

# 확률홍수량 산정에 관한 방법론적 비교연구

## A Study on Methodological Comparison of Probability Flood Discharge

윤선권\*, 오태석\*\*, 문영일\*\*\*, 계대영\*\*\*\*

Sun-Kwon Yoon, Tae-Suk Oh, Young-Il Moon, Dea-Young Kye

### 요 지

일반적인 설계 홍수량 산정 절차는 분석하고자 하는 대상구역의 수문자료 중 홍수량 자료가 존재하지 않을 경우 강우빈도해석을 실시하고, 만약 홍수량 자료가 존재한다면 유출을 통계분석하여 홍수빈도 해석을 실시하여야 한다. 본 연구에서는 1999~2008년까지 수위-유량 관측을 실시하여 유출자료를 비교적 충분히 보유하고 있는 서울시 관내 지방하천인 우이천 유역을 대상으로 수위-유량관계곡선을 작성하여 과거 호우사상을 토대로 강우-유출모형의 매개변수를 최적화하였으며, 최적화된 모형을 이용하여 기상청관할 서울지점 시간강우관측 자료를 입력 자료로 유출모의를 실시하였다. 모의된 홍수량계열과 관측유량계열을 사용하여 연최대홍수계열을 구축한 후 홍수빈도해석을 실시하였다. 분석결과 기존의 '확률강우량-단위도' 방법에 비하여 불확실성이 제거된 확률홍수량 추정치의 결과를 얻을 수 있었다.

**핵심용어** : 확률홍수량, 홍수빈도해석, 연최대홍수계열, 강우-유출모형

### 1. 서 론

설계홍수량은 연최대 또는 초과 홍수량계열의 통계분석으로 추정되는 것이 최선인데, 우리나라의 경우 과거 20여년 전부터 미계측유역에 적용되어야 할 '확률강우량-단위도'가 거의 모든 계측유역에도 적용되어 하천정비기본계획과 유역종합치수계획, 댐 계획 등의 수문설계 자료로 분석하여 적용되어지고 있는 실정이다. 이는 "유량관측자료의 부족과 부정확"이라는 이유로 '확률강우량-단위도'가 가질 수 있는 다양한 불확실성(확률강우량, 유효수량, 면적감소계수, 강우의 시공간 분포, 강우-유출관계 등)을 내포하고 있어 실무자에 따라 차이가 나는 것이 불가피하다(김승, 2008.12, 한국수자원학회지). 일반적인 설계 홍수량 산정 절차는 분석하고자 하는 대상구역의 수문자료 중 홍수량 자료가 존재하지 않을 경우 강우빈도해석을 실시하고, 만약 홍수량 자료가 존재한다면 홍수빈도 해석을 실시한다. 따라서 대상유역에 대한 유출자료가 충분하다면 유출을 통계분석하여 홍수량을 추정해야 하고, 강우와 유출관측 자료를 활용하여 연최대홍수계열을 구축한 후 홍수빈도해석을 실시해야 할 것이다.

본 연구에서는 1999~2008년까지 수위-유량 관측을 실시하여 유출자료를 비교적 충분히 보유하고 있는 서울시 관내 지방하천인 우이천 유역을 대상으로 수위-유량관계곡선을 작성하였다. 또한 과거 호우사상을 토대로 강우-유출모형의 매개변수를 최적화하였으며, 최적화된 모형을 이용하여 기상청관할 서울지점 시간강우관측 자료를 입력 자료로 유출모의를 실시하였다. 모의된 홍수량계열과 관측유량계열을 사용하여 연최대홍수계열을 구축한 후 홍수빈도해석을 실시하였다. 분석결과 기존의 '확률강우량-단위도' 방법에 비하여 불확실성이 제거된 확률홍수량 추정치결과를 얻을 수 있었다. 다음 Fig.1은 일반적인 홍수량 산정절차를 나타내었다.

