

# 실시간 저류함수모형

## Real-Time Storage Function Model

○배덕효\*, 이홍래\*\*, 김양수\*\*

### 1. 서론

어떤 수공학적 현상을 규명하거나 실무에 응용하기 위하여 모형을 사용하고자 할 때에는 사용 목적에 따라 모형의 선정 기준이 달라지지만 일반적으로 모형의 정확성, 간결성 및 입력자료의 가용성 등이 중요한 기준이 된다. 홍수예측모형은 이와 같은 기준 이외에도 홍수시 급변하는 하천 유량에 영향을 미칠 수 있는 모든 기상학적, 수문학적 변동 상황에 따라 즉각 대처할 수 있는 실시간 예측모형이 중요한 기준이 된다. 이상적인 실시간 홍수예측 시스템은 실시간으로 관측되는 수문·기상자료의 관측 시스템과 홍수량 예측모형 시스템이 적절한 조화를 이룰 때 가능한 것으로 알려져 있다(Georgakakos and Bras, 1982; Bae et. al., 1995).

본 연구에서는 실시간 홍수추적이 가능하도록 저류함수모형을 상태·공간 형태의 모형으로 개선키고자 한다.

### 2. 추계학적 상태·공간 형태의 저류함수모형

현재 국내의 홍수예경보에서는 5대강 유역을 중심으로 주요 지점에 무인방식의 수위 및 우량 관측소로부터 Telemeter에 의해 매 시간별 수위와 우량을 자동관측하고 있다. 한편 하천 유출량을 계산하기 위해서는 1961년 Kimura에 의해 제안된 유역과 하도에 각각 적용할 수 있는 저류함수 모형이 이용되고 있다. 이 방법은 주로 일본에서 널리 사용되어 왔으며, 국내의 수문 및 기상자료의 부족으로 매개변수 산정에 다소 문제가 있으나 계산 절차가 간편하고 홍수 유출의 비선형성을 고려할 수 있다는 점에서 채택·운영되고 있으며 소유역의 유출량 계산을 위한 기본 개념은 다음과 같다.

$$\frac{ds(t+T_l)}{dt} = r_{ave}(t) - q(t+T_l) \quad (1)$$

$$s(t) = k q(t)^b \quad (2)$$

\* 창원대학교 토목공학과, 조교수

\*\* 한국건설기술연구원, 선임연구원

여기서,  $s(t)$ 는 시간  $t$ 에서의 유역의 단위저류고(mm),  $q(t)$ 는 단위유출고(mm/hr),  $k$ 와  $p$ 는 저류상수를 나타낸다.  $r_{ave}(t)$ 는 시간  $t$ 에서 유역의 평균강우량으로부터 계산되는 단위유입량(mm/hr)으로서 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$r_{ave}(t) = \begin{cases} f_1 r_{ave}(t) & \Sigma r_{ave} < R_{sa} \\ r_{ave}(t) & \Sigma r_{ave} \geq R_{sa} \end{cases} \quad (3)$$

여기서  $\Sigma r_{ave}(t)$ 는 계산의 시작점에서 시간  $t$ 까지의 누가우량,  $f_1$ 은 초기 유출율,  $R_{sa}$ 는 포화 누가우량을 나타낸다. 식(1), (2), (3)에서와 같이 이 모형에는  $k$ ,  $p$ ,  $T_1$ ,  $f_1$ ,  $R_{sa}$  5개의 매개변수가 있으며, 이들은 과거의 우량 및 유량 자료로부터 추정된다.

식(1)로 표현되는 저류함수모형은 다음 식(4), (5)와 같은 모형과 관측 시스템의 오차를 고려할 수 있는 상태·공간 형태(state-space form)의 추계학적 모형으로 표현될 수 있다.

$$\frac{dq(t+T_1)}{dt} = \frac{1}{k p q(t+T_1)^{p-1}} (r_{ave}(t) - q(t+T_1)) + w(t+T_1) \quad (4)$$

$$z_k = h_k(q_k) + v_k \quad (5)$$

여기서  $w(t)$ 는 모형의 불완전성, 입력자료의 부정확성, 매개변수 산정치의 오차 등으로 인한 모형의 불확실성을 나타내는 항이다. 또한 관측치의 오차를 나타내는 항을  $v_k$ 로 표현할 때 이는 일반적으로  $w(t)$ 와 상호 독립적이고 평균이 0인 백색잡음 과정으로 가정된다.

