

## Bayesian 추계학적 신뢰도 기법을 이용한 소양강댐 퇴사용량 감소의 불확실성 분석

### Identification of Uncertainty on the Reduction of Dead Storage in Soyang Dam Using Bayesian Stochastic Reliability Analysis

이 철 응\* / 김 상 욱\*\*

Lee, Cheol-Eung / Kim, Sang Ug

---

#### Abstract

Despite of the importance on the maintenance of a reservoir storage, relatively few studies have addressed the stochastic reliability analysis including uncertainty on the decrease of the reservoir storage by the sedimentation. Therefore, the stochastic gamma process under the reliability framework is developed and applied to estimate the reduction of the Soyang Dam reservoir storage in this paper. Especially, in the estimation of parameters of the stochastic gamma process, the Bayesian MCMC scheme using informative prior distribution is used to incorporate a wide variety of information related with the sedimentation. The results show that the selected informative prior distribution is reasonable because the uncertainty of the posterior distribution is reduced considerably compared to that of the prior distribution. Also, the range of the expected life time of the dead storage in Soyang Dam reservoir including uncertainty is estimated from 119.3 years to 183.5 years at 5% significance level. Finally, it is suggested that the improvement of the assessment strategy in this study can provide the valuable information to the decision makers who are in charge of the maintenance of a reservoir.

**Keywords** : sedimentation, reliability analysis, stochastic gamma process, Bayesian MCMC, informative prior distribution

---

#### 요 지

저수지 내 퇴적과정으로 의한 저수용량 감소에 대한 효율적 관리의 중요성에도 불구하고, 불확실성을 포함하는 확률론적 관점의 신뢰도 분석이론을 활용한 저수용량 감소에 관한 연구는 많지 않다. 본 연구에서는 신뢰도 분석모형의 하나인 추계학적 감마 과정(stochastic gamma process)을 이용하고 개발된 모형을 소양강댐에서 적용하여 향후 발생될 수 있는 저수용량의 감소를 불확실성 측면에서 분석하였다. 특히 불확실성을 분석하기 위하여 정보적 사전분포(informative prior distribution)를 이용한 Bayesian MCMC 기법을 사용하여 추계학적 감마 과정의 모수(parameter)를 추정하였다. 구축된 정보적 사전분포를 적용한 결과 사전분포의 불확실성에 비해 사후분포의 불확실성이 상당히 감소되어 정보적 사전분포의 효과를 확인할 수 있었으며, 소양강댐 퇴사용량의 기대 수명(expected life time)은 5% 유의수준에서 119.3년부터 183.5년의 불확실성을 나타내는 것으로 분석되었다. 이와 같은 연구는 저수용량의 감소에 관한 불확실성 측면의 정보를 신뢰도 분석결과와 함께 제공할 수 있으므로, 향후 퇴적과정으로 인한 저수지의 유지관리계획을 수립함에 있어 댐 관리자 등에게 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

---

\* 강원대학교 공과대학 토목공학과 교수 (e-mail: celee@kangwon.ac.kr)

Professor, Department of Civil Engineering, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

\*\* 교신저자, 강원대학교 공과대학 토목공학과 조교수 (e-mail: sukim70@kangwon.ac.kr, Tel: 033-250-6233)

Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

## 1. 서 론

홍수나 가뭄과 같은 수자원의 변동성에 대응하기 위하여 건설되는 다목적 댐은 홍수조절, 용수공급, 수력발전, 낚시나 수상시설을 활용한 레크리에이션 활동의 제공 등과 같은 수자원 관리계획의 이행에 있어 중요한 역할을 제공한다. ICOLD(1998)에 따르면 댐 체체의 높이가 15 m 가 넘는 대규모 댐은 세계적으로 45,000개에 달하며, 이 댐들은 대부분 제2차 세계대전이 종료된 1945년 이후에 본격적으로 건설되었다. 또한 Mahmood (1987)는 전 세계에 건설된 인공저수지들은 평균적으로 약 22년이 경과되었음을 제시한 바 있다. 우리나라의 경우에는 1970년 이후부터 본격적으로 시행된 여러 가지 국가계획 및 사업에 따라 다목적 댐, 수력 댐 및 농업용 저수지의 건설로 인해 수많은 인공 저수지가 건설되었으며, 이로 인한 치수안정성의 확보 및 안정적인 수자원 공급은 지난 반세기 동안 우리나라의 경제발전, 공업화, 도시화에 중요한 역할을 제공하였다. 그러나 최근 10년 전부터는 댐의 건설로 인한 환경적 영향에 대한 재고 필요성 대두, 미래 국내 인구의 급격한 감소 등과 같은 문제로 인해 과거와 같은 대규모 다목적 댐의 건설이 어려운 형편이다. 따라서 이와 같이 신규 댐 개발이 어려운 상황에서는 기존 댐들의 유지관리에 관한 사항이 과거 어느 때보다 중요하게 대두될 수 있으며, 특히 미래 용수공급량을 만족시키기 위한 저수지 용량에 대한 전면적인 검토와 이를 지원할 수 있는 관련 연구가 먼저 진행될 필요가 있다.

미래의 용수공급량을 만족시키기 위한 저수용량의 유지관리를 위해 검토되어야 하는 중요한 문제 중 하나는 저수지 내 퇴적과정(sedimentation)으로 인한 저수용량의 감소이다. 저수지 퇴적과정에 관한 연구는 국내·외적으로 수자원공학과 관련된 타 분야의 연구보다 진행된 연구 성과가 미흡한 편인데, 이는 퇴적과정 분석의 기초가 되는 자료의 부족으로 인한 것으로 파악된다. 미국은 'the Committee on sedimentation of the Water Resources Council'에서 매 10년 마다 저수지 내 퇴적과정과 관련된 기초조사를 수행하고 있으며, 우리나라도 저수지 관리자가 대개 매 10년 마다 퇴적 관련 자료를 조사하고 있다.

퇴적과정 문제를 다룬 최근 연구 중 국외 연구로는 퇴적 자료를 활용한 조사 성과를 다루는 연구(Hasholt et al., 2000; Marsh et al., 1999; Munthali et al., 2011; Palmieri

et al., 2001), 퇴사율(sedimentation rate) 산정 및 평가에 관련된 연구(Aduwi et al., 2009; Omerod, 1998; Renwick et al., 2005; Xu, 2003), 퇴적과정의 발생 기작 및 변동성에 관한 연구(Versaeten et al., 2003), 퇴적과정 발생에 대한 물리적·수학적 모형의 구축(Hrissanthou, 2006)과 같은 분야의 연구가 수행된 바 있다. 퇴적과정과 관련된 문제를 해결하기 위하여 과거에는 다양한 경험식을 구축하기 위한 연구(Butler, 1987; Miltz and White, 1987; Ruddy, 1987)가 많았으나, 최근에는 다양한 물리적 모형을 활용한 연구가 주로 연구되고 있다. Pandey et al. (2008)은 저수지 내 퇴적과정의 물리적 과정을 규명하기 위하여 수리학 및 수문학적 모형을 이용하여 분석한 바 있으며, Minear and Kondolf (2009)는 저수지 내 퇴사율을 시간 및 공간단위로 예측하기 위한 모형을 제시한 바 있다. 또한 조사를 통한 퇴적 관련 자료의 축적과 물리적 모형을 활용한 퇴적과정의 예측자료의 제공으로 인해 퇴적 문제에 관한 확률론적 접근방법을 적용하는 연구도 최근 활발해지고 있다. Duckstein et al. (1997)은 불확실한 유사유입을 무작위성 가정 하에 확률론적으로 분석하는 연구를 수행한 바 있으며, Salas and Shin (1999)은 라틴 하이퍼큐브 샘플링(Latin hypercube sampling)을 활용한 몬테카를로(Monte Carlo) 기법을 적용하여 년평균 저수지 퇴사량과 시간에 따른 누적퇴사량의 불확실성에 관한 연구를 수행한 바 있다. 국내의 경우도 저수지 퇴적과정에 관한 다양한 연구(Kwon, 1973; Ryu and Kim, 1976; Ahn and Lee, 1984; Yoon, 1988; Jung, 1997; Lee and Lee, 1988; Seo et al., 2002)가 진행된 바 있으나, 대부분의 연구가 경험식의 작성에 국한된 측면이 있다.

