

모의조건에 따른 홍수 유출자료의 공간적 확장 영향분석 Simulation Conditions based Characteristics of Spatial Flood Data Extension

김 남 원* / 정 용** / 이 정 은***
Kim, Nam Won / Jung, Yong / Lee, Jeong Eun

Abstract

The effects of initial conditions and input values of the rainfall-runoff model were studied in the applications of a lumped concept model for flood event data extension. For the initial conditions of the rainfall-runoff model, baseflow effects and spatial distributions of saturation points (R_{sa}) for the storage function methods (SFM) were analyzed. In addition, researches on the effects of rainfall data conditions as input values for the rainfall-runoff model were performed. The Chungju Dam watershed was selected and divided into 3 catchments including smaller size of 22 sub-catchments. The observed discharge and inflow amounts at Yeongwol 1, Chungju Dam, and Yeongwol 2 water level stations were individually operated as criteria for flood data extension in 30 flood events from 1993 to 2009. Direct and base flow were distinguished from a stream flow. In order to test capability of flood data extension, obtained base flow was applied to the rainfall-runoff model for three water level stations. When base flow was adopted in the model, the Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) was increased. The numbers of over satisfaction for model performance (>0.5) were increased over 10%. Saturation points (R_{sa}) which strongly influence the runoff amount when rainfall starts were optimized based on the runoff amount at three water level stations. The sizes of saturation points for three locations were similar which means saturation point size is not depending on the runoff amount. The effects of rainfall information for flood runoff were tested at 2002ev1 and 2008ev1. When increased the amount of rainfall information, the runoff simulations were closer to the simulations with full of rainfall information. However, the size of improvement was not substantial on rainfall-runoff simulations in terms of the size of total amount of rainfall.

Keywords : rainfall-runoff model, baseflow, saturation point, rainfall information, data extension

요 지

일괄형¹⁾ 수문모형(Lumped Model)을 활용한 홍수 유출자료의 공간확장에 영향을 미치는 강우-유출모형의 초기조건과 입력자료의 영향에 대해 연구하였다. 강우-유출모형의 초기조건으로는 기저유량 정보의 모형모의에 대한 영향과 저류함수법의 포화우량(R_{sa})의 공간분포에 대한 분석을 실시하였으며, 강우-유출모형의 입력자료로서 강우정보의 영향을 자료의 유무에 관련한 과거자료의 조건을 중심으로 그 영향을 분석하였다. 이를 위해 충주댐유역을 선정하였으며, 충주댐 유역을 대규모유역으로 정하고 이를 기준으로 3개 중규모유역과 22개의 소규모유역으로 구분하였다. 영월1, 충주댐, 영월2의 수위관측소를 70년대 수문자료 유무에 따라 중심 수위관측소로 선정하였으며 이들을 개별적 중심축으로 삼고 1993년부터 2009년까지 30개의 홍수사상을 이용해 홍수유출자료 확장의 특성을 분석하였다. 관측유출을 직접유출과 기저유출로 분류하고 산정된 기저유출을 강우-유출모의에 적용하였다. 기저유출의 적용 유무 조건하에서 세 곳의 수위관측소를 중심으로 각각의 자료 확장성을 파악하였다. 기저유출을 고려한 모의시 Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) 값은 모의 만족범위를 넘어서는 사상이 10% 이상 증가되었다. 강우에 대한 초기 유출의 양을 결정하는 포화우량(R_{sa})의 분포는 세 곳 수위관측소의 유량값을 중심으로 중권역의 포화우량(R_{sa})을 최적화 하는 경우, 중권역의 최적화된 포화우량(R_{sa}) 값은 큰차이를 보이지 않으며 포화우량(R_{sa}) 분포가 강우사상과 유출량의 크기분포에 큰 영향을 받지 않았다. 홍수 유출자료의 강수자료 영향은 30개의 홍수사상 자료에서 자료의 이상치를 제외한 17개 홍수사상을 이용해 검증하였으며 강우자료가 많아질수록 오차 범위가 줄어들음을 보였다. 하지만, 전체 홍수사상의 규모에 비해 그 영향이 크지 않은 것으로 파악되었다.

핵심용어 : 강우-유출모형, 기저유출, 포화우량, 강우정보, 공간확장

* 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, 한국건설기술연구원, 수자원연구실, 연구원 (e-mail: yjung@kict.re.kr, gpic0126@gmail.com, Tel: 82-31-9100-475)

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

*** 한국건설기술연구원, 수자원연구실, 수석연구원 (jeus22@kict.re.kr)

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

¹⁾Lumped에 대한 번역에는 집중형, 집체형, 총괄형 등이 이용되기도 한다.

1. 서 론

수자원의 운영관리, 수공구조물 설계에 사용되는 홍수빈도 해석은 유출자료 중에서 홍수량자료만을 이용한다(Zrinji and Burn, 1994; Crochet, 2012). 더욱이 홍수의 공간적 해석은 홍수방어, 침수, 설계, 수자원의 운영 등에 매우 중요하며, 이는 홍수발생 해석공간의 다양성을 활용하여 홍수빈도치의 공간적인 정보를 얻을 수 있다. 이를 위한 홍수량자료는 정상성을 가정하고, 자료기록기간이 길어야 해석의 정밀성을 얻는다(Kirby and Moss, 1987). 또한 유역규모에 따라 유역의 특성을 나타내기 위해 유역내 여러 지점의 충분한 기간 자료가 필요하다(Petrow and Merz, 2009). 이는 실측 홍수자료의 중요성을 보이는 것이다.

현재 우리나라는 인구가 밀집되고 산업이 급진적으로 발전함으로써 수자원의 운영관리, 설계 등에서도 고도화된 기법이 요구된다(Kim and Won, 2004). 그러나 우리나라의 경우는 실측된 홍수량자료가 부족하며 실측자료가 존재 하더라도 대부분 단기간의 자료를 보유하고 있으며 신뢰성과 정상성이 부족하다(Yoon, 2011; Lee et al., 2013). 이로 인해, 홍수빈도 분석의 정확한 정보를 얻을 수 없고 공간적인 해석이 불가능하며 이에 따라 수자원의 운영관리 및 범람해석은 물론 수공구조물의 규모까지도 크게 흔들리고 있는 실정이다(Jung and Yoon, 2003). 더욱이 국내 자료 형태의 불완전성으로 인해 국내의 연구 및 기술개발 방향도 국지적이고 지점에 관련된 해석이 많다. 이에 따라 우리나라 대부분의 수자원 해석 척도는 외국의 공간 해석자료를 활용하는 실정이다.

