

RCP 기후변화 시나리오를 고려한 금호강 유역의 중장기 자연유출 예측*

Long-term Natural Flow Prediction Based on RCP Climate Change Scenarios
in Geumho River Watershed

Han Na Kim**, Eul Rae Lee, Sin Uk Kang, Hyun Gu Choi***

Water Resources Research Center, K-water Institution,
1689 beon-gil 125, Yuseong-daero, Yuseong-gu, Daejeon, Korea

Abstract

Climate change is expected to affect water resource management causing precipitation variation in the future. This study predicts the natural flow variation to manage the streamflow in Geumho river watershed for a long time by climate change. Based on SWAT model which is calibrated by observed inflow data of Imha Dam where artificial factors are excluded and RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios were applied using HadGEM3-RA model which is one of the RCM(Regional Climate Model). For comparison on natural flow results in relation to climate change, natural flow amounts which is applied SWAT model from 2001 to 2010 was selected as a criteria for comparison. This study shows that natural flow tends to decrease across the Geumho river. Especially, the amount of tributary's inflow was more decreased than main stream's inflow. Furthermore, flow tends to increase during the spring season and decrease during the summer season. It will be essential to change the current river and watershed management due to the changed hydrological pattern caused by climate change. Finally, the results of this study can be used as essential data to establish structural/non-structural water management future plan in subwatershed.

Key words: climate change, RCP scenario, Geumho river watershed

* 본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(11기술혁신C06)에 의해 수행되었습니다.

** The 1st author. Tel. +82-42-870-7487. E-mail. hanyou01@partner.kwater.or.kr

*** Corresponding author. Tel. +82-42-870-7443. E-mail. choihg@kwater.or.kr

Submission & Publication Process

Received: Apr. 10, 2015 / Revised: May. 10, 2015 / Accepted: May. 20, 2015

국문초록

기후변화는 미래 강수량 변동을 야기하여 하천유량 관리에 큰 영향을 미칠 것으로 예상하고 있다. 이에 본 연구에서는 기후변화에 따른 중장기 하천유량 관리를 위하여 금호강 유역을 대상으로 미래 자연유출량 변화를 예측하였다. 자연유출량이라는 특수성을 고려해서 인위적인 요소가 배제된 임하댐 상류지역의 실측자료를 이용하여 보정된 SWAT 모형을 기반으로, 지역기후모형(RCM)인 HadGEM3-RA모형을 활용한 RCP 4.5, RCP 8.5 시나리오를 적용하였다. 2001~2010년을 대상으로 SWAT 모형을 적용한 자연유출량을 기후변화에 따른 유출량 결과와 비교를 위한 기준유량으로 선정하였으며, 금호강 유역 전반에 걸쳐 유출량이 감소하는 경향을 가지며, 특히 금호강 본류에 비해 지류유역의 건천화가 심해지는 양상을 보였다. 또한 현재에 비해 여름철 유출패턴 시기가 앞당겨져 봄철 유량이 증가하고 여름철에 감소하는 경향을 보이고 있다. 기후변화로 인한 수문패턴의 변화로 현재 하천 및 유역 유량관리 방안의 변화가 필요할 것으로 판단되며, 향후 본 연구결과를 바탕으로 물수지 분석을 추가하여 표준유역에서 적용가능한 구조적비구조적 물관리 방안 제시를 위한 주요자료로 활용이 가능하다.

주제어: 기후변화, RCP 시나리오, 금호강 유역

1. 서론

산업혁명 이후 화석연료 소비로 이산화탄소를 통한 탄소배출과 온실가스의 배출이 극도로 증가하였다(IPCC, 2001). 지구온난화는 대기 중 이산화탄소, 메탄가스와 같은 온실가스의 농도가 증가함에 따라 온실효과를 발생시킨다. 이러한 지구온난화 영향으로 기온상승, 강수일수의 감소, 강수의 규모와 패턴의 변화는 유출량의 변화와 증발산량의 증가의 원인이 되며 토양수분의 변화가 예상되어 궁극적으로 수문순환 변화에 많은 영향을 미치게 된다(안소라 외, 2013). 수문순환의 변화는 극한 가뭄, 국지성 호우, 극한 홍수를 불러오며, 이로 인해 물관리가 어려워지고 물분쟁이 빈번히 발생할 수 있다. 기후변화에 따른 유출량의 예측과 그 결과를 바탕으로 한 물수지분석 결과를 이용하면 미래 물공급을 예측할 수 있어 새로운 물관리 방안을 수립할 수 있으며 물분쟁의 소지를 최소화할 수 있게 한다.

미래 기후변화 시나리오의 불확실성에도 불구하고, 미래 기후변화 시나리오에 따른 수문요소, 하천유량의 변동, 용수 공급능력 평가 등을 모의하는 연구가 계속 진행되고 있다. 지난 10여년간 IPCC AR(Assessment Report)4 SRES(Special Report on Emission Scenarios) 시나리오를 이용한 연구들이 주를 이루어 왔다. 손태석 외(2010)는 낙동강 유역을 대상으로 SWAT 모형과 SRES A2, A1B, B1 기후변화 시나리오 및 GCM 모형 3가지를 적용하여 각 GCM 모형에 따른 하천유량의 영향 분석을 하였고, 박진혁 외(2011)는 대청댐 및 용담댐 유역을 대상으로 SWAT 모형과 SRES A1B 시나리오를 적용하여 각 지점의 유입량과 최종방류부의 유출량 변화를 분석하였다. 김환석 외(2012)는 낙동강유역을 대상으로 기후변화에 의한 취약성 변화를 평가하였다.

최신의 RCP(Representative Concentration Pathways) 시나리오를 적용한 연구로는 노선희 외(2013)는 금강유역을 대상으로 SWAT 모형을 이용하여 미래의 용수공급 변화를 전망하였고, 남원호 외

(2014)는 중부지역과 남부지역으로 구분하여 농업용 저수지의 미래 용수공급을 전망하였다. 박종윤 외(2014)는 기후변화가 용담댐 유역의 수문요소에 미치는 영향을 평가하였으며, 맹승진 외(2015)는 RCP 시나리오와 관측강수량을 이용하여 영종도 유역의 유출분석을 수행하였다.

본 연구에서는 기후변화에 따른 금호강 유역의 자연유출량 변화를 분석하였다. 자연유출량을 산정하기 위해서 SWAT 모형을 선정하였으며, 유역에 적용할 수 있도록 매개변수를 보정하였다. 현재 기상청에서 제공중인 RCP 4.5, 8.5 시나리오를 적용하기 위해 대상유역에서 적용할 수 있도록 강우에 대해 편의 보정을 수행하여 모형의 입력자료로 활용하였다. 예측된 자연유출량의 비교자료로 SWAT 모형의 2001~2010년 자연유출량 산정자료를 이용하였으며, 미래예측은 2011~2040년, 2041~2070년, 2071~2099년으로 구분하여 예측한 후 월별, 계절별, 표준유역별로 변화를 분석하였다. 본 연구의 결과는 해당유역 수자원관리의 기초자료로 다른 연구의 비교대상 자료 또는 물수지 분석의 입력자료로 활용될 수 있으며, 이를 바탕으로 표준유역에서 적용가능한 구조적·비구조적 물관리 방안을 제시하여 가물·홍수와 같은 위기관리에 활용가능할 것으로 판단된다.

