

제주도 지하수자원의 보존을 위한 향후 연구방향 고찰

고동찬, 이대하(한국자원연구소, 환경지질연구부)

<목 차>

- I. 서론
- II. 제주도의 일반적 특성
- III. 지질
- IV. 수문지질
- V. 기존 연구에 대한 개관 및 향후 연구방향 제시
지질 및 수문지질 단위 조사
- VI. 결론

1. 서론

우리나라는 강우량이 비교적 많은 온대지역에 속해 잠재적 수자원이 비교적 풍부하다고 볼 수 있으나, 대도시 인구집중 등에 의한 특정지역에 집중된 수요가 수자원의 효율적인 관리에 어려움을 주고 있다. 이를 극복하기 위해 많은 댐들을 건설하여 지표수 자원을 효율적으로 이용하고자 하였다. 그러나 현재는 더 이상 댐 건설 예정지를 쉽게 찾을 수 없을 만큼 지표수의 개발은 한계에 다다르고, 수자원의 이용량은 인구 증가와 일인당 물사용량의 증가로 계속 늘어날 전망이다. 이와 같이 지표수의 개발에는 많은 노력을 기울여 왔으나 지하수에 대해서는 상대적으로 관심을 기울이지 못했다. 지하수는 상수도 보급이 이루어지지 못한 지역에서 소규모로 생활용수로 이용하기 위해 개발되거나, 한해가 발생하였을 때 농업용수로 사용하기 위해 집중적으로 지하수를 개발하여 이용해 왔을 뿐이다. 따라서 지하수는 지표수의 부족을 보충하는 역할로서 필요에 의해 개발되고, 체계적이고 장기적인 관리는 전혀 이루어지지 못했다. 이에 비해 상대적으로 제주도의 지하수에 관해서는 그동안 많은 조사와 연구가 이루어져 왔다. 제주도 지역은 육지 지역과 달리 지표수가 빈약하고, 함양량이 많고 투수성이 좋은 대수층이 발달했다는 점에서 지하수의 중요성은 우리나라의 그 어느 곳보다도 강조되어 왔다. 그러나 제주도의 지하수 조사가 지하수 개발이 활발한 해안지역에 치우쳐서 이루어

졌고, 체계적이고 장기간의 지하수 관측이 최근에 들어서야 실시되고 있으며, 대수층 특성 및 함양특성에 관해서도 정량적인 조사가 미흡한 실정이다 (건설교통부, 1996).

제주도는 지질, 수문지질, 기후 등의 여러 면에서 육지 지역과 판이한 특성을 가지고 있다. 육지 지역의 대수층은 결정질암이나 퇴적암으로 구성된 기반암을 비교적 두꺼운 충적층이나 토양층이 피복하는 형태로 지하수 산출량이 많은 충적층보다는 파쇄대 형태로 발달한 기반암내의 대수층에 대해 개발이 이루어져 왔다. 일차공극이 거의 없는 기반암 대수층은 파쇄대에만 대수층이 발달하여 지하수 산출이 상대적으로 많지 않다. 그러나, 제주도 대수층은 투수성이 좋은 현무암 및 조면암류에 형성되어 있다. 현무암 및 조면암류층은 수평방향의 투수성이 매우 커서, 해안지역을 제외하고는 비포화대의 두께가 두꺼우며, 평상시 물이 흐르는 하천의 발달이 매우 불량하다. 따라서 관정 개발이 본격화되기 이전에는 대부분의 용수를 해안지역에서 용출하는 용천수에 의존해야 했다. 지하수 개발이 본격화되면서, 상수도 보급을 위한 수원과 농업 및 공업용수로 지하수를 이용하게 되었다. 우리나라 전체 수자원 이용총량의 10%정도만 지하수가 차지하는 점을 고려하면, 제주도에서 지하수의 중요성은 육지 지역과 비교할 수 없을 정도로 크다는 것을 알 수 있다. 또한 제주도는 지표층을 이루는 토양의 투수성이 높고, 강우량이 많아 지하수 함양량이 큰 특성으로 인해 지하수 순환속도가 빠른 특성을 가지고 있다. 지하로의 오염물 유입으로 인한 영향이 빠른 속도로 광범위한 지역으로 확산될 가능성이 높아 지하수 오염에 취약하다고 할 수 있다 (한국수자원공사, 1993).

지하수자원의 평가를 위해서는 기상학, 지표수수문학, 토양학, 수문지질학 등의 여러 분야의 조사가 필요하다. 지하수에 대한 함양, 대수층의 특성, 지표수체와의 상호작용, 지하수이용현황 등에 대한 많은 조사와 분석 및 연구를 통해 그 지역의 지하수자원에 대한 종합적인 평가를 내려야 할 것이다. 제주도 지하수에 대해서도 이러한 다양한 접근방법으로 지하수자원에 대한 평가를 실시해야 하며 이 중 어느 한부분이라도 간과된다면 효율적이고 지속가능한 지하수 자원의 이용에 지장을 초래할 수 있다. 이 논문에서는 지하수의 개발과 보존이라는 관점에서 지금까지 수행한 제주도 지하수 조사를

개관하고 앞으로의 연구방향을 제시하고자 한다.

