

碩士學位論文

제주도 동부지역의 地下水 鹽水化에  
대한 理化學的 特性

濟州大學校 大學院  
環境工學科

金京訓

1998年 12月

# 제주도 동부지역의 地下水 鹽水化에 대한 理化學的 特性

指導教授 吳 潤 根

金 京 訓

이 論文을 工學碩士學位 論文으로 提出함

1998年 12月

金京訓의 工學碩士學位 論文을 認准함

審査委員長	이	용	두	印
委 員	오	윤	근	印
委 員	조	은	일	印

濟州大學校 大學院

1998年 12月

Physicochemical characteristics for  
groundwater salinization in the Eastern area of  
Cheju Island

Kyung-Hoon Kim

(Supervised by professor Youn-Guen Oh)

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

DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING  
GRADUATE SCHOOL  
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

1998. 12.

# 목 차

Summary	
I. 서론	3
II. 이론적 고찰	5
1. 염수화의 요인	5
1) 개요	5
2) 자연적인 염지하수	6
3) 암염의 용해	8
4) 해수침입 특성	9
5) 기타	13
2. 수질특성의 해석기법	14
1) Piper 및 Stiff diagram	14
2) 이온조성비	18
3) 이온교환특성	18
4) 전기전도도	20
III. 연구내용 및 방법	21
1. 대상지역	21
2. 분석방법	23
3. 연구방법	23
IV. 결과 및 고찰	24
1. Piper diagram과 Stiff diagram을 이용한 수질특성	24
2. 지하수와 해수의 이온 조성비	34
3. Chloride-bicarbonate 비를 이용한 수질특성	36
4. 해수의 혼합에 의한 이온교환 특성	38
5. 조석에 따른 수질변화	41
6. 심도별 수질변화	47
7. 전기전도도의 분포 및 Cl이온과의 상관성	50
V. 결론	53
VI. 참고문헌	55

## List of Figures

Fig. 1. Classification scheme of hydrochemical facies based on major-ion percentage on Piper diagram. -----	15
Fig. 2. Piper diagram of chemical composition of coastal saline water. Rigiional 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). ----	17
Fig. 3. Sampling sites for groundwater and spring water. -----	22
Fig. 4. Variation of major ions at each sampling sites. -----	24
Fig. 5. Piper diagram of chemical composition of study area in May, 1998.-----	26
Fig. 6. Piper diagram of chemical composition of study area in July, 1998. ----	27
Fig. 7. Stiff diagram of chemical composition of study area from April to August, 1998. -----	29~33
Fig. 8. Bivariate plots of major ions versus chloride. -----	35
Fig. 9. Distribution of chloride-bicarbonate ratio. -----	36
Fig. 10. Schematic diagram showing well structure of D-124, D-28. ----	42
Fig. 11. Variation of major elements in accordance with tidal levels in D-28 well. -----	44
Fig. 12. Variation of major elements in accordance with tidal levels in D-124 well. -----	46
Fig. 13. Variation of major elements in accordance with depth in D-28 well. ----	48
Fig. 14. Variation of major elements in accordance with depth in D-124 well. ----	49
Fig. 15. Equipotential line of 500 $\mu$ mhos/cm based on EC values of Study area. -----	51
Fig. 16. Correlation between EC and Chloride concentration. -----	52

## List of Tables

Table 1. Groundwater classification based on TDS ranges -----	6
Table 2. Concentration of major and significant minor chemical constituents in sea water -----	10
Table 3. Changes in ionic rations due to ion exchange relative to the position of the intruding water -----	19
Table 4. The present data of well at each sampling sites -----	21
Table 5. Monthly precipitation of Sungsanpo in 1998 -----	25
Table 6. Groundwater types and classification based on Stiff diagram ---	28
Table 7. Classification with chloride-bicarbonate ratio -----	37
Table 8. Mixing trend and ion exchange through comparison between theoretical and actual concentration of Na -----	39
Table 9. The range of electrical conductivity and distance from the coast to equipotential line of 500 $\mu$ mhos/cm based on EC values of Study area ---	50

## Summary

The salinization of groundwater is widely known as one type of water contamination in all over the coastal area. To investigate this salinization of groundwater, the various approaches are needed because its characteristics is widely changed from area to area and from time to time, depending on the aquifer conditions.

The purpose of this study is to investigate the physical and chemical characteristics of salinization of groundwater at the Eastern area of Cheju island. For this purpose, the major ions of groundwater, spring water and sea water are analyzed according to the well depth and tidal levels. The results obtained from this study are summarized as follows:

1. It can be shown that the concentration of  $\text{Cl}^-$  and  $\text{Na}^+\text{K}^+$  contained in the groundwater at near the coastline are higher than those at inland area away from the coastline. This indicates that mixing and ion exchange between sea water and fresh water in the study area are occurred. The water quality components of groundwater observed at this area can be classified into 4 types such as Na-Cl,  $\text{HCO}_3$ , Na-Cl- $\text{HCO}_3$  and Ca- $\text{HCO}_3$ .

2. The concentration ratio of  $\text{SO}_4^-$  to  $\text{Cl}^-$  is 0.1354 ( $R^2=0.972$ ) at this area. This value is very similar with Dittomer's ratio of 0.13. For  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , and  $\text{Mg}^{2+}$  versus  $\text{Cl}^-$ , their ratios also show a significant relationship between sea water and groundwater in this area. These results shows the salinization source of groundwater is attributed to the intrusion of seawater.

3. From the chloride-bicarbonate ratio, it can be estimated that the intrusion distance of seawater from coastline to inland area is 2.8km at Onpyung-Nansan, Sangdo and Pyungdae areas, and 5.4km at Kosung-Susan area. As getting closer to the coastline, this ratio is gradually increased.

4. The mixing ratio between seawater and fresh water by the intrusion of seawater is decreased with the distance toward inland from coastline. This ratio(fresh water : seawater) is 80:20 in spring water adjacent the coastlines, Onpyung area and 99.8:0.2 in the well at No.3 of Susan located at inland away from the coastline. The concentration of  $\text{Na}^+$  observed at field is 25~45% lower than that theoretically calculated by this mixing ratio. This values is due to the effect of ion exchange rather than the effect of mixing.

5. At D-28 well, the deeper the well depth, the greater the degree of water quality fluctuation with tidal levels. However, this phenomenon is appeared inversely at D-124 well. This difference is due to the existence of the specific permeation structure such as cracks and joints at the same level with mean sea level at their location. It is found that time lag between tidal level and the fluctuation of water quality is 2~2.5 hours at D-28 well, and 3~3.5 hours at D-124 well.

6. As the depth of well is deeper, the concentrations of major ions are increased, excepting the case of  $\text{NO}_3^-$  originated from the land sources.

7. Based on the data of EC, the equipotential line of  $500\mu\text{mhos/cm}$  is located at 4~5km point at Kosung-Susan area and 2,5km point at the other area. The equation of correlation between  $\text{Cl}^-$  concentration and EC values is  $\text{Cl}^- = 0.1927\text{EC} - 16.683$  for the area lower than  $500\mu\text{mhos/cm}$  and  $\text{Cl}^- = 0.2773\text{EC}$  for the area beyond  $500\mu\text{mhos/cm}$ .

## I. 서론

제주도의 지질은 주로 화산암으로 구성되어 있고 투수성이 매우 커서 다우(多雨) 지역임에도 불구하고 지표수의 유출이 비교적 적다. 제주도 지하수는 제주도민의 생활과 산업을 뒷받침하는 유일한 수자원이다. 제주도에서는 지난 20여년간 원예농가의 증가와 대형화, 가축사육두수의 증가, 골프장 및 휴양시설의 증가에 따른 지속적인 지하수 개발로 지하수 오염이 확대되어 문제가 되고 있다. 제주도의 지하수는 다른 지역에서보다 비교적 산업 폐기물에 의한 오염이 덜된 것으로 보고되고 있으나 바다와 직접 접해 있기 때문에 해수침입이 예견되어 왔으며 제주도 동부지역의 경우 지하수의 염수화는 심각한 문제로 대두되고 있다. 1940년대 Oahu도 진주만 지역의 지하수 관정에서 염도 증가로 폐공이 발생된 것과 같이 이러한 염수화는 해안변에서 수리구배가 대단히 완만한 지역에서 주로 나타나고 있다(최, 1994; 권 등, 1997).

제주도의 지하수체는 강수 등이 중력에 의해 지하로 침투하여 흐름장을 형성하는데 불투수면을 중심으로 상위지하수(high level groundwater)와 기저지하수(basal ground water)체를 형성하고 이동과 배출의 수문학적 순환과정을 거치면서 물 균형(water balance)을 이루고 있다. 담수와 해수가 접하는 곳에는 동적평형상태를 유지하고 있으며, 어떤 폭을 갖는 혼합부분인 점이대를 형성한다. 이러한 점이대는 간만의 차, 담수의 유입 및 기타 양수에 의하여 지하수위 변화에 따라 확산된다(최, 1988).

일반적인 염수화의 잠재 요인으로서는 1) 자연적인 염지하수(natural saline groundwater), 2) 암염의 용해(halite solution), 3) 해수침입(sea-water intrusion), 4) 가스나 유정에 의한 고염화(oil-and gas-field brine), 5) 농지에서 유출(agricultural effluents), 6) 염화확산(saline seep), 7) 용설제에 의한 염화(road salt) 등이 있다(Richter et al., 1993).

현재까지 수행된 연구결과에 의하면 제주도 동부지역의 지하수 염수화 원인을 제주도 형성 당시부터 염지하수가 부존할 수 있는 지질구조로 인한 자연적인 현상(고 등, 1997), 과잉양수에 의한 해수침투(최 등, 1991), 토양 및 사구층내의

염분의 용해·침투에 의한 현상(윤, 1986)이라고 보고되고 있다.

지하수의 염수화는 해안을 접하고 있는 대부분의 지하수에서 잠재되어 있는 현상으로 대수층의 조건에 따라 시·공간적으로 변동하고 매우 복잡하기 때문에 광범위하게 논의되어야 하며 다양한 접근이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 제주도 동부지역 지하수와 해안용천수 및 해수를 대상으로 수질특성과 주요 이온성분비 및 조석에 따른 시간별, 심도별 수질변화를 비교 분석하여 지하수 염수화의 요인과 그에 따른 이화학적 특성을 고찰하였다.

## II. 이론적고찰

### 1. 염수화의 요인

#### 1) 개요

지하수의 염수화 문제는 지하수자원을 가장 위협하는 것으로서, 그 주요한 잠재적 원인으로 다음 7가지가 있다(Richter and Kretler, 1993).

- ① 자연적인 염지하수(natural saline ground water)
- ② 암염의 용해(halite solution)
- ③ 해수침입(sea-water intrusion)
- ④ 가스나 유정에 의한 염수화(oil-and gas field brine)
- ⑤ 농지에서의 유출(agricultural effuents)
- ⑥ 염화 확산(saline seep)
- ⑦ 용설제에 의한 염화(road salts)

모든 자연수에는 대기나 토양, 다른 용해성 물질의 혼합에 의한 상호작용 및 생물권이나 암석권의 상호작용 등에 의한 용해성 광물질이 포함되어 있다. 지하수의 염수화(salinization)란 물 속에 녹아있는 용존물질이나 콜로이드 상태로 있는 총용존고형물질(TDS)의 증가를 의미하며, 염도(salinity)는 해양학에서는 보다 복잡한 의미로 쓰이긴 하지만 원칙적으로 TDS와 같은 의미로 사용된다. 지하수의 염수화는 수질오염 형태로는 가장 널리 확산된 문제이며 이로 인하여 특정한 광물질 뿐만 아니라 전체적인 광물성분의 용존농도가 증가한다. Table 1은 TDS의 함량에 따른 지하수의 분류를 나타낸 것이다.

토양을 통하여 함양되는 지하수는 물리, 화학 및 생물학적 변화를 하는데, 그 원인은 증발산, 광물 용해와 침전, 가스의 용해, 다른 용해물질의 혼합 등에 의한 것이다. 지하수는 함양지역에서 유출지역까지 흐르는 동안 화학적 성분이 계속적으로 변하는데, 물과 암석의 상호작용과 혼합이 가장 유력하게 나타난다.

Table 1. Groundwater classification based on TDS ranges(mg/L)

Robinove and others, 1958		Greeze and Cherry, 1979	
Fresh	0 - 1,000 TDS	Fresh	0 - 1,000 TDS
Slightly saline	1,000 - 3,000	Brackish water	1,000 - 10,000
Moderately saline	3,000 - 10,000	Saline water	10,000 - 100,000
Very saline	10,000 - 35,000	Brine	> 100,000
Briny	> 35,000		

인간의 활동에 의해서 서로 다른 지하수가 혼합되는데, 예를 들면 관정을 부적당하게 시추하거나 구조물을 설치하여 담수 대수층과 염수 대수층이 연결하게 되고, 지하수를 양수하면 지하수 흐름방향이 변하거나 양수관정 쪽으로 염수의 침입을 야기하게 된다.

지하수가 염퇴적물과 접촉하게 되는 경우 특히 암염 지역에서 다량의 관정시추와 광산활동을 하게 되면 염의 용해와 그 지역 지하수의 염수화가 일어나게 된다.

대수층이 해양과 접하게 되면 해수침입이 일어나게 되는데 함양된 지하수가 흘러 나가지 않는 지역에서는 만조시 해수면 상승 등으로 해수침입이 일어나게 되고, 양수에 의하여 담수가 내륙 쪽으로 이동하여 지하수가 염수화하게 된다.

위 7가지 염수화의 요인 중 제주도 동부지역에서는 자연적인 염지하수, 암염에 의한 염수화 및 해수의 침입에 의한 개연성을 갖고 있어 이에 대해 이론적 고찰을 하고자 한다.

## 2) 자연적인 염지하수(natural saline ground water)의 특성

자연적 염지하수란 담수 대수층 아래에 존재하는 염지하수를 말하며, 양수 등에 의해 담수와 염지하수가 혼합되거나 염지하수가 존재하는 대수층까지 관정을 시추하게 되면 염지하수가 위로 이동하여 염수화가 일어난다.

염지하수의 발생 요인은 강우분포와 강우량, 증발산량과 함양량, 토양의 형태와 대수층의 구성물질, 체류시간과 흐름 속도 또는 유출지역의 특성 등이다. 자연적인 염지하수 형태는 얇은 대수층에서는 거의 발견되지 않는데 이는 강우에 의해 형성된 물이 얇은 대수층을 통하여 흐르기 때문이다. 상대적으로 수리경사가 낮거나 수리전도도가 낮은 해안 대수층에서는 부분적으로 자연적인 염지하수가 형성될 수 있다. 자연적 형태의 염지하수에서 염도는 대수층의 구성물질과 화학반응, 체류시간 및 다른 지하수와의 혼합 등에 따라 지표에서부터 깊이가 깊어질수록 증가한다.

담수가 자연적으로 염지하수에 의해 오염되는 것은 염수 대수층의 물이 지표면으로 유출(용천수)하거나 지하에서 담수와 염수가 혼합될 때 일어나며, 이런 용천의 형태는 미국의 여러 지역에서 보고되고 있다(Richter and Kreitler, 1993).

담수와 염지하수의 경계는 다양한 두께를 가진 점이대가 존재하고 비지질적인 원인 즉 과잉양수 등에 의해 이 점이대가 변하거나 수위하강으로 인해 염수가 침입하게 된다. 이와 같이 담수와 염수가 혼합할 때 수질특성이 변하게 된다.

자연적으로 염분이 높은 지하수는 주요한 음이온인 염소와 양이온인 나트륨 농도가 높게 나타난다. TDS 농도가 수십만 ppm에 근접하는 깊은 수역의 고염수에서는 칼슘 농도가 높게 나타나며, 이런 고염수는 거의 대부분 NaCl과 CaCl<sub>2</sub>로 이루어져 있다. 광물퇴적에 의한 자연적인 고염수는 일반적으로 다른 고염수에서 나타나지 않는 Cu, Zn, Ni, Co, Pb 또는 Ag와 같은 이온이 고농도로 나타난다(Richter and Kreitler, 1993).

대부분의 지하수는 지질구조가 형성될 때부터 체류하는 물(connate water, 체류수), 강우에 의하여 형성된 물(meteoric water, 강우수) 및 이 두 가지가 혼합된 형태의 물(mixing water, 혼합수)로 이루어져 있다. 따라서 체류수의 기원은 주요한 지질구조의 형성 연대와 관계를 가지고 있으며, 강우수는 체류수 보다 훨씬 형성 기원이 짧다.

