앙상블 칼만필터를 연계한 추계학적 연속형 저류함수모형 (II) : - 적용 및 검증 -

Stochastic Continuous Storage Function Model with Ensemble Kalman Filtering (II) : Application and Verification

이 병 주* / 배 덕 효** / Eylon Shamir***

Lee, Byong Ju / Bae, Deg Hyo / Eylon Shamir

Abstract

The objective of this study is to evaluate an application of stochastic continuous storage function model with ensemble Kalman filter technique. The case study is performed at the upstream basin of Jibo streamflow gauge including Andong and Imha dam. Test period is for the rainy season during 2006 and 2007. Long term runoff analysis is feasible in the case of using deterministic model. Ensemble members for input data and parameters are generated using Monte Carlo simulation for the purpose of applying ensemble Kalman filter technique. The cumulative absolute errors of stochastic model to the deterministic one are improved for the amount of 17.5 %, 18.3 % and more than 40.0 % for Andong dam, Imha dam and Jibo station, respectively. The results indicate that the stochastic model improves the accuracy of the simulated discharge considerably.

keywords : ensemble Kalman filter, stochastic continuous storage function model, Monte Carlo simulation, real-time flood forecast

요 지

본 연구의 목적은 앙상블 칼만필터 기법과 연속형 저류함수모형을 연계하여 개발한 추계학적 연속형 저류함수모형의 적용성을 평가하고자 하는데 있다. 대상유역은 안동댐과 임하댐을 포함하는 지보 수위관측소 상류유역을 선정하였으며 2006년과 2007년 홍수기에 대해 분석을 수행하였다. 확정론적 모형을 적용한 결과 장기간의 모의기간에 대해 유출해석이 가능한 것을 확인하였다. 앙상블 칼만필터 기법을 적용하기 위해 Monte Carlo 모의기법을 적용하여 모형입력자료와 매개변수들에 대해 앙상블 멤버를 생성하였다. 추계학적 모형과 확정론적 모형의 누적절대오차를 비교한 결과 안동댐과 임하댐의 2007년 사상에서 각각 17.5 %와 18.3 %의 정확도가 향상되고 지보수위관측소에서는 40 % 이상의 정확도가 향상되는 것으로 나타났다. 이상의 결과로부터 관측유량과의 오차가 큰 모의결과에 있어서는 추계학적 모형이 보다 향상된 결과를 도출하는 것을 확인하였다.

핵심용어 : 앙상블 칼만필터, 추계학적 연속형 저류함수모형, Monte Carlo 모의, 실시간 홍수예보

* 교신저자, 세종대학교 토목환경공학과 박사수료

Corresponding Author, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea (e-mail: bjlee0704@paran.com)

** 세종대학교 물자원연구소 · 토목환경공학과 교수

Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea

*** Research Specialist Engineer, Hydrologic Research Center, 12780 High Bluff Drive, Suite 250 San Diego, CA 92130, USA

1. 서 론

우리나라는 1990년 한강유역에 발생한 대홍수를 시작으로 최근 20년 동안 여러 차례의 대홍수가 발생하였다. 1990년 홍수로 인해 충주댐 상류의 영월지역이 물에 잠겼고 하류의 잠실 일대가 침수된 사례가 있으며, 1998년에는 지리산에 시간당 140 mm의 폭우가 쏟아져 중소하천의 붕괴뿐만 아니라 많은 인명피해가 속출하였다. 또한 2002년 태풍 ‘루사’와 2003년 태풍 ‘매미’로 인해 각각 6조원과 4조원의 천문학적인 피해액이 발생하였다. 가장 최근인 2006년 7월 17일에는 충주댐 상류유역에 대홍수가 발생하였으나 적절한 댐 운영을 통해 하류에 홍수피해가 발생하지 않았다. 홍수로 인해 대도시가 침수되는 국가적 재앙을 예방하기 위해서는 홍수조절용 댐의 건설이 가장 구체적이고 확실한 대안이 될 수 있다. 그러나 댐 건설에 의한 생태계의 직·간접적 악영향에 대한 우려로 인해 사회적 합의를 도출하기가 매우 어려우며 실제 한탄강댐 사례를 살펴보면, 1999년 수해방지종합대책의 일환으로 한탄강댐 건설계획을 수립하였으나 많은 논쟁 끝에 2007년에 들어와서야 공사를 착수할 수 있었다.

