

## 홍수 유출자료의 공간확장과 홍수저감효과에 대한 댐 영향 분석 II

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

정 용\* / 김 남 원\*\* / 이 정 은\*\*\*

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

#### Abstract

This is a continuous study on the dam effects for the spatial extension of flood data. In this study, flood reduction rates of dams and their influences on downstream using the spatially extended flood data were implemented. Nam-Han River was selected for measuring the impacts of ChoongJu and HoangSung dams. In the evaluations of flood reduction rate at dams, the larger flood events have the lower flood reduction rates for both dams. At the YeoJoo water level station, the analyses of the relations between flood reduction rates and the sizes of watersheds dams located were performed. the sizes of watersheds having a functional dam have highly influenced on the reduction rates of flood. The average of flood reduction rates was smaller than the area rate. For instances, area rates of HoangSung (0.02) and ChoongJu dams (0.6) are larger than the average flood reduction rates for HoangSung (0.01) and ChoongJu dams (0.51), respectively. However, the water level station follows the dam flood reduction characteristics of dams themselves. The spatial effects of dam flood reductions are analyzed based on the three water level stations (GangChun, YeoJoo, YangPyung). The distance of flood reduction rates lower than 0.1 as average flood reduction rate was the area 7 times of watershed having a dam with 0.02 as a minimum reduction rate.

**Keywords** : spatial extension of flood discharge data, flood control effects, effects of dam size, effects of watershed size, spatial effective range

#### 요 지

본 연구는 홍수 유출자료의 공간확장에 대한 중간 시설물 (e.g. 댐)의 영향 연구의 연장으로, 공간확장된 시간당 홍수 유출자료를 활용하여 댐의 홍수조절 특성과 댐의 홍수저감률 변화를 공간적으로 분석하였다. 이를 위해 황성댐과 충주댐의 직접적인 영향을 받는 남한강 본류를 연구중심지역으로 선정하였다. 댐의 홍수저감률에 대한 댐 자체 분석에 의하면 홍수사상 크기가 커질수록 댐의 홍수저감률이 작아지는 것을 황성댐과 충주댐 모두 보였다. 두 댐의 영향을 받는 여주 수위관측소에서 유역면적의 비와 홍수저감률과의 관계는 댐이 포함하는 유역이 커질수록 홍수저감률이 커지는 특성이 있으며 선정된 수위관측소에서의 평균 홍수저감률은 유역면적비에 비해 작게 나타났다. 일례로, 침투홍수량(peak discharge)을 기준으로, 황성댐과 충주댐의 유역면적비가 0.02와 0.6인데 평균 홍수저감률이 0.01와 0.51로 나타났다. 댐에서 떨어진 거리의 수위관측소에서도 홍수의 크기에 따른 홍수저감률은 댐 자체의 홍수저감 특성과 동일하게 작용하였다. 댐의 홍수저감률에 대한 공간적 영향범위를 세 곳의 수위관측소(강천, 여주, 양평)를 기준으로 분석하였다. 이 과정을 통해 댐을 포함하는 유역면적의 7배에 해당하는 유역면적에서는 홍수저감률이 약 0.1이하로 떨어졌고, 최저 0.02까지 떨어지는 것을 관찰할 수 있었다.

**핵심용어** : 홍수 유출자료 공간확장, 홍수저감률, 댐 규모영향, 유역면적 영향, 공간적 영향범위

\* 원광대학교 토목환경공학과 조교수 (e-mail: yong\_jung@wku.ac.kr)

Assistant Professor, Civil and Environmental Engineering, Wonkwang University, Iksan-si, Jeonbuk 570-749, Korea.

\*\* 교신저자, 한국건설기술연구원 수자원연구실 선임연구위원 (e-mail: nwkim@kict.re.kr, Tel: 82-31-9100-256)

Corresponding Author, Senior Research Fellow, Hydrology Research Div., Korea Institute of Construction Technology, Goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea.

\*\*\* 한국건설기술연구원 수자원연구실 수석연구위원 (e-mail: jeus22@kict.re.kr)

Senior Researcher, Hydrology Research Div., Korea Institute of Construction Technology, Goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea.

## 1. 서론

하천흐름에 대한 수공구조물의 영향 특히, 댐과 같은 대규모 구조물의 설치로 인하여 발생하는 현상에 대한 연구는 침투홍수량( $Q_p$ )의 변화와 물의 흐름량의 변화에 초점 맞추어져 있다. 이에 관심을 갖는 이유는 침투홍수량 변화는 하천 자연흐름의 구조적 변화를 주게 되고, 하천 흐름 주변의 지형학적인 변화를 주며(Magilligan et al. 2003) 하천에 흐르는 물의 거동 변화는 자연생태계 영양소 변화 등을 초래하기 때문이다(Poff et al., 2006).

하천흐름에 대한 수공구조물의 영향에 대한 연구는 다양하게 이루어져 왔다. Fitzhugh and Vogel (2010)은 미국 지질조사국(USGS)이 보유한 미국 전역의 4,859개의 수위관측소에 대해 댐의 생성 전후 각각 10년 이상의 자료를 활용하여 댐의 수문학적 영향으로 인한 홍수흐름의 영향을 조사하였다. 이들은 연간 25% 이상의 홍수저감률을 지닌 댐을 선정하여 댐의 영향으로 인한 하류의 수문학적 변화와 생태 환경적 변화를 조사하였다. Magilligan and Nislow (2005)는 미국 지질조사국에서 제공하는 전국 댐자료 (National Inventory of Dams: NID)를 통해 미국 전역의 댐에 대한 자료를 조사하고 21개의 수위관측소를 통해 댐의 설치 전과 후의 수문학적인 변화에 대해 조사하였다. 이들은 일일 유출량의 변화로 영향을 받는 32개의 정해진 수리/수문학적 특성을 통계적으로 처리하는 수문변화 지표법(Indicators of hydrologic alteration: IHA)을 활용하여 댐 이후의 수문학적인 변화, 즉, 다양한 기간 동안의 최저와 최고 홍수량 흐름의 변화에 대해 연구하였다. Romano et al. (2009)은 미국 일리노이 지역의 Lower Kaskaskia강에 위치한 Carlyle댐이 홍수빈도와 홍수기간의 변화에 어떤 영향을 미쳤는지 연구하였는데 이들은 하천수위모형을 활용하여 하천수두와 지형의 높이와의 관계를 통해 홍수빈도를 확보하고 이를 통해 댐 전후의 변화를 파악하였다.

댐으로 인한 주변환경의 변화를 넘어 댐의 홍수조절의 직접적인 영향범위에 대해 몇몇 연구들이 실시되었다. Graf (2006)는 기존연구와 비슷하게 미국 내에 있는 큰 댐들(저장용량  $10^9 \text{ m}^3$  이상)로 인한 수문학적인 변화와 지형학적 변화 그리고 생태학적인 변화를 연구하였다. 더욱이, 댐 상하류의 관측된 흐름 분석을 통해 큰 댐은 연간 침투홍수량 감소가 67%를 나타내는 것을 보였으며 댐으로 인한 유역의 영향범위가 지형학적으로 댐이 없을 때의 영향 범위보다 72배나 작게 파악됨을 보였다. Gross와 Morgan (2007)은 미국 메릴랜드지역의 34개의 댐을 중심