위에서 언급한 퇴적관련 조사결과에 관한 연구, 물리 및 수학적 접근에 의한 퇴적과정의 규명에 관한 연구, 모형의 구축에 관한 연구 등은 저수지 퇴적과정의 시간적, 공간적 분포를 분석하고 미래의 퇴사량을 예측하는 데 필수적인 연구이다. 그러나 이와 같은 기초적인 연구를 바탕으로 하여 퇴적과정으로 인해 발생하는 저수용량의 감소에 관한 확률통계적 개념 및 이를 바탕으로 하는 신뢰도 분석기법의 적용에 관한 연구도 반드시 함께 진행될 필요가 있다. 수자원공학 분야에서 신뢰도 분석기법의 적용은 Tung and Mays (1980) 및 Lee and Mays (1983)가 정적 및 동적 신뢰도 모형을 수공구조물의 설계에 적용하면서 유용하게 사용되고 있다.

따라서 본 연구에서는 저수지 내 퇴적과정으로 인해 저감(deterioration)되는 저수용량에 관한 문제를 다루기 위하여 추계학적 감마 과정을 이용한 신뢰도 분석기법을 이용하고 이를 소양강댐 저수지에 적용함으로써, 소양강댐의 저수용량 저감에 관한 연구를 수행하였다. 특히 감마 과정의 모수를 추정하고 신뢰도 분석에 있어서 발생하는 불확실성을 평가하기 위하여 Bayesian MCMC 기법을 사용하였으며, 이 과정에 보다 효과적인 불확실성의 산정을 위하여 정보적 사전분포를 구축하였다.

## 2. 신뢰도 모형 및 감마 과정의 구축

### 2.1 저수용량 저감에 대한 신뢰도 모형의 구축

퇴적과정으로 인한 저수용량 저감 및 이로 인한 용수공급의 제한은 시스템의 파괴로 간주될 수 있다. 신뢰도 기법은 궁극적으로 특정 구조물이나 시스템의 파괴확률을 추정하기 위하여 사용되며, 시스템의 상태는 다음과 같은 상태함수(performance function)로 표현될 수 있다.

$$g = R - L \quad (1)$$

여기서,  $g$ 는 특정시점의 시스템에 대한 상태함수이고  $R$ 은 시스템의 저항력,  $L$ 은 시스템에 부과되는 하중이다. 시스템의 파괴확률은  $g=0$ 이 되는 시점, 즉 시스템의 저항력과 하중이 같게 되는 시스템의 한계시점(limit stage)에서 산정된다.

본 연구의 주요 분석대상인 저수용량의 감소문제를 Eq. (1)에 적용하면, 시스템의 저항력  $R$ 은 저수용량 또는 용수공급량이며, 시스템에 부과되는 하중  $L$ 은 저수지 내

퇴사량이 된다. 저수지 내 퇴적이 발생된 이후 일정 시점( $t_1$ )이 경과되면, 퇴사( $S(t)$ )의 축적으로 인해 퇴사량이 퇴사용량( $s_0$ )과 같게 될 수 있으며, 시간이 더욱 경과하여 일정 시점( $t_2$ )이 되면 전체 저수용량( $r_0$ )과 같게 될 수 있다. 본 연구에서는  $t_1$ 에 달하는 상태를 사용한계상태(serviceable limit state, SLS)로  $t_2$ 에 달하는 상태를 극한한계상태(ultimate limit state, ULS)로 정의하여, Fig. 1에 표시하였다.

또한 사용한계상태와 극한한계상태 중 어떤 상태에 대한 상태함수를 구축해야 할지 결정할 필요가 있다. 사용한계상태에서 상태함수는 Eq. (2)와 같이 표현될 수 있고, 극한한계상태에서 상태함수는 Eq. (3)과 같이 표현될 수 있다.

$$g = s_0 - X(t) \quad (2)$$

$$g = (r_0 - s_0) - X(t) \quad (3)$$

여기서,  $r_0$ 는 전체 저수용량,  $s_0$ 는 퇴사용량이며,  $X(t)$ 는 퇴사( $S(t)$ )로 인해 발생하는 저수용량의 저감을 나타낸다. 퇴사가 축적되어 퇴사용량과 같게 되는 시점부터 실질적인 용수공급에는 제한이 발생하게 되므로 본 연구에서는 Eq. (2)의 사용한계상태에 대해서만 신뢰도 분석을 수행하였다.

### 2.2 추계학적 감마 과정의 구축

2.1절에서 구축된 사용한계상태에 대한 신뢰도 모형에서 저항력을 나타내는 퇴사용량,  $s_0$ 는 댐마다 설계 시에 결정되는 상수이다. 그러나 퇴적과정으로 인해 발생하는 저수용량의 저감,  $X(t)$ 는 저수지로 유입되는 유량, 유사

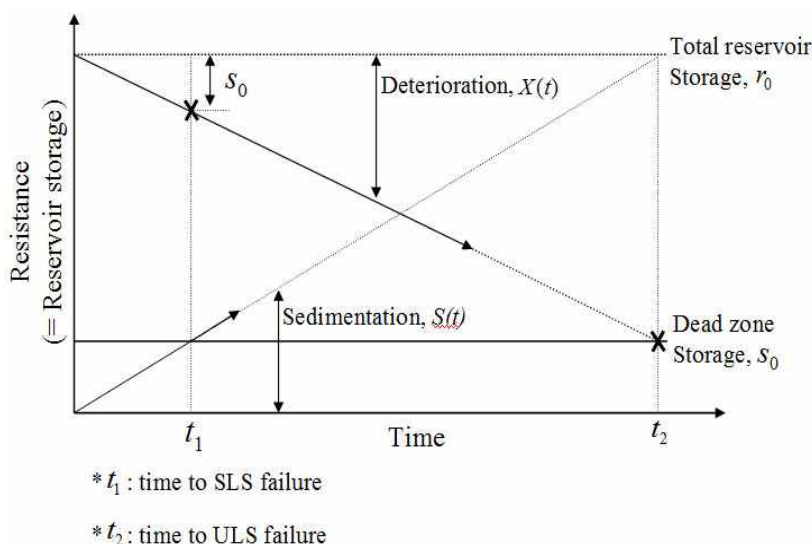


Fig. 1. Deterioration of Reservoir Storage by Sedimentation

량 등의 영향을 받으므로 불확실성을 가지는 확률변수로 취급될 수 있고, 궁극적으로 시간에 따른 추계학적 과정으로 간주될 수 있다.

