

미국의 새로운 홍수빈도해석 가이드라인(Bulletin 17C)의 적용

이태삼* · John F. England** · 손찬영***

Lee, Taesam*, John F. England**, Son, Chanyoung***

Application of New Version of Flood Frequency Analysis (Bulletin 17C)

ABSTRACT

Accurate flood frequency and magnitude estimation has a critical role in flood risk management and damage reduction. In United States, Log Pearson Type-III (LP-III) distribution with method of moments for parameter estimation has been uniformly and consistently employed in estimating design floods. After the first version of flood frequency guidelines (Bulletin 15) was published in 1967, the revised version Bulletin 17B has been employed since 1982 up to now. A new version of flood frequency guidelines, Bulletin 17C, is prepared and about to come out soon. In the current study, we analyzed the new features of the upcoming Bulletin 17C and presented case studies applying its new features. From the presented results, we see what critical components in the new design flood frequency guideline we could learn.

Key words : Bulletin 17C, Expected method algorithms, Log pearson Type-III, Flood frequency analysis

초록

정확한 홍수빈도와 강도의 추정에는 홍수위험관리 및 피해감소에 중요한 역할을 담당하고 있다. 미국에서는 설계수문량 산정을 위한 Log Pearson Type-III (LP-III)와 매개변수 추정을 위한 모멘트법을 일괄적으로 적용해오고 있다. 1965년 홍수빈도해석 가이드라인인 Bulletin 15가 처음으로 만들어진 이후 이를 개량해 나아가 현재에는 Bulletin 17B가 가이드라인으로 사용되고 있다. 최근에 Bulletin 17C가 기존 가이드라인의 부족한 부분을 보완하고 새로운 방법들을 흡수하여 거의 완료상태에 있고 곧 출시될 예정이다. 본 연구에서는 새로이 보완된 Bulletin 17C에 대한 주요사항들을 분석하고 이를 적용하여 보았다. 분석결과들로부터 우리나라 설계홍수량 산정방법 및 절차의 개선방안에 대하여 고찰하였다.

검색어 : Bulletin 17C, Expected method algorithms, Log pearson Type-III, 홍수빈도해석

1. 서론

미국과 같은 선진국의 경우 약 50년 전부터 수공구조물의 규모 등의 결정에 활용되는 홍수빈도해석에 대한 공식적인 이론과 기준을 설정하여 모든 관련 계획 등의 기초로 이용되어 왔다. 대표적인 홍수빈도해석 지침서로는 Bulletin 시리즈를 예로 들 수 있으며 이는 1967년 홍수량빈도해석을 위한 가이드라인으로서 Bulletin No.15 "A Uniform Technique for Determining Flood Flow Frequencies"가 시초로 마련되었다(USWRC, 1967). 이 가이드라인의 핵심은 홍수량 자료를 로그로 변환한 후 Pearson Type-III (3변수 감마분포)를

* 정희원 · 경상대학교 공학연구원 토목공학과 부교수 (GyungSang National University · tae3lee@gnu.ac.kr)

** 미공병단 수자원재해관리센터 연구원 (Institute for Water Resources Risk Management Center · john.f.english@usace.army.mil)

*** 정희원 · 교신저자 · 수문기상협력센터 연구개발팀 연구원 (Corresponding Author · Hydrometeorological Cooperation Center · cyson@kwater.or.kr)

Received November 25, 2016/ revised December 28, 2016/ accepted January 4, 2017

사용하는 것이 골자로 되어있었다. 이후 1976년 이를 보완한 Bulletin 17이 발간되었다(USWRC, 1976). 이 보고서에서는 현재까지 가능한 기술적 방법들을 적용해서 통일된 분석을 시행하기 위한 세부적인 내용들이 담겨있다. 이 보고서가 다시 가중왜곡도(weighted skew)를 계산하는 부분에 대해서 보완되어 1977년에 Bulletin 17A가 만들어졌고 이후 세부적인 내용을 조금 더 개정하여 1982년에 현재 홍수빈도해석 지침서로 사용되고 있는 Bulletin 17B가 개정되었다(IACWD, 1982). 최종 보고서인 Bulletin 17B에는 일괄적 왜곡도 연구 결과로부터 지점별 왜곡도를 가중시키는 절차를 담고 있으며, 이와 더불어 이상치(outlier)의 탐지와 처리, 두 지점간의 비교, 빈도곡선에 대한 신뢰수준 산정에 관한 내용들을 담고 있다.

