

# 제주도 서북부 귀덕리 해안지역에 발달한 심부 담수대수층에 관한 연구

고 기 원 · 박 윤 석  
제주도수자원개발사업소  
김 태 윤  
제주발전연구원

## 1. 서 언

일반적으로 지하수의 부존 및 산출특성은 지하의 지질분포 상태와 그 구조에 의해 지배된다. 특히, 제주도와 같은 화산암 분포지역에서는 용암류 단위(lava flow unit)의 두께와 연속성, 용암류 사이에 화산회층 및 고토양층 또는 퇴적층의 협재 여부, 용암류의 바다 쪽으로의 분포범위 등 여러 가지 수문·지질학적인 인자들에 의해 지하수의 부존 및 산출특성은 결정되어질 수 있다.

'80년대 중반부터 제주도 동부의 해안지역을 중심으로 시설되기 시작한 육상수조식 양식장에서는 바닷물과 함께 염지하수(saline groundwater; 일부에서는 지하해수라고도 함)를 개발하여 어·패류의 양식에 이용하고 있다. 보링·그라우팅 전문건설업체들에 의하면, 염지하수의 개발과정에서 특이한 현상이 가끔 나타난다고 한다. 즉, 해안지역에서 일정심도까지 착정하면 염분도가 비교적 높은 지하수가 존재하지만 좀더 깊게 착정하면 염분농도가 매우 낮은 담수지하수를 만나게 되며, 이 구간을 지나 더 깊게 착정하면 해수에 가까운 염지하수가 존재하는 경우가 있다는 것이다. 이와 같은 사례는 북제주군 한림읍 협재리에서 찾아 볼 수 있다. 이 지역 해안가에는 호텔 2개소가 있는데 지표하 30m까지 착정한 A호텔의 지하수 관정에서는 염분농도가 높아 먹는물로 이용할 수 없는 상태이지만 B호텔의 경

우는 A호텔보다 70m 더 깊은 지표하 100까지 착정하여 먹는물로 사용할 수 있을 정도로 양호한 수질의 지하수개발에 성공한 바 있다. 이와 같은 경험담과 사례는 해안지역의 지하수 부존상태가 지질조건과 대수층의 발달 규모 등에 따라 다양한 형태로 나타날 수 있는 가능성을 암시해 주고 있다. 외국의 사례를 보면, 해수면하 300m 또는 그 이하의 깊이에서도 담수 지하수가 발견되고 있으며(McGuinness, 1963), New England의 해안에서 64km 떨어진 Nantucket Island의 심부관정에서는 223~250m와 274~283m 사이에 담수지하수가 부존하고 있는 것이 확인된 바도 있다(Kohout et. al., 1977).

제주도 지하수의 부존상태에 대해서는 농어촌진흥공사(1971, 1989)와 한국수자원공사(1981, 1993), 고기원(1993, 1997) 등에 의한 개괄적인 분류가 이루어졌을 뿐 지역적으로 세부적인 구분은 아직까지 이루어진 바가 없다. 따라서, 본 연구는 제주도 지하수의 부존형태를 상세화해 나가기 위한 연구의 일환으로서 북제주군 한림읍 귀덕리 해안에서 조사한 결과를 중심으로 해안지역 지하수의 부존상태를 고찰하고자 한다.

## 2. 조 사 결 과

### 2-1. 조사지역의 수문지질

본 연구지역은 행정구역상 북제주군 한림읍 귀덕리에 해당하며, 해안으로부터 100m 떨어진 해발 2.5m지점에 위치하고 있다(그림 1). 이 지역 일대의 지하수 부존형태는 Ghyben - Herzberg 원리가 적용되는 이른바 기저지하수(basal groundwater)가 부존하고 있는 것으로 보고된 바 있다(한국수자원공사, 1993).

