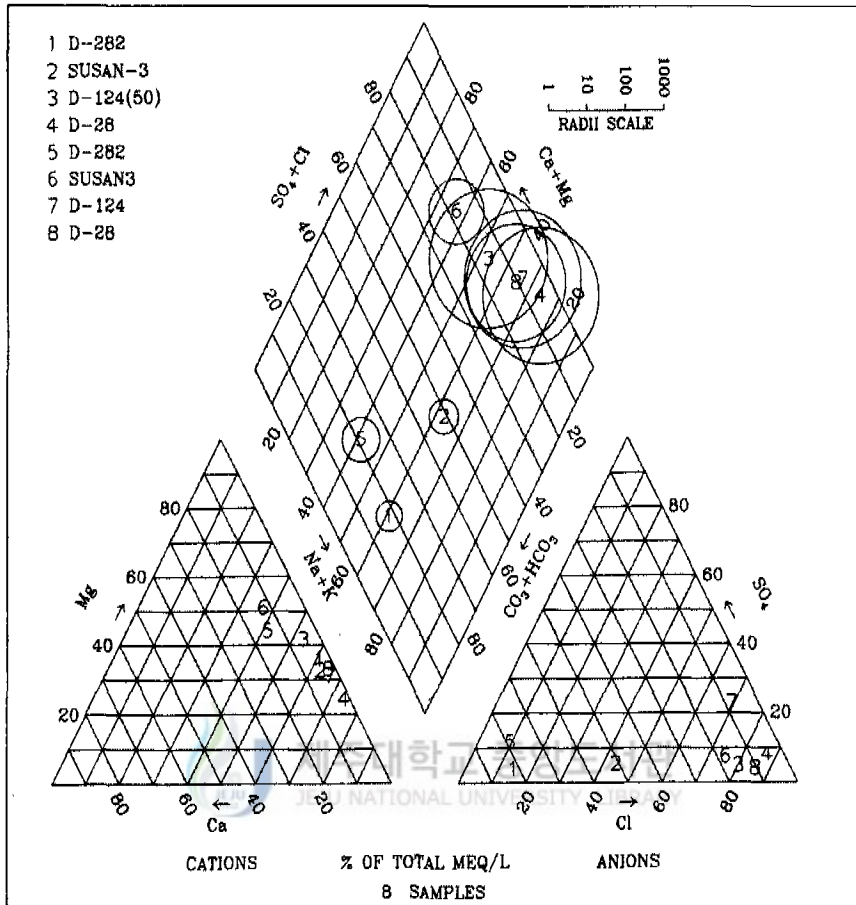


Fig. 10(b) Piper diagram of chemical composition of the study area in June, 1998 and 1999.

