韓國水資源學會論文集
第48卷 第3號·2015年 3月
pp. 209~220

J. Korea Water Resour. Assoc.
Vol. 48, No. 3:209-220, March 2015
http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2015.48.3.209
pISSN 1226-6280 • eISSN 2287-6138

홍수 유출자료의 공간확장과 홍수저감효과에 대한 댐 영향 분석 I

Dam Effects on Spatial Extension of Flood Discharge Data and Flood Reduction Scale I

김 남 원* / 정 용** / 이 정 은***

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

Abstract

In this study, the effects of changed environment on spatial extension of flood discharge data which is generating discharge data at ungauged watersheds. Especially, effects of dams on spatial extensions of flood discharge data and on natural flow generation were studied. This is somehow an intial trial of flood discharge data generation for heterogeneous watersheds because of dam installation. Data extensions have been performed based on the flood discharge data from YeoJoo water gauge station located on the Nam-Han River. For the evaluation of flood discharge data spatial extension under dam effects and producing natural flow, 41 flood events associated with YeoJoo water gauge station were selected from 1986 to 2010. When flood discharge data were extended based on YeoJoo water gauge station, 77% of selected flood events were over the satisfaction ranges (NSE>0.5) of Nash-Sutcliffe Efficiency for model validation. Extended flood discharge data at Yangpyung has 0.84 NSE obtained from spatial data extension based on YeoJoo water gauge station. Generated natural flow at YeoJoo was influenced strongly by Chungju Dam which has larger effects on streamflow at YeoJoo than Hoangsung Dam. Observed peak discharges after the 1986 of Chungju Dam installation were smaller than those of the obtained natural flow. Through these results, spatial extension of flood discharge data with installed dams works efficiently for ungauged watersheds and natural flow can be generated using extended flood discharge data.

Keywords : spatial extension of flood data, natural flow, dam effects, NSE

요 지

본 연구에서는 미계측 유역의 홍수 유출자료를 생성하는 공간확장법에 대한 주변여건 변화의 영향을 검토하였다. 특히, 댐이 있는 곳에서의 홍수 유출자료의 공간확장 가능성을 보이고 공간확장 된 자료를 활용한 자연유량의 생성에 대한 연구를 실시하였다. 이는 댐의 설치로 유역동질성이 손실된 미계측 유역의 유출자료생성을 위한 시도이다. 댐의 영향을 받는 유역의 홍수 유출자료 공간확장을 위해서 남한강에 위치한 여주 수위관측소를 중심으로 양평 수위관측소까지를 연구의 공간적 범위로 삼았다. 홍수 유출자료의 공간확장성을 분석하기 위해 1986년부터 2010년까지의 여주수위관측소의 홍수유량을 중심으로 41개의 홍수사상을 선정하였으며, 이를 통해 홍수 유출자료 공간확장성과 댐 영향을 제거한 자연유량을 산정 하였다. 홍수 유출자료의 공간확장 작업에서 여주의 관측유출량을 중심으로 공간확장 했을 때 77%이상의 사상이 Nash-Sutcliffe efficiency의 만족도 범위 내(NSE>0.5)로 분포 하였으며, 확장된 양평 수위관측소의 첨두홍수량(peak discharge)에 대해 0.84 NSE를 얻을 수 있었다. 홍수 유출자료의 자연유량은 여주수위관측소를 중심으로 구하였으며 충주댐의 영향이 횡성댐의 영향보다 커 충주댐의 유입량을 중심으로 자연유량을 확보하였다. 충주댐이 존재하는 1986년 이후의 자연유량은 관측 유량보다 첨두홍수량이 크게 나타나고 있다. 본 연구의 결과로 댐과 같은 구조물의 설치가 있는 곳에서도 홍수 유출자료의 공간확장이 가능하며 홍수 유출자료 공간확장된 자료를 활용하여 자연유량을 구할 수 있음을 보였다.

핵심용어 : 홍수 유출자료 공간확장, 자연유량, 댐 영향, NSE

* 한국건설기술연구원, 수자원연구실, 선임연구위원 (e-mail: nwkim@kict.re.kr)
Senior Research Fellow, Hydrology Research Div., Korea Institute of Construction Technology, Goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea
** 교신저자, 원광대학교, 토목환경공학과, 조교수 (e-mail: yong_jung@wku.ac.kr)
Corresponding Author, Assistant Professor, Civil and Environmental Engineering., Wonkwang University, Iksan-si, Jeonbuk 570-749, Korea
*** 한국건설기술연구원, 수자원연구실, 수석연구원 (e-mail: jeus22@kict.re.kr)
Senior Researcher, Hydrology Research Div., Korea Institute of Construction Technology, Goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea

1. 서 론

우리나라 하천은 여름 장마기간을 포함한 4개월(6~9월)에 집중된 호우와 하천의 급한 하상경사로 인해 홍수조절 어려움에 놓여있다(Kim et al., 2007). 홍수조절을 위한 시설물 설치 및 관리 분석을 위해 여러 가지 수문 관측자료가 요구되며 그중 하천유출에 관련된 자료는 필수적이다(Kim et al., 2013). 우리나라의 경우는 상당한 양의 관측 유출자료를 보유하고 있음에도 불구하고 댐과 같은 인위적인 하천 시설물에 의해 자료가 왜곡되거나, 관측오류나 관측시설의 이설등과 같은 원인으로 자료의 신뢰성을 잃는 경우가 많다(Kim and Won, 2004). 최근에 측정된 자료들은 과거자료에 비해 신뢰성을 많이 높였으나 대부분은 단기간의 자료를 보유하고 있으며(Lee et al., 2013), 특히, 하천의 홍수조절을 위한 설계나 관리를 위해 계측자료를 필요로 하는 중소규모 유역의 하천은 측정된 유출자료가 존재하지 않는 경우(미계측 유역)가 많다(Choi et al., 2010).

미계측 유역의 유출자료를 확보하기 위한 방법으로 유역의 수문학적 동질성과 유역흐름 조건이 비슷한 곳에 적용하는 지역화 방법이 빈번하게 이용 된다(Benson 1962; Seibert 1999; Merz and Bloschl, 2004; Parajka et al., 2005). 지역화 방법은 관측된 풍부한 유출자료를 중심으로 분석하여 미계측 유역에 적용하기 위한 방법으로, 주변 지역의 수문학적 특성과 연관하여 지역화한 평균적인 매개변수를 미계측 유역에 적용한다. 따라서 관측 유출자료가 많지 않은 경우 미계측 유역에 대한 자료를 확보해야 지역화 방법을 활용할 수 있다. 미계측 유역의 홍수 유출자료를 확보하기 위해 Kim et al. (2013)은 관측된 홍수 유출자료를 중심으로 주변 미계측 유역의 홍수 유출자료를 확보하는 홍수 유출자료 공간확장의 개념을 소개하였다. 이 방법은 지역화 방법이 미계측 유역의 유출자료를 예측하는 것과는 다르게 일괄형(집중형) 강우-유출모형을 활용하여 관심유역 내 중소규모 미계측유역의 과거 홍수 유출자료를 생산하는 것이다. 이들의 연구에서는 홍수 유출자료의 공간확장의 개념을 통해 얻어낸 미계측 유역(교차확인 지점)의 홍수 유출자료는 홍수 사상마다 달라지는 초기 조건을 고려하여 더 정확하게 얻을 수 있었으며 적용된 유역은 충주댐 상류유역이다. 충주댐 상류유역은 하천의 흐름이 댐이나 홍수조절 시설물과 같은 인위적인 변화가 존재하지 않아 자연유량에서의 홍수 유출자료의 공간확장성을 나타낸 것이다. 하지만, 우리나라는 댐과 같은 대규모 구조물에 의해서 상당한 양의 자료가 조절되어 있어, 다양한 개발에 의해 변화하는 공간의 미계측 유역 홍수 유출자료 확보 가능성에 대한 의문이 남아있다. 따라서 본 연구에서는 자연유량 하에서의 홍수 유출자료의 공간확장을 벗어나 하천의 흐름이 댐에 의해 통제되는 흐름과 통제되지 않는 자연흐름이 동시에 존재하는 환경에서의 홍수 유출자료의 공간확장을 시도하였다. 또한, 댐과 같은 큰 구조물에 의한 홍수조절영향을 파악하기 위해서는 조절되지 않은 홍수량을 얻는 것이 중요하여 홍수조절에 의해 변화한 홍수 유출량을 공간확장된 홍수 유출량을 활용하여 자연유량을 확보하였다. 따라서 본 연구에서는 먼저, 댐 유무에 따른 홍수 유출자료의 공간확장 개념과 절차를 설명하고, 저류함수법과 홍수 유출자료 공간확장의 연관 관계를 바탕으로 공간확장을 위한 최적화된 초기 조건의 경향에 대해 논의 할 것이다. 또한, 댐이 존재하는 관심유역의 한 지점을 기준으로 홍수 유출자료의 공간확장이 이루어지는 특성을 분석하고 마지막으로, 수자원 관리측면에서 기준이 되는 자연유량을 홍수 유출자료의 공간확장을 통해 얻은 자료의 적용 가능성에 대해 논의하고자 한다.

