



토지이용 및 기후 예측자료를 활용한 미래 기저유출 분석

Analysis of Baseflow using Future Land Use and Climate Change Scenario

최유진^a · 김종건^b · 이동준^c · 한정호^d · 이관재^e · 박민지^f · 김기성^g · 임경재^{h, †}

Choi, Yujin · Kim, Jonggun · Lee, Dong Jun · Han, Jeongho · Lee, Gwanjae · Park, Minji · Kim, Kisung · Lim, Kyoung Jae

Abstract

Since the baseflow, which constitutes most of the river flow in the dry season, plays an important role in the solution of river runoff and drought, it is important to accurately evaluate the characteristics of the baseflow for river management. In this study, land use change was evaluated through time series data of land use, and then baseflow characteristics were analyzed by considering climate change and land use change using climate change scenarios. The results showed that the contribution of baseflow of scenarios considering both climate change and land use change was lower than that of scenarios considering only climate change for yearly and seasonal analysis. This implies that land use changes as well as climate changes affect base runoff. Thus, if we study the watershed in which the land use is occurring rapidly in the future, it is considered that the study should be carried out considering both land use change and climate change. The results of this study can be used as basic data for studying the baseflow characteristics in the Gapcheon watershed considering various land use changes and climate change in the future.

Keywords: Baseflow; climate change; land use change; runoff

1. 서론

전 세계적으로 홍수, 태풍, 극심한 가뭄, 폭염 등 기상이변에 따른 피해는 매년 되풀이되며, 피해규모 또한 점차 증가하고 있다. 이러한 기후변화 현상은 온실가스의 증가와 함께 도시화와 같은 지역적 요인에 따라 발생한다(Koo et al., 2007). 이상기후 현상 중에 가장 뚜렷이 나타나는 현상은 물 순환과

정의 변화이며(Choi et al., 2008), 도시화와 같은 토지이용의 변화는 물 순환 변화를 가속시킨다(Park et al., 2009). 강수량, 증발산, 토양수분량 등 물 순환과정의 변화는 유출량 특성의 변화를 초래한다(Ahn et al., 2001; Gregory et al., 2007; Wetherald and Manabe, 1995). 유출은 강우 발생 후 여러 흐름 경로를 통해 유역출구로 유출되므로 다양한 형태의 강우와 유출간의 관계를 규명하고 수문현상을 해석하는데 중요한 부분을 차지한다(Joo et al., 2007).

일반적으로 하천을 통한 총유출은 직접유출(Direct runoff)과 기저유출(Base flow)로 구분한다. 기저유출은 건기 시 하천 유량을 유지시켜주는 중요한 수원이며 도시화 및 기후변화에 따른 하천의 건천화, 가뭄 등의 문제를 해결하기 위한 중요한 해결책이 될 수 있다(Han et al., 2016). 건기시 하천유량의 대부분을 구성하는 기저유출의 감소는 수질 악화 및 어류의 서식지 감소 등의 직접적이고 부정적인 영향을 하천에 미치게 된다. 이에 따라 기저유출의 특성을 정확히 평가하고 관리하는 것이 건기의 하천 수질 및 수생태 연구의 핵심이 되며, 기저유출에 대한 연구는 홍수기에 대한 연구만큼 중요한 문제로 대두되고 있다(Hong et al., 2015). 그러나 홍수기 연구의 핵심이 되는 직접유출에 비해 땅 속을 통해 유출되는 기저유출의 특성상 정확한 측정에는 경제적/기술적 어려움이 있어 다양한 연구가 진행됨에도 불구하고 기초 측정 자료가 미비한 실정이다(Cho, 2006).

앞서 기술한 바와 같이 기후변화와 토지이용변화는 물순환

^a MS Student, Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

^b Postdoctoral Research Fellow, Institute of Agricultural and Life Science, Kangwon National University

^c PhD Student, Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

^d PhD Student, Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

^e PhD Student, Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

^f Researcher, Han River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research

^g Professor, Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

^h Professor, Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

[†] Corresponding author

Tel.:+82-33-250-6468 Fax: 033-259-5560

E-mail: kjlim@kangwon.ac.kr

Received: August 7, 2018

Revised: September 27, 2018

Accepted: October 19, 2018

과정의 변화를 초래하며 이러한 변화가 수자원에 미치는 영향에 대한 관심이 매우 커지고 있다. 따라서 이를 개별적으로 고려한 유출 특성에 대해 다양한 연구가 진행되고 있다.

기후변화를 고려한 연구사례를 살펴보면 Kim et al. (2004)는 기후변화가 용담댐 유역의 유출에 미치는 영향을 평가하였으며, Choi et al. (2009)과 Han et al. (2017)은 병선천 유역과 소양강댐 유역을 대상으로 기후변화가 수문 및 수질에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 Ahn et al., (2013)은 설마천 유역을 대상으로 RCP 기후변화 시나리오에 따른 수문순환 영향을 평가한 바 있다. 토지이용변화를 고려한 연구사례를 살펴보면 Wicklein and Schiffer (2002)는 플로리다주 Reedy Creek 유역에서 토지이용변화가 유출 및 수질에 미치는 영향을 평가하였으며, Lee et al. (2003)과 Park et al. (2005)은 토지이용변화가 경안천 유역과 경안수위관측소 상류유역의 수문변화에 미치는 영향을 평가한 바 있다. Ahn et al. (2008)은 미래토지이용 및 기후변화에 따른 경안천 유역의 하천 유출 특성에 대해 분석하였으며 Park et al. (2011)과 Ahn et al. (2015)은 충주댐 유역과 안성천 상류 유역을 대상으로 Soil and Water Assessment Tool (SWAT) 모형과 Conversion of Land Use and its Effects at Small regional extent (CLUE-S) 모형을 이용하여 미래 기후 및 토지이용 변화에 따른 수문학적 특성을 분석하였다. Lee et al. (2014a)는 기후변화에 따른 급경사지 유역에서의 기저유출 및 토양유실에 대하여 평가하였으며, Lee et al. (2014b)는 토지이용변화에 따른 미계측 유역의 기저유출량을 산정 및 평가하였다. 이와같이 기후변화, 토지이용변화 그리고 기저유출에 대한 연구는 다양하게 진행되었으나 아직까지 기후변화와 토지이용 변화를 모두 고려하면서 기저유출 특성 분석에 초점을 맞춘 연구는 제한적으로 이루어지고 있다.

이에 본 연구의 목적은 기후변화 및 토지이용변화를 고려하였을 때의 미래 시나리오를 구성하여 수문 특성을 분석한 후 기저유출의 특성을 분석하는데 있다. 이를 위하여 갑천 유역을 대상으로 CLUE-S 모형을 이용한 토지이용변화 및 기후변화 시나리오를 SWAT 모형에 적용하여 미래의 유출량 변화를 평가한 후 WHAT 시스템을 이용하여 미래의 기저유출 특성을 분석하였다.

II. 방 법

기후변화와 토지이용변화를 모두 고려한 미래 시나리오를 구성하고 기저유출의 특성을 분석하기 위하여 1) 갑천 유역을 대상으로 SWAT-CUP을 이용하여 유출량을 검·보정하였다. 2) SWAT 모형을 이용하여 미래 기후변화 시나리오만 적용한

시나리오 1과 기후변화와 토지이용변화를 모두 적용한 시나리오 2를 모의하였으며, SWAT-CUP 결과 매개변수를 적용하여 미래의 유출량 변화를 평가하였다. 3) WHAT 시스템을 활용하여 시나리오 1과 시나리오 2의 미래 유출량 자료를 기저유출과 직접 유출로 분리하고 기후변화를 고려하였을 경우와 기후변화와 토지이용변화를 모두 고려하였을 경우의 기저유출 변화를 비교·분석하였다(Fig. 1).

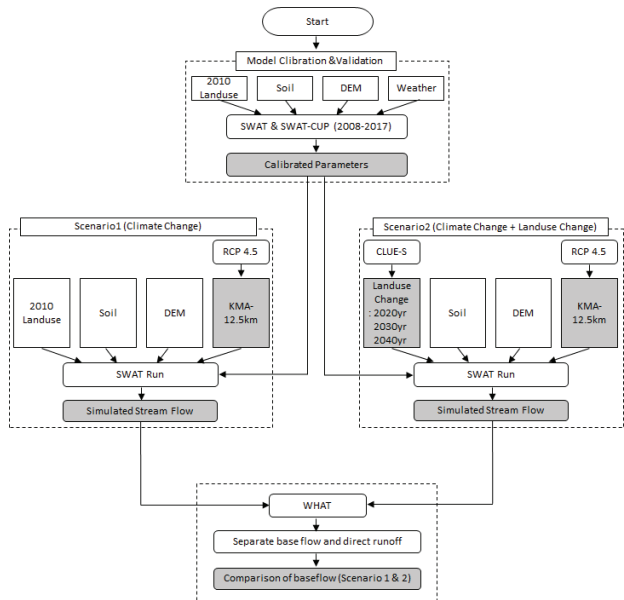


Fig. 1 Overview of this study

1. 연구대상지역

연구대상지역인 갑천 유역 (Fig. 2)은 금강 수계에 위치하며 대전광역시, 계룡시, 논산시, 금산군을 포함하고 있다. 유역면적은 647.8km², 유로연장은 73.7km로 대전광역시의 3대 하천 (갑천, 대전천, 유등천)을 포함한다.

