

추계동력학적 유역 및 하도 통합 저류함수모형 개발 및 적용

Development and Application of Stochastic-Dynamic Storage Function Method for Combined Watersheds and Channel Routing

이동희*, 배덕효**

Dong-Hee Lee, Deg-Hyo Bae

요 지

본 연구의 목적은 국내 홍수예경보의 일부로 사용되고 있는 유역 및 하도 저류함수모형을 칼만필터를 이용하여 실시간 홍수추적에 적합한 추계동력학적 저류함수모형으로 개발하여 그 적용을 평가하는데 있다. 기존의 저류함수모형과 본 연구의 추계동력학적 모형의 적용을 위해 낙동강 유역내의 감천 유역 중 김천 수위지점 상류유역을 선정하였다. 유출분석을 위해 김천 수위지점 상류유역을 3개의 소유역으로 구분하였고, 2002년 8월에서 2003년 8월 사이에 발생한 3개의 주요 호우사상을 선정하였다. 면적강우는 감천유역 내외에 존재하는 9개 강우관측소로부터 Thiessen 방법을 이용하여 계산하였고, 모형에 사용된 매개변수는 호우사상별로 기존의 저류함수모형의 관측치를 잘 모의하는 값을 사용하였다. 두 모형의 유출해석 결과를 도식적 및 통계적으로 분석한 결과 본 연구에서 개발된 추계동력학적 유역 및 하도 저류함수모형이 모형 효율성 계수는 0.94 ~ 0.96, 유출용적 및 침투유량 오차는 10% 내외를 보이며, 기존의 모형보다 정확한 유량예측이 가능한 것으로 나타났다.

핵심용어 : 추계동력학적 저류함수모형, 칼만필터, 유출모형

1. 서 론

수문모형은 일반적으로 하천 하류의 유출량을 예측하거나 시공간적으로 비선형인 강우-유출과정을 이해하는데 사용된다. 이때 유출모형에 사용되는 매개변수는 시변적이나 고정된 값으로 간주되며, 합리적인 매개변수 추정을 위해서는 신뢰성 있는 관측 수문자료를 필요로 한다. 과거에는 보다 정확한 유출모의를 위해 정확한 매개변수를 추정하는데 많은 노력을 경주하였다. 그러나 유출모형에는 매개변수 추정의 오차뿐만 아니라 모형구조가 가지는 불확실성, 매개변수 추정에 사용되는 관측 수문자료의 불확실성 등을 내포하고 있다. 실제 대부분의 개념적 수문모형에서는 위와 같은 다양한 불확실성을 고려하지 않는 확정론적 구조를 가지는 단점을 안고 있다. 특히, 정확한 유출모의가 요구되는 홍수예경보의 경우, 실시간으로 매개변수를 조정하여야 하는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 국내 홍수예경보에 사용되는 저류함수모형을 Extended Kalman Filter(EKF)를 이용하여 유역 및 하도가 통합된 추계동력학적 저류함수모형으로 개선하고, 낙동강 유역내의 감천유역에 적용하여 그 정확성과 적용성을 평가하고자 한다.

* 정회원 · 세종대학교 토목환경공학과 석사 · E-mail : imdonghee@paran.com

** 정회원 · 세종대학교 · 물자원연구소 · 토목환경공학과 부교수 · E-mail : dhbae@sejong.ac.kr

2. 추계동력학적 저류함수 모형

2.1 칼만필터 이론

칼만 필터는 시간 k 에서 상태변수벡터 $x(k)$ 의 값을 알면 시간 $(k+1)$ 에서의 상태변수벡터 $x(k+1)$ 을 알 수 있는 식 (1)의 상태방정식과 관측벡터 $Y(k)$ 를 도입하여 최적추정을 수행하는 식 (2)의 관측방정식으로 구성된다. 여기서, 상태방정식과 관측방정식의 오차를 나타내는 W_k , V_k 는 일반적으로 상호독립적이고 평균이 0인 백색잡음(white noise) 과정으로 가정된다.

