

# 서울 북부 지역의 지하수 함양량산정에 관한 연구

## Estimation of Groundwater Recharge Rate at the Northern Part of Seoul City

김 병 우(Kim, Byung Woo)

부경대학교 환경지질학과

정 상 용(Chung, Sang Yong)

부경대학교 환경지질학과

강 동 환(Kang, Dong Hwan)

부경대학교 환경지질학과

심 병 완(Shim, Byoung Ohan)

부경대학교 환경지질학과

정 상 원(Cheong, Sang Won)

충북대학교 과학교육부

### 요약

서울 북부지역에 위치하는 북한산 일대의 지역단위 지하수 함양량 산정에 대하여 물수지 분석법과 SCS-CN방법을 이용하였다. 물수지분석법에는 Coutagne 공식과 Turc 공식을, SCS-CN방법에는 직접유출율과 누가침투율을 계산하여 평균 지하수 함양량을 산정하였다.

물수지분석법인 Coutagne 공식과 Turc 공식에서 평균 21.36%가 지하수 함양량으로 산출되었다. SCS-CN 방법에서는 직접유출율과 침투율을 계산하여 산정한 결과 지하수함양량은 30.07%로 추정되었다. 여기서 북한산 일대의 기반암을 경계로 상당량이 기저유출(baseflow)의 형태로 유출되기 때문에, 기저유출량 10.9%를 제외한 19.17%를 순수 지하수함양량으로 결정하였다. 누가침투율을 이용한 지하수함양량은 약22.0%로 산정되었다. 물수지분석법과 SCS-CN 방법들을 이용하여, 북한산 지역의 지하수 함양량을 산출한 결과 평균 약 20.84%로 산정되었다.

### 서론

지하수 함양에는 강우 중에 침투되는 자연함양, 하천·저수지, 산악지역의 계곡이나 수괴에서 침투되는 지표수 함양, 인공 댐에서 발생한 상부의 물이 지하 내부로 침투되는 인공함양으로 구분된다. 대부분의 지역단위에서는 자연함양을 이용한 지하수 함양 산출이 주가 된다(1995, 이동률).

자연함양량의 산정 방법은 주로 물수지 분석방법으로, 대상기간의 총강우량에서 유출량, 증발산량, 유입유출을 제외하여 침투량을 산정하는 것이다. 지하수의 함양량을 산정하기 위해 먼저 대상지역의 유출량과 증발산량 자료가 있어야 보다 정확한 분석이 가능하다.

본 연구에서는 서울북부지역에 위치하는 북한산 지역을 대상으로 물수지방법과 SCS-CN 방법을 이용하여 전체평균 지하수 함양량을 산출하였다. 북한산 지역은 산이 높고 경사가 크며, 암석은 견고한 화강암(1982, 홍승천 등)으로 구성되어 있다.

북한산 지역은 동두천 기상관측소가 가까우나, 이 곳의 기상관측은 1998년 2월부터 실시되어 자료가 부족하기 때문에, 동두천 다음으로 북한산지역에 가까운 서울기상관측소에서 측정된 기상자료를 이용하였다. 이용된 기상자료는 10년 간의 강수량, 기온, 일조시간이다.

증발산량(Evapotranspiration ratio)은 수면으로부터의 증발(evaporation)과 식물로부터의 증산(transpiration)을 합한 값과 수분이 기체 상태로 대기에 환원되는 모든 것을 포함한 것이다. 본 연구에서는 기후인자와의 상관관계에 따른 방법중 Thonthwaite의 경험식을 이용하여 증발산량을 계산하였다.

직접유출량과 누가침투량 계산은 SCS(soil conservation service method) 방법을 이용하여 계산하였다. SCS-CN방법은 토양의 건조상태에 따라 유출량이 크게 달라지고, 강수의 영향은 토양의 상태보다 더 많은 유출이 일어나므로, 토양의 초기함수 상태는 강수로부터 발생하는 유출량을 결정하는 주 요인이 된다.

따라서 서울 기상청자료만으로 지하수 함양량을 추정하기 위하여, 물수지분석법과 SCS-CN 방법들을 적용하여 북한산 일대의 전체평균 지하수 함양량을 산정하였다.

