

# 수문해석과정의 불확실성을 고려한 수문학적 댐 위험도 해석 기법 개선

## Improvement of Hydrologic Dam Risk Analysis Model Considering Uncertainty of Hydrologic Analysis Process

나 봉 길\* / 김 진 영\*\* / 권 현 한\*\*\* / 임 정 열\*\*\*\*

Na, Bong-Kil / Kim, Jin-Young / Kwon, Hyun-Han / Lim, Jeong-Yeul

### Abstract

Hydrologic dam risk analysis depends on complex hydrologic analyses in that probabilistic relationship need to be established to quantify various uncertainties associated modeling process and inputs. However, the systematic approaches to uncertainty analysis for hydrologic risk analysis have not been addressed yet. In this paper, two major innovations are introduced to address this situation. The first is the use of a Hierarchical Bayesian model based regional frequency analysis to better convey uncertainties associated with the parameters of probability density function to the dam risk analysis. The second is the use of Bayesian model coupled HEC-1 rainfall-runoff model to estimate posterior distributions of the model parameters. A reservoir routing analysis with the existing operation rule was performed to convert the inflow scenarios into water surface level scenarios. Performance functions for dam risk model was finally employed to estimate hydrologic dam risk analysis. An application to the Dam in South Korea illustrates how the proposed approach can lead to potentially reliable estimates of dam safety, and an assessment of their sensitivity to the initial water surface level.

**keywords** : dam risk analysis, Bayesian regional frequency analysis, Bayesian HEC-1, uncertainty

### 요 지

수문학적 댐 위험도 분석은 복잡한 수문분석과 연계되어 있으며, 기본적으로 수문분석 과정과 모형에 사용되는 입력 자료에 대한 불확실성을 평가하는 과정이 필요하다. 그러나 체계적인 불확실성 분석 과정을 통한 댐 위험도 분석 절차에 대한 연구는 상대적으로 적은편이다. 이러한 점에서 본 연구에서는 기존 연구에 대해서 2가지 주요 개선점을 도출하여 댐 위험도 분석에 활용하였다. 첫째, 강우 분석 시 매개변수의 불확실성 분석이 가능한 Bayesian 모형 기반의 지역빈도해석 절차를 수립하였다. 둘째, 강우-유출 모형 매개변수의 사후분포를 정량적으로 추정하기 위하여 Bayesian 모형과 연계한 HEC-1모형을 도입하였다. 도출된 유입 시나리오를 댐의 수위로 환산하기 위하여 기존 저수지 운영기준에 근거하여 저수지 추적을 수행하였으며, 최종적으로 실행함수를 통하여 수문학적 위험도를 추정하였다. 실제 댐에 대해서 모형의 적합성을 평가하였으며, 초기수위 가정에 따른 수문학적 위험도에 민감도를 평가하였다.

**핵심용어** : 댐 위험도, Bayesian 지역빈도해석, Bayesian HEC-1, 불확실성

\* 한국수자원공사 수자원사업처 수자원계획 팀장 (e-mail: nbk@kwater.or.kr)

Head Manager, K-water, 200, Sintanjin-ro, Daedeok-gu, Daejeon, 306, Korea

\*\* 전북대학교 토목공학과 박사과정, 방재연구센터 (e-mail: jinyoungkim@jbnu.ac.kr)

Ph.D. Course, Department of Civil Engineering, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

\*\*\* 교신저자, 전북대학교 토목공학과 부교수, 방재연구센터 (e-mail: hkwon@jbnu.ac.kr, Tel: 82-63-270-2426)

Corresponding Author, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

\*\*\*\* 한국수자원공사 K-water 연구원 기반시설연구소 지반구조연구팀 (e-mail: passion@kwater.or.kr)

Principal Researcher, K-water Institute, 462-1, Jeonmin-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-730, Korea

## 1. 서 론

최근 전 세계적으로 급증하는 기후변화의 영향으로 이상홍수 발생, 댐의 여유고 부족 등 댐 붕괴를 위협하는 다양한 위험인자가 도출되고 있으며, 댐 붕괴시 하류부에 막대한 피해 결과를 초래할 가능성이 크다. 특히 댐 하류부의 급격한 도시화 및 발전으로 인해 댐 붕괴시 막대한 예산 소요 및 하류부에 과도한 불안감을 야기할 수 있다. 국내에서 시행되고 있는 정밀안전진단은 현장조사, 상세외관조사, 내구성조사, 수문학적 안전성 평가 등 다양한 방법의 접근으로 댐 안전성 평가가 이루어지고 있다. 그러나 기존 안전성평가에서 시행되고 있는 정밀안전진단의 경우 특정 수문학적 빈도와 가정조건을 기준으로 댐의 안전을 판단하고 있으며 댐 파괴의 결과를 단순히 재해로 규정하는 등 전반적으로 보수적인 해석 절차를 따르고 있다. 반면 국외에서는 1990년대 이후로 기존 댐 안전성 분석방법의 단점을 극복하고자 위험도 평가기법을 도입하여 댐 안전성 분석을 수행하고 있다. 즉, 댐 안전성 평가시 위험요소들의 분류와 규명, 위험요소들 간의 인과관계, 위험요소들의 발생확률 산정 등을 통해 각각의 위험요소들의 발생경로와 발생확률 등을 체계적이고 합리적인 방법으로 안전성 평가가 수행되고 있다.

전통적으로 국내 수문학적 댐 안전성 평가는 3단계로 이루어진다. 첫째, 유역내 강우관측소를 대상으로 확률강우량 추정 후 면적강우량으로 환산, 둘째, 추정된 면적강우량과 유역특성인자를 고려하여 강우-유출 분석을 수행한다. 마지막으로 강우-유출 분석에서 도출된 유출량을 댐의 유입량으로 간주하고, 댐 운영모의를 수행한 결과를 이용하여 최종적으로 댐 안전여부를 판단한다. 이러한 분석 절차는 국내에서 가장 일반적으로 이루어지고 있는 수문학적 댐 안전성 평가 절차이다. 그러나 기존 댐 안전성 절차에서는 각각의 단계에서 불확실성을 고려하지 못하는 문제점이 있다. 첫째로, 확률강우량 추정 시 선택되는 확률분포형 매개변수의 불확실성이 효과적으로 고려되지 못하고 있다(Kwon et al., 2013a; Kwon and Lee, 2011; Kim and Lee, 2008). 둘째, 강우-유출 분석 중 매개변수 추정시 상대적으로 적은 강우-유출 사상만을 가지고 매개변수를 추정하고 있으며, 각 사상마다 추정된 매개변수를 단순히 평균하여 사용되고 있어 표본오차(sampling error)에 대한 불확실성이 매우 크다 하겠다(Kwon et al., 2012). 마지막으로, 댐 모의 운영시 댐 수문의 작동여부, 초기수위 조건, 여수로 방류능력 여부 즉, 댐 현재 상태를 고려하지 않고 댐 안전성 평가를 수행해 왔다. 본 연구에서는 위에

서 언급한 3가지 문제점 중 확률강우량의 불확실성과 강우-유출 분석의 불확실성 등 2가지 문제점을 개선할 수 있는 방법론을 개발하고 국내 댐에 적용하고자 한다.

최근 국내외에서 댐 위험도 해석기법을 기반으로 한 연구들은 다음과 같다. Lee (2002)는 댐 안전성 평가를 위한 구체적인 모형 구축방안, 위험요소 인지, 인지된 위험요소별 반응확률 추정 등 위험도 평가기법에 대한 다양한 방법론과 가이드라인을 제시하였다. Han et al. (1997)은 댐 및 제방에 대한 수문학적 위험도 평가를 위해서 Monte-Carlo Simulation (MCS)기법과 Advanced First-Order Second-Moment (AFOSM) 기법에 의한 위험도 모형을 개발하여 기존의 댐 및 제방에 대한 안전도 평가와 유지보수 정책결정 등에 기여할 수 있는 모형을 제시하였다. 국외 연구로는 Melching et al. (1987)은 매개변수의 불확실성을 고려한 홍수사상의 초과확률의 해석적인 유도를 위해서 강우-유출 모형의 AFOSM 방법을 응용하여 해석하였다. Kuo et al. (2008)은 불확실성을 고려한 수문학적 월류 확률을 추정하기 위해서 MCS 기법을 도입하여 대만 지역의 댐에 대해서 모형의 적합성을 검증하였다. Moon and Kwon (2004a,b)은 기존 매개변수적 확률밀도함수 추정방법의 단점을 보완하기 위하여 비매개변수적 핵밀도 추정기법을 이용한 위험도 해석기법의 개발과 적용을 수행하였다.

