

한강대교 지점에서의 비매개변수적 홍수빈도해석

Nonparametric Flood Frequency Analysis at Hangang Bridge

오 태 석*, 윤 선 권**, 오 근 택***, 문 영 일****
Tae Suk Oh, Sun Kwon Yoon, Keun Taek Oh, Young-Il Moon

요 지

본 연구에서는 한강의 중요한 관측지점인 한강대교(구 인도교)지점에서 관측된 연최대치 홍수량을 자료를 이용하여 홍수빈도해석을 수행하였다. 홍수빈도해석을 위하여 확률분포형을 가정해 적합도 검정을 통해 최적 분포형을 선정해 확률홍수량을 산정하는 매개변수적 빈도해석과 원자료에 핵함수를 적용하는 비매개변수적 빈도해석을 통해 각각 산정한 확률홍수량을 비교하였다. 비매개변수적 빈도해석을 위해서는 변동핵밀도함수를 적용한 Modified Cauchy 핵밀도함수와 Sheater & Jones Plug-In 광역폭 결정 방법을 이용하였다. 따라서 본 연구에서 분석한 확률홍수량과 한강대교 지점의 계획홍수량의 비교를 통해 현재의 계획홍수량의 적정성을 평가하였다.

핵심용어 : 홍수빈도해석, 핵밀도함수, 광역폭

1. 서론

수공구조물의 설계를 위한 설계홍수량의 추정은 매우 중요한 과정이라 할 수 있다. 설계홍수량을 추정하는 방법은 관측된 연최대치 유량을 직접빈도해석하는 방법과 강우빈도해석을 통해 산정된 확률강우량을 강우-유출 모형을 통해 유출량으로 환산하여 설계홍수량을 산정할 수 있다. 그러나 전자의 방법은 상대적으로 부족한 관측자료로 인해 강우-유출모형을 통한 설계홍수량 산정이 일반적으로 많이 이루어지고 있는 추세이다. 그러나 대상 유역의 보다 정확한 설계홍수량의 추정을 위해서는 관측된 홍수량 자료를 활용한 빈도해석이 강우-유출 모형이 갖는 비선형성을 고려하였을 때에 보다 정확한 Quantile을 추정할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 변동핵밀도함수(variable Kernel density function)을 활용한 홍수빈도해석을 통해 한강대교 지점의 설계홍수량을 산정하였다.

홍수량 자료를 활용한 빈도해석으로 서규우 등(1995)과 김경덕 등(1996)은 한강 대교(구 인도교) 지점의 수위 자료를 분석하여 1991년의 단면을 기준으로 수위-유량 곡선을 분석해 연최대치 홍수량 계열을 구성하여 확률분포형을 적용하고 적합도 검정을 통해 최적 확률분포형을 선정하여 한강 대교 지점의 확률홍수량을 산정하는 데는 Wakeby-5, GEV, Gumbel 분포형이 적합한 것으로 분석하였다. 윤용남 등(1998)도 한강 대교 지점의 1918년부터 1992년간의 총 68년 동안 관측된 자료를 분석하여 지점빈도해석을 수행하였다. 분석 결과에서 3변수 대수정규분포, 제 1형 극치분포, 제 3형 극치분포 및 Pearson-type III 분포에 의한 확률홍수량 값이 부합되는 것으로 나타내었다.

따라서 본 연구에서는 한강 대교(구 인도교) 지점에서 관측된 연최대 유량 자료를 통해 빈도해석을 수행하였다. 빈도해석 방법은 지점빈도해석 방법 중에서 확률분포형을 이용하는 매개변수적 방법과 변동핵밀도함수를 적용한 비매개변수적 기법을 통해 확률 홍수량을 추정하였다.

