

제주도 중산간지대 지하수의 부존특성

진기옥* · 양성기

*제주시청 건설과 · 제주대학교 해양토목공학과

Characteristics of Groundwater Bearing in Middle Area of Halla Mountain in Jeju Island

Ki-Ok Chin* and Sung-Kee Yang

**Construction Affairs, Jeju City, Jeju-Do, 690-701, Korea*

Department of Ocean Civil Engineering, Cheju Nation University, Jeju-Do, 690-756, Korea

The number of developed groundwater wells on Jeju island is approximately 5,100 and 245 of them are located in the mountainous area whose altitude varies from 200m to 600 m. Since the development and usage of groundwater on hillsides started, a detailed investigation on groundwater characteristics, such as the distribution of the geologic stratum, groundwater occurring characteristics, content and amount of gainable groundwater, has been investigated. In this study, groundwater occurring characteristics are examined through the evaluation of drawdown and level fluctuation based on the distributive type found in the geologic stratum in the mountains.

The higher the land elevation is, the deeper the absolute depth of natural and balanced groundwater level occurs. However drawdown, which shows 25.7 m, 24.63 m, 13.8 m and 12.5 m, respectively at each elevation, tends to decrease as ground elevation increases.

It is found that more than half of the transmissible geologic structure of Sumgol, Gotjawal, Oreum, or small river is distributed over the hillside area from data examined by Jeju province. Although it helps groundwater recharge, it does not have direct relationship with the transmissivity which is represented by the capacity of the groundwater supply. The capacity of groundwater supply mainly depends on the distributive type of the aquifers that poses low permeability.

Key words : groundwater well, geologic stratum, transmissible geologic structure, groundwater recharge, transmissivity

서론

철해고도인 제주도는 약 300만년전 제3기 플라이오세에서 제4기초까지 수습 회에 걸쳐 화산활동에 의해 생성된 화산도로서 특수한 지형, 지질조건, 수

문 및 수리지질 특성으로 인해 일찍부터 물이 귀한 지역으로 인식되어 왔다. 그러나 제주도는 해양성기후와 한라산에 의한 지형성 강우의 영향으로 연평균 강우량은 전국의 약 1.5배에 달하는 1,872 mm이며, 강수량은 연간 33.8억톤에 이르는 풍부한 수자원을 보유하고 있다. 따라서 제주도는 신생화산도의 특징으로 인해

매우 양호한 투수성을 보여 다량의 지하수체를 확보할 수 있는 수문지질학적 특성을 가지고 있다(고, 1997).

1970년대 초반부터는 지하수개발에 대한 조사가 착수되어 관정에 의한 지하수개발이 본격적으로 시행되어, 도 전역에 산재한 지하수관정과 저지대연안을 따라 지표로 용출하는 용천수를 주수원으로 하여 상수도시설, 농업관개시설, 자가취수공급시설 등의 용수 공급체계를 이루고 있으며, 이로부터 생활, 공업, 농업 등 각종 용수를 공급, 이용하고 있다. 앞으로 제주도는 사회 및 경제개발의 진척에 따라 용수수요는 지속적으로 증가될 것으로 예상되는 반면, 제주도의 유일한 수자원인 지하수는 최근에 와서 무분별한 개발로 인해 생활 및 농·축하수에 의한 지하수 오염과 일부 해안지역의 염수침입, 지하수위 및 해안용출수량의 감소가 보고되고 있어 제주도 수자원의 개발, 이용 및 보전에 관한 관심과 대책이 요구되고 있다(변 등, 1999).

제주도의 중산간 지대는 1970년대부터 지하수관정이 개발되기 시작하였음에도 불구하고 최근에 들어서야 체계적인 관리를 위한 시스템을 구축하는 등 많은 문제점들이 노출되고 있는 실정이다. 또한 택지 및 상가 등은 형성되지 않더라도 대규모 관광단지 및 골프장이 조성되면서 지하수의 개발이 급증하고 있는 추세여서 이 지대 지하수의 개발과 보존에 관심을 가져야 할 시점이 되었다. 또한 중산간지대의 지하수 개발에 대한 방안 및 연구자료는 미흡한 상태이며, 기 연구·발표된 논문들 또한 제주도의 저지대 지하수를 동-서-남-북으로 구분하여 지역별 분포특성을 비교·검토한 것은 많으나 중산간지대에 대한 자료는 부족한 편이다. 1990년대에 들어서면서부터 제주도 지하수에 관한 조사와 연구가 본격적으로 이루어지게 되었다. 이들 연구들은 주로 해안지대를 중심으로 한 지하수의 수위변동, 지하수자원의 개발가능량 산정, 지하수의 유동, 해안대수층에서의 담·염수 경계 등에 관한 내용들이었다(최, 1998 ; 고, 1997 ; 박, 1993 ; 한, 1998).