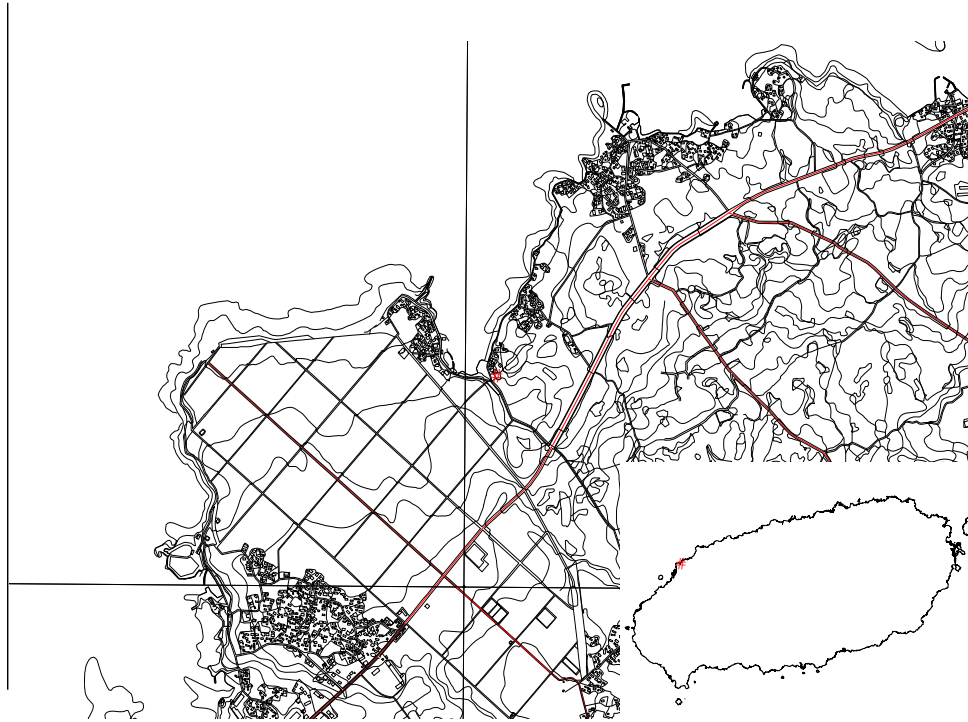


그림 1. 연구지역의 위치도

연구지역의 지형은 내륙쪽으로 완만한 경사를 이루고 있으나 조사대상 관정이 위치한 지점은 동·서쪽의 언덕지형으로 인하여 주변보다 다소 낮은 오목한 지형을 이루고 있고, 관정의 서쪽에는 소규모의 습지도 형성되

어 있다. 지표를 이루고 있는 지질은 다공질의 현무암류로서 단위 두께가 얇고, 균열이 발달한 침상장석감람석현무암(Acicular Feldspar Olivine Basalt ; AFOB)으로 이루어져 있다. 이 용암류의 말단부에는 로피구조와 크고 작은 구갑상절리도 관찰된다.

조사관정은 해수면하 55m까지 착정되었다. 시추코아에 대한 지질검층을 실시한 결과(그림 2), 지표에서 42.3m까지 구간은 10매의 침상장석감람석현무암으로 이루어져 있는데 용암류 단위의 두께는 평균 4.3m이고, 수직절리가 발달해 있다. 용암류 단위의 상·하부는 기공이 크고, 절리 및 균열이 집중적으로 발달해 있으나 중간부분은 기공이 작을 뿐만 아니라, 비교적 치밀한 상태를 이루고 있다. 지표하 42.3~43.0m까지 0.7m 구간은 적색 및 적갈색을 띠는 화산회층이 얇게 협재되어 있으며, 그 하부 구간은 침상장석감람석으로 이루어져 있다. 착정이 완료된 이후 나공상태(open hole)에서 공내촬영 카메라를 통하여 공내검층을 실시한 결과, 용암류에는 비교적 많은 절리가 발달해 있고, 특히 화산회층이 존재하는 42.3m 상부에서 지하수의 흐름이 확인되었다.