Hanor(1983)는 고염수가 되는 요인을 세 가지 메카니즘, 즉 i) 증발잔류암이 침강후에 남겨진 고염용액에 의하거나, ii) 층이나 돔 형태로 존재하는 암염이 유역수에 의한 용해, iii) 유역수가 저투수성 혈암(역삼투압 작용을 함)을 통과하면서 혈암의 고압측에 염수를 형성한다고 설명하였다.

이외에도 역삼투에 의한 염의 잔류 이론(Desitter, 1947; Atkinson and others, 1986), 증발 잔류암의 침강(Land, 1987) 등에 의해 자연적인 염지하수가 형성된다고 하였다. 일반적으로 열수(hydrothermal)의 구성물질, 변성암(metamorphic) 또는 화성암(igneous)을 통하여 흐르는 지하수는 염수화가 된다(Roedder, 1984).

자연적인 요인, 인위적인 요인 또는 다른 요인에 의한 염지하수인가를 구별하는 데는 여러 가지 비교법이 있지만, 대부분은 주요한 양이온과 음이온, 미량원소 Br 과 I, 동위원소  $^{18}\text{O}$ , 중수소와  $^{34}\text{S}$ 를 사용하며, 이들 각 이온 또는 원소의 비율 즉  $\text{I/Cl}$ ,  $\text{SO}_4/\text{Cl}$ ,  $\text{Mg/Cl}$ ,  $\text{K/Cl}$ ,  $\text{Ca/Cl}$ 과  $(\text{Ca}+\text{Mg})/\text{SO}_4$  등을 사용한다(Richter et al., 1993).

### 3) 암염의 용해(Halite solution)

암염이 용해될 수 있는 필요한 조건은 암염이 존재하는 지역을 강우수 등이 통과하면서 생기는 고염화된 물이 계속 흐르게 할 수 있는 에너지(수리구배 등)와 유출구(outlet)가 있어야 한다(Johnson and other, 1977). 이러한 조건이 충족되어 고염화된 물이 지표면이나 지하수 대수층에 유출되면 담수와 혼합 등이 이루어 진다. 암염은 층이나 돔형으로 지하에 존재하며, 퇴적된 암염의 형태는 염화물(예, carnalite,  $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), 황산염(예, polyhalite,  $\text{K}_2\text{Ca}_2\text{Mg}[\text{SO}_4] \cdot \text{H}_2\text{O}$ ; anhydrite,  $\text{CaSO}_4$ ; gypsum,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), 탄산염(예, dolomite,  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ; limestone,  $\text{CaCO}_3$ )과 관계가 깊다. 암염은 대부분 순수한 NaCl 형태로 존재하는데 멕시코만 연안의 salt-dome에서는 92%, Louisiana에서는 93~99% 및 Texas 내륙에서는 99%가 NaCl이며 나머지 성분은  $\text{CaSO}_4$  등이다.

암염의 용해되거나 이와 혼합에 의해 생긴 염지하수의 성분은 순수한 NaCl이 많기 때문에 상대적으로 일정한 화학적 조성을 가지며, 주요 이온인 Ca와 Mg도 다른 요인에 의한 염지하수의 형태와 비교하면 비교적 높게 나타난다.

암염에 의한 염수화의 요인을 파악하는 주요 인자로는  $\text{K/Na}$ ,  $\text{Br/TDS}$ ,  $(\text{Ca}+\text{Mg})/(\text{Na}+\text{K})$ ,  $\text{Na/Cl}$ ,  $\text{Ca/Cl}$ ,  $\text{Mg/Cl}$ ,  $\text{SO}_4/\text{Cl}$ ,  $\text{K/Cl}$ ,  $^{18}\text{O/D}$  등이다(Richter et al., 1993).

#### 4) 해수침입 특성

##### (1) 메카니즘

해수침입은 대부분의 해안지역에 발생된다고 보고되고 있으며, 해수침입으로 지하수 관정이 폐공되고 있고, 해수침입의 확산을 방지하기 위해서 상당한 비용이 들고 있다. 자연적인 조건하에서 비피압 해안 대수층이나 얇은 해안 대수층의 지하수는 지형적인 원인에 의하여 바다로 흐르고 있다. 이런 흐름 때문에 만조시 해수면에 의한 압력이나 폭풍에 의한 범람 등으로 해수침입이 일어난다. 해수침입이 어느정도 일어나는가는 여러 가지 요인에 따라 다르지만 그 중에서도 함양량, 수리수두 및 대수층의 투수량 등에 영향을 받는다.

담수와 해수가 접하는 경계층(점이대, 염소이온농도 250mg/L~18,000mg/L)은 지역에 따라 조석의 변동, 담수의 유출량, 수리학적 관계에 따라 다르며 미국 Florida의 Miami에서는 50ft 두께(Kohout, 1960), 북부 Atlantic Plain에서는 400ft~2,200ft 두께까지 이르고 있다(Meisler, 1989). 이 점이대내에서 해수중의 일부는 다시 바다로 유출되는데, Florida의 Biscayne 대수층에서는 침입된 해수의 20%가 다시 바다로 유출된다(Kohout, 1960). 이와 같은 점이대 내에서의 흐름 때문에 담수의 수위가 낮거나 지형적인 요인에 의하여 내륙 쪽으로 해수가 흐를 수 있는 어떤 조건하에서는 담수와 해수가 혼합된 점이대가 상당한 거리까지 내륙 쪽으로 위치하게 된다(Stringfield and LeGend, 1996; Cotecchia and others, 1974). 이 점이대는 조석에 따라 영향을 받으며, 그 점이대의 변동폭은 수직으로 1.5m, 수평으로 60m정도이다(Urish and Ozbilgin, 1985).

얇은 해안 대수층에서 점이대의 평형을 교란시킬 수 있는 것은 관정을 통하여 과잉양수를 하거나 대수층으로 함양되는 수량이 감소하여 담수의 흐름이 감소할 때이다. 해안 대수층에서 과잉양수를 하게 되면 지하수위가 해수면 아래로 내려가고 지하수의 흐름이 역전되어 양수된 지역으로 해수가 침입하게 된다. 또한 해안으로 흐르는 지표수가 산업용이나 가정용 등으로 과잉으로 사용하거나 지표면 건축 등의 원인으로 지하수 함양을 차단시키거나 준설 등에 의한 수로의 변경으로 인해서도 해수가 침입하게 된다. 폭풍 시에 발생하는 물보라(sea spray)에 의해서도 연안 대수층의 염수화가 발생한다(Richter et al., 1993).

(2) 해수의 화학성분

해수는 Table 2에 나타낸 바와 같이 약 35,000mg/L의 염분(TDS)을 포함하고 있으며, 이 중 염소와 나트륨이 84%를 차지하고 있다.

Table 2. Concentration of major and significant minor chemical constituents in sea water(Goldberg and others, 1971; Hem, 1985)

Constituent	Concentration(mg/L)	Percent(%)	Total Percent(%)
Chloride, Cl	19,000	54	54
Sodium, Na	10,500	30	84
Sulfate, SO <sub>4</sub>	2,700	8	92
Magnesium, Mg	1,350	4	96
Calcium, Ca	410	1	97
Potassium, K	390	1	98
Bicarbonate, HCO <sub>3</sub>	142	0.4	98.4
Bromide, Br	67	0.2	98.6
Strontium, Sr	8	0.02	98.6
Silica, SiO <sub>2</sub>	6.4	0.02	98.6
Boron, B	4.5	0.01	98.6
Fluoride, F	1.3	0.003	98.7
Iodide, I	0.06	0.00017	98.7

해수에서 주요한 양이온과 음이온은 나트륨과 염소인데 반해 담수에서는 칼슘과 중탄산 이온, 황산화물 이온이다. 해수에서의 Ca/Mg의 비율은 약 0.3 정도이고 담수에서의 이론적 Ca/Mg의 비율은 0.83이다. 시료의 각 성분비를 도식화하여 해수의 성분비와 비교하면 염수화의 요인이 해수침투 여부를 판명할 수 있다.

(3) 해수의 침입에 대한 이화학적 특성

염수화의 원인이 단순히 해수침입에 의한 경우에 나타나는 현상은 TDS 농도가 증가하고 양이온과 음이온의 농도가 증가한다. 해수침입에 의한 염수화를 규명하는데 가장 많이 사용하는 추적자는 염소 이온인데, 이는 염소 이온이 물에 녹으면 보존성이 높은 자연적인 성분이기 때문이다. 해수가 침입되지 않는 관정

의 배경농도와 과거의 농도 등을 기준으로 하여 주기적으로 염소이온 농도를 관측하여 비교한다. 지하수의 염수화의 원인은 단순하지 않고 여러 가지 복합적으로 작용하기 때문에 염소 이온 이외에 다른 추적자를 이용해서 분석할 수 있다. 캘리포니아주 Monterey County의 Castroville 지역은 1944년 내륙 5마일까지 해수가 침입되어 있었는데 과잉양수에 의해 1959년에는 1마일 더 내륙쪽으로 해수가 침입되었다(Richter and Kreidler, 1993). 이 곳에서는 염수는 시추된 지하수 관정을 통하여 얇은 대수층에서 깊은 대수층으로 유출되었는데, Piper diagram을 사용하여 해수침입에 의한 혼합이나 이온교환형태를 구별할 수 있다. 대수층의 원지하수와 침입된 해수 사이에 칼슘과 나트륨이 이온교환을 하는데, 나트륨이 포화농도에 이를 때까지 이온교환이 일어나며, 나트륨이 포화농도가 되면 칼슘은 원지하수에 더 이상 방출되지 않는다. 얇은 대수층에서 깊은 대수층으로 염수가 유출될 때는 해수와 담수의 화학성분은 단순한 혼합형태를 나타낸다. Piper(1953) 등에 의하면 남부 California에서 TDS가 약 2,000ppm(Cl 농도 약 1,000ppm) 일 때 나트륨이 포화농도에 달한다고 하였다.

대수층내에 존재하는 염지하수가 오래 전에 형성·진행되었는가 또는 최근에 진행되었는가를 판단하는 것은 대단히 중요한 문제이며 대수층내에 존재하는 염수성분의 체류시간을 이용하여 분석할 수 있다.

이 분석인자로는

- ①  $^3\text{H}$  분석 : 내륙의 담수에는 얼마간의  $^3\text{H}$ 가 존재하지만 심해수에는 거의 영에 가깝다(Custodio, 1987).
- ②  $^{14}\text{C}$  동위원소 : 해수에는  $^{14}\text{C}$  동위원소가 유기물질의 값과 거의 비슷한 반면에 형성될 때부터 있었거나 해수침입으로 인하거나 오래된 해수는 이 값이 낮다(Custodio, 1987).
- ③ I/Cl 의 비율 : 해수에서의 I/Cl의 비율은  $3 \times 10^{-6}$ 이고 해수침입이 오래 된 지역에서는 I/Cl 비율이 상대적으로 높은  $10^{-4}$ 으로 나타나며 그 연대를 추정하면 7,000~21,000년으로 Ipswichian 간빙기 시대와 관계가 있다(Howard and Lloyd, 1983).
- ④ Br/Cl 중량비 : 해수에서 이 비율은  $3.4 \times 10^{-3}$ 이고 캘리포니아 맨하탄 해변 지역의 해수가 침입된 관정에서는  $3.2 \times 10^{-3}$ 에서  $3.7 \times 10^{-3}$  까지 나타났으

며, 암염의 용해에 의한 염수는 이 비율이  $5 \times 10^{-4}$  정도보다 적게 되므로 염수화가 해수침입에 의한 것인지 암염의 용해에 의한 것인지를 판명하는데 유용하게 사용된다(Brennan, 1956).

⑤  $SO_4/Cl$  : 염지하수가 해수 기원인지 아닌지는 이 성분비율에 의해 알 수 있는데, 해수에서는  $SO_4^-/Cl^- = 0.13$  이라는 일정한 값을 취한다. 이 비율을 Dittomer's ratio라고 한다(山本莊毅, 지하수조사법, 1983).

⑥ 기타 : 동위원소  $^{18}O$ 과 이중수소, 탄소동위원소  $^{13}C$ ,  $Ca/Mg$  중량비등을 이용한다.

해수가 침입된 대수층에서 지하수의 이화학적 특성을 변화시키는 주요한 요인은 이온교환과 중탄산이온의 용해에 의한 것이다. Nadler(1981) 등은 모래 퇴적층으로 이루어진 대수층내의 점이대에서 일어나는 과정을 1)해수의 희석, 2)  $Ca-Mg$  교환, 3)  $Na-Ca$  또는  $Na-Mg$  교환, 4) 황산화물의 환원으로 요약했고, 일본 후지시의 해안지역에서 해수가 침입된 지하수에서는 해수와 담수의 이론적인 혼합비율에 의한 것보다는 이온교환과 침전작용으로 1)  $Ca$  농도 증가, 2)  $SO_4$  농도가 약간 증가하고 3) 단순히 혼합되었을 때 기대했던 것보다  $Na$ ,  $K$ ,  $HCO_3$ 의 농도가 낮아진다고 하였다(Ikeda, 1967). 지하수의 염수화가 오래 전에 일어난 것인지 근래에 일어난 것인지를 판단하는 또 다른 방법(Jecks, 1973)은  $Ca$ 의 농도에 의한 것인데, 염수화가 오래 전에 일어난 지하수는 담수와 해수사이의 이온교환 반응이 오랜 시간동안 행해졌기 때문에 근래에 일어난 염수화에 비해서  $Ca$ 의 농도가 높을 것이라는 이론적 가정에 기초한 것이다.

#### (4) 해수침입의 반응특성

##### ① 혼합(mixing)과 이온교환(ion exchange)

점이대안에서 해수와 담수가 혼합되면 염소농도는 배경농도에서 해수농도까지 나타나며, 점이대의 전면에서는 이온교환이 일어나고 그 후면에서는 해수 성분이 지하수에 의해 희석되는 혼합현상이 나타난다. 이런 혼합현상은 Piper diagram상에서 직선으로 나타나기 때문에 쉽게 구별할 수 있으며, 염소이온농도

를 기준으로 주요 양이온과 음이온을 x와 y축을 이용한 그래프로 그리면 담수와 해수사이에 이론적인 혼합을 나타내는 선에 근접하게 표시된다.

대수층에 존재하는 점토질 등은 표면에 자유 음전하를 띠게 되어 물 속의 양이온을 흡착하게 된다. 전형적인 담수 대수층에서는 주로 칼슘이온으로 포화되어 있고 염수대수층에는 주로 나트륨이온이 함유되어 있어 해수가 담수층에 침입할 때는 나트륨이 칼슘으로 이온교환이 일어난다.

## ② 탄산염 용해

해수와 담수에는 각각 탄산칼슘이 포화되어 있으나 서로 혼합되면 불포화된다. 해수와 담수가 혼합되면 탄산염의 용해가 일어나서 칼슘과 중탄산이 증가하며, pH나 CO<sub>2</sub>의 변화와 관련되어 유기물이 풍부한 퇴적층에서 황산염의 환원이 일어날 때 추가적으로 탄산칼슘의 용해가 일어난다(Custodio, 1987).

## ③ 황산염 환원

해수에는 상대적으로 높은 황산염 농도를 가지고 있고, 대수층에 존재하는 유기물과 같은 산화물질이나 박테리아와 같은 반응 촉매에 의하여 황산염은 환원되어 해수에서보다는 농도가 낮아진다.

## 5) 기타

농업지역이나 축산지역에서 사용되는 용수의 유출(effluents)로 인하여 주요한 양·음이온과 NO<sub>3</sub> 등이 지하수의 TDS를 증가시킨다.

이외에도 염수화 요인은 우리 나라에서는 볼 수 없는 현상이지만 미국의 평야지역이나 캐나다에서 상당히 나타나는 염화확산(saline seep) 현상이 있다. 염화확산이란 관개용수를 사용하지 않는 지역이면서 일정기간 또는 항상 습지인 지역으로 지각이 종종 백염(white salt)으로 이루어진 염분이 있는 토양이 최근에 확대되어, 이곳에서 농작물이나 목초의 생산이 감소하거나 생산할 수 없게 되는 현상을 말한다.

동계기간에 도로의 결빙을 막기 위해 뿌리는 염화나트륨이나 염화칼슘에 의한 지하수의 염수화 문제가 발생하는데, 미국의 동부와 중-북부 주인 경우 지역적인 기후조건으로 동계에 도로에 살포하는 염화나트륨이나 염화칼슘의 양은 1985년부터 1990년까지 연평균 10.5백만톤을 살포하였다(Richter and Kreitler, 1993).

이외에도 폭풍우 등에 의한 물보라(sea spray), 쓰레기 매립장 침출수 등의 원인에 의해서도 지역적으로 지하수의 염수화가 일어날 수 있다.