$$X_{k+1} = F_x X_k + W_k \quad (1)$$

$$Y_k = H_k X_k + V_k \quad (2)$$

$$E[W_n W_k^t] = Q_k \text{ for } n = k, 0 \text{ for } n \neq k \quad (3)$$

$$E[v_n v_k^t] = R_k \text{ for } n = k, 0 \text{ for } n \neq k \quad (4)$$

2.2 칼만필터를 이용한 저류함수 모형 개선

유역 저류함수모형에서 단위저류고를 변수로 하나의 미분방정식 형태로 전환하여 나타내면 아래 식 (5)와 같다.

$$\frac{dq(t)}{dt} = \frac{1}{k_p q(t)^{p-1}} (r_{ave}(t-T_l) - q(t)) \equiv f(q(t), t) \quad (5)$$

이를 모형과 관측 시스템의 오차를 고려할 수 있는 상태-공간 형태(state-space form)의 추계학적 모형으로 표현하면, 예측단계는 현재의 시간 k 에서 다음 시간 $k+1$ 시점에 대한 상태변량의 값 $\hat{q}(t)$ 와 오차 $P(t)$ 를 예측하는 단계로서 다음 식 (6)으로 표현된다.

$$\frac{d\hat{q}(t)}{dt} = \frac{1}{k_p \hat{q}(t)^{p-1}} (r_{ave}(t-T_l) - \hat{q}(t)) \equiv f(\hat{q}(t), t) \quad (6)$$

갱신단계는 현재의 시점 k 에서 시간이 경과하여 $k+1$ 시점이 되었을 때 관측 시스템으로부터 입수한 관측치와 예측단계에서 구한 예측치로부터 상태변량의 최적추정을 수행하는 단계로서 식 (7) 및 (8)과 같이 표현된다(배덕효, 1997).

$$\hat{q}_k(+) = \hat{q}_k(-) + K_k [z_k - h_k(\hat{q}_k(-))] \quad (7)$$

$$P_k(+) = [I - K_k H_k(\hat{q}_k(-))] P_k(-) \quad (8)$$

하도추적 저류함수모형을 위와 같이 예측과 갱신의 단계로 나타내면 식 (9)에서 식 (11)과 같다.

$$\frac{d\hat{q}(t)}{dt} = \frac{\sum i_c(t-T_l) - \hat{q}(t)}{k_p \hat{q}(t)^{p-1}} \equiv g(t, \hat{q}(t)) \quad (9)$$

$$\hat{q}_k(+) = \hat{q}_k(-) + K_k [z_k - \xi_k(\hat{q}_k(-))] \quad (10)$$

$$P_k(+) = [I - K_k \psi_k(\hat{q}_k(-))] P_k(-) \quad (11)$$

여기서, K_k 는 Kalman Gain으로 모형과 관측자료의 불확실성 정도에 따라 달라진다.

3. 추계동력학적 저류함수모형 적용

3.1 적용 대상유역 특성 및 수문자료

대상유역은 그림 1과 같이 낙동강 유역내 감천유역 중 김천 수위지점을 출구로 하는 상류유역을 선정하였다. 유역면적은 499.5km² 이고, 감천유역 인근 9개 강우관측소로부터 Thiessen방법을 이용하여 면적강우를 산정하였다. 호우사상은 2002~2003년 기간동안 3개를 선정하였다. 본 연구의 추계동력학적 저류함수모형의 정확도를 평가하기 위해 각 유역 출구의 관측유량은 김천 수위지점의 유량을 비유량법으로 분배하였다. 한편 그림 2와 같은 하도추적을 위해 구간 A에서는 기존의 저류함수모형을 사용하였으며, 구간 B에서는 3번 소유역의 유량을 하도추적 B 전에 편입시켜 김천지점의 관측유량을 이용하여 Kalman filter를 적용한 하도추적을 수행하였다.



