Journal of Wetlands Research, Vol. 16, No. 4, pp. 303-318 (2014)

토지이용변화에 따른 미계측 유역의 기저유출량 산정 및 평가

이지민 · 신용철* · 박윤식 · 금동혁 · 임경재 · 이승오** · 김형수*** · 정영훈****+

국립강원대학교 지역건설공학과

* APEC 기후센터 , ** 홍익대학교 토목공학과, *** 인하대학교 토목공학과, **** 국립강원대학교 환경연구소

Estimation and assessment of baseflow at an ungauged watershed according to landuse change

Lee, Ji Min · Shin, Yongchun* · Park, Youn Shik · Kum, Donghyuk

· Lim, Kyoung Jae · Lee, Seung Oh** · Kim, Hungsoo*** · Jung, Younghun****+

Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University, Korea,

** APEC climate center,*

*** School of Urban and Civil Engineering, Hongik University, Korea*

**** Department of Civil Engineering, Inha university, Korea*

***** Environmental Research Center, Kangwon National University, Korea*

요 약

기후변화와 도시화는 기저유출이 하천유량에 미치는 계절별 특성에 변동성을 초래한다. 이러한 기저유출의 변동성은 수생태의 혼란을 유발할 뿐만 아니라 불안정한 수자원 관리를 초래할 수 있다. 토지이용변화는 직접유출과 기저유출에 영향을 주며, 결과적으로 다른 수문순환 요소들에게 미치게 된다. 일반적으로 기저유출은 관측된 하천유량을 통해 산정되지만, 모델링의 유량 예측을 통해서 미계측 유역의 기저유출량 산정에 유용하게 사용 될 수 있다. 따라서, 본 연구의 목적은 1) RECESS 통해 alpha factor를 산정한 후, SWAT 모형에 적용하여 보정 예측을 향상시키고, WHAT 시스템을 미계측 유역의 적용하여 기저유출을 분석하며, 3) 토지이용변화에 따른 기저유출 특성을 평가하는 것이다. 이러한 목적으로 미계측 지역인 갑천 유역에 Period 1(1990-1996)과 Period 2(2000-2006)로 설정하여 적용하였다. RECESS를 통해 alpha factor를 산정한 후, SWAT 모형 보정에 적용한 결과는 유량예측의 정확성을 향상시키고, 기저유출의 특성인 감수부분도 반영되었다. 두기간 사이의 연평균 기저유출을 비교했을 때 토지이용변화는 연평균 기저유출량에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 그러나 두기간 사이의 계절별 기저유출의 분포를 비교했을 때 토지이용변화는 기저유출의 계절별 특성에서 큰 상이성을 초래했다. 따라서 토지이용변화로 인한 갑천 유역의 유량 및 기저유출의 변동성은 금강 본류로 전달되기 때문에 계절별 변화에 따라 전략적으로 분석 및 관리가 필요하다.

핵심용어 : 기저유출, 감수부, 미계측 유역, 토지이용변화

Abstract

Baseflow gives a significant contribution to stream function in the regions where climatic characteristics are seasonally distinct. In this regard, variable baseflow can make it difficult to maintain a stable water supply, as well as causing disruption to the stream ecosystem. Changes in land use can affect both the direct flow and baseflow of a stream, and consequently, most other components of the hydrologic cycle. Baseflow estimation depends on the observed streamflow in gauge watersheds, but accurate predictions of streamflow through modeling can be useful in determining baseflow data for ungauged watersheds. Accordingly, the objectives of this study are to 1) improve predictions of SWAT by applying the alpha factor estimated using RECESS for calibration; 2) estimate baseflow in an ungauged watershed using the WHAT system; and 3) evaluate the effects of changes in land use on baseflow characteristics. These objectives were implemented in the Gapcheon watershed, as an ungauged watershed in South Korea. The results show that the alpha factor estimated using RECESS in SWAT calibration improves the prediction for streamflow, and, in particular, recessions in the baseflow. Also, the changes in land use in the Gapcheon watershed leads to no significant difference in annual baseflow between comparable periods, regardless of precipitation, but does lead to differences in the seasonal characteristics observed for the temporal distribution of baseflow. Therefore, the Guem River, into which the stream from the Gapcheon watershed flows, requires strategic seasonal variability predictions of baseflow due to changes in land use within the region.

Keywords : Baseflow, Land use change, Recession, Ungauged watershed

+ Corresponding Author: jung.younghun@gmail.com

1. 서론

기후변화, 지하수 이용, 토지이용변화는 수문현상에 변동성을 초래하는 대표적인 요소들이다(Ferguson et al., 2012; Li et al., 2013; Mehta et al., 2013). 특히 토지이용변화는 수문요소인 침투량과 증발산에 영향을 주며, 연쇄적으로 다른 수문요소에도 영향을 주어 수문순환의 변화를 초래한다. 도시화로 증가되는 건물, 도로, 압축토양, 지하주차장과 같은 불투수층 지역은 수문반응에 직접적인 영향을 준다 (Shuster et al., 2005; Ogden et al., 2011). 이러한 현상은 수문순환에 관련된 여러 요소들에게 영향을 미치지만, 이를 정량적으로 특성화하여 평가하기에는 어려움이 있다. 이에 인구와 토지이용 변화의 정량화는 수문 변동성을 추정하는데 이용 될 수 있다. 특히, 토지이용변화 자료는 지표의 특성을 공간적으로 수문특성에 전달하는 중요한 요소이고, 지리 정보 시스템 (Geographic Information Systems; GIS)를 이용하여 그 변화를 추정할 수 있다. 이러한 이유로 수문변화에 대한 도시화의 영향에 대한 연구는 활발히 수행되고 있다 (Kim et al., 2005; Gao et al., 2009; Maneta et al., 2009; De et al., 2011).

도시화에 따른 수문 변화는 수생태 환경에 위협적 요인으로 작용하고 있다 (Hamel et al., 2013). 또한 하천 유량에 대해 건기와 우기에 다르게 작용하여 하천의 기능을 저감시키고 있다 (Malhi et al., 2009). 그러나 많은 연구들은 강우사상발생시 첨두유출을 증가시키는 영향에 대하여 집중해 왔다. 우기에 도시화의 영향은 불투수층의 증가로 인하여 직접유출을 증가시킨다. 이와 관련해서 하천유량의 증가와 함께 유사량이 증가되면서 수질, 수생태 서식지, 유수체계를 위협한다 (Wang et al., 2001). 반면 기저유출과 저유량에 대한 영향은 고유량 및 홍수에 비해 상대적으로 적은 관심을 받아왔다 (Price et al., 2011). 따라서 도시화에 따른 기저유출의 변동성을 분석하고 대응할 필요성이 있다.

하천 유량은 주로 직접유출과 기저유출로 구성된다. 기저유출은 지하수유출과 지표하유출에 의해 구성되며 강우사상에 직접적인 영향을 받아 건기시 하천유량의 대부분을 점유 한다 (Hall et al., 1968; Sophocleous et al., 2002; Santhi et al., 2008). 기저유출의 감소는 건기 시 하천 수질과 수생태 환경에 부정적인 영향을 미칠 수 있으며, 하천건천화의 위험을 증가 시킬 수 있다. 따라서 계절적 특성이 뚜렷한 지역에서 하천환경에 대한 기저유출의 역할은 중요하다. 또한 도시화가 진행된 지역에서는 불투수층의 증가로 인한 침투량의 감소 때문에 효율적 하천관리를 위해서 기저유출을 고려해야한다. 따라서, 하천 관리를 하기 위해 직접유출과 기저유출 사이의 상호작용을 고려한 하천 기능을 개선시킬 수 있는 전략적 계획이 요구된다.