이에, Kim et al. (2013)은 홍수자료의 공간확장이라는 새로운 개념 및 모식을 도입하여 강우-유출모형을 이용할 경우 홍수량자료를 공간적으로 확장할 수 있음을 제시한 바 있다. 이 개념은 국내외에서 개발된 분포형 강우-유출모형을 이용할 경우 모형의 구동성만으로 미계측유역의 홍수량을 발생할 수 있음을 나타내었다(Choi et al., 2010). 따라서 홍수자료의 공간확장 개념은 분포화된 강우-유출모형을 이용한다는 제약성과 한 개 이상의 관측된 자료가 유역내에 존재해야한다는 가정을 내포하고 있다. 그러나 국내의 경우 만족할 만한 분포형모형이 부족하기에, Kim et al. (2013)은 우리나라 한강홍수통제소에서 홍수예경보 모형으로 사용 중인 저류함수법을 이용하여 충주댐 유역에 대한 홍수자료의 공간확장 개념을 적용하였다. 저류함수법은 일괄형모형이기에 이를 분포형 모형처럼 소유역의 특징을 나타낼 수 있도록 분포화하느냐가 문제가 되고 이를 해결하기 위한 여러 가지 절차 즉, 매개변수 지역화

와 유역자료의 일관성을 위한 매개변수의 안정화가 홍수자료의 공간확장 개념의 주요한 골자가 되었다. 일괄형모형을 분포화시킬 경우, 강우-유출모형의 매개변수 지역화는 물론, 유역내 공간에서의 각종 입력력자료의 일관성이 중요함을 알 수 있었으나, 이에 대한 제반사항을 Kim et al. (2013)은 충분히 증명하지 못하였다고 할 수 있다. 실제로 충주댐 유역의 홍수자료 공간확장 상황은 자료의 오류 또는 미관측 등으로 인해 홍수자료의 공간확장 개념과 강우유출관계 이외에도 많은 문제가 노출되어 있다. 예를 들어, 유출검정지점의 변화와 강우관측소의 밀도 변화에 따른 유역내 유출초기치의 이상성이 공간확장 모의자료에 미치는 영향을 검토할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 공간확장 모의 방법에서 강우자료의 변동성과 모의 기준지점의 변화, 그리고 유역의 초기치가 공간확장 유출자료에 미치는 영향에 대해서 검토함으로써, 공간확장의 신뢰성을 확보하고, 그 개념을 좀 더 구체화하고자 한다. 이를 위해서 먼저 Kim et al. (2013)이 제안한 홍수유출자료의 공간확장개념과 공간확장에 영향을 미치는 인자들에 대한 평가를 구체화하려 한다. 특히, 기저유출량에 대한 변화특성, 강우밀도의 영향, 그리고 저류함수법의 초기매개변수인 포화우량(R_{sat})의 영향을 고찰하고자 한다.

2. 홍수 유출자료 공간확장

Kim et al. (2013)이 제시한 홍수자료의 공간확장 개념과 특성 분석을 위한 배경과 연구 절차는 아래와 같다. 기존에는 미계측유역의 유출자료를 얻기 위해서는 여러 단위 유역의 유출자료를 중심으로 각각의 유역에 대한 수문지형학적 특성을 분석하고 이를 지리학적으로 근접한 유역에 수문학적 동질성 및 유역영역 흐름여건이 동일하다는 전제 조건을 가지는 미계측 유역의 자료를 예측하였다(Benson, 1962; Zrinji and Burn, 1994; Bloschl and Sivapalan, 1995; Bardorssy, 2008). 하지만, 새롭게 제시된 방법은 홍수 유출자료의 예측을 위한 방법이 아닌, 과거 유출자료를 기준으로 강우-유출모형을 통해 미계측 유역에 발생한 홍수유출 자료를 생산해 내는 방법이다. 이를 통해 얻어진 미계측 유역의 홍수유출 자료는 미계측 유역의 홍수 피해 저감을 위한 설계와 같은 작업에 사용될 수 있다.

홍수 유출자료의 공간확장의 절차는 강우-유출모형을 모의하는 동안 하나의 큰 유역을 중소규모 유역으로 나누고 소유역 각각에 필요한 매개변수들을 최적화 하는데, 이는 지정된 한 지점의 측정된 유출량을 기준으로 이루어

진다. 최적화 된 매개변수들 중에 수문지형학적 특성과 연관된 매개변수들(k, p, T)은 선택된 유역의 수문지형학적 인자들과의 상관관계를 통하여 유역을 대표할 수 있는 매개변수 안정화를 실시하였다. 안정화된 매개변수들을 소유역에 적용하고 강우사상에 좌우되는 매개변수(f_i, R_{ss})는 홍수사상마다 최적화 하여 미계측 유역의 강우에 대한 유출량을 산정하였다. 매개변수의 안정화는 한 지점의 변화가 다른 지점의 변화에 대해서 일관된 변화를 가질 수 있게 하는 것이며, 이를 간략하게 식으로 표현하면 Eqs. (1) and (2)로 나타낼 수 있다.

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

$$\varepsilon_1 \cong \varepsilon_2 \cong \dots \cong \varepsilon_n \quad (2)$$

여기서, ε_i : 측정값 O 와 모의값 C 의 차이의 상대 에러, n : 소유역의 총수

이번 연구에서는 수문지형학적 특성과 연관이 있는 매개변수들은 Kim et al. (2013)에서 얻어진 안정화식을 사용하여 모든 홍수사상의 모의에 적용하였으며 저류함수 모델로는 한국수자원공사에서 개발한 COSFIM모델(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2005)을 기반으로 하였다. 안정화 식은 아래 Eqs. (3)~(5)와 같다. 수문지형학적 특성, 즉 유역면적(A), 하천길이(L), 유역형상계수(FF), 유역 평균경사(WAS), 하천경사(RS)이 충주댐의 저류함수 매개변수 안정화 식에 사용되었다.

$$k = -6.544 \ln(FF) - 52.91RS^{0.8} + 28.096 \quad R^2 = 0.68 \quad (3)$$

$$p = 0.07FF + 3.69RS + 0.38 \quad R^2 = 0.78 \quad (4)$$

$$T_i = 0.11L - 0.06 \quad (5)$$

안정화식 이후로, 강우사상마다 달라지는 매개변수의 최적화는 강우관측값이 강우-유출 모의를 위해 충분한 정보를 보유하고 있으며 선택된 유역의 최종유출지점의 관측 유출량을 보유하고 있다는 전제조건을 가지고 있다. 하지만, 선택된 충주댐유역의 경우 1970년대에는 강우정보가 현재보다 충분하지 않으며 최종 유출지점인 충주댐 유입량이 존재하지 않기 때문에 이에 대한 홍수 유출자료 공간확장의 영향을 분석할 필요가 있다. 이는 기존 연구자들에 의해 주장된 입력 자료로서의 강우자료의 중요성 (Andreassian et al., 2001; Oudin et al., 2006; Kuczera et al., 2006)이 홍수자료 공간확장에 어떤 영향을 미치는지 보기 위함이다. 또한 홍수자료의 공간확장에 영향을 미칠 유역내 강우와 지표면 상태와의 관계의 중요성 (Andreas-

sian, 2004; Norbiato et al., 2008; Manus et al., 2008; Oudin et al., 2008; Brocca et al., 2013; Samuel et al., 2012) 또한 검증할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 홍수 유출자료의 공간적 확장의 개념은 같으나 다양한 조건, 즉 유역 최종지점의 유출량이 존재 하지 않은 상황과 강우량 정보의 유무상황에 대한 충주댐 유역의 홍수 유출자료의 공간적 확장방법을 제시하고 그의 영향을 나타낼 것이다.

