

제주도 동부지역 地下水의 鹽水化와 理化學的 特性

오 윤 근 · 김 경 훈 · 류 성 필
제주대학교 환경공학과
(1999년 12월 1일 접수)

Physicochemical Characteristics of Groundwater Salinization in the eastern area of Cheju Island

Youn-Keun Oh, Kyung-Hoon Kim and Seong-Pil Ryu

Dept. of Environmental Engineering, Cheju National University

(Manuscript received 1 December, 1999)

The purpose of this study is to investigate the physicochemical characteristics of salinization of groundwater at the eastern area of Cheju island. For this purpose, the major ions of groundwater, spring water are analyzed. The concentration of 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. The water quality components of groundwater observed at this area can be classified into 4 types such as Na-Cl, HCO_3^- , Na-Cl- HCO_3^- and Ca- HCO_3^- . The concentration ratio of SO_4^{2-} to Cl^- is 0.1354 ($R^2=0.972$) at this area. This value is very similar with Dittomer's ratio of 0.13. For Na^+ , K^+ , and Mg^{2+} versus Cl^- , their ratios also show a significant relationship between sea water and groundwater in this area. 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.

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 Na^+ observed at field is 25~45% lower than that theoretically calculated by this mixing ratio. 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 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 $500 \mu\text{mhos/cm}$.

Key word: salinization, Piper diagram, Stiff diagram, Dittomer's ratio, ion exchange

1. 서 론

제주도의 지하수는 다른 지역에서보다 비교적 산업 폐기물에 의한 오염이 덜된 것으로 보고되고 있으나 바다와 직접 접촉 있기 때문에 해수침입이 예견되어 왔으며 제주도 동부지역의 경우 지하수의 염수화는 심각한 문제로 대두되고 있다. 1940년대 Oahu도 진주만 지역의 지하수 관점에서 염도 증가로 폐공이 발생된 것과 같이 이러한 염수화는 해안면에서 수리구배가 대단히 완만한 지역에서 주로 나타나고 있다.^{1,2)}

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.³⁾

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.⁴⁾

현재까지 수행된 연구결과에 의하면 제주도 동부지역의 지하수 염수화 원인을 제주도 형성 당시부터 염지하수가 부존할 수 있는 지질구조로 인한 자연적인 현상,⁵⁾ 과잉양수에 의한 해수침투,⁶⁾ 토양 및 사구층내의 염분의

용해·침투에 의한 현상⁷⁾이라고 보고되고 있다.

지하수의 염수화는 해안을 접하고 있는 대부분의 지하수에서 잠재되어 있는 현상으로 대수층의 조건에 따라 매우 복잡하고 다양하기 때문에 광범위하게 논의되어야 하며 다양한 접근이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 제주도 동부지역 지하수와 해안용천수 및 해수를 대상으로 수질특성과 주요 이온성분비, 이온교환 특성, 전기전도도의 분포와 Cl 이온과의 상관성을 비교·분석하여 지하수 염수화의 요인과 그에 따른 이화학적 특성을 고찰하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구대상지역

제주도 동부지역 지하수 염수화의 이화학적 특성을 규명하기 위한 조사지점 선정은 지하수개발보고서¹⁰⁾에 보고되어 있는 자료를 토대로 지하수 관정 15개소, 용천수 2개소, 우물 1개소를 대상으로 1998년 4월부터 8월까지 5회에 걸쳐하여 분석하였다. 조사지역의 지하수 관정과 용천수의 현황은 Table 1에 나타내었고, Fig. 1에는 조사지점을 나타내었다.

