

제주도 지하수자원의 최적 개발가능량 선정에 관한

수리지질학적 연구

한정상 (한서엔지니어링)·김창길 (유신설계공단)
김남종 (한국수자원공사)·한규상 (한서엔지니어링)

요 약

제주도 지하수자원의 산출특성을 규명키 위하여 총 455개 공의 자료를 전산처리하여 지역별 대수층 수리특성을 규명하였다. 제주도는 주로 현무암 내에 협재된 화산쇄설층, crinker층과 현무암의 1 및 2차 유효공극이 주 대수대의 역할을 하며 이들은 기저, 준기저 및 상위대수층으로 구성되어 있다. 본도 대수층의 평균 투수량계수는 $29,300\text{m}^2/\text{일}$ 이며 평균 저유계수는 0.12로써 자유면 대수층을 이루고 있다. 종합적인 물수지 분석을 실시한 바 본도에 부존된 지하수 부존량은 약 $440\text{억}\text{m}^3$ 이고, 년평균 강수량은 $33.9\text{억}\text{m}^3$ 으로써 이중 하천유출량은 $6.38\text{억}\text{m}^3/\text{년}$ 이며, 증발산량은 $12.56\text{억}\text{m}^3/\text{년}$ (37%)이고 지하수함양량은 년평균 강수량의 44.1%에 해당하는 $14.94\text{억}\text{m}^3$ 이다. 본도에 부존된 지하수의 최적 개발가능량(sustainable yield)을 각 지역별로 정량적으로 계산한 결과 그 양은 함양량의 41%에 해당하는 $6.2\text{억}\text{m}^3/\text{년}$ ($1,689,000\text{ m}^3/\text{일}$)정도였으며 잔여 $8.74\text{억}\text{m}^3/\text{년}$ ($2,404,000\text{ m}^3/\text{일}$)은 해안이나 해저용천으로 유출된다. 특히 최근 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 요인이다.

ABSTRACT : The Hydrogeologic data of 455 water wells comprising geologic and aquifer test were analyzed to determine hydrogeologic characteristics of Cheju island. The groundwater of Cheju island is occurred in unconsolidated pyroclastic deposits interbedded in highly jointed basaltic and andesitic rocks as high level, basal and parabasal types under unconfined condition. The average transmissivity and specific yield of the aquifer are at about $29,300\text{m}^2/\text{day}$ and 0.12 respectively. The total storage of groundwater is estimated about 44 billion cubic meters(m^3). Average annual precipitation is about 3390 million m^3 among which average recharge amount is estimated 1494 million m^3 being equivalent 44.1% of annual precipitation with 638 million m^3 of runoff and 1256 million m^3 of evapotranspiration. Based on groundwater budget analysis, the sustainable yield is about 620 million m^3 (41% of annual recharge)and rest of it 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 was situated at the $120 \pm 68\text{m}$ below sea level. And also the other low-permeable sedimentary rock called Segipo-formation which is deemed younger than former marine sediment is occurred at the area covering north-west and western part of Cheju at the $\pm 70\text{m}$ below sea level.

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

1. 지형과 지질

지형

제주도는 장축의 길이가 약 74km이고, 단축의 길이가 약 32km인 타원체이며, 중앙부에 해발고도 약 1,950m인 한라산체가 있다. 한라산을 중심으로 동서사면은 $3 \sim 5^\circ$ 의 매우 완만한 경사를 이루고 있으나 남북방향에서는 약간 급한 5° 내외의 경사를 이루고 있다. 타원형의 장축 방향은 $N70^\circ E$ 로서 한반도의 남해안선과 나란하고 요동방향과 일치한다. 특히 이 장축방향선상에는 기생화산이 많이 분포되어 있는 것이 특징이다.

전체 지형은 해발고도와 경사도에 따라 해안가에서 해발고도 약 200m까지의 해안저지대, 200~400m사이의 중산간지대, 그 이상에서 한라산 정상부근까지의 한라산체 등으로 구분된다. 본도의 동서 양사면은 대지상의 해안저지대와 중산간지대가 넓게 분포한다. 반면에 남북 양사면에는 해안저지대와 중산간지대의 면적이 좁고 한라산체가 많은 부분을 차지한다. 본도는 전체적으로 보아 Shield volcano의 아스피테형 화산이다.

수계는 대체로 한라산과 동서장축을 분수령으로 하여 약 60여개의 대소하천이 남류 또는 북류하며 본도의 동서부지역에서는 하천의 발달이 극히 빈약하다. 수계의 형성은 지면의 용암류의 종류, 용암류의 경계 및 지형경사도에 따라 영향을 받게 된다. 특히 용암류의 경계와 용암터널이 합몰된 합몰지역은 한라산 정상에서 해안쪽을 향하여 수십 km길이의 깊게 V자형 침식계곡을 따라 발달하는 것이 특징이다. 조직이 치밀한 하와이아이트는 지표수의 지하침투가 불량하고 주상절리를 따라 괴상붕괴가 용이하기 때문에 깊은 계곡이 발달되고 있다.

본도 하천의 대부분은 손실하천(losing stream)이며, 지속하천은 북류천중 도근천, 산지천, 한림천이 있고 남류천으로는 중문천, 강정천, 창고천 등이 있으나 이들은 모두 용천에 그 수원을 두고 있다. 해안을 따라 발달하는 해식애는 화산쇄설성 퇴적암류로 구성되어 있는 송악산, 산방산, 일출봉 등지를 제외하면 서귀포-중문-대평리 지역에 한정되어 있다. 이것은 조직이 치밀한 하와이아이트가 이들 지역에 분포하는 것과 밀접한 관계가 있다. 본도의 북부와 동서 해안저지대의 해안을 따라 사구가 발달하는데 이들은 남동 및 북서 계절풍에 의하여 형성된 것으로서 내륙쪽으로 해발고도 약 100m에 까지 침입한 곳도 있다.

지질과 지사

제주도는 현무암류, 조면암질 안산암류, 조면암류 등의 화산암류와 서귀포층, 성산층, 신양리층과 같은 화성기원의 퇴적암류와 기생화산 등으로 구성되어 있으며 이중 현무암이 전도의 90%이상을 차지한다.

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

제주도의 기반은 최근에 실시한 심부 시추자료와 화산체설물에 포함된 암편의 종류를 관찰한 바 유라기의 대보화강암, 백악기의 퇴적암류, 응회암류, 화산암류로 구성되어 있는 것으로 해석된다. 이들 기반암의 상부(현 해수면 하부 약 100m에서 200m사이)는 미고결 저투수성 퇴적층(일명 세화리층)이 분포되어 있는데, 유공층과 패류화석을 함유하는 것으로 보아 해성층으로 해석된다. 그림 1은 최근 온천개발을 위해 굴착한 심부 시추위치와 시추주상도로써 지표에 분포하는 현무암류는 지하 50m~160m까지 연속되고 있으나 그 하부에는 100~200m 두께의 소위 세화리라 불리우는 미고결 퇴적층이 분포한다.

세화리층의 하부 해수면하 약 500m까지는 백악기 응회암으로 구성되어 있다. 이들 기반암을 피복하고 있는 제 1 단계의 화산활동에 의해 형성된 현무암류는 지표에서는 관찰되지 않으나 응회암 내에 포획되어 있는 암편과 시추자료에서 확인되며, 현무암류의 연대는 K-Ar 연대측정 결과 0.94~1.20Ma이다. 제주도 남사면에 분포하는 산방산 조면암은 제 1단계 말기의 분화물로서 분출시기는 K-Ar 연대측정 결과 0.87~0.75Ma이고, 고지자기측정 결과 Matuyama Magnetozone에 해당한다. 제주도 남부해안에 동형대로 분포하는 범섬, 문섬 및 각시바위 등은 이 시기의 최종분화물이다. 이 화산암층의 상부에는 패류화석이 들어 있는 사질의 해성층이 현재의 해수면하 약 50m 하부에 분포하고 있으며, 이들은 제 2단계의 화산활동기에 속하는 침상장석감람석현무암류에 의해 피복되어 있으며 이 퇴적층은 일명 서귀포층으로 명명되고 있다.

제 2단계 화산활동기에 속하는 침상장석 감람석현무암류는 약 0.60Ma 전부터 수십회의 분출을 계속하여 현 제주도 동부와 서부에 넓은 용암대지를 형성하였다. 이 시기는 점성이 낮은 용암류를 다량으로 분출하여 현 제주도의 형태를 이루었으며, 해발고도 1,000m 이상의 한라산체를 제외한 제주도의 현재 해안선의 외형이 형성된 시기로 생각된다.

