Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers
DOI : https://doi.org/10.5389/KSAE.2016.58.6.093

Vol. 58, No. 6, pp. 93~100, November 2016
ISSN 1738-3692 | eISSN 2093-7709

기후변화에 따른 고삼저수지의 환경유량 영향평가

Assessment of Environmental Flow Impacts for the Gosam Reservoir According to Climate Change

윤태형* · 강호영* · 김종석** · 문영일*†
Yoon, Tae Hyung · Kang, Ho Young · Kim, Jong Suk · Moon, Young Il

Abstract

This study conducted a quantitative assessment on the environmental flows associated with climate change in the Gosam Reservoir, Korea. The application of RCP 8.5 climate change scenario has found that the peak value of High Flow Pulses has increased by 36.0 % on average compared to historical data (2001 ~ 2010), which is likely to cause disadvantage on flood control and management but the increase in peak value is expected to make a positive impact on resolving the issue of green algal blooms, promoting vegetation in surrounding areas and encouraging spawning and providing habitats for native species by releasing a larger amount of landslides as well as organic matters than the past. However, the decreasing pattern of the peak value of High Flow Pulses is quite apparent with the trend of delay on the occurrence time of peak value, necessitating a long-term impact analysis. The peak value of Large Floods shows a clear sign of decrease against climate change scenario, which is expected to lead to changes in fish species caused by degraded quality of water and decreasing habitats. A quicker occurrence of Small Floods is also expected to make an impact on the growth cycle of aquatic plants, and the reduction in occurrence frequency of Extreme Low Flows is to contribute to increasing the population of and raising the survival rate of native fish, greatly improving the aquatic ecosystem. The results of this study are expected to be useful to establish the water environment and ecological system in adapting or responding to climate change.

Keywords: Climate Change; Hydrologic Alterations; Environmental Flow Impacts; Gosam Reservoir

Ⅰ. 서 론

기후변화에 의한 영향은 가뭄 및 홍수, 해수면 상승, 육상 및 해상 생태 종의 개체 수 변화, 작물 수확량의 감소 등 인간과 자연시스템에 걸쳐 광범위하게 나타나고 있으며, 대부분 긍정적인 영향보다는 부정적인 영향이 지배적으로 나타나고 있다 (IPCC, 2014). 기후변화에 따른 영향은 우리나라도 예외는 아니며, 과거대비 홍수의 발생빈도 및 규모가 상당히 증가하고 있으며, 가뭄의 발생지역은 지역규모에서 전국단위로 확대되어 가는 양상이 자주 나타나고 있다 (KMA, 2009; ME·NIER, 2015). 그러나 아직까지 국내에서는 기후변화로 증가된 중호우 사상에 대비한 설계가 제대로 반영되지 못하고 있는 게 현실이다 (Park et al., 2015). 또한, 최근 들어 국지성 호우에 의한 저수지 유입량의 증가와 저수율 상승에 따른 수압에 의해 노후화된 저수지 붕괴사례가 증가하고 있으며, 이에 대한 대비책 마련이 시급한 실정이다 (NDMI, 2013; Park et al., 2010).

기후변화에 대한 연구로는, Jung et al. (2008)은 장기유출모형인 PRMS, SLURP, SWAT모형을 적용하여 강수와 기온자료를 바탕으로 합성시나리오를 구축하였으며, 기후변화에 따른 수자원의 영향평가를 실시하여 수자원 중장기 계획 수립을 위한 가이드라인을 제시하고자 하였다. Moon et al. (2012)는 기후변화시나리오의 통계적 상세화 기법을 적용하여 SWAT 모형을 통한 합천 댐 저수지의 유입량 및 수질변화를 전망하였다. Nam et al. (2014)는 이수측면에서 농업용 저수지 용수공급의 기후변화 대응 능력을 평가하였다. Choo et al. (2015)은 RCP 기후변화시나리오에 따른 SWAT 모형의 모의를 통해 장기적 댐 유입량 변화를 분석한 바 있다. Okkan et al. (2015)은 A1B, A2, B1 시나리오에 대한 기계학습방법을 통하여 터키의 Kemer 댐의 미래 월 유입량과 통계적 분석을 실시하였다.

생태환경시스템에 대한 기후변화 영향평가에 관한 연구로는, Richter et al. (1996)은 수자원의 인위적 사용에 의해 발생하는 수문학적 변동성을 정량적으로 평가하기 위한 방법으로 수문변화지표법을 제안하였다. Gao et al. (2009)은 수문변화지표법의 지표 간 상호 연관성으로 인해 나타나는 결과의 중복성을 최소화하기 위해 독립성과 대표성을 갖는 수문변화지

* Civil Engineering, University of Seoul
** Urban Flood Research Institute, University of Seoul
† **Corresponding author**
Tel.: +82-2-6490-5600 Fax: +82-2-6490-5604
E-mail: ymoon@uos.ac.kr
Received: September 22, 2016
Revised: October 24, 2016
Accepted: October 26, 2016