Karlin and Taylor (1975)는 정규분포(normal distribution)를 이용하여 유체 내에 존재하는 입자들의 불확실성을 추계학적으로 표현하는 모형을 제시한 바 있다. 그러나 제시된 모형은 특정물질의 특성의 변화가 저하 및 증가를 모두 표현하는 것으로 시스템 또는 구조물의 성능과 같이 저하되는 일방향적인 물리적 변동 현상을 모의하기에는 적합하지 않다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 Kallen and van Noortwijk (2005)는 추계학적 감마 과정의 사용을 제안한 바 있다. 추계학적 감마 과정이란, 시간의 변화에 따른 특정 시스템의 변동분이 Eqs. (4) and (5)와 같은 감마 분포(gamma distribution)를 따르는 확률 과정으로 단조(monotonic) 증가나 감소와 같은 일방향적인 물리적 변동량을 표시하기에 적합한 것으로 알려져 있다(van Noortwijk et al., 2007). 따라서 본 연구에서도 퇴적과정의 발생은 항상 일방향적인 감소 변동량을 가지므로 추계학적 감마 과정을 적용하였다.

$$Ga(x|\alpha, \beta) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} \exp(-\beta x) I_{(0, \infty)}(x) \quad (4)$$

$$\Gamma(\alpha) = \int_{t=0}^{\infty} t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (5)$$

여기서,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 각각 양의 값을 가지는 형태모수(shape parameter)와 축척모수(scale parameter)를 나타내며,  $I_{(0, \infty)}(x) = 1$ 은  $x$ 가  $0 \sim \infty$ 의 범위에서는 '1'의 값을 가지고, 그 외의 범위에서는 '0'을 가짐을 나타낸다.

Kallen and van Noortwijk (2005)는 시간에 따라 변화되는 물리량을  $X(t) = at^b$ 와 같은 비선형 형태의 함수로 가정하여 감마 과정을 적용하였고, Ellingwood and Mori (1993)은 이와 같은 저감량의 표현에 있어 부식과 같이 시간에 따라 단조적으로 변화하는 경우는 이를 선형형태의 함수로 가정하여 사용하여도 결과의 정확성에 큰 영향을 미치지 않음을 제시한 바 있다. 따라서 본 연구에서도 퇴적 과정은 단조적으로 증가하는 것으로 가정하여  $X(t) = at$ 와 같은 선형형태의 함수를 사용하였다.

정상(stationary)상태에 대한 추계학적 감마과정은 시간에 따른 변동분이 감마 분포를 따르므로 형태모수를  $\alpha(t) = at$ , 축척모수  $\beta$ 를 상수로 간주할 수 있으며, Abdel-Hameed (1957)은 이에 대한 확률밀도함수를 Eq. (6)과 같이 제시한 바 있다.

$$f_{X(t)}(x) = Ga(x|at, \beta) \quad (6)$$

$X(t)$ 에 대한 기대값과 분산을 적률생성함수(moment generating function)를 이용하여 구하면 Eq. (7)과 같고, 이 관계와 변동계수(coefficient of variation, cov)를 사용하여 Eq. (6)을 다시 나타내면 Eq. (8)과 같다.

$$E[X(t)] = at/\beta, \quad Var[X(t)] = at/\beta^2 \quad (7)$$

$$f_{X(t)}(x) = Ga\left(x \left| \frac{t}{cov^2}, \frac{1}{\mu cov^2} \right. \right) \quad (8)$$

여기서,  $\mu$ 는 퇴적과정으로 인한 저수용량감소의 평균 저감량(average deterioration)을 나타내는 확률변수이며, cov는 변동계수로서 자료로부터 산정되거나 실용적 측면에서 분석자의 주관에 따라 가정되어 사용될 수 있는 값이다.

### 3. Bayesian MCMC기법을 이용한 모수의 추정

#### 3.1 Bayesian 기법의 필요성 및 요약

특정 확률밀도함수의 모수를 추정하기 위해서는 다양한 방법이 적용될 수 있지만 본 연구에서는 Bayesian 기법을 사용하였다. 베이즈의 정리를 연속 확률밀도함수로 나타내면 베이즈의 정리는 Eq. (9)와 같이 표현될 수 있다.

$$\pi(\theta|x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{f(x_1|\theta) \dots f(x_n|\theta)\pi(\theta)}{\int_{\theta} f(x_1|\theta) \dots f(x_n|\theta)\pi(\theta)d\theta} \quad (9)$$

Eq. (9)에서 좌변의  $\pi(\theta|x_1, x_2, \dots, x_n)$ 는 사후분포(posterior distribution), 우변 분자의  $\pi(\theta)$ 는 사전분포(prior distribution)라 명명되며, 우변의 분모는 상수로서 주변분포(marginal distribution)이고, 우변의 분자의  $f(x_1|\theta) \dots f(x_n|\theta)$ 는 발생할 수 있는 모든 가능성을 고려한 우도함수(likelihood function)이다. 본 연구에서 추정되어야 할 모수는 퇴적으로 인한 저수용량감소의 평균 저감량을 나타내는  $\mu$ 이며, Eq. (8)을 이용한 우도함수를 나타내면 Eq. (10)과 같다.

$$L(\delta_1, \dots, \delta_n | \mu) = \prod_{i=1}^n f_{X(t_i)-X(t_{i-1})}(\delta_i) \\ = \prod_{i=1}^n \left( \frac{\left( \frac{1}{\mu \cdot cov^2} \right)^{\frac{t_i - t_{i-1}}{cov^2}}}{\Gamma\left(\frac{t_i - t_{i-1}}{cov^2}\right)} \cdot \delta_i^{\frac{t_i - t_{i-1}}{cov^2} - 1} \cdot \exp\left[-\frac{\delta_i}{\mu \cdot cov^2}\right] \right) \quad (10)$$

여기서,  $\delta_i$ 는 조사된 저수용량 자료사이의 증분을 나타낸다. 또한 사전분포  $\pi(\theta)$ 는 여러 가지 기법을 사용하여 적용될 수 있으나, 사전분포의 구축은 본 연구에서 상당한 비중을 차지하고 있어 다음의 절에서 상세히 설명하였다.

위에서 언급한 Bayesian 기법을 이용한 모수의 추정엔 자료로부터 얻은 모수에 대한 정보와 모수에 대한 과거의 경험 또는 주관을 사전분포로 표현함으로써 보다 정확한 모수의 불확실성에 대한 탐색에 그 목적이 있다고 할 수 있다. Bayesian 기법에서 특히 Eq. (9) 우변에서 분모의 적분은 대부분의 확률밀도함수의 경우 수학적으로 적분하기 어려운 경우가 많았으나, 최근 하드웨어적 및 다양한 Bayesian 계산 알고리즘의 발전으로 인하여 최근 들어 수자원공학 분야에서 Bayesian 방법의 적용이 활발하다 (Coles and Powell, 1996; Kavetski et al., 2006; Kim and Lee, 2010; Kuczera, 1999; Kuczera and Parent, 1998; Lee and Kim, 2008; Reis Jr. and Stedinger, 2005; Reis Jr. et al., 2005; Seidou et al., 2006).

Bayesian 계산 방법 중에서 Metropolis et al. (1953)에 의하여 만들어진 Metropolis-Hastings 알고리즘을 활용한 연구가 많으며, 이 알고리즘에 관한 이론적 설명은 Lee and Kim (2008)의 연구를 비롯한 다수의 연구(Reis Jr. and Stedinger, 2005; Seidou et al., 2006)에서 찾아볼 수 있으므로, 상세한 설명은 생략하였다. Metropolis-Hastings 알고리즘을 수행하고 최종적으로 몬테카를로 적분을 적용하면 추정된 모수들의 평균과 같은 통계적 특성치를 근사적으로 얻을 수 있다. 또한 기존 통계학에서 사용되는 신뢰구간(confidence interval)과 유사한 개념의 신용구간(credible interval)을 얻을 수 있고 이를 이용하여 추정된 모수의 불확실성을 표현할 수 있다. 반복하여 추출된 모수의 개수,  $n$ 과 유의수준(significance level),  $\alpha$ 에서 Bayesian MCMC 방법에 의한 신용구간,  $100(1-\alpha)\%$ 는 다음 Eq. (11)과 같다.

