

강우 및 강우-유출 모형의 불확실성을 고려한 홍수빈도곡선 유도

Derivation of Flood Frequency Curve with Uncertainty of Rainfall and Rainfall-Runoff Model

권 현 한* / 김 장 경** / 박 세 훈***

Kwon, Hyun-Han / Kim, Jang-Gyeong / Park, Sae-Hoon

Abstract

The lack of sufficient flood data being kept across Korea has made it difficult to assess reliable estimates of the design flood while relatively sufficient rainfall data are available. In this regard, a rainfall simulation based derivation technique of flood frequency curve has been proposed in some of studies. The main issues in deriving the flood frequency curve is to develop the rainfall simulation model that is able to effectively reproduce extreme rainfall. Also the rainfall-runoff modeling that can convey uncertainties associated with model parameters needs to be developed. This study proposes a systematic approach to fully consider rainfall-runoff related uncertainties by coupling a piecewise Kernel-Pareto based multisite daily rainfall generation model and Bayesian HEC-1 model. The proposed model was applied to generate runoff ensemble at Daechung Dam watershed, and the flood frequency curve was successfully derived. It was confirmed that the proposed model is very promising in estimating design floods given a rigorous comparison with existing approaches.

Keywords : rainfall simulation, uncertainty analysis, flood frequency curve, rainfall-runoff simulation

요 지

신뢰성 있는 홍수빈도해석을 수행하기 위해서는 충분한 홍수량 및 강우자료가 필요하다. 강우자료의 경우 우리나라 대부분 지역에서 30년 이상의 극치자료가 활용이 가능한 반면 홍수량 자료는 상대적으로 충분한 자료가 확보되지 않아 신뢰성 있는 빈도해석이 어려운 실정이다. 이에 따라 강우모의기법에 근거한 홍수빈도곡선 유도방안연구가 몇몇 연구에서 제안된 바 있으나, 기본적으로 입력된 강우의 빈도와 홍수의 빈도가 동일하다고 가정함으로써 발생하는 불확실성이 상당부분 내포되어 있다. 이러한 점에서 본 연구의 목적은 강우모의기법과 불확실성 분석이 고려된 홍수빈도곡선 유도방법을 개발하는 것으로 홍수빈도곡선을 유도하는데 있어서의 핵심은 미래에 발생 가능한 극치강수량을 효과적으로 재현할 수 있는 강수량 모의발생 기법과 강우-유출관계의 불확실성 분석에 있다. 본 연구에서는 극치강수량 모의를 위해 불연속 Kernel Pareto 분포를 이용한 다지점 강수모의기법과 Bayesian HEC-1 (BHEC-1) 모형을 연계하여 본 연구의 대상유역인 대청댐 유역의 강우-유출 관계의 불확실성을 고려한 홍수빈도곡선을 개발하고 모형의 적합성을 평가하였다. 최종적으로 기존 홍수빈도결정방법과 비교를 통해서 모형의 적합성을 확인하였다.

핵심용어 : 강우모의, 불확실성 분석, 홍수빈도곡선, 강우-유출 모의

* 교신저자, 전북대학교 토목공학과 조교수, 방재연구센터 (e-mail: hkwon@jbnu.ac.kr, Tel: 063-270-2426)
Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Chonbuk National University
** 전북대학교 토목공학과 석사과정, 방재연구센터 (e-mail: kjk2388@jbnu.ac.kr)
Department of Civil Engineering, Chonbuk National University
*** 한국시설안전공단 상하수도팀 팀장(e-mail: shpark@kistec.or.kr)
Director/Ph.D, Water supply & sewerage team, KISTEC

1. 서 론

수문학적 빈도해석은 수공구조물을 설계하는데 있어서 가장 기본적으로 고려되는 해석방안으로서 강우빈도해석, 홍수빈도해석으로 크게 구별된다. 신뢰성 있는 빈도해석을 수행하기 위해서는 충분한 자료가 필요하며 20년 이상의 자료가 일반적으로 요구된다. 강우의 경우 우리나라 대부분 지역에서 30년 이상의 극치자료가 활용이 가능한 반면 홍수량 자료는 상대적으로 충분한 자료가 확보되지 않아 신뢰성 있는 빈도해석이 어려운 실정이다. 이는 비단 자료의 연한뿐만 아니라 우리나라 대부분의 유출량이상류의 수공구조물로부터 조정된 유량이기 때문에 빈도해석을 위한 홍수량 자료의 질적 기준을 만족하기가 어려운 실정이다. 이러한 점에서 국내에서는 빈도홍수량 결정은 강우빈도해석 결과를 강우-유출 모형에 입력하여 빈도홍수량으로 변환하는 간접적인 방안이 주로 이용되고 있다. 이는 입력된 강우의 빈도와 홍수의 빈도가 동일하다고 가정하는 것으로서 불확실성이 상당히 내포되어 있다. 즉, 홍수량은 다양한 수문학적 과정에 의해서 이루어지며 동일한 강우량일지라도 토양함수, 강우강도 등에 따라서 상당히 다른 유출 특성을 나타내기 때문에 불확실성 분석을 고려한 해석이 필요하다.

국외에서는 강우모의발생 기법과 연계한 홍수량 산정방안이 수립되어 운영되고 있으며(Frost et al., 2004; Srikanthan, 2005), 이밖에도 미계측 유역에 대한 빈도홍수량을 산정하기 위한 목적으로 모의기법에 근거한 홍수빈도곡선 유도 기법 개발에 대한 연구가 다수 이루어지고 있다(Cameron et al., 2000; Boughton and Droop, 2003). 그러나 대부분의 연구에서 확률밀도함수(probability density function)로부터 강우량을 모의발생 한 후 강우-유출 모형에 입력시켜 다수의 홍수량을 산정하는 단순한 형태의 Monte-Carlo Simulation 기법(MCS)이 주로 이용되고 있다(Bloschl and Sivapalan, 1997; Loukas, 2002; Muzik, 2002; Rahman et al., 2002). 이러한 경우 강우-유출 관계에 대한 불확실성을 효과적으로 고려하지 못하는 단점이 있다. 이밖에도 강우의 모의발생시 관측 범위 내에 존재하는 강우의 내삽(interpolation) 시에는 큰 문제가 발생하지 않으나 관측 범위를 벗어나는 극치값에 대해서는 과소 또는 과대 추정되는 문제점이 존재한다. 이러한 점에서 본 연구의 주요 목적은 불확실성을 포괄적으로 고려한 홍수빈도곡선 유도 방안을 수립하는 것이며 이를 위하여 극치강우량 재현에 유리한 강우모의기법과 강우-유출모형 매개변수의 불확실성을 고려할 수 있는 방안을 수립하고자 한다.

강수량 모의발생기법 중 일반적으로 일강수량을 모의함에 있어 1차 Markov Chain 모형이 주로 이용되고 있으며 강수 발생과 강수량의 평균적인 특성을 모의하는데 유용하게 사용되고 있다. 그러나 기존 Markov Chain 모형의 일반적인 문제점은 분산, 왜곡도 등 고차모멘트의 통계학적 특성을 재현하는데 어려움을 가지고 있다는 점이며, 이러한 문제점은 기본적으로 강우량을 모의하기 위해서 사용되는 확률분포의 문제로 귀결되며 이를 보완하는 연구들이 진행되고 있다. 즉, 일강수량의 평균적인 특성과 극치강수량의 통계적인 분포특성을 동시에 만족시키기에 기존에 확률분포형에 입각한 분석에 한계가 존재한다. Kwon and So (2011)는 기존 2-State Markov Chain 모형에서 일강수량에 평균적인 특성과 극치특성을 동시에 재현할 수 있도록 불연속(piecewise) Kernel-Pareto Distribution (PKPD)을 적용한 강수발생 모의기법을 개발하였다. PKPD는 핵밀도함수의 장점과 Pareto분포형의 장점을 동시에 고려할 수 있도록 고안된 불연속확률분포형으로서 특정 Threshold를 넘는 극치강수량에 대해서 Thick-Tail을 가지는 Pareto 분포형을 적용하고 극치강수량을 제외한 일반적인 강수량에는 핵밀도함수를 적용하게 된다.