이후 2005년 HFAWG (Hydrologic Frequency Analysis Work Group)에서는 홍수빈도해석에 대한 연구진척을 분석하고 Bulletin 17B의 개정방향에 대해 논의하였고 2006년 홍수빈도해석의 개정 연구를 제안하였다. 이는 일반화 모멘트법(generalized method of moments)에 대한 평가, 문제시되는 자료에 대한 새로운 해석절차, Monte-Carlo 시뮬레이션 연구를 통한 새로운 방법들의 광범위한 평가들을 담고 있다. 이를 바탕으로 2013년 HFAWG에서는 Bulletin 17B에 대한 개정을 제안하였다. 현재 다양한 연구를 바탕으로 Bulletin 17C의 초기버전을 만들어 검토작업에 들어갔으며 2016년 말에 보고서를 완성할 예정이다.

본 연구에서는 설계홍수량 산정을 위한 새로운 가이드라인인 Bulletin 17C의 주요기법들을 소개하고 예시들을 통해 새로이 적용된 기법들을 확인해봄으로써 우리나라 홍수량 산정의 향후 발전방향을 모색해 보았다.

2. 이론적 배경

2.1 Multiple Grubbs-Beck Test (MGBT) and Potentially Influential Low Flows (PILFs)

Multiple Grubbs-Beck Test (MGBT)는 관측치 중 최소값에 대해서 하부이상치인지를 판단하는 Grubbs-Beck Test (Grubbs and Beck, 1972)를 발전시켜 하나 이상(예 k 개)의 관측치에 대해서 하부이상치에 대한 판단을 가능케 하는 기법으로 Cohn et al. (2013)에 의해서 개발되었다. 이는 연 최대홍수량 자료에 로그를 취해 변형할 경우 음왜곡도(negative skewness)가 될 수도 있는데 이때 작은 관측치가 필요이상으로 많은 영향을 미치게 되어 비현실적인 저홍수량을 야기시키므로 이에 대한 영향을 소거하기 위한 제거 범위를 계산하고자 제안되었다. 로그를 취한 연 최대홍수량을 X_i [$i = 1, \dots, n$]라 하고 이를 작은 것부터 순차적으로 정리한 값을 $X_{(i)}$ 라 한다. 예를 들어, $X_{(1)}$ 는 최저치를 의미한다. 이 변수를

정규분포로 가정하고 다음의 통계치를 계산한다.

$$\tilde{\omega}_k = \frac{X_{(k)} - \hat{\mu}_k}{\hat{\sigma}_k} \quad (1)$$

$$\hat{\mu}_k = \frac{1}{n-k} \sum_{i=k+1}^n X_{(i)} \quad (2)$$

$$\hat{\sigma}_k^2 = \frac{1}{n-k-1} \sum_{i=k+1}^n (X_{(i)} - \hat{\mu}_k)^2 \quad (3)$$

이를 표준정규분포화로 변환시켜 이 값보다 표준정규분포로부터 나오는 k 번째 최소값(η) 보다 클 확률이 특정 확률(예, 0.01)보다 작을 경우 이를 하부이상치로 결정하며 Eq. (4)와 같다. 이처럼 결정된 값은 잠재적 영향 저홍수량(Potentially-Influential Low Floods, PILFs)이라고 하였다.

$$p_k[\eta] = P[\tilde{\omega}_k < \eta] \quad (4)$$

2.2 Expected Moment Algorithms (EMA)

Expected Moment Algorithms (EMA)은 Pearson Type-III (P-III) 분포형의 매개변수를 산정하기 위한 모멘트법을 일반화한 것이라 할 수 있다(Cohn et al., 2013; England Jr, 2004; England Jr and Cohn, 2008; England Jr et al., 2003; Griffis et al., 2004). 특히 중도절단자료(censored data)를 매개변수 추정에 활용할 수 있도록 해주는데, 이는 Bulletin 17C의 주요 핵심 중 하나이다(Cohn et al., 1997). 예를 들어 과거 수십 년 전의 흔적수위나 고증자료, 주민들의 증언 등이 정보화되어 매개변수 추정 및 설계에 필요한 재현기간의 홍수량을 보다 정확하게 추정할 수 있다(England et al., 2014; England et al., 2010). 10년전 큰 홍수가 발생했을 때 수위상승으로 특정위치가 침수되었을 경우 이를 유량으로 추정 하면 이때의 홍수량은 $Q > 1,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 또는 $Q < 1,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 형태로 수치화 될 수 있다. 이는 다음의 매개변수 추정절차를 통해 수치화가 된다.

