韓國水資源學會論文集
第48卷 第6號·2015年 6月
pp. 511~522

J. Korea Water Resour. Assoc.
Vol. 48, No. 6:511-522, June 2015
http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2015.48.6.511
pISSN 1226-6280 • eISSN 2287-6138

한강유역 관측유출자료가 지역홍수빈도분석 결과에 미치는 영향

Effect of Observed Discharge Data on Regional Flood Frequency Analysis in the Han River Basin

김 남 원* / 이 정 은** / 이 정 우*** / 정 용****

Kim, Nam Won / Lee, Jeong Eun / Lee, Jeongwoo / Jung, Yong

Abstract

This study assessed the impact of uncertainties in flood data on the results of flood frequency analysis for Han river basin. To meet this aim, this study quantified assessment focused on the index flood and quantile by regional flood frequency analysis using the flood data from 17 water level gauges in Han river basin. We analysed the results categorized by three cases according to the characteristics of the measured data. Firstly, we analyzed the regional flood frequency for the water level gauge in the Pyungchang river basin to investigate the impact of water level data. The results has the error of 0.240 with respect to the mean flood. Secondly, we examined the impact of uncertainty in measurement data generated by the application of rating on the results of regional flood frequency analysis. We have compared the results by applying the rating estimated for each year to the one by the recently estimated rating. The results showed that the mean error has 0.246 in terms of the mean flood. Finally, we have inferred the regional flood frequency analysis results with the regulated flow in the downstream area of dams. The regulated specific discharge in the downstream area of dams controlled by dam operation showed a large difference to the estimated specific discharge in the downstream area of dams by extension of the natural specific discharge in the upstream area using the regionalization method.

Keywords : regional flood frequency analysis, uncertainty, water stage, rating, regionalization

요 지

본 연구에서는 한강유역을 대상으로 관측홍수량 자료의 불확실성이 홍수빈도분석 결과에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 이를 위해 한강유역 내의 17개 수위관측지점의 홍수량 자료를 이용하여, 지역홍수빈도분석을 수행한 결과인 지수홍수와 분위수를 중심으로 정량적인 평가를 수행하였다. 연구결과는 관측자료의 특성에 따라 3가지 경우로 분류하여 분석하였다. 첫 번째로 수위자료의 영향을 파악하기 위해 평창강 유역의 수위관측지점을 대상으로 지역홍수빈도분석 결과를 분석하면, 평균홍수량에 대한 오차는 0.240으로 평가되었다. 두 번째로 레이팅 적용에 따른 관측자료의 불확실성이 지역홍수빈도분석 결과에 미치는 영향을 분석하였다. 해당연도에 개발된 레이팅을 각각 적용한 결과와 가장 최근 개발된 레이팅을 적용한 결과를 분석해보면, 평균홍수량에 대한 오차는 평균 0.246으로 평가되었다. 마지막으로 인위적으로 유량이 조절된 댐하류의 통제된 흐름영역에서의 지역홍수빈도분석 결과를 유추하였다. 댐하류에서의 홍수량 거동은 댐운영에 의해 조절된 것으로 댐상류의 자연유역에서의 비유량 지역화 결과를 연장할 경우, 댐하류의 조절유역에서의 비유량 거동과 큰 차이를 나타내었다.

핵심용어 : 지역홍수빈도분석, 불확실성, 수위, 수위-유량관계, 지역화

* 한국건설기술연구원 수자원·하천연구소 선임연구위원 (e-mail: nwkim@kict.re.kr)
Senior Research Fellow, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang-si, Gyeonggi-do, Korea
** 교신저자, 한국건설기술연구원 수자원·하천연구소 수석연구원 (e-mail: jeus22@kict.re.kr, Tel: 82-31-910-0275)
Corresponding Author, Senior Researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang-si, Gyeonggi-do, Korea
*** 한국건설기술연구원 수자원·하천연구소 수석연구원 (e-mail: ljw2961@kict.re.kr)
Senior Researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang-si, Gyeonggi-do, Korea
**** 원광대학교 토목환경공학과 조교수 (e-mail: yong_jung@wku.ac.kr)
Assistant Professor, Civil and Environmental Engineering, Wonkwang University, Iksan-si, Jeonbuk, Korea

1. 서 론

수공구조물의 설계 및 계획을 위해 설정된 홍수량 및 홍수거동을 설계홍수량이라 하며, 댐과 같이 가능최대홍수량(Probable Maximum Flood)을 기준으로 설계되는 대규모 수공구조물을 제외하고 대부분의 하천구조물의 설계홍수량은 특정 재현기간에 해당되는 홍수량을 해석하는 홍수빈도분석 절차를 거쳐 산정된 빈도홍수량으로 결정된다. 홍수빈도분석 결과는 설계홍수량의 기본이 될 뿐만 아니라 수자원 정책 및 평가에 있어서도 중요한 잣대로도 활용된다.

빈도홍수량의 추정은 관측자료를 이용하여 통계적인 절차에 의해서 계산하는 것이 이상적이나(IACWD, 1982), 이의 대안적인 방법으로 강우를 시공간적으로 분석한 결과인 설계호우를 강우-유출관계에 접목한 설계호우-단위도법이 주로 이용된다(MCT, 2007). 일반적으로 자료에 의한 홍수량 빈도분석은 첨두유량만이 필요할 때 사용하는 방법이고, 설계호우-단위도법은 댐설계와 같이 첨두유량은 물론 이에 따른 수문곡선의 거동이 중요한 경우에 이용된다. 이외의 빈도홍수량 추정방법으로 동역학적 홍수빈도분석법, 그리고 경험식 등이 있다.

빈도홍수량 추정에 있어 여러 방법이 사용되기 때문에 도출된 값의 이산성 및 불확실성으로 인하여 일종의 표준이 되는 지침이 필요하다. 미국의 경우, 국회 차원에서 이를 다루어 통계적인 홍수빈도분석을 기본으로 하는 지침 Bulletin #17 (IACWD, 1982)을 작성하여 표준으로 사용하였고, 영국에서는 Flood Studies Report (NERC, 1975), Flood Estimation Handbook (IH, 1999)을 통하여 통계적인 홍수빈도분석의 결과를 표준으로 하여, 강우-유출관계의 매개변수를 결정하였다. 호주에서도 Australian Rainfall and Runoff(IE, 1987)을 통하여 통계적 홍수빈도분석 결과를 근간으로 한 강우-유출관계를 제시하였다. 이와 같이 미국, 영국, 호주 등 선진 국가에서는 홍수량 자료로 유도되는 통계적인 결과를 표준으로 삼고, 설계호우-단위도법의 각종 매개변수를 추정하는 방법의 근간으로 하고 있다.

국내의 경우 대부분 빈도홍수량 추정시 설계호우-단위도법을 사용하고 있다(MCT, 2007). 그러나 이 방법은 확률강우량 산정, 설계강우의 시간분포, 면적우량환산계수, 단위도 매개변수 산정 등 여러 절차를 거쳐야 하고, 각 절차별 도출되는 값뿐만 아니라 절차 전반에 걸쳐 많은 불확실성과 주관적 요소가 내재되어 있다. 따라서 불확실성과 주관적인 요소를 줄이고 국내 실정에 적합한 각 절차별 방법을 정립해가려는 다양한 연구가 수행되어 왔다(MC, 1993; MCT, 2000a, 2000b; MLTM, 2011). 그러나, 이러한 연구들은 각 성분별 거동에 초점을 둔 것으로 추정되는 빈도홍수량 산정 결과의 타당성에 관한 국내 연구는 수행되고 있지 못한 실정이다. 이는 실제 빈도홍수량의 기준이 되는 방법인 홍수량 자료에 기반한 홍수빈도분석 연구가 상대적으로 매우 미흡하기 때문이다.

