

제주도 지하수의 지역별 수질특성과 수위변화

윤정수 · 박상운

제주대학교 해양학과

Regional Water Quality Characteristics and Fluctuations of Groundwater Level in Cheju Island

Jeung-Su Youn · Sang-Woon Park

*Department of Oceanography, Cheju National University,
Cheju-do 690-756, Korea*

The purpose of this study is to describe the altitudinal distribution of drilled wells, yield capacity of the aquifer and to provide information on the occurrence, relation of groundwater level to tidal effect and tendency of annual groundwater pollution potential.

The information of 335 wells drilled by Korean Agricultural Development Corporation indicates that the elevation of 225 wells were distributed below the 100m level and only 90 wells located 100m upper level.

The water yield located below the 50m level wells are 1,874.1m³/day, 50.1 ~ 100m : 1,400.9 m³/day, 100.1 ~ 150m : 1,194.7m³/day, upper 150m level wells are 1,061.8m³/day, as increase the elevations higher is distinctly decrease with the yield capacity.

The groundwater well which piezometric surface situated under the sea level in Cheju Island as follow : In the eastern region exist 11 wells, western region content 13 wells and northern part have 2 wells, if the overdraft groundwater under the these condition, the wells near the coastal area are salt intruded due to over pumping activity.

In the eastern parts, including Shinchon, Kujwa and Sungsan area, are sinusoidal fluctuation of groundwater level occurs in the response to oceanic tides.

However, in the western parts, thus the Gosan and Taejeong area shows the groundwater level is directly influenced by the amount of precipitation.

Base on the long-term groundwater level test of 32 inventory wells were measured of study area, which the 27 measurements of sites were drawdown rather than that the initial groundwater level.

The freshwater lens type in the eastern region have shallow aquifer, therefore if the drilling well is near the coastal areas, it's pressure the sea water intrusion, while the western region the aquifer existing perfect fresh water lens type.

According to the NO₃⁻-N, Cl⁻, SO₄²⁻ components in Cheju groundwater from 1983 to 1993 analysed date, the degree of pollution for the Cheju groundwater is continuous increasing

rather than the initial development water quality.

key words : aquifer, pollution potential, yeild capacity, piezometric surface, grandwater level, water quality

서 론

물은 우리의 생명을 유지시켜주는 생명체의 근원이며 풍족한 물이 없었다면 인간의 문명 및 문화생활 또한 존재할 수 없었을 것이다. 이렇듯 우리생활의 가장 근간을 이루는 물이 인구의 증가, 생활수준의 향상에 따라 필연적으로 그 사용량이 급격히 증대되고, 물은 흔하기 때문에 무한자원으로 잘못 인식되어 손만 벌리면 어디서나 쉽게 얻어지는 것으로 생각하여 소홀히 다루어진 결과 오늘날 세계 곳곳에서는 고도의 산업화와 도시화에 따른 수량과 수질문제가 심각하게 대두되고 있는 실정이다.

우리 제주섬도 수자원에 대한 개발은 1963년을 시작으로 1970년 농어촌 진흥공사가 설립되면서 1972년까지 2년간 본 도 전역에 걸친 세부지질조사와 지하수 부존 가능성 조사를 실시한 결과 본 도 지하심부에는 두꺼운 담수 lens가 존재한다는 결론을 얻고 1972년부터 오늘에 이르기까지 지하수 개발사업이 진전되고 있다. 그동안 25여년간에 걸친 조사와 개발의 산물로 1992년도 현재 도 전역에는 국가관정과 민간시설관정을 포함하여 약 3,170여 개소의 지하수개발공이 산재하는 것으로 추측된다. 이와같은 지하수개발사업의 큰 성과는 제주도의 생활환경과 세계적인 관광지로 발돋움하는데 획기적인 발전을 가져왔으나 해안지역과 인구밀집지역 지하수원의 과다사용으로 인한 기존 용천수의 용출량 및 지하수면의 현저한 감소추세와 지하수오염의 증가 및 일부 지역 지하수의 고염분함량 등 그 이용면에서

여러가지 문제가 대두되고 있음이 또한 사실이다.

제주도의 수위변동에 관한 조사는 농어촌진흥공사가 1991~2000년까지 '장기 수위관측망 조사계획'을 10개년 계획으로 추진중인 것과 박(1993)의 연구를 제외하면 매우 미흡한 실정이다.

또한 제주도의 지하수에 대한 거동특성 및 수질에 관한 연구 조사로는 농어촌진흥공사(1989, 1992, 1993), 한국수자원공사(1993) 등의 전문기관과 유등(1985, 1986, 1989), 최(1989), 고등(1992, 1993), 윤(1986, 1994) 등이 있다.

김(1992)에 의하면 해안에서 1km까지 지하수 염소이온함량이 1,000ppm 이상을 나타내고, 특히 동부지역은 해안에서 6km지점까지 염소함량이 크게 증가하여 농업용수로 이용하기도 불가능하며, 1989년도에 농진공에서 193관정에 대한 지하수위 측정조사결과에 의하면 그간의 제주도의 평균 지하수위 강하량이 개발당시보다 1.4m 강하 하였으며, 이중 28%에 해당하는 시설관정에서 염소함량이 음용수 수질기준치를 초과한 것으로 분석되었다. 1983년 제주시, 서귀포시 및 인구밀집지역의 취수정 10개소의 수질시험결과 질산성질소가 10ppm 이상 검출된 곳이 4개소였고, 일반세균과 대장균이 검출된 곳이 8개소로 나타났다. 또한 1993년도 한국수자원공사에서 128개소로 구성된 광역 수질관리망 관측정에서 수질 시험결과 19.5%에 해당하는 25개공이 질산성질소함량이 음용수 수질기준을 초과한 것으로 보고된 바 있다.

따라서 본 연구에서는 지하수 개발역사가 25여년이 지난 오늘에 이르기까지 그간의 본

도 지하수의 수질상태 및 총체적인 지하수 포장체의 거동과악과 지역별 지하수 개발가능량을 설정하는데 필수적 기본자료인 지역별 지하수위 변동양상에 대하여 논의하고자 한다.

재료 및 방법

제주도 지하수의 지역별 개발내역을 파악하기 위하여 1972~1992년까지 농어촌진흥공사에 의해 개발된 총 372개공 중 자료해석이 양호한 335개의 지하수 개발공을 대상으로 그 현황을 표고별, 심도별, 양수량별 및 절대수위등을 분석하였다.

조석간만의 지하수 자연수위에 미치는 영향을 조사하기 위하여 Fig. 1과 같이 기저지하수의 관입된 관정 8개 지역을 선택하여 해안선에 수직방향으로 각 지역당 3개소씩 선정 총 24개 관정 (신촌지구: 신촌(D-189), 삼양(W-5), 신촌(D-52), 애월지구: 이호(D-96), 월산(79-4), 연동(D-66), 한림지구: 협재(D-128), 동명(W-1), 헤아미(F-27),

고산지구: 고산(D-80), 조수(F-29), 청수(D-74), 대정지구: 일과(D-113), 보성(D-107), 신평(D-197), 표선지구: 하천(D-31), 하천(D-259), 성읍(D-20), 성산지구: 고성(D-28), 수산(D-124), 수산(D-69), 구좌지구: 상도(W-10), 평대(D-203), 송당(D-50)에 대하여 1993년 8월에 관측을 실시하였는데, 수위측정은 1시간 간격으로 48시간 연속으로 관측하였다. 수위관측 결과는 수로국의 제주항과 서귀포항의 1993년도 조위 관측자료와 함께 분석하였다.

제주도 전역을 대상으로 한 광역 지하수 관리망 장기조사는 제주 북부지구에서 10개소(제주시:6개공, 애월:2개공, 초천:2개공), 동부지구 6개소(구좌, 성산, 표선:각각 2개공), 남부지구 10개공(서귀포:6개공, 안덕, 남원:각각 2개공), 서부지구 6개소(한경, 대정, 한림:각각 2개공)에서 1993년 4월부터 9월까지 6개월간 실시하였다.

지역별 수질특성 및 지하수의 오염상태를

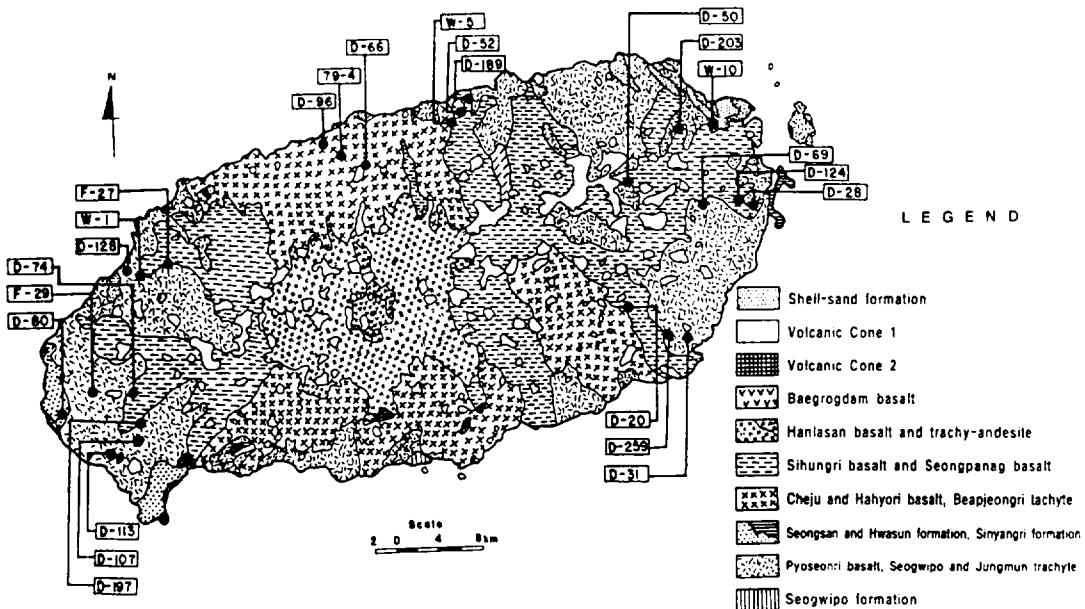


Fig. 1. Measurement wells of groundwater level.

