



## Assessment of future stream flow and water quality of Man-gyeong river watershed based on extreme climate change scenarios and inter-basin water transfer change using SWAT

Woo, So-Young<sup>a</sup> · Lee, Ji-Wan<sup>b</sup> · Kim, Yong-Won<sup>c</sup> · Kim, Seong-Joon<sup>d\*</sup>

<sup>a</sup>Ph.D Candidate, Graduate School of Civil, Environmental and Plant Engineering, Konkuk University, Seoul, Korea

<sup>b</sup>Post-Doctorate researcher, School of Civil, Environmental and Plant Engineering, Konkuk University, Seoul, Korea

<sup>c</sup>Ph.D Student, Graduate School of Civil, Environmental and Plant Engineering, Konkuk University, Seoul, Korea

<sup>d</sup>Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Konkuk University, Seoul, Korea

Paper number: 20-063

Received: 24 June 2020; Revised: 10 July 2020; Accepted: 10 July 2020

### Abstract

The purpose of this study is to assess the future hydrological and water quality change of Man-gyeong river basin (1,602 km<sup>2</sup>) based on future extreme climate change scenarios and reduction of inter-basin water transfer amount using SWAT (Soil and Water Assessment Tool). The SWAT was calibrated (2012~2014) and validated (2016~2018) at 2 water level observation stations (DC, JJ) and 2 water quality observation stations (SR, GJ) considering inter-basin water transfer amount, stream water withdrawal, and point source data. For the streamflow, the coefficient of determination ( $R^2$ ) was 0.70 and the average Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) was 0.51 respectively. For the water quality of SS, T-N, and T-P, the  $R^2$  was 0.72, 0.80 and 0.72 respectively. The future average streamflow under climate change scenarios increased up to 459 mm/yr, and average SS, T-N and T-P yields also increased up to 19,548 ton/yr, 68,748 kg/yr, and 13,728 kg/yr respectively. When the amount of inter basin water transfer decreased, the streamflow especially decreased in spring and winter periods, and the future water quality yields increased under the influence of precipitation. In order to solve the deterioration of water quality due to decrease in the flow rate and an increase in the load, the amount of inter basin water transfer should be maintained to a certain level.

**Keywords:** Climate change, Extreme climate change, RCP scenario, Inter-basin water transfer, Hydrological and water quality change, SWAT

## SWAT을 이용한 극한 기후변화 시나리오와 유역간 물이동 변화를 고려한 만경강 유역의 미래 수문 및 수질 평가

우소영<sup>a</sup> · 이지완<sup>b</sup> · 김용원<sup>c</sup> · 김성준<sup>d\*</sup>

<sup>a</sup>건국대학교 대학원 사회환경플랜트공학과 박사수료, <sup>b</sup>건국대학교 대학원 사회환경플랜트공학과 박사후연구원,

<sup>c</sup>건국대학교 대학원 사회환경플랜트공학과 박사과정, <sup>d</sup>건국대학교 공과대학 사회환경공학부 교수

### 요 지

본 연구에서는 만경강유역(1,602 km<sup>2</sup>)을 대상으로 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)을 이용하여 미래 극한 기후변화 시나리오와 유역간 물이동 감소에 따른 유역의 수문 수질 변화를 미래기간(S1: 2010~2039, S2: 2040~2069, S3: 2070~2099)로 구분하여 평가하였다. 이를 위해 유역간 물이동량, 유역내 취수량, 점 오염원 등을 고려하여 SWAT 모형을 구축 후 수위 관측소 2지점(대전, 전주), 수질 관측소 2지점(삼례, 김제)에 대하여 유출량과 부하량을 보정(2012~2014년) 및 검증(2016~2018년)하였다. 검증결과 유출량의 평균  $R^2$ 는 0.7, NSE는 0.51이었으며, SS, T-N, T-P의 평균  $R^2$ 는 0.72, 0.80, 0.72로 분석되었다. 미래 기후변화에 따른 연평균 유출량은 최대 459 mm/yr 증가하였으며, 연평균 SS, T-N, T-P 부하량은 각각 최대 19,548 ton/yr, 68,748 kg/yr, 13,728 kg/yr 증가하였다. 미래 유역간 물 이동량이 감소하였을 때, 봄과 겨울에 유출량이 감소하였으며, 미래 수질 부하량은 강수량의 영향으로 과거 관측 기간보다 증가하였다. 유출량 감소와 부하량 증가로 인한 수질 악화를 개선하기 위해서는 유역간 물이동이 일정 수준으로 지속되어야 할 것으로 판단된다.

**핵심용어:** 기후변화, 극한 기후변화, RCP 시나리오, 유역간 물 이동, 수문·수질 변화, SWAT

\*Corresponding Author. Tel: +82-2-444-0186

E-mail: kimsj@konkuk.ac.kr (S.-J. Kim)

## 1. 서론

기후변화는 유역의 강수량 변화와 더불어 수문 시스템에 전반적인 변화를 가져옴으로써 수자원의 양과 질에 영향을 미치고, 이로 인해 수자원의 가용성 및 공급이 불안정해질 것으로 전망된다(IPCC, 2014). 이는 지역간 수자원의 불균형을 더욱 심화시키며(Schewe *et al.*, 2014), 이를 해결하기 위해 유역간 물이동에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

유역간 물이동은 지리적으로 구분되어 있는 하나의 유역에서 다른 유역으로 물을 이동하는 것을 의미하며(Davies *et al.*, 1992), 국내외에서 수자원 불균형을 해결하기 위한 다양한 방법 중 하나로 유역간 물이동이 이뤄지고 있다. 국외의 물 이동 사례로는 콜로라도 강의 풍부한 수자원이 유타, 와이오밍, 애리조나, 네바다 등의 미국의 주(states)와 멕시코로 공급되고 있으며, 스페인의 Tagus-segura 유역간 물이동, 레소토와 남아프리카의 물이동 등이 있다. 이와 더불어 중국에서도 수자원이 부족한 북쪽에 물 공급을 위해 South to North water transfer project가 진행되고 있다. 국내에서도 낙동강의 안동댐과 임하댐 사이의 물이동, 섬진강의 주암댐과 영산강의 광주천 사이의 물이동, 금강의 용담댐에서 만경강으로의 물이동 등이 수행되고 있다.

유역간 물이동의 영향을 평가하기 위해 Gu *et al.* (2012)은 유역간 물이동으로 인한 수원의 월별 물 부족 위험도를 분석하였으며, Zeng *et al.* (2015)은 EFDC모형을 이용하여 중국의 SNWP로 인한 수질 변화를 모의하였다. Karamouz *et al.* (2010)은 수질 모델과 최적화 모델을 연계하여 유역간 물이동으로 인한 환경적 영향을 평가하였으며, Wang *et al.* (2016)은 1차원 hydrodynamic 모델과 수질 모델을 연계하여 물이동이 수량과 수질에 미치는 영향을 평가하였다. 이처럼 국외에서 물이동으로 발생하는 공급 유역에서의 수문, 수질을 포함한 환경적 변화에 관한 연구가 수행되고 있으나, 공급 받는 유역의 수문 수질 변화에 관한 연구는 부족한 실정이다. 뿐만 아니라 국내에서는 수리권이 복잡하여 수량, 수질과 관련된 다수의 물분쟁 사례가 존재하며(MOLIT, 2008) 이를 해결하기 위해서 미래 기후변화와 물 이동량 변화에 따른 유역의 수문 수질 변화에 대한 연구가 필요하다.

