

레이더 추정강우의 수문학적 활용 (II): 불확실성 해석

Hydrologic Utilization of Radar-Derived Rainfall (II) Uncertainty Analysis

김진훈* / 이경도** / 배덕효***

Kim, Jin-Hoon / Lee, Kyoung-Do / Bae, Deg-Hyo

Abstract

The present study analyzes hydrologic utilization of optimal radar-derived rainfall by using semi-distributed TOPMODEL and evaluates the impacts of radar rainfall and model parametric uncertainty on a hydrologic model. Monte Carlo technique is used to produce the flow ensembles. The simulated flows from the corrected radar rainfalls with real-time bias adjustment scheme are well agreed to observed flows during 22-26 July 2003. It is shown that radar-derived rainfall is useful for simulating streamflow on a basin scale. These results are diagnose with which radar-rainfall input and parametric uncertainty influence the character of the flow simulation uncertainty. The main conclusions for this uncertainty analysis are that the radar input uncertainty is less influent than the parametric one, and combined uncertainty with radar and parametric input can be included the highest uncertainty on a streamflow simulation.

keywords : radar-derived rainfall, uncertainty, semi-distributed TOPMODEL, Monte Carlo technique, ensemble flow

요 지

본 연구에서는 관악산 레이더 자료로부터 소양강 유역에서 최적 추정된 레이더 강우로 준분포형 TOPMODEL의 적용성을 평가하고 Monte Carlo 난수발생 기법과 연계한 앙상블 유량모의 기법을 구축하여 레이더 추정강우가 가질 수 있는 불확실성이 수문모형에 미치는 영향을 모형의 매개변수와 연계하여 분석하였다. 레이더 추정강우를 활용하여 소양강 유역의 유량계산을 2003년 7월의 사례기간 동안 수행한 결과 실시간 편차보정 기법으로 수정된 레이더 입력강우의 경우 관측유량과 비교하여 매우 잘 일치하는 것으로 나타나 레이더 추정강우의 수문학적 활용성은 매우 높은 것으로 판단된다. 불확실성 분석에서는 레이더 강우가 가질 수 있는 불확실성이 수문모형의 매개변수 불확실성 보다 덜 민감하게 영향을 미치는 것으로 검토되었고 레이더 강우와 매개변수가 혼합된 불확실성이 유량모의에서 가장 큰 오차를 보일 수 있는 것으로 검토되었다.

핵심용어 : 레이더 추정강우, 불확실성, 준분포형 TOPMODEL, Monte Carlo 기법, 앙상블 유량

* 세종대학교 토목환경공학과 박사과정
Graduate Student, Dept. of Civil & Envir. Engrg., Sejong University, Seoul 143-747, Korea
(e-mail: jhenu@chol.com)

** 세종대학교 토목환경공학과 석사졸업(현 (주) 웹솔루스 대리)
M.S., Dept. of Civil & Envir. Engrg., Sejong University, Seoul 143-747, Korea

*** 세종대학교 물자원연구소 · 토목환경공학과 부교수
Associate Professor, Water Resources Institute, Dept. of Civil & Envir. Engrg., Sejong University, Seoul 143-747, Korea

1. 서론

최근 기상 레이더를 활용하여 시·공간적으로 강수량을 추정하고 분포형(distributed) 수문모형을 활용하여 현업적(operational) 유량 모의 및 예측에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다(Collinge and Kirby, 1987; Wyss et al., 1992; Olivera and Maidment, 1999). 또한, 이러한 연구는 분포형 수문모형 개발(예, Singh and Frevert, 2002)과 병행되어 수문모형이 유역단위의 시·공간적 강우 입력자료에 매우 민감하게 반응함을 제시하기도 하였고(Krajewski et al., 1991; Koren et al., 1999; Carpenter and Georgakakos, 2004), 수문모형의 매개변수가 생산할 수 있는 모의오차 및 이와 관련된 매개변수 산정에 관한 연구를 수행하기도 하였다(Michaud, 1994; Finnerty et al., 1997; Carpenter et al., 2001).

국내의 경우 기상청에서 관악산, 부산, 제주, 동해, 군산, 백령도, 진도, 광덕산 레이더 등, 건설교통부에서 강화도 수문레이더를 설치하여 강수유무 및 강수량 예보의 질적 향상을 도모하기 위해 레이더의 활용성을 부각시키고 있으나, 하천유량 모의와 같은 수자원 분야에서의 레이더 활용에 대한 연구는 미비한 실정이다. 특히, 여름철 치수기에 효율적인 홍수예경보 업무를 수행하기 위해서는 수계내의 강수량에 대한 정확한 정보와 향후 예측이 선행되어야 하므로(염경택 등, 2000) 시·공간적으로 우수한 해상도를 가지는 레이더 자료를 활용한다면 약기상에 대한 사전 감시를 통해 소규모 단위의 하천유역에 발생할 수 있는 돌발홍수와 같은 재해를 미연에 방지할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 이와 같은 국내의 실정을 고려하여 배덕효 등(2005)에서 추정된 최적 레이더 추정강우로부터 준분포형 TOPMODEL의 적용성을 평가한 후, 레이더 추정강우가 가질 수 있는 불확실성이 수문모형에 미치는 영향을 앙상블(ensemble) 유량모의 기법을 이용하여 다각적으로 검토하고자 한다. 본 논문의 2장에서는 레이더 강우를 적용하기 위한 수문모형 및 불확실성 분석의 기본이론을 기술하고, 3장에서는 국내 레이더 추정강우의 수문모형 적용사례, 레이더 강우 및 수문모형 매개변수의 불확실성이 수문모형에 미치는 영향을 분석하여 이들의 요약 및 결론을 4장에 기술하였다.

