

## 실시간 범람위험도 예측을 위한 수리학적 모형의 개발

### Hydraulic Model for Real Time Forecasting of Inundation Risk

한 건 연\* / 손 인 호\*\* / 이 재 영\*\*

Han, Kun Yeun / Son, In Ho / Lee, Jae Young

---

#### Abstract

This study aims to develop a methodology of real time forecasting of inundation risk based on DAMBRK model and Kalman filter. The model is based on implicit, nonlinear finite difference approximations of the one-dimensional dynamic wave equations. The stochastic estimator uses on extended Kalman filter to provide optimal updating estimates. These are accomplished by combining the predictions of the deterministic model with real time observations modified by the Kalman filter gain factor. Inundation risks are also estimated by applying Monte Carlo simulation to consider the variability in cross section geometry and Manning's roughness coefficient. The model calibrated by applying to the floods of South Han River on September, 1990 and August, 1995. The Kalman filter model indicates that significant improvement compared to deterministic analysis in flood routing predictions in the river. Overtopping risk of levee is also presented by comparing levee height with simulated flood level.

*Keywords* : river, flood routing, real time, Kalman Filter, Monte Carlo Simulation

---

#### 요 지

본 연구의 목적은 하천에서의 실시간 범람위험도 해석을 위해서 DAMBRK 모형과 Kalman filter를 연계한 수치모형을 개발하는데 있다. 본 모형은 1차원 동역학 방정식의 비선형 유한차분 근사해인 음해법을 기본으로 하고 있다. 추계학적 추정법으로서 최적의 갱신 예측치를 얻기 위해 확장된 Kalman filter 기법을 사용하였다. 이 과정은 확정론적 모형에 의한 예측치를 Kalman filter gain factor에 의해 보정된 실시간 관측치와 조합함으로써 수행되었다. 홍수범람위험도는 하도단면의 기하형상과 Manning 조도계수의 변동성을 고려하여 Monte Carlo 모의를 적용하여 예측되었다. 본 모형은 1990년 9월과 1995년 8월의 남한강 홍수에 적용하여 검증하였다. Kalman filter에 의한 해석은 이 기간 동안에 확정론적 해석결과와 비교하여 실측자료와 잘 일치되는 양상이 나타났으며, 이에 따라 제방의 월류위험도를 모의된 홍수위와 제방고를 비교함으로써 얻을 수 있었다.

**핵심용어** : 하천, 홍수추적, 실시간, Kalman Filter, Monte Carlo 모의

---

\* 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수 (E-mail. kshanj@knu.ac.kr)

Prof. Dept of Civil Engineering, Kyungpook National Univ, Taegu 702-701, Korea

\*\* 경북대학교 대학원 토목공학과

Graduate Students, Dept of Civil Engineering, Kyungpook National Univ, Taegu 702-701, Korea

## 1. 서 론

홍수재해로부터 많은 인명과 각종 산업시설을 보호하고 있는 하천제방과 같은 수공구조물들은 그 설계와 관리에 만전을 기하고 있음에도 불구하고 토지이용상황, 유출조건 등의 수문학적 변화, 집중호우, 이상홍수, 지진 등의 기상변화와 상류측 수문조작의 오류 등에 의해서 제방 월류와 붕괴 등으로 인한 洪水流 및 土石流의 범람피해가 발생되고 있다.

홍수범람 재해시 범람구역으로 유입되는 홍수량을 적절히 예측하는 것은 매우 중요하다. 범람 수리현상은 유입유량의 증대로 인한 유역자체에서의 범람과 제방 미루에서의 월류 및 붕괴에 의한 범람으로 대별될 수 있다. 홍수범람에 의한 재해는 계내지에서 많은 인명손실과 극심한 재산피해를 줄 뿐 아니라, 사회적 문제를 야기할 수 있다.

이제까지의 범람홍수에 대한 연구는 피해발생 이후에 모의를 중심으로 연구되어 왔으나 실제로 필요한 것은 대규모 홍수가 발생했을 경우 이를 미리 예측하여 적절한 피난대책을 수립하여야 하는 것으로서 이를 위한 범람모의모형에 대해서는 아직까지 연구되고 있지 못한 실정이다. 범람홍수의 정확한 모의를 위해서는 하도부에서의 홍수예측이 필수적인 사항인데, 기존의 확정론적 모형에서는 기본방정식, 매개변수, 경계 및 초기조건에 포함되어 있는 불확실성을 제대로 반영할 수 없었다. 따라서, 본 연구에서는 확정론적 동역학 시스템을 Gaussian 백색잡음 과정을 도입하여 추계학적 동역학 시스템으로 변형시켜, 동역학적 모형에 의한 예측치를 실시간 관측치와 조합하여 해석할 수 있는 Kalman Filter 기법을 도입하여 실시간 범람위험도를 예측할 수 있는 알고리즘을 개발하였다.

본 연구의 목적은 하천에서의 실시간 홍수해석을 통해서 제방월류 예상지점을 산정하고, 하천의 홍수범람 위험도를 산정함에 있다. 이를 위해서 본 연구에서는 하도부에서 실시간 홍수해석을 위해서 DAMBRK 모형을 Kalman Filter 기법(Kalman, 1960)과 연계하여 적용하고자 한다. Manning의 조도계수, 경계조건 및 초기조건과 같은 방정식에 포함된 수리학적 매개변수에 대한 불확실도를 고려하여 실시간 홍수범람 위험 예상지점을 판단하고, 제내지로의 범람위험도를 산정한다.

