

진주시 농촌지하수의 함양량 산정

함세영	부산대학교 지질학과
정재열	부산대학교 지질학과
차용훈	부산대학교 지질학과
박일규	농업기반공사 울산지사
황종환	농업기반공사 제주도본부

1. 서 론

지하수 함양은 수문순환의 한 과정으로 지하로 침투한 물이 포화대까지 도달하는 것을 말하며, 지하수 함양량의 변화는 대수층 내 지하수 저장량을 변화시킨다. 즉, 강수량이 감소하면 지하 침투량이 줄어들고, 지하수 함량은 감소하고 따라서 대수층 내 저수량이 감하게 된다. 앞으로 인구 증가와 산업의 발전에 따라 양수량의 증가는 지하수위의 계속적인 하강과 함께 대수층 고갈의 위험성을 증대시키게 될 것이다. 따라서, 지하수 보전 및 관리의 가장 중요한 요건 중의 하나는 지하수 양수량을 자연적인 함양량 이하로 유지시키는 것이다. 특히, 암반대수층의 경우에는 지표로부터 지하 심부까지 도달하는 데에는 적어도 수십년 또는 수백년이 걸리므로, 한번 고갈된 지하수는 다시 회복되기가 어렵다. 그러므로, 가능한 한 정확한 지하수 함양량을 산출하고, 이에 의거하여 적정 양수량을 개발하는 것이 지하수 보전의 가장 중요한 요건이다.

연구지역은 진주시 진집지구(대곡면, 금산면, 집현면, 미천면 일대)이며 대부분 임야와 농경지로 되어 있어서 농업이 주산업이다. 경작지는 논이 전체 경작지의 66%로서 우세하다(농림부, 농업기반공사, 2004). 진집지구의 지하수 이용량 구성을 보면, 농업용수가 $1.31 \times 10^6 \text{m}^3/\text{년}$ (76.7%)로서 가장 많은 양을 차지하고 있으며, 그 다음으로 생활용수 $0.33 \times 10^6 \text{m}^3/\text{년}$ (19.4%), 공업용수 $0.67 \times 10^5 \text{m}^3/\text{년}$ (3.9%)이다. 이는 이 지역이 부분 농업지역이고, 지하수 중 상당량이 식수 또는 생활용수로 사용되고 있기 때문이다.

지하수공의 심도별 현황을 보면, 암반관정의 경우 91.7%가 굴착심도 51~200m이며, 그 중에서도 51~100m가 50.4% 정도를 차지한다(농림부, 농업기반공사, 2004). 충적관정의 경우에는 1~10m의 굴착심도가 69.8%로서 대부분을 차지한다. 이 지역에서 지하수공의 폐공 발생 원인을 보면, 수량부족과 상수도대체 등의 용도 상실이 대부분을 차지한다. 따라서 기 굴착된 지하수공이 장기적으로 제 기능을 다하기 위해서는 개발 초기에 지하수 함양량에 기초한 적정양수량 산정과 철저한 수질 관리가 필요하다는 것을 알 수 있다.

본 연구는 진집지구(대곡면, 금산면, 집현면, 미천면 일대)의 농촌지하수 개발과 관련하여, 이 지역의 지하수 함양량을 산정하고자 한다.

2. 물수지

지하수 함양량은 강수량에서 지표유출량(강우에 의한 직접유출량), 기저유출량, 그리고 증발산량을 뺀 양이다. 따라서 지하수 함양량을 산정하기 위해서는 강수량, 지표유출량, 기저유출량, 증

발산량을 알아야 한다. 강수량은 기상관측소에서 측정한 강수량 자료로부터 알 수 있으나, 지표유출량, 기저유출량, 증발산량 자료는 연기가 용이하지 않다. 지하수 함양량 산정방법에는 물수지 방법(선우중호, 1992; 한정상, 1995), 지하수위 변동 곡선법(문상기와 우남칠, 2001), 무강우 지속일수 동안의 지하수위 감수곡선법(최병수와 안중기, 1998), 기저유출 분리법(박창근, 1996a, 1996b), 환경동위원회를 이용하는 방법(고용권 등, 2001), 물수지분석과 SCS 방법(함세영 등, 2004, 2005) 등이 있다. 여기서는 직접유출량을 SCS방법으로 구하고, 기저유출율은 낙동강 유역의 평균값(박창근 등, 1996)을 이용하고, 증발산량은 Thornthwaite(1944) 방법으로 구하는 물수지분석과 SCS방법으로 지하수 함양량을 구하였다.