II. 재료 및 방법

1. 유역모형의 선정

강우-유출을 해석할 수 있는 유역모형은 다양하며, 주로 AnnAGNPS, HSPF, MIKE SHE, SWAT, AGNPS, ANSWERS, PRMS Storm Mode 등이 활용되고 있다(Borah & Bera, 2003). 그리고 국내에서 활용빈도가 높은 TANK, SSARR 모형을 추가적으로 고려할 수 있다. 이 중에서 기후변화를 고려할 수 있는 장기유출해석이 가능한 모형은 AnnAGNPS, HSPF, MIKE SHE, SWAT, TANK, SSARR 모형이며, 토지이용과 토지피복 같은 유역의 특성을 반영할 수 있는 모형은 AnnAGNPS, HSPF, MIKE SHE, SWAT 모형 정도로 압축할 수 있다. AnnAGNPS 모형은 농업 모델링을 목적으로 소규모 유역에 적합하며, MIKE SHE 모형은 고가이기 때문에 본 연구에서 제외하였다. 마지막으로 HSPF 모형보다 SWAT 모형이 토양의 물리적 특성을 잘 반영하고, 매개변수의 직접 입력 및 수정이 가능하여 SWAT 모형을 본 연구에서 선정하게 되었다.

2. SWAT 모형의 개요

SWAT 모형은 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service)의 Jeff Arnold에 의해 개발된 유역모델로써(Arnold, *et. al.*, 1998), Soil and Water Assessment Tool의 약자이다. 장기간에 걸쳐 다양한 종류의 토양과 토지이용, 운영 조건을 가진 대규모의 복잡한 유역에서 유출, 농업화

학물질의 거동에 대하여 토지관리방법의 영향을 예측하기 위하여 1994년 최초로 개발되었다. 일 단위의 모의가 가능한 유역단위의 준분포형 장기 강우-유출모형으로써 수문, 토양유실, 영양물질, 하도추적 부모형으로 구성되어 있다.

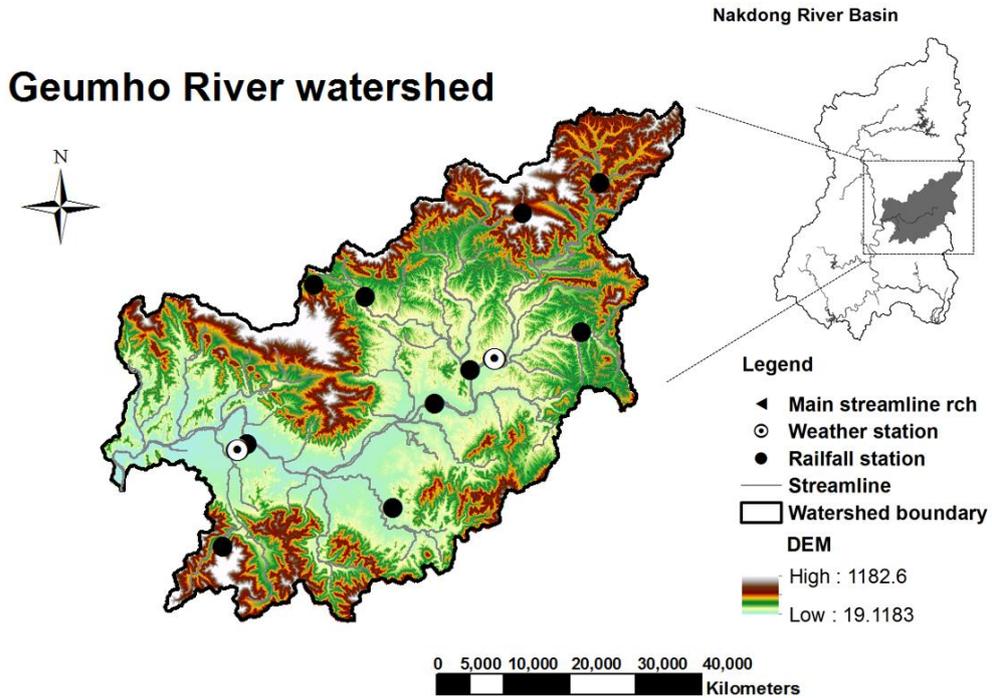
SWAT 모형에서는 토지부분의 수문순환을 정확히 예측하기 위하여 물수지 방정식에 근간을 두고 지표유출, 측방 지표하 유출, 침투, 지하수, 수로손실, 증발산 등으로 구성하며 여러 종류의 작물과 토양에서의 다양한 증발산을 반영할 수 있게 소유역을 구분한다. 수문학적 반응 단위(Hydrologic Response Units, HRUs)는 소유역 안에 토지이용, 운영, 토양, 기울기를 포함한 단위유역 내에서 동일한 반응이 일어나는 것으로 각 수문학적 반응단위 유역 내에서 총 유출량을 얻기 위하여 흐름이 추적된다(Jha, *et. al.*, 2004). 물수지 방정식은 다음 (식 1)과 같이 나타낼 수 있다(Neitsch, *et. al.*, 2002).

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (\text{식 1})$$

여기서, SW_t 는 최종 토양수분량(mm), SW_o 는 i 일의 초기 토양수분량(mm), R_{day} 는 i 일에서의 강수량(mm), Q_{surf} 는 i 일에서의 지표유출량(mm)을 의미한다. E_a 는 i 일의 증발산량(mm), W_{seep} 는 i 일의 토양면으로부터 투수층으로의 투수되는 총량(mm), Q_{gw} 는 i 일의 회귀량(mm), t 는 시간(day)이다. 이때, SCS(USDA-SCS, 1972)의 유출곡선법(Curve Number)에 의해 지표유출량을 산정하며, 측방 유출량은 동역학적 저류모형(Kinematic Storage Model)을 이용하였다. 하도추적은 Variable Storage Routing Method(Williams, 1969), 잠재증발산량은 Priestley-Taylor(Priestley & Taylor, 1972) 방법을 이용하였다.

