AWS 강우정보의 실시간 유량예측능력 평가**Validation of Real-Time River Flow Forecast Using AWS Rainfall Data**

이 병 주* / 최 재 천** / 최 영 진*** / 배 덕 호****

Lee, Byong Ju / Choi, Jae Cheon / Choi, Young Jean / Bae, Deg Hyo

Abstract

The objective of this study is to evaluate the valid forecast lead time and the accuracy when AWS observed rainfall data are used for real-time river flow forecast. For this, Namhan river basin is selected as study area and SURF model is constructed during flood seasons in 2006~2009. The simulated flow with and without the assimilation of the observed flow data are well fitted. Effectiveness index (EI) is used to evaluate amount of improvement for the assimilation. EI at Chungju, Dalcheon, Hoengsung and Yeosu sites as evaluation points show 32.08%, 51.53%, 39.70% and 18.23% improved, respectively. In the results of the forecasted values using the limited observed rainfall data in each forecast time before peak flow occur, the peak flow under the 20% tolerance range of relative error at Chungju, Dalcheon, Hoengsung and Yeosu sites can be simulated in forecast time-11h, 2h, 3h and 5h and the flow volume in the same condition at those sites can be simulated in forecast time-13h, 2h, 4h and 9h, respectively. From this results, observed rainfall data can be used for real-time peak flow forecast because of basin lag time.

Keywords : AWS observed rainfall, real-time river flow forecast, forecast lead time, SURF model

요 지

본 연구는 AWS 관측강우정보를 이용하여 실시간 유량예측을 수행할 경우 적용가능한 예측선행시간 및 정확도를 평가하고자 하는데 그 목적이 있다. 이를 위해 남한강 상류유역을 대상유역으로 선정하였으며 2006~2009 홍수기간에 대해 SURF 모형을 구축하였다. 관측유량 자료동화 수행 유무에 따른 모의유량은 관측유량을 잘 모의하며 유효성지수를 이용하여 자료동화 효과를 분석한 결과에서 충주댐 32.08%, 달천 51.53%, 횡성 39.70%, 여주 18.23%가 개선된 것으로 나타났다. 첨두유량 발생시간 이전 가상의 현재시점까지의 AWS 관측강우정보를 이용하여 유량예측 적용성을 평가한 결과 허용오차 20% 범위 내에서 첨두유량은 충주 11시간, 달천 2시간, 횡성 3시간, 여주 5시간, 유출용적은 충주 13시간, 달천 2시간, 횡성 4시간, 여주 9시간 이내에서 예측이 가능한 것으로 나타났다. 따라서 유역의 지체효과로 인해 관측강우만을 이용하여 적정 예측시간에 대해서 실시간 첨두유량 예측이 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : AWS 관측강우, 실시간 유량예측, 예측선행시간, SURF 모형

* 교신저자, 선임연구원, 국립기상연구소 응용기상연구과 수문자원연구팀 (e-mail: bjee0704@korea.kr)

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

** 국립기상연구소 응용기상연구과 수문자원연구팀 팀장 (e-mail: jcchoi@korea.kr)

Chief, Hydrometeorological Resources Research Team, Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Research, Seoul 156-720, Korea

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

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

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

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

1. 서론

중소규모의 홍수에 대해서는 홍수조절용 댐을 이용하여 효과적으로 대응할 수 있지만 이례적으로 큰 홍수에 대해서는 큰 효과를 기대하기가 어려우며 대신 잘 구축된 홍수예측시스템이 홍수피해 완화 측면에서 더욱 효과적이라 할 수 있다(Sugawara, 1974). 홍수예측의 실효성은 예측유량의 정확도에 의해 좌우된다고 할 수 있으며 이는 관측강우와 예측강우의 정확도, 대상유역에 적합한 유출모형 적용과 추정된 매개변수의 적합성으로부터 결정된다. 특히, 관측강우는 강우-유출반응의 지체시간만큼 미래기간의 유량을 산정하는데 있어서 직접적으로 활용될 뿐만 아니라 예측강우가 적용되는 시점의 유량에 영향을 줌으로 단기유량예측에 있어서는 예측강우보다 더 중요하다고 할 수 있다. 따라서 예측강우를 활용하여 유량예측을 하기에 앞서 관측강우의 정확도 개선 및 이를 이용한 유량예측 가능성에 대한 선행연구가 필요하다.

국지적인 집중호우나 돌발적인 기상 현상 등은 그 범위가 협소하기 때문에 기상관서에서의 관측만으로는 관측되지 못하는 경우가 많다. 이와 같이 정규기상관측망으로 관측이 어려운 규모의 기상 현상을 관측하기 위해 무인기상관측장비를 개발하여 1970년대부터 선진국에서 사용하기 시작하였다. 우리나라 기상청에서도 2010년 현재 기상관측소에 자동기상관측장비(automatic weather system; AWS) 687개소를 설치하여 1분 간격으로 관측을 실시하고 있으며 매시간 컴퓨터로 자료를 수집 및 처리하여 실시간으로 기상예보와 기상재해 발생을 통보하는데 이용하고 있다(www.kma.go.kr).

