



소유역 별 기저유출 감수상수를 적용한 유량 및 기저유출 모의 Baseflow and Streamflow Simulation Applying Baseflow Recession Constants in Individual Sub-watersheds

한정호* · 임경재* · 정영훈**,[†]

Han, Jeong Ho · Lim, Kyoung Jae · Jung, Younghun

Abstract

This study attempted to improve the accuracy of streamflow and baseflow prediction of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) by applying baseflow recession constants for each sub-watershed. This study set two different scenarios (S1 and S2) to evaluate the impact of application of baseflow recession constants for each sub-watershed on streamflow prediction. In S1, Only the baseflow recession constant obtained from the streamflow station located in the final outlet of study area was applied for whole sub-watersheds. In S2, baseflow recession constants obtained from six different streamflow stations were applied for each sub-watershed. Then, baseflow was separated from the measured streamflow data and the predicted streamflow of S1 and S2 using Web-based Hydrograph Analysis Tool (WHAT). The results showed Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) and R^2 of S2 were a little higher than these of S1 in both streamflow and baseflow prediction results. However, it is important that S2 reflected physical meaning of baseflow recess. Also, recession part of hydrograph in S2 was calibrated better than that of S1 compared to the measured hydrograph.

Keywords: Baseflow, Baseflow separation, Recession constants, SWAT, WHAT

1. 서 론

최근 기후변화로 인해 전 지구적으로 수문환경이 변화하고 있으며, 그로 인해 국내에서도 홍수나 가뭄 등의 자연재해 발생빈도와 규모가 증가되고 있다(Kang, 2011). 특히 최근 매년 봄철 심각한 피해를 발생시키고 있는 가뭄은 2061~2090년에는 과거 1977~2006년에 비하여 발생기간이 3.4배 증가되어 더욱 심각해질 것이라 전망되고 있다(Han et al., 2016a). 이에 가뭄 대응을 위한 다양한 대책들이 연구되고 있으며, 그 중에서도 지하수와 기저유출에 관한 연구가 많이 진행되고 있는 상황이다(Han et al., 2016a; Jung et al., 2014; Lee et al., 2014; Lee et al., 2017).

대수층 내 지하수가 하천으로 유출되는 것을 의미하는 기저유출은 하천유량을 유지하는데 있어 매우 큰 기여를 하고 있다. 특히 건기시 하천유량의 대부분은 기저유출에 의존하

기 때문에 하천유량에 대한 기저유출의 기여도가 큰 하천일 수록 안정적인 유량 확보가 가능하며, 이로 인해 연중 유량의 변동이 작다는 특징이 있다(Han et al., 2016b). 이에 하천에서의 기저유출 관리는 갈수기 유량 확보와 가뭄 예방 대책을 위한 하나의 방안으로 대두되고 있다(Hong et al., 2015). 하지만 기저유출의 유출 특성으로 인해 실제 하천에서 장기간에 걸친 기저유출 관측은 기술적으로 한계가 있다(Cho, 2006). 이러한 이유로 대부분의 기저유출 연구에서는 계측 유역에서 관측된 유량자료로부터 분리한 기저유출을 관측 기저유출 자료로 가정하여 연구를 진행하였다. 또한 관측 유량 자료가 존재하지 않는 미계측 유역에 대해서는 강우유출 모형을 이용하여 유량을 예측한 후 예측된 유량자료로부터 기저유출을 추정하는 방법이 많이 이용되고 있다(Han et al., 2016a; Loukas, A and Vasiliades. 2014; Luo et al., 2012).

다양한 강우유출 모형 중에서 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형은 전 세계적으로 미계측 유역에 대한 수문특성 모의를 위해 많이 사용되고 있는 모형이다(Neitsch et al., 2010). SWAT 모형은 국내에서도 다양한 유역을 대상으로 적용되었으며, 많은 연구를 통해 적용성과 정확성이 검증되었다. SWAT 모형은 수많은 매개변수들을 통해 유량 및 수질을 모의하며, 이 때문에 사용자가 시행착오법으로 예측 결과를 직접 보정하는 것은 많은 시간과 노력이 요구된다. 이러한 이유로 대다수의 사용자가 자동보정모형을 이용하여 예

* Department of Regional Infrastructures Engineering, Kangwon National University

