관측자료 동화기법과 댐운영을 고려한 실시간 댐 수문량 예측모형 개발

Development of Realtime Dam's Hydrologic Variables Prediction Model using Observed Data Assimilation and Reservoir Operation Techniques

이 병 주* / 정 일 원** / 정 현 숙*** / 배 덕 효****

Lee, Byong Ju / Jung, Il-Won / Jung, Hyun-Sook / Bae, Deg Hyo

Abstract

This study developed a real-time dam's hydrologic variables prediction model (DHVPM) and evaluated its performance for simulating historical dam inflow and outflow in the Chungju dam basin. The DHVPM consists of the Sejong University River Forecast (SURF) model for hydrologic modeling and an auto-reservoir operation method (Auto ROM) for dam operation. SURF model is continuous rainfall-runoff model with data assimilation using an ensemble Kalman filter technique. The four extreme events including the maximum inflow of each year for 2006~2009 were selected to examine the performance of DHVPM. The statistical criteria, the relative error in peak flow, root mean square error, and model efficiency, demonstrated that DHVPM with data assimilation can simulate more close to observed inflow than those with no data assimilation at both 1-hour lead time, except the relative error in peak flow in 2007. Especially, DHVPM with data assimilation until 10-hour lead time reduced the biases of inflow forecast attributed to observed precipitation error. In conclusion, DHVPM with data assimilation can be useful to improve the accuracy of inflow forecast in the basin where real-time observed inflow are available.

Keywords : realtime, DHVPM, SURF model, ensemble Kalman filter, auto ROM

요 지

본 연구의 목적은 앙상블 칼만필터링 기법과 연속형 강우-유출모형을 연계한 SURF 모형과 Auto ROM을 결합한 실시간 댐 수문량 예측모형(DHVPM)을 개발하고 그 적용성을 평가하는데 있다. 대상유역은 충주댐 상류유역을 선정하였으며 2006~2009년 동안 연최대 유입량이 발생한 4개 사례를 선정하였다. 관측유량 자료동화 적용에 따른 선행시간 1시간 유입량에 대한 첨두유량 상대오차, 평균제곱근오차, 모형효율성계수를 산정한 결과, 2007년 첨두유량 상대오차 결과를 제외한 모든 사례에서 자료동화기법을 적용한 결과가 우수한 것으로 나타났다. 현시점으로 가정한 가상시점에서 예측선행시간 10시간에 대해 유입량을 예측한 결과에서, 유역평균강우량의 오차가 큰 경우에 대해 자료동화기법을 적용함으로써 예측 유입량의 오차가 줄어드는 것을 확인하였다. 이상의 결과로부터 실시간 예측유입량의 정확도를 향상시키기 위해서는 관측 유입량의 실시간 활용이 가능한 환경에서 자료동화기법을 연계한 유입량 예측모형을 이용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

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

Corresponding Author, Senior Researcher, Applied Meteorology Research Division, National Institute of meteorological Research, Seoul 156-720, Korea

** 팀장, APEC 기후센터 기후변화연구팀 (e-mail: bobilwon@apcc21.org)

Team Leader, Climate Change Research Team, Climate Research Department, Busan 612-020, Korea

*** 과장, 국립기상연구소 응용기상연구과 (e-mail: hsjung@korea.kr)

Manager, Applied Meteorology Research Division, National Institute of meteorological Research, Seoul 156-720, Korea

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

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

1. 서 론

신뢰성 있는 댐유입량 예측은 다목적댐의 홍수관리에 필수적인 요소이다. 국내에는 20개 이상의 홍수조절댐이 운영되고 있으며, 이들 댐들의 효율적인 운영을 위해서는 충분한 선행시간이 확보된 유입량 예측이 요구된다. 유입량 예측을 위해서는 정확도 높은 강수추정치와 예측치의 확보가 필수적이다. 지금까지 유량모의를 위한 강수추정 및 예측과 관련하여 다양한 연구들이 진행되어 왔다. 레이더 자료를 이용한 연구로 Bae et al. (2005)과 Kim et al. (2005)은 관악산 레이더 자료를 이용하여 Marshall-Palmer와 Z-R 관계식과 실시간 편차보정기법 적용을 통해 강수량을 추정하고 이를 소양강 유역에 적용하여 레이더 추정 강수량의 유량모의 적용성을 제시하였다. Kim and Bae (2006)는 GDAPS 중기 기상 수치예보자료를 활용한 ESP (Ensemble Streamflow Prediction) 기법을 개발하고 소양강 유역에 적용하여 중장기 유량예측에 활용이 가능함을 보인다. Choi et al. (2006)은 지상관측자료와 레이더자료를 ordinary cokriging 보간방법을 적용하여 강수량을 추정하여 홍수유출모의에 활용하였다. Vieux et al. (2009)은 보정된 레이더 강수추정치를 분포형 모형에 적용하여 용담댐과 남강댐에 대한 홍수모의 가능성을 제시하였으며 Valeriano et al. (2009)은 댐 하류의 침투홍수량 감소방안을 도출하는 과정에서 레이더자료와 분포형 수문모형을 연계한 바가 있다. 또한 Su et al. (2011)은 위성강수와 분포형 수문모형을 연계하여 일단위 하천유량모의 가능성을 평가하였다. 이들 연구들은 주로 기상예측자료의 수문학적 활용성을 평가하거나 지상관측자료를 이용하여 정확도를 개선시키는 데 초점을 맞추었다.