$$(\theta_{[(\alpha/2)n]}, \theta_{[(1-\alpha/2)n]}) \quad (11)$$

### 3.2 사전분포의 구축

일반적으로 사전분포는 ‘정보적 사전분포(informative prior distribution)’와 ‘무정보적 사전분포(non-informative prior distribution)’의 두 가지 형태로 구분할 수 있다. 정보적 사전분포는 모수를 추정하기 위한 다양한 자료를 객관적으로 분석하고, 최종적으로 분석자의 주관적 견해를 통해 채택되는 사전분포이다. 이와 달리 무정보적 사전분포는 수학적으로 입증된 분포를 채택하는 경우로써, 사전분포와 사후분포가 같은 분포가 되도록 하는 공액사전분포(conjugate prior distribution)를 주로 사용하게 된다. 사전분포의 구축은 Bayesian 기법의 적용에 있어 가장 논란의 여지가 있을 수 있는 부분이며, 따라서 Bayesian

기법을 사용하여 특정 확률밀도함수의 모수를 추정함에 있어 가장 중요한 부분으로 볼 수 있다. 만약 추정되어야 할 모수에 대한 정보가 사전에 상당히 밝혀져 있거나 모수의 추정에 사용할 수 있는 자료의 길이가 충분히 길다면, 사전분포가 사후분포에 미치는 영향은 미미해진다. 그러나 그렇지 못한 경우에는 사전분포가 사후분포에 미치는 영향이 증대되므로, 어떤 사전분포를 채택할 지에 관한 문제는 중요한 문제로 대두된다.

본 연구에 있어서도 퇴적과정으로 인한 저수용량 저감에 대한 조사 자료가 매우 제한적인 요인이 있으므로, 정보적 사전분포를 구축하여 Bayesian MCMC 기법을 수행하였다. 정보적 사전분포는 크게 2-단계 Bayes 기법(Kaplan, 1983), 경험적 Bayes 기법(Berger, 1985; Carlin and Louis, 1996; Maritz and Lwin, 1989), 최대 엔트로피 기법(Bertucio and Julius, 1990; Wheeler, 1993)과 같은 3가지의 기법을 활용하여 구축될 수 있다. 본 연구에서는 이러한 기법 중 가장 널리 사용되고 있는 경험적 Bayes 기법에 따라 사전분포를 구축하였다. 이 기법은 에르고딕(ergodic) 가정 하에 인근 지역의 자료가 통계적 동질성(homogeneous)이 있다는 가정을 사용한다. 즉 분석대상 지점 인근의 자료에 대한 확률밀도함수를 선정하고 모수를 각각 최우추정법을 사용하여 추정한 이후, 추정된 모수의 값들을 다시 특정 확률밀도함수를 따르는 것으로 간주하여 이 확률밀도함수를 사전분포로 선정한다. Lee and Kim (2008)은 저수용량의 빈도분석을 수행하면서 에르고딕 가정을 이용한 주변 지역자료를 이용한 정보적 사전분포를 구축하고 이를 무정보적 사전분포와 비교함으로써 지역정보를 이용한 정보적 사전분포의 우수성을 입증한 바 있다.

따라서 경험적 Bayes 기법에 의한 정보적 사전분포를 구축하기 위해서는 퇴적의 동질성이 있는 댐들의 집합을 먼저 구성할 필요가 있다. 본 연구의 경우 퇴적의 동질성이 각 댐 상류유역의 토양성분과 밀접한 관련성이 있는 것으로 보고, 토양성분이 유사한 댐들만의 비퇴사량 자료를 이용하기로 하였다. Fig. 2는 연구의 분석대상인 소양강댐을 포함하여 충주댐, 안동댐, 임하댐, 합천댐, 남강댐, 용담댐, 대청댐, 섬진강댐 및 주안댐의 9개 댐의 상류유역의 토양성분을 나타낸 것이다.

Fig. 2에서 소양강댐의 상류유역의 토양성분과 유사한 성질을 가지고 있는 댐들을 선정하기 위해서 k-means 알고리즘을 이용한 군집분석(cluster analysis)을 수행하였다. Matlab toolbox에서는 동질성의 결과를 실루엣(silhouette) 값을 이용하여 표현해 주는 데, 이 값은 -1에서 +1까지의 값을 가지며, 대개 0.6 이상의 값을 가지는 경우를 통계적

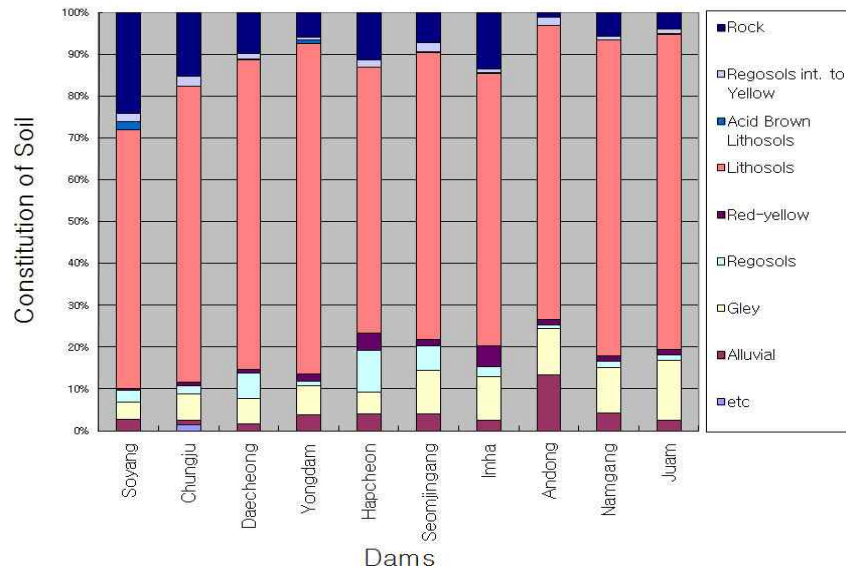


Fig. 2. Constitution of the Soil at the Upper Basin of the 10 Dams

으로 동질하다고 판단한다. 최종적으로 9개의 댐 중에서 소양강댐 상류유역과 통계적으로 동질하다고 볼 수 있는 댐은 충주댐, 대청댐, 섬진강댐, 합천댐, 임하댐으로 결정 되었으며, 이들 댐에 대한 기존의 비퇴사량을 수집하여 Table 1에 제시하였다.

정보적 사전분포를 구축하기 위해 먼저 13개의 비퇴사량에 가장 적합한 확률분포를 선정하였다. 이를 위해 Table 2와 같이 정규 분포(normal distribution), 감마 분포(gamma distribution), GEV 분포(generalized extreme distribution), 로그정규 분포(log normal distribution) 및 2변수 와이블 분포(2 parameter Weibull distribution)에 대한  $\chi^2$ -test, K-S test, CVM(Cramer Von Mises) test 를 시행하였다.

Table 2의 결과로부터 정규 분포와 로그정규 분포가 가장 양호한 값을 나타내는 것을 알 수 있으며, 최종적으로는  $\chi^2$ -test 결과가 가장 양호한 정규 분포를 사전분포로 선정하였다. 즉 정보적 사전분포로 선정된 확률분포는 Eq. (12)와 같은 평균 739.23과 표준편차 237.34를 가지는 정규분포이며, 이를 Fig. 3에 13개의 비퇴사량 자료와 함께 나타내었다.

