기후변화와 수리구조물의 영향을 고려한 금강유역의 미래 수문순환 특성 변화 분석

Analysis of Future Hydrological Cycle considering the Impact of Climate Change and Hydraulic Structures in Geum River Basin

전환돈* · 김수전**

Jun, Hwandon* and Kim, Soojun**

Abstract

The purpose of this study is to evaluate the impacts of climate change and hydraulic structures on future hydrological cycle in the Geum river basin. The rainfall-runoff model was built up using Soil and Water Assessment tool and the three weirs were input to the model as reservoir factor. The nine weather data series consisted by the three climate change scenarios and the three climate models were used as input data sets of the model. The spatio-temporal change of the hydrological cycle characteristics was explored in the three future periods (2010-2039, 2040-2069, 2070-2099) on the basis of the historical period (1980-2009). As a result, the trends showed the increase of precipitation, evapotranspiration, and runoff and the decrease of snowmelt and soil water content. The runoff and its uncertainty increased in the mid-term and long-term from the estimated result. Both of the flood and drought risk was predicted to increase due to the increased runoff in wet season and the decreased runoff in dry season. Especially drought damage will be the most serious in the future.

Key words : Climate Change, Hydrological Cycle, Drought, Flood, SWAT, Reservoir

요 지

본 연구에서는 기후변화와 함께 수리구조물의 영향을 고려함으로써 금강유역의 미래 수문순환의 특성의 변화를 검토하고자 하였다. SWAT을 이용하여 금강유역에 대한 유출모형을 구축하였으며, 금강 본류에 시공된 3개의 보 요소를 저수지 요소로 입력하였다. 3개의 기후변화 시나리오와 3개의 기후모형으로 구성된 9개의 기상계열을 모형의 입력자료로 활용하였다. 과거기간(1980-2009)을 기준으로 미래 3개의 기간(2010-2039, 2040-2069, 2070-2099)을 구분하고 유역의 수문순환 특성의 변화를 시공간적으로 확인하였다. 전반적으로 강수량의 증가, 용설량의 감소, 증발산량의 증가, 토양수분량의 감소, 유출량의 증가 경향이 있는 것으로 나타났다. 또한 미래 유출 특성을 분석한 결과 중장기적으로 유출량과 불확실성이 증가하였다. 월별 유출 분석 결과 홍수기 유출량의 증가와 갈수기 유출량의 감소 특성으로 인하여 미래에 홍수와 가뭄의 발생빈도 및 규모가 증가할 것이며 특히 가뭄피해가 더욱 심각할 것으로 예상되었다.

핵심용어 : 기후변화, 수문순환, 가뭄, 홍수, SWAT, 저류지

1. 서 론

유라시아 대륙과 태평양 사이에 위치하고 있는 우리나라(북위 33-38도, 동경 125-132도)는 동아시아 몬순과 열대성 저기압(태풍)의 영향을 크게 받는 지역이다. 연 강수량의 대부분이 여름철(6-9월)에 집중되며, 국토의 70% 이상이 산지로 이

루어져 있어 단시간에 강수가 바다로 유출된다. 더욱이 경제 개발에 집중된 수자원 정책으로 인한 수자원 개발의 불균형이 지역간 수자원 분배에 대한 갈등이 심화되고 있기도 하다. 이와 같이 우리나라는 수자원 관리에 아주 취약한 기상학적, 지형학적, 사회학적 특성을 가지고 있다고 할 수 있다. 여기에서 우리나라의 수자원은 기후변화라는 새로운 도전을 받고

*정회원. 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과 교수(E-mail: hwjun@snut.ac.kr)

Member. Professor Dept. of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology,

**교신저자. 정회원. Columbia University, Columbia Water Center, 박사후연구원(Tel: +1-646-318-7107, Fax: +1-201-854-7081, E-mail: sk3609@columbia.edu)

Corresponding Author. Member. Post-doctoral Researcher, Columbia Water Center, Columbia University

있다. 최근에 우리나라 뿐만 아니라 전세계 곳곳에서도 홍수와 가뭄과 같은 자연재해의 발생빈도와 강도가 증가함에 따라 지구온난화에 의한 기후변화의 영향에 관심을 집중하고 있다. 기후변화가 수문순환 과정을 빠르게 진행시키고, 극한 사상의 빈도와 극치 상태를 증가시킨다는 가정이 실제 수문 자료에서 그 변화가 관측됨에 따라 수자원 분야에서 주된 관심사가 되고 있다.