먼저 여러 모아진 자료들 중 현재기간 동안 관측된 유량 자료 ($Q_i, i = 1, \dots, N$)에 대해 로그를 취한 자료들 ($X_i = \log Q_i, i = 1, \dots, N$)를 사용한다. 여기서, 로그를 취한 이유는 적용될 확률분포형이 Log Pearson Type-III (LP-III)이기 때문이다.

적용된 P-III의 확률밀도함수의 형태는 Eq. (5)와 같이 정의된다.

$$f(x|\alpha, \beta, \tau) = \frac{\left(\frac{x-\tau}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{x-\tau}{\beta}\right)}{|\beta|\Gamma(\alpha)} \quad (5)$$

여기서, α 는 형상변수(shape parameter), β 는 규모변수(scale parameter), τ 는 위치변수(location parameter)를 의미한다.

이들 자료에서 일반적인 유량 관측을 통해 얻어진 자료를 시스템 자료(system data, X_s)라 하고, 고증 정보 등을 통해 얻은 자료를 역사자료(historical data, X_H)라 한다. 만일 고증 정보를 통해 T값의 홍수량이 중도절단자료를 통해 나왔다면(예, 흔적수위 환산을 통해 이전의 홍수량이 1,000 m³/s (T)로 산정되었다.)

$$X_s^< = [X_s < \log T] \tag{6}$$

$$X_H^< = [X_H < \log T] \tag{7}$$

$$N_H^< = \# \text{ of data that } [X_H < \log T] \tag{8}$$

이를 통해 Eq. (9)의 모멘트 값을 구하게 된다.

$$\tilde{\mu} = \frac{\sum X_s^< + \sum X^> + N_H^< E[X_H^<]}{N} \tag{9}$$

이 모멘트는 특정치(log T)보다 작은 시스템 자료($X_s^<$)와 특정치보다 큰 전체 자료의 값($X^>$)을 더하고 나머지 역사자료에 대한 합은 특정치보다 작은 역사자료($X_H^<$)의 기대치에 그 개수를 곱한 것으로 $N_H^< E[X_H^<]$ 를 산정하게 된다. 다른 2차 및 3차 중앙 모멘트의 값도 Eqs. (10)~(11)과 같이 유사한 방식으로 산정할 수 있다.

$$\tilde{\sigma}^2 = \frac{c_2 \left(\sum (X_s^< - \tilde{\mu})^2 + \sum (X^> - \tilde{\mu})^2 + N_H^< E[(X_H^< - \tilde{\mu})^2] \right)}{N} \tag{10}$$

$$\tilde{\gamma} = \frac{c_3 \left(\sum (X_s^< - \tilde{\mu})^3 + \sum (X^> - \tilde{\mu})^3 + N_H^< E[(X_H^< - \tilde{\mu})^3] \right)}{N \tilde{\sigma}^3} \tag{11}$$

여기서 사용된 계수 c_2 와 c_3 는 Eqs. (12)~(13)를 통해 산정되며 특정값(log T)보다 작은 역사자료의 기대값은 α , β , γ 의 매개변수를 가지는 감마분포를 가정하기 때문에 $E[X_H^<]$ 는 Eq. (14)와 같이 쉽게 계산될 수 있다.

$$c_2 = (N_s^< + N^>) / (N_s^< + N^> - 1) \tag{12}$$

$$c_3 = (N_s^< + N^>)^3 / [(N_s^< + N^> - 1)(N_s^< + N^> - 2)] \tag{13}$$

$$\begin{aligned} E[X_H^< | \alpha, \beta, \tau] &= E[X | \alpha, \beta, \tau, X < \log(T)] \\ &= \tau + \beta \frac{\Gamma\left(\frac{\log(T) - \tau}{\beta}, \alpha + 1\right)}{\Gamma\left(\frac{\log(T) - \tau}{\beta}, \alpha\right)} \end{aligned} \tag{14}$$

다른 p 차 중앙모멘트도 Eq. (15)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} E[(X_H^< - \tilde{\mu})^p | \alpha, \beta, \tau] &= E[(X - \tilde{\mu})^p | \alpha, \beta, \tau, X < \log(T)] \\ &= \sum_{j=0}^p \binom{p}{j} \beta^j (\tau - \tilde{\mu})^{p-j} \left(\frac{\Gamma\left(\frac{\log(T) - \tau}{\beta}, \alpha + j\right)}{\Gamma\left(\frac{\log(T) - \tau}{\beta}, \alpha\right)} \right) \end{aligned} \tag{15}$$