2. 기본이론

2.1 수문모형

본 연구에서 사용한 수문모형은 준분포형(semi dist-

ributed) TOPMODEL(배덕효와 김진훈, 2005)로써 기존 TOPMODEL(Beven et al., 1994)이 소유역에만 적용될 수 있는 모형의 한계를 극복하기 위한 모형으로 유역 홍수량 산정 모형과 하도 홍수추적 모형으로 구성되어 있다. 유역 홍수량 산정 모형에서 지형지수 계산, 토양수분의 변화 모의 및 유역 홍수추적은 기존 TOPMODEL의 개념과 동일하게 사용된다. 이렇게 모의된 상류 유역의 유출량은 하류유역으로 흘러 들어가 하도추적을 거치게 되는데, 본 연구에서는 운동파(kinematic wave; Miller, 1984; HEC, 1990) 방법에 의한 하도 홍수추적 모형을 선정·구축하였다.

이와 같은 유역 및 하도 홍수추적 모형을 특정지역에 적용하고자 할 때는 유역의 크기, 지형조건에 따라 다르지만, 일반적으로 Fig. 1과 같이 설명될 수 있다. 즉, 특정 유역을 강우의 분포특성이나 지형 및 토양조건 등이 비교적 균일하도록 몇 개의 소유역으로 분할하고 상류의 유량유입이 없는 headwater 유역 "1", "2"에 대한 유량을 유역 유출모형을 이용하여 계산한다. 그 후 각각의 소유역에서 계산된 유량의 시간적 분포를 합산하여 합류점 "A"에 대한 수문곡선을 계산한다. 또한, 합류점 "A"에 대한 수문곡선을 상류 유입조건으로 하도구간 "A-B"에 대한 하도홍수 추적을 실시하고 유역 "3"에 대한 유량을 유역 유출모형으로 계산하여 합산함으로써 유역 출구점 "B"에 대한 최종 수문곡선을 계산한다.

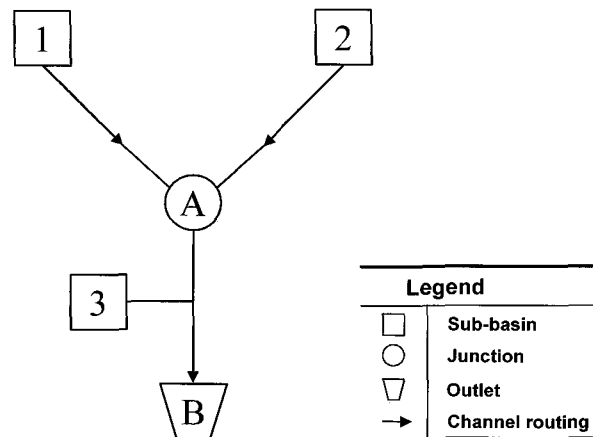


Fig. 1. Schematic diagram for combining basin and channel flow routing

2.2 레이더 추정강우의 불확실성 분석기법

레이더 추정 강우의 수문학적 불확실성 해석을 수행하기 위해 배덕효 등(2005)에서 산정된 최적 레이더 유역평균 강우량을 활용하여 수문모형의 유량해석에 미치

는 불확실성의 정도를 파악하였다. 본 연구를 위해 Monte Carlo 난수 발생기법을 도입하여 레이더 강우입력에 대한 100개의 앙상블을 생산하였고, 이를 수문모델에 입력하여 100개의 유출 수문곡선을 계산하였다. 최적 레이더 추정강우를 기준으로 균등분포(uniform distribution)의 강우입력 앙상블을 생산하기 위한 선형 기법은 Eq. (1)과 같다.

$$P_e = P_0(1 + \alpha) \quad (1)$$

여기서, P_0 는 레이더로부터 추정된 유역평균 강우량, P_e 는 교란된 유역평균 강우량, α 는 무작위적 오차항을 나타낸다. α 의 값은 [-0.5, +0.5]의 범위내에서 Monte Carlo 난수 발생기법을 통해 균등분포를 가지면서 선택되며, 이것은 레이더 유역평균 강우량을 기준으로 $\pm 50\%$ 의 불확실성 범위를 나타낸다. Eq. (1)과 같은 불확실성 생산기법은 레이더가 강수량을 기록하지 못할 때 무강수 조건을 고려할 수 있도록 설계되었는데, 이는 불확실성 또한 존재하지 않는 것으로 고려된다(Carpenter and Georgakakos, 2004).

Krajewski and Georgakakos(1985)는 Eq. (1)과 같은 레이더 강우량의 균등분포 발생기법이 강우 오차에 대한 확률적 구조를 포함하지 않는 것으로 보고 기상 레이더 강우량 추정에 대한 경험적 연구를 통해 레이더 강우량 입력의 불확실성 분석을 위한 지수함수적 관계식을 다음과 같이 제안하였다.

$$P_e = P_0 10^\varepsilon \quad (2)$$

여기서 P_0 와 P_e 는 앞선 수식의 정의와 동일하고, 난수 ε 는 [-0.2, +0.2]의 범위내에서 Monte Carlo 난수 발생기법을 통해 균등분포를 가지면서 선택된다. 이것은 P_e/P_0 의 비율로 계산을 할 경우 0.6에서 1.6의 범위를 가질 수 있으며 Eq. (1)으로 정의된 분포와 유사한 범위를 가진다. 또한, 지수함수적 불확실성 모델에서도 무강수 조건에서 공간적 혹은 시간적 상관성을 포함하지 않으면서 불확실성 또한 고려하지 않는다.

이상과 같은 레이더 강우 입력자료의 수문학적 불확실성 기법과 함께 수문모델 자체의 불확실성 분석도 함께 이루어 졌다. 수문모델의 불확실성 해석은 모델의 매개변수를 바탕으로 레이더의 균등분포 불확실성 분석과 동일하게 민감도가 높은 매개변수를 대상으로 $\pm 50\%$ 의 불확실성 범위를 주는 것이다.

