

앙상블 칼만필터 이론을 이용한 분포형모델의 홍수유출예측

Flood Forecasting by using Distributed Models with Ensemble Kalman Filter

박효길*, 최현일**, 지흥기***

Hyo Gil Park, Hyunil Choi, Hong Kee Jee

요 지

홍수피해를 예방할 수 있는 대책에는 여러 가지 방법이 있으나 비구조물적인 방법 중에서 대표적인 것이 홍수예경보이다. 이에 합리적인 설계홍수량 산정을 위해 하천유역에서 강우-유출과정의 정확한 해석과 유출예측은 수자원의 효율적인 활용과 하천의 이수, 치수를 위한 수문학적 해석에 있어서 매우 중요하며, 이를 위해서는 강우로부터 정도 높은 유출량 예측이 요구된다. 뿐만 아니라 하천범람 등의 재해로부터 인명과 재산을 보호하기 위한 홍수예경보 시스템의 구축이 필요하다. 홍수예경보 시스템의 효율적인 관리를 위해서는 실시간 홍수예측(Real-time Flood Prediction) 기법의 개발이 필요하다.

홍수유출모형에 있어 공간적 변화특성과 평균 강우량의 공간분포를 반영할 수 있는 분포형 매개변수 모형(Distributed-Parameter Model)인 분포형 모델을 대상으로 앙상블 칼만필터(Ensemble Kalman Filter, EnKF) 이론을 적용하여 비선형시스템에서 오차를 포함한 반응을 실시간으로 처리하여 불확실성을 정량적으로 감소시켜 홍수유출을 예측하는데 그 목적이 있다.

하천유역특성을 이용한 홍수유출예측을 위하여 비선형시스템에서의 앙상블 칼만필터 기법을 적용한 분포형 모형을 이용하여 더욱 정밀한 홍수유출을 예측하게 되고 향후 홍수예경보모형으로서 적정 유역분할 규모를 결정해주는 근거를 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 분포형모델, 홍수예측, EnKF

1. 서 론

최근에 극심한 기상이변으로 인하여 하천유역에서 발생하는 이상홍수의 홍수유출과정에 대한 정확한 해석과 유출예측은 수자원의 효율적인 활용과 하천의 이수 및 치수는 물론 친수관점에서 볼 때 자연하천의 관리측면에서도 매우 중요시 되고 있다. 홍수유출을 해석하고 예측하기 위해서는 유역 내에서 발생하는 수문기상학적 요소와 유역의 물리적 특성인자들의 정확한 상호 관련성의 규명이 필요하다. 홍수유출 자료는 강우의 시공간적 불균등한 분포와 침투, 토양의 특성 및 상류 수위 등과 같은 변수들의 변동이 비선형으로서 하천 홍수량에 영향을 끼치기 때문에 홍수량을 예측하는데 있어서 매우 어려운 점이 있다. 특히, 유역의 유출과정은 토양의 종류, 토지이용과 선행수문사상에 따라 유출조건이 복잡하고 유역의 수문과정에서 강우-유출관계가 강한 비선형성을 내포하고 있다.

* 정회원·영남대학교 대학원·석사과정·E-mail : rookey1004@nate.com

** 정회원·영남대학교 건설시스템공학부·조교수·E-mail : hichoi@ynu.ac.kr

*** 정회원·영남대학교 건설시스템공학부·교수·E-mail : hkjee@yu.ac.kr

본 연구에서는 홍수유출예측을 위한 분포형모델에 EnKF를 적용함으로써 수문순환과정의 불확실성으로 인한 모형과 관측치의 오차를 최적화할 수 있는 가능성을 분석토록 하였다.

2. 분포형모델(Distributed Model)

유역유출과정을 추적하는데 있어서 분포형모델로 이용되고 있는 TOPMODEL은 유출현상을 개념적으로 단순화하였으며, 기본 가정은 포화층의 흐름은 정상상태(Steady State)이고, 유역내 특정지점의 포화층 동수경사는 그 지점의 지표면 경사와 동일하며, 토양깊이에 따른 전도계수(Transmissivity)의 변화는 지수감소곡선을 갖는다는 것이다. 이와 같은 세 가지 기본가정으로부터 특정지점의 지하수면 깊이는 다음 식 (2.1)로 표현할 수 있다.