최근 국토해양부에서는 비구조적 홍수방어기술을 중대시하기 위해 2004년 ‘전국 강우레이더 설치 및 홍수예경보 개선계획’을 수립하고 전국에 걸쳐 11기의 강우레이더를 운영할 계획을 가지고 있으며 올해인 2009년에 처음으로 낙동강유역 내에 위치한 비슬산 강우레이더 설치를 완료하고 운영을 시작하였다. 이와 같이 국토해양부의 강우레이더와 기상청에서 운영하는 기존의 기상레이더를 이용한 실시간 또는 예측강우정보를 홍수예보시스템에 효과적으로 이용하기 위해서는 실시간 자료동화 및 연속적인 유출모의가 가능한 유출모형을 개발할 필요가 있다. 이를 위해 본 연구에서는 논문 I에서 우리나라 홍수예보시스템의 유출모형으로 이용되고 있는 사상형 저류함수모형을 연속형 모형으로 개선하였으며 자료동화기법인 칼만필터(Kalman Filter; 이하 KF) 기법의 개선방법인 앙상블 칼만필터(Ensemble Kalman Filter; 이하 EnKF) 기법을 연계하여 실시간 보정이 가능한 추계학적 연속형 저류함수모형을 개발하였다.

EnKF 기법은 기존의 KF 기법을 개선한 방법으로서 모형의 오차를 손쉽게 산정할 수 있으며 다양한 통계적 분석이 가능한 장점을 가지고 있다. 수문모형과 관련된 EnKF 기법의 적용사례를 살펴보면, Moradkhani *et al.* (2005)는 EnKF 기법을 이용하여 일유출모형인 HyMOD 모형의 상태변수와 매개변수의 갱신을 통해

모형의 불확실성을 평가하였으며 Clark *et al.* (2008)은 분포형 유출모형인 TopNet 모형의 상태변수를 갱신하기 위한 방법으로 EnKF 기법의 적용성을 평가한 바 있다. 또한 Komma *et al.* (2008)은 관측유량자료를 이용한 토양수분의 갱신을 위해 EnKF 기법을 이용하였으며 토양수분 갱신을 통해 유출모의결과가 향상됨을 증명하였다.

국내에서는 최근까지 KF 기법을 활용한 연구가 대부분을 차지하고 있으며, 유출모형과 연계한 사례로서 배덕효(1997) 및 배덕효와 정일문(2000)은 각각 단일 유역 및 하도에 대해 저류함수모형을 구축하고 KF 기법을 이용하여 추계학적 상태-공간 형태의 모형으로 개선하였으며, 안상진(2002)은 KF 기법과 신경망 BP (Back Propagation) 모형을 이용한 강우-유출 모형을 개발한 바 있다.

본 연구에서는 기존의 사상형 저류함수모형을 개선한 연속형 저류함수모형의 적용 타당성을 검토하고 EnKF 기법을 이용한 자료동화기법을 통해 실시간 예측 홍수량의 정확도를 평가함으로써 홍수예보시스템의 유출모형으로서 추계학적 연속형 저류함수모형의 활용성을 평가하는데 목적이 있다.

2. 모형구축

2.1 대상유역 선정

본 연구에서는 개발된 모형의 적용성을 평가하기 위한 시험유역으로 낙동강유역 본류의 상류지역에 위치한 지보 수위관측소 상류유역을 선정하였다(Fig. 1). 시험유역에는 지보 수위관측소와 더불어 안동댐과 임하댐이 위치하고 있으므로 개발된 모형을 수위관측소와 댐지점에 대해 각각 적용·분석할 수 있을 것으로 판단된다.

대상유역은 안동댐과 임하댐 상류유역, 임하댐 직하류에서 합류되는 길안천유역 및 3개 소유역의 합류 후 지보 수위관측소까지의 소유역의 4개 소유역으로 구성하였으며, 본 연구에서는 편의상 이들을 각각 안동댐유역, 임하댐유역, 길안천유역, 지보유역으로 칭하고자 한다. 각 소유역에 대한 유역특성인자는 Table 1과 같다. 유역면적은 안동댐유역이 1590.72 km²으로 가장 크고 길안천유역이 608.03 km²으로 소유역 중 가장 작으며 유역평균경사는 하류에 위치한 지보유역이 29.12 %로 가장 완만하며 나머지 유역은 대략 40~42 % 정도의 경사를 갖는 것으로 나타났다. 또한 총 하천연장을 유역면적으로 나눈 값을 의미하는 수계밀도는 약 3 km⁻¹ 내외의 값을 가지며 각 유역에 대한 불투수층은 2 % 이내로 대부분이 투수지역인 것으로 조사되었다.

