

多重減水 水文模型의 開發

김현준¹⁾, 정성원¹⁾, 김승²⁾

要 旨

일유출량을 모의하는 수문모형이 많이 개발되었지만 그 이용에 있어서는 입력자료와 매개변수가 다양하고 매개변수의 산정에 경험을 필요로 하는 경우가 많기 때문에 수문실무자들이 사용하기에는 다소 어려운 점이 있다. 본 연구에서는 최소의 입력자료(강우량, 증발량)와 매개변수로 일자연유량을 모의할 수 있는 집중형 확정론적 모형을 개발하였는데, 관측된 수문곡선으로부터 입력매개변수를 도출할 수 있으며 그 종류가 작기때문에 실무에서 쉽게 이용할 수 있도록 하였다.

개발된 모형의 기본 개념은 강우-유출에 질량불변의 법칙을 적용하고, 선형저수지와 유사한 다중 감수 과정에 따른 수문곡선에 근거한다. 제안된 수문곡선은 차단을 제외한 강우량에 기인한 유량의 시간분포를 나타내며 기저유출과 장래에 손실될 증발산량을 포함한다. 제안된 수문곡선은 2개의 상승부와 3개의 감수부로 구성되며 수문곡선의 우측부는 개방되어 있다. 수문곡선의 상승부에는 감수계수의 개념을 역으로 적용하였으며, 계산을 단순화 하기 위하여 각 상승부 및 감수부의 구간은 정수값만을 갖는다고 가정하였다.

개발된 모형을 한강유역의 인도교지점(1918-1974), 영산강유역의 나주지점(1906-1990)의 일유출량을 모의하기 위하여 적용하였다. 모형의 적용결과 모의 기간중에 매개변수의 조정없이 전 기간에 걸쳐서 양호한 장기간의 일유출량 모의 결과를 얻을 수 있었다.

1) 한국건설기술연구원 수자원연구실 연구원

2) 한국건설기술연구원 수자원연구실 수석연구원

1. 서론

수문모형이란 특정 유역에 내린 강수로부터 그 유역의 유출반응을 모의하는 것으로서 수문순환 자체를 단순하게 표현하거나 각 순환성분을 간략화하여 나타내는 방법이다. 그런데, 지상에 내린 강수의 수문순환과정을 그대로 모형으로 만드는 것은 수문순환 자체가 매우 복잡한 여러가지 성분으로 구성되어 있기 때문에 거의 불가능하며 이러한 점이 모형의 개발과 적용에 제약을 주게 된다. 적절히 개발되고 검증된 수문모형은 우량으로부터 유량자료를 모의 발생하고 수문학적 설계에 응용되며, 현재 유역의 수분저류상태로부터 앞으로의 유역의 유출을 예상할 수 있으므로 수문시스템의 운영 및 유역의 물관리에도 도움이 될 수 있다.

기 개발된 여러 수문모형은 다양한 수문순환 성분을 포함하고 있으며 많은 매개변수와 초기 입력자료들을 필요로 하기 때문에 실무에서 보다 간편하게 이용하기 위해서는 간략화된 모형이 필요하다. 이러한 목적으로 전체적인 수문순환중에서 물리적인 이해를 바탕으로 각 성분을 자세히 구하기 보다는 개략화된 상수 등으로 처리하는 단순 수문모형을 구성하기로 하였다.

2. 모형의 개발

2.1 모형의 구조

제시하는 수문모형의 기본적인 개념은 유출량과 증발산량의 합이 강수량과 같고, 선형저수지와 유사한 다중감수과정에 따른 수문곡선에 근거한다.

모형의 주요성분과 계산의 흐름은 그림 1에 제시되어 있다. 이 모형은 감수과정을 3단계로 보았는데, 차단을 거친 강우는 우선 첫번째 감수과정으로 들어가며 이 과정이 끝나면 둘째, 셋째로 이어진다. 증발산은 차단량에서 우선적으로 배출되며, 차단량이 부족할 때는 제3감수의 저류량에서 배출된다. 후자에서 배출될 때는 이를 음의 감수로서 간주하여 배출되도록 하되 감수의 정도는 제3감수와 같다고 가정한다.