2. 댐 유무에 따른 공간확장

2.1 댐 유무에 따른 공간확장 개념

홍수 유출자료의 공간확장은 중소규모 미계측 유역의 홍수 유출자료를 동일 유역 내, 동일 기간의 관측 홍수 유출자료를 활용하여 얻어내는 것으로 Kim et al. (2013)에 의해 도입되었다. 공간확장을 위한 시스템은 일괄형(집중형) 강우-유출 모형을 근간으로 매개변수들을 지형학적 변수들과 연관관계를 통해 일반화(안정화)하여 고정하고, 홍수 사상마다 달라지는 초기조건(e.g. 유역표면의 포화도)을 최적화하여 홍수 유출자료를 공간확장 하였다. 초기조건의 최적화는 충주댐 관측 유입량과 계산유입량의 비교를 통해 진행되었으며 초기조건의 최적화 동안에 유역 내 중소규모 유역들의 홍수 유출자료를 확보하였다. 이와 같은 시스템은 Eq. (1)과 같이 초기조건의 변화로 인해 발생하는 한 지점의 오차가 다른 지점에도 동일하게 전파되어 일관된 오차를 유역전체에 나타내기 위함이고 홍수 유출자료의 공간확장에서 가장 중요한 개념이라 할 수 있다.

$$\varepsilon_i = \left(\frac{O_i - C_i}{O_i} \right)^2, where\ i = 1,...,n \tag{1}$$

$$\varepsilon_1 \cong \varepsilon_2 \cong \cdots \cong \varepsilon_n$$

여기서, ε_i: 측정값 O와 모의값 C의 차이의 상대 에러

n: 소유역의 총수

Kim et al. (2014)은 2013년의 연구와 차별되게 지역적인 매개변수를 스스로 고정하지 않고 한강홍수통제소나 수자원공사에서 댐 운영 및 홍수통제를 위한 목적으로 적용하는 도네가와(利根川) 경험식을 적용하였다. 홍수 유출자료의 공간확장된 결과값을 기준으로 지역화 한 매개변수의 적용과 도네가와(利根川) 경험식의 적용 사이에는 큰 변화를 보이지 않았기 때문에 지형학적 특성을 반영하는 매개변수보다 홍수 발생초기의 조건이 홍수 유출자료의 공간확장에 더 큰 영향을 미쳤다고 볼 수 있다. 홍수유출의 공간확장에 대한 연구들은 유역 내 자연흐름에 대한 홍수 유출자료 공간확장을 의미하며 Fig. 1에서 댐의 영향을 받지 않는 댐 상류지역(유역 A)에 해당하는 홍수유입량을 공간적으로 확장한 것이다. Fig. 1의 유역 B와 같이 인위적인 홍수조절유량이 존재하는 경우는 앞서 설명한 자연유역에서의 공간확장과 다른 형태의 유량거동을 나타낸다. 따라서 이 지역에서의 홍수 유출자료의 공간확장에 대한 절차와 공간확장된 자료를 이용해 자연유량을 구하는 절차는 아래와 같다. 절차의 기본은 댐에 의해 조절된 유량(관측유량)을 모의할 수 있는지를 판단한 후, 댐에서 유입되는 유량을 고려하여 자연유량을 다시 산정하는 개념이다. 자세한 절차는 아래와 같다.

Step 1) 홍수 유출자료 공간확장을 위한 사전작업:

강우-유출모형의 매개변수와 초기조건의 홍수 유출에 대한 민감도 분석을 통해 최적화를 위한 시스템 조건 완성(홍수 유출자료 공간확장을 위한 최적화 매개변수나 초기조건을 선정하여 최적화 간소화)

Step 2) 댐 영향을 고려한 댐 하류지역(유역 B)의 홍수유출자료 공간확장:

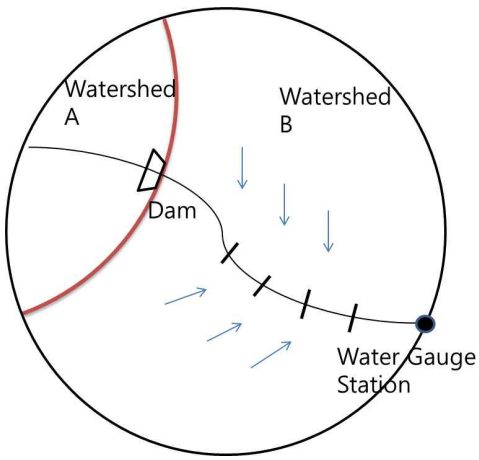


Fig. 1. Spatial Extension of Flood Discharge Data in Downstream of a Dam

선정된 시스템 조건하에서 관측된 댐 유출량의 하도추적 유량과 댐 하류지역의 자연유량을 선정된 매개변수나 초기조건을 조절하여 유량관측지점(Fig. 1의 water gauge station)의 유량을 관측 홍수 유출량에 맞춘다. 이를 통해 댐 하류지역의 중소규모 미계측 유역의 유출량을 확보 한다.

Step 3) 구조물에 의한 홍수조절영향을 파악하기 위해 댐 영향이 없는 자연유량 확보:

유량관측지점의 자연유량은 step 2)에서 매 사상마다 최적화된 시스템 값을 이용하여 댐 유출 대신에 댐 유입량을 도입하고 다시 모의하여 댐의 영향이 없는 자연유량을 산정한다. 단, 유역 A에 관측 유입량이 없는 경우, 유역 A 내의 다른 관측소의 유량을 중심으로 공간확장해서 얻어낸 유역 A의 계산 유입량을 관측 유입량으로 활용하여 자연유량을 구한다.

2.2 저류함수법

홍수 유출자료의 공간확장에 쓰이는 강우-유출모형은 비선형성을 고려한 저류함수법을 활용하였다. 저류함수법은 과거 약 20년 동안 한강 홍수통제소에서 호우예경보를 위해 사용되었으며 수자원공사의 다목적 댐 운용에 활용되고 있다(Ministiry of Land, Infrastructure and Transportation: MLIT 2004). 저류함수법은 유역저류함수와 하도추적 부분으로 이루어져 있는데 유역과 하도구간의 저류량(S)와 유출량(Q)의 관계는 Eq. (2)와 같다.

$$S = KQ^P \tag{2}$$

여기서, K와 P는 저류함수의 매개변수로 유역의 특성과 관련되어 있다 (Sugiyama et al., 1997). 유역에 대해 단위시간당 변화하는 저류량을 유효(초과) 강우량과 유출량을 이용하여 연속방적식으로 풀면 Eq. (3)과 같다.

$$\frac{1}{3.6} \times A \times r_e(t - T_l) - Q(t) = \frac{dS}{dt} \tag{3}$$

초과우량(r_e: mm/hr)은 포화우량(R_{sa}: mm/hr)과 강우에 의한 단위 유입량($r(t)$: mm/hr)에 대한 조건에 따라 그 값이 달라지는 데 이를 표현하면 아래와 같다.