#### 4. Bayesian MCMC기법의 적용 및 저수용량의 신뢰도 분석 결과

##### 4.1 적용대상 유역

본 연구에서 개발된 Bayesian 신뢰도 분석모형의 적용 대상은 Fig. 4에서 표시한 소양강 다목적댐이다. 소양강

Table 1. 13 Sedimentation Rates Per Unit Area at the 6 Dams

Name of the dam	Sedimentation rate per unit area ( $m^3/km^2/year$ )
Soyang	500 / 1,039 / 930 / 914
Chungju	1,000 / 1,007 / 853
Daecheong	616 / 725 / 628
Seomjingang	459
Hapcheon	639
Imha	300

댐은 1973년 완공되어 댐 하류에 위치한 수도권 지역에 대한 홍수조절 및 용수공급을 목적으로 하고 있는 중요한 댐이다. 소양강댐의 제체높이는 123m이고, 유효 저수용량과 총 저수용량은 각각  $1,900 \times 10^6 m^3$  및  $2,900 \times 10^6 m^3$ 이다. 또한 본 연구의 신뢰도 모형에서 저항력으로 사용되는 소양강댐의 퇴사용량은  $280 \times 10^6 m^3$ 이다. 소양강댐의 상류유역 면적은  $2,703 km^2$ 이고, 이 유역은 인북천 유역( $923.8 km^2$ ), 내린천 유역( $1,069.3 km^2$ ) 및 소양강댐유역( $709.9 km^2$ )으로 구성되어 있으며, 1973년 이후부터 이들 유역으로부터 유입되는 유사가 저수지 내에 퇴적되고 있다. 특히 2006년에는 태풍 에위니아(Ewinia)의 영향으로 많은 유사가 유입되어 280일 간 탁수가 지속되어 용수공급이 제한된 사건이 발생하기도 하였다.

소양강 다목적댐 공사지(Korea Water Resources Corporation, 1974)에서는 100년 퇴사량을  $135 \times 10^6 m^3$ 로 예측하

있음을 알 수 있으며, Korea Water Resources Corporation (2010)이 제시하고 있는 과거 3회에 걸쳐 조사된 10년 주기의 소양강댐 저수지에 대한 퇴적 조사 결과는 다음의 Table 3과 같다.

Table 3으로부터 소양강댐의 설계 시 사용된 비퇴사량은  $500 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{year}$ 이나, 3회의 조사를 걸쳐 추정된 평균 비퇴사량은  $961 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{year}$ 이므로, 최근 추정된 평균 비퇴사량이 설계에 사용된 비퇴사량에 비해 거의 2배에 가깝다는 것을 알 수 있다. 따라서 소양강댐의 경우 설계 시

보다 많은 유사가 저수지 내에 퇴적되고 있음을 알 수 있으며, 이는 소양강댐의 미래 용수공급능력에 상당한 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

#### 4.2 Bayesian MCMC 기법에 의한 추정결과

퇴적과정으로 인한 소양강댐의 저수용량 감소의 신뢰도 분석을 위해 추계학적 감마 과정을 구축하였고, 확률 모형의 모수를 추정하기 위한 Bayesian 기법이 수립되었다. 앞서 언급한 바와 같이 모형에서 추정되어야 하는 모

Table 2. Results of the Statistical Test for the Selection of the Prior Distribution

Distributions	$\chi^2$ -test (Table value=3.84)	K-S test (Table value=0.36)	CVM (Table value=0.46)
Normal	1.02	0.13	0.05
Gamma	2.31	0.12	0.06
GEV	6.67	0.13	0.05
Log normal	1.46	0.13	0.02
Weibull	2.69	0.14	0.46

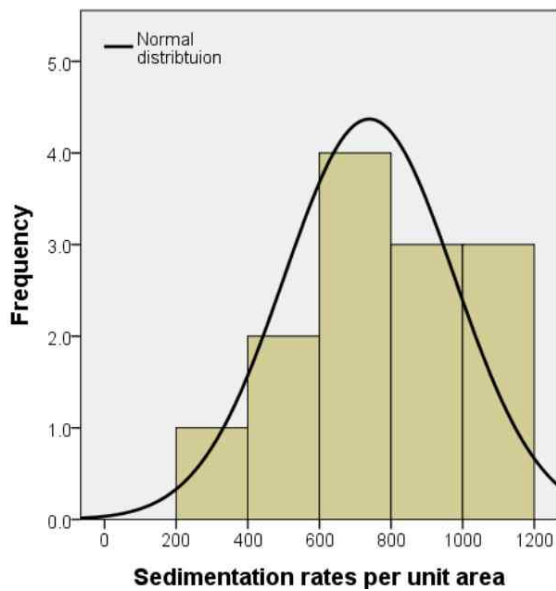


Fig. 3. Selected Distribution and the Frequency



Fig. 4. Location of the Soyang Dam

Table 3. The Surveyed Data of the Sedimentation in the Soyang dam

Items	Estimates in Designs	Survey 1 (1983 year)	Survey 2 (1994 year)	Survey 3 (2005 year)
Amount of Sedimentation ( $\times 10^6 \text{ m}^3$ )	135	30.9	55.3	81.5
period from 1973 year (years)	100	11	22	33
Sedimentation rate per unit area ( $\text{m}^3/\text{km}^2/\text{year}$ )	500	1,039	930	914



수는 퇴적과정으로 인한 저수용량감소의 평균 저감량을 나타내는  $\mu$ 이며, 모수의 추정을 위해서 Bayesian MCMC 기법 중 하나인 Metropolis-Hastings 알고리즘이 사용되었다. Metropolis-Hastings 알고리즘은 Matlab을 이용하여 코딩되었으며, 이 알고리즘을 110,000회 반복시켜 110,000개의  $\mu$ 를 발생시켰다. 이 과정에서 변동계수, cov는 소양강댐의 퇴적 자료로부터 계산하여 0.3에 대해서만 모수를 추정하였으며, 알고리즘을 통해 추정된 110,000개의 추정값 중 초기에 발생한 10,000개의 추정값은 평균 및 불확실성 산정 등의 계산에서 제외되었다. 이러한 추정치의 제외과정은 'burn-in'이라 명명되는 과정으로 알고리즘이 안정화되기 이전의 불안정한 추정값들을 제외하는 과정이며, 어디까지를 제외할 것인지에 따라 최종 결과에 영향을 미칠 수 있으나 적절한 burn-in 값의 선정은 Bayesian MCMC 기법의 적용과 관련된 또 다른 연구 주제 중의 하나이므로 본 연구에서는 발생횟수를 증가시키고 그 중 10%를 제외하는 방법을 사용하였다.

또한 알고리즘의 안정성을 검증하기 위해서는 위에서 평균 채택률(average acceptance rate)을 계산할 필요가 있다. 채택률이란 알고리즘의 반복회수에 대한 추정된 모수의 채택된 비율을 의미하며, 채택률이 낮은 경우에는 모수의 새로운 값이 추정되지 않는 문제가 발생되고, 반대로 채택률이 너무 높은 경우에는 모수를 탐색하는데 있어서 과도한 시간이 필요하므로 반복횟수를 증가시키게 되어 계산시간이 너무 길어지는 비효용성을 가지게 된다. 적절한 채택률은 알고리즘의 효율성과 크게 관계있으며 Robert et al. (1994)은 약 0.45를 Gamerman (1997)은 0.2에서 0.5 사이를 적절한 채택률로 제시한 바 있는데, 본 연구에서 산정된 채택률은 0.3865 (38.65%)로 기존 연구자들이 제시한 채택률의 범위 내에 있어 알고리즘이 합리적이라는 것을 알 수 있었다. Fig. 5에는 초기의 불안정한 10,000개의 추정치를 제외한 100,000개의 추정값의 변화를 나타내었으며, 저수용량감소의 평균 저감량은 722.99로 산정되었고, 이 값은 곧 소양강댐의 비퇴사량을 의미하는 것으로 단위는  $m^3/km^2/year$ 이다.