파악하기 위하여 1983년도 부터 1993년까지 제주 전역을 대상으로 지하수질 관리망을 선정하여 여러기관에서 실시한 수질분석 자료를 수집하여, 제주시 지역 17개공, 애월지역 13개공, 한림지역 8개공, 한경지역 13개공, 대정지역 5개공, 안덕지역 5개공, 서귀포지역 11개공, 남원지역 6개공, 표선지역 5개공, 성산지역 10개공, 구좌지역 16개공, 조천지역 5개공 총 114개공에 대한 수질성분 중 오염인자의 중요한 요소인 NO_3^- , N , Cl^- , SO_4^{2-} 의 배경수질 성분들의 지하수 개발 초기보다 그간의 변화 추세를 조사하였다.

결과 및 고찰

지하수 개발현황 및 관정의 산출특성 한국수자원공사(1993)의 지하수문학적 불수지분석 자료에 의하면 본도에 년평균 강우량은 1,872mm로서 년간 총 수자원량은 33.9억 m^3 이며, 이 중 56%인 19억 m^3 이 지표유출 및 증발산에 의해 손실되고, 전체 강우량의 44%에 해당하는 14.9억 m^3 이 지하수로 함양되며, 도내 지하수 이용가능량중 최적 개발가능량은 전체함양량의 약 41%에 해당하는 연간 6.2억 m^3 정도로 하였다.

1992년 현재 제주도에에서 개발된 지하수 개발공은 총 3,170여개소로 국가개발관정은 372개소에 개발량은 연간 1.12억 m^3 이며 나머지 2,798개소는 사설관정으로 개발량은 약 2,500만 m^3 이다.

한국수자원공사(1993)의 자료에 의하면 제주도의 수원시설은 1991년 현재 총 시설규모 810천 m^3 /일의 지하수가 개발되었으나 실제로 용수공급을 위하여 가용시설 용량은 552천 m^3 /일로서 이 중 약 67%인 368.8천 m^3 /일이 지하수 개발 관정이고, 나머지 약 4%인 21.5천 m^3 /일이 상위용천수를 저수하여 공급하는 어승생수원이다. 용수이용 현황을 보면 1991년 현재 일

일 평균 296.4천 m^3 , 연간 9,400만 m^3 으로 수자원 개발량 552천 m^3 /일의 약 54%정도만 실제로 이용되고 있다. 그러나, 여름철과 같은 일일 최대 용수 이용량은 517.3천 m^3 /일로 현 수자원 개발량에 거의 육박하고 있어, 계속적인 지하수 개발이 시급한 실정이라고 추정하고 있다.

제주도의 지역별, 해발 표고별, 양수량별 지하수의 산출특성을 파악하기 위하여 도전역을 4개의 지역으로 구분하여, 수리지질자료 해석이 양호한 335개의 지하수 개발공을 대상으로 그 실적 내역을 분석한 결과는 다음과 같다.

Table 1에서와 같이 총 335개소의 개발공 중 73.2%에 해당하는 245공이 표고 100m이하에 개발이 집중되었고, 100m 이상의 개발공은 90공에 불과하다. 특히 동부지역(구좌읍, 성산읍, 표선면)은 총 47개 분석공 중 해발 100m 이상에 착정된 관정은 불과 7개공이며, 서부지역(한경면, 대정읍, 한림읍)은 총 116개 분석공 중 9개공에 불과한 실정이다.

이는 본도 마을의 분포, 지하수 개발의 경제성 등 제요인에 의한 것으로 이해되나, 제주도의 지하수 개발관정에서 개발 초기에는 염소이온 함량이 대부분 5~150ppm 정도로 나타나 국내 음용수 수질기준(150ppm)에 모두 적합한 것으로 나타났으나, 1989년 하반기에 농어촌진흥공사에서 제주도 지하수개발 장기계획수립을 위한 조사과정에서 시설관저 155개소에 대한 염도측정을 시행한바, 해안에서 1~6km거리에 있는 44개소 관정에서 염도가 150ppm을 초과하여 음용수 수질에 부적합한 것으로 판명되는 등 해안변 지하수의 해수침입현상이 일어나고 있으므로 향후 관정개발은 가능한한 담수체 렌즈가 두꺼운 표고가 높은 내륙으로 개발되어야 할 것으로 제안하였다. 개발개소당 평균 양수량은 Table 2와 같이 50m이하에서는 1,874.1 m^3 /일, 50.1~100m까지 1,400.9 m^3 /일, 100.1~150m가 1,194.7 m^3 /일, 150m이상에서 1,061.8 m^3 /일로 분석되어 표고

제주도 지하수의 지역별 수질특성과 수위변화

Table 1. Altitudinal distributions of groundwater in cheju Island

Region (No. of wells)		Elevation (m)		100.1 ~ 150	150.1 ~ 200	200.1 ~ 250	250.1 over	Total
		0 ~ 50	50.1 ~ 100					
East Region	Kujwa	12	10	2	1			25
	Sungsan	6	4					10
	Pyoson	4	4	4				12
	Total	22	18	6	1			47
	%	46.8	38.3	12.3	2.1			100
West Region	Hangyong	31	6	3				40
	Taejeong	42	19	1				62
	Hallim	8	2	4			1	14
	Total	81	27	8			1	116
	%	69.8	23.3	6.9			0.9	100
South Region	Sogwipo	4	7	8	10	3	2	34
	Namwon	4	7	7	2			20
	Andeog	5	4	4	3			16
	Total	13	18	19	15	3	2	70
	%	18.6	25.7	27.1	21.4	4.3	2.9	100
North Region	Cheju	8	18	19	3	2	1	51
	Aewol	13	13	5	2			33
	Chochoon	12	2	3	1			18
	Total	33	33	27	6	2	1	102
	%	32.4	32.4	26.5	5.9	2.0	1.0	100

Table 2. Altitudinal yield variations of groundwater in Cheju Island

Elevation yield (kg/ha) Area	50m below			50.1 ~ 100m			100.1 ~ 150m.			150.1m over			Total		
	No. of wells	Total yeild	Mean yeild	No. of wells	Total yeild	Mean yeild	No. of wells	Total yeild	Mean yeild	No. of wells	Total yeild	Mean yeild	No. of wells	Total yeild	Mean yeild
Cheju	6	9,362	1,560.3	15	22,746	1,516.4	16	20,948	1,309.3	6	6,000	1,000	43	59,056	1,373.4
Sogwipo	6	9,133	1,551	9	13,577	1,508.6	5	6,370	1,274.1	15	16,607	1,107.1	35	45,687	1,305.3
Aeowol	14	22,775	1,626.8	12	14,892	1,241	8	8,900	1,112.5	2	2,200	1,100	36	48,767	1,354.6
Hallim	9	15,146	1,626.8	3	4,437	1,479	6	7,680	1,280	1	800	800	19	28,063	1,477.0
Hangyong	32	70,170	2,192.8	9	9,100	1,011.1	5	5,300	1,060				46	84,570	1,838.5
Taejeong	47	84,890	1,806.2	18	30,127	1,673.7	2	2,200	1,100				67	117,217	1,749.5
Andeog	5	10,707	2,141.4	3	4,479	1,493	4	4,580	1,145	3	3,200	1,066.7	15	22,981	1,532.1
Namwon	4	7,040	1,760	10	14,785	1,478.5	7	8,560	1,222.9	3	3,100	1,033.3	24	55,310	2,304.6
Pyoson	4	5,890	1,472.5	6	6,478	1,079.7	3	3,110	1,036.7				13	15,478	1,190.6
Sungsanpo	6	10,445	1,740.8	5	5,669	1,133.8	1	1,000	1,000				12	17,114	1,426.2
Kuja	8	15,181	1,897.6	10	14,000	1,400	2	2,000	1,000	1	1,105	1,105	21	32,286	1,537.4
Chochon	12	25,992	2,166	4	5,400	1,350	2	2,230	1,115	1	967	967	19	34,589	1,820.5
Total	153	286,731	1,874.1	104	145,690	1,400.9	61	72,878	1,194.7	32	33,979	1,061.8	350	561,118	1,603.2

가 높아짐에 따라 양수량이 전반적으로 감소되고 있음을 보여주는데, 이것은 제주도 지하수 부존형태가 해안변 지역에서는 Ghyben Herzberg 원리에 의한 두꺼운 담수체 렌즈가 형성되어 있음을 의미한다.