기후변화가 수자원에 미치는 영향에 대한 연구는 1980년대 중반 이후 활발히 진행되었다. Gleick(1986)은 전지구적인 기후변화가 지역의 수자원에 미치는 영향을 검토하고자 미국의 세크라멘토 유역을 대상으로 검토하였다. 이후 기후변화가 유출량 및 용수공급에 미치는 영향을 평가하는 연구(Miller *et al.*(1992), Cooley *et al.*(1992))가 진행되었고 Bronstert *et al.*(1999)은 독일의 사례를 통하여 유출량 모의에 기후변화의 영향을 검토하였다. McCabe and Wolock(1999)은 기후변화가 미국 서부지역의 용설에 미치는 영향을 분석하였으며 Hamlet and Lettenmaier(1999)은 콜롬비아강 유역을 대상으로 수자원의 영향을 검토하였다. 또한 Roald *et al.*(2003)은 노르웨이에 대하여 기후변화 시나리오를 바탕으로 연평균 유출량과 계절평균 유출량을 모의하였다. Jha *et al.*(2003, 2004)은 기후변화가 미시시피강 상류유역을 대상으로 SWAT 모형을 이용하여 유출량에 미치는 영향을 분석하였으며 Stewart *et al.*(2005)은 기후변화의 영향에 의하여 미국 서북부의 유출특성의 시간적 변화에 대하여 검토하였고 Andersson *et al.*(2006) 등은 기후변화와 개발 시나리오에 따른 유출 변화의 영향을 분석한 바 있으며, 최근에는 기후변화에 의한 유출 특성 뿐만 아니라 도시화, 토지피복, 오염물질의 영향에 대한 연구(Franczyk and Chang, 2009; Cuo *et al.*, 2009; Dunn *et al.*, 2012)도 활발히 진행되고 있다.

우리나라의 경우도 안재현 등(2001)은 대청댐 유역을 대상으로 기후변화 영향에 의한 수문환경변화를 검토하였으며, 김병식 등(2004)은 YONU GCM과 축소기법을 이용하여 기후변화가 용담댐 유역에 미치는 영향을 평가하였고 이동률 등(2004)은 기후변화가 기상학적 가뭄과 홍수에 미치는 영향에 대하여 검토하였다. 배덕효 등(2007)은 SRES A2 시나리오를 이용하여 기후변화에 따른 우리나라 수자원의 시공간 변화를 평가하였고 안소라 등(2008)은 기후변화 뿐만 아니라 미래 토지이용변화를 함께 고려하여 유출분석을 실시하였다. 김수전 등(2010)은 한강유역을 대상으로 기후변화와 토지이용 변화와 함께 유출분석 및 물수지 분석을 수행하여 미래 용수공급에 있어 더욱 심각한 문제가 발생할 가능성을 제시하였다. 손태석 등(2010)은 낙동강 유역을 대상으로 SRES 기반의 기후변화 시나리오 자료와 SWAT 모형을 이용하여 유출분석을 수행하고 미래 유출의 변동성이 증가할 수 있음을 제시하였다. 그리고 김종필과 김광섭(2011)은 WAMIS에서 제공하는 강수량과 PRMS 모의 유출량 자료를 이용하여 우리나라의 경우

강수량 보다 유출량이 기후변화에 더욱 민감함을 제시하였으며 김응석 등(2013)은 낙동강 본류 및 지류하천의 수심변화에 기후변화가 미치는 영향을 평가하였다.

이와 같이 기후변화에 대한 많은 관심과 함께 기후변화에 대한 적응노력이 활발히 진행 중이다. 기후변화에 대비하여 대규모 다목적 댐의 치수능력을 향상시킨 바 있으며 저류량을 확보하기 위하여 하도내에 다수의 보를 설치하기도 하였다. 이와 같은 노력은 기후변화와 함께 유역의 수문특성을 변화시키는 요인으로 작용하기도 한다. 기후변화 적응을 위한 수자원 계획의 첫걸음은 유역내 수문순환 특성을 정확히 파악하는 것이다. 따라서 본 연구에서는 기후변화와 함께 하천 특성의 변화를 함께 고려함으로써 미래 유역의 수문순환 특성의 변화를 분석하고자 한다. 단, 본 연구에서는 인위적 또는 자연적 요인에 의하여 발생하는 유역내 모든 하천특성의 변화를 고려하기 보다는 최근 설치된 금강유역내 3개의 보(금남보, 금강보, 부여보)에 대한 영향이 하천특성 변화를 대표한다고 가정하고 연구를 수행하였다. 기후변화와 유역의 수문순환에 대한 평가에 있어 기존 연구는 기후변화 시나리오의 적용을 통한 유역의 유출분석에 초점을 맞추었다면 본 연구는 전지구적 측면의 기후변화 영향과 함께 지역적 측면의 수자원 사업의 영향에 의한 수리구조물의 영향을 함께 고려함으로써 미래에 예상되는 수문특성의 변화를 보다 정량적으로 살펴보고자 한다. 이를 위하여 보의 영향을 저류지 요소로 고려할 수 있는 강우-유출 모형을 이용하여 기후변화 시나리오 자료를 입력자료로 미래 유출량을 모의하고 미래 목표기간별 수문특성의 변화에 대한 평가에 중점을 두고자 한다.

