

분포형 광역 수문모델 개발 및 한강유역 미래 기후변화 수문영향평가*

김성준¹ · 박근애¹ · 이용관¹ · 안소라^{1*}

Development of a Meso-Scale Distributed Continuous Hydrologic Model and Application for Climate Change Impact Assessment to Han River Basin*

Seong-Joon KIM¹ · Geun-Ae PARK¹ · Yong-Gwan LEE¹ · So-Ra AHN^{1*}

요 약

본 연구의 목적은 광역의 일단위 수문순환을 모의할 수 있는 격자기반의 분포형 모델을 구축한 후, 이를 미래 기후변화에 따른 광역적 수문영향을 평가하는데 있다. 격자별로 지표 유출층, 지표 하 불포화 및 포화 토양층의 3단으로 구성하여 일별 물수지를 계산하며, 증발산량은 Penman-Monteith 방법을 사용하였고, 지표 및 지표하유출은 지체계수(lag coefficient)와 감수곡선 계수(recession curve slope)를 적용하였다. 모델의 검보정을 위하여 한강유역의 충주댐과 소양강댐을 대상으로 9개년(2001-2009)의 댐유입량 자료를 이용하여 모델의 6개 주요매개변수를 보정하였으며, Nash-Sutcliffe 모델효율(NSE)은 각각 0.57, 0.71의 값을 보였으며, 결정계수(R^2)는 각각 0.65, 0.72의 값을 보였다. 5개의 IPCC SRES A1B 기후변화 시나리오자료(CSIRO MK3, GFDL CM2_1, CONS ECHO-G, MRI CGCM2_3_2, UKMO HADGEM1)를 적용한 결과, 미래 유출량의 변화는 강수량과 비슷한 경향을 보이면서 전체적으로 7.0%~27.1% 증가하였고, 증발산량도 미래 기온의 증가경향으로 일부 경우를 제외하고 증가하는 경향을 나타내었으며, 이들의 공간적 변화를 제시하였다.

주요어 : 격자기반, 분포형, 수문모델, 기후변화, 공간적 평가

2014년 7월 20일 접수 Received on July 20, 2014 / 2014년 9월 11일 수정 Revised on September 11, 2014 /
2014년 9월 23일 심사완료 Accepted on September 23, 2014

* 이 논문은 2013학년도 건국대학교의 연구년교원 지원에 의하여 연구되었음.

1 건국대학교 사회환경시스템공학과 Department of Civil and Environmental Systems Engineering,
Konkuk University

※ Corresponding Author E-Mail : ahnsora@konkuk.ac.kr

ABSTRACT

The purpose of this paper is to develop a meso-scale grid-based continuous hydrological model and apply to assess the future watershed hydrology by climate change. The model divides the watershed into rectangular cells, and the cell profile is divided into three layered flow components: a surface layer, a subsurface unsaturated layer, and a saturated layer. Soil water balance is calculated for each grid cell of the watershed, and updated daily time step. Evapotranspiration(ET) is calculated by Penman-Monteith method and the surface and subsurface flow adopts lag coefficients for multiple days contribution and recession curve slope for stream discharge. The model was calibrated and verified using 9 years(2001-2009) dam inflow data of two watersheds(Chungju Dam and Soyanggang Dam) with 1km spatial resolution. The average Nash-Sutcliffe model efficiency was 0.57 and 0.71, and the average determination coefficient was 0.65 and 0.72 respectively. For the whole Han river basin, the model was applied to assess the future climate change impact on the river basin. Five IPCC SRES A1B scenarios of CSIRO MK3, GFDL CM2_1, CONS ECHO-G, MRI CGCM2_3_2, UKMO HADGEMI) showed the results of 7.0%~27.1 increase of runoff and the increase of evapotranspiration with both integrated and distributed model outputs.

KEYWORDS : *Grid-Based, Distributed, Hydrologic Model, Climate Change, Spatial Assessment*

서론

우리나라는 국토의 약 70%가 산림이고, 일반적으로 유역의 15~30%가 논으로 구성되어 있으며, 최근 수십년 동안은 토지나 수자원 등 국토자원 이용의 강도가 다른 나라에 비하여 현저하게 높기 때문에 지구온난화에 따른 기후변화와 같은 약간의 기후변동으로도 심각한 수자원 문제가 발생할 가능성이 내포되어 있다. 그러므로 기후변화에 따른 수자원 예측과 대응 방안을 마련하기 위해서는 기후변화와 수문순환과의 관계가 국토 전반에 걸쳐 예측되고 평가되기 위한 시스템이 구축되어야 하며, 장기적인 국가 수자원계획을 위해서는 기후변화에 의한 한반도 및 유역 단위의 수자원에 미치는 영향 예측 및 평가가 필요하다고 할 수 있다(Kim *et al.*, 2005).

