

# 해수침투 방지를 위한 물리검층과 GIS활용방안

한규언, 이상선, 정차연  
(농업기반공사 제주도지사)

## Protection for sea-water intrusion by geophysical prospecting & GIS

Kyu-Eon Han, Sang-Sun Yi, Cha-Youn Jeong  
(Cheju Branch, Korea Agricultural & Rural Infrastructure Corporation)

**요 약:** 제주도에 해수침투로 발생된 고염분 지하수 산출에 의한 지하수 장애가 나타나고 있거나 우려되는 지역이 있다. 고염분 지하수 산출에 의한 지하수 장애발생 가능지역과 고염분 지하수 산출원인을 파악하기 위하여 제주도 지하수보전·관리 계획 수립조사의 일환으로 농업기반공사에 의해 구축된 제주도 지하수정보관리시스템을 이용하였다. 고염분 지하수 산출이 뚜렷한 16개 관정에 대해 전기비전도도를 검층하여 우물내에서의 담·염수 부존상태를 파악하고자 하였다. 심도별 염소이온농도 분포도를 작성한 결과, 고염분 지하수산출에 의한 지하수장애가 우려되는 지역은 제주도 동부해안지역과 북부 해안일부지역으로 나타났다. 제주도 동부해안지역의 고염분 지하수 산출원인은 지질 구조적인 요인에 의한 저지하수위 형성과 낮은 수리경사 등에 의해 해안선에서 상당히 먼 거리까지 지하 천부에 담·염수 경계면이 형성되어 있기 때문이다. 이러한 사실은 이미 고염분 지하수가 산출되는 관정에서 전기비전도도가 높게 나타나는 구간을 되메움(시멘트 그라우팅) 처리함으로써 염수유입을 방지시키고 양호한 수질을 확보한 사례에서도 알 수 있다. 고염분 지하수의 산출이 우려되는 지역에 대해서는 특별관리지역으로 설정하여 지하수개발·이용을 관리할 필요가 있다. 심도별 염소이온농도 분포도와 지하수 수위자료, 지역별 비양수량을 이용하여 지하수 개발 심도, 양수량을 관리함으로써 다각적인 지하수개발·이용이 검토되어질 수 있다.

**주요어:** 제주도, 해수침투, 고염분, 특별관리지역, 지하수보전·관리

**Abstract:** There are groundwater trouble by high-salinity yield inducing sea-water intrusion in Cheju Island. It is used groundwater-GIS(Well-Info) in the maintenance and management of groundwater in Cheju Island to grasp groundwater trouble area and cause of high-salinity yield. For 16 wells certain to yield high-salinity, we logged specific electrical conductivity(EC) and tried to get hold of freshwater and saltwater relationship. As result of distribution of  $Cl^-$  by depth, it is showed up groundwater trouble by high-salinity yield in the east coastal area and the partly north coastal area. The reason of high-salinity groundwater yield are low-groundwater level by the structure of geology and low-hydraulic gradient etc. There is necessity for management to development and use of groundwater in the high-salinity area, special management area.

**Keywords:** Cheju Island, sea-water intrusion, high-salinity, special management area, maintenance and management of groundwater

## 1. 서 론

제주도는 화산활동에 의해 형성된 현무암류와 화산쇄설물로 이루어진 화산도로서, 평상시의 강우는 지형 및 지질적인 영향으로 일시에 바다로 유출되거나 지하로 침투되므로 풍수기를 제외하고는 대부분의 하천이 건천을 형성하여 지표수의 개발이 제한된다. 따라서 대부분의 용수는 지하수에 의존하고 있는 실정이다. 도민들은 1960년대까지만 하더라도 빗물을 이용한 비위생적인 봉천수와 강우가 지하로 스며들어 다시 용출되는 해안 용출수를 생활용수로 사용하였다.

1963년 정부에서 제주도에 자유항 건설을 시작하면서 정부 지원으로 국지적인 지질조사가 착수되었고, '70년 농업진흥공사의 설립과 동시에 한림일대에 지하수 시범조사를 시행하여 '71년 제1차 국토종합개발계획 수립과 때를 같이하여 막대한 양의 지하수가 부존하고 있음을 확인하였다. 이를 토대로 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 등 전량을 지하수로 이용하고 있는 실정이다. 이와 같은 상황에서 제주도의 일부지역 지하수에서 나타나는 고염분 현상에 의한 염소이온 과다검출은 용수이용과 토지이용에 지역간 불균형을 초래하여 이에 대한 전반적인 대책이 시급한 실정이다.

농업기반공사에서는 1998년 6월부터 2000년 6월까지 2개년에 걸쳐 제주도 전역에 대해 전반적인 지하수 기초조사를 실시하고, 모든 자료를 데이터베이스화하고 기존의 제주도 지리정보시스템의 기반위에 지하수정보관리시스템(Well-Info)을 구축하는 한편 지하수 관리계획을 수립하였다.

본 연구에서는 고염분 지하수 산출현상에 의한 지하수장애를 예방하기 위하여 제주도 지하수정보관리시스템을 이용하여 지하수개발·이용에 따른 고염분 지하수 산출 가능지역을 파악하고, 고염분 지하수 산출원인을 규명하고자 하였다. 또한 고염분 지하수가 산출되는 관정에 대해 전기비전도도 물리검층을 실시하여 우물내에서의 담·염수 부존상태를 파악하고자 하였다.

고염분 지하수 산출이 우려되는 지역으로 지하수개발·이용시 장애가 예상되는 지역에 대해서는 지질구조, 수리특성, 담·염수 경계면 형성심도 등에 따른 관리방안을 제안하고자 하였다.

## 2. 이론적 배경

일반적으로 해안변지역에서의 지하수 부존형태와 산출특성은 담수와 해수의 밀도차에 의한 정수역학적인 균형관계로 설명될 수 있으며, 제주도 또한 이러한 해안변 지하수 부존형태로 그 특성을 설명하여 왔다(농업진흥공사, 1971, 1989; 최순학, 1988; 한국수자원공사, 1993; 고기원, 1997).

