

제주도 동부지역 지하수의 염수화에 관한 연구

김 지 영 · 오 윤 근 · 류 성 필
제주대학교 환경공학과
(2000년 12월 6일 접수)

Study on The Salinization in Groundwater of the Eastern Area of Cheju Island

Ji-young Kim, Youn-Keun Oh and Seoug-Pil Ryu
Dept. of Environmental Engineering, Cheju National University
(Manuscript received 16 December, 2000)

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.

Key word : groundwater, salinization, Tritium(^3H), chloride ion

1. 서 론

1998년말 제주도내 지하수 이용량은 총 4,176개공(염지하수공 623개소 제외)으로 711천 $\text{m}^3/\text{일}$ 의 지하수가 개발되어 지하수 함양량 4,093천 $\text{m}^3/\text{일}$ 의 17%, 지하수 적정 개발량 1,689천 $\text{m}^3/\text{일}$ 의 42%에 달한다. 지역별로는 북제주군이 98년 12월 현재 657공으로 지하수 이용량의 33%인 232천 $\text{m}^3/\text{일}$, 남제주군이 1,641공으로 263천 $\text{m}^3/\text{일}$ (40%), 제주시 지역이 868공에 143천 $\text{m}^3/\text{일}$ (20%), 서귀포시지역이 1,010공에 73천 $\text{m}^3/\text{일}$ (10%)로 나타났다.¹²⁾

제주도내 지하수 관정 중 1998년도에 용도전환 조치된 관정은 없었으나 1999년도에 5개소를 포함하여 지금까지 모두 34개공이 용도전환 조치되었으며, 이중 염소 이온농도, 질산성 질소 농도가 먹는 물 수질기준(각각 250 mg/ℓ 이하, 10 mg/ℓ 이하)을 초과하여 농업용 등 다른 용도

로 전환된 지하수공은 94년 이후 98년까지 29개공에 이른다.⁶⁾ 일반적인 지하수 염분 증가 혹은 염수화의 잠재원인에 대한 연구방법을 보면 대부분 지하수의 수질변화 특성, 해수와의 주요 이온간의 상관관계를 비교한 방법 그리고 Piper diagram을 이용한 방법이 있으며 그 외에 염수화 원인의 조사방법으로는 방사능 동위원소를 이용한 방법이 있으나 국내에서 보다 국외에서 주로 사용되고 있다. 이러한 방법은 다년간의 분석결과와 누적효과를 통해 매우 신뢰도가 높은 것으로 증명되어진 방법으로 ^{18}O , ^2H , ^3H , ^{14}C 등의 동위원소가 주로 사용되고 있다. 동위원소를 이용한 국내의 지하수 연구는 1980년대 들어서 소수의 연구자에 의하여 동위원소 ^{18}O , ^2H 을 수리수문과 지하수 염수화 원인 규명에 이용하고 있다. 그러나 동위원소 ^3H 을 이용한 지하수 염수화의 원인규명에 관한 연

구는 미비한 실정이다.

따라서 본 연구는 제주도의 지하수 관정 중 염수화가 많이 진행된 제주도 동부지역의 지하수 관정에 대하여 염수화의 원인을 규명하기 위하여 주요 이온간의 상관관계를 비교하고 및 Piper diagram을 이용하였다. 아울러 최근 지하수 염수화의 원인규명에 이용되고 있는 방사능 동위원소인 ³H을 이용하여 염수화 원인을 규명하고자 하였다.

2. 이론적 배경

2.1: 지하수 염수화의 원인

여러 연구자들의 연구결과에 따르면 지하수 염수화 원인으로 크게 7가지를 들 수 있다.

자연적인 염지하수(Natural saline groundwater)에 의한 오염은 담수 대수층 아래에 존재하는 염지하수의 양수층에 의해 담수와 염지하수가 혼합되거나 염지하수가 존재하는 대수층까지 관정을 시추하여 염지하수가 위로 이동하여 발생한다. 암염의 용해(Halite solution brine)에 의한 오염은 층 혹은 돌형으로 지하에 존재하거나 퇴적된 형태로 존재하던 암염에 강수의 통과 등 용해될 수 있는 조건에서 생기는 고염수가 지하수와 혼합되면서 발생한다.¹⁹⁾

염수화의 가장 흔한 원인중의 하나인 해수 침입(Sea water intrusion)은 주로 인위적인 요인인 과잉 양수 등에 의하여 발생하지만 자연적인 요인으로서 비피압 해안 대수층이 얇은 지형적인 요인이 원인이 되어 발생한다.¹⁹⁾

농지에서의 유출(Agricultural effluents)은 지표에서의 작물재배, 가축 사육 등의 농작활동을 위해 살포된 비료가 지하수의 염도를 증가시키는 원인이 되어 발생하는 현상이다. 염화화산(Saline seep)이란 인위적인 오염원이 미치지 않는 지역에서 발견되는 염분 토양으로 일부분 혹은 대부분이 짙어 있으며 주로 하얀 소금 알갱이와 함께 발견되고 주변의 작물이나 풀의 성장은 중지되거나 사멸되어 있는데 강수의 요인으로 인하여 염수화가 발생한다.¹⁹⁾

이러한 7가지의 지하수 염수화의 원인에 따른 여러 가지 종류의 분석 parameter를 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Parameters used for identification of salinity sources.¹⁹⁾

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, ³ H, I/Cl, B, Ba, I, ¹⁸ O, ² H, 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

2.2. 지하수 염수화의 원인조사방법

1) 주요 이온조성비를 이용한 방법

담수에서의 주요 이온이 Ca²⁺과 HCO₃⁻, SO₄²⁻인데 비해 해수의 주요 이온은 Na⁺과 Cl⁻으로 주요 이온성분부 터가 매우 상이하여 Cl⁻과 Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, SO₄²⁻, HCO₃⁻, Br²⁻, I⁻, Li²⁺의 이온조성비는 둘 이상의 염수화의 원인에 의해 오염된 지하수 오염원을 판명하는데 사용된다.

강수 중의 농도는 내륙지방에서는 1mg/l 미만을 나타 내지만 해안에서는 1~20mg/l 정도의 범위를 보이는데 해염과 해풍 등은 연안지역의 지표수와 지하수에서 나타 나는 높은 염분농도의 원인이 되며, 대부분의 지하수는 0.001mg/l 에서 1mg/l 정도의 Cl⁻을 함유하고 있다.¹⁹⁾

Cl⁻농도는 수심이 깊을수록 그리고 함양지역으로부터 멀어져 해안에 가까울수록 증가하는데 해수에서의 Cl⁻농도는 약 19,000mg/l 이상 검출된다. 특히 심층수와 가스 나 오일과 함께 존재하는 지하수는 100,000mg/l 를 초과 하기도 한다.

지하수중에 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 용설체의 살포, 공장폐수, 생활하수 그리고 농업용수, 가수나 유정에 의한 염수 그리고 과잉 양수에 의한 해수 침입 등이 있다.