한편, 강우-유출과정의 물리적인 관계는 기본적으로 강우-유출 모형을 통해서 모의되며 강우-유출 모형의 매개변수(parameter)는 강우, 유량, 증발산 등의 입력 자료를 이용하여 추정된다. 우리나라의 경우 수문자료가 충분하지 않기 때문에 물리적, 통계적으로 유의성을 갖는 매개변수들을 추정하기 어려운 문제점이 존재한다. 따라서 신뢰성 있는 유출 분석을 위해서는 강우-유출 분석 시에 불확실성 분석은 반드시 요구되는 분석과정으로 인식되고 있다(Bae et al., 2002). 그러나 불확실성을 정량화하는 것은 통계학에서도 쉽지 않은 연구 분야로서 가장 진보된 불확실성 해석 방법으로는 Bayesian 방법이 컴퓨터의 발전과 더불어 많은 학문 분야에서 이용되고 있다. 특히, Bayesian 방법은 매개변수의 추정과 불확실성을 동시에 수행할 수 있는 방법으로서 추정되는 매개변수들이 사후분포(posterior distribution)로 귀결되어 최종적으로 확률분포형의 형태를 갖게 된다. 이러한 점에서 본 연구의 목적은 앞서 언급된 극치강수량 재현기법, Bayesian 강우-유출 모형 기반의 불확실성 평가기법 등을 연계한 홍수빈도곡선 유도 기법을 개발하고자 한다.

이와 관련된 국내외 강우-유출 관계의 불확실성 분석에 가장 대표적인 방법으로 Monte Carlo Simulation (MCS)을 적용한 사례가 다수 있으며(Melching, 1995; Binley et al., 1991; Beven and Binley, 1992), 기존 MCS을 개선한

Latin Hypercube Sampling (LHS)(Melching, 1992 a,b; Kwon et al., 2007)을 적용하여 신뢰성 평가에 활용하였다. 해석학적 방법으로서 Mean First Order Second Moment (MFOSM), Advanced Mean First Order Second Moment (AFOSM)와 Rosenbruth's Point Estimation Method (RPEM), Harr's Point Estimation Method (HPEM) 등이 있으며 이들 신뢰성 분석 방법의 상대적인 수행능력을 여러 연구에서 비교 검토하였다(Melching, 1992a,b; Bates and Townley, 1988; Lei and Schilling, 1993; Garen and Burges, 1981; Binley et al., 1991). Melching (1995)은 수공학 분야 강우-유출 모형의 불확실성 검토기법을 비교 검토하였으며 최종적으로 HPEM과 LHS기법이 가장 적합한 기법으로 적용이 가능하다고 언급하였다. Yu et al. (2001)은 분포형 강우-유출 모델의 대해서 MCS, LHS, RPEM, HPEM 등 4가지 신뢰성 해석기법을 적용시켰으며 이중 MCS와 LHS 방법이 분포형 강우-유출 모형의 신뢰성 해석기법으로 가장 적합하다고 언급하였다.

국내의 연구사례를 살펴보면, Shin and Yoon (1998)은 저수지 퇴사량 산정에 대한 불확실성 분석을 위해서 MCS와 LHS를 적용한 사례가 있으며, Han et al. (1997)은 저수지에 대한 신뢰성 평가를 위해서 MCS와 AFOSM 방법을 적용하였다. Kim et al. (1993)은 하수관망의 신뢰성 분석을 MFOSM를 이용하여 수행한 사례가 있다. Kwon et al. (2004a,b)은 매개변수적 LHS를 이용하여 강우-유출모형의 불확실성 해석기법을 개발하였으며 강우모의발생기법과 연계하여 소양강댐의 홍수빈도곡선을 유도하였다. Kwon et al. (2007)은 기존 매개변수적 LHS 방법을 개선한 비매개변수적 LHS기법을 이용하여 위험도 분석에서 효율성 및 신뢰성을 개선하는 연구를 수행하였다. Kwon et al. (2008)은 Bayesian 기법과 Sacramento 장기유출 모형을 통합한 Bayesian Sacramento 모형을 개발하여 소양강댐 유역의 장기유출 과정의 불확실성을 평가하였다. Kwon and Kim (2009)은 기후변화에 따른 홍수량 변동성 평가를 위하여 통계학적 Downscaling 기법과 연동할 수 있는 Bayesian Sacramento 모형을 이용하였다. 최근에 Kwon et al. (2012)은 Bayesian 모형을 이용하여 단일강우사상에 대한 강우-유출모형의 매개변수를 최적화하고, 최적화된 매개변수의 사후분포를 추정하여 강우-유출모형의 불확실성을 평가하였다.

앞서 언급한 바와 같이 홍수빈도곡선을 유도하는데 핵심은 극치강수량의 재현 및 강우-유출 모형의 불확실성 분석이다. 따라서 본 연구에서는 극치강수량 재현에 유리한 PKPD 기반의 강우량 모의발생기법, 불확실성 분석이

가능한 Bayesian Markov Chain Monte Carlo (MCMC) 기반의 Bayesian HEC-1 (BHEC-1) 강우-유출모형을 연동해서 홍수빈도곡선을 유도할 수 있는 모형을 개발하는 것이다. 본 연구는 대청댐 유역을 대상으로 하였으며 논문의 진행 절차는 다음과 같다. 1장에서는 홍수빈도곡선에 대한 연구 동향을 살펴보았으며, 2장에서는 극치강수량 모의 및 강우 유출 불확실성 분석을 위한 방법론에 대해서 간략히 요약 정리하였다. 3장에서는 BHEC-1모형을 이용한 강우-유출 모형의 불확실성 평가를 수행하였으며 4장에서는 극치강수량 모의와 홍수빈도곡선 추정을 수행하였다.

2. 극치강수량 모의 및 강우-유출 모형의 불확실성 분석방법

2.1 불연속 Kernel-Pareto Distribution을 이용한 극치강수량 모의

본 연구에서는 불연속 Kernel-Pareto 분포를 이용한 극치강수량 모의기법을 적용하였으며 Kwon and So (2011)에서 제시한 방법론에 대해서 간단히 요약하여 정리하였다. 일반적으로 내삽에서 가장 우수한 재현능력을 가지는 핵밀도함수(Kernel density function) 방법과 극치강수량 재현에 유리한 Generalized Pareto Distribution (GPD)를 동시에 고려할 수 있는 분포형을 일강수량모의기법에 적용하고자 한다. 핵밀도함수 방법과 GPD에 대해서 간단히 살펴보면 다음과 같다.

비매개변수적 핵밀도함수 해석방법은 어떤 분포의 가정이 필요 없이 관측자료 자체에서 분포형을 유도할 수 있기 때문에 분포형 선정의 어려움을 해소할 수 있고 또한 관측자료의 적절한 분포형을 선정할 수 있으며 특히, 내삽시에 매우 우수한 능력을 발휘한다. Rosenblatt (1956)는 발생된 자료 각각의 위치에 정규분포와 같은 독립된 핵함수를 부여하고 이들 모든 핵함수를 합하여 하나의 분포특성을 유도할 수 있는 핵밀도함수방법을 개발하였으며, 이는 모든 실수 x 에 대하여 Eq. (1)과 같이 정의하였다.

$$f(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{h} K\left(\frac{x-X_i}{h}\right) \quad (1)$$

여기서, X_1, X_2, \dots, X_n 은 독립적으로 동일하게 분포된 실관측치이고, $K\left(\frac{x-X_i}{h}\right)$ 는 핵함수, h 는 양의 광역폭(bandwidth)이며 본 연구에서는 다음과 같이 간단한 추정공식을 이용하였다.

$$\hat{h}_0 = 2.78 \hat{\sigma} n^{-1/5} \quad (2)$$

여기서, n 은 자료의 개수를 나타내며 $\hat{\sigma}$ 는 자료의 표준편차를 의미한다. 일반적인 핵함수는 연속적이고 대칭인 방정식의 형태를 가지며 해석 목적에 맞는 핵함수를 사용하는 것이 효율성을 높일 수 있다. 다음으로 GPD에 대해서 살펴보면 다음과 같다. 본 연구에서 사용한 GPD의 확률밀도함수와 누가확률밀도함수는 각각 Eqs. (3) and (4)와 같다.