제주도에서 조사·발간된 중산간지역 종합조사서(1997)에서도 제주도 지하수와 관련하여 부존현황, 산출특성, 용천수현황, 오염원조사 등의 내용을 조사하면서 대부분 200 m 이하의 저지대를 대상으로 하고 있다. 이는 당시(1995년 말까지 개발된 관정을 대상) 200 m 이상의 중산간지대에 개발된 관정이 불과 20여

개에 불과하였으며, 또 이들 관정 대부분이 300 m 이하에 분포하고 있어 표고 200~600 m의 중산간지대를 종합적으로 검토·해석하는데는 부족한 편이었다. 그러나, 중산간지대에 대규모 골프장시설 및 관광지구의 개발이 활발하게 됨에 따라 1999년까지 표고 200 m 이상에 개발된 관정은 245 개이고, 그 중 300 m 이상에는 80개의 관정이 개발되었다. 따라서 이 연구에서는 중산간지대의 지하수개발이 급증하고 있음을 인식하여, 제주도 중산간(표고 200~600 m)지대 지하수의 개발현황을 조사하고 부존특성을 규명코저 한다.

자료 및 연구방법

지하수의 조사에는 수위변동, 수량변화, 함양량 등의 분량적인 면과, 수질, 수온, 오염정도를 중점으로 하는 질적인 면으로 나눌 수 있으나 이 연구에서는 전자에 초점을 맞추어 지층의 분포특성과 수위의 변동특성을 통해 중산간지대 지하수의 부존특성을 파악하였다.

1999년 말까지 제주도 내에 개발된 지하수 공은 5100여 개에 달하며, 이들 중 표고 200 m 이상의 중산간지대에 해당되는 것은 245 공이다. 이들 관정을 중심으로 중산간지대 지하수의 개발 현황과 특성을 조사하였으며, 1970년대부터 개발이 시작된 지하수공들에 대하여는 직접적으로 검토하기는 현실적으로 어려운 실정이다. 따라서, 이 조사를 위해서는 기 개발되어 이용허가를 득한 관정들의 체원 및 지질주상도, 양수시험 자료 등을 취합하여 분석·검토하였다.

자료의 신뢰성을 높이기 위하여 주로 농어촌진흥공사(현 농업기반공사)에서 개발한 관용관정을 대상으로 하였으며, 표고 301~400 m, 401~500 m, 501~600 m 지대에서는 농업용수·공업용수 축산용수 등을 목적으로 개발된 관용관정이 각각 10개 미만(501~600 m 지대는 없음)으로 극소수에 불과하여 관광사업 시행에 따라 생활용수로 개발된 사설관정의 자료를 참조하여 검토하였다.

중산간지대에서는 상위지하수체로 이들 영향에 의한 지하수 특성보다는 소화산체(제주의 '오름') 형성에 의해 각 개별적으로 분포된 지층 특성 및 대수

제주도 중산간지대 지하수의 부존특성

층·저투수층의 연계 또는 지하수함양에 양호한 지질 특성 등이 중요한 요인임으로 수역별 구분보다는 표고별(201~300 m, 301~400 m, 401~500 m, 501~600 m)로 구분하여 검토하였다. 지층분포 특성 및 동수위변화를 조사하고 기 조사 자료에 제시된 저지대의 특성과 비교·검토하여 중산간지대 지하수의 부존특성을 파악하였다.

결과 및 고찰

중산간지대의 지하수환경

1. 자연환경

제주도의 지형은 해발고도와 경사도에 따라 해안에서 해발고도 약 200m까지의 해안저지대, 200~600m 사이의 중산간지대, 그 이상에서 한라산 정상부근까지의 한라산체 등으로 구분되며, 남북 양사면에는 대지상의 해안저지대와 중산간지대의 면적이 좁고 한라산체가 많은 부분을 차지한다(건설부, 1993).

중산간지대의 면적은 제주도 전체의 31.5%에 해당되는 577 km²를 차지하고 있으며, 하부의 경사도 약 10°로 대체적으로 평탄한 지형을 이루고 있으나, 상부로 갈수록 오름의 분포가 급증하면서 대부분 경사

도 30°이상을 이루고 있다. 한라산을 정점으로 한 계곡 및 하천이 가파르게 형성되기도 한다. 360여 개에 달하는 기생화산은 대부분 Scoria 및 분석구로 구성되어 있으며, 주변으로 습골, 꽃자왈 등이 분포되어 지하수함양 가능한 지질구조를 형성하고 있다. 대부분 초지 및 산림지대를 이루고 있으며, 대규모 목초지대에서는 축산업이 이뤄지고 있다.

2. 지하수의 환경

제주도는 Table 1에 제시된 바와 같이 연평균 강우량은 1,872 mm로 다우지역이며, 표고가 높아짐에 따라 강우량이 증가하는 분포를 보여 중산간지대(200~600 m)는 2,024 mm의 높은 강우량을 나타낸다(건설부, 1993).

