

미계측 유역의 홍수피해분석을 위한 자연유량의 홍수지표 기반 확률홍수량 산정

채병석* · 최시중** · 안재현*** · 김태웅****

Chae, Byung Seok*, Choi, Si Jung**, Ahn, Jae Hyun***, Kim, Tae-Woong****

Estimation of Flood Quantile in Ungauged Watersheds for Flood Damage Analysis Based on Flood Index of Natural Flow

ABSTRACT

In this study, flood quantiles were estimated at ungauged watersheds by adjusting the flood quantiles from the design rainfall - runoff analysis (DRRA) method based on regional frequency analysis. Comparing the flood frequency analysis (FFA) and DRRA, it was found that the flood quantiles estimated by the DRRA method were overestimated by 52%. In addition, a practical method was suggested to make a flood index using natural flows to apply the regional frequency analysis (RFA) to ungauged watersheds. Considering the relationships among DRRA, FFA, and RFA, we derived an adjusting formula that can be applied to estimate flood quantiles at ungauged watersheds. We also employed Leave-One-Out Cross-Validation scheme and skill score to verify the method proposed in this study. As a result, the proposed model increased the accuracy by 23.2% compared to the existing DRRA method.

Key words : Design rainfall-runoff analysis, Flood frequency analysis, Regional frequency analysis, Natural flow

초 록

본 연구에서는 설계 강우-유출 관계 분석법으로 산정된 값을 지역빈도해석 기법을 바탕으로 보정하여 미계측 유역에서의 확률홍수량을 산정하는 방법을 제안하였다. 홍수빈도해석법과 설계 강우-유출 관계 분석법을 비교·분석한 결과, 설계 강우-유출 관계 분석법으로 산정된 확률홍수량이 약 52% 과대 산정되는 것으로 나타났다. 또한, 미계측 유역의 확률홍수량을 산정하기 위해서 유역 특성인자를 자연유량으로 지표화 하여 지역빈도해석법을 수행하였다. 이와 같은 세 가지 방법의 설계홍수량 산정법을 기반으로 미계측 유역을 대상으로 적용할 수 있는 보정식을 도출하였다. 미계측 유역에 대한 적용성을 검토하기 위해 Leave-One-Out Cross-Validation 기법과 Skill Score 기법을 적용하였다. 그 결과, 정확도가 기존의 설계 강우-유출 관계 분석법보다 23.2% 증가한 것으로 나타났다.

검색어 : 설계 강우-유출 관계 분석법, 홍수빈도해석법, 지역빈도해석법, 자연유량

* 한양대학교 대학원 건설환경공학과 석사과정 (Hanyang University · coqudtjr914@naver.com)

** 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원·하천연구소 수석연구원 (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · sjchoi@kict.re.kr)

*** 중신회원 · 서경대학교 공과대학 토목건축공학과 교수 (Seokyeong University · wr@skuniv.ac.kr)

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

Received December 8, 2017/ revised December 26, 2017/ accepted December 28, 2017

1. 서론

최근 기후변화로 인하여 강우패턴이 불규칙해지고 집중성 호우의 빈도가 증가하여 홍수피해가 증가하고 있다. 이에 효과적으로 대응하기 위한 수공구조물의 안정성 있는 설계를 위해 신뢰성 높은 설계홍수량 산정에 대한 필요성이 커지고 있다. 설계홍수량 산정은 치수구조물의 규모 및 설계기준을 결정하는 가장 기초가 되는 분석과정으로, 설계홍수량 산정법은 크게 두 가지로 대별된다. 첫 번째는 관측 홍수량 자료를 수집한 후, 연최대치계열을 구축하여 통계학적 빈도해석을 통해 설계홍수량을 산정하는 홍수빈도해석법(Flood Frequency Analysis, FFA)이다. 두 번째는 관측 강우자료를 통해 설계강우량을 산정한 후, 강우-유출 모형에 적용하여 설계홍수량을 산정하는 설계 강우-유출 관계 분석법(Design Rainfall-Runoff Analysis, DRRRA)이다.

홍수빈도해석법은 관측 유량 자료가 충분히 많을 때, 이론적으로 가장 적합한 방법이지만, 우리나라의 경우, 홍수량에 대한 관측 자료가 매우 적기 때문에 홍수빈도해석법을 적용할 때 산정된 설계홍수량의 불확실성이 크고, 미계측 유역이 많기 때문에 홍수빈도해석법을 직접 적용하여 설계홍수량을 산정할 수 없는 경우가 많다. 따라서 우리나라 수자원 실무에서는 비교적 많은 강우자료를 활용할 수 있는 설계 강우-유출 관계 분석법을 적용하여 설계홍수량을 산정하고 있으며, 미계측 유역의 확률홍수량 산정에 관한 연구도 꾸준히 진행되고 있다(Heo et al., 2007; Nam et al., 2008; Kim et al., 2016). 그러나 이러한 두 가지 설계홍수량 산정법은 같은 유역에 적용했을 경우에도 서로 다른 값을 산정하는 경우가 빈번하게 발생한다(Rogger et al., 2012).

