

## 탱크模型的 媒介變數推定을 위한 狀態空間模型的 決定 Determination of State-Space Model for Parameter Estimation of Tank Model

李 寬 洙\* · 李 英 錫\*\* · 鄭 鎰 光\*\*\*

Lee, Kwan Soo · Lee, Young Suk · Chung, Ill Kwang

---

### Abstract

The propose of this study is improve the uncertainty of parameter choice of tank model by the trials and errors method. The real time prediction of parameter by using the Kalman filter is practiced to get the effective prediction algorithm of low flow runoff. Even though the total discharge of runoff through the orifice of each tank should be similar to the observed discharge, the tank model which can show the various basin characteristic is influenced by the runoff circumstances. As a result of the real-time estimation of the tank model parameter by the state-space type of Kalman filter, the variation of runoff circumstances is static when the convergence of observed value and estimated value keeps the fixed high point. The parameter of tank model which is estimated by Kalman filter shows good result for low flow and reasonable adaptability where flow change abruptly. The Kalman filter method is proved to give better result than Automatic structure estimation method.

---

### 요 지

본 연구의 목적은 탱크모형의 매개변수를 시행착오법으로 산정할 경우, 불확실성을 개선하기 위해 Kalman filter로 매개변수를 실시간 예측하여 저수유출의 예측에 효과적인 알고리즘을 얻고자 하였다. 유역특성을 다양한 구조로 나타낼 수 있는 탱크모형은 각 단 탱크에 부착된 유출공으로부터 유출한 총 유출량이 관측유출에 유사하게 나타나야 하지만 유출환경의 영향으로 수렴성이 좋지 않았다. 이러한 영향을 보완하기 위하여 탱크 모형의 매개변수를 Kalman filter의 상태공간 모형에 의하여 실시간으로 추정된 결과, 시간 경과에 따라 추정치와 관측치의 수렴도가 높아 일정한 값을 유지하였으며, 이때의 유출환경을 나타내는 상태공간의 매개변수 변화가 정적임을 알 수 있었다. 따라서 Kalman filter에 의한 탱크모형의 매개변수 추정기법은 저수유출 예측에 특히 효율성이 좋았으며 유량이 급변하는 곳에서도 어느 정도 적용하여 기존 탱크모형의 구조를 자동기법으로 정하는 예측시스템 보다 유출예측 시스템에 의한 탱크모형의 구조적 알고리즘이 적합한 모형을 입증하였다.

---

\* 전남대학교 토목공학과 교수

\*\* 광주대학교 토목공학과 부교수

\*\*\* 목포전문대학 토목과 교수

## 1. 序 論

다목적 시설의 건설 및 인접유역으로의 유역변경을 포함한 광역 이수계획을 수립해야 하는 단계까지 이르도록 전체 물 수요가 급증하게 되었으며, 또한 비교적 풍부한 강수량의 혜택을 받고 있지만 강수의 월별 및 계절적 편기현상이 매우 심하여 이에 따른 하천 수자원의 부족현상이 날로 심화 되어 가고 있기 때문에 강수에 의한 수자원의 규모를 예측하여 활용하기 위해서는 일단위 정도의 하천유출량을 정확하게 추정할 수 있는 유출해석이 필요하다.

일별유출량의 유출해석에는 현재 및 장래 유역의 유황을 파악하여 저수유출량 예측이 가능하고, 유역의 물 수지 해석에 적용이 용이한 예측모형으로서 다성분계 비선형인 탱크모형이 있다. 이 모형은 유역에 따라 직렬 또는 병렬로 연결하여 유역반응을 표현하는 것으로 일본의 많은 유역에 적용하여 실용화 된 모형이다(菅原, 1972, 1979)

탱크모형의 계반계수를 결정하는 방법으로 초기 단계에서는 시행착오법에 의하여 매개변수를 결정하는 일종의 수치실험이 사용되었으며, 그후 각 부분기간에 있어서 추정유량과 관측유량의 비와 추정,관측의 수문곡선의 감쇄시의 경사 비를 평가기준으로 하는 자동화 모형에 의하여 매개변수를 결정하는 최적기법이 발표되었고(Sugawara 등, 1977), 유황곡선의 비교에 의한 기법도 제안되었다(Sugawara 등, 1978).

한편 국내에서는 탱크모형을 이용한 하천유출모형을 결정, 이를 영산강유역의 장기유출해석에 적용하여 재현성을 입증한 바 있다(이관수, 1984).

그러나 지금까지의 연구는 일단의 최적화 기법으로써, 결정된 매개변수가 매우 정적이므로 시간에 따라 변화하는 유역의 유출 환경변화에는 적용하기가 힘들었다. 따라서 Kalman filter를 이용하여 하천유출량을 예측하기 위해서는 상태공간 구성이 필요하며 이 상태공간을 대표하는 상태벡터를 최적 추정하여야 한다.