식(4)와 식(5)로 구성된 상태·공간 형태의 추계학적 시스템은 시간이 경과함에 따라 상태변량의 평균(state mean)과 공분산(covariance)의 예측단계(prediction step)와 갱신단계(updating step)의 순환과정을 거친다.

예측단계는 현재의 시간  $t$ 에서 다음 시간  $t+1$  시점에 대한 상태변량의 값  $\hat{q}(t+1)$ 과 오  $P(t+1)$ 을 예측하는 단계로서 다음 식 (6)과 식(7)로 표현된다.

$$\frac{d\hat{q}(t+1)}{dt} = \frac{1}{k p \hat{q}(t+1)^{p-1}} (r_{ave}(t+1-T_1) - \hat{q}(t+1)) \quad (6)$$

$$\frac{dP(t+1)}{dt} = \frac{2}{k p} \{ (1-p) r_{ave}(t+1-T_1) q^{-p} - (2-p) q^{1-p} \} P(t+1) + Q(t+1) \quad (7)$$

갱신단계는 현재의 시점  $t$ 에서 시간이 경과하여  $t+1$  시점이 되었을 때 관측 시스템으로부터 입수한 관측치와 예측단계에서 구한 예측치로부터 상태변량의 최적추정을 하는 단계로서 다음 식과 같이 표현된다.

$$\hat{q}_k(+)= \hat{q}_k(-) + K_k [z_k - h_k(\hat{q}_k(-))] \quad (8)$$

$$P_k(+) = [I - K_k H_k(\hat{q}_k(-))]P_k(-) \quad (9)$$

$$\text{where, } K_k = \frac{P_k(-)}{P_k(-) + R_k}$$

여기서,  $Q(t)$ 와  $R_k$ 는 각각 모형과 관측 시스템의 불확실성을 나타내는  $w(t)$ 와  $v(t)$ 의 분산을 나타내며,  $K_k$ 는 Kalman Gain이다.

### 3. 실시간 예측 모형

일반적으로 강우-유출 모형은 적어도 다음과 같은 두가지 관점에서 그 중요성을 갖는다. 하나는 여러 가지 수리·수문학적 요소의 영향을 받는 유출현상을 수식화하여 해석하므로써 유출현상을 보다 잘 이해할 수 있다는 점이고, 또 다른 하나는 강우-유출 모형을 이용하여 미래에 나타날 유출현상을 보다 잘 예측할 수 있다는 것이다. 강수에 의한 하천 유출현상을 수식적으로 표현한 강우-유출 모형은 모형의 간략화에서 야기되는 모형의 불확실성의 고려 유무에 따라 확정론적 모형(식 1)과 추계학적 모형(식 4)으로 구별할 수 있다. 실시간 예보 모형은 매 시간별 관측되는 강우량 및 유출량의 실시간 자료를 이들 모형 시스템에 이용하여 현재의 시점에서 향후에 예상되는 유출량을 보다 정확히 예측할 수 있는 시스템을 말한다.

