

저류함수법에 의한 추계동역학적 하도홍수추적모형의 개발

Development of Stochastic-Dynamic Channel Routing Model by Storage Function Method

배 덕 효* / 정 일 문**
Bae, Deg-Hyo / Chung, Il Moon

Abstract

The objectives of this study are to develop a state-space form of stochastic dynamic storage function routing model and to test the model performance for real-time flow forecast. The selected study area is the main Han River starting from Paldang Dam site to Indogyo station and the 13 flood events occurred from 1987 to 1998 are selected for computing model parameters and testing the model performance. It was shown that the optimal model parameters are quite different depending on flood events, but the values used on field work also give reasonable results in this study area. It is also obvious that the model performance from the stochastic-dynamic model developed in this study gives more accurate and reliable results than that from the existing deterministic model. Analysis for allowable forecast lead time leads that under the current time step the reasonable predicted downstream flows in 5 hours time advance are obtained from the stochastic dynamic model on relatively less lateral inflow event in the study area.

Keywords : storage function method, stochastic dynamic model, channel routing model, Kalman filter, Han River

요 지

본 연구의 목적은 추계동역학적 상태·공간형태의 하도 저류함수모형을 개발하고 실시간 홍수예보를 위한 모형의 적용성을 검토하는데 있다. 팔당댐에서 인도교 지점에 이르는 하도구간을 개발된 모형의 적용 대상구간으로 설정하였으며, 1987~1998년에 발생한 13개의 홍수사상을 선택하여 모형 매개변수 산정 및 적용성을 검토하였다. 그 결과 최적 매개변수는 각 홍수사상마다 다르지만, 현재 실무에서 사용하고 있는 매개변수를 사용한 유량예측은 비교적 합리적인 결과를 제시하였다. 또한 본 연구에서 개발한 추계동역학적 모형에 의한 유량예측 결과와 기존의 확정론적 모형에 의한 결과를 비교·검토한 결과 본 연구모형이 보다 정확한 결과를 제시하는 것으로 나타났다. 본 연구 대상지역의 예측가능시간을 분석한 결과 비교적 지류의 유입이 적은 홍수사상의 경우 5시간 정도까지는 정확한 하류단의 유량예측이 가능한 것으로 판단된다.

핵심용어 : 저류함수모형, 추계동역학적 모형, 하도홍수추적모형, 칼만필터, 한강

* 창원대학교 토목공학과 부교수

Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Changwon National University, Changwon 641-773, Korea

** SK건설 연구소 선임연구원

Senior Research Engineer, R&D Center, SK Engineering and Construction, Seoul 110-300, Korea

1. 서 론

우리나라 홍수예정보는 1974년 한강 홍수통제소가 개소된 이후 5대강 유역을 중심으로 운영되고 있으며, 홍수예보를 위한 모형으로는 저류함수모형이 사용되고 있다. 이 모형은 계산절차가 간편하고 홍수유출의 비선형성을 고려해 주는 방법이므로 선형모형보다는 합리적인 것으로 알려져 있어 유역 및 하도에 공히 사용되고 있다. 이와 같은 저류함수모형은 효율적인 홍수예보를 위해 초기 구축단계보다는 그 동안 많은 개선방안이 제시되어 왔고 이중 상당 부분이 실제로 채택되어 실무에 이용되고 있으나 지역화된 매개변수의 산정 문제, 현재 사용하고 있는 모형을 실시간 홍수예측모형으로 개선·발전시키는 문제 등이 여전히 요구되고 있는 실정이다.

일반적으로 개발된 모형의 적합성 여부는 모형의 간결성, 계산된 결과의 정확성 등에 달려 있지만, 홍수예보 모형은 이외에도 미래에 변화할 홍수량을 사전에 예측할 수 있는 실시간 모형 개념이 중요하다. 왜냐하면 홍수예보는 유역내 특정지점에서 발생될 홍수의 규모와 시간을 가능한 한 빠르고 정확하게 예측하여 홍수에 대비할 수 있도록 유관기관 및 지역주민에게 정보를 제공함으로써 홍수로부터 피해를 최소화하는 것이기 때문이다. 이와 같은 실시간 홍수예보 모형이 개발되기 시작한 것은 1970년대 이후이며, 추계동역학적 상태·공간 형태의 모형이 가장 보편 타당한 접근방법으로 알려져 있다(Wood와 O'Connell, 1985; Bras와 Rodriguez-Iturbe, 1985). 이와 같은 모형 개념은 실제 적용시 모형과 관측자료의 불확실성을 고려할 수 있을 뿐 아니라 확률론적인 홍수예측이 가능하다는 점에서 기존의 모형기법보다 적절한 것으로 알려져 있다. 상태·공간형태의 모형에 관한 국내 연구로는 박상우 등(1994), 이재형 등(1994), 정동국(1989), 조원철 등(1996), 배덕효(1997) 등의 연구가 있다. 이들 가운데 배덕효(1997)의 연구는 본 연구의 선행연구로써 국내 홍수예정보로 이용되고 있는 유역 저류함수모형을 상태·공간형태의 실시간 모형으로 개선·발전시켜 모형의 유용성을 향상시킨 것이다. 실제로 우리나라 5대강 유역과 같은 대유역에 적용할 수 있는 홍수예측모형의 개발은 유역내의 불균일성(강우의 공간분포, 식생조건, 토양조건 등), 모형의 최대 적용 가능면적의 제한성, 원하는 홍수예보 지점의 위치 등에 따라 여러 개의 소유역으로 나누고, 각 소유역에 적용할 수 있는 유역

홍수추적모형과 각 소유역을 연결하는 하도 홍수추적 모형 및 저수지 운영 프로그램의 연계운영 기법 등이 개발되어야 하는데 본 연구는 하도홍수추적과 관련된 연구이다.

