

제주도 해안지역 고염분 현상에 대한 고찰

한규언, 신희섭(농업진흥공사 제주도지사)

The study of high chloride in the coastal area of Cheju island

Han Kyu-Eon, Shin Hee-Sup

(Korea Agriculture & Rural Infrastructure Corporation)

요 약 : 제주도 해안지방에서 고염분 지하수가 산출되고 있다. 이 지역의 지질 구조에 의한 저지하수위 형성이 주 요인으로 보이며 부분적으로는 관정에서 과다양수 등의 사유가 문제가 된다. 본 연구에서는 고염분을 가진 관정의 분포를 알아내고, 16개 관정의 전기전도도를 검층하였다. 동부지역에서 다른 지역에 비해 염소이온이 높게 나왔다. 관정저의 표고가 해수면 기준 0m이상, 0m~-10m, -10~-20m, -20~-30m, -30~-40m, -40m 이하의 6개의 군으로 나누어 수질성분 분석자료를 비교하였다. 이외에 전기전도도 검층 등 다른 조사자료를 수집하여 염소이온과의 관계를 파악하고, 염소이온농도 분포도를 작성하였다. 북제주군 한림읍 지역에서 염수를 막은 2개의 사례는 염수 침입이 이루지는 대수층을 그라우팅으로 봉쇄하여, 염수의 침입현상을 방지하는 공법이다.

주요어 : 해수침입, 고염분, Ghyben-Herzberg 이론, 지하수 보전·관리

*

Abstract : In the Cheju Island, there are high salinity water yield in the coastal area. There are various reason; the main reason is low-groundwater level by the structure of geology, and over-yielding etc. This study analysis water quality, the distribution of high salinity wells. 16 sample well logged the electronic geology survey. As result of distribution of Cl^- is the East Area is high than other areas. Water quality test data divides 6 group by sea level of well bottom : over 0m, 0m~-10m, -10~-20m, -20~-30m, -30~-40m, under -40m. According collect data of Kriging, and logged the electronic geology survey, and other survey are related chlorine(Cl^-). The map of Cl^- distribution was made. Bukcheju Gun, Hallim Up, there are 2 wells prevent high salinity water. Both of well are effective grout sill salinity water intrusion aquifer.

Keywords : seawater intrusion, high chloride management of groundwater

1. 서론

우리나라의 최남단에 위치한 제주도는 투수성 지질특성에 의해 하천수가 없으므로 1960년대까지만 하더라도 해안 용출수나 봉천수를 식수로 사용하여 왔다. 1970년 2월부터 5월까지 필자(한규언)가 제주도 최초로 관정(제주도 동명 1호공)에 의한 지하수 개발에 성공하고 이어 1971년부터 광역지질 및 지하수 부존 가능성 조사를 농업진흥공사에서 실시한 이후 이를 토대로 본격적인 지하수 개발이 시작되어 제주도의 물문제는 일대 전환기를 맞이하였다.

1998년 말까지 제주도에 개발된 관정은 총 5,706공으로 해마다 증가하고 있으며 현재 생활용수 일부를 용출수로 활용하기도 하나 모든 생활용수, 농업용수, 기타 산업용수 전량을 지하수로 이용하고 있는 실정이다. 이와 같은 상황에서 제주도의 일부지역 지하수의 염소이온과 다중염화물 문제는 중요한 문제로 부각되고 이에 대한 전반적인 대책이 시급한 실정이다.

농업기반공사에서는 1998년 6월부터 2000년 6월까지 2년에 걸쳐 제주도 전역에 대해 전반적인 지하수 기초조사를 실시하고, 모든 자료를 DataBase화 하고 지하수GIS를 구축하는 한편 지하수 관리계획을 수립하였다.

본 연구에서는 염소이온을 포함하는 지역의 지하수위와 수질검사자료 및 전기검층 조사 등을 통한 현재의 상황을 파악하였고, 고염분 현상이 보이는 관정의 방제사례를 제시하였다.

2. 이론적 배경

일반적으로 담·염수의 경계면에 Ghyben-Herzberg이론을 적용하여 설명한다. Ghyben(1888)과 Herzberg(1901)는 해안에 있어서 담수와 해수와의 관계를 다음과 같이 나타내었는데 식 (2)를 일반적으로 Ghyben - Herzberg관계식이라 한다.

$$\rho_s g h_s = \rho_f g (h_s + h_f)$$

$$h_s = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f \quad (1)$$

h_s : 해수면에서 담수와 해수와의 경계면까지의 높이 ρ_f : 담수의 밀도

ρ_s : 해수의 밀도

h_f : 해수면에서 지하수면까지의 높이

$\rho_s = 1.025\text{g/cm}^3$, $\rho_f = 1.000\text{g/cm}^3$ 라 하면,

$$\therefore h_s = 40 h_f \quad (2)$$

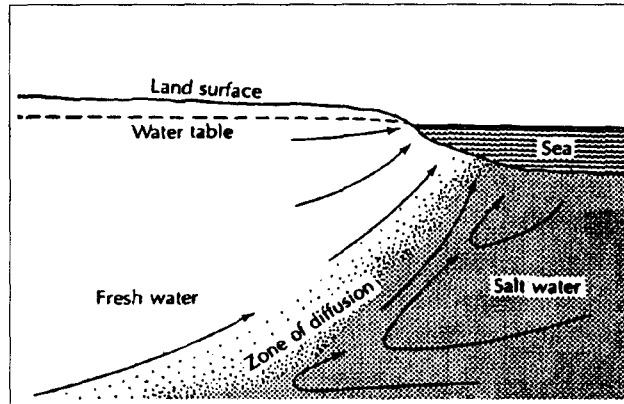


Figure 1. Circulation of fresh and saline groundwater at a zone of diffusion in a coastal aquifer(Cooper,1964).

Ghyben-Herzberg이론의 관계식이 설립 할 수 있는 중요한 전제 조건은 첫째 대수층의 매질은 모래층(모래섬)과 같이 등방균질의 투수성 지층이어야 하고, 둘째 대수층 매질에는 항상 신선한 물(담수)이 공급되어야 한다.

피압지하수에서도 자유면지하수와 같이 관계를 구할 수 있으나 이들 모두는 「담수-해수체의 평형 조건은 지하수면이 해수면보다 위에 있어야 하고, 수리경사는 바다쪽을 향하여야 한다.」는 조건이

필요하다. Figure 1과 같이 해안변지역에서 담수와 염수의 경계면은 확산대(zone of diffusion), 전이대(transition zone) 혹은 접이대(interface zone)라고 부르는 경계면을 갖는다.

Figure 2는 지층사이에 여러개의 대수층이 해안에서 존재하여 담수층 사이에서 염수의 대수층으로 인해 염수가 침입하는 한 예이다.

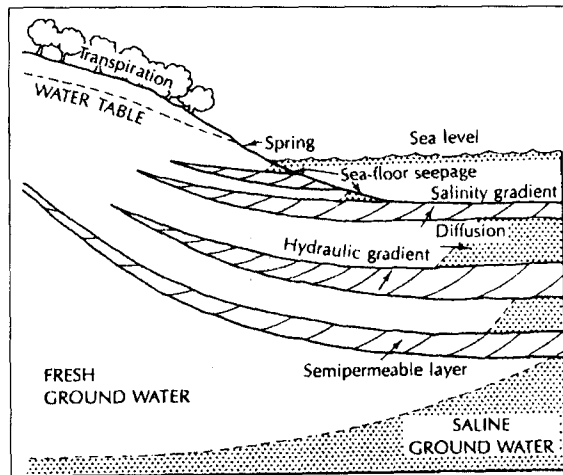


Figure 2. Typical fresh-water-salt-water relationship in a layered coastal aquifer(C.W.Fetter 1994).

Figure 3는 정상류 때에 해수의 침입이 되지 않았지만 양수로 인해 해수가 침입 되는 예이다.

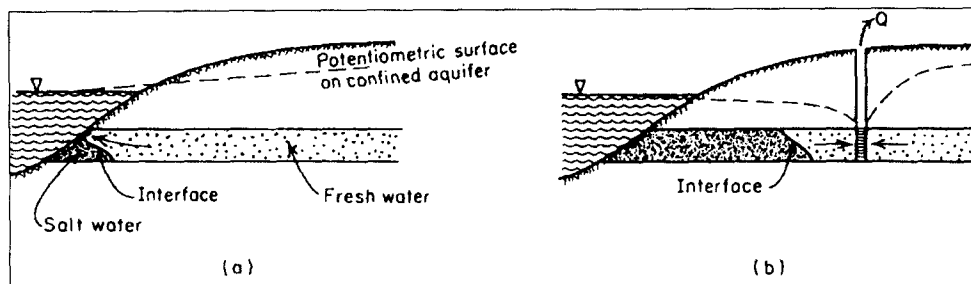


Figure 3. (a) Saltwater-freshwater interface in a confined aquifer under conditions of steady-state seaward flow; (b) seawater intrusion due to pumping(Freeze and Cherry).

3. 제주도 지하수 고염분 현상에 대한 기존 연구

제주도에서 여러 연구자들에 의해 일부지역 지하수의 염분농도 검출에 대한 사례연구가 있었다. 이들 연구는 제주도 해안지역 해침원인을 크게 4가지 유형으로 분류하고 있다. ① 제주도의 지질구조와 관련하여, 윤(1986)은 여러 가지 원인 중 동부지역 패사사구층내에 다량 함유되어 있는 염분이 강우시 빗물에 용해되어 지하로 침투한 것이 주된 원인이라 하였으며 고(1997)는 서귀포층의 결층현상과 깊은 관계가 있는 것으로 추정하였으며 또한 서귀포층의 결층외에도 균열 또는 절리가 발달된 현무암류가 호층으로 존재하며 스코리아층도 호층으로

발달되어 있어 제주도가 생성될 당시부터 해수가 내륙 깊숙이까지 침투할 수 있는 지질구조 때문이라 하였다. ② Choi et al.(1991)은 해안 인접지역에서의 과잉양수가 해수침입의 주 요인이라 하였으며, 김(1992)은 해안변에서의 과잉양수에 의한 담수층의 파괴로 해수가 침입하고 있다고 하였으며 이(1994)는 수학적 모의모형으로 분석한 결과 양수에 의해 염도가 증가하고 있다고 하였다. ③ 복합적 요인으로써 부(2000)는 제주도내에 개발된 관정 중 염소이온이 250mg/l 이상인 지역으로 북군 한림읍 수원리, 남제주군 대정읍 상모리, 서귀포시 보목동 등의 일부 해안지역과 동부권역의 해안에서 가까운 곳에 개발된 대부분의 관정에서 염수가 산출되고 있다고 하였으며 동부권역 담지하수 대수층에 대한 염수침입의 주된 원인은 자연적인 수위하강과 용수사용량의 급증으로 인한 과잉양수, 지하지질구조, 저투수성의 미고결 퇴적층의 결층등 복합적인 작용에 의해 염수침입이 되었다고 하였다. ④기타로는 조 의(1987)는 토양이나 암층에 누적된 염분의 영향으로 고염분 현상을 설명하였고 한국에너지연구원(1986)는 환경동위원소인 ^{18}O 함량과 염분함량(Na^+ , Cl^-), 전기전도도 값을 분석한 결과 해수침입에 의한 염수화현상이 발생하고 있다고 하였다. 최와 김(1989)은 제주도의 기존 관정 45개 지역을 선정하여 수질분석을 한 결과 상위지하수는 직접 바다와 접할수 있는 수리지질학적인 조건을 갖고 있지 않으므로 염수의 직접적인 침입을 받고 있지 않으나 기저지하수분포지역의 일부 지역에서는 해수의 침입으로 지하수 수질에 영향을 주는 것으로 분석하는 등 해수침입에 대한 여러 가지 유형이 제시되었다.

