

제주도 삼양 3수원지의 염소이온농도 상승 원인에 관한 연구

The Study on the Increased Causes of Chloride (Cl^-) Concentration of the Samyang 3rd Pumping Station in Cheju Island

이성복(Sung - Bok Lee)* · 김구영(Kue - Young Kim)* · 한소라(So - Ra Han)* ·
한정상(Jeong - Sang Hahn)*

요 약 : 연구 지역은 제주도의 해안 용천수를 수원지로 하고 있는 삼양 3수원지로서 1996년 1월부터 원수의 염소이온농도가 먹는 물 수질기준치인 150 mg/l를 훨씬 초과하여 그 원인을 수리지질학적으로 규명하기 위하여 연구를 수행하였다. 연구결과 그 원인은 다음과 같은 매우 복잡한 자연 및 인위적인 현상에 의해 발생하였다. 1996년 1월~9월 동안 내린 강수량은 그 이전 36년간 제주에서 발생한 연평균 강수량의 41.7%에 해당하는 극심한 한발기로서 이러한 강수량의 감소는 결국 용천 유출량의 감소와 용천수위 강하의 원인이 되었고, 이로 인해 만조시 매 주기별로 2~3.8시간 동안 해수면이 수원지내 지하수위보다 4.4~12.4 cm 높게 되어 기존 차수벽 하부의 투수대 구간을 통해 해수가 역동수구배를 따라 수원지내 유입되어 지하수의 염소이온농도 증가원인이 되었다. 또한 주기적인 조석간만의 영향으로 인해 발생한 두께가 얇아진 담수체의 수축 팽창현상이 접이대의 확장을 촉진시켜 염소이온농도를 증가시켰으며, 뿐만 아니라 강수량 감소에 따른 지하함양량 감소로 접이대에서 지하수 흐름의 역전현상이 발생하였고, 이에 부가하여 강우누적 결핍시기 동안 해안지하수체의 수축현상이 가장 심하게 발생한 간조시에 일평균 $2790 \pm 450 \text{ m}^3$ 의 지하수를 반복채수함으로 인해 추가적인 지하수위의 하강을 초래하여 접이대의 확장과 염수의 역상승 현상을 유발하였다. 수원지 주변 용천에서 염소이온농도가 150 mg/l 이하로 유출되는 순수지하수 유출지속 시간은 하루 약 2시간 정도였으며 유출량은 $532 \text{ m}^3/\text{일}$ 이었고 만조시 Cl^- 이온의 농도는 1900 mg/l 이상이다.

Abstract : The study is aimed to find out the causes of rapidly increasing chloride (Cl^-) concentration of the Samyang 3rd pumping station originated from coastal springs of Cheju since January 1996. The study results show that it was caused by following complicated natural and anthropogenic effects. Due to severe draught in 1996 with total rainfall of only 41.7% of annual mean of the last 36 years (1991 to 1995), it creates firstly significant decrease of the spring discharges as well decline of the groundwater level at the site. Sea water level was in general 4.4 cm to 12.4 cm higher than the groundwater level of the site during 2 to 3.8 hours at each high tide. Those higher potential head of sea water motivates the sea water intrusion into the fresh water lens through the permeable clinkers and fracture zones situated beneath the existing grouted zone which was installed to a maximum 10 m below the ground water surface. The repeated expansion and contraction of the fresh water lens occurred by periodic changes of the sea water level at high and low tide accelerates secondly the enlargement of the transition zone between the fresh and sea water at the site. The decrease of recharge amount by rainfall shortage creates thirdly the reverse flow at the interface of sea water and groundwater. The repeated groundwater extraction of $2790 \pm 450 \text{ m}^3/\text{d}$ at the time of low tide, when the fresh water lens of the site is under the contraction state, makes additional drawdown of the ground water level and induces the upconing of salt water into the fresh water lens. The duration of spring discharge whose Cl^- concentration is less than 150 mg/l at the low tide measured at the nearby springs was about two hours with discharge rate of $532 \text{ m}^3/\text{d}$ and after that Cl^- concentration is increased up to more than 1900 mg/l.

서 론

삼양 3수원지는 과거 사석과 토사를 이용하여 약 3~4 m의 두께로 성토하여 매립한 투수성이 매우 양호한 비고결암 구간

*연세대학교 지구시스템과학과(Department of Earth System Sciences, Yonsei University, 134 Shinchon-dong, Sudaemon-ku, Seoul 120-749)

내에 수평유공관으로 만들어진 수평도수로와 집합정을 이용하여 용천수를 집수하는 구조로 이루어져 있다((주) 대림기초건설, 1996a). 즉 용천에서 유출되는 용천수는 일단 매립구간으로 유입된 후 수평도수로와 집합정을 통해 펌프장으로 유입된다. 특히 조석간만에 따라 해수가 수원지내로 유입되는 현상을 방지하기 위하여 Figure 1((주) 우주종합건설, 1994)과 같이 수원

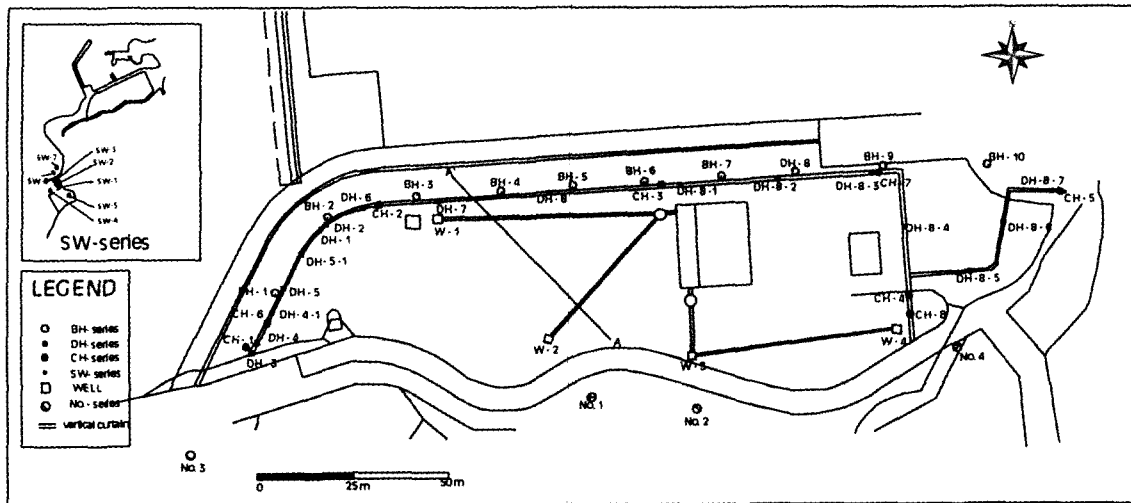


Figure 1. Location map of SW-series springs and observation wells of the study area.

지 외각에 심도 2~10 m, 두께 1 m의 콘크리트 웅벽과 그 하부에 그라우팅을 실시하였다((주) 대림기초건설, 1996b). 본 연구의 목적은 제주도 삼양 3수원지의 염소이온농도가 먹는 물 기준치 이상으로 초과 검출되어 그 원인을 수리지질학적으로 규명하여 이에 대한 대책을 마련하려는 데 있다.

