

평가인자 가중치에 대한 베이지안 추론과 민감도 분석을 통한 적정 하천설계빈도 결정

유재희* · 김지은** · 이진영*** · 박경운**** · 김태웅*****

Ryu, Jae Hee*, Kim, Ji Eun**, Lee, Jin-Young***, Park, Kyung-Woon****, Kim, Tae-Woong*****

Estimation of the Hydrological Design Frequency of Local Rivers Using Bayesian Inference and a Sensitivity Analysis of Evaluation Factors

ABSTRACT

In Korea, annual precipitation and its variability have gradually increased since modern meteorological observations began, and the risk of disasters has also been increasing due to significant regional variations and recent abnormal climate conditions. Given that damage from storms and floods mainly occurs around rivers, it is crucial to determine the appropriate design frequency for river-related projects. This study examined existing design practices used to determine hydrological design frequencies and suggested a new method to determine appropriate design frequencies. The study collected available data pertaining to seven evaluation factors, specifically the basin areas, shape parameters, channel slopes, stream orders, backwater effect reaches, extreme rainfall frequencies, and urbanized flood inundation areas for 413 local rivers in Chungcheongnam-do in Korea. The estimated weights for areas of extreme rainfall frequencies and urbanized flood inundation were found to be 18, having a great effect on determining the design frequency. Compared with the established design frequency in previous government reports, the estimated design frequency increased for 255 rivers and decreased for 158 rivers.

Key words : Bayesian inference, Sensitivity analysis, Design frequency, Evaluation factor, Weight

초 록

우리나라는 기상관측 이래 연평균 강수량과 변동성은 점진적으로 증가하는 추세이고, 지역 간 편차가 크다. 또한, 최근의 이상기후로 인하여 재해에 대한 위험도가 증가되고 있는 실정이다. 풍수해의 피해는 주로 하천주변에서 발생하기 때문에 하천기본계획을 수립하기 위해서는 우선적으로 적절한 설계빈도를 결정하는 과정이 반드시 필요하다. 본 연구에서는 설계빈도 결정에 대한 기존 방법론을 분석하여 문제점 및 개선 방향에 대해 제시하였다. 충청남도에 위치한 지방하천 중 자료구축이 가능한 하천인 413개소를 대상으로, 7개의 평가인자(유역면적, 형상계수, 하도경사, 수계차수, 배수영향 구간, 이상강우 발생빈도, 시가화 침수면적)를 선정하고, 베이지안 추론을 통해 가중치를 산정하였다. 그 결과, 이상강우 발생빈도 및 시가화 침수면적의 가중치가 각각 18로 가장 크게 산정되어, 하천 설계빈도 결정에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 이러한 가중치를 통해 설계빈도를 추정한 결과, 기수립 설계빈도보다 본 연구에서 추정된 설계빈도가 증가하는 하천은 255개이고 감소하는 하천은 158개로 나타났다.

검색어 : 베이지안 추론, 민감도 분석, 하천설계빈도, 평가인자, 가중치

* 한양대학교 대학원 건설환경시스템공학과 박사과정 (Hanyang University · hydroryu@hanmail.net)

** 정희원 · 한양대학교 대학원 건설환경시스템공학과 석박사과정 (Hanyang University · helloje2@hanyang.ac.kr)

*** 한국농어촌공사 통합물관리추진단 주임전임연구원 (Korea Rural Community Corporation · hydrojy@gmail.com)

**** 종신회원 · 한양대학교 대학원 건설환경시스템공학과 석박사과정 (Hanyang University · sienger@daum.net)

***** 종신회원 · 교신저자 · 한양대학교(ERICA) 건설환경공학과 교수 (Corresponding Author · Hanyang University · twkim72@hanyang.ac.kr)

Received January 5, 2022/ revised April 15, 2022/ accepted May 28, 2022

1. 서론

우리나라의 최근 10년 동안 풍수해(호우, 대설, 태풍) 피해액은 3,397,332백만원으로 전체 재해 피해액인 3,516,937백만원의 96.60%에 해당된다(MOIS, 2019). 이처럼 풍수해에 의한 피해가 다른 자연재해보다 큰 원인은 지속적인 토지이용 개발로 인한 불투수면적의 증가와 공간적 변동성이 큰 강수 특성 그리고 기후변화에 따른 극지성 집중호우의 증가 때문이다. 특히 연강수량은 최저 754 mm (1939년)에서 최고 1,756 mm (2003년)로서 변화폭이 크며, 대부분의 강수량은 홍수기(6~9월)에 편중되고(68%), 지역 및 유역별 강수량 편차가 심하여 홍수관리를 어렵게 한다(MOLIT, 2016). 또한 국토의 65%가 산악지형으로 대부분의 하천은 경사가 급하기 때문에 홍수시 일시적으로 유출이 발생하고, 이로 인해 풍수해 피해는 주로 하천주변에서 발생하고 있다. 따라서 하천기본계획을 적절하게 수립하면 토지이용의 변화와 기후변화에 따른 재해를 예방할 수 있다. 하천기본계획을 수립하기 위해서는 설계빈도를 결정하는 것이 중요하다. 설계빈도는 사업규모, 제원, 비용, 하천시설 필요여부 등 많은 부분을 결정할 수 있는 기준이 되며, 사업의 타당성에도 직결된다. 따라서, 하천기본계획을 수립하기 위해서는 우선적으로 적절한 설계빈도를 결정하는 과정이 반드시 필요하다.