2.2 비선형 수문곡선의 제안

독립호우사상으로 인한 총 하천유량의 시간적 분포를 표시하는 수문곡선은 상승부, 첨두부, 그리고 하강부 또는 감수곡선을 나타낸다.

그림 2와 같이 본 연구에서 제안하는 수문곡선은 2개의 상승구간과 3개의 감수구간으로 구성되며, 각 구간은 상승계수 또는 감수계수(k_0, k_1, k_2, k_3, k_4)와 같은 계수가 지속되는 구간의 길이(u, v, w, x)로 표시된다.

본 연구에서 제안하는 독립호우에 기인한 단위수문곡선은 앞서 기술한 전통적인 수문곡선의 가정과 거의 일치하나 다음과 같은 특징을 들 수 있다.

- 1) 제안하는 수문곡선은 단위시간의 실제 유효우량에 의한 유량의 시간분포를 나타낸다.
- 2) 제안하는 수문곡선은 강우에 의한 유출의 총합을 나타낸다.

- 3) 제안하는 수문곡선을 나타내는 감수계수는 유역의 상태와 입력치의 크기에 따라 변하며 중첩의 원리가 적용될 수 있다.
- 4) 수문곡선의 상승부도 감수계수의 개념을 적용하되 2개의 구간을 둔다.
- 5) 수문곡선의 구간은 분리된 계산을 할 수 있도록 정수값을 갖는다고 가정한다.

2.3 수문곡선의 환산

그림 3에서 첨두유량을 갖는 단위기간 동안의 유출 요소를 $q_{n,m}$ 으로 나타낸다. 여기에서 n 은 입력이 발생한 시간을 나타내고 m 은 유출이 발생한 시간을 나타낸다. 첨두값은 입력(I_n)이 발생한 후 $u+v$ 간격만큼 나중에 발생하므로 $m=n+u+v$ 라고 할 수 있으며, 총입력과 수문곡선의 합이 같다고 가정하고 이를 식으로 나타내면, 다음과 같다.

$$I_n = \sum_{j=0}^{\infty} q_{n,n+j} \quad \text{-----} \quad (2.1)$$

식 (2.1)을 그림 3에 나타낸 것처럼 수문곡선의 상승부에서 하강부까지 상승 또는 감수 특성이 계속되는 구간동안 발생하는 유출요소의 합을 C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 라 하고, 각각을 감수계수와 구간간격으로써 유도하면 다음과 같다.

$$I_n = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 \quad \text{-----} \quad (2.2)$$

입력(I_n)과 첨두유출요소($q_{n,m}$)의 관계로 부터 식(2.2)를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I_n = q_{n,m} (G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5) \quad \text{-----} \quad (2.3)$$

만일, $\lambda_n = (G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5)^{-1} \quad \text{-----} \quad (2.4)$

따라서, $q_{n,m} = \lambda_n I_n \quad \text{-----} \quad (2.5)$

2.5 수문곡선의 중첩

어떤 지점의 유량은 과거 입력치에 기인하는 유출요소중 그 시점에 해당된 것들을 합한 것이라고 할 수 있다. 그림4에 나타낸 것처럼 입력(I_{n-2}, I_{n-1}, I_n)은 수문곡선(q_{n-2}, q_{n-1}, q_n)을 각각 유발하고, 시점 n 의 유량은 과거 수문곡선을 중첩하고 그 중에서 시점 n 에 해당된 면적과 같다.

그림 4는 시간 n 에 있어서 I_{n-2}, I_{n-1}, I_n 에 기인한 수문곡선의 중첩을 도시적으로 나타낸 것이다. 수문곡선은 2개의 단위간격을 가진 1개의 상승부와 각각 1개의 단위간격을 가진 제1, 제2 감수구간 그리고 제3감수구간으로 구성되어 있다. 점선으로 둘러 싸인 면적은 시점 n 의 유량(Q_n)을 나타내는데, 그 중에서 점으로 나타낸 것은 수문곡선 상승부에서 기여된 것을, 빗금으로 나타낸 것은 제1감수부에서 기여된 것을, 그리고 까맣게 칠한 부분은 제3감수부에서 기여된 것을 나타낸다. 여기에서는 입력이 q_{n-2} 까지 밖에 없으므로 제2감수부로부터 기여된 유출은 없다.