으로 침투홍수량의 감소비를 구하고 댐 영향이 미치는 범위를 선정하였다. 댐의 영향범위를 예측하기 위해 댐 안전 환경처가 제공하는 수위-저류량-유량관계 곡선(stage-storage-discharge curve)을 기반으로 두 개의 선형모형을 구해 홍수저감 효과에 대한 직접적인 영향범위를 주변 상황에 의해 예측하였다. 국내에서 댐 영향에 대한 연구로 Park et al. (2005)은 영천댐 건설에 의한 유황분석을 시행하였으며, 유황변화에 의한 어류의 서식변화에 대해 연구하였다. 또한, Park et al. (2014)은 댐 건설기간동안의 수위변화가 한탄강 댐 하류의 습지 식생에 미치는 영향에 대해 연구하는 등 댐으로 인한 생태환경의 변화에 대해 연구를 실시하였다. 댐으로 인한 하상변화에 대한 연구로 Choo and Chae (2012)는 HEC-6모형과 SED-2D 모형을 활용해 댐 설치전후의 유사량의 변화로 인한 하상변화에 대해 분석하였다. 홍수 시 댐에 의해 직접적인 영향에 대해 홍수기의 댐 운용이 하류수위에 미치는 영향을 분석하여 댐 상류부 침수피해를 줄이고 하류부의 낮은 수위를 확보하기 위한 댐 운영방안을 Shim et al. (2004)의 연구가 있다. Kim and Kim (2013)은 충주댐의 홍수조절효과를 검토하여 방류에 따른 상·하류 수위관측소의 수위상승 영향을 정략적으로 분석하여 댐 운용의 적정성을 분석하였다. 하지만, 이들은 댐으로 인한 주변 환경의 변화와 댐 운용 최적화에 초점 맞춰져 있어, 홍수기간 중에 댐의 직접적인 홍수 조절능력과 영향 범위에 대한 연구가 다양하지 않음을 볼 수 있다.

본 연구는 Gross and Morgan (2007)의 댐 영향 범위의 연구를 발전시켜 댐이 홍수조절에 미치는 직접적인 영향 범위에 대해 조사하고자 한다. 특히, 본 연구에서는 댐이 가지는 풍부한 자료를 기반으로 연구를 실시한 해외의 연구와는 다르게 자료가 충분히 존재하지 않은 곳, 특히 다양한 개발로 인해 자료가 부재한 곳도 '홍수 유출자료의 공간확장과 홍수저감효과에 대한 댐 영향 분석 I (Kim et al., 2015)'에서 홍수 유출자료를 공간확장하여 생산된 과거 홍수 유출자료를 활용하여 댐의 홍수조절과 직접적인 영향 범위에 대해 평가할 수 있음을 보인다. 따라서 본 연구는 댐 영향 분석을 위한 홍수 유출자료를 공간확장에 따른 모의자료를 통해 얻고, 이를 이용하여 홍수 유출에 대한 댐의 영향에 대해 분석한다. 분석 내용으로는 댐 자체 내의 홍수조절 능력과 홍수크기와의 관계 및 특정 수위관측소에서의 댐의 영향, 댐의 홍수조절 능력과 댐이 속한 유역면적과의 연관관계, 그리고 댐으로 인한 홍수유출의 영향범위를 평가하였다.

## 2. 댐영향 분석(대상유역 및 홍수사상)

공간확장된 홍수 유출자료의 활용으로 댐의 영향을 분석하기 위해 선정된 지역은 충주댐과 횡성댐이 포함되어 있는 남한강 본류이다. 충주댐은 1985년 10월에 완공되었으며 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에는 1993년부터 시단위 총방류량을 제공하고 있으며 1995년부터 충주댐 유입량을 제공하고 있다. 횡성댐은 2000년에 세워진 다목적댐으로 횡성댐이 포함하는 유역면적은 210 km<sup>2</sup> 정도이며 이는 충주댐(6,648 km<sup>2</sup>)에 비해 약 30배의 크기 차이를 가지고 있다. Fig. 1에서 보듯이 충주댐과 횡성댐의 영향을 분석하기 위해 두 댐의 방류량이 흘러 직접적인 영향을 받는 남한강 본류의 수위관측소 세 곳(강천, 여주, 양평)을 선정 하였으며, 두 댐의 홍수 유출자료가 공간확장에 미치는 영향을 각각의 수위관측소에서 홍수저감률을 중심으로 분석하였다. 강천, 여주, 그리고 양평이 속한 유역의 면적은 각각 10,900 km<sup>2</sup>, 11,100 km<sup>2</sup>, 12,200 km<sup>2</sup>이다. 댐 영향 분석 위해 충주댐이 설치된 1986년부터

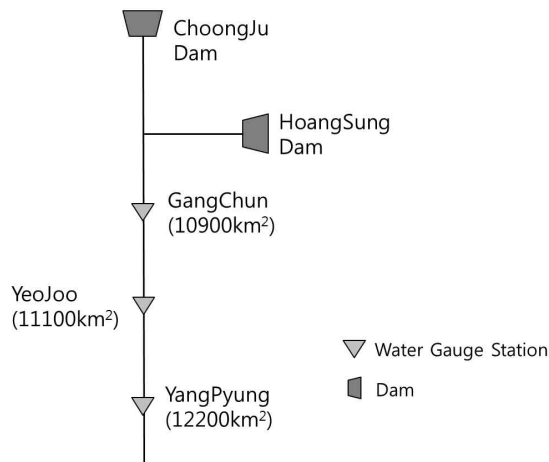


Fig. 1. Water Gauge Stations in the Major Streams of the Nam Han River

홍수 사상을 선정할 수 있으나 두 개의 댐을 중심으로 홍수자료의 공간확장에 미치는 영향에 대해서 조사 위해 두 개의 댐이 완공 된 2000년 이후부터 2010년까지의 홍수사상 18개를 놓고 분석하였다(Table 1). 이들 홍수사상들 중 충주댐과 횡성댐의 20%를 상회하는 홍수사상은 각각 4개씩이며 그 범위는 10,000 cms와 500 cms 이상이다. 충주댐에서 최대 첨두홍수량은 21,400 cms로 06\_1사상이다. 충주댐의 관측 유입량이 관측 유출량과 비슷한 사상들은 07\_2 사상과 03\_A 사상들이다. 횡성댐의 경우도 두 값이 비슷한 경우는 00\_A사상과 03\_A 사상들이다. 선정된 홍수사상의 평균 첨두유량은 7,530 cms (충주댐)와 360 cms (횡성댐)이다.

## 3. 홍수 유출자료의 공간확장

Kim et al. (2013)이 소개한 홍수 유출자료의 공간확장법은 과거 관측자료를 중심으로 같은 시간대의 미계측 유역 자료를 재생산해 내는 것이다. 이는 ‘홍수 유출자료의 공간확장과 홍수저감률에 대한 댐 영향분석 I (Kim et al. 2015)’에서 언급하였듯이 선정된 공간에서의 오차(관측지역)가 다른 지역(미계측지역)에서의 오차를 동일하게 전과되어 일관된 오차비율을 유역 전체에 갖는다는 것이 홍수 유출자료의 공간확장법에서의 핵심사항이다. 이를 위해 유역의 특성에 따라 결정이 가능한 매개변수는 유역의 특성에 맞게 고정하고 홍수사상마다 달라지는 초기 조건을 최적화하여 관심 유역내의 미계측 유역의 자료를 관심 유역내의 관측값을 기준으로 생산해 내는 것이다. 본 연구에서는 홍수 유출자료의 공간확장을 위한 강우-유출모델로 저류함수법을 활용하였으며 유역의 특성을 나타내는 매개변수( $K$ ,  $P$ ,  $T$ )는 도네가와(利根川) 경험식을 활용하였다. 홍수사상마다 달라지는 초기 조건 중에서 일차 유출률( $f$ )은 0.3으로 고정하고 공간적인 변화가 작은 포화량( $R_{sat}$ )을 관심유역에 동일하게 적용하고 이를 최적