2. 제주도의 일반적 특성

제주도는 약 250만년에서 300만년전의 신생대 제3기말과 제4기초에 일어난 화산활동에 의해 형성되었다. 제주도 본 섬은 장축 74km, 단축 32km인 타원형이고, 1828.3 km²의 면적을 가진다. 해발고도 1950m의 한라산을 중심으로 표고에 따라 200m이하의 해안지역, 200m에서 600m까지의 중산간지역, 600m이상의 산악지역으로 나누며, 각 지역이 전체면적에서 차지하는 비율은 각각 54.3%, 32.2%, 13.5%이다. 경사는 해안지역이 5도 미만이고, 중산간지역은 5-10도, 산악지역은 10-20도이다. 동부와 서부는 3도 이하의 평탄한 지형을 이루며 남부와 북부는 이보다 경사가 급하다. 전체적으로 평탄한 현무암 대지를 이루며, 360여개의 오름이라 불리는 분석구들이 구릉을 이루며 산재하고 있다. 수계는 한라산을 중심으로 방사상으로 발달하는데, 남부와 북부에 발달하고 동부와 서부는 하천 발달이 빈약하다. 대부분의 하천은 강우시에만 물이 흐르고 평상시는 말라 있는 건천이며, 평상시에도 물이 흐르는 하천은 극히 일부분이다. 수역은 16개 수역으로 나눌 수 있는데, 이들 수역은 다시 소유역으로 나눌 수 있다. 제주시지역의 중제주수역 및 동제주수역과 애월읍 일부를 포함하는 서제주수역, 북제주군지역의 한경면과 한림읍일부를 포함하는 한경수역, 한림읍과 애월읍을 포함하는 한림수역, 애월읍과 제주시 일부를 포함하는 애월수역, 조천읍과 제주시 일부를 포함하는 조천수역, 구좌읍을 포함하는 구좌수역, 남제주군에서는 대정읍과 안덕면을 포함하는 대정수역, 안덕면과 서귀포시 일부를 포함하는 안덕수역, 남원읍을 포함하는 남원수역, 표선면과 북제주군 조천읍일부를 포함하는 표선수역, 성산읍과 표선면 일부를 포함하는 성산수역이 있으며 서귀포시지역에는 서서귀, 중서귀 및 남원읍 일부를 포함하는 동서귀수역이 있다.

제주도의 토양은 평균 60cm의 심도를 가지며 전형적인 화산회토의 특성을 지니고 있다. 대부분의 토양은 현무암을 모재로 하고 일부는 조면암 및 조면암질 암석을 모재로 하고 있다. 토양은 공극률이 높고 투수성이 좋은 특성을 가지고 있다. 토지이용은 면적 기준으로 산림, 초지, 밭, 과수원, 주거지, 논 의 순이며 전체 면적에 비해 각각, 34.7%, 25.1%, 17.3%, 16.4%, 2.3%, 0.03%

이다.

상수도 시설의 현황을 보면 시설용량 $341,350\text{m}^3/\text{일}$, 급수량이 $172,414\text{m}^3/\text{일}$, 일인당 일급수량이 323ℓ 이며 99.9%의 보급율을 보이고 있다. 수원별로는 용천수, 지하수, 어승생수원, 저수지 등을 이용하며 급수량 기준으로 각각, 57.6% 34.4% 7.7% 0.3%을 차지한다. 일인당 일급수량이 전국평균 395ℓ 보다 작아 향후 급수량의 증가가 예상되며, 용천수를 이용한 수원은 오염에 취약한 특성을 보일 수 있으므로 장기적으로 이를 대체할 수원개발이 시급할 것으로 보인다.

지하수 개발 및 이용 현황을 살펴보면 양수능력 기준으로 지하수 개발량은 일평균 $953,673\text{ m}^3$ 이며 지하수 이용량은 일평균 $188,792\text{ m}^3$ 이다. 지하수 이용량 중 58%는 생활용수, 38%는 농수축산용수, 4%는 공업용수이다. 표고별 이용량을 살펴보면 표고 100m이하가 전체 이용량의 69%, 표고 100m에서 200m가 21%로 90%가 200m 이하의 해안지역에 집중되어 있다. 지표수 수역에 따라 개발량을 분석해 보면, 지하수개발량이 적정이용가능량을 초과한 수역은 중제주와 대정 수역이다.

연평균 강수량은 해안지역에서는 1562mm 이나 제주도 전체의 면적평균강수량은 1807mm 으로 육지지역보다 월등히 많은 강수량을 보이고 있다. 강수량의 공간적인 분포는 한라산 정상으로 갈수록 강우량이 많아지는 섬의 모양과 비슷한 타원형의 등우량선을 보이고 서부지역보다는 동부지역의 강우량이 많다. 월별로는 6월에서 8월이 가장 많고 12월과 1월에 가장 적다. 제주도의 연평균기온은 해안지역에서 15.4°C 이며 월별 기온은 8월에 26.5°C 로 가장 높고, 1월에 5.3°C 로 가장 낮다 (한국수자원공사, 1993; 제주도, 2000).

3. 지질

제주도의 지질을 살펴보면 하부로부터 기반암, 미고결퇴적층, 서귀포층, 현무암 및 조면암류의 순이며, 지표에는 거의 대부분 현무암 및 조면암류가 분포한다.

제주도의 기반암은 응회암류와 화강암으로 구성되어 있다. 응회암류는 백악기에서 제3기에 형성되었으며 응회암, 용결응회암, 화산력응회암등으로 구성되어 있으며, 이를 백악기 말에서 제3기초에 화강암이 관입하였다. 기반암

은 지표상에 노두로 나타나지 않으며 해수면하 312m에서 155m까지 분포하고 있다.

기반암을 피복하는 화산암류로는 일부 지역의 시추조사에서 나타난 감람석 휘석현무암과 판포현무암이 있다. 이들은 플라이오세 중기에 분출한 것으로 추정된다. 이 화산암류가 제주도 전역에 걸쳐 분포하는지 여부는 확실치 않다.

대부분의 지역에서는 기반암을 미고결 사질 퇴적층이 피복하고 있으며 기반암과 마찬가지로 지표에는 나타나지 않고 두께는 최소 111m, 최대 180m이다.