유량을 계산하기 위하여 그림 4에 표시된 것처럼 가장 최근 입력된 유출요소부터 추적하여 더하되 이를 기여된 수문곡선 구간별로 구분하면 다음과 같다.

$$Q_n = \sum_{j=0}^{\infty} q_{n-j,n} \text{ ----- (2.6)}$$

$$= \sum_{j=0}^{u-1} q_{n-j,n} + \sum_{j=u}^{u+v-1} q_{n-j,n} + \sum_{j=u+v}^{u+v+w-1} q_{n-j,n} + \sum_{j=u+v+w}^{u+v+w+x-1} q_{n-j,n} + \sum_{j=u+v+w+x}^{\infty} q_{n-j,n} \text{ --- (2.7)}$$

위식에 따라 시점 n의 유출을 계산할 수 있는데 제1상승부, 제2상승부 그리고 제1감수부에 기여된 유출을 Q1_n, 제2감수부에서 기여된 유출을 Q2_n, 제 3감수부에서 기여된 유출을 Q3_n이라 하면 다음 식들이 성립된다.

$$Q1_n = D_1 + D_2 + D_3 \text{ ----- (2.8)}$$

$$Q2_n = D_4 \text{ ----- (2.9)}$$

$$Q3_n = D_5 \text{ ----- (2.10)}$$

그런데, 위 식중 제3감수부에서 기여되는 Q3_n은 무한항으로 구성되어 있기 때문에 직접 계산할 수 없다. 만일, Q3_n을 첫번째 항(Q3f_n)과 나머지항(Q3r_n)으로 분리하여 나타내면, 다음과 같다.

$$Q3_n = Q3f_n + Q3r_n \text{ ----- (2.11)}$$

$$Q3f_n = \lambda_{n-p} I_{n-p} k2_{n-p}^w k3_{n-p}^x \text{ ----- (2.12)}$$

$$Q3r_n = \sum_{j=p+1}^{\infty} \lambda_{n-j} I_{n-j} k2_{n-j}^w k3_{n-j}^x k4_{n-j}^{j-p} \text{ ----- (2.13)}$$

여기서, $p = u + v + w + x$

식(2.13)의 Q3r_n을 Q3_{n-1}에서 제3감수계수(k4_{n-1})로 감소된 값이라고 가정한다면 Q3_n을 근사하게 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$Q3r_n = Q3_{n-1} k4_{n-1} \text{ ----- (2.14)}$$

2.6 증발산의 배출

증발산은 지표면에서 뿐만아니라 지표하에서도 식생의 뿌리와 줄기를 통하여 대기중으로 배출되므로 앞에서 계산한 Q1_n, Q2_n, Q3_n도 과거부터 n 시점까지 발생한 증발산의 영향을 고려하여 조정해야 한다. 증발산의 유출에 대한 영향은 실제 증발산을 산정하여 우선 차단량으로 배출시키고 차단량으로 배출하지 못한 나머지는 강수와는 반대로, 즉 음의 유출로 해석함으로써 유출을 감소시켜 고려할 수 있다. 수문곡선의 경우와 같이 감수계수를 적용한다면 배출되지 못한 나머지 증발산량은 이로 인한 유출감소의 합과 같아야 한다.

$$ETr_n = \sum_{j=0}^{\infty} e_{n,n+j} \text{ ----- (2.15)}$$

여기에서, ETr_n = 시점 n의 증발산 중 지표 차단으로써 배출되지 못한 나머지

$e_{n,n+j}$ = ETr_n에 기인하고 n+j 시점에 발생한 유출감소성분

그런데 증발산의 유출에 대한 영향은 지표와 식생을 통하여 느리게 장기간 동안 나타나므로 유출감소성분 $e_{n,n+j}$ 가 수문곡선의 제3감수부에서와 같이 감수계수(k4_n)에 따라 감소된다고 가정하

면 ETr_n 은 다음식으로 표시된다.

