

소유역의 지하수함양율 추정기법

Estimation Methods of Groundwater Recharge Rate in Small Basin

박재성(Jae-Seong Park)* · 김경호(Kyoung-Ho Kim)* ·
전민우(Min-Woo Jeon)* · 김지수(Ji-Soo Kim)**

요 약 : 지하수 수요예측과 개발계획을 수립하기 위해서 지하수 함양율을 적절히 산정할 필요가 있다. 본 연구에서는 초정리 일원의 소유역을 선정하고 이 유역에 대해서 지하수 함양율 추정기법중 물수지분석법, SCS-CN 방법, 지하수위 강하곡선법 및 유출수문곡선법으로 함양율을 추정하였다. 물수지분석법과 SCS-CN 방법에서는 청주기상대의 10년 강우자료가 이용되었다. 지하수강하곡선법을 위해서는 1997년 한해 동안 3개의 관측정으로부터 얻은 지하수위자료를 이용하였고, 유출수문곡선법 적용시에는 3개년도의 수위·유량곡선자료가 이용되었다. 각 방법에 의한 함양율은 물수지분석법이 19%, SCS-CN 방법이 12.95%, 지하수강하곡선법이 16.5%, 그리고 유출수문곡선법이 10.9% 정도의 결과값을 보였다. 상기 방법들에 의해 계산된 이 유역의 지하수 평균함양율은 14.84%이었다.

Abstract : It is necessary to estimate the groundwater recharge rate properly to predict the demand of groundwater and to establish the plan for the development of groundwater in the future. In this paper, A small basin in Chojung area is selected to calculate the groundwater recharge rate. In the calculation, water balance analysis, SCS-CN (Soil Conservation Service-Curve Number) method, groundwater-level analysis and hydrograph of outflow analysis are applied to this area. Data of precipitation measured by Chungju climatological station for about 10 years are used for water balance analysis and SCS-CN method. For the groundwater-level analysis, variations of groundwater-level measured from the 3 test wells in 1997's are used and stage-discharge rating curves in this area for 3 years are used for the hydrograph of outflow. The recharge rate calculated by water balance is 19%, 12.95% by SCS-CN method, 16.51% by groundwater-level analysis and 10.9% by hydrograph of outflow analysis and the overall average recharge rate is about 14.84%.

서 론

우리나라 지하수 개발은 1970년대부터 본격적으로 추진되어 왔으나, 지하수개발과 이용에 따른 법적 제도적 장치가 완비되지 못한 상태에서 개발이 무분별하고도 무계획적으로 이루어져 온 감이 없지 않다.

이러한 무분별한 지하수 개발은 수량고갈, 과잉양수에 의한 지반침하, 해수침입등 각종 지하수 환경재해를 유발하고 있어 지하수의 체계적이고 합리적인 관리의 필요성을 깊이 인식하게 되었으며, 또한 지하수 수요의 장래 예측적인 측면에 있어서도 특정한 지역의 지하수 개발가능량 또는 안전 채수량을 검토할 필요성이 생겼다. 이러한 점에서 지하수함양량의 추정은 중요한 의미를 갖는다.

지하수 함양량에 대한 연구는 물수지방법(선우중호 1992, 한정상 1995)이 주류를 이루어 왔는데, 이 방법은 대상유역의 유출량과 증발산량에 대한 조사자료가 필요하거나 손실량을 계산할 수 있는 특별한 방법을 필요로 하기 때문에 오차가 심하고, 지하수와 관련된 단위유역에 적용하기에는 더욱 큰 오차발생이 우려되어 왔다. 따라서 이와 같은 단점을 해소하고자 소유역단

위에서는 유출량과 증발산량의 자료를 사용하지 않고서도 지표의 수문학적 조건에 의해 무계측으로 평균 자연함양량을 신뢰도 높게 구하는 SCS-CN 방법이 연구 발표되어 사용되고 있고(최병수, 1997), 또 자유면 대수층지역에서 지하수위 강하곡선해석(최병수, 1996)에 의한 자연함양을 산정방법등 다양한 지하수 함양량 추정 방법들이 제안되어왔다. 그 밖에 최근에는 GIS 소프트웨어인 GRASS를 이용하여 원격탐사자료와 수치고도자료등과 같은 공간자료(Spatial data)를 이용하여 지하수함양량을 추정(한국수자원공사, 1997)한다든지 전기탐사에 의해 함양량을 구하는 등 많은 연구가 진행중이다. 그러나 이처럼 많은 연구가 진행되어 왔음에도 불구하고 현재 직접적으로 지하수 함양량을 추정할 수 있거나 객관적으로 인정된 방법이 없는 실정이다(Su, 1994). 따라서 여러가지 추정방법을 이용하여 다양하게 적용해 보고 비교분석하는 것이 합리적이라 생각된다. 본 연구에서는 물수지 분석법과 지하수위 강하곡선법, SCS-CN 방법 및 유출수문곡선을 이용한 방법에 의해 지하수 함양량을 추정하여 비교·분석하였다.

연구방법 및 기본자료

본 연구 대상지역인 충북 청원군 초정리 일원은 청주에서 약 8 km 떨어진 지점에 위치하며 중부내륙의 산간분지에 입지하여 한서의 차가 심하고 대륙성 기후의 특성을 지녀 계절별 기온차가 심하게 나타난다.

* 충북대학교 토목공학과(Dept. of Civil Engineering, Chungbuk National University Cheongju 361-763 Korea)

** 충북대학교 지구환경과학과(Dept. of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea)

이 지역의 지질은 주로 변성퇴적암, 화강암류, 맥암류 지층을 이루고 있는데 가장 넓은 분포를 보이고 있는 것은 반상화강암이며, 현 초정지구는 주로 석영반암으로 이루어져있다. 토양은 대부분 사질토 및 사양토로 구성되어 있으며, 초정지역의 유역도는 아래 Figure 1과 같다.

물수지분석을 위해 Table 1과 2의 청주기상대에서 관측한 년평균기온과 위도에 따른 조정계수를 Thornthwaite(한정상, 1983)

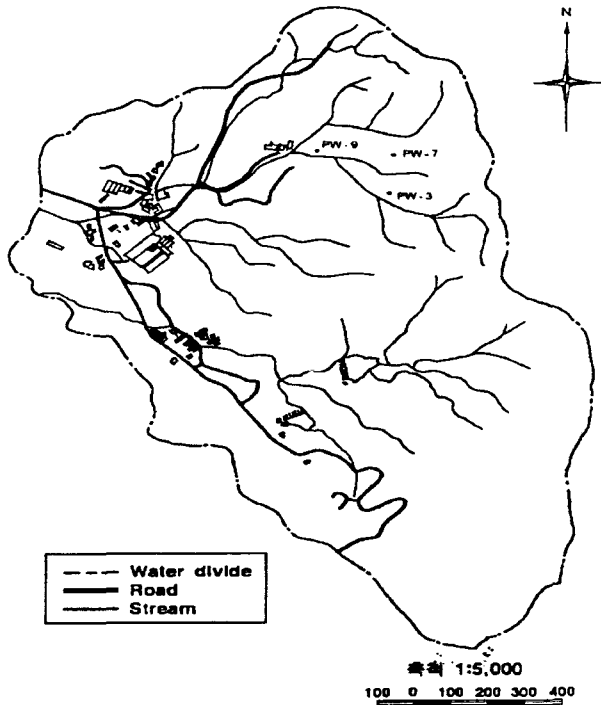


Figure 1. Basin map of Cho-Joung.

의 경험식에 적용하여 잠재증발산량을 산정하였고, Table 3의 일조율을 적용하여 실제증발산량을 계산하였다. 또, 손실량계산은 대상유역과 근접한 청주기상대의 년평균강우량 자료를 이용하여 Coutagne(농어촌진흥공사, 1998)과 Turc(尹泰勳, 1997)식을 각각 적용하였다.

