

Bayesian MCMC를 이용한 제방 월류위험도 기반의 홍수피해 산정 방안



이 충 성 |

한국수자원공사 기술지원센터 선임위원
sung@kwater.or.kr



이 한 구 |

한국수자원공사 기술지원센터 팀장
hglee@kwater.or.kr



장 성 필 |

한국수자원공사 기술지원센터 대리
jang@kwater.or.kr



김 종 범 |

미육군공병단(USACE) ERDC 연구원
jhujb@yahoo.com

로 인해 우리나라가 몬순기후에서 아열대성 기후로 변화할 것이라는 예측을 감안하면 이 같은 현상은 일시적 변동이 아닌 장기적, 구조적 양상으로 판단된다. 이 같은 강우패턴의 변동과 더불어 산업화, 도시화에 따른 자산증가는 홍수피해 잠재성을 증가시키고 있다. 즉, 동일한 홍수에도 피해규모는 과거와 비교할 수 없을 정도로 증가할 것임을 의미한다.

이처럼 높아진 홍수피해 잠재성에 비해 기존의 치수대책은 제방 축조에 중점을 둔 소극적 방개 개념으로서 급증하는 홍수량을 소통시키기에는 이미 한계에 다다른 상황이다. 계획홍수위를 높이고 이에 따라 제방을 증고하는 것은 다른 측면으로 잠재적 홍수피해 위험도를 더욱 증가시키는 결과를 초래하기 때문이다. 보다 근본적인 홍수량 소통을 위해서는 하폭을 넓히거나 하상준설을 통해 통수단면적을 증가시키고 계획홍수위를 저하시켜야 한다. 현재 건설 중인 4대강 살리기 사업에서는 새로이 하천구역으로 지정해야 하는 하폭확장 보다는 하상준설을 통해 계획홍수위를 저하시키는 것을 목표로 하고 있다.

본 연구에서는 4대강 살리기 사업 전·후 홍수위 저하에 따른 제방 월류위험도를 산정하고 홍수피해액 산정에 월류위험도를 활용할 수 있는 방안을 제시하였다. 월류위험도는 Bayesian MCMC 방법에 의해 홍수위 산정과정에서의 매개변수 불확실성을 감안하여 산정하였다. 일반적으로 제방월류로 인한

1. 머리말

최근 우리나라는 기상이변으로 인해 강우량의 지역적, 계절적 편차가 과거보다 심화되면서 극한홍수의 발생빈도가 증가하고 있다. 전 지구적 기후변화

피해가 발생하지 않을 경우에도 내수침수로 인한 피해가 있을 수 있으나, 이는 별도의 수리학적 해석이 필요한 부분이다.

2. 월류위험도 기반의 홍수피해 산정 모형

2.1 기본이론

1) Bayesian MCMC

수자원·환경 분야에서 확률론적 방법으로 모형의 매개변수 추정과 예측치의 불확실성 분석을 위해 Bayes 이론에 의한 Bayesian 학습기법이 많은 관심을 끌고 있다(Borsuk et al, 2000). Bayes 이론은 Bayesian 모델링 기법의 근간을 이루며 $Y=f(X, \theta, \varepsilon)$ 형태의 기본 방정식과 함께 다음 식과 같이 확률론적 모델링에 확장되어 이용되고 있다. Bayes 이론의 기본적인 함수형태는 식(1)과 같다.

$$p(\theta|Y) = \frac{p(\theta, Y)}{p(Y)} = \frac{p(Y|\theta)p(\theta)}{\int p(Y|\theta)p(\theta)d\theta} \propto p(Y|\theta)p(\theta) \quad (1)$$

여기서, θ 는 모형의 매개변수 벡터, Y 는 홍수위와 같은 종속변수, $p(\theta|Y)$ 는 θ 의 사후(posterior) 확률분포, $p(\theta, Y)$ 는 결합(joint) 확률분포, $p(Y|\theta)$ 는 우도함수(likelihood function), $p(\theta)$ 는 θ 의 사전(prior) 확률분포, 그리고 $p(Y)$ 는 Y 의 주변(marginal) 확률분포를 각각 의미한다. Bayesian 기법은 매개변수 벡터 θ 를 확률분포로 표현되는 불확실한 변수로 처리하며 가장 최근의 관측치가 반영된 사후분포(posterior distribution)를 얻기 전에 사전분포(prior distribution)를 결정하게 된다. 사전분포는 보통 전문가의 판단이나 과거자료의 통계분석에 의해 규정하거나, 또는 편의상 공액(conjugate) 사전분포, 균등분포 등으로 지정하기도 한다.