수문모델링측면에서 댐유입량 예측의 정확도를 향상시키기 위해서는 유출모형의 구조적 차이에서 발생하는 유출모형 선정의 불확실성과 매개변수 추정에 따른 불확실성을 줄이는 것이 필요하다(Moradkhani and Sorooshian, 2008). 자료동화기법(data assimilation technique)은 수문모델링에서 발생하는 입력자료에 따른 불확실성(예, 공간강우정보의 부재, 관측강수량의 결측 또는 측정오차)과 유출모형의 구조적 차이와 매개변수 추정에서 발생하는 불확실성을 효과적으로 줄이는 방법으로 알려져 있다(Shamir et al., 2010). 자료동화기법에서는 새로운 관측치

를 이용해 실시간 모형결과를 갱신(updating)함으로써 다음 단계의 유량예측의 정확도를 효과적으로 향상시킬 수 있다(Lee and Bae, 2011a). 이러한 이유로 미국의 National Weather Service River Forecast System (NWSRFS)과 유럽의 European Flood Alert System (EFAS)에서 실시간하천유량 예측 현업에 자료동화기법을 활용하고 있다.

국내에서도 자료동화기법인 칼만필터(Kalman Filter, KF) (Kalman, 1960)를 홍수통제소에서 하천의 홍수예보 업무에 이용되는 저류함수모형에 대해 적용하여 추계학적 상태-공간 형태의 모형으로 개선함으로써 유량모의의 정확도가 향상됨을 보였다(Bae, 1997; Bae and Jung, 2000). 그러나 칼만필터는 모형의 상태변수를 선형적으로만 갱신하므로 비선형성이 강한 강우-유출현상에 적용하기에는 한계가 있었다. 이를 극복하기 위해 Monte Carlo 모의기법을 적용하여 시스템의 비선형성을 고려하면서 모형의 불확실성도 평가할 수 있는 앙상블칼만필터기법(Ensemble Kalman Filter, EnKF)이 제안되었다(Evensen, 1994). Lee and Bae (2011a)는 EnKF를 저류함수모형에 적용하여 Sejong University River Forecast Model (SURF)를 개발하였다. SURF 모형을 낙동강유역에 적용하여 평가한 결과, 관측유량 자료동화효과로 인해 예측선행시간 5시간까지 30.1~46.2%의 예측유량 정확도가 개선됨을 보여주었다(Lee and Bae, 2011b).

그러나 SURF 모형은 저수지운동을 고려하지 않음으로 인해 저수지를 포함하는 유역에서의 적용에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 기존의 SURF 모형에 저수지 운영모듈을 추가하여 적용성을 향상시키고자 한다. 이를 위해 저수지 운영모델로는 많이 적용되고 있는 Auto ROM 기법을 검토하였으며, 대상유역으로는 충주댐유역을 선정하였다. 저수지 운영모델의 평가에서 모의 저수위나 방류량이 관측치를 얼마나 잘 모의하는 것이 중요하나 국내의 경우 저수량과 방류량 자료가 가용한 지점은 댐 운영자의 판단에 의해 결정되므로 관측치와 모의치를 직접적으로 비교하기는 현실적으로 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 모의유입량에 대해서는 관측치를 기준으로 정확도를 평가하고 저수위와 방류량에 대해서는 동일한 조건에서 자료동화 적용 유무에 따라 달라진 유입량이 저수위와 방류량에 어느 정도 영향을 주는지를 분석하고자 하였다. 또한, 댐 수문량(유입량, 저수위, 방류량)을 모의

와 예측구간으로 나누어 저수지모형을 고려한 SURF 모형을 성능을 평가하였다.

2. 댐 수문량 예측모형

본 연구에서는 댐 수문량 예측을 위해 Lee and Bae (2011a)가 개발한 SURF 모형(Sejong University River Forecast Model)과 저수지 운영모형인 Auto ROM 모형을 연계한 댐 수문량 예측모형(Dam's Hydrologic Variables Prediction Model; DHVPM)을 개발하였으며 모형구성은 Fig. 1과 같다. SURF 모형은 실시간 하천유량 예측모형으로서 Fig. 1에서 1단계의 사상형 저류함수모형과 연속형 수문성분 산정모형을 연계하여 하천유량을 연속적으로 모의하는 부분과 2단계의 유량예측능력 향상을 위한 자료동화기법의 연계 부분으로 이루어진다. 여기서 연속형 수문성분 산정모형에서는 토양수분량, 실제증발량, 지표/중간/지하수에 대한 유역평균발생량을 모의한다. 실시간 댐 수문량 예측모형은 SURF 모형으로부터 모의된 유량을 저수지 유입량으로 적용하여 저수위와 댐 방류량을 모의하는 3단계에 해당한다.

이 모형은 자료동화기법을 연계하여 유량을 모의하므로 기존의 결정론적 모형과 달리 강우량의 오차가 큰 사례에 대해서 오차가 누적되지 않음으로 인해 예측정확도가 향상될 수 있다. 또한 댐 운영모형과 연계하여 상류에 댐이 존재하는 대유역에 대해서도 유출모의가 가능하다는 장점이 있다.