$$ETr_n = \sum_{j=0}^{\infty} e_{n,n} k4_n^j$$

$$= \frac{e_{n,n}}{1 - k4_n} \quad \text{-----} \quad (2.16)$$

따라서, $e_{n,n} = (1-k4_n) ETr_n$ ----- (2.17)

그러므로, ETr_n 으로 인하여 감소되어야 할 유출은 식 (2.17)로 계산할 수 있으며 총유량은 다음식으로 표시된다.

$$Q_n = Q1_n + Q2_n + Q3_n - (1-k4_n) ETr_n \quad \text{-----} \quad (2.18)$$

3. 모형의 운영

3.1 입력

유역의 자연유량을 모의하기 위해서는 유역의 평균우량과 유역증발산량을 추정하기 위한 자료가 필요하다. 또한 실측된 유량자료가 있다면 모의된 계산유량과 모의 결과의 정도를 통계적 또는 다른 방법으로 비교할 수 있도록 실측유량자료가 기본입력자료에 포함될 수 있다.

입력 매개변수는 수문곡선 상승부 및 감수부의 시간 간격과 감수계수 및 유역의 최대차단저류량, 초기차단저류량, 초기유출량과 계기증발량을 실제증발산량으로 바꾸기 위한 계수 등이 있다. 한편, 증발산량의 개략적인 추정은 대형계기 증발량(U.S. Weather Bureau Class A pan)의 값을 이용하는 방법이 실용적이라고 알려졌으며 많은 수문모형들에서 증발산량의 추정을 간략하게 처리하고 있다.

3.2 출력

모형의 계산은 단위 시간(여기서는 하루)별로 시행되며 단위 시간의 강수량, 계기증발량 및 실측유량을 자료 파일로부터 읽은 후 유출량을 계산하고 다음 단위시간으로 반복되어 진행된다. 모형의 계산 결과는 각 계산 시점에서의 차단저류량, 증발산량, 유출에 기여하는 강수량, 차단저류량에서 증발산에 이용되지 못한 증발산 소요량 및 제1감수부, 제2감수부, 제3감수부에서 각기 유출되는 유출량 등이다.

4. 모형의 모의 결과

4.1 한강유역 인도교 지점

서울측후소의 강우 관측 기록은 1950~1953년 동안 결측이다. 따라서 이 기간을 분기점으로 하여 1919~1949년과 1954~1974년의 두 기간으로 구분하여 모형을 적용하였다. 초기에 설정된

각 매개변수 값을 모의 중간에 변화시키지 않고 20~30년 동안 동일하게 유지하며 일별 자연유량을 모의하였다. 결측치가 있는 기간을 제외한 32년간의 평균값은 강수량이 1,410.6mm, 증발산량은 666.4mm, 실측유출량은 748.4mm, 계산유출량은 748.6mm 의 결과를 보이고 있다. 또한 수위가 결측된 기간을 포함한 전 기간의 평균값은 강수량 1,356.7mm, 증발산량 683.8mm, 계산유출량 704.4mm 로써 강수량과 계산값의 차이는 -31.5mm 이다.

4.2 영산강유역 나주 지점

광주측후소의 강우 관측 기록은 1940년부터 이용할 수 있으며 1906년부터 1939년까지의 강우기록은 목포측후소의 자료를 이용하도록 하였다. 초기에 설정된 각 매개변수 값을 모의 중간에 변화시키지 않고 85년 동안 동일한 값을 사용하였다. 결측치가 있는 기간을 제외한 59년간의 평균값은 강수량이 1,241.9mm, 증발산량은 544.6mm, 실측유출량은 680.8mm, 계산유출량은 691.1mm 의 결과를 보이고 있다. 또한 수위가 결측된 기간을 포함한 전 기간의 평균값은 강수량 1,203.5mm, 증발산량 549.9mm, 계산유출량 654.6mm 로써 강수량과 계산값의 차이는 -1.0mm 이다.