우리나라의 하천 설계빈도는 1961년 이후부터 2000년 초반까지 대부분의 지방하천에 대해서 50년 빈도로 채택되었으나, 2004년 하천법의 개정에 따라 지방 1급, 2급 하천이 지방하천으로 통합되면서, 50~100년 빈도로 상향되었다. 하천의 계획규모는 유역별로 수립된 유역종합치수계획에 따라 결정되지만, 유역종합치수계획이 수립되어 있지 않은 유역의 경우에는 하류지역의 통수능 및 대상하천의 특성을 고려하여 결정하거나(MLTM, 2008), 하천의 중요도 및 하천등급에 따라 결정할 수 있다(MOLIT, 2019). 그러나, 하천의 중요도를 결정하는 방법은 다소 정량적이지 못하고 적용범위가 모호하여 주관적인 판단이 개입할 소지가 크다. 이는 하천의 특성을 반영하지 못하고 일률적인 설계빈도를 적용하여 하천사업의 효율성이 낮아지는 문제를 야기할 수 있다. 즉, 각종 지침에서 제시된 설계빈도의 기준은 하천 중요도(국가하천의 주요구간(A), 국가하천(B), 지방하천(C)) 및 지역특성(도시지역, 농경지지역, 산지지역)에 따라 설계빈도를 제시하고 있으나, 적용범위가 넓으며 명확한 평가기준이 수립되어 있지 않아 하천의 지형적, 치수적 특성 등을 반영하지 못하는 한계가 있다. 따라서, 하천의 특성, 제내지 현황 등을 고려한 하천의 설계빈도를 결정하는 방법의 개발이 필요한 실정이다.

충청남도의 경우, 제내지 현황, 유역특성, 하도특성 및 강우특성으로 이루어진 4개의 평가항목과 7개의 평가인자(시기화 침수면적,

유역면적, 형상계수, 하도경사, 수계치수, 배수영향구간 및 이상강우 발생빈도)를 결합하여 평가점수를 산정하고, 평가점수에 대한 적정 설계빈도 범위 및 홍수피해잠재능(Potential Flood Damage, PFD)을 이용하여 적정 설계빈도를 결정하는 지침을 개발하였다(Chungcheongnam-do, 2017). 이때 다양한 평가인자를 결합하기 위하여, 계층화 분석 방법(Analytic Hierarchy Process, AHP)을 활용하여 평가항목과 평가인자에 대한 가중치를 산정한다. 하지만, AHP 기법과 같은 설문조사에 의한 가중치 산정 방법은 평가자의 경험 및 능력에 많이 의존하기 때문에 평가자에 의해 결과가 주관적으로 결정되거나 왜곡될 수 있으며, 시간 및 비용 등이 많이 소요된다. AHP 기법에서의 설문조사에 의한 주관성을 배제하기 위하여 Ryu et al.(2018)은 베이스 이론을 적용하여 평가인자의 상대적 가중치를 산정하였으며, 전반적으로 설계빈도가 낮아지는 결과를 보인 바 있다.

위험도 및 취약성 평가에서 평가인자에 대한 가중치 산정시 주관적인 요소를 배제하기 위하여 적용되는 확률-통계적인 기법으로 산술평균 방법, 기중평균방법, 주성분 분석 등이 있다. Lee et al.(2015)은 지역의 수방능력 및 재해위험을 고려한 침수위험도를 결정하기 위하여 산술평균, 기중평균 및 주성분 분석을 적용하였다. 그러나 산술평균은 다른 특성을 가진 인자에 대한 동일한 가중치를 부여하여 인자의 특성을 적절히 반영하지 못하고, 기중평균은 여러 변수 사이에 다중공선성 문제가 발생하였다. 최근에는 엔트로피 방법과 베이지안 네트워크 방법이 평가인자의 가중치를 산정하는데 적용되고 있다. Chen et al.(2018)은 침수지역의 위험도를 판단하는 근거로 홍수재해지표(Flood Disaster Indicator)를 산정하였으며, 이때 엔트로피 가중치 방법을 적용하였다. Lee et al.(2018)은 강우, 유출, 지역 요인 등의 평가항목에 대하여 다기준의 사결정기법인 프로메티(PROMETHEE) 기법과 가중치 산정기법인 엔트로피 기법을 적용하여 도시 중소유역의 홍수위험도를 평가하였다. Joo et al.(2019)은 충청도 28개 시·군을 대상으로 통합홍수위험평가지수와 순현재 가치를 이용하여 치수 투자우선순위를 결정하였는데, 이때 AHP 기법, 총합고정척도법 및 엔트로피 기법을 베이지안 네트워크로 결합하여 산정한 통합 가중치를 사용하였다.

하천기본계획 등 하천 계획의 주요 기준이 되는 설계빈도의 결정은 현재 편익-비용비 방법, 하천중요도를 고려한 방법, 하천특성, 제내지 특성 및 강우특성을 이용한 방법 등이 있으나, 대부분의 방법이 주관성을 완전히 배제하지 못하거나, 통계적으로 적절한 인자를 선정하지 못하고 있는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 하천의 적정 설계빈도를 추정하기 위하여 Chungcheongnam-do(2017)와 Ryu et al.(2018)의 접근방법을 확장하여 베이지안 추론과 민감도 분석을 통해 설계빈도 평가항목의 가중치를 산정하는