우도함수 $p(Y|\theta)$ 는 모형 $Y=f(\cdot)$ 의 매개변수가 관측치(Y)를 모의하는데 얼마나 적합한지를 나타낸

다. 따라서 우도함수는 매개변수의 사전분포를 신규 관측치와 함께 갱신하여 식(1)과 같이 사후분포의 결정에 이용된다. 식(1)의 분모인 $p(Y)$ 는 사전에 측분포라 하며 의 함수가 아닌 관계로 상수로 간주된다. 따라서 사후 확률분포는 보통 우도함수와 사전 확률분포의 적으로 표현되며, 대개는 수학적 확률분포가 아닌 비정상 분포로 표현된다(Gelman, et al. 1995). 일단, 우도함수와 사전분포가 결정되면 $p(\theta|Y)$ 의 사후분포로부터 매개변수를 샘플링하여 이를 추론함과 동시에 Y 의 사후예측분포를 결정할 수 있게 된다. 여기서 기술적으로 부딪치는 문제점은 수학적으로 표현되지 않는 비정상 형태의 사후분포 $p(\theta|Y)$ 로부터 매개변수를 샘플링하는 방법이다. 이 문제의 해결을 위해 MCMC라는 일종의 수치해석 기법이 최근 지대한 관심을 받고 있다. MCMC 기법은 $p(\theta|Y)$ 의 근사 분포로부터 Monte Carlo 개념의 샘플링을 시도하고 Markov chain 기법으로 전후 샘플링에 대한 고리를 형성한다. MCMC 기법의 알고리즘으로 다수 존재하나 Gibbs 및 Metropolis-Hastings (MH) 해법이 가장 널리 이용된다. MCMC 기법에 대한 내용은 Gelman, et al.(1995)에 자세히 서술되어 있다.

2) 다차원홍수피해산정법

다차원홍수피해산정법(MD-FDA: Multi-Dimensional Flood Damage Analysis)은 기존보다 정밀한 홍수피해산정을 위해 건설교통부(2004a, 2004b)에서 개발하였다. ‘다차원법’은 통계자료를 조사하여 산정하는 일반자산 피해 5개항목과 ‘90년대까지 사용되어 오던 ‘간편법’(건설부, 1985; 1993)의 원단위를 이용한 인명/이재민피해, 마지막으로 일반자산 피해에 비율계수를 곱하여 계산하는 공공시설피해 등 총 7가지 피해항목으로 구성되어 있다. 다차원법의 적용 절차는 ① 피해지역의 행정구역별 일반자산조사, ② 일반자산의 공간분포를 고려한 침수편입율 산정, ③ 침수심별도 수심-피해관계(depth-percent damage) 적용을 통

한 일반자산 피해액 산정, ④ 인적피해 및 공공시설 물피해 산정 등의 순서로 진행된다. 다차원법을 적용할 때에 필요한 일반자산 항목의 조사는 각 지자체가 발간한 최근 통계연보를 활용하고 자산항목별 평균단가는 국토해양부(2008)에서 제시한 값을 사용하고 있다.

2.2 월류위험도에 의한 홍수피해 산정 방안

기존에는 하천 치수사업의 경제적 편익 산정시 계획홍수위 이하의 홍수에 대해서는 무피해를 가정하고 제방이 방어할 수 있는 무피해 사상에 대해서 편익을 산정하여 왔다. 이는 확률빈도 해석(frequency analysis)에 의한 홍수위의 연초과확률(annual exceedance probability)이 특정 년의 최대수위가 목표수위(target stage)를 초과할 가능성을 나타낸 것이기 때문이다. 빈도해석과 같이 매개변수적(parametric) 통계기법은 수자원 분야에서 일반적으로 활용되고 있으나 자료의 구축과 해석이란 두 가지 측면에서 문제점이 있다. 자료의 구축 측면에서 볼 때, 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해서는 양적 질적으로 충분한 자료가 필요한데 장기간의 수문 관측 자료를 획득하는 것이 어려울 뿐더러 홍수량을 포함, 대다수의 수문자료는 관측하기가 쉽지 않다. 자료 해석 측면의 문제점은 표본자료의 모집단 분포형을 가정해야 한다는 점에 있는데, 적합도 검정(goodness of fit test)을 거친다 하더라도 실제 모집단의 분포를 사전에 알 수는 없으므로 이에

따르는 표본오차(sampling error)는 항상 문제가 된다. 즉, 매개변수적 확률빈도해석에 의한 빈도별 강우량이나 홍수량은 표집된 자료의 양적 질적 문제와 모집단 분포형 추정과정에서 오는 오차에 의해 좌우되는 불확실성의 범주에 놓이게 된다.

