

베이지 이론을 활용한 적정 하천설계빈도 결정

류재희* · 이진영** · 김지은*** · 김태웅****

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

Determination of the Optimal Return Period for River Design using Bayes Theory

ABSTRACT

It is necessary to determine an optimal design frequency for establishing stable flood control against frequent flood disasters. Depending on the importance of river and regional characteristics, design return periods are suggested from at least 50 years up to 200 years for river design. However, due to the wide range of applications, it is not desirable to reflect the geographical and flood control characteristics of river. In this study, Bayes theory was applied to seven evaluation factors to determine the optimal design return period of rivers in Chungcheongnam-do; urbanization flooded area, watershed area, basin coefficient, slope, water system and stream order, range of backwater effect, abnormal rainfall occurrence frequency. The potential flood damage (PFD) capacity was estimated considering climate change and the appropriate design return period was determined by analyzing the capacity of each district. We compared the design return periods of 382 rivers in Chungcheongnam-do with the existing design return periods. The number of rivers that were upgraded from the existing return period were 65, which have relatively large flooding areas and have large PFDs. Whereas, the number of rivers that were downgraded were 169.

Key words : River design frequency, Bayes theory, River, Potential flood damage

초 록

본 연구는 최근 빈번히 발생하는 홍수재해에 대비하고 안정적인 치수대책 수립을 위하여 공학적 판단에 근거한 하천의 적정 설계빈도 결정방안을 제시하였다. 지방하천의 설계빈도는 하천의 중요도 및 지역특성에 따라 최소 50년부터 최대 200년까지 설정되고 있으나, 적용범위가 넓어 하천의 지형적, 치수적 특성을 제대로 반영하지 못하는 실정이다. 본 연구에서는 지방하천의 적정 설계빈도를 결정하기 위하여 7개의 평가인자(시가화 침수면적, 유역면적, 형상계수, 하도경사, 수계 및 하천차수, 배수영향구간, 이상강우 발생빈도)에 대하여 베이지 이론을 적용하여 가중치를 산정하였다. 또한, 기후변화를 고려한 홍수피해잠재능을 산정하였고, 시군구별 잠재능을 구분하여 적정 설계빈도를 결정하였다. 충청남도 382개 지방하천에 대하여 현행 설계빈도의 적정성을 평가하였다. 382개의 현행 하천설계빈도보다 상향되는 하천은 65개 하천으로 상대적으로 시가화 침수면적이 크게 산정되고 홍수피해잠재능이 큰 지역의 하천이며, 하향되는 하천은 169개로 분석되었다.

검색어 : 하천설계빈도, 베이지 이론, 지방하천, 홍수피해잠재능

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

** 정회원 · 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사수료 (Hanyang University · hydrojy@hanyang.ac.kr)

*** 한양대학교 대학원 건설환경시스템공학과 석박통합과정 (Hanyang University · helloje2@nate.com)

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

Received September 6, 2018/ revised September 27, 2018/ accepted October 12, 2018

1. 서론

우리나라의 연평균 강수량은 약 1,300mm로 세계 평균 강수량의 약 1.3배이지만 연강수량의 약 70%가 여름에 집중되어 계절적 변동 폭이 매우 크다. 또한 전 국토의 약 64% 이상이 산지인 지형적 특성으로 인해 하천은 유로연장이 짧고 경사가 급하고 하천의 유출량은 단기간에 집중적으로 증가한다. 최근 들어서는 이상강우 및 국지성 집중호우를 동반한 돌발 홍수 등의 재해가 자주 발생하고 있으며, 이로 인해 많은 인명과 재산피해가 증가하고 있다(Kim, 2018).

기후변화에 따른 기상이변 등으로 인해 강우강도의 세기와 집중호우의 발생빈도가 증가하고 있는 최근의 경향을 보면 홍수피해 저감을 위한 대책마련이 필요하다(MOLIT, 2008a). 그러나 여러 가지 구조물적 및 비구조물적 홍수피해 저감 대책들이 제안되고 있으나, 현실적인 한계가 있으므로, 하천의 설계빈도를 보완하고 치수 안전성을 확보할 필요가 있다.

미국의 연방정부와 지방정부는 대부분 100년 빈도의 홍수를 대상으로 하천설계를 하고 있으며, 국가홍수보험제도(National Flood Insurance Program, NFIP)를 운영하여 강제적으로 보험계약을 체결하고 있다. 특히 재산과 인명피해를 많이 볼 수 있는 시설물들에 대해서는 표준설계홍수(Standard Project Flood, SPF)와 500년 빈도 홍수를 사용하여 하천별 홍수량 방어목표를 설정하고 있다(Min, 2010).