Table 1. Selected Flood Events for the Analyses of Dam Effects

Events		Duration		Events		Duration	
1	00_A	2000 0912 0000	2000 0922 2300	10	06_1	2006 0714 0000	2006 0724 2300
2	00_1	2000 0722 0600	2000 0726 0500	11	06_2	2006 0726 0600	2006 0803 2300
3	01_1	2001 0628 0000	2001 0707 1300	12	07_1	2007 0803 1300	2007 0814 0100
4	02_A	2002 0830 0000	2002 0907 2300	13	07_2	2007 0914 1000	2007 0923 1500
5	02_1	2002 0805 0000	2002 0812 2300	14	08_1	2008 0723 1800	2008 0728 0800
6	03_A	2003 0908 0000	2003 0917 2300	15	09_1	2009 0709 0000	2009 0716 1700
7	04_1	2004 0617 0500	2004 0628 2300	16	09_2	2009 0811 1000	2009 0817 0900
8	04_3	2004 0711 2000	2004 0719 0100	17	10_1	2010 0812 1700	2010 0821 0600
9	05_1	2005 0727 1900	2005 0731 1900	18	10_2	2010 0909 0700	2010 0916 0700

화하였다. 댐 유입량과 유출량의 자료는 관측유출과 유입으로 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS) 자료를 활용하였다. 수위관측소에 대한 댐의 영향을 분석하기 위해 여주 수위관측소를 중심으로 홍수 유출자료를 관심유역 내 중소유역에 공간확장한 자료를 활용하였다. 이때 확정된 매개변수를 적용하여 댐의 유무 시에 각각의 수위관측소의 유출량 변화로 댐 영향을 분석하였다. Fig. 2는 여주에서의 관측유출량과 모의유출의 최대값을 비교한 그래프와 자연유출량과 관측유출량의 최대값을 각 사상마다 보인 것이다.

#### 4. 홍수 유출에 대한 댐의 영향 분석

##### 4.1 댐에서의 홍수의 크기와 홍수조절 영향

홍수에 대한 댐의 영향으로 댐 자체 홍수 조절 능력에 대해 먼저 분석 하였다. 댐의 홍수 조절 능력은 홍수가 발생할 때 댐에 유입되는 유량의 특성을 조절하기 위한 목적으로 한다. 이는 댐에서 댐 유입량을 저류하고 이를 일정부분 유출시킴으로 홍수유출의 지체시간을 확보하고 첨두유출의 크기도 감소시키는 것이다. 이를 댐의 홍수저감률(FRR: flood reduction rate)이라는 수치로 표현하는 것이 Eqs. (1) and (2)에 나타나 있다. 본 연구에서 사용되는 홍수저감률은 Gross와 Morgan (2007)이 댐의 영향 범위를 구할 때 사용한 식과 동일하다. 홍수저감률은 댐으로 유입되는 홍수유입량에 대해 댐 유출량의 차이를 홍수유입량의 비이다. 이는 댐에 유입되는 홍수유입량에 대해 얼마나 댐에 저류 시키는지에 대한 비라고 할 수 있다. 첨두홍수량(peak discharge)를 기준으로 홍수저감률을 계산하면 Eq. (1)을 활용하고 홍수용적(volume)을 기준으로

홍수저감률을 나타내면 첨두홍수량이 발생하는 지점에서 전후 1일, 총 2일 동안의 유출을 Eq. (2)에 적용하여 계산하였다. Figs. 3(a) and 3(b)는 홍수 발생 시 댐(충주댐)에서의 단위유출도와 댐 하류의 수위관측소(여주)에서의 유출도를 각각 보이는 것이다. 본 연구에서는 홍수 시 댐 유출을 위해 고려하는 다양한 요소들, 댐 운용이 하류수위에 미치는 영향, 댐 초기 저류량, 댐 상류부 침수피해를 저감 및 저류량 등에 대한 고려를 배제한 과거 댐의 기록만을 바탕으로 홍수저감률을 분석하였다.

$$FRR = 1 - \frac{Q_d}{Q_n} \quad (1)$$

$$FRR = 1 - \frac{Vol_d}{Vol_n} \quad (2)$$

여기서, FRR: 홍수저감률(flood reduction rate), Qd: 댐유출 또는 댐 유출에 의한 유량, Qn: 댐 유입량 또는 댐의 영향이 없는 자연유출을 나타낸다.

Figs. 4 and 5는 두 댐(CJ: 충주댐, HS: 횡성댐)의 댐 자체 홍수저감률을 관측유출을 기준으로 계산한 그래프와 선정된 몇몇 사상에 대한 유출도이다. Figs. 4(a) and 4(c)는 관측된 시간당 첨두홍수량(peak discharge, Qp)을 기준으로 홍수저감률을 분석한 결과이며 Figs. 4(b) and 4(d)는 관측된 시간당 홍수용적(volume)을 정해진 시간의 홍수용적으로 환산한 값을 활용해 홍수저감률을 분석한 결과이다. 각각의 그래프에 나타난 점선은 충주댐과 횡성댐의 발전최대 사용수량(충주: 788 cms, 횡성: 2.74 cms)을 홍수 시에 여수로 방류가 없는 최대 유출로 계산하고 나타낸 것이다.

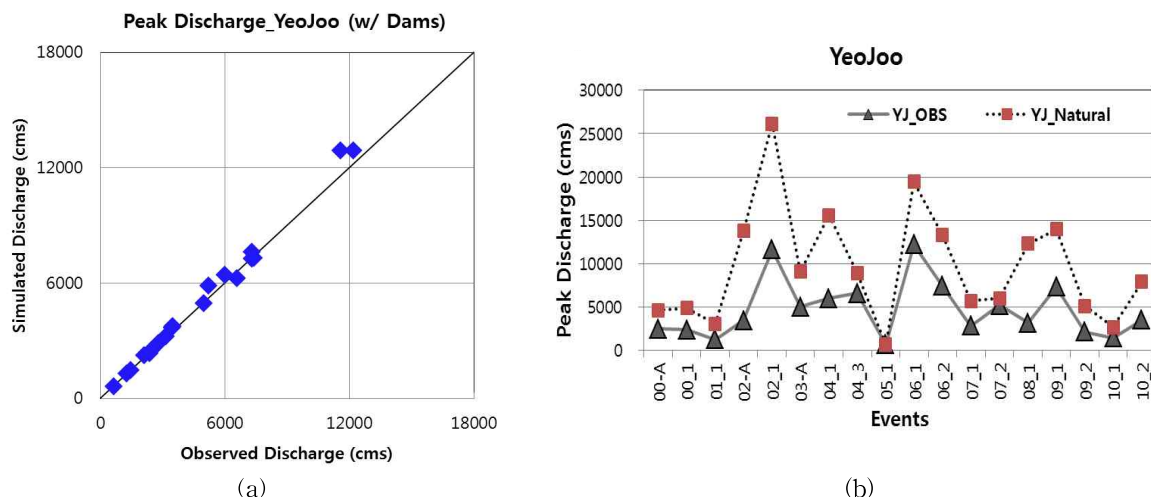


Fig. 2. Comparison between Observed and Simulated Peak Discharge (a) and Observed and Natural Peak Discharge at YeoJoo Water Gauge Station for Dam Effects Analysis (b)

Figs. 4(a) and 4(c)의 그림에 있는 첨두홍수량( $Q_p$ )과 홍수저감률의 비교는 첨두홍수량이 증가하는 것에 대해 별다른 경향성을 보이지 않는다. 특히 홍수량 크기가 큰 충주댐의 경우는 특성을 구별하기가 더욱 힘들게 나타나고 있으나 횡성댐의 경우는 최대유출치가 증가할수록 홍수조절율이 저감하는 경향을 보이고 있다. Fig. 4(a) 충주댐 첨두홍수량 비교의 경우 약40%의 홍수량이 여수로의 이용 없이 홍수를 조절하였다. 하지만, 홍수량이 다소 작은(5,000 cms) 홍수량에도 0.3의 FRR을 보이고 있는 07\_2

의 경우는 Fig. 5(b)에서 보듯이 홍수 유입의 최대유량과 댐에서 방류하는 최대유출치의 차이가 많지 않음을 보이고 있다. Fig. 4(c) 횡성댐의 경우는 00\_A사상이 홍수량이 작는데도 횡성댐 여수로를 통해 방류한 것으로 관측되었다.