## 지하수 함양량 산정

### 물수지 분석법

물수지 분석법의 하나인 질량보존 법칙(water balance analysis)에 의한 분석법은 지역단위내로 물의 유입·유출의 양과 저류량 변화 관계가 항상 평행상태를 이루고 있는 것을 가정한 방법으로, 식 (1)을 이용해 지하수 함양량을 산정할 수 있다.

$$GR = D - PE \quad (1)$$

여기서,

$$D = \frac{P}{\sqrt{(0.9 + P^2)/L^2}} \quad L = 300 + 25t_n + 0.05t_n^3 \quad (\text{Turc})$$

$$D = P - \lambda P^2 \quad \lambda = \frac{1}{0.8 + 0.14t_n} \quad (\text{Coutagne})$$

D는 지역단위에서의 손실량, PE는 증발산량, P는 총 강수량으로 Turc 식에는 (mm)단위 Coutagne 식에서는 (m)단위,  $\lambda$ 와 L은 평균기온의 함수로 나타낸다.

또 다른 물수지방법은 일정 지역단위 지역내의 강수량과 직접유출량, 증발산량, 지하수함

양량 간에 수문평형상태가 유지된다는 가정 하에 다음 식 (2)으로 나타낼 수 있다.

$$GR = P - DR - PE \pm IU \quad (2)$$

$$GR = P - DR - PE \quad (3)$$

여기서 GR은 지하수함양량, DR은 직접유출량, IU는 타수역으로부터 지하수 유출입량이다. 식 (2)에서 지하수의 유입과 유출이 없다고 가정할 경우 우변 4째 항을 제거하면 식 (3)로 나타낼 수 있다.

### Thornthwaite의 경험식

경험법으로써 가장 일반적인 Thornthwaite 방법은 기온이 높아지면 증발산이 증가한다는 관계에서 평균기온으로부터 가능증발산량을 요구하는 것이며, 가장 보편적인 요소인 기온으로 thornthwaite의 경험식을 식 (5)과 같이 나타내었다(1993, 石川梯二).

월평균 기온이  $t$  °C 일 때, 잠재증발산량  $PE_x$ (식물소비량)은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$PE_x = Ct_n^a \quad (5)$$

여기서  $PE_x$  는 식물소비량 혹은 잠재증발산량,  $t_n$ 은 월평균기온(°C), C는 상수,  $a$  는 년열지수(annual heat index: I)를 사용하여 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$a = (6.75 \times 10^{-7})J^3 - (7.71 \times 10^{-3})J^2 + (1.79 \times 10^{-2})J + 0.49239 \quad (6)$$

$$J = \sum_{n=1}^{12} j_n \quad (7)$$

$PE_x$ 는 1개월이 30일, 월평균 일조 시간이 12시간일 때, 식 (5)를 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$PE_x = 1.62 \left( \frac{10 t_n}{J} \right)^a \text{ cm/day} \quad (8)$$

$PE_x$ 는 월간 잠재증발산량의 이론치이므로 평균기온이  $t$  °C인 특정 월에 대한 실증발산

PE는 다음 식(9)로 보정할 수 있다.

$$PE = PE_x \cdot \frac{D}{30} \cdot \frac{T}{12} \quad (9)$$

여기서 D는 해당 월의 일수이고, T는 해당 월의 평균 일조시간이다.

### SCS-CN 방법

SCS 방법은 유효수량의 크기에 직접적으로 영향을 미치는 인자로서 그 지역의 토양의 종류(soil type), 토양피복(cover treatment), 토양의 함수조건(hydrologic conditio), 토지 이용 상태별 유출곡선지수(Runoff Curve Number, CN)의 지역의 특성에 따라 무게측 유역의 유출량을 추정하는 것이다.

강우로부터 발생하는 직접유출량은 토양이 최대로 저류할 수 있는 최대저류능(Potential storage, S)을 유역의 특성으로 하고, 최대저류능(S)에 대한 실저류량(Actual storage, F)의 비율이며, 직접유출량(Q)이 강우량(P)에서 초기손실(Initial abstraction,  $I_a$ )을 제거함 비율이다. 여기서 초기손실( $I_a$ )은 최대저류능(S)의 크기에 비례한다. 이 가정을 수식으로 표시하면 식 (10)과 같이 나타난다.

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P - I_a} \quad (10)$$

$$F = P - I_a - Q \quad (11)$$

식 (11)의 초기손실은  $I_a = \alpha S$ 로 사용되나 SCS에서는  $I_a = 0.2S$ 를 사용하여 식 (10), (11)에서 Q에 대하여 아래의 방정식이 성립한다.