2.3 불확실성의 정량화

Monte Carlo 난수발생 기법을 이용하여 수문모형에서 생산된 100개의 유량 앙상블들은 각 시간대별 분산(dispersion) 정도를 측정함으로써 불확실성의 정량적 기준으로 평가하였다. 이러한 분산은 다음 Eq. (3)과 같이 확률적으로 90번째 및 10번째 발생할 수 있는 유량 앙상블간의 차이를 중앙값 유량 앙상블로 정규화하여 산정한다(Carpenter and Georgakakos, 2004).

$$R_Q = \frac{Q_{90} - Q_{10}}{Q_{50}} \quad (3)$$

Eq. (3)과 같은 불확실성 평가방법은 서로 다른 유량 앙상블 시나리오들 사이에서 앙상블 변동폭을 측정하기 위한 매우 유용한 수단이 될 수 있고, 각 시간대별 앙상블 값의 빈도분포의 형상과 독립적으로 계산할 수 있다.

3. 사례연구

3.1 수문모형 매개변수 추정

최적 추정된 레이더 입력강우를 준분포형 TOP-MODEL에 적용하기 위해서 소양강댐 상류유역을 Fig. 2와 같이 9개의 소유역으로 구분하였다. 그림과 같은 소유역들은 대상유역이 2,703km²의 대유역임을 감안하여 유역면적의 크기, 하천수계의 구성형태, 수위 관측지점의 위치 등을 고려하여 구분한 것으로, 고해상도 레이더 강우자료의 활용성을 평가하고 준분포형 수문모델의 적용을 위한 것이다. 각 소유역에 대한 준분포형 TOPMODEL의 유량모의는 인북천 유역(S_1, S_2)에서 시작하여 내린천(S_3, S_4, S_5, S_6, S_7) 및 소양강(S_8, S_9) 하류유역으로 각 소유역 및 하도의 유출량을 추적한 후 소양강댐 지점에서 최종 유출량 산정하게 된다.

준분포형 TOPMODEL의 지형학적 매개변수인 지형지수(topographic index) 및 하천특성인자(하도연장, 경사 등)를 산정하기 위해 소양강 유역의 30m 해상도 수치고도모델(DEM) 자료 및 하도 GIS 자료를 활용하여 계산하였다. 소양강 유역은 0~1,670m의 고도분포를 가지면서 각 소유역에서 계산된 지형지수의 평균치(λ_i)는 Table 1과 같이 5.71~6.52의 범위를 보이면서 유사한 변동성을 보인다. 또한 모형 개념에서와 같이 상류 유입량이 존재하는 소유역($S_2, S_4, S_6, S_7, S_8, S_9$)들은 하도 홍수추적 과정을 통해 유출량을 산정하게 되는데, 여기에 필요한 각 소유역의 하도특성은 Table 2와 같다. 이들 변수 중 하도길이 및 경사는 GIS 자료로 산출

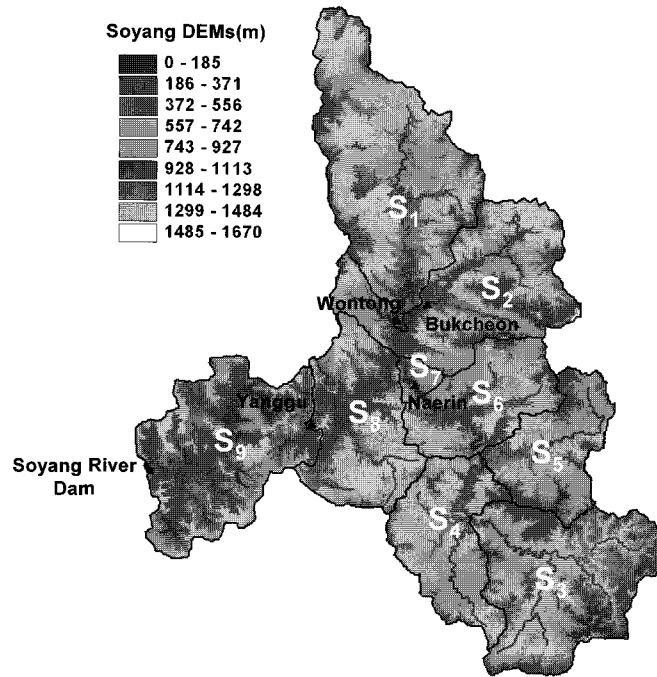


Fig. 2. Study area with DEMs and sub-basin delineation

Table 1. Statistical results of topographic index for each sub-basin

Sub-basin	Items	Mean	Standard Dev.	Skewness	Area (km ²)
1		5.7123	7.3159	-0.7174	526.57
2		5.9903	6.6527	-0.8006	391.53
3		5.9020	4.8706	-0.9981	407.51
4		6.2535	5.3201	-1.0266	238.46
5		5.8991	5.8654	-0.8991	199.21
6		5.8597	4.7090	-1.0130	216.22
7		6.1998	6.1485	-0.8299	24.62
8		6.4485	6.3173	-0.9241	276.18
9		6.5164	7.2379	-0.8394	405.63

Table 2. Estimated parameters for each sub-basin and stream channel

Basin No.	Basin parameters					
	m (m)	T ₀ (ln(m ² /h))	S _{rmax} (m)	S _{r0} (m)	t _d (h/m)	v (m/s)
Entire	0.058	0.287	0.05	0.0001	50	2.0
1~2	0.031	0.287	0.05	0.0001	50	2.0
3~6	0.045	0.274	0.05	0.0001	50	2.0
7~9	0.052	2.975	0.05	0.0001	50	2.0
Channel No.	Channel parameters					
	Length (L, km)	Slope (S, unitless)	Shape	Bot. Width (W _b , m)	Sec. Slope (z, unitless)	Remark
2	26.88	0.006339	Trapezoid	46.4	1.05	Impuk
4	15.30	0.003012	"	62.7	1.04	Naerin
6	18.52	0.017058	"	139.9	1.04	"
7	7.13	0.014494	"	154.8	1.05	"
8	22.31	0.009359	"	1442.3	1.02	Soyang
9	36.69	0.014921	"	1624.2	1.02	"

가능한 값이고 하도단면 자료는 강원도(1991a, 1991b, 2000) 하천정비기본계획 보고서의 각 하도단면의 하천 측량 성과물 자료를 바탕으로 단면적 및 통수능이 동일한 제형단면으로 변환하고 그 평균값을 사용하였다. 이들 자료 중 단면자료가 존재하지 않는 일부 하도구간에서는 지형자료를 기준으로 선형보간하여 사용하였다.

