

제주도 지하수자원의 최적 개발가능량

Sustainable Yield of Groundwater Resources of the Cheju Island

한정상 (Jeongsang Hahn)* · 한규상 (Kjusang Hahn)* · 김창길 (Changkil Kim)**

김남중 (Namjong Kim)*** · 한 찬 (Chan Hahn)****

요 약 : 제주도 지하수자원의 산출특성을 규명키 위하여 총 455개 기존관정의 자료를 전산처리하여 지역 별 대수성 수리특성을 규명하였다. 제주도는 주로 현무암내에 협재된 화산쇄설층, crinker층과 현무암의 1 및 2차 유효공극이 주 대수대의 역할을 하며 이들은 기저, 준기저 및 상위대수층으로 구성되어 있다. 본도 대수층의 평균 투수량계수는 29,300m²/일이며 평균 저유계수는 0.12로써 자유면 대수층을 이루고 있다. 종합적인 물수지 분석을 실시한 바 본도에 부존된 지하수 부존량은 약 440억m³이고, 년평균 강수량은 33.9억 m³으로써 이중 하천유출량은 6.38억m³/년이며, 증발산량은 12.56억m³/년(37%)이고 지하수함양량은 년평균 강수량의 44.1%에 해당하는 14.94억m³이다. 본도에 부존된 지하수의 최적 개발가능량(sustainable yield)을 각 지역별로 정량적으로 계산한 결과 그 양은 함양량의 41%에 해당하는 6.2억m³/년(1,689,000 m³/일) 정도였으며 잔여 8.74억m³/년(2,404,000m³/일)은 해안이나 해저용천의 형태로 유출된다. 특히 최근에 실시한 심부 시추조사 자료에 의하면 EL-120±68m 부근에 저투수성 해성 퇴적층(일명 세화리층)이 분포되어 있는 것으로 판명되었으며 과거 서귀포층군으로 알려진 저투수성 퇴적층이 북서부와 서부 일원에서 EL-70m 부근에 널리 분포되어 있어 서귀포층군과 세화리층의 명확한 구분이 필요하다. 만일 이러한 저투수성 퇴적층이 제주도의 기저층을 이루는 경우 제주도 내에 부존된 지하수는 주로 준기저 지하수일 것이며 이는 제주도 지하수의 산출특성에 결정적인 영향을 미칠 것이다.

Abstract : The Hydrogeologic data of 455 water wells comprising geologic log and aquifer test were analyzed to determine hydrogeologic characteristics of the Cheju island. The groundwater of the Cheju island is occurred in unconsolidated pyroclastic deposits and crinker interbedded in highly jointed basaltic and andesic rocks as high level, basal and parabasal types under unconfined condition. The average transmissivity and specific yield of the aquifer are at about 29,300m²/day and 0.12 respectively. The total storage of groundwater is estimated about 44 billion cubic meters. Average annual precipitation is about 3,390 million m³ among which average recharge is estimated for 1,494 million m³ being equivalent 44.1% of total annual precipitation with 638 million m³ of runoff and 1,256 million m³ of evapotranspiration. Based on groundwater budget analysis, the sustainable yield is about 620 million m³(41% of annual recharge)and the rest is discharging into the sea.

The geologic logs of recently drilled thermal water wells indicate that very low-permeable marine sediments (Sehwa-ri formation) composed of loosely cemented sandy silt derived from mainly volcanic ashes at the 1st stage volcanic activity of the area is situated at the 120±68m below sea level. Another low-permeable sedimentary rock called Seogipo-formation which is deemed younger than the former marine sediment is occurred at the area covering north-west and western part of the Cheju island at the ±70m below sea level.

If these impermeable beds are distributed as a basal formation of fresh water zone of the Cheju island, the most of groundwater in the Cheju island will be para-basal type. These formations will be one of the most important hydrogeologic boundary and groundwater occurrences in the area.

* (주)한서엔지니어링(서울시 강남구 역삼동 773-4)
** (주)유신설계공단(서울시 강남구 역삼동 832-40)
*** 한국수자원공사(대전직할시 대덕구 연축동 산 6-2)
**** 서울대학교 대학원(서울시 관악구 신림동 산 56-1)

지하수 부존과 산출특성

지하수의 부존특성

대수층: 제주도는 현무암류, 조면암질 안산암류, 조면암류 등의 화산암류와 서귀포층, 성산층, 신양리층과 같은 화성기 원의 퇴적암류와 기생화산 등으로 구성되어 있으며 이중 현 무암이 전도의 90% 이상을 차지한다.

제주도는 크게 4단계의 화산활동에 의해서 형성된 것으로 추론된다. 제주도를 형성한 화산활동 단계를 암질의 차이, 계단상 및 용암류 선단의 지형상의 특징, 고도양의 존재, K/ Ar 연대 측정 자료의 종합하면 Table 1과 같이 구분할 수 있다(이동영 외, 1993).

최근 동부지역 일대에서 시행한 심부시추 결과에 의하면 해수면하 50m~160m에서부터 하부에 저투수성 미고결 퇴적층(소위 세화리층)이 넓게 분포되어 있는 것으로 밝혀지고 있다(Figure 1). 미고결 퇴적층은 해수면하 200-300m부터 분포된 백악기 응회암을 피복하고 있으며 그 층후는 89m~238m에 이르고 있다. 이 지층은 화산활동에 의한 쇄설성 화산회사가 바다에 퇴적된 지층으로 해석되고 있다(이동영 외, 1993).

본도의 화산암류중에서 투수성이 가장 양호한 암석은 장석감람석현무암(FOB)과 장석취석감람석현무암(FAOB)이며 이들은 보통 3m내외의 암층으로 구성되며 각 암층간에는 화산쇄설층과 crinker를 협재하고 있다. 화산암층 내의 주대수

층은 용암류 사이에 협재된 화산쇄설층과 crinker로써 그 두께는 화산암의 20%에 해당한다(농진공, 1989, 1970-1992). 또한 화산암 내에 발달된 균열, 절리와 기타 불연속면들은 지하수의 하방유동을 쉽게 한다. 남북해안 지역에 분포된 피상의 조면암류는 투수성이 낮아 대수층으로서의 역할은 낮으나 암층간의 풍화면상부 화산쇄설층은 좋은 대수층을 이루고 있다.

또한 1970년초 이래로 제주도에서 시행해 온 지하수개발 시추자료에 의하면 서귀포층으로 명명된 퇴적층이 본도 지표면 하부에 폭넓게 분포되어 있는 것으로 기재되어 있다. 퇴적층은 일반적으로 상부에 위치한 현무암에 비해 저투수성이므로 본도와 같이 퇴적층이 해수면하에 낮게 형성되어 있을 경우에 퇴적층은 지하수흐름의 Neuman boundary의 역할을 할 수 있으므로 본도 지하수 부존과 흐름의 특성을 지배하는 주요인이 된다(농진공, 1989).

기생화산은 일반적으로 투수성이 높아 지하수체에 미치는 영향은 크지 않을 것이나 규모가 큰 기생화산 부근에서는 국지적으로 지하수위가 높게 형성되는 현상을 보이고 있다(수공, 1993a).

지하수 부존형태: 제주도 지하수의 부존형태는 상위지하수(High level groundwater)와 기저지하수(Basal groundwater)와 준기저지하수(Parabasal groundwater)로 대별할 수 있다.

상위지하수(High level groundwater): 상위지하수는 중산간 지대 및 고지대와 남북부해안지역 전역에 걸쳐 넓은 지역에

Table 1. Geological sequences of Cheju volcanic and sedimentary rocks

Stratigraphic Age	Paleo magnetic age	Sequence of volcanic & sediment rocks			
		Volcanic maturity	Volcanic flow & Rock type	Parasitic volcano	Sedimentation
Recent Pleistocene	10000yrs Upper 0.125Ma Middle	4th stage	Cinder cone	cinder cone	sand dune
			Hanra-san musiolite		
		Baklokdam basalt	0.16Ma		
	0.73a Lower	3th stage	Yongsil Musiolite	Ilchulbong Songac Mts. Suwol-bong	paleo-soil
			Aphanitic augite		
		2nd stage	Seogipo-Hawaiite	Dangsan Dusanbong Yongduam	Seogipo formation
Olivin basalt	0.87Ma				
Paleogene to	Matuyama Reversal Epoch	1st stage	Sanbansan trychite	Dan Hwasoon	Basaltuffaceous sedimentary rock
		Basal augite basalt	Yucheon group(crystalline tuff) granite		

(after won.J.K, Lee.V.Y and Lee.M.W., 1992)

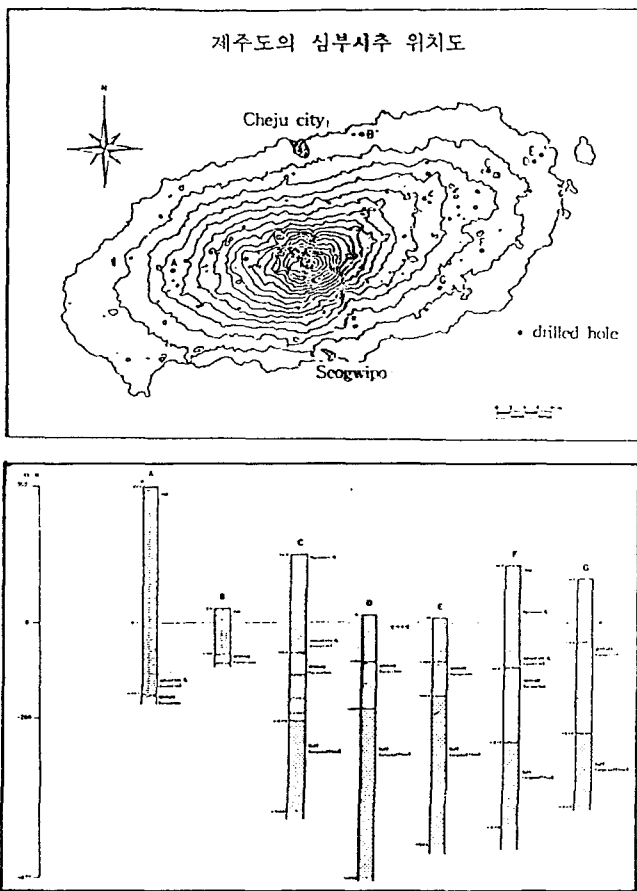


Figure 1. Location and drill log of thermal water wells in Cheju.

