댐 수위 추정 방법의 개선을 통한 수리·수문학적 위험도 분석

Hydraulic·Hydrologic Dam Risk Analysis through Improving Estimation Methods of Dam Water Surface Level

권현한*, 문영일**

Hyun Han Kwon, Young Il Moon

요 지

댐의 수리·수문학적 월류 확률 추정시에 가장 민감한 불확실성 변량은 댐의 초기수위라 할 수 있으며, 특히 자료의 특성을 충분히 반영하고 댐마루(dam crest)의 높이를 초과하지 않으면서 경계를 갖는 분포형을 추정하는 것은 무엇보다 중요하다. 그러나 기존의 매개변수적 확률분포 추정방법으론 이러한 문제점을 적절히 반영할 수 없으며 통계특성을 반영하지 못하고 이상화시키는 단점이 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해서 비매개변수적 핵밀도함수 방법과 Bootstrap 기법을 적용하여 수위의 신뢰구간을 추정하였다. 연 최대치 자료를 이용한 비매개변수적 핵밀도함수 기법을 이용한 해석결과에서는 댐의 설계빈도를 상회하는 비교적 큰 위험도 나타냈으며 홍수기의 평상수위로 가정하는 Bootstrap Resampling을 적용한 위험도는 5.11E-06의 값을 나타났다. 가장 극심한 기상상태를 가정한 해석 결과인 1.1972E-03은 본 댐은 여수로의 설계빈도가 1,000년 빈도로서 설계당시보다 확률수문량이 크게 증가된 현재 여수로 방류능력 및 안전성 상태로 고려해보면 적당한 위험도 값으로 추정된다.

핵심용어 : 댐 수위, 위험도 분석, 비매개변수적 핵밀도함수 방법, Bootstrap

1. 서 론

댐의 수리·수문학적 월류 확률 추정시에 가장 민감한 불확실성 변량은 댐의 초기수위라 할 수 있으며, 특히 자료의 특성을 충분히 반영하고 댐마루(dam crest)의 높이를 초과하지 않으면서 경계를 갖는 분포형을 추정하는 것은 무엇보다 중요하다. 그러나 기존의 매개변수적 방법으론 이러한 문제점을 적절히 반영할 수 없으며 기존의 경계를 갖는 삼각형분포, 균등분포, beta분포 등은 변량에 대한 통계특성을 반영하지 못하고 이상화시키는 단점이 있으며 경계를 갖지 않는 정규분포와 같은 분포형은 일정 범위를 초과하는 비현실적인 확률분포를 추정하게 되는 문제점이 발생할 수 있다. 따라서, 이러한 문제점을 보완하기 위해서 2가지 방법론을 제시하고자 한다.

첫째, 댐 수위에 대해서 기존의 경계를 갖는 확률분포형을 이용하는 매개변수적 방법의 문제점을 검토하고 이를 보완할 수 있는 경계를 갖는 핵밀도함수(boundary kernel density function)를 이용한 비매개변수적 방법을 적용하여 저수지의 적정 확률분포형을 추정하고자 한다.이때 사용되는 자료는 연최대치 수위자료계열을 통해서 모의를 실시하였다.

둘째, 댐 수위는 제한된 범위(bounded)의 값을 가지며 비정상성(nonstationary)을 유지하는 특성

* 정회원·서울시립대학교 토목공학과 박사수료·E-mail : hkwon@sidae.uos.ac.kr

** 정회원·서울시립대학교 토목공학과 부교수·E-mail : ymoon@uos.ac.kr

으로 해석자료의 선택에 있어서도 매우 어려운 문제점을 내포한다. 이러한 문제점을 보완하기 위한 방법으로 비매개변수적 방법인 Bootstrap Resampling을 통해서 댐의 수위를 모의하였다. Bootstrap Resampling을 이용하여 다시 두 가지 방법으로 모의를 실시하였다. ① 대상 유역의 수위를 홍수기와 비홍수기로 나누어 홍수기의 일수위 시계열자료를 바탕으로 일단위(daily)에 신뢰구간을 추정하여 삼각형분포(triangular distribution)의 매개변수를 산정하였으며 이를 바탕으로 위험도 분석을 실시하였다. ② 또한 홍수기의 일수위 자료를 단순히 Bootstrap Resampling하여 댐의 수위로 추정하여 댐 위험도를 추정하였다.