Table 4에는 Bayesian MCMC의 결과를 95% 신뢰도

의 불확실성과 함께 표시하였다. 이 Table로부터 산정된 평균 저감량은  $722.99 m^3/km^2/year$ , 하한값은  $564.46 m^3/km^2/year$ , 상한값은  $868.10 m^3/km^2/year$ 로 산정되었음을 알 수 있다. Table 4에서 나타낸 바와 같이 사용된 정보적 사전분포의 평균은  $739.23 m^3/km^2/year$ 이며, 표준편차는  $237.34 m^3/km^2/year$ 이다. 즉 이와 같은 결과로 볼 때, 사용된 정보적 사전분포와 Bayesian MCMC의 평균값은 상당히 유사한 반면, 불확실성을 나타내는 표준편차는 Bayesian MCMC의 결과가  $92.26 m^3/km^2/year$ 으로 산정되어 정보적 사전분포가 가지는 불확실성보다 상당히 감소되어진 것을 알 수 있다.

이와 같은 평균과 표준편차의 사전분포 및 사후분포간의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 또한 3회에 걸쳐 조사된 소양강댐 퇴적자료의 평균은  $845.75 m^3/km^2/year$ 이고, 표준편차는  $237.10 m^3/km^2/year$ 으로 Bayesian MCMC에 의한 사후분포의 값과 비교하였을 때, Bayesian MCMC를 사용한 경우의 표준편차가 상당히 감소된 것을 알 수 있다. 따라서 3개의 조사 자료만을 이용하였을 때 산정되는 불확실성의 범위보다 Bayesian MCMC에 의한 불확실성

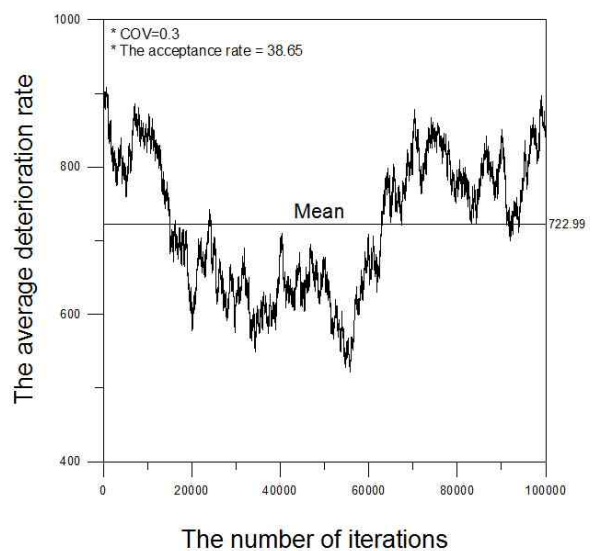


Fig. 5. Change of the Estimated Sedimentation Rates Per Unit Area

Table 4. Sedimentation Rates Per Unit Area at the 5% Significance Level

Items	Bayesian MCMC (Std. = 92.26)			* Soyang Dam data (Mean: 845.75, Std.: 237.10)
	2.5%	Mean	97.5%	
The sedimentation rates per unit area ( $m^3/km^2/year$ )	564.46	722.99	868.10	* Prior distribution - Mean: 739.23 (Std.=237.34)



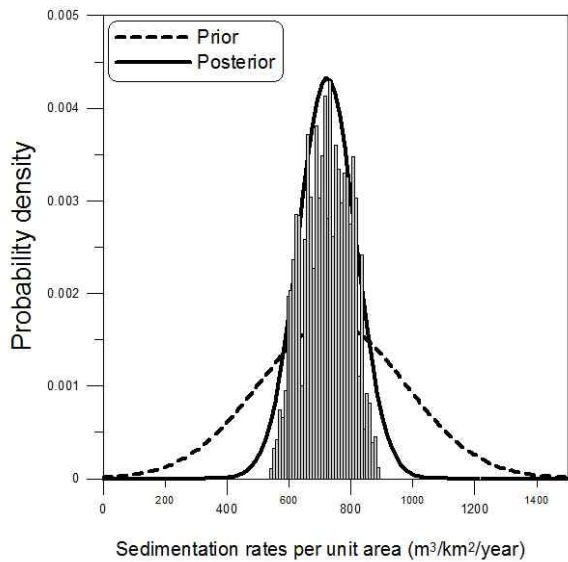


Fig. 6. Comparison of the Prior Distribution with the Posterior Distribution

이 현저히 감소됨을 알 수 있었으며, 이로부터 관측 자료의 개수가 적어 발생하는 넓은 범위의 불확실성 문제에 대해 정보적 사전분포를 사용한 Bayesian MCMC가 통계적으로 의미있는 대안을 제공할 수 있음을 알 수 있다.

추정된 하한, 평균, 상한의 퇴적으로 인한 소양강댐 저수지 내에서 평균 저감량을 이용하여 시간에 따른 예측 저감량을 산정하여 Fig. 7에 나타내었다. 소양강댐의 총 저수용량은  $2,900 \times 10^6 \text{ m}^3$ 이고, 퇴사용량은  $280 \times 10^6 \text{ m}^3$ 이므로, 이 두 값의 차이는  $2,620 \times 10^6 \text{ m}^3$ 이다. 따라서 퇴적과정으로 인해 저수용량이 총 저수량에서 감소하기 시작하여  $2,620 \times 10^6 \text{ m}^3$ 이 되는 시점을 용수공급에 제한이 발생할 수 있는 사용한계상태로 볼 수 있다.

소양강 댐의 경우 산정된 사용한계 상태는 하한이 119.3년 이후, 평균이 143.3년 이후, 그리고 상한이 183.5년 이후로 이를 소양강댐의 준공년도(1973년)를 시점으로 환산하면 각각 약 2092년, 약 2116년, 그리고 약 2157년임을 알 수 있다. 즉 이 결과는 최악의 조건에서는 2092년부터 퇴적과정으로 인한 용수공급의 제한이 발생할 수 있으며, 최상의 조건에서도 2157년 이후 부터는 용수공급의 제한이 발생할 수 있음을 의미한다. 단, 아직까지도 상한과 하한의 불확실성 범위는 95% 신뢰수준에서 64.2년으로 불확실성의 범위가 상당히 광범위한 것을 알 수 있는데, 이러한 불확실성의 범위를 감소시키기 위해서는 향후 추가적인 소양강댐의 퇴적관련 자료가 보충되어야 할 것으로 판단된다. 또한 향후에는 유역 유사량의 모의기능이 있는 강우-유출모형을 추가로 구축함으로써, 소양강댐 상류유

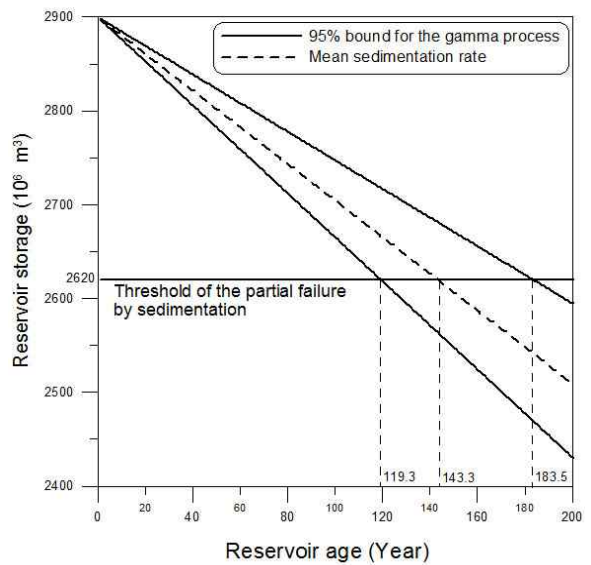


Fig. 7. Expected Lifetime Including Uncertainty of the Dead Storage in Soyang Dam

역으로부터 유입되는 유사량을 예측하고 이로부터 비퇴사량 자료를 추가로 확보함으로써 불확실성의 범위를 더욱 감소시킬 수 있는 연구가 추가될 필요가 있다.