제주도 중산간지역은 이들 많은 강우를 지하로 이동시켜주는 투수성 지질구조(습골, 용암동굴 및 용암 튜브, 절리구조, 클링커층 등) 분포에 따라 지하수함양지역으로서의 보전 및 관리에 대한 중요성이 더해가고 있다.

중산간지대는 상위지하수체로 비포화대내의 다른 대수층과 수리적으로 연결되어 있지 않은 단속적인 지하수체이기 때문에 강우량에 따라 유량변화의 폭은 크지만, 해수와 직접 접촉하지 않으므로 염수침입과 연관된 수질은 비교적 양호한 편이다. 또한 현재까지

Table 1. Distribution of yearly mean of rainfall by altitude

Altitude Precipitation	>200 m	200 ~ 400 m	400 ~ 600 m	600 ~ 800 m	800 m >	Total
1.000-1.200	50.0					27.0
1.200-1.400	300.4	3.4				162.9
1.400-1.600	260.5	302.8	12.9			207.3
1.600-1.800	517.5	233.1	369.9	10.2		370.8
1.800-2.000	362.1	436.8	287.1	504.3	43.7	352.6
2.000-2.200	134.4	521.6	413.7	389.1	201.8	268.0
2.200-2.400		419.7	394.0	348.5	277.2	175.0
2.400-2.600			518.7	393.5	292.5	102.0
2.600-2.800			134.7	481.1	423.1	75.3
2.800-3.000				143.6	444.3	43.2
3.000-3.200				21.4	412.3	33.8
3.200-3.400					298.7	23.8
3.400-3.600					385.0	30.5
Total	1,624.9	1,917.4	2,131.0	2,291.7	2,778.6	1,872.1

는 생활하수에 의한 인위적인 오염현상이 확인되지 않고 있으나, 개발이 급증함에 따라 대규모 축산폐수 및 골프장에 사용되는 비료·농약에 의한 오염물질 유입, 생활하수 등에 의해 오염될 가능성의 위험을 안고 있다.

중산간지대의 투수성 지질구조

신생화산체의 제주도 지질은 현무암질 용암류가 가장 많으며, 서귀포층·성산층·신양리층과 같은 퇴적층 그리고 제주의 '오름'이라 불리는 소화산체의 분출물 및 소규모의 풍성사구층 등으로 구성되어 있다

(이 등, 1977). 이렇게 제주도를 이루는 주된 형성체는 화산활동의 소산물이며, 이들 크고 작은 화산활동 개개의 Unit별로 용암류·다공질 Scoria·화산쇄설층(화산재~화산력에 이르는 다양한 물질) 등이 반복적으로 분포되어 있고, 용암류를 기준으로 상·하단부에 Clinker 구조를 포함하는 특징을 보인다. 용암류는 대부분 다공질로 형성되었을 뿐만아니라 지표 상에 습굴, 함몰지, 꽃자왈 및 수직·수평 절리 등의 각종 투수성지질들이 지하수 함양의 역할을 하고 있고, 지층 사이에 나타나는 Clinker 구조, 균열 및 절리, 다공질 Scoria층 구간이 대수층을 형성하고 있다.

Fig. 1은 제주도내 분포되고 있는 투수성 지질구조

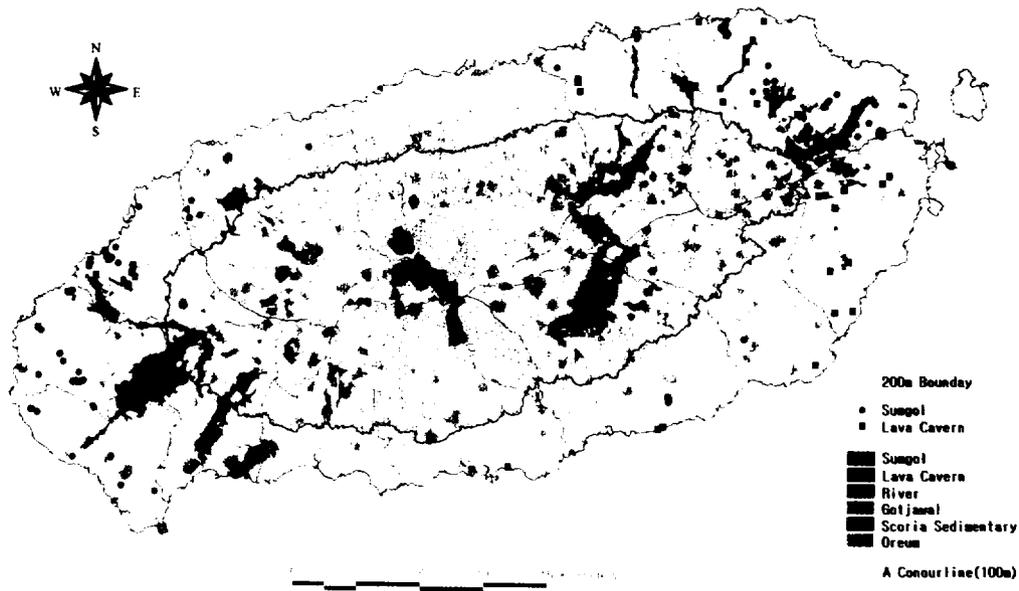


Fig. 1. Distribution map of permeable geologic structure in Jeju Island.