이를 지역별로 살펴보면 Table 3과 같이 2,000m³/일 이상 채수가 가능한 지역별 비율은 동부지역이 16%, 서부지역이 30%, 남부지역은 8.3%, 북부지역은 10.6%로 서부지역이 가장 많고, 남부지역이 가장 적은 것으로 나타났는데, 이는 서부지역이 공당 평균양수량이 가장 많은 표고 50m이하의 전체 분석공 116공 중 70%에 해당하는 81개공이 이지역에 편중되어 있기 때문이며, 서부지역은 기저 또는 준기저지하수가 두꺼운 담수체 렌즈(lens) 형태로 광범위하게 부존되어 있고 대수층 하부에는 서귀포층과 해안변에는 불투수층인 성산층이 대수층을 피복하고 있어 본 도에서 지하수 개발에 가장 유리한 입장에 있는 곳으로 알려졌다. 한편 남부지역이 타지역에 비해 평균채수량이 적은 것은 남부지역의 지하수는 대부분 상위지하수로 구성되어 있으며 투수도가 낮은 서귀포층과 조면암류가 해수면 상부까지 널리 분포하고 있음으로 기저지하수 개발에 불리한 여건을 갖고 있을 뿐만 아니라 대수층의 생산성이 적은 것으로 알려지고 있다.

지역별 지하수위 변동 지하수위 자료는 지하수 포장체의 규모, 대수층의 성격과 능력, 지하수 유동방향 판단 및 대수층 변동예측 뿐만 아니라 총체적인 지하수 거동과악을 통한 지역별 지하수 개발가능량을 설정하는데 필수적인 기본자료가 된다.

일반적으로 지하수위는 수문, 기상조건, 양수등에 따라 년중 끊임없이 변화하며(Brede-hoeft, 1967; Todd, 1980), 특히 제주도는 지하지질 구조가 투수성이 큰 지질매체로 구성

되어 있어 수위변동도 각종 요인에 의해 큰폭으로 나타나고 있는 것으로 추정하고 있다. 지하수위 변동은 강우량, 증발산량, 정호장에서 양수량, 조석간만에 의한 영향 등의 요인에 의해 발생하고 있으며, 본 도에서의 지하수위 변화는 수역별 대수층의 유형과 지질구조, 양수량, 강우량, 조석간만에 의한 영향의 특성에 따라 수역별로 상이하게 나타나고 있다(고동, 1992; 윤, 1986).

섬지방의 지하수위 변동요인은 주로 조석간만에 의한 영향이 관측되며 그 변동폭과 영향권은 해안변 지역의 수리지질학적 특성과 조차등의 조건에 따라 가변적으로 나타나고 있다. 그리고 강우량의 변화와 양수량에 의해서 지하수 수위가 단기적 및 계절적 변동을 유발시키는 가장 근본적인 요인이 되고 있다(Todd, 1980; Lau, 1980).

제주도와 같은 섬지역에서의 담수 lens체의 두께는 조석운동, 대수층의 불균질성, 개발에 따른 지하수의 불규칙한 소모량 등에 따라 복잡한 유동상태를 이루고 있어 해수와 동적평형을 유지하는 것으로 밝혀졌고 담수체와 해수가 접하는 곳에서의 어떤 폭을 갖는 점이대가 형성되어 있다(농진, 1973).

이러한 점이대는 조석의 영향, 함양량과 유출량의 변동, 기타 양수량에 의한 지하수위의 변화에 따라 확산되며 일시에 많은 양의 지하수를 심정공에서 양수할 경우 담수 lens체 하부에는 갑작스런 국부적 변위현상이 일어나 염수는 상향운동을 일으키게 되어 넓은 점이대가 형성되며 기존 대수층내로 염수가 침입될 가능성이 있다.

제주도 내에서도 동부 일부지역은 지하지질구조 특성에 의해 담수 lens체가 얇고, 과잉양수에 의한 해수침입이 가장 확산된 지역으로서 내륙부 6km까지 해수침입이 관측되며 해안에서 1km까지의 염도는 1,000ppm을 초과

Table 3. Pumping rate distributions of groundwater in cheju Island

Pumping rate Region (No. of wells)		150 ~ 1000	1000.1 ~ 1500	1500.1 ~ 2000	2000.1 ~ 2500	2500.1 ~ 3000	3000.1 over	Total
East Region	Kujwa	6	8	4	2	1	1	22
	Sungsan	1	3	5	1			10
	Pyoson	3	5	1	2			11
	Total	10	16	10	5	1	1	43
	%	22.7	36.4	22.7	11.4	2.3	2.3	100
West Region	Hangyong	6	12	8	13	3	5	47
	Taejeong	8	16	23	12	2		61
	Hallim	3	5	6	2			16
	Total	17	33	37	27	5	5	124
	%	13.7	26.6	29.8	21.8	4.03	4.03	100
South Region	Sogwipo	14	16	2	1			33
	Namwon	5	10	4	2			21
	Andeog	6	6	3	2	1		18
	Total	25	32	9	5	1		72
	%	34.7	44.4	12.5	6.9	1.4		100
North Region	Cheju	11	20	10		1		42
	Aewol	6	17	8	2			33
	Chochon	5	6	2	3	3	1	20
	Total	22	43	20	5	4	1	95
	%	23.2	45.3	21.1	5.3	4.2	1.1	100

제주도 지하수의 지역별 수질특성과 수위변화

Table 4. Groundwater wells of piezometric surface situated under the sea level

Region	Well No.	Local name	Altitude (m)	Depth (m)	Natural water level (m)	Dynamic water level (m)	Satatic water level (m)	Drow-down (m)	Yield (m ³ /D)
East Region	F-32	Pyoson	81	114	85	96	-4	11	1500
	F-43	Hamdeog	60	87	64.5	78	-18	13.5	1500
	W-20	Sangdo	28.17	50	29.75	29.80	-1.58	0.05	3308
	D-30	Onpyeong	32	50	32.4	33.65	-0.4	1.25	1552
	D-37	Seiwa	63	95	64.0	64.5	-1.0	0.5	1140
	D-69	Susan	97.5	132	127.47	128.0	-30.47	0.5	1100
	D-132	Hamdeog 2	34.5	55	36.0	37.0	-1.5	1.0	2000
	D-140	Kimyeong2	30	60	34.5	39.0	-4.5	4.5	2030
	D-152	Sangdo	35	60	37.5	43.6	-2.5	6.1	1805
	D-158	Pyosun	42	61	41.8	46	0.2	4.2	2060
	D-203	Pheongdae	65	90	190.4	207.0	-2.0	5.0	1200
Wast Region	F-38	Sindo	25	80	27.5	36.0	-2.5	8.5	1700
	F-46	Gwideol	40	72	42	54	-2.0	12.0	1000
	D-9	Doomo	13.26	85	35	36.6	-21.74	1.6	1754
	D-56	Sindo	39	100	37.9	45.0	-7.9	45	1040
	D-83	Sindo	10	82	18.0	20.0	-8.0	2.0	1660
	D-86	Kosan3	15	80	24	40	-9.0	15	2290
	D-99	Mureung 3	36.5	112	42.4	46.7	-5.9	4.3	1500
	D-103	Sindo 4	35	122	35	90	0	55	2000
	D-121	Sindo 5	10	80	12	20	-2.0	8	2160
	D-180	Kosan 13	25	110	26	31	-1.0	5	2000
	D-182	Suwon 2	12	70	12	15	0	3	2000
	D-192	Sindo 8	34	120	38.4	91	-4.4	52.6	1500
D-207	Sindo	23.5	100	24.0	61.0	-0.5	37	1500	
Nouth Region	D-141	Aewol 2	31	60	32.3	33.0	-1.3	0.7	2030
	D-163	Shinheung	15	60	19.5	44	-4.5	24.5	1500
	D-220	Daeheul	107	141	113.0	120.0	-6.0	7.0	1000

Table 5. Variation of groundwater level by tidal influence in Cheju Island

Region		Well No.	Name of well	Minimum (m)	Maximum (m)	Fluctuation (m)	Distance from coast(km)
1	Shinchon	D-189	Shinchon	44.247	44.430	0.183	0.9
		W-5	Samyang	30.920	30.998	0.078	1.0
		D-52	shinchon	29.646	29.769	0.123	1.82
2	Aewol	D-96	shinchon	20.531	20.568	0.037	0.85
		79-4	wolsan	70.303	74.450	0.147	3.1
		D-66	youndong	92.062	92.532	0.470	4.5
3	Hallim	D-128	hyeobje	16.333	15.416	0.083	1.1
		W-1	Dongmyeong	16.103	16.144	0.041	1.44
		F-27	Haeami	101.909	101.944	0.035	3.9
4	Gosan	D-80	Kosan	16.715	16.748	0.033	0.9
		F-29	Chosoo	47.855	47.911	0.056	4.1
		D-74	Cheungsu	57.222	57.261	0.039	6.2
5	Taejeong	D-113	Ilgwa	7.880	8.170	0.290	0.75
		D-107	Boseong	33.585	33.600	0.015	3.72
		D-197	Sinpyeong	34.031	34.093	0.062	4.93
6	Pyosun	D-31	Hacheon	38.373	38.499	0.126	1.6
		D-259	Hacheon	65.729	65.800	0.071	3.92
		D-20	Seongeeub	121.862	121.918	0.056	7.54
7	Sungsan	D-28	Koseung	26.623	26.853	0.230	1.76
		D-124	Susan	27.017	27.169	0.152	2.45
		D-69	Susan	107.816	107.899	0.083	7.5
8	Kujwa	W-10	Sangdo	25.466	25.705	0.239	1.92
		D-203	Pyeongdae	65.119	65.238	0.119	3.1
		D-50	Songdang	140.552	140.653	0.083	9.52

하여 이지역 지하수는 농업용수로도 사용이 불가능한 실정으로 조사되었다. Table 4는 본도의 지하수개발공 중 절대수위가 해수준면 이하가 되는 지하수 관정을 나타낸 것으로 동부지역이 D-140(김녕), D-69(수산), D-152(상도), F-32(표선), 등 11개공이며, 서부지역은 D-9(두모), D-56(신도), D-86(고산) 등 13개공이고, 북부지역은 D-141(애월), D-163(신흥) 등 3개공으로 이들 지역에서 갈수기의 과잉양수때는 이미 해수침입이 발생하였거나 혹은 해수가 침입할 위험부담이 있는 관정으로 지속적인 지하수 수위 및 수질감시가 요망되는 지역이다. 이러한 증거로는 절대수위가 해수면 이하가 되는 D-69(수산), D-140(김녕), D-152(상도), D-158(표선), W-15(난산), D-182(수원), D-9(두모) 등의 관정에서 염소이온 함량이 150ppm을 초과하고 있어 과잉양수에 의한 담수 lens체의 수축으로 해수침입의 개연성을 뒷받침 해주고 있다.