최근에 국내에서 제방붕괴로 인한 홍수피해의 예는 1990년 9월 일산제 붕괴로 인한 일산지역의 대침수

피해, 1991년 8월 태풍 Gladys에 의한 부산 수영강 상류부의 제방월류에 따른 저지대 침수로 인한 큰 피해가 있었다. 1992년 9월 방조제 붕괴로 인한 목포시의 침수피해와 1995년 8월 태풍 Janis와 집중호우로 인해서 남한강 등 전국에 걸친 하천유역에서 범람침수 피해를 겪은 바 있다. 또한, 1996년 7월 한탄강 유역에서 발생한 연천댐의 붕괴에 따른 제방월류에 의한 범람피해, 1998, 1999년에 임진강 등에서 발생한 홍수 범람 등은 이 분야에 대한 연구의 필요성을 크게 증대시켰다.

수공학 분야에서 Kalman Filter와 상태공간기법에 대한 연구로서는 Duong 등(1985)이 확장된 Kalman Filter기법을 수문모형에 적용하였고, Szollosi-Nagy (1976)는 회선적분에 의해 표시되는 수문학적 입출력 모형을 사용하여 유출 예측에 대하여 이산형 Kalman Filter기법을 적용하였다. Wood와 Szollosi-Nagy (1978)은 Italy에서의 Ombrone강에서의 6시간 앞선 시간에서의 유량예측을 위해서 Kalman Filter 기법을 사용하였다.

실시간 홍수예보와 제어에 관한 적용은 O'Connell (1980)에 의해 보고된 바 있으며 개념적 수문모형에 대한 Kalman Filter 기법의 적용에 대한 연구는 Kitanidis와 Bras (1980a,b)에 의해서 보고된 바 있다. Cooper와 Wood(1982a,b)는 강우-유출과정의 모의에 적용되었을 때 다변량 시계열의 확인과 매개변수 추정의 문제를 연구하였고, Cooper(1982)는 비선형 수문모형에서의 매개변수의 실시간 추정을 위해서 추계학적 근사기법을 적용하였으며, Patry와 Marino (1984)는 실시간 도시유출 예측모형에 대한 매개변수에 대해 확인하였다. Kitanidis 등(1984)은 Kalman Filter기법을 사용하여 자료수집 전략의 효율성을 평가하였다. Bras와 Rodriguez Iturbet(1985)는 Kalman Filter기법에 의한 동역학적 수문시스템 평가를 실시하였다.

Szollosi-Nagy와 Melus(1988)는 ARMAX 모형의 순환적 실시간 예측에 Kalman Filter기법을 적용하였고 확정론적 모형과 ARMA모형을 Danube강에 적용하였으며, Young(1989)은 수문시계열의 순환적 평가와 예측에 대해 검토하였다.

국내에서 실시간 홍수모의에 관한 연구는 매덕효 등(1995)이 실시간 유량예측을 위해 추계동역학적 모형을 연구한 바 있다. 조원철 등(1996)은 Muskingum-Cunge 방법에 의해서 실제하천에서의 추계학적 상

태·공간모형을 개발하고 이를 한강하류부 지역에 적용하였고, 배덕효(1997)는 저류함수법을 이용하여 추계학적 홍수예측모형을 개발하고, 이를 낙동강 회천 유역에 적용한 바 있다. 홍수법람에 관한 불확실도 해석에 대해서는 한건연 등(1997a, 1997b)은 홍수위의 부동류해석을 위해서 Monte Carlo 기법을 적용하여 해석한 바 있고, 이흥래 등(1998a)이 Monte Carlo 기법과 동역학적 홍수추적 모형에 대해서 연구하고, 이를 연천 댐 붕괴에 대해서 적용한 바 있다. 또한 이흥래 등(1998b, 1998c)은 DWOPER 모형과 Monte Carlo 모형을 연계하여 해석한 바 있으나, 아직까지 실시간의 개념을 도입하고 dynamic wave 모형을 Kalman filter와 연계한 연구는 미미한 실정이다.

## 2. 확정론적 홍수해석

### 2.1 기본방정식

확정론적 홍수추적을 위한 DAMBRK 모형은 Saint-Venant 식에 대한 음해형 유한차분해석에 그 기본을 두고 있다. 즉, 자연하천에 대한 질량보존의 식과 운동량보존의 식은 식 (1), (2)와 같다 (Fread, 1990).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial(A+A_0)}{\partial t} - q = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \left( \frac{\partial h}{\partial x} + S_f + S_e \right) + L = 0 \quad (2)$$

$$\text{여기서 } S_f = \frac{n^2 |Q| Q}{A^2 R^{4/3}} = \frac{|Q| Q}{K_c^2}$$

$$S_e = \frac{K_e \partial(Q/A)^2}{2g \partial x}$$

여기서  $Q$ =유량,  $A$ =흐름단면적,  $A_0$ =저류단면적,  $q$ =측방유입량,  $x$ =거리,  $t$ =시간,  $h$ =수위,  $S_f$ =마찰경사,  $S_e$ =단면 확대·축소에 의한 손실경사,  $B$ =하폭,  $n$ =조도계수,  $L$ =저류에 의한 운동량의 변화이다.