본 연구에서는 국내 홍수예정보 모형의 일부로 사용되고 있는 하도 저류함수모형을 실시간 홍수추적에 적합하도록 Kalman filter 개념을 도입하여 추계동역학적 상태·공간형태의 하도 홍수추적모형으로 개선·발전시키고, 그 적용성 및 유용성을 검토하고자 한다.

2. 추계동역학적 하도저류함수모형

상류 한 지점에서의 수문곡선을 이용하여 하류의 일정 지점에서의 유량을 계산하는 하도 저류함수모형은 다음 식 (1)과 같은 연속방정식과 하도의 저류량과 유량의 관계를 나타내는 운동량 방정식에 근거하고 있다.

$$\frac{dS(t)}{dt} = \sum_{i=1}^n f_i I_i(t) - Q(t) \quad (1)$$

여기서 $S(t)$ 는 하도 구간내의 실저류량(m^3), f_i 는 평균유입계수, I_i 는 유역 및 지류역으로부터 하도로의 유입량 혹은 하도구간의 상류단에서의 유입량(m^3/sec). $Q(t)$ 는 하도구간 하류단에서의 유출량(m^3/sec)을 나타낸다. 식 (1)에서 유입량의 지체시간 T_i 를 고려하여 단위시간당 저류고 개념으로 나타내면 다음 식 (2)과 같고, 하도구간에서 저류량과 하류단 유량의 관계는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\frac{ds(t)}{dt} = \sum_{c=1}^n i_c(t - T_i) - q(t) \quad (2)$$

$$s(t) = Kq(t)^p \quad (3)$$

여기서 $s(t)$ 는 하도구간의 실저류량(mm)으로 $S(t)$ 를 유역면적 $A(km^2) \times 1000$ 으로 나눈 것이며, $i_c(\cdot)$ 는 지체시간을 고려한 상류단의 유입량(mm/hr), $q(t)$ 는 하류단의 유출량(mm/hr)를 나타낸다. $i_c(\cdot)$ 와 $q(t)$ 는 $I_i(\cdot)$ 및 $Q(t)$ 를 각각 $A/3.6$ 으로 나눈 것이다. K , p 및 T_i 은 모형의 매개변수이며, 이는 대상 구간내의 상류단과 하류단에서 동시 유량자료로부터 저류량과 유량의 일가함수 관계를 구축하여 직접 산정하는 방법과 하도특성 자료를 이용한

간접적인 산정 방법이 있다(윤용남, 1996).

한편 식 (2)의 연속 방정식을 하류단 유량 $q(t)$ 의 함수로 나타내기 위해 식 (3)를 식 (2)에 대입하여 정리하면 다음 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\frac{dq(t)}{dt} = \frac{\sum i_c(t-T_i) - q(t)}{k p q(t)^{p-1}} \quad (4)$$

$$\equiv g(t, q(t))$$

이와 같은 식의 하도 저류함수모형은 다음 식 (5), (6)과 같은 모형과 관측시스템의 불확실성을 고려한 상태·공간형태의 추계동역학적 하도 저류함수모형으로 표현이 가능하다.

$$\frac{dq(t)}{dt} = g(q(t), t) + w(t) \quad (5)$$

$$z_k = \xi_k(q_k) - v_k \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

여기서 $w(t)$ 는 모형의 불완전성, 입력자료의 부정확성, 매개변수 산정의 오차 등에 의해 야기되는 모형의 오차를 나타내는 항으로 통상 평균 0, 분산 $Q(t)$ 를 갖는 정규분포로 가정된다. z_k 는 상태변량 $q(t)$ 의 관측치를 나타내며, $\xi_k(\cdot)$ 는 모형의 상태변량과 시간 k 에서의 상태변량 관측치와의 관계를 나타내는 스칼라 함수이다. v_k 는 관측치의 오차를 나타내며, 이는 일반적으로 모형 오차를 나타내는 $w(t)$ 와 상호 독립적이고 평균 0, 분산 R_k 인 백색잡음(white noise) 과정으로 가정된다.

식 (5), (6)으로 구성된 상태·공간형태의 추계동역학적 시스템은 시간이 경과함에 따라 다음 식 (7)~(10)과 같이 상태변량 평균(state mean)과 공분산(covariance)의 예측-갱신 순환과정(prediction-updating cycle)을 거친다.

예측단계 :

$$\frac{d\hat{q}(t)}{dt} = \frac{\sum i_c(t-T_i) - \hat{q}(t)}{k p \hat{q}(t)^{p-1}} \quad (7)$$

$$\equiv g(\hat{q}(t), t)$$

$$\frac{dP_k(t)}{dt} = G(\hat{q}(t), t) P(t) + P(t) G^T(\hat{q}(t), t) + Q(t) \quad (8)$$

여기서,

$$G(\hat{q}(t), t) = \left. \frac{\partial g(q(t), t)}{\partial q(t)} \right|_{q(t)=\hat{q}(t)}$$

$$= \frac{1}{k p} \{ (1-p) \sum i_c(t-T_i) \hat{q}(t)^{-p} + (p-2) \hat{q}(t)^{1-p} \}$$

갱신단계 :

$$\hat{q}_k(+) = \hat{q}_k(-) + K_k [z_k - \xi_k(\hat{q}_k(-))] \quad (9)$$

$$P_k(+) = [I - K_k \Psi_k(\hat{q}_k(-))] P_k(-) \quad (10)$$

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

$$\Psi_k(\hat{q}_k(-)) = \left. \frac{\partial \xi_k(q(t_k))}{\partial q(t_k)} \right|_{q(t_k)=\hat{q}_k(-)}$$

여기서 $\hat{q}(t)$ 는 상태변량의 예측값, $P(t)$ 는 예측의 오차, $\hat{q}_k(-)$ 와 $P_k(-)$ 는 각각 시간단계 k 에서 식 (7), (8)로부터 계산되는 예측단계의 상태변량 모형 시스템과 관측시스템의 해를 나타낸다. $\hat{q}_k(+)$ 는 모형 예측치 $\hat{q}_k(-)$ 와 유량 관측치 z_k 에 의해 구한 최적 추정치를 나타내며, $P_k(+)$ 는 $P_k(-)$ 로부터 갱신된 분산오차를 의미한다. 일반적으로 시스템의 초기 조건과 모형 및 관측시스템의 불확실성을 나타내는 $Q(t)$ 와 R_k 는 기지 값으로 가정한다. 식 (10)의 K_k 로 표현되는 Kalman Gain은 모형과 관측 자료의 불확실성 정도에 따라 달라진다(Bras와 Rodriguez-Iturbe, 1985; Gelb, 1974).