4. 고염분 관정 분포조사

가. 수질검사자료에 의한 염소이온 분포

제주도에서 1992년부터 1998년까지의 수질검사자료를 시·군청 및 보고서등을 통해 수집하였다. 수집된 수질검사자료 1,980공 5,518건 중 염소이온 검사자료가 있는 1,858공에 대해 염소이온 현황을 분석하였다(Figure 4). 한 공에 여러번의 수질조사 자료가 있는 관정의 자료는 최근의 자료를 주로 하여 1,858건의 자료로 분석하였다. 지역별로 16개 수역으로(Figure 5) 나누어 분석한 결과 16개 수역중 가장 관정이 밀집된 대정수역(20.8%)과 남원수역(13.0%)에서 분석한 공이 가장 많았고 이밖에 동서귀수역(8.2%), 중제주수역(8.1%), 조천수역(7.1%)등이 많은 순이 있었다.

염소이온농도를 0~50mg/l, 50~150mg/l, 150~250mg/l, 250~500mg/l, 500mg/l 이상 검출된 공수를 분류한 결과 0~50mg/l 인 공이 전체 조사공중 94.2%를 나타냈고 먹는물 수질기준치(250mg/l)이상 높게 나타난 공은 9공(0.5%) 이었다.

염소이온농도는 구좌수역과 성산수역에서 0~150mg/l 으로 다른 수역에 비해 폭넓게 나타나지만, 다른 14개 수역에서는 염소이온농도가 대부분 0~50mg/l 으로 나타난다. 이와 같이 구좌수역과 성산수역이 속한 동부지역에서 고염분 현상이 일어나고 있음을 알 수 있다.

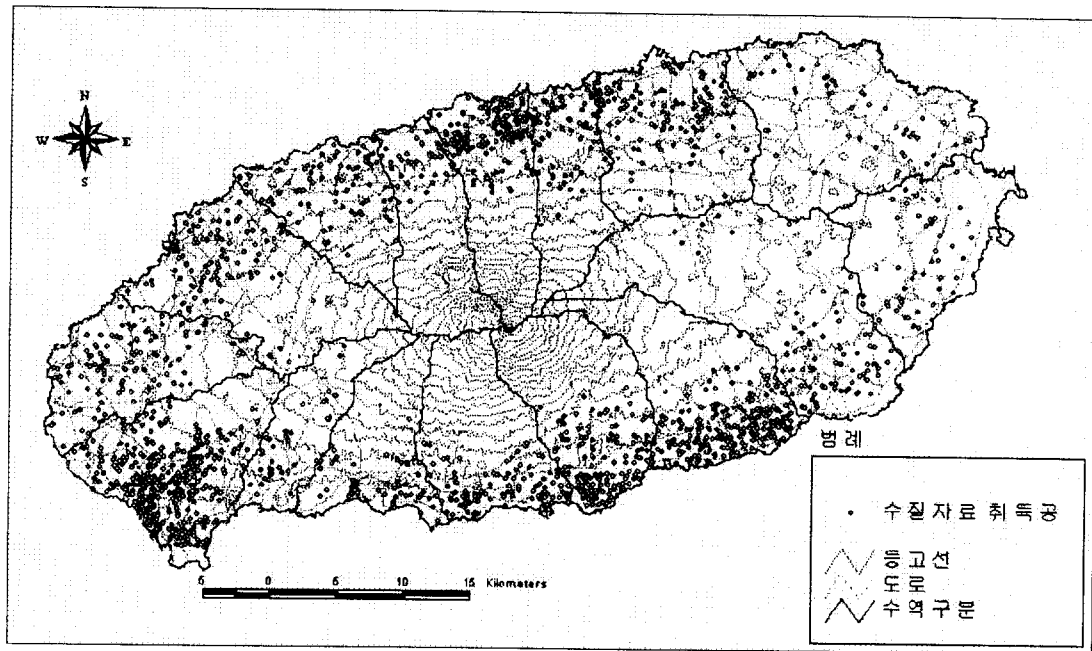


Figure 4. Distribution of sample data wells

염소이온농도가 150mg/l 이상 검출된 관정은 부록(Table 5)에 기재하였고 그 위치도는 Figure 6과 같다. 구좌수역 6공은 해안에서 2.9km까지 폭넓게 분포하며 성산수역 6공은 2.2km까지 나타났다. 표선수역 3공은 해안변에 인접한 공부터 최고 1.2km까지 분포하였고 남원수역 8공은 해안에서 불과 190m까지 밖에 분포하지 않아 해안변에 바로 인접한 공으로서 동부지역의 염소이온이 높은 관정은 해안에서 2.9km까지 폭넓고 지역적으로도 해안변을 따라 고르게 분포하고 있다.

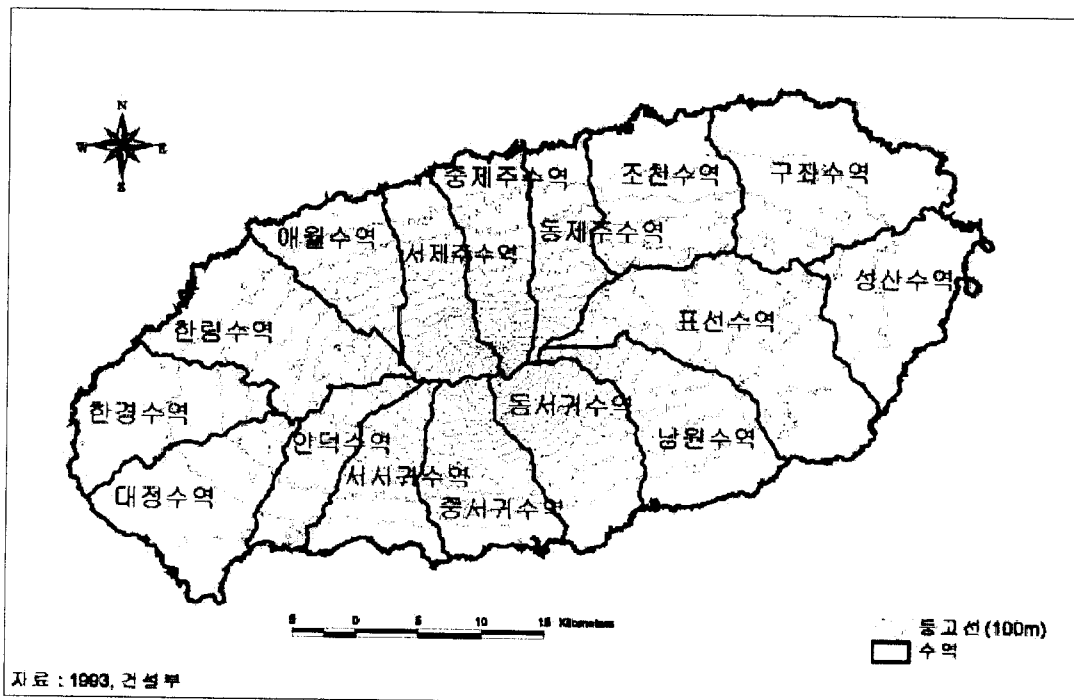


Figure 5. Map of water basins

서부지역에서는 대정수역 3공만이 염소이온이 높게 나타나고 있는데 해안에서 1.1km까지이며 지역적으로는 대정읍 상모리와 하모리에서 나타나고 있었고 염소이온도 매우 높아 500 mg/l 이상이 나타났다. 남부지역에서는 서귀포수역 1공이 높게 나타나고 있는데 해안에서 3.5km에 위치하고 있으며 지역적으로는 서귀포시 하례동으로서 이곳은 해안 염수침입보다는 다른 요인에 기인할 것으로 판단된다.

Table 1. Distribution of Chloride(Cl⁻)

수역명	염소이온농도(mg/l)										계
	0~50	(%)	50~150	(%)	150~250	(%)	250~500	(%)	500이상	(%)	
구좌수역	30	58.8	15	29.4	5	9.8	1	2.0	-	-	51
성산수역	31	65.9	12	25.5	2	4.3	2	4.3	-	-	47
표선수역	71	92.2	3	3.9	2	2.6	1	1.3	-	-	77
남원수역	234	96.7	-	-	6	2.5	-	-	2	0.8	242
한림수역	101	92.7	8	7.3	-	-	-	-	-	-	109
한경수역	113	97.4	3	2.6	-	-	-	-	-	-	116
대정수역	370	95.6	14	3.6	1	0.3	-	-	2	0.5	387
안덕수역	35	100.0	-	-	-	-	-	-	-	-	35
서서귀수역	67	98.5	1	1.5	-	-	-	-	-	-	68
중서귀수역	103	97.2	3	2.8	-	-	-	-	-	-	106
동서귀수역	151	98.6	1	0.7	1	0.7	-	-	-	-	153
애월수역	77	93.9	4	4.9	1	1.2	-	-	-	-	82
서제주수역	31	96.9	1	3.1	-	-	-	-	-	-	32
중제주수역	143	94.7	8	5.3	-	-	-	-	-	-	151
동제주수역	62	88.6	4	5.7	3	4.3	1	1.4	-	-	70
조천수역	131	99.2	-	-	1	0.8	-	-	-	-	132
계	1,750	94.2	77	4.1	22	1.2	5	0.3	4	0.2	1,858

북부지역에서는 애월수역 1공(애월읍 구엄리, 해안거리 150m), 동제주수역 4공(해안거리 950m)으로서 제주시의 동쪽에 위치한 화북1동과 삼양1동의 해안변에서 높게 나타났다.

