

Kalman Filter 이론에 의한 하천유역의 선형저수지 모델

이 영 화

경산대학교 환경보건학과
(1994년 5월 3일 접수)

A Linear Reservoir Model with Kalman Filter in River Basin

Yeong-Hwa Lee

Dept. of Environmental Health, Kyungsan University, Kyungsan, 712-240, Korea
(Manuscript received 3 May 1994)

Abstract

The purpose of this study is to develop a linear reservoir model with Kalman filter using Kalman filter theory which removes a physical uncertainty of rainfall-runoff process. A linear reservoir model, which is the basic model of Kalman filter, is used to calculate runoff from rainfall in river basin.

A linear reservoir model with Kalman filter is composed of a state-space model using a system model and a observation model. The state-vector of system model in linear reservoir model with Kalman filter takes the ordinate of IUH from linear reservoir model. The average value of the ordinate of IUH for a linear reservoir model with Kalman filter is used as the initial value of state-vector.

A linear reservoir model with Kalman filter shows better results than those by linear reservoir model, and decreases a physical uncertainty of rainfall-runoff process in river basin.

Key Words : linear reservoir model, Kalman filter, state-space model, system model, observation model, IUH(Instantaneous Unit Hydrograph), state-vector, physical uncertainty, linear reservoir model with Kalman filter

1. 서 론

수문시계열에서 수문량은 선행수문량의 이월효과 (carry over effect)의 영향을 받으므로 강한 추계학적(stochastic) 성질을 가지며, 이와 같은 수문 사상이 발생하는 하천유역을 하나의 추계학적 시스템으로 볼 수 있다.

그러므로 시변인 Kalman filter 이론과 강우-유출모델의 결합에 의한 유출예측의 시도는 강우-유출모델에 의한 물리적 과정의 불확실성과 입력자

료에서 나타나는 불확실성을 감소시킬 수 있게 된다. Kalman(1960)은 확률과정의 정상성을 가정하지 않고 최적 추정오차의 공분산 행렬을 구하기 위하여 비선형 미분방정식을 유도함으로써 최적 선형 filter의 미분방정식의 계수를 얻었다. 그리고 Kalman과 Bucy(1961)는 최적 filter에서 발생하는 오차의 공분산 행렬을 Riccati형의 비선형 미분방정식으로 유도한 바 있다. 또한 시스템의 관측계를 이용한 측정결과를 기준으로 구성된 Kalman filter 이론은 문제의 설정이 일반화되어 있으며,

과거의 장기자료가 필요 없기 때문에 관측자료가 빈약한 지점의 예측에 큰 이점을 지니고 있다. Kalman filter는 주어진 과정모델(process model)의 상태벡터 공간을 결정하는데 있으며, 수문계에 이용되는 Kalman filter는 자료를 상태벡터로 하는 방법과 매개변수를 상태벡터로 취급하는 방법이 있다. Todini(1978)는 전자의 방법을 택하였으며, Hino(1974)는 후자의 방법을 택한 연구가 있었다.

본 연구에서는 하천유역의 강우-유출해석과 정확한 유출예측을 위하여 일반적으로 강우-유출해석에 많이 사용하여 온 선형저수지모델을 기본모델로 구성하였다. Kalman filter이론을 이용한 선형저수지모델은 자료를 상태벡터로 취급하는 방법을 택하여 선형저수지모델의 계산결과인 순간단위의 종거를 상태벡터로 하였으며, 강우-유출모델의 물리적 과정의 불확실성을 감소시키고 정도높은 하천유역의 유출예측 일그러짐을 확립하는데 그 목적을 두었다.

2. Kalman Filter 이론

상태공간 모형의 상태추정 알고리즘인 Kalman filter는 불확실한 관측자료, 초기경계조건 및 매개변수를 가지는 결정론적 혹은 추계학적 모델로서 시스템 상태를 최적상태로 제공하는 기법이다.