$$r_e(t - T_l) = \begin{cases} f_1 \times r(t - T_l), & \text{if} \sum r(t - T_l) \le R_{sa} \\ r(t - T_l), & \text{if} \sum r(t - T_l) \ge R_{sa} \end{cases} \tag{4}$$

여기서, f_1은 일차유출율, T_l은 지체시간(hr), A는 유역면적(km^2)을 나타낸다. 단위유역에 발생하는 초과우량(유

입)과 유역에서 배출되는 유출과의 관계를 통해 단위시간당 변화하는 저류량을 나타낸다. 이때 발생하는 유출량을 Eq. (5)와 같은 유출량의 하도에 대한 연속방정식에 유역 및 저류함수의 하도유입량(I_j)에 적용하고 하도 형상에 따른 저류과정을 통과하여 하도구간의 출구로 배출되는 유출을 최종유출로 한다.

$$\sum_{j=1}^{n} f_j I_j - Q_l(t) = \frac{dS_j}{dt} \quad (5)$$

여기서, $Q_l(t) = Q_l(t+T_l)$: 유역 지체시간(T_l)을 고려한 하류단의 직접유출량(m3/sec, cubic meter per second: cms), f_j: 평균유입계수, S_j: 하도구간 저류량(m^3)이다. 유역의 저류상수(K, P)와 지체시간(T_l), 하도의 저류상수(K', P')와 지체시간(T_l')은 유역의 지형학적 특성에 밀접하게 관련이 있다.

유역 B에서 나오는 자연유출량을 Eq. (3)과 같은 유역에 대한 연속방정식을 통해 구하고 하도추적된 유량과 종합하여 최종 수위관측소의 유출량을 산출하고 관측된 유량값과 차이를 최소화 하는 동안 홍수유출량의 중소규모 유역에 대한 공간확장성을 파악한다. 금번 홍수 유출자료의 공간확장과 자연유량을 구하기 위해 적용된 저류함수 모형은 한국 수자원공사에서 개발한 COSFIM모델(MLIT 2004)을 활용하였다.

3. 홍수 유출자료 공간확장에 대한 댐영향 배경

3.1 대상지역 및 댐운영 유무에 따른 모의

본 연구는 충주댐과 횡성댐의 직접적인 영향을 받는 남한강 상류의 여주수위관측소를 중심으로 홍수 유출자료의 공간확장성을 분석하고 수자원 관리측면에서 기준이 되는 자연유량을 생산하였다. 연구 대상지역으로 선정된 남한강 상류지역은 북한강 상류가 가지는 다양한 주변환경의 영향(e.g. 화천댐 상류에 위치한 북한의 임남댐의 영향과 하도구간에 존재하는 춘천댐, 의암댐, 청평댐과 같은 발전전용 댐의 영향)을 배재할 수 있기 때문이다. 본 연구에서는 여주수위관측소를 중심으로 여주 하류에 존재하는 양평수위관측소까지를 홍수 유출자료 공간확장의 범위로 선정하였으며 댐 유역을 제외시키고 17개의 중소유역으로 구분하였다. Fig. 2는 남한강에 위치한 댐과 유역을 나타내고 있다. 여주 수위관측소의 홍수 유출량을 중심으로 홍수 유출자료의 공간확장을 실시할 경우 상류에 있는 충주댐과 횡성댐의 영향을 고려해야 한다. 선정된 홍수 사상이 댐이 설치된 이후이면 충주댐과 횡성댐의 관측 유출값을 직접 유출모의 모형에 넣어서 하도추적을 하고 댐 하류지점의 유역에 대한 자연유량과의 접목을 통해 댐 홍수조절 시에 얻어지는 모의유출량의 값과 관측유량의 값을 비교할 수 있다. 홍수 유출자료 공간확장을 모의할 때 모의의 타당성을 보이기 위해 양평 수위관측소의 홍수 유출량을 비교대상으로 선정하였다. 여주 수위관측소에서의 관측 유출자료는 1997년까지 국가수자원관리종합정보 시스템(WAMIS, www.wamis.go.kr)의 시유량자료를 사용하였으며 1997년 이전의 시유량자료는 관측된 수위관측자료와 같은 년도에 해당하는 수위유량관계곡선식을 활용하여 관측유량을 확보하였다. 또한 강우관측 자료는 국가수자원관리종합 정보 시스템의 자료를 기반으로 티센가중치를 적용하여 강우-유출에 적용하였다.

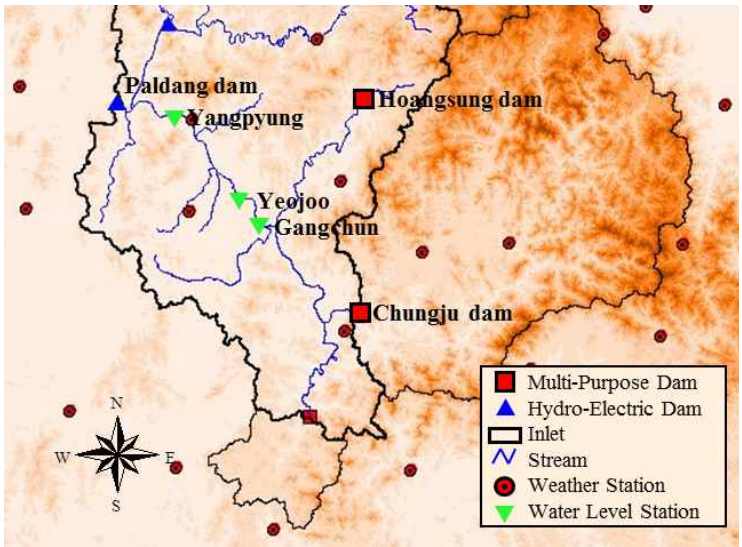


Fig. 2. Nam-Han River Watershed (Kim and Lee, 2009)

3.2 선정 홍수사상

여주 수위관측소는 관측 개시일이 1913년이며 관측 유출자료는 1917년부터 보유하고 있다. 하지만, 댐의 영향을 받는 홍수 유출자료의 확장성을 파악하기 위해 선정된 남한강 상류에 설치된 충주댐의 경우 1985년 10월에 완공되었다. 충주댐의 유출량 관측 자료가 있는 1986년부터 2010년까지의 유출자료에서 선정된 홍수사상을 기준으로 홍수 유출자료 공간확장의 가능성을 조사하였다. 선정된 홍수 사상은 각 해 마다 2개에서 3개의 홍수사상을 선정하는 것을 기준으로 총 41개를 선정하였다. 이에 더하여 댐 시설이 없을 때의 유량을 생산하기 위해 댐의 영향이 없으며 댐의 관측 유입량자료도 없는 경우의 자연유량의 값을 구하기 위해 1975년부터 1985년까지의 13개의 사상을 41개의 홍수 사상에 더하여 선정하였다. 아래의 Table 1은 선정된 홍수사상을 나타낸다.