## 2. 수질특성의 해석기법

### 1) Piper 및 Stiff diagram

Piper diagram은 하단의 두 개의 삼각형 중 왼쪽은 주 양이온인  $\text{Na}^+\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ 의 농도(epm)를 백분율로 환산하여 나타내며 오른쪽 삼각형은 주 음이온인  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$  이온의 농도(epm)를 역시 백분율로 환산하여 표시하고, 다음으로 양이온과 음이온 삼각형에 표시한 점을 상부에 있는 다이아몬드형 그래프에 나타낸다.

Piper diagram은 Fig. 5, 6에서와 같이 지하수의 유형분석과 서로 다른 유형의 지하수의 혼합, 양이온교환, 침식과 용해작용, 황산염환원 등의 관계를 분석하는데 사용된다.

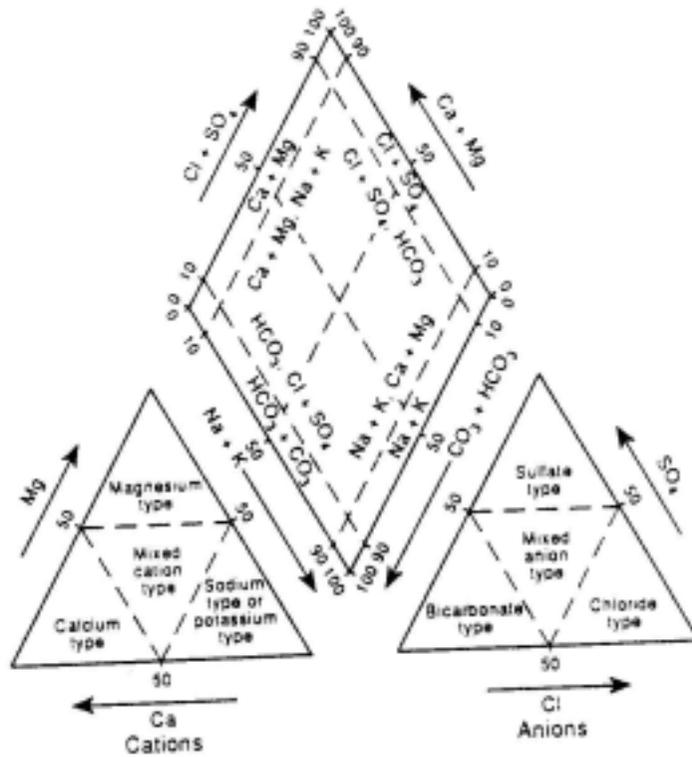


Fig. 1. Classification scheme of hydrochemical facies based on major-ion percentage on Piper diagram.

Fig. 2는 Richter(1993) 등에 의하여 piper diagram을 이용하여 혼합과 이온 교환을 분석한 것으로 (a1)는 어떤 지역에서 해수침입에 의하여 이온교환 특성이 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 Ca와 Na 사이의 교환형태가 가장 뚜렷하며, 해수가 침입하여 Na가 대수층에 포화될 때까지 진행하며, 담수와 해수가 접하는 점 이대의 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.

Stiff diagram은 도표의 중앙선을 중심으로 왼쪽은 양이온 중에서  $\text{Na}^+\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ 의 이온농도를 나타내고 오른쪽은 음이온 중에서 주 음이온인  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ 의 농도를 일종의 모형으로 나타내어 작성한 것이다. 지하수 조사에 있어서 각 시료채취 지점의 수질분석 결과를 이러한 모형으로 도식화하면, 동일 기원의 지하수는 같은 형태의 모양을 나타내므로 유용하게 사용할 수 있다. 이 diagram은 도식화된 양이온 이외에도 특정 오염물질 1~2개를 사용할 수 있고 음이온도  $\text{NO}_3^-$  등 특정성분을 표기하여 수질 특성을 고찰할 수 있다.

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.

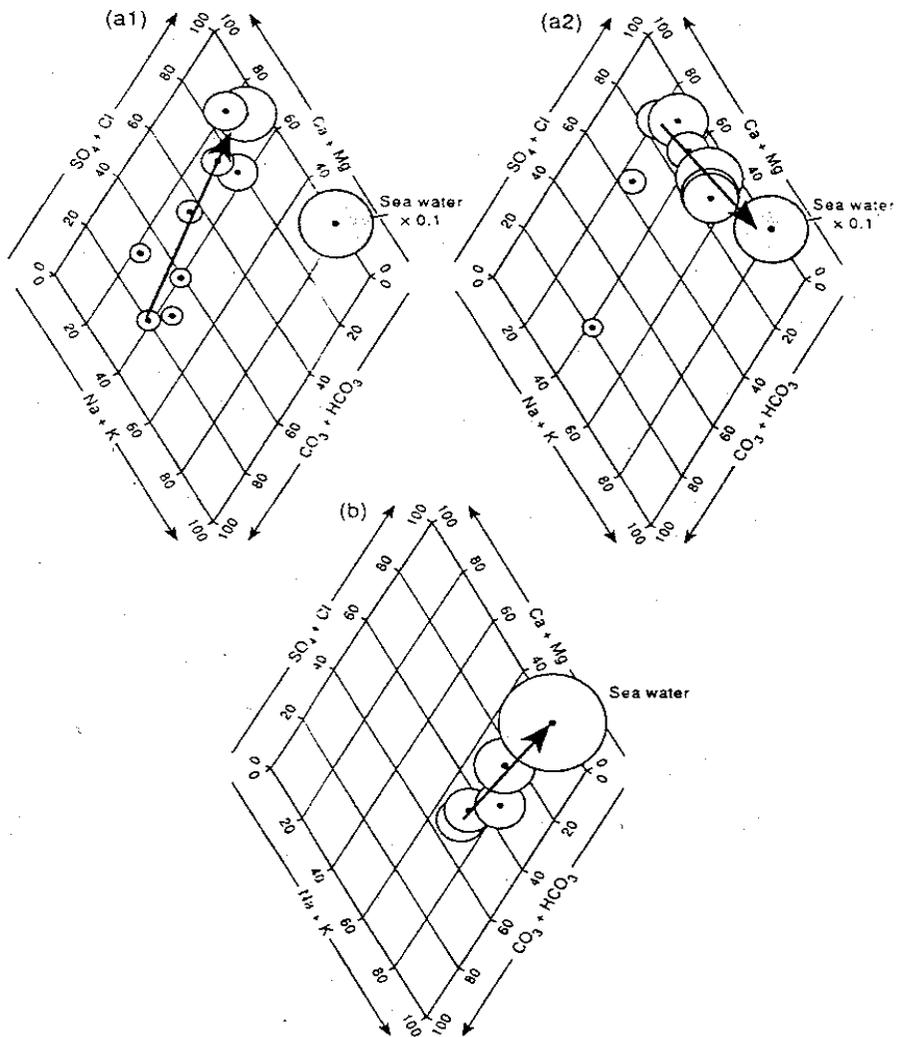


Fig. 2. Piper diagram of chemical composition of coastal saline water. Regional seawater intrusion is characterized by ion exchange (a1) and mixing (a2), whereas local mixing of intruded seawater with fresh water along boreholes is characterized by simple mixing (b) (Richter and Kreitler, 1993).

## 2) 이온 조성비

$\text{Cl}^-$ 을 기준으로 주요 이온성분을 비교하면 암염의 용해에 의한 지하수 염수화 형태는 암염이 순수한  $\text{NaCl}$ 로 대부분 이루어졌기 때문에  $\text{Cl}^-$ 과  $\text{Na}^+$  사이에 일정한 비례관계가 성립하고, 다른 이온성분 사이에는 일정한 관계가 나타나지 않으며, 해수에서는 일정한 비율을 갖는다. 이와 같이 이온 조성비의 비교를 통해서 염수화 요인이 암염 용해나 해수침입 또는 다른 요인에 의한 것인가를 구별할 수 있다(Richter and others, 1993). 또한 염지하수가 해수 기원인지 아닌지는 성분비율에 의해 알 수 있는데, 해수에서는  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^- = 0.13$  이라는 일정한 값을 취한다. 이 비율을 Dittomer's ratio라고 한다(山本莊毅, 지하수조사법, 1983).

지하수중의 해수침입을 평가하기 위하여 Revelle(1941)는 Chloride-bicarbonate 비를 이용했다. Chloride는 해수중에 많이 포함되어 있는 반면에 지하수 중에는 적은 양이 존재하고 bicarbonate는 반대로 해수중에는 비교적 소량이고 지하수 중에는 비교적 많이 함유된 음이온이다. 또 해수와 지하수가 혼합될 경우에 발생할 수 있는 이온교환 현상, 황산이온의 환원이나 탄산과 기타 약산기의 상호치환, 그리고 침전현상 등과는 무관하게 Chloride와 bicarbonate는 영향을 받지 않는다는 사실을 응용해서 Chloride-bicarbonate 비를 계산해서 해수침입의 지표로 사용했다.

Todd(1959)는 Chloride-bicarbonate ratio가 0.5 이하인 경우 해수침입의 문제가 없고, 0.5~1.3인 경우 약간 문제가 되며, 1.3~2.8인 경우 보통정도로 침입되어 있고, 2.8~6.6인 경우 심하게 침입된 것을 나타낸다고 하였다.

한정상(1991)은 Chloride-bicarbonate ratio가 1.3 이상을 침입의 징후가 농후한 것으로 분석하였으며, 2 이상을 침입이 심각한 것으로 분류하고 있다.

## 3) 이온교환 특성

일반적으로 이온교환이란 어떤 물질을 염류의 수용액과 접촉시켜 두면 그 물질 속의 이온은 용액 속으로 나오고 용액 속의 이온이 물질 속으로 들어가는 현상을 말하며 양이온교환과 음이온교환이 있다. 점이대안에서 해수와 담수가 혼합

되면 염소농도는 배경농도에서 해수농도까지 나타나며, 점이대의 전면(initial front)에서는 이온교환이 일어나고 그 후면(behind front)에서는 해수 성분이 지하수에 의해 희석되는 혼합현상이 나타난다. 이런 혼합현상은 Piper diagram상에서 직선으로 나타나기 때문에 쉽게 구별할 수 있으며, 염소이온농도를 기준으로 주요 양이온과 음이온을 x와 y축을 이용한 그래프로 그리면 담수와 해수 사이에 이론적인 혼합을 나타내는 선에 근접하게 표시된다.

대수층에 존재하는 점토질은 표면에 자유 음전하를 띠게 되어 물 속의 양이온을 흡착하게 된다. 전형적인 담수 대수층에서는 주로 칼슘이온으로 포화되어 있고 해수에는 주로 나트륨이온이 함유되어 있어, 해수가 담수대수층에 침입할 때는 나트륨이 칼슘으로 이온교환이 일어난다. 이런 이온교환은 순식간에 일어나는 것으로 추정하고 있다(Kafri and Arad, 1979). 마그네슘과 칼륨도 칼슘을 대신하여 이온교환을 하지만 Na-Ca 교환이 지배적으로 나타난다. 염소이온농도는 이온교환에 영향을 받지 않기 때문에 Na/Cl 비는 해수침입에서 주요한 추적자이다. 해수가 담수 대수층에 침입한 경우에 Na/Cl 비는 해수 중에 존재하는 비율보다 감소할 것이고 반대로 담수가 해수로 가거나 해저 퇴적물에 닿으면 상대적으로 높은 Na/Cl 비율이 나타나게 된다(Custodio, 1987). 이온교환이 일어난 면 뒤에서 침입된 해수성분은 이미 모든 교환이 일어났기 때문에 Na/Cl 비율에 변화가 없게되고, 그 비율은 해수의 Na/Cl 비율(=0.85 몰비)에 거의 접근하게 된다. 반면에 암염에 의해 염수화된 지하수의 Na/Cl 비율은 전형적으로 0.64 몰비를 갖고 있어 차이가 있다. 이온교환에 의해 일어나는 변화 폭은 해수침입 면의 위치를 나타낼 뿐 아니라 해수가 침입된 시간을 나타내 준다.

Table 3. Change in ionic ratios due to ion exchange relative to the position of the intruding water

	Recent Salt-water Intrusion		Fresh-water Intrusion
	Advancing front	Behind advancing front	
Ca/Na	increase	no change	decrease
$\Delta  Ca + Mg  / \Delta  Na $	constant	no change	constant
Na/Cl	decrease	no change	increase

Table 3은 이온교환이 일어나는 경계면에서 이온간 비율의 변화를 나타낸 것이다. 해수 침입이 최근에 일어난 경우에 이온교환 특성은 그래프 상에서 뚜렷하게 나타나지만 오래된 경우에는 뚜렷한 특성이 없거나 거의 나타나지 않는다(Howard and Lloyd, 1983).

#### 4) 전기전도도

전기전도도(electrical conductivity, EC)는 전도도(conductivity), 비전도도(specific conductance)라 부르며, 현장에서 쉽게 측정 가능하고 이온농도나 염도를 측정하는 지표로 사용되기 때문에 지하수 수리학, 해양이나 호소, 토양 및 관개공학 등에 주요 측정인자로 다양하게 사용된다(John, 1961).

물의 전기전도도는 단위체적을 갖는 25℃의 수용성 용액의 두 대응면에서 측정된 전기저항의 역수로 정의하고 있고, 그 단위는 특정온도(℃)에서 cm당 micromhos, 즉 micromhos/cm로 나타내고 있다. SI(international system of units)는 전기전도도의 단위를 ‘siemens(1 siemens=1 mhos)’로 개명해서 사용하고 있으나 아직까지 전세계적으로 이용되지 않고 있다. 물 속에 전하를 띤 이온이 많을수록 즉 용액내에서 이온농도가 증가할수록 용액의 전기전도도는 증가하기 때문에 전기전도도는 바로 이온농도의 지시인자이다(한, 1998).

전기전도도와 용존고용물질의 함양(TDS) 사이의 관계는 다음과 같다.

$$TDS(mg/L) = A \cdot \text{전기전도도}(\mu\text{mhos})$$

자연수에서 비례상수 A는 0.54~0.96 이며 일반적으로 A는 0.55~0.75 정도이다. 미국 Arizona에 있는 Gilla River의 경우 A는 0.59 정도이며(미국지질조사소), 제주도의 경우 0.64를 사용하고 있다(장기관측망 실적보고서, 1996).

전기전도도는 다음식을 이용하여 양이온 총량(meq/L)으로부터 구할 수 있다(John, 1961).

$$\text{전기전도도}(\mu\text{mhos}) = \text{양이온(또는 음이온) 총량(meq/L)} \times 100$$

### Ⅲ. 연구내용 및 방법

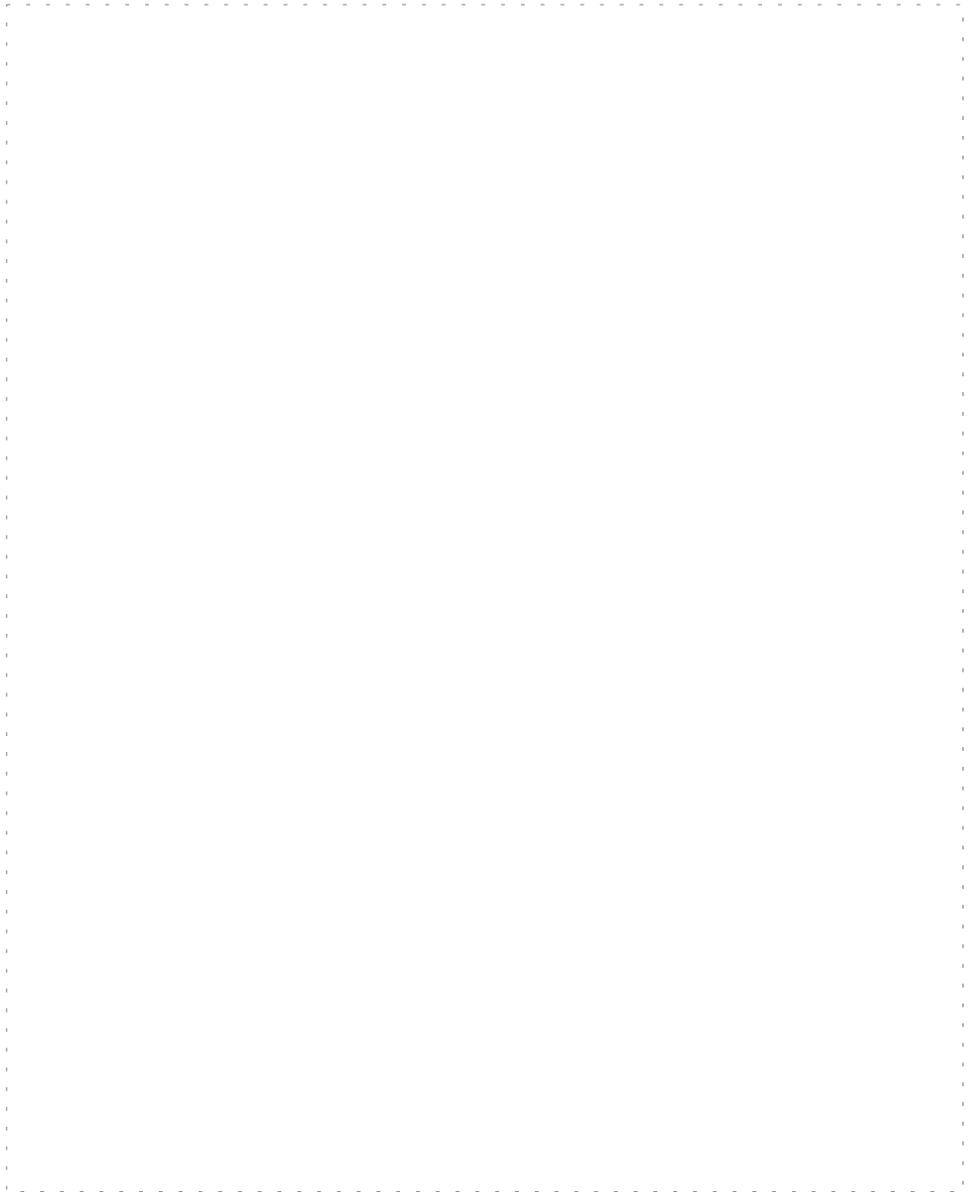
#### 1. 대상지역

제주도 동부지역 지하수 염수화의 이화학적 특성을 규명하기 위한 조사지점 선정은 지하수개발보고서(농어촌진흥공사, 1993)와 제주도환경백서(1997)등에 보고되어 있는 결과를 토대로 지하수 관정 15개소, 용천수 2개소, 우물 1개소를 대상으로 1998년 4월부터 8월까지 5회에 걸쳐 채수하여 분석하였다. 또한 조석에 따른 수질변화를 관측하기 위하여 두 곳의 관정(D-124, D-28)에서 조석간만의 차가 크게 나타나는 1998년 8월 8일부터 9일까지 24시간 동안 2시간마다 심도에 따라 연속 채수하여 분석하였다. 각 조사지역 지하수 관정과 용천수의 현황은 Table 4 와 Fig. 3과 같다.

