

집중형 수문모형을 활용한 홍수유출자료 공간적 확장성 분석

Spatial Extension of Runoff Data in the Applications of a Lumped Concept Model

김 남 원* / 정 용** / 이 정 은***

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

Abstract

Runoff data availability is a substantial factor for precise flood control such as flood frequency or flood forecasting. However, runoff depths and/or peak discharges for small watersheds are rarely measured which are necessary components for hydrological analysis. To compensate for this discrepancy, a lumped concept such as a Storage Function Method (SFM) was applied for the partitioned Choongju Dam Watershed in Korea. This area was divided into 22 small watersheds for measuring the capability of spatial extension of runoff data. The chosen total number of flood events for searching parameters of SFM was 21 from 1991 to 2009. The parameters for 22 small watersheds consist of physical property based (storage coefficient: k , storage exponent: p , lag time: T_l) and flood event based parameters (primary runoff ratio: f_s , saturated rainfall: R_{sa}). Saturated rainfall and base flow from event based parameters were explored with respect to inflow at Choongju Dam while other parameters for each small watershed were fixed. When inflow of Choongju Dam was optimized, Youngchoon and Panwoon stations obtained average of Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) were 0.67 and 0.52, respectively, which are in the satisfaction condition ($NSE > 0.5$) for model evaluation. This result is showing the possibility of spatial data extension using a lumped concept model.

Keywords : runoff data, spatial extension, lumped concept model

요 지

홍수빈도해석이나 홍수예측과 같은 홍수조절을 위한 필수적인 정보는 유출자료이다. 하지만, 소규모 유역의 경우 유출자료를 측정하지 않는 미계측 유역의 다지점 분석과 총량분석을 위한 정보가 너무 부족한 실정으로 이를 극복하기 위한 방안을 제시하였다. 이를 위해 본 연구에서는 집중형 모델인 저류함수법을 활용하여 충주댐유역을 세분화하여 적용하였다. 충주댐 유역은 22개의 소유역으로 분류하였으며 충주댐 수위관측소의 유출자료의 공간적 확장성을 검증하였다. 홍수사상은 1990년부터 2009년까지의 21개 홍수사상을 활용하여 한 곳(충주댐 유입량)의 자료를 중심으로 22개 소유역의 저류함수법의 수문지형학적 특성에 관여하는 매개변수(k, p, T_l)를 고정하고 홍수사상마다 달라지는(f_s, R_{sa})를 최적화 하며 22개 유역의 유출자료를 생산하였다. 교차검증 지점인 영춘과 판운 수위관측소의 평균 Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)는 충주댐의 유입량이 0.71을 나타낼 때 각각 0.67과 0.52를 나타내 유출자료의 확장성에 있어서 만족($NSE > 0.5$)하는 범위에 들어 집중형 모형을 활용한 유출자료의 확장가능성을 보였다.

핵심용어 : 홍수유출자료, 공간적 확장, 집중형 모형

* 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

** 고신저자, 한국건설기술연구원, 수자원연구실, 연구원 (e-mail: yjung@kict.re.kr, gpic0126@gmail.com, Tel: 031-9100-475)

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

수문기상요소의 시공간적 변화와 유역 특성의 변동으로 인한 홍수피해에 대처하기 위한 조치사항으로는 구조적인 대책과 비구조적 대책으로 나눌 수 있다. 구조적 대책은 하천제방이나 홍수조절 댐 등을 고려하는 것이며 비구조적 대책은 홍수예경보 등을 통한 방법이다. 이들을 위한 홍수량의 산정 방법으로는 강우-유출관계를 활용한 방법과 홍수빈도 해석방법이 가장 보편적이다(Yoon, 2011). 두 가지 방법에 있어서 하천유출의 측정치는 필수적인 요소이지만, 우리나라에서는 홍수 예보지역, 대하천 내 주요지점을 위주로 유출 측정이 이루어지고 있어 중소 유역의 경우 유출 관측이 이루어 지지 않고 있는 실정이다. 이와 같이 홍수량이 측정되지 않은 유역을 미계측 유역이라 분류하며 미계측 유역의 유출자료 확보를 위한 연구가 필수적이라 할 수 있다.

미계측 유역의 수문현상을 예측하기 위한 가장 보편적인 접근 방법은 매개변수의 지역화를 들 수 있다. 이는 지리학적으로 인접한 계측유역이 미계측 관심유역과 수문학적 동질성 및 유역 흐름영역의 여건이 동일하다면 계측 유역의 자료를 차용하여 미계측 유역에 활용하는 방법(Bloschl and Sivapalan, 1995)과 다양한 유역의 특성, 즉 유역형상, 상태, 기후여건 등과 매개변수와의 관계를 회귀분석을 통하여 구하고, 이를 미계측유역에 적용하는 방법(Boughton and Chiew, 2007; Wagener and Wheater, 2006; Parajka et al., 2005)이다. 이는 지역화를 통한 평균적인 매개변수로 미계측 유역의 홍수사상을 생산하므로 홍수사상마다 달라지는 매개변수들에 대한 고려가 부족하며 홍수사상에 대한 설계(Design Flood)를 목적으로 실시하였다. 또한 이러한 접근방법은 개발도상국이나 댐건설, 하천보강 및 개선작업들이 빈번이 일어나고 있는 지역에서는 관측자료의 부재와 관측자료의 질적인 문제로 인해 이들의 직접적인 적용에 문제가 있다고 할 수 있다(Piman and Babel, 2013). 이는 장기간 안정적인 유출자료를 확보하고 있는 선진국들(Merz and Bloschl, 2004)과는 다른 양상이라 할 수 있다. 이를 보완하기 위해, 본 연구에서는 현재 보유한 유출자료를 중심으로 공간적인 자료 확장의 개념을 도입하여, 같은 유역내의 중소규모의 미계측 유역의 유출자료를 확보하고자 한다. 여기서, 공간적 자료확장이란 본 연구에서 새롭게 도입하는 개념으로서 기존연구, 즉 관측유출량을 맞추기 위해 매개변수를 조정하는 것과는 다르게 미계측유역의 매개변수들을 조정하기 위해 계측 유출을 활용하고, 조정된 매개변수를 적용하여 미계

측유역의 유출자료를 확보하는 것이다. 이를 위해 물리적 기반의 분포형 모형의 적용이 적합하나, 접근이 용이하고 손쉬운 운용이 가능한 집중형 모형을 세분화 된 소유역에 적용하여 발생한 홍수사상에 대한 각 소유역의 반응을 일관된 공간적 오차범위를 갖는 유출반응으로 유도하여 현재 보유하고 있는 과거 유출자료를 중심으로 미계측 소유역의 유출자료를 동일하게 확보하고자 한다.