4. 홍수 유출자료 확장과 홍수유출에 대한 댐영향 분석

4.1 최적화 초기 조건 선정

댐의 영향을 고려하여 홍수 유출자료의 공간확장을 실시할 경우 2.1에서 언급 하였듯이 댐에서 발생하는 유출량과 댐 유출이 통과하는 유역의 자연유량을 고려하여 저류함수 모델의 매개변수와의 관계를 설명할 필요가 있다. 본 연구에서는 유역저류함수의 매개변수(K, P, T_l)는 도네가와(利根川) 경험식으로 고정하고 사상마다 달라지는 초기 조건(f_i, R_{sa})을 최적화 하였다. 댐에서 발생하는 유량의 하도추적을 위한 매개변수(K', P', T_l')도 하도의 지형학적 특성에 관련되어 있다. 도네가와(利根川) 경험식에 따르면 K'는 manning의 조도계수, 하도연장, 그리고 하도의 평균폭으로 그 값을 나타낼 수 있으며 T_l'은 하도의 연장과 연관되어 있다. P'는 하천의 형상과 홍수 사상과는 관계없이 0.6으로 고정하였다. Eqs. (6)~(13)은 본 연구에

Table 1. Selected Flood Events from 1986 to 2010 (N: Before Dams Installed, D: After Dams Installed)

Events		Duration		Events		Duration	
N1	75_1	1975 0715 1000	1975 0719 1200	D15	97_1	1997 0701 0000	1997 0704 1600
N2	76_A	1976 0812 0000	1976 0822 2300	D16	97_2	1997 0715 0400	1997 0718 1600
N3	77_1	1977 0709 0100	1977 0711 1200	D17	97_3	1997 0803 0600	1997 0807 1500
N4	78_2	1978 0711 0800	1978 0714 1000	D18	98_1	1998 0808 0000	1998 0818 2300
N5	79_A	1979 0624 0000	1979 0629 2300	D19	99_1	1999 0731 0300	1999 0806 2200
N6	80_A	1980 0403 0100	1980 0409 2300	D20	99_2	1999 0919 0900	1999 0929 2300
N7	80_1	1980 0713 2200	1980 0717 0400	D21	00_A	2000 0912 0000	2000 0922 2300
N8	80_2	1980 0825 1000	1980 0831 0700	D22	00_1	2000 0722 0600	2000 0726 0500
N9	81_A	1981 0711 0000	1981 0717 2300	D23	01_1	2001 0628 0000	2001 0707 1300
N10	82_1	1982 0813 2300	1982 0823 2200	D24	01_2	2001 0713 1900	2001 0716 1800
N11	83_1	1983 0719 1400	1983 0728 0700	D25	01_3	2001 0727 0300	2001 0803 1600
N12	84_A	1984 0901 0000	1984 0914 0300	D26	02_A	2002 0830 0000	2002 0907 2300
N13	85_1	1985 1012 0600	1985 1014 0200	D27	02_1	2002 0805 0000	2002 0812 2300
D1	86_1	1986 0718 1600	1986 0721 1100	D28	03_A	2003 0908 0000	2003 0917 2300
D2	87_1	1987 0719 0000	1987 0729 2300	D29	04_1	2004 0617 0500	2004 0628 2300
D3	87_2	1987 0828 0400	1987 0907 2300	D30	04_2	2004 0701 2200	2004 0712 0800
D4	88_1	1988 0718 0000	1988 0728 2300	D31	04_3	2004 0711 2000	2004 0719 0100
D5	89-A	1989 0723 0000	1989 0802 2300	D32	05_1	2005 0727 1900	2005 0731 1900
D6	90_1	1990 0618 1200	1990 0628 0000	D33	06_1	2006 0714 0000	2006 0724 2300
D7	90_2	1990 0908 0000	1990 0918 2300	D34	06_2	2006 0726 0600	2006 0803 2300
D8	91_1	1991 0719 1800	1991 0727 1600	D35	07_1	2007 0803 1300	2007 0814 0100
D9	92_A	1992 0824 0000	1992 0902 2300	D36	07_2	2007 0914 1000	2007 0923 1500
D10	93_A	1993 0809 0000	1993 0814 2300	D37	08_1	2008 0723 1800	2008 0728 0800
D11	93_1	1993 0712 0100	1993 0715 1500	D38	09_1	2009 0709 0000	2009 0716 1700
D12	94_A	1994 0628 0000	1994 0708 2300	D39	09_2	2009 0811 1000	2009 0817 0900
D13	95_A	1995 0819 0000	1995 0829 2300	D40	10_1	2010 0812 1700	2010 0821 0600
D14	96_A	1996 0724 0000	1996 0730 2300	D41	10_2	2010 0909 0700	2010 0916 0700

서 사용한 도네가와(利根川) 경험식을 나타낸다.

$$K = 118.84 \times i^{0.3} \quad (6)$$

$$P = 0.175 \times i^{-0.235} \quad (7)$$

$$T_l = 0.056 \times L - 0.031 \quad (8)$$

$$K' = 1.67 \times K_s \quad (9)$$

$$K_s = 0.185 \times L' \times W_d^{0.4} \times i'^{-0.3} \times n^{0.6} \quad (10)$$

$$n = 0.1 - 0.02 \times \log(1/i') \quad (11)$$

$$P' = 0.6 \quad (12)$$

$$T_l' = 0.00165 \times L' - 0.031 \quad (13)$$

여기서, L: 주하천 연장(km), i: 주하천 평균경사, L': 하도 연장(km), W_d: 하도의 평균폭(m), i': 하도 평균경사, n: Manning의 조도계수

댐 유출에 의한 하도추적이 미치는 영향에 대한 분석으로 04_1 사상을 이용해 K'과 T_l'의 변화에 따른 여주에서의 수문곡선의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 하도추적에 사용된 매개변수는 도네가와 경험식을 사용하였으며 각 유역마다 산정된 값들을 기준으로 10%씩 변화를 주어 80%에서 120%까지 값의 변화로 여주의 수문곡선에 대한 영향을 분석하였다. Eq. (14)에서 나타낸 NSE (Nash-Sutcliffe efficiency)를 기준으로 Fig. 3의 관측값과 모의값의 비교에 대한 경향선의 변화는 K'과 T_l'의 영향에 의한 NSE의 변화를 나타낸다. NSE의 범위가 $-\infty$에서 1까지인데 NSE값이 1인 경우는 모의한 값과 관측값이 동일함을 의미한다.

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{n} \left(Y_i^{obs} - Y_i^{sim} \right)^2}{\sum_{i=1}^{n} \left(Y_i^{obs} - Y^{obs\ mean} \right)^2} \right] \quad (14)$$

여기서, Y_i^{obs} : i 번째의 관측값, Y_i^{sim}: i 번째의 모의값, $Y^{obs\ mean}$: 관측값의 평균값

매개변수 K'는 모의값의 경향성 변화에는 영향이 작다. 첨두홍수량(peak discharge, Qp)은 K'의 변화에 의해 관측 첨두홍수량에 대해 6%의 차이를 보이고 있으며 NSE는 0.92-0.94의 범위를 보인다. T_l'의 변화에 대한 수문곡선의 변화는 NSE를 기준으로 0.986-0.982의 범위이며 모의 첨두홍수량은 관측 첨두홍수량과 2.7%의 차이를 보이고 있다. T_l'에 의한 첨두홍수량이 일어나는 시간의 변화는 최대 1시간이었다. 따라서 K'에 의한 경향성과 첨두홍수량의 변화가 T_l'에 의한 변화에 비해 크게 나타나지만, K'과 T_l'에 영향을 미치는 하천 지형학적인 변화는 크게 일어나지 않으므로 이 하도구간 매개변수도 도네가와 경험식을 사용하였다. 본 연구에서는 유역저류함수에서 홍수사상마다 달라지는 초기 조건(f_i, R_{sa}) 중 첨두홍수량에 더욱 민감한 R_{sa}를 중심으로 홍수 유출자료를 확장하였다. Fig. 4는 f_i과 R_{sa}에 영향을 받는 첨두홍수량의 변화를 나타내며 R_{sa}가 f_i에 비해 큰 영향을 주는 것을 보인다.

