

저류함수법을 이용한 추계학적 실시간 홍수에측모형 개발

Development of Stochastic Real-Time Flood Forecast System by Storage Function Method

배 덕 효*

Bae, Deg-Hyo

Abstract

This study attempts to develop a stochastic-dynamic real-time flow forecasting model for an event-oriented watershed storage function model (SFM), which has been used as an official flood computation model in Korea, and to evaluate its performance for real-time flow forecast. The study area is the 747.5 km² Hwecheon basin with outlet at Gaejin and the 8 single flow events during 1983-1986 are selected for comparison and verification of model parameter and model performance. The used model parameters in this study are the same values on field work. It is shown that results from the existing model highly depend on the events, but those from the developed model are stable and well predict the flows for the selected flood events. The coefficient of model efficiency between observed and predicted flows for the events was above 0.90. It is concluded that the developed model that can consider model and observation uncertainties during a flood event is feasible and produces reliable real-time flow forecasts on the area.

요 지

본 연구의 목적은 현재 국내 홍수에경보 시스템의 유출량 계산모형으로 이용되고 있는 단일 홍수사상을 모의할 수 있는 유역저류함수모형을 추계동력학적 상태·공간형태의 모형으로 개선·발전시키고 실시간 홍수에보에 대한 모형의 적용성을 검토하는데 있다. 모형의 적용대상 유역은 개진을 유역출구로 하는 낙동강 회천유역(747.5 km²)이며, 매개변수의 적절성 및 모형의 적용성을 평가하기 위해서 1983년부터 1986년 사이에 발생한 8개의 단일 홍수사상을 선정하였다. 본 연구에 사용된 모형의 매개변수는 실무에서 사용하고 있는 값을 사용하였다. 그 결과 기존 모형의 적용성은 선택된 사상에 따라 많은 차이를 나타내는데 비해 본 연구에서 개발한 모형에 의한 결과는 모형의 효율성 계수가 0.90 이상으로 정확한 값을 제시하였다. 따라서 홍수시 모형과 관측시스템의 오차를 고려할 수 있는 본 연구의 모형은 회천유역의 실시간 홍수에보 모형으로서 유용한 것으로 판단된다.

Keywords: storage function method, real-time flow forecast, stochastic model, Kalman filter

* 창원대학교 토목공학과 조교수

1. 서 론

매년 전 세계적으로 홍수로 인한 많은 인명과 재산피해를 내고 있다. 특히 우리나라는 지형적으로 하천의 유로가 짧고 경사가 급하며, 연강수량의 2/3가 여름철에 집중하는 기상특성 때문에 홍수피해가 많은 지역에 속한다. 이와 같은 홍수피해를 줄이기 위해서 여러 가지 구조적·비구조적 대책이 강구되어 왔으며 지속적으로 그 노력을 경주하고 있다. 홍수조절용 다목적 댐과 같은 수공구조물을 설치하는 구조적 홍수대응책 뿐만 아니라 비구조적 대책의 일환으로 미래에 발생할 홍수를 사전에 예측할 수 있는 홍수예경보 시스템을 개발하는 것도 구조적 대책 못지 않게 실질적인 홍수피해를 줄이기 위해서는 중요한 일이다.

일반적으로 모형개발의 목적은 강우-유출의 상관관계에 있어서 유역반응의 복잡성을 과학적으로 더 잘 이해하고 이에 대처할 뿐 아니라 수자원의 효율적인 관리 및 이용에 있다. 개발된 모형의 유용성 여부는 모형으로부터 계산된 결과의 정확성과 적용성 여부에 달려 있지만, 홍수예측모형은 이외에도 미래에 변화할 홍수량을 사전에 예측하는 것이 매우 중요하다. 왜냐하면 홍수예경보는 강우로 인하여 발생하는 홍수의 규모와 시간을 가능한 한 정확하고 빨리 예측하여 댐수문 조작에 의한 홍수조절을 가능하게 하고 홍수에 대비할 수 있도록 유관기관 및 지역주민에게 사전에 홍수에 관한 정보 즉 예측되는 수위와 시간을 제공함으로써 홍수로부터의 피해를 최소화하는 것이기 때문이다(건설부 한강홍수통제소, 1988). 이와 같은 목적을 성공적으로 완수하기 위한 이상적인 홍수예경보 시스템은 홍수시 급변하는 하천유량에 영향을 미치는 모든 수문학적, 기상학적 자료를 신속·정확하게 수집할 수 있는 관측 시스템의 구축뿐만 아니라 이들 수집된 자료를 이용하여 실시간 홍수추적을 할 수 있는 효율적인 유출량 계산모형이 조화를 이룰 때 가능하다.