Table 1. The present data of wells at each sampling sites (unit : m)

Well No.	Location	Elevation	Depth	Natural water level	Dynamic water level	Distance from coast
Kyorae	kyorae	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)

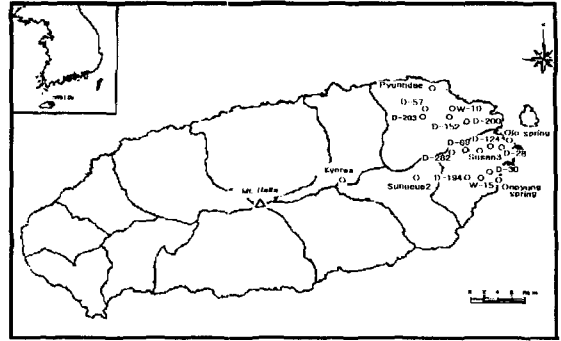


Fig. 1. Sampling sites for groundwater and spring water in cheju.

2.2. 분석방법

분석항목중 수온, pH, 전기전도도는 현장에서 측정하였다. pH는 pH meter(Orion model 250A)로 측정하고, 전기전도도는 전기전도도계(ATI Orion model 128)로 측정하였다. 음이온 성분중 Cl⁻, SO₄²⁻, F⁻, NO₃⁻, Br⁻은 Ion chromatography(Dionex-500, USA)을 이용하였고, HCO₃⁻은 bromocresol green을 사용하여 0.02N-H₂SO₄로 적정하여 정량하였다. 양이온인 Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Sr²⁺은 원자흡광광도계(GBC 904AA)를 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Piper diagram과 Stiff diagram을 이용한 수질특성

3.1.1. Piper diagram

전반적인 수질특성을 살펴보기 위하여 주요 양·음이온의 월 평균 농도(mg/l)를 관정별로 Fig. 2에 나타냈다. 주요한 수질특성으로서 Cl⁻ 등 다른 이온은 해안변에서 내륙 쪽으로 거리가 증가함에 따라 뚜렷하게 감소하는 현상을 나타내고 있고, HCO₃⁻은 평대우물을 제외하고 대부분 관정과 용천수에서 30~70 mg/l 정도의 값을 보이고 있다.

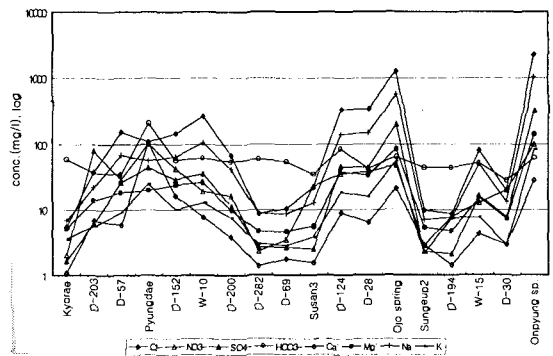


Fig. 2. Variation of major ions at each sampling sites in cheju.

Table 2는 1998년 3월부터 8월까지 성산포지역의 강수량을 나타낸 것으로, 5월 강수량이 적고 6월과 7월에

Table 2. 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

강수량이 비교적 많다. Fig. 3, 4는 강수량이 적은 5월과 비교적 강수량이 많은 7월의 Piper(Trilinear) diagram을 나타낸 것이다. 음이온 삼각형에 나타난 바와 같이 음이온은 해안으로 갈수록 HCO₃에서 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. Richter⁴⁾에 의해 Piper diagram의 다이아몬드형에서 분석한 것을 기초로 하여 연구대상지역 지하수를 분석하면 Fig. 3, 4에 나타나는 바와 같이 해안으로 접근할수록 담수와 해수간에 이온교환(ion exchange)과 혼합(mixing) 형태가 나타남을 알 수 있다.