홍수 유출자료 공간확장에 있어서 저류함수법의 기저유량과 포화우량(R_{sa})에 대한 고려는 Kim et al. (2014)의 방법을 적용하였다. 이들의 연구에서 충주댐 유역의 세 곳(영월1, 영월2, 충주댐)의 수위관측소를 중심으로 홍수유량자료의 공간확장 시 포화우량의 분포를 분석하여 동일한 포화우량 적용시 NSE의 변화가 크지 않았으며, 홍수유출자료의 공간확장 시 포화우량(R_{sa}) 분포를 동일유역내

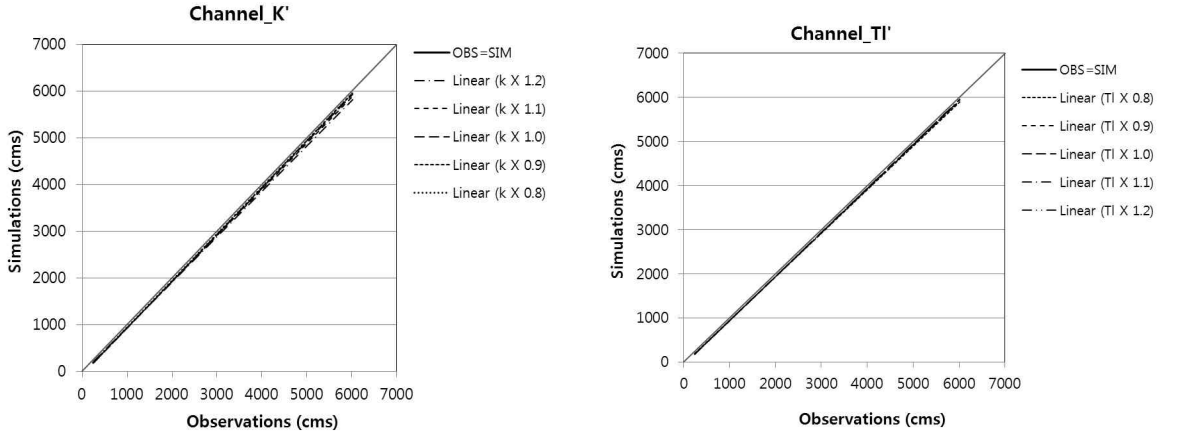


Fig. 3. Sensitivity Tests of Channel Parameters at YeoJoo Water Gauge Station

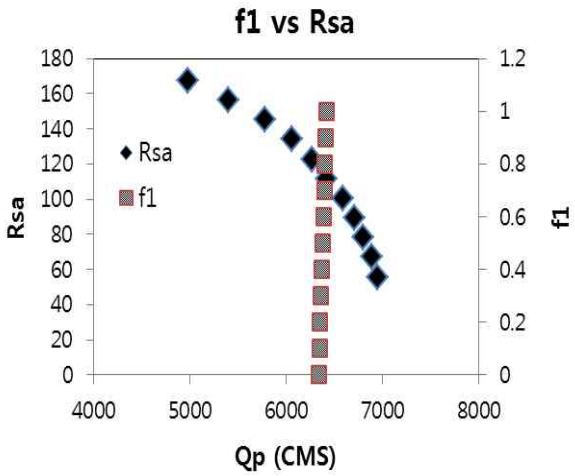


Fig. 4. Sensitivities of Model Initial Conditions for Peak Discharge at YeoJoo Water Gauge Station

의 소유역에 균등하게 분포시킬 수 있음을 보였다. 따라서 댐의 영향을 받는 홍수 유출량을 공간확장하였다. 기저유출의 분류는 홍수기간 동안 균등하게 적용하였다.

4.2 댐의 영향을 고려한 여주 중심의 홍수 유출자료 공간확장

선정된 홍수사상을 기준으로 관심 유역전체에 동일 포화우량을 적용하여 관측된 여주의 홍수 유출자료와 모의자료를 비교 분석하여 NSE를 계산하였다. 41개의 홍수사상 중에 여주의 관측 홍수 유출자료에서 이상이 있다고 판단된 자료를 제외하고 35개의 홍수사상을 모의 하였다. 관측 유출자료의 이상은 강우에 전혀 반응하지 않는 유출의 모형, 계측자료의 변화가 없는 관측값, 그리고 관측값의 급작스런 변화들이 자주 일어나는 사상들이다. 여주 수위관측소의 관측 유출량을 중심으로 홍수 유출량의 공간확장을 통해 선택된 35개의 홍수 사상에서 77% 이상이 NSE의 모의 만족범위 (Moriasi et al., 2007: NSE>0.5 만족)에 들었으며 전체 NSE의 평균값은 0.62이다. Fig. 5는 여주에서의 첨두홍수량(peak discharge)과 최대홍수량(discharge volume)을 비교 분석하였다. 첨두홍수량은 관측 홍수 유출량의 크기보다 모의 홍수 유출량의 크기가 미소하게 큰 경향이 있다. 98_1사상의 경우는 관측 최대 유입량이 7,890 cms이나 모의치는 5,751 cms로 작게 모의되었다. 이는 초기 유출량이 모의 치에 비해 크게 나타났기 때문이다. 최대홍수량(discharge volume)의 경우는 모의 값이 과다 산정된 것과 과소 산정된 것이 고루 분포하고 있는 것으로 보이나 몇몇 사상의 경우 첨두홍수량에 비해 홍수량의 모의 값이 과소하게 산정된 것을 보이고 있다. 88_1사상은 첨두홍수량 비교의 98_1사상처럼 기저유출을 따라가지 못하는 것을 보인다. 98_1 사상의 경우는 첨두홍수량을 따라가는 것에 어려움을 보이지만 88_1의 경우는 전체적인 홍수 유출의 크기가 과소하게 산정되었다. 95_A사상의 경우도 기저유출의 크기에 좌우되어 홍수유출이 발생 시작 100여 시간동안 관측유출을 따라가지 못하고 있어 홍수량의 차이를 보이고 있다. Fig. 6은 여주 수위관측소를 중심으로 홍수 유출자료를 확장할 때 얻은 유량도이다. 90_2사상은 첨두홍수량을 맞추는 것과 홍수 사상이 선정된 시작시점으로부터 80여 시간이후에 발생하는 초기 유출치 상승을 따라가지 못하는 모습을 보인다.

