



## Reliability Evaluation Techniques for Improving the Safety and Maintenance of Aging Dams

Hyun Han Kwon<sup>1#</sup>, Byoung Han Choi<sup>2</sup>, Jang Won Moon<sup>3+</sup>

<sup>1</sup> Department of Civil and Environmental Engineering, Sejong University, Seoul, Korea

<sup>2</sup> Korea Rural Community Corporation's Rural Research Institute, 870 Hae-an-ro, Sangnok-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do, Korea

<sup>3</sup> Department of Civil and Environmental Engineering, Sejong University, Seoul, Korea

### Abstract

The risk of dam failure is increasing due to environmental changes such as climate change and extreme weather events. As a result, there is growing interest in the aging of large hydraulic structures both domestically and internationally. The need for stability analysis methodologies to estimate the potential risks of these structures, along with international regulatory directions on dam safety management, has become evident. This study proposes a probabilistic safety evaluation model using Bayesian techniques. Analytical methods based on the binomial distribution and Poisson distribution were developed for aging assessment under both stationarity and nonstationarity conditions. Furthermore, the analysis was extended to include a population variability model that incorporates prior information reflecting data variability to calculate risk probabilities. The proposed aging evaluation model is expected to provide a basis for quantifying the aging of dams, thereby enabling the determination of remaining service life and the optimal timing for maintenance and repair.

**Key words:** dam aging, nonstationarity, binomial distribution, poisson distribution

### I. 서론

우리나라의 많은 댐들이 30년 이상 경과됨에 따라 선제적 안전관리와 노후화에 따른 생애주기 비용을 최소화 할 필요가 있다. 미국과 일본 등 주요 국가에서는 사후관리에서 선제적 투자로 시설물 관리방식을 전환하고 있으며, 우리나라의 경우 SOC 분야 재정투입 규

모를 감안, 효율적 시설물 안전 및 유지관리 체계 수립 (국회 입법조사처, '18.10)을 권고하고 있다. 이에 따라, 댐 시설의 유지관리 미래 핵심기술 및 자산관리 선진 사례 검토, 신뢰성 해석 기법 활용, 댐 시설물의 안전 및 유지관리 개선방안 등을 마련하고, 국내외 기관의 물 인프라 관리 개선에도 적용할 수 있도록 보편성과 기관 별 현실적 여건을 감안할 수 있는 탄력성과 유연

<sup>#</sup> The 1st author: Hyun Han Kwon, Tel. +82-2-3408-3726, Fax. +82-2-3408-4332, e-mail. [hkwon@sejong.ac.kr](mailto:hkwon@sejong.ac.kr)

<sup>+</sup> Corresponding author: Jang Won Moon, Tel. +82-2-3408-3726, e-mail. [jangwon\\_moon@naver.com](mailto:jangwon_moon@naver.com)

성을 확보하여야 한다.

노후화(Aging)를 정량적으로 표현한 보편적 정의는 없지만, 일본 등에서는 통상적으로 시설물이 30년이 경과되면서 보수보강 비율이 급격하게 증가하고, 「법 인세법 시행규칙」 감가상각 내용연수 하한선을 30년으로 인식하기 때문에 일반적으로 노후화를 준공 후 경과년수(30년 적용)에 따라 분류하고 있는 추세이다(K-water, 2016). ICOLD(1994)에서는 노후화의 정의를 운영 시작 후 5년 이상시 발생하는 열화(deterioration)로 정의한다. ICOLD에서는 댐 노후화는 구조물과 기초 건설에 사용된 재료의 물성이 시간적으로 변화하는 것과 관련된 열화 유형으로서 정의할 수 있다.

댐 붕괴에 대한 원인을 외국 사례를 살펴보면 Peng & Zhang(2012)은 171건의 댐 붕괴 사례 중에 91.8%가 월류로 인한 붕괴인 것으로 분석하였으며, Zhang, *et al.*(2009)은 필댐 붕괴 사례를 검토하였고 그 중 58%가 월류로 인한 붕괴, 37%는 파이핑인 것으로 분석되었다. 국내 피해 사례 중 2002년 태풍 RUSA 내습시 농업용 저수지의 피해 사례를 검토한 결과 월류에 의한 피해가 52%, 파이핑으로 인한 피해가 18%로 나타났다(Choi, 2015).

국내에서 가시적인 물인프라 시설물의 노후화 및 유지/안전관리 소홀로 인한 안전사고는 발생하지 않은 것으로 보고되고 있다. 그러나 향후 물인프라 시설물의 노후화가 충분히 예상되는 바, 국내외 시설물 노후화로 인한 안전사고 사례와 유사한 안전사고가 발생할 여지가 있다.

댐의 노후화는 시간이 지남에 따라 내구성이 저하되는 현상과 밀접한 관련이 있으며, 이러한 특성은 정상성 모형만으로는 충분히 설명하기 어렵다. 특히, 시간에 따른 댐 배수량 변화는 비정상적인 특성을 보일 가능성이 높아, 이를 노후화의 주요 지표로 활용할 수 있다고 가정하였다. 본 연구에서는 댐 수위와 하류 배수량 데이터를 다변량 분포로 분석하고, 댐 수위에 따른 배수량이 기준 범위를 초과하는 사상(event)을 추출

하였다. 이를 기반으로 초과확률 기준을 적용하여, 댐 노후화를 정량적으로 평가할 수 있는 대리변수를 제안하고자 한다. 이러한 접근법은 장기간에 걸친 기반 계측 자료 확보가 어려운 국내 상황에서도 효과적으로 적용 가능하며, 댐 안정성을 위협하는 특정 사상의 발생 가능성을 시간적 관점에서 평가하는 데 유용할 것으로 판단된다.

