

## 지역단위 지하수 자연함양율 산정방법 연구

# A Study on the Estimation of Regional Groundwater Recharge Ratio

최병수(Byong - Soo Choi) · 안중기(Jung - Gi Ahn)

**요 약** : 근래에 우리나라에서도 지하수부존량과 개발가능량의 산정방법에 관한 여러 연구가 수행되고 있으나 대개 전국적이거나 광역적인 개념으로 검토되어 왔다. 지하수 이용계획 수립 또는 지하수 환경영향 평가의 관점에서는 소 구역의 지역단위 개념으로 지하수 개발가능량을 분석하여야 하므로 지역단위 지하수함양율 산정방법의 연구가 요구되고 있다. 지역단위 지하수함양율 산정에 대하여 실무적으로 쉽게 적용할 수 있는 두가지 방법을 연구하여 제안하였다. 그 하나는 SCS-CN방법에 의하여 강우의 침투량을 구하고 여러해의 평균 침투량과 평균 강우량을 비교하여 지하수 함양율을 구하는 것이고 다른 하나는 자연상태의 지하수위 변동량을 관측 분석하여 지하수 함양율을 계산하는 것이다.

**Abstract** : Recently, many researchers have studied on the estimation of groundwater storage and its usable amount in Korea. Those studies were, however, mostly on the groundwater recharge amount over the nation or for the large extent of areas. On the other hand, it has been also needed to study on the regional recharge rate for the planning of groundwater management or for the assessment of groundwater development impacts. In this paper, two practical methods for the estimation of regional groundwater recharge have been studied and proposed, which are ① the estimation of the groundwater recharge due to the SCS-CN infiltration method, and ② the estimation of groundwater recharge ratio by analyzing groundwater level hydrographs.

### 서 론

지역단위의 지하수 이용계획을 수립코자 할 때 안전채수량 (safe yield) 범위 내에서 지하수 개발가능량을 검토하여야 한다. 안전채수량은 지하수역의 주어진 관리조건하에서 지하수를 양수할 때 부정적 영향이 발생하지 않는 범위 안에서 항구적으로 양수·이용할 수 있는 채수량이라고 정의된다. 부정적 영향이 생기지 않게 하기 위하여는 지하수의 함양과 배출이 평형이 되도록 연간 함양량 한도에서 연간 취수량을 제한하여야 한다.

지하수 함양에는 강우중에 침투되는 자연함양, 하천 또는 저수지에서 침투되는 지표수함양, 인위적으로 물을 지하로 침투시키는 인공함양 등이 있는데 대부분의 소유역에서는 자연함양이 주 함양원이 된다.

자연함양량의 계산은 주로 물 수지분석 방법으로 수행하는데 그 절차는 대상기간의 강우량에서 유출량과 증발산량을 제하여 침투량을 구하는 것이며 대상유역의 유출량과 증발산량 조사자료가 있어야 분석이 가능하다.

근년에 우리나라의 지하수함양량과 적정개발가능량에 대하여 많은 연구자들의 제안이 발표되었는데 그 내용을 요약하면 Table 1과 같다.

이 표에서 추정량은 전 국토 면적에 해당되는 것으로 함양율의 70% 내외를 적정개발 가능량으로 추정하고 있다. 함양율은 연구자에 따라서 15~20%의 범위를 보이고 있으나 통계적으로 지하수 함양율을 인용할 경우에는 이들의 평균값에 해당하는 18%를 적용하는 예가 있다. 지하수 영향조사등 단기간 조사로 개발가능량을 평가하는 경우 불가피하게 통계적 방법으로 추정하는 경우가 있으나 조사지역에 부합되는 별도의 지역단위 함양량 추정방법이 요구되고 있다.

SCS-CN방법은 본래 무계측 유역의 유출량 추정에 이용되었으나 유출량 공식을 침투량 공식으로 바꾸어 표시할 수가 있으므로 이를 이용하여 장기간의 누가 침투량을 구한 결과 이것이 지하수 함양량에 해당함을 알 수 있었으며 같은 기간중의 강우량과 비교하여 조사지역의 평균 자연함양율을 구할 수 있었다.

한편 자유면대수층에서 지하수위 변동자료를 해석하여 지하수 함양율 산정방법을 연구하였는 바, 이것은 무강우시 지하수위 최대강하량과 1개월 강하량의 비율을 지하수위 강하율이라 정의하고 지하수 함양율과 지하수위강하율 사이의 관계를 검토한 결과 직접적인 비례관계가 성립하는 것을 알 수 있었으며 사례연구지역에서 지하수위 변동조사와 아울러 SCS-CN방법에 의한 함양율 조사를 시행하여 비교하므로써 비례상수를 결정할 수 있었다.

또한 기존의 지하수위 관측자료를 다수 같은 방법으로 분석 검토한 결과 지하수 함양율이 지하수위강하 감쇠상수를 변수로

농어촌진흥공사 지하수사업처(Rural Development Corporation, Dept. of Groundwater Development)

**Table 1.** Estimated groundwater recharge and its usable amount in Korea

연구자	지하수 함양량		적정개발 가능량		추정방법
	추정량(억m <sup>3</sup> /년)	함양율(%)	추정량(억m <sup>3</sup> /년)	강우비율(%)	
선우중호(1992)			100~150	7.9~11.8	Chremisinoff기준 물 수지분석
한정상 (1992)	228	18	135	10.8	암반지하수 최적개발가능량 추정
최병수 (1992)	205	16	143	11.3	건설통계편람(1990)자료로 추정
이천복 (1994)	228	18			건설통계편람(1992)자료로 추정
한국자원 연구소(1994)	194	15.3	132	10.7	기저유출량분석 및 regression 기법
이동울 (1995)			65	7.8	갈수기 지하수유출량 분석
강장신 (1997)	247	20.1	173	14.1	Coutagne-Turc법 손실량분석

하는 회귀방정식으로 나타낼 수 있었다. 그러므로 지하수위강 하 감쇠상수와 기저유출 감쇠상수가 비슷한 지역조건에서는 10일 정도 단기간의 기저유출 조사만으로 기저유출 감쇠상수를 구하여 지하수함양율을 산정할 수가 있다.

### SCS-CN 방법에 의한 지하수함양량 추정

#### SCS-CN 방법의 기초이론

1960년대 미국 농무성 토양보전국(Soil Conservation Service, SCS)에서는 소유역에 대한 유출량 산정을 위하여 유출량과 토양의 관련자료를 광범위하게 수집 분석하고 강우와 유출의 관계식을 유도하였다. 이 SCS 모형의 특징은 수문학적 토양구분과 토지 이용상태별 유출곡선지수(Runoff Curve Number, CN)를 정하여 유역의 특성에 따라 무계측 유역의 유출량을 추정하는 것이다.