시변 시스템에 쉽게 적용할 수 있고 순환구조를 갖는 Kalman filter 알고리즘이 최초로 발표되었

으며(Kalman, 1960), 최적필터에서 발생하는 오차의 공분산행렬을 Riccati형의 비선형 미분방정식으로 유도하여 이산화(discrete)된 선형필터로 바꾸어 순환으로 해를 구하였다(Kalman 등, 1961).

1970년대에 처음으로 수문학분야에 Kalman filter 이론이 응용된 이래(日野, 1974), Kalman filter를 홍수유출의 예측에 적용하여 양호한 유출 예측을 한 바 있으며(서병하, 1982, Wood 등, 1985), 치수방재를 위한 저수지군의 실시간 최적제어를 목적으로 유입량과 저수량을 상태벡터로 하는 상태벡터의 추정에 Kalman filter를 이용한 바 있다(이영석, 1987). 따라서 본 연구에서는 탱크모형에 의하여 산정된 매개변수의 불확실성을 개선하기 위하여 매개변수를 Kalman filter의 상태공간 모형에 의하여 실시간(real time)으로 예측하는 저수유출예측의 알고리즘을 얻고자 하였다.

## 2. 研究 內容

대상유역에 가장 부합된 탱크모형을 구성하여 저수유출을 예측하고자 하였지만 시행착오법에 의하여 매개변수가 산정되기 때문에 보편성이 떨어지고 적용성이 매우 약하여 정상적인 유출예측 보다는 실시간적인 유출해석으로 장기유출을 추정하고자 하였다.

탱크모형의 매개변수 산정은 Kalman filter를 이용하여 매 기간마다 그 여건에 적합한 매개변수를 정하였으며 이로 인한 유출예측을 시도하였다. Kalman filter에 의한 저수유출의 매개변수 산정은 유출자료가 급격히 변하는 곳의 현상을 추정함에 있어서는 다소 어려움이 있으나, 탱크모형 자체가 가지고 있는 조종성의 둔감으로 폭주하지 않고 정적인 안정성(stability)으로 인하여 상호 보완할 수 있는 예측모형이다(菅原, 1979). 따라서 본 연구는 Kalman filter로 탱크모형의 매개변수를 산정하고 탱크모형을 이용하여 유출량을 얻는 방법을 취하였으며, 다음과 같은 제약조건을 두었다.

1) 수문입력 자료의 기간은 1일로 하며, 2) 각종 자동계측 장비로 측정된 일별 관측자료는 즉시 컴퓨터에 입력되어야 한다. 3) 탱크모형의 구성은 각 유역마다 그 유역에 적합한 모형을 재 구성하

Table 1. Summary of Discrete Kalman Filter Equation

System model	$x(k+1) = \Phi(k) x(k) + w(k)$
Measurement model	$z(k) = H(k) x(k) + v(k)$
State vector update	$\hat{x}(k   k) = \hat{x}(k   k-1) + K(k) [z(k) - H(k) \hat{x}(k   k-1)]$
Error covariance update	$M(k   k) = [I - K(k)H(k)] M(k   k-1)$
Kalman gain matrix	$K(k) = M(k   k-1) H(k)^T [H(k)M(k   k-1)H(k)^T + R(k)]^{-1}$

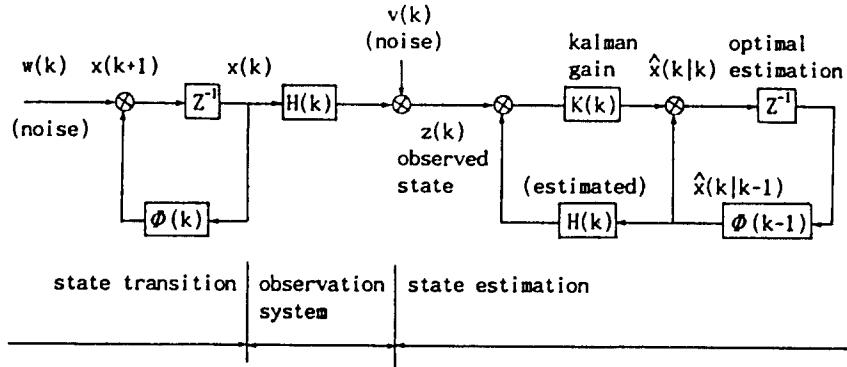


Fig. 1. Conceptual Explanation of Kalman Filter

며, 4) 관측지점의 유역내에 있는 댐 방류량은 댐 하류에 가장 인접한 우량관측소의 강우로 환산하여 추가한다. 5) 증발량은 월평균량을 일증발량으로 환산하여 적용한다.

### 3. Kalman filter의 基本理論

이산형이고 선형이 동적거동인 시스템의 특성을 시스템의 상태로 나타내고 상태벡터  $x(k)$ 를 순환 필터의 알고리즘으로 바꾼다.

