일강우 내삽을 이용한 일유량 시뮬레이션 및 앙상블 유량 발생

Ensemble Daily Streamflow Forecast Using Two-step Daily Precipitation Interpolation

황 연 상* / 허 준 행** / 정 영 훈***

Hwang, Yeonsang / Heo, Jun-Haeng / Jung, Younghun

Abstract

Input uncertainty is one of the major sources of uncertainty in hydrologic modeling. In this paper, first, three alternate rainfall inputs generated by different interpolation schemes were used to see the impact on a distributed watershed model. Later, the residuals of precipitation interpolations were tested as a source of ensemble streamflow generation in two river basins in the U.S. Using the Monte Carlo parameter search, the relationship between input and parameter uncertainty was also categorized to see sensitivity of the parameters to input differences. This analysis is useful not only to find the parameters that need more attention but also to transfer parameters calibrated for station measurement to the simulation using different inputs such as downscaled data from weather generator outputs. Input ensembles that preserves local statistical characteristics are used to generate streamflow ensembles hindcast, and showed that the ensemble sets are capturing the observed steamflow properly. This procedure is especially important to consider input uncertainties in the simulation of streamflow forecast.

Keywords : two-step precipitation interpolation, PRMS, forecast, ensemble, distributed model

요 지

입력자료의 불확실성은 강우-유출 모의에서 중요한 불확실성 요소 중의 하나이다. 본 연구에서는 먼저 세 가지의 서로 다른 내삽 기법을 통해 계산된 강수 입력 자료(관측값을 각 소유역의 중심점으로 내삽하여 추정된 입력자료임)들이 강우-유출 모형에 미치는 영향을 분포형 수문모형(PRMS)을 이용하여 분석하였으며, 내삽오차를 바탕으로 발생한 입력자료를 앙상블 유량 예측에 이용하는 과정을 수문학적으로 서로 다른 두개 하천 유역에 적용하였다. 또한 Monte Carlo 기법을 이용하여 수문 모형의 매개변수가 서로 다른 입력자료의 특성에 따라 변화하는 양상을 구분하여 보았다. 본 연구에서 제시된 앙상블 유량 예측방법은 기상 예측 및 기상 모형의 결과물 등의 입력자료를 이용함으로써 중/장기 유량 예측에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 2단계 일강우 내삽법, PRMS, 예측, 앙상블, 분포형 모형

* 아칸소 주립대학교 조교수 (e-mail:Yeonsang.Hwang@astate.edu)

Assistant Professor, Arkansas State University, P.O. Box 1740, State University, AR 72467, USA.

** 교신저자, 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수 (e-mail:jheo@yonsei.ac.kr)

Corresponding Author, Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea.

*** 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사과정 (e-mail: yhjung2000@yonsei.ac.kr)

Ph.D., Candidate, School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea.

1. 수문 모의에 있어서 입력자료 불확실성의 문제

강우-유출과정의 시뮬레이션에는 불확실성을 초래하는 크게 세 가지-모형 입력자료의 불확실성, 모형의 구조적인 불확실성, 모형 매개변수의 불확실성-의 요소가 존재한다. 이 중 입력자료의 불확실성은 다양한 요소가 복합된 것으로, 기계오차 또는 기록의 오류로 인한 불확실성은 일련의 확인 절차를 통하여 개선될 수도 있으나 (Reek et al., 1992), 기본적으로 입력자료의 불확실성에 대한 이해 없이는 수문 모형의 정확도 향상을 한계가 있다고 할 수 있다. 그러나 입력자료의 불확실성을 야기하는 근본적인 이유 중의 하나가 관측 자료의 내삽임에도 불구하고, 실제로 여러가지 내삽모형들이 강우-유출 모형에 미치는 영향에 대한 연구는 찾아보기 힘들다.

한편, 입력자료의 불확실성이 강우-유출 모형의 결과에 미치는 영향을 이해하기 위해서는 모형의 매개변수에 대한 연구도 필수적인 요소이다 (Xia et al., 2002; Gourley and Vieux, 2005). 다만, 모형의 보정과정을 통하여 입력자료의 차이가 상쇄되기도 하므로 서로 다른 입력자료가 모형의 결과에 미치는 영향의 검토는 매개변수를 고정하거나, 최소한 매개변수의 변화 추이를 이해하면서 진행해

야 한다 (Carpenter et al., 2001; Blazkova and Beven, 2002; Carpenter and Georgakakos, 2004).