이를 기반으로 첫째, 관측기저유량의 영향에 대해 분석하였다. Samuel et al. (2012)도 언급하였듯이 기저유출량은 강우-유출 모의에 큰 영향을 주어 홍수피해 저감에 중요한 요소이므로, 이번 연구에서는 하천흐름에서 직접유출과 기저유출을 구분하고 결정된 기저유출의 양을 저류함수법의 기저유출로 적용하고 모의된 최종 유출량을 비교 하였다. 둘째, 결정된 기저유출 값을 기반으로 Kim et al. (2013)이 가정으로 세운 포화우량의 유역내 공간적인 분포에 대한 검증과 셋째, 강우 분포의 영향을 과거자료를 기반으로 확장 가능성 여부를 검증하고자 하였다. Fig. 1은 이를 간략하게 설명하는 순서도이다.

3. 홍수사상과 연구대상지역

홍수 유출자료의 확장에 대한 특성 분석을 위해 본 연구에서는 충주댐 유역을 선정하였다. Kim et al. (2013)은 충주댐 유입 관측값을 중심으로 1990년부터 2009년까지의 충주댐 유역의 홍수 유출자료 공간 확장을 보였다. 이는 충주댐 유입량 자료가 1985년 이후로 존재하기 때문이었다. 만일, 충주댐 유역의 홍수 유입자료를 70년대 자료까지 공간확장 하려면 충주댐 유입량이 아닌 다른 지역의 유출량을 기준으로 선정하여야 한다. 충주댐 유역에 존재하는 수위관측소는 37곳이며 70~80년대의 수문곡선식을 보유하고 있는 곳은 영월1과 영월 두 지점이다. 영월의 경우 1917년부터 시간 수위자료가 존재 하지만 측정연도가 꾸준하지 않다. 특히 70년대 자료의 경우는 1970년 일년 수위자료만을 보유하고 있어 1975년부터 적용이 가능한 강우자료의 활용성을 고려하면 영월은 홍수자료 공간확장을 위한 기준자료로서 부적합하다. 하지만, 영월1은 1975년부터 꾸준히 시간 수위자료를 확보하고 있어 홍수자료 공간확장을 위한 기준점으로 선정하였다. 이는 선정된 유역의 홍수 유출자료의 공간확장을 위해 유역의 최종 유출지점을 기준점으로 공간확장을 하는 개념을 벗어나 유역내 다른 지점을 선정하여도 홍수 유출자료의 공간확장을 위해 사용될 수 있음을 보이는 실험이기도 하다.

충주댐 유역의 주요 하천 흐름은 간략하게 두 개의 상

류흐름이 어느 중간지점을 중심으로 합류하는 형상을 나타내고 있다(Fig. 2). 충주댐 유역은 세 개의 중권역으로 분류할 수 있으며 이 세 개의 중권역은 충주댐 중권역, 남한강 상류 중권역, 평창강 중권역이다. Fig. 2의 c)가 이를 간략하게 나타내는 그림이며 남한강 상류 중권역은 영월1 수위관측소(B)를 대표지점으로 볼 수 있으며 남한강 상류

중권역은 영월2 수위관측소(C)가 이 중권역의 대표 수위관측소로 볼 수 있다. Fig. 2의 b)에서 나타나듯이 (B)와 (C) 수위관측소의 경우는 충주댐(A)의 상류지점에 위치하고 있으며, 수위관측소 (B)와 (C)는 같은 하천위에 존재하는 것이 아니다. 하지만, 충주댐을 중심으로 홍수 유출자료를 확장하면 충주댐의 유입량과 (B)와 (C) 수위관

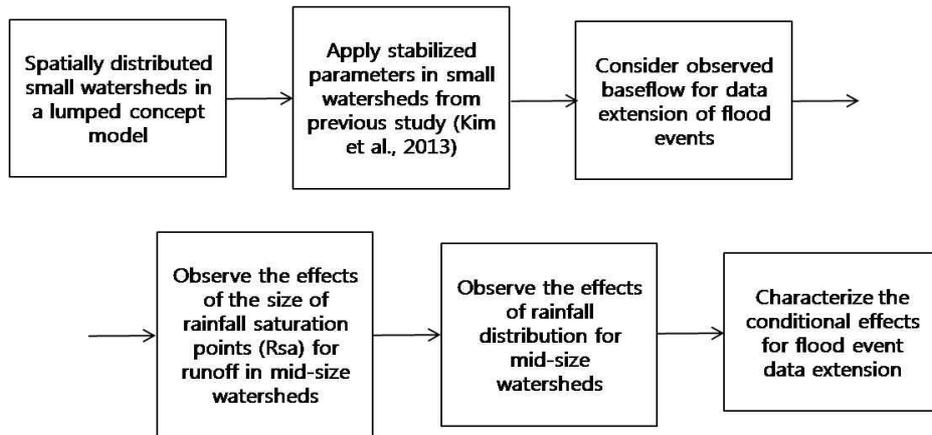


Fig. 1. Procedure of Characterization of Spatial Extension using a Lumped Concept Model

