大 韓 土 木 學 會 論 文 集
第29卷 第3B號 · 2009年 5月
pp. 269 ~ 279

과거강우사상과 저류함수모형을 이용한 대유역 계획홍수량 추정

Design Flood Estimation using Historical Rainfall Events and Storage Function Model in Large River Basins

윤종우* · 이동률** · 안원식*** · 임해욱****
Youn, Jong-Woo · Lee, Dong-Ryul · Ahn, Won-Sik · Rim, Hae-Wook

Abstract

The design flood estimation in a large river basin has a lot of uncertainties in areal reduction factors, time-spatial rainfall distribution, and parameters of rainfall-runoff model. The use of historical concurrent rainfall events for estimating design flood would reduce the uncertainties. This study presents a procedure for estimating design floods using historical rainfall events and storage function model. The design rainfall and time-spatial distribution were determined through analyzing concurrent rainfall events, and the design floods were estimated using storage function model with a non-linear hydrology response. To evaluate the applicability of the procedure of this study, the estimated floods were compared to results of frequency analysis of flood data. Both floods gave very similar results. It shows the applicability of the procedure presented in this study for estimating design floods in practices.

Keywords : *design rainfall, design flood, time-spatial rainfall distribution, frequency analysis, storag function model*

요 지

대유역에서 계획홍수량 추정은 ARF, 강우 시공간분포 및 강우-유출 모형의 매개변수 등에서 많은 불확실성이 발생한다. 과거 동시 강우사상을 이용한 계획홍수량의 추정은 이들 불확실성을 개선할 수 있다. 본 연구는 과거 동시 강우사상과 저류함수모형을 이용하여 대유역의 홍수량을 추정하는 방법을 제시하였다. 과거 동시 강우사상의 시공간분포를 이용하여 계획 강우량과 강우의 시공간분포를 산정하였고 비선형 강우-유출 반응을 재현할 수 있는 저류함수모형을 이용하여 홍수량을 추정하였다. 추정된 계획홍수량은 실측홍수량에 의한 빈도분석 결과와 비교하여 본 연구에서 제시한 홍수량 추정기법의 적용성을 평가하였다. 본 연구의 결과는 실측홍수량의 빈도해석과 비슷한 결과를 얻었으며 이는 대유역의 홍수량 추정에서 본 연구의 홍수량 추정과정을 충분히 이용할 수 있음을 보여준다.

핵심용어 : 계획강우량, 계획홍수량, 강우시공간분포, 빈도분석, 저류함수모형

1. 서 론

하천의 선개념에서 유역의 면개념으로 홍수방어대책의 전환은 계획홍수량 추정에서 유역전체의 상하류를 포괄하는 대규모 호우에 의한 홍수량산정 및 댐과 같은 홍수저류시설의 조절용량 분석 등에서 기존과 다른 접근방식을 필요로 한다. 공간적으로 수천~수만 범위의 대유역에서 홍수량 추정은 중소규모의 유역보다 강우의 시공간 분포, 지속기간 및 홍수량 산정 모형과 매개변수 등에서 불확실성이 더욱 커지게 된다.

계획홍수량 추정기법은 관측유량에 의한 빈도해석과 계획강우량을 이용한 홍수량을 추정하는 방법이 있다. 국내외에서 과거 관측유량의 이용은 자료의 부족으로 적용되는 경우가 적고 장기간 기록을 가지고 있는 강우량을 이용하여 계획홍수량을 추정하는 것이 일반적이다. 우리나라의 현업에서는 임계지속기간의 확률강우량을 산정하고 면적감소계수(Areal Reduction Factor, ARF)를 이용하여 유역의 공간적인 분포를 반영한 유역평균 확률강수량을 산정한다. 또한 계획홍수량을 추정하기 위하여 확률강우량은 과거에 발생한 강우의 평균적인 시간분포를 이용하여 지속기간에 따른 설계강우주상도(design hyetograph)를 작성하고 유효우량을 산정한 후 강우-유출 모형에 입력하여 계획홍수량을 추정한다(건설교통부, 2005). 그러나 이와 같은 과정을 대유역에 적용하는 데는 임계지속기간, ARF 및 강우의 시간분포에서 많은 불확실성이 있다는 점이 한계이다. 이들 불확실성은 장기간의 과거 동시 강우량의 지속시간별 유역평균강우량의 빈도분석과 시간분포를 이용한 홍수량 추정으로 저감할 수 있다. 현

*정회원 · 수원대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail : sansy810@hananet.net)
**정회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 수자원연구실 책임연구원 (E-mail : dryi@kict.re.kr)
***정회원 · 수원대학교 토목공학과 교수 (E-mail : wsan@suwon.ac.kr)
****(주)서영엔지니어링 전무 (E-mail : hwrim@seoyeong.co.kr)

실적으로 우리나라 대유역에서 신뢰성 있게 적용 가능한 ARF와 시간분포형의 선정에도 한계가 있다. 건설교통부(2007)에서는 ARF가 한강 일부지역의 자료만을 이용하여 1,000 까지만 설정되어 있고 국내 우량관측소의 밀도에서 신뢰성 있는 ARF의 산정이 가능하냐에 대한 현실적인 문제를 지적하였다. 또한 유역치수계획에서는 거의 20,000 범위까지 ARF를 요구하고 있으나 이러한 대유역까지 실측면적강우량 자료를 이용하지 않고 ARF를 사용해야한다는 것에 대한 논란이 예상된다고 하였다.

홍수량추정을 위하여 국내에서 이용하는 강우-유출 모형은 단위도법을 이용하고 있다. 단위도법은 강우-유출의 관계가 유역에서 선형적으로 반응한다는 가정에서 출발하여 수문학적으로 비선형 반응을 가지고 있는 유역의 대홍수 추정은 부정확할 수 있다(Smithers 등, 2007). 또한 단위도법 만의 단일 기법에 의한 홍수량 추정은 다른 기법에 의한 결과와 비교·평가를 할 수가 없어 추정된 홍수량에 대한 객관성 부족을 초래할 수 있다. 이러한 측면에서 건설교통부(2005)는 실측 홍수량 자료가 가용할 경우 반드시 빈도해석법을 이용하여 홍수량을 산정하고 단위도법에 의해 추정된 홍수량과 비교하여 타당성을 검토하여야 한다고 하였다. 대유역에서 강우-유출의 수문학적 비선형 반응과 가용 실측홍수량이 부족한 현실을 고려할 때 단위도법의 결과와 비교·평가할 수 있는 비선형 강우-유출모형에 의한 홍수량 추정은 객관적인 설계홍수량의 결정에 매우 필요하다. 건설교통부(2007)에 의하면 계획강우량을 이용하여 추정한 홍수량은 강우-유출 관계의 비선형성 때문에 홍수빈도해석에 의한 발생빈도가 다른 것으로 알려져 있다. 비선형 모형을 이용할 경우 이와 같은 일반적인 경향을 평가할 수 있을 것이다.

본 연구는 과거 동시 강우사상의 시공간특성을 이용한 계획강우량과 강우시간분포의 산정과정을 제시하고 비선형 강우-유출 반응을 재현할 수 있는 저류함수모형을 이용하여 홍수량을 추정하였다. 추정된 계획홍수량은 실측홍수량에 의한 빈도해석의 결과와 비교 검토하여 저류함수모형의 적용성을 검토하였다. 연구의 결과는 향후 현업의 대유역 홍수량 추정에 활용할 수 있으며 보다 객관적인 설계홍수량의 결정을 지원할 수 있을 것이다.

2. 홍수량 추정방법의 고찰

일반적인 계획홍수량의 추정방법은 Fig. 1과 같이 자료의 가용성에 따라 다르다. 충분한 실측 홍수량 자료를 이용할 수 있으면 홍수자료의 빈도분석에 의한 방법을 이용한다. 이들 방법에는 경험적 방법, 지점 및 지역 빈도분석이 있다. 자료가 불충분한 지점의 홍수량 추정은 지역빈도분석을 이용한다. 그러나 충분한 실측 유량자료를 가지고 있는 지점이 거의 없거나 빈도분석을 위해서 필요한 자료기간이 짧기 때문에 대부분 경우 강우-유출모형에 의해 홍수량을 추정한다. 이 경우 모의된 홍수량의 빈도는 입력된 강우량의 빈도와 같다는 가정을 한다(Chetty 등, 2005).