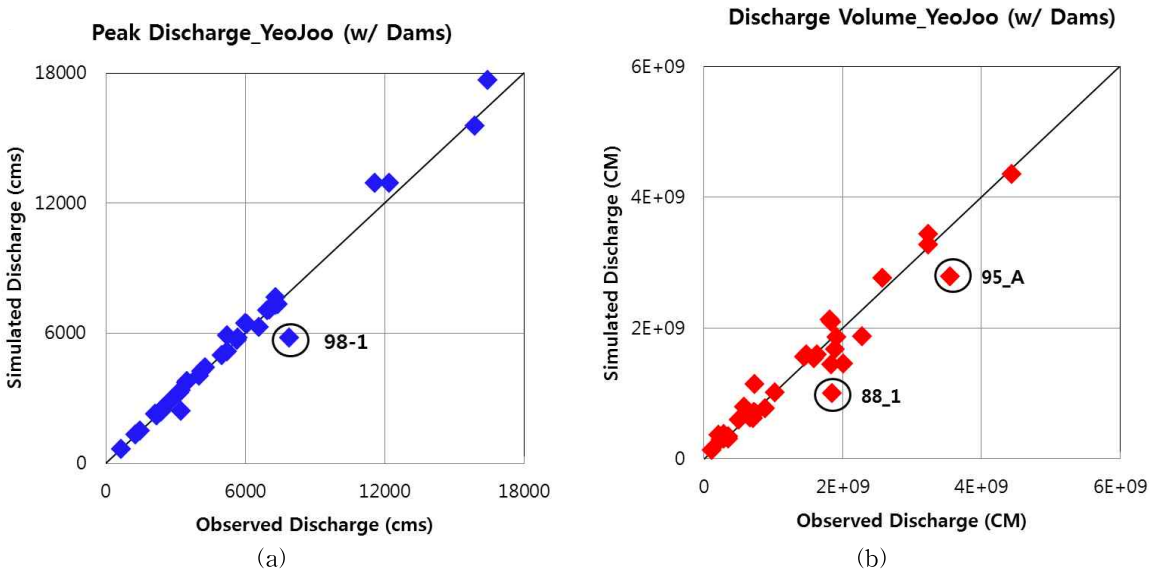


Fig. 5. Comparisons between Observed and Simulated Peak Discharges and Volumes

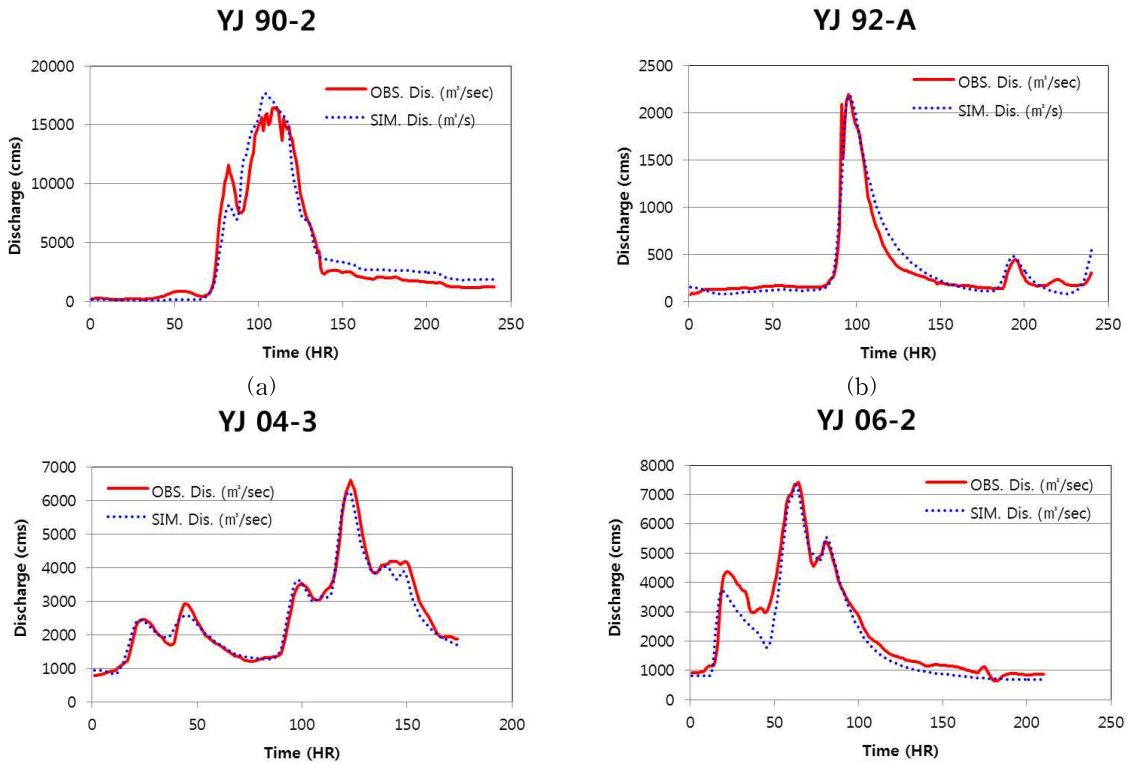
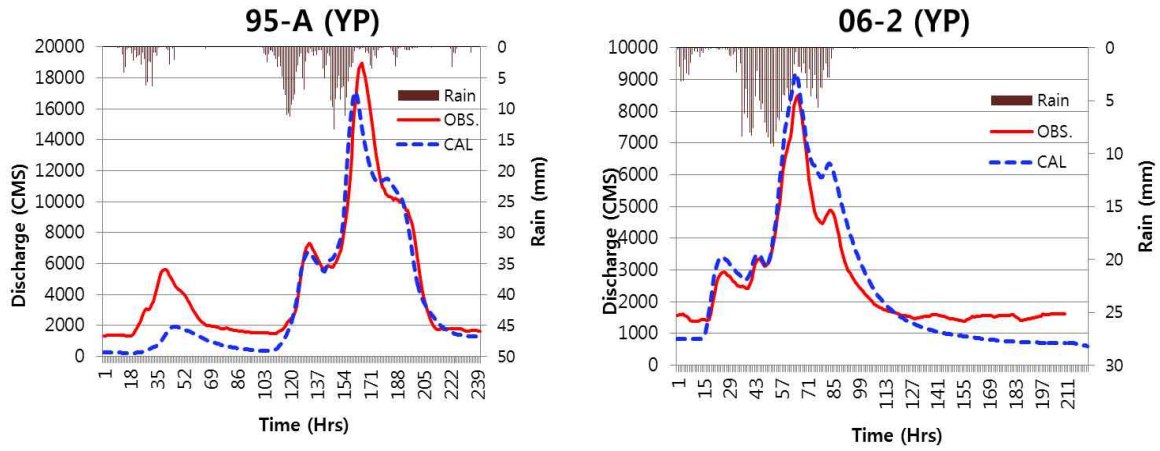


Fig. 6. Hydrographs at YeoJoo Water Gauge Station for Spatial Extension

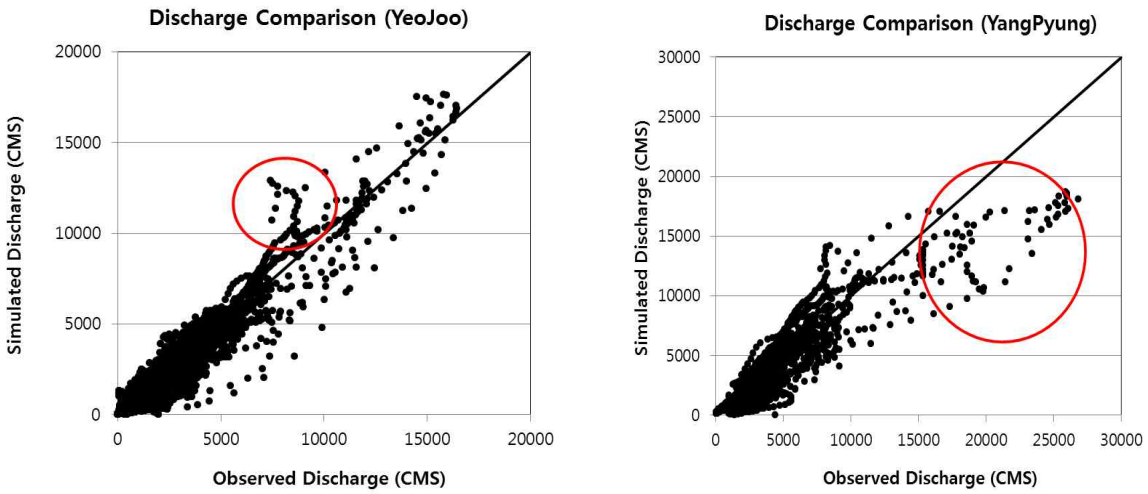
06_2의 사상에서도 초기 상승 유출치를 잘 따라가지 못하고 있으나 전체적으로 관측 유출치를 잘 모의하고 있다.