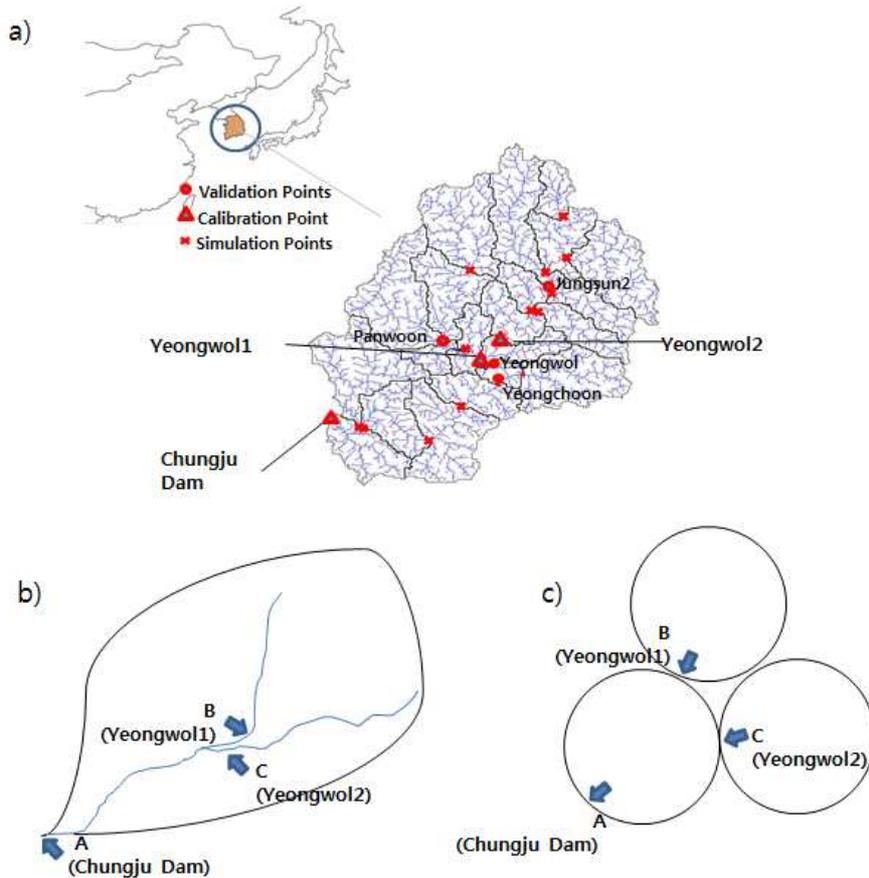


Fig. 2. Schematics of the Chungju Dam Watershed

측소의 자료 사이에 상관계수가 주어지지만, (B)를 중심으로 홍수 유출자료를 공간 확장하면 (C)수위관측소와는 상관계수가 줄어들 가능성이 있어 세 곳을 중심으로 최적화하여 포화우량(R_{ss})의 분포를 알아보는 포화우량(R_{ss}) 공간 분포 연구부분에서 설명하도록 하겠다. 또한, 영월1을 기준으로 홍수 유출자료의 공간 확장성을 보이며 홍수 유출자료 공간확장의 또 다른 특성인 공간 확장 중심점의 전환(충주댐, 영월1, 영월2)이 끼치는 영향에 대해서도 알아보았다.

4. 홍수 유출자료 확장에 대한 초기자료 및 매개변수의 영향

4.1 기저유량의 영향

1993년부터 2009년까지의 30개의 홍수사상을 선정하여

그 홍수 사상을 영월1, 충주댐, 영월2를 중심으로 최적화하여 홍수 유출자료의 확장성을 파악하였다. Table 1은 홍수사상에 대해 기저유출을 고려할 때와 고려하지 않을 때의 Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE, Nash and Sutcliffe, 1970) 값을 나타내고 있다. 이는 기저유출을 고려할 때와 고려하지 않을 때의 홍수 유출자료 공간확장의 효율성을 비교하기 위한 것이다. 이곳에서 사용한 NSE는 관측치와 모의치를 일대일 비교를 통해 시스템에서의 모의치와 관측치의 근접 정도를 나타내는 지표이며 그의 범위는 $-\infty$ 에서 1까지이다. NSE 값이 1이면, 모의치가 관측치에 정확하게 일치하는 것을 나타낸다. Eq. (6)은 NSE값을 보인다. 기저유출의 분류는 선정된 유량관측소 홍수사상의 초기유출량을 기준으로 수평직선 분리법을 활용하였다. 선정된 기저유출은 저류함수에 대입되었으며 선정된 사상의 전체 기간 동안에 동일한 값으로 적용되었다. 영월1을 중심으로 홍수량자

Table 1. Flood Events with the Comparisons with or Without Baseflow Consideration (Greens at events: big differences of initial flow amount, Oranges at w/baseflow: observations with malfunction)

Events		Event Period		NSE					
				w/o Baseflow			w/ Baseflow		
				YW1	CJ	YW2	YW1	CJ	YW2
1	1993ev1	1993-07-13 1:00	1993-07-14 21:00	0.91	0.93	0.93	0.99	0.92	0.95
2	1993ev2	1993-08-09 19:00	1993-08-11 18:00	0	0	0.47	-2.32	0.28	0.78
3	1996ev1	1996-07-20 8:00	1996-07-25 7:00	0.93	0	-0.01	0.91	0	-0.02
4	1996ev2	1996-07-26 6:00	1996-07-30 0:00	0.62	0	0.59	0.71	0	0.85
5	1997ev1	1997-07-01 0:00	1997-07-03 13:00	0	0.66	0.98	-8.99	0.56	0.95
6	1997ev2	1997-07-15 4:00	1997-07-18 16:00	0.45	0.4	0.92	0.45	0.39	0.94
7	1997ev3	1997-08-03 6:00	1997-08-06 18:00	0.71	0.28	0.92	0.61	0.25	0.94
8	1998ev1	1998-08-08 3:00	1998-08-10 11:00	0.34	0	0.23	-0.26	0.66	0.37
9	1999ev1	1999-08-01 16:00	1998-08-05 20:00	0.86	0.93	0.95	0.97	0.93	0.96
10	1999ev2	1999-09-19 9:00	1999-09-26 11:00	0.78	0.78	0.96	0.8	0.78	0.95
11	2002ev1	2002-08-05 16:00	2002-08-09 6:00	0.91	0.98	0.93	0.97	0.99	0.95
12	2002ev2	2002-08-30 21:00	2002-09-02 1:00	0.93	0.96	0.35	0.95	0.94	-2.75
13	2003ev1	2003-07-21 15:00	2003-07-26 16:00	0.79	0.04	0.84	0.82	0.03	0.93
14	2003ev2	2003-08-27 10:00	2003-08-30 14:00	0.9	0.78	0.57	0.94	0.4	0.9
15	2003ev3	2003-09-11 23:00	2003-09-14 12:00	0.37	0.67	0.75	0.72	0.79	0.76
16	2004ev1	2004-06-18 23:00	2004-06-22 18:00	0.62	0.92	0.96	-9.54	0.95	0.98
17	2004ev2	2004-07-14 21:00	2004-07-19 1:00	0.45	0.68	0.07	0.85	0.93	0.9
18	2004ev3	2004-08-17 23:00	2004-08-20 22:00	0.48	0.83	0.91	0.59	0.87	0.97
19	2005ev1	2005-06-30 8:00	2005-07-03 6:00	0.92	0.87	0.79	0.75	0.9	0.9
20	2006ev1	2006-07-14 5:00	2006-07-20 0:00	0.88	0.94	0.78	0.85	0.98	0.65
21	2006ev2	2006-07-27 6:00	2006-07-31 11:00	0.7	0.93	0.94	0.95	0.95	0.96
22	2007ev1	2007-08-03 13:00	2007-08-14 1:00	0.6	0.74	0.94	0.83	0.77	0.95
23	2007ev2	2007-08-26 16:00	2007-09-11 7:00	-0.54	0.4	0.79	0.15	0.46	0.85
24	2007ev3	2007-09-14 10:00	2007-09-19 15:00	0.69	0.82	0.93	0.9	0.82	0.84
25	2008ev1	2008-07-23 18:00	2008-07-28 8:00	0.9	0.89	0.92	0.92	0.95	0.98
26	2009ev1	2009-07-09 0:00	2009-07-11 12:00	0.83	0.59	0.88	0.76	0.52	0.91
27	2009ev2	2009-07-11 16:00	2009-07-14 5:00	0.96	0.59	0.32	0.96	0.97	-3.42
28	2009ev3	2009-07-13 18:00	2009-07-16 17:00	0.77	0.31	-0.1	0.65	0.91	0.63
29	2009ev4	2009-07-17 13:00	2009-07-20 21:00	-1.94	0	0.62	0.53	0.58	0.89
30	2009ev5	2009-08-11 10:00	2009-08-14 9:00	0.89	0.84	0.93	0.89	0.67	0.94

료를 확장하는 경우, 영월1의 초기유출량을 영월1을 중심으로 하는 평장강 중권역의 면적으로 나누어 면적에 따른 유출량의 비를 확보하고 전체 유역에 대해 면적기법을 활용하여 초기유출량으로 적용하였다.