2) Piper diagram을 이용한 방법

Piper diagram은 지하수의 유형분석과 서로 다른 유형의 지하수의 혼합, 양이온교환, 침식과 용해작용, 황산염 환원 등의 관계를 분석하는데 사용된다. Fig. 1(a)~(c)의 하단에 있는 두 개의 삼각형 중 왼쪽은 주요 양이온인 Na⁺+K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺의 농도(epm)를 백분율로 환산하여 나타내고, 오른쪽 삼각형은 주요 음이온인 Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻+CO₃²⁻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 해수 침입에 의하여 이온교환 특성을 나타날 때이고, (a2)는 혼합 특성을 나타날 때이며, (b)는 시추공을 따라 침입된 해수와 담수가 단순한 혼합 특성을 나타날 때의 Piper diagram을 나타낸 것이다. 이온교환은 대수층에서 Ca²⁺와 Na⁺ 사이의 교환형태가 가장 뚜렷하며, 해수가 침입하여 Na⁺가 대수층에 포화될 때까지 진행하며, 담수와 해수가 접하는 접이대의 전면(initial front)에서만 일어나며 그 후면(behind front)에서는 일어나지 않는다.

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.

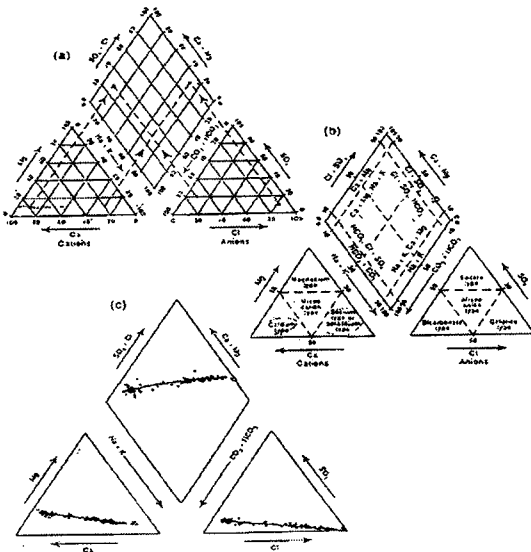


Fig. 1. Presentation of chemical constituents Piper diagram (a) (c) and classification scheme of hydrochemical facies (b), based on major-ion percentages(Krieger and Hendrickson, and other, 1960)

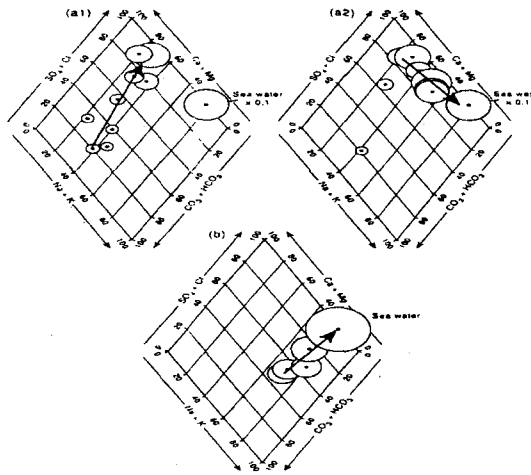


Fig. 2. Piper diagram of chemical composition of coastal saline water. Regional sea-water intrusion is characterizes by ion exchange(a1) and mixing(a2), whereas local mixing of intruded sea-water with fresh water along boreholes is characterized by simple mixing(b).¹⁹⁾

3) 방사능 동위원소 Tritium(³H)을 이용한 방법

지하수와 해수의 혼합 즉, 지하수 염수화를 해석하는데에는 동위원소 ¹⁸O, ²H, ³H, ¹³C, ¹⁴C, ³⁴S, ³⁶Cl 등이 주로 사용되는데, 자연적인 염지하수(natural saline groundwater)

일 때는 ¹⁸O, ²H, ³⁴S, 암염의 용해(halite-solution brine)일 때는 ¹⁸O/D, 해수 침입(sea-water intrusion)일 때는 ¹⁸O, ²H, ³H, ¹³C, ¹⁴C 등이 사용된다. 환경동위원소 ³H는 강수의 일부분으로 자연수에 유입되는데 유입농도가 계절별, 연도별로 변하고 방사능 붕괴 성질도 가지고 있어 물의 구성동위원소로서 지하수 중에 용존하고 있는 화학성분처럼 주위의 물질과 반응해 변화하지 않고 물 자체로 이동하는 특성을 가지고 있으므로 지하수 연대측정, 오염원 추적 및 지하수-해수 혼합에 대한 연구 등 지하수 연구에 매우 유효하게 사용된다.²⁹⁾

(1) Tritium(³H)의 생성

대기 기원물질인 ³H는 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 3.0×10⁷Curies정도가 자연계에서 생성되고 있다. 자연수중에 존재하는 ³H는 약 12.3년의 짧은 반감기를 갖고 있어 자연적으로 소멸되므로 그 생성과 소멸이 일정한 평형을 이루게 되며 정상적인 환경중에서 ³H의 농도는 일정하게 유지된다.²⁹⁾

(2) 자연수의 Tritium(³H) 함량

자연수 중의 ³H의 유입은 대부분이 강수에 의하여 지하수로의 ³H의 유입 또한 강수에 의해 이루어지고 있다.

1987~1989년, 3년 동안의 대덕 지방 강수 중의 ³H 함량을 보면 3년간의 연평균 ³H함량은 11.50, 21.05, 12.34TU였다. 또한 제주 지역의 강수 중의 ³H의 함량은 12.1±0.43~17.4±0.44TU(Tritium Unit)를 보였다.¹⁰⁾ 제주시의 지하수와 해수에서의 ³H의 함량을 Table 2에 나타내었다. 제주도 지역 해수 중의 평균 ³H의 함량은 5.4TU로 지하수는 평균 14.5TU로 나타났는데 이는 안 등²³⁾의 연구 결과와 동일하다.

국내 12개 지역의 지하수, 지표수, 해수중의 연평균 ³H 함량은 안 등²³⁾의 연구결과에 의하면 해수 중에서는 4~5TU를 나타냈고 지표수에서는 12~48TU를 나타냈으며, 지하수에서의 ³H 함량분포는 13~29TU로 나타냈다.

자연수 중의 ³H의 기원은 강수로서 모두 같다고 하겠으나 일반적으로 해수에서는 낮고 지하수 및 용천수 등에서는 비교적 높은 편이며 최근 내륙 담수에는 얼마간의 ³H이 존재한다.¹⁶⁾

일반적으로 담수 중의 ³H 함량은 4~25TU정도로 ³H의 짧은 반감기와 담수의 비교적 짧은 체류시간을 고려하면 지표수에는 얼마간의 ³H이 존재하나 체류시간이 긴 심해수에서는 거의 0TU에 가깝기 때문에 해수와 지표수가 혼합되면 ³H 함량은 낮아질 수밖에 없다.¹⁹⁾

Table 2. Tritium(³H) concentration include type of water at Cheju city.¹⁰⁾

Water	Sea Water	Groundwater
Tritium(TU)	5.4	14.5

3. 조사지역 및 방법

3.1. 조사지역

제주도 동부지역의 지하수 염수화에 대해 연구하기 위해 선정된 조사지역을 Fig. 3과 Table 3에 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.¹²⁾

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 1m 내외로 연중 안정된 상태를 유지하고 있다.¹¹⁾ 또한 다른 지역과 비교할 때 조사지역은 투수성이 매우 양호한 지역으로 해안부근의 지질은 모래토양이고 주요 지하수의 함양지역인 해발 100m이상의 지역에는 주로 목초지 및 임야가 많이 분포되어 있다.