\* 정회원·서울시립대학교 토목공학과 박사수료·E-mail : skyoon@uos.ac.kr

\*\* 정회원·서울시립대학교 토목공학과 공학박사·E-mail : Waterboy@uos.ac.kr

\*\*\* 정회원·서울시립대학교 토목공학과 교수·E-mail : ymoon@uos.ac.kr

\*\*\*\* 정회원·서울시립대학교 토목공학과 석사과정·E-mail : mrkye@unitel.co.kr

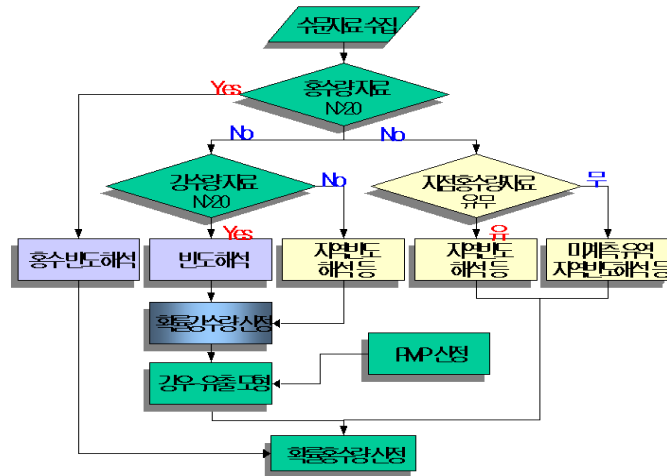


Fig. 1. Flow Chart of Design Flood Calculation

## 2. 홍수량산정을 위한 수문 시계열 자료

### 2.1 확률홍수량 추정

매개변수적 홍수빈도해석은 모멘트법, 최우도법 및 확률가중모멘트법으로 매개변수의 추정을 수행하였으며, 주로사용이 되는 13개 확률 분포형 적용하고 KS-검정,  $\chi^2$ 검정 등을 통해 적합도 검정을 수행하였다.

또한 비매개변수적 홍수빈도해석 방법으로 변동핵밀도함수인 Modified Cauchy 핵함수(차영일 등, 2006)를 이용하여 지점빈도해석을 수행하였다. 다음 Eqn.(1)과 Eqn.(2)는 각각 Modified Cauchy 핵함수의 확률밀도함수와 누가확률밀도함수이다.

$$f(x) = \frac{8}{3\sqrt{5}\pi(1+x^2/5)^3} \quad (1)$$

$$F(x) = \frac{1}{2} + \frac{5x + \frac{3x^2}{5}}{3\sqrt{5}\pi\left(1 + \frac{x^2}{5}\right)^2} + \frac{1}{\pi} \tan^{-1}\left(\frac{x}{\sqrt{5}}\right) \quad (2)$$

또한, Sheather와 Jones(1991)가 제시한 Plug In 방법(SJPI)을 사용하여 확률밀도함수의 광역폭을 결정하였다. 이 방법은 Hall과 Marron(1987)이 제시한 이론을 보완하여 개발된 것으로 다음의 식 (3)으로부터 변동폭을 결정하게 된다.

$$h = [R(K)/\{\sigma_K^4 \hat{S}_D(\hat{\alpha}_2(h))\}]^{1/5} n^{-1/5} \quad (3)$$

여기서,  $\hat{S}_D(\alpha) = \{n(n-1)\}^{-1} \alpha^{-5} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \phi^{iv}\{\alpha^{-1}(X_i - X_j)\}$  이며,  $\hat{\alpha}_2(h) = 1.357\{\hat{S}_D(a)/\hat{T}_D(b)\}^{1/7} h^{5/7}$  이고,

$\hat{T}_D(b) = -\{n(n-1)\}^{-1} b^{-7} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \phi^{iv}\{b^{-1}(X_i - X_j)\}$  이다. 또한  $a = 0.920\hat{\lambda}n^{-1/7}$  and  $b = 0.920\hat{\lambda}n^{-1/9}$  이며,  $\hat{\lambda}$ 는 표본의 interquartile range이다.