Fig. 1. A Map of the Study Area

Table 1. Characteristics of Each Subbasin

Subbasin	Andong	Imha	Gilan	Jibo
Area (km ²)	1590.72	1367.74	608.03	964.31
Main Stream Length (km)	167.33	96.09	16.92	54.11
Tributary Length (km)	167.33	96.09	93.10	102.94
Total Stream Length (km)	5381.87	4000.59	1740.98	2848.89
Mean Slope (%)	41.88	40.35	40.05	29.12
Stream Density (km ⁻¹)	3.38	2.92	2.86	2.95
Impervious Area (km ²) (%)	28.5 (1.79)	10.9 (0.80)	6.3 (1.03)	8.0 (0.83)

2.2 모형 입력자료 구축

유출모의를 위해 낙동강홍수통제소로부터 30개 우량 관측소의 시 강우자료를 수집하였으며 기상청으로부터 7개 기상관측소의 일 기상자료(최대/최소 기온, 상대습도, 풍속, 일조시간)를 수집하였다. 또한 수위관측소의 시 유량은 낙동강홍수통제소로부터 수집하였으며 댐 관련 자료는 국가수자원관리종합정보시스템으로부터 수집하였다. 유역 특성인자 및 매개변수 초기값 추정을 위해 수치표고모델(30m×30m)과 토지이용도(30m×30m)는 국가수자원관리종합정보시스템을 통해 구축하였으며, 정밀도양도(1:25000) 및 토양속성정보는 농업과학기술원으로부터 수집하였다.

일반적으로 물리적 기반의 토양수분 모의기능을 가지고 있는 유출모형에서 조절인자나 가중치 또는 매개변수를 제외한 모형 입력변수 중 토양과 관련된 인자는

다른 변수들보다 상대적으로 추정하기가 어렵다. 특히 토양 관련 변수는 유출모의결과에 큰 영향을 미치므로 가능한 객관적으로 추정하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 이를 위해 앞서 언급된 정밀도양도와 속성정보를 이용하여 대상유역에 대한 토양층깊이, 포화토양수분량, 포장용수량, 영구위조점, 포화수리전도도 자료를 구축하였다. Fig. 2와 Table 2는 각각 토양특성인자의 분포현황과 소유역 평균값을 산정한 결과이다. 포화수리전도도를 제외한 특성인자들은 공간적으로 유사한 것을 확인할 수 있으며 포화수리전도도는 공간적인 분포 특성을 찾기 어려운 것으로 나타났다. 소유역별 평균값에서는 안동댐유역이 모든 특성인자들에 대해 가장 큰 값을 가지며 이외의 소유역은 최대값 대비 80 % 이상의 값을 가지므로 4개 소유역 모두 대체로 유사한 특성을 갖는다고 할 수 있다. 본 연구에서는 Table 2의 결과를 토양 관련 입력변수로 이용하였다.

Fig. 2. Soil Characteristics; a) Soil Depth(mm soil), b) Water Content at Saturation(mm H₂O), c) Water Content at Field Capacity(mm H₂O), d) Water Content at Wilting Point(mm H₂O), e) Saturated Hydraulic Conductivity (mm/hr)

Table 2. Mean Value of the Soil Characteristics on the Each Subbasin

Subbasin No.	Sol_Z (mm)	SAT (mm)	FC (mm)	WP (mm)	Ks (mm/hr)
1	875.3	330.9	191.3	68.7	49.7
2	622.3	256.9	157.5	63.1	44.3
3	712.9	275.7	152.5	63.2	43.7
4	762.4	298.2	150.7	60.2	48.2

3. 모형 정확도 평가

연속형 저류함수모형은 홍수량 예측 과정에서 상태에 추방정식과 유량예측모형으로 이용되므로 유출모형의 모의능력은 자료동화를 통한 추계학적 모형의 결과에도 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 추계학적 연속형 저류함수모형의 적용성을 평가하기 위해 앞서 확립된 연속형 저류함수모형에 대한 모의능력을 평가하고자 하며 두 모형에 대한 적용결과는 다음과 같다.

