

지하수위 변동곡선 및 물수지분석 기법을 적용한 소유역 지하수 함양량 산정에 관한 연구

김만일 · 김진훈 · 장광수 · 석희준 · 김형수

한국수자원공사 수자원연구원
e-mail: mikim916@paran.com

요 약 문

본 연구에서는 장기간의 강우자료, 지하수위 변동자료 및 토지이용 상태 등을 이용하여 소유역내 지하수 함양량을 산정하였다. 적용된 기법은 지하수위 변동곡선법, SCS-CN법, 통계자료 분석기법 및 손실량 분석기법을 이용하여 소유역내에서 일평균 지하수 함양량을 각기 산정하였다. 지하수위 자료를 적용해 산정된 지하수 함양율은 SCS-CN법의 평균 지하수 함양율 14.24%보다 높은 18.9%로 나타났으며, 이는 우리나라 지하수 함양율인 18% 내외임을 감안할 때 소유역에서의 지하수 함양량은 일평균 약 800m³ 이상 지하수로 환원되고 있음을 의미한다.

key word : 지하수 함양량, 지하수위 변동곡선법, SCS-CN법

1. 서론

강수가 지하로 들어가는 양인 지하수 침투량과 지하수위까지 도달하는 지하수 함양량은 오염된 지하수가 인간의 건강에 해를 미치는 정도를 파악하여 지하수 복원의 기준을 설정하고자 하는 위해성 평가에 중요한 인자로 인식되고 있다. 뿐만 아니라 이러한 함양량과 침투량은 지하수의 개발 및 적정 채수량 설정을 위한 지하수 유동, 오염물질의 거동특성 파악을 위해서는 필수적인 물성치이다. 지표수와 수문환경을 지배하는 요소인 강우량, 유출량, 증발산량 등을 분석하고 지표수와 지하수의 상호관계를 파악하여 지하수 함양량을 산출할 수 있다. 그러나 정확한 지하수 함양은 지형, 지질, 임상, 토질, 기상 등 복합적인 물성을 파악해야만 한다. 현실적으로 지반 및 지하수 관련 자료의 부족에 의해 정량적인 지하수 함양량을 파악하는 것은 어려운 일이다. 지하수 함양에는 강우 중 침투되는 자연 함양, 하천 내지 저수지에서 침투되는 지표수 함양, 인위적으로 물을 지하로 침투시키는 인공 함양 등이 있으나 대부분의 소유역에서는 강우에 의한 자연 함양이 주요 함양원으로 작용한다.

본 연구에서는 전형적인 농촌지역을 분수령을 기준으로 하여 소유역으로 설정한 후, 이 유역에 대한 지하수 함양량을 파악하기 위하여 지하수위 변동곡선법, SCS-CN법, 통계자료 분석기법, 손실량 분석기법 및 갈수유량 분석기법 등을 적용하여 소유역내 지하수 함양량을 산정하여 비교하였다.

2. 연구방법

2.1. 지하수위 변동곡선법

강우시 유역의 특성에 따라 강우의 일정량이 지하에 함양된다는 가정을 전제로 하여 강우량과 함양량의 관계를 특정 기간 중 함양지역 면적(A)에 대하여 강우량(P)이 내렸을 때 지하수

함양량(R)은 $R=aA(P-P_0)$ 으로 나타낼 수 있다. 여기서 a 는 지하수 함양계수 내지 함양율, P_0 는 지하수 침투가 시작되는 강우량을 의미한다. 동일한 지역에서 어떤 시점의 선행기간중 강우량 P_1 에 의한 함양량 R_1 이었고, 일정기간 경과후 그 기간의 강우량 P_2 에 의한 함양량 R_2 이었다면 $R_1=aA(P_1-P_0)$, $R_2=aA(P_2-P_0)$ 으로 표현된다. 이들 함양량의 차이는 $R_1-R_2=aA(P_1-P_2)$ 로 유도된다. 여기서 P_1 기간의 P_0 와 P_2 기간의 P_0 는 토양 함수조건에 따라 다를 수 있으나 평균 개념으로