2.1 유출모형

연속형 강우-유출모형은 사상형 저류함수모형과 연속

형 수문성분 모의모형을 결합한 모형으로 토양수분, 유역저류량, 하도저류량에 대한 연속방정식은 Eqs. (1)~(3)과 같고 유역과 하도유출량에 대한 운동량방정식은 Eqs. (4) and (5)와 같다. Eq. (1)에서 계산시간간격에 대한 토양수분 변화량($dSW(t)/dt$)은 해당 계산시점의 유역평균 강우량(P), 실제증발산량(AET), 지표유출량(Q_{sur}), 중간유출량(Q_{lat}), 지하수유출량(Q_{gw})으로부터 산정되며 각 세부 성분들에 대한 산정방법은 Bae and Lee (2011)에 상세히 기술되어 있다. 이들 성분들의 단위는 mm/h이다. Eq. (2)에서 유역저류량의 변화($dS_s(t)/dt$)는 기존 저류함수 모형에서 적용되던 유효우량을 대신하여 지표, 중간, 지하수유출량을 이용하여 유역저류량을 연속적으로 산정한다. Q_s 는 유역유출량(mm/h)이다. Eq. (3)의 하도저류량 변화($dS_c(t)/dt$)는 상류에서 유입되는 양에서 하도유출량을 뺀 값으로 표현되며 식에서 S_s 는 유역저류량(m^3), K_{sb} 와 P_{sb} 는 유역 저류상수, Q_c 는 하도유출량(m^3/s)을 의미한다. Eq. (5)에서 S_c 는 하도저류량(m^3), K_{ch} 와 P_{ch} 는 하도 저류상수를 의미한다.

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

$$\frac{dS_s(t)}{dt} = [Q_{sur}(t - \tau) + Q_{lat}(t - \tau) + Q_{gw}(t - \tau)] - Q_s(t) \quad (2)$$

$$\frac{dS_c(t)}{dt} = \sum \left(\frac{S_s(t)}{K_{sb}} \right)^{1/P_{sb}} - Q_c(t) \quad (3)$$

$$Q_s(t) = \left(\frac{S_s(t)}{K_{sb}} \right)^{P_{sb}} \quad (4)$$

$$Q_c(t) = \left(\frac{S_c(t)}{K_{ch}} \right)^{P_{ch}} \quad (5)$$

Fig. 1. Concept of Dam's Hydrologic Variables Prediction Model

2.2 자료동화

앙상블 칼만필터(EnKF) 기법은 Evensen (1994)에 의해 처음 제안되었으며 시계열 수문자료의 자료동화에 많이 활용되고 있는 칼만필터(KF)(Kalman, 1960) 기법을 비선형 시스템에서 안정적으로 적용할 수 있도록 개선한 방법으로 Monte-Carlo Simulation (MCS) 기법을 기반으로 Kalman Gain을 산정하여 상태변수(state variable)를 갱신하는 방법이다(Lee and Bae, 2011a).

EnKF 기법은 Table 1과 같이 MCS 기법을 이용하여 다수의 앙상블 상태변수를 생성하는 예측과정과 상태변수를 갱신하는 두 과정으로 이루어진다. x_t 는 t 시점에서의 상태변수, u_t 는 강우와 같은 모형 입력자료, θ_t 는 모형 매개변수이며 $f(\cdot)$ 는 상태전이함수이다. u_t^i 와 θ_t^i 는 각각 i 번째 앙상블 입력자료와 매개변수이며 ζ_t^i 와 ξ_t^i 는 각각의 오차항으로 평균이 0이고 분산이 Σ_t^u 와 Σ_t^θ 인 정규분포 특성을 갖는다. 또한 y_t 는 관측변수이며 $h(\cdot)$ 는 상태변수와 관측변수를 관계를 나타내는 변환함수이다. w_t 와 v_t 는 백색잡음(white noise)이며 상호 독립적이고 평균이 0이며 분산이 Σ_t^x 와 Σ_t^y 인 정규분포 특성을 갖는다. EnKF 기법에서는 각 앙상블 상태변수별로 갱신과정을 수행하며 $x_{t+1|t+1}^i$ 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. y_{t+1}^i 은 관측치에 대한 앙상블 멤버를 나타내며 관측치의 i 번째 앙상블 멤버로 분산 Σ_{t+1}^y 을 갖는 오차항 η_{t+1}^i 로부터 산정된다. EnKF 기법에서 K_{t+1} 은 비교적 쉽게 산정이 가능하며 $\Sigma_{t+1}^{xx'}$ 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. Σ_{t+1}^y 는 관측 오차의 분산을 나타낸다.

2.3 저수지 운영

저수지 운영방법(Reservoir Operation Method; ROM)은 Auto ROM, Technical ROM, Rigid ROM 등 여러 가

지 방법이 있으며 어떤 방법이 실제 저수지운영과 더 유사한 방법이라 단정하기는 어렵다. 본 연구에서는 목표수위를 기준으로 방류량을 조절하는 Auto ROM을 적용하였다. 이 방법은 가장 간단한 저수지 운영방법으로 댐 수위가 목표수위(상시만수위 또는 홍수기제한수위)보다 낮을 경우는 목표수위에 도달할 때까지 여수로 방류를 실시하지 않고 목표수위보다 높아지면 여수로 수문을 전개하여 목표수위를 유지하도록 하는 방법이다. 또한 수력발전 기능을 갖고 있는 댐에 대해서는 저수지 운영 시 발전방류량도 고려해야 한다. 이 경우 저수위가 기준수위 이상인 경우는 최대사용수량으로 방류하는 것이 일반적이나 저수위-방류량 운영결과를 살펴보면 방류시점과 방류량에 대해 일정한 규칙을 찾기가 어려우며 이러한 결과는 기준수위 이하에서도 유사하다. 그러나 장기간의 누적방류량은 저수량에 큰 영향을 미치므로 연속모의를 위해서는 방류량을 고려하는 것이 바람직하다. 따라서 본 연구에서는 과거 저수지 운영결과로부터 월별 시 평균 발전방류량을 산정하여 저수지 운영모형에 적용하였다.