기저유출은 일반적으로 수문곡선 그래프를 통하여 분리되며, 강우에 의한 직접유출 발생의 초기지점과 최종지점에 대한 정보를 필요로 한다 (Nathan et al., 1990; Tallaksen et al., 1995; Szilagyi et al., 1998; Arnold et al., 1999; Ahiablame et al., 2013). 여기서 초기지점에 대한 정보는 강우사상에 의하여 하천유량이 증가하는 시점으로 비교적 쉽게 얻을 수 있지만, 최종지점의 구분은 임의적이고 모호하다 (Kulandaiswamy et al., 1969). 이러한 이유로 최종지점은 감수부에서 로그로 치환한 하천유량이 일정해지는 지점으로 결정된다 (Chapman et al., 1999). 그러나 그래프기반의 몇몇 기저유출분리방법들은 장기간의 연속된 기저유출을 분리하는데 한계가 있다 (Chow et al., 1988; Lim et al., 2005). 장기간의 수문곡선으로부터 기저유출은 디지털 필터 방법에 의해 분리될 수 있다 (Eckhardt, 2005; Eckhardt, 2008). 이와 같이 하천유량으로부터 기저유출을 분리하는 다양한 방법들 가운데 WHAT시스템은 BFLOW와 Eckhardt 필터 방식을 적용하여 기저유출 부분을 자동으로 분리할 수 있는 기능을 가지고 있다 (Lim et al., 2005). WHAT 시스템은 저수지와 댐 방류 및 해빙이 기저유출에 미치는 영향을 고려하지 않지만, 기저유출을 분리하는데 있어 매우 효과적이며 하천 유량에서 지하수의 역할을 파악하는데 결정적인 기여를 할 수 있다 (Lim et al., 2010)

기저유출의 산정은 일반적으로 유역 측정지점에서 관측된 유량 자료를 이용한다 (Bako et al., 1988; Wilcox et al., 2010). 그러나 미계측 지점 혹은 자료가 미흡한 지점에서는 강우-유출모형을 이용하여 유량을 모의한 후 모의된 유량으로부터 기저유출을 분리한다 (Samuel et al., 2012). 이와 관련해서 다양한 모형들이 미계측 지점에서 유량을 산정하기 위해 활용되고 있다. 이 중 SWAT (Soil Water Assessment Tool) 모형은 준분포 강우모형으로서 미계측유역의 수질, 유량, 유사량을 예측하는 연구에 널리 적용되었다 (Gitau et al., 2010; Singh et al., 2012). 특히 SWAT 모형은 ParaSol (Parameter Solution), SUNGLASSES (Sources of Uncertainty Global Assessment using Split Samples), SCE-UA (Shuffled

Complex Evolution-University of Arizona) 이라는 자동 보정모듈을 지원하여 그 활용성을 넓혀 왔다. 또한 스위스 연방연구소 EAWAG (German acronym for Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz)에서 SWAT 사용자들에게 보다 편리하고 다양하게 보정할 수 있도록 SWAT-CUP을 개발하여 HRU (hydrologic response unit)별로 다중 유출지점에 대해 보정 할 수 있다. 그러나 SWAT모형에는 각 수문요소들을 해석하기 위한 많은 매개변수들이 포함되어 있다. 보정과정에서 이러한 매개변수들은 물리적 특성을 고려하지 않고 수학적인 조합들로 모형을 보정하기 때문에 감수부 특성을 반영하는데 한계점이 있다. 이러한 이유로 감수부의 관련된 기저유출량 산정부분에서 오류가 발생할 수 있다. 이에 따라 본 연구의 목적은 1) 감수부분을 고려할 수 있는 alpha factor 산정하여 SWAT 모형의 하천유량의 예측에서 감수부의 특성을 반영하고 2) 보정된 매개변수를 이용하여 미계측 유역에서 하천유량을 예측하고 이를 이용해 미계측 유역에서의 토지이용 변화의 따른 기저유출량의 변화를 분석한다. 이러한 목적을 달성하기 위해 회덕 지점의 실측 유량을 SWAT 모형으로 보정 후에 미계측지점인 갑천 유역의 유량을 산정하여 기저유출량을 분리하여 분석한다.

2. 연구 방법

본 연구의 방법은 다음과 같이 세 가지 단계로 되어 있다. 1) 회덕지점을 대상으로 감수부에 관련 있는 alpha factor를 산정하여, SWAT-CUP에 적용한 후 보정한다. 2) 보정된 매개변수을 미계측지점인 갑천 지역에 적용한 후, WHAT 시스템으로 기저유출을 평가한다.3) 시공간적으로 다른 토지이용도에 의한 유출을 WHAT 시스템 적용해 기저유출을 분리하여 평가한다. 이러한 절차방법은 Figure. 1과 같다.

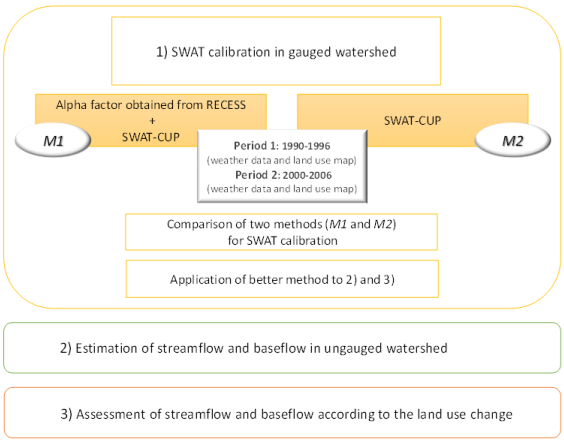


Fig. 1. Procedure

2.1 연구지역

연구대상지역인 갑천 유역(649 km^2)은 금강수계에 위치하고 있으며(Figure. 2), 이 유역은 대전광역시를 포함하고, 지난 20년 동안 광범위하게 개발되었다. 1,500,000명의 인구가 거주하고 있는 대전광역시는 지난 25년 동안 600,000명이 증가하였다. 갑천 유역에서 도시화는 수자원 관리에서 심각한 문제로 대두되고 있다. 갑천이 금강 본류와 합류되는 지점에서 실측자료 정보가 부재하기 때문에 기저유출에 대한 정보가 미흡한 실정이다. 갑천 유역은 상류의 대청댐과 하류의 세종시 사이의 금강본류에 합류한다. 세종시는 인구분산과 지역발전 균등화의 국가적 차원의 목적으로 500,000 명의 인구를 수용할 예정이기 때문에 갑천 유역으로부터 금강본류에 유입되는 유량과 수질은 하류에 위치한 세종시에 영향을 줄 수 있다. 또한 상류에 위치한 대청댐은 금강의 수질과 수량을 조절할 수 있기 때문에 갑천 유역으로부터 유입되는 유량의 정보는 금강본류의 관리를 위해 매우 유용할 것이다. 그러나 갑천 유역은 미계측 지점으로 하천유량에 대한 정보가 없기 때문에 본 연구에서 회덕지점에서의 관측 유량자료를 이용하여 SWAT모형을 보정하였다. 회덕지점은 갑천 유역 안에 위치하며, 회덕지점을 유출구로 하는 유역면적은 약 597 km^2 이다. 갑천 유역은 가파른 산악지형으로 평균경사도는 약 28%, 평균고도는 약 176m, 평균 유역 폭은 11km, 연평균 강수량은 1,354 mm 그리고 연평균 온도는 12.3°C 이다. 갑천 유역은 1995년부터 2005년 사이에 상당한 토지

이용변화가 있었으며(Figure. 3; Table 1), 특히 다른 토지이용도에 비해 도시유역 (UCOM: +29.53 km^2) 이 크게 증가하였다. 따라서 토지이용변화에 의한 갑천 유역에서의 수문학적 변동성을 분석하는 것이 필요하다.

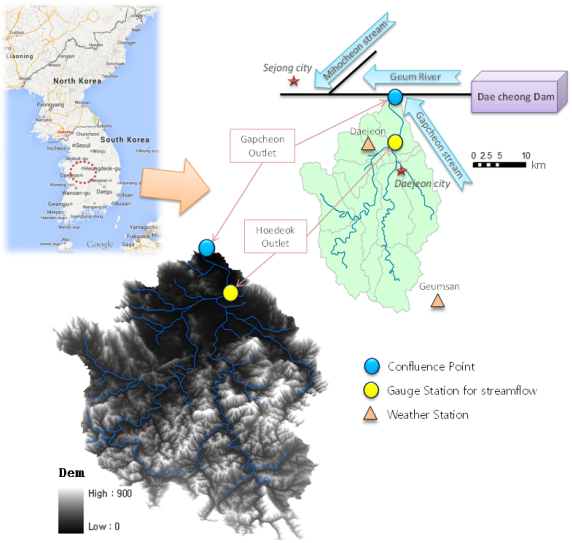


Fig. 2. Scheme of study site location

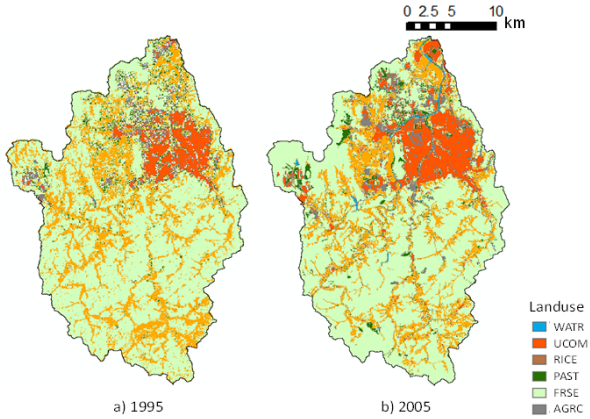


Fig. 3. Land use change in the Gapcheon watershed

Table 1. Landuse change in the Gapcheon watershed

Landuse type	1995		2005		Temporal Change In Area (km^2)
	Area (km^2)	Percent (%)	Area (km^2)	Percent (%)	
WATR (Water)	3.00	0.45	7.49	1.15	+ 4.48
UCOM (Urbanization)	65.97	10.16	95.5	14.7	+ 29.53
AGRC (Agriculture)	16.75	2.58	20.76	3.2	+ 4.01
PAST (Pasture)	21.16	3.26	27.82	4.28	+ 6.66
FRSE (Forest)	400.10	61.59	385.40	59.33	- 14.70
RICE (Paddy)	142.64	21.96	112.65	17.34	- 29.98
Total	649.62	100.00	649.62	100.00	0.00