분포되어 있다. 상위지하수는 부존상태에 따라 첫째로 비포화대 내에 단속적으로 부존하여 타 대수층과 수리적으로 연결되지 않은 일종의 부유지하수(Perched aquifer)이다. 상위지하수체는 대체적으로 해수와 직접적인 접촉을 갖지 않아 지하수질은 매우 양호하며 불연속 또는 국지적으로 분포하여 그 규모가 크지않아 강수의 함양정도에 따라 담수체의 변화가 심하며 계절적으로도 유량과 수위변동이 크게 발생한다. 따라서 상위지하수체는 동일 지질조건하의 기저지하수체에 비해 그 생산성이 낮다(한정상, 1992).

기저지하수(Basal groundwater): 기저지하수는 동부지역의 조천, 신촌에서 남원지역과 서부지역의 한림, 고산 및 한경수역의 해안선을 따라서 분포되어 있다. 기저지하수는 상위지하수와 달리 담수 lens의 수축현상에 따라 수직 및 수평운동이 일어나게 된다. Dupuit-Gyben-Herzberg(DGH)원리에 의하면 지하수위와 해수면하 담수대의 두께비는 약 1:40이다. DGH 원리는 정적상태를 가정한 것으로 실제로는 담수 lens의 두께가 크고 지하수흐름이 완만한 상태에서는 만족한 결과를 나타내나 해안면에서와 같이 지하수의 수직적인 동수구배가 크거나 또는 수직방향흐름이 클 경우에는 큰 차이를 보인다. 그예로 버뮤다의 DGH비는 1:60(UN, 1989) 정도이다. 담수 lens와 해수는 담수체의 수축과 팽창 그리고 조

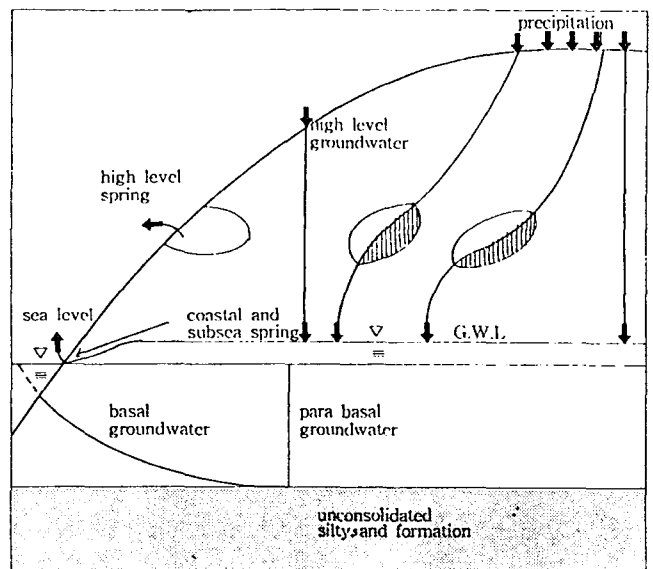


Figure 2. Schematic diagram of the Cheju island groundwater

수의 영향에 의해 해수와 염수가 혼합된 점이대가 발달되어 있다. 점이대 두께는 담수체의 두께가 두터운 상류 구배구간에서는 얇으나 해안에 가까워질수록 두터워지며 해안유출지점에서는 담수체의 전체층이 점이대를 이루기도 한다.

준기저지하수(Para basal groundwater): 준기저지하수는 담수체의 하부경계면이 불투수층 또는 저투수층과 접해 있는 해수와는 직접적으로 접촉하지 않고 있는 담수체이다. 따라서 준기저지하수체는 기저지하수에 비해 DGH원리를 적용할 수 없는 하부의 고정 경계조건을 가지고 있다(BWS, 1982). 준기저지하수체에서 지하수를 개발할 시에는 염수와 담수의 접촉면이 내륙쪽으로 이동되는 것을 고려하여 개발량과 유입량이 평형을 이루도록 해야 한다. 세화리층의 분포 규모로 보아 준기저지하수체는 추후 제주도 지하수자원의 주 공급원이 될 수 있는 지하수체이다.

본도에서 저투수성 퇴적층으로 분류되는 서귀포층의 분포 지역에서 관정 개발 당시의 자연수위와 이번 연구시 측정 한 수위자료와 퇴적층의 표고자료를 요약하면 Table 2와 같다. Table 2에 의하면 서귀포층의 분포심도는 대체로 해안면에서 깊게 분포되어 있고 내륙쪽으로 갈수록 그 해발표고는 높다. 또한 분포깊이도 상당히 단속적이다. 이러한 사실은 과거 서귀포층으로 기재되었던 상당수의 저투수성 퇴적층이 최근에 확인된 세화리층일 가능성이 농후하다.

대체적으로 근래에 제주도 일원에서 실시된 바 있는 7개 공의 심부 시추공굴착 결과에 의하면 제주도 최하위 현무암(OAB 나 FOB)하부에는 모두 저투수성 지층인 미고결 세화리층이 분포되어 있는 것으로 확인되었으며 그 두께는 최소 89m 에서 최대 238m(163.5±74.5m)에 이르고(동서 북부 일원의 7개 공 자료) 그 분포심도는 EL-(120±68)m이다. 상술한 7개공의 심부 시추자료를 살펴보면 특히 동부지역에서 세화리층의 분포심도는 내륙쪽으로 갈수록 깊어지고 반대로 해안쪽으로는 얕은 심도에서 산출된다. 제한된 자료가

Table 2. The elevation of Seogipo formation

Location	Name of watershed	Well No.	Elevation (EL.m)	Depth(m)	Water level(EL.m)		Pumping rate (CMD)	Distance from sea coast(m)	Elevation of Seogipo formation	Remarks
					static	pumping				
West Area	Hankyung	D-103	44.50	12.00	9.50	-45.50	2000	2900	-71.80	Average depth: EL-52.5ms
	Hankyung	D-121	13.00	80.00	1.00	-7.00	2160	1050	-61.00	
	Hankyung	D-196	26.56	102.00	5.56	-25.44	1300	1900	-70.04	
	Hankyung	D-083	21.00	82.00	3.00	1.00	1660	1350	-32.00	Range: EL-32 to -72.8m
	Hankyung	D-134	18.00	85.00	4.50	-10.00	2302	1700	-50.00	
	Hankyung	D-086	15.00	80.00	1.50	0.90	2290	950	-55.00	
	Hankyung	D-171	29.88	80.00	3.88	-3.12	1800	2100	-48.12	
	Hankyung	D-190	16.19	80.00	2.69	-8.81	1900	700	-38.51	
	Hankyung	D-155	17.50	70.00	1.80	-5.30	4400	600	16.80	
	Hankyung	D-079	17.60	85.00	1.50	1.10	2160	700	-59.90	
	Hankyung	D-080	18.00	82.00	2.70	2.40	2440	1000	-56.50	
	Hankyung	D-093	19.50	87.00	6.50	6.00	2590	650	-50.00	
	Hankyung	D-181	19.50	90.00	7.50	5.50	2500	400	-48.50	
	Hankyung	D-123	24.00	100.00	7.00	-39.00	2160	1900	-47.50	
	Hankyung	D-104	20.00	85.00	7.00	-8.00	2500	300	-46.50	
	Hankyung	D-115	18.10	101.00	13.10	-29.90	2030	1000	-37.90	
	Hankyung	D-179	18.00	100.00	8.50	-22.00	2440	1300	-70.50	
	Hankyung	D-151	21.00	79.00	3.50	-20.00	1400	1750	-54.00	
	Hankyung	D-009	11.68	85.00	8.18	-24.92	1754	900	-63.32	
	Hankyung	D-102	10.81	104.00	2.81	-29.19	1400	1200	-61.19	
	Hankyung	D-052	73.32	125.00	33.82	13.32	900	4850	-43.18	
	Hankyung	D-221	44.05	153.00	10.55	-45.95	1000	2500	16.25	
	Hankyung	D-244	83.99	160.00	42.99	-62.01	-	5700	-43.51	
	Hankyung	D-056	42.50	100.00	4.60	-25.00	1500	1900	-45.30	
	Hankyung	D-209	32.50	103.00	5.70	-27.50	1500	1150	-53.70	
	Hanrim	D-128	26.13	82.00	9.73	-25.87	1900	900	-49.87	Average depth:
	Hanrim	D-033	122.50	153.60	16.20	16.05	1180	3100	-1.50	
	Hanrim	D-119	44.29	80.00	3.29	-9.71	1920	1800	-34.71	
	Daejeong	D-198	46.00	105.00	29.00	-26.00	1300	2100	-37.50	Average depth: EL-52.3m
		D-004	78.43	104.00	46.73	19.03	1034	2900	-5.57	
		D-100	43.75	61.00	18.05	3.75	1400	3700	-16.25	
		D-193	35.50	92.00	12.00	-29.50	1700	3000	-54.50	Range: EL-5.57M to 144.8m
D1-99		14.74	70.00	0.74	-5.26	1000	500	-54.76		
D-185		42.50	95.00	19.50	-25.00	2000	4500	-45.50		
D-095		47.50	75.00	27.90	23.00	1710	4400	-24.50		
D-127		47.30	85.50	32.40	30.30	2030	3750	-25.70		
D-197		62.10	100.00	30.10	12.10	1500	4800	-33.90		
D-114		17.20	70.00	2.20	-2.80	2160	1350	-144.80		
D-055		15.82	63.00	2.42	1.42	2200	1000	-41.68		
D-081		16.74	130.00	5.64	-16.26	1615	800	-100.76		
D-159		160.00	164.00	60.20	58.00	1200	9750	2.00		
D-145		43.20	115.00	8.20	3.20	1802	3600	-67.80		
D-122		33.00	104.00	8.30	0.90	1770	2600	-41.70		
D-017		32.50	114.00	10.10	2.80	2030	2900	-69.00		
D-099		42.50	112.00	0.10	-4.20	1500	3300	-60.50		
D-146		53.50	120.00	9.50	-21.50	1503	3900	-63.50		
D-113		23.00	80.00	5.60	-2.30	2030	750	-53.00		
North Area		Aewol	D-044	32.26	130.00	10.80	2.26	1000	650	-72.154
	Aewol	D-027	40.18	135.00	9.05	-4.82	1339	1150	-78.52	EL-75.53m
	East Cheju	D-127	145.28	180.00	23.28	9.28	1230	4400	-17.22	
East Area	Namwon	D-129	143.91	170.00	40.91	19.91	1400	3800	-3.19	Average
	Namwon	D-097	134.61	170.00	39.41	24.61	1050	2700	17.61	EL+7.2m
		D-125	109.26	165.00	68.26	27.26	2030	3500	23.26	Average
East		D-177	190.47	195.00	145.27	85.47	1200	5000	42.97	EL+25.4m

Table 2. Continued.