불확실성을 고려한 미래 기후변화가 수자원에 미치는 영향을 모의하기 위해 다양한 기후변화 시나리오들을 이용한 연구가 수행되고 있으며(Bae *et al.*, 2007; Kwon *et al.*, 2008), 최근에는 과거 경험하지 못한 극심한 폭우, 장마 기간 이외의 집중호우, 가뭄등과 같은 극한 사상의 발생빈도가 증가함에 따라 극한지수를 활용한 미래 극한사상에 대한 관심이 높아지

고 있다. 국내에서 많이 알려진 극한지수로는 유럽연합에서 제안한 STARDEX (Statistical and Regional dynamical Downscaling of Extremes) 극한 지수, WMO에서 제안한 ETCCDI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices) 지수 등이 있으며, 다양한 연구에서 미래 기후변화의 영향을 평가하기 위해 극한지수를 활용하고 있다(Kim and Kim, 2009; Jeung *et al.*, 2013; Kim *et al.*, 2018).

이에 본 연구에서는 수자원의 외부 의존도가 높은 만경강 유역을 대상으로 미래 기후변화와 물 이동량 변화에 따른 유역의 수문 수질 변화를 분석하고자 한다. 미래 기후변화의 영향을 모의하기 위해 다양한 기후변화 시나리오 중 기상청 공인 시나리오와 STARDEX 극한지수를 기반으로 습윤하고 강수량이 많은 시나리오, 건조하고 강수량이 적은 시나리오를 선정하였다. 선정된 시나리오를 SWAT 모형에 적용하여 미래 물이동량이 감소하였을 때, 만경강 유역의 수문 및 수질 변화를 미래 평가기간(S1:2010~2039, S2:2040~2069, S3:2070~2099)으로 구분하여 분석하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 SWAT 모형

SWAT 모형은 미국 농무성(United States Department of Agriculture, USDA) 농업연구소(Agricultural Research Service, ARS)에서 개발한 준분포형의 장기-강우 유출 모델(continuous rainfall-runoff model)로서 토양 특성, 토지이용, 그리고 토지관리 상태 등을 고려하여 유출량, 지하수량 등의 수문학적 요소뿐만 아니라 질소, 인 등의 영양물질 이동 모의가 가능한 모델이다. SWAT 모형은 전체 유역을 수문반응단위(Hydrologic Response Unit, HRU)로 분할하여, 각 HRU에 대해 물수지 방정식을 기반으로 강수, 증발산, 지표유출, 중간유출, 기저유출 등에 대한 수문 순환 모의를 수행한다. 또한, 유역 내 점오염원, 비점오염원의 발생을 고려하여 수정범용 토양침식공식(Modified Universal Soil Loss Equation, MUSLE)를 기반으로 토양침식과 질소, 인과 같은 영양물질의 이동 모의를 수행한다.

SWAT 모형 내에는 물 관리(Water Management)와 관련된 다양한 방법을 사용할 수 있으며, Inlet 기능을 이용하여 유역간 물이동을 모의할 수 있다. Inlet은 유역에 새로운 유입구를 추가할 수 있는 기능으로 Luzio *et al.* (2002)에 의해 개발되었다. Inlet기능을 이용하여 새로운 유입구를 생성하는 경우, 상류의 소유역 정보가 사라지는 단점이 있으나(Kim *et al.*, 2020),

외부에서 유입되는 물 이동량과 더불어 유사, 유기질소, 유기인, 질산염, 수용성인, 암모니아, 아질산염, 금속, 박테리아 등을 모의할 수 있다. 자세한 SWAT 모형의 이론은 Arnold *et al.* (1996)와 Neitsch *et al.* (2001)에 언급되어 있다.

**2.2 대상유역의 현황**

본 연구의 대상유역은 만경강 유역으로 완주군 동상면 원정산에서 발원하며, 유역면적 1,602 km<sup>2</sup>, 유로 연장은 80.86 km이다. 만경강 유역은 14개의 표준유역으로 분할되며, 유역의 하류에는 새만금 방조제로 만들어진 새만금 담수호가 위치해 있다. 만경강 유역은 농경지가 발달한 유역으로, 유역 내 가용용수가 부족하여 인근 유역인 금강의 용담 다목적댐에서 연평균 280백만 톤의 용수를 공급받고 있다. 더불어 만경강 유역 내 위치한 대아, 경천 저수지에서도 생공농업 용수를 방류하고 있으며, 연평균 130백만 톤의 용수가 어우보에서 취입되어 대아 대간선수로 통해 유역에 생공농업용수로 공급되고 있다. 유역내 4개의 기상관측소(전주, 임실, 군산, 금산)가 위치하고 있으며, 유역의 과거 30년(1985~2014년) 평균 강우량은 1,241 mm이며, 평균 기온은 12.9°C이다. 유역 내 2개의 하

수종말처리장이 위치하고 있으며 2015년 이후 총인저감시설이 설치되어 T-P의 농도를 0.2 mg/L로 유지하고 있다.

SWAT 모형의 GIS 공간 입력자료로 DEM (Digital Elevation Model)와 토양도는 국가수자원관리종합정보시스템(Water management Information System, WAMIS)의 30 m × 30 m DEM, 1:25,000 정밀토양도를 이용하였다. 만경강 유역의 고도는 0~1,066 m이며(Fig. 1(b)), 토양종류는 사양토(Sandy loam)와 양토(Loam)이 각각 58%, 24%로 높은 비율을 차지하고 있다(Fig. 1(c)). 토지이용도는 환경부의 2008년 중분류 자료를 이용하여 활엽수림, 침엽수림, 혼효림, 주거지, 논, 밭, 초지, 나지, 수역 9개 항목으로 분류하였다. 분류 결과 유역의 50%가 농경지로(36% 논, 14% 밭)이며, 전주와 군산을 포함한 도시가 10%, 산림이 32%으로 이루어져 있다(Fig. 1(d)).

본 연구에서는 만경강의 어우보를 Inlet 지점으로 선정하였다. 용담댐으로부터 공급되는 물 이동량과 더불어 유역 내 고산, 대아, 경천 저수지 등을 통해 공급되는 물의 양, 그리고 어우보를 기준으로 생공농업을 위해 취수되는 물의 양을 고려하여 하천으로 흘러갈 수 있는 공급량을 Inlet 데이터로 입력하였다.