국내에서 실시간 유량예측모형 개발 및 적용과 관련된 연구(배덕효, 1997; 강민구 등, 2009; 배덕효 등, 2009; 이병주와 배덕효, 2011a; 이병주와 배덕효, 2011b)는 많이

수행되었으나 유량예측을 위한 관측강우의 활용성에 초점을 맞춘 연구는 많지 않다. 이와 관련한 연구로 장수형 등(2007)은 저수지 상류유역에 대해서 Clark (1945) 유역추적과 Muskingum (McCarthy, 1938) 하도추적 방법을 적용하여 임의시점의 관측유량을 적용하여 예측유량의 적용성을 평가한 바 있다. 또한 예측강우와 관련하여 이재형 등(1993)은 구름물리학을 토대로 강우를 예측하여 저류함수모형과 연계하였으며 김진훈 등(2005)은 RDAPS 예측강우와 저류함수모형을 이용하여 하천유량 예측능력을 분석한 바가 있다.

본 연구에서는 기상청 AWS 강우자료를 실시간으로 활용할 수 있다는 가정 하에서 유량을 예측하고 이 결과로부터 침투유량 및 유출용적에 대해 적용가능한 예측선행시간 및 정확도 평가를 수행하고자 한다.

2. SURF 모형

본 연구에서는 유출모의를 위한 도구로 SURF 모형(Sejong University River Forecast Model)을 이용하였다. 이 모형은 이병주와 배덕효(2011a)에 의해 개발되었으며 모형구성은 Fig. 1과 같다. 이 모형은 사상형 저류함수모형에 연속형 수문성분 산정모듈을 연계하여 유량을 연속적으로 모의하는 부분과 유량예측능력 향상을 위해 관측유량을 실시간으로 활용할 수 있다는 가정 하에서 자료동화 기법인 앙상블 칼만필터(ensemble Kalman filter; ENKF) 기법의 연계부분으로 구성되어 있다.

2.1 유출모형

강우-유출모형은 유역단위의 공간해상도와 시간단위의 시간해상도를 갖는 연속형 강우-유출모형으로 강우량과 잠재증발산량을 입력자료로 이용한다. 유역의 토양수분

Fig. 1. SURF Model Concept

은 Eq. (1)의 연속방정식으로부터 연속적으로 모의가 가능하며 식에서 좌변은 t 시점의 토양수분 변화량이고 우변의 각 항은 해당 계산시점의 유역평균 강우량 (P), 실제 증발산량 (AET), 지표유출량 (Q_{sur}), 중간유출량 (Q_{lat}), 지하수유출량 (Q_{gw})를 나타내며 단위는 mm/h이다. 각 수문성분은 토양수분의 함수로 표현되며 산정방법에 대한 자세한 설명은 배덕효와 이병주 (2011)에 제시되어 있다.

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

유역과 하도의 유출량은 저류함수모형을 기반으로 모의된다. 유역 유출량에 대한 운동량방정식과 연속방정식은 Eqs. (2) and (3)과 같다. 기존 저류함수모형에서 적용되던 유효우량을 대신하여 Eq. (3)에서와 같이 지표, 중간, 지하수유출량을 이용하여 유역 저류량을 연속적으로 산정한다. 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 Eqs. (4) and (5)와 같으며 $Q_c(t)$ 는 하도 유출량(m^3/s), $S_c(t)$ 는 하도구간 내 저류량(m^3), K_{ch} 와 P_{ch} 는 하도 저류상수를 의미한다.

$$Q_s(t) = \left(\frac{S_s(t)}{K_{sb}} \right)^{P_{sb}} \quad (2)$$

$$\frac{dS_s(t)}{dt} = [Q_{sur}(t-\tau) + Q_{lat}(t-\tau) + Q_{gw}(t-\tau)] - Q_s(t) \quad (3)$$

$$Q_c(t) = \left(\frac{S_c(t)}{K_{ch}} \right)^{P_{ch}} \quad (4)$$

$$\frac{dS_c(t)}{dt} = \sum \left(\frac{S_s(t)}{K_{sb}} \right)^{1/P_{sb}} - Q_c(t) \quad (5)$$

2.2 자료동화

ENKF 기법은 Evensen (1994)에 의해 처음 제안되었으며 시계열 수문자료의 자료동화에 많이 활용되고 있는 칼만 필터(Kalman filter) (Kalman, 1960) 기법을 비선형 시스템에서 안정적으로 적용할 수 있도록 개선한 방법으로 Monte-Carlo 모의기법을 기반으로 Kalman Gain을 산정하여 상태변수(state variable)를 갱신하는 방법이다.