홍수빈도해석법과 설계 강우-유출 관계 분석법으로 산정된 확률홍수량이 서로 다른 원인은 여러 가지가 있다. 우선 Boughton and Hill(1997)이 빅토리아 지역에서 설계 강우-유출 관계 분석법과 홍수빈도해석법에 의해 산정된 확률홍수량에 대해 비교-분석을 수행한 결과, 관측 유량 자료의 관측연수가 적거나 일부분의 자료를 활용했을 경우, 홍수빈도해석법에 의한 설계홍수량이 최대 80%까지 작게 산정되었다. 또한 강우-유출 사이의 비선형성이 확률홍수량 산정에 영향이 미친다. 실무에서 사용되고 있는 설계 강우-유출 관계 분석법의 대표적인 강우-유출 모의 모형인 HEC-HMS는 Clark 단위유량도 개념을 사용하고 있다. 단위유량도는 유역의 강우-유출의 관계는 선형성을 가지며 시간불변이라는 가정을 기반으로 강우자료와 유출자료를 분석하여 개발된 이론이다(Lee, 2015). 그러나 Pilgrim and Cordery(1975)는 강우와 홍수량 사이의 선형성 가정은 일반적으로 성립되지 않는다고 주장했으며, Haan and Schulze(1987)은 강우 사상이 발생할 때마다 유역의 선형조건이 변화하기 때문에 강우-유출 관계의 선형성 가정이 성립하지

않는다고 주장하였다. 이에 Choi et al.(2015)는 강우-유출 사이의 선형성 가정을 전제로 하는 설계 강우-유출 관계 분석법의 문제점을 개선하기 위하여 홍수빈도해석법과 설계 강우-유출 관계 분석법을 비교 분석한 후, 호우사상에 대한 강우-유출 해석을 통해 연최대 홍수량을 구축하고 이를 빈도해석하는 확률홍수량 산정법을 제안하였다. 이러한 세 가지 확률홍수량 산정법을 적용한 결과, 산정된 확률홍수량의 오차 값은 유역 면적에 따라 상이하게 나타난다는 결론을 도출했다. 따라서 유역 특성인자 또한 확률홍수량을 산정하는데 고려해야 하는 주요 인자이다. 「하천설계기준, 해설」에 따르면 하도흐름의 유하시간이 매우 짧은 소유역에서는 도달시간이 매우 짧게 산정되므로 합리식과 단위도법 등 모든 방법에서 홍수량이 크게 산정된다(Korea Water Resources Association, 2009). Chae et al.(2017)은 설계 강우-유출 관계 분석법으로 추정된 확률홍수량을 회귀모형으로 보정하는 방안을 제시하였다. 특히, 유역 면적을 기준으로 대상유역을 구별한 후, 미계측 유역에 적용할 수 있는 확률홍수량 추정법을 제시하였다. 유역 면적을 고려하여 미계측 유역에 적용하였을 경우 유역 면적을 고려하지 않았을 때보다 정확도가 2.1%p 상승하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 Chae et al.(2017)에서 제안된 방법을 개선하기 위하여 유역의 특성을 반영하여 미계측 유역의 확률홍수량을 추정하는 방안을 제안하였다.

2. 대상 유역

본 연구는 우리나라에서 홍수빈도해석법의 대안으로 사용되고 있는 설계 강우-유출 관계 분석법의 과다설계 문제를 개선하고,

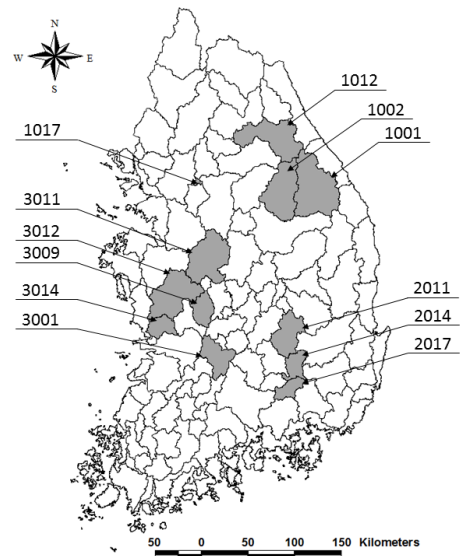


Fig. 1. Middle-Scale Watersheds Used in This Study

Table 1. Area & Period of Rainfall Data in Study Area

Basin Code	Area (km ²)	Observation Period (Year)
1001	2,283.2	1995-2014 (20 years)
1002	1,403.4	
1012	2,705.0	
1017	23,800.0	
2011	11,074.4	
2014	14,034.3	
2017	16,449.6	
3001	908.0	
3009	609.4	
3011	1,594.1	
3012	8,328.8	
3014	9,379.6	

유역 특성을 고려하여 미계측 유역의 확률홍수량을 산정할 수 있는 방법을 제안하는데 목적이 있다. 이에 이론적으로 가장 적합하다고 판단되는 홍수빈도해석법으로 추정된 확률홍수량을 참값으로 하여 강우자료를 기반으로 확률홍수량을 산정하는 방법인 설계강우-유출 관계 분석법의 추정값과 비교·분석하였다. 확률홍수량의 비교·분석을 수행하기 위해 Fig. 1과 같이 12개(한강권역 4개, 낙동강권역 3개, 금강권역 5개)의 중권역 유역을 선정하였다. 선정된 대상 유역은 관측홍수량 자료가 20개 이상이며, 관측 유량의 관측 지점과 유역종합치수계획보고서의 확률홍수량 산정지점이 일치하는 유역으로 선정하였다. 구축된 관측 유량 자료의 관측 연수 및 유역 면적은 Table 1과 같다.

