

기상 관측자료 및 RCP 기후변화 시나리오를 고려한 용담댐 유입하천의 유량 및 수온변화 전망

이혜숙*[†] · 김동섭* · 황만하* · 안광국**

*한국수자원공사 K-water연구원

**충남대학교 생물학과

Assessment of Runoff and Water temperature variations under RCP Climate Change Scenario in Yongdam dam watershed, South Korea

Hye-Suk Yi*[†] · Dong-sup Kim* · Man-Ha Hwang* · Kwang-Guk An**

*K-water Institute

**Department of Biological Sciences, College of Biosciences and Biotechnology, Chungnam National University

(Received 12 October 2015, Revised 24 February 2016, Accepted 2 March 2016)

Abstract

The objective of this study is to quantitatively analyze climate change effects by using statistical trends and a watershed model in the Yongdam dam watershed. The annual average air temperature was found to increase with statistical significance. In particular, greater increases were observed in autumn. Also, this study was performed to evaluate the potential climate change in the streamflow and water temperature using a watershed model (HSPF) with RCP climate change scenarios. The streamflow of Geum river showed a decrease of 5.1% and 0.2%, respectively, in the baseline data for the 2040s and 2080s. The seasonal impact of future climate change on the streamflow showed a decrease in the summer and an increase in the winter. The water temperature of Geum river showed an average increase of 0.7~1.0°C. Especially, the water temperature of Geum river showed an increase of 0.3~0.5°C in the 2040s and 0.5~1.2°C in the 2080s. The seasonal impact of future climate change on the water temperature showed an increase in winter and spring, with a decrease in summer. Therefore, it was determined that a statistical analysis-based meteorological and quantitative forecast of streamflow and water temperature using a watershed model is necessary to assess climate change impact and to establish plans for future water resource management.

Key words : Climate change, HSPF, RCP Scenario, Statistical analysis, Yongdam dam watershed

1. Introduction

기후변화는 전세계적인 현상으로 수재해, 수질오염의 증가 등이 가능하고 수문 및 수질변화의 새로운 패턴을 야기시킬 수 있기 때문에 새로운 물관리를 위한 주요 이슈가 되고 있다. 기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)의 기후변화와 물에 관한 기술보고서에서는 지구상 모든 생명체의 필수불가결한 요소, 그리고 모든 유형의 인간활동과 생존에 있어서 가장 중요하게 인식되고 있는 수자원과 기후변화와의 상관관계를 설명하고 있으며, 수자원이 기후변화에 상당히 취약하기 때문에 생태계에 광범위하게 영향을 미칠 것이라는 증빙 및 예측자료를 제시하고 있다(IPCC, 2013). 이와 같은 기후

변화의 영향으로 전세계적으로 평균기온이 상승하고 가뭄 및 집중호우의 발생빈도가 증가하고 있으며 우리나라의 경우에도 지난 100년간 기온은 약 1.7°C 상승하여 세계기온 증가율에 비해 2.3배 상승하였고, 최근 50년 동안 강수량은 감소하고 호우발생 빈도는 증가하는 것으로 나타났다(Jung et al., 2010). 이와 같은 기후변화에 의한 미래 기온 상승과 강수량의 패턴변화는 새로운 수자원관리 패터다임을 요구하고 있음에 따라 국내외 수자원연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 수문변화와 기온의 상승은 수온변화를 유발하고 이는 수질에 직·간접적인 영향을 미치게 된다. 많은 수질항목이 온도에 의존하여 변화하고 수온의 증가는 수생태계에 필요한 수체 용존산소 농도를 감소시키고 하천의 증가된 수온은 저수지 유입후에 성층화에도 영향을 미침으로써 영양물질의 순환에도 영향을 미치게 된다(Ahn and Han, 2010; Cheon et al., 2006; Gleick and Adams, 2000; Han et al., 2008; Kim et al., 2006; Murdoch et al., 2000).

우리나라는 각 수계별 다목적댐이 운영되고 있으며 댐저수지의 수환경은 유역으로부터 유입되는 오염물질과 수체 내 거동에 의해 결정된다. 최근 기후변화에 따라 강수량과

[†] To whom correspondence should be addressed.
yihs@kwater.or.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

기온 증가로 인해 댐유역의 유량 변화와 수온증가가 발생할 수 있고 이는 댐저수지 수질에 영향을 미칠 수 있다. 이에, 다목적댐의 효율적인 수질관리를 위해서는 최근 물관리 주요 이슈인 기후변화를 고려하여 영향을 파악하여 매년 여름철 발생하는 조류 등 수질문제를 대비해야 한다. 기후변화를 평가하는 방법은 관측자료의 경향성 통계분석을 통해 영향을 파악하고, 기후변화에 관한 정부 간 협의체인 IPCC에 의해 제공되는 온실가스 시나리오 대표농도 경로 RCP 시나리오를 활용하여 댐 유역의 유량 및 수온변화를 전망할 수 있다(Nam et al., 2011). 기후변화에 따른 미래 전망을 위하여 유역모형이 적용되고 있으며 유출량 및 수문요소에 많이 적용되어 왔으며 모형의 불확실성을 줄이기 위한 노력도 지속적으로 이루어지고 있다(Bae et al., 2008; Jang et al., 2015; Kim et al., 2004; Shin et al., 2013; Shin et al., 2014; Yoon et al., 2007).

본 연구에서는 금강수계에 위치한 용담댐 저수지의 기후변화에 대응한 수질관리 의사결정에 필요한 기초 정보 제공을 목적으로 기후변화 시나리오에 의한 유출량 및 수온변화를 전망하고자 하였다. 용담댐 유역의 과거 약 30년간(1973~2014년)의 강수량, 기온의 관측값의 Mann-Kendall 검정법으로 경향성 분석을 수행하였고, RCP 기후변화 시나리오를 고려한 용담댐 유입하천의 대표지점의 유량 및 수온변화를 전망하였다.

2. Materials and Methods

2.1. 연구대상지역

본 연구의 대상유역은 금강 수계 상류의 용담댐 유역으로 북위 35°35'~36°00', 동경 127°20'~127°45'의 범위에 위치하며, 무주군, 진안군, 장수군을 포함하는 전라북도 및 충청남도, 경상남도의 경계에 있으며 주요 하천은 주자천, 정자천, 진안천, 구량천 및 금강분류로 Fig. 1에 나타내었다. 유로연장은 62.58 km이고 유역면적은 930.4 km²로 금강 유역면적의 약 9.5%를 차지하고 있다. 대부분 산지(70%)와 농업지역(21%)을 차지하고 있으며 기상관측소는 전주, 금상, 임실, 거창, 장수 총 5개 지점이 있고 환경부 수질측정망은 금본A 지점이 위치하고 있다. 용담댐 유역을 대상으로 기후변화 영향평가는 주로 유출량 및 수문순환 연구가 이루어진 바 있으며(Jung et al., 2015, Park et al., 2015) 수온 및 수질에 대한 평가는 부족한 실정이다.