** Department of Construction & Disaster Prevention Engineering, Kyungpook National University

[†] Corresponding author

Tel.: +82-54-530-1253 Fax: +82-54-530-1258

E-mail: y.jung@knu.ac.kr

Received: September 27, 2017

Revised: October 24, 2017

Accepted: October 24, 2017

측 결과를 보정하고 있다. 하지만 자동보정모듈은 각각의 매개변수의 물리적 의미에 대한 고려 없이 단순히 목적함수를 만족시키는 매개변수의 조합만을 찾는다. 이 때문에 보정된 매개변수 결과가 각 수문요소들의 특성을 나타내지 못하는 경우가 발생하고, 이로 인해 유량을 직접유출량과 기저유출량으로 분리하여 사용하고자 할 때 불확실성이 매우 크게 발생할 수 있다 (Jung et al., 2014). 따라서 정확한 기저유출 모의를 위해서는 유역의 물리적 특성을 고려하여 기저유출 관련 매개변수 값을 설정해주어야 한다.

이를 위해 Lee et al. (2014)는 수문곡선에서 침투유출 발생 후 기저유출의 감수부의 감수특성을 나타내는 기저유출 감수상수를 자동으로 산정할 수 있는 웹기반 RECESS 시스템 개발하였다. 또한 Jung et al. (2014)는 웹기반 RECESS를 이용하여 관측 유량자료로부터 기저유출 감수상수를 산정하고 이를 SWAT 모형에 적용하여 유량 및 기저유출 모의에 있어서 기저유출 감수상수의 영향을 평가하였다. 이 외에도 여러 연구에서 관측 유량자료로부터 산정된 기저유출 감수상수를 SWAT 보정 매개변수에 적용하여 유량을 모의하는 연구가 진행되었다. 그러나 기존의 연구에서는 유역의 최종유출구에 위치한 유량관측소에 대하여 산정된 기저유출 감수상수를 유역 내 모든 소유역 전체에 일괄적으로 적용하였다는 한계점이 있었다. 넓은 유역의 경우 소유역별로 토지이용도, 토성, 경사도 등 수문순환에 영향을 주는 물리적 특성이 다양할 수 있기 때문에 최종 유출구에서 산정된 기저유출 감수상수를 유역 전체에 획일적으로 적용하는 것은 유량 및 기저유출 모의에 있어서 불확실성을 증가시킬 수 있다. 이에 본 연구에서는 최종유출구의 기저유출 감수상수를 전체 소유역에 일괄적으로 적용한 결과와 각 소유역에 대해서 산정된 기저유출 감수상수를 각각의 소유역에 개별적으로 적용한 결과를 비교하여 유량 및 기저유출 모의의 정확도에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하고자 하였다.

따라서 본 연구의 목적은 1) 각 소유역별 관측유량자료로부터 산정된 기저유출 감수상수를 적용하여 유량 모의에 대한 기저유출 감수상수 영향을 분석하고, 2) 유량 모의 결과로부터 기저유출을 분리하여 기저유출 모의에 있어서 기저유출 감수상수의 영향을 분석하는 것이다.

II. 방 법

1. SWAT 모형

SWAT 모형은 준분포형 강우유출 모형으로 미국 농무성 농업연구소 (United States Department of Agriculture Agricultural Research Service; USDA ARS)에서 개발하였다. SWAT 모

형은 다양한 토지이용과 토양 특성을 가진 유역에 대한 장기 간 물순환 분석과 유사량, 영양염류 및 농약 등 오염물질의 거동 분석이 가능하다. SWAT 모형은 동일한 토지이용과 토양도의 중첩을 의미하는 수문반응단위 (Hydrologic Response Unit, HRU)를 최소 모의 단위로 하며 HRU 단위, 소유역 단위 및 유역 단위에 대한 분석이 가능하다.

SWAT 모형에서의 대수층을 얇은 대수층 (shallow aquifer)과 깊은 대수층 (deep aquifer)으로 구분하여 지하수를 모의한다. 토양특성과 토양의 수분함량 등과 같은 조건에 의해 최하부 토양층에서 대수층으로 함양되는 물의 양이 결정되면, 깊은 대수층으로 이동하는 일부를 제외한 모든 함양량은 얇은 대수층으로 이동하여 지하수가 된다 (Han et al., 2016b). 얇은 대수층 내의 지하수는 대수층 특성에 따라 일정 기간 동안 대수층 내에 저류되어 있으며, 기저유출 발생 조건을 만족하는 경우 기저유출 형태로 얇은 대수층 내의 지하수는 하천으로 이동한다. 얇은 대수층에서 하천으로 이동하는 기저유출량은 식 (1)에 의해 정의된다.