이러한 점에서 이항분포(binomial distribution)의 매개변수인  $p$ 가 시간에 따라 변화하는 비정상성 모형의 개발과 이를 통해 000댐의 노후화 정도를 예시를 통해 제시하였다. 본 연구를 통해 제시되는 방법은 기존에 정상성 기반의 위험도 해석 기법과는 차별성 있는 새로운 해석 방법으로서 이상치의 발생빈도의 시변성을 고려한 모형으로 확장하였다.

## II. 연구방법

댐 노후화 평가를 위하여 000댐의 배수량 및 수위의 관계를 평가하였다. 2개의 변량의 관계를 결합확률 분포로 정의하고 결합확률이 0.9를 벗어나는 이상치를 댐의 구조적 문제가 발생하는 구간으로 가정하여 시계열로 구성하였으며 이를 노후화 평가를 위한 기초자료로 활용하였다. 노후화 평가 방법으로는 정상성(stationarity) 및 비정상성(nonstationarity)에 따른 이항분포, 포아송 분포(Poisson distribution)를 기반의 해석 방법을 개발하였다. 정상성 모형은 시간적인 종속성을 고려하지 않는 모형이며 비정상성 모형은 시간적인 종속성을 고려한 모형으로 정의할 수 있다. 따라서 비정상성 모형을 노후화 평가를 위한 해석 모형으로 채택하였으며, 정상성 모형은 비정상성 모형과 비교하기 위한 기본모형(reference)으로 활용하였다. 이와 함께 자료 및 매개변수에 불확실성을 평가하기 위하여 Bayesian 모형을 활용하였다. 이를 통해 노후화에 따른 위험도를 산정함과 동시에 해석결과에 대한 불확실성 정보를 제시하였다.

1. 댐 배수량 및 수위 자료의 관계성 평가 방안 제시

<Figure 1>은 소양강댐의 수위와 배수량과의 관계를 나타낸다. 댐 수위가 높은 경우 배수량이 커지는 특성을 기대할 수 있다. 댐 수위와 배수량과의 관계 분석을 통해 기대할 수 있는 것은 이러한 양의 상관성이 시간적으로 지속되느냐에 대한 문제이다. 즉, 댐 수위가 높은 경우 댐의 배수량도 과거에 관측되었던 수준으로 유지되어야 하나, 만약 배수량의 크기가 현저히 작아지거나 커지는 경우 댐의 구조적 및 기능적 문제를 의심할 수 있다. 따라서 이러한 관계설정을 통해 특정 기준값(threshold)을 결정하고 운영한다면 댐의 안정성 평가와 함께 시간적 추이 변화도 관찰이 가능하다. 최종적으로 댐의 노후화를 평가할 수 있는 모형으로 확

장도 가능할 것으로 판단된다.

<Figure 2>는 댐의 수위와 배수량의 특성을 시간 규모별로 평가하기 위하여 Wavelet Transform을 통해 주파수대별로 시계열을 분리하였다. 고주파(high frequency)에서 저주파(low frequency) 순서로 분리하면서 댐의 수위와 배수량의 관계를 평가하여 그래프로 나타내었다. 주기별로 동조(modulation)되는 부분도 있는 반면 서로 다른 상이한 관계(phase)를 갖는 특성을 갖는 경우가 있는 것으로 분석되었다. 향후 주파수 영역별로 차이가 발생하는 부분과 실제 댐의 안전상의 문제점이 나타나는 시점을 서로 비교함으로써 댐의 구조적/기능적 노후화 등을 사전에 인지하거나 예측이 가능한 모형으로 확장도 가능할 것으로 판단된다.