3.1 연속형 저류함수모형

연속형 저류함수모형 적용 시 모형입력자료(강우, 잠재증발산량)와 토양 관련 변수를 제외한 주요 매개변수에는 유역과 하도의 저류상수(K_{sb} , P_{sb} , K_{ch} , P_{ch}), 유역 지체시간(τ), 지표 및 중간유출에 관계된 지수상수(l ,

m), 지하수 감수계수(K_b) 등이 있다. 본 연구에서는 이들 매개변수를 결정하기 위해 보정기간에 대해 매개변수를 추정하고 검정기간 동안 추정된 매개변수의 타당성을 평가하였으며 최종적으로 추정된 매개변수는 Table 3과 같다. 연속적인 모의능력을 평가하기 위해 장기간에 대해 유출해석을 수행하였으며 Fig. 3은 보정기간(2006.7.7~7.24)과 검정기간(2007.8.28~9.25)에 대해 안동댐, 임하댐, 지보수위관측소의 3개 관측지점에 대한 유출모의결과를 도시한 것이다. 검·보정기간의 호우사상이 복합호우사상임에도 불구하고 안동댐의 검정기간을 제외한 모든 경우에서 저수량 및 홍수량에 대해 모의유량이 관측유량과 유사하게 거동하는 것을 확인할 수 있다. 다만, 안동댐의 검정기간의 경우는 시간에 따른 관측유량의 변화가 심하게 발생하여 모의결과를 평가하기에는 무리가 있을 것으로 판단된다.

Table 3. Estimated Parameters of Continuous Storage Function model

Subbasin or Channel No.	Parameter Estimates							
	K_{sb}	P_{sb}	K_{ch}	P_{ch}	τ	l	m	K_b
	(hr ⁻¹)	(-)	(sec ⁻¹)	(-)	(hr)	(-)	(-)	(hr ⁻¹)
1	14	1	10 ⁴	1	4	8	1	0.005
2	8	1	10 ⁴	1	3	6	1	0.005
3	16	1	10 ⁴	1	3	7	1	0.006
4	16	1	10 ⁴	1	3	7	1	0.006

a) Calibration Period (2006.7.7~7.24) b) Verification Period (2007.8.28~9.25)

Fig. 3. Simulated Discharges of Continuous Storage Function Model on the Each Measurement Site

Table 4는 유출모의결과에 대한 통계적 평가를 수행한 결과이며 통계지표로는 유출용적오차(REV), 첨두홍수량의 상대오차(REQ), 평균제곱근오차(RMSE), 모형효율성계수(ME)를 이용하였다. 보정기간동안 유출용적오차는 -11~ -4 %로 강우에 대한 손실량이 다소 크게 모의되었으며 첨두홍수량은 안동댐에서 0.21 %로 관측치와 거의 일치하고 지보수위관측소에서 -17.19 %로 오차가 다소 크게 나타났다. 또한 평균제곱근오차에서도 지보수위관측소가 208.14 m³/s로 관측지점 중 오차가 가장

크게 발생하는 것으로 확인되었다. 모형효율성계수는 3개 지점에 대해 0.9 이상을 갖는 것으로 나타났다. 검정기간에서는 유출용적오차와 평균제곱근오차가 보정기간과 대체로 비슷한 정도를 가지나 첨두유량과 모형효율성계수에서는 보정기간에 비해 상대적으로 오차가 큰 것으로 나타났다. 특히, 안동댐의 경우 첨두유량오차가 54.83 %, 모형효율성계수가 0.44임을 고려할 때 모의결과가 매우 불확실 한 것으로 판단되나 이러한 결과는 Fig. 3에서 알 수 있듯이 댐 유입량이 시간에 따라 큰

Table 4. Statistical Analysis for Simulated Discharges of Continuous Storage Function Model

Site	Calibration Period				Verification Period			
	REV (%)	REQ (%)	RMSE (m³/s)	ME (-)	REV (%)	REQ (%)	RMSE (m³/s)	ME (-)
Andong	-4.82	-0.68	151.92	0.93	5.57	54.83	132.43	0.44
Imha	-9.09	8.62	134.12	0.92	3.53	9.18	70.74	0.88
Jibo	-13.14	-17.19	208.14	0.90	-18.28	-20.58	154.39	0.71

Relative error in volume (REV) = $(\sum S_i - \sum O_i) / \sum O_i \times 100$

Relative error in peak flow (REQ) = $(S_p - O_p) / O_p \times 100$

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

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.

