Meta-Gaussian 방법을 이용한 강우-유출 모형에서의 불확실성 산정

김 병 식* / 김 보 경*** / 권 현 한***

Evaluation of the Uncertainties in Rainfall-Runoff Model Using Meta-Gaussian Approach

Byung Sik Kim* / Bo Kyung Kim*** / Hyun Han Kwon***

요약: 홍수나 가뭄 등 극한 사상을 예측하여 재해에 대비하거나 또는 수자원을 효율적으로 관리, 배분하기 위하여 강우-유출 모형이 이용되고 있다. 그러나 많은 수문학자들은 강우-유출 모형이 가질 수밖에 없는 불확실성에 대하여 언급하였다. 실제 유역에 내린 강우는 증발과 증산, 차단, 침투 등 여러 과정을 거쳐 유출로 이어지는데, 모형에서는 이러한 복잡한 물리적 과정을 단순화하여 표현하였으므로 불확실성이 반드시 존재할 수밖에 없는 것이다. 따라서 모형으로부터의 모의 결과를 신뢰할 수 있는지를 정량적으로 판단하는 과정이 이루어져야 한다. 본 논문에서는 현재까지 강우-유출 모형의 불확실성을 평가한 선행 연구 중 Montanari와 Brath(2004)가 제시한 Meta-Gaussian 기법을 이용하여 강우-유출 모형 모의 결과에 대한 불확실성을 검토하였다. 이 기법은 모형 오차의 확률 분포형으로부터 신뢰구간의 상한계와 하한계를 추정하는 방법으로 수문모형의 전역적 불확실성(Global Uncertainty)을 정량화할 수 있다. 본 논문에서는 동일한 강우사상에 대한 물리적 기반의 분포형 모형인 Vflo™모형과 개념적 준 분포형 모형인 HEC-HMS 모형으로부터 모의된 유출량을 Meta-Gaussian 기법을 적용하여 불확실성을 분석하였다.

핵심용어 : 불확실성, 강우-유출 모의, 신뢰구간, Meta-Gaussian approach

Abstract: Rainfall-runoff models are used for efficient management, distribution, planning, and design of water resources in accordance with the process of hydrologic cycle. The models simplify the transition of rainfall to runoff as rainfall through different processes including evaporation, transpiration, interception, and infiltration. As the models simplify complex physical processes, gaps between the models and actual rainfall events exist. For more accurate simulation, appropriate models that suit analysis goals are selected and reliable long-term hydrological data are collected. However, uncertainty is inherent in models. It is therefore necessary to evaluate reliability of simulation results from models. A number of studies have evaluated uncertainty ingrained in rainfall-runoff models. In this paper, Meta-Gaussian method proposed by Montanari and Brath(2004) was used to assess uncertainty of simulation outputs from rainfall-runoff models. The model, which estimates upper and lower bounds of the confidence interval from probabilistic distribution of a model's error, can quantify global uncertainty of hydrological models. In this paper, Meta-Gaussian method was applied to analyze uncertainty of simulated runoff outputs from VfloTM, a physically-based distribution model and HEC-HMS model, a conceptual lumped model.

Keywords: Uncertainty, Rainfall-Runoff simulation, Confidence bands, Meta-Gaussian approach

⁺ Corresponding author: winnerbk@noaa.co.kr

^{*} 한국건설기술연구원 수자원연구실 선임연구원

^{**} 노아솔루션(주) 기술연구소 대리

^{***} 한국건설기술연구원 수자원연구실 선임연구원

1. 서 론

강우-유출(Rainfall Runoff, R-R) 모형은 수자 원계획과 관리를 위해 가장 보편적으로 이용되는 도구로써 홍수, 가뭄 등과 같은 극한 사상의 예측 또는 물수지의 분석을 위해 이용되어 왔다. 최근 컴퓨터 계산 능력의 발달과 고해상도의 시공간적 수문자료 관측이 가능해 지면서 R-R 모형은 수문 학자들이 직면하고 있는 많은 문제들에 해답을 줄 수 있는 매력적인 도구가 되었다. 지난 수십 년간 R-R 모형에 대한 연구와 노력이 집중되어 왔음에 도 불구하고 R-R 모의와 관련된 통계학적으로 유의한 불확실성은 여전히 해결하지 못하는 문제 로 남아있다. 한편, 대부분의 수문학자들 및 수공 기술자들은 R-R 모형을 이용하여 점 추정치 (point estimation)만을 제공해야 한다고 생각해 왔다. 왜냐하면 대부분의 수자원 실무에서 원하는 것은 R-R 모의치의 불확실성을 정량화하는 것 보 다는 최적치를 찾는데 전념해 왔기 때문이다 (Brath와 Rosso, 1993; Singh과 Woolhiser. 2002).

R-R 모형의 불확실성은 여러 방법을 이용하여 평가될 수 있으며 어떠한 방법을 이용하여 불확실 성을 평가할 지는 R-R 모형의 각 특성에 따라 결 정된다. 불확실성 방법을 평가하기 위한 첫 번째 방법은 확률분포형을 가정하여 불확실성을 평가하 는 것으로 최적 모의치(optimal simulation)를 따 라 그에 해당되는 신뢰구간(Confidence Interval, CI)을 확률적으로 산정하는 것이다(Montanari 등, 1997). 두 번째 방법은 과거 관측 유량을 재현하 는데 있어 발생된 R-R 모형의 오차 시계열의 통 계학적 특성을 분석하여 불확실성을 평가하는 것 이다. 이 방법은 통계 분야(Yar와 Chatfield, 1990)와 수문 분야(Loukas 등, 2002)에서 이미 여러 연구자들에 의해 시도된 바가 있다. 세 번째 방법은 Monte Carlo 기법(Metropolis, 1987) 등 과 같이 재 표본추출 기법을 이용하여 반복 모의 를 하는 것으로 방법론에 따라 크게 두 가지로 구 분할 수 있다;①Important sampling(Kuckzera 와 Parent, 1998) ② Generalized Likelihood Uncertainty Estimator(GLUE)(Beven과 Binly, 1992). 한편, R-R 모형의 불확실성을 산정하는 도구로는 NLFIT(Kuczera, 1994), PEST (Brockwell과 Davis, 1987), BaRE(Thiemann 등, 2001) 등이 있으며, 최근에는 Metropolis Monte Carlo Markov Chain(MCMC) 기법과 기존 SCE(Shuffled Complex Evolution)의 장점을 조합하여 최적의 매개변수 집합(set)을 추정한 후이에 따른 신뢰구간을 산정하는 SCEM-UA 기법 (Vrugt 등, 2003)이 널리 이용되고 있다.