R. E. Kalman에 의하면 “filtering은 일종의 수학적 기법에 의한 동적 시스템에서 과거 관측치에 근거하여 과거, 현재 및 미래에 대한 매개변수의 정확한 묘사를 하는 것”이라고 정의하였다.

Kalman filter의 알고리즘은 동적시스템 모델, 관측모델 및 Kalman filtering으로 구성되어 있으며, 그 과정은 Fig. 1과 같다.

2.1 동적시스템 모델

시간분포가 이산형이고 동적거동을 갖는 시스템의 특성을 상태벡터 $X(k)$ 로 나타내면 이 동적시스템 모델은 식(1)로 표시할 수 있다.

$$X(k) = \Phi(k|k-1) \cdot X(k-1) + \Gamma(k|k-1) \cdot w(k-1) \quad (1)$$

여기서, $X(k)$: 상태벡터 ($n \times 1$)

$\Phi(k|k-1)$: $k-1$ 시각에서 k 시각의 상태 천이행렬 ($n \times n$)

$\Gamma(k|k-1)$: $k-1$ 시각에서 k 시각의 시스템오차 천이행렬 ($n \times n$)

$w(k-1)$: 시스템 오차 ($n \times 1$)

2.2 관측모델

시스템의 상태벡터 $X(k)$ 는 어떤 관측계를 통하여 측정되므로 오차가 없이 직접 상태벡터를 구한다는 것은 불가능하다. 따라서 상태벡터 $X(k)$ 와 관측오차를 표시하는 벡터 $v(k)$ 의 선형결합으로 나타낼 수 있는 관측벡터 $Z(k)$ 를 도입하여 식(1)과 같은 관측방정식으로 표시할 수 있다.

$$Z(k) = H(k) \cdot X(k) + v(k) \quad (2)$$

여기서, $Z(k)$: 관측벡터 ($m \times 1$)

$H(k)$: 관측 천이행렬 ($m \times n$)

$v(k)$: 관측 오차벡터 ($m \times 1$)

어떤 시스템을 전술한 동적시스템 모델과 관측모델로 모형화할 경우 이를 상태공간 모형형성(state-space formulation)이라 한다. 그리고 시스템 모델의 식(1)과 관측모델의 식(2)의 오차항 $w(k)$ 와 $v(k)$ 는 상호독립 Gaussian 과정을 이룬다고 가정하며, 그들의 통계치는 식(3)과 같다.

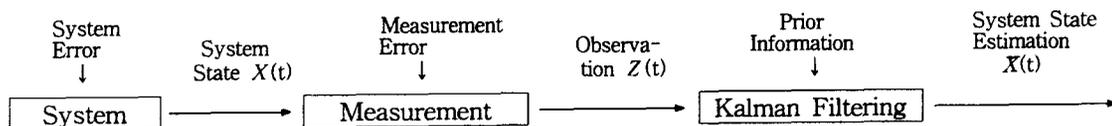


Fig. 1. Algorithm for Kalman Filter.

$$\begin{aligned}
 E[w_k] &= \bar{w}_k \\
 E[v_k] &= \bar{v}_k \\
 E[(w_t - \bar{w}_t) \cdot (w_k - \bar{w}_k)^T] &= Q_t \delta_{t,k} \\
 E[(v_t - \bar{v}_t) \cdot (v_k - \bar{v}_k)^T] &= R_t \delta_{t,k} \\
 E[(w_t - \bar{w}_t) \cdot (v_k - \bar{v}_k)^T] &= 0
 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, \bar{w}_k, \bar{v}_k : 평균치

Q_t, R_t : 각각 w_t, v_t 의 공분산 행렬

T : 전치 행렬

$\delta_{t,k}$: Kroneker Delta 함수

$\delta_{t,k}=1$ if $t=k$

$\delta_{t,k}=0$ if $t \neq k$

2.3 상태 추정과정

시각 $(k-1)$ 에서 시각 k 에 대한 상태 예측치 $\bar{X}(k|k-1)$ 는 식(4)와 같다.

$$\bar{X}(k|k-1) = \Phi(k|k-1) \cdot \hat{X}(k-1|k-1) \quad (4)$$

상태추정치 $(k|k)$ 는 식(5)로 표시할 수 있다.