강우-유출관계가 아닌 홍수량 자료를 직접 이용하여 홍수빈도분석을 수행한 연구로서 수자원관리기법개발연구조사 보고서(MC, 1993)에서는 첨두유량에 대한 자료를 수집한 바 있으며, Kim and Won (2004)에 의해서 지역홍수빈도분석의 절차를 시도한 바 있다. 그러나, MLTM (2010b)에서 '우리나라의 경우는 연최대 순간 홍수량 자료계열을 확보하고 있는 지점 수나 자료기간, 자료의 신뢰도 등에 여러 가지 문제가 있어서 홍수빈도 분석방법에 의한 미계측유역의 설계홍수량 산정방법의 개발이 현재로서는 어려울 것으로 판단됨'이라 지적한 것처럼, 우리나라의 홍수량 자료기간이 충분치 않고, 신뢰성이 부족하다는 이유로 미국, 영국, 호주 등에서 표준으로 삼고 있는 홍수량 자료기반의 홍수빈도분석 방법이 국내에서는 널리 활용되지 못하고 있다. 따라서 이 방법의 활용성을 높이기 위해서는 홍수량 자료의 불확실성에 대한 충분한 검토가 필요하며 또한 이러한 불확실성을 줄이기 위한 연구가 필요하다. 우리나라는 전국적으로 570개소의 수위관측소가 운영되고 있고 이 중 약 35%인 200개소에서 수위-유량관계식이 제시(MLTM, 2010a)되어 있어 통계적 홍수빈도분석을 위한 홍수량 자료 확보 여건이 마련되어 가고 있다. 다만, 홍수빈도분석의 관점에서 관측자료의 불확실성에 대한 문헌을 찾아볼 수 없으며, 그에 대한 문제도 정량적, 정성적으로 논의되지 못한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 관측된 홍수자료가 홍수빈도분석에 어떠한 영향을 미치는지에 대해서 정량적으로 평가하고자 하였다. 이를 위해서 먼저 관측 수위 및 유량 자료의 불확실성에 대해서 구체적으로 살펴보고, 한강유역을 대상으로 자료의 각 특성별 문제를 중심으로 홍수빈도분석 결과를 고찰하고자 하였다.

2. 문제의 제기와 분석방법의 설정

2.1 관측자료의 특성

통계적인 방법에 의한 홍수빈도분석은 자료의 정확성을 근거로 하여 통계적인 절차에 의거하여 분석하고, 이의 특성치를 이용하여 특정 재현기간의 홍수량을 추정한

다. Chow(1951)가 제안한 빈도계수법으로 이를 설명하면 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_T = \overline{Q} + \sigma K_T \quad (1)$$

여기서, Q_T는 특정 재현기간(T)의 홍수량, $\overline{Q}$는 홍수량 계열의 평균값, σ는 표준편차이다. K_T는 홍수량 계열의 왜곡도 계수와 관련이 있는 빈도계수이다. Eq. (1)에서 알 수 있듯이 순수한 자료의 특성치(통계량)인 평균, 표준편차, 왜곡도가 특정 재현기간의 홍수량을 결정하는데 중요한 역할을 한다는 것이다. 물론 이 특성치는 유역의 특성인자, 기후인자 등과 연계하거나 분석을 통하여 미계측 지역의 홍수량을 추정하는데 이용되기도 한다(MC, 1993, Kim and Won, 2004). 따라서 통계적인 특성치를 얻기 위해서는 자료가 가능한 정확하여야 함은 물론 장기간의 관측기록을 가져야 하며, 다른 인자들(유역의 특성인자, 기후인자 등)과의 관계를 위해서는 유역의 일관된 자료 특성을 가지고 있어야 한다. 일반적으로 설계를 필요로 하는 지역 및 지점은 대부분 관측된 자료를 가지고 있지 못하기 때문에 신뢰성 있는 관측자료를 중심으로 해석된 결과를 이용하는 소위 지역화 방법이 이용된다.

따라서 통계적인 방법에 의한 홍수빈도분석은 다른 어느 방법보다 유출자료가 중요하다. 물론 수문해석의 대부분은 수문자료의 거동 모두가 중요하지만, 홍수빈도분석에서는 다른 수문해석과 달리 수문성분별 해석에 의거하지 않고 홍수량 자료에 의해서만 추론을 하기 때문이다. 유출자료는 일반적으로 두 가지의 관측에 의해서 유도된다. 하나는 수위자료이고, 다른 하나는 소위 레이팅(rating)이라 불리는 수위-유량관계이다. 따라서 유출자료에 의문을 제기하는 것은 두 관측의 어느 부분에 이상이 있음을 의미하는 것으로, 이에 대한 근본 원인을 자세히 살펴볼 필요가 있다.

수위자료는 한국수문조사연보(MLTM, 2010a) 및 국가수자원관리 종합정보시스템(WAMIS, Water Management Information System, http://www.wamis.go.kr/), 국토교통부 한강홍수통제소 등을 통해서 구할 수 있다. Kim (1998)에 의하면 불완전한 수위에 영향을 미치는 요소는 몇 가지로 대별할 수 있다. 첫째는 관측기기의 오작동으로 인한 경우로 시간이 불일치하거나, 관측기기가 갑자기 멈추는 경우, 누전 등으로 관측범위 밖으로 값을 제공하는 등의 문제가 발생한다. 둘째, 목자판의 불완전한 설치 및 운영으로 기준수위가 변경되는 경우로 시기적으로 약간씩 다른 수위를 나타낸다. 이는 목자판의 변동, 개보수로 인하여 다른 수위를 보이는 경우이다. 셋째는 수위관측소의 운영 및 점검이 충분치 않은 경우로 기준수위가 수시로 변동한다든지 또는 부유물에 의해서 수위가 다르게 관측되는 등의 여러가지 기타문제가 여기에 속한다. 첫번째 경우를 제외하고는 일반적으로 홍수시 수위의 오측은 관측 당시에 파악되지 않으면, 그 이후 관측수위에 대한 평가가 매우 어렵다고 할 수 있다.

유량자료의 경우는 일반적으로 하상단면에 따라 유속을 측정하여 얻게 되는데, 대체로 유속을 어떻게 구하느냐에 따라서 유량측정의 정확도가 결정된다. 유럽의 기준 EU ISO 748:97로 관측유량이 가지는 오차(X_Q)를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$X_Q = \pm \sqrt{\left[X_m^2 + \frac{1}{m}(X_b^2 + X_d^2 + X_e^2 + X_p^2 + X_c^2)\right]} \quad (2)$$

여기서, X_b는 하천의 단면폭 측정에 관련된 무작위 오차, X_d는 하천단면 관측을 위해서 여러 단면으로 나눈 각 측선에서의 수위 측정치의 오차이다. 나머지 세항은 유속측정치와 관련된 항목으로서, X_e는 측정시간(duration), X_m은 단면의 측선수, X_p는 각 측선에서 측정점 수의 함수, X_c는 유속계의 검정에 관련된 것이며, m은 단면의 측선수이다. Eq. (2)는 유량측정에 있어 유속의 중요함을 단적으로 나타낸 것이다. 관측오차가 정규분포한다는 가정하에, 최소 측선수를 20개로 했을 때 관측측정치의 불확실도는 신뢰구간 95%에서 유량값의 5.3%에 해당한다. 이것은 유량의 정확도가 95%일 경우, 계산치의 0.265배 이내에 있다는 것을 의미한다(Domeneghetti et al., 2012).