2.2. 기상자료 수집 및 분석방법

기후변화로 인한 수자원에 미치는 영향을 분석하는 방법으로는 크게 관측 자료를 이용해 변화를 분석하는 방법, 기후모형을 이용하는 방법, 그리고 기후모형과 결정론적 수문모형을 이용하는 방법으로 나눌 수 있다. 관측 자료를 이용하는 방법은 주로 기후변화의 징후나 증거 분석에 이용되는 방법으로 과거의 실제 현상을 통해 기후변화의 특성을 파악할 수 있다(Kim et al., 2011). 본 연구에서는 금강수계 다목적댐 유역의 기후변화 경향을 조사하기 위하여

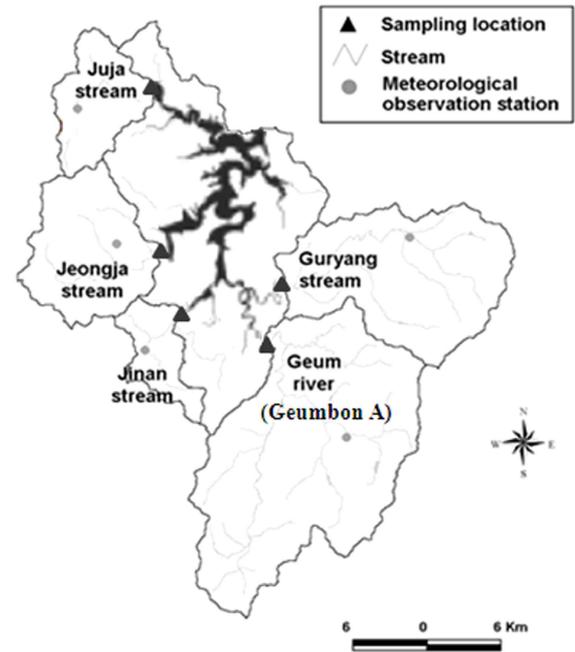


Fig. 1. Map showing study area.

기상청에서 제공하는 기상관측소의 1973년부터 2014년까지의 일별 기온, 강수량 자료를 수집하였다. 관측소의 티센가중치를 고려하여 댐저수지 대표값을 산출하여 연별 및 계절별로 추출한 후에 Mann-Kendall 검정법을 이용한 경향성을 분석함으로써 기후변화 시나리오에 의한 미래 전망뿐만 아니라 과거 관측자료 특성을 제시하여 비교하고자 하였다. Mann-Kendall 검정법은 전통적인 통계검정방법들이 모평균의 분포를 동일한 분산에 대해 정규분포로 가정하고 그 분석을 수행하는 것과 달리 단지 연속적인 모평균을 가진다는 가정아래 검정분석을 수행한다(Helsel et al., 1980). 관측치의 차이를 상대적인 크기로 계산하는 비모수 통계방법으로 통계치 Z를 산정하고 이를 유의수준(α)의 표준 통계치와 비교하여 경향을 파악한다. 이러한 특성 때문에 비정규 분포를 가지는 자료의 분석에 적합하며 시계열 자료의 경향성을 판단하는 유용한 지표로 사용된다.

2.3. 적용모형

HSPF (Hydrological Simulation Program - Fortran) 유역모형은 1960년대 초 스탠포드 유역모형(Stanford Watershed Model)으로 처음 개발되었으며 1970년대 수질 기작이 1980년대 전후처리 소프트웨어가 추가 되었고, 유역관리를 위해 많이 사용되는 모형 중의 하나이다. 미국 TMDL을 위해 개발된 BASINS을 통해 지형분석 및 방대한 입출력 자료 관리 등이 사용자가 편리하게 사용할 수 있도록 개발되어 윈도우 기반의 WinHSPF로 발전되었다. 유역모형내 적용 모듈은 투수지역의 수문 및 수질을 모의하는 PERLND, 불투수지역의 수문 및 수질을 모의하는 IMPLND, 수체 내의 수리 및 수질을 모의하는 RCHRES로 구성되어 있으며, 각 모듈은 물의 흐름과 관계된 부분, 토사유출 및 영양염류 등 수질과 관계되는 부분으로 구분되어 있다.

유역을 투수층과 불투수층으로 구분하여 각기 다른 방식으로 수문모의가 이루어지며 수문 및 수리 모의에 영향을 주는 요소는 강수, 식물 등에 의한 차단, 지표저류, 증발산, 침투, 지표수 유출, 중간 유출 및 지하수 유출 등이 있다. 수체 내 수리 모의는 흐름을 한 방향으로 보며 한 부분의 유입과 여러 방향의 유출 부분으로 구성되어 있으며, 수체의 깊이에 대한 수표면적과 저류되는 수량과의 관계는 변하지 않는다는 가정을 기초로 하고 있다. 수질 모의는 불투수 및 투수층의 오염물질의 축적 및 세정에 의하여 지표 유출, 중간 유출, 지하수 유출이 하천으로 유입되며 토사와 흡착된 오염물질, 용존 오염물질로 구분되어 하천에서 반응하게 된다.

2.4. RCP 시나리오

IPCC 4차 보고서에서는 미래 온실가스 배출에 영향을 미치는 사회경제적 요소들을 다루어 크게 4개의 SRES (Special Report on Emission Scenario, SRES) 시나리오(A1, A2, B1, B2)로 구분하였으나 5차 보고서에서의 RCP는 온실가스, 에어로솔 및 인간의 활동이 대기에 미치는 요인을 고려한 온실가스농도를 산정하였다. RCP 시나리오는 정확도 향상 및 다양한 분야에서 활용성을 고려한 필요성이 제기되어 개발되었으며, 복사강제력(radiative forcing)에 따라 4개의 시나리오(RCP 2.6, 4.5, 6.0, 8.5)로 구분되어 있다. 본 연구에서는 기상청에서 제공하는 남한 상세(1km) 기후변화 시나리오를 활용하였다. 이 시나리오는 지역기후모델인 Had-GEM3-RA를 통해 생산된 한반도(12.5km) 기후변화 시나리오를 바탕으로 관측자료(2000~2010)를 통계적 상세화하여 1km 해상도의 관측격자 자료로 생산한 기후값으로 일강수량, 일평균기온, 일최고기온 및 일최저기온 값을 유역모형에 적용하였다. 남한 상세 기후변화 시나리오의 신뢰도는 Bias는 일평균기온과 일강수량 모두 계절에 상관없이 매우 낮게 나타났으며, RMSE는 일강수량의 경우 1.80~6.63 mm, 일평균기온 0.27~0.86°C, 일최고기온 0.31~1.03°C, 일최저기온 0.27~1.31°C로 분석된 바 있다(Kim et al, 2012, Kim et al, 2013).