SCS-CN 방법의 적용에 있어서 수문학적 토양피복군의 분류는 우리나라에 비치되어 있는 1:25,000 토양도를 이용하되 유출에 영향을 미치는 토양의 종류나 토지이용 및 관리상태를 기초로 하여 수문학적 토양피복군을 분류하여 표로 제시하였다.

지하수위 강하곡선법의 적용에 있어서는 대상유역의 97년도 지하수위 변동자료를 사용하였으며 지질의 특성을 고려하여 3개 관정에 대한 자료를 사용하였다. 또 작도법상의 문제점을 배제하기 위하여 지하수위 강하곡선을 지수강하곡선으로 가정하고, 분석상의 모호성을 배제하기 위해서 무강우시 지하수위 최대강하량과 1개월 강하량의 비율을 지하수위 강하율이라 정의하였다. 한편, 지하수 함양율과 지하수위 강하율 사이의 비례상수를 구하고 지하수위강하 감수상수를 변수로 하는 회귀방정식을 구하여 함양율을 산정하였다.

유출수문곡선을 이용한 지하수함양율의 방법에서는 대상유역에 가장 근접한 美湖川 중류부(544.72 km²)에 위치한 북일유량관측소의 수위자료를 사용하였는데 관측개시일이 1993년 3월인 관계로 본 논문에서는 94, 95, 96년의 3년 자료와 錦江洪水統制所에서 제공한 94, 95, 96년 rating curve를 이용하였으며, 일반적인 우리나라의 강우에 따른 지하수감수특성에 따라 전반기 감수곡선을 A, 후반기감수곡선을 B로 나타내어 함양율을 산정하였다.

기본이론

지하수함양율(Re)은 년 총강수량에서 지하로 함양되는 부분

Table 1. Temperature (T_m, °C)

년	월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	년
1986		-5.5	-3.2	4.8	12.2	17.4	22.3	24.1	24.7	19.1	12.0	4.8	1.7	11.2
1987		-2.3	0.3	4.5	11.2	17.5	22.6	24.4	25.0	19.5	14.6	6.8	0.3	12.0
1988		-1.9	-1.5	3.7	11.4	18.1	22.8	24.9	25.6	20.2	13.5	4.5	-0.4	11.7
1989		0.3	1.8	5.7	13.8	18.0	20.9	24.7	25.6	20.2	12.3	6.6	1.0	12.6
1990		-3.1	2.7	7.0	11.4	16.9	21.8	26.1	26.7	21.5	14.0	9.1	0.1	12.9
1991		-2.6	-1.3	5.0	12.6	17.6	23.1	24.8	24.8	20.2	12.7	5.3	1.7	12.0
1992		-0.5	0.2	7.0	12.1	16.6	21.1	26.0	25.2	20.3	13.1	5.6	1.4	12.3
1993		-2.1	1.0	5.2	11.1	16.1	22.1	23.8	22.6	20.4	12.3	8.0	-0.1	11.9
1994		-1.5	0.4	3.9	14.7	18.2	22.7	29.1	27.7	20.0	14.2	8.6	1.2	13.3
1995		-2.4	1.4	5.9	11.4	17.0	21.8	23.6	26.9	19.3	14.6	5.2	-1.5	11.9
평균		-2.2	0.2	5.3	12.2	17.3	22.1	25.2	25.5	20.1	13.3	6.5	0.5	12.2

Table 2. Corection factor due to latitude (b)

기상 관측소	월 좌표			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	북위	동경	고도												
청주 기상대	36 38'	127 26'	59.0	0.86	0.84	1.03	1.10	1.22	1.23	1.25	1.17	1.03	0.97	0.85	0.83

Table 3. Sun-Shine (S_s %)

년	월별												
	S _s (%)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1986	62.5	63.5	57.9	64.7	57.6	45.0	38.0	45.9	51.0	48.6	55.5	41.5	
1987	59.1	57.9	50.7	54.0	58.2	54.7	27.0	32.6	58.9	50.9	52.7	57.3	
1988	54.6	57.2	49.4	62.9	56.3	51.0	30.8	55.3	59.0	65.9	62.4	53.9	
1989	32.9	51.6	57.6	70.9	62.2	52.1	45.1	57.2	51.2	62.0	51.3	48.1	
1990	49.9	35.7	52.1	52.8	41.6	32.5	39.2	56.8	46.7	67.0	49.2	47.8	
1991	58.1	57.6	51.6	69.3	61.9	52.7	28.7	52.1	48.3	74.9	59.8	41.4	
1992	44.9	64.7	47.0	57.9	55.5	51.4	43.7	42.0	41.1	57.4	49.5	42.4	
1993	48.7	56.0	53.0	59.8	58.4	35.5	32.5	31.9	53.6	60.4	30.5	48.2	
1994	52.6	58.4	61.4	55.5	50.3	53.5	55.4	55.4	62.0	54.4	59.6	50.3	
1995	58.8	66.5	49.4	63.4	55.0	54.3	38.4	46.9	48.6	61.7	62.7	51.0	

이 차지하는 양(P year)이므로 이를 년 총강수량에 대한 백분율을 취하여 지하수 함양율(α, %)로 나타내면

$$\alpha = \frac{R_c}{R_{year}} \times 100 \quad (1)$$

식 (1)과 같이 함양율을 산정할 수 있다.

물수지분석법

질량보존의 법칙에 의한 물수지분석(water balance analysis)법은 조사지역내로 유입 및 유출되는 물의 양과 지역내의 저류되는 수자원량의 변화 사이에는 항상 평형조건이 이루어진다는 가정으로부터 다음과 같은 지하수함양량을 얻을 수 있다.

$$R_c = D - E \quad (2)$$

여기서 D는 지역내에서 주어진 기간 동안의 손실량, E는 증발산량으로 각각 다음의 식을 적용하였다.

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

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

여기서 P는 강수량으로 Coutagne 식에서는 (m)단위, Turc 식에서는 (mm)단위이다. λ와 L은 기온의 함수이다. 증발산량은 Thronthwaite의 경험식을 적용하였으며 그 식은 다음과 같다.

$$E_p = cT_m^a \quad (4)$$

여기서 E_p는 잠재증발산량(Cm), a, c는 지역, 위도에 따라 변화하는 계수이며, a의 값은 년열지수(annual heat index : I)를 사용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$a = 67.5 \times 10^{-8}I^3 - 77.1 \times 10^{-6}I^2 + 0.01792I + 0.49239$$

$$I = \sum_{m=1}^{12} \left[\frac{T_m}{5} \right]^{1.514} \quad (5)$$

매일 12시간의 낮의 길이가 월 30일이라 가정하면 식 (4)는 다

음과 같이 간단히 표시할 수 있다.

$$E_p = 1.62b \left[\frac{10T_m}{I} \right]^a \quad (6)$$

여기서 b는 위도에 따라 정해지는 조정계수이다. 위의 식은 월 평균 기온이 0°C 이하 일때는 증발하지 않는다고 보고 포함시키지 않았다.

식 (6)은 포화상태에서의 값을 나타내는 잠재증발산량(잠재증발산량)이므로 실제 유역에서는 토양이 물로 포화되어 있는 상태에서 증발산이 계속되면 토양중의 수분이 점차로 감소하게 되어 식물의 뿌리를 통한 증산뿐만 아니라 토양면으로부터의 증발도 둔화되어 실제증발산율은 다음 호우로 인해 유역이 물로 포화될 때까지 점점 감소하게 되므로 실제 증발산량(E)은 잠재증발산량보다 작게되며 그 관계를 다음과 같이 제안하여 계산하였다.

$$E = S_s E_p \quad (7)$$

여기서 S_s는 일조율(Sun-Shine, S_s%)을 나타낸다.

SCS-CN 방법

강우시 차단, 지표저류, 토양저류 등에 의한 최대저류량(Potential retention, S)을 유역특성 값으로 놓을때, 실 저류량(Actual retention, F)이 최대저류량(S)에 대하여 갖는 비율은 직접유출량(Q)이 강우량(P)에서 초기손실(Initial abstraction, I_a)을 뺀 값에 대한 비율이 서로 같다고 가정한다.