이러한 불확실성으로 말미암아 특정 하천구간에서 산정된 계획빈도 이하의 홍수위가 제방고에 해당하는 임계사상(critical event)을 초과할 수도 있고, 반대로 계획빈도 이상의 홍수위가 임계사상을 초과하지 않을 가능성도 있다. 이에 따라 최근에는 하천 치수사업의 경제적 편익 산정시 월류위험도 산정을 통해 불확실성을 고려하고자 하는 연구가 수행되고 있다. 최승안 등(2007)은 특정 하천지점의 장기간 홍수위자료로부터 Monte Carlo 모의에 의한 조건부 비초과확률을 이용하여 댐에 의한 홍수조절로 하루 하천의 계획홍수위가 저하 될 때의 홍수피해경감효과를 산정하였다. 이 연구에서는 Monte Carlo 모의를 통해 홍수조절 전후의 비초과확률을 산정한 후, 이로부터 홍수조절 전후의 초과확률(=1-비초과확률) 차이를 월류위험도 경감률로 정의하였다. 박태선(2009)은 이 연구결과에 근거하여 하상준설로 인한 월류피해 경감효과 산정방법을 제시한 바 있다.

위의 연구들은 실측 홍수위자료로부터 비매개변수적(non-parametric) 방법으로 월류위험도를 산정하였으나, 확률강우량 산정에 따른 강우-유출모형과 수리모형에 의해 계획홍수위를 산정하는 경우에는 모형 매개변수의 불확실성도 제방 월류 및 붕

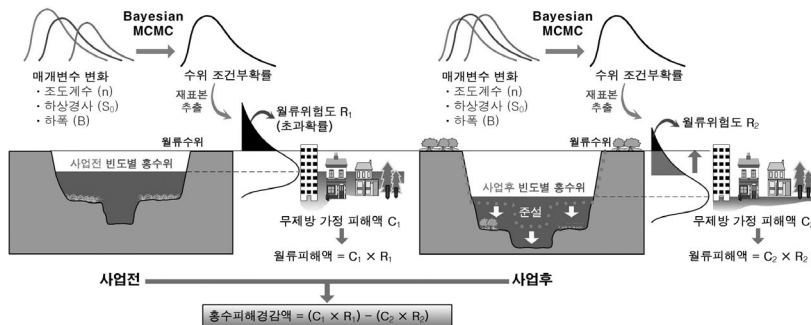


그림 1. Bayesian MCMC에 의한 월류위험도 산정 개념

학술/기술기사

외에 잠재적 영향을 미치는 중요한 요인으로 작용할 것이다. 본 연구에서는 이러한 매개변수 불확실성을 고려하여 제방의 월류위험도를 산정하였고 산정된 월류위험도를 이용하여 제방 월류시 홍수피해액을 산정하였다. 즉, 제방이 없을 때를 가정하여 산정한 홍수피해액에 제방이 월류할 확률을 적용하는 방식이다. 월류위험도 산정을 위해 고려한 매개변수는 Manning 조도계수, 하상경사, 하폭 등이다. 그림 1은 본 연구에서 적용한 Bayesian MCMC방법에 의해 월류위험도를 산정하는 개념을 나타낸 것이다.

월류위험도는 식(2)와 같이 Manning 공식을 적용하여 홍수위 산정의 불확실성을 양적으로 평가하는 방식으로 가능하다

$$h = \left(\frac{nQ}{S_0^{1/2}B} \right)^{3/5} \quad (2)$$

여기서, h 는 홍수위, n 은 Manning 조도계수, Q 는 홍수량, S_0 는 하상경사, B 는 하폭으로 수심에 비해 폭의 비율이 매우 큰 광폭수로의 경우에 해당된다.

우도함수는 부등류로 기설정된 계획홍수위(h_{nu})를 관측치에 상응시켜 식(3)과 같이 구성하였다.

$$\epsilon = (h - h_{\nu}) \sim Normal(0, \sigma^2)$$

$$P(h|\theta) = \prod \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(h - h_{\nu})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

여기서, h 는 Manning 공식에 의한 계산수위, θ 는 Manning 공식에 적용된 변수를 의미한다.