### 2.2 해석알고리즘

식 (1), (2)의 비선형 편미분방정식을 대수방정식으로 변환하기 위하여 4점 가중 음해법의 유한차분 근사해법이 적용되었고, 이를 식 (3)과 같은 Newton-Raphson 방법에 의해서 해석하게 된다.

$$J'(X^k) \Delta X = -F(X^k) \quad (3)$$

여기서  $X^k$  = 벡터량,  $J'$  = Jacobian ( $X^k$ ) 값에 대한 편미분치들로 구성되는 계수 매트릭스,  $F(X^k)$  =  $X^k$  값에 대한 비선형방정식,  $\Delta X$  =  $2N$ 개의 미지수를 포함하는 벡터이다. 식 (3)은 미지의 벡터  $\Delta X$ 가 선형일 경우의 연립방정식을 나타낸다. 미지값  $\Delta X$ 에 대한 식 (3)의 해는 Gauss 소거법과 같은 적절한 역행렬계산기법 등으로 구할 수 있다. 실제로  $\Delta X$  벡터는 식 (4)와 같은 초기추정치와 개량된 추정치간의 차이를 나타내게 된다.

$$\Delta X = X^{k+1} - X^k \quad (4)$$

여기서  $k$ =반복횟수,  $X^k$ =초기추정치,  $X^{k+1}$ =개량된 추정치를 나타낸다. 미지의 유량 ( $Q_i^{+1}$ ,  $Q_{i+1}^{+1}$ )과 수위 ( $h_i^{+1}$ ,  $h_{i+1}^{+1}$ )항을 포함하는  $\Delta X$ 가 허용한계 이내보다 작을 경우 보통 1~2회 반복계산으로 만족한 결과를 얻을 수 있다. 효율적인 매트릭스 해석기법은 음해형 수치모형에 있어 매우 중요한 사항이다. DAMBRK에서는 penta-diagonal형의 변형된 Gauss 소거기법에 의하여 효과적으로 그 해를 구할 수 있다.

## 3. 실시간 범람위험도 해석

범람위험도 모의를 위해서 기존의 확정론적 모형에서는 모형에 대한 입력자료의 정확도에 크게 의존하게 되는데, 모형의 기본방정식, 매개변수, 경계조건 및 초기조건에 포함되어 있는 불확실성을 제대로 반영하지 못하고 있다. 따라서, 하도부에서 실시간 홍수해석을 위해서 기존의 DAMBRK 모형을 Kalman Filter 기법과 연계하여 적용하였다. 또한 Kalman Filter에 의해서 예측된 실시간 홍수예보 자료를 이용하고, Monte Carlo 기법을 도입하여 홍수파의 제방법람에 대한 위험도를 산정하였다.

### 3.1 추계동역학적 방정식

DAMBRK의 기본방정식인 식 (1), (2)에서 Manning의 조도계수, 경계조건 및 초기조건과 같은 방정식에 포함된 수리학적 매개변수에 포함된 불확실도를 고려하기 위해서 주어진 지배방정식에 Gaussian 백색잡음과정을 도입함으로써 확정론적 동역학 시스템을 추계학적 동역학 시스템으로 변형하였다. 즉 확정론적 방정식인 식 (5)는 추계학적 방정식인 식 (6)으로 기술될 수 있다.

$$F(Y_{j-1}, Y_j, t_{j-1}, t_j) = 0 \quad (5)$$

여기서  $Y_j = (Q_1, h_1, \dots, Q_N, h_N)_{t=t_j}$ 이고,  $Q, h$ 는 각각 유량과 수위이다.

$$F(Y_{j-1}, Y_j, t_{j-1}, t_j) = W_{j-1} \quad (6)$$

여기서  $W$ 는 Gaussian 백색잡음 벡터이다. 하천 주요 관측점에서의 수위 및 유량의 실시간 관측치를 각 시간 단계에서 구할 수 있고, 관측치에 있어서의 오차가 백색잡음과정에 의해 표시될 수 있다면, 관측지점의 위치에 해당하는  $x$  좌표에서의 일련의 관측방정식을 유도할 수 있다. 이제 관측방정식은 아래와 같은 벡터-매트릭스 형태로 기술될 수 있다.

$$Z_j = H_j Y_j + V_j \quad (7)$$

여기서  $Z_j$ 는 시간  $t_j$ 에서의 관측치,  $H_j$ 는 시간  $t_j$ 에서의 관측 매트릭스로서 잡음이 없는 경우에  $Z_j$ 를 구성하는 상태변수의 선형조합으로 기술된다  $V_j$ 는 관측오차와 관련된 잡음으로서 관측잡음과정의 통계치로서 기정한다.

Preissmann의 4점 유한차분모형을 이용하여 시간  $t = t_j$ 에서의 상태변수에 대한 예측 추정치  $Y_j(-)$ 는 이전 단계에서의 최적 추정치  $Y_{j-1}(+)$ 에 의해서 치환된  $Y_{j-1}$ 을 가지고 흐름방정식으로부터 얻어진다. 식 (5)는 Taylor 확장을 사용하고 1차항 만을 보유하여  $Y_{j-1}(+)$ 과  $Y_j(-)$ 에 대해서 선형화될 수 있으므로 식 (8)과 같이 선형추계학적 시스템으로 변형될 수 있다.