2. 자료 수집 및 모델링 방법

2.1 기후변화 시나리오 자료

전세계의 기후변화 시나리오 및 기후모델의 자료는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)의 DDC(Data Distribution Centre)에서 제공하고 있다. 최근에 IPCC 제 5차 평가보고서(IPCC WG I, 2013)에서는 대표농도경로(RCPs, Representative Concentration Pathways) 기반의 기후변화 시나리오를 채택함으로써 최근 본 시나리오를 통한 연구가 활발히 진행 중이다. 여기에서 대표농도경로 시나리오는 기존의 온실가스 배출시나리오(Emissions Scenarios)와 상이한 시나리오라기 보다는 SRES 시나리오를 포함하는 개념의 시나리오라고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 IPCC의 4차 평가보고서의 작성을 위하여 활용되었던 23개 GCM 모형의 결과 중 A2, A1B, B1에 대해 공동으로 제공하는 14개 GCM 모형을 이용하여 최종적으로 3개의 모형을 채택한 배덕효(2011)의 결과를 활용하였다. 즉, 3개의 기후변화 시나리오(A2, A1B, B1)와 3개의 기후모형(CNRM, UKMO, IPSL)의 결과로 조합된 9개의 시나리오를 활용하였다. 모의 기간은 1980-

Table 1. Climate scenarios, climate models and simulation periods

Scenarios	Climate models	Periods
A2	CNRM-Cm ³	1980-2009
A1B	UKMO-HADCM ³	2010-2039
B1	IPSL-CM4	2040-2069
		2070-2099

2099년으로 총 120년이며, 과거를 비롯하여 미래기간을 30년 씩 구분하여 분석기간을 Table 1과 같이 구분하였다. 그리고 기후변화 시나리오 자체는 불확실한 미래에 대한 가이드라인 이라고 할 수 있다. 따라서 그 불확실한 범주를 특정 몇 개의 시나리오로 통합한 것이 기후변화 시나리오인 것이다. 또한 이러한 시나리오로부터 전구단위로 기후를 모의할 경우 각 모의 조건에 의하여 그 만큼 불확실성이 발생하게 된다. 그러므로 본 연구에서는 불확실성의 범위를 앞서 언급한 9개의 조합된 시나리오로부터 도출된 수문변량의 최대값과 최소값 기준으로 불확실성 범위를 설정하였다.

2.2 SWAT 모형을 이용한 저수지 모의

SWAT모형(Neitsch *et al.*, 2002)은 입력 자료로써 강수량, 최고/최저온도, 상대습도, 일사량, 풍속과 같은 기상자료와 수치지도모형(DEM), 토양도, 토지이용도 등의 수치지도가 중요하게 활용된다. 또한 일 단위의 모의가 가능한 유역단위의 준 분포형 모형으로서 4가지의 부모형(sub-model)으로 구성되어 있다. 즉 수문 부모형, 토양유실 부모형, 영양물질 부모형, 하도추적 부모형으로 구분된다. 이 중에서 수문 부모형은 저류방정식에 의해 일 단위로 물수지를 산정하며, 차단, 지표면 유출, 중간유출(측방유출), 침투, 기저유출, 수로손실, 증발산 등으로 구성되어 있다(참고: Assessment Tool Theoretical Documentation; <http://swatmodel.tamu.edu>).

SWAT모형은 4개 형태의 수체(연못, 습지, depressions/potholes, 저수지)를 모의한다. 이 중에서 연못, 습지, depressions/potholes는 각 소유역에 위치하여 해당 소유역으로부터 물을 공급받지만, 저수지의 경우 하천에 위치하여 상류의 모든 소유역으로부터 물을 공급받는다. 이와 같은 특성은 하천 유출에 아주 큰 영향을 미치는 요소로 작용하며 저수지의 저류량은 Fig. 1과 같이 Sediment storage 용량, Water supply (recreation, power 포함) 용량, Flood and Emergency flood control 용량으로 구성된다.

저수지에 있어 물수지 방정식은 Eq. (1)에 의하여 저류량이 결정된다.

$$V = V_{stored} + V_{flowin} - V_{flowout} + V_{pcp} - V_{evap} - V_{seep} \quad (1)$$

여기에서, V 는 최종 저류량, V_{stored} 는 최초 저류량, V_{flowin} 은 유입용량, $V_{flowout}$ 는 유출(방류)용량, V_{pcp} 는 수체에 발생한 강수

Fig. 1. Components of a reservoir with flood water detention features (Ward and Elliot, 1995).

량, V_{evap} 는 증발량, V_{seep} 는 침윤량을 나타낸다.

유역 내 주하천망에 위치한 저류지에 대하여 4가지의 방류량 결정 방법을 사용할 수 있다. 관측된 일 방류량을 사용하는 Measured Daily Outflow 입력 방법, 관측된 월 방류량을 사용하는 Measured Monthly Outflow 방법, 비운영 자연방류 개념의 연평균 방류율을 입력하는 Average Annual Release Rate for Uncontrolled Reservoir 방법, 저수지의 운영 방법으로 목표방류량을 입력하는 Target Release for Controlled Reservoir 방법(Neitsch *et al.*, 2002)이 있다. 이와 같이 SWAT 모형은 저류지 용량 설정 방법이 세분화 되어 있을 뿐만 아니라 다양한 운영 방법론을 제시하고 있어 저수지 모의에 대한 적용성이 아주 우수하다고 할 수 있다.