기후변화에 따른 전국 및 권역규모의 영향평가에 관한 연구로 기후변화에 따른 전국 식생 분포전망(Ha *et al.*, 2007; Shin *et al.*, 2012), 기후변화에 따른 전국 미래 강수량 예측(Joh *et al.*, 2011), 기후변화에 따른 낙동강 권역 지하수 함양량 예측(Lee *et al.*, 2011) 등의 연구가 진행되나, 기후변화 시나리오와 연계할 수 있도록 구축된 국내형 분포형 수문순환모형이 없어 기후 및 기상변화로 인한 우리나라에서의 수자원 영향 평가가 제대로 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 이를 위해, 국내의 지형조건을 고려한 미래 기후변화에 따른 수문 변화를 총체적으로 분석하기 위한 광역적(Meso-scale) 수문순환 모델링 기법을 개발할 필요가 있다.

일반적으로 수문모형은 SSARR(Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation Model), HEC-HMS(Hydrologic Modeling System)

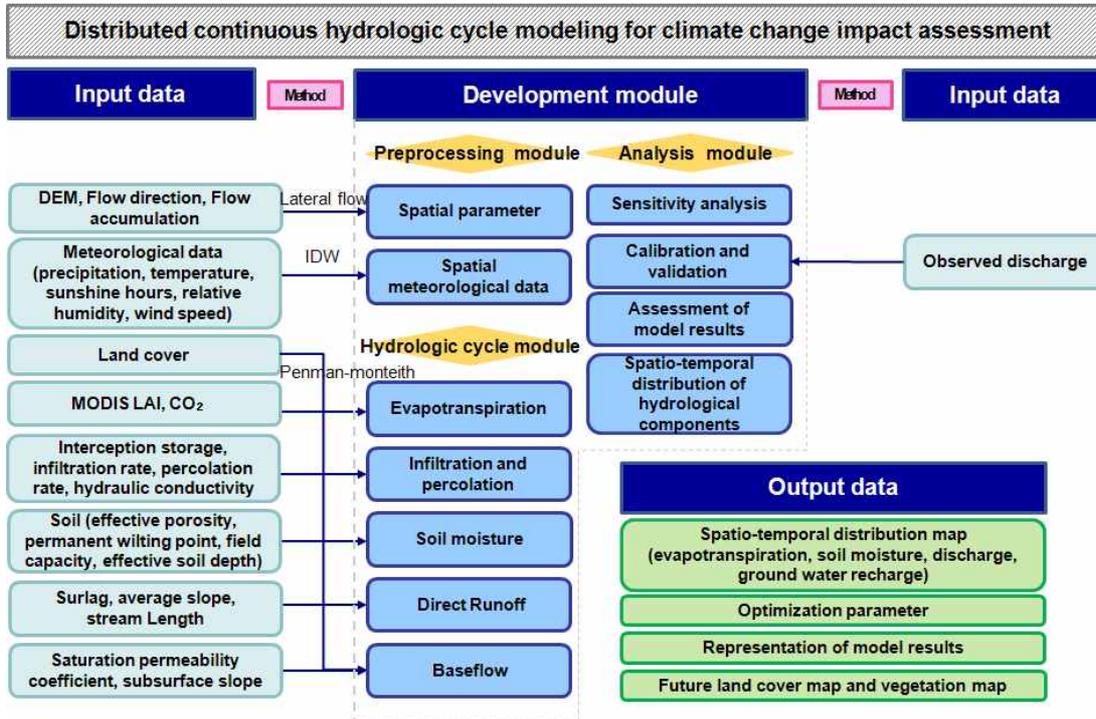


FIGURE 1. Outline of a meso-scale distributed continuous hydrologic modeling

등과 같은 집중형 모형, SWAT(Soil Water Assessment Tool), SLURP(Semi-distributed Land Use-based Runoff Processes)와 같은 HRU(Hydrologic Response Unit) 기반의 준분포형 모형, VIC(Variable Infiltration Capacity)과 VfloTM과 같은 격자 기반(Grid-based)의 분포형 모델 등 외국에서는 다양한 목적에 맞게 개발되어 특정 유역규모의 수문순환 해석에 활발히 적용되고 있다. 한편, 이 중에서 격자기반의 분포형 모델은 유역내의 시공간적 수문거동에 대한 현상을 이해하고 분석, 평가하는데 특히 장점이 있다. 또한 격자의 크기를 조절하면 우리나라 전체를 대상으로 주요 권역마다의 수문해석을 동시에 수행할 수도 있다.

따라서 본 연구에서는 현재까지 개발을 시도해온 일련의 격자기반 분포형 유역수문모형(Kim and Chae, 1999; Hong *et al.*, 2010)을 개선하여 광역의 수문순환을 모의할 수 있

는 분포형 연속수문모델로 발전시킨 후, 이 모델로 미래 기후변화에 따른 광역 수문 영향평가를 시도하고자 한다. 광역 수문 영향평가는 먼저 과거 기간 동안의 유출, 증발산량, 토양수분의 물수지를 추정하고, 미래 기후변화 시나리오를 적용하여 미래 물수지 영향평가를 수행하고자 한다. 본 연구에서 제안하는 모델구성의 전체개요는 그림 1과 같다. 여기서 개발된 광역 수문모델은 한강유역을 대상으로 적용테스트 과정을 통해 그 활용성을 검토하였다.