Ghyben(1888)과 Herzberg(1901)는 해안에 있어서 담수와 해수의 관계를 다음과 같이 나타내었는데, 식 (2)를 일반적으로 Ghyben-Herzberg 관계식이라 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,  $\rho_f$  : 담수의 밀도,  
 $\rho_s$  : 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,

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

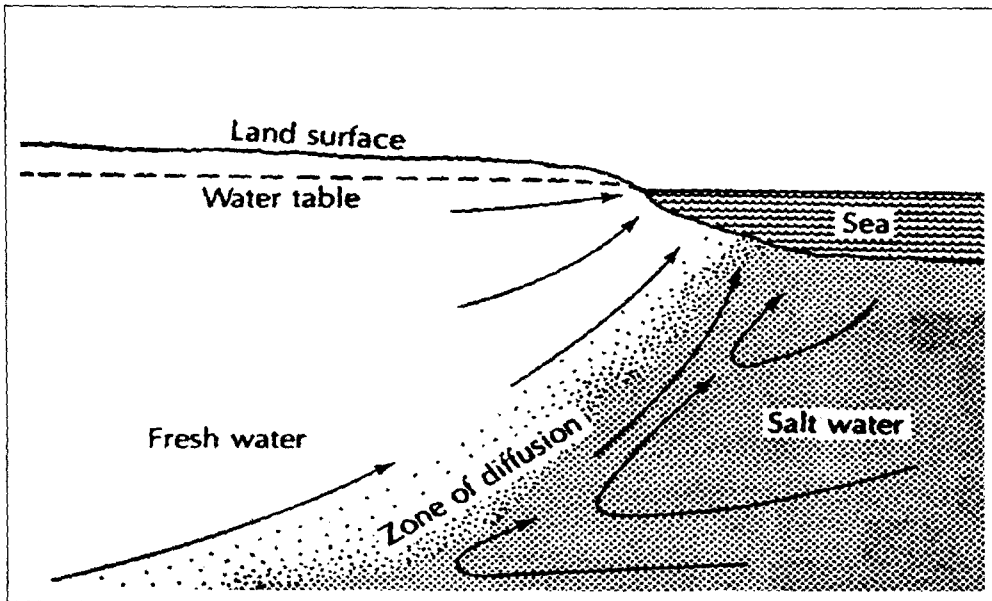


Fig. 1. Circulation of Fresh and saline groundwater at a zone of diffusion in a coastal aquifer (Cooper, 1964).

Ghyben-Herzberg이론의 관계식이 성립될 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 같은 관계를 구할 수 있으나 이들 모두는 「담수-해수체의 평형조건은 지하수면이 해수면보다 위에 있어야 하고, 수리경사는 바다쪽으로 향하여야 한다」는 조건이 필요하다.

해안변지역에서 담수는 Ghyben-Herzberg원리에 의해 해수위에 부유되어 부존되며, 담수와 해수의 경계는 해안선으로부터 내륙방향으로 경사진 지하경계를 나타낸다(Fig. 1). 즉, 담수와 해수가 정지된 평형상태를 유지하고 있는 것은 양자간의 밀도차이 때문이며, 밀도차이는 담수렌즈의 두께와 형태에 영향을 미치는 근본 요소이다. 지표에서 함양된 강수는 지하로 침투하여 해수의 상부에 부존하며, 해안선 근처에서는 지하수의 배출이 끊임없이 일어난다. 또한 해안변지역에서 담수와 해수의 지하경계면을 확산대(zone of diffusion), 전이대(transition zone) 혹은 접이대(interface zone)라고 부르며, 이 경계면에서 담수와 해수는 혼합되어 섞인다. 이때 담·염수 접이대의 두께와 형성심도에 영향을 주는 요소로는 강수의

함양율, 지하수의 유동을 좌우하는 대수층의 균질성과 투수성, 해수와 담수가 혼합되어 일으키는 영향 등 여러 외부 요인이 있다.

### 3. 제주도 지하수 고염분 현상에 대한 기존 연구

여러 연구자들에 의해 수행된 제주도 일부지역 우물에서 나타나는 고염분 지하수에 대한 원인연구 결과, 고염분 농도가 검출되는 것은 지질구조적인 요인(고기원, 1997), 과잉양수(Choi et al., 1991; 김철수, 1992; 이상호, 1994), 지질구조적인 요인과 과잉양수의 복합작용(부성안, 2000), 기타원인(한국에너지연구소, 1986; 최순학과 김영기, 1989)에 의한 해수침입으로 설명하거나 폐사사구층, 토양 또는 암층에 누적된 염분의 용해(윤정수, 1986; 조진동 외, 1987)로 설명하여 왔다.

특히 한국에너지연구소(1986)는 환경동위원소인  $^{18}\text{O}$  함량과 염분함량( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ), 전기전도도 값을 분석한 결과 해수침입에 의한 염수화현상이라는 결론을 얻었다. Ghyben-Herzberg 원리에 의해 지하수가 부존되고 지하수중의 고농도의 염분이 해수와 관계가 있다면, 우물을 통한 고농도의 염소이온의 산출은 함양량의 감소 또는 과잉양수 등에 기인된 자유면대수층의 수위저하에 따른 담수체의 두께감소 및 담·염수경계면의 상승과 관계가 있다. 피압대수층에서도 자유면대수층의 지하수와 같은 관계가 성립되며, 다만 대수층두께가 얇기 때문에 우물주위의 수위가 평균해수면이하로 하강될 경우 보다 내륙 깊이까지 대수층내로 해수가 침입할 수 있다(Fig. 2).

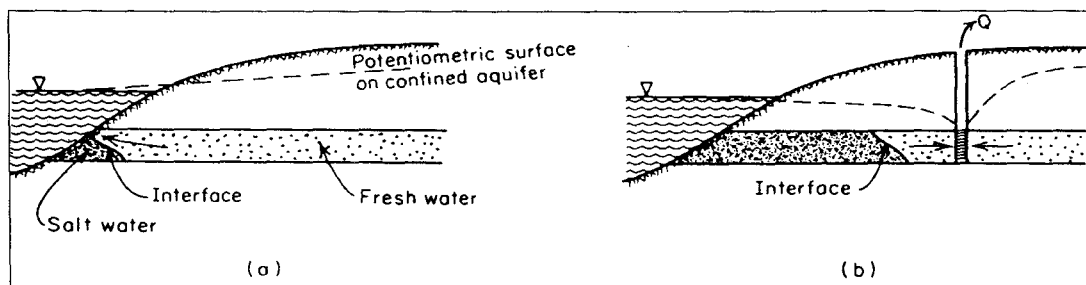


Fig. 2. (a) Saltwater-freshwater interface in a confined aquifer under condition of steady-state seaward flow; (b) seawater intrusion due to pumping (Freeze and Cherry).

### 4. 고염분 관정 분포조사

#### 4.1. 수질검사 자료 분석

1992년 이후 제주도에 분포된 지하수 원수를 대상으로 실시된 먹는물 또는 농업용수 수질기준 검사자료를 수집하였다. 수집된 수질검사 자료중 염소이온 검사자료가 있는 1,858공에 대해 염소이온 검출 현황을 분석하였다.

분석대상공을 염소이온 검출농도 50mg/l 미만, 50~150mg/l, 150~250mg/l, 250~500mg/l, 500mg/l 이상의 5개 모임으로 분류한 결과, 50mg/l 미만으로 검출된 공이 전체 조사공중 94.2%로 나타났고 먹는물 수질기준(250mg/l 이상)보다 높게 나타난 공은 9공(0.5%)이었다(Table 1).

