제주도 지하수의 특성과 수자원관리(Ⅱ)
- 제주지하수의 수문지질학적 특성 -

고 기 원 |
제주특별자치도 수자원본부 수자원연구실장
lavakoh@hanmail.net

1. 제주도의 수문지질

제주도는 화산체의 두께가 약 2,100m(해수면 상부 1,950m, 해수면 하부 150m)에 달하는 순상화산으로서 화산암류와 퇴적암류로 이루어져 있다. 화산암류는 제주도 면적의 98%에 이르는 넓은 지역을 피복하고 있는 반면, 퇴적암류의 분포면적은 2%(28㎢) 정도에 불과하다. 화산암류의 화학적 조성은 알카리현무암(Alkali Basalt), 현무암(Basalt), 조면질현무암(Trachybbasalt), 조면질안산암(Trachyandesite), 현무암질 조면안산암(Basaltic trachyandesite), 현무암질 안산암(Basaltic andesite), 조면암(Trachyte) 등 비교적 다양하며(고기원 외 2005), 퇴적암류는 응회퇴적층, 해양성 퇴적층, 용암류 사이에 협제된 퇴적층, 현생퇴적층, 사구층 등으로 이루어져 있다.

화산암은 용암의 물리적 특성에 의해 파호에호에(Pahoehoe) 용암과 아아(Aa) 용암으로 나눌 수 있는데, 파호에호에 용암류는 주로 동부와 서부의 해안저지대 지역에 분포하며, 아아 용암류는 남부와 북부, 그리고 한라산 고지대 지역을 중심으로 분포하고 있다. 시추코아에 대한 지질검층 결과에 의하면, 제주도에 분포하는 파호에호에 용암은 단위 두께가 0.5~5m 정도로 얇고 절리와 균열이 발달된 다공질의 특징을 나타낸다. 또한, 아아 용암류는 단위 두께가 5~15m 정도이고 수직절리와 균열이 발달하며, 가운데 부분은 비교적 치밀하지만 상·하부에는 투수성이 매우 좋은 클린커(Clinker) 층이 발달하고 있다(그림 1 참조). 수직적으로 볼 때, 제주도는 두께가 얇은 용암류 누층으로 이루어져 있는데, 용암류의 매수는 지역별로 큰 차이를 나타내어 동부지역이 11~14매, 서부지역은 12~60매, 남부지역 5~9매, 북부지역 20~24매로 조사되었다(고기원, 1997). 아울러, 해수면 하부에 존재하는 용암류의 분포 깊이는 동부지역이 해수면 하 100~150m 범위이고, 서부지역과 북부지역은 해수면 하 50~70m, 남부지역은 해수면 위 10~80m 범위이다.

제주도에는 크고 작은 용암동굴이 60여 개소 분포하고 있으며, 대표적인 용암동굴로는 빌레못동굴(L : 11,749m), 만장굴(L : 8,924m), 수산굴(L : 4,674m) 등을 꼽을 수 있다(홍시환, 1988). 용암동굴은 그 형성과정에서 천장이 붕괴되는 경우가 많은데, 제주도에서는 용암동굴 천장이 붕괴된 곳을 통해 배수가 잘 되기 때문에 '숨골' 이라 부르고 있다. 숨골은 지표수 또는 빗물이 지하로 막힘없이 침투할 수 있는 지질구조이기 때문에 지하수 함양에는 좋은 역할을 하고 있으나 지하수 오염물질의 유입통로라는 측면에서는 부정적인 기능을 지니고 있다.

또한, 제주도에는 분출시기를 달리하는 360여개에 달하는 소화산체들이 분포하고 있는데, 제주도에서는 이를 '오름' 이라 부르고 있다. 이들 소화산체 대부분은 분석구(Cinder Cone) 또는 스코리아구(Scoria Cone)이고, 일부는 응회구(Tuff Cone)이나 응회환(Tuff Ring)이다. 분석구 또는 스코리아구는 미고결 분석(스코리아)으로 이루어져 있어 투수성이 매우 좋

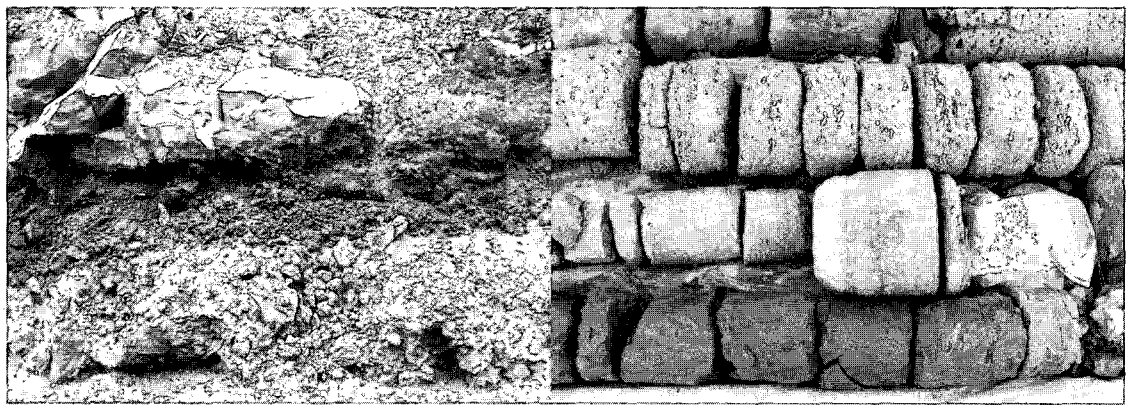

그림 1. 아아용암류에 발달하는 클린커층(왼쪽)과 시추코아로 회수된 지하에 분포하는 서귀포층(오른쪽)