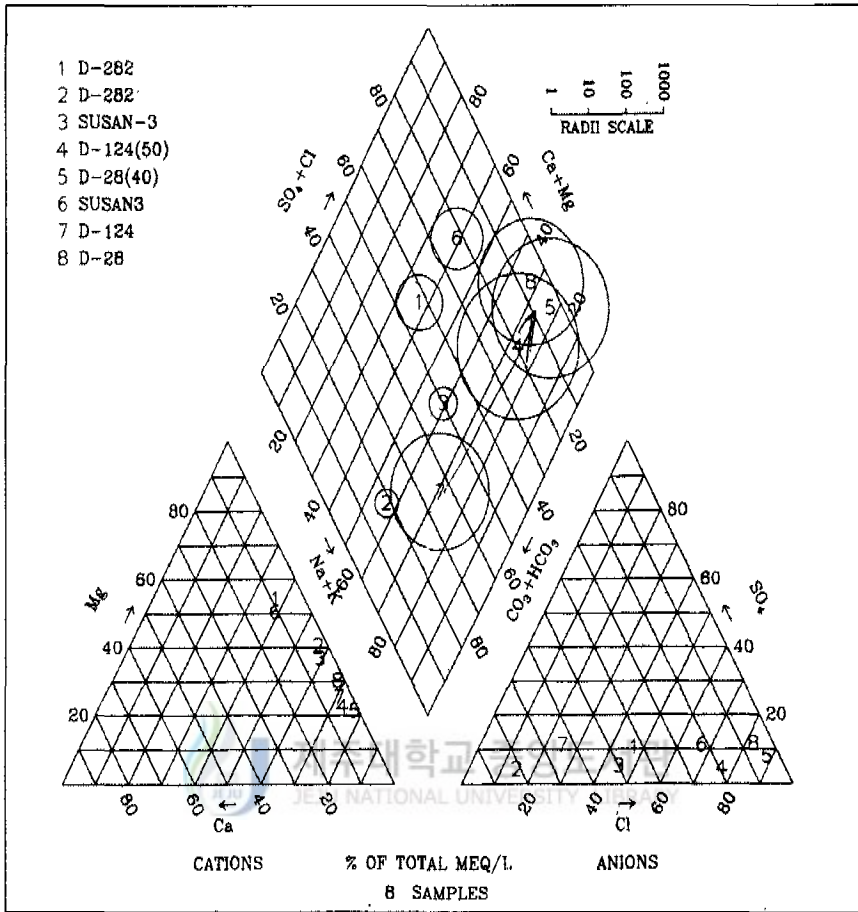


Fig. 10(c) Piper diagram of chemical composition of the study area in July, 1998 and 1999.

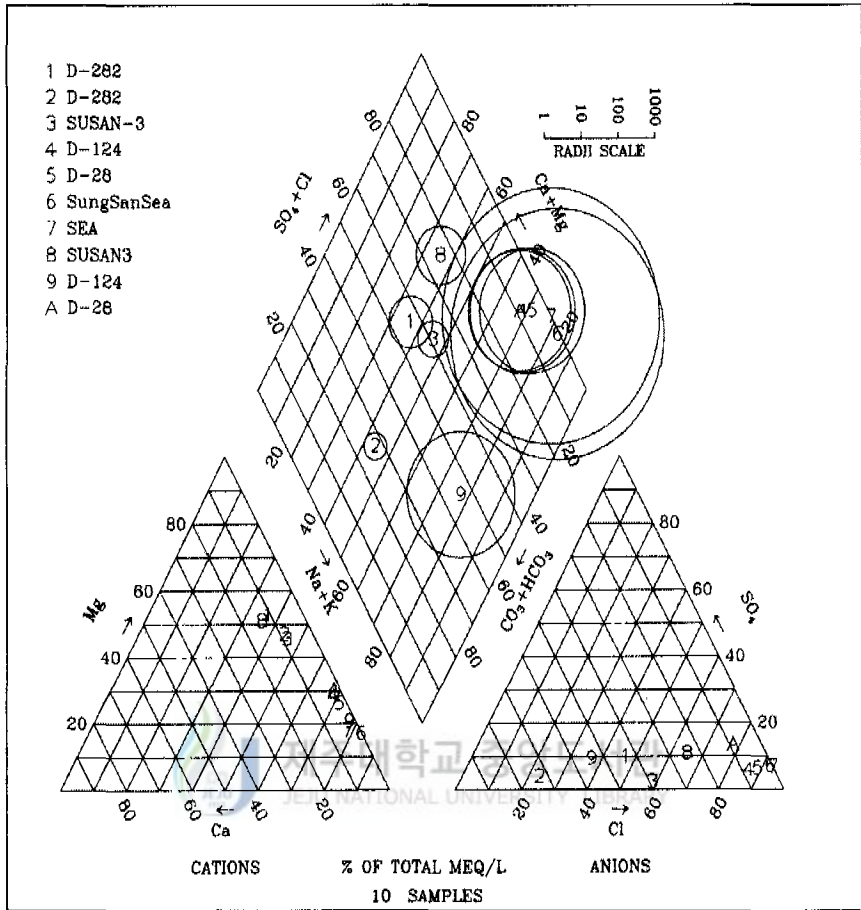


Fig. 10(d) Piper diagram of chemical composition of the study area in August, 1998 and 1999.

4. Tritium(³H) 함량의 분석

조사관정인 D-28, D-124, Susan 3 그리고 D-282관정에서 1999년 8월과 12월에 채수한 지하수와 조사지역인 성산해수 그리고 강수에서의 ³H 함량과 Cl 농도와의 관계를 Fig. 11에 나타내었다.

분석시료의 8월의 ³H 함량을 살펴보면 강수는 12.10TU, 해수는 3.80TU

로 나타났고 각 관정의 평균 ^3H 함량은 D-28 관정은 4.80TU, D-124 관정은 5.00TU, Susan 3 관정은 6.85TU, 그리고 D-282는 7.30TU로 나타났다.