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P - I_a} \quad (8)$$

또, 초기손실(I_a)은 최대저류량(S)의 크기에 비례한다.

$$I_a = \beta S \quad (9)$$

여기서 β는 초기흡수계수로서 SCS에서는 경험에 의하여 β = 0.2를 채택 하였다. 한편 물수지로 볼 때 다음식이 성립한다.

$$F = P - I_a - Q \quad (10)$$

위의 식 (8), (9), 및 (10)에서 P > βS인 경우 Q에 대해서 풀고 β = 0.2를 택하면 다음식을 얻을 수 있다.

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (11)$$

여기서 최대저류량 S는 호우와 유역 특성에 따라 결정되며, 유출곡선지수(Runoff Curve Number, CN)를 도입하면 다음식으로 표시된다.

$$S = \frac{25.400}{CN} - 254 \quad (\text{mm}) \quad (12)$$

한편, (8), (9), (10)과 (11)식에서 침투량(F)은 다음 식과 같이 유도된다.

$$F = \frac{(P - 0.2S)S}{P + 0.8S} \quad (13)$$

단, $P \leq \beta S$ 일 경우 $F = 0$ 이 된다.

유출곡선지수

유출곡선지수(Runoff Curve Number)는 토지 이용형태 그리고 기상조건에 따라 결정된다. 동일한 종류의 흙에 대해서도 토지의 사용용도에 따라 유출 발생능력이 다르게 되므로 토지 사용에 따른 CN 값도 제시하였다.

미국에서는 침투능에 따라 상기 수문학적 토양의 4종류의 토양 피복군별 유출곡선지수를 정리하여 Table 4에 나타내었다. 본 자료들은 미국 동부지역자료를 근거로 산정된 것이며 SCS 방법은 주로 농촌지역을 대상으로 개발된 방법이기 때문에 산악지역 등에서의 적용에는 세심한 주의가 필요하다.

수문학적 토양 피복군(Hydrological Soil Group)

직접유출 또는 초과강우량을 계산하는데 있어서 고려되어야 할 사항으로는 흙의 종류, 토지의 이용용도, 흙의 초기 수분상태이고, 이 세 가지 요소는 CN(Curve Number) 값에 의하여 직접유출량 계산에 반영되고 CN값도 이에 따라 구분되어진다. SCS에서는 흙의 종류를 유출을 발생시킬 수 있는 능력에 따라 Table 5와 같이 A, B, C, D의 네 가지로 분류하였고, 본 연구에서는 1:25,000 정밀 토양도와 1:5,000 지형도를 사용하여 분류하였다.

선행토양함수조건

선행토양수분상태란 특정한 호우사건의 5일~30일 전에 내린 강우에 의해 유역 토양중의 수분함량을 지수로 표시한 것으로서 이 지수는 어떤 유역에 동일한 강수가 내린다고 하여도 선행강수량이 많으면 유역 토양의 습윤도가 높으므로 유출을 즉, 유효우량이 상대적으로 많아지며, 선행강수량이 적을 경우에는 침투손실이 커지므로 유효우량도 적어져서 유출율은 저하되기 때문에 유출량과 유출율을 결정하는 중요한 인자가 된다.

일반적으로 선행토양함수조건(AMC)을 다음 Table 6과 같은 3가지 조건으로 구분하고 있다.

또한, Table 4와 Table 5의 유출곡선지수(CN)는 AMC II일대의 값이므로 AMC 조건이 변화될때는 아래 식에 의해서 바뀌어야 한다.

Table 4. Hydrologic soil-cover complexes (AMC-II, $I_a=0.2S$)

토지의 이용상태	피복 상태	수문학적 토양조건	토양의 종류			
			A	B	C	D
주거지역(Residential)						
평균규모(m^2)	불투수면적비(%)					
<500	65		77	85	90	94
1,000	38		61	75	83	87
1,500	30		57	72	81	86
2,000	25		54	70	80	85
4,000	20		51	68	79	84
포장된 주차장, 지붕, 차도 등 도로 및 보도			98	98	98	98
포장(록석 및 우수거 설치)			98	98	98	98
자갈			76	85	89	91
비포장			72	82	87	89
상업지역	(불투수면적 85%)		89	92	94	95
공업지역	(불투수면적 72%)		81	88	91	93
	(불투수면적 65%)		77	85	90	92
개발지, 잔디밭, 공원, 골프장, 공동묘지 등 양호한 상태: 전 면적의 75% 이상 초지피복			39	61	74	80
보통의 상태: 전 면적의 50~75% 초지 피복			49	69	79	84
나지상태			-	77	86	91
휴경지(Fallow)	작물잔재물로 피복	불량	76	85	90	93
		양호	74	83	88	90
조식작물(Row crops)	직선줄재배	불량	72	81	88	91
		양호	67	78	85	89
	등고선재배	불량	70	79	84	88
		양호	65	75	82	86
	등고선 및 대상재배	불량	66	74	80	82
		양호	62	71	78	81
소곡류(Small grains)	직선줄재배	불량	65	76	84	88
		양호	63	75	83	87
	등고선재배	불량	63	74	82	85
		양호	61	73	81	84
	등고선 및 대상재배	불량	61	72	79	82
		양호	59	70	78	81

Table 5. Hydrological soil group

토양형 (SCS)	토양의 성질
Type A	· 낮은 유출율(low runoff potential) · 침투율이 대단히 크며 자갈이 있는 부양질, 배수 매우 양호(high infiltration rate)
Type B	· 침투율이 대체로 크고(Moderate infiltration rate)돌 및 자갈이 섞인 사질토, 배수 대체로 양호
Type C	· 침투율이 대체로 작고, 대체로 細砂質 토양층, 배수 대체로 불량
Type D	· 높은 유출율(High runoff potential) · 침투율이 대단히 작고, 점토질 종류의 토양으로 거의 불투성, 배수 대단히 불량

$$AMC-I: CN_I = \frac{CN_{II}}{2.281 - 0.01281CN_{II}} \quad (14)$$

$$AMC-III: CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0.427 + 0.00573CN_{II}} \quad (15)$$

Table 6. Antecedent soil moisture condition (AMC)

AMC Group	5일 선행 강수량, P ₅ , (mm)	
	非盛水期	盛水期
I	P ₅ < 12.70	P ₅ < 35.56
II	12.70 < P ₅ < 27.94	35.56 < P ₅ < 53.34
III	P ₅ > 27.94	P ₅ > 53.34

지하수위 강하곡선 해석

동일 지역의 어떤 시점에서 강수량 P₁에 의한 함양량이 R₁이고 일정시간 경과후 강수량 P₂에 의한 함양량이 R₂이면 이 기간동안의 함양량의 차이는 다음식이 된다.

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

즉, $\Delta R = \alpha \cdot A \cdot \Delta P$ (16)

한편 지하수함양량 증가분 ΔR 에 의해 지하수위가 $\Delta h (= h_1 - h_2)$ 만큼 상승하였다고 하면, 단위 지하수위 저하에 대응해서 대수층에 저류되어 있는 지하수가 단위면적당 배출되는 수량 (%)인 비산출률(S_y)을 도입하여 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta R = A \cdot \Delta h \cdot S_y$$
 (17)

따라서 식 (16)과 (17)을 α 에 대해서 연립하여 풀면 다음과 같이 된다.

$$\alpha = \frac{\Delta h}{\Delta P} \cdot S_y = \frac{h_1 - h_2}{P_1 - P_2} \cdot S_y$$
 (18)

이 식은 각 시점에서의 지하수 수두 h₁, h₂를 관측하고 또 각 기간의 강수량 P₁과 P₂를 알면 지하수 함양율 α 를 추정할 수 있음을 보여준다.