표를 제시하였다. Poff et al. (2010)은 환경유량을 평가하기 위한 수문변동에 대한 생태학적 경계 (Ecological Limits Of Hydrologic Alteration, ELOHA)에 대한 연구를 수행하였다. 이를 통해 유량변동과 이에 따라 나타나는 생태학적 반응 간의 관계를 명확히 하여 종합적인 환경유량 관리 시스템 구축을 위한 가이드라인을 제시하고자 하였다. 그러나 국내에서는 아직까지 기후변화에 대한 영향평가는 치수와 이수적 관점의 단순한 변동특성만을 평가하여 왔으며, 건강한 생태환경시스템 구축을 위한 다양한 환경영향지표를 통한 정량적 분석에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 기후변화에 따른 물 환경 및 수 생태시스템에 미치는 지역적 영향을 정량적으로 평가하기 위해 수문변화지표법 (Indicators of Hydrologic Alteration, IHA)을 적용하였으며, 다양한 환경유량지표를 통해 고삼저수지 유역의 수문학적 변화뿐만 아니라 환경 및 생태학적 측면에서의 영향을 평가하여 기후변화 대응 및 적응을 위한 유용한 자료를 제공하고자 하였다.

II. 대상유역 및 분석방법

1. 대상 유역

본 연구의 대상유역은 경기도 안성시 고삼면 월향리에 위치하고 있는 고삼저수지이다. 고삼저수지 유역은 주 하천인 한천의 상류부에서 저수지 유입부까지의 유로길이가 12.7 km로 정비가 비교적 잘 되어 있어 홍수 시 저수지로의 유입이 원활하게 이루어질 수 있는 지형적 조건을 갖추고 있다. 고삼저수지의 유역면적은 71 km^{2}이고, 제체의 높이는 17.1 m, 길이는 174 m인 중심코어형 필댐 형식으로 구축되어 있다. 산림이 전체 유역의 61.5 %을 차지하고 있으며, 논 15.6 %, 밭 11.2 %, 기타 11.7 %의 순으로 분포되어있다. 다음 Figure 1은 고삼저수지 유역도를 나타내고 있으며, 저수지 제원에 대한 설명은 Table 1에 제시되어 있다.

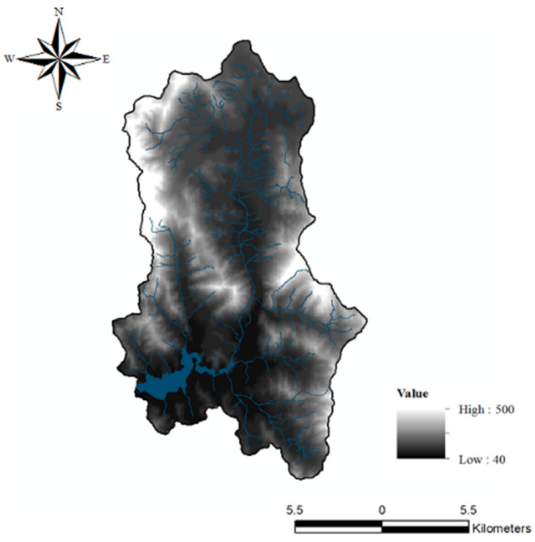

Fig. 1 Basin Map of the Gosam Reservoir

2. 대상자료 및 분석방법

본 연구에서는 기후변화에 따른 농업용 저수지의 환경 영향 평가를 위해 고삼저수지 유역을 대상으로 RCP 8.5 기후변화시나리오를 적용하였다. 기후변화에 관한 정부 간 협의체 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)에서 제시한 RCP 온실가스 시나리오를 바탕으로 CMIP5 GCM (General Circulation Model) 모델 중 우리 나라 국가표준시나리오인 HadGEM2-AO모형을 포함한 26개의 GCMs 모형 (Table 2)을 검토하여 한반도 강수에 대한 지속성, 극치사상, 공간모의 능력을 고려하여 중앙치 모델인 HadGEM2-ES를 적용하였다. 그러나 HadGEM2-ES 모델은 해상도가 1.875 × 1.250 km로 본 연구의 대상유역에 적용하기에는 해상도가 낮으므로 종관기상관측시스템 (Automated Synoptic Observing System, ASOS) 관측지점에 대한 일 단위의 기후시나리오에 대해서 대표적으로 사용되고 있는 BCSD (Bias Correction/Spatial Disaggregation)와 기후변화시나리오의 장기적 추세를 반영할 수 있는 QDM (Quantile Delta Mapping) 기법을 결합한 통계적 상세화 (Statistical Downscaling) 결과를 적용하여 나온 시나리오를 이용하였다(Cannon et al., 2015; Eum et al., 2016).

