유출자료 공간확장방법을 활용한 미계측유역의 지역최대홍수량 추정

Estimating Regional Maximum Floods using a Runoff Data Spatial Extension Method in Ungauged Watersheds

김기현* · 정용**

Kim, Ki Hyeon*, and Jung, Yong**

Abstract

In this study, regional maximum floods for ungauged watersheds at the Choongju dam (CJD) were estimated using flood runoff data generated in storage function method (SFM) applications. The CJD watersheds were divided into smaller watersheds to generate runoff data for ungauged watersheds. The SFM optimized saturated rainfall (R_{sa}) while keeping other parameters (k , p , Tl , and f_i) constant. Possible flood occurrences were estimated based on estimated runoff data and by analyzing the correlation between specific mean flooding events and regional maximum floods (Q_{RMF}) at the CJD. Results show that, in terms of being able to estimate runoff data for CJD watersheds, the spatial extension method based on an SFM was suitable for estimating possible regional flood occurrences ($NSE > 0.5$). Furthermore, there are strong correlations between flood events and Q_{RMF} (Pearson's $r > 0.9$); can be used to estimate regional maximum floods in the CJD watersheds.

Key words : Regional Maximum Flood, Specific Flood, Ungauged Watersheds, Storage Function Method

요 지

충주댐 유역을 대상으로 미계측유역에 대해 저류함수법을 활용한 홍수유출자료 공간확장방법의 적용 가능성을 평가하고 지역최대홍수량을 추정하였다. 미계측유역의 유출자료를 산정하기 위하여 충주댐 유역을 소유역으로 분할한 후 소유역의 물리적 매개변수(k , p , Tl)와 사상중심 매개변수(f_s , R_{sa}) 중 물리적 매개변수(k , p , Tl)와 초기유출율(f_i)을 고정하여 포화우량(R_{sa})을 최적화하는 절차를 밟았다. 산정한 유출자료를 바탕으로 충주댐 유역의 일반적인 홍수사상과 지역최대홍수량(Q_{RMF}) 사이의 상관관계를 분석하여 선정 지역의 최대홍수발생가능성을 추정하였다. 그 결과 충주댐 유역의 유출자료 추정에 있어서 저류함수법 기반의 홍수유출자료 공간확장방법은 지역발생가능 홍수사상 추정에 대해서 적합한 것으로 나타났다($NSE > 0.5$). 또한, 산정한 유출자료의 일반적인 홍수사상과 Q_{RMF} 사이의 상관관계가 있는 것으로 나타났으며 (Pearson's $r > 0.9$), 충주댐 유역의 지역최대홍수량을 추정할 수 있었다.

핵심용어 : 지역최대홍수량, 비홍수량, 미계측유역, 저류함수법

1. 서 론

기후변화로 인해 전 세계적으로 기상이변현상이 많이 발생하고 있다. 이러한 기상이변현상은 호우 패턴의 변화 및 국지성 호우의 증가로 나타나고 있으며, 홍수 등 자연재해의 증가

로 이어져 수자원에 큰 피해를 주고 있다(Park et al., 2004). 아울러 문명이 발달함에 따라 대규모 플랜트사업, 토양 포장공사, 도시화 등 토지 이용이 확대되어 토지의 표면 조도계수와 투수율이 감소하고 있으며, 이로 인하여 식생 분포의 감소 및 하천의 직선화로 강우가 유출 출구 지점까지 도달하는

*정회원, 원광대학교 토목환경공학과 석사과정(E-mail: hlkh92@gmail.com)

Member, Master Student, Department of Civil & Environmental Engineering, Wonkwang University

**교신저자, 정회원, 원광대학교 토목환경공학과 교수(Tel: +82-63-850-6718, Fax: +82-63-850-6718, E-mail: yong_jung@wku.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Wonkwang University

시간이 짧아지고 홍수방어능력이 감소하여 홍수피해가 증가하였다(Kwon et al., 2014). 국내에서는 1997년 이후로 국지성 호우로 인한 피해량 및 홍수량 규모의 증가로 기존 수공구조물을 위협하는 수준에 이르렀다. 이 때문에 수공구조물이 홍수로 손상되거나 붕괴되지 않도록 적절한 대책을 마련해야 한다는 주장이 일고 있다(Tofiq and Guven, 2014). 또한, 기존 수공구조물과 신규 수공구조물의 안정성을 확보하기 위하여 침투유량에 관한 연구를 통해 홍수규모를 추정하여 수공구조물들의 설계빈도를 새롭게 제시해야 한다는 주장도 제기되었다(Korea River Association, 2016).