Fig. 2는 캘리포니아 Manhattan Beach의 해안지역 지하수의 과잉양수로 인해 절대수위가 해수준면 이하로 하강된 상태로 해수가 담수 lens내로 침입한 예를 나타낸 그림이다(Todd, 1980).

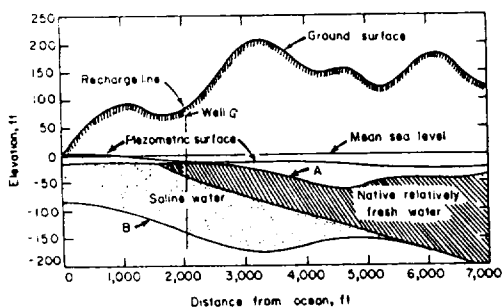


Fig. 2. Sea water intrusion at Manhattan Beach, Calif, prior to recharge A—upper boundary of aquifer; B—lower boundary of aquifer (after Laverty and van der Goot).

이처럼 해수가 침입하여 오염된 지하수를 원래의 부존상태로 유지하기 위하여는 오랜 기간과 경비가 필요하나 일단 오염된 지하수는 담수 lens체에 침입한 해수가 곳곳에 그냥 남아 있거나 점이대가 두터워져 식수로도 사용하기 불가능한 것으로 조사되었다. 전술한 바와 같이 지하수위 자료는 지하수 포장체의 규모와 대수층의 변동에 대한 정량적인 예측의 직접적인 지표가 되므로 수위자료를 근거로 채수량 조절, 채수시간대 조절 및 수역별 지하수개발 한계량을 설정할 수 있다.

해안과 접하고 있는 해안지역 대수층내의 지하수위는 조석 간만의 영향에 따라 정현곡선(Sine curve)을 그리며 운동하게 된다. 따라서 섬지방에서의 조석 간만의 영향에 따라 지하수 자연수위에 미치는 영향을 파악하는 것은 담수체와 해수가 혼합된 점이대를 파악하는데 필수 불가결한 것으로 해안지방에서의 지하수 포장체의 규모 및 대수층의 성격과 지하수개발 한계량등을 결정하는데 가장 중요한 요소이다(Robison, 1939).

금번 조사에서는 조석의 영향범위를 검토하기 위하여 Fig. 1과 같이 기저지하수에 관입된 관정 8개지역을 선택하여 해안선에 수직방향으로 각 지역당 3개소씩 선정 총 24개 관정에 대하여 조수위의 영향권을 파악하기 위하여 1993년 8월에 지하수위를 48시간 연속으로 관측하였다.

동 관측결과를 검토해보면 Table 5와 같이 조석간만의 변화가 지하수위의 변화에 영향을 미치는 범위는 신촌지역이 해안지역에서 1.82km까지 수위 변동폭이 0.18~0.08m(Fig. 3), 구좌지역은 해안에서 내륙으로 약 9.5km까지 수위변동폭이 0.24~0.08m(Fig. 4), 성산지역은 해안에서 7.5km까지 수위변동폭이 0.23~0.08m(Fig. 5), 표선지구는 해안에서 3.92km까지 수위변동폭이 0.13~0.07m, 한림지구는 해안에서 3.9km까지 수위변동폭이

0.08 ~ 0.04m로 조석간만의 영향에 따라 자연 수위가 정현곡선(sine curve)을 그리며 운동하고 있음을 확인할 수 있었다.

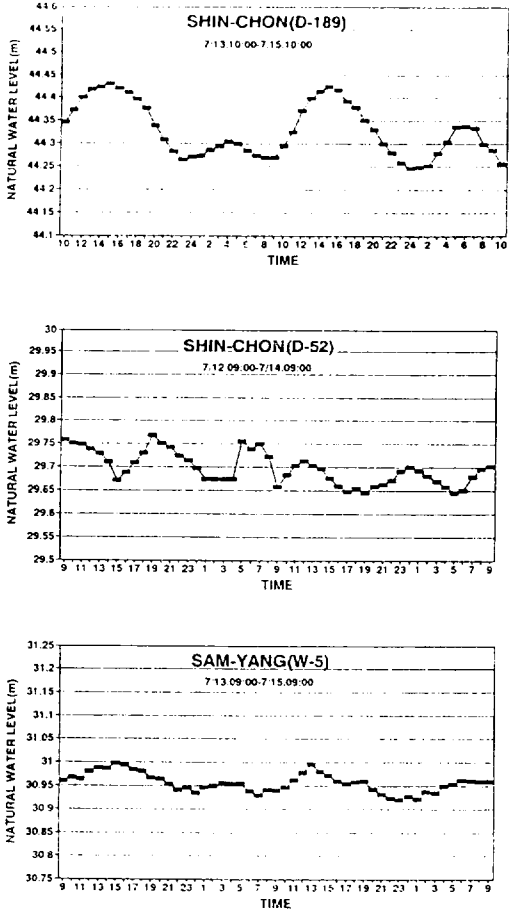


Fig. 3. Fluctuation of groundwater level in Shinchon area.

해안으로부터 약 0.9km 거리에 위치한 신촌 지역(D-189)공에 대한 수위측정자료와 조위 관측자료를 비교 검토한 결과에 의하면 만조시 최고조 시간으로부터 자연수위가 최고점에 이르는 시간까지의 시간차가 가장 길 때가 1992년 6월 4일 2시간 56분이었으며, 가장 짧은 때는 6월 23일에 소요된 시간은 35분으로서 만조시 조석이 자연수위에 영향을 미치는

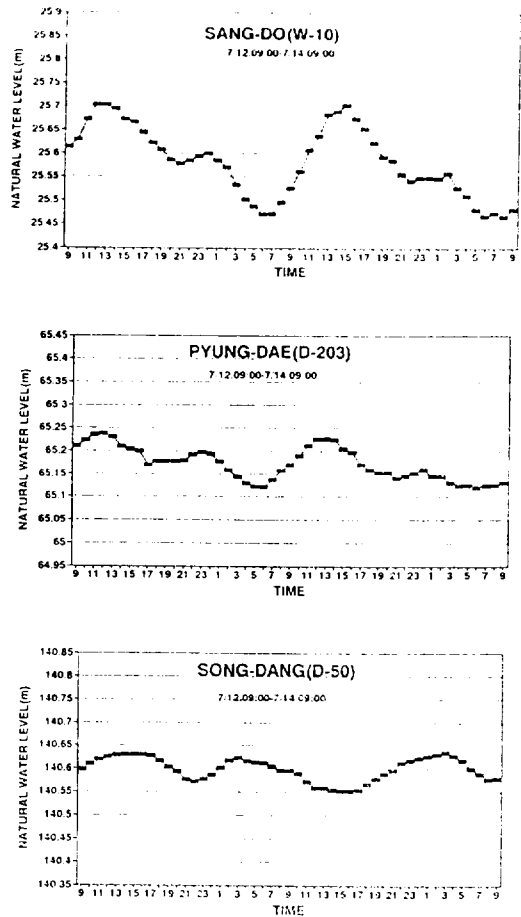


Fig. 4. Fluctuation of groundwater level in Kujwa area.

데 소요되는 시간은 월 평균 1시간 36분으로 나타났으며, 간조시에는 가장 긴 때가 6월 6일의 3시간 21분이고 가장 짧은 때가 6월 28일 1시간 8분으로 평균 2시간 22분으로 나타났다.

조석의 운동이 규칙적으로 반복운동을 할때 조석운동파는 해안에서 내륙으로 전달되며 조석파의 영향은 내륙쪽으로 거리가 멀어짐에 따라 적어지고 전달되는 시간차는 증대된다 하였다(Fujinaka *et al.*, 1980).