현재 국내의 홍수예경보 시스템은 5대강 유역을 중심으로 주요 지점에 무인방식의 수위 및 우량관측소로부터 Telemeter에 의해 매 시간별 수위와 강우량을 자동 관측하고 있다. 한편, 홍수유출량을 계산하기 위해서 1961년 기무라(木村)에 의해 제안된 유역과 하도에 각각 적용할 수 있는 저류함수모형을 홍수량 계산모형으로 채택·적용하고 있다. 이 방법은 계산절차가 간편하고 홍수유출의 비선형성을 고려해 주는 방법이므로 선형모형보다 합리적인 것으로 알려져 있다. 저류함수모형을 보다 효율적으로 적용하기 위해서 지역화된 매개

변수의 산정 등 많은 노력이 경주되어 왔다. 남궁달(1985)은 저류함수법의 변수추정에 관한 연구를 하였고, 이순탁과 이영화(1986)는 저류함수모형을 다른 선형 및 비선형 모형과 비교 연구하였다. 심순보 등(1992)은 최적화 기법을 이용하여 저류함수법의 매개변수를 자동으로 보정할 수 있는 방법을 제시하였다. 또한 건설교통부에서는 각 수계별로 저류함수모형을 홍수예측모형으로 설정하고 이를 운영하기 위해서 각 소유역별 매개변수를 추정하여 사용하고 있다(건설교통부 낙동강홍수통제소, 1995). 그러나 실무자들이 이 모형을 보다 효율적으로 활용하기 위해서는 지역화된 매개변수의 산정문제, 현재 사용중인 모형을 실시간 홍수예측모형으로 개선·발전시키는 문제 등이 여전히 요구되고 있다.

홍수예경보나 수자원의 실시간 관리를 위해서 실시간 예측모형이 개발되기 시작한 것은 1970년대 이후이며, 실시간 홍수예측을 위한 가장 보편·타당한 접근방법은 추계동력학적 상태·공간 형태의 모형으로 알려져 있다(Wood와 O'Connell, 1985; Bras와 Rodriguez-Iturbe, 1985). 이는 모형의 실제 적용시 모형의 불확실성, 입력자료의 불확실성, 매개변수의 불확실성 등으로 인해 발생하는 모형과 관측치의 불확실성을 고려할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이와 같은 상태·공간 형태의 모형에 관한 국내에서의 연구로는 TF 모형을 이용한 실시간 유출예측(박상우 등, 1994), 강우모형과 프라사드 유출모형을 결합한 혼합모형에 의한 유출해석(이재형 등, 1994) 등이 있다. 또한, 정동국(1989)은 비선형 저수지모형의 매개변수에 대한 순환추정 알고리즘을 적용하여 홍수예측에 관한 연구를 수행하였고, 조원철 등(1996)은 실제하천에 적용 가능한 추계학적 상태·공간형태의 Muskingum-Cunge 모형을 개발하였다.

본 연구에서는 현재 국내에서 공식적인 홍수 유출량 계산모형으로 이용되고 있는 저류함수모형을 칼만필터(Kalman filter) 개념을 도입하여 추계동력학적 상태·공간 형태의 저류함수모형으로 개선·발전시키고 그 적용성 및 유용성을 검토하고자 한다. 본 연구에서는 상류로부터 유입되는 유량이 없는 소유역에 적용 가능한 유역유출모형 개발로 그 범위를 제한하고자 한다. 실제로 낙동강 유역과 같은 대유역 전체를 효율적으로 통제할 수 있는 실시간 홍수예측모형의 개발은 먼저 유역홍수추적모형, 하도홍수추적모형, 저수지 운영 프로그램 개발 등 대유역 모형의 각각의 요소를 개발하고 이를 통합 운영할 수 있는 기법이 개발되어야 하기 때문에 상당히 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 또한 대유

역의 홍수예경보 시스템의 신뢰도와 정확성은 각각의 소유역에서의 유역 홍수유출량의 계산 결과와 하도 추적모형의 계산 결과의 정확도 여부에 달려 있기 때문에 소유역에 적합한 실시간 홍수예측모형의 개발이 선행되어야 하고, 개발된 모형에 대한 정량적 연구를 수행하여 선택된 모형과 접근방법에 대한 신뢰성을 가진 후 대유역에 적합한 모형을 개발하는 것이 효율적이기 때문이다. 또한 대유역에 대한 홍수예경보 시스템을 설정한 후, 소유역의 유출계산모형을 변경하는 데는 많은 노력과 경비가 소요되기 때문이기도 하다.

2. 추계학적 상태·공간 형태의 유역저류함수모형

홍수예경보 시스템은 일반적으로 관측시스템과 모형 시스템으로 구성되어 있다. 관측시스템은 홍수시 급변하는 기상 및 수문자료를 실시간으로 관측할 수 있어야 하고, 모형시스템은 유역내의 특정지점에 대한 정확한 유출량의 예측이 가능해야 한다. 유출량 예측은 일반적으로 유역내의 강우와 유출량의 상관관계를 모의하는 유출예측모형에 의해 가능하다. 현재 국내 홍수예경보 시스템에서는 하천 유출량을 계산하기 위해서 1961년 기무라에 의해 제안된 유역과 하도에 각각 적용할 수 있는 저류함수모형이 이용되고 있다. 이 방법은 주로 일본에서 널리 사용되어 왔으며, 국내의 수문 및 기상 자료의 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 같은 연속 방정식과 운동량 방정식으로 표현된다.

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

$$s(t) = K q(t)^p \quad (2)$$

여기서 $s(t)$ 는 시간 t 에서 유역의 단위저류고(mm), $q(t)$ 는 단위유출고(mm/hr), K 와 p 는 저류상수를 나타낸다. 이 때 단위저류고와 단위유출고는 유역저류량과 유출량을 각각 유역의 면적 환산치(A/3.6)로 나눈 값을 의미한다. $r_{ave}(t)$ 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 유출률, R_{sa} 는 포화 누가우량을 나타낸다. 이와 같이 저류함수법은 강우와 유출의 차이를 저류량이라 하고 유출량은 저류량에 비례한다는 개념에 따라 유출량을 추차적으로 계산해 나가는 방법이라 할 수 있다. 한편, 식 (1), (2), (3)에서와 같이 이 모형에는 K , p , T_i , f_1 , R_{sa} 등 5개의 매개변수가 있으며, 이들은 과거의 우량 및 유량 자료로부터 추정할 수 있다(윤용남, 1996; 한국건설기술연구원, 1993; 건설교통부 낙동강홍수통제소, 1995).