본 연구에서는 유역 유량모의를 위한 TOPMODEL의 주요 매개변수(배덕효 등, 2000)를 추정하기 위해 소양강 전체유역을 단일유역으로 가정하고 소양강댐 유입량을 기준으로 유역전체를 대표할 수 있는 초기 매개변수를 수동보정법으로 추정하였으며, 이렇게 산정된 초기 매개변수는 9개의 소유역에 동일 적용한 후 상류 수위지점(원통, 인북천, 내린천, 양구) 관측자료를 기준으로 재조정하였다. 이와 같은 재조정 과정에서는 비교적 민감도가 높은 지수형 전도계수 감소상수 m 과 포화상태의 측면 전도계수 T_0 를 중점적으로 최적화하였으며, 기타 매개변수는 전유역에 동일 값을 적용하였다. Table 2는 배덕효 등(2005)에서 총 강우깊이에 따른 G/R 비율로 2003년 7월 22일~23일 동안 편차 보정한

최적 레이더 강우자료로부터 산정된 각 소유역의 매개변수를 나타낸 것이다.

3.2 레이더 추정강수를 이용한 유량해석

본 절에서는 레이더 추정강수를 활용하여 소양강 유역의 유량계산을 수행하였다. 유량계산에 이용된 준분포형 TOPMODEL은 앞절에서 산정된 매개변수를 사용하며, 모형의 강우 입력치로 M-P 레이더 강우, G/R 비율로 보정된 레이더 강우를 입력하여 이에 따른 유량결과를 분석하였다. Fig. 3은 수문모형의 계산결과를 나타낸 것으로 유량자료 획득이 가능한 원통, 내린천, 소양강댐 지점의 모의유량을 표시하였다. 그림에서와 같이 대상유역의 출구점인 소양강댐 지점에서는 유량계산결과가 관측유량과 비교하여 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 3의 유량모의 결과에서 M-P 관계식의 레이더 추정강우의 유량모의 결과는 강우의 과소모의로 인하여 전 소유역에서 동일 변동성을 보이는 것으로 나타났고, 편차가 보정된 레이더 입력강우의 경우 관측유량과 비교하여 매우 잘 일치하는 것으로 나타나 레이더 추정강

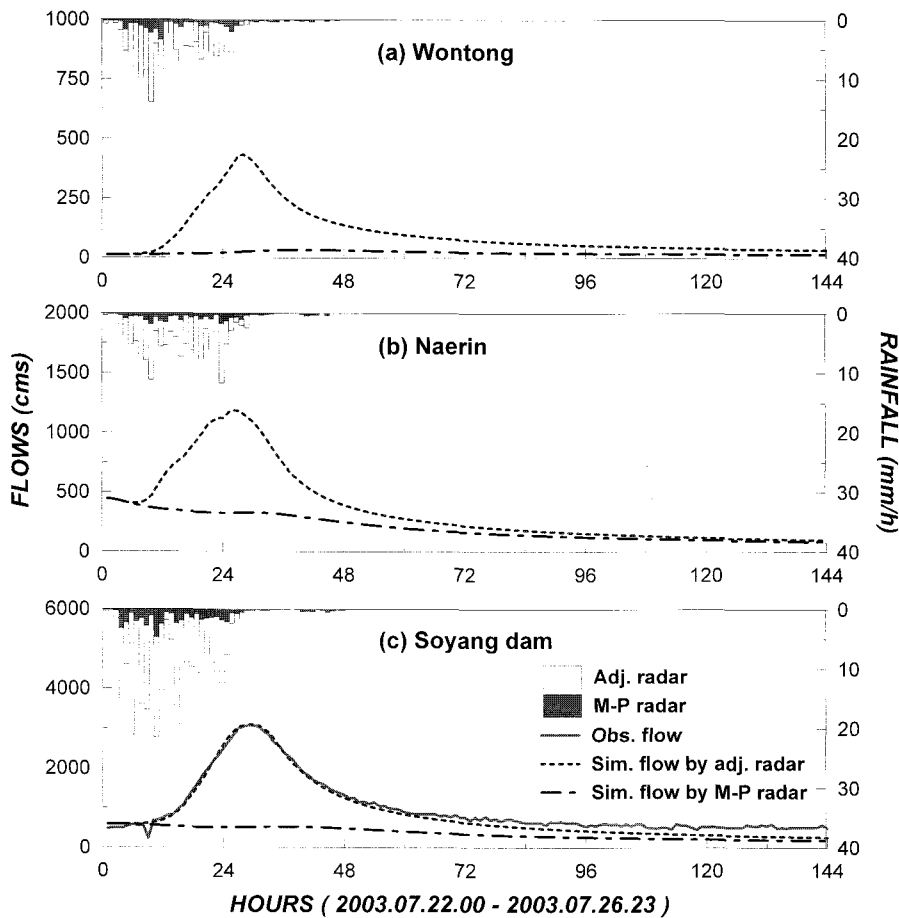


Fig. 3. Hydrograph plots of simulated streamflows from radar-derived rainfalls for the Soyang River watershed: (a) sub-catchment 2; (b) sub-catchment 6; (c) sub-catchment 7. Observed flows(solid line) are shown at Soyang dam outlet

우의 수문학적 활용성이 매우 높은 것으로 사료된다. Table 3은 소양강댐 지점에서 유량해석에 따른 통계특성치를 계산한 것으로 관측 및 계산유량 사이의 상관계수는 강우입력에 따라 각각 0.99, 0.69, rmse는 148.62, 579.73cms, 유출용적 상대오차는 -10.96, -56.59%로 계산되었다. 이렇게 계산된 통계치는 Fig. 3과 같이 G/R 비율에 따른 편차보정 기법으로 추정된 레이더 강우량의 유량모의 적용결과는 관측유량과 거의 유사한 적용성을 보이고, M-P 관계식으로 추정된 레이더 강수량은 매우 과소평가됨을 알 수 있다.