변동폭을 가지는데 기인한 것으로 판단된다. 따라서 이상의 도식적 및 통계적 분석결과로부터 본 연구에서 개발한 연속형 저류함수모형은 장기간의 유출해석에 있어서 충분히 활용 가능한 것으로 판단된다.

3.2 추계학적 연속형 저류함수모형

앙상블 칼만 필터 기법을 연계한 연속형 저류함수모형을 적용하기 위해서는 우선 모형 입력자료와 매개변

수에 대한 앙상블 멤버(ensemble member)를 생성해야 한다. 본 연구에서는 강우 및 잠재증발산량의 모형 입력자료와 유역과 하도의 저류상수(K_{sb} , K_{ch}) 및 지수상수(l , m)에 대해서 Monte Carlo 모의기법을 이용하여 앙상블 멤버를 생성하였다. Fig. 4는 모의기간 중 임의 시간에 대한 앙상블 멤버 생성 예를 나타낸 것으로서 그림에서 회색 실선은 100개의 앙상블 멤버를 나타내고 중간의 굵은 실선은 앙상블 멤버의 평균값을 의미하며

Fig. 4. 100 Ensemble Members of Forcing Data (Mean Areal Precipitation, Mean Areal Potential Evapotranspiration) and Model Parameters (K_{sb} , K_{ch} , l , m)

평균값을 기준으로 상·하의 얇은 실선은 각각 초과확률 10 %와 90 % 신뢰구간의 경계를 나타낸다. 또한 'SUB'는 소유역 번호를 의미하고, 'CHA'는 하도추적구간을 나타낸다. 유역평균 강수량(MAP)과 유역평균 잠재증발산량(MAPET)은 관측자료로부터 시계열 모형인 AR1 모형을 이용하여 선행시간 1시간에 대한 앙상블 예측자료를 생산한 것이며 이때 강우와 잠재증발산량의 오차는 Gaussian 분포를 갖는 것으로 가정하였다. 모형 매개변수는 앞서 모형 매개변수 검·보정에서 추정된 매개변수를 평균값으로 가정하고 매개변수의 오차 또한 Gaussian 분포를 갖는 것으로 가정하였다.

Fig. 5는 안동댐, 임하댐, 지보수위관측소 지점에 대해 EnKF 기법을 적용한 유출모의 결과를 도시한 것이

다. 관측소별로 위의 그림은 관측유량과 모의유량을 의미하는 100개의 앙상블 유량 멤버와 평균값을 도시한 것이고, 아래 그림은 앙상블 평균값에서 관측유량을 뺀 나머지(residual)를 나타낸 것이다. 3개 관측지점에서 2006년과 2007년 호우사상에 대해 모의유량이 관측유량과 유사하게 거동하는 것을 확인할 수 있다. 안동댐 지점의 2006년 호우사상에서 최대 830 m³/s의 오차가 발생하며 나머지 지점에서는 홍수시 최대 500 m³/s의 오차 이내의 정확도를 갖는 것으로 나타났다. 또한 안동댐의 2007년 호우사상의 경우 Fig. 3에서는 홍수시 모의유량이 관측유량과 큰 차이를 보이는 반면 Fig. 5에서는 거의 유사하게 거동하는 것을 확인할 수 있으며 침투유량의 상대오차에서도 54.83 %에서 13.11 %로 향

Fig. 5. Ensemble streamflow forecasting of Stochastic Continuous Storage Function Model on the Each Measurement Site

Table 5. Statistical Analysis for the Simulated Discharges of Stochastic Continuous Storage Function Model

Site	2006.7.7~7.24				2007.8.28~9.25			
	REV (%)	REQ (%)	RMSE (m ³ /s)	ME (-)	REV (%)	REQ (%)	RMSE (m ³ /s)	ME (-)
Andong	13.61	18.50	159.79	0.92	5.67	11.02	98.51	0.69
Imha	13.38	13.36	135.43	0.92	9.87	14.41	57.53	0.92
Jibo	1.46	2.37	107.22	0.97	-5.29	-6.11	73.94	0.93