Table 2. Distribution chart of permeable geologic structure (unit: km²)

	Type of permeable geologic structure					
	Cavern	Sumgol	Gotjawal	Oreum	River	Sedimentary layer Scoria
Jeju Is.	2.34	0.73	122.1	135.0	36.13	11.52
Middle area of Jeju Is.	0.30 (12.8%)	0.51 (69.8%)	73.26 (60%)	99.40 (73.6%)	26.60 (73.6%)	0.33 (2.9%)

제주도 중산간지대 지하수의 부존특성

의 분포도(제주도, 2000)를 나타낸 것이며, Table 2에는 이들 중 중산간지대 분포현황을 나타낸 것이고, 투수성 지질구조 유형 중 습골·꽃자왈·오름·하천은 제주도 전역에 분포되는 것의 60%가 넘는 면적이 중산간지대에 분포되고 있음을 확인할 수 있다. 투수성 지질구조는 중산간지대의 지하수함양 역할을 하나, 이들은 지표상의 수 m 깊이에 대한 분포현황이며 그 자체가 수백 m 굴착한 지하수 개발공의 양수능력을 결정한다고는 볼 수 없다. 즉, 양수능력은 대수층 및 그것을 받쳐주는 저투수층의 분포형태 및 규모에 따라 차이를 나타낸다.

200 m 이하의 저지대에서는 기저의 서귀포층·성산층·신양리층으로 명명되는 퇴적층이 저투수층의 역할을 하는데, 중산간지대에서는 이들보다는 소화산체 분출 시 형성된 점토질 화산재층에 의해 차수되거나 피압되는 양상으로 보인다. 수차례의 소규모 분출에 의해 수직적으로 수매의 대수층 또는 저투수층이 형성되고, 기복이 심한 원지형의 형상에 따라 수평적으로 또한 다소 불규칙적이므로 저지대에 비해 지층

단면을 연결해서 대수층구간을 추정하는데 다소 무리가 따른다. 이에 따라 중산간지대에서는 개발위치별로 소화산체의 분포 및 원지형의 형상에 따라 개별적으로 검토하여 수리특성을 파악하는 게 적절할 것이다. 이렇게 수직·수평적 불규칙적인 지층분포는 곧 대수층 및 수리특성과 연관되며 따라서 중산간지대의 지역별 또는 표고별 특정한 평균치를 적용시키는 것은 많은 오차가 따를 것임을 감안해야 한다.

개발관정에 의한 지층분포의 특성과 지하수위

중산간지대의 경우는 개발주상도에서 보여지는 것처럼 수층의 현무암층과 화산쇄설층이 반복적으로 분포되고 있다. 현무암층은 치밀·건고한 상태로 나타나기도 하며, 균열 및 절리가 발달되거나, 다공질 형태로 나타나기도 하고, 하단부의 층경계면에서는 Clinker 구조가 확인되기도 한다. 화산쇄설층의 경우는 화산재, 화산사, 화산력 및 다공질 Scoria 형태도 포함시켜 구분되기도 하며, 퇴적층 뿐만 아니라 화산