은 반면, 응회구 및 응회환은 고결 내지는 준고결의 응회퇴적층을 이루고 있는 관계로 투수성이 불량한 편이다. 지표에서 응회퇴적층은 성산일출봉을 비롯하여 수월봉, 당산봉, 단산, 용머리, 두산봉, 고내봉, 파군봉, 매오름, 송악산 등 주로 해안가에 분포하고 있고, 지하에서도 비교적 다양한 심도에서 두께를 달리하여 존재하고 있어 지하수의 유동에 영향을 미치는 수문지질학적 방벽(hydrogeological barrier)의 역할을 하고 있다.

해양성 퇴적층인 서귀포층은 지표상에는 서귀포시 천지연폭포 서쪽 해안가에만 약 33m 높이로 노출되어 있으나 지하에는 제주도 형성초기에 분출한 화산암류 하위에 광범위하게 분포하고 있어 지하수의 부존형태와 산출특성을 결정짓는 매우 중요한 역할을 한다(고기원, 1997). 이 층의 지하 분포심도는 지역에 따라 비교적 큰 차이를 나타내고 있는데, 동부지역은 평균 해수면 하 110~150m 범위, 서부지역은 평균 해수면 하 40~70m 범위, 북부지역은 평균 해수면 하 70~80m 범위, 남부지역은 평균 해수면 위 10~80m 범위이다(그림 1 참조).

비포화대의 두께는 지역별로 차이를 나타낸다. 해발 100m 지점을 기준으로 할 때, 동부지역은 비포화대의 두께가 약 95~98m 정도이고, 서부지역은 50~60m이며, 북부지역은 70~80m, 남부지역은 40~50m 정도이다. 따라서, 지하로 침투된 빗물이 지하수체에 도달하기까지는 비포화대 용암누층(lava sequence)을 통과하면서 물리적 여과가 이루어지고 있다.

2. 지하수 함양량과 적정 개발량

2.1 강우량

제주도는 우리나라에서 비가 가장 많이 내리는 지역 중의 한 곳이다. 해안 저지대에 위치한 기상청 관할 4개 기상대 및 기상관측소(제주, 서귀포, 고산, 성산포)에서 측정된 30년 평균 강우량은 1,567mm이지만, 중산간지역을 포함한 도 전역의 10년 평균(1993~2002) 강우량은 1,975mm로서 전국 평균 1,283mm(건설교통부, 한국수자원공사, 2001)보다 무려 692mm가 더 많다(표 1). 그러나, 강우량의 지역적 편차가 심하여 남부·동부·북부지역은 연강우량이 2,027~2,339mm인데 반해 서부지역은 1,299mm에 불과하다. 또한, 해발 100m 증가함에 따라 연강우량은 약 273mm씩 증가하는 현상을 나타내고 있는데, 해발 200m 이하지역은 연간 1,651mm인 반면, 해발 200~600m의 중산간 지역은 2,184mm이고 해발 600m 이상지역은 2,784mm이다(제주도·한국수자원공사, 2003). 이처럼, 표고에

표 1. 제주도의 지역별 연강우량 통계 (단위 : ㎜)

Districts	Annual Mean Rainfall		Minimum Year (1996)	Maximum Year (1999)
	1993~2002	1923~2002		
Entirelsland	1,975	1,972	1,419	2,945
Eastern	2,077	2,037	1,571	3,276
Western	1,299	1,293	1,022	1,844
southern	2,339	2,347	1,738	3,355
Northern	2,027	2,046	1,215	3,047

따른 강우량의 변화가 뚜렷하고, 동부·남부지역이 북부·서부지역보다 강우량이 많은 것은 한라산의 지형적 영향에 의한 것으로 해석되고 있다.

제주도의 유출발생 강우량은 1일 40mm로 분석되었으며(제주도·한국수자원공사, 2003), 1일 40mm 이상 강우 발생 일수는 연 중 5.2~18.6일 범위이다. 1일 40mm 이상 내린 강우량은 연평균 강우량의 35~80.7%를 차지하고 있으나 전반적으로 40~100mm 강우 일수 및 강우량이 가장 많은 편이다.