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left[1 - \frac{k}{\alpha} (x - \epsilon) \right]^{-1 + \frac{1}{k}} \quad (3)$$

$$F(x) = 1 - \left[1 - \frac{k}{\alpha} (x - \epsilon) \right]^{\frac{1}{k}} \quad (4)$$

여기서, k , α , ϵ 는 각각 형상매개변수(shape parameter), 규모매개변수(scale parameter), 임계값(threshold)을 나타낸다. 누가확률밀도함수 $F(x)$ 와 매개변수를 고려하면 극치강수량은 다음 Eq. (5)의 Quantile 함수를 통해서 추정된다(Fig. 1).

$$x = \epsilon + \frac{\alpha}{k} [1 - (1 - F)^k] \quad (5)$$

2.2 Bayesian HEC-1(BHEC-1) 모델을 이용한 강우-유출 모형의 불확실성 분석

본 연구에서는 홍수빈도곡선 유도과정에서 강우-유출 모형의 불확실성을 평가하기 위해서 국내외에서 범용되

고 있는 대표적인 단일강우사상모형인 미공병단의 HEC-1 FLOOD Package Code를 수정하여 연구를 진행하였다(Hydrologic Engineering Center, 1990). 강우-유출분석에는 SCS 유출곡선지수 방법과 Clark 순간단위도법을 사용하여 강우-유출 모형을 구축하였으며, HEC-1 모형 매개변수의 불확실성을 정량화하기 위해서 BHEC-1 모형을 적용하여 매개변수의 사후분포를 추정하였다.

본 연구에서 사용된 Bayesian 모형은 강우-유출 모형의 여러 매개변수의 최적 해를 구할 뿐만 아니라 이에 따른 매개변수의 사후분포를 추정할 수 방법으로서 기본적으로 Bayesian Markov Chain Monte-Carlo (MCMC)를 활용하여 사후분포를 추정하였다. MCMC 기법을 이용한 불확실성 분석과 관련한 연구에는 극치강수량 예측모형(Kwon and Moon, 2007) 및 Bayesian MCMC 기법을 통한 NWS-PC 강우-유출 모형 매개변수의 최적화 및 불확실성 분석(Kwon et al., 2008) 등이 있으며, 다양한 수리수문학적 불확실성 정량화를 위한 대안으로서 적용되고 있다. 본 연구에서는 단일사상 강우-유출 모형 구축을 위한 매개변수 추정 및 불확실성 분석을 수행하기 위해 목적함수를 설정하고 각 사상별로 10,000회 이상 모의하여 다양한 표본공간으로부터 매개변수들이 추출될 수 있도록 하였다.

Bayesian 방법은 사전분포(prior distribution)를 기준으로 자료의 증가에 의해서 정보가 갱신되며 최종적으로 사후분포(posterior distribution)를 추정하는 과정을 의미한다(Gelman et al., 2004). 주어진 확률변수 θ 와 y 가 있을 때, 두 확률변수들의 결합확률분포(joint probability dis-

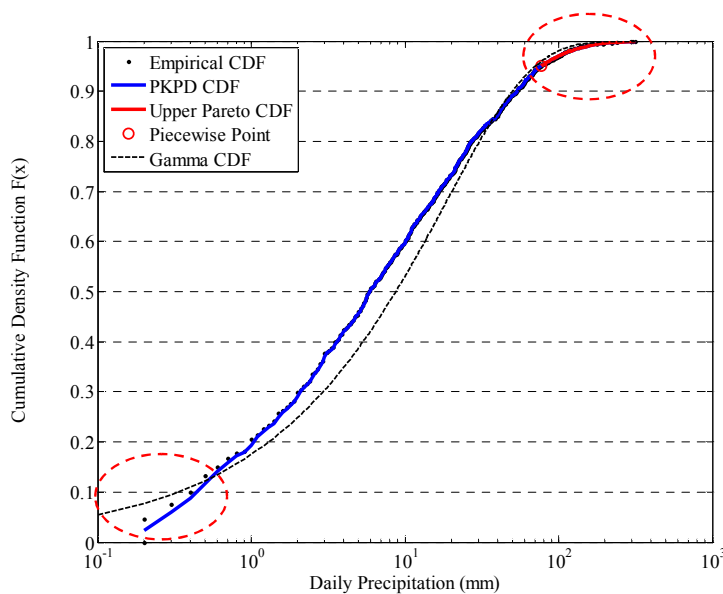


Fig. 1. A Concept of Piecewise Kernel-Pareto Distribution

tribution)는 사전분포(prior distribution) $p(\theta)$ 와 우도(likelihood) $p(y|\theta)$ 의 곱으로 표현할 수 있다.

$$p(\theta, y) = p(\theta)p(y|\theta) \quad (7)$$

MCMC기법의 대표적인 방법으로 Metropolis-Hastings 알고리즘과 Gibbs 표본법이 있다. MCMC 기법은 원하는 다변량 확률분포에서 iid 표본을 추출하는 것이 복잡하거나 난해한 경우 이용 가능하다. Gibbs 표본법은 Metropolis-Hastings 알고리즘에 기반을 둔 방법론으로서 모의계산이 빠르고 적용하기 쉽다는 장점이 존재한다. 이러한 점에서 본 연구에서는 Gibbs 표본법을 MCMC 기법으로서 이용하였다. 앞선 연구에서 언급한 바와 같이 강우-유출 모형을 구성하는데 있어서 SCS Curve No. (CN)와 Clark 합성단위유량도의 2개의 매개변수(Tc_n, K_n)를 최적화 대상으로 하였다. 대청댐 유역의 경우 총 7개 유역으로서 유역마다 3개의 매개변수가 최적화 대상이므로 총 21개의 매개변수를 최적화 하였다. 본 연구에서는 21개의 매개변수를 정규분포로 가정하였으며, 21개의 매개변수에 대한 결합확률은 Eq. (9)와 같다.

$$CN_n \sim N(\mu_{cn}, \sigma_{cn}^2) \quad n = 1, \dots, 7 \quad (8.a)$$

$$Tc_n \sim N(\mu_{tc}, \sigma_{tc}^2) \quad n = 1, \dots, 7 \quad (8.b)$$

$$K_n \sim N(\mu_{K}, \sigma_{K}^2) \quad n = 1, \dots, 7 \quad (8.c)$$

$$p(CN_{1,\dots,7}, Tc_{1,\dots,7}, K_{1,\dots,7}) \propto 1 \quad (9)$$

Bayes 정리에 의해서 매개변수의 사후분포는 다음과 같이 전개될 수 있다.

$$p(\theta | y) = \frac{p(\theta, y)}{p(y)} \propto p(y | \theta) \cdot p(\theta) \quad (10)$$

여기서, $\theta = [CN_{1,\dots,7}, Tc_{1,\dots,7}, K_{1,\dots,7}]$ 는 전체매개변수들의 집합을 나타내며, $p(\theta)$ 는 매개변수들의 사전분포를 $p(y | \theta)$ 는 유입량자료 y 의 우도함수(likelihood function)를 의미한다.

$$p(y | \theta) \propto \prod_{t=1}^T N(y_t | \mu(t), \sigma) \cdot \quad (11)$$

$$N(\mu(t) | CN_{1,\dots,7}, Tc_{1,\dots,7}, K_{1,\dots,7}, \sigma_{cn}, \sigma_{tc}, \sigma_r^2)$$

Eq. (11)은 모든 매개변수에 대한 적분을 통해 직접적으로 추정하는 것은 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 앞서 언급한 MCMC 방법을 도입하여 매개변수들의 사후

분포를 추정하게 된다.

