

지하수 함양량 추정과 하천의 보장유량 예측을 위한 지하수 감수곡선의 이용

이 동 료* 윤 용 남**

1. 서 론

본 연구에서는 지하수 감수곡선을 분석하여 유역의 지하수 함양량 추정과 하천의 보장유량을 예측하였다. 지하수 함양량 추정을 위하여 Barnes(1939)의 지하수 감수곡선, 보장유량예측을 위하여 Riggs(1961)의 “10일 지하수 감수곡선”을 우리나라 5대하천의 주요 유량관측 지점에 대하여 각각 정의하였다. 추정된 지하수 함양량은 선행강수량과 관계를 분석하여 강수량에 따른 지하수 함양량을 추정할 수 있도록 하였다. 본 연구에서 지하수 함양량을 발생 시키지 않는 강수량을 “지하수함양 임계강수량”으로 정의하였다. 5대 하천의 주요지점에 대하여 “임계강수량”을 제시하였으며, 임계강수량과 각 유역의 실제증발산량이 서로 비슷한 양을 가짐을 알았다. 보장유량 예측모형의 개발로 유역별 최저보장유량을 제시하였고, 지하수 함양이 거의 없는 가뭄기간의 하천 가용수자원을 예측할 수 있다. 이들 분석을 이용하여 1939년, 1968년, 그리고 1994년 가뭄기간의 지하수 함양량과 가용수자원의 평가를 수행하였다.

2. 지하수 함양량 추정 및 분석

2.1 지하수 함양량 추정

본 연구에서는 Mayboom(1961)이 제안한 유출수문곡선을 이용한 지하수 함양량 추정기법을 이용하였다. 이를 위하여 유출수문곡선에서 Barnes(1939)에 의한 지하수 감수곡선을 그림 2.1과 같이 정의하였다.

우리나라 하천의 지하수 감수기간은 그림 2.1과 같이 일반적으로 4월초에서 6월말, 9월초에서 다음해 2월말의 두기간이며, 지하수가 증가하는 기간은 3-5월과 7-9월이다. 본 연구에서는 우리나라 5대 하천의 28개 주요 지점을 대상으로 유출수문곡선에서 지하수 감수곡선을 선정하였고, 각 지하수 감수곡선에서 감수곡선의 초기유량, 감수기간 및 감수계수를 산정하였으며, 이를 이용하여 지하수 함양량을 추정하였다.

지하수 유출특성을 나타내는 감수계수와 강수량, 초기유량, 유역면적의 관계분석에서 유역의 대수층에서 지하수 흐름을 등방, 균일한 매체와 같은 거동으로 해석하는데 무리가 없음을 알 수 있었다. 또한 어떤 유역에서 지하수 함양량은 각 지점들의 감수곡선의 초기유량의 함수로 나타낼 수 있었고, 유역면적과 초기유량의 비유량, 지하수 함양량의 관계는 모두 유역면적에 따라 일정한 같은 경향을 보여줘 유역내 신뢰성 있는 어떤 한지점 또는 몇개의 지점으로 해당유역의 지하수 함양량을 나타낼 수 있었다.