매개변수의 추정 방법은 모멘트법, 최우도법 및 확률가중 모멘트 법으로 추정하였다. 각 매개변수 추정 기법에 따른 확률분포형에 대한 매개변수는 큰 차이를 보이지 않았으나, 각 분포형 적합도 검정 결과와 최근의 추세에 맞추어 확률가중모멘트법에 의해 추정된 매개변수를 이용하였다. 분포형별로 실제 강우 자료와의 적합성을 판단하기 위해  $\chi^2$ 검정, K-S검정, CVM검정 및 PPCC검정을 통해 적합도 검정을 수행한 결과에서 Wakeby-5분포형, GEV분포형과 Gumbel분포형이 관측자료와 적합성이 가장 뛰어난 것으로 분석되었다.

### 2.2 홍수량 자료

일반적으로 사용되는 수문자료치 계열은 부분기간치 계열(patial duration series)과 극치계열(extreme value series)이다. 부분기간치 계열은 어떤 기준치보다도 큰 값을 가진 모든 자료로서 구성되며 이 계열에 속하는 자료의 숫자가 기록연수와 같게 되도록 기준값이 선정되었을 때 이 계열을 연초과치 계열(annual exceedance series)이라 부른다. 극치계열은 해당 자료가 존재하는 기록기간을 일정기간 단위로 나누어 그 기간 내에 발생하는 최대치만으로 구성된 계열을 말한다. 통상 사용되는 기간 단위는 연이며, 매년의 최대치만으로 구성된 계열을 연최고치 계열(annual maximum series)이라 한다. 다음 Fig.2는 우이천 유역의 매개변수 최적화과정을 통하여 최적모형으로 선정된 SWMM(storm water management model) 강우-유출모형을 통하여 산정해낸 과거 48개년 발생한 전기간 홍수자료치 계열에 대하여 연초과치와 연최고치의 수문자료치 계열로 나누어 나타내었다.

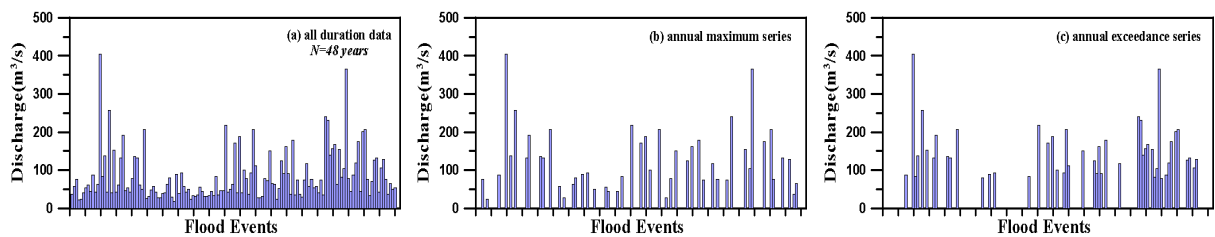


Fig. 2. Time Series Data of Flood Events

### 2.3 연최고치 및 연초과치 계열

수문자료치 계열을 분류하기 위해 순위 전자료치와 연 최고치 및 연 초과치를 크기순으로 Fig.3에 표시하였으며 Fig.3(b)에서 보는바와 같이 많은 수의 연초과치가 연최고치보다 큼을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 대상유역의 수공구조물 설계시 어떤 해에 발생한 최고치뿐만 아니라 두 번째 크기의 값도 그 구조물의 설계에 중요한 영향을 미칠 수 있다고 판단이 되어 여러 차례에 걸친 홍수로 인한 연속적인 홍수유량이 수공구조물에 미치는 영향에 대한 고려를 위하여 연최고치 뿐만아니라 연초과치계열에 대한 홍수빈도해석을 실시하였다. 본 연구에서는 1961년부터 2008년까지의 48개년 서울지점(108) 기상청 강우자료로부터 산정해 낸 우이천 유역의 연최고치 및 연초과치 홍수량 계열을 크기순으로 나열하여 빈도해석에 사용하였다.