일반적으로 이렇게 측정된 유량은 연속된 수위에 적용하기 위해서 해당수위에 따른 유량측정치와의 관계인 수위-유량관계를 작성한다. 수위-유량관계는 자연적인 형태의 경우에 어떤 수위는 항상 같은 유량을 가지고 있거나, 비슷한 관계를 유지한다는 개수로의 기본 흐름이론에 의거한 것이다(Kennedy, 1984). 이러한 수위-유량관계는 하천단면의 성질에 따른 저수위, 평수위, 고수위에 따라 다른 복합수위-유량관계(complex rating)로 작성하는 것이 일반적이나, 대체로 다음 Eq. (3)과 같은 단순수위-유량관계(simple rating)로 표현된다.

$$Q = a(h-b)^c \quad (3)$$

여기서, Q는 유량, h는 관측된 수위로 해당 수위지점의 기준점으로부터의 수위이다. a, b, c는 계수로서 해당관측소의 형상과 관련이 있다. 특히, b값은 일반적으로 흐름이 영이 되는 수위로 생각하나, 실제로 영점과 관련이 없다. Eq. (3)은 단면의 형상과 유량 크기에 따라, 수위에 따른

유량변화를 잘 표현하는 식이지만, 관측자료에 의해서 3차, 4차 다항식(polynomial equation)으로 나타내는 경우도 있다. 복합수위-유량관계는 유량조사사업단에서 수행한 수문조사보고서(MLTM, 2012)와 같이 저수위 부분과 평수위 이상의 경우로 나누어 작성하는 것이다. 참고로 수위-유량관계는 complex rating, simple rating으로 분류하며, 표현하는 방법에 따라 rating curve, rating table, rating equation, stage-discharge relation 등이 있다. 이를 총괄하여 rating (레이팅)이라 한다(Kennedy, 1984; Rantz et al., 1982). 여기서는 이하 레이팅 또는 수위-유량관계로 칭한다. 우리나라의 경우, 대체로 레이팅을 Eq. (3)과 같이 작성하게 될 때, 저수위와 고수위 사이에서의 불연속성으로 인한 불확실성, 단면과 유량측정치의 불확실성이 발생하고, 또한 유량측정시 발생하는 오차와는 다르게 단순 레이팅 유도시 오차항과 불확실성이 존재하게 된다.

이외에 또 다른 관측자료로는 댐이나 저수지에서 직접 측정한 자료로서 일반적으로 다음과 같은 관계로 유량을 추정한다(Kim, 1996).

$$Q_i(t) = S(t) - S(t-1) + \frac{Q_o(t) + Q_o(t-1)}{2} \qquad (4)$$

여기서, $Q_i(t)$는 현재시간의 계산된 댐유입량, $S(t)$, $S(t-1)$은 현재시간과 전시간의 저수위에 의해 환산된 저수량, $Q_o(t)$, $Q_o(t-1)$은 현재시간과 전시간의 댐방류량(발전+여수로)이다. Eq. (4)를 이용하여 현재시간의 댐유입량을 계산하기 위해서는 이를 측정하는 수위표가 존재해야 하며, 이때 저수위 관측의 불확실성은 앞서 설명한 수위상황과 동일하다. 다만, 저수지에서의 수위표는 저수지 내의 어디에 설치되어 있는가에 따라 저수지 내로 유입되는 유출거동의 비선형적 또는 동적 영향을 받는다. 따라서, 관측된 저수위가 전체 저수지 내의 정적상태 저수량을 대변할 수 있느냐가 방법의 정확도와 관련되어 있다.

2.2 분석방법

2.2.1 지역홍수빈도분석 결과의 표현

홍수빈도분석은 앞서 설명한 관측수위와 레이팅을 이용하여 환산된 홍수량 중 첨두홍수량을 선별하고, 분석목적에 따라 한해에 몇 개의 홍수량을 선별하여 자료계열을 구성한 후에 Eq. (1)과 같은 특성치(평균, 표준편차, 왜곡도)에 따라 재현기간별 홍수량을 추정한다. 대체로 홍수자료는 매년 최대치를 이용하는 연최대치 계열이 이용된다. 홍수빈도분석의 연구의 초점은 (1) 자료수가 홍수빈도분석을 수행할 수 있을 정도로 충분한가, (2) 이에 필요한 확률분포는 적합한가, (3) 확률분포에 따른 매개변수 추정방법은 적정한가 등에 맞추어져 있고, 오차분석 또는 불확실성에 대한 연구 모두가 이 범주에 속한다고 할 수 있다.

반면 수공구조물의 설계, 계획, 평가와 홍수범람 등의 경우는 대체로 홍수량 자료를 측정하지 못한 지역(이하 미계측 유역)이기 때문에 이에 대한 홍수빈도분석 방법이 필요하다. 이 경우는 계측된 인접지역의 빈도홍수량의 특성치 또는 추정치를 이용하여 유추하는 것이 일반적인데, 이를 지역화 해석 또는 지역빈도분석이라 한다. 지역빈도분석은 유역내 또는 수문학적인 동질성을 가정한 경우 각 지점의 통계적인 특성치의 성질을 이용하여 유역특성의 유사성(similarity)을 연계해석하는 절차이다. 이 분석방법은 Q_t 통계량 분석법, 지수홍수법, 모멘트추정법, 전이법 등 여러가지가 있으나(Kim and Won, 2004, MC, 1991, Burnham, 1980), Darymple (1960)이 제안한 지수홍수법(index flood method)이 가장 유용한 방법으로 알려져 있다(Hosking and Wallis, 1997). 따라서, 홍수량 자료에 의한 설계홍수량을 추정하는 방법이라는 말은 바로 지역홍수 추정방법을 의미하기도 한다.

우리나라의 홍수빈도분석의 경우, Kim and Won (2004)에 의해서 전국적인 분석이 수행된 바 있으나, 이들 연구 또한 그 동안에 제시되었던 Ko (1977), MC (1993)과 같이 자료의 신뢰성 및 자료가 가지는 특성치에 대해서는 충분하게 고찰하지 못하였다. Kim and Won (2004)은 지수홍수법, Q_t 통계량 분석법을 모두 이용하여, 다음 Eq. (5)와 같은 지수식을 제시하였다.

$$Q = cA^b \qquad (5)$$

여기서, Q는 지수홍수 즉, 평균홍수량(m^3/s)을 의미하며, A는 유역면적(km^2), b, c는 계수이다. Eq. (5)의 형태는 O'connell (1868)이 제안하였으며, c값은 지역에 따른 지수, b값은 0.5로 제시하였다. Fuller (1914)는 미국전역에 걸쳐 지수항인 b값이 0.8임을 밝혔고, c값은 지역에 따라 변화한다고 하였다. 우리나라의 경우 Ko (1977)은 Q_t 통계량 방법으로 제시하였지만, 평균적인 값에 대해서 한강유역의 경우 b값을 0.8로 제시하였다. Kim and Won (2004)의 결과에 따르면 한강유역의 경우 b값을 0.7로 제시하였고, Eq. (5)에 의한 값은 공간적으로 평균적인 값을 나타내는 것으로 값의 신뢰성을 나타내는 결정계수는 0.943으로 분석되었으며, 이에 따른 분위수의 성향도 같은 능력으로 나타났다. 즉, 지역화 해석 결과에 대한 불확실성이

존재하는 상황인 것이다.

2.2.2 관측홍수량 자료의 오차에 대한 연구동향

관측유량의 오차가 홍수량 모의해석 또는 홍수예경보 등에 미치는 불확실성에 대해서 논의된 바 있으나, 대부분은 레이팅 작성시 나타나는 오차에 대한 연구로 관측오차 자체의 문제로 인한 것은 없다. 즉, 레이팅을 정확하게 만들려는 노력에 국한되어 있다.

홍수빈도분석의 경우 Potter and Walker (1981, 1985)는 레이팅 오차로 인해 빈도분석에 영향을 받을 수 있음을 강조하였다. 홍수빈도분석에 이용되는 수위가 대체로 연최대치 계열로서 Eq. (3)의 레이팅의 작성 범위를 벗어나 있기 때문에 해당수위의 유량을 획득하기 위해서는 레이팅의 확장이 필요하며, 이때 확장된 레이팅에 대한 불확실성 연구에 그 초점이 맞추어 있다. 이와 유사한 연구로는 Kuczera (1996)와 Di Baldassarre et al. (2012)은 레이팅의 고수위 부분에서의 불확실성이 홍수빈도분석 결과에 미치는 영향을 평가하였다.