3. 대상지역 및 자료구축

본 연구에서는 Fig. 2와 같이 남한강 최상류에 위치한 충주댐 상류유역을 대상유역으로 선정하였다. 충주댐 유역면적은 6,648 km²이고 지형고도분포는 68~1,560 m이다. 충주댐은 한강유역의 용수공급, 홍수관리, 수력발전 기능을 담당하고 있는 중요한 다목적 댐이며 총저수용량은 2,750 × 10⁶ m³으로 우리나라에서 소양강댐(2,900 × 10⁶ m³)에 이어 두 번째로 큰 저수용량을 가지고 있다.

유출모의를 위해 충주댐 유역을 7개의 소유역으로 구분하였으며 시간위 강우량, 기온, 상대습도, 풍속, 일조시간 자료는 기상청으로부터 수집하였다. 또한 수지표고모텔과 토지피복도는 국토해양부 국가수자원관리종합정보시스템(www.wamis.go.kr), 정밀토양도는 국립농업과학원(www.naas.go.kr)으로부터 수집하였다.

Table 1. Ensemble Kalman Filter Algorithm

State Variable Prediction	State Variable Update
$x_{t+1 t}^- = f(x_{t t}^-, u_t, \theta_t) + w_t, \quad w_t \sim N(0, \Sigma_t^x)$ $y_t = h(x_t, \theta_t) + v_t, \quad v_t \sim N(0, \Sigma_t^y)$ $u_t^i = u_t + \zeta_t^i, \quad \zeta_t^i \sim N(0, \Sigma_t^u)$ $\theta_t^i = \theta_t + \xi_t^i, \quad \xi_t^i \sim N(0, \Sigma_t^\theta)$	$x_{t+1 t+1}^i = x_{t+1 t}^{i-} + K_{t+1}(y_{t+1}^i - h(x_{t+1 t}^{i-}, \theta_{t+1}^i))$ $y_{t+1}^i = y_{t+1} + \eta_{t+1}^i, \quad \eta_{t+1}^i \sim N(0, \Sigma_{t+1}^y)$ $K_{t+1} = \Sigma_{t+1}^{xx'} [\Sigma_{t+1}^{x'} + \Sigma_{t+1}^y]^{-1}$

4. 적용 및 결과분석

4.1 댐 수문량 모의

관측유량 자료동화에 따른 저수지 유입량, 저수위, 댐 방류량의 댐 수문량에 대한 변화를 분석하기 위해 자료동화 기법의 적용유무에 따른 관측수문량과 모의수문량을 비교하였다. 작용사례는 2006~2009년에 대해 매년 댐 유입량이 가장 크게 발생한 4개 사례를 선정하였으며 각 사례에 대한 모의기간, 첨두유입량, 첨두시간에 대한 정보는 Table 2와 같다. 여기서 첨두시간은 모의시작시점부터 첨두유입량이 발생하기까지의 시간을 의미한다. 특히, 2006년은 태

Fig. 2. Study Area

Fig. 3. Relative Error in the Peak Flow (REP), Root Mean Square Error (RMSE) and Model Efficiency (ME) for the Inflows with and without the Updating Process

풍 ‘에위니아’와 장마전선의 영향으로 많은 양의 강우가 발생한 경우이며 다른 사례보다 첨두유입이 대략 2.8~6.3 배 많이 발생하였다.

자료동화 적용 유무에 따른 모의유입량의 정확도 평가결과는 Fig. 3과 같다. 통계지표는 첨두유량 상대오차(REP), 평균제곱근오차(RMSE), 모형효율성계수(ME)를 이용하였다. SIM_C1과 SIM_C2는 각각 자료동화기법의 미적용과 적용에 대한 모의유입량의 정확도 산정결과이다. SIM_C2는 자료동화 과정에서 예측선행시간 1시간에 대한 유입량 예측결과로서 자료동화효과가 가장 높게 반영된 결과이다. 첨두유량 상대오차는 2007년을 제외하고 SIM_C2가 SIM_C1에 비해 상대적으로 작게 나타났다. 평균제곱근오차는 유입량규모가 상대적으로 큰 2006년에서 가장 높으며 전체사례에서 SIM_C2가 SIM_C1에 비해 작게 나타났다. 모형효율성계수는 SIM_C2가 0.91~0.95 범위를 갖는 반면에 SIM_C1은 0.79~0.92의 범위를 가지며 전체사례에서 SIM_C2가 높게 나타남을 확인할 수 있다. 이상의 결과로부터 관측유량 자료동화기법을 적용함으로써 인해 평균적으로 모의유입량의 정확도가 향상됨을 알 수 있다.