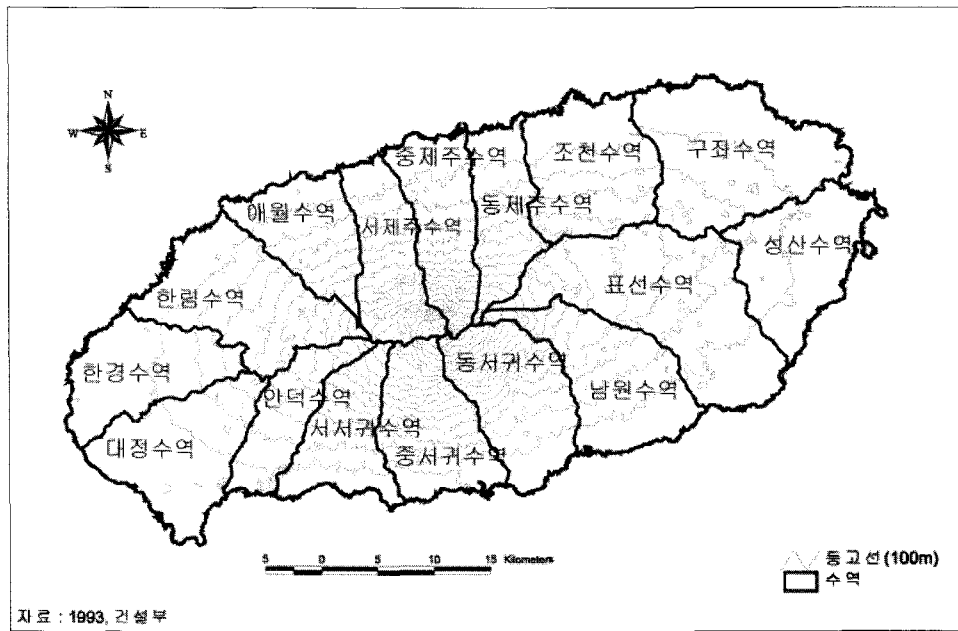


Fig. 3. Map of water basins

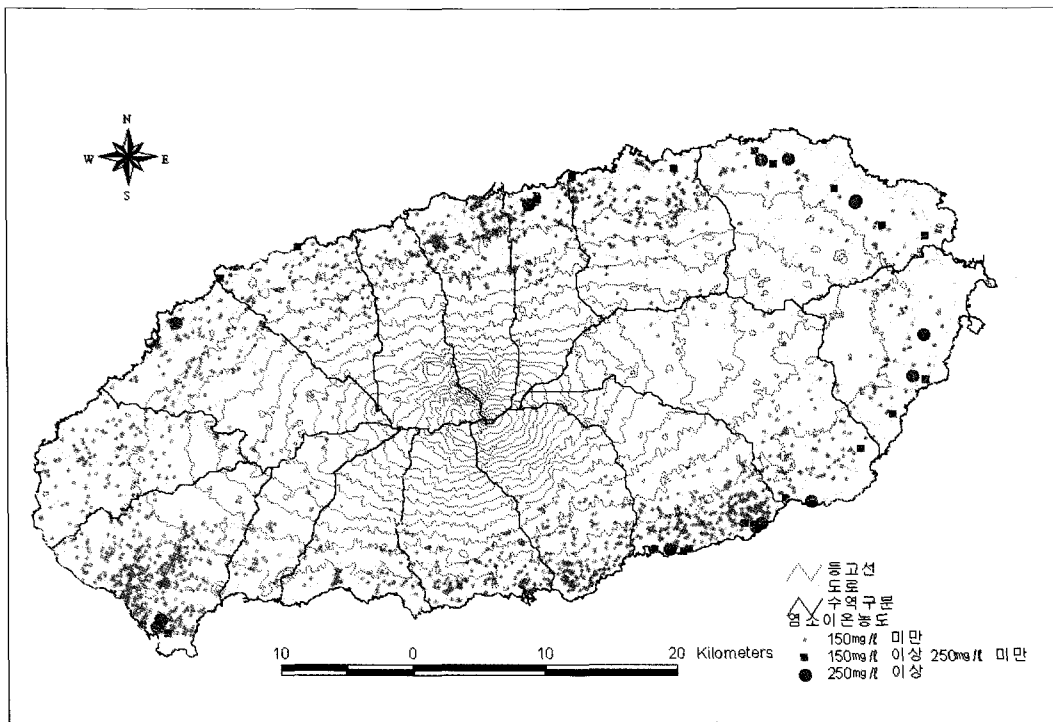


Fig. 4. Distribution of sample data wells

제주도 16개 수역별 분석대상공의 분포를 보면, 150mg/l 이상의 염소이온농도를 보이는 관정이 구좌수역과 성산수역에 집중되어 나타나는 반면, 이들 수역을 제외한 14개 수역에서는 대부분 50mg/l 미만의 염소이온 검출농도를 보인다. 구좌수역과 성산수역에서 나타나는 염소이온농도 150mg/l 이상의 관정들은 해안선으로부터 최대 2.9km까지 내륙으로 고르게 분산 위치하여 상당히 넓은 지역에 걸쳐 나타남을 알 수 있다. 지역별로는 동부지역은 해안

변을 따라 폭넓게 나타나며, 서부지역에서는 상모리와 하모리 일대, 남부지역에서는 하례리, 북부지역에서는 제주시 동쪽 화북동과 삼양동 일대에서 염소이온이 높게 나타났다(Fig. 4).

Table 1. Distribution of Chloride(Cl<sup>-</sup>)

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

#### 4.2. 물리검층

물에 용해되어 있는 물질은 전기전도도를 측정함으로써 추정가능하며, 일반적으로 전도도는 염분농도가 증가함에 따라 일정비율로 증가하기 때문에 간편한 염도측정에 많이 사용된다. 전기비전도도(specific electrical conductivity, EC)는 표준온도(25℃)에서 1cm<sup>3</sup>체적의 물이 가지는 전도도로 정의하며, 온도가 1℃증가 함에 따라 약 2%의 전도도가 증가한다. 전기비전도도의 단위는 전기저항의 단위(ohm)의 역수를 이용하여 mhos/cm로 나타내며, 일반적으로 매우 작은 값을 나타내기 때문에  $\mu$  mhos/cm( $\mu$ S/cm,  $\mu$ S,  $\mu$  mhos, siemens 로도 표기) 단위를 주로 사용한다.

물의 종류에 따른 전기비전도도를 보면 일반적인 지하수원수는  $50 \mu\text{S}/\text{cm}$ 이며, 광화수는  $50 \sim 1,000 \mu\text{S}/\text{cm}$ , 산업용폐수는  $10,000 \mu\text{S}/\text{cm}$  이상을 나타낸다. 또한 물을  $103 \sim 105^\circ\text{C}$ 나  $180^\circ\text{C}$ 에서 완전히 증발시켰을 때 증발잔속에 남아 있는 잔량을 증발잔유물(TS, total solid)이라 하며, 증발잔유물 중에서  $1 \mu$  이상의 부유물질(SS, suspended solid)을 제외한 물속에 용존되어 있거나 콜로이드상태로 존재하는 물질의 총 합량을 총용존고형물질(TDS, total dissolved solid)이라고 한다. 염도(salinity)란 해양학에서는 보다 복잡한 의미로 사용되기도 하나 총용존고형물질과 같은 의미로 일반적으로 사용된다.  $\text{TDS}(\text{mg}/\ell) = A \cdot \text{EC}(\mu\text{mhos})$ 의 관계를 가진다(미국지질조사소, 1947). A값은 물속의 황산염농도가 높을수록 증가하는 경향을 보이지만 일반적으로  $0.55 \sim 0.75$  정도의 값을 나타낸다.