식 (18)에서 두 시점의 기간을 30일로 취하고 전 1개월은 우기로, 후 1개월은 가뭄기간으로 가정하여 P₂ = 0, h₁ - h₂ = s₃₀ (월 수위강하량)을 대입하면 함양율에 대한 식은 다음식으로 표현된다.

$$\alpha = \frac{s_{30} S_y}{P_1}$$
 (19)

한편, 유역내 대수층의 지하수 포장량은 대수층 면적 A, 대수층수두 h(하부 불투층면으로부터 지하수면 높이), 대수층의 비산출률을 S_y라 할 때

$$V = A \cdot h \cdot S_y$$
 (20)

로 나타낼 수 있으며, 강우에 의해 함양된 지하수는 포장량을 증가시키게 되나 무강우기간에는 포장량중 일부는 기저유출과 증발산량으로 손실된다. 이때의 하천 기저 유출량(baseflow)은 다음공식으로 주어진다.

$$Q = Q_0 \cdot e^{-bt}$$
 (21)

여기서 Q₀ : 기준시점(t=0)에서 기저유출량
 Q : t시간 경과후 기저유출량
 b : 기저유출 감수상수

따라서 유역내에 다른 함양원이 없고 양수 이용도 없는 경우 지하수 포장량의 변화율은 기저유출량과 증발산량(E_v)의 합과 같다고 볼 수 있고, 여기서 증발산량은 기저유출량에 비하여 매우 작은 비율이므로 무시될 수 있다고 가정하면 다음 식을 얻는다.

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{Q_0}{A \cdot S_y} \cdot e^{-kt}$$
 (22)

여기서 k는 지하수위 감수상수이다. 식 (22)를 t=0일 때 h=h₁, t=1일 때 h=h₂라 하고 양변을 적분하면 지하수위 강하량(s=h₁-h₂)은 다음 식이 된다.

$$s = \frac{Q_0}{AS_y} \cdot \frac{1}{k} (1 - e^{-kt})$$
 (23)

장기간 무강우시(t → ∞)일 때 지하수위 최대 강하량 s_m은 다음과 같이 표현된다.

$$s_m = \frac{Q_0}{AS_y} \cdot \frac{1}{k}$$
 (24)

식 (24)를 식 (23)에 대입하면, 다음과 같은 지하수 수위강하에 대한 식을 얻을 수 있다.

$$s = s_m (1 - e^{-kt})$$
 (25)

한편, 최대강하량과 월강하량의 비를 지하수위강하율(γ)이라고 정의 하면 다음과 같다.

$$\gamma = \frac{s_{30}}{s_m} \quad (\text{단, } 0 < \gamma \leq 1)$$
 (26)

식 (19) 및 식 (24), (26)에 의해 지하수위 감수상수와 지하수 함양율의 관계인 T = $\gamma / (k \cdot \alpha)$ (여기서 T = $A \cdot P_1 / Q_0$)를 나타낼 수 있고, 식 (25)를 e^{-kt}에 대해서 정리하고 양변에 자연대수를 취하면 다음과 같이 된다.

$$kt = \ln \frac{s_m}{s_m - s}$$
 (27)

s_m - s의 값은 양수이고, 자연대수의 속성상 s가 s_m에 수렴할 때 t 값이 상당한 크기의 유한한값을 갖기 위해서는 0 < δ < 0.1 사이의 값을 갖는 임의 상수 δ 값을 취하여 s_m - s = $\delta \cdot s_m$ 이 될 때의 t를 T로 취하면 된다

따라서 kT = $\ln(s_m / \delta \cdot s_m) = \ln(1/\delta) = \text{const}$ 이 되고, 함양율은 다음식으로 표현된다.

$$\alpha = \frac{1}{\ln(1/\delta)} \cdot \gamma = C \cdot \frac{s_{30}}{s_m}$$
 (28)

여기서 C는 δ 값에 따라 변화하는 상수이다.

유출수문곡선법

강우에 의한 유출은 크게 직접유출과 기저유출로 나눌 수 있는데, 직접유출은 지표면 유출과 지표하 유출로 다시 나뉘고 기저유출은 주로 지하수에 의한 유출을 의미한다. Mayboom

(1961)은 지수방정식 형태의 기저유출 감수곡선식을 이용하여 유출수문곡선으로부터 지하수 함양량을 추정하는 기법을 제시하였다.

본 연구에서도 Mayboom의 추정기법을 적용하여 함양량을 추정하였으나, 감수시점은 우리나라 하천의 유출특성을 고려하여 지하수 유출량이 3-5월, 7-9월의 두기간에 발생한다고 가정하였다(이동률, 1995).

지하수 유출에 의한 지하수 저류량은 지하수 유출 감수곡선을 적분하면 얻을 수 있다.

$$Q_t = Q_0 k_r^t \quad (29)$$

한편 Butler(1957)는 지하수 유출 감수곡선식으로서 다음식을 제안하였다.

$$Q_t = Q_0 10^{-t/K_1} \quad (30)$$

여기서 Q_0 는 $t=0$ 일 때 유량이고, Q_t 는 t 시간 후의 유량이고, k_r 은 감수인자이다. 상기 두 식을 비교하면 다음 식을 얻는다.

$$k_r = 10^{(-1/K_1)} \quad (31)$$

여기서 $1/K_1$ 은 감수상수이다. 또, 각 흐름성분에 대한 감수인자의 값은 Table 7에 제시한 바와 같다.

갈수기간에서 기저유출은 식 (30)과 같이 표시될 수 있으므로, Figure 2에서와 같이 지하수 유출의 감수가 중단없이 계속된다면 전체 지하수 유출 감수기간 동안에 유출되는 지하수 유출의 총 용적은 감수시점 $t_0^{(i)}$ 에서 ∞ 까지 적분하면 구할 수 있다. Mayboom은 이 용적을 잠재지하수유출량($V_p^{(i)}$)이라 하였고, 이때 계산의 편의상 $t_0^{(i)}=0$ 으로 하여 식 (30)을 적분하면 다음 식이 된다.

$$V_{ip}^{(i)} = \frac{Q_0 K_1}{2.3} \quad (32)$$

Table 7. Recession coefficients according to the runoff components

Flow Components	k_r hourly	k_r daily
Groundwater	0.998	0.95
Interflow	0.99	0.8~0.9
Surface runoff	0.95~ 0.99	0.3~ 0.8

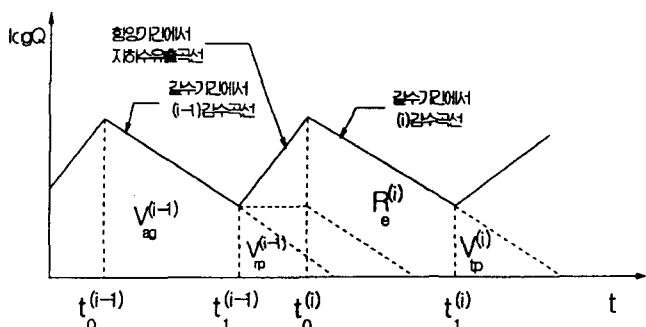


Figure 2. Estimate the amount of baseflow by the method of separation of baseflow.