2.2 SWAT모형 개요 및 입력자료

SWAT 모형은 미국 농무성 농업연구소 (USDA / ARS) 에 의해 개발된 장기유출을 모의할 수 있는 준분포형 모형으로서, 유량, 유사, 수질을 모의 할 수 있다. 또한 예측 정확성을 향상시키기 위해 많은 연구가 수행되어 왔다 (Chaplot et al., 2005; Jeong et al., 2011; Neitsch et al., 2005; Arnold et al., 1993; Gitau et al., 2010). SWAT모형은 소유역의 토지이용, 토양도 조합을 고려하여 더 세분화된 HRU로 나누며 (Neitsch et al., 2005), HRU별로 유사한 토양과 토지이용이 고려되어 계산된다. 또한 Penman-Monteith 방법, Priestley-Taylor 방법, 그리고 Hargreaves 방법을 통해 잠재 증발산량을 산정할 수 있으며 NRCS curve number와 Green-Ampt 침투량 방법은 직접유출량을 산정하는데 이용될 수 있다. 지하수 흐름에 대해 SWAT 모형은 얕은 대수층과 깊은 대수층을 모의 할 수 있다 (Arnold et al., 1993). 본 연구에서는 SWAT 모형을 통해 토지이용변화에 따른 기저유출량과 미계측 유역의 기저유출량의 영향을 분석하였으며, 모의 기간은 Period 1 (1990-1996)과 Period 2 (2000-2006)로 나누어 분석하였다. 입력 자료로 기후자료(강수량, 풍속, 습도, 일사량, 온도), 지형자료, 토지이용도, 토양도 등이 사용되었다 (Table 2).

Table 2. Dataset for SWAT simulation

Data type	Resolution	Periods	Source
Precipitation	Temporal (1 day)	1990 ~ 1996, 2000 ~ 2006	KMA (Korea Meteorological Administration)
Temperature	Temporal (1 day)	1990 ~ 1996, 2000 ~ 2006	KMA (Korea Meteorological Administration)
Wind Speed	Temporal (1 day)	1990 ~ 1996, 2000 ~ 2006	KMA (Korea Meteorological Administration)
Solar Radiation	Temporal (1 day)	1990 ~ 1996, 2000 ~ 2006	KMA (Korea Meteorological Administration)
Humidity	Temporal (1 day)	1990 ~ 1996, 2000 ~ 2006	KMA (Korea Meteorological Administration)
Streamflow	Temporal (1 day)	1990 ~ 1996, 2000 ~ 2006	WAMIS (water management information system, Republic of Korea)
DEM (Digital Elevation Model)	Spatial (5 m grid size)	-	NGII (National Geographic Information Institute, Republic of Korea)
Land use	Spatial (30 m grid size)	1995, 2005	EGIS (Environmental Geographic Information System, Republic of Korea)
Soil	Spatial (30 m grid size)	-	RDA (Rural Development Administration, Republic of Korea)

2.3 SWAT 모형 유출량 보정

SWAT은 강우유출에 관련된 많은 매개변수를 포함하고 있으며 예측의 정확성을 높이기 위하여 매개변수들이 보정이 필요하다. SWAT 모형은 ParaSol, SCE-UA, 그리고 SUGLASSES 인 자동보정 알고리즘을 제공하며. 최근에는 사용자 편의성을 위한 SWAT-CUP 이 개발되었다(Figure. 4). SWAT-CUP은 SUFI-2 (Sequential uncerainty fitting algorithm; Abbaspour et al.,2007) GLUE (Generalized Likehood Uncertainty Estimation; Beven et al., 1992), ParaSol (Parameter Solution; Van Griensven et al., 2006), MCMC (Markov chanin Monte Carlo; Kuczera et al., 1998) 그리고 PSO(Particle swarm optimization; Eberhart et al., 1995)으로 구성되어있다. 본 연구에서는 SUFI-2 알고리즘을 적용하여 SWAT 모형을 보정하였다. Periods 1과 2로 나누어서 각각 4년 동안의 warming-up 기간을 제외하고, 2년 동안을 보정기간으로 설정하였다. 본 연구는 계측유역에서 보정된 매개변수들이 미계측 유역에서도 동질하다는 가정아래 수행되었다. 그러나 매개변수들은 기후자료와 토지이용도에 다르게 보정되기 때문에 본 연구에서는 Period 1과 Period 2 에 대해 각각 SWAT을 보정하고 미계측 유역에서의 유량을 예측하였다. SWAT 모형에 포함된 모든 매개변수를 보정하는 것은 비효율적이다. 본 연구에서는 매개변수의 민감도 분석을 수행하여 9개의 매개변수를 보정하였고, 보정에 대한 적합성 평가는 NSE (Nash-Sutcliffe efficiency)를 사용하였으며, NSE 산정은 식 (1)에서 보이는 바와 같다.

$$NSE = 1 - \sum_{i=1}^{n}(O_i - S_i)^2 / \sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O_i})^2 \quad (1)$$

O_i는 각 강우시 실측된 값이고, S_i는 모델에서 예측된 각 강우별 모의 값이며, $\overline{O_i}$는 모든 강우시 실측값의 평균이다. NSE 값이 1에 갈수록 모델의 예측치가 실측치를 잘 예측하는 것을 의미한다.

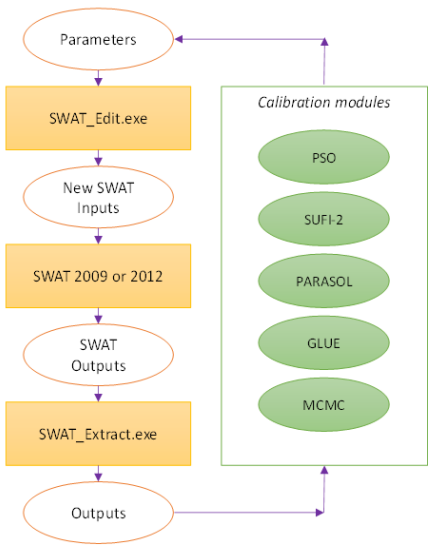


Fig. 4. Overview of SWAT-CUP (Abbaspour, 2012)

2.4 alpha factor 산정 및 적용

유량의 감수부는 하천으로 자연적으로 공급되는 물흐름에 대한 중요한 정보를 제공하며 기저유출과 깊은 관계가 있다. SWAT 모형은 강우유출 모의 시 기저유출의 특성을 표현하고자 감수부와 관련 있는 매개변수 (alpha factor)를 가지고 있다. 그러나 앞에서 언급한 것처럼 SWAT의 보정은 많은 매개변수들의 조합으로 수행되기 때문에 첨두유량과 저유량을 포함한 전체적인 유량을 모의하는데 있어 일부 매개변수들에 의해 왜곡된 결과를 얻을 수 있다. 이러한 이유로 SWAT의 보정과정에서 기저유출의 특성을 정확히 반영하기는 힘들다. 따라서 본 연구에서는 SWAT을 이용한 강우 유출 모의시 기저유출의 특성을 반영하고자 RECESS를 이용하여 관측유량으로부터 alpha factor를 산정하고 이를 SWAT에 적용하였다. 이 방법의 실효성을 검증하기 위하여 Figure 1과 같이 두가지 방법 (M1, M2)으로 SWAT을 보정한 후 그 결과를 비교하였다. M1은 RECESS를 이용하여 alpha factor를 산정하여 SWAT에 고정값으로 적용한 후 나머지 8개의 매개변수들을 SWAT-CUP으로 보정하였다. 반면 M2는 alpha factor를 포함한 9개의 보정인자를 SWAT-CUP에 적용하여 자동보정을 수행하였다. 두 방법에 의한 결과는 NSE를 계산하여 비교 분석하였다.