해수중에 나타나는 염류의 농도는 지역에 따라 차이가 나지만 각 성분간의 비율은 거의 일정하게 나타나며, 표준해수(해수중의 염도가 35%,  $35,000 \text{mg}/\ell$ )에서의 염소이온(Cl)의 농도는 평균  $19,000 \text{mg}/\ell$ 로 알려져 있다(Garrels and Mackenzie). 따라서  $\text{TDS} \approx \text{Cl} \times 1.842$ 의 관계식으로 나타낼 수 있다. 지하수중의 EC(또는 TDS)와 Cl 농도와의 관계는 지역에 따라 차이가 나타나는 것으로 알려져 있다. 제주도지역에 있어서는 용천수의 수리화학적연구로 지역에 따른 EC와 Cl 농도의 변화 연구(윤정수와 박상운, 1998)가 있으나, 지하수중의 두인자간의 관계규명에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 제주도과 가장 유사한 지하수부존을 나타내는 하와이 지역에서의 연구에 의하면, 기저지하수 중에서 상위구간에 속하는 지하수는  $\text{Cl} = 0.1429\text{EC}$ , 하부지하수는  $\text{Cl} = 0.333\text{EC} - 109$ , 특히 지하수에 의해 희석된 해수(점이대 가까운 구간)는  $\text{Cl} = 0.2976\text{EC}$ 의 상관관계를 가지는 것으로 조사되었다(한정상, 1998).

제주도 동부지역과 그 인근에서 염소이온이 높게 검출되고 있는 관정 중 일부 관정에 대하여 전기비전도도 수직검층을 실시하여 관정내에서 나타나는 담수와 염수의 부존특성을 직접 조사하였다(Fig. 5).

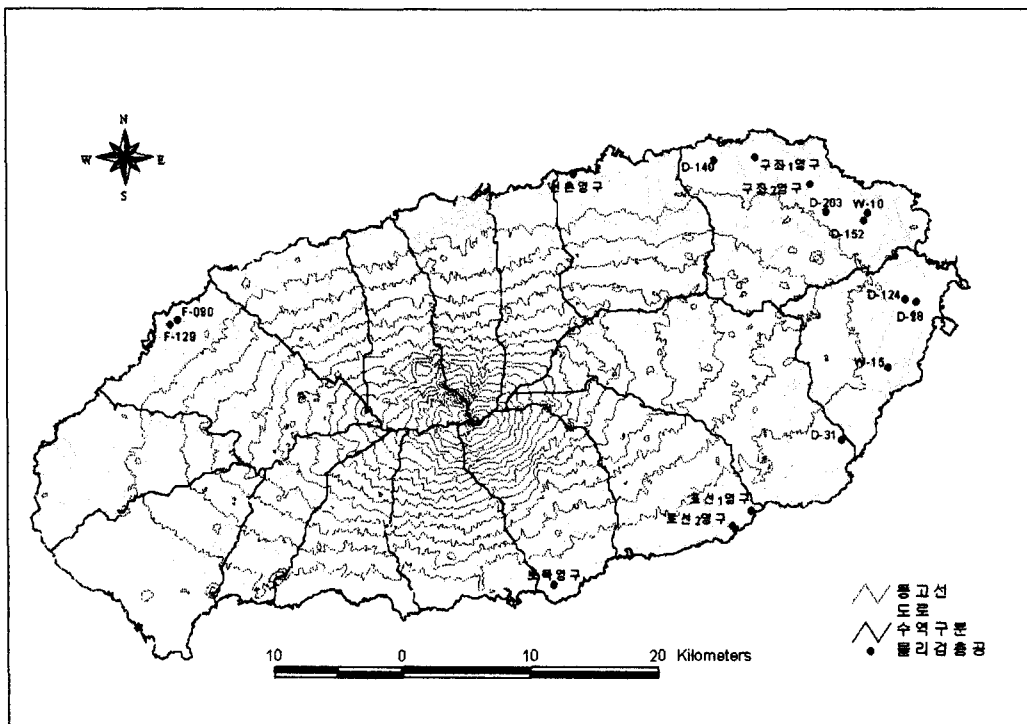


Fig. 5. Location of the logged wells

전기비전도도 물리검층을 실시한 결과, 담·염수의 경계가 뚜렷히 나타난 관정이 있는 반면, 우물자재의 설치 또는 양수의 영향 등에 의해 담수와 해수가 서로 혼합되어 자연수위까

지 높은 전기비전도도를 나타내는 관정과 같이 담·염수 경계면(전이대)에 대한 분석이 불가능한 관정도 있었다(한규언과 신희섭, 2000). 물리검층 대상공에 대한 심도별 전기비전도도 측정값을 분석한 결과, 전기비전도도 측정치가 상부에서 122~300  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 거의 일정한 값을 나타내다가 자연수위하 일정구간을 지나게 되면 급격하게 상승하여 대략 14,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에 이르게 되며 이하 구간에서는 관정바닥까지 거의 일정하게 나타난다. 전기비전도도가 급격히 변화하는 구간의 간격은 검층대상공별로 약간의 차이가 있으나 대략 0.5m~13m로 매우 좁게 나타났다.

금번 관정별 전기비전도도 수직검층은 조사대상공의 굴착심도가 충분하지 못하고, 조사공 하부에서 나타나는 14,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  전기비전도도 값을 보이는 부분을 해수로 해석하기에는 전기비전도도가 너무 낮은 등의 이유로 담·염수경계면(점이대) 구간과 해수구간을 쉽게 결론지을 수는 없었다. 그러나 전기비전도도가 급격히 변하기 시작하는 부분이 담·염수경계면(전이대)의 상부에 해당하는 것이라고는 할 수 있을 것이다. 향후 담·염수경계면(점이대)에 대해서는 충분한 굴착심도로 개발된 조사공을 통한 전기비전도도 검층 등 다양한 조사가 수행되어야 할 것이다.