Melching 등(1991)은 HEC-1과 RORB 모형 (Laurenson과 Mein, 1983)의 검정을 통하여 FOSM(First Order Second Moment)과 MCS (Monte Carlo Simulation) 방법으로 불확실성 분 석을 수행하였고, Kuczera(1994)는 한 호우 사상 으로부터 얻은 모형 매개변수는 다른 호우 사상으 로부터 얻은 매개변수와 통계적으로 일치하지 않 는 부분에 대한 원인을 유역 강우량의 오차 또는 모형의 단순화로 설명하였다. 그리고 이를 보정하 기 위하여 모형 매개변수의 평균과 공분산 행렬을 Bayesian 방법으로 유도하였다. Beven과 Binley (1992)는 MCS기법을 적용하여 모형 검정과 신뢰 성 추정을 위한 절차인 GLUE를 개발하였으며 이후, Kuczera와 Parent(1998)는 수문모형 매개 변수의 불확실성을 평가하기 위하여 GLUE에 포 함된 Importance Sampling 방법과 매개변수 불확 실성을 해석하는 Metropolis algorithm의 두 가 지 방법을 적용하였다. Hann 등(1998)은 매개변 수의 불확실성을 위하여 MCS 기법을 이용하였고 입력 매개변수의 평균과 분산을 정확하게 추정하 는 것이 실제 매개변수의 확률분포를 추정하는 것 보다 더 중요하다고 지적하였다.

국내에서는 김문모 등(1992,1993)이 수문모형에 적용되는 신뢰도 분석방법을 소개하였으며 한건연 등(1995)은 하천수질 변동 예측을 위한 추계학적 수질해석 모형을 개발하기 위하여 MCS기법을 이용하였다. 오규창(1998)은 수문모형의불확실성을 매개변수 추정을 통하여 연구하였는

데, 6개의 검정절차로부터 모형의 적합성과 매개 변수 추정의 결과 분석 및 잔차 계통오차 분석을 실시하는 오차분석과 매개변수의 민감도 영향성 분석을 수행하였다. 권현한과 문영일(2004)은 HEC-1 모형에 대해서 Latin Hypercube Sampling 기법을 적용하여 확률분포형으로부터 매개변수들을 모의 발생시켜 불확실성을 검토 하 였다.

본 논문의 목적은 Montanari와 Brath(2004)에 의해 제시된 Meta-Gaussian 기법을 이용하여 강우-유출 모형의 불확실성을 정량화하는 것이다. 강우-유출관계를 모의하기 위해서, 최근 들어 홍수유출을 위해 사용이 증가되고 있는 강우-유출모형으로 물리적 기반의 분포형 모형인 VfloTM모형과 개념적 준 분포형 모형인 HEC-HMS 모형을 선택하였으며, 대상유역은 비교적 양질의 과거 수문기상자료와 유출량자료를 보유하고 있는 중랑천 유역을 선정하여 신뢰구간 95%에서의 불확실성 분석결과를 비교, 검토하였다.

2. 강우-유출(R-R) 모형의 불확실성의 원인

R-R 모형의 모의에 영향을 미치는 불확실성은 앞에서 언급한 바와 같이 여러 원인에 의해 발생하며 이러한 각각의 불확실성은 상호영향을 미치게 된다. 본 절에서는 이러한 원인들을 살펴보고, 어떻게 전역적으로 불확실성을 산정할 것인가에

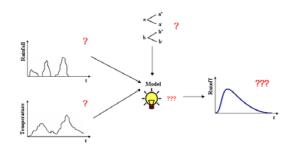


Fig. 1. Conceptual diagram for uncertainty associated with Rainfall-Runoff Model

대하여 논의하였다. Fig. 1은 R-R 모형에서 불확실성이 발생할 수 있는 원인을 개념적으로 나타낸 것이며, R-R 모형에서 각 요소별 불확실성 확률적 분포에 대한 설명을 Fig. 2와 같이 표현하였다.

2.1 관측 입력 자료의 불확실성

R-R 모형의 잠재적 불확실성 원인 중의 하나 는 모형의 입력 자료인 온도, 강수량 등과 같은 관측 또는 추정된 수문기상 자료와 모형의 입력 매개변수로 쓰이는 초기 토양 습윤량, 적설량 등 과 같이 모형의 초기 상태를 나타내는 값 등에 있 다. 여기서 강우자료의 불확실성은 융설이 유출정 보에 중요한 영향을 미치는 유역을 제외한다면 일 반적으로 온도자료 보다 R-R 모형에 더 큰 불확 실성에 영향을 미치게 된다. 입력 자료가 R-R 모 형에 미치는 불확실성을 정량화할 수 있는 적절한 방법은 최적의 값을 제시하는 것보다는 무작위적 변수(random variable)로써 확률분포로부터 입력 자료를 추정하여 모형에 제공하는 것이다. 일단 입력 자료의 확률분포형을 알게 되면, 유출 모의 결과에 포함된 불확실성을 유도할 수 있다. 강우-유출 모의 시 관측 자료를 입력 자료로 이용하면 그 값이 매우 정확하다고 가정하며 입력 자료의 불확실성을 무시하는 것이 일반적이다. 그러나 이 것은 지점 강우 측정의 오차와 점 강우 관측에서 유도된 불완전한 해상도에 대한 공간강우의 불확 실성이 무시되는 것이다. 다시 말하면 입력 자료 가 완벽하다는 가정은 그로 인해 초래될 수 있는

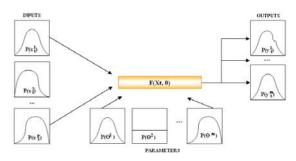


Fig. 2. Probability density function of uncertainties of Rainfall-Runoff Model at each level

불확실성들을 무시하게 되는 것이다. R-R 모형 유출 예측에 예측 강우를 입력 자료로 이용하는 경우, 입력 강우의 불확실성을 정량화하는 것은 매우 중요한 과정이 되며 이 때, 미래의 강우 입력 자료는 점 추정 값보다는 앙상블을 이용하는 확률분포형의 형태로 입력된다. NWS(National Weather Service)는 확률적 QPF(Quantitative precipitation Forecasting)로써 강우 예측치를 제공하고 있다(Seo 등, 2000).