제주도 전지역중에서 염소이온농도가 높게 나타나는 곳은 동부지역의 해안변을 따라 폭넓게 나타나며 서부지역중에서는 상모리와 하모리 일대, 남부지역중에서는 하례리, 북부지역중에서는 제주시의 동쪽 해안변에서 높게 나타나고 있다.

수질이 불량한 지역의 수질검사 건수(자료수)는 매우 적다. 이는 염소이온이 높게 나타나는 지역에서는 지하수 개발자체가 미미하여, 염소이온의 농도를 그 지역의 대표값으로 보기에는 한계가 있어 자료분석에 어려움이 있다.

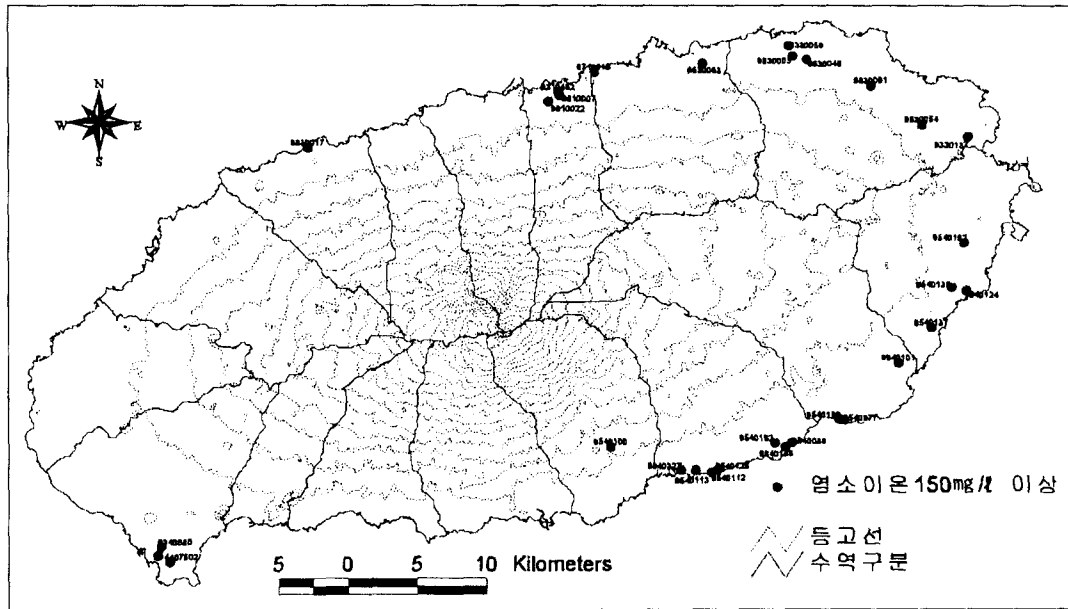


Figure 6. Well location of Cl^- over 150mg/l

나. 동부지역 관정의 수직 물리검층 분석

전기전도도(EC)는 1개의 물질이 전류를 흐르게 하는 능력을 말하며 단위체적(cm^3)을 갖는 25°C 의 수용성용액의 두 대응면에서 측정된 전기저항(ohm)의 역수로 정의하고 있다. 따라서 용액내에 이온이 많을수록 전기저항은 감소되고 전기전도도는 증가한다.

Table 2. Electric conductivity of water

(unit : $\mu\text{s/cm}$)

물의종류	Hem(1985)	Cleary(1990)
순수한 물(증류수포함)	$0.05 \mu\text{s/cm}$	0.5~2
일반수(원수)	-	50~500
광화수	-	500~1,000
산업용폐수	-	10,000 이상
해수	41,500 이상	-
고염수	225,000	-

물의 종류에 따른 전기전도도를 보면 일반적인 지하수원수는 $50\sim 500\mu\text{s/cm}$ 이며 광화수는 $500\sim 1,000\mu\text{s/cm}$, 산업용폐수는 $10,000\mu\text{s/cm}$ 이상을 말한다. 또한 증발잔류물에서 부유물질을 뺀 양을 TDS로 정의하며 TDS는 물속에 녹아 있는 용존물질이나 콜로이드 상태로 있는 물질의 총합으로 사용하기도 한다. Gila River의 경우는 TDS와 EC의 비례상수로서 0.59를, 자연수에서는 0.54~0.96사이이며 일반적으로 0.55~0.75의 비례상수를 갖는다.

동부지역과 그 인근에서 염소이온이 높게 나타나고 있는 관정 중 일부 관정에 대하여 전기전도도의 수직 검층 결과를 부록(Figure 14)에 수록하였다. 해수는 담수(1,000)에 비해 큰 밀도(1.025)를 갖고 있고 밀도에 의한 수두는 지하수 흐름의 한 지배력이 된다. 이러한 지하수 밀도류를 따라 내륙으로 이동한 해수는 전기전도도를 증가시키고 내륙의 수두와 평형을 이루는 영역 주위로 해수와 담수의 접이대가 형성된다. 만일 지하수 관정을 접이대에 굴착

하게 되면 전기전도도는 높아질 것이고 또한 점이대가 아닐지라도 그 주변에 굴착된 관정에서는 과잉양수에 의해서도 전기전도도가 높아질 것이다.

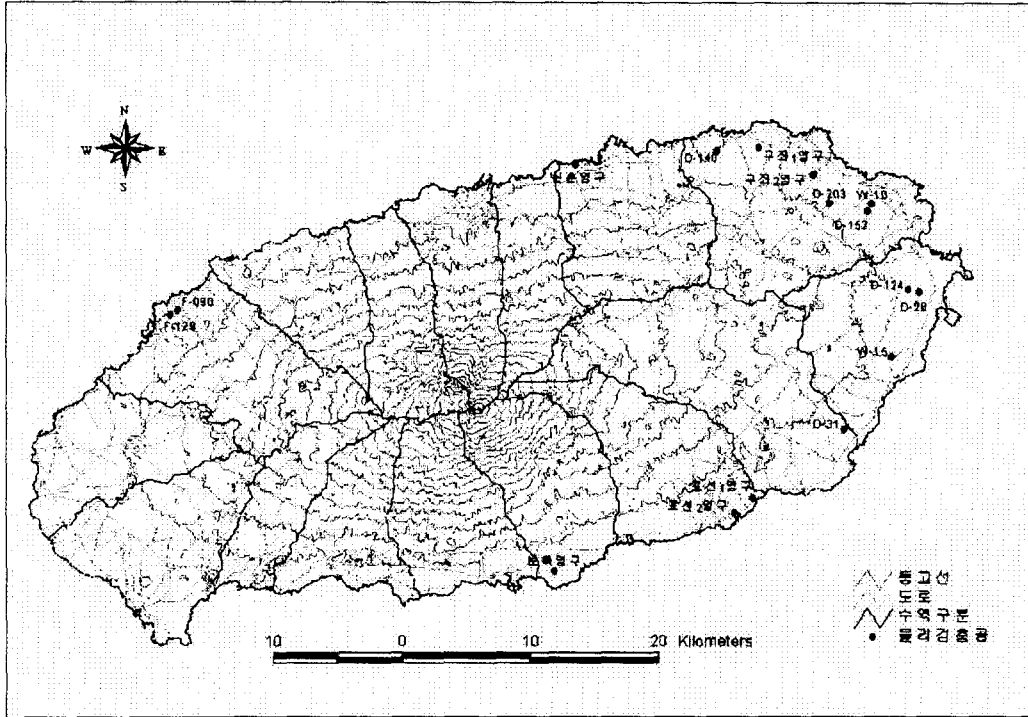


Figure 7. Location of the logged well

조사공들의 심도별 전기전도도를 측정한 결과를 보면 신촌1공은 해수면하 약 -35m부근까지는 전기전도도가 평균 $248.2\mu\text{s}/\text{cm}$ 로서 담수대가 존재하나 -54m부터 -58m까지는 평균 $13,116.8\mu\text{s}/\text{cm}$ 로서 해수에 가까운 지하수가 나타나며 -35~-54m구간은 담수와 염수가 혼합되는 점이대가 존재하고 있다.

구좌1공은 해수면하 약 -28.0m부근까지는 전기전도도가 평균 $508.7\mu\text{s}/\text{cm}$ 로서 담수대가 존재하나 지표하 -41m부터 -51.48m구간은 평균 $14,046.6\mu\text{s}/\text{cm}$ 로서 약 -41m부터 염수가 유입되고 있다.

표선1공은 해수면하 -42.3m 부근까지는 전기전도도가 평균 $257.9\mu\text{s}/\text{cm}$ 로서 담수대가 부존하고 있으나 -49.3m부터 갑자기 높아져 -49.3 ~ -54.3m구간은 평균 $13,398.86\mu\text{s}/\text{cm}$ 로서 염수가 유입되고 있다.

하천공은 조석영향을 고려하여 2회에 걸쳐 EC검층을 실시한 결과 간조시 수위가 1.5m에 형성되었으나 만조시는 1.98m에 형성되어 간조와 만조시에 수위변동이 0.47m차이를 보였다. 만조시는 해수면하 -10.2m부근에서 전기전도도가 $3,003\mu\text{s}/\text{cm}$ 까지 높아졌고 간조시는 해수면하 -18.2m부근에서 $3,004\mu\text{s}/\text{cm}$ 까지 높아져 간조와 만조시의 전기전도도가 최고값에 도달하는데에는 약 8m차이가 있다. 따라서 간조와 만조시의 초기수두차(0.47m)는 지하심부에서의 점이대에서는 약 17배의 변동폭을 보였다. 부록에서 나타난 전기검층결과는 관정내에 우물자재가 설치되어 장기간의 양수가 이루어지지 않은 상태이고 측정시점의 조석영향등을 고려하지 않아 측정값에는 오차가 있을 수도 있다.