미고결퇴적층의 상부에는 해성퇴적층인 서귀포층이 분포한다. 이 층은 역질사암, 사암, 이암, 셰일 등으로 구성되어 있다. 고결정도는 미고결에서 고결까지 다양하며, 두께는 약 100m이다. 지표상에는 서귀포시지역에서만 노출되어 있다. 북제주군 조천읍 북촌리와 남제주군 표선면 표선리를 연결하는 선의 서부지역에 수평적인 연속성을 가지고 분포한다. 그러나 이 선의 동부에는 이 층이 확인되지 않는다

지표상의 대부분은 조면암질 또는 현무암질 용암류로 구성된 화산암류가 서귀포층을 피복하며 분포하고 있다. 이 화산암류의 하부에는 침상장석감람석현무암이 분포한다. 이 현무암은 제주도 전역에 걸쳐 분포하며 분출시 점성이 낮아 파호이호이 용암류의 특징을 갖으며 넓은 용암대지를 형성하였다. 이 현무암은 두께가 3m내외로 상대적으로 얇은 용암류로 구성되며, 많은 용암동굴을 형성하고 주상절리가 발달한다. 침상장석감람석현무암류는 한라산을 중심으로 분출한 반상장석현무암과 반상휘석현무암이 부정합으로 피복하고 있다. 이들 현무암류는 점성이 큰 아아 용암류의 특징을 보이며 수직절리가 발달하고 각 용암류의 상하부에 클링커층이 두껍게 발달한다. 이 층은 제주도 동부와 서부의 해안지역을 제외한 전지역에 걸쳐 지표상에 나타나고 있다. 이 층과 시기를 같이하여 해안지역에서도 분출이 일어나 수월봉 송악산, 성산일출봉등이 형성되었고, 한라산 정상부근에서는 영실조면암이 형성되었다. 이러한 화산암류들을 플라이오세 후기에 한라산의 사면에 많은 분석구를 형성시킨 분출활동으로 이루어진 화산암류들이 피복하고 있다. 이 시기에는 해침에 의해 해안 주변에서 신양리층이 퇴적되었다. 신양리층은 화산

회, 화산사, 화산력, 폐사등으로 이루어진 층리가 발달된 해성기원의 준고결층이다. 이시기의 말기에는 한라산의 정상에서 조면암류가 분출하여 백록담d을 형성하였다.

4. 수문지질

제주도의 주 대수층을 구성하는 화산암류는 각 용암류의 상부와 하부에 형성된 화산쇄설층과 클링커층이 대수층 역할을 하며 중심부 부분은 치밀하고 물을 통과시키거나 함유할 수 있는 부분이 없는 경우가 많다. 대수층역할을 하는 부분은 전체구간에서 약 20%정도이다. 화산암류 중에서도 장식감람석 현무암층이 가장 좋은 대수층 역할을 한다. 각 용암류 사이에는 고토양이나 저투수성 화산쇄설물은 수직적인 지하수 유동을 제한하고 있다.

화산암류 이외에 서귀포층이나 미고결퇴적층에 대해서도 지하수개발이 이루어진 경우가 있으나 화산암류 대수층에 비해 상대적으로 개발량이 적다. 기반암을 이루는 응회암류와 화강암에 대해서는 온천등의 심부지하수개발이 이뤄지고 있으나 역시 화산암류에 비해 지하수 산출능력은 훨씬 낮다. 분석구를 이루는 분석구는 투수성이 좋아 지하수 함양에 큰 역할을 할 수 있으나 연장성이 나빠 이에 관해서는 좀 더 연구가 진행되어야 할 것이다. 제주도는 특징적으로 뚜껍고 수평방향의 유동이 우세한 비포화대가 발달한다. 이러한 비포화대에서는 지하수 함양에 따라 일시적인 대수층이 형성되어 지하수가 용천수로 유출되거나 일부는 하부의 대수층으로 이동하기도 한다.

5. 기존 연구에 대한 개관 및 향후 연구방향 제시

지질 및 수문지질단위 조사

제주도의 지표지질에 관해서는 많은 조사가 진행되어 왔으나 제주도의 전반적인 수직적인 층서에 대한 연구는 현재까지 진행중이다. 기존의 심부시추자료 및 관정시추자료를 이용하여 지층단위별 층서 설정 및 각 층의 연속성에 대한 이해가 선결되어야 한다. 예를들어, 제주도의 주대수층인 현무암대수층의 특성상 지하수 유동은 주로 용암류와 용암류의 경계지역에서 일어나므로 이들의 분포와 연장성은 대수층의 특성 파악 및 지하수 유동경로 추정에서 중요하다.

또한, 제주도 전역에 분포하는 분석구에 의한 지하수 유동의 변화를 고려하여야 한다. 분석구의 분출에 의해 기존의 현무암층이 교란되어 지하수 유동에 영향을 줄 수 있기 때문이며, 지하수 함양에 영향을 줄 수 있는 수직절리나 용암류의 경계나 클링커층의 분포 등에 대한 조사 및 자료구축도 필요하다. 한라산 정상에 포함된 산악지역의 경우에는 정밀한 지표지질조사를 통해 지하수를 통과시킬 수 있는 지질구조에 대해 조사할 필요가 있으며 장기적으로는 시추조사를 통해 수직적인 지질과 지질구조를 밝혀야 한다. 산악지역은 가장 높은 강우량과 가장 낮은 증발산량을 가지므로 지하수 함양에 있어 중요한 역할을 할 수 있기 때문이다.

하와이섬의 경우 열극에 의해 지하수 유동이 단절되어 지하수 유역이 나뉘어진다. 제주도에서도 이러한 열극들이 존재하여 지하수 유동에 영향을 주고 있는가를 조사할 필요가 있다. 지형에 의해 지표수 수계를 기준으로 지하수 유역을 구분할 경우는 지하의 수리지질학적 특성을 고려할 수 없으므로 구분된 수역들이 지하수 유동을 제대로 나타낼 수 없기 때문이다. 일차적으로 각 관측점들의 지하수위의 변화의 상호관련성을 조사하여 지표지질만으로는 확인할 수 없는 수리지질학적인 경계의 존재 및 분포를 밝힐 수 있다. 이러한 경계들의 존재는 지하수 함양, 이동, 배출 등에서 매우 중요한 역할을 하며 각 지하수 유역의 구분 및 물수지 분석 등에도 큰 영향을 미칠 수 있으며 향후 정량적인 지하수 유동 모델링에서 대수층에 대한 개념적 모델구성에서 기본적인 자료가 될 수 있다. 앞서 기술한 분석구와 선구조 등이 이러한 수리지질학적인 경계에 대한 자료를 제공할 수 있다. 분석구의 분포는 제주도 전역에 걸쳐 있으나 이들은 어떤 일정선상에 배열될 수 있으며 이러한 구조가 지하수 유동에 미치는 영향이 평가되어야 한다. 또한 선구조들이 분석구 활동에 영향을 줄 수 있고 용암류의 분포에도 영향을 준다. 따라서 이러한 요소들을 고려한 지하수 유동 조사가 필요하다