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{obs\ mean})^2} \right] \quad (6)$$

여기서, Y_i^{obs} 는 i 번째의 관측값, Y_i^{sim} 은 i 번째의 모의값, 그리고 $Y^{obs\ mean}$ 은 관측값의 평균값을 나타낸다.

Table 1에서 보듯이 기저유출의 양의 차이가 나타나지 않는 홍수사상에 대해서는 NSE값의 변화가 크지 않으나 초기유출량이 기저유출량으로 인해 차이를 보이고 있는 홍수사상(진한 회색, 9개 사상: 1993ev2, 1998ev1, 2003ev2, 2003ev3, 2004ev2, 2004ev3, 2007ev2, 2009ev3, 2009ev4)에 대해서는 NSE값이 크게 개선되었다. 이를 막대그래프로 나타내면 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. Fig. 3에서 보듯이 자료의 공간 확장성을 확보하기 위해 선택한 수위관

측소(영월1, 충주댐, 영월2)에서의 최적화 후 얻어진 NSE 값들을 비교해 보면 기저유출을 고려하는 것이 고려하지 않는 것 보다 홍수유출량을 나타내는 영향이 큰 것을 볼 수 있다. 영월1과 충주댐, 영월2를 중심으로 공간확장 모의를 실시하는 경우는 NSE 모의값이 0.5 이상(모델모의의 만족범위, Moriasi et al., 2007)으로 나타나는 것이 모든 수위관측소에서 10%가량 증가하였다. 또한 유입 및 유출량의 초기치의 차이가 많은 경우의 모의 NSE 값은 영월1에서의 몇몇 사상(1993ev2, 1998ev1, 2009ev3)을 제외하고는 모든 곳에서 현저하게 NSE값이 증가하는 것을 보인다. 영월1의 세 사상 NSE값이 개선되지 않은 이유는 관측유출값의 오차가 주요 원인이다. Fig. 4의 경우는 기저유출을 고려하였을 때 관측된 최대 유량값과 계산된 최대 유량값의 비를 1:1에 비추어 본 그림이다. 좌측에 있는 그림은 기저유출을 고려하지 않은 비교이며 우측은 기저유출을 고려한 비교이다. 이는 기저유출을 고려하는 것이 홍수량 유출의 자료 확장에 필수적임을 보인다. 기저유출을 고려하지 않은 경우의 계산 유량은 관측유량보다

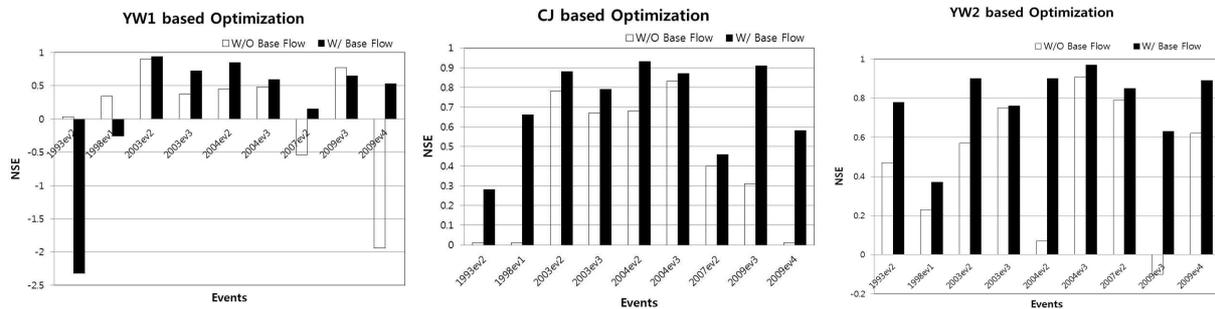


Fig. 3. NSE Comparisons with Baseflow Consideration for Flood Data Extension

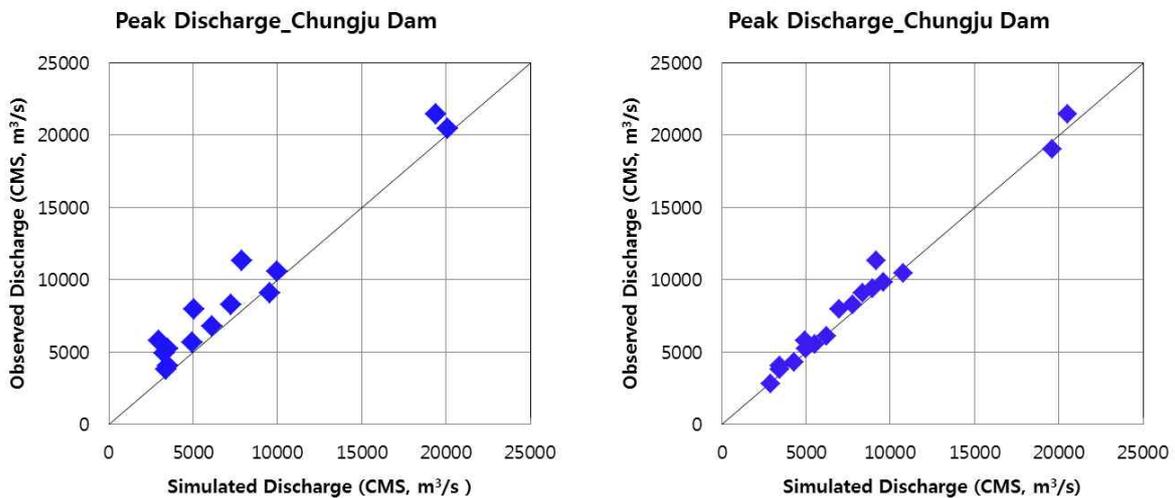


Fig. 4. Peak Discharge Comparison between Observed and Simulated Discharges at Chungju (Left: w/o baseflow, Right: w/ baseflow)

전체적으로 작게 모의되는 양상이다. 이는 기저유출량의 영향 때문에 계산유량 조정이 가능한 R_{sa} 의 한계를 넘어서는 양의 유출이 발생한다. Fig. 4의 홍수 사상들은 관측 유출량과 계산된 유출량의 차이를 나타내는 NSE값이 0.8 이상인 경우를 전제로 한다. Table 1 우측에 있는 지지유출을 고려한 NSE값(w/baseflow)은 관측값에 이상이 있는 사상들에 대해서 회색으로 강조하였다.