* 정회원·서울시립대학교 공과대학 토목공학과 박사과정 수료 · E-mail : waterboy@uos.ac.kr
** 정회원·서울시립대학교 공과대학 토목공학과 박사과정 · E-mail : skyoon@uos.ac.kr
*** 정회원·서울시립대학교 공과대학 토목공학과 석사과정 · E-mail : civil798@uos.ac.kr
**** 정회원·서울시립대학교 공과대학 토목공학과 교수 · E-mail : ymoon@uos.ac.kr

2. 확률홍수량의 추정

한강대교 지점에서 1918년부터 2006년까지 89년 동안 관측된 연최대 홍수량 계열을 이용하여 빈도해석을 수행하였다. 연최대 유량 계열은 서울특별시 한강사업본부(2007)에서 수행한 한강수로 조사 보고서에서 제시한 연최대 유량을 이용하였다. 유량 자료는 [한국수문조사서] 및 [한국수문조사연보]에서 발췌한 내용을 중심으로 1925년도 자료는 [조선의 홍수(1925)] 및 1972년에 건설부가 조사한 [한강 하류부 및 남한강 홍수실태조사보고서]에서 발췌한 자료이다. 또한, 1962년 이후 자료는 수위-유량 곡선식에 의해 추정된 홍수량 자료를 제시하고 있다. 이에 대한 내용은 서울특별시(2007)에 자세히 기술되어 있다.

한강 대교 지점의 연최대 홍수량 계열은 1918~2006년까지의 관측 기간 중에서 1926, 1941~1951, 1977~1978년까지 총 89개 중에서 14개 년도의 결측 구간이 존재하며, 1939년은 관측된 자료의 홍수량 값이 670m³/s로 너무 작아 빈도해석 대상 자료에서 제외하였다. 따라서 총 89년 동안의 관측 기간 중에서 15년의 결측 자료를 제외한 74개 연최대치 홍수량 자료를 이용하여 빈도해석을 수행하였다.

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

변동핵밀도함수인 Modified Cauchy 핵함수(차영일 등, 2006)를 이용하여 지점빈도해석을 수행하였다. 다음 식 (1)과 식 (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.

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

$$\text{여기서, } \widehat{S}_D(\alpha) = \{n(n-1)\}^{-1} \alpha^{-5} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \phi^{iv} \{ \alpha^{-1}(X_i - X_j) \}$$

$$\widehat{\alpha}_2(h) = 1.357 \{ \widehat{S}_D(a) / \widehat{T}_D(b) \}^{1/7} h^{5/7}$$

$$\widehat{T}_D(b) = - \{n(n-1)\}^{-1} b^{-7} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \phi^{iv} \{ b^{-1}(X_i - X_j) \}$$

$$a = 0.920 \widehat{\lambda} n^{-1/7} \quad \text{and} \quad b = 0.920 \widehat{\lambda} n^{-1/9}$$

여기서, $\widehat{\lambda}$ 는 표본의 interquartile range 이다.

74개 연최대 홍수량 자료를 이용한 매개변수적 지점빈도해석을 수행하였다. 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 χ^2 검정, K-S 검정, CVM 검정 및 PPCC 검정을 통해 적합도 검정을 수행한 결과에서 Wakeby-5분포형, GEV 분포형과 Gumbel 분포형이 관측 자료와 적합성이 가장 뛰어난 것으로 분석되었다. 이는 서규우 등(1995)과 윤용남 등(1998)에서 제시한 결과와 어느 정도 부합되는 것으로 판단된다.

적합도 검정에서 우수한 결과를 보인 Wakeby-5분포형, GEV 분포형 및 Gumbel 분포형에 의해 추정된 확률 홍수량과 각 분포형별 누가확률밀도함수(CDF)를 도시하였다.