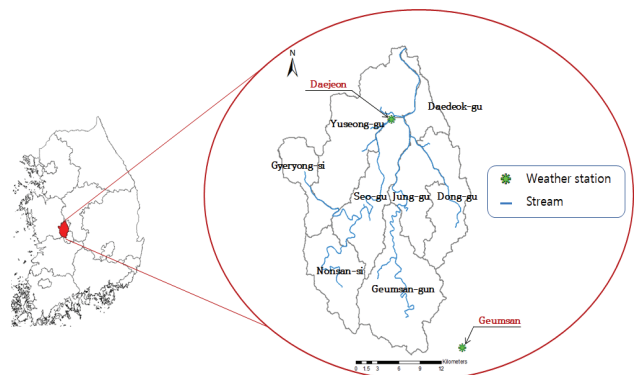


Fig. 2 Study area (Gapcheon watershed)

Table 1 Changes in Land use for this study area

Land use type	1990		2000		2010		Temporal Change in Area (km ²)
	Area (km ²)	Percent (%)	Area (km ²)	Percent (%)	Area (km ²)	Percent (%)	
Urban	59.17	9.13	96.30	14.86	98.73	15.24	+39.56
Agriculture	123.7	19.10	114.77	17.72	87.44	13.50	-36.26
Forest	409.31	63.18	383.87	59.26	378.82	58.48	-30.49
Pasture	36.37	5.61	23.11	3.57	47.62	7.35	+11.25
Wetland	0.00	0.00	3.57	0.55	8.09	1.24	+8.09
Bareland	18.28	2.82	19.58	3.02	19.86	3.07	+1.58
Water	0.97	0.15	6.60	1.02	7.24	1.12	+6.27
Total	647.80	100	647.80	100	647.80	100	0.00

갑천 유역은 과거 농지 및 산림의 비율이 유역의 대부분을 차지하였으며 도시의 비율이 농지의 비율보다 낮았으나 지난 20년 동안 갑천 유역을 중심으로 도시화가 진행되어 2010년에는 도시 비율이 농지 비율보다 높아지게 되었다. 또한 대전 광역시의 경우 2003년 이후 대전시를 하나의 공원으로 만들어 사람과 자연이 더불어 살 수 있는 도시환경 조성을 위한 적극적 도시녹화 사업이 진행되었다(Jung, 2011). 1990년의 토지이용 비율은 도시 9.13%, 농지 19.10%, 산림 63.18%, 초지 5.61%, 나지 2.82%, 수역이 0.15%였다. 약 20년간 갑천 유역을 중심으로 도시화가 진행되며 2010년에는 도시 15.24%, 농지 13.50%, 산림 58.48%, 초지 7.35%, 습지 1.24%, 나지 3.07%, 수역 1.12%로 변화하였다. 1990년대 이후 도시화가 진행되는 20년 동안 도시의 비율은 66.86% 증가하였으며, 초지의 비율의 경우 2000년대 이후 진행된 도시녹화 사업에 의해 30.93% 증가하였다(Table 1).

Fig. 3은 대전관측소의 평균기온과 일강수량의 과거 20년(1970-1989)과 최근 20년(1990-2009)까지의 변화를 서로 비교하였다. 분석결과 과거 20년의 연평균기온은 12.1℃였고,

최근 20년의 연평균기온은 13.0℃로 연평균기온이 약 0.9℃ 상승했으며 특히 2월의 월평균기온은 최대 1.6℃까지 상승하였다. 과거 20년의 연평균강수량은 1,330.7mm이고 최근 20년 연평균강수량은 1,385.2mm로 평년 대비 약 4.1% 증가하였다. 월별 변화를 살펴보면 최근 20년간 평균 강수량 증가는 여름철 강수량의 증가에 의한 것임을 알 수 있다. 6월은 과거 20년 월평균강수량이 152.3mm이나 최근 20년 월평균강수량이 193.6mm로 약 27% 증가하였다. 반면 여름철을 제외한 계절에는 과거에 비해 최대 15%까지 강수량이 감소하였다. 갑천 유역에 위치한 금산관측소의 평균기온과 일강수량의 변화를 과거 20년과 최근 20년까지를 비교한 결과, 대전관측소에서 변화한 양상과 같은 경향을 보였다.

이처럼 갑천 유역은 지난 20년동안 도시화와 녹지조성에 따른 토지이용변화와 강수량 변화 등의 기후변화가 꾸준히 발생한 지역이다. 따라서 본 연구에서는 갑천 유역을 미래의 토지이용 및 기후변화를 모두 고려하고 이에 따른 기저유출 특성을 분석하기에 적합한 지역으로 판단하여 본 연구의 대상지역으로 선정하였다.

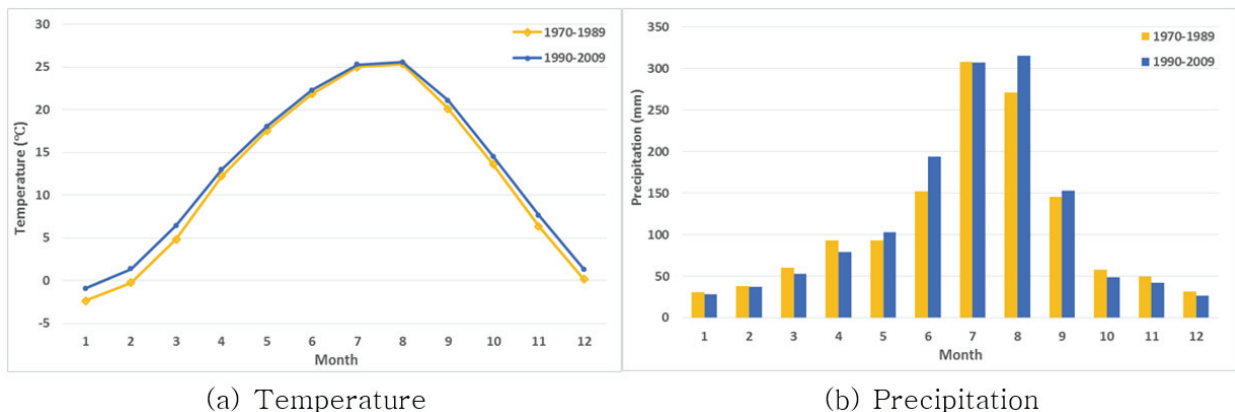


Fig. 3 Monthly averaged temperature and precipitation in Daejeon weather station

2. SWAT 모형을 이용한 유출 해석

가. SWAT 모형 개요 및 입력자료

SWAT 모형은 미국 농무성 농업연구소 (USDA / ARS)에 의해 개발된 유역단위 모형으로서 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 수질과 유사 및 농업화학물질의 거동에 대한 토지 관리 방법 등의 영향 예측과 유역에서의 수문 거동을 모의하기 위하여 개발되었다(Neitsch et al., 2005a; Neitsch et al., 2005b). SWAT 모형을 이용하여 수문 및 수질을 시·공간적으로 분석하기 위해서 시간적으로 변화하는 기상자료와 공간적으로 다르게 분포하는 토지이용, 토양속성, 그리고 지형자료 등이 필요하다(Arnold, 1992; Arnold et al., 1998). 본 연구에서는 갑천 유역에 대한 미래 토지이용변화 및 기후변화에 따른 기저유출량의 변화 분석을 위해 SWAT 모형을 활용하였다. 이를 위해 현재의 토지이용이 미래에도 유지된다는 가정으로 미래 기후변화만 적용했을 때인 시나리오 1과 미래의 토지이용 변화와 기후변화를 모두 고려한 시나리오 2로 나누어 비교 분석하였으며, 모의기간은 2020s (2020-2029), 2030s (2030-2039), 2040s (2040-2049)로 나누어 분석하였다. 입력자료로 기상자료는 갑천 유역 내 위치한 대전관측소와 금산관측소의 관측자료를 기상청에서 제공하는 자료를 이용하여 구축하였다. 또한 미래 장기 유출 해석에는 기후변화 시나리오를 적용하였다. 수치표고모형 (Digital Elevation Model, DEM)은 국립지리원에서 제공하는 수치지도 (1:5,000)을 이용하여 구축하였으며, 토양도는 농촌진흥청 농업과학기술원에서 제공하는 개략토양도 (1:50,000)를 사용하였다. 토지이용도는 환경부 환경공간정보서비스에서 제공하는 2010년 중분류 토지이용도 (1:50,000)를 이용하였다. 또한 미래 장기 유출 해석에는 CLUE-S 모델을 통해 구축한 토지이용도 (2020yr, 2030yr, 2040yr)를 이용하였다.