* 고려대학교 토목환경공학과 대학원

** 고려대학교 토목환경공학과 교수

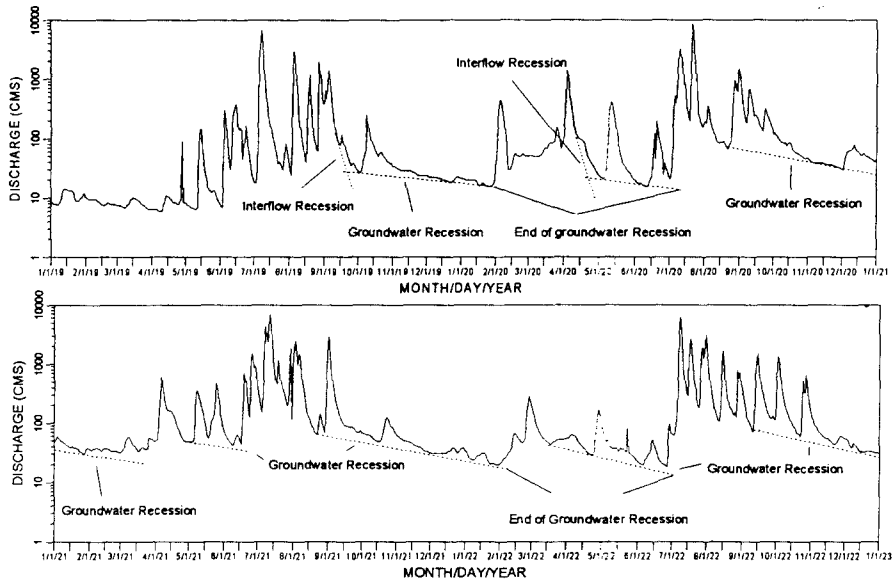


그림 2.1 낙동강 현풍지점의 유출수문곡선(1919-1922)

표 2.1은 분석 기간이 장기간이고 비슷한 지하수 함양량을 보여주고 있는 유역별 대표지점들의 평균으로 나타낸 지하수 함양량과 이들 함양량에 영향을 주는 기간별 총강수량에서 함양량의 비율을 나타낸 것이다. 표 2.1에서 Re4, Re9는 3-5월, 7-9월기간의 각 지하수 함양량을 나타내고, YRe는 두기간의 총지하수함양량인 연지하수함양량을 나타낸다. 또한 P1.5, P6.9, YP는 각각 3-5월, 7-9월, 연지하수함양량에 영향을 미치는 1-5월, 6-9월, 연총유역평균강수량을 나타낸다. 표 2.1에서 유역별 지하수 함양량은 한강과 금강, 낙동강, 섬진강 그리고 영산강유역이 각각 거의 비슷한 함양량을 보이고 있다.

표 2.1 유역별 평균 지하수 함양량과 기간별 총강수량의 함양비율

유역	Re4 (mm)	Re4/P1.5 (%)	Re9 (mm)	Re9/P6.9 (%)	Re9/P1.9 (%)	YRe (mm)	YRe/YP (%)
한강	24	10	72	9	9	96	9
낙동강	20	7	54	8	8	74	7
금강	26	8	73	10	9	99	8
섬진강	24	8	55	6	7	79	6
영산강	25	7	53	6	6	78	6

또한 표 2.1에 제시한 지하수 함양량은 단위면적당 함양량으로 여기에 유역면적을 곱하면 적정 지하수 개발량이라 할 수 있으며, 한강과 금강유역이 다른 3개 유역 보다 상대적으로 단위면적당 약 20mm의 지하수를 더 개발할 수 있음을 보여준다. 또한 유역별 각 기간의 총강수량중 6-9%가 지하수로 함양됨을 알 수 있다.

2.2 지하수 함양량 분석

유역별 강수량에 따른 함양량을 추정하기 위하여 유역평균강수량과 함양량의 관계를 분석하여 표 2.2에 나타내었다. 이들 관계에서 선행강수량에 따른 지하수 함양량을 추정할 수 있다.

표 2.2 유역별 강수량과 지하수 함양량 관계

(a) 1-5월 총강수량(P_{1-5})과 3-5월 지하수 함양량(Re_4) 관계

유역	관계식	$P_{1-5}, Re_4=0$
한강	$Re_4 = 0.2453P_{1-5} - 29.23$	119 mm
낙동강	$Re_4 = 0.1358P_{1-5} - 33.47$	246 mm
금강	$Re_4 = 0.1636P_{1-5} - 22.54$	138 mm
섬진강	$Re_4 = 0.1580P_{1-5} - 28.23$	179 mm
영산강	$Re_4 = 0.0831P_{1-5} - 13.82$	167 mm