2.2 매개변수의 불확실성

R-R 모형의 매개변수는 일반적으로 특정기간 의 관측 유량자료를 대상으로 모의 유량시계열 자 료가 관측 유량 시계열 자료를 잘 재현할 수 있도 록 매개변수를 최적화함으로써 보정이 이루어진다 (Brath와 Rosso, 1993). 그러므로 매개변수의 보 정을 위해 어떤 기간의 유량자료를 사용했는지 또 는 보정기간에 사용한 관측유량의 기록이 얼마가 되는지에 따라 매개변수의 불확실성에 영향을 미 치게 된다. 즉, 매개변수 추정 시 각 사상들에서 추정된 매개변수가 서로 다르게 되며 일반적으로 이를 평균하여 사용하고 있다. R-R 모형의 최적 매개변수 집합(set)은 시행착오 또는 자동화 기법 에 의해 목적함수를 최적화함으로써 찾을 수 있 다. 그러나 이러한 최적화 기법들은 추정된 매개 변수의 신뢰구간(Confidence Interval, CI) 정보 를 제공할 수 없기 때문에 이 방법은 GLUE (Beven과 Binly, 1992) 등과 같은 몬테카를로 방 법을 이용하여 R-R 모의를 반복함으로써 CI를 추 정하게 된다.

2.3 모형 구조의 불확실성

R-R 모형 구조에 의한 불확실성은 유역의 강우-유출 관계를 수문모형으로 표현하는 과정에서 실제 수문순환을 완벽히 구현하지 못하는 데에서 비롯된다. 모형 구조의 불확실성은 비록 특정 R-R 모형의 참 입력 자료와 매개변수 값이 알려져 있다고 하더라도 모의 결과는 정확하지 않을

수 있다는 것이다. 모형 구조의 불확실성은 입력 자료와 매개변수의 불확실성이 없을 때 관측 유량 과 모의 유량의 오차의 통계적 특성을 추정함으로 써 가능하다.

3. Meta-Gaussian 기법을 이용한 R-R 모형의 불확실성 분석

3.1 Meta-Gaussian 기법의 이론

지금까지 R-R 모형의 불확실성은 여러 방법을 이용하여 추정되어 왔다. 그러나 GLUE 등을 포함한 대부분의 불확실성 분석 방법들은 R-R 모형의 매개변수가 유출모의에 미치는 영향을 분석한 것들이며, R-R 모형 모의의 전역적 불확실성 (Global uncertainty) 분석을 정량화하지는 못하였다.

최근 Montanari와 Brath(2004)는 Meta-Gaussian 기법에 의해 R-R 모형의 불확실성을 정량화하는 방법을 제시하였다. 이들은 이탈리아 볼로냐 대학에서 개발한 AFFDEF 분포형 모형과 Xinanjiang 모형에서 파생된(Zaho 등, 1980) ADM 집중형 모형(Franchini, 1996)에 Meta-Gaussian 방법을 적용하여 불확실성을 평가하였다. 대상유역은 이탈리아 북부에 위치한 Samoggia River 로 선정하였으며 보정 및 검증 기간은 1994-1995년과 1996-1997년으로 구성하였다. 각 모형 모의 결과에 대한 불확실성 분석 결과 분 포형 모형의 경우 특히 보정보다 검증 기간에서의 불확실성이 큰 것으로 나타나 집중형 모형과 차이 를 보였으며, 이에 대하여 R-R 모형 보정에서 한 정된 자료의 이용에 따른 결과로 언급하였다. 한 편, 이들 모형은 특정 강우 사상(06/26/1995)에 서 첨두치의 과소·과대추정으로 95% 신뢰구간을 벗어나는 결과를 보이기도 하였다. 하펶. Montanari와 Brath(2004)가 제안한 방법의 목적 은 R-R 모형에 의해 모의된 유량의 조건부로써 모형 오차의 확률 분포형을 추정하는 것으로 일단 오차의 확률 분포형이 추정이 되면, 주어진 유의

수준에서의 R-R 모의결과 CI의 상한계와 하한계를 추정할 수 있다. Meta-Gaussian 기법을 이용하여 R-R 모형의 불확실성을 정량화하는 방법은 다음과 같이 수식으로 나타낼 수 있다. Fig. 3은 Meta-Gaussian 기법의 개념도를 나타낸다.

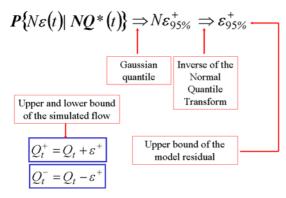


Fig. 3. Basic concept of Meta-Gaussian Approach

Meta-Gaussian 방법은 모의 유출량에 대한 절 대 모형 잔차 확률 분포를 추정하여 이를 정량화 하는데, 이를 위하여 모의 유출량과 잔차 두 자료 모두 Gaussian 분포(Kelly와 Krzysztofowicz, 1997)를 따른다고 가정하게 된다(여기서 잔차란, 관측치와 모의치의 차를 의미한다). 먼저 유출 자 료와 잔차에 대한 표준정규변환(Normal Quantile Transform, NQT) 과정이 요구된다. 홍수예보 불 확실성 평가를 위한 새로운 접근 방법을 제시한 유럽의 한 보고서(Report on the new methodological approach to assess flood forecasting uncertainty, 2000)에서는 표준정규 변환이 Meta-Gaussian 방법의 핵심이라고 언급 하여 이 과정이 중요함을 강조하였다. 한편, 유출 자료와 잔차의 상관관계를 구현하기 위하여 이변 량 Gaussian 분포를 도입하여 표준유량에 따른 잔차의 조건부 확률을 추정하게 된다. 이변량 표 준정규변환은 표준정규분포 Q와 이변량 분포의 역함수로 정의(Kelly와 Krzysztofowicz, 2000)되 며 이에 대한 자세한 설명은 Moran(1970), Hosking과 Wallis(1998)을 참고할 수 있다. 이들 과정을 단계별로 나타내면 다음과 같다.