θ 의 사전분포는 균등분포(uniform distribution)로 지정하여 분석자의 판단을 최소화하였다. 이로부터 산정된 4대강 사업 전·후 월류위험도(R)는 제방이 존재하지 않는 경우를 가정하고 산정된 피해액(C)에 적용되어 식(4)와 같이 사업 전·후 홍수피해경감액을 산출하게 된다.

$$\text{홍수피해경감액} = (C_1 \times R_1) - (C_2 \times R_2) \quad (4)$$

여기서, C_1 , R_1 는 사업전, C_2 , R_2 는 사업후 피해액 및 월류위험도를 의미한다.

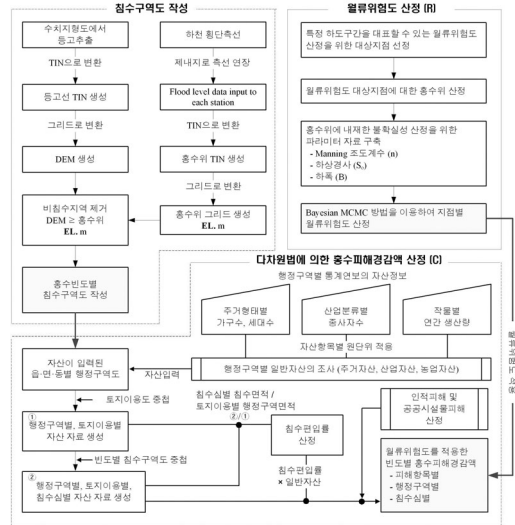


그림 2. 월류위험도에 의한 홍수피해경감편의 산정 절차

그림 2는 이상과 같은 내용들을 절차적으로 나타낸 것이다.

3. 월류위험도 산정

3.1 4대강 살리기 사업의 치수분야 사업내역

4대강 살리기 사업에서는 퇴적토 준설과 댐 건설 및 저수지 증고, 홍수조절지 및 천변저류지 등으로 홍수조절용량을 9.2억 m^3 증대하고, 추가로 노후제방 보강과 하구둑 배수문 증설 등을 통해 4대강유역의 홍수위험을 저감시킨다는 계획이다. 표 1은 각 수계별 사업내역을 나타낸 것으로 낙동강유역의 경

표 1. 4대강 살리기 사업으로 확보될 수계별 홍수조절용량 (단위: 억 m^3)

구분	한강	낙동강	금강	영산강	합계
퇴적토준설	0.5	4.4	0.5	0.3	5.7
중소규모댐	-	0.8	-	-	0.8
농업용저수지증고	0.1	0.9	0.5	0.7	2.2
홍수조절지·천변저류지	0.3	-	-	0.2	0.5
노후제방 보강	131km	335km	117km	37km	620km
하구둑 배수문 증설	-	1.1m저감	-	0.3m저감	-
계	0.9	6.1	1.0	1.2	9.2

우 신규 확보될 홍수조절용량이 6.1억^m³, 노후제방 보강은 335km로 각각 전체의 67%와 54%를 점유하고 있어 절반 이상의 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 4대강 전역에서 준설에 의해 확보될 홍수조절용량은 전체의 약 62%로서 4대강 살리기 사업의 핵심과제라 할 수 있다.

3.2 4대강사업 전·후의 월류위험도

제방은 하천을 따라 연속적인 형태이지만 본 연구에서는 특정 하도구간을 대표하는 지점을 선정하여 월류위험도를 산정하고 대표지점의 월류위험도가 하도구간 전체에 대해 동일한 것으로 가정하였다. 대표지점의 선정기준은 주요 지류의 합류부나 보 건설 전후에 위치한 수위표 지점으로서, 총 27 표 2. 대상지점에 대한 월류위험도 산정 결과