격자기반의 광역 분포형 수문모델 이론

광역기반의 수문분석은 대상지역을 일정 크기의 격자로 구분하고, 격자별로 3단 구성의 형태를 가진다. 그림 2와 같이, 각 격자에서 수평으로는 지표유출, 중간유출, 기저유출이 계산되며, 연직방향으로는 강우, 증발산, 침투, 침투

등이 모의된다. 일단위로 물수지를 산정하며, 크게 토양수분, 증발산, 유출 산정모듈로 구성되었다. 격자별 토양수분은 다음의 물수지 식에 의하여 일별로 산정된다(식 1).

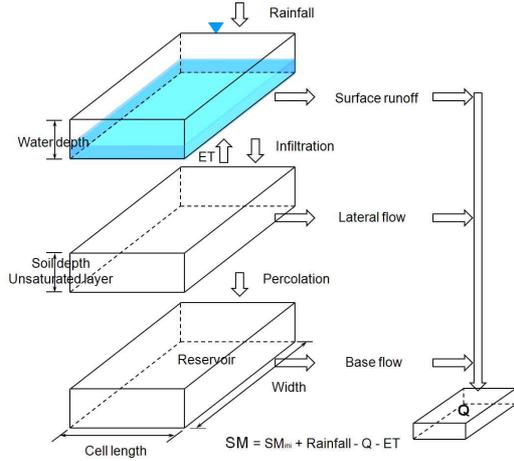


FIGURE 2. Schematic representation of the flow system

$$SM_t = SM_{ini} + \sum_{i=0}^t (R_{day} - ET - Q_{surf} - Q_{latf} - Q_{basf}) \quad (1)$$

여기서, SM_t 는 최종 토양수분량(mm), SM_{ini} 는 i 일의 초기토양수분량(mm), t 는 시간(day), R_{day} 는 i 일의 강수량(mm), Q_{surf} 는 i 일의 지표유출량(mm), Q_{latf} 는 i 일의 중간유출량(mm), Q_{basf} 는 i 일의 기저유출량(mm), ET 는 i 일의 증발산량(mm)이다.

증발산량 추정을 위하여 FAO Penman-Monteith 식(Verhoef and Feddes, 1991)을 사용하였다. 토양의 저류능을 추적하여 SCS-CN(Soil Conservation Service Curve Number)법으로 지표유출을 산정한다. 하천을 통하여 하루 이상 유하하는 지표유출의 경우에는 식 (2)와 같이 SWAT에서의 감수곡선식을 사용하였다. 중간유출 추적을 위한 지표하 흐름은 토양수분이 포장용수량을 초과할 때 다음 식을 적용하여 계산한다(Beven, 1982; Sloan

and Moore, 1984).

$$Q_{surf} = (Q'_{surf} + Q_{stor,i-1}) \cdot (1 - \exp\left[\frac{-surlag}{t_{conc}}\right]) \quad (2)$$

여기서, Q_{surf} 은 지표유출량, Q'_{surf} 은 주어진 날 소유역에서 발생한 유출량(지표유출체적), $Q_{stor,i-1}$ 은 전날 유출되지 않은 유출량, $surlag$ 는 지표유출 지체매개변수, t_{conc} 는 집중시간(hr)이다. t_{conc} 는 하천경사와 하천연장에 의하여 정해진다.

$$Q_{sub} = K_{sat} S_0, \quad FC < SW_c < PO_e \quad (3)$$

$$Q_{sub} = 0, \quad SW_c \leq FC \quad (4)$$

여기서, Q_{sub} 는 지표하 유출량(m^3/sec), S_0 는 지표하층의 경사(m/m), K_{sat} 는 포화투수계수(m/sec), SW_c 는 토양수분함량(m^3/m^3), FC 는 포장용수량(m^3/m^3), PO_e 는 유효공극률(m^3/m^3)이다(식 3, 4). 지표하 유출의 감수곡선식은 다음 식을 사용하였다(식 5).

$$Q_t = Q_0 K_r^t = Q_0 e^{-\alpha t} \quad (5)$$

여기서, Q_0 는 감수곡선상의 어떤 시각에 있어서의 유량이고, Q_t 는 Q_0 보다 t 시간 이후의 유량크기, K_r 은 감수상수(<1), α 는 토양 및 대수층의 특성을 표시하는 계수로서 $\alpha = -\ln K_r$ 의 관계를 가진다. 보다 자세한 이론내용은 Hong et al.(2010)에서 찾아볼 수 있다.