한편 식 (2), (3) (또는 식 (4))으로 구성된 기존의 확정론적 모형과 식 (7)~(10)으로 구성된 본 연구의 모형 개념은 그림 1과 같이 비교 설명될 수 있다. 즉, 식 (4) 및 그림 1(a)와 같이 기존의 확정론적 모형의 경우 시간 t 에서의 계산유량은 시간 $t-T_i$ 의 상류

단 유입유량을 입력치로 하고 시간 $t-1$ 의 계산유량 $q(t-1)$ 혹은 초기유량 $q(0)$ 를 초기치로하여 미분 방정식의 해 $q(t)$ 를 산정하게 된다. 이 경우 시간 t 에서 하류단의 관측유량은 모형 계산과정에는 이용되지 않고 단지 모형계산 결과의 정확도 판단에 이용될 뿐이다. 이에 비해 그림 1(b)와 같이 식 (7)~(10)으로 표현되는 상태공간 형태의 추계동역학적 모형은 식 (7), (8)에 의해 시간 $t+1 - T_j$ 의 상류단 유입유량을 입력치로 하고 현재의 시점 t 에서 하류단의 유량 $q(t)$ 를 초기치로 하여 미래의 시간 $t+1$ 에 대한 예측유량 $\hat{q}(t+1)$ 및 예측유량 오차 $P(t+1)$ 를 산정한다. 그 후 시간이 경과하여 시간 $t+1$ 시점이 되었을 때는 시간 $t+1$ 에 대한 하류단의 유량이 관측되므로 이와 같은 관측유량과 시간 t 에서 예측한 시간 $t+1$ 의 예측유량 사이에 식 (9), (10)에 의해 최적 추정(갱신, updating)을 하게 된다 이들 두 모형 시스템 개념의 가장 큰 차이는 그림 1(a)의 확정론적 모형은 단지 상류단의 유입유량 자료를 이용하여 하류단의 유량 $q(t)$ 를 계산하기 때문에 시간이 경과함에 따라 발생한 유량 오차는 누적되는 경향이 있다. 이에 비해 그림 1(b)의 본 연구 모형은 상하류단의 유량 모두를 이용하여 미래의 시간에 대한 유량을 예측하기 때문에 오차가 누적되지 않아 정확한 유량예측이 가능할 뿐 아니라 실시간 유량예측에도 적합한 형태로 알려져 있다(Wood와 O'Connell, 1985).

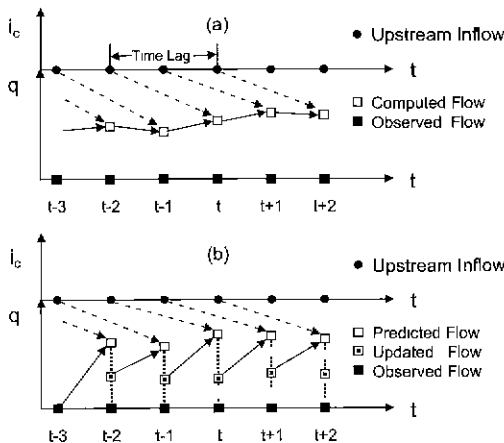


그림 1. 모형 개념도

3. 단일예측과 다중예측

실시간 유량예측에서 또 다른 중요한 문제는 현재의 시점에서 미래의 어느 시간까지 유량 예보의 정확도를 유지할 수 있는나 하는 문제이다. 이는 통상 예측가능 시간(forecast lead time) 개념으로 설명되며, 그 기본 개념은 그림 2와 같다. 즉 그림 1(b)의 예측가능시간이 Δt 시간인 단일예측(single forecast)은 매 시간간격마다 예측과 갱신의 순환과정을 거치지만, 다중예측(multiple forecast)의 경우 현재의 시점 t 에서 예측가능시간 $n\Delta t$ 까지 식 (7), (8)에 의해 n 회 예측단계만을 수행하는 경우이다. 이는 현재의 시점에서는 특정 미래 시점까지의 하류단 관측유량을 알 수 없기 때문이며, 식 (10)의 관측의 부정확성을 나타내는 R_k 가 매우 큰 경우와 동일한 개념이다. 이 경우 Kalman Gain은 0이 되며 식 (9), (10)은 다음 식 (11), (12)와 같이 표현되어 식 (7), (8)에 의해 n 회 연속 예측단계의 수행이 가능해진다.

$$\hat{q}_k(+) = \hat{q}_k(-) \quad (11)$$

$$P_k(+) = P_k(-) \quad (12)$$

한편, 지류의 유입 역시 이와 비슷한 개념으로 고려될 수 있다. 그림 3에서 상류단의 유입 유량을 $i_c(t)$, 하도구간내 일지점에서의 지류 유입유량을 $q_k(t)$, 하류단의 관측유량을 $q_{obs}(t)$ 라 하면 지류 유입이전을 나타내는 B 지점에는 통상 관측 유량이 존재하지 않으므로 먼저 식 (7), (8), (11) 및 식 (12)에 의해 시간 간격 Δt 동안 본류의 유량 예측만을 수행하게 된다. 그 후 B 지점의 예측 유량과 지류 유입유량을 더하여 C 지점의 예측 유량, 즉 하도구간 CD의 상류유입조건이

