

# 저류함수모형 매개변수의 불확실성 평가

## Assessment of Parametric Uncertainty for Storage Function Method

이동희\* , 김진훈\*\*, 배덕효\*\*\*

Dong-Hee Lee, Jin-Hoon Kim, Deg-Hyo Bae

### 요 지

본 연구의 목적은 현 국내 홍수 예경보시스템에 사용되고 있는 저류함수모형의 매개변수 변화에 따른 유량해석의 불확실성을 평가하는데 있다. 적용 대상지점으로는 개진을 출구로 하는 낙동강 회천유역(747.5km<sup>2</sup>)이며 비교적 양호한 수문자료를 가지고 있는 단일 호우사상을 선정하였다. 불확실성 평가에 사용된 매개변수는 관측수문곡선을 비교적 정확하게 모의하는 경험적인 값을 기준으로 Monte Carlo 기법을 이용하여 각각의 매개변수(K, P, T<sub>i</sub>, f<sub>1</sub>, R<sub>sa</sub>)에 대한 정규분포를 가지는 100개의 난수를 발생시켜 저류함수 모형으로 모의되는 유량 앙상블을 평가하였다. 최적화된 매개변수를 이용하여 유량해석을 실시한 결과, 각각의 매개변수가 유출 해석에 미치는 영향을 파악할 수 있었으며, 그 중 저류상수 K와 포화누가우량 R<sub>sa</sub>가 불확실성이 제일 큰 매개변수로 나타났고, 이들의 혼합 앙상블 유출결과도 매우 큰 불확실성을 내포하는 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 불확실성 평가, Monte Carlo 기법, 저류함수 모형, 앙상블

### 1. 서 론

사회과학의 고속성장으로 인하여 무분별한 화석연료 및 천연자원의 소비로 여러 환경문제를 야기하고 있는 21세기에는 그에 따른 이상 기후변화 현상으로 인하여 홍수 및 가뭄의 빈도와 규모를 예측하기 힘든 상황에 직면해 있다. 특히 단기간에 내리는 집중호우는 인명피해 뿐만 아니라 막대한 재산피해를 줄 수 있는 반면에 수자원의 활용 측면에서 중요한 변수로 작용하는 양면성을 지니고 있다. 국내에서는 이러한 수자원의 효율적 관리와 대처를 위해 홍수예경보 시스템을 구축·운영하고 있으며, 현 홍수예경보 시스템에서는 1960년대 기무라가 제안한 유역 및 하도추적 저류함수모형을 사용하고 있다.

일반적으로 수문 유출모형은 강우-유출의 자연현상을 간략화 하여 모델링 하는 과정으로서 저류함수 모형의 경우 단일호우사상의 유출해석에 주로 사용된다. 하지만 모델링의 간략화 과정에서 생기는 여러 물리적 현상의 배제는 유출해석의 불확실성을 수반하게 되며, 이러한 불확실성은 저류함수 모형을 비롯한 모든 유출 모형의 정확도에 영향을 미치게 된다. 저류함수모형을 보다 정확하게 사용하기 위해서 유출에 큰 영향을 미치는 매개변수 산정방법에 많은 노력이 경주되어 왔는데, 기존의 경험적, 해석적 방법뿐만 아니라 박봉진 등(1997)은 유출에 큰 영향을 미치는 매개변수 추정방법에 유전자 알고리즘을 적용하였고, 이정규와 김한섭(2000)은 매개변수 산정에 최적화 기법으로 퍼지제어 기법을 도입하여 적용하기도 하였다. 따라서, 본 연구에서는 이들 산정된 매개변수의 부정확성이 유출해석에 미치는 불확실성을 평가하기 위해 관측수문곡선을 가장 잘 모의하는 최적매개변수를 기준으로 Monte Carlo 난수발생 기법을 이용하여 매개변수에 대한 정규분포를 가지는 유량 앙상블을 생산하여 각 매개변수의 민감도 분석과 함께 유출해석에 미치는 불확실성을 정량적으로 검토하고자 한다.