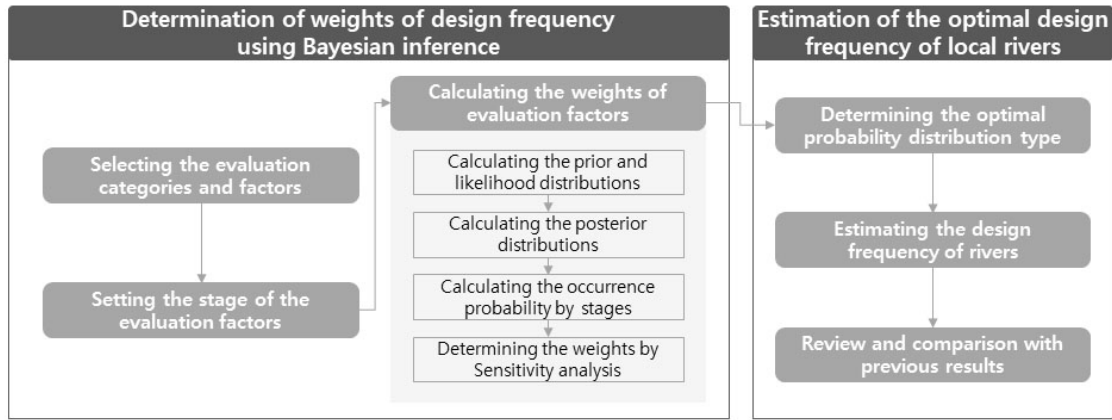


Fig. 1. Procedure of This Study

방안을 제시하였다. 본 연구에서의 적정 하천설계빈도 결정 과정은 Fig. 1과 같다.

2. 이론적 배경

2.1 베이زي안 추론

주어진 관측된 정보로부터 모수에 대한 어떠한 결론을 이끌어 내는 과정을 의미하는 통계적 추론에는 베이زي안 접근법과 고전적인 접근법으로 구분할 수 있다. 고전적인 접근법은 관측된 자료의 분포만을 고려하기 때문에 관측 자료의 영향을 많이 받는다. 베이زي안 접근법은 관측된 자료와 함께 모수에 대한 확률분포를 사용하기 때문에 표본이 작거나 이상치가 존재하는 등 자료가 불완전할 경우 과거의 경험 또는 선행연구의 결과 등을 통한 사전정보를 활용하여 정확도를 향상시킬 수 있다.

베이زي안 추론에서 모수 θ 는 고정된 값이 아닌 확률변수이다. 일반적으로 관측자료 y 에 대한 우도함수 $f(y|\theta)$ 와 사전분포 $p(\theta)$ 가 주어졌을 때, Eq. (1)과 같이 미지(unknown)의 모수 θ 의 조건부 확률인 사후분포 $p(\theta|y)$ 를 산정할 수 있다.

$$p(\theta|y) = \frac{p(y|\theta)p(\theta)}{p(y)} = \frac{p(y|\theta)p(\theta)}{\int p(y|\theta)p(\theta)d\theta} \quad (1)$$

여기서, $p(y|\theta)$ 는 모수 θ 가 주어졌을 때 관측자료의 조건부 확률분포이며, y 의 우도함수로 정의된다. $p(\theta)$ 는 θ 의 사전분포이며, θ 에 대한 과거 및 사전 정보로부터 유도할 수 있다. $p(y)$ 는 y 에 대한 주변분포이며 전확률정의에 의해 $p(y) = \int p(y|\theta)p(\theta)d\theta$ 이다.

베이زي안 추론 과정에서 사전분포는 관측값을 포함하지 않기

때문에 사전분포 선택에 있어 특정한 기준은 없으며, 모수에 대한 충분한 사전정보가 거의 없는 경우에는 무정보적 사전분포를 사용한다. 일반적으로 추정하고자 하는 모수의 분포에 대한 제약이 없는 제프리스(Jeffreys) 사전분포가 많이 사용되고 있다(Yoo and Kim, 2020). 관측자료에 대한 확률밀도함수의 평균을 이용하면, 제프리스 사전분포는 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$p(\theta) \propto 1/\sigma \quad (2)$$

여기서, σ 는 관측자료의 표준편차이다.

2.2 민감도 분석을 통한 가중치 산정

본 연구에서 제안하는 베이زي안 추론과 민감도 분석을 통한 적정 설계빈도를 결정하기 위한 평가인자의 가중치를 산정하는 절차는 다음과 같다. 먼저, 각 평가인자들을 정규분포로 가정하고, 최우추정법을 이용하여 모수인 평균(μ) 및 표준편차(σ)를 추정한다. 즉, 관측값 y 에 대한 정규분포함수인 $p(y|\theta)$ 가 우도함수가 된다. 사전분포는 2.1절에서 설명한 바와 같이 제프리스 사전분포를 적용한다. 따라서, 우도함수와 사전분포를 결합하여 평가인자에 대한 사후분포를 추정한다. 각 평가인자에 대한 사후분포의 누적분포함수를 통해 세부 구간에 따른 발생확률(Occurrence Probability, OP)을 산정한다. 평가인자의 세부 구간은 최댓값 및 최솟값을 통해 적절한 구간으로 설정할 수 있다. 이러한 구간은 설계빈도의 값을 낮추는 안전한 구간인 첫 번째 단계부터, 설계빈도의 값을 높이는 위험한 구간인 마지막 단계(10번째, 5번째 또는 2번째)로 구분된다. 이 중 첫 번째 단계인 가장 안전한 단계를 기준시나리오(Scenario 1, S1)라고 하며, 해당 구간의 발생확률과 가장 발생확률이 큰 값과의 민감도 분석을 통해 평가인자의 가중치를 산정한다.

