

## Bayesian Network (BN)를 활용한 수문학적 댐 위험도 해석 기법 개발

### A Development of Hydrologic Dam Risk Analysis Model Using Bayesian Network (BN)

김진영\* / 김진국\*\* / 최병한\*\*\* / 권현한\*\*\*\*

Kim, Jin-Young / Kim, Jin-Guk / Choi, Byoung-Han / Kwon, Hyun-Han

#### Abstract

Dam risk analysis requires a systematic process to ensure that hydrologic variables (e.g. precipitation, discharge and water surface level) contribute to each other. However, the existing dam risk approach showed a limitation in assessing the interdependencies across the variables. This study aimed to develop Bayesian network based dam risk analysis model to better characterize the interdependencies. It was found that the proposed model provided advantages which would enable to better identify and understand the interdependencies and uncertainties over dam risk analysis. The proposed model also provided a scenario-based risk evaluation framework which is a function of the failure probability and the consequence. This tool would give dam manager a framework for prioritizing risks more effectively.

**Keywords** : Bayesian Network, dam risk analysis, uncertainty, interdependency

#### 요 지

댐 위험도 해석시 수문학적 변량(강수, 유출 및 수위)들의 상호관계를 고려한 체계적인 분석과정이 요구된다. 그러나 기존 댐 위험도 해석 연구에서는 변량간의 체계적인 관계 평가를 수행하는데 있어서 한계점을 나타내고 있다. 이러한 점에서, 본 연구에서는 수리·수문학적 변량간의 관계를 효과적으로 평가하고자 Bayesian Network 기반의 댐 위험도 해석 기법을 개발하였다. 실제 댐에 대해서 제안된 모형을 적용한 결과 파괴인자간의 상호관계 규명 및 불확실성을 평가하는데 있어서 기존 연구보다 쉽게 가장 큰 파괴인자를 파악할 수 있는 장점이 있었다. 이와 더불어 다양한 시나리오에 따른 댐의 안정성을 파괴확률 및 예상피해의 함수인 위험도로 평가할 수 있도록 하였다. 즉, 기존 댐 위험도 기법으로 수행한 결과에서는 월류 확률이 도출 되지 않았지만, Copula 함수를 도입하여 댐 초기수위를 고려한 결과 댐 월류 확률이 발생하였으며, 피해결과 역시 크게 증가하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과를 기반으로 향후 댐의 보수보강 등의 우선순위 결정을 위한 도구로서 활용이 가능할 것으로 판단된다.

**핵심용어** : Bayesian Network, 댐 위험도 해석, 불확실성, 상호연관성

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

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

\*\* 전북대학교 토목공학과 석사과정, 방재연구센터 (e-mail: jg.kim@jbnu.ac.kr)

Master Course, Department of Civil Engineering, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

\*\*\* 농어촌연구원 선임연구원, 한국농어촌공사 (e-mail: han1020@hotmail.com)

Senior Researcher, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

\*\*\*\* 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

## 1. 서론

댐과 같은 수공구조물의 치수능력부족은 구조물의 파손이나 붕괴로 직결되며, 대규모 재산피해와 인명피해가 불가피하다(Sin et al., 2007). 최근 기후변화 및 기후변동성 증가로 인해 발생되고 있는 극치강우와 홍수는 댐 안전을 저해하는 요소로 작용하고 있다. 특히 세계대댐회(international commission on large dams, ICOLD) 및 호주대댐회(australian national committee on large dams, ANCOLD) 등에서 조사한 결과를 기준으로 판단해보면 댐 안전과 직결되는 수문학적 위험 요소로서 극치강우 및 홍수로 인한 월류가 가장 영향이 큰 것으로 조사되었다(BRE, 2002). 이러한 이유로 1990년도 이후 선진국에서는 수문학적 댐 안전성 평가 시 다양한 하중조건 및 불확실성을 효과적으로 고려하기 위해 위험도 해석 기법 기반의 댐 안전도 평가 기법의 개발 및 적용이 이루어지고 있다. 즉, 댐 안전성 평가 시 위험요소들의 분류와 규명, 위험요소들 간의 인과관계, 위험요소들의 발생확률 산정 등을 통해 각 위험요소들의 발생경로 등을 체계적으로 고려한 해석이 이루어지고 있다(Na et al., 2014).

최근 국외에서는 수공구조물 중 댐 및 제방에 대한 정량적인 위험도 해석과 정성적인 위험도 해석을 병행하여 운영하고 있으며 주로 미국, 호주, 대만, 유럽 등에서 적극적인 방법론 도입이 이루어지고 있다. ICOLD, ANCOLD 등 대댐회를 중심으로 댐 및 제방 위험도 분석의 가이드라인 및 분석방법이 제공되고 있으며, 국내외 다양한 연구에서 확률론적 위험도 해석 방안에 대한 연구가 이루어지고 있다(Prendergast, 1979; Kreuzer and Bury, 1984; Bowles, 1988; Thomson et al., 1997; Grygier, J.C., and Stedinger, J.R., 1985; Haines et al., 1988; Karlsson and Haines, 1989; Kwon and Moon, 2006; Kuo et al., 2008; Hsu et al., 2011). 그러나 기존 연구에서는 변량간의 상호연관성과 불확실성을 동시에 고려할 수 있는 방안에 대한 연구는 상대적으로 미비한 상태이다.

기존 수공구조물 안전성 평가는 결정론적 방법에 근거하며, 단순한 시나리오를 기준으로 현재의 위험도를 평가하는데 그치고 있다. 즉, 댐 안전도를 평가하기 위해 주기적인 모니터링을 수행하고 있으나 증가하는 기상학적 변동성 및 이로 인한 수문학적 불확실성을 고려하지 못하는 현실적인 어려움이 있다. 우리나라에서 수문학적 댐 안전성 평가는 빈도별 강수량 또는 가능최대강수량을 기준으로 빈도홍수량 및 가능최대홍수량을 추정하고 최종적으로 홍수기 제한수위를 기준으로 댐 모의운영을 실시한 후,

여기에 여유고를 고려하여 댐의 월류 여부를 판단하고 있다. 그러나 다양한 수문학적 조건에 따른 수위 변동성을 고려하지 못하고 있으며 특히, 최근 증가하는 기상변동성을 감안한다면 다소 소극적인 검토 방안이라 할 수 있다. 이러한 점에서 댐 안전도 평가 시 불확실성을 정량적으로 평가하고 최근 증가하는 기상변동성을 효과적으로 고려하기 위한 위험도 해석기반의 수공구조물 안정성 평가기법 개발이 필요한 시점이다(Kwon and Moon 2006; Kwon et al., 2007).