홍수용적(volume)에 대한 변화는 두 개의 댐에서 동시에 그 경향성을 드러내고 있다. 홍수용적이 큰 충주댐의 경우 홍수용적의 크기에 따른 홍수저감률이 홍수용적 규모가 작은 횡성댐의 경우보다 같은 시기에 일어난 홍수에

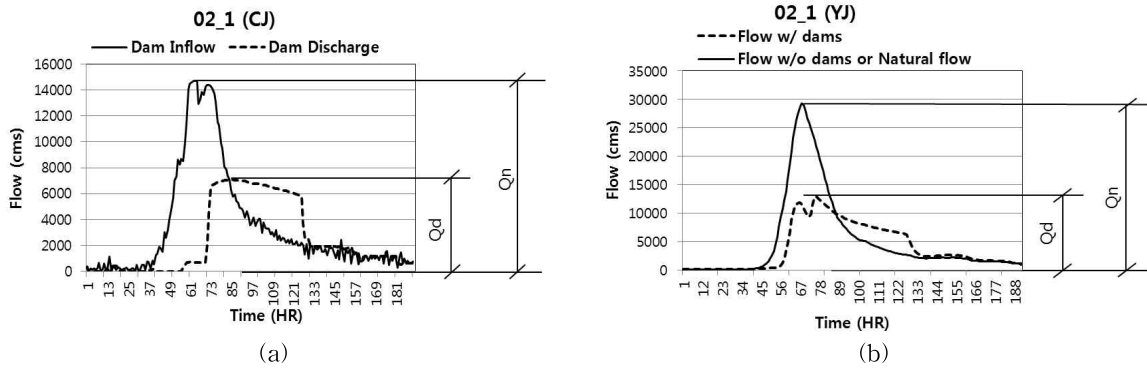


Fig. 3. Hydrographs at a Functional Dam and at Water Gauge Station located at Downstream of a Dam

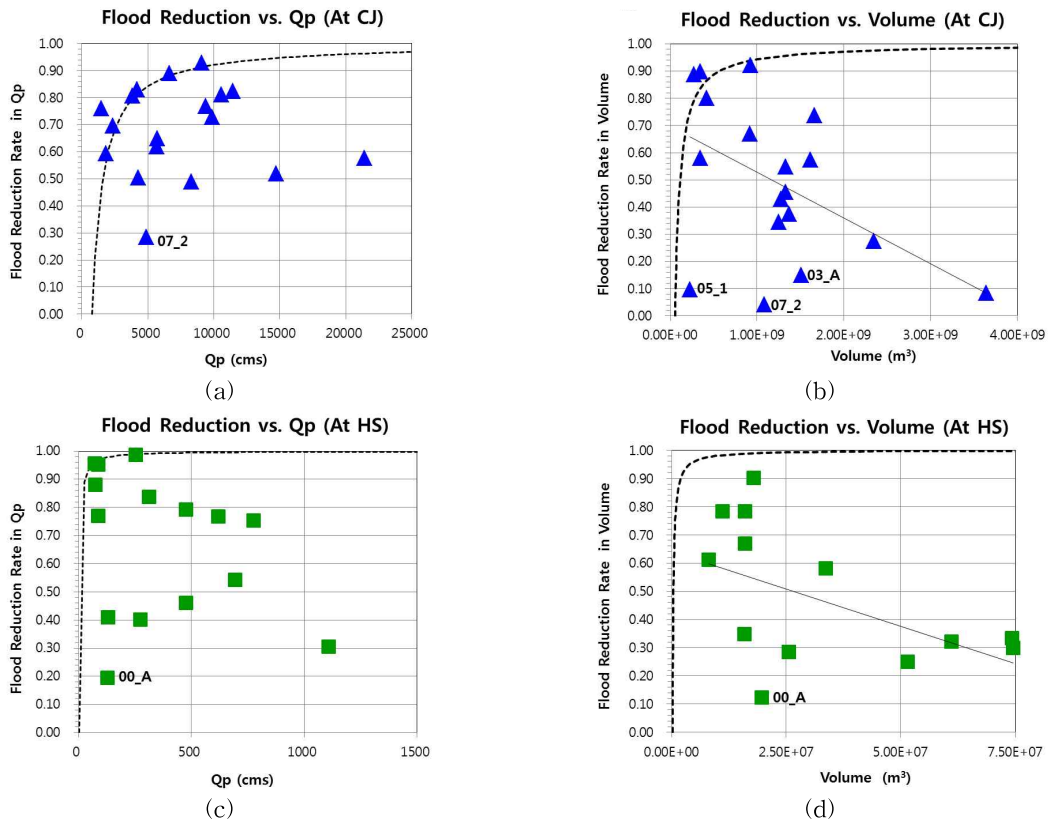


Fig. 4. Flood Reduction Rate Compared with Flood Scales at Two Dams (Choongju Dam and Hoangsung Dam)

대해 크게 변화하는 것을 볼 수 있다. Fig. 4(b)에 나타난 충주댐의 홍수저감률은 07\_2, 03\_A, 그리고 05\_1 사상이 홍수용적이 작는데 비해 유출을 많이 실시한 것으로 파악된다. 특히, Fig. 5(b)에서 보듯이 07\_2사상의 경우는 첨두홍수량 분석과 비슷하게, 유입하는 홍수용적의 대부분을 방류해 홍수저감률이 현저하게 작게 나타나고 있다. 또한 충주댐의 03\_A사상의 경우도 홍수시작 후 130시간의 첨두홍수량을 제외한 나머지 대부분은 방류한 것으로 관측되어 홍수용적을 통한 홍수저감률이 낮은 경우로 분류되었으며 05\_1의 사상도 유입량과 방류량을 거의 동일시 하고 있어 같은 양상을 보인다. 황성댐의 경우는 홍수 유입량보다 홍수유출량이 많은 사상들(03\_A, 04\_3, 06\_1)이 있다. 이들 중 03\_A의 유량도를 보면 홍수기간 시작 후 25시간 후에 최대 홍수유입량을 보이지만 60시간 이후부터는 유출이 유입의 2배 이상을 유출하므로 선정된 기간 동안에 홍수유입보다 홍수유출이 크게 나타났다. 첨두홍수량을 활용한 분석에서도 홍수량이 작음에도 불구하고 유출을 많이 실시한 00\_A사상도 Fig. 5에서 보듯이 유입량과 유출량의 차이가 많이 나지 않음을 보이고 있다.

두 댐에 대한 이번 분석을 통해 홍수량의 크기가 커지면 커질수록 홍수저감률은 줄어들음을 볼 수 있다. 이를 다르게 표현하면, 홍수량의 크기에 맞게 방류를 조절하는데

유입량이 클수록 홍수량의 일정부분을 저장하고 나머지는 방출하므로 그 방출하는 양이 많음을 알 수 있다.