3.1.2. Stiff diagram

Fig. 5는 조사지점에서의 Stiff diagram 형태에 따라 수질특성을 나타낸 것으로서, Table 3과 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-57 관정에서 나타났다. Type II는 해안에서 2.8km이상에서 HCO₃가 우세하게 나타나는 형태로 교래지수, 성음2리, D-69, D-194, D-282, 수산3 관정에서 나타났다. Type III은 위 두 가지 유형의 혼합 형태로 해안거리 1.5~2.9km 사이에 Na-Cl-HCO₃ 형태로 D-203, W-15, D-200, D-30 관정에서 나타났다. Type IV는 Ca-HCO₃가 우세하게 나타나는 형태로 평대우물과 그 상부에 있는 D-152(40m)에서 나타났으며, 각

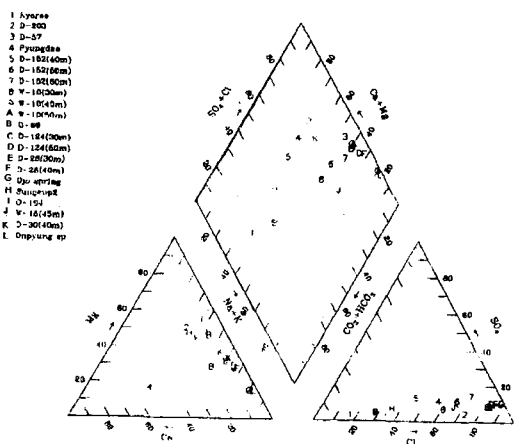


Fig. 3. Piper diagram of chemical composition of study area in May, 1998.

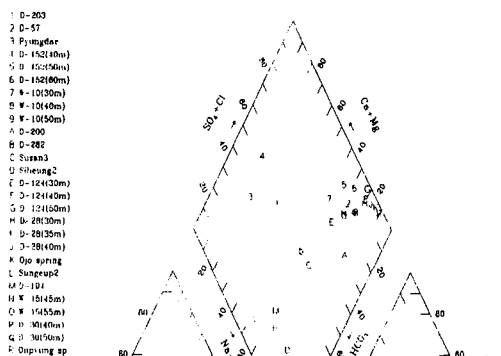


Fig. 4. Piper diagram of chemical composition of study area in July, 1998.

관정마다 특이한 수질 특성을 보이고 있다.

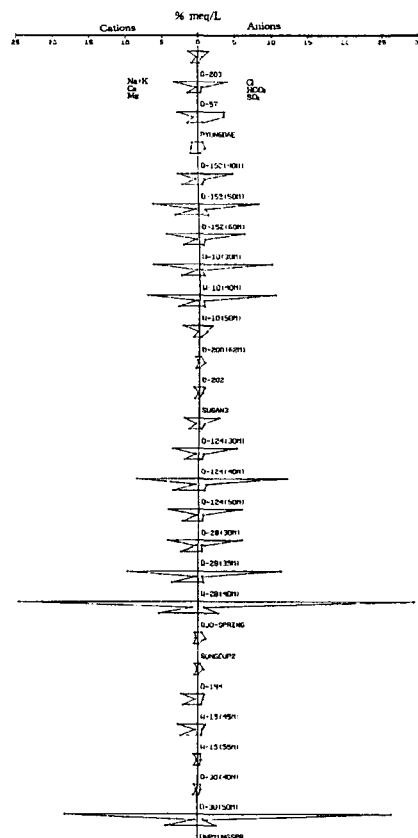


Fig. 5. Stiff diagram of chemical composition of study area from April to August, 1998.

Table 3. 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 ₃ type
Type III	33m~68m (1.5km~2.9km)	D-203, W-15, D-200, D-30	Na-Cl-HCO ₃ type
Type IV	Occurred in Pyungdae area	Pyungdae, D-152(40m)	Ca-HCO ₃ type

3.2. 지하수와 해수의 이온 조성비

Cl⁻을 기준으로 주요 이온성분을 비교하면 암염의 용해에 의한 지하수 염수화 형태는 암염이 순수한 NaCl로 대부분 이루어졌기 때문에 Cl⁻과 Na⁺ 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.⁴⁾

염지하수가 해수 기원인지 아닌지는 성분비율에 의해 알 수 있는데, 해수에서는 SO₄²⁻/Cl⁻ = 0.13 이라는 일정한 값을 취한다. 이 비율을 Dittomer's ratio라고 한다.⁸⁾

Fig. 6은 지하수와 해수사이의 주요 이온의 조성비를 나타낸 것으로 각 그래프상의 오른쪽 점(Cl⁻ 농도 10,000 이상)은 연안해수의 조성비를 나타낸 것이며, 그 외의 점들은 지하수의 이온조성비를 각각 나타낸 것이다.