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad \text{단, } P \leq 0.2S \text{ 일 때 } Q = 0 \quad (12)$$

여기서 최대저류량(S)은 강우와 유역의 특성을 가지고 유출량을 구할 수 있다. 유출곡선지수(CN)의 관계는 다음과 같다.

$$S = \frac{25,400}{CN} - 254 \text{ (mm)} \quad (13)$$

한편 강우중 누가침투량 산출은 위의 식 (10)~(13)를 방정식을 이용하여 누가침투량 F를 유도하였다(1997, Aron et al).

$$F = \frac{(P - 0.2S)S}{P + 0.8S} \quad (14)$$

SCS-CN 방법에서는 식 (12)와 (13)을 사용하여 직접유출량과 식 (14)를 사용하여 누가침투량을 산정하는데 유출곡선지수(Runoff Curve Number, CN), 수문학적 토양 피복형(hydrologic soil-cover complexes)과 선행토양함수조건(antecedent soil moisture condition, A.M.C) 등을 고려한다. SCS는 5일 선행강우량을 지수로 하여 아래와 같이 3가지 경우로 선행함수조건(Antecedent Soil Moisture Condition, AMC)을 분류한다.

A.M.C-I: 유역내 토양이 건조상태이며 유출율이 대단히 낮은 상태.

A.M.C-II: 일반적인 토양의 습윤상태로 유출율이 보통인 상태.

A.M.C-III: 토양이 수분으로 포화되어 있어 유출율이 대단히 높은 상태.

## 연구지역의 지하수함양량 산정

### 물수지분석법 적용

물수지분석에 의한 함양율산정은 Turc 공식과 Coutagne 공식에 의해 손실량을 구한 후 손실량과 실제증발산량의 차로써 함양량(GR)을 산정하였다. 증발산량은 Thronthwaite의 경험식을 이용였으며, 서울 기상청에서 공개한 1992~2001년까지의 월평균온도와 평균일조량을 이용하여 잠재증발산량( $PE_x$ )과 실증발산량(PE)을 계산한 결과, 실증발산량은 330.3mm/y로 연평균강수량 1,457.1mm/y의 약 22.7%, 그리고 잠재증발산량의 약 47.2%로 산정되었다.

따라서 Coutagne의 손실량 공식에 의한 함양율이 약 20.5%로 Turc의 손실량 공식의 약 22.1%보다 다소 낮게 산정 되었으며, 두 공식의 평균 함양율은 약 21.3%로 산정되었다.

### SCS방법의 적용

본 연구에서는 지표수 및 지하수에서는 조사지역의 토지이용은 자연녹지 및 관목숲으로 이루어져 있으며, 토양피복상태에 따라 유출곡선지수 CN값을 산출하였다.

북한산 일대의 지하수 함양량을 구하기 위해 SCS의 유출에 영향을 미치는 토양의 종류나 토지이용 및 관리상태 등을 기초로 하여 수문학적인 토양피복군(Hydrological soil GRoup)을 Table 4에서 토지이용과 피복상태, 수문토양군별로 유출곡선지수 A, B, C, D군별 면적으로 분류한 결과 북한산 일 때는 D로 분석되었다. 또한 이것을 지형에 맞게 토양분류별, 토지이용구분(산림지역)별 면적을 계산하고 각 단위별 CN값을 유출곡선 지수표에서 계산한

결과 Table 5와 같다.

Table 4. Hydrologic soil-cover complexes(A. M. C-II, I<sub>a</sub>=0.2S)

식생 피복 및 토지 이용 상태	피복 처리 상태	토양의 수문학적 조건(배수조건)	토양형			
			A	B	C	D
관목숲(forests)	매우 듅성듅성	-	56	75	86	91

침투량공식을 적용하기 위하여 북한산에서 가장 가까운 서울 관측소의 강수량 자료를 이용하였는데 1992년 1월부터 2001년 12월(10년)기간의 일별 강수량을 그 선행 강우조건(A.M.C)별로 분류하여 식 (12)를 적용하였다.

본 연구에서는 SCS에서 기준으로 삼고 있는 선행토양함수조건을 1년 성수기(Growing season)를 6~8월, 비수기(dormant season)를 1~5월과 9~12월로 나누어 1일 강수량과 5일 선행 강수량을 계산하였다. Table 3에서 P는 1일 동안 발생한 강수량이고 P<sub>5</sub>는 5일 선행 강수량이며 A.M.C의 5일 선행 강수량을 이용하여 선행토양함수조건을 I, II, III으로 분류한 것이다.

수문학적인 토양피복과 Table 4에서 초기함수조건이 II인 경우에 가중 CN 값은 91이므로 식 (15), (16)을 이용해서 CN(I)과 CN(III)를 구하면 다음과 같다.

$$CN(I) = \frac{4.2 \times 91}{10 - 0.058 \times 91} = 80.94 \approx 80$$

$$CN(III) = \frac{23 \times 91}{10 + 0.13 \times 91} \approx 97$$

위 계산에서 얻은 CN 값으로 잠재보유수량(S)을 구하였다. Table 5에 산출된 CN 값과 S 값이 있다.