일본은 우리나라와 같이 하류 및 저지대에 인구와 자산이 집중되어 있으며 매년 반복되는 홍수피해를 경감시키기 위해 전체 유역을 고려한 접근방법을 사용하고 있다. 유출억제지역, 홍수지체지역, 지지지역으로 구분하여 지역의 용도에 알맞은 개발계획을 수립함으로써 유역의 홍수피해를 최소화하기 위해 노력하고 있다(JICE, 2000). 또한 유역면적이 10km² 이상인 유역에 대하여 도시하천 100년 빈도, 주요 하천 50년 빈도, 기타하천 30년 빈도로 구분하여 지역적 중요도와 유역 크기에 따라 설계 빈도를 달리 설정하고 있다.

영국은 등가가옥(House Equivalent, HE)의 개념을 도입하여 도시화에 따른 5개의 토지이용 지역을 구분하고 한 가구당 1년간 홍수 피해액의 50~100%를 방어하는 치수안전도를 설정하였다. 이러한 목표방어를 적용하여 토지이용 구역에서 동일한 홍수방어 능력을 제공한다(Birks et al., 1992).

네덜란드는 전 국토의 50%가 해수면보다 낮은 위치에 있는 지형적 특징 때문에 일찍이 홍수에 대한 안전기준이 마련되었다. 1953년에 발생한 250년 빈도의 대홍수로 인하여 네덜란드 국민총생산(GNP)의 14%에 해당하는 심각한 피해를 입은 이후, 경제적 가치에 따라 안전기준을 10,000년 빈도로 설정하였다가 1977년에 1250년 빈도로 하향 조정되어 지금까지 유지하고 있다(De Ronde, 1998).

우리나라는 MOLIT(2000)에서 치수안전도 설정을 위하여 처음으로 홍수피해잠재능(Potential Flood Damage, PFD)을 도입한 이후, 하도 위주의 선 개념에서 유역에 대한 종합적인 치수대책과 함께 새로운 면 개념의 유역 치수 안전도가 요구되고 있다(Min, 2010). 우리나라의 하천 계획 빈도 설정은 1961년 이후부터 2000년 초반까지 대부분 지방하천이 50년 빈도로 채택되어 왔으나, 2004년 하천법의 개정에 따라 지방 1급, 2급 하천이 지방하천으로 통합되고 50~100년 빈도로 상향되어 수립되어 왔다. 「유역종합치수계획 수립 지침」(MOLIT, 2008b)에 따르면, 하천의 계획규모는 유역별로 수립된 유역종합치수계획에 따라 결정하게 되지만, 유역종합치수계획이 수립되어 있지 않거나 설계빈도가 제시되어 있지 않은 경우 하류지역의 통수능 및 대상하천의 특성을 고려하여 결정한다. 또한, 「하천설계기준-해설」(MOLIT, 2016)에 따르면, 설계빈도는 하천의 중요도 및 하천등급에 따라 계획규모 범위로 제시되어 있다. 그러나, 이러한 설계빈도는 적용범위가 넓어 하천의 지형적, 치수적 특성을 제대로 반영하지 못하는 한계가 있다.

우리나라의 광역지방자치단체 중 충청남도는 하천의 적정 설계빈도를 결정하기 위하여 제내지 현황, 하도경사, 유역면적, 하천연장, 하폭, 수계 치수 등 6개의 평가항목을 결정한 바 있으며(Chungcheongnam-do, 2015), 각 항목의 가중치를 결정하는 절차를 개선하고 지방하천의 설계빈도를 체계적이고 합리적으로 결정하기 위해 「충청남도 지방하천 적정설계빈도 결정방안」을 제정하였다(Chungcheongnam-do, 2017). Chungcheongnam-do(2017)은 6개 평가항목의 적정성을 평가하여 4개의 평가항목과 7개의 평가인자를 도출한 후, 계층화 분석 방법(Analytic Hierarchy Process, AHP)을 활용하여 평가항목과 인자에 대한 가중치를 산정하였다. 평가인자에 따른 하천의 평가점수는 적정 설계빈도 범위로 도출되고 PFD 결과를 이용하여 적정 설계빈도를 결정하였다. 하지만, 의사결정 과정에서 전문가들의 검증없이 수행된다면 가중치의 값이 편중될 수 있으며, 주관적 응답에 의해 결정될 수 있는 한계점이 있다. 따라서 본 연구에서는 충청남도에서 제안된 방법을 개선하기 위하여 베이즈 이론을 적용하여 공학적 객관성을 확보하고자 한다.