## 5. 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 저수지의 유지관리에서 중요한 비중을 차지하고 있는 저수지 내 퇴적과정으로 인한 용수공급의 저감을 불확실성을 포함한 확률론적 접근방법으로 분석하였다.

먼저 신뢰도 기반의 이론을 적용하기 위하여 감마 과정을 사용하여 용수공급의 저감을 모델링하였고, 감마 과정의 적용에 필요한 모수를 Bayesian MCMC 기법 중 하나인 Metropolis-Hastings 알고리즘을 적용하여 추정하였다. 특히 퇴적과정과 관련된 분석에 있어서는 사용할 수 있는 자료가 매우 한정적이므로, 자료가 적은 경우에도 효과적으로 관련 모수를 추정할 수 있는 정보적 사전분포를 구축하였다. 이를 위하여 소양강댐의 기존 퇴적관련 자료를 수집하고 정보적 사전분포를 구축하기 위하여 소양강댐의 상류유역의 토양성분과 동질성을 가지는 5개의 댐으로부터 필요한 정보를 추가로 사용하였다. 최종적으로 구축된 알고리즘을 110,000회 반복하여 100,000개의 퇴적과정으로 인한 평균 저감량을 추정하였으며, 주요한 결과를 간단히 요약하면 다음과 같다.

첫째, 퇴적 문제와 같이 저수지의 유지관리를 위한 신뢰도 분석에 관한 연구결과는 기존 댐의 유지관리를 위한

기초적인 자료를 제공하는 데 효과적임을 알 수 있었고, 특히 Bayesian 신뢰도 분석을 통해 불확실성을 포함한 결과를 제공함으로써 저수지 관리자에게 탄력성 있는 유지관리 계획을 제공할 수 있는 자료를 제공할 수 있었다.

둘째, 불확실성을 포함한 Bayesian MCMC의 수행결과 소양강댐의 평균 저감량은 Bayesian 평균값은  $722.99 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{year}$ , 하한값은  $564.46 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{year}$ , 상한값은  $868.10 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{year}$ 로 산정되었고, 표준편차는  $92.26 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{year}$ 로 산정되었다. 이와 같은 결과는 소양강댐의 기존 조사결과나 정보적 사전분포와 비교할 때, 평균에서는 큰 차이를 보이지 않았으나 표준편차는 상당히 감소되어 불확실성의 감소차원에서 의미있는 결과를 도출했음을 알 수 있었다.

셋째, 위와 같은 불확실성의 감소로부터 자료가 적은 퇴적문제를 다룸에 있어 정보적 사전분포를 사용한 Bayesian 기법의 적용이 유용함을 알 수 있었다.

넷째, 소양강 댐의 경우 산정된 사용한계 상태는 하한이 119.3년 이후, 평균이 143.3년 이후, 그리고 상한이 183.5년 이후부터 발생됨을 알 수 있었다. 즉 이 결과로부터 최악의 조건에서는 2092년부터 퇴사과정으로 인한 용수공급의 제한이 발생될 수 있으며, 최상의 조건에서도 2157년 이후부터는 용수공급의 제한이 발생될 수 있음을 알 수 있었다.

다만 최종적으로 산정된 불확실성의 범위가 아직까지도 상당히 광범위함을 알 수 있었는데, 이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 향후 다음과 같은 연구 및 조사가 필요할 것으로 판단된다.

첫째, 저수지 내 퇴적관련 조사는 현재 특별한 경우를 제외하고서는 10년을 주기로 수행된다. 이러한 획일적 조사주기를 탄력적으로 변경할 필요가 있다. 즉 댐 또는 저수지마다의 유사량 유입특성을 검토하고 각 댐의 경과년수를 고려하여 퇴적의 영향이 미미할 것으로 판단되는 댐은 10년을 주기로 조사를 수행하되, 그렇지 않은 댐이나 저수지는 조사의 주기를 퇴적이 미치는 영향력에 따라 감소시켜 시행할 필요가 있다.

둘째, 유역 유사량을 모의할 수 있는 강우-유출 모형을 댐 상류유역에 적용하여 조사로는 불충분한 비퇴사량에 관한 예측을 수행할 필요가 있다. 또한 기후변화와 관련된 연구와 접목시켜 미래의 강우자료를 활용하여 저수지 내 퇴사과정과 관련된 다양한 연구가 수행될 필요가 있다.

셋째, 퇴적이 심각한 댐이나 저수지 등에 있어서는 이를 방지하기 위한 사전적 조치나 사후적 조치에 관한 계획을 수립할 필요가 있다. 일반적으로 저수지 내에서 준설은 환경적으로 저수지 수질에 악영향을 미칠 수 있으므

로, 준설과 같은 극단적인 조치보다는 유사의 저감과 관련된 다양한 저수지 유지관리 계획의 수립이 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 2012년도 강원대학교 학술연구조성비 및 국토해양부 한국건설교통기술평가원의 건설기술혁신사업(11-기술혁신-C06)을 통한 첨단기술 기반 하천운영 및 관리 선진화 연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Abdel-Hameed, M. (1957). "A gamma wear process." *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 24, No. 2, pp. 152-153.
- Aduwi, A., Amegashie, B.K., and Agyare, W.A., Tamene, L., Odai, S.N., Quansah, C., and Vlek, P. (2009). "Assessing sediment inputs to small reservoirs in upper region, Ghana." *Lakes & Reservoirs: Research and Management*, Vol. 14, pp. 279-287.
- Ahn, S.J., and Lee, J.H. (1984). "A correlation of reservoir sedimentation and watershed factors." *Journal of Korea Water Resources Association*, KSCE, Vol. 17, No. 2, pp. 107-112. (In Korean)
- Berger, J.O. (1985). *Statistical decision theory and Bayesian analysis*. Springer, New York.
- Bertucio, R.C., and Julius, J.A. (1990). "Analysis of CDF: Surry, Unit 1 internal events." *US Nuclear Regulatory Commission NUREG/CR-4550*, Vol. 5, pp. 2-8.
- Butler, D.L. (1987). *Sedimentation discharge in Rock Creek Reservoir*, Northwestern Colorado. Water resources investigations report, USGS.
- Carlin, B.P., and Louis, T.A. (1996). *Bayes and empirical Bayes methods for data analysis*. Chapman and Hall, New York.
- Coles, S.G., and Powell, E.A. (1996). "Bayesian methods in extreme value modeling: A review and new developments." *International Statistical Review*, Vol. 64, No. 1, pp. 119-136.
- Duckstein, L., Szidarovszky, F., and Yakowitz, S. (1997). "Bayes design of a reservoir under random sediment yield." *Water Resources Research*, Vol. 13, No. 4, pp.