조사지역은 행정구역상 북제주군 조천읍 신촌리 삼양1동에 위치하며 위도 33°30'~33°31', 경도 126°35'~126°37'에 해당한다. 조사지역 중 원당봉(해발 170.7 m) 일대를 제외하고는 대부분이 평탄한 현무암대지로 이루어져 있다. 수계의 발달은 미약하며 연구지역의 남서부에 해당하는 해안가를 따라서 주택이 밀집해 있다. 삼양 3수원지 인근지역의 지표지질은 투수성이 매우 양호하며 다양한 크기를 갖는 스크리아를 포함하는 미 고결된 각력질 응회암으로 구성되어 있다(Figure 2 참조). 따라서 투수성이 매우 좋으리라 사료되며 또한 고화되지 않은 층리를 보이는 응회암도 그 상부에 분포되어 있다. 본 취수장의 남서부 지역에서 기반암을 이루고 있는 하와이아이트는 다양한 입자

크기의 미 고결 집괴암이 수십미터 이상의 두께로 협재되어 있다. 하와이아이트보다 후기의 화산활동에 의해 형성된 Scoria Volcanic Cones(Lee, 1982)로 기재되어 있는 원당봉지역은 지표지질조사 결과 원당봉을 중심으로 북쪽방향으로 수 개의 작은 기생화산이 분포하며 전체적으로 스크리아역을 많이 포함하는 각력 응회암으로 구성되어 있다. 원당봉 정상 of 화구부근에서는 비교적 큰 현무암역을 포함하고 있으며 원당봉 하부지역에서는 투수성이 매우 양호한 적색의 스크리아가 주를 이루며 분포하고 있다. 스크리아의 크기는 다양하며 각력 응회암내에는 평균 주향과 경사가 각각 N40°W, 13°SW인 층리면을 보이는 층상의 응회암들이 협재되어 나타난다. 이들 응회암은 총후 1~2 m로 원당봉 북서부 및 동남부 지역에서 수십미터 이상의 연장성을 가지고 분포한다. 전체적으로 이들 각력응회암은 등고선이 완만한 저지대까지 분포하는데 넓게는 북쪽해안선까지 이르고 있다.

연구방법

1996년 8월 20일에서 24일 사이에 현장에서 Hermit Data Logger 2000과 염소이온 계측기(detector)를 이용하여 수원지 일대의 수리지질 특성, 조수위의 변동에 따른 수원지 내 각 집수정과 관측정에서의 수위변동 특성과 수질변동 특성 및 인근 용천의 유출량 및 수질 변동특성을 연구하였다.

또한 제주도의 36년간의 강수량을 이용하여 제주시의 강수발생 특성을 연구하였으며 1996년 9월 18일부터 9월 19일 사이에 수원지 서쪽에 위치한 SW-1 용천(골강물)에 간이 수위표(staff gage)를 설치하고 조석간만에 따른 용천수위의 변화와 이에 따른 용천수의 염소이온농도의 변화를 측정하였다.

연구내용

제주도내 해안선에서 용천유출 특성과 강수량과의 관계
 제주시의 36년간 강수발생 특성 : 1961년에서 1996년도 9월까지 약 36년간 제주시의 강수량을 분석한 바 36년간 연평

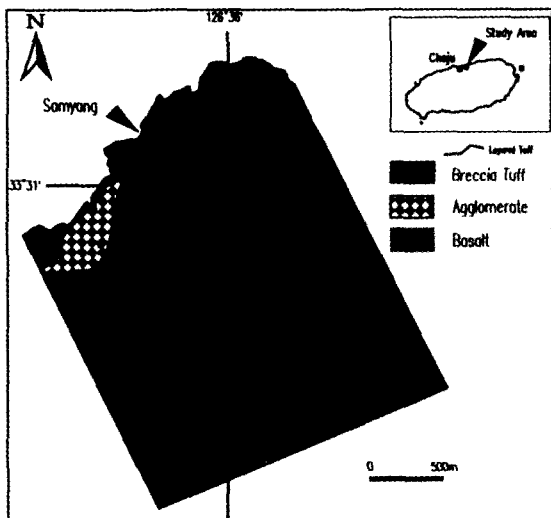


Figure 2. Geological map of the study area.

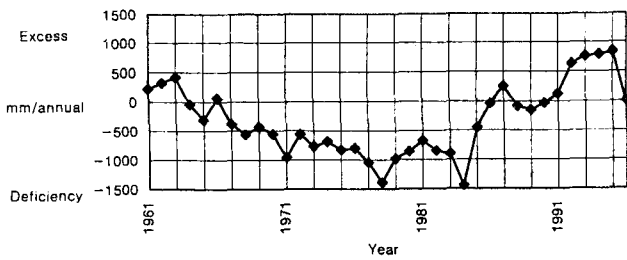


Figure 3. Accumulated excess and deficiency of annual precipitation (1961~1996).

균 강수량은 1424.9 mm/년 이었으며, 강수량이 가장 적게 발생한 연도는 1984년의 878.5 mm/년으로 기록되어 있으나 실제로는 1996년의 경우 9월까지의 강수량이 593.8 mm이었으므로 앞으로 3개월이 갈수기임을 감안하면 1996년이 최갈수년이 될 것이다. 연도별 강수량과 36년간의 연평균 강수량을 기준으로 연도별 강수량의 강수누적 결핍 및 초과곡선을 작성한 결과는 Figure 3과 같다. 대체적으로 1963년부터 1984년까지는 연평균 강수량에 비해 그 누적치가 지속적으로 감소하였으며 1984년부터 1995년까지는 일반적으로 누적치가 증가하는 현상을 보이다가 1995년을 기점으로 다시 하강하였다.

강수누적 결핍기간이 심하게 발생한 기간은 1963년에서 1978년, 1981년~1984년, 1987년~1989년이었고, 올해 1996년은 전반적인 강수누적 초과기간에서 심한 누적 결핍기간임을 나타내고 있다. 물론 1996년의 경우에 앞으로 발생할 10, 11, 12월간의 강수량이 가산되지 않았지만 이 시기가 강수량이 적은 갈수기임을 감안하면 1996년은 강수 누적 초과시기 중에서 강수 결핍현상이 가장 심하게 발생한 시기이다.

Figure 4는 1961년에서 1995년 사이의 36년간 월 평균강수량과 1996년의 월 평균강수량을 도식한 것으로 지난 9개월 중 1월, 2월, 4월의 월간 강수량은 제주시 월 평균강수량의 30% 수준이었고 특히 7월, 8월 및 9월의 월간 강수량은 제주시 월 평균강수량의 20% 이내 수준이다.

해안선에서 용천 유출량과 강수량과의 관계 : 제주도내 연도별 강수량누적 초과 결핍량을 살펴보면(Figure 3 참조) 1989년

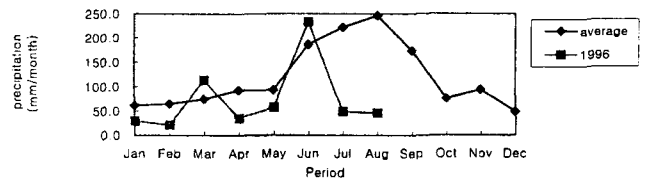


Figure 4. Monthly mean precipitation between the study period and past 36 years (1961~1996).

부터 1995년까지는 강수 누적 초과기간으로서 1995년말에는 832.7 mm가 누적 초과되었다.