저수지의 유입량을 산정하기 위해 대표적인 장기유출모형인 TANK 모형을 통하여 유출분석을 실시하였다. TANK 모형은 유역의 수문기상학적 특성을 고려할 수 있고 순별, 일별 유출자료를 산출하여 이를 통한 유량변화 분석이 용이한 특징

Table 1 Information of the Gosam Reservoir

Index			Specifications
Reservoir	Area	Basin Area (km^2)	71
		Flood Area (km^2)	2.29
	Storage Volume	Total (10^3 m^3)	16105
		Effective (10^3 m^3)	15217
Levee Body		Type	Earth-Cored Fill Dam
		Height (m)	17.1
		Length (m)	174

Table 2 CMIP5 GCM Models

No.	GCM Model	Resolution	Development Institution
1	HadGEM2-AO	1.875 × 1.250	Met Office Hadley Centre (United Kingdom)
2	HadGEM2-ES		
3	HadGEM2-CC		
4	MICRO5	1.406 × 1.401	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo)
5	BCC-CSM1-1-M	1.125 × 1.122	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration
6	BCC-CSM1-1	2.813 × 2.791	
7	CMCC-CM	0.750 × 0.748	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamementi Climatici
8	CMCC-CMS	1.875 × 1.865	
9	CNRM-CM5	1.406 × 1.401	Centre National de Recherches Meteorologiques
10	CanESM2	2.813 × 2.791	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis
11	GFDL-ESM2G	2.500 × 2.023	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
12	GFDL-ESM2M		
13	INM-CM4	2.000 × 1.500	Institute for Numerical Mathematics
14	IPSL-CM5A-MR	2.500 × 1.268	Institut Pierre-Simon Laplace
15	IPSL-CM5A-LR	3.750 × 1.895	
16	IPSL-CM5B-LR		
17	MIROC-ESM-CHEM	2.813 × 2.791	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies
18	MIROC-ESM		
19	FGOALS-s2	2.813 × 1.659	LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences
20	MPI-ESM-LR	1.875 × 1.865	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)
21	MPI-ESM-MR		
22	MRI-CGCM3	1.125 × 1.122	Meteorological Research Institute
23	CCSM4	1.250 × 0.942	National Center for Atmospheric Research
24	CESM1-BGC		
25	CESM1-CAM5		
26	NorESM1-M	2.500 × 1.895	Norwegian Climate Centre

이 있다. TANK 모형의 입력자료 구축을 위하여 국가수자원관리종합정보시스템 (Water Resource Management Information System, WAMIS)에서 제공하는 유역도 및 토지피복도를 이용하였다. 또한, 강우입력자료를 구축하기 위해서 유역 주위의 기상관측소를 바탕으로 Thiessen Network를 구축하여 유역평균강우량을 산출하였다. 유역의 잠재 증발산량은 지배관측소에서 관측된 기상자료 (평균풍속, 최고온도, 최저온도, 평균온도, 평균상대습도, 일조시간)를 입력자료로 하여 Penman-Monteith 방법을 적용하여 산정하였다.

TANK 모형의 매개변수 최적화는 평균제곱근오차 (Root Mean Squared Error, RMSE)를 목적함수로 하여, SCE-UA (Shuffled Complex Evolution-University of Arizona) 탐색기법을 적용하여 수행하였다. 유출모형의 매개변수 검·보정은 과거 10년 (2001 ~ 2010)의 자료를 이용하였으며, 전반부 5개년 (2001 ~ 2005)의 관측자료에 대한 검정과 후반부 5개년 (2006 ~ 2010)의 관측자료에 대한 보정을 통해 수행하였다.

마지막으로, 기후변화에 따른 환경유량 영향 평가를 위해 RCP 8.5 기후변화시나리오 (2011 ~ 2099)를 통해 산출된 유입량 모의결과를 적용하였으며, 수문변화지표법에 의한 대표적인 환경유량지표인 HFPs (High Flow Pulses), LFs (Large Floods), SFs (Small Floods), ELFs (Extreme Low Flows)에 대한 통계적 변동특성을 분석하였다. 환경유량지표는 환경유량의 종류에 따라 다음과 같은 기준에 의해 분류하였다. SFs는 2년 빈도보다 더 큰 첨두치를 갖는 초기 High Flow로 산정하였고, LFs는 10년 빈도보다 더 큰 첨두치를 갖는 초기 High Flow를 적용하였다. SFs나 LFs로 분류되지 않는 모든 초기 High Flow는 HFPs로 분류하며, 분석기간 내의 일 유량의 10 % 이하인 초기 Low Flow를 ELFs로 산정한다. 이 때,

Table 3 Information of Environmental Flow Components (EFCs)