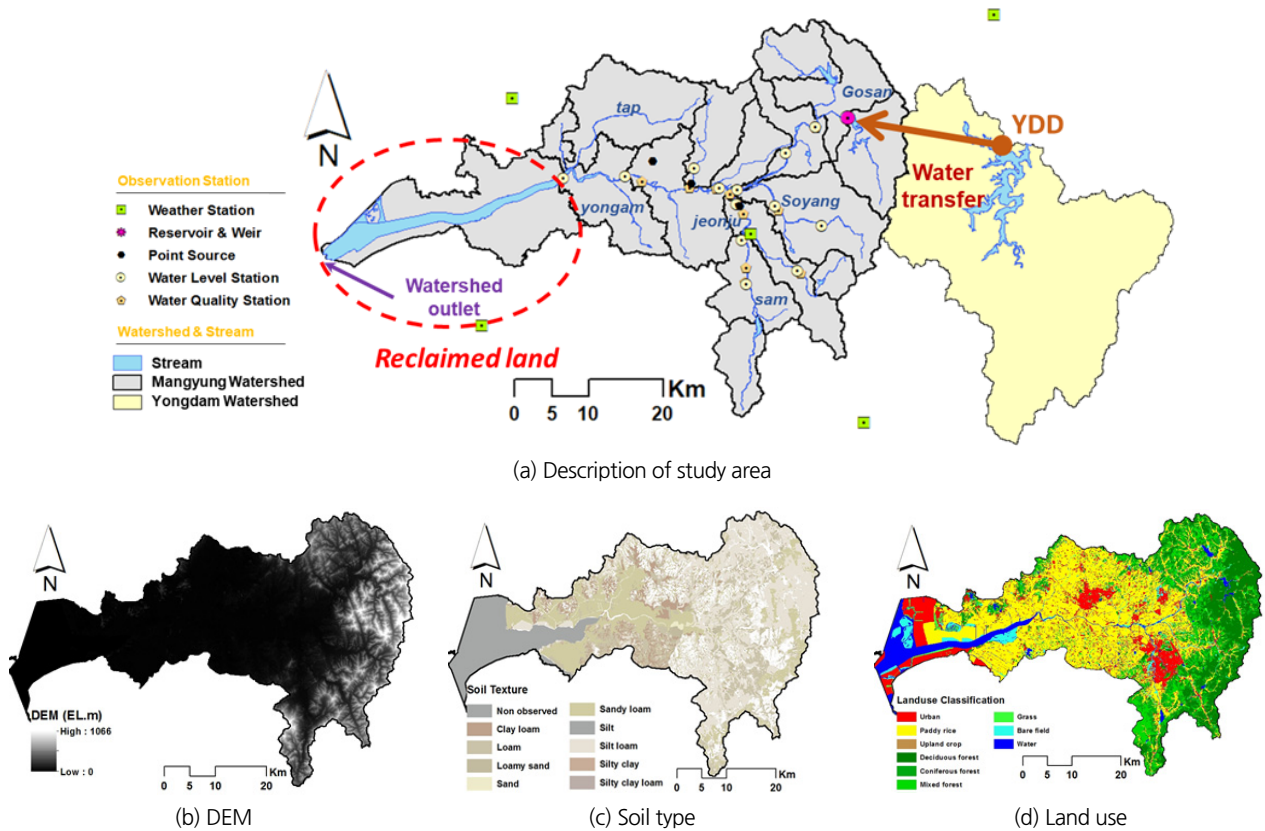


Fig. 1. Description of Study area and GIS data

### 2.3 STARDEX 기반 극한 기후변화 모델 선정

STARDEX (Statistical and Regional dynamical Downscaling of EXtremes)는 통계적, 동적, 및 역학적 축소기법을 기반으로 극한 기후 사상의 빈도와 강도의 경향성을 평가하는 지수로서, 6개의 강우관련 지수와 4개의 기온관련 핵심지수로 이루어져 있다(EU, 2005). 본 연구에서는 유역간 물이동의 영향을 분석하기 위해 강우 관련 극한 기후변화 모델 선정을 목표로 하였다. 강우 관련 극한지수는 집중호우 한계점, 지속 기간 5일 최대 강수량, 습윤일의 강우강도, 최대 건조 지속 기간, 집중호우 한계점 이상 강우량 비율, 집중호우 한계점 이상 발생빈도이며 이를 Table 1에 정리하였다.

본 연구에서는 8개의 GCM RCP 8.5 시나리오(CanESM2, CNRM-CM5, GFDL-ESM2G, HadGEM2-ES, INM-CM4, IPSL-CM5-LR, IPSL-CM5-MR, MRI-CGCM3)와 기상청 공인 시나리오 HadGEM3-RA RCP 8.5에 대한 강우관련 극한지수를 산정하였다. 각 모델의 RCP 8.5 시나리오별 산정 지수의 상대 비교를 통해 극한성이 가장 높은 모델에 rank 1, 극한성이 낮은 모델에 rank 9를 할당하였다. INM-CM4와 HadGEM2-ES가 강우 관련 극한성이 낮은 것으로 분석되었으며, CanESM2와 GFDL-ESM2G가 극한성이 높은 것으로 분석되었다. 극한성과 연평균 강수량을 고려하여, 가장 건조(dry)하며 강우 관련 극한성이 낮은 모델로는 INM-CM4, 가

Table 1. Rainfall related Indices of extreme event (EU, 2005)

Index name	Definition
Heavy rainfall threshold	90th percentile of rainy day amount (mm/day)
Greatest 5-days rainfall	Greatest 5-day total rainfall (mm) max rainfall of 5-day duration (mm)
Average wet days rainfall	Simple daily intensity (rainfall intensity of a rainy day) (mm/hr)
Longest dry period	Maximum number of consecutive dry days (days)
Heavy rainfall proportion	% of total rainfall from events > long-term 90th percentile (%)
Heavy rainfall days	Number of events > long-term 90th percentile of rainy days (%)

Table 2. Average annual precipitation and climate change model rank of rainfall related extreme indices

Models	CanESM2	CNRM -CM5	GFDL -ESM2G	HadGEM2 -ES	INM -CM4	IPSL -CM5-LR	IPSL -CM5-MR	MRI -CGCM3	HadGEM3 -RA
PCP (mm)	<b>1,497</b>	1,417	1,425	1,344	<b>1,270</b>	1,340	1,306	1,351	<b>1,493</b>
His	<b>1</b>	6	1	9	<b>5</b>	1	4	8	<b>6</b>
S1	<b>4</b>	2	1	9	<b>4</b>	7	4	8	<b>3</b>
S2	<b>1</b>	2	5	8	<b>9</b>	3	6	6	<b>4</b>
S3	<b>1</b>	6	2	9	<b>8</b>	3	3	6	<b>3</b>
Avg.	<b>1</b>	3	2	9	<b>8</b>	4	4	7	<b>6</b>

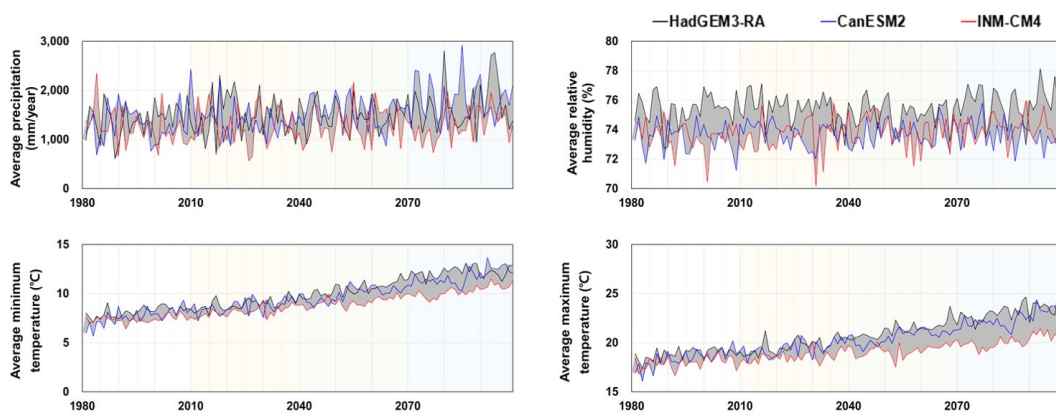


Fig. 2. Changes in precipitation, relative humidity, maximum and minimum temperature due to climate change scenarios

장 습윤(wet)하며 극한성이 높은 모델은 CanESM2를 선정하였다(Table 2).