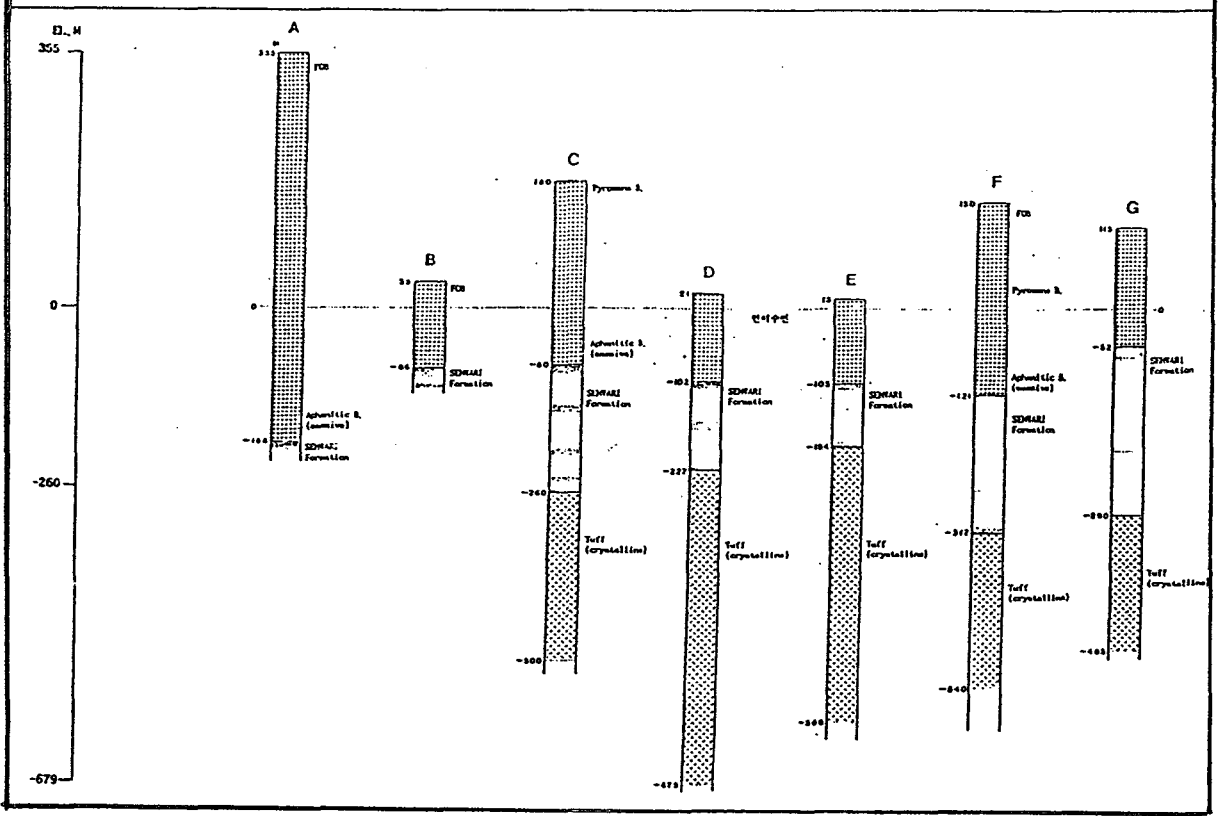
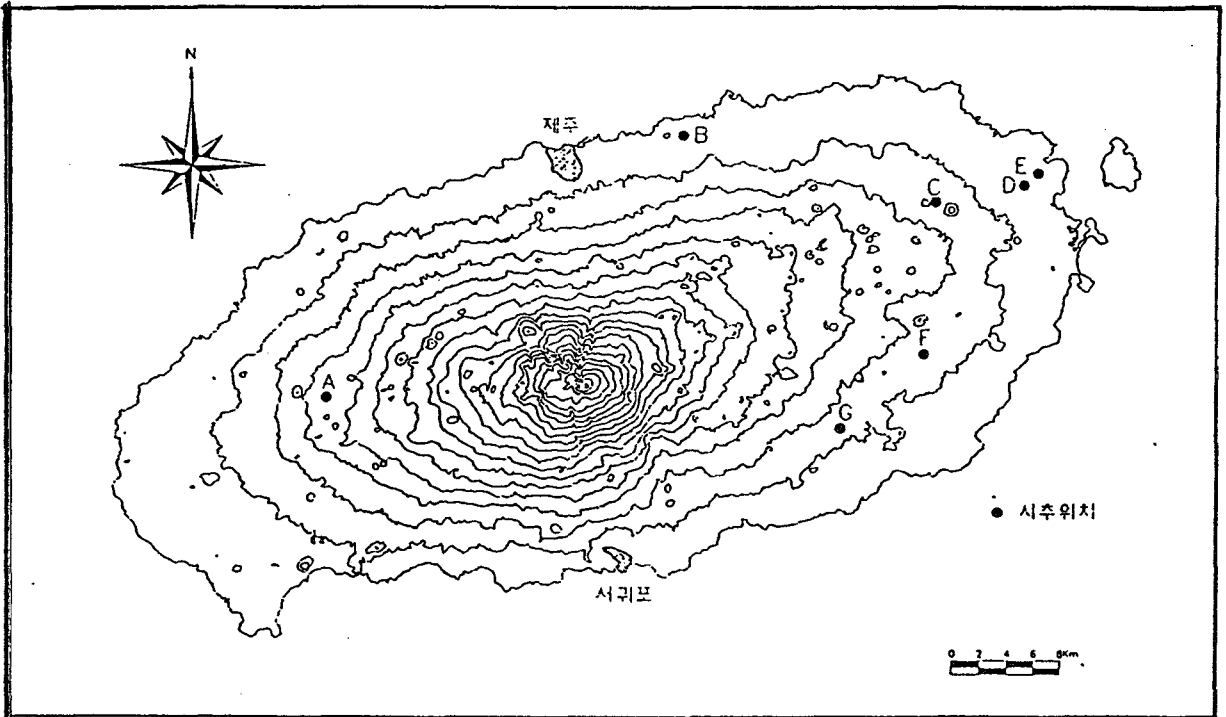


Fig. 1. Location and drill log of thermal water wells in Cheju.

Table 1. Geological sequences of Cheju volcanic and sediment rocks

Stratigraphic Age		Paleo-magnetic Age	Sequence of volcanic & sediment rocks			
			Volcanic maturity	Volcanic flow & Rock type	Parasitic volcano tuff cone	Sedimentation
Recent		Brunhes Normal Epoch	4th stage	Cinder cone	cinder cone	sand dune
10000yrs	Upper			Hanra-san musiolite Baklokdam basalt		
0.125Ma	Middle		3th stage	Yongsil Musiolite	Ilchulbong	paleo-soil
Pleisto-cene				Aphanitic augite basalt	Songac Mts. Suwol-bong	
			0.41Ma	2nd stage	Seogipo-Hawaiite Olivin basalt	
0.73Ma	Lower	1st stage	Sanbongsan trychite Basal augite basalt	Dan Hwasoon	Basal-tuffaceous sedimentary rock	
0.87Ma			Matuyama Reversal Epoch			
Paleogene to			Yucheon group(crystalline tuff) granite			

서귀포층을 피복하고 있는 하와이아이트는 K-Ar연대측정값이 0.41Ma이다. 이 용암류는 제주도의 중산간 지대와 한라산 화산체의 하부를 이루며, 제주도의 순상화산체를 형성하였다. 해안저지대에 큰 규모로 발달된 용암터널은 이 시기에 분출한 다량의 감람석 현무암에 의해서 형성된 것이다.

제주도에 대한 기존의 연구 결과에 따르면 시추코아속에서 패류화석이 포함된 퇴적층이 산출되면 과거에 이를 서귀포층으로 명명하였다. 기존의 서귀포층이라고 명명된 원래의 지층은 서귀포시 남성리 해안의 해식애에서 해수면상부 약 30m까지에 분포하며 패류화석을 많이 포함하고 있는 지층이다. 플라이오세에 속하는 것으로 해석되어왔던 서귀포층은 0.61~0.41Ma사이와 중기 프라이스트세에 일어났던 해침에 의하여 해안가에 국지적으로 퇴적된 천해성 퇴적층으로 해석된다(원종관, 1993).

순상화산체를 부정합으로 피복하는 제 3단계의 화산활동은 현재의 한라산화산체를 중심으로 진행되었다. 제1단계나 제 2단계의 화산활동시 분출된 용암류가 감람석 현무암류이거나 비현정질 하와이아이트인데 반해서 이 단계에서 분출된 용암류는 장석 및 휘석 반정이 많은 현무암인 것이 특징이다. 한편 이 단계에 해안가에서도 화산활동이 있었으며, 수월봉, 송악산, 성산일출봉 등은 이 활동기에 형성된 응회구 또는 응회환으로서, 이때 해침이 일어나 화산이 활동할 때 물이 화구로 들어갔음을 시사하고 있다. 제 3분출기 최중기에는 한라산 정상부근에 분포하는 영실 조면암 등을 분출하였으며 그 시기는 K-Ar연령측정값으로 0.16Ma이다. 따라서 현재와 같은 한라산 화산체의 대체적인 모양은 이 시기에 형성된 것으로 해석된다.

제4단계는 약 0.125Ma 이후 상부 플라이스트세 동안 순상 한라산 화산체의 산사면에서 소규모의 용암분출 또는 분석구를 형성한 시기이다. 이 시기의 분출은 특히 장축방향에 따라 활발하게 일어났다. 이들의 일부는 현재의 해안저지대까지 분출되었으며 약 0.03Ma의 K-Ar연대 값을 갖는 것도 있다. 제주도 남부 병악에서 분출되어 산방산 동쪽 해안까지 흐른 용암류와 성산 지미봉에서 분출된 용암류는 이 시기의 것으로 해석된다.