2.2.3 분석방법론의 설정

본 연구에서는 관측자료의 특성에 따라 홍수빈도분석 결과에 미치는 오차 현황을 통계적으로 분석하기 위해서 홍수빈도분석 특성을 고려한 다음과 같은 방법론을 설정하였다. 관측자료의 불확실성이 홍수빈도분석 결과에 미치는 오차를 정량적으로 평가하기 위해서 다음 Eq. (6)과 같이 관측유량을 참값과 오차의 합으로 나타내고, 오차의 통계값을 다음과 같이 유도하였다.

$$Q_{obs} = Q_{true} + \beta Q_{true} \cdot \epsilon \tag{6}$$

$$\beta \cdot \epsilon = \frac{Q_{obs} - Q_{true}}{Q_{true}} \tag{7}$$

여기서, Q_{obs}는 관측유량값, Q_{true}는 유량의 참값이다. β는 오차항을 나타낸 것이며, ϵ는 평균이 0이고, 분산이 1인 정규분포의 무작위 오차이다. 상정된 두 관측 자료계열을 Eq. (7)의 양변을 제곱하여 평균한 후, 식을 정리하면 Eq. (8)과 같다.

$$E[\beta^2] \cdot E[\epsilon^2] = E\left[\left(\frac{Q_{obs} - Q_{true}}{Q_{true}}\right)^2\right] \tag{8}$$

$$Var[\epsilon] = E[\epsilon^2] - (E[\epsilon])^2 \tag{9}$$

Eq. (8)에서 좌변의 $E[\beta^2]$은 β^2이 상수이므로 β^2이 되고, $E[\epsilon^2]$은 Eq. (9)의 관계에 따라 ϵ의 평균은 0, 분산은 1이므로 1이 된다. 좌변항의 값을 대입하여 양변에 루트값을 취해주면, 최종적으로 오차 β는 Eq. (10)과 같다.

$$\beta = \sqrt{E\left[\left(\frac{Q_{obs} - Q_{true}}{Q_{true}}\right)^2\right]} \tag{10}$$

미계측 유역을 위한 지역홍수빈도 분석시 지수홍수법(Index flood method)을 따를 경우에 지수홍수로서 평균홍수량, 분위수로서 표준편차 및 왜곡도가 유역별 일관성을 설명한다는 점에 착안하였다. 오차분석은 수위와 레이팅, 그리고 기타의 경우로 구분하여 지수홍수 및 분위수 오차를 이용하여 분석하고자 하였다. 따라서, 지수홍수인 평균홍수량의 경우는 β값의 변화가 어떤 경향을 가지고 있는지, 무작위성을 가지고 있는지에 대해서 검토한다. β값의 변화 특성은 Eq. (5)와 같이 평균값이 유역면적의 특성을 가지고 있는 점을 감안하여 이에 준하는 분석을 한다. 분위수의 경우는 비교를 위해서 지역빈도분석을 통해서 계산된 두 집단 분위수의 일치성에 초점을 맞추어 분석한다. 분석을 위해 Hosking and Wallis (1997)가 제안한 L-moment 방법을 채택하였으며, 확률분포는 오차분석을 위해서 홍수빈도해석에 널리 이용되고 있는 GEV분포(general extreme value distribution)를 선택하였다(NERC, 1975). 지역해석은 Hosking이 제안한 절차를 따랐으며, 자세한 사항은 Hosking and Wallis (1997)에 기술되어 있다.

3. 관측자료의 불확실성이 지역홍수빈도분석에 미치는 영향

3.1 분석대상 지점 선정

관측홍수량 자료의 평가를 위해서 한강유역내에 위치한 수위관측소 중 최근까지 수위 측정 및 레이팅이 개발되고 있는 되고 있는 17개 지점을 본 연구의 분석대상 지점으로 선정하였다. Table 1은 본 연구에서 선정한 수위관측소의 관측개시일부터 2010년까지의 시수위 자료와 레이팅 현황을 정리한 것으로 수위관측소의 관할기관에 따라 국토교통부, 한국수자원공사로 구분하였고, 각 수위관측지점이 인위적인 통제를 받고 있는지 여부를 나타내었다.

3.2 지역홍수빈도분석 결과

분석 대상지점의 수위자료를 유량자료로 환산하기 위해 해당년도에 개발된 레이팅곡선식이 있을 경우에는 각

해당년도 레이팅 곡선식을 적용하고, 없을 경우에는 그 바로 전에 개발된 레이팅곡선식을 적용하였다. 이는 일반적으로 홍수량 자료를 추출할 때 이용하는 방법이다. 수위관측지점별 1975년부터 2010년까지의 수위자료에 레이팅곡선식을 적용하여 환산된 홍수량을 '현홍수량'이라 명명하였으며, 이 자료를 이용하여 지역홍수빈도분석을 수행한 결과인 지수홍수와 분위수를 각각 Figs. 1 and 2와 같이 나타내었다. Table 1에 나타낸 바와 같이 지점별로 댐에 의한 인위적 통제 영향 여부가 다르나, 여기에서는 댐 조절 영향을 무시하고 홍수량 자료를 분석하였다.

지수홍수인 평균홍수량과 유역면적간의 관계를 Eq. (5)의 형태로 유도한 결과, c와 b는 각각 10.8, 0.7의 값을 가지는 것으로 나타났으며, 평균홍수량을 유역면적으로 나누어 비유량(specific discharge)으로 환산하여 나타내면 Fig. 1과 같다. 선행연구와의 비교를 위해서 Kim and Won (2004)의 결과를 함께 도시하였다. 현홍수량으로 계산된 값의 분석기간(1975~2010년)과 Kim and Won (2004)의 분석기간(관측시점-1999년)이 다름에도 불구하고 비유량과 유역면적간의 관계가 서로 비슷하게 나타남을 알 수 있다. 또한, 분위수를 비교한 Fig. 2의 경우도 마찬가지로

Table 1. Status of Stage Stations in Han River

Station name	Agency	Area (km^2)	Record length (-2010)			Number of rating
			Controlled	Uncontrolled	Total	
Yeongwol	MOLIT	2,462.2	-	50	50	17
Ieemokjung	MOLIT	55.9	-	20	20	20
Jangpyunggyo	MOLIT	103.6	-	19	19	19
Baekokpo	MOLIT	142.3	-	19	19	19
Sanganmi	MOLIT	396.3	-	24	24	21
Habangjung	MOLIT	84.0	-	22	22	21
Banglimgyo	MOLIT	519.7	-	22	22	21
Yeongchun	K-water	4,690.0	-	27	27	19
Mokgye	MOLIT	8,433.8	18	33	51	16
Ganhyeon	MOLIT	1,273.7	7	8	15	9
Yeoju	MOLIT	11,104.4	25	56	81	50
Seomyeon	MOLIT	1,305.8	-	23	23	15
Cheongpyeong	MOLIT	10,455.5	53	25	78	9
Gyeongan	MOLIT	509.4	-	24	24	15
Jamsugyo	MOLIT	24,578.0	27	-	27	4
Hangangdaegyo	MOLIT	24,753.2	53	21	74	36
Anyang	MOLIT	110.7	-	27	27	14

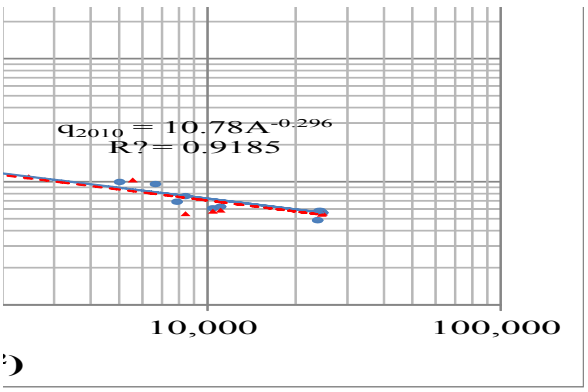


Fig. 1. Relation of Index Flood to Contributing Drainage Area

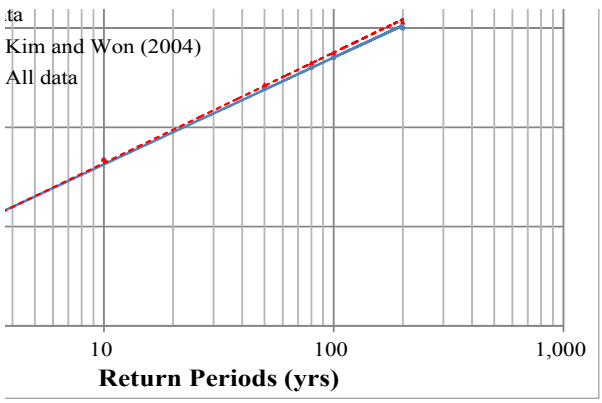


Fig. 2. Comparing Quantiles for Two Samples

두 계열의 오차는 2% 이하로 산정되어 지점수 및 자료기간의 영향이 미미한 것으로 분석되었다. 다만, 본 분석 결과는 댐 조절 영향을 무시한 것으로 댐 조절 영향을 고려한 보다 정밀한 홍수빈도분석에 미치는 지점수 및 자료기간의 영향 평가가 필요할 것이다.