- ① $Q^* = (t)$ 을 표준정규변환(NQT)한다.
 - 관측치 Q(t)의 경험적 누가빈도 F(Q)을 계산한다.
 - 각 F(Q)의 $NQ^{*}(t)$ 을 계산한다.
- ② $\epsilon(t)$ 을 표준정규변환(NQT) 하여 $N\epsilon(t)$ 를 계산한다.
- ③ $P\{N\epsilon(t)|NQ^*(t)\}$ 의 조건부 확률분포형이 이변량(bivariate) Gaussian 분포라고 가정한다.

$$P\{|\epsilon(t)||Q^*(t)\}\tag{1}$$

$$\epsilon(t) = |Q(t) - Q^*(t)| \tag{2}$$

여기서

Q(t) ; 관측 유량

 $Q^*(t)$; 모형에 의해 모의된 유량 $\epsilon(t)$; R-R 모형의 잔차 시계열

이변량 Gaussian 분포를 이용한 유량에 대한 잔 차에 조건부 확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P\{N\epsilon(t)|NQ^*(t)\}$$

$$= (2\pi\sigma_{N\epsilon}\sigma_{NQ^8}\sqrt{1-\rho^2})^{-1} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \cdot \left[\left[\frac{N\epsilon(t)-\mu_{N\epsilon}}{\sigma_{N\epsilon}}\right]^2 - 2\rho\left[\frac{N\epsilon(t)-\mu_{N\epsilon}}{\sigma_{N\epsilon}}\right] \cdot \left[\left[\frac{NQ(t)-\mu_{NQ}}{\sigma_{NQ}}\right] + \left[\frac{N\epsilon(t)-\mu_{N\epsilon}}{\sigma_{N\epsilon}}\right]^2\right]\right]$$

$$(3)$$

여기서 μ_N ; $N\epsilon$ 의 평균

 $\sigma_{N\epsilon}$; $N\epsilon$ 의 표준편차

 μ_{NQ} ; NQ의 평균

 σ_{NQ} ; NQ의 표준편차

위의 관계를 간략히 나타내면 다음과 같다. 여기서 N은 2변량 정규분포를 나타낸다.

$$P\{N\epsilon(t)|NQ^*(t)\} = N(\mu^*, \sigma^*) \tag{4}$$

$$\mu^* = \mu_{N\epsilon} + \rho (\sigma_{N\epsilon} / \sigma_{NQ}) (NQ^*(t) - \mu_{NQ^*})$$
 (5)

$$\sigma^* = \sigma[N\epsilon(t)|NQ^*(t)] = [\sigma_{N\epsilon}^2(1-\rho^2)]^{0.5}$$
 (6)

3.2 대상유역 및 분석에 이용한 R-R 모형

본 논문에서는 R-R 모형의 불확실성을 평가하기 위하여 한강 제1지류인 중랑천 유역을 대상유역으로 하였다. 중랑천 유역은 경기도 양주군 주내면 산북리에 위치한 불곡산에서 발원하여 의정부시를 지나 남류하고 서울시 성동구 사근동에 이르러 유역의 최대 지류인 청계천에 합류하여 한강본류에 유입한다. 서울시와 의정부시의 3/4이상을 점하고 있는 고밀도 도시지역으로 농경지는 상류부에 다소 분포하여 대표적인 도시유역으로 설명할 수 있다(건설교통부, 2007). Fig. 4는 중랑천 위치 및 유역도를 나타낸다.

3.2.1 분포형 모형(spatially distributed model), Vflo™ 모형

본 논문에서 이용한 Vflo[™]모형은 미국 Oklahoma 대학에서 개발한 물리적 기반의 분포형 모형으로 흐름방향(Flow Direction), 경사도 (slope), 조도계수(Roughness), 수리전도도 (hydraulic conduction)를 포함한 침투 요소가 입력 자료로 요구된다. 이들은 각 유역의 지형자료에서 추출할 수 있으며 본 논문에서는 국가수자원관리 종합정보 홈페이지(WAMIS)에서 제공하는수치고도자료, 토지이용도, 토양종류별 토양도, 토양 배수분포별 토양도 자료를 사용하였으며 이들자료를 입력 자료로 활용하기 위하여 GIS 프로그램을 사용하여 일련의 과정을 수행하였다. 이 때, 컴퓨터의 계산 용량과 계산 시간의 효율성을 고려하여 중랑천 유역의 DEM 크기를 300m로 재구성하여 적용하였으며, 침투율을 산정하기 위하여 Green-Ampt 방법을 적용하였다. Vflo™모형의입력 자료 변환 과정을 포함한 자세한 과정은 홍준범 등(2006)을 참고할 수 있다.

3.2.2 집중형 모형(lumped model), HEC-HMS 모형

본 논문에서는 집중형 모형의 불확실성을 분석하기 위하여 HEC-GeoHMS를 이용하였다. 먼저 중랑천 유역을 13개의 소유역으로 분할한 후 중 랑천 수위관측소인 신곡, 우이, 중랑교에서의 유출량을 산정하기 위하여 16개의 소유역으로 구성하였다. HEC-GeoHMS를 이용하여 나타낸 중랑천 유역의 입력결과는 Fig. 5(b)에 나타내었다.한편, 유출량과 홍수추적을 산정하기 위하여 각각 Clark 단위도법과 Muskingum 방법을 사용하였으

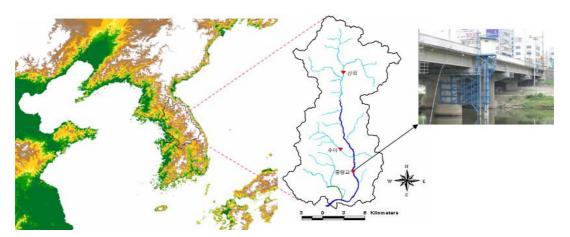
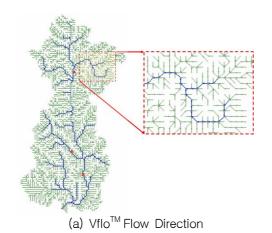
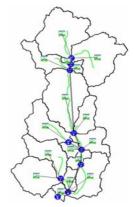


Fig. 4. Map showing Jungrang Watershed for case study(홍준범 등, 2006)





(b) Watershed schematic for HEC-HMS

Fig. 5. Graphical representation of input layer for a) Vflo™ rainfall-runoff model and b) HEC-HMS(홍준범 등, 2006)

며 강우의 손실 분석을 위하여 SCS 방법을 사용하였다. Clark 단위도의 매개변수는 도달시간 T_c 와 저류상수 R 등으로 구성되며 본 논문에서는 도달시간과 저류상수를 산정하기 위하여 각각 식 (7)과 식(8)의 Rziha 경험공식과 Sabol 공식 (Sabol, 1998)을 사용하였다.

$$Tc = 0.0139 \frac{L}{S^{0.6}} \tag{7}$$

여기서, T_c 는 도달시간(hr), L은 유로연장(km), S 는 평균경사이다.

$$\frac{T_c}{R} = 1.46 - 0.0876 \frac{L^2}{A} \tag{8}$$

여기서, T_c 는 도달시간(hr), L은 유로연장(km), A는 유역면적(km)이다.