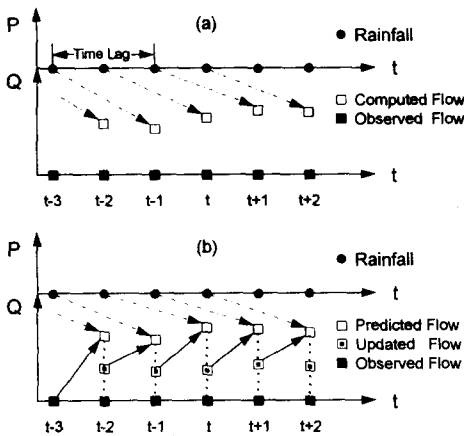


그림 1. 모형 개념도

그림 1(a)에서와 같이 식(1)에서 식(3)으로 구성된 기존의 저류함수 모형의 경우 시간  $t$ 에서의 계산 유량은 시간  $t-T_1$ 의 관측 강우량을 입력치로 하고 시간  $t-1$ 에서의 계산 유량을 초기치로 하여 계산된다. 이 경우 시간  $t$ 에서의 관측 유량은 단지 모형 계산 결과의 정확도 판단에 이용될 뿐이다. 이에 비해 그림 1(b)와 같이 식(4)와 식(5)로 표현되는 상태·공간 형태의 추계학적 모형은 현재의 시점  $t$ 에서 시간  $t+1-T_1$ 에서의 관측 강우량을 이용하여 시간  $t+1$ 의 유량을 예측한다. 그 후 시간이 경과하여 시간  $t+1$ 의 시점이 되었을 때에는 시간  $t+1$  시점에 대한 하천 유량이 관측되므로 이와같은 관측 유량과 시간  $t$  시점에서

예측한 시간  $t+1$ 의 예측 유량사이에 최적 추정치의 단계를 거치게 된다. 이들 두 모형 시스템의 가장 큰 차이점은 그림 1(a)와 같은 기존의 모형 시스템은 단지 실시간으로 관측되는 강우량만을 이용하여 시간  $t+1-T_1$ 의 계산 유량을 초기치로하여 시간  $t+1$ 의 유량을 계산하기 때문에 계산 유량의 오차가 계속 누적되지만, 그림 1(b)와 같은 시스템은 시간  $t+1$  시점의 유량을 예측하기 전에 현 시간에서의 관측 유량과 계산 유량 사이에 최적 추정을 하기 때문에 예측 유량의 오차가 누적되지 않는다는 점이다. 즉 전자의 경우는 단지 관측 강우량만을 이용하여 하천 유량을 모의하는데

비해 후자는 현재의 관측 강수량과 관측 유량  $D$  를 이용하여 미래의 특정시간에 대한 하천유량을 예측하는 시스템이다.

#### 4. 모형의 적용

본 연구의 적용대상 지역은 그림 2와 같이 방림을 유역출구로 하는 평창강 IHP 유역이다. 평창강은 남한강의 한 지류로서 유역면적은  $528 \text{ km}^2$  이고 표고의 범위는 290-1,577 m이다. 대부분의 지형은 침엽수와 낙엽수의 산악지형으로 태백산맥이 그 주류를 이루고 있으며 일부는 전답으로 이용되고 있다(그림 2).

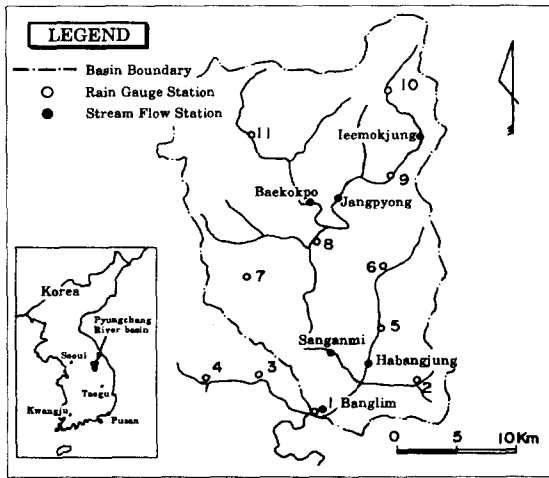


그림 2. 평창강 IHP 유역도

본 연구대상 지역에는 IHP 사업의 일환으로 11개의 강우 관측소와 6개의 수위 관측소가 설치되어 1981년 10월부터 운영되고 있다. 건설부에서 운영하고 있는 강수 관측소에서는 매년 4월부터 10월까지 자기기록기와 보통우량계를 이용하여 강수량을 측정하고, 동절기인 10월부터 다음해 3월까지의 보통우량계에 의해 일강수량만을 측정하고 있다(윤석영 등, 1991). 이 유역의 수문 및 기상 특성을 파악하기 위해 1983년부터 10년간의 일기상 및 수문자료를 사용하였다. 이 기간 동안의 연평균 강수량은 1,380mm로서 우리나라

연평균 강수량보다 다소 크며, 일평균 최대 및 최소 온도는 각각  $11.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $1.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 나타났다. 또한 하천유량과 강수량의 비를 나타내는 연평균 유출계수는 0.71로 나타났다.