Fig. 4는 Table 2에 제시된 4개 기간에 대해 자료동화기법 적용 유무에 따른 모의유입량과 이로 인한 저수위와 방

Table 2. Mean Area Precipitation, Peak Flow and Peak Time During the Simulation Periods

Simulation period	MAP (mm)	Q_{peak} (m^3/s)	T_{peak} (h)
2006.7.8~7.22 (360h)	612.0	25,477.5	209
2007.8.1~8.15 (360h)	250.0	4,070.8	113
2008.7.18~8.1 (360h)	271.8	8,990.0	180
2009.7.8~7.22 (360h)	417.8	9,140.5	121

Fig. 4. Observed and Simulated Dam's Hydrologic Variables with and without the Updating Process

류량 모의결과를 도시한 것이다. 여기서 자료동화기법을 적용한 댐 유입량은 선행시간 1시간에 대한 결과이다. 저수위와 방류량은 저수량-수위, 수위-방류량 관계로부터 산정된다. 방류량은 앞서 언급한 바와 같이 Auto Rom 방법을 적용한 결과이다. Fig. 4의 결과에서 관측치를 기준으로 모의유입량이 얼마나 정확한가를 분석하는 것은 의미가 있으나 저수량과 방류량은 당시 유역의 수문상황과 댐 운영자의 판단에 의해 결정되므로 관측치와 모의치를 직접 비교하여 정확도를 평가하기는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 모의유입량에 대해서는 관측치를 기준으로 정확도를 평가하고 저수위와 방류량에 대해서는 동일한 조건에서 자료동화 유무에 따라 달라진 유입량이 저수위와 방류량에 어느정도 영향을 미치는지를 분석하고자 한다.

2006년 사례(a)에서 관측수문량을 살펴보면, 최대유입량은 $25,477.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 충주댐 최대방류량인 $20,850.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 보다 큰 유입이 유입되었으며 이 때 실제 방류량은 최대 $9,067.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 운영되었다. 이로 인해 저수위는 홍수기제한수위 138.0 m 를 6.01 m 초과하여 144.01 m 까지 상승하였다. SIM_C1 유입량이 SIM_C2에 비해 상대적으로 적음으로 인해 저수위도 낮게 나타나며 최대 수위차는 2.54 m 로 나타났다. 이로 인해 여수로 방류량은 SIM_C1이 SIM_C2에 비해 4시간 지체되어 발생하였다.

2007년 사례(b)의 관측수문량은 유입량 증가로 인해 수위가 홍수기제한수위 이상으로 상승한 시점 이후에도 방류량이 거의 변화가 없으며 22시간이 지난 시점부터 $2,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 내외로 방류량이 증가되었다. SIM_C2의 최대방류

량도 이와 비슷한 값으로 나타났다. 자료동화를 적용하지 않은 SIM_C1의 모의유입량은 관측치에 비해 상당히 과소모의되며 이에 비해 SIM_C2는 적합도가 높은 것을 확인할 수 있다. 모의유입량에 따른 저수위는 최대 2.30m의 차이를 보였다.

2008년 사례(c)에서는 최대유입량이 8,990.0 m³/s로 많은 양이 유입되었으나 여수로방류를 하지 않음에도 불구하고 저수위가 홍수기제한수위를 넘지않는 것으로 나타났다. 이는 모의시작시점의 저수위가 117.7m로 매우 낮은 상태로 저수량의 여유가 충분하기 때문이다. 유입량곡선의 상승부에서 두 모의치가 관측치와 유사하게 상승함에도 불구하고 관측첨두유입량 발생시점 이후에도 모의치가 상승하는 것으로 나타났으며 이는 모형에 적용되는 티센법으로부터 산정된 유역평균강우량의 오차에서 기인한 것으로 판단되며 자세한 내용은 다음절에서 논의하고자 한다. 모의유입량 차이로 인한 저수위는 최대 1.85m의 차이를 보였다.

2009년 사례(d)에서 최대유입량은 9,140.5 m³/s가 발생하였으나 저수위가 홍수기제한수위를 넘기 전에 선제적으로 대략 2,000 m³/s 이상의 방류를 통해 저수위는 홍수기제한수위를 넘지 않았다. 모의방류량은 저수위가 홍수기제한수위를 넘기 전 시점까지 발전방류만 하다가 이후시점에서 SIM_C1은 약 4,000 m³/s 이상, SIM_C2는 2,000 m³/s 이상의 여수로방류를 하는 것으로 모의되었다. 이 때 SIM_C2의 최대방류량은 관측치와 유사한 값을 갖는 것으로 나타났다. 유입량 차이로 인한 저수위는 최대 2.02m의 차이를 보였다.

이상의 결과를 종합하면, 자료동화 적용유무에 의한 모의유입량의 차이로 인해 저수위는 1.85~2.54m의 차이를 보이며 최대방류량도 2007년과 2009년의 경우 대략 두 배의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 따라서 이러한 댐수문량의 차이는 여수로 방류량을 결정해야 하는 긴급한 상황에서 매우 큰 변수가 될 수 있으며 자료동화로 인한 유입량 정확도의 개선효과는 댐수문량 결정에 상당한 영향을 줄 것으로 판단된다.

4.2 댐 수문량 예측

현시점을 기준으로 관측유량자료가 존재하는 과거기간은 자료동화의 적용이 가능하지만 미래기간은 기상예측 정보와 유출모형을 이용하여 유량을 모의하게 된다. 즉, 현재시점에서 모의된 수문변수의 정확도가 높으면 예측값의 정확도도 향상될 가능성이 높다는 전제하에서 자료동화기법은 관측정보를 이용해서 현시점의 모형 내 수문

변수를 참값에 가깝게 모의되게 함으로 인해 미래예측에 대한 오차를 줄이고자 하는 것이다. 본 절에서는 앞서 4.1 절에서 분석된 사례들에 대해서 첨두유입량 발생 이전시점을 현시점으로 가정하여 자료동화 적용 유무에 따른 댐 수문량 예측결과를 분석하고자 한다. 자료동화효과만을 고려하기 위해 유입량 예측에 적용된 예측강우는 AWS 관측강우로부터 산정된 유역평균강우량을 적용하였다.