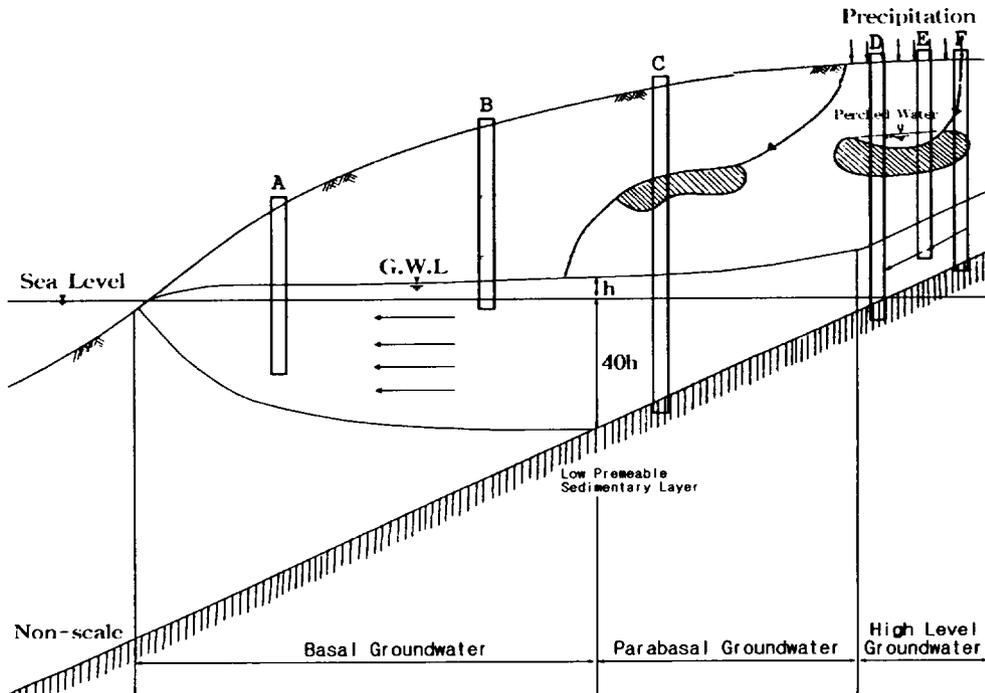


Fig. 2. Development pattern by types of groundwater bearing.

재가 주를 이루는 화산쇄설층의 경우 또한 저투수층 역할을 하여 수층의 대수층을 형성하는 근원이 된다 (송 등, 1996).

제주도 지하수 부존형태에서 저지대를 기저지하수-준기저지하수에 해당된다고 보았을 때, 서귀포층·성산층·신양리층의 저투수퇴적층이 대부분 해수면 하부에 분포되고 있고, 지하수위 또한 해수면 상부 10m 내의 선상에서 형성되기 때문에 개발심도는 일반적으로 해수면 이하 20~50m까지 이뤄진다. Fig. 2는 한국수자원공사(1993)에서 모식화한 지하수부존도에 따라 제주도 지하수개발 Pattern을 표시한 것으로, 저지대에서는 하부 저투수층을 통과하지 않으면서 해수면 이하 수십미터 심부까지 개발(A)되거나, 해수면 부근까지 개발(B)되기도 하고, 저투수층까지 도달하는 지하수관정(C)들이 다수 포함된다. 이에 반해 중산간지대는 대부분 상위지하수체로 저투수퇴적층은 해수면 선상에서부터 상부에 분포되고 있고, 서귀포층·성산층의 퇴적층 외에 점토질의 화산재층이 상부에 수매 분포되며 지하수위는 해수면 기준 50~100m, 400m 이상의 고지대에서는 200m 상부에까지 높게 형성되고 있다. 이에 따라, 개발심도는 저투수층까지 도달하면서 해수면이하 수m 이내 깊이까지 개발(D)하거나,

해수면 상부 수m까지 개발(F)되고, 또는 하단부 저투수층까지 도달하지 않으면서 해수면 상부 수m~수십m 상부까지 개발(E)되는 Pattern을 보인다.

그러나, 위에 언급된 것처럼 중산간지대 경우는 대수층 및 저투수층 역할을 하는 지층구조가 해수면 상부에 수매 분포되고 있는 특성과 연관되어 지하수개발심도는 해수면기준이하 몇m 또는 하단부 서귀포층·성산층의 저투수층 통과 등을 기준으로 하여 필요이상의 굴착을 피해야 하며 굴착시 지층분포 및 대수층의 형성 특성에 따라 개발심도를 결정해야 한다.

일부 제시된 개발지층단면도에서 검토하면, 하부에 저투수퇴적층에 도달한 경우 대수층은 그 상단구간에서 확보되었음에도 불구하고 퇴적층을 수십m 이상 굴착한 관정(F-298, JSSM, F-308 등)이 있으며, 서귀포층에 도달하지 않더라도 상부에 분포된 대수층 및 점토질의 화산재층에 의해 형성된 지하수위가 해수면 상단 100~200m 수준에 달하나 그 이하 심부까지 과굴착된 형태를 보이는 관정(F-296, BGH-1, PICC-1, JJCC 등)이 확인된다. 조사공의 목적으로 개발된 지하수공은 제외되더라도 중산간지대에 개발된 관정의 지질추상도를 검토할 경우 필요이상의 고심도를 굴착