미고결퇴적층 및 서귀포층에 대한 수리지질학적 조사가 진행되어야 한다. 현재까지는 이들 층에 대해 전반적으로 투수성이 낮은 것으로 평가하고 있으나 이들이 제주도주대수층의 기저를 이루고 있으므로 이들에 대한 심도있는 연구가 필요하다. 현재는 이 지층에만 스크린이 설치되고, 상부 지층의 지하수 유입이 차단된 관측점이 없으므로, 이들 지층에 대한 시추조사 및 관

측정설치를 실시하여 시추코아의 물리적 특성조사, 물리검층, 양수시험, 추적자시험등을 통해 수리지질학적인 특성들을 정량화할 필요가 있다. 또한 기반암을 이루고 있는 응회암 및 화강암에 대해서도 조사가 필요하다. 이들 지층은 제주도 전체 지하수유동에 기여하는 대수층으로 보기는 어려우나 이들의 수질특성 및 체류시간 등에 대한 자료는 제주도에서 가장 긴 지하수 유동경로를 파악하는 데 큰 도움이 될 것이다. 제주도의 해안주변을 피복하고 있는 퇴적층들은 현무암 대수층에 대해 피압층의 역할을 할 수 있고 지하수 배출을 제한하여 지하수위를 유지하는 역할을 할 수 있다 따라서 이들 퇴적층들의 분포 및 수리지질학적인 특성도 지하수 순환에서 중요한 역할을 할 수 있다.

지하수 유동 특성

제주도 지하수의 부존 형태는 기존의 연구자들에 의하면 상위지하수와 기저지하수로 크게 나눌 수 있다. 다시 이를 세분하여 상위지하수, 상부준기저지하수, 하부준기저지하수, 기저지하수, 기반암지하수로 나타내는 경우도 있다 (제주도, 2000). 제주도 지역에서 상위지하수의 부존 형태나 순환에 관해 지하수 관정에서의 실제 관측을 통한 조사나 연구는 진행되지 못했으며 표고가 높은 지역에 위치하는 용천수의 조사를 통해 상위지하수의 특성을 간접적으로 추정해 왔다. 따라서 앞으로 상위지하수의 부존형태에 관해서는 많은 연구가 진행되어야 할 것으로 보인다. 해안지역의 지하수면 경사와 중산간지역의 일부 관정의 지하수위자료를 고려하면, 비포화대의 두께가 표고에 비례하여 커져 육지 지역의 다른 대수층과는 달리 비포화대가 매우 두껍다. 중산간이상 지역에서 기저지하수면의 연장성에 대해서는 현재까지 자료가 부족하여 정확한 설정이 어렵다. 그러나 중산간 및 산악지역의 투수성이 해안지역과 크게 다르지 않다면 해안지역의 지하수면의 경사가 크게 달라질 수 없으므로 이 지역에서의 비포화대는 매우 두꺼울 가능성이 크다.

이러한 비포화대내에 연속성이 적은 대수층이 산재하여 지표로부터의 함양된 지하수가 부존되어 있고 이를 상위지하수라고 할 수 있을 것이다. 이러한 상위지하수는 수평적으로 유동하여 고지대 용천수를 이루기도 하고 수직적으로 기저지하수체로 유동한다. 단일현무암용암류의 수직적 투수성이 수평적

투수성에 비해 크게 작으므로, 수직적인 유동은 개개의 주상절리나 용암류의 경계부분을 따라 일어나며 이는 이중공극모형으로 설명할 수 있을 것이다. 즉, 투수성이 좋은 경로를 따라 우선적으로 지하수의 유동이 일어나며 이후에 투수성이 나쁜 부분을 따라 서서히 지하수의 공급이 일어난다. 상위지하수의 분포 및 유동특성을 보다 자세히 규명하기 위해서는 중산간지역 및 산악지역에서의 시추조사 및 관측정 설치가 필수적이다. 시추조사를 통해 상위지하수면의 실재와 그 부존 특성을 확인하고 장기적인 관측정 관측을 통해 비포화대내에서의 지하수유동에 대한 연구를 수행할 수 있다. 현무암류층에서 대수층을 이루는 부분은 용암류와 용암류의 사이에 형성되어 있다. 기저지하수면에 도달할 때까지 대수층의 수직적인 분포를 파악하고 이들 대수층의 수리특성 및 각 대수층간의 수리적 연결성 등에 대한 조사를 실시할 필요가 있다. 또한 심도별로 관측정을 설치하여 지하수위 및 수질관측을 통해 상위지하수의 부존 특성 및 기저지하수와의 관계를 밝히는 것이 중요하다.

중산간지역 및 산악지역에서의 용천수가 상위지하수의 일부로 볼 수 있다. 이들 용천수에 대한 수량, 수질 및 동위원소 등에 대한 장기 관측을 통해 용천수를 공급하는 수원에 대한 특성을 평가하는 것이 필요하다. 용천수 수량에 대한 관측을 통해 대수층의 투수성 및 저류특성에 대한 정보를 얻을 수 있으며 (Manga, 1999), 수질 및 동위원소 등에 대한 관측자료로부터 대수층의 함양특성 및 체류시간 등에 대한 연구를 수행할 수 있다 (James et al., 2000). 직접적으로는 중산간 및 산악지역에서의 관측정 설치를 통해 대수층 매질의 특성을 파악할 수 있다. 하와이 등의 많은 화산섬지역에서 발견되는 고지대지하수(High-level groundwater)의 부존 특성에 대해 조사할 필요가 있다. 현재까지 중산간지역보다 높은 지역에서의 시추 조사가 부족하여 수직적인 수리지질특성이 정확하게 알려지지 않았고 지하수 부존형태에 관한 조사 또한 미흡한 실정이다. 하와이의 경우에는 섬의 중심부에 발달된 암맥(dike)에 의해 지하수의 수평흐름이 차단되면서 기저지하수와 분리된 dike-impounded water가 존재하는 것으로 조사되었다 (Back, 1988).

