

미래 강수량 자료만을 이용한 SWAT모형의 유출 예측

이지민 · 금동혁 · 김영석* · 김윤중** · 강현우 · 장춘화 · 이관재 · 임경재†

강원대학교 지역건설공학과

*한국건설기술연구원

**포스코건설 R&D 센터

Prediction of SWAT Stream Flow Using Only Future Precipitation Data

Ji Min Lee · Donghyuk Kum · Young Sug Kim* · Yun Jung Kim** · Hyunwoo Kang · Chun Hwa Jang · Gwan Jae Lee · Kyoung Jae Lim†

Department of Regional Infrastructures Engineering, Kangwon National University

*Korea Institute of Construction Technology

**POSCO E&C, R&D Center

(Received 8 October 2012, Revised 7 January 2012, Accepted 7 January 2012)

Abstract

Much attention has been needed in water resource management at the watershed due to drought and flooding issues caused by climate change in recent years. Increase in air temperature and changes in precipitation patterns due to climate change are affecting hydrologic cycles, such as evaporation and soil moisture. Thus, these phenomena result in increased runoff at the watershed. The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model has been used to evaluate rainfall-runoff at the watershed reflecting effects on hydrology of various weather data such as rainfall, temperature, humidity, solar radiation, wind speed. For bias-correction of RCP data, at least 30 year data are needed. However, for most gaging stations, only precipitation data have been recorded and very little stations have recorded other weather data. In addition, the RCP scenario does not provide all weather data for the SWAT model. In this study, two scenarios were made to evaluate whether it would be possible to estimate streamflow using measured precipitation and long-term average values of other weather data required for running the SWAT. With measured long-term weather data (scenario 1) and with long-term average values of weather data except precipitation (scenario 2), the estimate streamflow values were almost the same with NSE value of 0.99. Increase/decrease by $\pm 2\%$, $\pm 4\%$ in temperature and humidity data did not affect streamflow. Thus, the RCP precipitation data for Hongcheon watershed were bias-corrected with measured long-term precipitation data to evaluate effects of climate change on streamflow. The results revealed that estimated streamflow for 2055s was the greatest among data for 2025s, 2055s, and 2085s. However, estimated streamflow for 2085s decreased by 9%. In addition, streamflow for Spring would be expected to increase compared with current data and streamflow for Summer will be decreased with RCP data. The results obtained in this study indicate that the streamflow could be estimated with long-term precipitation data only and effects of climate change could be evaluated using precipitation data as shown in this study.

Key words : Future precipitation, RCP8.5 scenario, Runoff simulation, SWAT

1. 서론

기후변화에 따른 정부 간 패널 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007a)의 제 4차 보고서에 의하면 한반도 기온은 30년 평균대비 21세기말 4도가 상승하며 강수량은 20%가 증가할 것으로 발표하였다. 특히 수자원 부분에서는 최근 빈번히 발생하는 집중호우 등의 기상이변으로 유출량이 급격히 증가하여 홍수로 인한 1999년 연천댐, 2002년 장현저수지와 동막저수지, 2007년 대사저수지

와 춘정저수지 등의 붕괴 및 인명/재산 등의 피해가 심화되고 있다(Joo, 2011). 이처럼 기후변화에 의해 발생하는 급격한 유출 변화로 홍수와 가뭄의 취약성이 증가됨으로서 수자원문제에 대응하기 위해 정량적으로 파악 및 평가가 필요하다. 이를 위해서는 미래 기후변화에 의한 유출량 변화가 분석 및 평가되어야 한다(Park et al., 2011).

이러한 유출량 분석에는 SWAT(Soil and Water Assessment Tool; Arnold et al., 1998)모형과 HSPF(Hydrological Simulation Program in Fortran; Bichnell et al., 2001), ANSWERS(Beasley et al., 1980), CRCAMS(Frere et al., 1980), HEC-HMS(Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System; Hydrologic Engineering Center, 2001) 모

† To whom correspondence should be addressed.

kjlim@kangwon.ac.kr

형 등이 있으며, 이 중 전 세계적으로 SWAT모형이 널리 활용되고 있다. 국내 연구에서 소양강댐 유역의 자동보정을 위한 SWAT-CUP의 적용 및 평가(Ryu et al., 2012), SWAT 모형을 이용한 소양강댐 유역의 미래 수자원 영향 평가(Park et al., 2010), SWAT ArcView GIS Extension Patch를 이용한 소유역 분할에 따른 수문 및 유사 거동에 미치는 영향 평가(Heo, Kim, Park et al., 2008) SWAT 모형을 이용한 제주도 하천의 유출량 모의(Jung et al., 2009), 만대천 유역의 비점오염 예측과 초생대 수질 개선 효과 분석(Lee et al., 2011) 등의 연구 결과를 보면 SWAT모형이 수문 분석에 높은 적용성을 보이는 것으로 나타났다. SWAT모형은 기상자료로 강우량, 온도, 습도, 일사량, 평균풍속이 필요로 하는데, 미래 기후변화에 따른 기상변화 자료는 다양한 시나리오 분석을 통해 산정되어 기상청에서 제공하고 있다. SRES(Special Report on Emission Scenerios)시나리오는 국내외의 연구에서 가장 활발히 사용되고 있지만(Lee et al., 2008) 1990년대 말 개발된 시나리오로 최근 온실가스 농도 변화 경향을 반영하지 못하고 있다. 이에 최근 온실가스 농도 변화경향을 반영하며, 최근 예측모델에 맞게 해상도를 업데이트시킨 RCP시나리오가 개발되어 제공되고 있다. 하지만 RCP(Representative Concentration Pathways) 시나리오는 전지구적인 모델 결과로 국내에 그대로 적용하기에는 불확실성이 내재되어 있기 때문에 편이보정을 통한 시나리오 보정이 필요하다(Kang, 2011; Park et al., 2011).