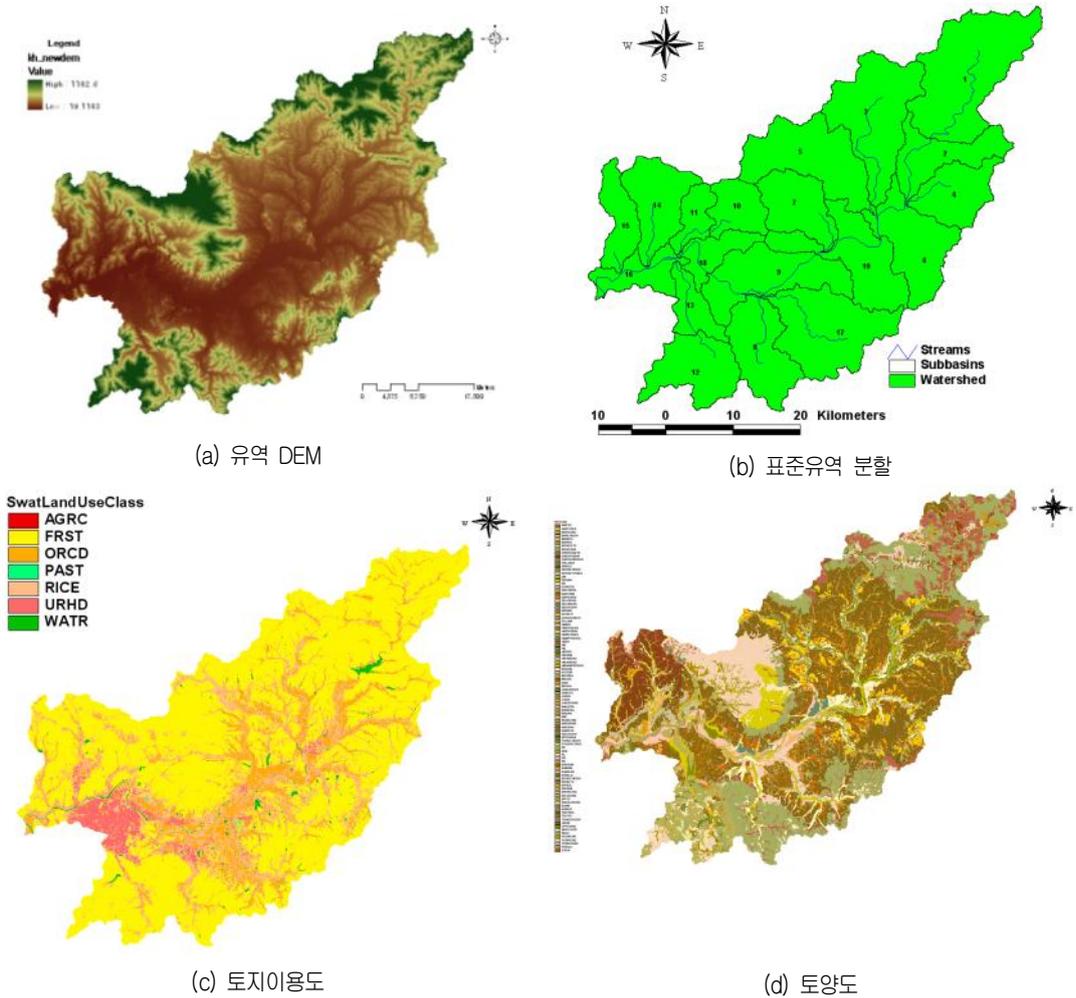
3. 연구대상지역 및 자료 구축

본 연구의 대상유역은 낙동강 중류부 좌측에 위치하며, 경상북도 포항시 북구 가장면 가사리 가사령에서 발원하여 영천시를 지나 서측으로 유하하면서 경산시, 대구광역시로 흐른다. 금호강은 낙동강에 합류하는 제 1지류이며, 유로연장은 114.6km이다. 유역면적은 2,092km²이며, 낙동강 전 유역면적의 9%를 차지하고 있고, 19개의 표준유역으로 구성되어 있다. 본류 6개와 지류 8개로 총 14개 수위관측소가 위치하고 있다. 유역의 토지이용은 산림지가 66.4%, 농경지는 28.8%를 차지한다. 연평균기온은 13℃, 연강수량 1,007mm이다.



<그림 1> 금호강 유역의 유역도와 관측소 위치도

금호강 유역의 강수량 관측소 현황은 <그림 1>과 같이 죽장, 고경, 화북, 신령, 영천, 금호, 자인, 서부, 동촌, 가창 총 10개와 대구, 영천 2개의 기상관측소가 위치해 있으며, 1997년부터 2012년까지의 일별 강수량 (mm), 기온 (°C), 풍속(m/sec), 상대습도(%) 및 일사량(MJ/m²) 자료를 기상청으로부터 제공받아 모형의 기상입력 자료로 사용하였다. 모형의 GIS 입력자료는 <그림 2>와 같이 국가지리정보시스템의 자료를 활용하여 30m 격자의 DEM을 제작하여 사용하였고, 토지이용도는 환경부의 중분류 토지이용도, 토양도는 농업진흥청에서 제작한 정밀토양도를 표준유역 분할은 WAMIS의 자료를 이용하였다.



<그림 2> 금호강 유역의 GIS 입력자료

4. RCP 시나리오

IPCC AR4에서 인구, 기술, 경제발전 등의 형태가 먼저 결정되고 이에 따른 미래 온실가스 배출에 영향을 미치는 요소들을 다루어 크게 4개의 SRES 시나리오(A1, A2, B1, B2)로 구분한 것과 달리, AR5의 RCP는 인간 활동이 대기에 미치는 복사량으로 온실 가스 농도를 우선 산정하였다. RCP 시나리오는 SRES 자료의 노후화 및 해상도 문제를 보완하고 정확도를 향상시키기 위해 새로운 시나리오의 도입의 필요성에 의해 개발된 것이다. 하나의 대표적인 복사 강제력에 대해 여러 가지 사회-경제 시나리오가 나올 수 있다는 의미에서 ‘대표(Representative)’라는 표현을 사용하고 온실가스 배출 시나리오의 시간에 따른 변화를 강조하기 위해 ‘경로(Pathways)’라는 의미이다. RCP 시나리오는 복사강제력(W/m^2)을 기준으로 RCP 2.6, 4.5, 6.0 및 8.5로 구분한다(국립기상연구소, 2011).