식 (1)을 유역의 단위저류고를 변수로 하는 미분방정식의 형태로 전환하기 위해서 식 (2)를 식 (1)에 대입하여 정리하면 다음 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dq(t)}{dt} &= \frac{1}{k p q(t)^{p-1}} (r_{ave}(t-T_i) - q(t)) \\ &\equiv f(q(t), t) \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)로 표현되는 저류함수모형은 다음 식 (5), (6)과 같은 모형과 관측 시스템의 불확실성(uncertainty)을 고려할 수 있는 상태·공간 형태(state-space form)의 추계학적 모형으로 표현될 수 있다.

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

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

여기서 $w(t)$ 는 모형의 불완전성, 입력자료의 부정확성, 매개변수 산정치의 오차 등으로 인한 모형의 불확실성을 나타내는 항이다. Z_k 는 상태변량의 관측치를 나타내며, $h_k(\cdot)$ 는 모형의 상태변량과 시간 k 에서 관측치와의 관계를 나타내는 스칼라 함수이다. 또한 관측치의 오차를 나타내는 항을 v_k 로 표현할 때 이는 일반적으로 $w(t)$ 와 상호 독립적이고 평균이 0인 백색잡음 과정으로 가정된다.

식 (5), (6)으로 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(식 (7))과 오차(식 (8))를 예측하는 단계로서 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{q}(t)}{dt} &= \frac{1}{k p \hat{q}(t)^{p-1}} (r_{ave}(t-T_i) - \hat{q}(t)) \\ &\equiv f(\hat{q}(t), t) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\frac{dP(t)}{dt} = F(\hat{q}(t), t)P(t) + P(t)F^T(\hat{q}(t), t) + Q(t)$$

여기서

$$F(\hat{q}(t), t) = \left. \frac{\partial f}{\partial q} \right|_{q=\hat{q}} \quad (8)$$

$$= \frac{1}{kp} \{ (1-p)r_{ave}(t-T)q^{-p} - (2-p)q^{1-p} \}$$

여기서 $\hat{q}(t)$ 는 상태변량의 예측값을 나타내며, $P(t)$ 는 예측의 오차를 나타낸다. $Q(t)$ 는 모형의 불확실성을 나타내는 식 (5)에 나타난 $w(t)$ 의 분산을 의미한다.

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.

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

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

여기서

$$K_k = \frac{P_k(-)}{P_k(-) + R_k} \quad (11)$$

$$H_k(\hat{q}_k(-)) = \left. \frac{\partial h_k(q(t_k))}{\partial q(t_k)} \right|_{q(t_k) = \hat{q}_k(-)} \quad (12)$$

여기서 $\hat{q}_k(-)$ 와 $P_k(-)$ 는 각각 식 (7), (8)로부터 계산되는 예측단계의 상태변량 모형시스템과 관측시스템의 해를 나타내며, 이들은 각각 예측단계의 유량 예측치와 분산오차를 나타낸다.

$\hat{q}_k(+)$ 는 모형의 예측치 $\hat{q}_k(-)$ 와 유량 관측치 z_k 에 의해 구한 최적 추정치를 나타내며, $P_k(+)$ 는 $P_k(-)$ 로부터 갱신된 분산오차를 의미한다. 이들 $\hat{q}_k(+)$ 와 $P_k(+)$ 는 다음 시간단계 유량 예측을 위한 초기값이 된다. 또한, R_k 는 식 (6)의 관측시스템의 불확실성을 나타내는 $v(t)$ 의 분산을 나타낸다. 일반적으로 시스템의 초기조건과 모형 및 관측시스템의 불확실성을 나타내는 $Q(t)$ 와 R_k 는 알고 있는 것으로 가정한다. 식 (10)의 K_k 로 표현되는 Kalman Gain은 모형과 관측 자료의 불확실성 정도에 따라 달라진다 (Bras와 Rodriguez-Iturbe, 1985; Gelb, 1974). 시간단계 $t+1$ 의 갱신단계는 다음 시간단계 $t+2$ 시점의 예측을 위한 기준을 제공한다.

3. 모형개념의 비교

일반적으로 강우-유출 모형은 적어도 다음과 같은 두 가지 관점에서 그 중요성을 갖는다. 하나는 여러 가지 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 (5))으로 구별할 수 있다. 이들 두 모형 시스템에 대한 개념을 비교하면 다음과 같다.