3. 미래 유출량의 추정

3.1 대상유역의 선정 및 유출모형의 구축

기후변화와 하천특성 변화에 따른 미래 유출특성의 변화를 검토하기 위하여 대상유역으로 금강유역을 선정하였다. 최근 금강에는 3개의 보(부여보, 금강보, 금남보)가 시공되었으며 이의 영향으로 하천 유출 특성에 영향이 있을 것으로 예상된다. 이와 같은 변화를 고려하기 위하여 SWAT을 이용하여 대상 유역에 대한 유출모형을 구축하고자 하였다(Fig. 2, 보 설치 전). 1:25,000 수치지도를 수집하여 100×100 m DEM을 작성(Fig. 2(a))하고 전처리 과정을 거쳐 수자원단위지도상의 중권역 규모로 소유역을 구분하였으며 유역 내에 포함하고 있는 주요 댐(대청댐, 용담댐) 및 3개의 보지점(부여보, 금강보, 금남보)을 고려(Fig. 2(b))하였다. 이와 함께 국가수자원관리 종합정보시스템(WAMIS; <http://www.wamis.go.kr/>)에서 제공하는 토지피복도(Fig. 2(c))와 토양도(Fig. 2(d))를 활용하였다.

금강 유역 내 청주, 대전, 추풍, 보은, 부여, 금산을 포함하는 6개 기상관측소의 일기상자료(최저온도, 최고온도, 강수량, 상대습도, 풍속, 일사량)를 Table 2와 같이 수집하였다. 모형의 보정 및 검증 위하여 공주지점을 대상으로 수위자료를 수집

Fig. 2. GIS data as an input data of SWAT.

Table 2. Weather stations in Geum river basin

Code	Name	Latitude(°)	Longitude(°)	Elevation(m)	Periods
131	Cheongjoo	36.6364	127.4428	57.4	1981-2006
133	Daejeon	36.3691	127.3743	68.3	1981-2006
135	Chuphung	36.2171	127.9965	242.5	1981-2006
226	Boeun	36.4848	127.7363	170	1981-2006
236	Buyeo	36.2694	126.923	16	1981-2006
238	Geumsan	36.1027	127.4838	170.7	1981-2006

하였으며, 수위자료의 변동성을 Fig. 3(a)와 같이 검토하였다. 검토 결과 2008년을 전후로 유출특성이 변화한 것을 확인하였다. 2008년 이후에 보 설치 공사로 인하여 수위관측소가 영향을 받았을 뿐만 아니라 상류의 대청댐 유역에서 임의로 유량을 관리하였던 것으로 판단된다. 따라서 1981~2006년(26

년) 기간 중 1981~2000년에 대하여 금강 본류내의 공주 지점을 대상으로 모형을 보정하고, 2001~2006년에 대하여 검증 수행하였다(Fig. 3(b),(c)). 그리고 Table 3과 같이 보정 및 검증기간에 대하여 상관계수(CC), 결정계수(R^2), 모형효율성 계수(ME, Nash and Sutcliffe, 1970), 표준화한 평균 제공근 오

(a) water level (2002-2013)

(b) Calibration (1981-2000)

(c) Verification (2001-2006)

Fig. 3. Calibration and verification of runoff series at Kongjoo station.

Table 3. Calibration and verification of runoff series at Kongjoo station

	Calibration	Verification
Coefficient of correlation (CC)	0.74	0.86
Coefficient of determination (R^2)	0.55	0.73
Model efficiency (ME)	0.53	0.73
Normalized Root Mean Squared Error (RMSE)	0.93	0.84

차(Nomalized RMSE)와 같은 평가함수를 적용하였다. 보정과 검증에서 각각 상관계수 0.74, 0.86, 모형 효율성 계수 0.53, 0.73, 표준화한 평균 제곱근 오차 0.93, 0.84)으로 나타나 모형이 금강 유역의 유출특성을 잘 대표하고 있는 것으로 판단되었다.

금강 본류에 설치된 3개의 보는 SWAT 모형에서 저류지로

가정할 수 있다. 따라서 국토해양부(2009)에서 제시한 Table 4의 금강 다기능보 주요 제원을 바탕으로 보 설치후의 저류량 증가용량을 SWAT에서 저류지의 저류용량으로 가정하였다. 또한 새롭게 시공된 보는 홍수를 조절하기 위한 치수측면의 구조물이 아니기 때문에 갈수기 동안의 저류지 운영에 초점을 맞추었다. 이 기간 중 하천유지유량을 목표로 저수지가 운영되는 것을 가정하였다. 따라서 저류지는 목표 방류 개념의 Target Release for Controlled Reservoir 방법을 선택하여 적용하였다. 여기에서 보 설치 후의 영향에 대한 검증은 한계 (Fig. 3(a))과 같이 현재 자료에 대한 한계가 있는 것이 사실이다. 하지만 모형내에서 보는 개념적으로는 갈수기에 기존의 유출량(보 설치 전)과 비교하여 보 설치 후에는 저류지 효과와 함께 목표 방류량의 영향으로 유출 특성이 바뀌는 것으로 이해할 수 있다. 따라서 보 설치 후의 현재기간 대한 검증보다는 과거기간에서 보의 설치 전과 설치 후에 어떠한 유출특

Table 4. Design data of the weirs on Geum river(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2009)

	Length (km)	Hight (m)	Water level (EL.m)	Average depth (m)	Surface area (10^6 m^2)	Increased Stream width (m)	Increased storage volume (10^6 m^3)
Booyeo-Geumgang	23.4	7	4.2	4.6	6.8	131	18.1
Geumgang-Geumnam	18.7	7	8.8	4.2	4.7	78	10.4
Geumnam-Miho Stream	8	4	11.4	2.1	3.0	72	1.3

Fig. 4. The differences in runoff between case 1 and case 2 at the weirs.