본 연구의 결과에서도 해안에서 약 1.9km 떨어진 상도(W-10)의 조석효율은 39.6%로

제주도 지하수의 지역별 수질특성과 수위변화

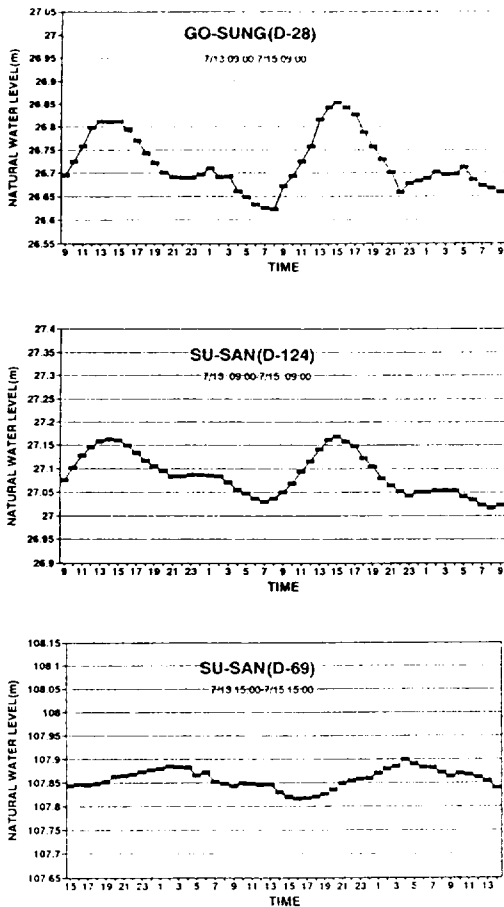


Fig. 5. Fluctuation of groundwater level in Sungsan area.

가장 높고, 이와 내륙쪽으로 약 3.1km거리인 일직선상에 있는 평대지역(D-203)에서는 23.1%로 조석효율이 16.5%나 감소하였다. 이와같은 현상은 성산지구에서도 거의 유사한 현상을 나타내었다.

반면, 대정과 고산지구는 동부지구와 상이하게 Fig. 6에서와 같이 지하수의 자연수위가 조석의 영향을 거의 받지 않고 있음을 확인할 수 있었다.

서부지구 중 해안에서 약 0.9km내륙에 위치한 고산(D-80) 관측정에서는 조석의 자연수위에 미치는 영향을 일일동안의 변동폭이 평

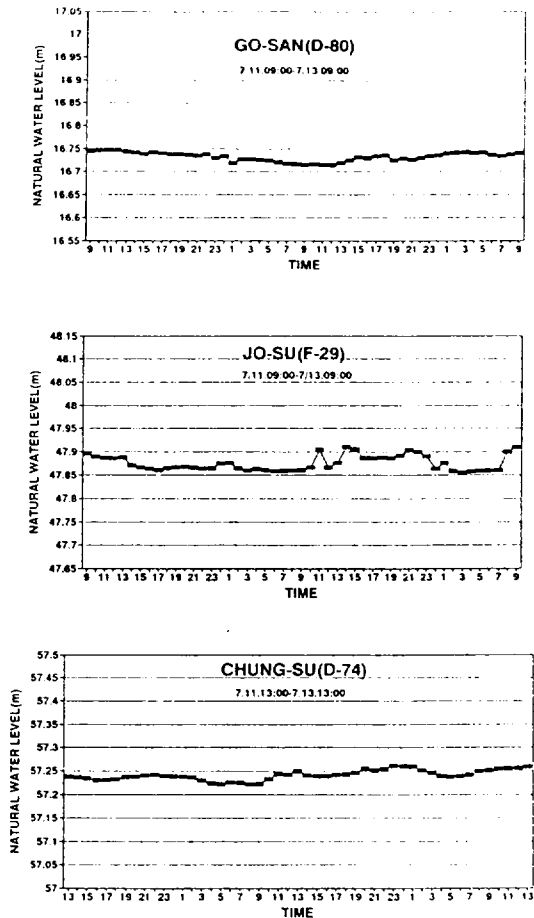


Fig. 6. Fluctuation of groundwater level in Gosan area.

균 6.4cm로서 소폭으로 변화를 나타내고 있어 동부지구와는 지하수의 부존형태가 근본적으로 다름을 암시해주고 있다.

이상의 수위관측 자료를 종합하여 볼때 동부지역 중 구좌와 성산지역의 조석의 영향에 의한 수위 변동폭이 가장 크게 나타나 제주도 동부지역이 서부지역보다 조석의 영향을 매우 크게 받고 있음을 알 수 있다. 또한 이들 조석의 영향은 해안에서 내륙으로 멀어짐에 따라 수위 변동폭이 점차적으로 작아짐을 나타내고 있어 조수의 운동이 규칙적인 반복운동을 할 때 조석운동파는 해안에서 내륙쪽으로 전달되

Table 6. Situation of groundwater lens of east and west region

Region	No.	Well No.	Local name	Ground EL.(m)	Total Depth(m)	Natural water level(m)	Dynamic water level(m)	Static water level(m)	Yield (m ³ /D)	Salinity(ppm)		Distance from sea (m)
										Primary	Secondary	
Eastern	1	D-140	Keum young	30	60	34.5	39	-4.5	2,030	266.7	262.4	1,000
	2	D-124	Soosan 2	25	51	27.3	33	-2.3	1,650	210	198.4	2,100
	3	D-31	Hachun	50	80	39.6	39.9	10.4	1,598	256.9	272.5	2,300
	4	D-148	Toesan	112	140	104	120	8	1,313	106	141	3,500
	5	W-28	Kasee	100.9	104.5	85.2	91	15.7	838	76.4	60	4,800
	6	W-28	Whajeon	74	82	72.4	73	1.6	1,052	105	95	5,600
	7	D-20	Seungub	129.5	143	116.8	116.9	12.7	1,707	67	78.6	6,800
	8	D-42	Deukchun 1	150	174	131	144	19	1,000	57.6	49	7,500
	9	D-50	Songdang	200	200	140	151	60	1,105	55.6	64	10,000
Western	1	D-81	Youngrak 1	20	130	11.8	33	8.2	1,615	34.6	32.4	700
	2	U-42	Kosan	16.8	128	14.1	22.1	2.7	2,500	19	18.6	1,000
	3	D-142	Mooreung	30	110	30	85	0	1,300	22.5	21.7	2,100
	4	D-103	Sindo 4	35	122	35	90	0	2,000	25.3	28.1	2,700
	5	D-147	Mooreung 8	38	114	22	38	16	1,802	15.4	20.6	3,600
	6	D-146	Mooreung 7	56	120	44	795	12	1,503	17.8	20.2	4,300
	7	D-52	Josoo	70	125	39.5	60	30.5	900	24.3	27.2	6,400
	8	D-21	Jeugee	120.8	187	89.2	94	31.6	1,297	21.6	29.4	9,000
	9	D-92	Meungleedong	142	210	87	141.5	55	1,500	12.4	22.6	10,200

고 있으며 이들 조석과의 영향은 내륙쪽으로 거리가 멀어짐에 따라 적어지고 영향이 전달되는 시간차는 증가됨도 확인 할 수 있었다. 따라서 제주도내 해안지역과 특히 동부지역의 기저지하수체에는 강우량의 정도, 조수의 간만차, 인위적인 양수량 등으로 인해 개발 당시보다 지하수 유동에 많은 변화가 발생하고 있으며, 특히 해안부근에 관정을 개발하여 지하수 함양량보다 양수량 또는 배수량이 큰 지하수 공인 경우는 담수 lens체 내의 균형이 파괴됨으로 인하여 염수의 역상승에 의한 염수침입이 부분적으로 발생하고 있음을 알 수 있었다.

이러한 현상은 현재 문제가 되고 있는 동부지역 특히 구좌, 성산지역의 기존 지하수 관정의 염분함량이 높게 나타나고 있는 이유로도 설명될 수 있다. 그러므로 동부지역은 계절별 수위변화를 보면 강우량의 과다에 관계없이 주로 조석의 영향에 따라 수위변화가 일어나고 있으며, G-H원리에 의한 기저지하수체를 이루고 있다. 따라서 이지역의 동수구배와 대수층 수리성 등을 근거로 한 동부지역의 지하수 함양량이 제주도 전체 지하수 부존량의 양

50%에 이르는 풍부한 수자원 부존성을 지니고 있다는 일부 연구자들의 주장은 문제점이 있다고 판단된다.

Table 6과 Fig. 7은 농어촌진흥공사에서 이행한 지하수 개발공을 착정심도별, 지하수위별로 서부지역의 지하수 부존형태의 단면도로 나타낸 것이다.

그 결과 동부지구는 표고에 비해 대수층 두께가 얇으며, 자연수위가 해수준면과 가까와 해안 가까운 곳에서 지하수의 착정심도를 깊게 할 경우 해수가 올라올 수 있는 부존상태를 갖고 있다 하겠다. 그러나 서부지구는 동부지구와는 그 지하수부존 형태가 달라서 표고는 낮으나 함수층이 두터운 이상적인 담수 lens형태를 이루고 있는 관계로 착정심도를 어느정도 깊게 한다해도 해수가 담수대 내로 침입할 위험부담이 적은 편이다. 따라서 섬지방 지하수자원의 염분 함유량 증가를 억제시키기 위하여는 과다한 양수를 삼가해야 하며 아울러 지역별로 광역적인 지하수 수질 및 수위 관리망 설정과 운영을 설치하여 지하수위 및 수질 변화특성, 양수량 등을 그 지역의 조수

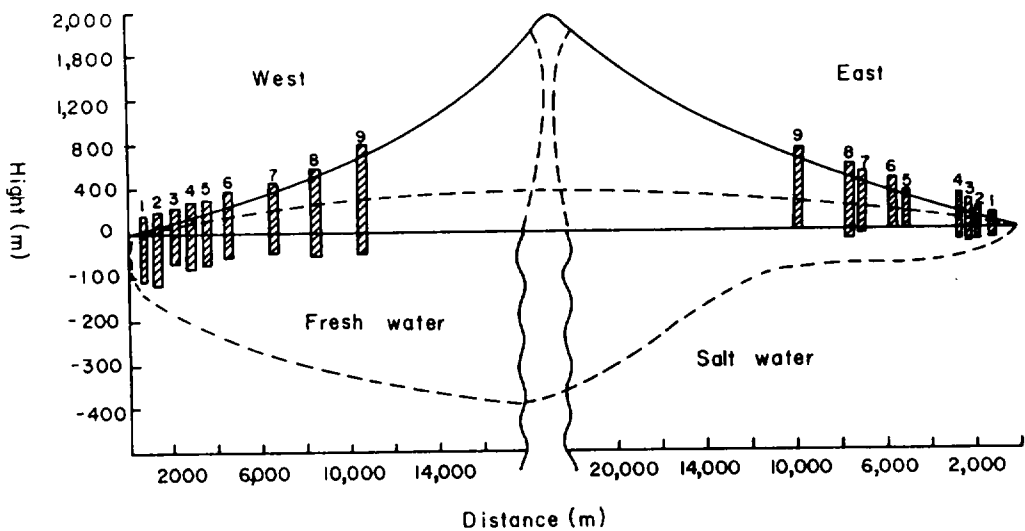


Fig. 7. Fresh-water lens cross-section in east and west region.