그림 1(a)에서와 같이 식 (1)에서 식 (3)으로 구성된 기존의 확정론적 저류함수모형의 경우 시간 t 에서의 계산 유량은 시간 $t-T$ 의 관측 강우량을 입력치로 하고 시간 $t-1$ 에서의 계산 유량을 초기치로하여 계산된다. 이 경우 시간 t 에서의 관측 유량은 단지 모형 계산 결과의 정확도 판단에 이용될 뿐이다. 이에 비해 그림 1(b)와 같이 식 (5), (6)으로 표현되는 상태-공간 형태의 추계학적 모형은 현재의 시점 t 에서 시간 $t+1-T$ 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 이와 같은 관측 유량과 시간 t 시점에서 예측한 시간 $t+1$ 의 예측 유량사이에 최적 추정 단계의 거치게 된다. 이들 두 모형 시스템의 가장 큰 차이점은 그림 1(a)와 같은 기존의 모형 시스템은 단지 실시간으로 관측되는 강우량만을 이용하여 시간 $t+1+T$ 의 계산 유

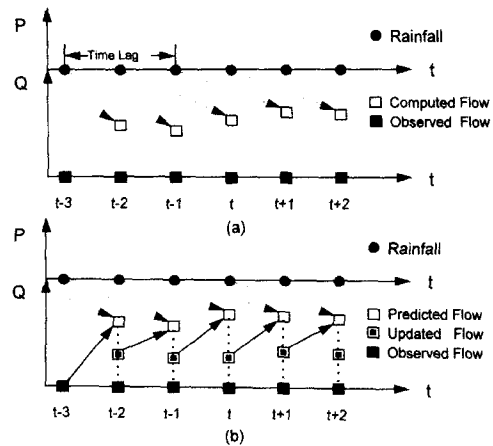


그림 1. 모형개념의 비교

량을 초기치로하여 시간 $t+T_1$ 의 유량을 계산하기 때문에 계산 유량의 오차가 계속 누적되지만, 그림 1(b)와 같은 시스템은 시간 $t+T_1$ 시점의 유량을 예측하기 전에 현 시간에서의 관측 유량과 계산 유량 사이에 최적 추정을 하기 때문에 예측 유량의 오차가 누적되지 않는다는 장점이 있다. 즉 전자의 경우는 단지 관측 강우량만을 이용하여 하천 유량을 모의하는데 비해 후자는 현재의 관측 강우량과 관측 유량 모두를 이용하여 미래의 특정시간에 대한 하천유량을 예측하는 시스템이다. 또한, 상태·공간 형태의 추계학적 모형은 모형, 매개변수 및 관측치의 불확실성을 고려할 수 있고, 현재의 관측치를 이용하여 미래의 증가 혹은 감소하는 홍수량을 사전에 알 수 있다는 장점이 있다. 이와 같이 매 시간별 관측되는 강우량 및 유출량의 실시간 자료를 이들 모형 시스템에 이용하여 현재의 시점에서 향후에 예상되는 유출량을 예측할 수 있으므로 그림 1(b)의 시스템은 실시간 예보 모형으로 적절히 이용될 수 있다.

4. 모형적용 및 해석

본 연구의 적용대상 지역은 그림 2와 같이 개진읍 유역출구로 하는 회천유역이다. 회천은 낙동강의 제 1지류로서 유역면적 747.5 km², 유로연장 62.9 km, 표고차 942 m로서 낙동강 전체의 약 3.1%를 차지하고 있다. 이 유역은 비교적 방사선상 및 평형상의

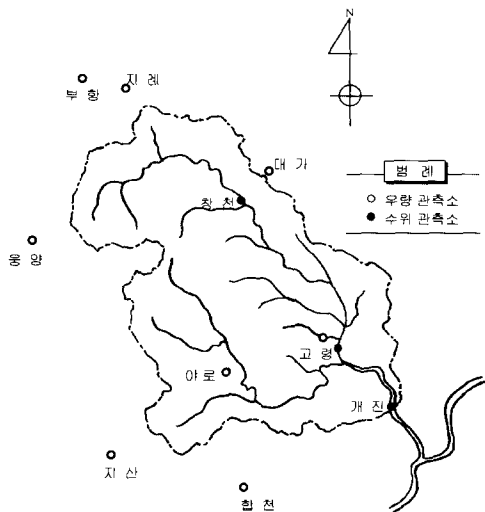


그림 2. 회천 유역도

혼합상을 이루고 있으며, 유역의 형상계수(A/L_2)는 0.19이다. 유역의 평균폭은 동서로 약 22-25 km, 남북으로 약 20-30 km이며 유역의 평균경사는 0.015이다. 토지이용 상태는 침엽수와 혼효림이 주종을 이루는 임야 76%, 경지면적 15.5%, 대지 및 기타 8.5%로 구성되어 있다.

본 연구에서 개발될 모형의 계산 및 검정을 위해서 1983년에서 1986년 사이에 발생한 비교적 자료의 보관상태가 양호한 8개의 단일 홍수사상이 선택되었다. 사용된 우량 자료는 유역내의 야로와 고령 관측소, 인접 감천유역의 지례 관측소, 황강유역의 웅양 및 합천 관측소의 시우량 자료를 산술평균하여 유역 평균강우량으로 사용하였다. 또한, 유역내에는 유역 출구인 개진을 비롯하여 고령, 창천 수위관측소가 있다. 본 연구 유역의 출구에 해당하는 개진 지점의 수위자료를 유량으로 환산하기 위해서 낙동강 유량측정조사 보고서(건설부 한강홍수통제소, 1986) 상의 수위-유량관계 곡선식을 이용하였다. 본 연구유역의 연평균 강우량은 1,166mm, 연평균기온은 11.9 °C, 연평균증발산은 1,246.7mm로 나타났다(경상남도, 1988).