본 연구에서는 과거 대홍수가 발생하였던 동시 강우사상에 의해 산정된 계획강우량을 비선형 강우-유출 모형인 저류함수모형에 입력하여 계획홍수량을 추정하는 절차를 제시하였다. 또한 실측 홍수자료를 빈도분석하여 과거 동시 강우사상을 저류함수모형에 적용하여 추정된 홍수량과 비교·검토하여 본 연구에서 제시된 홍수량 추정과정의 적용성을 평가하였다.

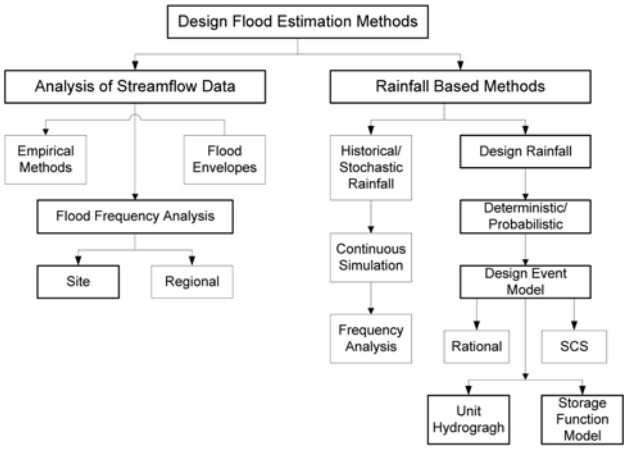

Fig. 1 Methods for Estimating Design Floods

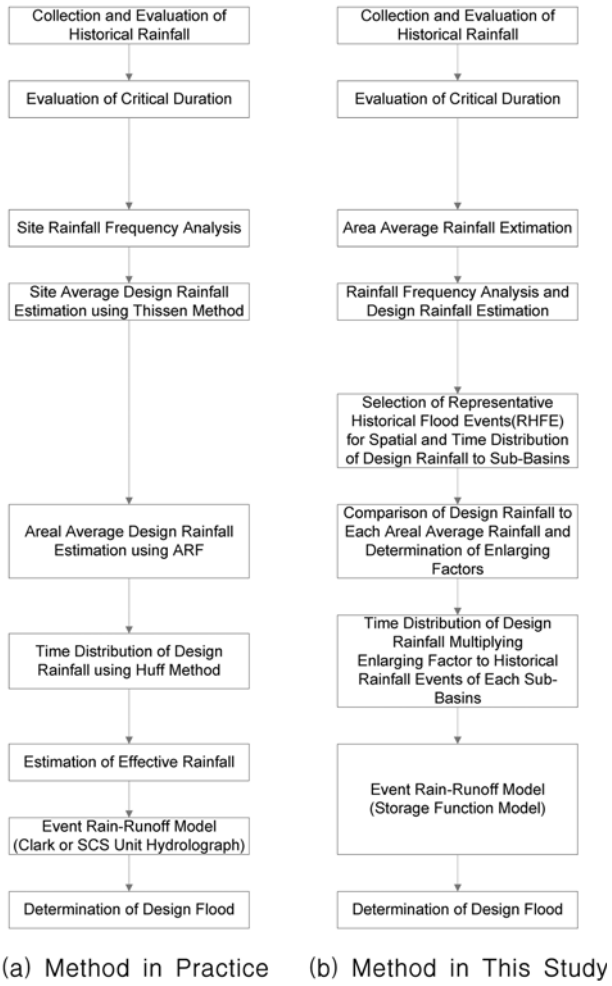

Fig. 2 Procedures for Estimating Design Floods

현재 실무에서 이용되고 있는 홍수량추정과 본 연구의 추정절차는 Fig. 2와 같다. Fig. 2(a)와 같이 실무의 홍수량 추정은 임계지속기간에 따른 지점의 연최대치계열을 작성하고 지점확률강우량을 산정하여 지점평균확률강우량을 구하고 ARF를 이용하여 유역의 설계강우량을 추정한다. 설계강우량은 과거에 발생한 강우의 통계학적 분석을 통해 제시된 무차원 누가곡선, 즉 Huff 방법에 따라 시간분포를 작성한다.

대유역의 기준지점에서 홍수량을 추정할 경우 산정된 설계 강우량은 상류 소유역에 동일 시간분포로 균일하게 내리며 이 경우 최대홍수량이 발생한다는 가정이 있다. 결국 이런 가정은 대유역내에서 강우의 시공간분포가 동일한 강우사상에 대한 분석이라 할 수 있다. 그러나 실제 대유역의 과거 홍수사상에서는 공간적으로 균일하게 동일 시간분포로 내리는 경우는 거의 없고 다양한 시공간분포에 따라 동일 확률 강우량이라도 홍수량은 다르게 발생한다.

본 연구에서 강우의 시공간분포는 과거의 대홍수에서 실제 발생하였던 동시 강우사상을 이용한다. 즉, 실무의 방법은 단일 시공간분포를 이용하여 하나의 계획홍수량을 추정하지만 본 연구의 방법은 과거의 각 대홍수 기간에 소유역에 발생하였던 동시 강우의 시공간분포를 이용하여 계획홍수량을 추정한다. 이런 방법은 일본의 실무에서 이용하고 있으며 대유역에서의 상하류의 일관된 물리적으로 설명가능한 홍수량을 추정할 수 있는 장점이 있다(國土技術研究センター, 2000). 본 연구는 과거에 발생한 홍수의 동시 강우사상에서 임계지속기간에 따른 유역내 각 지점강우량을 이용하여 대유역 기준지점에서의 유역평균강우량을 산정한다. 확률강우량을 추정하기 위하여 동시 강우사상에서 산정된 연최대 유역평균강우량을 빈도분석으로 추정한다. 여기에서 추정된 확률강우량은 실무에서 ARF를 이용하여 산정된 계획홍수량에 해당되는 강우량이다.

앞에서 기술하였듯이 본 연구에서는 현재 실무에서 이용되고 있는 하나의 강우 시공간분포를 이용하여 홍수량을 추정하는 방법과는 다르게 과거 홍수사상들에서 발생한 동시 강우사상의 시공간분포를 이용한다. 따라서 같은 확률강우량이라도 강우의 시공간분포에 따라 다른 홍수량이 추정되므로 과거 홍수에서 어떤 강우사상의 시공간분포를 이용할 것인가를 결정해야 한다. 이 경우 기준지점 상류의 각 소유역에 공간적으로 균일하게 내린 강우사상을 평가하여 선정하고 이들 강우사상에서 다양한 시간분포를 갖는 대표홍수사상을 선정해야 한다.

2.1 대표홍수의 선정

본 연구의 계획홍수량 추정 방법은 대유역 기준지점의 확률강우량을 산정한 후 해당 강우량이 상류 소유역의 과거 홍수사상들의 동시강우 시공간분포와 동일하게 발생한다는 가정을 하고 각 소유역의 유역평균강수량이 기준지점의 확률강우량과 같도록 비례증감법을 이용하여 조정하게 된다. 이와 같은 방법은 일본에서 "강우의 인신(引伸)방법"이라고 하는데 이는 "강우의 비례증감법"이라 할 수 있다(國土技術研究センター, 2000). 비례증감계수는 기준지점의 확률강우량을 상류 동시 강우사상의 유역평균강수량으로 나눈 값이다. 예로 기준지점의 확률강우량이 200 mm이고 과거 한 홍수사상의 동시 강우량에 의한 유역평균강우량이 100 mm라면 비례증감계수는 2.0이 되고 이 계수를 각 소유역에 매시간 내린 강우량에 곱하면 해당 소유역에 대한 확률강우량의 시간분포를 작성할 수 있다. 이 같은 예는 3.4절의 Fig. 6에 제시하였다. "강우의 비례증감법"의 대상이 되는 과거 홍수들이 대표홍수군이 되며 이들의 선정은 충분한 강우의 시공간분포에 대한 검토가 필요하다.