즉 시간  $k$ 에서의 상태  $x(k)$ 의 값을 알면 현재 시각에서의  $x(k+1)$ 의 값을 결정할 수 있다는 가정하에서 상태방정식의 형태는 다음과 같다.

$$x(k+1) = \Phi(k) x(k) + w(k) \quad (1)$$

여기서  $x(k)$ 는 상태벡터( $n \times 1$ ),  $\Phi(k)$ 는 상태 천이 행렬(state transition matrix,  $n \times n$ ),  $w(k)$ 는 시스템오차벡터( $n \times 1$ )를 나타낸다.

수자원 문제에서 홍수예보와 같이 실시간으로 처리되는 경우에는 상태벡터  $x(k+1)$ 을 직접 관측할 수 없으므로 그 대신에 벡터  $x(k+1)$ 과 관측오

차를 표시하는 벡터  $v(k)$ 의 선형결합으로 나타낼 수 있는 관측벡터  $z(k)$ 를 도입한다.

Kalman filter에 의한  $x$ 의 최적추정치를 이론식으로 표시하면 다음과 같은 관측방정식으로 나타낼 수 있다.

$$z(k) = H(k) x(k) + v(k) \quad (2)$$

여기서  $z(k)$ 는 관측벡터( $m \times 1$ ),  $H(k)$ 는 관측 변환행렬( $m \times n$ )로 관측치와 상태와의 관계를 나타내며,  $v(k)$ 는 관측오차벡터( $m \times 1$ )이다. 이들 식 (1) 및 (2)를 시스템방정식으로 취하여 Kalman filter 알고리즘을 전개하게 된다.

어떤 시스템을 시스템방정식과 관측방정식으로 모형화할 경우를 상태공간 모형구성(state-space formulation)이라고 부른다.

이와같은 시스템 모형의 형성이 가능할 경우 관측치  $z(1), z(2), \dots, z(k)$ 가 주어지면 시스템의 상태  $x(k+1)$ 의 추정이 가능하며 관측오차 때문에  $x(k+1)$ 의 추정이 불가능할 때에 적용하고자 개발된 것이 Kalman filtering 기법이다.

상태 예측오차의 공분산행렬(covariance ma-

trix)  $M(k | k-1)$ 은

$$M(k | k-1) = E\{[x(k) - \hat{x}(k | k-1)][x(k) - \hat{x}(k | k-1)]^T\} \quad (3)$$

이며, 칼만 이득(Kalman gain) 행렬을 사용해서 관측시각  $k$  에서  $x$  의 최적 추정치  $\hat{x}(k | k)$ 를 계산하면 다음과 같다.

$$\hat{x}(k | k) = \hat{x}(k | k-1) + K(k) \cdot [z(k) - H(k) \hat{x}(k | k-1)] \quad (4)$$

따라서 갱신오차 공분산행렬에 대한 일반식은 다음과 같다.

$$M(k) = [I - K(k)H(k)]M(k | k-1) + [I - K(k)H(k)]^T + K(k)R(k)K(k)^T \quad (5)$$

식 (5)는 부분최적화로서 이득(gain)  $K(k)$ 에 대하여 적용되며, 식 (6)은 평균자승추정오차를 최소화하는 가중치로써 칼만 이득이라 한다.

$$K(k) = M(k | k-1)H(k)^T [H(k)M(k | k-1)H(k)^T + R(k)]^{-1} \quad (6)$$

이는 관측치와 예측치 오차의  $k$ 시간에서 상태추정  $\hat{x}(k | k)$ 를 위한 가중인자로 필터 알고리즘에서 중요한 의미를 갖는다. 관측시각  $k$  에 있어서 상태추정오차의 공분산행렬  $M(k | k)$ 는 다음 식에 의하여 갱신한다.

$$M(k | k) = [I - K(k)H(k)]M(k | k-1) \quad (7)$$

여기서  $I$  는 단위 행렬(unit matrix)을 나타낸다.

필터링 오차의 공분산 행렬은 식 (6)에 의해서 주어진  $K(k)$  값을 사용하여 얻는다.

전술한 식 (4)와 (7)을 이용하면 필터링 된 상태추정치  $\hat{x}(k | k)$ 와 오차공분산(error-covariance)  $\hat{M}(k | k)$ 는 관측치  $z(k)$ 가 주어지면 구할 수 있다.

이상에서 유도한 Kalman filter의 알고리즘을 정리하면 Table 1 과 Fig.1 과 같다.

## 4. 模型設定

### 4.1 地點雨量 補正係數 決定

菅原(1978)에 의하여 제안된 지점우량 보정계수  $CP(K)$  ( $K=1, \dots, NP$ ; 단,  $NP$ 는 우량지점수)는 높은 산지나 다우지역 그리고 평지에 따라 강우 분포 差가 크기 때문에 본 연구에서는 유출량의 변화에 따른 지점우량 보정계수를 다음과 같이 실험적으로 3가지를 정하여 적용하였다.