Depth(m)	Thick(m)	Geology	Description
42.3	6.0	VVVVVVVVV VVVVVVVVV VVVVVVVVV	Acicular Feldspar Olivine Basalt(AFOB) * Consist of 10 Lava flows * Average Lava flow unit : 4.23 m * Vesicular and Jointed
	3.0	VVVVVVVVV	
	5.0	VVVVVVVVV VVVVVVVVV	
	3.5	VVVVVVVVV	
	4.5	VVVVVVVVV VVVVVVVVV	
	4.0	VVVVVVVVV VVVVVVVVV	
	6.0	VVVVVVVVV VVVVVVVVV VVVVVVVVV	
	6.0	VVVVVVVVV VVVVVVVVV VVVVVVVVV	
	3.0	VVVVVVVVV VVVVVVVVV	
	1.3	VVVVVVVVV	
43.0	0.7	○○○○○○○○	Volcanic Ash layer reddish in color
55.0	7.0	VVVVVVVVV VVVVVVVVV VVVVVVVVV VVVVVVVVV	Acicular Feldspar Olivine Basalt(AFOB)
	5.0	VVVVVVVVV VVVVVVVVV	* Vesicular and Jointed

그림 2. 조사관정의 지질주상도

고기원 등(1998)이 조사한 결과에 의하면, 한림읍 귀덕1리와 귀덕2리 해안가에는 20개소의 용천수가 분포하고 있으며 1일 용출량은 29,140m<sup>3</sup>이다. 이들 용천수의 용출량은 최소 10m<sup>3</sup>에서부터 최대 5,000m<sup>3</sup> 범위까지 다양하게 나타나는데, 대부분 용암류경계면에서 지하수가 용출되고 있다. 전기비전도도는 평균 1,412 $\mu$ s/cm, 최대 2,220 $\mu$ s/cm로 높은 편이며, 수온은 평균 16.1℃, 최대 17.3℃를 보이고 있다.

## 2-2. 지하수위 변화

지하수위는 Telog社의 WLS-2102E Level Tracker를 사용하여 10분 간격으로 24시간 이상 연속관측을 실시하였으며, 관측결과는 <그림 3>과 같다. 지하수위는 평균해수면 위 약 0.5m에 위치하고 있으나 조석의 영향을 현저하게 받아 정현곡선을 나타내며 주기적인 등락을 반복하고 있다. 조사기간 동안의 일최대 수위변화 폭은 70cm로서 50%의 조석효율을 나타내어 조석에 의한 영향을 지배적으로 받고 있음을 알 수 있다.

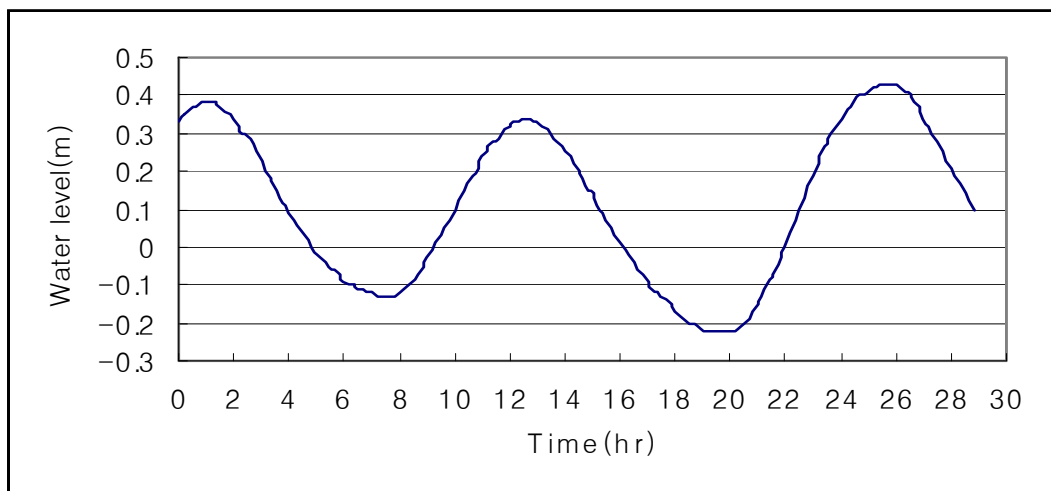


그림 3. 조사대상 관정에서 측정된 자연수위 변화('98. 2. 26~2. 27)

## 2-3. EC 및 수온의 수직변화

조사관정의 수직적인 수질변화를 파악하기 위하여 착정 종료 후 우물자

재를 설치하지 않은 나공상태(open hole)와 지표에서 23m까지 시멘트 그라우팅 시공 및 우물자재를 설치(케이싱과 스크린 설치)한 후 조석주기를 고려하여 Green Span社의 CTDP 3163 수직검층기를 사용하여 심도별 전기전도와 수온의 변화를 측정하였을 뿐만 아니라, 수질분석도 병행하여 실시하였다.