2. 저류함수법

저류함수법은 강우-유출관계의 비선형성과 유역의 지체시간 등을 고려하는 계산이 용이한 유출해석 모형이다. 특히 실측된 이산자료(discrete data)를 활용하여 짧은 시간에 가능할 수 있는 여러 홍수사상들을 계산할 수 있는 장점이 있으며 유역 추적에도 유리하여 전체 유역의 홍수 추적에 많이 적용되고 있는 실정이다. 또한 저류함수법은 그의 접근성과 손쉬운 운용으로 인해 20여년 동안 한강호우예경보에 사용되었으며 1987년부터 낙동강 홍수예경보에 적용되기 시작하였다. 수자원공사의 경우 1985년에 저류함수를 사용한 다목적댐 홍수유출해석 프로그램을 개발하여 1987년에 실시간 현장 수문자료를 취득할 수 있도록 실시간 홍수관리 시스템을 구축하였다(Ministry of Land, Infrastructure and Transportation, 2004). 따라서 집중형 모형인 저류함수는 홍수예경보와 댐운용을 위해 우리나라 전체에 직접적으로 적용이 가능한 실무적인 모델이다. 저류함수법은 유역저류함수와 하도홍수추적 부분으로 이루어져 있다. 저류함수의 유역모형에 대한 지배방정식은 아래의 Eq. (1)과 같이 유역저류고(s)와 유효유출고(q)와의 관계로 표시할 수 있다.

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

여기서, k 와 p 는 유역의 특성을 나타내는 저류함수의 매개변수이다. 유출고를 계산하는 과정에서 Kimura (1961)는 연속방정식에서 유도한 수정 puls 방법과 저류함수법을 혼합하였다.

$$r_e(t - T_l) - q(t) = \frac{ds}{dt} \quad (2)$$
$$r_e(t - T_l) = \begin{cases} f_l \times r(t - T_l), & \text{for } \sum r(t - T_l) \leq R_{sa} \\ r(t - T_l), & \text{for } \sum r(t - T_l) \geq R_{sa} \end{cases}$$

여기서, $r(t)$ 은 시간 t 에 대한 유역의 강우량으로부터 얻어진 단위유입량(mm/hr)이며, r_e 는 초과우량(mm/hr), $q(t)$

는 단위유출고 ($q(t) = \frac{Q(t)}{A} \times 3.6$, mm/hr), f_j 은 일차유출률, T_j 은 지체시간(hr), R_{sa} 는 포화우량(mm/hr), A 는 유역면적(km^2), 그리고 $Q(t)$ 는 직접유출량(m^3/s , 이하 CMS)을 나타낸다. 하도홍수추적은 하천 연속방정식과 저류함수를 활용한다.

$$\left(\sum_{j=1}^n f_j I_j \right) - Q = \frac{dS}{dt} \quad (3)$$

여기서, f_j 는 평균유입계수이며 I_j 는 하도구간의 상류단이나 유역으로부터의 유입량(CMS)이고 $Q = Q(t+T_j)$ 는 지체시간을 고려한 하도구간 하류의 유출량(CMS), 그리고 S 는 하도구간 저류량(m^3)이다. 하도의 저류함수는 Eq. (4)와 같이 홍수류의 운동방정식을 하나의 하도구간으로 가정하여 얻어낸 것이다. 이는 상류단의 유입홍수량 $I(t)$ 를 연속방정식에 저류함수식과 함께 정리하면 하류단의 저류량 Q 를 구할 수 있다.

$$S = KQ^p - T_l Q \quad (4)$$

저류함수법의 매개변수들은 유역의 특성에 따라 결정이 가능한 것(k, p, T_l)과 강우사상에 따라서 달라지는 매개변수들(f_j, R_{sa})로 구분 된다. 저류함수법을 활용한 다양한 연구들을 살펴보면, 유출모형의 개선을 중심으로 하는 연구들이 대부분이며, 특히, 매개변수를 최적화하는 연구들이 주를 이루고 있다. 이는 다양한 최적화 모델과 목적함수들을 활용하여 매개변수를 추정하였다(Park et al., 1997; Song et al., 2006; Kim et al., 2006; Kim et al., 2008). Kim and Yoon (2007)은 SCS (Soil Conservation Service) 초과우량 산정법을 활용하여 유효유출을 산출하는 방법을 적용하여 첨두홍수량 산정을 개선하였으며 매

개변수를 줄여 적용성을 확보하였다. 매개변수의 최적화를 넘어서 저류함수의 매개변수와 운동파모형의 매개변수들과의 관계를 중심으로 저류함수의 매개변수의 특성을 파악하는 연구들도 이루어져 왔다(Sugiyama et al., 1997). 저류함수법을 주어진 상황에 맞게 변형하여 모델을 개발하는 연구(Bae, 1997; Bae and Chung, 2000; Shin et al., 2004) 또한 활발하게 진행되었으며, Shin et al., (2004)의 경우는 저류함수 모형을 격자기반($100 \times 100 \text{ m}$) 모형으로 변형하여 활용하였다. 이런 다양한 연구들의 기본개념들을 활용하여 미계측유역의 자료를 계측 유역의 정보를 중심으로 자료를 확장하는데 조금 더 나은 결과를 얻을 수 있었다. 본 연구에서는 한국 수자원공사에서 개발한 COSFIM모델(Ministry of Land, Infrastructure and Transportation, 2004)을 기반으로 자료확장의 가능성을 모의 하였다.

3. 홍수자료의 미계측유역에 대한 공간적 확장 방법

3.1 공간확장 개념

국내의 많은 연구들(Bae and Chung, 2000; Kim et al., 2008; Chung et al., 2012)은 하류단의 한 지점을 중심으로 한 유역의 매개변수의 최적값은 추정하여 특정 사상에 대한 홍수유출모의를 관측유출에 가장 가깝게 만드는데 목적을 두고 있다. 하지만, 본 연구에서는 관측된 유출을 이용하여 나뉘어진 중소규모의 미계측유역의 최적화된 매개변수를 구하는데 사용하고 이를 미계측유역의 유출자료를 얻어내기 위한 확장작업의 기초 작업으로 활용한다. Fig. 1은 미계측유역에 대한 유출자료 확장에 대한 개요도이다. Fig. 1의 개요도에서 k, p, T_l, f_j, R_{sa} 는 유역에 대한 매개변수이고, R_A 는 전체유역에 대한 유출량, $CR_{a, b, c, \text{or } d}$ 는 유역 a , 또는 b, c, d 에 대해 계산된 유출량, 붉은 선은 소유

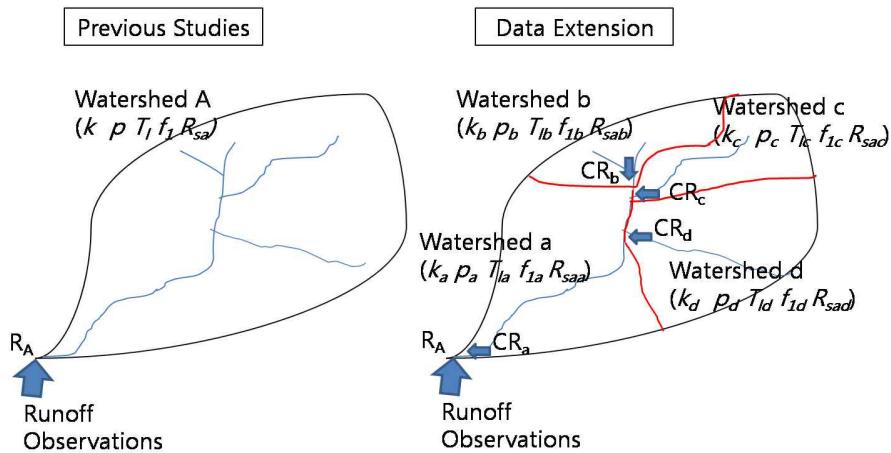


Fig. 1. Schematic of Spatial Extension of Runoff Data

역 분할선을 나타내고 있다. 유출자료의 공간적인 확장을 Fig. 1을 중심으로 설명하면, 현재 보유하고 있는 유출량(R_A)를 활용하여 작게 나뉘어진 소유역들(watershed a, b, c, d)의 매개변수들을 최적화하여 얻어내고 이 매개변수들을 중심으로 각 소유역에 대한 유출량(CR_a , CR_b , CR_c , CR_d)을 산정하는 것이다. 이는 큰 유역에 존재하는 한 개의 유출을 작게 나뉘어진 소유역의 유출로 나누는 효과를 가지는 것이다.