EnKF 기법에서 상태-공간 모델은 Eqs. (6) and (7)과 같이 표현할 수 있다. Eq. (6)에서 x_t 는 t 시점에서의 상태변수, u_t 는 강우와 같은 모형 입력자료, θ_t 는 모형 매개변수이며 $f(\cdot)$ 는 상태전이함수이다. 앙상블 상태변수 예측에 적용되는 모형 입력자료와 매개변수의 앙상블 멤버는 Eqs. (8) and (9)로부터 생성된다. 식에서 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 Eq. (7)에서 y_t 는 관측변수이며 $h(\cdot)$ 는 상태변수와 관측변수를 관계를 나타내는 변환함수이다. Eqs. (6) and (7)에서 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.

$$x_{t+1|t}^- = f(x_{t|t}^-, u_t, \theta_t) + w_t, \quad w_t \sim N(0, \Sigma_t^x) \quad (6)$$

$$y_t = h(x_t, \theta_t) + v_t, \quad v_t \sim N(0, \Sigma_t^y) \quad (7)$$

$$u_t^i = u_t + \zeta_t^i, \quad \zeta_t^i \sim N(0, \Sigma_t^u) \quad (8)$$

$$\theta_t^i = \theta_t + \xi_t^i, \quad \xi_t^i \sim N(0, \Sigma_t^\theta) \quad (9)$$

상태변수 갱신은 t 시점에서 시간이 경과하여 $t+1$ 시점이 되었을 때 관측 시스템으로부터 입수한 관측치와 모형으로부터 추정된 예측치로부터 상태변수의 최적추정을 하는 단계로서 Eqs. (10)~(12)로부터 산정된다. EnKF 기법에서는 각 앙상블 상태변수별로 갱신과정을 수행하며 Eq. (10)에서 $x_{t+1|t+1}^{i+}$ 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. Eq. (11)은 관측치에 대한 앙상블 멤버를 나타내며 y_{t+1}^i 는 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 Eq. (12)로부터 비교적 쉽게 산정이 가능하며 식에서 $\Sigma_{t+1}^{xx'}$ 는 관측치와 동일한 변량을 의미하는 모의치의 오차로 모의치(x'_{t+1})의 분산으로부터 산정되고 $\Sigma_{t+1}^{xx'}$ 는 상태변수 $x_{t+1|t}^{i-}$ 와 관측치와 동일한 변량을 갖는 모의치 x'_{t+1} 의 공분산을 의미한다. Σ_{t+1}^y 는 관측 오차의 분산을 나타낸다.

$$x_{t+1|t+1}^{i+} = x_{t+1|t}^{i-} + K_{t+1}(y_{t+1}^i - h(x_{t+1|t}^{i-}, \theta_{t+1}^i)) \quad (10)$$

$$y_{t+1}^i = y_{t+1} + \eta_{t+1}^i, \quad \eta_{t+1}^i \sim N(0, \Sigma_{t+1}^y) \quad (11)$$

$$K_{t+1} = \Sigma_{t+1}^{xx'} [\Sigma_{t+1}^{xx'} + \Sigma_{t+1}^y]^{-1} \quad (12)$$

본 연구에서는 유량을 예측하는데 있어서 초기조건에 해당하는 유역토양수분 ($SW(t)$), 유역저류량 ($S_s(t)$), 하

도저류량($S_c(t)$)을 상태변수로 선정하였다. 이들의 상태 예측방정식은 Eq. (1), Eq. (3), Eq. (5)와 같다. 예측단계에서 상태변수 $SW(t)$, $S_s(t)$, $S_c(t)$ 는 유출모형을 통해 예측되고 모형의 오차는 모형 입력자료와 매개변수의 앙상블 멤버로부터 모의된 앙상블 상태변수의 분산으로부터 산정된다. 또한 갱신단계에서는 관측유량과 모의유량의 오차정보를 이용하여 상태변수를 갱신하게 되며 갱신된 상태변수는 다음 시점의 예측을 위한 초기값이 된다. 실시간 하천유량 예측을 위한 SURF 모형은 이러한 예측단계와 갱신단계를 반복적으로 수행함으로써 매 시간 관측유량자료의 동화를 통해 선행시간에 대한 유역과 하도의 유출량을 예측하도록 개발된 모형이다. SURF 모형에서 유출모형과 자료동화기법 연계에 대한 적용성은 각각 배덕효와 이병주(2011), 이병주와 배덕효(2011a, 2011b)에서 검증되었다.