2.2 지하수 함양량

제주도에서는 2003년 지하수 함양량 재평가 연구에서 우리나라 최초로 유효 지하수 함양지역 및 함양량 개념을 도입하였다. 즉, 각 유역별로 토지이용이 집중되고 있는 해안선으로부터 직선거리 500m 이내의 109.3㎢지역을 지하수 함양지역에서 배제하고, 1,719.0㎢ 지역을 대상으로 유효 지하수 함양량을 산정하였다. 지하수 함양 배제지역이 고려된 제주도의 전체적인 물 수지를 보면, 총강우량은 3,427백만㎥/년이고 직접유출량은 708백만㎥/년, 증발산량은 1,138백만㎥/년이며, 지하수 함양량은 1,581백만㎥/년이다(표 2). 즉, 총강우량의 46.1%가 지하수로 함양되고 있다. 유역별 지하수 함양량을 보면, 동부유역이 529백만㎥/년으로 가장 많고, 남부유역이 459백만㎥/년, 북부유역이 396백만㎥/년이다. 그렇지만, 서부유역은 197백만㎥/년으로 4개 유역 중 지하수 함양량이 가장 적은 것으로 분석되었다.

2.3 지하수 적정 개발량

'지하수 적정 개발량(sustainable yield)'이란 수질과 양수량에 영향을 미치지 않는 상태에서 지속적으로 지하수를 양수할 수 있는 양을 의미한다. 이 개념은 지하수자원의 보호를 위해 하와이주에서 처음으로 개발되었다. 2003년 평균 강우량을 기준으로 분석한 제주도의 지하수 적정 개발량은 1일 1,768천㎥, 연간 645백만㎥이다(제주도 수문지질 및 지하수자원종합조사(3), 2003). 수역별 지하수 적정개발량은 북부수역이 553천㎥/일으로 가장 많고 남부수역이 502

표 2. 제주도의 지역별 물 수지

Districts	Area (㎢)	Annual Mean Rainfall(㎜)	Total Rainfall (10^6㎥/yr)	ET (10^6㎥/yr)	Runoff (10^6㎥/yr)	Groundwater Recharge	
						(10^6㎥/yr)	(10^3㎥/day)
Total	1,719.0	1,975	3,427	1,138	708	1,581	4,329
Eastern	459.7	2,077	964	282	153	529	1,447
Western	349.4	1,299	455	217	41	197	539
Southern	466.2	2,339	1,100	329	312	459	1,257
Northern	443.7	2,027	908	310	202	396	1,086

(자료 : 제주도 수문지질 및 지하수자원종합조사(3), 2003)

표 3. 제주도의 유역별 지하수 적정 개발량(평균 강우량 기준)

Districts	Groundwater Recharge (10^3m^3/day)		Sustainable Yield (10^3m^3/day)		Percentage (%)	
	1993	2003	1993	2003	1993	2003
Total	4,093	4,329	1,689	1,768	41	41
Eastern	1,383	1,447	498	401	36	28
Western	570	539	331	312	58	58
Southern	1,176	1,257	414	502	35	40
Northern	964	1,086	446	553	51	51

천m^3/일, 동부수역은 401천m^3/일, 서부수역이 312천m^3/일이다. 지하수 함양량이 가장 많은 동부수역의 적정 개발량이 남부 및 북부수역보다 적은 것은 해수침투 방지를 위해 안전율을 감안하였기 때문이며, 서부와 북부수역이 상대적으로 많은 것은 준기저지하수체의 부존특성을 고려했기 때문이다(표 3).

3. 지하수 부존특성

3.1 지하수 부존형태

제주도의 지하수 부존형태는 담-염수 경계면의 형성 및 변동특성, 서귀포층의 분포상태, 지하수의 수리경사, 지하수위 분포 및 변동특성, 지하수의 수질, 지하 지질분포 등을 고려하여 기저지하수, 준기저지하수(상부 및 하부준기저지하수), 상위지하수, 기반암지하수의 4가지 형태로 분류할 수 있다(그림 2 및 3 참조).

기저지하수(basal groungwater)

기저지하수란 염수와 담수의 비중 차에 의해서 담수가 염수 상부에 렌즈형태로 부존하는 즉, Ghyben-Herzberg원리(이하 "G-H원리"라 한다)에 의해 부존하는 지하수를 말한다. 일반적으로 담수의 밀도는 1.000g/cm^3이고 해수의 밀도는 1.025g/cm^3