조사 관정의 선정은 제주도 동부지역 지하수 중 염도가 높은 관정 2개소(D-28, D-124)와 이 관정과 해안가로부터 일정 거리 떨어져 있는 관정 2개소(Susan 3, D-282)를 선정하였다. D-28관정은 성산읍 고성리에 위치한 관정으로 지하수의 염소이온 오염이 심각하여 현재는 폐공되어 있으며, 해안으로부터 2,000m떨어져 있다. D-124관정은 성산읍 수산리에 위치하고 있으며 이 관정역시 염소이온의 오염이 심하여 현재는 사용하지 않고 폐공 관리되고 있고, 해안으로부터 2,750m떨어져 있다. Susan 3관정과 D-282관정은 성산읍 수산리에 위치한 현재 사용중인 관정으로 각각 해안으로부터 5,400m와 7,600m떨어져 있다. Susan 3관정의 주변에는 과수원이 위치해 있으며 주거 지역과 가까이 접해 있는 반면에 D-282관정은 도로변에 위치해 있는데 주변에서는 과수 재배와 밭농사가 행해지고 있다.

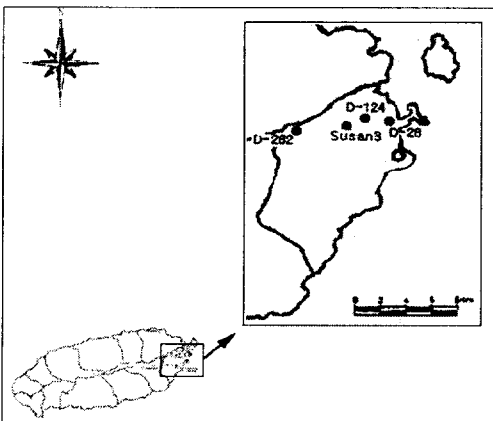


Fig. 3. Sampling site on this study.

Table 3. The data of well at each sampling sites^{b)}

(Unit: m)

Well No.	Location	Elevation	Depth	Natural water level	Dynamic water level	Distance from coast
D-28	Kosung	28.24	41.0	27.2	27.3	2,000
D-124	Susan	28.65	51.0	27.3	33.0	2,750
Susan 3	Susan	92.09	120.0	91.4	107.0	5,400
D-282	Susan	130.00	170.0	151.0	158.0	7,600

3.2. 분석방법

1) 주요 이온성분 분석

시료의 채수는 1998년과 1999년 건기인 5월부터 우기인 8월 사이에 대조기를 택하여 행하였고 1999년의 채수 시에는 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.

분석항목과 그에 따른 분석 방법 및 사용기기를 Table 4에 나타내었다.

Table 4. 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 ₂ SO ₄ titrated method

2) Tritium(³H)의 분석 방법

환경동위원소 ³H은 1999년 8월과 12월에 채수한 각 관정의 시료와 강수 및 해수 시료를 일본 큐슈 환경관리 협회에 의뢰하여 액체섬광계수를 이용하여 분석하였다.

(1) 시료의 전처리

모든 시료는 증류하여 염을 제거한 후 400g을 취하여 전기분해 장치로 농축하는 동안에 전극의 부식을 방지하기 위하여 0.4% Na₂O₂를 가하여 알칼리로 하였다.

(2) Tritium(³H)의 농축

전 처리된 시료는 전기분해 장치를 이용하여 20g까지 농축한 후 시료를 전기분해 할 때에는 -1~0℃로 유지하여 ³H의 증발을 방지하고 결빙을 방지하기 위해서 냉동조 내에 10% ethylene glycol을 첨가하였다.

시료량이 처음 400g일 때에는 전류는 3.5mA, 전압은 15V로 낮추었고, 다시 시료량이 100g 정도로 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 10ml취하

여 여기에 Ready Gel을 10ml가하여 액체섬광계수기(Quantulus Oy Wallac, Finland)로 계측하였다. 이때 계측효율은 ^3H 표준물질로 구하였다. 검출한계는 0.1~1TU에서 측정값에 약 10%의 오차를 가진다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 해수와 지하수의 주요 이온조성비