이러한 점에서 본 연구에서는 수리·수문학적 변량들의 연관성을 효과적으로 고려함과 동시에 불확실성을 정량적으로 평가할 수 있는 Bayesian Network (BN) 개념의 위험도 해석 모형을 개발하고, 국내 댐에 대해서 모형의 적합성을 검토하고자 한다. BN 개념의 연구는 컴퓨터공학, 통신 분야에서 개발 및 적용 사례가 있으나 수문학적 댐 위험도 분석에 적용한 사례는 매우 제한적이다.

본 연구에서는 첫째, 기존 보고서 및 논문 조사를 바탕으로 수리·수문학적 파괴인자를 도출하였으며, BN 모형 구축을 위해 각 수문변량별 주변확률분포(marginal distribution)를 노드 구축에 활용하였다. 둘째, BN 모형에 구축된 노드간의 조건부 확률은 상관계수를 활용하여 인자간의 상호의존도를 부여하였으며, 피해액 산정 기법은 다차원 홍수피해액 산정기법(multi dimensional flood damage assessment, MD-FDA)을 활용하였다. 마지막으로, 기존 댐 위험도 해석에서는 초기수위를 상시만수위 혹은 홍수기 제한수위로 댐 위험도 해석을 수행하였지만, 본 연구에서는 댐 초기수위의 변동성을 고려한 댐 위험도 해석 평가를 수행하였다. 이때 초기수위의 변동성은 Copula 함수를 도입하여 모의하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 1장에서는 논문의 배경 및 목적에 대해 언급하였으며, 2장에서는 본 연구에서 이용한 Bayesian Network 모형 및 copula 함수에 대해 설명하였다. 3장에서는 실증 댐에 대해 Bayesian Network를 적용하여 도출된 댐 위험도 해석 결과를 수록하였으며, 마지막으로 결론 및 토의를 4장에 수록하였다.

## 2. 본론

본 연구에서는 BN 모형 기반의 댐 위험도 적용을 위해 실증댐에 적용하여 분석을 수행하였다. 본 장에서는 댐 파괴에 큰 영향을 미치는 수문학적 파괴인자를 도출하고 도출된 수문학적 변량을 이용하여 BN 모형을 구축한 이론적인 배경을 수록하였다.

## 2.1 Bayesian Network 모형

위험도는 확률과 파괴결과로서 정의될 수 있으며, 위험도 해석은 시스템의 기능 또는 재난과 재난을 유발시키는 요소들에 대한 잠재성을 검증하고 위험도를 감소시키는 수단을 찾기 위한 일환으로 사용되어 지고 있다. 위험도 해석 평가 수행 중 가장 중요한 부분은 위험요소를 인지하고 각 위험요소로 인해 발생하는 위험도를 정량적으로 추정하는 것이다. 즉, 발생 위험도를 정확히 인지하는 것이 전체적인 위험도 해석 결과의 신뢰성을 결정짓는 가장 중요한 사항이며 본 연구에서는 수문학적 위험도를 정량적으로 해석할 수 있도록 조사·분석을 통해 파괴인자를 도출하였다.

일반적으로 수공구조물의 위험도 분석을 위해 구조물 자체적인 문제뿐만 아니라 기상조건, 환경적인 요인 등 내·외부 요인들에 대한 충분한 검토가 필수적으로 요구되며 고려된 요소들 간의 상호작용을 평가할 수 있는 Network 기반의 해석체계 구축이 필요하다. 다시 말해서 대부분의 위험도 해석과정에서 요구되는 매개변수들의 불확실성이 매우 크다는 점과 각 매개변수들의 불확실성이 전체 해석결과에 영향을 준다는 점을 고려해야 한다. 이러한 점에서 본 연구에서는 구조물의 신뢰성을 저해시키는 복합적인 위험요소들을 동시에 고려할 수 있는 BN 모형 기반 댐 위험도 해석 모형을 활용한 댐 위험도 해석 모형을 개발하였다.

앞서 언급하였듯이 최근 증가하는 기후변화로 인해 발생하는 이상홍수, 댐 여유고 부족 등 댐 파괴를 위협하는 다양한 위험인자가 도출되고 있으며, 이러한 현상은 댐 하류부에 막대한 피해를 끼칠 가능성이 크다(Na et al., 2014). 이러한 이유로 본 연구에서 개발하고자 하는 BN 모형은 각 노드간 효과적인 연계분석이 가능한 모형이 개발될 수 있도록 주안점을 두었다. 기존 위험도 분석에서는 수문변량간의 관계를 독립적으로 간주하여 해석하는 단편적인 모형이므로 실제 수문현상을 재현하는데 단점이 존재하였다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 극복하고자 BN 기법을 도입하여 수문학적 관점에서 각 파괴인자들이 모두 연관성을 가지고 댐 위험도 해석을 수행할 수 있는 모형을 개발하였다. BN 모형은 2변량 이상의 다변량 파괴인자들이 가지는 관계를 규명하고 각 변량간의 조건부 확률을 추정하는데 매우 효율적이다.

일반적으로 BN 모형은 Bayesian 통계모델, Graph 이론(graph theory)과 연계된 결정이론(decision theory)이 통합된 확률모형으로서 원인과 결과에 대한 정량적인 해석

이 가능하며 다양한 인과관계를 효과적으로 분석할 수 있는 장점을 제공한다(Pearl, 1988; Jensen, 2001). 특히, BN 모형은 자연재해와 같은 불확실성이 큰 원인들로부터 기인하는 위험도를 지속적으로 평가하는데 유리하며 위험도 저감을 위한 대책 수립 시 상호의존성(interdependency)을 이해하는데 다양한 정보를 제공한다. 이러한 장점 외에도 위험도 저감 및 최적대안 수립을 위한 계획수립 시 유용하게 활용될 수 있다.

먼저 Bayesian 확률은 사전확률(prior probability)을 기준으로 자료의 증가에 의해서 정보가 갱신되며 최종적으로 사후확률(posterior probability)을 추정하는 과정이다. Bayes 정리(Bayes's rule)는 두 확률 변수의 조건부 확률을 나타내는 정리로, 새로운 근거가 제시될 때 신뢰 값(belief)을 갱신하는데 활용된다(Gelman et al., 2004). 이는 주어진 확률변수  $\theta$ 와  $y$ 가 있을 때, 두 확률변수들의 결합확률분포(joint probability distribution)는 사전분포(prior distribution)  $p(\theta)$ 와 우도(likelihood)  $p(y|\theta)$ 의 곱으로 표현할 수 있으며, Eq. (1)과 같다.