(b) 6-7월 총강수량(P_{6-9})과 7-9월 지하수 함양량(Re_9) 관계

유역	관계식	$P_{6-9}, Re_9=0$
한강	$Re_9 = 0.1466P_{6-9} - 40.98$	280 mm
낙동강	$Re_9 = 0.1661P_{6-9} - 59.14$	356 mm
금강	$Re_9 = 0.1561P_{6-9} - 51.40$	329 mm
섬진강	$Re_9 = 0.1003P_{6-9} - 35.04$	349 mm
영산강	$Re_9 = 0.1034P_{6-9} - 32.59$	315 mm

(c) 1-9월 총강수량(P_{1-9})과 연지하수함양량(YRe) 관계

유역	관계식	$P_{1-9}, YRe=0$
한강	$YRe = 0.1705P_{1-9} - 88.63$	520 mm
낙동강	$YRe = 0.1748P_{1-9} - 95.27$	545 mm
금강	$YRe = 0.1657P_{1-9} - 77.89$	470 mm
섬진강	$YRe = 0.1244P_{1-9} - 70.52$	567 mm
영산강	$YRe = 0.1302P_{1-9} - 61.84$	475 mm

2.3 지하수함양 임계강수량

표 2.2에는 3-5월, 7-9월, 그리고 1-9월에 지하수로 함양이 발생하기 위해서 각 유역에서 가져야 하는 최소강수량을 제시하였다. 최소강수량은 표 2.2의 관계식에서 Y축(Re_4, Re_9, YRe)이 0인 X축($P_{1-5}, P_{6-9}, P_{1-9}$)값을 말한다. 즉 이 강수량 이상이 발생했을 때 지하수함양이 발생한다.

표 2.2에서 Y축, 즉 함양량이 0이 되는 X축의 강수량은 모두 증발산되어 지층으로 침투되지 못하는 강수량으로 볼 수 있다. 본 연구에서는 이때 X축의 강수량을 “地下水涵養 臨界降水量(no groundwater recharge critical precipitation)”이라 정의하였다. 지하수 함양량은 이 임계강수량 이상 강수량이 있어야 발생한다. 표 2.3에 1-5월, 6-7월, 1-9월 총실제증발산량과 이들 기간의 강수량과 함양량의 관계식에서 함양량이 0가 되는 표 2.2의 임계강수량을 같이 나타냈다. 표 2.2에서 6-9월, 1-9월의 총실제증발산량은 같은 기간의 함양량이 0가 되는 강수량과 거의 일치함을 알 수 있어 강수량과 함양량의 관계식의 $Y=0$ 일때 X축은 함양량의 임계강수량이고 이 임계강수량은 유역의 증발산량이라고 할 수 있다. 그러나 1-5월에서는 실제증발산량이 임계강수량보다 상대적으로 상당히 크게 나타났다. 이와같은 결과는 실제증발산량의 추정오차 또는 3-4월에서의 지하수 함양량의

추정오차에서 기인된다고 판단된다.

표 2.3 지하수함양 임계강수량과 실제증발산량의 비교

유역	기간	총증발산량 (mm)	지하수함양 임계 강수량 (mm)
한강	1 - 5월	215	119
	6 - 9월	243	280
	1 - 9월	458	520
낙동강	1 - 5월	236	246
	6 - 9월	247	356
	1 - 9월	483	545
금강	1 - 5월	248	138
	6 - 9월	288	329
	1 - 9월	462	470
섬진강	1 - 5월	244	179
	6 - 9월	288	349
	1 - 9월	532	567
영산강	1 - 5월	213	167
	6 - 9월	245	315
	1 - 9월	453	475

표 2.4 과거 가뭄기간의 유역평균강수량과 지하수 함양량

(단위 : mm)