나. SWAT 모형 유출량 보정

다양한 매개변수를 이용하여 수문 및 수질을 예측하는 SWAT모형은 대상 유역에 대하여 매개변수를 보정한 후 수문 및 수질을 모의해야 한다. 그러나 매개변수 사이에는 복잡한 상호관계가 존재하므로 스위스 연방연구소 Eawag에서는 SWAT 모형의 자동 보정을 보조하기 위하여 SWAT-CUP을 개발하였다(Abbaspour, 2007; Kum et al., 2015). SWAT-CUP은 5개의 알고리즘 (SUFI-2, PARASOL, MCMC, PSO, GLUE)을 이용하여 SWAT모형을 보정한다. Ryu et al. (2012)의 연구에서는 순차적으로 매개변수를 추정하는 방법인 SUFI-2 알고리즘이 SWAT 모형의 매개변수 추정에 가장 적합하다고 하였다. 이에 따라 본 연구에서는 SUFI-2 알고리즘을 이용하여

SWAT모형의 매개변수 보정을 진행하였다. 매개변수 보정을 위해 환경부 물환경정보시스템의 수질총량측정망 갑천A 지점의 8일 간격 유량 측정 자료를 사용하였으며 보정기간은 2009년~2011년으로 검정기간은 2012년~2014년으로 하였다. 적용성 평가는 결정계수 (Coefficient of determination, R^2)와 유효지수 (Nash and Sutcliffe Efficiency, NSE)를 사용하였다. 여기서 O_n 은 n번째 실측값이며 S_n 은 n번째 모의값이고, \bar{O} 는 모든 실측값의 평균값이며 \bar{S} 는 모의값의 평균값을 의미한다. 또한 N은 데이터의 개수를 의미한다. NSE가 1에 가까울수록 모형의 예측값이 실측값을 잘 반영하는 것을 의미한다. R^2 와 NSE의 산정공식은 식(1), 식(2)와 같으며, 효율 범위와 신뢰 구간은 Table 2와 같다(W. Me et al., 2015).

$$R^2 = \frac{\sum_{n=1}^N [(S_n - \bar{S})(O_n - \bar{O})]^2}{\sum_{n=1}^N (O_n - \bar{O})^2 \times \sum_{n=1}^N (S_n - \bar{S})^2} \quad (1)$$

$$NSE = \frac{\sum_{n=1}^N (O_n - \bar{S}_n)^2}{\sum_{n=1}^N (O_n - \bar{O})^2} \quad (2)$$

Table 2 Evaluation Index (W.Me et al., 2015)

	Unsatisfactory	Satisfactory	Good	Very good
R^2	<0.5	0.5-0.6	0.6-0.7	0.7-1
NSE	<0.5	0.5-0.65	0.65-0.75	0.75-1

3. WHAT 시스템을 이용한 기저유출 분석

SWAT 모형을 이용하여 모의된 미래의 유량자료 (2020s, 2030s, 2040s)를 직접유출과 기저유출로 분리하기 위하여 전 세계적으로 널리 활용되고 있는 WHAT 시스템을 활용하였다. WHAT 시스템은 유량자료로부터 기저유출 분리하기 위해 개발된 모델로 사용자 편의를 위해 웹기반으로 개발되었다(Lim et al., 2005; Shin et al., 2010). 현재 다양한 연구에서는 기저유출의 모의 및 분석을 위하여 WHAT 시스템을 활용하고 있다. WHAT 시스템을 이용한 연구사례를 살펴보면 Han et al. (2017)은 평창강 유역을 대상으로 기저유출 모의에 있어서 기저유출 감수상수의 영향을 분석하였으며, Nam et al. (2013)은 경상남도 창녕군 영산면 일대를 대상으로 건기 및 우기 때의 기저유출량을 비교하였고, Jung et al. (2014)은 갑천 유역을 대상으로 수문곡선의 감수부 특성을 고려하여 기저유출을 산정하였다.

WHAT 시스템은 Local Minimum Method, BFLOW filter (Lyne and Hollick, 1979), Eckhardt filter (Eckhardt, 2005) 총 3 개의 기저유출 분리 방법을 이용한다. Local Minimum Method 방법은 수문곡선이 감소하였다가 증가되는 지역적인 최소값을 연결하여 기저유출을 분리하는 방법이다. BFLOW filter는 저주파수 신호로부터 고주파수 신호를 분리하는 신호 분석에서 사용되는 방법을 이용하여 수문곡선으로부터 기저유출을 분리하는 방법이다. Eckhardt filter는 하천유량 중 기저유출비를 의미하는 BFI(Baseflow Index) 중 최대값에 해당하는 값을 변수로 활용하여 대수층의 특성을 고려할 수 있는 방법이며 식(3)을 통해 기저유출을 분리할 수 있다.

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

여기서, b_t 는 t시간에 분리된 기저유출량(m^3/s), b_{t-1} 는 t-1 시간에 분리된 기저유출량(m^3/s), α 는 필터의 매개변수 값, Q_t 는 t시간에 전체 하천유출량(m^3/s), BFI_{max} 는 장기간의 총 유출량에 대한 기저유량 비의 최댓값이다. 이 때 변수인 BFI_{max} 은 사용자가 직접 입력이 가능하다. 하지만 잘못된 BFI_{max} 를 사용할 경우 잘못된 기저유출 분리 결과가 도출될 수 있으므로 Eckhardt는 항시 하천이 흐르고 공극이 많은 대수층은 0.80, 단속적으로 하천이 흐르고 공극이 많은 대수층은 0.50, 항시 하천이 흐르고 암반으로 구성된 대수층은 0.25로 BFI_{max} 값을 제안하였다(Eckhardt, 2005). 본 연구에서는 3가지의 기저유출 분리방법 중 유역내 대수층의 특성을 고려할 수 있는 Eckhardt filter 방법을 사용하였다. 이 때 유역 내 대수층의 특성에 가장 적합한 BFI_{max} 를 결정하기 위해 갑천 유역의 토양도를 NRCS 토양분류 방법을 이용해 A, B, C, D의 토양군으로 구분하였다. 갑천 유역은 투수율이 좋은 A와 B군이 전체 유역에서 91.5%의 비율을 차지하고 있다. 이에 따라 BFI_{max} 값은 0.80을 적용하였다.

4. CLUE-S 모형을 활용한 미래 토지이용변화 예측

가. CLUE-S 모형 개요 및 입력자료 구축

CLUE-S 모형은 토지이용 변화를 모의하기 위해 개발된 모형으로 네덜란드의 Wageningen 대학에서 기존 CLUE 모형을 개선하여 개발하였다(Verburg et al., 2002). CLUE-S 모형은 비공간적 모듈과 공간적 모듈로 구성되어 있으며 비 공간적 모듈은 총괄적으로 모든 토지이용 유형에 대한 지역의 변화를 계산하고, 공간적 모듈에서 이를 레스터자료 기반 시스템을 사용하여 연구지역 내의 다른 위치로 토지이용을 할당하는 구조를 가진다. 그러나 CLUE-S 모형은 비공간적 모듈을

제외한 공간적 모듈만 사용자 인터페이스로 제공하므로 비공간적 모듈에 필요한 자료와 결과는 사용자가 직접 엑셀 혹은 SPSS와 같은 통계프로그램을 이용하여 작성해야한다(Ryu et al., 2014).

CLUE-S 모형을 구동하기 위해서는 토지이용 자료 (Land use map), 토지이용요구 자료 (Land use requirements), 특별토지이용정책 자료 (Spatial policies and restriction), 지역 특성 자료 (Location characteristics), 토지이용변화 매개변수 자료 (Land use type specific conversion settings)의 총 5가지로 의 자료가 필요하다.

CLUE-S 모형의 입력자료로 사용하기 위한 토지이용 자료는 환경부 환경공간정보서비스에서 제공하는 2000년과 2010년의 중분류 토지이용도를 이용하였다. 여기서 23개의 중분류 토지이용을 모두 적용시킬 경우, 모형이 구동되지 않는 한계가 있으므로 토지이용 분류를 7개의 대분류로 재분류하였다.

재분류한 토지이용 자료를 활용하여 비 공간적 모듈 자료에 해당하는 토지이용요구 자료를 구축하였다. 토지이용요구 자료는 현재의 토지이용면적이 특정한 경향에 따라 미래에 어떻게 변화할 것인가에 대하여 사용자가 주관적으로 작성할 수 있는 자료이다. 이에 따라 본 연구에서는 과거의 토지이용이 미래의 토지이용 경향에 영향을 준다고 가정하고 2000년과 2010년의 토지이용별 면적을 SPSS 통계프로그램에 적용하여 토지이용요구 자료를 산정하였다.

또한 지역 특성 자료를 이용하여 토지이용 및 면적의 변화에 영향을 주는 다양한 토지변화요소를 사용자가 설정할 수 있으며 이에 따른 토지이용별 회귀분석을 진행하여 얻은 결과를 토지변화예측을 위한 입력자료로 사용한다. 본 연구에서는 총 7가지 (경사향, 경사도, DEM, 인구밀도, 인구, 도로까지의 거리, 하천까지의 거리)를 지역 특성 자료로 설정하였다. 이와 같은 토지변화요소 자료를 생성한 후 SPSS 통계프로그램을 이용하여 토지이용별로 토지변화요소에 대한 회귀분석을 진행하였으며, 분석결과 얻어진 회귀계수를 CLUE-S의 입력자료로 사용하였다.

$$\ln\left(\frac{P(x)}{1 - P(x)}\right) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_K X_K \quad (4)$$

여기서, β_n 은 회귀계수, X_n 은 토지변화요소, P_i 는 격자 i의 토지이용이 변화될 확률이다(Verburg et al., 2002). 그러나 모든 회귀식이 적합하지 않을 수 있으므로 각 토지이용별 회귀 분석의 적합성을 검증하기 위하여 ROC (Receiver Operation Characteristic) curve 분석을 진행하였다.