EFC Type	Hydrologic Parameters	Ecosystem Influences
HFPs	– Frequency of high flow pulses during each water year or season – Mean or median values of high flow pulse event a) Duration (days) b) Peak flow (maximum flow during event) c) Timing (Julian date of peak flow) d) Rise and fall rates	– Shape physical character of river channel, including pools riffles. – Determine size of streambed substrates (sand, gravel, and cobble). – Prevent riparian vegetation from encroaching into channel. – Restore normal water quality conditions after prolonged low flows, flushing away waste products and pollutants. – Aerate eggs in spawning gravels, prevent siltation. – Maintain suitable salinity conditions in estuaries.
LFs	– Frequency of large floods during each water year or season – Mean or median values of large flood event a) Duration (days) b) Peak flow (maximum flow during event) c) Timing (Julian date of peak flow) d) Rise and fall rates	– Maintain balance of species in aquatic and riparian communities. – Create sites for recruitment of colonizing plants. – Shape physical habitats of floodplain – Deposit gravel and cobbles in spawning areas – Flush organis materials (food) and wood debris (habitat structures) into channel. – Purge invasive, introduced species from aquatic and riparian communities.
SFs	– Frequency of small floods during each water year or season – Mean or median values of small flood event a) Duration (days) b) Peak flow (maximum flow during event) c) Timing (Julian date of peak flow) d) Rise and fall rates	– Provide migration and spawning cues for fish – Trigger new phase in life cycle – Enable fish to spawn in floodplain, provide nursery area for juvenile fish. – Provide new feeding opportunities for fish, waterfowl – Recharge floodplain water table – Deposit nutrients on floodplain
ELFs	– Frequency of extreme low flows during each water year or season – Mean or median values of extreme low flow event a) Duration (days) b) Peak flow (maximum flow during event) c) Timing (Julian date of peak flow)	– Enable recruitment of certain floodplain plant species – Purge invasive, introduced species from aquatic and riparian communities – Concentrate prey into limited areas to benefit predators

Source: TNC (2009)

분석기간 내의 일 유량의 75 %를 초과하는 모든 유량을 초기 High Flow, 나머지 유량은 초기 Low Flow로 적용하였다. EFCs에 변화에 따른 생태학적 영향은 Table 3을 참조할 수 있다.

III. 분석결과

1. 장기유출모형의 매개변수 검·보정

장기유출모형의 매개변수 검·보정을 위하여 관측 값과 모의 값에 대한 RMSE를 목적함수로 하고, SCE-UA 탐색기법을 적용하였다. 과거 10년 (2001 ~ 2010) 관측자료 중 5개년 (2001 ~ 2005)자료를 이용하여 매개변수를 검정하고, 나머지 5개년 (2006 ~ 2010)자료에 대해서는 매개변수 보정을 실시하였다. 그 결과, 검정기간 (2001 ~ 2005)에 대해서 상관계수는 0.90를 보였으며, RMSE 1.38, MAE 0.58로 양호한 결과가 도출되었다. 보정기간 (2006 ~ 2010)에 대해서도 상관계수 0.92, RMSE 1.10, MAE 0.63으로 관측유량에 대한 모의가 잘 수행된 것으로 분석되었다. 과거 관측자료의 전체 기간 (2001 ~ 2010)에 대한 모의 결과에서는 RMSE 1.79로 약간 상승하기는 했지만, 상관계수 0.91로 관측유출량과 모의유출량과의 적합이 잘 된 것으로 나타났다. 전체 적용 기간 동안 관측유량의 유출률의 범위는 29.80 % ~ 70.26 %, 평균 유출률은 50.61 %로 나타났으며 유출률이 가장 높은 해는 2008년으로 분석되었다.

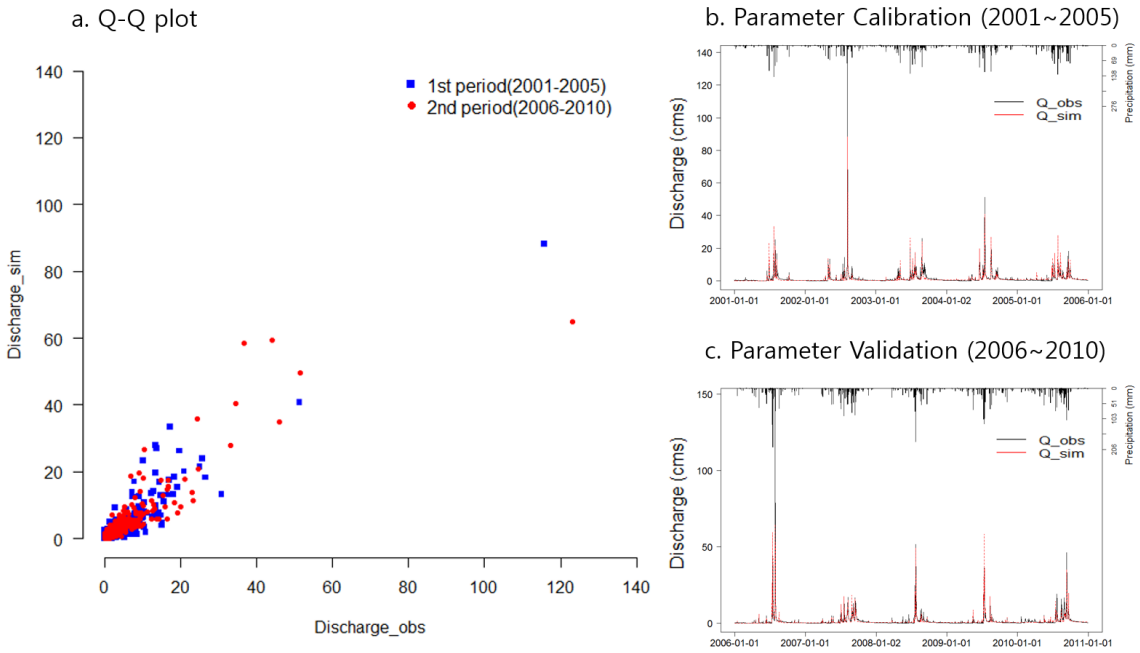

Fig. 2 Calibration and Validation of Tank Model Parameters (2001~2010)

