

자료동화 기법을 연계한 실시간 하천유량 예측모형 개발

Development of Real-Time River Flow Forecasting Model with Data Assimilation Technique

이 병 주* / 배 덕 효**

Lee, Byong Ju / Bae, Deg Hyo

Abstract

The objective of this study is to develop real-time river flow forecast model by linking continuous rainfall-runoff model with ensemble Kalman filter technique. Andong dam basin is selected as study area and the model performance is evaluated for two periods, 2006. 7.1~8.18 and 2007. 8.1~9.30. The model state variables for data assimilation are defined as soil water content, basin storage and channel storage. This model is designed so as to be updated the state variables using measured inflow data at Andong dam. The analysing result from the behavior of the state variables, predicted state variable as simulated discharge is updated 74% toward measured one. Under the condition of assuming that the forecasted rainfall is equal to the measured one, the model accuracy with and without data assimilation is analyzed. The model performance of the former is better than that of the latter as much as 49.6% and 33.1% for 1 h-lead time during the evaluation period, 2006 and 2007. The real-time river flow forecast model using rainfall-runoff model linking with data assimilation process can show better forecasting result than the existing methods using rainfall-runoff model only in view of the results so far achieved.

Keywords : continuous rainfall-runoff model, ensemble Kalman filter, real-time river flow forecast, data assimilation

요 지

본 연구에서는 연속형 강우-유출모형과 앙상블 칼만 필터 기법을 연계하여 실시간 하천유량 예측모형을 개발하고 자료동화로 인한 정확도 개선 정도를 평가하고자 한다. 대상유역은 안동댐 상류유역을 선정하고 2006.7.1~8.18과 2007.8.1~9.30의 홍수기간에 대해 평가를 수행하였다. 자료동화를 위한 모형 상태변수는 유역의 토양수분과 저류량 및 하도 저류량을 선정하였으며 하루 댐 지점의 관측유량을 이용하여 상태변수를 갱신하도록 모형을 설계하였다. 상태변수의 칼만계인 거동을 분석한 결과 모의유량은 관측유량으로 74% 이동한 것으로 나타났다. 예측강우를 관측강우와 동일하다고 가정하고 예측선행시간 1시간에 대해 자료동화 전·후의 모의유량을 분석한 결과 2006년과 2007년에 각각 49.6%와 33.1%의 정확도가 향상됨을 확인하였다. 이상의 결과로부터 실시간 하천유량 예측시스템에 자료동화기법을 연계할 경우 강우-유출모형만을 이용한 결과보다 정확한 홍수량 예측이 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 연속형 강우-유출모형, 앙상블 칼만 필터, 실시간 하천유량예측, 자료동화

* 교신저자, 선임연구원, 국립기상연구소 응용기상연구과 수문자원연구팀 (e-mail: bjlee0704@korea.kr)

Corresponding Author, Senior Researcher, Hydrometeorological Resources Research Team, Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Research, Seoul 156-720, Korea

** 세종대학교 물자원연구소 · 토목환경공학과 교수 (e-mail: dhbae@sejong.ac.kr)

Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Sejong University, Seoul 143-747, Korea

1. 서론

통상 수문모형의 효용성 여부는 대상유역에 대한 모형 적용성과 모의결과의 정확성에 달려있지만, 하천유량 예측모형은 추가적으로 미래에 발생할 유량을 사전에 모의할 수 있는 예측능력이 요구된다. 이를 위해 최근에는 유역 내 강우자료와 하천유량자료의 실시간 전송 및 구축이 가능해짐에 따라 실시간 홍수예측모형을 개발하기 위한 시도가 증가하고 있다.

우리나라는 1974년 한강을 시작으로 낙동강, 금강, 영산강의 4대강 홍수통제소에서 하천의 홍수예보업무를 담당하고 있으며 홍수량 예측을 위한 강우-유출모형으로는 유역과 하도의 저류함수모형을 이용하고 있다. 저류함수모형은 모형의 매개변수를 과거의 유량자료로부터 쉽게 도출할 수 있고 유역의 비선형성을 고려할 수 있다는 장점이 있는 반면에, 실시간 홍수예측모형으로 활용하기에는 홍수 전 유역의 수문상태를 파악하기가 어렵고 유역의 수문반응이 복잡하고 분석기간이 긴 경우에 모형의 정확도가 떨어지는 단점이 있다. 또한 홍수통제소에서 운영 중인 통합홍수예측시스템은 자료동화기법을 도입하지 않고 있어 관측 및 예측강우와 유출모형의 불확실성으로 인해 발생하는 오차가 홍수량 예측결과에 지속적으로 반영되는 한계를 가지고 있다.

실시간 하천유량예측 분야에서 자료동화기법 연계의 장점은 앞서 언급된 다양한 불확실성이 누적되는 것을 관측치에 근거하여 차단함으로써 보다 정확한 정보를 긴 선행시간에 대해 예측할 수 있다는 데 있다. 실시간 홍수예보 분야에서 이용되는 자료동화 방법으로는 Kalman (1960)이 제안한 칼만 필터(Kalman Filter; KF) 기법이 대표적이다. 이 기법은 대표적인 시계열 자료동화기법으로서 관측수문자료를 이용한 실시간 보정방법으로 많이 활용되고 있으며 선형 시스템에서 적용이 가능하고 자연현상과 같은 비선형 시스템에서는 적용하기 어려운 것으로 알려져 있다. Maybeck (1979)은 비선형 시스템의 고차항(high order)을 제거함으로써 근사적으로 시스템을 선형화한 후 KF 기법을 적용하는 방법인 확장형 칼만 필터(Extended Kalman Filter; EKF)를 제안하였으나 비선형성이 강한 시스템에서는 모형의 분산오차(error variance)가 불안정한 값을 가지며 자료동화 결과의 오차가 큰 것으로 알려져 있다(Evensen, 1992). Evensen (1994)는 KF 및 EKF 기법의 한계를 극복하기 위해 Monte Carlo 모의기법을 이용한 앙상블 칼만 필터(Ensemble Kalman Filter; EnKF) 기법을 제안하였다. 이 방법은 시스템의 선형화 과정 없이 비선형 시스템에 적용이 가능하며 모형의 오차를 쉽게 추정할 수 있는 장점이 있다. 또한 최근 컴퓨터

성능이 향상되고 앙상블 해석에 대한 관심이 높아지면서 다양한 분야에서 활용되고 있다(Young, 2002; Liu and Oliver, 2005; Neal et al., 2007; Clark et al., 2008).