Location	Name of watershed	Well No.	Elevation (EL.m)	Depth(m)	Water level(EL.m)		Pumping rate (CMD)	Distance from sea coast(m)	Elevation of Seogipo formation	Remarks
					static	pumping				
South Area	Seogipo	D-187	178.77	172.00	120.87	86.77	1300	3750	32.77	
		D-063	55.00	70.00	33.30	32.70	2100	1450	2.50	
		D-108	73.16	100.00	56.16	56.16	2030	1900	-11.94	Average
		W-004	70.30	42.50	57.07	39.30	1500	1500	29.20	EL+21.3m
		D-116	50.00	82.00	47.00	0.00	1900	800	10.00	
		D-217	220.00	160.00	150.00	125.00	700	3400	148.000	Range:
	Middle	D-215	180.00	196.00	133.50	115.00	1500	3200	-9.00	EL-44.93m~
	Seogipo	D-101	162.00	190.50	109.00	24.00	1050	2100	12.00	EL+148m
		D-241	205.00	230.00	95.00	19.00		3600	36.00	
		D-118	157.57	220.00	55.57	10.57	1000	3300	-44.43	
West	Seogipo	D-087	55.21	120.00	4.71	0.61	1500	650	-40.89	Average
		D-178	52.44	90.00	37.94	-11.56	1300	1300	4.54	EL+29.95m
		D-038	185.00	122.00	107.60	107.28	1088	3000	94.50	
		D-169	80.00	170.00	48.00	-12.00	1300	900	-55.90	Range:
	Seogipo	D-168	113.17	130.00	77.17	53.17	2000	1800	5.17	EL-55.9m~
		D-111	100.00	222.00	38.00	-65.00	1000	850	4.50	EL+94.5m
		D-205	160.00	170.00	78.00	40.00	1200	2500	44.00	
		D-039	140.00	150.00	59.80	50.60	1070	2250	24.00	
		D-048	14.04	94.00	1.54	-1.46	1054	600	-34.46	
	Andug	D-165	190.00	207.00	105.00	42.00	1000	4500	20.00	Average
	D-049	124.82	135.00	84.62	50.52	850	2900	49.9	EL+35m	
	D-138		90.00	42.60	29.50	2445	1550	35.00		

*Sources of date: ADC drilling report

기 때문에 속단키는 어려우나 세화리층의 해수면하 심도는 후기에 분출한 현무암의 두께에 비례하여 깊어지는 것으로 판단된다.

현재와 같이 심부시추공마다 세화리층이 계속 발견되고 제주도의 최하위 현무암 직하부에 이들 저투수성 해성퇴적층이 연속적으로 분포되어 있을시 제주도 내에 부존된 지하수는 대부분 준기저지하수(para-basal groundwater)일 가능성이 크다. Table 2에 의하면 대정, 한경, 한림, 애월 등 제주의 서부지역과 동서지역에서 서귀포층군의 평균 분포심도는 각각 EL-52.3m, EL-52.5m, EL-42.3m 및 EL-75.5m 정도이며, 남원지역은 EL+7.2m이고, 서귀지역은 EL+21.3m 에서 EL+29.5m 정도이며, 안덕지역은 EL+35m 이다. 특히 대정지역(서부해안)의 D-114공과 D-81공의 서귀포층 분포심도가 EL-144.8m와 EL-100.7m로 기록되어 있어 이들 관정의 굴착당시에는 세화리층이 알려져 있지 않았기 때문에 세심한 검토가 필요하다.

지하수부존량: 현재까지 제주도 내에서 실시한(동서남북 구간) 7개공의 심부시추공 자료에 의하면 제주도의 기저 저투수성 퇴적층인 세화리층의 평균 분포심도는 EL-(120±68)m 정도이고 이들 층의 두께는 163.5±74.5m 이다. 즉 세

화리층의 평균 해수면하 분포심도는 EL-105m 정도이고 본 층의 평균 두께는 166m 정도이다. 추후 심부시추공 자료가 축적되는대로 세화리층의 분포심도와 두께가 더 정확히 규명되었지만 현재까지의 시추결과에 의하면 7개공 모두에서 세화리층이 발견되었다는 점에 주목할 필요가 있다. 제주도의 기저가 상술한 세화리층의 저투수층으로 구성되어 있다고 가정할때 도내 중심부에서 준기저지하수의 해수면상 수위는 최소 EL+50m 이상된다(Canter, 1986). 또한 도내에 분포된 현무암 대수층의 평균 비산출율은 0.12이므로 그 공극율은 최소 0.2를 상회할 것이다(Walton, 1985). 따라서 상위 지하수를 제외한 본도에 부존된 기저 및 준기저지하수량은 저투수성지층이 EL+105m에 분포되어 있다고 가정할때 최소 440억 m³에 이른다[1810x10⁶(59x0.2/3) + 105x0.2].

용천: 제주도의 용천은 그 위치에 따라서 고지대 용천과 해안용천(해저 용천 포함)으로 대별할 수 있다. 일반적으로 고지대 용천은 상위지하수에 기인하며 해안 용천은 기저지하수에 그 기원을 두고 있다. 상위지하수의 용천은 강수가 수리지질학적인 1, 2차 유효공극을 따라 하부로 유하 도중에 저투수층을 만나 수직강하가 이루어지지 못하여 지표로 용출되는 것으로 중산간 고지대의 용천과 남부지역에 분포한

대부분의 용천이 이에 해당된다. 특히, 본도 중산간지대 및 고지대에 위치한 용천은 부유 상태로 용출되는 부유 용천에 속한다.

기저지하수 용천은 지하로 침투한 지하수가 수리지질학적 인 동수구배를 따라 해안으로 이루어지다가 해안선 일대에서 유출되는 용천으로써 동부지역 용천수가 기저지하수로부터 용출되고 있으며 북부지역의 삼양 용천과 남부지역의 자굴이 용천 등도 이에 속한다.

해안용천 : 과거에 용천개발은 주로 해안지대에서 간단한 집수시설을 설치하여 부락단위의 식수로 이용해 왔으나, 현재에는 생.공.농업용수 등 다용도로 이용되고 있으며, 수원이 지표면에서 자연용출되고 있어 타수원에 비해 개발이 용이하여 본도 용수 해결에 큰 비중을 차지하고 있다. 그러나 해안 저지대 용천은 대부분 주거지역과 농경지에 인접해 있어 생활하수와 각종 비료와 퇴비 사용에 따른 지표오염원에 의해 virus나 E-coli 및 질산성질소에 완전 노출되어 있고 특히 동부와 서부지역의 해안 용천은 염분함량이 높다(한정상 외, 1994). 따라서 장래 해안용천수 개발 이용시에는 반드시 수질오염대책을 세운 후 용천수의 용출형태, 용출량, 수질, 장래오염요인 등을 면밀히 분석해야 할 것이다. 본 연구시 과거 농어촌진흥공사(1989년), 한국수자원공사 등 관련기관에서 현재까지 조사한 해안 용천수 자료를 최대한 이용하였으며 그 결과에 의하면 해안저지대에 위치한 용천은 대체적으로 383개소에 이르며 1일 용출량은 약 1,078,000m³(3.9억m³/년)으로 추산된다.

고지대 용천: 고지대용천은 부유지하수 형태로 부존된 상위지하수가 지표로 부터 용출되는 지하수노두이다. 여태까지 조사된 중산간 및 고지대에 위치한 용천은 현재까지 총 20개소로써 그 유출량은 320,000m³/일로 추정된다. 현재까지 기개발된 고지대 용천은 어승생 및 구구곡 용천을 비롯하여 성판악, 선돌, 돈내코, 가시머리 등이 있다. 고지대 용천의 부존량은 한정되어 있으나, 수질이 양호하고 자연유하식 용수공급이 가능하여 본도 중산간지역의 용수공급에 큰 몫을 차지하고 있다. 그러나 용출지점이 분산되어 있고 일부 몇개소를 제외하면 용출량이 적으며 특히 용출량이 강우에 직접적인 영향을 받고 있어 연별, 계절별 수량의 변화가 심하여 안정적인 용수공급에 어려움이 있다.

고지대 용천수의 감수곡선과 함양량: 상위지하수체는 대부분 함양량이 유출량보다 많은 풍수기 동안 주로 저류되며 반대로 갈수기에는 유출량이 함양량보다 커서 상위지하수체의 저류량이 감소하게 된다. 상위지하수체의 저류량은 풍수기 말에 최대가 되며 갈수기의 말기에 최소가 된다.

분석결과 유출량은 5월 부터 서서히 증가되다가 9월에 이르르면 최대가 된다. 갈수기는 10월부터 4월까지 지속되며 갈수기중 12월 이후 겨울철에서 봄철사이에는 산악형 강설과 해빙의 영향으로 일시적인 유출량 증가 현상을 보이기도 한다. 그러나 9월의 최대 유출량은 감수곡선을 이루면서 5월에 최소가 된다. 분석기간중 풍수기때 최대용출량은 약 31,500m³/일 이었으며 갈수기때 최소용출량은 8,300m³/일 정

도였다(수공, 1993a).

어승생의 어리목계곡 용천은 백록담장석현무암 내에 발달된 부유상태의 상위 지하수부존대(표고 약 1,200~1,400m)로부터 장석현무암과 조면암질 안산암의 접촉부에 발달된 화산쇄설층 및 장석현무암 내의 Clinker를 따라 지표로 유출되고 있는 고지대 용천으로써 유출량이 상당히 크다. 따라서 Y 계곡(EL. 1,100m)지점에 취수보를 설치(약 20,000 m³/일)한 후 어승생댐으로 도수하여 현재 이를 각종 용수로 이용하고 있다.

또한 분석기간 동안 어승생댐 우량관측치를 기준으로 등우선도를 이용하여 면적강우량을 구해본 바 그 값은 연평균 3,050mm이었고 3년간 누가강우총량은 40,442,000m³에 정도였다. 또한 어승생댐 운영일지를 이용하여 용출지점에서 3년간 총용출량을 계산한 바 그 양은 18,628,500m³정도였다. 따라서 총강우량에 대한 총용출량의 비율 즉 본유역 지하수 함양률은 약 46% 이다. 본 지점에서 상위대수층의 총저유용량은 갈수기 지하수 감수곡선을 추정된 후 산정하였으며, 지하수 감수곡선은 반대수지를 이용한 주지하수 감수곡선 분리법을 적용하여 산정한 바 그 관계식은 다음과 같다 (Figure 3).

$$r_m Q = Q_0 e^{-0.014t}$$

여기서 대수층 포화 후의 초기용출량을 풍수기 말기인 9월의 3년간 평균 용출량으로 가정하면 약 24,000m³/일로 산정되며, 이를 상기 식에 대입하면 대수층의 총저유용량(V₀)은 약 1,700,000 m³으로 추정된다(V₀ = Q₀/a).