그러나 편이보정을 위해서는 평균 과거 30년치의 관측 자료가 구축되어 있어야 하지만 현재 강수관측 자료는 결측치가 거의 없이 구축되어 있는 반면, 다른 기상자료(기온, 습도, 풍속, 일조량)에 대해서는 결측 기간이 다수 있으며 관측 지점도 강수관측지점보다 현저히 적은 실정이다. 또한 과거 관측 자료가 구축되어 있다고 하더라도 기상청에서 제공하는 RCP시나리오가 다양한 모델들의 입력 자료로 이용되는 기상자료를 모두 제공해 주지 않기 때문에 사용상 어려움이 있다. 이에 본 연구에서는 SWAT 모형을

이용한 유출해석에서 다른 기상자료는 장기 실측 평균값을 사용하고, 실측 강수량 자료만을 이용하였을 경우 유출 모의 적용성을 검토하고, 이 결과를 활용하여 미래 기후변화가 유역 유출에 미치는 영향 평가시 강수량 자료만을 이용하여 분석하였다.

따라서 본 연구의 목적은 1) 실측 강수량자료와 장기 평균 기상자료만을 이용한 SWAT모형의 유출 분석/적용성 평가와 2) RCP 시나리오를 이용하여 미래 수자원의 변동성을 전망하였다.

2. 연구방법

2.1. 연구지역

본 연구에서는 강원도 홍천군 홍천강 유역을 연구 대상 지역으로 선정하였으며(Fig. 1), 일 유량 관측지점(서면 관측소) 위치는 Fig. 1, Table 1과 같다. 홍천강 유역은 면적은 1,566.1 km²이며, 유역평균경사 39.3%, 연평균 강수량은 1,387.1 mm이다(MOE, 2009). 지리적 위치는 북위 37°32'~37°56', 동경 128°51'~127°32'에 위치하며, 토지이용은 임야 82.5%, 전 6.2%, 답 4.3%, 대지 2.2%로 대부분 산림과 농업지역으로 분포되어 있다(MOE, 2009).

Table 1. Location of monitoring station

Monitoring station	Latitude	Longitude
Seomyeon	37-41-37	127-40-15

2.2. SWAT 모형 개요

SWAT 모형은 미국 농무성 농업연구소(USDA/ARS)에서 개발된 유역단위 모형이다(Arnold, 1992; Arnold et al., 1998). 특히 SWAT 모형은 유역내의 장기 강우-유출, 유사 이동 및 과정을 예측 모의하며, 미 계측 유역의 수문 분석도 가능한 것이 장점이다. 그리고 경작형태나 기후·식생 등의 변화에 따른 수질의 상대적 효과도 수치화 할

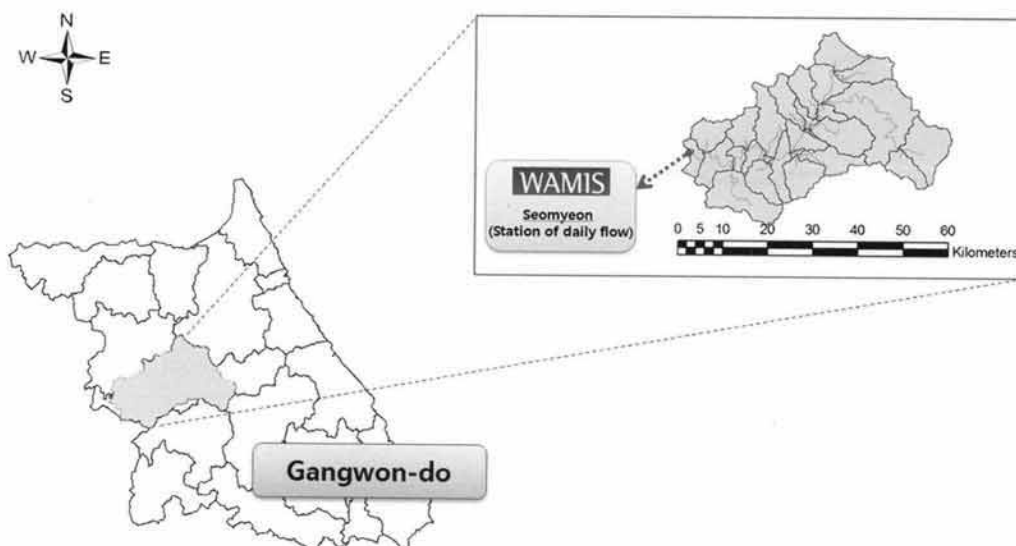


Fig. 1. Location of Hongcheon-gang watershed.

수 있는 특징을 지니고 있다. SWAT 모델을 이용하여 수문 및 수질을 시·공간적으로 분석하기 위해서는 시간적으로 변화하는 기상자료(일 강수량, 기온, 풍속, 일조량, 상대습도)와, 공간적으로 변화하는 토지이용현황, 토양속성, 그리고 수치표고모형(Digital Elevation Model, DEM) 등이 필요하다(Table 2) (Heo, Kim, Kim et al., 2008). SWAT 모델은 유역에서의 강수에 따른 유출 및 비점오염의 발생 및 거동의 시·공간적 변화를 분석할 수 있기 때문에 널리 이용되고 있다.

2.3. SWAT 모델의 입력자료

본 연구에서는 SWAT 모델의 수계 구분을 위해 10 m ×

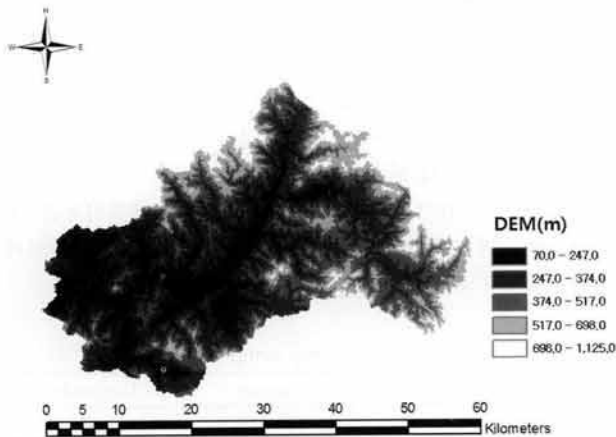


Fig. 2. DEM of study watershed.