2. 연구방법

본 연구는 하천의 설계빈도를 결정함에 있어서 정량적인 분석방법을 제시하고 적용하는 것을 목적으로 충청남도 492개 하천 중 자료수집이 가능한 382개 지방하천에 대하여 4개의 평가항목에 따른 7개 평가인자별 가중치를 산정한 후, 평가표에 따른 점수를 산정하였다. 산정된 점수는 정규분포를 따른다는 가정과 분포함수의 99%가 50년에서 100년의 재현기간을 가진다고 가정하였다. 그리고 PFD의 잠재성, 위험성 요소를 4개의 그룹으로 분리하여

A그룹에 속하면 잠재성과 위험성이 크기 때문에 큰 빈도값을 선택하는 방법으로 적정 하천설계빈도를 결정하였다. 즉, 평가점수에 의해 50~80년, 80~100년의 재현기간 범위를 설정하고 PFD의 속하는 그룹에 따라 적정 하천설계빈도를 결정하였다.

2.1 평가항목

Chungcheongnam-do(2015)는 6개의 평가항목을 제안하였고, Chungcheongnam-do(2017)은 기존 6개 평가항목의 문제점을 도출하고 적정성 검토를 통하여 항목을 조정하였다. 여기서 제시된 문제점은 제내지 현황과 하도경사의 평가내용이 중복되고, 영역의

크기만으로 침투홍수량의 규모를 결정하기에는 무리가 있으며, 같은 유역면적이라도 하천의 연장은 큰 차이가 발생한다. 또한, 하구의 하폭이 크면 해소 가능한 홍수량 역시 크지만, 대상하천의 전체를 평가하는 것은 무리가 있는 것으로 문제점을 도출하였다. 기존 6개의 평가항목에서 4개의 평가항목에 따른 총 7개의 평가인자로 평가하였다(Chungcheongnam-do, 2017).

4개의 평가항목은 제내지 현황, 유역특성, 하천특성, 강우특성으로 구분된다. 평가항목은 1~3개의 평가인자로 구성된다. 제내지 현황은 시가화 침수면적, 유역특성은 유역면적과 형상계수, 하천특성은 하도경사, 수계 및 하천치수, 배수영향유무로 구분되며, 강우

Table 1. Result of Uniform Interval According to Evaluation Factor

Evaluation Items	Evaluation Factor	Uniform Interval Result					Num. of Data
		Less than 0.4	0.4~0.2	0.2~0.66	More than 0.66		
Protected Lowland Status	Urbanization Flooded Area (ha)	Less than 0.4	0.4~0.2	0.2~0.66	More than 0.66	445	
		Less than 4	4~6	6~11	11~23	More than 23	492
Watershed Characteristics	Watershed Area (km ²)	Less than 4	4~6	6~11	11~23	More than 23	492
	Basin Coefficient	Less than 0.22	0.22~0.29	0.29~0.39	More than 0.39		492
River Characteristics	Slope (%)	More than 1.4	0.9~1.4	0.56~0.9	0.29~0.56	Less than 0.29%	433
	Stream Order	Fourth or more	Third	Secondary	First	Mainstream	492
	Backwater Effect	None			Exist		433
Rainfall Characteristics	Abnormal Rainfall Occurrence Frequency	D	C	B	A	-	

Table 2. Classification and Grading of Rainfall Characteristics

Evaluation Factor	Evaluation Score			
	A (20P)	B (15P)	C (10P)	D (5P)
Heavy Rainfall Watch	632~564	563~495	494~426	425~354
Heavy Rainfall Warning	136~111	110~85	84~59	58~32
Rainfall More than 50mm/hr	17~15	14~12	11~9	8~6
Rainfall More than 80mm/hr	2	1	-	-
Future Rainfall 80mm/day	5.2~4.7	4.6~4.1	4.0~3.5	3.4~2.8

※ Source: Chungcheongnam-do (2017)

Table 3. Weights Calculation Using Bayes Theory

Evaluation Factor	Station									
	Seosan	Cheonju	Daejeon	Gunsan	Jeonju	Cheonan	Boryeong	Buyeo	Geumsan	
Heavy Rainfall Watch	A	D	B	C	D	C	A	A	D	
Heavy Rainfall Warning	C	D	C	A	C	C	A	B	D	
Rainfall More than 50mm/hr	B	D	B	C	C	D	A	A	D	
Rainfall More than 80mm/hr	D	D	D	B	D	A	A	A	D	
Future Rainfall 80mm/day	A	B	D	B	D	B	C	C	C	
Classification by Station	B	D	C	B	D	B	A	A	D	

※ Source: Chungcheongnam-do (2017)

특성은 이상강우 발생빈도로 구분된다. 2개 이상의 평가인자를 가지는 평가항목은 각 점수구간의 곱으로 표현하여 복합적으로 평가가 가능하게 구성되었다. Table 1은 평가항목과 평가인자, 분포 결과 및 사용된 자료의 갯수를 정리한 것이다.