위, 강수량, 계절별동과 관련시켜 정기적으로 관측조사 하여야 한다.

한편, 제주도 일원에 대한 지하수위 장기관측은 Table 7과 같이 제주도 북부지구에서 10개소(제주시 : 6개공, 애월 : 2개공, 조천 : 2개공), 동부지구 6개소(구좌, 성산, 표선 : 각각 2개공), 남부지구 10개공(서귀포 : 6개공, 안덕, 남원 : 각각 2개공), 서부지역(한경, 대정, 한림 : 각각 2개공)에서 1993년 4월부터 9월까지 6개월간 실시하였다.

표에서 보는 바와 같이 총 장기 관측공 32개공 중 77%에 해당하는 27개공이 개발 당시보다 수위가 현저히 낮게 떨어졌음을 알 수 있고, 특히 제주시와 서귀포지역과 같은 지하수관정 개발수도 많고 지하수 이용량도 많은 지역은 개발 당시보다 각각 평균 7.5m와 평균 10.8m씩 수위강하가 있었으며, 그 외 애월이 4.0m, 표선 : 3.4m, 남원 : 4.8m, 한경 : 1.9m, 성산 : 0.5m등 지역에 따라 수위강하폭이 심한 편차를 보이고 있다. 그러나 이러한 수위강하현상은 풍수기인 8월~10월 사이에 강수량의 정도에 따라 전체적으로 다소 상승함을 부언해 둔다.

이와 같은 결과는 1989년 농어촌진흥공사에서 실시한 제주도 전역 193개공에 대한 광역 지하수위 측정조사 결과에서도 그간의 제주도의 평균지하수위 강하량이 개발당시보다 전반적으로 1.73m나 하강하였다는 조사 결과와도 잘 일치하고 있다.

지역별 지하수의 수질상태 변화 지하수 자원의 오염 취약성에 대한 평가는 지하수자원 개발이나 제반허가등의 결정과정에서 중요한 자료가 된다. 지표에 산재한 오염물질은 강수에 의하여 지표면에 발달한 틈을 따라 지하대수층으로 유입된다. 제주지역 일대에 분포된 화산암은 수리지질학적으로 지표로부터 오염 취약성이 매우 큰 암석이다. 즉, 본도 지표면에는 빗물의 대수층내로 함량과 부존된 지하

수의 이동특성을 지배하는 각종 2차 유효공극인 수축질리와 미고결 화산쇄설층등이 지표면에 잘 발달되어 있기 때문이다. 그렇기 때문에 파손된 하수관과 폐공된 지하수공을 통해 누출된 하·폐수나 쓰레기 매립장의 침출수 및 골프장, 축산단지 등에서 방류된 하·폐수가 지표면의 습골을 통해 하향으로 침투하여 하부에 보존된 지하수자원을 쉽게 오염시킬 수 있다.

1972년부터 제주도의 지하수 산출특성과 그 부존상태를 규명키 위해 여러 관계기관에서 수질분석을 시행해 온 바 있으나 어디까지나 지하수 개발 측면에만 중점을 두었고 지하수의 오염상태 및 수역별 수질 특성, 오염원의 유형조사, 점 및 비점 오염원의 실태파악 등과 같은 수질보전에 관한 체계적인 조사연구는 매우 미미한 실정이며 단지 문제가 되고 있는 지역에 대한 음용수의 수질기준 적격여부 판단을 위해 몇몇 연구기관에서 간헐적으로 수질분석만 시행하고 있는 실정에 있다.

대체적으로 개발초기에 설치한 본도 지하수관정의 수질은 모두 음용수 기준에 적합한 매우 양호한 수질이였다. 그러나 1992년 현재 본도내 지하수 개발 관정은 약 3,170개소로 무분별하게 개발하기에 이르렀고 급기야는 제주도의 동부 일부지역은 내륙부 6km지점까지 염소함량이 크게 증가하여 심지어 농업용수로도 이용하기에 불가능한 오염현상을 유발케 되었다. 따라서 본 연구는 Fig.. 8과 Table 8에서와 같이 1983~1993까지 제주도 전역을 대상으로 여러기관에서 실시한 수질분석자료를 수집하여, 제주시지역 17개공, 애월지역 13개공, 한림지역 8개공, 한경지역 13개공, 대정지역 5개공, 안덕지역 5개공, 서귀포지역 11개공, 남원지역 6개공, 표선지역 5개공, 성산지역 10개공, 구좌지역 16개공, 조천지역 5개공, 총 114개공에 대한 수질성분 중 오염인자의 중요한 요소인 NO_3^- -N, Cl^- , SO_4^{2-} 성분들의 지하수 개발

Table 8. Annual variation of $\text{NO}_3^- - \text{N}$, Cl^- , SO_4^{2-} component in Cheju groundwater

Region	Yearly component (No. of wells)	1983	1985	1989	1990	1991	1992	1993
		Cheju	$\text{NO}_3^- - \text{N}$ (ppm)	1.4 (1)	1.08 (3)	0.33 (2)	0.85 (1)	1.29 (10)
	Cl^- (ppm)	7.3 (1)	10.0 (3)	14.2 (2)	12.2 (1)	20.45 (10)	27.93 (16)	31.36 (16)
	SO_4^{2-} (ppm)	— (1)	2.02 (3)	2.0 (2)	2.4 (1)	5.46 (10)	6.62 (16)	10.60 (16)
Aewol	$\text{NO}_3^- - \text{N}$ (ppm)		0.34 (2)	1.89 (11)	2.85 (2)	2.8 (1)	4.12 (13)	5.25 (13)
	Cl^- (ppm)		11.15 (2)	12.58 (11)	12.85 (2)	18.4 (1)	17.49 (13)	21.02 (13)
	SO_4^{2-} (ppm)		— (2)	2.11 (11)	3.25 (2)	6.6 (1)	5.18 (13)	7.12 (13)
Hallim	$\text{NO}_3^- - \text{N}$ (ppm)		0.82 (2)	1.55 (2)	2.15 (2)	3.47 (3)	3.69 (8)	5.6 (8)
	Cl^- (ppm)		13.0 (2)	15.8 (2)	17.2 (2)	40.73 (3)	34.04 (8)	38.05 (8)
	SO_4^{2-} (ppm)		0.63 (2)	2.85 (2)	1.5 (2)	7.57 (3)	10.63 (8)	13.85 (8)
Hanyong	$\text{NO}_3^- - \text{N}$ (ppm)	0.48 (2)	0.42 (1)	2.55 (2)	5.8 (3)	6.91 (7)	7.01 (12)	9.13 (13)
	Cl^- (ppm)	15.75 (2)	16.4 (1)	20.03 (2)	23.6 (3)	24.06 (7)	23.84 (12)	30.77 (13)
	SO_4^{2-} (ppm)	4.1 (2)	1.11 (1)	2.85 (2)	8.33 (3)	7.69 (7)	7.43 (12)	11.35 (13)
Taejeong	$\text{NO}_3^- - \text{N}$ (ppm)					0.2 (1)	3.09 (5)	8.06 (5)
	Cl^- (ppm)					8.5 (1)	15.84 (5)	20.52 (5)
	SO_4^{2-} (ppm)					— (1)	10.68 (5)	14.28 (5)
Anduk	$\text{NO}_3^- - \text{N}$ (ppm)	0.43 (2)			0.4 (1)	3.7 (3)	1.87 (3)	7.18 (5)
	Cl^- (ppm)	18.5 (2)			10.0 (1)	14.63 (3)	14.3 (3)	21.98 (5)
	SO_4^{2-} (ppm)	0.22 (2)			6.0 (1)	5.7 (3)	6.82 (3)	12.48 (5)

제주도 지하수의 지역별 수질특성과 수위변화

Table 8. Continued.