SCS 모델은 세가지 가정을 기초로 하고 있다. 즉 강우시 차단, 지표저류, 토양저류 등에 의한 최대저류능(Potential storage, S)을 유역의 특성으로 하고, 최대저류능(S)에 대한 실제저류량(Actual storage, F)의 비율은 직접유출량(Q)이 강우량(P)에서 초기손실(Initial abstraction, I<sub>a</sub>)을 뺀 값에 대한 비율과 같으며, 초기손실(I<sub>a</sub>)은 최대저류능(S)의 크기에 비례한다는 것이다. 이 가정을 수식으로 표시하면,

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P - I_a} \quad (1)$$

이 되고 초기손실은 I<sub>a</sub>=αS로 표시할 수 있으나 SCS에서는 I<sub>a</sub>=0.2 S 를 채택하였다.

한편 물 수지로 볼 때 다음식이 성립한다.

$$F = P - I_a - Q \quad (2)$$

위의 식 (1), (2)에서 Q에 대하여 풀면,

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad \text{단, } P \leq 0.2S \text{ 일 때 } Q=0 \quad (3)$$

이 되며 이 식은 S변수 하나만으로 유출량을 구할 수 있어 무계측 유역에서도 강우별 직접유출량을 구할 수 있다. 변수 S는 호우와 유역특성에 따라 결정되며 SCS(1971)에서는 유출곡선지수(CN) 방법을 개발하여 S와 CN의 관계를 다음과 같이 제시

하였다.

$$S = \frac{25,400}{CN} - 254 \text{ (mm)} \quad (4)$$

한편 Aron *et al.*(1977)과 Hjelmfelt(1980) 등은 위의 식 (1)~(4)에서 실제저류량 F가 강우중 누가침투량과 같다고 하였으며 F를 다음 식으로 유도하였다.

$$F = \frac{(P - 0.2S)S}{P + 0.8S} \quad (5)$$

Hjelmfelt(1980)는 이 식의 미분형을 취하여 강우 중 침투율(Infiltration rate)을 구한 결과 Holtan의 침투율공식과 일치되었으며 이 누가침투량 공식으로 강우 침투량을 산정할 수 있음을 보여 주었다.

각 강우사상별 침투량은 바로 지하수함양량으로 볼 수 있으므로 장기간의 침투량을 누계하여 같은 기간의 강우량과 비교하면 지하수함양율을 산정할 수 있다.

(5)를 이용하여 침투량을 산정하려면 조사지역의 유역 특성에 따른 최대저류능 S를 알아야 하는데, S는 유출곡선지수(CN)에 의해 결정되고 CN은 유역의 토양종류와 토지 이용형태 그리고 기상조건(선행함수조건)에 따라 결정된다. CN은 0~100 사이의 값을 가지며 CN→0일 때 S→∞이고 CN→100일 때 S→0이 된다.

SCS는 유출에 영향을 미치는 토양의 종류나 토지이용 및 관리상태 등을 기초로 하여 수문학적인 토양피복군(Hydrological soil group)을 다음과 같이 4가지 그룹으로 분류하였으며 토지이용과 피복상태, 수문토양군별로 유출곡선지수를 정리하여 제시하였다(Singh, 1992; Viessman, 1977).

- A: 침투율 및 투수율이 매우 높은 토양. 지표 유출가능성이 낮은 상태임. 이 그룹은 자갈 또는 모래로 구성되어 있음.
- B: 중간정도의 침투율과 투수율을 가진 토양. 미세한 입자에 서부터 자갈정도의 크기까지 골고루 분포되어 있음.
- C: 침투율이 전체적으로 느린 토양으로 투수율도 다소 느림.
- D: 점성토의 토양으로 침투율과 투수율이 매우 느림. 지표 유출가능성이 높은 상태임.

토양의 선행함수조건(Antecedent Soil Moisture Condition, AMC)이란 홍수분석을 하는 시점을 중심으로 그 이전의 강우에

의해 유역 토양 중의 수분함량을 말하며, SCS는 5일 선행강우량을 지수로 하여 아래와 같이 3가지 경우로 선행함수조건을 분류하고 있다.

- AMC I: 유역내 토양이 건조상태이며 유출율이 대단히 낮은 상태(Lowest runoff potential).
- AMC II: 일반적인 토양의 습윤상태로 유출율이 보통인 상태(Average runoff potential).
- AMC III: 토양이 거의 포화되어 있고 유출율이 대단히 높은 상태(Highest runoff potential).

한편 SCS는 토양의 선행함수조건을 성수기(growing season)와 비성수기(dormant season)로 나누어 선행강우량의 크기에 따라 토양의 함수조건을 Table 2와 같이 분류하였다.

한편 식 (4)에서 유출곡선지수(CN)는 평균적인 조건 즉 AMC II일 때의 값이므로 AMC조건이 변화될 때는 다음과 같이 CN값도 바뀌어야 한다.

$$AMC\ I: CN_I = \frac{CN_{II}}{2.281 - 0.01281CN_{II}} \quad (6)$$

$$AMC\ III: CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0.427 + 0.00573CN_{II}} \quad (7)$$

SCS 방법의 적용사례

농어촌진흥공사에서는 경기도 부천시의 지하수 오염실태와 수맥조사사업을 수행하였는데('96.10.~'97.12.), 부천시의 면적은 53.45 km<sup>2</sup>로서 이중 85%에 해당하는 45.69 km<sup>2</sup>가 한강의 지류인 굴포천의 유역에 포함되고 있다.

Table 2. Classification of antecedent moisture condition

Condition	5 day-antecedent precipitation, P <sub>5</sub> (mm)	
	Dormant season	Growing season
AMC I	P <sub>5</sub> <13	P <sub>5</sub> <35
AMC II	13<P <sub>5</sub> <28	35<P <sub>5</sub> <53
AMC III	P <sub>5</sub> >28	P <sub>5</sub> >53

Table 3. CN values by soil group and land use in Gulpo basin, Puchon

토지이용		A		B		C		D		면적계	평균 CN	토지구분별 평균 CN
		면적	CN	면적	CN	면적	CN	면적	CN			
농경지 (1,408)	전	119	65	90	76	37	84	15	88	261	72.8	79.9
	답		70	112	79	1008	84	27	88	1147	81.5	
산림지역 (697)	불량		57		73		82		86		66.5	54.9
	보통	194	43	154	65	102	76	21	82	471	59.1	
	양호	121	32	69	58	36	72		79	226	46.3	
도시지역 (2,468)	주거지	377	77	278	85	368	90	24	94	1047	84.1	86.9
	학교	39	54	44	70	41	80		85	124	68.3	
	도로	167	98	173	98	195	98	10	98	545	98	
	철로	7	75	7	85	5	89		91	19	82.7	
	공업지	166	81	163	88	86	91		93	415	85.8	
	상업지	58	89	74	82	102	94	6	95	240	92.2	
공원	24	49	30	69	20	79		84	74	65.2		
계		1272		1194		2000		103		4569		79.9