가뭄기간	기간	한강	낙동강	금강	섬진강	영산강
1939년	1-5월	205.6	173.9	179.8	181.2	192.7
	(3-5월)	(21.0)	(0.0)	(6.9)	(0.4)	(2.2)
	6-9월	287.8	341.3	314.6	474.8	546.0
	(7-9월)	(1.2)	(0.0)	(0.0)	(12.6)	(23.7)
1968년	1-5월	135.0	129.7	180.3	210.1	248.8
	(3-5월)	(3.9)	(0.0)	(7.0)	(5.0)	(6.7)
	6-9월	808.0	583.9	591.4	618.3	477.7
	(7-9월)	(77.5)	(45.8)	(40.9)	(27.0)	(16.8)
1994년	1-5월	222.0	267.9	223.1	242.7	217.8
	(3-5월)	(25.2)	(2.9)	(14.0)	(10.1)	(4.1)
	6-9월	496.8	326.0	474.7	389.6	421.3
	(7-9월)	(31.7)	(0.0)	(22.7)	(4.0)	(11.0)

() : 지하수 함양량

2.4 가뭄기간의 지하수 함양량 분석

우리나라의 대표적인 한발기간은 1939, 1968, 1994년으로 이 기간의 기간별 강수량과 지하수 함양량을 표 2.4에 나타내었다. 3개년의 가뭄기간에서 1939년 낙동강, 금강유역은 함양량이 거의 없었으며, 1994년 극심한 가뭄을 겪었던 낙동강, 섬진강, 영산강유역 지하수 함양량이 거의 없었다.

3. 하천의 보장유량 예측

보장유량 예측을 위하여 Riggs(1961)의 정의에 의한 “10일 지하수 감수곡선”을 계절별로 정의하였다. 그림 3.1은 고안지점의 10일 지하수 감수곡선이다.

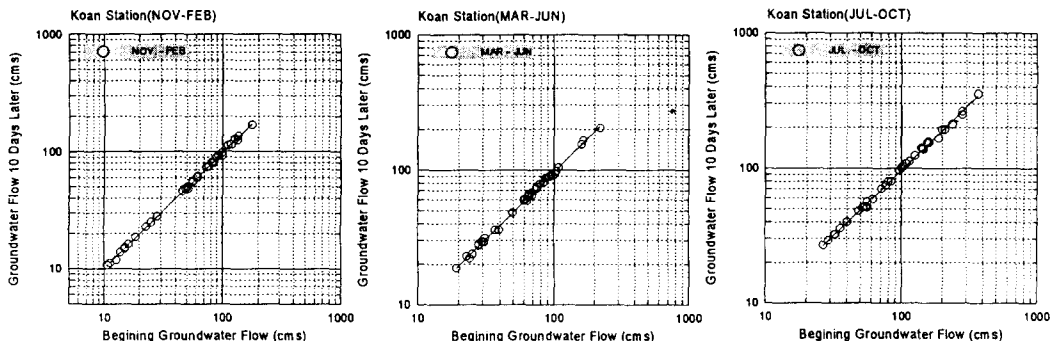


그림 3.1 고안지점의 10일 지하수 감수곡선

하천에서 갈수시 하천유출의 주요 공급원은 지하에 저장된 물이다. 가까운 장래 또는 계속되는 무강우시 하천에 유입되는 지하수량은 지하수감수곡선의 사출(projection)로 예측할 수 있다. 보장유량 예측은 먼저 그림 3.1에서 작성된 계절별 감수곡선을 사출하여 연속 지하수유출 감수곡선을 작성하여 수행된다. 그림 3.2는 그림 3.1의 감수곡선을 이용하여 작성된 연속 지하수유출 감수곡선이다.

고안 지점의 지하수 감수곡선을 나타내는 그림 3.2에서 9월 1일에서 100.0 cms로 시작한 감수곡선은 그림 3.1의 횡축상에 100.0 cms에서 7-10월 감수곡선과 만나는 종좌표에서 96.7 cms의 9월 11일의 지하수 유량을 얻는다. 다시 96.7 cms를 종축에 대입하여 93.7 cms의 9월 21일의 지하수 유량을 얻어 10월까지 연속 지하수 유량을 작성한다. 11-2월, 3-6월의 연속곡선 역시 해당 월의 10일 지하수 감수곡선을 이용하여 작성된다.