볼 때 그 차이는 무시될 수 있으므로 상쇄되었다. 한편 지하수 함양 증가량 R_1-R_2 에 따라 이 지역에서 지하수위가 h_1-h_2 만큼 상승하였다고 하면, $a \cdot A \cdot (P_1-P_2)=A \cdot (h_1-h_2) \cdot S_y$, 즉 $a=(h_1-h_2)/(P_1-P_2) \cdot S_y$ 로 표현된다. 여기서 S_y 는 대수층의 비산출율이고 h 는 지하수두이다. 본 식은 어떤 시점에서 전후 기간의 지하수두 h_1 과 h_2 를 관측하고 또 각 기간의 강우량 P_1 과 P_2 를 알면 지하수 함양율(a)을 추정할 수 있음을 보여준다.

최병수·안중기(1998)¹⁾의 지하수위 강하곡선을 이용한 지하수 함양율 추정방법¹⁾은 지하수위 자료에서 최고 및 최저 지하수위의 관계로부터 지하수 최대 수위강하량(s_m)을 구한 후, 일별 지하수위 자료를 이용하여 수위 변동곡선을 작도하고 이 곡선에서 지하수 함양을 산정에 필요한 수위강하 구간들을 서로 평행 이동하여 몇 개의 강하곡선이 서로 연결되거나 중첩되도록 지하수위 대표곡선을 유도한다. 이 대표곡선을 구한 각 시간별 지하수위를 이용하여 최고 수위에서 지하수위를 감하여 수위강하량(s)를 계산하고, 최고 수위와 최저 수위의 차이인 지하수 최대 수위강하량

(s_m)에서 수위강하량을 감하여 s_m-s 를 산정한다. 수위강하량 s_m-s 를 자연 로그값으로 취하여 반대수 그래프에 작도한 후 이 값들에 가장 근접한 직선으로부터 직선 기울기 k 값을 구하여 k 값과 $s_m-s=s_m e^{-kt}$ 식을 이용하여 무강우 지속시간이 30일이 되었을 때 발생하는 수위강하량 s_{30} 을 구한다. 이를 지하수 함양율(a) 추정식인 $a=-(1/\ln\delta) \cdot (s_{30}/s_m)$ 에 대입하여 지하수 함양율을 산정한다(김규범 등, 2004)²⁾. 여기서, 우리나라의 지하수 함양율은 건설교통부·한국수자원공사(1999)³⁾에 의하면 18% 내외에 분포하는 것으로 알려져 있기 때문에 δ 의 범위는 0.005~0.01 범위로 선택하여 산정하였다. 이 범위 내에서 산정된 결과중 함양율과 함양량의 관계를 그림 1에 나타내었다. 여기서 함양량은 1995년부터 2005년까지의 연평균 강우량인 1289.50mm를 적용하여 계산하였다.