모델의 검보정

1. 대상유역 개요 및 자료

모델의 검보정을 위하여 그림 3과 같이, 한강유역내 소양강댐, 충주댐의 2개 유역을 선정하였다. 한강유역에는 27개의 기상관측소가 있으며, 이들을 대상으로 9개년(2001-2009년)

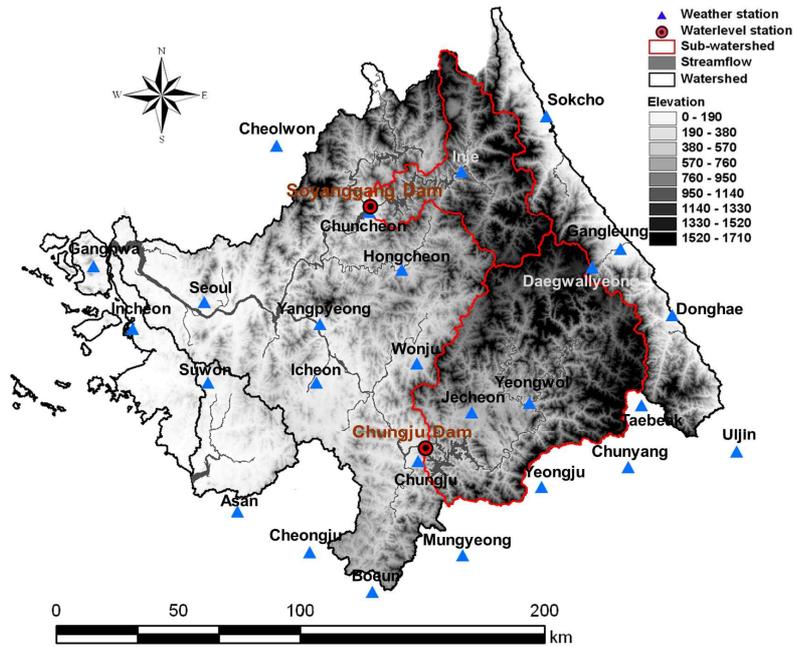


FIGURE 3. Study area

간의 일강수량, 최저/평균/최고온도, 상대습도, 일조시간, 풍속 등의 7개의 기상인자에 대한 자료와 모형의 검·보정을 위하여 2개 댐지점(충주댐, 소양강댐)의 유입량 자료를 수집하였다. 기상자료들은 IDW (Inverse Distance Weighting) 방법으로 공간분포화하는 모듈을 개발하여 일별로 1km 공간해상도의 입력자료를 준비하였다.

모델의 공간 입력자료로는 환경부에서 제공하는 1:25000의 중분류 토지피복도를 11개의 토지피복항목으로 재분류하여 사용하였으며, 작물높이, 알베도, 기공저항, 작물계수 선정 등에 이용되었다. 농촌진흥청에서 제공하는 1/25000 정밀토양도를 이용하여 토양 종류에 따른 공극률, 포장용수량, 위조점, 토양 유효 깊이속성자료를 모델에 입력하였다. Penman-Monteith