지하수의 산출특성

지역별 수리특성: 제주도 일대에 기 설치된 관정의 지하수 산출상태와 수리특성을 규명하기 위하여 1970년부터 1993년까지 제주도 일원의 농.공.생활용수와 조사공으로 설치한 기설관정중에서 수리지질학적인 자료가 비교적 잘 정비된 455개공의 가용자료를 수집하여 분석하였다.

각 관정의 비양수량(specific capacity : SPC)과 각 관정 설치 지점의 수리특성인자인 투수량계수(T)와 저유계수(S)와 수리전도도(K)값은 그동안 제주도일원에서 실시한 대수성시험자료와 농어촌진흥공사(1970-1992)에서 발간한 년도별 제주도 지하수보고서('70~'92년)에 수록된 양수일보를 AQTESOLV와 TG의 전산code를 이용하여 분석하였다.

도내 기설관정은 거의 대부분이 포화대를 완전히 관통하지 않은 부분관통정(partially penetrated well)이기 때문에 분석시 부분관통정에 의한 보정과 정호수두손실(well loss)에 관한 보정을 한 후 각 관정 위치의 대수성수리상수(Duffield, 1990)를 구하였다. 제주도 내에 기설관정은 해발표고 6 ~ 314m 사이에 설치되어 있고 관정의 심도는 최소 20m에서 최대 320m로서 평균 107.77m이다(Table 3). 각 관정의 초기착정당시 평균 지하수위는 지표하 52.96m였고 각 관정을 시설용량으로 채수시 동수위는 지표하 71.2m였으며 평균 1개공당 채수가능량은 1,451m³/일이다(한정상, 1992)

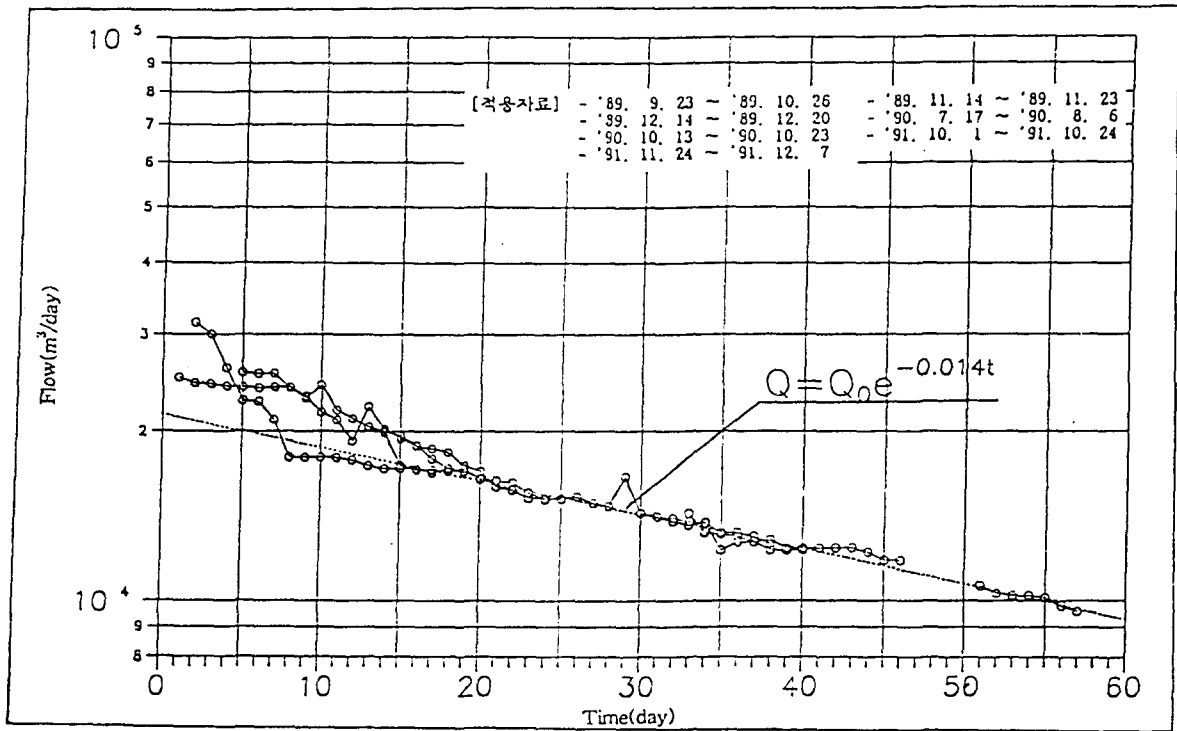


Figure 3. Recession curve of high level groundwater in Eosungseng reservoir of the Cheju island (KOWACO, 1993)

상술한 전산 program을 이용하여 분석한 제주도내 포화대의 평균 투수량계수는 29,300m³/일/m이며 평균 수리전도도는 84.17 m/일이고 평균 저유계수는 0.12로서 제주도의 대수층은 자유면대수층이다. 또한 도내에 기설치되어 있는 관정의 수온은 13℃ ~ 19℃로서 평균 15.8℃이다. 제주도내 관정의 산출특성과 수리특성을 지역별로 상술하면 다음과 같다.

동부지역: 동부지역은 조천, 구좌, 성산, 표선 및 남원의 5개 구역이다. 본 지역에 설치된 총 109공 관정의 평균 해발표고는 73.88m 이며 그 범위는 EL 10.3m~ EL 230m이다. 기설관정의 평균 심도는 98.2m 이고 그 범위는 26m~250m에 이른다. 각 심정별 초기의 자연수위는 심정설치 표고에 따라 차이를 보이는데 최소 지하수위가 지표하 9.6m에서 최대치는 198m이다. 측정당시의 평균 지하수위는 지표하 63.3m였고 대수성시험시 평균 동수위는 지표하 77.01m였다.

본 지역 일대에 설치된 총 109개 심정의 1공당 평균 채수량은 1,454m³/일이고 평균수온은 15.6℃이다. 본 지역의 평균 비양수량(SPC)은 3,270m³/일이고 평균 투수량계수(T)는 42,200m³/일이며, 평균 저유계수는 0.127이고, 평균 수리전도도는 193m/일이다. 설치된 관정의 포화대를 구성하고 있는 지질은 대체적으로 장석암석현무암이거나 장석현무암으로 이루어져 있고 포화대 내에 점토층과 스코리아 및 크린커층의 평균 협재매수는 각각 2매씩이다(Table 3).

서부지역: 서부지역은 한경, 한림 및 대정수역을 포함한다. 본 지역에 설치된 관정의 해발표고는 평균 51.71m이며 그 범위는 EL. 6m ~ 295m이다. 기설관정의 평균 심도는 98.

9m이고 그 범위는 20m ~ 320m에 이른다. 측정당시의 초기 평균 지하수위는 지표하 34.67m였고 대수성시험시 평균 동수위는 지표하 54.62m였다. 서부지역 일대에 설치된 총 165개 심정의 1공당 평균 채수량은 1,638m³/일이며 평균 수온은 15.93℃이다. 본 구역에 설치된 관정의 평균 비양수량(SPC)은 927m³/일이며, 평균 투수량계수(T)는 21,300m³/일이고 평균 저유계수는 0.112이며, 평균 수리전도도는 53.57m/일이다. 본 구역에 분포된 포화대수층은 주로 장석암석현무암(FOB)으로 구성되어 있으며 전체 굴착관정중 42.5%가 퇴적층인 서귀포층까지 굴착한 관정이다. 포화대 내에서 점토층과 스코리아/크린커층의 협재 매수는 평균 각각 2 및 3매씩이다.

북부지역: 북부지역은 애월, 제주시의 동,중 및 서 수역을 포함한다. 본 지역에 설치된 109개공의 관정자료를 이용하여 전산분석을 실시한 후 작성한 현황목록표는 Table 3과 같다. 본 지역의 관정은 EL. 9.35m에서 EL. 286.4m사이에 설치되어 있으며 그 평균 해발표고는 92.4m이다. 관정심도는 관정 설치위치에 따라 최소 26m에서 최대 280m로서 평균 119m이다. 측정초기의 공내 평균 지하수위와 측정후 대수성시험 이후 측정된 평균 동수위는 각각 지표하 83.13m와 87.25m이었으며, 관정 1개공당 평균 채수가능량은 1,329m³/일이고, 평균 비양수량(SPC)은 1,300m³/일이다.

평균 투수량계수는 27,900m³/일이며 평균 저유계수는 0.13이고 평균 수리전도도는 53m/일이다. 심정 굴착구간의 포화대 내에 발달되어 있는 점토층과 스코리아층의 협재 매수는 각각 1매와 2매이며 평균 지하수수온은 15.85℃이다.

Table 3. Aquifer test results of the Cheju island(455 water well date)

Location	Altitude (m)	Well depth (m)	Static water level		Dynamic Water level	Pumping rate	Aquifer parameter			TDS(mg/l)		Temperature (°C)		Key bed			
			'93 before 93	'93 Difference			SPC (m ² /d)	T(m ² /d)	S	K(m ² /d)	'89 before 89	'89 Difference	Main aquifer	Crinker or pyroclastic			
Ave	73.88	89.19	63.33	62.07	1.88	14.54	327E+03	422E+04	L3E-01	1.93E+02	132.40	324.49	216.79	15.61	2	2	
Min	10.32	26.00	9.60	9.30	-560	370	1.21E+01	2.05E+01	L3E-02	L43E-03	12.00	32.00	-406.00	14.00	1	1	
Max	230.00	250.00	198.00	164.50	29.30	4121	3.30E+04	7.66E+04	4.2E-01	2.12E+03	800.00	2387.00	1967.00	17.50	4	6	
Ave	51.71	98.88	34.67	40.99	2.94	1638	9.27E+02	2.13E+04	L1E-01	5.34E+03	79.47	143.44	17.13	19.93	2	3	
Min	6.00	20.00	3.50	7.30	-1010	350	7.65E+00	2.17E-01	3.0E-04	1.10E-03	7.00	26.00	-1010.00	14.00	1	1	
Max	295.00	320.00	252.00	128.80	24.60	4400	1.81E+04	4.32E+05	5.0E-01	1.49E+03	1152.00	1376.00	193.00	19.00	7	7	
Ave	120.12	129.46	50.71	56.78	7.86	1120	4.06E+02	3.21E+04	1.3E-01	2.94E+01	35.85	84.82	53.67	15.67	2	2	
Min	14.04	25.00	12.50	10.97	-600	233	3.97E+00	1.09E+00	4.6E-04	3.91E+04	0.00	35.00	-19.00	0.00	1	1	
Max	314.00	230.00	114.00	124.50	27.50	2445	3.82E+03	7.68E+05	2.8E-01	6.58E+02	110.00	229.00	208.50	17.00	6	6	
Ave	92.40	119.04	69.77	83.13	6.78	1329	1.30E+03	2.79E+04	1.3E-01	5.30E+01	38.62	108.06	71.51	15.85	1	2	
Min	9.35	26.00	8.00	24.90	-0.80	320	1.99E+01	1.78E+00	1.0E-06	1.82E-03	4.30	37.00	0.00	13.00	1	1	
Max	286.40	280.00	212.00	199.00	28.00	2800	3.87E+04	5.75E+05	4.0E-01	1.31E+03	113.00	313.00	196.00	19.00	4	5	
Ave	76.79	107.77	52.96	60.38	4.02	1451	1.52E+03	2.93E+04	1.2E-01	8.46E+01	84.17	185.28	114.46	15.80	2	2	
Min	6.00	20.00	3.50	7.30	-10.10	233	3.97E+00	2.17E-01	1.0E-06	3.91E-04	4.30	26.00	-1010.00	13.00	1	1	
Max	314.00	320.00	252.00	199.00	29.30	4400	3.87E+04	7.67E+05	5.0E-01	2.12E+03	1152.00	2387.00	1967.00	19.00	7	7	
Noof wells	4.76	440	407	184	131	377	304	283	264	283	162	151	102	101	313	153	264