2.2 강우의 시간분포 검토

유출량은 강우의 시간분포에 따라 크게 다르다. 대상강우의 대표성을 반영하기 위하여 다양한 강우의 시간분포를 선정하여 홍수량을 추정할 필요가 있다. 강우의 시간분포지수는 Eq. (1)로 산정된다(國土技術研究センター, 2000).

$$l = \frac{r_1^2 + (r_1 + r_2)^2 + \ldots + (r_1 + r_2 + \ldots + r_p)^2}{(r_1 + r_2 + \ldots + r_p)^2} = \frac{\sum_{j=1}^{p}\left[\sum_{i=1}^{j} r_i\right]^2}{\left[\sum_{i=1}^{p} r_i\right]^2} \quad (1)$$

여기서, r_i는 i시각의 시간우량, i=1은 강우개시시각, i=p는 강우피크시각이다. 시간분포지수 l은 강우 패턴의 형상을 나타내는 지표로서 강우패턴이 평평하면 l은 커지며 강우패턴이 급격하면 l은 작아진다. 대표홍수군에는 l에 의해 다양한 강우사상을 선정해야 한다.

2.3 강우의 공간분포 검토

강우의 시간분포와 같이 공간분포에 따라 유출량이 크게 다르다. 따라서 강우가 유역전체에 균일하게 내린 과거 호우사상에 의해 대표홍수군을 선정할 필요가 있다. 강우의 공간분포 평가는 Eq. (2)의 공간분포율 K에 의해 결정된다.

$$K_i = \frac{R_i}{\sum R_i} \quad (2)$$

여기서, K_i는 유역의 공간분포율, R_i는 i유역의 유역평균우량의 총우량이다. 공간적으로 균등하게 내리는 호우에서 K_i는 비슷한 값을 갖는다. 한편 강우의 국지성 또는 균일성을 평가하는 지표로서 Eq. (3)과 같은 지역편차 S_r를 이용하는데 국지성이 강하면 은 커지고, 유역에 균일하게 내리는 강우에 대해서는 작아진다. 대표홍수군은 S_r이 적은 값을 선정한다.

$$S_r = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(1 - \frac{R_i}{R_{ave}}\right)^2 \times \frac{A_i}{A} \times 100} \quad (3)$$

여기서, R_{ave}는 기준지점 상류유역의 강우지속기간의 평균우량, R_i는 소유역평균우량, A는 기준지점유역면적, A_i는 소유역면적, N은 소유역의 수(분할유역수)이다(國土技術研究センター, 2000).

2.4 계획홍수량의 추정

확률강우량을 과거 대표홍수군의 강우 시공간분포를 이용하여 작성한 소유역별 유역평균강우량을 강우-유출 모형에 입력하여 각 대표홍수에 해당하는 유출수문곡선을 산정하고 이들 수문곡선군에서 첨두홍수량의 최대치를 계획홍수량으로 설정한다. 본 연구에서는 비선형 강우-유출모형인 저류함수모형을 이용하여 계획홍수량을 추정하였다.

2.5 저류함수모형

국내 현업에서 유역홍수량은 단위도법에 의해 추정되고 있다. 그러나 대유역에서 이 방법의 적용성에 대한 검증이 미진하여 물리적인 매개변수들의 불확실성이 매우 큰 실정이

다. 또한, 현업에 적용하고 있는 단일기법에 의한 홍수량만을 평가한다면 선형 개념의 단위도법의 홍수량 추정한계로 인하여 객관적인 홍수량 비교 · 평가에 어려움이 있다. 따라서 단위도법을 보완할 수 있는 비선형 강우-유출모형을 홍수량 추정 모형으로 현업에 적용함으로써 홍수량 산정결과에 대한 신뢰성을 향상시킬 필요가 있다.

저류함수모형은 1974년 한강홍수통제소의 개소와 함께 우리나라의 홍수예경보 모형으로 처음 이용하면서 1980년대 이후 5대강의 홍수유출모형으로 활용되어 전국 유역에 대한 매개변수들의 검 · 보정으로 제반 매개변수들이 설정되어 있고 실무에 적용하기 위한 기반이 구축되어 있다. 1961년 Kimura의해 개발된 저류함수모형은 강우-유출현상을 비선형으로 나타내기 위하여 강우량에서 유출량의 변화과정에서 유역의 저류량과 유출량의 관계를 비선형으로 가정하여 저류량을 매개함수로서 강우량에서 유출량을 산정하는 방법이다. 일반적인 저류함수의 개념은 유역의 저류현상을 표현하는 탱크와 하도의 홍수지체를 나타내는 선형수로에서 모형화되고 이 모형에 대한 운동 및 연속방정식을 계산하여 유출량을 산정하는 방법이다. 또한 저류탱크에서 유출량은 저류량의 지수승에 비례하며 유역과 하도구간의 저류현상을 동일하게 취급한다.

저류함수모형은 홍수유출을 Manning 공식으로 표시할 수 있는 지표면 유출이라고 가정하면 유역과 하도구간의 저류량을 유출량의 멱함수로 표시할 수 있다.

$$S_l = KQ_l^P \tag{4}$$

여기서, K, P는 유역 혹은 하도구간에 대한 상수이며, Eq. (4)는 홍수류의 운동방정식이다. 한편, 유역에 대한 연속방정식은 바로 물수지방정식으로서 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{1}{3.6}fr_{ave}A - Q_l = \frac{dS_l}{dt} \tag{5}$$

여기서, f는 평균유입계수, r_{ave}는 단위시간당 유역평균강우량(mm/hr), A는 유역면적(km^2), $O_l(t)=O(t+T_l)$은 유역 지체시간 T_l을 고려한 유역으로부터의 직접유출량(m^3/sec), S_l은 유역 내의 실제저류량(m^3)이다. 또한 하도구간에 대한 연속방정식을 표시하면 다음과 같다.

$$\left(\sum_{j=1}^{n} f_j I_j\right) - O_l = \frac{dS_l}{dt} \tag{6}$$

여기서, f_j는 평균유입계수이며, I_j는 유역 및 지류역으로부터 하도로의 유입량 혹은 하도구간의 상류단으로의 유입량(m^3/sec)이고, $O_l(t)=O(t+T_l)$은 지체시간 T_l을 고려한 하도구간의 하류단에서의 유출량(m^3/sec), S_l은 하도구간 내의 실 저류량(m^3)이다.

유역과 하도에 대한 상수 K, P는 기왕의 홍수유출자료로부터 쉽게 구할 수 있으며, S_l은 O_l의 항으로 표시되므로 유역평균강수량 r_{ave} 혹은 하도유입량 I만 주어지면 홍수유출량 O이 계산이 가능하게 된다(윤용남, 2007).

저류함수모형은 유역과 하도구간에서 한 개의 탱크에 의한 저류함수의 범위가 10~1,000 km^{2}의 유역면적과 10~100 km의 하도구간에서 적정한 유출량을 산정할 수 있다. 따라서 대유역의 경우 저류함수의 범위에 따라 유역과 하도구간을 분할하여 유출계산을 해야한다(土木硏究所, 1985).

3. 연구 대상자료와 방법

3.1 연구 대상자료

본 연구에서는 유역면적이 크며 동시 강우사상과 실측 유량자료를 확보할 수 있는 충주댐 유역을 대상으로 하였다. 충주댐은 6,648 km^{2}의 유역면적을 가지고 있으며 1986년 준공되었고 연간 3,380백만 m^{3}의 용수공급능력과 616백만 m^{3}의 홍수조절능력을 가지고 있어 한강 중하류부의 용수공급과 홍수조절에 중요한 역할을 하고 있다. 충주댐 유역은 저류함수모형에 의한 홍수량 예측을 위하여 Fig. 3과 같이 7개 소유역과 5개의 하도구간으로 분할되어 있다.