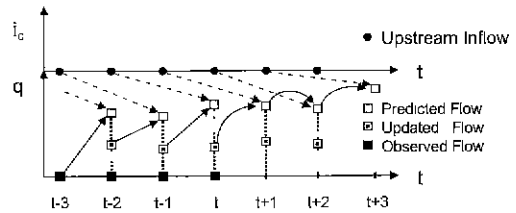


그림 2. 다중예측 개념도

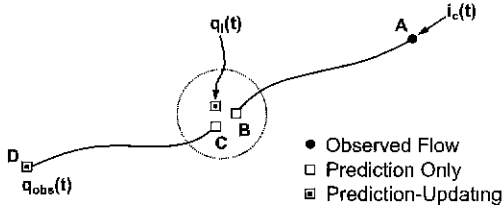


그림 3. 지류유입을 고려한 예측-갱신 순환과정도

되며 식 (7)~(10)에 의해 예측과 갱신의 순환과정으로 D 지점의 유량을 예측할 수 있다.

4. 사례연구

본 연구에서 개발된 모형의 적용성을 검토하기 위하여 팔당댐으로부터 인도교 지점까지 총 유로연장 35.3 km에 해당하는 구간을 선정하였다. 이 구간은 왕숙천, 탄천, 중랑천 등이 지류로 유입되고 있으며, 강동대교에서 인도교 지점에 이르는 서울지구 한강구간은 1986년 한강종합개발사업이 완료되었고 경기도 지역의 한강구간은 1993년 미사리 지역의 개발사업이 완료되어 팔당댐에서 미사리 구간을 제외한 본 연구의 모든 구간은 하도정비가 이루어진 상태이다.

본 연구에서 사용한 홍수자료는 한강홍수예경보(건설교통부, 1987~1998)에 수록된 주요 홍수사상의 자료를 선택하였다. 상류단의 유입유량은 팔당댐 방류량

자료를 이용하였으며, 하류단의 유량 수문곡선은 인도교 지점의 관측 수위를 수위-유량관계 곡선에 의해서 환산한 유량을 사용하였다. 각 홍수기간의 최대 유입량과 최대 유출량, 최대 유입과 유출이 발생한 시간차로 산정한 홍수 지체시간은 표 1과 같다. 여기서 지체시간은 첨두유량의 발생시간 차이를 나타내는 물리적 의미의 지체시간이며, 이는 저류함수모형에서 저류량을 맞추기 위한 결보기 지체시간을 의미하는 것은 아니다. 한편, 이 기간중에 발생한 대표적인 홍수사상 중에서 상하류단의 관측 수문곡선을 검토하여 부정확한 자료가 포함된 것으로 판단되거나 결측치가 많은 홍수사상은 적용대상에서 제외시켰다. 또한 90년 8월, 90년 9월, 95년 8월, 97년 7월, 98년 8월의 사상 등은 하류단의 첨두유량이 상류단의 첨두유량보다 크거나 하류단 첨두유량이 상류단 첨두유량보다 선행하여 발생한 것으로 보아 연구대상 하도구간내 주요 지류의 유입유량 영향이 상대적으로 컸기 때문인 것으로 판단된다.

본 연구의 모형을 실제 적용하기 위해서는 먼저 모형에 포함된 매개변수들을 추정하여야 한다. 모형의 매개변수로는 지체시간 상수 T_b , 하도 저류량과 유출량의 관계를 나타내는 K 및 b 가 있다. 이들 매개변수는 상하류 수문곡선의 지체시간 T_c 를 가정한 후 상류단의 유입량을 T_b 만큼 지체시킨 후 산정된 시간별 누가 유입량과 하류단의 시간별 누가 유출량의 차이를 산정하여 저류량의 변화를 산정한 다음, 전대수 방안지

표 1. 홍수자료의 특성

| 발생년도 | 홍 수 기 간 | | 팔당댐 최대 방류량 (cms) | 인도교 최대 유출량 (cms) | 지 체 시 간 (hr) |
|------|--------------|------------------|------------------|------------------|--------------|
| | 기 간 (월/일 시간) | | | | |
| 1987 | 7/21 | 0:00-7/24 0:00 | 12,194 | 11,323 | 1 |
| 1989 | 7/27 | 0:00-7/29 23:00 | 6,485 | 6,059 | 1 |
| 1990 | 6/18 | 0:00-6/22 23:00 | 11,207 | 11,033 | 3 |
| 1990 | 8/31 | 0:00-9/ 3 23:00 | 7,494 | 7,971 | 6 |
| 1990 | 9/ 9 | 0:00-9/13/23:00 | 31,303 | 28,800 | -1 |
| 1991 | 7/24 | 0:00-7/26 23:00 | 15,302 | 13,493 | 3 |
| 1992 | 8/26 | 0:00-8/30 23:00 | 8,379 | 6,714 | 6 |
| 1993 | 7/10 | 0:00-7/17 0:00 | 9,398 | 7,442 | -1 |
| 1994 | 6/29 | 0:00-7/ 2 0:00 | 5,613 | 4,840 | 2 |
| 1994 | 8/28 | 0:00-8/30 0:00 | 6,454 | 5,750 | 2 |
| 1995 | 8/22 | 18:00-8/28 23:00 | 23,977 | 26,952 | -4 |
| 1997 | 7/ 1 | 0:00-7/ 2 20:00 | 8,069 | 8,310 | -1 |
| 1998 | 8/ 5 | 12:00-8/13 12:00 | 17,704 | 20,463 | -6 |