어떤 주어진 지하수 유출 감수곡선의 시점 $t_0^{(i)}$ 에서 감수가 끝나는 $t_1^{(i)}$ 까지 실제로 유출되는 지하수 총용적은 실제지하수유출량($V_{ag}^{(i)}$)이 되고 다음과 같이 표현된다.

$$V_{ag}^{(i)} = \left[\frac{Q_0 K_1 / 2.3}{2.3} \right] - \left[\frac{Q_0 K_1 / 2.3}{10^{t_1^{(i)}/K_1}} \right] \quad (33)$$

또, 시점 t_0 에서 ∞ 까지 잠재지하수유출량($V_p^{(i)}$)과 t_0 에서 감수가 끝나는 t_1 까지의 실제지하수유출량($V_{ag}^{(i)}$)의 차는 잔여잠재지하수유출량($V_{ip}^{(i)}$)이라 하며 이 양은 대수층에 남아 있는 지하수 저류량으로서 아래 식과 같이 된다.

$$V_{ip}^{(i)} = \frac{V_{ip}^{(i)}}{10^{t_1^{(i)}/K_1}} \quad (34)$$

Figure 2에서 알 수 있는 바와 같이 지하수 함양량은 어떤 주어진 감수곡선의 종점에서 잔여잠재지하수유출량(V_{ip})을 다음 감수곡선 시점의 잠재지하수유출량(V_{ip})에서 감하여 얻을 수 있으며, 이들은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} Re(i) &= V_{ip}(i) - V_{ip}(i-1) \\ &= V_{ip}(i) - [V_{ip}(i-1) - VB_{ag}(i-1)] \end{aligned} \quad (35)$$

적용 및 고찰

물수지분석법에 의한 함양율 산정

물수지분석에 의한 함양율산정은 실제증발산량(E)을 식 (7)에 적용하여 구하고 식 (3)의 Coutagne과 Turc 공식에 의해 손실량을 구한 후 손실량과 실제증발산량의 차로써 함양율(R_c)을 구하고 식 (1)에 의하여 지하수 함양율을 산정한다. 산정결과는 Table 8에 도시 하였으며, Table 8에의하면 Coutagne의 손실량 공식에 의한 함양율이 19.13%로 Turc의 손실량 공식의 18.85%보다 다소 높게 산정되었으며 연도별 함양율 분포에 따르면 Coutagne의 공식의 적용에 의한 함양율 산정보다 Turc의 공식을 적용할 때 보다 안정적인 함양율을 산정할 수 있음을 알 수 있다.

물수지분석법에 의한 본 대상유역의 평균 함양율은 약 19%로 산정되었다.

SCS 방법에 의한 함양율 산정

유출곡선지수의 결정 - Table 9는 4가지 토양형 분류에 따른 토지이용상태별 면적 및 각각 토지 이용상태와 토양종류에 해당하는 유출곡선지수(CN) 값을 나타내고 있다. Table 9의 작성에 있어서 사용된 지도는 1:5,000 지형도이며, 1:25,000 정밀 토양도를 상기의 Figure 3과 같이 입혀서 4개의 토양군으로 나눈 후 각각에 해당하는 면적에 대해 구적으로 구한 다음 합산하여 면적을 구하였다.

CN 값의 결정은 Table 4를 기준으로 구하였다. 또한, 평균 CN값은 토지이용상태에 따라 같은 그룹에서의 면적가중평균으로 구하고, 토지구별 평균CN 값은 그룹별 CN 값에 다시 면적가중을 취하여 구하였으며 그 결과는 Table 9와 같다.

토지 이용상태를 보면 농경지의 면적이 전체의 25%이며 산

Table 8. Recharge rate by analysing water balance

year	P(mm)	λ	L	a	I	Coutagne D(mm)	Turc D(mm)	E_A (mm)	recharge (mm)		rate (%)	
									C-D	T-D	C-D	T-D
86	1157.5	0.4223	650.25	1.3661	55.5763	591.7	573.84	354.8	236.9	219.1	20.47	18.92
87	1656.2	0.4032	686.4	1.4	57.7153	550.22	638.8	340.5	209.7	298.3	12.67	18.01
88	878.9	0.4102	672.58	1.4029	57.9269	562.04	544.27	387.2	174.8	157.1	19.89	17.88
89	1280.3	0.3900	715.02	1.4144	58.6494	641.02	631.82	418.3	222.7	213.5	17.39	16.68
90	1473.7	0.3837	729.54	1.4732	62.3256	640.38	660.34	363.5	276.9	296.8	18.79	20.14
91	1143.6	0.4032	686.4	1.407	58.1826	616.29	596.48	385.5	230.8	211.0	20.18	18.45
92	990.1	0.3965	700.54	1.4067	58.1633	601.41	581.66	360.6	240.8	221.1	24.32	22.33
93	1301.8	0.4055	681.76	1.3514	54.6337	614.61	610.56	311.5	303.1	299.1	23.28	22.98
94	1012.0	0.3757	750.13	1.5321	65.9266	627.23	613.61	457.5	169.7	156.1	16.77	15.43
95	1339.8	0.4055	681.76	1.3993	57.6952	611.9	613.97	377.2	234.7	236.8	17.52	17.67
평균											19.13	18.85

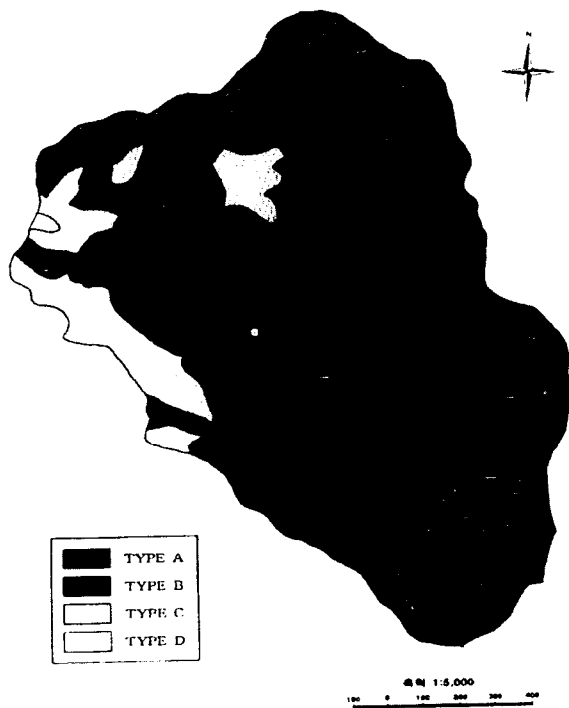


Figure 3. Hydrological soil group.

지역 63.4%, 도시지역 11.6%로 산림지역이 대부분을 차지하며 농경지, 도시지역 순이다. 각각의 평균 CN 지수는 Table 9와 같다.

누가침투량공식의 적용 - 초정지역의 침투율 즉, 자연함양율을 구하기위하여 청주기상대의 1986.1.1~1995.12.31(10년) 기간의 강우량 자료를 일별 강우량과 그 선행 강우량 조건별로 분류하여 앞서 언급했던 식 (13)의 침투량 공식에 적용하였다.

Table 10에서 강우량은 각 해당년도의 연총강우량을 나타내며 CN 지수는 AMC II 조건을 기준으로 한것이므로 선행함수 조건에 따라 식 (14), (15)를 이용하여 AMC II 조건으로 환산하여 침투량을 구하였다. 또, 선행함수조건(AMC)에서 6-9월의

림 4개월을 성수기로 보았으며 나머지 1~5, 10~12월의 8개월은 비성수기로 간주하였다.

무강우 지속일수(no rainy days) 즉, 강우가 있으되 수문과 지하수함양에 아무런 영향을 미치지 않는 강우를 말하는 것으로써 보통 수문학에서는 0.1 mm 이하를 무강우로 취급하나 본 대상지역에서는 무강우 기준우량을 계산결과에 의하여 5 mm를 적용하였다.

산정된 CN 지수에 따른 침투율의 결과를 보면 CN 값이 95에서 극대치를 보이고 CN95를 기준으로 각각 감소하는 경향을 보인다. 상기 계산결과를 CN 값과 침투율(F)의 관계곡선에 의해 회귀방정식을 식 (36)과 같이 얻을 수 있다. 따라서 대상지역의 토지이용 그룹별 CN 값만 알고 있으면 침투율을 바로 산정할 수 있다.

$$y = -0.0004457x^3 + 0.08755x^2 - 5.1475x + 102.515$$

$$R^2 = 0.9172 \quad (36)$$

여기서 x는 CN 지수를 나타내고, y는 침투율, R²는 결정계수(coefficient of Determination)를 의미한다.