특별 토지이용정책 자료를 이용하여 토지이용정책에 대한 영향을 CLUE-S 모형 내에 반영할 수 있다. 본 연구에서는 갑천 유역 내에 국립공원과 상수도보호구역 자료를 이용하여 해당 구역의 토지이용 변화를 제한하였다. CLUE-S 모형에서는 사용자가 토지이용변화 매개변수 자료인 변환탄성 (Conversion Elasticity) 계수와 변환행렬 (Conversion Matrix) 을 임의로 지정해주어 토지이용 변화에 대해 예측한다. 본 연구에서는 2020년대에서 2040년대까지의 미래 유출을 모의하기 위하여 2020년, 2030년, 2040년의 토지이용도를 예측하였다.

나. CLUE-S 모형의 적용성 평가

CLUE-S 모형의 적용성을 평가하기 위하여 2000년의 토지 이용도로부터 모의된 2010년의 토지이용도를 환경부의 2010년 토지이용도와 비교하였다. 모형의 적용성 평가에는 Kappa 값을 이용하였다. Kappa 값은 실측 자료와 모의된 자료 사이의 유사성을 평가하는 변량이며(Hagen, 2002) 토지이용변화의 모의결과를 평가하는데 이용된다. Kappa 값 산정에는 식 (5)~식(7)을 이용한다.

$$K = \frac{P(A) - P(E)}{1 - P(E)} \quad (5)$$

$$P(A) = \sum_{i=1}^n p_{ii} \quad (6)$$

$$P(E) = \sum_{i=1}^n (p_{iT} \times p_{Ti}) \quad (7)$$

여기서, K는 Kappa 값, P(A)는 두 가지 토지이용도에서 동일한 항목에 대한 일치도 비율, P(E)는 두 가지 토지이용도에서 전체 항목에 대한 일치도 비율, n은 토지이용 항목의 수, p_{ii} 는 토지이용도 A와 토지이용도 B의 동일한 항목이 사상된 비율, p_{iT} 는 토지이용도 A의 각 항목과 연관된 전체 비율, p_{Ti} 은 토지이용도 B의 각 항목과 연관된 전체 비율을 의미한다(Hagen, 2002). 일반적으로 Kappa 값은 0.40에서 0.60이면 '신뢰도가 있다', 0.60에서 0.75이면 '신뢰도가 높다', 0.75 이상이면 '신뢰도가 매우 높다'는 의미를 가진다(Fleiss, 1981).

5. 기후변화 시나리오

가. RCP 시나리오 개요

갑천 유역에서의 미래 장기 유출을 모의하기 위하여 RCP 시나리오를 사용하였다. RCP시나리오는 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)의 제 5차 평가보고서 (5th Assessment

Report, AR5)에서 발표한 표준 온실가스 배출 시나리오이며, 온실가스 농도 변화에 따라 RCP 2.6, 4.5, 6.0, 8.5로 구분한다.

APEC 기후센터에서는 RCP 시나리오 자료를 사용하기 위하여 기상청에서 제공하는 KMA-12.5km 지역규모모형 (Regional Scale Model, RCM)과 6개 기상변수 (강수량, 최고 기온, 최저기온, 상대습도, 풍속, 일사량)을 포함하는 8개의 전지구모형의 결과를 상세화 및 편의보정하여 일단위 자료를 생성하였다(Jo et al., 2013). 시나리오의 상세화 과정 및 편의 보정에는 확률분포함수 없이 모의 및 관측 자료의 실제 분포를 직접 사용하여 오차를 줄여 정확한 편의보정을 할 수 있는 (Gudmundsson et al., 2012) 비모수적 분위사상법 (Non-parameteric Quantile Mapping)을 활용하였다. 현재 APEC 기후센터에서 생성한 기후변화 시나리오 자료는 Choi et al. (2018), Cho et al. (2015), Chung et al. (2015) 등 기후변화의 영향을 고려하는 다양한 연구에서 활용되고 있다.

본 연구에서는 APEC 기후센터에서 상세화 및 편의보정하여 제공하는 KMA-12.5km 모델을 이용한 RCP 4.5 시나리오 자료를 사용하였다. 현재로부터 먼 미래일수록 기후변화 시나리오의 불확실성이 증가된다는 점을 고려하여 기후변화 시나리오 자료의 전체 기간인 2010년-2100년 중 2020년대에서 2040년대까지의 자료를 이용하여 미래 유출을 모의하였다.

III. 결과 및 고찰

1. SWAT 모형을 활용한 유량 모의 보정 및 검정 결과

SWAT 모형을 통해 미래 장기유출을 모의하는데 앞서 SWAT-CUP을 이용하여 모형 매개변수의 최적화 작업을 수행하였다. 매개변수는 민감도 분석을 통해 P-value가 0.1 이하인 8개의 매개변수를 선정하였으며 선정된 매개변수는 Table 3과 같다. 갑천 유역의 2009년부터 2011년까지의 8일 간격 실측 유량자료와 선정된 매개변수를 이용하여 SWAT 모형을 보정한 모의값은 실측값에 대해 R^2 는 0.74, NSE는 0.73으로 W. Me et al. (2015)이 제시한 기준으로 매우 높은 적용성을 나타내었다. 이 매개변수를 이용하여 2012년부터 2014년까지를 검정한 결과 R^2 는 0.76, NSE는 0.72으로 높은 적용성을 나타내었다.

2. CLUE-S 모형을 이용한 미래 토지이용변화 특성

CLUE-S 모형을 이용하여 토지이용변화를 모의하는데 사회·정책·지형적 인자를 고려하기 위해 7가지의 토지변화 요소 (경사향, 경사도, DEM, 인구밀도, 인구, 도로까지의 거리, 하천까지의 거리)를 결정하였으며, 이를 이용한 토지이용

Table 3 SWAT-CUP Parameters

Parameter	Description	Variation Method	Fitted Value	Parameter Range
ALPHA_BF	Baseflow recession constant	Replace by Value	0,2237	0 – 1,0
CH_K2	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium	Replace by Value	64,6203	0,01 – 150
CH_N2	Manning's "n" value for main channel	Replace by Value	0,0270	0,01 – 0,3
SOL_AWC	Available water capacity	Multiple by Value	0,7845	0 – 1,0
GW_REVAP	Revap coefficient	Replace by Value	0,0805	0,02 – 0,2
GW_DELAY	Delay time for aquifer recharge	Replace by Value	70,6750	0 – 500
GWQMN	Threshold water level in shallow aquifer for base flow	Replace by Value	1,388,1	0 – 5,000

별 회귀분석을 수행하여 회귀계수 β 값을 산정하였다. β 값을 사용하는데 있어 회귀분석의 적합성을 판단하기 위하여 ROC curve를 이용하였다.

ROC curve는 True positive (민감도)와 True negative (특이도)를 동시에 나타내는 그래프로 x축은 False positive rate ($=1 - \text{True negative}$), y축은 True positive rate를 나타낸다. 적합한 ROC curve의 아래쪽 면적인 AUC (Area Under the ROC Curve) 값으로 평가된다. Song (2009)은 AUC가 0.5 이하인 경우 사용할 수 없는 부적합한 회귀식, 0.5에서 0.7 사이인 경우 비교적 덜 정확한 회귀식, 0.7에서 0.9 사이인 경우 비교적 높은 적합성을 가지는 회귀식, 0.9에서 1 사이인 경우 매우 높은 적합성을 가지는 회귀식, 1인 경우 완벽한 적합성을 가지는 회귀식으로 구분하였다. ROC curve를 분석한 결과 도시, 산림, 습지에 대해서는 0.9 이상으로 매우 높은 적합성을 나타냈으며, 농지, 나지, 수역에 대해서는 0.8 이상, 초지에서는 0.74로 비교적 높은 적합성을 나타냈다(Table 4). 모든 토지이용에서 높은 적합성을 보였으므로 이에 대한 회귀분석 결과를 CLUE-S 모델에 반영하였다.

미래토지이용을 모의하기에 앞서 변환탄성계수와 변환행렬 값의 적합성을 판단하기 위해 2010년 환경부 토지이용도와 CLUE-S를 통해 생성한 2010년 토지이용도를 비교하였다. 그 결과 산림지역 90.8%, 도시지역 70.7%, 농업지역 59.3%, 수역에서 50.1%의 일치율을 나타냈다. 그러나 초지와 습지, 그리고 나지에서는 상대적으로 일치율이 낮게 나타내며 Kappa 값은 0.583으로 신뢰도가 있는 것으로 나타났다. 세 개 토지이용의 일치율이 낮게 나온 이유는 이 3가지의 토지이용 변화를 대변할 적절한 토지이용변화요소의 부재로 인해 발생한 것으로 판단된다. 그러나 이 토지이용의 면적은 전체 면적

의 약 11%로 큰 비율을 차지하지 않으며 Kappa 값이 신뢰도가 있다고 판단되므로 추가적인 보정 없이 매개변수를 그대로 적용하여 미래 토지이용을 모의하였다.

Fig 4는 CLUE-S를 이용하여 예측한 미래 토지이용도이다.