여주를 중심으로 홍수 유출자료를 공간확장 했을 경우에 여주의 하류에 위치한 양평 수위관측소에서 홍수 유출자료를 비교하였다. 양평 수위관측소의 관측유량의 이상치를 제외한 21개의 사상을 활용하여 첨두홍수량(peak discharge)에 대해 1986년부터 2010년까지의 관측값과 모의치를 계산하여 NSE로 비교하면 0.84의 값을 나타낸다. 그리고 각각의 홍수 사상에 대해 NSE는 52% 이상의 사상이 모델 모의의 만족범위를 넘는 것으로 나타났다. 결과적으로 여주 수위관측소의 값을 중심으로 홍수 유출자료를 공간확장 시에 양평 수위관측소에서도 첨두홍수량에 대해 새롭게 자료를 얻을 수 있음을 나타낸다. Fig. 7(a), 7(b)는 NSE값이 높은 것을 나타내고 있다. 95_A 사상(0.85)과 06_2사상(0.81)을 나타내고 있다. 95_A사상의 경우는 초기 홍수가 발생하고 106시간동안 모의 유출량이 관측 유출량에 미치지 못하는 유량을 생산하였다. 선택된 홍수 사상에는 크게 세 차례의 강우가 발생한다. 첫 번째 발생한 강우에 대해서 여주의 수위에 가장 큰 영향을 주는 충주댐의 관측유출량이 없지만, 충주댐 이외의 지역에는 강우가 계속적으로 발생해 관측유량과 충주댐 관측유출에 영향을 받는 모의유량에 영향을 줄 수 있다. 하지만, 그 이후 유출에 대한 모의는 관측된 유출의 유형과 첨두홍수량을 잘 모의 하고 있는 것으로 나타나고 있다. 06_2 사상의 경우 유량도에서 첨두홍수량을 계산하고 홍수 감수곡선부에서 관측값을 계산 값이 따라가지 못하는 것은 95_A사상과 비슷하게 양평과 여주에 가장 크게 영향을 미치는 충주댐의 유출이 홍수 초반 40시간에만 일어나고 그 이후에는 충주댐 유출이 존재하지 않기 때문이다. Fig. 8에서 여주수위관측소에서의 유량의 비교값과 홍수 유출자료가 공간확장된 양평의 자료를 전체 사상의 유출량 전체에 대해 비교하였다. 여주의 경우는 관측유출값과 모의유출값이 서로 잘 모의 되어 1:1선 안에 고르게 잘 분포하는 것을 보인다. 하지만, 모의유출이 관측유출보다 과다하게 많이 산정되는 모의는 02_1사상으로 두 개의 홍수최대치 값이 있지만 모의 값이 둘 중 첫 번째만을 잘 묘사하고 두 번째 홍수최대치를 잘 모의하지 못해서 생긴 값이다. 양평의 경우는 관측유출량이 큰(15,000 cms 이상) 한 개 사상(90_2)의 모의에서 홍수 유출자료 공간확장이 관측유량에 미치지 못 하여 전체적인 공간확장이 큰 홍수사상을 생산하지 못하는 것으로 보이나 이는 한 개의 사상에 대한 결과이며 한 개의 사상을 제외한 사상들의 분포가 고



(a) (b)

Fig. 7. Hydrographs at YangPyung Water Gauge Station after Spatial Extension of Flood Discharge Data and Chungju Inflows



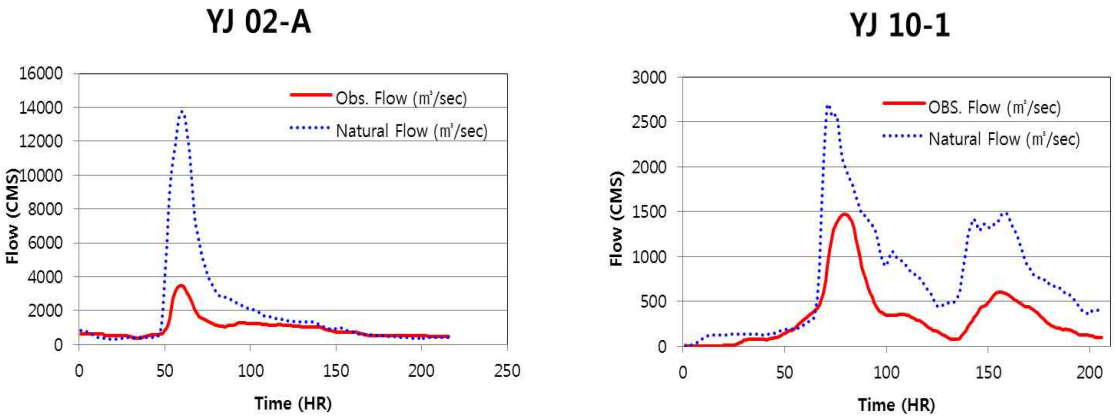
(a) (b)

Fig. 8. Comparisons of Spatially Extended Flood Discharge Data at YeoJoo and YangPyung Water Gauge Stations

루 분포하고 있는 것으로 확인된다.

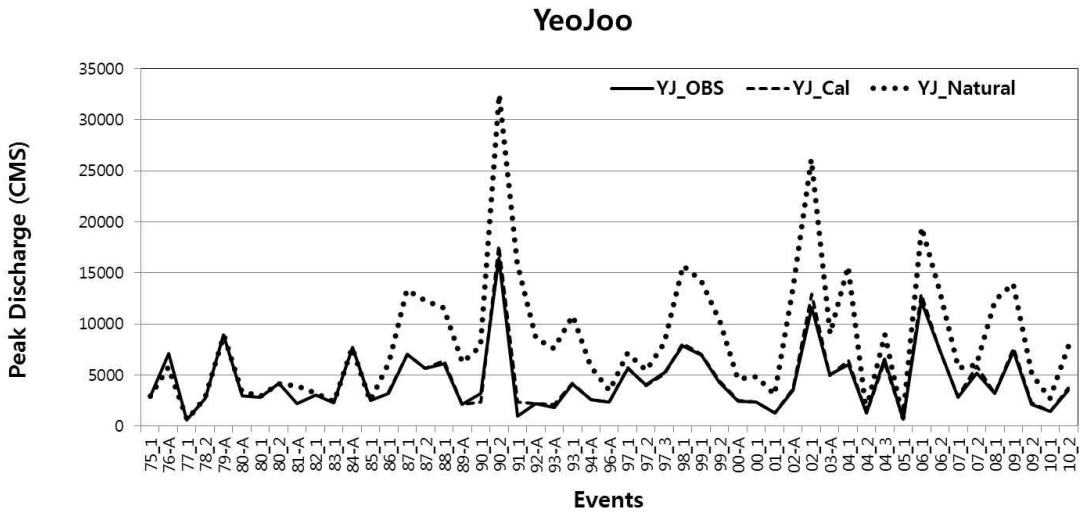
4.3 자연 유량 흐름

여주 수위관측소에서의 자연유량을 유량도에 도식하면 Fig. 9와 같이 관측 유량도를 상회하게 나타난다. 이러한 현상은 홍수 발생 시 댐의 역할을 제거하고 충주댐과 횡성댐의 관측된 유입량을 댐 유출값 대신에 사용하여 하도 추적하여 얻어낸 자연유량의 값이다. 여기에 더해서, Fig. 10은 여주 수위관측소에서의 관측 유량과 자연유량 그리고 모의 유량을 한 그래프 안에 도식한 것이다. 자연유량은 댐이 건설되기 이전의 유량을 구하고 수자원관리 측면에서 기준이 되는 정보로 활용하기 위해 얻는 것이다 (Kim and Kim, 2012). 1986년부터 2010년까지의 홍수사상에 대한 모의 유량의 경우는 여주에 직접적인 영향을 주는 충주댐과 횡성댐을 고려하여 그 값을 구했다. 횡성댐의 경우 2000년에 세워져 유입량의 값이 2000년 전에는 주어지지 않는다. 하지만, 04_1 사상을 기준으로 여주에서의 횡성댐의 홍수조절 능력은 0.3%이고 충주댐은 58%로 횡성댐의 영향이 크지 않기 때문에 2000년 이전의 관측 유입량 자료는 충주댐의 유입량만을 활용하여 자연유량

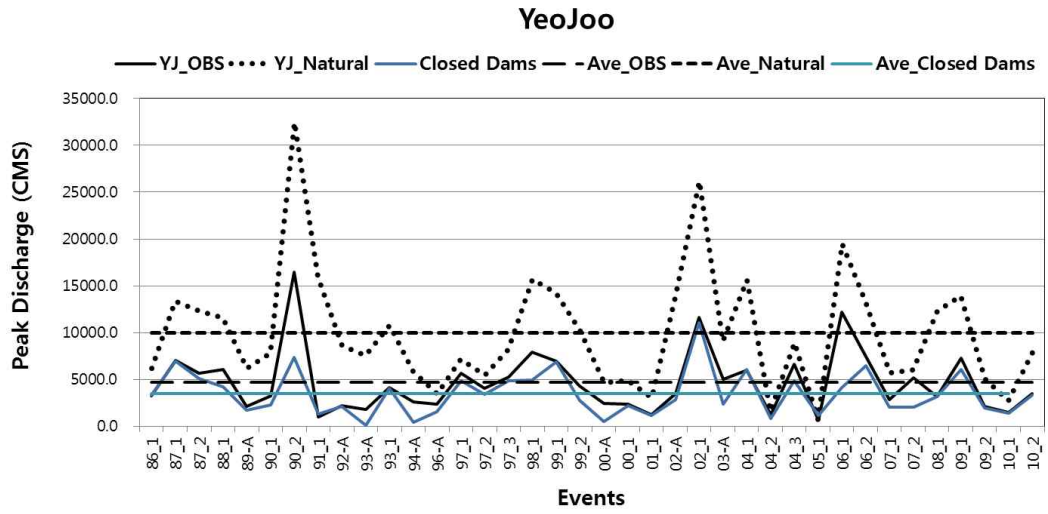


(a) (b)