본 연구에서는 기존 Kwon and Moon (2006)이 제시한 수리·수문학적 댐 위험도 분석 기법을 개선하는데 연구의 목적이 있다. 기존 연구에서는 실행함수 불확실성 변량에 대해서 비매개변수적 핵밀도함수법을 활용하였다. 그러나 핵밀도함수 방법의 경우 외삽시 과소 추정되는 문제점과 더불어, 확률강우량의 불확실성을 추정하지 못하는 단점이 있다. 또한, 기존 연구에서는 강우-유출 모형의 불확실성을 고려하기 위하여 매개변수의 범위를 단순히 가정하는 등 불확실성 분석에 대한 체계적인 접근이 이루어지지 못하였다.

본 연구에서는 첫째, 대상 댐 유역내 불확실성이 고려된 면적강우량 산정을 위해 Kwon et al. (2013a)이 제안한 계층적 Bayesian 지역빈도해석 모형을 기반으로 지역빈도 해석을 수행하였다. 둘째, 강우-유출 모형 매개변수의 불확실성 분석 및 침투유량을 효과적으로 재현하기 위하여 Bayesian 모형 기반의 HEC-1 강우-유출 모형(Kwon et al., 2013b)과 연계한 해석기법을 개발하였다. 마지막으로 개발된 주요 변량을 Kwon and Moon (2006)이 제안한 수리·수문학적 댐 위험도 실행함수를 활용하여 연구 대상댐의 월류 확률을 산정하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같

다. 1장에서는 논문의 배경 및 목적에 대해서 언급하였으며, 2장에서는 기존 댐 위험도 분석의 문제점 및 본 연구에서 개발한 각 방법론에 대해서 기술하였다. 3장에서는 연구 대상댐에 적용한 결과를 나타내었으며, 마지막으로 결론 및 토의를 4장에 수록하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 기존 수문학적 댐 위험도 해석기법

수리·수문학적 변량들은 각각 변량 자체의 고유한 통계학적인 특징을 가지고 있다. 기존의 위험도 분석에서 다루어지는 변량들에 대해서 통계적인 특징을 적절하게 반영하지 못하는 경우가 많았다. 즉, 수리·수문학적 변량인 강수량, 유출량, 풍속, 초기수위 등에 정규분포, 삼각형 분포 등을 적용시켜 위험도 분석을 실시하였다. 특히, 대부분의 수리·수문학적 변량들이 짧은 자료연한으로 인해 확률밀도함수 추정 시 매개변수의 신뢰도가 떨어져 관측 자료의 분포특성을 정확히 설명하는데 어려움이 따르며, 해석결과 전반에 불확실성을 가중시키는 원인으로 작용한다.

앞서 언급하였듯이 댐과 같은 수공구조물의 치수능력 부족은 구조물의 파손이나 붕괴에 직결되며, 대규모 인명 피해와 재산피해가 불가피하다. 그러나 현재의 수공구조물 안전성 평가는 주로 수리·수문학적으로 빈도별 강수량 및 홍수량을 산정하고 이에 따른 수위 변동성을 고려하여 여유고 개념의 결정론적 해석이 주로 수행되고 있다. 전통적으로 수문학적 안전성 평가는 확률강수량 추정, 강우-유출분석 그리고 댐 운영모의 순으로 댐 안전성 평가가 이루어진다. 이러한 댐 안전성 평가 절차는 국내외적으로 일반적으로 수행되어지고 있는 절차이다. 그러나 기존 안전성 평가는 각 단계별로 아래와 같은 문제점이 존재한다.

- 1) 국내의 확률강수량 추정 연구들은 주로 분포형 선택 및 매개변수 추정문제 등에 초점이 맞추어져 이루어졌다. 그러나 상대적으로 짧은 자료연한을 가지는 수리·수문자료에 대한 표본오차로 인해 추정되는 매개변수의 불확실성을 체계적으로 고려하지 못하는 단점이 있다.
- 2) 강우-유출 모의 수행 시 강수와 동일하게 신뢰성 있는 유출 자료의 부족으로 인해 매우 제한적인 범위에서 강우-유출 모형의 매개변수 추정이 이루어진다. 이러한 경우 강우의 초기상태, 강우강도, 유역의 전반적인 상태에 따라 동일한 강우라 하더라도 유출

특성이 매우 다르게 나타나는 등 댐 안전성 평가에 있어 주요 불확실성 요소로 작용할 수 있다.

- 3) 댐 운영모의 수행 시 일반적으로 초기수위 검토, 월류·여유고 확보 여부, 하류부 위험도 검토 순으로 댐 안전성 평가가 수행된다. 즉, 강수량 및 홍수량을 산정하고 이에 따른 수위 변동성을 고려하여 여유고 개념의 결정론적 해석이 주로 행해지고 있다. 그러나 댐 수문의 예기치 못한 작동 실패, 초기 수위의 변동성 등 댐 운영상의 불확실성은 반영하지 못하는 문제점이 존재한다.

앞서 언급하였듯이 본 연구에서는 위에서 문제점으로 지적한 1번째 및 2번째 문제에 대한 개선점을 제시하고 수리·수문학적 댐 월류 위험도 모형을 개발하고자 한다. 이를 위해 본 연구에서 도입한 주요 연구내용을 요약하면 다음과 같다.

## 2.2. 수리·수문학적 댐 위험도 해석기법 개선

### 2.2.1 계층적 Bayesian 지역빈도해석 모형

본 연구에서는 계층적 Bayesian 지역빈도해석 모형을 활용하여 댐 위험도 분석을 위한 강우시나리오를 도출하고자 한다. 일반적으로 댐 안전성 평가 시에는 유역내에 존재하는 강우관측소를 개별적으로 빈도해석을 실시하고 Thiessen 가중법을 이용하여 면적강수량으로 환산하는 과정을 통해 댐 안전성 평가를 위한 강우시나리오를 도출하게 된다. 그러나 제시된 방법으로 면적강수량 산정 시 상대적으로 자료연한이 짧은 단점으로 인해 추정되는 확률분포 매개변수의 신뢰성을 확보하기 어려운 경우가 많다. 또한, 중소규모 댐의 경우 유역 내에 빈도해석을 위한 강우지점이 존재하지 않아 체계적인 댐 안전성 평가가 어려운 문제점이 있다. 이와 더불어 추정되는 기존 확률강수량의 신뢰성을 정량적으로 평가하지 못하게 됨으로서 댐 위험도 분석 시 기본적으로 요구되는 불확실성을 고려하지 못하는 단점이 존재한다. 이러한 점에서 본 연구에서는 Kwon et al. (2013a)이 개발한 계층적 Bayesian 지역빈도해석 모형을 활용하여 대상유역의 면적강수량을 산정하고자 하며, 계층적 Bayesian 지역빈도해석 모형에 대해서 간단히 요약정리하면 다음과 같다.

계층적 Bayesian 지역빈도해석 모형은 기존의 지역빈도해석 방법과 개념적으로는 유사하지만, 접근하는 방식은 상이하다. 즉, 지점별 확률분포형을 추정하되 유역전체의 확률특성을 표현할 수 있는 상위단계의 대표 확률밀도함수를 연속적으로 추정할 수 있도록 모형이 구성된다.

즉, 매개변수 추정시 각 지점별로 정보를 공유하여 최종적으로 지역적 매개변수로 귀결되는 형태의 모형이다. 또한 기존 L-모멘트 기법과 유사한 결과를 도출하는 동시에 매개변수들은 Bayesian 모형으로부터 사후분포(posterior distribution)를 추정하여 불확실성을 정량화 할 수 있는 장점을 제공한다(Kwon et al., 2013a).

본 연구에서는 Gumbel 분포를 지역빈도해석 기법의 대표 확률분포형으로 선택하여 연구를 진행하였다. 계층적 Bayesian 지역빈도해석의 개념도는 Fig. 1과 같으며, 단계별 해석절차는 다음과 같다. 여기서  $\mu_\mu, \sigma_\mu, k_s, s_\sigma$ 는 강우관측지점별 Gumbel 분포 매개변수의 사전분포를 뜻하며, Y는 백터자료로서 t년도 n개의 강우관측지점을 의미한다.