어떤 특정 유역에서 유출량을 계산할 수 있는 저류함수모형을 실무에 사용하기 위해서는 모형에 포함된 매개변수들(저류함수의 시간상수 K , 저류함수의 지수승 p , 유역의 지체시간 T_1 , 일차 유출률 f_1 , 포화우량 R_{sa})을 과거의 강우 및 수위자료로부터 추정하여야 한다. 이들 자료로부터 매개변수를 결정하는 방법에는 (1) 해당유역에서 과거에 발생한 대표적인 홍수기록 자료를 사용하여 매개변수를 결정하고, 이와 같은 고정된 상수를 이용하여 홍수유출 계산을 실시하는 상수고정법, (2) 유출계산을 실시할 때 계산시간 이전의 실측된 누가우량과 누가유량으로부터 각 시각의 저류함수모형의 모형상수를 역산하고 이들 값의 평균치를 유출계산의 초기치로 사용하여 홍수량을 계산하는 상수역산법, (3) 초기유량의 크기에 따라 저류상수를 결정하고 우량의 지체시간을 누가우량의 상관관계식으로부터 구하여 유출계산을 수행하는 초기유량 평가법, (4) 모형의 매개변수와 유역형상계수, 유로연장, 평균하상경사 등 유역의 특성인자의 경험적인 상관관계로부터 매개변수를 결정하는 경험식 방법이 있다. 과거 본 연구 대상 유역에 대해서 매개변수를 추정된 것은 1987년 낙동강홍수예보 설치 이후 소유역의 저류상수 K , p 와 T_1 을 추정하는데 사용되는 이근천 공식에 의한 매개변수 값, 건설교통부 낙동강홍수통제소(1995)에서

표 1. 낙동강 화천(개진)유역에 대한 저류함수모형의 매개변수 값

	K	p	T _i	f _i			R _{sa}			비 고
				AMC I	AMC II	AMC III	AMC I	AMC II	AMC III	
이근찬공식	33.71	0.4696	2.87	0.035	0.102	0.186	202.0	147.0	97.0	건설교통부 낙동강홍수통제소(1995)
수정제안치	25.45	0.3593	3.82							건설교통부 낙동강홍수통제소(1995)
경험치	37.00	0.4365	2.73	0.035	0.102	0.186	202.0	147.0	97.0	홍수통제소

표 2. 선택된 홍수사상에 대한 최적 매개변수 추정치

번호	기 간 (년/월/일/시)	총강우량 (mm)	침투유량 (cms)	유역 매개변수				
				K	p	T _i	f _i	R _{sa}
1	83/08/27/00 -83/08/31/23	59.0	445.0	12.476	0.715	4	0.108	14.262
2	83/09/11/00 -83/09/13/23	45.0	285.0	27.282	0.640	5	0.010	8.577
3	84/07/05/01 -84/07/07/00	102.0	1041.0	19.036	0.724	3	0.010	24.192
4	85/09/18/01 -85/09/21/00	152.0	1152.0	38.670	0.413	2	0.010	27.432
평균				24.366	0.623	3.5	0.035	18.616

1987년-1993년의 주요 호우별 유역평균 우량주상도와 홍수수문곡선을 분석하여 얻은 저류상수와 소유역의 지형학적 특성인자를 상관시켜 구한 경험식으로부터 산출한 매개변수 값, 그리고 현재 실무에서 경험적으로 사용하고 있는 값이 있으며, 그 값들은 표 1과 같다. 여기서 f_i 와 R_{sa} 는 선행토양함수조건(Antecedent Soil Moisture Condition, AMC)에 따른 미국토양보존국(SCS)의 유효우량 산정법에 의해 결정된 값이다.

본 연구에서는 매개변수의 적절성 및 모형의 유용성을 검토하기 위하여 적용대상 지역에 홍수예경보 시스템이 설치되기 이전의 비교적 수문자료가 양호한 기간동안에 발생한 8개의 홍수사상을 선택하였다. 이들 사상 가운데 표 2에 나타난 4개의 사상은 모형의 매개변수를 검토하기 위해서 홍수사상이 끝날 때까지 우량 및 유량자료를 모두 알고 있다는 가정하에서 각 홍수사상에 최적인 저류함수모형의 매개변수 값을 추정하였다. 매개변수를 추정하는 방법은 기존의 방법과 동일한 방법으로 수행하였다(윤용남, 1996). 표 1, 2에서 알 수 있는 바와 같이 선택된 홍수사상에 대한 최적 매개변수 값은 각 홍수사상마다 다른 값을 가지며, 표 1의 각각의 방법과도 다소 차이가 있음을 볼 수 있다. 이는 저류함수모형 구조의 단순함을 고려할 때 예견되는 일이며,

실제로 유역 고유의 매개변수를 산정하는 데는 많은 어려움이 있다. 표 1, 2를 비교할 때 모형적용 대상 유역에 대한 매개변수 K , p , T_i 값은 어느 정도 일치하지만 유역의 침투능력을 대표하는 f_i 와 R_{sa} 는 다소 많은 차이가 남을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 상태·공간 형태의 추계동력학적 저류함수모형의 유용성을 검토하기 위해서 K , p , T_i 값은 표 1의 경험치를 사용하고, f_i 와 R_{sa} 는 표 2의 평균값을 사용하고자 한다. 이는 실제 실무자들이 이 모형을 사용할 때 강수가 시작되기 전에는 표 1에 나타난 경험치를 초기치로 사용하여 수문곡선의 상승부 시간까지 홍수추적을 하고, 그때까지 예측된 유량과 관측유량을 비교하여 잘 일치하지 않으면 f_i 와 R_{sa} 를 경험적으로 조정하여 침투유량의 예측을 수행하는 것처럼 실무에서 적용하고 있는 방법과 가장 유사한 방법으로 모형의 유용성을 평가하고자 함이다.