성의 변화가 발생하였는지에 대하여 검토하였다.

보의 영향이 금강유역의 유출특성에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 평가를 위하여 보 설치전(Case 1)과 보 설치후(Case 2)로 구분하고 1981-2006년 기간동안의 일유출계열을 작성하였으며, 금남보, 금강보, 부여보 지점에 대하여 일유출량의 차이를 분석하였다(Fig. 4 (a),(b),(c)). 보 설치전과 비교하여 보 설치후에 일유출량은 최대 금남보 약 11 m³/s, 금강보 약 18 m³/s, 부여보 약 45 m³/s 정도 감소하였는데 홍수기에 저류효과에 의하여 유출량을 감소시키는 역할을 한 것으로

나타났다. 또한 각 보지점에서 유황분석을 수행한 결과 평균 풍수량(95일) 약 0.4 m³/s, 평수량(185일) 약 0.3 m³/s, 저수량(275일) 약 0.2 m³/s, 갈수량(355일) 약 0.2 m³/s 증가한 것으로 나타났다. 따라서 보의 설치에 의한 유출특성은 보의 저류효과에 의해 홍수량의 감소와 유황의 개선 효과를 기대할 수 있는 것으로 나타났다.

3.2 기후변화 시나리오를 이용한 미래 수문순환 변화

금강유역을 대상으로 구축한 SWAT 모형에 Table 1의 9개

Table 5. Comparison of hydrological variables between the past and future

	Periods	Precipitation	Snowmelt	Evapotranspiration	Soil water content	Runoff
Max	1980-2009	1,351.0 mm	127.3 mm	333.4 mm	15.3 mm	996.3 mm
	2010-2039	3.4 %	-6.3 %	6.3 %	-10.7 %	3.4 %
	2040-2069	5.4 %	-14.3 %	7.0 %	-10.8 %	6.9 %
	2070-2099	7.2 %	-16.9 %	6.1 %	-11.7 %	9.4 %
Med	1980-2009	1,228.1 mm	92.5 mm	309.6 mm	12.0 mm	881.1 mm
	2010-2039	0.5 %	-17.7 %	1.0 %	-11.4 %	-0.4 %
	2040-2069	0.5 %	-27.3 %	1.6 %	-17.9 %	0.1 %
	2070-2099	2.4 %	-29.9 %	3.0 %	-17.6 %	2.9 %
Min	1980-2009	1,090.0 mm	55.7 mm	284.6 mm	7.8 mm	759.5 mm
	2010-2039	-2.7 %	-27.4 %	-1.0 %	-15.8 %	-5.5 %
	2040-2069	-3.2 %	-39.3 %	-4.4 %	-36.1 %	-6.0 %
	2070-2099	-3.5 %	-45.5 %	-4.3 %	-36.5 %	-10.2 %

Fig. 5. Spatio-temporal change in comparison between the past and future.

Fig. 5. Continued.

(기후변화 시나리오 3개 × 기후모형 3개) 입력자료를 이용하여 1980-2099년 까지 약 120년을 모의하였다. 9개의 결과 중 최대값, 중간값, 최소값을 기준으로 목표기간별 주요 연수문 변량의 변화를 Table 5와 같이 4개의 기간(30년씩 구분)으로 구분하여 요약하였다. 기후변화의 영향에 의한 결과를 중간값 기준에서 살펴보면 강수량의 증가, 용설량의 감소, 증발산량의 증가, 토양수분량의 감소, 유출량의 증가 경향을 확인 할 수 있다. 여기에서 미래 기온의 상승으로 인한 강수량의 증가는 유출량을 증가시킬 뿐만 아니라 식생의 활력을 높여 증발산량 또한 증가시키는 것으로 판단되었다. 용설량이 감소한 이유는 기온의 상승으로 인하여 겨울철 강수의 형태인 강설량이 감소하였기 때문인 것으로 판단되며, 토양수분량의 감소

는 강수량의 증가 보다 증발산량의 증가로 인한 손실율이 더욱 크며, 연중 발생하는 강수의 불균형이 더욱 심화되기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 5에는 소유역별로 각 수문변량(중간값)의 시공간적 변화 특성을 나타내었다. 강수량은 금강 전체 소유역에서 증가하며 하류지역에 집중되었고, 용설량은 금강 상류유역의 감소경향이 뚜렷하였다. 증발산량은 금강 전체유역에서 서서히 증가하였고, 토양수분량은 금강 상류유역에서 감소율이 컸으며, 유출량은 전체 소유역에서 증가하지만, 특히 금강 중하류에서 뚜렷한 증가 특성을 보였다.