KF 기법과 연계한 실시간 홍수예측 분야에 대한 국외 연구사례를 살펴보면, Komma et al. (2008)은 분포형 연속형 강우-유출모형(Reszler et al. 2006)에 EnKF 기법을 적용하여 홍수예측의 초기조건에 해당하는 유역토양수분을 관측유량을 근거로 갱신함으로써 유출모의결과의 정확도가 향상됨을 제시하였다. Moradkhani et al. (2005)는 개념적 강우-유출모형인 HyMOD(Wagener et al., 2001)과 EnKF 기법을 연계하였으며 갱신 대상으로 모형의 상태변수인 유역 토양수분과 저류량 뿐만 아니라 모형 매개변수를 같이 갱신하는 dual state-parameter 기법을 적용하여 유출모의결과의 정확도가 향상됨을 제시하였다. Blöchl et al. (2008)은 분포형 강우-유출모형에 EnKF 기법을 연계하고 관측유량을 기반으로 격자별 토양수분을 갱신하여 유출모의결과의 정확도가 향상됨을 제시한 바 있다.

국내에서는 홍수예측분야에서 최근까지 KF 기법을 활용한 몇몇 연구가 수행된 바 있다. 배덕효(1997) 및 배덕효와 정일문(2000)은 각각 단일 유역 및 하도에 대해 저류함수모형을 구축하고 KF 기법을 이용하여 추계학적 상태-공간 형태의 모형으로 개선하여 정확도가 향상됨을 보인 바 있다. 한건연 등(2000)은 DAMBRK 모형과 KF 기법을 연계한 범람위험도 해석에서 자료동화로 인해 정확도가 향상됨을 보였으며 안상진 등(2002)은 KF 기법과 신경망 BP(Back Propagation) 모형을 연계하여 적용성을 평가한 바 있다. 김상호(2003)는 수리학적 홍수해석모형에 KF 기법을 적용하여 모의결과가 향상됨을 제시하였다. 또한 배덕효 등(2009)과 이병주 등(2009)은 연속형 저류함수모형과 앙상블 칼만필터링 기법을 연계하여 안동댐과 임하댐에 대해 적용성을 평가한 바 있다.

본 연구에서는 배덕효와 이병주(2011)가 개발한 연속형 강우-유출모형과 앙상블 칼만필터 기법을 연계하여 실시간 하천유량 예측모형을 개발하고자 하며 국내 유역의 적용을 통해 자료동화 과정에서 고려되는 모의치와 관측치의 불확실성 크기와 이에 따른 상태변수의 갱신 정도에 대해 분석하고 자료동화로 인한 하천유량 예측결과의 정확도 향상 정도를 평가하고자 한다.

2. 실시간 유량예측모형 개발

2.1 강우-유출모형

본 연구에서는 하천유량예측을 위한 유출모형으로 배덕효와 이병주(2011)가 제안한 연속형 강우-유출모형을

이용하였다. 이 모형은 토양수분과 연계한 수문성분 산정 기법과 사상형 저류함수모형을 연계하여 장기간의 강우에 대한 연속적인 유출반응 모의가 가능하며 각 수문성분 및 유출량 산정 방법은 다음과 같다.

토양수분에 대한 연속방정식은 Eq. (1)과 같다. 식에서 좌변은 t 시점의 계산시간동안의 토양수분의 변화량을 나타내며 우변은 각각 해당 계산시점의 유역평균 강우량 (P), 실제증발산량 (AET), 지표유출량 (Q_{sur}), 중간유출량 (Q_{lat}), 지하수유출량 (Q_{gw})를 나타낸다.

$$\frac{dSW(t)}{dt} = P(t) - AET(t) - Q_{sur}(t) - Q_{lat}(t) - Q_{gw}(t) \quad (1)$$

실제증발산량은 토양수분량의 선형함수로 표현할 수 있으며 Eq. (2)와 같이 잠재증발산량과 장력수 내 토양수분량 비를 이용하여 산정하였다. 식에서 $PET(t)$ 는 t 시점의 잠재증발산량 (mm), $SW_t(t)$ 는 장력수 영역 내 토양수분량 (mm), SW_t^0 는 장력수 영역의 포화 토양수분량 (mm)을 의미한다.

$$AET_t(t) = PET(t) \left(\frac{SW_t(t)}{SW_t^0} \right) \quad (2)$$

지표유출량 산정방법은 Eq. (3)과 같으며 이 방법은 SCS (1972)와 Arnold et al. (1998)이 제안한 일단위 지표유출량 산정방법을 배덕효와 이병주 (2011)가 시단위에서 산정이 가능하도록 개선한 방법이다. 식에서 $S(t)$ 는 토양수분에 따라 가변하는 저류변수 (mm)를 의미한다.

$$Q_{sur}(t) = \frac{\left(\sum_{t=1}^{24} P(t) - 0.2S(t) \right)^2}{\sum_{t=1}^{24} P(t) + 0.8S(t)} - \frac{\left(\sum_{t=2}^{24} P(t) - 0.2S(t) \right)^2}{\sum_{t=2}^{24} P(t) + 0.8S(t)} \quad (3)$$

측방흐름은 Sloan et al. (1983)과 Sloan and Moore (1984)에 의해 제안된 운동학적 저류모형 (kinematic storage model)을 적용하였으며 산정방법은 Eq. (4)와 같다. 식에서 SW_{exc} 는 포장용수량을 초과하는 토양수분량 (mm), K_{sat} 는 포화수리전도도 (mm/h), slp 는 토양층 경사 (mm/mm), ψ_d 는 토양 내 배수가 가능한 공극률 (mm/mm), L_{hill} 은 경사면 길이 (m)를 의미한다.

$$Q_{lat}(t) = 0.002 \left(\frac{SW_{exc}(t) \cdot K_{sat} \cdot slp}{\psi_d \cdot L_{hill}} \right) \quad (4)$$

지하수유출량은 지하수위와 지하수유출량의 변화가 선형적인 관계를 갖는다는 가정 하에서 Arnold et al. (1993)가 제안한 방법을 적용하였으며 산정방법은 Eq. (5)와 같다. 식에서 $W_{rchrg}(t)$ 는 지하수함양량 (mm), α_{gw} 는 기저유출 감수상수 (recession constant) 또는 비례상수, Δt 는

계산시간간격 (h)을 나타낸다.

$$Q_{gw}(t) = Q_{gw}(t-1) \cdot \exp[-\alpha_{gw} \cdot \Delta t] + W_{rchrg}(t) \cdot (1 - \exp[-\alpha_{gw} \cdot \Delta t]) \quad (5)$$

이 모형에서 유역과 하도의 유출량 산정방법은 저류함수모형을 기반으로 하고 있다. 유역의 운동량방정식과 연속방정식은 Eqs. (6) and (7)과 같다. 앞서 산정된 지표, 중간, 지하수유출량은 Eq. (7)에서 유역 유입량에 해당하는 유효우량을 대신하여 적용되고 이로부터 연속적인 유역 유출량을 산정하게 된다. 식에서 $Q_s(t)$ 는 유역 유출량 (mm/h), $S_s(t)$ 는 유역 저류량 (mm), K_{sb} 와 P_{sb} 는 유역에 대한 저류상수, τ 는 유역 지체시간 (h)을 의미한다. 또한 하도의 운동량방정식과 연속방정식은 Eq. (8) and (9)와 같으며 $Q_c(t)$ 는 하도 유출량 (m³/s), $S_c(t)$ 는 하도구간 내 저류량 (m³), K_{ch} 와 P_{ch} 는 하도 저류상수를 의미한다.

$$Q_s(t) = \left(\frac{S_s(t)}{K_{sb}} \right)^{1/P_{sb}} \quad (6)$$

$$\frac{dS_s(t)}{dt} = \frac{1}{3.6} A [Q_{sur}(t-\tau) + Q_{lat}(t-\tau) + Q_{gw}(t-\tau)] - Q_s(t) \quad (7)$$

$$Q_c(t) = \left(\frac{S_c(t)}{K_{ch}} \right)^{1/P_{ch}} \quad (8)$$

$$\frac{dS_c(t)}{dt} = \sum \left(\frac{S_s(t)}{K_{sb}} \right)^{1/P_{sb}} - Q_c(t) \quad (9)$$

본 연구에 도입한 강우-유출 모형에 대한 국내 적용성 평가는 배덕효와 이병주 (2011)에서 수행된 바 있다.