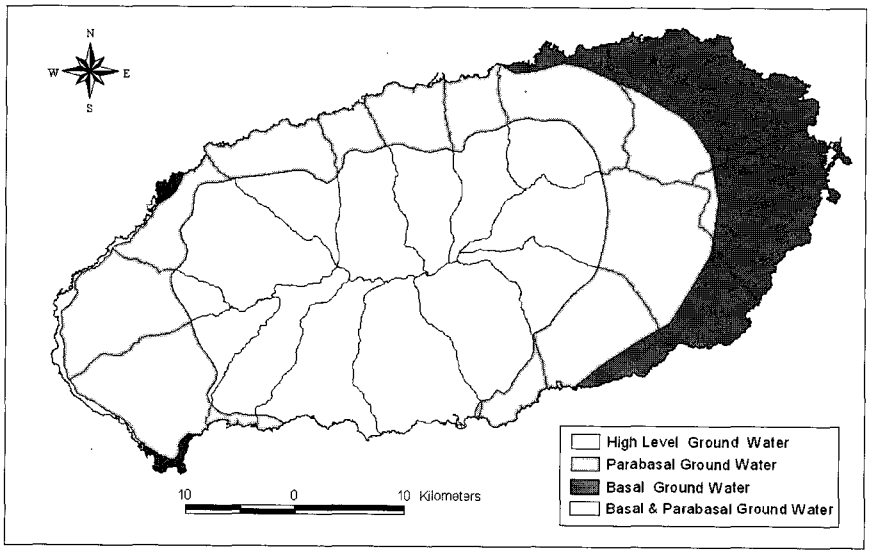

그림 2. 제주도 지하수의 부존형태별 분포도

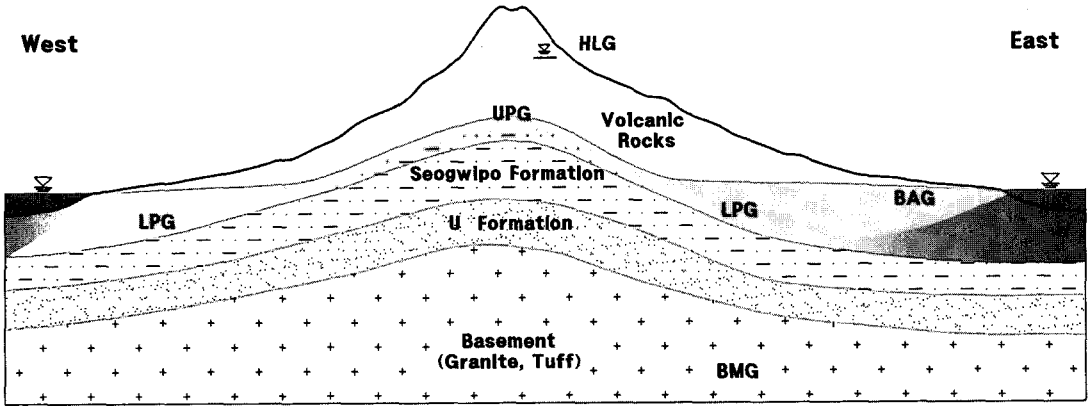

그림 3. 제주도의 지하지질구조와 지하수 부존모식도(Koh, 2005). HLG : High Level Groundwater, UPG : Upper Parabasal Groundwater, LPG : Lower Parabasal Groundwater, BAG : Basal Groundwater, BMG : Basement Groundwater

이므로 담수지하수는 해수면 상부 지하수위 높이의 40배 만큼의 깊이까지 부존할 수 있다(1 : 40의 비율을 "G-H 비"라 한다).

제주도에서 기저지하수는 조천읍 북촌리에서 남원읍 위미리에 이르는 동부의 해안지역과 서부지역의 한림읍 수원리-귀덕리에 이르는 해안지역, 그리고 모슬포 하모리-산이수동의 해안지역을 따라 부존하고 있다. 동부지역에서 담수 지하수체(또는 담수렌즈)의 수직적인 분포 두께는 해안에서의 거리에 따라 큰 차이를 나타내고 있다. 즉, 해안선에서 약 0.9㎞ 내륙 쪽에 위치한 한동1호공에서는 평균 해수면 하 33.6m까지 담수 지하수체가 형성되어 있으나 약 2.5㎞ 내륙 쪽에 위치한 한동2호공에서는 평균 해수면 하 35.3m로 다소 두터워지며, 내륙 쪽 5.2㎞ 지점에 위치한 한동3호공에서는 평균 해수면 하 68.2m를 나타내어 내륙 쪽으로 거리가 멀어짐에 따라 담수 지하수체의 두께가 두꺼워지는 현상을 나타내고 있다. 또한, 수산지역에서도 담수지하수는 1호공(해안에서의 거리 1.4㎞)의 경우는 평균 해수면 하 26.84m까지, 2호공(해안에서의 거리 3.2㎞)은 평균 해수면 하 28.95m, 3호공(해안에서의 거리 5.5㎞)은 48.34m까지 각각 분포하고 있다. 그러나, 한동4호공(해안에서의 거리 8.8㎞)과 수산4호공(해안에서의 거리 8.1㎞)에서는 담-염수 경계면을 갖는 지하수체는 형성되지 않고 자연수위에서 공저까지 담수지하수로 이루어져 있다. 이처럼, 제주도 동부지역에서 담수렌즈가 형성되고 있는 수직적 비율(G-H비)은 최소 1 : 13, 최대 1 : 31, 평균 1 : 19의 값을 나타내어 일반적인 G-H비에 의한 담수지하수체 보다 두께가 훨씬 얇은 담수렌즈가 형성되고 있다(고기원외 3인, 2003).