- 1) 염소이온(Cl^-)과 주요 이온과의 상관관계
- 각 조사관정의 지하수와 해수의 Cl^- 과 주요 이온과의

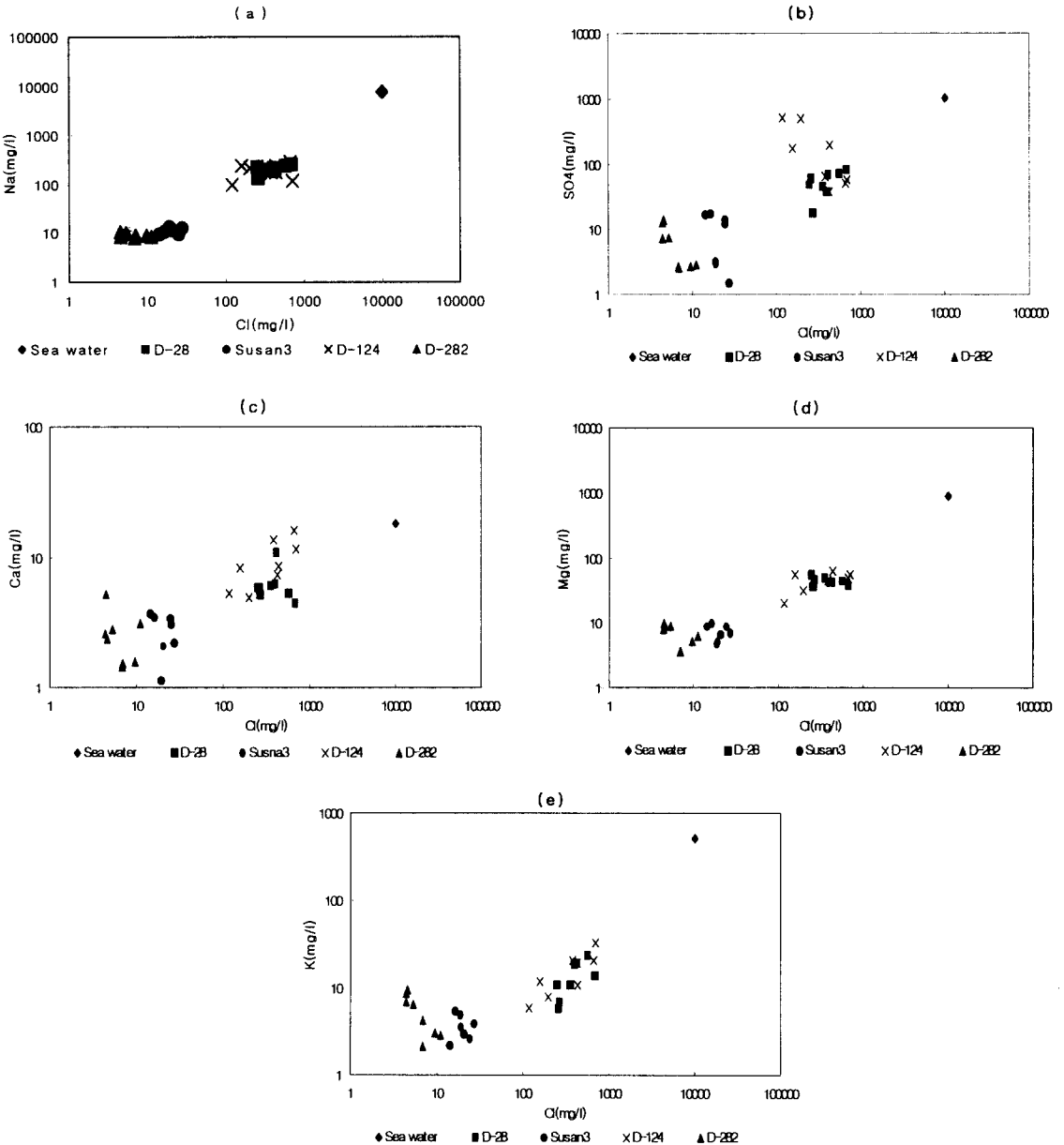


Fig. 4. Bivariate plots of major ions versus chloride for groundwater from eastern area at Cheju island((a) $\text{Na}^{2+}/\text{Cl}^-$, (b) $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$, (c) $\text{Ca}^{2+}/\text{Cl}^-$, (d) $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-$, (e) K^+/Cl^-).

화학성분조성의 상관관계를 Fig. 4에 나타냈다. 각 그림의 우측 상위의 점은 조사지역인 제주도 동부지역 성산해수의 화학성분조성을 나타낸 것이며 그 이외의 점들은 각 관정에서의 화학성분조성을 나타낸 것이다.

Cl⁻과 Na⁺의 화학조성성분을 비교하여 나타낸 Fig. 4의 (a)에서 염수화가 진행된 관정과 그렇지 않은 관정과 그룹화를 볼 수 있다. 염수화가 진행된 D-28과 D-124 관정은 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. Fig. 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 해수 침입으로 사료되었다.

SO₄²⁻과 Cl⁻과의 상관관계를 Fig. 4의 (b)에 나타내었다. Cl⁻농도가 조사관정 중에서 가장 높게 나타난 D-28 관정에서의 SO₄²⁻과 Cl⁻과의 상관관계는 증가 추세로 나타났다. D-124관정에서의 Cl⁻과 SO₄²⁻농도의 분석결과는 두 이온 모두 높게 나타났으나 D-28관정에서와 같이 일정한 증가 추세로 나타나지 않고 다양하게 분산된 형태로 나타났다. SO₄²⁻농도의 증가는 석회암과 황화철 등의 용해에 의해서 이루어지는데 D-124관정을 포함한 조사지역은 현무암류로 구성되어 어 지질환경적인 특성에 의한 것은 아닌 것으로 사료된다. 자연적인 염지하수나 암염의 용해액에서의 SO₄²⁻농도는 화학적 변환으로 인해 저농도를 나타내므로 자연적인 염지하수도 원인이 될 수가 없다. 따라서 D-124관정에서의 Cl⁻과 SO₄²⁻농도의 변화는 자세한 관측이 필요하다고 사료된다.

염수화 현상이 없는 Susan 3과 D-282관정은 비교적 SO₄²⁻농도가 낮게 나타났고 Cl⁻과 일정한 상관관계를 나타내지는 않았다.

조사관정에서의 Ca²⁺과 Cl⁻과의 상관관계를 나타낸 Fig. 4의 (c)에서도 염수화가 진행된 D-28과 D-124관정에서는 분석결과가 해수의 분석결과쪽을 향하는 증가 추세를 나타냈으나 Susan 3과 D-282관정에서의 분석결과에는 Ca²⁺/Cl⁻비에 대한 일정한 상관관계를 찾아볼 수 없었다.

Mg²⁺과 Cl⁻과의 상관관계는 Fig. 4의 (a)에서 나타낸 바와 같이 그룹화를 보였고 염수화된 관정인 D-28과 D-124관정에서의 Mg²⁺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 증가 추세로 상관관계를 나타내고 있는 반면에 Susan 3과 D-282관정은 다양한 분석결과가 나타났으며 특히 Susan 3 관정에서는 역의 상관관계를 나타내고 있었다.

Susan 3관정의 Cl⁻과 주요 이온과의 비교를 보면, 염

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

2) 중탄산이온(Bicarbonate, HCO₃⁻)

연구 지역에서 조사기간 동안 분석한 Cl⁻/HCO₃⁻비를 Table 5에 나타내었다. Table 5에서 보는 바와 같이 연구 지역에서 Cl⁻/HCO₃⁻비가 0.5 이하로서 해수 침입이 안된 관정은 해안으로부터 7.6km에 위치한 D-282관정이며, 이 관정은 현재 음용수와 농업용수로 사용되고 있다. Susan 3관정도 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 invaded(Cl⁻/HCO₃⁻=0.5~1.3)에 속하였지만 Cl⁻/HCO₃⁻비가 1.7로 높게 나타나는 것으로 보아 앞으로 Susan 3관정에 대한 수질변화의 관측이 계속되어야 할 것으로 사료된다.

해안에서부터 2.75km 이내로 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-28관정은 Cl⁻/HCO₃⁻비가 매우 높아 해수 침입으로 인한 염수화가 상당히 진행된 것으로 사료된다.

Table 5. 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, Ca²⁺)과 마그네슘(Magnesium, Mg²⁺)

Fig. 5에 나타낸 바와 같이 염수화된 관정인 D-28과 D-124관정에서의 Ca²⁺과 Mg²⁺농도는 높은 값으로 나타났으며, 염수화되지 않은 Susan 3과 D-282관정에서의 Ca²⁺과 Mg²⁺의 농도는 비교적 낮게 나타났다.

해수 중의 Mg²⁺농도는 Ca²⁺의 3배 이상 높게 나타나는 데 조사지역 해수에서의 Mg²⁺/Ca²⁺비는 4.758로 일반적인 해수의 화학성분조성의 농도를 통해서 본 5.488보

다는 비교적 낮게 나타났고, D-28관정과 D-124관정에서는 비교적 높은 10이상의 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-124관정에서 높게 나타난 이유는 해수의 영향이라고 추정할 수 있는데, 이는 Ca^{2+} 과 Mg^{2+} 이 해수 중에 다량 용존되어 있기 때문이다.