4. 적 용

4.1 R-R 모형의 매개변수 보정 및 검증

중랑천 유역에 위치한 상계, 송정, 우이, 의정부, 장암, 퇴계원과 진접의 총 7개 관측소의 30분 강우 자료를 각 모형의 입력 자료로 이용하였다.

분포형 모형인 Vflo™ 모형은 앞서 지형자료와 같이 300m 격자에 크리깅 기법을 적용하였으며, 집중형 모형인 HEC-HMS는 각 관측소를 이용하여 구성된 Thiessen 망에 따라 면적강우량을 산정하였다. 각 모형에 입력된 강우사상은 2003년 7월 21일 ~ 7월 23일, 8월 19일 ~ 8월 20일, 8월 23일~8월 25일, 9월 18일 ~ 9월 20일로 총 4개이며, 본 논문에서 이용한 강우사상(4개)은 홍준범등(2006)이 분포형 수문모형의 정확성 평가 연구에서 사용한 자료와 동일하다.

앞서 제시한 2003년 4개 강우사상에 대한 중 당천 유역의 유출량을 모의하기 위하여 매개변수를 보정한 Vflo™ 모형과 HEC-HMS에 각각 입력하였다. 김병식 등(2007)은 Vflo™ 모형의 주요매개변수에 대한 민감도 분석을 실시하였으며, 본논문에서는 이 내용에 근거하여 여러 매개변수 중수문곡선 전체 유출량에 영향을 미치는 수리전도도와 첨두시간에 영향을 미치는 조도계수를 조정하였다. 한편, HEC-HMS의 경우 매개변수 보정에 CN, 도달시간과 저류상수를 이용하였다. 매개변수 보정에 사용된 강우 사상은 2003년 8월 23일 강우 사상이며, 매개변수를 보정한 후 나머지 3개의 호우사상에 대하여 검증(verification)하여그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6 (a)에서보는 것처럼 매개변수 보정 결과 첨두치와 도달

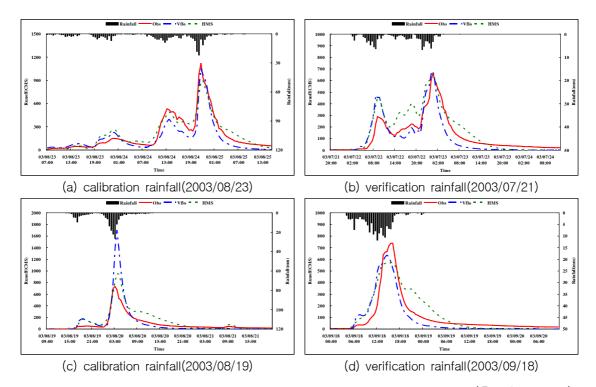


Fig. 6. Comparison of rainfall runoff model according to the proposed models(홍준범 등, 2006)

시간 측면에서 볼 때, Vflo[™] 모형에 의한 결과가 HEC-HMS에 의한 결과보다 더 정확한 것으로 나타났으며 이와 같은 결과는 8월 19일 강우 사상(Fig. 6 (c))을 제외한 7월 21일(Fig. 6 (b))과 9월 18일(Fig. 6 (d)) 검증 사상에서도 각각 확인할수 있었다.

한편, Fig. 6 (c) 8월 19일 강우 사상의 경우 매개변수 보정 전보다 보정 후에 관측치와의 오차가 더 컸으며 이는 매개변수 보정 전 모의된 첨두 치가 실제 관측치와 거의 비슷한 정도를 유지하였기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 매개변수 보정에 사용된 8월 23일 강우 사상의 첨두치와 전체 유출용적이 관측치보다 작게 모의됨에 따라 이들 요소를 관측치와 유사하도록 매개변수가 보정되어나타난 결과인 것으로 판단된다.

4.2 Meta-Gaussian 기법을 이용한 R-R 모형 의 불확실성 산정 및 비교 분석

본 논문에서는 3.1에서 언급한 Meta-Gaussian

기법을 이용하여 분포형과 집중형 모형에 의해 모의된 보정 및 검증 기간 강우사상으로부터 모의된 유출 결과에 대한 불확실성 분석을 실시하였다. Fig. 7부터 10은 보정 기간에 대한 각 R-R 모형별 모의 결과를 분석한 것으로 각각 관측 유출량과 모의 유출량의 산점도(Scatter Plot), 확률밀도함수(Probability Density, Function, PDF), 모형잔차의 Gaussian 변환 결과와 Gaussian 공간 내에서 신뢰구간 산정을 위한 회귀분석 결과를 나타낸 것이며 각 Fig.에서 (f)는 식 (1)~식 (6)을 이용하여 신뢰수준 95%에서의 불확실성 범위 산정하여 모의 유출량과 함께 도시한 것이다.

Fig. 7에는 2003년 8월 23일 강우 사상에 대하여 분포형 모형 VfloTM을 적용하여 추정된 불확실성 결과를 나타내었다. Fig. 7(d)에서 표준화된 유출량과 잔차와의 상관도를 보면 전형적인 2 변량 Gaussian의 거동을 따르고 있으며, 이는 Meta-Gaussian 방법론의 적합성을 시사해주고있다. 이는 다시 한 번 Fig. 7(e) Q-Q plot을 통

해서 Gaussian 분포의 기본가정이 입증되고 있다. Fig. 7(f)를 통해 알 수 있듯이 모의치가 신뢰구간의 범위 내에서 거동하고 있으며 보정 시에는 모의 유출량의 값이 유의하다는 것을 확인할 수 있었다.

집중형 모형 HEC-HMS를 통해 추정된 불확실 성 결과를 Fig. 8에 나타낸 결과, 앞서 추정된 $Vflo^{TM}$ 모형과 유사한 결과를 나타내고 있으며.

Fig. 8(e)에서 보듯이 Meta-Gaussian 모형의 기 본가정을 만족하면서 모의치가 신뢰구간 내에 위 치하고 있다.