2. 본 론

댐 위험도 분석에서 초기수위의 모의기법은 전체 위험도 해석 결과에 신뢰성을 평가하는데 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서는 기존 위험도 해석방법의 문제점을 보완하기 위해서 두 가지 방법을 적용하였다. 즉, 비매개변수적 핵밀도함수 방법과 Bootstrap Resampling을 이용하여 수위를 모의하여 위험도 해석을 실시하였다. 대상댐의 수위에 대한 기존 해석방법의 문제점 및 개선방법을 제시하였다.

2.1 기존 매개변수적 확률분포 추정방법의 문제점

현재 댐 위험도 분석 등의 사용되는 Monte Carlo Simulation 방법을 이용하는데 있어서 가장 어려운 문제이면서 약점으로 지적되어 온 것이 수리·수문학적 불확실성 변수들에 대해서 정확한 확률분포를 정의할 수 없다는 것이다. 즉 기존 매개변수적 확률분포 추정방법들은 모집단 분포의 형태를 가정하고, 분포의 매개변수에 관한 통계적 분석을 하는 방법이다.

대상댐에 대해서 적용한 결과 일정한 경계를 갖는 수위에 대해서 그림 1과 같이 정규분포 등과 같은 경계를 갖지 않는 확률분포형을 적용하는 경우에는 댐의 높이를 초과하는 비현실적인 수위를 추정하는 오류를 범하게 되며 또한 그림 2와 같이 기존의 경계를 갖는 확률분포형인 삼각형분포, 균등분포, 베타분포 등은 실제 변량의 확률분포를 왜곡되게 추정하게 되는 오류가 발생하게 된다.

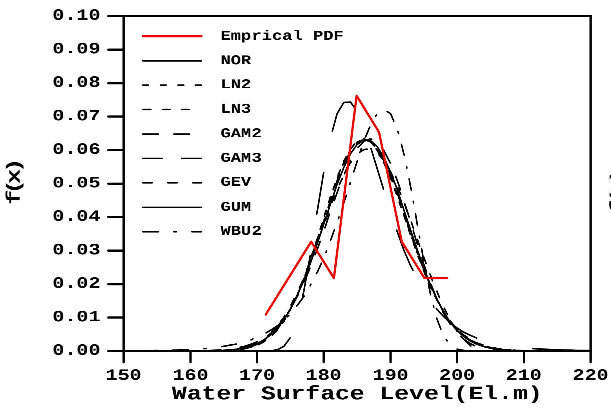

그림 1. 대상댐 수위의 매개변수적 확률밀도함수 적용결과

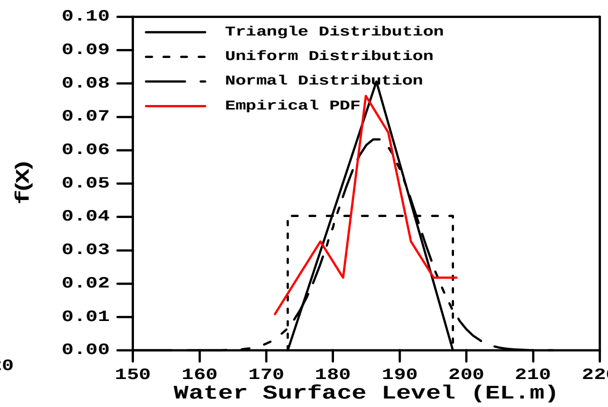

그림 2. 정규분포, 균등분포 삼각형분포 적용결과

2.2 비매개변수적 핵밀도함수 방법

조사대상이 되는 모집단 분포에 관한 정보가 부족하기 때문에 어떤 가정이 곤란하거나, 부정확한 가정을 전제로 하지 않고 통계량을 분석하여 통계적 추론을 하는 방법이 필요하게 되며, 이를 비매개변수적 방법(nonparametric methods)이라고 한다. 비매개변수적 확률밀도함수 추정법의 기본 개념은 히스토그램에서 출발했다 할 수 있다. 히스토그램은 가장 오래되고 쉽게 사용되는 확률밀도함수 추정 법으로 알려지고 있다. 그러나 히스토그램의 단점은 계급구간이 변화는 점에서 불연속적이고 구간간격과 시작점의 선택에 따라 확률밀도함수의 모양이 달라지는 것이다. 이와 같은 히스토그램의 단점을 보완하여 비매개변수적 확률밀도함수 추정식을 모든 실수 x에 대하여 식 1과 같이 정의하였다(Silverman, 1986). 여기에서, $X_1, X_2, \cdots, X_n$은 독립적으로 동일하게 분포된 실관측치이고, K(.)는 핵함수, h는 양의 광역폭(bandwidth)이다.