Bayesian MCMC 방법은 앞서 언급했듯이 우리가 정확히 알지 못하는 다변량 분포들의 결합확률밀도분포를 조건부분포를 통해 추론하는 방법론으로서 HEC-1모형을 예를 들어 설명하면 다음과 같다. 어떤 유역의 SCS Curve No., Clark의 Tc와 K값을 찾아내기 위해서 우선 SCS Curve No.를 정규분포로부터 모의 발생시키고 모의 발생된 SCS Curve No.를 조건부로 하는 Clark의 Tc를 찾아내고 다음으로 K값을 찾는 등 연속적으로 Chain의 형태를 가지고 진화해 간다. 즉, 단순히 변량을 모의발생시키는 Monte-Carlo 모의가 아니라 변량간의 관계를 규정하고 이를 유지하면서 다음 변량을 추정하는 등 이를 그대로 Markov Chain의 형태를 가지게 된다.

3. BHEC-1 모형 적용 결과

홍수빈도곡선 도출시에 강우-유출 모형의 불확실성 분석은 가장 핵심적인 부분으로서 본 연구에서는 BHEC-1 모형을 적용하여 매개변수, 모형의 불확실성을 정량화하였다. 추정된 매개변수의 사후분포로부터 다수의 수문곡선을 추출하였으며 이를 통해 대청댐 유역의 홍수빈도곡선을 유도하였다.

3.1 강우-유출 모형의 매개변수 검정 및 불확실성 분석

본 연구에서 제안한 BHEC-1 모형의 적용을 위해서 GIS 분석을 통해서 도출된 유역정보로부터 경험공식 등을 이용하여 강우-유출 모형의 매개변수들의 초기값을 도출하였다. 모형의 검정을 위해서 매개변수의 초기값과 기존 HEC-1 최적화기법을 이용하여 본 연구의 대상유역인 대청댐유역의 2003~2010년의 매해 주요 실측된 강우-유출 사상을 대상으로 매개변수를 검정을 수행한 결과, 각 사상별 매개변수가 다르게 추정되는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 앞서 언급한 바와 같이 수문자료의 불확실성, 강우강도, 강우지속시간, 유역의 선행함수조건 등의 상이함으로 기인하는 것으로 사료된다. 한편, 대상유역의 소유역별 유역특성인자는 Table 1과 같고, 8개년의 모형 검정을 통해서 산정된 매개변수의 초기값은 다음 Table 2에 요약하여 나타냈다 (Fig. 2).

3.2 BHEC-1 모형의 매개변수 최적화 및 불확실성 평가

앞 절에서 분석한 BHEC-1 모형은 단일강우사상에 대

Table 1. Watershed Characteristics for Rainfall-Runoff Modeling

No.	Basin Name	Area (km ²)	Flow Length (km)	Slope (m/m)
1	Yongdam Dam Basin	129.04	28.488	0.01921
2	Namdae-cheon Basin	464.46	58.274	0.02420
3	Youngdong-cheon Basin	704.17	68.551	0.00420
4	Chogang Basin	672.75	72.260	0.00855
5	Bocheong-cheon Basin	557.42	72.060	0.00487
6	Daecheong Dam Upstream Basin	117.51	28.667	0.00431
7	Daecheong Dam Basin	668.54	81.654	0.00600

Table 2. A Range of Rainfall-Runoff Parameters Used in this Study

Basin Name	Time of Concentration(hr)			Storage Coefficient(hr)			CN No.		
	Minimum	Average	Maximum	Minimum	Average	Maximum	Minimum	Average	Maximum
Yongdam Dam Basin	2.45	3.14	3.92	2.67	3.22	3.92	81.2	88.3	94.5
Namdae-cheon Basin	4.15	5.87	7.34	4.46	6.33	7.60	81.4	86.0	98.4
Youngdong-cheon Basin	4.95	6.89	8.48	5.25	6.57	8.59	80.6	84.1	99.1
Chogang Basin	3.76	5.78	6.93	4.24	5.84	7.65	80.2	84.1	97.3
Bocheong-cheon Basin	4.63	6.13	8.29	4.65	6.81	9.75	81.4	85.6	99.1
Daecheong Dam Upstream Basin	1.38	2.12	2.93	1.88	3.00	4.18	85.2	89.4	97.7
Daecheong Dam Basin	4.28	6.46	10.86	4.89	5.99	7.83	81.4	87.7	97.3

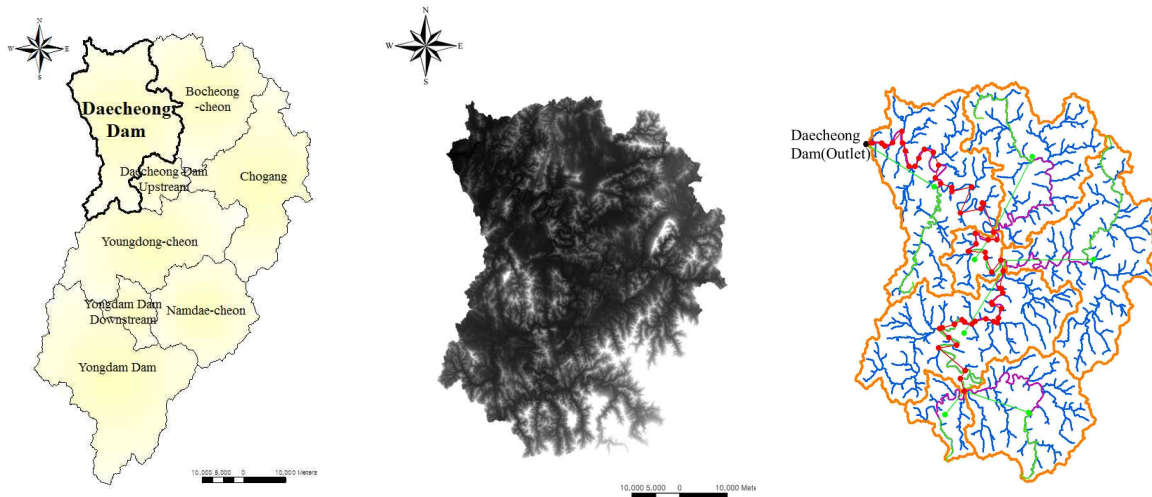


Fig. 2. A Map Showing Daecheong Watershed

하여 기존 HEC-1모형에 비해 침투유량 추정에서 우수한 성능을 보여주었다. 그러나 강우사상은 매해 그 특성이 다르며, 유출되는 수문곡선의 형태 역시 일정하지 않게 된다. 즉, 강우-유출모형이 시간에 따라 계속적으로 변하게 되므로 매년 매개변수를 새로 추정해야할 필요가 생긴다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 2003년부터 2010년까지 8개 강우사상에 대한 각각

연속 100시간 수문곡선을 연계시켜 연속 800시간에 해당하는 강우사상에 대한 강우-유출모형의 매개변수를 추정하였다. 단, 독립된 강우-유출 사상간의 간섭효과를 없애기 위해서 각 강우-유출 사상 사이에 상당부분을 무강우-무유출구간으로 처리하였다. BHEC-1모형에 적용하기 위한 사전분포는 기존 HEC-1모형 최적화 과정으로부터 추정된 매개변수를 기준으로(Table 1), 그 사전분포를 정

의하였으며, 7개 소유역을 동시에 대상으로 최적화를 수행하였다. 그 결과, 각 소유역별 3개의 매개변수(SCS의 CN, No, Clark의 Tc, R), 총 21개의 매개변수를 동시에 최적화 할 수 있었으며, 매개변수가 충분히 수렴할 수 있도록 10,000번 모의를 수행하였다. 매개변수 수렴과정은 다음 Fig. 3과 같으며, 매개변수 및 강우-유출 모형의 불확실성을 포함한 수문곡선은 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다. 매개변수에 대한 사후분포 추정과정은 기존 Kwon et al. (2012)의 연구 결과를 활용하였다.