$$Q_{gw,i} = Q_{gw,i-1} \cdot \exp[-\alpha_{gw} \cdot \Delta t] + w_{rchrg,sh} \cdot (1 - \exp[-\alpha_{gw} \cdot \Delta t]),$$

$$Q_{gw,i} = 0, \quad \text{if } aq_{sh} > aq_{shthr,q}$$

$$Q_{gw,i} = 0, \quad \text{if } aq_{sh} \leq aq_{shthr,q} \quad (1)$$

여기서, $Q_{gw,i}$ 는 i일 기저유출량(mm), $Q_{gw,i-1}$ 는 i-1일의 기저유출량(mm), α_{gw} 는 기저유출 감수상수 (baseflow recession constant), Δt 는 time step, $w_{rchrg,sh}$ 는 i일 얇은 대수층 함양량(mm), aq_{sh} 는 얇은 대수층 저류된 지하수량(mm), $aq_{shthr,q}$ 는 기저유출 산정을 위한 얇은 대수층 임계값 (mm)이다. 얇은 대수층 내 저류된 지하수량이 임계값을 초과하는 경우에만 하천에서 기저유출이 발생하게 된다.

식(1)에서 기저유출량에 영향을 주는 매개변수는 기저유출 감수상수이다. 기저유출 감수상수란 수문곡선에서 침투유출 발생 후 직접유출이 모두 소멸된 이후 기저유출의 감수특성을 나타내는 값으로 대수층 내 지하수 흐름의 직접적인 지표로써, 토양특성과 대수층 특성에 영향을 받는다 (Smedema and Rycroft, 1983). 기저유출 감수상수는 관측 유량자료를 이용하여 산정할 수 있으며, 0에서 1사이의 값을 가진다. 0에 가까울수록 기저유출의 감수가 느리게 진행되는 것을 의미하고 1에 가까울수록 기저유출의 감수가 빠르게 진행되는 것을 의미한다.

2. RECESS를 이용한 기저유출 감수상수 산정

RECESS는 미국지질조사국 (United States Geological

Survey; USGS)에서 개발한 프로그램으로 주지하수곡선법 (Master Recession Curve)을 적용하여 수문곡선의 감수 특성을 분석하기 위해 개발되었다 (Lee et al., 2014; Liddle, 1988). USGS에서 개발한 RECESS 프로그램은 데스크탑 기반의 MS-DOS 프로그램으로 여러 가지의 부프로그램으로 구성되어 있다. 데스크탑 기반의 RECESS 프로그램은 전체 기간의 수문곡선 중에서 감수특성을 분석하고 싶은 감수곡선을 사용자가 직접 선택해야 했기 때문에 장기간에 대한 분석을 위해서는 많은 시간이 소요되는 단점이 있었다. Lee et al. (2014)은 이러한 단점을 개선하고자 웹기반의 RECESS 프로그램을 개발하였다.

Lee et al. (2014)이 개발한 웹기반 RECESS는 사용자가 분석하고 싶은 기간에 대한 실측유량자료를 업로드하면 자동으로 수문곡선 중 감수부만을 선별하고 이를 분석하여 유량이 하나의 로그 주기만큼 감수되는데 걸리는 시간을 의미하는 감수인자 (Recession index)를 결정하여 MRC 추정 결과를 제공한다 (Jung et al., 2014). 또한 이때 산정된 감수인자로부터 기저유출 감수상수를 산정하여 MRC 추정 결과와 함께 제공한다 (식 (2)).

$$Q_t = Q_0 K^t = Q_0^{-\alpha t}$$

$$\alpha = -\ln K \tag{2}$$

여기서 Q_0 는 감수부 시작점에서의 유량, Q_t 는 시간 t 에서의 유량, K 는 감수인자 그리고 α 는 기저유출 감수상수이다.