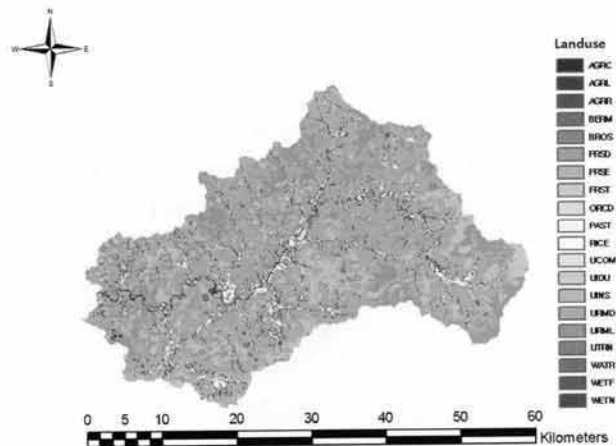


Fig. 3. Landuse of study watershed.

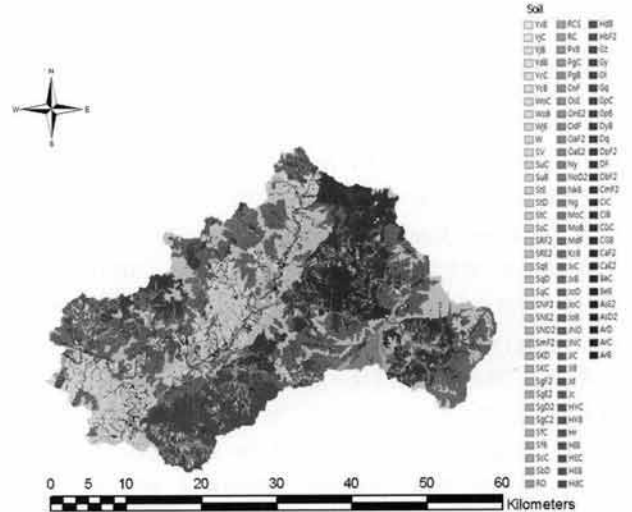


Fig. 4. Soil of study watershed.

10 m로 DEM을 구축하였다(Fig. 2). 토지이용도는 환경지리정보서비스에서(Environmental Geographic Information System; EGIS) 제공하는 1:25,000 중분류 토지이용자료를 이용하였으며(Fig. 3), 토양도는 농촌진흥청 국립농업과학원에서 제공해 주는 1:25,000 정밀토양도를 사용하였다(Table 3) (Fig. 4). 일 강수(mm), 일 평균풍속(m/sec), 일 평균상대습도(%), 일 최고·최저기온(°C), 일 수평면 일사량(MJ/m²) 기상자료는 기상청(2006년 1월 1일 ~ 2011년 12월 31일) 자료를 이용하여 구축하였다.

2.4. SWAT모델의 유출해석에 강수인자가 미치는 영향 분석

국가수자원관리종합정보시스템(Water Management Information System: WAMIS)은 총 754개 지점에서 강수자료를 제공하고 있지만, 기상청에서는 93개 지점의 강수자료를 제공하고 있다. 즉 WAMIS와 기상청의 공통된 부분을 제외한 661개의 지점은 강수자료는 있지만 나머지 기상자료는 제대로 구축이 되어 있지 않은 실정이다. 또한 미래기후 모델인 RCP 시나리오를 편이보정을 하려면 과거 30년 기상데이터가 구축되어 있어야 하지만 현재 데이터 구축상황에서는 강수량데이터를 제외한 나머지 기상인자들이 과거 5~6년 자료 밖에 없기 때문에 미래기후 편이보정하는 과정에 어려움이 있다.

물론 미 계측 기상관측 지점의 기상을 예측하는 방법으

Table 2. Input and Output data of the SWAT model

SWAT input		SWAT output	
Temporal analysis	Precipitation	Daily / Monthly / Yearly	Runoff / soil erosion / water quality for HRU
	Temperature		Runoff / soil erosion / water quality for subwatershed
	Wind speed		
	Solar radiation		
	Relative humidity		Runoff / soil erosion / water quality for each segment
Spatial analysis	Land use		
	Soil		
	Topography		

Table 3. Soil legend

Silty clay loam	Loam	Silt loam	Loamy coarse sand	Sandy loam soil
ArB, ArC, ArD, HiB, KcB, SfC, SqC, SqD, SqE, YjB, YjC	AsD2, AsE2, DaF, GpB, GpC, Gq, Gt, Gy, HYB, HYC, Mdf, MoB, MoC, MoD, MVF2, NkB, NoD2, PgB, PgC, PxB, SgE2, SgF2, SbD, SbE, ScB, ScC, SNE2, SNF2, SRE2, SRF2, SsC, WjE, YcB, YcC, YdB, YxB	BeB, BeC, CaE2, CaF2, CGB, CGC, CiB, CiC, CmE2, CmF2, CmF3, CvF2, DbF2, DF, DpF2, Dq, DyB, GZ, HbF2, HdC, HEB, HEC, Hr, JiB, JiC, OnE2, OsE, Ng, PuB, RC, RCS, RO, SE, Sfb, SgD2, SmE2, SmF2, StC, StD, StE, SuB, SuC, SV, WoB, WoC, YaC2, YbD2, YbD3	EgB	Jc, Jd, JNC, JND, JoB, JoC, JoD, JxB, JxC, Ny, OaE2, OaF2, OdF, SgC2, SKC, SKD, SND2,

로는 기상 위성 자료를 사용한 보간 방법, 과거 기상자료로부터 변동 특성을 분석하여 보간 하는 방법, 인근 지역 기상 자료 관측 값을 사용하여 보간 하는 방법 등(Lee et al., 1994)을 활용하여 기상자료를 구축하고 모델에 적용할 수 있다.

하지만 앞서 설명한 미 계측 기상관측 지점의 기상을 예측하는 방법들은 대다수가 보간 방법을 이용하기 때문에 대상지역 주변의 기상자료를 광범위하게 구축해야하는 단점이 있고, 이렇게 구축된 자료 또한 결측치가 존재할 수 있기 때문에 자료의 정확성에 문제점이 있다.

이에 따라 본 연구에서는 강수량자료는 있고, 나머지 기상자료가 구축되어 있지 않는 지점에 대한 SWAT모형 유출량 분석을 하기 위해 실측 기상자료 그대로 적용한 시나리오1과 강수량을 제외한 나머지 인자들을 장기 기상 평균자료로 적용한 시나리오2를 비교하여 강수 기상자료 외의 나머지 기상자료가 SWAT모형 유출량에 미치는 영향을 분석하였다.