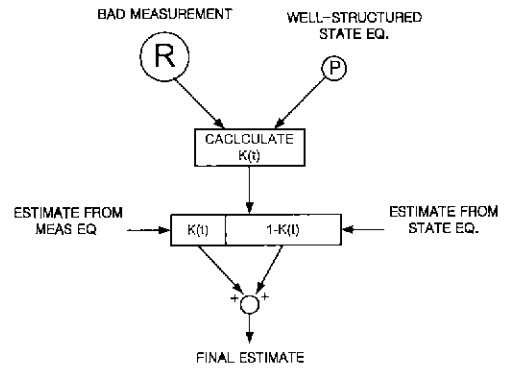
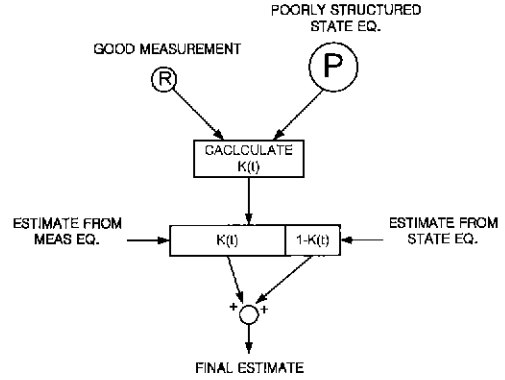


그림 1. Kalman Gain의 개념

$$Y_j = \Phi_{j-1} Y_{j-1} + W_{j-1} \quad (8)$$

$$\Phi_{j-1} = - \left[ \left( \frac{\partial F}{\partial Y_j} \right)^{-1} \left( \frac{\partial F}{\partial Y_{j-1}} \right) \right]_{(Y_{j-1}(-), Y_{j-1}(+))} \quad (9)$$

실시간 추정치는 선형 Kalman Filter 알고리즘을 적용시켜 해석하였다. 그림 1은 Kalman Filter 적용 시 Kalman gain의 개념을 나타내고 있으며, 본 연구에서 적용된 계산과정은 다음과 같이 정리될 수 있다.

① 시간대  $t_{j-1}$ 에서  $Y$ 의 최적 추정치  $\hat{Y}_{j-1}(+)$ 를 기초로 하여 새로운 시간대  $t_j$ 에서  $Y$ 의 예측추정치  $\hat{Y}_j(-)$ 를 동역학적 모형에 의해 계산한다.

$$\hat{Y}_j(-) = \Phi_{j-1} \hat{Y}_{j-1}(+) \quad (10)$$

② 예측추정치  $\hat{P}_j(-)$ 의 공분산  $\hat{P}_j(-)$ 를 다음 방정식에 의해 계산한다.

$$\hat{P}_j(-) = \Phi_{j-1} \hat{P}_{j-1}(+) \Phi_{j-1}^T + Q_{j-1} \quad (11)$$

여기서  $\hat{P}_{j-1}(+)$ 는  $\hat{Y}_{j-1}(+)$ 의 공분산이다.

③ 시간  $t_j$ 에서의 Kalman gain 매트릭스를 계산한다.

$$K_j = \hat{P}_j(-) H_j^T [H_j \hat{P}_j(-) H_j^T + R_j]^{-1} \quad (12)$$

④ 새로운 관측치  $Z_j$ 가 이용가능하다면, 예측추정치는 다음 방정식을 적용하여 시간  $t_j$ 에서의  $Y$ 의 최적 상태추정치인  $\hat{Y}_j(+)$ 를 얻기 위해 경신된다.

$$\hat{Y}_j(+) = \hat{Y}_j(-) + K_j [Z_j - H_j \hat{Y}_j(-)] \quad (13)$$

⑤  $Y_j(+)$ 의 공분산은 다음 식에 의해 계산된다.

$$\hat{P}_j(+) = [I - K_j H_j] \hat{P}_j(-) \quad (14)$$

여기서,  $I$ 는 단위 매트릭스이다

⑥ 시간간격을 증대시키면서 ①~⑤ 단계를 반복수행한다.

### 3.2 범람위험도의 산정

하천에서의 홍수와 해석에 있어 하천 유역의 하도단면의 형상을 결정하기 위해 필요한 자료정보는 통상 지형자료로부터 얻게 된다. 하도단면의 불확실도에 관한 오차의 주요 원인은 실제 관측에 의한 오차, 지형도 상의 등고선 간격간의 선형변화를 가정한 오차, 등고선 간격간의 거리가 측정될 때 도입되는 수직업에 의한 오차 등이다. Manning의 조도계수는 하천에 있어 흐름에 대한 수로내의 저항력을 포괄적으로 표시하고 있으나 직접적인 관측은 불가능하다. 통상적인 강우-유출에 의한 홍수의 경우에 있어서 Manning의  $n$ 값은 주로 실제 관측에 의해서 평가되며 과거의 홍수기록으로부터 관측된 홍수위를 사용함으로써 검정하게 된다.

그러나 댐 붕괴의 경우는 과거의 댐 붕괴에 따른 판

측기록이 없는 매우 큰 홍수위가 발생되기 때문에 이전의 홍수기록에 기초하여 Manning의 계수를 완전하게 검정하는 것은 불가능하다. 과거홍수로부터 유도된 계수는 댐 붕괴 홍수와 관련된 추가적인 에너지 손실을 고려하기 위해서 때로는 증대될 필요가 있다. 과연 어느 정도까지 그 계수를 증대시켜야할 지에 관한 불확실도가 야기된다.