2.2 자료동화 기법

본 연구에서는 실시간 하천유량 예측모형을 개발하기 위해 실시간 관측유량자료를 실시간으로 이용할 수 있다는 가정 하에서 앞서 소개된 연속형 강우-유출모형과 자료동화 기법을 연계하고자 하며 자료동화기법의 이론 및 연계방법은 다음과 같다.

Evensen (1994)은 KF 기법과 EKF 기법에 대한 비선형 시스템에서의 한계를 극복하기 위해 Monte Carlo Simulation (MCS) 기법을 이용하여 오차분산을 추정하는 EnKF 기법을 개발하였다. EnKF 기법에서 상태·공간 모델은 Eqs. (10) and (11)과 같이 표현할 수 있다. 식에서 x_t 는 t 시점에서의 상태변수, u_t 는 강우와 같은 모형 입력 자료, θ_t 는 모형 매개변수를 의미한다. 다수의 상태변수를 생성하기 위해 상태변수 예측에 적용되는 모형 입력자료

와 매개변수는 Eqs. (12) and (13)을 이용하여 생성하게 된다. 식에서 u_t^i 와 θ_t^i 는 각각 i 번째 앙상블 입력자료와 매개변수이며 ζ_t^i 와 ξ_t^i 는 각각 평균이 0이고 분산이 Σ_t^u 와 Σ_t^θ 인 정규분포 특성을 갖는 백색잡음이다. 기존 방법의 가정과 동일하게 w_t 와 v_t 는 상호 독립적이고 평균이 0이고 분산이 Σ_t^x 와 Σ_t^y 인 정규분포 특성을 갖는다.

$$x_{t+1|t}^- = f(x_{t|t}^-, u_t, \theta_t) + w_t, \quad w_t \sim N(0, \Sigma_t^x) \quad (10)$$

$$y_t = h(x_t, \theta_t) + v_t, \quad v_t \sim N(0, \Sigma_t^y) \quad (11)$$

$$u_t^i = u_t + \zeta_t^i, \quad \zeta_t^i \sim N(0, \Sigma_t^u) \quad (12)$$

$$\theta_t^i = \theta_t + \xi_t^i, \quad \xi_t^i \sim N(0, \Sigma_t^\theta) \quad (13)$$

상태변수의 참값을 알고 있을 경우 모형의 오차는 상태변수의 분산으로 표현할 수 있으나 실제 상태변수의 참값을 얻는 것은 불가능하므로 EnKF 기법에서는 참값을 앙상블 상태변수의 평균값으로 가정한다. 따라서 모형의 오차는 Eq. (14)와 같이 생성된 n 개의 앙상블 상태변수를 이용하여 산정할 수 있다(Evensen, 1994). 식에서 e_{t+1}^- 은 $[x_{t+1|t}^{1-} - \bar{x}_{t+1|t}^-, x_{t+1|t}^{2-} - \bar{x}_{t+1|t}^-, \dots, x_{t+1|t}^{i-} - \bar{x}_{t+1|t}^-, \dots, x_{t+1|t}^{n-} - \bar{x}_{t+1|t}^-]$ 의 집합이며 $\bar{x}_{t+1|t}^-$ 는 예측된 상태변수의 앙상블 멤버에 대한 평균을 의미한다.

$$P_{t+1}^- = E[e_{t+1}^- e_{t+1}^{-T}] = \frac{1}{n-1} \sum e_{t+1}^- e_{t+1}^{-T} \quad (14)$$

상태변수 갱신은 t 시점에서 시간이 경과하여 $t+1$ 시점이 되었을 때 관측 시스템으로부터 입수한 관측치와 모형으로부터 추정된 예측치로부터 상태변수의 최적추정을 하는 단계로서 Eqs. (15)~(17)을 이용하여 산정할 수 있다. EnKF 기법에서는 각 앙상블 상태변수별로 갱신과정을 수행하며 Eq. (15)에서 $x_{t+1|t+1}^+$ 는 t 시점에서 예측된 앙상블 상태변수 $x_{t+1|t}^{i-}$ 와 $t+1$ 시점의 앙상블 관측치 y_{t+1}^i 의 정보로부터 갱신된 상태변수를 의미한다. Eq. (16)은 관측치에 대한 앙상블 멤버를 나타내며 y_{t+1}^i 은 관측치의 i 번째 앙상블 멤버로 분산 Σ_{t+1}^y 을 갖는 오차항 η_{t+1}^i 을 이용하여 산정할 수 있다. EnKF 기법에서 K_{t+1} 은 Eq. (17)로부터 비교적 쉽게 산정이 가능하며 식에서 $\Sigma_{t+1}^{x'}$ 는 관측치와 동일한 변량을 의미하는 모의치의 오차로 모의치 (x_{t+1}^{i-})의 분산으로부터 산정되고 $\Sigma_{t+1}^{xx'}$ 는 상태변수 $x_{t+1|t}^{i-}$ 와 관측치와 동일한 변량을 갖는 모의치 x_{t+1}^{i-} 의 공분산을 의미한다. 또한 Σ_{t+1}^y 는 관측 오차 (Eq. (11))의 분산을 나타낸다.

$$x_{t+1|t+1}^+ = x_{t+1|t}^{i-} + K_{t+1}(y_{t+1}^i - h(x_{t+1|t}^{i-}, \theta_{t+1}^i)) \quad (15)$$

$$y_{t+1}^i = y_{t+1} + \eta_{t+1}^i, \quad \eta_{t+1}^i \sim N(0, \Sigma_{t+1}^y) \quad (16)$$

$$K_{t+1} = \Sigma_{t+1}^{x'} [\Sigma_{t+1}^{x'} + \Sigma_{t+1}^y]^{-1} \quad (17)$$

2.3 상태변수와 상태예측방정식

유출모형과 EnKF 기법을 연계하기 위해 모형의 상태변수와 각각에 대한 상태예측방정식을 결정해야 한다. 본 연구에서는 다음시간의 유량을 예측하는데 있어서 초기 조건에 해당하는 유역토양수분 ($SW(t)$), 유역저류량 ($S(t)$), 하도저류량 ($S_c(t)$)을 상태변수로 선정하였다. 이들의 상태예측방정식은 Eqs. (1), (7), (9)와 같다.