Table 4. The present data of well at each sampling sites( unit:m )

Well No.	Location	Elevation	Depth	Natural water level	Dynamic water level	Distance from coast
Kyoraе	kyoraе	345.00	296.0	246.00	252.00	15,700
D-203	Kujwa	68.08	90.0	66.70	73.00	2,900
D-57	Pyungdae	57.28	79.5	56.00	56.10	2,000
Pyungdae	Pyungdae					50
D-152	Sangdo	40.55	60.0	39.30	43.60	2,700
W-10	Sangdo	29.78	50.0	26.10	29.80	2,000
D-200	Jongdal	52.02	75.0	51.10	62.00	2,200
D-282	Susan	130.00	170.0	151.00	158.00	7,600
D-69	Susan	109.20	132.0	100.00	120.50	6,750
Susan3	Susan	92.09	120.0	91.40	107.00	5,400
D-124	Susan	28.65	51.0	27.40	33.00	2,750
D-28	Kosung	28.24	41.0	27.20	27.30	2,000
Ojo spring	Ojori	0	0			0
Sungeup2	Sungeup2	195.00	200.0	177.00	180.00	10,280
D-194	Nansan	88.28	102.0	87.03	92.50	2,800
W-15	Nansan	40.01	55.0	38.50	40.80	2,500
D-30	Onpyung	33.26	50.0	32.90	33.65	1,500
Onpyung spring	Onpyung	0	0			0

※자료: 제주도수자원종합개발계획수립 보고서(1993)



## 2. 분석방법

분석항목중 수온, pH, 전기전도도는 현장에서 측정하였으며, pH는 pH meter(Orion model 250A)로 측정하고, 전기전도도는 전기전도도계(ATI Orion model 128)로 측정하였다. 음이온 성분중  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Br}^-$ 은 Ion chromatography(Dionex-500, USA)을 이용하였고,  $\text{HCO}_3^-$ 은 bromocresol green을 사용하여 0.02N- $\text{H}_2\text{SO}_4$ 로 적정하여 정량하였다. 양이온인  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ 은 원자흡광광도계(GBC 904AA)를 이용하여 분석하였다.

## 3. 연구방법

지하수의 여러 가지 이화학 성분들 중에서 분석항목은 Richter와 Kreitler(1993) 등에 의해 염수화 요인을 파악할 수 있는 화학적 parameter를 참고하여 선택하였다.

Piper diagram은 plotchem program으로 도식화하였으며, 이를 이용하여 지하수의 유형과 혼합 및 이온교환 형태를 분석하였다. 또한 Stiff diagram은 Geopal program으로 도식화하고, 이온성분의 차이에 따라 모양이 다르게 나타나는 점을 이용하여 지하수의 유형을 분석하고 동일 기원의 지하수인가를 분석하였다.

대상지역 지하수의 이온조성비 상호관계를 비교, 분석하여 염수화 요인과 염수화가 어느 정도까지 일어났는가를 파악하였으며, 조석에 따른 수질변화를 시간별·심도별로 나타내어 분석하였다. 또한 이온농도나 염도를 측정하는 지표로 사용될 수 있는 전기전도도의 분포와 Cl 이온과의 상관성을 살펴보았다.

## IV. 결과 및 고찰

### 1. Piper diagram과 Stiff diagram을 이용한 수질특성

#### 1) Piper diagram

전반적인 수질특성을 살펴보기 위하여 주요 양·음이온의 월 평균 농도 (mg/L)를 관정별로 Fig. 4에 나타냈다. 주요한 수질특성으로서  $\text{Cl}^-$  등 다른 이온은 해안변에서 내륙 쪽으로 거리가 증가함에 따라 뚜렷하게 감소하는 현상을 나타내고 있고,  $\text{HCO}_3^-$ 은 평대우물을 제외하고 대부분 관정과 용천수에서 30~70 mg/L 정도의 값을 보이고 있다.

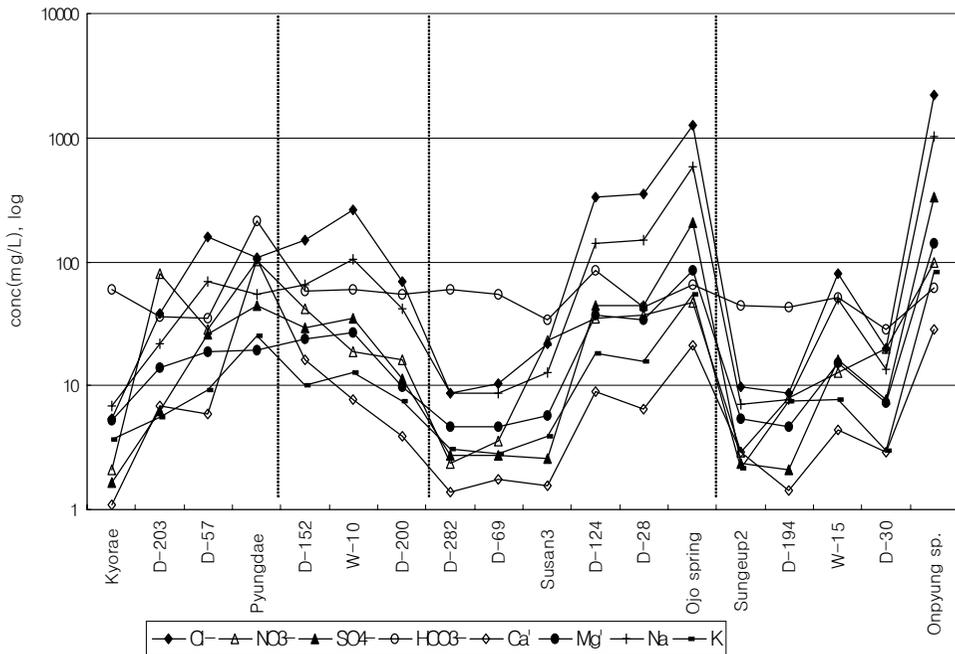


Fig. 4. Variation of major ions at each sampling sites.

Table 5는 1998년 3월부터 8월까지 성산포지역의 강수량을 나타낸 것으로, 5월 강수량이 적고 6월과 7월에 강수량이 비교적 많다. Fig. 5, 6은 강수량이 적은 5월과 비교적 강수량이 많은 7월의 Piper(Trilinear) diagram을 나타낸 것이다. 음이온 삼각형에 나타난 바와 같이 음이온은 해안으로 갈수록  $\text{HCO}_3$ 에서  $\text{Cl}$  이온의 형태로 변하며 이런 변화추세는 매월 변함이 없다. 양이온 삼각형에서는 평대우물과 D-152(40m)를 제외하고 Mg에서 Na+K 이온의 형태로 변하는 수질 특성을 보이고 있다. Richter(1993) 등에 의해 Piper diagram의 다이아몬드 형에서 분석한 것을 기초로 하여 연구대상지역 지하수를 분석하면 Fig. 5, 6에 나타나는 바와 같이 해안으로 접근할수록 담수와 해수간에 이온교환(ion exchange)과 혼합(mixing) 형태가 나타남을 알 수 있다.

Table 5. Monthly precipitation of Sungsanpo in 1998(The Meteorological Agency, 1998)

Month	March	April	May	June	July	August
Precipitation (mm)	151.5	237.0	96.5	372.5	369.5	257.4



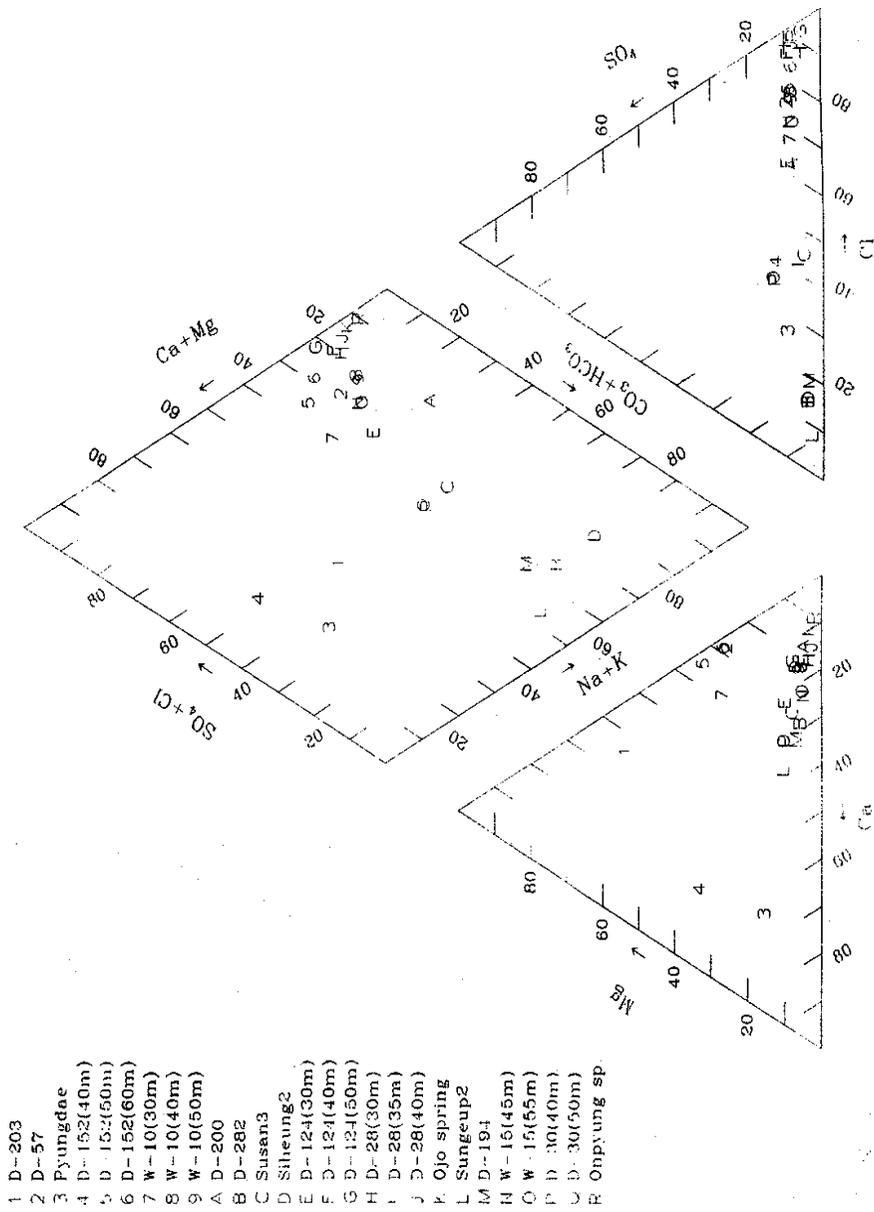


Fig. 6. Piper diagram of chemical composition of study area in July, 1998

## 2) Stiff diagram

Fig. 7은 Stiff diagram을 이용하여 1998년 4월부터 8월까지 동부지역의 수질 특성을 나타낸 것으로 Stiff diagram 형태에 따라 수질특성을 분류하면 Table 6과 같이 대략 4가지 유형으로 나눌 수 있다.

Type I은 해안에서부터 2.7km까지 Na-Cl형이 우세하게 나타나는 형태로 해안용천수와 D-28, D-124, W-10, D-152(40m, 50m), D-57관정에서 나타났다. Type II는 해안에서 2.8km이상에서 HCO<sub>3</sub>가 우세하게 나타나는 형태로 교래지 하수, 성읍2리, D-69, D-194, D-282, 수산3 관정에서 나타났다. Type III은 위 두가지 유형의 혼합형태로 해안거리 1.5~2.9km 사이에 Na-Cl-HCO<sub>3</sub> 형태로 D-203, W-15, D-200, D-30 관정에서 나타났다. Type IV는 Ca-HCO<sub>3</sub>가 우세하게 나타나는 형태로 평대우물과 그 상부에 있는 D-152(40m)에서 나타나며, 연구대상지역에서 특이한 수질특성을 보이고 있다. 일부 관정은 계절에 따라 약간씩 다른 형태를 보이기도 하는데 이는 강우등에 의한 영향이라 사료되며 전반적으로는 같은 형태가 나타남을 알 수 있다.