미래 기후변화 영향평가를 위해 기상청에서 제공하는 HadGEM3-RA 지역기후모형(Regional Climate model, RCM)의 모의결과 값을 이용하였다. HadGEM3-RA 기후모형의 공간해상도는 12.5km이며, RCP 4.5, 8.5 기반의 일별 강수량, 최고·최저기온(2006~2099년)을 제공하고 있다. 한편, 기후모형의 결과물을 연구에 사용할 때에는 신뢰성을 높이기 위하여 기후모형 결과를 현재 관측 관측된 자료와 비교하여 확인하는 과정이 필요하다(Carter, *et al.*, 1999). 따라서, 본 연구에서는 금호강 표준유역별 기후변화에 의한 영향을 모의하기 위하여 편이보정(Bias correction) 방법을 적용하였다. 편이보정방법에는 선형, 비선형, 감마 확률분포 등 여러 가지 방법이 있으나, 가장 간편하고 RCM 모형에서 모의된 결과를 가장 훼손하지 않는 선에서 사용할 수 있는 방법인 선형 편이보정 방법을 사용하였다. 또한 강우-유출모형인 SWAT에서 가장 큰 영향을 주는 매개변수인 기온과 강수에 대해 (식 2)와 (식 3)을 이용하여 통계적인 유사성을 가지도록 보정을 실시하였다(Chen, *et al.*, 2011).

$$T_{cor, fur} = T_{RCM, fur} + (\overline{T}_{obs} - \overline{T}_{RCM, ref}) \quad (\text{식 2})$$

$$P_{cor, fur} = P_{RCM, fur} \times (\overline{P}_{obs} / \overline{P}_{RCM, ref}) \quad (\text{식 3})$$

여기서, $T_{cor, fur}$ 는 보정된 미래 기온, $T_{RCM, fur}$ 는 RCM에서 모의된 미래 기온, \overline{T}_{obs} 는 과거 기준기간 동안의 관측된 기온에 대한 평균값, $\overline{T}_{RCM, ref}$ 는 과거 기준기간 동안의 RCM에서 모의된 기온의 평균값을 의미한다. 강수량의 경우, $P_{cor, fur}$ 는 보정된 미래 강수량, $P_{RCM, fur}$ 는 RCM에서 모의된 미래 강수량, \overline{P}_{obs} 는 과거 기준기간 동안의 관측된 강수량에 대한 평균값, $\overline{P}_{RCM, ref}$ 는 과거 기준기간 동안의 RCM에서 모의된 평균값을 의미한다. 본 연구에서는 과거 30년(1976~2005년, baseline) 기상자료를 활용하여 편이보정을 실시하였으며, RCP 4.5, 8.5시나리오별 결과 값을 S1(2011~2040년), S2(2041~2070년), S3(2071~2099년)으로 분할하여 월별, 계절별 미래 강수량, 기온, 유량을 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. SWAT 모형의 적용성 평가

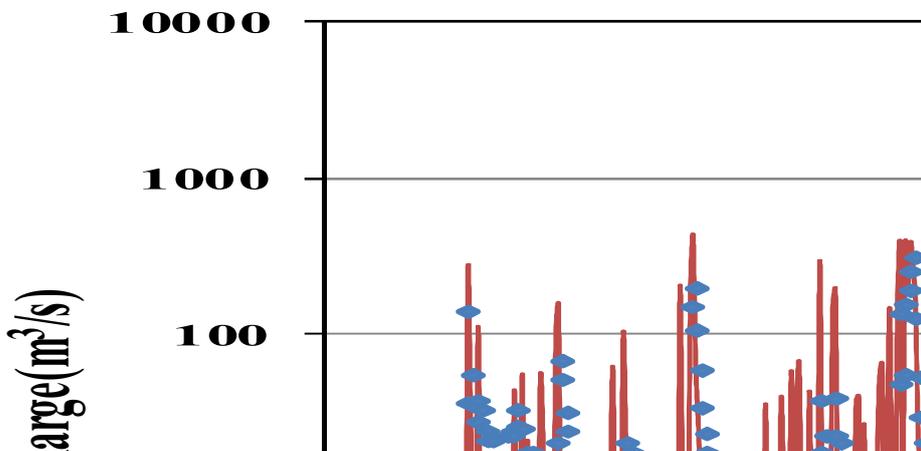
SWAT 모형의 적용성을 평가하는데 금호강 유역에는 몇 가지 한계가 있다. 첫 번째, 자연유량은 인위적 통제를 배제한 유량으로 금호강 유역에서 실측자료와 비교할 수 있는 소유역이 없다. 두 번째, 영천댐 유역의 실측자료(댐유입량 자료)가 존재하나 영천도수로를 통한 도수량이 일정하지 않아 자연유량 산정결과를 비교할 수 없다. 그래서 부득이하게 연구대상유역 인근 실측자료가 존재하고 인위적

인 유량통제가 거의 없는 임하댐 상류유역을 대상으로 매개변수 보정을 수행하였다. 보정을 위해 모의기간은 2008~2012년을 선택하였으며, 2008년과 2009년은 warm-up기간으로 실측치와 비교자료로 사용한 결과값은 2010~2012년 자료를 사용하였고 <그림 3>에 실측자료와 비교하여 도시하였다. 보정은 민감도 분석 수행 후 타 연구와 비교하여 8개의 유량 매개변수를 선정하였고, 이어서 선정된 매개변수의 최소·최대 적용 범위 내에서 시행착오법으로 보정을 수행하였다. 유량 보정에 사용된 8개의 매개변수는 <표 1>과 같이 ESCO, EPCO, SURLAG, ALPHA_BF, CH_K2, REVAPMN, SOL_AWC, GW_DELAY 이다.

<표 1> 보정에 사용된 SWAT 매개변수

매개변수	설명	범위		보정값
		하한치	상한치	
ESCO	토양증발 보상계수	0	1	0.05
EPCO	식물의 토양수분 흡수 보상계수	0	1	1
SURLAG	표면 유출 지연 계수	1	24	0.5
ALPHA_BF	기저유출 감수상수(days)	0	1	0.07
CH_K2	하천에서 수리전도도 계수(mm/hr)	0	150	25
REVAPMN	증발 발생에 대한 얇은 대수층 임계깊이(mm)	0	500	10
SOL_AWC	각 토양층의 가용토양수분능(mm/mm)	0	1	0.14
GW_DELAY	지하수 지체시간(days)	0	500	0.033

구축된 모형의 적용성을 정량적으로 평가하기 위해 상관계수(correlation coefficient)와 Nash-Sutcliffe 효율계수, 평균절대오차(MAE), 평균제곱근오차(RMSE)를 산정하였다. 상관계수와 효율계수는 '1'에 가까울수록, 평균절대오차와 평균제곱근오차는 '0'에 가까울수록 보정이 잘되었음을 의미한다. 산정된 값은 각각 0.734, 0.700, 8.955, 30.066으로, 상관계수와 효율계수는 적정범위에 들었고, 자연유출량이 0~1,000m³/s의 범위를 가지므로 평균절대오차와 평균제곱근오차도 큰 값은 아니라는 판단에 보정된 매개변수를 금호강 유역에도 적용하였다.



<그림 3> SWAT 보정결과

2. 미래 기후 전망

편이보정에 따른 HadGEM3-RA의 RCP 4.5와 8.5 시나리오에 대한 월별 강수량 및 평균기온 변화는 <그림 4>에 도시하였으며, <표 2>에 계절별로 정리하였다. 강우와 기온에 대한 기준자료는 해당 유역의 30년(1976~2005년)의 자료를 평균하여 사용하였다.