일반적으로 설계홍수량 산정에는 홍수량 자료의 시계열 빈도해석 방법(Flood Frequency Analysis, FFA)과 설계 강우 유출 관계분석 방법(Design Rainfall Runoff Analysis, DRRA)을 사용한다(Chae et al., 2018). 하지만 두 가지 모두 실측 홍수량 자료를 기반으로 수위유량 관계 곡선 분석 및 유출량 모의를 실행하기 때문에 소하천이나 유출 측정이 이루어지고 있지 않은 곳에서는 적용하기 힘든 실정이다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2012). 이처럼 관측 유출자료가 부족하거나 검증되지 않은 유역을 미계측유역이라고 한다(Sivapalan et al., 2003). 미계측유역의 유출자료 확보는 설계홍수량 분석에 있어서 중요하기 때문에 현재 정확하고 신뢰도 있는 미계측유역의 유출자료를 확보하기 위한 연구는 꾸준히 진행되고 있다. 일반적으로 미계측유역의 유출자료를 통계적으로 산정하는 다중선형회귀분석(Vogel et al., 1999; Goswami et al., 2007)을 주로 사용하였으며, 최근에는 지역회귀모형의 설명변수에 수문모형의 매개변수를 추가하여 회귀모형의 적합성을 향상한 하이브리드 지역화 모형으로 미계측유역의 유출자료를 생성하기도 하였다(Kim et al., 2018). 또한, 미계측유역 내에 하류 지점을 중심으로 전체유역의 매개변수를 추정하여 홍수유출을 모의하였으며(Bae and Chung, 2000), 이를 응용하여 미계측유역을 소규모로 분할한 뒤 각 소유역의 유출 출구 지점 중심으로 매개변수를 산정하여 유출자료를 생성하기도 하였다(Kim et al., 2013). 분포형 모형과 공간확장자료 생성방법을 이용하여 미계측유역의 홍수유출 시계열 자료를 생성하여 침투유량을 추출하고 분석한 연구도 있다(Kim and Shin, 2017).

기존 연구를 보면 홍수량 산정 및 홍수해석에 있어서 미계측유역의 강우 공간분포를 고려한 유량산출이 필수적이기 때문에 미계측유역의 홍수자료를 추출하기 위해서 유역의 수문현상 예측과 매개변수를 최적화하는 절차가 요구된다. 이에 본 연구에서는 충주댐 유역에 유출자료 공간 확장방법을 적용하여 산출한 미계측유역의 유출자료가 공간적인 분석 가능성이 있는지 확인하고자 한다. 또한, 충주댐 유역의 일반적인 홍수 사상과 Kovacs가 제안한 Q_{RMF} 사이의 상관관계 분석하여 미계측유역을 포함한 충주댐 유역에 대한 홍수발생가능성의 추정을 검토하는 데 목적을 두었다.

2. 배 경

2.1 대상 유역 및 기간

유출자료 공간확장방법을 적용한 미계측유역의 유출자료 산출과 홍수 사상 분석을 위해 충주댐 유역을 대상 유역으로 선정하였다. 충주댐 유역은 대한민국 강원도 남한강 수계에 있으며, 생활·농업·공업용수 공급, 발전, 홍수조절 등의 중요한 역할을 하는 국내 최대 규모의 다목적댐이다. 충주댐은 유역면적 6,648k m², 총저수용량 27억 m³이고 6.16억 m³의 홍수를 조절할 수 있다. 유로 연장 375 km에 달하는 대하천은 서울 동쪽 약 20 km 지점에서 북한강과 합류하여 한강분류를 형성한다(K-water, 2012).

관측유출자료는 1985년부터 존재하나 유출자료의 공간 확장 가능성을 보기 위해 Table 1과 같이 2008~2013년, 2016~2017년을 선정하였다. 선정한 연도에서 연 강수량이 가장 많으며 홍수량 자료가 적절하게 표현된 기간(홍수의 시작과 끝을 명확히 구별할 수 있는)을 대상 기간으로 선정하였으며, 1시간 단위의 강수량자료와 유출자료를 이용하여 관측홍수 사상과 모의홍수 사상을 비교 및 분석하였다. 최근 사상에 가까워질수록 수위관측소가 증가하였는데 수위관측소의 개수에 따라 유역 특성이 달라지므로 동일한 유역 특성을 가진 연도를 선정하여 2008~2009년 22개, 2010~2013년 35개, 2016~2017년 75개로 유역을 분할하였다. 또한, 적절한 비교와 검증의 통일성을 위해 충주댐, 영월1, 영춘 수위관측소를 검증지점으로 지정하였다(Fig. 1).

Table 1. Information of Each Event

Events		Start	End	Number of Watersheds	R _{sa}	NSE
1	event 1	2008-07-24 0:00	2008-07-29 0:00	22	0.24	0.88
2	event 2	2009-07-14 0:00	2009-07-18 0:00		0	0.47
3	event 3	2010-09-10 0:00	2010-09-15 0:00	35	0.02	0.94
4	event 4	2011-08-16 0:00	2011-08-22 0:00		0.04	0.92
5	event 5	2012-07-05 0:00	2012-07-11 0:00		0.61	0.89
6	event 6	2013-07-14 0:00	2013-07-20 0:00		0	0.87
7	event 7	2016-07-04 0:00	2016-07-10 0:00	75	0.33	0.73
8	event 8	2017-07-02 0:00	2017-07-08 0:00		0.91	0.73