2.1. 증발산량

증발산은 수면으로부터의 증발과 식물로부터의 증산을 합한 값이며, 수분이 기체 상태로 대기에 환원되는 모든 것을 포함한 것이다. 증발산은 기상학적 인자 이외에도, 식물의 종류, 색깔, 식물의 밀도, 성장 속도, 잎 표면의 크기 등의 식물 요소 및 토양의 공극율, 함수율, 수리전도도, 입도 등에 직접적으로 영향을 받는다. 증발산량은 직접적인 측정이나 간접적인 계산에 의해 결정할 수 있다. 직접적인 측정은 일반적으로 라이시미터(lysimeter)를 이용한다. 그러나, 실제로는 직접적인 측정에 의해서 증발산량을 구하는 것이 용이하지 않으므로 많은 경우에 간접적인 방법(Thornthwaite, 1944; Turc 1963; Penman, 1948; Blaney and Criddle, 1950)으로 증발산량을 구하게 된다. 본 연구에서는 Thornthwaite의 방법을 이용하여 증발산량을 계산하였다. Thornthwaite의 방법은 비교적 간단하면서도 기후 인자를 고려하므로 월별 증발산량의 변화를 알 수 있을 뿐만 아니라 비교적 정확성도 높기 때문이다.

증발산량 산출을 위해서는 강수량과 기온 자료가 필요하다. 1974년 1월부터 2003년 12월까지 30년간의 진주지역 강수량과 기온 자료는 진주기상 관측소에서 측정한 기상자료이다. 지난 30년간의 진주지역의 연 평균 강수량은 1512mm(최대 2193mm, 최소 785mm)이고, 연 평균기온은 13.1°C(최저 월평균 기온은 1월의 -0.1°C, 최고 월평균 기온은 8월의 25.6°C)이다. 그리고 월 최대 일조시간은 United Nations(1977) 자료를 이용하였다. 진주지역의 1974년부터 2003년까지 30년간 연평균 강수량(1512.4mm)과 기온자료를 이용하여 Thornthwaite 방법으로 구한 평균 실증발산량은 연평균 강수량의 47.67%에 해당하는 720.9mm이다. 월별 실증발산량을 보면, 최대 실증발산량은 7월의 146.2mm이고, 최소 실증발산량은 1월의 0.46mm이다. 이는 여름철에는 기온이 높고 강수량도 많은 반면에, 겨울에는 기온이 낮고 강수량도 적기 때문이다.

2.2. 직접유출량

지상에 도달한 강우의 일부는 토양의 표면을 통하여 침투하고, 그 초과분은 토양의 표면으로 유출된다. 따라서 지표유출량의 변화는 침투량에 크게 영향을 미친다. 강우에 의한 지표유출은 토양의 건조상태에 따라 크게 달라진다. 매우 건조한 상태에서 흙은 무한에 가까운 침투율을 갖고 있으나, 이미 발생한 강수의 영향으로 토양의 함수량이 커지면 같은 강수량이라고 할지라도 건조상태의 토양보다 많은 지표유출이 일어난다. 이와 같이 토양의 초기 함수상태에 따라 침투량은 직접적으로 영향을 받기 때문에, 토양의 초기 함수율은 강수로부터 발생되는 유출량을 결정하는 주요한 요인이다.

많은 경우에는 유출량 자료를 구할 수가 없으며, 이때 유역의 토양 종류나 토지이용도, 식생

피복의 종류, 피복상태 등의 수문학적 조건을 고려하여 초과강수량 즉 지표유출량을 산정할 수 있는 방법으로서 Soil Conservation Service (SCS) 방법이 있다(Morel-Seytoux and Verdin, 1981). SCS방법은 미국의 계획 유역의 초과강수량(직접유출량 혹은 유효수량)의 산정에 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 SCS방법에 의해서 직접유출량을 산정하였다.

1974년 1월부터 2003년 12월까지 30년간에 대해서 10mm/일 이상의 강수량에 대한 지표유출량을 SCS방법으로 산출한 결과, 연평균 지표유출량은 연평균 강수량(1512.4mm)의 27.99%에 해당하는 449.6mm(1989년의 최대 841.47mm, 1994년의 최소 111.34mm)이다. 각 면별 평균 지표유출량을 보면, 대곡면이 442.79mm(연평균 강수량의 29.27%), 금산면은 435.42mm(연평균 강수량의 28.79%), 집현면이 453.58mm(연평균 강수량의 29.99%), 미천면은 466.46mm(연평균 강수량의 30.84%)이다. 따라서 각 면별 지표유출량은 서로 큰 차이가 없으나, 그 중에서 미천면이 가장 높고 금산면이 가장 낮다.