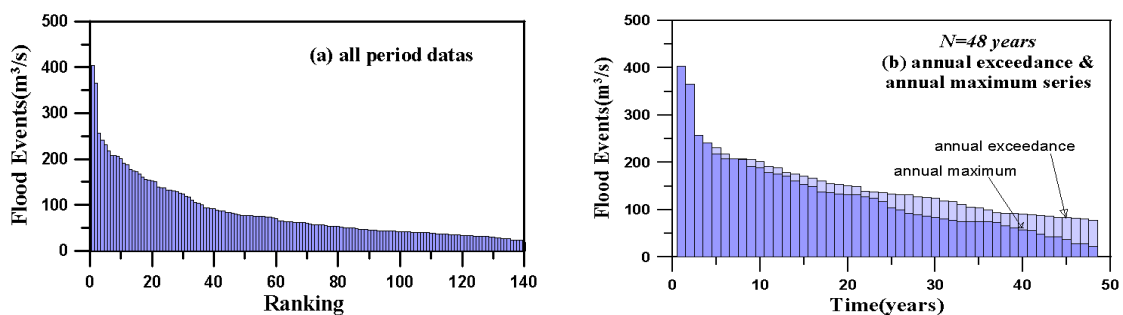


Fig. 3. Time Series Data of Annual Ranking Plots

### 2.4 수위-유량관계 곡선

수위-유량관계 곡선의 개발 및 보정은 우선 관측이 용이한 수위를 측정함으로써 유량을 쉽게 산정할 수 있다는 장점을 가지고 있으며, 강우-유출모형의 입력자료로서 활용되고 있다. 또한 거시적인 수자원 관리 및 계획을 위한 기초자료가 되며, 축적된 자료는 갈수량, 평수량, 홍수량 산정으로 이치수 및 지속적인 하천 운용에도 사용될 수 있다. 본 연구의 적용 대상 하천은 서울시 관내 지방2급 하천인 우이천 유역으로 하천 하류부 장월교 지점에 자기수위 관측기(T/M)가 설치 운영되고 있으며, 『대학 연계용역, 2008., 서울시』의 일환으로 실측호수가 관측되고 있다. 다음 Fig.4은 1999~2008년까지 유량측정을 통하여 얻어낸 우이천 장월교지점의 수위-유량관계곡선과 유량측정구간의 횡단측량 단면을 나타내었으며, Table 1은 수위-유량 관계곡선 식이다.