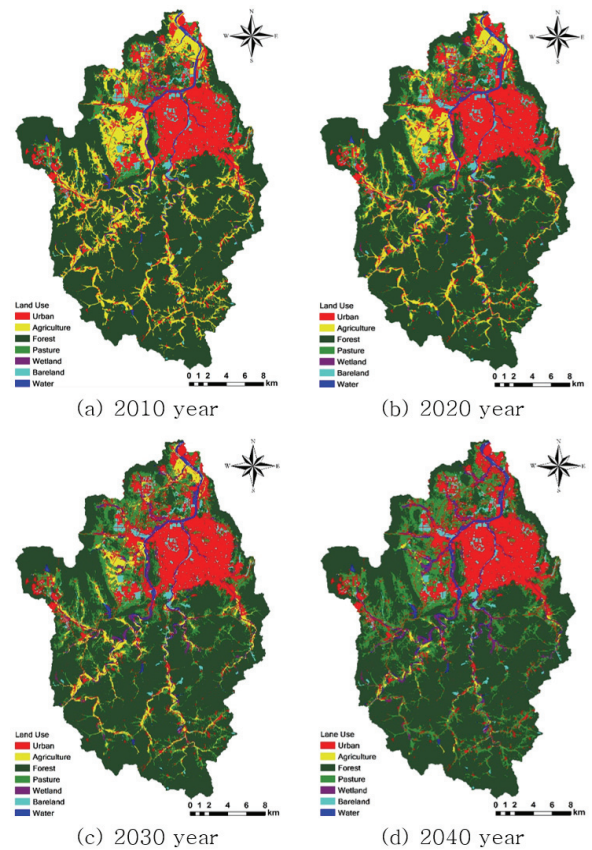


Fig. 4 Simulation of Land use changes in 2010, 2020, 2030 and 2040 using CLUE-S

Table 4 AUC (Area Under the ROC Curve) in ROC curve

Urban	Agriculture	Forest	Pasture	Wetland	Bareland	Water
0,917	0,833	0,938	0,739	0,963	0,819	0,885

Table 5 Changes in 7 Land use Classes in 2010, 2020, 2030, and 2040 years

Year	Land Use (km ²)						
	Urban	Agriculture	Forest	Pasture	Wetland	Bareland	Water
2010	98.73 (15.24 %)	87.44 (13.50 %)	378.82 (58.48 %)	47.62 (7.35 %)	8.09 (1.25 %)	19.86 (3.06 %)	7.24 (1.12 %)
2020	101.21 (15.62 %)	59.97 (9.26 %)	374.23 (57.77 %)	72.07 (11.13 %)	12.63 (1.95 %)	20.04 (3.09 %)	7.65 (1.18 %)
2030	103.64 (16.00 %)	32.74 (5.05 %)	369.17 (56.99 %)	96.63 (14.92 %)	17.05 (2.63 %)	20.30 (3.13 %)	8.27 (1.28 %)
2040	106.05 (16.37 %)	5.36 (0.83 %)	364.11 (56.21 %)	121.25 (18.72 %)	21.57 (3.33 %)	20.57 (3.17 %)	8.89 (1.37 %)

미래 토지이용변화를 모의한 결과 2010년에서 2040년까지 농업과 산림지역은 지속적으로 감소하는 경향을 보였으며 나머지 토지이용은 증가하는 경향을 보였다. 감소하는 경향의 토지이용은 농업, 산림지역이며 이들은 2010년부터 2040년까지 각각 16.89%, 3.88 %의 감소율을 보였다. 특히 농업지역의 경우 30년동안 약 80km²의 면적이 감소하는 급격한 변화를 보였다. 이는 토지이용변화 모의 시에 농업지역의 감소가 크게 나타난 2000년부터 2010년까지의 토지이용변화 양상이 미래의 토지이용변화의 경향에 영향을 주었기때문으로 판단된다. 증가하는 경향의 토지이용은 도심, 초지, 습지, 나지, 수역이다. 초지가 15.15%로 가장 크게 증가하는 경향을 보였으며 습지, 도시, 수역, 나지 순으로 각각 2.78%, 1.51%, 0.35%, 0.15%의 증가율을 보였다(Table 5).

3. SWAT 모형을 이용한 미래 토지이용변화와 기후 변화 시나리오 적용에 따른 유출 특성 분석

본 연구에서는 기후변화 시나리오만 적용한 경우인 시나리오1과 기후변화 시나리오와 미래 토지이용도를 적용한 시나리오2 두 가지의 시나리오를 적용하였으며, 2020년~2029년 (2020s), 2030년~2039년 (2030s), 2040년~2049년 (2040s) 총 3개의 기간으로 구분하여 미래기간에 대한 갑천 유역 유출 특성을 비교 분석하였다. Table 6은 SWAT 모형으로 모의한 유량자료를 유황별로 분석한 결과를 보여준다. 2020s의 홍수기는 시나리오 1에 비해 시나리오 2에서 더 많은 유출량을 나타냈으며, 풍수기, 평수기, 저수기, 갈수기에서는 시나리오 1이 전체적으로 더 많은 유출량을 나타냈다. 또한, 2030s의

Table 6 Analysis of Flow Duration Curve for Scenario 1 and 2

		Scenario 1			Scenario 2		
		Avg. (m ³ /s)	Max (m ³ /s)	Min (m ³ /s)	Avg. (m ³ /s)	Max (m ³ /s)	Min (m ³ /s)
2020s	High-Flow	113.1	1,235.0	42.4	114.6	1,258.0	42.3
	Moist-conditions	21.4	42.3	12.3	21.0	42.3	12.0
	Mid-range-Flow	10.4	12.3	8.5	10.1	12.0	8.2
	Dry-conditions	6.1	8.5	3.8	5.8	8.1	3.7
	Low-Flow	2.8	3.8	1.7	2.7	3.6	1.6
2030s	High-Flow	124.0	1,316.0	38.8	125.1	1,333.0	38.1
	Moist-conditions	20.6	38.5	11.7	19.8	38.1	11.4
	Mid-range-Flow	9.9	11.7	8.3	9.7	11.4	8.1
	Dry-conditions	6.2	8.3	4.0	6.0	8.1	3.9
	Low-Flow	3.0	4.0	1.8	2.9	3.8	1.7
2040s	High-Flow	161.3	1,731.0	71.9	161.1	1,743.0	70.9
	Moist-conditions	31.6	71.9	16.4	31.2	70.7	15.9
	Mid-range-Flow	13.8	16.4	11.5	13.4	15.9	11.3
	Dry-conditions	8.6	11.5	5.7	8.4	11.3	5.6
	Low-Flow	4.1	5.7	1.8	4.0	5.6	1.8

홍수기는 2020s와 마찬가지로 시나리오 1에 비해 시나리오 2에서 더 많은 유출량을 나타냈으며, 풍수기, 평수기, 저수기, 갈수기에서는 시나리오 1이 전체적으로 더 많은 유출량을 보였다. 반면 2040s는 모든 유황에서 시나리오 1이 시나리오 2에 비해 많은 유출량을 나타냈다. 그러나 2040s의 경우 홍수기의 평균유출량은 시나리오 1이 더 많게 나타났지만 침투유량은 시나리오 2에서 더 높게 나타났다.

이와 같은 결과에 따라 기후변화만 고려할 때에 비해 기후변화와 토지이용변화를 모두 고려하였을 때의 침투유량이 크게 나타나는 것으로 예측되었다. 이러한 결과는 기후변화뿐만 아니라 도시의 면적이 증가하고 농경지의 면적이 감소하게 되는 토지이용변화가 고려되었기 때문으로 판단된다. 따라서 미래 유출량 평가시에는 기후변화만 고려하는 것보다는 기후변화와 토지이용의 변화를 모두 고려하는 것이 더욱 합리적인 결과를 나타낼 것으로 판단된다.

4. 미래 토지이용변화와 기후변화 시나리오 적용에 따른 기저유출 변화 분석

가. 연도별 기저유출 분리

Table 7는 SWAT 모형으로 모의한 시나리오 1과 시나리오 2의 미래 유출량 자료 (2020s, 2030s, 2040s)를 WHAT 시스템에 적용하여 기저유출을 분리하고 연별, 10년 평균 기저유출량과 BFI를 산정한 결과를 제시하였다.

전체 연구기간 동안 두 가지 시나리오의 기저유출량을 비교한 결과 기저유출량의 차이는 최소 5,800~16,800 천톤/yr로 나타났다. 이 때 두 가지 시나리오의 기저유출량의 차이가

가장 작게 나타난 기간은 2020s였으며, 차이가 가장 크게 나타난 기간은 2040s였다.

전체적인 기저유출의 양은 2020s에 비해 2040s에 증가하는 경향을 나타내고 있으나 기저유출의 기여도는 오히려 2040s에 감소하는 것으로 나타난다. 이는 2040s에 하천유량 전체는 다양한 요인에 의해 증가하였으나 하천유량에 대한 기저유출의 기여도는 다른 기간에 비해 오히려 작아졌다는 것을 보여준다. 이러한 결과는 평균 연강수량이 2020s에 비해 2040s에 약 400 mm 증가하였기 때문으로 보여진다. 또한 전체 기간동안 시나리오 1에 비하여 시나리오 2의 기저유출량과 기저유출의 기여도는 모두 감소하는 것으로 나타난다. 이와 함께 2020s에서 2040s까지 시간이 흐를수록 두 가지 시나리오의 기저유출량 차이가 점차 증가하는 것으로 나타난다. 이는 시간이 흐름에 따라 토지이용의 변화로 인해 불투수층의 면적이 증가하여 지표유출이 증가하고, 산림이 감소하여 토양에 침투할 수 있는 양이 감소한 것에 대한 결과로 보여진다.