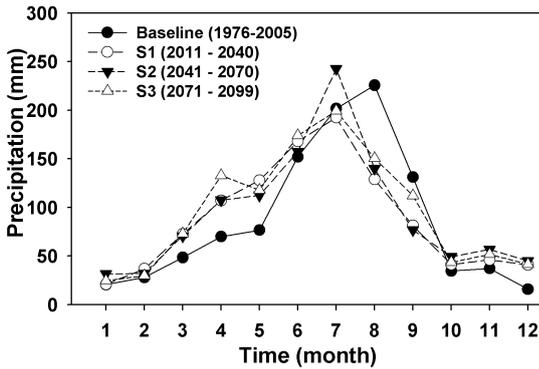
<표 2> RCP 시나리오별 계절별 강수량 및 평균기온, 기준기간 대비 변화량

구 분	계 절	기준기간 평균	RCP 4.5			RCP 8.5		
			S1	S2	S3	S1	S2	S3
강수량 (mm)	봄	195.0	307.4 (△57.7%)	290.4 (△48.9%)	335.5 (△72.1%)	300.1 (△53.9%)	304.1 (△55.9%)	350.3 (△79.6%)
	여름	579.4	509.6 (▼12.0%)	546.45 (▼5.7%)	507.15 (▼12.5%)	504.9 (▼12.9%)	486.6 (▼16.0%)	441.1 (▼23.9%)
	가을	202.9	168.6 (▼16.9%)	182.8 (▼9.9%)	211.3 (△4.1%)	171.3 (▼15.6%)	209.0 (△3.0%)	183.2 (▼9.7%)
	겨울	64.3	98.5 (△53.1%)	108.6 (△68.8%)	97.2 (△51.0%)	91.8 (△42.7%)	113.9 (△77.0%)	152.1 (△136%)
	연평균	1,007.7	1,063.95 (△5.6%)	1,121.8 (△11.3%)	1,193.4 (△18.4%)	1,020.1 (△1.2%)	1,168.3 (△15.9%)	1,124.5 (△11.6%)
평균기온 (°C)	봄	12.6	15.4 (+2.8°C)	16.3 (+3.7°C)	16.7 (+4.1°C)	15.8 (+3.2°C)	17.0 (+4.4°C)	19.0 (+6.4°C)
	여름	24.2	27.2 (+3.0°C)	28.2 (+4.0°C)	29.0 (+4.8°C)	27.6 (+3.4°C)	29.3 (+5.1°C)	31.4 (+7.2°C)
	가을	14.3	17.6 (+3.3°C)	18.8 (+4.5°C)	19.4 (+5.1°C)	17.9 (+3.6°C)	19.7 (+5.4°C)	22.0 (+7.7°C)
	겨울	0.9	3.5 (+2.5°C)	4.1 (+3.1°C)	4.6 (+3.7°C)	3.2 (+2.2°C)	5.2 (+4.3°C)	7.1 (+6.2°C)
	연평균	13.0	16.0 (+2.9°C)	16.9 (+3.8°C)	16.9 (+3.9°C)	16.2 (+3.1°C)	17.9 (+4.8°C)	19.3 (+6.2°C)

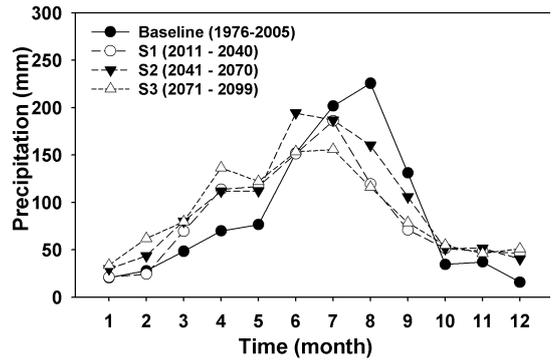
※ 기준기간: 1976~2005, S1: 2011~2040, S2: 2041~2070, S3: 2071~2099

먼저, RCP 4.5 시나리오의 경우 2011년에서 2099년까지 봄철(3~5월)의 강수량은 기준기간에 비해 59.6%가 증가하고, 여름철(6~8월)에는 10.1% 감소하였다. 가을철(9~11월)에는 7.6% 감소하였으며, 겨울철(12~2월)에는 53.1% 증가하며, 연평균은 11.8% 강수량이 증가하는 것으로 분석되었다. 평균기온은 각 구분 시기별로 3.6°C, 3.9°C, 4.3°C, 3.1°C 정도 상승하는 것으로 나타났으며 연평균 3.5°C 증가하였다. RCP 8.5 시나리오의 경우 2011년에서 2099년까지 봄철의 강수량은 기준기간에 비해 63.2%가 증가하고, 여름철에는 17.6% 감소하였다. 가을철에는 7.4% 감소하였으며, 겨울철에는 85.4% 증가하며, 연평균은 9.6% 강수량이 증가하는 것으로 분석되었다. 평균기온은 각 구분 시기별로 4.7°C, 5.3°C, 5.5°C, 4.2°C 정도 상승하는 것으로 나타났으며 연평균 4.7°C 증가하였다.

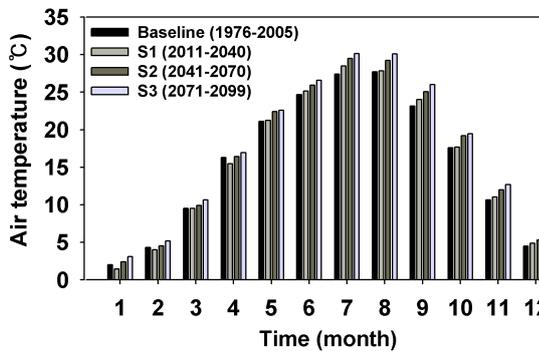
기간별로 살펴보면 RCP 4.5 시나리오의 경우 S1, S2, S3 기간에 각각 강수량의 연평균이 5.6%, 11.3%, 18.4% 증가하며, RCP 8.5 시나리오의 경우에도 각각 1.2%, 15.9%, 116% 증가하는 것으로 나타났다. <그림 4>와 같이 침투 강우는 기준년도에는 8~9월에 발생하였으나, RCP 시나리오에서는 6~7월로 이동하는 것을 알 수 있으며, 봄과 겨울에 강우가 증가하는 것으로 나타났다.