2. 기후변화시나리오 적용을 통한 유량 변화 분석

미래의 기후변화가 대상유역의 유출에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 RCP 8.5 기후변화시나리오에 대한 GCM모델인 HadGEM2-ES를 이용하였다. ASOS 관측지점에 대한 일 단위의 기후시나리오에 대해서 BCSD와 기후변화 시나리오의 장기적 추세를 반영한 QDM기법을 결합한 통계적 상세화 결과를 적용하였다. 고삼저수지 유역의 기후변화 전망자료를 분석한 결과, 과거 자료 (1976 ~ 2010) 대비 21세기 말 (2071 ~ 2099)의 기온과 강수량이 증가하는 것으로 나타났다. RCP 8.5 기후변화시나리오의 경우, 기온은 5.67 ℃ 증가할 것으로 전망되고 있으며, 강수량은 약 28.7 % 증가하는 것으로 모의되었다.

기후변화의 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 기후변화 시나리오를 통해 생산된 수문정보를 TANK모형의 입력변수로 적용하여 고삼저수지 유역의 유입량 변화를 모의하였다. 과거자료와 기후변화 시나리오 자료에 대한 월별 유입량 자료를 비교한 결과(Figure 3), 계절별 유량 변화패턴이 전반적으로 양호하게 모의되고 있는 것으로 나타났다. 홍수기인 6월과 9월사이의 평균유입량은 과거자료와 기후시나리오의 결과에서 큰 차이를 보이고 있지는 않으나, 월별 변동폭은 기후시나리오를 적용하였을 경우 더 크게 나타났다. 특히, 6월 유입량의 경우, 관측유입량의 변동계수가 0.40로 나타났으나 시나리오 적용결과는 1.16으로 평균유입량은 50 % 증가하였

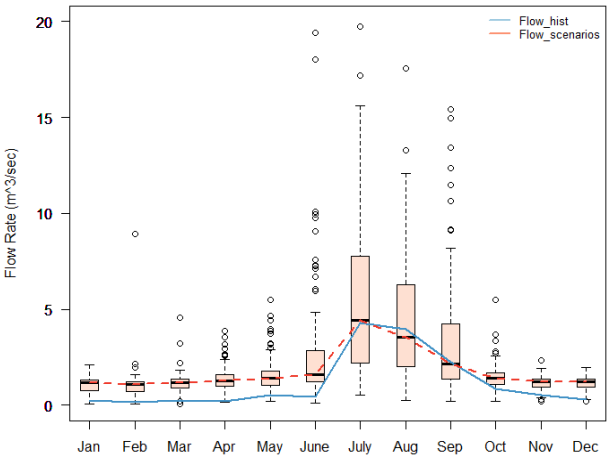

Fig. 3 Monthly Runoff Estimated by Historical Data (2001~2010) and Climate Change Scenarios (2011~2099)

으며 변동폭도 90 이상 더 커지는 경향을 보이는 것으로 분석되었다. 갈수기 (10월 ~ 5월)의 월별 평균유입량의 변화는 관측자료 대비 50.5 % ~ 82.4 % 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 변화는 유량-유황곡선 (Flow Duration Curve, FDC)에서도 확인할 수 있다.

Figure 4는 고삼저수지 유역의 유량규모와 변동성을 평가하기 위하여 관측 일 유입량 자료와 RCP 8.5 시나리오를 적용하여 유출모의를 통해 도출된 일 단위의 전망자료 분석 자료

를 적용하여 초과 확률별 일 유량을 정리하여 유량-유황곡선을 도시한 결과를 보여주고 있다. 그림에서도 보이는 바와 같이, 기후변화시나리오를 적용하였을 경우 유량-유황곡선이 평활화되는 경향을 보이고 있으며, 이는 기후변화 상황 하에서 유입량의 증가로 인하여 과거에 비하여 상위 20 % 이하의 비교적 중-저유량이 많이 나타나고 있음을 의미한다.

Figure 5는 과거자료 (2001 ~ 2010)와 기후변화시나리오 (2011 ~ 2099) 적용에 따른 계절별 유량의 변화를 도시하고

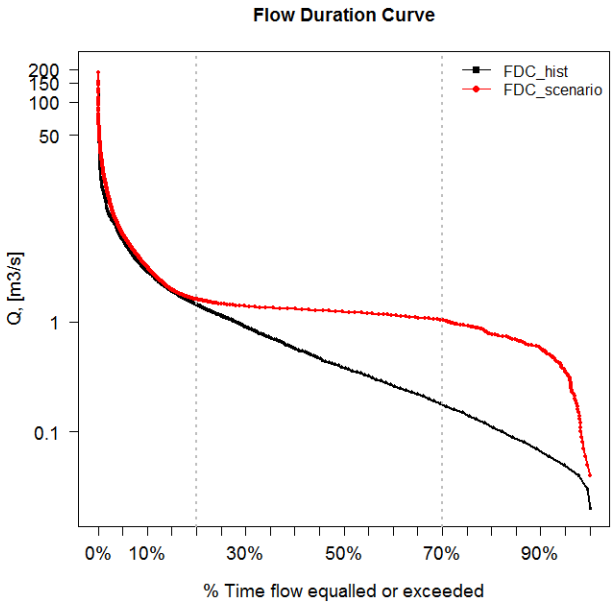

Fig. 4 Flow Duration Curve for Historical Data (2001~2010) and Climate Change Scenarios (2011~2099)