3. 연구방법

3.1 홍수빈도해석법

통계학적 수문빈도해석에서는 자료가 독립적이고 동일한 분포로부터 획득되었다고 가정한다. 따라서 유량 자료에 대한 독립성 및 동질성 검정을 수행하였다. 유량 자료 간에 독립성이 있는지를 검증하는 1차 계열상관계수(Lag-one Serial Correlation Coefficient, γ_1)는 Eq. (1)과 같다. 각 유역의 유량 자료에 대한 1차 계열상관계수(γ_1) 및 95% 신뢰구간(Confidence Interval, CI)을 바탕으로 유량 자료의 독립성을 검증한 결과(Table 2), 관측 유량 자료는 수문학적 지속성이 거의 없는 무작위 계열로 시간에 대하여 독립적인 것으로 분석되었다. 또한 Eq. (2)를 이용하여 유량 자료에 대한 동질성 검정을 수행한 결과(Table 2), 모든 유역에서 검정 통계량이 5% 유의 수준(Significant Level, SL)의 임계값보다 작게 나타나 유량 자료들은 동질적 모집단에 속해 있는 것으로 분석되었다.

Table 2. Results of Homogeneity and Independence Test (Observed Flow)

Basin Code	r_1	95% Confidence Interval for r_1	$\frac{S}{\sqrt{n}}$	5% S.L. for $\frac{S}{\sqrt{n}}$
1001	-0.3300	-0.4903 ≤ r_1 ≤ 0.3850	0.2280	1.22
1002	0.1592		0.5868	
1012	-0.3313		0.5428	
1017	-0.1394		0.6931	
2011	-0.0280		0.5375	
2014	-0.0801		1.0628	
2017	0.2201		0.3669	
3001	0.1311		1.1543	
3009	-0.1425		0.9374	
3011	-0.0865		0.7265	
3012	-0.0347		0.9499	
3014	-0.1495		1.0062	

$$\gamma_1 = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^{n-1} (X_t - \bar{X})(X_{t+1} - \bar{X})}{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (X_t - \bar{X})^2} \quad (1)$$

$$\frac{S}{\sqrt{n}} = \max_{1 \leq k \leq n} \frac{1}{\sqrt{n}} \left| \frac{\sum_{t=1}^k (X_t - \bar{X})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (X_t - \bar{X})^2}} \right|, k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

여기서, S는 시간 동질성에 대한 민감도이며, n은 자료의 개수, X_t 는 유량계열이며, \bar{X} 는 유량자료의 평균값이다.

본 연구에서는 Gamma 분포, 일반극치(GEV) 분포, Gumbel 분포, Weibull 분포에 대한 모수를 확률가중모멘트법을 이용하여 추정하고, Kolmogorov-Smirnov (K-S) 검정을 통하여 확률분포 형의 적합성을 검증하였다. 12개 대상 유역에 대한 4가지 확률분포 형 모두 적합성이 타당한 것으로 검토되었다. Kim and Heo(2006)에 의하면, 자료의 수가 적을 때, 대체적으로 2변수 Gamma 분포가 적합하며, Gumbel과 GEV 분포는 자료의 수가 많이질수록 적합하다. 또한 수문자료의 최대치 또는 최소치 계열을 분석하는 경우에는 GEV 분포가 적절하다(Lee, 2015). 따라서 본 연구에서는 GEV 분포를 최적 확률분포형으로 선정하였다. GEV 분포의 확률밀도함수는 Eq. (3)과 같다.

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left[1 - \frac{\beta(x-x_0)}{\alpha} \right]^{\frac{1}{\beta}-1} \exp \left[- \left(1 - \frac{\beta(x-x_0)}{\alpha} \right)^{\frac{1}{\beta}} \right] \quad (3)$$

여기서, α 는 척도모수, β 는 형상모수, x_0 는 위치모수이다.

본 연구에서는 GEV 분포를 이용하여 12개의 대상 유역의 확률홍수량을 산정했으며, 소하천설계기준, 하천설계기준, 유역종합치수계획 등에서 설계기준으로 주로 사용되는 재현기간 30년, 50년, 80년, 100년, 200년에 해당하는 확률홍수량(FFA)을 Table 3에 제시하였다.

3.2 설계 강우유출 관계 분석법

설계 강우-유출 관계 분석법(DRRA)은 관측 강우 자료를 빈도해석하여 확률강우량을 산정하고 산정된 확률강우량을 강우-유출 모형을 통해 모의하여 확률홍수량을 산정하는 방법이다. 설계 강우-유출 관계 분석법은 유량 자료에 비해 상대적으로 풍부한 강우 자료를 활용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 설계 강우-유출 관계 분석법으로 산정된 확률홍수량의 일관성을 유지하기 위해 2008년 국토교통부에서 발간한 「한강유역종합치수계획 보고서」와 「금강유역종합치수계획 보고서」 그리고 2009년 국토교통부에서 발간한 「낙동강수계 하천기본계획 보고서」에 고시된 확률홍수량 값을 수집했다. 재현기간 30년, 50년, 80년, 100년, 200년에 해당하는 확률홍수량(DRRA)은 Table 3에 정리하였으며, 홍수빈도해석법으로 산정된 확률홍수량(FFA)과 비교·분석하였다. 분석 결과, 본 연구에서 선정된 12개의 대상 유역 중 적포교 유역(Code #2017)을 제외한 11개의 유역에서 설계 강우-유출 관계 분석법(DRRA)으로 산정된 확률홍수량이 홍수빈도해석법

(FFA)으로 산정된 확률홍수량보다 크게 산정되는 것으로 나타났다. 유역별로 과대 산정되는 비율은 Table 3에 제시되었으며, 평균 52.1% (적포교 유역을 제외하면 57.4%) 과다 산정되는 것으로 나타났다.