에서 저류량과 유출량의 관계가 선형관계가 될 때 저류상수 K 와 p 를 결정한다. 표 2는 선택된 홍수사상에 대해서 산정된 매개변수를 나타낸다. 본 연구의 하도 저류량과 하류단의 유량은 각각 mm, mm/hr의 단위이므로 대상 하도구간의 유역면적을 $A(\text{km}^2)$ 이라 할 때, m^3 , cms의 단위를 갖는 상하류단의 관측유량으로부터 산정된 K' 및 p' 와는 다음의 관계 식을 갖는다.

$$K = \frac{A^{p'-1}}{1000 \cdot 3.6^p} K' ; p = p' \quad (13)$$

표 1에서 알 수 있는 것처럼 각 홍수사상에 대해서 추정된 최적 매개변수는 사상마다 서로 다르다. 이는 하도 저류함수모형 구조의 단순함을 고려할 때 예견되는 일이며, 실제 하도 교유의 매개변수를 산정하는 데는 지류유입량 처리 등 많은 어려움이 있다. 특히 지체시간의 경우 0~3시간으로 나타났으나 통상 홍수파의 유속을 1.5~2.5m/sec로 간주할 때 검토대상 하도구간을 통과하는 데는 약 4~6시간이 소요될 것임에 불구하고 대부분의 경우 지체시간이 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 대상 하도구간내의 지류유입, 하류부 조석의 영향 등 여러 요인에 의한 것으로 판단되어 단순히 유출입 수문곡선만을 이용하여 지체시간을 결정함에 한계가 있으며 이는 앞으로 극복해야 할 주요 과제이다.

한편 과거 본 연구대상 하도구간에서 하도 저류함수 모형의 매개변수를 추정된 대표적인 사례를 살펴보면

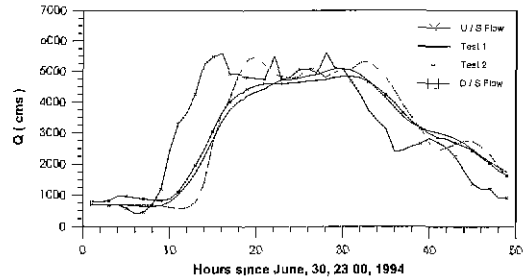


그림 4. 매개변수에 따른 확정론적 유량예측 결과 (94년 6월 홍수)

건설부(1985), 건설부(1991) 등이다. 현재 실무에서 활용되고 있는 매개변수는 표 2에서 대표 매개변수로 제시되어 있는 값이다. 이는 하천의 측량성과를 활용하여 하도의 지체시간은 식 (14)에 의해 산출하였고, K 및 p 는 정상등급로 기정한 Manning 공식에 의한 유량과 대표 하도단면 및 하도길이에 의한 저류량의 관계 식으로부터 간접적으로 산정한 것이다. 유량산정에 사용된 조도계수는 식 (15)에 의해 계산되었다. 여기서 L 은 하도연장(km), S_0 는 하도 평균경사를 나타낸다.

$$T_l = 0.00165 \frac{L}{\sqrt{S_0}} \quad (14)$$

$$n = 0.1 - 0.02 \log(S_0^{-1}) \quad (15)$$

그림 4는 94년 6월 30일 홍수사상에 대해서 표 2의

표 2. 선택된 홍수사상의 최적 매개변수

| 홍수사상 | 계산시간 간격(Δt) | K | p | T_l | R^2 값 |
|-----------|-----------------------|--------|-------|-------|---------|
| 87년 7월 사상 | 1 | 7 809 | 0.318 | 0.00 | 0.44 |
| 89년 7월 사상 | 1 | 7.856 | 0.447 | 3.00 | 0.96 |
| 90년 6월 사상 | 1 | 4.167 | 1.094 | 0.00 | 0.87 |
| 90년 8월 사상 | 1 | 4.771 | 0.410 | 1.00 | 0.21 |
| 91년 7월 사상 | 1 | 20.367 | 0.087 | 0.00 | 0.41 |
| 92년 8월 사상 | 1 | 6.541 | 1.292 | 0.00 | 0.88 |
| 93년 7월 사상 | 1 | 60581 | 0.454 | 0.00 | 0.56 |
| 94년 6월 사상 | 1 | 5 945 | 0.497 | 0.00 | 0.99 |
| 94년 8월 사상 | 1 | 30.133 | 0.060 | 0.00 | 0.70 |
| 95년 8월 사상 | 2 | 27.202 | 0.375 | 0.00 | 0.18 |
| 97년 7월 사상 | 2 | 4.087 | 0.309 | 0.00 | 0.49 |
| 98년 8월 사상 | 1 | 11.440 | 1.067 | 1.00 | 0.30 |
| 대표 매개변수 | - | 4.328 | 0.590 | 3.79 | - |

최적 매개변수를 사용하였을 경우(Test 1)와 실무의 대표 매개변수를 사용한 경우(Test 2)의 하류 인도교 지점에서의 계산유량을 비교하여 도시한 것이다. 범례의 "U/S Flow"는 상류단의 유입수문곡선, "D/S Flow"는 하류단의 유출수문곡선을 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 Test 2에 의한 하류단 계산 수문곡선은 상류의 유입 수문곡선과 비슷한 형상을 가지면서 약 4시간 지체된 침투유량이 다소 감쇠된 형태를 지닌 비교적 운동파(kinematic wave) 모형의 특성을 잘 반영하고 있다. 또한 예상되는 바와 같이 본 홍수 사상의 상하류단 유량을 모두 알고 있는 상태에서 추정된 최적 매개변수를 사용하여 계산한 Test 1에서의 하류단 유량 수문곡선은 Test 2의 유량 수문곡선보다 정확함을 알 수 있다. 이들 두 경우에 대한 최대유량의 관측치와 계산치의 발생시간 및 크기의 오차를 살펴보면 Test 1의 경우 최대유량 계산치가 +1시간, 5.20%이며, Test 2의 경우에는 -2시간, 9.74%이다. 그러나 이들 두 경우 모두 모형의 구조 및 특성 등을 고려할 때 94년 6월 홍수사상에 대해서는 비교적 만족할 만한 결과를 나타내는 것으로 판단된다. 본 연구에서 개발된 추계동역학적 모형의 적용성을 검토하기 위해서 매개변수는 실시간 홍수예보 개념으로 표 2의 대표 매개변수 값을 사용하고자 한다.