기저지하수의 수직적 연속성에 대해서도 심도있는 조사가 계속 수행되어야 한다. 현재 해안지역의 현무암 대수층에 설치된 관측정에 대한 조사만으로는 부족한 점이 많다. 지역적으로는 중산간지역에도 많은 관측정을 설치하여 제

주도 전역에서의 기저지하수의 연장 특성을 밝히고, 수직적으로도 미고결퇴적층, 서귀포층, 응회암류 및 화강암 등에 대한 관측정 설치로 이들 지층의 수리지질학적인 특성 및 상호간의 수리적인 연결성 등에 대한 조사를 진행할 필요가 있다.

지하수 함양

자연적인 지하수 함양은 강우나 강, 호수 등으로부터 일어날 수 있다. 지하수 자원의 일시적인 또는 영구적인 증가가 지하수 함양이라고 할 때 물이 토양층을 통해 침투하는 시간 간격이 중요하다. 따라서 토양층의 특성이 지하수 함양에서 매우 중요한 역할을 하게 된다. 시간적인 관점에서 지하수 함양은 일회의 강우에 의해 일어나는 단기간의 함양과 건기와 우기가 존재하는 지역에서의 우기 때의 계절적 함양, 그리고 열대우림지역 경우와 같이 연중 강우가 있는 지역에서의 지속적인 함양 등으로 구분할 수 있다. 공간적으로 지하수 함양과정을 포함하여 토양과 대수층의 특성은 수평적으로나 수직적으로 다른 값을 가진다. 토양층의 두께가 얇거나 없는 경우나, 지표에 노출된 대수층에 균열이 많은 경우는 지하수 함양이 클 수 있다 (Simmers, 1988).

지하수 함양량을 결정하는 일반적인 방법을 살펴보면 다음과 같다. 건조하지 않은 지역에서는 하천의 기저유출량을 분석하여 지하수 함양량을 구할 수 있다. 이 방법은 하천의 시간에 따른 유출량을 나타내는 수문곡선으로부터 직접 유출과 기저 유출로 구분하고, 기저 유출을 대수층에 함양된 지하수의 양으로 결정한다. 이 방법은 대상 하천의 유역 전체를 대상으로 평균적인 함양량을 계산할 수 있고 자료 수집 및 분석이 용이한 장점이 있으나 수문곡선의 분리에 대한 검증이 어려운 단점이 있다.

비포화대내의 토양수 및 함양지역에서 지하수면 근처의 지하수 성분 조사를 통해 함양량을 결정할 수 있다. 토양수내에서 염소이온과 같이 보존성이 있는 성분을 조사하여 강우에 의해 공급된 물의 양과 증발산에 의해 제거된 물의 양을 계산하여 함양량을 결정할 수 있다. 또는 비포화대내에서의 물의 이동 속도를 측정하여 함양량을 결정할 수 있다. 즉, 삼중수소나 Cl-36 등은 핵실험에 의해 대기중의 농도가 크게 증가해 1960년대 중반 가장 높았다가

그 이후로 감소하고 있는 경향을 보여주는데 이러한 특성을 이용하여 가장 농도가 큰 지점의 비포화대내에서의 위치를 결정하고 이로부터 함양량을 구하게 된다 (Sharma, 1988).

함양지역에서의 지하수의 연령측정을 통해서 지하수 함양을 추정할 수 있다. 지하수 함양지역에서는 지하수의 유동이 수직방향이 우세하므로 여러 심도에서 지하수의 연령을 측정하면 수직적인 지하수의 유동속도를 알게 되고 유효공극률을 이용하여 함양량을 결정할 수 있다 (Solomon et al., 1995).

강수량이 비교적 많은 지역에서는 강수량, 증발산량, 직접유출량 등을 계산하여 지하수 함양량을 결정하는 물수지 분석법을 이용할 수 있다. 증발 산의 경우에는 실제값을 측정하기가 어려우나 여러 추정식을 통해 그 값을 구하거나 계기증발량 및 식생자료를 활용하여 구할 수 있다. 증발산량을 결정하는 과정을 살펴보면 다음과 같다. 먼저 최대 증발이 일어날 수 있는 양을 계기증발량이나 추정식을 통해 구하고 토양내의 물의 함량이 이보다 크다면 실제증발산량은 최대증발산량과 같게 되고 여분의 물은 지하수로 함양되고, 작다면 실제증발산량은 토양내의 물의 함량과 같게되고 지하수 함양은 일어나지 않게 된다. 토양내의 비포화대에서 직접 토양의 수분 함유량을 측정하여 물수지 분석을 실시할 수도 있다. lysimeter를 이용하여 물수지에 관련된 여러 요소를 측정하거나 토양의 시추코어를 분석하여 물수지분석을 실시한다 (Finch, 1998; Bekesi and McConchie, 1999).

지하수 수치모델에 의한 보정을 통해 함양량을 결정할 수 있다. 지하수위를 결정하는 요인은 크게 지하수함양과 대수층의 수리특성이다. 지하수위에 대한 자료와 대수층의 수리특성에 대한 자료가 있다면 대수층에 대한 지하수 수치모델을 지하수위로 보정하여 지하수 함양량을 결정할 수 있다. 대수층의 수리특성의 큰 불확실성 및 지하수 함양량의 공간적인 분포 등의 조건으로 인해 결정된 함양량의 오차범위가 매우 커질 수 있다 (Walter, 1996).