3. Results and Discussion

3.1. 기상 관측자료의 경향성 분석

금강수계 용담댐 유역의 기상 관측자료 경향성을 평가하기 위하여 연강우량과 연평균기온 그리고 계절별 특성을 분석하기 위하여 봄철(3~5월), 여름철(6~8월), 가을철(9~11월), 겨울철(12~2월)로 추출하였다. 유량 및 댐 유입량과 상관성이 높은 강수량의 경우 여름철 증가 경향성이 통계적으로 유의한 것을 제외하고는 증가 경향성이 나타나지 않았다. 반면에 기온의 경향성 분석 결과, 연평균 기온과 가을, 겨울철에 통계적으로 유의하게 증가 경향성이 나타났으며 Table 1에 통계값을 나타내었다. 이와 같은 특성은 Fig. 2에 나타낸 그래프를 통한 경향성에서도 확인할 수 있으며 강우량의 경우 년도별로 지속적으로 증가하는 경향성 보다는 증가와 감소가 반복되어 나타나면서 전체적으로 증가하는 경향이 나타났으며 특히, 여름철에 강우량 증가가 뚜렷하게 나타나고 봄철과 겨울철에는 통계적으로 유의하지는 않지만 점진적으로 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 기온의 경우에는 강우량과는 달리 지속적인 증가 경향성이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 과거 관측값을 활용한 통계분석을 통해 대상지의 특성을 분석할 수는 있으나 기후변화에 의한 장단기적인 물관리 계획 수립을 위한 자료 제공에는 한계점이 존재할 수 있다.

3.2. 용담댐 유역 RCP 시나리오 분석

기상청에서 400년 제어적분으로 제공되는 1km 해상도의 RCP 2.6, 4.5, 6.0 및 8.5 기후변화 시나리오에 대하여 연강수량, 일평균기온, 일최고기온 및 일최저기온을 2040s (2021~2060년), 2080s (2061~2100년)로 구분 및 추출한 후에 Baseline (2003~2010년)에 대한 변화율을 분석하였다. Baseline 기준은 댐 건설이후 시나리오 관측기간인 2010년까지로 설정하였다. 연강수량의 경우, RCP 2.6에서는 2040s에는 3.1%, 2080s에는 2.0% 감소하는 것으로 나타났으며 RCP 4.5, 6.0 및 8.5에서는 2080s에 4.4%, 3.9% 및 5.6%로 점차 증가하는 것으로 전망되었다. 평균기온의 경우에는

Table 1. Mann-Kendall trend analysis results for precipitation and air temperature in Yongdam dam watershed

Items		Mann-Kendall				
		Slope	Z	p	Trend	
					= 0.1	= 0.05
Precipitation	Annual	4.260	1.214	0.225	-	-
	Spring	-1.013	-1.257	0.209	-	-
	Summer	5.016	1.821	0.069	▲	-
	Autumn	0.6991	0.282	0.778	-	-
	Winter	-0.4475	-0.954	0.340	-	-
Temperature	Annual	0.0182	2.761	0.006	▲	▲
	Spring	0.0177	1.902	0.057	▲	-
	Summer	0.0177	1.651	0.099	▲	-
	Autumn	0.033	2.650	0.008	▲	▲
	Winter	0.019	1.303	0.192	-	-