본 연구에서는 STARDEX 지수 기반으로 선정된 2개의 극한 기후변화 GCM 모델 CanESM2, INM-CM4과 극한성이 중간이며 기상청 공인 RCM HadGEM3-RA RCP 8.5 총 3개의 모델을 이용하여 만경강 유역에 미치는 미래 기후변화의 영향을 분석하였다. Fig. 2는 기후변화 시나리오의 요소(강수량, 상대습도, 최저/최고기온)의 연평균 시계열 그림이다. 연강수량의 경우, 강수량이 많고 극한성이 큰 CanESM2에서 미래로 갈수록 커지는 경향을 나타내며, INM-CM4에서 강수량이 가장 작은 것으로 나타났다. 상대습도는 HadGEM3-RA에서 가장 크고, INM-CM4에서 가장 작았으나, 대체적으로 72% ~ 78% 범위에서 변화하는 것으로 나타났다. 최저/최고기온은 모든 시나리오에서 미래로 갈수록 증가했으며, HadGEM3-RA에서 기온 증가 폭이 가장 컸고, INM-CM4에서의 증가 폭이 가장 작았다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 SWAT 모형의 검보정 결과

본 연구에서는 물 이동량과 취수량을 고려하여 SWAT 모형을 구축하였으며, 모형의 보정기간은 2012~2014년, 검증기간은 2016~2018년으로 설정하였다. 유출량에 대한 검보정 지점은 대천(DC), 전주(JJ) 수위 관측소로 선정하였으며, 수질에 대한 검보정 지점은 김제(GJ), 삼례(SR) 수질 관측소로 선정하였다. 하나의 유역에 대하여 상류부터 하류로 순차적으로 다지점 검보정을 수행하여, 모형의 정확도를 향상시켰다(White and Chaubey, 2005; Santhi *et al.*, 2001; Arnold *et al.*, 2012).

유출량 검보정은 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS, Water resources Management Information System)에서 제공하는 하천의 일별 수위 관측자료를 활용하였다. 지표유출, 중간유출, 기저유출을 고려하여 검보정을 수행하였으며, 민감도 분석 결과를 기반으로 지표유출 CN2, CH\_K1, 중간유출

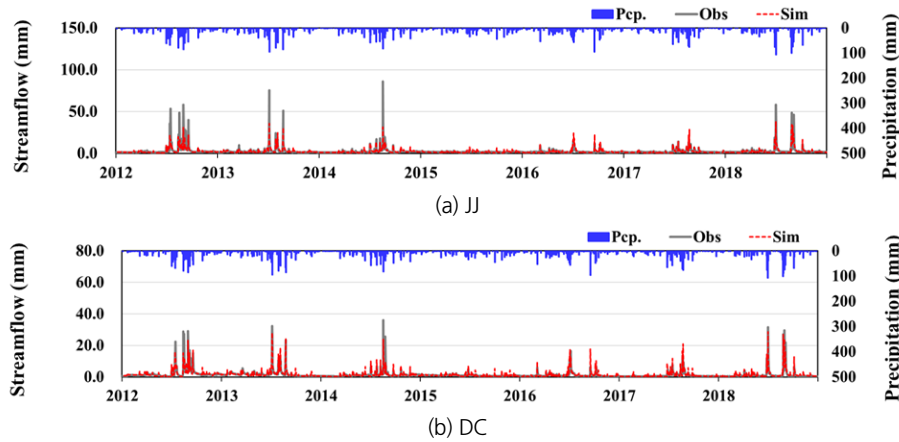


Fig. 3. Calibration and Validation results for stream flow at (a) JJ station and (b) DC station

Table 3. Summary of calibration and validation results for precipitation, runoff, and objective functions

Evaluation	PCP (mm)	Runoff (mm)		Runoff ratio (%)		Objective function				
		Obs	Sim	Obs	Sim	R <sup>2</sup>	NSE	PBIAS	RMSE (mm/day)	
JJ	Cal	1,284	1,034	937	80	73	0.73	0.65	8.71	3.33
	Val	1,138	847	818	74	72	0.70	0.33	2.43	2.04
	AVE	1,155	890	832	76	72	0.72	0.50	8.54	2.69
DC	Cal	1,284	651	677	47	52	0.71	0.70	-4.38	1.54
	Val	1,138	391	463	34	40	0.62	0.31	-17.86	1.49
	AVE	1,155	493	539	42	46	0.67	0.51	-11.15	1.51

Cal : Calibration Period (2012~2014), Val : Validation Period (2016~2018), Ave : Average Total Period (2012~2018)  
 PCP : Precipitation, Obs : Observed data, Sim : Simulation data

LAT\_TIME, 기저유출 GW\_DELAY, GWQMN, ALPHA\_BF, REVAPMN 매개변수들을 사용하였다.

유출량에 대한 검보정 결과를 평가하기 위한 목적함수로서 coefficient of determination ( $R^2$ ), Nashe and Sutcliffe (1970)

model efficiency (NSE), percent bias PBIAS, Root mean square error (RMSE)를 사용하였다. Fig. 3는 유출량에 대한 검보정 결과를 나타낸 그래프이며, Table 3은 강수량, 유출량, 유출물 그리고 검보정 결과를 정리한 것이다. 전주 관측소의

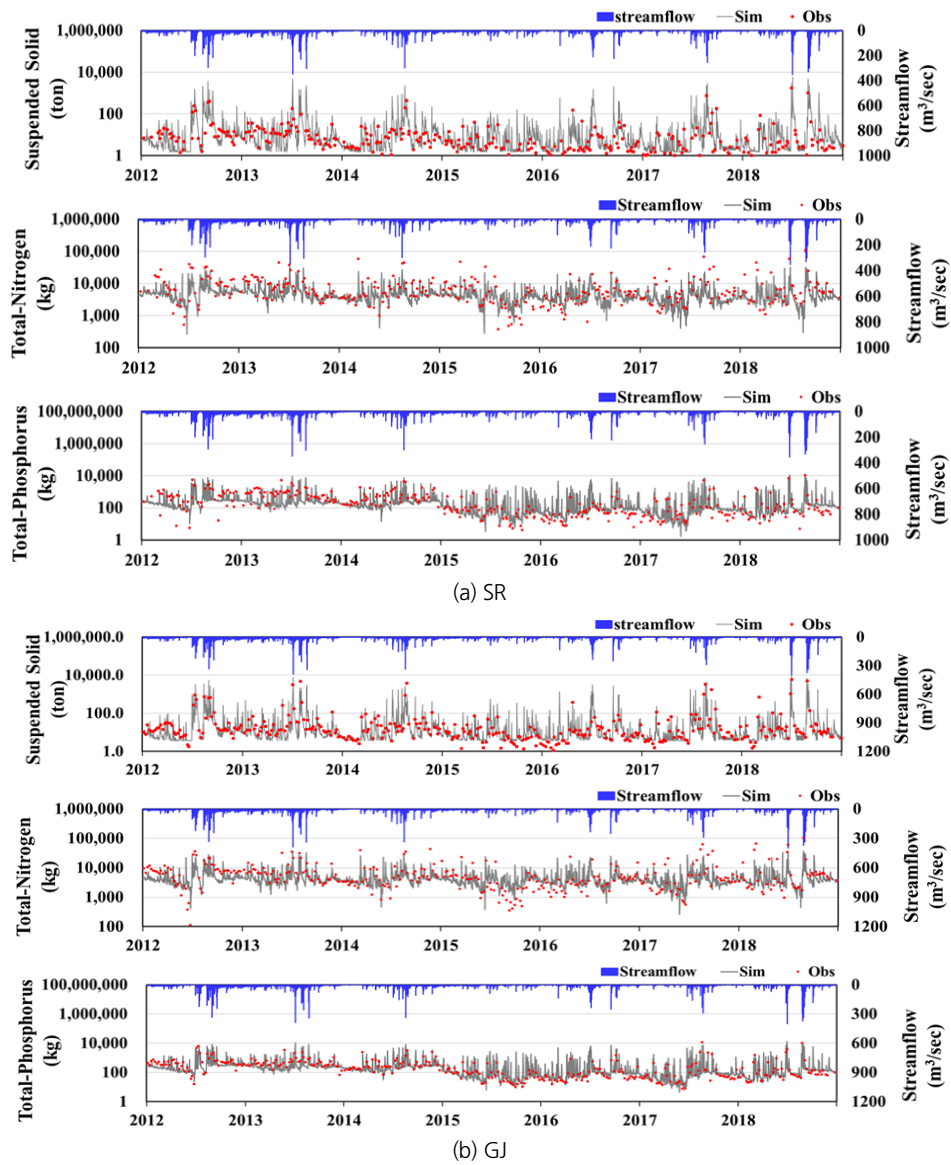


Fig. 4. Calibration and Validation results for water quality yields (SS, T-N, T-P) at (a) SR station and (b) GJ station