이상으로부터 예측단계에서 상태변수 $SW(t)$, $S_s(t)$, $S_c(t)$ 는 유출모형을 통해 예측되고 모형의 오차는 모형 입력자료와 매개변수의 앙상블 멤버에 대한 분산으로부터 산정된다. 또한 갱신단계에서는 관측유량과 모의유량의 오차 정보를 이용하여 상태변수를 갱신하게 되며 갱신된 상태변수는 다음 시점의 예측을 위한 초기값이 된다. 본 연구에서 개발한 실시간 유량예측모형은 이상의 예측단계와 갱신단계를 반복적으로 수행함으로써 매 시간 관측유량 자료의 동화를 통해 선행시간에 대한 유역과 하도의 유출량을 예측하도록 설계하였다.

3. 대상유역 선정 및 모형 입력자료 구축

본 연구에서는 낙동강 최상류에 위치한 안동댐 상류유역을 대상유역으로 선정하였다. 안동댐은 상류 유역면적

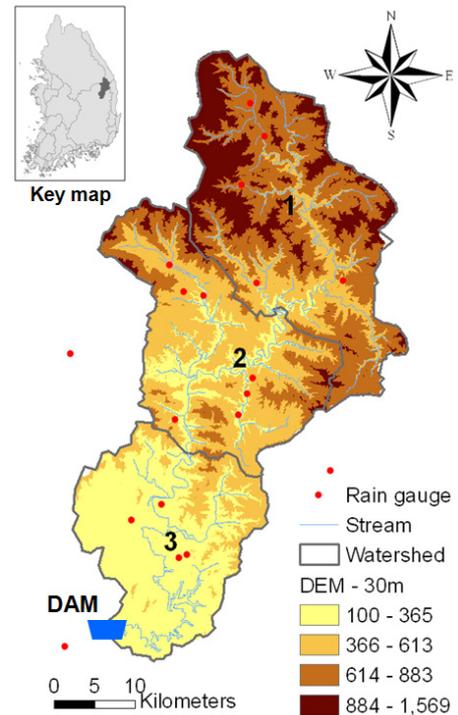


Fig. 1. Study Area

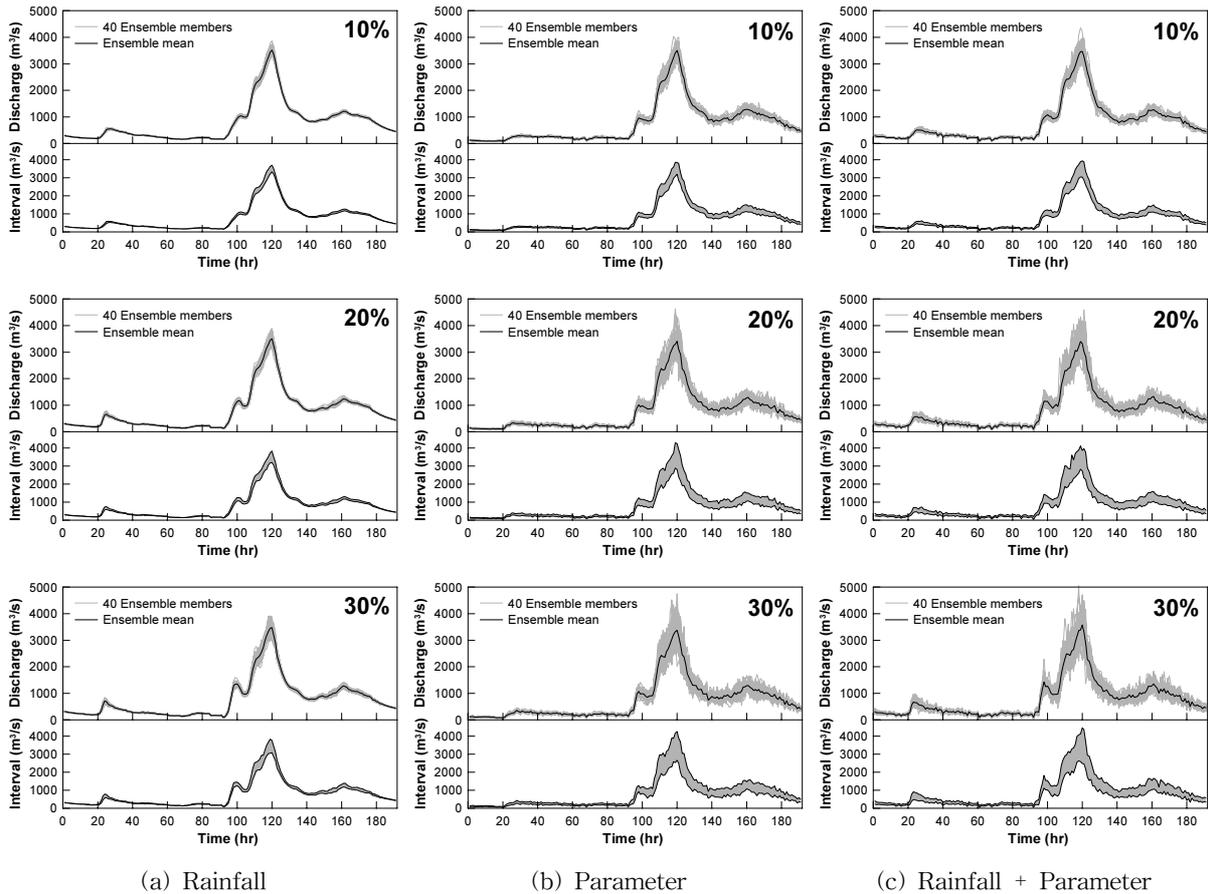


Fig. 2. 40 Ensemble Discharges and 5~95% Exceedance Intervals Corresponding to Standard Deviation Changes of Rainfall and Parameter

1590.72 km², 총저수용량 1,248 × 10⁶ m³, 홍수조절용량 110 × 10⁶ m³의 제원을 갖는 다목적 댐으로 낙동강의 홍수 조절 및 하천유지유량 관리를 위한 중요한 댐이다. 안동댐 상류유역은 2004년 이전까지 3개 소유역으로 구분되어 홍수예보를 수행하였으며 이후 수위 및 우량관측소 증설로 인해 13개 유역으로 구분되어 수행되고 있다. 본 연구에서는 소유역 출구점에서의 유량자료를 활용하지 못하는 상황에서 소유역을 과다하게 구분하는 것은 무의미하다는 판단 하에 Fig. 1과 같이 소유역을 3개 소유역으로 구분하였다. 강우자료와 댐 유입량 자료는 낙동강 홍수통제소로부터 2006~2007년에 대해 수집하였으며 유역평균 강우량 산정을 위해 19개 우량관측소가 이용되었다.