$$p(\theta|y) = p(\theta)p(y|\theta) \quad (1)$$

이때 BN 모형이 조건부 독립이라고 가정하고 체인 규칙(chain rule)을 적용하면, BN 모형을 구성하는 각 노드에 대한 결합확률은 Eq. (2)와 같으며, Fig. 1은 BN의 개념도를 도시한 결과이다. BN 모형은 각 노드마다 조건부 확률을 갖는 하나의 Directed Acyclic Graph (DAG)로 정의가 가능하다. 이때 각각의 노드는 파괴인자로서 사건의 발생을 의미하고 노드를 이어주는 선을 Edge라고 명명하여 각 노드간의 상호 의존관계를 설정하는 역할을 하게 된다.

$$p(x_1, x_2, x_3) = p(x_1)p(x_2 | x_1)p(x_3 | x_1) \quad (2)$$

$$p(x) = p(x_1)p(x_2, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n p(x_i | p_a) \quad (3)$$

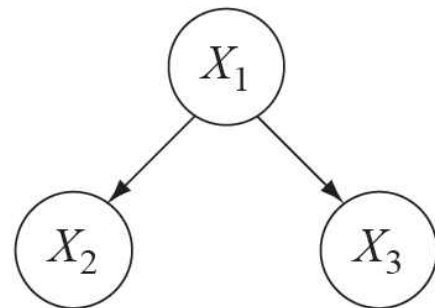


Fig. 1. A Conceptual Diagram of Bayesian Network Model

BN 모형의 입력인자는 연속변량의 경우 노드별 파괴 인자의 확률분포형으로 입력되며, 각 노드별 의존도를 산정하여 모형을 구성하게 된다. 이때 각 노드별 의존도는 노드간 상관계수를 활용하였으며, BN 모형으로 구축한 수문학적 댐 위험도 해석 모형의 예시는 Fig. 2와 같다.

Eq. (3)의 경우 Bayes 정리, 곱셈 규칙, 체인 규칙에 의해 식이 만들어 진다. 여기서  $x_1, \dots, x_n$ 은 특정 데이터의 속성 집합이고  $p_a$ 는  $x_i$ 의 상위노드(parent node)들의 집합이다. 이렇게 구성된 BN은 사건들의 발생 특성을 확률적으로 표현하는 대표적인 수단으로 위험 인자들 간의 의존 관계를 나타내는 그래프와 각 인자들의 조건부 확률로 구성된다. 위의 Eqs. (2) and (3)에서 볼 수 있듯이 BN 모형은 상위 노드에 조건부로 하위노드(children node)의 확률을 추정하게 되는 개념으로 파괴인자간의 상호 의존성을 보다 현실적으로 고려할 수 있는 장점이 있다.

## 2.2 Copula 함수를 활용한 수문학적 다변량 분석

본 연구에서는 댐 위험도 분석 시 수문학적 변량간의 연관성을 토대로 다변량 분석을 수행하기 위해서 Copula 함수를 적용하였으며, 최종적으로 댐 위험도 분석시 BN 노드 간에 연계성을 정량적으로 평가하는데 활용하였다. 일반적으로 두 개 이상의 변량간 관계성을 파악하는데 있어 상관계수를 활용하지만 변량간의 확률분포를 다루는

경우에는 Copula 함수를 사용하여 그 의존성 구조를 파악하는 것이 타당하다고 알려진 바 있다. 이러한 Copula 함수는 Sklar (1959)에 의해 처음으로 제시되었으며 수자원 분야에서 다양한 연구가 수행되고 있다.

Copula 함수는 임의의 확률변수  $X, Y$ 에 대한 결합누가분포확률  $F_{X,Y}(x,y)$ 의 주변 누가분포함수  $F_X(x), F_Y(y)$ 가 존재하고 이를 연계하는 Copula 함수  $C$ 가 존재하게 된다. 여기서, 주변 누가분포함수  $F_X(x), F_Y(y)$ 는 확률변수  $X, Y$ 의 확률분포함수로부터 결정되며, 주변 누가분포함수  $F_X(x), F_Y(y)$ 의 결합 누가분포함수는 Copula 함수를 통해 Eq. (4)와 같이 정의된다. 이때 각 변량  $x,y$ 는 각각 상위노드와 하위노드를 의미한다.

$$F_{X,Y}(x,y) = C[F_X(x), F_Y(y)] \quad (4)$$

일반적으로 사용되는 매개변수적 Copula 함수는 Gaussian, Gumbel, Student-t, Frank, Clayton 등이 있으며 Table 1에 자세하게 제시하였다.

## 3. 적용 및 고찰

본 연구에서는 댐 위험도 해석을 위해 BN 모형을 구축하고 불확실성을 고려한 댐 위험도 해석을 수행하였으며, 본 연구에서 수행한 방법은 다음과 같이 요약 할 수 있다.

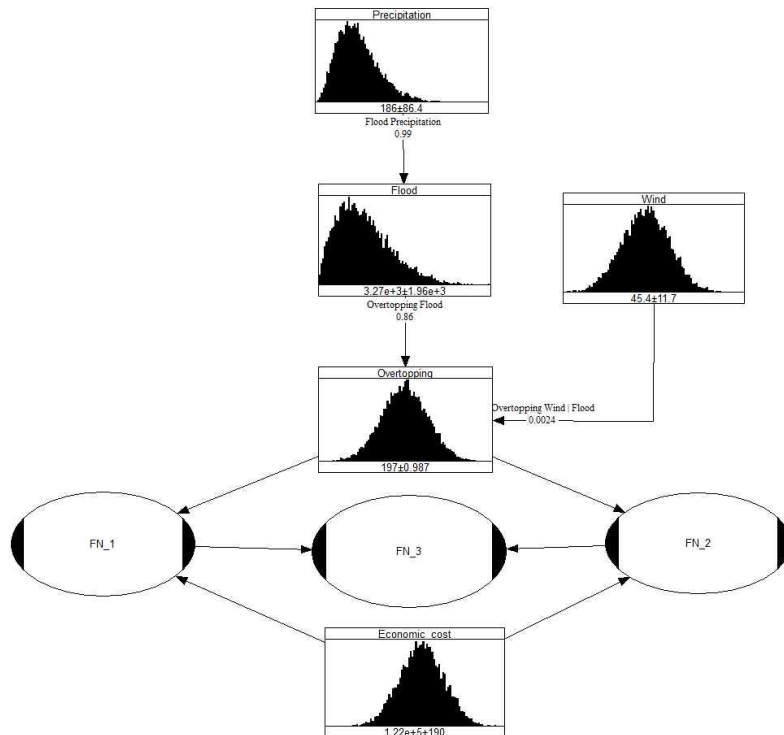


Fig. 2. A Conceptual Diagram of Bayesian Network Model for Dam Risk Analysis

Table 1. Joint Probability Distribution Functions for Copula (Nelsen, 2006)