Fig. 1. Study Area Including Validation Points in 2016~2017

2.2 유출자료의 공간확장개념

지표면에 내린 강우는 지표면 유출, 중간유출, 지하수유출로 나뉘어 유역 출구 지점까지 흘러간다. 일반적으로 지표면 유출에 대해서 유출해석을 시행하며 지표면 유출은 여러 가지 인자에 의해 영향을 받는다. 영향을 주는 인자는 수문학적 관점으로 기후학적 인자와 지형학적 인자로 분류할 수 있다. 기후학적 인자는 강우, 증발, 강우 강도, 강우 지속시간 등을 의미하며 지형학적 인자는 유역면적, 유역의 방향성(강우분포), 유역의 형상, 투수능 등을 의미한다. Singh (1997)은 이러한 인자의 공간분포가 유출에 큰 영향을 미치는 것을 밝혀냈다. 강우의 이동 방향이 유출의 흐름 방향과 같을 때 최대 침투유량이 발생하였고, 일정한 강우 패턴보다 변동하는 강우 패턴에서 더 많은 침투유량이 발생하였다. 이것은 강우의 공간적인 분포가 유출에 상당한 영향을 미치는 것을 의미한다. Nassif and Wilson (1975)은 침투능 및 사면 경사와 유출 사이의 관계를 분석하였다. 유출은 식생이 분포된 토지보다 그렇지 않은 토지에서 더 많게 나타났으며, 사면경사가 급할수록 유출이 많아지는 것으로 나타났다. 특히 지하수 함양률의 공간적인 분포는 유출에 대해 지배적인 것으로 나타났다(Singh, 1997). 이것은 침투능, 사면 경사, 기저 유량 등과 같은 인자의 공간적인 분포에 따라 유출이 변화하는 것을 의미한다. 유출자료의 산정 및 분석을 하는 데 있어서 유출은 유효우량과 매우 밀접한 관련이 있으므로 유출에 영향을 주는 인자에 대한 공간적인 해석은 매우 중요하다. 따라서 유출자료를 공간확장하기 위해서는 유효우량을 매개변수로 설정하여 최적화하는 과정이 필요하다.

2.3 저류함수모형

저류함수모형(Storage Function Method, SFM)은 강우-유출의 비선형성과 자연상태에서 발생하는 홍수유출의 부정류를 고려하여 해석할 수 있다. 따라서 산지가 많은 충주댐 유역에 대해 저류함수모형을 적용하였다. 저류함수모형은 유역의 저류방정식과 하도의 저류방정식에 기초를 두고 있다. 유역의 저류방정식은 Eq. (1)과 같다.

$$s = kq^p \quad (1)$$

여기서 s 는 유역의 저류량, q 는 유역의 유출량이며, k 와 p 는 유역의 물리적 특성을 나타내는 저류 상수이다. Kimura (1961)는 저류함수모형에 수정 puls 방법을 혼합하여 유출고를 계산하였다.

$$(r_e(t - T_l) - q(t)) = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (2)$$

$$r_e(t - T_l) = \begin{cases} f_1 r(t - T_l), & \sum r(t - T_l) \leq R_{sa} \\ r(t - T_l), & \sum r(t - T_l) \geq R_{sa} \end{cases}$$

여기서, $r(t)$ 는 시간 t 에 대한 유역에 내린 단위유입량(mm/h), r_e 는 초과우량(mm/h), $q(t)$ 는 단위유출고, f_1 은 일차유출률, T_l 는 지체시간(hr), R_{sa} 는 포화우량(mm/h)이다. 하도의 저류방정식은 Eq. (2)와 같다.

$$I - O = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (3)$$

여기서 I 는 유입량, O 는 유출량, Δt 는 시간 변화량, ΔS 는 저류의 변화량이다. 즉, 시간변화량에 따른 저류변화량은 유입량과 유출량의 차이와 같음을 의미한다. 본 연구에서는 K-water에서 개발한 저류함수법 기반의 COSFIM 모델로 유출자료를 모의하였다.

3. 방 법

3.1 홍수유출자료의 공간확장방법

홍수량 산정 및 홍수해석에 있어서 강우의 공간분포를 고려한 유량산출은 필수적이다(Kim and Shin, 2017). 전체 강우량이 같은 경우 강우의 공간분포를 고려해서 해석한 것과 고려하지 않은 것의 유출 수문곡선 및 침투유량의 크기는 다르게 나타날 수 있기 때문이다(Singh, 1997). 그러므로 강우의 공간분포는 홍수량 산정 및 홍수해석에 큰 영향을 주며 이는 곧 수자원 설계에 직접적인 영향을 미치기 때문에 강우의 공간분포가 유출에 미치는 영향에 대한 정량적인 분석이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 공간분포를 고려하여 미세측유역의 유출자료를 생성하기 위해 유출자료 공간확장방법을 사용하였다. 유출자료 공간확장방법은 계측유역의

관측유출자료로 추정된 매개변수를 미계측유역에 적용하여 저류함수모형 기반의 모의유출자료를 생산하는 방법이다. 유출자료 공간확장방법의 개념은 다른 연구에서 사용된 적이 있다. 이전의 연구에서는 어느 한 유역의 유출 출구 지점을 기준으로 유역에 대한 최적의 매개변수를 추정하여 모의한 유출을 관측유출에 최대한 유사하게 만드는 방법을 사용하였다(Bae and Chung, 2000; Kim et al., 2008, Chung et al., 2012). 다른 연구에서는 어느 한 유역을 중소규모 단위로 나누고 관측유출자료를 이용하여 각 소유역에 대한 최적의 매개변수를 추정한 뒤, 이 매개변수로 각 소유역의 유출량을 산정하는 방법을 사용하였다(Kim et al., 2013). 최근에는 지역회귀모형의 설명변수에 수문모형의 매개변수를 추가하여 회귀모형의 적합성을 향상한 하이브리드 지역화 모형으로 미계측유역의 유출자료를 생성하기도 하였다(Kim et al., 2018). 이처럼 공간자료확장방법은 계측 가능한 유역의 관측 유출자료를 사용하여 미계측유역의 유량 자료를 생성할 수 있으며, 분할한 소유역의 매개변수를 추정하여 각 소유역의 유출량을 산정하므로 하나의 유역의 유출을 여러 개의 유출로 나누는 효과가 있다.