Table 4. Summary of calibration and validation results for Water quality yields (SS, T-N, T-P)

Component		SS (ton/day)			T-N (kg/day)			T-P (kg/day)		
Station	Period	Cal	Val	Ave	Cal	Val	Ave	Cal	Val	Ave
SR	$R^2$	0.8	0.66	0.72	0.78	0.69	0.75	0.63	0.68	0.65
GJ	$R^2$	0.71	0.86	0.73	0.84	0.89	0.86	0.81	0.71	0.78

Cal : Calibration Period (2012~2014), Val : Validation Period (2016~2018), Ave : Average Total Period (2012~2018)

유출률은 4% 적게 모의되었으며, 이러한 차이는 여름철 장마철 발생하는 유출을 실제보다 적게 모의하였기 때문으로 판단된다. 통계분석 결과  $R^2$ , NSE, PBIAS, RMSE는 0.72, 0.5, 8.54%, 2.69 mm/day로 분석되었다. 반면, 대천 관측소의 유출률은 4% 크게 모의되었으며, 중간유출 및 기저유출을 실제보다 많이 모의하였기 때문인 것으로 보인다. 통계분석 결과  $R^2$ , NSE, PBIAS, RMSE는 0.67, 0.51, -11.15%, 1.51 mm/day로 분석되었다.

수질 검보정은 물환경정보시스템의 8일 간격 하천 수질 관측 자료를 활용하였으며, 관측 자료 중 유사량(SS, Suspended Solid), 총질소(T-N, Total-Nitrogen), 총인(T-P, Total-Phosphorus)에 대한 검보정을 수행하였다. SS는 CH\_EQN, CH\_COV1, CH\_COV2, LAT\_SED 매개변수를, T-N은 LAT\_ORGN, RAMMO\_SUB, RCN\_SUB, NPERCO, SHALLEST\_N 매개변수를, T-P는 GWSOLP, LAT\_ORGP 매개변수를 사용하여 검보정하였다.

Fig. 4는 수질부하량에 대한 검보정 결과를 나타낸 그래프이며, Table 4는 SS, T-N, T-P 검보정 결과를 정리한 것이다. 수질 부하량의 경우, 삼례 관측소 지점에서 검보정 결과에 따른 SS, T-N, T-P의  $R^2$ 는 보정기간에 대하여 0.8, 0.78, 0.63로 분석되었으며, 검증기간에 대하여 0.66, 0.69, 0.68로 분석되었다. 김제 관측소 지점에서의 SS, T-N, T-P의  $R^2$ 는 보정기간에 대하여 0.71, 0.84, 0.81 그리고 검증기간에 대하여 0.86, 0.89, 0.71로 분석되었다. 모의값과 실측값의 통계분석 결과로부터 SWAT 모형은 만경강 유역의 유역간 물이동량과 유역내 취수량을 고려하여 하천의 유출 및 수질 특성을 잘 반영하고 있는 것으로 판단된다.

### 3.2 기후변화와 유역간 물이동량 변화에 따른 수문 및 하천 유출량 변화 평가

미래 유역의 수문 및 하천 유출량 변화 평가를 위해 선정한 3개의 기후변화 시나리오를 SWAT 모형에 적용하였으며, 유역의 수문 요소 변화(강수량, 증발산량, 토양수분 함양량, 총 유출량, 지표 유출량, 기저유출량)를 과거 관측자료(1980~2005년, baseline)와 시나리오의 과거 자료(1980~2005년, Historical), 미래기간 S1(2010~2039), S2(2040~2069), S3(2070~2099)로 구분하여 분석하였다.

강수량의 경우, Historical 기간에서는 HadGEM3-RA에서 가장 높았으며, 나머지 두 시나리오는 baseline보다 낮은 것으로 분석되었다. 미래기간에서 시나리오별 강수량 차이가 크게 나타났으며, 강우 관련 극한성이 가장 높았던 CanESM2 S3 기간에 강수량 1,800 mm로 가장 많았고 극한성이 가장 낮은

INM-CM4에서 강수량은 1,299 mm로, 두 시나리오의 강수량 차이는 최대 501 mm인 것으로 분석되었다. 증발산량과 토양수분 함양량은 HadGEM3-RA, Can-ESM2에서는 큰 차이가 없었으나, INM-CM4에서 상대적으로 낮은 것으로 분석되었다. 유역의 평균 증발산량과 토양수분 함양량은 각각 533 mm, 135 mm 이었으며 편차 범위는 각각 -31~+47 mm, -4~+5 mm 이다(Fig. 5(a)~(c)).

유출량은 총 유출량(TQ), 지표 유출(SQ), 그리고 기저유출(GWQ)로 구분하여 분석하였으며, 강수량 패턴과 유사하게 나타났다. Baseline에서의 총 유출량은 773 mm로 분석되었으며, Can-ESM2의 historical 기간을 제외하면 모든 시나리오 모든 기간에서 총 유출량이 증가하는 것으로 나타났다. 총 유출량은 Can-ESM2의 S3기간에 최대 1,232 mm로 까지 증가하며, INM-CM4에서는 평균 800 mm로 유지되었다. 지표 유출과 기저유출 또한 모두 baseline과 비교하였을 때, 미래기간에서 증가하였으며, 지표유출은 최대 182 mm, 기저유출은 최대 123 mm 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 5(d)~(f)).

전반적으로 INM-CM4에서 강수량, 증발산량, 토양수분 함양량이 모두 낮았으며, 이는 Fig. 2에서 확인할 수 있듯이 강수량, 상대습도, 최고·최저 기온이 모두 낮기 때문으로 판단된다. 상대적으로 증발산량과 토양수분 함양량은 시나리오 별 큰 차이가 없었으나 강수량과 유출량은 시나리오에 따라 큰 차이가 발생했으며, 이는 강우 관련 극한성을 기준으로 극한 시나리오를 선택했기 때문이다. 또한, 미래기간으로 갈수록 시나리오별 기상요소의 편차 증가가 유출량의 차이를 증가시킨 것으로 보인다.

유역간 물이동량 감소, 즉 취수량을 제외하고 하천으로 흘러가는 물 이동량을 감소하였을 때, 하천 유출량에 미치는 영향을 분석하였다. 물이동에 가장 많은 영향을 받는 소유역을 기준으로 과거 관측 baseline 기간 대비 유출량 변화를 계절별로 구분하여 비교하였다(Table 5). 물 이동량이 감소하였을 때, 과거와 강수량이 비슷한 Historical 기간 유출량은 모든 계절에 감소하였으며, 봄에 최대 3.47 m<sup>3</sup>/s 감소하는 것으로 분석되었다.

미래 S1기간의 경우, 강수량이 증가하였으나 모든 시나리오에서도 유출량이 감소하는 것으로 나타났다. 봄과 여름에는 극한성이 가장 작은 INM-CM4를 적용하였을 때 유출량 감소가 가장 컸으며, 각각 3.70, 2.64 m<sup>3</sup>/s 감소하였다. 가을과 겨울에는 HadGEM3-RA에서 유출량 감소가 가장 컸으며, 각각 0.76, 0.88 m<sup>3</sup>/s 감소하였고, CanESM2의 영향이 가장 적은 것으로 분석되었다.