3. 기저유출 감수상수를 고려한 유량 산정

본 연구에서는 SWAT 모형의 자동보정보툴인 SWAT-CUP (Calibration and Uncertainty Program)을 이용하여 유량 모의 결과를 보정하였다. SWAT-CUP은 목적함수를 기준으로 사용자가 선택한 매개변수에 대하여 최적의 값을 제공해준다. 본 연구에서는 모형 보정 결과를 평가하기 위해 결정계수 (R^2)

과 모델효율성지수 (Nash-Sutcliffe Efficiency; NSE)를 이용하였으며, 각각의 산정방법 아래와 같다 (Nash and Sutcliffe, 1970). 여기서, P_i 는 모의값, \bar{O} 는 평균 관측값, O_i 는 관측값이다. 또한 각 평가지수의 만족범위는 Table 1과 같다.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \tag{3}$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \tag{4}$$

또한 소유역별로 기저유출 감수상수를 적용하는 것이 유량 및 기저유출 모의에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하기 위하여 두 가지의 시나리오를 가정하여 유량 보정을 진행하였다. 시나리오 1 (S1)은 유역 최종유출구인 영월1 유량관측소의 유량자료로부터 산정된 기저유출 감수상수 산정 결과값을 유역 내 위치한 모든 소유역에 일괄적으로 적용하고 감수상수를 제외한 다른 매개변수들에 대해서는 SWAT-CUP을 이용하여 보정하였다. 시나리오 2 (S2)는 유역 내 위치한 6개의 유량관측소에 대해서 산정된 기저유출 감수상수 값들을 각 유량관측소가 위치한 소유역에 개별적으로 적용하고 감수상수를 제외한 매개변수들 중 S1 보정에 사용된 매개변수와 동일한 매개변수에 대하여 SWAT-CUP을 이용하여 보정하였다. S2 보정 과정에서 유량관측소가 존재하지 않는 소유역에 대해서는 상류와 하류 소유역 중에서 가장 가까이 위치한 유량관측소의 기저유출 감수상수를 적용하였다.

4. WHAT 시스템을 이용한 기저유출량 분석

본 연구에서는 실측 유량자료와 SWAT 모형을 통해 모의된 유량자료로부터 기저유출을 분리하기 위해 WHAT 시스템 이용하였다. WHAT 시스템 (<http://www.envsys.co.kr/~what>)은 Local minimum method (LMM), BFLOW filter, Eckhardt filter 세 가지 방법 중에서 사용자가 선택한 방법을 이용하여

Table 1 Classification of model efficiencies

Statistical criterion	Value	Classification of performance	Reference
R^2	$0.90 < R^2 \leq 1.0$	Excellent	Parajuli et al. (2009)
	$0.75 < R^2 \leq 0.90$	Very good	
	$0.50 < R^2 \leq 0.75$	Good	
	$0.25 < R^2 \leq 0.50$	Fair	
NSE	$0.75 < NSE \leq 1.00$	Very good	Boskidis et al. (2012)
	$0.65 < NSE \leq 0.75$	Good	
	$0.50 < NSE \leq 0.65$	Satisfactory	Santhi et al. (2001)
	$0.40 < NSE \leq 0.50$	Acceptable	
	$NSE \leq 0.40$	Unsatisfactory	

기저유출을 분리하는 웹기반 프로그램이다 (Lee et al., 2017). LMM은 수문곡선을 이용한 기저유출 분리 방법이며, BFLOW filter는 신호처리 (signal processing)분야에서 고주파와 저주파를 분리하기 위해 사용되는 방법을 수문곡선에 적용하여 기저유출을 분리하는 디지털 필터방법이다. Eckhardt filter는 수문학적 특성을 제대로 고려하지 못하고 단순히 수문곡선의 형상만을 가지고 기저유출을 분리하는 BFLOW filter의 단점을 개선하고자 개발된 방법으로, 기저유출의 최대 기여도를 의미하는 BFI_{max} 라는 변수를 통해 대수층의 특성을 고려할 수 있는 기저유출 분리 방법이다 (식 (5)).

$$b_t = \frac{(1 - BFI_{max}) \times \beta \times b_{t-1} + (1 - \beta) \times BFI_{max} \times Q_t}{1 - \beta \times BFI_{max}} \quad (5)$$

여기서 b_t 는 t 시간에 분리된 기저유출량 (m^3/s), β 는 필터의 매개변수, Q_t 는 t 시간에서의 전체 하천유량 (m^3/s), BFI_{max} 는 장기간의 총 유출량에 대한 기저유출비의 최대값이다. Eckhardt (2005)는 적절하지 않은 BFI_{max} 사용으로 인한 잘못된 기저유출 분석 결과를 초래할 수 있기 때문에 항상 하천이 흐르고 공극이 많은 대수층, 단속적으로 하천이 흐르고 공극이 많은 대수층, 항상 하천이 흐르고 암반으로 구성된 대수층에 대하여 각각 0.80, 0.50, 0.25로 BFI_{max} 값을 제안하였다 (Lim et al., 2010). 본 연구에서는 대수층 특성을 고려할 수 있는 Eckhardt filter 방법을 이용하여 기저유출을 분석하였으며, BFI_{max} 값으로 항상 하천이 흐르고 공극이 많은 대수층에

해당하는 0.8을 적용하였다.