2.5. 기후변화 시나리오 작성

2.5.1. RCP 시나리오 개요

IPCC 4차보고서에 사용된 시나리오 SRES는 해상도 문제와 정보지연성에 대한 한계성을 드러내고 있어, 2007년 9월에 온실가스 농도 시나리오 회의에서 이를 보완하는 새로운 시나리오인 RCP가 선정되었다(Climature change information center, 2012). RCP는 대표적인 복사강제력에 대해 경제, 사회 시나리오는 여러 가지가 될 수 있고, 온실가스 배출 농도의 시간에 따른 변화를 의미한다(IPCC, 2007b).

RCP의 특징은 SRES와 달리 기후변화 대응정책이 얼마나 수행되었는가에 따라 온실가스 배출 농도가 달라질 수 있다는 점을 나타내고 있으며, 배출농도를 2.6, 4.5, 6.0, 8.0의 4가지의 대표적인 경우로 구분되어 있다.

본 연구에서는 다원화 사회를 내포된 SRES A2와 유사한 RCP 8.5를 미래기후 시나리오로 선택하고 SWAT모형에 적용하였다. 이는 현재 추세로 저감 없이 온실가스가 배출되는 경우를 나타내는 시나리오이다.

2.5.2. 편이보정

기후모델을 이용하여 예측한 미래기후변화 결과 자료들은 불확실성이 내포되어 있다. 기후모델이 전지구적인 광범위한 스케일을 대상으로 하기 때문에 이에 따라 기후모델의 결과물을 가지고 연구에 사용할 시 신뢰성을 높이기 위

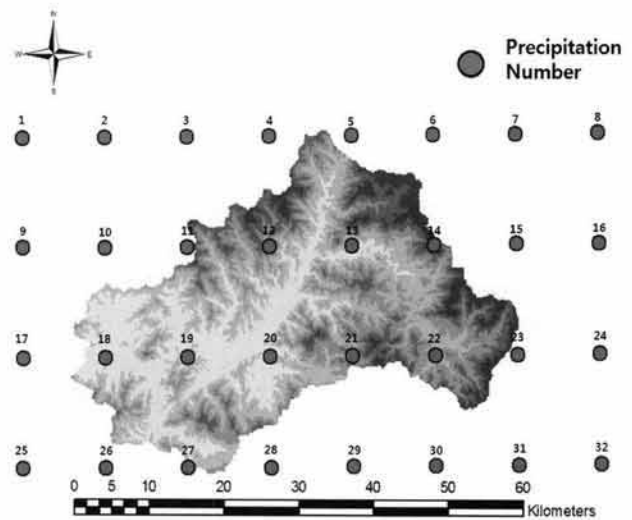


Fig. 5. Location of Hongcheon-gang watershed, precipitation number.

해 모델 결과를 현재 관측된 자료와 비교하여 확인하는 보정 과정이 필요하다(Carter et al., 1999).

따라서 본 연구에서는 과거 30년 기상자료(1971-2000)를 편이보정하기 위해 AICamo et al. (1997)이 사용했던 강수량에 대한 편이 보정법을 이용하였다(식 (1)).

$$P'_{GCM \cdot fut} = P_{GCM \cdot fut} \times (\overline{P_{meas}} / \overline{P_{GCM \cdot his}}) \quad (1)$$

여기서 $P'_{GCM \cdot fut}$ 는 보정된 미래의 강수량이며, P_{meas} 는 과거 30년 기준기간 동안 관측된 강수량, $\overline{P_{GCM \cdot fut}}$ 는 GCM에서 모의된 미래 강수량의 평균, $\overline{P_{GCM \cdot his}}$ 는 과거 기준기간 동안의 GCM에서 모의된 강수량의 평균을 말한다.

미래 수문예측을 위한 강우자료를 구축할 때 대표하하는 하나의 관측소에서 자료를 구축 한 것이 아니라 보다 세밀하고 정확하게 표현하기 위해서 32개의 강우 지점을 사용하여 분석을 하였다(Fig. 5).

2.6. SWAT모형을 이용한 미래강우 시나리오 적용

2.6.1. SWAT 모형 보정

본 연구에서는 SWAT 모형의 유출량 예측 정확성을 높이기 위해 매개변수 보정을 하였다. 먼저 유출량과 관련된 매개변수는 SOL_K, SURLAG, SOL_AWC, GW_DELAY,

ALPHA_BF, CH_N2, CH_K2, CN2, CANMX, GWQMN, SLOPE로 11개의 매개변수가 가장 민감하게 반응하는 것으로 나타났다.

일 유량 자료는 WAMIS(Water Management Information System)에서 제공하고 국토해양부에서 관리하는 서면 관측소의 2008년의 자료를 사용하였고, 2009년 일 유량 자료를 사용하여 추정된 유량 매개변수를 검증하였다.

홍천강 유역의 SWAT 모형 적용성 평가는 유효지수(Nash and Sutcliffe efficiency, NSE)를 이용하였으며, NSE 산정은 식 (2)와 같다(Nash and Sutcliffe, 1970).

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

여기서 O_i 는 실측 일 유량, P_i 는 모델에서 예측된 일유량, \bar{O}_i 는 실측 일 유량 평균이다. NSE 값이 1에 가까울수록 모델의 예측치가 실측치를 잘 예측하는 것을 의미한다.

Ramanarayanan et al. (1997)연구에 따르면 R^2 가 0.5 이상이고 NSE가 0.4 이상이면 모형이 자연현상을 잘 모의하는 것으로 제안하였으며, Donigian and Love(2003)의 연구에 따르면, 과거 10년 이상의 모델의 적용사례와 연구 자료를 바탕으로 일반적인 모델의 효율 범위와 신뢰구간을 Table 4와 같이 제시하였다.

2.6.2. 미래강우시나리오

SWAT모형을 이용해서 미래 유출량 전망을 예측하기 위해 보·검정된 SWAT모형에 편이 보정된 RCP 시나리오 기 후 자료를 구축하여 분석하였다. 세 기간으로 2025 s (2012 ~ 2040), 2055 s (2041 ~ 2070), 2085 s (2071 ~ 2100) 나누어 연평균 유출량 비교 및 경향을 분석 하였고, 계절별로 나누어서 현재와 비교하고 강우패턴 변화 및 경향을 예측해 보았다.