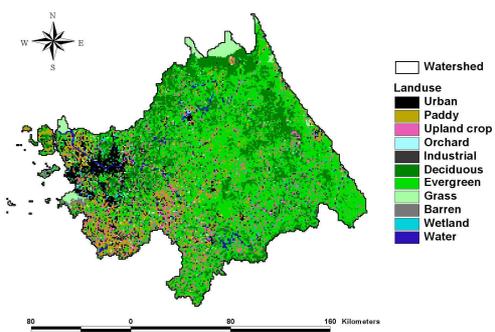


FIGURE 4. Land cover

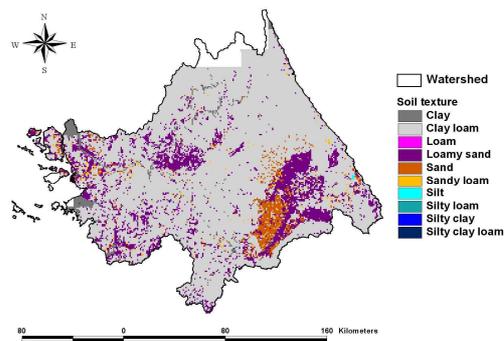


FIGURE 5. Soil texture

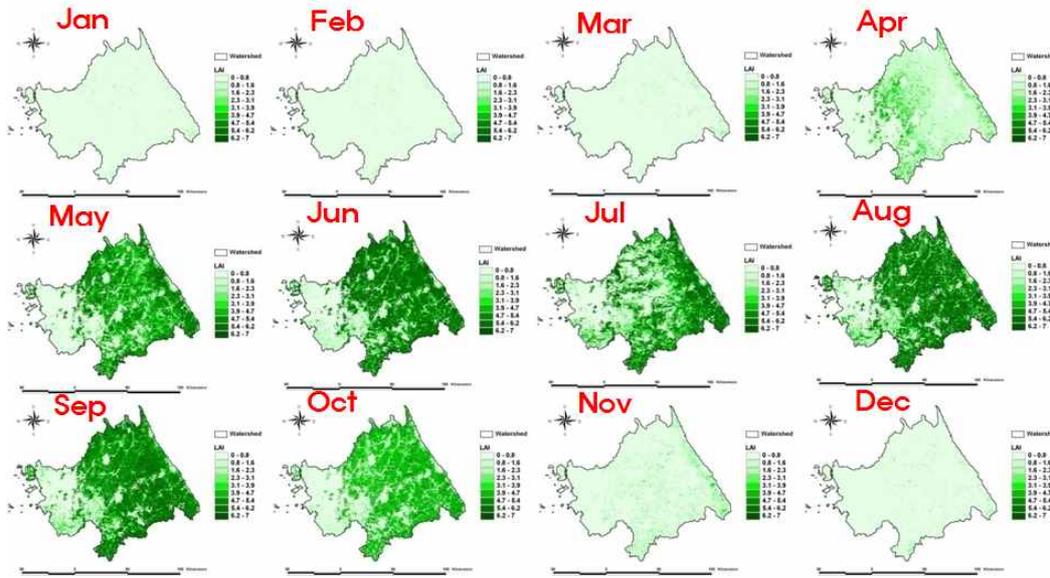


FIGURE 6. Monthly LAI for Han river basin (2001–2009)

증발산량 식에서 공기동역학적 저항 r_s 를 계산하는 과정에서 식생의 활력도를 나타내는 LAI(Leaf Area Index)는 Terra MODIS 위성영상의 LAI 자료를 준비하였다(그림 6). 모델에서는 월별로 LAI가 입력되며, 2001–2009년까지의 MODIS 위성영상을 사용하여 월별 평균 LAI 맵을 작성하여 사용하였다.

2. 모델의 검보정

유출관련 매개변수로써 표 1과 같이 6개의 매개변수를 선정하였으며, 3개 댐유역을 대상으로 9년 동안의 일 유출량 모의를 통한 매개변

수 값들을 정리하였다. per_rt는 기저유량에 크게 민감한 것으로 분석되었으며, surlag은 지표 유출을 재분배하여 유출되는 속도를 조절하는데 사용하였다. time_l, slp_l과 time_b, slp_b는 각각 중간유출의 집중시간과 경사, 기저유출의 집중시간과 경사를 나타낸다. 따라서 이 값이 커질수록 침투 유출량이 작아지고 유출 속도가 느려지는 특성을 가진다. 초기 매개변수를 안정화하기 위하여 2000년을 초기 안정화 기간으로 지정하고, 2001–2005년(5년)을 보정기간, 2006–2009년(4년)을 검증기간으로 사용하였으며, 각 유역별로 기저유출량, 감수곡

TABLE 1. The calibrated model parameters at four sub-watersheds

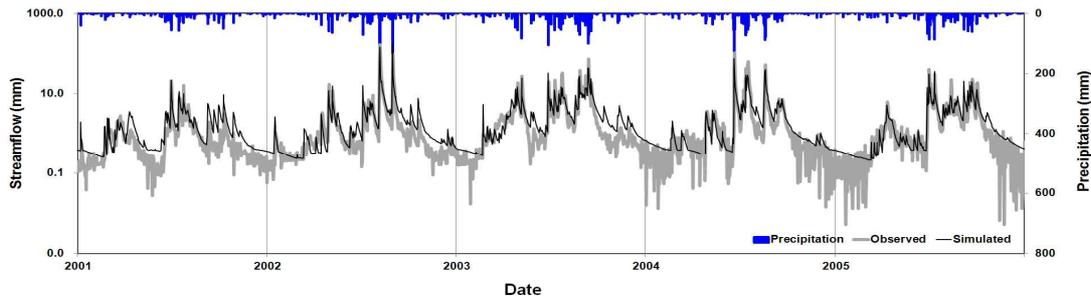
Parameter	Definition	Unit	LB	UB	CJ	SY	Avg.
per_rt	Soil percolation ratio	%	0.001	0.50	0.050	0.070	0.06
surlag	Surface runoff lag coefficient	–	1	10	4	2	3
slp_l	Lateral flow recession curve slope	mm/day	0.01	10.0	0.3	0.3	0.3
time_l	Lateral flow lag time	day	1	30	5	3	4
slp_b	Base flow recession curve slope	mm/day	0.001	5.0	0.01	0.01	0.01
time_b	Base basin lag time	day	1	90	3	3	3

LB: Lower Bound, UB: Upper Bound, CJ: Chungju Dam Watershed, SY: Soyonggang Dam Watershed, CP: Cheongpyeong Dam Watershed, Avg: Average

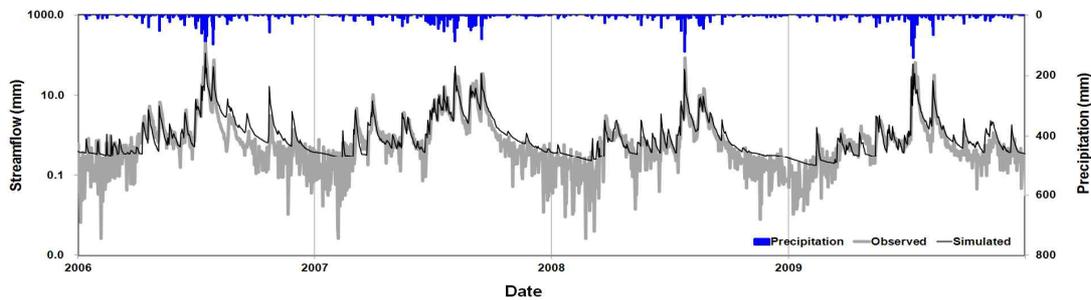
선 형태, 침투유출 순으로 보정을 실시하였다.