#### 4.2 여주 수위관측소에서의 댐의 영향 분석

댐의 직접적인 홍수조절 역량을 넘어 댐에서 거리를 둔 수위관측소에 대한 댐 홍수조절이 미치는 영향을 분석하였다. 선정된 수위관측소는 여주수위관측소이며, 이는 남한강 본류의 한 지점에 위치하여 충주댐과 황성댐의 홍수조절의 영향을 분석할 수 있다. Fig. 6에서 나타내는 w/o dams는 충주댐과 황성댐이 동시에 사라지고 관측 유입량을 유출량으로 대입하여 자연유량을 계산했을 때의 값을 첨두홍수량(peak discharge)과 홍수용적(volume)에 대해 표현한 것이다. 첨두홍수량을 기준으로 홍수 크기가 작은 경우 자연유량과 댐 유출량의 차이가 없어 여주수위관측소에서의 유량의 차이 작게 나타나고 있다. 반면에 홍수 사상의 크기가 큰 경우는 자연유량에 대한 여주에서의 유량은 댐 유출량에 비해 그 크기가 커 유량차이가 크게 나타나고 있다. 평균적으로 여주에서 댐이 있을 때와 없을 때의 유량차이는 5,054 cms의 차이를 보이고 있다. 홍수용적을 기준으로 여주에서의 댐 영향을 보면 첨두홍수량에서 보이는 경향과는 다르다. 홍수량 크기가 큰 사상에서도 댐이 있을 때와 없을 때의 홍수용적차이가 일정한

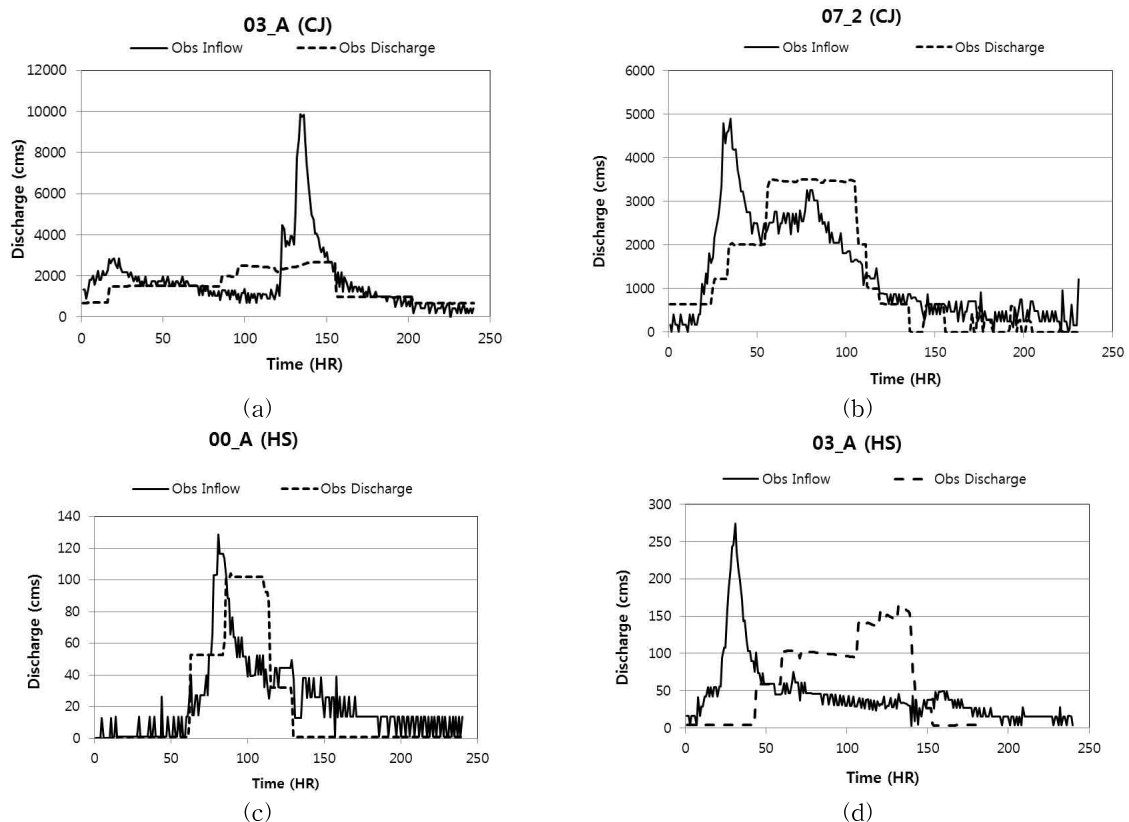


Fig. 5. Observed Hydrographs of ChungJu and HoangSung Dams



정도를 유지하고 있다. 그 값이 평균적으로  $3.37E+08\text{ m}^3$ 의 차이를 보이고 있다. 이는 홍수용적을 기준으로 홍수의 크기가 작은 경우는 댐으로 들어오는 유량이 작으므로 댐이 있을 때와 댐이 없을 때의 유량의 차이가 여주에서 크지 않다. 홍수크기가 커지면 홍수용적을 기준으로 홍수저감률이 작아지므로 댐에 들어오는 유량의 많은 부분을 댐 유출로 방출하므로 여주에서 댐이 있을 때와 없을 때의 유량 차이가 크지 않는 것으로 파악된다.

위는 두댐에서 동시에 발생하는 홍수저감률에 여주 수위관측소에 미치는 영향을 보였다. Fig. 7은 여주에서 충주댐과 황성댐 각각의 영향에 의해 일어나는 홍수저감률을 침투홍수량을 기준으로 분석하였다. 여주에서의 충주댐의 영향이 홍수발생에 대해 0.51(점선표시)의 평균적인 저감률을 보이고 있다. 또한 충주댐을 이용해서 저감하는 홍수들 중 가장 작게 저감률을 나타내는 것은 0.03으로 07\_2 사상이다. 이는 충주댐의 사상을 나타내는 Figs. 4 and 5에서 홍수사상이 크지 않지만 유입량과 유출량의 크기를 동일시하였기 때문이다. 최대 홍수저감률은 0.73으

로 02\_A사상이다. 충주댐의 경우 홍수저감률이 그 면적의 비(60%, 충주댐 유역면적/여주유역 면적)가 커 여주 수위관측소에 영향을 미치는 홍수저감률의 폭도 약 0.37로 크게 나타나고 있다. 이는 07\_2사상의 홍수저감률을 제외한 차이 값이다. 황성댐의 경우 여주에서 측정된 홍수용적에 대해 충주댐이 미치는 영향에 비해 미소함을 보이고 있다. 평균적으로 0.008(점선표시)의 홍수저감률을 보이고 있으며 최소율은 0.0009의 홍수저감률을 보이고 있다. 최대로는 0.027의 09\_1 사상이다. 홍수저감률의 폭은 0.0261이다. 이는 여주에서 발생하는 홍수에 대한 황성댐의 영향이 작다고 할 수 있다.

Fig. 8은 여주수위관측소에서 댐의 역할로 인한 홍수저감률을 댐이 위치한 유역의 유역면적의 비로 나타내었다. 유역면적의 비는 Eq. (3)과 같다.

$$Area\ Rate(Y,J) = \frac{aA_{HS} + bA_{CJ} + cA_O}{A_{YJ}} \quad (3)$$

여기서,  $A_{YJ}$ : 여주수위관측소가 포함하는 유역의 면적,

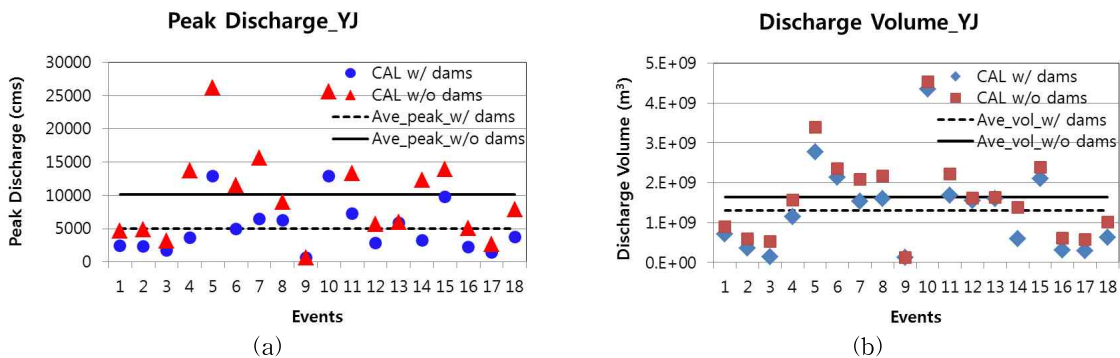


Fig. 6. Peak Discharges and Discharge Volumes depending on the Existences of Dams (ChoongJu Dam and HoangSung Dam)