위의 식을 통해 계산된 모멘트로부터 매개변수를 구하면 Eqs. (16)~(18)과 같다.

$$\tilde{\alpha} = 4/\tilde{\gamma}^2 \tag{16}$$

$$\tilde{\beta} = \text{sign}(\tilde{\gamma}) \left(\frac{\tilde{\sigma}^2}{\tilde{\alpha}} \right)^{1/2} \tag{17}$$

$$\tilde{\tau} = \tilde{\mu} - \tilde{\alpha} \tilde{\beta} \tag{18}$$

EMA는 위의 방법을 통해 모멘트를 구하고 매개변수를 추정하는 과정을 반복해서 수렴할 경우의 값을 취하여 추정을 완료하게 되는데 이는 Dempster et al. (1977)에 개발된 Expectation-Maximization (EM) algorithm에서 그 방식이 도입되었기 때문이다.

3. 분석결과

3.1 MGBT 적용사례 - Orestimba Creek near Newman, California

Fig. 1은 Orestimba Creek의 연최대홍수량을 보여주고 있다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 연최대홍수량이 0인 값이 10개 존재하고 있으며 극치 홍수량이라고 보기에는 작은 값들이 다수 존재하는 것을 확인할 수 있다. 모든 연최대홍수량 자료 중 0을 제외하고 왜곡도를 산정한 결과 -1.3336의 왜곡도를 보였는데 이는 매개변수 산정 시 작은 값들의 영향이 매우 큼을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 위에서 서술된 PILF값들을 계산에서 제외시켰으며 산정방법은 MGBT 분석을 통해 이루어졌다. 0보다 큰 연최대홍수량 자료에 로그를 취한 값들에 대해서 MGBT 분석을 실시한 결과, 하부이상치 제거 범위는 584 cfs (=16.54 cms)이하로 산정되었다. 즉, 홍수량

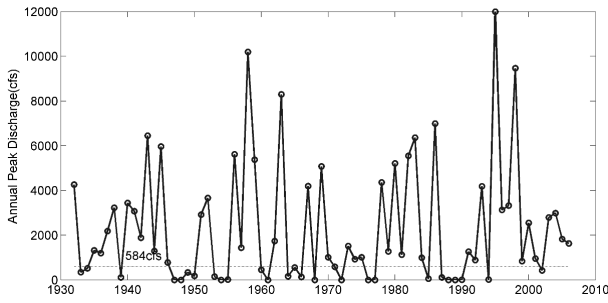


Fig. 1. Time Series of Annual Peak Flow of Orestimba Creek, CA. Note that the Red Dotted Line Indicates the Low Outlier Threshold (584 cfs) Defined by MGBT (see Fig. 2 for the Detail Information)

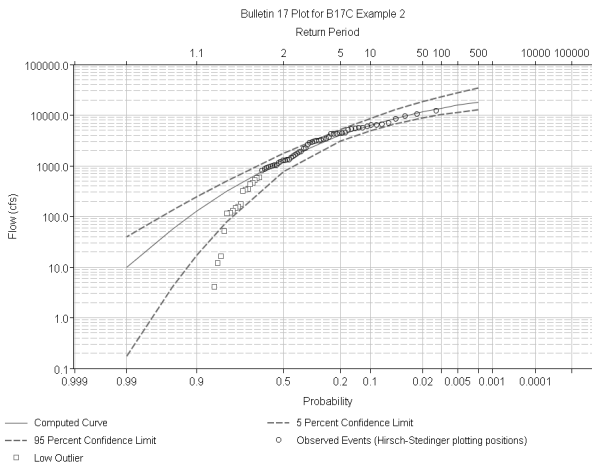


Fig. 2. Example of Low Outlier Detected by MGBT for Annual Peak Flow of Orestimba Creek, CA. Note that the Green Square Markers Indicate the PILFs and Eliminated in the Fitting. The Plot was Generated from HEC-SSP2.1 (unit: cfs, 1 cms =35.31 cfs)