* ▲ : trend increase, ▽ : trend decrease, - : not

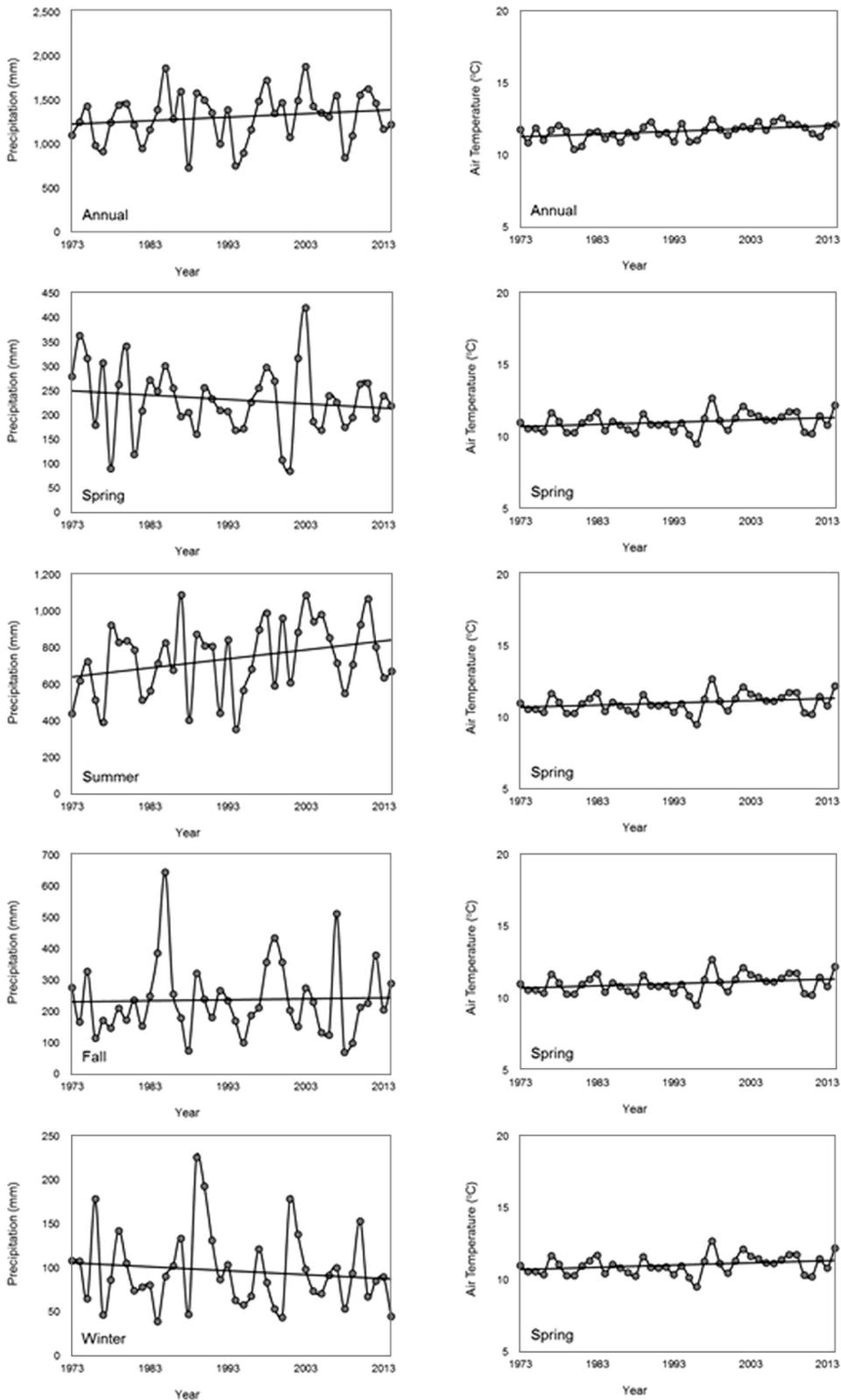


Fig. 2. Yearly, seasonal precipitation (left graph) and air temperature (right graph) trend line of Yongdam dam watershed (1973 ~ 2014).

RCP 2.6에서는 2040s와 2080s에 1.2°C, 1.3°C 증가하는 것으로 전망되었으며 RCP 4.5, 6.0 및 8.5에서는 각각 2080s에 2.0°C, 2.0°C 및 3.5°C 증가하는 것으로 전망되었다. 최

고기온과 최저기온의 경우에도 평균기온과 유사한 증가폭을 나타내었으며 RCP 8.5에서 2080s에 최저기온 3.4°C, 최고기온 3.6°C 증가하는 것으로 전망되었다(Table 2).

Table 2. Yearly, seasonal precipitation (left graph) and air temperature (right graph) trend lines for Yongdam dam watershed (1973 ~ 2014)

Period	Scenario	PCP (mm)	Tmean (°C)	Tmin (°C)	Tmax (°C)	
Annual	Baseline	1588.0	10.4	4.9	16.7	
	RCP 2.6	2040s	1538.7 (-3.1%)	11.6 (+1.2°C)	6.2 (+1.3°C)	17.9 (+1.2°C)
		2080s	1556.8 (-2.0%)	11.6 (+1.3°C)	6.0 (+1.1°C)	17.9 (+1.3°C)
	RCP 4.5	2040s	1574.2 (-0.9%)	11.4 (+1.0°C)	5.8 (+0.9°C)	17.7 (+1.0°C)
		2080s	1658.2 (+4.4%)	12.3 (+2.0°C)	6.9 (+2.0°C)	18.7 (+2.0°C)
	RCP 6.0	2040s	1564.9 (-1.5%)	10.8 (+0.4°C)	5.3 (+0.4°C)	17.1 (+0.4°C)
		2080s	1650.1 (+3.9%)	12.3 (+2.0°C)	6.9 (+2.0°C)	18.6 (+1.9°C)
	RCP 8.5	2040s	1567.7 (-1.3%)	11.5 (+1.2°C)	6.0 (+1.1°C)	17.9 (+1.2°C)
		2080s	1677.4 (+5.6%)	13.9 (+3.5°C)	8.3 (+3.4°C)	20.3 (+3.6°C)

* PCP : Precipitation, Tmean : Mean temperature, Tmin : Minimum temperature, Tmax : Maximum temperature

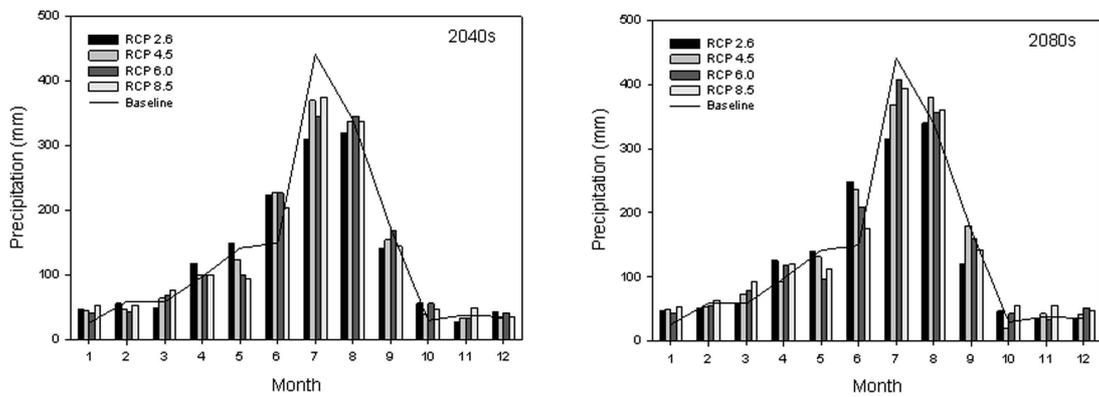


Fig. 3. Monthly precipitation changes under the RCP 2.6, 4.5, 6.0 and 8.5 scenarios in the 2040s (left graphs) and 2080s (right graph).

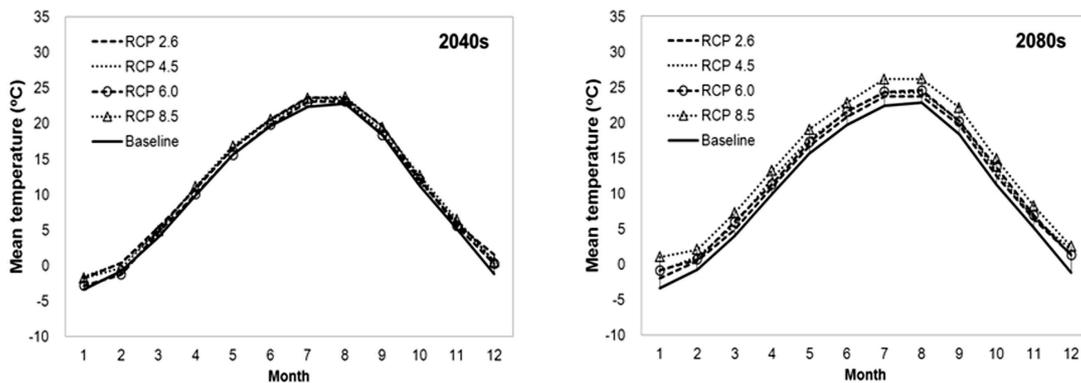


Fig. 4. Monthly mean temperature under the RCP 2.6, 4.5, 6.0 and 8.5 scenarios in the 2040s (left graphs) and 2080s (right graph).