미래 S2기간의 경우 CanESM2의 가을을 제외하고 모두 유출량이 감소하였다. 미래 S3 기간에는 HadGEM3-RA,

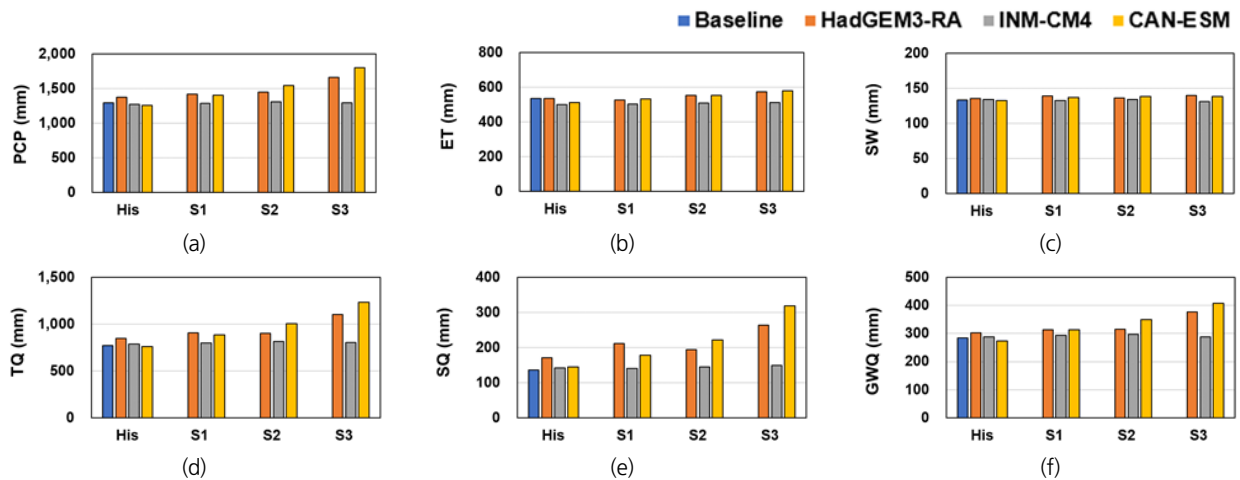


Fig. 5. Hydrologic components based on climate change scenarios

Table 5. Stream flow change based on climate change scenarios and reduced inter-basin water transfer (unit : m<sup>3</sup>/sec)

Period	Season	HadGEM3-RA	INM-CM4	CanESM2
His	Spr	2.35 (-3.49)	2.42 (-3.43)	2.38 (-3.47)
	Sum	10.71 (-0.75)	9.42 (-2.04)	9.21 (-2.24)
	Aut	4.11 (-0.95)	4.11 (-0.96)	3.77 (-1.30)
	Win	1.35 (-0.91)	1.28 (-0.98)	1.27 (-0.99)
S1	Spr	2.65 (-3.19)	2.15 (-3.70)	2.60 (-3.24)
	Sum	11.22 (-0.24)	8.81 (-2.64)	9.93 (-1.52)
	Aut	4.31 (-0.76)	4.77 (-0.30)	4.97 (-0.10)
	Win	1.37 (-0.88)	1.67 (-0.59)	1.75 (-0.51)
S2	Spr	3.17 (-2.67)	2.17 (-3.67)	3.02 (-2.83)
	Sum	10.56 (-0.90)	9.88 (-1.57)	11.43 (-0.02)
	Aut	4.06 (-1.01)	4.04 (-1.03)	5.71 (+0.64)
	Win	1.66 (-0.60)	1.69 (-0.57)	1.89 (-0.37)
S3	Spr	3.10 (-2.74)	2.24 (-3.60)	2.97 (-2.87)
	Sum	13.27 (+1.82)	8.98 (-2.47)	15.34 (+3.88)
	Aut	5.18 (+0.11)	4.86 (-0.21)	6.95 (+1.88)
	Win	2.20 (-0.05)	1.34 (-0.91)	1.86 (-0.40)

CanESM2에서 여름과 가을 유출량이 증가하는 것으로 분석되었으며, 이는 물 이동량 감소보다 미래 강수량 증가의 영향으로 판단된다. 극한성이 크고, 강수량이 많았던 CanESM2의 여름에 최대 3.88 m<sup>3</sup>/s 증가하였다. 반면, 극한성이 작고, 강수량이 작은 INM-CM4에서는 모든 계절 유출량이 감소하는 것으로 나타났다.

물 이동량이 감소할 경우 미래 강수량이 크게 증가하는 CanESM2에서도 봄과 겨울 하천의 유출량이 감소하는 것으로 분석되었다. 뿐만 아니라, 극한성이 작고 건조한 INM-CM4에서는 모든 계절 하천의 유출량이 감소하였다. 이에 따라 미

래 강수량이 증가하여도, 하천의 유출량 유지를 위해서 물 이동량은 일정 수준 유지되어야 할 것으로 생각된다.

### 3.3 기후변화와 유역간 물이동량 변화에 따른 하천 수질 평가

미래 기후변화에 따른 하천의 수질 변화 평가를 위해 유사 (Suspended solid, SS), 총질소(Total-Nitrogen, T-N), 총인 (Total-Phosphorus, T-P)의 월별 부하량을 분석하였다(Fig. 6). 과거 관측 Baseline에서 월별 수질을 분석하였을 때, SS의 부하량은 10월~3월 평균 300 ton/mon 이었으나 4월부터 증가



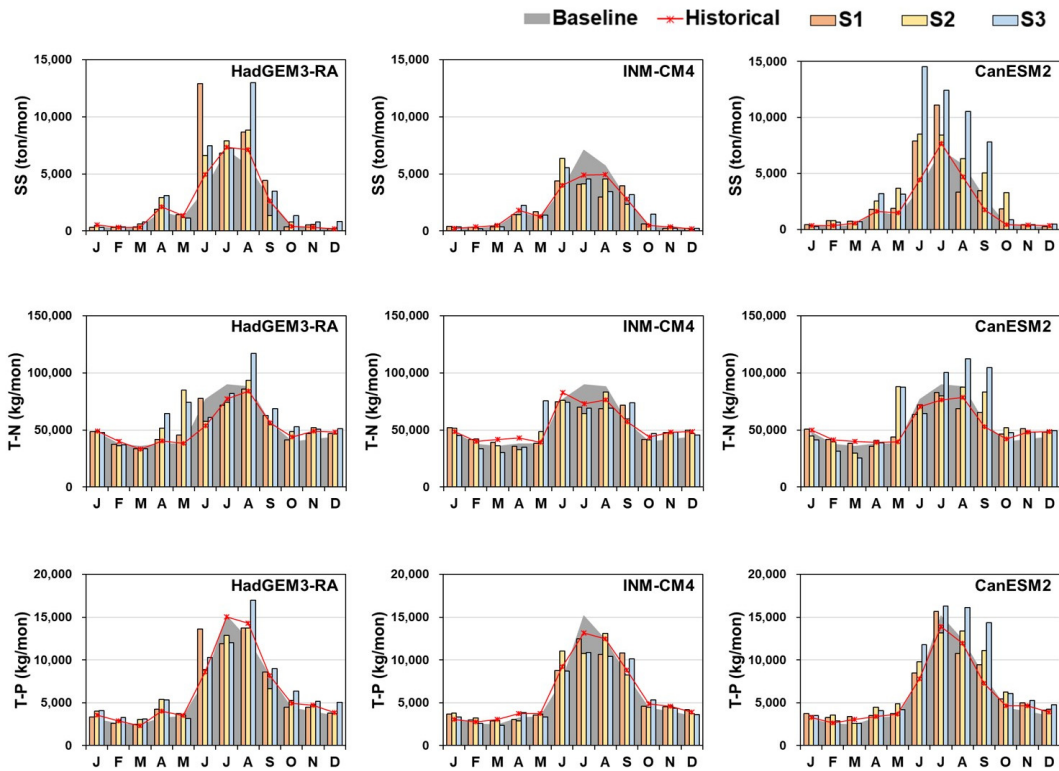


Fig. 6. Monthly water quality yields based on climate change scenarios

하여 7월 부하량은 7,065 ton/month로 가장 많은 양이 유출되었다. T-N 부하량은 3월에 35,000 kg/month로 가장 작았고, 7월에는 최대 89,500 kg/month까지 증가하였다. T-P는 SS와 월별 유출 경향성이 비슷하며, 최대 부하량은 7월에 15,000 kg/month로 분석되었다.