준기저지하수(parabasal groundwater)

준기저지하수란 지하에 투수성이 낮은 서귀포층이 분포하고 있음으로 인하여 담수지하수체가 해수와 직접 접하고 있지 않을 뿐만 아니라, 통상적인 G-H비가 적용되지 않는 지하수체를 말한다. 준기저지하수는 서귀포층의 지하 분포심도에 따라 상부준기저지하수와 하부준기저지하수로 구분할 수 있다. 상부준기저지하수는 서귀포층의 상부면을 따라 빠른 선형유속으로 유동함으로서 풍수기와 갈수기간에 수위변동 폭이 크게 나타나며, 채수에 의한 수위 강하량이 최대인데 반해 공당 평균 채수량은 낮은 편이다. 대체로 안덕에서 서귀포에 이르는 지역은 서귀포층이 해수면 상부에 위치하고 있기 때문에 상부준기저하수체가 발달하고 있다. 하부준기저지하수는 서귀포층이 해수면 하부에 분포하고 있는 제주도 서부 및 북부지역에 광

범위하게 부존하고 있다. 자연수위 변동은 강우에 의해 지배되어지고 있지만 서귀포층이 해수면 하 약 60m 이하에 분포하는 일부지역에서는 조석의 영향이 미약하게 나타난다.

상위지하수(high level groundwater)

상위지하수란 비포화대 내의 치밀질 화산암류나 고토양층 · 퇴적층 등의 저투수성 지층 상부를 따라 비교적 빠른 선형유속으로 유동하거나 고여 있는 일종의 부유지하수체(Perched Water)를 말한다. 상위지하수는 대부분 중산간 및 고지대지역에 편중되어 있다. 영실, Y계곡, 돈내코, 입석 등지의 용천수들은 상위지하수가 지표로 용출하고 있는 대표적인 예들이다. 상위지하수는 비포화대 내의 다른 대수층과 수리적으로 연결되어 있지 않은 단속적인 지하수체이기 때문에 강우량에 따라 유량변화의 폭은 크지만 해수와 직접 접촉하지 않으므로 수질은 매우 양호한 편이다.

기반암지하수(basement groundwater)

해수면 하 300~400m 이하에 분포하는 기반암(화강암, 용결응회암)내에 발달된 파쇄대나 절리 등과 같은 1, 2차 유효공극에 부존하는 강우기원의 심부지하수를 말한다. 1980년대 말부터 온천개발을 목적으로 일부 지역에서 심부시추가 이루어지면서 기반암 지하수에 대한 정보들이 조금씩 알려지기 시작하였는데, 기반암 상부의 지질구조와 지하수 부존형태에 따라 수질과 채수 가능량에서 차이를 나타내고 있다. 이미 개발된 12개 온천공의 평균 지온 증온율은 2.06℃/100m이고, 최대 2.76℃/100m, 최소 1.63℃/100m으로서 내륙지방보다 낮은 편이다.

3.2 지하수의 수질

제주도는 토양층이 얇고 배수성이 크고, 대수층을 이루는 화산암류의 투수성이 크며, 또한 강수량이 내륙에 비해 상대적으로 많아 지하수의 용존 성분들의 변화가 다른 수리지질학적인 조건을 갖는 지역 보다 적다. 또한 내륙지역과는 구성암석의 종류와 암석화학적 특징이 다르므로 지하수의 수질 역시 많은 차이를 나타내고 있다. 용천수는 5.4~7.4 범위의 pH를 가지며 평균 pH는 6.3이다. 대체로 표고가 낮아지면서 지질매체와의 반응을 통해 pH가 증가하는 경향을 나타낸다. EC(전기전도도)는 39~338㎲/㎝범위이며 평균 152㎲/㎝이고, 중간 값은 127㎲/㎝이다. 표고가 낮아지면서 지질매체와의 반응, 오염, 해수의 영향 등으로 EC가 증가하는 경향을 보인다. 수온은 4.5~16.5℃의 범위이며 평균 12.9℃이다.

관정 지하수는 5.6~9.0의 pH 범위를 가지며 평균 7.3이다. 용천수에 비해 지질매체와의 반응 정도가 크고 오염에 덜 취약하므로 상대적으로 pH가 높은 것으로 해석된다. EC는 61~2,930㎲/㎝의 범위이고 평균 284㎲/㎝이다. 그러나 EC 값의 분포가 비대칭이고 일부 높은 EC에 의해 평균값은 크게 영향을 받으므로 자료의 대표 값으로는 중간 값이 더 의미가 있으며 그 값은 131㎲/㎝이다. EC가 높은 지점들은 자연적인 영향보다는 오염 등의 인위적인 영향이 큰 것으로 보인다. 수온은 9.8~17.4℃의 범위이며 평균 14.3℃이다.