RCP 기후변화 시나리오에 의한 월별 변화를 분석한 결과, 연강수량의 경우에는 2040s에는 여름철(7~9월)보다는 봄철(3~5월)과 겨울철(12~2월) 증가폭이 크게 나타났으며 2080s에는 여름철 증가폭이 더욱 커지는 것으로 전망되었으며 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. 평균기온의 경우에는

2040s에는 겨울철(12~2월) 증가폭이 RCP 2.6, 4.5, 6.0 및 8.5 각 시나리오에서 1.1~2.7°C, 1.0~1.9°C, -0.5~1.4°C 및 0.4~1.7°C의 범위로 가장 크게 나타났으며 2080s에도 마찬가지로 겨울철 증가폭이 컸으며 2040s에 비해 가을철 증가폭도 커지는 것으로 전망되었다.

3.3. 기후변화에 따른 용담댐 유입하천의 유량 및 수온변화 전망

3.3.1. 모형 구축

HSPF 모형을 적용하기 위하여 필요한 입력자료는 지형 자료, 토지피복도, 토양도 및 기상자료로 구분할 수 있다. 용담댐 유역의 30m × 30m DEM으로부터 Flow Direction과 Flow Accumulation을 계산하여 하천망을 생성시킨 후, 하천도 및 유역도, 수질측정지점을 고려하여 30개 소유역으로 구분하였다. 공간적으로 변화하는 유역내 수문현상 및 토사발생 모의에 필요한 입력자료 구축을 위해 DEM, 하천도 및 유역도를 사용하여 각 소유역별 면적, 경사도, 유역의 평균길이 등 지형특성을 추출하였으며 유역내 침투 및 유출을 모의할 수 있도록 구축하였다. 기상자료와 점오염원 부하량은 WinHSPF 자료관리 프로그램인 WDMUtil을 활용하여 소유역별 wdm 파일로 생성하였다.

3.3.2. 유역모형의 적용성 평가

HSPF 모형의 적용성 평가를 위해 2008~2009년을 안정화기간으로 설정하고, 2010~2014년의 최근 5년간을 대상으로 모의하였다. 모형의 보정은 모형의 초기조건과 매개변수를 유역의 조건에 맞도록 일치시키는 과정으로 계산된 값과 측정된 값이 가장 잘 일치할 때의 매개변수 값을 추정하는 것이다. 본 연구에서는 모형의 재현성을 평가하기 위하여 R² (Correlation coefficient) 및 NSE (Nash-Sutcliffe efficiency)를 산정하여 적용성을 평가하였으며 계산식은 Table 3에 나타내었다. 이 때, Q_{obs,i}는 i 시간에 실측치, Q_{pred,i}는 i 시간에 예측치, Q_{obs}는 실측치의 평균, Q_{pred} : 예측치의 평균, n은 실측치와 예측치 쌍의 개수를 의미한다.

Table 3. Equation used to estimate goodness-of-fit measures

Notation	NSE	R ²
Equation	$1 - \frac{\sum_i^n (Q_{obs,i} - Q_{pred,i})^2}{\sum_i^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs,i}})^2}$	$1 - \frac{\left(\sum_i^n Q_{obs,i} \times Q_{pred,i} - n \overline{Q_{obs}} \times \overline{Q_{pred}} \right)^2}{\left(\sum_i^n Q_{obs}^2 - n \overline{Q_{obs}}^2 \right) \left(\sum_i^n Q_{pred}^2 - n \overline{Q_{pred}}^2 \right)}$

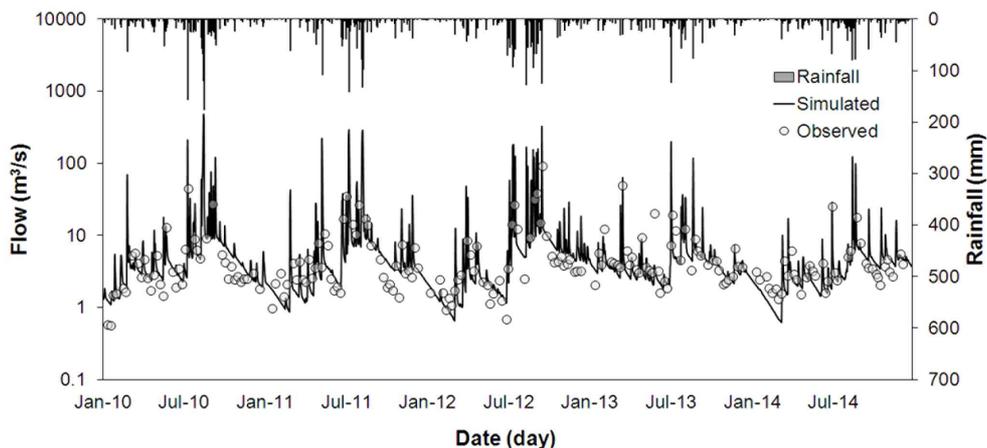


Fig. 5. Comparison of the observed and simulated daily flow for Geumbon A in Yongdam dam watershed.

Table 4. Statistical efficiency of calibration results for flow and water temperature

Year	Flow		Water temperature	
	R ²	NSE	R ²	NSE
2010	0.84	0.83	0.94	0.93
2011	0.83	0.82	0.93	0.91
2012	0.88	0.63	0.91	0.89
2013	0.73	0.56	0.93	0.93
2014	0.80	0.79	0.96	0.94

수질오염총량지점인 금본 A 지점에 대한 유출량 적용성 평가 결과, Table 4에 나타낸 것과 같이 R²값은 0.73~0.88, NSE값은 0.56~0.83로 나타나 모의된 유량이 실측유량을 잘 모의하는 것으로 판단되었다. 수온 적용성 평가 결과에서도 R²값은 0.91~0.96, NSE값은 0.89~0.94로 높은 예측력을 확인하여 모형이 자연현상을 잘 재현하는 것으로 분석되었다(Fig. 5~6). R²값은 유출량과 수온의 경우, 기온 등에 의한 반응 민감도를 평가할 수 있고, NSE값은 모의치와 실측치의 침투값 차이의 민감도를 평가할 수 있는 값으로 각각 다른 특성을 항목을 이용하여 모형의 모의능력을 평가하고자 하였다. 이와 같은 통계항목을 통해 모형의 자연현상 재현력이 검증된 후에는 미래 예측을 위하여 적용가능하다고 판단되며 용담댐 유역의 유량 및 수온관측지점 및 강우시 자료의 부족 등 한계점이 있어 정밀한 측정자료가 뒷받침 된다면 모형 적용의 불확실성이 개선될 수 있을 것으로 판단된다.