\* 정회원·세종대학교 토목환경공학과 석사과정·E-mail : imdonghee@paran.com  
\*\* 정회원·세종대학교 토목환경공학과 박사과정·E-mail : jhcnu@chol.com  
\*\*\* 정회원·세종대학교 물자원연구소·토목환경공학과 부교수·E-mail : dhbae@sejong.ac.kr

## 2. 유역 저류함수모형

저류함수모형은 하천 또는 유역에서의 유출응답을 계산하기 위해서 기무라(1961)에 의해 제안된 모형으로서 일본에서 주로 사용되어 왔으며, 국내에서는 한강의 홍수량 산정에 다년간 사용되어 왔고, 1987년부터는 낙동강, 금강, 섬진강, 영산강 유역에도 채택되어 사용되고 있다. 저류함수법의 가장 큰 특징으로는 자연 상태에서 발생하는 일반적인 홍수파의 비선형형성을 고려할 수 있고, 기왕의 수문자료로부터 매개변수를 산정할 수 있으며 수식이 간단하여 홍수유출을 쉽게 이해하고 적용할 수 있다는 점이다. 그러나 수문자료가 없거나 불충분할 경우 매개변수 추정에 어려움이 있으며, 사용자의 주관적인 판단이 작용할 수 있는 단점도 내포하고 있다. 소유역의 유출량을 계산하기 위한 기본개념은 다음과 같은 운동량 방정식과 연속방정식으로 표현된다(배덕효, 1997).

$$\frac{ds(t+T_l)}{dt} = r_{ave}(t) - q(t+T_l) \quad (1)$$

$$s(t) = kq(t)^p \quad (2)$$

여기서  $s(t)$ 는 특정시간  $t$ 에서 유역의 단위저류고(mm),  $q(t)$ 는 단위유출고(mm/h),  $k$ 와  $p$ 는 유역에서의 저류상수를 나타낸다. 이때 단위저류고와 단위유출고는 유역저류량과 유출량을 각각 유역의 면적 환산치(A/3.6)로 나눈 값을 의미한다.  $r_{ave}(t)$ 는 시간  $t$ 에서 유역의 평균강우량으로부터 계산되는 단위유입량(mm/h)으로서 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$r_{ave}(t) = \begin{cases} Rf_1 r_{ave}(t) & \sum r_{ave} < R_{sa} \\ r_{ave}(t) & \sum r_{ave} \geq R_{sa} \end{cases} \quad (3)$$

여기서  $\sum r_{ave}(t)$ 는 유출계산의 시작점에서 시간  $t$ 까지의 누가우량,  $R_{sa}$ 는 포화누가우량,  $f_1$ 은 초기유출률을 나타낸다. 저류함수모형을 사용하여 유효우량을 산정하기 위해서는 시간에 따라 변하는 유입계수  $f$ 를 산정하여야 하고, 강우초기에는 그림 1에서와 같이  $f_1A$ 의 면적(유출역)만으로 유출이 발생하며, 누가우량이 포화누가우량을 초과하면  $f=1$ (포화유출률)로 되어  $(1-f_1)A$  (침투역)에서도 유출이 발생한다는 가정하에서 홍수기간 종료시까지 유출역과 침투역으로 분리하여 계산한 후 이를 합산하여 얻은 직접유출량에 기저유출량을 합산하여 최종적인 유출량을 산정한다.

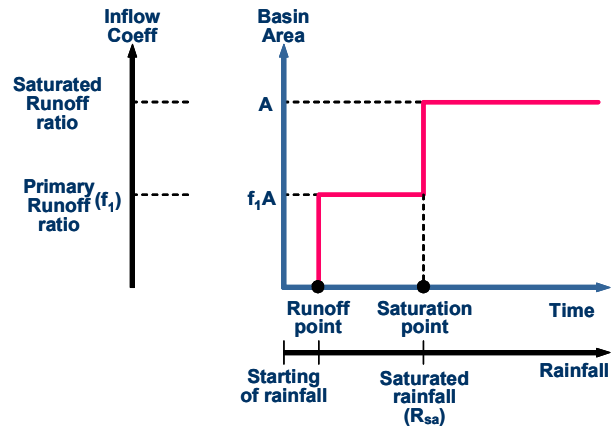


그림 1. 저류함수 유출해석 개념도

## 3. 사례연구

### 3.1 연구대상 유역 및 최적 매개변수 추정

본 연구에서는 저류함수모형의 매개변수 불확실성을 평가하기 위해 적용대상 유역으로 그림 2와 같이 개진 수위지점을 유역출구로 하는 회천유역을 선택하였다. 회천유역은 낙동강의 제 1지류로서 유역면적 747.5km<sup>2</sup>, 유로연장 62.9km, 표고차 974m로서 낙동강 하류에 위치하고 있으며, 유역내에는 야로, 고령, 지례, 웅양 및 합천 등의 총 5개 우량관측소가 존재한다. 저류함수 모형의 매개변수를 추정하기 위해 회천유역에 발생한 8개 호우사상을 선택하여 경험식과 최적매개변수 추정방법을 통해 모형에 포함된 매개변수(K, P, T<sub>1</sub> .