- 1) 고산준령으로 둘러 쌓여 있는 높은 산지가 많은 곳: 0.1~0.8
- 2) 강우량이 타 지역에 비하여 다우지역에 속하는 곳: 1.2~2.0
- 3) 우량관측소가 평지에 분포되어 있는 곳: 0.9~1.1

지점우량 보정계수는 Table 2 와 같으며, 관측 지점의 유역내에 있는 섬진강댐과 보성강댐의 방류량은 댐 하류에 가장 인접한 우량관측소의 유출고로 환산한 후, 방류계수  $CD(K)$ 를 곱하여 추가하였다. 이때 사용된 섬진강댐과 보성강댐의 방류계수는 각각 1.7, 0.7로 하였다.

그러나 지형적 여건이나 토질 기타의 유역여건에 따라 이 값이 크고 작음은 유출예측을 실행하는 유

Table 2. Correction Factors  $CP(K)$  and  $CD(K)$  in Seomjin River Basin

number	station	$CP(K)$	$CD(K)$
1	imshil	1.33	0.0
2	gangjin	1.32	1.7
3	namwon	1.17	0.0
4	sunchang	1.15	0.0
5	beonam	0.73	0.0
6	bognae	0.25	0.7
7	dongbog	0.35	0.0
8	sungju	0.30	0.0
9	gurye	0.57	0.0
10	samilam	0.10	0.0

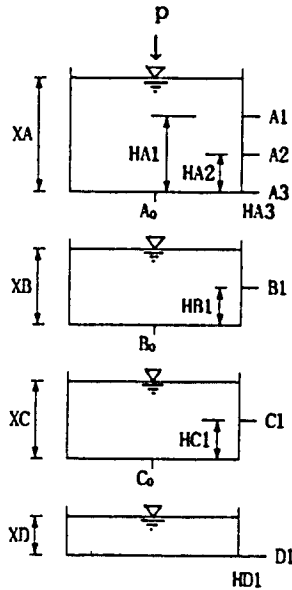


Fig. 2. Each Tank Model for the Estimation of the State-Vector

역 여건에 따라 달라질 수 있다.

#### 4.2 Kalman filter 狀態空間 模型 決定

Fig. 2.는 상태벡터의 추정에 관한 각 단 탱크모형의 매개변수를 나타내며 각 단 탱크의 저류고는

$$\begin{aligned} XA &= \bar{X}A + P \\ XB &= \bar{X}B + XAA_0 \\ XC &= \bar{X}C + XBB_0 \\ XD &= \bar{X}D + XCC_0 \end{aligned} \quad (8)$$

이며, 탱크의 유출공을 통한 총 유출량은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Q &= A1(XA - HA1) + A2(XA - HA2) \\ &+ A3(XA - HA3) + B1(XB - HB1) \\ &+ C1(XC - HC1) + D1(XD - HD1) \end{aligned} \quad (9)$$

각 침투계수  $A_0, B_0, C_0$ 를 Kalman filter에 의존, 추정하기 위해 식 (8)을 (9)에 대입하여 침투계수항만을 분리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Q &= A1(\bar{X}A + P - HA1) + A2(\bar{X}A + P - HA2) \\ &+ A3(\bar{X}A + P - HA3) + B1(\bar{X}B - HB1) \\ &+ B1XAA_0 + C1(\bar{X}C - HC1) + C1XBB_0 \\ &+ D1(\bar{X}D - HD1) + D1XCC_0 \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)을 행렬 구조로 변환시켜 관측방정식을 취하면

$$Q = [H] [X] \quad (11)$$

여기서 관측변환행렬  $[H]$  는

$$[H] = \begin{bmatrix} \bar{X}A + P - HA1 \\ \bar{X}A + P - HA2 \\ \bar{X}A + P - HA3 \\ \bar{X}B - HB1 \\ \bar{X}C - HC1 \\ \bar{X}D - HD1 \\ B1 \\ C1 \\ D1 \end{bmatrix}^T \quad (12)$$

이며, 상태벡터  $[X]$ 는 다음과 같다.

$$[X] = \begin{bmatrix} A1 \\ A2 \\ A3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ XAA_0 \\ XBB_0 \\ XCC_0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

관측잡음  $V$  는 다음식으로 구할 수 있다.

$$v(k) = z(k) - Q \quad (14)$$

여기서  $z(k)$  는 관측유량이고,  $Q$  는 모형에 의하여 추정된 추정유량이다.