3.3.3. 용담댐 유역의 유량 및 수온변화 전망

HSPF 모형을 적용성을 평가한 후에 RCP 기후변화 시나

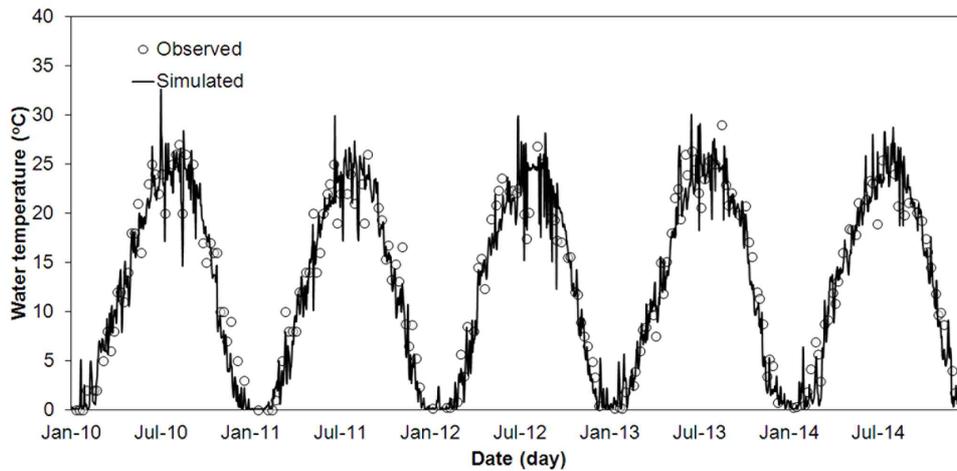


Fig. 6. Comparison of the observed and simulated daily water temperature for Geumbon A in Yongdam dam watershed.

리오 적용에 따른 용담댐 유역 주요 5개 하천에서의 연평균 유량 변화를 전망하여 Table 5와 Fig. 7에 나타내었다. 2040s와 2080s로 구분하여 비교한 결과, RCP 2.6 시나리오

에서는 모두 감소하였으며 금강분류인 금본 A 지점에서 2040s에 5.1%, 2080s에 0.8% 감소하는 것으로 전망되었다. RCP 4.5와 RCP 6.0 시나리오의 경우에는 연평균 유량이

Table 5. Annual mean streamflow changes in major streams in the Yongdam dam watershed

Stream	Scenario	Jeongja	Juja	Jinan	Guryang	Geum river (Geumbon A)	
Annual mean	Baseline	2.53	1.50	1.77	4.29	7.45	
	RCP 2.6	2040s	2.41 (-5.0%)	1.42 (-5.0%)	1.67 (-5.4%)	4.07 (-5.1%)	7.07 (-5.1%)
		2080s	2.52 (-0.6%)	1.49 (-0.6%)	1.75 (-1.0%)	4.26 (-0.8%)	7.39 (-0.8%)
	RCP 4.5	2040s	2.54 (+0.1%)	1.50 (+0.1%)	1.76 (-0.3%)	4.29 (-)	7.45 (-)
		2080s	2.74 (+8.2%)	1.62 (+8.2%)	1.90 (+7.9%)	4.64 (+8.1%)	8.05 (+8.1%)
	RCP 6.0	2040s	2.66 (+5.1%)	1.57 (+5.1%)	1.85 (+4.6%)	4.50 (+4.9%)	7.81 (+4.9%)
		2080s	2.71 (+6.8%)	1.60 (+6.8%)	1.88 (+6.4%)	4.58 (+6.7%)	7.95 (+6.7%)
	RCP 8.5	2040s	2.57 (+1.2%)	1.51 (+1.2%)	1.78 (+0.7%)	4.34 (+1.0%)	7.53 (+1.0%)
		2080s	2.59 (+2.3%)	1.53 (+2.2%)	1.80 (+1.9%)	4.39 (+2.2%)	7.61 (+2.2%)

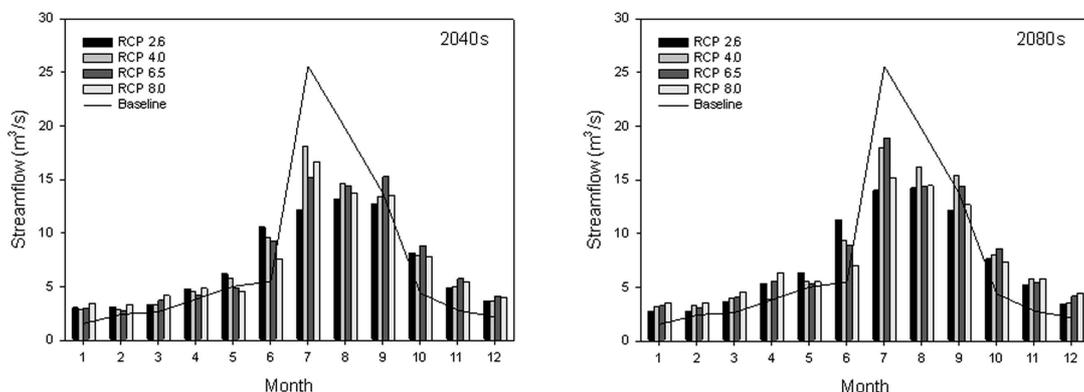


Fig. 7. Monthly streamflow changes for Geum river (Geumbon A) under the RCP 2.6, 4.5, 6.0 and 8.5 scenarios in the 2040s (left graphs) and 2080s (right graph).