4.2 홍수 유출자료와 포화우량(R_{sa})

안정화하여 고정한 매개변수(k, p, T)를 배경으로 자료의 공간확장에 영향을 미칠 수 있는 포화우량(R_{sa})에 대해 각 수위관측소를 중심으로 최적화 하여 포화우량의 분포를 조사하였다. 이는 수문 지형학적인 특성과 관련이 있어 안정화한 매개변수들(k, p, T)과는 다르게 매번 발생하는 홍수사상 마다 변화하며 홍수사상의 유출량에 가장 밀접하게 관련이 있는 유출상수 (f_i, R_{sa})들 중 하나를 선정하여 영향을 분석한 것이다. 이는 Jeong et al. (2008)이 보인 일차유출율 (f)과 포화우량값(R_{sa})의 상호보완적인 관계를 감안하여 일차유출율의 값을 고정하고 공간적인 변화가 작은 포화우량값(R_{sa})의 홍수사상마다의 분포에 대해 분석하였다.

Kim et al. (2013)이 주장한 포화우량값(R_{sa})이 균등하게 분포하고 있다고 하는 가정 하에서는 한 곳의 포화우량값(R_{sa})만을 획득하여도 그것을 기준으로 홍수 유출자

료를 강우-유출모형을 활용하여 얻을 수 있을 것이다. 포화우량값(R_{sa})의 공간적인 분포를 파악하기 위해 Table 1에 나타나 있는 홍수사상을 기준으로 영월1, 충주댐, 영월2의 관측값에 대해 매 사상마다의 관측값 오차가 있는 것을 제외하고 나머지를 활용하였다. 이는 각각 세 곳의 관측유출량을 중심으로 홍수사상 자료를 확장할 때 각각의 장소를 기준으로 R_{sa} 를 조정하여 R_{sa} 분포를 파악하였다. 또한, 최종값들에 의한 다른 중권역의 유출량에 대한 영향을 파악하였다. 이때 각각의 관측값을 기준으로 얻어진 최고의 NSE값들을 바탕으로 R_{sa} 값들을 얻고 다른 지역의 최종 R_{sa} 분포를 비교하여 차이가 큰 경우 R_{sa} 값을 조정하여 조정전과 후(Before or After Adjusted)로 Table 2에 나타내었다.

조정전의 R_{sa} 값들을 보면 많은 홍수사상에서 공간적으로 큰차이를 보이지 않는 R_{sa} 를 관찰할 수 있다. 한 예로, 2005ev1, 2006ev1, 그리고 2009ev3는 각각의 장소를 중심으로 유출량을 최적화 하였을 경우에 R_{sa} 값의 차이가 <10 미만으로 작은 차이를 보이고 있다. 이는 R_{sa} 의 분포는 홍수사상의 크기에 따라 크게 차이를 나타내지 않으며 한 시스템 내의 중권역에서는 포화우량의 크기가 현저한 차이를 갖지 않는다고 볼 수 있다. 하지만, 이에 반해 큰 R_{sa} 의 차이를 보이는 경우 이들 세 곳의 R_{sa} 값을 서로 만족하는 값으로 조정하였으며 그에 따른 NSE값의 변화를 보았다. 따라서 R_{sa} 의 값의 조정이 없는 사상은 Table 1에

Table 2. R_{sa} Distribution Based on Stabilized Parameters

Events	Before Adjusted						After Adjusted						
	Rsa			NSE			Rsa			NSE			
	YW1	CJ	YW2	YW1	CJ	YW2	YW1	CJ	YW2	YW1	CJ	YW2	
1	1993ev1	65.4	20.4	20.4	0.99	0.92	0.95	65.4	65.4	65.4	0.99	0.9	0.92
2	1999ev2	97.8	84	84	0.8	0.78	0.95	97.8	97.8	97.8	0.8	0.63	0.84
3	2002ev1	76.2	100.7	100.7	0.97	0.99	0.95	76.2	76.2	76.2	0.97	0.99	0.93
4	2003ev2	62.3	5	9.6	0.94	0.4	0.9	32.1	32.1	32.1	0.81	0.82	0.62
5	2003ev3	47.1	5	5	0.72	0.79	0.76	54.1	54.1	54.1	0.73	0.53	0.54
6	2004ev2	125	5	5	0.85	0.93	0.9	60	60	60	0.57	0.84	0.5
7	2004ev3	150	75	75	0.59	0.87	0.97	100	100	100	0.58	0.88	0.89
8	2005ev1	5	12.3	12.3	0.75	0.9	0.9	5	5	5	0.75	0.79	0.83
9	2006ev1	5	2.5	2.5	0.85	0.98	0.65	5	5	5	0.85	0.98	0.85
10	2006ev2	128.1	12.7	12.7	0.95	0.95	0.96	57.2	57.2	57.2	0.81	0.78	0.72
11	2007ev1	222.3	60.4	60.4	0.83	0.77	0.95	134.5	134.5	134.5	0.7	0.68	0.74
12	2007ev3	131.9	71.8	71.8	0.9	0.82	0.84	86.1	86.1	86.1	0.6	0.6	0.85
13	2008ev1	78.7	104.1	104.1	0.92	0.95	0.98	82.2	82.2	82.2	0.92	0.93	0.96
14	2009ev1	90.7	33.5	33.5	0.76	0.52	0.91	71.4	71.4	71.4	0.53	0.57	0.92
15	2009ev3	0.5	5	5	0.65	0.91	0.63	0.5	0.5	0.5	0.65	0.87	0.66
16	2009ev4	108.1	5	5	0.53	0.58	0.89	94.1	94.1	94.1	0.5	0.21	0.51
17	2009ev5	117.1	124.8	124.8	0.89	0.67	0.94	97.4	97.4	97.4	0.81	0.61	0.65
Average					0.82	0.81	0.88				0.74	0.74	0.76

서 보이는 NSE값과 동일한 값을 보인다. R_{sw} 값을 조정하여 구한 홍수 유출자료 공간확장은 NSE값의 큰 변화를 보이지 않고 전체적으로 NSE값이 개선되는 경향을 보이고 있다. 1993ev1의 경우는 영월1을 기준으로 R_{sw} 를 조정하였을 경우 충주댐과 영월2의 유입 및 유출량에 대한 NSE값은 0.02와 0.03 정도의 감소를 나타내고 큰 차이를 나타내지 않고 있어 충주댐과 영월2의 R_{sw} 값을 20.4가 아닌 65.4로 사용하여도 홍수 유출자료를 확장하는데 큰 영향을 미치지 않을 것으로 보인다. 2006ev2와 2007ev1의 경우는 각각의 수위자료 위치를 중심으로 R_{sw} 를 구했을 때 그 값의 차이가 현저하게 나타나고 있다. 이를 NSE값에 가장 적게 영향을 주는 R_{sw} 값을 찾아서 NSE를 구하면, 각각을 중심으로 NSE값을 얻었을 때 보다 작아지는 NSE값을 보이지만, 이 값들 또한 Moriasi et al. (2007)이 주장한 모델의 만족범위에 대한 모델평가 기준(NSE>0.5)의 범주를 넘는 값을 보이고 있다.

4.3 홍수 유출자료에 대한 강우자료의 영향

지금까지 본 연구에서는 홍수 유출자료의 공간확장을 위한 초기값의 영향을 설명하기 위해 1990년대 초반부터 그 이후의 자료를 중심으로 강우관측소와 강우-유출 모의를 위한 자료가 풍부한 조건하에서 홍수 유출자료의 공간 확장을 보였다.