충주댐 상류에는 국토해양부 및 기상청의 40개 실시간 강우관측소가 운영되고 있으나 많은 관측소들이 관측기간이 짧아 본 연구에서는 이들 관측소에서 1988년부터 지속적으로 실시간 강우자료를 축적하고 있는 15개 지점의 동시 시간강우를 분석대상으로 하였다. 충주댐은 1988년부터 현재까지 홍수예경보 및 댐운영을 위한 수문자료를 축적하고 있다. 그러나 본 연구에서 필요한 유역의 연최대 유입량 및 동시 시간강우량 자료는 결측 및 오측 등으로 획득에 어려움이 있다. 본 연구에서는 먼저 연최대유입량을 검토하고 해당 홍수의 동시 시간강우량 자료를 수집하여 유역평균강우량을 분석하였다. 분석 자료기간은 Table 1과 같이 19년(1988~2006년)으로 최대유입량은 2006년 7월 태풍 에위니아에 의한 22,260 m^3/s이며 1990년 일산제방을 붕괴시킨 홍수 때는 22,164 m^3/s의 유입량을 기록하였다. 이 기간에 홍수예경보 발령은 8회로 약 2년마다 빈번한 대홍수가 발생하였다. 분석에 이용한 실측 홍수량은 1996년의 오측에 의한 홍수량을 제외한 18개 연최대홍수량이다. 실측 홍수사상의 동시 시간우량은 오측 및 결측으로

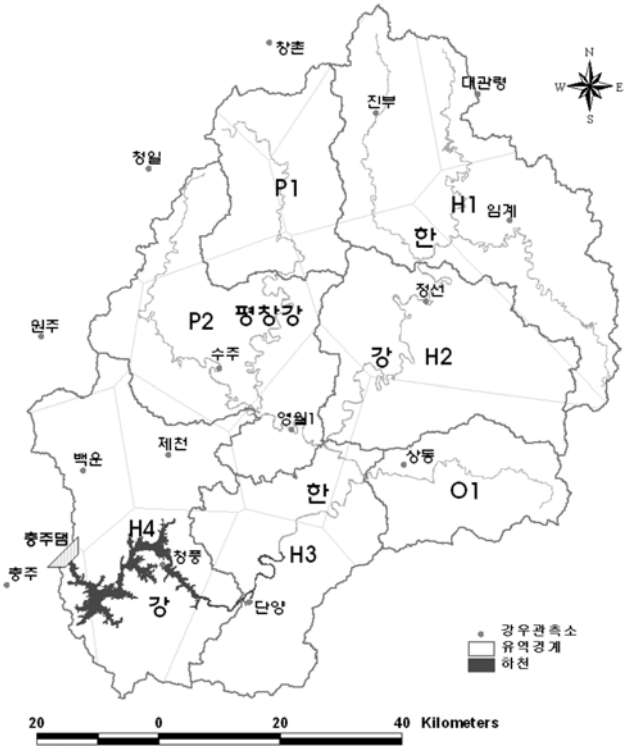

Fig. 3 Chung-ju Dam Basin and Thiessen Network

Table 1. Historical Concurrent Rainfall Events in Chung-Ju Dam Basin

Events		Total Rainfall Duration (hr)	Concurrent Areal Average Rainfall (mm)	48hr Max. Concurrent Areal Average Rainfall (mm)	Annual Maximum Discharge (m^3/s)	Remarks
1988. 07. 20.	No. 1	122	222.77	174.35	11,207	Flood watch
1989. 07. 24.	No. 2	133	339.85	284.84	8,881	
1990. 09. 11.	No. 3	98	370.56	329.78	22,164	Flood watch and warning
1991. 07. 20.	No. 4	-	-	-	4,290	
1992. 08. 26.	No. 5	-	-	-	2,445	
1993. 07. 11.	No. 6	91	158.40	131.85	7,928	
1994. 06. 30.	No. 7	72	187.39	186.61	3,171	
1995. 08. 24.	No. 8	106	276.33	226.56	9,864	Flood watch and warning
1996. 08. 25.	No. 9	102	86.81	79.98	-	
1997. 07. 02.	No.10	-	-	-	5,059	
1998. 08. 08.	No.11	118	205.81	132.90	8,016	Flood watch and warning
1999. 08. 02.	No.12	101	242.36	235.78	10,572	Flood watch and warning
2000. 09. 13.	No.13	-	-	-	5,635	
2001. 06. 29.	No.14	34	97.36	97.36	6,062	
2002. 08. 07.	No.15	139	385.49	344.04	14,714	Flood watch and warning
2003. 06. 27.	No.16	31	98.29	98.29	2,258	
2004. 07. 16.	No.17	146	311.69	154.48	5,694	Flood watch
2005. 07. 01.	No.18	-	-	-	5,807	
2006. 07. 16.	No.19	136	407.89	291.68	22,650	Flood watch and warning

실측홍수량과 동일한 자료수를 획득할 수 없어 최종적으로 분석 가능한 14개 사상에 대한 강우량 자료를 분석하여 이용하였다.

3.2 실측 강우량의 빈도분석

강우량의 빈도분석은 임계지속기간에 따른 동시 유역평균 강우량에 대하여 수행하였다. 국토해양부(2008)에 따르면 충주댐 지점의 임계지속기간은 48시간으로 제시되고 있어 본 연구에서도 48시간 최대유역평균강우량에 대한 빈도분석을 수행하였다. 빈도분석에 이용된 자료수는 Table 1에 제시된 14개 강우자료이다. 확률분포형으로서 일반적으로 실무에서 많이 이용하는 Gumbel, Gamma, GEV(Generalized Extreme Value)와 LN2P(2-Para. Log Normal)분포를 적용하였다. 이들 분포의 매개변수는 확률가중모멘트법을 이용하였으며 최대유역평균강우량 자료의 통계적 적합도 검정을 모두 만족하였다.

Fig. 4는 이들 분포의 재현기간에 따른 확률강우량을 나타낸 것이다. 100년 빈도 확률강우량은 Gumbel, Gamma과 GEV 분포가 모두 약 488 mm로 추정되었으나 LN2P는 550 mm로 높게 추정되었다. 본 연구에서는 100년 빈도 유역평균강우량을 3개 확률분포형에 의해 비슷하게 추정된 488 mm로 결정하고 이를 과거 대표홍수의 강우 시공간분포를 적용하여 저류함수모형에 의한 계획홍수량 추정에 이용하였다.

3.3 실측 홍수량의 빈도분석

홍수량의 빈도분석은 Table 1의 18개 연최대유입량자료을 이용하였다. 3.2절 강우량의 빈도분석과 같은 확률분포형과 과정으로 추정된 확률홍수량은 Fig. 5와 같다. 100년 빈도의 홍수량의 추정결과 Gumbel과 Gamma 분포에서는 27,500 m^3/s정도이고 GEV와 LN2P에서는 33,000 m^3/s로 추정되었다. 이들 실측 홍수량에 의한 추정량은 5.3절에서 계획강우량을 입력한 저류함수모형에 의해 산정된 홍수량과 비교하는데 이용하였다.

3.4 대표홍수의 평가와 결정

계획강우량이 결정되면 과거에 발생한 대표홍수군의 다양한 강우의 시공간분포가 동일하게 발생한다는 가정 하에 실측우량을 계획강우량까지 비례증감법에 의해 확대 또는 축소하고 이를 유출모형에 적용하여 홍수량을 산정한다. 대표홍수군의 동시 강우량의 시공간분포를 계획강우량에 의한 비례증감계수를 이용하여 기준지점 상류의 소유역에 대한 설계강우주상도를 작성하고 저류함수모형을 이용하여 계획홍수