부천시 지역의 토양수문군 분류를 위하여 농촌진흥청 농업기술연구소에서 발행한 한국정밀토양도를 이용하였다. 이 토양도에서는 토양 배수상태의 구분을 양호, 약간양호, 약간불량, 불량 등 4단계로 분류하고 있는데 이 분류가 SCS의 수문군별 토양분류와 일치하고 있으므로 이것을 토양분류 A, B, C, D군별 면적으로 분류하였다. 또한 이것을 같은 축도의 지형도에 투영하여 토양분류별, 토지이용구분(농경지역, 산림지역, 도시지역)별 면적을 계산하고 각 단위별 CN값을 유출곡선 지수표에서 구하였는 바 그 내용은 Table 3과 같다. 여기서 토지구분별 평균 CN값은 면적 가중평균에 의한 것이다.

침투량공식을 적용하기 위하여 부천시에서 제일 가까운 김포항공관측소의 강우량 자료를 이용하였는데 1986~1996(11년)기간의 일별 강우량을 그 선행 강우조건(AMC)별로 분류하여 식 (5)를 적용하였다. 여기서 유의해야 할 사항은 각 유역별 평균 CN값을 적용하여 유역의 평균침투량과 함양율을 구하는 것은 피하여야 한다. 그 이유는 CN값과 침투량 사이에 선형비례 관계가 성립하지 않기 때문이다. 다소 번잡하지만 유역내의 토지구분별로 각각 침투량과 함양율을 구하고 면적 가중평균에 의하여 유역 전체의 침투량과 함양율을 산정하는 것이 바람직하다. 또한 Table 3의 토지구분별 CN값에 대응하여 일일이 침투량과 함양율을 산출하기 보다는 대상 유역의 강우특성을 표현하는 그래프를 작도하여 이용하는 것이 효율적이다.

Table 4는 김포항공관측소의 강우량 자료에 임의의 CN값을 가정하여 연도별 침투량을 구하고 평균 침투량과 함양율을 구한 것이다. 그 결과를 그래프로 표시하면 Figure 1과 같으며, CN값과 함양율의 관계는 다음과 같이 3차원 회귀방정식으로 주어진다.

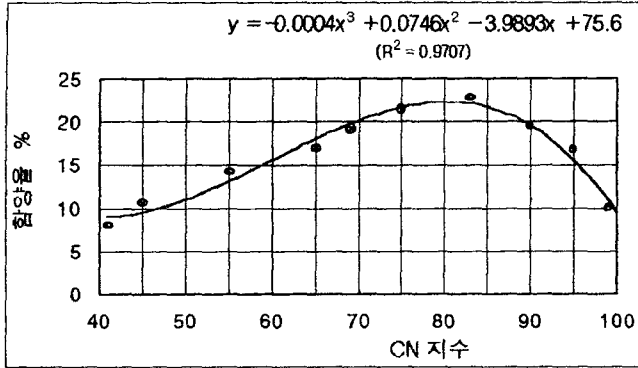
$$y = -0.0004x^3 + 0.0746x^2 - 3.9893x + 75.6 \quad (8)$$

위 식에서 y는 함양율(%)이고 x는 CN지수이다. 그림에서 보여 주듯이 함양율은 CN값이 80에서 극대값을 보이고 있어서 만일 앞 표의 조사지역 평균 CN값 79.9를 적용한다면 실제보다 훨씬 큰 함양율을 얻게 될 것이다.

Table 5는 Table 3의 굴포천유역 토지이용구분 및 토양구분별

**Table 4.** Variation of annual infiltration and recharge ratio due to the change of CN values in Gulpo basin

구 분	강우량 (mm)	연 침 투 량 (mm)								
		CN 45	CN 55	CN 65	CN 69	CN 75	CN 83	CN 90	CN 95	CN 99
'86~'96 평균	1232.8	133.9	172.9	207.8	237.4	265.6	280.2	240.1	205.5	121.7
함양율(%)		10.9	14.0	16.9	19.3	21.5	22.7	19.5	16.7	9.9



**Figure 1.** Relationship between recharge ratio and CN values in Gulpo basin.

**Table 5.** Recharge ratio by SCS-CN method in Gulpo basin

토지이용 구분	면적(ha)	CN값	함양율(%)	평균 함양율(%)
농경지역 (1,408)	전	261	72.8	21.1
	답	1147	81.5	22.0
산림지역 (697)	불량		66.5	18.0
	보통	471	59.1	15.1
	양호	226	46.3	9.8
도시지역 (2,464)	주거지	1047	84.1	20.8
	학 교	124	68.3	18.2
	도 로	545	98.0	10.0
	철 로	19	82.7	21.2
	공업지	415	85.8	20.7
	상업지	240	92.2	17.4
	휴식지	74	65.2	17.2
계	4,569	79.9		18.36

CN값을 Figure 1의 그래프에 적용하여 토지구분별 함양율을 계산하고 면적 가중치에 의하여 유역 전체의 평균 함양율을 산정한 것으로 이 지역의 평균 지하수함양율은 18.4%로 구해졌다.

이 결과의 합리성을 검토하기 위하여 장기유출 분석방법으로 우리나라에서 많이 쓰이고 있는 Kajiya 유출공식에 의거 평균 유출량을 계산하고 물수지를 검토하였다. Table 6은 김포항 공관측소의 강우량 자료에 의한 굴포천유역 유출 분석 결과인데 유출율이 59.7%이므로 손실률은 40.3%이다(농어촌진흥공사, 부천시 지하수 관리계획 기본조사 보고서, 1997). 통계적으로 침투율은 손실율의 40~45%를 적용하고 있는데, 이를 인용하면 굴포천유역의 침투율은 16.1~18.1%가 되며 이것은 SCS 방법에 의한 함양율보다 약간 작게 나타났다. 그러나 Table 5의 도시지역 함양율을 검토해 보면 주거지 및 공업지의 함양율이

**Table 6.** Discharge analysis in Gulpo basin by Kajiya method

구 분	강우량(mm)	유출량(mm)	유출율(%)	손실율(%)
'86~'96 평균	1,232.8	747.8	59.7	40.3

과대하게 산정되어 있는데 이것은 CN지수가 이수팔트 포장등 현대적 환경을 반영하지 못하였기 때문으로 보여진다.