2.5 WHAT 시스템을 이용한 기저유출 분석

WHAT(https://engineerg. purdue.edu /~what) 시스템은 BFLOW filter 방법과 Eckhardt filter 방법을 적용하여 기저유출을 분리한다(식2; 식3) (Lim et al., 2005).

$$q_t = a \times q_{t-1} + \frac{(1+\beta)}{2} \times (Q_t - Q_{t-1}) \quad (2)$$

여기서, qt는 지표유출이며(m^3/s), q_{t-1}는 t-1시간의 지표유출(m^3/s), a는 필터 인자, Q_t는 t 시간당 총 유량(m^3/s), Q_{t-1}는 t-1 시간당 총 유량(m^3/s)이다.

$$b_t = \frac{(1-BFI_{\max}) \times a \times b_{t-1} + (1-a) \times BFI_{\max} \times Q_t}{1-\beta \times BFI_{\max}} \quad (3)$$

여기서, b_t는 t시간의 기저유출, b_{t-1}는 t-1시간의 기저유출, BFImax는 총 유량에 대한 기저유출 장기 비율의 최대치, a는 필터 인자, Q_t는 시간당 총 유량이다. 웹 기반 인 WHAT 시스템은 사용성, 접근성, 실용성을 향상시켰고, USGS의 관측소로부터 일 유량자료를 제공받는다. 또한 다른 지역 유량자료는 직접 업로드하여 기저유출을 산정할 수 있다. WHAT 시스템의 또 다른 장점은 계산 결과를 즉시 확인 할 수 있다는 것이다. 이러한 WHAT 시스템의 장점은 다양한 연구를 통하여 그 적용성이 검증되었다(Lim et al., 2005; Lim et al., 2010; Chiu et al., 2012). 본 연구에서는 SWAT모형을 이용하여 모의된 미계측 지점의 유량을 WHAT 시스템에 적용하여 토지이용변화에 따른 기저유출량의 영향을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 SWAT 모형 유량 보정 결과

미계측유역의 기저유출을 평가하기 위해서는 계측유역에서 모델링을 통한 정확한 유량 예측이필요하다. 이에 본 연구에서는 계측유역에서 관측된 유량을 이용하여 SWAT 모형을 보정하였다. Table. 3은 SWAT 모형을 통해 유량 보정시 alpha factor를 포함한 9개 매개변수를 민감한 순서로 보정범위를 나타내었으며, alpha factor는 Period 1과 Period 2에서 2번째로 민감한 매개변수로 산정되었다. 또한 RECESS를 이용하여 alpha factor를 산정한 뒤, SWAT-CUP 보정에 적용한 M1 방법과 alpha factor를 포함한 9개의 매개변수를 보정한 M2방법을 이용하였다. 두 방법으로 산출된 결과를 비교하여 alpha factor가 유량 감수부에 미치는 영향을 평가하였다. M1의 방법을 이용하여 SWAT 모형보정을 수행하기 위해서 RECESS로부터 산정된 alpha factor는 Period 1일 때 0.041, Period 2일 때 0.049이다(Figure. 5). M1 방법을 이용하여 보정된 결과는 Period 1에서 0.80의 NSE와 Period 2에서 0.79의 NSE가 산정되었다. M2 방법에 대해서 Period 1일 때 NSE는 0.77, Period 2 일 때 NSE는 0.76 의 보정결과 값이 산정되었다. 모형보정에서 M1 방법은 고정된 alpha factor를 사용했음에도 불구하고 M2 방법에 의한 보정만큼 정확히 수행되었다. M1과 M2 방법의 보정결과는 유사했지만, Figure. 6에서 보듯이 실측유량을 대상으로 M1 방법이 M2 방법보다 유량 감수부를 정확하게 예측하였다.

일반적으로 기저유출분리 방법들은 관측유량에 적용된다 (Tallaksen et al., 1995). 미계측 유역에서 기저유출을 예측하기 위해서는 계측유역의 감수부 경향을 정확하게 분석할 필요가 있다. 연구결과를 토대로 SWAT모형 보정에 M1 방법의 적용은 미계측 유역의 기저유출의 특성을 보다 더 정확하게 반영할 수 있다

고 판단된다. alpha factor에 대한 정보는 유량 감수부의 중요한 요소로 반영되며, 25개의 매개변수의 조합으로 복잡하게 수행되는 SWAT 모형보정에 있어 하나의 관측 자료로 고려될 수 있다. 이를 통해 SWAT의 입력 자료인 기후 지형자료와 같이 alpha factor도 유역특성에 따라 다르게 적용할 수 있다.

Table 3. Parameters selected from sensitivity analysis

a) Period 1

Sensitivity Rank	Parameter Name	Description	Fitted Value	
			M1	M2
1	CN2	SCS runoff curve number for moisture condition Ⅱ	-16.480	23.250
2	ALPHA_BF	Baseflow Alpha factor	***0.0412***	0.647
3	SOL_K	Saturated hydraulic conductivity(mm/hr)	-0.530	-9.648
4	GW_DELAY	Groundwater delay	264.570	158.100
5	GWQMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur	1.370	1.510
6	GW_REVAP	Groundwater ”revap” coefficient	0.110	0.160
7	CH_N2	Mannings’ ”n” value for the main channel	0.160	0.250
8	CH_K2	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium	25.560	43.130
9	SOL_AWC	Available water capacity of the soil layer	0.170	0.379

b) Period 2

Sensitivity Rank	Parameter Name	Description	Fitted Value	
			M1	M2
1	CN2	SCS runoff curve number for moisture condition II	-3.000	-1.480
2	ALPHA_BF	Baseflow Alpha factor	***0.053***	0.049
3	GW_DELAY	Groundwater delay	7.500	9.550
4	GWQMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur	1.475	1.850
5	GW_REVAP	Groundwater ”revap” coefficient	0.066	0.090
6	ESCO	Soil evaporation compensation factor	0.850	0.990
7	SOL_AWC	Available water capacity of the soil layer	-0.110	-7.500
8	SOL_K	Saturated hydraulic conductivity(mm/hr)	-19.800	-17.148
9	SURLAG	Surface runoff lag time	9.050	9.150

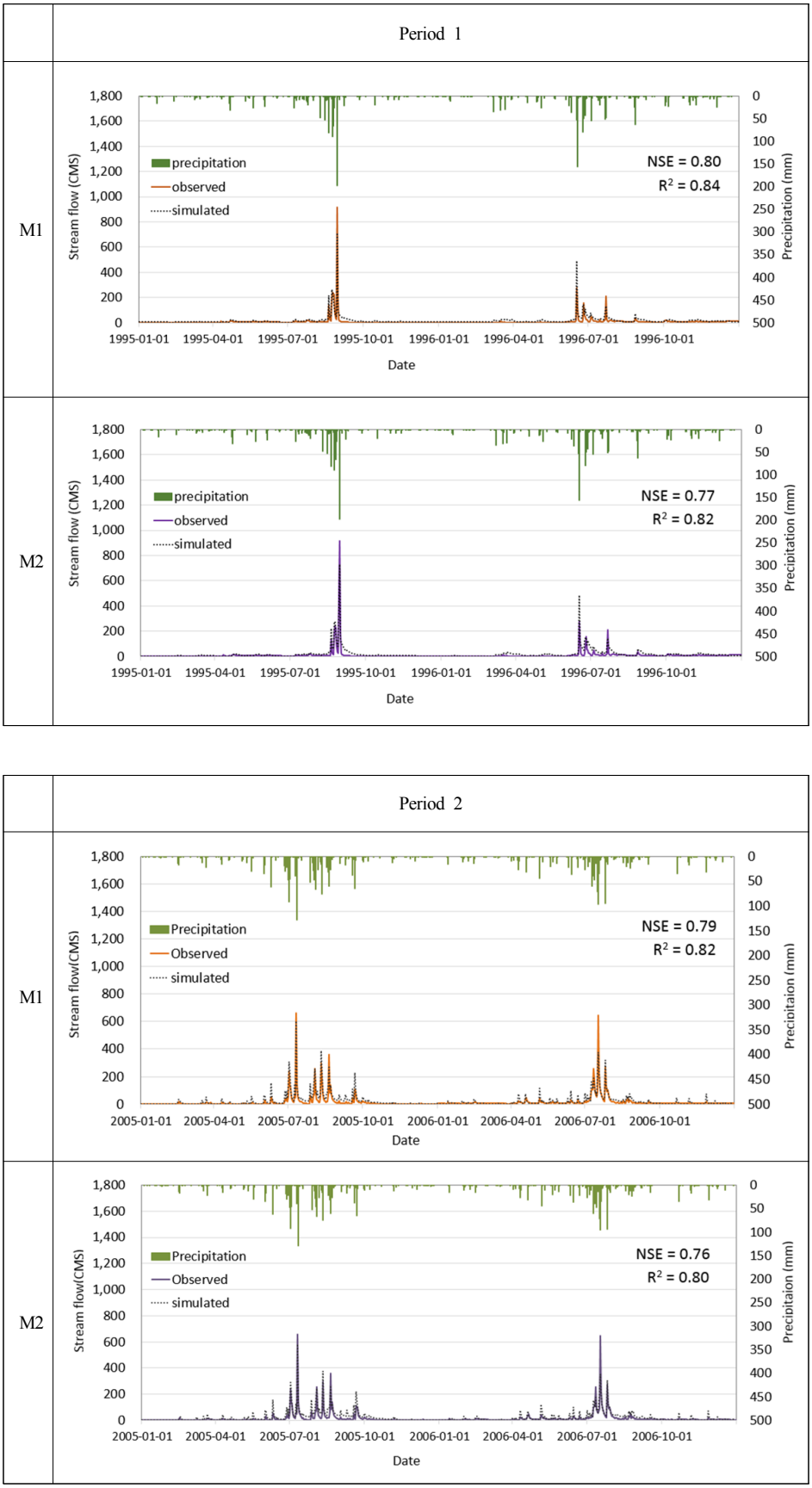
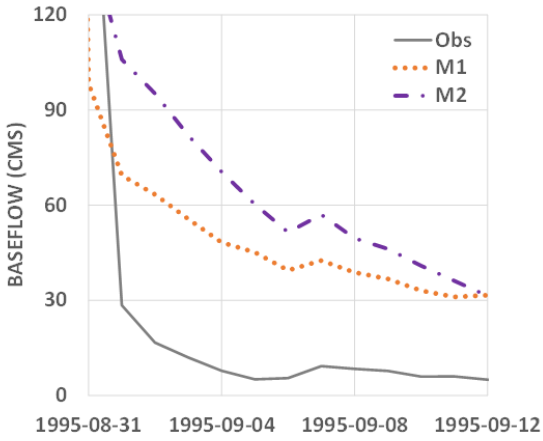
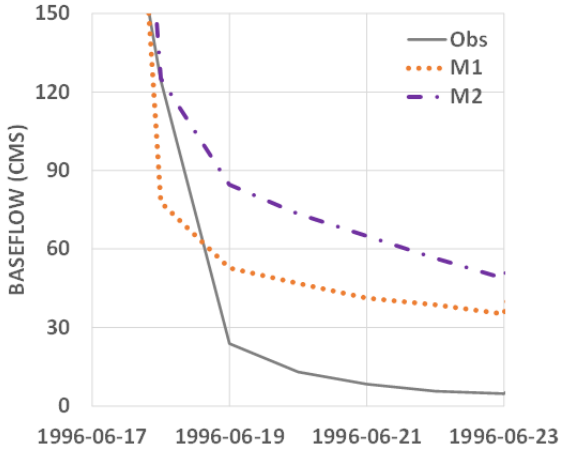