Table 11에 의하면 농경지역에서의 함양율은 크게 나타나고, 산림지역에서는 함양율이 작게 나타나고 있다. 농경지역에서 함양율이 큰 것은 전·답 모두 침투율이 크므로 당연한 결과이고, 산림지역의 함양율이 작은 것은 경사도가 크고, 수목 및 지표에서의 차단 등으로 인한 손실이 크게 나타났기 때문으로 판단된다.

도시지역에서의 함양율이 22.29%로서 도시 포장율을 감안할 때 상당히 과대 평가되고 있는데, 원래 SCS 모형이 농경지역을 대상으로 하여 만들어졌기 때문에 나온 결과이므로 도시지역에 적용하는 경우는 제한이 있는 것을 알 수 있다.

특히 SCS-CN 모형은 CN 지수가 40~80의 범위에서 적합도가 좋은 것으로 보고되고 있는데, Table 11에서 알 수 있는 바와 같이 본 연구에서 도시지역의 CN 지수는 유희지를 제외하고는 CN 지수가 모두 80 이상의 값을 나타내므로 이에 대한 연구가 더 필요하다고 본다.

위의 표에서 알 수 있는 바와 같이, 본 대상구역의 평균 함양율은 약 12.95%로 산정되었다.

Table 9. Index of CN by SCS-CN Methods

토지이용	A		B		C		D		평균CN	토지 그룹별 평균 CN
	면적	CN	면적	CN	면적	CN	면적	CN		
농경지 726834	전	62104	63	214648	74	35148	82	85	72.7	77
	답	29490	70	233604	79	150844	84	995	80.2	
산림지역 1840534	불량		57		73		82		86	47.5
	보통	1196316	43	368294	65	526	76	82	48.2	
	양호	166238	32	90490	58	18670	72	79	43.3	
도시지역 336074	주거지	594.6	77	69202	85	7404	90		94	85.4
	도로	7347	98	32123	98	9635	98		98	87.1
	공업지		81	91084	88	11721	91		93	
	상업지	17100	89	35614	92	7219	94		95	
	유흥지		49	42846	69		79	4184	84	
계	1479191		1177905		241167		5179		59.5	
CN	AMC I : 40 (S = 381) AMC II : 60 (S = 169) AMC III : 78 (S = 71.8)									

Table 10. Calculated Infiltration rate by Index of CN 단위 : (mm)

연도	구분 P (mm)	침투량												
		CN 40	CN 45	CN 50	CN 55	CN 60	CN 65	CN 70	CN 75	CN 80	CN 85	CN 90	CN 95	CN 99
86	1157.5	64	75	93	107	125	136	149	184	224	263	309	322	192
87	1656.2	183	205	224	240	248	267	302	332	361	387	409	395	190
88	878.9	36	56	71	80	90	100	128	156	181	212	247	247	141
89	1280.3	67	89	120	150	187	218	245	276	310	341	365	331	183
90	1473.7	124	155	181	196	235	271	294	308	312	322	349	361	221
91	1143.6	25	33	40	59	89	121	167	222	267	304	332	328	197
92	990.1	38	40	39	41	64	85	110	139	162	189	233	281	209
93	1301.8	100	104	109	113	144	178	221	254	294	325	352	340	188
94	1012.0	17	40	66	98	152	196	228	243	252	254	264	264	158
95	1339.8	190	198	227	240	247	256	268	282	288	281	271	242	137
평균	1223.4	84.4	99.5	117.0	132.4	158.1	182.8	211.2	239.6	265.1	287.8	313.10	311.1	181.6
침투율 (%)		6.9	8.13	9.56	10.82	12.92	14.94	17.26	19.58	21.67	23.52	25.59	25.43	14.84

Table 11. Recharge rate by analyzing SCS-CN method

토지이용구분	면적(m ²)	CN 값	침투율(%)	평균침투율 (%)	
농경지역	전	311900.	72.7	19.76	21.55
	답	414933.5	80.2	22.90	
산림지역	보통	1565135.1	48.2	7.90	7.85
	양호	275398.5	43.3	7.59	
도시지역	주거지	77200.4	85.4	23.84	22.29
	도로	49105.2	98	19.40	
	공업지	102805.6	88.3	23.76	
	상업지	59933.7	91.4	23.11	
	유흥지	47029.2	70.3	18.48	
계	2903441.2			12.95	

지하수위 강하곡선을 이용한 함양을 산정

지하수위강하곡선을 해석하기 위하여 앞서 기본이론에서 유

도된 식 (25)를 적용하고 최대 수위강하량 s_m 과 경과기간 t_m 을 구하기 위하여 그림에서 점선 부분과 같이 최대수위 강하량 s_m 은 관측조사기간중 최고수위로부터 갈수기의 최저수위까지의 강하량으로 잡고 지하수위 강하곡선이 최저수위에 도달되는 기간을 t_m 으로 잡는다. 작도결과 각 관정의 수위강하량 s_m 은 각각 1.52m, 6.75m, 6.54 m임을 알 수 있고, 수위강하 기간은 68일과 76일 임을 알 수 있다. 이것을 일별 지하수위 강하량과 $s_m - s$ 값을 나타내면 Table 12와 같다.

Table 12 및 Figure 5, 6에서 PW-3, PW-7, PW-9는 관정을 나타내며 그 위치는 Figure 1에 도시되어 있다.

상기 도표의 관계를 반대수지에 작도한 다음 식 (25)를 변형하여 $s_m - s = s_m e^{-kt}$ 인 관계에 착안하여 $s_m - s$ 가 y가 되는 직선의 회귀방정식을 구하여 k의 값과 s_m 의 값을 구한다.

식 (28)에서 상수값 C는 δ 값이 $0 < \delta < 0.1$ 사이의 변화에 대한 자연대수 값이므로 δ 에 따른 자연대수 값을 나타내었다. 본 연구에서는 적당한 δ 값 산정을 위하여 91' 건교부 통계연

Table 12. Water level drawdown vs. dry-day duration

Time since peak pt. (day)	Drawdown (m)			$S_m - S$			비 고
	PW-3	PW-7	PW-9	PW-3	PW-7	PW-9	
0	0	0	0.08	1.52	6.75	6.46	PW-3 starting day: 97.7.18
5	0.32	1.41	1.34	1.2	5.34	5.2	ending day: 97.9.24
10	0.62	2.78	2.34	0.9	3.97	4.2	t_m : 68 days
15	0.76	3.61	3.22	0.76	3.14	3.32	s_m : 1.52 m
20	0.9	4.22	3.82	0.62	2.53	2.72	PW-7 starting day: 97.7.18
25	1.02	4.82	4.34	0.5	1.93	2.2	ending day: 97.9.24
30	1.11	5.26	4.83	0.41	1.49	1.71	t_m : 68 days
35	1.2	5.58	5.14	0.32	1.17	1.4	s_m : 6.75 m
40	1.27	5.84	5.43	0.25	0.91	1.11	PW-9 starting day: 97.8.05
45	1.33	6.05	5.61	0.19	0.7	0.93	ending day: 97.10.20
50	1.39	6.29	5.77	0.13	0.46	0.77	t_m : 76 days
55			5.94			0.6	s_m : 6.54 m
60			6.05			0.49	
65			6.24			0.3	