2. 수치실험의 준비

2.1 대상유역 및 수문자료

일강수의 내삽이 분산형 강우-유출 모형 (PRMS, Precipitation Runoff Modeling System)에 미치는 영향을 실험한 본 연구의 대상 유역은 콜로라도주 Durango에 위치한 Animas강 유역 (이하 Animas)과 조지아주 Statenville에 위치한 Alapaha강 유역 (이하 Alapaha)이다 (Fig. 1, Tables 1 and 2). Fig. 2의 일평균 강수량 및 월평균 유량에서 볼 수 있듯이 Animas 유역은 겨울동안의 적설량과 강우 및 기온상승으로 인한 용설유출이 첨두유량 및 시기에 영향을 미치는 지역이고, Alapaha 유역은 표고가 낮은 지역으로서 월강수량곡선에 이중 첨두부 (bimodal)를 확인할 수 있으나 (1~3월 및 6~8월) 연중 비교적 고르게 강수 유출이 발생한다 (여름철의 높은 증발산율로 인해 월첨두 유량은 1~3월에 발생).

기초 수문자료는 National Climate Data Center에서 관리하는 Cooperative (COOP) 관측망 그리고 Natural

Fig. 1. Two Study Basins (Watershed boundaries are shown in thick black lines on top of DEM around the basins. White dots show climate stations left: Alapaha Basin, right: Animas Basin). Elevations Shown in Legends are in Meters.

Table 1. Study Basin

	Basin	
	Animas	Alapaha
Time Series	1970.1 ~1995.12	1974.1 ~1995.12
Number of HRUs	121	180
Number of Stations	37	28
Elevation (EL.m)	2000~3700	40~125
Area (km ²)	1792	3626
Station Density (station/km ²)	0.021	0.008

Table 2. Flow Characteristics (unit: m³/s)

	Alapaha (1974~1995)	Animas (1970~1995)
Mean Annual Flow	33.7	23.8
Maximum Annual Flow	65.2	34.2
Minimum Annual Flow	3.9	8.3
Upper 10 percentile flow	96.7	64.8
Minimum Daily Flow	0.54	3.1
Maximum Daily Flow	526	219

Fig. 2. Monthly Daily Mean Precipitation and Monthly Mean Flow in Study Basins. Each Line Represents Single Year Record on Corresponding Years. This Means the Numbers of Lines are the Same as the Number of Years in Timeseries Used in This Study.

Resources Conservation Service에서 관리하는 SNOTEL (SNOwpack TELemetry) 관측망에서 얻었다.

2.2 수문모형

PRMS는 USGS (US Geological Survey)에서 개발하

여 사용하고 있는 분산형 강우-유출 모형으로써 Fig. 3에서 보는바와 같이 각각의 단위 프로세스가 모듈화되어 있다 (Leavesley et al., 1983; Leavesley et al., 1996). 이 모형은 유역의 유출 과정을 분산형 기법으로 해석하기 위하여 전체 대상 유역을 HRU (Hydrologic Response Unit)라

Fig. 3. PRMS Flow Chart (modified from Leavesley et al., 1983)

고 불리는 소유역으로 나눈다. 이 HRU의 구분은 다른 분산형 모형과 마찬가지로 유역경사, 고도, 식생, 및 토양구분 등을 바탕으로 비교적 균질한 수문학적 특성을 가지도록 정해진 알고리즘을 통해 이루어진다. 따라서 이 소유역은 단순히 유역의 면적만을 기준으로 정해지는 것이 아니며, Animas처럼 지형의 경사 등 관련 인자들의 변화가 심한 경우가 Alapaha보다 상대적으로 HRU의 평균 면적이 작아지게 된다 (Table 1).

모형의 주요 상태변수들은 Hay et al. (2006)과 Clark and Hay (2004)가 수행한 기존의 연구결과를 이용하여 대부분의 기본적인 입력자료 간 차이에 영향이 없는 변수들은 고정하였다. 그 외 두 유역의 수문학적 특성 차이에 영향이 있는 변수들과 입력 자료에 따라 변화가 예상되는 변수들만을 대상으로 Duan et al. (1993)이 제안한 SCE-UA (Shuffle Complex Evolution) 기법을 이용하여 보정하

였다. 보정에 사용된 해당 변수들은 다음의 3절에서 설명하도록 한다.