3.2 연구대상지역 및 홍수사상

연구대상지역으로는 남한강 수계에 위치한 충주댐 유역(Fig. 2)을 선택하였으며 유역면적은 $6,648 \text{ km}^2$ 이며 총 하천길이는 385 km, 평균경사는 0.36이다. 본 연구에서는 수자원공사가 보유한 수위관측지점인 6곳(판운, 영춘, 영월1, 영월2, 영월, 정선2, Ministry of Land, Infrastructure and Transportation, 2005a)의 유출자료 중, 본 연구에서 선정한 기간에 대한 자료를 균일하게 보유하고 있으며 수위관측소의 분포를 고려하여 두 곳(영춘, 판운)을 유출자료의 확장에 대한 교차검증 지점으로 선정하였다. 또한 교차검증 지역 이외의 지역(영월1, 영월2, 영월, 정선2)은 자료기간의 이산과 자료의 신뢰성 문제로 부분기간별 검증용으로 사용한다. 충주댐 유역은 표준권역을 중심으로 수자원공사 관리체계의 효율을 위해 구분한 22개의 중소유역을 대상유역으로 선정하였다. 따라서 충주댐 수위관

측소에서 구한 관측유입량을 기준으로 하는 최적화 방법을 통해 다른 지역, 22개 소유역의 유출구에 미치는 오차 범위들을 분석하고자 2곳(판운, 영춘 수위관측소)의 관측지점의 값과의 교차검증을 통해서 자료 확장성을 보이도록 하였다. 수문자료는 1990년부터 2009년까지의 1시간단위 강우자료와 유출자료를 활용하여 홍수사상을 선정하였다. 홍수사상을 선정하는 기본 요건으로 한 해에 3개 정도를 선정하고자 하였으나 홍수의 크기, 예로 충주댐 첨두 유출이 4000 CMS 이상인 자료와 자료의 질적인 면을 고려하여 21개의 홍수사상을 선정하였다. Table 1은 22개의 충주댐 소유역에 대한 수문지형학적인 값들을 나타내고 있다.

3.3 연구절차

유출자료를 공간적으로 확장하기 위한 절차를 순차적으로 설명하면(Fig. 3), 최적화를 위한 매개변수로 k , p , T 의 경우는 수문지형학적인 특성과 관련이 있어 호우사상별 선행강수조건과 호우규모에 상관관계가 상대적으로 낮기 때문에 이를 사전에 안정화 하는 식으로 고정하고 f_i , R_{sa} 를 최적화시키는 절차를 밟으며, 본 연구에서는 f_i , R_{sa} 의 중요성을 보일 것이다. 이러한 절차적 방법은 Ministry of Land, Infrastructure and Transportation (2004, 2005b, 2006)가 언급한 현재 홍수예경보시에 사용되는 방법, 즉 f_i , R_{sa} 만을 대상변수로 보고 나머지 변수들(k , p , T)은 고정하여 사용하는 방법과 유사하다.

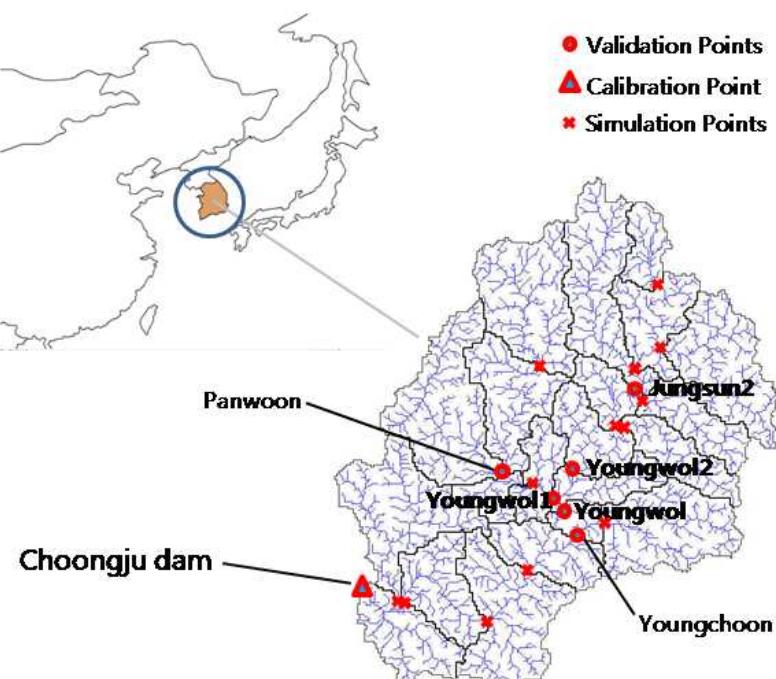


Fig. 2. Choongju Dam Watershed with 22 Sub-basins and Cross Validation Points

Table 1. Properties of Choongju Dam Watershed

Number of Small Watersheds	Area (A, km ²)	River Length (L, km)	Form Factor (FF)	Watershed Average Slope (WAS)	River Slope (RS)
1	546.000	35.108	0.445	0.421	0.013
2	276.200	22.875	0.528	0.467	0.021
3	487.200	32.875	0.451	0.443	0.017
4(Jungsun2)	220.900	20.554	0.523	0.490	0.023
5	143.000	9.661	1.532	0.493	0.061
6	233.000	21.446	0.507	0.482	0.027
7(Youngwol2)	238.400	18.232	0.717	0.481	0.026
8(Youngwol)	147.100	15.018	0.652	0.447	0.037
9	518.300	25.196	0.816	0.391	0.021
10(Panwoon)	364.500	26.268	0.528	0.422	0.019
11	3.300	1.982	0.840	0.228	0.072
12	606.100	38.589	0.407	0.370	0.013
13(Youngwol1)	121.000	6.446	2.912	0.290	0.048
14	156.600	6.089	4.224	0.402	0.061
15	61.700	4.839	2.635	0.460	0.083
16(Youngchoon)	508.400	26.625	0.717	0.501	0.026
17	246.500	8.589	3.341	0.460	0.066
18	492.000	22.161	1.002	0.429	0.029
19	297.700	7.339	5.527	0.358	0.055
20	539.500	22.518	1.064	0.348	0.021
21(Choongju Dam)	291.600	6.268	7.422	0.424	0.086
22	149.000	22.875	0.285	0.314	0.034

(유역 분할: Ministry of Land, Infrastructure and Transportation, 2005a.)