$$\hat{X}(k|k) = \bar{X}(k|k-1) + K(k)[Z(k) - H(k) \cdot \bar{X}(k|k-1)] \quad (5)$$

여기서, $K(k)$: Kalman gain

$[Z(k) - H(k) \cdot \bar{X}(k|k-1)]$: 관측오차

상태추정오차의 공분산 $P(k|k)$ 는 식(6)으로 표시할 수 있다.

$$P(k|k) = [I - K(k) \cdot H(k)] \cdot P(k|k-1) \cdot [I - K(k) \cdot H(k)]^T + K(k) \cdot R(k) \cdot K(k)^T \quad (6)$$

식(6)에 포함된 관측오차의 공분산 $R(k)$ 는 식(7)과 같다.

$$R(k) = \frac{1}{k} [(k-1) \cdot R(k-1) + \Gamma(k) \cdot \Gamma(k)^T + H(k) P(k|k-1) H(k)^T] \quad (7)$$

Kalman gain $K(k)$ 는 상태추정오차의 공분산 행렬 $P(k|k)$ 의 대각선 요소의 가중합을 최소화함으로써 구할 수 있다. 이 때 최소화 함수 $J(k)$ 는 식(8)로 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 J(k) &= E[\bar{X}(k|k)^T \cdot I \cdot \bar{X}(k|k)] \\
 J(k) &= \text{trace}[P(k|k)]
 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, $\bar{X}(k|k)$: 상태추정오차 ($\hat{X}(k|k) - X(k)$)

그러므로 $J(k)$ 를 최소화하기 위한 조건은 식(9)와 같다.

$$\frac{\partial [J(k)]}{\partial K(k)} = \frac{\partial}{\partial K(k)} \text{trace}[P(k|k)] = 0 \quad (9)$$

상태추정오차의 공분산 $P(k|k)$ 의 식(6)과 식(9)으로 부터 식(10)이 구해진다.

$$-2[I - K(k) \cdot H(k)] \cdot P(k|k-1) \cdot H(k)^T + 2K(k) \cdot R(k) = 0 \quad (10)$$

이로부터 Kalman gain $K(k)$ 를 구하면 식(11)과 같다.

$$K(k) = P(k|k-1) \cdot H(k)^T \cdot [H(k) \cdot P(k|k-1) \cdot H(k)^T + R(k)]^{-1} \quad (11)$$

3. Kalman Filter 이론에 의한 선형저수지 모델

3.1 선형저수지 모델

선형저수지모델(Linear Reservoir Model)은 유역이 일련의 선형 저수지로 구성되어 있으며, 각 저수지에 대한 저류량 S 와 유출량 Q 가 식(12)과 같은 선형관계를 가진다고 가정하여 유출해석을 시도한다.

$$S = K \cdot Q \quad (12)$$

여기서, K : 저류상수

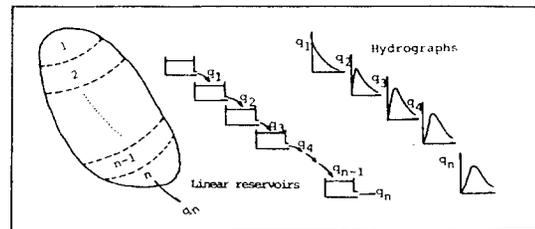


Fig. 2. Conception for Linear Reservoir Model.

Fig. 2와 같이 n 개의 선형저수지로 가정하여, 첫번째 저수지가 순간적으로 만수되어 두번째 저수지로 유출되고, 두번째 저수지로부터 세번째 저수지로 유출되고, 이와같은 방법으로 마지막 n 번째 저수지를 통과하는 유출량을 계산한다.