3. 결과 및 고찰

3.1. SWAT모형의 유출해석에 강수인자가 미치는 영향 분석 결과

본 연구에서 SWAT모형을 이용하여 기상자료가 유출량에 미치는 영향을 분석한 결과 기상인자 중 강수량에 대해 가장 민감한 것으로 나타났다.

실측 기상자료를 그대로 적용한 시나리오1과 강수량을 제외한 나머지 기상인자는 장기 기상 평균자료를 적용한 시나리오2의 유출량을 비교/분석한 결과 $NSE = 0.99$, $R^2 = 0.99$ 로 나타났으며, Fig. 6에서 보듯이 두 시나리오 유출량 경향이 동일하다는 것과 연중 최고유량이 899.8 CMS로 나타났다. 그리고 기상 인자 중 온도 및 습도를 $\pm 2\%$, $\pm 4\%$ 변화를 주어 유출량을 분석한 결과 동일한 결과 값으로 나타나 온도와 습도도 유출량에 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

3.2. SWAT모형 보·검정 결과

본 연구에서는 SWAT모형을 이용하여 산정된 유출량에 대해 보·검정을 수행하였다. 보정에는 서면 관측소의 2008년 실측 일 유량을 자료를 사용하였고, 유출량에 대해 민감한 11개의 매개변수를 이용하였다. 또한 이렇게 보정된 매개변수를 이용하여 2009년에 적용하고 검증하였다. 보정에 사용된 매개변수와 보정 값은 Table 5와 같으며, 보정기간 NSE는 0.70, 검정기간 0.80로 나타나 보·검정 모두 높은 적용성을 보이는 것으로 나타났다(Fig. 7, 8). 유량 보정 결과 Ramanarayanan et al.(1997)과 Donigian and Love (2003)가 제시한 기준에 모두 만족하였고, 이는 본 연구에서 홍천강 유역에 대해 구축한 SWAT모형이 자연현상을 잘 모의하는 것으로 사료된다.

본 연구의 결과에서 보이는 바와 같이 SWAT 모형이 홍천강 유역의 유출량을 정확히 평가 할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 4. Criteria for evaluating model performance (Donigian and Love, 2003)

	Poor	Fair	Good	Very good
NSE for daily simulation	< 0.60	0.60 ~ 0.70	0.70 ~ 0.80	> 0.80

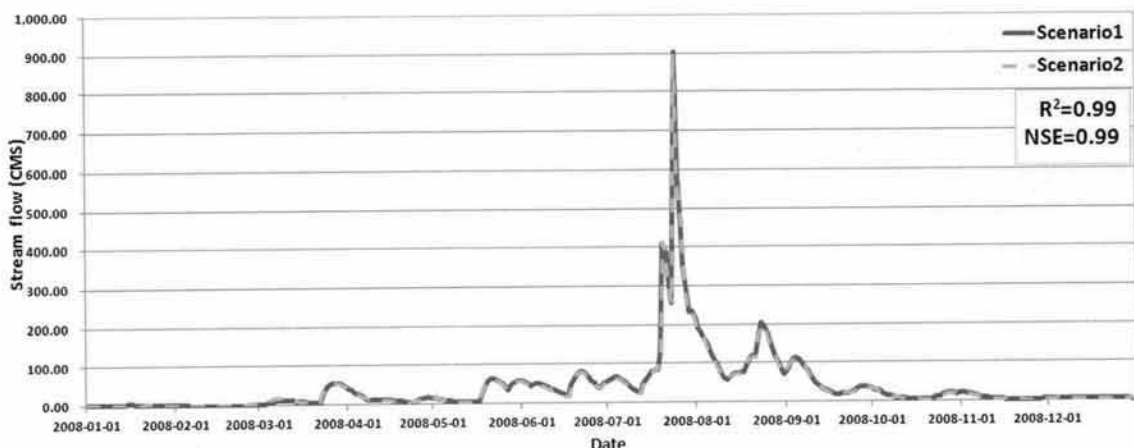


Fig. 6. Flow estimation by the SWAT model Scenario1 or Scenario2 during 2008.

Table 5. Eleven parameters used in calibration for flow estimation

Parameter	Description	Variation method	Value
SOL_K	Saturated hydraulic conductivity (mm/hr)	Multiply by value (%)	16.60
SURLAG	Surface runoff lag time	Replace by value	0.10
SOL_AWC	Available water capacity of the soil layer	Multiply by value (%)	44.00
GW_DELAY	Groundwater delay	Add to value	-7.81
ALPHA_BF	Baseflow alpha factor	Replace by value	1.00
CH_N2	Mannings' "n" value for the main channel	Replace by value	1.00
CH_K2	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium	Replace by value	150.00
CN2	SCS runoff curve number for moisture condition II	Multiply by value (%)	70.00
CANMX	Maximum canopy storage	Replace by value	6.61
GWQMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur (mm H2O)	Add to value	-492.94
SLOPE	Increase the lateral flow	Multiply by value (%)	35.00

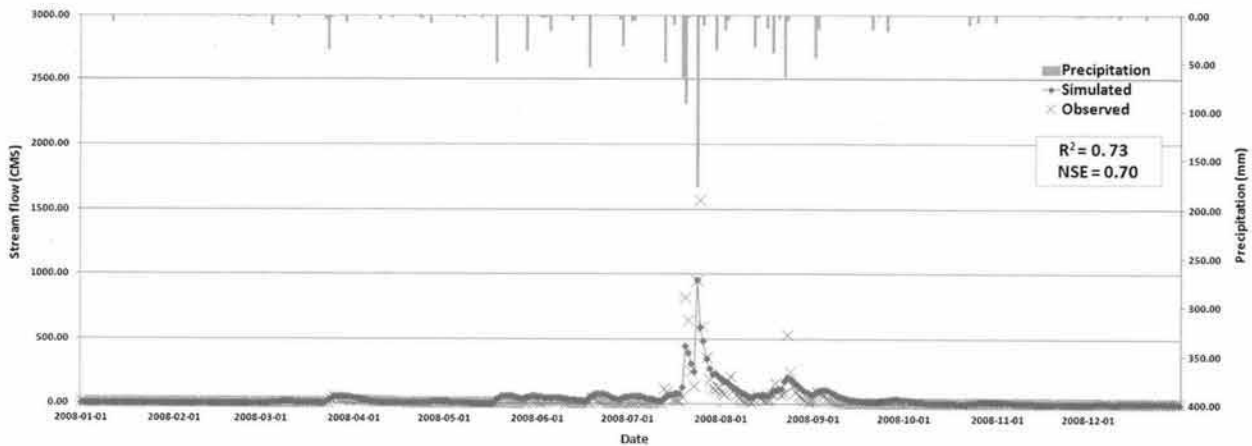


Fig. 7. NSE from SWAT calibration for flow estimation.