홍수 유출자료의 공간확장을 더욱더 확보하기 위해서 강우자료가 풍부하지 않은 조건인 1970년대의 자료 상황의 홍수 유출자료 공간확장에 대한 영향을 파악할 필요가 있다. 충주댐 유역에는 2010년 현재 총 51개의 강우관측소를 보유하고 있으며 국토교통부와 한국수자원공사, 두 기관이 관리하고 있다. 본 연구에서는 수자원공사의 관리하에 있는 34개의 강우관측소의 자료를 중심으로 강우관측소의 유무에 따른 유출량의 변화를 보였다. 1970년대와

1980년대의 강우관측 자료의 유무를 중심으로 세 개의 시나리오로 만들었으며 이를 자료가 충분한 90년 이후(1993~2009)의 자료 17개의 홍수 사상에 적용하여 각각의 시나리오에 의한 유출량 산정에 대한 영향을 보았다. 시나리오1은 1970년대의 강우관측소를 이용하였으며 총 강우관측소의 수는 11개의 강우관측소가 세 개의 중권역에 고루 분포하고 있다. 두 개의 상류 중권역을 대표하는 각각의 유량관측소인 영월1과 영월2의 강우관측소의 수는 각각 3개씩을 보유하고 있다. 강우관측소 밀도를 살펴보면, 영월2의 강우관측소 한 개가 훨씬 넓은 유역의 강우량을 측정하는 것으로 나타나고 있다. 시나리오2는 각각의 중권역에 서너 개의 강우관측소를 더해 21개의 강우관측소, 그리고 시나리오3은 22개의 강우관측소를 보유하고 있으며 강우관측값은 티센다각형법을 적용하여 유역평균강우량을 산정하였다.

강우관측소의 밀도에 따른 오차의 범위를 살펴보면, Table 3에서 보듯이 강우관측소의 수가 늘어날수록 average-root mean square error (A-RMSE)값이 줄어드는 것을 보이고 있다. 특히 시나리오1에서 시나리오2로의 변화는 A-RMSE값이 두 배의 차이를 보이며 변화하는 것을 보이고 있다. Table 3에 진하게 표시 되어 있는 영월2와 영월은 동일한 남한강 상류 중권역에 속하고 있으며 같은 중권역 속에서 다른 면적으로 같은 수의 강우관측소를 소유하므로 강우관측소 밀도가 다르게 나타나고 있다. 두 곳의 A-RMSE를 비교하면, 한 개의 강우관측소가 측정해야 할 면적이 클수록 A-RMSE값이 크게 나타나는 것을 보이고 있다(영월2<영월). 또한, 시나리오2와 3의 경우는 강우관측소 밀도가 변화하지 않는데도 A-RMSE가 개선되는 것을 보이는데 이는 다른 중권역의 늘어난 강우관측소 밀도의 티센가중치 영향으로 보인다.

Fig. 5는 17개의 홍수 사상 중에 두 개(2002ev1과 2008

Table 3. Average RMSE for Discharge Locations with Diverse Rainfall Observation Condition

Discharge Loc.	Average-RMSE (CMS, m ³ /s)			Density of Rainfall Obs. Loc. (Area/No. Obs.; Km ²)		
	S1	S2	S3	S1	S2	S3
Chungju Dam	190.51	122.11	103.41	604.36	316.57	302.18
Jungsun 2	110.30	47.51	43.30	559.77	279.88	279.88
Yeongwol 2	105.24	50.99	43.63	764.57	286.71	286.71
Panwoon	66.07	41.53	10.51	441.40	294.27	220.70
Yeongwol 1	114.93	51.21	29.64	536.63	321.98	402.48
Yeongwol	108.30	53.07	45.95	816.77	306.29	306.29
Yeongchoon	157.19	98.83	72.53	597.18	318.49	298.59

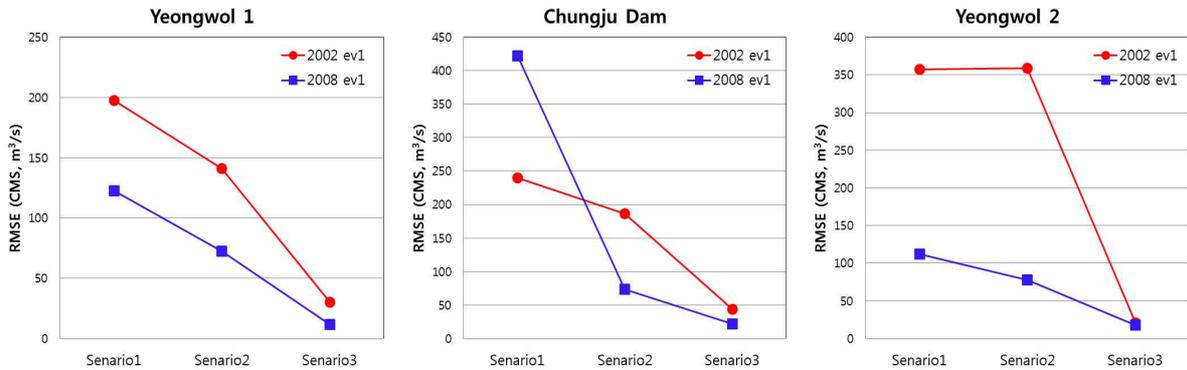


Fig. 5. RMSE at Three Discharge Locations for Two Flood Events

ev1)를 선별하여 강우의 영향을 세 곳의 유량관측소를 중심으로 표현하였다. 강우의 영향을 보기위해 RMSE를 각 시나리오와 전체 강우량을 활용하였을 때의 차이를 보여 주고 있다. 강우자료의 양이 증가하는 시나리오3이 시나리오1 보다 명백하게 두 홍수 사상에서 더 나은 모의를 수행하는 것을 볼 수 있다. 하지만, 관측유량과의 비교에 있어서 전체 강우 정보를 사용한 모의 값과의 비교와는 동일한 값이 나오지 않을 수 있으며 전체 홍수사상의 규모에 비해 오차가 크지 않을 수 있다. 따라서 시나리오1은 강우자료 전체를 포함하는 경우보다 모의 오차가 크게 나타날 수 있지만, 70년대 홍수 유출자료 공간확장을 위해 시나리오1과 같은 자료를 활용하여도 유출자료의 확장 부분에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 보인다. Fig. 5는 최종적으로 얻어진 충주댐에서의 유출량을 관측값과 비교한 그림이다.