그림 7~8은 충주댐, 소양강댐 유입량에 대한 실측치와 모의치 수문곡선을 비교한 것이며, 표 2~3은 통계분석 결과를 정리한 것이다. 9년간의 평균 유출율을 보면, 충주댐 유역은 7% 크

게, 소양강댐 유역은 7% 적게 모의되었다. Nash-Sutcliffe 모델효율(NSE)은 충주, 소양강댐 각각 0.57, 0.71의 값을 보였으며, 결정계수(R^2)는 각각 0.65, 0.72의 값을 보였다.

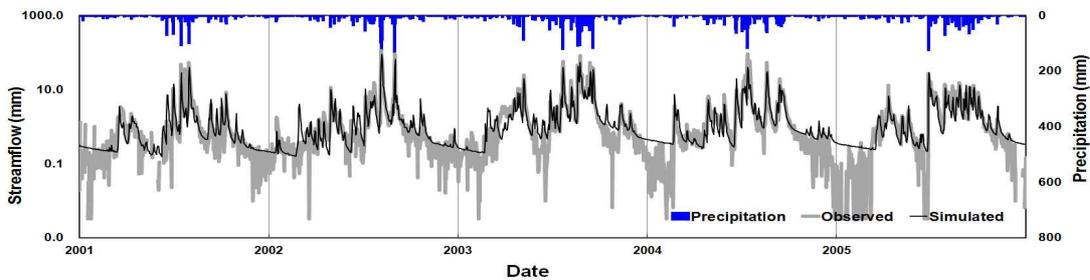


(a) Calibration



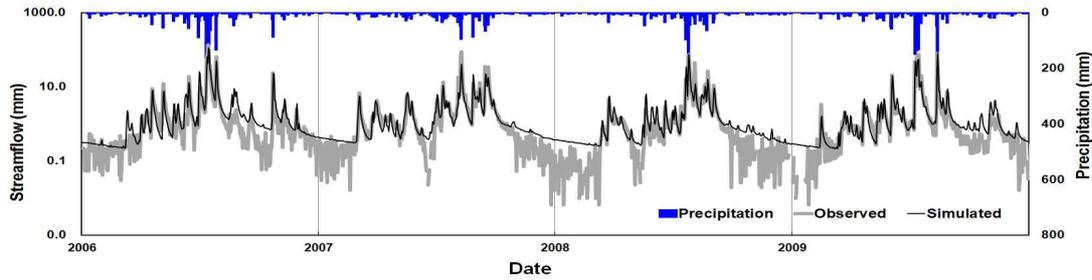
(b) Validation

FIGURE 7. Comparison of the observed and simulated inflow(Chungju-dam watershed)



(a) Calibration

FIGURE 8. Comparison of the observed and simulated inflow(Soyanggang-dam watershed)



(b) Validation

FIGURE 8. Continued

TABLE 2. Summary of model calibration and validation for streamflow(Chungju–dam watershed)

Year	Precipitation (mm)	Streamflow(mm)		Runoff ratio		RMSE (mm/day)	R ²	NSE	Note
		Obs.	Sim.	Obs.	Sim.				
2001	1321.7	601.5	712.3	0.46	0.54	2.78	0.66	0.59	C
2002	1050.8	307.1	419.7	0.29	0.40	1.76	0.50	0.62	
2003	1861.1	831.2	922.2	0.45	0.50	4.44	0.73	0.61	
2004	2093.0	1039.1	1222.3	0.50	0.58	3.20	0.59	0.50	
2005	1572.8	901.0	994.1	0.57	0.63	4.61	0.68	0.48	
2006	1574.4	734.6	845.6	0.47	0.54	2.48	0.73	0.50	V
2007	1737.2	943.6	1079.8	0.54	0.62	4.03	0.87	0.80	
2008	1550.7	1004.9	989.9	0.65	0.64	3.94	0.55	0.54	
2009	1050.9	457.1	510.8	0.43	0.49	4.91	0.58	0.50	
Average	1534.7	757.8	855.2	0.48	0.55	3.57	0.65	0.57	-

C: Calibration, V: Validation, RMSE: Root Mean Square Error, R²: Determination Coefficient, NSE: Nash–Sutcliffe Model Efficiency

TABLE 3. Summary of model calibration and validation for streamflow(Soyanggang–dam watershed)