3.2 매개변수 최적화 및 검증 방법

관측유출자료와 모의유출자료의 차이를 비교하여 유출 자료 공간확장방법의 매개변수를 최적화하기 위해 Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE; Nash and Sutcliffe, 1970)를 사용하였다. NSE는 모의값을 관측값과 비교하여 타당한 매개변수를 추정하는 목적함수이다. 모의값의 정확도를 정량적으로 설명할 수 있으며, 수문 분야에서 매개변수 보정 및 적절성 검정을 할 수 있어 목적함수로 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 사용한 매개변수는 물리적 매개변수(k, p, T)와 사상중심 매개변수(f_i, R_{ss})로 구분하지만 모든 공간적 매개변수를 고려하여 유출을 모의하기에는 현실적으로 어려운 부분이 있으므로 물리적 매개변수(k, p, T)와 f_i (유출률)을 고정하였다. 그리고 목적함수 NSE를 기준으로 R_{ss} (포하우량)를 시행착오법으로 보정하여 최적화하는 절차를 밟았다.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{m=1}^n (Q_m^t - Q_o^t)^2}{\sum_{m=1}^n (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad (4)$$

여기서 $\bar{Q}_o$ 는 관측유량의 평균, Q_m^t 은 t 시간에서 모의 유량 자료, Q_o^t 은 t 시간에서 관측유량, n 은 총시간 수이다. NSE는 $-\infty \leq NSE \leq 1$ 의 범위를 가지며 1은 모의값이 관측값에 일치하는 것을 의미한다. NSE 한계값은 보통 $0.5 < NSE < 0.65$ 로 보고 있으며, 본 연구에서는 NSE가 0.5 이상인 경우를 적절한 범위로 가정하였다(Moriasi et al., 2007; Ritter and Muñoz-Carpena, 2013).

산정한 충주댐 유역의 모의유출자료에 가장 적합한 홍수량 산정 방법을 찾기 위해 Pearson correlation coefficient

(Pearson's r)과 Root Mean Square Error(RMSE, 평균제곱근 오차) 검증방법을 사용하였다. Pearson's r 과 RMSE는 다음과 같다.

$$\text{Pearson's } r = \frac{\sum XY - (\frac{\sum X \sum Y}{n})}{\sqrt{[\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{n}][\sum Y^2 - \frac{(\sum Y)^2}{n}]}} \quad (5)$$

여기서 X, Y 는 각 변수의 변량, n 은 변량의 개수다. r 은 $-1 \leq r \leq 1$ 의 범위를 가진다. +1에 가까울수록 양의 상관관계, -1에 가까울수록 음의 상관관계, 0은 상관관계가 존재하지 않는 것을 의미한다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2} \quad (6)$$

여기서 N 은 자료의 개수, M 은 예측값, O 는 관측값을 의미한다. RMSE의 검증값은 0에 가까울수록 관측값과 예측값이 서로 유사한 것을 의미한다. RMSE는 두 표본의 인과관계를 고려하지 않고 모의값과 관측값 사이의(또는 표본 사이) 차이만을 비교하기 때문에 유형이 다른 자료의 비교는 유효하지 않다(Hyndman et al., 2006). 따라서 RMSE로 검증하기 전에 Pearson's r 을 사용하여 두 표본 사이에 상관성을 확인하였다. 본 연구에서는 유출자료 공간확장방법으로 산정한 모의유출자료와 홍수량 산정 방법 사이에 상관성을 확인하기 위해 Pearson's r 로 검증하였으며, 모의유출자료에 가장 정확도가 높은 홍수량 산정 방법을 찾기 위해 RMSE를 사용하였다.

3.3 지역최대홍수량(Regional Maximum Flood, RMF)

홍수지형학자 Horton (1932, 1945)과 Strahler (1952, 1964)은 유출과 직접적으로 관련이 있는 물리적 특성을 조사한 결과 하천길이, 하천순서, 유역면적, 유역경사, 채널경사, 조도 계수 등의 매개변수가 유출에 중대한 영향을 미치는 것을 확인하였다. Kovacs (1988)는 이 결과를 바탕으로 침투유량이 유역면적 및 유역 특성에 대해 상관성을 나타낸 Q_{RMF} 식을 제안하였다. Q_{RMF} 식은 수문학적으로 동질한 유역에 대해 최대 침투유량을 추정하여 주어진 지역의 예상 침투유량을 정의하는 곡선을 산출하는 식이다(Pegram and Parak, 2004).

$$Q_{RMF} = 10^6 \left(\frac{A}{10^8} \right)^{1-0.1K} \quad (7)$$

여기서 Q_{RMF} 는 지역최대홍수량(m^3/s), A 는 유역면적(km^2), K 는 유역의 지질학적 특징, 지형형태, 식생의 분포, 유역 경사 등 유역의 특성을 나타내는 무차원 계수다. K 값은 유역마다 다르며 같은 유역이어도 유역을 분할하거나 시간

이 지남에 따라 유역 특성이 변화하면 K값도 변할 수 있다. 또한, 건설교통부에서 제시한 비유량법을 추가하여 비교하였다. 비유량법은 유량을 직접 측정할 수 없는 유역을 선정하여 단위면적에 대한 평균유출고를 산정하여 유량을 추정하는 방법으로 미계측유역의 첨두홍수량을 산정하기 위하여 사용한다. 비유량법 공식은 다음과 같다.

$$q = 11.25 \frac{1}{A^{0.25}} \quad (8)$$

여기서 q 는 단위면적당 연평균최대홍수량($m^3/sec/km^2$), A 는 유역면적(km^2)이다. Fig. 2에 미계측유역의 유출자료를 생성하기 위한 전반적인 과정을 나타냈다. 홍수량의 추정에 있어서, 평균유출자료가 최대유출자료에 비해 낮게 나타나기 때문에 각 사상을 평균을 내어 하나의 사상으로 나타내면 홍수량을 추정하는 목적에 적절하지 않을 수 있다. 따라서 평균유출자료가 아닌 최대유출자료를 사용하여 홍수사상을 평가하였으며, 유출량이 가장 많은 연도를 기준으로 홍수발생가능성을 추정했다. 또한, 유출자료 공간확장방법으로 생성한 모의 유량을 비홍수량으로 변환하여 Q_{RMF} 및 비유량법과 비교하였으며, 충주댐 유역의 K값을 계산하는 절차를 밝히 홍수발생가능성을 추정할 수 있는지 확인하였다.