이 기간동안 현 해안 주변에는 해변 퇴적층이 퇴적되었는데 이를 신양리층이라 부른다. 신양리층은 해수면 상에 수 m 까지 노출되어 있으며, 이는 Riss-Wurm 간빙기에 퇴적된 것으로 해석된다(이동영, 김주용, 1993). 이 단계의 말기에는 한라산 정상부에서 조면암류의 분출과 함께 정상부에 백록담이 형성되고, 그후 다시 더 젊은 용암류가 분출한 것으로 관찰된다. 한라산 화산체가 형성된 후, 침식작용은 계속되어 곳에 따라 화산체의 원지형이 파괴되었으며, 침식윤회로 보아 한라산 화산체는 화산단계 내지 프라네즈단계에 해당된다. 완만한 경사로 해안으로 연결되는 해안선 부근의 저지대에는 탁월봉에 의해 형성된 해안사구가 분포되어 있다. 용암층 사이에서도 사구사가 발견되고 있어 사구의 형성은 화산활동기간 중에도 있었던 것으로 해석된다.

1993년에 제주도는 대한지질학회에 의뢰하며 성산도폭(Kowaco, 1993)에 대해 정밀 세부 지표지질조사를 시행한 바 있다. 이 지질조사 결과에 의하면 70년대에 작성했던 지질도폭 조사결과와는 상당히 새로운 사실들이 많이 발견된 바 있다. 따라서 제주도의 지질분포상태는 년차적으로 시행될 세부 지표지질조사 결과에 따라 점차적으로 재수정 보완되어야 할 것이다.

2. 지하수 부존과 산출특성

지하수의 부존특성

대수층 - 본도의 화산암류중에서 투수성이 가장 양호한 암석은 장석 감람석 현무암(FOB)과 장석 휘석감람석 현무암(FAOB)이며 이들은 보통 3m내외의 암층으로 구성되며 각 암층간에는 화산쇄설층과 crinker를 협재하고 있다. 화산암층내의 주대수층은 용암류 사이에 협재된 화산쇄설층과 crinker로써 그 두께는 화산암의 20%에 해당한다(ADC, 1989a, 1970-1992b). 또한 화산암내에 발달된 균열, 절리와 기타 불연속면들은 지하수의 하방유동을 쉽게 한다. 남부해안 지역에 분포된 괴상의 조면암류는 투수성이 낮아 대수층으로서의 역할은 낮으나 암층간의 풍화면상부 화산쇄설층은 좋은 대수층을 이루고 있다.

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

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

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

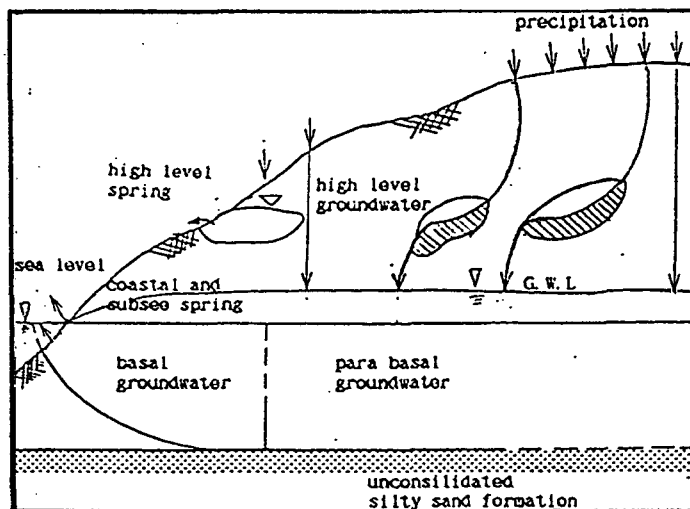


Fig. 2. Schematic diagram of cheju groundwater

상위지하수(High level groundwater) : 상위지하수는 중산간지대 및 고지대와 남북부해안 지역 전역에 걸쳐 넓은 지역에 분포되어 있다. 상위지하수는 부존상태에 따라 첫째로 비포화대내에 단속적으로 부존하여 타 대수층과 수리적으로 연결되지 않은 일종의 부유지하수(Perched aquifer)이다. 상위지하수 담수체는 대체적으로 해수와 직접적인 접촉을 갖지 않아 지하수질은 매우 양호하며 불연속 또는 국지적으로 분포하여 그 규모가 크지않아 강수에 따라 담수체에 변화가 심하며 계절적으로도 유량과 수위변동이 크게 발생한다. 따라서 상위지하수체는 동일 지질조건하의 기저지하수체에 비해 그 생산성이 낮다(한정상, 1990).

기저지하수(Basal groundwater) : 기저지하수는 동부지역의 조천, 신촌에서 남원지역과 서부지역 한림, 고산 및 한경수역에서 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 해안변에서와 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 조수의 영향에 의해 해수와 염수가 혼합된 점이대가 발달되어 있다. 점이대 두께는 담수체의 두께가 두터운 상류 구배구간에서는 얇으나 해안으로 가까워질수록 두터워지며 해안유출지점에서는 담수체의 전체층이 점이대로 형성되기도 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, 1982b). 준기저지하수체에서 지하수를 개발할 시에는 염수와 담수의 접촉면이 내륙쪽으로 이동되는 것을 고려하여 개발량과 유입량이 평형을 이루도록 해야 한다. 세화리층의 분포규모로 보아 준기저지하수는 추후 제주도 지하수자원의 주 공급원이 될 수 있는 지하수체이다.

본도에서 저투수성 퇴적층으로 분류되는 서귀포층의 분포지역에서 관정 개발 당시의 자연수위와 이번 연구시 측정한 수위자료와 퇴적층의 표고자료를 요약하면 표 2와 같다. 표 2에 의하면 서귀포층의 분포심도는 대체로 해안변에서 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 7개공의 심부시추공 굴착결과에 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(동.서 북부일원의 7개공 자료) 그 분포심도는 EL-(120±68)m이다. 상술한 7개공의 심부 시추자료를 살펴보면 특히 동부지역에서 세화리층의 분포심도는 내륙쪽으로 갈수록 깊어지고 반대로 해안쪽으로는 얕은 심도에서 산출된다(그림 1). 제한된 자료이기 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. 표 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(농어촌진흥공사, 1970-1992).

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 세화리층의 평균 해수면하 분포심도는 EL-105m 정도이고 본층의 평균 두께는 166m 정도이다. 추후 심부시추공 자료가 축적되는대로 세화리층의 분포심도와 두께가 더 정확히 규명되겠지만 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(Cauter, 1986). 또한 도내에 분포된 현무암 대수층의 평균 비산출율은 0.12이므로 그 공급율은 최소 0.2를 상회할 것이다(Walton, 1985). 따라서 상위지하수를 제외한 본도에 부존된 기저 및 준기저지하수량은 최소 440억 m³ (1810x10⁸(59x0.2/3) + 105x0.2)에 이른다.

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 불투수층을 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 수리지질학적인 동수구배를 따라 해안으로 이루어다가 해안선 일대에서 유출되는 용천으로써 동부지역 용천수가 기저지하수로부터 용출되고 있으며 북부지역의 삼양 용천과 남부지역이 자갈이 용천 등도 이에 속한다.

해안용천 : 과거에 용천개발은 주로 해안지대에 간단한 집수시설을 설치하여 부락단위의 식수로 이용해 왔으나, 현재에는 생·공·농용수 등 다용도로 이용되고 있으며, 수원이 지표면에서 자연용출되고 있어 타수원에 비해 개발이 용이하여 본도 용수 해결에 큰 비중을 차지하고 있다. 그러나, 해안저지대 용천은 대부분 주거지역과 농경지에 인접해 있어 생활하수와 각종 비료퇴비 사용에 따른 지표오염원에 의해 virus나 E-coli 및 질산성질소에 완전 노출되어 있고 특히 동부와 서부지역의 해안 용천은 염분함량이 높다(Kowaco, 1993). 따라서, 장래 해안용천수 개발 이용시에는 반드시 수질오염대책을 세운 후 용천수의 용출형

Table 2. The elevation of Seogipo fromation

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 (EL. m)	Remarks		
					static	pumping						
West Area	Hankyung	D-103	44.50	122.00	9.50	-45.50	2000	2900	-71.80	Average depth : EL-52.5m Range : EL-32 to -72.8m		
	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			
	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	3.69	-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	-2.50	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 : EL-42.3m
		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 Range : EL-5.57m to 144.8m
	Daejeong	D-004	78.43	104.00	46.73	19.03	1034	2900	-5.57			
	Daejeong	D-100	43.75	61.00	18.05	3.75	1400	3700	-16.25			
	Daejeong	D-193	35.50	92.00	12.00	-29.50	1700	3000	-54.50			
	Daejeong	D-199	14.74	70.00	0.74	-5.26	1000	500	-54.76			
	Daejeong	D-185	42.50	95.00	19.50	-2.50	2000	4500	-45.50			
	Daejeong	D-095	47.50	75.00	27.90	23.00	1710	4400	-24.50			
	Daejeong	D-107	47.30	85.50	32.40	30.30	2030	3750	-25.70			
	Daejeong	D-197	62.10	100.00	30.10	12.10	1500	4800	-33.90			
	Daejeong	D-114	17.20	70.00	2.20	-2.80	2160	1350	-144.80			
	Daejeong	D-055	15.82	63.00	2.42	1.42	2200	1000	-41.68			
	Daejeong	D-081	16.74	130.00	5.64	-16.26	1615	800	-100.76			
	Daejeong	D-159	160.00	164.00	60.20	58.00	1200	9750	2.00			
	Daejeong	D-145	43.20	115.00	8.20	3.20	1802	3600	-67.80			
	Daejeong	D-122	33.00	104.00	8.30	0.90	1770	2600	-41.70			
	Daejeong	D-017	32.50	114.00	10.10	2.80	2030	2900	-69.00			
	Daejeong	D-099	42.50	112.00	0.10	-4.20	1500	3300	-60.50			
	Daejeong	D-146	53.50	120.00	9.50	-21.50	1503	3900	-63.50			
	Daejeong	D-113	23.00	80.00	5.60	-2.30	2030	750	-53.00			