Monte Carlo기법이 홍수류의 하도단면의 형상과 저항계수에 기인한 불확실도의 영향을 검토하기 위해 적용되었다. 하천의 형상과 조도계수에 있어서의 오차는 공간적으로 비상관적이며 임의적으로 분포되어 있는 것으로 고려하였다. 홍수위와 관련된 하천제방은 홍수를 소통시키기 위해 하도를 제한하는 시설물로서, 홍수소통능력을 상회하는 홍수량이 상류로부터 전달되어 유희하는 경우에는 제방의 정상부를 월류하게 된다. 이 경우의 실행함수  $g_L$ 은 식 (15)와 같다.

$$g_L = H_D - H_0 - h_F \quad (15)$$

여기서  $h_F$ ,  $H_D$ ,  $H_0$ 는 각각 홍수의 유입에 의한 상승수위, 제방고, 초기수위를 나타내고 있다.  $H_D$ 의 값은 제방지점에서 직접 측정하거나 설계도면으로부터 알 수 있다.  $H_0$ 는 저유량시의 하천수위이다.  $h_F$ 는 홍수에 의한 최대 상승수위로서 그 값은 상류로 유입되는 홍수의 유입수문곡선, 초기수위, 하천의 수위-저류량 관계 등에 따라 변동성을 가지게 된다. 이상홍수로 인해 발생한 홍수류가 하도 내로 전파될 경우 이로 인한 하천제방의 홍수범람위험도를 산정하기 위해 Monte Carlo 기법을 적용하여 해석하였다.

본 연구에서 난수의 발생은 식 (16), (17)과 같은 multiplicative congruential generator를 이용하였다

$$X_{i+1} = a X_i \pmod{m} \quad (16)$$

$$U_i = \frac{X_i}{m} \quad (17)$$

여기서  $a=16807$ ,  $m=231-1$ ,  $\pmod{m}$ 은 modulus  $m$ 에 의한 나머지 값,  $X_i$ 는 균등난수를 발생시키기 위한 초기값,  $U_i$ 는 균등분포에 의한 난수를 나타내고 있다. Monte Carlo기법에 의한 위험도 계산 방법은 다음과 같이 요약될 수 있다.

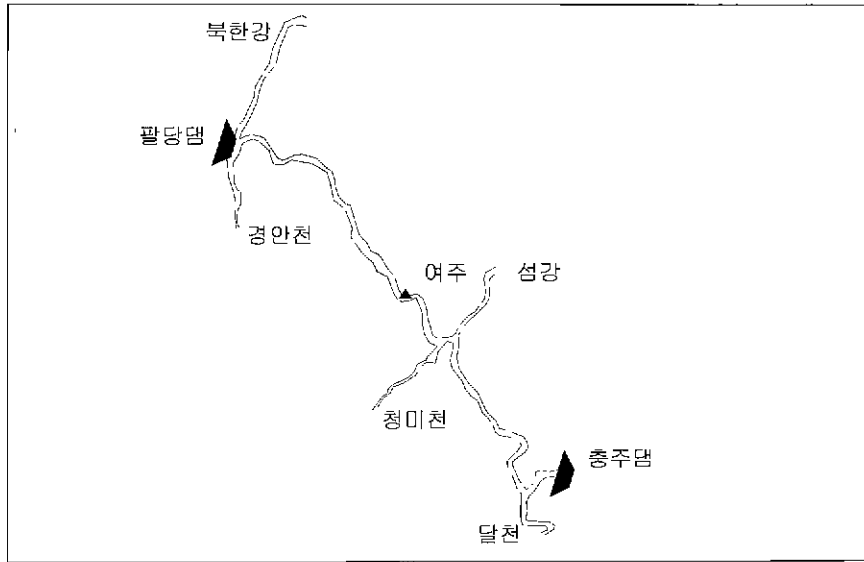


그림 2. 적용대상 구간

- ① 각 매개변수에 대한 분포형을 결정하고 평균과 표준편차(또는 변동계수)를 산정한다.
- ② 각 분포형에 맞게 난수를 발생시킨다.
- ③ 정해진 실행합수의 각 매개변수 값들을 계산한다.
- ④ 반복계산 후 발생빈도 및 반복계산수에 의하여 위험도를 구한다.

#### 4. 모형의 적용

##### 4.1 대상유역

본 연구모형을 1990년 9월 9일~9월 13일 기간과

1995년 8월 22일~8월 28일 기간의 한강 유역에 대한 홍수의 경우에 대하여 적용하였다. 계산구간은 그림 2에서와 같이 충주댐~팔당댐까지의 114.21km구간으로서 82개의 계산단면이 적용되었다.

평균적인 계산거리간격  $\Delta x=1.4\text{km}$ , 계산시간간격은  $\Delta t=1\text{hr}$ 이었다. 이 구간에서의 주요 지류로서는 달천, 청미천, 섬강, 경안천, 북한강이 고려되었다. 상류단 경계조건으로서는 충주댐의 방류유량 수문곡선을 이용하였고, 하류단 경계조건으로서는 팔당에서의 수위수문곡선을 이용하였다. 그림 3~그림 6은 '90년, '95년 홍수에 대한 충주댐의 유량수문곡선과 팔당지점의 수위수

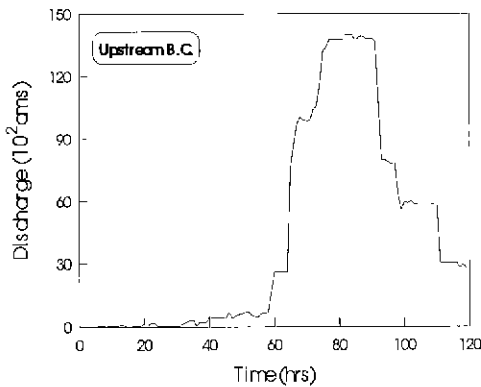


그림 3. 충주댐에서의 유량수문곡선 ('90년 홍수)