3.3 레이더 추정강우의 불확실성 해석

본 연구에서는 레이더 추정강우가 가질 수 있는 불확실성이 수문모델에 미치는 영향을 분석하기 위해 소양강 상류유역을 대상으로 구축된 준분포형 TOP-

MODEL 및 G/R 비율로 보정된 최적 레이더 추정강우를 활용하였다. 불확실성 분석 기법은 전술한 바와 같이 Monte Carlo 난수발생 기법을 도입하여 최적 추정된 레이더 강우를 기준으로 $\pm 50\%$ 의 균등분포 및 지수형 분포를 가지는 100개의 강우입력 앙상블이 생산되며, 이들은 수문모형에 입력되어 유량 앙상블 결과의 불확실성을 Eq. (12)로 추정하였다. 여기서 수문모형의 매개변수는 Fig. 3과 같이 본 연구의 사례기간인 2003년 7월 22일~26일 강우-유출사상으로 각 소구역마다 최적 추정된 값이 동일하게 적용되었다.

Fig. 4는 균등분포를 가지는 레이더 입력 앙상블에 대한 유량해석 결과를 나타낸 것으로, 상단 그래프는 100개 유량 앙상블 결과이고 하단 그래프 유량결과에 대한 누적치를 표현한 것이다. 또한, 상단 그래프에서 진한 실선으로 표현된 것은 강우 입력 앙상블 생산에서

Table 3. Statistical results between observed and simulated flows

Rainfall	Items	Q_m (cms)	σ	Q_p (cms)	t_p	rmse	cc
Adjusted RDR	Obs.	1007.90	712.77	3080.00	29	148.62	0.99
	Cal.	897.42	777.46	3102.23	30		
	Res.	-110.48	107.63	-	-		
M&P RDR	Cal.	411.59	117.89	601.01	40	579.73	0.69
	Res.	-576.53	629.22	-	-		

Note: Obs. : Observed flow, Cal. : Computed flow, Res. : Residual between observed and computed flow, Q_m : Mean, σ : Standard deviation, Q_p : Peak flow, t_p : Peak time, rmse : Root mean square error, cc : Correlation coefficient

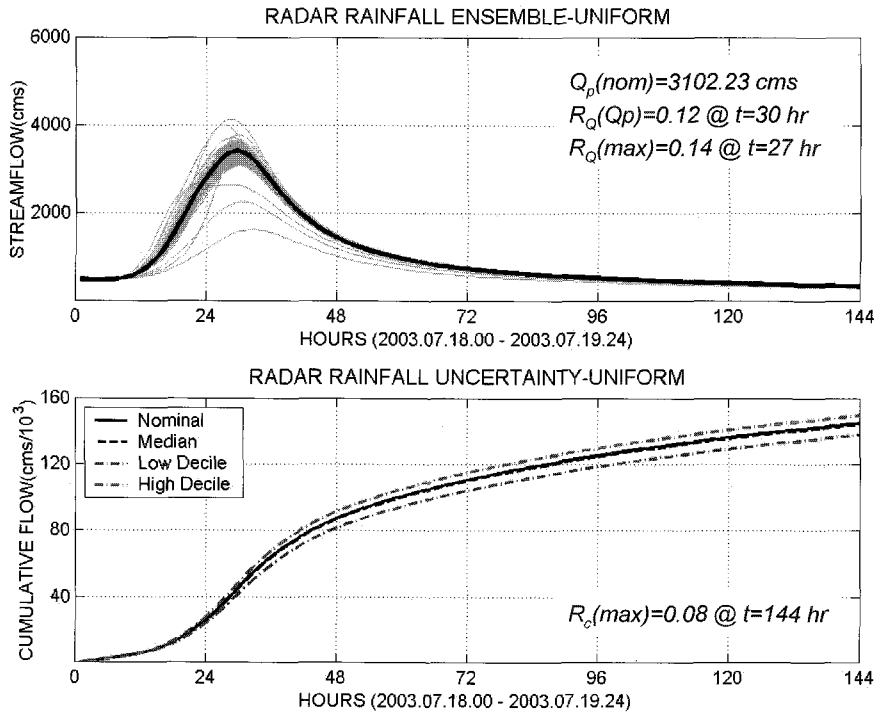


Fig. 4. Hourly ensemble-flow simulations and cumulative simulations for radar rainfall with uniform distribution

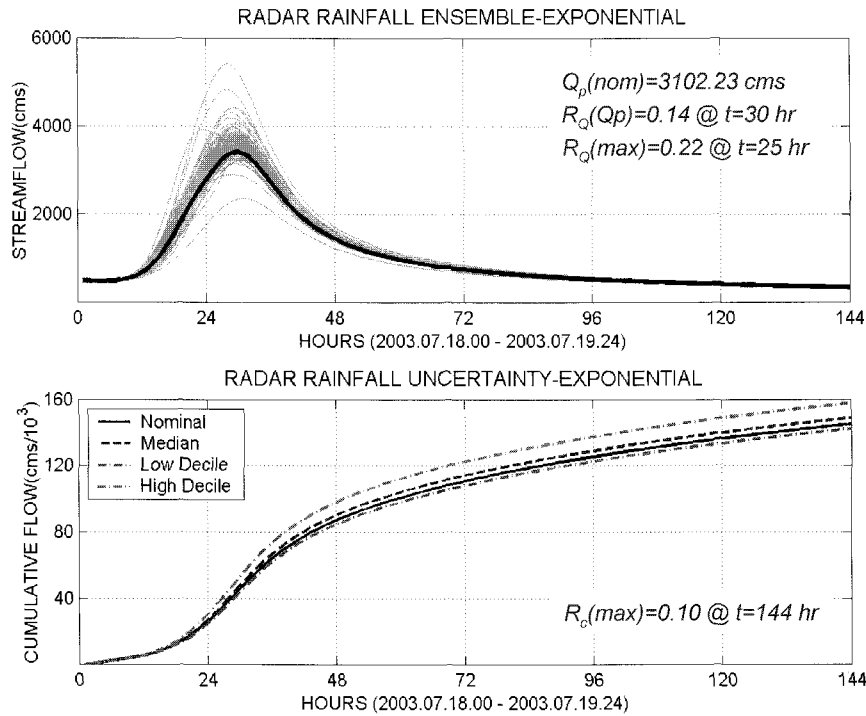


Fig. 5. As in Fig. 4 but for radar rainfall with exponential relationship

기준이 된 공칭개념의 초기 레이더 강우량에 대한 유량 결과(하단 그래프의 "Nominal")이고, 하단 그래프에서 "Median"은 각 시간대의 유량 앙상블 결과에서 크기순 누적확률 50%에 해당하는 누적 유량결과, "Low Decile" 및 "High Decile"은 각각 10% 및 90%에 해당하는 누적 유량결과이다.