상되었다. 통계적 평가에서도 유출용적오차는 15 % 이내로 나타나고 첨두유량오차는 안동댐의 2006년 사상에 대해 18.50 %로 가장 크게 나타났다. 평균제곱근오차는 안동댐의 2006년 사상에서 159.75 m³/s로 가장 크게 발생하며 이는 홍수량의 크기에 상대적으로 영향을 받기 때문에 판단된다. 수문곡선의 전체적인 거동을 설명하는 모형효율성계수는 관측유량이 불규칙한 2007년 안동댐 경우를 제외하고 0.9 이상으로 높게 나타났다. 이상의 결과로부터 본 연구에서 개발한 추계학적 연속형 저류함수모형의 결과는 전체적인 수문곡선 거동과 첨두홍수량에서 모두 우수한 결과를 갖는 것으로 확인되었다.

본 연구에서는 자료동화로 인한 모형의 정확도 향상

정도를 평가하기 위해 앞서 산정된 확정론적 모형의 결과와 추계학적 모형의 결과의 누적절대오차(cumulative absolute error)를 비교하였다. 절대누적오차의 산정방법은 Eq. (1)과 같으며 식에서 n 은 모의기간(hr), Q_{obs} 와 Q_{sim} 은 각각 관측유량(m³/s)과 모의유량(m³/s)을 의미한다.

$$CAE = \sum_{i=1}^n |Q_{obs} - Q_{sim}| \quad (1)$$

Fig. 6은 2006년과 2007년 기간에 대한 관측지점별 비교결과이다. 2006년에는 안동댐과 임하댐에서 두 방법의 정확도가 비슷하나 지보수위관측소에서는 추계

Fig. 6. Comparison of Cumulative Absolute Error with and without Updating Process on the Each Measurement Site

학적 모형의 결과가 확정론적 모형에 비해 41.1 % 향상된 것으로 나타났다. 또한 2007년의 경우는 안동댐 17.5 %, 임하댐 18.3 %, 지보수위관측소 49.2 %의 정확도가 향상되는 것을 확인하였다. 이상의 결과로부터 확정론적 모형의 정확도가 상대적으로 높은 2006년 안동댐과 임하댐에서는 두 방법의 정확도가 비슷하나 관측치와의 오차가 큰 경우에는 추계학적 모형이 보다 안정적인 결과를 모의하는 것을 알 수 있다.

자료동화를 위한 KF 기법은 관측유량의 오차와 모형의 오차를 고려하여 상태변수를 갱신하고 이 값을 다음시간의 유량을 모의하기 위한 초기값으로 이용하는 순환시스템이다. 이와 같은 방법은 관측유량자료가 자료의 품질에 따라 일정한 오차를 가지고 유량정보로부터 상태변수가 갱신되는 과정과 갱신된 상태변수와 기상정보로부터 유량을 예측하는 과정에서 오차를 가지고 있는 것으로 가정한다. 따라서 전체 모의기간에 대해 관측자료동화를 통한 추계학적 모형결과가 확정론적 모형결과보다 항상 높은 정확도를 갖는다고 할 수 없다. 다만, 자료동화를 통해 상태변수의 오차가 누적되는 것을 차단함으로써 실시간 홍수예측을 수행하는데 있어 확정론적 방법에 비해 활용성이 높다고 할 수 있다.

4. 결 론

최근 레이더자료와 수치예보자료를 이용한 실시간 및 예측 강우자료의 활용성이 증대되면서 이들 자료를 이용한 실시간 홍수예보시스템의 개발에 대한 관심이 높아지고 있다. 본 연구에서는 실시간 홍수예측이 가능한 유출모형을 개발하기 위해 논문 I 을 통해 현재 우리나라에서 홍수예보의 유출모형으로 활용되고 있는 저류함수모형을 연속적인 유출모의가 가능하도록 토양수분산정 컴포넌트를 결합한 연속형 저류함수모형을 개발하였으며 앙상블 칼만필터 기법을 연계한 추계학적 모형으로 개선하였다. 논문 II 는 개발된 모형의 적용성을 평가한 내용으로, 안동댐과 임하댐을 포함하는 지보수위관측소 상류유역에 적용한 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 확정론적 연속형 저류함수모형을 대상유역에 구축하였으며 유역과 하도의 저류상수(K_{sb} , P_{sb} , K_{ch} , P_{ch}), 유역 지체시간(τ), 지표 및 중간유출에 관계된 지수상수(l , m) 등의 매개변수를 추정하였다. 보정기간(2006.7.7~7.24)에 대해 추정된 매개변수를 검정기간(2007.28.28~9.25)에 대해 평가하였다. 분석기간이 장기간임에도 불구하고 관측유량의 불확실성이 높은 안동댐의 2007년 모의결과를 제외