이는 Figure 5에서 나타난 바와 같이 1995년말까지는 대체적으로 수원지내 각 취수정에서 염소이온(CI)농도는 먹는 물 기준치인 150 mg/l 이하였으나 1996년 1월부터는 그 농도가 전반적으로 상승하여 150 mg/l 이상을 나타내고 있는 현상과 관련이 있다. 특히, 강수량이 도내 36년간 월 평균치를 초과했던 1996년 3월(114.1 mm/월)과 6월(233.3 mm/월)은 염소이온이 다소 감소하였으나 전반적인 강수량 감소로 인하여 수원지내 염소이온 농도는 시간이 지남에 따라 증가 추세를 보인다. 이러한 현상은 도내 용천수의 근원이 지하수의 배출에 기인하고 있으며 용천수의 유출량은 함양지역에서 지하수 함양에 근거를 두고 있기 때문이다. 대체적으로 함양지역에 내린 강수 중 직접 유출과 증발산량을 제외한 수량은 지하수 함양량으로서 이들은 함양지역의 현무암 대수층으로 침투한 후 최종적으로 용천으로 유출된다.

전술한 바와 같이 연구 지역을 포함하는 지형수계는 옴나물내의 소규모 유역이다. 1993년 한국수자원공사는 도내에서 연평균 1,872 mm/년의 강수량이 내릴 때 해안길이당 지하수의 함양량(해안유출량)을 22,200 m³/일/km로 산정한 바 있다(한정상 등, 1994).

그러나 1996년도와 같이 강수량이 700 mm/년(9월말까지 593.8 mm/년)보다 적게 내리면 용천 유출량은 약 8,300 m³/일/km로써 평균유출량의 37%이하로 감소한다. 삼양 3수원지와 같이 용천에 의존하는 수원지는 자유면 대수층에서 유출되는 지하수에 기인하므로 해안선에서 용천 유출량(q)은 일반적으로 (1)식과 같이 해수면상 지하수 수두(h)의 제공에 비례한다

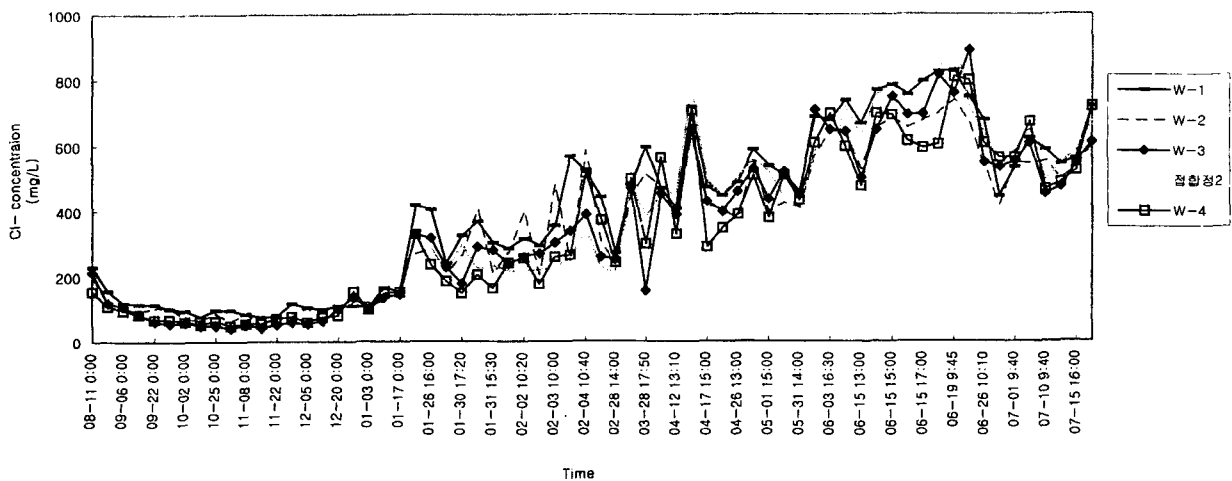


Figure 5. Variation of Cl⁻ concentration measured at observation wells (mg/l) (95. 8~96. 7).

(한국수자원공사, 1993).
즉,

$$q = \frac{\alpha K}{2X} B h^2 \quad (1)$$

여기서 X : 해안선에서 거리,
K : 평균 수평 수리 전도도,
B : 용천 용출지역 대수층의 폭,
h : 해수면상 지하수위이다.
 α : 비례상수

또한 (1)식에서 지하수위(h)는 상류지역의 지하수 함양량에 비례한다. 환언하면 강수량이 감소하여 지하 함양량이 감소하면 지하수의 수두가 감소하고 이에 따라 용천 유출량은 지하수의 수두에 제곱으로 감소하게 된다. 따라서 수원에서 염소이온이 상승하는 원인 중의 하나는 강수량의 감소에 따른 용천 유출량의 격감에 그 원인이 있다.

조수위 변동에 따른 기존 집수정과 관측정의 수위 및 수질 변화특성

장기 조석간만에 의한 수원지내 지하수위 변동을 이용하여 구한 투수량계수 : 해안과 인접하고 있는 해안지역 대수층내 지하수위는 조석간만에 따라 정현곡선 (sinusoidal fluctuations)을 그리며 운동하게 된다. 즉, 해안선 인근에 소재한 곳에서 측정 한 지하수위는 조수위와 거의 평행하게 변동한다.

H_0 를 조석간만의 진폭이라 하고 t_0 를 조수의 주기라 하면, 해안에서 거리가 x만큼 떨어진 곳에서의 대수층내 지하 수위의 진폭 H_x 는 (2)식(Jacob, 1950)으로 표현된다(Fetter, 1994).

$$H_x = H_0 \exp\left(-x \sqrt{\frac{\pi S}{t_0 T}}\right) \quad (2)$$

여기서 H_x : 대수층에서 지하 수위의 진폭(m)
 H_0 : 조석간만에 따른 해수면의 진폭(m)
x : 해안으로부터의 거리(m)
 t_0 : 조수의 주기(일)
S : 저류계수
T : 투수량계수($m^2/일$)이다.