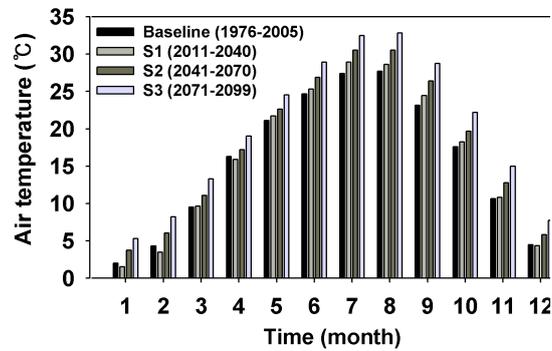
(a) RCP 4.5 시나리오에 따른 월 강수량 변화



(b) RCP 8.5 시나리오에 따른 월 강수량 변화



(c) RCP 4.5 시나리오에 따른 월 평균기온 변화



(d) RCP 8.5 시나리오에 따른 월 평균기온 변화

<그림 4> RCP 시나리오별 월별 강수량 및 평균기온 변화

3. 미래 기후변화에 따른 유역 수문영향 평가 및 고찰

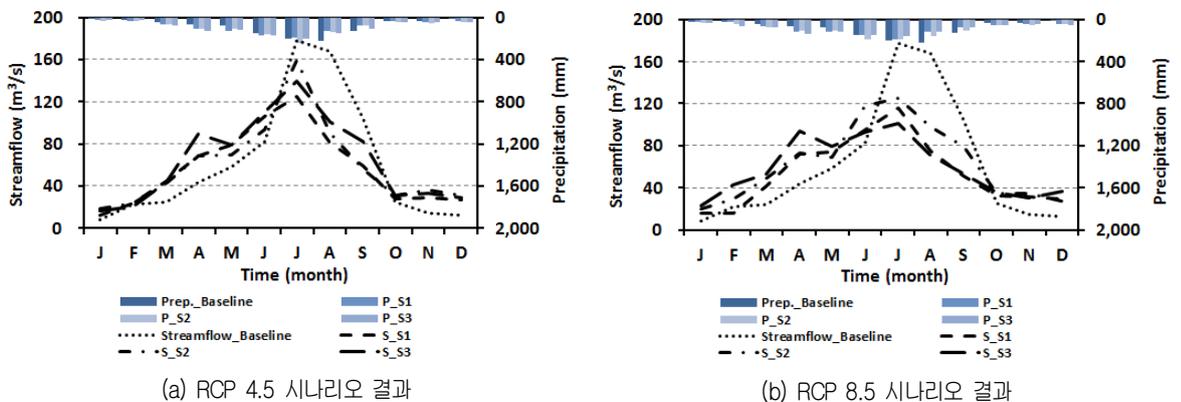
SWAT 모형의 적용성을 평가한 후, RCP 4.5와 8.5 기후변화 시나리오를 SWAT 모형의 입력자료로 활용하여 금호강 유역의 유출량 변동을 분석하였다. 자연유출량을 비교하기 위해서 1998년에서 2010년까지 SWAT 모형을 이용하여 모의를 수행하였으며, 1998년에서 2000년을 warm-up 기간으로 설정하여 비교 기준년도는 2001년에서 2010년까지를 사용하였다. <그림 5>는 시기별로 유출량에 대한 월별 변화를 도시하였으며, <표 3>에서는 계절별로 자연유출량의 변화와 기준기간 대비 변화율을 나타내었다.

먼저, RCP 4.5 시나리오의 경우, S1, S2, S3 기간별 하천유출량은 살펴보면, 봄철은 기준기간보다 각각 53.3%, 43.8%, 67.6% 증가하며, 여름철에는 각각 27.1%, 19.5%, 17.8% 감소하는 경향을 나타낸다. 가을철에는 각각 -19.4%, -14%, 2.1%의 변동을 보였으며, 겨울철에는 각각 98.3%, 133.6%, 128.4%로 기준기간에 비해 1.2배에 증가하는 것으로 보여준다.

RCP 8.5 시나리오에서는 S1, S2, S3 기간별 하천유출량은 살펴보면, 봄철은 기준기간보다 각각 48.8%, 51.9%, 80.0% 증가하며, 여름철에는 각각 33.2%, 20.2%, 38.2% 감소하는 경향을 나타낸다. 가

을철에는 각각 -20.4%, 2.7%, -17.1%의 변동을 보였으며, 겨울철에는 119.8%, 134.5%, 156.0%로 기준기간에 비해 1.4배에 증가하는 것으로 분석되었다.

미래 기후변화에 의한 금호강 유역의 수문영향을 종합해보면, RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오의 연평균유출량은 S1과 S3 기간에서는 기준기간 대비 감소하지만 S2 기간에서는 일정하지 않았다. 계절별로는 봄철에는 두 시나리오의 시간적 패턴이 기준기간에 비해 유출량이 증가하면서 비슷하였고, 여름철에는 기준기간의 첨두 유출량이 8~9월 사이에서 6~7월 사이로 옮기면서 기준기간에 비해 감소하는 추세를 보이고 있다. 겨울철에는 RCP 8.5 시나리오에서 유출량 증가량이 RCP 4.5 시나리오 보다 큰 것으로 나타났다.

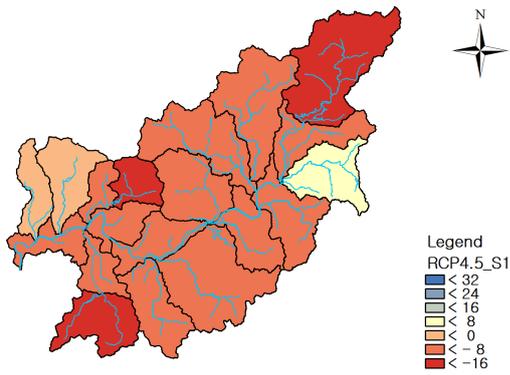


<그림 5> RCP 시나리오별 금호강 유역의 자연유출량 변화

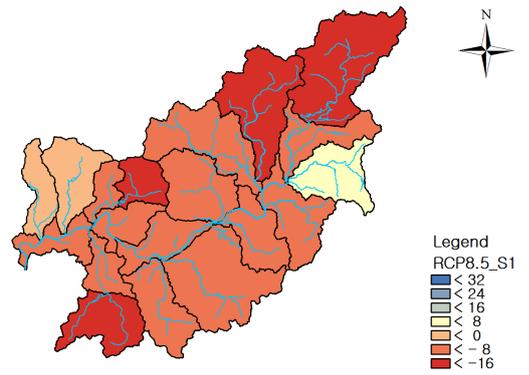
※ 기준기간: 2001~2010, S1: 2011~2040, S2: 2041~2070, S3: 2071~2099

<그림 6>에서 표준유역도별로 기준기간 대비 유출량 변화를 도시하였다. 범례에서 빨강색으로 갈수록 기준기간 대비하여 미래 유출량은 감소 것을 뜻하고 파랑색으로 갈수록 증가하는 것을 뜻한다. RCP 4.5와 8.5 시나리오 모두 S1 기간에서 금호강 상류(영천댐)와 하류(공산댐, 신천상류) 지역이 16%이상 감소할 것으로 나타났다. RCP 8.5 시나리오의 S2 기간에는 금호강 중류지점을 중심으로 유출량이 8% 이상으로 상승할 것으로 나타났고 S3 기간에는 8%이내의 유출량 감소를 나타냈다.