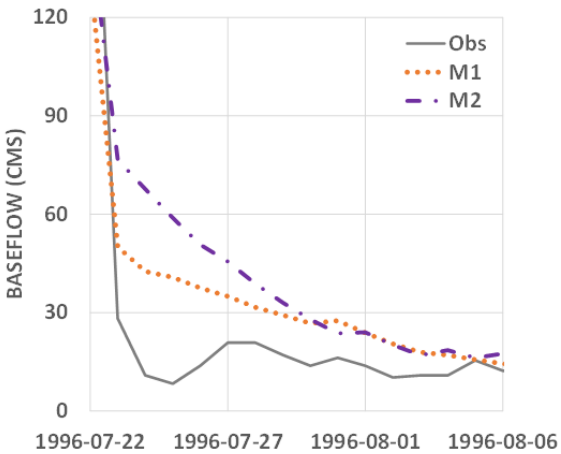
Fig. 5. Comparison of calibrations using M1 and M2 for the observed streamflow at Heodeok gauge station (M1 is calibrations using Alpha factor estimated from RECESS and SWAT-CUP; M2 is calibrations using only SWAT-CUP)



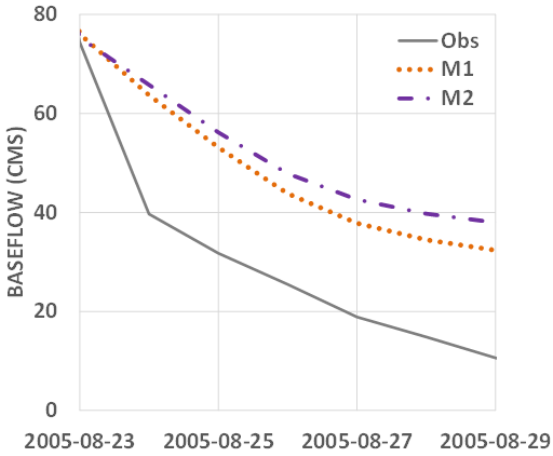
a) 1995/8/31-1995/9/12



b) 1996/6/17-1996/6/23

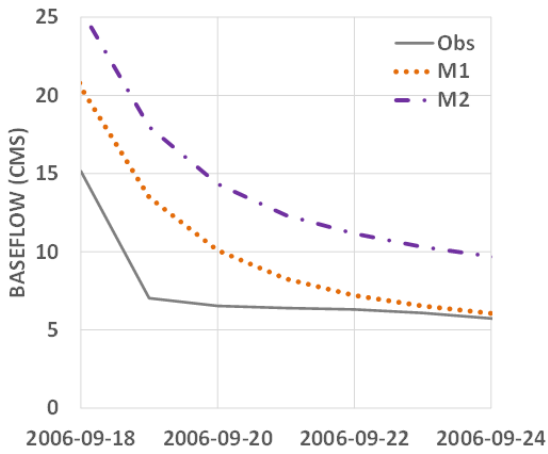


c) 1996/7/22-1996/8/06



d) 2005/8/23-2005/8/29

e) 2006/7/18-2006/7/24



f) 2006/9/18-2006/9/24

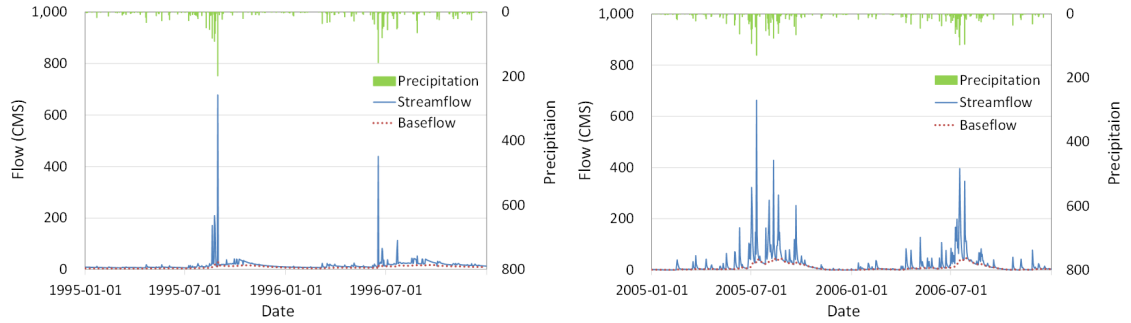
Fig. 6. Comparisons of the predicted streamflow recessions using M1 and M2

3.2 미계측 유역의 유량 평가 결과

M1을 이용해 회덕지점에 대하여 보정된 SWAT모형의 매개변수를 미계측지점인 갑천 유역에 적용하여 유량을 예측하였다. 그 예측유량을 바탕으로 강우변화와 함께 유량, 직접유출, 기저유출에서의 변동성을 분석하였다 (Table 4). 예측된 연평균 유량은 Period 1에서 5.707×10^8 m^3/year, Period 2에서 7.653×10^8 m^3/year이다(Figure. 7; Table 4). 연 평균 강수량은 Period 1에서 1,099.81 mm/year, Period 2에서 1,240.37 mm/year 로 발생하였다. Period 1에서 강수량의 표준편차는 13.20 mm이고 Period 2에서 표준 편차는 12.24 mm이다. 또한 Period 2에서의 강수량은 Period 1보다 약 150 mm/year 더 발생하였으며 이러한 강수량 차이는 Period 1에서의 유량보다 약 2.0×10^8 m^3/year 증가한 Period 2의 유량에 기여하였다.