본 연구에서는 실시간 저류함수 모형의 가용성을 파악하기 위해 1983년에서 1988년 동안에 발생한 8개의 대표적인 홍수사상을 선택하였다. 이들 중에서 1983년에서 1987년까지의 6개의 홍수사상을 이용하여 저류함수모형의 매개변수( $k$ ,  $p$ ,  $T_1$ ,  $f_1$ ,  $R_{sa}$ )를 산정하였으며, 1988년에 발생한 2개의 홍수사상은 실시간 모형의 가용성 파악에 이용하였다. 저류함수모형의 매개변수 추정치는 기존의 연구(예, 윤용남, 1996; 이홍래와 김형섭, 1993; Cho et. al., 1995)와 동일한 방법으로 추정하였으며 추정된 값은 표 1과 같다. 이때 이용된 유역 평균 강수량은 그림 2에서 보는 바와 같이 유역 내에 존재하는 11개의 점강우 관측지점의 값을 산술 평균하여 구하였다. 표 1에서 알 수 있는 바와 같이 최적 추정된 매개변수 값은 홍수사상별로 각각 다른 값을 가지고 있으며 그 변화폭도 많은 편차를 나타냄을 알 수 있다. 예를 들어 유역의 지체시간을 나타내는  $T_1$ 의 경우 선택된 6개의 홍수사상에 대해서 2~5 시간을 나타냈으며, 이들 값은 각 홍수사상의 침투유량과 상관성이 희박한 것으로 나타났다. 이와같이 저류함수모형의 매개변수 값은 홍수사상마다 서로 달라 유역 고유의 매개변수를 산정하는데 많은 어려움이 있다.

표 1. 선택된 홍수사상에 대한 저류함수 모형의 매개변수 추정치

번호	호우기간	총강우량 (mm)	첨두유량 (cms)	유역 매개변수				
				K	p	T <sub>1</sub>	f <sub>1</sub>	R <sub>sa</sub>
1	83.08.07 83.08.14	53.50	82.50	19.921	0.796	5	0.033	34.392
2	84.07.02 84.07.06	194.30	783.90	35.824	0.540	2	0.039	67.599
3	85.08.14 85.08.17	84.30	94.20	13.026	0.388	3	0.015	65.154
4	86.07.16 86.07.24	195.90	1190.90	14.068	0.752	5	0.054	54.387
5	87.07.21 87.07.25	262.60	1847.70	17.315	0.685	3	0.085	64.984
6	87.07.26 87.08.01	96.60	338.10	38.351	0.260	3	0.039	22.195
평균				23.084	0.570	3	0.044	51.452

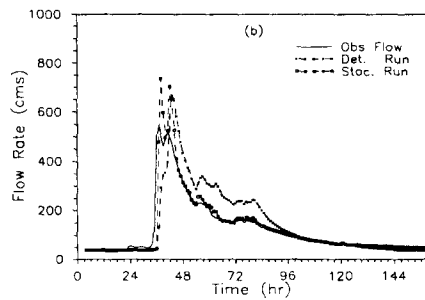
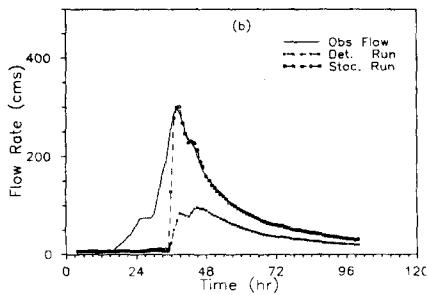
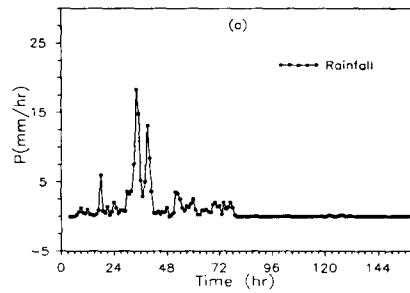
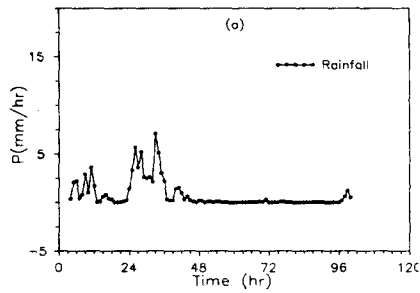