3. 대상유역 및 자료구축

본 연구에서는 Fig. 2와 같이 우리나라 제1권역인 한강 유역에 속해있는 남한강 유역을 대상유역으로 선정하였다. 유역면적은 12,407 km²로 한강 전체유역면적의 36.05%를 차지한다. 유역 내에는 충주댐을 비롯하여 괴산댐, 횡성댐이 위치하고 있으며 이들 댐은 용수공급, 수력발전, 홍수대응을 위해 이용되고 있다. 또한 주요 수위관측소로 영월, 달천, 여주 수위관측소가 위치하고 있으며 이중 영월과 여주 관측소는 한강홍수통제소에서 홍수예보를 위한 기준관측소로 활용되고 있다.

Fig. 2. Study Area

유출모의를 위해 남한강유역을 17개의 소유역으로 분할하였으며 시단위 강우자료와 잠재증발산량 산정을 위한 기온, 상대습도, 풍속, 일조시간 자료는 기상청으로부터 수집하였다. 또한 수치표고모델과 토지피복도는 국토해양부 국가수자원종합정보시스템(www.wamis.go.kr), 정밀토양도는 국립농업과학원(soil.rda.go.kr)으로부터 구축하였다.

기상청 관측강우 현황을 살펴보면, 기상청에서는 2010년 현재 위험기상의 연속감시를 위해 전국 687개소에서 자동기상관측장비(automatic weather system: AWS)를 운영하고 있으며, 국지성 집중호우가 빈번하게 발생함에 따라, 소규모 국지기상감시의 선도관측을 위한 도서지역과 관측공백지대인 산간지역에도 설치운영 중에 있다. 관측자료는 1분 간격으로 관측되며, 기상전문을 생산하여 자료를 데이터베이스시스템에 저장하고, 기상정보시스템에 전송된다. 남한강 유역에는 Fig. 3과 같이 62개소가 운영 중에 있으며 관측소간 평균거리는 14.14km이다. 본 연구에서는 시단위 유출모의를 위해 이들 관측지점에 대해서 시단위 강우자료를 구축하였으며 티센법(Thiessen method)을 이용하여 유역평균강우량을 산정하였다.

4. 하천유량 예측능력 평가

4.1 하천유량 예측모형 정확도 평가

하천유량 예측모형의 주요 매개변수는 지표, 중간, 지하수유출에 대한 지체상수, 유역과 하도의 저류상수, 유역

Fig. 3. Location of the 62 AWSs and the Thiessen Network

지체시간 등이 있으며 매개변수에 대한 자세한 설명은 배덕효와 이병주(2011)에 기술되어 있다. 매개변수 추적을 위해 대상유역 내 관측유량의 품질이 양호한 4개 지점(충주댐, 달천 수위관측소, 횡성댐, 여주 수위관측소)을 평가 지점으로 선정하였다. 분석기간은 2006~2009년 중 연중 최고유량이 발생한 호우사례를 선정하였으며 초기수문변수 추정을 위해 첨두유량 발생시점을 기준으로 충분한 예비모의기간을 고려하였다. 분석기간 중 2008년과 2009년은 매개변수 보정기간, 2006년과 2007년은 매개변수 검증기간으로 구분하여 분석을 수행하였다. 각 평가지점의 분석기간과 첨두유량(Q_{peak}) 및 발생시간(T_{peak})은 Table 1과 같다. 여기서 첨두유량 발생시간은 모의시작시점을 기준으로 발생한 시간을 의미한다. 2006년은 태풍 ‘예위니아’와 장마전선의 영향으로 다른 연도의 첨두유량에 비해

두 배 이상 큰 유량이 발생한 것으로 나타났다.

보정기간과 검증기간에 대한 유출모의결과는 Fig. 4와 같다. 그림에서 OBS는 관측유량, SIM_{noup}은 유출모형만을 이용한 모의유량, SIM_{up}는 유출모형과 관측유량 자료동화를 연계한 모의유량을 의미한다. 이때, 관측유량 자료동화를 연계한 결과는 자료동화 후 예측선행시간 1시간에 대한 모의유량으로 자료동화 효과가 최대한 반영된 결과이다. 그림에서 유출모형만을 적용한 결과는 자료동화를 수행한 결과보다 상대적으로 관측유량과 오차가 크게 발생하였다. 이러한 오차는 지점 강우량으로부터 계산된 유역평균강우량과 유출해석기법의 오차로부터 기인한다고 할 수 있다. 또한 댐과 수위관측소에서 관측된 유량도 직접 관측된 값이 아닌 저수위와 하천수위로부터 환산된 값이므로 많은 오차를 내포한다고 할 수 있다. 따라서