제주도의 함양특성은 육지지역의 일반적인 지하수계와 다르다. 함양지역의 토양의 심도가 낮고 현무암류가 지표에 노출되어 있는 경우도 있다. 일반적으로 비포화대에서의 지하수 유동은 수직유동이 우세하다. 그러나 제주도의 경우는 비포화대의 두께가 매우 두껍고 지하수의 유동이 수직방향보다는 수평방향이 훨씬 우세하다. 따라서 함양지역에서 함양된 지하수가 비포화대내

에서 수직적으로 기저지하수면으로 이동하더라도 수평적으로 발달된 국지적인 상위지하수면을 만나게 되면 수평적으로 이동하게 되고 이들은 용천으로 용출되거나 원래의 함양지역으로부터 상당한 거리를 이동한 후에 하부의 지하수체로 유동하게 된다. 따라서 지표의 어느 한 지점에서의 함양량 추정은 실제 현상과 다른 결과를 보여줄 수 있다. 그러므로 국지적인 함양량 조사보다는 광역적인 지하수 유동을 고려한 함양량 조사가 필요하다. 특히 기저지하수체 상위의 비포화대내에서의 지하수유동은 지하수 함양량에서 큰 영향을 미칠 수 있다. 즉 지표에서의 자료만으로 계산된 함양량은 비포화대내에서의 지하수 유동을 고려할 수 없으므로 상위지하수나 기저지하수 전체에 대한 함양량에 대한 자료를 제공할 수는 있으나, 현재 주 지하수개발대상이 되는 기저지하수에 대한 함양량이라고 보기는 어렵다.

지금까지 제주도 지하수 함양량에 대한 조사는 물수지분석법에 의해 이루어졌다. 그러나 이러한 방법은 여러 문제점을 내포하고 있다. 먼저 직접유출을 계산할 때 사용한 모델은 현재 제주도의 수문특성에 대해 전혀 보정이 이뤄지지 못했다. 하천에서의 실제 유출량을 이용하거나 일부지역에서라도 모델을 실제값에 대해 보정하여야 할 필요가 있다 (Shade, 1996). 증발산량의 계산에서 잠재증발산량을 해안지역에 분포하는 2지역의 기상자료만을 이용하여 계산하였다. 일반적으로 표고가 높아질수록, 기온이 낮아지고, 구름이 많이 형성되어 일조량이 감소하고 강우량이 증가하여 해안지역보다는 잠재증발산량이 크게 감소한다. 따라서 해안지역자료만으로 잠재증발산량을 구했을 경우 실제보다 과도하게 추정하였을 가능성이 크다. 따라서 제주도 전역에 걸쳐 계기 증발량을 측정하는 측정망을 설치 운영할 필요가 있다. 이러한 계산을 통해 얻어진 함양량은 함양지역의 지하수위 자료로 검증하여야 한다. 지하수위 자료를 이용하는 경우에는 장기간에 걸친 관측된 함양지역의 지하수위 자료를 보정 기준으로 하여 물수지분석에 사용된 불확실한 인자들의 값을 결정하게 된다 (Lee and Lee, 2000).

이렇게 하여 구하는 인자값들을 이용하여 광역적인 지하수 유동 모델링에 의한 지하수 함양량 추정이 필요하다. 이를 위해서는 먼저 지하수 부존특성을 감안한 개념모델의 정립이 선행되어야 한다. 주 대상을 기저지하수라고 하였을 때, 상위지하수의 부존형태 및 상위지하수가 기저지하수에 미치는 영

향을 정량적으로 평가할 수 있어야 한다. 다음으로는 투수량계수 및 저류계수에 대한 자료가 필요하다. 마지막으로 설정된 수치모델을 검증할 수 있는 관측정의 수위등의 자료가 필요하다. 지역적인 함양 특성도 각 지점에서의 함양량 추정에서 반영될 수 있다. 그러나 이러한 작업은 많은 양의 입력자료가 필요하므로 장기간의 관측자료와 양질의 수리특성 자료의 축적이 요구된다. 이러한 과정을 통해 지하수 유동 모델링이 만들어지면 지하수위나 지하수 연령 등을 보정 기준으로 하여 지하수 함양량을 결정할 수 있게 된다.

해수 침입

기저지하수는 해수와 인접하여 나타난다. 지하수의 양수로 인해 지하수위가 하강하게 되면 지하수보다 밀도가 큰 해수는 대수층으로 이동하게 된다. 이러한 해수 침입에 의해 지하수의 수질이 악화되게 된다. 해수 침입과정에는 대수층의 투수계수, 저류계수, 지하수위의 변화 등이 영향을 주게 된다. 현재까지 해수침입에 대한 여러 대책들이 제시되어 있지만 경제적으로 활용성이 있는 대책은 지하수 개발 자체를 조절하는 방법이 유일하다. 기본적으로 지하수를 적정 수준으로 개발하며, 지하수 관정의 분포 및 양수 시기의 조절 등을 통해 지하수위 강하를 최소화하는 등의 방법이 있다 (Freeze and Cherry, 1979). 해수 침입의 우려가 있는 지역의 경우에는 이러한 관리를 목적으로 한 대수층 특성조사가 진행되어야 할 것이다. 지속적인 지하수에 대한 관측과 지하수 개발에 따른 해수 침입의 가능성을 예측할 수 있는 모델을 개발하여 활용할 필요가 있다 (Oki, 1996).

제주도의 경우 동부지역에서 특히 해수침입에 의한 영향이 뚜렷하다. 동부지역은 다른 지역에 비해 지하수위가 낮아 해수와 담수 지하수의 경계면이 해안에 상대적으로 근접하여 형성되어 있다. 그러므로 이 지역에서는 지하수 개발에 의한 해수 침입이 용이할 것으로 사료된다. 다른 지역에 비해 이 지역의 강우량이 많고, 지하수 개발량이 작음에도 불구하고, 지하수위가 낮은 원인으로서는 상대적으로 지형이 완만하고, 배출지역의 면적이 크고, 대수층의 투수성이 좋으며, 주 대수층인 현무암 및 조면암류층의 두께가 두꺼운 점 등이 있을 수 있다. 그러나 이에 관해서는 좀 더 상세하고 구체적인 연구가 필요하다.

이 지역에서의 해수 침입에 대한 대책으로는 앞서 언급한 개발량의 조절 외에 인공 함양에 의한 방법이 가능할 것으로 보인다. 동부지역은 상대적으로 강수량이 많고 하천의 유출량이 크므로 직접 유출되는 지표수를 활용할 수 있기 때문이다. 인공함양 분지 또는 일련의 함양 관정을 설치하여 해안지역의 지하수위를 상승시키고 해수에 대한 완충지역을 만들어 해수 침입을 막을 수 있다. 그러나 인공함양에 관해서는 현재 연구된 바가 없으므로 이의 실현을 위해서는 많은 연구가 필요할 것으로 보인다.