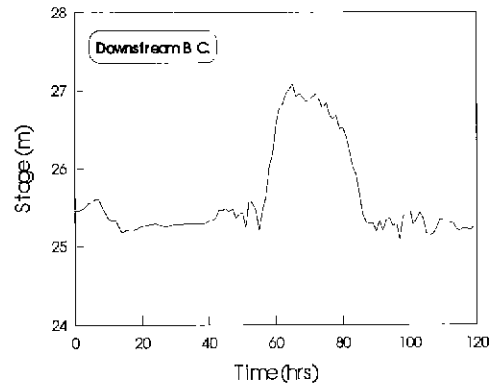


그림 4. 팔당에서의 유량수문곡선 ('90년 홍수)

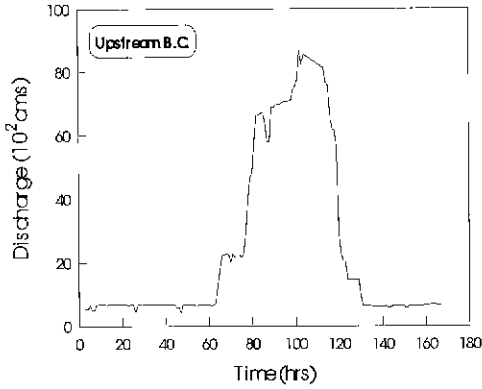


그림 5. 충주댐에서의 유량수문곡선 ('95년 홍수)

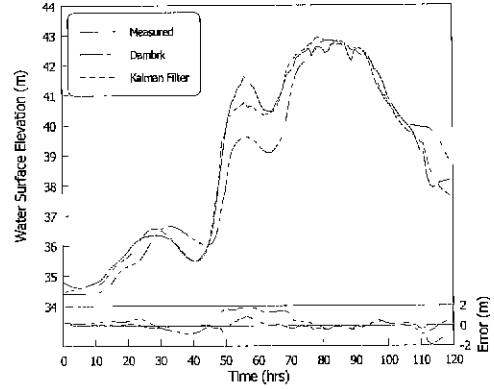


그림 7. 여주지점에서의 수위수문곡선의 비교 ('90년 홍수)

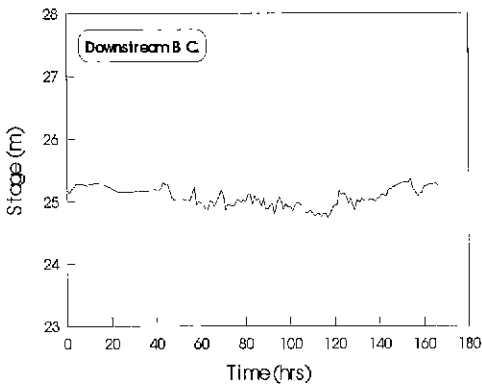


그림 6. 팔담에서의 유량수문곡선 ('95년 홍수)

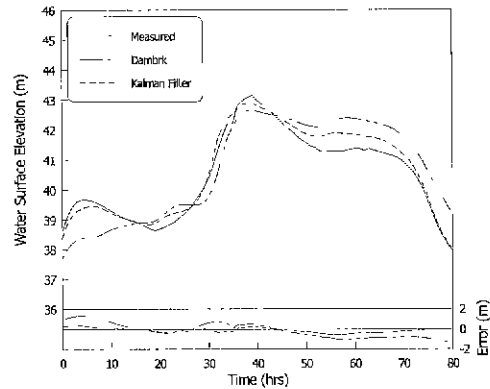


그림 8. 여주지점에서의 수위수문곡선의 비교 ('95년 홍수)

문곡선을 나타내고 있다.

#### 4.2 실시간 홍수추적

DAMBRK 모형을 이용하여 확정론적 홍수추적을 실시하였다. 적용된 조도계수는 이전의 홍수조건으로부터 검증된 값으로서 거리구간 및 수위조건별로  $n=0.020\sim0.052$ 의 범위를 이용하였다(건설교통부, 1997).

'90년 홍수조건에 대해서 도출된 최적값으로서는 관측수위의 분산은  $0.1m^2$ , Saint-Venant식이 가지는 잡음의 분산은 0.5로 구하였고, 초기수심과 유량의 분산은 각각  $0.001m^2$ ,  $1000(m^3/s)^2$ 으로 산정되었다. 여주지점 기지의 관측값과 Kalman Filter 기법을 도입하기 이전의 결과와 Kalman Filter 기법을 도입한 후의 결과를 비교하여 그림 7에 도시하였다. '90년 홍수의 경우 확정론적 계산치와 실측치의 오차는  $0.01\sim$

$2.05m$ 로 나타났으나 Kalman Filter를 도입한 경우에 대한 오차는  $0.01\sim0.89m$ 로 나타났다.

'90년 홍수에 대해 도출된 최적값을 '95년 홍수에 대해서 검증한 결과가 그림 8에 나타나 있다. 이 경우에도 확정론적 계산치와 실측치의 오차는  $0.04\sim1.32m$ 로 나타났으나 Kalman Filter를 도입한 경우에 대한 오차는  $0.00\sim0.62m$ 로 나타났다. 각 경우에 대한 평균 제곱오차는 '90년 홍수에 있어서 확정론적 모의의 경우  $0.86m$ 로 나타났으나 Kalman Filter를 도입한 경우에는  $0.28m$ 로 나타났고 '95년 홍수에 있어서 확정론적 모의의 경우  $0.77m$ 로 나타났으나 Kalman Filter를 도입한 경우에는  $0.25m$ 로 나타났다. 그림에서 보는 바와 같이 기존의 DAMBRK 모형보다 Kalman Filter와 연계한 모형이 실제적으로 더욱 관측값과 일치됨을 볼 수 있었다. 또한 관측값과 본 연

구모형의 결과와의 편차 오차를 도시하였는데 대부분의 시간단계에서 그 오차가 개선되었음을 확인할 수 있었다.