다. Cl/HCO₃ 비를 이용한 해수침입 가능성 평가

지하수중의 해수오염의 정도를 평가하기 위해 Revelle(1941)는 Chloride-Bicarbonate (Cl/HCO₃)비를 이용하였다. Chloride는 해수중에 많이 함유되어 있는 반면에 지하수중에는 소량이 존재하고 Bicarbonate는 Chloride와는 반대로 해수중에는 비교적 소량으로 지하수중에는 다량으로 함유된 음이온이다. 또한 해수와 지하수가 혼합하는 경우에 발생할 수 있는

염기치환현상, 황산이온의 환원이나 탄산과 기타 약산기의 상호치환 그리고 침전현상과는 무관하게 Cl⁻과 HCO₃⁻는 영향을 받지 않는다는 것을 응용하여 Cl/HCO₃값을 계산하여 해수의 오염지표로 사용한다. 즉 Cl/HCO₃의 비가 0.5이하인 경우 해수에 의한 오염은 전혀 없고 0.5~1.3인 경우 약간 문제가 되며 1.3~2.8인 경우 보통정도로 오염되어 있고 2.8~6.6인 경우 심한 오염 정도를 나타낸다. 농어촌진흥공사(1995)자료를 이용하여 제주지역의 30개 관정에 대하여 '92년부터 '94년까지 수질분석자료를 년도별 평균으로 권역별로 구분하여 Table 3에 나타냈다.

제주도를 4개 권역(Figure 8)으로 분류하여 볼 때 동부지역 13공은 Cl/HCO₃의 비가 0.35~5.76으로서 수산3과 시흥을 제외하고는 보통정도의 오염을 나타냈고 그중 4공(종달1, 종달2, 고성, 동김녕)은 심한 오염정도를 보였다. 서부지역중 심한오염의 정도를 보인 수원을 제외하고는 8공은 양호한 편이며 남부와 북부지역 또한 모든 공이 양호한 편으로서 동부지역과 서부지역의 일부만이 오염정도가 심한 편이었다.

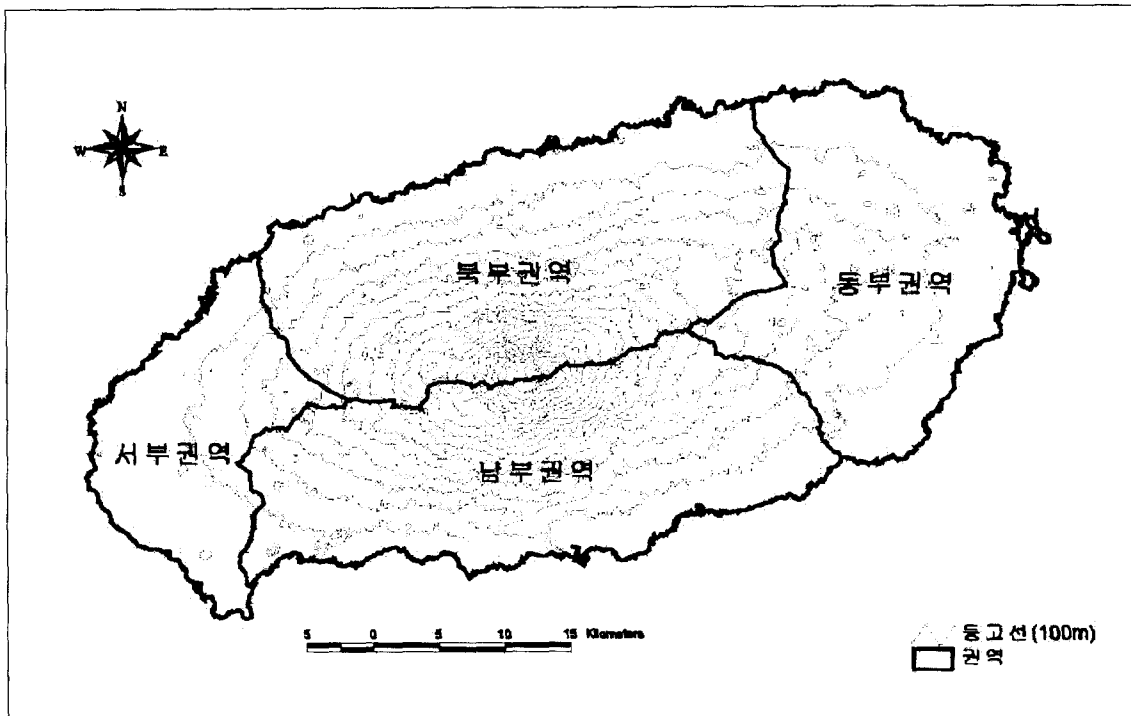


Figure 8. Map of 4 water zone

Tabel 3. Ratio of Cl/HCO₃ in Cheju Island

동부 권역		서부 권역		남부 권역		북부 권역	
지구명	Cl/HCO ₃ 비	지구명	Cl/HCO ₃ 비	지구명	Cl/HCO ₃ 비	지구명	Cl/HCO ₃ 비
종달1	3.46	수원	2.99	월라봉	0.39	함덕	0.44
고성	5.76	영락	0.20	예래	0.78	삼양	0.32
수산	2.78	고산1	0.82	화순	0.19	월산	0.30
동북	2.2	고산2	0.84	서흥	0.41	연동	0.25
온평	1.58	일과	0.94	-	-	-	-
난산	1.87	대립	0.30	-	-	-	-
상도1	2.21	동명	0.34	-	-	-	-
하천	2.28	협재	0.17	-	-	-	-
동김녕	4.60	판포	0.97	-	-	-	-
종달2	2.93	-	-	-	-	-	-
평대	1.31	-	-	-	-	-	-
수산3	0.61	-	-	-	-	-	-
시흥	0.35	-	-	-	-	-	-

라. 관정저의 Level에 따른 염소이온농도

수집 조사된 수질조사자료를 이용하여 분석하면, 서로 인근에 위치한 관정이라 할지라도 관정의 굴착심도에 따라 염소이온농도값은 큰 차이를 보이고 있다. 관정저의 level 깊고 낮음에 따라 염소이온의 차이가 크게 나타나는 현상이므로, 수질검사 조사대상공의 자료를 관정저의 level에 의해 소집단을 만들어 염소이온의 농도 분포를 분석하였다.

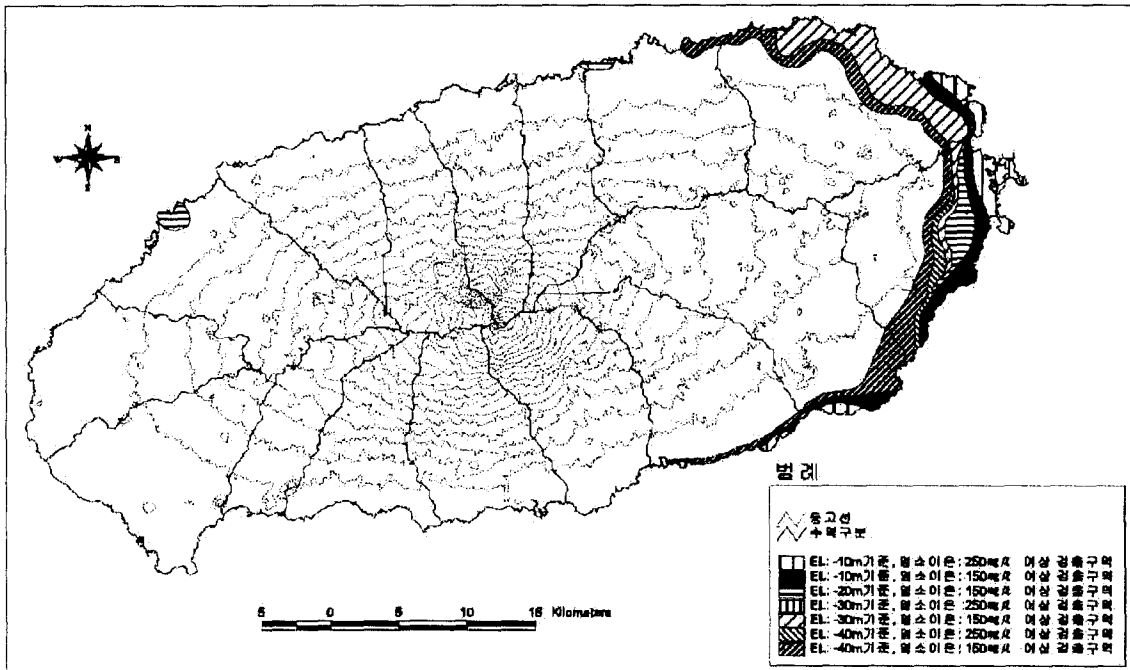


Figure 9. Contour map of Cl⁻ and depth of well bottom

염소이온농도는 총4,970건의 자료 중 해수면 기준 관정저의 level을 「0m이상, 0m~-10m, -10m~-20m, -20m~-30m, -30m~-40m, -40m이하」로 구분하여 6개의 소집단으로 분석하였다. 관정저 level에 의한 각 소집단별로 자료를 취합하여 크리깅 분석을 실시하였다. 크리깅 분석은 분석 대상공이 공간적 분포상의 연속성이 있어야 하나, 수집된 수질검사자료는 고염분을 나타내는 관정의 수가 적어 크리깅에서 나타난 결과물로는 그 추정선을 나타내기 불가능하여, 기존의 자료와 전기검층자료를 종합적으로 분석하여 Figure 9와 같이 염소이온 등농도 분포선을 얻을수 있다.

마. 염소이온 농도 검출지역의 지하수위

제주도 전지역의 지하수위 등고선을 보면, 제주도의 지하수위 등고선은 대부분 지형효과가 반영되어 지하수면이 북부와 남부지역은 등고선 간격이 매우 조밀한 급한 수리경사를 보이고, 서부와 동부지역은 완만한 수리경사를 보이고 있다(Figure 10). 특히 동부지역은 등고선 간격이 매우 넓은 완만한 수리경사를 나타내고 있다. 각 지역의 수리경사를 분석하면, 남부지역의 수리경사가 가장 급하고(서서귀수역 15.05×10^{-3}), 북부,서부,동부(성산수역 1.04×10^{-3})순으로 완만한 수리경사를 나타내고 있다.

장기관측이 이루어지고 관측공의 평균수위를 보면 동부권역(14공)이 평균지하수위가 1.20m로 타권역[서부권역(11공) 10.48m, 북부권역(12공) 19.9m, 남부권역(8공) 30.23m]에 비해 낮는데 이는 다른 지역에 비해 지형고도가 낮을뿐만 아니라, 지역기초지반지질에 불투수성 내지 반투수성 미고결퇴적층이 분포하고 있지 않고 투수성지질구조로 되어 있기 때문이다.

제주도에서의 지하수는 강수량, 조석, 양수량, 개발하한심도, 대수층의 지질이나 지하수 부존상태에 따라 일별 혹은 월별로 수위가 달라지므로 연간수위변화량과 조석에 의한 일변화량을 감안할 때 갈수기의 간조시에는 수위가 해수면과 거의 일치할 가능성도 있다.