5. 연구대상지역

평창강 유역은 한강수계의 중권역 중 하나이며 한강의 제 1 지류로서 행정구역상으로는 강원도 평창군에 위치하고 있다 (Fig. 1). 유역의 면적은 1,774 km^2 , 유로연장은 147 km 이고, 유역 내 최고고도 1,560 m , 최저고도 200 m , 평균고도 614 m 로 산림지역이 많이 분포하고 있어 유역의 고도가 높다 (Yi et al., 2012). 또한 평창강 유역은 국제수문개발계획 (International Hydrological Program; IHP) 시범유역으로 선정되어 유역 내 위치하고 있는 유량관측소는 오랜 기간에 대한 유량 관측 자료를 보유하고 있다. 본 연구에서는 국토교통부 영월1 유량 관측소를 최종유출구로 설정하여 유역을 재분할 하였다. 영월1 유량관측소를 최종유출구로 재분할한 결과 본 연구에서 분석한 평창강 유역의 면적은 1,613 km^2 이다.

6. 유량자료 및 모형 입력자료

본 연구에서는 SWAT alpha factor 산정 및 모형 모의 결과 보정을 위해 국가수자원관리 종합정보시스템 (Water management information system, WAMIS)에서 제공하는 유량 자료를 활용하였다. 연구대상지역인 평창강 유역에는 영월1, 주천교, 백옥포교, 상방림교, 선애교, 장평교, 평창교, 안흥교 총 8개의 유량관측소가 위치해 있다 (Fig. 1). 8개의 유량관측소 중에서 본 연구에서는 자료기간 중 장기간 결측치가 있는 선애

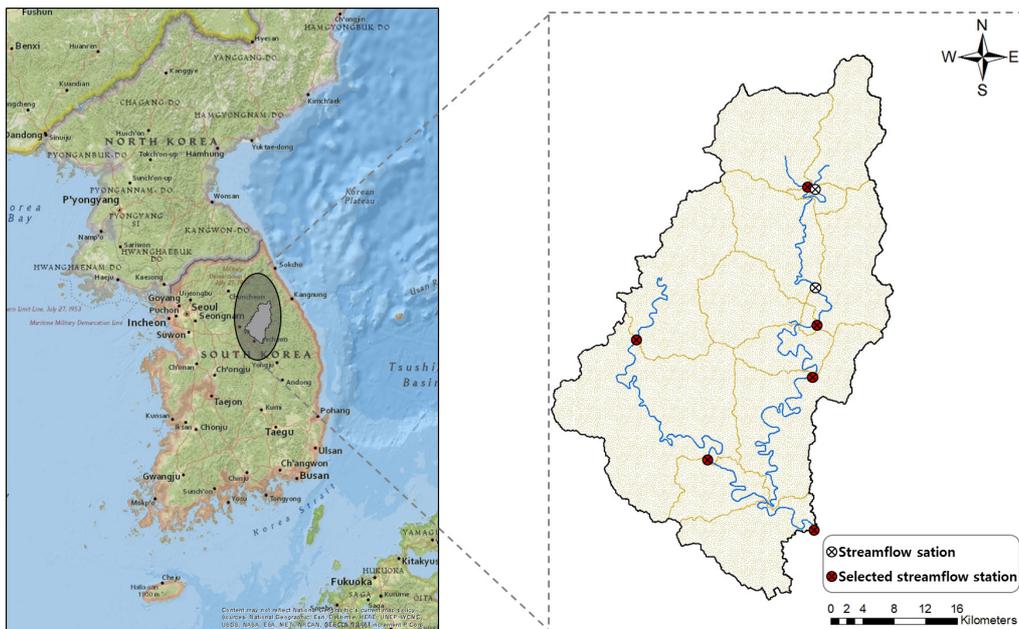


Fig. 1 Location of Pyeongchang-watershed and streamflow stations

Table 3 Range of calibration parameters and the results

Parameter	Boundary for calibration			Calibration results	
	Method	Min	Max	S1	S2
ALPHA_BF	repalce	-		0,0846	each
CN2	add	-5	5	-4,62	-4,85
CH_K2	replace	-0,01	50	14,98	21,65
CANMX	replace	0	70	68,21	51,68
CH_N2	replace	-0,01	0,1	0,0315	0,0294
GWQMN	replace	0	5000	3794,47	4150,47
SLSUBBSN	relative	-0,2	0,2	1,185	1,177
SLOPE	relative	-0,2	0,2	0,80	0,97
SFTMP	replace	0	5	4,75	2,68
SMTMP	replace	0	5	2,89	3,25