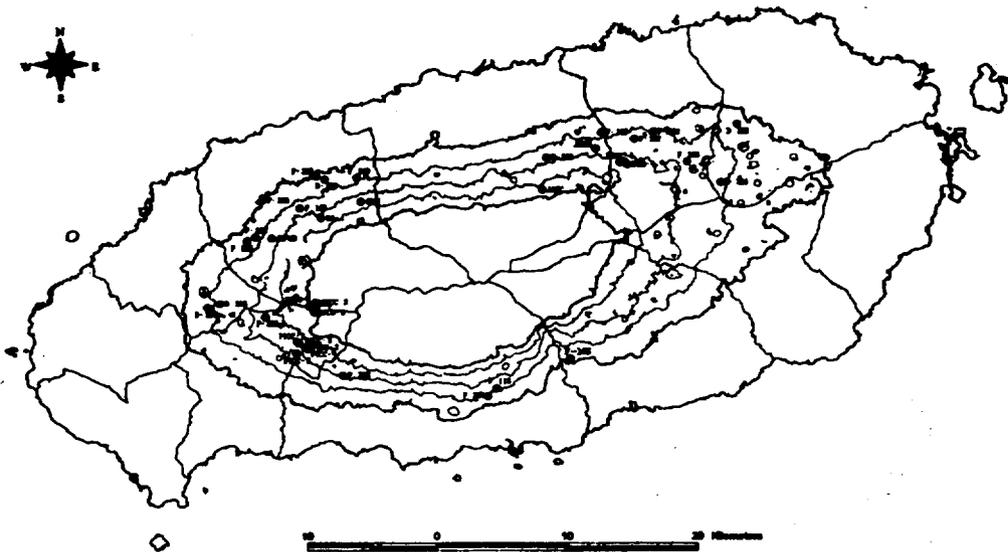


Fig. 3. Location of sampling sites for geologic log section.

한 경우가 다수 존재한다.

지하수 부존형태의 분류

제주도의 지하수는 서귀포층의 지하분포상태에 따

라 지하수위가 형성되고 있을 뿐만 아니라, 수위변동과 수질변화에 있어서도 차이를 나타내고 있다.

서귀포층의 지하분포상태를 비롯하여 지하수위 분포 및 변동 특성, 지하수의 수직적인 수질변화, 지역별 수질특성에 대한 조사결과에 의해 고(1993) 등 많

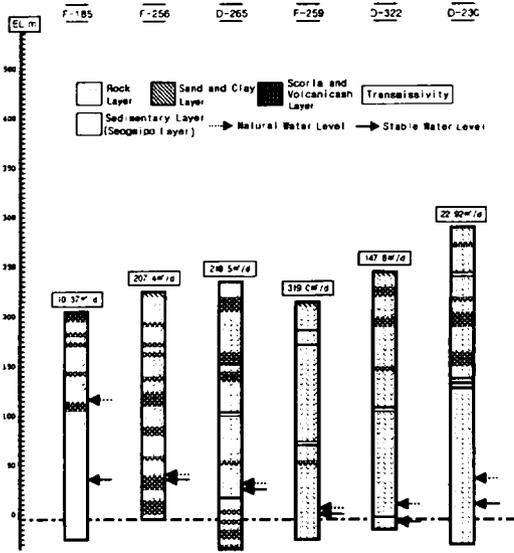


Fig. 4a. Geologic log of wells for level 200~300 m (I).

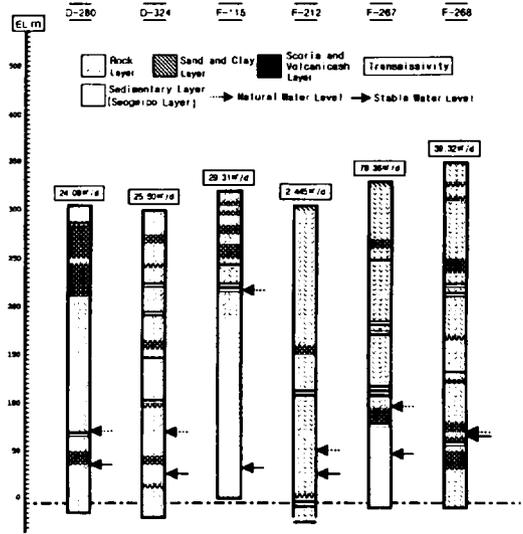


Fig. 4c. Geologic log of wells for level 300~400 m (I).

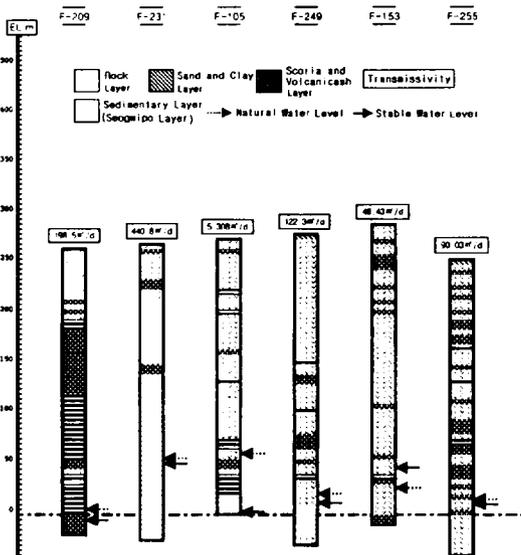


Fig. 4b. Geologic log of wells for level 200~300 m (II).