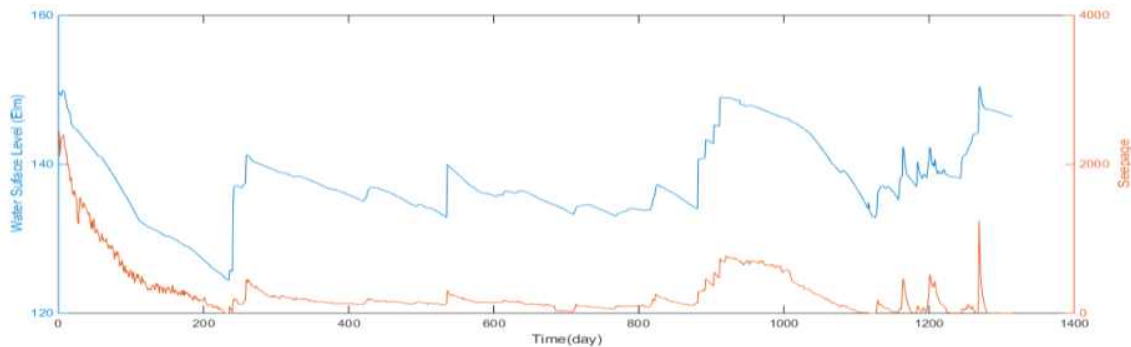


Figure 1. The relationship between dam water levels and discharge volume

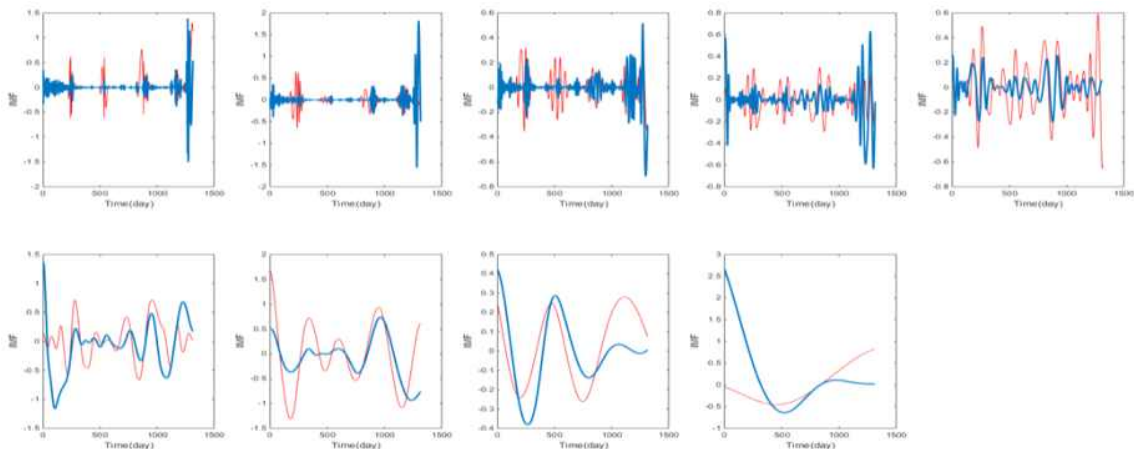


Figure 2. Evaluation of the characteristics of dam water levels and discharge volume at different time scales

<Figure 3>은 댐의 수위와 배수량의 상관성을 보여 주고 있는 것으로 시간적인 지체를 포함한 상관성 평가를 위하여 지체상관계수를 산정하였다. 두 변량간의 지체는 나타나지 않고 있으며 상관성은 대략 0.5를 나타내고 있다. 이러한 상관성을 시간에 경과에 따라 지속적으로 평가하고 변동성을 파악하는 것도 댐의 이상 징후를 파악할 수 있는 방안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

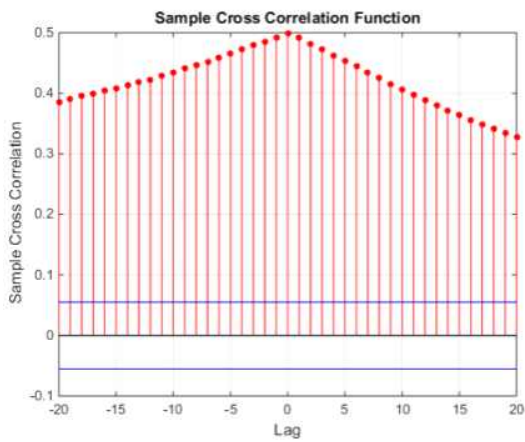


Figure 3. The correlation between dam water levels and discharge volume

2. 댐 배수량 및 수위에 따른 결합확률 분포

Copula 함수 방법을 기반으로 OOO댐의 배수량

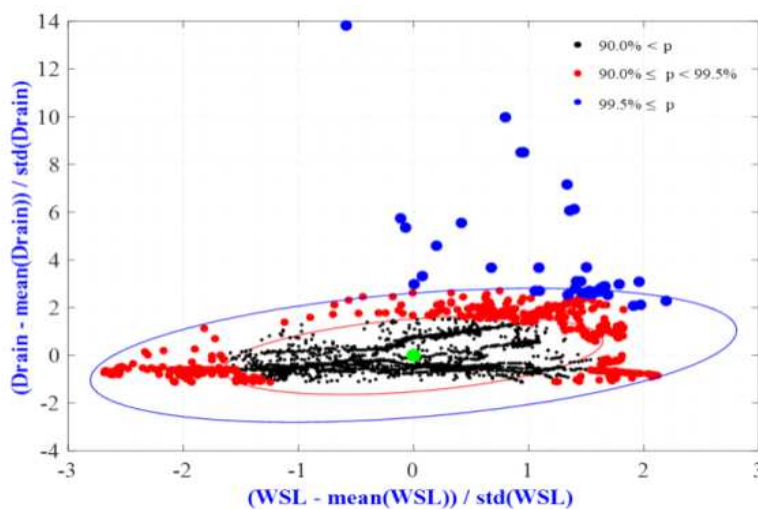


Figure 4. Bivariate joint probability estimation based on Copula

(drain)과 수위 자료 간의 2차원 결합확률분포를 구축하였다. 구축된 2차원 결합확률분포를 토대로 결합확률이 90% 이상 99.5% 미만의 값을 댐의 구조적 이상(abnormal) 상황으로 가정하여 관측 자료로부터 이들 사상을 추출하고 시계열로 구성하였다. 즉, 연단위로 이상치의 발생횟수 및 발생간격을 시계열로 구축하고 댐의 노후화 분석을 위한 기초자료로 활용하였다. 본 연구에서는 99.5% 결합확률을 벗어나는 계측정보는 이상치(Outlier)로 가정하였으며, 1985년 이전의 값에서도 다수의 이상치가 확인되어 자료 기간을 1985년(포함) 이후로 결정하여 연간 발생 횟수를 결정하였다. <Figure 4>는 Gaussian Copula 함수를 이용하여 배수량과 수위간의 2차원 결합확률밀도 함수를 산정한 결과를 나타낸다.

<Figure 4>에서 정의된 결합확률분포로부터 이상치를 추출하여 나타내면 <Figure 5>와 같으며, 이를 연간 발생횟수로 나타내면 <Figure 6>과 같다. <Figure 6>에서 보면 이상치 발생횟수가 시간이 경과됨에 따라 증가하는 경향을 나타내는 확인할 수 있다. 이를 댐의 노후화와 연계하여 해석할 수 있는 방법을 개발하였다.