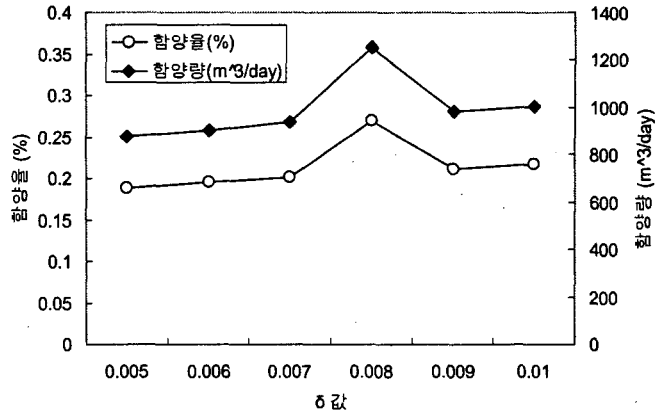


그림 1. δ 값을 적용해 산정된 함양율과 함양량 관계

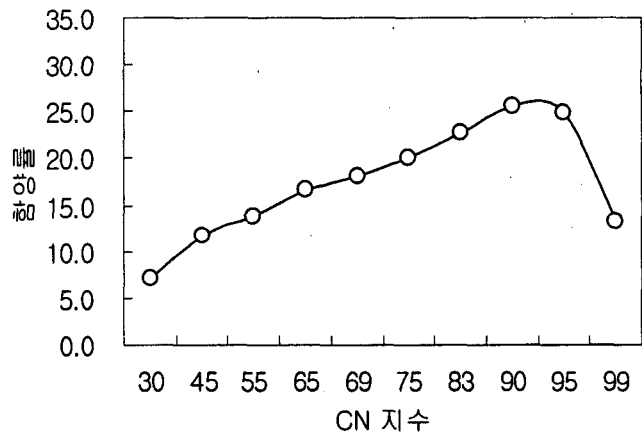


그림 2. 강우량 변동에 따른 CN 지수와 함양율 변화 (1995년~2005년)

2.2. SCS-CN 기법

미국의 토양보전국(Soil Conservation Service, SCS)에서는 소유역에 대한 유출량 산정을 위하여 많은 토질보전 연합단체들에 의하여 측정된 유출량과 토양자료를 광범위하게 수집하여 분

석함으로써 강우와 유출의 관계식을 유도하였다. SCS-CN기법은 토양종류별, 토지이용상태별 유출곡선지수(Runoff Curve Number, CN)를 정하여 유역의 특성에 따라 무계측 유역의 유출량을 추정하는 모형이 개발되었다.

본 지역의 토양수문군 분류는 농촌진흥청 농업기술연구소에서 발행하는 한국정밀토양도, 토지이용 면적은 지형도(1:25000, 1:5000)에서 필지별로 산정하였다. 이를 기초로 수문학적 토양분류에 따른 A, B, C, D군별 면적으로 재분류하여 현지실정과 맞지 않는 부분은 주민 청문조사 및 현장답사를 통하여 수정 보완하였다. 대상지역은 전형적인 농촌지역으로써 주변 산계와 수계를 고려하여 영향반경을 설정하여 총유역 면적을 약 1.312km²로 산정하였다. 또한 조사지역의 자연함양량을 산정하기 위해 1995년부터 2005년까지의 11년치 일별 강우량 자료를 토대로 선행강우량 조건별로 분류하였다. CN 지수와 침투량 사이에는 선형비례 관계가 성립하지 않기 때문에 평균 CN 지수값을 적용하여 유역 내 토지구분별로 각 침투량과 함양률을 구하고 면적가중평균법에 의하여 유역 전체의 함양률을 산정하였다.

강우 자료 11년치를 이용하여 평균 강우량에 대하여 임의의 CN값 변화에 따른 연도별 침투량을 계산하고 함양률을 계산하여 CN 지수 변화에 대한 함양률의 관계를 그래프로 도시하면 그림 2와 같다. 본 지역의 토지이용상태에 따른 각각의 CN 지수값에 따라 산출된 해당 함양율을 적용하고 유역 면적비로 가중평균하여 함양율을 구하면 표 1과 같이 유역면적에 대한 지하수 자연함양율은 약 15.06%로 산정되었다.

SCS-CN 지수 변화에 따른 대상지역의 침투량과 함양율 변동의 관계로부터 산정된 지하수 함양율은 13.41%이며, 토지이용 면적비에 대해 가중평균으로 계산된 지하수 함양율 15.06%로써 평균 지하수 함양율은 14.24%로 계산되었다. 본 유역의 평균 함양율을 적용하여 강우에 의한 지하수함양량을 추정하면 약 2.41×10⁵m³/year가 된다. 한편 자연함양 이외의 기타 함양은 관개용수 순환을 고려할 수 있는데 논 면적 약 0.258km²에 대하여 침투량을 3mm/day로 계산하면 관개용수에 의한 지하수 함양량은 0.77×10⁵m³/year가 되므로 본 지구의 연간 평균 지하수함양량은 약 3.18×10⁵m³/year(871.23m³/day)로 산정된다.