이 절차에서 기존 연구들과 상이하게 다른 점은 유출 측정치가 존재하는 유역뿐만 아니라 존재하지 않는 유역 (Fig. 1의 watershed a, b, c, d)의 매개변수들의 값도 유출의 측정치가 존재하는 값(Fig. 1의 R_A)을 기준으로 최적화 방법으로 동시에 구해, 이를 유역의 특성과 관련하여 안정화 하였다는 점이다. 안정화 된 매개변수들은 유출 자료의 미계측유역의 유출자료를 재생산하는 매개변수로 사용한다. 본 연구에서의 한 가지 특이사항은 분포형 모델에서만 보일 수 있는 매개변수의 공간분포적 특성과 미계측유역의 유출량의 값을 집중형 모형을 활용하여 확보 할 수 있다는 것이다. Fig. 3은 미계측유역의 유출량을 확보하기 위한 작업의 흐름도를 보여주고 있다. 그림 3의 절차를 간략히 언급하면, 집중형 모형을 공간적으로 분포시키고 미계측유역의 매개변수들(k, P, T)을 계측된 유출량을 기준으로 홍수사상마다 최적화하고 최적화된 매개변수들을 선정된 유역의 수문 지형학적 특성을 기준으로 안정화하였다. 여기에서 안정화란 각각의 소유역에 유역의

수문지형학적 특성에 맞게 매개변수를 지역화하여 미계측 소유역을 포함한 전체유역에 일정한 오차변화 범위를 적용하기 위한 것이다. 안정화된 매개변수를 활용하고 홍수 사상마다 달리 표현되는 f, R_{sa} 를 최적화하여 미계측 유역의 유출량을 도출해 내는 것이다. 홍수사상마다 달라지는 매개변수, 즉 최적화 되는 매개변수는 과거자료 모의(simulation)에 대해 전체적인 오차를 줄이기 위해 사용된다.

4. 홍수자료의 공간적 확장성 평가 및 해석

4.1 지역적 매개변수의 안정화

지역적 매개변수의 안정화를 통해 각 소규모 유역들에 고정된 매개변수를 사용하는 것은 발생하는 강우사상에 대해 계측 유역뿐만 아니라 미계측유역의 유출가능성을 추출하기 위함이다. 예로, 만일 21개의 호우사상에 대해 각 유역의 매개변수의 값이 모두 다르게 나타나게 되면 자료

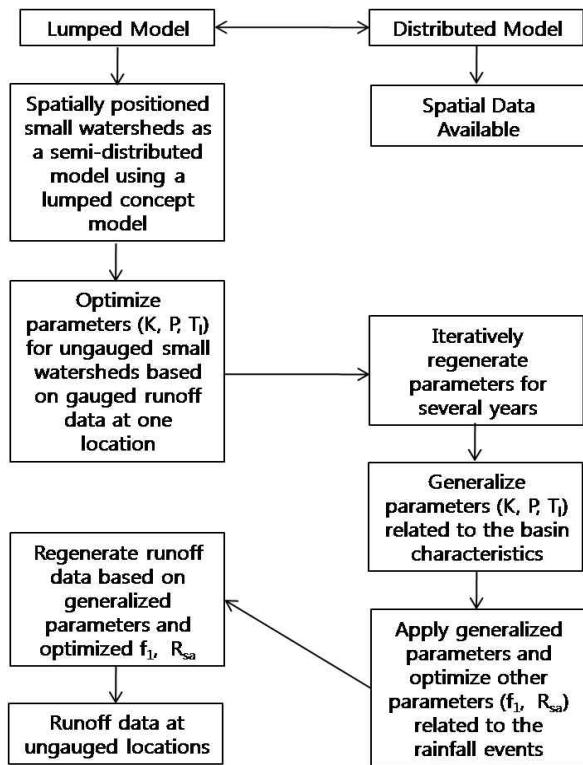


Fig. 3. Procedure of Spatial Extension using a Lumped Concept Model

의 확장의 경우, 한 지점의 변화가 다른 지점의 변화에 대해서 일관된 변화를 가지게 할 수 없기 때문이다. 이는 최적화 개념에 있어서는 온전한 최적값을 가질 수 없다는 부정적인 요소일 수 있다. 한 지점의 변화가 각 지점의 변화에 일관되게 변함을 식으로 나타내면 Eqs. (5) and (6)로 나타낼 수 있다. 여기서 O 와 C 는 각각 측정값과 모의값을 나타내며 n 은 소유역의 총수이다.

$$\epsilon_1 = (O_i - C_i)^2, \text{ where } i = 1, \dots, n \quad (5)$$

$$\epsilon_1 \cong \epsilon_2 \cong \dots \cong \epsilon_n \quad (6)$$

매개변수의 안정화를 위해 수문지형학적 특성에 관여하는 매개변수 k , p , T_i 를 먼저 지역화 하였다. 안정화를 위해 선정된 21개의 홍수 사상에 대한 22개의 소유역의 매개변수들의 최적값을 관측된 충주댐 유입량을 중심으로 Golden Search 방법을 이용하여 추출하였다. Golden Search 방법은 지역중심의 최적화 방법으로 초기값을 어떻게 두느냐에 따라서 그의 값들의 방향이 많이 움직이는 테(Chapra and Canale, 2006), 본 연구에서는 매개변수들의 초기 값으로 이근천식(Ministry of Land, Infrastructure and Transportation, 2001)을 지역적 최적화를 위한

초기 값으로 활용하여 현재 관심을 가지고 있는 22개의 소유역들의 특성과 매개변수들과의 연관관계를 파악하는 것이다. 따라서 초기에 나누어진 소규모 유역(22개의 소유역)의 매개변수를 경험식(이근천식)으로 정하고 이를 동일한 변환 비율을 적용하여 충주댐의 관측된 유입량과 저류함수에 의해 계산된 유입량의 차이를 최소화 하여 최적화하였다. 이는 충주댐의 관측 유입량만을 이용하는 조건 하에서 고정된 지역 매개변수 식을 이용하여 얻어진 소유역의 유출값들의 오차 범위들을 얻어 볼 수 있다. 또한 간소화된 최적화로 인해 얻어볼 수 있는 시간적인 유익성들도 이 방법에는 포함된다고 할 수 있다. 21개의 홍수 사상에 대한 22개의 소유역의 매개변수들에 대한 각각의 최적값들을 구하고 이를 수문지형학적 특성, 즉 유역 면적(A), 하천길이(L), 유역형상계수(FF), 유역 평균경사(WAS), 하천경사(RS)와의 관계를 추출하였다. 최적화된 매개변수 값은 초기에 주어진 매개변수의 값에 대해 큰 변화를 나타내고 있지 않지만, 매개변수의 수문지형학적 인자와의 안정화를 통해 조금 더 이 지역여건에 맞는 매개변수로 고정할 수 있다.