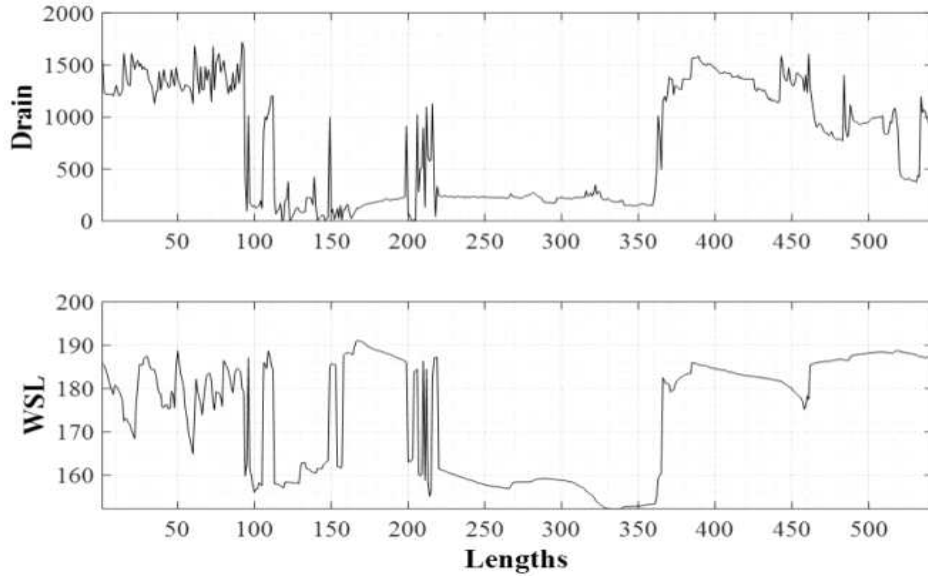
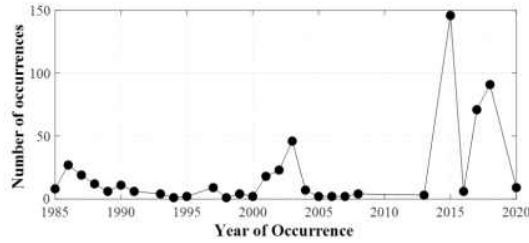


Figure 5. Discharge and water level variation of OOO Dam


 Figure 6.  $90 \leq p < 99.5$  Annual occurrence frequency within the range.

### 3. 정상성 노후화 평가 모형

#### 1) Bayesian 모형 기반의 정상성 이항분포 모형

이항분포 기반의 모형은 성공(안전) 과 실패(위험)로 구분되며, 이항분포의 가정은 다음과 같다.

- ① 사상은 성공 및 실패의 두 경우로 구분된다.
- ② 각 문제에 대하여 실패확률(위험성)의 확률이 있으며, 매개변수  $p$ 로 표기한다.
- ③ 이전의 결과가 이후 결과에 영향을 주지 않는 독립성 가정에 근거한다.

이항분포에서 매개변수는 위험 발생확률  $p$ 이며,  $n$ 으로 표기되는 지정된 횟수 내에서 발생횟수를  $x$ 로 표기된다. 노후화 평가모형으로서 본 연구에서  $n$ 은 365일이며  $x$ 는 365일 동안 발생한 이상치 발생횟수로 정의할 수 있다.

위험도  $p$ 의 추정은 일반적으로 우도함수를 최대화 함으로써 산정되며 다음과 같이 추정될 수 있다.

$$\hat{p} = \frac{x}{n} \quad (1)$$

이항분포의 경우, Bayesian 추론 시 매개변수  $p$ 의 사전분포로 Beta 분포가 활용되며, Beta 사전분포를 표현하기 위해서는  $\alpha_{prior}$ 와  $b_{prior}$ 로 표기되는 두 가지 Hyper-parameter로 정의된다. 개념적으로  $\alpha_{prior}$ 는 사전분포에 포함된 위험 횟수로 볼 수 있고  $\alpha_{prior}$ 와  $b_{prior}$ 의 합은 이러한 위험이 발생했을 때의 대응 횟수와 같다.

$$\begin{aligned} \alpha_{post} &= \alpha_{prior} + x \\ \beta_{post} &= \beta_{prior} + n - x \end{aligned} \quad (2)$$

$n$ 의 기간 동안에서  $x$ 개의 발생 횟수로 구성된 관측 데이터로 사전분포(prior distribution)의 공액분포(conjugate distribution), 우도함수(likelihood function)를 활용하여 사후분포를 추정할 수 있다. 공액분포는 사전·사후분포(posterior distribution)가 동일하고, 공액분포 특성 상 사후분포 또한 Beta 분포를 따르게 된다 (Berti, et. al., 2012).

Beta 분포의 특성으로부터  $p$ 의 사전평균과 사후평균은 각각  $\alpha_{prior} / (\alpha_{prior} + \beta_{prior})$ 와

$\alpha_{post} / (\alpha_{post} + \beta_{post})$ 로 구할 수 있다. 또한, 사후분포에 거의 영향을 미치지 않는 사전분포를 사용할 수도 있다. 즉, 모형의 사전분포로 다양한 방법이 적용된다(informative 사전분포, diffuse 사전분포, reference 사전분포, formal 사전분포, vague 사전분포 및 objective 사전분포).