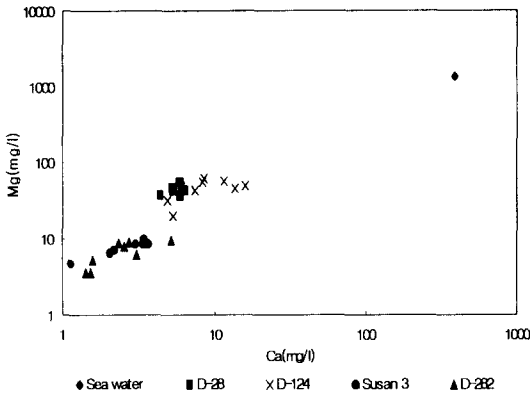
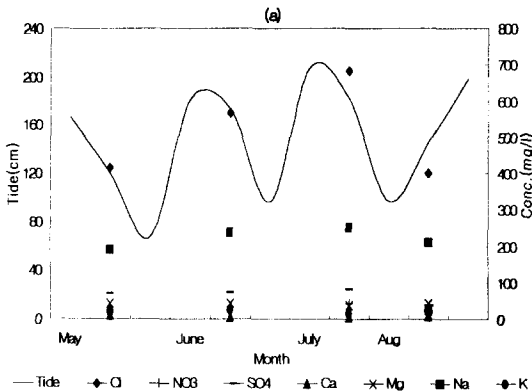


Fig. 5. Bivariate plots of calcium ion and magnesium ion for each wells.

4.2. 조석에 따른 지하수 수질변화

1) D-28 관정의 수질변화

D-28관정에서 1998년도 5월에서 8월까지의 분석결과를 조석과 함께 Fig. 6(a)에 나타내었는데 1998년에 행한 실험에는 time lag를 고려하지 않았으나 실험결과, 관정에 따라 차이는 있으나 약 2시간 정도임을 고려하여 분석하였다.



게 나타났고 월별로 보면 5월과 8월의 성분농도는 비슷한데 반해 6월과 7월은 1999년의 농도가 낮게 나타났는데 이러한 분석결과의 원인은 1999년에 강수량이 1998년보다 월등히 많기 때문인 것으로 추정된다. 1998년의 5~8월까지 4개월 동안의 총강수량은 1,050.9mm인데 반해 1999년의 총강수량은 1,365.1mm로 300mm이상의 차이를 보였다.

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

2) D-124 관정의 수질변화

D-124 관정에서의 조석에 따른 수질변화를 Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)에 나타내었다.

해안과의 거리가 2,750m 떨어져 있는 D-124관정에서의 조석에 따른 주요 구성성분농도를 보면, 1998년의 분석결과를 나타낸 Fig. 7(a)에서 Cl^- 과 Na^+ 의 농도는 D-28관정의 1998년의 분석결과에서와 같이 높게 나타났으나 SO_4^{2-} 농도는 낮게 나타났다. 그리고 1999년의 분석결과를 나타낸 Fig. 7(b)를 보면 해수의 주요 구성성분인 Cl^- , Na^+ , SO_4^{2-} 농도와 조석과의 상관관계가 D-28관정에서와 같이 정적 상관관계로 상관성이 높은 것으로 나타났으며, NO_3^- 의 함량은 주요 이온들과는 조석에 따른 역의 상관성을 보였다.

D-124관정에서의 수질변화의 형태가 조석에 따른다는 것은 D-28관정과 동일하지만 NO_3^- 의 농도가 D-124관정에서는 높게 나타나고 있다는 점이 다른데 이는

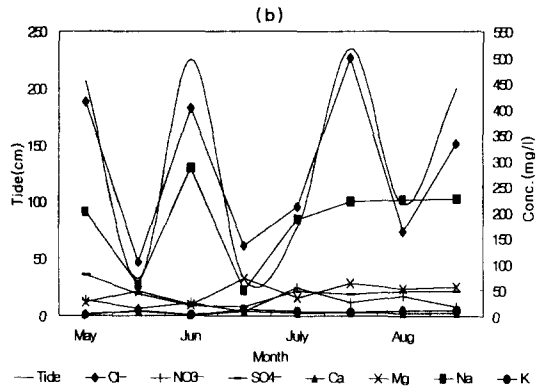


Fig. 6. Variation of major ions in accordance with tidal levels at D-28(in 1998(a), in 1999(b)).

1999년의 결과는 Cl^- 과 Na^+ , SO_4^{2-} 농도의 상관관계가 대상관정중 가장 높게 나타났고 육상기원물질이라 할 수 있는 NO_3^- 의 함량은 Fig. 6(b)에서는 주요 이온들과 다른 역의 상관성을 보였다. 1998년의 주요 이온구성성분 농도가 Cl^- 농도를 포함하여 전체적으로 1999년도보다 높

D-28관정과 염수화 원인은 동일하지만 기타 주변환경에 따른 차이로 인한 것으로 추정된다. SO_4^{2-} 농도는 Land(1987)에 의하면 심층수일수록 SO_4^{2-} 농도가 높게 나타난다고 하였으므로 수심 40m에서 채수한 D-28관정보다 50m에서 채수한 D-124관정에서 높은 농도의 SO_4^{2-} 이 분석되

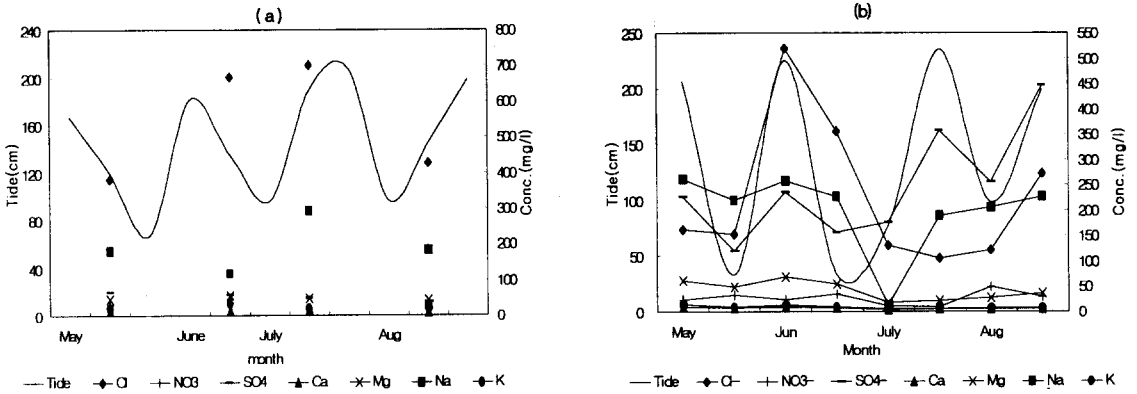


Fig. 7. Variation of major ions in accordance with tidal levels at D-124 in 1998, 1999.