강우특성의 경우 기상관측소 기준으로 호우주의보, 호우경보, 50mm 이상 호우횟수, 80mm 이상 호우횟수, 장래 80mm 이상 발생일 수를 산정하여 구간배정한 자료를 활용하였다(Chungcheongnam-do, 2017)(Tables 2~3).

2.2 베이지 이론을 활용한 가중치 산정

베이지 이론은 두 확률변수의 조건부 확률에 대한 수학적 정리로 새로운 근거가 제시될 때 신뢰값을 갱신하는데 활용된다. 베이시안 기법은 과거의 자료 또는 유사한 정보를 사전정보라 하고 이를 현재의 정보와 결합하여 사후정보를 추정하는 것이다. 즉, 통계학적으로 두 확률변수 θ 와 y 의 사후확률(posterior probability)은 사전 확률(prior probability, $p(\theta)$)과 우도(likelihood, $p(y|\theta)$)의 곱으로 표현되며, Eq. (1)과 같다.

$$p(\theta|y) = p(\theta)p(y|\theta) \tag{1}$$

베이시안 기법을 적용하기 위해서는 사전분포가 정해져야 하며, 사전정보의 유무에 따라서 정보적 사전분포와 무정보적 사전분포로 구분된다. 일반적으로 과거자료, 전문가의 지식 또는 자료의 특성 등에 대한 정보를 활용하여 사전분포를 유도한다. 하지만, 본 연구에서는 각 자료에 대한 모형의 모수들과 관련된 정보가 거의 없기 때문에 무정보적 사전분포를 가정하였다. 무정보적 사전분포는 정보적 사전분포와 달리 사전분포의 초모수(hyper-parameter)들에 대한 유도가 필요 없기 때문에, 베이시안 기법을 적용하는데 있어서 간단하고 효율적이다(Kim and Suh, 2009).

본 연구에서는 관측자료에 대한 확률밀도함수가 정규분포를 따른다고 가정했으며, 이에 대한 우도함수는 최우추정법(maximum

likelihood method)을 사용하여 결정하였다. 또한, 무정보적 사전 분포로 모수의 불변성을 극복하는 제프리스(Jeffreys) 사전분포를 적용했으며, Eq. (2)와 같다.

$$p(\theta) \propto \sqrt{I(\theta)} \tag{2}$$

여기서, $I(\theta)$ 는 피셔정보수(Fisher information number)라고 하며, Eq. (3)과 같다.

$$I(\theta) = E\left[\left(\frac{\partial \log p(y|\theta)}{\partial \theta}\right)^2 \middle| \theta\right] = E\left[\frac{\partial^2 \log p(y|\theta)}{\partial \theta^2} \middle| \theta\right] \tag{3}$$

이때, 관측자료에 대한 확률밀도함수의 평균을 이용하여 Eqs. (2) and (3)을 계산하면, 제프리스 사전분포는 Eq. (4)와 같다.

$$p(\theta) \propto 1/\sigma \tag{4}$$

따라서, Eq. (4)와 관측자료에 대한 확률밀도함수의 우도함수를 결합하여 사후확률을 계산할 수 있다.

베이시안 기법을 적용하여 각 자료별 사후확률이 추정되면, 각 구간별 발생확률을 산정한다. 발생확률은 사후확률에 대한 누가분포함수(Cumulative Distribution Function, CDF)를 산정하고 평가인자의 구간별 확률로 결정하였다. 각 구간별 세부 가중치는 등분포로 산정하였으며, 가장 안전한 때(S1)와 가장 위험할 때(S2)를 기준시나리오로 설정하여 각 평가인자별 S1의 발생확률과 최대 발생확률과의 비율을 산정하였다. 또한 민감도 분석을 통해 산정한 영향력 순서 및 비율을 고려하여 각 평가인자의 가중치를 산정하였다.