해안선으로부터 조석간만에 의한 지하수위 변동 측정 지점은

Table 1. Transmissivity estimated using the tidal data at the observation wells

공번	내용	해안에서의 거리(m)	지하 수위차 (m)	간만차(m)	주기(hr)	저류계수	T (m^2/Day)	평균 T값	측정일
CH-7	제1주기	13.6	0.661	0.815	6.25	0.12	6104	6451	96.8.21~8.23
	제2주기	13.6	0.996	1.241	7.08	0.12	4887		
	제3주기	13.6	0.635	0.758	5.83	0.12	9156		
	제4주기	13.6	0.86	1.059	6.83	0.12	5655		
CH-3	제1주기	14.7	0.65	0.815	6.25	0.12	6113	6005	
	제2주기	14.7	0.96	1.241	7.08	0.12	4189		
	제3주기	14.7	0.621	0.758	5.83	0.12	8439		
	제4주기	14.7	0.839	1.059	6.83	0.12	5279		
CH-1	제1주기	17.9	0.409	0.815	6.25	0.12	976	1107	
	제2주기	17.9	0.654	1.241	7.08	0.12	998		
	제3주기	17.9	0.394	0.758	5.83	0.12	1161		
	제4주기	17.9	0.597	1.059	6.83	0.12	1292		
W-1	제1주기	20.2	0.39	0.815	6.25	0.12	1087	1176	
	제2주기	20.2	0.627	1.241	7.08	0.12	1119		
	제3주기	20.2	0.37	0.758	5.83	0.12	1231		
	제4주기	20.2	0.551	1.059	6.83	0.12	1266		
W-2	제1주기	49.6	0.39	0.815	6.25	0.12	6556	6954	
	제2주기	49.6	0.619	1.241	7.08	0.12	6498		
	제3주기	49.6	0.372	0.758	5.83	0.12	7536		
	제4주기	49.6	0.541	1.059	6.83	0.12	7224		
W-4	제1주기	54.7	0.388	0.815	5.25	0.12	7863	8628	
	제2주기	54.7	0.619	1.241	7.08	0.12	7903		
	제3주기	54.7	0.379	0.758	5.83	0.12	9665		
	제4주기	54.7	0.547	1.059	6.83	0.12	9082		
W-3	제1주기	61.6	0.386	0.815	6.25	0.12	9835	10699	
	제2주기	61.6	0.613	1.241	7.08	0.12	9748		
	제3주기	61.6	0.377	0.758	5.83	0.12	12072		
	제4주기	61.6	0.541	1.059	6.83	0.12	11143		
제2점합정	제1주기	45.5	0.873	1.939	6	0.12	4902	4853	96.9.14~9.15
	제2주기	45.5	0.848	1.944	5.67	0.12	4803		
NO.2	제1주기	72.7	0.889	1.939	6	0.12	13106	12896	
	제2주기	72.7	0.860	1.944	5.67	0.12	12687		

Table 1과 같고 수위 변동곡선은 Figure 6과 같다.

해안선으로부터 CH-7, CH-3, CH-1, W-1, W-2, W-4 및 W-3까지 측정된 거리 x는 각각 13.6 m, 14.7 m, 17.9 m, 20.2 m, 49.6 m, 54.7 m, 61.6 m이며 저류계수(S)는 제주도의 평균 저류계수인 0.12를 사용하였다. 각 측정지점 주변 포화대의 투수량 계수(T)는 수위변동 곡선의 각 주기별로 대수층내 지하수위의 진폭(H_v)과 조석간만의 진폭(H_o)을 이용하여 총 4종의 투수량계수 (T)를 (2)식으로 구하였다.

조석간만의 주기는 각 주기별로 상이하나 대체적으로(6.455 ± 0.625) 시간이었다. 각 측정지점에서 투수량계수(T)를 주기별 지하수위의 진폭과 조수의 진폭을 이용하여 구해 본 바 그 결과는 Table 1과 같다.

Table 1에 의하면 수원지 배후면에 설치한 NO.2 관측정 인근 대수층의 평균 투수량계수는 12,896 m²/일 로써 대체적으로 제주도내 투수성 현무암류의 투수량계수와 비슷하다(한국수자원공사, 1993). 수원지내에 설치한 집수정 가운데 W-3, W-4, W-2 집수정의 인근 포화대의 투수량계수는 10,699 m²/일~6,954 m²/일이며 이 중에서 W-3 집수정은 NO.2 관측정 인근 포화대의 투수량계수와 유사하다. 특히 W-1 집수정의 투수량계수는 그라우팅을 실시한 CH-1 관측정의 투수량계수와 비슷한 1,176 m²/일 로써 투수성이 매우 낮는데 이는 W-1 집수정 바로 북측에 그라우팅을 실시했기 때문인 것으로 판단된다.

그 외 CH-3 및 CH-7 관측정의 인근 포화대의 투수량계수는 6,451 m²/일 에서 6,005 m²/일 정도인데 이는 그라우팅을 실시하지 않은 차수벽 하부구간에 투수대가 잘 발달되어 있기 때문이다.

수위변화특성과 수원지내 염소이온농도 증가 : 1996년 8월 21일 13시 55분부터 8월 23일까지 총 2880분간 Hermit Data Logger 2000(8 channel형)을 이용하여 해안과 CH-7, CH-3 및 CH-1 관측정(3개공은 기존 그라우팅구간에 설치한 관측정)과 수원지내에 소재한 W-1, W-2, W-3 및 W-4 집수정에 총 8개의 transducer를 설치하여 조수위 변동에 따른 수원지내 각 집수정과 관측정의 수위변화를 매 5분 간격으로 자동측정하였는데, 그 결과는 Figure 6과 같다.

Figure 6에 따르면 수원지내에 소재하는 지하수 관측지점의 지하수위는 조수위 변동에 직접적인 영향을 받고 있다. 조사연구기간동안 조수위와 지하수위의 변동은 고조, 저조를 포함한 총 4주기로 구분가능하다.

연구기간 동안 각 주기별로 각 관측지점에서 측정된 최고, 최저수위를 요약하면 Table 2와 같다.

Table 2에 나타난 바와 같이 해수면의 최고조수위는 주기별로 약간의 차이가 있는데, 최고 EL+2.418 m(제1주기)에서 EL+2.207 m(제4주기)로서 그 범위는 EL+(2.313±0.106) m였으며 최저 조수위는 EL+(1.098±0.24) m의 범위를 보이고 있다.

이에 비해 수원지내 집수정 중에서 해안선에 가장 가까이 소재한 W-1 집수정에서 최고 지하수위는 EL+2.349 m에서 EL+2.214 m[범위 EL+(2.282±0.068) m]였으며 해안선에서 비교적 원거리에 위치한 W-2, W-3, 및 W-4 집수정에서 지하수위의 변동형태는 대동소이하며 수원지내 총 7개소의 지하수위 관측지점에서 수위 변화폭이 가장 적게 나타났다.

Table 3에서 볼수 있는바와 같이 조수위 진폭에 따른 각 지하수위 측정지점에서 지하수위의 진폭 비율은 해안선에서 거리에 대체적으로 반비례한다. 특이한 현상은 CH-1 관측정과 W-1 집수정의 진폭비는 W-2, W-4 및 W-3 집수정에 비해 해안선에서의 거리가 매우 가까운데도 불구하고 그 진폭이 W-2, W-4 및 W-3 진폭비와 유사한 형태를 띠고 있는데 이는 수직 차수벽 영향때문인 것으로 판단된다.

Figure 6에서 제2주기와 제3주기의 만조시 해수위가 수원지내에 소재한 각 집수정과 관측정의 지하수위보다 높았던 지속시간을 도표화하면 Table 4와 같다.

즉, 해안선에서 가장 가까이 위치한 CH-7과 CH-3 관측정의 지하수위가 해수위보다 낮았던 지속시간은 235분~232.5분(약 3.9시간)정도였고, CH-1 관측정과 W-1 집수정은 217.5분에서 230분(약 3.8시간)정도였으며, W-2, W-3 및 W-4 집수정에서는 대체적으로 125~130분정도였다. 이와 같이 해수위가 수원지내 지하수위보다 높았던 지속시간동안에는 비록 그라우팅구간의 차수가 잘 되었다 하더라도 수직 그라우팅벽의 하부구간에 발달된 투수대를 통해 해수가 역동수구배에 따른 이류와 분산기작에 의해 수원지내로 유입될 수 있다.