첫번째 저수지로 부터의 유출량은 식(13)과 같으며,

$$Q_1 = \frac{V}{K} \cdot e^{-t/k} \quad (13)$$

여기서, V : 순간유입량의 체적
 K : 저류상수
 t : 시간

Q_1 은 두번째 저수지의 유입량이 되고, 두번째 저수지의 유출량 Q_2 는

$$Q_2 = \frac{V}{K} \cdot \left(\frac{t}{K}\right) \cdot e^{-t/k} \quad (14)$$

이며, 마찬가지로 세번째 저수지의 유출량 Q_3 은 식(3.1.4)와 같다.

$$Q_3 = \frac{V}{2K} \cdot \left(\frac{t}{K}\right)^2 \cdot e^{-t/k} \quad (15)$$

따라서 n 번째 저수지의 유출량 Q_n 은

$$Q_n = \frac{V}{K(n-1)} \cdot \left(\frac{t}{K}\right)^{n-1} \cdot e^{-t/k} \quad (16)$$

이며, Gamma 함수 $\Gamma(n)$ 으로 나타내면 다음 식(3.1.6)과 같다.

$$Q_n = \frac{V}{K\Gamma(n)} \cdot \left(\frac{t}{K}\right)^{n-1} \cdot e^{-t/k} \quad (17)$$

여기서, n : Gamma 함수인자

그러므로 유역에 순간적으로 단위유효우량이 발생하여 n 개의 선형저수지를 통과하여 유출되는 순간단위유량도(Instantaneous Unit Hydrograph, IUH)의 종거는 식(18)과 같으며, 순간단위유량도의 형상은 변수 n , K 에 의하여 결정된다.

$$U(0,t) = \frac{V}{K\Gamma(n)} \cdot \left(\frac{t}{K}\right)^{n-1} \cdot e^{-t/k} \quad (18)$$

식(18)을 유역면적 $A(\text{km}^2)$ 에 대한 유출량으로 나타내면 식(19)이 된다.

$$U(0,t) = \frac{2.78 \cdot A}{K\Gamma(n)} \cdot \left(\frac{t}{K}\right)^{n-1} \cdot e^{-t/k} \quad (19)$$

이와같이 유역에 대한 순간단위유량도 $U(0,t)$ 가 결정되면 임의의 지속기간을 갖는 호우로 부터의 직접유출량의 계산은 회선적분(convolution integer)으로 구한다.

3.2 Kalman filter 이론에 의한 선형저수지 모델

3.2.1 시스템 모델

선형저수지 모델의 매개변수 n , K 의 평균치를 사용하여 구한 IUH 종거 $U(k)$ 와 계산유량 $PQK(k)$ 를 상태벡터 $X(k) : (2 \times 1)$ 로 나타내면 식(20)과 같다.

$$X(k) = \begin{bmatrix} PQK(k) \\ U(k) \end{bmatrix} \quad (20)$$

그리고 상태 천이행렬 $\Phi(k) : (2 \times 2)$ 와 시스템오차 천이행렬 $\Gamma(k) : (2 \times 2)$ 는 단위행렬 I 로 가정하였다. 또한 시스템오차의 공분산 행렬은 $Q(k)$ 의 초기치는 $Q(0) = 0.01 \cdot I$ 로 가정하였다. 따라서 시스템모델의 관계식은 식(21)과 같다.

$$X(k) = X(k-1) + w(k) : w(k) \sim N(0, Q(k)) \quad (21)$$

한편 상태추정오차의 공분산 행렬 $P(k) : (2 \times 2)$ 의 초기치 $P(0|0)$ 는 식(22)로 가정하였다.

$$P(0|0) = \begin{bmatrix} [OBQ(1) - PQK(1)]^2 & 0 \\ 0 & 3.0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

여기서, OBQ : 관측유량 (CMS)

PQK : 계산유량 (CMS)