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

일반적인 핵함수는 중앙에서 최대치를 가지며 연속적이고 대칭인 방정식의 형태를 가진다. 일반적으로 확률밀도 추정시에 사용되는 핵밀도함수는 그림 3과 같다. 핵함수의 선택은 일반적으로 연속적이고 미분 가능한 밀도함수가 필요한 경우는 경계를 갖지 않는 핵함수를 사용하는 것이 적용상의 유리하다. 그러나 댐 수위와 같은 경계를 갖는 변량에 대해서는 Epanechinikov(EP)와 같은 경계핵함수를 사용해야 한다. 그림 4는 대상댐 유역의 경계를 갖는 EP핵함수를 사용하여 추정한 확률밀도함수이다. 비교적 경험적인 확률밀도함수와 유사한 형태를 보이며 경계를 갖는 분포함수를 제시하고 있다.

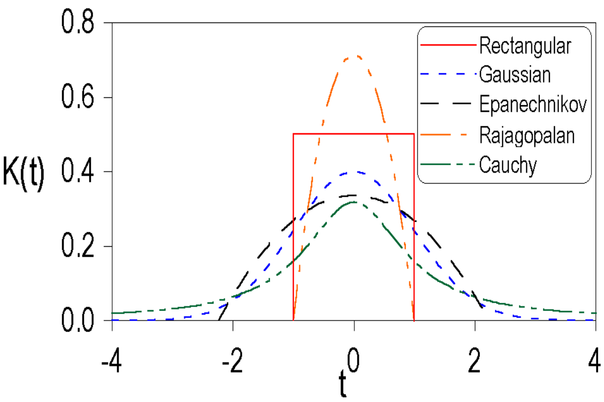

그림 3. 여러 가지 핵함수

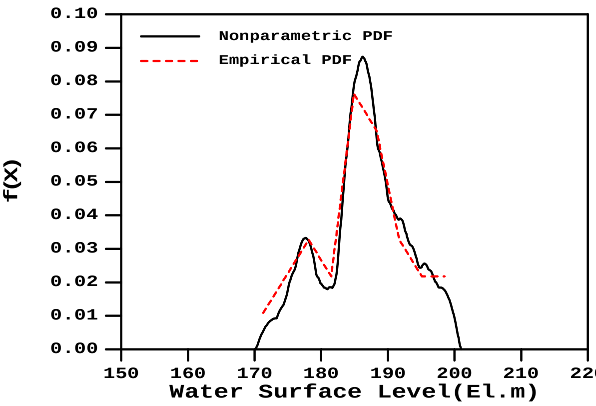

그림 4. 비매개변수적 확률밀도함수 적용결과

2.3 Bootstrap Resampling 기법

우리나라에서는 홍수기와 비홍수기를 6월 1일부터 9월 31일까지로 구분하고 있으므로 본 연구에서도 이 기준을 토대로 일수위 자료를 분류하였으며 분류된 자료를 대상으로 Bootstrap 기법을 적용하여 시계열자료의 신뢰구간을 추정하였다. 그림 4는 Bootstrap을 이용한 신뢰구간 추정기법의 과정을 나타낸다. 신뢰구간을 추정하기 위해서는 일수위 시계열 자료의 곡선을 Fourier 급수의 형태의 곡선으로 추정이 필요하다. 그림 6은 Fourier 급수로 이용하여 댐 수위의 시계열을 적합시킨 결과를 나타낸다.