Fig. 6에 나타난 바와 같이 이 지역 지하수는 Cl⁻과 SO₄²⁻, Na⁺, K⁺, Mg²⁺ 은 해수의 성분과 높은 상관관계를 나타내고 있다. 또한 SO₄²⁻과 Cl⁻의 비율은 0.1354(R²=0.972)로 나타나고 있으며, Na⁺와 Cl⁻의 비율은 0.6462(R²=0.908), K⁺ = 0.0325Cl⁻+6.86(R²=0.837), Mg²⁺ = 0.085Cl⁻+6.86(R²=0.957)로 나타나고 있다. 따라서 이 지역의 지하수 염수화 요인은 해수의 침입에 기인한 것으로 사료된다. NO₃⁻과 Cl⁻의 성분비는 상관성이 없는 것으로 나타났으며, 이는 NO₃⁻가 육상기원의 물질이기 때문이라 사료된다.

3.3. Chloride-bicarbonate 비를 이용한 해수침입 평가

Fig. 7는 Revelle⁹⁾와 Todd¹⁰⁾에 의한 평가방법을 적용하여 연구 대상지역에서 조사기간 동안 분석한 값을 평균하여 Cl/HCO₃ 비율을 나타낸 것이다. Fig. 7와 Table 4에서 보는 바와 같이 연구대상 지역에서 Cl/HCO₃ 비율이 0.5 이하로서 해수침입이 안된 관정은 해안으로부터 2.8km이상에 위치한 교래지하수, D-282, D-69(시흥2), 성읍2, D-194이며, 이 관정들은 현재 음용수 또는 농업

용수로 사용되고 있다. Cl/HCO₃ 비율이 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 비율이 0.64로서 이 관정을 앞으로 계속 monitoring을 하여야 할 것이다. Cl/HCO₃ 비율이 1.3~2.8사이로 보통 정도로 침입된 관정은 2.5~2.7km에 위치한 D-152, W-15 관정이다. 이 비율이 2.8를 넘어 해수침입이 심각한 관정과 용천수는 D-57, W-10, D-124, D-28, 오조 및 은평 용천수로 해안에서부터 2.75km내에 위치하고 있다. 또한 오조 및 은평 용천수는 이 비율이 19.47과 36.0으로 해수침입이 매우 심각한 상태이다.

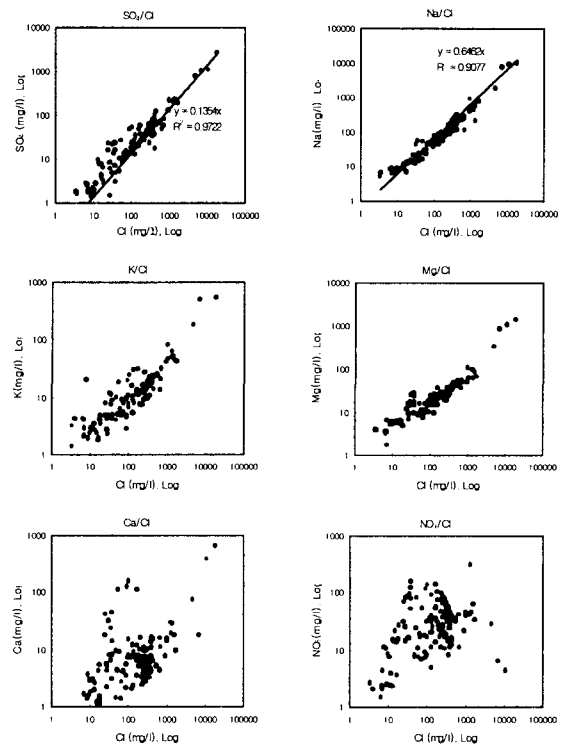


Fig. 6. Bivariate plots of major ions versus chloride.