BHEC-1 기법을 통해 모의된 수문곡선과 실측수문곡선을 시각적으로 비교해보면 거의 일치된 값을 보여주고 있으며, 기존에 HEC-1 매개변수 최적화 방법인 Nelder 방법에 비해 모의능력 현저하게 개선되었음을 확인하였다. 이를 통계적인 지표를 통해 정량적으로 비교 검토하였다. 본 논문에서는 통계적 평가 수단으로 상관계수(correlation coefficient, CC), Nash-Sutcliffe 계수(N-S), 일치계수(Index of agreement, IoA), 편의(bias), 평균제곱오차(root mean square error, RMSE)를 사용하여 모형의

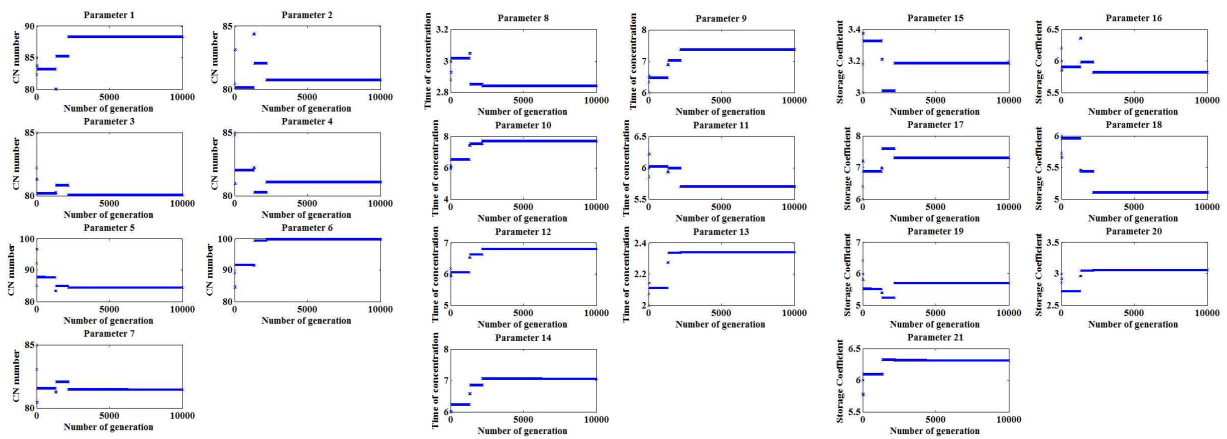


Fig. 3. Plot of Convergence of 21 Rainfall-runoff Parameters (Kwon et al., 2012)

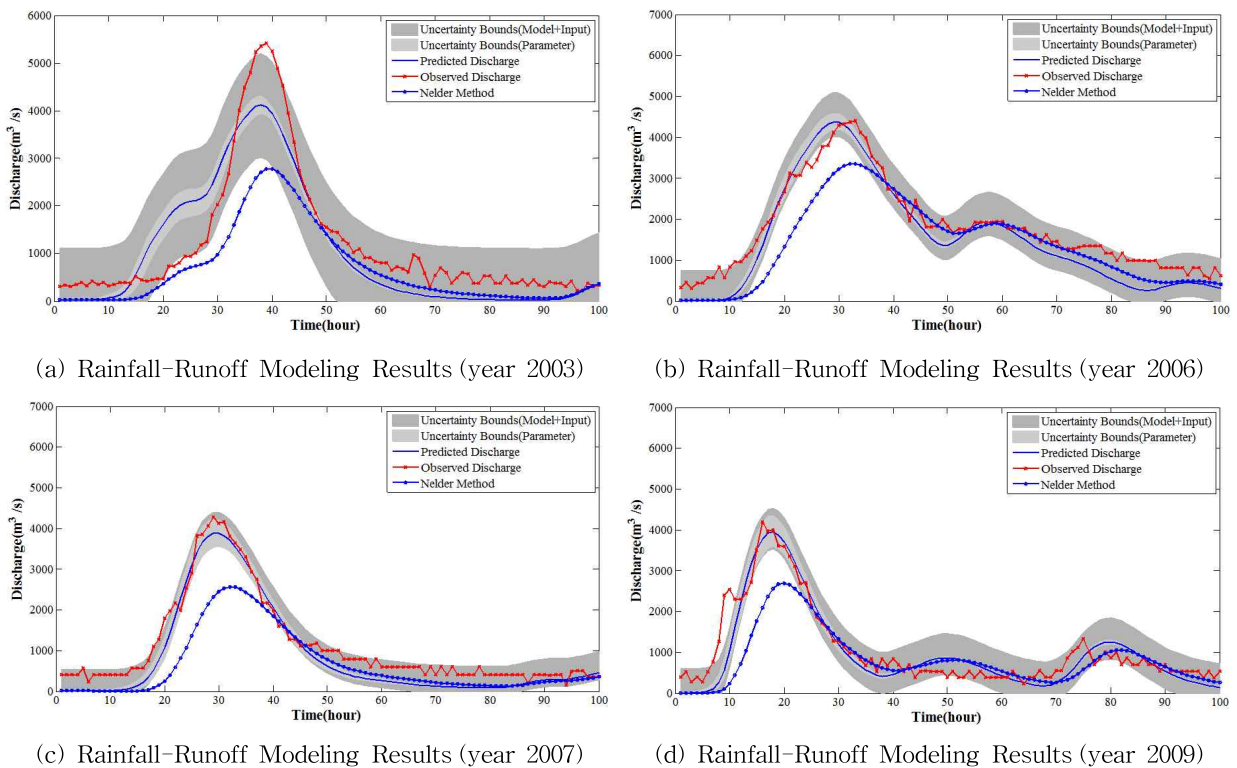


Fig. 4. Calibration Results and Their Uncertainties Estimated from Posterior Distribution

Table 3. A Comparison through Statistical Assessment between Observed and Simulated Discharge

Statistics (Estimation)	2003 (Year)		2006 (Year)		2007 (Year)		2009 (Year)	
	Nelder	Bayesian	Nelder	Bayesian	Nelder	Bayesian	Nelder	Bayesian
CC	0.96	0.91	0.91	0.98	0.91	0.98	0.79	0.93
N-S	0.62	0.81	0.68	0.85	0.59	0.91	0.55	0.85
IoA	0.86	0.95	0.92	0.97	0.86	0.98	0.84	0.96
Bias	541.19	175.54	417.44	273.71	478.32	257.39	246.43	77.18
RMSE	840.68	589.79	601.11	411.45	703.67	333.95	650.41	376.58
Median (Obs.)	1,216.60		1,799.34		1128.51		1,082.40	
Median (Sim.)	675.41	1,041.06	1,381.90	1,525.63	650.19	871.12	835.97	1,005.22
SD (Obs.)	1,373.51		1,072.51		1103.63		975.77	
SD (Sim.)	806.02	1,298.75	999.36	1,288.79	770.68	1173.00	665.48	1,014.93

적합성을 평가하였다. 전체적인 검정결과를 통계적으로 분석하여 비교하면 Table 3과 같다. 전체적으로 상관계수는 크게 차이를 보이지 않고 있으나 N-S 계수, IoA, Bias, RMSE 등은 BHEC-1 모형이 상대적으로 우수한 모의능력을 나타내고 있다. 이밖에도 모형의 편의 및 자료자체의 기본 특성치를 모의하는데 있어서는 상대적으로 BHEC-1 방법이 향상된 결과를 보이고 있다. 무엇보다도 BHEC-1 방법론의 가장 큰 장점은 매개변수의 불확실성을 정량화할 수 있다는 것이다.

4. 홍수빈도곡선 유도

4.1 극치강수량 모의 발생

본 연구에서는 극치강수량을 모의하기 위해 비교적 장기간의 자료를 보유하고 있는 기상청 관할 3개의 기상관측소 강수량을 대상으로 연구를 진행하였다. 본 연구에서 사용한 강수지점은 보은, 금산, 추풍령이며 모두 40년 이상의 강수량을 보유하고 있다. 이와 같이 강우-유출 모형의 입력 강수량으로 의미를 가지기 위해서는 유역 내 강수지점간의 상관성 재현이 기본적으로 보장되어야 한다. 즉, 유역출구에서 홍수량을 추정하기 위해서 사용되는 강수지점의 강수사상이 실제 강우사상과 같이 공간적으로 유사한 특성으로 재현되어야 실질적으로 유역출구에서 홍수량이 의미 있는 값을 가지게 된다. 이를 위해서 본 연구에서는 지점간의 강수발생 상관성을 고려한 모형을 적용하였으며 이와 더불어 극치강수량에 재현성을 극대화하기 위하여 PKPD를 적용하여 2,000년(365일×2000년)에 해당하는 일강수량자료를 모의하였다.