2012년 국토교통부에서 발간한 「설계홍수량 산정요령(안)」에 따르면 우리나라는 미국 SCS에서 제시하고 있는 기준 중 설계안전 차원에서 높은 유출량 조건을 채택하고 있다. 또한, 설계 강우-유출 관계 분석법으로 설계홍수량을 산정할 경우의 선행토양함수조건은 설계안전을 고려하여 유출률이 가장 높은 AMC-III 조건을 적용하여 CN-III를 채택한 후 수행됨에 따라 설계홍수량의 과대 산정 결과가 나타난다.

적포교 유역의 경우, 다른 유역에 비해 유역 폭이 좁아 침투홍수량이 지체된다. 따라서 강우-유출 모형을 적용할 경우, 침투홍수량이 작게 산정되는 경향이 있는 것으로 추정된다.

3.3 지역빈도해석법

우리나라에서 관측 유량 자료의 부족과 홍수빈도해석법에 대한 인식 부족 때문에 홍수빈도해석법은 일부 다목적 댐 설계를 제외하고는 실무에서 거의 적용되지 못하고 있는 실정이다(Yoon et al., 2005). 관측 유량 자료의 수가 매우 적은 우리나라의 경우, 계측유역의 홍수빈도해석법 결과를 이용하여 미계측 유역의 확률홍수량을 추정해야 한다. 이를 미계측 유역에 대한 지역빈도분석이라 할 수 있으며, 지역빈도분석은 Q_t 통계량 분석법, 지수홍수법, 모멘트 추정법, 전이법 등이 있으나(Burnham, 1980; Kim and Won, 2004), 지수홍수법(Index Flood Method)이 가장 많이 이용되고 있다.

지수홍수법은 자료 표본으로부터 대표적인 통계량을 도출하는

Table 3. Flood Quantiles Estimated by FFA and DRRA

Basin Code	FFA (m ³ /s)					DRRA (m ³ /s)					Overestimation rate (%)
	30yr	50yr	80yr	100yr	200yr	30yr	50yr	80yr	100yr	200yr	
1001	4,292	4,818	5,313	5,552	6,310	5,898	6,575	7,199	7,489	8,394	35▲
1002	2,580	3,028	3,485	3,718	4,518	3,743	4,179	4,580	4,767	5,352	32▲
1012	4,810	5,113	5,367	5,479	5,801	9,239	10,276	11,220	11,657	13,016	108▲
1017	23,478	24,946	26,164	26,703	28,230	36,290	39,824	43,184	44,760	49,712	65▲
2011	8,037	8,853	9,604	9,961	11,075	12,000	13,200	14,300	14,800	16,400	49▲
2014	11,014	12,270	13,455	14,029	15,856	12,900	14,100	15,300	15,800	17,500	14▲
2017	14,303	15,717	16,999	17,603	19,459	13,500	14,700	15,900	16,400	18,100	6▽
3001	1,723	1,955	2,177	2,285	2,636	3,240	3,615	3,900	4,010	4,445	79▲
3009	1,887	2,233	2,590	2,775	3,417	2,450	2,700	2,930	3,030	3,375	14▲
3011	3,100	3,657	4,234	4,532	5,568	5,790	6,385	6,925	7,155	7,950	65▲
3012	6,637	7,263	7,826	8,091	8,898	13,320	14,720	15,980	16,525	18,415	104▲
3014	8,417	9,216	9,935	10,271	11,294	13,805	15,255	16,565	17,130	19,085	66▲

데 매우 유용한 방법이다. 일반적으로 지수홍수는 연최대유량계열의 평균과 일치한다고 가정한다(Kim et al., 2016). 또한, 연최대유량계열의 평균은 유역 면적 등의 유역 특성인자들과의 멱함수로 표현될 수 있다(Fill and Stedinger, 1998; Malamud and Turcotte, 2006; Yoon et al., 2005; Kim et al., 2016). 본 연구에서는 관측 유량 자료 부족으로 인한 불확실성의 문제점을 극복하기 위해 자연유량을 통해 연최대계열을 작성한 후, 자연유량의 연최대계열의 평균값과 유역 특성인자간의 상관관계식을 멱함수를 이용하여 유도하고 미계측 유역의 확률홍수량을 추정할 수 있는 지표홍수를 도출하였다. 본 연구에 활용된 자연유량 자료는 2011년 국토교통부에서 발간한 「수자원장기종합계획(2011~2020)」에서 활용된 자료로써 강우-유출모형인 토양수분 저류구조 탱크모형을 이용하여 산정된 자료이다. 또한, 5대강 권역의 42년간 중권역별 일 강수량 자료와 댐 지점 및 하천 지점의 유량자료 수집을 통하여 토양수분 저류구조 탱크모형 매개변수의 보정과 검증이 수행된 바 있다.