Table 6. Groundwater types and classification based on Stiff diagram

Type	Classified by elevation (distance from coast)	Well No.	Remark
Type I	0~57m (coast~2.7km)	Onpyung spring, Ojo spring, D-28, D-124, W-10, D-152(40m, 50m), D-57	Na-Cl type
Type II	>88m (>2.8 km)	Kyoraе, Sungeup2, D-69, D-194, D-282, Susan3	HCO <sub>3</sub> type
Type III	33m~68m (1.5km~2.9km)	D-203, W-15, D-200, D-30	Na-Cl-HCO <sub>3</sub> type
Type IV	Occurred in Pyungdae area	Pyungdae, D-152(40m)	Ca-HCO <sub>3</sub> type



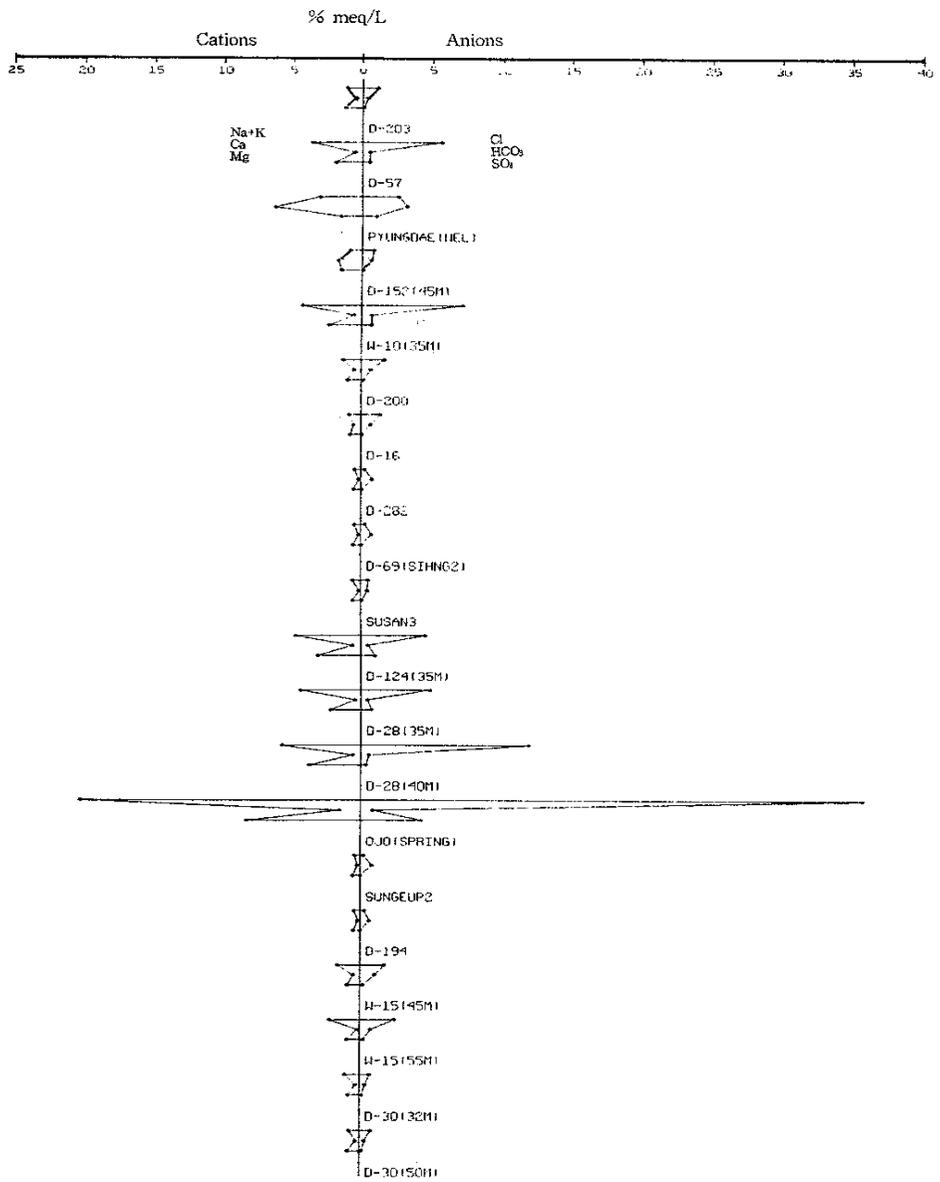


Fig. 7. Continued(in May, 1998).



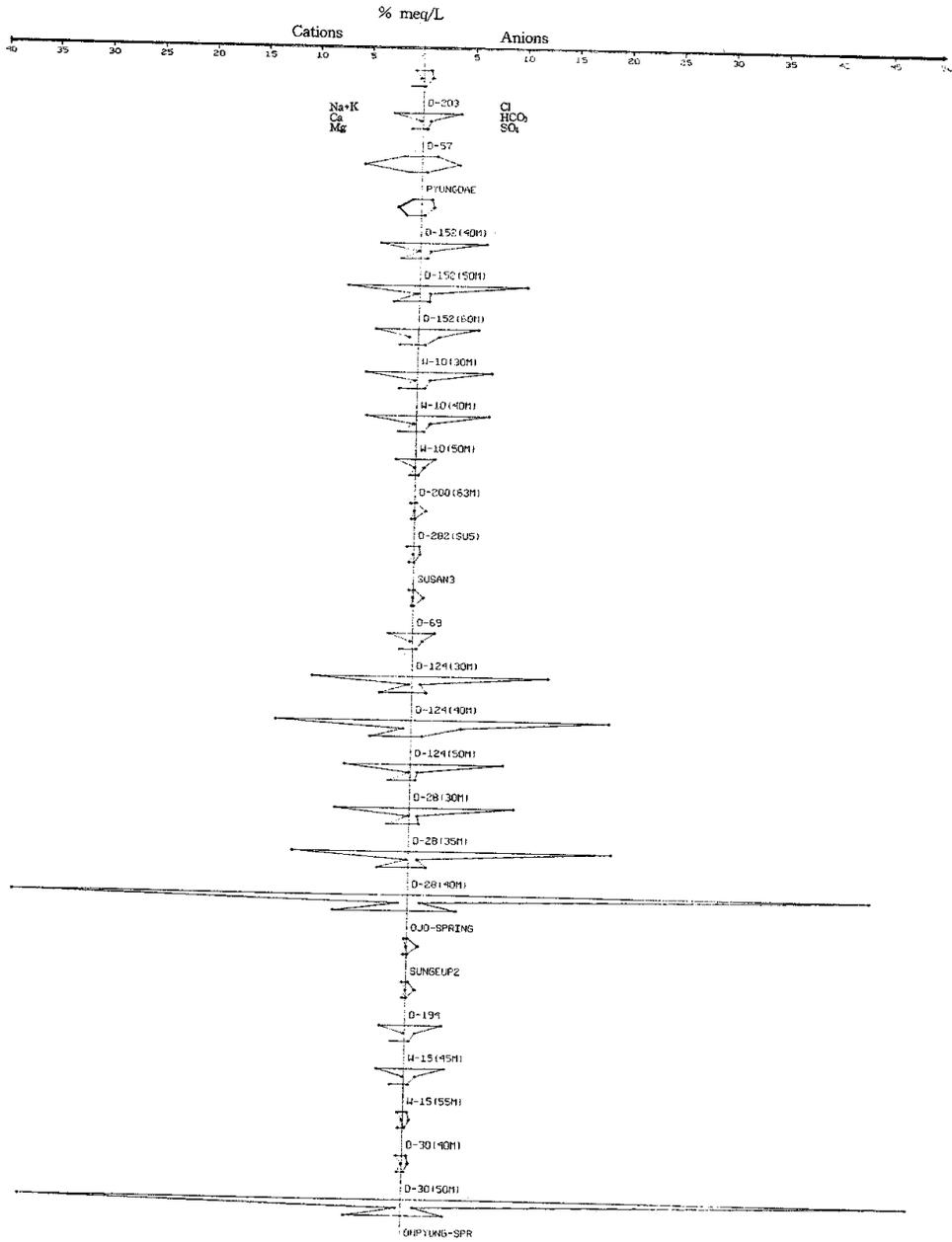


Fig. 7. Continued(in July, 1998).

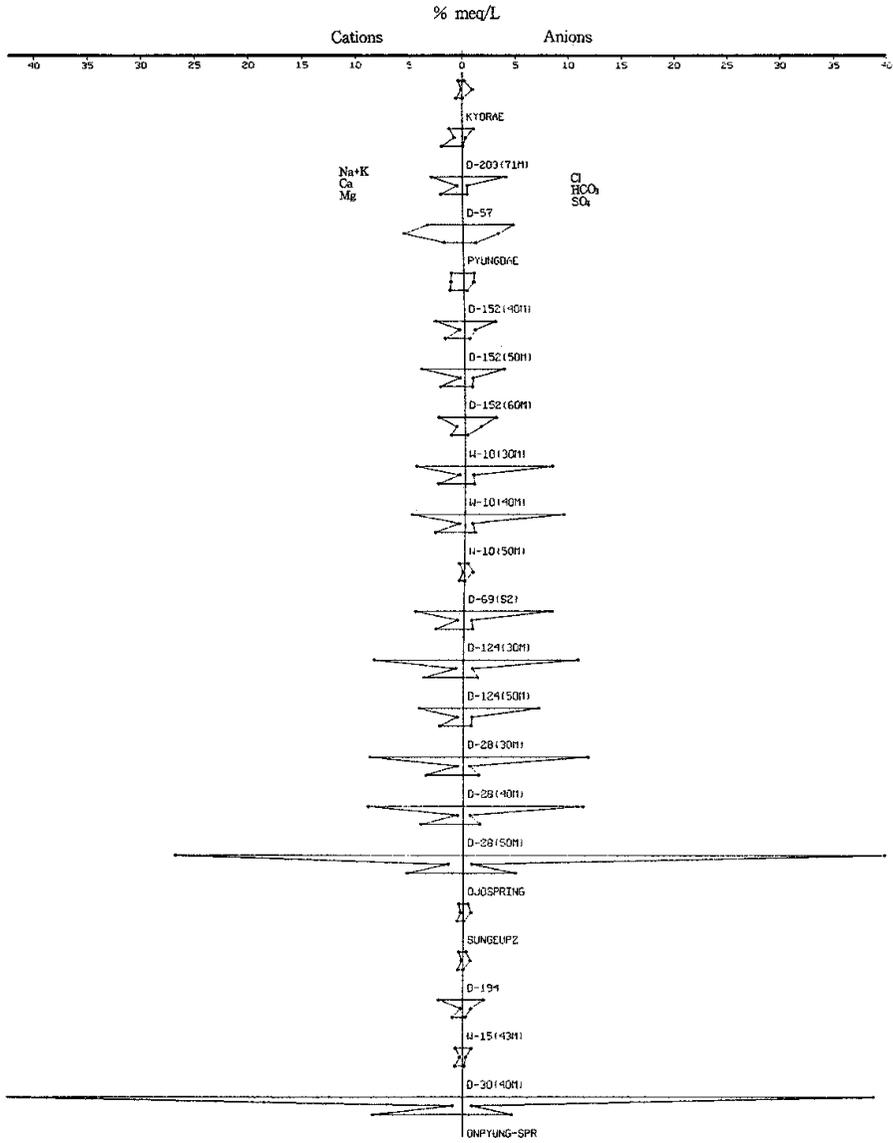


Fig. 7. Continued (in August, 1998).

## 2. 지하수와 해수의 이온 조성비

Cl<sup>-</sup>을 기준으로 주요 이온성분을 비교하면 암염의 용해에 의한 지하수 염수화 형태는 암염이 순수한 NaCl로 대부분 이루어졌기 때문에 Cl<sup>-</sup>과 Na<sup>+</sup> 사이에 일정한 비례관계가 성립하며 다른 이온성분 사이에는 일정한 관계가 나타나지 않으며, 해수에서는 일정한 비율을 갖는다. 이와 같이 이온 조성비의 비교를 통해서 염수화 요인이 암염 용해나 해수침입 또는 다른 요인에 의한 것인가를 구별할 수 있다(Richter and others, 1993).

염지하수가 해수 기원인지 아닌지는 성분비율에 의해 알 수 있는데, 해수에서는 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/Cl<sup>-</sup>= 0.13 이라는 일정한 값을 취한다. 이 비율을 Dittomer's ratio라고 한다(山本莊毅, 지하수조사법, 1983).

Fig. 8은 지하수와 해수사이의 주요 이온의 조성비를 나타낸 것으로 각 그래프상의 오른쪽 점(Cl<sup>-</sup> 농도 10,000이상)은 연안해수의 조성비를 나타낸 것이며, 그 외의 점들은 지하수의 이온조성비를 각각 나타낸 것이다.

Fig. 8에 나타난 바와 같이 이 지역 지하수는 Cl<sup>-</sup>과 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup> 은 해수의 성분과 높은 상관관계를 나타내고 있다. 또한 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>과 Cl<sup>-</sup>의 비는  $0.1354(R^2=0.972)$  로 나타나고 있으며, Na<sup>+</sup>와 Cl<sup>-</sup>의 비는  $0.6462(R^2=0.908)$ , K<sup>+</sup> =  $0.0325Cl^- + 6.86(R^2=0.837)$ , Mg<sup>2+</sup> =  $0.085Cl^- + 6.86(R^2=0.957)$ 로 나타나고 있다. 따라서 이 지역의 지하수 염수화 요인은 해수의 침입에 기인한 것으로 사료된다. NO<sub>3</sub><sup>-</sup>과 Cl<sup>-</sup>의 성분비는 상관성이 없는 것으로 나타났으며, 이는 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>가 육상기원의 물질이기 때문이라 사료된다.

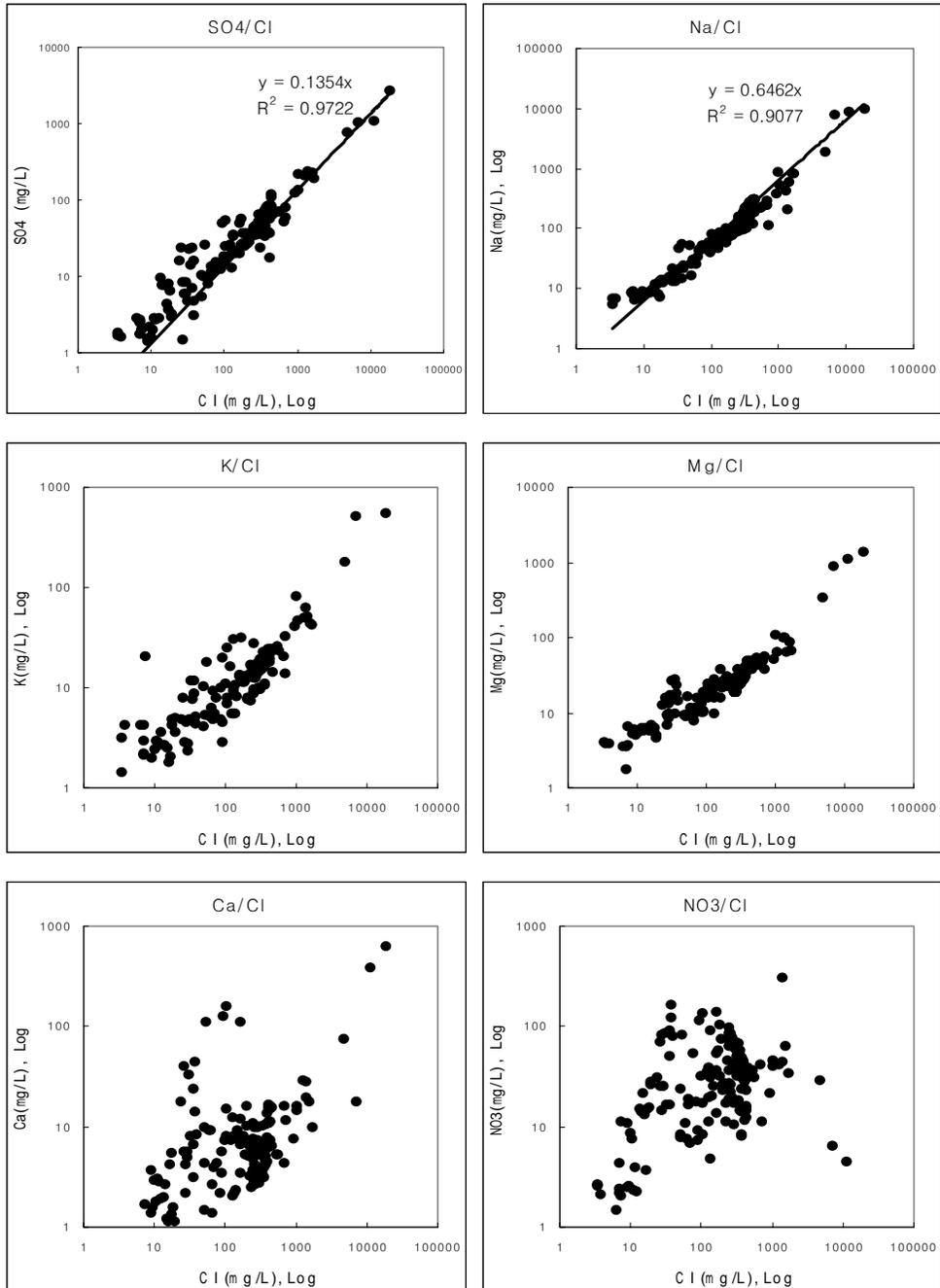


Fig. 8. Bivariate plots of major ions versus chloride.

### 3. Chloride-bicarbonate 비를 이용한 해수침입 평가

Fig. 9는 Revelle(1941)와 Todd(1959)에 의한 평가기법을 적용하여 연구 대상 지역에서 조사기간 동안 분석한 값을 평균하여 Chloride- bicarbonate 비를 나타낸 것이다. Fig. 9와 Table 7에서 보는 바와 같이 연구대상 지역에서 Chloride-bicarbonate 비가 0.5 이하로서 해수침입이 안된 관정은 해안으로부터 2.8km이상에 위치한 교래지하수, D-282, D-69(시흥2), 성읍2, D-194이며, 이 관정들은 현재 음용수 또는 농업용수로 사용되고 있다. Chloride-bicarbonate 비가 0.5~1.3으로 약간 침입된 관정은 2.2~5.4km에 위치한 D-203, 평대우물, D-200, 수산3, D-30 관정이다. 수산3 관정은 현재 사용중인 지하수 관정으로 이 비가 0.64로서 이 관정을 앞으로 계속 monitoring을 하여야 할 것이다. Chloride-bicarbonate 비가 1.3~2.8사이로 보통 정도로 침입된 관정은 2.5~2.7km에 위치한 D-152, W-15 관정이다. 이 비가 2.8를 넘어 해수침입이 심각한 관정과 용천수는 D-57, W-10, D-124, D-28, 오조 및 온평 용천수로 해안에서부터 2.75km내에 위치하고 있다. 또한 오조 및 온평 용천수는 이 비가 19.47과 36.0으로 해수침입이 매우 심각한 상태이다.