지역식을 추출하는 과정에서는 각각의 수문지형학적 특성들과 매개변수들의 비례중요도를 사용하여 분석한 결과를 모델 변수들의 모델식에 대한 영향력 평균분포도(LMG: Lindeman, Merenda, and Gold, 1980)로 나타내면 하천길이(L)가 k 에 대해서 가장 큰 영향력(58% 이상)을 주고 있는 것으로 나타났다. 또한, 매개변수 p 에 대해서도 하천길이(L)의 값이 56% 이상의 영향을 미치는 것을 보였다. 하지만 이들을 다중공선성(multicollinearity)을 분석하면 유역면적과 하천길이의 상관관계가 높게 나타나므로 이를 형상계수로 변환하고 단계적 회귀분석(stepwise regression)을 통해 최적의 관계식을 찾아내었으며 이는 Eqs. (7)~(9)로 나타나 있다. T_i 의 경우, 초기에 사용된 이근천 식이 하천길이에 관련한 식이며 이를 최적화 하여도 이를 근거로 하기에 완벽한 R^2 값을 나타낸다. 이곳에 사용된 FF와 RS는 Table1에서 나타낸 형상계수와 하천경사를 나타낸다.

$$k = -6.544 \ln(FF) - 52.91 RS^{0.8} + 28.096 \quad R^2 = 0.68 \quad (7)$$

$$p = 0.07 FF + 3.69 RS + 0.38 \quad R^2 = 0.78 \quad (8)$$

$$T_i = 0.11 L - 0.06 \quad (9)$$

4.2 미계측유역에 대한 매개변수의 영향

수문지형학적 특성에 의한 안정화한 저류함수의 매개변

수의 값을 이용하여 충주댐 수위관측소의 유출의 값을 재생산하여 비교 분석한 결과 강우사상마다 변화를 보이는 f_f , R_{sa} 값들의 변화가 전체 모의 유출값에 큰 영향을 미친다는 것을 보였다. 이번 연구에서는 모델의 평가를 위해 크기가 없는 평가치로 Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE, Nash and Sutcliffe, 1970)을 활용하였다. NSE는 관측값과 모의값을 상대비교하며 1:1선으로 표현하는 것이다. 만일 NSE가 1이면 관측값과 모의값이 정확하게 일치하는 것을 나타내며 그의 범위는 $-\infty$ 에서 1까지이다.

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{obs mean})^2} \right] \quad (10)$$

여기서, Y_i^{obs} 는 i 번째의 관측값, Y_i^{sim} 은 i 번째의 모의값, 그리고 $Y_i^{obs mean}$ 은 관측값의 평균값을 나타낸다. 이번 모의에서 f_f 와 R_{sa} 값을 모델 초기 값을 0.5, 20으로 각각 고정하고 사용할 때 전체 사상에 대한 충주댐의 최대와 최저의 Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)은 0.92 (2004년 6월 18일 23:00~2004년 6월 22일 18:00)와 0 (다수의 사상)이며 평균 NSE는 0.15로 낮게 나타나고 있다. NSE의 평균치 정도의 값을 가지고 있는 2008년 사상(2008년 7월 23일 18:00~1990년 7월 28일 08:00)에 대한 시간유출 곡선의 비교를 보면(Fig. 4), 2008년의 유출곡선은 최대 유출을 나타내는 시간은 관측치 보다 약간의 지체가 발생하는 것으로 모의하고 있으나 유출이 전체적으로 많이 부족함을 보이고 있다. 이는 유출에 영향을 주는 매개변수인 f_f 과 R_{sa} 의 조절

이 필요함을 말하고 있다. 최종적으로 안정화한 식과 최적화한 f_f 과 R_{sa} 를 활용한(Region. & Optim. Para.) 유출량은 관측치와 유사한 모의를 나타내고 있다. 본 연구에서 새로이 도입된 자료확장의 개념은 예측의 개념과 달라서 각 소유역마다의 수문지형학적 특성에 관여하는 매개 변수 k , p , T 가 미리 안정화되어야만 측정된 유출자료의 공간적인 확장으로 인해 전해지는 공간적 오차의 범위를 각각의 홍수사상에 대해 나타낼 수 있다. 또한 공간적 자료확장은 매개변수 k , p , T 에 비해 f_f 과 R_{sa} 의 최적화가 더욱 중요하다.

4.3 미계측유역을 위한 홍수자료 확장성 평가

안정화하여 고정한 매개변수(k , p , T)를 배경으로 각 홍수 사상마다 유출의 관측치가 존재하는 충주댐 수위관측소의 유출값을 기준으로 f_f 과 R_{sa} 를 최적화하여 교차검증을 위한 수위관측소(영춘, 판운)의 유출을 비교 분석하였다. 이때 f_f 과 R_{sa} 를 전체 충주댐 유역에 균일하게 분포함을 가정하고 최적화를 실시하였다. 먼저 f_f 과 R_{sa} 의 최적화 이후 충주댐에서의 NSE의 변화는 최대치는 0.98로 2002 ev1 사상에 대한 값이며 평균 NSE값은 0.71로 월등하게 계선된 값을 보이는 것을 볼 수 있다. Table 2는 최종 R_{sa} 의 값과 다른 매개변수의 안정화식, 그리고 홍수사상에 대해 나타내고 있다. 홍수사상을 살펴보면 기본적으로 3.2 연구대상지역 및 홍수사상에서 언급하였듯이 충주댐 유입량을 기준(4000 CMS 이상)으로 선별하고 이 기간의 강우를 기준으로 모의한 값과 관측치를 비교하여 이상치에

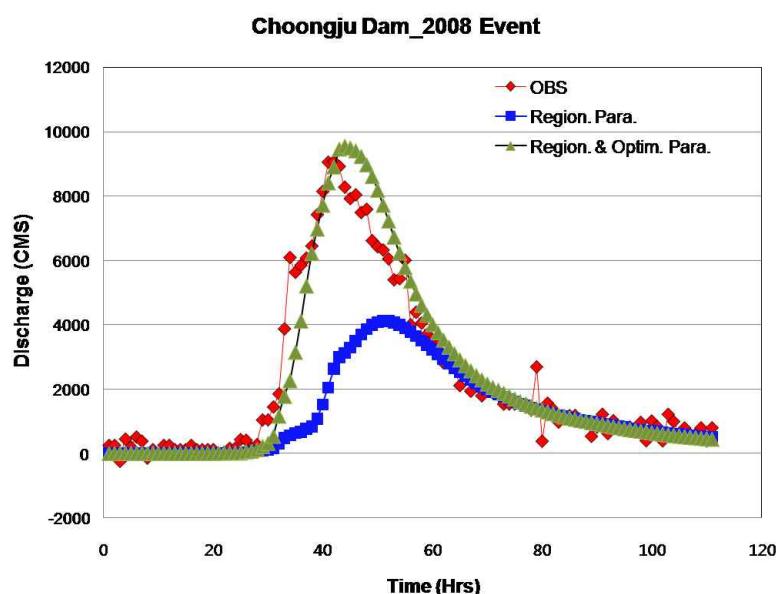


Fig. 4. Comparison between Regionalized Parameters and Regionalized & Optimized Parameters