3. 내삽모형에 따른 매개변수 검토

본 연구에서는 일강수의 특성을 잘 추정할 수 있도록 강수의 발생을 먼저 로지스틱 회귀분석으로 추정하고 강수발생 지역에 대해서만 강수량을 기존의 내삽법으로 추정하는 2단계 일강수 내삽기법을 사용하여 강수 관측값으로부터 대상 유역 내의 강수값을 추정하였다. 기존의 연구에서 2단계 강수 내삽 기법은 기존의 직접 내삽에 비하여 강수의 발생확률 및 분산도를 잘 재현하는 것으로 확인되었다 (황연상 등, 2010). 강수량 자체의 내삽에는 기존의 회귀분석법 (MLR), 유역의 월평균 강수패턴을 감안하는 회귀분석법 (CMLR), 및 국지가중 다항식법 (LWP)

Table 3. PRMS Parameters Used for Model Calibration

Parameter*	Definition
dday_intcp (RDM)	Slope for relation between temperature and degree day or sky cover
dday_slope (RDC)	Intercept for relation between temperature and degree day or sky cover
tmax_index (TSOLX)	Daily maximum temperature
jh_coef (CTS)	Air temperature coefficient for ET computation for months (1-12)
adjmix_rain (AJMX)	Rain/snow mixture adjustment coefficient, by month
tmax_allrain (PAT)	Maximum air temperature, which when exceeded, forces precipitation to be all rain
cecn_coef (CECN)	Convection-condensation energy coefficient for months (1-12)
emis_noppt (EAIR)	Emissivity of air on days without precipitation
freeh2o_cap (FWCAP)	Free water holding capacity of snowpack
potet_sublim (CTW)	Coefficient for computing snowpack sublimation from PET
smidx_coef (SCN)	Coefficient in contributing area-soil moisture index relation
smidx_exp (SC1)	Coefficient in surface runoff contributing area -soil moisture index relation
gwflow_coef (RCB)	Routing coefficient for each groundwater reservoir
ssrcoef_sq (RCP)	Non-linear routing coefficient for each sub-surface reservoir
soil2gw_max (SEP)	Seepage rate from soil moisture excess to each groundwater reservoir
soil_moist_max (SMAX)	Maximum available water holding capacity of soil profile for each HRU
soil_rechr_max (REMX)	Maximum value of storage in upper part of soil profile for each HRU

* Fortran variable names are shown in ().

Table 4. Example PRMS Parameter Ranges (Given values are for CMLR input)

Parameter*	Min.	Max.	Alapaha	Animas
adjmix_rain (AJMX)	0.0	3.0	2.79	0.002
tmax_allrain (PAT)	50.0	75.0	53.34	74.92
cecn_coef (CECN)	0.0	20.0	7.28	0.002
emis_noppt (EAIR)	0.757	1.0	0.933	0.892
freeh2o_cap (FWCAP)	0.01	0.2	0.065	0.199
potet_sublim (CTW)	0.1	0.75	0.242	0.567
smidx_coef (SCN)	0.0001	1	0.0001	0.488
smidx_exp (SC1)	0.2	0.8	0.200	0.373
gwflow_coef (RCB)	0.0	0.05	0.044	0.004
ssrcoef_sq (RCP)	0.0	1.0	0.008	0.001
soil2gw_max (SEP)	0.0001	0.5	0.499	0.113
soil_moist_max (SMAX)	0.0	20.0	15.787	7.074
soil_rechr_max (REMX)	0.0	4.0	3.673	3.935

* Among the parameters listed in Table 3, dday_intcp, dday_slope, tmax_index, and jh_coef are not used for model calibration.

을 사용하였다(Helsel and Hirsch, 2002; Rajagopalan and Lall, 1998; Hay and McCabe, 2002).