2.3. 지하수 함양량

SCS방법에 의한 조사지역인 진집지구의 연평균 지표유출량은 449.6mm, Thornthwaite 방법에 의하여 계산된 연평균 실증발산량은 720.9mm, 기저유출량은 낙동강 유역의 평균값 10.2%를 적용하면 154.2mm이다. 따라서 연구지역의 연평균 지하수 함양량은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{array}{cccccc} \text{지하수 함양량} & = & \text{강수량} & - & \text{실증발산량} & - \text{지표유출량} & - \text{기저유출량} \\ (187.6\text{mm}) & & (1,512.4\text{mm}) & & (720.9\text{mm}) & & (449.6\text{mm}) & & (154.3\text{mm}) \\ & & 100\% & & 47.67\% & & 29.73\% & & 10.20\% \end{array}$$

1974년부터 2003년까지 30년간의 연평균 강수량에 대한 지하수 함양량은 187.6mm이다. 또한 각 면별 지하수 함양량을 보면, 대곡면 195.18mm(12.91%), 금산면 202.44mm(13.39%), 집현면 190.43mm(12.59%), 미천면 178.53mm(11.80%)로서 금산면의 지하수 함양량이 가장 높다. 이는 금산면의 지표유출량이 가장 낮은 것과 연관된다. 즉, 지표유출량이 낮다는 것은 그 만큼 지하수 함양량이 많다는 것을 의미한다.

3. 지하수 가채수량

지하수 함양량(187.6mm)에 대상지역의 면적을 곱한 값이 지하수의 가채수량이라고 할 수 있다. 각 면 및 조사지역 전역의 연평균 지하수 함양량에 면적을 곱하여 최대 가채수량을 구하였다 (Table 1). 진집지구 전체의 가채수량은 $32.58 \times 10^6 \text{m}^3/\text{yr}$ 이다. 그리고 각 면별 가채수량을 보면, 대곡면의 가채수량은 $9.87 \times 10^6 \text{m}^3/\text{yr}$, 금산면은 $5.61 \times 10^6 \text{m}^3/\text{yr}$, 집현면은 $8.21 \times 10^6 \text{m}^3/\text{yr}$, 미천면은 $9.33 \times 10^6 \text{m}^3/\text{yr}$ 로서, 대곡면이 가장 높고, 금산면이 가장 낮다. 대곡면의 지하수 가채수량이 가장 높은 것은 지하수 함양율이 높고 면적이 넓기 때문이다. 한편, 현재 지하수 이용량과 가채수량의 비를 보면, 금산면이 가장 높고, 다음은 대곡면, 집현면, 미천면의 순이다.

Table 1. Critical groundwater yield of all Myeon areas.

	Ave. groundwater recharge (mm/yr)	Ave. groundwater recharge percent to precipitation	Area (km ²)	Critical yield, Q _c (x10 ⁶ m ³ /yr)	Groundwater use, Q (x10 ⁶ m ³ /yr)	Q/Q _c (%)	No. of households
Daegok-Myeon	195.18	12.91	50.57	9.87	0.58	5.88	1,897
Geumsan-Myeon	202.44	13.39	27.70	5.61	0.51	9.09	2,390
Jiphyeon-Myeon	190.43	12.59	43.13	8.21	0.30	3.65	1,767
Micheon-Myeon	178.53	11.80	52.26	9.33	0.32	3.43	1,008
Total area	187.60	12.48	173.66	32.58	1.71	5.22	7,062

4. 결 론

진주시 진집지구(금산면, 집현면, 미천면, 대곡면)에 대한 물수지분석을 실시하고 지표유출량, 증발산량, 지하수 함양량을 산정하였다. 지하수 함양량은 지하수 가채수량의 산정 기준이 된다. 즉, 지하수 가채수량은 원칙적으로 지하수 함양량을 초과할 수 없다. 물론 지표수자원이 거의 없는 지역에서는 수자원을 전적으로 지하수자원에 의존할 수 밖에 없으며, 수자원의 수요가 많을 때는 불가피하게 지하수 함양량을 초과하여 지하수를 개발할 수 밖에 없다. 그러나, 이런 경우에도 인공함양 방식에 의하여 대수층에 물을 인위적으로 함양하지 않으면 대수층이 고갈될 수 있다.

본 연구지역은 농촌지역으로서 대부분의 지하수를 농업용수와 생활용수로 활용하고 있다. 따라서, 연구지역의 지하수자원에 대한 정확한 양적 평가는 장기적인 측면에서 농업용수와 생활용수를 안정적으로 공급하기 위해서 필수적으로 요구된다.