Fig. 5에서 T1, T2, T3 시점은 가상의 현재시점을 의미하며 이후 10시간에 대한 값들은 현재시점에서 모형으로부터 예측된 값이다. 단, 2007년과 2008년 사례에서는 T4 시점에서의 5시간 예측결과를 추가하여 분석을 수행하였다. Lee et al. (2012)은 AWS 관측강우를 이용하여 충주댐 유입량을 예측할 경우 대략 미래 10시간 이내에서는 첨두유량과 유출용적오차가 크게 감소하지 않으며 충주댐의 지체시간이 10시간 이상임을 제시한 바 있다. 따라서 본 연구에서도 유입량 예측시 유역규모에 따른 관측강우의 적용성을 고려하기 위해 미래예측기간을 10시간으로 설정하였다. Fig. 5에서 T1 시점을 현재시점으로 가정하면, 유입량은 T1 시점까지의 과거기간동안 자료동화기법의 적용유무에 따른 모의값과 T1 시점 이후의 미래기간은 유출모형만을 이용하여 예측된 모의값의 결합으로 이루어진다. 따라서 과거기간에서의 유입량 차이는 자료동화기법의 적용유무가 원인이며 미래기간은 현재시점(T1)에서의 수문변수 차이에서 기인된 결과이다. 저수량과 방류량은 T1 시점의 관측값이 초기값이 되며 T1 시점 이후에는 예측유입량에 따라 변하게 된다.

2006년 사례(a)에서 가상의 현재시점 T1, T2, T3는 각각 모의시작 후 190, 200, 210시간으로 가정하였다. 유입량에 영향을 미친 강우량을 정확하게 규정하기는 어려우나 Fig. 5(a)의 강우량과 유입량의 형태로부터 T1 시점 이후 10시간의 유입량은 이전 10시간의 강우로부터 형성된 것이라 할 수 있다. 이 때 이전 10시간의 누적강우량은 75.53mm이며 이후 10시간의 관측유입량은 51.19mm로 나타나 67.8%의 유출률을 보였다. 이에 비해 두 모의값은 53.0% 미만의 유출률을 보이며 관측값에 비해 과소모의하는 것으로 나타났다. 이는 유출률이 높지 않음을 고려할 때 유역평균강우량의 오차라기보다는 유출모의과정에서 초기강우에 대한 손실량이 많이 발생한 것이 원인이라 판단된다. T2와 T3 시점에서의 유입량 예측결과에서 SIM_C1과 SIM_C2의 정확도는 예측시간에 따라 일정한 경향을 보이지 않음을 확인할 수 있다. 즉, 2006년 사례에서는 예측시점에 따라 자료동화효과로 인해 예측유입량의 정확도가 항상 개선된다고 보기 어렵다. 저수위와 방류량 예측

(a)

(b)

(c)

(d)

Fig. 5. The Results of Forecasted Dam's Hydrologic Variables at Virtual Time Assumed Current Time

결과에서도 T2 시점의 예측결과에서 SIM_C2의 저수위 예측결과가 SIM_C1 결과보다 홍수기제한수위에 먼저 도달하므로 인해 방류량이 2시간 정도 일찍 발생하는 것 이외에 자료동화 적용유무에 따라 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

2007년 사례(b)는 예측결과의 정확도가 상당히 낮은 경우이다. T1, T2, T3 시점에서의 유입량 예측결과에서 SIM_C1은 관측치에 비해 과소모의되고 첨두유량은 3시간 지체되어 발생하였다. SIM_C2는 T1, T2 시점에서 관측치에 가깝게 모의하고 T3 시점에서는 과대모의하며 첨두유량은 관측치에 비해 1시간 지체되었다. SIM_C1은 어느 시점에서 예측하더라도 동일한 결과를 모의하나 SIM_C2는 자료동화효과로 인해 예측결과가 달라진다. T4는 모의 후 115시간을 현재시점으로 가정한 시점이며 115시간

결과에서도 T2 시점의 예측결과에서 SIM_C2의 저수위 예측결과가 SIM_C1 결과보다 홍수기제한수위에 먼저 도달하므로 인해 방류량이 2시간 정도 일찍 발생하는 것 이외에 자료동화 적용유무에 따라 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