제주도 지하수의 수질은 크게 세 가지 군으로 나눌 수 있다. 즉, 해수에 의해 영향을 받는 군과 NO_3-에 의해 영향을 받는 군, 해수나 NO_3-에 의해 영향을 받지 않은 배경수질을 가지는 군으로 구분할 수 있다. 지하수의 수질유형은 주요 양이온 및 음이온의 상대적인 당량 농도에 따라 Ca-HCO_3, Ca-Cl, Na-HCO_3, Na-Cl의 4가지로 분류할 수 있다. 수질유형은 대체로 절반 정도는 Ca-HCO_3형이고 나머지는 Ca-Cl형 및 Na-Cl형이다. Ca-HCO_3형은 중산간 지역의 용천수 및 관정 지하수와 해안지역의 일부 관정 지하수에서 나타난다. Ca-Cl형은 주로 해안지역의 관정 지하수 및 용천수가 해당되며 Na-Cl형은 주로 동부지역에 분포한다.

3.3 용천수

제주도의 해안과 고지대의 곳곳에 분포하고 있는 용천수는 지하의 지층 속을 흐르던 지하수가 지표와 연결된 지층이나 암석의 틈을 통해 솟아 나오는 지하수이다. 용출위치가 멸실·매립되거나 훼손된 것을 포함한 용천수의 분포 현황을 보면, 200m이하의 저지대에 전체의 92.3%에 달하는 841개소가 대부분 분포하고 있으며 중산간지대에 49개소, 600m이상의 고지대에도 21개소가 분포하고 있었다. 지역별로는 북제주군에 398개소로 가장 많은 용천수 분포하고 남제주군, 서귀포시, 제주시 순서로 분포 개소수가 많다.

용천수의 분포상태를 보면, 지형경사 완만하고 현무암질 용암류가 대지상으로 분포하는 동·서부의 중산간지역에는 10여 개소에 지나지 않고 있는 반면, 대부분의 용천수들은 지형경사 급하고 조면암과 조면질현무암류가 주로 분포하는 남·북지역의 중산간 및 고지대에 집중적으로 분포하고 있다. 특히, 남·북사면에 분포하는 용천수들은 주로 하천변이나 그 주변지역에 위치하는데 비하여 동·서부지역에서는 분석구의 주변이나 기슭에서 용출하고 있다. 용천수들은 하천의 절벽이나 벼랑, 요철지형의 오목지(凹), 산기슭 등에 위치하고 있는데, 이는 중력의 지배를 받으며 유동하던 지하수가 지형변화로 인하여 지하수면이 지표로 노출됨으로서 생겨나는 현상이다.

제주도 용천수는 용출지점의 지질구조에 따라 크게 용암류경계형, 절리형, 사력층형으로 구분할 수 있다. 「용암류경계형」이란 용암류가 서로 접촉하는 경계면 또는 가장자리나 용암류의 말단부를 따라 용출하는 용천수를 말하며, 「절리형」이란 용암류에 발달한 수직절리의 틈이나 균열를 따라 용출하는 경우이고, 「사력층형」은 미고결 또는 준고결 사력층의 공극에 저류된 지하수가 지형변화 지점 또는 오목지를 따라 용출하는 용천수를 말한다. 용천수를 지질구조에 따라 분류해 보면(위치멸실 156개소 제외), 전체의 90.3%인 682개소가 용암류경계형이며, 절리형은 56개소(7.4%), 사력층형은 17개소(2.2%)로서, 제주도 용천수의 대부분은 용암류의 경계면이나 경계지점에 발달하고 있음을 알 수 있다.

1998~1999년에 걸쳐 제주도광역수자원관리본부에서 701개소의 용천수에 대한 용출량을 측정한 결과, 1일 평균 1,083천㎥, 최대 1,608천㎥으로 시기에 따라 용출량 변화가 큰 것으로 조사되었다(제주도, 1999). 전체 용천수의 용출량 변동량(최대 용출량 - 평균 용출량)은 523,570㎥/일으로서 평균 용출량의 48%에 해당하여 강우량에 따른 용출량의 변동 폭이 매우 크다. 용천수의 수질은 지역별로 차이를 나타내는데, 대체적으로 해발 200m 이상의 지역에 위치한 용천수들은 강우의 조성에 가까운 수질조성을 보이고 있는데, 이 같은 현상은 지하수의 순환속도가 매우 빠름으로써 지층 내에서 물-암석반응이 거의 이루어지지 않고 있음을 의미하는 것이다.

3.4 지하수 체류시간

2001년 제주도에서 한국지질자원연구과 공동으로 미국 유타대학 Noble Gas Laboratory에 의뢰해 26개소(용천수 6개소, 관정 20개소)에 대한 프레온가스(CFCs; Chorofluorocarbons) 분석법을 이용해 지하수의 체류시간 분석을 실시하였다. 제주도 지하수의 평균 체류시간은 16년으로서 현생지하수의 범위에 포함되고 있다. 그렇지만, 제주도 서부의 일부 지역에서는 40년 이상을 나타내는 지하수도 존재하고 있으며, 서귀포를 포함하는 남부지역은 10년 전후의 체류시간을 나타낸다. 또한, 삼다수의 경우는 18년이고, 삼양1동에 있는 큰물용천수는 15년, 영실계곡의 용천수는 1년으로 조사되어 지역에 따라 지하수의 연령이 큰 차이를 보인다(제주도 수문지질 및 지하수자원종합조사, 2001). 지하수의 유동속도 또한 지역에 따라 큰 차이를 나타낸다. 느린 것은 1년에 70m 정도의 속도로 이동하고, 빠른 것은 연간 1,500m 이동하고 있는데, 제주도 전체적인 평균 이동속도는 연간 475m로 조사되었다.