그러나 검증기간의 강우 사상에 대한 불확실성 분석을 실시한 결과, 분포형 모형과 집중형 모형 이 다른 결과를 보여줌을 확인할 수 있었다. 기본 적으로 집중형 모형은 Fig. 10(b)에서 보듯이 실 측자료에 비해 상대적으로 평평한 자료 분포를 보

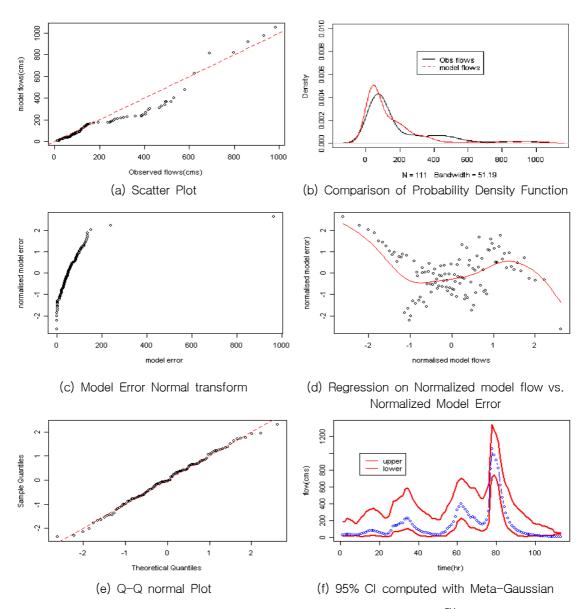


Fig. 7. Uncertainty analysis on the events in calibration mode through VfloTM model (2003/08/23)

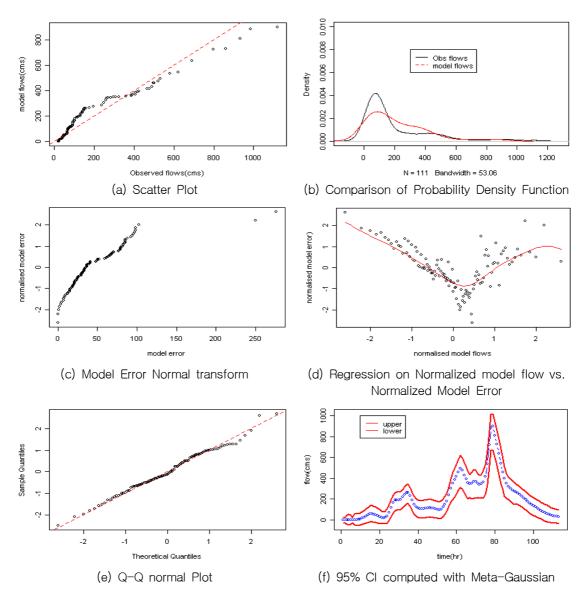


Fig. 8. Uncertainty analysis on the events in calibration mode through HEC-HMS model (2003/08/23)

여주고 있으며 이는 수문곡선의 상승부 또는 하강부에서 과소 또는 과대 추정되고 있음을 함축적으로 나타낸다 할 수 있다. 또한 확률분포의 Tail이상대적으로 실측치에 비해 작아 첨두치를 효과적으로 모의하지 못하고 있으며, 전체적으로 불확실성 구간이 좁게 추정되고 있다. 분포형 모형의 경우 Fig. 9(b)을 통해서 알 수 있듯이 집중형 모형의 경우보다 실측치에 근접한 모의 결과를 나타내

고 있으며, 불확실성 구간의 경우 상대적으로 넓 게 분포하고 있음을 확인 할 수 있다.

Fig. 9와 10은 Fig. 7과 8에서와 동일하게 각각의 검증 강우 사상에 대한 분포형 모형과 집중형 모형의 불확실성 산정 분석 결과를 나타낸 것이다. 검증 사상(Fig. 9와 10)에 대한 분석결과, 분포형 모형의 모의 유출량은 실측 유출량의 확률 밀도함수가 거의 유사하게 재현하고 있으나 집중

형 모형의 결과는 실측치의 확률밀도함수를 전혀 재현하고 있지 못함을 확인 할 수 있었다. 이러한 결과를 모형의 기본적인 구조로서 판단해 보면, 집중형 모형의 매개변수가 물리적 기반의 분포형 모형에 비해 잘 반영하지 못하기 때문에 발생하는 문제로 판단된다. 또한 통계적으로 판단해보면, Meta-Gaussian 방법론의 기본개념상 모의된 유

출량과 이에 따른 오차가 표준정규변환을 통해 정 규분포로 변환되어야 하나 Fig. 10(d)와 (e)에서 나타나듯이 여전히, 모의된 유출량과 오차가 서로 상관되어 있으며 Q-Q Normal Plot 또한 심하게 왜곡되어 있음을 확인할 수 있다. 이는 결과적으로 Fig. 10(f)와 같이 부(negative)의 유량을 발생시키는 원인으로 작용하고 있다.

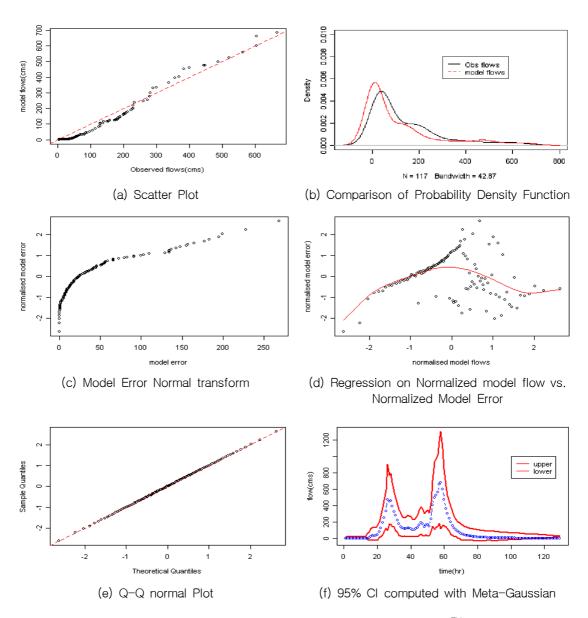


Fig. 9. Uncertainty analysis on the events in verification mode through Vflo[™] model(2003/07/21)