584 cfs이하는 잠재적 영향 저홍수량(PILFs)이라 할 수 있다. Fig. 2는 MGBT 분석을 통해 계산된 PILFs (녹색 사각형)와 PILFs를 제외하여 모의된 재현기간별 홍수량 결과를 보여주고 있다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 가장 작은 것부터 시작해서 어느 자료까지 PILF로 판단할 것인지를 알 수 있다. Table 1은 MGBT

분석을 통한 여러 하부이상치들을 제거하여 모의된 결과와 오직 하나의 하부이상치만을 제거(Single Grubbs-Beck Test; SGBT) 하여 모의된 결과를 정량적으로 보여주고 있다. 분석결과, 재현기간 5년과 10년의 홍수량을 제외한 모든 재현기간의 홍수량이 MGBT 분석을 적용한 극치홍수량이 크게 산정되었으며 낮은 설계빈도에서는 큰 차이를 보이지 않으나 높은 설계빈도 특히 50년 이상의 빈도에서는 10~20% 이상까지도 설계값이 크게 산정된다는 것을 알 수가 있다. 이는 PILFs값들에 대해서 그 영향들을 MGBT방법을 통해 제거함으로써 얻어진 것이다. 이처럼 MGBT 분석은 PILFs의 범위를 판단해주는 데 있어 매우 유용하며 PILFs의 제거를 통해 비교적 현실적인 홍수량 계산이 가능해질 수 있음을 확인할 수 있다. 하지만, MGBT 분석의 경우 다수의 하부이상치 자료가 제거 되어 모의를 수행함에 따라 자료가 충분히 확보된 경우에만 보다 신뢰할 수 있는 설계홍수량을 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 EMA 기법 적용사례 - Arkansas River, Colorado

본 연구에서는 중도절단자료를 활용하여 확률분포형의 매개변수를 추정할 수 있는 EMA를 적용하고자 Arkansas River를 대상지점으로 선정하고 적용하였다. Arkansas River는 Mississippi River의 주요지류로서 Fig. 3에서 보는 바와 같이 Colorado에서 발원하여 Arkansas에서 Mississippi River와 합류하게 되며, 본 지점은 Arkansas River 중 Pueblo Dam에 위치한 USGS 07099500지점의 자료를 활용하였다.

England et al. (2010)은 이 지역에 대하여 1921년 6월 2-6일에 발생한 홍수의 흔적들을 비롯한 다양한 분석을 통하여 과거 발생한 홍수정보를 파악한 바 있고 이를 Table 2에서 보는 바와 같이 수치화시켰다. 이를 시계열 자료로 시각화시켜 Fig. 4의 상위패널과 같이 나타낼 수 있다. Table 2에 나타나 있는 1165~1858년도 사이의 하부경계값인 150,000 cfs (=4248 cms)는 하천 홍수터에서 시추한 자료를 분석해서 다른 높이의 시추에 쌓인 흙에서 얻은 정보를 통해 어느 특정높이까지 홍수가 발생한 지를 알 수 있었고 이렇게 쌓인 흙의 높이를 통해 그 기간을 추정하고 수위를 유량으로 환산하여 이 기간 동안 150,000 cfs 이상의 값이 발생되지 않음을

Table 1. Estimated Floods for the Annual Peak flow of Orestimba Creek, California (unit: cfs, 1 cms=35.31 cfs) with MGBT and SGBT. Note that MGBT Eliminates Low 17 Annual Peak Flows While SGBT (Single Grubbs-Beck Test) Does the Smallest Flow and Relative Difference is Estimated with Relative Diff (%)= (Diff MGBT-SGBT)/SGBT*100

Return Period	Prob.*100	MGBT Estimated Flood	SGBT Estimated Flood	Diff MGBT-SGBT	Relative Diff (%)
500	0.2	18,149.8	14,655.8	3,494.0	23.84
200	0.5	15,800.3	13,514.1	2,286.2	16.92
100	1	13,823.8	12,382.0	1,441.8	11.64
50	2	11,689.3	10,972.2	717.1	6.54
20	5	8,677.3	8,631.5	45.8	0.53