수 계	지 점	500년	200년	150년	100년	80년	50년	30년	
사 업 전	한강	양평		0.3570	0.3297	0.2659	0.2929	0.2411	
		이포		0.2653	0.2339	0.1535	0.1741	0.1212	
		여주		0.2580	0.2316	0.1343	0.1844	0.1269	
		삼합		0.2360	0.2039	0.1274	0.1374	0.0940	
	낙동강	구포		0.3359		0.3070	0.2993	0.2766	0.2520
		월촌		0.4935		0.4020	0.4386	0.4123	0.3663
		수산		0.4934		0.3823	0.3900	0.3522	0.2983
		진동		0.4165		0.3133	0.3105	0.2651	0.2240
		적포교		0.3189		0.2635	0.2116	0.1719	0.1255
		고령교		0.3336		0.1880	0.2478	0.2082	0.1661
		성주		0.2895		0.2100	0.2076	0.1671	0.1245
		왜관		0.2038		0.1341	0.1394	0.1008	0.0698
		구미		0.1330		0.1231	0.0811	0.0544	0.0353
		낙동		0.1247		0.1387	0.0743	0.0575	0.0323
		구담		0.1038		0.1935	0.0614	0.0477	0.0343
	금강	양산		0.2504		0.3167	0.2398	0.1469	0.0520
		화성		0.5064		0.3834	0.3928	0.3323	0.2603
		반조원	0.3651	0.3116		0.2336	0.2491	0.2140	
		진두	0.3303	0.2480		0.1853	0.1740	0.1389	
영산강	공주	0.4163	0.2550		0.2620	0.2536	0.2094		
	금남	0.3325	0.2416		0.1633	0.1477	0.1078		
	하구언	0.3775	0.3552		0.2527		0.2720		
	사포	0.4609	0.4024		0.3146		0.2910		
	영산포	0.3628	0.4992		0.2136		0.1531		
	본동	0.3064	0.2148		0.1468		0.0939		
	마륵	0.0810	0.0318		0.0137		0.0039		
삼지	0.0014	0.0001		0.0000		0.0000			

개 수위표를 선정하였으며 월류위험도를 적용할 피해지역은 영산강의 경우 유역종합치수계획의 치수 단위구역, 나머지 수계는 행정구역(읍면동)을 기본 단위로 하였다. 전술한 바와 같이 월류위험도 산정을 위한 매개변수는 Manning 조도계수, 하상경사, 하폭 등이며, 본 연구에서는 수계별 하천기본계획에서 자료를 취득하였다. 표 2는 사업 전·후 빈도별로 산정된 월류위험도 결과를 나타내고 있다.

3.3 홍수피해경감편의 산정

일반적으로 연평균 홍수피해경감액은 빈도별 홍수피해경감액을 빈도의 역수인 초과확률의 구간별 증분에 곱하여 누적시키는 방식으로 조건부 기댓값

표 2. 대상지점에 대한 월류위험도 산정 결과(계속)

수 계	지 점	500년	200년	150년	100년	80년	50년	30년	
사 업 후	한강	양평		0.3570	0.3297	0.2659	0.2929	0.2411	
		이포		0.2448	0.2016	0.1172	0.1384	0.0830	
		여주		0.1305	0.1088	0.0374	0.0668	0.0366	
		삼합		0.1260	0.0944	0.0454	0.0527	0.0282	
	낙동강	구포		0.2619		0.1999	0.1881	0.1674	0.2520
		월촌		0.3760		0.3234	0.3164	0.2779	0.3663
		수산		0.2575		0.1375	0.1829	0.1467	0.2124
		진동		0.2061		0.1778	0.1387	0.1193	0.2240
		적포교		0.1822		0.1097	0.1227	0.0987	0.0323
		고령교		0.2384		0.0955	0.1659	0.1258	0.1661
		성주		0.1979		0.1300	0.1315	0.0935	0.1245
		왜관		0.0952		0.0370	0.0444	0.0236	0.0677
		구미		0.0460		0.0520	0.0200	0.0118	0.0068
		낙동		0.0063		0.0270	0.0016	0.0002	0.0056
		구담		0.0236		0.0120	0.0122	0.0061	0.0064
		양산		0.2504		0.3167	0.1374	0.0812	0.0426
		화성		0.5064		0.1561	0.3928	0.0891	0.0597
		금강	반조원	0.3249	0.2629		0.1969	0.2126	0.1786
	진두		0.2319	0.1533		0.1910	0.0895	0.0605	
	공주		0.3395	0.2550		0.2078	0.1683	0.1250	
	금남		0.2402	0.1502		0.0933	0.0743	0.0461	
	영산강	하구연	0.3677	0.3508		0.2527		0.2704	
		사포	0.4171	0.3583		0.2694		0.2486	
		영산포	0.2303	0.1956		0.1044		0.0668	
		본동	0.1534	0.0777		0.0446		0.0200	
		마륵	0.0186	0.0016		0.0007		0.0000	
		삼지	0.0013	0.0000		0.0000		0.0000	