그림 1. 감천유역

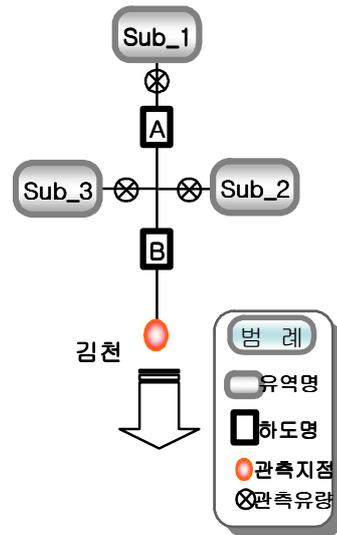


그림 2. 유출 모식도

표 1. 유출분석을 위한 호우사상

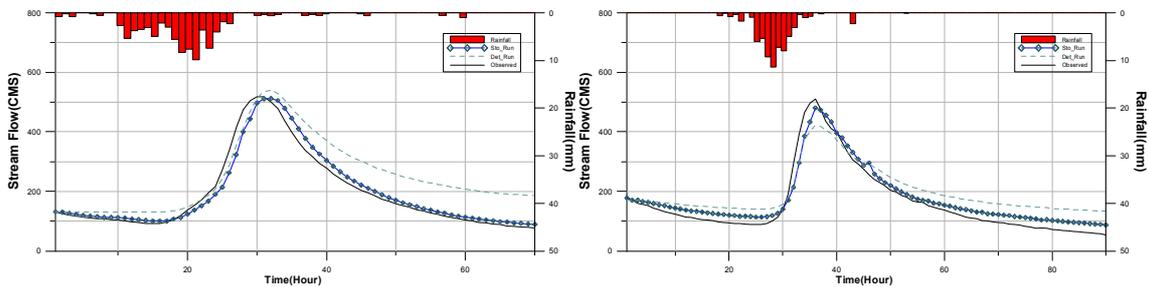
호우사상	사례기간	실측첨두유량(cms)	지점명
1	2002.08.14 ~ 16	518.7	김천수위관측소
2	2003.07.12 ~ 15	510.0	김천수위관측소
3	2003.08.18 ~ 20	788.0	김천수위관측소

3.2 모형적용 및 결과

유역저류함수모형에 사용되는 매개변수는 저류상수(K, P) 지체시간(T_1), 유출률(F_1), 포화누가우량(R_{sa}) 등의 5개가 존재하며, 하도추적의 경우는 3개의 매개변수(K, P, T_1)가 필요하다. 위 매개변수는 건교부(2004)의 「낙동강 홍수예경보시스템 개선보고서」를 참고로 시행착오법을 이용하여 산정하였다. 산정된 매개변수는 기존의 일반적인 저류함수모형에 적합한 매개변수이며, 추정된 매개변수를 추계동력학적 저류함수모형에 동일하게 적용하여 유출모의를 수행하였다.

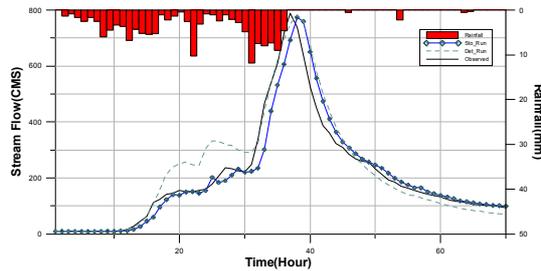
표 2. 저류함수모형 매개변수

호우사상	유역구분	K	P	T_1 (Hour)	F_1	R_{sa} (mm)
1	유역1	27.0	0.563	1.0	0.035	11.61
	유역2	26.0	0.513	1.0	0.035	12.62
	유역3	22.0	0.753	1.0	0.035	8.62
2	유역1	20.0	0.313	1.0	0.035	11.61
	유역2	24.0	0.503	1.0	0.035	12.62
	유역3	24.0	0.590	1.0	0.035	8.62
3	유역1	27.0	0.503	1.0	0.035	11.61
	유역2	26.0	0.413	1.0	0.035	12.62
	유역3	23.0	0.603	1.0	0.035	8.62
하도추적 A		4.3	0.590	1.0	-	-
하도추적 B		10.3	0.390	1.0	-	-