그림 3. 계산 결과의 비교, 1988a 홍수

그림 4. 모형 결과의 비교, 1988b 홍수

본 연구에서는 표 1에 나타난 6개의 홍수사상으로부터 추정된 매개변수 값이 이 유역을 대표할 수 있는 최적 매개변수로 볼 수는 없으므로 이들을 평균한 값을 매개변수의 nominal value로 간주하여 매개변수 추정에 이용하지 않았던 나머지 두 홍수사상에 대해서 실시간 모형의 적용성을 검토하였다(그림 3과 4). 그림 3은 1988년 7월 8일에서 12일 사이에 발생한 사상에 대한 유역 평균강우량(그림 3(a)), 관측 유량 및 모형의 계산 유량(그림 3(b))를 나타낸다. 여기서 범례의 Det. Run은 매개변수를 nominal value로 고정한 상태에서 기존의 저류함수 모형(식 1)에 의해서 계산된 유량을 나타내며, 범례의 Stoc. Run은 상태·공간 형태의 추계학적 모형(식 5)의 예측단계에서 예측된 유량을 나타낸다. 그림 4는 1988년 7월 12에서 19일 사이에 발생한 홍수 사상에 대해서 그림 3과 같이 관측 강우량, 관측 유량 및 모형의 계산 결과를 나타낸다. 그림 3과 그림 4에서 알 수 있는 바와 같이 기존의 저류함수 모형의 결과보다는 본 연구의 상태·공간 형태의 저류함수 모형의 결과가 실시간 홍수예측에는 보다 향상됨을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 현재 국내 홍수예경보에 사용되고 있는 저류함수모형을 실시간 홍수예경보에 보다 적합하도록 모형을 개선하였다. 일반적으로 실시간 홍수예경보에서 가장 문제가 되는 것은 강우-유출 모형의 입력치로 요구되는 미래에 발생할 예측 강우량이 부정확하다는 것이다. 그러나 저류함수모형의 경우 모형 구조가 유역의 지체시간을 고려할 수 있는 매개변수  $T_1$ 를 가지고 있기 때문에 현재 시간  $t$ 의 관측 강우량을 이용하여 미래의 시간  $t+T_1$  시점까지는 별도의 예측 강우량 없이 유량 예측이 가능하다는 것이다. 이는 기존에 저류함수 모형의 장점으로 알려진 모형의 간편성, 유출의 비선형성 고려 이외에도 실시간 홍수예보 모형으로서 매우 중요한 장점이 될 수 있다.

## 6. 참고문헌

- 윤석영, 김 승, 김규호 (1991). "평창강유역의 수문특성조사", 연구보고서, 건기연 91-WR-111, 한국건설기술연구원.
- 윤용남 (1996). "공업수문학", 청문각.
- 이홍래, 김형섭 (1993). "수문모형 평가에 관한 연구, -강우-유출모형을 중심으로-", 연구보고서, 건기연 92-WR-111-2, 한국건설기술연구원.
- Bae, D.-H., Georgakakos, K.P., and Nanda, S.K. (1995) "Operational Forecasting With Real-Time Databases", *J. of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 121, No. 1*, pp. 49-60.
- Cho, W.C., Bae, D.-H., and Seo, K.W. (1995) "A Comparison of Flood Forecasting Systems in South Korea and USA", *Proceedings of International Joint Seminar on Reduction of Natural and Environmental Disasters in Water Environment*, Seoul National Univ., pp. 45-54.
- Georgakakos, K.P., and Bras, R.L. (1982) "A Precipitation Model and Its Use in Real-Time River Flow Forecasting", *Rep. No. 286*, Ralph M. Parsons Lab., Dept. of Civil Engrg., MIT.