2.3 확률분포형을 고려한 적정 설계빈도 범위 설정

충청남도의 382개 하천에 대하여 평가표로 평가점수를 산정한 후, 산정된 점수를 정규분포에 적용하여 누가분포함수(CDF)의

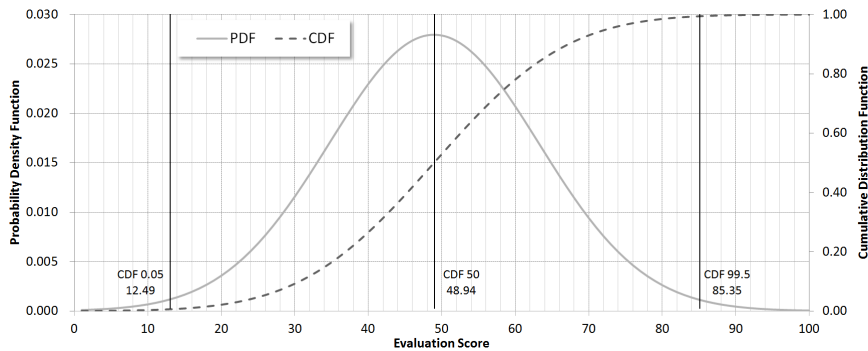


Fig. 1. Example of Evaluation Scoring Using Probability Density Function (PDF) and Cumulative Distribution Function (CDF)

99%가 일반적으로 지방하천의 설계기준인 50년 빈도부터 100년 빈도에 해당한다고 가정하였다. 충청남도의 지방하천 중 200년 빈도에 해당하는 하천은 없기 때문에 이러한 가정은 타당하다고 판단된다.

Fig. 1은 확률밀도함수(Probability Density Function, PDF)와 누가분포함수를 도시하고 누가분포함수의 0.05와 99.5에 해당하는 평가점수를 도시하였다. 평가점수가 산정되면 하천의 적정 설계빈도는 Table 4와 같이 빈도의 범위로 변환되고 홍수피해잠재능의 그룹에 따라 적정 설계빈도를 산정하였다.

2.4 홍수피해잠재능

홍수피해잠재능(PFD)은 “수문요소 뿐만 아니라 사회경제적인 요소까지 포괄하여 특정 치수단위구역의 홍수에 대한 잠재적인 피해 취약도를 나타내는 지수”라 정의되며, 「수자원장기 종합계획

(Water Vision 2020)」에서 지역적 특성과 치수계획의 일관성을 유지하기 위해 고안된 지표이다(MOLIT, 2000). 홍수피해잠재능은 잠재성과 위험성으로 구분된다. 잠재성 요소(F_{Po})는 동일조건하에서 홍수가 발생했을 때 발생할 수 있는 잠재적 피해 정도이며, 위험성 요소(F_{Ru})는 어떤 지역에 대해 홍수피해가 발생할 가능성 및 홍수 방어능력 정도를 나타낸다. 본 연구에서는 MOLIT(2000)에 제시되어 있는 홍수피해잠재능의 세부요소와 산정절차를 활용하였다.

행정구역별 산정된 PFD는 A~D까지 A그룹은 잠재성과 위험성이 모두 0.5 이상, B그룹은 잠재성 0.5 이상이고 위험성 0.5 미만, C그룹은 잠재성과 위험성 모두 0.5 미만, D그룹은 잠재성 0.5 미만이고 위험성 0.5 이상으로 구분하였다. A그룹에 속하면 적정 설계빈도 범위에서 큰 값을 취하고 B, C, D그룹에 대하여는 작은 값을 취하여 하천의 적정 설계빈도를 산정하였다. PFD를 구성하는

Table 4. Appropriate Range of Design Return Period According to Evaluation Score

Evaluation Point	Less than 12.5	12.5~48.9	48.9~85.4	More than 85.4
Range of Return Period	Less than 50	50~80	80~100	100~200

Table 5. Grouping Results by PFD Characteristics (Administrative District)

Administrative District	Potential Factor	Risk Factor	PFD	PFD Group
Cheonan-si	0.9500	0.6880	0.8080	A
Gongju-si	0.3670	0.6390	0.4840	D
Boryeong-si	0.5000	0.4800	0.4900	C
Asan-si	0.7950	0.4000	0.5640	B
Seosan-si	0.6370	0.3620	0.4800	B
Nonsan-si	0.3310	0.5980	0.4450	D
Gyeryong-si	0.9660	0.5850	0.7520	A
Geumsan-gun	0.1770	0.3100	0.2340	C
Buyeo-gun	0.3180	0.5850	0.4310	D
Seocheon-gun	0.3250	0.4720	0.3920	C
Cheongyang-gun	0.1580	0.6210	0.3130	D
Hongseong-gun	0.4700	0.5270	0.4980	D
Yesan-gun	0.2940	0.3260	0.3100	C
Taeon-gun	0.2880	0.3440	0.3150	C
Dangjin-si	0.6050	0.3900	0.4860	B

※ Source: Chungcheongnam-do (2017)

Table 6. Appropriate Design Return Period Considering PFD

	Less than 12.5	12.5~48.9		48.9~85.4		More than 85.4	
Range of Return Period	Less than 50	50~80		80~100		100~200	
PFD	A, B, C, D	B, C, D	A	B, C, D	A	B, C, D	A
Appropriate Return Period	50	50	80	80	100	100	200

잠재성 요소 및 위험성 요소의 항목별 산정치는 Table 5와 같으며, PFD의 그룹화에 따른 적정 설계빈도는 Table 6과 같다.