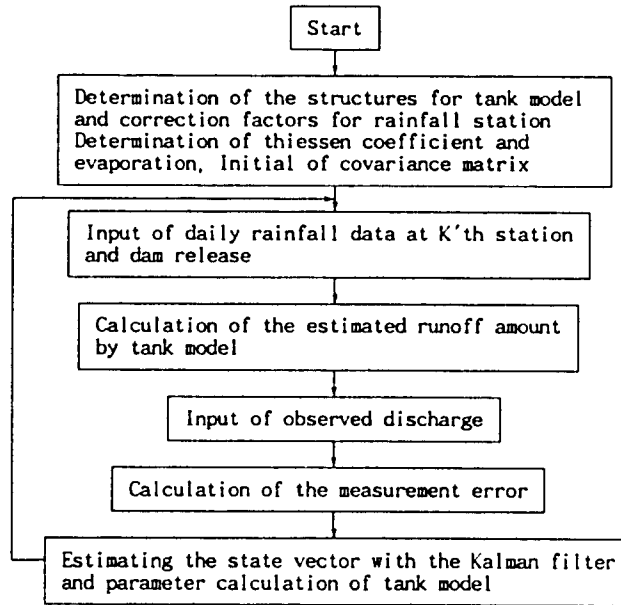


Fig. 3. Decision Procedure of Parameters of Tank Model by Kalman Filter

#### 4.3 媒介變數의 變換行列

탱크모형에서 가장 문제되는 유출공의 매개변수는 각 유역마다 시행착오로 얻어지는 값이지만, 각 유역의 모든 인자가 시간적으로 변화하기 때문에 Kalman filter를 이용하여 탱크모형의 매개변수를 상태벡터 모형으로 바꿔 다음과 같이 나타낸다.

$$x(k) = [A_1, A_2, A_3, B_1, C_1, D_1, XAA_0, XBB_0, XCC_0]^T \quad (15)$$

여기서  $A_1, A_2, A_3, B_1, C_1, D_1$ 은 탱크모형의 유출계수이고  $XAA_0, XBB_0, XCC_0$ 는 침투량이며 각각 Kalman filter의 상태벡터의 원소인  $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9$ 에 해당된다.

따라서 유량은 칼만의 이론을 이용하여 다음과 같이 추정할 수 있으며, 식(4)의  $H(k)x(k | k-1)$ 를 구할 수 있다.

$$z(k) = H(k) \cdot x(k) \quad (16)$$

여기서  $z(k)$ 는 관측치이고  $H(k)$ 는 변환행렬이며  $x(k)$ 는 상태벡터이다.

변환행렬은

$$H(k) = [(\bar{X}A + P - HA1), (\bar{X}A + P - HA2), (\bar{X}A + P - HA3), (\bar{X}B - HB1), (\bar{X}C - HC1), (\bar{X}D - HD1), B1, C1, D1] \quad (17)$$

이다. 여기서  $\bar{X}A, \bar{X}B, \bar{X}C, \bar{X}D$ 는 각 단 탱크의 이전(a priori)의 저류고이고  $P$ 는 강우이며

또한  $HA1, HA2, HA3, HB1, HC1, HD1$ 은 유출공의 높이이고,  $B1, C1, D1$ 은 2, 3, 4단의 유출계수이다.

유출계수 및 침투량의 최대오차를 100mm로 보고 관측오차와 시스템오차의 공분산행렬  $R$  및  $Q$ 의 값을  $10^4$ 으로 하였으며, 상태벡터의 공분산행렬에 대한 변환행렬  $\Phi$ 는 단위행렬이다.

상태벡터추정오차의 공분산행렬의 초기치는 다음과 같다.

$$M = \begin{bmatrix} 10^4 & & & & & & 0 \\ & 10^4 & & & & & \cdot \\ & & 10^4 & & & & \cdot \\ & & & \cdot & & & \cdot \\ & & & & \cdot & & \cdot \\ & & & & & \cdot & \cdot \\ & & & & & & 10^4 \\ & & & & & & & \cdot \\ & & & & & & & & 10^4 \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 10^4 \end{bmatrix}$$

Fig.3 은 Kalman filter 에 의한 탱크모형의 매개변수를 결정하는 개요를 나타내는 흐름도이다.

#### 4.4 媒介變數 補正

유출고를 환산할 때 침투계수의 최대치 한계는  $A_0$ ,  $B_0$ 가 각각 0.3, 0.1이고,  $C_0$ 는 0.03으로 하였다. 이것은 Kalman filter로 수정한 매개변수가 일종의 Black Box 모형으로 탱크모형의 매개변수를 추정하는 상식에 접근하지 못하기 때문이다. 또한 각 단 탱크의 승수의 합은 마땅히 1 보다 적어야 하지만 Kalman filter 에서 구한 상태벡터의 내용은 이러한 기준을 무시하고 있다. 따라서 이에 대한 보정치를 다음과 같이 계산하여 유출고 산정에 반영하였다.

$$1\text{단 탱크} : TA = A_0 + X(1) + X(2) + X(3) + 0.001$$

$$2\text{단 탱크} : TB = B_0 + X(4) + 0.001$$

$$3\text{단 탱크} : TC = C_0 + X(5) + 0.01$$

$$4\text{단 탱크} : TD = X(6) + 0.1$$

$$\text{만약 } TA > 1 : X1 = X(1)/TA$$

$$X2 = X(2)/TA$$

$$X3 = X(3)/TA$$

$$TB > 1 : X4 = X(4)/TB$$

$$TC > 1 : X5 = X(5)/TC$$

$$TD > 1 : X6 = X(6)/TD$$

단, 각 탱크에서 TA, TB, TC, TD 의 보정값 0.001, 0.001, 0.01, 0.1은 반드시 1 보다 적어야 하므로 추가된 값이다. 매개변수가 적은 값을 요구할 때 더욱 큰 보정치를 주었다.