3.2.2 관측 모델

선형저수지 모델에서 이용할 수 있는 유일한 관

Table 1. n and K Value by Linear Reservoir Model

Basin	Storm	n	K(hr)	IUH Peak-flow (CMS)	Peak-time (hr)
Museung	86.9.19 (No.1)	3.9	2.6	113.5	7.7
	87.7.14 (No.2)	1.5	4.7	135.4	2.3
	87.7.22 (No.3)	3.9	2.0	145.9	6.0
	83.6.20 (No.4)	2.0	5.5	89.0	5.4
	Mean	2.83	3.7	121.0	5.4
Hyoreong	86.9.19 (No.5)	3.5	2.7	37.5	6.9
	87.7.14 (No.6)	2.3	4.0	34.3	5.3
	87.7.22 (No.7)	6.1	0.9	81.2	4.6
	83.6.20 (No.8)	1.5	5.3	31.4	2.8
	Mean	3.35	3.23	48.1	4.9

측자료는 유량 Q이므로 이를 벡터 Z로 표시하여 관측모델을 나타내면 식(23)과 같다.

$$Z(k) = H(k)X(k) + v(k) : v(k) \sim N(0, R(k)) \quad (23)$$

여기서, 관측 천이행렬 $H(k)$; (1×2) 는 $H(k) = [1 \ 0]$ 로 가정하고 관측오차공분산의 초기치는 유량의 추정치가 없으므로 $R(0) = 0$ 으로 하였다.

4. 모델의 적용 및 분석

4.1. 분석 유역

본 연구에서 선형저수지모델과 Kalman filter 이론에 의한 선형저수지모델에 대한 이론과 알고리즘을 실제 하천유역에 적용하기 위한 대상유역은 비교적 정밀한 강우, 수위 및 유량 등의 수문 자료가 있는 IHP 대표유역인 낙동강 위천유역을

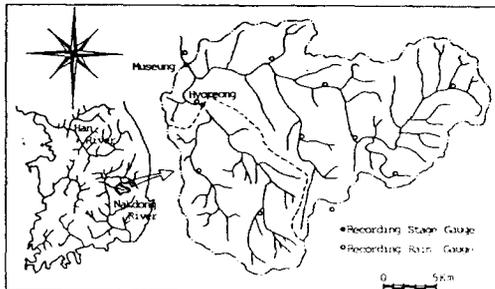


Fig. 3. Study River Basin(Wi-Stream).

선정하였으며 분석지점은 무성지점과 효령지점을 택하였으며 Fig. 3과 같다.

4.2 선형저수지 모델

선형저수지모델의 IUH는 Gamma 함수인자인 n 와 저류상수 K 의 함수로 표시되며, 이 n 와 K 가 IUH의 형태를 결정하게 된다. 본 연구에서는 n 와 K 를 결정하기 위하여 모멘트법을 이용하였으며, 호우별 n 와 K 는 Table 1과 같다. 여기서 직접유출량은 Table 1의 n , K 에 의해서 IUH를 구한 다음 회전적분으로 계산하였다.

4.3 Kalman filter이론에 의한 선형저수지 모델

선형저수지모델의 IUH 종거[U]를 비정상성으로 가정하여 Kalman filter의 상태공간모형화를 하였으며, 상태벡터 $X(k)$ 의 초기치는 $X(0) = [PQK(1), U(0)]^T$ 로 하였다. 여기서 $PQK(1)$ 는 초기 계산유량이며, $U(0)$ 는 IUH 종거의 평균치 U 이고 무성지점의 $U(0)$ 는 $25.25(m^3/sec)$ 및 효령지점의 $U(0)$ 는 $8.21(m^3/sec)$ 로 산정되었다.

Kalman filter 선형저수지 모델에 의한 유출예측을 수행하는데 있어서 상태벡터 $X(k)$ 인 IUH의 종거(U)가 시간에 따라 변하는 것과 Kalman Gain을 분석해 본 결과 8개의 분석호우 모두 비슷한 변화 경향을 나타내고 있었다. 대표적으로 무성지

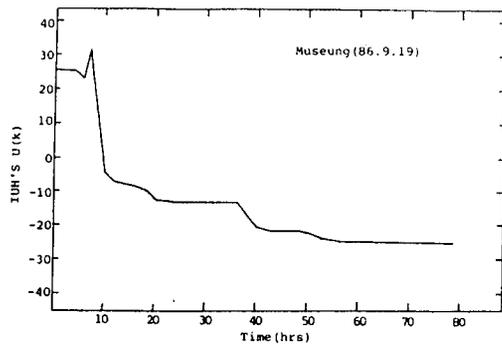


Fig. 4. State Vector by Linear Reservoir Model with Kalman Filter.