3. 적용 결과

본 연구는 하천의 적정 설계빈도를 공학적으로 산정하기 위해 베イズ 이론을 활용하여 구간별 가중치를 산정하고 정규분포에 적용하여 설계빈도 범위를 도출한 후, PFD를 적용하여 적정 설계빈도를 도출하였다.

3.1 평가항목별 가중치 산정 결과

베イズ 이론을 적용하여 평가항목의 인자에 대한 가중치를 산정하였다. 시가화 면적은 21, 유역면적은 19, 형상계수는 10, 하도경사 7, 수계차수 14, 배수영향 8, 이상강우 발생빈도 21점으로 산정되었다. 유역특성 항목과 하천특성 항목은 각각 2개, 3개로 구성되어

있는데, 각 인자의 곱으로 가중치가 산정되어 유역특성과 하천특성을 복합적으로 고려할 수 있다. 즉, 유역면적이 23.0km² 이상이고 형상계수가 0.39 이상이면 각 평가인자의 최대점수인 7.75와 3.87의 곱으로 유역특성 평가항목의 점수가 산정되며, 이 경우에 최대점수는 30점이다. Table 7은 평가항목 및 인자에 대한 가중치 산정결과이다. 여기서, 괄호는 베イズ 이론을 적용하여 산정된 실제값이며, 평가항목의 점수를 10 단위로 정리하여 적정 설계빈도 결정에 활용하였다.

3.2 적정 설계빈도 결정

하천기본계획이 2015년 이후에 수립된 30개 하천에 대하여 적정 설계빈도 결정방안을 적용하였다. 현행 하천설계빈도보다 증가하는 하천은 5개 하천, 동일한 하천은 19개, 감소하는 하천은 6개로 분석되었다. 상대적으로 규모 및 시가화 면적이 크며, 하천의 특성(하도경사, 수계 차수, 배수영향)이 큰 하천의 설계빈도가 상향

Table 7. Weights Calculation Using Bayes Theory

Evaluation Items	Evaluation Factor	Total Score	Weight Factor	Weight Factor for Sections				
				Less than 0.4	0.4~0.2	0.2~0.66	More than 0.66	
Protected Lowland Status	Urbanization Flooded Area (ha)	20 (21)	20 (21)	5.0	10.0	15.0	20.0	
				Less than 4	4~6	6~11	11~23	More than 23
Watershed Characteristics	Watershed Area (km ²)	30 (29)	20 (19)	1.55	3.10	4.65	6.20	7.75
				Less than 0.22	0.22~0.29	0.29~0.39	More than 0.39	
	Basin Coefficient		10	0.97	1.94	2.90	3.87	
				More than 1.4	0.9~1.4	0.56~0.9	0.29~0.56	Less than 0.29
River Characteristics	Slope (%)	30 (29)	8 (7)	0.52	1.03	1.55	2.06	2.58
				4th or more	3rd	2nd	1st	Main
	stream order		14 (14)	0.90	1.80	2.71	3.61	4.51
				8 (8)	None		Exist	
Backwater Effect	8 (8)	1.29		2.58				
		Rainfall Characteristics	20 (21)	20 (21)	D	C	B	A
5.0	10.0				15.0	20.0		

※ () Actual results using Bayesian theory

Table 8. Estimated Design Frequency

Num.	Name	Location	Protected Lowland Status	Watershed Characteristics	River Characteristics	Rainfall Characteristics	Results	Range of Design Return Period	PFD	Optimal Return Period (yr)	Existing Return Period (yr)
1	Sinjang	Seosan-si	20.0	6.0	19.2	15	60.20	80~100	B	80	80
2	Banyang	Seosan-si	15.0	3.0	7.2	15	40.23	50~80	B	50	80
3	Gipo	Seosan-si	15.0	4.5	5.4	15	39.93	50~80	B	50	80
4	Heungin	Taeon-gun	10.0	9.0	9.0	15	43.04	50~80	C	50	80

Table 8. Estimated Design Frequency (Continue)