3.3 기후변화 시나리오를 이용한 미래 유출 평가

기후변화 시나리오 및 기후모형의 조합에 의하여 구성된 9

Fig. 6. Estimation of the annual runoff at the weirs and outlet.

Table 6. Change of runoff characteristics in the future

		1980-2009	2010-2039		2040-2069		2070-2099	
		Runoff (m ³ /s)	Runoff (m ³ /s)	Increase rate (%)	Runoff (m ³ /s)	Increase rate (%)	Runoff (m ³ /s)	Increase rate (%)
Geumnam weir	Max.	258.3	267.6	3.6	273.0	5.7	277.1	7.3
	Med.	189.3	187.2	-1.1	188.7	-0.3	194.5	2.7
	Min.	137.6	137.6	0.0	137.9	0.2	116.4	-15.4
Geumgang weir	Max.	288.6	299.5	3.8	306.3	6.1	309.7	7.3
	Med.	211.1	209.0	-1.0	210.7	-0.2	217.1	2.9
	Min.	152.5	151.7	-0.5	154.9	1.6	129.6	-15.0
Booyeo weir	Max.	309.8	321.2	3.7	329.8	6.5	331.4	7.0
	Med.	227.0	225.3	-0.7	226.9	0.0	233.6	3.0
	Min.	163.2	166.5	2.1	167.6	2.8	139.5	-14.5
Outlet	Max.	373.2	386.0	3.5	399.4	7.1	397.1	6.5
	Med.	273.3	272.1	-0.4	273.7	0.2	281.5	3.0
	Min.	194.2	200.5	3.3	204.2	5.2	168.1	-13.4

Fig. 7. Comparison of the characteristics of the monthly runoffs for target periods (Left: Variance, Right : Variance rate).

개의 시나리오에 따라 참조기간(1980-2009)에도 보가 설치되어 있는 것으로 가정하고 미래 기후변화에 의한 유출특성의 변화를 모의하였다. 유출분석 결과는 많은 불확실성을 포함하고 있다고 할 수 있기 때문에 각 기후변화 시나리오에 대하여 모의한 유출량의 최대값과 최소값을 불확실성 범위로 설정하고 중간값을 유출분석 결과로 활용하였으며 보지점 및 유역 출구지점을 대상으로 한 결과는 Fig. 6과 같다. 전반적으로 유출량의 변동폭이 미래에는 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 미래기간을 Table 6과 같이 단기(2010-2039), 중기(2040-2069), 장기(2070-2099)로 구분하여 비교한 결과 중간값 기준에서 유출량이 단기에는 약간 감소하지만 장기에는 증가하는 특성이 있는 것으로 나타났다. 미래에는 불확실성이 증가함에 따라 장기적으로 최대값 또는 중간값의 증가 비율 보다는 최소값의 감소비율이 더욱 큰 것으로 나타나 가뭄측면에서 미래 기후변화에 더욱 취약할 수 있음을 확인하였다.

미래 월별 유출특성의 변화를 살펴보기 위하여 금강 유역의 최종 출구지점을 대상으로 목표기간별-월별 유출량을 중간값 기준으로 비교·분석하였다(Fig. 7). 우선 목표기간별-월별 유

출의 증감량을 살펴보면 전반적으로 과거(1980-2009년)를 기준으로 홍수기 유출량의 증가와 갈수기 유출량의 감소를 확인할 수 있었다. 특히 미래로 진행될수록 그 차이는 더욱 증가하였다. 따라서 미래 연유출량의 증가는 연중 유출량의 증가가 아니라 홍수기(7월, 8월, 9월)에 유출량이 큰 폭으로 증가하기 때문인 것으로 나타났다. 그리고 유출량의 증감량(m³/s)외에 증감비율(%)을 살펴보면 갈수기에 유출량의 감소비율이 상당히 크다는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 분석결과에 의하면 금강유역의 경우 미래에 기후변화로 인하여 홍수와 가뭄의 발생빈도 및 규모가 모두 증가할 것으로 예상된다. 특히 갈수량의 감소율이 큰 것으로 판단할 때 가뭄 피해가 가장 심각할 것으로 추정된다.

4. 요약 및 토의

기후변화와 함께 금강 본류내에 시공된 대규모 하천구조물인 보의 영향을 고려하여 금강유역의 미래 수문순환 특성을 전망한 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다. 우선, 소유역별

Fig. 8. Comparison of runoff characteristics due to the impact of weirs at the outlet of Geum river basin.

수문량 변화를 살펴보면 강수량의 증가, 융설량의 감소, 증발산량의 증가, 토양수분량의 감소, 유출량의 증가 경향을 확인할 수 있었다. 여기에서 미래 기온의 상승으로 인한 강수량의 증가는 유출량을 증가시킬 뿐만 아니라 식생의 활력을 높여 증발산량 또한 증가시키는 것으로 판단되었다. 융설량이 감소한 이유는 기온의 상승으로 인하여 겨울철 강수의 형태인 강설량이 감소하였기 때문인 것으로 판단되었으며, 토양수분량의 감소는 강수량의 증가 보다 증발산량의 증가로 인한 손실이 더욱 크게 예상되기 때문이다. 이는 강수 발생빈도의 감소 현상과 강도의 증가 현상에 기인할 것으로 예상되는 부분이다. 이러한 소유역별 수문 특성은 금강 본류의 유황에 직접적인 영향을 미치는 것으로 판단된다.