무정보(non-informative) 사전분포는 매개변수에 대한 정보를 거의 포함하지 않으며, 완전한 불확실성에 근거하여 매개변수를 추정한다. 즉, 무정보 사전분포는 관측 자료가 충분히 많은 경우에 적합하며, 사전정보보다는 우도함수에 근거한 해석을 목적으로 활용된다. 즉, 강한 사전정보를 부여함으로써 나타날 수 있는 매개변수의 부정확성을 방지하기 위한 목적으로 활용된다. 무정보 사전분포를 적용하는 방법은 매우 다양하며 통계적 및 수학적 관점에서 적용 가능한 무정보 사전분포를 사용하는 것이 일반적이다. PSA(Probabilistic Sensitivity Analysis)의 단일매개변수 추론을 위해서 본 연구에서는 Jeffreys 무정보 사전분포(noninformative prior)를 활용하였다. Jeffreys 사전분포 함수 형태는 우도함수에 따라 달라지기 때문에, 각 우도함수에 따라 서로 다른 Jeffreys 사전분포가 적용된다(Choi, et. al., 2018).

<Figure 7>은 Bayesian 모형 기반의 정상성 이항분포 모형을 통한 OOO 댐의 PSA 결과를 나타낸다. 위험도  $p$ 를 매년 추정할 수 있으며 분석기간 동안 평균 발생확률은 0.054로 추정되었다. 즉, 매년 5.4%의 확률로 이상치 관측되고 있음을 확인할 수 있다. 매년 추정되는 위험도 추정치는 Bayesian 모형으로부터 사후분포 형태로 제시되며 95% 구간을 동시에 보여주고 있음을 확인할 수 있다. 위험확률이 1985년부터 2000년 초반까지 일정 값을 유지하다가 2003년 이후 증가하는 경향성을 확인할 수 있다. 이러한 점에서 시간종속성을 가지는 노후화 함수를 명확하게 위험도 추정 시 활용하는 것이 통계적으로 적합성이 있다 하겠다. 이러한 점에서 노후화를 함수형태로 제시한 비정상성 모형을

다음 절에서 제시하였다. 한 가지 특이점은 위험도가 클수록 불확실성 구간도 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 상대적으로 적은 이상치를 고려한 Sampling 오차를 고려한 결과로서 Bayesian 모형의 장점 중 하나로 판단할 수 있다.

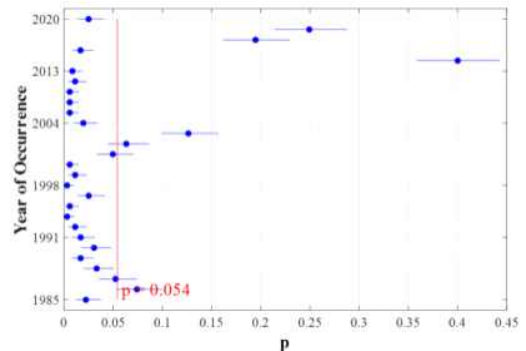


Figure 7. Results of risk analysis for OOO Dam based on Binomial normality

## 2) Bayesian 모형 기반의 정상성 Poisson 모형

Poisson 모형은 확률론적 위험도 평가를 위해 사용되는 대표적인 확률모형으로서 위험발생 확률을 예측하기 위한 목적으로 위험도 평가에서 사용된다(Chan & Vasconcelos, 2009).

Poisson 분포에 대한 일반적인 가정은 다음과 같다.

- ① 짧은 시간 간격에서 고장이 발생할 확률은 대략적으로 시간 간격의 길이에 비례한다. 고장률 또는 위험도 발생확률로 정의되며  $\lambda$ (lambda)로 표기한다.
- ② 짧은 시간 안에 동시다발적으로 고장이 발생할 확률은 거의 0에 가깝다.
- ③ 특정 시간구간에 발생한 사건은 또 다른 시간구간에서 발생할 확률에 영향을 미치지 않는 독립성 가정에 근거한다.

Bayesian 기법을 이용한 Poisson 모형에서 매개변수는  $\lambda$ 로 나타내며, 관측기간에서 특정 기간(t) 내의 사건 발생 횟수(x)로 구성된다.

$\lambda$ 는 발생률 또는 고장율로 나타내는 비율이고 단위는 시간의 역수를 갖는다.  $\lambda$ 는 시간의 함수가 아니기

때문에 단순한 Poisson 분포는 신뢰도 성장(reliability growth)이나 노후화 문제에 적용될 수 없으며, 추후 비정상성을 나타내는 모형으로 확장이 필요 된다. 관련 사항은 다음절에 기술하였다.

매개변수  $\lambda$  추정은 이항분포의  $p$ 와 마찬가지로, 우도함수를 최대로 하는 값으로 추정되며, 산정식은 다음과 같다.

$$\hat{\lambda} = \frac{x}{t} \tag{4}$$

최우도법 기준으로 산정된 매개변수  $\lambda$ 의 신뢰구간은 일반적으로 Chi-square 분포를 통해 다음과 식과 같이 정량화할 수 있다.

$$\lambda_L = \frac{\chi_{\alpha/2}^2(2x)}{2t} \tag{5}$$

$$\lambda_U = \frac{\chi_{1-\alpha/2}^2[2(x+1)]}{2t} \tag{6}$$

이항분포의 경우와 마찬가지로, Bayesian 추론의 수학적 편리성 때문에 공액사전분포가 적용되며, Poisson 분포에 대한 공액사전분포는 Gamma 분포로 적용된다. 공액사전분포는 사전분포와 사후분포가 동일하게 추정될 수 있는 사전분포로서 Bayesian 모형 적용 시 모형의 효율성뿐만 아니라 정확성 측면에서도 다양한 장점을 제공한다. Gamma 사전분포는 두 개의 매개변수 ( $\alpha_{prior}$  및  $\beta_{prior}$ )가 필요하며, 개념적으로  $\alpha_{prior}$ 는 사전분포에 포함된 발생횟수로 볼 수 있고,  $\beta_{prior}$ 는 이 사건들이 발생한 기간으로 볼 수 있다.