$f_1$ ,  $R_{sa}$ 들을 산정하였다(배덕호, 1997). 그림 3은 1983년 7월에 발생한 호우사상의 저류함수모형 유출량 모의치를 나타낸 것으로, 사용된 매개변수 값은  $K=37.0$ ,  $P=0.4365$ ,  $T_1=2.73$ ,  $f_1=0.035$ ,  $R_{sa}=18.616$  이다.

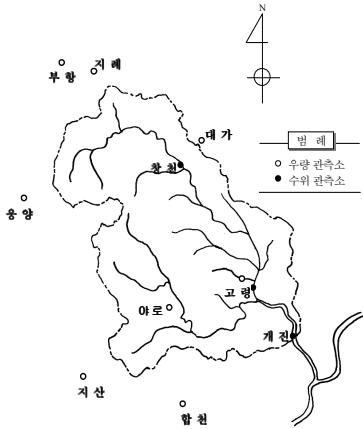


그림 2. 회천 유역도

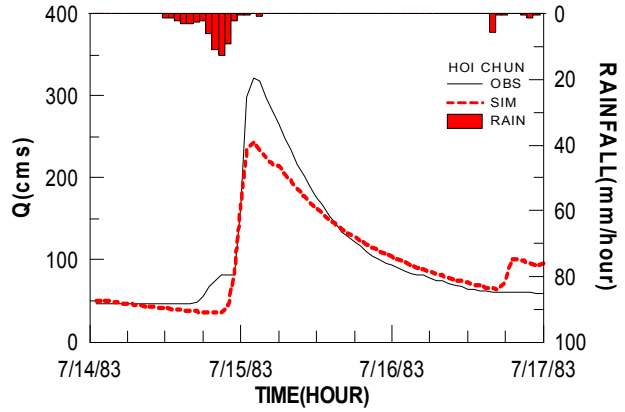


그림 3. 회천유역의 단일 호우사상 유출모의 결과

### 3.2 매개변수 불확실성 평가

상기 제시된 5개 매개변수를 대상으로 유출해석에 미치는 불확실성을 평가하기 위해 Monte Carlo 난수 발생 기법을 이용하여 최적 매개변수를 기준으로 정규분포를 가지는 100개의 유량 앙상블을 생산하였다. 각 매개변수는  $\pm 50\%$ 의 범위를 가지도록 난수를 발생시켰으며, 이들 100개의 유량 앙상블의 각 시간대별 변동폭을 측정하기 위해 식 (4)와 같이 확률적으로 90번째 및 10번째 발생할 수 있는 유량 앙상블간의 차이를 중앙값 유량 앙상블로 정규화하여 불확실성의 정량적 기준으로 평가하였다(Carpenter와 Georgakakos, 2004).

$$R_Q = \frac{Q_{90} - Q_{10}}{Q_{50}} \quad (4)$$

식 (4)와 같은 불확실성 평가방법은 서로 다른 유량 앙상블 시나리오들 사이에서 앙상블 변동폭을 측정하기 위한 매우 유용한 수단이 될 수 있고, 각 시간대별 앙상블 값의 빈도분포의 형상과는 독립적으로 계산할 수 있다.