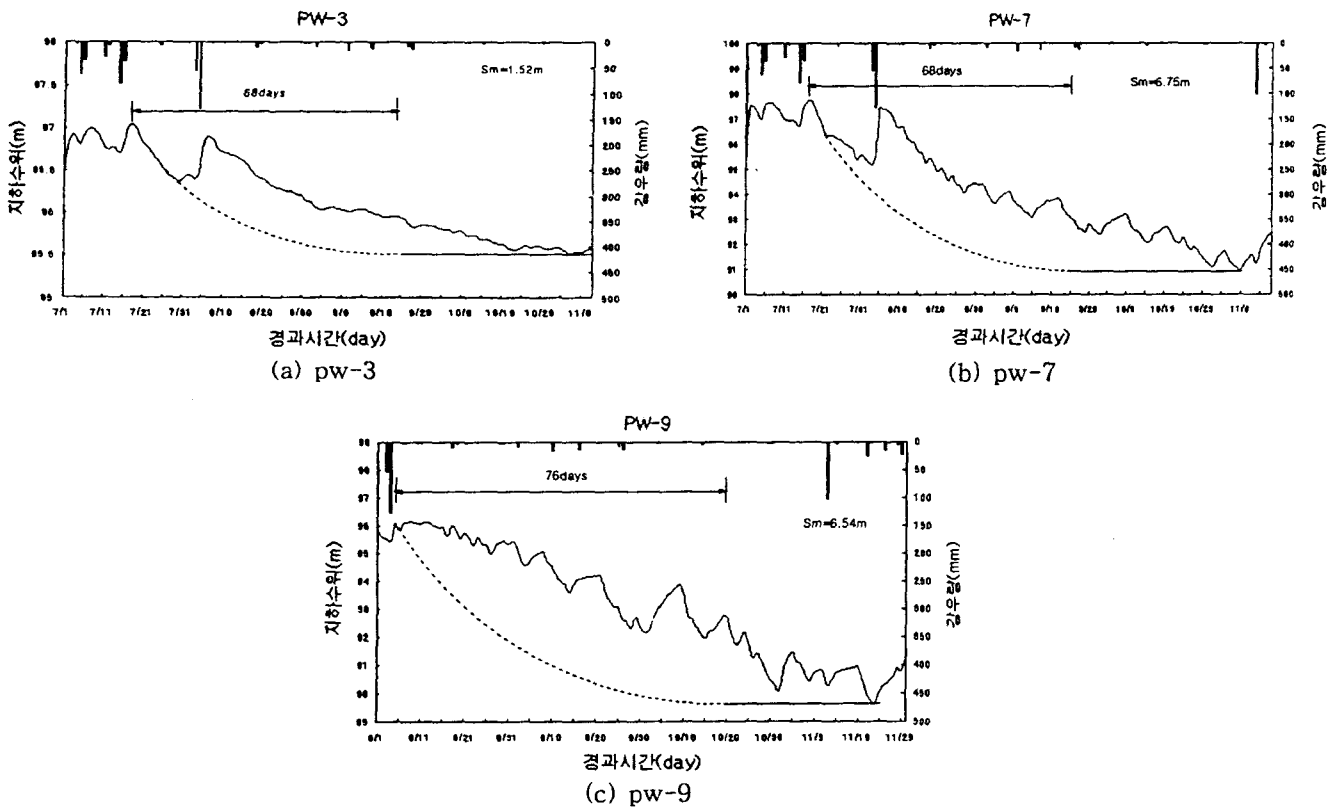


Figure 5. Groundwater-level hydrograph.

보에 따라 우리나라 수자원부존량중 지하수 함양량을 총량의 18%로 보고 이에 부합되도록 δ 값을 산정하였다. 그 결과 δ 는 0.01의 값이므로 C를 0.2171로 적용하였다.

Table 13에서 s_{30} 의 값은 직선 방정식의 t값에 30일을 넣어 계산하면 되고 식 (38)과 식 (42)에 의하여 지하수위 강하율과 각 관정에 대한 함양율을 구하였다.

유출수문곡선을 이용한 함양율 산정

Figure 7은 Table 14의 북일지점의 94', 95', 96' 3년에 해당 하는 Rating curve를 이용하여 일유출수문곡선을 반대수지에 나타낸 것이며, 이로부터 지하수 유출을 분리하기 위하여 세분 하여 도시한 것이 Figure 8이며 나머지 5개부분은 동일한 방법으므로 생략하였다. 본 연구에서는 그림에서와 같이 감수시 점에서 감수종료부의 최저점을 연결하여 이것을 지하수 감수 곡선으로 가정하였다.

Figure 8을 이용하여 감수곡선의 특성치인 초기유량(Q_0), 실

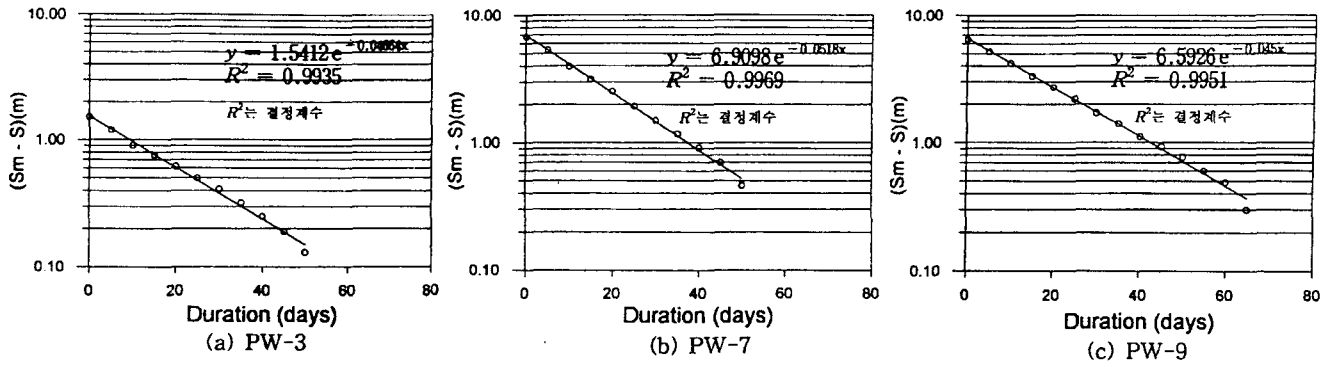


Figure 6. Dry-day duration vs $s_m - s$.

Table 13. Recharge rate by analysing groundwater- level hydrograph

공 번	value of k	S_m (m)	S_{30} (m)	γ	α
PW-3	0.04664	1.5412	1.1608	0.7532	0.1634
PW-7	0.0518	6.9098	5.4491	0.7886	0.1711
PW-9	0.045	6.5926	4.8835	0.7408	0.1608

Table 14. Stage-discharge curve in Bukil

채택 분석 년도 자료	수위구분	유도된곡선식	상관 계수	비고
'94 '94	-	$Q=2.20539h^{4.01295}$	-	-
'95 '94, '95	$0.92 \leq h < 6.55$	$Q=57.5594(h-0.92)^{2.2854}$	0.998	통계처리
'96 '96	$0.57 \leq h < 7.35$	$Q=17.731(h-0.57)^{2.977}$	0.999	-
	$h < 0.57$	$Q=2.0436h^{4.00}$	-	-

제 지하수유출감수기간(RP), 감수인자(k_r)와 감수상수(K_1)를 구한 결과는 Table 15와 같다.

Table 15에서 k_r 의 값은 0.9541~0.9919로서 Pilgrim이 Table 7로 제시한 값과 유사한 값을 얻을 수 있었다. 본 연구에서는 Table 15의 감수곡선의 특성치를 식 (31)~(34)에 적용하여 Table 16과 같이 함양율을 산정하였다.

표에서 알 수 있는 바와 같이 평균함양율은 약 10.9%로서 다른 방법에 의한 결과치 보다 비교적 낮은 함양율을 보이고 있다. 이는 식 (31)~(34)에서 알 수 있듯이 지하수 함양량은 감수곡선의 초기유량에 비례하기 때문에 초기유량의 선정값의 크기에 따라 함양량이 과대 또는 과소 추정되는 원인이 된다. 또, 강우량이 많은 연도에는 상대적으로 함양율이 높아지고 강우량이 적은 연도에는 함양율이 낮아지므로, 본 추정방법에 의한 함양율산정은 소유역에 적용하는 경우에는 적어도 10년 이상의 자료를 사용해야 할 것으로 사료된다.