민감도 분석이란 모형을 구성하고 나서 하나의 인자 값을 변경하

면서 평가 값이 얼마나 변하는지를 분석하는 것이다. 이때 큰 변화를 일으키는 인자의 기여도가 높다고 판단한다. 본 연구에서는 각 평가인자마다 가장 안전한 단계의 발생확률과 가장 많이 발생하는 단계의 발생확률의 비를 비교하여 민감도 분석을 실시하고 이를 통해 기여도가 높은 평가인자에 가중치를 크게 부여하는 방법을 적용하였다. 이는 가장 안전한 단계와 가장 많이 발생하는 단계와의 비율을 통해 해당 평가인자가 최종 점수에서 얼마나 기여하는지를 판단하기 위한 것이다. 만약, 가장 안전한 단계가 발생확률이 제일 클 경우는 가장 안전한 단계와 발생확률이 제일 작은 경우와의 비율을 산정하였다. 즉, 먼저 베이지안 추론을 통해 업데이트된 평가인자에 대한 확률분포를 적정 구간을 나누어 단계별 확률 값을 산정하고, 민감도 분석을 통해 가중치를 부여하였다. 여기서, 발생확률 비율(Occurrence Probability Ratio, OPR)은 Eq. (3)을 적용하여 산정하였다.

$$OPR = \begin{cases} \frac{|S1 - OP_{max}|}{OP_{max}}, & S1 \neq OP_{max} \\ \frac{|S1 - OP_{min}|}{S1}, & S1 = OP_{max} \end{cases} \quad (3)$$

모든 평가인자의 비율이 산정되면 Eq. (4)와 같이 총 비율에서 해당 비율을 나누어 평가인자의 가중치(Weight_i)를 산정하였다. 평가인자의 최종 가중치를 각 평가인자별 구간 수를 고려하여 등간격으로 나누어 평가인자 구간별 가중치를 산정하였다.

$$Weight_i = \frac{OPR_i}{\sum_{i=1}^n OPR_i} \quad (4)$$

여기서, *i*는 평가인자 번호를 의미하며, *n*은 총 평가인자 수이다.

3. 적용 결과

3.1 대상 지역

본 연구에서 제안한 베이지안 추론을 활용한 적정 설계빈도 산정 방법을 충청남도의 지방하천에 적용하였다. 충청남도의 전체 면적은 8,204 km²으로 우리나라 면적 99,617 km²의 약 8.6 %를 차지하며, 행정구역으로는 천안시, 공주시, 보령시 등 15개 시·군으로 구성되어 있다. Fig. 2는 충청남도의 행정구역(시·군) 현황이며, 본 연구에서는 지방하천의 시점과 종점이 충청남도에서 발원·합류·바다로 유출되는 하천에 대하여 수집하고 적정 설계빈도를 추정하였다.

한국하천일람(MOLIT, 2018)에 따르면, 충청남도에는 492개의 지방하천이 있으며, 국가하천으로 유입하거나 서해, 호 및 만으로 유출되는 하천은 157개이다. 국가하천으로 유입되는 유역은 99개(63.06 %)이며, 서해로 유출되는 하천은 28개(17.83 %), 호 및 만으로 유출되는 하천은 30개(19.11 %)이다. 또한, 충청남도의 80년 빈도 이상인 하천이 252개(65.5 %), 50년 빈도 이하인 하천이 133개(34.5 %)이다.



Fig. 2. Map of The Study Areas

3.2 지방하천 설계빈도 추정을 위한 평가인자 도출

「충청남도 지방하천 적정설계빈도 결정방안」(Chungcheongnam-do, 2017)에서는 지방하천의 설계빈도를 결정하기 위하여 7개의 평가인자를 도출하고(Table 1), 평가인자의 가중치는 AHP 기법을 통해 산정하였으며, 가중치를 적용한 점수의 총합과 홍수피해잠재능(PFD)을 고려하여 적정 설계빈도를 추정할 바 있다. 그러나, Chungcheongnam-do(2017)의 방법은 평가인자의 가중치가 AHP 분석을 위해 선정된 전문가 집단의 개인적 선호에 따라 결정될 수 있고, 기후변화 시나리오를 고려한 이상강우의 특성은 평균치를 활용하여 미래의 강우 변화량만을 적용하였으며, 미래에 변화가 발생할 시기와 침수면적과 PFD는 현재 기준으로 설정되어 있어 미래 변화량을 적절히 반영하지 못하는 문제점이 있다.

따라서, 본 연구에서는 Chungcheongnam-do(2017)의 평가인자를 준용하되, 문제점을 보완하고 통계학적 객관성을 확보하기 위해 베이지안 추론을 적용하였으며, PFD 방법을 사용하지 않고 적정 확률분포형을 통해 도출된 빈도값을 사용하여 기수립 빈도와 비교·검토하였다.

3.3 베이지안 추론에 의한 가중치 산정

베이즈 이론을 활용한 연구에서 평가인자들을 확률분포에 적합할 때 일반적으로 정규분포를 활용하므로, 본 연구에서도 각 평가인자를 정규분포에 적합하여 확률분포화 하였다. 정규분포의 매개변

수는 Table 2에 나타내었으며, 최우도법을 적용하여 우도함수를 결정하였다.

사전분포로는 제프리스 사전분포를 채택하였으며, Eq. (2)와 같이 주어진 자료의 표준편차를 활용하였다. 사전분포와 우도함수를 Eq. (1)에 적용하여 사전분포에 의해 갱신된 사후확률분포를 추정하였다. 예를 들어, Fig. 3의 검정색 실선은 베이지안 추론을 적용하기 전인 하도경사 원자료의 우도함수 정규분포이며, 파란색 점선은 사전분포와 결합하여 베이지안 추론 과정을 통해서 추정된 사후확률분포를 나타낸 것이다.