5. 요약

효율적인 유역물관리 시스템의 기본이 되고 실무에서 쉽게 이용할 수 있는 장기수문모형의 개발을 목표로 본 연구가 수행되었으며 연구 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 강우-유출에 질량불변의 원칙을 적용하여 최소한의 입력과 매개변수로 실무에서 쉽게 이용할 수 있는 다중 감수 수문모형을 개발하였다.
- (2) 개발된 모형을 인도교 지점과 나주 지점에 적용하여 양호한 장기간 일유출량 모의결과를 얻을수 있었다.
- (3) 실측치와 모의결과의 차이는 지점강수의 적용과 선형적인 감수계수의 가정에 기인한다.

< 참고 문헌 >

1. Barnes, B. S.(1939), The Structure of Discharge-Recession Curves, Transactions of the American Geophysical Union 20(Part IV), pp. 721-725.
2. Crawford, N. H. and R. K. Linsley(1966), Digital Simulation in Hydrology:Stanford Watershed Model IV, Technical Report No. 39, Department of Civil Engineering, Standford University, Standford, California, p. 210.
3. Goodrich, D. C. and D. A. Woolhiser(1991), Catchment Hydrology, U.S. National Report to International Union of Geodesy and Geophysics 1987-1990, pp. 202-209.
4. Singh, V. P.(1989), Hydrologic Systems : Watershed Modeling Volume 2, Prentice Hall, pp. 246-254.