Table 4. The estimation of streamflow and baseflow in the Gapcheon watershed using SWAT and WHAT

Periods	Precipitation (mm/year)	Streamflow 10^8(m^3/year)	Direct Runoff 10^8(m^3/year)	Direct Runoff /Precipitation (%)	Baseflow 10^8(m^3/year)	Baseflow/ Precipitation (%)
Period1	1099.87	5.707	2.767	58.9	2.940	41.1
Period2	1240.37	7.653	4.631	63.5	3.023	37.5



a) Period 1 b) Period 2

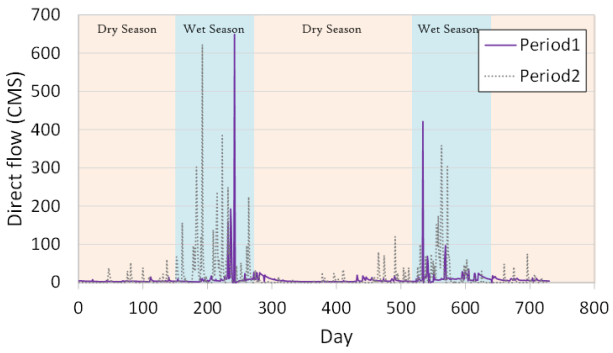
Fig. 7. Predictions of Streamflow and Baseflow in ungauged watershed (Gapcheon watershed)

3.3 토지이용변화에 따른 미계측 유역에서의 기저유출량 변동성

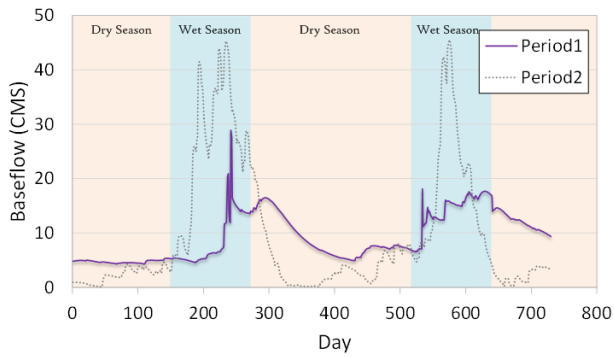
본 연구에서는 SWAT 모형을 이용하여 갑천 유역의 하천 유량을 산정한 후, WHAT 시스템을 통해서 기저유출을 분리하였다. 결과에서 보듯이 Period 1의 연평균 직접유출량은 2.767×10^8 m^3/year, Period 2의 연평균 직접유출량은 4.631×10^8 m^3/year이다. 또한 Period 1의 연평균 기저유출량은 2.940×10^8 m^3/year 이며, Period 2의 연평균 기저유출량은 3.023×10^8 m^3/year이다. 두 기간사이의 직접 유출량과 기저유출량 차이는 각각 1.964×10^8 m^3/year, $0.083\times10^8$$m^3$/year 으로 산정되었다. 정량적인 결과를 기반으로 두 기간사이의 기저유출량 변화는 적지만, 직접유출량 변화는 크게 나타났다. 그러나 정량적인 결과만 보았을 때 토지이용과 기후의 조건과 관계없이 갑천 유역의 기저유출은 변화가 없다는 오해를 일으킬 수 있다. 기저유출에서 정량적 차이는 크지 않았으나, 직접유출과 기저유출의 시간적 분포에서는 두 기간사이에 상이한 경향을 보였다(Figure. 8). Period 1은 Period 2와 비교하였을 때 우기에 직접유출량이 높게 산정되었고, 건기에는 직접유출량이 낮은 경향으로 산정되었지만, 기저유출 부분에서는 우기 때 Period 1이 낮게 산정되고, 건기 일 때 기저유출량이 높은 경향을 보였다. 물론 기후조건에 따라 기저유출은 크게 영향을 받지만 우기에 Period 1에서 더 많은 강수량이 발생했음에도 불구하고 기저유출은 Period 2보다 더 낮게 산정된 이유는 기후이외의 다른 인자에 의하여 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 또한 Period 2에서 Period 1보다 기저유출 감수부분 경사가 가파른 이유는 유량의 변동성이 더 크다는 것을 암시한다. 이런 유량의 변동성이 증가하는 원인은 기후의 영향 외에 불투수층의 증가가 대표적이라 할 수 있다. 일반적으로, 감수부의 경사는 강수량이 감소됨에 따라 지하수 함양과 침투량이 영향을 받게 되어 가파르게 나타나는 경향이 있기 때문이다. 갑천 유역에서 연강수량에

대한 기저유출의 비는 Period 1에서 41%, Period 2에서 38 %로 산정되었고, 이는 기저유출에 대한 토지이용변화의 영향이 반영된 것이라 판단된다. 토지이용변화가 도시지역은 29.53 km^2 증가되고, 농업지역이 감소 된 것을 고려하여 기저유출변화를 각 소유역에 대하여 분석하였다. 농업지역이 도시화지역으로 토지이용변화가 일어남으로서 연강수량 대비 각 소유역 기저유출량 비는 감소하는 결과가 나타났다. 12,13,14번 소유역의 경우 도시화가 증가됨에도 불구하고, 강수량 대비 기저유출량 비율이 증가되었다. 또한 2번 소유역의 경우 도시화가 진행되면서, 강수량 대비 기저유출량은 감소되는 경향을 보여주었다. 대부분 소유역에서 농업지역 면적이 감소함에 따라, 연 강수량에 대한 기저유출량 비는 감소되었지만, 소유역 12,14번은 농업지역이 감소됨에도 불구하고 강수량 대비 기저유출량이 증가되었다. 또한 소유역 13번은 농업지역이 증가되면서, 강수량 대비 기저유출량 비율이 증가되었다. 이는 대부분 갑천 유역에서 농업지역이 시간이 지남에 따라 도시지역으로 토지이용이 변하였다는 것을 의미하며, 이러한 갑천 유역의 토지이용변화로 인하여 기저유출량도 변화가 발생한 것을 확인할 수 있었다 (Figure. 9; Table 5). 그러나 소유역 2,12,13,14번은 토지이용변화가 미치는 수문영향을 확인할 수 없었지만 지형적 요인과 유역 특성으로 분석으로 그 이유를 추정할 수 있다. 예를 들어 소유역 12,13,14번은 경사도가 약 40%로 산악지형이고, 다른 소유역의 비해 상대적으로 기저유출량이 적다 (Table 6). 또한 SWAT 모형은 경사가 가파른 산악지형에 적용될 때 CN 값 산정과정에서 오류가 발생할 수 있다 (Bieger et al., 2013; Bonuma et al., 2012). 본 연구에서 산악지형의 소유역은 기저유출에 대한 토지이용변화의 영향이 적은 경향을 보였다. 소유역 2번의 경우, 다른 소유역에 비해 면적이 적었으며, 도시화가 증가됨에도 불구하고 상류 소유역으로부터 수문반응이 전달됨에 따라 연 강수량에 대한 기저유출량이 비가 증가되었을 가능성이 있다.

본 연구 결과에서 보듯이 토지이용변화로 인해 연강수량에 대한 기저유출비가 감소되었고, 불투수성 면적이 증가되면서 직접유출량과 기저유출량의 분포에 영향을 준 것으로 나타났다(Figure. 2). 또한 갑천 유역은 우기에 직접유출량이 증가되고, 건기에 기저유출량이 감소하는 경향이므로 이러한 계절별 유량변동이 금강 본류에 영향을 줄 수 있기 때문에 유량 변화에 따른 분석 및 관리가 필요하다.

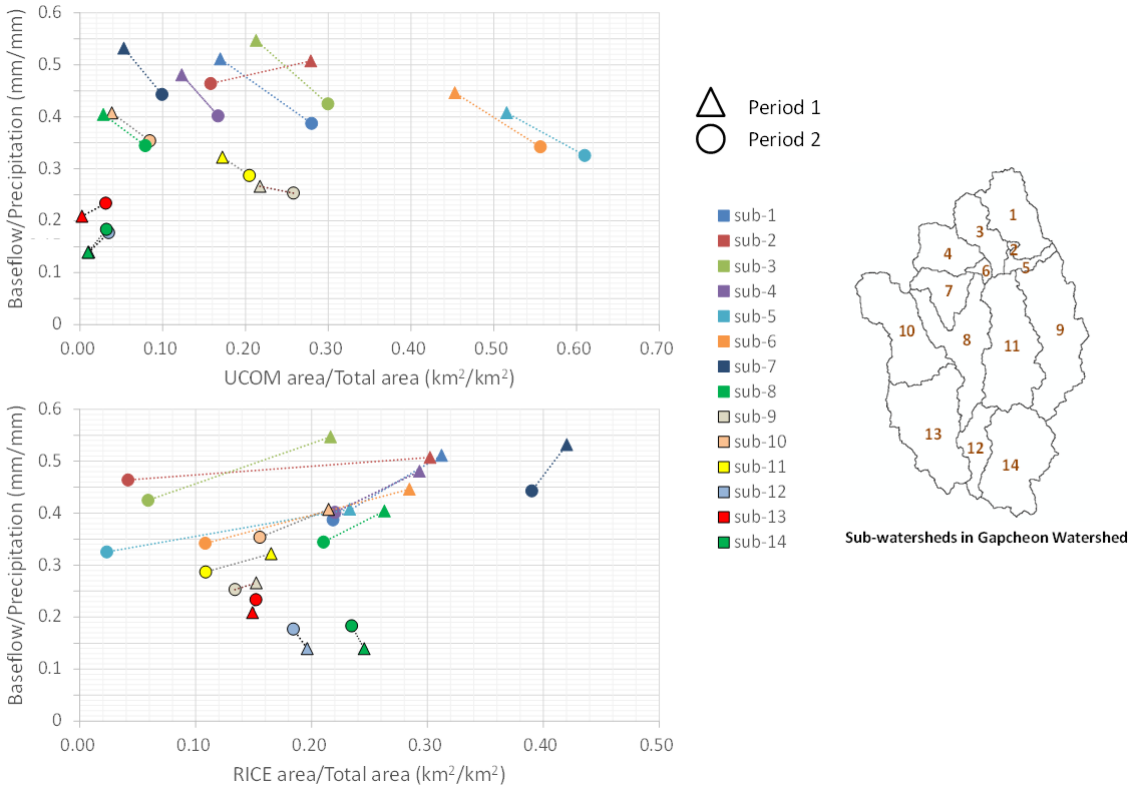


a) Direct flow



b) Baseflow

Fig. 8. Temporal distribution of direct flow and baseflow in the Gapcheon watershed