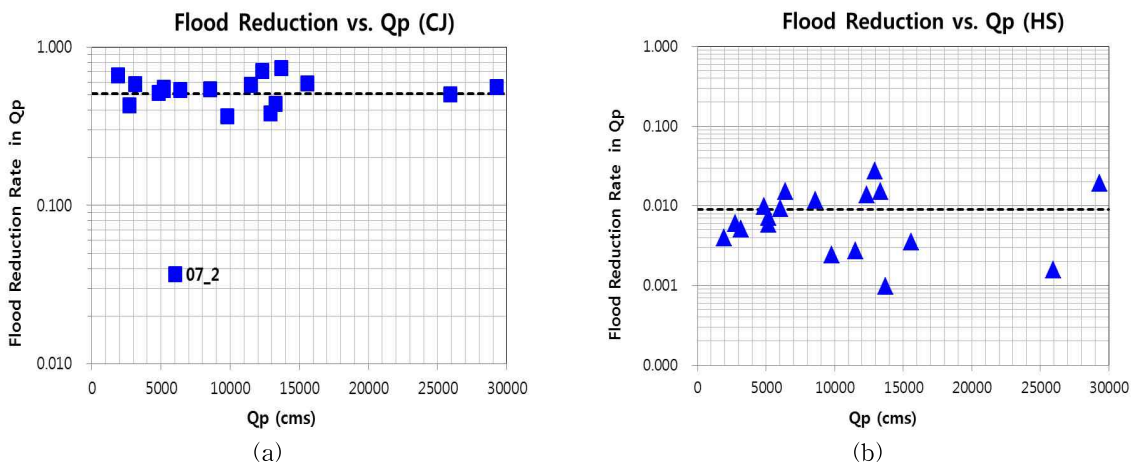
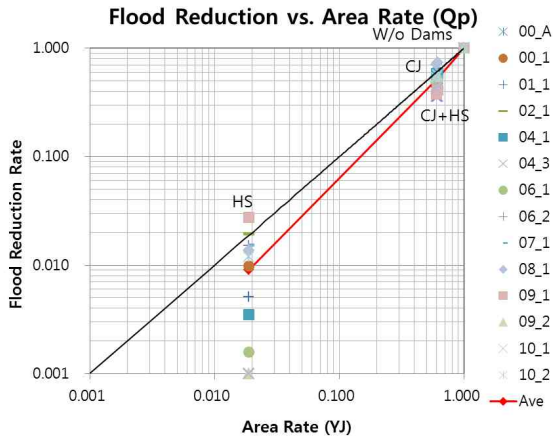
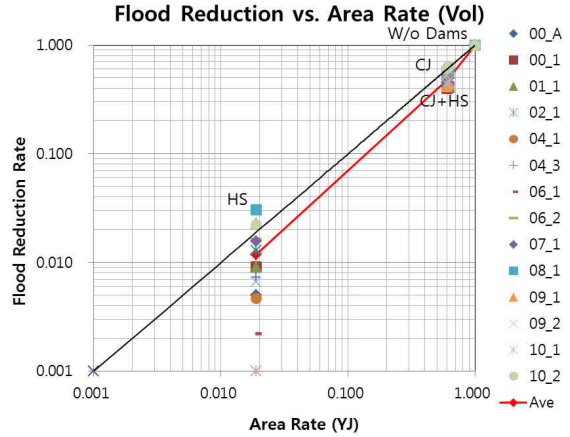


Fig. 7. Flood Reduction Rate at the YeooJoo Water Gaugel Station



(a)



(b)

Fig. 8. Peak Discharges and Discharge Volumes Depending on the Existences of Dams (ChoongJu Dam and HoangSung Dam)

$A_{HS}$ ,  $A_{CJ}$ ,  $A_o$ : 황성댐과 충주댐이 포함하는 면적과 여주 수위관측소가 포함하는 면적에서 황성댐과 충주댐이 제외된 유역의 면적( $A_o = A_{YJ} - A_{HS} - A_{CJ}$ ),  $a, b, c$ 는 상태 변수로 1또는 0으로 면적을 고려할 때와 고려하지 않을 때를 나타낸다.

이는 댐에 의해 홍수조절이 이루어지는 면적의 비가 선정된 수위관측소의 홍수조절 크기에 어떻게 영향을 침두 홍수량( $Q_p$ )와 홍수용적(volume)을 중심으로 나타내었다. 면적비는 여주수위관측소가 포함하는 유역면적( $11,100 \text{ km}^2$ )에 대해 황성댐( $210 \text{ km}^2$ ), 충주댐( $6,650 \text{ km}^2$ ), 황성댐과 충주댐의 면적( $6,860 \text{ km}^2$ )의 비이다. 홍수저감률의 비는 댐이 없을 때, 즉 자연유량의 상태를 최대값으로 하고 이를 기준으로 댐에 의한 홍수조절량을 비율로 표현한 것이다. 그림에서 보듯이 침두홍수량과 홍수용적이 동시에 면적의 비가 늘어날수록 홍수조절 영향이 커지는 것을 보이고 있다. 황성은 면적의 비가 2%정도이며 이에 맞게 홍수 조절 능력도 09\_2의 경우는 0.023을 보이지만, 04\_1 사상의 경우는 0.003의 저감률을 갖는다. 09\_2 사상의  $Q_n$ 이 5,100 cms인데 04\_1은 15,600 cms로 홍수의 크기가 커지면 그에 따라 댐에서 조절하여 방류하는 댐방류량( $Q_d$ )이 커져 홍수저감률이 여주수위관측소에 작게 나타난다. 이는 Fig. 4의 결과와 동일하게 홍수량이 커지면 커질수록 댐에서 배출하는 방류량이 많아 홍수저감률이 작아지는 것을 보이는 것이다. 충주댐의 경우 면적의 비가 60%이며 홍수용적이 큰 04\_1 사상에서 시간 침두홍수량이 0.58의 홍수저감률을 보이고 홍수용적의 경우 0.59의 저감률을 각각 보인다. 이는 홍수용적의 크기에 따라 면적비에 대한 홍수저감률이 달라짐을 보이는 것이다. 황성의 경우 홍수용적

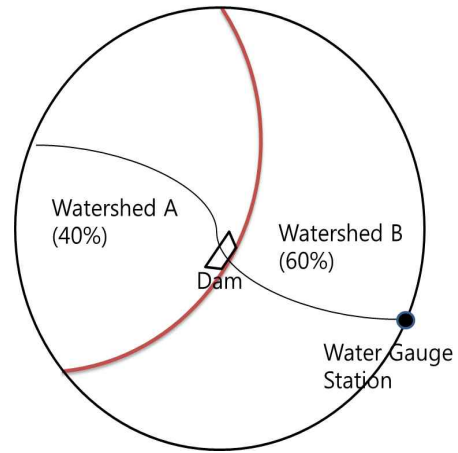


Fig. 9. A Supplementary Figure for Detail Explanation of the Relation between Flood Reduction Rate and Area Rate

이 커질수록 홍수저감률이 감소하는 것을 보이고 있으나 충주댐의 경우는 같은 홍수용적에 대해 면적에 따른 홍수저감률이 비슷한 비율로 홍수규모와 댐의 규모와도 연관 관계가 있음을 나타낸다. 홍수저감률에 대한 평균값을 보면 홍수저감률은 댐이 포함하는 유역면적의 비의 크기보다 작게 나타난다. 또한 홍수용적이 커지면 커질수록 홍수저감률이 작아진다.