3.3.1 빈도별 홍수량과 지형인자의 상관관계 분석

본 연구에서는 대상 유역의 연평균 자연유량($\overline{Q_n}$)과 특성인자(면적, 유로 연장, 하상 경사, 유역평균폭)와의 상관관계를 분석하였다. 그 결과 연평균 자연유량($\overline{Q_n}$)과 면적의 상관계수는 0.992, 유로연장과는 0.960으로 유의한 상관성을 보였으나(Fig. 2), 하상 경사와 유역평균폭은 각각 0.164, 0.219로 유의하지 않은 것으로 나타났다.

다중회귀분석의 비선형성 함수는 대표적으로 지수 방정식, 멱 방정식, 포화성장률 방정식 등 3가지가 있다. 3.3절에 언급한 바와 같이 지역빈도해석법에서 연최대유량계열의 평균과 유역 면적 등의 유역 특성인자들과의 경험관계는 주로 멱함수로 표현된다. 따라서 본 연구에서도 유역 특성인자 중 면적과 유로연장을 멱함수

형태로 다중회귀분석하여 연평균 자연유량과 회귀식 Eq. (4)를 도출하였다.

$$\overline{Q_n} = a \times A^b \times L^c \tag{4}$$

여기서, A는 유역 면적, L은 유로연장이며 또한 a,b,c는 다중회귀분석으로 도출된 회귀계수로 각각 0.224, 1.618, -0.751의 값을 가진다.

3.3.2 유역의 대표 지표홍수빈도 곡선의 작성

미계측 유역에 대한 확률홍수량은 Yoon et al.(2005)에서 제시한 I_t 와의 관계를 이용한 Eq. (5)와 같이 산정할 수 있다.

$$Q_t = I_t \times \overline{Q_n} = I_t \times aA^bL^c = I_t \times 0.224A^{1.618}L^{-0.751} \tag{5}$$

여기서, I_t 는 각 빈도별 확률홍수량 (Q_t)의 연평균 자연유량($\overline{Q_n}$)에 대한 비($Q_t/\overline{Q_n}$)이다. 재현기간 30, 50, 80, 100, 200년에 대한 I_t 값은 각각 2.02, 2.21, 2.38, 2.46, 2.71이다.

3.3.3 자연유량 지역빈도해석 후, 보정식 적용

본 연구에서 자연유량을 고려한 지역빈도해석법을 수행한 목적은 관측 유량 자료가 존재하지 않는 미계측 유역에 대하여 강우자료, 유역 면적 등의 특성 인자를 활용하여 홍수량을 추정하기 위한 것이다. 즉, 자연유량을 고려한 지역빈도해석법으로 산정된 확률홍수량을 미계측 유역의 확률홍수량 추정의 지표홍수로 활용하는 것이다.

Chae et al.(2017)은 홍수빈도해석법과 설계 강우-유출 관계 분석법으로 산정된 확률홍수량 간의 관계식을 도출하여 미계측 유역의 적용할 수 있는 확률홍수량 추정 공식을 제안한 바 있다.

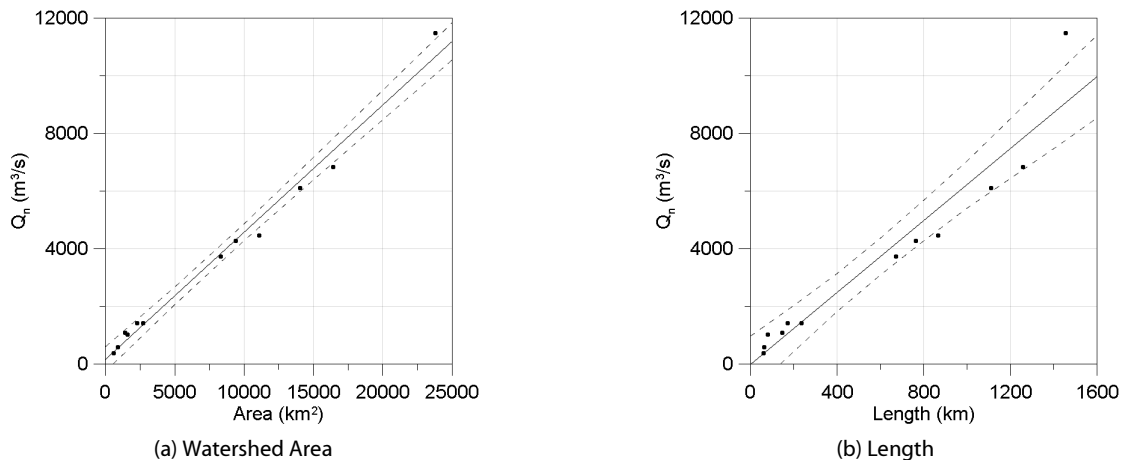


Fig. 2. Relationship between Annual Average Natural Flood and Topographic Factors

Table 4. Regression Equations of Flood Quantiles from Flood Frequency Analysis and Design Rainfall-Runoff Analysis Method

Name	Equation	R ²
Exponential equation	$Y = a(e^{bX_1} \times e^{cX_2})$	0.953
Power equation	$Y = a(X_1^b \times X_2^c)$	0.966
Saturation-growth-rate equation	$Y = \left(\frac{aX_1}{b+X_1} \times \frac{cX_2}{d+X_2} \right)$	0.965

그러나 아직까지 설계 강우-유출 관계 분석법의 확률홍수량 보정 과정에서는 미계측 유역의 특성과 관련된 불확실성이 크기 때문에 추가적인 유역 특성을 반영하는 방법을 개발할 필요성이 있었다.