Table 5. The estimated S values associated with CN.

구 분	북한산		
	I	II	III
초기 함수 조건			
CN 값	80	91	97
S 값	63.5	25.1	7.85

CN 값을 이용하여 북한산지역에서 1992년 1월부터 2001년 12월까지 10년 동안 10mm/day 이상의 강수량에 대하여 적용하였으며, 물수지분석에 의한 북한산 지역의 지하수 함양량은 다음과 같이 산정되었다.

$$\begin{array}{rclcl}
 \text{함양량} & = & \text{강수량} & - & \text{증발산량} & - & \text{지표유출량} \\
 (438.2\text{mm}) & & (1,457.1\text{mm}) & & (330.2\text{mm}) & & (688.8\text{mm}) \\
 30.07\% & & 100\% & & 22.66\% & & 47.27\%
 \end{array}$$

### 기저유출 적용

북한산지역의 함양량은 438.2mm/y으로 총강수량 대비 30.07%로 산정 되었으며, 지표유출량은 47.27%, 증발산량은 22.66%로 산정 되었다. 그러나 북한산 일대의 지역은 표토와 풍화토의 두께가 크지 않고, 기반암의 암질상태가 매우 좋기 때문에 투수성이 크지 않다. 한국도로공사의 보고서(1998년)에 의하면 터널 입출구부 암석의 평균 투수계수는  $5.31 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ 이다. 시험시추는 지표면에서 최대 50m 심도에 불과하므로, 지하심부에서의 투수계수는 더 적을 것이다. 따라서 이 지역의 토양층에 침투된 강수는 저투수성인 기반암을 경계로 상당량의 지하수가 기저유출(baseflow)의 형태로 다시 유출될 것으로 보인다.

기저유출의 산출은 여러 가지 기초자료를 필요로 하지만, 현재 북한산 지역에서는 기저유출을 이용할 자료가 없기 때문에, 우리나라 5대강 유역에 대한 평균 강우함양계수를 이용하였다. 우리나라 5대강유역의 강우함양계수는 Table 6와 같이 평균 10.9%로 나타났다(1996, 박창근<sup>b)</sup>).

Table 6. Estimated amount of GRoundwater recharge per year(1996, Chang-Kun Park).

유역	한강	낙동강	금강	영산강	섬진강	5대강 <sup>a)</sup>
강우함양계수 $\alpha$ (%)	12.0	10.2	12.2	7.1	8.4	10.9
유역면적 (km <sup>2</sup> )	23,026	23,187	9,805	3,371	4,943	64,962
연평균 강수량 (mm)	1,286	1,166	1,269	1,319	1,414	-

<sup>a)</sup> 5대강에 대한 수치는 유역면적 가중평균을 적용 함.

따라서 기저유출량을 제외한 북한산 유역의 순수 지하수 함양량은 다음과 같이 추정될 수 있다.

$$\begin{array}{rclcl}
 \text{순수 지하수 함양량} & = & \text{물수지분석 지하수 함양량} & - & \text{기저유출량} \\
 19.17\% & & 30.07\% & & 10.9\%
 \end{array}$$

위의 관계로부터 10년간 평균 강수량에 대한 순수 지하수 함양량은  $1,457.1\text{mm/y} \times 19.17\% = 279.3\text{mm/y}$ 로 산정 되었다.

### 누가침투량에 의한 함양량 산정

SCS 방법에서 누가침투율인 자연함양율을 구하기위하여 식 (14)의 침투량 공식을 이용하였다. Table 8은 북한산 일대의 누가침투량을 CN지수별로 산정한 것이며, 이를 그래프로 나타낸 것이 Figure 1이다. Figure 1에서 CN지수별 함양율을 볼때 CN 85를 기점으로 감소하는 경향이 나타난다. CN지수에 대한 함양율의 관계는 식(16)의 회귀방정식으로 나타낼 수 있다.

$$y = -0.0002x^3 + 0.0369x^2 - 2.0663x + 49.914 \quad (16)$$

여기서 y는 침투율이고, x는 CN지수이다. 이때 결정계수(coefficient of Determination) R<sup>2</sup>은 0.9857이다.

따라서 누가침투량에 의한 함양율은 약 22.0%(320.3mm/yr)이며, 물수지분석에 의한 19.17%보다 약 1.83%(26.7mm) 정도 크게 나타났다.

Table 7. Variation of annual infiltration and recharge ratio due to CN values.