민감도 분석을 적용한 구간별 가중치를 산정하기 위하여 충청남도 지방하천에 대한 유역 및 하천(하도특성), 강우 특성인자들을 적절한 단계로 등분할하였다. 유역면적과 형상계수, 하도경사, 시가화 침수면적, 이상강우 발생빈도는 총 10구간으로 등분할하였으며, 수계차수와 배수영향구간은 각각 5개 구간, 2개 구간으로 등분할하였다. 추정된 평가인자별 사후확률분포의 면적을 구간별로 계산하여 구간에 따른 발생확률을 산정하였다. 구간에 따른 발생확률은 Table 3과 같다. Table 3에서 진하게 표시된 구간이 각 평가인자에서 가장 안전한 구간이며, 음영이 들어간 구간이 최대 또는 최소 발생확률을 갖는 구간이다. 각 구간별 발생확률을 Eq. (3)에 적용하여 발생확률 비율을 산정하였다. 예를 들어, 하도경사의 가장 안전한 단계인 1단계의 발생확률은 0.07이며, 최대 발생확률은 0.18인 3번째 단계에 해당된다. 따라서 하도경사의 발생확률 비율은

Table 1. Category and Indicators

Category	Indicator
1. Basin characteristics	① Basin area (km ²)
	② Shape parameter
2. River characteristics	③ Channel slope (%)
	④ Stream order
	⑤ Backwater effect reach
3. Extreme floods and inundation characteristics	⑥ Extreme rainfall frequency
	⑦ Urbanized flood inundation area (m ²)

Table 2. Parameters of Normal Distributions for Indicators

Category	Indicator	Parameter of normal distribution	
		Mean (μ)	Standard deviation (σ)
Basin characteristics	Basin area (km ²)	22.52	41.51
	Shape parameter	0.31	0.12
River characteristics	Channel slope (%)	0.87	0.73
	Stream order	1.76	1.01
	Backwater effect reach	0.29	0.45
Extreme floods and inundation characteristics	Extreme rainfall frequency	875.94	82.72
	Urbanized flood inundation area (km ²)	107801.31	335821.81

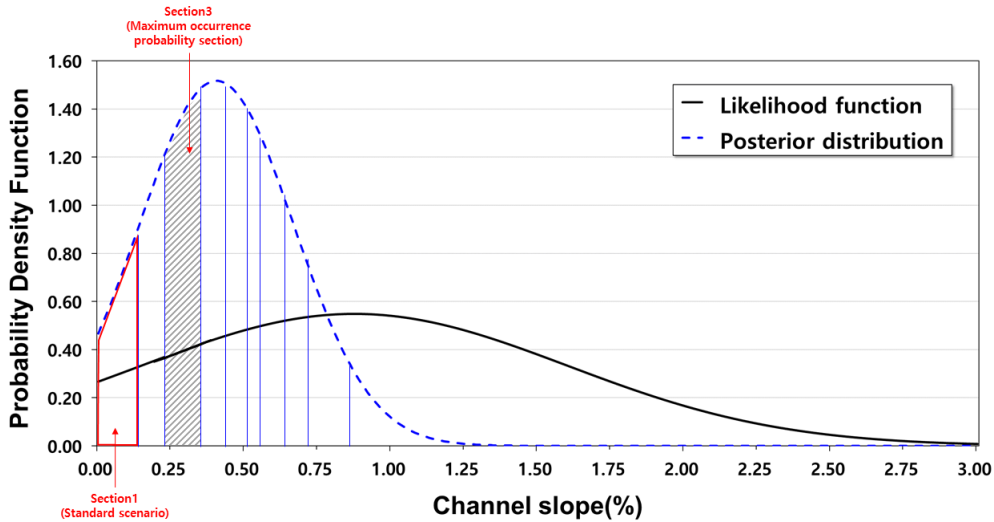


Fig. 3. Likelihood Function and Posterior Distribution of Channel Slopes (Ryu et al., 2022)

Table 3. Occurrence Probability of Indicators Using Bayesian Inference

Category	Indicator	Total score	Occurrence probability									
			0~2.59	2.59~3.88	3.88~4.97	4.97~6.08	6.08~8.31	8.31~10.43	10.43~14.20	14.20~21.76	21.76~42.34	42.34 and more
Basin characteristics	Basin area (km ²)		0~2.59	2.59~3.88	3.88~4.97	4.97~6.08	6.08~8.31	8.31~10.43	10.43~14.20	14.20~21.76	21.76~42.34	42.34 and more
		0.08	0.45	0.03	0.01	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.29
	Shape parameter		0~0.17	0.17~0.20	0.20~0.23	0.23~0.26	0.26~0.28	0.28~0.32	0.32~0.36	0.36~0.41	0.41~0.48	0.48 and more
		0.07	0.14	0.18	0.14	0.08	0.10	0.05	0.07	0.01	0.15	
River characteristics	Channel slope (%)		1.80 and more	1.36~1.80	1.08~1.36	0.86~1.08	0.69~0.86	0.54~0.69	0.41~0.54	0.28~0.41	0.18~0.28	0~0.18
		0.16	0.03	0.04	0.07	0.10	0.10	0.10	0.12	0.13	0.14	
	Stream order		4 and more	3			2		1		0 (main stream)	
		0.18	0.00			0.26		0.52		0.05		
	Backwater effect reach		0 (No backwater effect)					1 (Backwater effect)				
	0.74						0.26					
Extreme floods and inundation characteristics	Extreme rainfall frequency		0~621	621~664	665~709	710~753	754~797	798~841	842~885	886~930	931~974	975 and more
		0.56	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.35	
	Urbanized flood inundation area (m ²)		0~1,234	1,234~3,086	3,086~6,159	6,159~11,886	11,886~21,332	21,332~33,054	33,054~50,610	50,610~97,017	97,017~1201,494	201,494 and more
		0.00	0.00	0.00	0.03	0.08	0.28	0.12	0.21	0.10	0.19	

0.82가 된다.

이와 같이 모든 평가인자들의 발생확률 비율을 모두 계산한 다음, 총 합에서 각 평가인자의 비율을 계산하여 산정한 최종 가중치 결과는 유역면적은 15점, 형상계수는 11점으로 유역특성은 26점으로 산정되었다(Table 4). 하천(하도)특성은 전체 38점으로 하도경사 15점, 수계차수 12점, 배수영향구간 11점으로 산정되었다. 이상

강우 및 침수특성인자는 이상강우 발생빈도 18점, 시가화 침수면적은 18점으로 산정되었다. 즉, 유역면적이 42.34 km² 이상이면 15점이며, 하도경사가 0.18 ~ 0.28 % 내에 해당하면 13.5점이다. 산정된 각 평가인자의 가중치는 합으로 산정되어 최종 점수를 산정하게 된다. 최종적으로 베이지안 추론과 민감도 분석에 의한 가중치 산정결과를 정리하면 Table 5와 같다.