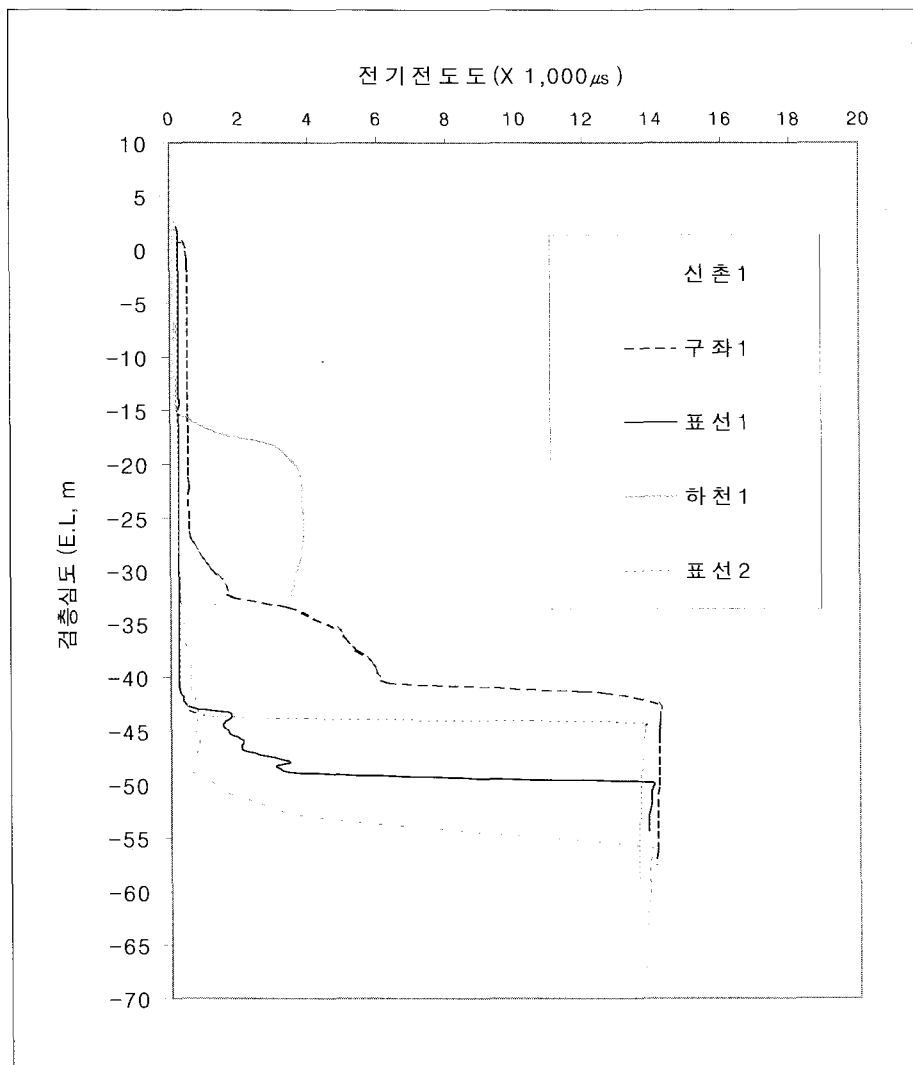


Fig. 6. Well logging data.



## 5. 염소이온 검출농도의 공간적 분포

관정의 수질검사자료, 위치 및 개발내역 자료를 비교해 보면, 서로 인근에 위치한 관정이라 할지라도 평균해수면기준 개발심도에 따라 염소이온의 검출농도는 큰 차이를 나타낸다. 이러한 평균해수면기준 개발심도에 따라 염소이온 검출농도가 다르게 나타나는 점을 이용하기 위하여 수질검사 자료가 있는 관정들을 개발심도(평균해수면기준)에 따라 0m이상, 0m~ -10m, -10m~-20m, -20m~-30m, -30m~-40m, -40m이하로 6개의 소집단으로 구분하고 각각의 심도범위에서 검출되는 염소이온의 평면적인 농도분포를 분석하였다.

일차적으로, 평균해수면기준으로 구분된 관정들의 소집단별로 일반적인 지구통계학적인 분석에 보편적으로 사용되는 Kriging분석을 실시하여 일정심도에서 검출되는 염소이온의 평면적인 농도분포를 나타낼 수 있는 심도별 염소이온 등농도선도 6장을 작성하였다. 다음으로, 심도별 염소이온 등농도선도에서 나타난 150mg/l와 250mg/l 등농도선만을 대상으로 낮은 기준심도에서 보다 고농도의 염소이온 등농도선이 나타나는 부분을 우선적으로 취합하여 3차원적인 염소이온 검출분포도를 조합하였다(Fig. 7). 최종적으로, 관정의 개발심도와 수질 검사자료를 이용하여 작성한 염소이온농도 검출분포도와 전기비전도도 검출자료를 비교하였다. 즉 검출자료에서 전기비전도도가 급격히 상승하는 구간의 평균해수면기준 심도와 250mg/l 염소이온 등농도선의 심도범위내에 들지 않을 경우 등농도선을 약간씩 수정하였다.

평균해수면기준 -40m이내 심도에서 고농도의 염소이온이 검출되는 지역의 공간적 범위를 나타내어본 결과, 제주도 동부해안지역과 북부일부 해안지역이 포함되어 나타났다.

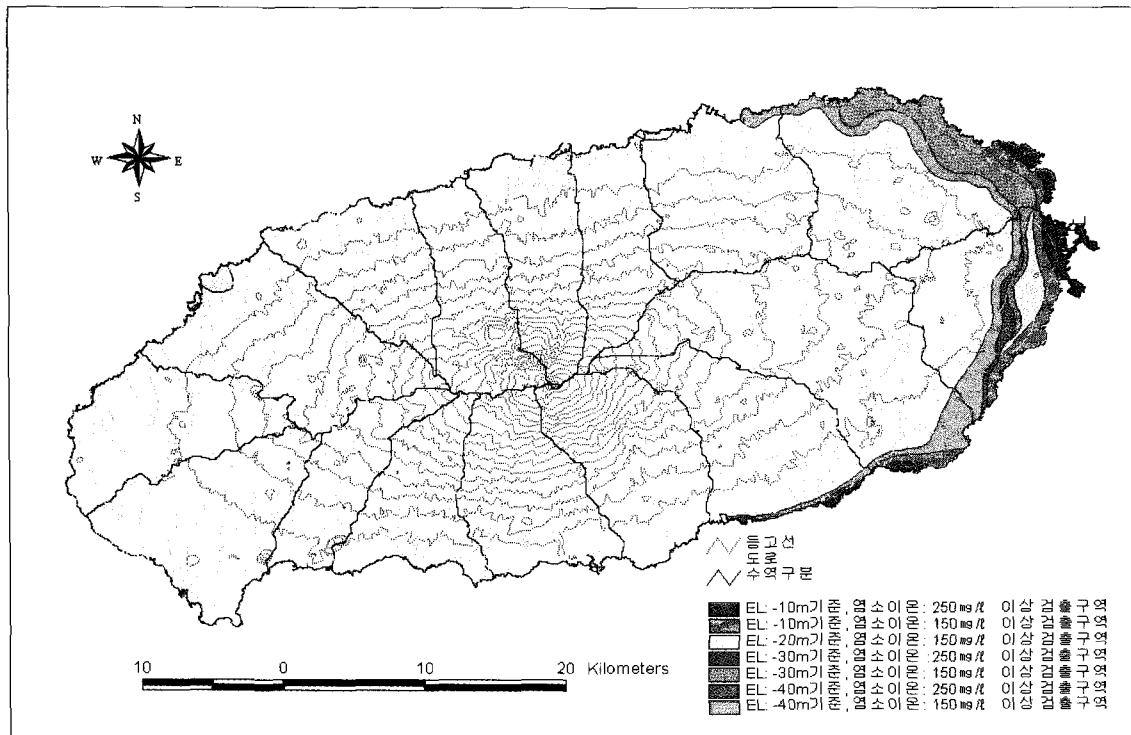


Fig. 7. Contour map of Chloride(Cl<sup>-</sup>).