을 취해 산정할 수 있다. 그러나 연평균 홍수피해 경감액은 현재시점의 화폐적 가치로 나타난 것일 뿐, 재화의 시간적 가치를 반영하고 있지는 않다. 즉, 50년간의 편익이 당장 현재년도에 모두 발생하는 것은 아니므로 할인율을 사용하여 현재가치로 환산해 주어야 한다. 편익의 현재가치화를 위한 기준시점은 각종 통계자료가 발표되는 시점을 감안하여 분석이 수행되는 현재시점의 전해년도 말로 설정하여야 한다. 또한 할인율은 「수자원부문 예비타당성조사 표준지침(제4판)」(한국개발연구원, 2009)을 일반적으로 이용하는데, 기준시점부터 운영 개시 후(일반적으로 공사 완료 후) 30년까지 5.5%, 이후 20년간 4.5%의 사회적 할인율을 적용하고 있다.

4. 맺음말

본 연구에서는 계획홍수위 저하에 따른 홍수피해 경감편익 산정을 위해 제방의 월류위험도를 적용하는 방법을 제시하고 이를 4대강 살리기 사업에 적용하였다. 즉, 시설제방의 존재를 배제하고 다차원법을 이용하여 산정한 사업전·후 빈도별 홍수피해액에 제방이 월류할 확률을 적용하는 방식이다. 기존에는 제방의 경제적 효과 산정시 계획홍수위 이하의 홍수에 대해 무피해를 가정하고 이를 편익으로 산정하여 왔다. 이는 연초과확률 개념으로 산정된 홍수위가 어떤 해에 잠재적인 모든 홍수를 고려할 때 최대수위가 목표수위(target stage)를 초과할 가능성을 확률로 나타낸 것이기 때문이다. 그러나 예측의 관점에서 강우-유출모형에 의해 계산된

계획홍수위는 수리·수문학적 불확실성 뿐 아니라 모형, 매개변수의 불확실성 등을 내포하는 한계가 있다. 이러한 불확실성은 수공구조물의 붕괴에 대한 잠재성을 가진 중요한 요인으로 작용한다. 본 연구에서는 이러한 잠재적 위험을 고려하기 위하여 매개변수 불확실성을 고려하여 조건부 초과확률을 산정하는 월류위험도 산정방안을 제시한 것이다.

한편, 다차원법에 의한 홍수피해경감편의 산정은 대상 하천유역에서 발생할 수 있는 잠재적 최대피해를 대상으로 하고 있다. 그러나 실제 홍수피해의

발생양상은 월류 및 파제, 내수침수 등이 기술적, 인문·사회적으로 다양한 원인에 의해 복합적으로 나타나고 있다. 따라서 홍수피해의 발생 양상별로 세분화된 침수해석이 가능하다면 보다 현실적인 분석내용을 포괄 할 수 있을 것이다. 이를 위해서는 단기간에 수행되는 경제성분석의 특성을 감안한 내수침수나 범람해석 방법이 마련되어야 하며, 이러한 공학적 분석방법이 다차원법과 같은 경제성분석 기법과 연계될 수 있는 방안이 검토되어야 할 것이다. ☞

참고문헌

1. 건설교통부 (2004a). 치수사업 경제성분석 방법 연구.
2. 건설교통부 (2004b). 하천설계기준.
3. 건설부 (1985). 하천시설기준.
4. 건설부 (1993). 하천시설기준.
5. 국토해양부 (2008). 수자원사업의 타당성분석 개선방안 연구.
6. 박태선 (2009). “하상준설에 의한 월류피해 경감효과 산정방법”, 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제 42권, 제 10호, pp. 89-94.
7. 최승안, 이충성, 심명필, 김형수 (2007). “댐의 홍수조절에 의한 경제적 효과분석”, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제 40권, 제 5호, pp. 383-396.
8. 한국개발연구원 (2009) 수자원부문 예비타당성조사 표준지침(제4판)
9. Borsuk, M. E. and Craig A. Stow (2000). "Bayesian Parameter Estimation in a mixed-order model of BOD decay", *Water Res.*, 34(6), 1830-1836.
10. Gelman, A., Carlin, J., Stern, H.S., Rubin, D.B. (1995). *Bayesian Data Analysis*, 2nd Edition, CRC Press.