1974년부터 2003년까지 30년간의 연평균 지하수 함양량을 보면, 금산면이 202.44mm(13.39%), 대곡면이 195.18mm(12.91%), 집현면이 190.43mm(12.59%), 미천면이 178.53mm(11.80%)로서, 금산면의 지하수 함양량이 가장 높고 미천면이 가장 낮다. 그리고 연구지역 전체의 지하수 함양량은 187.6mm(12.40%)이다. 지하수 함양량을 기초로 연구지역의 지하수 가채수량을 선정한 결과, 대곡면의 가채수량은 $9.87 \times 10^6 \text{m}^3/\text{yr}$, 미천면은 $9.33 \times 10^6 \text{m}^3/\text{yr}$, 집현면은 $8.21 \times 10^6 \text{m}^3/\text{yr}$, 금산면은 $5.61 \times 10^6 \text{m}^3/\text{yr}$ 이다. 대곡면은 지하수 함양율도 높고 면적도 미천면 다음으로 넓어서 가채수량이 가장 많다. 금산면은 4개면 중에서 지하수 함양율이 가장 높지만, 면적이 가장 작아서 가채수량이 가장 적다. 한편, 현재 지하수 이용량과 가채수량의 비를 보면, 금산면이 가장 높고, 다음은 대곡면, 집현면, 미천면의 순이다. 따라서, 금산면의 지하수 함양율이 높지만, 가구수와 지하수 이용율이 높아서 체계적인 지하수 관리계획이 요구된다.

농촌지역의 지하수자원의 효율적인 관리를 위해서는 지하수 함양량과 사용량을 함께 고려하여야 하며, 지하수와 지표수를 적절하게 연계하여 사용하는 방법과 지하수의 지역적인 적절한 분배 그리고 수요와 공급의 원칙에 의한 사용요금의 책정 등의 여러 가지 방법을 도입하여야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 농업기반공사의 연구비 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드린다.

참고문헌

- 고용권, 배대석, 김천수, 김경수, 정형재, 김성용, 2001, 환경동위원소를 이용한 여수지역 소유역에 서의 지하수함양특성 고찰. 한국지하수토양환경학회지, 6권, 93-106.
- 농림부, 농업기반공사, 2004, 전주시 진집지구 농촌지하수 관리사업 보고서.
- 문상기, 우남칠, 2001, 누적강수량과 지하수위 곡선을 이용한 지하수 함양률 추정 방법. 한국지하수토양환경학회지, 6권, 33-43.
- 박창근, 1996a, 우리나라 지하수개발가능량 추정: 1. 개념정립과 기법의 개발. 지하수환경, 3권, 15-20.
- 박창근, 1996b, 우리나라 지하수개발가능량 추정: 2. 5대강 유역에의 적용. 지하수환경, 3권, 21-26.
- 박창근, 신현민, 김성탁, 김남종, 1996, 우리나라 5대강 유역 지하수 함양량 추정. 대한지하수환경학회 1996년도 정기총회 및 학술발표회, 54-63.
- 선우중호, 1992, 우리나라 지하수개발의 필요성. 물관련 정책 토론회, 건설부·한국수자원공사, 99-119.
- 최병수, 안중기, 1998, 지역단위 지하수 자연함양율 산정방법 연구. 지하수환경, 5권, 57-65.
- 한정상, 1995, 지하수개발과 관리대책, 수자원 개발과 보존대책. 한국수자원공사, 39-103.
- 함세영, 정재열, 김형수, 한정상, 류수희, 2004, 창원시 북면 낙동강 주변 하성퇴적층의 지하수유동 모델링 연구, 자원환경지질, 37권, 499-508.
- 함세영, 정재열, 김형수, 한정상, 차용훈, 2005, 창원시 대산면 강변여과수 취수부지 주변의 지하수 유동 모델링, 자원환경지질, 38권, 67-78.
- Blaney, H.F. and Criddle, W.D., 1950, Determining Water Requirements in Irrigated Areas from Climatological and Irrigation Data. USDA(SCS) TP-96. 48.
- Morel-Seytoux H.J. and Verdin J.P., 1981, Extension of the Soil Conservation Service rainfall-runoff methodology for ungaged watersheds. Report FHWA/RD-81/060, Offices of Research & Development, Environmental Division, US Federal Highway Administration, 75.
- Penman, H.L., 1948, Natural evapotranspiration from open water, bare soil, and grass. Proc. Roy. Soc. London, Ser. A, Vol. 193, 120-145.
- Thornthwaite, C.W., 1944, Report of the Committee on Transpiration and Evaporation, 1943-1944. Transactions, American Geophysical Union, Vol. 25, 687 p.
- Turc, L., 1963, Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle, formulation simplifié et mise à jour. Ann. Agron., 12, 13-49.
- United Nations, 1977, Crop water requirement. Food and Agricultural Organization (FAO), Irrigation and Drainage Paper 24, 14.