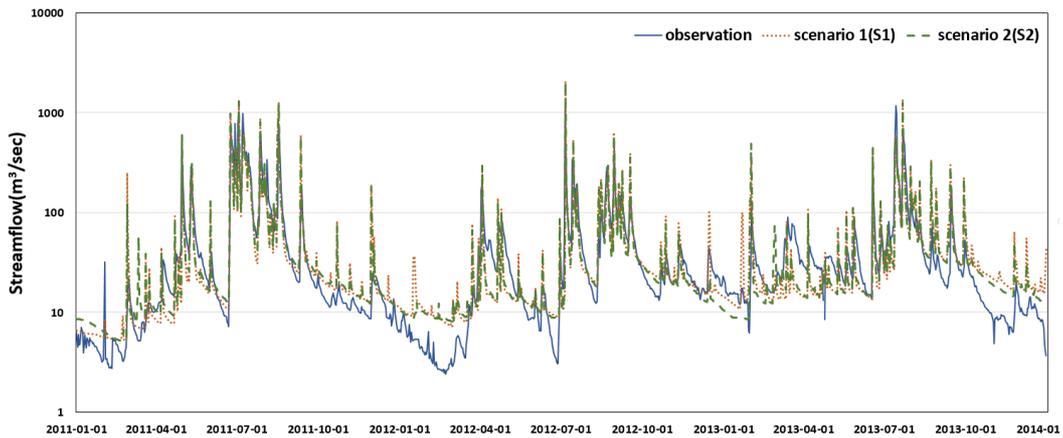


Fig. 3 Streamflow observation and streamflow simulation results of SWAT

평가되었다.

S1과 S2의 R²와 NSE의 차이는 큰 차이를 보이지는 않았으나, 최종유출구의 기저유출 감수상수를 유역 내 소유역 전체에 일괄적으로 적용한 S1에 비해 각각의 소유역에 대해서 산정된 기저유출 감수상수 소유역별로 적용한 S2의 정확도가 다소 높게 산정되었다. 또한 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 S1에 비하여 S2가 관측유량자료와 비교했을 때 첨두유량 발생 후 유량이 감소되는 감수부 부분을 상대적으로 관측유량자료에 더 가깝게 모의된 것을 알 수 있다.

하지만 S1과 S2에 동일한 매개변수에 대하여 기저유출 감수상수를 제외한 나머지 매개변수에 서로 다른 값을 적용했음에도 모의 결과의 정확도가 유사한 것은 보정된 매개변수의 값이 각 매개변수들에 대한 물리적 특성을 고려하지 않고 단순히 수학적적인 조합으로만 이루어진다는 것을 보여준다. 따라서 단순히 기저유출 감수상수의 영향으로 감수부 모의

정확도가 향상된 것이라고 판단할 수 없기 때문에 다양한 유역 특성을 고려할 수 있도록 많은 유역을 대상으로 본 연구를 확대 적용할 필요하다.

2. 기저유출 산정 결과

기저유출은 발생특성으로 인해 실제 하천에서 관측하는 것은 기술적인 한계가 있기 때문에 대부분의 연구에서는 기저유출 분리 방법을 적용하여 관측유량자료로부터 산정된 기저유출을 실측 자료로 가정하였다 (Ahiablame et al., 2013; Arnold et al., 2000; Jung et al., 2014; Zhang et al., 2011). 본 연구에서도 WHAT 시스템을 이용하여 관측유량자료로부터 분리한 기저유출을 관측 기저유출이라 가정하였다.

기저유출 모의에 대한 기저유출 감수상수의 영향을 분석하기 위하여 SWAT 모형으로 모의한 유량 결과(S1, S2)로부터 분리된 기저유출 결과를 관측 기저유출과 비교하였다(Fig.