## 5. 適用 및 比較 考察

### 5.1 適用流域

섬진강유역은 총 유역면적이 4896.5km<sup>2</sup>이고, 간선 유로연장은 212.30km이며, 하상구배는 1/300

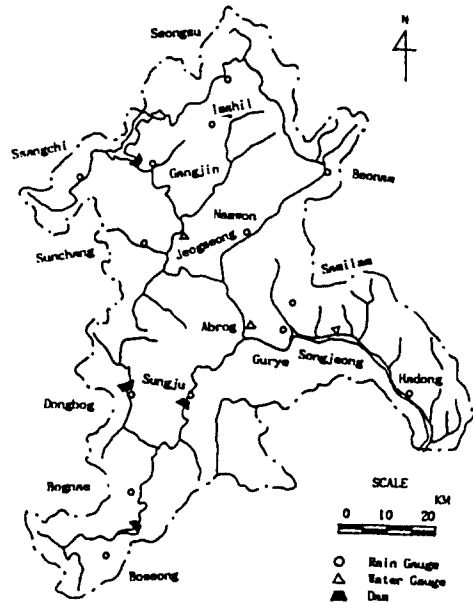


Fig. 4. Gauging Station of the Seomjin River Basin

Table 3. Areas and Thiessen Coefficients of Sub-basins

station	watershed area (km <sup>2</sup> )	thiessen coefficient
imshil	202.82	0.0627
gangjin	218.31	0.0675
namwon	404.98	0.1251
sunchang	462.46	0.1429
beonam	265.71	0.0821
bognae	335.76	0.1037
dongbog	292.63	0.0904
sungju	446.41	0.1379
gurye	396.43	0.1225
samilam	211.03	0.0652
total	3236.54	1.0000

Table 4. Evaporation Used for Runoff Analysis of the Seomjin River Basin (mm/day)

Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Agu.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
1.24	1.62	2.52	3.62	4.32	4.24	3.84	4.11	3.24	2.63	1.62	1.21

~1/6000(중류:1/1200)이다. 고산준령으로 둘러 쌓인 본 유역에는 하도유출에 직접 영향을 주는 댐으로 상류부에 섬진강 다목적댐과 하류부에 보성강 댐 및 동북댐을 비롯하여 주암 다목적댐이 건설되어 있다. 또한 연평균 강우량은 1408.3mm(건설부 섬진강 홍수통제소,1991,12)로서 이는 우리나라 연평균 강우량 1159mm보다 많은 분포로 다우지역에 속한다고 할 수 있다.

본 유역의 기존 수문관측소 현황은 Fig.4와 같으며, 송정 수위관측 지점을 기준으로 유역 평균강우량은 유역내에 위치한 10개 우량관측소의 우량기록(건설부, 1983~1989)을 이용하여 티센망(Thiessen Network)으로 부터 계산된 각 우량관측소별 지배 면적률에 의한 加重평균법으로 산정하였으며, Table 3은 관측소별 지배면적과 Thiessen 계수를 계산한 결과이다.

일증발자료는 1972 1990년까지의 자료(한국수자원공사,1992,12)에서 월평균치를 구하여 일증발량으로 환산하여 사용하는 것으로 하였으며 Table. 4와 같다.

## 5.2 模型의 比較檢討

섬진강유역의 일별유출량(1983~1989)을 추정함에 있어 菅原에 의하여 제안된 자동화 모형은 매개변수가 일단 결정되면 변함이 없기 때문에 저수유출 예측에서는 어느 정도 유사한 경향을 보여주고 있으나 신뢰도는 매우 약하며, 유출환경의 변화가 심한 곳의 예측은 더욱 불확실하고 수렴도가 떨어진다(Fig.5). 이에 반하여 Kalman filter 에 의한 유출예측은 실시간 추정으로 적응도가 높고 관측치와 매우 유사함을 보여 주고 있다(Fig. 5).

그러나 홍수기에는 유출변화가 극심하므로 일별 유출량으로서는 추정하기가 어려운 점이 있기 때문에 시간별로 세분화하여 좀 더 면밀한 예측방법을 이용하여야 할 것이다.

Kalman filter에 의하여 실시간으로 추정된 탱

크모형의 매개변수는 초기단계의 경우는 진동이 심하지만 시간의 경과에 따라 차츰 안정성을 갖고 있음을 보여 주었다(Fig.6). 시변함수인 상태벡터는 수렴의 향상에 따라 일정한 값을 유지할 때 유출환경의 변화가 정적임(stationary)을 알 수 있으며, 칼만 이득은 유출여건이 급작스런 변화에 대응하는 가중치로서 입력하는 자료를 기준으로 유출환경을 대변해 준다.