Region	component (No. of wells)	Yearly						
		1983	1986	1989	1990	1991	1992	1993
Sogwi po	NO ₃ ⁻ -N (ppm)	0.11 (3)	0.85 (2)		0.86 (4)	2.18 (4)	3.61 (11)	5.12 (11)
	Cl ⁻ (ppm)	7.73 (3)	9.4 (2)		8.43 (4)	11.03 (4)	11.36 (11)	13.45 (11)
	SO ₄ ²⁻ (ppm)	- (3)	3.3 (2)		0.83 (4)	1.64 (4)	4.52 (11)	5.49 (11)
Region	component (No. of wells)	1983	1985	1989	1990	1991	1992	1993
Nam won	NO ₃ ⁻ -N (ppm)			2.3 (2)	0.6 (2)	2.1 (3)	3.92 (6)	7.3 (6)
	Cl ⁻ (ppm)			12.2 (2)	11.35 (2)	6.7 (3)	13.05 (6)	15.52 (6)
	SO ₄ ²⁻ (ppm)			0.3 (2)	2.2 (2)	3.53 (3)	2.93 (6)	3.9 (6)
Region	component (No. of wells)	1983	1984	1985	1990	1991	1992	1993
Pyoson	NO ₃ ⁻ -N (ppm)	0.03 (2)	0.1 (2)	0.29 (2)	0.5 (3)	2.1 (1)	1.21 (5)	2.08 (5)
	Cl ⁻ (ppm)	18.6 (2)	19.5 (2)	19.25 (2)	141.7 (3)	12.4 (1)	115.66 (5)	175.08 (5)
	SO ₄ ²⁻ (ppm)	- (2)	2.7 (2)	- (2)	21.17 (3)	2.8 (1)	16.6 (5)	27.14 (5)
Region	component (No. of wells)	1983	1985	1989	1990	1991	1992	1993
Sungsan	NO ₃ ⁻ -N (ppm)	0.25 (2)	0.1 (1)	1.59 (6)		1.35 (3)	2.56 (8)	4.38 (10)
	Cl ⁻ (ppm)	115.75 (2)	40.1 (1)	61.8 (6)		59.2 (3)	79.91 (8)	93.65 (10)
	SO ₄ ²⁻ (ppm)	10.35 (2)	2.61 (1)	4.55 (6)		9.20 (3)	14.43 (8)	16.2 (10)
Kujwa	NO ₃ ⁻ -N (ppm)	0.13 (2)	0.13 (4)	1.2 (2)	0.86 (4)	1.0 (4)	1.49 (15)	2.61 (16)
	Cl ⁻ (ppm)	85.55 (2)	51.98 (4)	107.75 (2)	204.83 (4)	157.45 (4)	127.95 (15)	140.03 (16)
	SO ₄ ²⁻ (ppm)	2.47 (2)	4.58 (4)	11.95 (2)	24.79 (4)	16.18 (4)	16.2 (15)	23.77 (16)
Cho chon	NO ₃ ⁻ -N (ppm)	0.21 (2)	0.52 (1)			2.4 (1)	2.0 (5)	5.0 (5)
	Cl ⁻ (ppm)	15.17 (2)	37.2 (1)			11.0 (1)	14.24 (5)	17.48 (5)
	SO ₄ ²⁻ (ppm)	1.35 (2)	1.9 (1)			4.2 (1)	8.12 (5)	15.9 (5)

증가경향을 나타냈다.

대정지역은 1991년 이전 자료가 없는 관계로 그간의 수질 변화상태를 알 수 없으나 이곳 지하수의 오염상태도 개발초기보다 최근에 와서 점차 증가하고 있음을 알 수 있으며, 질산성질소는 1992년보다 1993년도가 약 2.6배 증가하였고, 식수 기준치를 초과한 관정은 D-113공이다. 염소이온함량도 개발초기보다 꾸준히 증가하고 있음을 알 수 있으며, 황산이온은 1991년에는 배경수질을 보이다가 1992년에는 약 10배로 높은 증가현상을 보였다.

일반적으로 NO_3^- 가 지하수 중에서 높게 검출되는 원인으로서는 축산시설의 분뇨 및 오폐수, 유기질 비료 및 퇴비, 정화조의 누출, 질소질 화학비료, 생활하수 및 부패된 음식물 등으로부터 생겨나는 유기질 질소가 지하로 침투됨으로써 비롯되는 것으로 알려져 있다. 이러한 오염원으로부터 발생한 유기질소의 변환과 운명은 지하로 침투하는 질소의 형태와 다양한 생물학적 변환에 따라 좌우되는데 대체로 유기질소는 $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$ 순의 변환과정을 밟는다. 따라서 지하수 중의 농도는 오염원으로부터 거리가 멀어질수록 점진적으로 증가하는 현상을 나타내어 하류구배에서 높은 농도의 NO_3^- 가 검출되게 된다(Aller et al., 1987; Junge, 1963). 서부지역 일부 관정들의 NO_3^- 성분은 동부지역에 비해 높은 농도를 나타내고 있을 뿐만 아니라, 다우기 동안이 갈수기 보다 높은 농도를 나타내고 있어 강우의 영향을 매우 민감하게 받고 있는 것으로 나타났다. 아울러, 상류구배지역 보다는 하류구배에 위치해 있는 관정들이 높은 농도를 보이고 있으며, Cl^- 성분과도 비례적인 변화패턴을 보여주고 있다. 이와같은 현상은 이 지역에 분산되어 있는 중·소규모의 양돈장으로부터 배출되는 오폐수와 축산부산물을 이용한 유기질퇴비 등에 함유된 질소성분들이 강우시 투수성 지질구조를 통하여 빗물과 함께 지하

수체로 유입됨으로써 비롯되고 있는 것으로 사료된다. 그렇지만, NO_3^- 성분이 축산분뇨 및 오폐수 또는 인분에 의해 오염된 경우에는 지하수 중에서 비교적 높은 농도의 NO_3^- 와 함께 배변성 대장균이 검출되어야 하는데 본 연구에서는 미생물학적 연구를 실시하지 않았기 때문에 오염원을 단정할 수는 없다.

안덕지역, 서귀포지역 및 남원지역은 Table 8과 같다. 안덕지역은 질산성질소 함량치가 1983년도보다 1991년에 와서는 약 3.8배, 1993년도에는 16배 이상으로 증가하는 현상을 보였다. 식수 기준치를 초과한 관정은 총분석공 5공 중 2개공(D-49, U-49)이었다. 염소이온은 1993년의 다소 증가현상을 제외하고는 년도별 뚜렷한 경향을 볼 수 없으며, 황산이온은 1983년도보다 1991년 이후에는 약 37배나 증가하였다. 서귀포지역은 질산성질소 함량치가 1983년도보다 1990년에는 7.8배, 1993년도에는 무려 47배나 증가하였고 식수 기준치를 초과한 관정은 총 분석공 11공 중 2개공(D-169, F-1)이었다. 염소이온과 황산이온 함량치도 1983년도보다 1990년 이후에는 각각 1.4배와 5.5배씩 증가하였다. 남원지역은 질산성질소 함유량이 1989년도보다 1992년 이후에는 약 2.4배 증가하였고, 식수 기준치를 초과한 지하수 관정은 2개공(D-5, W-7)이었으며, 염소이온과 황산이온 함량은 1989년도보다 1992년 이후에 와서는 각각 1.8배, 11.4배나 증가하였다. 특히 이들 남부지역의 상기 수질성분들은 갈수기인 11월, 12월보다 풍수기인 8월, 9월에 높은 농도를 나타내고 있어 제주도 남부지역의 지하수체의 수질변동 양상은 강우의 영향을 민감하게 받고 있음을 알 수 있었다.

표선지역, 성산지역 및 구좌지역은 Table 8과 같이 수질성분이 본 도의 서부나 남부지역보다 다른 양상을 나타내며, 특히 이지역 지하수에는 염소이온함유량이 타지역 지하수보다 높다는 점이다. 표선지역은 질산성질소가 1983

년보다 1990년 이후에 와서는 약 16.6배 이상 증가하였으나 음용수 기준치를 초과한 관정은 없고 염소이온은 1983년보다 1990년 이후에는 약 6배 증가하였으며, 식수 기준치를 초과한 관정은 2개공(D-158, W-12)이었고, 황산이온도 개발초기보다 증가추세를 보였다. 성산지역은 질산성질소가 1989년보다 1992년이 약 1.6배 증가하였고, 식수 기준치를 초과한 관정은 W-9공이며, 염소이온도 1989년보다 1992년이 약 1.3배로 약간 증가현상을 보였으며, 식수 기준치를 초과한 지하수 공은 3개공(D-28, D-54, W-15)이었다. 구좌지역은 질산성질소가 1985년보다 1990년 이후에는 약 6.6배, 염소이온은 약 1.8배 증가했으며, 식수 기준치를 초과한 관정은 7개공(D-16, D-19, D-140, D-200, W-10, W-19, F-23)으로 총 분석공의 약 44%를 차지할 정도로 제주도 동부지역의 지하수는 전반적으로 염소이온이 타 지역에 비해 월등히 높은 함량치를 보였고, 음용수 수질 기준치를 초과한 관정도 상대적으로 많은 편이다.

이는 제주도 동부지역의 지하수의 동수구배가 제주지역에서 가장 완만하고, 지하수위 등고선도 해수면과 거의 근접하며, 수리지질학적으로 서귀포층의 결층으로 지하수를 받쳐줄 만한 차수층이 없으므로 담수 lens체의 두께가 G-H원리에 의거한 두께보다는 얇은 두께의 지하수 부존형태를 하고 있는 관계로 보고있다. 따라서 동부지역 지하수의 고염분함량은 담수 lens가 얇은 이 지역에서 장기간의 지하수 채수로 인해 염수의 역상층(upconing)에 의한 해수침입으로 해석된다.

