

Bayesian MCMC에 의한 하천제방 월류위험도 적용 4대강살리기사업 홍수피해경감편익 산정 방안 Flood Damage Reduction Estimation for 4 Major River Restoration Project Applying Overtopping Risk of Levee Using Bayesian MCMC

이충성*, 이한구**, 정남정***
Choong Sung Yi, Han Goo Lee, Nahm Jung Chung

요 지

기존의 하천개수사업 치수경제성분석에서는 홍수피해경감편익 산정시 계획홍수위 이하의 홍수에 대해서 제방이 완벽히 방어한다는 가정 하에 제방으로 인한 피해경감액을 편익으로 산정하고 있다. 그러나 전통적 빈도해석 방법 및 수리·수문 모형에 내재된 매개변수 불확실성으로 인하여 특정 하천구간에서 산정된 계획빈도 이하의 홍수위가 제방고에 해당하는 임계사상을 초과할 수도, 반대로 계획빈도 이상의 홍수위가 임계사상을 초과하지 않을 가능성도 있다. 이러한 불확실성은 수공구조물의 붕괴에 대한 잠재성을 가진 중요한 요인으로도 작용한다. 본 연구는 이러한 잠재적 위험도를 제방 월류위험도로 정의하고 이를 Bayesian MCMC에 의해 산정하는 방법을 제시하였다. 제시된 방법론은 4대강살리기사업 전·후에 대해 적용하였으며, 계획홍수위 저하에 따른 잠재적 홍수위험 감소 효과를 정량적으로 나타낼 수 있었다. 월류위험도는 빈도별 홍수피해액의 피해발생 확률로서도 적용될 수 있으며, 이는 물리적 침수구역 설정의 어려움에 따른 홍수피해액 과다산정 문제 해결의 대안으로서도 의미가 있다.

핵심용어 : 월류위험도, Bayesian MCMC, 4대강살리기사업, 홍수피해

1. 서론

최근 우리나라는 기상이변이나 자산가치 증가 등 홍수피해 잠재성은 높아졌으나, 기존의 치수대책은 제방 축조에 중점을 둔 소극적 방어개념으로서 급증하는 홍수량을 소통시키기에는 이미 한계에 다다른 상황이다. 계획홍수위를 높이고 이에 따라 제방을 높이는 것은 다른 측면으로 잠재적 홍수피해 위험도를 더욱 증가시키는 결과를 초래하기 때문이다. 근본적인 대책은 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 4대강살리기사업 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.

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

* 정회원 · 한국수자원공사 4대강사업본부 기술지원센터 선임위원 · E-mail : sung@kwater.or.kr

** 정회원 · 한국수자원공사 4대강사업본부 기술지원센터 센터장 · E-mail : hglee@kwater.or.kr

*** 한국수자원공사 4대강사업본부 본부장 · E-mail : chung@kwater.or.kr

Bayesian 모델링 기법의 근간을 이루며 $Y=f(X, \theta, \epsilon)$ 형태의 기본 방정식과 함께 다음 식과 같이 확률론적 모델링에 확장되어 이용되고 있다. Bayes 이론의 기본적인 함수형태는 식(1)과 같다.

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

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

우도함수 $p(Y|\underline{\theta})$ 는 모형 $Y=f(\cdot)$ 의 매개변수가 관측치(Y)를 모의하는데 얼마나 적합한지를 나타낸다. 따라서 우도함수는 매개변수의 사전분포를 신규 관측치와 함께 갱신하여 식(1)과 같이 사후분포의 결정에 이용된다. 식(1)의 분모인 $p(Y)$ 는 사전예측분포라 하며 $\underline{\theta}$ 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 $p(\underline{\theta}|Y)$ 의 사후분포로부터 매개변수를 샘플링하여 이를 추론함과 동시에 Y 의 사후예측분포를 결정할 수 있게 된다. 여기서 기술적으로 직면하는 문제점은 수학적으로 표현되지 않는 비정상 형태의 사후분포 $p(\underline{\theta}|Y)$ 로부터 매개변수를 표본추출하는 방법이다. 이 문제의 해결을 위해 MCMC라는 일종의 수치해석 기법이 최근 지대한 관심을 받고 있다. MCMC 기법은 $p(\underline{\theta}|Y)$ 의 근사 분포로부터 Monte Carlo 개념의 샘플링을 시도하고 Markov chain 기법으로 전후 샘플링에 대한 고리를 형성한다. MCMC 기법의 알고리즘은 다수 존재하나 Gibbs sampling 및 Metropolis-Hastings 알고리즘이 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. 다차원법에 대한 자세한 사항은 국토해양부(2008)의 내용을 참조하기 바란다.