있다. 연 유량의 변화의 경우 과거에 비하여 기후변화시나리오 적용 시, 평균 53.15 % 증가하는 것으로 나타났으며 변동폭 (C.V: 0.365)도 커지는 경향을 보이는 것으로 분석되었다. 계절유량에서 가장 큰 차이는 보이는 시기는 여름철인 것으로 나타났으며 평균 유량이 44.04 % 증가를 보이고 있으며 변동계수는 0.592로 상대적으로 큰 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 시나리오 기간을 3구간 (S_1: 2011 ~ 2040, S_2: 2041 ~ 2070, S_3: 2071 ~ 2099)으로 나누어 분석한 결과에서도 볼 수 있다. 계절별로 약간의 차이를 보이고는 있으나 기후변화시나리오를 적용하였을 경우 계절평균유량이 44.04 % ~ 71.3 % 증가하는 경향을 보이고 있으며 S_3 (2071~2099)기간에서 변동성이 다른 기간보다 크게 나타나고 있다.

3. 기후변화에 따른 환경유량 변화분석

유역의 수문학적 변동특성을 정량적으로 파악하는 것은 이수와 치수뿐만 아니라 환경적인 측면에서도 중요한 일이며, 특히 환경유량의 변화는 생태계의 구조와 기능 조절에 중요한 역할을 할 수 있기 때문에 면밀한 분석이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 기후변화시나리오를 적용하여 대표적인 환경유량관련 지표들에 대한 평가를 실시하였으며, 각각의 환경지표들의 변동추세 결과는 다음 Table 4와 같다.

Table 3에서 제시한 바와 같이, 환경유량지표 중 HFPs (High Flow Pulses)는 강우 이후에 발생하며 수온을 감소시키고 용존산소량을 증가시키기 때문에 하천생태계에 미치는 영향이 크다. 또한, 하도 주변의 식생이 과도하게 번식되는 것을 막고, 많은 양의 토사와 유기물을 하류로 내보내기 때문에

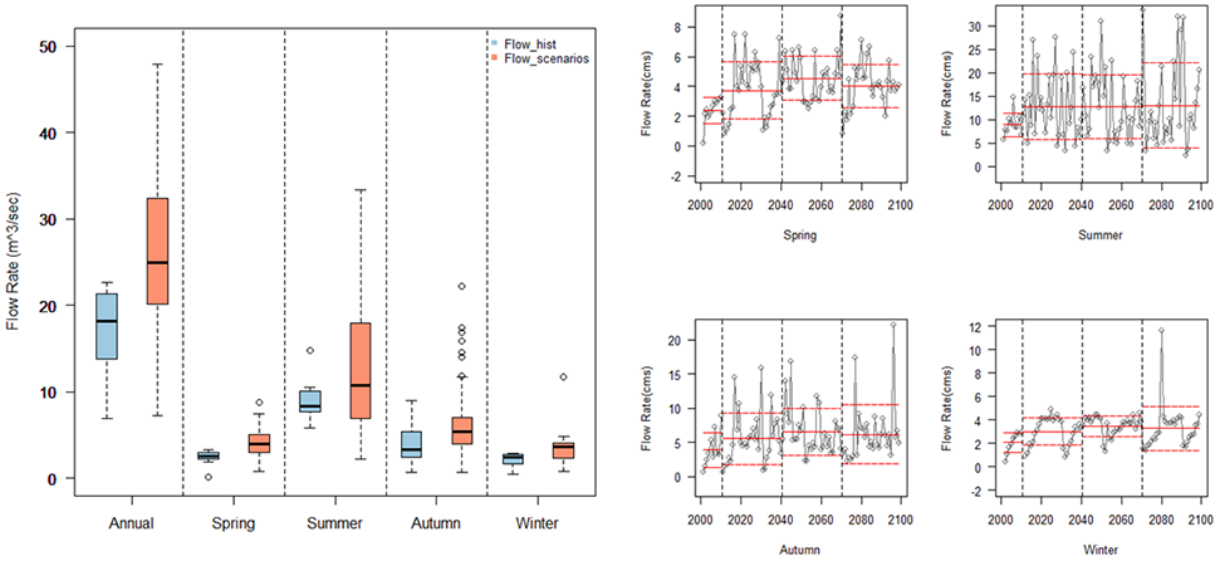

Fig. 5 Seasonal Runoff Estimated by Historical Data (2001~2010) and Climate Change Scenarios (2011~2099)