Fig. 5는 동일 레이더 강우 입력자료를 이용하여 Eq. (11)과 같은 지수함수적 관계식을 가지도록 유량 앙상블을 생산한 결과로서 각 그래프의 범례는 Fig. 6과 동일하다. 각 그림에 표시된 R_Q 와 R_C 는 Eq. (12)와 같이 각 시간대의 유량 앙상블의 분산 정도를 측정된 값으로써, 균등분포 및 지수함수적 관계식에 대하여 동일 첨두 유량일 때의 R_Q 는 각각 0.12, 0.14로 계산되었고, R_Q 의 최대치 및 발생시간은 각각 0.14, 0.22와 27, 25hr로 검토되었다. 또한 R_C 의 최대치는 누적유량인 관계로 두 경우 모두 수문곡선 종결시점에서 발생하였고, 그 값은 각각 0.08, 0.10으로 계산되었다. 이러한 결과는 레이더 강우 입력 앙상블의 경우 동일 조건의 유출모형 유량결과에서 균등분포로 추정된 불확실성보다 지수함수적 관계식의 불확실성이 보다 높게 추정된 것으로 나타났으나, 이것은 기법상의 차이와 함께 각 기법에 부여된 분포형의 상하 범위가 그 주요 원인인 것으로 사료된다.

3.4 수문모형의 매개변수와 혼합된 불확실성 분석

상술한 레이더 추정강우의 불확실성과 함께 수문모형

자체의 불확실성을 검토하기 위해 TOPMODEL의 매개변수 중 민감도가 높은 지수형 감소상수 m 과 전도계수 T_0 에 대한 불확실성 분석을 수행한 후, 이를 레이더 입력자료와 혼합하여 강우 입력과 수문모형 매개변수에 대한 복합적 불확실성이 유출모형에 미치는 영향을 검토하였다. 여기서, 매개변수에 대한 앙상블 생산시 최적으로 추정된 각 소유역의 m 과 T_0 를 기준으로 균등분포 $\pm 50\%$ 의 범위로 매개변수 입력 앙상블을 생산하였다.

Fig. 6 및 7은 TOPMODEL의 매개변수(좌측그림) 및 레이더 입력강우와 혼합된 불확실성 해석결과(우측그림)를 나타낸 것이다. 매개변수 단독의 불확실성 해석의 경우 강우입력을 고정시킨 상태에서 최적 추정된 매개변수 값을 기준으로 유량 앙상블을 생산한 결과로 매개변수 m 의 불확실성 정도가 T_0 보다 높게 나타난 것으로 검토되었다. 또한 이들 매개변수를 혼합하여 불확실성 분석을 수행한 결과 매개변수 m 에 귀중되어 앞선 두 경우와 비교하여 수문모형의 오차가 보다 높게 발생하는 것을 살펴볼 수 있다. Table 4와 같이 유량 앙상블의 분산정도를 측정된 결과 첨두유량일 때의 R_Q 는 두개의 매개변수 및 혼합된 결과들에서 각각 0.37, 0.04, 0.40으로 계산되었고, R_Q 의 최대치의 경우 0.46, 0.05, 0.50, R_C 의 경우 0.30, 0.03, 0.33으로 나타나 그림에서와 마찬가지로 매개변수의 m 의 불확실성이 비교적 높게 나타났고, m 과 T_0 이 혼합된 불확실성이 가장 높게 측정되었다.

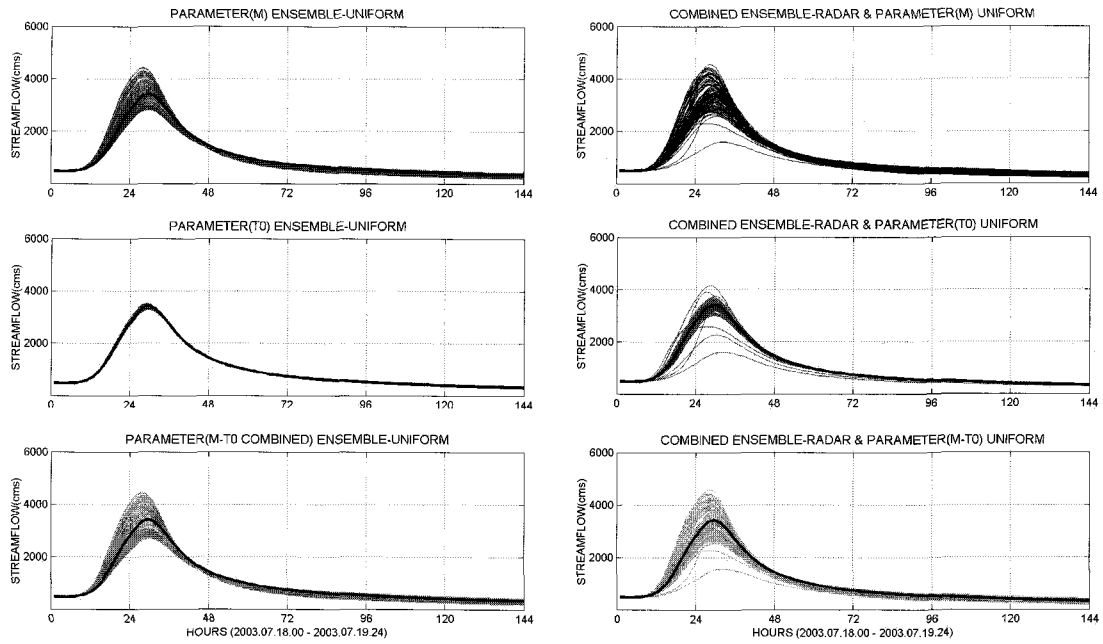


Fig. 6. Hourly ensemble-flow simulations for various uncertainty conditions. The nominal simulations is shown in black