적정개발량과 지하수의 보존

지하수의 개발과 이용은 양적인 면에서 적정 수준을 결정하는 것이 매우 중요하다. 일반적으로 지하수 유동을 고지대에서 강우에 의한 함양으로 지하수가 공급되고 대수층을 따라 저지대로 이동하여 하천이나 바다로 지하수가 유출되는 정상상태의 유동계라고 하였을 때, 함양량에 해당하는 양까지는 개발하여 이용하여도 대수층의 지하수 유동계는 기존의 상태를 유지할 것으로 보아왔다. 왜냐하면 대수층에 공급되는 양 이하로 지하수를 개발한다면 대수층내의 지하수는 고갈되지 않으므로 계속해서 안정적으로 지하수를 이용할 수 있기 때문이다. 따라서 어떤 지역의 적정 수준의 지하수 개발을 위한 많은 지하수 조사에서 함양량 전체나 함양량의 일부를 임의적으로 적정개발량으로 제시하였다. 그러나 이러한 접근방법은 지하수 유동계가 외부의 변화에 반응하는 역동적 개념을 무시한 것이다. 자연적인 대수층내의 지하수 유동계는 오랜 세월에 걸쳐 함양과 배출이 균형을 유지하고 있다. 인위적으로 대수층내의 지하수를 개발할 경우에 이 균형은 깨어지게 되고 개발하는 양에 따라 새로운 균형을 이루는 방향으로 유동계는 반응을 하게 된다. 개발되는 지하수는 초기에는 대수층의 저유량에서 공급되어 이 영향을 받는 일부 지역에서만 수위가 강하하는 현상을 일으키게 된다. 그러나 이 수위 강하가 전체 지하수 유동계에서 무시할만한 정도가 아니라면 지하수 유동계에서는 지표수체로부터의 지하수 함양이 증가하거나 하천이나 바다로의 자연적인 배출이 감소하게 되어 새로운 균형을 이루게 된다. 이러한 유동계의 변화과정은 새로운 균형을 이룰 때까지 계속되며 대수층에 따라 오랜 시간이 걸릴 수 있다. 따라서 적정개발량으로 지하수를 개발하더라도 함양지역에서의 지표수

의 고갈, 하천의 기저유출의 감소 등의 지표환경에 대한 악영향이 발생할 수 있다. 그러므로 하나의 수치로 고정된 적정개발량은 지하수의 전체 유동계의 특성을 반영할 수 없다 (Sophocleous, 2000).

현재 제주도의 경우에도 물수지분석에 의해 결정된 지하수 함양량을 근거로 지하수의 적정개발량을 마련하고 있다. 이러한 기준으로 지하수의 개발 및 이용이 지하수 자원의 보존 및 환경에 미치는 영향을 예측하는 것은 적절하지 못하다. 제주도의 경우 지하수위가 낮고, 하천 등의 지표수계가 거의 발달하고 있지 않아 하천수의 고갈 등의 지표수에 미치는 영향은 크지 않다. 그러나 지하수 개발은 필연적으로 지하수의 자연 배출량을 감소시키므로 해안지역에서의 지하수 자원 활용에 문제를 발생시킬 수 있다. 즉, 해안 용천수의 감소를 유발하고, 지하수위 하강과 배출량 감소로 인한 해수의 영향 증가 등이 일어날 수 있다. 해안지역의 용천수 감소는 용천수를 수원으로 하는 지역의 용수 공급의 부족, 용천수 주변 환경 및 생태계의 변화 등으로 인한 환경문제 발생 및 관광자원의 훼손 등을 일으킬 수 있다. 또한, 제주도의 지하수 이용은 주로 해안지역에 밀집되어 있으므로 이러한 악영향들이 발생할 경우 매우 심각한 피해를 줄 수 있다.

다음으로 지역적인 특성에 따른 지하수 보존 대책이 필요하다. 제주도 전역에 대한 지하수 조사 결과를 근거로 지역적인 지하수 개발 및 이용을 관리한다면 지역적인 지하수 특성을 반영하지 못하기 때문이다 (Scholl et al., 1996). 제주도의 지하수는 광역적으로 한라산을 중심으로 방사상으로 유동하고 국지적으로는 각 지하수 유역에서는 지형 및 대수층 특성에 따라 함양지역에서 배출지역으로 이동한다. 현재까지는 지형을 고려한 16개 수역을 기준으로 지하수에 대한 함양 및 배출 등을 조사하여 왔다. 그러나 지하수의 유동은 지형에 의한 영향 뿐 아니라 대수층의 특성에 의해 더 크게 좌우된다. 지하수 유동이 용암류의 경계부분에 따라 주로 일어나고 특히 해안지역에서는 지형적인 기복이 크지 않아 지형이 지하수 유동에 미치는 영향이 크지 않을 수 있다. 지하수위 조사 및 대수층 특성 조사를 통해 실제 지하수 유동을 반영하는 지하수 유역을 설정할 필요가 있으며, 설정된 각 지하수 유역에서 공간적인 대수층의 분포 특성 및 함양 특성을 파악하고 장기관측에 의한 자료축적이 필수적이다.

지하수 및 강우의 안정동위원소, 삼중수소 및 주요성분 등의 조사를 통해 함양된 지하수의 유동경로를 밝힐 수 있다. 제주도 전역에 걸쳐 주기적으로 강우를 채취하여 이들 성분들을 조사함으로써 함양되는 지하수의 특성을 공간적으로 파악한다. 이러한 자료를 지하수와 비교하여 지하수의 광역적 및 국지적 유동 범위와 경로를 밝힐 수 있다. 이러한 자료는 지하수 유역을 구분하고 관정에 대한 지하수 함양지역을 결정하는데 이용될 수 있다.

이러한 조사를 통해 축적된 자료를 바탕으로 각 지하수 유역에서의 물수지 분석, 수치모델링 등을 통해 현재의 지하수 개발이 미치는 영향을 정량화하고 앞으로의 변화를 예측하는 구체적인 지하수 보존 대책이 요구된다.