- 1) 먼저 최우도법(maximum likelihood method)을 이용하여 Gumbel 분포의 매개변수를 추정하여 Bayesian 모형에 초기치로 활용하였다. 다음 Eqs. (1) and (2)는 Gumbel 분포형의 확률밀도함수 및 누가확률밀도함수를 나타낸다. 여기서  $\mu$ 는 위치 매개변수(location parameter)이고,  $\sigma$ 는 규모 매개변수(scale parameter)이다.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma} \exp\left[-\frac{x-\mu}{\sigma} - e^{-\frac{x-\mu}{\sigma}}\right] \quad (1)$$

$$F(x) = \exp\left[-e^{-\frac{x-\mu}{\sigma}}\right] \quad (2)$$

- 2) 지점별로 확률분포형을 적용하여 유사한 통계적 특성을 가지는 자료집단들이 정보를 서로 효과적으로 공유하기 위해 상위단계에 지역적 확률분포형을 배치함으로써 지역의 대표 매개변수를 취득하였다. 지역빈도해석을 위한 48시간 연최대치자료 계열이 Gumbel 분포를 따른다고 가정할 때 계층적 Bayesian

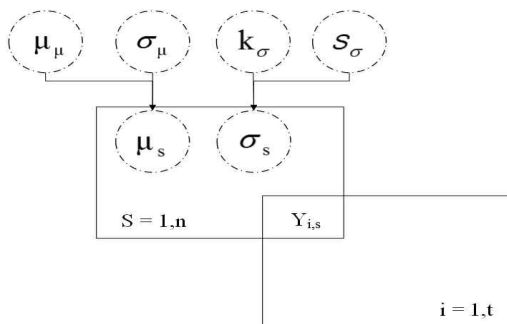


Fig. 1. Directed Acyclic Graph for Hierarchical Bayesian Model Based Regional Frequency Analysis

모형은 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 Y는 백터자료로서 n개 강우관측지점( $s = 1, \dots, 12$ )의 48시간 연최대치자료를 의미하며,  $\mu, \sigma$ 는 강우관측지점별 Gumbel 분포의 n개 매개변수를 나타낸다. Bayesian 모형 하에서, Eq. (3)의 매개변수들  $\mu, \sigma$ 가 확률분포를 가질 때, 각 강우지점별 매개변수는 Eqs. (4) and (5)와 같이 상위단계의 확률분포로부터 추정되는 것으로 계층적 Bayesian 모형을 구축하였다.

$$Y_{i,n} \sim \text{Gumbel}(\mu_s, \sigma_s), \quad s = 1, \dots, 12 \quad (3)$$

$$\mu_s \sim N(\mu_\mu, \sigma_\mu) \quad s = 1, \dots, 12 \quad (4)$$

$$\sigma_s \sim G(k_\sigma, s_\sigma) \quad s = 1, \dots, 12 \quad (5)$$

- 3) Eq. (6)은 계층적 Bayesian 모형내 매개변수들의 결합사후분포(joint posterior distribution)를 나타낸다. Eq. (6)에서 모든 매개변수에 대한 적분을 통해 직접적으로 추정하는 것이 불가능하여 본 연구에서는 MCMC (Monte Carlo Markov Chain) 방법을 도입하여 매개변수들의 사후분포를 추정하였다. 본 연구에서는 MCMC 방법 중 깁스표본법(Gibbs sampling)을 이용하여 매개변수들을 추정하였으며, 매개변수의 수렴(Convergence)을 위해 3개의 Chain을 독립적으로 시행하여 효과적으로 혼합(mixing)되도록 하였다.

$$p(\mathbf{Y} | \Theta) = \prod_{s=1}^n \prod_{i=1}^t \text{Gumbel}(Y_{i,s} | \mu_s, \sigma_s) \quad (6)$$

$$\cdot N(\mu_s | \mu_\mu, \sigma_\mu) \cdot G(\sigma_s | k_\sigma, s_\sigma)$$

- 4) 획득한 지역매개변수의 사후분포를 활용하여 강우시나리오의 도출과 더불어 불확실성을 정량화 하였다. 최종적으로 도출된 강우시나리오는 Bayesian HEC-1 모형의 강우 입력 자료로 활용된다.

## 2.2.2 Bayesian HEC-1 모형을 활용한 확률홍수량 산정

국내외에서 대표적으로 이용되고 있는 HEC-1 모형은 두 가지 문제점이 존재한다. 첫째, 기존 HEC-1 모형내에 내장되어 있는 매개변수 최적화 기법은 다수의 유역을 대상으로 매개변수 최적화 수행 시 수렴하지 않는 문제점이 있다. 둘째, 일반적으로 모형 검증시 적은 수의 실측자료만을 이용하여 강우-유출모형 매개변수의 추정이 이루어지며, 이로 인해서 강우-유출관계의 불확실성을 고려하지 못하는 단점이 있다. 이러한 점에서 Kwon et al. (2012)는

위에서 언급한 문제점을 개선하고자 Bayesian 기법을 HEC-1 모형에 연계할 수 있는 방안을 수립하였다. 본 연구에서는 댐 위험도 평가 시 요구되는 유출시나리오 산정을 위해서 Bayesian HEC-1 모형을 도입하여 강수로부터 유출까지 일련의 강우-유출 분석 단계에서의 불확실성을 정량적으로 해석하는 방안을 개발하였다.

모형을 적용하는데 있어서 시행착오를 최소화하기 위하여 Bayesian HEC-1 모형은 우선적으로 기존 HEC-1 모형의 해석과정 및 입출력 양식이 그대로 유지되도록 개발되었다. 둘째, 앞서 언급한 매개변수의 불확실성과 매개변수의 효과적인 최적화를 위하여 Bayesian 기법을 핵심 모의기법으로 도입하였다. Bayesian HEC-1 모형에서 가장 핵심이 되는 부분은 기존 HEC-1 모형에서는 다루지 못 하였던 불확실성을 고려한 매개변수 추정이 가능하다는 점이다. Bayesian MCMC 기법의 대표적인 방법으로는 Metropolis-Hastings 알고리즘과 깃스표본법이 있다. 깃스표본법은 Metropolis-Hastings 알고리즘에 기반을 둔 방법론으로서 모의계산이 빠르고 적용하기 쉽다는 장점을 제공한다.

본 연구에서는 ○○댐의 3개 유역내 총 9개의 매개변수 ( $CN_n, Tc_n, k_n$ ,  $n = 1, 2, 3$ )를 최적화 대상으로 HEC-1 모형을 구축하였다. 본 연구에서 9개의 매개변수는 정규분포로 가정하였으며 총 9개의 매개변수에 대한 결합확률은 Eq. (8)와 같다. 즉, 유역내 SCS Curve No(CN), Tc, K 값을 최적화하기 위해, 우선 CN을 Eq. (7a)와 같이 정규분포로 모의발생 시키고 모의 발생된 CN을 조건부로 하는 Tc를 찾아낸 후 K값을 찾는 등 연속적인 Chain의 형태를 가지고 진화하는 과정을 통해 최적의 매개변수가 추정되게 된다.

$$CN_n \sim N(\mu_{cn}, \sigma_{cn}^2) \quad n = 1, 2, 3 \quad (7a)$$

$$Tc_n \sim N(\mu_{tc_n}, \sigma_{tc_n}^2) \quad n = 1, 2, 3 \quad (7b)$$

$$K_n \sim N(\mu_{K_n}, \sigma_{K_n}^2) \quad n = 1, 2, 3 \quad (7c)$$

$$p(CN_{1,2,3}, Tc_{1,2,3}, K_{1,2,3}) \propto 1 \quad (8)$$

Bayes' 정리를 식으로 나타내면 Eq. (9)와 같다. 여기서,  $\theta = [CN_{1,2,3}, Tc_{1,2,3}, K_{1,2,3}]$ 는 전체매개변수들의 집합을 나타내며,  $p(\theta)$ 는 매개변수들의 사전분포를  $p(y|\theta)$ 는 유출자료  $y$ 의 우도함수(likelihood function)를 의미한다.