Table 4. Classification with chloride-bicarbonate ratio

Classification	Cl-HCO ₃ 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)

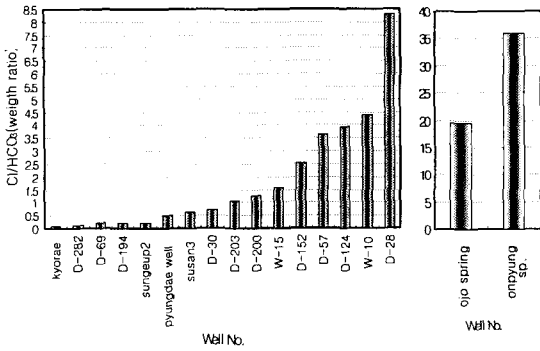


Fig. 7. Distribution of Chloride-bicarbonate ratio.

위의 Fig. 7에서 보듯이 제주도 동부지역에서 Cl/HCO₃ 비율은 내륙에서 해안 지역으로 갈수록 점점 증가하여 해수침입이 증가하는 것으로 나타났으며, 해안 용천수에서는 가장 높은 비율을 보여 해수침입이 가장 심하게 나타났다.

3.4. 해수의 혼합에 의한 이온교환 특성

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

앞의 Piper diagram Fig. 3, 4를 통하여 동부지역의 지하수에서 담수와 해수간에는 혼합과 이온교환 형태가 나타나고 있음을 알 수 있었다. Richter⁴⁾은 해수가 침입되지 않은 관정과 해수의 화학조성(end-member composition)을 알면 혼합된 정도를 수학적으로 백분율로 구할 수 있다고 하였다. 즉 대수층내에서 가장 보존적인 물질인 Cl⁻이온을 이용하여 혼합작용만이 있고 혼합작용 시에 Cl⁻이온농도가 증가한다는 가정 하에 그 백분율은 다음 식으로 구한다.

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

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-member를 성산외항의 해수와 해수의 침입이 전혀 없는 교래지하수의 농도를 대입하면,

$$C_{ClM} = 1253.43\text{mg}/\ell \text{ (오조 용출수의 5개월 평균농도)}$$

$$C_{ClF} = 6\text{mg}/\ell \text{ (교래지하수)}$$

$$C_{ClS} = 10,967\text{mg}/\ell \text{ (성산외항의 해수)}$$

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

그러므로 오조 용출수의 평균적인 담염수 혼합비율은 담수가 88.6%를 차지하고 해수가 11.4%를 차지하고 있다. 이 용출수에서 이론적인 Na⁺ 농도를 계산하면

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

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

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

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 Na⁺ 농도는 907.5mg/ℓ 이고 실제 측정된 농도는 578.6mg/ℓ 이다. 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 5에 나타냈다.

Table 5에 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 Na⁺ 농도를 구하여 실측한 Na⁺ 농도와 비교하면 실측한 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.

Table 5. Mixing trend and ion exchange through comparison between theoretical and actual concentration of Sodium

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
Oio 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

3.5. 전기전도도의 분포 및 Cl⁻ 이온과의 상관성

제주도에 산재된 지하수 관정으로부터 EC 등위분포 선도를 보면 모두가 섬의 중앙부로 갈수록 그 값이 감소하고 있는데 북부, 남부 및 서부지역은 그 구배가 완만하나 동부지역은 급하다. 남부 및 서부지역은 해안변으로부터 평균 250 μmhos/cm의 값을 갖는 지역까지의 거리는 대략 2km 미만인데 반하여 동부지역은 거의 3배에