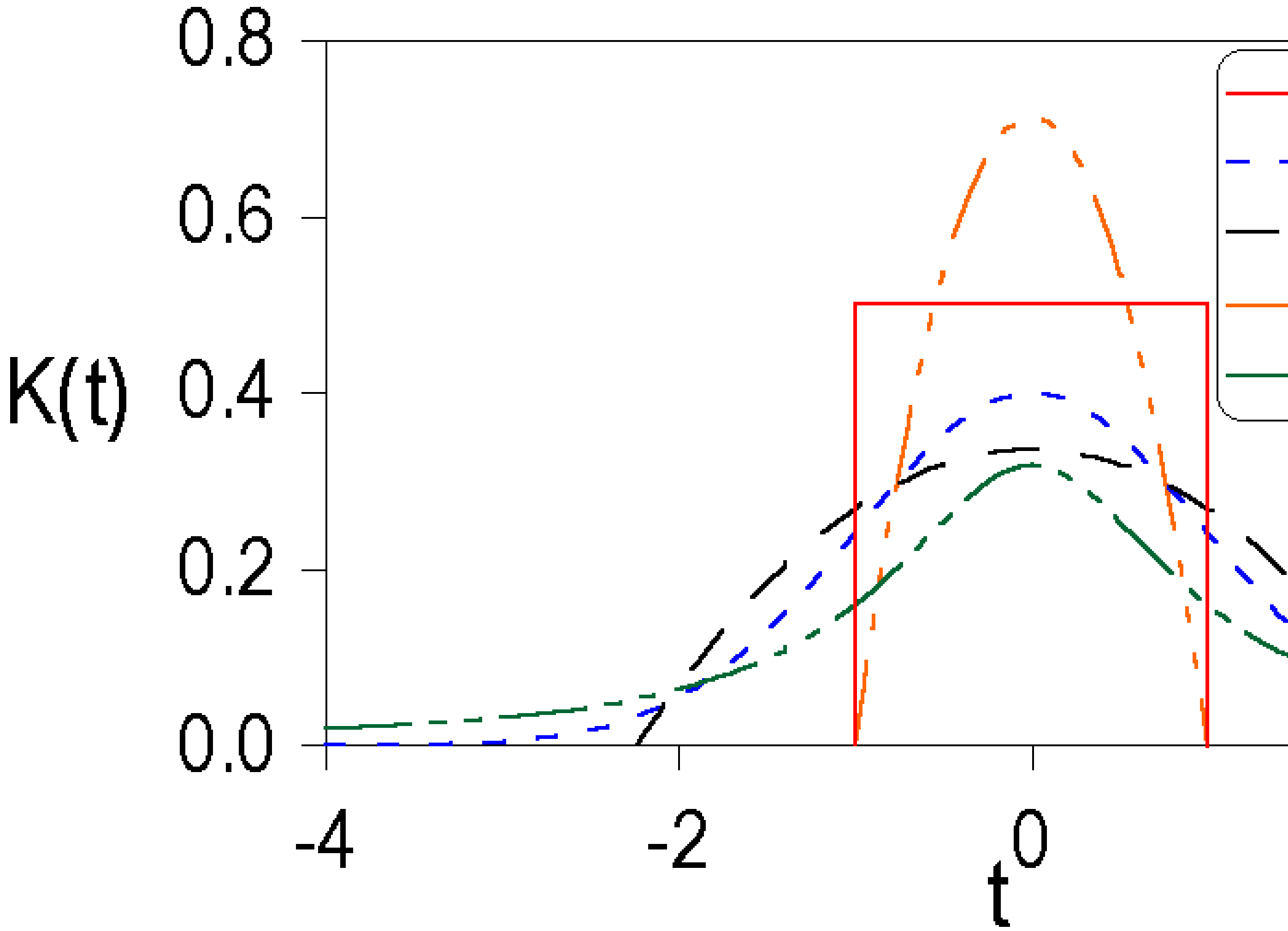

그림 3. 여러 가지 핵함수

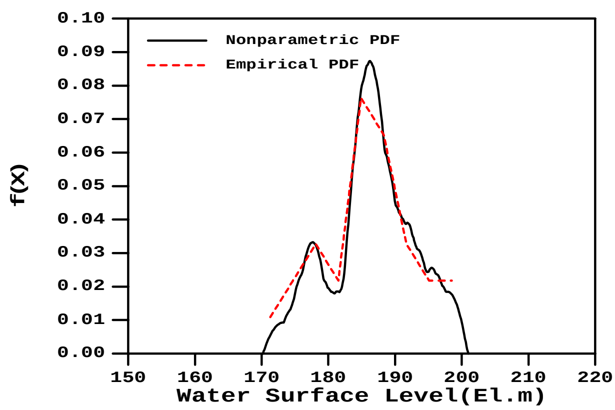

그림 4. 비매개변수적 확률밀도함수 적용결과

2.3 Bootstrap Resampling 기법

우리나라에서는 홍수기와 비홍수기를 6월 1일부터 9월 31일까지로 구분하고 있으므로 본 연구에서도 이 기준을 토대로 일수위 자료를 분류하였으며 분류된 자료를 대상으로 Bootstrap 기법을