Fig. 9. Natural Flows at YeoJoo Water Gauge Station



(a)



(b)

Fig. 10. Peak Discharges of Observed, Calculated, and Natural Flows at YeoJoo Water Gauge Station

을 구하였다. 더욱이 충주댐의 자료를 활용한 여주 수위관측소에서의 첨두홍수량의 모의값과 관측값의 Index of Agreement (IOA)의 값은 0.99로 첨두홍수량에 대한 모의값의 정확도가 높음을 나타낸다. 또한 1986년 이전의 충주댐 유입량 자료의 부재는 충주댐 상류의 영월 1 수위관측소를 중심으로 홍수 유출자료를 공간확장한 모의 유입량 자료를 활용하여 충주댐 하류의 자연유량을 구하는데 적용하였다. Fig. 10의 아래 그림처럼 1986년 이후의 최대 유출값만을 비교하면 작은 점선으로 나타나는 자연유량의 첨두홍수량은 여주에서 관측된 유출치의 유형을 잘 모사하고 그 자연유출 값의 크기가 관측 유출보다 큰 평균값을 나타내고 있다. 관측 첨두홍수량의 평균값은 4,680 cms이고 자연흐름은 9,940 cms로 두 배 가량 크게 나타난다. 댐을 닫고 방류 또한 차단하였을 경우 그 평균값이 3,480 cms로 관측 값보다도 더 낮아지는 것을 보인다.

5. 요약 및 결론

본 연구는 홍수 유출자료의 공간확장에 있어서 주위 환경의 변화, 특히 댐의 영향에 대해 분석 하였고, 댐에 의해 조절된 유량과 공간확장된 유량을 활용해 자연유량을 구할 수 있음을 제시 하였다. 댐 영향을 고려한 홍수 유출자료 공간확장은 기존의 미계측 유역의 유량자료를 생성하는 것에 있어 유역의 동질성이 저해된 곳에서 유량자료를 생성할 수 없었던 것을 넘어서 미계측 유역의 유량자료를 생성하는 시도이다. 댐의 영향을 받는 유역의 홍수 유출자료의 공간확장을 위해 남한강 상류에 있는 여주수위관측소의 관측 유량을 기준으로 홍수유출량의 공간 확장성을 보였다. 먼저는 여주를 중심으로 홍수유출량 자료를 공간확장할 때 기존에 활용하였던 방법으로 수문지형학적인 매개변수는 고정하였고 매 홍수사상마다 달라지고 전체유역에 동일하게 적용된 포화우량을 최적화하였다. 댐에 대한 고려는 댐의 유출량자료를 직접유출로 대입하였다. 41개의 홍수 사상 중 관측 유출자료 이상이 있는 자료를 제회하고 35개의 사상을 모의하였고 이들 중 77%이상의 사상이 NSE의 만족범위에 들었다. 또한 여주를 중심으로 홍수 유출자료를 공간확장 할 경우 양평 수위관측소에서 첨두홍수량(peak discharge)에 대한 NSE가 같은 기간에 0.84를 나타내었다. 본 연구를 통해 댐이 있어도 홍수 유출자료 공간확장이 가능함을 보였으며 여주에서의 자연유량을 댐의 유무를 구분하여 구할 수 있었다. 따라서 홍수 유출자료가 댐의 영향으로 인해 제어된 유출량을 가지고 있어도 댐의 영향을 받는 중소규모 유역의 미계측 유역의 과거 홍수 유출자료도 관측된 유출출자료를 기준으로 재생산해 낼 수 있음을 보였다. 1986년부터 2010년까지의 홍수 유출치에 대한 최대 IOA의 값이 충주댐을 고려할 때 0.99까지 나와 충주댐을 고려하여 여주의 자연유량을 구하였다. 구해진 자연유량은 1986년 이후에 관측된 유량의 경향성을 잘 모사하며 그 값은 관측 값보다 크게 나타난다. 댐이 없었던 1986년 이전의 관측 유량의 크기가 댐이 있을 때에 비해 크지 않아 수위관측을 이용해 얻은 유량이 작게 계산될 수 있을 것으로 보인다. 이를 기반으로 연결되는 연구에서는 홍수조절댐의 영향과 홍수 유출자료 공간확장과의 연관성을 살펴보았다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(11기술혁신C06)에 의해 수행되었습니다. 저류함수 모형을 제공하여 주신 수자원공사 물관리센터에 감사드립니다.

References

Benson, M.A. (1962). “Factors influencing the occurrence of floods in a humid region of diverse terrain.” *U.S. Geol. Surv., Water-Supply Pap.*, Vol. 1580-B, p. 64.

Choi, Y.S., Kim, K.T., and Shim, M.P. (2010). “Discharge estimation at ungauged catchment using distributed rainfall-runoff model.” *J. of Korea Water Reso. Asso.* Vol. 43, No. 4, pp. 353-365.

Kim, N.W., and Won, Y.S. (2004). “Estimates of regional flood frequency in Korea” *J. of Korea Water Reso. Asso.* Vol. 37, No. 12, pp. 1019-1032.

Kim, N.W., Lee, J.E., and Lee, B.J. (2007). “Characteristics of flow duration according to the operation of multi- purpose dams in the Han-River Basin.” *J. of Korea Society of Civil Eng.* Vol. 27, No. 1B, pp. 53-63.

Kim, N.W., Jung, Y., and Lee, J.E. (2013). “Spatial extension of runoff data in the applications of a lumped concept model.” *J. of Korea Water Reso. Asso.* Vol. 46, pp. 923-934.

Kim, N.W., Jung, Y., and Lee, J.E. (2014). “Simulation conditions based characteristics of spatial flood data extension.” *J. of Korea Water Reso. Asso.* Vol. 47,

No. 6, pp. 501-511.

Kim, C.G., and Kim, N.W. (2012). "Comparison of natural flow estimation for the Han river basin using TANK and SWAT models." *J. of Korea Water Reso. Asso.* Vol. 45, No. 3, pp. 301-316.

Lee, K.S., Oh, J.-H., Park, K., and Sung, J.-H. (2013). "Estimation of design considering nonstationarity for river restoration in the Mokgamcheon." *J. of the Korean Soceity of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 4, pp. 1361- 1375.

Merz, R., and Bloschl, G. (2004). "Regionalisation of catchment model parameters." *J. of Hydrology*, Vol. 287, pp. 95-100.

Ministiry of Land, Infrasturture and Transport (2004). Improvement of flood forecasting and warning systeme for Keum River: Yongdam Dam and Miho-chun, Research Report, Korea Institute of Construction Technology.

Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Hrmel, R.D., and Veith, T.L. (2007). "Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations." *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, Vol. 50, No. 3, pp. 885-900.

Parajka, J., Merz, R., and Bloschl, G. (2005). "A comparison of regionalization methods for catchment model parameters." *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Vol. 9, pp. 157-171.

Seibert, J. (1999). "Regionalisation of parameters for a conceptual rainfall-runoff model." *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 98-99, pp. 279-293.

Sugiyama, H., Kadoya, M., Nagai, A., and Lansey, K. (1997). "Evaluation of the storage function model parameter characteristics." *J. of Hydrology*, Vol. 191, pp. 332-348.

paper number : 14-119
Received : 2 December 2014
Revised : 14 January 2015 / 13 February 2015
Accepted : 13 February 2015