4. 불확실성 평가

강우-유출모형과 앙상블 칼만 필터링 기법을 연계한 유량예측모형은 관측 및 예측 강우량, 추정된 유출모형 매개변수, 관측유량의 불확실성 크기에 따라 상태변수의 갱신 정도가 달라지며 이로 인해 홍수량 예측 결과도 변하게 된다. 따라서 본 연구에서는 홍수량 예측능력을 평

가하기에 앞서 강우량, 유출모형 매개변수, 관측유량의 불확실성에 따른 홍수량 예측결과의 변화를 분석하고자 한다. 이때, 각 인자의 불확실성은 각각의 앙상블 멤버의 변동폭과 관계가 있으며 본 연구에서는 변동폭을 앙상블 멤버의 표준편차 크기로 정의하였다.

우선, 모의유량의 불확실성 원인이 되는 강우와 매개변수 (K_{sb} , K_{ch})에 대해서 분석을 수행하였다. 분석기간은 2006.7.12~7.19의 홍수기간을 선정하였으며 안동댐 지점의 모의유량 변화에 대한 결과는 Fig. 2와 같다. 그림에서 (a) 강우, (b) 매개변수, (c) 강우와 매개변수의 합성한 경우에 대해서 각 앙상블 멤버의 표준편차가 기준값의 10%, 20%, 30%에 대한 유출모의 결과이다. 각 그래프에서 위의 것은 모의유량에 대한 40개 앙상블 멤버를 나타내고 아래는 5~95% 초과확률에 해당하는 범위를 나타낸다. 동일한 표준편차에서 매개변수가 강우량보다 모의유량의 변화에 더 큰 영향을 미치며 이러한 현상은 매개변수의 변화가 모의유량 산정에 직접적이고 지속적으로 영향을 주는데 반해 강우는 이산적 형태에서 연속성을 갖는 유량으로 변환되는 과정에서 극치 강우에 대한 영향이 줄어들기 때문으로 판단된다. 3가지 경우 중에서 강우와 매개변

Table 1. Mean Coefficient of Variation of the Simulated Runoff Corresponding to the Standard Deviation Changes of Rainfalls and Parameters

SD of Ensemble Member	Rainfall	Parameter	Rainfall + Parameter
10%	0.027	0.084	0.091
20%	0.039	0.134	0.149
30%	0.047	0.154	0.171

수를 합성한 경우에서 모의유량의 변동폭이 가장 큰 것으로 확인되었다.

추가적으로 모의유량 변동폭에 대한 정량적 분석을 위해 평균변동계수 (Mean Coefficient of Variation; MCV) 를 이용하였으며 이 통계지표는 각 시간대별 변동계수를 모의기간동안 평균한 값으로 Eq. (18)로부터 산정할 수 있다. CV_t 는 t 시간의 변동계수를 의미하며 Eq. (19)로부터 산정된다. N 은 총 모의시간, $x_{t,i}$ 는 t 시간의 i 번째 앙상블 멤버, \bar{x}_t 는 t 시간의 앙상블 멤버 평균치, N_e 는 총 앙상블 멤버 수를 의미한다.

$$MCV = \frac{\sum_{t=1}^N CV_t}{N} \quad (18)$$

$$CV_t = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_e} (x_{t,i} - \bar{x}_t)^2}{N_e}}}{\bar{x}_t} \quad (19)$$

강우량과 매개변수의 앙상블 멤버의 표준편차 10%, 20%, 30%에서 모의유량의 평균변동계수는 Table 1과 같다. 강우와 매개변수에 대한 앙상블 멤버의 표준편차가 증가함에 따라 모의유량의 평균변동계수도 증가하는 것을 알 수 있다. 동일한 표준편차에서 매개변수 변화에 따른 모의유량의 평균변동계수가 강우에 대한 값보다 3배 이상 큰 값을 가지며 강우와 매개변수를 합성한 경우가 동일한 표준편차에 대해 모의유량의 변동 폭이 가장 큰 것으로 나타났다.

자료동화 과정에서 상태변수의 갱신은 모의유량과 관측유량의 불확실성 정도에 따라 결정되므로 관측유량의 불확실성이 모의유량에 대해 미치는 영향을 파악하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 관측유량에 대한 앙상블 멤버의 표준편차를 해당 유량의 10~100% 범위로 변경하였을 때 관측유량과 모의유량의 평균변동계수를 비교하여 관측유량의 불확실성이 모의유량에 미치는 정도를 분석하였으며 그 결과는 Fig. 3과 같다. 이때, 모형의 오차를 나타내는 강우와 매개변수의 불확실성은 각각에 대한 표준편차 30%를 적용하였다. 전 구간에서 관측유량

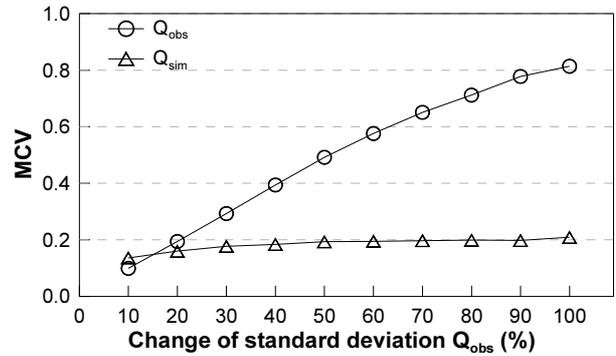


Fig. 3. Comparison of Mean Coefficients of Variation for Measured and Simulated Discharges

에 비해 모의유량의 변화가 상대적으로 적게 나타나며 표준편차가 50% 이상인 경우에는 관측유량의 평균변동계수는 증가하더라도 모의유량은 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 이는 관측유량의 불확실성이 모의유량에 비해 상대적으로 많이 클 경우 칼만계인은 0에 근접하게 되며 이로 인해 모형의 상태변수 갱신 전후의 값의 차이가 상대적으로 작아지게 되므로 모의유량의 변화는 크게 발생하지 않기 때문이다. 반대로, 관측유량의 불확실성이 작을수록 칼만계인은 1에 근접하게 되고 이로 인해 모의치는 관측치에 근접하게 되므로 변동성은 작아지게 된다. Fig. 3에서도 표준편차 10~50% 구간에서 관측유량의 표준편차가 작아질수록 관측치와 모의치의 평균변동계수가 같이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

칼만 필터 기법의 상태변수 갱신에 대한 기본 개념은 모의치와 관측치의 불확실성 크기의 비에 근거하여 모형의 상태변수를 일정부분 관측치에 가깝게 이동시키는 것이다. 이를 위해서는 모의치를 결정하는 모형 입력자료와 매개변수 및 관측치에 대한 참값을 알아야 하나 이는 현실적으로 불가능하며 사용자의 수문학적 자료의 이해 능력과 해석 경험에 따라 결정된다고 할 수 있다. 다만, 자료동화를 통한 예측결과가 항상 관측치와 근접한 결과를 갖게 하기 위해 모의치의 불확실성을 인위적으로 많이 부여하고 반대로 관측치는 적게 부여하는 오류를 범하여서는 안 된다. 본 연구에서는 앞선 연구결과를 토대로 지점강우로부터 산정된 유역평균강우, 관측 및 예측강우, 추정된

매개변수의 불확실성 등을 고려할 때 모의유량의 불확실성이 평균 20% 이내의 오차를 가지는 것으로 가정하여 강우와 매개변수의 불확실성을 표준편차 30%로 설정하고자 한다. 또한 관측유량은 관측기기의 오차와 Q-h 곡선의 오차를 고려할 때 자료의 품질이 우수한 경우 10%의 오차를 가지는 것으로 알려져 있으므로 (Georgakakos, 2008) 안동댐 지점의 관측유량자료 품질이 우수하다는 판단 하에 표준편차 10%를 가정하여 관측유량의 불확실성을 반영하고자 한다.