- 713-719.
- Ellingwood, B.R., and Mori, Y. (1993). "Probabilistic methods for condition assessment and life prediction of concrete structures in nuclear power plants." *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 142, pp. 155-166.
- Gamerman, D. (1997). *Markov Chain Monte Carlo-Stochastic simulation for Bayesian inference*. Chapman & Hall, London UK.
- Hasholt, B., Walling, D.E., and Owens, P.N. (2000). "Sedimentation in arctic proglacial lakes: Mittivakkat Glacier, south-east Greenland." *Hydrological Processes*, Vol. 14, No. 4, pp. 679-699.
- Hrissanthou, V. (2006). "Comparative application of two mathematical models to predict sedimentation in Yermasoyia Reservoir, Cyprus." *Hydrological Processes*, Vol. 20, No. 18, pp. 3939-3952.
- International Commission on Large Dams (1988). *World register of dams*. Paris.
- Jung, J.S. (1997). "Sediment estimation of large reservoir using daily flowrate analysis." *Journal of the Korean Environmental Sciences Society*, KENSS, Vol. 6, No. 5, pp. 417-423. (In Korean).
- Kallen, M.J., and van Noordwijk, J.M. (2005). "Optimal maintenance decisions under imperfect inspection." *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 90, pp. 177-185.
- Kaplan, S. (1983). "On a 'two-stage' Bayesian method used for the T-Book application." *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. PAS-102, pp. 195-262.
- Karlin, S., and Taylor, H.M. (1975). *A first course in stochastic processes: second edition*, Academic Press, New York, pp. 340-344.
- Kavetski, D., Kuczera, G., and Franks, S.W. (2006). "Bayesian analysis of input uncertainty in hydrological modeling: 1. Theory." *Water Resources Research*, Vol. 42, W03407.
- Kim, S.U., and Lee, K.S. (2010). "Regional low flow frequency analysis using Bayesian regression and prediction at ungauged catchment in Korea." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 87-98.
- Korea Water Resources Corporation (1974). *Report for the construction of Soyang Dam*. Daejeon. (In Korean)
- Korea Water Resources Corporation (2010). *Master plan and feasibility study for the extension of life-cycle of the conventional dams*. Daejeon. (In Korean)
- Kuczera, G. (1999). "Comprehensive at-site flood frequency analysis using Monte Carlo Bayesian inference." *Water Resources Research*, Vol. 35, No. 5, pp. 1551-1557.
- Kuczera, G., and Parent, E. (1998). "Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: the Metropolis algorithm." *Journal of Hydrology*, Vol. 211, pp. 69-85.
- Kwon, O.H. (1973). "Forecasting distribution of sediment deposits in Soyang Lake." *Journal of Korea Water Resources Association*, KSCE, Vol. 6, No. 1, pp. 76-86. (In Korean)
- Lee, K.S., and Kim, S.U. (2008). "Identification of uncertainty in low flow frequency analysis using Bayesian MCMC method." *Hydrological Processes*, Vol. 22, No. 12, pp. 1949-1964.
- Lee, G.M., and Lee, W.S. (1998) "Long-term prediction of dam sedimentation using efficiency curve and dam operation technique." *Journal of Korea Water Resources Association*, KSCE, Vol. 31, No. 1, pp. 95-103. (In Korean)
- Lee, H.L., and Mays, L.W. (1983). "Improved risk and reliability model for hydraulic structures." *Water Resources Research*, Vol. 19, pp. 1415-1422.
- Mahmood, K. (1987) *Reservoir sedimentation: impact, extent and mitigation*. World bank technical report.
- Maritz, J.S., and Lwin, T. (1989). *Empirical Bayes methods*. Chapman and Hall, New York.
- Marsh, P., Lesack, L.F.W., and Roberts, A. (1999). "Lake sedimentation in the Mackenzie Delta, NWT." *Hydrological Processes*, Vol. 13, No. 16, pp. 2519-2536.
- Metropolis, N., Rosenbluth, A.W., Teller, A.H., and Teller, E. (1953). "Equations of state calculations by fast computing machines." *Journal of Chemical Physics*, Vol. 21, pp. 1087-1092.
- Miltz, D., and White, D.C. (1987). "Sedimentation and the economics of selecting an optimum reservoir size." *Water Resources Research*, Vol. 23, No. 8, pp. 1443-1448.
- Minear, J.T., and Kondolf, G.M. (2009). "Estimating

- reservoir sedimentation rates at large spatial and temporal scales: a case study of California.” *Water Resources Research*, Vol. 45, W12502.
- Munthali, K.G., Irvine, B.J., and Murayama, Y. (2011). “Reservoir sedimentation and flood control: using a geographical information system to estimate sediment yield of the Songwe river watershed in Malawi.” *Sustainability*, Vol. 3, pp. 254-269.
- Ormerod, L.M. (1998). “Estimating sedimentation rates and sources in a partially urbanized catchment using caesium-137.” *Hydrological Processes*, Vol. 12, No. 7, pp. 1009-1020.
- Palmieri, A., Shah, F., and Dinar, A. (2001). “Economics of reservoir sedimentation and sustainable management of dams.” *Journal of Environmental Management*, Vol. 61, pp. 149-163.
- Pandey, A., Chowdary, V.M., Mal, B.C., and Billib, M. (2008). “Runoff and sediment yield modeling from a small agricultural watershed in India using the WEPP model.” *Journal of Hydrology*, Vol. 348, pp. 305-319.
- Reis Jr., D.S., and Stedinger, J.R. (2005). “Bayesian MCMC flood frequency analysis with historical information.” *Journal of Hydrology*, Vol. 313, pp. 97-116.
- Reis Jr., D.S., Stedinger, J.R., and Martins, E.S. (2005). “Bayesian generalized least squares regression with application to log Pearson type III regional skew estimation.” *Water Resources Research*, Vol. 41, W10419.
- Renwick, W.H., Carlson, K.J., and Hayes-Bohanan, J.K. (2005). “Trends in recent reservoir sedimentation rates in Southwestern Ohio.” *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 60, No. 2, pp. 72-99.
- Roberts, G.O., Gelman, A., and Gilks, W.R. (1994). *Weak convergence and optimal scaling of random walk Metropolis-Hastings algorithms*, Technical Report, University of Cambridge.
- Ruddy, B.C. (1987). *Sediment discharge in Muddy Creek and the effect of sedimentation rate on the proposed Wolford Mountain Reservoir near Kremmling, Colorado*, Water resources investigation report, USGS.
- Ryu, H.J., and Kim, S.W. (1976). “Study on sedimentation in reservoir.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KSCE, Vol. 9, No. 2, pp. 67-55. (In Korean)
- Salas, J.D., and Shin, H.S. (1999). “Uncertainty analysis of reservoir sedimentation.” *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125, No. 4, pp. 339-350.
- Seidou, O., Ouarda, T.B.M.J., Barbet, M., Bruneau, P., and Bobee, B. (2006). “A parametric Bayesian combination of local and regional information in flood frequency analysis.” *Water Resources Research*, Vol. 42, W11408.
- Seo, K.S., Lee, J.H., and Lee, E.T. (2002). “Comparative study on the distribution of sediment deposits along the Soyang-gang Dam by measurement data.” *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, KSHM, Vol. 2, No. 3, pp. 109-117. (In Korean)
- Tung, Y.K., and Mays, L.B. (1980). “Risk analysis for hydraulic design.” *Journal of Hydraulic Division*, ASCE, Vol. 106, No. HY5, pp. 893-913.
- van Noordwijk, J.M., van der Weide, J.A.M., Kallen, M.J., and Pandey, M.D. (2007). “Gamma process and peaks-over-threshold distributions for time-dependent reliability.” *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 92, pp. 1651-1658.
- Versraeten, G., Poesen, J., Vente, J., and Koninckx, X. (2003). “Sediment yield variability in Spain: a quantitative and semiquantitative analysis using reservoir sedimentation rates.” *Geomorphology*, Vol. 50, pp. 327-348.
- Wheeler, T.A. (1993). “Analysis of the LaSalle Unit 2 nuclear power plant: risk methods integration and evaluation program, parameter estimation analysis and screening human reliability analysis.” *US Nuclear Regulatory Commission NUREG/CR-4832*, Vol. 5, pp. 11-13.
- Yoon, Y.N. (1988). “Sedimentation in reservoir.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KSCE, Vol. 21, No. 1, pp. 9-15. (In Korean)
- Xu, J. (2003). “Sedimentation rates in the lower Yellow River over the past 2300 years as influenced by human activities and climate change.” *Hydrological Processes*, Vol. 17, No. 16, pp. 3359-3371.

논문번호: 12-111	접수: 2012.10.15
수정일자: 2012.11.12/11.22/11.26	심사완료: 2012.11.26