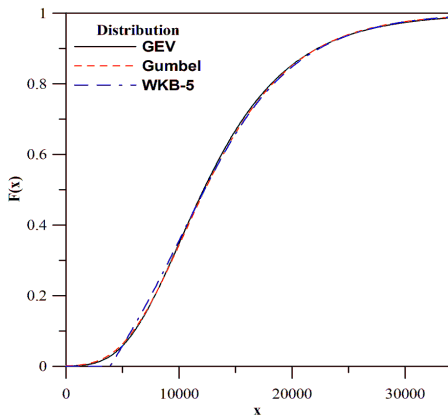


그림 1. 누가확률밀도함수의 비교

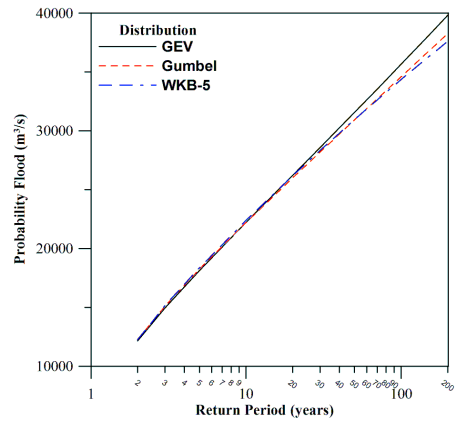


그림 2. 분포형별 확률홍수량 비교

적합성이 가장 뛰어난 GEV, Gumbel 및 Wakeby-5 분포형의 누가확률밀도함수의 형태와 위치는 거의 비슷한 결과를 나타내고 있으며, 이를 통해 추정된 확률홍수량은 약간의 차이를 보이고 있는 것으로 나타났다.

비매개변수적 지점빈도해석은 앞에서 분석한 매개변수적 지점빈도해석과 같이 확률분포형을 가정하지 아니하고, 발생한 대상 자료에 변동핵밀도함수를 이용하여 확률밀도함수를 추정함으로써 자료가 갖는 통계적 특성을 최대한 반영해주는 기법이다. 본 연구에서는 한강 대교 지점에서의 관측된 홍수량 자료를 대상으로 Modified Cauchy 핵함수와 변동 과역폭을 결정하는 SJPI 기법을 이용하여 비매개변수적 지점빈도해석을 수행하였다. 다음 그림은 한강 대교 지점의 연최대 홍수량 계열에 변동핵밀도함수를 적용하여 추정한 확률밀도 함수와 누가확률밀도 함수이다.

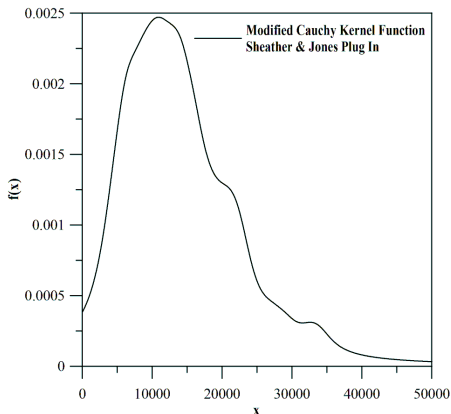


그림 3. 확률밀도함수의 추정 결과

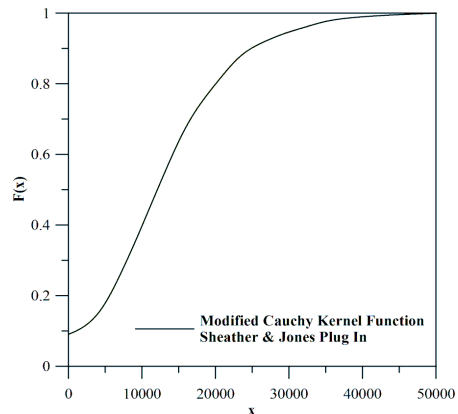


그림 4. 누가확률밀도함수의 추정 결과

다음의 표는 변동핵밀도함수를 이용하여 추정한 한강대교 지점의 확률홍수량이다.

표 1. 비매개변수적 지점빈도해석에 의한 한강대교 지점 확률홍수량 산정

| 재현기간 | 2 | 5 | 10 | 20 | 30 | 50 | 80 | 100 | 150 | 200 |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 확률홍수량 | 12428.9 | 19098.0 | 22953.6 | 27047.4 | 29742.4 | 32385.2 | 33903.9 | 34472.9 | 35384.0 | 35975.0 |

3. 확률홍수량의 비교 분석

본 연구에서 매개변수적 지점빈도해석과 비매개변수적 지점빈도해석으로 추정한 확률 홍수량을 한강대교 (구 인도교) 지점의 설계홍수량과 비교분석을 수행하였다. 아래의 표는 한강 대교 지점에서 관측된 연최대 홍수량 계열을 이용하여 산정한 빈도해석 결과와 한강 대교 지점의 설계홍수량을 비교한 결과이다. 분석 결과에서 매개변수적 지점빈도해석의 GEV 분포형, Gumbel 분포형 및 Wakeby-5 분포형과 비매개변수적 빈도

해석에 의한 Quntile값은 재현기간이 짧을수록 본 연구에서 산정한 확률홍수량이 설계홍수량보다 훨씬 더 크게 추정되었으며, 재현기간이 길어질수록 그 차이가 줄어드는 것으로 나타났다. 특히, 비매개변수적 지점빈도 해석에 의한 확률홍수량은 재현기간 200년에서 설계홍수량보다 작은 값을 갖는 것으로 나타났다.