3.3 수위자료의 불확실성 영향

수위자료상에 오차가 있는 경우에 대해서 연구한 사례는 사실상 찾을 수 없다. 수위의 오측은 수문학적인 분석자체를 할 수 없기 때문이다. 그러나, 실제 수문자료를 검토해보면, 여러 형태의 오측을 발견할 수 있다. 첫째, 수위자료가 두 개 있는 경우로 Fig. 3과 같이 한강유역 내에 위치하고 있는 IHP 유역인 평창강 유역의 경우 동일시간대의 IHP research report (MC, 1985; 1986)에서 발행한 수위자료와 현재 국토교통부(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, MOLIT)에서 제공하는 수위자료가 서로 다르다. 둘째, Fig. 4에서 하반정 지점처럼 수위의 반응이 일어나지 않는 경우이다. 셋째, Fig. 4에서 백옥포 지점과 같이 유역내에 다른 지점자료와 유사한 반응이 일어나지 않고 완전히 다른 형태로 나타나는 경우이다. 이러한 3가지 경우는 그래프상에서 쉽게 찾아낼 수 있으나, 기타 수위측정의 작은 오류에 대해서는 오류 여부를 정확하게 판별하기 어렵다.

현재의 자료체계상 기본적 지표인 정확한 값(정해)에 대한 정보가 없기 때문에 상기 세 항목에 대하여 그 오차가 미치는 영향을 파악할 수 없다. 다만, 한국수자원학회와 건설부(IHP 보고서)가 함께 관측한 바 있는 평창강 IHP 유역내의 6개 수위관측지점의 홍수사상별 수문곡선을 작성하고, 이를 검토하여 한강유역의 다른 관측소의 정황을 유추 해석하고자 하였다. 이때 사용된 홍수량이라 함은 홍수빈도분석에 이용되는 연최대 첨두유량임을 밝힌다. 첫 번째로 수위가 두 개 있는 경우는 강우–유출자료를 이용하여 유출율의 타당성 여부와 상하류의 수위관계의 상관성을 검토한 후 선택하였다. 두 번째와 세 번째의 경우, 즉 수위반응이 강우–유출관계를 도외시하거나, 유역의 일관된 유출반응과 완전히 다른 경우는 Kim et al. (2014)에서 제안한

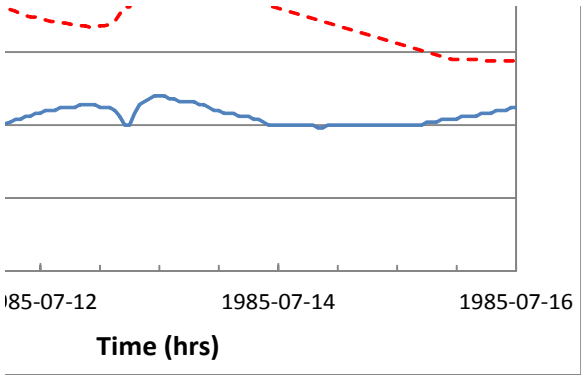


Fig. 3. Stage Data according to Sources (Banglim stage station in Pyeongchang river watershed)

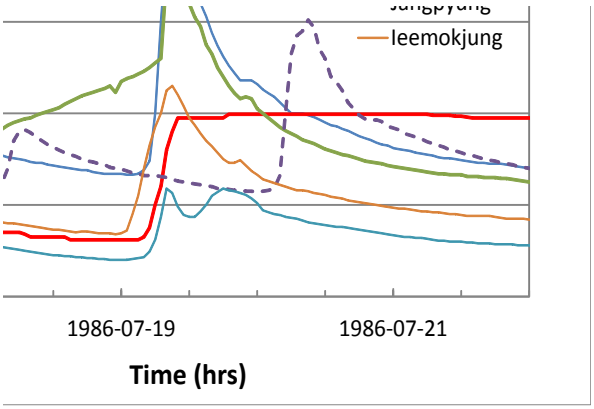


Fig. 4. Error of Data and Runoff Responses in Pyeongchang River Watershed

Table 2. Error Analysis between Observed and True Flood

Station name	Watershed area (km^2)	Observed flood		True flood		β (Eq. (10))
		Mean annual flood (m^3/s)	Variance	Mean annual flood (m^3/s)	Variance	
Banglim	519.7	1,037	873	1,131	753	0.198
Habangjung	84.0	252	269	203	150	0.196
Sanganmi	396.3	1,106	860	934	635	0.210
Baekokpo	142.3	409	223	399	236	0.207
Jangpyung	103.6	329	251	248	185	0.362
Ieemokjung	55.9	186	145	160	93	0.269
Average		474.57	436.8	439.71	342.0	0.240

자료확장법에 의거하여 자료를 검토하였다. 이와 같이 수위자료로 인한 문제를 교정한 것을 완전한 자료라고 가정하였고, 이에 따른 홍수량을 '진홍수량'이라 명명하였다. 현 홍수량과 진홍수량 자료의 정량적인 비교를 위해서 지역빈도분석을 수행하였으며, Table 2에 Eq. (10)의 오차 β를 나타내었다. 지점별로 β값이 작게는 0.196에서 최대 0.362의 범위를 보이며 평균적으로 0.24의 값을 나타내었다.

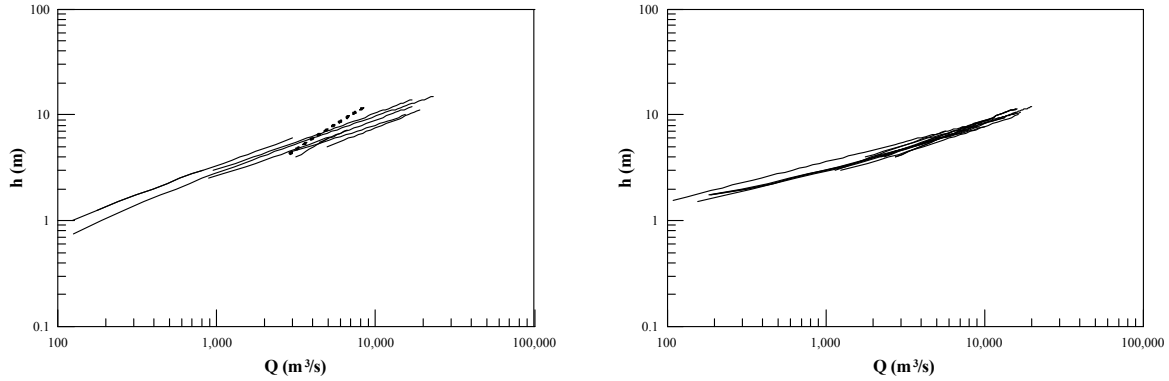
평창강 유역의 6개 수위관측지점에서 평균적으로 나타낸 β값 0.24는 평창강 유역의 관측기간에서 가질 수 있는 특성으로 한강유역 내의 전 수위관측소가 이 값의 범위에 있다고 유추하기에는 무리가 있다. 이는 평창강 유역의 수위관측 조건이 한강유역 내 다른 관측소보다 유역면적이 작고 주로 연구용으로 관리되었기 때문이다. 따라서, 수위오측은 관측의 관행상 항상 발생할 수 있지만, 평창강 유역의 오차정도를 한강유역 전체에 그대로 적용할 수 있다고 보기에는 상대적으로 적은 분석이라고 판단된다. 이하 분석(레이팅에 의한 오차분석)에서는 한강유역의 불확실한 관측수위가 평창강 유역의 오차정도를 가진다고 가정하기에는 하나의 오차가 다른 오차를 유발하는 종속적인 오차(conditional error) 등 관련된 불확실성 및 상관적인 오차가 따른다. 따라서 평창강 유역의 경우 홍수빈도분석상에는 진홍수량을 그대로 이용하였고, 이하 분석에는 이 지역의 수위 및 레이팅에는 오차가 없다고 가정하였다.