Table 2. Finalized R_{sa} with Events Information

Event Number		Start	End	Finalized R_{sa}	Other Parameters
1	1990ev3	1990-09-10 5:00	1990-09-13 8:00	11.2	
2	1993ev1	1993-07-13 1:00	1993-07-14 21:00	18.4	
	1995ev1	1995-08-31 2:00	1995-09-03 10:00		
3	1997ev1	1997-07-01 0000	1997-07-03 13:00	46.0	
4	1999ev1	1999-08-01 16:00	1999-08-05 20:00	30.3	
5	1999ev2	1999-09-19 9:00	1999-09-26 11:00	33.3	
	2001ev1	2001-07-09 22:00	2001-07-12 12:00		
	2001ev2	2001-07-17 0:00	2001-07-18 16:00		
6	2002ev1	2002-08-05 16:00	2002-08-09 6:00	50.4	
7	2002ev2	2002-08-30 21:00	2002-09-02 1:00	11.2	
8	2003ev2	2003-08-27 10:00	2003-08-30 14:00	11.2	$k = 6.544 \ln(FF) - 52.91RS^{0.8} + 28.096$
9	2003ev2	2003-09-11 23:00	2003-09-14 12:00	11.2	$p = 0.07FF + 3.69RS + 0.38$
10	2004ev1	2004-06-18 23:00	2004-06-22 18:00	139.7	
11	2004ev2	2004-07-14 21:00	2004-07-19 1:00	11.2	
12	2004ev3	2004-08-17 23:00	2004-08-20 22:00	22.4	
13	2005ev1	2005-06-30 8:00	2005-07-03 6:00	21.3	
14	2006ev1	2006-07-14 5:00	2006-07-20 0:00	19.1	
15	2006ev2	2006-07-27 6:00	2006-07-31 11:00	11.2	
16	2007ev1	2007-08-03 13:00	2007-08-14 1:00	34.5	
17	2007ev3	2007-09-14 10:00	2007-09-19 15:00	29.7	
18	2008ev1	2008-07-23 18:00	2008-07-28 8:00	51.8	
19	2009ev1	2009-07-09 0:00	2009-07-11 12:00	62.8	
20	2009ev2	2009-07-11 16:00	2009-07-14 5:00	33.1	
21	2009ev5	2009-08-11 10:00	2009-08-14 9:00	55.5	

대한 선별을 실시하여 최종적으로 얻어낸 홍수사상들을 보이고 있다. 예로, 초기에 선발된 2001년 사상1은 재 검증 과정에서 최대 유입량이 일어나는 시간이 최대 강우가 발생하는 시간보다 일찍 일어나는 양상을 보여 홍수 사상 선발에서 제외되었으며 2001년 사상 2는 강우가 발생하지 않는데 유입량이 발생하는 경우로 이 또한 제외되었다. 1995년의 경우도 유량자료는 존재하나 강우발생이 빈번한 7월부터 8월 사이의 강우자료가 존재하지 않고 있다. 이처럼 홍수사상의 모의를 통해서도 관측치의 이상 유무를 확인 할 수 있을 것으로 보이며 홍수사상의 공간자료 확장의 또 다른 목적으로 연구가 가능할 것이다.

이를 중심으로 영춘과 판운 수위관측소에 대한 유출최대치와 그의 발생시간, 그리고 전체적인 유출을 비교하여 보면 Figs. 5~7과 같이 나타낼 수 있다. 영춘 수위관측소의 NSE 값은 최대치가 0.95로 2003ev3 사상이다. 이때의 NSE값은 충주댐의 NSE값보다 더 좋은 값을 나타내고 있다. 영춘 수위관측소의 평균 NSE 값은 0.67이다. 판운 수위

관측소의 경우는 1997ev1 사상이 가장 좋은 NSE값(0.87)을 나타내고 있으며 판운 수위관측소의 평균 0.52를 나타내고 있다. 이는 Moriasi et al. (2007)이 언급한 모델평가의 기준에 의하면 평균적으로 모든 지역에서 모델의 모의가 만족하는 범위($NSE > 0.5$) 내에 드는 결과를 보인다. Fig. 5는 최고유출의 양에 세 곳의 NSE 비교를 보이고 있는데 이들 값이 최저가 판운 검증지점의 값이 0.74를 보이고 기준이 되어 계산하는 지점인 충주지점은 0.83을 나타내 최고유출 값에 대한 모의의 정확성을 보여주고 있다. 또한 최고유출이 발생하는 시간(time to peak)에 대한 결과로는 모든 지점에서 NSE값이 0.9를 넘는 결과를 보이고 있다. 이는 모델에서 사용하고 있는 T_f 안정화식이 이 지역의 유출에 대해 잘 모사하고 있는 것을 나타내고 있는 것이다. 유출량의 총량에 대한 비교는 가장 낮은 NSE값이 0.76으로 판운지역에 대한 값이다. Fig. 8은 충주댐, 영춘, 판운 수위관측소의 평균적인 NSE값을 지니고 있는 2008ev1, 2008년 7월 23일 18:00부터 2008년 7월 28일 08:00까지의

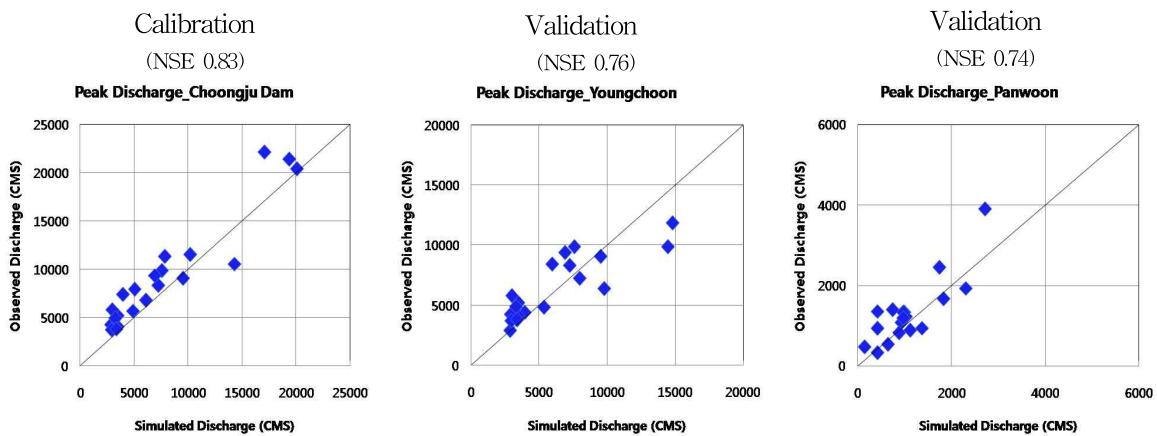


Fig. 5. Comparisons of Peak Flow (Choongju Dam, Youngchoon, Panwoon)