향후 더욱 정교한 모형의 적용을 위해서 관측값의 분산과 지배방정식의 잡음분산, 초기수위와 초기유량에 대한 분산의 적절한 범위와 최적의 값을 도출하기 위한 다양한 홍수시상에 대한 구체적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

### 4.3 범람위험도 산정

Kalman Filter에 의한 실시간 홍수모의 결과에 대해서 하도단면의 기하형상과 조도계수에 기인한 불확실도의 영향이 검토되었다. 하천의 기하형상과 조도계수에 있어서의 오차는 공간적으로 비상관적이며 임의적으로 분포되어 있는 것으로 고려하였다. 본 적용에 있어서 수위-수면폭 관계의 오차는 실제 측량도면에서의 읽음값의 오차를 고려하여  $\pm 1\%$ , 조도계수의 오차는  $\pm 5\%$ 인 균등분포로 가정하여 모의수행을 실시하였다.

각 하도 및 수위-수면폭 구간에 대해서 균등분포에 의한 난수를 발생시켜 해석하였다. 모의 수행 오차를 감소시키고, 통계학적으로 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해서 각 하도단면형상과 조도계수에 대해서 200회 반복수행이 이루어졌다. Monte Carlo 모의에서의 반복 계산횟수의 적정성을 살펴보기 위해서 100회, 200회, 300회, 500회를 모의해 본 결과, 본 연구에서는 200회에서 계산수렴성이 확인되었으므로 이 값을 적용하였다. 모의수행에 사용된 매개변수군은 단면형상과 조도계수에 대한 난수 발생값의 임의 조합에 의해 형성되었다. 추계학적 홍수위 해석결과를 이용하여 남한강 주요지점에서의 제방고와 홍수위를 비교하여 그림 9에 도시하였다.

하도단면 및 조도계수의 불확실도를 고려한 경우에 대해서 이 구간에서의 최소 및 최대수위에 대한 월류 위험도는 63~100%로 나타났다. 즉, 단면 No. 25 (38.38km), No. 32(47.75km), No. 42(63.22km), No. 44(65.65km)에서의 범람 위험도는 100%로 나타났다. No. 25 에서의 제방고는 EL 51.80m인데 반해서 Monte Carlo 모의에 의한 수위는 55.095~56.201m의 범위로 나타났고, No. 32에서의 제방고는 EL 47.0m인데 비해서 모의수위는 49.038~49.987m의 범위로 나타났다. 또한 No. 42에서의 제방고는 EL 41.60m이었고 모의수위는 41.837~42.517m의 범

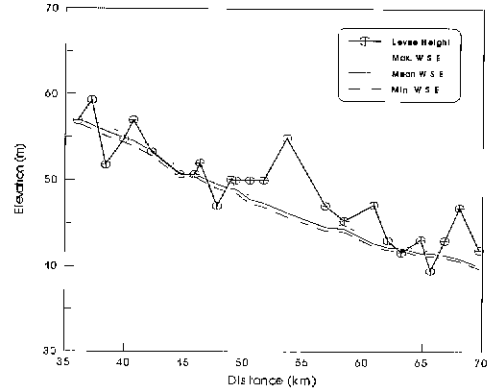


그림 9. 주요지점에서의 범람위험도 산정

위로 나타났고, No. 44에서의 제방고는 EL 39.5m 이었고 모의수위는 41.211~41.890m의 범위로 나타났다. 한편 No. 23, 26, 28, 29, 30의 범람위험도는 각각 68%, 64%, 62.5%, 69%, 74.5%로 각각 나타났다. 따라서, 이들 지점에 대해서는 제방고에 대한 보강이 집중적으로 이루어져야 할 것으로 판단되었다.

향후 주요하천에서의 관련 매개변수들에 대한 많은 자료와 정보를 수집, 분석하고, 이를 적용한다면 정확한 범람위험도를 산정할 수 있을 것으로 사료되었고, 그 해석결과는 하천제방의 안전관리 및 제내지의 홍수 방어의 측면에서 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구는 하천에서의 실시간 범람위험도 해석을 위해서 동역학적 홍수추적 모형인 DAMBRK에 Kalman Filter 기법을 도입하여 해석한 것으로서, 주요 연구결과는 다음과 같이 요약할 수 있다

(1) 본 연구에서는 확정론적 동역학 시스템을 Gaussian 백색잡음 과정을 도입하여 추계학적 동역학 시스템으로 변형시켜, 동역학적 모형에 의한 예측치를 실시간 관측치와 조합하여 해석할 수 있는 Kalman Filter 기법을 도입하여 실시간 범람위험도를 예측할 수 있는 알고리즘을 개발하였다.

(2) 본 연구모형은 '90년 9월과 '95년 8월의 남한강 홍수에 적용하였다. 그 결과 기존의 확정론적 모형보다 Kalman Filter를 도입한 모형이 실제적으로 더욱 관측값과 일치하는 것으로 모의되었다. 또한 관측값과 본 연구모형의 결과와의 편차 오차를 도시한 결과 대부분의 시간단계에서 그 오차가 개선되었음을 확인할 수



있었다.