해수위가 수원지내 지하수위보다 높았던 지속시간동안에 해수위와 지하수위와의 차이는 대체로 4.4 cm~12.4 cm에 이른다(Table 4 참조). 조사기간 동안 해수면의 고조와 저조 발생시간 사이의 차이는 약 370±60분으로 평균 377분이었으나 각 집수정과 관측정에서 고수위와 저수위의 발생시간차는 평균 373분(6.2시간)정도이다.

Table 2. Measured maximum and minimum groundwater levels of the observation wells (1996. 8. 21-8. 23)

관측지점	주기	SEA		CH-7		CH-3		CH-1		W-1		W-2		W-4		W-3	
		수위	수위차	수위	수위차	수위	수위차	수위	수위차	수위	수위차	수위	수위차	수위	수위차	수위	수위차
제1주기	max	2.418		2.387		2.393		2.352		2.349		2.430		2.425		2.413	
	min	1.603	0.815	1.726	0.661	1.743	0.65	1.943	0.409	1.943	0.39	2.040	0.390	2.037	0.388	2.027	0.386
제2주기	max	2.369		2.343		2.330		2.318		2.315		2.392		2.391		2.384	
	min	1.128	1.241	1.347	0.996	1.370	0.96	1.664	0.654	1.688	0.627	1.773	0.619	1.772	0.619	1.771	0.613
제3주기	max	2.366		2.364		2.367		2.337		2.326		2.407		2.411		2.409	
	min	1.608	0.758	1.729	0.635	1.746	0.621	1.943	0.394	1.956	0.37	2.035	0.372	2.032	0.379	2.032	0.377
제4주기	max	2.207		2.193		2.192		2.222		2.214		2.292		2.295		2.292	
	min	1.148	1.059	1.333	0.86	1.353	0.839	1.625	0.597	1.663	0.551	1.751	0.541	1.748	0.547	1.751	0.541

Table 3. The difference of the highest and lowest tide, a maximum and a minimum water level and distance from the coastal line to observation points

공 변	해안에서 의 거리 (m)	지하수위 변동(m) (2)	조수위 변동(m) (2)	(1)/(2)의 비	평 균 비 고	
CH-7	제1주기	13.6	0.661	0.815	0.811	0.816
	제2주기		0.996	1.241	0.803	
	제3주기		0.635	0.758	0.838	
	제4주기		0.86	1.059	0.812	
CH-3	제1주기	14.7	0.65	0.815	0.798	0.796
	제2주기		0.96	1.241	0.774	
	제3주기		0.621	0.758	0.819	
	제4주기		0.839	1.059	0.792	
CH-1	제1주기	17.9	0.409	0.815	0.502	0.528
	제2주기		0.654	1.241	0.527	
	제3주기		0.394	0.758	0.52	
	제4주기		0.597	1.059	0.564	
W-1	제1주기	20.2	0.39	0.815	0.479	0.498
	제2주기		0.627	1.241	0.505	
	제3주기		0.37	0.758	0.488	
	제4주기		0.551	1.059	0.52	
W-2	제1주기	49.6	0.39	0.815	0.479	0.495
	제2주기		0.619	1.241	0.499	
	제3주기		0.372	0.758	0.491	
	제4주기		0.541	1.059	0.511	
W-4	제1주기	54.7	0.388	0.815	0.476	0.498
	제2주기		0.619	1.241	0.499	
	제3주기		0.379	0.758	0.5	
	제4주기		0.547	1.059	0.517	
W-3	제1주기	61.6	0.386	0.815	0.474	0.494
	제2주기		0.613	1.241	0.494	
	제3주기		0.377	0.758	0.497	
	제4주기		0.541	1.059	0.511	

Figure 6에서 최고조와 최저조 수위발생시간과 이로 인한 주변관측지점에서 지하수위의 최고, 최저수위 발생시간을 도표화하면 Table 5와 같다. Table 5에서 제2주기와 제4주기의 최저 지하수위는 이 당시 기계실에서 지하수를 채수했기 때문에 이로 인해 발생한 수위강하의 영향을 받은 수위이므로 분석대상에서 제외하였다.

Table 5. The elapsed times between the highest and lowest tide, and a maximum and a minimum water level at the observation points (96. 8. 21~8. 23)

주기	관측지점	SEA		CH-7		CH-3		CH-1		W-1		W-2		W-4		W-3		비 고
		시간	차	시간	차	시간	차	시간	차	시간	차	시간	차	시간	차	시간	차	
제1주기	max	80		125		130		135		160		175		175		175		
	min	455	375	480	355	480	350	510	375	535	375	535	360	535	360	540	365	
제2주기	max	765	310	795	315	815	335	820	310	830	295	830	295	830	295	830	290	
	min	1190	425	1215	420	1210	395	1205	385	1225	395	1225	395	1225	395	1225	395	양수영향
제3주기	max	1620	430	1655	440	1655	445	1665	460	1690	465	1690	465	1690	465	1690	265	
	min	1970	350	2015	360	2015	360	2035	370	2050	360	2050	360	2055	365	2055	365	
제4주기	max	2310	340	2330	315	2340	325	2345	310	2350	300	2350	300	2350	295	2355	300	
	min	2720	410	2740	410	2740	400	2750	405	2780	430	2785	435	2785	435	2785	430	양수영향
평 균			377		374		373		374		374		373		373		373	

Table 4. The Duration that the sea water level is higher than the groundwater level at the site at 2nd and 3rd high tide (minute) (96.8.22)

공 변	거리(m)	지속시간(분)			해수위-지하수위(cm)		
		제2주기	제3주기	평균	제2주기	제3주기	평균
CH-7	13.6	225	245	235	7.1	7.3	7.2
CH-3	14.7	225	240	232.5	7.0	7.6	7.3
CH-1	17.9	185	250	217.5	8.6	10.7	9.65
W-1	20.2	190	270	230	11.8	13.0	12.4
W-2	49.6	90	170	130	4.0	4.9	4.45
W-4	54.7	90	160	125	3.8	5.0	4.4
W-3	61.6	90	160	125	4.8	5.1	4.95

조수위의 변동에 따라 주변 지하수위는 변하게 되는데, 해수면의 최고, 최저 조수위 발생시간과 주변 관측점 및 집수점에서 최고, 최저수위 발생 시간차를 지연시간(lag time)이라 하고 이를 도표화하면 Table 6과 같다. Table 6에 의하면 각 관측지점별 지연시간은 해안선으로부터 거리에 정비례한다.

수원지내 집수점에서 수질변동 특성과 해수의 역상승(up-coning) 현상

가) 자연상태와 단기간 소규모 지하수 채수시

전술한 바와 같이 Figure 6은 조수위 변화에 따른 수원지내에 소재한 각 관측지점에서의 지하수위변화 곡선이다.

시험당시에 시험개시후 1440분까지는 수원지내에 해안선과 가장 가까이 위치한 W-1 집수정(해안으로부터 거리 20.2 m)에 Hermit logger의 EC probe를 설치하여 조석간만에 따른 지하수의 전기전도도를 측정하였는데 그 결과는 Figure 7과 같다.

특히 이 시험기간 동안에 제2주기의 간조(썰물)시와 제4주기의 간조시에 각각 2시간 10분 및 3시간동안 기계실에 설치되어 있는 양수기 2대를 가동하여 지하수를 강제 채수하면서 지하수의 수질 변동 특성을 파악하였다. 기계실에 설치된 양수기의 양수능력은 1기당 9 m³/분이었으므로 제2주기의 간조시 채수한 지하수량은 약 2340 m³규모이고 제4주기의 간조시 채수해 낸 지하수량은 약 3240 m³규모이다.