Table 1. Peak Flow and Peak Time in the 4 Sites During the Simulation Periods

Simulation period	Cal. / Ver.	Chungju		Dalccheon		Hoengsung		Yeoju	
		Q_{peak} (m^3/s)	T_{peak} (h)	Q_{peak} (m^3/s)	T_{peak} (h)	Q_{peak} (m^3/s)	T_{peak} (h)	Q_{peak} (m^3/s)	T_{peak} (h)
2009.7.8 ~ 7.17 (240h)	Cal. 1	9140	121	1498	176	792	111	6875	114
2008.7.18 ~ 7.27 (240h)	Cal. 2	8990	180	1865	182	500	166	3751	173
2007.8.1 ~ 8.15 (360h)	Ver. 1	4070	113	1008	98	621	211	3407	218
2006.7.8 ~ 7.22 (360h)	Ver. 2	25477	209	3199	213	1093	185	12199	220

(a) Calibration period 1

(b) Calibration period 2

(c) Verification period 1

(d) Verification period 2

Fig. 4. Measured and Simulated Discharges with and without the Updating Process at 4 Gauged Sites for Each Period

본 연구에서는 단순히 모의유량이 관측유량을 어느 정도 유사하게 모의하는지에 대한 평가보다는 관측유량 자료동화를 통해 모의결과가 어느 정도 개선되는지가 중요한 평가요소가 된다. 이는 비록 관측유량이 어느 정도 오차를 내포하고 있더라도 현재 유량을 파악하는 기준이 됨으로 실시간 관측유량을 자료동화하여 임의 시점에서 모의유량을 관측유량과 가깝게 모의할 수 있다는 측면에서 중요한 의미를 가진다고 하겠다.

관측유량 자료동화 효과를 정량적으로 평가하기 위해 각 평가지점의 검보정 기간에 대한 통계지표를 산정하였으며 그 결과는 Table 2와 같다. 침투유량과 유출거동에 대한 종합적인 평가를 위해 통계지표는 침투유량 상대오차(RPE), 평균제곱근오차(RMSE), 상관계수(CORR), 모형효율성계수(ME)를 채택하였다. 충주(Cal. 1, 2), 달천(Ver. 1, 2), 횡성(Cal. 2), 여주(Ver. 1)에서와 같이 유출모형의 오차가 큰 경우에도 관측유량 자료동화를 통해 정확도가 크게 개선됨을 확인할 수 있다. 모든 통계지표에서 자료동화를 수행한 결과(Up)가 유출모형만을 적용한 결과(Noup)보다 정확도가 높게 나타나며 전체평균 통계

지표로부터 침투유량오차는 21.20%에서 8.88%, 평균제곱근오차는 298.66 m³/s에서 214.19 m³/s, 상관계수는 0.96에서 0.98, 모형효율성계수는 0.85에서 0.95로 개선됨을 확인할 수 있다. 또한 Eq. (13)의 유효성지수(effectiveness index; EI)를 이용하여 분석기간에 대한 상대적인 정확도 개선정도를 평가한 결과 충주댐 32.08%, 달천 51.53%, 횡성 39.70%, 여주 18.23%가 개선되는 것으로 나타났다. 이들 수치는 유출모형만을 적용한 결과의 오차를 100%로 볼 때 자료동화를 통한 정확도 개선정도를 의미한다. 달천지점은 유출모형의 오차가 크므로 인해 자료동화 효과가 크게 나타난 반면, 여주지점의 경우는 상류의 충주댐 관측방류량의 영향으로 유출모의만을 이용하여 모의한 결과의 정확도가 높기 때문에 자료동화로 인한 개선효과가 상대적으로 적게 발생하는 것으로 판단된다.

$$EI = 100 \times \left(1 - \frac{\sum_{t=1}^N (Q_{up,t} - Q_{obs,t})^2}{\sum_{t=1}^N (Q_{noup,t} - Q_{obs,t})^2} \right) \quad (13)$$