#### 4. 비정상성 노후화 평가 모형

##### 1) Bayesian 모형 기반의 비정상성 이항분포 모형

비정상성 모형과 관련된 매개변수를 수학적으로 유도하는 것은 쉽지 않으며 본 연구에서는 앞서 설명된 Bayesian MCMC 기법을 활용하여 매개변수를 추정하였다(Kim, et. al., 2016).

이항분포의 매개변수  $p$ 가 시간에 따라 변화할 수 있게 하는 일반적인 방법은 Canonical Link 함수를 직

접 확률모형에  $f(p) = a + bt$ 의 함수형태 정의하는 것이다. 여기서,  $f(p)$ 는  $p$ 의 사용자 정의 함수이고  $a$ 와  $b$ 는 경향성을 평가하기 위한 회귀 매개변수,  $t$ 는 시간을 나타낸다. 만약  $b$ 가 0이면 앞서 논의된 시간에 따라  $p$ 가 변화하지 않는 모델로 축소된다. 0보다 크면 시간의 변화와 함께  $p$ 값이 증가하고,  $b$ 가 0보다 작은 경우에는  $p$ 값은 감소한다. 여기서, 매개변수  $a$ 와  $b$ 의 정확한 추정이 가장 핵심적인 사항이다.

Bayesian 추론에서는 이러한 매개변수 추정 시 무정보 사전분포를 적용하는 것이 일반적인 방법이다. 물론 사전정보가 매개변수  $a$ 와  $b$  추정 시 이용 가능하다면 신뢰성 있는 정보가 되지만, 잘못된 사전정보로 인한 문제점이 크게 나타날 수 있으므로 무정보 사전분포를 통해 매개변수의 범위를 조정하면서 매개변수를 추정하는 것이 바람직한 대안이 될 수 있다.

<Table 1>은 매개변수의 수렴정도는 지표를 통해서도 확인하였으며, 수렴 정도를 높이기 위하여 9,000회 반복 시행하여 매개변수를 추정하였다. 매개변수  $b$ 에 대한 사후분포를 분석하면 경향성의 정도를 판단할 수 있다. 사후분포가 0의 오른쪽에 있으면, 증가 경향을 나타내며, 반대로 0의 왼쪽에 있으면 감소 경향을 나타낸다.  $b$  값의 사후분포를 통하여 노후화 진행 정도를 확률적으로 해석할 수 있다. <Figure 8>에서 제시된 것처럼  $b$ 가 0보다 크며 불확실성 구간도 매우 작은 것을 확인할 수 있으며, 이는 노후화의 특성을 나타내는 이상치 발생확률  $p$ 의 증가 경향 정도가 통계적으로 유의함을 나타낸다.

제시된 Bayesian 기법 기반의 비정상성 모델을 통하여 미래에 대한  $p$ 를 추정할 수 있으며, 본 분석에서 제시된 결과는 앞서 제시된 노후화 분석을 위한 PSA 체계에서 직접적으로 사용될 수 있다. <Figure 9>는 본 연구에서 개발한 비정상성 이항분포를 이용한 노후화 평가 결과를 나타낸다. 예시를 위해 2021년에 대한 이상치 발생률  $p$ 에 대한 모의를 시행하였으며 90% 신뢰 구간 [0.13, 0.16]과 사후확률 0.14로 추정되었다. 모형

을 통해 추정된  $p$ 의 사후분포를 이용하여 위험도  $p$ 의 각 연도별 90% 신뢰구간을 나타내었으며, 빨간색으로 나타낸 확률  $p=0.053$  값은 과거 기간에서의  $p$ 의 평균 값을 나타낸다. 본 모형에서 시간  $t$ 를 지속적으로 증가 시키면서 확률  $p$ 를 추론할 수 있으며, 이는 앞서 제시된 <Figure 10>와 같은 형태로 변환하여 적용이 가능하다. 즉, 확률  $p$ 를 활용하여 위험도 기준을 결정한 후 (<Figure 10>에서 y축의 2 또는 3) 제시된 기준까지 도달하는데 요구되는 시간  $t$ 를 추정한다면 앞서 제시된

일반화된 노후화 모형에 직접적으로 활용이 가능하다.

2) Bayesian 모형 기반의 비정상성 Poisson 모형

Poisson 분포의 매개변수  $\lambda$ 가 시간에 따라 변화할 수 있게 하는 일반적인 방법은 앞서 이항분포 모형에서 언급한 것과 동일하게 매개변수  $\lambda$ 를  $f(\lambda) = a + bt$ 의 함수로 정의하는 것이다. 여기서,  $f(\lambda)$ 는  $\lambda$ 의 사용자 정의 함수이고  $a$ 와  $b$ 는 매개변수를 나타내며  $t$ 는 시간을 의미한다.

Table 1. Results of statistical validation of simulated posterior probabilities (Binomial distribution)

Variables	Mean	Stand. Dev.	MC error	2.5%	Median	97.5%	Start	Sample
a	-4.40	0.13	0.00	-4.65	-4.40	-4.16	5001	9000
b	0.09	0.01	0.00	0.08	0.09	0.10	5001	9000

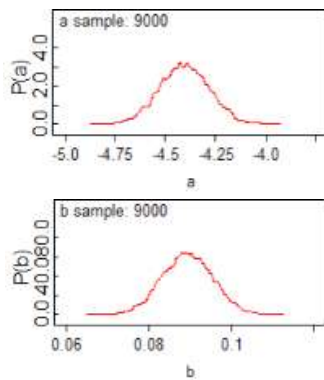


Figure 8. Convergence of parameter posterior probabilities considering time variability