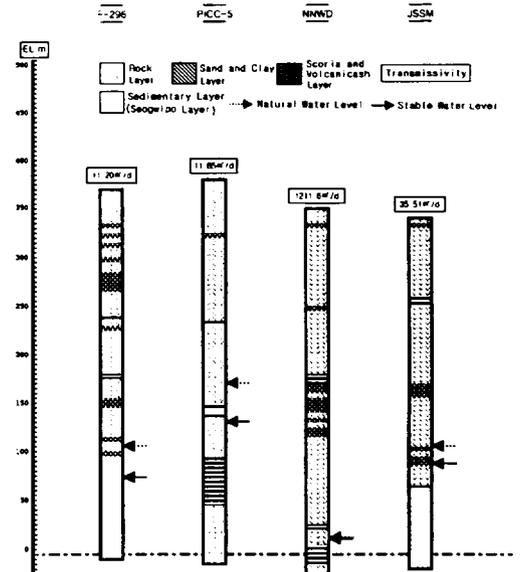


Fig. 4d. Geologic log of wells for level 300~400 m (II).

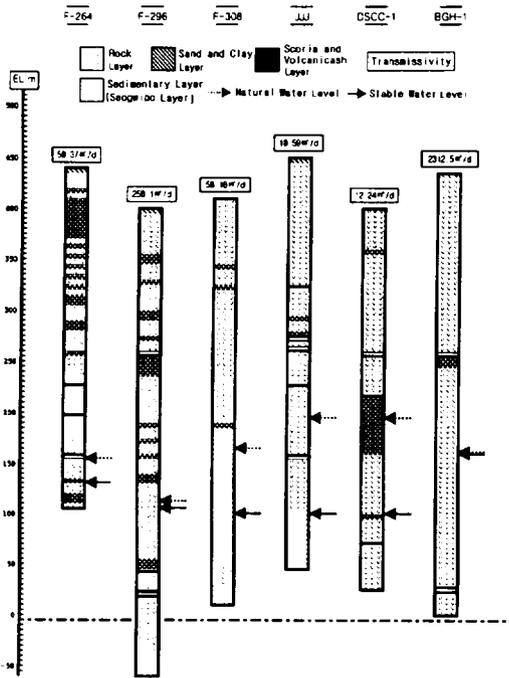


Fig. 4e. Geologic log of wells for level 400~500 m (I).

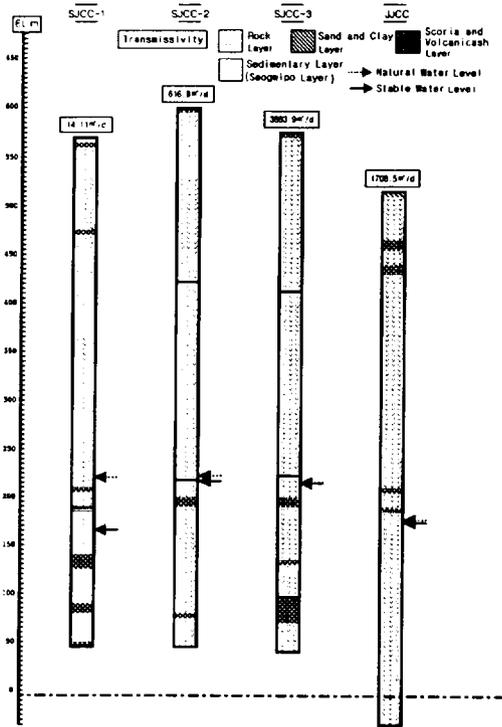


Fig. 4g. Geologic log of wells for level 500~600 m (I).

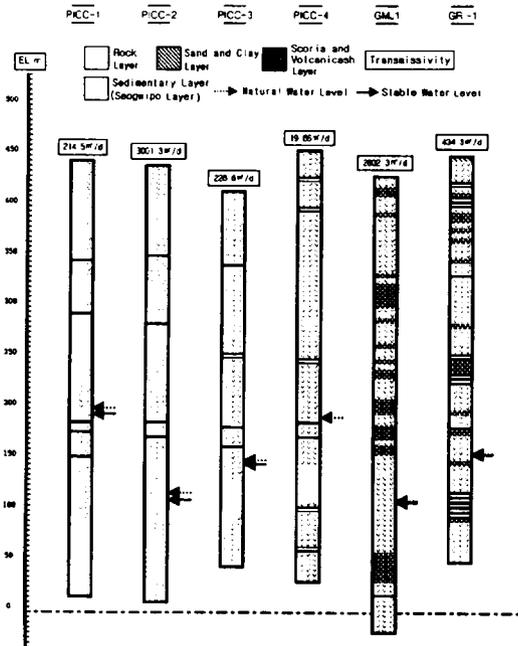


Fig. 4f. Geologic log of wells for level 400~500 m (II).

은 연구자들이 연구결과를 근거로 제주도의 지하수 부존형태는 상위지하수(High level groundwater), 기저지하수(basal groundwater), 상부준기저지하수(Upper parabasal groundwater), 하부준기저지하수(Lower parabasal groundwater)와 기반암 지하수(Basement groundwater)로 나누어 5가지 형태로 분류하고 있다.