구 분	강우량 (m)	CN50	CN55	CN60	CN65	CN70	CN75	CN80	CN85	CN90	CN91	CN95	CN98
		연 침 투 량 (m)											
'92-'01평균	1,457.1	222.7	222.5	251.6	268.5	293.5	303.5	314.9	320.3	329.7	318.6	299.8	188.6
누가침투율 (%)	-	15.3	15.3	17.3	18.4	20.1	20.8	21.6	22.0	22.6	21.9	20.6	12.9

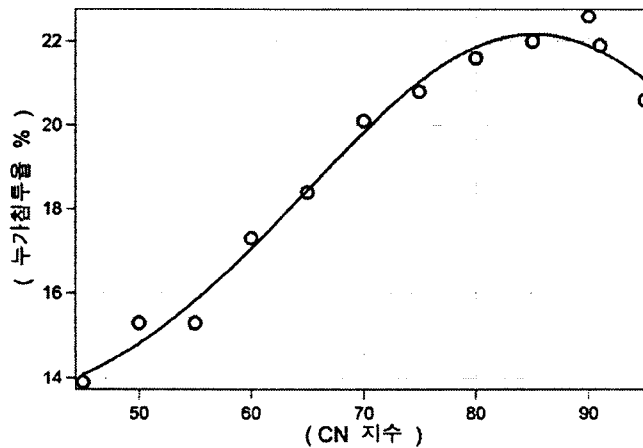


Figure 1. Relationship between recharge ratio and CN values in Northern Mountain.



## 결론

서울 북부지역에 위치한 북한산 일대에서 지역단위 개념으로 지하수 발생가능량을 분석하기 위하여 여러 기법들을 적용하였다. 북한산 지역의 약 750,000 m<sup>2</sup>를 대상으로 지하수 함양량을 산정한 결과 약 2,183,250m<sup>3</sup>/y로 추정되었다.

물수지분석법에 의한 Coutagne 공식과 Turc 공식에서 평균 지하수 함양량이 약 21.36%로 산정되었다. SCS-CN방법은 대상지역의 토양피복상태와 토지이용상태인 CN지수에서 북한산 일대의 직접유출량을 산정한 결과 총강수량의 약 47.27%가 유출양으로, 증발산량과 기저유출양을 제외한 순수한 지하수 함양량은 약 19.17%로 추정되었다. 누가침투율을 이용한 지하수함양량은 약22.0%로 산정되었다. 물수지분석법과 SCS-CN방법들을 적용하여 전체평균량을 추정한 결과 북한산 일대의 지하수 함양량은 약 20.81%로 추정되었다.

이상의 결과를 종합적으로 분석해 볼 때 물수지분석에 의한 함양량과 SCS-CN 방법에 의한 누가침투량은 큰 차이가 없었으나, 직접유출량에 의한 함양량산정에서 조금 낮은 함유량을 보였다. 이것은 북한산 지역에서 기저유출을 이용할 정확한 자료가 없었기 때문에 우리나라의 5대강유역의 평균 기저유출량을 사용함으로써 발생하는 오차로 사료된다.

## 참고문헌

- 김경수, 2000, 대청댐유역의 기저유출분리를 통한 기저유량 산정에 관한 연구, 지하수환경학회지, 6(1), p. 15-19.
- 대한광업진흥공사, 1998, 지하수 개발가능량 및 오염취약성 평가에 관한 연구, p.27-75.
- 박재성, 1999, 소유역의 지하수함양을 추정기법, 지하수환경학회, 6(2), p. 76-86
- 박창근, 1996<sup>a</sup>, 우리나라 지하수 개발가능량 추정: 1. 개념 정립과 기법의 개발, 지하수환경학회지, 3(1), p. 15-20.
- 박창근, 1996<sup>b</sup>, 우리나라 지하수 개발가능량 추정: 2. 5대강 유역에의 적용, 지하수환경학회지, 3(1), p. 21-26.
- 이동률, 1995, 지하수 감수곡선을 이용한 지하수 함양량 추정과 장기 감수량 예측, 고려대학교 박사학위논문.
- 최병수, 안중기, 1997, 소유역의 지하수함양량 산정에서 SCS-CN 방법의 적용, 농어촌진흥공사 농공기술 제 56호, p. 11-20.
- 최병수, 안중기, 1998, 지역단위 지하수 자연함양을 산정방법 연구, 지하수환경학회지, 제2권, 2호, p. 57-65.
- 한국수자원공사, 1994, 지하수자원 기본조사: 지하수 이용관리
- 石川梯二, 1993, 地下水調査 および 観測指針(案), (財)国土開発技術研究センター, p.108-119.

Bear, J., 1979, *Hydraulics of Groundwater*, P. 30-41.

Visessman, W., 1997, *Introduction to Hydrology*, Chap. 3, 11.