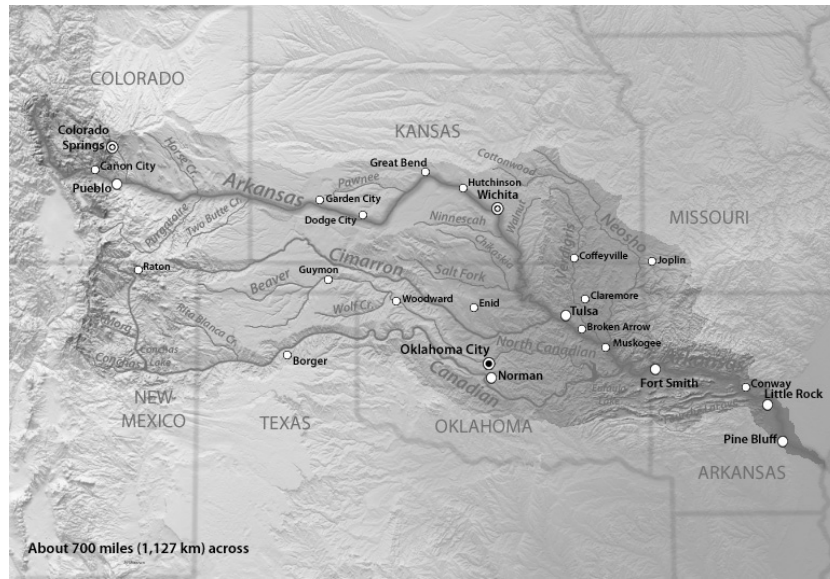


Fig. 3. Arkansas River map (https://en.wikipedia.org/wiki/Arkansas_River#/media/File:Arkansasrivermap.jpg). Note that the Station of the Annual Peak Data Used is Near Pubeblo (See the Top-Left Part)

Table 2. Perception Threshold for the Annual Peak Flow of Arkansas River, Colorado (unit: cfs, 1 cms=35.31 cfs)

Start Year	End Year	Low Threshold	High Threshold	Comment
1165	2004	0	inf	Total Record
1165	1858	150,000	inf	Paleoflood Nonexceedance boundary
1859	1863	40,000	inf	1864 Historical Info
1865	1892	40,000	inf	1864 Historical Info
1893	1894	19,900	inf	1893 Historical Info
1977	2004	20,000	inf	Post-reservoir Boundary

Table 3. Estimated Statistics with EMA and its Parameters for LP-III as Well as Data Information for the Annual Peak Flow of Arkansas River in Colorado

Statistics and Parameters		Data Information	
Mean (μ)	3.886	Historic Events	4
Standard Dev (σ)	0.246	Missing Events	727
Skew (γ)	0.818	Systematic Events	81
α	5.978	Historic Period	840
β	0.101		
τ	3.285		

알 수 있었다. 그리고 Pueblo Dam이 건설된 이후 1977~2004까지 20,000 cfs 이상의 홍수가 발생되지 않은 것도 확인하여 이를 수치화하였다.

수치화된 중도절단자료들을 통합시켜 EMA분석에 활용하였으며 Eqs. (9)-(11)의 통계치(평균, 표준편차, 왜곡도)를 산정한 결과와 통계치를 활용하여 LP-III분포형의 매개변수(Eqs. (16)-(18))를 산정한 결과는 Table 3과 같다. 이를 바탕으로 각 경험적 방법과

LP-III분포형의 다양한 분위 수에 대하여 값을 표시하여 Fig. 4의 아래 패널에 나타내었다. 여기서 하늘색으로 채워진 원 마크가 과거 정보들을 수치화하여 산정된 것으로 Fig. 4에서 보는 바와 같이 중도절단자료들이 수치화 됨에 따라 상위 분위(probability 0.002-0.001)에서 모형을 적용하는데 큰 도움을 주는 것을 확인할 수 있다.