따라서 본 연구에서는 단순히 홍수빈도해석법과 설계 강우-유출 관계 분석법 간의 관계뿐만이 아닌 미계측 유역의 유역 특성인자를 추가적으로 고려하여 다중회귀분석을 통해 보정식을 제안하였다. 다중회귀분석의 대표적인 함수의 형태는 Table 4와 같으며, 결정계수가 가장 높은 멱 방정식을 채택하였다. 또한, 다중회귀분석에 활용되는 설계 강우-유출 관계 분석법으로 산정된 확률홍수량(X_1)과 자연유량 지역빈도해석법으로 산정된 확률홍수량(X_2)간의 영향을 더하는 형태의 가법모형과 곱하는 형태의 승법모형이 있다. 가법 모형은 개별 요인의 효과를 구분하고 함께 더하여 데이터를 모형화한 것이다. 자료가 계절 패턴 등의 영향을 받지 않을 때 가법 모형이 선택되며, 승법 모형은 자료의 계절 패턴 크기가 자료 크기에 따라 달라지는 경우 선택한다. 본 연구에서 사용되는 자료는 각 방법으로 산정된 확률홍수량으로써 계절의 영향을 많이 받기 때문에 승법 모형을 채택하여 Eq. (6)과 같은 형태로 보정식을 제안하였다.

$$Y = a \times X_1^b \times f(X_2)^c \quad (6)$$

여기서, Y는 홍수빈도해석법의 확률홍수량 값(m³/s)이며, X₁은 설계 강우-유출 관계 분석법의 확률홍수량 값(m³/s)이다. 또한, f(X₂)는 자연유량을 고려한 지역빈도해석법의 확률홍수량 값(m³/s)으로 유역 특성을 포함하고 있다.

4. 미계측 유역에의 적용

본 연구에서 제안한 확률홍수량 추정법은 부족한 관측 유량 자료 대신 풍부한 강우자료를 활용할 수 있는 장점이 있으며, 적용하고자 하는 미계측 유역에 대하여 유역 특성을 고려할 수 있고 수행과정이 비교적 간단한 장점을 가지고 있다. 그러나 이를 미계측 유역에 적용하기 위해서는 먼저 미계측 유역에 대한 적용성 검증이 필요하다.

4.1 Leave-One-Out Cross-Validation (LOOCV)

본 연구에서 제안한 자연유량을 고려한 지역빈도해석을 이용하여 설계 강우-유출 관계 분석법의 보정식을 미계측 유역을 대상으로 적용성을 확인하기 위해 Leave-One-Out Cross-Validation (LOOCV) 방법을 적용하고 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 활용하여 Skill Score를 산정하였다. 이를 통해 본 연구에서 제안한 방법이 기존의 방법보다 상대적으로 얼마만큼의 정확도를 상승시켰는지 정량적으로 확인할 수 있다.

LOOCV 방법이란 통계량에 대한 자료의 영향을 검토하기 위한 방법으로 통계량 계산에 n개의 자료를 사용할 때, 그 중 하나의 자료를 제외한 (n-1)개의 자료를 이용하여 통계량을 계산한 후, 각각의 변화량을 이용하여 계산된 통계량을 검증하는 방법이다. 즉, 12개의 대상 유역 중 한 개의 유역을 미계측 유역이라 가정한 후, 나머지 11개의 유역을 대상으로 본 연구에서 제안한 방법을 적용하여 최종적으로 미계측 유역이라 가정된 유역에 적용하였다. 이 방법을 12개의 대상 유역에 대하여 모두 1번씩 순차적으로 적용시킨 후 Skill Score를 산정하였다.

4.2 Skill Score (SS)

Skill Score는 특정한 예측기법의 상대적 성능 평가를 하는데 주로 쓰이는 기법이다. 완벽한 예측과 기준 예측 사이의 상대적 예측 정확도에 대한 평가기법으로써 일반적으로 Eq. (7)로 표현된다.

$$SS_{ref} = \frac{A_{new} - A_{ref}}{A_{perf} - A_{ref}} \times 100\% \quad (7)$$

여기서, A_{perf}는 완벽한 예측의 정확도, A_{ref}는 기존 방법의 예측 정확도, A_{new}는 새로운 방법의 예측 정확도로 의미된다.