Figure 7에 의하면 수원지내에 부존된 지하수의 수질은 만조 때에 일반적으로 전기전도도가 상승하고, 간조때에는 감소하는 경향을 뚜렷히 보이고 있다. 즉 최고조수위일 때 지하수의 전기전도도는 최고치에 도달한 후 서서히 최저조수위 도달시까지

Table 6. The lag time observed at 7 observation wells (minute) (96. 8. 21~8.23)

주 기	관측지점	CH-7	CH-3	CH-1	W-1	W-2	W-4	W-3	비고
제1주기	max	45	50	55	80	95	95	95	
	min	25	25	55	80	80	80	85	
제2주기	max	30	50	55	65	65	65	65	양수영향
	min								
제3주기	max	35	35	45	70	70	70	70	
	min	45	45	65	80	80	85	85	
제4주기	max	20	30	35	40	40	40	45	양수영향
	min								
평 균	max	32.5	41.25	47.5	63.75	67.5	67.5	68.75	
	min	35	35	60	80	80	82.5	85	

하강하다가 다시 상승한다. 특히 해수위가 수원지내 지하수위 보다 높을 때 더욱 뚜렷한 현상을 보인다. 이러한 현상들은 만조때 상당량의 해수가 수원지내의 지하수체내로 이류 및 분산 기작에 의해 유입되고 있음을 잘 나타내고 있으며 주 유입구간은 그라우팅 하부구간에 분포되어 있는 투수대 구간으로 판단된다.

앞에서 언급한 바와 같이 제2주기와 제4주기의 간조시 수원지내에 저유되어있던 지하수를 강제 배수한 바 W-1, W-2, W-3 및 W-4 집수정의 수위는 동시에 하강하였다. 제2주기의 간조시 약 2340 m³ 규모의 지하수를 2시간 10분 동안 강제배수시 W-1, W-2, W-3 및 W-4 집수정에서 실제 지하수의 강하량은 약 11.8 cm였으며, 제4주기의 간조시 3시간동안 약 3240 m³의 지하수를 채수했을때는 수원지내 모든 집수정에서 실수위강하량이 제2주기보다 큰 13.2 cm정도였다.

Figure 7에 의하면 수원지내에 지하수의 전기전도도는 간조시에는 일반적으로 감소하였는데 양수 개시후 약 1시간 이후부터는 간조기간인데도 불구하고 지하수의 전기전도도는 급격히

상승하였다. 즉 해안선에서 가까이 위치한 W-1 집수정은 양수 개시후 1시간 이후부터 지하수의 전기전도도가 상승하기 시작하여 양수 중지 후 지하수위가 원상태로 회복될 때까지 약 300 μS/cm정도 상승하였다. 전기전도도의 상승기간은 지하수위가 원상태로 회복될때까지 지속한다. 이에 비해 해안선으로부터 W-1 집수정보다 원거리에 설치되어있는 W-2 집수정에서는 양수 개시후 1시간 이후부터 전기전도도가 일시 상승하여 최저조 수위를 지나 지하수위가 원상태로 회복될때까지 약 120 μS/cm 이상 상승한 후 서서히 원상태로 회복되었다.

이러한 사실은 섬지역에 부존되어 있는 지하수의 일반적인 특성으로서 지하수위가 하강하면 역으로 절이대나 그 하부에 부존되어있던 염수가 대수층내로 역상승하기 때문이다.

상기 사실을 종합해보면 수원지내에 부존되어 있는 지하수체는 해수의 조석간만에 직접적인 영향을 받고 있다. 뿐만 아니라 자연상태하에서도 만조시 지하수의 전기전도도는 증가하고 간조시에는 전기전도도가 감소하는 주기적인 반복작업을 계속하므로 인해 해수와 담수의 절이대가 확대된다.

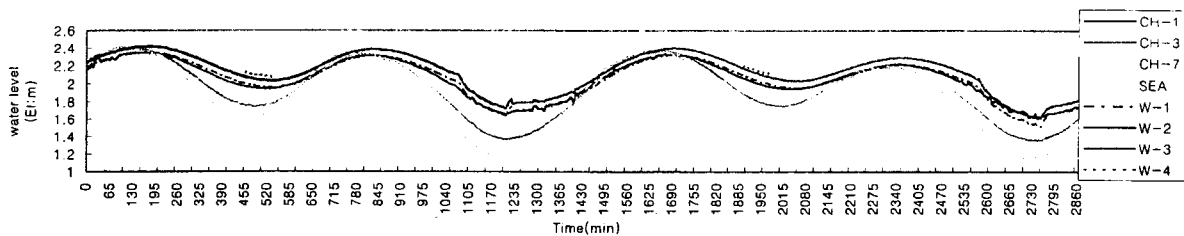


Figure 6. Fluctuation of ground water levels and sea water measured by Hermit data loggers (96.8.21~8.23).

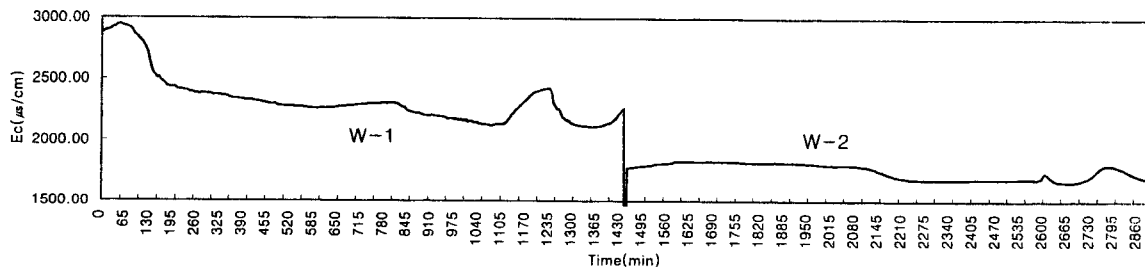


Figure 7. Electric conductance measured at W-1 collector well and at W-2 collector well.

이러한 현상은 강수량의 결핍으로 지하함양량이 감소하면, 용천 유출량이 감소되고 이로 인해 지하수위가 하강하게 되어 점이대내에 함유되어 있는 염소이온이 분산기작에 의해 수원지내로 서서히 확산된다. 이에 부가하여 수원지내의 지하수를 강제 채수하면 수위강하율을 더욱 증폭시켜 수원지내의 지하수체내로 염수의 역상승현상과 같은 악순환을 초래하게 되어 현재 수원지의 염소함량을 높이는 원인이 된다.

대체적으로 제주도내에 부존된 지하수의 염소이온농도와 전기전도도와 상관계는 하와이의 현무암 대수층내에 저유된 경우와 유사하다. 일반적으로 지하수내에 함유된 염소이온의 농도가 100 mg/l 이하의 저농도인 경우에 염소이온과 전기전도도(EC)의 관계는 $Cl^- = 0.1429 EC$ 정도이나 염소이온의 농도가 100 mg/l 이상인 경우에는 $Cl^- = 0.3333 EC - 109$ 의 관계가 성립한다(한정상, 1997). 조사기간중 9월 14일과 9월 15일 사이에 각 집수정별로 측정된 염소이온농도는 W-1 집수정이(765.5 ± 73.5) mg/l, W-2 집수정이(737.5 ± 89.5) mg/l, W-3 집수정이(793 ± 86) mg/l, W-4 집수정이(770 ± 85) mg/l이었다.