Name	Bivariate copula Function $C_\theta(u, v)$
Gaussian	$C^G(u_1, \dots, u_n; \Sigma) = \frac{\partial}{\partial u} C^G(u_1, \dots, u_n; \Sigma) = \frac{1}{ \Sigma ^{\frac{1}{2}}} \exp(-\frac{1}{2} y^T (\Sigma^{-1} - I) y)$
Gumbel	$\exp(-((-\log(u))^\theta + (-\log(v))^\theta)^{1/\theta})$
Student-t	$C(u; v; \Sigma) = \frac{\Gamma((v+d)/2)[\Gamma(v/2)]^{d-1}}{[\Gamma((v+1)/2)]^{\frac{1}{2}}} \frac{[\prod_{i=1}^d (1+y_i^2/v)^{(v+1)/2}]}{(1+y^T \Sigma^{-1} y/v)^{-(v+d)/2}}$
Frank	$-\frac{1}{\theta} \ln(1 + \frac{(e^{-\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1)}{e^{-\theta} - 1})$
Clayton	$[\max(u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1, 0)]^{-1/\theta}$

- 1) 실증법에 영향을 미치는 수문학적 파피인자를 도출하고 이를 활용하여 댐 위험도 해석을 위한 BN 모형을 구축하였다. 앞서 언급하였듯이 노드에 사용된 변량에 적합한 확률분포형을 부여하여 댐 위험도 해석 BN 모형을 구축하였다.
- 2) 앞서 언급하였듯이 구축된 BN 모형의 노드간의 관계는 Copula 함수를 활용하였으며, 기존 댐 위험도 해석을 기반으로 한 BN모형과 댐 초기수위의 변동성을 고려한 댐 위험도 해석 모형 2가지 모형을 개발하여 댐 위험도 해석을 수행하였다. 이때 두 가지 모형의 비교를 위해 강수량 및 초기수위에 강제임계값(hard threshold)을 부여하여 모형 간 비교 결과를 제시하였다.
- 3) 마지막으로 댐 붕괴로 인한 피해액은 다차원 홍수피해액 산정기법을 활용하였으며, 피해금액의 단위는 민감한 사항으로 작용할 수 있으므로 본 연구에서는 unit 단위를 사용하여 결과를 도출하였다.

### 3.1 수문학적 파피인자 모의

본 연구에서는 댐 월류확률을 산정하는 전반적인 과정은 Na et al. (2014)이 제안한 위험도 해석 과정을 따랐다. 우선적으로 강수량의 경우 극치분포에 널리 이용되는 Gamma 분포를 대표 확률분포형으로 선택하여 극치강수량을 무작위로 모의발생 하였으며, Gamma 분포의 확률밀도함수와 누가확률밀도 함수는 다음 Eqs. (5) and (6)과 같다. 여기서  $k$ 는 형상매개변수(shape parameter),  $\theta$ 는 규모매개변수(scale parameter)이다. Gamma 분포의 매개변수 추정시 확률가중모멘트법을 활용하였다.

$$f(x; k, \theta) = \frac{x^{k-1} e^{-\frac{x}{\theta}}}{\theta^k \Gamma(k)} \quad (5)$$

$$F(x; k, \theta) = \frac{1}{\Gamma(k)\theta^k} \int_0^x t^{k-1} e^{-\frac{t}{\theta}} dt \quad (6)$$

BN 노드 중 홍수량의 경우 Kwon et al. (2012)이 제안한 Bayesian기법과 연계한 HEC-1 (BHEC-1) 모형을 활용하여 산정하였다. BHEC-1은 Bayesian 기법을 기존 HEC-1 모형에 연계하여 강우-유출 매개변수의 불확실성을 정량적으로 평가할 수 있는 모형으로서 홍수빈도곡선 등을 유도하는데 신뢰성을 개선할 수 있는 방법이라 할 수 있다. 따라서 앞서 Gamma 분포로 도출된 극치강수량은 BHEC-1 모형의 입력자료로 활용되며, BHEC-1을 통해 도출된 홍수량은 BN 노드의 변량으로 입력된다. 본 연구에서는 수문학적 불확실성 변량에 대해서 적합도 검정을 통해 적용된 확률분포가 유의수준 내에 모두 위치하는 것을 확인할 수 있었으며, 각 수문학적 변량들의 적용된 분포형 및 기본 통계치는 Table 2와 같다.

### 3.2 Copula 함수를 활용한 댐 초기수위 모의

앞서 언급하였듯이 본 연구에서는 수문변량의 확률분포간의 상관성을 고려하기 위하여 Copula 함수를 고려하였다. 이중 댐의 초기수위와 강수간의 상관성을 예시로 설명하면 다음과 같다. 기존 댐 운영모의 분석시 초기수위는 상시만수위 혹은 홍수기 제한수위로 가정하여 댐 위험도 분석을 수행하였다. 즉, PMF (probability maximum flood)를 댐 최대유입량으로 가정하고, 댐 초기수위는 홍수기 제한수위로 고정하여 댐 운영률을 기준으로 월류 여부를 판단하고 있다. 그러나 실제 홍수기 댐 운영 상황과는 상당히 괴리감이 존재한다. 즉, 댐 수위는 강수량 및 댐 운영률 등에 의해 수시로 변동하는 값이지만 기존 연구에서는 댐 초기수위의 변동성을 고려하지 않아 현실성이 다소 결여되어 있다. 댐 위험도 해석 및 월류확률을 추정하는데 있어서 초기수위의 민감도는 매우 크다 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 Copula 함수를 이용하여 사전강수특성에 따른 초기수위를 결정하였으며, 이를 HEC-5 모형의 초기수위로 가정하여 댐 월류 수위를 산정하였다. 즉, 연구대상 댐의 연 최대 강우사상을 추출하고, 다음날의 댐 수위 값을 추출하였다. 이러한 이유는 앞서 언급하였듯이 댐 초기수위는 항상 변동하는 값이며, 큰 호우 사상 특성에 따라 얼마든지 변할 수 있는 값이다. 따라서 위와 같은 방법으로 추출된 값과 Copula 함수 중 Gaussian Copula 함수를 이용하여 초기수위를 모의한 결과를 Fig. 3에 도시하였다.

앞서 산정된 결과를 기반으로 댐의 정상운영 상태일 때 기존에 이용되고 있는 홍수기제한수위로 고정한 위험도 해석과 Copula 함수를 통해 산정된 댐 초기수위의 변동성을 고려하여 댐 월류 확률을 비교하였다. 먼저 홍수기제한수위로 가정한 댐 운영 모의 시 월류 사상은 발생하지 않았지만, 초기수위 변동성을 고려한 결과 댐 월류 확률이 3.00E-04로 증가하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 동일 유입량이 부여 될지라도 댐 초기수위에 따라 댐 월류 사상이 상당히 다른 결과를 도출하고 있으므로, 댐 위험도 해석시 초기수위의 변동성을 보다 효과적으로 고려

한 해석이 필요할 것으로 사료된다. 초기수위 변화에 따른 댐 월류 확률을 산정한 결과는 Fig. 4에 도시하였으며, 이 두 가지 해석 방법 모두 BN 노드에 구축한 비교결과를 3.3절에 언급하였다.