5. 유량예측능력 평가

5.1 상태변수 갱신 정도 평가

본 연구에서는 하천유량 예측모형의 정확도를 평가하

기에 앞서 관측유량의 자료동화로 인한 상태변수의 거동 특성을 분석하고자 한다. 본 연구에서 구분한 대상유역 3개 소유역별 상태변수 현황을 살펴보면, 최상유역인 1번 소유역은 토양수분량과 유역저류량의 2개 상태변수를 가지고 2번과 3번 소유역은 토양수분량, 유역저류량, 하도저류량의 3개 상태변수를 가진다. 이들 8개 상태변수에 대한 칼만계인의 거동은 Fig. 4에 도시되어 있다. 첫 번째 그래프는 관측유량과 40개의 앙상블 멤버와 앙상블 평균으로 이루어진 모의유량을 나타낸 것이며 아래 그래프는 순차적으로 8개 상태변수에 대한 칼만계인을 도시한 결과이다. 또한 마지막 그래프는 유일하게 관측자료가 존재하는 3번 하도 유출량에 대한 칼만계인이며 상태변수 갱신 정도를 평가하기 위해 추가적으로 분석을 수행하였다. 각 상태변수에 대해서 칼만계인이 0에 가까워질수록 자료동

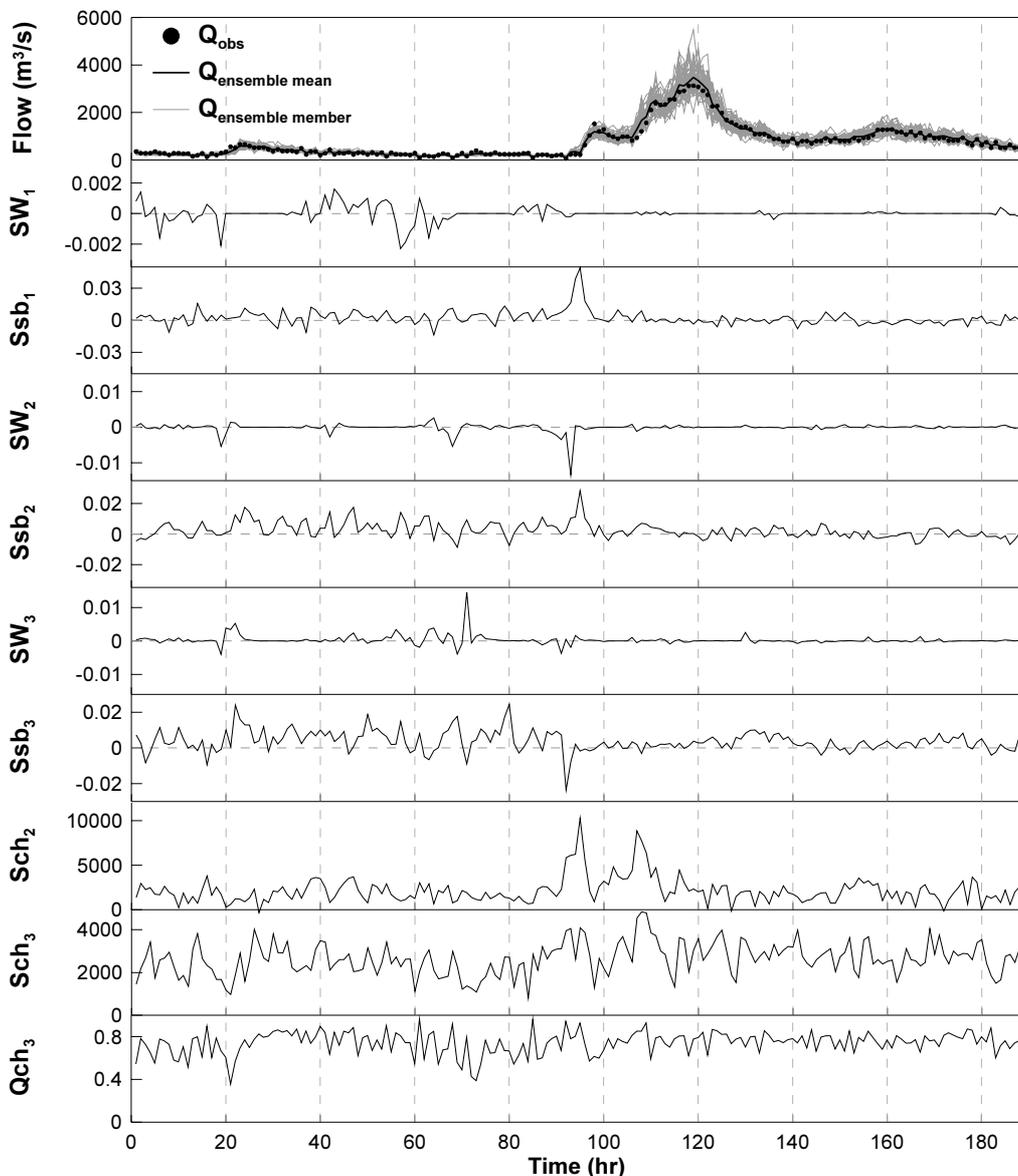


Fig. 4. Kalman Gain Behavior of 9 State Variables on Andong Dam Basin

화로 인한 상태변수의 변화가 적으며 반대인 경우는 갱신으로 인한 변화가 크게 발생하는 것을 의미한다. 유역 토양수분량(SW1, SW2, SW3)에 대한 칼만계인은 저유량 즉, 무강우기간인 경우 변화가 크게 발생하고 고유량 즉, 강우기간에는 칼만계인이 거의 0의 값을 갖는 것으로 나타났다. 이는 토양수분량이 장력수 이내에서 존재하는 경우는 포장용수량에서의 토양수분량까지 여유가 있기 때문에 변화의 여지가 있으나 강우로 인해 토양수분량이 장력수를 초과하는 경우는 거의 포장용수량에서의 토양수분량에 근접한 값을 가지기 때문에 변화의 여지가 줄어들게 된다. 따라서 칼만계인 산정식(Eq. (17))의 $\Sigma_{t+1}^{xx'}$ 이 0에 가까워지므로 칼만계인도 0에 근접하게 된다.