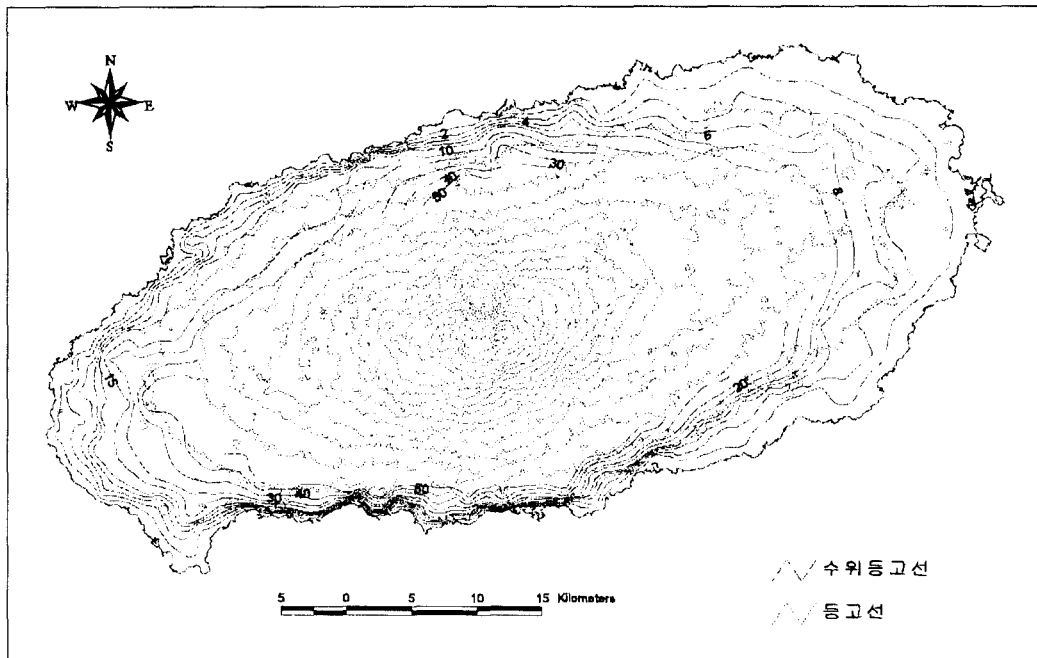


Figure 10. Contour map of groundwater level ('98.12)

5. 제주도 동부지역의 고염분 지하수의 원인고찰

앞에서 검토한 바와 같이 제주도 동부지역의 고염분 지하수의 원인은 첫째, 비교적 저평한 지형과 지하지질의 영향으로 지하수위가 낮아 담수렌즈의 두께가 얇게 구성되어 있기 때문이다. 둘째는 투수성지질구조에서 조석의 영향을 크게 받음으로써 지하수위의 변동에 따라 담수와 염수 접이대가 동반하여 상승과 하강이 반복되기 때문이다.

동부지역에서는 지질학적으로 투수성이 뛰어나고 수리경사가 낮아 자연수위가 2m(E.L) 내외로 낮게 형성되어 Ghyben-Herzberg이론에 따라 담수체의 렌즈가 다른 지역에 비해 매우 얇게 되어 있어 양수에 의해 지하수위가 하강되면 처음에 구성된 담수렌즈가 소멸되어 염수가 양수되는 결과를 보이게 된다.

그러므로 동부지역에서의 고염분 현상이 발생하는 것은 근본적으로 낮은 수두 때문이다. 이와함께 조석의 영향이 미치기 때문이다.

동부지역의 고염분현상은 제주도의 지하수를 처음개발할 당시에도 염분이 높게 나타났고, 동부지역 해안지방의 주민들도 옛부터 찬물을 음용수로 사용했다는것과 1937년 일본 중앙시험소의 조사에 의하면 용천수에서 고염분현상이 발생한 것으로 보아 지하수가 개발되기 이전에도 이미 동부지역의 지하수에는 다량의 염분이 함유되어 있는 것으로 보인다.

70년대 개발초기에는 굴착장비와 경제적인 이유로 지하수개발이 해안변에 집중되었으나, 점점 산록쪽으로 이동하면서 지하수를 개발하고 있는바, 이들 염분농도 분포지역이 산록쪽으로 확산되고 있는지를 판별하기위해서는 체계적인 장기관측 조사가 필요하다.

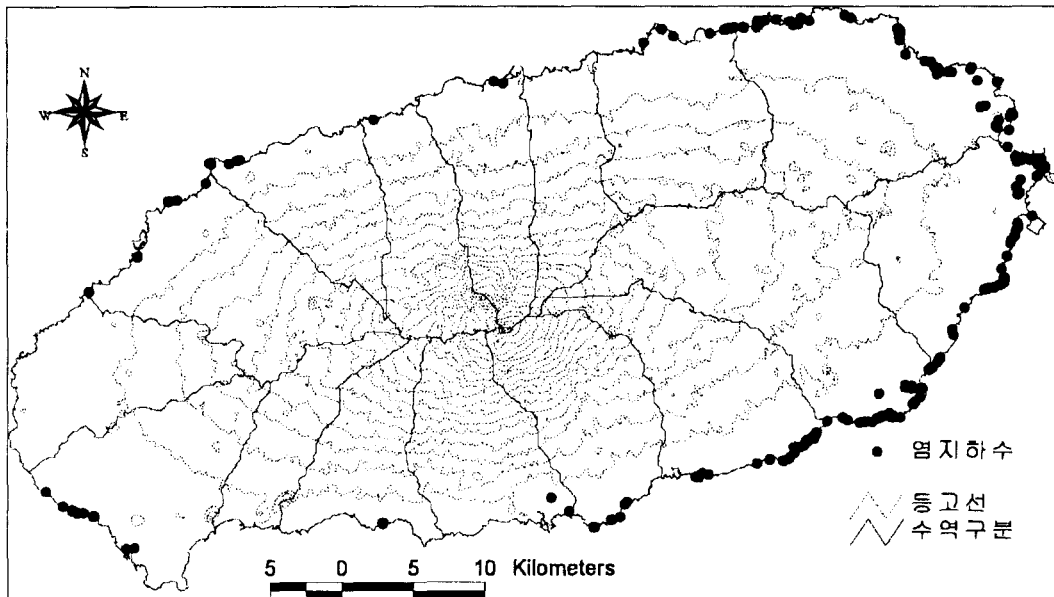


Figure 11. Map of seawater well.

이외에도 최근에 발생되고 있는 인위적인 지하수 장애로는 다량의 염지하수(해수)를 양수하여 이용하고 있는 것이 문제점이다. 이지역에는 많은 수산양식이나 바다물고기 양식장이나 식품접객업소, 해수사우나 목욕탕 등이 해수를 직접 채수하지 않고, 해안변 약 100m이내의 지상에서 지하수관정을 굴착하여 염소이온농도 약 7,000~8,000mg/l 인 염지하수(해수)를

채수하는 관정이 약 600여공 개발되어 있다. 염지하수는 양식업등 산업에는 도움을 주지만 과도한 양의 해수를 채수함으로써 염이대가 상승하고, 다량의 해수의 유입환경을 만들어 상부 대수층에 염분성분을 오염시킬수 있다. 특히 동부지역과 같이 지하수위가 낮고 투수성이 좋은 지질구조에서는 염지하수가 고염분현상에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.

6. 고염분 관정에서 염분농도의 저감 사례

가. 사례 1.

제주도의 일부지역에서 고염분 현상이 나타나고 있고, 관정이 막대한 예산을 투입하여 개발되었나 염분으로 인해 사용하지 않을 때는 원상복구를 하여야만 한다. 이들 관정에 대한 염분농도 저감방안을 연구하여 고염분 관정을 담지하수 관정으로 사용한 예를 제시하고자 한다. 고 외(1998)는 북제주군 한림읍 귀덕리에 해안으로부터 100m 떨어진 해발 2.5m(E.L) 지점에 위치하는 관정을 조사하여 염소이온이 높게 나왔지만 적절할 그라우팅을 통하여 현재 담지하수로 사용하고 있다.

자동수위 관측기로 자연수위 변화를 조사한 결과, 수위 변화폭은 50%의 조석효율을 나타내어 조석에 의한 영향을 지배적으로 받고 있음을 조사 분석 하였다. 둘째 우물자재를 설치하지 않고 수직적인 전기전도도를 간조와 만조시에 측정하였다(Figure 12). 전기전도도 측정 결과에 의하면 지표하 36.5m심도까지는 1,500~1,600 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 였으나, 지표하 36.5m~46.5m까지 약 10m구간에서는 전기전도도가 700~900 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 를 나타내는 담지하수가 존재하고 있음을 알수 있었다. 이는 만조시간대가 간조시보다 다소 증가하는 경향은 있으나 변화폭은 작은 편이다. 사례공에서는 지표에서 23m까지 시멘트 그라우팅 시공 과 우물자재를 설치하고, 지표하 37~45m 구간에 스크린 설치 등 우물자재를 설치한 결과 염소이온이 77.2mg~96.5mg/l의 범위를 나타내었다고 보고하였다.

이러한 사례와 같이 염수 사이에도 담수가 존재하는 지역에서는 염지하수 사이에 존재하는 담지하수를 확보하여 염지하수의 유입을 차단하여 담지하수를 이용하는 좋은 사례이다.

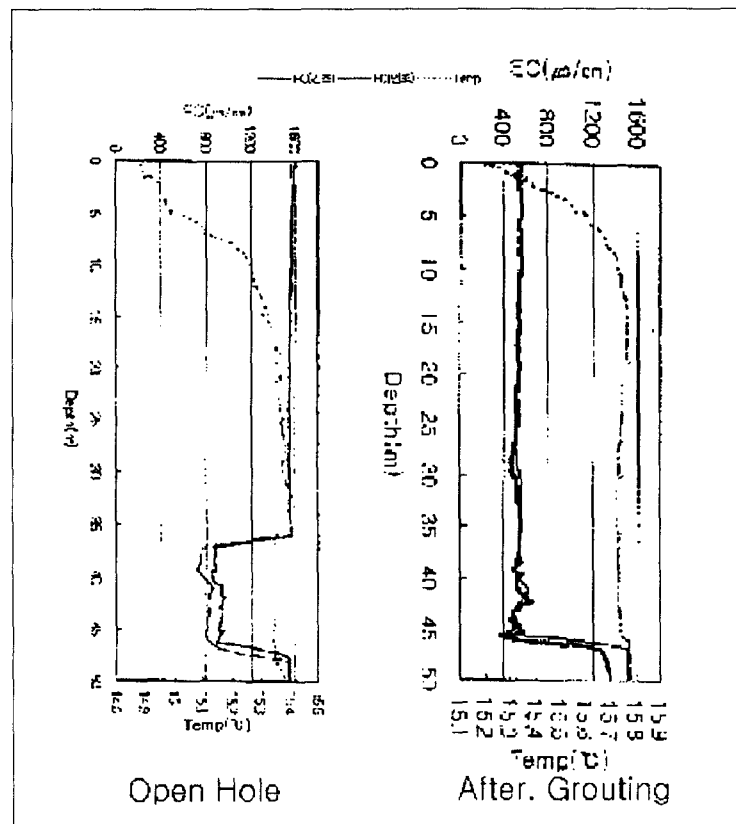


Figure 12. Well logging data of study well

위와 같은 사례가 발생하는 지역은 Figure 2와 같이 대수층이 이루어진 것으로 추정할 수 있다.