(3) 추계동역학적 모형에 의한 실시간 홍수모의와 Monte Carlo 기법을 연계하여 하도단면의 기하형상과 조도계수에 기인한 불확실도의 영향을 검토하였다. 200회의 반복계산 결과 남한강 주요지점에서의 홍수범람 위험도를 산정한 결과, 주요 범람지점의 위험도는 63~100%로 나타났다.

(4) 향후 주요하천에서의 다양한 홍수사상의 경우에 대한 실측치에 의한 매개변수를 검증하고, 이를 적용한다면 정확한 범람위험도를 산정할 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 그 해석결과는 하천제방의 안전관리 및 제내지의 홍수방어의 측면에서 크게 기여할 수 있을 것으로 판단되었다.

### 감사의 글

본 연구는 1998년도 한국학술진흥재단 학술연구비인 자유공모과제(1998-001-E01931)에 의해서 지원되었으며 지원당국에 깊이 감사드립니다.

### 참고 문헌

베덕호, 조원철, 허준행 (1995). "실시간 유량예측을 위한 추계동역학적 모형에 관한 연구." 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제15권, 제2호, pp. 433~442.

베덕호 (1997). "저류함수법을 이용한 추계학적 실시간 홍수예측모형의 개발." 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제30권, 제5호, pp. 449~457.

이홍래, 한건연, 조원철 (1998a). "댐 붕괴 홍수모의에 대한 불확실도 해석." 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제31권, 제3호, pp. 337~345.

이홍래, 한건연, 김상호, 최현상 (1998b). "하천홍수 범람해석을 위한 수치모형의 개발: I. GIS와의 연계해석", 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제31권, 제4호, pp. 415~427.

이홍래, 한건연, 김상호 (1998c). "하천 홍수범람해석을 위한 수치모형의 개발(II) : 불확실도 해석." 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제31권, 제4호, pp. 429~437.

조원철, 베덕호, 이종철 (1996). "실제하천에서의 추계학적 상태·공간형태의 Muskingum-Cunge 모형 개발." 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제16권, 제II-6호, pp. 533~542.

한건연, 이종석, 김상호 (1997a). "댐 및 하천제방에

대한 위험도 해석기법의 개발 : I 모형 및 이론", 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제30권, 제6호, pp. 679~690.

한건연, 이종석, 김상호 (1997b). "댐 및 하천제방에 대한 위험도 해석기법의 개발: II. 적용 예", 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제30권, 제6호, pp. 681~698.

Bras, R.L., and Rodriguez-Iturbe, I. (1985). *Random Functions and Hydrology*. Addison-Wesley, Massachusetts.

Cooper, D.M. (1982). "Adaptive Parameter Estimation for Non-Linear Hydrological Models with General Loss Functions." *J. of Hydrology*, Vol. 58, pp. 29~45.

Cooper D.M., and Wood, E.F. (1982a). "Identification of Multivariate Time Series and Multivariate Input-Output Models." *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 4, pp. 937~946.

Cooper D.M., and Wood, E.F. (1982b). "Parameter Estimation of Multiple Input-Output Time Series Models: Application to Rainfall-Runoff Processes." *Water Resources Research*, Vol. 10, No. 5, pp. 1352~1364.

Duong, N., Win, C.B., and Johnson, G.R. (1975). "Modern Control Concepts in Hydrology." *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.* Vol. 5, No. 1, pp. 46~53.

Fread, D.L. (1990). *DAMBRK Users Manual*, Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service, Silver Springs, MD.

Kalman, R.E. (1960). "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems." *J. of Basic Eng.* (Trans ASME Ser. D), Vol. 82, No. 1, pp. 35~45.

Kitanidis, P.K., and Bras, R.L. (1980a). "Real-Time Forecasting with a Conceptual Hydrologic Model: 1 Analysis of Uncertainty." *Water Resources Research*, Vol. 16, No. 6, pp. 1025~1033.

Kitanidis, P.K., and Bras, R.L. (1980b). "Real-Time Forecasting with a Conceptual

- Hydrologic Model: 2. Applications and Results." *Water Resources Research*, Vol. 16, No. 6, pp. 1034~1044.
- Kitanidis, P.K., Lara, O.G., and Lane, R.W. (1984). "Evaluation of Streamflow Data Collection Strategies for Alluvial Rivers." *J. of Hydrology*, Vol. 72, pp. 85~103.
- O'Connell, P.E. (1980). "Real-Time Hydrologic Forecasting and Control." *Proc. of Third International Workshop*, Institute of Hydrology, Wallingford, England.
- Szollosi-Nagy, A. (1976). "An Adaptive Identification and Prediction Algorithm for the Real-Time Forecasting of Hydrological Time Series" *Hydro. Sci. Bull.* Vol. 21, No. 1, pp. 163~176.
- Szollosi-Nagy, A., and Mekis, E. (1988). "Comparative Analysis of Three Recursive Real-Time River Flow Forecasting Models: Deterministic, Stochastic and Coupled Deterministic-Stochastic." *Stochastic Hydrol. and Hydraul.* Vol. 2, pp. 17~38.
- Wood, E.F., and Szollosi-Nagy, A. (1978). "An Adaptive Algorithm for Analyzing Short-Term Structural and Parameter Changes in Hydrologic Prediction Models." *Water Resources Research*. Vol. 14, No. 4, pp. 577~581.
- Young, P. (1989). *Recursive Estimation and Forecasting of Hydrological Time Series*, NATO Summer School, Peniscola, Spain.

(논문번호:00-013/접수 2000.02.28/심사완료:2000.04.06)