Year	Precipitation (mm)	Streamflow(mm)		Runoff ratio		RMSE (mm/day)	R ²	NSE	Note
		Obs.	Sim.	Obs.	Sim.				
2001	1187.6	732.9	622.9	0.62	0.52	2.25	0.83	0.80	C
2002	1014.7	563.1	524.5	0.55	0.52	1.68	0.88	0.86	
2003	1434.7	843.4	719.4	0.59	0.50	3.04	0.68	0.60	
2004	1857.8	1334.0	1071.5	0.72	0.58	3.15	0.78	0.76	
2005	1452.2	1004.9	1215.2	0.69	0.84	3.07	0.45	0.56	
2006	1327.3	779.6	661.9	0.59	0.50	1.48	0.56	0.62	V
2007	1759.0	1183.8	995.1	0.67	0.57	2.40	0.88	0.74	
2008	1273.8	940.3	779.7	0.74	0.61	2.80	0.72	0.70	
2009	1225.0	725.9	594.2	0.59	0.49	2.27	0.74	0.73	
Average	1392.5	900.9	798.3	0.64	0.57	2.46	0.72	0.71	-

C: Calibration, V: Validation, RMSE: Root Mean Square Error, R²: Determination Coefficient, NSE: Nash–Sutcliffe Model Efficiency

3. 분포형 모델의 결과분석

그림 9~11은 두 댐유역을 대상으로 검토된 평균 매개변수 값을 이용하여, 한강유역 전체의 10개년(2000-2009년) 간의 연평균 유출, 증발산량, 토양수분의 공간적 모의결과를 보여

주고 있다. 한강유역의 전체면적에 대한 두 댐유역의 면적이 상당부분을 차지하며, 댐의 영향을 받는 하류유역은 제외하고 주요 댐유역을 대상으로 검토정하여 평균 매개변수 값을 적용하였다. 유출의 공간적 결과를 보면, 지역별 강