나. 사례 2.

농업기반공사에서 제주도 북서쪽에 위치한 북제주군 한림읍 수원리 F-129호공에서 고염분농도 저감 방안을 실시하여 양호한 수질을 확보하여 현재 농업용수로 활용하는 고염분농도 저감사례이다.

F-129호공은 1996년 7월에 착정구경 8" 로 지표(해발고도 : 25m)에서 60m를 착정 개발하였다. 개발당시의 자연수위는 1.0m(E.L), 안정수위는 0.5m(E.L), 양수량은 800 m³/D으로 개발하였다. 개발당시의 염소이온농도는 91mg/l로 고염분 현상을 보이지 않았다. 지질주상도는 부록(Figure 15)에 수록하였다.

Table 4. Content of F-129

표고	착정심도	자연수위	안정수위	양수량	착정구경	펌프설치 심도	해안과의 거리
25m (E.L)	60 m	1.0 m (E.L)	0.5 m (E.L)	800m ³ /일	200 mm	-29m (E.L)	843m

1998년 8월 16일 수질검사결과 고염분 현상이 일어난다는 것을 확인하고, 전기검층과 주변 관정의 염소이온을 측정하였다. 당시 1998년 8월에는 “백중사리”의 현상이 나타나 전국에서 해수에 대한 피해가 보고되었다. 백중사리란 달과 태양, 지구의 위치가 일직선상에 위치하면서 달과 지구가 가장 가까운 거리에 있을 때로서 높은 조위를 나타내는 것이 특징이다.

첫 번째 저감방안의 시도는 염소이온 농도를 측정하고 펌프설치심도와 양수량을 조절하여 염소이온농도의 변화를 조사하였다. 조사 당시의 염소이온농도는 1,000mg/l를 나타내었다. 염분농도를 낮추기 위해 펌프를 26m에 설치하여, 상부 대수층의 지하수를 이용코자 양수량을 조절하였으나 펌프용량이 커서 양수량 조절에 한계가 있었다. 측정된 염소이온 농도는 1,100mg/l로 염소이온 저감방법은 효과가 없었다.

좀더 정확한 염소이온의 변화등을 알기 위해 공내 물리검층을 실시하였다. 물리검층의 결과는 Figure 13과 같다.

Figure 13에서 전기전도도 상승은 대수층구간을 중심으로 나타나기 시작하여 지속적인 증가를 보이고 있다. F-129의 지질주상도와 착정당시의 개발자의 의견을 종합한 결과 2개의 대수층구간이 있는 것으로 조사되었다. 제1대수층은 22~45m의 장석감람석현무암의 연암구간으로 그층의 하부에 가까울수록 대수층형성이 발달된 것으로 알 수 있다. 주로 다공질암석으로 상부에 담홍색에서 서서히 회색이 되는 층으로 이루어져 있다. 제2대수층은 51~55m구간의 장석감람석현무암의 풍화암구간으로서 회색을 나타내며 질리발달이 잘 이루어져 있다.

두 번째 시도는 지질주상도 분석 및 현장의 코아사진을 분석하여 하부의 제2 대수층을 차단키로 하였다. 완벽한 지층의 그라우팅을 위해 먼저 우물자재를 인양후 우물내의 그라우팅을 실시하였다.

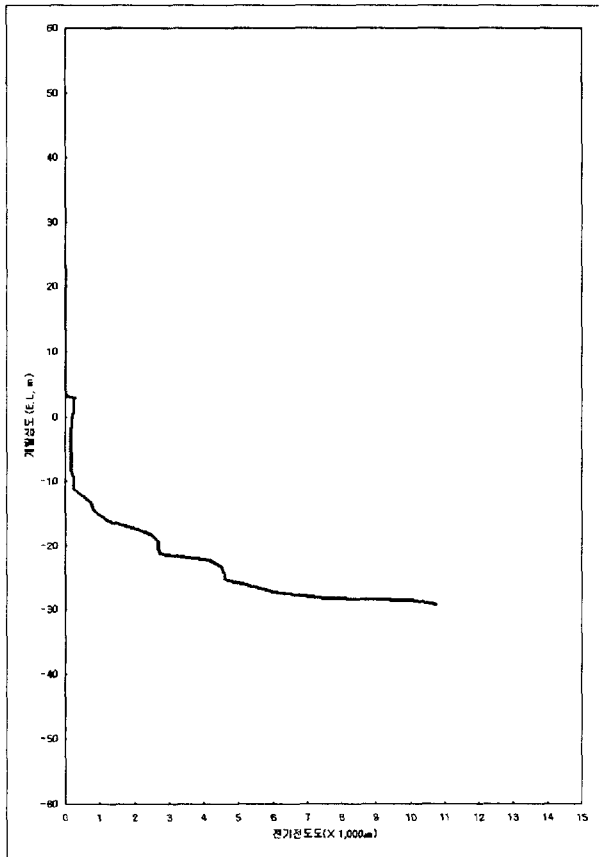


Figure 13. Well logging Data of F-129

48m까지 packing을 실시하였다. 2중 다층구조를 사용함으로써 경제적으로 연결성을 차단할 수 있었다. 12m를 다층구조로 그라우팅을 실시 후 우물자재를 설치하였다. 우물자재는 맨 하부에 우물파이프를 넣어 다시 1m를 시멘트 탄을 이용하여 우물자재에서 1m를 시멘트로 그라우팅을 실시하여 하부의 지층에서 유입될 수 있는 영향을 최소화시키도록 시공하였다. 실제 그라우팅의 시공상태를 알기 위해 수차례 TV 검층을 실시하여 그라우팅의 시공상태를 확인하였다. 우물자재를 제1대수층에 스트레나가 배치하도록 재배열하였다. 펌프를 26m에 설치하고 이미 상부 대수층에 존재하고 있을 잔류염분을 제거하기 위하여 장시간 동안 양수를 실시하였다. 장기간 동안의 양수를 실시하면서 전기전도도를 시간별로 체크한 결과 전기전도도도 단계적으로 값이 하강하는 것으로 알 수 있었다. 최종적으로 나타난 F-129호공의 양수량은 800m³/일로 양수를 하면서 179.1mg/l을 나타내었다.

F-129호공의 염소이온이 높게 나온 원인을 분석하면 F-129호공이 위치한 제주도 북제주군 수원, 대림 지역 일대의 지하수부존특성은 기저지하수 부존지역으로 자연수위가 해발고도 1m에 형성되어 있으며, 장기 가뭄으로 인해 지하수의 함양이 줄었고 백중사리 등의 영향으로 담수체의 두께가 얇아진 지하수체 자체의 변화 요인이 있었다. 그리고 가뭄으로 인해 농업 관개를 위한 과다양수 등 다양한 원인으로 인하여 염수가 유입되었다고 판단된다.

그라우팅은 염수침입의 공간을 완벽히 막아 주어야 하고 대수층이 이미 연결되어 있어 공내 굴착과정에서 생길수도 있는 공간까지도 완벽히 차단해야 하므로, 공사기간을 충분히 두어 그라우팅을 실시하였다. 그라우팅은 먼저 2~4mm 정도의 수중에서 왕사끼리 점착력이 있는 재료를 선정하여 이용하였다.

먼저 대수층이 아닌 구간에 왕사를 5m를 채우고 그 상부에 시멘트를 10~20m 직경의 탄을 만들어 공내에 투입하였다. 시멘트로 만든 탄은 일정한 무게를 가지므로 공내 하부까지 재료의 손실을 최소화하여 지하수공 하부까지 도달할 수 있고, 수중에서 불림 현상과 상부에 누적되는 시멘트 탄이 자체무게로 인해 압력을 가하여 packing 효과를 얻을 수 있다. 맨 먼저 5m(연암구간)를 왕사로 채우고 4m(풍화암구간)를 시멘트로 packing 하여 그라우팅을 실시하여 충분히 고결이 되도록 시간적 여유를 두었다. 다시 2m(보통암구간)을 왕사로 채워 놓고 4m(연암구간)을 시멘트탄을 채워

7. 고염분 지하수 지역에 대한 대책

해안변의 지하수의 해수침입은 단기간에 발생하는 것이 아니므로 이에 대한 방지대책을 수립하기 위해 제주도 전역에 지하수 장기관측망을 설치하여 자연수위, 안정수위, 채수량 등을 장기관측하고, 해당지역의 조수간만차, 강우량, 유출량 등과 연결하여 지역별 지하수개발 한계량을 설정한 후 지역별로 적절한 개발과 물 이용배분계획을 수립하여 이를 토대로 지하수개발사업이 추진되어야 할 것이다.

제주도지역의 고염분 지하수의 대책으로는 첫째, 해안변의 지하수를 상승시킬수 있는 방법을 강구해야한다. 고염분 현상의 가장 직접적인 원인이 지하수위이므로 수위를 상승시키기 위해 인공함양정을 이용한 인공함양과 지표에 대규모 저수지를 만들어 지표에서 인공함양을 시키고, 지하댐건설, 차수벽설치 등을 통해 지하수의 함양을 늘여야한다. 둘째는 장기적인 조사를 실시한 후 염도가 낮은 시기에 시기별 채수 등 관정굴착심도를 제한하거나 현재의 획일적인 지하수 이용형태에서 계절과 주변여건에 맞는 다양한 관정이용프로그램을 개발하는 것이다. 셋째는 실시간 지하수위 및 수질 모니터링을 통한 일정수위 이하로 떨어질 경우 지하수 이용 자제 등의 지하수 경보시스템 도입이다. 넷째는 현재 해안지역의 양식장에서 사용하고 있는 염지하수를 과다하게 개발하지 않도록 규제 하여 담염수 점이대가 내륙으로 이동하는 것을 막아야 한다. 다섯째, 국지적인 지역에서 나타나는 고염분현상은 정밀한 조사를 실시한 후 그라우팅 등을 이용한 고염분 저감공법으로 적절한 지역을 시공하는 등이 있다.