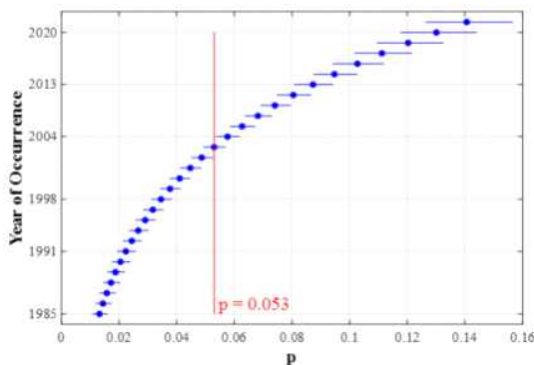


Figure 9. PSA analysis based on nonstationary binomial

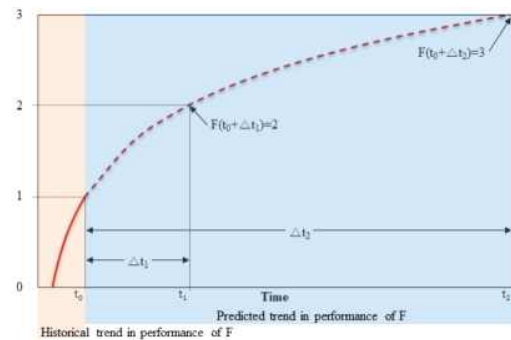


Figure 10. Conceptual diagram of the generalized aging model

Bayesian MCMC를 통해 9,000회 반복 시행을 통해 매개변수를 추정하였다. 매개변수 중 경향성을 나타내는 매개변수  $b$ 에 대한 사후분포를 분석하면 노후화의 정도를 판단할 수 있다.  $a$ 의 사후평균은 -8.98이고 95% 신뢰구간 [-10.25, -7.76]을 나타냈으며,  $b$ 는 사후분포의 중앙값은 0.71이고 95% 신뢰구간 [0.57, 0.86]을 나타내었다. 매개변수  $a$ 와  $b$ 의 유의수준은 <Figure 11>에서 제시된 사후분포도를 통해서도 확인할 수 있다. 즉, 매개변수  $b$ 의 경우 음의 값을 포함하지 않으며 매우 좁은 확률분포 형태를 가지는 것을 확인할 수 있으며, 이는 경향성을 나타내는 매개변수  $b$ 의 통계적 유의성이 매우 크다는 것을 직감적으로 인지할 수 있다.

개발된 비정상성 Poisson 모델을 통하여 2021년에

대한 이상치 발생률  $\lambda$ 를 추정할 수 있으며, 추정된 값은 앞서 제시된 이항분포와 동일하게 일반화된 노후화 평가체계인 PSA에 직접적으로 사용될 수 있다.  $\lambda$ 에 대한 예측 사후분포를 모의하여 90% 신뢰구간과 함께 사후확률 0.089를 추정할 수 있다. <Figure 12>는 제시된 비정상 모형에 의해 추정된 시변성을 갖는 매개변수  $\lambda$ 의 경향성을 분석한 그림이다. 각 연도별 90% 신뢰구간을 제시하였으며, 빨간색으로 나타낸  $\lambda=0.053$ 는 과거 기간에서의 추정한 이상치의 평균재현율을 나타낸다. 1998년을 전후로 평균값을 넘어  $\lambda$ 가 증가 추세인 것을 확인 할 수 있다.

### III. 결론

기후변화, 이상기후 등 극한 환경으로 인한 댐 붕괴 관련 사고가 증가하면서 국내에서 운영 중인 댐과 같은 대형 수공구조물 노후화에 대한 관심이 대두되고 있다. 국제 댐 안전관리 규제 방향과 구조물의 잠재 위험도를 추정하기 위한 안정성 해석방법론이 요구되

고 있으며, 이에 본 연구에서는 Bayesian 기법을 활용한 확률론적 안전성 평가 모형을 제시하였다.

댐 노후화 평가를 위하여 OOO댐의 배수량 및 수위의 관계를 평가하였다. 2개의 변량의 관계를 결합확률 분포로 정의하고 결합확률이 0.9를 벗어나는 이상치를 댐의 구조적 문제가 발생하는 구간으로 가정하여 시계열로 구성하였으며 이를 노후화 평가를 위한 기초자료로 활용하였다.

노후화 평가 방법으로는 정상성(stationarity) 및 비정상성(nonstationarity)에 따른 이항분포, 포아송 분포를 기반의 해석 방법을 개발하였다. 정상성 모형은 시간적인 종속성을 고려하지 않는 모형이며 비정상성 모형은 시간적인 종속성을 고려한 모형으로 정의할 수 있다. 따라서 비정상성 모형을 노후화 평가를 위한 해석 모형으로 채택하였으며, 정상성 모형은 비정상성 모형과 비교하기 위한 기본모형(reference)으로 활용하였다. 이와 함께 자료의 변동성을 나타내는 사전정보를 활용하여 위험확률을 산정하는 모형(population variability model)으로 확장하여 분석을 수행하였다.