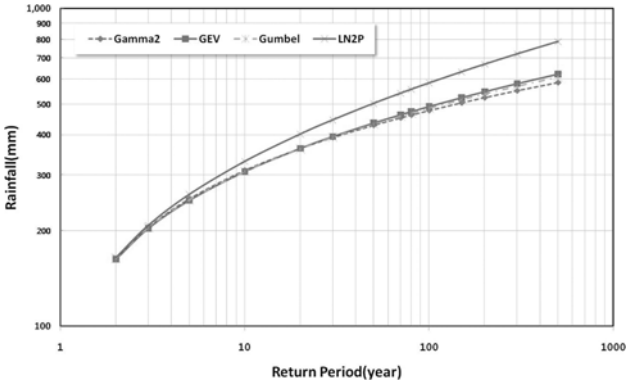

Fig. 4 Relationships between Rainfall and Return Periods

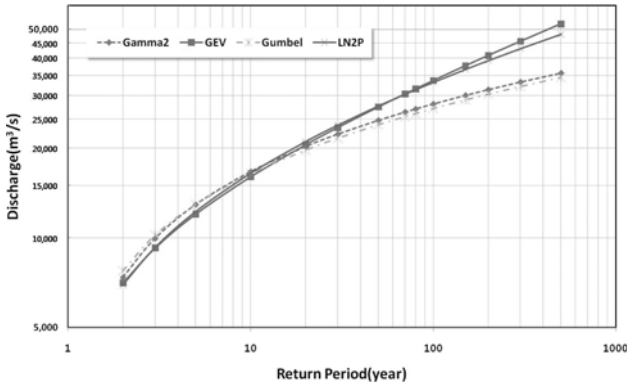

Fig. 5 Relationships between Discharge and Return Periods

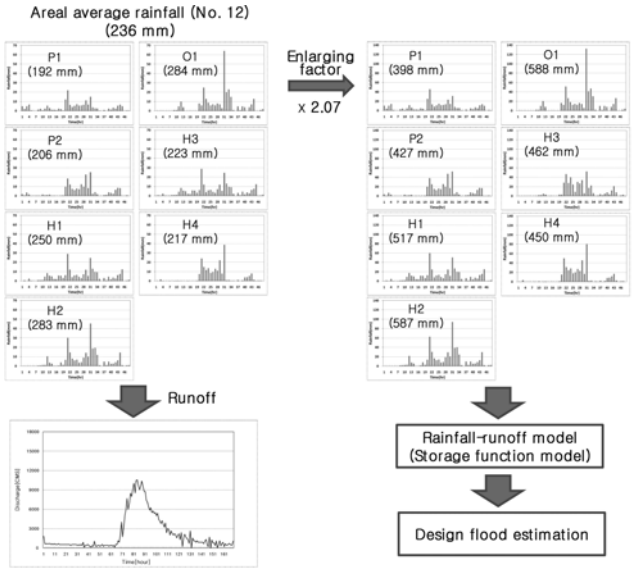

Fig. 6 Method for Enlarging Historical Rainfall to Design Rainfall

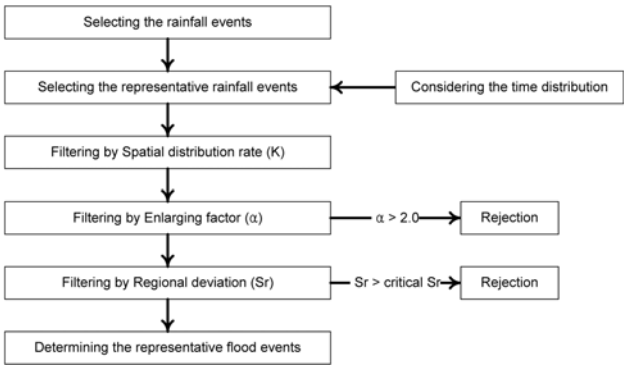

Fig. 7 Procedure for Determining the Representative Flood Events

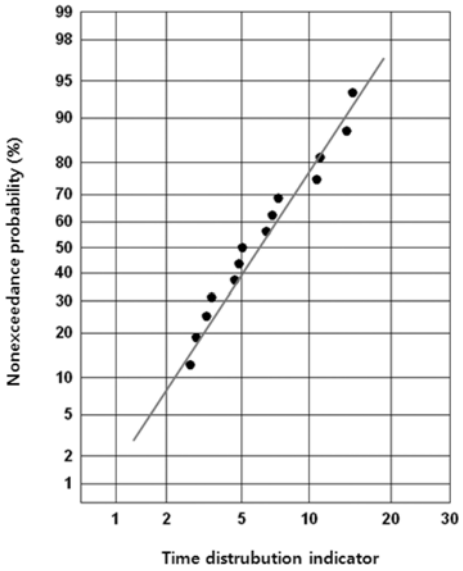

Fig. 8 Time Distribution Indicator (I)

량을 추정하는 과정은 Fig. 6과 같다. 7개 소유역으로 구분된 충주댐 유역에 Table 1의 1999년 8월 2일(No. 12)홍수에서 48시간 동시 시간강우사상의 유역평균강우량 236 mm가 발생했을 때 7개 소유역 강우의 시공간분포는 Fig. 6의 왼쪽 그림과 같으며 이들 강우량에 의해 발생된 실측홍수량은 10,572 m^3/s를 기록하였다. 또한 3.2절에서 100년 빈도 계획강우량은 488 mm로 추정되었다. 따라서 No. 12 홍수의 유역평균강우량은 236 mm이므로 비례증감계수는 2.07로서 각 소유역의 시간강우량에 2.07배를 하게 되면 기준지점의 계획강수량 488 mm가 모든 소유역에서 No. 12 홍수와 같은 동시 강우 시공간분포를 가지며 Fig. 6의 오른쪽과 같이 재현시킬 수 있다. 이 과정을 통하여 최종적으로 결정된 강우의 시공간분포를 저류함수모형에 입력하여 No. 12의 대표홍수 하나의 사상에 대한 계획홍수량을 추정한다. 주지된 바와 같이 강우의 시공간 분포는 계획홍수량에 많은 영향을 주게 된다. 따라서 충분한 과거 홍수사상의 강우 시공간분포를 평가하여 가능한 많은 대표홍수를 선정할 필요가 있다.

대표홍수군의 선정 절차는 Fig. 7과 같다. 대표홍수군의 선정은 Table 1의 홍수사상에서 다양한 시간분포를 검토할 필요가 있다. 즉 과거 홍수사상 중 Eq. (1)을 이용하여 강우의 시간분포를 고르게 선정해야 한다. 두 번째 단계는 Eq. (2)의 공간분포율 K_i를 분석하여 공간적으로 균등하게 내린 홍수사상을 평가한다. 세 번째는 계획강우량에 비해 과거 홍수사상의 유역평균강우량이 적으면 비례증감계수(α)가 지나치게 크게 산정되어 홍수량이 과다 추정될 수 있다. 일반적으로 비례증감계수가 2.0보다 크면 대표홍수군에서 제외된다(國土技術硏究センター, 2000). 마지막으로 Eq. (3)의 S_r을 이용하여 홍수사상들의 강우의 국지성을 평가하여 기준을 초과하는 홍수는 이상홍수로 평가하여 대표홍수군에서 제외한다.

3.4.1 강우 시・공간 분포, 비례증감계수(α) 및 지역편차(S_r)의 평가

본 연구에서 선정한 대표강우군은 Table 1의 14개 강우사상으로서 이중 8개 홍수사상은 홍수경보가 발령된 대홍수들이다. Eq. (1)을 이용하여 산정된 시간분포지수 I의 확률분포는 Fig. 8과 같으며, 강우의 시간분포지수가 어느 한 분포형에 집중되지 않고 다양한 분포를 가지고 있음을 보여주고 있다.

충주댐 상류유역에 대한 대표강우군의 공간분포율(K_i)에 대한 결과는 Fig. 9와 같으며 대표강우군의 K_i의 분포상황을 통해 공간적으로 현저하게 치우쳐 있는 강우군은 대표강우군에서 제외시켰다.

공간분포율(K_i)이 현저하게 치우쳐 있는 강우군을 선택하여 대표홍수군에서 제외시키기 위해서는 직관적으로 판단할 수 밖에 없으며 소유역의 개수가 많을수록 이를 도시화하여 분류하기란 더욱더 어려워진다. 따라서 본 연구에서는 보다

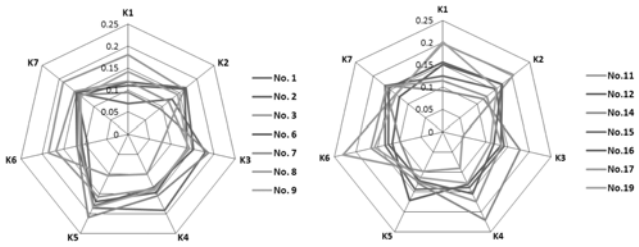

Fig. 9 Spatial Distribution Rate (K)

객관적인 판단기준을 제시하고자 Eq. (7)과 같은 공간분포지수(K_t)를 개발하였다. 각 소유역의 공간분포율이 동일한 값을 가질수록 공간적으로 균등하게 내린 강우라 할 수 있기 때문에 각 공간분포율이 동일값으로부터 얼마나 떨어져 있는가를 판단하여 강우군을 선택하는 방법이다.

$$K_t = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{1}{N}-K_i\right)^2} \tag{7}$$

여기서, K_i는 i유역의 공간분포율, N은 소유역의 수이다. 소유역의 수에 따라 공간분포율은 동일한 $1/N$의 값에 가까울수록 공간적으로 균등하게 내린 강우라고 할 수 있다. 따라서 어떤 동시 강우사상의 K_t가 적을수록 유역에서 균일한 강우사상을 나타내며 연구결과 의의 상한치로 전 홍수사상의 K_t의 평균치가 적정한 것으로 나타났다. 본 연구에서는 Eq. (7)에서 산정한 결과를 토대로 14개의 강우군에 대한 K_t의 평균치보다 큰 값들은 대표홍수군에서 기각처리하였다.