표 2. 한강 대교 지점의 확률홍수량과 설계홍수량의 비교 분석

| 분포형 재현기간 | 매개변수적 지점빈도해석 | | | 비매개변수적 지점빈도해석 | 계획홍수량 |
|-------------|--------------|---------|---------|------------------|-------|
| | GEV | Gumbel | WKB-5 | | |
| 50 | 31559.9 | 30925.9 | 30960 | 32385.22 | 27980 |
| | ▲12.8% | ▲10.5% | ▲10.7% | ▲15.7% | |
| 80 | 34331.4 | 33424.2 | 33288 | 33903.92 | 30810 |
| | ▲11.4% | ▲8.5% | ▲8.0% | ▲10.0% | |
| 100 | 35658.8 | 34607.5 | 34367.1 | 34472.89 | 32160 |
| | ▲10.9% | ▲7.6% | ▲6.9% | ▲7.2% | |
| 150 | 38091.8 | 36754.3 | 36286.1 | 35384.01 | 34630 |
| | ▲10.0% | ▲6.1% | ▲4.8% | ▲2.2% | |
| 200 | 39835.3 | 38275.7 | 37615.5 | 35974.99 | 37000 |
| | ▲7.7% | ▲3.4% | ▲1.7% | ▼2.8% | |

분석 결과에서 Wakeby-5 분포형이 현재 이용하고 있는 설계홍수량과의 차이가 가장 작고, 선행 연구인 서규우 등(1995)과 윤용남 등(1998)에서 제시한 확률홍수량과의 관계를 고려하였을 때에 Wakeby-5 분포형이 한강대교 지점의 확률홍수량을 추정하는데 가장 적합한 확률분포형인 것으로 사료 된다.

4. 결론

한강 대교 지점에서 관측된 연최대치 홍수량 계열을 이용하여 지점빈도해석을 수행하였다. 빈도해석 방법은 확률분포형을 가정하는 매개변수적 지점빈도해석과 변동행밀도함수를 이용한 비매개변수적 지점빈도해석을 수행하였다. 분석 결과에서 본 연구에서 산정한 확률홍수량이 비매개변수적 빈도해석의 200년 빈도에 해당하는 Quntile을 제외하고 모두 더 큰 값을 갖는 것으로 추정되었다. 또한, 한강대교(구 인도교)지점의 설계홍수량 및 선행 연구(서규우; 1995, 윤용남; 1998)과 비교한 결과에서 한강대교 지점의 확률홍수량은 매개변수적 지점빈도해석에 의한 Wakeby-5 분포형이 가장 적합한 것으로 사료 된다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. 서울특별시 한강사업본부, 2007, 한강수로조사 보고서.
2. 김경덕, 서규우, 허준행, 조원철, 1996, “한강 인도교지점에서의 홍수빈도해석(II) -확률홍수량 산정-”, 대한토목학회논문집, 제16권, 제II-1호, 대한토목학회, pp. 23-31.
3. 서규우, 김경덕, 허준행, 조원철, 1995, “한강 인도교지점에서의 홍수빈도해석(I) -자료 해석 및 적정확률분포형 선정-”, 대한토목학회논문집, 제15권, 제6호, 대한토목학회, pp. 1697-1709.
4. 윤용남, 원석연, 1998, “한강 인도교 지점의 계획홍수량 산정을 위한 지점빈도해석”, 한국수자원학회 논문집, 제31권, 제4호, 한국수자원학회, pp. 469-481.

5. 차영일, 김범순, 문영일, 2006, "극치값 추정에 적합한 비매개변수적 핵함수 개발.", 한국수자원학회 논문집, 제 39권, 제 6호, 한국수자원학회, pp.187-194.
6. Hall, P., Marron, J. S., 1987, "Estimation of integrated squared density derivatives", *Statist. Probab. Lett.*, Vol. 6, 109-115.
7. 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.