2.2 월류위험도에 의한 홍수피해 산정 방안

기존에는 하천 치수사업의 편익 산정시 계획홍수위 이하의 홍수를 무피해로 가정하고 제방사업의 편익으로 산정하여 왔다. 이는 빈도해석에 의한 홍수위의 연초과확률이 특정 년의 최대수위가 목표수위(target stage)를 초과할 가능성을 나타내기 때문이다. 그러나 매개변수적(parametric) 통계기법은 표집된 자료의 양적 질적 문제와 모집단의 분포형 추정으로 인한 오차에 의해 불확실성을 내포하고 있다. 따라서 특정 하천구간에서 산정된 계획빈도 이하의 홍수위가 제방고를 초과할 수도, 반대로 계획빈도 이상의 홍수위가 초과하지 않을 수도 있다. 최근에는 실측 홍수위로부터 비매개변수적(non-parametric) 방법으로 월류위험도를 산정하여 홍수피해액 산정에 불확실성을 반영하고자 하는 연구가 수행된 바 있다(최승안 등, 2007; 박태선, 2009).

그러나 수리·수문모형으로 계획홍수위를 산정할 때에는 모형의 매개변수 불확실성이 홍수위에 미치는 영향

도 분석되어야 한다. 본 연구에서는 월류위험도 산정시 이러한 매개변수 불확실성을 고려하였다. 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.

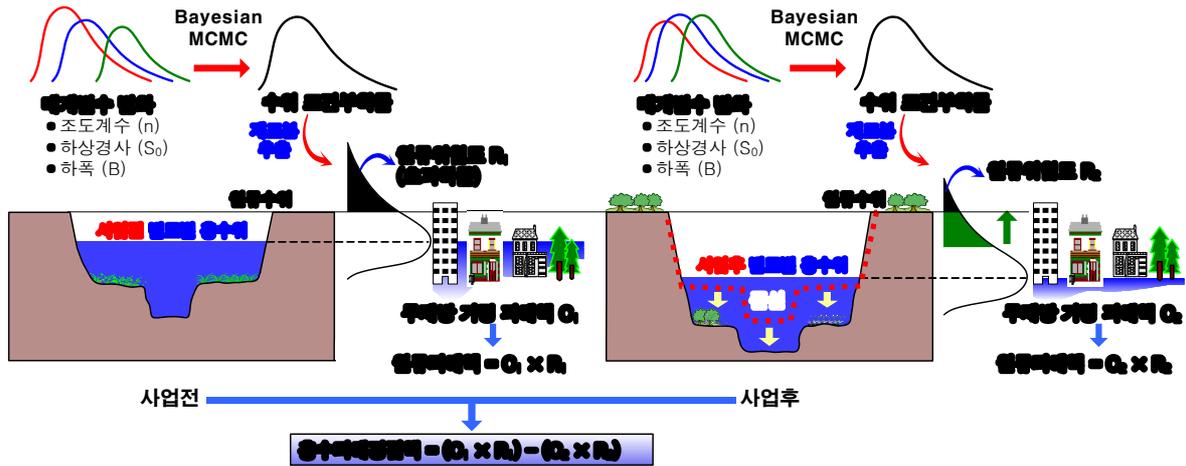


그림 1. Bayesian MCMC에 의한 월류위험도와 홍수피해경감액 산정 개념

월류위험도는 식(2)와 같이 Manning 공식을 적용하여 홍수위 산정의 불확실성을 평가할 수 있다.

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

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_p)를 관측치에 상응시켜 식(3)과 같이 구성하였다.

$$\epsilon = (h - h_p) \sim Normal(0, \sigma^2) \quad (3)$$

$$P(h|\theta) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(h_i - h_p)^2}{2\sigma^2}\right)$$

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

θ 의 사전분포는 균등분포(uniform distribution)로 지정하여 분석자의 판단을 최소화 하였다. 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 은 사업전, C_2 , R_2 는 사업후 피해액 및 월류위험도를 의미한다.

3. 월류위험도 산정

3.1 4대강사업 전·후의 월류위험도

제방은 하천을 따라 연속적이지만 본 연구는 특정 하도구간의 대표지점을 선정하여 산정된 월류위험도가 하도구간 전체를 대표하는 것으로 가정하였다. 대표지점 선정기준은 주요 지류의 합류부나 보 건설 전후에 위치한 수위표 지점으로서, 총 25개 수위표를 선정하였다. 전술한 바와 같이 월류위험도 산정을 위한 매개

변수는 Manning 조도계수, 하상경사, 하폭 등이며, 본 연구에서는 수계별 하천기본계획에서 자료를 취득하였다. 표 2는 사업 전·후 빈도별로 산정된 월류위험도 결과를 나타내고 있다.