### 3.3 BN모형을 활용한 댐 위험도 해석 결과

본 절에서는 BN 모형 구축시 기존 댐 위험도 해석 수행방법과 본 연구에서 제안하는 댐 위험도 해석 두 가지 모형을 비교하였다. 다시 말해서, 일반적으로 기존에 수행되고 있는 댐 위험도 해석 기법은 초기수위를 상시만수위 혹은 홍수기 제한수위로 가정하여 댐 월류 여부를 판단하였다. 그러나 이러한 해석 방법은 댐의 현재 상태를 효과적으로 재현하지 못하고, 실제 댐 현상을 묘사하기에는 현실적이지 않다. 이러한 이유로 본 연구에서는 댐 초기수위의 변동을 고려한 BN 모형을 구축하여 기존 연구와 비교 결과를 제시하였으며, 구축된 모형은 Fig. 5에 도시하였다.

앞서 언급하였듯이 댐 하류부 피해액 산정기법은 다차원 홍수피해액 산정기법을 사용하였으며, 이 기법은 회귀식에 의한 기존 개선법의 문제점을 보완하기 위하여 국토

Table 2. Statistical Characteristics for the Selective Hydrologic Variables

Variable	PDF	Mean	Standard deviation	5th percentile	50th percentile	95th percentile
Rainfall	Gamma distribution	185.58	85.58	70.48	172.61	344.99
Wind	Weibul distribution	45.35	11.72	26.07	45.35	64.62
Flood	Lognormal distribution	3262.54	1968.52	641.65	2950.60	6956.77
Initial WSL	Gamma distribution	190.96	0.94	189.41	190.96	192.51

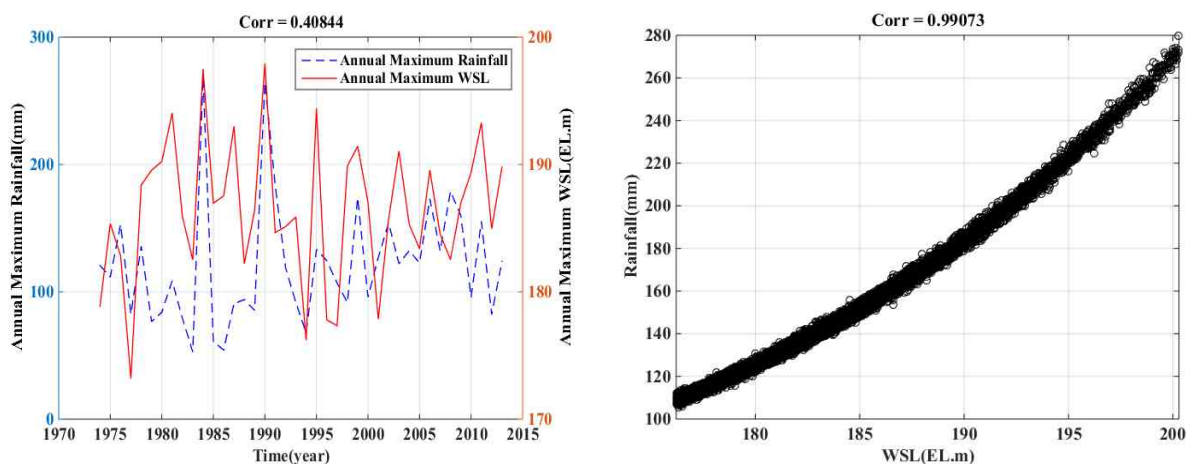


Fig. 3. A Comparison Between Annual Maximum WSL and the Antecedent Annual Maximum WSL (left) and Simulation Result of Initial WSL Given the Antecedent Rainfall using Gaussian Copula Function

해양부에서 개발한 홍수 피해액 산정방법이다. 침수심을 고려한 다차원 홍수피해액 산정방법은 범람지역 내의 피해자산을 산정하여 침수심에 맞는 피해율을 곱해서 직접 피해를 산정한다. 직접피해액 항목은 크게 인명 피해액, 건물 피해액, 건물 내용 피해액, 농경지 피해액, 농작물 피해액, 사업소 유형·재고자산 피해액, 공공시설 피해액으로 7가지로 분류된다. 본 연구에서 사용한 댐 하류부 피해

액 산정 이론은 Lee et al. (2014)에 상세히 수록되어 있다.

Fig. 5의 FN\_1~FN\_3의 노드는 함수노드으로써 댐의 작용하는 하중에 따른 반응확률(system response probability, SRP)과 피해액을 산정하는 노드이다. 즉, 사력댐의 경우 월류 높이에 따라 댐 하류부에 영향을 댐 붕괴 위험이 달라지므로 댐 위험도 해석시 월류높이에 따른 파괴위험도를 고려할 필요가 있으며, 본 연구에서 사용한 Srivastava