이러한 조건을 감안한다면 SCS방법에 의한 함양율은 허용오차 범위내에서 유출분석에 의한 침투율과 일치한다고 할 수 있다.

### 지하수위 강하곡선 해석에 의한 함양량산정

#### 기초 이론

강우시 유역의 특성에 따라 강우량의 일정부분이 지하에 함양된다는 가정 하에 강우량과 함양량의 관계를 다음과 같이 설정할 수 있다(Bear, 1979). 즉, 어느 기간 중 함양지역 면적 A에 강우량 P가 내렸을 때 지하수 함양량이 R 이었다면

$$R = \alpha A (P - P_0) \tag{9}$$

여기서  $P_0$ : 지하수침투가 시작되는 강우량(threshold precipitation)

$\alpha$ : 지하수함양계수 또는 함양율 (recharge ratio)

같은 지역에서 어떤 시점에서 선행기간중 강우량  $P_1$ 에 의한 함양량이  $R_1$ 이었고, 일정기간 경과후 그 기간의 강우량  $P_2$ 에 의한 함양량  $R_2$ 이었다면 식 (9)에 의하여

$$R_1 = \alpha A (P_1 - P_0), \quad R_2 = \alpha A (P_2 - P_0)$$

로 쓸 수 있고 그 함양량의 차이는

$$R_1 - R_2 = \alpha A (P_1 - P_2), \quad \text{즉 } \Delta R = \alpha \cdot A \cdot \Delta P \tag{10}$$

로 표시할 수 있다. 여기서  $P_1$  기간의  $P_0$ 와  $P_2$  기간의  $P_0$ 는 토양 함수조건에 따라 다를 수 있으나 평균개념으로 볼 때 그 차이가 무시될 수 있으므로 상쇄되었다.

한편 지하수함양 증가량  $\Delta R$ 에 따라 이 지역에서 지하수위가  $\Delta h (=h_2 - h_1)$ 만큼 상승하였다고 하면

$$\alpha \cdot A \cdot \Delta P = A \cdot \Delta h \cdot S_y$$

$$\alpha = \frac{\Delta h}{\Delta P} \cdot S_y = \frac{h_1 - h_2}{P_1 - P_2} \cdot S_y \tag{11}$$

여기서  $S_y$ 는 대수층의 비산출율(specific yield)이고  $h$ 는 지하수 수두이다. 이 식은 어떤 시점에서 전후 기간의 지하수 수두  $h_1, h_2$ 를 관측하고 또 각 기간의 강우량  $P_1$ 과  $P_2$ 를 알면 지하수 함양율  $\alpha$ 를 추정할 수 있음을 보여준다.

지하수의 유동특성상 지하수문분석의 단위기간을 연간단위, 계절단위, 월단위 등으로 하는 것이 일반적이다. 지하수 함양과

관계가 큰 무강우 지속일수(dry-days)는 가뭄정도를 해석하는 기준으로 쓰고 있는데 우리 나라에서 관개기간(5~9월)중 1개월간 무강우이면 10년 빈도의 가뭄에 해당된다고 한다. 강우량 등 기상자료 통계도 월 단위로 작성되고 있다. 그러므로 본 연구에서는 지하수함양을 월 단위로 분석하는 기법을 도입하였다.

식 (11)에서 기간을 30일로 취하고 전 1개월은 우기로, 후 1개월은 가뭄기간으로 가정하여  $P_2=0$ ,  $h_1-h_2=s_{30}$ (월 수위강하량)을 대입하면

$$\alpha = \frac{s_{30}}{P_1} S_y \quad (12)$$

한편 유역내 대수층의 지하수 포장량  $V$ 는 대수층 면적  $A$ , 대수층 두께  $h$ (지하수 포화층 두께)라 할 때  $V=A \cdot h \cdot S_y$ 로 나타낼 수 있으며, 강우에 의해 함양된 지하수는 포장량을 증가시키게 되나 무강우기간에는 포장량 중 일부는 기저유출과 증발산량으로 손실된다. 이때의 하천 기저유출량은 다음 식으로 주어진다.

$$Q = Q_0 \cdot e^{-bt} \quad (13)$$

여기서  $Q_0$ : 기준시점( $t=0$ )에서 기저유출량  
 $Q$ :  $t$  시간 경과후 기저유출량  
 $b$ : 기저유출 감쇠상수

그러므로 유역 내에 다른 함양원이 없고 양수도 없는 경우 지하수 포장량의 변화율은 기저유출량과 증발산량( $Et$ )의 합과 같다고 볼 수 있다.

$$-\frac{dV}{dt} = -A \cdot S_y \cdot \frac{dh}{dt} = Q_0 \cdot e^{-bt} + Et \quad (14)$$

여기서 증발산량은 기저유출량에 비하여 작은 비율이 될 것으로 예상되는데 지하수위가 지표에서 1.0~1.5 m 이상 되면 지하수로 부터의 증발산은 무시될 수 있다(잔디 또는 1년생 작물 지역 1.0 m, 과수 지역 1.5 m). 그러므로  $Q_0 e^{-bt} + Et = Q_0 e^{-kt}$ 가 성립한다고 가정하면 식 (14)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{Q_0}{A \cdot S_y} \cdot e^{-kt} \quad (15)$$

(15)는 시간경과에 따른 지하수위 변화의 감소를 나타내므로 여기서  $k$ 를 지하수위강하 감쇠상수라고 정의하면  $Et=0$  일때  $k=b$  이고,  $Et>0$ 이면  $k$ 는  $b$ 보다 약간 큰 값이 될 것이다. 이 식의 양변을 적분하고  $t=0$ 일 때  $h=h_1$ ,  $t=t$ 일 때  $h=h_2$ 라 하면 지하수위강하량  $s=h_1-h_2$ 는

$$s = \frac{Q_0}{A \cdot S_y} \cdot \frac{1}{k} (1 - e^{-kt}) \quad (16)$$

이 되며 장기간 무강우시 즉  $t \rightarrow \infty$ 일 때 지하수위 최대강하량  $s_m$ 은

$$s_m = \frac{Q_0}{A \cdot S_y} \cdot \frac{1}{k} \\ s = s_m (1 - e^{-kt}) \quad \text{또는} \quad s_m - s = s_m e^{-kt} \quad (17)$$