달하는 6km 지점에서 200 μmhos/cm의 값을 보여주고 있다.¹¹⁾

Table 6은 조사대상지역에서 해안거리에 따라 EC분포를 나타냈으며, 고성-수산 지역에서는 해안으로부터 2.7km 떨어진 지점에서 EC가 1,500 μmhos/cm로 나타났고, 4~5km 지점에서 500 μmhos/cm까지 나타나 가장 먼 거리까지 해수침입현상이 나타나고 있다. 그 외 지역에서는 해안으로부터 2.5km에서 EC가 500 μmhos/cm로 나타나고 있다.

Fig. 8은 대상지역의 관정에서 측정된 EC 값을 평균하여 500 μmhos/cm의 등위선을 나타낸 것으로, 고성-수산지역에서는 이 등위선이 해안으로부터 4~5km까지 나타나고 있고 온평-난산, 평대 및 상도 지역에서는 2.5km에서 나타나고 있다.

Table 6. The range of electrical conductivity and distance from the coast to equipotential line of 500 μmhos/cm based on EC values.

Area	Range for EC value (μmhos/cm)	Distance from coast to 500 μmhos/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

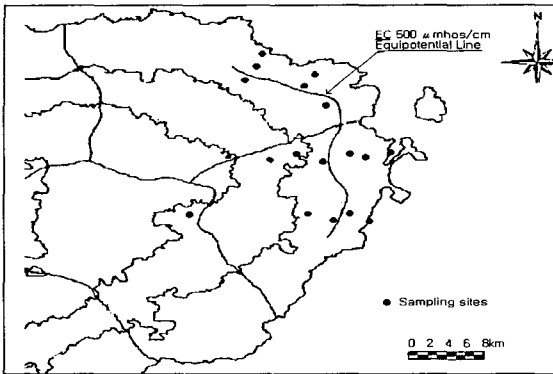


Fig. 8. Equipotential line of 500 μmhos/cm based on EC values.

Fig. 9는 조사대상 관정에서 EC 값 500 μmhos/cm을 기준으로 Cl⁻농도와 EC와의 관계를 나타낸 것이다. 한정상¹¹⁾은 제주도과 하와이의 기저지하수 중에서 상위구간에 속하는 지하수의 Cl⁻농도와 EC와의 관계는 Cl⁻=0.1429EC 정도이고, 하부지하수의 상관관계는 Cl⁻=0.333EC-109 정도이며, 특히 지하수에 희석된 해수(점이대 가까운 구간)에서 Cl⁻ 농도와 EC의 관계는 Cl⁻=0.2976EC 라고 하였다. Fig. 9에서 (a)는 해안으로부터 2.5km이상 떨어진 관정 9 개소에서의 Cl⁻농도와 EC와의 관계는 Cl⁻=0.1927EC-16.683 이고, (b)는 2.5km이하에서의 Cl⁻농도와

EC와의 관계는 Cl⁻=0.2773EC으로 나타났다.

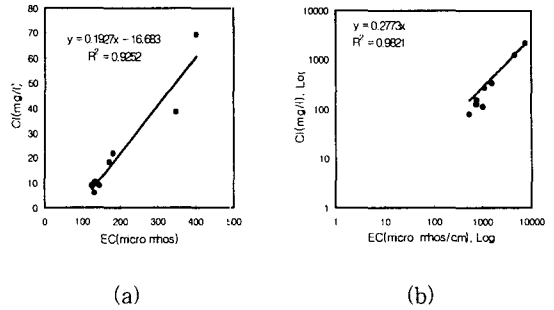


Fig. 9. Correlation between EC and chloride concentration.