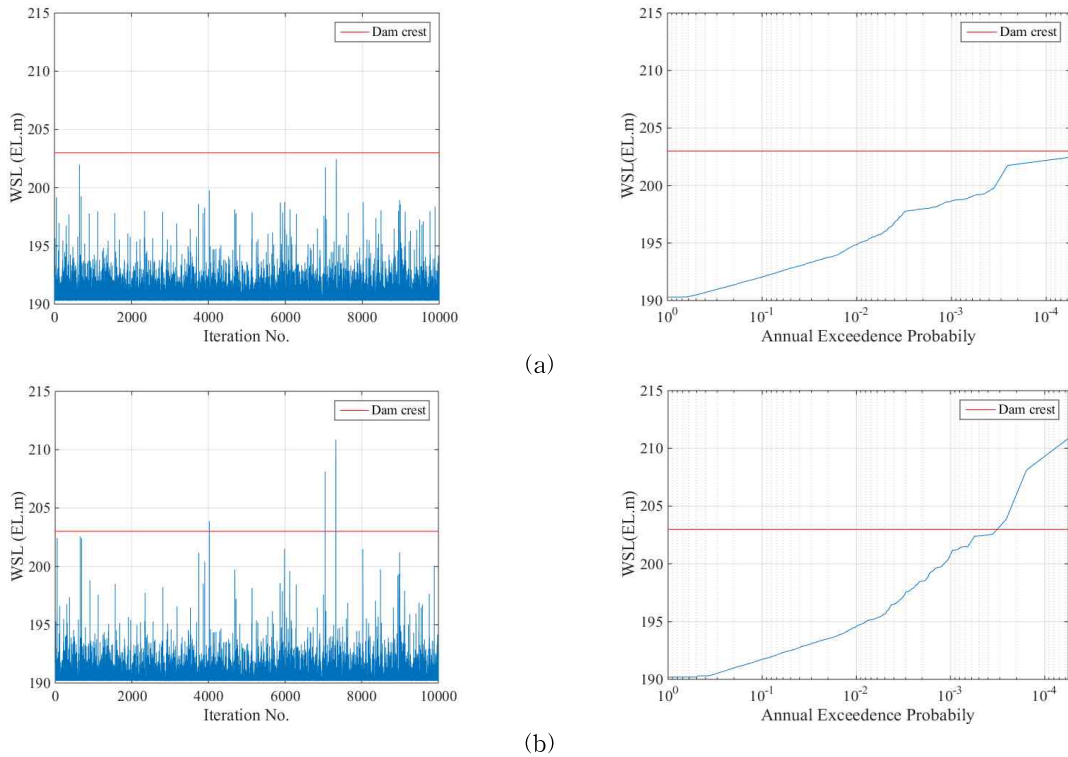


Fig. 4. A Comparison of Overtopping Events between the Existing Method (a) and the Proposed Bivariate Copula Function Method (b)

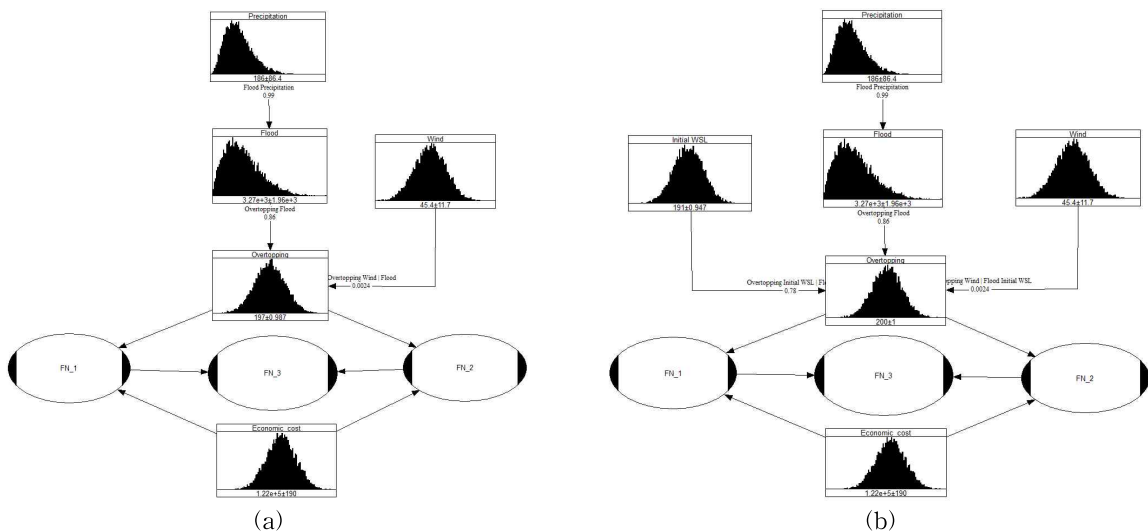


Fig. 5. The Bayesian Network Models without (a) and with (b) the Initial WSL Node

(2008)가 제시한 SRP를 채택하여 분석을 수행하였다. 즉, FN\_1, FN\_2는 월류 높이에 따라 SRP값이 곱해져 피해액을 산정해주며, FN\_3의 경우 FN\_1과 FN\_2에서 도출된 피해액 결과의 합으로써 이는 최종 댐 파괴 피해액이 도출되는 것이다.

Fig. 7은 극한 강우사상이 발생하였을 때로 가정하여 댐 위험도 분석을 수행하였다. 즉, 본 연구대상 유역에서 모의 발생된 강우량 중 가장 큰 강우(714mm)를 임계값으로 부여하고 댐 위험도 분석을 수행하였다. 기존 댐 위험도 해석 모형으로 분석한 결과 월류 수위는  $200 \pm 0.501$  m (댐 체제 높이: 203m)로 월류 사상은 발생하지 않았다. 즉, 홍수기 제한수위를 초기수위로 지정할 경우 댐의 월류는 발생하지

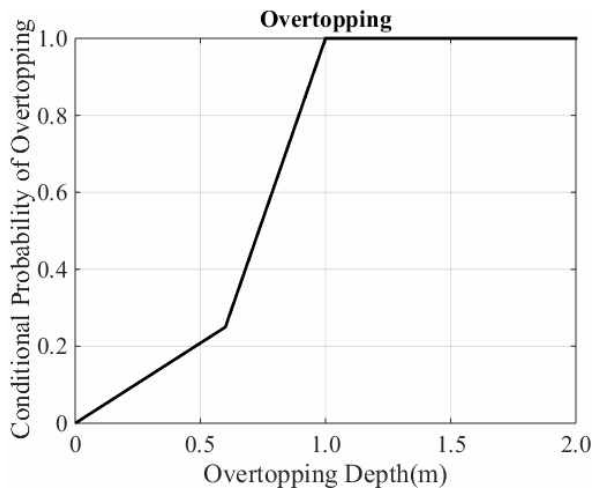


Fig. 6. A System Response Probability Relationship according to Overtopping Depth (m)

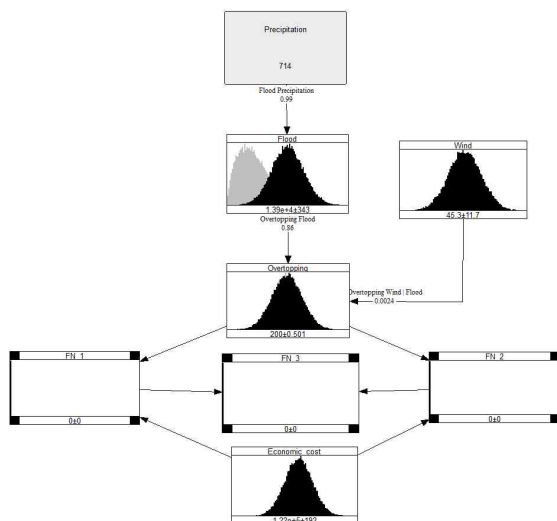


Fig. 7. A Result of Dam Risk Analysis Given Hard Threshold Value of Precipitation (714mm)

않는 것으로 분석되었으며, 이에 따른 SRP 값 역시 0이므로 피해액 또한 발생하지 않은 것을 확인할 수 있다.