까지의 자료동화효과로 인해 이 시점에서의 예측유량은 110 시점에서의 예측결과보다 정확도가 향상됨을 알 수 있다. 이것이 자료동화기법과 연계한 실시간 하천유량예측의 장점이라 할 수 있다. 유사한 효과는 2008년 사례(c)에서도 확인할 수 있다. T1과 T3 시점에서 두 예측값은 관측치와 유사하게 모의되었다. 반면에 T3 시점에서 예측유입량은 상승하는 반면에 관측치는 하강하는 것으로 나타나 관측치에 대해 예측결과가 많은 오차를 보이는 것으로 나타났다. 그 원인으로 예측유입량은 177~180시간에 발생한 유역평균강우량으로 인해 예측유량은 상승하나 관측치에는 강우량이 반영되지 않은 것으로 판단된다. 관측유량의 신뢰도가 AWS 지점자료로부터 계산된 유역평균강우량보다 높다고 가정할 때 예측유량에 대한 오차의 원인은 예측에 이용된 강우량이 주된 원인이라 할 수 있다. 따라서 이러한 강우량의 오차가 큰 사례에서는 유출모형만을 이용하여 유량을 모의할 경우 모형 매개변수만으로는 이러한 오차를 줄이기가 어렵다. T3 시점에서 자료동화효과가 반영된 SIM_C2의 예측유량의 정확도가 낮은 원인은 이 시점에서 자료동화효과가 미비하고 이후 유출모형만을 이용하여 예측된 유량에 177~180시간의 강우량이 반영되었기 때문이다. 반면에 T4 시점에서는 자료동화효과로 인해 갱신된 유량이 관측치에 근접하고 이를 초기값으로 적용하여 예측된 결과는 T3 시점에서 예측된 결과보다 정확도가 향상됨을 확인할 수 있다. 따라서 강우량의 오차가 큰 경우는 모형 매개변수의 조정으로 예측유량의 정확도를 향상시키기는 어려우나 자료동화기법은 예측시점에 따라 정확도 향상이 가능하다고 할 수 있다.

2009년 사례(d)에서 유입량 예측결과는 자료동화효과를 잘 나타낸 사례라 할 수 있다. 자료동화기법 적용 유무에 따른 두 유입량 예측결과가 유사한 형태를 보이기는 하나 유입량곡선의 상승부 초기의 T2 시점에서 자료동화효과로 인해 수문변수의 정확도가 개선됨으로서 이로부터 예측된 SIM_C2가 SIM_C1보다 상승부에서 유입량을 잘 예측하게 된다. 이러한 현상은 하강부를 예측한 T3 시점에서도 동일하게 나타난다.

본 연구는 자료동화효과에 따른 저수지 유입량, 저수위, 댐 방류량의 변화에 대해서 분석하고자 하는 것이 목적이며 유입량은 자료동화기법의 적용유무와 예측시점에 따라 상당한 차이를 보이나 저수위는 분석된 예측시간이 10시간으로 한정됨으로 인해 1m 이내에서 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 다만, 저수위가 홍수기제한수위를 초과하는 긴급한 상황에서는 작은 저수위의 차이도

댐 운영에 중요하게 고려될 것이라 판단된다. 2006년 사례(a)를 제외하고 분석기간 동안 저수위가 홍수위제한수위를 초과하지 않음으로 인해 여수로 방류량은 발생하지 않으며 이로 인해 자료동화효과에 의한 차이를 확인하기는 어려웠다.

5. 결 론

본 연구에서는 앙상블 칼만필터링 기법과 연속형 강우-유출모형을 연계한 SURF 모형과 저수지 운영기법 중 하나인 Auto ROM을 결합한 실시간 댐 수문량 예측모형을 개발하였다. 자료동화기법의 적용유무에 따른 저수지 유입량, 저수위, 댐 방류량에 해당하는 댐 수문량의 예측결과를 분석하였으며 도출된 주요결과를 정리하면 다음과 같다.

댐 수문량 예측모형은 충주댐 유역에 대해 2006~2009년 동안 연최대 유입량이 발생한 4개 사례에 대해서 적용하였다. 자료동화기법의 적용유무에 따른 유입량의 정확도를 비교하기 위해 두 방법에 대한 예측선행시간 1시간의 유입량을 비교하였다. 첨두유량 상대오차, 평균제곱근 오차, 모형효율성계수를 비교한 결과 2007년의 첨두유량 상대오차를 제외하고 모든 사례에 대해서 자료동화기법을 적용한 유입량의 정확도가 높은 것으로 확인되었다.

두 방법에 따른 모의유입량 차이로 인해 저수위는 최대 1.85~2.54m의 차이를 보이고 최대방류량은 2007년과 2009년에 대략 두 배의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 따라서 저수위가 홍수기제한수위(상시만수위)에 근접하는 긴급한 상황에서 자료동화로 인한 유입량 정확도의 개선효과는 댐 수문량 조절에 상당한 영향을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

연도별로 분석기간동안 3~4개의 임의시점을 현시점으로 가정하고 자료동화기법 적용 전(SIM_C1)과 후(SIM_C2)의 유입량, 저수위, 방류량에 대한 예측결과를 분석하였다. 2006년 사례(a)에서 SIM_C1과 SIM_C2의 예측유입량의 정확도는 예측시간에 따라 일정한 경향을 보이지 않으며 저수위와 방류량의 예측결과도 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 2007년 사례(b)는 예측결과의 정확도가 상당히 낮은 경우이다. 예측유입량은 대체로 SIM_C2가 SIM_C1에 비해 정확도가 높으며 첨두유량 직전(T3)에서 예측된 SIM_C1은 과소모의, SIM_C2는 과대모의하는 것으로 나타났다. 다만, 첨두유량 이후 시점(T4)에서의 예측유입량은 자료동화효과로 인해 SIM_C2가 높은 정확도를 보이는 것을 확인할 수 있다. 2008년 사례(c)는 첨두유