4. 결과 및 분석

4.1 홍수유출자료의 공간확장방법

각 유역에서 유출자료 공간확장방법을 활용하여 생성된 모의 유량으로 유역과 채널 사이의 홍수추적방법(Flood Routing)을 통해 최대 75개 유역에 대한 유출량을 산출하였다. 최적화된 R_{sa} 와 충주댐 기준(유역출구지점)의 NSE 값을

Table 1에 나타냈다. Fig. 3은 2008년의 충주댐, 삼육교, 장평교, 평창, 주천, 영춘 수위관측소를 대표로 하여 관측유량자료와 모의유량자료를 나타낸 그래프이다. 삼육교 및 장평교 수위관측소에서는 실제관측유량자료에 비해 과소평가하여 모의된 것을 볼 수 있다. 특히 장평교는 전체적으로 모의자료가 관측자료보다 적게 평가되었다. 영춘은 첨두부분에 관측자료보다 많게 모의되었으며, 가장 하류에 위치한 충주댐 수위관측소는 관측유량에 가깝게 적절히 모의된 것으로 나타났다. 이것은 유출자료 공간확장방법을 이용한 모의유량의 추정은 적절하다는 것을 의미한다. 하지만 수위관측소 대부분에서 초기기간의 모의 유량을 대체로 모의하지 못하는 것으로 나타났다. 이는 기저유량을 고려하지 않고 모의했기 때문에 초기시간에 대해 과소평가한 것으로 보인다. 따라서 선행 강우에 따른 기저유량 자료를 적용한다면 기존의 모의 유출자료보다 적절한 결과가 나올 것으로 판단하였다.

Fig. 4는 충주댐, 영월, 영춘에서 모든 분석 기간의 관측 유량과 모의 유량의 비교를 나타낸 그래프이다. NSE값은 충주댐, 영월, 영춘에서 각각 0.53, -0.46, 0.48을 나타내어 영월과 영춘에서 0.5보다 작은 값이 나타나 적절하지 않았지만, 영춘은 이상점(outlier)의 영향으로 보고 적절하다고 판단하였다. 상위 유역에서 기준에 못 미치게 모의가 되었지만 유량은 유역 출구 지점으로 집중된다는 점을 참작하여 가장 하류에 위치하는 유역 출구 지점인 충주댐에서 0.53으로 만족하였으므로 유출자료 공간확장방법을 적용한 모의유출자료 산정은 적절하다고 판단하였다. 또한, 모의유출자료의 첨두발생시간이 실제 유역의 특성과 유사한 것으로 나타났다. Fig. 5는 모의유출자료의 유효우량 시작부터 첨두유량 발생까지의 시간을 나타낸 그래프이며, 유역면적이 커질수록 첨두발생시간이 지연되는 실제 유출자료와 유사한 모의 유출자료의 특성을 볼 수 있었다.

Fig. 2. Research Process Using Runoff Data Spatial Extension Method

Fig. 3. The Hydrograph of Runoff Using Spatial Extension Method

Fig. 4. Comparison Between Observation Runoff Data and Calculation Runoff Data

Fig. 5. Time to Peak of Runoff Data on Watershed Area

유출자료 공간확장방법을 이용하여 생성한 모의유출자료를 비홍수량으로 변환하여 Fig. 6과 같이 나타냈다. Fig. 6은 2009, 2010, 2016년의 비홍수량을 나타내는 그래프이다. 가로축은 유역면적(km^2)이며 세로축은 유출량(m^3)을 유역면적(km^2)으로 나눈 비홍수량(mm/h)이다. 점은 각 유역의 모의유출자료, 점선은 모의비홍수량의 경향성, 가는 실선은 모의비홍수량의 최대치 경향성을 나타낸다. 수자원설계시 침투홍수량을 기준으로 설계하므로 홍수량의 최소치는 표시하지 않았다. Fig. 6을 보면 유역이 하류에 위치할수록(유역면적이 커질수록) 비홍수량이 작아지고 분포가 좁아지는 것을 확인할 수 있었으며, 유역면적과 비홍수량의 power law 관계를 확인할 수 있었다. 이 특징은 강우분포가 유역 전체에 걸쳐 불균질하고 강우 강도가 일정하지 않을 때 유역별로 유출량의 차이가 나타나게 되어 비홍수량의 분포가 좁아지는 현상이다. 즉, 자연적인 강우가 내릴 경우 일반적인 유출로 나타나는 현상이므로 산정한 유출자료는 실제 유출과 유사한 것으로 보았으며, 유출자료 공간확장방법을 적용하여 산정한 유출자료는 적절하게 모의되었다고 판단했다.