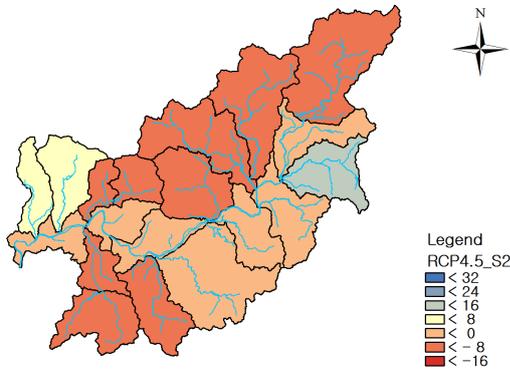
표준유역별 분석에서 각각의 표준유역별로 편차가 크게 나타나는 이유는 먼저 유역의 토양과 토지 이용에 따른 영향이 있을 것이며, 또한 기준기간에는 금호강 유역의 2개의 기상관측소와 10개의 강우 관측소 자료를 이용하여 각 표준유역에 대한 신뢰도 높은 분석이 수행될 수 있었으나, 미래 기후변화 자료는 기상관측소에만 해당되므로 대구와 영천 기상관측소만의 미래 강우로 분석되어 각 표준유역별로 정확한 강우의 반영이 되지 않아 표준유역별 편차가 발생한 것으로 사료된다.



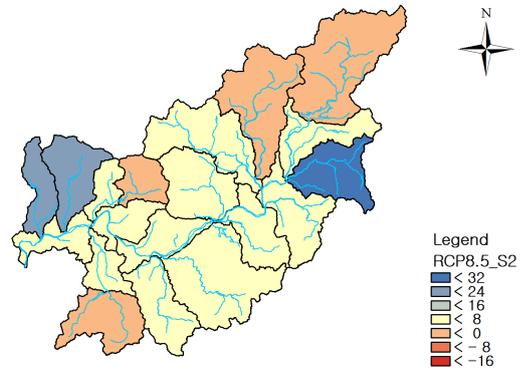
(a) RCP 4.5, S1



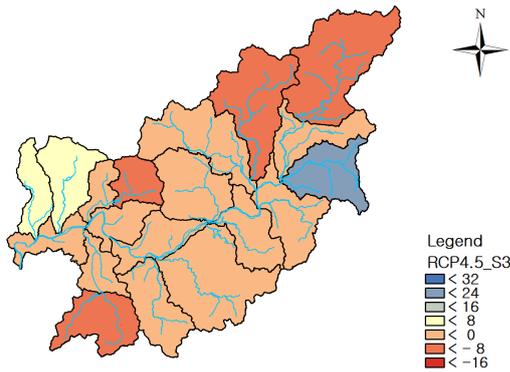
(b) RCP 8.5, S1



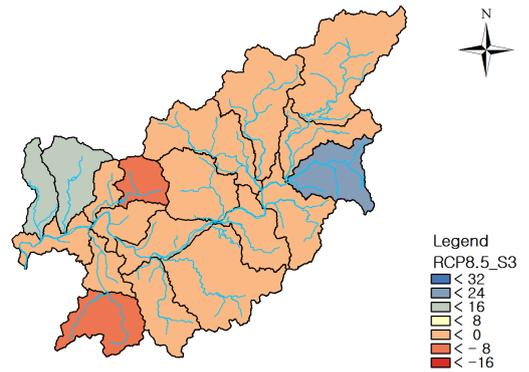
(c) RCP 4.5, S2



(d) RCP 8.5, S2



(e) RCP 4.5, S3



(f) RCP 8.5, S3

<그림 6> RCP 시나리오별 표준유역별 기준기간 대비 자연유출량 변화

※ 기준기간: 2001~2010, S1: 2011~2040, S2: 2041~2070, S3: 2071~2099

<표 3> RCP 시나리오별 금호강 유역의 계절별 자연유출량과 기준기간 대비 변화율

구 분	계 절	기준기간 (m ³ /s)	RCP 4.5			RCP 8.5		
			S1	S2	S3	S1	S2	S3
	봄	42.0	64.4 (△53.3%)	60.4 (△43.8%)	70.4 (△67.6%)	62.5 (△48.8%)	63.8 (△51.9%)	75.6 (△80.0%)
	여름	142.5	103.9 (▼27.1%)	114.7 (▼19.5%)	117.1 (▼17.8%)	95.2 (▼33.2%)	113.7 (▼20.2%)	88.1 (▼38.2%)
	가을	48.0	38.7 (▼19.4%)	41.3 (▼14.0%)	49.0 (△2.1%)	38.2 (▼20.4%)	49.3 (△2.7%)	39.8 (▼17.1%)
	겨울	11.6	23.0 (△98.3%)	27.1 (△133.6%)	26.5 (△128.4%)	25.5 (△119.8%)	27.2 (△134.5%)	29.7 (△156.0%)
	연평균	62.0	55.8 (▼10.0%)	58.2 (▼6.1%)	60.4 (▼2.6%)	54.9 (▼11.5%)	65.7 (△6.0%)	61.7 (▼0.5%)

※ 기준기간: 2001~2010, S1: 2011~2040, S2: 2041~2070, S3: 2071~2099

IV. 결론

본 연구에서는 금호강 유역의 중장기 수문변화를 예측하고자 RCP 4.5와 8.5 시나리오를 이용하여 SWAT 모형을 기반으로 자연유출량의 예측하였고 이를 기간별로 구분하여 월별, 계절별로 유출량 변동을 분석하였다.

본 연구에서 적용한 RCP 시나리오는 금호강 유역 내 과거 30년 기준기간을 기준으로 연강수량은 평균 10.7% 증가하며, 평균기온은 4.1℃ 증가하고 있다. 특히, RCP 시나리오에서 두드러지게 나타나고 있는 강수의 패턴은 여름철에 감소하고 침투 강수량의 시기도 앞당겨지는 것으로 나타났다. 겨울과 봄철에 기준기간에 비해 강수량이 증가하고 있다. 이로 인해 하천유출량 패턴도 강수량 패턴과 유사하게 변화하는 것으로 보여졌다.

공간적인 측면에서 표준유역별 기준기간 대비 유출량 변화는 RCP 4.5 시나리오에서 영천댐 지점과 금호강 하류의 유출량 변동이 다른 표준유역에 비해 감소하는 것으로 나타났고, S2 기간과 S3 기간에서는 고촌천 유역에서 16%이상 유출량이 증가할 것으로 나타났다. RCP 8.5 시나리오에서는 S1 기간에서는 RCP 4.5와 비슷한 결과를 보여주고, S2 기간에서는 8%이상의 유출량 증가하였으며, S3 기간에서는 8% 감소하는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 표준유역별 토지이용과 식생 변화 등에 의한 유역환경에 따라 유출량이 다르게 나온 것으로 보여준다.

미래 유출량 변화 결과를 보면, 유출량과 강수량의 변화 패턴이 높은 상관성을 보이면서, 향후 이수기 용수공급 측면에서 기준기간보다 향상될 것으로 보여준다. 비록 본 연구에서는 토지이용과 식생의 변화를 고려하지 않은 상태에서 기후변화에 의한 유출량 영향을 모의하고 평가하였으나, 하천유량관리를 위해 중장기 측면에서의 대응 수립에 활용 될 수 있는 기초자료로 활용가능할 것으로 판단된다.