Table 4. Weights of Indicators Using Bayesian Inference and a Sensitivity Analysis

Category	Indicator	Total score	Occurrence probability									
			0~2.59	2.59~3.88	3.88~4.97	4.97~6.08	6.08~8.31	8.31~10.43	10.43~14.20	14.20~21.76	21.76~42.34	42.34 and more
Basin characteristics	Basin area (km ²)	15	0~2.59	2.59~3.88	3.88~4.97	4.97~6.08	6.08~8.31	8.31~10.43	10.43~14.20	14.20~21.76	21.76~42.34	42.34 and more
			1.5	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5	15.0
	Shape parameter	11	0~0.17	0.17~0.20	0.20~0.23	0.23~0.26	0.26~0.28	0.28~0.32	0.32~0.36	0.36~0.41	0.41~0.48	0.48 and more
			1.1	2.2	3.3	4.4	5.5	6.6	7.7	8.8	9.9	11.0
River characteristics	Channel slope (%)	15	1.80 and more	1.36~1.80	1.08~1.36	0.86~1.08	0.69~0.86	0.54~0.69	0.41~0.54	0.28~0.41	0.18~0.28	0~0.18
			1.5	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5	15.0
	Stream order	12	4 and more	3			2		1		0 (main stream)	
			2.4	4.8			7.2		9.6		12.0	
Backwater effect reach	11	0 (No backwater effect)					1 (Backwater effect)					
		5.5					11.0					
Extreme floods and inundation characteristics	Extreme rainfall frequency	18	0~621	621~664	665~709	710~753	754~797	798~841	842~885	886~930	931~974	975 and more
			1.8	3.6	5.4	7.2	9.0	10.8	12.6	14.4	16.2	18.0
	Urbanized flood inundation area (m ²)	18	0~1,234	1,234~3,086	3,086~6,159	6,159~11,886	11,886~21,332	21,332~33,054	33,054~50,610	50,610~97,017	97,017~1201,494	201,494 and more
			1.8	3.6	5.4	7.2	9.0	10.8	12.6	14.4	16.2	18.0

Table 5. Ratio of the Occurrence Probability and Weights for Indicators (Ryu et al., 2022)

Category	Indicator	Ratio of occurrence probability	Score
Basin characteristics	Basin area (km ²)	0.81	15
	Shape parameter	0.59	11
River characteristics	Channel slope (%)	0.82	15
	Stream order	0.66	12
	Backwater effect reach	0.64	11
Extreme floods and inundation characteristics	Extreme rainfall frequency	1.00	18
	Urbanized flood inundation area (m ²)	1.00	18

3.4 적정 설계빈도 추정

Chungcheongnam-do(2017)에서는 충청남도 지방하천 중 자료분석이 가능한 413개 하천에 대하여 평가표를 작성하고, 평가점수가 정규분포를 따른다고 가정하였으나, 이는 가장 기본적인 확률분포형으로 실제 자료계열은 다른 확률분포형일 수 있다. 본 연구에서는 확률론적 수문분석에서 많이 사용되는 18개의 확률분포형에 대해서, 일반적으로 적용되는 3가지 매개변수 추정법(최우도법, 모멘트법, 확률가중모멘트법)으로 매개변수를 추정하고, 5가지 적합도 검정(Chi-Square (χ^2) 검정, Kolmogorov-Smirnov (K-S) 검정, Probability Plot Correlation Coefficient (PPCC) 검정, Cramer von Mises 검정, Modified Anderson-Darling Test

(MADT))을 실시하여, 4가지 이상 적합도 검정방법을 통과한 GEV 확률분포형을 채택하였다.

충청남도 413개 지방하천에 대하여 평가표를 작성하여 평가점수를 산정한 후, 산정된 점수를 GEV 분포에 적용하여 누기분포함수의 99%가 일반적인 지방하천의 설계빈도인 50년 ~ 100년 빈도에 분포한다고 가정하였다. 충청남도의 지방하천 중 200년 빈도에 해당하는 하천은 없기 때문에 이러한 가정은 타당한 것으로 판단된다. 즉, 누기분포함수의 0.05와 99.5에 해당하는 평가점수를 도시하고(Fig. 4), 각각 30년, 100년 빈도로 환산하였다. 또한 50(%)에 해당하는 평가점수는 80년 빈도로 가정하여 충청남도 413개 지방하천에 대한 적정 설계빈도를 추정하였다(Table 6).

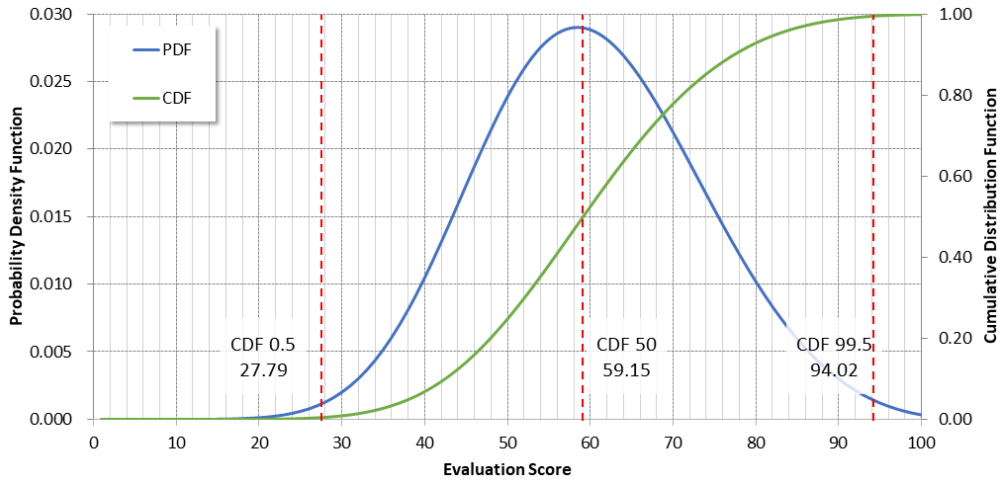


Fig. 4. Probability Distribution for the Design Frequencies (GEV Distribution)