(Table 2의 계속)

Location	Name of watershed	Well No.	Elevation (EL. m)	Depth (m)	Water level(EL. m)		Pumping rate (CMD)	Distance of sea coast (m)	Elevation of Seogipo formation (EL. m)	Remarks
					static	pumping				
North Area	Aewol Aewol	D-044	32.26	130.00	10.80	2.26	1000	650	-72.54	Average depth : EL-75.53m
		D-027	40.18	135.00	9.05	-4.82	1339	1150	-78.52	
	East Cheju	D-127	145.28	180.00	23.28	9.28	1230	4400	-17.22	
East Area	Nanwon Nanwon	D-129	143.91	170.00	40.91	19.91	1400	3800	-3.19	Average depth : EL+7.2m
		D-097	134.61	170.00	39.41	24.61	1050	2700	17.61	
South Area	East Seogipo	D-125	109.26	165.00	68.26	27.26	2030	3500	23.26	Average depth : EL+25.4m
		D-177	190.47	195.00	145.27	85.47	1200	5000	42.97	
		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	
	Middle Seogipo	D-108	73.16	100.00	56.16	56.16	2030	1900	-11.94	Average depth : EL+21.3m Range : EL-44.93m ~ EL+148m
		W-004	70.30	42.50	57.07	39.30	1500	1500	29.20	
		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	148.00	
		D-215	180.00	196.00	133.50	115.00	1500	3200	-9.00	
		D-101	162.00	190.50	109.00	24.00	1050	2100	12.00	
		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 depth : EL+29.95m Range : EL-55.9m ~ EL+94.5m
		D-178	52.44	90.00	37.94	-11.56	1300	1300	4.54	
		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	
		D-168	113.17	130.00	77.17	53.17	2000	1800	5.17	
		D-111	100.00	222.00	38.00	-65.00	1000	850	4.50	
		D-205	160.00	170.00	78.00	40.00	1200	2500	44.00	
		D-039	140.00	150.00	58.80	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 depth : EL+35m
		D-049	124.82	135.00	84.62	50.52	850	2900	49.92	
		D-138	80.00	90.00	42.60	29.50	2445	1550	35.00	

* Sources of data : ADC drilling report

태, 용출량, 수질, 장래오염요인 등을 면밀히 분석하여야 한다. 본 연구시 과거 농어촌진흥공사(1989년), 한국수자원공사(1981, 1982년) 등 관련기관에서 현재까지 조사한 해안 용천수 자료를 최대한 이용하였는데 그 결과에 의하면 해안저지대에 위치한 용천은 대체적으로 383개소에 이르며 1일 용출량은 약 $1,078,000\text{m}^3$ ($3.9\text{억}\text{m}^3/\text{년}$)으로 추산된다.

고지대 용천 : 고지대용천은 부유지하수 형태로 부존된 상위지하수가 지표로부터 용출되는 지하수노두이다. 여태까지 조사된 중산간 및 고지대에 위치한 용천은 현재까지 총 20개소로서 그 용출량은 $320,000\text{m}^3/\text{일}$ 로 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.

어승생의 어리목계곡 용천은 백록담장석현무암내에 발달된 부유상태의 상위 지하수부존대(표고 약 $1,200\sim 1,400\text{m}$)로부터 장석현무암과 조면암질 안산암의 접촉부에 발달된 화산쇄설층 및 장석현무암내의 Clinker를 따라 지표로 유출되고 있는 고지대 용천으로써 용출량이 상당히 크다. 따라서 Y 계곡(EL. $1,100\text{m}$)지점에 취수보를 설치(약 $20,000\text{ m}^3/\text{일}$)한 후 어승생댐으로 도수하여 현재 이를 각종 용수로 이용하고 있다.

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

분석결과 용출량은 5월 부터 서서히 증가되다가 9월에 이르면 최대가 된다. 갈수기는 10월 부터 4월까지 지속되며 갈수기중 12월이후 겨울철에서 봄철사이의 산악형 강설과 해빙의 영향으로 일시적인 용출량 증가 현상을 보이기도 한다. 그러나 9월의 최대 용출량은 감수곡선을 이루면서 5월에 최소가 된다. 분석기간중 풍수기때 최대용출량은 약 $31,500\text{m}^3/\text{일}$ 이었으며 갈수기때 최소용출량은 $8,300\text{m}^3/\text{일}$ 정도였다.

또한 분석기간동안 어승생댐 우량관측치를 기준으로 등우선도를 이용하여 면적강우량을 구해본 바 그 값은 연평균 $3,050\text{mm}$ 이었고 3년간 누가강우총량은 $40,442,000\text{m}^3$ 에 정도였다. 또한 어승생댐 운영일지를 이용하여 용출지점에서 3년간 총용출량을 계산한 바 그 양은 $18,628,500\text{m}^3$ 정도였다. 따라서 총강우량에 대한 총용출량의 비율 즉 본유역 지하수 함양률은 약 46% 이다. 본 지점에서 상위대수층의 총 저유용량은 갈수기 지하수감수곡선을 추정후 산정하였으며, 지하수감수곡선은 반대수지를 이용한 주지하수 감수곡선 분리법을 적용하여 산정한 바 그 관계식은 다음과 같다(그림 3).

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

여기서 대수층 포화 후의 초기용출량을 풍수기 말기인 9월의 3년간 평균 용출량으로 가정하면 약 $24,000\text{m}^3/\text{일}$ 로 산정되며, 이를 상기 식에 대입하면 대수층의 총저유용량(V_0)은 약 $1,700,000\text{ m}^3$ 으로 추정된다($V_0 = Q_0/a$).

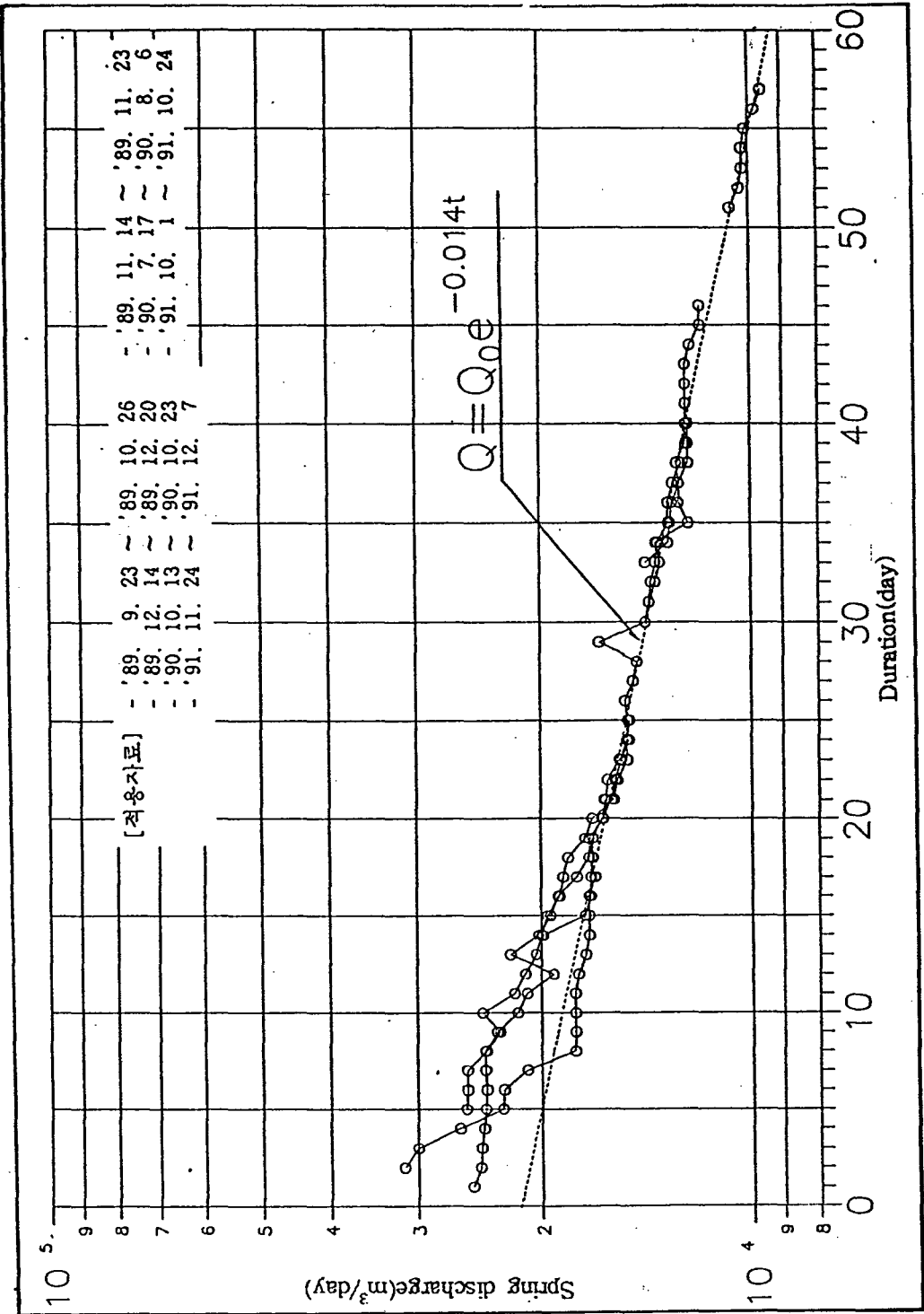


Fig. 3. Recession curve of high level groundwater in Eosungseng reservoir of Cheju(KOWACO, 1993)

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 관정설치지점의 수리특성인자인 투수량계수(T)와 저유계수(S)와 수리전도도(K)값은 그동안 제주도일원에서 실시한 대수성시험자료와 농어촌진흥공사에서 발간한 년도별 제주도 지하수보고서('70~'92년)에 수록된 양수일보를 AQTESOLV와 TG의 전산code를 이용하여 분석하였다(농어촌진흥공사, 1970-1992).