아래 Fig. 5는 3개의 강수지점에 대해서 지점간의 상관성을 실측치로부터 추정한 결과와 본 연구에서 제안된 모

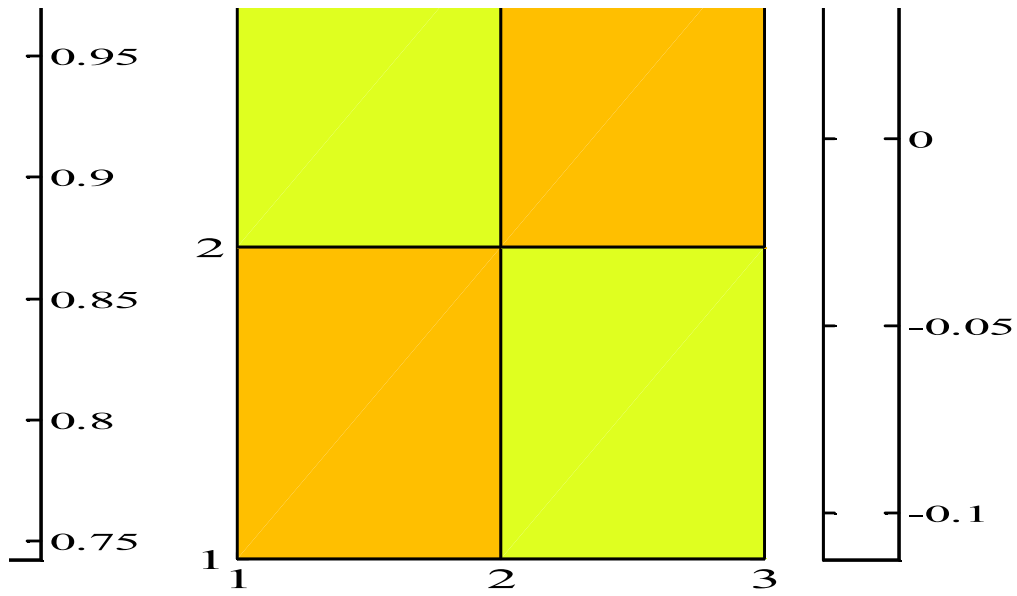
형을 통하여 추정된 각 지점의 강수량간의 상관성을 비교한 것을 나타낸다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 재현된 강수량이 실제 강수지점간의 공간적인 특성을 거의 동일하게 재현하는 것을 확인할 수 있다. 즉 두 개의 상관행렬의 차이를 보면 거의 0의 가깝게 추정되고 있다.

Fig. 6은 다지점 강수모의기법을 통해서 모의된 강수량이 관측강수량의 특성을 효과적으로 재현할 수 있는지를 판단하기 위해서 중앙값, 표준편차, 왜곡도, 100년 빈도 강수량을 실측강수량, 기존 Gamma 분포를 활용한 강수모의기법, 불연속 Kernel Pareto 분포를 이용한 다지점 강수모의 기법 등 3가지 방법에 대해서 비교한 것을 나타낸다. Fig. 6에서 나타나고 있듯이 본 연구에서 적용된 다지점 강수모의기법이 모든 지표에서 월등한 재현 능력을 보여주고 있다.

4.2 홍수빈도곡선 유도

앞절에서 유역의 선행함수조건, 강우형태 등의 유역 매개변수의 불확실성을 포함한 모의를 하기 위해서 BHEC-1 강우-유출 모형의 불확실성 분석을 실시하여 매개변수, 모형 및 입력자료의 불확실성을 정량화할 수 있었다. 홍수빈도곡선을 유도하기 위해서는 다수의 수문곡선의 추출이 필수적이며, 이를 위하여 2,000년 모의강수량을 BHEC-1 모형의 입력자료로 활용하였다. 이와 더불어 앞선 연구에서 추정된 매개변수들의 사후분포로부터 매개변수들을 추출하여 강우-유출 과정의 불확실성과 강우의 불확실성이 종합적으로 고려된 다수의 홍수수문곡선을 추출하였다. Fig. 7은 2,000개의 극치사상에 해당하는 홍수수문곡선을 나타낸다.

최종적으로 모의된 홍수수문곡선으로부터 첨두홍수량만을 추출하였으며 확률도시공식으로 각 홍수량에 재현



(a) Correlation Matrix Estimate From Observation (b) Correlation Matrix Estimate From Simulation Result (c) Difference Between Matrix (a) and Matrix (b)

Fig. 5. Assessment of Spatial Dependence Between Observation and Simulation Results