*Ave. : Average value
 Min. : Minimum value
 Max. : Maximum value

남부지역: 남부지역은 동, 중 및 서서귀 및 안덕지역을 포함한다. 본 지역에 설치된 관정의 해발표고는 EL 14.04~314m로써 관정의 심도도 비교적 깊어 평균 120m 이며 D-241 호공의 심도는 230m에 이른다. 기설관정의 초기 평균 자연수위는 지표하 50.71m였고 대수성시험 종료시 측정된 평균 동수위는 지표하 88.14m 였으며 착정초기에 측정된 자연수위가 지표하 100m이상 되는 곳도 5개소나 된다. 관정 1개공당 평균 채수가능량은 제주도에서 가장 채수량이 적은 1,120m³/일이며 비양수량은 406m³/일 이다.

본 지역은 주로 상위지하수의 분포구간으로써 수역별로 지하대수층의 수리성에 큰 차이를 보이는 즉, 불균질, 이방성이 큰 지역이다. 특히 관정 1개공당 채수량이 최소 233m³/일에서 최대 2,455m³/일에 이르며 수리전도도의 경우도 최소 3.91x10⁻⁴m/일에서 최대 658m/일 이다. 본 지역에서 평균 투수량계수는 32,100m²/일이고 평균 저유계수는 0.13이며 평균 수리전도도는 29.4m/일 이다. 본역에 설치된 기설관정에서 점토층과 스코리아 및 크린커크층의 평균 공당 협재 매수는 각각 1.95매와 2.3매 정도이고 평균 지하수온은 15.8℃이다.

상술한 대수성 수리상수를 이용하여 작도한 투수량계수와 수리전도도는 제주도의 국지적인 지하수관리 program인 지하수 취수정 보호계획(WHPA)과 광역적인 지하수 보호계획에 필수적인 기본도이다.

그러나 본 제주전역의 수리전도도는 전술한 바와 같이 각 관정별로 AQTESOLV의 전산 program과 TG 전산 program으로 먼저 투수량계수(T)를 구하고 이를 다시 Dupuit Ghyben-Herzberg원리를 이용하여 부분관통에 따른 보정을 실시한 후 우물 수두손실을 감안하여 수리전도도(K)를 구하였다(한정상, 1994). 따라서 추후 제주도 지하수자원의 부존과 산출 특성에 결정적인 영향을 미칠 것으로 예상되는 기저 미고결 퇴적층의 분포상태의 규명 등 계속적인 지하수조사 자료가 축적되면 이에따라 이들 수리상수도 수정, 보완되어 나가야 할 것이다.

제주도의 물수지

제주도는 전국 평균의 약 1.5배에 해당하는 많은 강우량이 내리며, 투수성이 큰 현무암때문에 강우는 쉽게 지하로 침투하여 대수층에서 지하수담수체를 이룬 후 다시 하류구배구간으로 서서히 이동하여 해안이나 해저에서 용천의 형태로 유출된다.

지하수 수문학적인 물수지분석은 제반 수문인자를 평가하여 지하수함양량을 추정하는 과정이다. 일반적으로 분석방법은 장기간에 걸친 평균적인 균형상태를 가정하여 실시하기 때문에 중간과정의 동적인 수문, 수리상태를 고려하지 못하는 결점이 있으나 계획단계에서 수자원의 지역적인 부존량을 파악하고 대수층의 초기 및 경계조건을 설정하는데 있어 필수적이다.

수문학적인 물수지 분석방법은 일정 수역 내의 강우량과 직접유출, 증발산량, 지하수함양량간에 수문평형이 유지되

는 것으로 보아 다음 (1)식으로 표현된다.

$$I=P-DR-ET\pm IU \quad (1)$$

여기서, I는 지하수 함양량, DR은 지표수 직접유출량, P는 강수량, ET는 증발산량, IU는 타수역으로부터 지하수 유출입량이다.

여기서 지하수함양량이란 제주도의 수리지질학적인 특성에 의거 지하로 침투하는 모든 수량을 의미하며 해안에서 유출되고 있는 용천수량도 이에 포함시켰다. 물수지분석의 대상수역은 행정구역과 현재까지 밝혀진 지하수 부존상태, 지형 및 지질분포와 급변에 작도한 지하수위등고선도(PM map) 등을 고려하여 4개 지역과 16개 수역으로 구분하였다.

강수량

현재 제주도 내에는 기상청 관할 측후소와 분실, 지방자치단체, 한국수자원공사와 제동목장 등이 우량계를 설치하여 운영하고 있다. 그 외 1992년에 재해대책본부에서 24개 T/M우량계와 온라인망에 의한 광역 자동 수취 시스템의 강우 관측망이 운영되고 있다. 현재 제주도내 우량 관측자료를 보유한 지점은 약 40개소에 이르나 그중 15년이상 장기 우량 관측자료를 보유한 관측소는 기상청 관할 제주, 서귀포, 성산 및 대정 측후소와 어승생 및 제동목장 등 6개소에 불과하며 기타 지점은 단지 1년에서 5년 이내의 단기자료만 보유하고 있을 뿐이다.

유역면적 우량 산정방법으로는 산술평균법, Thiessen가중법, 등우선법이 있으나 제주도와 같이 우량계의 분포가 고르지 못하고 지형성 강우의 영향을 많이 받는 곳에서는 등우선법이 가장 적합한 방법이다(Boutwell 외 1986). 면적강우량을 산정하기 위해 우선 신뢰할 수 있는 장기 강우기록을 보유한 제주 및 서귀포측후소를 기준관측소로 설정하고 각 관측소의 일강우량자료를 기준으로 인근 관측치와 비교하여 각 자료의 신뢰성을 검증하였다. 신뢰성이 있는 단기 관측자료는 동일기간의 기준관측소의 강우량과의 비율을 기준관측소의 연평균강우량에 적용하여 각 지점별 평균 강우량을 산정하고 그 결과를 이용하여 등우선도를 작성한 후 강우량을 산출하였다. 이에 의거하여 표고별 연평균강우량과 수역별 평균 강우량을 구한 바 그 결과는 Table 4와 같다(한국수자원공사, 1993a).

Table 4에 제시된 바와 같이 제주도의 연평균강우량은 1,872mm 이다. 표고별 연평균강우량은 표고 200m이하 지역이 1,625mm, 표고 800m 지역이 2,779mm 이다. 지역별로는 한라산을 기준으로 남동부 산악지역에 가장 많은 강우가 내리며 서부지방에서는 비교적 적은 량의 강우를 보이고 있다.

증발산량

도내 증발산량을 추정할 수 있는 계기증발량 및 기상자료 등의 기초자료를 보유하고 있는 기상관측소는 기상청 산하 해안면 4개 측후소에 불과하여, 이 4개 기상관측소의 기상자료를 이용하여 경험식에 의한 증발산량을 산정하였다.

본도의 잠재 증발산량은 장기 관측자료를 보유한 제주와

Table 6. Water budget analysis of watersheds of the Cheju

Watershed	Area (km ²)	Rainfall (mm)	Total rainfall (10 ⁶ m ³)	Run off (10 ⁶ m ³)	ET (10 ⁶ m ³)	Recharge		Darcian flux (10 ⁶ m ³ /km)	
						Annual (10 ⁶ m ³)	Daily (10 ³ m ³)		
Total	1,810.0	1,872	3,388	638	1,256	1,494	4,093	22.2	
North area	subtotal	339.7	1,861	632	150	242	240	657	22.8
	Aewol	84.1	1,527	128	24	60	44	120	10.9
	Cheju	255.6	1,971	504	126	182	196	537	30.0
	east	80.2	1,961	157	39	57	61	167	29.3
	middle	88.9	1,986	177	44	63	70	192	24.3
	west	86.5	1,964	170	43	62	65	178	41.4
South area	subtotal	357.7	2,146	768	220	249	299	820	23.0
	Seogipo	298.7	2,226	665	195	207	263	721	24.0
	east	108.1	2,507	271	79	75	117	321	38.7
	middle	106.5	2,198	234	70	74	90	247	26.0
	west	84.1	1,900	160	46	58	56	153	12.4
	Andug	59.0	1,743	103	25	42	36	99	18.0
West area	subtotal	371.7	1,394	518	44	266	208	570	12.7
	Daejung	123.0	1,375	169	10	88	71	195	12.7
	Hankyung	110.7	1,280	142	7	79	56	153	9.3
	Hanrim	138.0	1,503	207	27	99	81	222	16.9
East area	subtotal	740.9	1,985	1,470	224	499	747	2,046	27.5
	jocheon	124.4	1,835	228	30	86	112	307	29.5
	Guzwa	169.8	1,774	301	18	113	170	466	19.4
	Sungsan	115.8	1,840	213	13	75	125	342	17.8
	Pyoseon	203.3	2,192	446	98	138	210	575	67.6
	Namwon	127.6	2,213	282	65	87	130	356	28.9

담수체의 물수지

제주도 내에서 강우에 의해 일단 지하로 함양된 양은 동부 지역의 해안부근에서는 기저지하수체로, 북서부와 남부지역에서는 준기저지하수나 상위지하수의 형태로, 서부지역에서는 주로 준기저지하수체로 부존된 후 서서히 해안으로 유출된다. 담수체인 대수층을 기준으로 할때 지하수 유출입사이의 관계식은 다음 (2)식으로 표현할 수 있다.

$$I \pm IU + R + \Delta V = D + L \tag{2}$$

여기서, I는 지하수 함양량, IU는 타수역으로부터 지하수 유출입량, R은 회귀수(return flow), ΔV는 대수층의 저유량 변동, D는 채수량(개발량), L은 해안 및 해저유출량이다. 상기 식에서 타수역으로부터 지하수 유출입량과 회귀수량이 없다고 가정하면 (2)식은 (3)과 같이 된다.