우물자재를 설치하지 않은 나공상태에서 심도별 전기비전도도와 수온검층을 실시한 결과, 자연수위에서부터 약 36.5m까지 구간은 전기비전도도가 3,000 $\mu$ s/cm 이상을 나타내는 담·염수 혼합대가 존재하고 있으나 36.5~46.5m까지 약 10m구간에서는 전기비전도도가 700~900 $\mu$ s/cm를 나타내는 담수지하수가 부존하며, 그 하부에는 3,000 $\mu$ s/cm 이상의 값을 갖는 고염수가 부존하고 있음이 확인되었다(그림 4).

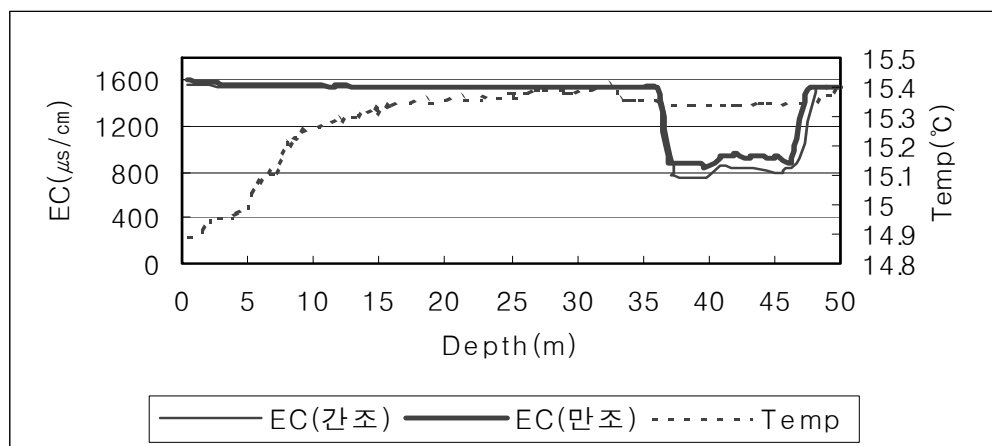


그림 4. Open hole 상태에서의 전기비전도도와 수온의 변화('98. 1. 6)

조석에 따른 수직적인 전기비전도도의 변화를 보면, 만조시간대가 간조시보다 다소 증가하는 경향은 있으나 변화 폭은 작은 편이다. 수온의 수직분포는 담·염수 혼합대에서는 15.36~15.39 $^{\circ}$ C의 범위를 나타내지만 담수 대수층 구간(36.5~46.5m)에서는 15.34~15.35 $^{\circ}$ C로 상부의 혼합대 구간에 비해 0.2~0.4 $^{\circ}$ C 낮은 수온 분포를 보이고 있다.

한편, 지표에서 23m까지의 주변공간(annular space)에 대한 시멘트 그라우

우트팅을 실시하고 해수면 하 37~45m 구간에 스크린을 설치한 후 자연 수위 이하에 대한 심도별 전기비전도도와 수온을 검층한 결과, 45.5m 상부 구간의 전기비전도도가 600 $\mu$ s/cm 이하로 우물자재를 설치하기 이전 보다 훨씬 낮아졌으며, 염소이온 농도도 우물자재 설치 이전 농도(1,100mg/ℓ)의 1/10수준인 100mg/ℓ로 낮아졌다(그림 5). 수온의 심도별 변화 양상은 우물 자재 설치 이전과 별 다른 차이를 나타내지 않았다.