Num.	Name	Location	Protected Lowland Status	Watershed Characteristics	River Characteristics	Rainfall Characteristics	Results	Range of Design Return Period	PFD	Optimal Return Period (yr)	Existing Return Period (yr)
5	Okgye	Boryeong-si	5.0	6.0	2.4	20	33.44	50~80	C	50	50
6	Taebong	Seosan-si	10.0	3.0	3.6	15	31.61	50~80	B	50	50
7	Yong	Dangjin-si	15.0	4.5	14.4	15	48.95	80~100	B	80	50
8	Wa	Asan-si	20.0	4.5	3.6	15	43.11	50~80	B	50	80
9	Shinheung	Yesan-gun	10.0	4.5	7.2	20	41.71	50~80	C	50	50
10	Yeok	Dangjin-si	20.0	7.5	15.0	15	57.53	80~100	B	80	100
11	Cheonui	Dangjin-si	10.0	4.5	14.4	15	43.93	50~80	B	50	80
12	Taean	Taean-gun	15.0	30.0	12.0	15	71.98	80~100	C	80	80
13	Yongsu	Gongju-si	20.0	22.5	2.4	10	54.90	80~100	D	80	80
14	Nampo	Boryeong-si	20.0	22.5	15.0	20	77.49	80~100	C	80	80
15	Gilhyeon	Boryeong-si	10.0	3.0	1.8	20	34.82	50~80	C	50	50
16	Hwasan	Seocheon-gun	20.0	6.0	12.0	15	53.03	80~100	C	80	50
17	Naehyun	Hongseong-gun	5.0	6.0	3.6	15	29.60	50~80	D	50	50
18	Chadong	Hongseong-gun	5.0	1.5	3.0	15	24.53	50~80	D	50	50
19	SangHwang	Hongseong-gun	5.0	6.0	12.0	15	37.98	50~80	D	50	50
20	Gagok	Hongseong-gun	15.0	4.5	4.8	15	39.31	50~80	D	50	50
21	Banggil	Seosan-si	10.0	24.0	9.0	15	58.01	80~100	B	80	50
22	Osa	Seosan-si	10.0	6.0	4.8	15	35.81	50~80	B	50	50
23	Gonam	Seosan-si	5.0	6.0	7.2	15	33.23	50~80	B	50	50
24	Jinjang	Seosan-si	10.0	13.5	15.0	15	53.50	80~100	B	80	50
25	Yedeck	Seosan-si	10.0	6.0	7.2	15	38.23	50~80	B	50	50
26	Yongyo	Taean-gun	20.0	24.0	30.0	15	89.01	100~200	C	100	50
27	Goongdong	Geumsan-gun	15.0	24.0	1.8	5	45.81	50~80	C	50	50
28	Wonmoon	Buyeo-gun	15.0	4.5	5.4	20	44.91	50~80	D	50	50
29	Doma	Seocheon-gun	20.0	6.0	9.0	15	50.03	80~100	C	80	80
30	Gwan	Geumsan-gun	10.0	3.0	3.6	5	21.61	50~80	C	50	50

되었다. 특히 용요천(#26)의 경우 서해안으로 유출되는 분류하천으로 직접적으로 배수의 영향을 받으며, 태안군청과 인접하여 크게 산정된 것으로 판단된다.

현행 하천설계빈도보다 하향된 6개 하천은 대부분 유역면적이 10km² 이하로 형상계수가 작고 도달시간이 길어 상대적으로 침투홍수량이 작은 하천에 해당하는 것으로 분석되었다. 역천(#10)은 유역면적이 173.3km²이고 시가화 침수면적이 30개 하천 중에서 가장 크지만 형상계수가 작고 PFD가 B등급으로 산정되어 80년 빈도로 결정되었다. 30개 하천의 적정 설계빈도 분석결과는 Table 8과 같다.

또한, 적정 설계빈도의 평가가 가능한 382개의 하천에 대하여 본 연구의 결과를 적용하였다. 설계빈도가 증가하는 하천은 65개 (17.0%), 감소하는 하천은 169개(44.2%), 동일한 하천은 148개

(38.8%)로 분석되었다. 현행 하천설계빈도와 본 연구의 적정 설계빈도 결과에 따라 변화하는 하천수와 비율을 Table 9에 정리하였다. Chungcheongnam-do(2017)의 결과와 비교하면, 2015년 이후 기본 계획이 수립된 하천 30개에 대해서 빈도가 증가하는 하천이 1개소, 감소하는 하천이 2개소, 동일한 하천이 27개소이며, 비교가 가능한 413개의 하천 중 빈도가 증가하는 하천이 1개소(0.2%), 감소하는 하천이 69개소(16.7%), 동일한 하천이 343개소(83.1%)로 분석되었다. 이러한 차이는 PFD의 산정 결과는 동일하기 때문에 AHP의 의사결정 과정에서 시가화 침수면적 인자의 가중치가 본 연구의 결과보다 2배나 큰 만큼 하나의 인자가 전체 평가에서 크게 기여하기 때문에 발생한 것으로 판단된다.