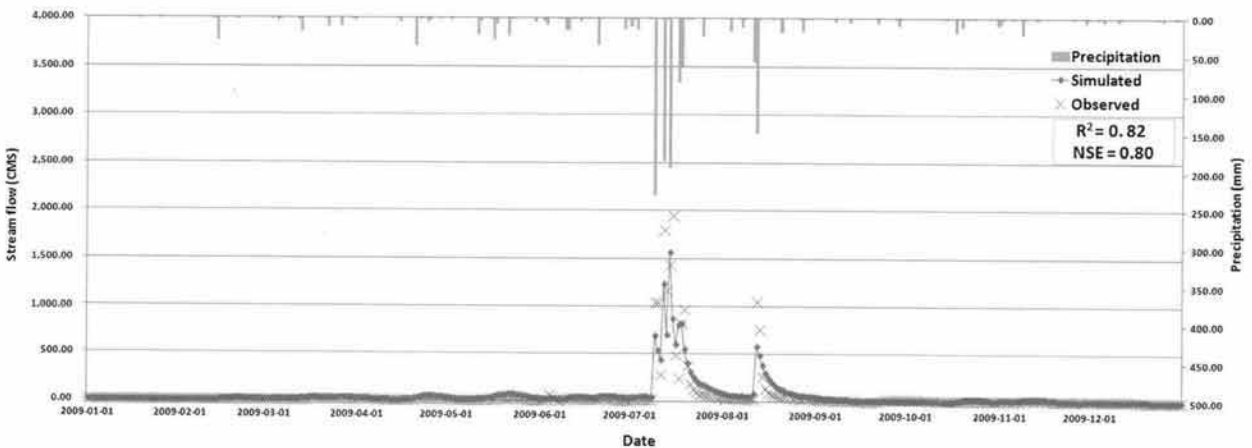


Fig. 8. NSE from SWAT validation for flow estimation.

3.3. 기후변화 시나리오

3.3.1. 편이보정 결과

RCP8.5 시나리오 편이보정한 결과 Table 6과 같다. 이러한 결과를 가지고 보정계수를 세 기간 2025 s (2012 ~ 2040), 2055 s (2041 ~ 2070), 2085 s (2071 ~ 2100)에 일별로 곱하여 미래 강수 자료를 구축하였다. 보정계수는 범위는 0.881 ~ 1.025 이고, 평균값은 0.934이다. RCP8.5 시나리오에서 각 강수지점의 30년치 범위는 3.053 mm ~ 3.553 mm 이고, 평균값은 3.240 mm 이다.

3.3.2. 미래강우 시나리오에 따른 모델 결과

본 연구에서는 RCP8.5 시나리오를 기후변화 시나리오로 선정하여 홍천강유역의 미래 강수 시나리오를 구축하였다. 기후변화 분석기간은 2012년부터 2100년까지 89년을 대상 기간으로 선정하였다. RCP8.5 시나리오에 의한 미래 유출량 및 강수량을 Table 6과 같다. 분석결과 세 기간(2025 s, 2055 s, 2085 s) 중 2055 s (2041 ~ 2070년) 기간이 가장 많은 유출량을 보였고, 2025 s (2012 ~ 2040년) 유출량은 2055 s 로 접어들면서 약 20% 증가되었다. 또한 2055 s 유출량은

Table 6. Bias-correction data

Precipitation number	Previous observed mean values (mm)	RCP8.5 scenario precipitation mean values (mm)	Correction factor
1	3.468	3.257	0.939
2		3.247	0.936
3		3.185	0.918
4		3.152	0.909
5		3.094	0.892
6		3.093	0.892
7		3.152	0.909
8		3.181	0.917
9		3.209	0.925
10		3.206	0.924
11		3.145	0.907
12		3.094	0.892
13		3.094	0.892
14		3.182	0.917
15		3.324	0.959
16		3.416	0.984
17		3.238	0.934
18		3.202	0.923
19		3.091	0.891
20		3.053	0.881
21		3.178	0.916
22		3.375	0.973
23		3.553	1.025
24		3.549	1.023
25		3.200	0.921
26		3.229	0.931
27		3.237	0.933
28		3.220	0.928
29		3.283	0.947
30		3.405	0.982
31		3.455	0.996
32		3.366	0.970

Table 7. Future precipitation and stream flow

Division	2012~2040	2041~2070	2071~2100
Hongcheon Stream flow (CMS)	40.61	48.94	44.70
Hongcheon Precipitation (mm)	1,189.22	1,360.58	1,232.00

2085 s (2071 ~ 2100년)로 접어들면서 약 9% 감소되는 경향을 보였다. 이러한 경향은 편이보정법이 보정된 계수를 곱하는 것이기 때문에 일별로 강수 계급별 차이가 클 때에 곱하게 되면, 편차가 작은 강수량에 곱한 것과 차이가 난다. 또한 세 기간(2025 S, 2055 S, 2085 S) 상위 30일 정도 강수량을 평균값을 보면 2025 s: 118.36 mm, 2055 s: 176.50 mm, 2085 s: 140.48 mm 결과가 나타난다.

월별 강수량은 다음과 같다(Fig. 9). 계절별 유출량 변화 경향을 분석한 결과(Fig. 10), 봄철 미래 유출량은 현재 유출량에 비해 상대적으로 증가하고 여름철 미래 유출량은 지금보다 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타남으로서 지금과는 다른 강우 패턴으로 변화될 것으로 예상된다. 이에 따라 매년 유출량 변화에 대응하는 예방도 중요하지만 장기적인 인프라를 구축하여서 효율적인 물 관리 체계로 전환하고, 향후 강우 패턴 변화에 대해서도 전망해야 할 것으로 사료된다(Park et al., 2011).