Table 6. Water temperature changes in major streams in the Yongdam dam watershed

Stream	Scenario		Seokjoeng	Juja	Jinan	Guryang	Geum river
Annual mean	Baseline		13.4	13.1	11.6	12.3	12.2
	RCP 2.6	2040s	13.9 (+0.6°C)	14.0 (+0.9°C)	12.3 (+0.8°C)	12.9 (+0.7°C)	12.6 (+0.4°C)
		2080s	14.0 (+0.6°C)	14.0 (+0.9°C)	12.4 (+0.9°C)	13.0 (+0.8°C)	12.7 (+0.5°C)
	RCP 4.5	2040s	13.8 (+0.5°C)	13.9 (+0.8°C)	12.2 (+0.6°C)	12.8 (+0.6°C)	12.6 (+0.4°C)
		2080s	14.1 (+0.7°C)	14.1 (+1.0°C)	12.6 (+1.0°C)	13.2 (+0.9°C)	12.9 (+0.7°C)
	RCP 6.0	2040s	13.8 (+0.5°C)	13.9 (+0.8°C)	12.2 (+0.6°C)	12.8 (+0.6°C)	12.5 (+0.3°C)
		2080s	14.2 (+0.8°C)	14.2 (+1.1°C)	12.7 (+1.1°C)	13.3 (+1.0°C)	13.0 (+0.8°C)
	RCP 8.5	2040s	14.0 (+0.6°C)	14.0 (+0.9°C)	12.4 (+0.8°C)	13.0 (+0.7°C)	12.7 (+0.5°C)
		2080s	14.5 (+1.1°C)	14.5 (+1.4°C)	13.2 (+1.6°C)	13.7 (+1.4°C)	13.4 (+1.2°C)

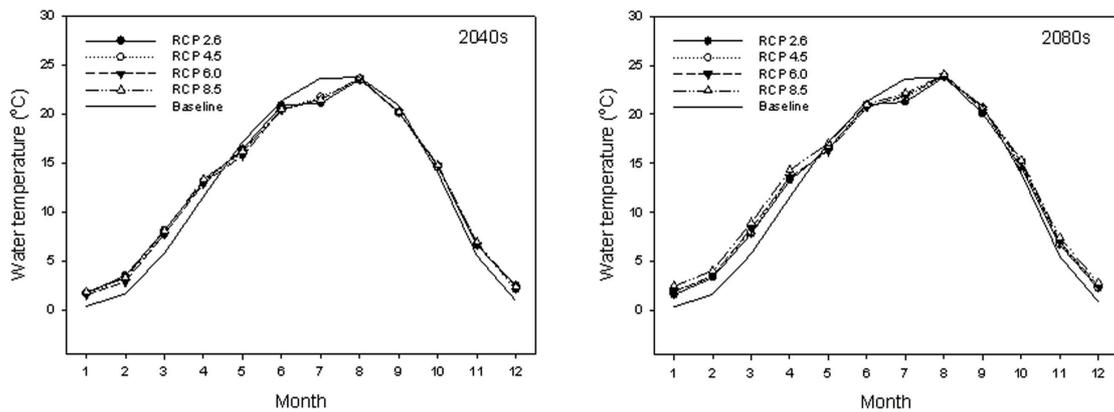


Fig. 8. Monthly water temperature changes for Geum river (Geumbon A) under the RCP 2.6, 4.5, 6.0 and 8.5 scenarios in the 2040s (left graph) and 2080s (right graph).

증가하는 것으로 나타났으며 2040s에서보다 2080s에 증가율이 높은 것으로 전망되었다. RCP 4.5 시나리오에서는 2040s에 변동폭이 거의 없었고 2080s 시나리오에서는 평균 8.1% 증가하는 것으로 전망되었다. RCP 6.0 시나리오의 경우에는 2040s에 평균 4.9%의 증가하는 것으로 전망되었고 2080s에는 평균 8.1% 증가율이 전망되었다. 그리고 RCP 8.5 시나리오 경우에는 2040s와 2080s의 증가율이 유사하게 나타났다. 금강본류인 금본 A 지점의 계절별 변동성은 여름철(7~9월)에는 유량이 감소하고 겨울철(12~2월) 증가율이 높은 것으로 나타났으며 이는 연강수량 변동성에 의한 것이며 2040s보다 2080s의 강수량 증가율이 다소 높아지는 것으로 전망되었다.

용담댐 유역 주요 하천의 RCP 기후변화 시나리오 적용에 따른 수온변화를 분석한 결과를 Table 6과 Fig. 8에 나타내었다. RCP 2.6, 4.5, 6.0 및 8.5의 각 시나리오별로 2040s에는 평균 0.7°C, 0.6°C, 0.6°C, 0.7°C, 증가하였으며 2080s에는 평균 0.7°C, 0.9°C, 1.0°C, 1.3°C, 증가하는 것으로 나타나 2040s보다 2080s에 증가율이 높은 것으로 전망

되었다. 금강본류인 금본 A지점의 경우에는 RCP 기후변화 시나리오에 적용에 따라 2040s에는 0.3~0.5°C 증가하였으며 2080s에는 0.5~1.2°C 증가하는 것으로 전망되었으며 계절별 변동성의 경우에는 겨울철과 봄철에는 수온이 증가하고 여름철에는 다소 감소하는 것으로 전망되었다. 그리고, 2040s에 비해 2080s에 수온이 증가하는 것으로 나타났으며 가을철 변동성은 상대적으로 작은 것으로 전망되었다.

4. Conclusion

본 연구에서는 금강수계에 위치하고 있는 용담댐 유역을 대상으로 과거 약 30년간(1973~2014년)의 강수량, 기온의 관측값의 경향성 분석을 수행하였고, RCP 기후변화 시나리오에 의한 미래 기후변화, 이에 따른 용담댐 유입하천의 유량 및 수온변화를 전망하였다. 기상청에서 제공하는 RCP 기후변화 시나리오에 대하여 연강수량, 일평균기온, 일최고 및 일최저기온을 2040s, 2080s으로 구분하여 변화율을 분석하였다. 연강수량의 경우, 2040s보다 2080s에 증가하는

것으로 전망되었으며, 평균기온의 경우에도 2040s보다 2080s에 증가하는 것으로 전망되었다. 계절별 변화를 분석한 결과, 연강수량의 경우에는 2040s에는 여름철보다는 봄철과 겨울철 증가폭이 크게 나타났으며 2080s에는 여름철 증가폭이 더욱 커지는 것으로 전망되었다. 평균기온의 경우에는 2040s에는 겨울철 증가폭이 크게 전망되었으며 2080s에는 가을철 증가폭도 다소 전망되었다.