또한 관측-추정 순 유출량의 등가선(equal value line)으로 모형의 적합성도 검토하였다. 비교 결과는 자동화의 경우, 기울기가 0.538~1.392 이고 Kalman은 0.697~1.142 이었으며, 상관계수는 각각 0.836~0.973, 0.936~0.993 으로서 Kalman에 의한 경우에 양호한 값을 보여주고 있다(Fig.7).

## 6. 結 論

강우-유출 과정을 모형화 하여 홍수 및 저수유출을 해석할 수 있는 비선형 유출모형인 菅原의 탱크모형에 있어서 각단 탱크의 측벽에 부착된 유출공을 통한 총유출량이 관측지점의 유량과 동일하게 추정되어야 하지만, 탱크모형의 매개변수가 각 변수간에 交互작용 또는 비선형 종속관계에 있기 때문에 그 지역의 유역에 적합하도록 매개변수를 결정하는 것은 매우 중요하다.

탱크모형의 유출계수를 결정하는 자동화 프로그램은 매우 편리하게 만들어져 있으나 일단 확정된 유출계수는 시간에 따라 변화하지 않으므로 유출환경의 적용에 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서 이용한 탱크모형의 매개변수를 Kalman filter의 상태공간 모형에 의하여 섬진강유역에 적용시켜 실시간으로 추정한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) Kalman filter 에 의하여 실시간으로 추정된 탱크모형의 매개변수는 시작년도에는 진동이 심하지만, 시간의 경과에 따라 차츰 안정성