한편, 본 연구의 하도 저류함수모형을 사용하기 위해서는 기존의 매개변수 K , b , T_l 이외에 모형과 관측시스템의 불확실성을 나타내는 식 (8)의 $Q(t)$ 와 식 (10)의 R_k 를 산정하여야 한다. $Q(t)$ 는 예상되는 하류단의 최대유량 \bar{q}_m , R_k 는 \bar{q}_m 의 1/2에 해당되는 유량에서 \bar{q}_m 의 10%에 해당하는 최소값을 갖는 것으로 하여 유량의 증가 혹은 감소에 따라 2차원적으로 증가하는 것으로 결정하였다. 이는 일반적으로 고수위와 저수위에서 관측유량의 정확도가 감소하는 것을 고

려하기 위함이다. 그림 5는 93년 7월 홍수사상에 대해서 본 연구의 추계동역학적 하도 저류함수모형의 적용 결과를 도시한 것이다. 추계동역학적 하도추적 모형은 시간이 진행됨에 따라 식 (5), (6)으로 구성된 모형과 관측 시스템의 예측단계와 갱신단계의 순환과정을 거친다. 이 때 모형의 매개변수는 기존의 모형에서 요구되는 K , b , T_l 과 모형과 관측 시스템의 불확실성을 나타내는 $Q(t)$ 와 R_k 가 있다. 모형의 초기조건은 상류단의 유량으로 가정하였다. 그림의 범례에서 "Prediction"은 식 (7)에 의해 예측된 유량을 나타낸다. 그 후 시간간격 Δt 가 경과하여 하류단 인도교 지점의 유량이 관측되면 식 (9)에 의해 모형에 의한 예측유량과 관측유량 사이에 최적추정을 하게 되며, 그 결과가 범례의 "Updating"으로 표시되었다. 조원철 등(1996)에서도 언급한 것처럼 "Updating"은 현재 시간에서 이미 관측된 유량과 전 시간단계에서 현재 시간에 예측한 유량과의 최적추정한 결과이므로 이를 관측유량과 비교하는 것은 의미가 없다. 왜냐하면 현재의 시간에서 이미 관측유량이 존재하기 때문이다. 다만 이와 같이 갱신된 유량은 다음 시간단계의 유량예측의 초기조건으로서 의미를 갖으며, 이는 예측유량의 오차 누적을 방지하는 이유이기도 하다. 따라서 추계동역학적 모형에서 모형의 유용성을 판단할 때 예측유량(범례의 "Prediction")과 관측유량을 비교하는 것이 의미를 갖는다.

그림 6은 93년 7월 홍수사상에 대해서 기존의 방법에 의한 확정론적 계산결과(범례의 Det. Run)와 본 연구의 추계동역학적 계산결과(범례의 Stoc. Run)를 관측유량과 함께 도시한 것이다. 즉, "Det. Run"은 식 (4)로 표현되는 기존의 방법에 모형의 매개변수 K , b , T_l 을 표 2의 대표 홍수사상 값을 사용하여 얻은 결과이다. 이에 비해 "Stoc. Run"은 식 (7)~

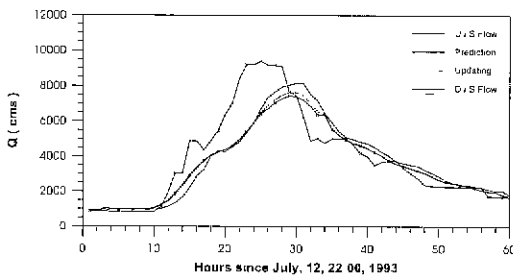


그림 5. 추계동역학적 하도저류함수모형의 적용 결과(93년 7월 홍수)

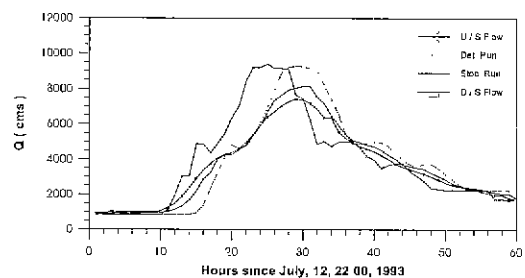


그림 6. 확정론적모형과 추계동역학적모형 결과의 비교(93년 7월 홍수)

(10)의 본 연구 모형의 예측단계의 유량예측 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 본 연구에서 개발한 모형에 의한 산정치는 기존 모형에 의한 것보다 향상된 결과를 나타낼 수 있다. 이는 기존의 모형이 모형의 단순함에서 야기되는 모형오차, 관측자료의 부정확에서 오는 관측오차 등을 고려할 수 없어 계산시간이 진행됨에 따라 계산유량의 오차가 계속 누적되는데 비해, 본 연구의 모형은 모형 및 관측의 오차를 고려할 수 있고 또한 현 시간까지의 하류단의 유량을 입력자료로 이용하므로 오차가 누적되지 않아 이와 같은 향상된 예측결과를 나타내고 있다. 이들 두 경우의 통계적 특성을 살펴보면 “Det. Run”의 경우 절대 잔차평균(absolute residual mean), 평균 제곱오차(root mean square error), 상관계수(correlation coefficient) 및 모형 효율성 계수(model efficiency)가 각각 607.8, 884.8, 0.96, 0.81 인데 비해 “Stoc. Run”은 각각 256.9, 351.2, 0.99, 0.96으로 나타났다. 이들 통계 지표의 정의 및 물리적 특성은 이흥래와 김형섭(1993), 배덕효(1997) 등에서 상술된 바 있다.