표 2. 대상지점에 대한 월류위험도 산정 결과

수계	지점	500년	200년	150년	100년	80년	50년	
사업 전	한 강	양 평		0.3570	0.3297	0.2659	0.2929	0.2411
		이 포		0.2653	0.2339	0.1535	0.1741	0.1212
		여 주		0.2580	0.2316	0.1343	0.1844	0.1269
		삼 합		0.2360	0.2039	0.1274	0.1374	0.0940
	낙 동 강	구 포		0.3359		0.3070	0.2993	0.2766
		월 촌		0.4935		0.4020	0.4386	0.4123
		수 산		0.4934		0.3823	0.3900	0.3522
		진 동		0.4165		0.3133	0.3105	0.2651
		적포교		0.3189		0.2635	0.2116	0.1719
		고령교		0.3336		0.1880	0.2478	0.2082
		성 주		0.2895		0.2100	0.2076	0.1671
		왜 관		0.2038		0.1341	0.1394	0.1008
		구 미		0.1330		0.1231	0.0811	0.0544
		낙 동		0.1247		0.1387	0.0743	0.0575
	구 담		0.1038		0.1935	0.0614	0.0477	
	금 강	반조원	0.3651	0.3116		0.2336	0.2491	0.2140
		진 두	0.3303	0.2480		0.1853	0.1740	0.1389
		공 주	0.4163	0.2550		0.2620	0.2536	0.2094
		금 남	0.3325	0.2416		0.1633	0.1477	0.1078
	영 산 강	하구언	0.3775	0.3552		0.2527		0.2720
		사 포	0.4609	0.4024		0.3146		0.2910
		영산포	0.3628	0.4992		0.2136		0.1531
		본 동	0.3064	0.2148		0.1468		0.0939
		마 립	0.0810	0.0318		0.0137		0.0039
삼 지		0.0014	0.0001		0.0000		0.0000	
사업 후	한 강	양 평		0.3570	0.3297	0.2659	0.2929	0.2411
		이 포		0.2448	0.2016	0.1172	0.1384	0.0830
		여 주		0.1305	0.1088	0.0374	0.0668	0.0366
		삼 합		0.1260	0.0944	0.0454	0.0527	0.0282
	낙 동 강	구 포		0.2619		0.1999	0.1881	0.1674
		월 촌		0.3760		0.3234	0.3164	0.2779
		수 산		0.2575		0.1375	0.1829	0.1467
		진 동		0.2061		0.1778	0.1387	0.1193
		적포교		0.1822		0.1097	0.1227	0.0987
		고령교		0.2384		0.0955	0.1659	0.1258
		성 주		0.1979		0.1300	0.1315	0.0935
		왜 관		0.0952		0.0370	0.0444	0.0236
		구 미		0.0460		0.0520	0.0200	0.0118
		낙 동		0.0063		0.0270	0.0016	0.0002
	구 담		0.0236		0.0120	0.0122	0.0061	
	금 강	양 산		0.2504		0.3167	0.1374	0.0812
		화 성		0.5064		0.1561	0.3928	0.0891
		반조원	0.3249	0.2629		0.1969	0.2126	0.1786
		진 두	0.2319	0.1533		0.1910	0.0895	0.0605
	영 산 강	공 주	0.3395	0.2550		0.2078	0.1683	0.1250
		금 남	0.2402	0.1502		0.0933	0.0743	0.0461
		하구언	0.3677	0.3508		0.2527		0.2704
		사 포	0.4171	0.3583		0.2694		0.2486
		영산포	0.2303	0.1956		0.1044		0.0668
본 동		0.1534	0.0777		0.0446		0.0200	
삼 지	마 립	0.0186	0.0016		0.0007		0.0000	
	삼 지	0.0013	0.0000		0.0000		0.0000	

3.2 홍수피해경감편의 산정

일반적으로 연평균 홍수피해경감액은 빈도별 홍수피해경감액을 빈도의 역수인 초과확률의 구간별 증분에 곱하여 누적시키는 방식으로 조건부 기댓값을 취해 산정할 수 있다. 그러나 연평균 홍수피해경감액은 현재 시점의 화폐적 가치로 나타낸 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 전 해년도 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. 결론

본 연구에서는 계획홍수위 저하에 따른 홍수피해경감편의 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. 그러나 예측의 관점에서 강우-유출모형에 의해 계산된 계획홍수위는 자연적 불확실성 뿐 아니라 매개변수 불확실성을 고려해야 한다. 본 연구에서는 매개변수 불확실성을 고려한 Bayesian MCMC 방법을 이용하여 월류 위험도를 산정하였으며, 이를 통해 계획홍수위 저하에 따른 잠재적 홍수위험 감소 효과를 정량적으로 나타낼 수 있었다. 또한 이렇게 산정된 월류위험도는 빈도별 홍수피해액의 피해발생 확률로서도 적용될 수 있으며, 이는 물리적 침수구역 설정의 어려움에 따른 홍수피해액 과다산정 문제 해결의 대안으로서도 의미가 있다.

참 고 문 헌

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.