6. 결론

지금까지 제주도의 전반적인 지하수조사 현황과 앞으로의 연구방향 등에 대해 언급하였다. 지하수 조사는 많은 학문분야의 다양한 접근 방법을 통해 이루어져야 전반적인 특성을 파악할 수 있다. 이 중에서도 중요하다고 생각되는 부분은 다음과 같다.

1) 수문지질단위 설정 및 수직적 분포에 대한 조사를 체계적으로 실시하여야 하고 각 단위 별로 대수층의 수리적 특성을 파악해야 한다. 주 대수층인 현무암층을 각 용암류별로 세분하고 수평적 및 수직적 연장성과 두께 등을 조사해야 하며, 각 세부 대수층에 대한 수리특성 조사를 실시할 필요가 있다. 또한, 현무암층의 기저를 이루는 미고결퇴적층과 서귀포층이 전체 지하수 유동계에서 어떤 역할을 하는가에 대해 정량적인 조사가 이뤄져야 한다.

2) 지하수 관측망 설치 및 운영을 장기적인 관점에서 실시할 필요가 있다.

지하수 유동계의 변화는 장기간에 걸쳐 서서히 일어나므로 이에 대한 조사와 분석 및 예측을 위해서는 적절한 공간적인 배치를 갖는 관측망이 필요하다. 기저 지하수 상위의 지하수 유동 특성 조사를 위해 심도와 용암류의 경계를 고려한 관측정을 설치가 필요하다. 이러한 관측 자료는 대수층 특성 조사 뿐만 아니라 지하수 개발에 따른 지하수 유동 특성의 변화를 예측하는 기본 자료로 활용할 수 있다.

3) 물수지 분석 및 수치 모델에 의한 지하수 함양 조사를 실시한다. 물수지 분석을 위해서는 관측자료에 대한 여러 지표 요소들에 대한 검증과 모델 설

정이 필요하며, 이를 통해 공간적인 지하수 함양의 분포를 결정한다. 이 결과는 지하수 수치 모델과 지하수위자료를 이용하여 다시 검증하는 과정을 거칠 필요가 있다.

4) 해수 침입

주거지역의 대부분을 이루며 지하수 개발이 집중되는 해안지역에서의 지하수에 대한 해수에 의한 영향은 지하수 자원 보존 면에서 중요한 요소이다. 현재는 동부지역에서 해수 침입에 의한 영향이 큰 것으로 알려지고 있다. 이러한 동부지역의 해수침입에 대한 취약성 뿐만 아니라 해안지역에서 지하수 개발에 따른 해수의 영향에 대한 적절한 평가가 이뤄져야 한다.

5) 지하수의 보존

지하수 함양량을 적정개발량의 상한선으로 보는 견해는 지하수의 지속적 개발 및 지하수와 관련된 환경보존이란 측면에서는 상당한 문제를 야기할 수 있다. 지하수와 관련된 여러 환경적인 요소를 고려한 통합적인 접근방법으로 지하수 개발에 따른 영향을 다각적인 측면에서 분석하여 지하수 개발 및 이용을 적절한 수준으로 조절해야 한다.

참고문헌

건설교통부, 1996, 지하수관리기본계획보고서.

제주도, 2000, 제주도지하수보전 • 관리계획 보고서.

한국수자원공사, 1993, 제주도수자원종합개발계획수립보고서.

Back, W., Rosenshein, J. S., and Seaber, P.R., 1988, Hydrogeology, The Geology of North America Vol. O-2, The Geological Society of America.

Bekesi, G. and McConchie, J., 1999, Groundwater recharge modelling using the Monte Carlo technique, Manawatu region, New Zealand., Jour. Hydrol., 224, 137-148

Finch, J.W., 1998, Estimating direct groundwater recharge using a simple water balance model - sensitivity to land surface parameters, Jour. Hydrol., 211, 112-125.

Freeze, R.A. and Cherry, J.A., 1979, Groundwater, Prentice-Hall,

Englewood Cliffs, New Jersey.

- James, E.R., Manga, M., Rose, T.P., Hudson, G.B., 2000, The use of temperature and the isotopes of O, H, C and noble gases to determine the pattern and spatial extent of groundwater flow., *Jour. Hydrol.*, 237, 100-112.
- Lee, J. and Lee, K., 2000, Use of hydrologic time series data for identification of recharge mechanism in a fractured bedrock aquifer system. *Jour. Hydrol.* 229, 190-201.
- Manga, M., 1999, On the timescales characterizing groundwater discharge at springs, *Jour. Hydrol.*, 219, 56-69.
- Oki, D.S., Souza, W.R., Bolke, E.L., and Bauer, G.R., 1996, Numerical analysis of ground-water flow and salinity in the Ewa area, Oahu, Hawaii, U.S. Geological Survey, Open-File Report 96-442.
- Scholl, M.A., Ingebritsen, S.E., Janik, C.J., Kauahikaua, J.P., 1996, Use of precipitation and groundwater isotopes to interpret regional hydrology on a tropical volcanic island: Kilauea volcano area, Hawaii, *Water Resour. Res.* 32, 3525-3537.
- Shade, P.J., 1996, Water budget for the Lahaina district, Island of Maui, Hawaii, U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 96-4238.
- Sharma, M.L. (ed), 1989, *Groundwater Recharge*, A.A. Balkema, Rotterdam, Holland.
- Simmers I. (ed), 1988, *Estimation of Natural Groundwater Recharge*, D. Reidel, Dordrecht, Holland.
- Solomon, D.K., Poreda, R.J., Cook, P.G., and Hunt, A., 1995, Site characterization using $^3\text{H}/^3\text{He}$ ground-water ages, Cape Cod, MA, *Ground Water*, 33, 988-996.
- Sophocleous, M., 2000, From safe yield to sustainable development of water resources - the Kansas experience, *Jour. Hydrol.*, 235, 27-43.
- Walter, D.A., Masterson, J.P., and Barlow, P.M., 1996, *Hydrogeology and*

analysis of ground-water-flow system, Sagamore Marsh area, southeastern Massachusetts. U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigation Report 96-4200.