일유량의 비교에 앞서 수문 모형에 적용된 입력자료의

차이에 따른 매개변수 변화를 Monte Carlo기법을 사용하여 검토하였다. Table 3에는 PRMS의 주요 매개변수를 수록하였으며 그 중 Fig. 4에는 본 연구의 시뮬레이션에 사용

Fig. 4. Parameter Objective Function Plot in Animas Basin
(Optimum parameters are shown in gray circles)

된 13개 매개변수의 값과 목적함수(최소화) 값을 표시하였다. 그림에 나타난 매개변수의 변화를 보면(최적 매개변수는 회색 원으로 표시되어 있음), 첫째, 저부가 편평한 모양으로, 매개변수가 모형의 일유량 모의에 크게 영향을 미치지 않는 경우, 둘째, 매개변수 그래프가 V자 모양으로 나타나 일유량 모의 시 민감한 변수이지만 내삽 기법에 따른 변수값의 차이는 없는 경우(예, gwflow_coef, soil2gw_max와 같은 지하수 관련 변수들), 셋째, V자 모양으로 나타나면서 서로 구분되는 다른 매개 변수값을 가지는 경우가 있다(예, Animas 유역의 soil_moist_max). 세 번째의 경우처럼 최적 매개변수가 서로 명확히 구분되는 경우는 매개변수가 입력자료의 변화에 예민하므로 향후 기후변화를 비롯한 일강수 자료의 변화 시, 또는 추정된 매개변수를 다른 유역(미계측 유역)에 적용할 경우 주의를 기울여야 함을 의미한다. 모형의 최적 매개변수의 예는 Table 4에 수록되어 있다.

4. 강우-유출 모형에 의한 일유량의 모의 결과

4.1 내삽방법의 차이에 따른 일유량의 차이

각각의 내삽방법에 따른 일유량 모의 결과는 NS (Nash-Shutcliffe) 스킵 스코어(Nash and Sutcliffe, 1970) 및 평균 제공근 오차(RMSE)를 이용해 비교하였다(Fig. 5).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N (q_{t,sim} - q_{t,obs})^2}{N}} \quad (1)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (q_{t,sim} - q_{t,obs})^2}{\sum_{t=1}^N (q_{t,obs} - q_{mean})^2} \quad (2)$$

여기서, q_{mean} 는 관측된 일평균 유량, $q_{t,obs}$ 는 관측된 일유량, $q_{t,sim}$ 는 모형에서 모의한 일유량, N 은 모의하는 매년의 일수.

Fig. 5. Performance of Simulated Annual Runoff in Animas Basin (Observed daily runoffs are shown in bar chart in the top two graphs. In the top two graphs, monthly precipitation is also shown in mm)

Fig. 6. Comparison of Observed and Simulated Monthly Flows in Animas and Alapaha Basins

Fig. 5를 보면, 일유량의 모의에서 LWP를 사용하여 내삽한 강수량자료가 전반적으로 낮은 유량 오차를 발생하는 것으로 나타났다. 이는 연평균유량의 추이나 누적확률 그래프를 보아도 비슷한 결과임을 알 수 있다. 다만 극심한

가뭄이 발생한 1977년의 경우 오히려 CMLR이 좋은 결과를 보였는데, 이 내삽법의 경우 해당 유역에서 기왕의 월 강수 패턴을 참고함으로써 결측치에 대해 덜 민감하기 때문으로 판단된다. Fig. 6에서 모의한 유출량을 계절별로

살펴보면 흥미로운 결과를 확인할 수 있다. 월유량 곡선을 보면 두 유역 모두에서 MLR 및 LWP를 이용하여 얻은 그래프는 비슷하지만 CMLR를 이용해 모의한 유량은 다른 양상으로 보이며 다소 오차가 큰 것으로 나타났다. 두 그래프를 비교해 보면 내삽방법별 차이가 비교적 크게 나타나는 Alapaha 유역에서 모의된 유량의 차이가 비교적 큰 것을 확인할 수 있다. 특히 CMLR의 경우는 저유량 계절인 6월에서 11월 사이의 유량 모의에서 오차가 크게 나타나는 것을 알 수 있는데, 이는 여름철 발생하는 소나기성 강우의 공간적/시간적 양상을 CMLR이 잘 재현해 내지 못하고, 이 차이가 증발산이 활발한 여름철 기간에 더욱 확대되기 때문인 것으로 보인다. 반면 용설 유출이 지배적인 Animas 유역의 경우, 비록 일강수량의 공간적 분포에 차이가 있다고 하여도 유역 내에 발생하는 겨울철 동안의 총 적설량에는 큰 차이가 없으므로, 봄철 일유량에서 차이가 크게 발생하지 않는 것으로 분석된다.