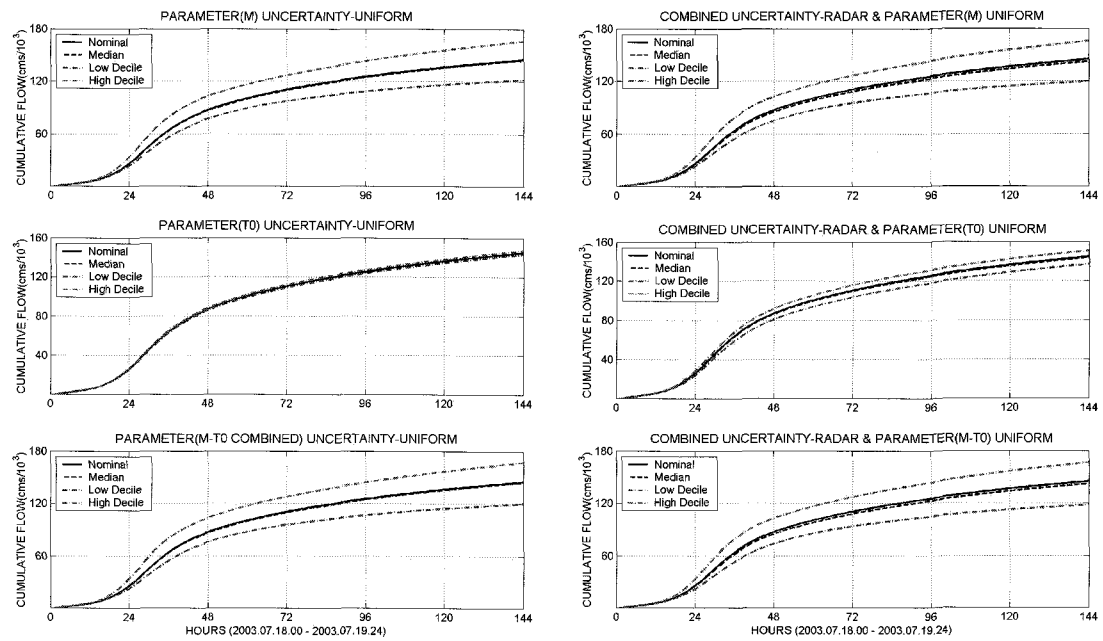


Fig. 7. Analogous to Fig. 6, but for cumulative hourly simulation

Table 4. Summary for the uncertainty analysis

Case		$R_Q(Q_p)$		$R_Q(\max)$		$R_C(\max)$	
		Value	Time(hr)	Value	Time(hr)	Value	Time(hr)
1	rdr(nor.)	0.12	30	0.14	27	0.08	144
2	rdr(exp.)	0.14	30	0.22	25	0.10	144
3	m	0.37	30	0.46	26	0.30	144
4	T_0	0.04	30	0.05	28	0.03	144
5	$m-T_0$	0.40	30	0.50	26	0.33	144
6	rdr-m	0.40	30	0.52	25	0.32	144
7	rdr- T_0	0.14	30	0.15	29	0.09	144
8	rdr-m- T_0	0.42	30	0.57	25	0.34	144

이상과 같은 레이더 강우 입력자료 및 유출모형 매개변수에 대한 불확실성을 바탕으로, 이들이 혼합된 조건으로 유량해석에 미치는 불확실성을 분석하였다. 본 사례연구를 위해 (a) 레이더 입력자료(균등분포)와 매개변수 m 의 혼합 불확실성; (b) 레이더 입력자료와 매개변수 T_0 의 혼합 불확실성; (c) 레이더 입력자료와 매개변수 m 및 T_0 가 복합적으로 혼합된 불확실성 분석을 수행하였다. Fig. 6 및 7에서 우측의 각 사례결과는 이들의 유량 양상 및 유량 누적치를 표현한 것이고, 불확실성의 정량적 수치는 Table 4와 같다. 각 경우에 대해 침투유량일 때의 $R_Q(Q_p)$ 는 0.40, 0.14, 0.42로 계산되었고, $R_Q(\max)$ 는 0.52, 0.15, 0.57, $R_C(\max)$ 는 0.32, 0.09, 0.34로 계산되어 레이더 강우 및 매개변수 단독의 불확실성보다 높게 나타났고 이들 값이 발생한 시간 또한 다양하게 변동함을 알 수 있다.

지금까지의 결과를 종합해 보면, 본 연구의 사례기간 동안 최적으로 추정된 레이더 강우 및 수문모형 매개변수를 대상으로 $\pm 50\%$ 균등분포 불확실성을 동일하게 수문모형에 입력하여 유량 양상부를 생산하고 검토한 결과, 레이더 강우가 가질 수 있는 불확실성이 수문모형의 매개변수 불확실성보다 덜 민감하게 영향을 미치는 것으로 검토되었다. 특히 매개변수 m 의 불확실성은 단독의 평가에서 가장 큰 민감도를 보이고, 레이더 강우와 매개변수(m, T_0)가 혼합된 불확실성이 유량모의에서 가장 큰 오차를 보일 수 있는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 기상 레이더 추정강우의 수문학적 활용성을 높이고자 관악산 레이더 자료로부터 소양강 유역에서 추정된 최적 레이더 강우로 수문모형의 적용성을 평가하고 이에 대한 불확실성이 수문모형에 미치는 영향을 모형의 매개변수와 연계하여 분석하였다. 본 연구에 사용된 준분포형 TOPMODEL은 고해상도 레이더 강우자료의 이점을 최대한 활용하기 위해 소양강 상류 유역을 9개의 소유역으로 구분하여 유량모의를 수행하였고, 불확실성 분석을 위해 Monte Carlo 난수발생 기법과 연계한 양상부 유량모의 기법을 구축하여 다양한 조건에 대한 수문모형의 반응을 검토하였다.