그림 3.2에 제시된 12개월 지하수 감수곡선은 지하수함양량이 없는 기간동안 대수층에서 공급되는 지하수유출량을 나타내고, 유출수문곡선에서 지하수 유출만을 나타내는 선형부분으로부터 유도됐기 때문에 이들 곡선은 12개월 전기간에 발생한 거의 최소유량을 나타낸다.

그림 3.2에서 연속 지하수 감수곡선은 지하수 함양량이 없는 기간의 각 유역의 대수층에서 공급되는 지하수로 9월 이후 겨울과 여름까지 유지되는 보장유량을 알 수 있다. 각 유역별 9월 이후 다음해 8월까지 지하수 함양량이 없을 때 대수층에서 공급되는 유량은 표 3.1와 같다.

4. 결론

본 연구에서는 감수곡선을 이용하여 지하수 함양량을 추정하였으며 하천의 보장유량을 제시하

였다. 또한 지하수 함양량과 강수량의 분석으로 강수량에 따른 지하수 함양량을 추정할 수 있으며, 유역별 “지하수함양 임계강수량”을 제시하였다. 추정된 지하수 함양량은 지하수개발량의 지표로 이용할 수 있으며, 보장유량은 수자원 관리, 및 할당문제에서 최소제약조건으로 이용할 수 있다.

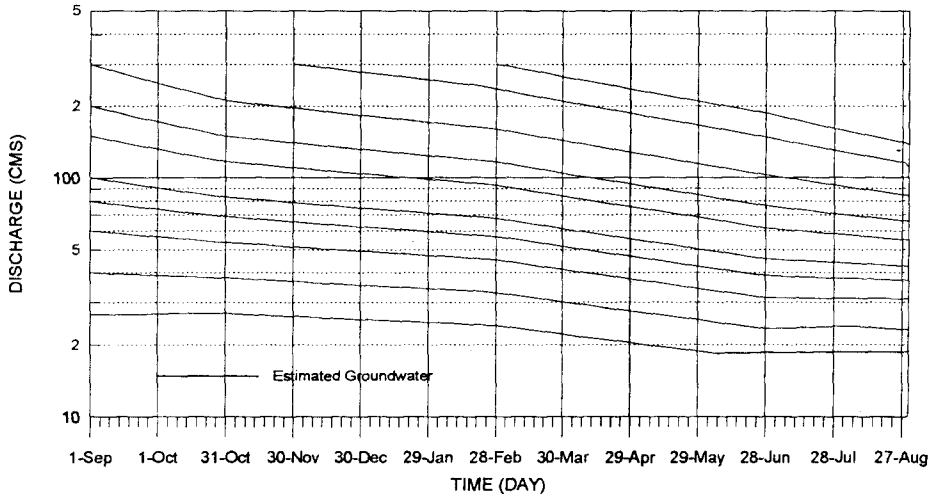


그림 3.2 고안지점의 연속 지하수 감수곡선

표 3.1 유역별 대수층의 최소 지하수공급량

(단 위 : cms)

고 안	청 평	여 주	충 주	진 동	현 풍	왜 관
18	12	12	4	11	9	7
낙 동	규 압	공 주	용 담	송 정	압 록	나 주
5	3	3	1.5	2.2	1.0	2.1

5. 참고 문헌

- 이동률, 1995, 지하수 감수곡선을 이용한 지하수 함양량 추정과 장기 갈수량예측, 공학박사학위 청구논문(초록), 고려대학교 토목환경공학과.
- 이동률, 윤용남, 1994, 강수량과 지하수 함양량 관계, 1994년도 학술발표회 논문집(II), 대한토목학회, 255-258.
- Barnes, B.S., 1939, The Structure of Discharge-Recession Curves, Trans. Am. Geophys. Union, 20, 721-725.
- Mayboom, P., 1961, Estimating Groundwater Recharge from Stream Hydrographs, Journal of Geophysical Research, 66(4), 1203-1214.
- Riggs, H.C., 1961, The Base-Flow Recession Curves as an Indicator of Groundwater, International Assoc. of Sci. Hydrology, Publ. No. 63, 352-363.