본 연구에서 누가분포함수에서 추정된 각 지방하천의 설계빈도 추정 결과, 기수립 지방하천의 설계빈도와 비교하여 증가하는 하천은 225개, 감소하는 하천 158개로 분석되었다. Chungcheongnam-do (2017)을 살펴보면, 평가점수 구간별 분류 결과 지방하천의 설계빈도가 증가하는 하천이 97개, 감소하는 하천이 141개, 동일한 하천이 144개이다.

이러한 결과의 차이는 Chungcheongnam-do(2017)은 AHP를 활용하여 가중치를 산정한 후 정규분포의 누가분포함수의 결과를 범위로 산정하여 30년, 50년, 80년, 100년, 200년 빈도로 추정하였고, 평가점수 외에 PDF를 통해 해당 설계빈도로 선정하였기 때문이다. 즉, 누가분포함수의 결과가 50년 ~ 80년 빈도의 점수로 추정되었을 때, PDF의 결과에 따라 해당하천이 50년 또는 80년 빈도의 설계빈도로 추정되어 실제 평가항목의 점수는 현재 설계빈도보다 높은 점수이지만, “동일” 또는 “감소”하는 하천의 수가 많아진 것이다.

3.5 기수립 설계빈도의 비교검토

충청남도의 기수립 지방하천 중 자료의 구축이 가능하고 평가가 가능한 413개 하천에 대하여 본 연구의 추정 설계빈도와 비교 검토하였다. 현재 충청남도의 지방하천의 설계빈도는 30년 빈도(5개), 50년 빈도(127개), 80년 빈도(265개), 100년 빈도(16개)로 분포되어 있다(Table 7). 또한 Chungcheongnam-do(2017)에서 추정한 지방하천 설계빈도에 해당하는 하천수는 50년 빈도는 181개, 80년 빈도는 185개, 100년 빈도는 16개이다.

Table 8을 살펴보면, 충청남도의 지방하천 설계빈도가 상향되는 것으로 분석되었다. 범위로 보면 30년 ~ 50년 빈도로 추정된 하천은 1개이고, 50년 ~ 80년 빈도로 추정된 하천의 수는 195개이고, 80년 ~ 100년 빈도로 추정된 하천은 213개이며, 100년 빈도 이상으

Table 6. Section of the Design Frequency Using the GEV Distribution

Range (%)	0.00	27.79	59.15	94.02	100.00
Frequency (yr)	30	50	80	100	200

Table 7. Number of Local Rivers Corresponding to the Design Frequency

Frequency	30	50	80	100	200	Total
Current design frequency	5	127	265	16	-	413
Chungcheongnam-do(2017) design frequency*	-	181	185	16	-	382

* Thirty-one rivers could not be reviewed because they are not listed in the records of the MOLIT(2018).

Table 8. Number of Local Rivers Corresponding to the Design Frequency in This Study

Frequency	30~49	50~79	80~99	100~200	200 and more	Total
Number	1	195	213	4	-	413

로 추정된 하천은 4개이다. 100년 빈도 이상으로 추정된 4개의 하천은 모두 99.95년 빈도에서 반올림을 한 것이며, 100년 빈도를 초과하는 하천은 없는 것으로 나타났다. 본 연구 분석 결과 평균적으로 기수립 설계빈도보다 약 (+)7.62년 상향되었다.

본 연구의 결과 중 상향되는 하천 중 삼교천의 경우 현재 50년 빈도로 수립되고 있으나, 본 연구의 결과는 약 99.46년 빈도로 추정되었다. 이러한 이유는 본류에 해당하며 하류에 침수가 되는 시가지 지역이 매우 넓게 분포하여 시가지 침수면적이 만점(18점)에 해당하는 ‘201,494 m² 이상’ 보다 2배 이상 큰 5,066,929 m²로 평가점수가 매우 높게 나타난 경우이다.

하향되는 하천 중 남창천의 경우 유역면적이 1.86 km²인 매우 작은 하천이지만, 하천설계빈도는 80년 빈도로 수립되고 있다.

남창천의 시가화 침수면적은 2,043 km²이며 수계차수는 3차이다. 기수립 대비하여 매우 저평가 되어 50.84년 빈도로 추정되었다.

기수립 설계빈도와 선행연구(Chungcheongnam-do, 2017)보다 본 연구의 결과가 고빈도로 추정되었다. 본 연구의 결과가 평가항목에 대한 통계학적 추론을 통해 가중치를 산정하여 정량적인 평가를 수행하였으며, 적정 설계빈도의 범위가 아닌 평가표로 도출된 빈도이기 때문인 것으로 판단된다.

Chungcheongnam-do(2017)에서 검토한 2015년 이후 기본계획이 수립된 지방하천 중 30개 지방하천에 대하여 본 연구의 결과와 비교 검토하였다. 추정 설계빈도가 증가하는 하천은 20개 하천이고 감소하는 하천은 10개 하천이다. 평균적으로 약 5.83년 상향 조정되는 것으로 분석되었다. Chungcheongnam-do(2017)에서는 감소(5개), 증가(5개), 동일(20개) 하천으로 분석하였다. 적정 설계빈도의 범위로 산정하였기 때문에 평가점수만을 비교하면 감소하는 하천은 8개 하천이며, 증가하는 하천은 22개 하천인 것으로 분석되었다.