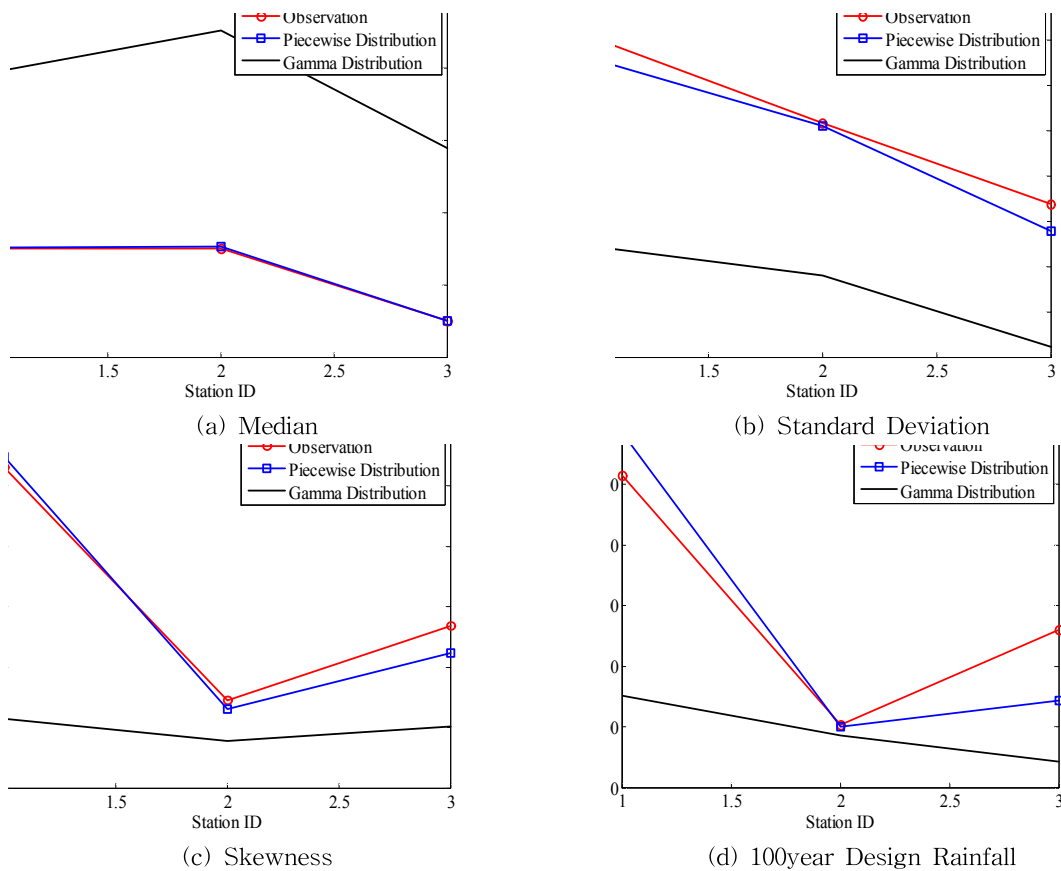


Fig. 6. Assessment of Simulation Capacity with Main Characteristics of Rainfall

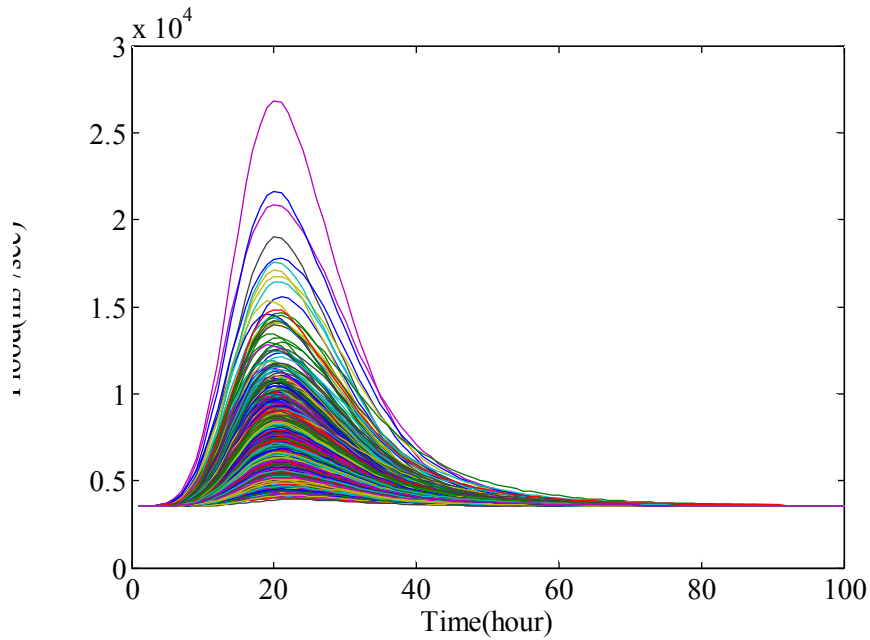


Fig. 7. Discharge Ensemble Using Rainfall Simulation Technique and Bayesian HEC-1 Model

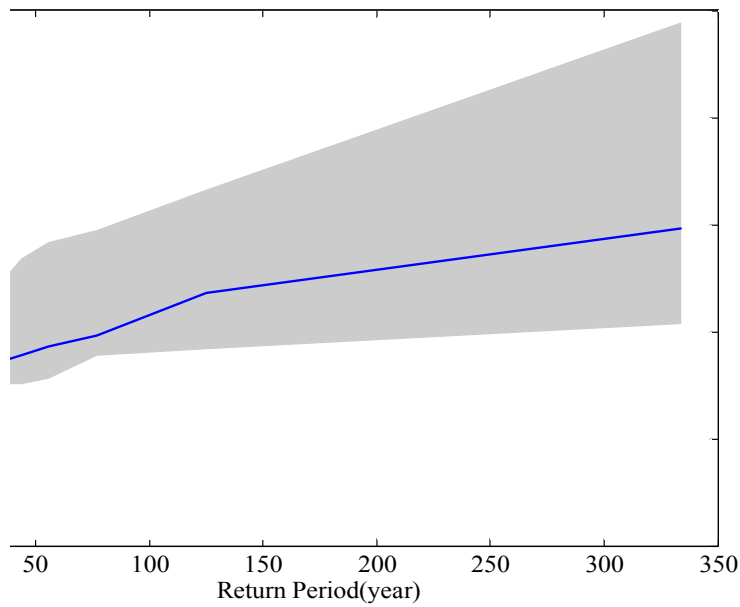


Fig. 8. Flood Frequency Curve and Associated Uncertainty Bound Using Proposed Model

기간을 부여하였다. Fig. 8은 최종적으로 도출된 홍수빈도곡선을 나타내며 100년 빈도 및 200년 빈도의 홍수량은 대략 11,000 cms, 12,000 cms의 정도의 값으로 추정되고 있다.

본 연구에서 제안하고 있는 모의기반의 홍수빈도추정 방법과 비교차원에서 강우빈도해석을 통해서 대청댐의 빈도별 면적확률강우량을 추정하고 최종적으로 강우-

유출 모형을 통해 빈도별 확률홍수량을 계산하여 Table 4에 나타냈다. 이와 함께 연최대홍수량자료를 이용한 빈도해석도 실시하여 비교하여 Table 5에 나타냈다. 기존 빈도별 홍수량을 추정하는 방법인 강우빈도해석기법과 연계한 강우-유출 모의와 홍수빈도해석결과와 본 연구에서 제안하는 모의기반의 홍수빈도곡선 유도방법과 큰 차이를 보이지 않는 것을 확인할 수 있었으며 이는

Table 4. Results of Existing Approach Using Rainfall Frequency Analysis and Rainfall-Runoff Modeling

Return Period (year)	2	3	5	10	20	30	40	50	100	200	500	1,000
Design Flood	3,784	4,643	5,603	6,804	7,976	8,349	8,657	9,504	10,666	11,813	13,384	14,560

Table 5. Design Flood Estimation Using Flood Frequency Analysis

Dist. / Freq.	NOR	GEV	GUM	LGU2	LN2	LN3	WBU2	WKB5	Mean
2	4,266	4,204	3,939	3,591	4,213	4,213	4,128	4,388	4,118
5	5,866	5,888	5,694	5,184	6,157	5,849	5,871	5,318	5,728
10	6,704	6,780	6,856	6,609	7,509	6,736	6,820	6,158	6,771
20	7,395	7,499	7,970	8,344	8,846	7,485	7,613	7,238	7,799
25	7,596	7,703	8,324	8,984	9,279	7,707	7,845	7,648	8,136
50	8,173	8,266	9,413	11,282	10,638	8,347	8,512	9,155	9,223
100	8,691	8,740	10,494	14,143	12,029	8,932	9,112	11,096	10,405
200	9,166	9,141	11,571	17,716	13,461	9,475	9,662	13,595	11,723
500	9,741	9,579	12,992	23,846	15,427	10,143	10,329	18,031	13,761
1000	10,144	9,852	14,066	29,850	16,975	10,619	10,796	22,521	15,603

모의강수량과 BHEC-1 모형을 이용한 홍수빈도곡선 작성 방법이 홍수량 추정방법으로서 적용이 가능함을 의미한다.

5. 결 론

최근 지구온난화로 인한 이상기후 및 기후변동성 증가는 방재관점에서 홍수관리의 어려움을 가중시키고 있으며 더불어 수문변동성 증가로 인해 이수관점에서 수자원 관리의 어려움도 동시에 커지고 있다. 이러한 점에서 신규 수공구조물의 설계 및 기존 수공구조물의 안정성 평가를 위해서 기본적으로 요구되는 홍수빈도해석의 중요성이 특히 강조되고 있다. 즉, 기후변화와 같은 비정상성 요소의 고려뿐만 아니라 수문자료의 부족으로 인한 표본 오차 등을 고려하여 불확실성이 반영된 홍수수문빈도해석 절차의 수립이 요구되고 있는 현실이다. 국외에서는 상대적으로 자료연한이 긴 강수량자료의 모의기법과 강우-유출 모형의 불확실성 분석이 연계된 홍수빈도곡선 유도방안 수립되어 운영되고 있다. 우리나라의 경우 강우빈도해석과 강우-유출모형을 연계한 간접적인 방안이 실무적으로 활용되고 있으며 적용된 강우의 빈도와 추정되는 홍수량의 빈도를 동일시하여 해석하고 있으나 상당한 불확실성이 내재되어 있는 것이 사실이다. 이러한 점에서 본 연구에서는 극치강수량 모의기법과 Bayesian 강우-유출 모형

을 연계하여 불확실성 분석이 포함된 홍수빈도곡선 유도 기법을 개발하여 대청댐 유역에 적용하였다. 본 연구를 통해서 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 본 연구에서는 PKPD 기반의 강우 모의발생 기법을 적용하여 극치강수량에 대한 불확실성을 고려한 해석이 가능하였다. 적용된 PKPD 기반의 다지점 강우 모의 발생 기법은 유역의 강우 발생패턴을 복원하면서 극치강수량을 재현할 수 있도록 고안되었으며 보다 현실적인 극치강우발생이 가능하였다.

둘째, 댐으로 유입되는 유입량에 대한 불확실성을 고려한 해석을 위해서 Bayesian 기반의 HEC-1 모형이 적용되었으며 강우-유출 매개변수들의 사후분포 추정이 가능하였다. 추정된 매개변수들의 사후분포로부터 매개변수들을 추출하고 모의된 강우량이 입력 자료로 활용됨으로서 다중의 수문곡선 앙상블을 도출할 수 있었으며 강우-유출 관계에 대한 불확실성을 종합적으로 고려할 수 있었다.