Table 2. Statistical validation results of simulated posterior probabilities (Poisson distribution)

Variables	Mean	Stand. Dev.	MC error	2.5%	Median	97.5%	Start	Sample
a	-8.98	0.64	0.02	-10.25	-8.96	-7.76	5001	9000
b	0.71	0.07	0.00	0.57	0.71	0.86	5001	9000

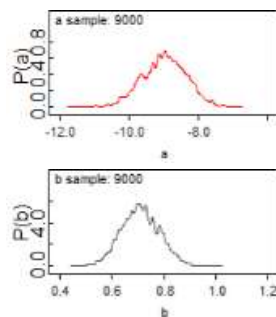


Figure 11. Convergence of parameter posterior probabilities of  $\lambda$  considering time variability

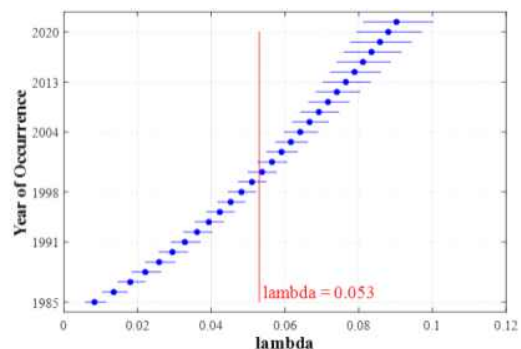


Figure 12. PSA analysis based on nonstationary Poisson

본 모형을 통하여 노후화 정도를 매개변수의 비정상성을 고려하여 정량적으로 제시할 수 있으며 이들 매개변수들의 불확실성을 정량화가 가능하였다. 즉, 제

시된 노후화 평가모형을 통해 댐의 노후도를 정량화함으로써 잔여수명 및 최적보수 시기 등을 판단 및 근거로 제시, 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 농업기반 및 재해대응 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음(322079-3).

### References

Berti, M., M. L. V. Martina, S. Franceschini, S. Pignone, A. Simoni, and M. Pizziolo. 2012. Probabilistic Rainfall Thresholds for Landslide Occurrence Using a Bayesian Approach. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 117(F4): 1-20

Chan, A. B. and N. Vasconcelos. 2009. *Bayesian Poisson Regression for Crowd Counting*. In 2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision. IEEE.

Choi, Byung Hwan. 2015. *Disaster Risk Analysis and Management Plans of Agricultural Reservoirs*. Master's Thesis. Kyungpook National University.

Choi, Hong Geun, Uranchimeg Sumiya, Yong Tak Kim, and Hyun Han Kwon. 2018. A Bayesian Approach to Gumbel Mixture Distribution for the Estimation of Parameter and its Use to the Rainfall Frequency Analysis. *Journal of*

*the Korean Society of Civil Engineers*. 38(2): 249-259.

ICOLD. 1994. Ageing of Dams and Appurtenant Works. Bulletin 93, Committee on Dam Ageing, International Commission on Large Dams. Paris, France.

Kim, Tae Jeong, Byung Jin So, Min Suk Ryou, and Hyun Han Kwon. 2016. Development of Dam Inflow Simulation Technique Coupled with Rainfall Simulation and Rainfall-runoff Model. *Journal Korea Water Resour.* 49(4): 315-325.

K-water Convergence Research Institute. 2016. Study on Diagnosing the Structural Integrity of Aging Dams for Performance Improvement(III). K-water.

Peng, M. and L. M. Zhang. 2012. Analysis of Human Risks Due to Dam-Break Floods-Part 1: A New Model Based on Bayesian Networks. *Natural Hazards*. 64(1): 903-933.

Zhang, L. M., Y. Xu, and J. S. Jia. 2009. Analysis of Earth Dam Failures: A Database Approach. *Georisk*. 3(3): 184-189.

### *Korean References Translated from the English*

K-water 융합연구원. 2016. 댐 성능개선을 위한 Aging 댐체 건전성 진단 연구(III). K-water.

최병환. 2015. 농업용 저수지의 재해위험도 분석과 관리개선 방안. 석사학위논문. 경북대학교.

## 노후 댐의 안전 및 유지관리 개선을 위한 신뢰성 평가 기법

**국문초록** 기후변화, 이상기후 등 환경 변화로 인한 댐 붕괴 위험성이 높아지고 있다. 이에 따라 국내외 대형 수공구조물의 노후화에 대한 관심이 증가하고 있다. 국제 댐 안전관리 규제 방향과 구조물의 잠재 위험도를 추정하기 위한 안정성 해석방법론의 필요성이 대두되고 있으며, 이에 본 연구에서는 Bayesian 기법을 활용한 확률론적 안전성 평가 모형을 제시하였다. 노후화 평가 방법으로는 정상성(stationarity) 및 비정상성(nonstationarity)에 따른 이항분포(binomial distribution)와 포아송 분포(Poisson distribution)를 기반의 해석 방법을 개발하였다. 또한, 자료 변동성을 반영한 사전 정보를 활용하여 위험확률을 산정하는 모형(population variability model)으로 확장하여 분석을 수행하였다. 본 노후화 평가 모형은 댐의 노후도를 정량화함으로써 잔여 수명과 최적 보수 시기 등을 판단할 수 있는 근거를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

**주제어:** 댐 노후화, 비정상성, 이항분포, 포아송 분포

---

**Profiles** **Hyun Han Kwon:** He received his M.A. and Ph.D. from the University of Seoul, and later worked as a postdoctoral researcher at Columbia University. He is currently serving as a professor at Sejong University, conducting research that integrates hydrology, climatology, and data mining to address water resource issues, as well as combining data mining techniques with physical and statistical models to study hydrologic systems (hkwon@sejong.ac.kr).

**Byoung Han Choi:** He received his M.A., Ph.D. from Chungbuk National University. And he worked at North Carolina State University as a postdoctoral researcher. Now he is serving as a Principal researcher at the KRC Rural Research Institute and conducting various studies in the field of disaster reduction and safety management (han1020@ekr.or.kr).

**Jang Won Moon:** He received his M.A. and Ph.D. from the University of Seoul and later worked at ISAN Corporation in the Hydropower Department. He is currently serving as a principal researcher at Sejong University, conducting research in the fields of flood and drought to address water resource issues (jangwon\_moon@naver.com).