한편 1개월간 무강우시 지하수위 월 강하량은 식 (12)에서

$s_{30} = \frac{P_1}{S_y} \cdot \alpha$ 가 되므로 최대강하량과 월간 강하량의 비를 지하수위강하율(Water level depression ratio)이라고 정의하면

$$\gamma = \frac{s_{30}}{s_m} \quad (\text{단}, 0 < \gamma \leq 1) \quad (18)$$

$$s_m = \frac{Q_0}{A S_y} \cdot \frac{1}{k} = \frac{s_{30}}{\gamma} = \frac{\alpha}{\gamma} \cdot \frac{P_1}{S_y}$$

가 되어 수위강하 감쇠상수와 지하수 함양율의 관계는 다음과 같이 된다.

$$\frac{1}{k} = \frac{\alpha}{\gamma} \cdot \frac{A \cdot P_1}{Q_0} \quad (19)$$

여기서  $P_1$ 은 풍수기의 월 강우량으로서  $A P_1$ 은 대상구역의 강수총량 [ $m^3$ ]이며  $Q_0$ 는 유량 [ $m^3/day$ ]이므로  $A P_1 / Q_0$ 는 시간단위(day)임을 알 수 있다. 이것을  $T$ 라 놓으면  $T$ 는 풍수기 총 강수량이 기저유출로 배수되는 기간을 나타내며 (19)식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{1}{k} = \frac{\alpha}{\gamma} \cdot T \quad \text{또는} \quad \alpha = \frac{\gamma}{k \cdot T} \quad (20)$$

한편 식 (17)에서 양변에  $\ln$ 를 취하면

$$kt = \ln \frac{s_m}{s_m - s} \quad (21)$$

가 되고  $s \rightarrow s_m$ 일 때  $t \rightarrow T$ 이 될 것이나  $\ln$ 의 속성상  $(s_m - s) > 0$ 인 매우 작은 값을 선정하여야 한다. 만약  $0 < \delta < 0.1$ 인 임의의 상수  $\delta$ 를 취하여  $s_m - s = \delta \cdot s_m$ 가 될 때의  $t$ 를  $T$ 로 잡으면

$$kT = \ln \frac{s_m}{\delta \cdot s_m} = \ln \frac{1}{\delta} = \text{const}(\text{일정상수}) \quad (21)$$

가 되고 식 (20)은 다음과 같이 된다.

$$\alpha = \frac{1}{\ln(1/\delta)} \cdot \gamma = C \cdot \frac{s_{30}}{s_m} \quad (\text{단}, C = -\frac{1}{\ln \delta}; \text{상수}) \quad (22)$$

#### 사례연구지역에 대한 분석

식 (22)에서  $\delta$ 의 값을 어떻게 취하는 것이 적당한가는 실제의 함양율이 어느 쪽에 접근하는가에 따라서 결정할 문제이다.  $\delta$ 를 0.001~0.1 범위에서  $C$ 값을 계산해 보면 다음과 같이 0.14~0.43의 범위이나 우리나라 지하수함양율은 통계적으로 강우량의 18% 내외를 계상하고 있으므로  $\delta$ 가 0.005~0.01 범위의 값이 될 것으로 예측된다.

$\delta$ 값	0.001	0.005	0.01	0.02	0.1
$C$ 값	0.1448	0.1887	0.2171	0.2556	0.4342

이에 대한 검토를 위하여 경기도 부천시 의월천 상류부 유역을 사례연구지역으로 정하고 하천 유출지점 인근에 관측공 ( $\phi 2" \times 14$  m) 1개소를 설치하여 지하수위 변동을 장기관측하는 한편, 하천에서의 기저유출(base flow)조사와 이 지역의 토양분류 및 토지이용에 따른 SCS-CN방법의 침투량을 분석하여 결과를 비교하되 식 (22)의 상수 값을 유도하였다.

**Table 7.** Recharge ratio calculated by SCS-CN method in Berne stream basin

토지이용 구분	면적(ha)	CN값	함양율(%)	평균 함양율(%)
농경지역 (71)	전	39	67.0	19.8
	답	32	84.2	
산림지역 (167)	보통	152	72.1	20.7
	양호	15	58	
도시지역 (6)	주거지	1	85	13.0
	도로	5	98	
계	244	72.5	20.2	

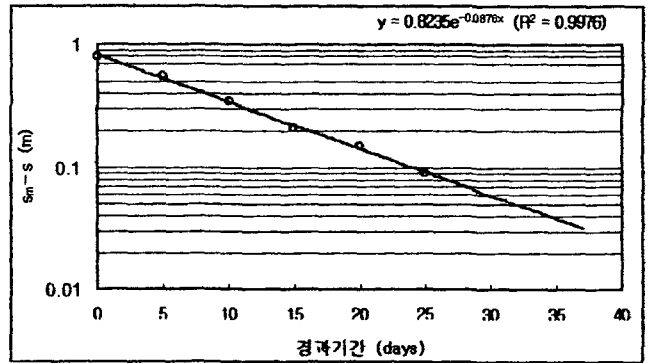
여월천 상류를 베르네천이라고 하는데 유역면적 244 ha의 전형적인 농촌 소유역에 해당된다. 이 지역의 토지이용 구분 면적별 CN값과 각 CN값에 해당하는 지하수 함양율은 Table 7과 같으며 SCS-CN방법에 의한 이 지역 평균 지하수 함양율은 20.2%로 산정되었다. 여기서 CN값별 함양율 산출은 사례연구지역과 같은 우량관측 관할지역인 부천시 굴포천유역의 CN~함양율 관계곡선(Figure 1 참조)을 인용하였다.

Figure 2은 베르네천 유출부 인근의 관측공에 설치한 리-살식 자동 수위기록계의 지하수위 변동 수문곡선이다. 이 수위변동곡선에서 최대수위강하량은 0.8 m이며 peak점(24일)으로부터 최저수위점(103일)까지의 기간중 강우의 영향을 배제하도록 투명지에 수위강하곡선을 수평으로 이동하면서 수위강하부분이 매끈하게 연결되도록 작도하면 무강우기간의 지하수위강하 지수함수곡선을 그릴 수 있는데 이렇게 얻은 지수곡선에서 경과기간과 수위강하량의 관계를 보면 Table 8과 같다.

이 표에서 경과기간과 수위강하량 차이( $s_m-s$ )의 관계를 반대수지에 작도하면 Figure 3과 같으며 최대수위강하량은 0.82 m로 조정되었다. 그림에서  $s_m-s_{30}=0.06$  m이므로  $s_{30}=0.76$  m이고 수위강하율은  $\gamma = \frac{0.76}{0.82} = 0.927$ 로 구해지며, SCS-CN방법에 의한 지하수함양율을 적용하면  $\alpha=C \times 0.927=0.202$ 이므로  $C=0.2178$ 로 구해진다. 이것은 앞에서  $\delta=0.01$ 일 때의 C값과 일치하고 있다.