셋째, 기존 강우빈도해석 방법과 홍수빈도해석 결과들과 비교를 수행하였으며 불확실성 범위 내에서 기존 방법들과 유사한 거동을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 “국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비지

원[11기술혁신C02]에 의해 지원되었습니다. 저자들은 전북대학교 방재연구소에 소속되어 연구를 수행 하였습니다.

참고문헌

- Bae, D.-H., Jeong, I.-W., and Kang, T.-H. (2002). "A Study on Parameters Estimation Considering Runoff Characteristics in Watershed." *Proceedings: Korean Society Civil Engineering Conference*, KSCE, pp. 1226-1229.
- Bates, B.C., and Townley, L.R. (1988). "Nonlinear, discrete flood event models. 3. Analysis of prediction uncertainty." *Journal of Hydrology*, Vol. 99, pp. 91-101.
- Beven, K.J., and Binley, A. (1992). "The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction." *Hydrological Processes*, Vol. 6, pp. 279-298.
- Binley, A.M., Beven, K.J., Calver, A., and Watts, L.G. (1991). "Changing responses in hydrology: assessing the uncertainty in physically based model predictions." *Water Resources Research*, Vol. 27, No. 6, pp. 1253-1261.
- Bloschl, G., and Sivapalan, M. (1997). *Process control on flood frequency: Runoff Generation, Storm Properties and Return*, Centre for Water Research Environmental Dynamics Report, ED 1159 MS. Department of Civil Engineering, The University of Western Australia.
- Boughton, W., and Droop, O. (2003). "Continuous simulation for design flood estimation—a review." *Environ Model Software*, Vol. 18, pp. 309-318.
- Cameron, D., Beven, K.J., Tawn, J., and Naden, P. (2000). "Flood frequency estimation by continuous simulation (with likelihood based uncertainty estimation)." *Hydrol. Earth Sys. Sci.*, Vol. 4, No. 1, pp. 23-34.
- Frost, A.J., Srikanthan, R., and Cowpertwait, P.S.P. (2004). *Stochastic Generation of Daily Rainfall at a Number of Sites*. CRC Technical report 04/09. CRC for Catchment Hydrology.
- Garen, D.C., and Burges, S.J. (1981). "Approximate error bounds for simulated hydrographs." *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 107, pp. 1519-1534.
- Gelman A, Chew G.L, and Shnaidman M. (2004). "Bayesian Analysis of Serial Dilution Assays." *Biometrics*, Vol. 60, No. 2, pp. 407-417.
- Han, K.-Y., Lee, J.-S., Kim, S.-H. (1997). "Risk Model for the Safety Evaluation of Dam and Levee (I). - Theory and Model-." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 30, No. 6, pp. 679-690.
- Hydrologic Engineering Center (1990). "HEC-1 Flood Hydrograph Package, User's Manual." U.S. Army Corps of Engineers, Davis, California.
- Kim, M.-M., Lee, W.-H., and Cho, W.-C. (1998). "Reliability Analysis of Storm Sewer System by AFOSM Method." *Journal of Korean Society Civil Engineering*, KSCE, Vol. 13, No. 2, pp. 201-209.
- Kwon, H.-H., and Kim, B.-S. (2009). "Development of Statistical Downscaling Model Using Nonstationary Markov Chain." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 42, No. 3, pp. 213-225.
- Kwon, H.-H., and Moon, Y.-I. (2007). "Development of Statistical Seasonal Rainfall Model Considering Climate Information and Typhoon Characteristics." *Journal of Korean Society Civil Engineering*, KSCE, Vol. 27, No. 1B, pp. 45-52.
- Kwon, H.-H., and So, B.-J. (2011). "Development of Daily Rainfall Simulation Model Using Piecewise Kernel-Pareto Continuous Distribution." *Journal of Korean Society Civil Engineering*, KSCE, Vol. 31, No. 3B, pp. 277-284.
- Kwon, H.-H., Kim, J.-G., Lee, J.-S., and Na, B.-K. (2012). "Uncertainty Assessment of Single Event Rainfall-Runoff Model Using Bayesian Model." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 45, No. 5, pp. 505-516.
- Kwon, H.-H., Moon, Y.-I., and Khalil, A.F. (2007). "Nonparametric Monte Carlo Simulation For Flood Frequency Curve Derivation : An Application to A Korean Watershed." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 43, No. 5, pp. 1316-1328.
- Kwon, H.-H., Moon, Y.-I., Kim, B.-S., and Yoon, S.-Y. (2008). "Parameter Optimization and Uncertainty Analysis of the NWS-PC Rainfall-Runoff Model Coupled with Bayesian Markov Chain Monte Carlo Inference Scheme." *Journal of Korean Society Civil*

- Engineering*, KSCE, Vol. 28, No. 4B, pp. 383-392.
- Kwon, H.-H., Park, D.-H., and Moon, Y.-I. (2004a). "Derivation of Flood Frequency Curve Using Uncertainty Analysis of Single Event Rainfall-Runoff Model (I). -Uncertainty Analysis of Rainfall-Runoff Model-." *Journal of Korean Society Civil Engineering*, KSCE, Vol. 24, No. 3B, pp. 229-239.
- Kwon, H.-H., Park, D.-H., and Moon, Y.-I. (2004b). "Derivation of Flood Frequency Curve Using Uncertainty Analysis of Single Event Rainfall-Runoff Model (II). -Derivation of Flood Frequency Curve-." *Journal of Korean Society Civil Engineering*, KSCE, Vol. 24 No. 3B, pp. 241-246.
- Lei, J., and Schilling, W. (1993). "Propagation of model uncertainty. Proceedings Sixth International Conference on Urban Storm Drainage, Niagara Falls, Canada." *Seapoint Publishing, Victoria, BC, Canada*, pp. 465-470.
- Loukas, A. (2002). "Flood frequency estimation by a derived distribution procedure." *Journal of Hydrology*, Vol. 255, pp. 69-89.
- Melching, C.S. (1992a). "An improved first-order reliability approach for assessing uncertainties in hydrologic modeling." *Journal of Hydrology*, Vol. 132, pp. 157-177.
- Melching, C.S. (1992b). "A comparison of methods for estimating variance of water resources model predictions. In: Kuo, J.-T., Lin, G.-F. (Eds.)." *Stochastic Hydraulics '92, Proceedings Sixth International Association for Hydraulic Research Symposium on Stochastic Hydraulics*, Taipei, Taiwan. Water Resources Publications, Littleton, CO, pp. 663-670.
- Melching, C.S. (1995). Computer models of watershed hydrology. In: Vijay Singh, P. (Ed.). *Reliability Estimation*. Water Resources Publications, Littleton, CO, pp. 69-118.
- Muzik, I. (2002). "A first-order analysis of the climate change effect on flood frequencies in a subalpine watershed by means of a hydrological rainfall-runoff model." *Journal of Hydrology*, Vol. 267, pp. 65-73.
- Rahman, A., Weinmann, P.E., Hoang, T.M.T., and Laurenson, E.M. (2002). "Monte Carlo simulation of flood frequency curves from rainfall." *Journal of Hydrology*, Vol. 256, pp. 196-210.
- Rosenblatt Murray (1956). "On the Estimation of Regression Coefficients of a Vector-Valued Time Series with a Stationary Residual." *The Annals of Mathematical Statistics*, Vol. 27, No. 1, pp. 99-121.
- Shin, H.-S., and Yoon, Y.-N. (1998). "An Uncertainty and Sensitivity Analysis in Estimating Annual Reservoir Sediment Deposition Based on MCS and LHS Methods." *Journal of Korean Society Civil Engineering*, KSCE, Vol. 18, No. 2-2, pp. 141-152.
- Srikanthan, R. (2005). *Stochastic Generation of Daily Rainfall at a Number of Sites*. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology. Technical report 05/7.
- Yu, P.S., Yang, T.C., and Chen, S.J. (2001). "Comparison of uncertainty analysis methods for a distributed rainfall-runoff model." *Journal of Hydrology*, Vol. 244, pp. 43-59.

논문번호: 12-094	접수: 2012.08.14
수정일자: 2012.09.17/09.27	심사완료: 2012.09.27