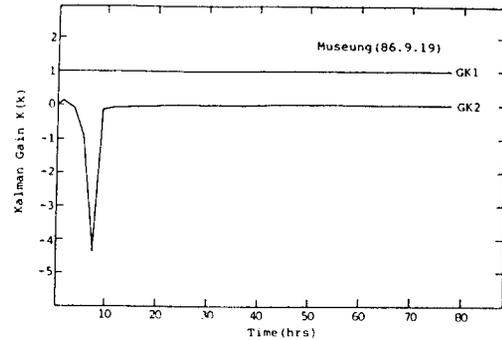


Fig. 5. Kalman Gain by Linear Reservoir Model with Kalman Filter.

점의 1986년 9월 19일 호우(No.1)에 대하여 나타내면 Fig. 4와 같으며, 그 경향은 대체로 순간단위 유량도의 침투유량의 발생시간이 Table 1에 나타낸 바와같이 7.7시간이므로 침투치 부근에서 유량의 변화가 크므로 급격한 변화를 보이다가 10시간 이후부터는 완만한 하향곡선을 나타내고 있으며, 특히 57시간 이후부터 변화가 없는것은 IUH의 종거가 0.0으로 계산 되었기 때문이다. 그리고 관측오차를 filtering함으로서 상태추정을 하는데 필요한 Kalman gain $K(k)$ 는 Fig. 5와 같다. 여기서 GK1은 상태벡터 PQQ에 해당되는 Kalman gain으로 상수 1이 되며, GK2는 IUH의 종거(U)에 대한 Kalman gain으로서 초기단계에서는 Fig 4에서와 같은 이유로서 IUH의 침투유량 발생시간이 7.7시

간이므로 침투치 부분에서 IUH 종거의 변화가 상당히 크므로 급격한 변화를 나타내나 침투치 부분을 지나서 부터는 IUH 종거의 변화폭이 작아지므로 그후부터 0.0 에 수렴하는 것으로 나타났다.

4.4 분석결과와 비교고찰

하천유역의 강우-유출해석을 위하여 위천 대표 유역에 기존 강우-유출모델인 선형저수지모델과 Kalman filter 선형저수지모델의 분석 결과로 부터 각 모델의 계산수문곡선과 관측수문곡선은 Fig. 6과 같으며, 관측치에 대한 각 모델의 적합성 검정을 실시한 결과는 Table 2와 같다. Fig. 6과 Table 2로부터 선형저수지모델에 의한 결과보다

Table 2. Comparison of Error Indices for Models

Statistics	ME		MSE		Bias		VER(%)		QER(%)		TER(hr)	
	L	LK	L	LK	L	LK	L	LK	L	LK	L	LK
Museung No.1	0.70	0.97	47.47	14.21	31.70	0.44	27.06	0.37	30.12	-3.95	-2.0	0.0
No.2	0.88	0.96	77.12	44.36	42.55	-1.06	26.66	-0.54	20.58	2.09	-1.0	-1.0
No.3	0.61	0.94	35.73	13.64	27.60	1.00	28.16	1.02	21.34	-6.81	-1.0	-1.0
No.4	0.85	0.97	68.55	30.55	47.33	-0.73	25.87	-0.40	23.56	-3.41	1.0	-1.0
Hyoreong No.1	0.67	0.95	21.59	8.76	12.13	-0.08	26.85	-0.17	39.45	0.14	-3.0	-1.0
No.2	0.86	0.97	37.21	16.12	24.62	-0.71	26.86	0.78	26.28	3.66	0.0	-1.0
No.3	0.60	0.96	10.66	3.31	5.77	-0.22	22.44	-0.84	22.59	-4.15	-2.0	-1.0
No.4	0.82	0.92	17.57	11.60	10.10	-0.10	24.29	-0.25	29.86	0.17	0.0	-3.0