**Table 8.** Relation between time and water-level depression during no rainy days

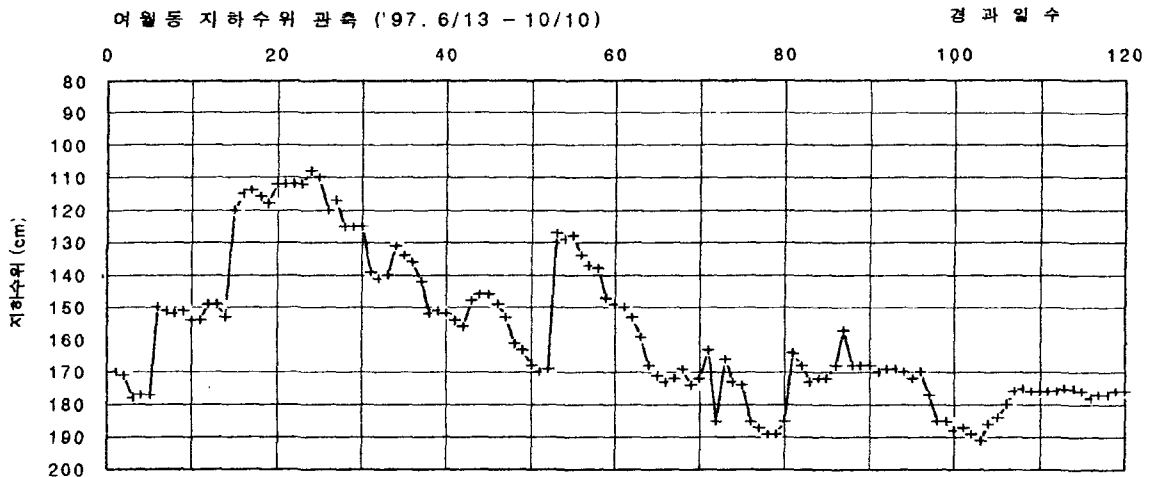
경과기간 (day)	지하수위 (m)	수위강하량 s(m)	$s_m-s$ (m)	비고
0	1.07	0	0.80	$s_m: 0.80$ m 적용
5	1.32	0.25	0.55	
10	1.52	0.45	0.35	
15	1.66	0.59	0.21	
20	1.72	0.65	0.15	
25	1.78	0.71	0.09	



**Figure 3.** Water-level depression analysis in the observation well near Berne stream.

지하수위 관측자료에 의한 회귀방정식

농어촌진흥공사에서는 1971~1975년 기간 중 전국 총적관정 123개소에 대한 기설관정관측조사를 시행하였으며 그 중 48개소에 대하여는 장기 일일 수위관측조사를 실시하였다. 이들 장기관측 수위자료를 경과기일을 횡축으로 작도하여 지하수위 수문곡선(Groundwater level hydrograph)을 얻었으며 사례연구지역 조사에서와 같이 무강우 기간의 지하수위강하 지수함수 곡선을 유도할 수 있었다. Figure 4는 이러한 지수함수곡선들을 반대수지에 직선형으로 작도한 것이며 이 그래프에서 최대수위강하량  $s_m$ 과 월 수위강하량  $s_{30}$ 를 읽어 지하수위강하율  $\gamma$ 를 구하고



**Figure 2.** Groundwater level hydrograph at the observation well located near Berne stream.

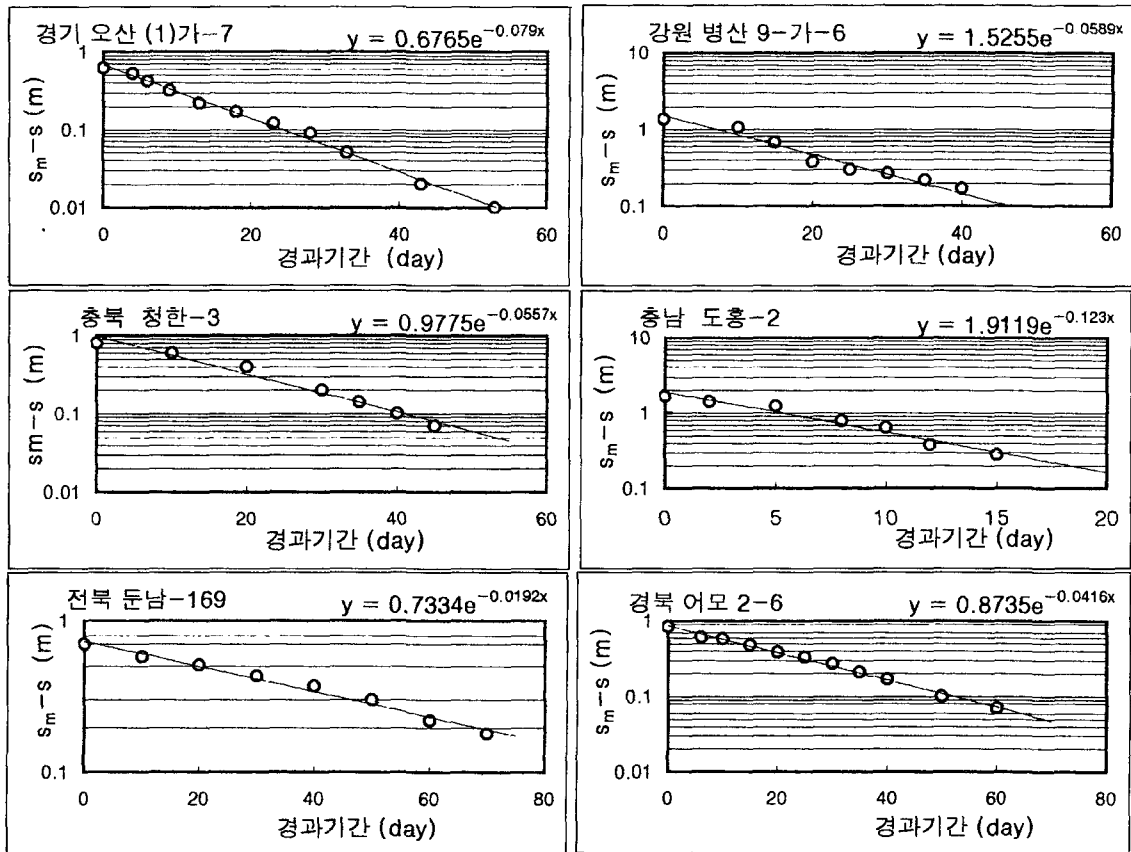


Figure 4. Water-level depression Analysis of the existing shallow wells.