나. 계절별 기저유출 분리

본 연구에서는 SWAT 모형을 통해 모의된 미래 유출량 자료를 활용하여 월별로 기저유출을 분리한 후 3~5월을 봄, 6~8월을 여름, 9~11월을 가을, 12월~2월을 겨울로 구분하여 계절별 기저유출을 예측하였다. Table 8은 시나리오 1과 시나리오 2의 2020s, 2030s, 2040s의 유량자료에 대해 WHAT 시스템을 통한 기저유출 분리방법을 사용해 10년 평균 계절별 기저유출량과 이를 통해 산정한 BFI를 제시한 것이다.

연구 결과 2020s, 2030s, 2040s의 기간 모두 계절별로 큰 차이를 나타냈다. 특히 모든 기간에서 여름의 기저유출량이

Table 7 Comparison of annual precipitation and baseflow for scenario 1 and 2 (pcp=precipitation)

	Year	PCP (mm)	Scenario 1			Scenario 2		
			Streamflow (10 ⁶ m ³ /yr)	Baseflow (10 ⁶ m ³ /yr)	BFI	Streamflow (10 ⁶ m ³ /yr)	Baseflow (10 ⁶ m ³ /yr)	BFI
2020s	2020	1,015.7	403.6	288.4	0.715	396.9	280.3	0.706
	2021	1,934.1	876.3	564.2	0.644	871.5	553.9	0.636
	2022	1,602.2	777.2	513.2	0.660	773.5	504.6	0.652
	2023	937.2	369.2	273.3	0.740	363.6	266.4	0.733
	2024	1,109.4	515.2	341.0	0.662	511.1	333.3	0.652
	2025	1,029.9	414.7	297.3	0.717	410.7	291.5	0.710
	2026	1,363.4	592.2	377.1	0.637	587.4	367.8	0.626
	2027	1,572.4	753.5	505.2	0.670	749.0	496.1	0.662
	2028	2,153.3	1,089.8	694.0	0.637	1,086.9	683.5	0.629
	2029	2,037.6	1,021.9	673.7	0.659	1,016.0	658.5	0.648
	Avg.	1,475.5	681.4	452.7	0.664	676.7	443.6	0.656

	Year	PCP (mm)	Scenario 1			Scenario 2		
			Streamflow (10 ⁶ m ³ /yr)	Baseflow (10 ⁶ m ³ /yr)	BFI	Streamflow (10 ⁶ m ³ /yr)	Baseflow (10 ⁶ m ³ /yr)	BFI
2030s	2030	1,794.9	935.1	621.2	0.664	931.9	612.5	0.657
	2031	2,218.3	1,219.7	731.8	0.600	1,214.3	715.8	0.589
	2032	1,087.8	492.8	348.3	0.707	486.8	341.1	0.701
	2033	896.4	362.3	255.3	0.705	356.7	246.7	0.692
	2034	1,363.0	602.5	414.9	0.689	596.6	407.8	0.684
	2035	1,122.4	466.8	320.1	0.686	461.2	311.9	0.676
	2036	1,366.4	599.6	397.9	0.664	593.8	388.3	0.654
	2037	1,008.3	397.6	289.1	0.727	391.6	281.8	0.720
	2038	1,047.9	436.2	312.5	0.716	430.9	306.3	0.711
	2039	2,647.8	1,511.5	879.6	0.582	1,509.1	865.9	0.574
	Avg.	1,455.3	702.4	457.1	0.651	697.3	447.8	0.642
2040s	2040	2,089.6	1,099.9	711.9	0.647	1,091.8	697.0	0.638
	2041	1,614.7	804.8	531.0	0.660	798.3	524.7	0.657
	2042	2,869.3	1,582.9	1,040.0	0.657	1,581.1	1,028.6	0.651
	2043	1,834.0	848.3	585.0	0.690	840.3	576.7	0.686
	2044	1,816.0	908.8	618.3	0.680	904.4	610.6	0.675
	2045	2,986.1	1,682.3	936.2	0.556	1,678.6	919.4	0.548
	2046	1,385.2	642.8	454.2	0.707	635.1	445.6	0.702
	2047	1,346.9	601.8	418.2	0.695	595.5	411.5	0.691
	2048	1,225.2	546.9	381.7	0.698	541.5	373.1	0.689
	2049	1,805.0	897.0	589.4	0.657	891.8	579.3	0.650
	Avg.	1,897.2	961.6	626.6	0.652	955.8	616.6	0.645

다른 계절에 비해 크게 나타났으며, 가장 기저유출량이 작은 계절은 겨울철로 여름과 겨울의 기저유출량은 약 4배정도의 차이를 나타냈다. 모든 기간에서 전반적으로 가을과 겨울의 BFI가 봄과 여름에 비해 큰 값을 나타내었으며, 이 중 여름철인 7월과 8월에 기저유출량은 가장 많은 양으로 산정되지만 기저유출의 기여도는 여름에 가장 낮게 산정된다. 이러한 결과는 우리나라의 강우특성으로 인한 것으로 보여진다. 우리나라는 여름철에 연강수량의 약 2/3 정도의 강우가 집중되며, 이에 따라 많은 양이 지표유출로 이어지게 된다. 따라서 여름철 하천유량은 증가하고 기저유출의 양 또한 증가하지만 하천유량 중 직접유출이 차지하는 비율이 증가하여 기저유출의 기여도는 감소하게 된다. 이에 따라 기저유출의 기여도는 다른 계절에 비해 상대적으로 매우 낮게 나타난다. 반면 겨울의 경우에는 기온이 영하로 내려가기 때문에 강설 시에 대부분이 지표면에 적설형태로 존재하게 된다. 이는 봄철에 기온이 상승할 때 지표를 통해 직접유출 형태로 하천에 유입하게 된다(Lee et al., 2003). 따라서 겨울에는 강설이 발생하여도 지표를 통해 유출이 거의 발생하지 않기 때문에 하천유량에서 기

저유출의 기여도가 다른 계절에 비해 상대적으로 높게 나타난다. 이는 우리나라의 기저유출 기여도는 계절의 기후 특성에 따라 큰 변동성을 나타내는 것을 보여준다. 이러한 결과는 국내의 기후 특성이 잘 반영된 것으로 보여지며 미래에도 현재와 비슷한 기후 특성을 보일 것으로 보여진다.

계절별로 기저유출을 분석할 때 연별 기저유출과 마찬가지로 시나리오 1에 비해 시나리오 2에서 상대적으로 작은 기저유출량과 기저유출 기여도를 보인다. 이를 통해 기후변화 뿐만 아니라 토지이용의 변화도 기저유출의 기여도를 평가하는데 영향을 준다고 판단할 수 있다. 이에 따라 우리나라와 같이 계절에 따라 뚜렷한 기후의 차이를 가지며 토지이용이 꾸준히 변화하는 지역을 대상으로 기저유출을 분석할 때에는 연단위의 기저유출 분리보다는 계절별 기저유출 분리가 상대적으로 합리적인 것으로 보이며, 기후변화만 적용했을 때에 비해 기후변화와 토지이용변화를 모두 고려하여 기저유출을 분리하는 것이 더욱 합리적일 것으로 판단된다.