$$p(\theta | y) = \frac{p(y|\theta)p(\theta)}{p(y)} \quad (9)$$

$$p(y | \theta) \propto \prod_{t=1}^T N(y_t | \mu(t), \sigma) \quad (10)$$

$$\bullet N(\mu(t) | CN_{1,2,3}, Tc_{1,2,3}, K_{1,2,3}, \sigma_{cp}^2, \sigma_{tc}^2, \sigma_r^2)$$

Bayesian 방법을 이용한 매개변수 추정 시 각 매개변수에 적절한 사전분포(prior distribution)를 이용하여 매개변수의 사후분포(posterior distribution)를 추정할 수 있게 된다. 즉, 자료로부터 얻은 매개변수에 대한 정보와 매개변수의 과거 경험 또는 주관적 판단을 사전분포로 표현함으로써 보다 정확한 매개변수를 추정할 수 있어야 한다. 그러나 Eq. (9)를 보면 모든 매개변수에 대해 적분을 통해 직접적으로 추정하는 것은 불가능하다. 따라서 앞서 언급한 MCMC 방법을 도입하여 매개변수들의 사후분포를 추정하였다. Bayesian MCMC 기법은 단순히 변량을 모의발생 시키는 MCS 모의와는 다르게 변량간의 관계를 규정하고 이를 유지하면서 다음 변량을 추정하는 조건부 Sampling 방법이라 할 수 있다.

### 2.2.3 수리·수문학적 댐 위험도 모형

본 연구에서는 앞서 언급하였듯이 Kwon and Moon (2006)이 제시한 수리·수문학적 실행함수를 이용하여 댐 월류 위험도 산정 모형을 제시하였으며, 수문학적 댐 위험도 해석 모형에 대해서 요약하여 나타내면 다음과 같다. 즉, “홍수로 인한 월류 위험도( $P_F$ )”, “풍파로 인한 월류 위험도( $P_H$ )”, “홍수와 풍파가 동시 발생으로 인한 월류 위험도( $P_{FW}$ )” 등 3개의 실행함수를 도입하였으며, 다음 Eqs. (11)~(13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_F = f(h_F + H_0) - f(H_0) \quad (11)$$

$$MAX[\int_0^{t_p} I - \int_{t_s}^{t_p} C_d L(h_F + H_0 - H_s)^{3/2}] = 0$$

$$P_H = H_c - H_0 - [\frac{V_w^2 F}{63200D} + az_w \exp(-b(0.031v_w^{0.18} F_e^{-0.09}))] \quad (12)$$

$$P_{FW} = \frac{\mu_F}{\mu_F + \mu_W} P[h_F + h_{mz} > H_c - H_0] \quad (13)$$

$$+ \frac{\mu_F}{\mu_F + \mu_W} MAX[P[h_F + \frac{h_{mz}}{2} > H_c - H_0]]$$

여기서,  $P_F, P_H, P_{FW}$ 는 실행함수의 종속변수에 해당하며, 독립변수들은 다음과 같다.  $h_F$ 는 홍수 유입에 의한 수위증가분,  $H_c$ 는 댐체체의 높이,  $H_0$ 는 초기저수위를 나타낸다.  $V_w$ 는 풍속,  $F$ 는 취송거리,  $D$ 는 저수지 평균수심,  $F_e$ 는 유효취송거리,  $a, b$ 는 사면 경사에 따른 계수를 나타낸다. 또한  $H_s$ 는 여수로

높이,  $C_d$ 는 유량계수,  $L$ 은 여수로 길이,  $\mu_F, \mu_w$ 는 위험도 평가 시 고려되는 평균홍수지속시간 및 평균풍속지속시간을 의미하며,  $h_{mz}$ 는  $h_w, h_F$ 에 의해서 계산되는 최대값을 의미한다.

본 연구에서는 앞서 설명된 Bayesian 강수모의기법과 Bayesian 강우-유출모의기법을 연계하여 수문학적 댐 위험도 해석을 위한 앙상블 시나리오를 도출하였으며, 이를 기존 HEC-5모형에 입력하여 수위 앙상블 시나리오를 도출하였다. 도출된 수위 앙상블 자료는 강수에서부터 유출 모형까지의 불확실성이 반영된 시나리오로써 위에서 제시한 실행함수의 입력매개변수로 활용되며 최종적으로 수문학적 댐 위험도가 확률로 제시된다.

### 3. 적용 및 고찰

#### 3.1 계층적 Bayesian 지역빈도해석 적용 결과

본 연구에서는 대상유역내 12개 강우관측소 자료를 선정하여 연구를 진행하였다. 대상유역의 면적은 2,500 km<sup>2</sup> 이상으로 유역면적이 상당히 큰 유역이며, 설계당시 임계 지속시간은 48시간으로 기준으로 강우량자료를 추출하여 Bayesian 지역빈도해석을 수행하였다. 추출된 자료계열의 기본적인 통계치는 Table 1과 같다.

Bayesian 지역빈도분석에 앞서 12개 지점의  $\chi^2$ 검정, KS 검정, CVM검정, PPCC 검정을 수행한 결과 Gumbel 확률

Table 1. Basic Statistics of 48 Hours Annual Maximum Rainfall Across 12 Stations

Station	Mean (mm)	Stan. Dev. (mm)	Skewness	Kurtosis	Minimum (mm)	Maximum (mm)
1	177.94	86.63	0.73	2.96	44.00	403.00
2	196.76	109.97	1.05	3.31	46.50	492.00
3	180.46	98.29	1.16	3.90	55.00	464.30
4	182.69	85.38	1.02	3.45	50.50	409.00
5	186.84	91.03	0.91	2.83	82.00	408.00
6	177.59	92.19	1.50	6.25	44.90	529.00
7	190.15	86.50	1.39	6.59	57.00	534.00
8	190.65	83.04	0.85	3.05	74.20	427.00
9	194.82	86.42	1.28	4.39	91.00	470.00
10	187.80	90.31	1.35	4.51	79.00	475.00
11	184.06	83.76	1.05	4.06	63.50	450.70
12	185.21	92.21	0.73	2.53	66.50	402.00

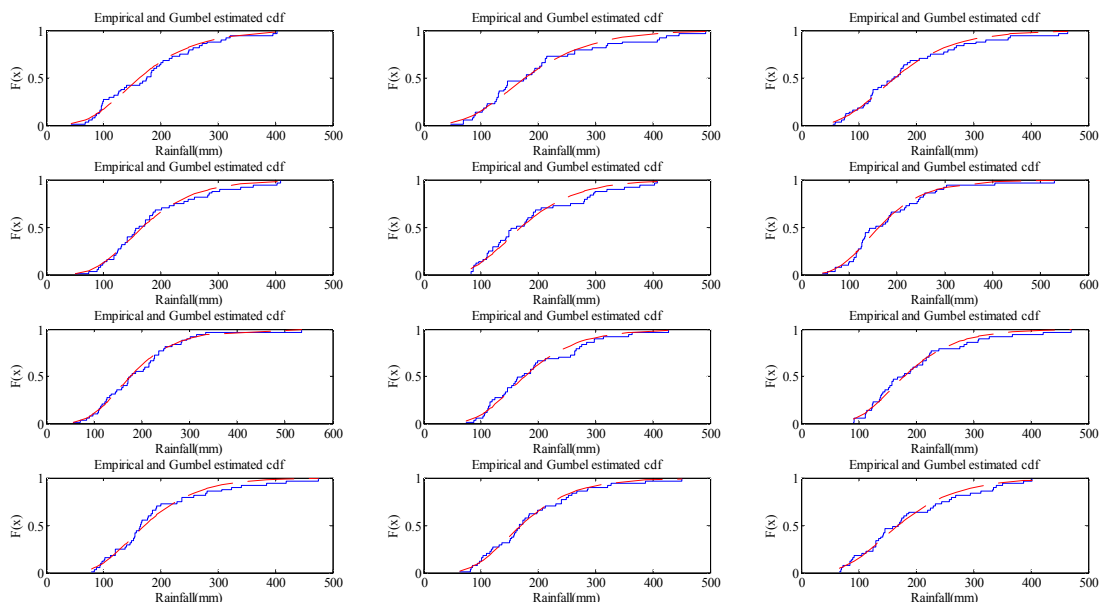


Fig. 2. A Graphical Representation CDF of Gumbel Distribution with Empirical CDF

분포는 유의수준 5%에서 적합성을 모두 통과하였으며, Fig. 2와 같이 시각적인 검토를 실시한 결과 모든 지점에서 Gumbel 확률분포가 대표 확률분포형으로 적용이 가능할 것으로 판단하였다. 앞서 언급하였듯이 본 연구에서는 확률강우량 산정 시 불확실성을 정량적으로 추정하고 보다 신뢰성 있는 해석을 위하여 계층적 Bayesian 모형을 이용한 지역빈도해석 절차를 도입하였다. 즉, Eq. (6)과 같이 Gumbel 확률분포매개변수의 결합사후분포를 추정할 수 있으며, 이와 더불어 결합사후분포로부터 주변사후분포 (marginal posterior distribution)를 추정할 수 있으며 이를 Fig. 3에 도시하였다.