현재 가장 시급하게 다양한 연구가 이루어져야 할 것은 실제 어떤 과정을 통해서 고염분 이온이 높게 나타나고 있는가에 대해 정확한 조사가 실시되지 않았다. 학자마다 그 원인에 대한 차이를 두고 있으므로 하루 빨리 연구목적용 고심도 관정개발등 다양한 연구를 통하여 완벽한 고염분 현상의 메카니즘을 조사한다면 그 원인에 따른 효율적이고 경제적인 방제대책을 마련하여 효율적으로 지하수 자원을 이용하고, 고염분에 대한 재해를 예방할 수 있을 것으로 사료된다.

8. 결 론

연구에서 수질검사자료 총1,585건을 분석하여 동부지에 위치한 수역에서 염소이온농도가 다른 수역에 비교해 높음을 알 수 있다. 연구에서는 동부지역 해안변일대, 서부지역의 대정읍 상모리와 하모리, 북부지역의 삼양1동, 화북1동 해안변일대에서 염소이온 농도가 높게 나타났다. 동부지역은 해안변에서 2.9km까지, 서부지역은 1.1km, 북부지역은 0.95km로서 동부지역이 해안에서 가장 내륙으로 염소이온이 높게 나타났고 다른 지역은 해안변 1.1km이내에서만 나타났다. 총16개의 관정을 전기검층을 한 결과 담·염수경계면의 존재를 알 수 있었고, Cl/HCO_3 의 비를 분석하여 해수의 오염정도를 조사한 결과 동부지역은 오염정도가 높았고 서부지역은 서북부의 해안에서 높았으나, 남부와 북부지역은 오염되지 않은 양호한 수질상태를 보였다. 수질자료를 관정저를 기준으로 6개 군으로 나누어 여러 가지 조사자료를 파악하여 관정저의 level에 따른 염소이온농도분포도를 작성하였다. 동부지역의 지하수위를 분석한 결과 지하수위가 낮고, 수리경사가 완만하였다. 상기의 분석결과를 보면, 투수성이 좋은 지층이 존재하여 지하수두가 낮아 담수체의 형성이 얇게 형성되어 있고, 조석의 영향으로 지하수두가 상승과 하강을 반복함과 더불어 점이대가 상승·하강을 반복하여 고염분을 나타나는 것으로 판단되었다. 북제주군 한림읍에 위치한 고염

분을 저감사례에서 충분한 조사를 통하여 그라우팅을 이용한 고염분 저감시킬수 있음을 알 수 있다.

고염분 지하수 지역에 대한 대책으로는 인공함양 등의 방법으로 지하수위를 상승하거나, 관정굴착심도 및 양수량의 제한 및 지하수 경보시스템 도입, 염지하수의 개발규제가 필요하다. 국지적인 저감방안으로는 그라우팅을 통한 고염분 저감공법이 효과적이었다.

향후에도 염분상승 메카니즘을 알 수 있는 연구목적용 고심도 관정을 개발하여 정확한 원인 규명이 있을 때 효과적인 방제대책의 마련과 동시에 고염분의 재해를 예방할수 있을 것으로 사료된다.

사 사 : 본 연구를 위한 현장자료를 수집 정리하는데 노고가 큰 농업기반공사 제주도지사 김석중, 정차연, 손주형님께 감사드립니다.

참고문헌

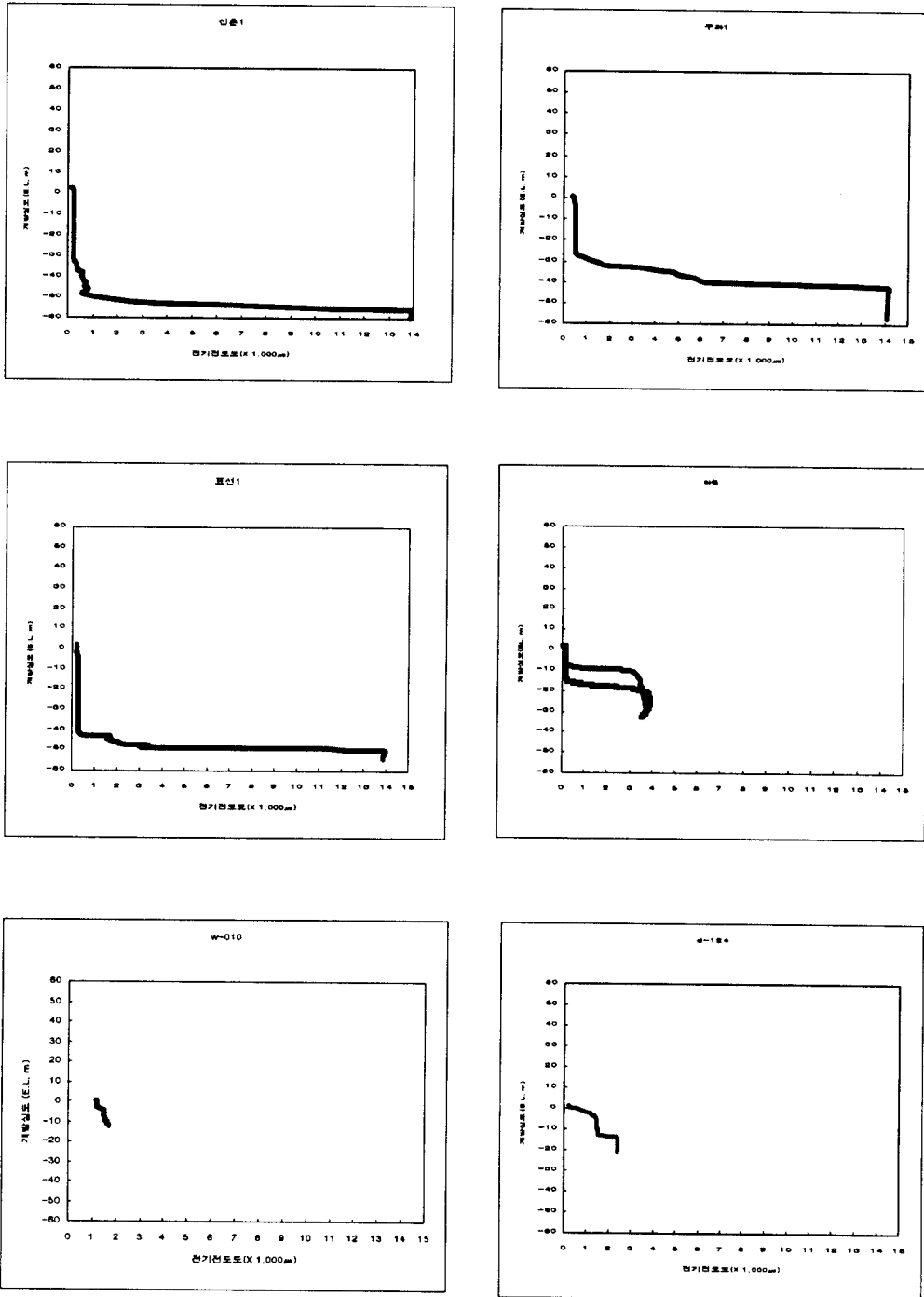
- 고기원, 1997, 제주도의 지하수 부존특성과 서귀포층의 수문지질학적 관련성: 부산대학교 대학원 박사학위 논문.
- 고기원, 문영석, 강봉래, 송시대, 박윤석, 1998, 담·염수 혼합대 하부에 발달한 담수 대수층에 관한 사례 연구: 국제학술심포지움 제주도 지하수의 함양·이용·보전 발표집, p. 111-119.
- 김철수, 1992, 제주도 지하수환경의 오염취약성 : 1992년도 제8회 공동학술강연회 발표논문집(지하수자원의 활용과 보전), 대한광산지질학회, p. 13-28
- 농업진흥공사, 1989, 제주도지하수장기개발계획수립보고서.
- 농어촌진흥공사, 제주도, 농림부, 1995, '95장기관측망 실적 및 보고.
- 농업기반공사, 제주도, 2000, 제주도 지하수보전,관리계획 요약보고서.
- 부성안, 2000. 제주도 지하수 부존특성 및 이용가능량 산출에 대한연구: 안동대학교 석사학위논문
- 윤정수, 1986, 제주동부지역 지하수의 고염도 요인에 관한 연구: 제주도연구 제3집, p. 309-326.
- 이상호, 1994, 제주도해안 지하수의 염수침입 개연성: 제주도 지하수자원환경학적보전과 개발이용, p. 145-165
- 조진동, 구성본, 이상규, 1987, 제주지역 영향권조사 연구(I): 한국동력자원연구소, KR-87-29, p. 191-231
- 최순학, 김영기, 1989, 제주도 지하수의 수질특성: 한국지질학회지, 25(3) p. 230-238.
- 한국에너지연구소, 1986, 동위원소를 이용한 제주지역 수자원에 관한 연구(III): KAERI/PR-527, p. 75.
- 한규언, 이문원, 1977, 제주도의 지질과 지하수와의 관계 연구: 제주대학교 논문집 제9집
- 한정상, 1998, 지하수환경과 오염. 박영사, p. 1018.
- Choi, S.H., Kim, Y.K., Lee, D.Y., 1991, Sea Water Intrusion in the Coastal Area of Cheju Volcanic Island, Korea: J.Korea Inst. Mining Geol.24(3), p. 319-327
- C.W. Fetter, 1994, Applied Hydrogeology 3rd edition: Prentice Hall, p. 364-368.
- R.Allan Freeze/John A.Cherry, Groundwater: Prentice Hall, p. 375-378.
- R. Revelle, 1941, Criteria for Recognition of Sea water in Groundwaters: Trans. Amer. Geophysical Union, Vol. 22, p. 593-597.