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. 제주도에 기설관정은 해발표고 6 ~ 314m 사이에 설치되어 있고 관정의 심도는 최소 20m에서 최대 320m로서 평균 107.77m이다(표 3). 각 관정의 초기 측정당시 평균 지하수위는 지표하 52.96m였고 각 관정을 시설용량으로 채수시 동수위는 지표하 71.2m였으며 평균 1개공당 채수가능량은 1,451m³/일이다.

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 수역이다. 본 지역에 설치된 총 109공 관정의 평균 해발표고는 73.88m이며 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 3,270m²/일이고 평균 투수량계수(T)는 42,200m²/일이며, 평균 저유계수는 0.127이고, 평균 수리전도도는 193m/일이다. 설치된 관정의 포화대를 구성하고 있는 지질은 대체적으로 장석암석현무암이거나 장석현무암으로 이루어져 있고 포화대내에 점토층과 스코리아 및 크린커층의 평균 협재매수는 각각 2배씩이다(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 98.9m 이고 그 범위는 20m ~ 320m에 이른다. 측정당시의 초기 평균지하수위는 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 수역에 설치된 관

Table 3.

Location	Altitude (m)	Well depth (m)	Static water level			Dynamic water level	Rising rate	Aquifer parameter				TDS (mg/L)			Temperature (°C)	Key bed	
			before '83	'83	Difference			S _v (m/d)	T _v (m/d)	S	K(m/d)	before '83	'83	Difference		Main aquifer	Clay
East area	Ave.	73.88	63.33	62.07	1.88	77.01	154	3.27E+03	4.22E+04	1.3E-01	1.53E+02	132.40	321.49	216.79	15.61		2
	Min.	10.32	9.60	9.30	-5.60	11.20	370	1.21E+01	2.05E+01	1.3E-02	1.43E+03	12.00	32.00	-46.00	14.00		1
	Max.	230.00	198.00	164.50	29.30	235.00	4121	3.35E+04	7.68E+05	4.2E-01	2.12E+03	800.00	2397.00	1997.00	17.50		4
West area	Ave.	51.71	34.67	40.99	2.94	54.62	1638	9.27E+02	2.13E+04	1.1E-01	5.34E+03	79.47	143.44	17.13	15.93		2
	Min.	6.00	3.50	7.30	-10.10	11.50	350	7.68E+00	2.17E-01	3.0E-04	1.10E+03	7.00	26.00	-100.00	14.00		1
	Max.	258.00	252.00	128.80	24.60	278.00	4400	1.81E+04	4.32E+05	5.0E-01	1.49E+03	1152.00	1376.00	198.00	19.00		7
South area	Ave.	120.12	129.46	50.71	55.78	88.14	1120	4.05E+02	3.21E+04	1.3E-01	2.94E+01	35.85	84.82	53.67	15.79		2
	Min.	14.04	12.50	10.97	-6.00	15.50	233	3.97E+00	1.08E+00	4.6E-04	3.91E+04	0.00	35.00	-19.00	0.00		1
	Max.	314.00	114.00	124.50	27.50	192.00	2445	3.82E+03	7.68E+05	2.8E-01	6.88E+02	110.00	229.00	208.50	17.00		6
North area	Ave.	92.40	69.77	83.13	6.78	87.25	1329	1.30E+03	2.79E+04	1.3E-01	5.33E+01	38.62	108.06	71.51	15.85		1
	Min.	9.35	8.00	24.90	-0.80	8.75	320	1.95E+01	1.78E+00	1.0E-05	1.82E+03	4.30	37.00	0.00	13.00		1
	Max.	268.40	212.00	199.00	28.00	238.00	2800	3.87E+04	5.73E+05	4.0E-01	1.31E+03	113.00	343.00	195.00	19.00		4
Total area	Ave.	76.79	52.96	60.38	4.02	71.25	1451	1.52E+03	2.93E+04	1.2E-01	8.45E+01	84.17	185.28	114.46	15.80		2
	Min.	6.00	3.50	7.30	-10.10	8.75	233	3.97E+00	2.17E-01	1.0E-05	3.91E+04	4.30	26.00	-100.00	13.00		1
	Max.	314.00	252.00	199.00	29.30	278.00	4400	3.87E+04	7.67E+05	5.0E-01	2.12E+03	1152.00	2397.00	1997.00	19.00		7
No. of wells		440	407	184	131	371	425	304	283	294	162	151	102	104		153	284

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

정의 평균 비양수량(SPC)은 $927\text{m}^3/\text{일}$ 이며, 평균 투수량계수(T)는 $21,300\text{m}^2/\text{일}$ 이고 평균 저유계수는 0.112이며, 평균 수리전도도는 $53.57\text{m}/\text{일}$ 이다. 본 역에 분포된 포화대수층은 주로 장석감람석현무암(FOB)으로 구성되어 있으며 전체 굴착관정중 42.5%가 퇴적층인 서귀포층까지 굴착한 관정이다. 포화대내에서 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. 286.4m 사이에 설치되어 있으며 그 평균해발표고는 92.4m이다. 관정심도는 관정설치 위치에 따라 최소 26m에서 최대 280m로서 평균 119m이다. 착정초기의 공내 평균 지하수위와 착정후 대수성시험 이후 측정된 평균 동수위는 각각 지표하 83.13m와 87.25m이었으며, 관정 1개공당 평균 채수가능량은 $1,329\text{m}^3/\text{일}$ 이고, 평균 비양수량(SPC)는 $1,300\text{m}^3/\text{일}$ 이다.

평균 투수량계수는 $27,900\text{m}^2/\text{일}$ 이며 평균 저유계수는 0.13이고 평균 수리전도도는 $53\text{m}/\text{일}$ 이다. 심정굴착 구간의 포화대내에 발달되어 있는 점토층과 스코리아층의 협재 매수는 각각 1매와 2매이며 평균 지하수수온은 15.85°C 이다.

남부지역 : 남부지역은 동, 중 및 서서귀 및 안덕지역을 포함한다. 본 지역에 설치된 관정의 해발표고는 EL 14.04~314m 로써 관정의 심도도 비교적 깊어 평균 120m 이며 D-241 호공의 심도는 230m에 이른다. 기설관정의 초기 평균 자연수위는 지표하 50.71m였고 대수성 시험 종료시 측정된 평균 동수위는 지표하 88.14m 였으며 착정초기에 측정된 자연수위가 지표하 100m 이상되는 곳도 5개소나 된다. 관정 1개공당 평균 채수가능량은 제주도에서 가장 채수량이 적은 $1,120\text{m}^3/\text{일}$ 이며 비양수량은 $406\text{m}^3/\text{일}$ 이다.

본 지역은 주로 상위지하수의 분포구간으로써 수역별로 지하대수층의 수리성에 큰 차이를 보이는 즉, 불균질, 이방성이 큰 지역이다. 특히 관정 1개공당 채수량이 최소 $233\text{m}^3/\text{일}$ 에서 최대 $2,455\text{m}^3/\text{일}$ 에 이르며 수리전도도의 경우도 최소 $3.91 \times 10^{-4}\text{m}/\text{일}$ 에서 최대 $658\text{m}/\text{일}$ 이다. 본 지역에서 평균 투수량계수는 $32,100\text{m}^2/\text{일}$ 이고 평균 저유계수는 0.13이며 평균 수리전도도는 $29.4\text{m}/\text{일}$ 이다. 본역에 설치된 기설관정에서 점토층과 스코리아 및 크린커층의 평균 공당 협재 매수는 각각 1.95매와 2.3매 정도이고 평균 지하수온은 15.8°C 이다.

수리상수도는 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 우물수두 손실을 감안하여 수리전도도(K)를 구하였다. 따라서 추후 제주도 지하수자원의 부존과 산출특성에 결정적인 영향을 미칠 것으로 예상되는 기저 미고결 퇴적층의 분포상태의 규명 등 지속적인 지하수조사 자료가 축적되면 따라 이들 수리상수도 수정, 보완되어 나가야 할 것이다.

3. 제주도의 물수지

제주도는 전국평균의 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 재반 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 일정수역내의 강우량과 직접유출, 증발산량, 지하수함양량간에 수문평형이 유지되는 것으로 보아 다음 (1)식으로 표현된다.

$$I = P - DR - ET \pm IU \text{ ----- (1)}$$

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 PM map 등을 고려하여 4개 지역과 16개 수역으로 구분하였다.

강우량

현재 제주도내에는 기상청 관할 측후소와 분실, 지방자치단체, 한국수자원공사와 제동목장 등이 우량계를 설치하여 운영하고 있다. 그 외 1992년에 재해대책본부에서 24개 T/M우량계와 온라인망에 의한 광역자동수취시스템의 강우관측망이 운영되고 있다. 현재 제주도내 우량 관측자료를 보유한 지점은 약 40개소에 이르나 그중 15년이상 장기 우량관측자료를 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. 면적강우량을 산정하기 위해 우선 신뢰할 수 있는 장기강우기록을 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 평균강우량을 산정하고 그 결과를 이용하여 등우선도를 작성하였다.