Table 4 Trend in Environmental Flow Components

	Peak	Timing	Duration	Frequency	Rise Rate	Fall Rate
HFPs	⬇	⬆	⇩	⇧	⬇	⇧
LFs	⬇	⇩	⇧	⇧	⇩	⇧
SFs	⇩	⬇	⇧	⇩	⇩	⇩
ELFs	⇧	⇩	⇩	⬇	–	–

조류 및 외래종의 어류증식을 막고, 토종 어류의 산란 및 서식처를 제공해주는 특징이 있다. 그러나 기후변화시나리오의 적용 결과, HFPs의 첨두치는 감소되고 있으며 발생 시기는 지연되는 경향을 보이는 것으로 나타났다. HFPs의 증가율 또한 뚜렷하게 감소하는 경향을 보이고 있어 기후변화조건하에서 수생태계 환경에 부정적인 영향을 미칠 수 있을 것으로 예상된다. LFs (Large Floods)의 경우, 자주 발생하지 않지만, HFPs와 마찬가지로 많은 양의 토사와 유기물을 이동시키고, 치어 (Juvenile Fish)들에게 영양분이 풍부한 새로운 서식처를 제공하여 준다. LFs에 대한 경향성 분석결과, 첨두치의 통계적으로 유의한 감소패턴이 나타나 수질의 문제와 서식지 감소에 따른 어종의 변화를 유발할 수 있을 것으로 전망된다. SFs (Small Floods)의 경우, 2-10년 빈도로 발생하며, SFs의 증가는 물새, 가축방목, 쌀 생산량 증가와 관련되어 있으며, 수 생태식물의 성장을 촉진하고 외래 어종의 유입을 감소시키는 역할을 한다. 기후변화시나리오 적용 시, SFs의 발생 시기는 빨라지는 경향을 보이고 있으며 다른 요소들은 통계적으로 뚜렷한 변화는 나타나지 않았다. ELFs (Extreme Low Flows)는 가뭄이 발생하는 기간에 나타나며 토종어류의 개체수 증가와 생존율 향상과 연관성이 높다. ELFs를 자연상태 수준으로 유지한다면 가뭄기간 동안 서식처의 개선과 수 생태식물의 성장에 유리한 조건을 제공할 수 있다. 기후변화시나리오 적용 시 ELFs의 첨두치는 약간 증가하지만 지속시간이 감소하는 경향을 보이고 있으며, 특히 ELFs의 발생빈도가 현저히 저하되는 경향을 보이고 있어 수생태계 환경이 개선될 것으로 전망된다. 그러나 아직까지 국내에서는 환경유량지표의 변화에 따른 수생태계의 영향에 대한 연구가 미흡한 실정이기 때문에 대상유역에 대한 관측자료와 사례연구 및 지역연구를 통한 환경영향평가 및 지속 가능한 생태환경시스템 구축을 위한 가이드라인 제시가 필요할 것으로 사료된다.

IV. 결 론

환경유량은 하천의 첨두 유량 변화, 발생 시기, 빈도, 지속기간 등의 다양한 요소를 평가하여 하천의 유황변화가 수생태계에 미치는 영향을 고려한 지속 가능한 생태환경을 구축하기 위하여 필요하다. 따라서 본 연구에서는 고삼저수지 유역을 대상으로 수문변화지표 모형을 적용하여 기후변화에 따른 환경유량의 변화를 평가하였으며, 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 기후변화시나리오 적용을 통한 유량분석 결과, 연 유입량의 경우 과거자료 (2001 ~ 2010)와 비교하여 평균 53.2 % 증가하는 것으로 나타났으며, 계절유량의 변화가 가장 큰 시기는 여름철 (C.V: 0.592)인 것으로 분석되었다. 기후변화 조건을 적용하였을 경우, 과거 관측자료에 비해 유량-유황곡선 (FDC)이 평활화되는 경향을 보이고 있어 중-저유량의 발생빈도가 높아지고 있는 것으로 나타났으며, 갈수기의 월별 평균유입량은 50.5 % ~ 82.4 % 증가되는 것으로 분석되었다.
2. 수문지표모형을 통한 환경유량변화를 분석한 결과, HFPs의 첨두치는 관측자료 (2001 ~ 2010) 보다 기후변화시나리오를 적용 시 평균 36.0 %가 증가되는 것으로 나타났으며, 과거보다 하류에 많은 양의 토사와 유기물을 보내어 주변식생과 토종어류의 산란 및 서식처 제공에 긍정적인 영향을 미칠 수 있을 것으로 전망되었다. 기후변화시나리오 적용 시, HFPs 첨두치의 감소패턴이 뚜렷하며, 첨두치의 발생시간이 지연되는 경향을 보여 장기적인 영향 검토가 필요한 것으로 나타났다. LFs 첨두치의 경우, 과거대비 61.1 %의 증가가 전망되었고, 지속시간은 과거보다 길어지는 경향이 나타났다. 그러나 LFs 첨두치의 변화는 뚜렷한 감소경향을 보이는 것으로 나타나 수질의 문제와 서식지 감소에 따른 어종변화가 나타날 것으로 전망되었다. 빨라진 SFs의 발생시기로 인하여 수생태계 식물의 성장 주기에 영향을 미칠 수 있을 것으로 예상되며, ELFs의 발생빈도의 현저한 저하는 토종어류의 개체 수 증가와 생존율 향상에 기여하는 등 수생태계 환경이 많이 개선될 것으로 전망되었다.