본 연구의 모형은 그림 3에서 언급한 것처럼 지류의 유입을 고려할 수 있도록 개발되었다. 그러나 본 연구대상 구간의 주요 지류유입 지점에는 일부 수위자료가 존재하지만 연속적인 자료가 부족하고 신뢰성있는 수위-유량관계곡선이 존재하지 않아 그 적용에 어려움이 있다. 따라서 표 1에서 분석한 결과에 따라 비교적 지류의 영향이 적을 것으로 판단되는 홍수사상을 선택하여 분석하였다. 또한 본 적용대상 구간은 조석의 영향이 미치는 지역으로 특히 저류량일 때 그 영향으로 수위상승이 심한 것으로 나타난 지역이다(이종태 등, 1993). 식 (4)에 의한 기존의 모형은 이와 같은 지류의 유입 및 조석의 영향 등을 고려할 수 없지만, 본

연구의 추계동역학적 모형에서는 식 (5), (6)의 $w(t)$, $v(t)$ 에서 간접적으로 고려할 수 있다. 그림 7은 95년 8월 홍수사상에 대해서 시간간격을 2시간으로 하여 기존의 방법(“Det. Run”)과 본 연구의 방법(“Stoc. Run”)의 결과를 비교·도시한 것이다. 95년 8월 홍수는 표 1에서 언급한 것처럼 상하류단 침두유량이 각각 23,977cms, 26,592cms로 하류단의 침두수위가 약 11% 크고 침두유량의 도달시간은 하류단의 침두유량이 4시간 선행하는 것으로 나타난 사상이다. 이는 본 연구대상 구간의 주요 지류인 왕숙천, 탄천, 중랑천 등으로부터 유입되는 지류의 영향으로 판단되는 전형적인 사상이다. 이와 같은 홍수사상의 경우에도 본 연구의 모형은 모형의 불확실성을 고려할 수 있으므로 기존의 모형보다 다소 향상된 결과를 제시하고 있다. 그러나 이와 같은 지류의 유입이 지배적인 경우에는 지류의 유입을 별도로 고려하지 않고는 모형의 결과를 향상시키는데는 한계가 있는 것으로 판단된다. 향후 본 연구대상 구간의 신뢰성있는 지류의 유입자료가 수집되면 모형의 예측결과는 보다 향상될 것으로 판단된다. 참고로 절대 잔차평균, 평균 제곱오차, 상관계수 및 모형 효율성 계수는 “Det. Run”의 경우 각각 1772.2, 2196.5, 0.98, 0.92이며, “Stoc. Run”의 경우 각각 1433.0, 2050.3, 0.98, 0.93으로 나타났다.

그림 8은 예측가능시간(forecast lead time)에 따른 하류단 유량예측의 정확도를 나타낸다. 그림에서 NF는 예측가능시간을 나타내며, 이는 NF=1인 경우 특정 시간단계 t 에서 식 (7), (8)에 의해 유량예측을 실시하고 시간이 경과하여 시간단계 $t+1$ 이 되었을 때 식 (9), (10)에 의해 개신단계를 수행하는 때 시간간격마다 예측-개신의 순환과정을 거친다. 그러나 NF=8인 경우에는 임의의 시간단계 t 까지는 NF=1과 같이 예측-개신의 순환과정을 거치지, 시간단계

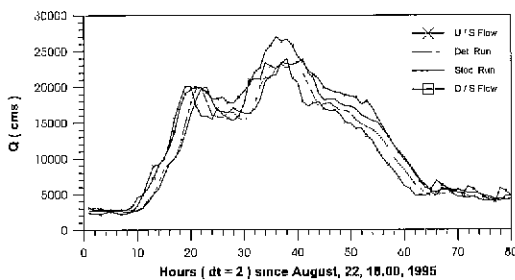


그림 7. 확정론적모형과 추계동역학적모형 결과의 비교(95년 8월 홍수)

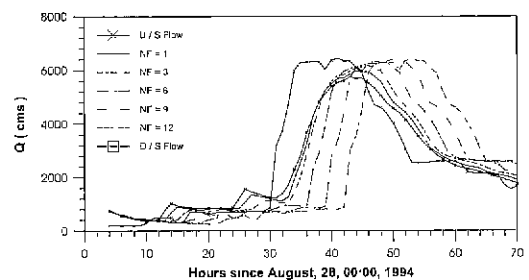


그림 8. 예측가능시간에 따른 유량예측 결과 (94년 8월 홍수)

표 3. 예측가능시간에 따른 유량예측의 통계값

| 예측가능시간 | 절대 산차평균 | 평균 제곱오차 | 상관계수 | 모형 효율성 계수 |
|--------|---------|---------|------|-----------|
| 1 | 152.6 | 206.0 | 0.99 | 0.98 |
| 2 | 252.2 | 324.6 | 0.98 | 0.96 |
| 3 | 332.2 | 410.7 | 0.98 | 0.94 |
| 4 | 430.0 | 534.5 | 0.97 | 0.90 |
| 5 | 545.9 | 688.1 | 0.95 | 0.84 |
| 6 | 675.9 | 865.3 | 0.91 | 0.74 |
| 9 | 1121.8 | 1450.6 | 0.75 | 0.23 |
| 12 | 1617.1 | 2027.9 | 0.51 | - |