4. 결론

본 연구에서는 홍천강 유역을 대상으로 SWAT모형과 RCP8.5 강수시나리오를 이용하여 미래 유출량을 전망하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) SWAT 유출량 분석 결과 기상인자 중 강수량이 가장 민감한 것으로 나왔다. 따라서 강수 이외의 다른 기상자료가 없는 유역에 대해서는 과거 자료의 평균값을 이용해 유출량 평가에는 큰 영향을 주지 않는다. 따라서 강수관측 지점만 있고, 다른 기상자료가 구축되지 않은

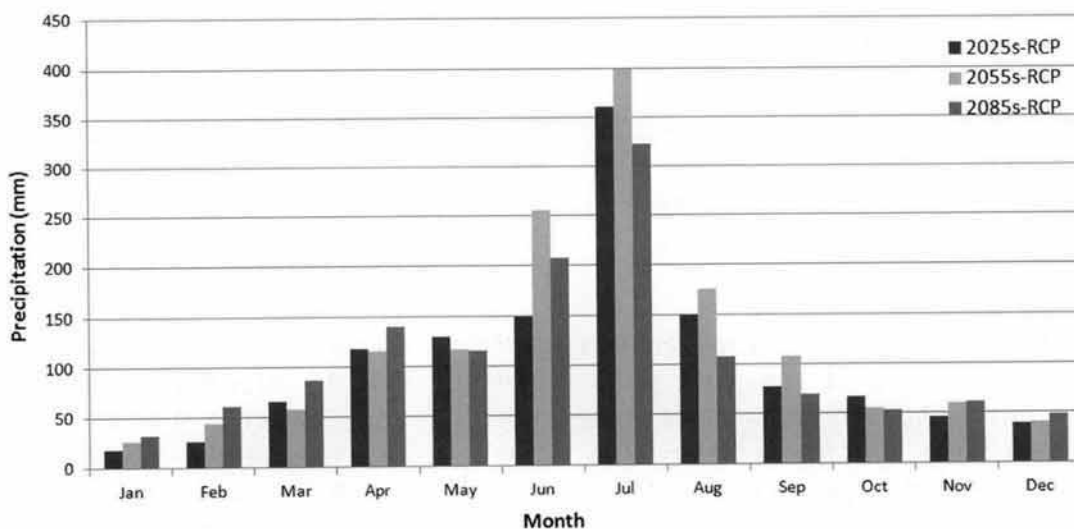


Fig. 9. Monthly mean precipitation.

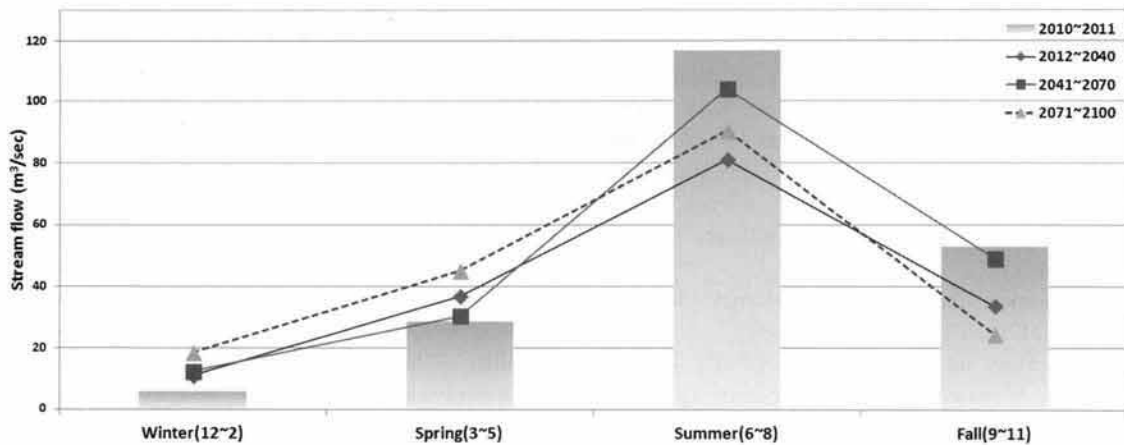


Fig. 10. Seasonal outlook of future stream flow.

지점에서 강수량 자료만 가지고도 SWAT모형 유출 분석/적용성 평가가 가능하다.

- 2) 국가수자원관리종합정보시스템(<http://water.nier.go.kr/>)에서 제공하는 서면 관측소의 일 유량 자료를 SWAT 모형에 실측 자료로 이용하여 일 유량을 보정한 결과 보정기간(2008년) $NSE = 0.70$, $R^2 = 0.73$, 검정기간(2009년)에 $NSE = 0.80$, $R^2 = 0.82$ 로 높은 적용성을 보이는 것으로 나타났다.
- 3) SWAT모형을 활용하여 RCP8.5 강수시나리오 미래 89년간의 유출량을 전망하였다. 분석결과, 세 기간(2025 s, 2055 s, 2085 s) 중 2055 s (2041~2070년) 기간이 가장 많은 유출량을 보였고, 2025 s (2012년~2040년) 유출량은 2055 s로 접어들면서 약 20% 증가되었다. 또한 2055 s 유출량은 2085 s (2071~2100년)로 접어들면서 약 9% 감소되는 경향으로 예측되었다. 이에 따라 미래 유출량 변동의 전체적인 경향을 볼 수가 있다.
- 4) 계절별 유출량 변화 경향을 분석한 결과, 봄철 유출량은 현재 유출량에 비해 상대적으로 증가하고 여름철 유출량은 지금보다 감소하는 경향으로 나타남으로서 지금과는 다른 강우 패턴으로 변화될 것으로 예상된다.
- 5) 기상인자 중 강수량자료만 제대로 구축이 된다면, 강수 이외의 자료는 과거 자료의 평균을 사용하여도 정확한 유출량 산정이 가능하리라 판단된다. 이에 따라 미래기후 평가시 강수량 자료만 편이보정을 하여도 미래 수자원 평가 분석이 가능할 것이다. 그러나 본 연구에서는 기상 자료가 수질 모의에 미치는 영향에 대해서는 분석하지 않았으므로 향후 기상자료가 수문 컴포넌트 및 수질에 미치는 영향을 분석할 것이다.