$$z_i = -\frac{1}{f} \ln\left(\frac{ra}{T_0 \tan\beta}\right) \quad (2.1)$$

식 (2.1)을 유역전체로 적분하면 유역평균 지하수면 깊이 \bar{z} 를 산정할 수 있고, 이를 저류량(Storage) 형식으로 변환해서 특정지점의 저류부족량(Local Storage Deficit)과 함께 표현하면 다음 식 (2.2)와 같다.

$$\frac{(\bar{S} - S_i)}{m} = \left[\ln \frac{a}{\tan\beta} - \frac{1}{A} \sum_i \ln \frac{a}{\tan\beta} \right] - \left[\ln T_0 - \frac{1}{A} \sum_i \ln T_0 \right] \quad (2.2)$$

여기서, m 은 모형의 매개변수이고 단위는 m이다. 그리고 우변 첫 번째 항 $\ln(a/\tan\beta)$ 는 지형지수(Topographic Index)라 하고, 두 번째 항은 유역평균 지형지수(λ), 세 번째항은 전도계수($\ln T_e$), 네 번째 항은 유역평균 전도계수를 나타낸다.

따라서 유역내 각 지점에서의 전도계수 및 지형지수를 알면 유역평균 지하수위 및 특정지점의 지하수위를 산정할 수 있다. 만약 지표로부터 지하수면까지의 깊이를 나타내는 z_i 가 0이 되는 지역은 토양이 완전히 포화되어 유입되는 강수는 전부 지표유출을 하게 된다. 이를 기여면적(Contributing Area)라 하며, TOPMODEL의 주요 특징 가운데 하나이다.

3. 앙상블 칼만필터(EnKF)

가능한 확률적 등가 필드들의 집합인 앙상블 내의 공분산을 사용하여 효과적으로 비선형성이 강한 시스템에 적용할 수 있는 EnKF은 데이터 동화(Data Assimilation) 기법의 하나로 수문학적 모형과 관측치의 오차를 정량화하여 실측값과 측정값을 최적화하는 방법으로 모형의 상태를 갱신시킨다. EnKF에서는 주어진 문제의 비선형성으로 인하여 참값을 알 수 없기 때문에 앙상블 평균을 참이라고 가정하고 앙상블 평균과 상태벡터의 차이로 추정오차를 결정한다. 그리고 예측과정에서 관측값을 획득할 때마다 상태를 교정한 후 다시 예측과정을 수행함으로써, 예측과정과 교정과정을 반복적으로 수행하여 참값에 가깝게 수렴한 추정값을 제시한다.

EnKF는 다음 식(3.1)로 설명할 수 있다.

$$X^b = (x_1^b, \dots, x_{nens}^b) \quad (3.1)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{nens} \sum_{i=1}^{nens} x_i^b \quad (3.2)$$

식(3.1)은 $nstate \times nens$ 형 X^b 행렬(여기서, $nstate$ 는 상태변수의 수이며, $nens$ 는 앙상블의 수를 나타낸다.)에서 x_1^b, \dots, x_{nens}^b 는 상태 갱신전의 각 앙상블에 대한 모델 상태벡터를 나타내고 식(3.2)는 앙상블의 평균을 나타내고 있다. i 번째 앙상블 멤버의 앙상블 이상(Ensemble Anomaly)은 $x_i'^b = x_i^b - \bar{x}_i^b$ 이며, 이상(Anomaly)의 앙상블 멤버는 식(3.3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$X'^b = (x_1'^b, \dots, x_{nens}'^b) \quad (3.3)$$

$$P^b = \frac{1}{\sqrt{nens-1}} X'^b X'^b{}^T \quad (3.4)$$

식(3.4)는 앙상블 이상으로부터 모델 오차 공분산 P^b 를 계산할 수 있으며, P^b 를 가지고 갱신 전 상태벡터(x_i^b)로부터 추정오차공분산을 최소화할 수 있는 갱신 후 상태벡터(x_i^a)로 갱신하는 것이다.

$$x_i^a = x_i^b + K(y_i - Hx_i^b) \quad (3.5)$$

$$K = P^b H^T (H P^b H^T + R)^{-1} \quad (3.6)$$

여기서, y_i 는 관측치 벡터($nobs \times 1$), H 는 측정행렬, K 는 칼만게인 및 R 은 측정오차공분산($nobs \times nobs$)를 나타낸다.