연유출량은 단기에는 약간 감소하지만 장기적 측면에서 증가하는 특성이 있는 것으로 나타났다. 미래에는 연유출량에 대한 불확실성이 증가함에 따라 장기적으로 최대값 또는 중간값의 증가 비율 보다는 최소값의 감소비율이 더욱 큰 것으로 나타나 가뭄측면에서 미래 기후변화에 더욱 취약할 수 있음을 확인하였다. 월별 유출 분석 결과 홍수기 유출량의 증가와 갈수기 유출량의 감소 특성으로 인하여 미래에 홍수와 가뭄의 발생빈도 및 규모가 증가할 것이며 특히 가뭄피해가 더욱 심각할 것으로 예상된다. 이는 미래에 보가 설치된 상황에서 기후변화의 영향을 고려하여 분석된 결과이다. 만약 보를 설치하지 않았다면 어떠한 유출 특성을 나타내는지에 대한 검토를 위하여 미래 유출 특성의 변화를 금강 본류내 설치한 3개의 보에 대한 영향을 모두 고려할 수 있다고 판단되는 금강유역의 최종 출구를 대상으로 Fig. 8과 같이 분석하였다. 현재기간을 기준으로 미래기간(2010-2039, 2040-2069, 2070-2099)에 대한 연유출물의 변화를 최대값, 중간값, 최소값을 통하여 살펴보면 각 기간에서 보설치 전 보다 보 설치 후에 최대유출량의 감소 특성과 최소유출량의 증가 특성을 나타내었다. 이는 각 보의 저류효과의 영향 때문인 것으로 판단되며 보 설치에 따라 단기간(2010-2039)에 홍수량 -2.6%, 갈수량 +4.8%, 중기간(2040-2069)에 홍수량 -0.7%, 갈수량 +7.9%,

장기간(2070-2099)에 홍수량 -3.7%, 갈수량 +5.9% 정도 보설치 전과 비교하여 홍수량의 감소와 갈수량의 증가에 따라 유황을 개선하는 효과가 있는 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 금강유역의 미래 수문순환의 특성의 변화를 검토하고자 하였다. 이를 위하여 미래에 예상되는 기후변화 시나리오와 함께 4대강 살리기 사업에 의하여 시공된 3개 보의 영향을 함께 고려하였다. SWAT을 이용하여 금강유역에 대한 유출모형을 구축하였으며, 3개의 기후변화 시나리오와 3개의 기후모형으로 구성된 9개의 기상계열을 모형의 입력자료로 활용하였다. 과거기간(1980-2009)을 기준으로 미래 3개의 기간(2010-2039, 2040-2069, 2070-2099)에 대하여 유역의 시공간적 수문순환 특성의 변화를 확인하였다. 전반적으로 강수량의 증가, 융설량의 감소, 증발산량의 증가, 토양수분량의 감소, 유출량의 증가 경향이 있는 것으로 나타났다. 월별 유출 분석 결과 홍수기 유출량의 증가와 갈수기 유출량의 감소 특성으로 인하여 미래에 홍수와 가뭄의 발생빈도 및 규모가 증가할 것이며 특히 가뭄피해가 더욱 심각할 것으로 예상되었다.

본 연구의 결과에 의하면 미래에 금강유역의 경우 유출량의 감소율이 커 가뭄 측면에서 큰 문제가 발생할 수 있는 가능성이 있을 것으로 판단된다. 따라서 보의 설치로 확보되는 저류용량과 더불어 상류의 다목적 댐인 용담댐과 대청댐의 연계운전을 통한 적극적인 수자원 관리 방안이 절실히 요구된다고 할 수 있다. 이와 함께 보 지점에서 목표한 저류량을 안정적으로 확보할 수 있는지와 확보된 저류량을 활용하여 특정지역의 가뭄을 저감시키거나 유황을 개선시킬 수 있는 방법론에 대한 연구가 지속적으로 필요하다고 판단된다.

감사의 글

이 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업 [NEMA-자연-2011-45] 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Ahn, J.H., Yoo, C., and Yoon, Y.N. (2001) An Analysis of Hydrologic Changes in Daechung Dam Basin using GCM Simulation Results due to Global Warming, *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 34, No. 4, pp. 335-345.
- Ahn, S.R., Lee, Y.J., Park, G.A., and Kim, S.J. (2008) Analysis of Future Land Use and Climate Change Impact on Stream Discharge, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 28, No. 2B, pp. 215-224.
- Andersson, L., Wilk, J., Todd, M.C., Hughes, D.A., Earle, A.,