향후 수자원 유출량에 전반적인 영향 및 평가와 미래기후변화에 대한 대응을 수립하는데 있어서 본 연구가 기초 자료로 이용될 수 있다고 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부 Eco-Star Project(과제번호: EW32-07-10), 부패(생태호 조성기술 및 생태복원 기술개발)의 지원을 받

아 수행되었으며, 이에 깊이 감사드립니다.

참고문헌

- Alcamo, J., Doll, P., Kaspar, F., and Siebert, S. (1997). *Global Change and Global Scenarios of Water Use and Availability: An Application of WaterGAP1.0*, Report A9701, Center for Environmental Systems Research, Germany, pp. 1-47.
- Arnold, J. G. (1992). *Spatial Scale Variability in Model Development and Parameterization*, Ph.D. Dissertation, Purdue University, West Lafayette, IN, pp. 1-186.
- Arnold, J. G., Sruvasan, R., Mutiah, R. S., and Williams, J. R. (1998). Large Area Hydrologic Modeling and Assessment: Part I: Model Development, *Journal of American Water Resources Association*, 34(1), pp. 73-89.
- Beasley, D. B., Huggins, F., and Monke, E. J. (1980). ANSWERS - A Model for Watershed Planning, *Transactions of the ASAE*, 23, pp. 938-939.
- Bichnell, B. R., Imhoff, J. C., Kittle, Jr. J. L., Jobes, T. H., and Donigan, Jr. A. S. (2001). *Hydrologic Simulation Program - Fortran (HSPF) User's Manual for Version 12*. U.S. Environmental Protection Agency, National Exposure Research Laboratory, Athens, G.A., pp. 1-843.
- Carter, T. R., Hulme, M., and Lal, M. (1999). *Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment*, IPCC, Geneva, pp. 1-77.
- Climate Change Information Center. (2012). <http://www.climate.go.kr/>.
- Donigan, A. S. and Love, J. T. (2003). *Sediment Calibration Procedures and Guidelines for Watershed Modeling*, WEF-TMDL 2003, November 16-19, WEF Specialty Conference Proceedings on CD-ROM, Illinois, Chicago, pp. 1-20.
- Frere, M. H., Ross, J. D., and Land, L. J. (1980). The Nutrient Submodel. In : CREAMS, A Field Scale Model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems, *USDA Conservation Research Report*, 26, pp. 65-85.
- Heo, S. G., Kim, K. S., Kim, N. W., Ahn, J. H., Park, S. H., Yoo, D. S., Choi, J. D., and Lim, K. J. (2008). Evaluation of SWAT Prediction Error according to Accuracy of Land

- Cover Map, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 24(6), pp. 690-700. [Korean Literature]
- Heo, S. G., Kim, N. W., Park, Y. S., Kim, J. G., Kim, J. A., Kim, S. J., A, J. H., Kim, K. S., and Lim, K. J. (2008). Evaluation of Effects on SWAT Simulated Hydrology and Sediment Behaviors of SWAT Watershed Delineation using SWAT ArcView GIS Extension Patch, *Journal of the Korean Society on Water Environment*, 24(2), pp. 147-155. [Korean Literature]
- Hydrologic Engineering Center. (2001). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual*, pp. 4-175.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007a). *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Summary for Policymakers*, Cambridge University Press, pp. 104.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007b). *Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies*, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, pp. 132.
- Joo, Y. H. (2011). *The Experimental Study of the Reinforcement Technique for the Breach Damage Mitigation on the Small Scale Reservoir*, M. A. Dissertation, University of Hongik, pp. 15-21. [Korean Literature]
- Jung, W. Y. and Yang, S. K. (2009). Simulation on Runoff of Rivers in Jeju Island Using SWAT Model, *Journal of the Environmental Sciences*, 18(9), pp. 1045-1055. [Korean Literature]
- Kang, M. R. (2011). *Discharged Characteristics of Non-point Pollutants Source by Future Climate Change using SWAT Model*, M. A. Dissertation, University of Chongju, pp. 1-99. [Korean Literature]
- Lee, J. W., Eom, J. S., Kim, B. C., Jang, W. S., Ryu, J. C., Kang, H. W., Kim, K. S., and Lim, K. J. (2011). Water Quality Prediction at Mandae Watershed using SWAT and Water Quality Improvement with Vegetated Filter Strip, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 53(1), pp. 37-45. [Korean Literature]
- Lee, J. H. and Jeon, I. K. (1994). A Rainfall Forecasting Model for the Ungaged Point of Meteorological Data, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 14(2), pp. 307-316. [Korean Literature]
- Lee, Y. J., Park, J. Y., Park, M. J., and Kim, S. J. (2008). Assessment of Future Climate and Land Use Change Impact on Hydrology and Stream Water Quality of Anseongcheon Watershed Using SWAT Model (I), *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 28(6), pp. 665-673. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (MOE). (2009). *Joong-kwon-yuk-mool-hwan-kyung-guan-ri-gye-hoek*, Ministry of Environment, pp. 11. [Korean Literature]
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970). River Flow Forecasting through Conceptual Models: Part I. A Discussion of Principles, *Journal of Hydrology*, 10(3), pp. 282-290.
- Park, J. H., Kwon, H. H., and No, S. H. (2011). Outlook of Discharge for Daecheong and Yongdam Dam Watershed Using AIB Climate Chang Scenario Based RCM and SWAT Model, *Journal of the Korean Water Resources Association*, 44(12), pp. 929-940. [Korean Literature]
- Park, M. J., Shin, H. J., Park, G. A., and Kim, S. J. (2010). Assessment of future hydrological behavior of Soyonggang Dam watershed using SWAT, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 30(4), pp. 337-346. [Korean Literature]
- Ramanarayanan, T. S., Williams, J. R., Dugas, W. A., Hauck, L. M., and McFarland, A. M. S. (1997). Using APEX to Identify Alternative Practices for Animal Waste Management, *ASAE International Meeting, Minneapolis*, pp. 97-2209.
- Ryu, J. C., Kang, H. W., Choi, J. W., Kong, D. S., Gum, D. H., Jang, C. H., and Lim, K. J. (2012). Application of SWAT-CUP for Streamflow Auto-calibration at Soyonggang Dam Watershed, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 28(3), pp. 347-358. [Korean Literature]