where,

Fig. 9. The relationship between the ratio of baseflow to precipitation and the ratio of land use area to total area at sub-watershed scale (total area indicates the area for each sub-watershed)

Table 5. The ratios of baseflow to precipitation for land use change in individual sub-watersheds

a) Period 1

Sub-Watershed	Sub-Watershed Area (km^2)	UCOM Area (km^2)	UCOM/ SW (km^2/km^2)	RICE Area (km^2)	RICE/ SW (km^2/km^2)	Precipitation (mm)	Baseflow (mm)	Baseflow/ Precipitation (mm/mm)
1	48.096	8.158	0.170	15.016	0.312	1136.2	581.060	0.511
2	0.999	0.279	0.279	0.302	0.302	1136.2	576.438	0.507
3	30.191	6.425	0.213	6.535	0.216	1136.2	621.459	0.547
4	32.876	4.044	0.123	9.640	0.293	1136.2	546.117	0.481
5	8.193	4.224	0.516	1.908	0.233	1136.2	463.079	0.408
6	4.347	1.970	0.453	1.237	0.284	1136.2	507.094	0.446
7	26.851	1.424	0.053	11.285	0.420	1136.2	604.435	0.532
8	66.522	1.879	0.028	17.487	0.263	1136.2	459.462	0.404
9	89.110	19.391	0.218	13.564	0.152	1136.2	302.461	0.266
10	70.326	2.721	0.039	15.095	0.215	1136.2	462.882	0.407
11	82.425	14.196	0.172	13.608	0.165	1136.2	366.098	0.322
12	25.204	0.273	0.011	4.946	0.196	1011.8	141.316	0.140
13	86.614	0.222	0.003	12.906	0.149	1011.8	211.086	0.209
14	77.864	0.763	0.010	19.108	0.245	1011.8	140.939	0.139

b) Period 2

Sub-Watershed	Sub-Watershed Area (km^2)	UCOM Area (km^2)	UCOM/ SW (km^2/km^2)	RICE Area (km^2)	RICE/ SW (km^2/km^2)	Precipitation (mm)	Baseflow (mm)	Baseflow/ Precipitation (mm/mm)
1	48.096	13.590	0.283	10.508	0.218	1195.2	462.673	0.387
2	0.999	0.158	0.158	0.041	0.042	1195.2	554.562	0.464
3	30.191	9.046	0.300	1.778	0.059	1195.2	507.819	0.425
4	32.876	5.490	0.167	7.237	0.220	1195.2	479.973	0.402
5	8.193	4.997	0.610	0.191	0.023	1195.2	388.941	0.325
6	4.347	2.419	0.556	0.471	0.108	1195.2	408.747	0.342
7	26.851	2.665	0.099	10.566	0.394	1195.2	529.251	0.443
8	66.522	5.254	0.079	13.988	0.210	1195.2	411.647	0.344
9	89.110	22.984	0.258	11.931	0.134	1195.2	302.539	0.253
10	70.326	5.939	0.084	10.919	0.155	1195.2	422.729	0.354
11	82.425	16.880	0.205	8.955	0.109	1195.2	343.033	0.287
12	25.204	0.873	0.035	4.643	0.184	1349.9	238.950	0.177
13	86.614	2.710	0.031	13.162	0.152	1349.9	315.314	0.234
14	77.864	2.495	0.032	18.263	0.235	1349.9	247.533	0.183

Table 6. Geometric and topographic characteristics of sub-watersheds

SW	Slope (%)	Longest river length (m)	Average elevation (m)
1	15.81	16064.19	74.25
2	12.30	2218.12	47.56
3	13.46	11080.42	84.34
4	21.50	11347.12	120.50
5	10.41	8187.57	78.26
6	9.19	3702.16	64.25
7	20.94	9887.56	118.34
8	30.22	26411.38	142.98
9	33.83	25808.31	176.76
10	29.06	22890.34	201.15
11	32.66	26583.40	157.93
12	50.35	14825.94	241.95
13	44.71	29782.99	240.82
14	43.80	22149.98	251.90

4. 결론

갑천 유역을 대상으로 한 SWAT모형의 매개변수들 가운데 감수 특성을 반영하는 alpha factor는 2번째로 민감하였다. 또한 RECESS를 이용하여 감수 특성을 반영한 alpha factor를 산정하여, SWAT-CUP에 적용한 M1 방법은 모든 매개변수를 자동 보정한 M2 방법만큼 만족스러운 보정 결과가 나왔다. M1과 M2 방법이 보정을 통해 NSE의 차이는 매우 유사했으나, M1 방법에 의한 모의 유량에서 감수특성을 더 잘 반영하였다. Period 1와 Period 2사이의 시간적 차이에서 강수량은 약 150mm/year 증가되었고, 이로 인하여 유량은 약2.0×10^8 m^3/year 증가되었다. 또한 WHAT 시스템을 통하여 기저유출을 분석한 결과 두 기간사이의 연평균 기저유출량의 정량적 차이는 크지 않았으나, 기저유출의 계절적 분포에는 큰 상이성을 보였다. 특히, Period 1는 Period 2보다 강수량은 더 작고 강수의 표준편차는 더 큼에도 불구하고 우기와 건기로 계절을 분리하였을 때 기저유출의 계절적 분포는 더 안정적인 결과를 보여주었다. 이는 갑천 유역에서 도시화로

인해 불투성 면적이 증가되면서 직접유출이 증가되었기 때문이라 판단된다. 또한 도시지역이 증가되고, 농업지역이 감소된 갑천 유역의 대부분 소유역에서 연강수량에 대한 기저유출량 비가 상당히 감소되어 나타났다. 본 연구에서 보여준 시간에 따른 갑천 유역에서 기저유출의 변동성 증가는 갑천 뿐만 아니라 금강본류의 환경적 기능 및 역할에 위협이 될 수 있다. 토지이용변화를 모의하는 과정에서 가파른 산악지형에서 불확실성이 발생할 가능성이 있다. 또한 산악지형으로 이루어진 경사가 가파른 소유역은 경사가 완만한 소유역에 비해 기저유출량이 적게 나타났으며, 이러한 지형적 토지이용변화의 따른 기저유출에 상당한 영향을 줄 수 있기 때문에 지형의 특성이 기저유출에 미치는 영향에 대한 추후 연구를 제시한다. 본 연구에서 보여준 기저유출의 변동성에 대한 고려는 보다 효율적이고 안정적인 유역관리에 기여할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국환경산업기술원 GAIA Project (No: 2012000540017) “식생조절 방안/공학적 저감 공법/토지개발사업 토양침식 저감 공법 개발”의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

Reference

Abbaspour, KC, Yang, J, Maximov, I, Siber, R, Bonger, K, Mieleitner, J, Zobrist, J and Srinivasan, R (2007). Modelling Hydrology and Water Quality in the Pre-alpine Thur Watershed using SWAT, *J. of Hydrology,* 333(2), pp. 413-430.

Ahiablame, L, Chaubey, I, Engel, B, Cherkauer, K and Merwade, V (2013). Estimation of annual baseflow at ungauged sites in Indiana USA, *J. of Hydrology,* 476(7), pp. 13-27.

Arnold, JG and Allen, PM (1999). Validation of Automated Methods for Estimating Baseflow and Groundwater Recharge From Stream Flow Records, *J. of American Water Resources Association*, 35(2), pp. 411-424.

Arnold, JG, Allen, PM and Bernhardt, GA (1993). A Comprehensive surface-groundwater flow model, *J. of hydrology,* 142(1), pp. 47-69.