3개 소유역에 대한 유역저류량(Ssb1, Ssb2, Ssb3)의 칼만계인은 0을 기준으로 고유량에서의 변화가 저유량에서보다 상대적으로 작은 것으로 나타났다. 이는 고유량에서 모형 불확실성이 저류량에 비해 상대적으로 그 크기가 작다는 것을 의미한다. 2번과 3번 소유역의 하도저류량(Sch2, Sch3)은 전체유역의 유출량과 거동이 거의 동일하므로 칼만계인은 0 이상의 값을 갖는 것으로 나타났다. 마지막으로 3번 소유역의 하도유출량은 전체유역의 유출량을 의미하며 관측유량이 존재하므로 직접적인 갱신이 가능하다. 하도유출량은 항상 '양'의 값을 가지며 관측유량과 동일한 변량 크기를 가지기 때문에 0~1의 범위를 갖는다. 하도유출량(Qch3)은 대체로 0.4 이상의 값을 가지며 모의기간 동안의 평균값은 0.74로 산정되었다. 이는 자료동화 과정을 통해 모의유량이 관측유량과의 오차범위 내에서 평균 74% 관측유량으로 동화되었다는 것을 의미한다. 이러한 방법은 유역 내 한정된 관측유량자료로부터 미세측 상류유역의 유량을 포함한 모든 상태변수의 자료동화를 통해 보다 향상된 유출모의 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

5.2 정확도 향상능력 평가

본 연구에서 개발한 하천유량 예측모형의 정확도를 평가하기 위해 자료동화 고려 전·후의 유출모의 결과를 비교하였다. Fig. 5는 2006. 7.1~8.18과 2007. 8.1~9.30의 홍수기간 동안 두 방법에 대한 예측선행시간 1시간에 대한 유출수문곡선과 관측유량과의 누적절대오차(Cumulative Absolute Error; CAE)를 나타낸 것이다. 여기서 미래에 대한 예측강우는 관측강우와 동일한 것으로 가정하였다. 그래프에서 'noup'와 'up'는 각각 자료동화 고려 전·후의 결과를 의미한다. 두 방법의 모형 효율성계수를 평가한 결과, 자료동화 고려 전·후에 대해 2006년 0.92와 0.98, 2007년 0.73과 0.87로 두 기간에서 모두 정확도가 향상되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 관측유량과의 누적절대오차에서도 확인할 수 있다.

본 연구에서는 자료동화로 인한 유출모의결과의 정확도 향상 정도를 정량적으로 평가하기 위해 유효성지수(Effectiveness Index; EI)를 평가지표로 이용하였으며 산정방법은 Eq. (20)과 같다. 식에서 Q_{det} 와 Q_{sto} 는 각각 자료동화 고려 전·후의 모의유량(m^3/s), Q_{obs} 는 관측유량(m^3/s)을 의미하고 t 는 해당모의시간(h)을 나타낸다. 식에서 괄호안의 분자는 자료동화 결과에 대한 누적절대오차이고 분모는 자료동화 고려전의 누적절대오차를 나타낸다. 따라서 자료동화 효과로 인해 정확도가 향상될수록 유효성지수는 100%에 가까워지며 반대로 성능이 떨어질 경우는 '음'의 값을 가지게 된다. 안동댐 지점에 대한 예측선행시간 1시간의 유효성지수는 2006년과 2007년에 대해 각각 49.6%와 33.1%로 산정되었다. 이는 미래 1시간에 대한 홍수량 예측 시 자료동화기법을 적용한 결과가 단순히 강우-유출모형을 이용한 결과보다 정확도가 49.6%와 33.1% 향상됨을 의미한다.

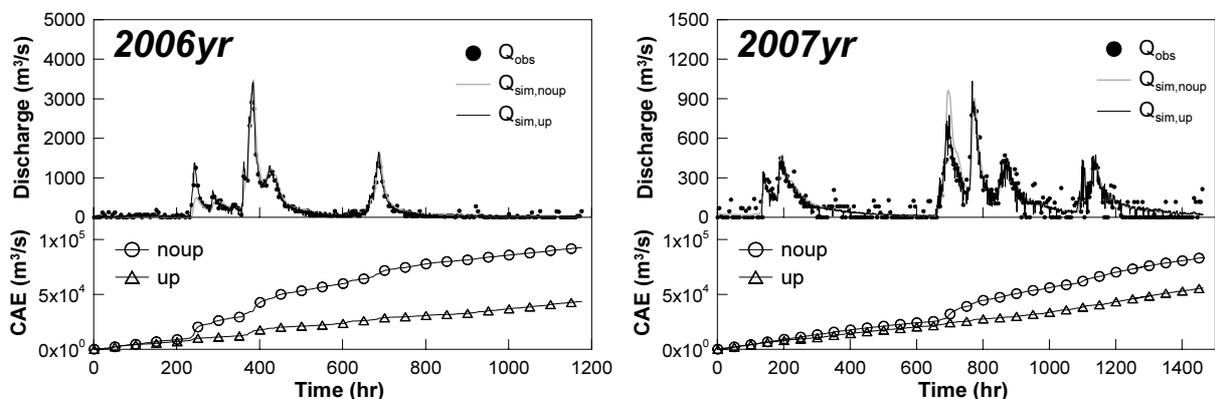


Fig. 5. Comparison of the Discharges with and without Updating Process at Andong Dam Site during 2006 and 2007 Flood Period

$$EI = 100 \times \left(1 - \frac{\sum_{t=1}^N |Q_{sto,t} - Q_{obs,t}|}{\sum_{t=1}^N |Q_{det,t} - Q_{obs,t}|} \right) \quad (20)$$

이상의 결과로부터 자료동화기법을 연계한 하천유량 예측모형의 유출모의결과가 순수 강우-유출모형만을 이용한 경우보다 정확도가 향상됨을 확인하였다. 따라서 관측자료의 실시간 수집 및 이용이 가능하다는 가정 하에 강우-유출모형과 자료동화기법을 연계하여 유량을 예측하는 것이 실시간 홍수예보를 가능하게 하는 강력한 도구가 될 것으로 사료된다.