등우선도를 이용하여 표고별 연평균강우량과 수역별 평균강우량을 구한 바 그 결과는 표 4와 같다(Kowaco, 1993a).

표 4에서 제시된 바와 같이 제주도의 연평균강우량은 1,872mm이다. 표고별 연평균강우량은 표고 200m이하 지역이 1,625mm, 표고 800m 지역이 2,779mm이다. 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 해안변 4개 측후소에 불과하여, 이 4개 기상관측소의 기상자료를 이용하여 경험식에 의한 증발산량을 산정하였다.

본도의 잠재 증발산량은 장기 관측자료를 보유한 제주와 서귀포 측후소의 30년간 기상자료(1962-1991년)를 이용하여, Penman공식으로 구하고 계기증발량과 비교하였다. 계산결과 제주의 연평균 잠재 증발산량은 계기증발량의 76.5%인 1,001mm/m이었으며 서귀포는 계기증발량의 73.7%인 949mm/m였다.

실제 증발산량은 최근 30년간(1962-1991년)의 일강우량 자료를 이용하여 10일 간격으로 토양수분평형법(Soil Moisture Balance Method)을 이용하여 계산하였다. 제주측후소의 실제 증발산량은 잠재 증발산량의 71.1%였고, 서귀포측후소는 73.0%로 산정되었다. 이와같이 높은 비율은 제주도의 많은 강우량과 강우의 고른 분포를 잘 반영해주고 있음을 시사한다.

제주도 전지역의 실제 증발산량은 제주와 서귀포에서 구한 값을 기초로 하여 성산과 대정 지점의 계기증발량으로 부터 실제 증발산량을 추정하였으며 타수역은 4개 관측소의 실제 증발산량값을 이용하여 중간치를 취하여 구하였다(표 5).

Table 5. Evapotranspiration of each representative area

Meteorological Station	Pan-evaporation (mm)	Potential ET (mm)	Actual ET (mm)
Average	1,282	962	693
CheJu	1,308	1,001	712
Seogipo	1,287	949	693
DaeJeong	(1,331)	998	719
SungSan	(1,200)	900	648

따라서 제주도 전역의 실제 증발산량은 693mm로써 계기증발량의 54%이고 총 강수량의 37%에 해당한다. 국내의 통상 잠재 증발산량은 계기증발량의 70%로 적용하고 실제 증발산량은 유역의 유출자료에 따라 간접적으로 산정하고 있다. 전국 연평균 실제 증발산량은 약

Table 4. Average annual precipitation by altitude and watershed

a) Altitude

altitude precipitation	200m <		200m - 400m		400m - 600m		600m - 800m		800m >		Total	
	A	P	A	P	A	P	A	P	A	P	A	A
1000-1200	42.0	50.0									42.0	27.0
1200-1400	223.7	300.4	1.0	3.4							224.7	162.9
1400-1600	169.3	260.5	78.5	302.8	1.7	12.9					249.5	207.3
1600-1800	293.4	517.5	52.7	233.1	42.6	369.9	0.6	10.2			389.3	370.8
1800-2000	186.3	362.1	89.6	436.8	30.0	287.1	26.8	504.3	3.3	43.7	336.0	352.6
2000-2200	62.5	134.4	95.8	521.6	39.1	413.7	18.7	389.1	13.8	201.8	230.9	268.0
2200-2400			71.1	419.7	34.0	394.0	15.3	348.5	17.3	277.2	137.7	175.0
2400-2600					41.2	518.7	15.9	393.5	16.8	292.5	73.9	102.0
2600-2800					9.9	134.7	18.0	481.1	22.5	423.1	50.4	75.3
2800-3000							5.0	143.6	22.0	444.3	27.0	43.2
3000-3200							0.7	21.4	19.1	412.3	19.8	33.8
3200-3400									13.0	298.7	13.0	23.8
3400-3600									15.8	386.0	15.8	30.5
Total	977.2	1624.9	389.7	1917.4	198.5	2131.0	101.0	2291.7	143.6	2778.6	1810.0	1872.1

* A : Area in km²
P : Precipitation in mm

b) Watershed

Location		area (km ²)	precipitation (mm)	Total precipitation (10 ⁶ m ³)	Remarks
Total		1,810.0	1,872	3,388	watershed means drainage area (small islets are excluded)
North area	sub total	339.7	1,861	632	
	AeWol	84.1	1,527	128	
	CheJu	255.6	1,971	504	
	East	80.2	1,961	157	
	West	86.5	1,964	170	
South area	sub total	357.7	2,146	768	
	Seogipo	298.7	2,226	665	
	East-west	108.1	2,507	271	
	Middle-west	106.5	2,198	234	
	West-west AnDug	84.1 59.0	1,900 1,743	160 103	
West area	sub total	371.7	1,394	518	
	DaeJeong	123.0	1,375	169	
	HanKyung HanRim	110.7 138.0	1,280 1,503	142 207	
East area	sub total	740.9	1,985	1,470	
	JoCheon	124.4	1,835	228	
	GuJwa	169.8	1,774	301	
	SungSan	115.8	1,840	213	
	PyoSeon NamWon	203.3 127.6	2,192 2,213	446 282	

568mm로 추정되며 이는 전국 연평균 계기증발량 1,176mm의 약 48%에 해당한다. 금번에 본 도에서 산정한 실제 증발산량은 해안 저지대를 대상으로한 것이므로 증산간지대와 고지대를 고려할 때 그 값은 상대적으로 높게 평가 되었을 가능성이 있다. 따라서 앞으로 고지대에도 관측소를 설치하여 기상자료를 축적함으로써 증발산량 산정의 정도를 높여 나가야 할 것이다.

직접유출

하천유출은 지표면을 흘러서 유출되는 직접유출과 지하수의 배출에 기인하는 기저유출로 구성된다. 그러나 제주도의 경우, 투수성이 큰 수리지질 특성으로 인해 기저유출은 대부분 해안이나 해저의 용천형태로 유출된다. 하천유출은 50mm이상 호우시에만 발생하며 유출기간도 연간 평균 4 ~ 5일에 불과하다.

제주도에서 하천수위 및 유출량에 대한 체계적인 관측자료는 1990년 10월 한국수자원공사에서 설치운영중인 3개 자기수위표지점(탐라, 천아, 미악)이 있다. 본 분석에는 3년간의 유출기록을 보유한 탐라 수위표지점에서의 직접유출 분석과 SCS방법을 이용한 간접적인 분석을 실시하여 제주도 북부지역의 개략적인 유출규모를 결정하고 도 전체의 유출은 각 지역의 강우 및 자연조건과 토지이용 등의 자료로 부터 유추하여 분석하였다. 탐라수위표 지점에서 유출분석결과 탐라유역에서 '90~'92년 3년간의 기록으로부터 분석한 유출율은 제주관측소 기준으로 총강우량의 약 20% 이다.

또한 SCS모형을 이용하여 제주시의 1972 - 1991년 사이의 20년간 일강우량 자료를 이용하여 유출량을 산정한 결과는 이 기간중 연평균 강우량은 1,489mm 였고, 연평균 유출량은 서제주가 395mm, 중제주가 416mm, 동제주가 390mm 였으며, 강우총량에 대한 유출율은 19 - 20%범위로 산정 되었다.

위에서 추정된 각 수역별 유출율을 이용하여 제주도의 총유출량을 산정한 바 연평균 강우량의 19%에 해당하는 6.38억³이다. 참고로 하와이제도의 유출측정자료에 의하면 현무암류 분포지역에서 연평균 유출량은 0 - 15% 이며 안산암질암 분포지역이 유출율은 25% 이다.

지하수 함양량과 함양율

총강우량에서 직접유출과 증발산량을 뺀 수량은 지하수함양량이 된다. 이들은 지하로 침투하여 지하수가 되고 다시 지하대수층을 따라 하류구배구간으로 서서히 이류하여 바다로 유출된다. 제주도 지하수 함양량은 Table 6와 같이 총강우량의 약 44.1%에 해당하는 연평균 14.94억³ 이고 일평균 약 4,100,000³에 달한다.

각 수계의 경계선이 대수층의 No flux boundary라고 가정하면 동부지역중 표선수역의 해안길이당 지하수의 비배출량(specific discharge)가 가장 크고, 서부 대정 및 한경수역이 가장 적다. 해안길이당 제주도 지하수 비배출량은 일간 평균 약 22,200³/km에 이른다

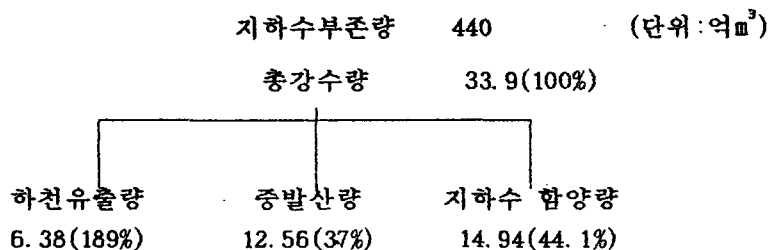
(표 6).