조천지역도 질산성질소가 1983년보다 1992년 이후 약 4.3배 증가하였고 염소이온과 황산이온도 각각 1.5배와 6배로 각각 증가하였다.

이상에서 살펴본 바와 같이 제주도 전지역의 수질 오염상태가 개발초기보다 시간이 지남에 따라 그 농도가 계속 뚜렷이 증대되고

있음을 잘 입증해주고 있다. 이는 무엇보다도 제주도의 관광진흥 정책에 따라 급속히 신도시화 하면서 1989년 이후 연평균 280여개가 개발되는 비체계적인 지하수공들이 급격히 증가함에 따라 이지역의 지하수 함양량에 비하여 과다한 양수에 기인할 뿐만 아니라 상류구배구간에 위치하는 양돈 및 목축장에서 배출되는 가축분뇨, 골프장에서 살포되는 비료 및 맹독성 농약, 대형건물등에서 배출되는 오·폐수가 파손된 하수구나 지표면에 발달된 송골을 통해 하향으로 이동하여 그 하부대수층을 오염시키기 때문으로 사료된다. 이는 한(1991)이 제시한 1989년도 이후에 측정된 염소이온 함량 자료에 의하면 1989년도 이전에 비하여 증가된 지하수관정수가 94%에 해당하며, 1979년~1980년 사이 제주시 일원의 용천수와 31개의 취수정에 대한 수질검사 자료에 의하면, 암모니아성 질소와 일반세균이 검출된 곳이 20%에 해당되는 6개소였다. 또한 1982년 제주도 전역 37개소의 취수정에 대한 수질검사 결과 대장균으로 오염된 곳이 46%에 해당하는 17개소였으며, 1989년 제주시, 서귀포시 및 인구밀집지역의 취수정 10개소의 수질시험 결과 질산성질소가 10ppm이상 검출된 곳이 4개소였고, 일반세균과 대장균이 검출된 곳이 8개소로 나타났다는 등의 연구결과와도 잘 일치하고 있다.

요 약

335개 분석공 중 표고별 내역을 보면 73.2%에 해당하는 245공이 표고 100m이하에 개발이 집중되어 있고, 100m이상의 개발공은 90공에 불과하다.

표고별 채수량은 50m이하에서는 1,874.1m³/일, 50.1~100m까지가 1,400.9m³/일, 100.1~150m가 1,194.7m³/일, 150m이상에서 1,061.8m³/일로 표고가 높아짐에 따라 양수량이 전반적으로 감소한다.

본도의 지하수 개발공중 절대수위 해수준면 이하가 되는 지하수 관정으로서는 동부지역이 11개공, 서부지역은 13개공, 북부지역은 3개공으로 이들 공에서는 과잉양수에 따라 해수가 침입할 위험부담이 있는 관정이다.

조석간만의 변화가 지하수위의 변화에 영향을 미치는 범위는 신촌지역이 해안에서 1.82km까지 수위변동폭이 0.18~0.08m, 구좌지역은 해안에서 내륙으로 약 9.5km까지 수위변동폭이 0.24~0.08m, 성산지역은 해안에서 7.5km까지 수위변동폭이 0.23~0.08m, 표선지역은 해안에서 3.92km까지 수위변동폭이 0.13~0.07m, 한림지역은 해안에서 3.9km까지 수위변동폭이 0.08~0.04m로 조석간만의 영향에 따라 자연수위가 정현곡선을 그리며 운동하고 있고, 고산지역과 대정지역은 자연수위가 조석의 영향을 미약하게 받고 있고 주로 강수량에 따라 지하수위가 변동하고 있다.

32개 지하수공에 대한 월 2회 6개월 동안 장기수위관측 결과에 의하면 이중 77%에 해당하는 27개공이 개발당시보다 수위가 현저히 하강하였다. 제주시와 서귀포지역은 개발당시보다 각각 평균 7.5m와 10.8m 씩 수위강하가 있었으며, 애월이 4.0m, 표선 3.4m, 남원 4.8m, 한경 1.9m, 성산 0.5m 등 지역에 따라 수위강하폭이 심한 편차를 보이고 있다. 그러나 이러한 수위강하 현상은 일부 대도시의 관정을 제외하고는 풍수기인 8월~10월 사이에 전체적으로 상승하였다.

동부 및 서부지구의 지하수부족 형태로서 동부지구는 표고에 비해 담수 lens층이 얇은 관계로 자연수위가 해수준면과 가까와 해안 가까운 곳에서 지하수 착정심도를 깊게 할 경우 해수가 올라올 수 있는 부존형태를 이루고 있는 만치 성산읍, 구좌읍 및 표선면 지역에서는 지하수 개발시 해수오염을 고려하여 착정심도 및 양수량 결정등에 각별히 유의하여야 할 것이다. 반면 서부지구는 그 지하구조가 달

라서 표고는 낮으나 대수층이 두꺼운 이상적인 담수 lens형태를 이루고 있어 착정심도를 어느정도 깊게 해도 해수가 침입할 위험부담이 적은 편이다.

1983년부터 1993년까지 수질분석자료 중 오염인자의 중요한 요소인 NO_3^- , N , Cl^- , SO_4^{2-} 성분들이 그간의 변화 추세는 질산성질소 성분은 제주시지역은 1983년보다 1991년 이후는 약 1.6배, 애월지역은 약 2.5배, 한림지역은 4.6배, 한경지역은 약 15배, 안덕지역은 약 3.8배, 서귀포지역은 7.8배, 표선지역은 약 16.6배, 구좌지역은 약 6.6배, 조천지역은 약 4.3배씩 증가하였고, 염소이온함량은 제주시지역은 약 1.5배, 한림지역은 약 2.5배, 한경지역은 약 1.6배, 서귀포지역은 약 1.4배, 남원지역은 약 1.8배, 표선지역은 약 6배, 구좌지역은 약 1.8배, 조천지역은 약 1.5배씩 그 농도가 꾸준히 증대되고 있다.

참 고 문 헌

- 고기원, 고용구, 김성홍, 오상실, 박원배, 윤선, 1992. 제주도 동부지역의 지하지질구조와 지하수위 변동 및 수질 특성에 관한 연구, 제주도 보건환경연구원보. 3:15-43.
- 고기원, 박원배, 윤정수, 고용구, 김성홍, 신승중, 송영철, 윤선, 1993. 제주도 동·서부지역의 지하수 부존형태와 수질특성에 관한 연구, 제주도 보건환경연구원보. 4:191-222.
- 김천수, 1992. 제주도 지하수 환경의 오염취약성, 대한광산지질학회 제8회 학술강연 p. 13-28.
- 농어촌진흥공사, 1973. 제주도와 OAHU도의 지하수, p. 43-162.
- 농어촌진흥공사, 1989. 제주도 지하수 장기개발계획 보고서, p. 63-124.
- 농어촌진흥공사, 1992. '92 장기관망 설치 및 조사보고서, p. 4-140.

- 농어촌진흥공사, 1993. '93 장기관망 설치 및 조사보고서, p. 4-182.
- 박원배, 1993. 제주도 지하수의 수위변동에 관한 연구, 제주대학교 대학원 석사학위논문, p. 1-48.
- 유장걸, 정창조, 박양문, 유기중, 안종성, 1985. 동위원소를 이용한 제주지역 수자원에 관한 연구, 제주대학교 방사능이용연구소 연구보고, 1:35-56.
- 유장걸, 정창조, 안종성, 송성준, 1986. 동위원소를 이용한 제주지역 수자원에 관한 연구, 제주대학교 방사능이용연구소 연구보고, 2: 29-42.
- 유장걸, 안종성, 정창조, 송성준, 1989. 동위원소를 이용한 제주지역 수자원에 관한 연구, 제주대학교 방사능이용연구소 연구보고, 4:35-56.
- 윤정수, 1986. 제주도 동부지역 지하수의 고염도 요인에 관한 연구, 제주도 연구, 3:43-53.
- 윤정수, 박상운, 1994. 지하수자원의 농업용수 활용방안과 수질보전, 제주대학교 제주도 수자원 연구회 학술발표회, p. 60-96.
- 최순학, 김영기, 1989. 제주도 지하수의 수질특성, 대한지질학회, 25(3):230-238.
- 한국수자원공사, 1993. 제주도 수자원 종합개발계획 수립보고서, IV-3-Ⅸ-33.
- 한정상, 1991. 제주도 환경보전 종합대책, 수질오염 방지 장기계획을 중심으로, 환경처, p. 71-239.
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J. H., Petty, R. J., and Hackett, G., 1987. Drastic : A standardized system for Evaluating Groundwater pollution using Hysrogeologic Setting U. S. Environment Protection Agency : 455-475.
- Bredehoeft, J. D., 1967. Response of well-aquifer system to earth tides, Jour. Geophys. Res., 72 : 3075-3087.
- Fujinaka, Y. H., Pang, D. Q. and Jubinsky, T. R., 1980. State of the groundwater resources of southen Oahu, Board of Water Supply City and County of Honolulu : 1-80.
- Junge, C. E., 1963. Air chemistry and Radioactivity, New York Academic press, : 38-389.
- Robison, T. W., 1939. Earth tides shown by fluctuations of water levels in well in New Mexicos and Iowa, Trans. Amer. Grephy Union, 20 : 656-666.
- Todd, D. K., 1980. Groundwater hydrology, second edition, John wiley & Sons, : 235-296.