또한, 한국수자원공사(1993)에 의하면 상기 언급한 것과 다소 차이를 보여 상위지하수, 기저지하수, 준기저지하수로 3분하고 있다.

지하수의 함양과 유동을 지배하는 인자

제주도는 지질학적으로 보아서 그 생성 연령이 상당히 젊기 때문에 지하수가 산출되는 대수층은 단층, 구조대 등의 2차적인 대규모적인 지질구조보다는 크링커, 화산쇄설물, 퇴적층과 2차 간극(수직절리)의 요소가 더 크게 작용하므로 이에 대한 조사가 더 중요하다고 판단된다. 조사지역 지하수의 함양과 유동은

지질인자(제주도, 1998)인 지질연령, 간극, 분석구, 퇴적층, 꽃자왈지역, 함몰지, 고도양, 지질경계선, 클럭커, 균열 및 절리대 등에 의해 결정된다.

지하수위의 변동특성

어떤 대수층의 지하수량의 증감 파악에 있어서 지하수위 변화는 대단히 중요하다. 만일 지하수위가 내려가면 대수층 내의 지하수량이 고갈되고 있는 중이고 지하수위가 올라가면 대수층내로 지하수가 유입되어 지하수량이 증가하고 있음을 의미한다. 따라서 지하수위의 변화는 그 지역 지하수체의 저류량의 변화, 즉 대수층의 특성을 대변한다고 할 수 있다.

제주도 지하수위는 우기인 여름철에는 상승하고 건기인 겨울에는 내려간다. 또한 지하수공의 지형고도가 높을수록 즉, 비포화대(vadose zone)의 두께가 두꺼울수록 지하수위 변동이 크고 지형고도가 낮은 기저지하수 지역에서의 지하수위 변동은 거의 없다.

요 약

제주도 내에 개발되어 있는 지하수관정은 총 5,100여 공이며, 이들 중 해발 200~600 m 구간의 중산간지대에 분포되는 공은 245공에 달하고 있다. 중산간지대의 지하수개발·이용이 활성화됨에 따라 지층분포 및 형태, 함양량, 채수가능량 등 지하수와 관련된 특성과 지하수 수위의 강하 정도와 변동특성 등을 조사하여 이 지대에 부존하는 지하수의 특성을 파악하였다.

자연수위 및 안정수위의 절대적 심도는 고지대로 갈수록 큰 폭으로 깊어지고 있으며, 고도의 각 구간별 수위의 강하량은 25.7 m, 24.63 m, 13.8 m, 12.5 m로서 표고가 높아짐에 따라 감소하는 경향을 보이고 있어 고지대에서도 양수에 따른 지하수의 공급이 충분하게 이루어지고 있음을 나타내고 있다.

제주도는 습골, 꽃자왈, 오름 및 소하천의 투수성 지질구조가 전 면적의 반 이상이 중산간지대에 분포

되고 있다. 그러나 이들 분포는 지하수 함양에는 유리한 역할을 하고 있으나 지하수의 양수능력을 판단하는 투수량계수와는 직접적인 연관성 없다. 따라서 중산간지대 지하수의 양수능력은 심부에 분포하고 있는 대수층 및 저투수층의 분포형태와 깊이에 따라 크게 좌우되고 있었다.

참고 문헌

- 건설부·제주도·한국수자원공사, 1993. 제주도수자원 종합개발계획수립보고서, VII 3-126.
- 박원배, 1993. 제주도 지하수의 수위변동에 관한 연구. 제주대학교 석사학위논문, 49 pp.
- 변창구·김재철·양성기, 1999. 제주도 수자원의 효율적인 이용방안 연구. 제주대학교 해양연구논문집, 23: 161-163.
- 최순학, 1989. 제주도의 형성과 지하수 특성.
- 한정상, 1998. 지하수환경과 오염. 박영사, pp. 75-96.
- 제주도, 1997. 제주도 중산간지역 종합조사.
- 제주도·농업기반공사, 1990-1998. 각 연도별 제주도 지하수개발보고서
- 제주도, 1998. 제주·예월도폭 지질보고서, pp. 211-212.
- 제주도, 2000. 제주도 지하수 보전·관리계획 보고서.
- 지하수 개발과 환경대책 총기술 편집위원회, 1996. 지하수 개발과 환경대책. 총기술, pp. 702-703.
- 건설부, 1993. 제주도 표고별 연평균 강우량분포.
- 고기원, 1997. 제주도의 지하수 부존특성 서귀포층의 수문지질학적 관련성. 부산대학교 박사학위논문, 325 pp.
- 이문원·한규언, 1977. 제주도의 지질과 지하수와의 연구(1). 제주대학교 논문집, 8: 23-29
- 송시태·고기원·윤선, 1996. 제주도 지하수의 함양과 오염에 영향을 미치는 습골구조와 꽃자왈지대에 관한 연구(I). 대한지하수환경학회 학술발표요지집.