적용하여 시계열자료의 신뢰구간을 추정하였다. 그림 4는 Bootstrap을 이용한 신뢰구간 추정기법의 과정을 나타낸다. 신뢰구간을 추정하기 위해서는 일수위 시계열 자료의 곡선을 Fourier 급수의 형태의 곡선으로 추정이 필요하다. 그림 6은 Fourier 급수로 이용하여 댐 수위의 시계열을 적합시킨 결과를 나타낸다.

$$f(t) = \mu + \sum_{k=1}^{K}\left(\alpha_k \cos\left(\frac{2\pi kt}{T}\right) + \beta \sin\left(\frac{2\pi kt}{T}\right)\right) \tag{2}$$

시계열자료를 Fourier 급수의 형태의 곡선으로 표현을 위해서는 곡선의 매개변수 추정이 이루어져야 하며 매개변수 추정은 최소자승법에 의해서 추정을 하였다. 추정 구간은 다음 식 3으로 추정하며 여기에 식 4에 Bootstrap 기법을 적용하여 신뢰구간을 추정하게 된다. 그림 7은 수위의 Bootstrap 과정을 나타내며 그림 8은 추정된 신뢰구간을 바탕으로 추정된 삼각형함수의 적합과정을 나타낸다. 여기서 B는 Bootsrap의 횟수를 나타내며 α는 신뢰구간을 나타낸다.

$$\hat{f}(t) \pm C_P \times \hat{\sigma}_{\hat{f}(t)} \tag{3}$$

$$\frac{1}{B} \times \sum_{b=1}^{B}\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} I\left(\max\left(\frac{|\ \hat{f}_{n+1}(t) - \hat{f}(t)\ |}{\hat{\sigma}_{\hat{f}}(t)}\right) \le C_P\right)\right] = 1 - \alpha \tag{4}$$