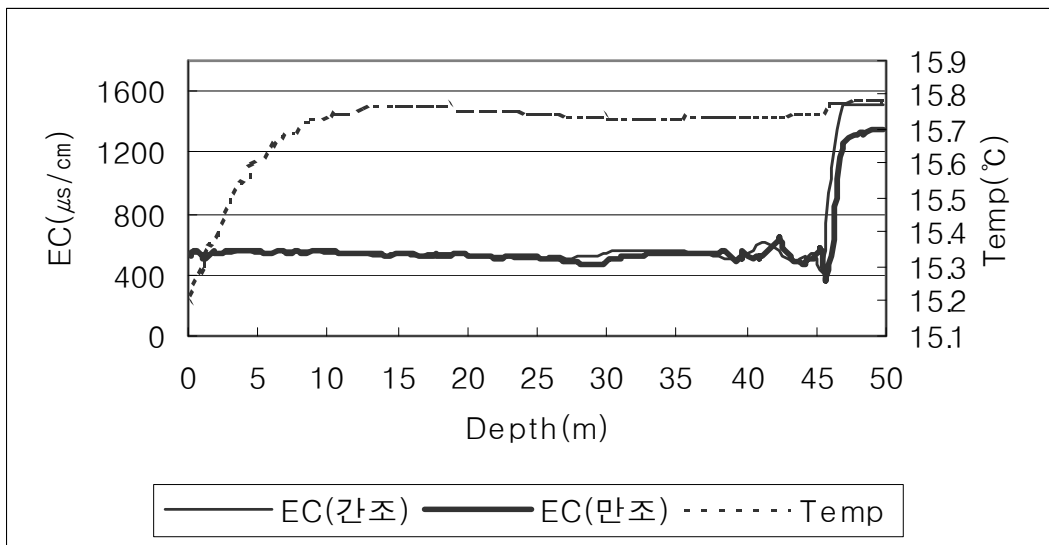


그림 5. 우물자재를 설치하고 난 이후의 전기비전도도와 수온의 변화('98. 2. 27)

#### 2-4. 양수에 따른 염소이온의 농도 변화

양수에 의한 염소이온 농도의 변화를 파악하기 위해 해수면 하 40m에 3HP의 수중모터 펌프(양수능력 9.5m<sup>3</sup>/hr)를 설치하여 24시간 동안 연속으로 양수시험을 실시하면서 수질분석용 물 시료를 양수 초기~3시간 경과시 까지 30분 내지 1시간 간격과 24시간 경과 후로 구분하여 채수해 제주도 보건환경연구원에 의뢰하여 염소이온 농도를 분석하였다.

수질분석 결과, 양수시간에 따른 염소이온농도 변화는 77.2~96.5mg/ℓ의 범위를 나타내었고 시간이 지남에 따라 다소 증가하는 경향은 있으나 먹는



물 수질기준인 150mg/ℓ 보다는 낮은 양호한 수질상태를 나타내었다(표 1).

표 1. 양수에 따른 염소이온 농도의 변화

구 분	채 수 시 점(양수 경과시간)					
	양수초기	30분후	1시간후	2시간후	3시간후	24시간후
염소이온(mg/ℓ)	77.7	72.9	77.0	80.0	80.0	96.5
채 수 일 자	'98. 3. 24	'98. 3. 24	'98. 3. 24	'98. 3. 24	'98. 3. 24	'98. 3. 25

### 3. 고 찰

제주도의 지형은 한라산을 정점으로 해안 쪽으로 경사져 있어 우수의 흐름방향과 지하수의 유동방향은 바다 쪽을 향하고 있다. 이와 같은 증거는 해안선을 따라 용출수들이 밀집되어 있는데서 찾을 수 있다. 따라서, 내륙 지역에서 함양된 지하수는 지층의 경사를 따라 해안 쪽으로 유동하여 용출수나 기저유출 및 담·염수경계면에서의 확산의 형태로 바다로 유출되고 있다. 해안지역 대수층으로부터 지하수가 유출하는데에는 다음과 같은 몇 가지 메카니즘을 생각해 볼 수 있다(Fetter, 1994). 즉, ① 지표면에서의 증발산 작용 ② 해안선이나 해저를 통한 용출 ③ 담·염수 접이대에서의 확산 및 혼합 등에 의해 담수지하수는 유출이 이루어지고 있다.