Table 2. Statistical Analysis for Simulated Discharges at 4 Gauged Sites

Site	Cal. / Ver. period	RPE (%)		RMSE (m ³ /s)		CORR (-)		ME (-)	
		Noup	Up	Noup	Up	Noup	Up	Noup	Up
Chungju	Cal. 1	21.83	-1.26	678.36	496.48	0.95	0.97	0.83	0.94
	Cal. 2	24.30	6.38	573.48	309.99	0.96	0.98	0.83	0.95
	Ver. 1	-9.36	11.92	389.46	244.35	0.92	0.96	0.79	0.92
	Ver. 2	-25.36	-15.61	1081.47	883.58	0.96	0.97	0.90	0.94
Dalcheon	Cal. 1	-8.55	-4.54	102.15	64.68	0.93	0.98	0.84	0.96
	Cal. 2	-28.30	-20.97	87.25	53.60	0.94	0.97	0.85	0.94
	Ver. 1	-42.12	-15.08	71.86	21.02	0.91	0.99	0.80	0.98
	Ver. 2	-24.58	1.22	180.98	72.14	0.96	0.99	0.87	0.98
Heongsung	Cal. 1	-15.79	7.45	26.49	20.38	0.96	0.99	0.93	0.98
	Cal. 2	60.52	13.40	37.55	12.02	0.98	0.99	0.63	0.97
	Ver. 1	6.92	0.97	23.52	13.89	0.96	0.98	0.87	0.96
	Ver. 2	7.13	13.72	41.18	30.14	0.97	0.98	0.92	0.96
Yeoju	Cal. 1	12.34	-5.32	258.89	222.45	0.99	0.99	0.97	0.98
	Cal. 2	18.56	3.71	274.65	237.64	0.93	0.95	0.86	0.89
	Ver. 1	-20.68	-8.10	425.81	290.47	0.97	0.98	0.79	0.90
	Ver. 2	12.88	12.44	525.44	454.13	0.99	0.99	0.97	0.97
Ave.		21.20	8.88	298.66	214.19	0.96	0.98	0.85	0.95

Relative error in peak flow (RPE) = $(s_p - o_p) / o_p \times 100$

Root mean square error (RMSE) = $\sqrt{\sum (s - o)^2 / n}$

Correlation coefficient (CORR) $ss_o / \sqrt{ss_o \times ss_s}$, $ss_o = \sum (o_i - \bar{o})(s_i - \bar{s})$, $ss_s = \sum (o_i - \bar{o})^2$, $ss_s = \sum (s_i - \bar{s})^2$

Nash-Sutcliffe efficiency (ME) = $[\sum (o_i - \bar{o})^2 - \sum (o_i - s_i)^2] / \sum (o_i - \bar{o})^2$

where, o_i and s_i are observed and simulated flow, o_p and s_p are observed and simulated peak flow and n is the number of data

4.2 관측실황강우의 유량예측능력 평가

실시간으로 관측된 강우를 관측실황강우라 정의할 때, 이러한 강우정보를 이용하여 유량을 예측할 경우 유역별로 활용 가능한 예측선행시간을 분석하였다. 유량예측은 침투유량이 발생하기 전의 임의시점을 현시점으로 가정하여 수행하였다. Fig. 5는 충주댐 지점에서의 2009년 분석기간동안 모의된 결과를 나타낸 것이다. 이 기간동안 침투유량은 $9140 \text{ m}^3/\text{s}$ 이며 발생시점은 모의시작시점을 기준으로 121시간이다. 유량예측결과 중 SIM_up_102h에서 SIM_up_120h까지의 결과는 현시점을 각각 102, 108, 114, 120시간으로 가정하였을 경우 그 시점까지의 관측강우(PCP)와 관측유량 자료동화를 이용하여 유량을 예측한 결과이고 SIM_noup_120h는 120시간까지의 관측강우와 유출모형만을 이용하여 유량을 예측한 결과이다. Table 2로부터 SIM_noup_120h는 관측유량(OBS)에 비해 침투유량 상대오차가 21.83%로 과대추정됨을 확인할 수 있다. 반면에 SIM_up_120h는 침투유량 발생시간 직전까지 관측유량 자료동화를 수행함으로써 인해 120시간 이전의 유량 모의결과가 관측유량과 매우 유사하게 모의되며 120시간 이후기간에 대해서도 유량예측결과가 매우 우수함을 확인할 수 있다. 이는 유량에 영향을 미치는 강우가 120시간 이전에 모두 발생하였기 때문에 관측강우만을 이용하더라도 모든 강우가 유출모의에 반영되었다고 볼 수 있다. SIM_up_114h의 결과에서는 114시간까지 관측유량 자료동화를 수행함으로써 인해 관측유량과 유사하게 모의가 되나 이후에는 관측유량에 비해 다소 크게 모의되는 것을 확인할 수 있다. 이는 자료동화가 끝나는 시점부터는 예측결과가 단지 유출모형만을 이용한 결과(SIM_noup_120h)에