량 전까지 SIM_C1과 SIM_C2의 정확도가 높으며 침투유량 발생시점(T3)에서의 예측유입량은 관측치와 달리 증가하는 결과를 보여 오차가 크게 발생하였다. 그 원인은 관측유량에 반영되지 않은 유역평균강우량이 존재하기 때문이며 이러한 문제는 모형 매개변수나 자료동화기법을 통해 개선하기는 어렵다. 다만, 관측침투유량 이후 시점(T4)에서 예측된 유입량 결과로부터 자료동화효과로 인해 SIM_C2의 정확도가 개선됨을 확인할 수 있다. 2009년 사례(d)의 유입량 예측결과는 자료동화효과를 잘 나타내는 사례이다. 두 유입량 예측결과가 유사한 형태를 보이나 가정된 현재시점에서 SIM_C2의 정확도가 높음으로 인해 이를 초기값으로 적용하여 예측된 결과에서도 정확도가 개선됨을 확인할 수 있다. 모든 사례에서 유입량 예측기간을 최대 10시간으로 한정함으로 인해 자료동화기법 적용 유무에 따른 저수위의 차이는 1m 이내이며 방류량은 2006년 사례(a)에서 1시간 정도의 방류시점차이를 보이거나 이 사례를 제외하고 저수위가 홍수위제한수위를 넘지 않음으로 인해 동일한 값을 갖는 것으로 나타났다. 따라서 유입량을 제외한 저수위와 방류량에 대한 자료동화효과에 의한 차이를 확인하기는 어려웠다.

저수지 운영에 있어서 가장 중요한 정보는 유입량 예측 정보이다. 관측유입량의 실시간 구축 및 활용이 가능한 환경에서 자료동화기법은 예측유입량의 정확도를 향상시킬 수 있는 확실한 방법이라 할 수 있다. 본 연구에서 개발한 댐 유입량 예측모형의 활용성을 검증하기 위해 추가적으로 여러 댐 유역에 대한 적용 및 평가와 댐 하류에 미치는 영향에 대해서 분석할 필요가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 기상청 재원의 국립기상연구소 주요사업 “응용기상기술개발연구” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Bae, D.H. (1997), “Development of stochastic real-time flood forecast system by storage function method.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 30, No. 5, pp. 449-457.
- Bae, D.H., and Jung, I.M. (2000). “Development of stochastic- dynamic channel routing model by storage function method.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 33, No. 3, pp. 341-350.
- Bae, D.H., Kim, J.H., and Yoon, S.S. (2005). “Hydrologic utilization of radar-derived rainfall (I) optimal radar rainfall estimation.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 38, No. 12, pp. 1039-1049.
- Bae, D.H., and Lee, B.J. (2011). “Development of continuous rainfall-runoff model for flood forecasting on the large- scale basin.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 44, No. 1, pp. 51-64.
- Choi, K.H., Han, K.Y., Kim, G.S., and Lee, C.H. (2006). “Development of a flood runoff and inundation analysis system association with 2-D rainfall data generated using radar (II) 2-D quantitative rainfall estimation using cokriging.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 39, No. 4, pp. 347-362.
- Evensen, G. (1994). “Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics.” *Journal of Geophysical Research*, AGU, Vol. 99, No. C5, pp. 10143-10162.
- Kalman, R. (1960). “New approach to linear filtering and prediction problems.” *Journal of Basic Engineering*, AMSE, Vol. 82D, pp. 35-45.
- Kim, J.H., and Bae, D.H. (2006). “Probabilistic medium- and long-term reservoir inflow forecasts (II) use of GDAPS for ensemble reservoir inflow forecasts.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 39, No. 3, pp. 275-288.
- Kim, J.H., Lee, K.D., and Bae, D.H. (2005). “Hydrologic Utilization of radar-derived rainfall (II) uncertainty analysis.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 38, No. 12, pp. 1051-1060.
- Lee, B.J., and Bae, D.H. (2011a). “Development of real-time river flow forecasting model with data assimilation technique.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 44, No. 3, pp. 199-208.
- Lee, B.J., and Bae, D.H. (2011b). “Streamflow forecast model on Nadong river basin.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 44, No. 11, pp. 853-861.
- Lee, B.J., Choi, J.C., Choi, Y.J., and Bae, D.H. (2012).

- “Validation of real-time river flow forecast using AWS rainfall data.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 45, No. 6, pp. 607–616.
- Moradkhani, H., and Sorooshian, S. (2008). “General review of rainfall-runoff modeling: Model calibration, data assimilation, and uncertainty analysis, in: Hydrological Modeling and the Water Cycle, Coupling of the Atmospheric and Hydrological Models.” *Water Science and Technology Library, Springer*, Vol. 63, pp. 1–24.
- Shamir, E., Lee, B.J., Bae, D.H., and Georgakakos, K.P. (2010). “Flood forecasting in regulated basins using the ensemble extended Kalman filter with the storage function method.” *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 15, No. 12, pp. 1030–1044.
- Su, F., Gao, H., Huffman, G.J., and Lettenmaier, D.P. (2011). “Potential utility of the real-time TMPA-RT precipitation estimates in streamflow prediction.” *Journal of Hydrometeorology*, AMS, Vol. 12, pp. 444–455.
- Valeriano, O.C.S., Koike, T., Yang, K., and Yang, D. (2009). “Optimal dam operation during flood season using a distributed hydrological model and a heuristic algorithm.” *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 15, No. 7, pp. 580–586.
- Vieux, B.E., Park, J.H., and Kang, B. (2009). “Distributed hydrologic prediction: sensitivity to accuracy of initial soil moisture conditions and radar rainfall input.” *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 14, No. 7, pp. 671–689.
- www.naas.go.kr
- www.wamis.go.kr

논문번호: 13-012	접수: 2013.01.30
수정일자: 2013.04.05/04.30	심사완료: 2013.04.30