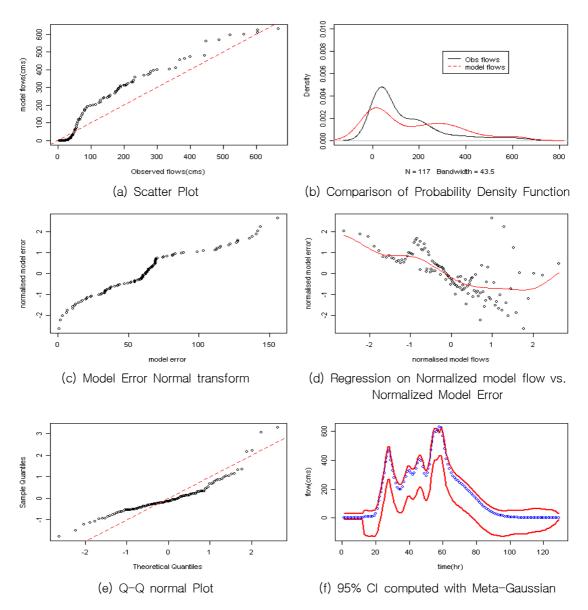


Fig. 10. Uncertainty analysis on the events in verification mode through HEC-HMS model (2003/07/21)

본 논문에서는 두 개의 사상이외에 2003년 8월 19일과 2003년 9월 18일 사상들에 대해서도 모형을 적용하였으며 요약 결과만을 Table 1에 제시하였다. HEC-HMS를 이용한 2003년 8월 19일 사상 외에는 통계적으로 모두 적합도 검정을 통과하는 것으로 나타났다. 하지만 전반적으로 HEC-HMS 모형의 경우 검정통계량이 VfloTM모

형에 비해 매우 큼을 알 수 있으며 이는 통계적으로 $Vflo^{TM}$ 모형이 유출량을 추정하는데 더욱 적합함을 의미하는 것으로 볼 수 있다.

본 논문에서 유도된 결론을 다시 정리하면 다음과 같다. Fig. 7부터 10은 검증 사상 및 모형별 유출결과에 대한 신뢰수준 95%에서의 불확실성을 나타낸 것이다. 분포형 모형에 의해 모의된 유

_					
	R-R Model	2003/08/23 (calibration)	2003/07/21 (verification)	2003/08/19 (verification)	2003/09/18 (verification)
	HEC-HMS	0.039(0.129)	0.084(0.126)	0.135(0.130)	0.0655(0.129)
	Vflo TM	0.035(0.129)	0.006(0.126)	0.064(0.130)	0.100(0.129)

Table 2. Probability plot correlation coefficient test, the value in parenthesis indicates limit values at 95% significant level

출량(Fig. 7과 9)의 경우 신뢰구간의 범위 내에서 거동을 하고 있는 반면, 집중형 모형의 모의 유출 량(Fig. 8와 10)은 신뢰구간의 상한치의 근처에서 거동을 하며 특히 최고치에서는 신뢰구간을 벗어나는 결과를 보여주었다. 이는 R-R 모형을 유출예측에 적용할 경우 집중형 모형보다는 분포형 모형을 이용하는 것이 예측의 불확실성이 작으며 신뢰구간 내의 유출량을 산정할 수 있다는 것을 의미하는 것이다.

5. 요약 및 결론

본 논문에서는 수자원계획과 관리 목적을 두고 가장 보편적으로 이용되고 있는 강우-유출 모형에 대한 불확실성을 검토하였다. 점차 시공간적수문 자료와 격자 기반의 지형 자료 보유가 가능해지면서 R-R 모형의 적용은 집중형과 분포형 모형으로 확대되고 있으나, 오랜 기간의 연구와 노력에도 불구하고 R-R 모의 결과에 대한 불확실성이 통계학적으로 유의한지에 대하여 여전히 미지의 숙제로 남겨져 있다. R-R 모형의 불확실성을 정량적으로 분석하기 위하여 본 논문에서는 Montanari와 Brath (2004)에 의해 제시된 Meta-Gaussian 기법을 이용하여 집중형과 분포형모형 모의 결과에 적용하였다. 본 논문의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) R-R 모형 모의 결과에서의 불확실성은 크게 입력 자료(수문 자료)의 불확실성, R-R 모형 매개변수의 불확실성과 R-R 모형 구조의 불 확실성을 그 원인으로 설명할 수 있다. 특 히, 모형 구조에 따른 불확실성은 인정할 수 밖에 없는 잠재적인 요소가 된다. 이러한 원인들로부터 발생하는 모의 결과에 대한 불확실성은 이미 통계와 수문 분야에서 평가된 바 있으나 이를 정량화하는 연구는 활발하게 이루어지지 못하였다. 이에 본 논문에서는 모의 결과에 대한 상·하한계의 신뢰구간을 추정하는 기법으로 불확실성을 정량적으로 분석할 수 있는 Meta-Gaussian 기법을 적용하였다.

- 2) 한강 내 대표적인 도시유역인 중랑천 유역에 대하여 분포형 모형인 Vflo™모형과 집중형 모형인 HEC-HMS 모형으로 각각 분석하였으며 이를 위하여 유역 내 위치한 7개 관측소(상계, 송정, 우이, 의정부, 장암, 퇴계원과 진접)의 30분 강우를 이용하였다. 또한, 각 모형의 주요 매개변수에 대한 민감도분석을 통하여 분포형 모형은 수리전도도와 첨두시간 조정 매개변수를, 집중형 모형은 CN, 도달시간과 저류상수를 이용하여 강우사상을 보정하였다.
- 3) 분포형과 집중형 모형에 의해 모의된 강우 기간의 유출 결과에 대하여 Meta-Gaussian 기법을 이용하여 불확실성을 검토하였다. 각 모형에 대하여 관측 유출량과 모의 유출량 의 Q-Q Plot, 확률밀도함수, 모형 잔차의 Gaussian 변환결과와 신뢰구간 산정을 위한 회귀분석을 실시한 결과, 두 모형 모두 모의 치가 신뢰구간 범위 내에 거동하고 있는 것 으로 나타났으며 보정 시 모의 유출량 값이 유의하다는 것을 확인하였다.
- 4) 검증(verification)기간 강우사상에 대하여

불확실성을 분석한 결과, 분포형 모형에서 추정된 모의 유출량이 실측 유출량의 확률 밀도함수를 거의 유사하게 재현하는 반면, 집중형 모형 모의 결과는 강우-유출관계를 적절히 재현하지 못하였으며, 이러한 결과는 95% 신뢰구간에서도 확인되었다. 이는 집중형 강우-유출 모형의 매개변수가 물리적 기반의 분포형 강우-유출 모형에 비해 잘 반영되지 못하기 때문에 발생하는 문제인 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연 구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문 헌