는 것이 타당하며, NO_3^- 농도가 높은 것은 하수 등의 유입에 의한 현상으로 사료된다.

3) Susan 3 관정의 수질변화

조석에 따른 Susan 3 관정에서의 지하수 수질변화를 1998년 6월부터 8월까지를 Fig. 8(a)에 1999년 5월부터 8월까지를 Fig. 8(b)에 나타내었다.

1998년 5월에는 Susan 3 관정에서 채수하지 않았기 때문에 6월부터 8월까지의 분석결과를 Fig. 8(a)에 나타내었다. Susan 3 관정에서의 Cl^- 은 조석에 따른 변화를 보

3관정에서는 과잉양수로 인해 지하수 함양량이 크게 줄어들어 해수에 의한 염수화가 일시적으로 나타난 것으로 보인다.

4) D-282 관정의 수질변화

D-282 관정에서의 조석에 따른 주요 이온성분 변화를 Fig. 9에 나타내었는데 1998년 5월부터 8월까지의 성분변화는 Fig. 9(a)에 나타내었고 1999년 5월부터 8월까지의 성분변화는 Fig. 9(b)에 나타내었다.

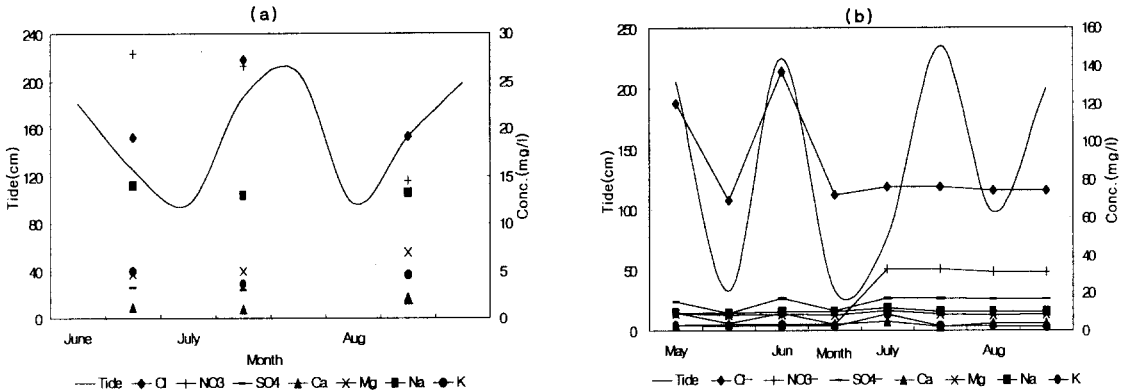


Fig. 8. Variation of major ions in accordance with tidal levels at Susan 3 in 1998, 1999.

이며, 19.05~27.21mg/l 로 낮은 농도를 보였다. 그러나 1999년 이 관정에서의 Cl^- 농도는 74.25~104.61mg/l 로 크게 증가하였으며 Cl^- 뿐만 아니라 다른 이온의 농도도 크게 증가하여 나타났는데 이러한 분석결과를 강수량 부족에 따른 양수량의 증가로 인한 일시적인 현상으로 해석할 수 있겠다. 1998년 1월부터 4월까지의 총강수량을 1999년과 비교해 보면 약 320mm 정도의 차이를 보였다. 또한 1999년의 분석결과를 보면 Susan 3 관정의 Cl^- 농도가 고농도로 나타난 시기가 건기인 5, 6월에 해당되고 강수량이 크게 증가한 7월 이후에는 Cl^- 농도가 낮아지고 있는 것으로 보아 가뭄이 계속되는 동안 Susan

1998년 D-282관정에서의 주요 이온성분 변화를 보면 Cl^- 농도에 비해 Na^+ 의 농도가 높게 나타났으며 NO_3^- 의 농도는 타 관정에 비하여 비교적 낮게 나타났음을 Fig. 9(a)에서 볼 수 있다. 1999년의 주요 이온성분 변화를 나타낸 Fig. 9(b)에서도 Cl^- 농도에 비해 Na^+ 의 농도가 높게 나타났고 NO_3^- 의 농도는 낮게 나타나고 있었으나 SO_4^{2-} 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. SO_4^{2-}

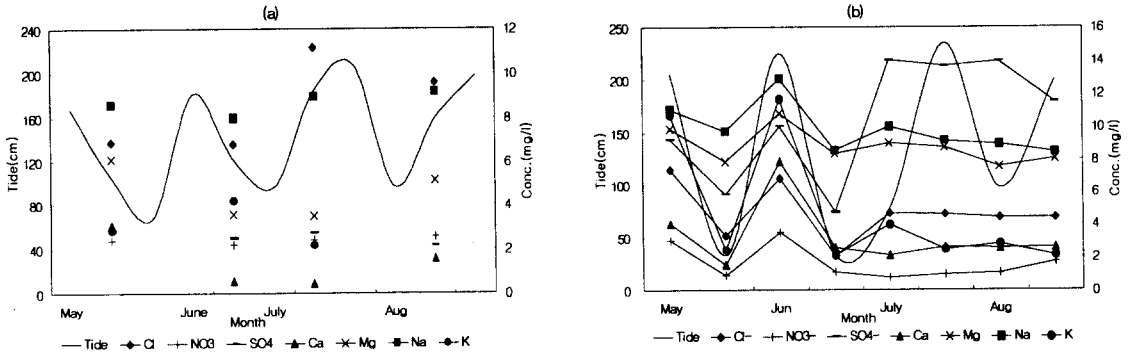


Fig. 9. Variation of major ions in accordance with tidal levels at D-282 in 1998, 1999.

농도는 심층수에서 높게 나타나거나(Land, 1987) 암석의 용해에 의해서 증가되는데 D-282관정은 현재 사용중인 관정으로 펌프에 의하여 양수되며 기반암은 현무암류로 이루어져 있으므로 이 두 가지의 경우 모두에 해당되지 않는다. 따라서 D-282관정에서의 SO_4^{2-} 농도의 증가에 대해서는 문헌고찰과 실험 등의 연구가 조금 더 이루어져야 할 것으로 사료되어 진다.

따라서 D-282 관정은 Fig. 9의 (a)와 (b)로부터 조사 관정 중 가장 Cl^- 농도가 낮은 관정으로 고·저조시의 농도변화는 보이지만 $12mg/l$ 미만의 낮은 농도를 나타내며, Na^+ 농도가 Cl^- 농도에 비해 높은 이유는 NO_3^- 농도가 높게 나타난 것으로 보아 인위적인 오염에 의한 것으로 추정된다.

이와같은 분석결과로부터 D-282관정은 염수화가 없는 관정으로 나타났으나 NO_3^- 농도의 함량변화를 보았을 때 지하수함양시에 비로 등에 의한 인위적인 오염이 발생할 수 있는 관정으로 사료되어 진다.