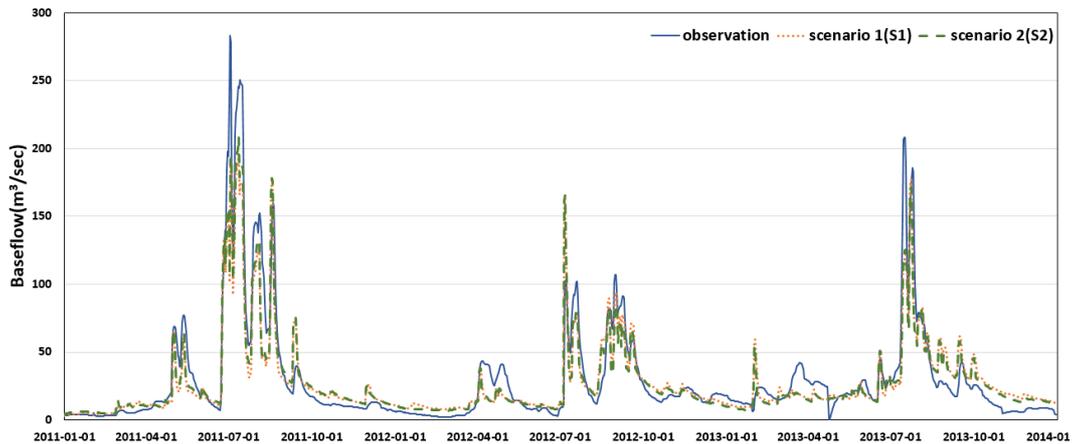


Fig. 4 Baseflow estimated from observation and SWAT simulation results using WHAT

4). 모의 만족도를 평가하기 위하여 R^2 와 NSE를 산정한 결과 S1의 R^2 와 NSE는 각각 0.853, 0.827이었으며 S2는 각각 0.875, 0.851였으며, 전체 소유역에 동일한 기저유출 감수상수를 적용한 것보다 각 소유역별 기저유출 감수상수를 적용한 것이 다소 높은 모의 만족도를 나타냈다. 다만, 유량 모의 결과에서처럼 두 시나리오의 모의 만족도는 큰 차이를 나타내지 않았다. 하지만 유량 모의 결과에서와 마찬가지로 Fig. 4에서 S2의 기저유출 모의 결과가 기저유출 감수부에서 상대적으로 S1에 비해 관측 기저유출을 잘 모의하는 것으로 나타났다. 즉, 유량 모의 결과 및 기저유출 모의 결과 모두에서 S1보다 S2가 모의 정확도가 상대적으로 높게 나타났으며, 특히 감수부에서의 모의 정확도가 향상되는 것으로 판단할 수 있었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 수문곡선의 감수부 모의 정확도 향상을 위해서 기저유출 감수상수의 영향을 분석하고자 하였다. 이를 위해 평창강 유역을 대상으로 각 소유역별 관측유량자료로부터 산정된 기저유출 감수상수를 각 소유역별로 적용하여 유량 모의에 대한 기저유출 감수상수 영향을 분석하였다. 또한 WHAT 시스템을 이용하여 유량 모의 결과로부터 기저유출을 분리하여 기저유출 모의에 있어서 기저유출 감수상수의 영향을 분석하였다. 이를 위해 최종 유출구에 위치한 유량관측소의 기저유출 감수상수를 전체 소유역에 일괄적으로 적용한 시나리오 1 (S1)과 각각의 소유역에 대해서 산정된 기저유출 감수상수를 각 소유역별로 적용한 시나리오 2 (S2)로 구분하여 SWAT 모형의 모의 결과를 보정하였다. S1과 S2의 보

정 결과를 관측 유량자료와 비교한 결과 S2의 NSE와 R^2 가 S1보다 다소 높게 나타났으나, 뚜렷한 차이를 나타내지는 않았다. 하지만 S2의 수문곡선에서의 감수부가 S1의 수문곡선에서의 감수부보다 상대적으로 관측 유량자료에 더 가깝게 모의된 것을 확인할 수 있었다.