해안지역의 지하지질 상태와 대수층의 발달규모는 상기와 같은 메카니즘에 의한 지하수의 유출을 지배한다. 미국 로스엔젤레스에서 북서쪽으로 60마일 떨어진 곳에 위치하고 있는 Oxnard Plain의 대수층은 지질상태에 따라 상부에서 하부로 주수 대수층(perched aquifer), Oxnard aquifer, Mugu aquifer 순의 3개의 대수층으로 구분되는데, 주수 대수층은 염소이온이 23,000mg/ℓ 로 지극히 높은 반면 중간에 위치해 있는 Oxnard aquifer는 염소이온 농도가 180~1,900mg/ℓ 이며, 가장 하부에 위치한 Mugu aquifer의

경우는  $76\text{mg}/\ell$  로 매우 낮은 값을 보인다(Izbicki, 1996). 그렇지만, 미국 하와이주 오아후섬의 Waipahu 심부 모니터링 관정에서 관측한 결과에 의하면, 지표 하 121m 지점의 염소이온 농도는  $150\text{mg}/\ell$  로 낮은 반면, 161m 지점에서는  $500\text{mg}/\ell$ , 228m 지점은  $8,000\text{mg}/\ell$ , 300m 지점의 경우는  $17,000\text{mg}/\ell$  로 심도가 증가함에 따라 염소이온 농도가 꾸준히 증가하는 경향을 나타내는 것으로 보고된 바 있다(Eyre, 1987).

제주지역의 경우, 해안에 가까운 곳에 위치해 있는 관정에서의 수직적인 수질의 변화는 지역별로 차이를 보이고 있다. 고기원(1997)의 연구결과에 의하면, 북제주군 조천읍 신촌리의 해발 39.1m 지점에 위치해 있는 Sc-3 관정은 지표하 151m(해수면하 119.9m)까지 측정되었는데 자연수위에서 공저까지의 전기비전도도와 수온이 수직적으로 거의 변화하지 않는 일정한 값을 나타내고 있다. 이와는 반면, 남제주군 표선면 하천리에 위치한 D-31 관정의 경우, 표고 40.95m 지점에서 지표하 80m(해수면하 39.05m)까지 측정되었는데, 자연수위로부터 49m까지 구간은 전기비전도도가  $250\mu\text{s}/\text{cm}$ 로 비교적 낮은 값을 나타내지만 그 이하부터는 급격히 증가하여 52m 지점에서  $3,250\mu\text{s}/\text{cm}$ , 70m에서는  $3,750\mu\text{s}/\text{cm}$ 까지 높아진다.

본 조사대상 지역은 Ghyben-Herzberg 원리가 적용되는 이른바 기저지하수(basal groundwater) 부존지역임에도 불구하고 전술한 바와 같이 담염수 혼합대 하부에 매우 낮은 염소이온 농도를 나타내는 담수대수층이 발달하고 있음이 확인되었다. 이와 같이 해안지역의 심부에 담수대수층이 발달할 수 있는 것은 담수대수층의 발달규모, 용암류의 바다쪽으로의 연장성 및 단위 두께, 용암류 사이에 화산회층 등의 저투수성 지층의 협재 여부 등 수문지질학적인 요인들에 의해 결정되는 것으로 판단된다.

그러나, 담·염수 혼합대 하부에 발달하는 담수대수층은 상류지역에서의 지하수 함양량의 변화 및 관정에서의 양수량 등에 따라 상하부에 존재하는 염분농도가 높은 지하수의 영향으로 수질이 악화될 가능성을 배제할 수 없다. 따라서, 이와 같은 담수대수층을 개발·이용하고자 하는 경우에는 담수대수층의 두께 및 지질특성, 수직적인 수질의 변화, 계절 및 양수에 따른

염소이온 농도의 변화 등을 우선적으로 조사하여야 할 뿐만 아니라, 최적 양수량 결정을 위한 장기양수시험이 필수적으로 실시되어야 할 것이다. 아울러, 향후 해안지역에 인접하여 개발이 이루어지는 지하수 관정에 대하여는 전기비전도도 및 수온 등의 수직검층을 실시함으로써 지역별 심부 담수대수층의 발달상태를 상세화 할 수 있는 기초자료가 축적되어야 할 것이다.