4.2 비홍수량 및 Q_{RMF} 을 이용한 홍수발생가능성 추정

충주댐 유역의 최근 유출 경향성을 분석하기 위해 2008~

2009년, 2010~2013년, 2016~2017년의 Q_{RMF} 와 모의유출자료를 비홍수량으로 변환하여 Figs. 7 및 8에 나타냈다. 실선은 Q_{RMF} K값을 2의 간격을 두어 도시한 Q_{RMF} 의 비홍수량이다. 최대모의비홍수량과 Q_{RMF} 의 비홍수량에 대해 비교하기 위해 유출량이 가장 많은 2010~2013년 기간을 선정하였다. 피어슨 상관계수와 RMSE의 평가 결과를 Table 2에 나타내었다. 피어슨 상관계수를 이용하여 평가한 결과 Pearson's r 은 거의 1에 근접하여 모의비홍수량의 최대치 추세선과 Q_{RMF} 곡선은 서로 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 비유량법 또한 Pearson's r 이 0.9이상으로 최대모의비홍수량과 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 특히 RMSE 비교를 이용하여 분석한 결과 $Q_{\text{RMF}}(K=5)$ 의 RMSE는 1.941로 $Q_{\text{RMF}}(K=5)$ 일 때 최대모의비홍수량과 가장 일치하는 것으로 나타났다. 비유량법의 RMSE는 3.556으로 최대모의비홍수량과의 유사성은 $Q_{\text{RMF}}(K=5)$ 보다 작았다. 이것은 비유량법을 이용한 방법보다 Q_{RMF} 를 이용할 때 충주댐 유역의 유출 경향성을 더 적절하게 대표할 수 있는 것을 의미한다.

Q_{RMF} 를 이용하여 충주댐 유역의 유출량 경향성을 적절하게 표현할 수 있기 때문에 충주댐 유역의 홍수발생가능성을 평가하기 위하여 Q_{RMF} K값을 추정하였다. 모든 연도 및 유역을 분석한 결과 유역에 따라 K값이 변동하는 것으로

Fig. 6. Generated Specific Flood Graph of Flow Data Using Spatial Data Extension Method

Fig. 7. Average Specific Flood and Specific Flood of Q_{RMF}

Fig. 8. Maximum Specific Flood and Specific Flood of Q_{RMF}

Table 2. Estimation Results for Pearson Correlation Coefficient and RMSE in Choongju Watershed

Verification Method	K											Specific Flood Method
	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	5	5.1	5.2	5.3	5.4	
Pearson's r	0.998	0.998	0.997	0.996	0.996	0.995	0.994	0.994	0.993	0.992	0.991	0.999
RMSE	4.99	4.47	3.90	3.29	2.67	2.14	1.94	2.33	3.25	4.53	6.09	3.56

나타났다. 사면 경사, 침투성, 기저유량 등과 같은 유역 특성이 유역마다 다르므로 K값이 변하는 것으로 보았다. 하지만 K값이 증가할수록 최대유출량도 증가하기 때문에 최대 K값으로 홍수발생가능성을 추정할 수 있다고 판단하였다. 추정 결과 2013년 자료의 27번 유역(4786.1 km²)에서 5.298에 해당하는 최대 K값이 발생하였다. 이때 유출량은 9308.94 m³/s로 비홍수량으로 변환하였을 때 7 mm/h로 나타났다. 최근 기상 이변 현상으로 국지성 호우가 증가하는 추세이며 유역면적과 비홍수량은 power law 관계(Kim et al., 2017)를 가지고 있으므로 유역면적이 작아질수록 최대침투유량의 발생 가능성이 높아지는 것은 사실이다. 따라서 충주댐 유역의 홍수발생가능성은 $Q_{RMF}(K=5.298)$ 로 추정했으며, 추정한 결과는 Table 3과 같다. 충주댐 유역 6661.5 km²에 대해서 10874.53 m³/s의 최대유출량이 발생하였으며, 이것은 5.88 mm/h의 강우가 충주댐 유역 전체에 내린 것과 같은 양이다.

5. 결 론

본 연구에서는 충주댐 유역에 대해 유출자료 공간확장방법을 적용하여 생성한 미세측유역 유량 자료의 적용 가능성 검토와 Q_{RMF} 를 이용하여 홍수발생가능성을 추정하는 방안을 제안하였다. 충주댐 유역의 2008~2017년에 대한 미세측유역의 유출자료를 산정하기 위해 최대 75개 유역을 소규모로 분할하여 유출자료 공간확장방법을 적용하였으며, 생성한 유량 자료를 유역과 채널의 홍수추적방법(Flood Routing) 관계를 이용하여 각 유역의 유출자료를 추출한 다음 비홍수량 자료로 변환하였다. 비홍수량과 유역면적의 관계와 특성

을 분석하였으며, Q_{RMF} 와 비교를 통해 홍수발생가능성을 전망하였다. 그 결과를 다음과 같이 정리하였다.

유출자료 공간확장방법을 적용하여 생성한 유출자료는 전체적으로 관측유출자료와 비슷하게 모의되었으나 기저유량을 고려하지 않았기 때문에 초기시간에서 과소평가하는 경향이 나타났다. 유역면적이 커질수록 비홍수량 분포가 좁아지며, 유역면적 대비 비홍수량이 작아지는 power law 관계가 성립하였다. 또한, 유역 출구 지점인 충주댐에서 NSE 기준을 만족하여 모의유출자료가 관측유출자료와 유사하다는 것을 확인할 수 있었다. 모의유출자료에 대해서 유역면적이 넓어질수록 침투발생시간이 지연되는 실제 유역의 특성과 유사한 것으로 나타났다. 따라서 유출자료 공간확장방법으로 충주댐 유역의 유출자료를 산출하는 방법은 적합하였으며, 미세측유역의 유출자료 생성 가능성 및 활용 가능성이 있는 것으로 나타났다.