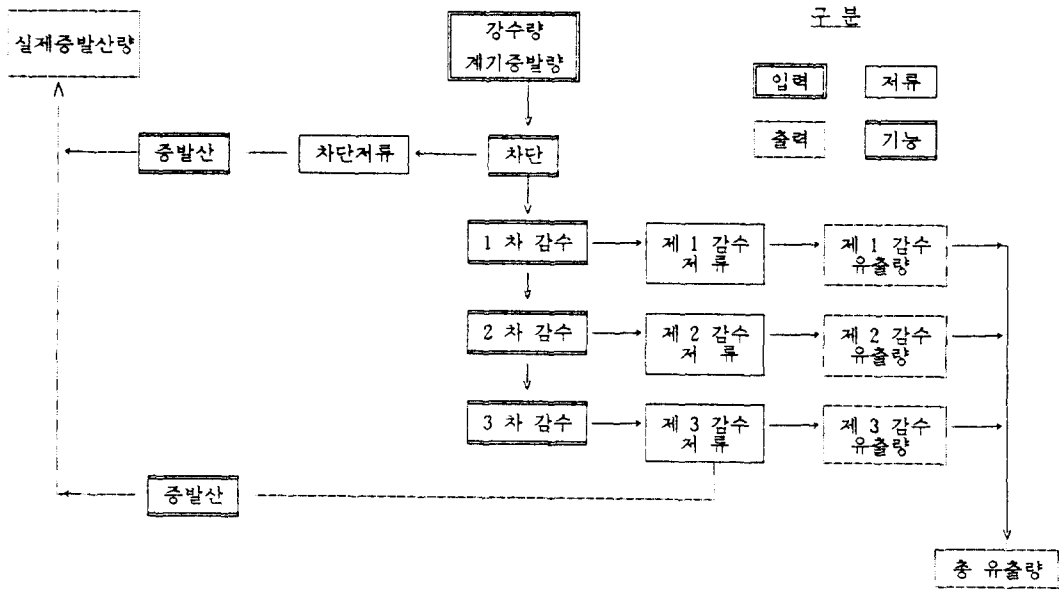


그림 1 모형의 흐름도

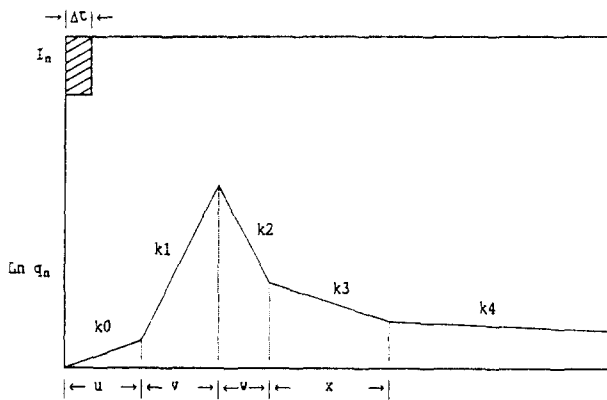


그림 2 제한된 비선형 수분곡선

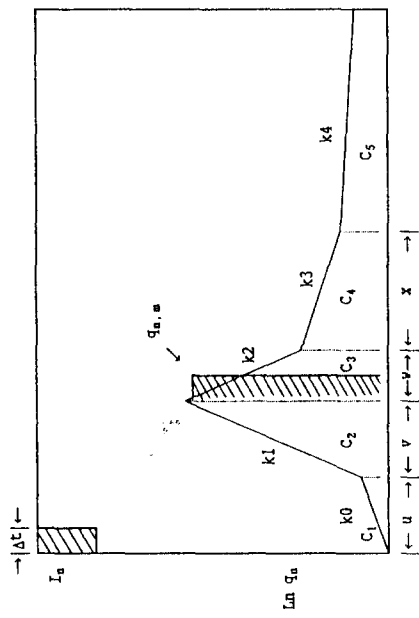


그림 3 각 구간별 유출요소의 합과 점두유출요소

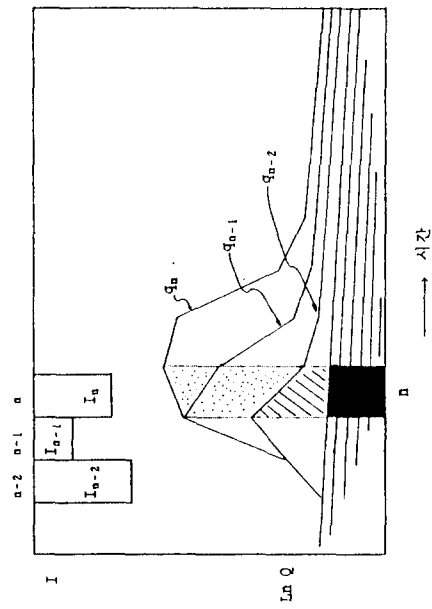


그림 4 시간 n에 있어서 I_n , I_{n-1} 에 기인한 수문곡선의 중첩

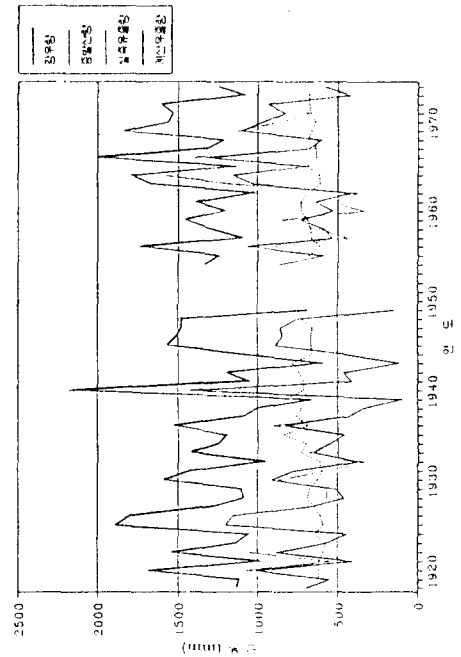


그림 5 인도교 지점의 전 기간 모의 결과

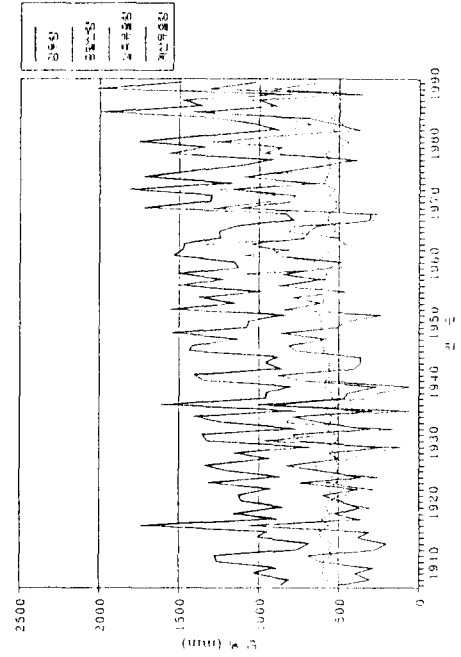


그림 6 나주 지점의 전 기간 모의 결과