## 4. 결 론

북제주군 한림읍 귀덕리 해안가에 해수면 하 55m까지 작성된 관정에 대한 시추코아 지질검층, 우물시공 과정별 및 조석주기에 따른 전기비전도도와 수온의 수직검층, 물 시료에 대한 염소이온 분석 등 조사를 실시한 결과는 다음과 같다.

○ 조사지역의 지하지질은 다공질의 침상장석감람석현무암(AFOB)이 주를 이루고 있는데 용암류 단위는 12매이고 평균 두께는 약 5m 정도이며, AFOB 사이에는 0.7m두께의 적갈색 화산회층이 협재되어 있다.

○ 조사 관정의 지하수위는 조석의 영향을 현저하게 받아 1일 최대 70cm의 변화폭을 나타내었으며, 귀덕1리와 2리 해안가에는 용천수 20개소에서 1일 약 29,140m<sup>3</sup>의 지하수가 용출되고 있으나 전기비전도도 값이 최대 2,220 $\mu$ s/cm로 매우 높은 편이다.

○ 자연수위 이하에 대한 전기비전도도와 수온을 수직검층한 결과, 36.5~46.5m 상하부 구간에는 전기비전도도가 3,000 $\mu$ s/cm 이상을 나타내는 염수지하수가 부존하고 있으나 36.5~46.5m의 10m 구간은 700~900 $\mu$ s/cm을 나타내는 담수대수층이 발달하고 있음이 확인되었다. 특히, 지표에서 23m까지의 주변공간에 대하여 시멘트로 그라우팅을 실시한 결과, 담수대수층(36.5~46.5m) 구간의 전기비전도도 값은 600 $\mu$ s/cm 이하로 낮아졌다.

○ 물 시료에 대한 염소이온 농도를 측정된 결과, 그라우팅 실시 이전에는 1,100mg/l 이었으나 시공 후에는 100mg/l 까지 낮아졌으며, 24시간 양수

시험과정에서도 염소이온 농도는 77.2~96.5mg/ℓ의 범위를 나타내었다.

○ 본 조사지역은 Ghyben-Herzberg 원리가 적용되는 이른바 기저지하수 (basal groundwater) 부존지역임에도 불구하고 담염수 혼합대 하부에 매우 낮은 전기비전도도 값을 나타내는 담수대수층이 발달하고 있음이 확인되었는데, 이와 같이 해안지역의 심부에 담수대수층이 발달할 수 있는 것은 담수대수층의 발달규모, 용암류의 바다쪽으로의 연장성 및 단위 두께, 용암류 사이에 화산회층 등의 저투수성 지층의 협재 여부 등 수문지질학적인 요인들에 의해 결정되는 것으로 판단된다.

## 참고 문헌

- 고기원, 1997. 제주도의 지하수 부존특성과 서귀포층의 수문지질학적 관련성, 부산대학교 대학원 박사학위 논문
- 고기원, 문영석, 강봉래, 송시대, 박윤석, 1998, 제주도의 용천수 분포와 용출 유형에 관한 연구( I ), 대한지질학회 추계 학술발표회 초록집 p. 24~25
- 한국수자원공사, 1993, 제주도 수자원종합개발계획수립보고서
- 산업기지개발공사, 1981, 제주도수자원종합조사보고서
- 농업진흥공사, 1971, 제주도지하수조사보고서
- 농어촌진흥공사, 1989, 제주도지하수장기개발계획수립보고서
- Eyre P. R., 1987, Source of Salts in the Waianae part of the Pearl Harbor Aquifer Near Barbers Point Water Tunnel, Oahu, Hawaii, U. S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 87-4247
- Fetter C. W., 1994, Applied Hydrogeology, third edition, Macmillan College Publishing Company, New York
- Izbicki J. A., 1996, Seawater Intrusion in a Costal California Aquifer, U.S. Geological Survey Fact Sheet 125~96
- Kohout, F. A., et al., 1977, Fresh groundwater stored in aquifer under the continental shelf : Implications from a deep test well, Nantucket Island, Massachusetts, water resources Bulletin, 13 : 373-86
- McGuinness, C. L., 1963, The role of groundwater in the national water situation, U. S. Geological Survey Water-Supply Paper 1800