$$I + \Delta V = D + L \tag{3}$$

상기 식에서 대수층 내에 부존된 지하수 부존량의 변동이 없을때(ΔV = 0) 이들 지하수는 평형상태(steady state)에 도달한다. 이때 (3)식은 다음(4)식과 같이 간단히 표현할 수 있다. 즉

$$I = D + L \tag{4}$$

(4)식에서 1960년대 이전 제주도에서 지하수를 전혀 개발 이용치 않았을 당시의 수문평형식은 I = L(D=0)이다. 즉 1960년대 이전에는 강수에 의해 지하로 함양된 전 지하수 함양량은 모두 해안의 용천이나 해저용천의 형태로 바다로 유출되면서 평형상태를 이루고 있었다. 그러나 현재와 같이 담수체에서 지하수를 인공적으로 채수 이용하면 상위 또는 준기저지하수의 저유량은 지하수위의 변동으로 나타나게 되지만 기저지하수는 담수체의 수축현상으로 나타난다. 즉 기저지하수체에서도 대수층의 저유량은 DGH 원리에 따라 지

하수위 h 의 함수로 표시된다. 지금 지하수흐름이 정류일때 Darcian flux인 비배출량 q 는 다음 (5)식으로 표시할 수 있다 (Walton, 1985).

$$q = K \cdot b \cdot z \frac{(\partial Z)}{(\partial X)} \quad (5)$$

여기서, K 는 수리전도도, b 는 대수층의 평균 폭, Z 는 담수체의 평균 두께, X 는 해안에서 거리이다.

(5)식의 경계조건과 DGH 원리를 적용하면 그 해는 (6)식과 같다.

$$q = \frac{41Kb}{2X} h^2 \quad (6)$$

즉, 대수층에서 해안으로 유출되는 양은 정류평형상태 하에서 지하수위(h)의 2승에 비례한다. 그런데 정류평형상태 하에 있던 지하수위의 강하에 따라 해안유출량과 대수층의 저유량이 변하게 된다. 일반적으로 부정류의 비평형상태 하에서 지하수채수량과 해안유출량의 합은 지하수의 함양량보다 크기 때문에 그 결과 대수층 내에서 수위강하가 발생하거나 아니면 해안유출량이 감소하는 원인이 된다.

전술한 바와 같이 기저지하수체는 개발량이 증가함에 따라 서서히 수축되고 담수체의 크기는 대수층에 영향을 주는 제요인간에 완충역할을 하게 된다. 즉 담수체는 그 크기 때문에 상당기간 동안 가뭄이 계속되는 비상시기에서도 허용 가능한 수위 범위 내에서 과잉채수도 가능하게 한다. 오히려도 진주만 수역의 경우, 기저지하수의 초기의 부존량은 136억톤이었으나 지하수개발이 시작된 후 100년이 지난 현재의 지하수 부존량은 초기 부존량에 비해 약 40%가 감소하였다. 그러나 현재 지하수 이용량은 함양량의 90% 이상인데도 가뭄에 대비하여 비상시 추가 개발까지도 검토하고 있다. 제주도 동부지역에는 전술한 바와 같이 기저지하수가 조천수역으로부터 남원수역 해안연변을 따라 널리 분포되어 있다. 이지역의 기저지하수는 해안으로부터 내륙으로 최대 약 7km까지 깊숙히 분포하고 있는 것으로 추정되고 있다.

물수지 분석결과와 지하수위의 분포상태를 검토한 바 동부지역내 각 수역간의 기저 지하수담수체는 서로 연결성이 매우 큰 것으로 사료된다. 즉 지하수 함양량이 큰 표천수역의 지하수는 동수구배와 대수층의 수리성을 감안할 때 상당량의 지하수가 인근 수역으로 유출되고 있는 것으로 추정된다. 동부지역 지하수 함양량은 일평균 2,046,000 m^3 로써 제주도 전체의 약 50%에 이른다. 지하로 침투된 강수가 동부해안지역에 고르게 분포되어 바다로 유입된다고 가정시 해안선 길이 1m당 평균 유출량인 비배출량(일명 Darcian flux 혹은 specific discharge)은 27.5 m^3 /일 정도이다(Table 5). 전술한 바와 같이 Darcian영역에서 단위폭($b=1m$)당 Darcian flux와 지하수위는 (6)식에서 다음(7)식으로 표시할 수 있다.

$$q/K = 41h^2/2x \quad (7)$$

여기서, q 는 단위폭당 지하수의 비배출량으로서 이는 물수

지분석시 추정될 수 있으며 K 는 대수성시험시 알아낼수 있는 수리특성인자이다.

일반적으로 대수성시험시 일개관정에서 지하수채수에 의해 발생한 수위강하량은 항상 우물수두손실이 포함된 값이므로 층류상태하에서 유도된 각종 우물공식에 이를 적용하면 수리상수가 낮게 산정된다. 지하수위 h 는 그 지역에 부존된 지하수의 분포형태나 수리특성을 규명하는데 가장 기초적이고 중요한 인자이다(Mink, 1992).

금번 연구시 동부지역에 위치한 관정의 자연수위와 해안으로부터의 거리를 이용하여 먼저 q/K 값을 구하였다. Table 7은 각 지역에서 구한 q/K 값으로써 그 평균치는 약 0.065 이다. Table 7에서 경계값으로 정한 q/K 의 값이 0.02일때 동부지역의 평균 지하수 비배출량인 27.5 m^3 /일을 적용하면 K 는 1,375 m /일로 너무 큰 값으로 나타나며, 0.2인 경우 K 값은 137 m /일로 낮아진다. Table 7에서 구한 q/K 의 평균값이 0.065일때 K 의 값은 423 m /일 정도이다.

금번 연구시 신촌지역의 SC-3시험정과 서귀포 GK-1시험정에서 실시한 장기 대수성시험으로 부터 구한 수리전도도는 각각 510 m /일과 658 m /일이었다. 따라서 금번에 유선망 분석으로 부터 구한 동부지역의 평균 수리전도도인 420 m /일은 상당히 합리적인 값으로 사료된다. 본 연구의 일환으로 실시한 장기 대수성시험시 시험공외에 최소 3개공의 관측공을 시험정 주변에 설치하여 지하수채수에 따른 각 관측정에서 지하수위 강하량을 측정하여 합성분석법으로 수리전도도를 구했으므로 시험의 정도를 높이는데 노력하였다.

제주도에 부존된 지하수의 흐름은 수역별 지하수함양량, 대수층의 발달상태, 수리전도도와지하수의 동수구배에 따라 지배된다.

기존 지하수위를 이용하여 관계식을 구하려고 하였으나 신뢰도가 극히 낮게 나타났다. 따라서 지하수흐름 방정식에서 q/K 값을 0.065로 일정하게 두고 동부지역에 분포된 지하수의 평균 동수구배를 계산한 바 그 결과는 다음과 같다.

Head difference	Distance from coast line	Average hydraulic gradient
1	315	0.0031
2	1,260	0.0016
3	2,840	0.0011
4	5,050	0.0008
5	7,780	0.0006

상기 수치는 동부지역의 평균적인 q , K 값을 이용하고 또한 Darcian flux를 상.하류지역에서 동일하게 가정하여 계산한 것이다. 그러나 기저지하수의 구배가 매우 완만한 것을 감안하면 앞으로 동부지역 지하수조사에서 하나의 기준으로 적용가능할 것이다.

Table 7. q/k values of basal groundwater bodies of Eastern Cheju

Water shed	Well no.	Elevation (EL.m)	Well depth (m)	Watershed(h,EL.m)		Distance from coast line(m)	q/K=(41 h ²)/2X		Remarks
				S.W.L	D.W.L		0<q/k<0.3	0.02<q/k	
	D-189		61.00	2.00	-6.00	1,000	0.0820	0.0820	
	D-067	36.16	60.00	4.46	-0.34	1,750	0.2325		
	SC-02	29.50	50.00	0.57	-	1,600	0.0042		
	SC-01	31.25	80.00	1.05	-	1,700	0.0133		
	SC-03	39.14	151.00	2.01	-	2,100	0.0394		
	U-035	39.95	47.20	2.55	1.76	2,300	0.0580	0.0580	
	U-053	26.60	54.50	1.30	0.38	1,100	0.0315	0.0315	
	U-034	20.38	42.00	1.88	1.74	900	0.0805	0.0805	
	U-052	31.12	152.00	1.22	0.73	1,600	0.0191		
	F-002	68.75	120.00	4.75	-11.25	2,300	0.2007		
	F-048	38.89	75.00	4.89	-17.11	2,150	0.2283		
	D-163	20.88	60.00	1.38	-23.12	700	0.0560	0.0560	
	D-243	138.00	70.00	5.00	-24.00	5,000	0.1025	0.1025	
	F-058	75.00	110.00	1.00	-9.00	3,550	0.0058		
	F-034	65.00	87.00	0.50	-13.00	3,000	0.0017		
	W-029	10.32	26.00	0.72	-6.18	600	0.0175		
	W-016	45.56	55.00	1.55	-2.45	2,200	0.0225	0.0225	
	D-132	38.50	55.00	2.50	1.50	1,800	0.0712	0.0712	
	D-003	79.47	104.00	1.17	-3.83	4,250	0.0066		
	D-201	65.83	110.00	2.83	-0.17	3,000	0.0548	0.0548	
	F-057	50.00	80.00	0.50	-15.00	2,300	0.0028		
	A-001	65.00	90.00	4.00	-7.00	1,800	0.1426	0.1426	
	D-211	59.92	86.00	1.52	-16.08	2,300	0.0225	0.0225	
	W-011	28.95	50.00	0.85	0.53	2,100	0.0212	0.0212	
	D-140	35.85	60.00	1.35	-3.15	700	0.0327	0.0327	
	D-019	55.98	80.00	1.58	1.00	1,150	0.0254	0.0254	
	D-042	133.08	171.00	2.08	-10.92	2,000	0.0138		
Gujwa	D-012	48.63	70.00	1.33	0.30	6,450	0.0180		
	D-057	57.28	80.00	1.28	1.18	2,000	0.0164		
	D-203	68.08	90.00	1.08	-4.92	2,050	0.0082		
	D-188	56.77	90.00	1.07	-3.23	2,900	0.0078		
	D-152	40.55	60.00	3.05	-3.05	3,000	0.0733	0.0733	
	W-010	29.78	50.00	0.08	-0.02	2,600	0.0001		
	W-019	38.50	45.50	1.50	1.03	2,000	0.0271	0.0271	
	D-253	95.79	130.00	1.79	-14.21	1,700	0.0121		
	D-016	12.02	35.00	1.32	0.82	5,400	0.0253	0.0253	
	D-200	52.02	75.00	1.02	-9.98	1,400	0.0079		
	F-023	46.33	72.00	3.33	-15.67	2,700	0.1623	0.1623	
	D-054	24.47	42.00	1.77	-1.73	1,400	0.0355	0.0355	
	수신3	92.09	120.00	0.59	-14.91	1,800	0.0013		
	수신4	85.76	110.00	1.76	-14.24	5,700	0.0129		
	D-028	28.24	41.00	1.04	0.94	4,900	0.0124		
	D-124	28.65	51.00	1.35	-4.35	1,800	0.0156		
	화진2	86.00	90.50	0.70	-1.40	2,400	0.0040		
SungSan	D-062	35.19	54.50	0.79	0.29	2,500	0.0127		

Table 7. Continued.