Q_{RMF} 비홍수량과 비유량법에 대해 피어슨 상관계수로 평가한 결과 모두 모의비홍수량과 상관관계가 있는 것으로 나타났다. RMSE로 평가한 결과 비유량법보다 Q_{RMF} 를 이용한 방법에 더 일치하는 것으로 나타나 충주댐 유역의 홍수량 추정은 비유량법보다 Q_{RMF} 를 이용한 방법이 더 적합하였다. 충주댐 유역의 K값은 $Q_{RMF}(K=5.298)$ 로 산출되었으며, 산출한 K값으로 충주댐 유역의 홍수발생가능성을 추정할 수 있었다.

Q_{RMF} 로 충주댐 유역의 홍수발생가능성을 추정할 수 있었지만, 이를 절대적 기준으로 활용하기에 다소 무리가 있을 수 있다. 그러나 본 연구에서 제시한 Q_{RMF} 홍수량 추정방법과 다른 홍수량 추정방법의 조합으로 홍수 발생 가능성의

Table 3. Possible Flood Occurrences at Choongju Dam Watershed Using $Q_{RMF}(K=5.298)$

No.	Area (km ²)	Q_{RMF} (m ³ /s)	Q_{RMF} (SF, mm/h)	K	No.	Area (km ²)	Q_{RMF} (m ³ /s)	Q_{RMF} (SF, mm/h)	K
S1	120.73	1650.08	49.20	5.298	S39	375.19	2812.09	26.98	5.298
S2	214.04	2159.86	36.33		S40	517.81	3272.01	22.75	
S3	291.78	2498.56	30.83		S41	533.73	3318.93	22.39	
S4	167.85	1926.59	41.32		S42	607.34	3526.78	20.90	
S5	547.19	3358.02	22.09		S43	1594.14	5551.62	12.54	
S6	149.42	1824.06	43.95		S44	1616.19	5587.59	12.45	
S7	352.11	2729.39	27.91		S45	1655.30	5650.76	12.29	
S8	973.38	4402.41	16.28		S46	93.25	1461.40	56.42	
S9	241.21	2284.69	34.10		S47	1773.37	5836.81	11.85	
S10	451.69	3068.46	24.46		S48	4273.73	8826.33	7.43	
S11	1693.69	5712.00	12.14		S49	133.46	1729.72	46.66	
S12	109.41	1575.44	51.84		S50	255.61	2347.83	33.07	
S13	229.96	2233.96	34.97		S51	97.43	1491.85	55.12	
S14	1792.32	5866.05	11.78		S52	495.25	3204.19	23.29	
S15	1834.70	5930.86	11.64		S53	4786.05	9308.89	7.00	
S16	121.94	1657.84	48.94		S54	4897.95	9410.60	6.92	
S17	188.52	2034.71	38.86		S55	4974.65	9479.60	6.86	
S18	224.93	2210.85	35.38		S56	5087.86	9580.42	6.78	
S19	2137.01	6371.80	10.73		S57	5102.08	9593.00	6.77	
S20	102.85	1530.30	53.56		S58	116.53	1622.84	50.14	
S21	2282.40	6572.06	10.37		S59	5281.84	9750.45	6.65	
S22	2293.71	6587.35	10.34		S60	137.04	1751.38	46.01	
S23	128.07	1696.51	47.69		S61	5435.00	9882.38	6.55	
S24	2447.82	6791.86	9.99		S62	95.41	1477.22	55.74	
S25	56.84	1157.95	73.34		S63	5550.38	9980.46	6.47	
S26	105.36	1547.75	52.88		S64	5583.12	10008.10	6.45	
S27	143.61	1790.37	44.88		S65	5679.01	10088.55	6.40	
S28	267.16	2397.13	32.30		S66	5826.73	10211.09	6.31	
S29	402.46	2906.41	26.00		S67	114.58	1610.02	50.59	
S30	86.29	1409.07	58.79		S68	153.78	1848.90	43.28	
S31	30.88	869.17	101.33		S69	324.27	2625.72	29.15	
S32	102.64	1528.84	53.62		S70	137.59	1754.68	45.91	
S33	696.94	3762.50	19.43		S71	482.92	3166.44	23.60	
S34	806.74	4030.42	17.99		S72	540.23	3337.87	22.24	
S35	888.00	4216.44	17.09		S73	114.95	1612.46	50.50	
S36	123.96	1670.70	48.52		S74	53.70	1127.42	75.58	
S37	191.03	2047.40	38.58		S75	6661.50	10874.53	5.88	
S38	305.49	2553.09	30.09						

* SF - Specific Flood

정확도를 더 향상할 수 있을 것으로 생각한다. 충주댐 유역에 대해 공간확장방법으로 미계측유역의 유출자료를 모의할 수 있었던 것처럼 다른 유역에서도 공간확장방법으로 미계측유역의 유출자료를 모의할 수 있을 것으로 보이며, 다양한

미계측유역의 유출자료 분석에 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 아울러 본 연구에서는 유출자료 중심으로 진행됐지만 추후에 강우의 공간분포를 고려한 홍수유출자료의 생성으로 모의유출자료의 품질을 향상할 수 있을 것으로 기대하는

바이머, RMSE 이외의 IOA, MBD, PBIAS 등의 모의자료 검증 방법을 병행하여 모의유출자료의 신뢰도를 높일 수 있을 것으로 보고 있다.