레이더 추정강우를 활용하여 소양강 유역의 유량계산을 수행한 결과 Marshall-Palmer 관계식의 레이더 추정강우의 과소모의로 인하여 유량 또한 과소모의되는 것으로 나타났고, 총 강우깊이에 따른 G/R 비율로 편차가 보정된 레이더 입력강우의 경우 관측유량과 비교하여 매우 잘 일치하는 것으로 나타나 레이더 추정강우의

수문학적 활용성이 매우 높은 것으로 판단되었다. 한편, 레이더 추정강우가 가질 수 있는 불확실성이 수문모형에 미치는 영향을 모형의 매개변수와 연계하여 분석하기 위해 2003년 7월의 사례기간 동안 최적으로 추정된 레이더 강우 및 수문모형 매개변수를 대상으로 $\pm 50\%$ 균등분포 불확실성을 동일하게 수문모형에 입력하여 유량 양상부를 생산하고 검토하였다. 그 결과 레이더 강우가 가질 수 있는 불확실성이 수문모형의 매개변수 불확실성보다 덜 민감하게 영향을 미치는 것으로 검토되었고, 특히 지수형 감소상수를 의미하는 TOPMODEL 매개변수 m 의 불확실성은 단독의 평가에서 가장 큰 민감도를 보이고, 레이더 강우와 매개변수(m, T_0)가 혼합된 불확실성이 유량모의에서 가장 큰 오차를 보일 수 있는 것으로 나타났다.

향후, 본 연구에서와 같은 단일 강우사상에 대한 적용결과를 확신하기 위해서는 강우사상 및 대상유역에 대한 다양한 사례연구를 통해 준분포형 TOPMODEL의 유량모의 특성을 고해상도 유역단위에서 파악하고, 최적 레이더 추정강우와 수문모형의 매개변수를 연계하여 유역크기에 따른 공간적 불확실성 분석연구가 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2003년도 건설핵심연구개발사업(03산학연C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과입니다.

참 고 문 헌

- 강원도 (1991a). 인북천하천정비기본계획, 보고서.
- 강원도 (1991b). 소양강하천정비기본계획, 보고서.
- 강원도 (2000). 소양강하천정비기본계획, 보고서.
- 배덕효, 김진훈, 권원태 (2000). "TOPMODEL의 단일 유역 홍수예보능에 관한 연구." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제1호, pp. 87-97.
- 배덕효, 김진훈 (2005). "준분포형 TOPMODEL 개발." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제10호, pp. 895-906.
- 배덕효, 김진훈, 윤성심 (2005). "레이더 추정강우의 수문학적 활용: (I) 최적 레이더 강우 추정." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제12호, pp. 1039-1049.
- 염경택, 이충기, 정구열, 정세웅, 김주환, 박우량, 정의용 (2000). "강화수문레이더를 이용한 임진강 유역

- 홍수에경보시스템 운영현황.” 한국기상학회 정기총회 및 가을 학술발표회 논문집, 한국기상학회, pp. 91-94.
- Beven, K., Quinn, P., Romanowicz, R., Freer, J., Fisher, J., and Lamb, R. (1994). *TOPMODEL and GRIDATB, A Users Guide to the Distribution Versions(94.03)*, CRES Technical Report TR110/94, Lancaster University, Lancaster, UK.
- Carpenter, T. M., and Georghakakos, 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, pp. 202-221.
- Carpenter, T. M., Georghakakos, 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. 254, pp. 169-193.
- Collinge, V. K., and Kirby, C. (1987). *Weather Radar and Flood Forecasting*, Wiley, New York, 296 p.
- Finnerty, B. D., Smith, M. B., Seo, D.-J., Koren, V., and Moglen, G. E. (1997). "Space-time sensitivity of the Sacramento model to radar-gage precipitation inputs." *Journal of Hydrology*, Vol. 203, pp. 21-38.
- HEC (1990). *HEC-1 Flood Hydrology Package. User's Manual*, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
- Koren, V. I., Finnerty, B. D., Schaake, J. C., Smith, M. B., Seo, D.-J., and Duan, Q. Y. (1999). "Scale dependencies of hydrology models to spatial variability of precipitation." *Journal of Hydrology*, Vol. 217, pp. 285-302.
- Krajewski, W. F., and Georghakakos, K. P. (1985). "Synthesis of radar rainfall data." *Water Resour. Res.*, Vol. 21, pp. 764-768.
- Krajewski, W. F., Lakshmi, V., Georghakakos, K. P., and Jain, S. C. (1991). "Monte Carlo study of a distributed catchment model." *Water Resour. Res.*, Vol. 27(11), pp. 119-128.
- Michaud, J., and Sorooshian, S. (1994). "Comparison of simple versus complex distributed runoff models on a mid-sized semiarid watershed." *Water Resour. Res.*, Vol. 30(3), pp. 593-605.
- Miller, J. E. (1984). "Basic concepts of kinematic wave models." *USGS Prof. Paper* 1302, pp. 29.
- Olivera, F., and Maidment, D. (1999). "Geographic information systems(GIS)-based spatially-distributed model for runoff routing." *Water Resour. Res.*, Vol. 35(4), pp. 1155-1164.
- Singh, V. P., and Frevert, D. K. (Eds.) (2002). *Mathematical Models of Small Scale Watershed Hydrology and Applications*, Water Resources Publications, LLC, Highlands Ranch, CO, 950pp.
- Wyss, J., Williams, E. R., and Bras, R. L. (1990). "Hydrologic modeling of New England river basins using radar rainfall data." *J. Geophys. Res.*, Vol. 95(D3), pp. 2143-2152.

(논문번호:05-110/접수:2005.07.27/심사완료:2005.10.21)