한국하천일람(2014년 기준)에 따르면 충청남도의 경우 80년 빈도 이상인 하천이 65.5%, 50년 빈도 이하인 하천이 34.5%로 다른

Table 9. Changes of River Design Frequency

River Design Return Period (yr)			Num. of River	Ratio(%)
Existing		This Study		
30	→	50	3	0.79
30	→	80	2	0.52
50	→	80	50	13.09
50	→	100	3	0.79
80	→	100	7	1.83
80	→	50	153	40.05
100	→	50	7	1.83
100	→	80	9	2.36
50	=	50	74	19.37
80	=	80	74	19.37
Increased			65	17.02
Decreased			169	44.24
Unchanged			148	38.74
Total			382	100.0

행정구역에 비하여 상대적으로 고빈도의 하천설계빈도가 설정되어 있으며, 지형적인 특성이 유사한 전라북도의 80년 이상 설계빈도는 17.3%, 전라남도는 44.3%으로 조사되었다(Chungcheongnam-do, 2017).

이와 같이 높은 설계빈도의 설정은 치수적 안전성은 확보되거나 공사비의 증가와 효율적 토지이용에 제한이 있을 수 있으며, 현재보다 설계빈도가 상향되는 하천은 기후변화에 따른 홍수재해에 안정적인 치수대책을 수립하기 위하여 면밀한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 기존의 하천설계빈도의 결정 과정에서 적용되었던 특정한 기준값이나 설계자의 주관적, 경험적인 판단의 개입을 최소화하고 공학적인 객관성을 확보하기 위해 베이즈 이론을 적용하여 평가인자에 대한 가중치를 산정하고 정규분포에 따른 적정 설계빈도를 산정하였다. 그 결과, 평가항목의 점수 구성에 따라 뚜렷한 특징을 보이며, 복합적인 평가로 인하여 어느 하나의 평가인자가 높더라도 다른 평가인자가 낮으면 낮게 점수가 부여되어 전반적으로 적정 하천설계빈도가 하향되는 것으로 분석되었다. 하지만 평가 점수를 정규화한 설계빈도 범위에 현행 하천설계빈도가 포함되는 하천은 382개 중 317개이며 나머지 65개는 모두 기존보다 큰 범위로 평가되어 설계빈도가 상향되는 것으로 분석되었다. 즉, 시군별 잠재성 요소와 위험성 요소의 PFD 그룹화가 적정 설계빈도

의 결정에 크게 좌우하기 때문에 적용에 있어서 주의가 필요하다.

적정 설계빈도가 상향되는 하천은 미래 기후변화를 고려하여 면밀하고 세밀한 검토가 필요하며, 하향되는 하천은 하천기본계획 및 치수계획 수립시 예산절감과 우선순위 결정 등 비교자료로써 본 연구의 결과가 활용 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 정부(행정안전부)의 재원으로 재난안전기술개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구임(MOIS-재난-2015-05).

References

Birks, C. J., Pickles, M. L., Bray, C. W. and Taylor, K. (1992). *Standards of service for flood defence: a framework for planning and monitoring*, Kluwer Academic, Dordrecht, Boston.

Chungcheongnam-do (2015). *Chungcheongnam-do river basin planning manual* (in Korean).

Chungcheongnam-do (2017). *Determination frequency of proper design of stream in Chungcheongnam-do* (in Korean).

De Ronde J. G. (1998). "Risk assessment and management of potential flooding in the Netherlands." *Floodplain Risk Management: Proceedings of an International Workshop on Floodplain Risk Management*, Hiroshima, 11-13 November 1996 edited by S. Fukuoka, Balkema, Rotterdam.

JICE (Japan Institute of Construction Engineering). (2000). *Comprehensive strategy for floodplain management*.

Kim, C. S. and Suh, M. S. (2009). "Change-point and change pattern of precipitation characteristics using bayesian method over South Korea from 1954 to 2007." *Korean Meteorological Society*, Vol. 19, No. 2, pp. 199-211 (in Korean).

Kim, D. H. (2018). *Determination of design frequency of local rivers considering disaster condition*, Master Thesis, Kangwon National University, Korea (in Korean).

Min, B. M. (2010). *Estimation of the potential flood damage for flood safety evaluation of Young-San River Basin*, Ph.D. Dissertation, Chosun University, Korea (in Korean).

MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport) (2000). *Water vision 2020* (in Korean).

MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport) (2008a). *Guidelines for calculating the potential risk of urban flood damage and the design frequency of the watershed* (in Korean).

MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport) (2008b). *Guidelines for establishing a comprehensive watershed flood control plan* (in Korean).

MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport) (2016). *Commentary of rivers design standard* (in Korean).