비례증감계수(α)에 의한 평가는 상한치를 약 2.0정도로 하고 있으며 선정된 대표강우군 중 계획강우량까지의 α가 2.0을 초과하는 홍수는 대표홍수에서 제외하였다. 마지막으로 국지강우사상을 평가하기 위하여 Eq. (3)의 S_r값을 평가한다. 과거 홍수사상에서 이 적을수록 강우의 국지성이 적다는 것을 의미하며 S_r에 의한 기각에 대한 기준치의 산정이 필요하다. S_r의 기준치는 각 홍수사상에서 계산한 S_r의 값을 토대로 Fig. 10과 같은 유역평균강우량과 지역편차와의 상관도를 작성하고 그 포락선과 기준지점에서의 계획강우량과의 교점에서의 S_r로 설정한다. 본 연구에서의 S_r의 기준치는 0.89가 되지만 Fig. 10의 포락선은 대략적으로 산정한 것이므로 약 20%의 불확실성을 고려하여 구한 교점의 값에 1.2배한 값을 이상홍수판정을 위한 한계 S_r으로 한다(建設省北陸地方建設局, 1985). 따라서, 충주댐 상류유역의 한계 S_r은 1.07이 되며, 이보다 큰 값을 가진 강우사상은 기각하였다.

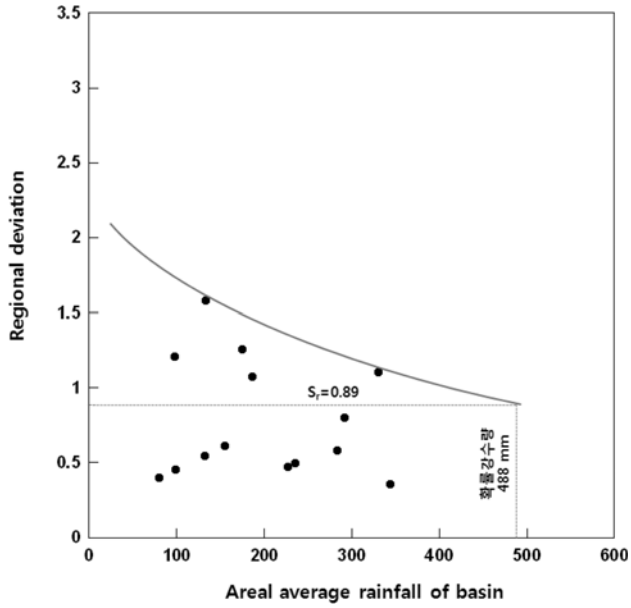

Fig. 10 Regional Deviation (S_r)

3.4.2 대표홍수군의 결정

대표강우군으로 산정된 14개의 사상 중 4.4.1절의 분석과 평가를 통하여 Fig. 6의 계획홍수량 추정을 위한 대표홍수량으로 총 5개 홍수가 선정되었다. 계획홍수량을 이들 홍수의 강우 시공간분포를 이용하여 3.2절에서 산정된 기준지점의 100년 빈도 계획강우량이 488 mm가 되도록 비례증감계수에 의해 시공간분포를 작성하게 된다. 각 홍수사상의 강우 시공

Table 2. Determination of Representative Flood Events

Events	Time distribution indicator (l)	Spatial distribution rate								Enlarging factor (α)	Regional deviation (S_r)	Accept or Reject				
		K_{P1}	K_{P2}	K_{H1}	K_{H2}	K_{O1}	K_{H3}	K_{H4}	K_t			K	K_t	α	S_r	Selection
No. 1	3.32	0.09	0.15	0.07	0.13	0.19	0.18	0.19	0.044	2.80	1.25	x	x	x	x	x
No. 2	5.03	0.11	0.14	0.12	0.17	0.18	0.15	0.13	0.024	1.72	0.58	o	o	o	o	o
No. 3	10.76	0.19	0.19	0.18	0.16	0.10	0.08	0.10	0.044	1.48	1.11	x	x	o	o	x
No. 6	3.53	0.12	0.15	0.11	0.16	0.17	0.14	0.15	0.020	3.70	0.54	o	o	x	o	x
No. 7	4.84	0.12	0.14	0.09	0.09	0.21	0.19	0.15	0.041	2.62	1.07	x	x	x	o	x
No. 8	14.04	0.17	0.16	0.12	0.12	0.16	0.14	0.14	0.018	2.16	0.47	o	o	o	o	o
No. 9	6.50	0.11	0.14	0.14	0.14	0.18	0.14	0.14	0.020	6.11	0.40	o	o	x	o	x
No.11	11.08	0.23	0.14	0.20	0.20	0.10	0.05	0.09	0.064	3.67	1.58	x	x	x	x	x
No.12	4.59	0.12	0.12	0.15	0.17	0.17	0.13	0.13	0.020	2.07	0.50	o	o	o	o	o
No.14	2.92	0.10	0.17	0.09	0.12	0.13	0.18	0.22	0.043	5.02	1.21	x	x	x	o	x
No.15	6.90	0.13	0.17	0.13	0.15	0.14	0.14	0.14	0.012	1.42	0.36	o	o	o	o	o
No.16	2.72	0.13	0.16	0.16	0.17	0.12	0.12	0.15	0.019	4.97	0.45	o	o	x	o	x
No.17	14.77	0.17	0.16	0.11	0.13	0.12	0.14	0.17	0.022	3.16	0.61	o	o	x	o	x
No.19	7.37	0.16	0.13	0.20	0.15	0.11	0.11	0.13	0.029	1.67	0.80	o	o	o	o	o

간분포, 비례증감계수, 국지강우량 평가 등의 결과는 Table 2와 같다.

4. 저류함수모형에 의한 계획홍수량 추정과 결과

4.1 유역 및 하도의 분할

대유역에 대한 홍수량 추정은 유역추적을 위해 소유역으로 분할하여 평가한다. 소유역의 규모는 강우의 시공간분포, 홍수도달시간 등의 유역 유출반응에 따라 결정된다는 것은 주지된 사실이다. 유역이 너무 크면 유역의 지형과 지질이 복잡해질 뿐만 아니라 유역내 하도가 길어져 유역유출보다 하도의 저류효과가 커지게 되므로 유역의 저류함수에 무리가 생긴다. 하도의 유하효과에 대한 영향이 큰 경우에는 유역을 분할해서 하류측 잔류유역에도 유역 및 하도의 저류함수를 만드는 것이 좋다(土木硏究所, 1985).

본 연구에서는 현재 구축되어 있는 한강홍수예경보시스템의 Fig. 3의 소유역 분할 자료를 이용하였고 이들 유역 및 하도의 규모는 2.5절에서 제시한 범위를 만족하고 있다. 연구의 대상유역인 충주댐 상류의 하천모식도는 Fig. 11과 같고, 분할된 소유역 및 하도의 특성은 Table 3과 같다.