지하수 자연함양율을 산정하였다. 여기서 자연함양율은  $\alpha=0.217$   $\gamma$ 식의 의거 계산하였는데 상수 값은 여러 시험자료를 통계으로 적용해야 하지만 다른 조사자료가 없으므로 사례연구지역 조사 자료를 전국적으로 적용하였다. 그러나 우리나라 충적층은 전국적으로 평균 두께 10 m 정도의 비슷한 상태임을 감안할 때 사례지구 예를 적용하여도 큰 오차는 없을 것으로 판단된다.

Table 9는 지하수위 관측공 32개소의 수위강하곡선을 이 방법으로 해석하여 지하수위강하 감쇠상수  $k$ , 수위강하율  $\gamma$ , 자연함양율  $\alpha$ 를 구한 결과표이다.

Figure 5는 Table 9에서 지하수함양율  $\alpha$ 와 지하수위강하 감쇠상수  $k$ 의 관계를 작도한 것으로  $\alpha$ 와  $k$ 의 관계는 다음과 같이 3차원 회귀방정식으로 주어진다.

$$\alpha = 112.02 k^3 - 38.205 k^2 + 4.517 k + 0.024 \quad (23)$$

그림에서 보여주듯이 이 회귀방정식은 상관도가 매우 높으며 우리나라 육지부의 충적층 지하수에서 수위변화와 함양관계를 잘 표현하고 있다고 할 수 있다. 임의 지역의 지하수위강하 감쇠상수를 구할 수 있으면 함양율은 그래프에서 바로 얻어진다. 사례지구 예를 들면(Figure 3 참조) 지하수위강하 분석에서  $k=0.0876(\text{day}^{-1})$ 를 얻었는데 이 그래프에서 해당 함양율을 찾으면 0.201이 되고 기왕에 구한 함양율과 일치된다.

한편 지하수위가 지표에서 1~1.5 m 이상 되면 지하수위강하

감쇠상수와 하천 기저유출 감쇠상수는 같다고 볼 수 있으며 이러한 지역에서는 단기간의 기저유출량 조사로서 자연 함양율을 추정할 수 있다. Figure 2에서 보는 바와 같이 사례지구의 지하수위는 1.1~1.9 m의 범위로 지하수의 증발산은 무시될 수 있을 것으로 판단되었다. Table 10는 베르네천 중앙부에 폭 50 cm인 사각 Weir를 설치하고 하천수의 일류수심을 관측하므로써 유량을 측정 한 결과이며 시간경과에 따른 유출량 감소추세를 반 대수지에 작도하면 Figure 6과 같다

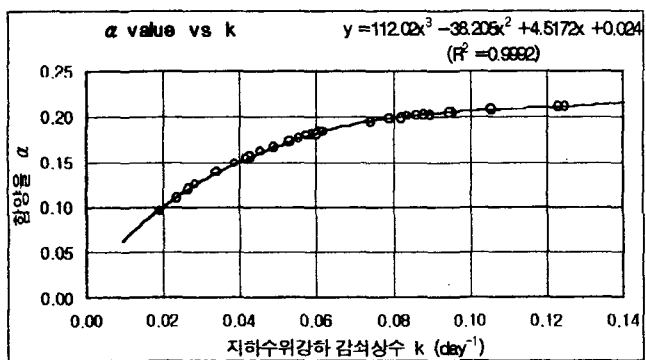
그림에서 하천의 기저유출 감쇠상수는  $b=0.0893 \text{ day}^{-1}$ 로 구해지며 이것은 지하수위강하 감쇠상수  $k=0.0876 \text{ day}^{-1}$ 와 거의 일치되고 있으므로 기저유출 감쇠상수를 구하여 식 (22)의  $k$ 값 대신 대입하면 지역단위 지하수 함양율을 산정할 수 있음을 보여주고 있다.

## 결론 및 토의

1. SCS-CN방법에 의거 강우사상별 침투량을 연간으로 누가 하여 연간 강우량과 비교하면 지하수 자연함양율을 구할 수 있다. 이렇게 산정한 결과는 물 수지분석 방법에 의한 결과와도 허용오차 범위내에서 일치되고 있으므로 SCS-CN방법에 의한 지하수 함양율 산정방법은 신뢰할 수 있다고 판단된다. 뿐만 아니라 SCS-CN방법은 대상지역의 토양피복상태와 토지이용상

**Table 9.** Groundwater recharge ratio calculated from the water level depression ratio of the existing shallow wells.

도별	지구명	공 변	k 값	최대수위		30일수위		수위		함양율 $\alpha = 0.217\gamma$
				강하량 $s_m(m)$	강 하량 $s_{30}(m)$	강하율 $\gamma = s_{30}/s_m$	강하율			
경기	오산	(1)가-7	0.0790	0.6765	0.6133	0.9065	0.197			
	동탄	동탄-15	0.0608	1.3017	1.0916	0.8386	0.182			
	"	동탄-10	0.0739	0.5931	0.5285	0.8911	0.194			
	외사	(1)가-9	0.0614	0.3858	0.3247	0.8415	0.183			
	원삼	(1)가-10	0.0284	1.1674	0.6694	0.5734	0.125			
	가남	96소유역	0.0455	0.2592	0.1930	0.7446	0.162			
강원	신북	5-가-9	0.0341	1.8151	1.1625	0.6405	0.139			
	"	5-가-10	0.0388	0.8449	0.5811	0.6878	0.149			
	병산	9-가-6	0.0589	1.5255	1.2649	0.8292	0.180			
충북	남일	(1)가-1	0.0821	0.3551	0.3249	0.9148	0.199			
	"	남일-14	0.0861	0.4309	0.3983	0.9245	0.201			
	감곡	청한-6	0.0787	0.5802	0.5255	0.9057	0.197			
	"	청한-7	0.0897	0.8164	0.7610	0.9322	0.202			
	감곡	청한-3	0.0557	0.9775	0.7937	0.8119	0.176			
충남	염치	곡교-4	0.0953	3.4118	3.2162	0.9427	0.205			
	"	도흥-2	0.1230	1.9119	1.8642	0.9750	0.212			
전북	용진	69-129	0.0489	1.0942	0.8419	0.7694	0.167			
	"	2-가-4	0.0267	1.8014	0.9928	0.5511	0.120			
	둔남	69-169	0.0192	0.7334	0.3211	0.4379	0.095			
	"	69-174	0.0236	1.2283	0.6232	0.5074	0.110			
	"	69-175	0.0427	0.706	0.5099	0.7222	0.157			
	대산	96소유역	0.0575	0.2813	0.2312	0.8218	0.179			
전남	서창	10-가-4	0.1247	1.1159	1.0894	0.9763	0.212			
	금천	69-101	0.0877	1.5103	1.4015	0.9280	0.202			
경북	어모	2-4	0.0338	1.0286	0.6555	0.6372	0.138			
	"	2-6	0.0419	0.8735	0.6250	0.7155	0.155			
	병곡	1-9	0.0945	0.926	0.8716	0.9413	0.204			
	"	2-34	0.0601	0.9141	0.7635	0.8352	0.181			
경남	하북	가-1-16	0.0835	1.344	1.2342	0.9183	0.199			
	양산	5-가-2-5	0.1424	0.3186	0.3142	0.9860	0.214			
	울산	6-가-2-5	0.0529	0.8529	0.6784	0.7955	0.173			
	농소	가-2-18	0.1054	0.7041	0.6743	0.9577	0.208			
	평균		0.0635	0.993	0.8453	0.8511	0.169			