과거 관측 baseline과 기후변화 시나리오의 과거 Historical 기간 수질 요소를 비교하였을 때, 6월~9월에 SS, T-N 부하량의 차이가 나타났으며, T-P 부하량의 차이는 크지 않은 것으로 분석되었다. 이러한 차이는 여름철 강수량의 차이가 지표 유출과 중간, 기저 유출에 영향을 미쳤기 때문이며, 그로 인해 수질 부하량의 차이가 발생한 것으로 보인다. 강수량이 적고 건조한 INM-CM4에서 부하량이 baseline보다 작았으며, HadGEM3-RA, CanESM2에서는 baseline과 유사한 패턴으로 유출되었다.

HadGEM3-RA를 적용하였을 때, SS, T-P 부하량은 6월, 8월에 크게 증가하였으며, 이는 강수량 증가로 인한 하천의 유출량 증가의 영향으로 판단된다. T-N은 4월, 5월, 9월에 증가하는 것으로 분석되었으며, 이는 기저 유출이 증가하여 용해된 질소가 유출되었기 때문으로 판단된다. INM-CM4 시나리오에서는 과거 부하량과 유사하였으며, 여름철 유출량이 감소하여 부하량이 오히려 감소하는 것으로 분석되었다. 반면

에 극한성이 크고, 강수량이 많아 습윤한 CanESM2에서, SS의 부하량이 크게 증가하는 것으로 모의 되었으며, 특히 S3기간에 최대 14,500 ton/month까지 증가하는 것으로 분석되었다.

Table 6은 미래 물 이동량이 감소하였을 때, 수질 부하량의 변화를 정리한 것이다. 물 이동량이 감소하였으나 강수량 증가가 큰 HadGEM3-RA, CanESM2에서 유출량 증가로 인한 수질 부하량은 증가하는 것으로 나타났으며, 강수량이 작고 건조한 INM-CM4에서는 수질 부하량이 감소하거나 거의 변하지 않는 것으로 분석되었다.

CanESM2에서 SS, T-N, T-P는 각각 최대 2,690 ton/year (+136%), 9,963 kg/year (+19%), 1,853 kg/year (+32%) 증가하였다. INM-CM4에서 SS는 258 ton/year (-13%) 감소하였으나, T-N, T-P는 1,173 kg/year (+2%), 230 kg/year (+4%) 증가하였다. 미래 강수량 변화는 유출량 변화에 직접적인 영향을 미치며, 이러한 변화는 다시 토양 유실과 더불어 하천으로 유입되는 수질 오염원에 영향을 미치는 것으로 보인다. 물 이동량이 감소하여도 미래 강수량 증가로 인해, 수질 부하량 증가하였다. 이러한 부하량 증가에 따른 수질 악화를 개선하기 위해서는 일정량의 유역간 물 이동량을 유지할 필요가 있을 것으로 판단된다.

**Table 6.** Water quality yields change based on climate change scenarios and reduced inter-basin water transfer

Water Quality	baseline	Period	HadGEM3-RA	INM-CM4	CanESM2
SS (ton/year)	1,971	Historical	2,294 (+16%)	1,815 (-8%)	1,990 (+1%)
		S1	3,177 (+61%)	1,712 (-13%)	2,815 (+43%)
		S2	2,654 (+35%)	1,854 (-6%)	3,323 (+69%)
		S3	3,320 (+68%)	1,929 (-2%)	4,661 (+136%)
T-N (kg/year)	52,650	Historical	51,069 (-3%)	53,470 (+2%)	52,213 (-1%)
		S1	53,232 (+1%)	52,559 (0%)	52,946 (+1%)
		S2	56,835 (+8%)	52,510 (0%)	59,579 (+13%)
		S3	61,609 (+17%)	53,823 (+2%)	62,614 (+19%)
T-P (kg/year)	5,799	Historical	6,319 (+9%)	6,109 (+5%)	5,833 (+1%)
		S1	6,412 (+11%)	6,012 (+4%)	6,375 (+10%)
		S2	6,226 (+7%)	6,030 (+4%)	6,801 (+17%)
		S3	6,984 (+20%)	5,738 (-1%)	7,652 (+32%)

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 농경지가 많으며 유역 내 가용용수가 부족하여 유역간 물이동을 통해 용수를 공급받는 만경강 유역을 대상으로 SWAT 모형을 이용하여 미래 기후변화와 물 이동량 변화에 따른 유역의 수문 및 수질 변화를 평가하였다. 유역간 물이동량과 취수량을 고려하여 SWAT 모형의 검·보정을 수행하였다. 미래 기후변화의 불확실성을 고려하기 위해 기상청 공인 HadGEM3-RA RCP 8.5 시나리오와 STARDEX 기반으로 선정된 극한 시나리오 INM-CM4, CanESM2 RCP 8.5를 적용하였으며, 유역간 물이동이 미치는 영향을 평가하기 위해 과거 baseline 대비 물 이동량이 감소하였을 때의 수문 수질 변화를 분석하였다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) SWAT 모형의 적용을 위해 만경강유역 내 2개의 수위 관측소(전주, 대천)와 수질 관측소(삼례, 김제) 지점에 대한 유출량 및 수질 부하량을 보정(2012 ~ 2014년) 및 검증(2016 ~ 2018년)하였다. 모형의 적용성 평가 결과 유출량의 경우 평균  $R^2$ 는 0.7, NSE는 0.51, PBIAS는 9.85%, RMSE는 2.1 mm/day였다. 수질 SS, T-N, T-P의 평균  $R^2$ 는 각각 0.72, 0.80, 0.72로, 검·보정 결과 통계적으로 유의한 수준인 것으로 분석되었다.
- 2) 선정된 3개의 기후변화 시나리오를 SWAT 모형에 적용하여 유역의 수문 요소 변화를 미래 기간 S1(2010 ~ 2039년), S2(2040 ~ 2069년), S3(2070 ~ 2099년)로 구분하여 분석하였다. 과거 baseline 대비 미래 강수량은 0 ~ 39% 증가, 증발산량은 -7 ~ +8%, 토양수분 함양량은 -2 ~ +5% 변화하였다.