## 6. GIS분석에 의한 제주도 지하수의 수리특성

### 6.1. 지하수위

1998년 12월 257공에 대한 지하수위 일제조사 자료를 이용하여 농업기반공사에 의해 작성된 지하수위 등고선을 보면, 제주도의 지하수위 등고선은 대부분 지형효과가 반영되어 지형 형태와 유사하게 나타나며, 한라산을 중심으로 방사상의 유선망을 보여준다(Fig. 8).

북부와 남부지역은 지하수위 등고선간격이 매우 조밀한 급한 수리경사를 보여주고, 서부와 동부지역은 완만한 수리경사를 보인다. 특히 동부지역은 지하수위 등고선간격이 매우 넓은 완만한 수리경사를 나타내어 표고 200m지역에서도 지하수위는 해수면위 약 10m에 위치하는 아주 낮은 지하수위를 보여주고 있다. 수역별 표고 200m지점에서의 평균수두를 지하수위 등고선도로부터 GIS TIN을 구성하여 수리경사를 계산한 결과, 제주도 표고 200m이하 지역 지하수의 수리경사는 평균  $5.49 \times 10^{-3}$ 으로 계산되었다. 남부지역의 수리경사가 가장 급하고(서서귀수역  $15.05 \times 10^{-3}$ ), 북부, 서부, 동부지역(성산수역  $1.04 \times 10^{-3}$ )으로 가면서 완만한 수리경사를 나타내었다.

### 6.2. 비양수량

농업기반공사에 의해 '96년~'98년 기간중 제주도에서 개발된 281공의 지하수 관정에서 수행된 양수시험자료를 해석하여 지역별 비양수량을 산출하였다.

우물에서 지하수위를 1m하강시킬 때 채수할 수 있는 지하수량인 비양수량은 제주도 전체 평균 305.9m<sup>3</sup>/일로 나타났으며, 특히 동부지역은 평균 435.2m<sup>3</sup>/일로 매우 높게 나타났다.

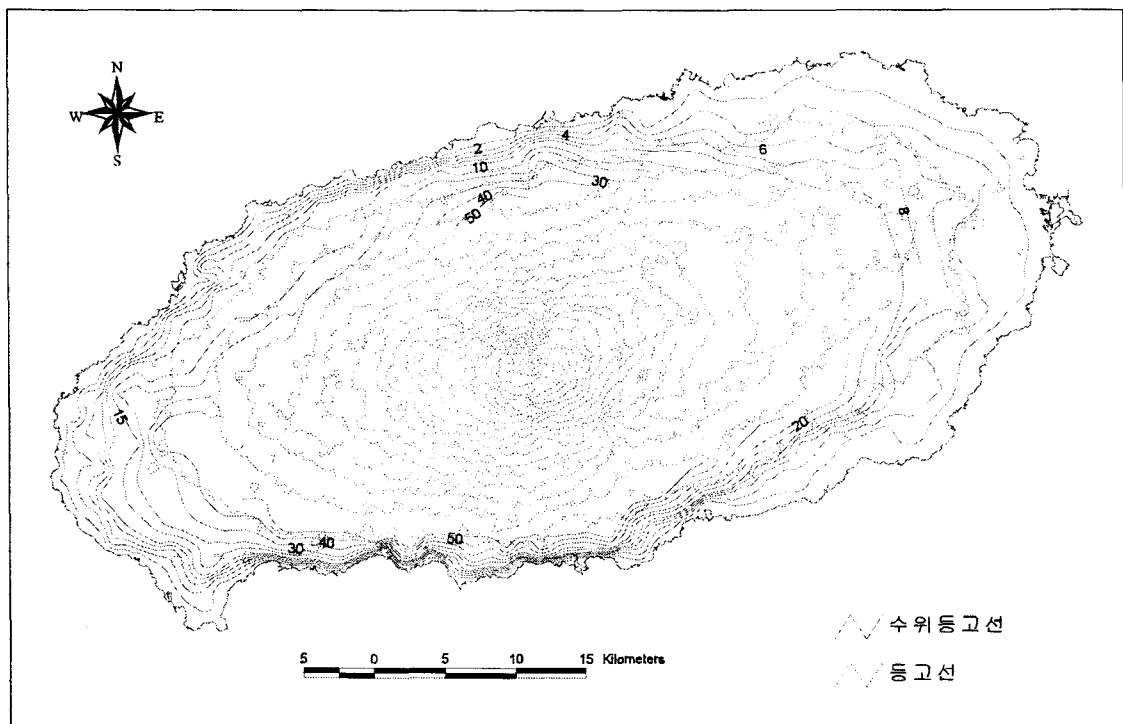


Fig. 8. Contour map of groundwater level ('98. 12)

Table 2. Hydraulic gradient, specific capacity.

지역구분	수역	수리경사 ( $\times 10^{-3}$ )	비양수량 ( $m^3/일$ )
전체	평균	5.49	305.9
동부지역	조천수역	2.21	162.5
	구좌수역	1.13	706.8
	성산수역	1.04	682.1
	표선수역	2.03	465.8
	남원수역 (평균)	6.66	376.3 435.2
서부지역	대정수역	6.37	99.1
	한경수역	4.60	116.4
	한림수역 (평균)	3.10	316.0 184.2
남부지역	동서귀수역	10.59	152.2
	중서귀수역	14.81	65.4
	서서귀수역	15.05	103.5
	안덕수역	9.93	38.6
	(평균)		101.6
북부지역	애월수역	4.26	689.7
	동제주수역	7.15	306.0
	중제주수역	9.44	87.6
	서제주수역 (평균)	9.16	83.7 488.2

## 7. 제주도 동부지역의 고염분 지하수의 원인고찰

제주도 동부지역의 고염분현상은 제주도 지하수를 처음 개발할 당시에도 염분이 높게 나타났다. 동부지역 해안지방의 주민들도 옛부터 짠물을 음용수로 사용했다는 것과 1937년 일본 중앙시험소의 조사에 의하면 용천수에서 고염분현상을 기재한 것으로 보아 지하수가 개발되기 이전에도 이미 제주도 동부지역은 다른 지역과는 구분되는 특이한 지하수 부존특성에 의해 다량의 염분이 산출될 수 있는 환경인 것으로 판단된다.