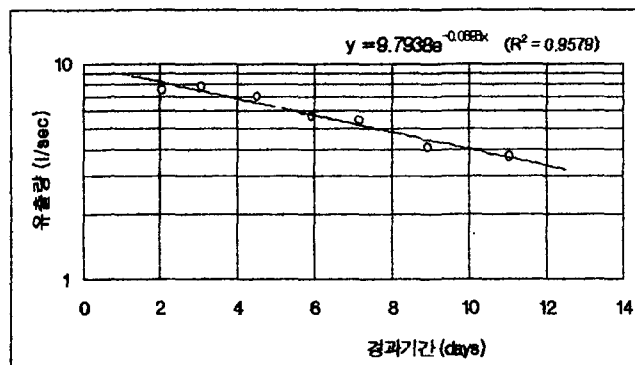


**Figure 5.** Relation between the groundwater recharge ratio and the recession coefficient of the water level depression.

태별 CN지수에 의거 소구역별로 함양율을 추정할 수 있기 때문에 지역단위 지하수 자연함양을 산정에 적합한 효율적인 방

**Table 10.** Base flow observation in Berne stream

관측일	관측시각	경과시간(day)	일류수심(cm)	유출량(l/sec)
97. 3. 15	11:00	0.00	5.8	12.6
3. 17	12:30	2.04	4.1	7.5
3. 18	13:00	3.06	4.2	7.8
3. 19	14:00	4.52	3.9	7.0
3. 21.	9:45	5.93	3.4	5.7
3. 22.	15:30	7.17	3.3	5.4
3. 24	9:30	8.92	2.7	4.1
3. 26.	10:00	11.04	2.5	3.7



**Figure 6.** Base flow analysis of Berne stream.

범이라고 할 수 있다.

2. 자유면대수층에서 무강우 시 수위강하량 변화는 배출하천의 기저유출 감쇠곡선과 비슷한 양상을 보이며 최대수위강하량을  $s_m$ , 수위강하 감쇠상수를  $k$ 라 할 때

$$s = s_m(1 - e^{-kt}) \quad \text{또는} \quad s_m - s = s_m e^{-kt}$$

로 표시할 수 있다.

3. 충전층지역에서 지하수위 변동을 관측하여 지하수위강하율( $\gamma = \frac{s_{30}}{s_m}$ )을 구하면 지하수 자연함양율은  $\alpha = 0.217 \cdot \gamma$ 로 산정할 수 있다. 여기서 비례상수는 SCS-CN방법에 의한 결과를 기준으로 결정한 것이다.

4. 충전층 지역의 지하수 함양율은 지하수위강하 감쇠상수  $k$ 를 변수로 하는 회귀공식으로 표시할 수 있다.

$$\alpha = 112.02 k^3 - 38.205 k^2 + 4.517k + 0.024$$

또한 유역내의 지하수위 강하 원인이 기저유출에만 기인하는 경우 하천의 기저유출 감쇠상수와 지하수위강하 감쇠상수는 같게 되며, 이러한 지역에서는 10일정도 단기간의 기저유출 조사를 시행하여 위의 회귀공식을 적용하면 지하수 함양율을 구할 수 있다.

### 참고 문헌

강장신, 1997, 지하수 수량의 평가, 지하수 자원의 개발 보전관리 심포지엄, 한국자원공학회, p.127-184.  
 농어촌진흥공사, 1975, 시설관정 관측조사 종합보고서, p. 103-



166.  
 농어촌진흥공사, 1997, 부천시 지하수 관리계획 기본조사 보고서, 제 5장.  
 농업기술연구소, 1977, 한국 정밀토양도(인천 및 부천시편, 1:25, 000).  
 이천복, 1994, 한국의 지하수자원과 개발방향, 지하수개발과 농어촌용수 심포지엄, 농어촌진흥공사, p. 133-164.  
 선우중호, 1992, 우리나라 지하수개발의 필요성, 물관련 정책토론회 자료집, 건설부·한국수자원공사, p. 99-119.  
 이동률, 1995, 지하수 감수곡선을 이용한 지하수 함양량 추정과 장기 갈수량 예측, 고려대학교 박사학위논문.  
 최병수, 1992, 우리나라 지하수개발의 현황과 문제점, 물관련 정책토론회 자료집, 건설부·한국수자원공사, p. 157-170.  
 최병수. 1996, 자유면대수층 지역에서 지하수위 변동자료 해석에 의한 대수층특성 연구, 농어촌진흥공사 농공기술 제51호, p. 3-13.  
 최병수, 안중기, 1997, 소유역의 지하수함양율 산정에서 SCS-CN 방법의 적용, 농어촌진흥공사 농공기술 제56호, p. 11-20.  
 한국수자원공사, 1994, 지하수자원 기본조사 보고서.  
 한정상, 1992, 광천음료수의 합리적 관리 방안에 관한 연구, 대한지질학회, 79p.  
 Aron, G., Miller, A. and Laktos, D. 1977, Infiltration Formular Based on SCS Curve Numbers, Jn. of Irr. and Drain. Div. ASCE, vol.103, no.IR4, p. 419-427.  
 Bear, J. 1979, Hydraulics of Groundwater, p. 37-41.  
 Hjelmfelt, A. T. 1980, Curve Number Procedures as Infiltration Method, Jn. of Hyd. Div. ASCE, vol. 106 no. HY 6, p. 1107-1111.  
 Singh, V. P. 1992, Elementary Hydrology, Prentice Hall Inc., Chap. 8., 10, and 14.  
 Soil Conservation Service, U.S.D.A. 1971, National Engineering Handbook, Section 4. "Hydrology", Chap. 4-10.  
 Viessman, W. 1977, Introduction to Hydrology, Chap. 3, 11, 12.