Table 8 Comparison of seasonal precipitation and baseflow for scenario 1 and 2

	Season	Month	PCP (mm)	Scenario 1			Scenario 2		
				Streamflow (10 ⁶ m ³ /mon)	Baseflow (10 ⁶ m ³ /mon)	BFI	Streamflow (10 ⁶ m ³ /mon)	Baseflow (10 ⁶ m ³ /mon)	BFI
2020s	spring	3	46.4	16.6	12.2	0.735	16.4	12.0	0.728
		4	133.6	41.4	24.4	0.589	41.4	24.2	0.583
		5	91.3	37.4	28.3	0.758	37.1	27.9	0.752
	summer	6	254.7	77.7	37.4	0.481	78.7	37.4	0.475
		7	245.8	108.5	70.7	0.652	108.3	69.6	0.643
		8	382.1	168.5	94.4	0.560	169.7	93.6	0.551
	autumn	9	147.2	102.2	75.1	0.735	100.6	73.3	0.728
		10	63.0	45.6	38.4	0.842	44.1	36.8	0.834
		11	40.1	29.5	25.7	0.873	28.3	24.6	0.871
	winter	12	23.1	24.5	21.1	0.863	23.5	20.3	0.864
		1	19.3	16.1	14.0	0.867	15.5	13.4	0.865
		2	28.9	13.5	11.0	0.817	13.2	10.7	0.812
2030s	spring	3	45.2	20.7	16.4	0.794	20.3	16.0	0.791
		4	83.7	26.8	18.9	0.706	26.4	18.6	0.705
		5	84.1	29.1	21.2	0.730	28.9	20.9	0.723
	summer	6	277.6	93.8	42.9	0.458	94.7	42.6	0.450
		7	180.8	91.4	63.3	0.692	90.4	61.9	0.685
		8	456.1	209.3	108.6	0.519	210.9	107.9	0.512
	autumn	9	125.0	91.9	69.4	0.755	90.2	67.4	0.747
		10	60.2	41.3	35.0	0.848	40.0	33.7	0.841
		11	40.3	33.3	28.7	0.863	32.2	27.8	0.861
	winter	12	16.7	22.7	20.8	0.915	21.8	20.0	0.916
		1	42.6	21.5	15.9	0.740	21.3	15.5	0.729
		2	42.9	20.7	15.9	0.769	20.1	15.5	0.769
2040s	spring	3	37.5	19.7	16.5	0.839	19.3	16.2	0.838
		4	131.6	44.7	26.7	0.598	44.5	26.5	0.595
		5	136.3	53.7	37.7	0.702	53.2	36.9	0.694
	summer	6	375.4	133.4	61.3	0.459	134.7	60.8	0.451
		7	306.3	165.1	112.8	0.683	163.3	110.9	0.679
		8	556.1	237.8	111.8	0.470	240.0	111.3	0.464
	autumn	9	126.6	122.0	104.9	0.860	119.8	102.8	0.858
		10	74.2	59.9	49.7	0.830	58.7	48.5	0.826
		11	53.9	43.1	36.5	0.845	42.0	35.5	0.846
	winter	12	27.0	30.5	27.3	0.896	29.8	26.7	0.896
		1	38.8	30.1	23.5	0.780	29.6	23.0	0.778
		2	33.3	21.5	18.0	0.836	21.1	17.6	0.836

IV. 결 론

최근 기후변화와 도시화에 따른 토지이용변화의 영향으로 하천의 건천화, 가뭄 등의 문제가 발생하여 이에 대한 해결책으로 건기시의 하천유량 확보가 중요시되고 있다. 따라서 본 연구는 금강수계의 갑천 유역을 대상으로 미래 토지이용변화 및 기후변화에 따른 기저유출 특성을 파악하기 위해 수행되었다. 미래의 기저유출을 분석하기 위해서 2020s, 2030s, 2040s로 나누어 분석하였으며, 현재 토지이용도에 기후변화만 적용한 시나리오 1과 미래토지이용도와 기후변화를 모두 적용한 시나리오 2로 구분하여 분석을 진행하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서는 SWAT 모형을 활용하여 유역의 유량 모의 및 검·보정을 진행하였다. 그 결과 보정기간과 검증기간의 R^2 와 NSE 모두 0.7 이상으로 매우 높은 적용성을 보였으며, 이 때의 매개변수를 미래의 강우-유출을 모의 시에 그대로 반영하였다.
- 2) CLUE-S 모형을 사용하여 갑천 유역의 미래 토지이용을 예측하였다. 모형의 예측 정확성은 Kappa value를 통해 평가하였으며, 그 결과 모형의 신뢰도가 높은 것으로 나타났다. 실측 자료인 2010년 토지이용도에 비해 미래의 토지이용은 농지와 산림이 꾸준히 감소하는 경향을 보였으며, 도시와 초지는 꾸준히 증가하는 경향을 보였다. 이는 도시화로 인해 도시 비율이 증가하면서 2000년대 이후로 진행된 도시녹화 사업에 따라 초지 비율이 증가하는 경향이 모형에 반영된 것으로 판단된다.
- 3) 미래 강우-유출 모의 결과를 유황별로 분석하였을 때, 홍수량의 경우 시나리오 1에 비해 시나리오 2에서 높은 유출량을 나타내었으며, 나머지 유황에서는 시나리오 1에서 시나리오 2에 비해 더 높은 유출량을 나타내었다.
- 4) 연별 기저유출 분석 결과 2020s에 비해 2040s에 전체적인 기저유출량은 증가하였으나 오히려 기저유출의 기여도는 작아지는 것으로 나타났다. 또한 계절별 기저유출 분석 결과 전반적으로 여름철 기저유출량이 다른 계절에 비해 높게 나타났으나 기저유출의 기여도는 오히려 낮게 나타났다. 반면 겨울철인 12월의 경우 기저유출의 기여도가 가장 높게 산정되는 것으로 나타났다. 연별/계절별 모두 전체 기간동안 시나리오 1에 비하여 시나리오 2의 기저유출량과 기저유출의 기여도가 모두 낮게 산정되는 것으로 나타났다. 이는 토지이용변화에 따라 투수층의 면적이 감소하여 지표유출이 증가하였기 때문으로 판단된다.

두 가지의 시나리오 모두 미래의 기후변화와 토지이용변화를 활용하여 모의한 유량자료를 활용하여 기저유출을 분리하였기 때문에 정확한 예측 값으로 단정하기 어렵다. 또한 토지이용변화 모의 시에 2000년부터 2010년까지의 토지이용변화를 이용하여 2040년까지의 토지이용변화를 평가하였으므로 실제 토지이용변화와 차이가 있을 수 있다. 이와 같이 기후변화 시나리오와 토지이용변화에 대한 예측은 검·보정이 불가능하므로 불확실성이 존재할 수 있다.

그러나 본 연구의 목적은 하천의 유량 및 기저유출량은 기후변화와 토지이용변화를 모두 고려하였을 때의 미래 시나리오를 구성하여 수문 특성 및 기저유출의 특성을 분석하고, 미래 수문 분석시에 토지이용의 변화를 고려해야함을 제시하는 것이다. 따라서 앞으로 토지이용이 급격하게 발생하는 유역에 대한 연구를 진행할 경우에는 토지이용의 변화와 기후변화를 모두 고려하여 연구를 진행해야할 것으로 판단된다. 뿐만 아니라 계절에 따라 뚜렷한 기후의 차이를 가지는 국내에서 기저유출을 분석할 경우에는 연별 기저유출 분석보다는 계절별 기저유출 분석이 비교적 합리적인 결과를 나타낼 것으로 판단된다.

본 연구의 결과는 향후 다양한 토지이용변화와 기후변화를 고려한 갑천 유역에서의 기저유출 특성을 파악하는 연구의 기초자료로 활용될 수 있을 것이며 향후 토지이용변화가 급격하게 이루어진 유역에서 가뭄이나 건기 시 효율적인 하천 관리 방안을 수립하는데 방향을 제시 할 수 있을 것이라 판단된다. 또한 토지이용과 기후변화를 고려한 모델링 기법을 이용하여 유역의 기저유출 특성을 분석하였으므로 향후 국내 다른 유역의 기저유출 특성을 분석하는데 있어 선행자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 2017년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비(관리번호-520170213)와 한강수계관리위원회의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였음(NIER-2017-05-01-018, 비점오염원 종합 모니터링 및 관리방안 연구).

REFERENCES

1. Abbaspour, K. C., J. Yang, I. Maximov, R. Siber, K. Bogner, J. Mieleitner, J. Zobris, and R. Srinivasan, 2007. Modelling hydrology and water quality in the

- prealpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology* 333: 431-430. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.09.014.
2. Ahn, J. H., Y. N. Yoon, and C. S. Yoo, 2001. On the change of hydrologic conditions due to global Warming : 2. an analysis of hydrologic changes in Daechung Dam basin using water balance model. *Journal of Korea Water Resources Association* 34(5): 511-519 (in Korean).
 3. Ahn, S. R., C. H. Jang, J. W. Lee, and S. J. Kim, 2015. Assessment of climate and land use change impacts on watershed hydrology for an urbanizing watershed. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 35(3): 567-577 (in Korean). doi:10.12652/Ksce.2015.35.3.0567.
 4. Ahn, S. R., Y. J. Lee, G. A. Park, and S. J. Kim, 2008. Analysis of future land use and climate change impact on stream discharge. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 28(2B): 215-224 (in Korean).
 5. Ahn, S. R., G. A. Park, C. H. Jang, and S. J. Kim, 2013. Assessment of climate change impact on evapotranspiration and soil moisture in a mixed forest catchment using spatially calibrated SWAT model. *Journal of Korea Water Resources Association* 46(6): 569-583 (in Korean). doi:10.3741/JKWRA.2013.46.6.569.
 6. Arnold, J. G., 1992. Spatial scale variability in model development and parameterization. Ph.D. diss., West Lafayette, Ind.: Purdue University.
 7. Arnold, J. G., R. Srinivasan, R. S. Muttiah, and J. R. Williams, 1998. Large area hydrologic modeling and assessment: part I: model development. *Journal of American Water Resources Association* 34(1): 73-89.
 8. Cho, S. H., 2006. Computation of baseflow contribution to streamflow using environmental tracers in three small catchments Yuseong, Daejeon. Ph.D. diss, Choongnam National University, Daejeon (in Korean).
 9. Cho, J. P., S. W. Hwang, G. D. Hwang, K. Y. Kim, and J. D. Kim, 2015. Assessing the climate change impacts on agricultural reservoirs using the SWAT model and CMIP5 GCMs. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 57(5): 1-12 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2015.57.5.001.
 10. Choi, D. G., M. S. Keem, N. W. Kim, and S. D. Kim, 2009. An analysis of the effect of climate change on Byeongseong Stream's hydrologic and water quality responses using CGCM's future climate information. *Journal of Korea Water Resources Association* 42(11): 921-931 (in Korean). doi:10.3741/JKWRA.2009.42.11.921.
 11. Choi, E. S., and I. J. Moon, 2008. The variation of extreme values in the precipitation and wind speed during 56 years in Korea. *Atmosphere* 18(4): 397-416 (in Korean).
 12. Choi, S. K., J. H. Jeong, J. P. Cho, S. O. Hur, D. H. Choi, and M. K. Kim, 2018. Assessing the climate change impacts on paddy rice evapotranspiration considering uncertainty. *Journal of Climate Change Research* 9(2): 143-156 (in Korean). doi:10.15531/ksccr.2018.9.2.143.
 13. Chung, U. R., J. P. Cho, and E. J. Lee, 2015. Evaluation of Agro-Climatic index using Multi-Model ensemble downscaled climate prediction of CMIP5. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 17(2): 108-125 (in Korean). doi:10.5532/KJAFM.2015.17.2.108.
 14. Eckhardt, K., 2005. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological Processes* 19(2): 507-515.
 15. Fleiss, J. L., 1981. *Statistical methods for rates and proportions*, Wiley.
 16. Gregory, J. M., J. F. B. Mitchell, and A. J. Brady, 1997. Summer drought in northern midlatitudes in a time-dependent CO₂ climate experiment. *Journal of Climate* 10(4): 662-686.
 17. Gudmundsson, L., J. B. Bremnes, J. E. Haugen, and T. Engen Skaugen, 2012. Technical note: downscaling RCM precipitation to the station scale using quantile mapping-a comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 9: 6185-6201.
 18. Hagen, A., 2002. Multi-method assessment of map similarity. In *Proceedings of the fifth AGILE conference on geographic information science*, Palma, Spain, 171-182.
 19. Han, J. H., D. J. Lee, B. S. Kang, S. W. Chung, W. S. Jang, K. J. Lim, and J. G. Kim, 2017. Potential impacts of future extreme storm events on streamflow and sediment in Soyang-dam watershed. *Journal of Korean Society on Water Environment* 32(2): 160-169 (in Korean). doi:10.15681/KSWE.2017.33.2.160.
 20. Han, J. H., K. J. Lim, and Y. H. Jung, 2017. Baseflow and streamflow simulation applying baseflow recession constants in individual sub-watersheds. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 59(6): 101-108 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2017.59.6.101.
 21. Hong, J. Y., K. J. Lim, Y. C. Shin, and Y. H. Jung, 2015. Quantifying contribution of direct runoff and baseflow to rivers in Han River system, South Korea. *Journal of Korea Water Resources Association* 48(4): 309-319 (in Korean).

- doi:10.3741/JKWRA.2015.48.4.309.
22. Jo, J. P., I. W. Jung, J. Y. Kim, J. P. Lee, S. K. Yoon, and E. J. Lee, 2013. Analysis of CMIP5 data in the water resources considering uncertainty. *Korea Water Resources Association (KWRA)*.
 23. Joo, S. W., Y. S. Park, J. G. Kim, S. G. Heo, K. S. Kim, J. D. Choi, and K. J. Lim, 2007. Estimation of BFI_{max} value for accurate Baseflow separation using WHAT system. *Journal of Agricultural, Life and Environmental Sciences* 18: 155-162 (in Korean).
 24. Jung, Y. H., K. J. Lim, and H. S. Kim, 2014. Estimation of baseflow considering recession characteristics of hydrograph. *Journal of Wetlands Research* 16(2): 161-171 (in Korean).
 25. Jung, H. D., 2011. Basic study on functional forestation business in Daejeon (in Korean).
 26. Kim, B. S., H. S. Kim, B. H. Seoh, and N. W. Kim, 2004. Impact of climate changes on Yongdam Dam basin. *Journal of Korea Water Resources Association* 37(3): 185-193 (in Korean).
 27. Koo, G. S., K. O. Boo, and W. T. Kwon, 2007. The estimation of urbanization effect in global warming over Korea using daily maximum and minimum temperatures. *Atmosphere* 17(2): 185-193 (in Korean).
 28. Kum, D. H., Y. S. Park, Y. H. Jung, M. H. Shin, J. C. Ryu, J. H. Park, J. E. Yang, and K. J. Lim, 2015. Analysis of Rainfall-Runoff characteristics on bias correction method of climate change scenarios. *Journal of Korean Society on Water Environment* 31(3): 241-252 (in Korean). doi:10.15681/KSWE.2015.31.3.241.
 29. Lee, J. M., Y. H. Jung, Y. S. Park, H. W. Kang, K. J. Lim, and H. S. Kim, 2014. Assessment of future climate change impact on groundwater recharge, baseflow and sediment in steep sloping watershed. *Journal of Wetlands Research* 16(2): 173-185 (in Korean).
 30. Lee, J. M., Y. C. Shin, Y. S. Park, D. H. Kum, K. J. Lim, S. O. Lee, H. S. Kim, and Y. H. Jung, 2014. Estimation and assessment of baseflow at an ungauged watershed according to landuse change. *Journal of Wetlands Research* 16(4): 303-318 (in Korean).
 31. Lee, J. W., H. J. Kwon, S. C. Shin, and S. J. Kim, 2003. Assessment of hydrological impact by long-term land cover change using WMS HEC-1 model in Gyeongang-cheon watershed. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 6(1): 107-118 (in Korean).
 32. Lim, K. J., B. A. Engel, Z. Tang, J. Choi, K. S. Kim, S. Muthukrishnan, and D. Tripathy, 2005. Automated web GIS based hydrograph analysis tool, WHAT. *Journal of American Water Resources Association* 41(6): 1407-1416. doi:10.1111/j.1752-1688.2005.tb03808.
 33. Lyne, V. D., and M. Hollick, 1979. Stochastic time-variable rainfall-runoff modeling. In *Hydrology and Water Resources Symposium, National Committee on Hydrology and Water Resources of the Institute of Engineering: Perth, Western Australia*, 89-93.
 34. Nam, K. H., G. B. Kim, and G. C. Jung, 2013. Baseflow comparison using the WHAT system and flow rate measurements in the dry and rainy seasons. *The Journal of Engineering Geology* 23(2): 117-125 (in Korean). doi:10.9720/kseg.2013.2.117.
 35. Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry, and J. R. Williams, 2005a. *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2005*. USDA, ARS, Temple, Texas.
 36. Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry, and J. R. Williams, 2005b. *Soil and Water Assessment Tool User's Manual Version 2005*, USDA, ARS, Temple, Texas.
 37. Park, J. Y., M. J. Park, H. K. Joh, H. J. Shin, H. J. Kwon, R. Srinivasn, and S. J. Kim, 2011. Assessment of MIROC3.2 HiRes climate and CLUE-s land use change impacts on watershed hydrology using SWAT. *Transactions of the ASABE* 54(5): 1713-1724.
 38. Park, K. S., E. S. Chung, S. U. Kim, and S. K. Lee, 2009. Effectiveness analysis of alternatives for water resources management considering climate change and urbanization. *Journal of Korea Water Resources Association* 42(12): 1103-1111 (in Korean). doi:10.3741/JKWRA.2009.42.12.1103.
 39. Park, M. J., H. J. Kwon, and S. J. Kim, 2005. Analysis of impacts of land cover change on runoff using HSPF model. *Journal of Korea Water Resources Association* 38(6): 495-504 (in Korean).
 40. Ryu, J. C., H. W. Kang, J. W. Choi, D. S. Kong, D. H. Kum, C. H. Jang, and K. J. Lim, 2012. Application of SWAT-CUP for streamflow Auto-calibration at Soyang-gang dam watershed. *Journal of Korean Society on Water Environment* 28(3): 347-358 (in Korean).
 41. Ryu, J. C., K. H. Ahn, M. D. Han, H. S. Hwang, J. W. Choi, Y. S. Kim, and K. J. Lim, 2014. Evaluation and application of CLUE-S model for Spatio-Temporal analysis

- of future land use change in total water pollution load management system. *Journal of Korean Society on Water Environment* 30(4): 418-428 (in Korean).
42. Shin, M. H., J. A. Lee, S. U. Chen, Y. J. Lee, K. J. Lee, and J. D. Choi, 2010. Analysis of the characteristics of NPS runoff and application of L-THIA model at upper Daecheong reservoir. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 52(1): 1-11 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2010.52.1.001.
43. Verburg, P. H., W. Soepboer, A. Veldkamp, R. Limpiada, V. Espaldon, and S. S. Mastura, 2002. Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S model. *Environmental management* 30(3): 391-405.
44. Me, W., J. M. Abell, and D. P. Hamilton, 2015. Effects of hydrologic conditions on SWAT model performance and parameter sensitivity for a small, mixed land use catchment in New Zealand. *Hydrology and Earth System Sciences* 19: 4127-4147. doi:10.5194/hess-19-4127-2015.
45. Wetherald, R. T., and S. Manabe, 1995. The mechanisms of summer dryness induced by greenhouse warming. *Journal of Climate* 8(12): 3096-3108.
46. Wicklein, S. M., and D. M. Schiffer, 2002. Simulation of runoff and water quality for 1990 and 2008 land-use conditions in the Reedy Creek watershed. East-Central Florida U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 02-4018, Tallahassee, Florida.