4.2 내삽 오차를 이용한 강수 앙상블 발생

일강수의 내삽은 사용하는 모형을 추정할 때 내재하는 잔차의 영향으로 해당일의 강수량으로 예측하는 추정 중간값을 중심으로 통계적으로 가능한 유사값이 존재하게 된다. 이점에 착안하여 내삽모형의 예측 오차를 이용하여 일강수 앙상블을 발생할 수 있다. Clark and Slater (2005)는 이 내삽 오차를 이용해 일강수 앙상블을 발생하는 기법을 제안하였다. 앙상블의 발생과정은 크게 세 단계를 거치게 된다; (1) 우선 대상 유역내의 모든 격자점에서 관측된 강수확률 (POP)을 계산한다(본 연구에서는 2×2 km); (2) 각 격자점에서의 강수 발생을 조건으로 강수량 추정 (PCP); 마지막으로, (3) 관측점에서의 예측오차를 계산하고 이를 각 격자점으로 내삽 (E)한다. 이렇게 계산된 POP, PCP, E를 이용해 각 격자점에서의 누적확률분포 함수를 구성하고, 이를 바탕으로 강수의 시-공간적 상관관계 구조가 유지된 난수를 유역의 모든 격자에 필요한 앙상블의 수만큼 발생한다. 이어서 발생된 난수의 크기에

Fig. 7. Flow Chart for Ensemble Daily Runoff Simulation and Forecast

따라서 각 격자점에서의 강수 발생이 결정되며, 강수가 발생되는 지점의 강수량은 PCP값에 난수로 발생한 누적 확률값 비율만큼의 E를 더하여 계산하게 된다. 이 과정을 반복함으로써 원하는 숫자의 앙상블을 발생한다. POP와 PCP의 내삽에는 내삽 기법중 양호한 유량 모의 결과를 보여준 LWP를 이용하였다. 이와같은 입력자료 앙상블은 Fig. 7에 소개된 흐름을 통하여 앙상블 일유량 모의에 사용된다.

4.3 입력 앙상블의 일유량 예측에의 적용

먼저 4.2절에서 발생된 입력자료 앙상블은 과거 유량 기록을 이용하여 효용성을 점검하였다. Fig. 8은 Alapaha 유역에서 모의한 앙상블 유량을 월유량, 연평균 유량 및 연유량의 누적확률분포도로 나타낸 것이다. 앙상블 유량(열은 회색)이 관측값(검은색 실선) 주위에 안정적으로

나타나 있는 것을 볼 수 있다.

현재 사용되고 있는 대부분의 유량 예측기법에서는 수문 모형 및 입력자료의 불확실성을 고려하고 있지 않은데 기존의 앙상블 일유량 예측 기법 (Ensemble Streamflow Prediction, ESP) (Day, 1985)은 기왕의 일강수 기록을 예측기간에 단순히 반복함으로써 일유량 앙상블을 얻는 것이므로 예측시작일 이전까지의 모든 수문, 기상학적 조건은 완전히 결정되어 있는 셈이다. 따라서 기존의 앙상블 예측 기법으로 얻어지는 앙상블 일유량은 장기간의 일단위 유량 예측에 제약을 받게 되는데 이는; 1) 예보되는 유량이 기왕의 일강수 자료 이상의 사상으로 인한 경우는 예측이 불가능하며, 2) 관측값 및 유출 모형의 예측값이 완벽하다는 가정에 기초하기 때문이라고 할 수 있다.

Fig. 8. Selected Flow Statistics of Simulated Ensemble Runoffs in Animas Basin (Top left: monthly mean flow, top right: annual mean flow, bottom left: cumulative probability of annual flow, thick gray lines represent 100 ensemble flows)

Fig. 9. Simulated Daily Runoff Ensembles in Alapaha Basin Using Two Different Methods (Conventional ESP (top), improved ensemble simulation (bottom) and observed daily flows are shown in solid dots while 45~55th percentile, 25~75th percentiles, and 5~95th percentiles are shown in shaded area)

4.3.1 일유량의 예측 방법

기존의 ESP와 입력자료 내삽 잔차를 이용한 ESP결과를 비교하였다. 기존의 방법을 사용하는 예보의 경우는 기상 20년간의 일강수 자료만을 이용할 수 있으므로 20개의 앙상블 일강수 시계열을 모의하였으며, 개선된 ESP에서는 20년간의 연간 앙상블 일강수 1개년 마다 각각 100개의 강수 오차 앙상블을 발생하므로 모두 2000개의 일강수 앙상블에 대응하는 일유량 앙상블이 작성되었다. 여기에서는 Alapaha 유역의 대상으로 수치실험을 실시하였으며, 앙상블 일유량 예측은 1996년 1월 1일을 시점으로 하였다.