4. 결 론

제주도 동부지역 지하수 염수화의 이화학적 특성에 대하여 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 제주도 동부지역의 지하수는 해안으로 갈수록 음이온은 HCO₃⁻에서 Cl⁻ 이온의 형태로 양이온은 Mg²⁺에서 Na⁺ + K⁺ 이온의 형태로 변하고 있으며, 담수와 해수 간에 이온교환(ion exchange)과 혼합(mixing) 형태가 나타남을 알 수 있다. 또한 수질유형은 Na-Cl, HCO₃, Na-Cl-HCO₃ 및 Ca-HCO₃형의 4가지 유형으로 분류할 수 있다.

2) 동부지역 지하수의 SO₄²⁻과 Cl⁻의 비는 0.1354 (R²=0.972) 로 나타나고 있어 Dittmer's ratio(=0.13)와 유사하며, Cl⁻과 Na⁺, K⁺, Mg²⁺의 성분비는 해수의 성분비와 일정한 상관관계를 나타내고 있다. 따라서 이 지역의 지하수 염수화 요인은 해수의 침입에 기인한 것으로 사료된다.

3) Cl/HCO₃ 비율에 의해 동부지역 지하수 성분을 분석한 결과 0.5 이하로서 해수침입이 안된 관정은 해안으로부터 2.8km이상에 위치한 5개관정이며 나머지 관정들은 해수침입이 되어 있었고, Cl/HCO₃ 비율은 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 Na⁺농도를 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) 조사대상지역에서 EC분포를 보면 고성-수산 지역에서는 4~5km 지점에서 500 μmhos/cm까지 나타나 가장 먼 거리까지 해수침입현상이 나타나고 있다. 그 외 지역에서는 해안으로부터 2.5km에서 EC가 500 μmhos/cm로 나타났다. 해안으로부터 2.5km이상 떨어진 지점에서의 Cl⁻농도와 EC와의 상관성은 Cl⁻= 0.1927EC-16.683이고, 2.5km이하에서는 Cl⁻= 0.2773EC으로 나타났다.

참 고 문 헌

- 1) 최순학, 1994, 지하수의 보존과 이용방안, 제주지역 개발과 환경보전(제주도문제 학술심포지엄), 한라일보사, 67~92.
- 2) 권병두, 이희순, 1997, 화산섬의 지구물리학적 및 환경지질학적 특성 비교연구 : 제주도와 하와이제도, J. Korean Earth Science Society, 18(3), 217~237.
- 3) 최순학, 1988, 제주도의 형성과 지하수 특성, 제주도 연구, 5, 59~77.
- 4) Richter, Bernd C. and Charles W. Kretler, 1993, Geochemical techniques for identifying sources of ground-water salinization, 200 ~ 260
- 5) 고기원, 1997, 제주도 지하수의 부존특성과 서귀포층의 수문지질학적 관련성, 부산대학교 지질학과, 박사학위논문, 325~330.
- 6) 최순학, 1991, 제주도와 Oahu도의 지질구조 및 수자원의 특성, 제주도 연구 8, 7~39.
- 7) 윤정수, 1986, 제주동부지역 지하수의 고염도 요인에 관한 연구, 제주도연구 3, 43~53.
- 8) 김남형, 오윤근, 1996, 地下水調査法, 동화기술, 766 .
- 9) Revelle, R., 1941, Criteria for recognition of seawater in groundwaters, Trans. Amer. Geophysical Union, 22, 593~597.
- 10) Todd, D. K., 1959, Groundwater hydrology, John & Sons Inc., 293~294.
- 11) 한정상, 1998, 지하수의 환경과 오염, 박영사, 1071.
- 12) Howard, K.W.F. and J.W. Lloyd, 1983, Major ion characterization of coastal saline ground waters, Ground Water, 21(4), 429~437.
- 13) John L., 1961, Estimation of Electrical Conductivity from chemical analysis of natural water, J. Geophysical Research, 66(8), 2479~2483.
- 14) 농어촌진흥공사, 농림부, 제주도, 1991~1997, 제주도 각 연도별 장기 관측망 설치 및 조사실적보고서.