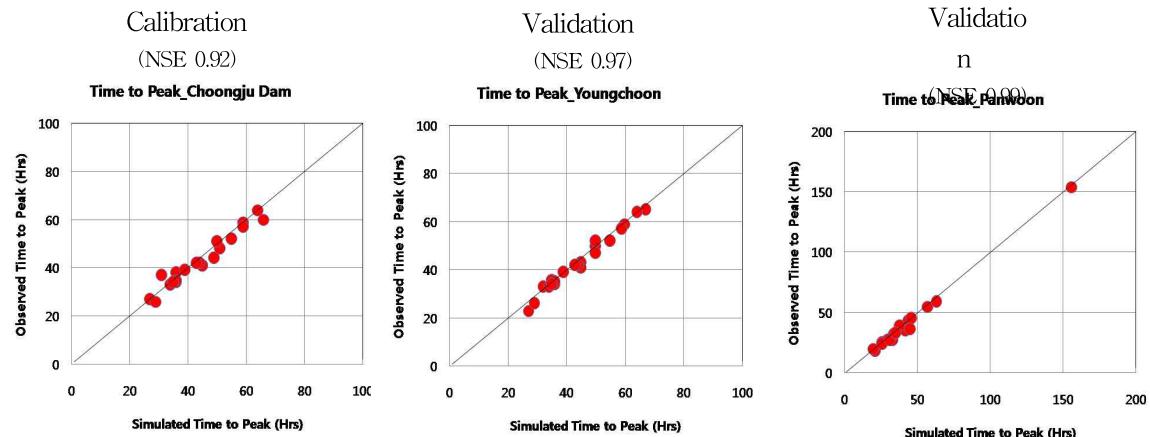


Fig. 6. Comparisons of Time to Peak (Choongju Dam, Youngchoon, Panwoon)

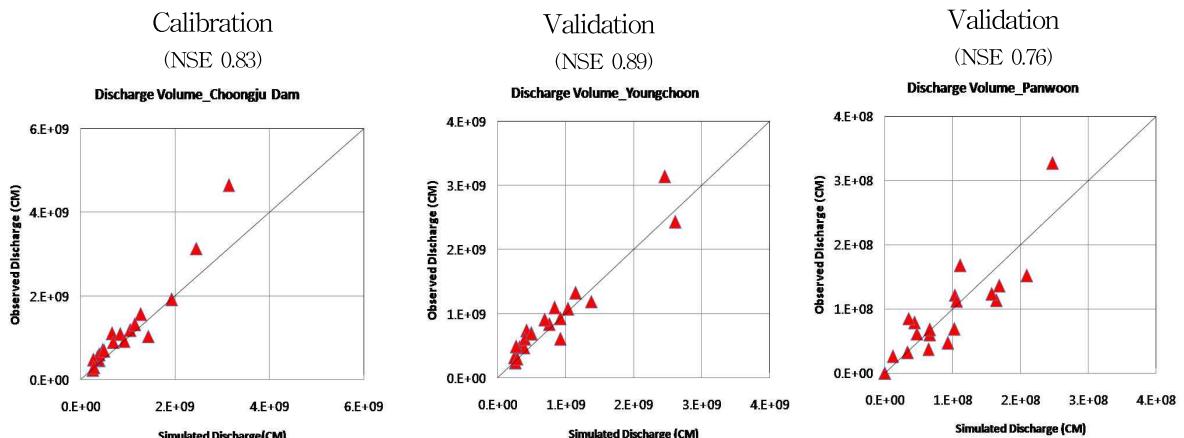


Fig. 7. Comparisons of Discharge Volume (Choongju Dam, Youngchoon, Panwoon)

유출량에 대한 여섯 곳의 수위관측소의 유출곡선의 비교를 보이는 것이다. 판운, 영월, 영월1의 경우는 유출곡선의 감소곡선부분이 이상이 있는 것으로 나타나고 있다. 영춘의 경우는 모의치가 관측치 보다 조금 더 과다하게

모의 되었지만, 여섯 곳 중에 가장 관측치와 일치되는 모의치를 나타내고 있다. 영월2의 경우는 모의치가 최대유출량 지점에서 과다하게 산정되는 양상을 보이고 있으며 정선2의 경우는 이와는 반대로 관측치에 미치지 못하는

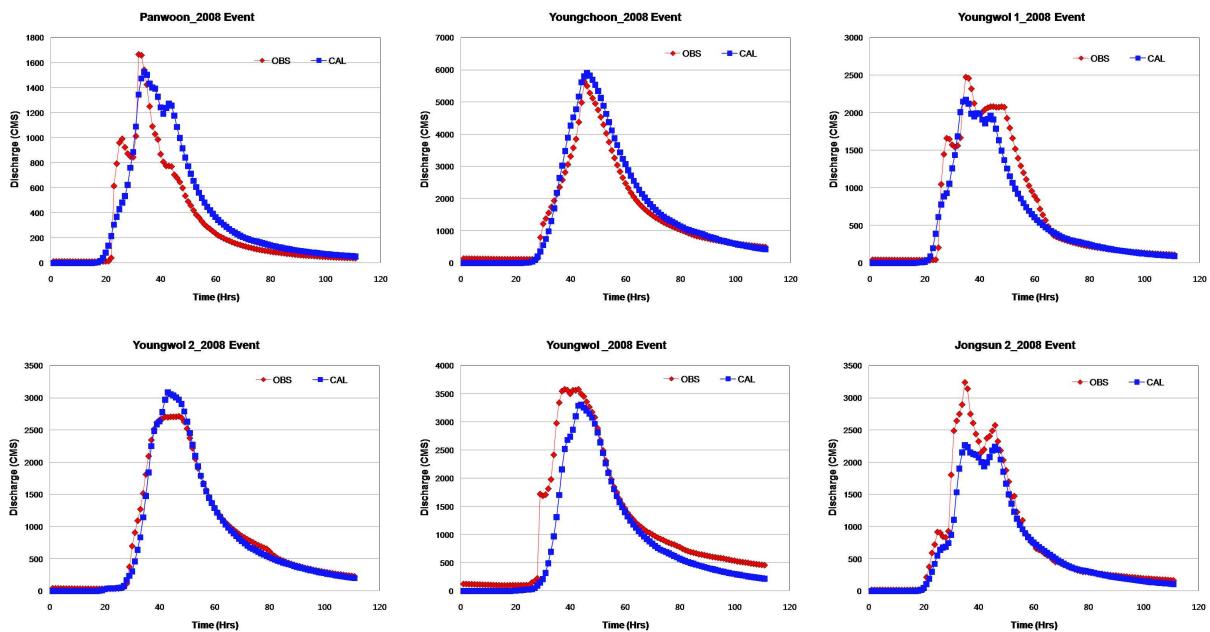


Fig. 8. Hydrographs after Spatial Extension

모의 값을 보이고 있다. 이처럼 한 곳의(충주댐 유입량) 자료를 중심으로 자료를 확장하는 경우 모의되는 자료는 오차를 포함하고 있지만, 전체적인 양상을 따라 잘 모의하는 것을 보이고 있다. 유출률은 계산된 충주댐유입량의 경우 평균이 61.6%로 나타내고 있으며 최대와 최저는 각각 83.7%와 38.2%를 보이고 있으며 관측유입량의 유출률은 최대 97.1%와 최저 34.5%를 보이고 있다.