(a)사상 : 2002.08.14-16

(b)사상 : 2003.07.12-15



(c)사상 : 2003.08.18-20

그림 3. 호우사상별 모의 수문곡선

기존의 저류함수모형(Det. Run)과 추계동력학적 저류함수모형(Sto. Run)의 모의 정확성을 정량적으로 검토하기 위하여 아래 표 3과 같은 통계학적 지표를 계산한 결과, 추계동력학적 저류함수모형 유출모의 결과에서 상관계수가 0.97~0.98, 모형 효율성계수가 0.94~0.96의 범위를 보이고 유출용적오차 및 첨두유량 오차가 10% 내외로 대부분의 통계적 지표에서 기존 저류함수모형 모의 결

과보다 비교적 정확하게 모의하는 것으로 나타났다.

표 3. 개선된 저류함수모형과 기존 모형의 통계적 분석결과

호우 사상	RMSE		CC		VER(%)		QER(%)		ME		TER (Hour)	
	Sto	Det	Sto	Det	Sto	Det	Sto	Det	Sto	Det	Sto	Det
1	25.9	74.7	0.98	0.92	2.1	29.3	1.3	4.3	0.96	0.67	2	2
2	28.0	53.0	0.98	0.97	9.5	21.6	5.8	17.2	0.94	0.77	0	0
3	45.3	57.4	0.97	0.97	0.8	10.3	1.7	0.5	0.94	0.90	1	1

주) RMSE : 평균제곱근오차, CC : 상관계수, VER : 용적오차, QER : 첨두유량오차, ME : 모형 효율성계수, TER : 첨두유량 도달시간 오차

4. 요약 및 결론

수문모형이 강우-유출과정의 자연현상을 모의하는 데는 여러 불확실성을 내포하고 있다. 이러한 불확실성을 줄이기 위해서는 유출모형과 관측수문자료의 적절한 조화가 필요하다. 특히 실시간 홍수예경보의 경우에는 신뢰성 있는 유출량 예측이 필수적이므로 관측수문자료와의 동화가 절실히 요구된다. 이를 위해 본 연구에서는 기존의 저류함수모형을 Kalman filter 기법을 통하여 유역 및 하도에서 유량모의를 수행할 수 있는 추계동력학적 저류함수모형으로 개발하고, 이 모형을 감천 유역에 적용하여 모형의 정확성 및 유용성을 평가하였다. 적용결과 기존의 저류함수모형보다는 본 연구에서 개발한 추계동력학적 모형이 정확한 유출해석이 가능한 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 및 한국 과학기술기획평가원이 공동 주관하는 “통합홍수정보시스템의 개발 및 운영” 과제에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 배덕효(1997). “저류함수법을 이용한 추계학적 실시간 홍수예측모형 개발”. **한국수자원학회 논문집**, 제30권, 제5호, pp.449-457.
- 배덕효, 정일문(2000). “저류함수법에 의한 추계동력학적 하도홍수추적모형의 개발”. **한국수자원학회 논문집**, 제33권, 제1호, pp.341-350.
- Brown,R.G., P.Y.C.Hwang(1992). *Introduction to Random Signals and applied Kalman Filtering*, John Wiely & sons, Inc.
- Evensen G.(1994). “Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics”. *J. Geophys Res.*, vol.99, pp.1043-1062.
- Gelb A.(1974). *Applied Optimal Estimation*, M.I.T. Press, Cambridge, Mass.
- Kalman,R.E.(1960) “A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems”. *Transaction of the ASME-Journal of Basic Engineeirng* vol.82, pp.35-45.