이와 더불어 본 연구에서는 초기수위의 변동성을 고려할 수 있는 BN 모형을 Fig. 8과 같이 구축하였으며, Fig. 7과 동일하게 강우량의 임계값을 부여하여 댐 위험도 분석을 수행하였다. 이때 댐 초기 수위는 각각 192.00El.m (a), 194.00El.m(b)로 가정하였다. 그 결과 댐 수위는 각각  $204 \pm 0.317$ ,  $205 \pm 0.318$ El.m로 산정되었으며, 이러한 결과는 앞서 분석한 기존 댐 위험도 해석 결과보다 약 4~5m 증가하는 결과를 보여주고 있다. 또한 댐 붕괴로 인한 하류부 피해 금액을 Unit 단위로 나타내본 결과 각각 31,200~123,400 Unit에서 115,650~126,350 Unit으로 증가하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 최종적으로 앞서 가정된 초기 수위와 더불어 풍속에 대해서도 임계값(c,d)을 적용하여 댐 위험도를 산정한 결과 바람에 대한 영향은 상대적으로 미미한 것으로 확인할 수 있었다. 이때 부여한 풍속에 대한 임계값의 경우 추정된 풍속값 중에서 가장 큰 값을 부여한 결과이다. 각 분석 시나리오에 따른 결과는 Table 3에 제시하였다.

#### 4. 결론 및 토의

댐 위험도 해석에 있어 신뢰성 있는 수문학적 변량 선정 및 해석 기법의 선정은 가장 중요한 요소이다. 이러한 이유는 예상치 못한 댐 파괴시 하류부에 막대한 영향을 끼칠 수 있으며, 이는 댐 붕괴로 그치는 것이 아닌 2차, 3차 피해가 이어질 수 있는 것이다. 그러나 기존 댐 위험도 해석시 수문학적 변량간의 관계를 효과적으로 고려하지 못하며, 댐 초기수위는 상시만수위 혹은 홍수기 제한수위로 가정한 연구가 진행되어 왔다. 이에 본 연구에서는 Network 기반의 댐 위험도 해석 기법을 개발하는데 목적이 있으며, 변량간의 불확실성 정량화와 함께 수문학적 변량간의 연계성을 고려한 해석을 위해 BN 모형을 구축하여 연구를 진행하였다. 본 연구를 통해서 얻은 결론은 다음과 같다.

첫째, 댐의 파괴는 여러 가지 복잡한 변량들과 변량간 인과관계를 통해 댐 파괴가 이루어진다. 그러나 기존 연구에서는 수문학적 댐 위험도 해석시 각 변량에 대한 해석기법은 다수 존재하였으나, 이들 관계를 효과적으로 해석할 수 있는 기법은 상대적으로 미비하였다. 이러한 단점을 개선하고자 본 연구에서는 BN 모형기반의 댐 위험도 해석기법을 개발하여 수문학적 파괴 인자간 인과관계를 정량적으로 파악할 수 있었으며, 기존 모형과의 비교를 통해 모형의 우수성을 입증하였다.



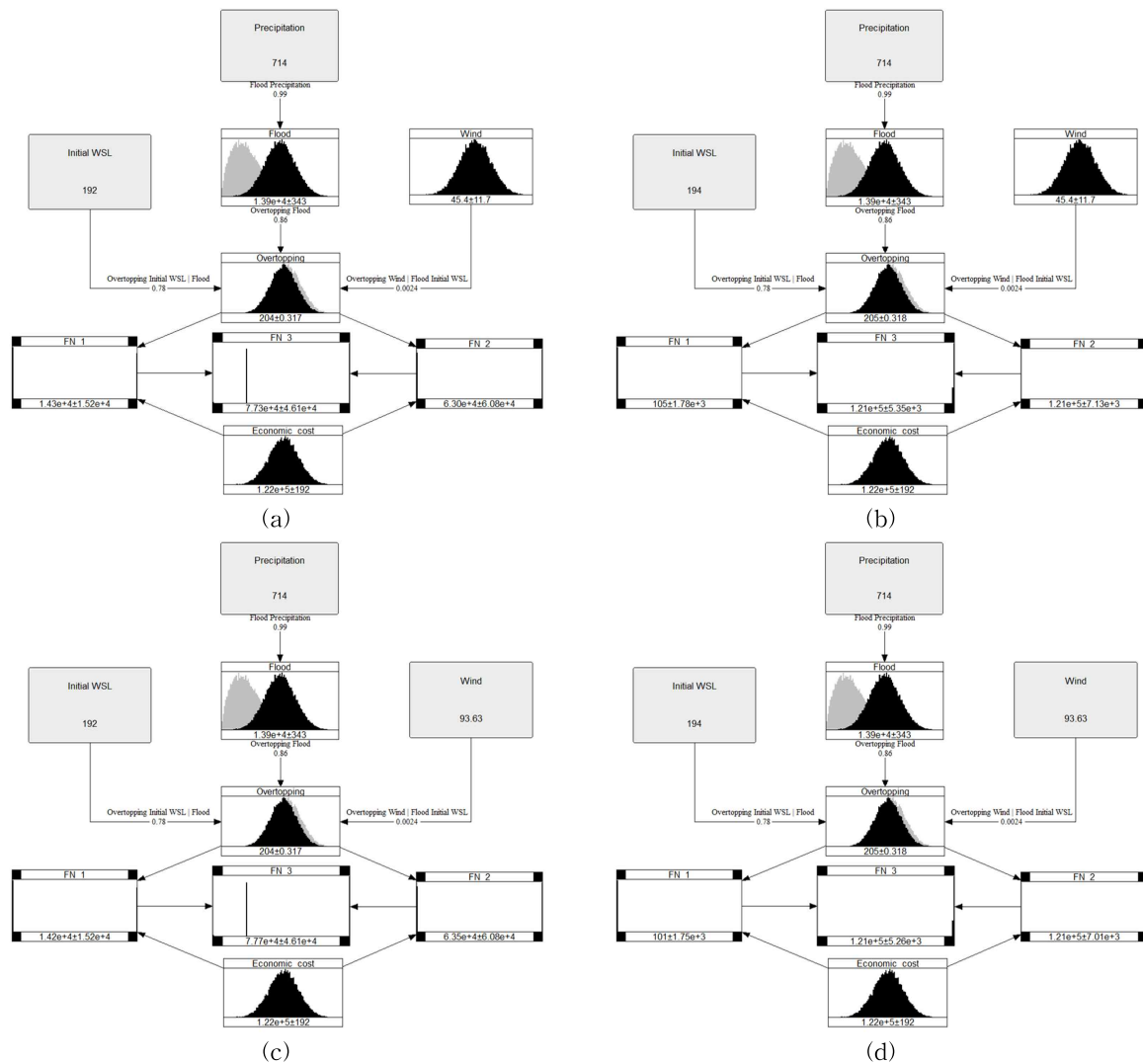


Fig. 8. A Simulation Result Given Hard Threshold Value of Precipitation (a) and Initial Water Surface Level (b) and a Simulation Result of Given Threshold Value of Wind (c, d 93.63 m/s)