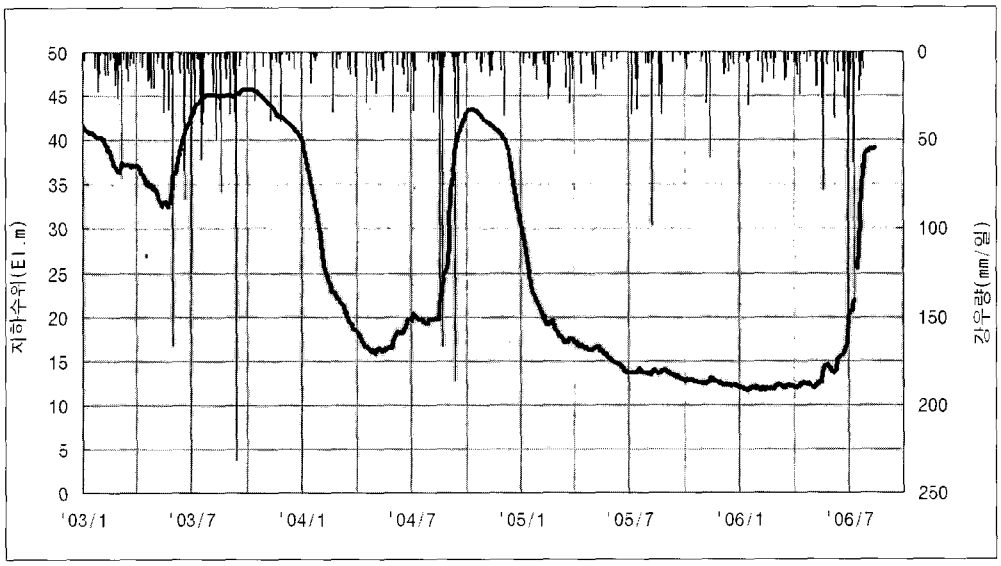

그림 4. 제주도 지하수의 수위 변화(제주시 연동관측정)

3.5 지하수위 분포 및 변동

제주도 지하수의 수위변동 요인에 대한 그 간의 연구결과를 종합해 보면, 수위변동을 일으키는 자연적 요인 중 주된 요인은 강우량과 해양조석이며, 수위변동 유형은 (1) 강우지배형(남부지역), (2) 조석지배형(동부지역), (3) 강우 및 조석 혼합형(서부 및 북부지역)으로 구분할 수 있다(박원배 외 2인, 1994; 고기원, 1997).

제주도 지하수의 수위는 지하수 부존형태에 따라서 변동양상이 뚜렷하게 구분되고 있다. 준기저지하수 부존지역의 평균 수위는 해수면 위 2~45m의 범위에서 분포하고 있으며, 연간 수위변동 폭은 2~34m를 나타낸다. 상위지하수 부존지역은 평균 수위가 해수면 위 37~177m로 매우 높게 형성되며, 연간 수위 변동폭은 5~16m의 범위이다. 이처럼, 상위지하수 부존지역의 지하수위가 높게 형성되고 있는 것은 지하에 저투수성 퇴적층인 서귀포층이 비교적 높은 위치에 분포하고 있고, 이들 관정이 설치된 지점의 표고도 높기 때문인 것으로 해석된다. 기저지하수 부존지역은 평균 수위가 해수면 위 3m 이하이고 연간 수위변동 폭은 4m 이하를 나타내 전술한 준기저 및 상위지하수 부존지역과는 매우 다른 양상을 나타낸다. 즉, 평균수위도 가장 낮을 뿐만 아니라, 수위변동 폭과 표준편차도 가장 낮은 특성을 보이고 있는데, 이러한 현상은 담-염수 경계면을 갖는 기저지하수체의 특징이라고 할 수 있다.

제주도 지하수의 수위는 전반적으로 강우량에 의한 계절적인 변화를 일으키고 있다. 강우량이 많은 하절기 동안은 상승국면을 유지하는데 대체로 10월경에 피크를 나타내고, 그 이후부터 하강국면으로 이어져 다음해 3~4월경에 최저 수위를 보인다. 10월 이후의 지하수위 하강추세를 분석한 결과에 의하면, 수위 하강율은 평균 6cm/일(3~15cm/일 범위)이며, 지하수위가 하강국면에 접어들게 되면 50mm 내외의 비가 내리더라도 지하수위를 상승국면으로 반전시키지 못하는 것으로 분석되었다.

4. 결 론

제주도는 투수성이 좋은 화산암류로 이루어져 있

어 지표수의 개발·이용여건이 취약한 관계로 전적으로 지하수에 의존하고 있어 지하수의 보전관리에 많은 노력을 기울여 오고 있다. 그동안 지하수의 체계적 관리를 위한 기초조사를 통해 얻어진 제주도의 수문지질과 지하수 부존특성을 요약하면 다음과 같다.