3.4 수위-유량관계가 홍수빈도분석에 미치는 영향

우리나라 홍수는 여름에 집중되며, 한 번에 내리는 강우량이 보통 200 mm를 상회하며, 연최대첨두유량의 평균치가 1.5 $m^3/s/km^2$에 달하기 때문에, 유속계에 의한 측정은 사실상 불가하며, 봉부자를 활용하여 유속을 측정하는 방법이 주로 이용되었다(MLTM, 2010a). 더욱이, 측정기간이 악천후에 있기 때문에 유속측정 만큼이나 측정시기와 당시 수위의 기록과 목자판과의 상관성이 매우 중요하다. 이는 측정된 유량을 이용하여 수위-유량관계곡선을 만들어야 하기 때문이다.

일반적으로 홍수빈도분석에 대한 수문관측의 오차 분석은 Potter and Walker (1981, 1985), Kuczera (1996)와 Baldassarre et al. (2012)과 같이 기존의 수문관측의 오차는 유지한다고 하더라도 레이팅을 최대홍수위까지 확장했을 때 도출되는 유량의 오차율에 핵심이 맞추어져 있다고 할 수 있다. 이것은 측정된 유량이 Eq. (2)와 같은 관측오차를 가지고 있다 할지라도 Eq. (3)과 같이 평균적으로 유도된 하나의 레이팅과 이에 따른 관측오차에 준하는 정확도를 나타내기 때문이다. 그러나 우리나라 대부분의 관측소는 하나의 레이팅을 가지고 있지 못하고, 동일 수위에서 다양한 레이팅을 가지고 있다. 그 예로, 한강유역내에 영월 수위표와 여주 수위표의 기작성된 레이팅을 각각 Fig. 5에 도시하였다.

Fig. 5에서 알 수 있듯이 관측기간 내에 한 수위에서 여러 개의 레이팅이 존재하고 있음을 알 수 있으며, 이를 확장한 경우 심지어 같은 수위에서 약 2배 정도의 유량 차이를 보이기도 한다. 이는 대체로 (1) 유속측정과 목자판의 상관성, (2) 유속측정의 불확실성 등 미흡한 유량측정 방법에 근거한다고 할 수 있으나, 실제로 어느 것이 잘못되었는지 판단하는 것은 불가능하다. 최근 2003년 이후 유량측정을 위한 전문기관인 '유량조사사업단'의 측정으로 가장 최근 개발된 레이팅은 일정한 형태를 유지하고 있기 때문에 이를 관측자료의 불확실성을 파악하는 비교의 대상으로 설정하였다. 실제 하천에서 홍수가 발생할 경우, 유사량이 쌓이거나(dune), 깍임(anti-dune)으로 인한 하천단면의 변화로 동일 수위에서의 홍수량이 증가하거나 감소하는 등의 소위 레이팅의 변화가 발생한다. 따라서, 하나의 레이팅을 기준으로 사용하는 것은 이러한 홍수량



(a) Yeongwol stage station (b) Yeoju stage station

Fig. 5. Comparisons of Annual Rating Curves

의 증감을 반영하지 못하여 오히려 레이팅 설정 기준에 적합하지 않을 수 있다. 실제로 홍수로 인한 하천단면 변화에 따른 레이팅의 변화는 저수위의 유량에는 영향을 미칠 수 있어 저수위에서의 레이팅을 따로 설정하는 것이 정상적이다(Kennedy, 1984). 반면 고수위에서는 유사작용에 의해 변화된 단면으로 인한 영향은 상대적으로 적다고 할 수 있기 때문에 고수위의 평균적인 레이팅에 첨부하여 특별한 다른 레이팅을 설정하지는 않는다.

따라서 첨두홍수량을 기준으로 하는 본 연구에서는 실제로 연간 최대수위 부근의 홍수량을 이용하기 때문에 목자판의 기준수위가 변동하지 않았다고 가정한다면, 정교한 홍수위 레이팅을 선택하는 것이 비교대상으로 가장 적절할 것이다. 이러한 평가방안에는 Fig. 5에 나타나 있는 여러개의 레이팅 중 홍수량의 최대치와 최소치를 유발하는 레이팅 간의 오차 즉, 최대, 최소치 간의 범위(range) 내에서의 첨두홍수량의 오차범위 분석 등 레이팅 범주에서 발생하는 오차를 확률적으로 평가할 수도 있다. 그러나 본 분석은 레이팅의 범주 오차분석이 아닌 주어진 홍수량 자료가 특정분석에 미치는 가용성만을 평가하기 때문에, 비교대상을 설정하여 불확실성을 평가하고자 하였다.

레이팅 적용에 따른 관측유량자료의 불확실성이 홍수빈도분석결과에 미치는 영향을 분석하기 위해 앞서 기술한 한강유역내 대상 수위관측소 지점에 대해 두 가지 관측유량자료를 이용하여 지역빈도해석을 수행하였다. 첫 번째는 해당연도에 개발된 레이팅을 각각 적용한 관측자료이며, 두 번째는 가장 최근 개발된 레이팅을 전기간에 걸쳐 적용한 관측자료이다. Fig. 6은 레이팅 적용방법에 따른 분위수를 비교한 것으로, 하나의 레이팅을 적용시에는 기개발된 레이팅을 모두 적용한 경우에 비해 재현기간 10, 50, 100, 200년에서 각각 2.38, 2.88, 2.91, 3.27% 증가한 결과를 보였다.

Fig. 7은 각 수위관측지점에 해당하는 유역면적에 대한 홍수빈도결과의 오차 β를 도시한 것으로, 평균 0.246의 값을 나타내었다. 또한, 유역면적이 증가할수록 오차 β가 감소하는 경향을 보였다. 이를 구체적으로 검토해보면, 최근 개발된 하나의 레이팅을 적용하였을 경우 유역면적이 약 100 km^2에서 25,000 km^2로 증가함에 따라 오차 β는 추세선을 기준으로 0.440에서 0.106으로 감소하였다. 유역면적의 증가에 따른 오차의 감소경향은 상대적으로 유역면적이 증가할수록 매년 개발된 레이팅의 범주가 안정적임을 의미한다고 할 수 있다. 그러한 이유로는 (1) 유역면적이 증가할수록 하천단면 변화의 영향이 작을 수 있으며, (2) 유역면적이 작을수록 홍수시의 유속 측정이 쉽지 않기 때문에 상대적으로 수위에 따른 유량측정값이 변동하

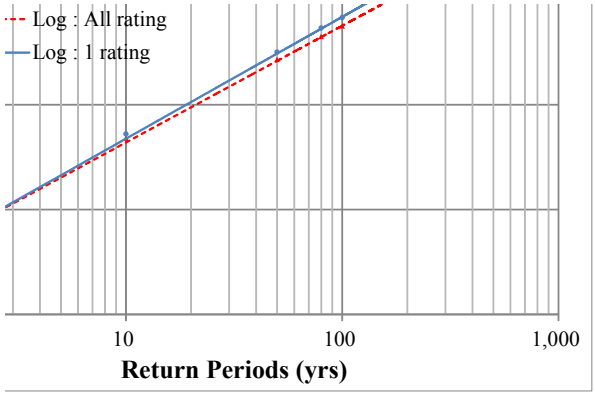


Fig. 6. Comparing Quantiles for Applying Rating Curve

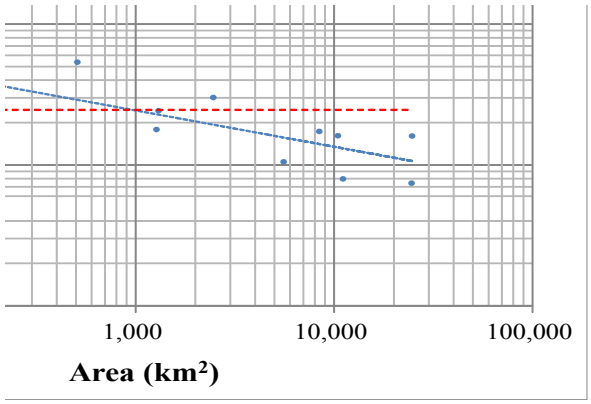


Fig. 7. Variation of β to Contributing Drainage Area

기 쉬워 레이팅의 불확실성이 증가하거나, (3) 유역면적이 작을수록 목자판의 변동 즉 상시관측점의 기준점이 변동된 경우가 상대적으로 많을 것으로 추론된다. 그러나, 구체적인 원인 규명을 위해서는 레이팅에 관련된 제반사항들을 고려한 연구가 필요할 것으로 보인다.