5. 결 론

다양한 외부여건의 변화로 인한 홍수사상의 변화에 대응하기 위한 과거자료의 효율적 활용이 요구되고 있다. 특히 유출 미계측 중소규모 유역에 대한 자료의 미비로 인해 이 지역의 정확한 홍수량 산정에 어려움이 있다. 이를 극복하기 위해 본 연구에서는 계측된 자료를 기반으로 집중형 모형인 저류함수법을 이용하여 유출자료의 공간적인 자료확장의 대안을 제안하였다. 이를 위해 선정된 지역은 충주댐유역으로 1990년부터 2009년까지의 1시간 단위의 강우와 유출자료를 중심으로 21개의 홍수 사상을 선정하였으며 충주댐 유역을 22개의 소유역으로 분할하였다. 자료의 공간적 확장성을 확보하기 위해 저류함수의 매개변수, 특히 수문지형학적인 영향을 받는 k , p , T_f 를 고정하고 매 강우사상마다 달라지는 매개변수인 f_i , R_{se} 를 최적화하여 22개 유역에 충주댐 수위관측소의 유입량을 기준으로 유출자료를 생성하였다. 교차검증 지역인 영춘과 판운

수위관측소의 결과를 NSE값을 기준으로 보면 충주댐의 NSE 평균값이 0.71일 때 영춘 수위관측소는 0.67, 판운 수위관측소는 0.52를 나타내었다. 이는 모델평가기준의 만족하는 범위($NSE > 0.5$)에 드는 것으로 관측 자료를 중심으로 미계측유역의 유출자료를 확장하는 것의 가능성을 보였다고 할 수 있으며 분포형 모형 대신에 집중형 모형을 활용하여 자료의 공간적인 확장성을 보였다. 하지만, 관측 자료의 확장성의 공간적 오차를 줄이기 위해, 본 연구에서는 충주댐 전 유역에 균질한 f_i , R_{se} 값을 적용하였으나, f_i , R_{se} 의 경우는 호우사상에 영향을 많이 받아 각각의 호우사상에 대한 변화 폭이 크고 소유역마다 다르게 나타날 것이므로 이를 전체유역에 일관되게 가질 수 있는 가에 대해 연구를 진행할 필요가 있다. 특히 R_{se} 의 값은 공간적인 확장성이나 변화를 보는 것이 정확성을 더욱 확보한 자료의 공간적인 확장 가능성을 보일 것이다.

감사의 글

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

References

Bae, D.-H. (1997). "Development of stochastic real-time

- flood forecast system by storage function method." *J. of Korea Water Reso. Asso.*, Vol. 30, No. 5, pp. 449–457.
- Bae, D.-H., and Chung, I.-M. (2000). "Development of stochastic-dynamic channel routing model by storage function method." *J. of Korea Water Reso. Asso.*, Vol. 33, No. 3, pp. 341–350.
- Bloschl, G., and Sivapalan, M. (1995). "Scale issues in hydrological modelling—a review." *Hydrol. Process.* Vol. 9, pp. 251–290.
- Boughton, W., and Chiew, F. (2007). "Estimating runoff in ungauged catchments from rainfall, PET and the AWBM model." *Environ. Model. Soft.*, Vol. 22, pp. 476–487.
- Chapra, S.C., and Canale, R.P. (2006). *Numerical methods for engineers 5th edition*, McGraw Hill Higher Education, New York.
- 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." *J. of Korea Water Reso. Asso.*, Vol. 45, No. 11, pp. 1169–1186.
- Kim, B.J., Kawk, J.W., Lee, J.H., and Kim, H.S. (2008) "Calibration and estimation of parameter for storage function model." *J. of Korean Soceity of Civil Engineering*, Vol. 28, No. 1b, pp. 21–32.
- Kim, B.J., Song, J.H., Kim, H.S., and Hong, I.P. (2006). "Parameter calibration of Storage function model and flood forecasting (2) comparative study on the flood forecasting methods." *J. of Korean Soceity of Civil Engineering*, Vol. 26, No. 1b, pp. 39–50.
- Kim, T., and Yoon, K. (2007). "Application of storage function method with SCS method." *J. of Korea Water Reso. Asso.*, Vol. 40, No. 7, pp. 523–532.
- Kimura, T. (1961). Storage function methods for flood routing, Ph.D. dissertation, Research Institute of Japan Civil Engineering, pp. 89–96, 203–209.
- Lindeman, R.H., Merenda, P.F., and Gold, R.Z. (1980). *Introduction to Bivariate and Multivariate Analysis*. Scott, Foresman, Glenview, IL.
- Merz, R., and Bloschl, G. (2004). "Regionalisation of catchment model parameters." *J. of Hydrology*, Vol. 287, pp. 95–123.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2001). *Seomjin River Flood Forecasting and Warning Report*, Research Report, Seomjin River Flood Control Office.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2004). *Improvement of flood forecasting and warning systems for Keum River: Yongdam Dam and Miho-chun*, Research Report, Korea Institute of Construction Technology.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2005a). *Installation of integrated flood control system with dam operation in Han River Watershed*, Research Report, K-Water.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2005b). *Improvement and evaluation of flood forecasting and warning model (1st Session)*, Research Report, Korea Institute of Construction Technology.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2006). *Improvement and evaluation of flood forecasting and warning model (2nd Session)*, 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.
- 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.
- 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.
- Park, B.-J, Cha, H.-S., and Kim, J.-H. (1997). "A study on parameter estimation of storage function model using the genetic algorithms." *J. of Korea Water Reso. Asso.*, Vol. 30, No. 4, pp. 347–355.
- Piman, T., and Babel, M.S. (2013). "Prediction of rainfall-runoff in an ungauged basin: Case study in the mountainous region of Northern Thailand." *J. of Hydrologic Engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 285–296.

- Shin, C.-K, Cho, H.-S., Jung, K.-S., and Kim, J.-H. (2004). "Grid based rainfall-runoff modeling using storage function method." *J. of Korea Water Resources Association*, Vol. 37, No. 11, pp. 969-978.
- Song, J.H., Kim, H.S., Hong, I.P., and Kim, S.U. (2006). "Parameter calibration of storage function model and flood forecasting (1) Calibration methods and evaluation of simulated flood hydrograph." *J. of Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 26, No. 1b, pp. 27-38.
- Sugiyama, H., Kadoya, M., Nagai, A., and Lausey, K. (1997). "Evaluation of the storage function model parameter characteristics." *J. of Hydrology*, Vol. 191, pp. 332-348.
- Wagener, T., and Wheater, H.S. (2006). "Parameter estimation and regionalization for continuous rainfall-runoff models including uncertainty." *J. of Hydrology*, Vol. 320, pp. 132-154.
- Yoon, T.H. (2011). *Applied Hydrology-Theory and Applications*, Chungmoon Gak, Seoul, Korea. pp. 807.

논문번호: 13-046	접수: 2013.05.10
수정일자: 2013.06.26/07.16/07.22	심사완료: 2013.07.22