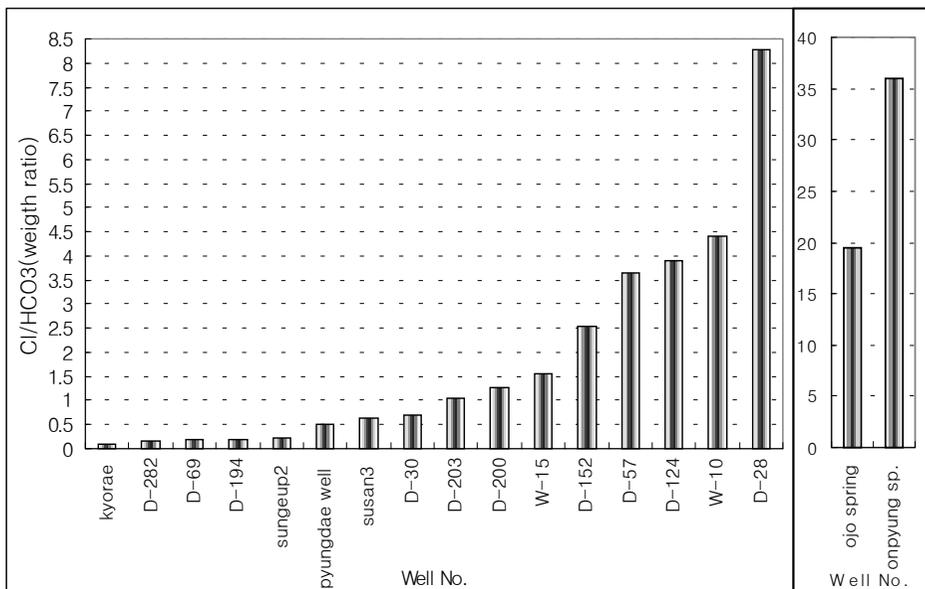


Fig. 9. Distribution of Chloride-bicarbonate ratio.

Table 7. Classification with chloride-bicarbonate ratio

Classification	Cl-HCO <sub>3</sub> ratio	Well No.	Distance from coast (Elevation)
No invaded	< 0.5	Kyoraе, Sungeup2, D-282, D-69, D-194	above 2.8km (above 88m)
Slightly invaded	0.5~1.3	D-203, Pyungdae, D-200, Susan3, D-30	2.2~5.4km (33~70m)
Moderate invaded	1.3~2.8	D-152, W-15	2.5~2.7km (40~41m)
Serious invaded	> 2.8	D-57, W-10, D-124, D-28, Ojo spring, Onpyung spring	coast~2.75km (0~57m)

제주도 동부지역에서 Chloride-bicarbonate 비는 내륙에서 해안 지역으로 갈수록 점점 증가하여 해수침입이 증가하는 것으로 나타났으며, 해안 용천수에서는 가장 높은 비를 보여 해수침입이 가장 심하게 나타났다.

#### 4. 해수의 혼합에 의한 이온교환 특성

점이대내에서 해수와 담수가 혼합되면 염소이온농도는 배경농도에서 해수농도까지 나타나며, 점이대의 전면(initial front)에서는 이온교환이 일어나고 그 후면(behind front)에서는 해수 성분이 지하수에 의해 희석되는 혼합현상이 나타난다. 이런 혼합현상은 Piper diagram에서 직선으로 나타나기 때문에 쉽게 구별할 수 있다.

앞의 Piper diagram Fig. 5, 6을 통하여 동부지역의 지하수에서 담수와 해수 간에는 혼합과 이온교환 형태가 나타나고 있음을 알수 있었다. Richter(1993) 등은 해수가 침입되지 않은 관정과 해수의 화학조성(end-member composition)을 알면 혼합된 정도를 수학적으로 백분율로 구할 수 있다고 하였다. 즉 대수층내에서 가장 보존적인 물질인 염소이온을 이용하여 혼합작용만이 있고 혼합작용시에 염소이온농도가 증가한다는 가정 하에 그 백분율은 다음 식으로 구한다.

$$C_M = X \cdot C_F + (1-X) \cdot C_S \implies X = (C_S - C_M) / (C_S - C_F)$$

$C_M$  = Constituent concentration in mixing water

$C_F$  = Constituent concentration in fresh water

$C_S$  = Constituent concentration in salt water

$X$  = Fraction of fresh water in the mixture

$1-X$  = Fraction of salt water in the mixture

위 식을 이용하여 오조 용출수의 혼합 백분율을 구하기 위하여 각 end-member 를 성산외항의 해수와 해수의 침입이 전혀 없는 교래지하수의 농도를 대입하면,

$$Cl_M = 1253.43 \text{mg/L (오조 용출수의 5개월 평균농도)}$$

$$Cl_F = 6 \text{mg/L (교래지하수)}$$

$$Cl_S = 10,967 \text{mg/L (성산항의 해수)}$$

$$X = (10,967 - 1,253.43) / (10,967 - 6) = 0.886$$

그러므로 오조 용출수의 평균적인 담염수 혼합비율은 담수가 88.6%를 차지하고 해수가 11.4%를 차지하고 있다.

이 용출수에서 이론적인 나트륨 농도를 계산하면

$$Na_M = 578.57\text{mg/L}(\text{오조 용출수의 5개월 평균 농도})$$

$$Na_F = 6.8\text{mg/L}(\text{교래 지하수})$$

$$Na_S = 7,908\text{mg/L}(\text{성산외항의 해수})$$

위 식을 적용하여 계산하면

$$0.886 = (7,908 - Y) / (7,908 - 6.8)$$

$$Y = 7,908 - 0.886 \times (7,908 - 6.8) = 907.5$$

이론적인 나트륨 농도는 907.5mg/L이고 실제 측정된 농도는 578.6mg/L이다. 이와 같이 이론적인 값을 계산하여 실제 측정 농도와 비교하면 그 차이만큼 혼합형태와는 다른 이온교환형태가 일어난 것을 알 수 있었다.

이와 같은 방법으로 계산한 값을 Table 8에 나타냈다.

Table 8. Mixing trend and ion exchange through comparison between theoretical and actual concentration of Na

Well No.	Mixing trend		Theoretical concentration of Na(mg/L)	Actual concentration of Na(mg/L)	Changes other than mixing (Ion exchange) (mg/L)
	Fresh-water(%)	Salt-water(%)			
Onpyung spring	80.0	20.0	1587	1013	574
Ojo spring	88.6	11.4	907.6	578.6	329.0
D-28	96.8	3.2	259.6	147.9	111.7
D-124	97.0	3.0	243.8	140.9	102.9
W-10	97.6	2.4	196.4	104.4	92.0
D-57	98.6	1.4	117.4	69.3	48.1
D-152	98.7	1.3	109.5	65.0	44.5
Pyungdae	99.1	0.9	77.9	55.0	22.9
W-15	99.32	0.68	60.5	50.1	10.4
D-203	99.7	0.3	30.5	21.7	8.7
Susan3	99.8	0.2	22.6	12.9	9.7
D-30	99.87	0.13	17.1	13.4	4.3

Table 8에 나타낸 바와 같이 온평용천수의 담수와 해수 혼합비율이 80 : 20으로 가장 높고 해안과의 거리가 멀어질수록 이 비율이 낮아져서 수산3 관정인 경우 99.8 : 0.2로 나타났다. 담수와 해수가 혼합에 의한 특성만이 존재한다고 가정하고 그 혼합비율에 의해 이론적인 Na농도를 구하여 실측한 Na 농도와 비교하면 실 측한 농도가 25~42%까지 낮게 나타나고 있다. 따라서 Na/Cl 비가 감소하며 해수가 담수 대수층으로 침입되어 있는 것을 알 수 있다. 또한 해수와 담수 대수층으로 침투할 때에 혼합(mixing)에 의한 특성뿐만 아니라, Na 농도가 감소한 만큼 다른 형태의 화학적 특성이 나타나는데 주로 이온교환 형태로 나타나는 것으로 사료된다.

## 5. 조석에 따른 수질변화

### 1) D-28, D-124 관정 현황 및 모식도

D-28과 D-124 관정에서 조석에 따른 수질변화를 고찰하기 위하여 관정의 현황과 모식도를 Fig. 10에 나타냈다.

D-28관정은 성산읍 고성리 해발 28.24m에 위치하고 해안으로부터 2.0km 떨어져 있으며, 1972년에 생활용수 및 농업용수로 개발되었다가 염분도가 높아져 폐공되어 지금은 제주도에서 장기관측망 장비를 설치하여 monitoring하고 있는 관정이다. 착정심도는 지표에서 41m, 자연수위는 27.2m로 평균해수면 상부 담수 두께가 1.04m이고 착정후의 동수위도 거의 변하지 않아 27.3m였다. 우물구조는 250mm의 casing으로 pipe길이 26m, strainer 15m로 구성되어 있다.

D-124 관정은 성산읍 수산리 해발 28.65m에 위치하고 해안으로부터 2.75km 떨어져 있으며, 1979년에 생활용수 및 농업용수로 개발되었다가 역시 염분이 높아져 폐공되어 장기관측망장비를 설치하여 monitoring하고 있는 관정이다. 착정심도는 지표에서 51m, 자연수위는 27.3m로 평균해수면 상부 담수 두께는 1.35m이고 착정후 동수위는 33.0m이고, 우물구조는 250mm의 casing으로 pipe 길이 31m, strainer 20m로 구성되었다. 두 관정 모두 주대수층의 지질구조는 FOB(Feldspar Olivine Basalt, 장석과 감람석류를 포함한 현무암)으로 되어있고, D-28, D-124 관정의 미고결투수층이 각각 2개층, 4개층이 존재한다(제주도수자원종합개발계획수립 보고서, 1993).

Well No.		D-28	D-124
Location		Sungsan	Sungsan
		Kosung	Susan
Elevation(m)		28.24	28.65
Depth(m)		41.00	51.00
Natural W.L.(m)	before '93	27.20	27.30
	'93	27.20	27.40
Dynamic W.L.(m)		27.30	33.00
Capacity(m <sup>3</sup> /d)		1901	1650
Hydro-geologic properties	SPC (m <sup>3</sup> /d)	1.9E+04	
	T(m <sup>3</sup> /d)	1.87E+2	
	s	3.6E-02	4.0E-1
	K(m/d)	1.36	
TDS (mg/L)	before '89	220.00	32.00
	after '89	960.00	640.00
Temp.(°C)		17.0	
Geological formation	major aquifer	FOB	FOB
	unconf-ormity	2	4
well struture (m)	dia.	0.25	0.25
	pipe	26.00	31.00
	strainer	15.00	20.00
Pump	built year	'73	'80
	type	A	75-E
	suction pipe(m)	35.00	45.00
usage		domestics, agriculture	domestics, agriculture
Drill. year		'72	'79

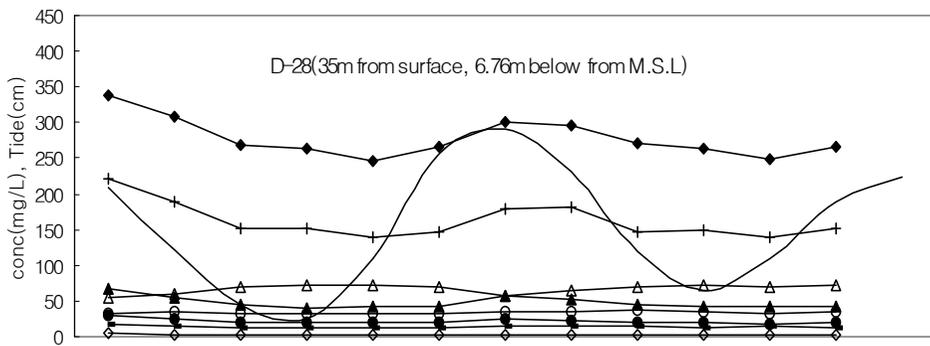
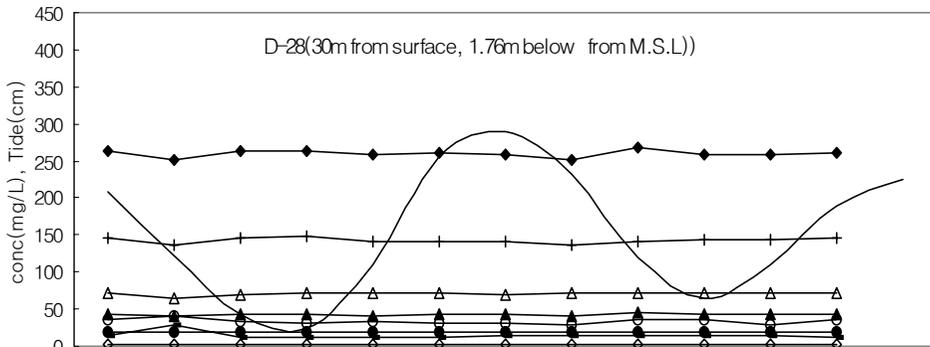
Fig. 10. Schematic diagram showing well structure of D-124, D-28.

## 2) D-28 관정의 수질변화

Fig. 11은 D-28 관정에서 조석에 따른 수질변화를 나타낸 것이다. D-28은 해안에서 2km 떨어진 거리에 위치하고 있으며, 조석효율은 13.57%로 비교적 조석의 영향을 많이 받고 있어 투수성이 좋은 지역에 위치하고 있다.

조석에 따른 수질변화의 주요한 특성은 심도 30m(평균해수면하 1.76m)에서는 변화가 미미하지만 심도가 내려갈수록 변화 폭이 증대되고 있다. 이는 지하로 유입된 지하수와 해수의 비중차(1:1.025)로 담수체가 해수위에 렌즈형태로 떠있어 점이대가 형성되어 있고, 이 점이대가 조석의 영향으로 변하는 것이라 사료된다. 이 관정의 수직적 수질 분포를 Fig. 13에서 살펴보면 상부점이대가 평균해수면과 같은 위치에 나타나고 있어 해수침입이 상당한 정도까지 이루어졌음을 알 수 있다.

D-28 관정에서는 해수면이 상승하는 고조시와 하강하는 저조시에 의해 수질변화에 미치는 지연시간(time lag)은 2~2.5 시간으로 나타났다. 이는 조석이 지하수위에 미치는 지연시간 2시간보다 약간 늦게 수질변화가 일어나고 있다. 그리고 조석의 변화에 따라서  $Cl^-$ 과  $Na^+$  등 주요한 이온은 비례적으로 변하고 있는 반면,  $NO_3^-$ 은  $Cl^-$  등 주요 이온의 농도와는 역의 상관성을 나타내고 있다.



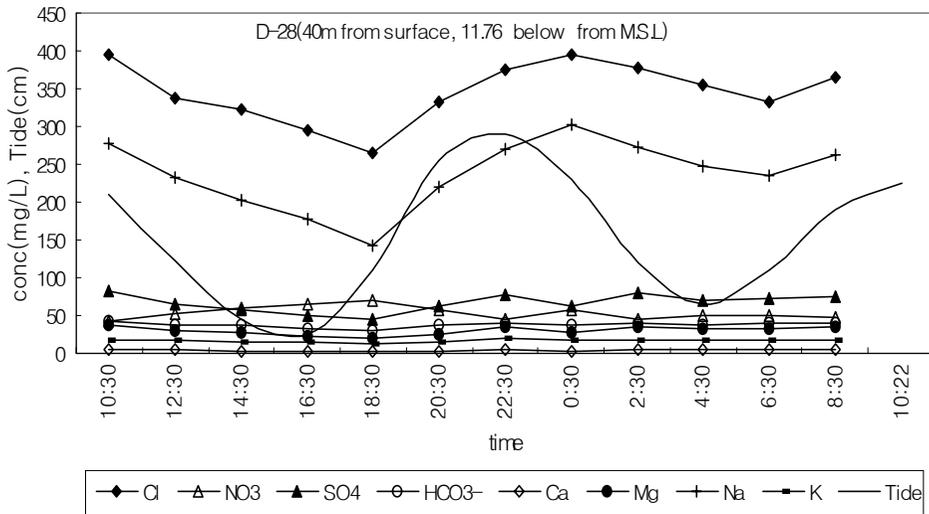


Fig. 11. Variation of major ions in accordance with tidal levels in D-28 well.