댐을 포함하는 유역면적이 댐 하류에 미칠 수 있는 홍수저감률과 면적비와의 관계를 Fig. 9를 통해 설명하면, 댐을 포함하는 유역 A가 유역 B를 포함한 전체 유역면적의 40%를 차지하고 있을 때 홍수저감률은 0.4를 최대로 볼 수 있다. 하지만, 이는 댐을 포함하는 전체면적에 균등하게 강우가 분포할 때 가능하다. 하지만, 유역 A에 내린 강



우가 유역 B에 내린 경우보다 많은 경우는 댐에 의해 유역 A의 홍수를 조절하는 양이 많아지므로 홍수저감률이 0.4보다 커지는 것이다. 이와 반대의 경우 유역 B에 강우가 더 내릴 경우에는 홍수저감률이 0.4보다 작아질 것이다. 따라서 댐에 의한 홍수저감률도 강우에 민감하게 반응하므로 강우의 영향에 대한 연구가 지속되어야 한다.

### 4.3 댐과 유역면적의 연관성분석

Figs. 7 and 8에서 횡성댐이 충주댐의 영향에 비해 여주 수위관측소에 작게 나타나 있다. 하지만, 크게 나타나지 않는 침투홍수량의 차이라도 홍수빈도 해석에 대한 영향이 나타날 수 있으므로 침투홍수량과 홍수용적 차이를 숫자적으로 Table 2에 나타내었다. 이 표에서는 시간당 침투홍수량(peak discharge)과 일정기간의 홍수용적(volume)의 차이를 횡성댐이 없는 상황과 횡성댐을 가동할 때의 차이를 나타낸다. 횡성댐 자체에서 홍수조절시 관측 최대 유입량(Max\_In)과 관측 최대 유출량(Max\_Out)을 비교하였다. 최대홍수량의 차이가 수위관측소가 포괄하는 면적이 넓어질수록 더욱더 작아지는 것을 볼 수 있는데 07-1의 경우는 횡성댐(210 km<sup>2</sup>)에서의 침투홍수량의 차이가 474.1 m<sup>3</sup>/s인데 홍수수위관측소가 포괄하는 범위가 넓어질수록(12,220 km<sup>2</sup>) 그 차이가 현저하게 작아지는 것(41.9 m<sup>3</sup>/s)을 볼 수 있다. 침투홍수량의 경우는 관측소의 수위관측의 오류나 수문곡선식의 이상으로 인해 그 크기가 현저하게 차이가 날 수 있지만, 홍수용적의 차이를 보면 보편적인 면적의 영향을 볼 수 있다. 횡성댐으로 인해 발생된 홍수량의 차이가 유역 범위가 넓어질수록 그 홍수

용적(volume)이 감소하는 것을 보인다. 이는 유역의 범위가 커지면 커질수록 홍수를 조절하는 댐의 영향이 작아지는 것을 나타낸다. 침투홍수량과 홍수용적의 변화가 유역의 범위에 크게 영향을 받지 않는 사상들은 횡성댐의 상류에서 발생한 홍수량의 크기가 작기 때문이다.

위에서 언급된 횡성댐의 홍수조절 능력은 충주댐에 비해 작지만 홍수 조절에 대해 유역면적의 크기 영향을 보였다. 이에 더하여, 홍수 조절능력이 미치는 영향범위를 파악하기 위하여 충주댐과 횡성댐의 홍수조절능력과 유역면적비와의 관계를 Fig. 10에 나타내었다. 여기에 사용된 면적비(area rate)는 Eq. (4)에 나타내었다.

$$Area\ Rate\ (Dam) = \frac{A_{DA}}{A_{DA}} + \frac{A_{DO}}{A_{DA}} \quad (4)$$

여기서,  $A_{DA}$ : 댐(횡성댐 또는 충주댐)이 속한 유역면적,  $A_{DO}$ : 댐을 제외한 하류 유역을 나타낸다. 따라서 각 댐(횡성댐과 충주댐)을 기준으로 면적비를 구해 횡성댐과 충주댐을 벗어난 유역의 면적과의 비를 나타낸다. 유역면적에 대한 면적비와 두 댐의 홍수저감률을 비율로 표현되므로 한 그래프에 도시할 수 있어 Fig. 10과 같이 동시에 도시하여 댐의 홍수조절 능력에 대한 유역면적의 효과를 볼 수가 있다. 원형 점은 면적비가 속한 곳에서 홍수저감률이 선정된 사상에 대한 영향을 나타낸다. Fig. 10의 다이아몬드는 각각의 위치에 발생한 홍수저감률에 대한 평균값이다. 댐에 의한 홍수량의 저감률은 댐하류 유역면적이 커지면 커질수록 작아진다. 횡성댐과 충주댐을 통해 홍수가 발생하는 시점에서 홍수저감률이 1.0에 가깝지만

Table 2. Differences of Discharge Peak and Volume

		Hoangsung Dam (210Km <sup>2</sup> )			Gangchun (10920Km <sup>2</sup> )		
		Max_In	Max_Out	Difference	w/o Dam	w/ Dam	Difference
04_1	Peak (m <sup>3</sup> /s)	86.7	4.3	82.4	6443.1	6392.1	51
	Vol (m <sup>3</sup> )	8006760	587160	7419600	539399520	532912320	6487200
05_1	Peak (m <sup>3</sup> /s)	74.3	9.1	65.2	1811	1795.7	15.3
	Vol (m <sup>3</sup> )	5198760	1215720	3983040	217954080	215700120	2253960
07_1	Peak (m <sup>3</sup> /s)	619.5	145.4	474.1	2922	2824.1	97.9
	Vol (m <sup>3</sup> )	25311960	4175640	21136320	323317800	314349480	8968320
09_2	Peak (m <sup>3</sup> /s)	253.2	3.7	249.5	1833.3	1736.5	96.8
	Vol (m <sup>3</sup> )	12663360	489600	12173760	146851920	138302280	8549640
		Yeoojo (11100Km <sup>2</sup> )			Yangpyung (12220Km <sup>2</sup> )		
		w/o Dam	w/ Dam	Difference	w/o Dam	w/ Dam	Difference
04_1	Peak (m <sup>3</sup> /s)	6492.3	6442.3	50	6635.6	6582.5	53.1
	Vol (m <sup>3</sup> )	550564200	544287960	6276240	590478120	584890920	5587200
05_1	Peak (m <sup>3</sup> /s)	1840.3	1824.9	15.4	2106.9	2091.3	15.6
	Vol (m <sup>3</sup> )	223095600	220831920	2263680	254967840	252519840	2448000
07_1	Peak (m <sup>3</sup> /s)	2989.4	2889.9	99.5	3291.3	3249.4	41.9
	Vol (m <sup>3</sup> )	331302600	322376760	8925840	354479760	345849120	8630640
09_2	Peak (m <sup>3</sup> /s)	2343.3	2257.4	85.9	2827.6	2743.2	84.4
	Vol (m <sup>3</sup> )	190104120	182159280	7944840	245428200	239178600	6249600