4.3. Piper diagram을 이용한 지하수 수질특성

1998년과 1999년의 5월에서 8월까지의 각 관정들 간의 이온조성비를 Piper diagram으로 하여 분석하였다. 건기인 5월은 지하수의 양수량이 급격히 증가하는 시기 이므로 D-282관정을 제외한 3개의 관정에 담수와 해수의 혼합특성을 나타내었다. 해안으로부터 5.4km 떨어져 있는 Susan 3관정은 5월의 분석결과 1회를 제외하고 높은 Cl^- 농도를 보이면서 해수와의 혼합특성을 보이고 있었는데, 이는 가뭄으로 인한 일시적인 현상으로 추정되었다.

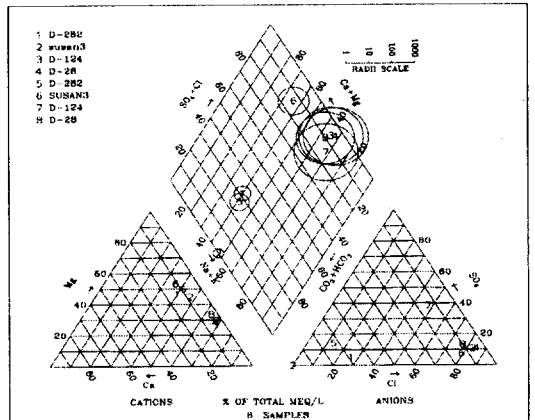
6월의 분석결과는 5월과 동일한 형태로 D-282관정을 제외한 3개의 관정에서 해수와의 혼합형태를 보였는데, D-28관정과 D-124관정은 현재 폐공관리되고 있는 관정임에도 불구하고 해수와의 혼합특성을 나타냈다.

1998년과 1999년의 7월의 분석결과는 조금 다른 형태를 보였다. D-28관정과 D-124관정은 5, 6월과 같은 형태인 염수와의 혼합형태를 나타냈고, Susan 3관정은 해수가 시추공을 통해 유입되었을 때의 단순한 혼합형태를 나타냈다.

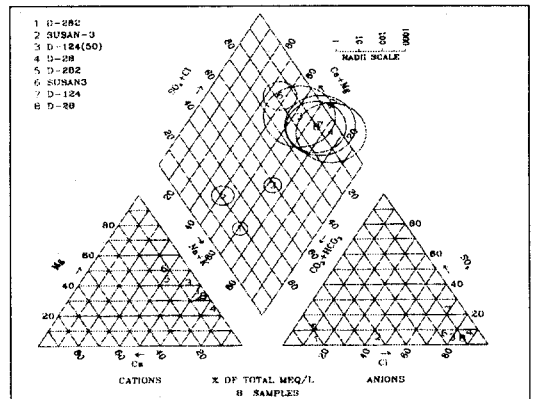
8월의 분석결과는 4개의 관정 모두가 앞의 7월의 분석과 동일한 형태를 나타내고 있으며 Susan 3관정은 충

분한 강수의 함양으로 인해 해수와의 혼합특성은 보이지 않고 단순한 시추공내로의 해수 유입의 형태를 나타냈다.

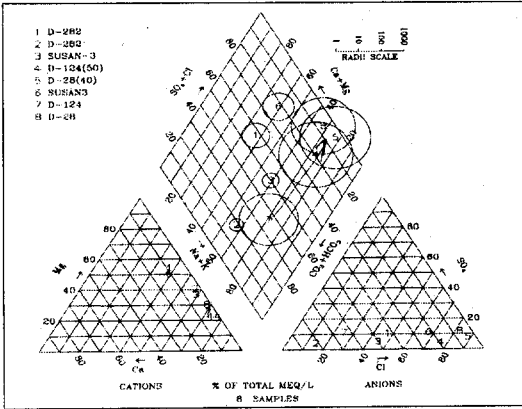
7월과 8월의 많은 강수에도 불구하고 Susan 3관정에 일시적으로 나타난 것으로 추정되는 해수와의 혼합특성 형태와 유입형태를 계속하여 나타내는 것으로 보아 이 관정에 대한 염수화 여부의 계속적인 관측이 필요할 것으로 사료된다.



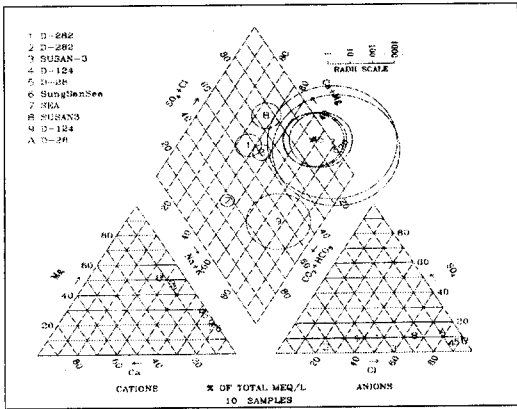
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 10. Piper diagram of chemical composition of the study area in 1998 and 1999 ((a)May, (b)June, (c)July, (d)August).

4.4. 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 ³H함량을 살펴보면 강수는 12.10TU, 해수는 3.80TU로 나타났고 각 관정의 평균 ³H함량은 D-28관정은 4.80TU, D-124관정은 5.00TU, Susan 3관정은 6.85TU, 그리고 D-282는 7.30TU로 나타났다. 그리고 같은 해 12월의 분석결과는 D-28관정은 4.8TU, D-124관정은 4.9TU, Susan 3관정은 5.9TU 그리고 D-282관정은 6.0TU로 D-28관정을 제외한 나머지 관정에서 12월에 ³H함량이 낮게 나타났다. 이렇게 8월보다 12월에 ³H의 함량이 낮게 나타나는 이유는 계절적인 영향으로서 여름보다 겨울에 ³H의 함량이 낮아지기 때문인 것으로

사료된다.

해안에서 먼 거리에 위치한 지하수 관정일수록 ³H함량이 높게 측정되었고 해안에서 가까운 지하수 관정일수록 ³H함량이 낮게 측정되었고, Cl⁻농도는 ³H함량에 대해서는 역의 상관성을 나타냈으며 해안에서부터의 거리로부터는 정의 상관성을 나타내었다. 조석에 따른 ³H 함량 분석결과에서는 고조시에 ³H의 함량이 낮아지고 저조시에는 높아졌으며 염수화된 관정인 D-28과 D-124관정에서 조석에 따른 ³H함량의 변화범위가 크게 나타났고 염수화된 두 관정중에서도 염수화의 진행정도가 심한 D-28관정에서의 변화범위가 더욱 크게 나타났다.

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

조사관정의 지하수 및 해수의 ³H함량과 Cl⁻농도와의 관계를 나타낸 Fig. 11로부터 해수와 지하수중의 ³H함량과의 일정한 관계 즉, ³H함량이 보다 낮은 해수가 일정한 ³H함유량을 보유하고 있는 지하수와 혼합되었을 때 수중의 ³H함량이 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 분석결과로부터 지하수 관정내 해수 침입시 ³H 함량변화가 뚜렷한 것으로 보아 ³H함량변화를 이용한 지하수 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.