- ㅇ 화산암류는 제주도 전체 면적의 98%에 이르는 넓은 지역을 피복하고 하고 있으며, (1) 아아 용암류에 수반되는 클린커(clinker) 층, (2) 용암류와 용암류 사이의 접촉면을 따라 발달하는 공간, (3) 냉각 절리, (4) 파호에호에 용암류에 발달하는 용암관(lava tube) 또는 용암터널(lava tunnel), (5) 고결되지 않은 분석이나 스코리아(scoria), 대형암괴, 스패터(spatter) 등과 같은 물질의 공극, (6) 기공, (7) 용암관 또는 용암터널이 붕괴되면서 생겨난 공동 등 투수성 지질구조가 발달되어 있어 연간 강우량의 46.1%에 이르는 빗물이 지하수로 함양되고 있다.
- ㅇ 담-염수 경계면의 형성 및 변동특성, 서귀포층의 분포상태, 지하수의 수리경사, 지하수위 분포 및 변동특성, 지하수의 수질, 지하 지질분포 등을 고려할 때, 제주도의 지하수 부존형태는 기저지하수, 준기저지하수(상부 및 하부준기저지하수), 상위지하수, 기반암지하수의 4가지 형태로 분류할 수 있다.
- ㅇ 제주도 지하수의 수질은 크게 해수에 의해 영향을 받는 군과 NO_3^-에 의해 영향을 받는 군, 해수나 NO_3^-에 의해 영향을 받지 않은 배경수질을 가지는 군으로 구분할 수 있다.
- ㅇ 제주도 지하수의 주된 수위변동 요인은 강우량과 해양조석이며, 수위변동 유형은 (1) 강우지배형(남부지역), (2) 조석지배형(동부지역), (3) 강우 및 조석 혼합형(서부 및 북부지역)으로 구분할 수 있다.
- ㅇ 용천수는 지형경사 완만하고 현무암질 용암류가 대지상으로 분포하는 동·서부의 중산간 지역에는 발달이 미약한 반면, 지형경사 급하고 조면암과 조면질현무암류가 주로 분포하는 남·북 지역에 집중적으로 분포하고 있으며, 특히, 남·북사면에 분포하는 용천수들은 주로 하천변이나 그 주변 지역에 위치하는데 비하여 동·서부지역에서는 분석구의 주변이나 기슭에서 용출하고 있다.
- ㅇ 제주도 지하수의 평균 체류시간은 16년으로서 현생지하수의 범위에 포함되고 있으나 서부의 일부 지역에서는 40년 이상을 나타내는 지하수도 부존하고 있으며, 서귀포를 포함하는 남부지역은 10년 전후의 체류시간을 나타낸다. 지하수의 유동속도 또한 지역에 따라 큰 차이를 나타내 느린 것은 1년에 70m 정도이지만 빠른 것은 연간 1,500m 이동하며, 제주도 전체적인 평균 이동속도는 연간 475m이다.

참고문헌

고기원, 1997, 제주도 지하수 부존특성과 서귀포층의 수문지질학적 관련성, 부산대학교 대학원 박사학위 논문, p.1~325

고기원, 1999, 제주도 수문지질에 관한 조사·연구연혁과 지하수의 합리적 이용을 위한 과제, 제주발전연구원·제주대학교환경연구소 주최 '제주지하수 영원한 자원인가?' 세미나 자료집 p. 47~97

고기원, 박윤석, 박원배, 문덕철, 2003, 제주도 동부지역의 수문지질과 지하수 부존특성(1), 제주도·제주지역환경기술개발센터 공동주최 제11회 세계물의 날 기념 학술세미나 발표자료집, p. 7~88

고기원, 2005, 제주도 지하수의 관리현황과 향후과제, 한국농업경영인 제주도연합회·제주농업발전포럼 주최 제주도의 지하수와 농업용수 토론회 발표 자료집, p. 9~51

고기원, 2005, 제주도 지하수의 공수화 관리방안, 제민일보사 주최 정책세미나 발표자료집, p. 87~138

고기원, 2005, 제주도 지하수의 부존 및 산출특성, 제주문화 제11호, p. 95~115

고기원, 박윤석, 박원배, 2005, 제주도 동부지역 지하

분포 화산암류의 $^{40}Ar-^{39}Ar$ 연대와 화산활동 해석, 2005 대한지질학회 추계학술발표회 초록집, p. 69

제주도, 1999, 제주의 물·용천수

제주도, 2001, 제주도 수문지질 및 지하수자원종합조사(1) 보고서

제주도, 2002, 제주도 수문지질 및 지하수자원종합조사(2) 보고서

제주도, 한국수자원공사, 2003, 제주도 수문지질 및 지하수자원종합조사(Ⅲ)

홍시환, 1988, 제주도의 동굴, 입정대학일한합동 한국 제주도 학술조사단 학술보고서(한국 제주도의 지역연구), p. 69~82