- 건설교통부, 강우레이더에 의한 돌발홍수예보시스 템 개발(3차년도), pp. 256-257, 2007.
- 권현한, 문영일, 단일사상 강우-유출 모형의 불확실성 분석을 통한 홍수빈도곡선 유도(I), 대한 토목학회논문집, 제24권, 제3B호, pp. 229-239, 2004.
- 홍준범, 김병식, 윤석영, Vflo[™] 모형을 이용한 물리기반의 분포형 수문모형의 정확성 평가, 대한토목학회논문집, 제26권, 제6B호, pp. 613-622, 2006.
- 김병식, 홍준범, 김보경, 김형수, 중랑천 유역에서 의 Vflo[™] 모형의 민감도 분석, 대한토목학회 2007년도 정기학술대회, pp. 2010-2014, 2007.
- 김문모, 조원철, 이원환, 수공학에서의 신뢰도 분석방법(I), 한국수자원학회지, 제25권, 제4호, pp. 18-24, 1992.
- 김문모, 조원철, 이원환, 수공학에서의 신뢰도 분석방법(Ⅱ), 한국수자원학회지, 제26권, 제1호, pp. 18-26, 1993.
- 오규창, 媒介變數 推定을 통한 降雨-流出 模型의

- 不確實性 分析, 박사학위논문, 서울대학교, 1998.
- 한건연, 김상현, 박재홍, 하천 수질변동의 예측을 위한 추계학적 수질해석 모형의 개발, 한국수 자원학회지, 제28권, 제2호, pp. 103-114, 1995.
- Beven, K.J., and Binley, A., The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction, Hydrological Processes, Vol. 6, pp. 279-298, 1992.
- Brath, A., and Rosso, R., Adaptive calibration of a conceptual model for flash flood forecasting, Water Resources research, Vol. 29, pp. 2561–2572, 1993.
- Brockwell, P.J., and Davis, R.A., Time series: theory and method, second edition, Springer & Verlag, New York. catchment models: the Metropolis algorithm, Journal of Hydrology, Vol. 211, pp.69–85, 1987.
- Franchini, M., Use of a genetic algorithm combined with a local search method for the automatic calibration of conceptual rainfall runoff models, Hydrology Science Journal, Vol. 41, pp. 21–39, 1996.
- Haan C.T., Storm D.E., Al-Issa T., Prabhu S., Sabbagh G.J., and Edwards D.R., Effect of parameter distributions on uncertainty analysis of hydrologic models, Transactions of the ASAE, Vol. 41, pp.65–70, 1998.
- Hosking, J. R. M., and J. R. Wallis, The effect of intersite dependence on regional flood frequency analysis, Water Resour. Res., 24, pp.588–600, 1988.
- Kelly, K. S., and R. Krzysztofowicz, A bivariate meta-Gaussian density for use in hydrology, Stochastic Hydrol. Hydraul., 11, pp.17–31, 1997.
- Krzysztofowicz, R. and Kelly, K.S., Hydrologic uncertainty processor for probabilistic river

- stage Forecasting. Water Resour. Res., 36(11), pp.3265–3277, 2000.
- Kuczera, G., Nlfit, a Bayesian Nonlinear Regression Program Suite, Version 1.00g, Department of Civil Engineering and Surveying, University of Newcastle, New South Wales, 1994.
- Kuczera, G., and Parent, E., Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: the Metropolis algorithm, Journal of Hydrology, Vol. 211, pp.69-85, 1998.
- Laurenson, E.M. and Mein, R.G., RORB
 Version 3: Runoff Routing Program User
 Manual(2nd Edition), Department of Civil
 Engineering, Monash University, Monash,
 Australia. 1983.
- Loukas, A., Vasiliades, L., and Dalezios, N.R., Climatic impacts on the runoff generation processes in British Columbia, Canada, Hydrology and Earth System Sciences, Vol. 6, No.2, pp.211–228, 2002.
- Melching, C.S., Yen, B.C., and Wenzel, H.G., Output Reliability as Guide for Selection of Rainfall-Runoff Models., Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, Vol. 117, No. 3, pp. 383-398, 1991.
- Metropolis, N., The beginning of the Monte Carlo method, Los Alamos Science, No. 15, pp.125–130, 1987.
- Montanari, A., and Brath, A., A stochastic approach for assessing the uncertainty of rainfall-runoff simulations, Water Resources Research, 40, doi:10.1029/2003WR002540, 2004.
- Montanari, A., Rosso, R., and Taqqu, M.S., Fractionally differenced ARIMA models applied to hydrologic time series: identification, estimation and simulation,

- Water Resource Research, Vol. 33, pp.1035 –1044., 1997.
- Moran, P. A. P., Simulation and evaluation of complex water system operations, Water Resour. Res., 6, pp.1737–1742, 1970.
- MUSIC(Multiple-Sensor Precipitation Measurements, Integration, Calibration and Flood Forecasting) Report on the new methodological approach to assess flood forecasting uncertainty, University of Bologna, 2000.
- Sabol, G.V., Clark Unit Hydrograph, Transactions of the ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 114, No. 1, pp.103-111, 1998.
- Seo, D. J., Breidenbach, J., Fulton, R., and Miller, D., Real-time adjustment of range-dependent biases in WSR-88D rainfall estimates due to nonuniform vertical profiles of reflectivity, Journal of Hydrometeorology, Vol. 1, pp. 222-240, 2000.
- Singh, V.P., and Woolhiser, D.A., Mathematical modeling of watershed hydrology, Journal of Hydrology Engineering. Vol. 7, No. 4, pp.270–292, 2002.
- Thiemann, M., Trosset, M., Gupta, H. and Sorooshian, S., Bayesian recursive parameter estimation for hydrologic models, Water Resource Research, Vol. 37, pp.2521–2536, 2001.
- Vrugt, J.A., Gupta, H.V., Bouten, W. and Sorooshian, S., A shuffled complex evolution Metropolis Algorithm for optimisation and uncertainty assessment of hydrological model parameters, Water Resource Research, 39, 1201, doi:10.1029/2002WR001642, 2003.
- Yar, M., and Chatfield, C., Prediction intervals

김병식 · 김보경 · 권현한

for the Holt-Winters forecasting procedure, International Journal of Forecasting, Vol. 6, pp. 127–137, 1990.

Zhao, R. J., Zhuang, Y.L., Fang, L. R., Liu, X. R. and Zhang, Q. S., The Xinanjiang model, IAHS Publ., Vol. 129, pp. 351–356, 1980.