Fig. 4는 지역매개변수를 추정하기 위해 Fig. 3에 제시된 관측소별 최우추정치가 지역매개변수 주위로 이동하는 과정을 도시한 결과이며, 이는 계층적 Bayesian 통계

의 대표적인 특징이라 할 수 있다. Fig. 4의 x축에 점선으로 나타난 최우추정치(최우추정치)가 계층적 모형을 통해서 빨간 실선으로 나타난 지역매개변수로 주위로 모두 Shrinkage 되는 경향을 확인할 수 있으며 이는 지점간의 상호정보가 효과적으로 공유되고 있음을 알 수 있다. 최종적으로 지역매개변수를 활용하여 대상 유역내 48시간 지속시간 강수시나리오와 이들 시나리오의 확률밀도함수를 Fig. 5에 나타내었다.

### 3.2 강우-유출 분석 결과

강우-유출 모형의 정확성은 주로 모형의 매개변수에 의존하게 된다. 그러나 강우-유출 사상의 매개변수 검정 시 각 사상별로 검정에 따른 매개변수가 다르게 추정되는 문제점이 발생하여 이는 유역의 초기함수조건 및 강우의

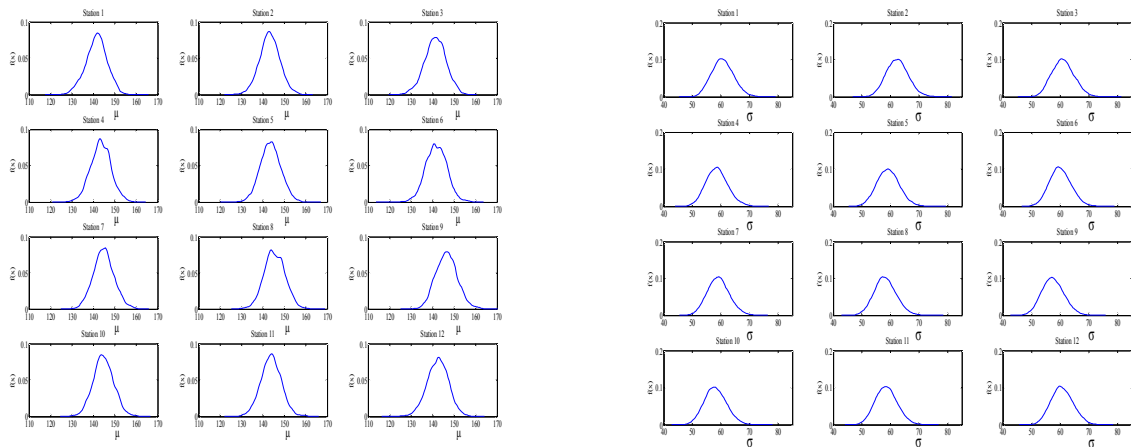


Fig. 3. Marginal Posterior Distributions of Gumbel Distribution at each Stations

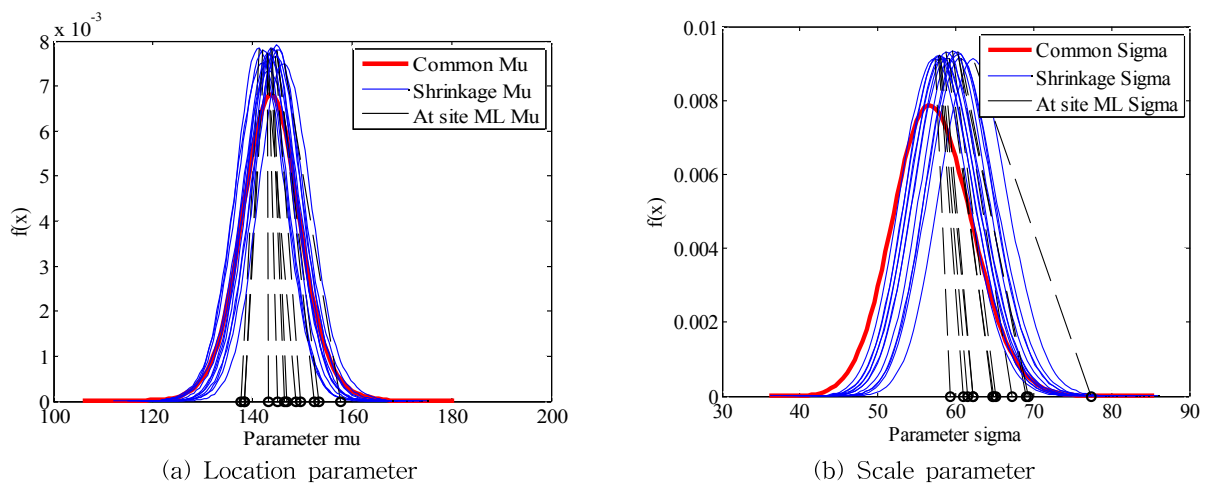


Fig. 4. Marginal Posterior Distribution Of Gumbel Parameters. The Thick Red Line Indicates Regional Parameters and the Solid Blue Line Represents Parameters at Site

발생형태 등의 상이함으로 초래되는 결과라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Bayesian HEC-1 모형을 이용하여 매개변수( $CN, T_c, K$ ) 최적화를 수행하였으며, 각 소유역별 3개의 매개변수 총 9개의 매개변수에 대해서 동시에 최적화 분석을 수행하였다. 본 연구에서는 매개변수가 충분히 수렴할 수 있도록 10,000번 모의 수행하였으며, 최종적으로 매개변수별 사후분포를 도출하였다. Fig. 6은 Bayesian HEC-1을 활용한 9개 매개변수의 사후분포를 도시한 결과이다.

Fig. 7은 매개변수 및 강우-유출 모형의 불확실성을 포함한 수문곡선을 나타낸다. Fig. 7에서 나타난 불확실성 구간은 앞서 산정된 매개변수의 사후분포로부터 유도된 결과로 강우-유출 사상별로 불확실성 구간을 제시하였다.

이는 부족한 자료를 대상으로 매개변수 최적화를 수행한 점을 감안하면 타당한 결과로 동일한 강우사상일지라도 상이한 결과를 나타낼 수 있음을 의미한다. 또한 기존 최적화 분석 기법인 Nelder 방법보다 정확하게 관측값을 모의할 수 있었으며 불확실성까지 정량화 할 수 있는 장점을 확인할 수 있었다. 여기서 과란실선은 Bayesian HEC-1을 이용한 확률홍수량의 중간값(median)을 나타내며, 빨간 실선은 관측값, 검은 실선은 기존 최적화 방법인 Nelder 방법을 이용한 결과이다.