한 모든 경우에서 유출용적오차와 첨두유량오차가 각각 19 %와 18 % 이내이며 모형효율성계수는 0.71~0.95의 범위를 갖는 것으로 나타나 연속형 저류함수모형의 모의능력이 상당히 우수한 것을 확인하였다.

2. EnKF 기법 적용을 위해 모형 매개변수 중 유역과 하도의 저류상수(K_{sb} , K_{ch}) 및 지수상수(l , m)에 대해서 Monte Carlo 모의기법을 이용하여 100개의 앙상블 멤버를 생성하였다. 또한 강우와 잠재증발산량은 Monte Carlo 모의기법을 연계한 AR1 모형을 이용하여 선행시간 1시간에 대한 100개의 앙상블 예측자료를 생산하였다.
3. 추계학적 연속형 저류함수모형을 2006년과 2007년에 대해 적용한 결과 3개 관측지점에 대해 유출용적오차와 첨두유량오차가 각각 14 %와 19 % 이내, 모형효율성계수가 안동댐을 제외하고 0.9 이상으로 나타나며 도식적인 평가에서도 전체적인 수문곡선이 관측치와 유사하게 거동하는 것을 확인하였다.
4. 자료동화를 통한 정확도 향상 정도를 평가하기 위해 확정론적 모형과 추계학적 모형의 정확도를 비교한 결과 2006년 안동댐과 임하댐에서는 비슷한 정확도를 보이는 반면, 지보 수위관측소에서는 추계학적 모형의 결과가 확정론적 모형에 비해 41.0 % 향상된 결과를 모의하는 것으로 나타났다. 또한 2007년의 경우는 안동댐, 임하댐, 지보수위관측소에 대해서 각각 17.5 %, 18.3 %, 49.2 %의 정확도가 향상된 것을 확인하였다. 이상의 결과로부터 자료동화를 통한 추계학적 모형의 결과가 확정론적 모형에 비해 상대적으로 정확한 유출해석이 가능하다는 것을 규명하였다.

본 연구는 우리나라 홍수예보시스템에서 유출모형으로 이용되고 있는 사상형 저류함수모형을 추계학적 연속형 저류함수모형으로 개선하고 적용성을 평가한 것이다. 이는 실시간 유출모의를 위해 기존의 모형을 개선했다는 측면에서 의의가 있다. 향후 레이더 예측강우와의 연계를 통한 예측홍수량의 정확도 평가 및 대유역에 대한 적용성 평가가 이루어진다면 대유역 실시간 홍수예보시스템에 활용이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업(지자체별 실시간 내배수재해 예측기술 개발) 연구비 지원으로 수행되었으며 수문자료를 제공해주신 낙동강홍수

통제소 최규현 연구사님께 감사의 말씀 드립니다.

참 고 문 헌

- 배덕효 (1997). “저류함수법을 이용한 추계학적 실시간 홍수예측모형 개발.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제30권, 제5호, pp. 449-457.
- 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.
- Clark M.P., Rupp D.E., Woods R.A., Zheng X., Ibbitt R.P., Slater A.G., Schmidt J., 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.

- Komma J., Blöschl G., Reszler C. (2008). “Soil moisture updating by Ensemble Kalman Filtering in real-time flood forecasting.” *Journal of Hydrology*, Vol. 357, pp. 228-242.
- Moradkhani H., Sorooshian S., Gupta H.V., Houser P.R. (2005). “Duel state parameter estimation of hydrological models using ensemble Kalman filter.” *Advances in Water Resources*, Vol. 28, pp. 135-147.

논문번호: 09-074	접수: 2009.06.26
수정일자: 2009.09.10	심사완료: 2009.09.10