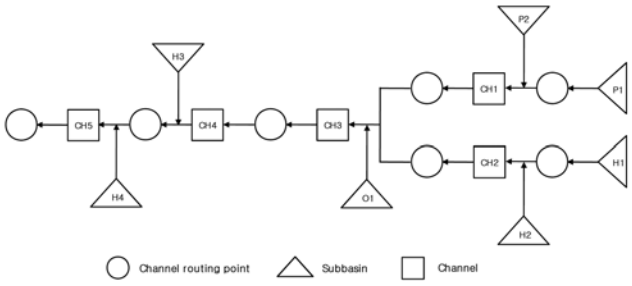

Fig. 11 Flood Routing Flow Chart

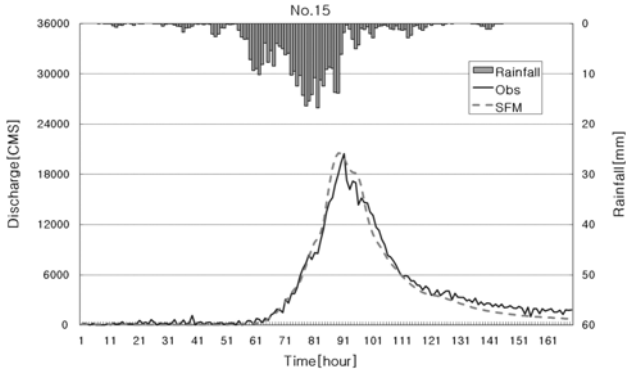

Fig. 12 Calibration of Storage Function Model

4.2 매개변수의 보정과 검증

저류함수법은 두개의 첨두홍수량을 갖는 홍수의 재현성은 한개의 첨두홍수량을 갖는 홍수량보다 좋지 않은 것으로 알려져 있다(土木硏究所, 1985). 따라서 매개변수를 추정하기 위해서는 단일 첨두홍수량을 가지는 최근의 홍수 중 비교적 유출규모가 크며 자료가 잘 정비되어 있는 호우사상을 선택하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 Table 1의 No.15 홍수사상을 검증대상으로 선정하여 매개변수를 보정하고 대표홍수로 선정된 No.2, No.8, No.12, No.19의 홍수에 대한 매개변수의 검증을 하였다. 저류함수모형의 추정 매개변수는 유역 저류함수의 K, P 및 지체시간 T_l, 1차유출률 f_1과 포화우량 R_{sa}가 있으며 하도유출 모형의 매개변수인 지체시간 T_l과 저류상수 K, P가 있다. 매개변수를 산정하기 위해서는 상수고정법, 상수역산법, 경험식에 의한 방법 등 여러 가지 방법이 있으며 본 연구에서는 매개변수를 추정하기 위해 기존의 한강홍수예경보시스템에서 이용하고 있는 매개변수를 시행착오법을 통해 수정·보완하였다. 매개변수 보정시 기저유량은 홍수가 강우에 영향을 받기 전의 유량을 이용하였다. No. 15 호우사상에 이한 매개변수의 보정결과는 Fig. 12와 Table 4에 제시하였다.

Table 3. Characteristics of Subbasin and Channel

Chung-ju dam basin	Subbasin							Channel				
	P1	P2	H1	H2	O1	H3	H4	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5
Area (km^2)	638.5	1093.3	1418.5	1020.5	496.3	1172.9	817.2	-	-	-	-	-
Length (km)	43.3	64.8	95.0	42.8	50.7	21.5	63.5	69.0	66.3	15.8	55.8	54.0
Width (km)	-	-	-	-	-	-	-	0.30	0.15	0.25	0.25	0.32
Slope	-	-	-	-	-	-	-	0.014	0.016	0.013	0.013	0.012
n (coeff.)	-	-	-	-	-	-	-	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04

Table 4. Parameters of SFM

Chung-ju dam basin	Subbasin							Channel				
	P1	P2	H1	H2	O1	H3	H4	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5
K	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	35.00	100.00	100.00	50.00	100.00	100.00
P	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
T_l	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
f_1	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	-	-	-	-	-
f_{sa}	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	-	-	-	-	-
R_{sa}	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	-	-	-	-	-

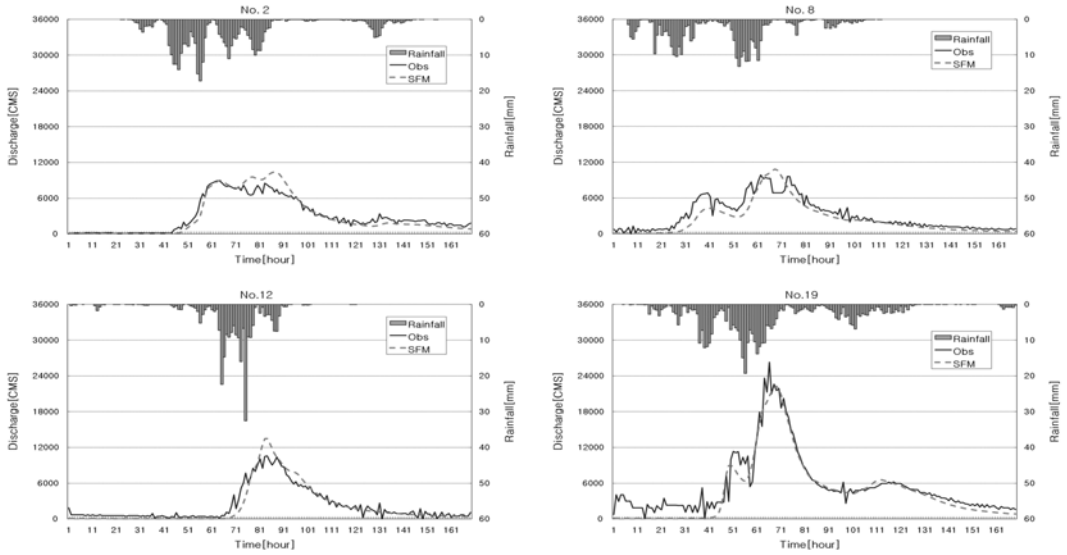

Fig. 13 Verification of Storage Function Model

Table 5. Results for verification

Events	Peak time		Peak Discharge		Diff. (%)	Error (E_Q)
	Obs.	SFM	Obs.	SFM		
No. 2	1989/7/26 15:00	1989/7/27 14:00	8881.00	10419.87	17.3	0.011
No. 8	1995/8/25 13:00	1995/8/25 19:00	9864.00	10855.45	10.05	0.017
No.12	1999/8/3 11:00	1999/8/3 11:00	10572.00	13449.11	27.21	0.009
No.15	2002/8/7 18:00	2002/8/7 16:00	20437.00	20505.54	0.34	0.002
No.19	2006/7/16 17:00	2006/7/16 20:00	26282.00	22270.58	-15.26	0.004

No.15 : Flood event for calibration

보정된 매개변수를 이용하여 다른 홍수의 재현성을 평가하기 위하여 No.2, No.8, No.12, No.19의 홍수사상에 대한 검증결과는 Fig. 13과 Table 5와 같다.

매개변수의 추정에서 중요한 점은 실측치와 계산치의 유출모형 검증의 허용오차이다. 國土技術硏究センター(2000)에서는 Eq. (8)과 같이 유출수문곡선에 대한 오차비율이 0.03이하를 허용오차로 하고 있다. 이는 실측유량에 대해 평균적으로 17%의 오차를 허용하는 것이다. 또 유출량의 첨두치만을 평가하기 위하여 Eq. (9)와 같은 첨두유출량오차를 제시하였다. 이는 실측과 계산 첨두유량의 비율로써 오차를 제시하며 첨두유량의 오차범위를 20%라고 제시하였다.

$$E_Q = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{Q_o(i)-Q_c(i)}{Q_{op}}\right)^2 \tag{8}$$

$$E_P = \frac{Q_{op}-Q_{cp}}{Q_{cp}} \tag{9}$$

여기서, E_Q는 유출파형오차, $Q_o(i)$는 i시 실측유량, $Q_c(i)$는 i시 계산유량, Q_{op}는 실측첨두유량, E_P는 첨두유출량오차, Q_{cp}는 계산첨두유량이다. 선정된 대표홍수군에 대해 추정된 매개변수를 이용한 저류함수모형을 통해 유출수문곡선을 산정하였으며 이를 실측치와 비교한 결과는 Table 5에 제시되었다. 모든 대표홍수군에 대해 실측치와 유출수문곡선의 오차비율이 0.03 이하임을 알 수 있으나, No.12 호우사상의 경우 첨두유출량 오차가 27.21%를 나타내고 있기 때문에 계획홍수량을 추정하기 위한 대표홍수군에서 제외시켰다.

4.3 계획 홍수량의 추정결과

계획홍수량을 추정하기 위하여 Fig. 6과 같은 과정으로 4개 대표홍수군의 시공간분포가 동일하게 발생한다는 가정 하에 대표홍수군의 실측우량을 계획강우량까지 비례하여 확대하였다. 계획홍수량은 이들을 저류함수모형에 입력하여 각 대표홍수에 해당하는 유출수문곡선을 산정하고 이들 수문곡선군에서 첨두홍수량의 최대치로 산정하였다. Fig. 14는 충주댐의 기준지점에서 100년 빈도 계획강우량 488 mm일 경우 각 대표홍수의 강우 시공간 분포에 따른 계획홍수의 유출수문곡선이며 추정된 계획홍수량은 Table 6과 같다.