본 연구에서는 통계학적 평가 수단으로 상관계수(Correlation coefficient, CC), Nash-Sutcliffe 계수(N-S), RMSE (Root Mean Square Error) 등을 사용하여 모형의 적합성을 평가하였으며, 이를 Table 2에 정량적으로 제시하여

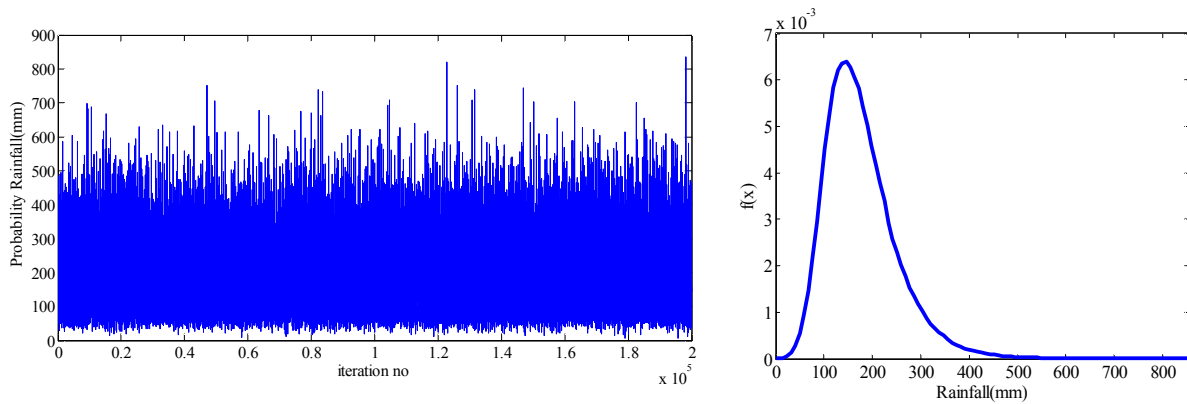


Fig. 5. Estimated Design Rainfalls for Duration of 48 Hours and Its Probability Density Function Based on Hierarchical Bayesian Regional Frequency Method (200,000 simulations)

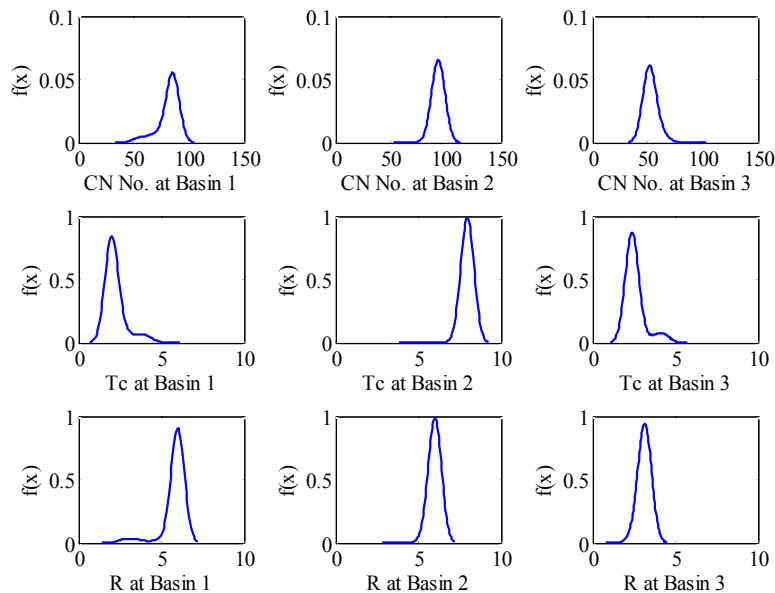


Fig. 6. Marginal Posterior Distributions of Parameters of Rainfall-runoff Model at Each Basin



나타내었다. 이때 IoA는 Willmott (1981)이 평균과 분산 사이의 차이를 추정할 때 상관계수에 근거한 통계치의 민감성을 보완하고자 일치계수를 개발하였다. 일치계수는 Eq. (14)와 같으며, 0~1의 범위를 가질 때 1에 가까울수록 모형의 예측능력이 우수함을 뜻한다. 여기서,  $q_0$ 는 실측 유량을  $q_s$ 는 모의유량을 나타낸다.

$$IoA = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (q_0(t) - q_s(t))^2}{\sum_{t=1}^n (|q_s(t) - \bar{q}_0| + |q_0(t) - \bar{q}_0|)^2} \quad (14)$$

그 결과 상관계수, N-S 계수, RMSE 등은 본 연구에서 적용한 Bayesian HEC-1 모형이 기존 Nelder 방법보다 상대적으로 우수한 해석능력을 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

최종적으로 Bayesian 지역빈도해석 모형으로부터 유도된 Gumbel 확률분포 지역매개변수의 사후분포와 강우-유출모형 매개변수의 사후분포로부터 200,000번 MCS를 수행하여 유출 앙상블 시나리오를 구축하였으며, Fig. 8과 같이 나타낼 수 있다. 이들 앙상블 유출 시나리오는 HEC-5의 입력자료로 활용되어 현재의 댐 운영률에 근거한 모의운영이 실시되었으며, 최종적으로 수위앙상블로 도출되어 위험도 실행함수의 매개변수로 활용된다. ○○댐의 경우 200년 빈도까지는 예측 유입량이 첨두에 이를 때까지 일정률로 방류하는 즉, Rigid ROM을 적용한다. 이와 더불어 PMF시 저수지 수위가 목표수위보다 높아지면 완전 개도하는 방법인 Auto ROM을 적용한다.

본 연구에서는 댐 운영모의 수행시 ○○댐의 기본적인 운영 기준을 그대로 유지하였으며, 국내외에서 널리 이용

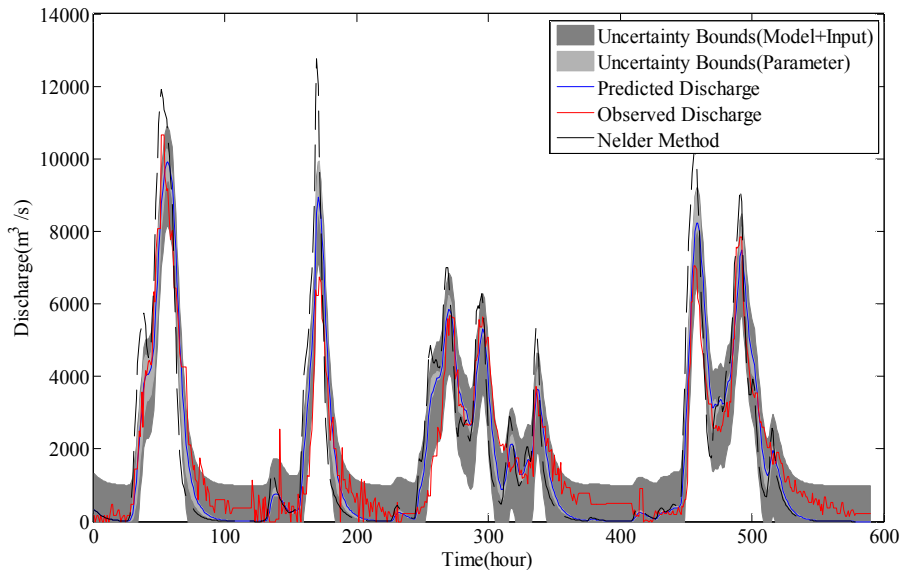


Fig. 7. Calibration Result and their Uncertainties Estimated from Posterior Distribution

Table 2. A Comparison Trough Statistical Assessment between Observed and Simulated Discharge

Statistics	Bayesian HEC-1	Nelder
CC	0.947	0.879
N-S	0.863	0.589
IoA	0.969	0.919
Bias	45.569	-40.189
RMSE	769.351	1334.170
Mean (Obs.)	1778.666	
Mean (Sim.)	1733.096	1818.856
SD (Obs.)	2085.350	
SD (Sim.)	2359.699	2726.742

되고 있는 HEC-5 모형을 활용하여 댐 운영모의를 수행하였다. 이때, ○○댐의 운영물은 비상여수로 설치전과 후로 구분하여 반영하였다. 최종적으로 본 연구에서는 앞서 산정한 Bayesian HEC-1의 모의 결과인 유출량자료를 댐 유입량으로 간주하여 분석하였으며 댐 운영모의를 통해 다수의 수위이상블을 도출하였으며, Fig. 9에 도시하였다. Fig. 9에 도시된 결과는 비상여수로 설치 후를 기준으로 작성된 시나리오를 나타낸다.

### 3.3 실행합수를 이용한 댐 월류 확률 결과

본 연구에서는 댐 위험도 분석시 Kwon and Moon (2006)이 제안한 실행합수를 활용하였으며, 기존 모의기법의 불확실성 분석 부분을 개선하는데 주안점을 두고 연구를 진행하였다. 최종적으로 모의발생을 통해서 얻은 수리·수문학적인 변량을 이용하여 위험인자별 월류 확률을 산정하였다. 본 연구에서는 강우의 불확실성, 강우-유출 분석 관계의 불확실성 해석 측면에서 개선된 수문학적 댐 위험도 시나리오를 도출하였으며, 이를 기준으로 비상여수로 설치 전·후의 수문학적 댐 위험도를 평가하였다.