그림 3-6은 선택된 8개 홍수사상 가운데 표 2의 모형 매개변수 검토에 사용되지 않은 나머지 4개의 홍수사상에 대해서 유역평균강우량, 기존의 방법(범례의 Det. Run)과 본 연구에서의 방법(범례의 Stoc. Run)에 의한 유량 예측 결과를 유량 관측치(범례의 Obs Flow)와 함께 나타낸 것이다. 유역평균강우량은 유역내의

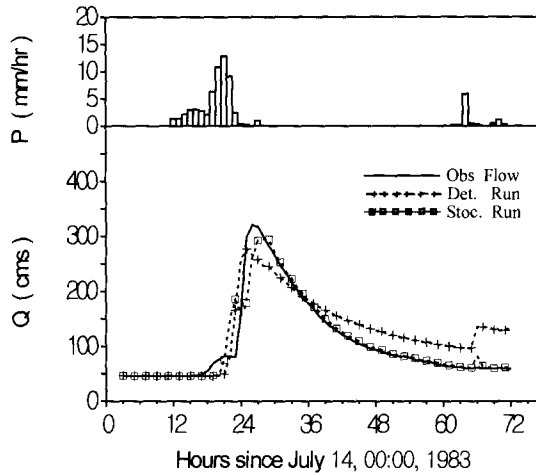


그림 3. 모형 결과의 비교 (83년 7월 14일 사상)

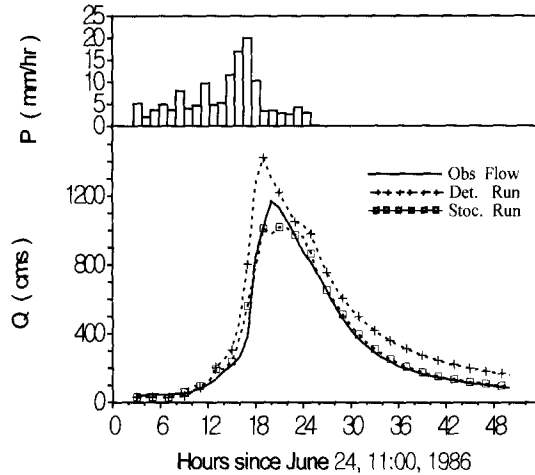


그림 5. 모형 결과의 비교 (86년 6월 24일 사상)

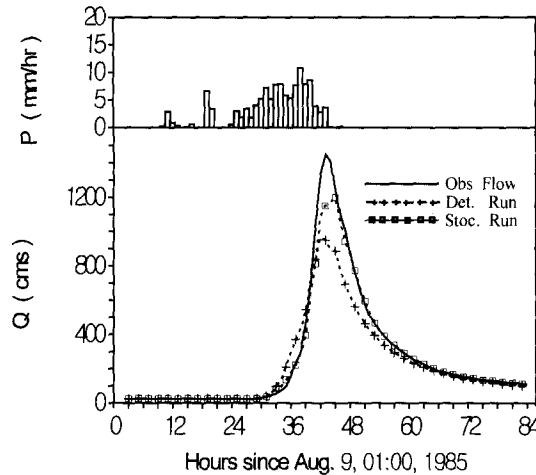


그림 4. 모형 결과의 비교 (85년 8월 9일 사상)

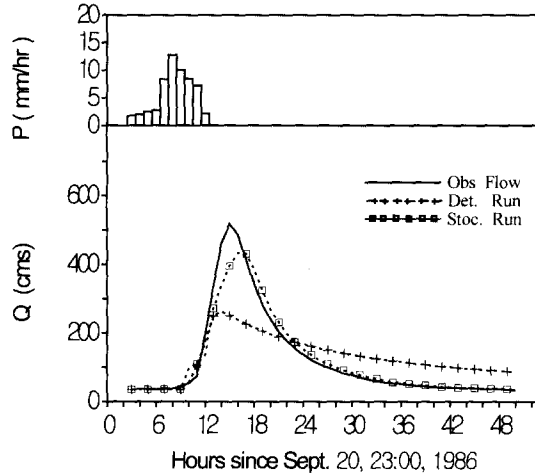


그림 6. 모형 결과의 비교 (86년 9월 20일 사상)

의 강우관측 지점으로부터 구한 시우량자료를 산술평균하여 산출하였다. 이때 자료의 보관상태가 불량하거나 결측된 자료는 계산에서 제외되었다. 선택된 사상에 대한 강우의 형태는 그림 3, 6의 (a)와 같은 단순 강우의 형태와 그림 4, 5의 (a)와 같은 복합 강우 형태 등 다양하지만, 각각의 그림 (b)에서 알 수 있는 것처럼 관측 유출수문곡선은 단순 곡선을 이루고 있음을 알 수 있다. 선택된 홍수사상에 대한 침투유량의 범위는 320-1,450 cms이고, 침투유량은 수문곡선의 상승부로부터 약 9-12 시간 이후에 발생하는 것으로 나타났다. 각각의 그림에서 범례의 "Det. Run"은 모형 매개변수 K, β, T_i 은 표 1의 경험치 값을 그리고 f, R_{∞} 는 표 2의 평균