3.5 댐 유입량의 불확실성 영향

댐 유입량의 산정은 댐 내에서 측정되는 수위에 큰 영향을 받으며, Eq. (4)에서 알 수 있는 것 같이 수위는 저류량의 변화에 영향을 미칠 뿐만 아니라 방류량의 변화량을 계산하는 것에도 영향을 미친다. 반면에 저수지 내의 수위는 실제 유입되는 홍수량의 동적 성질로 인하여, 저수지 상류에서의 유출거동과 저수지면에서의 유출거동이 다르다. 예를 들어, 배수위 효과나 저수지면의 처올림 현상 등이 발생한다. 더욱이 저수지 수문을 개폐할 때 나타나는 비선형 효과는 저수지 수위에 영향을 미쳐 저수지 수위를 정확하게 측정하기 어렵다. 이러한 이유들로 인하여 계산된 댐 유입량의 오류여부도 판단하기 어렵다.

물론 Kim et al. (2014)에 의하면 Eq. (5)에 의해서 계산된 댐 유입량의 거동이 상류의 관측 수위와 다른 거동을 보일 경우에는 이상이 있음을 판단할 수 있으나, 이에 대한 교정여부는 여기서 논하지 않는다. 다만, 충주댐의 관측된 홍수사상 중 강우-유출관계의 관점에서 유출율이 100%를 초과할 수 없기 때문에, 상류 관측유량의 평균비율을 고려한 Kim et al. (2014)의 자료확장의 연장선에서 이를 교정한 바 있다. 충주댐의 1990년 9월, 2006년 7월 사상을 도시하면 Fig. 8과 같으며, 교정된 댐유입량 자료는 홍수빈도분석 결과에 영향을 미치지만 여기서는 오차분석을 하지 않았다.

3.6 댐의 인위적 통제 영향

댐 하류에서의 홍수량 거동은 댐의 수문조작에 의해서 결정되기 때문에 완전히 통제된 흐름으로서 자연홍수량과는 구분이 필요하다. 즉, 통제된 흐름에서의 홍수빈도분석은 관측자료의 특성치와는 사실상 관계가 없다. 따라서 여기에서는 통제되지 않은 흐름영역에서의 관측자료의 특성치를 가지고 통제된 흐름영역의 홍수특성을 고찰하였다.

Fig. 9는 댐 상류의 자연유역을 대상으로 지역홍수빈도분석을 수행하여 얻은 무차원 성장곡선과 댐 영향을 무시하고 상하류 모든 지점을 분석한 결과를 함께 나타낸 것이다. 재현기간 100년 이상에서는 약 0.3%로 미미한 차이를 보이는 등 두 경우에 거의 차이를 나타내고 있지 않다. 즉, 댐 조절 여부가 분위수에는 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. Fig. 10은 댐 상류의 자연유역과 댐 하류의 통제된 유역에 대한 평균홍수량을 비교하여 나타낸 것으로, 댐 상류 자연유역에서의 비유량 거동을 유추해서 연장할 경우 댐 하류의 비유량 거동과 큰 차이를 보이고 있다. 즉, 통제된 흐름영역을 모두 포함한 지역적 경험식은 자연 흐름영역인 댐 상류유역에서의 결과와는 다름을 의미한다. 댐 상류유역을 대상으로 수행한 지역홍수빈도분석 결과를 바탕으로 평균홍수량과 유역면적과의 관계를 Eq. (5)의 형태로 유도하면 c는 7.1, b는 0.78로 산정되었으며, 이는 댐 영향을 고려하지 않고 댐 상하류 전체를 대상으로 분석한 결과(Fig. 1)인 c는 10.8, b는 0.7과는 큰 차이를 보이고 있다. 이 값의 변화 및 특성에 대해서는 추후 세밀한 검토가 필요할 것이다.

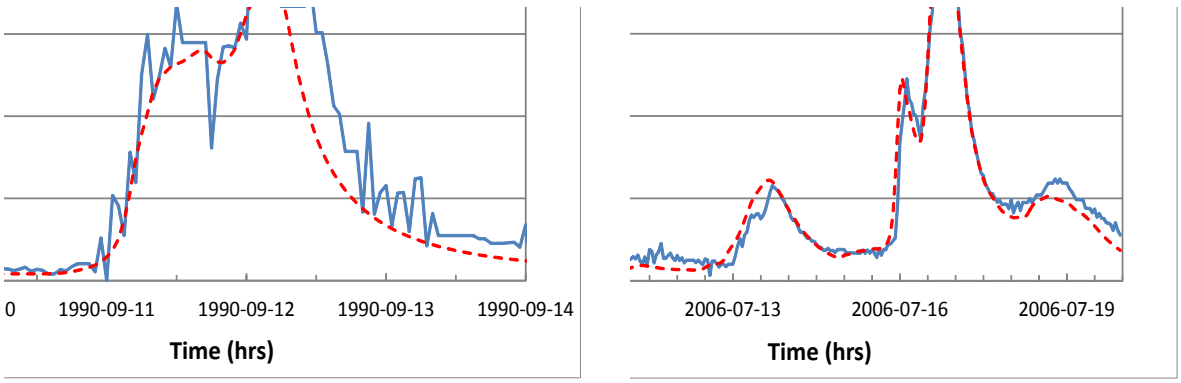


Fig. 8. Assessment of Chungju Dam Inflow

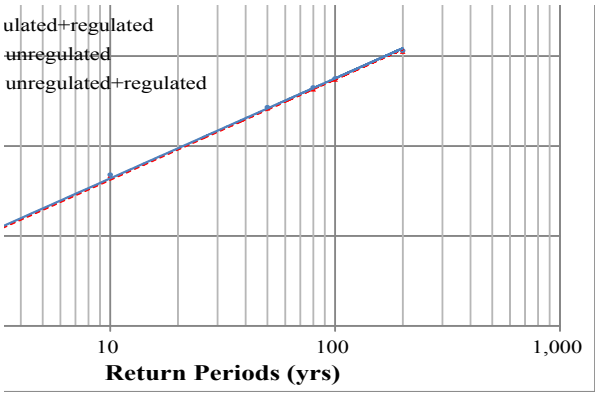


Fig. 9. Comparison between Two Quantiles according to Reservoir Operation

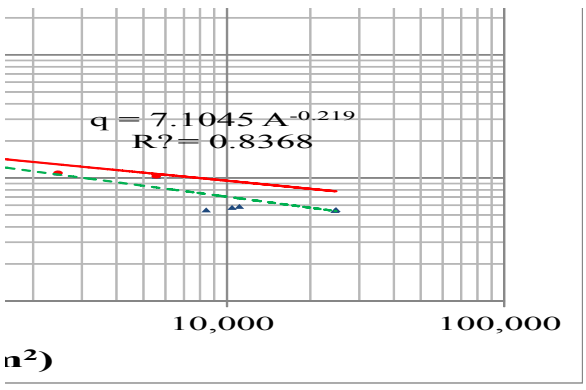


Fig. 10. Specific Discharges according to Reservoir Operation

4. 요약 및 결론

일반적으로 수공구조물의 설계 및 계획의 기준이 되는 빈도홍수량을 추정하기 위해 통계적인 홍수빈도분석 방법과 설계호우-단위도법이 주로 이용된다. 두 가지 방법 중 미국, 영국, 호주 등 선진국가에서는 통계적인 홍수빈도분석을 표준적인 방법으로 제시하고 있다. 그러나 국내에서는 관측홍수량 자료의 신뢰성 및 인위적인 저류시설물에 의한 조절영향으로 인하여 표준적인 방법은 수행되지 못하고 있는 실정이다. 실제로 수문 관측자료는 관측오차나 이상치가 발생하였다 하더라도, 이후 관측자료에 대한 수정이 불가능하며 이에 따른 불확실성은 항상 내포되어 있다. 따라서, 본 연구에서는 홍수량 관측자료의 특성을 수위와 레이팅(수위-유량관계)으로 구분하여 각각의 불확실성에 대한 구체적인 원인을 설명하였다. 또한, 관측자료가 홍수빈도분석 결과에 미치는 오차현황을 통계적으로 분석하기 위해 지역홍수빈도분석 특성을 고려한 오차 β를 제시하였다. 이를 이용하여 관측홍수량 자료의 불확실성이 홍수빈도분석 결과에 미치는 영향에 대하여 지수홍수와 분위수를 중심으로 정량적인 평가를 수행하였다.