감사의 글

본 연구는 2017년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 이공학 개인기초연구지원사업의 지원을 받아 수행된 것임(NRF-2017R1D1A3B03033585). 저류 함수 모형을 제공하여 주신 수자원공사 물관리센터에 감사드립니다.

References

- Bae, D.H., and Chung, I.M. (2000). Development of stochastic-dynamic channel routing model by storage function method. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 33, No. 3, pp. 341-350.
- Chae, B.S., Choi, S.J., Ahn, J.H., and Kim, T.W. (2018). Estimation of flood quantile in ungauged watersheds for flood damage analysis based on flood index of natural flow. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 38, No. 1, pp. 175-182.
- Chung, G., Park, H.S., Sung, J.Y., and Kim, H.J. (2012). Determination and evaluation of optimal parameters in storage function method using SCE-UA. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 11, pp. 1169-1186.
- Goswami, M., O'connor, K.M., and Bhattarai, K.P. (2007). Development of regionalisation procedures using a multi-model approach for flow simulation in an ungauged catchment. *Journal of Hydrology*, Vol. 333, No. 2-4, pp. 517-531.
- Horton, R. (1932). Drainage basin characteristics. *Eos Transactions. American Geophysical Union*, Vol. 13, pp. 350-361.
- Horton, R. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 56, No. 3, pp. 275-370.
- Hyndman, R.J., and Koehler, AB. (2006). Another look at measures of forecast accuracy. *International Journal of Forecasting*, Vol. 22, No. 4, pp. 679-688.
- K-water. (2012). *Korea's dam*. pp. 243-244.
- Kim, B.J., Kawk, J.W., Lee, J.H., and Kim, H.S. (2008). Calibration and estimation of parameter for storage function model. *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 28, No. 1B, pp. 21-32.
- Kim, N.W., Jung, Y., and Lee, J.E. (2013). 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.
- Kim, N.W., and Shin, M.J. (2017). Experimental study of rainfall spatial variability effect on peak flow variability using a data generation method. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 50, No. 6, pp. 359-371.
- Kim, Y.I., Seo, S.B., and Kim, Y.O. (2018). Development of a hybrid regionalization model for estimation of hydrological model parameters for ungauged watersheds. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 51, No. 8, pp. 677-686.
- Kimura, T. (1961). *Storage function methods for flood routing*. Research Institute of Japan Civil Engineering, pp. 89-96, 203-209.
- Korea River Association. (2016). Chapter 02: Investigation on the frequency of domestic stream design. In *Determination of proper frequency design of Local Stream in Chungcheongnam-do province*. Retrieved from http://www.prism.go.kr/homepage/entire/retrieveEntireDetail.do?research_id=6440000-201700039
- Kovacs. Z. (1988). Regional maximum flood peaks in Southern Africa. Technical Report No. 137, Department of Water Affairs, Pretoria, Republic of South Africa.
- Kwon, K.D., Lee, J.H., Kang, M.J., and Jee, H.K. (2014). Effect of estimation for time of concentration on the design flood. *Journal of Wetlands Research*, Vol. 16, No. 1, pp. 125-137.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs. (2012). *Design flood calculation tips*.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., and Veith, T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, Vol. 50, No. 3, pp. 885-900.
- Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.
- Nassif, S.H., and Wilson, E.M. (1975). The influence of slope and rain intensity on runoff and infiltration. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 20, No. 4, pp. 539-553.

- Park, J.Y., Shin, C.D., and Lee, J.S. (2004). A study on the critical duration of design rainfall in midsize catchment. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 37, No. 9, pp. 695-706.
- Pegram, G., and Parak, M. (2004). A review of the regional maximum flood and rational formula using geomorphological information and observed floods. *Water SA*, Vol. 30, No. 3, pp. 377-392.
- Pontius, R., Thontteh, O., and Chen, H. (2008). Components of information for multiple resolution comparison between maps that share a real variable. *Environmental and Ecological Statistics*, Vol. 15, No. 2, pp. 111-142.
- Ritter, A., and Muñoz-Carpena, R. (2013). Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *Journal of Hydrology*, Vol. 480, No. 1, pp. 33-45.
- Singh, V.P. (1997). Effect of spatial and temporal variability in rainfall and watershed characteristics on stream flow hydrograph. *Hydrological Processes*, Vol. 11, pp. 1649-1669.
- Sivapalan, M., Takeuchi, K., Franks, S.W., Gupta, V.K., Karambiri, H., Lakshmi, V., et al. (2003). IAHS decade on predictions in ungauged basins (PUB), 2003-2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 48, No. 6, pp. 857-880.
- Strahler, A.N. (1952). Hypsometric (Area-altitude) analysis of erosional topology. *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 63, pp. 1117-1142.
- Strahler, A.N. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In V.T. Chow (Ed.), *Handbook of Applied Hydrology* (pp. 439-476). New York: McGraw-Hill.
- Tofiq, F.A., and Guven, A. (2014). Prediction of design flood discharge by statistical downscaling and general circulation models. *Journal of Hydrology*, Vol. 517, No. 19, pp. 1145-1153.
- Vogel, R.M., Wilson, I., and Daly, C. (1999). Regional regression models of annual streamflow for the United States. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 125, No. 3, pp. 148-157.
- Willmott, C., and Matsuura, K. (2006). On the use of dimensioned measures of error to evaluate the performance of spatial interpolators. *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 20, pp. 89-102.

Received	February 8, 2019
Revised	February 18, 2019
Accepted	March 26, 2019