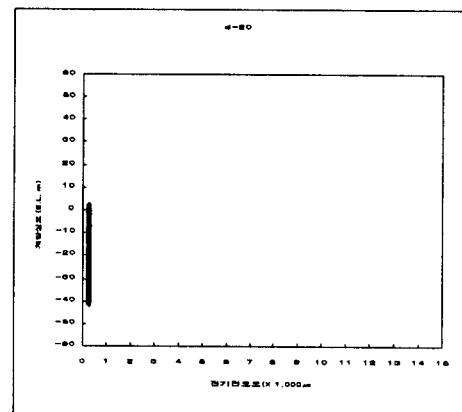
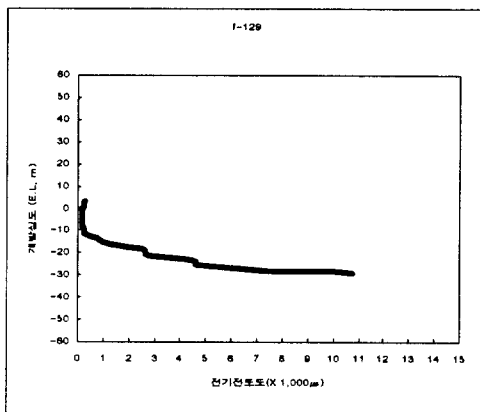
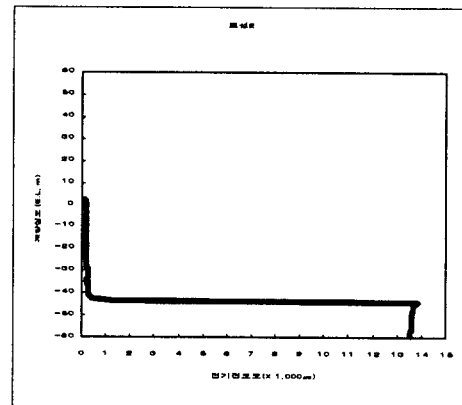
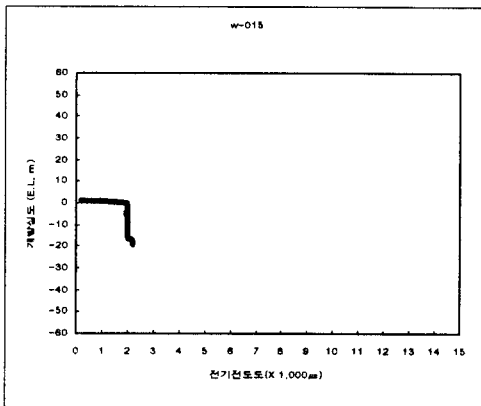
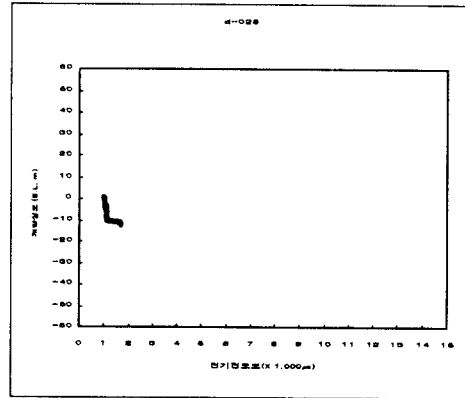
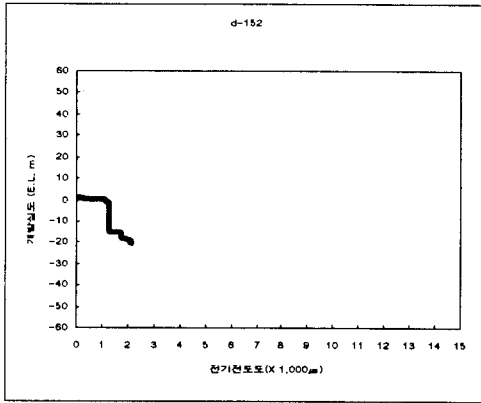
부록

Table 5. List of the wells that is over 150mg/ℓ chlorine

수역명	허가번호	시.군	읍.면	동.리	표고(m)	심도(m)	염소이온 (mg/ℓ)	해안거리 (m)
구좌	9330059	북군	구좌	김녕리	46.33	72.0	290.9	1519.8
구좌	9330137	북군	구좌	종달리	14.00	35.0	233.4	1218.3
구좌	9630049	북군	구좌읍	김녕리	55.0	80.0	179.8	1961.5
구좌	9630054	북군	구좌읍	세화리	52.5	85.0	192.0	2984.1
구좌	9830005	북군	구좌읍	김녕리	23.0	60.0	233.0	836.3
구좌	9830091	북군	구좌읍	한동리	72.0	100.0	237.5	2357.1
성산	9540137	남군	성산읍	신흥리	22.0	30.0	214.0	558.7
성산	9540138	남군	성산읍	난산리	30.0	60.0	421.0	1089.4
성산	9540182	남군	성산읍	온평리	57.5	70.0	350.3	2291.3
성산	9640124	남군	성산읍	신산리	17.0	34.0	170.1	438.3
표선	9540077	남군	표선면	세화리	12.0	13.0	425.3	20.9
표선	9540199	남군	남원읍	토산리	17.0	40.0	235.3	187.9
표선	9640101	남군	표선면	하천리	34.9	71.0	151.4	1260.0
남원	9540089	남군	남원읍	태흥리	7.5	15.0	2601.1	83.9
남원	9540112	남군	남원읍	위미리	5.0	20.0	205.2	21.1
남원	9540113	남군	남원읍	위미리	5.0	20.0	205.2	23.2
남원	9540126	남군	남원읍	남원리	20.0	35.0	170.5	158.3
남원	9540162	남군	남원읍	태흥리	21.0	60.0	151.1	861.3
남원	9540223	남군	남원읍	위미리	7.0	28.0	873.9	108.8
남원	9840136	남군	남원읍	태흥리	6.0	15.0	163.4	41.5
남원	9840327	남군	남원읍	위미2리	17.5	20.0	154.0	191.1
대정	9340680	남군	대정읍	상모리	17.5	35.0	1131.2	1103.3
대정	4407502	남군	대정	상모	16.0	72.0	221	838.4
대정	9740044	남군	대정	하모리	13.81	70.0	843.2	458.8
동서귀	9540100	남군	남원읍	하혜리	12.7	30.0	182.2	3545.8
애월	9830017	북군	애월읍	구엄리	12.0	47.0	179.7	153.8
동제주	9310462	제주시	-	화북1	30.0	40.0	216	706.5
동제주	9710015	제주시	-	삼양1동	50.0	60.0	220.3	327.8
동제주	9810007	제주시	-	화북동	43.0	48.0	191.9	950.0
동제주	9810022	제주시	-	화북1동	30.0	70.0	305.8	771.3
조천	9630063	북군	조천읍	북촌리	17.0	50.0	217.3	1092.8

Figure 14. Electric logging data





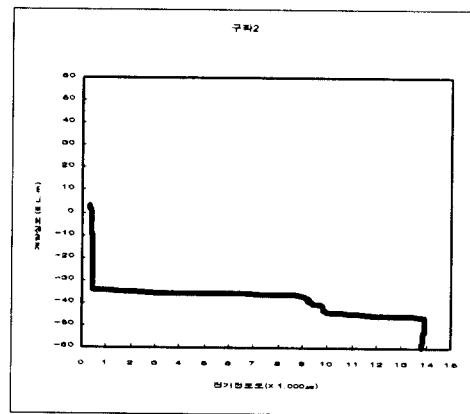
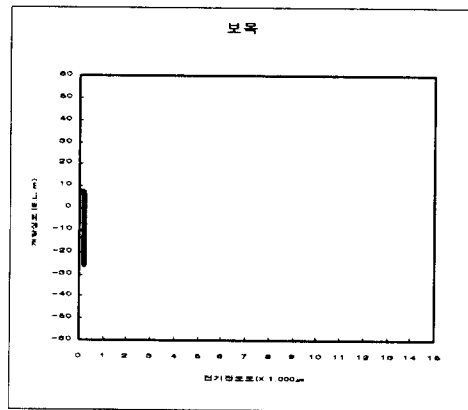
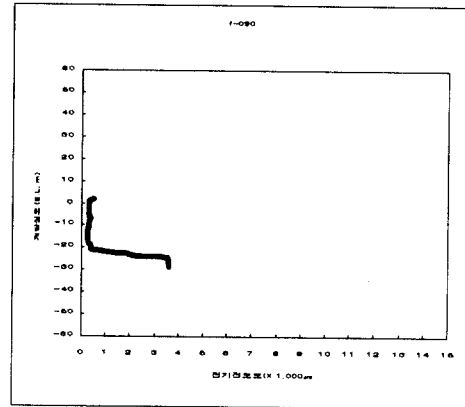
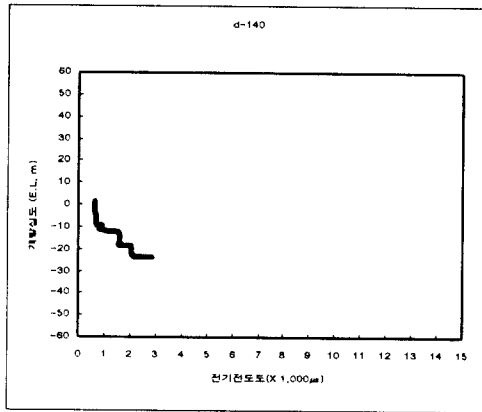


Figure 15. Geology logging Data of Well No. F-129

그라우팅 전		지 질 주 상 도							그라우팅 후									
심도	비 고	심도 (m)	두께 (m)	주상도	토목학명	지질학명	특 징	심 도	비 고									
1.0	지표표고 : (E.L) 25m	25.0	5.0	~ ~ ~ ~ ~	풍화암		암회색, 다공질 질리(조개질)발달											
		20.0	7.0	~~~~~	연암	장석감람석 현무암	회색, 질리발달											
0	자연수위 : (E.L)1m 수중모터실치심도 : (E.L)-29m	13.0	2.0	000000000000	사력층	화산쇄설층	담홍색	2.0	자연수위 : (E.L)2m 펌프실치심도 : (E.L)-3m 우물자재 : (E.L)25~-3m									
		11.0	2.0	~ ~ ~ ~ ~	풍화암	장석감람석현무암	담홍색, 질리발달											
		9.0	6.0	000000000000	사력층	화산쇄설층	다공질역 혼재됨 담홍색											
		3.0		~~~~~														
-15.0	우물자재 : (E.L)25~-15m	-20.0	23.0	~~~~~	연암	F.O.B	담홍색~회색 다공질 질리발달	-3.0	스트레너 : (E.L)-3~-19m									
										-21.0	1.0	+++++	보통암	치밀질, 담회색				
										-24.0	3.0	~~~~~	연암	질리발달				
										-26.0	2.0	+++++	보통암	회색, 치밀질				
										-31.0	우물자재 : (E.L)-15~-31m	-26.0	4.0	~ ~ ~ ~ ~	풍화암	회색, 질리발달	-26.0	
												-30.0	5.0	~~~~~	연암	회색, 기공소함		
-31.0	우물자재 : (E.L)-31~-35m	-35.0		~~~~~				-30.0	그라우팅 : (E.L)-23~-35m									