Water shed	Well no.	Elevation (EL.m)	Well depth (m)	Watershed(h,EL.m)		Distance from coast line(m)	q/K=(41 h^2)/2X		Remarks
				S.W.L	D.W.L		0<q/k<0.3	0.02<q/k	
	W-020	73.81	82.00	1.41	0.81	1,000	0.0095		
	D-194	88.28	102.00	0.78	-4.22	4,300	0.0037		
	W-015	40.01	55.00	1.01	-0.79	3,400	0.0064		
	D-257	114.00	132.00	0.60	-4.00	3,500	0.0021		
	D-030	33.26	50.00	0.86	-0.39	1,400	0.0108		
	W-009	67.66	80.00	0.66	-0.84	2,500	0.0036		
	D-258	92.00	115.00	0.50	-16.50	4,100	0.0013		
	D-031	40.95	80.00	1.35	0.97	1,650	0.0227	0.0227	
	하천2	86.00	114.00	1.00	-10.00	3,500	0.0059		
	D-259	66.90	100.00	1.90	-0.10	2,900	0.0254	0.0254	
	W-012	33.95	43.00	1.35	0.51	1,150	0.0324	0.0324	
	D-158	43.64	61.00	1.84	-2.36	2,350	0.0295	0.0295	
PyoSeon	D-223	74.00	100.00	1.00	-6.00	2,600	0.0079		
	F-043	91.27	120.00	1.77	-9.73	3,700	0.0174		
	D-037	65.72	95.00	1.72	1.22	2,500	0.0243	0.0243	
	D-148	107.82	140.00	3.82	-12.18	3,400	0.0881	0.0881	
	F-051	75.00	110.00	3.00	-21.00	1,700	0.0185	0.1085	
	D-006	25.45	50.00	1.25	0.72	750	0.0426	0.0426	
	F-006	37.50	74.00	2.70	-2.50	950	0.1573	0.1573	
	D-237	110.00	140.00	0.00	-20.00	4,200	0.0000		
	D-061	83.50	101.00	5.30	-2.50	3,300	0.1746	0.1746	
Nam-Won	D-247	58.00	90.00	2.00	-24.00	1,200	0.0683	0.0683	
	W-026	17.50	27.50	1.50	1.30	600	0.0769	0.0769	
	D-143	21.49	57.00	1.89	1.49	800	0.0911	0.0911	
	D-053	56.16	68.00	2.76	2.56	1,300	0.1198	0.1198	
	W-007	39.45	63.00	1.45	1.26	900	0.0476	0.0476	
Total							3.2197	2.2756	
Average							0.0441	0.0650	

*Static water levels are the one measured just after installed wells.

지하수의 최적 개발가능량(Sustainable yield)

제주도의 총강우량은 연평균 33.9억 m³에 이르며 이중 약 44.1%에 해당하는 약 14.94억 m³(4,093,000 m³/일)이 매년 지하로 침투하여 풍부한 지하수자원을 이룬다. 1993년 현재 수 자원 개발량은 557,000 m³/일로서 이는 총 지하수함양량의 14%에 해당하며 현 이용량은 7%에 불과하다. 적정 개발 및 이용가능량은 개발대상 대수층의 효율성을 손상시키지 않는 범위 내에서 대수층으로부터 영구적으로 취수가 가능한 양이다. 즉 개발이용하는 지하수의 수질과 양이 영구적으로 변하지 않는 지하수 최적관리기법에 기초해서 평가되어야만 한다.

전술한 바와 같이 자연평형상태에서 지하수를 채수하면 오랜 기간동안의 부정류 비평형상태를 거쳐 새로운 평형상태에 도달하게 된다. 자연상태에서 지하수위는 강우조건, 조수위 등에 의해 일시적으로 변화할 수도 있으나 대수층의 변화는 매우 서서히 일어나게 된다.

평형상태의 수두(hydraulic head)를 주어진 기간에 대수층의 수직적인 규모를 나타내는 저유수위(storage head)로 표시하면, 일시적인 지하수위변동에 의한 영향을 줄이고 다음과 같은 지하수의 평형방정식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{dq}{dx} = S \frac{dh}{dt} + W [I, D, q(h)] \tag{8}$$

여기서, q는 비배출량(specific discharge 혹은 Darcian flux)이고, x는 해안으로부터 거리이며, h는 지하수위이고, S는 비산출율(Specific Yield)이다. 또한 I는 지하수 함양량이고, D는 총 지하수 개발량이며, q(h)는 해안을 통한 용천유출량이다. 지금 I>D 일때 대수층내 평형방정식은 다음과 같다.

$$q = I - D \tag{9}$$

기저지하수로 부터 해안 용천유출량 q는 Darcy법칙으로

부터 다음 (10)식과 같이 표시된다.

$$q = 41Kbh \frac{dh}{dx} = \frac{41Kb}{2x} h^2 = Ch^2 \quad (10)$$

제주도에서 지하수를 개발이용치 않았던 시기에는 (9)식에서 $D=0$ 이므로 $q=I$ 이다. 이때 고려 대상 지역의 초기수위를 h_0 라 하면 (10)식에서 $C=I/h_0^2$ 이 된다. (7)식에서 x 방향의 Darcian flux가 일정하다고 하면 $dq/dx=0$ 이 된다. 지금 대수층의 해수면상 유출단면적을 A 라 할 때 (7)식은 체적단위로 다음과 같이 표현가능하다.

$$41SA \frac{dh}{dt} = I - D - ch^2 \quad (11)$$

(11)식에서 $41SA = \lambda$ 라 하고 초기상태의 대수층의 전포화체적을 V_0 라 하면 $V_0 = 41hoSA = \lambda Ho$ 가 되므로 $\lambda = V_0/h_0$ 가 된다. 즉 (11)식은 시간(t)과 지하수위(h)의 함수가 되므로 이를 시간 t_i 일때 수두를 h_i , 시간 t_{i+1} 일때 수두를 h_{i+1} 라 하면 $I > D$ 인 조건하에서 (11)식의 해는 (12)식과 같이 된다(Mink, 1992).

$$h_{i+1} = h_0 \left(\frac{I-D}{I} \right)^{t_{i+1}-t_i} \left\{ \frac{(I-D)^{t_{i+1}} + \frac{h_i}{h_0} (I)^{t_{i+1}} \exp \frac{[2\{(I-D)t\}^{1/2} + (t_{i+1} - t_i)]}{v_0}}{(I-D)^{t_i} + \frac{h_i}{h_0} (I)^{t_i} \exp \frac{[2\{(I-D)t\}^{1/2} + (t_{i+1} - t_i)]}{v_0}} \right\} \quad (12)$$

(12)식에서 h_i 와 h_{i+1} 는 비평형상태 하에서 경과시간별 수두이며 $t \rightarrow V_0$ 일때 (12)식은 (13)식에 수렴한다. 즉 평형수두(h)는 (13)식으로 표시가능하다.

$$h = h_0 \left(\frac{I-D}{I} \right)^{V_0} \approx D = I \left(1 - \frac{h}{h_0} \right)^2 \quad (13)$$

(13)식에서와 같이 평형상태에서 지하수위는 지하수 함양량과 개발량의 함수로 표시되며 대수층의 크기나 대수층의 수리특성과는 무관하다.

(13)식은 자유면상태 하에 있는 기저지하수를 기준으로 유도된 것이므로 동일한 자유면상태 하에 있는 상위 또는 준기저 지하수체에도 적용할 수 있다.

지금 지하수 함양량이 일정한 경우 평형상태에서 지하수 개발가능량은 평형수두를 얼마로 정하느냐에 따라 결정된다. 즉 지하수 개발량이 지하수 함양량과 동일한 경우에 평형수두는 0가 되며 이때 대수층의 저유량도 0이 된다(한정상, 1988).

일개지역에서 평형수두를 결정할때는 기저 및 상위지하수의 규모, 대수층의 수리지질과 수리특성과 함께 채수에 따른 담수체의 수축, 염수침입과 오염의 확산 및 분산상태, 담수와 염수의 접이대의 확산과 이동상태에 대한 장기적인 자료를 필요로 한다. 또한 평형수두의 선정에는 이러한 대수층의

수리특성 외에 기존 용수개발 시설의 개발위치, 배열과 개발심도 등 제반요인에 따라 달라질수 있다. 예를 들면 개발대상 대수층에서 이미 개발된 관정의 배열이나 개발심도가 적정치 못하고 이들 시설물을 계속 이용할 필요가 있을 때에 평형수두를 적정 수두보다 높게 선정하므로써 용수 이용가능량이 적어질 수 있다.

용수 이용가능량은 또한 지하수의 보호, 관리규모에 따라 서로 달라질수 있다. 고지대에서 지하수 함양지역을 철저히 보호, 관리하여 지하수 함양량을 증대시키든가 해안연변에 인공 주입정(injection well)을 설치하든가, 지하댐이나 불투수성 재료를 주입하여 지하수위를 상승시키면 이용가능량을 증대시킬 수 있다.

대수층의 크기는 용수개발시설의 용량을 결정할 뿐만 아니라 평형수두의 선정에도 주요한 요인이 된다. 대규모 대수층은 상당기간 지속되는 갈수시에도 큰 영향을 받지 않으나 소규모 대수층은 이시기에 큰 피해를 받게 되며 과잉 채수가 장기간 지속될 때 염수침입에 의한 피해도 대규모 대수층에 비해 훨씬 크게 발생한다.