2.3. 통계자료 분석기법

조사지역의 강우량 자료는 본 지역과 인접한 관할기상대에서 측정한 자료를 인용하였으

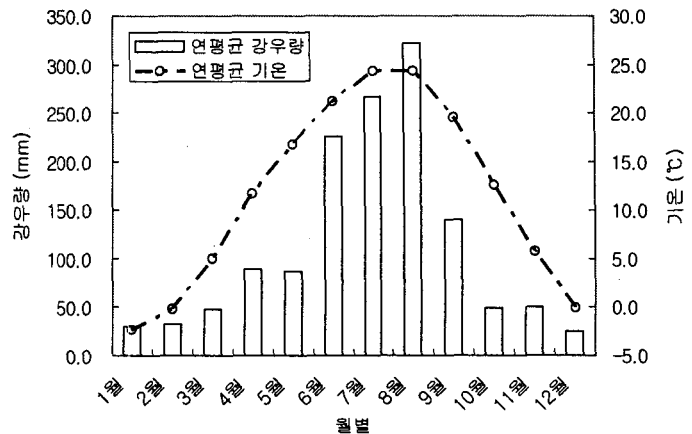


그림 3. 조사지역 내 연평균 강우량과 기온 분포도 (1995년~2005년)

표 1. 조사지역의 CN 지수를 이용한 함양율 산정

토지이용구분		면적 (km ²)	CN지수	함양율 (%)	평균값 (%)
농경지	논	0.258	79.26	21.30	18.72
	밭	0.575	67.00	17.56	
산림지역	보 통	0.369	25.00	3.60	3.60
	주거	0.104	92.41	26.27	
기타지역	도로	0.006	98.00	16.92	25.76
	하천	-	100.00	-	
범람지		-	100.00	-	
계		1.312	-	-	15.06

며 최근 11년간(1995~2005) 연평균 강우량은 1,289.50mm로 계산되었다. 최소 연강우량은 2001년 879.3mm, 최대 연강우량은 2003년 1,766.4mm이며 6~9월 사이에 집중적으로 강우가 내리고 있음을 알 수 있다(그림 3). 지하수 함양은 여러 가지 요인 및 복잡한 과정을 통하여 이루어지기 때문에 조사지역에서의 지하수 함양량은 장기간에 걸친 수문조사를 실시하여 취득한 자료를 토대로 하여 산출되어야 하나 조사지역내에 수문조사 자료가 구축되지 않아 본 조사에서는 물수지분석의 강우량에 대한 지하수 함양량 비율 18%를 적용하였다. 산정한 결과, 본 유역의 연평균 지하수 함양량(유역면적×강우량×함양비율)은 $3.045 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{year}$ 이며 1일 지하수 함양량은 $834.32 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 계산되었으며, 연최소 강우량이 발생한 2001년의 경우 $2.076 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ ($568.92 \text{ m}^3/\text{day}$), 연최대 강우량이 발생한 2003년에는 $4.172 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{year}$ ($1142.88 \text{ m}^3/\text{day}$) 정도인 것으로 산정되었다.

2.4. 손실량 분석 기법

손실량으로부터 판단한 지하수 함양량에 대한 설명에서 손실량이란 조사지역에 내리는 강우량에서 지표수 유출량을 뺀 값으로 정의된다. 물수지 분석에서는 지하로 침투하거나 지하의 유동경로를 통해서 다시 지표로 유출하는 양을 무시하고 있으므로 이 경우에 손실량은 실제 증발산량과 같다. 그러나 이 양을 무시할 수 없을 경우에는 즉 실제 증발산량과 손실량의 차이가 존재하는 경우 그 차이가 지하수 함양량이 될 것이다.

강우량과 증발산량과의 관계는 기온을 매개변수로 하여 공식으로 나타낼 수 있는데 본 조사에서는 Turc의 경험식인 $D=P/(\sqrt{0.9+(P^2/L^2)})$ 와 $L=300+25T+0.05T^3$ 을 적용하였다. 여기서 D는 손실량(mm), P는 강우량(mm), L은 매개변수로 기온의 함수로서 표현되고 T는 기온(°C)이다.