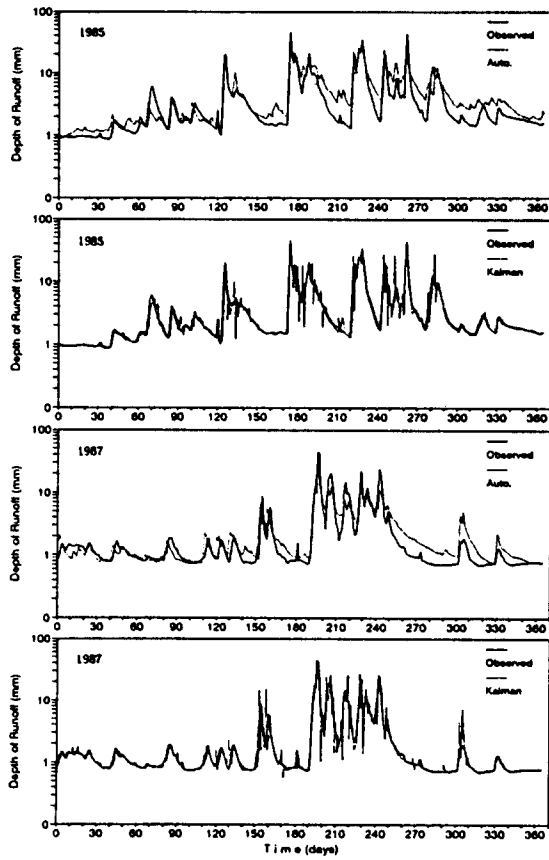


Fig. 5 Hydrograph by Automatic and Kalman Filter

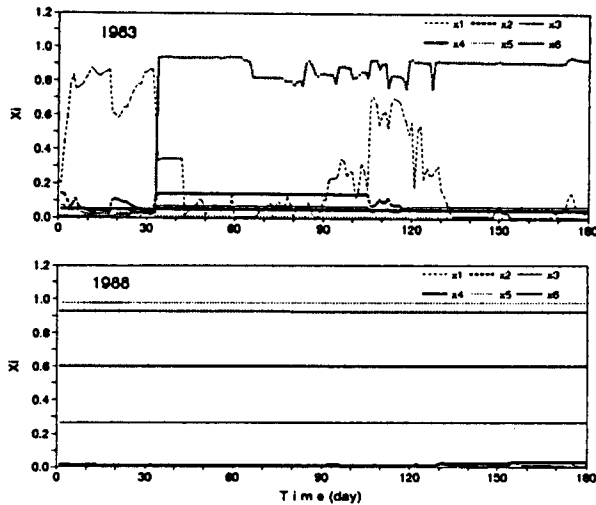


Fig. 6 Parameter by Kalman Filter

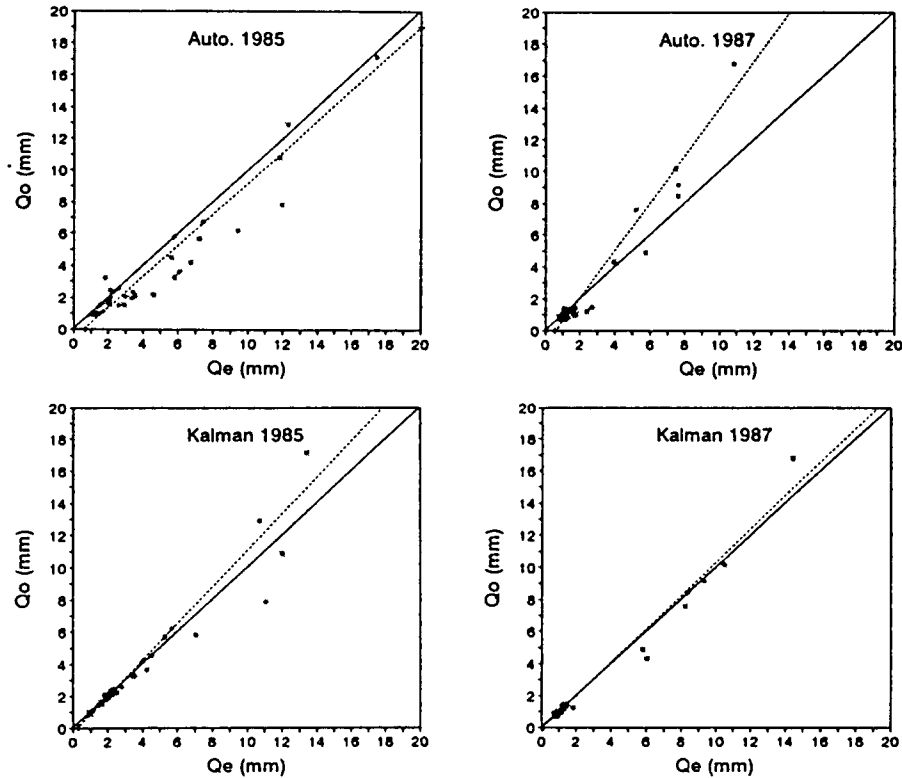


Fig. 7. Scattergram of Ten-Day Runoff Depths

을 보여 주었으며,

- 2) 탱크모형의 구조를 상태공간 모형으로 표현하여 추정된 유량은 Fig.7에서 알 수 있는 바와 같이 실측유량에 상당히 접근하고 있음을 알 수 있다.
- 3) 유량변화가 급변하는 시점에 있어서 일반적으로 적절한 적응력을 보여 주었으며, 특히 저수유출에서는 그 접근성이 매우 좋았다.
- 4) 기존의 자동화 탱크모형으로 부터의 산정된 결과와 비교해 보면 보다 개량된 예측모형임이 입증되었다.
- 5) Kalman filter의 매개변수는 상태벡터 모형으로 그 값은 Black Box 형태이다. 따라서 탱크 모형의 매개변수를 구할 때 주어지는 제약조건을 Kalman filter에서 동정(identification)하기가 어려우므로 이에 대한 연구가 더욱 필요하다고 생각

된다.

## 참 고 문 헌

- 한국수문조사년보. (1983-1989). 건설부.
- 섬진강홍수예경보. (1991). 건설부섬진강홍수통제소.
- 서병하 (1982). "상태벡터 모형에 의한 하천유출의 실시간 예측에 관한 연구," 박사학위논문, 인하대학교.
- 이관수 (1984). "하천유출모델과 장기유출해석에 관한 연구," 박사학위논문, 고려대학교.
- 이영석 (1987). "치수방재를 위한 저수지군의 최적제어," 박사학위논문, 연세대학교.
- 전국하천조사서. (1992). 한국수자원공사.
- Wood, E.F., and O'Connell, P.E. (1985). "Real-time forecasting," *Hydrological Forecasting*, Edited by M. G. Anderson and T. P. Burt,

- John Wiley and Sons Ltd., pp. 505-558.
- Kalman, R.E. (1960). "A new approach to linear filtering and prediction problems." *J. Basic Eng.*, Trans. ASME, Series D, Vol. 82, No. 1, pp. 35-45.
- Kalman, R.E., and Bucy, R.S. (1961). "New results in linear filtering and prediction theory." *Journal of Basic Engineering*, Transactions of the ASME, Vol. 83, pp. 95-108.
- Sugawara, M., Ozaki, E., Watanabe, I, and Katsuyama, Y. (1977). "Method of automatic calibration of tank model(first report)." *Rep. 17*, Nat. Res. Center for Disaster Prev., Tsukuba, March.
- Sugawara, M., Ozaki, E., Watanabe, I, and Katsuyama, Y. (1978). "Method of automatic calibration of tank model(second report)." *Rep. 20*, Nat. Res. Center for Disaster Prev., Tsukuba, November.
- 菅原正巳 (1972). 流出解析法. 共立出版.
- 菅原正巳 (1979). 續流出解析法. 共立出版.
- 日野幹雄 (1974). 水文流出系豫測へのカルマン フィルタ-理論の適用. 土木學會論文報告集, 第221號, pp. 39-47.

〈접수 : 94.10.6〉