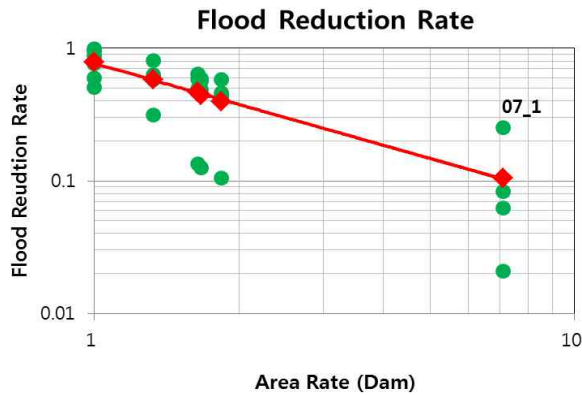


Fig. 10. Flood Reduction Rate Versus Area Rate

홍수를 받는 유역면적이 댐이 속한 유역면적의 7배가량이 되면 홍수저감률이 평균적으로 0.1로 줄어들며 최저 0.02까지 줄어들었다. 이는 횡성댐과 충주댐을 따로 놓고 같은 계산을 했을 경우에도 비슷한 홍수저감률의 변화를 보인다. 유역면적이 7배인 곳에서의 홍수저감률은 07\_1의 사상을 제외한 사상들에 대해서는 평균 0.053의 홍수저감 효과가 나타났다. 하지만, 07\_1사상이 가지는 약 0.25의 홍수저감률이 평균 홍수저감 영향을 높였다. 07\_1의 사상의 경우 유역에 내리는 강우의 양이 적어 댐의 유출에 대한 영향이 크다. 또한, 횡성댐의 홍수저감률 영향이 이 지역에 크게 닿기 때문이다. 횡성댐의 경우 면적의 비가 52배가 넘어가는 여주에서 댐의 영향이 평균 1%를 보이고 있다. 댐의 영향 범위에 대한 연구로, Romano et al. (2009)은 댐으로부터 32.2km 떨어진 곳에서 댐에 의한 영향보다는 기후에 의한 영향이 크다는 결과를 얻었다. 본 연구에서 얻은 결과와 비교하면, 댐의 규모에 따라서도 그 값이 다르겠지만, 횡성댐의 홍수저감률이 횡성댐 면적의 7배가 되는 곳과의 거리가 약 38km로 Romano et al. (2009)의 분석보다 댐의 영향을 받는 거리가 더 멀게 측정되었다. 또한 Gross et al. (2007)이 홍수 조절에 영향을 주는 하류의 범위를 FRR이 0.1이나 0.05에 이르는 것으로 정의하고 있는데, 이번 분석에서 홍수저감률이 댐이 포함하는 유역의 7배 이상의 면적에서 0.1정도를 보이는 것을 보이고 있다. 따라서 댐의 홍수 조절영향의 범위를 댐이 포함하는 유역의 면적의 7배 정도로 볼 수 있다.

## 5. 요약 및 결론

본 연구는 관측 홍수 유출자료와 공간확장된 유출자료를 활용하여 홍수 조절에 대한 댐과 댐이 포함하는 유역의 영향을 분석하였다. 관측 홍수 유출자료는 댐의 영향 분

석을 위해 선정된 충주댐과 횡성댐이 완공된 이후인 2000년부터 2010년까지의 18개 홍수 사상을 활용하였다. 또한, 댐 하류지역의 미계측 유역에 대해서는 여주 수위관측소의 관측 유출량을 중심으로 공간확장된 홍수 유출자료를 홍수 시 댐 조절로 인한 영향범위를 구할 때 활용하였다. 댐 자체의 홍수저감률 분석에서, 침투홍수량(discharge peak, Qp)과 홍수용적(volume)에 대한 홍수저감률의 비는 홍수량의 커질수록 홍수저감률이 줄어들음을 보였다. 이는 큰 홍수사상일수록 댐 상류에서 유입되는 유량을 홍수조절을 위해 더 많이 방출하기 때문이다. 두 댐에서 거리를 둔 여주 수위관측소에서 두 댐의 홍수 저감률은 댐이 포함하는 유역 면적이 큰 충주댐의 홍수저감률은 55%이며 여주 수위관측소는 1.1%를 저감한다. 이에 더해 여주수위관측소에서 댐에 의한 평균 홍수저감률은 유역면적의 비(여주 수위관측소가 포함하는 유역면적에 대한 댐이 포함하는 면적의 비)는 비해 작게 나타나고 있다. 이를 통해 댐을 포함하는 유역면적이 영향을 미치는 댐 하류의 홍수저감률은 유역면적의 비보다 작게 나타남을 알 수 있다. 댐의 홍수조절능력과 댐 외부유역면적과의 비는 홍수 유출자료의 공간확장에 미치는 영향을 보였다. 이때 횡성댐과 충주댐의 홍수저감률이 댐이 포함하는 유역면적에서 1에 가까운 저감률을 보이면 댐이 속한 유역면적의 7배에 해당하는 면적에서는 홍수저감률이 평균 0.1 작게는 0.02까지 줄어들었다. 이를 통해 홍수유출자료의 공간확장된 자료를 활용하여 댐의 홍수조절에 대한 공간적인 영향을 분석할 수 있음을 보였다. 하지만, 이는 홍수조절을 위한 댐 방류에 있어서 고려하는 다양한 사항들을 고려하지 않고 분석하였기에 더욱더 정밀한 분석을 위해서는 댐저류량, 댐 상하류의 여건들을 고려한 연구들이 진행되어야 할 것이다.

## 감사의 글

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

## References

- Choo, T.H., and Chae, S.K. (2012). "Influence analysis for natural river bed with dam construction." *J. of Korean Wetlands Society*, Vol. 14, No. 4, pp. 715-723. (In Korean)

- Fitzhugh, T.W., and Vogel, R.M. (2010). "The impact of dams on flood flows in the United States." *River Res. Applic.* DOI: 10.1002/rra.1417
- Graf, W.L. (2006). "Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers." *Geomorphology*, Vol. 79, pp 336-360.
- Gross, E.J., and Moglen, G.E. (2007). "Estimating the hydrological influence of Maryland State Dams using GIS and the HEC-1 Model." *J. of Hydrologic Engineering*, Vol. 12, No. 6, pp. 690-693.
- 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, N.W., Jung, Y., and Lee, J.E. (2015). "Dam effects on spatial extension of flood event data and flood reduction scale I." *J. of Korea Water Reso. Asso.* In Review.
- Magilligan, F.J., Nislow, K.H., Graber, B.E. (2003). "A scale-independent assessment of discharge reduction and riparian disconnectivity following flow regulation by dams." *Geology*, Vol. 31, pp. 569-572.
- Magilligan, F.J., and Nislow, K.H. (2005). "Changes in hydrologic regime by dams." *Geomorphology*, Vol. 71, pp. 61-78.
- Park, B.J., Sung, Y.D., and Jung, K.S. (2005). "An Evaluation of fish habitat conditions due to the construction of Youngchun dam in the Gumho river." *J. of Korea Water Reso. Asso.* Vol. 38, No. 9, pp. 771-778.
- Park, H.-C., Lee, J.-H., and Lee, G.-G. (2014). "Effects of water level change on wetland vegetation in the area of riparian forest for dam construction period-focused on the Hantan River dam." *J. of Forest Science*, Vol. 30, No. 1, pp. 76-84.
- Poff, N.L., Bledsoe, B.P., and Cuhaciyan, C.O. (2006). "Hydrologic variation with land use across the contiguous United States: geomorphic and ecological consequences for stream ecosystems." *Geomorphology*, Vol. 79, pp. 264-285.
- Romano, S.P., Baer, S.G., Zaczek, J.J., and Williard, K.W.J. (2009). "Site modelling methods for detecting hydrologic alteration of flood frequency and flood duration in the floodplain below the Carlyle dam, Lower Kaskaskia river, Illinois, USA." *River Research and Applications*, Vol. 25, pp. 975-984.
- Shim, J.H., Kim, J.T., Cho, W., and Kim, J.Y. (2004). "Multipurpose dam operation models for flood control using Fuzzy Control technique (III)-Multi reservoir operation methods." *J. of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 4, No. 3, pp. 61-72. (In Korean)

paper number : 14-120  
 Received : 4 December 2014  
 Revised : 14 January 2015 / 13 February 2015  
 Accepted : 13 February 2015