따라서 두터운 대수층은 h/h_0 의 비율을 높게 정하고 박층의 대수층은 그 비율을 낮게 책정해야 한다. 해안의 용천유출은 해당 대수층의 상류구배구간에 큰 영향을 주지 않는 수원이지만 산출량이 제한되어 있고 최근 이지역에서 각종 토지이용과 개발행위로 인해 인공 오염원에 의해 수질이 점차 저질화 되고 있다. 평형상태 하에서 상류구배구간의 용수개발로 인해 D/I 의 비율이 증가하면 해안 용천유출량은 감소하게 되며 기저지하수에 기원을 둔 용천 유출량은 이로 인해 염분의 농도가 증가하게 된다. 이러한 제요인을 감안할 때 제주도 지하수자원 개발은 수역 또는 대수층 단위로 종합적인 연구를 철저히 시행하여 해당지역의 적정 평형수두를 보다 과학적으로 결정할 필요가 있다.

하와이에서 지하수개발이 가장 활발히 이루어지고 있는 진주만 지역의 경우에 총지하수 함양량은 평균 $945,000 m^3/일$ 이며 이 중에서 허용취수량은 $850,000 m^3/일$ 로 규정하고 있어 총지하수 함양량의 90%를 이용하고 있다. $850,000 m^3/일$ 내에는 회귀수량이 포함되어 있어 이를 제하면 순지하수 이용량은 총함양량의 약 82%에 이른다. 기준 관측정에서 초기 수위는 해수면상 10.2m(33.5ft)이었는데 현재의 채수량이 계속될시 평형수두는 해발 4.4m(14.3ft)로 예측하고 있다(State of Hawaii, 1992b).

진주만수역은 산맥사이의 분지로 이루어져 있어 지하수 유출해안선이 짧고 또한 해안에 분포된 caprock에 의해 지하수 유출이 저지되고 있는데 비해 제주도는 원추형 상태의 해안선이 비교적 길어 진주만과 같은 지하수 이용율을 기대할 수는 없다. 따라서 지하수 개발가능량은 h/h_0 의 비, 즉 적정 평형수두를 어느 수준에서 결정하느냐에 좌우된다.

현 단계에서 지하수 적정 이용가능량은 각 수역간 대수층의 연결성, 대수층의 수리특성과 수질오염의 분산정도 등이 불확실한 상태에서 추정예의 존재할 수 밖에 없다. 따라서 본 연구에서는 지하수의 부존형태와 염수에 의한 해수침입 가능성 등을 고려하여 각 지역별 h/h_0 비를 상대적으로 평가하

Table 8. Sustainable yield of groundwater resources of the Cheju Island

Content	Recharge	Sustainable	Percentage(%)
North area	657	335	51
South area	820	286	35
West area	570	331	58
East area	2,046	737	36

여 적정개발량을 추정하였다. 남부지역을 제외한 도내의 상위지하수는 산출량의 불확실성때문에 국지적인 용수해결에 이용되어야 할 것이다. 또한 ?정에 의한 지하수개발은 지하수위가 최소 EL+2m이상 되는 지역에서만 개발되어야 하며, 대용량 관정은 내륙쪽으로 더 이동하여 설치해야 한다.

동부지역에서 기저지하수 개발은 해안으로부터 염수침입의 허용범위가 개발가능량 설정에 주요기준이 될것이다. 동부지역에서 기저지하수의 수위가 EL+5m되는 지역에서 평형수두를 EL+1m 까지 하강시킬때 즉 평형수두를 현수두의 80%로 유지시킬때 적정 개발가능량은 이지역 지하수 함양량의 35%에 해당하는 일평균 737,000m³정도가 된다. 이와 같이 동부지역에서 함양량의 35%를 최적 개발가능량으로 산정하여 지하수를 장기간 개발 이용할 때에는 본 지역에 소재한 해안용천수의 염도는 다소 증가할 것으로 예상된다. 따라서 해안변에서 생활용수로 이용하고 있는 시설관정은 타용도로의 전환해야 할 것이다. 동부지역 에서 지하수 개발가능량은 추후 수자원개발의 진척에 따라 대수층의 수축상태를 면밀히 연구하여 지속적인 조정이 필요할 것으로 사료되나 현 단계에서 상술한 지하수 개발가능량은 충분한 여유를 가지고 있다.

주로 준기저 또는 상위지하수가 분포되어 있는 북부지역은 지하수개발에 따른 염수의 역상승현상에 대한 우려가 별로 없으므로 기저지하수에 비해 대수층의 염수침입 위험도가 높지 않다. 그러나 개발지점 표고와 대수층의 층후가 이용가능량 설정에 주요한 지표가 된다. 따라서 북부지역의 준기저 또는 상위지하수의 평형수두를 현수위의 70%로 유지시킬때 지하수 개발가능량은 지하수 함양량의 약 51%에 해당한다.

서부지역은 기저 또는 준기저지하수가 광범하게 부존되어 있고 대수층하부에는 서귀포층이 널리 분포되어 있어 본도에서 지하수개발에 가장 유리한 입장에 있다. 본역 대수층의 평형수두를 당초 지하수 해수면상 수위의 65% 수준에서 유지시킬때 지하수 적정 개발가능량은 지하수 함양량의 58%에 해당하는 약 331,000 m³/일에 이른다.

남부지역의 지하수는 대부분 상위지하수로 구성되어 있으며, 타지역과 달리 조면암류가 해안연변을 따라 분포하여 대수층의 생산성이 비교적 저조하다. 따라서 본 지역에서 지하수 개발은 해안변의 용천수가 주대상이 되며, 대형관정에 의

한 지하수개발은 제한을 받고있다. 더욱이 본지역에는 천제연, 정방등의 경관이 수려한 폭포가 위치하고 있어 폭포수의 확보도 하나의 과제로 볼수있다. 남부지역에서 조사된 용천수량은 320,940m³/일로 추정된다. 이는 본 지역의 지하수함양량인 820,000m³/일의 약 39%에 이르고 있다. 따라서 이러한 현상을 고려하여 남부지역 지하수에서 개발가능량을 지하수 함양량의 35%로 설정하였다. 이를 종합하면 Table 8과 같다. 따라서 도내 지하수 이용가능량중 최적 개발가능량은 전체함양량의 약 41%에 해당하는 1,690,000m³/일 정도이다.

결론

1. 지하수의 지역별, 수역별 최적 개발가능량(sustainable yield) 산정 평가시에는 정확한 기상, 수문자료가 가장 중요한 인자이다. 따라서 도내의 중산간지역에 측우소와 주요하천에서 유량을 지속적으로 측정할 수 있는 수위표와 weir가 추가로 설치되어야 한다. 뿐만아니라 지하수위와 수질, 대수층의 수리특성, 염수와 담수체의 경계면의 변동에 대한 장기적인 관측이 수행되어야 할 것이다.
2. 현재까지 알려진 제주도의 기저 저투수성 퇴적층인 세화리층의 평균 분포심도 EL-(120±68)m 정도이고 이층의 두께는 163.5±74.5m 정도이다.
3. 본도 대수층의 하부 Neuman boundary가 될 세화리층의 분포상태를 보다 정밀하게 파악하고, 세화리층의 대수성수리상수를 규명기 위해 최소 동부지역에 3개소, 서부에 3개소, 북부에 3개소, 남부에 3개소에서 세화리층을 관통할 수 있는 시험시추와 대수성시험과 토질시험이 수행되어야 한다.
4. 특히 서부지역과 남부지역에 분포된 서귀포층군 하부 지하수환경과 그 수리성을 파악키위하여 3항의 조사시 이에 대한 조사도 동시에 시행해야 할 것이다.
5. 만일 세화리층이 전도에 걸쳐 분포되어 있을시 제주도 내 지하수는 주로 준기저지하수로 구성될 것이고, 준기저지하수가 제주도의 주용수원이 될 것이다.
6. 제주도 내에 발달 분포된 대수대의 평균 투수량계수는 29,300m³/일 이며 평균 수리전도도는 84.17m/일이고 평균 저유계수는 0.12이며 평균 수온은 15.8℃이다. 그러나 본 수리상수중 수리전도도는 DGH의 원리를 적용하여 구한 것이므로 추후 기저 퇴적층의 분포상태에 따라 수정되어야 할 것이다.
7. 물수지분석 결과 제주도의 년평균 강수량은 1,872mm 로써 연간 총강수량은 33.9억m³이고 이중 18.9%에 해당하는 6.38억m³은 하천유출의 형태로, 37%에 해당하는 12.56억m³은 증발산으로 유실되고 강수량의 44.14%에 해당하는 14.94억m³은 매년 지하로 침투하여 지하수가 된다.
8. 본도에 부존된 지하수부존량은 13년 강수량에 해당하는 약 440억m³이다.
9. 본도의 최적 개발가능량은 연간 함양량의 41%에 해당하는 일평균 1,690,000m³이다.

참고문헌

농어촌진흥공사, 1989, 제주도 지하수 장기개발계획 조사 보고서.
 농어촌진흥공사, 1970-1992, 제주도 지하수보고서 총 2권.
 이동영, 김주용, 1993, 제주도의 화산활동, 제주도 화산지질에 대한 심포지움.
 이문원, 1994, 제주도의 형성사와 지질구조, 제주도 지하수자원의 환경학적 보전 개발 이용, 대한 지하수환경학회지, p.54-75.
 한국수자원공사, 1993a, 제주도 수자원 종합조사, 자료집(2권).
 한국수자원공사, 1993b, 성산도폭지질도 설명서.
 한정상, 안종성, 1984, Environmental isotope-aided studies on water resources in the region of the Cheju Island, 한국수문학회지, v.17, No.2, p.72-29.
 한정상 등, 1988, 금촌 정호장의 취적채수량 및 물수지분석에 관한 연구, 지질학회지, v.24, No.2, p.140-172.
 한정상, 1992, 제주도 환경보전 종합대책, 환경처 광주시방환경청, p.71-230.
 한정상, 1994, 제주도 지하수자원의 보호전략에 관한 연구, 지질학회지, v.30, No.3, p.325-340.
 Boutwell, S.H. *et al.*, 1986, Modeling remedial actions at uncontrolled hazardous waste sites.
 BWS/City and County of Honolulu, 1982, Groundwater/summary report, p.1-40.
 Canter, L.W. *et al.*, 1986, Groundwater pollution control, Lewis pub., p.1-521.
 Duffield, M. *et al.*, 1990, AQTESOLV, Aquifer test solver, G.M. Inc., 133p.
 Min, J.F. *et al.*, 1992, Aquifer identification and classification for Kauai ; Groundwater protection strategy for Hawaii, WRRC/Uni. of Haii, p.1-21.
 State of Hawaii, 1992a, Hawaii administrative rules, chapter 183, 184, 185, 174c, amendment to chapter 13-169.
 State of Hawaii, 1992b, Maui County water use and development, Commission of Water resources management/Dept. of land and natural resources.
 UN/Division of technical co-operation, 1989, GW user's manual, Groundwater software-part one, p.51-60.
 Walton, W.C., 1985, practical aspects of groundwater modeling, NWWA, p.55-56.