가까워지려는 현상 때문이다. SIM_up_108h는 108시간 이후의 관측강우를 반영하지 못함으로써 인해 침투유량이 과소추정되며 상승부의 유량거동은 SIM_noup_120h와 유사하게 나타났다. 마지막으로 SIM_up_102h는 현시점을 침투유량 발생시점 이전 19시간으로 가정한 결과이며 침투유량에 영향을 미치는 강우를 거의 반영하지 못함으로써 인해 예측유량이 거의 상승하지 못하는 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 앞서 분석된 2009년 충주댐 사례와 동일한 방법을 적용하여 4개 평가지점의 모든 분석기간에 대해 관측강우의 침투유량 예측능력을 분석하였다. Fig. 6은 충주, 달천, 횡성, 여주 평가지점에 대해서 침투유량 발생시점 이전 임의시간을 현시점으로 가정하고 그때까지의 관측강우와 관측유량 자료동화를 통해 예측한 유량결과로부터 침투유량(RPE)과 유출용적(RVE) 상대오차를 산정한 결과이다. 하천의 경우는 침투유량이 중요하지만 댐은 침투유량과 유출용적이 중요한 의미를 가지므로 두 가지 지표를 이용하였다. 여기서 모의침투유량은 침투유량 발생 전 가상의 현재시점에서 모의된 관측침투유량 발생시점의 모의유량을 의미하고 유출용적은 가상의 현재시점으로부터 관측침투유량 발생시점까지의 유출용적을 의미한다. 또한 상류에 댐이 위치하고 있는 달천과 여주 지점의 경우는 임의시점 이후의 방류량은 관측강우와 동일하게 0으로 가정하였다. 그림에서 X축의 0은 관측침투유량 발생시점을 나타내고 0 이상의 값은 침투유량 발생시점과 임의 현재시점과의 시간차를 의미한다.

Fig. 6(a)을 통해 충주댐의 예측시간별 침투유량오차 거동을 살펴보면, 2006년도는 모든 기간에서 침투유량이 적게 추정되며 2007년도는 대략 10시간까지는 크게 추정되다가 이후부터는 적게 추정되는 것으로 나타났다. 또한

Fig. 5. Forecasted Discharges at the Previous Dam Times Based on the Peak Time on Chungju Dam

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

(g)

(h)

Fig. 6. Relative Peak Flow Error and Relative Volume Error at the Previous Times Based on the Peak Time on the 4 Sites

2008년과 2009년은 10시간까지 대체로 침두유량을 잘 모의하고 이후 적게 모의되는 것을 알 수 있다. 침두유량 발생시점을 기준으로 이전 10시간의 관측강우를 0으로 가정했음에도 불구하고 유량이 크거나 유사하게 모의되는 것은 충주댐의 경우 지체시간이 대략 10시간보다 길기 때문으로 판단된다. 이는 이 기간동안 발생한 강우는 침두유량에 거의 영향을 미치지 않음을 의미한다. 또한 Fig. 6(e)로부터 유출용적오차는 대략 12시간 이내에서 20% 이내의 오차를 가지는 것을 확인할 수 있다.

달천지점의 침두유량오차와 유출용적오차를 분석한 결과는 Fig. 6(c) and (f)와 같다. 모든 예측선행시간에 대해 예측유량이 관측유량에 비해 적게 모의되는 것으로 나타났다. Table 2의 달천지점 결과로부터 알 수 있듯이 유출모형만을 적용한 결과가 모든 분석기간에서 관측치보다 과소하게 추정되었기 때문에 자료동화 이후의 예측결과도 과소추정되는 것으로 판단된다. 허용오차를 20%로 가정했을 때 두 지표 모두 평균적으로 2시간 이내에서 예측이 가능한 것으로 나타났다.

횡성댐의 결과는 Fig. 6(c) and (g)이며 관측강우만으로 유량예측을 수행할 경우 2시간 이내에서 침두유량과 유출용적의 정확한 예측이 가능하며 2시간 이후에는 오차가 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이는 횡성댐 유역면적이 209km²로 매우 작아 지체시간이 3시간 이내이기 때문으로 판단된다.

여주지점의 결과는 Fig. 6(d) and (h)이다. 상류 유역면적이 11,104km²이며 상류에 충주댐, 괴산댐, 횡성댐의 지속적인 방류효과로 인해 정확도가 급하게 낮아지지는 않으나 상류 댐 방류량 영향이 지배적이므로 유효한 예측선행시간이 충주댐 경우만큼 길지 못한 것으로 나타났다. 허용오차를 20%로 가정했을 때 상류댐의 방류형태에 따라 차이는 있으나 침두유량은 대략 5시간, 유출용적은 9시간 이내에서 예측이 가능한 것으로 나타났다.

이상의 결과로부터 미래의 강우 및 댐 방류량 정보를 이용하지 않더라도 예측지점의 유역규모 및 상류 댐 유무에 따라 수 시간의 예측은 가능한 것으로 판단된다. 허용오차 20%를 기준으로 침두유량은 충주 11시간, 달천 2시간, 횡성 3시간, 여주 5시간 이내, 유출용적은 충주 13시간, 달천 2시간, 횡성 4시간, 여주 9시간 이내에서 유효한 예측이 가능할 것으로 판단된다. 따라서 지체시간이 1시간 이상인 하천 또는 댐 지점의 단기유량예측의 정확도를 높이기 위해서는 예측강우보다 관측 유역평균강우량의 정확도가 지배적인 영향을 미치므로 이에 대한 정확도 개선 연구가 선행되어야 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 AWS 실험강우를 이용하여 유량을 모의할 경우 침두유량과 유출용적의 예측가능성을 평가하였으며 도출된 결과를 요약하면 다음과 같다.