4. 모형의 적용 및 해석

본 연구에서는 국제수문개발계획(IHP) 대표유역으로 선정되어 관리되고 있는 위천유역의 무성수위 관측소를 출구점으로 하여 그 상류유역을 연구 대상으로 선택하였다. 위천유역은 수문 기상학적 자료의 입수가 용이할 뿐만 아니라 산악지형이기 때문에 타 지역에 비하여 산업화, 도시화 등에 따른 지형의 변동이 거의 없는 지역이고 유역면적은 472.3km^2 이며, 유로연장은 44.42km 이고 유역 평균경사는 0.318 이다. 본 연구에 적용된 EnKF의 상태벡터는 강우량, 증발량, 유효포화투수율 및 유량 관측치로 구성된다.

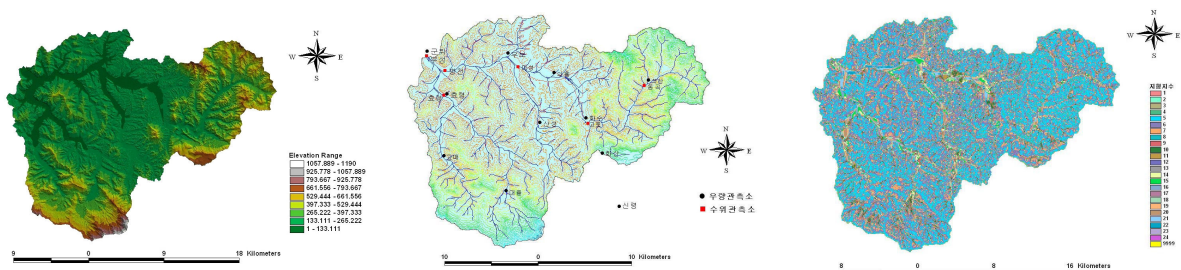


그림 1. 유역의 DEM

그림 2. 수문관측지점

그림 3. 지형지수 공간분포(MFD)

EnKF를 이용한 분포형모델에서의 홍수유출 비교분석을 위해 위천유역을 대상으로 TOPMODEL 및 EnKF를 이용한 TOPMODEL 모델의 홍수유출(TOP_EnKF)을 비교분석하였다. 호우사상 1997년, 2000년 및 2003년을 대상으로 각 모델에 대해 분석한 홍수유출모의결과를 바탕으로 표 1과 같이 각 호우사상별로 각 모델에 대한 침투유량과 유출용적을 비교하였으며, 또한 모델의 효율성을 비교할 수 있는 침투유량오차율, 침투시간오차, 유출용적오차율 및 모델 효율성 계수를 산정하여 함께 비교하였다.

표 1. EnKF를 이용한 분포형모델에서의 홍수유출결과 비교분석

호우	모델	$Q_{p,obs}$ (m^3/s)	$Q_{p,sim}$ (m^3/s)	PEP (%)	EPT (hr)	Vol_{obs} (10^6m^3)	Vol_{sim} (10^6m^3)	PEV (%)	CME	비고
970705	TOPMODEL	1,332	1,328	-16.54	0	67.72	80.99	19.59	0.90	
	TOP_EnKF		1,112	-0.33	0		74.32	9.74	0.96	
000722	TOPMODEL	744	705	-5.24	1	45.03	48.45	7.59	0.96	
	TOP_EnKF		740	-0.45	0		46.76	3.82	0.99	
030911	TOPMODEL	867	769	-11.30	2	62.72	63.96	1.98	0.93	
	TOP_EnKF		861	-0.67	1		63.36	1.02	0.98	

※ $Q_{p,obs}$: 관측 침투유량, $Q_{p,sim}$: 모의 침투유량, PEP: 침투유량오차율, EPT: 침투시간오차, Vol_{obs} : 관측 유출용적, Vol_{sim} : 모의 유출용적, PEV: 유출용적오차율, CME: 모델효율성계수