6. 결론

본 연구에서는 실시간 유량예측결과의 정확도를 향상시키기 위해 시간위 연속형 강우-유출모형과 앙상블 칼만필터링 기법을 연계한 하천유량 예측모형을 개발하였으며 안동댐 상류유역에 적용하여 유량예측능력을 평가하였다. 도출된 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 강우와 매개변수의 불확실성에 따른 모의유량의 변화를 분석하였으며 매개변수가 강우에 비해 약 3배 이상 모의유량의 변화에 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 강우와 매개변수를 합성한 경우 표준편차 30%에 대해서 모의유량이 17.1%의 변동성을 보이는 것으로 나타났다. 또한 관측유량의 불확실성은 모의유량에 크게 영향을 미치지 않으며 관측유량의 표준편차 10%에서는 관측유량이 모의유량보다 불확실성이 작고 20% 이상에서는 항상 크게 나타남을 확인하였다.
2. 자료동화 적용 시 강우와 매개변수의 불확실성을 표준편차의 30%로 가정하고 안동댐 관측유량의 불확실성은 표준편차의 10%로 가정하였다. 안동댐 상류유역에 대해서 각 소유역별 상태변수에 대한 칼만게인의 거동을 분석하였으며 관측유량에 대한 갱신 정도를 분석한 결과 모의유량은 관측유량과의 오차범위 내에서 평균 74% 관측유량으로 동화되는 것으로 나타났다.
3. 안동댐 유역에 대해서 2.006.7.1~8.18과 2007.8.1~9.30의 두 홍수기간을 선정하고 자료동화기법을 연계한 하천유량 예측모형의 정확도 개선 정도를 평가하였다. 자료동화 고려 전·후에 대해 모형효율성계수는 2006년 0.92와 0.98, 2007년 0.73과 0.87로 정확도가 향상되는 것으로 나타났다. 또한 유효성지수를 평가한 결과 자료동화로 인해 유출모의결과의 정확

도가 2006년 49.6%, 2007년 33.1% 개선되는 것으로 나타났다. 이상의 결과로부터 유량예측 시 자료동화 기법을 연계한 유량예측모형이 강우-유출모형만을 이용한 경우보다 정확도가 향상됨을 증명하였다.

본 연구는 관측강우를 예측강우로 가정하여 하천유량 예측모형을 개발하고 예측결과에 대한 정확도를 평가한 것으로 향후 레이다와 수치모델 정보를 기반으로 한 초단기 강우예측자료에 대한 홍수량 예측능력을 평가할 필요가 있다고 판단된다. 또한 한강과 낙동강 유역 등 대유역에 대한 적용성 평가가 이루어진다면 대유역 실시간 홍수예보시스템에 활용이 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 한국건설교통기술평가원의 2009 건설기술혁신사업인 ‘기후변화에 의한 수문 영향분석과 전망’과제에 의해 지원되었습니다.

참고문헌

- 김상호 (2003). “Kalman Filtering 기법을 이용한 수리학적 홍수예측.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제23권, 제6B호, pp. 541-549.
- 배덕효 (1997). “저류함수법을 이용한 추계학적 실시간 홍수예측모형 개발.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제30권, 제5호, pp. 449-457.
- 배덕효, 이병주 (2011). “대유역 홍수예측을 위한 연속형 강우-유출모형 개발.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제44권, 제1호, pp. 51-64.
- 배덕효, 이병주, Shamir E. (2009). “앙상블 칼만필터를 연계한 추계학적 연속형 저류함수모형 개발 (I): -모형개발-.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제11호, pp. 953-961.
- 배덕효, 정일문 (2000). “저류함수법에 의한 추계동역학적 하도홍수추적모형의 개발.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제3호, pp. 341-350.
- 안상진, 이재경, 한양수, 전계원 (2002). “유출예측모형을 이용한 홍수유출해석.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제22권, 제3-B호, pp. 311-319.
- 이병주, 배덕효, Shamir E. (2009). “앙상블 칼만필터를 연계한 추계학적 연속형 저류함수모형 개발 (II): -적용 및 검증-.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제11호, pp. 963-972.
- 한건연, 손인호, 이재영 (2000). “실시간 범람위험도 예측을 위한 수리학적 모형의 개발.” **한국수자원학회논문**

- 집, 한국수자원학회, 제33권, 제3호, pp. 331-340.
- Arnold, J.G., Allen, P.M., and Bernhardt, G. (1993). "A comprehensive surface-groundwater flow model." *Journal of Hydrology*, Vol. 142, pp. 47-69.
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., and Williams, J.R. (1998). "Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 34, No. 1, pp. 73-89.
- Blöschl, G., Reszler, C., and Komma, J. (2008). "A spatially distributed flash flood forecasting model." *Environmental Modelling & Software*, Vol. 23, pp. 464-478.
- Clark, M.P., Rupp, D.E., Woods, R.A., Zheng, X., Ibbitt, R.P., Slater, A.G., Schmidt, J., and Uddstrom, M.J. (2008). "Hydrological data assimilation with the ensemble Kalman filter: use of streamflow observation to update states in a distributed hydrological model." *Advances in Water Resources*, Vol. 31, pp. 1309-1324.
- Evensen, G. (1992). "Using the extended Kalman filter with a multilayer quasi-geostrophic ocean model." *Journal of Geophysical Research-Oceans*, Vol. 97, No. C11, pp. 17905-17924.
- Evensen, G. (1994). "Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 99, No. C5, pp. 10143-10162.
- Georgakakos, K.P. (2008). *Formulation of a system for flood forecasting in Korea based on the storage function method and distributed filtering technique*. HRC Technical Note, No. 32.
- Kalman, R. (1960). "New approach to linear filtering and prediction problems." *Trans AMSE, Journal of Basic Engineering*, Vol. 82D, pp. 35-45.
- Komma, J., Blöschl, G., and Reszler, C. (2008). "Soil moisture updating by Ensemble Kalman Filtering in real-time flood forecasting." *Journal of Hydrology*, Vol. 357, pp. 228-242.
- Liu, N., and Oliver, D.S. (2005). "Ensemble Kalman filter for automatic history matching of geologic facies." *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 47, pp. 147-161.
- Maybeck, P.S. (1979). *Stochastic models, estimation and control*, Volume 1. Academic Press, New York.
- Moradkhani, H., Sorooshian, S., Gupta H.V., and Houser, P.R. (2005). "Duel state parameter estimation of hydrological models using ensemble Kalman filter." *Advances in Water Resources*, Vol. 28, pp. 135-147.
- Neal, J.C., Atkinson, P.M., and Hutton, C.W. (2007). "Flood inundation model updating using an ensemble Kalman filter and spatially distributed measurements." *Journal of Hydrology*, Vol. 336, pp. 401-415.
- Reszler, C., Komma, J., Blöschl, G., and Gutknecht, D. (2006). "An approach to identifying spatially distributed runoff models for flood forecasting." *Hydrology and Wasserbewirtschaftung*, Vol. 50, No. 5, pp. 220-232.
- Sloan, P.G., and Moore, I.D. (1984). "Modeling subsurface stormflow on steeply sloping forested watersheds." *Water Resources Research*, Vol. 20, No. 12, pp. 1815-1822.
- Sloan, P.G., Morre, I.D., Coltharp, G.B., and Eigel, J.D. (1983). Modeling surface and subsurface stormflow on steeply-sloping forested watersheds. Water Resources Institute Report 142. University of Kentucky, Lexington.
- Soil Conservation Service (1972). National Engineering Handbook: section 4 - Hydrology. SCS.
- Wagner T., Boyle, D.P., Lees, M.J., Wheeler, H.S., Gupta, H.V., and Sorooshian, S. (2001). "A framework for development and application of hydrological models." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 5, No. 1, pp. 13-26.
- Young, P.C. (2002). "Advances in real-time flood forecasting." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 360, pp. 1433-1450.

논문번호: 11-006	접수: 2011.01.17
수정일자: 2011.02.15/03.02	심사완료: 2011.03.02