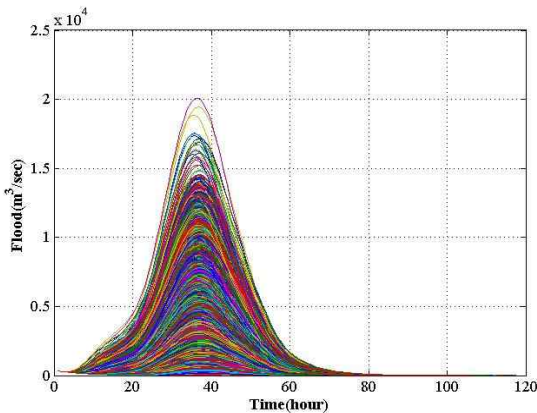


Fig. 8. Ensemble Scenarios of Dam Inflow Derived from Posterior Distributions of Rainfall-runoff Model

### 3.3.1 파괴인자별 월류 확률 해석 결과

본 연구에서는 앞서 산정한 확률강우량 및 Bayesian HEC-1 모형을 통하여 홍수량을 산정하며 저수지추적 모형인 HEC-5를 통하여 수위이상블 결과를 도출하였다. 즉 Kwon and Moon (2006)이 제시한 실행합수와 본 연구에서 도출된 시나리오를 적용하여 홍수, 풍파, 홍수와 풍파 동시 발생으로 인한 월류 확률을 산정하였다. 본 연구에서는 ○○댐 유역내 ○○관측소의 1966~2013까지 48년치 최대 풍속자료를 이용하였으며, 비매개변수적 핵밀도함수를 이용하여 풍속에 대해 모의발생을 실시하였다. 도출된 시나리오와 풍속자료를 대상으로 앞서 제시된 실행합수 Eqs. (11)~(13)에 대입하여 수문학적 댐 월류 확률을 추정하였으며 Table 3에 정리하여 나타냈다. 여기서 댐의 월류 확률은 초기수위를 현재 홍수기 제한수위인 185EL.m로 한정하여 해석된 결과이다.

비상여수로 설치전의 홍수로 인한 월류 확률은 3.00E-05에서 비상여수로 설치 후 5.00E-06으로 월류 확률이 낮아졌으며, 홍수 및 풍파로 인한 월류 확률 역시 8.01E-05에서 1.03E-05로 상당히 낮아진 걸 확인할 수 있다. 이러

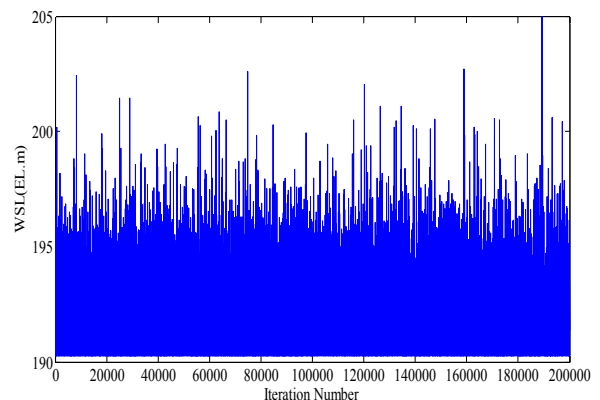


Fig. 9. Ensemble Scenarios of Dam Water Surface Level Given the Dam Operation Rule Based on HEC-5 Model

Table 3. Overtopping Probability of each Cause of Failure according to Number of Simulation

Cause of Failure	NO. of Simulation	Overtopping Probability (p/year, initial level=185 EL.m)	
		Before Emergency Spillway	After Emergency Spillway
Flood	200,000	3.00E-05	5.00E-06
Wind	200,000	0.00E-00	0.00E-00
Flood & Wind Combination	200,000	8.01E-05	1.03E-05

한 결과는 ○○댐에 대해서 이상홍수에 대비한 비상여수로 건설에 따라서 수문학적 안전성이 상당히 개선된 결과로 판단되며, 결과적으로 월류 확률이 낮아지는 효과를 정량적으로 보여주고 있다.

### 3.3.2 초기수위별 월류 확률의 민감도 분석

본 연구에서는 초기수위의 변동에 따른 위험도 해석 모형결과의 민감도를 검토하였다. 초기수위는 댐 위험도 분석에 있어서 매우 중요한 요소 중 하나이다. 그러나 기존 댐 정밀안전진단 시 이루어지는 안전성 평가의 경우 상시 만수위 또는 홍수기 제한수위로 가정하여 안전성 평가가 이루어지고 있다. 즉, 이러한 보수적인 가정에 의한 안전성 평가는 초기수위의 변동성을 고려할 수 없는 단점이 존재하며, 동일 유량일지라도 수문학적 안전성에 상이한 결과를 나타낼 수 있어 이에 대한 검토가 필요한 사항이다. 따라서 본 연구에서는 비상여수로 설치 전·후로 나누어 초기수위에 따른 수문학적 위험도를 평가하였으며, 이를 Table 4와 Fig. 10에 도시하였다.

Fig. 10에서 파란실선은 비상여수로 설치 전 수문학적 월류 확률이며, 검은 실선은 비상여수로 설치후의 수문학적 월류 확률을 도시한 결과이다. 여기서 빨간 실선은 USBR에서 제시하고 있는 댐 안전기준인  $1.00E-04$ 를 도시한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 비상여수로 설치 후에 설치 전보다 월류 확률 즉, 수문학적 안전성이 크게 개선되는 결과를 확인할 수 있다. 이는 앞서 언급하였듯이 ○○댐의 이상홍수를 대비해 비상여수로를 설치한 점을 감안하면 타당한 결과로서 구조적 대책 도입 후에 수문학적 안전성에 대한 정량적인 해석이 가능하였으며, 이와 더불어 수문분석과정에 대한 불확실성이 대부분 반영된 결과로서 해석 결과에 대한 신뢰성도 확보가 가능하였다.

마지막으로 앞서 산정한 파괴인자 및 수위별 월류 확률

에 대해서 댐 위험도 기준에 적용하여 검토한 결과를 Fig. 11에 도시하였다. 국내 댐 위험도 기준을 조사해 본 결과 국내에서는 파괴확률에 따른 위험도 기준이 전무한 실정이다. 따라서 국외에서 주로 이용되고 있는 위험도 기준을 조사해 본 결과 USBR Tier-1, USBR Tier-2, BC Hydro, ANCOLD 등이 있으며, 이 중 USBR의 기준이 가장 보편적으로 이용되는 것으로 조사되었다. USBR Tier-2 기준은 년당  $1.00E-04$ 를 기준으로 볼 때 기준보다 낮은 확률이면 댐은 안정한 상태이지만, 이를 초과할시 대상댐은 위험한 상태이며 위험도를 저감시키기 위한 구체적인 대책 수립이 필요한 상태이다. 여기서 본 연구에서 제안된 수리·수문학적 댐 위험도 해석에 의한 결과 비상여수로 설치 후 ○○댐의 안전도는 상당히 높아졌지만, 초기 수위의 변동 및 홍수, 풍파가 동시에 작용할 시에는 댐 월류 확률이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있으므로, 댐 운영시에 고려될 사항으로 판단된다.