- 건조한 시나리오 INM-CM4에서 수문량이 감소하였으며, HadGEM3-RA, CanESM2에서는 수문량이 증가하였다. 미래 총 유출량, 지표유출량, 기저 유출량은 모두 증가하였다.
- 3) 미래 물 이동량이 감소하였을 때, 물 이동에 가장 영향을 많이 받는 소유역의 하천 유출량을 baseline의 유출량과 계절별로 구분하여 비교 결과, INM-CM4에서는 유출량이 0.21 ~ 3.60 m<sup>3</sup>/sec 감소하였다. 극한성이 크고 습윤한 CanESM2에서 유출량은 -3.24 m<sup>3</sup>/sec (S1, 봄) ~ +3.88 m<sup>3</sup>/sec (S3, 여름) 범위에서 증감하였다.
  - 4) 미래 기후변화로 인한 수질 부하량의 변화를 분석한 결과, HadGEM3-RA에서는 봄, 겨울에는 큰 차이가 없으나, 여름, 가을에 증가하였다. INM-CM4에서는 baseline의 부하량과 비슷하거나, 여름철 강수가 적어 오히려 부하량이 감소하였다. CanESM2에서는 여름철 강수 증가의 영향으로 부하량이 증가가 눈에 띄게 나타났으며, 특히 S3 기간에 부하량이 크게 증가하였다.
  - 5) 미래 물 이동량이 감소하였을 때의 수질 부하량을 baseline과 비교한 결과, SS는 -13% ~ +136% 변화가 나타났으며, INM-CM4에서만 부하량이 감소하였다. T-N은 0 ~ 19% 증가하였으며, T-P는 -1 ~ 32% 변화하였다.

본 연구에서는 미래 기후변화의 불확실성을 고려하여 기상청 공인 시나리오와 가장 극한성이 큰 2개의 시나리오를 적용하여 기후변화에 따른 수문, 수질 변화를 분석하였다. 시나리오의 특성에 따라 유역의 수문, 수질 변화 양상이 상이한 것으로 나타났으며, 이를 통해 유역 물관리 계획 수립시 다양한 시나리오를 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다. 또한, 미래 유역간 물이동량 감소는 봄과 겨울철 하천의 유출량 감소로

이어지며, 미래 강수량 증가에 따른 부하량 증가로 인한 수질 악화를 개선하기 위해 물 이동량 감소는 신중하게 선택할 필요가 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 수생태계 건강성 확보 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2020003050001).

## References

- Arnold, J.G., Moriasi, D.N., Gassman, P.W., Abbaspour, K.C., White, M.J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R.D., van Griensven, A., Van Liew, M.W., Kannan, N., and Jha, M.K., (2012). "SWAT: Model use, calibration, and validation." *Transactions of the ASABE*, ASABE, Vol. 55, No. 4, pp. 1491-1508.
- Arnold, J.G., Williams, J.R., Srinivasan, R., and King, K.W. (1996). "SWAT manual." *USDA, Agricultural Research Service and Blackland Research Center*, T.X., U.S.
- Bae, D.H., Jung, I.W., and Kwon, W.T. (2007). "Generation of high resolution scenarios for climate change impacts on water resources (I): Climate scenarios on each sub-basins." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 40, No. 3, pp. 191-204.
- Davies, B.R., Thoms, M., and Meador, M. (1992). "An assessment of the ecological impacts of inter-basin water transfers, and their threats to river basin integrity and conservation." *Aquatic conservation: Marine and freshwater ecosystems*, John Wiley & Sons Inc., Vol. 2, No. 4, pp. 325-349.
- European Union (EU) (2005). STARDEX Diagnostic Extremes Indices Software User Information, STARDEX, accessed 23 October 2018, <[https://crudata.uea.ac.uk/projects/stardex/deis/Diagnostic\\_tool.pdf](https://crudata.uea.ac.uk/projects/stardex/deis/Diagnostic_tool.pdf)>.
- Gu, W., Shao, D., and Jiang, Y. (2012). "Risk evaluation of water shortage in source area of middle route project for South-to-North Water Transfer in China." *Water resources management*, Kluwer Academic Publishers, Vol. 26, No. 12, pp. 3479-3493.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014). *Climate change 2014: Synthesis report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, p. 151.
- Jeung, S.-J., Sung, J.H., and Kim, B.-S. (2013). "Change projection of extreme indices using RCP climate change scenario." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 46, No. 11, pp. 1089-1101.
- Karamouz, M., Mojahedi, S.A., and Ahmadi, A. (2010). "Interbasin water transfer: Economic water quality-based model." *Journal of irrigation and drainage engineering*, ASCE, Vol. 136, No. 2, pp. 90-98.
- Kim, B.K., and Kim, B.S. (2009). "Analysis of impact climate change on extreme rainfall using B2 climate change scenario and extreme indices." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 29, No. 1B, pp. 23-33.
- Kim, Y.W., Lee, J.W., and Kim, S.J. (2018). "Analysis of extreme cases of climate change impact on watershed hydrology and flow duration in Geum river basin using SWAT and STARDEX." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 51, No. 10, pp. 905-916.
- Kim, Y.W., Lee, J.W., Woo, S.Y., and Kim, S.J. (2020). "Inter-basin water transfer modeling from Seomjin river to Yeongsan river using SWAT." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 53, No. 1, pp. 57-70.
- Kwon, H.-H., Kim, B.-S., and Kim, B.-K. (2008). "Analysis of precipitation characteristics of regional climate model for climate change impacts on water resources." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 28, No. 5B, pp. 525-533.
- Luzio, M.D., Srinivasan, R., and Arnold, J.G. (2002). "Integration of watershed tools and SWAT model into basins." *Journal of the American Water Resources Association*, AWWRA, Vol. 38, No. 4, pp. 1127-1141.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MOLIT) (2008). *International Hydrologic Project (IHP) research report*. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, pp. 4.1-4.48.
- Nash, J. E., and Sutcliffe, J.V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models: Part I. A discussion of principles." *Journal of Hydrology*, Elsevier BV, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., and Williams, J.R. (2001). *Soil and water assessment tool; the theoretical documentation*. U.S Agricultural Research Service, Temple, Texas, pp. 340-367.
- Santhi, C., Arnold, J.G., Williams, J.R., Dugas, W.A., Srinivasan, R., and Hauck, L.M. (2001). "Validation of the swat model on a large rwer basin with point and nonpoint sources 1." *Journal of the American Water Resources Association*, JAWRA, Vol. 37, No. 5, pp. 1169-1188.
- Schewe, J., Heinke, J., Gerten, D., Haddeland, I., Arnell, N.W., Clark, D.B., Dankers, R., Eisner, S., Fekete, B. M., Colón-González, F.J., Gosling, S.N., Kim, H., Liu, X., Masaki, Y., Portmann, F.T., Satoh, Y., Stacke, T., Tang, Q., Wada, Y., Wisser, D., Albrecht, T., Frieler, K., Piontek, F., Warszawski, L., and Kabat, P. (2014). "Multi model assessment of water scarcity under climate change." *Proceedings of the National Academy of Sciences*, National Academy of Sciences, Vol. 111, No. 9, pp. 3245-3250.
- Wang, Y., Zhang, W., Zhao, Y., Peng, H., and Shi, Y. (2016). "Modelling water quality and quantity with the influence of inter-basin water diversion projects and cascade reservoirs in the Middle-lower Hanjiang River." *Journal of hydrology*, Elsevier BV, Vol. 541, pp. 1348-1362.
- White, K.L. and Chaubey, I. (2005). "Sensitivity analysis, calibration, and validations for a multisite and multivariable SWAT model."

*Journal of the American Water Resources Association*, AWRA, Vol. 41, No. 5, pp. 1077-1089.

Zeng, Q., Qin, L., and Li, X. (2015). "The potential impact of an inter-basin water transfer project on nutrients (nitrogen and

phosphorous) and chlorophyll a of the receiving water system." *Science of the Total Environment*, Elsevier BV, Vol. 536, pp. 675-686.