그리고 같은 해 12월의 분석결과는 D-28 관정은 4.8TU, D-124관정은 4.9TU, Susan 3관정은 5.9TU 그리고 D-282관정은 6.0TU로 D-28관정을 제외한 나머지 관정에서 12월에 ^3H 의 함량이 낮게 나타났다. 이렇게 8월보다 12월에 ^3H 의 함량이 낮게 나타나는 이유는 계절적인 영향으로서 여름보다 겨울에 ^3H 의 함량이 낮아지기 때문인 것으로 사료된다(김종훈, 1990).

해안에서 먼 거리에 위치한 지하수 관정일수록 ^3H 함량이 높게 측정되었고 해안에서 가까운 지하수 관정일수록 ^3H 함량이 낮게 측정되었고, Cl 농도는 ^3H 의 함량에 대해서는 역의 상관성을 나타냈으며 해안에서부터의 거리로부터는 정의 상관성을 나타내었다.

조석에 따른 ^3H 함량 분석결과에서는 고조시에 ^3H 의 함량이 낮아지고 저조시에는 높아졌으며 염수화된 관정인 D-28과 D-124관정에서 조석에 따른 ^3H 함량의 변화범위가 크게 나타났고 염수화된 두 관정 중에서도 염수화의 진행정도가 심한 D-28관정에서의 변화범위가 더욱 크게 나타났다.

D-28관정과 D-124관정에서의 염수화는 방사능 동위원소 ^3H 의 함량분석을 이용한 방법에서도 앞서 이온조성비에 따른 방법과 piper diagram을 이용한 방법을 통하여 해석한 결과와 동일한 원인인 해수의 침입으로 인한 것으로 사료되었다. 그리고 Susan 3관정에서의 ^3H 의 변화도 크지 않고 함량도 높게 분석되어 8월의 분석결과만으로는 건기의 5, 6월동안의 Cl 농도의 증가로 인한 일시적인 염수화 현상의 원인이 해수의 침입이라고 판단하기는 어려우므로 5, 6월동안의 ^3H 의 함량을 분석해 볼 필요가 있을 것으로 사료되어 진다.

조사관정의 지하수 및 해수의 ^3H 함량과 Cl 농도와의 관계를 나타낸 Fig. 11로부터 해수와 지하수중의 ^3H 의 함량과의 일정한 관계 즉, ^3H 의 함량이 보다 낮은 해수가 일정량의 ^3H 의 함유량을 보유하고 있는 지하수와 혼합되었을 때 수중의 ^3H 함량이 낮아지는 것을 확인할 수 있었다.

이러한 분석결과로부터 지하수 관정내 해수침입시 ^3H 의 함량변화가 뚜렷한 것으로 보아 ^3H 의 함량변화를 이용한 지하수의 염수화의 추세를 관찰할 수 있을 것으로 사료된다. 그러므로 염수화의 우려가 있는 지하수 관정에 대해 ^3H 함량을 정기적으로 장기간 분석하여 관리함으로써 지하수를 염수화로부터 더욱 효율적으로 관리할 수 있을 것으로 사료되어 진다.

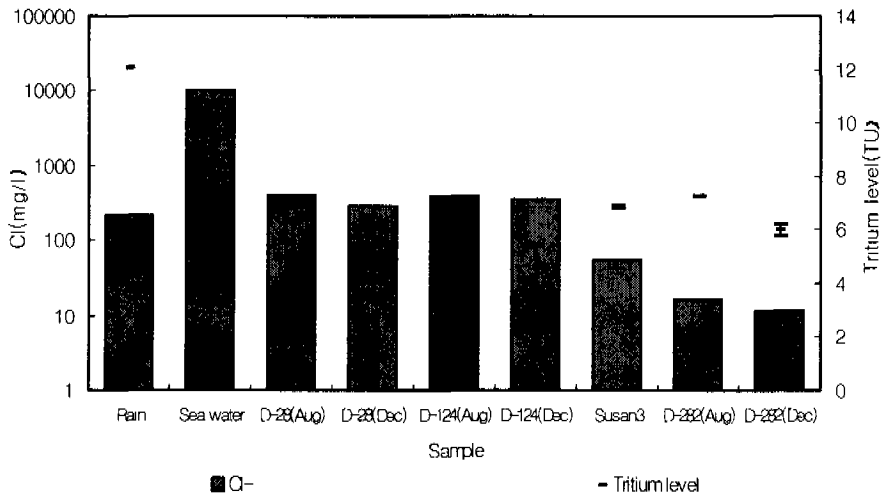


Fig. 11 Variation of tritium level and chloride ion concentration accordance with each well in Aug, Dec 1999.