값으로 고정한 상태에서 기존의 방법(식 (4))에 의해 계산을 수행한 결과이다. 이때 모형의 초기치는 계산 시작점의 관측유량을 사용하였다. 한편 범례의 "Stoc. Run"은 본 연구에서 기존의 저류함수모형을 추계동력학적 상태·공간 형태의 저류함수모형(식 (5), (6))으로 개선·발전시킨 모형을 이용하여 계산을 수행한 것이며, 제시된 결과는 식 (7)의 예측단계의 예측유량을 나타낸다. 이와 같은 모형을 사용하기 위해서는 기존의 매개변수 $K, \beta, T_i, f, R_{\infty}$ 이외에 모형과 관측시스템의 불확실성을 나타내는 식 (8)의 $Q(t)$ 와 식 (10)의 R_t 를 결정하여야 한다. 계산의 초기치 및 매개변수 $K, \beta, T_i, f, R_{\infty}$ 는 "Det. Run"과 같은 값을 사용하였다.

또한 $Q(t)$ 는 예상되는 하류단의 최대 직접유출량 (\bar{q}_m), R_t 는 \bar{q}_m 의 1/2에 해당하는 관측유량에서 \bar{q}_m 의 10%에 해당하는 최소값을 갖는것으로 하여 유량이 증가 혹은 감소함에 따라 2차원적으로 증가하는 것으로 결정하였다. 이는 수위-유량관계곡선이 고수위와 저수위에서 정확도가 감소하는 것을 고려한 것이며, 평창강 유역에도 동일한 방법으로 적용한 바 있다. 그림 3-6의 모형 계산 결과에서 알 수 있는 것처럼 본 연구에서 개발한 모형의 결과("Stoc. Run")가 기존의 모형 계산 결과("Det. Run")보다 향상됨을 알 수 있다. 이는 그림 1에서 설명한 바와 같이 "Det. Run"의 경우 매 시간별 입력되는 강우량 자료만으로 이전 시간단계에서의 계산유량을 초기치로하여 계산을 수행하기 때문

에 오차가 누적되는데 비해, "Stoc. Run"은 관측된 유량자료로부터 다음 시간단계 $t+1$ 에 대한 유량을 예측하고 그 후 시간이 경과하여 시간 $t+1$ 의 시점이 되었을 때에는 시간 $t+1$ 시점에 대한 하천유량이 관측되므로 이와 같은 관측 유량과 시간 t 시점에서 예측한 시간 $t+1$ 의 예측유량 사이에 최적추정을 한 후 이 값으로부터 다음 단계에 대한 예측을 수행하므로 오차가 누적되지 않기 때문이다.

표 3은 모형의 평가에 사용된 그림 3-6의 홍수사상에 대한 모형예측 결과의 통계 특성치를 나타내며, 표 4는 모형 예측결과의 정확도 평가에 사용된 통계지표의 물리적 의미를 요약한 것이다. 표 4에서 모형의 효율성 계수는 자료의 개수와 상관없는 무차원 양으로서 예측

표 3. 유량예측 결과에 대한 통계 특성치

항목/홍수	83년 7월 사상		85년 8월 사상		86년 6월 사상		86년 9월 사상	
	Det Run	Stoc Run	Det Run	Stoc Run	Det Run	Stoc Run	Det Run	Stoc Run
Q_m	106.69		262.87		333.65		121.93	
Q_{mc}	124.35	107.52	222.80	248.53	436.39	342.06	128.10	121.33
Q	17.66	0.83	-40.06	-14.34	102.74	8.42	6.17	-0.60
σ_0	75.57		351.01		333.17		130.48	
σ_c	65.15	71.54	252.45	309.74	391.78	320.13	61.35	116.85
σ_r	33.65	22.94	117.67	56.78	96.74	49.32	82.78	32.55
Q_0	321.0		1,450.0		1,170.0		517.0	
Q_{0c}	277.0	294.0	968.0	1,200.0	1,420.0	1,020.0	263.0	433.0
t_p (day, hr)	15, 2		10, 20		25, 7		21, 13	
t_{pc} (day, hr)	15, 1	15, 4	10, 19	10, 22	25, 6	25, 8	21, 12	21, 14
ARM	29.35	8.93	57.99	19.32	106.97	28.50	60.00	17.61
ERMS	38.00	22.95	124.31	58.57	141.12	50.04	83.01	32.56
CC	0.896	0.953	0.977	0.993	0.977	0.989	0.871	0.971
ME	0.747	0.908	0.875	0.972	0.821	0.977	0.595	0.938

표 4. 모형 예측결과의 정확도 평가를 위한 통계 지표

항목	관 련 식	비 고
잔차 절대치 평균 (ARM)	$\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n Q_0(t) - Q_c(t) $	n: 자료의 개수 $Q_0(t), Q_c(t)$: 관측 및 계산유량
평균 제곱 오차 (ERMS)	$\left[\frac{\sum_{t=1}^n [Q_0(t) - Q_c(t)]^2}{n} \right]^{1/2}$	Q_m, Q_{mc} : 관측 및 계산유량의 평균
상관계수 (CC)	$\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left[\frac{Q_0(t) - Q_m}{\sigma_0} \right] \left[\frac{Q_c(t) - Q_{mc}}{\sigma_c} \right]$	σ_0, σ_c : 관측 및 계산유량의 표준편차
모형 효율성 계수 (ME)	$\frac{\sum_{t=1}^n [Q_0(t) - Q_m]^2 - \sum_{t=1}^n [Q_0(t) - Q_c(t)]^2}{\sum_{t=1}^n [Q_0(t) - Q_m]^2}$	Q_p, Q_{pc} : 관측 및 계산 첨두유량 t_p, t_{pc} : 관측 및 계산 첨두시간