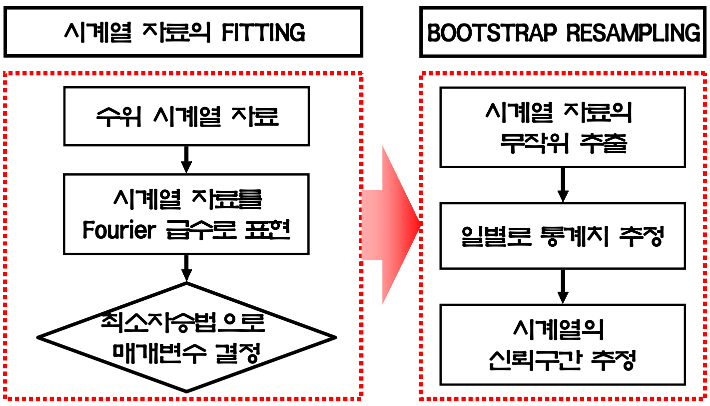

그림 5. Bootstrap 기법을 이용한 신뢰구간 추정 기법

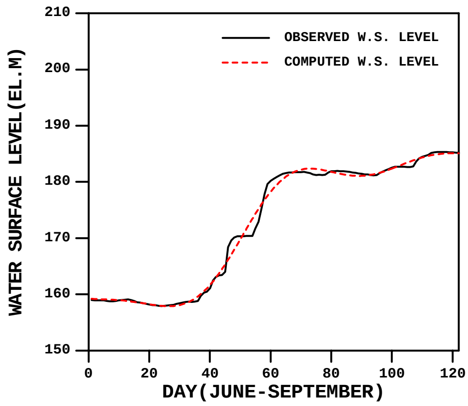

그림 6. 1975년 실측수위와 모의수위

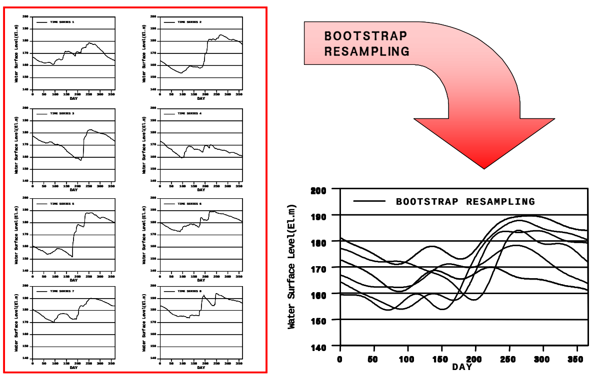

그림 7. 1975년 실측수위와 모의수위

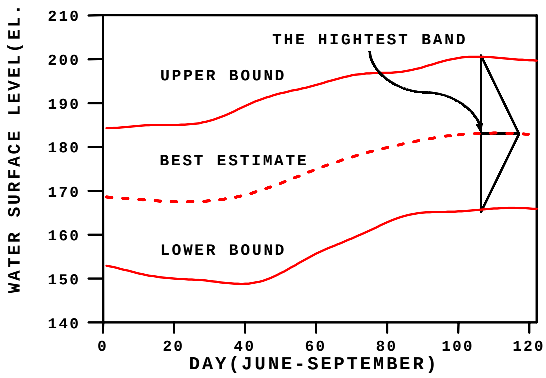

그림 8. Bootstrap 신뢰구간 추정기법

2.4 위험도 해석 결과

수리 · 수문학적 위험도 해석은 권현한 등(2003)이 제시한 비매개변수적 핵밀도함수를 이용한 Monte Carlo Simulation을 적용하여 해석하였으며 해석 결과는 표 1과 같다. 위험도 해석시에 고려되는 강우량, 풍속 등은 비매개변수적 핵밀도함수를 이용하여 모의하였으며 유역변수는 경계를 갖는 확률분포형인 삼각형분포 및 균등분포를 사용하여 모의를 실시하였다.

해석 결과 가장 극한 기상상황으로 가정한 경우 즉 비매개변수적 핵밀도함수 해석결과에서는 대략 1.16E-03정도의 값을 나타냈으며 홍수기의 평상수위로 가정하는 Bootstrap Resampling을 적용한 위험도는 5.11E-06의 값을 나타났다. 본 대상댐의 대해서 가장 극심한 기상상태를 가정한 해석 결과인 1.1972E-03은 본 댐은 여수로의 설계빈도가 1,000년 빈도로서 설계당시보다 확률수문량이 크게 증가된 현재 여수로 방류능력 및 안전성 상태로 고려해보면 적당한 위험도 값으로 추정된다.

표 1. 각 모의기법별 댐 월류확률 해석 결과

Cause of Failure		Overtopping Probability (p/year)		
		FLOOD	WIND	FLOOD & WIND COMBINATION
비매개변 수적방법	핵밀도함수법	6.45E-04	0.00E+00	1.16E-03
	Bootstrap 신뢰구간(삼각형)	2.15E-04	0.00E+00	3.73E-04
	Bootstrap Resampling	2.00E-06	0.00E+00	5.11E-06

3. 결 론

댐의 수리·수문학적 월류 확률 추정시에 가장 민감한 불확실성 변량은 댐의 초기수위라 할 수 있으며, 특히 자료의 특성을 충분히 반영하고 댐마루(dam crest)의 높이를 초과하지 않으면서 경계를 갖는 분포형을 추정하는 것은 무엇보다 중요하다. 그러나 기존의 매개변수적 확률분포 추정방법으론 이러한 문제점을 적절히 반영할 수 없으며 기존의 경계를 갖는 삼각형분포, 균등분포, beta분포 등은 변량에 대한 통계특성을 반영하지 못하고 이상화시키는 단점이 있으며 경계를 갖지 않는 정규분포와 같은 분포형은 일정 범위를 초과하는 비현실적인 확률분포를 추정하게 되는 문제점이 발생할 수 있다. 따라서, 이러한 문제점을 보완하기 위해서 2가지 방법론을 제시하였다.

해석 결과 가장 극한 기상상황으로 가정한 경우 즉 비매개변수적 핵밀도함수를 이용한 해석결과에서는 대략 1.16E-03정도의 값을 나타냈으며 홍수기의 평상수위로 가정하는 Bootstrap Resampling을 적용한 위험도는 5.11E-06의 값을 나타났다. 본 대상댐의 대해서 가장 극심한 기상상태를 가정한 해석 결과인 1.1972E-03은 본 댐은 여수로의 설계빈도가 1,000년 빈도로서 설계당시보다 확률수문량이 크게 증가된 현재 여수로 방류능력 및 안전성 상태로 고려해보면 적당한 위험도 값으로 추정된다. 따라서 댐의 월류확률 추정시에 수위와 같은 변량에 대해서 본 연구에서 제시한 Bootstrap Resampling기법을 병용하여 해석이 실시된다면 보다 신뢰성 있는 해석결과의 추정이 가능하리라 사료된다.

참 고 문 헌

1. 권현한, 문영일, 차영일, 전시영(2003). 비모수적 모의기법을 이용한 댐의 월류확률 산정에 관한

연구, 대한토목학회 학술발표회.
2. Silverman, B.W.(1986). Density estimation for statistics and data analysis, Chapman and Hall, London.