Table 6. Water budget analysis of each watershed of 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
	AcWol	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	1,954	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 HanRim	110.7 138.0	1,280 1,503	142 207	7 27	79 99	56 81	153 222	9.3 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
	Quzwa	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

제주도의 경우 년평균 강수량 1,872mm중 유출 및 증발산량에 의한 손실이 각각 352mm, 694mm로써 전강수량의 55.9%에 이르며 지하수 함양량은 전체의 44.1%인 년 826mm이다. 이에 비해 오후하도(진주만지역)의 연간 강수량은 1,340mm이고 이중 유출 및 증발산에 의한 손실은 각각 222mm, 332mm로써 전강수량의 41.3%를 차지하며 총강수량의 58.7%인 786mm가 지하수로 함양된다(State of Hawaii, 1992).

제주도의 물수지를 요약하면 다음과 같다.



4. 담수체의 물수지와 최적 개발가능량

담수체의 물수지

제주도 내에서 강수에 의해 일단 지하로 함양된 양은 동부지역의 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.

$$I \pm IU + R + \Delta V = D + L \quad \text{-----} \quad (2)$$

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

$$I + \Delta V = D + L \quad \text{-----} \quad (3)$$

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

$$I = D + L \quad \text{-----} \quad (4)$$

(4)식에서 1960년대 이전 제주도에서 지하수를 전혀 개발이용치 않았을 당시의 수문평형식은 $I = L(D=0)$ 이다. 즉 1960년대 이전에는 강수에 의해 지하로 함양된 전 지하수 함양량은 모두 해안의 용천이나 해저용출의 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 지하수위 h의 함수로 표시된다. 지금 지하수흐름이 정류일때 Darcian flux인 비배출량 q 는 다음 (5)식으로 표시할 수 있다.

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

여기서, K는 수리전도도, b는 대수층의 평균 폭, Z는 담수체의 평균 두께, h는 지하수위

이고, X는 해안에서 거리이다.

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

$$q = \frac{41Kb}{2X} H^2 \text{ ----- (6)}$$

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 결과로 인해 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 상당 기간동안 가뭄이 계속되는 비상시기에서도 허용가능한 수위 범위내에서 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 작성된 지하수위등고선도를 검토한 바 동부지역내 각 수역간의 기저지하수담수체는 서로 연결성이 매우 큰 것으로 사료된다. 즉 지하수 함양량이 큰 표선수역의 지하수는 동수구배와 대수층의 수리성을 감안할 때 상당량의 지하수가 인근 수역으로 유출되고 있는 것으로 추정된다. 동부지역 지하수 함양량은 일평균 2,046,000m³로써 제주도 전체의 약 50%에 이른다. 지하로 침투된 강수가 동부 해안지역에 고르게 분포되어 바다로 유입된다고 가정시 해안선 길이 1m당 평균유출량인 비배출량(일명 Darcian flux 혹은 specific discharge) 27.5m³/일 정도이다(Table 5). 전술한 바와 같이 Darcian영역에서 단위폭(b=1)당 Darcian flux와 지하수위는 (6)식에서 다음(7)식으로 표시할 수 있다.

$$q/K = 41h^2/2x \text{ ----- (7)}$$

여기서, q는 단위폭당 지하수의 비배출량으로서 이는 물수지분석시 추정될 수 있으며 K는 대수성시험시 알아낼수 있는 수리특성인자이다.

일반적으로 대수성시험시 일개관정에서 지하수채수에 의해 발생한 수위강하량은 항상 우물수두손실이 포함된 값이므로 충류상태하에서 유도된 각종 우물공식에 이를 적용하면 수리상수가 낮게 산정된다. 지하수위 h는 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/K의 값이 0.02일때 동부지역의 평균 지하수 비배출량인 27.5m³/일을 적용하면 K는 1,375m/일로 너무 큰 값으로 나타나며, 0.2인 경우 K값은 137m/일로 낮아진다. Table 7에서 구한 q/K의 평균값이 0.065일때 K의 값은 423m/일 정도이다.

하와이 오후우도의 경우 제주도의 동부지역과 비슷한 기저지하수 대수층의 K 값은 457m/일 정도이다. 또한 금번 연구시 신촌지역의 SC-3시험정과 서귀포 GK-1시험정에서 실시한 장기 대수성시험으로 부터 구한 수리전도도는 각각 510m/일과 658m/일이었다. 따라서 금번에 유선망 분석으로 부터 구한 동부지역의 평균 수리전도도인 420m/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 높이는 데 노력하였다.

제주도에 부존된 지하수의 흐름은 수역별 지하수함양량, 대수층의 발달상태, 수리전도도 외지하수의 동수구배에 따라 지배된다. 기저지하수의 유속은 일반적으로 매우 느린 층류를 이루며, 기저지하수의 동수구배는 대체적으로 다음과 같은 포물선으로 표시된다.

$$dh/dx = CX^{-(1/2)}$$

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		0.0q/K0.3	0.02q/K0.2	
	D-189	34.00	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	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	25.00	0.72	-6.18	600	0.0175		
	W-016	45.55	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	
GuJwa	F-057	50.00	80.00	0.50	-15.00	1,800	0.0028		
	A-001	65.00	90.00	4.00	-7.00	2,300	0.1426	0.1426	
	D-211	59.92	85.00	1.52	-16.08	2,100	0.0225	0.0225	
	W-011	28.95	50.00	0.85	0.53	700	0.0212	0.0212	
	D-140	35.85	60.00	1.35	-3.15	1,150	0.0327	0.0327	
	D-019	55.98	80.00	1.58	1.00	2,000	0.0254	0.0254	
	D-042	133.08	171.00	2.08	-10.92	6,450	0.0138		
	D-012	48.63	70.00	1.33	0.30	2,000	0.0180		
	D-057	57.28	80.00	1.28	1.18	2,050	0.0164		
	D-203	68.08	90.00	1.08	-4.92	2,900	0.0082		
	D-188	56.77	90.00	1.07	-3.23	3,000	0.0078		
	D-152	40.55	60.00	3.05	-3.05	2,600	0.0733	0.0733	
	W-010	29.78	50.00	0.08	-0.02	2,000	0.0001		
	W-019	38.50	45.50	1.50	1.03	1,700	0.0271	0.0271	
	D-253	95.79	130.00	1.79	-14.21	5,400	0.0121		
	D-016	12.02	35.00	1.32	0.82	1,400	0.0253	0.0253	
D-200	52.02	75.00	1.02	-9.98	2,700	0.0079			
F-023	46.33	72.00	3.33	-15.67	1,400	0.1623	0.1623		

(Table 7에서 계속)

Water shed	Well no.	Elevation	Well depth (m)	Watershed (h, EL. m)		Distance from coast line (m)	$q/K = (41 h^2) / 2X$		Remarks
		(EL. m)		S.W.L	D.W.L		$0.0q/k/0.3$	$0.02q/k/0.2$	
Sung-San	D-054	24.47	42.00	1.77	-1.73	1,800	0.0355	0.0355	
	수산3	92.09	120.00	0.59	-14.91	5,700	0.0013		
	수산4	85.76	110.00	1.76	-14.24	4,900	0.0129		
	D-028	28.24	41.00	1.04	0.94	1,800	0.0124		
	D-124	28.65	51.00	1.35	-4.35	2,400	0.0156		
	화진2	86.00	90.50	0.70	-1.40	2,500	0.0040		
	D-062	35.19	54.50	0.79	0.29	1,000	0.0127		
	W-020	73.81	82.00	1.41	0.81	4,300	0.0095		
	D-194	88.28	102.00	0.78	-4.22	3,400	0.0037		
	W-015	40.01	55.00	1.01	-0.79	3,300	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			
Pyo-Seon	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	
	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	0.1085	0.1085		
D-006	25.45	50.00	1.25	0.72	750	0.0426	0.0426		
Nam-Won	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	
	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 이루고 있다. 1993년 현재 수자원 개발량은 557,000 m³/일로서 이는 총 지하수함양량의 14%에 해당하며 현 이용량은 7%에 불과하다. 적정 개발 및 이용가능량은 개발대상 대수층의 효용성을 손상시키지 않는 범위내에서 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 변화할수도 있으나 대수층의 변화는 매우 서서히 일어나게 된다.