본 연구의 결과는 제한된 자료를 통한 유출분석과 기후변

화시나리오 적용을 통한 유역의 수문결과의 불확실성 한계가 있지만, 향후 장기간의 자료축적을 통한 유출모형의 매개변수 최적화, 대상유역의 확장, 다중모델앙상블 모델을 통한 기후모델적용 등 불확실성을 고려한 정확도 높은 평가가 이루어진다면 기후변화 대응 및 적응을 위한 물 환경 및 생태환경 시스템 구축하는 데에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 연구사업 (PJ011686022016)의 지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Cannon, A. J., S. R. Sobie, and T. Q. Murdock, 2015. Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes?. *Journal of Climate* 28(17): 6938-6959.
2. Choo, T. H., H. S. Ko, H. C. Yoon, H. S. Noh, and H. S. Son, 2015. The Estimation and Analysis of Miryang Dam Inflow based on RCP Scenario. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society* 16(5): 3469-3476 (in Korean).
3. Eum, H. I., A. J. Cannon, and T. Q. Murdock. Intercomparison of Multiple Statistical Downscaling Methods: Multi-Criteria Model Selection for South Korea. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 1-21.
4. Gao, Y., R. M. Vogel, C. N. Kroll, N. L. Poff, and J. D. Olden, 2009. Development of Representative Indicators of Hydrologic Alteration, *Journal of Hydrology* 374(1): 136-147.
5. 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 [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
6. Joen, B. S., 2009. Hydrometeorologic Policy Direction according to the Climate Change, *Meteorological Technology & Policy* 2(2): 1-2 (in Korean).
7. Jung, I. W., B. J. Lee, T. H. Jun, and D. H. Bae, 2008. Hydrological Model Response to Climate Change Impact Assessments on Water Resources. *Journal of Korea Water Resources Association* 41(9): 907-917 (in Korean).
8. Kim, B. S., B. K. Kim, and H. H. Kwon, 2011. Assessment of the Impact of Climate Change on the Flow Regime of the Han River Basin using Indicators of Hydrologic Alteration, *Hydrological Processes* 25(5): 691-704.
9. Lee, J. K., 2013. The Research Report on Safety Assessment and Reinforcement Method in Small Dams and Reservoirs, 14-15. RD-13-R6-081. Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation (in Korean).
10. Ministry of Environment and National Institute of Environmental Research, 2015. Korean Climate Change Assessment Report 2014, 31-34. Incheon, Korea (in Korean).
11. Moon, S. J., J. J. Kim, and B. S. Kang, 2012. Future Dam Inflow and water Quality in Hapcheon Dam Reservoir Projected using Downscaled RCM Model Output. *38th Korean Society of Civil Engineers Convention* 581-584 (in Korean).
12. Nam, W. H., E. M. Hong, T. Kim, and J. Y. Choi, 2014. Projection of Future Water Supply Sustainability in Agricultural Reservoirs under RCP Climate Change Scenarios. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(4): 59-68 (in Korean).
13. National Disaster Management Research Institute, 2013. Report: Levee Failure of the Sandae Reservoir in Gyeongju City, 2-6 (in Korean).
14. Okkan, U. and G. Inan, 2015. Statistical Downscaling of Monthly Reservoir Inflows for Kemer Watershed in Turkey: Use of Machine Learning Methods, Multiple GCMs and Emission Scenarios, *International Journal of Climatology* 35(11): 3274-3295.
15. Park, K. B., K. S. Kim, S. H. Cha, and S. S. Ahn, 2015. Assessment on Flood Control Ability of Small Agricultural Reservoir due to Climate Change. *2015 Korean Society of Hazard Mitigation Conference* 278-278 (in Korean).
16. Park, J. Y., H. K. Joh, I. K. Jung *et al*., 2010. Modeling Downstream Flood Damage Prediction Followed by Dam-break of Small Agricultural Reservoir. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 52(6): 63-73 (in Korean).
17. Poff, N. L., J. D. Allan, M. B. Bain *et al*., 1997. The Natural Flow Regime, *BioScience* 47(11): 769-784.
18. Poff, N. L., B. D. Richter, A. H. Arthington *et al*., 2010. The Ecological Limits of Hydrologic Alteration (ELOHA): A New Framework for Developing Regional Environmental Flow Standards, *Freshwater Biology* 55(1): 147-170.
19. Richter, B. D., J. V. Baumgartner, J. Powell, and D. P. Braun, 1996. A Method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems, *Conservation Biology* 10(4): 1163-1174.
20. The Nature Conservancy (TNC), 2009. Indicators of Hydrological Alteration, Version 7.1. User's Manual.
21. Wikipedia, Environmental flow. https://en.wikipedia.org/wiki/Environmental_flow#cite_note-16. Accessed 12 Sep. 2016.