*L : Linear Reservoir Model, LK : Linear Reservoir Model with Kalman Filter
 ME : Model Efficiency, MSE : Mean Square error, VER : Volume Error,
 QER : Peakflow Error, TER : Peakttime Error

Kalman filter 선형저수지모델의 결과가 더욱 향상되었음을 알 수 있으며, 상태벡터를 IUH 종거(U)로 취급하여 계산한 Kalman filter 선형저수지 모델모델이 적합성 검정에서 안정된 결과를 나타내고 있었다.

한편 각 모델들의 적합성 검정 결과를 무성지점에 대하여 살펴보면 다음과 같다.

무성지점에서 수문곡선의 전체적인 검정에 사용된 적합성 검정 중 모델의 효율도를 나타내는 ME(model efficiency)에 있어서 선형저수지모델은 0.61~0.88, Kalman filter 선형저수지 모델은 0.94~0.97로 나타나 실측치에 더욱 접근된 결과를 보여주고 있었다.

절대오차의 평균을 나타내는 MSE(mean square error)에 있어서 선형저수지모델은 35.73~77.12, Kalman filter 선형저수지 모델은 13.64~44.36로 각각 나타났으며, 상대오차의 평균을 나타내는 Bias에서도 선형저수지모델은 27.60~47.33, Kalman filter 선형저수지 모델은 -1.06~1.00으로 크게 향상됨을 알 수 있었으며 체적오차의 백분율 VER(volume error %)에서 검정결과를 살펴보면 선형저수지 모델은 25.87~28.16, Kalman filter 선형저수지 모델은 -0.54~1.02로 나타났으며, 역시 Kalman filter 선형저수지모델이 향상되었음을 알 수 있었다.

그리고 수문곡선의 첨두부분에 대한 적합성 검정은 첨두유량 차의 백분율 QER(peakflow error)와 첨두발생시간의 차 TER(peaktime error)을 분석하였으며, 그 결과를 살펴보면 다음과 같다. QER와 TER의 범위에 있어서 선형저수지모델은 20.58~30.12(%), -2.0~1.0(hr), Kalman filter 선형저수지 모델은 -6.81~2.09(%), -1.0~0.0(hr)으로 첨두치에 더욱 접근하는 향상된 결과를 보여주고 있었다.

이와같은 모델의 적합성 검정결과 중에서 ME 검정방법에 대하여 Kalman filter 선형저수지모델이 기본모델로 사용된 선형저수지모델보다 향상된 정도를 백분율로 표시하면 Kalman filter 선형저수지모델이 무성지점에서 9~54(%), 효령지점에서는 12~60(%)로 각각 향상되게 나타났다.

그리고 Fig. 6에서 Kalman filter 선형저수지모

델에 의한 수문곡선에서 60시간 이후의 감수부분에서 진동을 나타내고 있는데 이는 기본모델로 사용된 선형저수지모델에 의한 IUH의 종거가 57시간이후부터 0.0으로 계산되어 Fig. 5에서 나타난 바와같이 Kalman gain이 0.0에 근접한 값을 가지고 있으므로 상태추정을 경신하는 단계(식 2.3.2)가 무시됨으로 수문곡선에 진동이 나타나는 것으로 판단된다.

이상의 모델 적합성 검정결과 및 홍수수문곡선의 비교에서 알 수 있는 바와 같이 기존 강우-유출모델인 선형저수지모델에 시변계 이론인 Kalman filter를 결합하여 상태공간 모형을 실시함으로써 유출해석을 수행한 Kalman filter 선형저수지모델이 선형저수지 모델보다 모든 적합성 검정에서 향상된 계산결과를 얻을 수 있었다. 따라서 Kalman filter 선형저수지모델이 하천유역의 강우-유출해석 및 유출예측에 적용성이 우수한 모델임을 알 수 있었다.