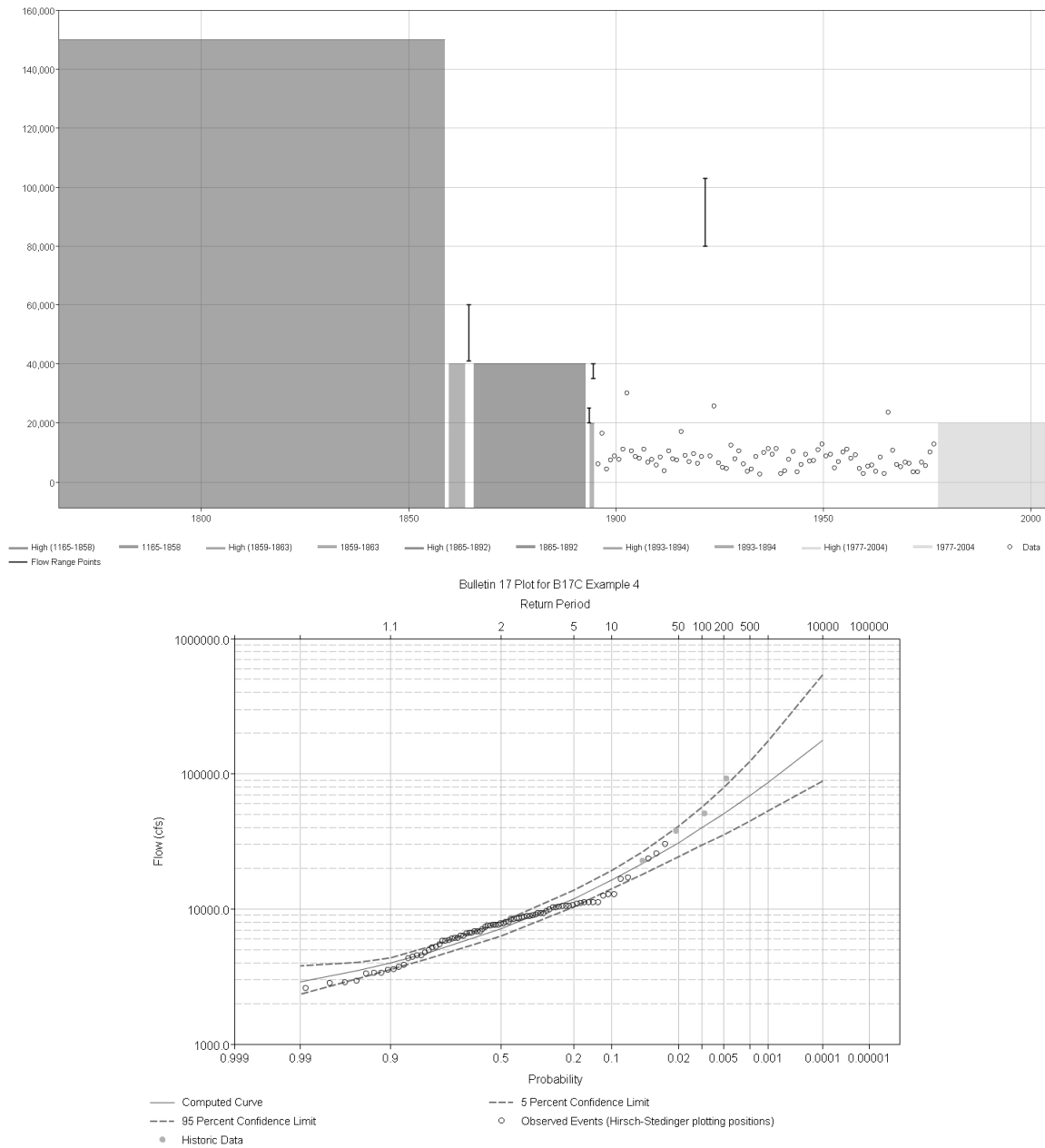


Fig. 4. Records in Arkansas River, Pueblo. The Plot Shows the Systematic and Historical Data Values as Well as Their Censoring Information. Note that the Circles Indicate the Systematic Data Xs and the Rectangles Present Censoring Information. The Plot was Generated from HEC-SSP2.1 (unit: cfs, 1 cms=35.31 cfs)

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 새로 발간될 홍수빈도해석 가이드라인(Bulletin 17C)의 핵심내용인 MGBT방법과 EMA방법을 검토하고 활용가능성을 살펴보고자 하였다. 주요핵심내용인 MGBT방법과 EMA방법은 자료들에 대한 처리와 이를 적절하게 정보화 및 수치화하여 보다 신뢰할 수 있는 홍수량을 추정하는데 목적이 있다. 분석결과

로그를 취한 홍수량이 음쇄곡도의 특성을 가질 경우 MGBT방법으로 홍수빈도해석에 필요이상으로 영향을 주는 하부 이상치들을 제거하고 EMA방법을 통해 기존의 홍수흔적 및 가능한 홍수정보들을 최대한 활용하여 매개변수를 추정함에 따라 현실적이고 상당히 안정적인 홍수량 산정을 가능하게 해주는 것으로 나타났다.

현재 우리나라의 경우 설계홍수량 산정은 실제 관측된 홍수량을 대부분 사용하지 않고 설계강우를 추정하고 Clark 단위도법에

의한 개념적 강우-유출 모델을 바탕으로 홍수량을 산정하게 된다. 물론, 이러한 방법이 부적절하다고 볼 수는 없으나, 실제 홍수량 관측을 등한시하는 등 문제점 또한 내포하고 있음을 간과해서는 안 될 것으로 여겨진다.