5. 결 론

다양한 홍수사상 대응을 목적으로 하는 설계홍수량 산정 방법으로는 여러 접근 방법들이 제시되어 지고 있으며 그 중 가장 보편적으로 사용하는 방법은 홍수빈도해석방법과 강우-유출 모형을 활용하는 것이다. 이를 활용하기 위한 필수조건으로 많은 양의 홍수량 자료가 확보되어야 하며, 확보된 자료 또한 신뢰도가 높아야 한다. 하지만, 우리나라 개발도상국에서는 홍수 유출자료가 풍부하지 않으며 그 또한 신뢰성을 충족하지 못하는 경우가 많이 존재한다. 이러한 여건에서도 보유한 유출자료의 활용성을 높이는 홍수유출자료의 공간확장 개념을 Kim et al. (2013)은 제시하였다. 이번 연구에서는 홍수자료의 공간확장에 있어, 일관형 강우-유출 모형에 대한 초기치의 영향에 대해 파악하고 강우의 변화에 따른 영향을 파악하고

자 하였다.

모형의 초기 치로는 하천의 흐름에 큰 영향을 보이는 기저유량의 영향과 저류함수의 초기 지표흐름을 좌우하는 포화우량(R_{sat})의 영향을 분석하였다. 이를 위해서 기저유출량과 직접유출량의 차이를 구분하고 강우-유출모형에 직접 입력하여 기저유출의 영향을 분석하였다. 기저유출을 고려할 때와 고려하지 않을 때를 비교하면 기저유출을 고려할 때의 NSE 값이 모델의 만족 범의($NSE > 0.5$)를 포함하는 홍수 사상이 10%이상 향상되었다. 이는 세 곳의 중권역을 중심으로 홍수 유출자료 확장 시 모두 적용되는 것으로 파악되었다. 홍수유출과 포화우량(R_{sat})과의 관계를 보면 세 개의 중권역을 중심으로 포화우량을 최적화 하였을 경우, 몇몇 홍수사상에 대해서 한 시스템 내의 중권역내의 포화우량 크기의 차이가 < 10 으로 작게 나타나고 있어 홍수유출량에 가장 큰 영향을 미치는 포화우량(R_{sat})은 강우사상과 유출량의 크기와 연관이 작으며 중권역의 특성치로 구분할 수 있는 가능성을 보였다.

마지막으로, 강우 자료의 유무에 따른 홍수유출자료의 영향은 1970년대 충주댐 유역의 강우자료 존재를 기준으로 강우자료의 증가에 따른 홍수유출모의가 전체 강우자료를 보유하고 있을 때의 모의에 가까워지는 것을 보였다. 이는 강우자료의 증가가 홍수유출자료의 모의를 보강한다고 볼 수 있으나 충주댐의 경우 유출자료 변화의 크기가 홍수 유출자료의 최대치와의 비교를 볼 때 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보인다.

본 연구를 통해 기저유출에 대한 정보는 홍수 유출자료의 공간확장성을 확보하는데 중요한 요소이며 포화우량의 분포의 균일성을 통해 한 지역의 포화우량을 확보하고 이를 적용하면 자료가 넉넉하지 않은 과거자료의 공간적인 홍수 유출자료 확장성을 확보할 수 있음을 보였다. 또한, 강우 자료의 영향이 크게 나타나지 않아 70년대의 홍

수 자료의 공간확장 가능성을 보였다.

감사의 글

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

References

- Andreassian, V. (2004). "Waters and forests: from historical controversy to scientific debate." *J of Hydrology*, Vol. 291, pp. 1-27.
- Andreassian, V., Perrin, C., Michel, C., Usart-Sanchez, I., and Lavabre, J. (2001). "Impact of imperfect rain-fall knowledge on the efficiency and the parameters of watershed models." *J of Hydrology*, Vol. 250, pp. 206-223.
- Bardossy, A., and Singh, S.K. (2008). "Robust estimation of hydrological model parameters." *Hydrology and Earth System Sciences*. Vol. 12, pp. 1273-1283.
- 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, pp. 64.
- Bloschl, G., and Sivapalan, M. (1995). "Scale issues in hydrological modelling—a review." *Hydrol. Process*. Vol. 9, pp. 251-290.
- Brocca, L., Liersch S., Melone, F., Moramarco, and T., and Volk, M. (2013). "Application of a model-based rainfall-runoff database as efficient tool for flood risk management." *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Vol. 17, pp. 3159-3169.
- 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.
- Crochet, P. (2012). *Evaluation of two delineation methods for regional flood frequency analysis in northern Iceland*, Icelandic Meteorological Office. Report VI, Icelandic Meteorological Office, ISSN 1670-8261.
- Jeong, D.K., Jeon, Y.W., and Lee, B.H. (2008). "Improved Parameter Computation Method Applications of Storage Function Model for the Han River Basin." *J. of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 8, No. 2, pp. 149-158.
- Jung, J.H., and Yoon, Y.N. (2003). *Practical designs in water resources*, Goomibook, Seoul, pp. 2-3.
- Kim, N.W., and Won, Y.S. (2004). "Estimates of flood frequency in Korea." *J. of Korea Water Reso. Asso*, Vol. 37, No. 12, pp. 1019-1032.
- 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.
- Kirby, W.H., and Moss, M.E. (1987). "Summary of flood-frequency analysis in the United States." *J. of Hydrology*, Vol. 96, pp. 5-14.
- Kuczera, G., Kavetski, D., Franks, S., and Thyer, M. (2006). "Towards a bayesian total error analysis of conceptual rainfall-runoff models: Characterising model error using storm-dependent parameters." *J. of Hydrology*. Vol. 331, pp. 161-177.
- 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 Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 4, pp. 1361-1375.
- Manus, C., Anquetin, S., Braud, I., Vandervaere, J.-P., Creutin, J.-D., Viallet, P., and Gaume, E. (2009). "A modelling approach to assess the hydrological response of small Mediterranean catchments to the variability of soils characteristics in a context of extreme events." *Hydrol. Earth Syst. Sci*. Vol. 13, pp. 79-97.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2005). *Installation of integrated flood control system with dam operation in Han River Watershed*, Research Report, K-Water.
- 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.
- Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles." *J. of Hydrology*, Vol. 10, No. 3,

- pp. 282-290.
- Norbiato, D., Borga, M., Degli Esposti, S., Gaume, E., and Anquetin, S. (2008). "Flash flood warning based on rainfall thresholds and soil moisture conditions: an assessment for gauged and ungauged basins." *J. of Hydrology*, Vol. 362, pp. 274-290.
- Oudin, L., Andreassian, V., Lerat, J., and Michel, C. (2008). "Has land cover a significant impact on mean annual streamflow? An international assessment using 1508 catchments." *J. of Hydrology*, Vol. 357, pp. 303-316.
- Petrow, T., and Merz, B. (2009). "Trends in flood magnitude, Frequency and seasonality in Germany in the preiod 1951-2002." *J. of Hydrology*, Vol. 371, No. 1-4, pp. 129-141.
- Samuel, J., Coulibaly, P., and Metcalfe, R.A. (2012). "Identification of rainfall-runoff model for improved baseflow estimation in ungauged basins." *Hydrol. Process*. Vol. 26, pp. 356-366.
- Zrinji, Z., and Burn, D.H. (1994). Flood frequency analysis for ungauged sites using a region of influence approach. *J. of Hydrology*, Vol. 153, pp. 1-21.

논문번호: 14-021	접수: 2014.02.20
수정일자: 2014.04.09/05.08	심사완료: 2014.05.08