또한, 평균제곱근오차(RMSE)는 확률홍수량을 산정하는 방법의 정확도를 나타내는 지표로 사용될 수 있으므로 본 연구에서는 평균제곱근오차를 예측 정확도로 활용하였다. 홍수빈도해석법, 설계 강우-유출 관계 분석법 그리고 자연유량-지역빈도해석법을 통한 보정식 적용법으로 산정된 확률홍수량은 Eq. (8)을 이용하여 2가지 방법(설계 강우-유출 관계 분석법과 자연유량-지역빈도해석법을 통한 보정식 적용법)에 대한 평균제곱근오차를 산정하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N (q_{t,est} - q_{t,true})^2}{N}} \quad (8)$$

여기서, q_{true}는 참값으로 본 연구에서는 홍수빈도해석법으로 산정된 확률홍수량(m³/s)이며, q_{est}는 비교되는 값으로 본 연구에서는 제안한 보정식을 적용하여 산정된 확률홍수량(m³/s)이다. 따라서,

A_{perf} 는 0이 되며, A_{ref} 는 홍수빈도해석법과 설계강우-유출 관계 분석법으로 산정된 확률홍수량 사이의 평균제곱근오차이고, A_{new} 는 본 연구에서 제안한 보정식을 적용하여 산정된 확률홍수량과 홍수빈도해석법으로 산정된 확률홍수량 간의 평균제곱근오차를 의미하게 된다.

4.3 적용결과

Table 5는 유역 면적이 가장 큰 팔당댐 유역에 대한 적용 결과를 대표적으로 제시한 것이며, 그 외의 유역에 적용한 결과는 Fig. 3에 제시하였다. 분석 결과, 기존의 설계 강우-유출 관계 분석법으로 산정된 확률홍수량이 홍수빈도해석법으로 산정된 확률홍수량보다 작은 적포교 유역(Code #2017)에서만 음의 Skill Score가 나타났으나, 이를 제외한 나머지 유역은 전반적으로 Skill Score가 증가하는 것으로 나타났다. 남한강 상류 유역(Code #1001)은 37.16%, 평창강 유역(Code #1002)은 33.1%, 소양강 유역(Code #1012)은 36.14%, 팔당댐 유역(Code #1017)은 74.95%, 왜관 유역(Code #2011)은 46.85%, 고령교 유역(Code #2014)은 52.86%, 북일 유역(Code #3001)은 12.74%, 회덕 유역(Code #3009)은 24.36%, 석화 유역(Code #3011)은 24.29%, 규암 유역(Code #3012)은 70.51%, 강경 유역(Code #3014)은 88.84% 정확도가 향상되는 결과를 보였다. 적포교 유역을 포함한 대상 유역 전체의 정확도

상승률은 약 23.21%인 것으로 나타났으며 적포교를 제외하고는 정확도 상승률이 약 42.62%로 매우 양호한 결과를 나타냈다.

5. 결론

본 연구에서는 설계홍수량 산정법의 대표적인 두 방법(홍수빈도 해석법과 설계 강우-유출 관계 분석법)간의 차이가 얼마만큼 발생하는지 확인하고, 설계 강우-유출 관계 분석법으로 산정된 값을 보정하여 확률홍수량을 산정하는 방법을 제시하였다. 홍수빈도해석법을 통해 관측 유량을 직접 빈도해석하여 확률홍수량 값을 산정했으며, 설계 강우-유출 관계 분석법은 유역종합치수계획보고서에 고시된 자료를 인용하여 활용했다. 이 두 가지 방법으로 산정된 확률홍수량을 비교·분석한 결과, 설계 강우-유출 관계 분석법으로 산정된 확률홍수량이 홍수빈도해석법으로 산정된 확률홍수량보다 평균 약 52% 크게 산정되었다. 또한, 지역빈도분석을 수행하기 위하여 유역 특성인자 중 유역 면적과 유로연장을 이용하여 자연 유량 지표홍수를 도출하였다.

LOOCV 방법과 Skill Score 방법을 이용하여 미계측 유역에 대한 적용성을 검증하였다. 검증 결과, 기존의 설계 강우-유출 관계 분석법보다 홍수빈도해석법으로 산정된 확률홍수량이 크게 나타난 적포교 유역을 제외한 나머지 11개 유역에서 모두 정확도가

Table 5. Adjusted Flood Quantiles using Flood Index of Natural Flow

Basin Code	Using adjustment formula (m ³ /s)					Skill Score (%)
	30yr	50yr	80yr	100yr	200yr	
1017	27,283.9	28,898.3	30,400.1	31,085.5	33,186.3	74.9 ▲