2011년 동일본 대지진으로부터 생성된 지진해일로부터 유일하게 피해를 막아낸 방조제를 지었던 와무라 유키에 준장은 자신이 겪은 경험을 바탕으로 15.5 m까지 높이로 설계하였고 이 정보가 결국은 한 마을을 지켜낸 결과로 이어지게 되었다.

어떠한 모델결과도 실제 관측한 자료 없이는 그 신뢰성이 떨어질 수 밖에 없다. Bulletin 17C를 새로 집필하는 과정을 지켜보며 관측자료에 대한 소중함을 가장 근본철학으로 하여 효율적으로 활용하기 위한 노력이 돋보임을 알 수 있었다. 나아가 Bulletin 18이상의 새로운 방향도 제시하고 있는데 이는 미계측 지역에 대한 설계홍수량 산정 방법, 기후변화에 대한 고려방안 등에 대해서 연구가 계속되고 있다.

감사의 글

이 논문은 국민안전처 자연재해저감기술개발사업단(자연피해 예측 및 저감연구개발사업)의 지원으로 수행한 ‘기후변화 적응을 위한 연안도시지역별 복합원인의 홍수 취약성 평가기술 개발 및 대응 방안 연구’ [MPSS-자연-2015-77]과제와 2015년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행되었고(2015R1A1A1A05001007) 이에 감사드립니다.

References

- Cohn, T. A., England, J. F., Berenbrock, C. E., Mason, R. R., Stedinger, J. R. and Lamontagne, J. R. (2013). “A generalized Grubbs-Beck test statistic for detecting multiple potentially influential low outliers in flood series.” *Water Resources Research*, Vol. 49, No. 8, pp. 5047-5058.
- Cohn, T. A., Lane, W. L. and Baier, W. G. (1997). “An algorithm for computing moments-based flood quantile estimates when historical flood information is available.” *Water Resources Research*, Vol. 33, No. 9, pp. 2089-2096.
- Dempster, A. P., Laird, N. M. and Rubin, D. B. (1977). “Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm.” *Journal of the Royal Statistical Society. Series B*, Vol. 39, No. 1, pp. 1-38.
- England Jr, J. F. (2004). “A simple moments-based estimator that utilizes historical and paleohydrologic information.” paper presented at Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management 2000, Minneapolis, MN.
- England Jr, J. F. and Cohn, T. A. (2008). “Bulletin 17B flood frequency revisions: Practical software and test comparison results.” paper presented at World Environmental and Water Resources Congress 2008: Ahupua'a, Honolulu, HI.
- England Jr, J. F., Jarrett, R. D. and Salas, J. D. (2003). “Data-based comparisons of moments estimators using historical and paleoflood data.” *Journal of Hydrology*, Vol. 278, No. 1-4, pp. 172-196.
- England, J. F., Godaire, J. E., Klinger, R. E., Bauer, T. R. and Julien, P. Y. (2010). “Paleohydrologic bounds and extreme flood frequency of the Upper Arkansas River, Colorado, USA.” *Geomorphology*, Vol. 124, No. 1-2, pp. 1-16.
- England, J. F., Julien, P. Y. and Velleux, M. L. (2014). “Physically-based extreme flood frequency with stochastic storm transposition and paleoflood data on large watersheds.” *Journal of Hydrology*, Vol. 510, pp. 228-245.
- Griffis, V. W., Stedinger, J. R. and Cohn, T. A. (2004). “Log pearson type 3 quantile estimators with regional skew information and low outlier adjustments.” *Water Resources Research*, Vol. 40, No. 7, pp. W075031-W0750317.
- Grubbs, F. E. and Beck, G. (1972). “Extension of sample sizes and percentage points for significance tests of outlying observations.” *Technometrics*, Vol. 14, No. 4, pp. 847-854.
- IACWD (1982). “Guidelines for determining flood flow frequency, Bulletin 17-B. Technical report.” Interagency Committee on Water Data, Washington, D.C.
- USWRC (1967). “A uniform technique for determining flood flow frequencies, Bulletin No. 15.” U.S. Water Resources Council, Washington, D.C.
- USWRC (1976). “Guidelines for determining flood flow frequency, Bulletin No. 17.” U.S. Water Resources Council, Washington, D.C.