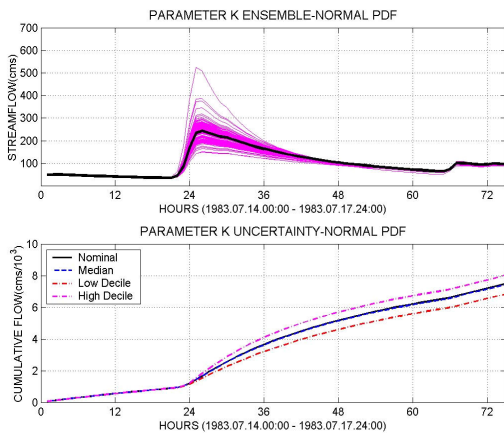


그림 4. 매개변수 K의 앙상블 유출결과

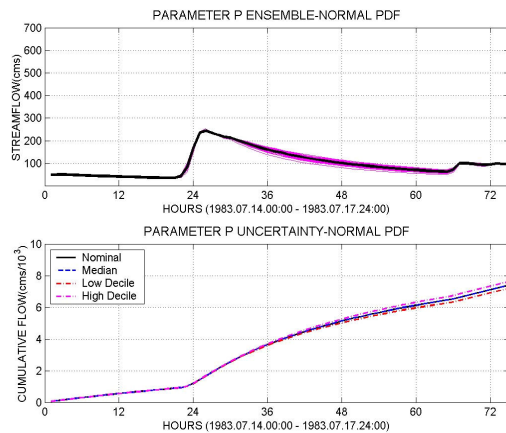


그림 5. 매개변수 P의 앙상블 유출결과

그림 4~8은 저류함수모형 각 매개변수에 대한 유량 앙상블 계산결과를 나타낸 것이다. 각 그림의 상단 그래프는 100개의 앙상블 시나리오와 최적추정 매개변수의 결과(진한 실선)를 동시에 나타낸 것이고, 하단 그래프는 초기 최적추정 매개변수 결과와 식 (4)에 사용된 유출량 값을 누적시켜 표현한 것으로 불확실성의 변동폭을 보다 쉽게 관별할 수 있다. 본 앙상블 결과에 따르면, 저류함수 모형의 5개 매개변수 중 유역 저류상수 K와 포화누가우량  $R_{sa}$ 가 제일 민감한 매개변수로 나타났고, 불확실성 또한 표 1에서와 같이 침투유량 일때의 변동폭( $R_Q^{Q_p}$ )이 0.42, 0.20, 최대 변동폭( $R_Q^{max}$ )은 0.44, 0.21, 누적우량에 대한 최대 변동폭( $R_C^{max}$ )은 0.16, 0.11로 가장 높게 계산되었다. 그림 9는 가장 민감한 매개변수 K와  $R_{sa}$ 가 혼합된 앙상블 결과를 표현한 것으로, 그 결과 또한  $R_Q^{Q_p}$ ,  $R_Q^{max}$  및  $R_C^{max}$ 가 각각 0.63, 0.66, 0.28로 계산되어 비교적 높은 불확실성을 내포할 수 있는 것으로 나타났다.