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

$$\frac{dq}{dx} = s \frac{dh}{dt} + W[I, D, q(h)] \text{ ----- (7)}$$

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, F는 해안을 통한 용천유출량이다. 지금 I>D 일때 대수층내 평형방정식은 (8)식과 같이 표시 가능하고,

$$q = I - D \text{ ----- (8)}$$

기저지하수로 부터 해안 용천유출량 q는 Darcy법칙으로 부터 다음 (9)식과 같이 표시된다.

$$q = 41Kbh \frac{dh}{dx} = \frac{41Kb}{2x} h^2 = ch^2 \text{ ----- (9)}$$

제주도에서 지하수를 개발이용치 않았던 시기에는 (8)식에서 D=0 이므로 q=I 이다. 이때 고려 대상 지역의 초기수위를 ho라 하면 (9)식에서 C=1/ho²이 된다. (7)식에서 x방향의 Darcian flux가 일정하다고 가정하면 dq/dx=0이 된다. 지금 대수층의 해수면상 유출단면적을 A라 할 때 (7)식은 체적단위로 다음과 같이 표현가능하다.

$$41SA \frac{dh}{dt} = I - D - ch^2 \text{-----} (10)$$

(10)식에서 $41SA = \lambda$ 라 하고 초기상태의 대수층의 전포화체적을 V_0 라 하면 $V_0 = 41h_0SA = \lambda H_0$ 가 되므로 $\lambda = V_0/h_0$ 가 된다. 즉 (10)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} 이라 하면 $I > D$ 인 조건하에서 (10)식의 해는 (11)식과 같이 된다.

$$h_{i+1} = h_0 \left(\frac{I-D}{I} \right)^{1/2} \left\{ \frac{(I-D)^{1/2} + \frac{h_i}{h_0} (I)^{1/2} \exp \left[\frac{2 \{ (I-D)I \}^{1/2} + (t_{i+1} - t_i)}{V_0} \right] - (I-D)^{1/2} + \frac{h_i}{h_0} (I)^{1/2}}{(I-D)^{1/2} + \frac{h_i}{h_0} (I)^{1/2} \exp \left[\frac{2 \{ (I-D)I \}^{1/2} + (t_{i+1} - t_i)}{V_0} \right] - (I-D)^{1/2} + \frac{h_i}{h_0} (I)^{1/2}} \right\} \text{-----} (11)$$

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

$$h = h_0 \left(\frac{I-D}{I} \right)^{1/2} \quad \text{즉} \quad D = I \left(1 - \frac{h}{h_0} \right)^2 \text{-----} (12)$$

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

(13)식은 자유면상태 하에 있는 기저지하수를 기준으로 유도된 것이므로 동일한 자유수면상태 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 0가 된다(한정상, 1988).

일개지역에서 평형수두를 결정할때는 기저 및 상위지하수의 규모, 대수층의 지질과 수리특성과 함께 채수에 따른 담수체의 수축, 염수침입과 오염의 확산 및 분산상태, 담수와 염수의 점이대의 확산과 이동상태에 대한 장기적인 자료를 필요로 한다. 또한 평형수두의 선정에는 이러한 대수층의 수리특성 외에 기존 용수개발시설의 개발위치, 배치와 개발심도 등 제반요인에 따라 달라질수 있다. 예를 들면 개발대상 대수층에서 기개발된 관정의 배치나 개발심도가 적정치 못하고 이들 시설물을 계속 이용할 필요가 있을 때 평형수두를 적정

수두보다 높게 선정 하므로써 용수 이용가능량이 적어질 수 있다.

용수 이용가능량은 또한 지하수의 보호, 관리규모에 따라서도 달라질 수 있다. 고지대에서 지하수 함양지역을 철저히 보호, 관리하여 지하수 함양량을 증대시키든가 해안연변에 지하수 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 점 및 비점오염원에 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 $945,000 \text{ m}^3/\text{일}$ 이며 이 중에서 허용취수량은 $850,000 \text{ m}^3/\text{일}$ 로 규정하고 있어 총지하수 함양량의 90%를 이용하고 있다. $850,000 \text{ m}^3/\text{일}$ 내에는 회귀수량이 포함되어 있어 이를 제하면 순지하수 이용량은 총함양량의 약 82%에 이른다. 기존 관측정에서 초기 수위는 해수면상 10.2m(33.5ft)이었는데 현재의 채수량이 계속될시 평형수두는 해발 4.4m(14.3ft)로 예측하고 있다(State of Hawaii).

진주만수역은 산맥사이의 분지로써 지하수 유출해안선이 짧고 또한 해안에 분포된 Caprock에 의해 지하수 유출이 저지되고 있는데 비해 제주도는 원추형 상태의 해안선이 비교적 길어 진주만과 같은 지하수 이용율을 기대할 수 없는 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 분산정도등이 불확실한 상태에서 추정해 의존할 수 밖에 없다. 따라서 본 분석에서는 지하수의 부존형태와 염수에 의한 해수침입 가능성 등을 고려하여 각 지역별 h/h_0 비를 상대적으로 평가하여 적정개발량을 추정하였다. 남부지역을 제외한 도내의 상위지하수는 산출량의 불확실성때문에 국지적인 용수해결에 이용되어야 할 것이다. 또한 관정에 의한 지하수개발은 지하수위가 최소 EL. +2m이상되는 지역에서만 개발되어야 하며, 대용량 관정은 내륙쪽으로 더 이동하여 설치해야 한다.

동부지역에서 기저지하수 개발은 해안으로부터 염수침입의 허용범위가 개발가능량 설정에 주요기준이 될 것이다. 동부지역에서 기저지하수의 수위가 EL+5m되는 지역에서 평형수두를 EL+1m 까지 하강시킬때 즉 평형수두를 현수두의 80%로 유지시킬때 작정 개발가능량은 이 지역 지하수 함양량의 35%에 해당하는 일평균 $737,000 \text{ m}^3$ 정도가 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 전환을 고려해야 할 것이다. 동부지역에서 지하수 개발가능량은 추후 수자원개발의 진척에 따라 대수층의 수축상태를 면밀히 연구하여 계속적인 조정이 필요할 것으로 사료되나 현 단계에서 상술한 지하수 개발가능량은 충분한 여유를 보유하고 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 충후가 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 분포되어 있고 대수층하부에는 서귀포층과 해안연변의 성산층 등이 분포되어 있어 본도에서 지하수개발에 가장 유리한 입장에 있다. 본역 대수층의 평형수두를 당초 지하수 해수면상 수위의 65% 수준에서 유지시킬때 지하수 적정개발가능량은 지하수 함양량의 58%에 해당하는 약 331,000 m^3 /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 의한 지하수개발은 제한을 받고있다. 더욱이 본지역에는 천제연, 정방등의 경관이 수려한 폭포가 위치하고 있어 폭포수의 확보도 하나의 과제로 볼수있다. 남부지역에서 조사된 용천수량은 320,940 m^3 /일로 추정된다. 이는 본 지역의 지하수함양량인 820,000 m^3 /일의 약 39%에 이르고 있다. 따라서 이러한 현상을 고려하여 남부지역 지하수에서 개발가능량을 지하수 함양량의 35%로 설정하였다. 이를 종합하면 Table 8과 같다. 즉 도내 지하수 이용가능량중 최적 개발가능량은 전체함양량의 약 41%에 해당하는 1,690,000 m^3 /일 정도이다.

Table 8. Sustainable yield of groundwater resources of Cheju island
(unit: $10^3 m^3/day$)

Location	Content	Recharge	Sustainable yield	Percentage(%)
North area		657	335	51
South area		820	286	35
West area		570	331	58
East area		2,046	737	36
Total		4,093	1,689	41

5. 결 론

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. 뿐만 아니라 지하수위와 수질, 대수층의 수리특성, 염수와 담수체의 경계면의 변동에 대한 장기적인 관측이 수행되어야 한다.

2. 본도 대수층의 하부 Neuman boundary가 될 세화리층의 분포상태를 보다 정밀하게 파악하고, 세화리층의 대수성수리상수를 규명키 위해 최소 동부지역에 3개소, 서부에 3개소, 북부에 3개소, 남부에 3개소에 대해 세화리층을 관통할 수 있는 시험시추와 대수성시험과 토질시험이 수행되어야 한다.

3. 특히 서부지역과 남부지역에 분포된 서귀포층군 하부 지하수환경과 그 수리성을 파악키위하여 2항의 조사시 이에 대한 조사도 동시에 시행해야 할 것이다.

4. 만일 세화리층의 분포상태가 현재와 같이 제주도의 제1분출시기에 해저에서 분출되어 전도에 걸쳐 분포되어 있을시 제주도내 지하수는 주로 준기저지하수로 구성될 것이고, 준기저지하수가 제주도의 주용수원이 될 것이다.

참고문헌

- 농어촌진흥공사, 1989, 제주도 지하수 장기개발계획조사 보고서.
- 농어촌진흥공사, 1970-1992, 제주도 지하수보고서 총 2권.
- 이동영, 김주용, 1993, 제주도의 화산활동, 제주도 화산지질에 대한 심포지움.
- 한정상 외, 1984, Environmental isotope-aided studies on water resources in the region of Cheju Island, 한국수문학회지, Vol 17, No 2, 72-29.
- 한정상, 1988, 금촌 정호장의 최적채수량 및 물수지분석에 관한 연구, 지질학회지, Vol 24, No 2, 140-172.
- 한정상, 1990, 국내 지하수자원의 산출특성과 지하수 수질관리 기술에 관한 연구, International on the 21st century prospects for policies and thecnology for water conservation/국립환경연구소 WHO.
- 한국수자원공사(KOWACO), 1993a, 제주도 수자원 종합조사, 자료집(2권).
- 한국수자원공사, 1993b, 성산도폭지질도 설명서.
- Boutwell, S.H., et al, 1986, Modeling remedial actions at uncontrolled hazadous waste sites.
- BWS/City and County of Honolulu, 1982b, Groundwater/summary report, 1-40.
- Canter, L.W. et al., 1986a, Groundwater pollution control, Lewis pub., 1-521.
- Duffield, M. et al., 1990, AQTESOLV, Aquifer test solver, G.M. Inc., 133.
- Mink, J.F., et al., 1991, Well head protection strategy for Hawaii, Water Resources Research Center/ Uni. of Hawaii.
- Mink, J.F., et al., 1992, Aquifer identification and classification for Kauai ; Groundwater protection strategy for Hawaii, WRRRC/Uni. of Hawaii, 1-21.
- State of Hawaii, Hawaii administrative rules, chapter 183, 184, 185, 174c, amendment to chapter 13-169.
- State of Hawaii, 1992, 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, 51-60.
- Walton, W.C., 1985, practical aspects of groundwater modeling, NWWA, 55-56.