한편, RCP 기후변화 시나리오는 여러 가지 요인에 의해 불확실성을 내포하고 있으며, SWAT 모형

과 같은 유역모형에서 매개변수 조정에 따른 불확실성을 고려하기 않았기 때문에 본 연구의 결과를 활용하는데 한계가 있을 수 있다. 하지만 중장기 유량관리를 위하여 미래 예측자료가 필요하며, 이를 반영한 하천운영관리 및 수공구조물 운영방법의 변화가 필요하다. 향후 본 연구결과를 바탕으로 물수지 분석을 추가하여 표준유역에서 적용가능한 구조적·비구조적 물관리 방안 제시를 위한 주요자료로 활용이 가능하다.

참고문헌

- 국립기상연구소. 2011. Climate Change Scenario Report 2011 to Respond to the IPCC 5th Assessment Report.
- 김환석, 박기정, 김상단, 최민하, 박무중, 윤재영. 2012. 기후변화와 대규모 하천정비 사업을 고려한 낙동강 유역 자연재해 홍수 취약성 평가. 한국방재학회논문집. 12(2): 107-113.
- 남원호, 홍은미, 김태곤, 최진용. 2014. 기후변화 시나리오를 고려한 농업용 저수지의 미래 용수공급 지속가능성 전망. 한국농공학회논문집. 56(4): 59-68.
- 노선희, 정관수, 박진혁, 류경식. 2013. RCP 기후변화 시나리오를 고려한 금강유역의 미래 용수공급 변화전망. 한국수자원학회논문집. 46(5): 505-517.
- 맹승진, 정지혜, 김형산, Muhammad, A., 황만하. 2015. 기후변화 시나리오에 의한 강수량과 관측강수량을 사용한 유출 분석. 한국위기관리논집. 11(2): 241-259.
- 박종윤, 정혁, 장철희, 김성준. 2014. RCP 배출 시나리오와 SWAT 모형을 이용한 기후변화가 용담댐 유역의 수문요소에 미치는 영향 평가. 한국농공학회논문집. 56(3): 19-29.
- 박진혁, 권현한, 노선희. 2011. AIB기후변화시나리오 기반 RCM과 SWAT모형을 이용한 대청댐 및 용담댐 유역 유출량 전망. 한국수자원학회논문집. 44(12): 929-940.
- 손태석, 이상도, 김상단, 신현석. 2010. 유역기반 모형을 이용한 기후변화에 따른 낙동강 유역의 하천 유량 영향 분석. 한국수자원학회논문집. 43(10): 865-881.
- 안소라, 박근애, 장철희, 김성준. 2013. SWAT 모형을 이용한 미래 기후변화가 설마천 혼효림 유역의 증발산과 토양수분에 미치는 영향 평가. 한국수자원학회논문집. 46(6): 569-583.
- 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 Resource Association*. 34(1): 73-89.
- Borah, D. K. and M. Bera. 2003. Watershed-Scale Hydrologic and Nonpoint-Source Pollution Models: Review of Mathematical Bases. *ASAE*. 46(6): 1553-1566.
- Carter, T. R., M. Hulme, and M. Lal. 1999. *IPCC-TGCIAGuidelines on the Use of Scenario Data*

- for *Climate Change Impact and Adaptation Assessment. Version 1*, IPCC, Task Group on Scenarios for Impact Assessment.
- Chen, J., P. Francois, F. P. Brissette, and R. Leconte. 2011. Uncertainty of Downscaling Method in Quantifying the Impact of Climate Change on Hydrology. *Journal of Hydrology*. 401(3): 190-202.
- IPCC, 2001. *The Scientific Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Jha, M., P. W. Gassman, S. Secchi, R. Gu, and J. Arnold. 2004. Effect of Watershed Subdivision on SWAT Flow, Sediment, and Nutrient Predictions. *Journal of the American Water Resources Association*. 40(3): 811-825.
- Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry, J. R. Williams, and K. W. King. 2002. *Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation, Version 2000*. TWRI Report TR-191. College Station, TX: Texas Water Resources Institute.
- Priestley, C. H. B. and R. J. Taylor. 1972. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-scale Parameters. *Mon. Weather. Rve*. 100: 81-92.
- USDA-SCS. 1972. Section 4: *Hydrology*. In *National Engineering Handbook*. Washington, D.C.: USDA Soil Conservation Service.
- Williams, J. R. 1969. Flood Routing with Variable Travel Time or Variable Storage Coefficient. *Trans. ASAE*. 12(1): 100-103.

김한나: 광주과학기술원에서 “태국 차오프라야 강 유역의 기후변화 시나리오에 따른 유량 및 수질 영향 평가”로 공학석사 학위를 취득하였으며(2014. 8), 현재는 한국수자원공사 K-water 연구원 위촉연구원으로 재직 중이다. 주요 관심분야는 수자원관리, 기후변화, 강우-유출 모형 등 이다(hanyou01@partner.kwater.or.kr).

이을래: 경북대학교에서 공학박사학위를 받고(논문: 수계오염의 최적관리를 위한 동수역학적 수치모형의 개발. 2000년 8월), 현재 한국수자원공사 K-water 연구원 책임연구원으로 재직 중이다. 유량관리, 홍수재해방지 및 하천에서의 수치해석이 주요 관심분야이며, 주요 논문으로는 “수리학적 모형을 이용한 낙동강 하류구간에서의 홍수도달시간 시나리오 분석(2015)”, “댐하류하천정비사업의 댐 운영개선 효과 경제성 분석(2011)” 등이 있다(erlee@kwater.or.kr).

강신욱: 부경대학교에서 토목공학 박사학위를 받고(논문: 차원변화 탐색기법을 이용한 장기 저수지 운영의 수위 구간 결정 방법 개발 및 적용. 2011년 2월), 현재 K-water 연구원 수자원연구소 책임연구원으로 재직 중이다. 수자원시스템, 전역최적화, 물수지분석, 수문통계 등이 주요 관심분야이며, 주요 논문으로는 “저수지 수위 구간별 운영률의 구간 경계 도출을 위한 집합체 혼합진화 알고리즘의 적용(2014)”, “SC-PDSI를 이용한 북한지역 가뭄분석 및 가뭄심도-지속기간-생기빈도 곡선의 유도(2014)” 등이 있다(sukang@kwater.or.kr).

최현구: 경북대학교에서 공학박사학위를 받고(논문: 자료기반 해석과 물리적 모형을 연계한 실시간 하천수질예측 시스템 구축. 2012년 8월), 현재 한국수자원공사 K-water 연구원 위촉선임연구원으로 재직 중이다. 유량관리, 수질관리 및 하천에서의 수치해석이 주요 관심분야이며, 주요 논문으로는 “수리학적 모형을 이용한 낙동강 하류구간

에서의 홍수도달시간 시나리오 분석(2015)”, “Development and Applicability Assessment of 1-D Water Quality Model in Nakdong River(2014)” 등이 있다(choihg@kwater.or.kr).