Table 15. Characteristic of recession curve in Buk-il

year	Groundwater Recession (A)						Groundwater Recession (B)					
	BR	ER	K_1	RP(日)	k_r	Q_0	BR	ER	K_1	RP(日)	k_r	Q_0
1994	5.16	6.17	64	32	0.9647	2.8	9.9	12.1	89	83	0.9745	15.3
1995	3.20	4.14	49	25	0.9541	4.9	9.1	11.29	139	89	0.9836	24.3
1996	3.29	5.13	64	45	0.9647	7.55	8.29	10.23	284	55	0.9919	4.54

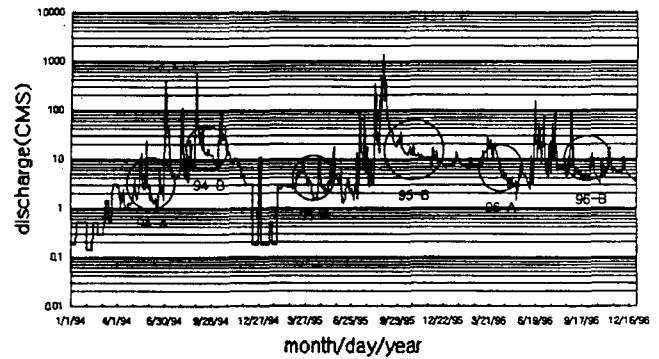


Figure 7. Outflow hydrograph in Bukil (1994-1996).

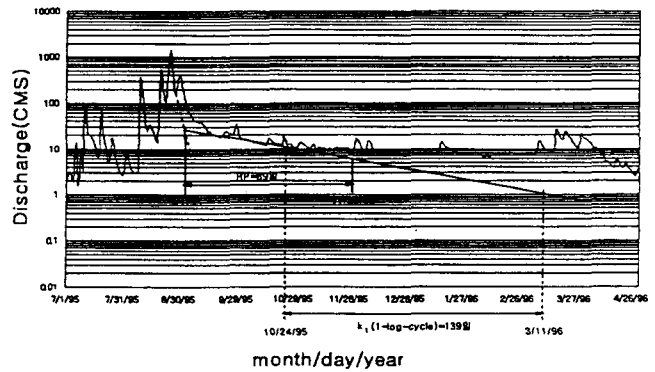


Figure 8. Outflow hydrograph in Bukil (95-B).

결론

초정지역 약 2,903,442 m²의 소유역을 대상으로 지하수 함양량을 추정해 본 결과 물수지분석에 의한 방법은 19%의 함

Table 16. Recharge rate by Analysing outflow hydrograph

year	RP (day)	Q ₀ (CMS)	Vtp (mm)	Vag (mm)	Vrp (mm)	Re (mm)	YRe (mm)	연강수량 (mm)	recharge rate (%)
1994(A)	32	2.8	12.36	8.45	3.91	-	89.99	898.4	10.06
1994(B)	83	15.3	93.9	82.93	10.97	89.99			
1995(A)	25	4.9	16.56	11.45	5.11	5.59	233.41	1478.6	15.79
1995(B)	89	24.3	232.93	179.6	53.33	227.82			
1996(A)	45	7.55	33.32	26.72	6.6	-20.01	62.31	905.0	6.89

양율로 계산되었고 전반적으로 물수지분석법에 의한 함양율 산정시에는 Coutagne의 손실량 공식보다는 Turc의 손실량 공식을 적용하는 것이 안정적인 함양율 추정을 할 수 있음 보여주고 있다. SCS-CN에 의한 함양율은 12.95%, 지하수위 강하곡선에 의한 함양율은 관정별로 큰차이가 없었고 그 평균치는 16.51% 정도였다. 또, 유출수문곡선에 의한 함양율 다른 세 가지 방법에 의한 추정치보다 비교적 낮은 함양율로서 10.9% 정도가 되었다. 상기 각 방법들에 의한 초정지역의 평균 함양율은 14.84% 정도로 추정되었다.

이상의 결과를 살펴볼 때 물수지분석법에 의한 함양율은 다른 방법에 의한 값들보다 크게 나타나고 있는데, 이는 다양하고 복잡한 수문조건을 단순화하는 과정에서 발생하는 오차 때문인 것으로 생각된다.

SCS-CN 방법은 토양의 피복상태와 이용상태 및 선행강수량에 따라 유출율을 결정짓는 CN 지수를 도입하여 비교적 정확한 함양량을 추정할 수 있다고는 하나 CN 지수의 결정에 있어서 미국 동부지역을 대상으로 작성된 것이기 때문에 우리나라 지형에 맞는 CN 지수를 산정해 놓을 필요가 있으며, CN 지수에 지배적인 영향을 미치는 토양의 이용상태에 따른 토양도의 새로운 작성이 요구된다.

지하수위 강하곡선법과 유출수문곡선법은 지하수위자료와 하천수위자료에 의해 비교적 정확한 값을 얻을 수 있으나 대상영역의 범위에 따라 커다란 차이를 보일 수 있으므로 적용에 신중을 기해야 할 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 한국학술진흥재단에서 지원하는 '97년도 대학 부설 연구소 과제 연구의 일부로서 지원해주신 학술진흥재단에 감사드린다.

참고문헌

농어촌진흥공사 부천시 사무소, 1997, "지표수문조사 및 지하수부존량 평가 보고서", 경기도 부천시 지하수관리계획 수립 조사사업, p.38-47.
 선우중호, 1992, "지하수자원 기본조사 보고서".
 선우중호, 1983, "水文學", 동명사, p.91-92.

尹泰勳, 1997, "응용수문학", 청문각, p.137-138.
 이동률, 1995, "지하수 감수곡선을 이용한 지하수 함양량 추정과 장기 갈수량 예측", 고려대학교 박사학위논문.
 이동률, 윤용남, 1996, "우리나라의 지하수 함양량 추정과 분석", 대한토목학회 논문집, 제16권 제II-4호, p.321-334.
 中央地下開發株式會社, 1998, 2., "일화 먹는샘물 환경영향조사 보고서".
 건설교통부, 1998, "지하수 관측연보", 299p.
 농어촌진흥공사 충북지사, 1998, "지하수 영향 조사서", 청원농지개발조합 봉산지구.
 충북개발연구원, 1997, "조정지구 관광개발 기본계획", p.28-33.
 최병수, 1997, "소유역의 지하수 함양량 산정에서 SCS-CN 방법의 적용", 농공기술 제56호, p.11-20.
 최병수, 1996, "자유면대수층지역에서 지하수위 변동자료 해석에 의한 대수층 특성연구", 농공기술 제51호.
 한국수자원공사, 1997, "공간자료를 이용한 지하수 함양량 계산기법 연구", '97연구요약보고서, p.699-716.
 한정상, 1995, "지하수개발과 관리대책, 수자원 개발과 보전대책", 한국 수자원공사, p.39-103.
 한정상, 1998, "지하수환경과 오염", 박영사, p.312-313.
 Butler, S. S., 1957, "Engineering Hydrology", Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., p.203-250.
 Glover, R. E., 1961, "Mathematical derivations pertaining to groundwater recharge", U.S. Dept. Agr., Agr. Res. Serv., Ft. Collins, Colo. (mimeographed), 81p.
 Hantush, M. S., 1967, "Growth and decay of groundwater mounds sponse to uniform percolation", Water Resour. Res., 3p, 22p.
 Liu, Y. & Zhang, C., 1993, "A Comparative Study of Calculation Methods for Recharge of Rain Fall Seepage to Ground Water in Plain Area", Ground Water, 31(1), p. 12~18.
 Marino, M. A., 1975, "Mathematical models of artificial recharge systems", Water Science and Engineering, University of California, Davis.
 Mayboom, P., 1961, "Estimating Groundwater recharge from stream hydrographs", Journal of Geophysical Research, 66(4), p. 1203-1214.
 Rushton, K. R., & Ward, C. 1979, "The estimation of groundwater recharge", Journal of Hydrology, 41p, p. 345-361.
 Soil Conservation Service, 1969, 1971, "Hydrology" in SCS National Engineering Handbook, Section 4.
 Su, N., 1994, "A formula for computation of time-varting recharge of groundwater", Journal of Hydrology, 160p, p.123-135.