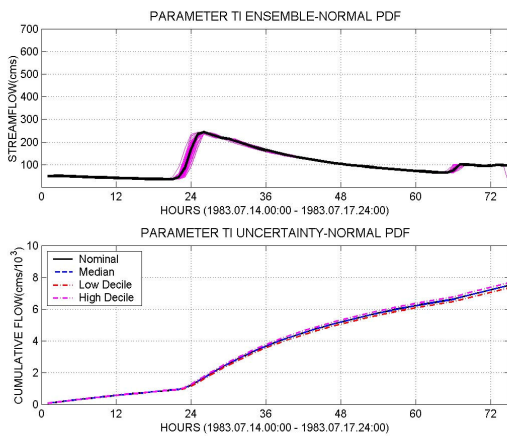


그림 6. 매개변수 T<sub>1</sub>의 앙상블 유출결과

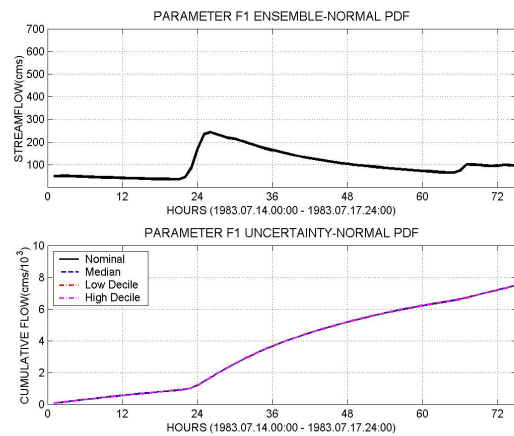


그림 7. 매개변수 f<sub>1</sub>의 앙상블 유출결과

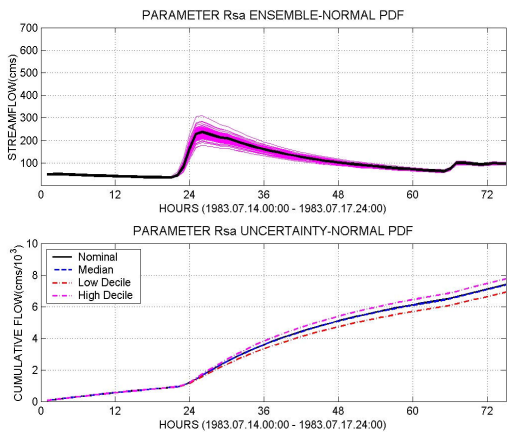


그림 8. 매개변수 R<sub>sa</sub>의 앙상블 유출결과

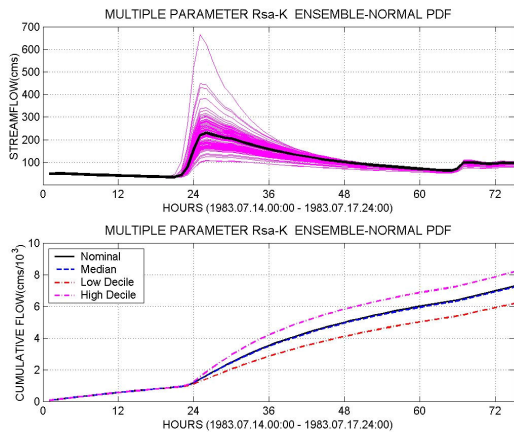


그림 9. 매개변수 K-R<sub>sa</sub>의 혼합앙상블 유출결과

그림 4~8과 같은 결과를 종합적으로 살펴볼 때, 회천유역의 경우 K가 유출해석에 가장 큰 불확실성을 나타내는데, 이는 타 매개변수보다 그 값의 비율이 가장 크기 때문에 발생할 수 있는 현상으로 사료되며,  $R_{sa}$ 의 경우 침투유량 도달시간과 총 유출량에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 한편, 초기유출률  $f_1$  값은 일반적으로 유출에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있으나 회천유역에 사용된  $f_1$  값은 비교적 작은 값으로 (0.0195 ~ 0.0525) 저류함수모형의 물리적 특성상 유출해석에 큰 영향을 미치지 못하였다. 이는 유역별로 유출

에 영향을 미치는 고유한 특성이 작용한 것으로 판단된다. 또한, T1은 수문곡선 형태변화에 영향이 거의 없고, 단순히 침투유량 도달시간에만 영향을 미치는 것으로 나타났으며, P는 유효강우량이 적은 관계로 유출해석에 큰 영향을 주지 않았다.

표 1. 매개변수 변화 따른 불확실성 산정치

매개변수	Nominal	$R_Q^{Q_p}$	$R_Q^{\max}$	$R_C^{\max}$
K	37.000	0.42	0.44	0.16
P	0.4635	0.02	0.16	0.06
T1	2.7300	0.02	0.35	0.04
F1	0.0350	0.01	0.01	0.00
R <sub>sa</sub>	18.016	0.20	0.21	0.11
K-R <sub>sa</sub>	-	0.63	0.66	0.28

#### 4. 결론 및 향후과제

간단한 연속방정식과 운동량방정식으로 구성된 저류함수모형은 유출 해석시 이해하기 쉽고 매개변수가 적어 적용이 간편한 장점이 있지만, 그로 인한 유출해석의 부정확성을 내포하는 것이 사실이다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 고려하여 현재 국내 홍수예경보 시스템에 사용되고 있는 저류함수모형의 매개변수가 가질 수 있는 불확실성을 평가하기 위해 Monte Carlo 기법을 이용하여 최적 매개변수에 대한 정규분포를 가지는 100개의 난수를 발생시켜 저류함수모형으로 모의되는 유량 앙상블의 불확실성을 평가하였다. 낙동강 회천 유역을 대상으로 연구를 수행한 결과 각각의 매개변수가 유출해석에 미치는 영향을 파악할 수 있었으며, 그 중 저류상수 K와 포화누기우량 Rsa가 불확실성이 제일 큰 매개변수로 나타났고, 이들의 혼합 앙상블 유출결과도 매우 큰 불확실성을 내포하는 것으로 나타났다. 향후, 매개변수의 물리적 적정 범위를 검토하여 호우사상과 유역면적에 따른 저류함수모형의 불확실성 연구가 필요할 것으로 사료된다.

#### 감 사 의 글

본 연구는 과학기술부 및 한국 과학기술기획평가원이 공동 주관하는 “통합홍수정보시스템의 개발 및 운영” 과제에 의해 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- 박봉진, 차형선, 김주환 (1997). "유전자 알고리즘을 이용한 저류함수모형의 매개변수 추정에 관한 연구". **한국수자원학회 논문집**, 제30권, 제4호, pp.347-355.
- 배덕효 (1997). "저류함수법을 이용한 추계학적 실시간 홍수예측모형 개발". **한국수자원학회 논문집**, 제30권, 제5호, pp449-457.
- 이정규, 김한섭 (2000). "홍수예보를 위한 통합저류함수모형의 퍼지제어(I)". **한국수자원학회 논문집**, 제33권, 제6호, pp689-699.
- Carpenter. T.M, Georgakakos. K.P. (2004). "Impacts of Parametric and radar rainfall uncertainty on the ensemble streamflow simulation of a distributed hydrologic model". *Journal of Hydrology* 298, pp. 202-221.
- Kimura T. (1961). "Run-off calculation method". Ministry of Construction and International Cooperation Agency.