HSPF 유역모형의 적용성을 평가한 후에 RCP 기후변화 시나리오에 따른 용담댐 유역 주요 하천의 유량과 수온변화를 전망하였다. 환경부 수질오염총량측정지점인 금본 A 지점에 대한 유출량 적용성 평가 결과, 모형이 자연현상을 잘 모의하는 것으로 나타났다. 2040s와 2080s로 구분하여 하천유량을 비교한 결과, RCP 각 시나리오별 평균 -5.1~8.1% 변화하였으며 2040s에서보다 2080s에 증가율이 높은 (최대 8.1%) 것으로 나타났다. 계절별 변동성의 경우에는 여름철에는 유량이 감소하고 겨울철 증가율이 높은 것으로 나타났다. 수온 변화를 분석한 결과, RCP 각 시나리오별 평균 0.7~1.0°C 증가하였으며 2040s보다 2080s에 증가율이 높은 것으로 전망되었다. 금강분류 지점에서 RCP 기후변화 시나리오에 적용에 따라 2040s에는 0.3~0.5°C 증가하였으며 2080s에는 0.5~1.2°C 증가하는 것으로 전망되었다. 계절별 분석 결과, 겨울철과 봄철에는 수온이 증가하고 여름철에는 다소 감소하는 것으로 전망되었다.

본 연구는 용담댐 유역의 기상관측자료의 경향성을 분석하고 미래 기후변화를 전망하고 이로 인한 하천유량과 수온변화를 전망함으로써 기후변화 대응한 용담댐 저수지 수질관리에 필요한 기초자료로 제공하고자 하였다. 수온의 증가는 수체내 용존산소의 감소 등 하천 수질과 생태계 서식 환경에 영향을 주는 요인으로 향후 수질 및 비점오염물질 변화에 대한 연구가 추가적으로 이루어짐으로써 기후변화에 대응한 하천 및 댐저수지 물관리를 위한 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 국토교통부 물관리사업의 연구비지원(14AWMP-B082564-01)에 의해 수행되었습니다.

References

- Ahn, J. H. and Han, D. H. (2010). Projected Climate Change Impact on Surface Water Temperature in Korea, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 26(1), pp. 133-139. [Korean Literature]
- Bae, D. H., Jung, I. W., and Chang, H. (2008). Long-term Trend of Precipitation and Runoff in Korean River Basins, *Hydrological Processes*, 22(14), pp. 2644-2656.
- Cheon, S. U., Lee, J. A., Lee, J. J., Yoo, Y. B., Band, K. C., and Lee, Y. J. (2006). Relationship Among Inflow Volume, Water Quality and Algal Growth in the Daecheong Lake, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 22(2), pp. 342-348.
- [Korean Literature]
- Gleick, P. H. and Adams, D. B. (2000). *Water: The potential Consequences of Climate Variability and Changes*, A Report of the National Water Assessment Group, U.S. Global Changes Research Program.
- Han, J. H. and An, K. G. (2008). Water Quality Variation Dynamics Between Artificial Reservoir and Effected Downstream Watershed: The Case Study, *Korean Journal of Limnology*, 41(3), pp. 382-394. [Korean Literature]
- Helsel, D. R., Mueller, D. K., and Slack, J. R. (1980). *Computer Program for the Kendall Family of Trend Tests*, Scientific investigation report 2005-5275, US. Geological Survey.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013). *Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jang, S. S., Ahn, S. R., Joh, H. K., and Kim, S. J. (2015). Assessment of Climate Change Impact on Imha-Dam Watershed Hydrologic Cycle under RCP Scenarios, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 18(1), pp. 156-169. [Korean Literature]
- Jung, C. M., Shin, M. J., and Kim, Y. O. (2015). A Comparison Study of Runoff Projections for Yongdam Dam Watershed Using SWAT, *Journal of Korea Water Resources Association*, 48(6), pp. 439-449. [Korean Literature]
- Jung, I. W., Bae, D. H., and Kim, G. (2010). Recent Trends of Mean and Extreme Precipitation in Korea, *International Journal of Climatology*, doi: 10.1002/joc.2068
- Kim, B. S., Kim, H. S., Seoh, B. H., and Kim, N. W. (2004). Impact of Climate Change on Yongdam Dam Basin, *Journal of Korea Water Resources Association*, 37(3), pp. 185-193. [Korean Literature]
- Kim, M. G., Han, M. S., Jang, D. H., Baek, S. G., Lee, W. S., Kim, Y. H., and Kim, S. (2012). Production Technique of Observation Grid Data of 1km Resolution, *Journal of Climate Research*, 7(1), pp. 55-68. [Korean Literature]
- Kim, M. G., Lee, D. H., and Kim, J. (2013). Production and Validation of Daily Grid Data with 1km Resolution in South Korea, *Journal of Climate Research*, 8(1), pp. 13-25. [Korean Literature]
- Kim, T. G. (2006). Variational Characteristics of Nutrient Loading in Inflow Streams of the Yongdam Reservoir Using Flow-Loading Equation, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 15(2), pp. 129-138. [Korean Literature]
- Kim, H. R., Yi, H. S., and Shin, J. K. (2011). Analysis of A1B Climate Change Scenario in the Watersheds of 15 Multi-purpose Dams in South Korea, *Korean Journal of Limnology*, 44(2), pp. 187-194. [Korean Literature]
- Murdoch, P. J., Baron, J. S., and Miller, T. L. (2000). Potential Effects of Climate Change on Surface-water Quality in North America, *Journal of The American Water Resources Association*, 36, pp. 347-366.
- Nam, K. P., Kang, J. E., and Kim, C. H. (2011). Analysis of Climate Change Characteristics Observed over the Korean Peninsula for the Estimation of Climate Change Vulnerability Index, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 20(6),

- pp. 891-905. [Korean Literature]
- Park, J. Y., Jung, H., Jang, C. H., and Kim S. J., (2015). Assessing Climate Change Impact on Hydrological Components of Yongdam Dam Watershed Using RCP Emission Scenarios and Swat Model, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 56(3), pp. 19-29. [Korean Literature]
- Shin, C. M., Na, E. Y., Lee, E. J., Kim, D. G., and Min, J. H. (2013). Operational Hydrological Forecast for the Nakdong River Basin Using HSPF Watershed Model, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 29(2), pp. 212-222. [Korean Literature]
- Shin, C. M., Na, E. Y., Lee, E. J., Kim, D. G., and Kim, K. H. (2014). Operational Water Temperature Forecast for the Nakdong River Basin Using HSPF Watershed Model, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 30(6), pp. 673-682. [Korean Literature]
- Yoon, C. G., Shin, A. H., Jung, K. W., and Jang, J. H. (2007). A Study on BASINS/WinHSPF for Evaluation of Non-point source Reduction Efficiency in the Upstream of Nam-Han River Watershed, *Journal of Korea Society on Water Environment*, 23(6), pp. 951-960. [Korean Literature]