Bako, MD and Owoade, A (1988). Field application of a numerical method for the derivation of baseflow recession constant, *J. of Hydrological processes,* 2(4), pp. 331-336.

Beven, KJ and Binley, AM (1992). The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction, *J. of Hydrological Processes,* 6(3), pp. 279-298.

Bieger, K, Hormaan, G and Fohrer, N (2013). Detailed spatial analysis of the plausibility of surface runoff and sediment yields at HRU level in a mountainous watershed in China, 2013 International SWAT Confrerence, Toulouse, France, http://swat.tamu.edu/media /77467/j11 _bieger.pdf.

Bonumá, NB, Rossi, CG, Arnold, JG, Reichert, JM, Minella, JP, Allen, PM and Volk, M (2012). Simulating landscape sediment transport capacity by using a modified SWAT model, *J. of Environmental Quality*, doi:10.2134/jeq2012.0217.

Chaplot, V (2005). Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment, and NO3−N loads predictions, *J. of Hydrology,* 312(1), pp. 207-222.

Chapman, TA (1999). Comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation, *J. of Hydrological Processes,* 13, pp. 701-704.

Chiu, MC and Kuo, MH (2012). Application of R/K selection to macro invertebrate responses to extreme floods, *J. of Ecological Entomology*, 37(2), pp. 145-154.

Chow, VT, Maidment, DR and Mays, LW (1988). Applied Hydrology, McGraw-Hill Series in water resources and Environmental Engineering, New York.

De, Moel, H and Aerts, JCJH (2011). Effect of uncertainty in land use, damage models and inundation depth on flood damage estimates, *J. of Natural Hazards*, 58(1), pp. 407-425.

Eberhart, R and Kennedy, JA (1995). New optimizer using particle swarm theory. Micro Machine and Human Science, 1995, MHS'95, Proceedings of the Sixth International Symposium on, pp. 39-43.

Eckhardt, KA (2008). Comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods, *J. of hydrology*, 352(1-2), pp. 168-173.

Eckhardt, K (2005). How to construct recursive digital filters for baseflow separation, *J. of Hydrological*

Processes, 19(2), pp. 507-515.

Ferguson, G and Gleeson, T (2012). Vulnerability of coastal aquifers to groundwater use and climate change, *J. of Nature Climate Change*, 2, pp. 342-345.

Gao, YZ, Giese, M, Han, XG, Wang, DL, Zhou, ZY, Brueck, H, Lin, S and Taube, F (2009). Land use and drought interactively affect interspecific competition and species diversity at the local scale in a semiarid steppe ecosystem, *J. of Ecological research*, 24(3), pp. 627-635.

Gitau, MW and Chaubey, I (2010). Regionalization of SWAT model parameters for use in ungauged watersheds, *J. of Water,* 2(4), pp. 849-871.

Hall, FR (1968). Base-Flow Recessions-A Review, *J. of Water Resources Research,* 4, pp. 973-983.

Hamel. P, Daly, E and Fletcher, TD (2013). Source-control stormwater management for mitigating the impacts of urbanization on baseflow: A review, *J. of Hydrology,* 485(2), pp. 201-211.

Jeong, J, Kannan, N, Arnold, J, Glick, R, Gosselink, L, Srinivasan, R and Harmel, D (2011). Development of Sub daily Erosion and Sediment Transport Models in SWAT, Trans. ASABE, 54, pp. 1685-1691.

Kim, SJ, Kwon, HJ, Park, G and Lee, MS (2005). Assessment of land‐use impact on streamflow via a grid‐based modelling approach including paddy fields, *J. of Hydrological processes,* 2005, 19(19), 3801-3817.

Kuczera, G and Parent, E (1998). Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: the Metropolis algorithm, *J. of Hydrology,* 211(1-4), pp. 69-85.

Kulandaiswamy, VC and Seetharaman, SA (1969). Note on Barnes' method of hydrograph separation, *J. of Hydrology*, 9, pp. 222-229.

Li, R and Merchant, JW (2013). Modeling vulnerability of groundwater to pollution under future scenarios of climate change and biofuels-related land use change: A case study in North Dakota, USA, *J. of Science of the Total Environment,* 447(1), pp. 32-45.

Lim, KJ, Engel, BA, Tang, Z, Choi, J, Kim, KS, Muthukrishnan, S and Tripathy, D (2005). Automated Web Gis based hydrograph analysis tool, WHAT1, *J. of American Water Resources Association,* 41, pp. 1407-1416.

Lim, KJ, Park, YS, Kim, J, Shin, YC, Kim, NW, Kim, SJ, Jeon, JH, Engel, BA (2010). Development of genetic algorithm-based optimization module in WHAT system for hydrograph analysis and model application, *J. of Computers & Geosciences,* 36(7), pp. 936-944.

Malhi, Y, Aragão, LE, Galbraith, D, Huntingford, C, Fisher, R, Zelazowski, P, Sitch, S, McSweeney, C and Meir, P (2009). Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced dieback of the Amazon rainforest, *J. of Proceedings of the National Academy of Sciences,* 106(49), pp. 20610-20615.

Maneta, MP, Torres, MDO, Wallender, WW, Vosti, S, Howitt, R, Rodrigues, L, Bassoi, LH and Panday, S (2009). A spatially distributed hydro economic model to assess the effects of drought on land use, farm profits, and agricultural employment, *J. of Water Resources Research,* 45(11), W11412.

Mehta, VK, Haden, VR, Joyce, BA, Purkey, DR and Jackson, LE (2013). Irrigation demand and supply, given projections of climate and land-use change, in Yolo County, California, *J. of Agricultural Water Management*, 117(31), pp. 70-82.

Nathan, RJ and McMahon, TA (1990). Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses, *J. of Water Resources Research*, 26(7), pp. 1465-1473.

Neitsch, SL, Arnold, JG, Kiniry, JR, Williams, JR and King, KW (2005). Soil and water assessment tool: theoretical documentation, version 2005, Texas, USA.

Ogden, FL, Raj, PN, Downer CW and Zahner, JA (2011). Relative importance of impervious area, drainage density, width function, and subsurface storm drainage on flood runoff from an urbanized catchment, *J. of Water Resources Research*, 47(12), W12503.

Price, K (2011). Effects of watershed topography, soils, land use, and climate on baseflow hydrology in humid regions: a review, *J. of Geography*, 35, pp. 465‐492.

Rostamian, R, Jaleh, A, Afyuni, M, Mousavi, SF, Heidarpour, M, Jalalian, A and Abbaspour, KC (2008). Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in

central Iran, *J. of Hydrological sciences,* 53(5), pp. 977-988.

Samuel, J, Coulibaly, P and Metcalfe, RA (2012). Identification of rainfall–runoff model for improved baseflow estimation in ungauged basins, *J. of Hydrological Processes,* 26(3), pp. 356-366.

Santhi, C, Allen, PM, Muttiah, RS, Arnold, JG and Tuppad, P (2008). Regional estimation of base flow for the conterminous United States by hydrologic landscape regions, *J. of Hydrology,* 351(1), pp. 139-153.

Shuster, WD, Bonta, J, Thurston, H, Warnemuende, E and Smith, DR (2005). Impacts of impervious surface on watershed hydrology: A review, *J. of Urban Water,* 2(4), pp. 263-275.

Singh, A, Imtiyaz, M, Isaac, RK and Denis, DM (2012). Comparison of soil and water assessment tool (SWAT) and multilayer perceptron (MLP) artificial neural network for predicting sediment yield in the Nagwa agricultural watershed in Jharkhand, India, *J. of Agricultural Water Management*, 104, pp. 113-120.

Sophocleous, M (2002). Interactions between groundwater and surface water: the state of the science, *J. of Hydrogeology,* 10(1), pp. 52-67.

Szilagyi, J and Parlange, MB (1998). Baseflow separation based on analytical solutions of the Boussinesq equation, *J. of Hydrology,* 204(1), pp. 251-260.

Tallaksen, LM (1995). A review of baseflow recession analysis, *J. of hydrology,* 165(1), pp. 349-370.

Van Griensven, A and Meixner, T (2006). Methods to quantify and identify the sources of uncertainty for river basin water quality models, *J. of Water Science & Technology*. 53(1), pp. 51-59.

Wang, L, Lyons, J, Kanehl, P and Bannerman, R (2001). Impacts of urbanization on stream habitat and fish across multiple spatial scales, *J. of Environmental Management,* 28(2), pp. 255-266.

Wilcox, BP and Huang, Y (2010). Woody plant encroachment paradox: Rivers rebound as degraded grasslands convert to woodlands, *J. of Geophysical Research Letters,* 37(7) pp 1-5.

○ 논문접수일 : 2014년 08월 29일
○ 심사의뢰일 : 2014년 09월 03일
○ 심사완료일 : 2014년 09월 29일