V. 결론

제주도 동부지역 지하수 염수화의 원인에 대한 연구를 하고자 주요이온 성분비를 이용한 방법, piper diagram을 이용한 방법 그리고 Tritium(^3H)을 이용한 방법을 사용하여 주요이온성분분석과 환경동위원소 ^3H 의 함량 분석을 1998년과 1999년 5월부터 8월까지 분석한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 제주도 동부지역 지하수에 대한 각 주요이온들과 Cl⁻과의 상관관계를 보면 지하수의 성분조성비가 연안해수의 것과 유사한 경향을 나타내고 있었다.

2. piper diagram을 이용한 결과 해수와 담수가 혼합되었을 때 나타나는 특징이 나타나는 것으로 보아 이들 지하수가 해수와 혼합되었음을 추정할 수 있었다. 따라서 주요이온성분비의 분석과 piper diagram을 이용한 분석의 결과로부터 본 논문의 연구지역인 제주도 동부지역의 지하수의 염수화는 해수침입에 의한 것으로 추정할 수 있었다.

3. 조석에 따른 Susan 3 관정의 주요이온의 변화를 보면 건기인 5, 6월에 강수량 부족과 과잉양수에 따른 일시적인 Cl⁻ 농도의 증가가 나타났으나 많은 양의 비가 내린 후인 8월에도 Cl⁻ 농도의 감소가 크게 나타나지 않고 있어 Susan 3관정에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다. D-282 관정의 Cl⁻ 농도의 변화는 타관정에 비해 소폭이었으나 Cl⁻ 농도가 높은 관정의 Na⁺ 농도에 비해 매우 높게 나타났다. 그러나 이는 NO₃⁻이 높은 것으로 보아 인위적인 오염에 의한 것으로 추정할 수 있겠으나 압염에 의한 오염의 가능성도 의신해 볼 수도 있는 바 장기적이고 지속적인 관측이 필요하겠다.

4. ^3H 함량은 연안과의 거리가 먼 관정인 Susan 3관정과 D-282관정에서는 높게 나타났고 염수화가 진행중인 관정인 D-28과 D-124관정은 ^3H 함량이 낮게 나타났다. 그러나 조사 관정에서의 Cl⁻ 농도는 ^3H 함량과 반대로 높게 나타났다. 8월과 12월의 조사관정에서의 ^3H 함량의 분석결과 Cl⁻ 농도가 높게 나타난 관정인 D-28과 D-124관정의 경우 Cl⁻ 농도가 높은 고조시에 ^3H 함량이 낮아지고 이와 반대로 Cl⁻ 농도가 낮은 저조시에는 ^3H 함량이 높아지는 것으로 나타났다. 그러므로 조석에 따른 염수화가 진행중인

관정의 ^3H 함량 분석의 결과로 보아 D-28과 D-124 관정의 지하수 염수화는 자연적인 염지하수나 암염의 용해에 의한 영향이라기보다 해수침입의 영향으로 인한 것임을 재차 확인할 수 있었다.

5. ^3H 을 이용한 지하수 염수화에 대한 연구 및 모든 지하수 연구에는 지하수는 물론 강수 및 연안해수에 포함된 ^3H 에 관한 더욱더 오랜 기간동안의 축적된 자료가 필요하다.

VI. 참고문헌

- 고기원 외 5인, 1993, 제주도 동부지역의 지하지질구조와 지하수위 변동 및 수질특성에 관한 연구, 제주도보건환경연구원보 제3권
- 고기원, 1997, 제주도 지하수 보존특성과 서귀포층의 수문지질학적 관련성, 박사학위논문
- 김경훈, 1998, 제주도 동부지역의 지하수 염수화에 대한 이화학적 특성, 석사학위논문
- 김남형, 오윤근 공저, 1997, 신판 지하수조사법, 동화기술
- 김성홍 외 8인, 1992, 제주도 지하수의 염분변화에 대한 고찰, 제주도보건환경연구원보 제3권
- 농어촌진흥공사, 1996, 제주도지하수개발보고서
- 대한지하수환경학회, 1994, 제주도 지하수자원의 환경학적 보전과 개발
- 박병권, 양재삼 공저, 1992, 일반해양학, 정문출판사
- 송영철 외 9인, 1997, 제주 지하수의 수질특성, 제주도보건환경연구원보 제7권
- 정창호 외 4인, 1985, 동위원소를 이용한 제주지역 수자원에 관한 연구, Cheju App. Rad. Res. Inst. Ann. Report, Vol.1
- 제주도, 1997, 환경지표설정
- 제주도, 1999, 환경백서
- 지하수개발과 환경대책 총기술 편집위원회, 1996, 지하수개발과 환경대책총기술, 도서출판 과학기술
- 한정상, 1986, 지하수학개론, 박영사
- 한정상, 1994, 국내지하수의 문제점과 현행 지하수법 개정의 당위성
- 허소림 외 2인, 1997, 제주시 자연수중의 Tritium 함량과 수질특성과의 관계, Cheju App. Rad. Res. Inst. Ann. Report Vol.11, 36-38p.
- 北岡豪一 외 1인, 1984, トリチウム濃度から測定される六甲山系の水環境の速さについて, 일본지하수학회지 제 26권 제4호
- 廣城 吉成 외 5인, 1999, 帶水層中の地球化學的水質特性について