따라서, 본 연구의 결과에서 추정된 지방하천의 적정 하천설계빈도의 결과는 선행된 연구와 마찬가지로 기존의 하천설계빈도보다 높게 산정되어 전반적으로 상향되는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

충청남도의 지방하천은 492개로 이 중 기본계획이 수립된 하천은 416개이다. 현재 충청남도의 지방하천 설계빈도를 살펴보면, 30년 빈도 5개 하천, 50년 빈도 128개 하천, 80년 빈도 236개 하천, 100년 빈도 16개 하천으로 약 61.3 % 하천이 80년 빈도로 수립되었다.

본 연구의 적정 설계빈도를 추정하기 위하여 도출한 평가항목 및 평가인자는 Chungcheongnam-do(2017)을 준용하고 보완하여 도출하였다. 특히, 기 수행된 연구에서는 계층화분석기법(AHP)을 통해 가중치를 산정하고 홍수피해잠재능(PFD)를 활용하여 적정 설계빈도를 추정하였지만, AHP는 설문 집단의 주관성 문제를 가지고 있으며, PFD는 미래의 추정치를 산정하기 어렵다는 문제를 가지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 통계적 객관성을 확보하기 위해 베이지안 추론을 활용하여 가중치를 산정하였으며, 이를 기수립 설계빈도, Chungcheongnam-do(2017)의 결과와 비교하여 적절성을 평가하였다.

가중치 산정결과 유역특성 평가항목(26점)의 유역면적은 15점, 형상계수는 11점이며 하천하도특성 평가항목(38점)의 하도경사는 15점, 수계차수는 12점, 배수영향구간은 11점이고, 이상강우 및 침수특성 평가항목(36점)의 이상강우 발생빈도는 18점, 시가화 침수면적은 18점으로 산정되었다.

이러한 결과는 유역특성 20점, 하천하도특성 20점, 시가화 침수

면적 40점, 이상강우 발생빈도 20점으로 산정한 Chungcheongnam-do (2017)과 다소 차이가 있지만, 상대적으로 본 연구의 결과가 하천하도특성은 더 크게 가중치를 부여하고 시가화 침수면적은 더 작게 부여한 결과이다. 즉, 통계적 기법을 적용하였을 때, 충청남도의 하천의 설계빈도 결정시 시가화 침수면적에 대한 범위보다 하천 자체의 특성(하도경사, 수계차수, 배수영향 구간)의 영향이 크다는 것을 반증하는 것으로 볼 수 있다.

충청남도 413개의 지방하천에 대한 설계빈도 추정결과, 기수립 설계빈도보다 증가하는 하천이 255개이고 감소하는 하천이 158개이다. 이러한 결과는 평가구간을 산정하고 PFD를 통해 적정 설계빈도를 산정한 Chungcheongnam-do(2017)와 비교하여 상향된 결과이다. 또한 2015년 이후 하천기본계획이 수립된 하천 중 30개 하천을 대상으로 비교검토를 수행한 결과에 따르면, 본 연구에서 증가하는 하천은 20개이며 감소하는 하천은 10개인 것으로 분석되었다. Chungcheongnam-do(2017)에서는 설계빈도의 감소 5개, 증가 5개, 동일 20개로 분석되었지만, PFD를 제외한 설계빈도의 증감은 증가(22개), 감소(8개)로 본 연구의 결과와 유사한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 행정안전부 극한재난대응기반기술개발사업(2020-MOIS33-006)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Chen, Z. M., Yeh, Y. L. and Chen, T. C. (2018). "Assessment of a regional flood disaster indicator via an entropy weighting method." *Natural Hazards Review*, Vol. 19, No. 2, 05018002.
- Chungcheongnam-do (2017). *Determination of the optimal return period for river design in Chungcheongnam-do* (in Korean).
- Joo, H. J., Lee, T. W., You, Y. H., Wang, W. J., Kim, S. J. and Kim, H. S. (2019). "Determination of investment priority for flood control using flood risk and economic assessments." *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, KSHM, Vol. 19, No. 6, pp. 291-301 (in Korean).
- Lee, E. H., Choi, H. S. and Kim, J. H. (2015). "Determination of flood risk considering flood control ability and urban environment risk." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 48, No. 9, pp. 757-768 (in Korean).
- Lee, J. H., Jun, H. D., Choi, J. W. and Park, J. B. (2018). "Evaluation of urban small watershed relative flood risk using multi criteria decision making method." *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, KSHM, Vol. 18, No. 2, pp. 431-438 (in Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2016). *Comprehensive water resources plan* (in Korean).

- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2018). *List of rivers in Korea* (in Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2019). *River design standards and commentary* (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM) (2008). *Guideline for basinwide flood mitigation plan* (in Korean).
- Ministry of the Interior and Safety (MOIS) (2019). *Disaster annual report* (in Korean).
- Ryu, J. H., Kim, J. E., Lee, J. Y., Kwon, H. H. and Kim, T. W. (2022). "Estimating optimal design frequency and future hydrological risk in local river basins according to RCP scenarios." *Water*, Vol. 14, No. 6, 945. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14060945>.
- Ryu, J. H., Lee, J. Y., Kim, J. E. and Kim, T. W. (2018). "Determination of the optimal return period for river design using Bayes theory." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 38, No. 6, pp. 793-800 (in Korean).
- Yoo, S. W. and Kim, I. G. (2020). "A study on the estimation of launch success probability for space launch vehicles using Bayesian method." *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 48, No. 7, pp. 537-546 (in Korean).