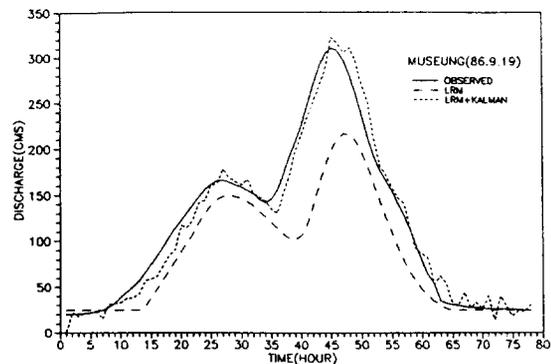


Fig. 6. Comparison of Flood Hydrographs by Linear Reservoir Model and Linear Reservoir Model with Kalman Filter.

5. 결 론

본 연구에서 선형저수지모델과 Kalman filter이론을 이용한 선형저수지모델을 낙동강 위천 대표유역에 적용 분석한 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) Kalman filter이론을 이용한 선형저수지모델

은 상태벡터를 적용 추정하여 유출예측을 실시한 결과 기본모델인 선형저수지모델에 의한 분석결과 보다는 실측치에 더욱 접근하는 향상된 결과를 얻었다.

2) Kalman filter이론을 이용한 선형저수지모델에 의한 분석결과는 모델효용도(ME)에 있어서 기본모델인 선형저수지모델의 분석결과 보다 무성지점은 9~54% 및 효령지점은 12~60%의 향상된 결과를 얻었다.

3) Kalman filter이론을 이용한 선형저수지모델의 상태벡터 [U]는 시간의 경과에 따라 감소하는 양상을 나타내고 있었으며, 초기유출시는 급격한 감소를 보이다가 시간이 경과함에 따라 상태벡터 [U]가 점차 완만한 감소현상을 나타내고 있었다.

본 연구에서 유출예측을 위하여 순환 알고리즘으로 구성된 Kalman filter 이론을 이용한 선형저수지모델은 강우-유출 과정의 물리적 불확실성을 감소시킴으로서 하천유출예측에서 양호한 결과를 얻었으며, 하천유역의 강우-유출예측 알고리즘으로서 적합하다고 판단된다.

참 고 문 헌

김치홍, 1983, 강우-유출 시스템의 물리기구를 고려한 홍수예측에 관한 연구, 동경공업대학 박사학위논문
 서병하, 윤용남, 강관원, 1982, 상태벡터 모형에 의한 하천유출의 실시간 예측에 관한 연구, 대한토목학회 논문집, 제 2권 제 3호.
 이순탁, 이영화, 1986, 선형-비선형 홍수유출모델

에 관한 연구, 한국수문학회지, 제 19권 제 3호, pp.1~6.

이원환, 이영석, 1986, Kalman filter에 의한 ON-LINE 유출예측, 대한토목학회 논문집, 제 6권 제 2호, pp.57~65.

日野幹雄, 1974, 水文流出豫測へのカルマンフィルタ-理論の適用, 日本土木學會論文報告集, 第 221號, pp.39~47.

Kalman, R.E., A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, Trans., ASME, Jr. of Basic Eng., Vol. 82, pp.35~45.

Kalman, R.E. and R.S. Bucy, 1961, New Results in Linear Filtering and Prediction Theory, Trans., ASME, Jr. of Basic Eng., Vol.83, pp.95~107.

Nash, J.E., 1957, The Form of the Instantaneous Unit Hydrograph, Intern. Assoc. Sci. Hydrology, Pub.45, Vol.3, pp.114~121.

Soontak Lee and Sang-In Kim, 1991, A Kalman Filter Model for River Stream-flow Forecasting, 7th IWRA World Congress on Water Resources, Morocco.

Todini, E., D., Bouillot, 1976, A Rainfall Runoff Kalman Filter Model, System Simulation in Water Resources, pp.69~81.

Todini, E., 1978, Mutually Interactive State-Parameter(MISP) Estimation, Application of Kalman Filter, Proc. of AGU Chapman Conference, Univ. of Pittsburgh, Pittsburgh, Penn., pp.135~151.