또한 기저유출 모의에 대한 기저유출 감수상수의 영향을 분석하고자 WHAT 시스템을 이용하여 관측 유량자료와 S1 및 S2의 유량 모의 결과로부터 기저유출을 분리하여 모의 만족도를 비교하였다. 비교 결과 S2의 기저유출 모의 결과가 S1보다 더 높은 모의 만족도를 나타냈으나, 큰 차이를 나타내지는 않았다. 하지만 유량 모의 결과와 마찬가지로 기저유출 수문곡선에서 S2의 기저유출 모의 결과가 S1의 기저유출 모의 결과보다 관측 유량자료에 더 가까운 것으로 나타났다. 이를 통해 기저유출 감수상수를 소유역별로 개별적인 값을 적용하는 것은 수문곡선에서의 감수부 모의 정확도를 향상시키는 것으로 판단되었다. 본 연구에서 제시한 소유역별 기저유출 감수상수의 개별적 적용 방법은 정확한 기저유출 모의를 통해 하천 유량에서의 기저유출 특성을 파악하는데 도움이 될 것으로 기대된다. 또한 이는 향후 가뭄 대응을 위한 하천관리 방안 수립 시 하천 특성에 대한 기초 자료로서 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원(17AWMP-B083066-04)을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Ahiablame, L.M., B.A. Engel, and I. Chaubey, 2013. Effectiveness of low impact development practices in two urbanized watersheds: Retrofitting with rain barrel/cistern and porous pavement, *Journal of environmental management* 119(15): 151-161.
- Arnold, J.G., R.S. Muttiah, R. Srinivasan, and P.M. Allen, 2000. Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin. *Journal of Hydrology* 227(1): 21-40.
- Boskidis, I., G.D. Gikas, G.K. Sylaios, and V.A. Tsihruntzis, 2012. Hydrologic and water quality modeling of lower nestos river basin. *Water Resource Management* 26: 3023-3051.
- Cho, S.H. 2006. Computation of baseflow contribution to streamflow using environmental tracers in three small catchments Yuseong, Daejeon. PhD Diss, Choongnam National University, Daejeon (in Korean).
- Hong, J. K.J. Lim, Y. Shin, and Y. Jung, 2015. Quantifying contribution of direct runoff and baseflow to rivers in Han river system, South Korea, *Journal of Korea Water Resource Association* 48(4): 309-319 (in Korean).
- Han, J.H., K.J. Lim, and Y. Jung, 2016. A Study on relationship between streamflow variability and baseflow contribution in Nakdong river basin, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 58(1): 27-38 (in Korean).
- Han, J.H., T.S. Ryu, K.J. Lim, and Y.H. Jung, 2016. A review of baseflow analysis techniques of watershed-scale runoff models. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 58(4): 75-83 (in Korean).
- Kang, D.S., 2011. Study on the change of river discharge and baseflow considering urbanization and climate change. MS diss., Kookmin University, Seoul, Korea (in Korean).
- Lee, G., Y. Shin, and Y. Jung, 2011. Development of web-based RECESS model for estimating baseflow using SWAT. *Sustainability* 6(4): 2357-2378.
- Lee, S.C., H.Y. Kim, H.J. Kim, J.H. Han, S.J. Kim, J. Kim, and K.J. Lim, 2017. Analysis of baseflow contribution based on time-scales using various baseflow separation methods, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 59(2): 1-11 (in Korean).
- Liddle, R.G. 1998. Recharge and discharge calculations to characterize the groundwater hydrologic balance. *Proceedings America Society of Mining and Reclamation* 41-53.
- Luo, Y., J. Arnold, P. Allen, and X. Chen, 2012. Baseflow simulation using SWAT model in an inland river basin in Tianshan Mountains, Northwest China. *Hydrology and Earth System Sciences* 16(4): 1259-1267.
- Nash, J.E. and J.E. Sutcliffe, 1970. River flow forecasting through conceptual models. part I-A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3): 282-290.
- Neitsch, S., J. Arnold, J. Kiniry, R. Srinivasan, and J. Williams, 2010. Soil and water assessment tool. user's manual, version 2009. Texas Water Resources Institute, Technical Report.
- Parajuli, P.B., N.O. Nelson, L.D. Frees, and K.R. Mankin, 2009. Comparison of AnnAGNPS and SWAT model simulation results in USDA-CEAP agricultural watersheds in south-central Kansas. *Hydrological Processes* 23(5): 748-763.
- Santhi, C., J.G., Arnold, J.R., Williams, W.A., Dugas, R. Srinivasan, and L.M. Hauck, 2001. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *Journal of the American Water Resources Association* 37: 1169-1188 (in Korean).
- Yi, J., S. Kim, T. Lee, and J. Ji, 2012. Design flood estimation for pyeongchang river basin using fuzzy regression method. *Journal of Korea Water Resources Association* 45(10): 1023-1034 (in Korean).
- Zhang, X., R. Srinivasan, J. Arnold, R.C. Izaurralde, and D. Bosch, 2011. Simultaneous calibration of surface flow and baseflow simulations: a revisit of the SWAT model calibration framework. *Hydrological Processes* 25(14): 2313-2320.