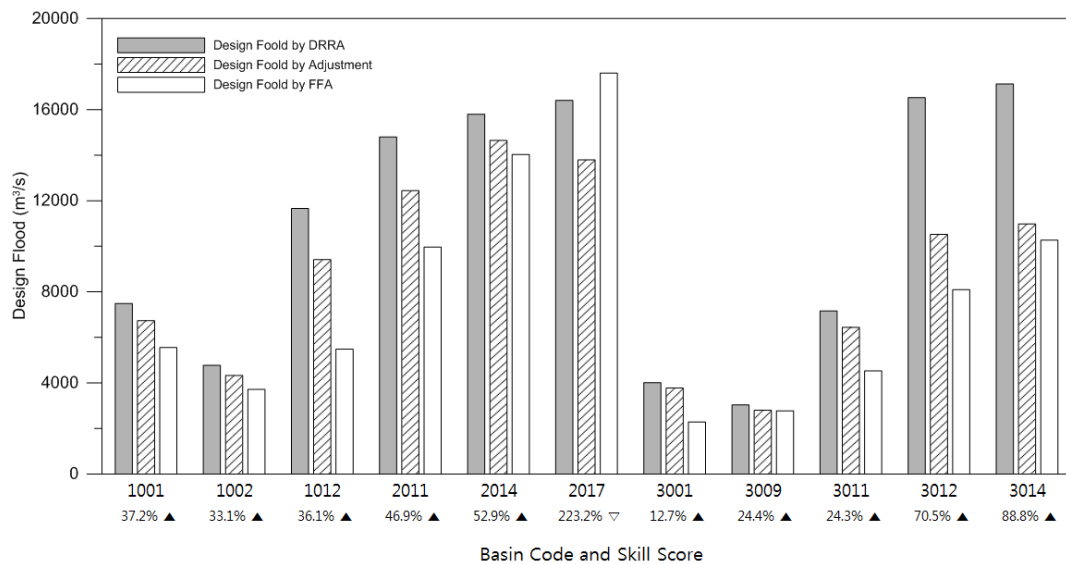


Fig. 3. Flood Quantiles Estimated by FFA, DRRA, and the Proposed Method

평균적으로 약 42.62%가 증가되는 결과를 보였다.

본 연구의 결과만으로 살펴볼 때 자연유량의 연최대 평균값과 유역평균폭의 비를 기준으로 결과가 달라지는 경향을 볼 수는 있다. 이를 절대적인 기준으로 적용하기에는 다소 무리가 있지만, 이번 연구의 결과로 볼 때 지금까지 사용되어온 설계 강우-유출 관계 분석법이 최선의 방법은 아니며 상대적으로 유역 면적 폭이 작은 유역에서는 본 연구에서 제시한 보정식을 통한 확률홍수량 산정법이 더 좋은 결과를 나타냈다고 보는 것이 합리적이라고 판단된다. 본 연구의 결과만으로 기존에 실무에서 많이 사용되던 확률홍수량 산정법에 대한 변화를 기대하기는 어려우나 앞으로 유역평균폭 등 유역의 형상이 확률홍수량 산정에 영향을 주는 인자들에 대한 추가적인 연구가 수행된다면 앞으로 더 합리적인 확률홍수량 산정법을 제안할 수 있을 것이라 기대된다.

감사의 글

본 연구는 정부(행정안전부)의 재원으로 재난안전기술개발사업단의 지원을 받아 수행(MOIS-재난-2015-05)되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Boughton, W. C. and Hill, P. I. (1997). "A design flood estimation procedure using data generation and daily water balance model." *Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology*, Victoria, Australia.
- Burnham, M. W. (1980). "Adoption of flood flow frequency estimates at ungauged location, training document 11." *US Army Corps of Engineers*.
- Chae, B., Lee, J., Ahn, J. and Kim, T. (2017). "Estimating design floods in ungauged watersheds through regressive adjustment of flood quantiles from the design rainfall - runoff analysis method." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 50, No. 9, pp. 627-635 (in Korean).
- Choi, J., Ji, J. and Yi, J. (2015). "A study on rainfall-runoff frequency analysis for estimating design flood." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 8, pp. 605-612 (in Korean).
- Fill, H. D. and Stedinger, J. R. (1998). "Using regional regression within index flood procedures and an empirical Bayesian estimator." *Journal of Hydrology*, Vol. 210, No. 1, pp. 128-145.
- Haan, C. T. and Schulze, R. E. (1987). "Return period flow prediction with uncertain parameters." *Transactions of the ASAE*, Vol. 30, No. 3, pp. 665-669.
- Heo, J., Lee, Y., Shin, H. and Kim, K. (2007). "Application of regional rainfall frequency analysis in South Korea (I): Rainfall quantile estimation." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 27, No. 2B, pp. 101-111.
- Kim, N. W. and Won, Y. S. (2004). "Estimates of regional flood frequency in Korea." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 37, No. 12, pp. 1019-1032 (in Korean).
- Kim, N. W., Lee, J. E., Lee, J. and Jung, Y. (2016). "Regional frequency analysis using spatial data extension method: I. An empirical investigation of regional flood frequency analysis." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 5, pp. 439-450 (in Korean).
- Kim, S. Y. and Heo, J. H. (2006). "Application for the selection criteria of appropriate probability distribution." *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, Korea Water Resources Association, pp. 169-173 (in Korean).
- Korea Water Resources Association (2009). *Commentary of rivers design standard* (in Korean).
- Lee, J. S. (2015). *Hydrology*. Goomibook (in Korean).
- Malamud, B. D. and Turcotte, D. L. (2006). "The applicability of power-law frequency statistics to floods." *Journal of Hydrology*, Vol. 322, No. 1, pp. 168-180.
- Nam, W., Kim, T., Shin, J. and Heo, J. (2008). "Regional rainfall frequency analysis by multivariate techniques." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 5, pp. 517-525 (in Korean).
- Pilgrim, D. H. and Cordery, I. (1975). "Rainfall temporal patterns for design floods." *Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 101, No. 1, pp. 81-95.
- Rogger, M., Kohl, B., Pirkl, H., Viglione, A., Komma, J., Kirnbauer, R., Merz, R. and Blöschl, G. (2012). "Runoff models and flood frequency statistics for design flood estimation in Austria-Do they tell a consistent story?" *Journal of Hydrology*, Vol. 456, pp. 30-43.
- Yoon, Y. M., Shin, C. K. and Jang, S. H. (2005). "An estimation of flood quantiles at ungauged locations by index flood frequency curve." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 38, No. 1, pp. 1-9 (in Korean).