- Bernd C. Richter and Charles W. Bledsoe, 1993, *Geochemical Techniques for Identifying sources of ground-water salinization*
- David A. Cates 외 2인, 1996, The impact of ion exchange processes on subsurface brine transport as observed on piper diagrams, *Ground water* Vol.34, No.3, 532-544p.
- Francisco Padilla and Javier Cruz-Sanjulian, 1997, Modeling sea-water intrusion with open boundary conditions, *Ground water* Vol.35, No. 4, 704-712p.
- H. Nash and G. J. H. McCall, 1995, *Groundwater quality*, Chapman & Hall
- Jong Sung Ahn 외 2인, 1995, Sea water interaction into coastal aquifer in cheju island by isotope analysis, *Journal of korean groundwater association* Vol. 4 · 5
- K.W.F. Howard 외 1인, 1983, Major ion characterization of coastal saline groundwaters, *Groundwater*, Vol. 21, No. 4
- Nizar S. Abu-Jaber 외 2인, 1998, Use of solute and isotopic composition of groundwater to constrain the groundwater flow system of the Azraq area, Jordan, *ground water* Vol. 36, No. 2, 361-365p.
- N. Momoshima 외 3인, 1983, Recent environmental tritium levels in japan, *RADIOCHEM.RADIOANAL.LETTERS* 58(1)
- N. Momoshima 외 4인, 1986, Recent environmental tritium levels in japan-II coastal seawater and lake water, *J.Radioanal.NUCL.CHEM., letters* 104(3)
- McGraw-Hill, 1993, *McGraw-Hill encyclopedia of environmental science & engineering* third edition, McGraw-Hill Inc.
- P. Fritz 외 1인, 1980, *Handbook of environmental isotope geochemistry*, Vol. 1A
- Set Rose, 1993, Environmental tritium systematics of baseflow in Piedmont province watersheds, Georgia(USA), *Journal of Hydrology*, 143, 191-216p.

Soontak Lee, 1996, Groundwater movement in the volcanic island of cheju, korea

Toshio KAJI 외 3인, 1986, Variations of tritium concentration in lake waters, Memoirs of the faculty of science, Kyushu university, Ser. C, Vol.15(2)

Yoshimasa Takashima 외 2인, 1978, Tritium concentration of sea water around Kyushu, Japan, Memoirs of the faculty of science, Kyushu university, Ser. C, Vol.11(2)



감사의 말씀

본 논문이 완성되기까지 지속적인 지도와 편달을 해주신 오윤근 지도교수님께 깊은 감사를 드립니다. 아울러 바쁘신 가운데도 미흡한 논문을 세심하게 다듬어 주신 이용두 교수님과 조은일 교수님께도 진심으로 감사를 드리며, 항상 깊은 관심과 조언을 아끼지 않으셨던 허목 교수님, 허철구 교수님, 감상규 교수님, 이기호 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

업무에 바쁜 와중에서도 저의 논문과 학업에 조언을 아끼지 않았던 류성필, 김경훈 선배님과 여러 선배님들 그리고 늦은 시간까지 계속되는 실험임에도 불구하고 도움을 준 환경화학실험실의 후배님들에게도 고마움을 표합니다.

마지막으로 힘든 여건속에서도 성심으로 뒷바라지를 해주시고 저를 따뜻이 이해해 주신 부모님께 감사드립니다. 엄마, 아빠. 사랑해요!

저의 작은 짜증도 조용히 넘겨준 제 가족과 글로는 모두 적어내려가지 못하지만 늘 저를 염려해주신 분들과 함께 작은 보람을 같이 하고 싶습니다.

2000년 6월 장마가 시작되던 날에...