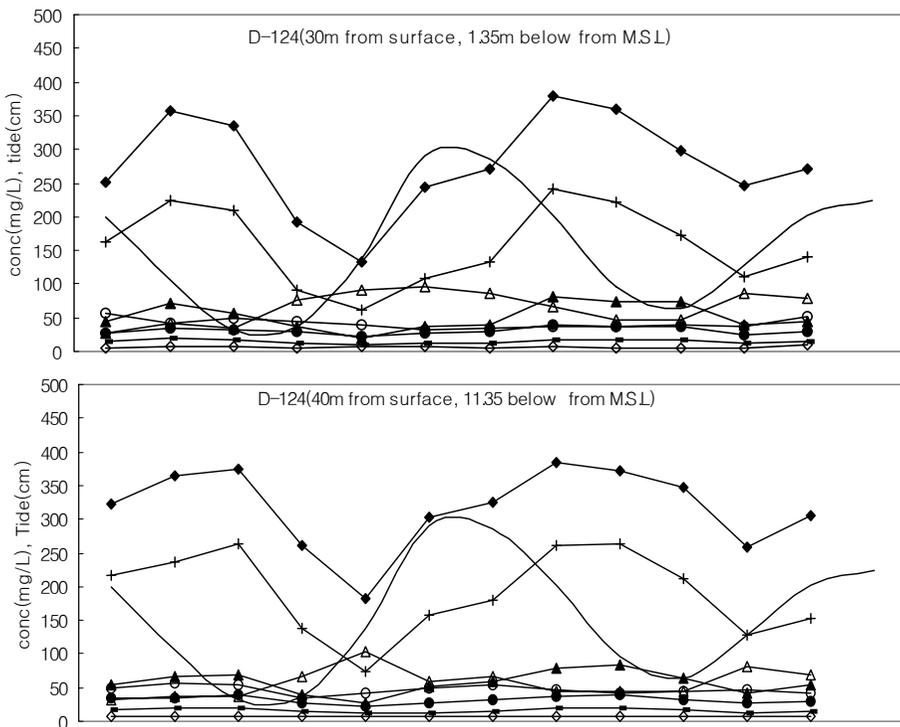
### 3) D-124의 수질변화

Fig. 12는 D-124 관정에서 조석에 따른 수질변화를 나타낸 것이다. D-124 관정은 해안에서 2.75km 떨어진 거리에 위치하고 있으며, 조석효율이 10.32%로 D-28과 같이 비교적 조석의 영향을 많이 받는 투수성이 좋은 지역에 위치하고 있다고 사료된다.

조석에 따른 수질변화의 주요한 특성은 D-28과는 역으로 심도 30m(평균해수면하 1.76m)에서는 변화폭이 크지만 심도가 내려갈수록 변화가 미미하게 나타나고 있다. 동부지역의 지질은 투수성이 좋은 용암류가 해수면하 115km까지 분포하고 있으며 용암류의 단위 두께가 얇고 균열 및 절리등의 투수성 구조들이 발달해 있다는 보고(고, 1997)와 같이 D-124 관정 하부에도 이런 투수성 구조가 존재하고 있다고 추정되며, 평균해수면상에 위치한 균열 및 절리를 통하여 조석의 영향에 따라 해수가 유입되고 유출되는 현상으로 사료된다. 이는 지표하 50m(해수면하 21.35m)에서  $\text{HCO}_3^-$ 이  $\text{Cl}^-$  등의 이온과 비례적인 상관관계를 갖고 있으나, 다른 지역은  $\text{Cl}^-$  등과 이러한 상관관계를 나타내고 있지 않다는 점에 비추어

추정할 수 있다.

D-124 관정에서 해수면이 상승하는 고조시와 하강하는 저조시에 의해 수질변화에 미치는 지연시간(time lag)은 3~3.5 시간으로 조석이 지하수위에 미치는 지연시간 3.5시간과 비슷하게 나타났다. 그리고 D-124 관정에서도 D-28 관정과 마찬가지로 조석의 변화에 따라서  $\text{Cl}^-$ 과  $\text{Na}^+$  등 주요한 이온은 비례적으로 변하고 있는 반면,  $\text{NO}_3^-$ 은  $\text{Cl}^-$  등 주요 이온의 농도와는 역의 상관성을 나타내고 있다.



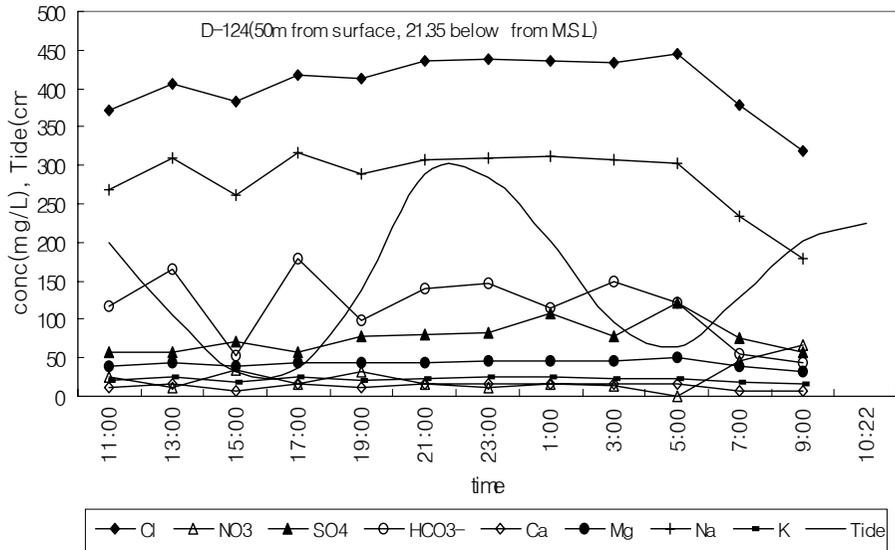


Fig. 12. Variation of major ions in accordance with tidal levels in D-124 well.

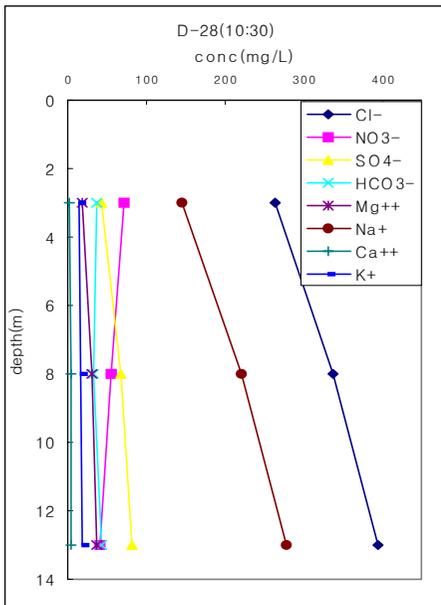
## 6. 심도별 수질 변화

Fig. 13, 14는 D-28과 D-124 관정에서 조석에 따른 수질 변화를 24시간 심도별로 측정된 결과 중에서, 고조시와 저조시의 시간지연(time lag)을 고려하여 수질의 정점과 저점에서 주요 이온에 대한 변화를 나타낸 것이다. D-28 관정은 지표 하 41m(해수면 하 12.76m)까지 측정되었고, D-124 관정은 지표 하 51m(해수면 하 22.35m)까지 측정되었다.

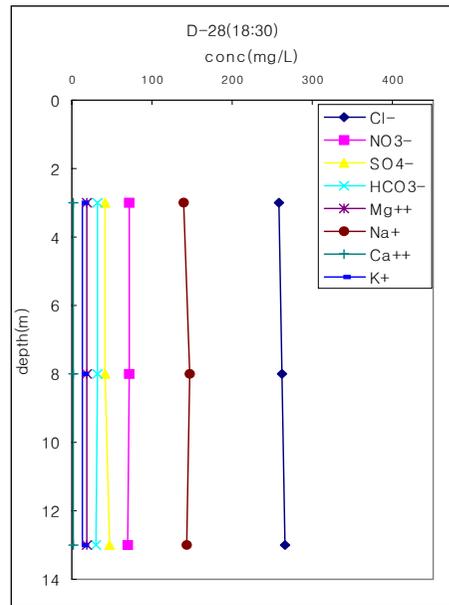
D-28 관정의 상부지점인 지표하 30m(해수면 하 1.76m) 부근에서  $Cl^-$  농도는 250~260mg/L에서 거의 변화를 나타내지 않으나, 하부지점으로 갈수록 해수면의 상승과 하강에 따라서  $Cl^-$  농도의 변화가 많이 나타난다. 지표하 40m(해수면 하 12.76)에서  $Cl^-$  농도는 260~400mg/L까지 변화가 나타나고 있다. 이와 같이 상부지점은 변화가 없고 저저조(Lower low water)시에 하부지점의  $Cl^-$  농도가 상부지점과 거의 같을 때까지 감소하게 되어 Fig. 13, 14에서 보여지는 것처럼 심도에 따라 농도변화가 미미하게 나타난다고 사료된다. 이와는 반대로 D-124 관정에서는 하부지점인 지표하 50m(해수면 하 21.35m)의  $Cl^-$  농도는 320~440mg/L으로 상대적으로 농도 변화폭이 적은 반면, 상부지점으로 갈수록  $Cl^-$  농도는 130~380mg/L까지 농도변화가 심하게 나타난다.

이런 원인등에 의하여 D-28 관정에서의 주요 이온은 심도에 따라 저조시에 비해 고조시가 상대적으로 변화폭이 크며, D-124 관정에서는 역으로 저조시가 변화폭이 크게 나타나고 있다.

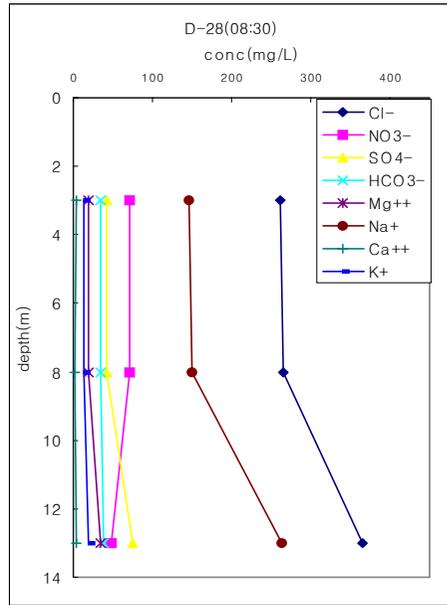
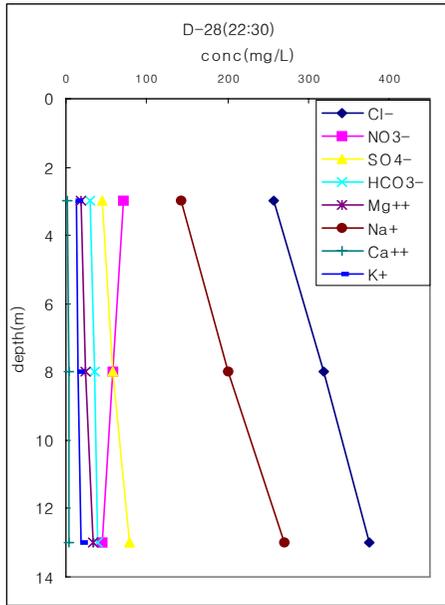
심도에 따라 대부분 이온의 농도가 증가하는데  $\text{NO}_3^-$  농도는 역으로 심도가 증가함에 따라 농도가 감소하는 경향이 나타나고 있다. 이는  $\text{NO}_3^-$ 는 육상기원의 물질로서 지하수 심도 깊이까지 침투하지 못함을 나타내는 것이며, 조석에 따라 다른 주요 이온의 변화하는 경향과 역으로 나타나고 있다.



(a)



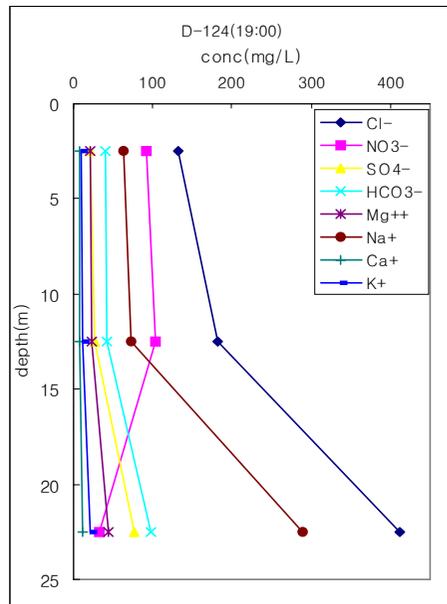
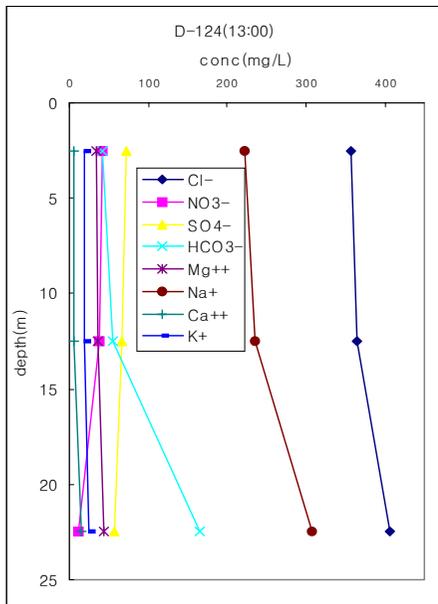
(b)



(c)

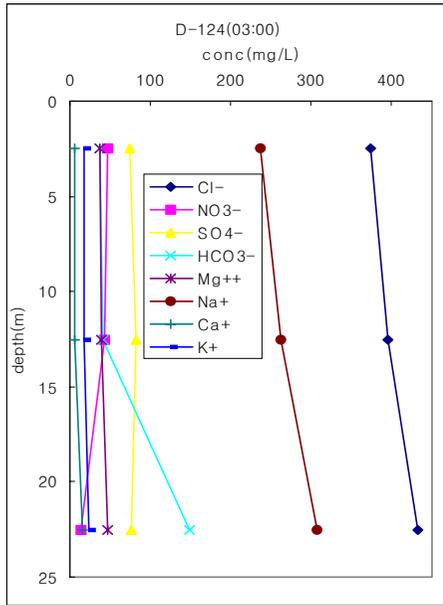
(d)

Fig. 13. Variation of major ions in accordance with depth in D-28 well.

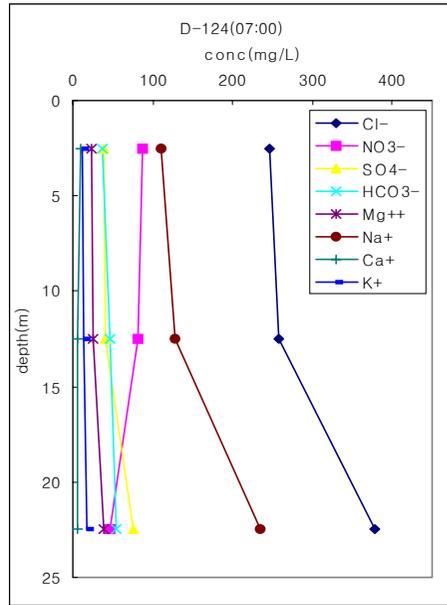


(a)

(b)



(c)



(d)

Fig. 14. Variation of major ions in accordance with depth in D-124 well.

### 7. 전기전도도의 분포 및 Cl 이온과의 상관성

제주도에 산재된 지하수 관정으로부터 EC 등위분포선도를 보면 모두가 섬의 중앙부로 갈수록 그 값이 감소하고 있는데 북부, 남부 및 서부지역은 그 구배가 완만하나 동부지역은 급하다. 남부 및 서부지역은 해안면으로부터 평균 250 $\mu$ mhos/cm의 값을 갖는 지역까지의 거리는 대략 2km 미만인데 반하여 동부지역은 거의 3배에 달하는 6km 지점에서 200 $\mu$ mhos/cm의 값을 보여주고 있다(한, 1994).

Table 9는 조사대상지역에서 해안거리에 따라 EC분포를 나타냈으며, 고성-수산 지역에서는 해안으로부터 2.7km 떨어진 지점에서 EC가 1,500 $\mu$ mhos/cm로 나타났고, 4~5km 지점에서 500 $\mu$ mhos/cm까지 나타나 가장 먼 거리까지 해수 침입현상이 나타나고 있다. 그 외 지역에서는 해안으로부터 2.5km에서 EC가 500 $\mu$ mhos/cm로 나타나고 있다.