4.3.2 앙상블 일유량 예측의 비교

Fig. 9를 보면 두개의 그래프 중 기존의 ESP 기법의 경우 (위쪽의 그래프)는 예측시점 이전까지는 모든 조건이 결정된 상태이므로 20개의 앙상블 유량 곡선이 하나로 겹쳐 있는 것을 알 수 있다. 입력자료 불확실성에 기초한 ESP의 경우(아래 그래프) 유량 예측시점 이전에도 내삽 모형의 오차에 기초한 일유량 앙상블의 범위가 회색으로 나타나 있다. 그래프에서 가장 안쪽은 45~55분위 유량, 중간이 25~75분위, 가장 바깥쪽이 5~95분위 앙상블 유량을 나타낸다.

위의 유량 그래프에서 보면 입력자료 불확실성을 감안한 ESP 예측의 범위가 기존의 방법에 비해 넓은 것을 쉽게 알 수 있으며, 특히 전체 발생된 일유량 앙상블의 범위 중 5~95분위 범위의 일유량 (가장 바깥쪽) 이 기존의 방법에 의한 것보다 관측값을 더 잘 포함하고 있음을 확인할 수 있다. 이 앙상블 유량 예측이 실제 예측기간에 기록된 일강수량 및 기상조건에 대한 정보가 전혀 없는 조건 하에서 이루어진 것을 감안하면 대단히 만족할 만한 결과라고 할 수 있다. 앙상블 일유량으로 부터 일유량의 첨두값 및 발생시기 등을 정확히 예측하지는 못하였으나, 이는 기상예보 없이 과거 자료만을 이용하는 앙상블 유량 예측의 한계라고 할 수 있으며, 앙상블 유량 예측이 물관리 목적의 월유량 또는 계절유량의 예측에는 적합하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

이와같이 확률예측을 가능하게 하는 앙상블 유량 예측은 물관리자 및 의사결정자에게 시사하는 바가 크다고 할 수 있다. 이 앙상블 유량 예측의 그래프를 확률 분포 곡선과 연관하여 생각하여 보면, 입력자료 불확실성을 바탕으로 한 앙상블 유량의 경우 예측된 유량의 분포형이 기상 및 강우 예측에 따라 바뀌게 되고, 초과유량이 발생할 확률 (또는 위험도)도 이에 따라 바뀌게 될 수 있음을 시사한다.

5. 결 론

본 연구에서는 강우-유출모의과정에서 발생하는 불확실성 요소의 하나인 입력자료의 불확실성을 분석하기 위하여, 3가지 내삽기법에 의한 입력자료를 분포형 수문모형인 PRMS에 적용하였으며, 내삽오차를 기초로 발생한 입력자료를 앙상블 유량예측에 이용하는 과정을 2개의 유역에 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 일강수량 내삽에 따른 일유량의 차이는 용설유출 보다는 강우유출이 지배적인 유역에서 크게 나타났다.
2. 홍수량의 예보에 사용될 수 있는 일유량 앙상블도 강우 유출이 지배적인 유역에서 큰 영향을 받는 것으로 확인되었다.
3. 기존의 무작위 추출에 의한 앙상블 유량 발생이 아닌 유역 강수의 통계학적 특성을 고려한 강수 앙상블을 적용한 앙상블 일유량 시뮬레이션을 검토하였으며, 이는 장기간인 계절유량 등의 예측에 적절히 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 시도한 일유량 예측은 기왕의 일강수 자료를 이용하여 앙상블 일유량을 예측하는 비교적 간단한 시도이지만 선택적인 관측자료의 사용이나 예측된 기상 정보 또는 기상모형(GCM)의 결과물 등을 다운스케일링함으로써 일유량 예측의 정확도를 향상시키는 것도 향후 연구 대상이다.