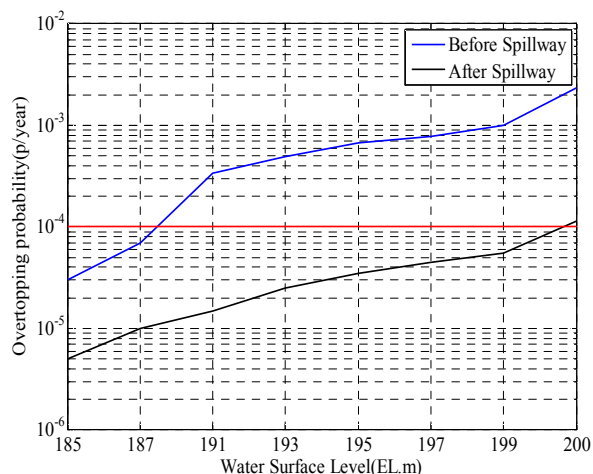


Fig. 10. A comparison of Sensitivity Analysis of Overtopping Probability between before and after Spillway

Table 4. Sensitivity Analysis on Initial Water Surface Level for Hydrologic Dam Risk Analysis

WSL (EL.m)	Overtopping Probability	
	Before Spillway	After Spillway
185	$3.00E-05$	$5.00E-06$
187	$7.00E-05$	$1.00E-05$
191	$3.35E-04$	$1.50E-05$
193	$4.90E-04$	$2.50E-05$
195	$6.75E-04$	$3.50E-05$
197	$7.85E-04$	$4.50E-05$
199	$1.01E-03$	$5.50E-05$
200	$2.37E-03$	$1.15E-04$

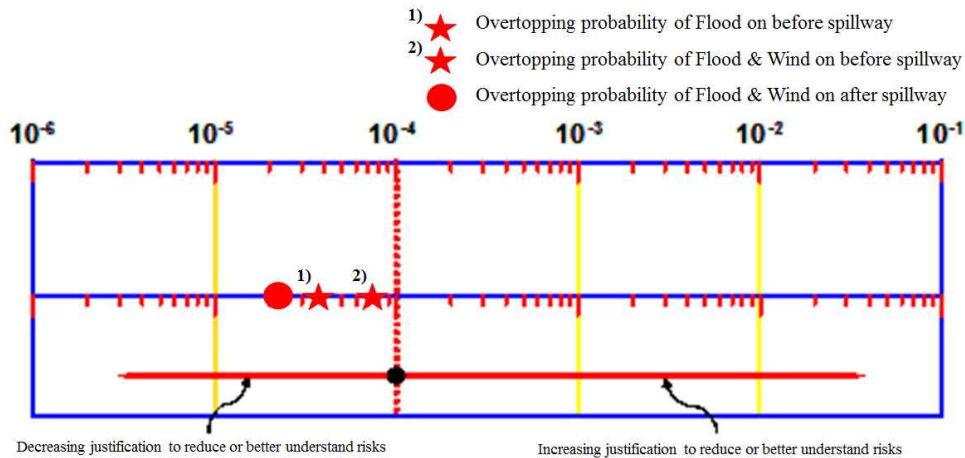


Fig. 11. Evaluation of Overtopping Risk Based on USBR Criterion, according to each Failure Mode between before and after Emergency Spillway

#### 4. 결론 및 토의

현재 우리나라에서는 주기적인 모니터링 및 결정론적 해석에 근거하여 댐의 안전성을 평가하고 있으며, 댐 안전성 평가를 위해 진행되는 모델링은 전반적으로 평균적인 개념에 근거한 해석이 이루어지고 있다. 즉, 댐 안전성에 영향을 미치는 다양한 위험인자의 수리·수문학적 해석 시 모형 및 입력 자료의 불확실성을 효과적으로 반영하지 못하는 단점이 존재한다. 이러한 이유로 본 연구에서는 계층적 Bayesian 지역빈도해석 모형 및 Bayesian HEC-1 모형을 활용하여 수문해석의 불확실성을 고려할 수 있는 수문학적 댐 위험도 평가 방안을 제안하였다. 즉, 본 연구에서는 기존 연구에서 수문학적 댐 위험도 분석 시 불확실성 분석에 대한 체계적인 접근이 이루어지지 못하는 단점을 극복하였으며, 기존 해석방법에 대한 신뢰성을 개선하는 주안점을 두고 연구를 진행하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서는 불확실성을 체계적으로 고려한 Bayesian 지역빈도해석 기법을 활용하여 확률분포 매개변수의 사후분포를 추정하였으며, 이를 활용하여 불확실성이 고려된 강수 앙상블 시나리오를 도출하였다.
- 2) 한정된 관측 자료로 인한 불확실성을 수문해석에 반영하고자, 본 연구에서는 Bayesian 기법과 연계한 HEC-1 강우-유출을 활용하였으며, 이를 통하여 강우-유출 모형 매개변수에 대한 불확실성 특성을 사후분포를 통해 추정할 수 있었다. 이를 토대로 강우-유출 관계의 불확실성을 감안한 유출 앙상블 시나리오를

도출하였다. 댐의 운영 기준을 토대로 도출된 유출 앙상블 시나리오를 활용하여 위험도 해석을 위한 다수의 수위정보를 취득할 수 있었다.

- 3) 수문학적 댐 위험도 평가를 위한 실행함수를 이용하여 파괴 인자별 ○○댐의 월류 확률을 비상여수로 설치 전과 후로 구분하여 산정하였다. 비상여수로 설치 후에 수문학적 안전성이 크게 개선되는 점을 월류 확률로서 평가가 가능하였으며, 현재 댐 운영 기준을 토대로 판단해보면, 비상여수로 설치 후 초기 수위가 상당히 높은 상태에서도 이상홍수로 인한 월류 위험도는 크지 않은 것으로 평가되었다.

본 연구결과를 통해 자료의 불확실성을 고려한 일련의 수리·수문학적 댐 위험도 해석이 가능하였으며 도출된 월류 확률을 기준으로 댐의 운영수위별 위험도를 평가할 수 있었다. 국내외에서 댐 모의 운영 시 초기수위는 대체적으로 상시만수위 혹은 홍수기 제한수위로 가정된 보수적인 연구가 진행 중에 있다. 이러한 점에 착안하여 향후 연구로서 사전강수와 수위와의 관계 등을 정량적으로 해석할 수 있는 기법과의 연계모의기법을 정립하고자 한다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설교통기술촉진연구사업의 연구비지원[11기술혁신C02]에 의해 수행되었습니다. 본 연구를 가능하도록 지원해주신 국토해양부 및 국토교통과학기술진흥원에 감사드립니다. 저자들은 모두 전북대학교 방재연구센터에 소속되어 연구를 진행하였습니다.

## References

- Han, K.Y., Lee, J.S., and Kim, S.H. (1997). "Risk Model for the Safety Evaluation of Dam and Levee: II. Application." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 30, No. 6, pp. 691-698.
- Kim, S.U., and Lee, K.S. (2008). "Regional Low Flow Frequency Analysis Using Bayesian Multiple Regression." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 41, No. 3, pp. 325-340.
- Kuo, J.-T., Hsu, Y.-C., Tung, Y.-K., Yeh, K.-C., and Wu, J.-D. (2008). "Dam overtopping risk assessment considering inspection program." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 22, pp. 303-313.
- Kwon, H.-H., and Moon, Y.-I. (2006). "Improvement of overtopping risk evaluations using probabilistic concepts for existing dams." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 20, pp. 223-237.
- Kwon, H.-H., and Lee, J.-J. (2011). "Seasonal rainfall outlook of nakdong river basin using nonstationary frequency analysis model and climate information." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 44, No. 5, pp. 339-350.
- 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., Kim, J.-Y., Kim, O.-K., and Lee, J.-J. (2013a). "A development of regional frequency model based on hierarchical bayesian model." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 46, No. 1, pp. 13-24.
- Kwon, H.-H., Kim, J.-G., and Park, S.-H. (2013b). "Derivation of flood frequency curve with uncertainty of rainfall and rainfall-runoff model." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 45, No. 1, pp. 59-71.
- Lee, J.S. (2002). "Application of risk analysis for dam safety assessment." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 35, No. 6, pp. 651-664.
- Melching, C.S., Wenzel, H., and Yen, B.C. (1987). *Application of system reliability analysis to flood forecasting, Application of Frequency and Risk in Water Resources*. V.P. Singh, ed, Reidel Publishing Company.
- Moon, Y.-I., and Kwon, H.-H. (2004a). "Hydraulic and Hydrologic Dam Risk Analysis (I)-Development of Dam Risk Analysis Methodology Using Nonparametric LHS-Monte Carlo Simulation-." *Journal of Korean Society of Civil Engineer*, KSCE, Vol. 24, No. 5B, pp. 477-487.
- Moon, Y.-I., and Kwon, H.-H. (2004b). "Hydraulic and Hydrologic Dam Risk Analysis (II) - Application of Dam Risk Analysis-." *Journal of Korean Society of Civil Engineer*, KSCE, Vol. 24, No. 5B, pp. 489-500.
- Willmott, C.J. (1981). "On the validation of models." *Physical Geograph*, 2, pp. 184-194.

논문번호: 14-074	접수: 2014.08.07
수정일자: 2014.09.03/09.18	심사완료: 2014.09.18