먼저, 한강유역을 대상으로 구축한 홍수량 자료(1975-2010)를 활용하여 지역홍수빈도분석을 수행하여 Kim and Won (2004)의 결과와 비교한 결과, 지수홍수와 분위수는 유사한 결론이 도출되었다. 구체적인 연구결과는 관측자료의 특성에 따라 3가지 경우로 분류하여 제시하였다. 첫 번째로 수위자료의 영향을 파악하기 위해 평창강 유역의 수위관측지점을 대상으로 지역홍수빈도분석 결과를 평가한 결과, 현홍수량과 진홍수량의 평균홍수량에 대한 오차 β는 0.240으로 분석되었다. 두 번째로 홍수량 자료의 가용성 평가를 목적으로 레이팅 적용에 따른 관측자료의 불확실성이 홍수빈도분석 결과에 미치는 영향을 분석하였다. 해당연도에 개발된 레이팅을 각각 적용한 결과와 가장 최근 개발된 레이팅을 적용한 결과를 분석해보면, 평균홍수량에 대한 오차는 유역면적이 증가할수록 감소하였으며 평균적으로 0.246의 오차를 보였다. 마지막으로 댐운영으로 인해 인위적으로 유량이 조절되어진 댐하류의 통제된 흐름영역에서의 지역홍수빈도분석 결과를 유추하여 댐운영 영향을 평가하였다. 댐하류에서의 홍수량 거동은 댐운영에 의해 조절된 것으로 댐상류의 자연유역에서의 비유량 거동을 연장할 경우, 댐하류의 비유량 거동과 완전히 다름을 확인하였다. 따라서, Kim and Won (2004)이 제시한 댐상하류 유역의 전 지점을 대상으로 지역홍수빈도분석을 수행하여 제시한 지역화 결과는 재검토되어야 할 것으로 판단된다. 추가적으로 댐으로 인하여 조절된 유역의 홍수량 거동변화 및 자연홍수량에 대한 구체적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(11기술혁신C06)에 의해 수행되었습니다.

References

Burnham, M.W. (1980). *Adoption of flood flow frequency estimates at ungaged location*, Training Document 11, U.S. Army Corps of Engineers.

Chow, V.T. (1951). "A general formula for hydrologic frequency analysis." *Transactions, American Geophysical Union*, Vol. 32, No. 2, pp. 231-237.

Darymple, T. (1960). *Flood frequency analysis, manual of hydrology*, Part 3, Flood-flow Techniques, U. S. Geological Survey Water Supply paper 1543-A, pp. 1-79.

Di Baldassarre, G., Laio, F., and Montanari, A. (2012). "Effect of observation errors on the uncertainty of design floods." *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, Vol. 42-44, pp. 85-90.

Domeneghetti, A., Castellarin, A., and Brath, A. (2012). "Assessing rating-curve uncertainty and its effects on hydraulic model calibration." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 16, pp. 1191-1202.

EU ISO EN 748:1997 (1997). *Measurement of liquid flow in open channel -velocity- area methods.*

Fuller, W.E. (1914). "Flood flows." *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 77, No. 1293, pp. 564-617.

Hosking, J.R.M., and Wallis, J.R. (1997). *Regional frequency analysis*, An Approach Based on L-Moment, Cambridge University Press.

IACWD (1982). *Guidelines for determining flood flow frequency*, Bulletin 17B (revised and corrected), Interagency Advisory Committee on Water Data, U.S. Department of the Interior, Geological Survey, Office of Water Data Coordination, Reston, VA.

IE (1987). *Australian rainfall and runoff: A guide to flood estimation*, Volume 1, Editor: D. H. Pilgrim, Institution

of Engineers, Australia.

IH (1999). *Flood estimation handbook*, 5 Volumes. Institute of Hydrology, Wallingford, UK.

Kennedy, E.J. (1984). *Discharge ratings at gaging stations*, Techniques of water-resources investigations of the U. S. Geological Survey, USGS-TWRI Book 3, Chapter A10.

Kim, N.W. (1996). *Study on reservoir operations during the dry and flood season in Soyanggang dam watershed*, Korea Institute of Construction Technology.

Kim, N.W. (1998). "Current state and improvement direction of Hydrological observation." *Korea Institute of Construction Technology, Engineering and Construction Technology Information*, Vol. 176, pp. 9-15.

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.

Kim, N.W., Yong, J., and Lee, J.E. (2014). "Spatial extension of runoff data in the applications of a lumped concept model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 9, pp. 921-932.

Ko, J.U. (1977). "Regional flood frequency studies in Korean rivers." *The Magazine of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 25, No. 4, pp. 95-102.

Kuczera, G. (1996). "Correlated rating curve error in flood frequency inference." *Water Resources Research*, Vol. 32, No. 7, pp. 2119-2127.

MC (1985). *International hydrological programme research report*, Ministry of Construction.

MC (1986). *International hydrological programme research report*, Ministry of Construction.

MC (1991). *Research on development of water resource management technology*, Korea Institute of Construction Technology, Ministry of Construction, 1991.

MC (1993). *Research on development of water resource management technology*, Korea Institute of Construction Technology, Ministry of Construction, 1993.

MCT (2000a). *Research on development of water resource management technology*, Vol. 2, No. 2, Analysis of Temporal Variations of Determining the Local Design Storms, Ministry of Construction and Transportation, 1999.

MCT (2000b). *Research on development of water resource management technology*, Vol. 1, Estimation of probability rainfall in Korea, Ministry of Construction and Transportation, 1999.

MCT (2007). *Guideline for design flood estimation*, Ministry of Construction and Transportation

Merz, B., and Thieken, A.H. (2005). "Separating natural and epistemic uncertainty in flood frequency analysis." *Journal of Hydrology*, Vol. 309, No. 1, pp. 114-132.

MLTM (2010a). *Annual hydrological report on Korea*, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs.

MLTM (2010b). *Research on advancement of design flood estimation*, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs.

MLTM (2011). *Improvement and supplement of probability rainfall in South Korea*, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs.

MLTM (2012). *Hydrologic investigation report*, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs.

NERC (1975). *Flood studies report*, 5 Volumes, Natural Environment Research Council, London.

O'Connell, P.P.L. (1868). "On the relation of the freshwater floods of rivers to the areas and physical features of their basins and on a method of classifying rivers and streams with reference to the magnitude of their floods." *Minutes Proceedings of The Institution of Civil Engineers*, Vol. 27, Session 1868, pp. 204-217.

Potter, K.W., and Walker, J.F. (1981). "A model of discontinuous measurement error and its effects on the probability distribution of flood discharge measurements." *Water Resources Research*, Vol. 17, No. 5, pp. 1505-1509.

Potter, K.W., and Walker, J.F. (1985). "An empirical study of flood measurement error." *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 3, pp. 403-406.

Rantz, S.E., and others (1982). *Measurement and computation of streamflow: Volume 2. Computation of discharge*, U. S. Geological Survey, Water-Supply Paper 2175.

paper number : 15-030
Received : 3 April 2015
Revised : 4 May 2015 / 21 May 2015
Accepted : 21 May 2015