나) 장기간 대규모로 지하수 채수시

1996년 9월 6일에서 9월 10일 사이에 수원지내 각 집수정(W-1, W-2, W-3 및 W-4)에 양수기를 설치하고 기계실의 양수기를 동시에 가동하여 수원지내 지하수를 장기 채수했을 때 제 1 및 제 2점합정에서 시간경과별 염소이온의 농도변화를 도시한 바 그 결과는 Figure 8과 같다.

Figure 8에서 해수위의 변동은 제주시의 조수위표를 이용하였다. 그리고 염소이온의 농도와 지하수의 양수위는 수원지내의 기계실에 설치된 계측기를 이용하여 측정하였다. 특히 기계실의 지하수위와 염소이온의 농도를 부정기적으로 측정하였기 때문에 정확한 분석은 할 수 없으나 뚜렷한 현상은 기계실의 지하수위가 하강하면 제 1 및 제 2점합정의 염소이온농도는 급격히 증가한다. 즉 지하수위하강과 염소이온농도는 직접 비례한다. 이와 같이 수원지내 지하수를 다량 채수할 때 염소이온의 농도는 최소 1000 mg/l 이상 상승하였다. 이러한 현상은 앞에서 설명한 수원지내 지하수위의 강하가 수원지내 지하수의 염소이온 농도 증가의 원인임을 잘 입증해 주고 있다.

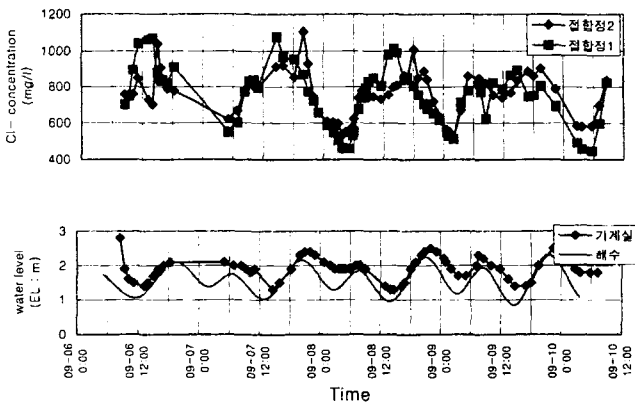


Figure 8. Variations of the water levels and Cl⁻ concentration at the observation wells during long term extraction of the groundwater (1996. 9. 6-9. 10).

인근 용천의 시간경과별 염소이온농도와 유출량

간조시 SW-1 용천의 염소이온농도 변화 : 수원지내에서 용천의 유출량 측정은 불가능하였다. 그래서 1996년 9월 18일부터 9월 19일 사이에 수원지 서쪽에 위치한 SW-1 용천(골강물)에 간이 수위표(staff gage)를 설치하고 조석간만에 따른 용천수위의 변화와 이에 따른 용천수의 염소이온농도를 측정한다. 그 결과는 Figure 9과 같다.

1996년 9월 18일 21시인 해수의 간조개시 시간부터 9월 19일 최저조위에 도달할때까지 총 13시간 동안 용천수위와 SW-1 용천의 염소이온농도를 측정하였다. Figure 8에 나타난 바와 같이 측정 개시후 9월 19일 0시 20분 이전까지인 만조시의 염소이온농도는 291 ± 55 mg/l의 범위였다가 해수면이 최고조수위에 도달하는 19일 01시 37분 이후 부터는 용천의 염소이온농도가 1591 mg/l로 급증하였다.

실제 최고 조수위와 용천의 최고수위는 Figure 9에 나타난 바와 같이 약 23분의 차이가 있으며, 용천수위가 최고수위가 될 때의 염소이온의 농도 범위는 1900 mg/l 이상이었고, 그 이후부터 용천수위나 해수면이 하강함에 따라 간조시 염소이온농도는 이에 비례하여 감소하였다. 용천의 염소이온농도가 1000 mg/l 이상 지속한 시간은 약 1시간 40분 정도(9월 19일 0시 40분~9월 19일 02시 20분)였으며, 그후 서서히 감소하며 9월 19일 08시 30분경에는 140 mg/l까지 하강하였다.

특히 염소이온농도가 먹는물 수질기준인 150 mg/l 이하로 지속되는 시간은 약 1시간 20분(9월 19일 07시 50분~9월 19일 09시 10분)간이었으며, 이 때 해수면의 최저조수위 발생 시간은 08시 28분이었다.

측정기간중 해수면이 최고수위에 도달하기 직전인 9월 19일 01시 25분경에 SW-1 용천수로(channel)의 표면수위에 부자를 설치하고 바닥에 얇은 조개껍질을 놓았다니 표면부자는 해안으로 흘러가는데 반해 수로바닥에 설치한 얇은 조개껍질은 오히려 반대방향으로 움직였다. 이러한 현상은 해안용천에서 해수위가 최고조 수위에 달하기 직전부터 비중이 용천수보다 높은 해수가 썩기형으로 용천내로 침투하고 있음을 입증해주고 있다.

대체적으로 SW-1 용천수로에서 흐르는 지하수는 표면수보다 수로바닥 부근에서의 염소이온농도가 높은 것이 특징이다.

특히 9월 19일 07시 30분에 SW-3, SW-6(여탕), SW-7(남탕), SW-4(해안선에 위치한 것), SW-5 용천에서 측정된 염소이온농도는 각각 SW-3가 290 mg/l, SW-6가 510 mg/l, SW-7이 680 mg/l, SW-4가 280 mg/l, 및 SW-5가 195 mg/l로서 이 지역에서 용천유량이 가장 큰 SW-1 용천의 이시점에 측정된 155 mg/l에 비해 월등히 높다.

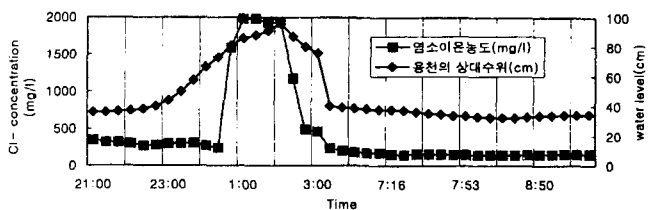


Figure 9. Variation of the spring water level and Cl⁻ concentration (mg/l) vs. time (96. 9. 18-9. 19).

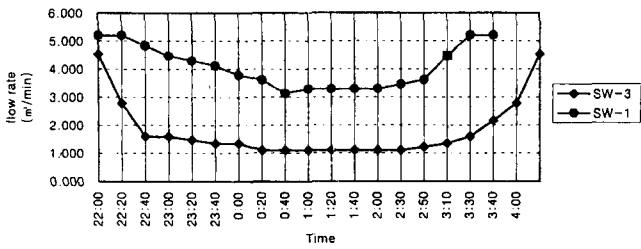


Figure 10. Variation of the spring discharge during low tide measured at SW-1 and SW-3 spring.