4개의 대표홍수로 추정된 최대홍수량는 32,800 m^3/s이며 실측 유량자료의 빈도분석에 의한 홍수량은 GEV분포의 33,670 m^3/s로서 약 2.6%의 편차에 불과하여 본 연구의 홍수량 추정과정의 적합성을 보여주고 있다. 또한 일반적으로 강우-유출 관계의 비선형성으로 실측자료의 빈도해석 결과와 선형모형에 의한 홍수량은 같은 빈도에서 다른 결과를 주고 있다. 그러나 본 연구의 비선형 강우-유출 모형인 저류함수모형에 의한 추정결과는 실측자료에 의한 홍수량과 비슷한 결과를 주고 있어 계획홍수량 추정에서 저류함수모형의 적용성을 확인할 수 있다.

4개의 대표홍수를 이용하여 추정된 100년 빈도 홍수량은 주지된 사실과 같이 강우의 시공간분포에 따라 다르게 산정되었다. 가장 크게 산정된 홍수량은 No. 19 홍수의 동시강우의 시공간분포가 발생하였을 때였다. 이 홍수는 2006년 태풍 에위니아에 의해 발생한 홍수로 Table 1의 본 연구에

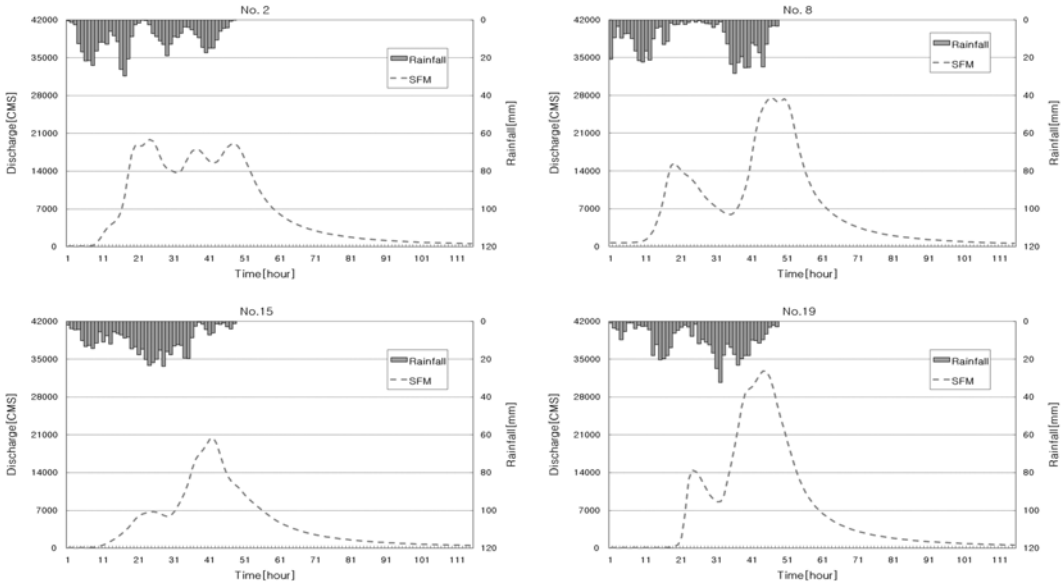

Fig. 14 Design Flood Hydrograph

Table 6. Comparison of Estimated Design Floods

Method	Storage Function Model	Flood Frequency Analysis of Historical Discharge
100 yr Design Flood (m^3/s)	No. 2 : 19,800 No. 8 : 27,580 No.15 : 20,400 No.19 : 32,800	Gamma2 : 28110 GEV : 33670 Gumbel : 27130 LN2P : 33180

서 이용한 실측 자료 중 최대홍수량을 기록한 홍수이다. 따라서 다른 유역에서도 과거 동시 강우량을 이용한 홍수량 추정에서 과거 최대홍수사상을 이용한다면 최대 계획홍수량을 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

유역치수계획을 위해서는 대유역의 상하류의 일관된 홍수량의 추정이 필요하다. 그러나 수천~수만 범위의 대유역에서 홍수량 추정은 강우의 시공간 분포, 지속기간 및 홍수량산정 모형과 매개변수 등에서 불확실성이 더욱 커지게 된다. 우리나라의 실무에서 적용하고 있는 대유역의 계획홍수량의 추정방법은 강우의 분석에서 대유역의 ARF 불확실성과 소유역에서 강우시간분포의 선정의 문제가 어려움이 되고 있다. 또한 홍수량 산정모형으로 이용하는 단위도법은 강우-유출의 관계가 유역에서 선형적으로 반응한다는 가정이 있어 수문학적으로 비선형 반응을 가지고 있는 유역의 대홍수 추정은 부정확할 수 있다. 보다 중요한 문제는 단위도법의 단일기법에 의한 홍수량 추정은 결과에 대한 객관성을 평가할 수 없다는 한계가 있다. 물론 실측자료에 의한 빈도해석의 결과와 비교할 수 있으나 가용자료의 한계로 어려움이 있다. 따라서 비선형 모형에 의한 홍수량 추정으로 결과에 대한 객관성을 높일 수 있다.

본 연구에서는 과거 홍수의 동시강우량 시공간분포를 이용하여 강우-유출의 비선형성을 재현할 수 있는 저류함수모형으로 계획홍수량을 추정하는 과정을 제시하였다. 또한 실측유량에 의한 빈도해석으로 본 연구에서 제시한 홍수량 추정방법의 적합성을 평가하였다. 본 연구에서 제시한 강우시공간분포의 기법을 이용하면 현재 홍수량 추정의 실무에서 어려움을 주고 있는 ARF와 강우의 시간분포의 선정문제를 해결할 수 있다. 강우의 공간분포해석에서 Eq. (2)의 기존의 방법은 공간분포를 직관적으로 평가해야하는 어려움이 있고 대유역의 많은 소유역이 있는 경우 해석적인 방법이 필요하다. 따라서 Fig. 9와 Eq. (7)을 이용하여 많은 홍수사상과 소유역에서 편리하게 균일한 강우사상을 선정할 수 있는 기법을 제시하였다.

실측유량의 빈도해석에 의한 계획홍수량은 본 연구에서 제시한 홍수량 추정량과 매우 일치된 결과를 보이고 있어 저류함수모형이 대유역의 비선형 강우-유출관계를 잘 재현할 수 있고 실무의 홍수량 추정에서 충분히 이용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 본 연구의 활용은 현재의 실무에서 이용하고 있는 단위도법에 의해 추정한 홍수량과 비교・검토할 수 있는 기회를 줄 수 있을 것이다.

실무에서 본 연구의 홍수량 추정방법을 적용할 경우 어려운 점은 동시 강우자료의 가용성일 것이다. 그러나 최대 계획홍수량이 과거 최대홍수의 시공간분포에서 발생되는 결과로 볼 때 최근의 대홍수사상의 시공간분포를 기준분포로 설정하여 이용하는 것도 대안일 것이다. 또한 저류함수모형의 이용에서 전국적인 유역의 매개변수의 추정이 문제인데 이미 5대강 홍수통제소의 홍수예경보 모형으로 활용되어 검증된 매개변수가 많아 적용에 어려움이 없을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 강우의 시공간분포에 따른 홍수량 변동 및 단위도법과 저류함수모형에 의한 홍수량의 비교는 연구의 범위에 포함되지 않았다. 그러나 향후 이들의 상세한 분석과 평가는 실무의 홍수량 추정에 도움이 될 것이다.

참고문헌

건설교통부(2005) **유역종합치수계획수립용역 홍수량산정지침서**.
건설교통부(2007) **홍수량산정기법 가이드라인 보고서**.
국토해양부(2008) **한강1권역(본류) 유역종합치수계획(안) 보고서**.
윤용남(2007) **수문학**, 청문각.
建設省北陸地方建設局(1985) 阿賀野川水系流量檢討報告書, 日本建設省.
國土技術研究センタ(2000) 高水計劃檢討の手引き(案).

土木研究所 (1985). 流出解析, 日本土木研究所 水文研究室.
Chetty, K. and Smithers, J. (2005) Continuous simulation modelling for design flood estimation in south africa: preliminary investigations in the thukela catchment. *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 30, pp. 634-638.
Smithers, J., Chetty, K., Frezghi, M., Knoesen, D., and Tewolde, M. (2007). Development and assessment of a continuous simulation modeling system for design flood estimation. WRC Report No. 1318/1/07. Water Research Commision, University of KwaZulu-Natal, Pietermaritzburg, South Africa.

(접수일: 2009.3.17/심사일: 2009.3.22/심사완료일: 2009.3.22)