Table 3. Dam Risk Analysis Results under Different Scenarios

Category	Threshold value	Flood (m <sup>3</sup> /s)	Overtopping (El.m)	Economic cost (unit)	State
Scenario-1	Precipitation (714.00 mm) & Initial WSL (El.190.30 m)	13,557~14,243	200 ± 0.501	0	Safety
Scenario-2	Precipitation (714.00 mm) & Initial WSL (El.192.00 m)	13,557~14,243	204 ± 0.317	31,200~123,400	Unsafety
Scenario-3	Precipitation (714.00 mm) & Initial WSL (El.194.00 m)	13,557~14,243	205 ± 0.318	115,650~126,350	
Scenario-4	Precipitation (714.00 mm) & Initial WSL (El.192.00 m) & Wind (93.63m/s)	13,557~14,243	204 ± 0.317	31,600~123,800	
Scenario-5	Precipitation (714.00 mm) & Initial WSL (El.194.00 m) & Wind (93.63 m/s)	13,557~14,243	205 ± 0.318	115,740~126,260	

둘째, 기존 댐 위험도 해석시 댐 초기수위의 경우 홍수 기제한수위 또는 상시만수위 즉, 단일값을 고정하여 수문학적 댐 위험도 분석을 수행해 왔다. 그러나 이러한 댐 위험도 해석기법의 경우 변동하는 댐 수위를 현실적으로 고려하지 못하는 단점이 존재하였다. 이러한 이유로 본 연구에서는 Copula 함수를 도입하여 댐 초기수위를 모의하였으며, BN 모형 구축시 이를 반영한 연구를 수행하였다. 기존에 수행되었던 연구결과와 비교해 본 결과 초기수위는 댐 위험도 분석에 가장 민감한 변량임을 확인할 수 있었으며, 다양한 수문학적 시나리오에 따른 댐 위험도 분석이 가능하였다.

마지막으로 본 연구에서 개발한 BN 모형을 활용하여 특정 노드에 임계값을 부여한 후 각 수문학적 노드의 확률 변화를 이용하여 댐 보수·보강시 실무자에게 의사결정에 대한 지원이 가능할 것으로 판단된다. 즉, 각 변량간의 의존관계를 실무자가 BN 결과를 기반으로 보다 쉽게 댐 위험 상태를 효과적으로 파악할 수 있을 것으로 사료되며, 여러 댐들에 대해서 적용한다면 댐의 위험도를 저감하기 위한 우선순위를 결정하는 데에도 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

향후 연구로서는 지반공학 및 구조적 파괴인자간의 고려를 통해 댐 파괴인자를 모두 고려한 댐 위험도 해석이 가능한 모형으로 확장이 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 정부(국민안전처)의 재원으로 자연재해저감 기술개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구임 [MPSS-자연-2015-78].

## References

Bowles, D.S. (1988). "Verde River Risk Assessment: an Interim Solution Study." paper presented at the 8th annual USCOLD Meeting, Phoenix, AZ, January.  
 Digest DG471 (2002). "Low-rise building foundations on soft ground, Building Research Establishment."  
 Gelman, A., Carlin, J.B., Stern, H.S., and Rubin, D.B. (2004). Bayesian Data Analysis. CHAPMAN&HALL/CRC.  
 Haimes, Y.Y. (1988). "Alternatives to the precommensuration of costs, benefits, risk, and time." *Journal of Water Resources Planning and management*, ASCE,

New York.  
 Hsu, Y.C., Tung, Y.K., and Kuo, J.T. (2011). "Evaluation of dam overtopping probability induced by flood and wind." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 25, No. 1, pp. 35-49.  
 Jan C. Grygier, and Jerry R. Stedinger (1985). "Algorithms for Optimizing Hydropower System Operation." *Journal of Water Resources Research*, Vol. 21, No. 1, pp. 1-10.  
 Jensen, J. (2001). "Genetic Evaluation of Dairy Cattle Using Test-Day Models." *Journal of Dairy Science*, Vol. 84, No. 12, pp. 2803-2812.  
 Karlsson, P., and Haimes, Y. (1989). "Risk Assessment of Extreme Events: Application." *J. Water Resour. Plann. Manage.*, Vol. 115, No. 3, pp. 299-320.  
 Kreuzer, H., and Bury, K. (1984). "A probability based evaluation of the safety and risk of existing dams, Proceedings of the International Conference on Safety of Dams." Coimbra, April 23-28, Edited by J. Laginha Serafim, University of Coimbra, Portugal.  
 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, No. 3, 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." *Springer-Verlag*, Vol. 20, No. 4, pp. 223-237.  
 Kwon, H.H., Moon, Y.I., and Khalil, A.F. (2007). "Non-parametric 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., 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.  
 Lee, J.Y., Lee, J.S., and Kim, K.Y. (2014). "Prediction of Loss of Life in Downstream due to Dam Break Flood." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 10, pp. 879-889.

- Na, B.K., Kim, J.Y., Kwon, H.H., and Lim, J.Y. (2014). "Improvement of Hydrologic Dam Risk Analysis Model Considering Uncertainty of Hydrologic Analysis Process." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 47, No. 10, pp. 853-865.
- Nelsen, R.B. (2006). "An Introduction to copulas." Springer, New York, pp. 109-155.
- Pearl, J. (1988). "Probabilistic Reasoning in Intelligence Systems." Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, 1988
- Prendergast, J.D. (1979). "Probabilistic Concept for Gravity Dam Analysis." Special Rep, M-265, Construction Engineering Research Lab, U.S. Army Corps of Engineers, Champaign.
- Sin, C.S., Ryu, G.J., Jo, K.S., and Bae, B.W. (2007). "Improvement of Hydrological Safety Evaluation Guideline for Existing Dams." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 40, No. 10, pp. 44-52.
- Sklar, K. (1959). "Fontions de repartition a n dimensions et leurs marge." Publ. Inst. Statist. Univ. Paris 8, pp. 11.
- Srivastava, A. (2008). "Generalized event tree algorithm and software for dam safety risk analysis." Utah State University.
- Thompson, K.D., Stedinger, J.R., and Heath, D.C. (1997). "Evaluation and presentation of dam failure and flood risks." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 123, No. 4, pp. 216-227.

<p>paper number : 15-057          Received : 28 July 2015          Revised : 11 August 2015          Accepted : 11 August 2015</p>
--