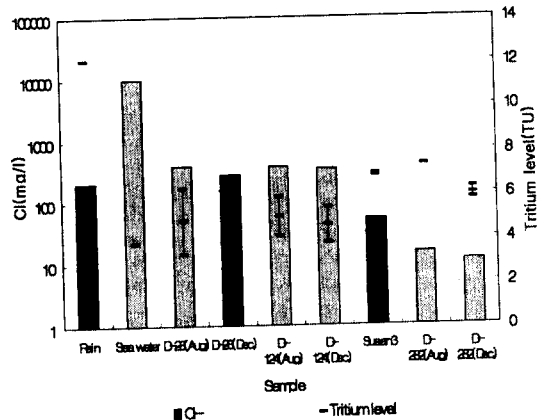


Fig. 11. Variation of tritium level and chloride ion concentration accordance with each well in Aug., Dec. 1999.

5. 결 론

제주도 동부지역 지하수 염수화의 원인에 대한 연구를 하고자 주요 이온성분비를 이용한 방법, Piper diagram을 이용한 방법 그리고 Tritium(³H)을 이용한 방법을 사용하여 주요 이온성분분석과 환경동위원소 ³H의 함량분석을 1998년과 1999년 5월부터 8월까지 분석한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 제주도 동부지역 지하수에 대한 각 주요 이온들과 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 주요 이온성분비의 분석과 Piper diagram을 이용한 분석의 결과로부터 본 논문의 연구지역인 제주도 동부지역의 지하수의 염수화는 해수 침입에 의한 것으로 추정할 수 있었다.

3. 조석에 따른 Susan 3관정의 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 다른 관정에 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 암염에 의한 오염의 가능성도 의심해 볼 수도 있는 바 장기적이고 지속적인 관측이 필요하겠다.

4. ³H함량은 연안과의 거리가 먼 관정인 Susan 3관정과 D-282관정에서는 높게 나타났고 염수화가 진행중인 관정인 D-28과 D-124관정은 ³H함량이 낮게 나타났다. 그러나 조사 관정에서의 Cl⁻농도는 ³H함량과 반대로 높게 나타났다. 8월과 12월의 조사관정에서의 ³H함량의 분석결과 Cl⁻농도가 높게 나타난 관정인 D-28과 D-124관정의 경우 Cl⁻농도가 높은 고조시에 ³H함량이 낮아지고 이와 반대로 Cl⁻농도가 낮은 저조시에는 ³H함량이 높아지는 것으로 나타났다. 그러므로 조석에 따른 염수화가 진행중인 관정의 ³H함량분석의 결과로 보아 D-28과 D-124관정의 지하수 염수화는 해수 침입에 의한 것임을 재차 확인할 수 있었다.

5. ³H을 이용한 모든 지하수 연구를 위해서는 지하수는 물론 강수 및 연안해수에 포함된 ³H에 관한 더욱 더 오랜 기간동안의 축적된 자료가 필요하다.

참 고 문 헌

- 1) 고기원 외 5인, 1993, 제주도 동부지역의 지하지질구조와 지하수위 변동 및 수질특성에 관한 연구, 제주도보건환경연구원보 제3권
- 2) 고기원, 1997, 제주도 지하수 보존특성과 서귀포층의 수문지질학적 관련성, 박사학위논문
- 3) 김경훈, 1998, 제주도 동부지역의 지하수 염수화에 대한 이화학적 특성, 석사학위논문

- 4) 김남형, 오윤근 공저, 1997, 신판 지하수조사법, 동화기술
- 5) 김성홍 외 8인, 1992, 제주도 지하수의 염분변화에 대한 고찰, 제주도보건환경연구원보 제3권
- 6) 농어촌진흥공사, 1996, 제주도지하수개발보고서
- 7) 대한지하수환경학회, 1994, 제주도 지하수자원의 환경학적 보전과 개발
- 8) 박병권, 양재삼 공저, 1992, 일반해양학, 정문출판사
- 9) 송영철 외 9인, 1997, 제주 지하수의 수질특성, 제주도 보건환경연구원보 제7권
- 10) 정창호 외 4인, 1985, 동위원소를 이용한 제주지역 수자원에 관한 연구, 제주대학교 방사능이용연구소보 제1권
- 11) 제주도, 1997, 환경지표설정
- 12) 제주도, 1999, 환경백서
- 13) 지하수개발과 환경대책 총기술 편집위원회, 1996, 지하수개발과 환경대책총기술, 도서출판 과학기술
- 14) 한정상, 1986, 지하수학개론, 박영사
- 15) 한정상, 1994, 국내지하수의 문제점과 현행 지하수법 개정의 당위성
- 16) 허소림 외 2인, 1997, 제주시 자연수중의 Tritium 함량과 수질특성과의 관계, 제주대학교 방사능이용연구소보 제11권, 36-38p.
- 17) 北岡豪 · 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
- 18) 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
- 19) Bernd, C. Richter and Charles W. Bledsoe, 1993, Geochemical Techniques for Identifying sources of ground-water salinization
- 20) David, A. Cates, et al., 1996, The impact of ion exchange processes on subsurface brine transport as observed on piper diagrams, Ground water Vol.34, No.3, 532-544p.
- 21) Francisco, Padilla. and Javier, Cruz-Sanjulian, 1997, Modeling sea-water intrusion with open boundary conditions, Ground water Vol.35, No. 4, 704-712p.
- 22) Nash, H. and G. J. H. McCall, 1995, Groundwater quality, Chapman & Hall
- 23) Jong Sung Ahn et al, 1995, Sea water interation into coastal aquifer in cheju island by isotope analysis, Journal of korean groundwater association Vol. 4·5
- 24) K. W. F. Howard et al, 1983, Major ion characterization of coastal saline groundwaters, Groundwater, Vol. 21, No. 4
- 25) Nizar, S. Abu-Jaber et al, 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.
- 26) Momoshima, N. et al, 1983, Recent environmental

- tritium levels in japan, RADIOCHEM. RADIOANAL. LETTERS 58(1)
- 27) N. Momoshima et al, 1986, Recent environmental tritium levels in japan-II coastal seawater and lake water, J.Radioanal.NUCL.CHEM., letters 104(3)
- 28) McGraw-Hill, 1993, McGraw-Hill encyclopedia of environmental science & engineering third edition, McGraw-Hill Inc.
- 29) P. Fritz et al, 1980, Handbook of environmental isotope geochemistry, Vol. 1A
- 30) Set Rose, 1993, Environmental tritium systematics of baseflow in Piedmont province watersheds, Georgia(USA), Journal of Hydrology, 143, 191-216p.
- 31) Soontak Lee, 1996, Groundwater movement in the volcanic island of cheju, korea
- 32) Toshio KAJI et al, 1986, Variations of tritium concentration in lake waters, Memoirs of the faculty of science, Kyushu university, Ser. C, Vol.15(2)
- 33) Yoshimasa Takashima et al, 1978, Tritium concentration of sea water around Kyushu, Japan, Memoirs of the faculty of science, Kyushu university, Ser. C, Vol.11(2)