- Kniveton, D., Layberry, R., and Savenije, H.G., (2006) Impact of climate change and development scenarios on flow patterns in the Okavango River. *Journal of Hydrology*, Vol. 331, pp. 43-57.
- Bae, D.H., Jung, I.W., and Lee, B.J. (2007) Outlook on Variation of Water Resources in Korea under SRES A2 Scenario, *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 12, pp. 921-930.
- Bae, D.H., Jung, I.W., Lee, B.J., and Lee, M.H. (2011) Future Korean Water Resources Projection Considering Uncertainty of GCMs and Hydrological Models, *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 5, pp. 389-406.
- Bronstert, A., Burger, G., Heidenreich, M., Katzenmaier, D., and Kohler, B., (1999) Effect of climate change influencing storm runoff generation: Basic considerations and a pilot study in Germany. Proceedings of the International RIBAMOD Workshop, Wallingford.
- Cooley, K.R., Flerchinger, G.N., Wight, J.R., and Hanson, C.L. (1992) Effect of Climate Changes On Water Supplies Managing Water Resources During Change. *Journal of American Water Resources Association*, Vol. 28, pp. 185-194.
- Cuo, L., Lettenmaier, D.P., Alberti, M., and Richey, J.E. (2009) Effects of a century of land cover and climate change on the hydrology of the Puget Sound basin, *Hydrological Processes*, Vol. 23, No. 6, pp. 907-933.
- Dunn, S.M., Brown, I., Sample, J., and Post, H. (2012) Relationships between climate, water resources, land use and diffuse pollution and the significance of uncertainty in climate change, *Journal of Hydrology*, Vol. 434-435, pp. 19-35.
- Franczyk, J. and Chang, H. (2009) The effects of climate change and urbanization on the runoff of the Rock Creek basin in the Portland metropolitan area, Oregon, USA, *Hydrological Processes*, Vol. 23, No. 6, pp. 805-815.
- Gleick, P.H. (1986) Methods for evaluating the regional hydrologic impacts of global climatic changes. *Journal of Hydrology*, Vol. 88, pp. 97-116.
- Hamlet, A.F. and Lettenmaier, D.P. (1999) Effects of climate change on hydrology and water resources objectives in the Columbia River basin, *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 35, pp. 1597-1624.
- Jha, M., Arnold, J.G., Gassman, P.W., and Gu, R. (2004) Climate change sensitivity assessment on upper Mississippi river basin streamflows using SWAT. Working Paper 04-WP 353, Center for Agricultural and Rural Development Iowa State University.
- Jha, M., Pan, Z., Takle, E.S., and Gu, R. (2003) The impacts of climate change on stream flow in the upper Mississippi river basin: A regional climate model perspective. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 109.
- 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*, Vol. 37, No. 3, pp. 185-193.
- Kim, E.S., Lee, J.H., Park, M.J., and Chung, G. (2013) Analysis of the Disaster Environmental Change Considering Climate Change : 1. Analysis of Flood Elevation, *Journal of KOSHAM*, Vol. 13, No. 4, pp. 207-217.
- Kim, J.P. and Kim, G. (2011) The Impact of Climate Change on the Trends of Precipitation Effectiveness Ratio and Runoff Data in South Korea, *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 8, pp. 683-694.
- Kim, S.J., Kim, B.S., Jun, H.D., and Kim, H.S. (2010) The evaluation of climate change impacts on the water scarcity of the Han river basin in south Korea using high Resolution RCM data, *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 3, pp. 295-308.
- Lee, D.R., Kim, W.T., and Yoo, C. (2004) Climate Change Impacts on Meteorological Drought and Flood, *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 37, No. 4, pp. 315-328.
- McCabe, G.J. and Wolock, D.M. (1999) General Circulation Model Simulations of Future Snowpack in the Western United States. *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 35, pp. 1473-1484.
- Miller, J.R., Russell, G.L., Van, B., and Scoott, C. (1992) The Effects of Climate Change On Monthly River Runoff, Managing Water Resources During Global Change, pp. 175-178.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs. (2009) Masterplan for the Four Major Rivers Project.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970) River Flow Forecasting through Conceptual Models, Part I-A Discussion of Principles, *Journal of Hydrology*, 10, pp. 283-290.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., and King, K.W. (2002) Soil and water assessment tool theoretical documentation, Texas Water Resources Institute, College Station, Texas.
- Roald L.A., Skaugen, T.E., Beldring, S., Væringstad, T., Engeset, R., and Forland, E.J. (2003) Scenaris of annual and seasonal runoff for Norway, *European Geophysical Society*, Vol. 5, 10395.
- Shon, T.S., Lee, S.D., Kim, S.D., and Shin, H.S. (2010) An Analysis of the Effect of Climate Change on Flow in Nakdong River Basin Using Watershed-Based Model. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 10, pp. 865-881.
- Stewart, I.T., Cayan, D.R., and Dettinger, M.D. (2005) Changes towards earlier streamflow timing across Western North America. *Journal of Climate*, 18:1136-1155.
- Ward, A.D. and Elliot, W.J. (1995) Environmental hydrology. Lewis Publishers, CRC Press, Inc., Boca Raton, FL.

Received July 3, 2014

Revised July 11, 2014

Accepted August 14, 2014