TOPMODEL 및 TOP_EnKF 모델의 침투유량오차율을 살펴보면, TOPMODEL은 -16.54% ~ -5.24%이며, TOP_EnKF는 -0.67% ~ -0.33%로 TOP_EnKF를 이용하는 것이 침투유량의 모의결과가 우수한 것으로 나타났다. 그리고 침투시간오차는 TOPMODEL의 경우 1~2시간 오차변화범위가 나타나지만 TOP_EnKF의 경우는 2003년 호우사상에서 관측치와 모의치가 1시간 차이 나는 것으로 나타났다. 또한 유출용적오차율은 TOPMODEL은 1.98%~19.59%이며, TOP_EnKF는 1.02%~9.74%로 각 호우사상에 대해 TOPMODEL이 TOP_EnKF보다 약 2배 이상 큰 것으로 나타났다. 모델효율성계수에서는 TOPMODEL의 경우 0.90~0.96의 범위를 나타내고 있으며, TOP_EnKF 모델의 경우는 0.96~0.99의 범위를 나타내고 있어 상대적으로 TOP_EnKF모델이 더 효율성이 큰 것으로 나타났다.

한편, 각 호우사상에 대한 TOPMODEL 및 TOP_EnKF 모델의 모의결과를 실측치와 함께 그림 4~그림 6에 나타내었으며, 이로부터 각 모델로부터 모의된 홍수유출수문곡선을 도식적으로 비교하였다.

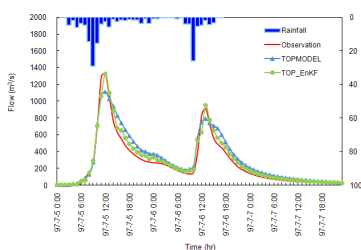


그림 4. 홍수유출(970705)

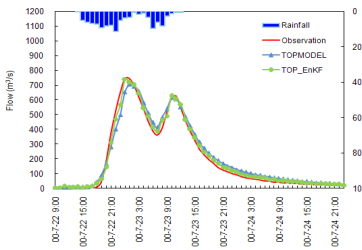


그림 5. 홍수유출(000722)

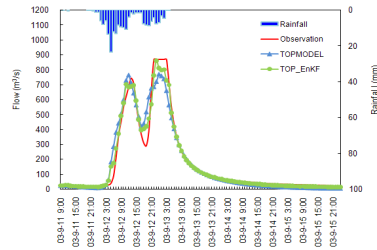


그림 6. 홍수유출(030911)

5. 결 론

본 연구에서는 하천유역특성을 이용한 홍수유출예측을 위하여 비선형시스템에서의 EnKF 기법을 이용한 분포형 모형을 이용하여 국제수문개발계획 대표유역으로 선정되어 관리되고 있는 위천유역의 무성수위 관측소를 출구점으로 유출모의를 적용하여 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 홍수유출모델에 대한 첨두유량오차율, 첨두시간오차, 유출용적오차율 및 모델 효율성 계수를 비교한 결과를 정리하면, TOPMODEL보다 EnKF 기법을 적용했을 때 더욱 우수한 모의결과를 나타냈다.
- 2) 비선형시스템에서의 EnKF 기법을 이용한 분포형 모형의 적용은 정밀한 홍수유출을 예측하게 되고 향후 홍수에경보모형으로서 적정 유역분할 규모를 결정해주는 근거를 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

감 사 의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 安善福(2006), 홍수유출예측에 있어서 분포모형과 집중모형의 비교 분석, 석사학위논문, 영남대학교.
2. 王琼(2008), 실시간 홍수예보를 위한 Kalman Filter 기법을 결합한 유역수문모형의 응용, 석사학위논문, 영남대학교.
3. 배덕효, 김진훈, 권원태(2000), TOPMODEL의 단일유역 홍수예보능에 관한 연구, 한국수자원학회논문집, 제32권 제1호, pp. 87-97.
4. 김상호(2003), Kalman Filtering 기법을 이용한 수리학적 홍수예측 - I .모형개발, 대한토목학회논문집, 제23권 제6B호, pp. 541-549.
5. Komma J, Bloschl G, Reszler C(2008), Soil Moisture Updating by Ensemble Kalman Filtering in Real-time Flood Forecasting, Journal of Hydrology, Vol. 357, Issue. 3-4, pp. 228-242.
6. Martyn P. Clark외 7명(2008), Hydrological Data Assimilation with the Ensemble Kalman Filter - Use of Streamflow Observations to Update States in a Distributed Hydrological Model, Advances in Water Resources, Vol. 31, Issue. 10, pp. 1309-1324.
7. Geir Evensen(2007), Data Assimilation_The Ensemble Kalman Filter, Springer, New York.