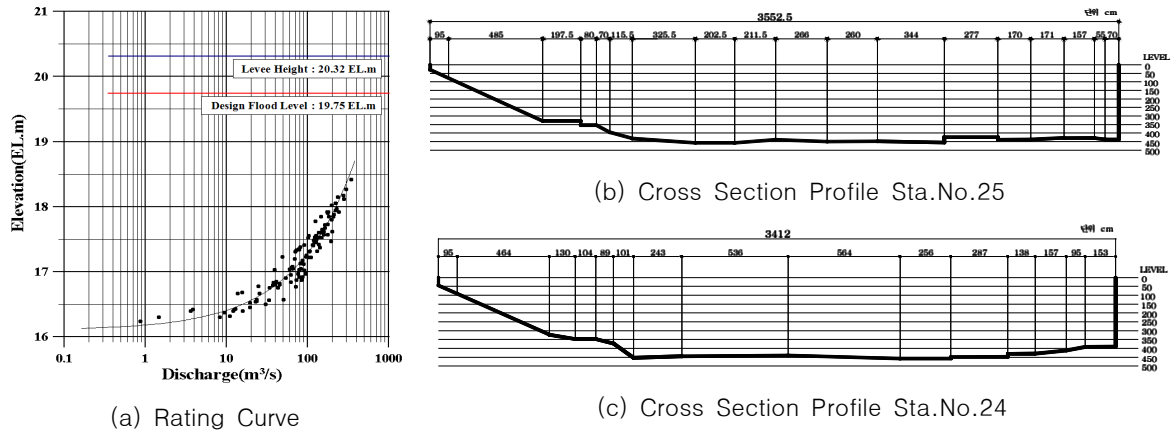


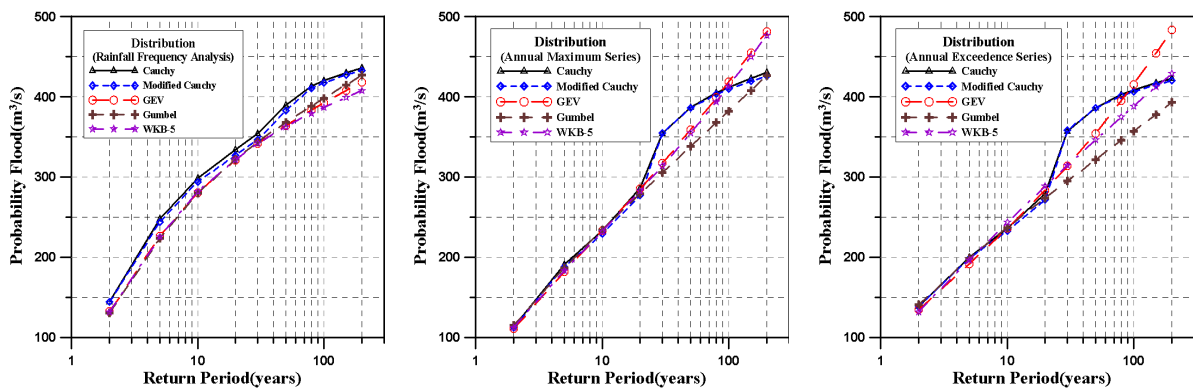
Fig. 4. Rating Curve and Cross Section Profile

Table 1. Development of Rating Curve

Observed Date	Rating Curve Eqn.	$R^2$
1999yr ~ 2007yr	$Q = 75.41(H - 16.10312)^{1.696408} (16.24 \leq H \leq 18.42)$	0.959699

### 3. 홍수량 산정 결과 비교·분석

본 연구에서는 매개변수적 빈도분석 방법과 비매개변수적 빈도분석 방법을 적용하여 추정된 확률 홍수량을 강우빈도분석(rainfall frequency analysis)방법과, 홍수빈도분석(flood frequency analysis)방법을 통하여 구한 값을 비교·분석하였다. 분석결과 강우빈도분석의 경우 Quintile값은 재현기간에 따라 매개변수적 지점빈도분석 결과가 비매개변수적 지점빈도분석의 결과보다 작게 산정되는 경향이 있었으며, 홍수빈도분석의 경우 재현기간이 짧을수록 매개변수적 지점빈도분석의 결과와 비매개변수적 지점빈도분석의 결과가 비슷한 Quintile값을 나타내었고 재현기간이 길어질수록 상이한 결과를 보였다. 특히, 비매개변수적 지점빈도분석에 의한 홍수빈도 해석 결과는 대상하천 설계재현기간인 50년 빈도에서 가장 큰 Quintile값을 나타내어 설계홍수량 산정시 비매개변수적 홍수빈도분석의 결과도 고려하여야 할 것으로 사료된다. 또한 Table 2에서 보는 바와 같이 GEV 분포형, Gumbel 분포형 및 Wakeby-5 분포형의 결과가 비매개변수적 방법인 Cauchy와 Modified Cauchy의 결과 보다 다소 작게 나타났으며, 연최대치계열(AMS)과 연최고치계열(AES)의 홍수빈도분석결과 연최대치계열의 결과가 연최고치계열의 결과보다 크게 산정됨을 확인할 수 있었다. 이는 여러 차례에 걸친 홍수로 인한 연속적인 홍수 유량의 영향이 클 경우 연최고치 뿐만 아니라 연초과치계열에 대하여도 홍수빈도분석을 실시하여 수공구조물 설계에 반영 하여야 함을 결과로부터 알 수 있다.