제주도 동부지역의 지하수 관정을 통해 다량의 염분이 산출되는 원인은 첫째, 지하수위의 형성이 다른 지역에 비해 매우 낮게 형성되어 있고 둘째, 수리경사가 매우 낮기 때문으로 판단된다. 제주도 동부지역을 구성하는 지하지질은 지표로부터 심부까지 침상장석감람석현무암으로 구성되어 있고(농어촌진흥공사, 1989), 저투수성의 퇴적층(서귀포층 등) 발달이 빈약함에 따라 다른 지역에 비해 투수성이 매우 좋다. 따라서 지하수의 부존이 Ghyben-Herzberg 원리에 지배되는 도서지역의 부존특성을 잘 나타낼 것이고, 담수는 해수와 의 관계에 의해 점이대를 형성하면서 해수의 상부에 부존 될 것이다. 또한 매우 낮은 수리경사로 인해 해안선에서 매우 먼거리까지도 지하 천부에 담·염수 경계면(점이대)이 형성되어 질 것이다.

이러한 지하수 부존특성을 나타내는 지역에서는 지하수 관정의 개발심도가 담·염수 경계면(점이대)에 도달하거나 또는 관통하기 쉽고, 양수에 의해 지하수위가 약간 하강하여도 담·염수 경계면(점이대)의 급격한 상승을 초래하여 고염분 지하수의 산출을 초래하게 되는 것이다.

### 8. 물리검층을 활용한 해수침투 방지 사례

제주도 북제주군 한림읍 수원리 F-129호공은 물리검층을 활용하여 염수가 혼입되는 구간을 시멘트로 되메움처리 함으로서 양호한 수질을 확보하여 현재 농업용수로 활용하는 해수 침투 방지 사례이다(한규언과 신희섭, 2000).

F-129호공은 개발당시에는 양호한 수질로 고염분 현상이 나타나지 않았다(Table 3). 그러나 1998년 8월 “백중사리”에 의한 매우 높은 조위에 의해 관정에서 고염분이 검출되는 해수 침투현상이 보고되었다.

Table 3. Content of F-129

표고	착정심도	자연수위	안정수위	양수량	염소이온 농도	펌프설치 심도	해안과의 거리
25m (E.L)	60 m	1.0 m (E.L)	0.5 m (E.L)	800m <sup>3</sup> /일	91mg/l	29m (E.L)	843m

우물내의 담수와 염수의 부존상태를 파악하기 위하여 전기비전도도 검층을 실시한 결과, 평균해수면기준 -20m하부에서 매우 높은 전기비전도도를 나타내는 염수가 부존함을 확인하였고(Fig. 9), 수질검사결과 염소이온농도는 1,100mg/l로 검출되었다. 따라서 관정바닥(E.L -35m)부터 E.L -23m까지 시멘트로 그라우팅하여 대수층구간을 폐쇄하기로 설계, 시공한 후 장기양수시험을 실시한 결과, 염소이온 농도 179mg/l의 양호한 수질을 확보할 수 있었다.

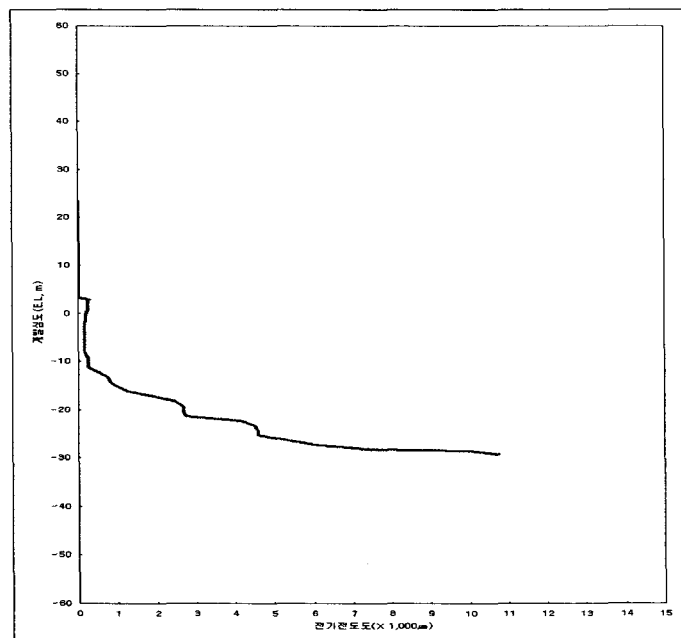


Fig. 9. Well logging Data of F-129

## 9. 해수침투 우려지역의 관리

앞장에서 설명한 것과 같이 제주도 동부지역과 북부 일부지역은 지하수 부존특성을 좌우하는 지질특성과 수리특성에 의해 다른 지역에 비해 해수(염수)로 혼입된 지하수와 담지하수의 지하경계 심도가 매우 얇게 나타나 지하수개발·이용시 장애가 발생되고 있는 지역이라 할 수 있다.

이러한 고염분 지하수가 산출될 가능성 때문에 제주도 동부 해안지역은 지하수개발·이용이 다른 지역에 비해 매우 낮다(농업기반공사, 1989). 따라서 필요한 용수를 다른 지역에서 급수하여 사용하거나 용수부족으로 토지이용이 저조한 실정이다.

만약 고염분 지하수의 유입이 일어나지 않는 적절한 범위의 지하수개발심도와 양수량을 결정하여 지하수개발·이용을 관리할 수 있다면, 다각적인 용수이용과 토지이용이 가능할 것이다.

지하수이용을 위한 관정개발에 있어, 수중모타 등의 이용시설 설치를 위한 최소한의 개발심도는 자연수위하부로 -30m정도는 굴착되어야 한다. 따라서 평균해수면기준 동일 심도에서의 상대적인 염소이온의 농도차이를 나타내기 위하여 '98년까지 개발된 지하수관정들의 개발심도별 수질검사자료와 지하수관측정 및 감시정의 전기비전도도 검층자료를 분석한 염소이온 검출농도 분포도를 이용하여 지하수개발·이용시 특별한 관리가 필요한 지역을 구분할 수가 있다. 평균해수면기준 -30m 이내로 개발된 지하수관정 중에서 염소이온농도가 250 mg/l 이상 초과 검출된 수질검사 자료가 있는 지역을 분석한 결과, 대부분이 동부해안 지역에 편중되어 있으며, 한림수역과 동제주수역 및 일부지역으로 나타났다. 또한 이들 지역의 지하수위는 거의 평균해수면 상부 약 2m 내외에 형성되어 있으므로, 이들 지역을 특별관리지역으로 설정하여 지하수개발·이용을 관리함으로써 고염분 지하수의 유입에 의한 장애를 예방하여야 할 것이다(Table 4, Fig. 10).