간조시 SW-1 및 SW-3 용천의 유출량 : 1996년 9월 21일과 9월 22일 양일간에 수원지 서측에 소재한 SW-1과 SW-3 용천에 폭이 각각 55 cm 및 50 cm 되는 장방형의 웨어(weir)를 용천유로에 설치하고 최저조수위 발생시간인 9월 22일 01시 17분을 중심으로 하여 9월 21일 21시 40분부터 9월 22일 04시 까지 총 6시간 40분동안 용천유출량을 측정하였다.

이 기간동안 측정한 각 용천에서 시간경과별 유출량을 도식화하면 Figure 10과 같으며 SW-3 용천은 SW-1 용천보다 약 10 cm 이상 표고가 높은 지점에 위치한다.

Figure 10에 의하면 SW-3 용천의 순수 지하수 유출량은 1.1 m³/분 정도이며, 그 지속시간은 최저조 발생이후부터 약 2시간(9월 22일 0:00~2:00)정도이다. 따라서 이 기간동안 침입된 해수에 의해 영향을 받지않은 순수 지하수의 유출량은 132 m³ 규모(2시간)이며, 1일 유출량은 1584 m³ 규모이다.

이에 비해 규모가 큰 SW-3 용천의 순수 지하수 유출량은 3.3 m³/분 규모이었고, 그 지속시간은 SW-3와 유사하게 약 2시간(9월 22일 0:30~2:30)정도였다. 2시간 동안 유출되는 순수 용천수량은 400 m³ 규모이고 1일 유출량은 약 4700 m³에 이른다.

따라서 해수의 영향을 받지않은 2시간 동안 2개 용천에서 유출되는 총량은 약 530m³ 규모이며, 염소이온농도가 먹는물기준 이상인, 즉 염수에 의해 영향을 받은 것을 합치면 2개 용천에서 1일 총 유출량은 6,200 m³ 규모이다.

결론 및 대책

수원지 인근에 소재한 SW-1 및 SW-3 용천 유출지점에서 해수의 간만조에 따른 이들 용천수의 수질과 유출량의 변동에 대해서 해안가 분산 용천들은 해수의 간만조에 직접적인 영향을 받고있다.

따라서 현재 각 집합정이나 집수정내로 유입되는 지하수의 염소이온농도가 높게 나타나는 이유는 다음과 같이 매우 복잡한 자연 및 인위적인 현상에 의해 발생된 것으로 판단할 수 있다.

1996년 9월말 현재까지 제주도 지역에 발생한 강수량(593.8 mm)은 1961년부터 1996년도까지 약 36년간 제주도 지역에서 발생한 연평균 강수량(1424.9 mm/년)의 41.7%(593.8 mm)에 해당하는 가장 극심한 한발기이다.

1996년도와 같은 극심한 한발로 인한 용천 유출량의 감소현상은 결국 용천수위 강하의 원인이 되어 만조시 매 주기별로 최소 2시간~3.8시간 동안 해수면이 수원지내 지하수위보다 4.4 cm~12.4 cm(Table 4참조) 높은 원인이 되었다. 이로 인해 차

수벽 하부의 투수대 구간을 통해 일부 해수가 역동수구배를 따라 수원지내로 유입되어 수원지내 지하수의 염소이온농도가 증가하게 되었다.

주기적인 조석간만의 영향으로 인해 얇아진 담수체의 수축, 팽창현상이 가속화되어 점이대가 확장되므로 해서 강수량 감소에 의한 지하 함양량 감소로 인해 해수와 담수의 점이대로부터 지하수 흐름방향의 역전현상과(김영웅, 1990) 이에 부가하여 제주도 강수누적결핍 지속기간 동안에, 특히 지하수체의 수축 현상이 가장 심하게 발생(흐름의 역전현상이 가장 클때)하는 간조시 1일 평균(2790±450)m³의 지하수를 간헐적으로 반복 채수함으로써 추가적인 지하수위의 변동을 유발하여 점이대의 확산과 염수의 역상승을 유발하였다.

이러한 현상은 현 해안선으로부터의 거리에 따라 다소 차이는 있긴 하겠으나 수원지내에는 물론, 조석간만에 의해 지하수위가 직접적인 영향을 받는 수원지 인근지역도 동일할것으로 판단된다.

기존 집수정 중 W-2, W-3 및 W-4 집수정 주변을 기반암까지 굴착하여 정확한 용천 유출지점을 확인한 후 조석간만에 따른 시간경과별 용천 유출량과 용천수의 염소이온농도 변화를 명확히 규명해야한다.

본 조사결과 염소이온농도가 150 mg/l나 250 mg/l 이하로 떨어지는 지속시간을 정확히 파악하고 그 지속기간이 긴 경우에 용천유출지점에서만 용천수를 취수할 수 있는 간이 집수정을 설치한 다음 집수된 용천수는 기존 집합정으로 집적 도수해야 할 것이다.

SW-1용천에서 측정한 염소이온농도가 150 mg/l 이하로 지속되는 시간은 약 1시간 20분간이었고 200 mg/l 이하로 지속되는 시간은 2시간 33분정도였다.

만일 조사 결과 각 집수정 인근지역에서 유출되는 용천의 염소이온농도가 250 mg/l 이상을 약간 상회하더라도 그 유출량이 풍부한 경우에는 이들을 직접 양수하여 타수원지의 저농도 지하수와 희석하여 이용하는 방법도 단기적인 대안이 될 수 있을 것이다.

그러나 1일 최대 채수시간은 SW-series 용천이나 수원지내 지하수의 조석간만 영향을 고려할 때 1일 최대 6시간 이내이어야 한다.

수원지 배후면 지역의 평균 해수면 상에서 산출되는 지하수와 용천수의 산출 및 수질특성을 조사하여 그 수질과 수량이 양호한 경우에 수원지 배후면(도로변)에 방사 집수정을 설치하고, 방사 집수정으로부터 방사상으로 수평집수관을 배후면 방향으로 설치하여 수원지내로 직접 양질의 지하수를 인입시키는 방안도 고려해 볼 필요가 있다.

예기치 않은 돌발사태나 금년과 같은 최악의 한발기를 사전에 대비, 대처하기 위해서 취약성이 큰 해안 용천수에 의존하고 있는 삼양 3수원지는 반드시 항구적인 예비, 보조 수원지를 차재에 마련해 두어야만 할 것이다.

참고문헌

김영웅, 1990, 제주도의 지하수부존과 해수침입, 환경지질과 오염,

p. 82-84.

(주)대림기초건설, 1996a, 삼양3수원지 해수유입에 따른 차수대책 검토 보고서.

(주)대림기초건설, 1996b, 삼양3수원지 차수보강 검토서.

(주)우주종합건설, 대림지질(주), 1994, 제주시 삼양3수원 개발부지 지반지질 조사 보고서(BH-series).

한국수자원공사, 1993, 제주도 수자원 종합개발계획수립 보고서. 9.

한정상, 김창길, 김남종, 한규상, 1994, 제주도 지하수자원의 최적 개발가능량 산정에 관한 수리지질학적 연구, 제주도 지하수자원의 환경학적 보전과 개발이용, p. 184-215.

한정상, 1997, 지하수환경과 오염, 박영사.

Fetter, C. W., 1994, Applied hydrogeology, Prentice hall, 376p.

Lee, M. W., 1982, Petrology and Geochemistry of Jeju Volcanic Island, Korea. Ph.D Thesis, Tohoku Univ.