(a) Rainfall Frequency analysis (b) Flood Frequency analysis(AMS) (c) Flood Frequency analysis(AES)

Fig. 5. Results of Probability Flood Discharge

**Table 2. Flood Frequency Analysis Results on Each Methods**

Distribution Return Period	FFA-Methods		Parametric Method			Non-parametric Method		Remark
			GEV	Gumbel	WKB-5	Cauchy	Modified Cauchy	
20	RFA		321.2	322.1	321.7	334.1	327.4	
	FFA	AMS	285.6	279.4	282.6	286.4	276.8	
		AES	283.5	273.9	288.7	279.5	271.7	
30	RFA		341.9	344.0	342.1	354.3	346.4	
	FFA	AMS	317.5	305.5	313.7	354.5	354.7	
		AES	313.7	295.1	314.6	357.2	358.3	
50	RFA		364.2	368.1	362.5	390.0	382.6	
	FFA	AMS	359.2	338.2	354.6	387.2	386.3	
		AES	354.5	321.6	346.4	386.6	386.2	
80	RFA		383.7	388.3	379.6	413.4	410.8	
	FFA	AMS	399.1	368.1	394.1	405.3	403.2	
		AES	395.1	345.8	375.0	402.7	401.2	
100	RFA		392.5	398.0	387.0	420.1	417.5	
	FFA	AMS	418.6	382.3	413.5	412.2	409.6	
		AES	415.5	357.3	388.4	408.5	406.7	

\* FFA(flood frequency analysis), RFA(rainfall frequency analysis), AMS(annual maximum series), AES(annual exceedance series)

#### 4. 결론

본 연구에서는 매개변수적 지점빈도해석 방법과 비매개변수적 지점빈도해석 방법으로 추정된 확률 홍수량을 강우빈도 해석(rainfall frequency analysis)방법과, 홍수빈도해석(flood frequency analysis)방법을 통하여 확률홍수량 산정 방법별로 비교분석 하였다. 분석결과 기존의 ‘확률강우량-단위도’ 방법에 비하여 불확실성이 제거된 확률홍수량 추정치의 결과를 얻을 수 있었으며, 분포형별로 실제 강우자료와의 적합도 검정을 수행한 결과 Wakeby-5, GEV, Gumbel 분포형이 관측자료와 적합성이 가장 뛰어난 것으로 분석되었다. 또한 재현기간이 짧은 경우에는 매개변수적 방법의 결과가 비매개변수적 방법인 Cauchy와 Modified Cauchy의 결과와 비슷한 Quantile값을 나타내었으나 재현기간이 길어질수록 상이한 결과를 나타냄을 확인할 수 있었다. 특히, 비매개변수적 지점빈도해석에 의한 홍수빈도 해석결과는 대상하천 설계재현기간에서 가장 큰 Quantile값을 나타내어 설계홍수량 산정시 비매개변수적 홍수빈도해석의 결과도 고려하여야 할 것으로 사료된다. 마지막으로 연최대치계열(AMS)과 연최고치계열(AES)의 홍수빈도해석결과 연최대치계열의 결과가 크게 산정됨을 확인할 수 있었으며, 이는 여러 차례에 걸친 홍수로 인한 연속적인 홍수량의 영향이 클 경우 연최고치 뿐만 아니라 연초과치계열에 대하여도 홍수빈도해석을 실시하여 수공구조물 설계에 반영하여야 함을 결과로부터 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구의 일부는 건설교통부 한국건설교통기술평가원의 이상기후대비시설기준강화 연구단에 의해 수행되는 2005 건설기술기반구축사업(05-기반구축-D03-01)에 의해 지원되었습니다.

#### 참고문헌

1. 서규우, 김정덕, 허준행, 조원철, 1995, “한강 인도교지점에서의 홍수빈도해석(I) -자료 해석 및 적정확률 분포형 선정-”, 대한토목학회논문집, 제15권, 제6호, 대한토목학회, pp. 1697-1709.
2. 차영일, 김범순, 문영일, 2006, “극치값 추정에 적합한 비매개변수적 핵함수 개발”, 한국수자원학회 논문집, 제 39권, 제 6호, 한국수자원학회, pp.187-194.
3. Hall, P., Marron, J. S., 1987, "Estimation of integrated squared density derivatives", Statist. Probab. Lett., Vol. 6, 109-115.
4. Sheather, S. F., and Jones, M. C., 1991, "A reliable data-based band-width selection method for kernel density estimation", J. Roy. Statistical Soc., B., vol. 53, pp.683-690.