Table 4. Special maintenance area

(단위 : km<sup>2</sup>)

구 분	면 적(A)	특별관리지역(먹는물 수질기준 초과검출 우려지역)	
		면 적 (B)	비율(B/A, %)
도 전 체	1828.06	57.40	3.1
구좌수역	171.28	10.04	5.9
조천수역	124.78	1.19	1.0
동제주수역	77.56	0.30	0.4
한림수역	142.60	3.29	2.3
남원수역	124.71	4.36	3.5
표선수역	208.92	5.92	2.8
성산수역	113.09	32.30	28.6

\* 면적 : 우도, 추자도 등의 부속도서 및 내륙바다를 제외하고, 백록담지역은 중제주수역에 포함한 GIS 분석결과

특별관리지역을 제외한 해수(염수)로 혼입된 지하수와 담지하수의 지하경계 심도가 비교적 얇게 나타나는 지역은 지하수 수위자료와 지역별 비양수량 자료를 이용하여 개발심도, 양수량을 관리함으로써 다각적인 지하수개발·이용이 검토되어야 할 지역으로 판단된다.

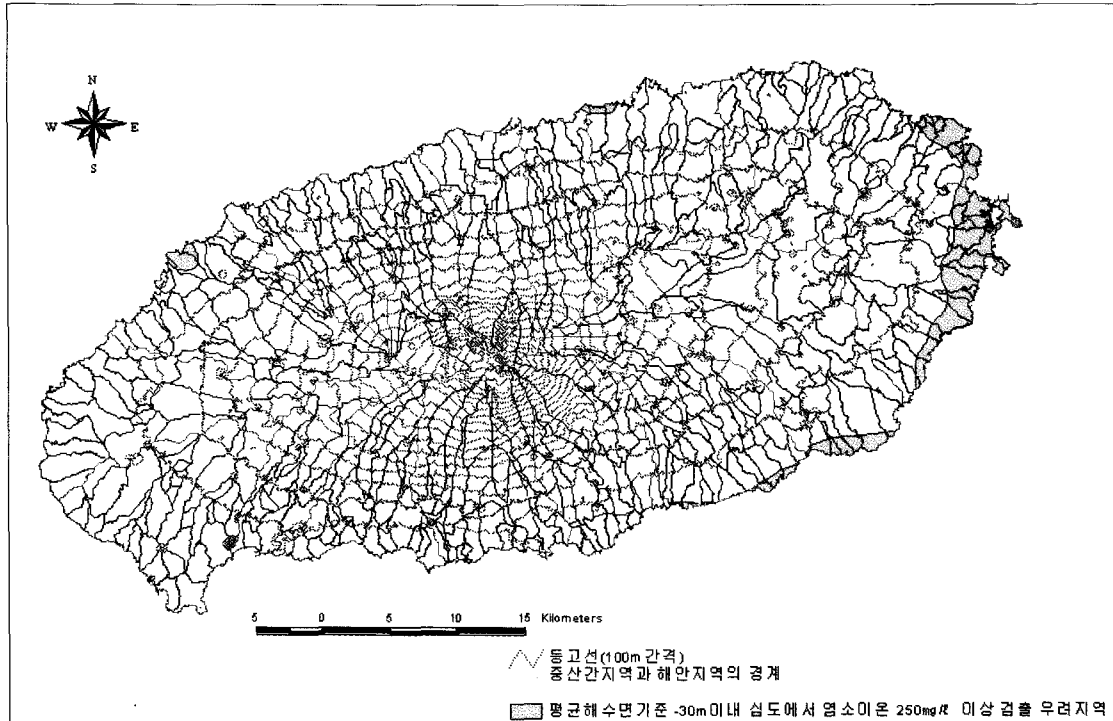


Fig. 10. Special management area.

## 10. 결 론

고염분 지하수 산출에 의한 지하수 장애발생 가능지역과 고염분 지하수 산출원인을 파악하기 위하여 제주도 지하수보전·관리 계획 수립조사의 일환으로 농업기반공사에 의해 구축된 제주도 지하수정보시스템을 이용하였다. 고염분 지하수 산출이 뚜렷한 16개 관정에 대해 전기비전도도를 검층하여 우물내에서의 담·염수 부존상태를 파악하고자 하였다.

심도별 염소이온농도 분포도를 작성한 결과, 고염분 지하수산출에 의한 지하수장애가 우려되는 지역은 제주도 동부해안지역과 대정읍 상모리와 하모리, 제주시 삼양1동, 화북1동 해안변 일부지역으로 나타났다.

제주도 동부해안지역의 고염분 지하수 산출원인은 지질 구조적인 요인에 의한 저지하수위 형성과 낮은 수리경사 등에 의해 해안선에서 상당히 먼 거리까지 지하 천부에 담·염수 경계면이 형성되어 있기 때문이다. 이러한 사실은 이미 고염분 지하수가 산출되는 관정에서 전기비전도도가 높게 나타나는 구간을 되메움(시멘트 그라우팅) 처리함으로써 염수유입을 방지시키고 양호한 수질을 확보한 사례에서도 알 수 있다.

자연수위로부터 담·염수 경계면까지의 구간이 매우 좁은, 즉 염수의 부존이 지하천부에 나타나 지하수이용시설을 설치할 수 있는 충분한 깊이로 굴착할 수 없는 것으로 나타난 제주도 동부해안지역에 대해서는 특별관리지역으로 설정하여 고염분 지하수의 유입에 의한 장애를 예방하여야 할 것으로 판단되었다. 또한 특별관리지역을 제외한 지역에 대해서는 심도

별 염소이온농도 분포도와 지하수 수위자료, 지역별 비양수량을 이용하여 지하수 개발심도, 양수량을 관리함으로써 다각적인 지하수개발·이용이 검토되어야 할 것이다.

사사 : 농업기반공사의 제주도 지하수관리계획 조사 용역팀 모두에게 감사를 드립니다.

## 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, 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, 309-326.
- 이상호, 1994, 제주도해안 지하수의 염수침입 개연성: 제주도 지하수자원환경학적보전과 개발이용, 145-165.
- 조진동, 구성분, 이상규, 1987, 제주지역 영향권조사 연구(I): 한국동력자원연구소, KR-87-29, 191-231.
- 최순학, 김영기, 1989, 제주도 지하수의 수질특성: 한국지질학회지, 25, 230-238.
- 한국에너지연구소, 1986, 동위원소를 이용한 제주지역 수자원에 관한 연구(III): KAERI/PR-527.
- 한규언, 이문원, 1977, 제주도의 지질과 지하수와의 관계 연구: 제주대학교 논문집 제9집
- 한정상, 1998, 지하수환경과 오염: 박영사.
- Choi, S. H., Kim, Y. K., and Lee, D. Y., 1991, Sea Water Intrusion in the Coastal Area of Cheju Volcanic Island, Korea: *J. Korea Inst. Mining Geol.*, 24, 319-327.
- Fetter, C. W., 1994, Applied Hydrogeology, 3rd edition: *Prentice Hall*, 364-368.
- Freeze, R. A., and Cherry, J. A., Groundwater: *Prentice Hall*, 375-378.
- Revelle, R., 1941, Criteria for Recognition of Sea water in Groundwaters: *Trans. Amer. Geophysical Union*, 22, 593-597.

부록

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	신평리	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	하메리	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