본 조사에서는 금산관측소에서 관측한 최근의 평균강우량, 연평균기온($P=1,289.50 \text{ mm}$, $T=11.26^\circ\text{C}$) 및 2001년($P=879.3 \text{ mm}$, $T=11.66^\circ\text{C}$), 2003년($P=1,766.4 \text{ mm}$, $T=11.65^\circ\text{C}$)을 적용하여 손실량(증발산량)을 산출하였으며, 지하수 함양량이 손실량의 약 30.9%라 보고 지하수 함양량을 지하수 함양량(m^3)=유역면적(m^2)×손실량(mm)×0.309에 적용하여 산출하였다. 산계와 수계를 근거로 산정된 본 조사지역 1.312 km^2 면적에 대해 손실량을 고려하여 계산한 결과, 연평균 강우량일 경우 평균 함양량은 $648.22 \text{ m}^3/\text{day}$, 연최소 강우량에서는 최소 함양량은 $599.64 \text{ m}^3/\text{day}$, 그리고 연최대 강우량에서는 최대 함양량이 $696.42 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 산정되었다.

3. 토의 및 결론

본 연구에서는 소유역의 지하수 함양량을 산정하기 위해 지하수위 관측자료와 장기 강우 자료를 이용한 지하수위 변동곡선법과 SCS-CN법 및 기타 물수지 분석법을 이용하였다. 우리나라의 지하수 함양율이 평균 18% 내외인 점을 감안해 볼 때, 지하수위 변동곡선법에서의 함양율은 δ 값이 0.005에서 0.01으로 증가할수록 함양율도 증가하였으며, $\delta=0.005$ 일 때, 약 18.9%의 함양율을 갖는 것으로 나타났다. 이는 SCS-CN법에서 CN지수 변화 따른 소유역의 침투량과 함양율 변동관계로부터 산정된 함양율 13.41%와 토지이용 면적비에 대해 가중평균으로 계산된 함양율 15.06%보다 높은 값을 가지고 있다. 특히 지하수위 변동곡선법의 함양율 18.9%를 11년간의 강우 자료에 적용해 일평균 지하수 함양량을 산정하여 보면 표 2에 나타난 것과 같이 $800 \text{ m}^3/\text{day}$ 이상 소유역의 대수층으로 함양되고 있음을 알 수 있다.

표 2. 산정 기법을 통한 소유역내 지하수 함양량 비교

구 분	평균함양량 (m ³ /day)	최소함양량 (2001년, m ³ /day)	최대함양량 (2003년, m ³ /day)	비 고
지하수위 변동곡선법	876.04	-	-	δ=0.005
SCS-CN법	871.23	-	-	
통계자료 분석	834.32	568.92	1142.88	
손실량 분석	648.22	599.64	696.42	
평 균	860.53	-	-	

본 산정 기법들은 간단한 통계기법과 강수 및 지하수위 변화자료를 이용하여 지하수 함양량을 계산하는 방법이지만 지하수 함양량은 시간 및 공간적으로 매우 다양한 값을 보이기 때문에 장기간에 걸친 지하수위 계측 및 다양한 현장 시험을 통한 수리지질학적 물성치를 파악하는 것이 매우 중요하다. 따라서 소유역에 대한 지하수 함양량을 파악하기 위해서는 국가지하수 관측망과 연계하여 장기적인 자료 수집과 분석이 필요하다.

4. 사사

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(대수층 활용 상수도 공급 시스템 개발, 과제번호 3-4-2)에 의해 수행되었다. 연구비를 지원해 준 사업단 측에 감사드린다.

5. 참고문헌

- 1) 최병수, 안중기, 1998, 지역단위 지하수함양을 산정방법 연구, 지하수환경학회지, 5(2), pp.57-65.
- 2) 김규범, 이명재, 김정우, 이진용, 이강근, 2004, 수위강하곡선을 이용한 함양량 추정기법의 국가 지하수 관측소 지하수위 자료에의 적용성 평가, 지질공학, 14(3), pp.313-323.
- 3) 건설교통부·한국수자원공사, 1999, 지하수위 장기 관측자료를 활용한 함양량 산정기법 연구보고서, 건설교통부·한국수자원공사, 대전, GW-99-2, 165p.