유량모의를 위한 도구로 연속형 강우-유출모형과 앙상블 칼만필터링 기법을 연계한 SURF 모형을 적용하였으며 남한강 상류유역에 대해 모형을 구축하였다. 충주댐, 달천 수위관측소, 횡성댐, 여주 수위관측소의 4개 지점에 대해 2006~2009년 주요 호우기간동안 모의능력을 평가한 결과 침두유량오차, 평균제곱근오차, 상관계수, 모형효율성계수에서 모두 양호한 결과를 보였다. 또한 유효성지수를 이용하여 관측유량 자료동화 효과를 분석한 결과 자료동화 이전 결과에 비해 충주댐 32.08%, 달천 51.53%, 횡성 39.70%, 여주 18.23%가 개선되는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 구축한 SURF 모형은 유량예측능력을 평가하기 위한 모형으로서 적합하다고 하겠다.

4개 평가지점에 대해서 침두유량 발생시점을 기준으로 이전 가상의 현재시점까지의 관측강우를 이용하여 유량모의를 수행한 결과, 허용오차 20% 기준에 대해 침두유량은 충주 11시간, 달천 2시간, 횡성 3시간, 여주 5시간 이내에서 예측이 가능하고 유출용적은 충주 13시간, 달천 2시간, 횡성 4시간, 여주 9시간 이내에서 유효한 예측이 가능한 것으로 나타났다. 이상의 결과로부터 유역규모에 따라 차이는 있으나 수 시간 이전의 관측강우만을 이용하여 침두유량과 유출용적의 예측이 가능함을 증명하였다.

유량모의결과의 정확도는 우량관측소 강우자료로부터 산정된 유역평균강우량의 정확도와 밀접한 관계가 있다. 향후에 보다 정확한 유역평균강우량 산정을 위해 국토해양부 우량관측소를 추가하여 유량모의 및 예측능력을 평가하고자 한다. 또한 분석대상지역을 확장하여 주요지점에 대한 평가를 수행할 필요가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 기상청 재원의 국립기상연구소 주요사업 “시범지역 수문기상기술개발 연구” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

강민구, Cai, Ximing, 고덕구 (2009). “Grey 모형을 이용한 다목적댐의 유입 홍수량과 하류 하천 홍수량 실시간 예

측.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제1호, pp. 61-73.

김진훈, 윤원진, 배덕호 (2005), “단기 예측강우를 활용한 실시간 유량 예측기법의 적용.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제1호, pp. 11-23.

배덕호 (1997). “저류함수법을 이용한 추계학적 실시간 홍수예측모형 개발.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제30권, 제5호, pp. 449-457.

배덕호, 이병주 (2011). “대유역 홍수예측을 위한 연속형 강우-유출모형 개발.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제44권, 제1호, pp. 51-64.

배덕호, 이병주, Shanir E. (2009). “양상불 칼만필터를 연계한 추계학적 연속형 저류함수모형 개발 (I): -모형개발-.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제11호, pp. 953-961.

이병주, 배덕호 (2011a). “자료동화 기법을 연계한 실시간 하천유량 예측모형 개발.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제44권, 제3호, pp. 199-208.

이병주, 배덕호 (2011b). “낙동강유역 하천유량 예측모형 구축.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제44권, 제11호, pp. 853-861.

이재형, 심명필, 전일권 (1993). “대청댐 예비방류를 위한 홍수예보.” **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제26권, 제2호, pp. 99-105.

장수형, 윤재영, 김상단, 윤용남 (2007). “홍수조절기능을

가진 저수지의 치수 및 이수목적 운영관리 시스템 구축 : I. 실시간 저수지 유입량 예측모형 구축.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제2B호, pp. 113-140.

Clark, C.O. (1945). Storage and the unit hydrograph, *Tras, Am. Soc. Civ. Eng.*, Vol. 110, pp. 1419-1446.

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.

Kalman, R. (1960). “New approach to linear filtering and prediction problems.” *Trans AMSE, Journal of Basic Engineering*, Vol. 82D, pp. 35-45.

McCarthy, G.T. (1938). The unit hydrograph and flood routing, *Proceedings of the Conference of North Atlantic Division, U.S. Army Corps of Engineers, R.I.*

Sugawara, M. (1974). On natural disasters-some thoughts of a Japanese, unpublished manuscript.

soil.rds.go.kr

www.kma.go.kr

www.wamis.go.kr

논문번호: 12-013	접수: 2012.02.12
수정일자: 2012.03.08	심사완료: 2012.03.08