수문곡선과 실측수문곡선이 잘 일치할수록 1에 가까운 값을 나타낸다. 표 3에서 알 수 있는 바와 같이 본 연구의 모형이 기존의 모형보다 모든 통계지표에서 향상된 결과를 나타냄을 알 수 있다. 예를 들어 모형 효율성 계수(ME)의 경우 각 홍수사상에 대해서 16.1, 9.7, 15.6, 34.3% 향상됨을 나타냈다.

5. 결 론

본 연구에서는 현재 국내 홍수예경보 시스템의 유출량 계산 모형으로 이용되고 있는 유역저류함수모형을 실시간 홍수예경보에 보다 적합하도록 추계동력학적 상태·공간형태의 저류함수모형으로 개선·발전시키고, 낙동강의 제 1 지류인 회천유역을 적용대상 지역으로 하여 계산을 수행하였다. 기존의 모형에 대한 매개변수는 실무에서 사용하고 있는 값을 이용하였으며, 모형의 평가는 매개변수 추정에 사용되지 않았던 기간의 대표적인 홍수사상을 선택하여 모형 계산을 수행하고 관측 유량과 비교하여 모형의 유용성을 검토하였다. 선택된 호우사상에 대해서 도식적 평가 및 통계적 분석을 한 결과, 본 연구에서의 모형이 기존의 모형에 비해 많은 향상된 결과를 나타냄을 알 수 있다. 예를 들어 모형 효율성 계수를 기준으로 볼 때 약 18 % 정도 향상됨을 알 수 있었다.

일반적으로 실시간 홍수예경보에서 문제점으로 지적되는 것은 매개변수의 부정확성뿐만이 아니라 강우-유출모형의 입력치로 요구되는 미래에 발생할 예측 강우량이 부정확하다는 것이다. 그러나 저류함수모형의 경우 모형 구조가 유역의 지체시간을 고려할 수 있는 매개변수 T 를 있기 때문에 현재 시간 t 의 관측 강우량을 이용하여 미래의 시간 $t+T$ 시점까지는 별도의 예측 강우량 없이 유량 예측이 가능하다는 것이다. 이는 기존에 저류함수 모형의 장점으로 알려진 모형의 간평성, 유출의 비선형성 고려 이외에도 실시간 홍수예보 모형으로서 매우 중요한 장점이 된다. 향후 하도 저류함수의 모형을 본 연구에서의 모형과 결합하여 대유역에 적용 가능한 모형으로 개발할 필요가 있는 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 1996년도 한국학술진흥재단 신진교수과제(과제번호: 04-E-0098) 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다. 자료수집에 도움을 주신 건설기술연구원의 이홍래 선임연구원, 낙동강홍수통제소 및 경남도청 담당관에게 사의를 표합니다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 낙동강홍수통제소 (1995). 낙동강수계 유출 프로그램 개선.
- 건설부 한강홍수통제소 (1986). 낙동강유량추정보고서.
- 건설부 한강홍수통제소 (1988). 한강홍수예경보.
- 경상남도 (1988). 남강, 회천 하천정비기본계획.
- 남궁달 (1985). "저류함수법에 의한 강우-유출모형의 변수 추정." *한국수문학회지*, 제18권, 제2호, pp. 175-185.
- 박상우, 오경두, 전병호 (1994). "Kalman Filter를 이용한 실시간 유출예측에서의 초기치 산정." *수공학 연구발표회 논문집*, 여수수산대학교, pp. 285-292.
- 심순보, 김선구, 고석구 (1992). "최적화 기법에 의한 저류함수 유출 모형의 자동보정." *대한토목학회논문집*, 제12권, 제3호, pp. 127-137.
- 윤용남 (1996). *공업수문학*. 청문각.
- 이순탁, 이영화 (1986). "선형-비선형 홍수유출모델의 비교 연구." *한국수문학회지*, 제19권, 제3호, pp. 267-276.
- 이재형, 전일권, 김운중 (1994). "강우와 유출의 혼합 모형에 의한 홍수 예보." *수공학연구발표회 논문집*, 여수수산대학교, pp. 381-386.
- 정동국 (1989) 강우-유출모형에 관한 상태 및 매개변수의 추계학적 추정. 공학박사 학위논문, 서울대학교.
- 조원철, 배덕효, 이종설 (1996). "실제하천에서의 추계학적 상태·공간형태의 MuskingumCunge 모형 개발." *대한토목학회 논문집*, 제16권, 제1-6호, pp. 533-542.
- 한국건설기술연구원 (1993). "수문모형 평가에 관한 연구: 강우-유출모형을 중심으로." *연구보고서*, 건기연 92-WR-111-2.
- 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.
- Bras, R.L., and 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. and O'Connell, P.E. (1985). "Real-time forecasting." *Hydrological forecasting*, Anderson, M.G. and Burt, T.P. eds., John Wiley and Sons, Ltd., pp. 505-558.
- 〈최종본 접수일 : 1997년 8월 16일〉