t 에서 $t+\delta$ 까지는 식 (7), (8)에 의해 단지 예측단 계만을 수행하는 경우이다. 이 경우 상류단의 유입유량은 현시간 단계의 유량이 δ 시간동안 지속되는 것으로 가정하였다. 표 3은 예측가능시간에 따른 하루단 유량 예측 결과의 통계적 특성을 나타낸다. 그림 8 및 표 3에서 알 수 있는 것처럼 예측가능시간이 3시간까지는 모형의 효율성 계수가 0.94, 상관계수가 0.98이상으로 매우 정확한 예측을 할 수 있었고 5시간까지는 상류단의 미래 유량에 대한 예측없이 현재의 유량만으로도 상관계수 0.95, 모형 효율성 계수 0.84 이상으로 비교적 정확한 예측을 할 수 있는 것으로 나타났다. 예측가능시간이 3시간까지 매우 정확한 예측이 가능한 것은 그림 1에서 알 수 있는 것처럼 하도 저류함수모형의 구조가 현재의 상하류단 유량만으로도 하도의 지체 시간 T (본 연구의 경우 3.79시간)까지는 예측이 가능하기 때문이다.

5. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 국내 5대강 유역 홍수예경보의 일부로 사용되고 있는 하도 저류함수모형을 상태·공간형태의 추계동역학적 하도 저류함수모형으로 개선·발전시켜 모형의 적용성 및 유용성을 검토하였다. 모형의 적용 대상구간은 한강유역 팔당댐에서 인도교지점까지로 하였으며, 1987~1998년의 주요 홍수사상 가운데 지류의 유입 및 조석의 영향 등 모형 및 관측시스템의 불확실성이 비교적 적은 홍수사상과 큰 홍수사상을 선택하여 모형 계산을 수행한 결과 얻은 주요 결론은 다음과 같다. 모형 매개변수의 경우 매 홍수사상마다 최적 매개변수는 서로 상이한 값을 나타내고 있으나, 기존 실무에서 사용하고 있는 대표 매개변수도 비교적

만족할만한 유출결과를 나타내었다. 또한 기존의 확정론적 모형과 본 연구의 추계동역학적 모형에 의한 인도교 지점의 예측유량을 비교할 때 모형 및 관측시스템의 불확실성을 고려할 수 있는 본 연구의 모형 결과가 더 정확한 예측을 할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 본 연구의 모형도 본 연구 대상구간의 주요 지류로부터 유입되는 유량이 지배적인 홍수사상에 대해서는 별도 지류의 유입을 고려하지 않는 경우 모형결과를 향상시키는데는 한계가 있었다. 마지막으로 본 연구 대상구간의 홍수예측 가능시간 분석 결과, 지류의 유입이 지배적이지 않는 홍수사상의 경우 5시간 정도까지는 현재 시간까지의 상류단의 유입정보만으로도 비교적 정확한 인도교 지점의 유량예측이 가능한 것으로 판단된다.

본 연구대상 구간의 홍수예보 능력을 향상시키기 위해서는 지류유입을 정확히 모니터링할 수 있는 시스템의 구축과 일관성있는 자료수집이 선행되어야 할 것이다. 향후 이들 지류에 대한 신뢰성있는 자료가 구축되면 지류유입을 고려한 실시간 유량예측이 수행될 필요가 있다고 생각된다.

감사의 글

본 연구는 1998년도 한국학술진흥재단 자유공모과제(1998-001-E01936) 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

건설부 (1985). 총주다목적댐 건설에 따른 한강홍수예경보 프로그램 개선 보고서. 건설부, 한강홍수통제소.

- 건설부 (1987~1994). 한강홍수예경보, 건설부, 한강홍수통제소.
- 건설부 (1991). 한강수계 유출 프로그램 개선방안, 건설부, 한강홍수통제소.
- 건설교통부 (1995~1998). 한강홍수예경보, 건설부, 한강홍수통제소.
- 박상우, 오경두, 전병호 (1994). "Kalman Filter를 이용한 실시간 유출예측에서의 초기치 산정", 수공학연구발표회 논문집, 한국수문학회, 여수수산대학교, 1994. 7. 9. pp. 285~292.
- 배덕효 (1997). "저류함수법을 이용한 추계학적 실시간 홍수예측모형 개발", 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제30권 제5호, pp. 449~457.
- 윤용남 (1996). 공업수문학, 청문각.
- 이재형, 전일권, 김운중 (1994). "강우와 유출의 혼합 모형에 의한 홍수 예보", 수공학연구발표회 논문집, 한국수문학회, 여수수산대학교, 1994. 7. 9. pp. 381~386.
- 이홍래, 김형섭 (1993). "수문모형 평가에 관한 연구, -강우-유출모형을 중심으로-", 연구보고서, 건기연 92-WR-111-2, 한국건설기술연구원.
- 이종태, 한건연, 서병하 (1993). "한강의 홍수규모에 따른 인도교 수위의 조석영향 분석", 한국수문학회지, 한국수문학회, 제26권, 제2호, pp. 67~77.
- 정동국 (1989). 강우-유출모형에 관한 상태 및 매개변수의 추계학적 추정, 공학박사 학위논문, 서울대학교 대학원, 토목공학과.
- 조원질, 배덕효, 이종철 (1996). "실제하천에서의 추계학적 상태·공간형태의 Muskingum-Cunge 모형 개발", 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제16권 제II-6호, pp. 533~542.
- Bras, R.L., Rodriguez-Iturbe, I. (1985). *Random Functions and Hydrology*, Addison-Wesley, Reading, Mass.
- Gelb, A. (1974). *Applied Optimal Estimation*, M.I.T. Press, Cambridge, Mass.
- Wood, E.F., O'Connell, P.E. (1985). "Real-Time Forecasting", in *Hydrological Forecasting*, Edited by M.G. Anderson and T.P. Burt, John Wiley and Sons Ltd. pp. 505~558.

(논문번호'00-010/접수:2000.02 17/심사완료 2000.04.12)