감사의 글

본 연구는 미국 NOAA GAPP program (Award NA16GP2806)과 NOAA RISA Program (Award NA17RJ1229)의 지원으로 완성된 것입니다. 또한 연구의 완성에 큰 도움을 준 미국 주립 콜로라도대학교의 Balaji Rajagopalan과 Martyn Clark, Hydrosphere Resource Consultants의 Subhrendu Gangopadhyay, 미국 USGS의 George Leavesley, Lauren Hay, 그리고 Steve Markstrom에게 특별히 감사를 드립니다. 논문의 완성도 향상을 위해 아낌없는 조언을 해주신 익명의 심사자들도 감사드립니다.

참고문헌

- 황연상, 정영훈, 임광섭, 허준행 (2010). “강우-유출 모형 적용을 위한 강우 내삽법 비교 및 2단계 일강우 내삽법의 개발.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제43권, 제12호, pp. 1083-1091.
- Blazkova, S., and Beven, K. (2002). “Flood frequency estimation by continuous simulation for a catchment

- treated as ungauged (with uncertainty).” *Water Resources Research*, Vol. 38, No. 8, pp. 1139-1151.
- Carpenter, T.M., and Georgakakos, K.P. (2004). “Impacts of parametric and radar rainfall uncertainty on the ensemble streamflow simulation of a distributed hydrologic model.” *Journal of Hydrology*, Vol. 298, No. 1-4, pp. 202-221.
- Carpenter, T.M., Georgakakos, K.P., and Sperflage, J.A. (2001). “On the parametric and NEXRAD-radar sensitivities of a distributed hydrologic model suitable for operational use.” *Journal of Hydrology*, Vol. 253, No. 1-4, pp. 169-193.
- Clark, M.P., and Hay, L.E. (2004). “Use of medium-range numerical weather prediction model output to produce forecasts of streamflow.” *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 5, No. 1, pp. 15-32.
- Clark, M.P., and Slater, A.G. (2005). “Probabilistic quantitative precipitation estimation in complex terrain.” *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 7, No. 1, pp. 3-22.
- Day, G.N. (1985). “Extended streamflow forecasting using NWSRFS.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 111, No. 2, pp. 157-170.
- Duan, Q., Gupta, V.K., and Sorooshian, S. (1993). “A shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization.” *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol. 76, No. 3, pp. 501-521.
- Gourley, J.J., and Vieux, B.E. (2005). “A method for evaluating the accuracy of quantitative precipitation estimates from a hydrologic modeling perspective.” *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 6, No. 2, pp. 115-133.
- Hay, L.E., and McCabe, G.J. (2002). “Spatial variability in water-balance model performance in the conterminous united states.” *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 38, No. 3, pp. 847-860.
- Hay, L.E., Leavesley, G.H., Clark, M.P., Markstrom, S.L., Viger, R.J., and Umemoto, M. (2006). “Step wise, multiple objective calibration of a hydrologic model for a snowmelt dominated basin.” *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 42, No. 4, pp. 877-890.

- Helsel, D.R., and Hirsch, R.M., (2002). Statistical methods in water resources, Techniques of water resources investigations, Book 4, Chapter A3. U.S. Geological Survey. pp. 522.
- Leavesley, G.H., Lichty, R.W., Troutman, B.M., and Saindon, L.G. (1983). Precipitation-runoff modeling system: user's manual, U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations 83-4238, pp. 207.
- Leavesley, G.H., Restrepo, P.J., Markstrom, S.L., Dixon, M., and Stannard, L.G. (1996). The modular modeling system - MMS: user's manual, Open file report pp. 96-151, U.S. Geological Survey.
- Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models part I-a discussion of principles." *Journal of Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.
- Rajagopalan, B., and Lall, U. (1998). "Locally weighted polynomial estimation of spatial precipitation." *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, Vol. 2, No. 2, pp. 44-51.
- Reek, T., Doty, S.R., and Owen, T.W. (1992). "A deterministic approach to the validation of historical daily temperature and precipitation data from the cooperative network." *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 73, No. 6, pp. 753-762.
- Xia, Y., Pitman, A.J., H.V. Gupta, M.L., Henderson-Sellers, A., and Bastidas, L.A. (2002). "Calibrating a land surface model of varying complexity using multicriteria methods and the cabauw dataset." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 3, No. 2, pp. 181-194.

논문번호: 11-002	접수: 2011.01.05
수정일자: 2011.03.04	심사완료: 2011.03.04