Table 9. The range of electrical conductivity and distance from the coast to equipotential line of 500 $\mu$ mhos/cm based on EC values of Study area

Area	Range for EC value ( $\mu$ mhos/cm)	Distance from coast to 500 $\mu$ mhos/cm in EC
Kosung-Susan	145 - 4,000	4~5 km
Onpyung-Nansan-Sungeup	130 - 7,500	2.5 km
Pyungdae	300 - 1,040	2.5 km
Sangdo	700 - 1,140	2.5 km

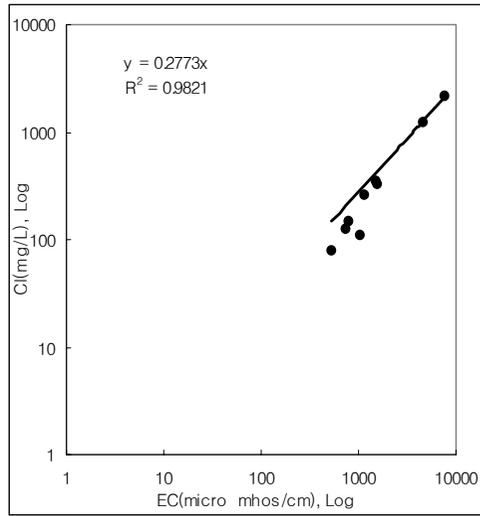
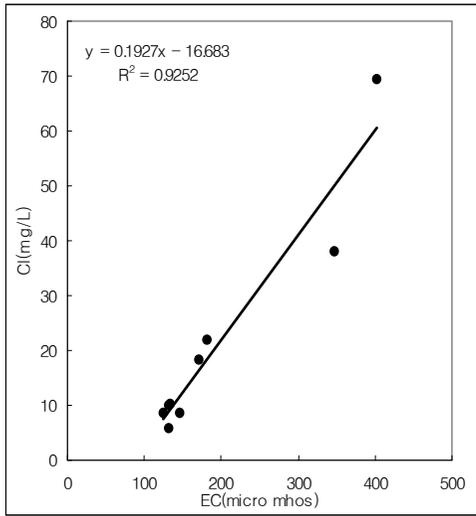
Fig. 15는 대상지역의 관정에서 측정한 EC 값을 평균하여 500 $\mu$ mhos/cm의 등위선을 나타낸 것으로, 고성-수산지역에서는 이 등위선이 해안으로부터 4~5km까지 나타나고 있고 온평-난산, 평대 및 상도 지역에서는 2.5km에서 나타나고 있다.



Fig. 15. Equipotential line of 500  $\mu\text{mhos/cm}$  based on EC values of study area.

Fig. 16은 조사대상 관정에서 EC 값 500 $\mu\text{mhos/cm}$ 을 기준으로  $\text{Cl}^-$ 농도와 EC와의 관계를 나타낸 것이다. 한(1998)은 제주도와 하와이의 기저지하수 중에서 상위구간에 속하는 지하수의  $\text{Cl}^-$ 농도와 EC와의 관계는  $\text{Cl}^- = 0.1429\text{EC}$  정도이고, 하부지하수의 상관관계는  $\text{Cl}^- = 0.333\text{EC} - 109$  정도이며, 특히 지하수에 희석된 해수(점이대 가까운 구간)에서  $\text{Cl}^-$  농도와 EC의 관계는  $\text{Cl}^- = 0.2976\text{EC}$  라고 하였다.

Fig. 16에서 (a)는 해안으로부터 2.5km이상 떨어진 관정 9 개소에서의  $\text{Cl}^-$ 농도와 EC와의 관계는  $\text{Cl}^- = 0.1927\text{EC} - 16.683$  이고, (b)는 2.5km이하에서의  $\text{Cl}^-$ 농도와 EC와의 관계는  $\text{Cl}^- = 0.2773\text{EC}$ 으로 나타났다.



(a)

(b)

Fig. 16. Correlation between EC and Chloride concentration.

## V. 결론

제주도 동부지역 지하수의 염수화에 대하여 이화학적 특성을 규명하기 위한 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 제주도 동부지역의 지하수는 해안으로 갈수록 음이온은  $\text{HCO}_3^-$ 에서  $\text{Cl}^-$  이온의 형태로 양이온은  $\text{Mg}^{2+}$ 에서  $\text{Na}^+\text{K}^+$  이온의 형태로 변하고 있으며, 담수와 해수간에 이온교환(ion exchange)과 혼합(mixing) 형태가 나타남을 알 수 있다. 또한 수질유형은  $\text{Na-Cl}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na-Cl-HCO}_3^-$  및  $\text{Ca-HCO}_3^-$ 형의 4가지 유형으로 분류할 수 있다.

2. 동부지역 지하수의  $\text{SO}_4^{2-}$ 과  $\text{Cl}^-$ 의 비는  $0.1354(R^2=0.972)$ 로 나타나고 있어 Dittomer's ratio(=0.13)와 유사하며,  $\text{Cl}^-$ 과  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ 의 성분비는 해수의 성분비와 일정한 상관관계를 나타내고 있다. 따라서 이 지역의 지하수 염수화 요인은 해수의 침입에 기인한 것으로 사료된다.

3. Chloride-bicarbonate 비에 의해 동부지역 지하수 성분을 분석한 결과 0.5 이하로서 해수침입이 안된 관정은 해안으로부터 2.8km이상에 위치한 5개관정이며 나머지 관정들은 해수침입이 되어 있었고, Chloride-bicarbonate 비는 내륙에서 해안 지역으로 갈수록 점점 증가하여 해수침입이 증가하는 것으로 나타났다.

4. 해수침입에 의한 담수와 해수 혼합비율은 온평용천수에서 80 : 20으로 가장 높고 해안과의 거리가 멀어질수록 이 비율이 낮아져서 수산3 관정인 경우 99.8 : 0.2로 나타났다. 이 혼합비율에 의해 이론적인 Na농도를 구하여 실제 측정된 Na 농도와 비교하면 실제 측정된 농도가 25~42%까지 낮게 나타나고 있는데, 이는 해수와 담수의 혼합(mixing)에 의한 특성뿐만 아니라 이온교환 형태로도 나타나는 것으로 사료된다.

5. 조석에 따른 수질 변화가 D-28, D-124관정에서 확연하게 나타나도 있으며, D-28 관정에서는 심도가 얕을수록 변화가 미미하고 심도가 깊어질수록 변화폭이 증대되고 있는 반면, D-124 관정에서는 역으로 나타나고 있어 평균해수면과 같은 위치에 균열 및 절리 등의 투수성 구조가 있다고 사료된다. 조석에 의해 수질

변화에 미치는 지연시간은 D-28에서는 2~2.5 시간이고 D-124에서는 3~3.5 시간으로 나타났다.

6. 심도가 깊어짐에 따라 주요 이온의 농도는 증가하며,  $\text{NO}_3^-$  농도는 역으로 심도가 깊어짐에 따라 농도가 감소하는 경향을 나타나고 있다. 이는  $\text{NO}_3^-$ 는 육상기원의 물질로서 지하수 심도 깊이까지 침투하지 못함을 나타내는 것이라 사료된다.

7. 조사대상지역에서 EC분포를 보면 고성-수산 지역에서는 4~5km 지점에서  $500\mu\text{mhos/cm}$ 까지 나타나 가장 먼 거리까지 해수침입현상이 나타나고 있다. 그 외 지역에서는 해안으로부터 2.5km에서 EC가  $500\mu\text{mhos/cm}$ 로 나타났다. 해안으로부터 2.5km이상 떨어진 지점에서의  $\text{Cl}^-$ 농도와 EC와의 상관성은  $\text{Cl}^- = 0.1927\text{EC} - 16.683$ 이고, 2.5km이하에서는  $\text{Cl}^- = 0.2773\text{EC}$ 으로 나타났다.

## VI. 참고문헌

- 박관석, 1994, 제주도 해안에서의 지하해수에 대한 화학적 특성, 제주대학교 석사학위논문, 50 pp.
- 박상운, 1996, 제주도 용천수의 수량변화와 수리화학적 특성, 제주대학교 석사학위논문, 115 pp.
- 박원배, 1993, 제주도 지하수의 수위변동에 관한 연구, 제주대학교 석사학위논문, 49 pp.
- Benner, Shan G., Eric W. Smart and Johnnie N. Moore, 1995, Metal behavior during surface-ground, Silver Bow Creek, Montana, *Environmental Science & Technology*, 29(7), pp.1789~1795.
- 최순학, 1988, 제주도의 형성과 지하수 특성, 제주도 연구, 5 : 59~77.
- 최순학, 1991, 제주도와 OAHU도의 지질구조 및 수자원의 특성, 제주도 연구, 8 : 7~39.
- 최순학, 1994, 지하수의 보존과 이용방안, 제주지역 개발과 환경보전(제주도문제 학술 심포지엄), 한라일보사, pp. 67~92.
- Emeki N., Karahanoglu N., Yazicigil H. and Doyuran V., 1996, Numerical simulation of saltwater intrusion in a groundwater basin, *Water Environment Research*, 68(5), pp.855~866.
- Frank Chew, 1961, Some implications of the highly saline water off the Southwest Coast of Florida, *J. Geophysical Research*, 66(8), 2445~2454.
- Freeze, R. Allan and John A. Cherry, 1979, *Groundwater*, Prentice-Hall, Inc.
- Genevieve Sego, *Clasic Groundwater Simulation: proving and improving numerical models*.
- 한국자원연구소, 1996, 지하수보전·환경교육교재, 245 pp.
- 한국자원공학회, 1997, 지하수자원의 개발, 보전, 관리(특별심포지움논문집), 282 pp.
- 한정상, 1998, 지하수의 환경과 오염, 박영사, 1071 pp.
- Howard, K.W.F. and J.W. Lloyd, 1983, Major ion characterization of coastal saline ground waters, *Ground Water*, 21(4), 429~437.

- 池田喜代治, 1985, 地下水の鹽水汚染の化學機構, 工業用水, 321 : 12~22.
- Jacob Bear and Gedeon Dagan, 1964, Some exact solutions of interface Problems by means of the Hodograph Method, J. Geophysical Method 69(8), 1563~1572.
- John Logan, 1961, Estimation of Electrical Conductivity from chemical analysis of natural water, J. Geophysical Research, 66(8), 2479~2483.
- Kalliat T. Valsaraj, Elements of environmental engineering, pp.431~432.
- 강승삼, 1987, 제주도 지형·지질 연구의 과거·현재와 전망, 제주도 연구, 4 : 147~172.
- 김성홍, 신승중, 오상실, 송영철, 오순미, 강신숙, 고정녀, 고현정, 고용구, 1992, 제주도 지하수의 염분화에 대한 고찰, 제주도보건환경연구원보, 3 : 201~215.
- 김성홍, 신승중, 오상실, 송영철, 오순미, 강신숙, 고정녀, 고현정, 고용구, 1993, 제주도 동·서부지역 지하수의 염분화에 대한 조사연구, 제주도보건환경연구원보, 4 : 153~167.
- Kiyokazu Ohroi and Mitchell M. J., 1998, Stream water chemistry in Japanese forested watersheds and its variability on a small regional scale, Water Resources Research, 34(6), pp.1553~1561.
- 고기원, 1997, 제주도 지하수의 부존특성과 서귀포층의 수문지질학적 관련성, 부산대학교 대학원 지질학과, 박사학위논문, 325 pp.
- 고기원, 박원배, 김호원, 채종일, 1992, 제주도의 지하지질구조와 지하수위 변동과의 관계(II)-조석에 의한 지하수위변동-(요약), 지질학회지, 28(5), 540~541.
- 고기원, 박원배, 고용구, 김성홍, 오상실, 윤선, 1992, 제주도 동부지역의 지하지질 하수위변동 및 수질특성에 관한 연구, 제주도보건환경연구원보 3 : 15~43.
- 고기원, 박원배, 윤정수, 고용구, 김성홍, 신승중, 송영철, 윤선, 1993, 제주도 동·서부지역의 지하수 부존형태와 수질특성에 관한 연구, 제주도보건환경연구원보 4 : 191~222.
- 고병련, 1998, 지하수 수질 및 오염예측 모델에 관한 연구, 영남대학교 대학원토목공학과, 박사학위논문, 187 pp.

- 고병련, 1987, 제주도 지하수의 용출현상에 의한 용천분석 연구(I) - 수리수문학적측면에서 -, 제주전문대학 논문집, 8 : 319~334.
- 고병련, 1988, 제주도 지하수의 용출현상에 의한 용천분석 연구(II) - 지형·지질학적측면에서 -, 제주전문대학 논문집, 9 : 273~293.
- 고병련, 1990, 해안대수층에서 담·염수 경계면의 위치에 관한 연구, 제주전문대학 논문집, 11 : 241~255.
- 고병련, 1984, 제주도 지하수 부존형태와 지하수위변동에 관한 연구, 건국대학교 석사학위논문, 53 pp.
- 고승학, 1994, 제주도 지하수중  $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도와 토양중 그의 이동에 관한 연구, 제주대학교 석사학위논문, 34 pp.
- Kohout, F.A., 1961, Fluctuation of Groundwater Levels Caused by Dispersion of Salts, J. Geophysical Research, 66(8), 2429~2434.
- 건설부, 제주도, 한국수자원공사, 1993, 제주도수자원 종합개발계획 수립보고서.
- 국무총리실 수질개선기획단, 환경부, 건설교통부, 1997, 지하수 보전관계 연찬회.
- 권병두, 이희순, 1997, 화산섬의 지구물리학적 및 환경지질학적 특성 비교연구 : 제주도와 하와이제도, J. Korean Earth Science Society, 18(3), 217~237.
- 이광식, 1985, 갈수시의 지하수 감수곡선에 관한 연구, 충남대학교 석사학위논문.
- 이기화, 1992, 제주도 담수-해수간의 유체동력학적 평형, 지질학회지, 28(6), 649~664.
- Leslie A. DeSimone, 1998, Nitrogen transport and transformation in a shallow aquifer receiving wastewater discharge, Water Resources Research, 34(2), pp.271~285.
- Leo C. Benz, R.H. Mickelson, F.M. Sandoval, and C.W. Carlson, 1961, Ground-water investigations in a saline area of the Red River Valley, North Dakota, J. Geophysical Research, 66(8), pp.2435~2443.
- Marsha I. Sheppard and et all, 1995, Aquatic-Terrestrial partitioning of deep groundwater discharge using Helium Fluxes, Environmental Science & Technology, 29(7), pp.1713~1721.
- 三井 宏, 尾島 勝, 村上仁士, 1979, 徳島縣沿岸部地質分布, 潮位振動特性, 地下水鹽分調査結果, 第26回海海工講演會論文集, pp.633~637.

- 농림수산부, 제주도, 농어촌진흥공사, 1991~1997, 제주도 각 연도별 장기관측망  
설치 및 조사실적보고서
- 농어촌진흥공사, 1966, 지하수 모델링 교육교재, P.330
- 尾島 勝, 1977, 揚水による鹽水化現象の變化に関する解析, 第24回海海工講演會論  
文集, pp.553~557.
- Pucci, Amelto A., Ted A. Ehike and James P. Owens, 1992, Confining Unit  
Effect on water quality in the New Jersey Coastal Plain, Ground  
Water, 30(3), pp.415~427.
- Pyne, R. D. G., 1995, Groundwater recharge and wells, CRC Press, Inc.
- Richter, Bernd C. and Charles W. Kretler, 1993, Geochemical Techniques for  
Identifying Sources of Ground-water Salinization, 258 pp.
- Richter, Bernd C. and Charles W. Kretler, 1986, Geochemistry of salt water  
beneath the Rolling Plains, North-Central Texas, Ground Water,  
24(6), 735~741.
- Revelle, R., 1941, Criteria for reconition of seawater in groundwaters, Trans.  
Amer. Geophysical Union, 22 : 593~597.
- 彬尾 哲, 林 耕司, 1989, 不均質地盤における鹽水侵入, 土と基礎, 37(6), 35~40.
- Soki Yamamoto, 1996, 地下水調査法, 김남형 · 오윤근 공역, 766 pp.
- 송영철, 1997, 제주도 지하수의 염소처리시 THM의 생성특성에 관한 연구, 제주  
대학교 석사학위논문.
- 송영철, 김성홍, 김길성, 오순미, 김태현, 김세라, 현준, 고용구, 오윤근, 유장걸  
1996, 제주 지하수의 수질특성, 제주도보건환경연구원보, 7 : 155~183.
- Todd, D. K., 1959, Groundwater hydrology, John & Sons Inc., pp.293~294
- Wang. H. F. and M. P. Anderson, 1982, Introduction to groundwater modeling  
Finite difference and finite element methods, 233 pp.
- 鷺見榮一, 1986, 吉井川河口地域における海水と地下水の關係, UDC, 21(4), 43~56.
- 윤정수, 1986, 제주동부지역 지하수의 고염도 요인에 관한 연구, 제주도연구 3 :  
43~53.