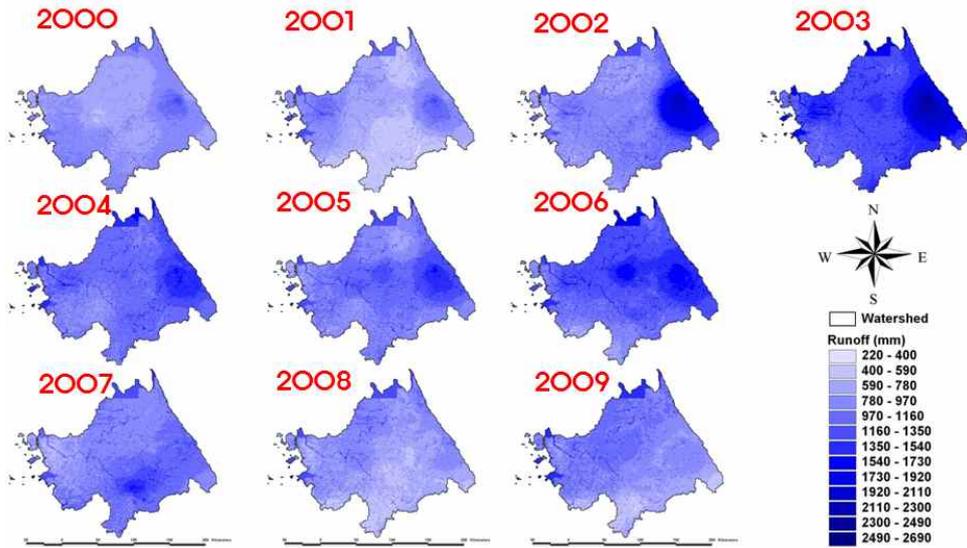


FIGURE 9. Annual average streamflow

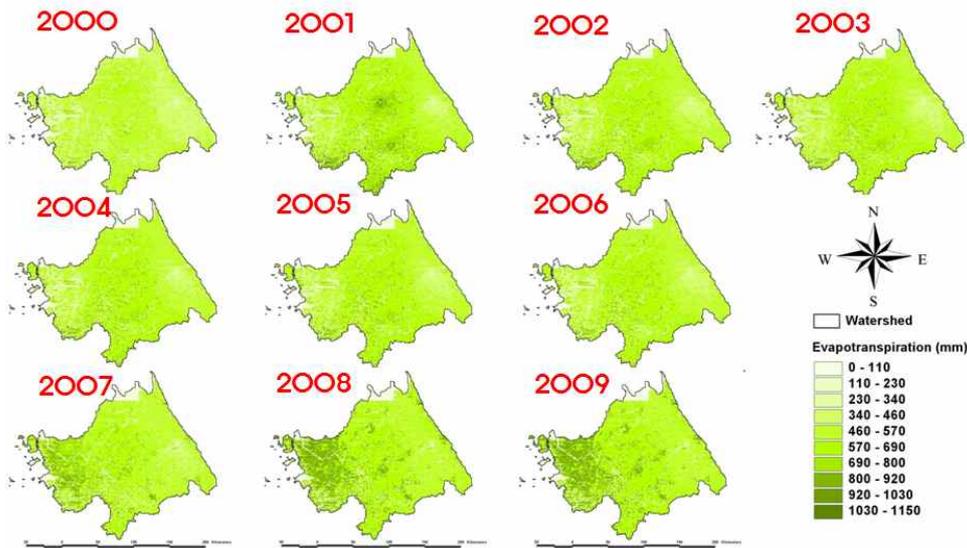


FIGURE 10. Annual average evapotranspiration

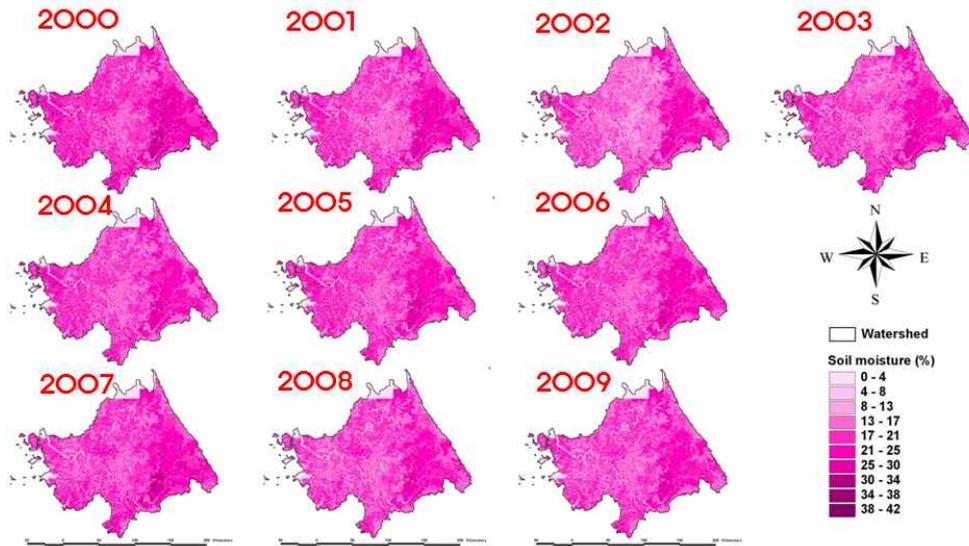


FIGURE 11. Annual average soil moisture

우에 의해 크게 지배를 받는 것을 확인할 수 있었다. 우리나라의 기상상황에서 증발산량이 점유하는 비율은 30~40%를 상회한다고 볼 수 있다(Shin *et al.*, 2006). 유역 내 셀 단위의 연평균 증발산량 분포도는 토지이용도와 비교해 보았을 때 논과 산림 지역의 증발산량이 높은 것을 확인할 수 있었다. 연평균 토양수분 분포도의 경우 토양수분은 강우와 토양에 가장 민감한 것을 알 수 있다. 또한 토양도와 비교해 보았을 때 같은 강우조건에서 토양종류가 silt loam(미사질양토)인 지역의 토양수분이 상대적으로 크게 모의되는 것을 확인할 수 있다. 이것은 silt loam이 loam(양토), sandy loam(사양토), sand(사토)에 비하여 입자가 작고 조밀하여 공극률이 비교적 작으므로 토양수분이 쉽게 배수되지 않고 오래 머물러 있기 때문이다.

4. 미래 기후변화에 따른 수문인자의 변화 평가

미래 기후에 따른 영향평가를 실시하기 위하여 5개의 기후변화 시나리오자료(CSIRO MK3, GFDL CM2_1, CONS ECHO-G, MRI CGCM2_3_2, UKMO HADGEM1)를 적용하였다. 본 연구에서는 한강유역을 25개의 유역으

로 구분하여, 각 유역별로 통계적 상세화 기법을 통하여 100년(2000-2099년) 동안 6개(최고/최저기온, 강수량, 상대습도, 일사량, 풍속)의 기상자료를 일별로 구축하였다. 통계적 상세화는 예측변수(predictor variables)의 GCM 결과와 관측자료 사이의 통계적 관계를 이용하여 기후모델 결과의 편의를 보정하는 기법이며, 통상 3가지 방법(일기상발생기, 전이함수, 일기도 분류)으로 구분된다(IPCC, 2001). 본 연구에서는 전이함수를 이용하여 공간적으로 상세화하고, 일기상발생기를 이용하여 시간적으로 상세화하는 조합(hybrid) 기법을 선택하였다. 본 연구에서 사용한 전이함수는 주성분분석 기법 중 하나인 CSEOF(CycloStationary Empirical Orthogonal Function)와 다중선형회귀분석을 이용하여 100~350km의 GCM 결과를 기상관측소 지점에 대해 공간적으로 상세화하였다. 이후 모델을 구동하여 10년 단위로 수문인자들의 변화를 평가하였다.

5개의 시나리오에 의한 미래 10년 단위의 수문변화를 정리하면 그림 12와 같다. 결과를 살펴보면, 미래 강수량은 모든 시나리오에서 증가하는 것으로 나타났으며 CONS ECHO-G시

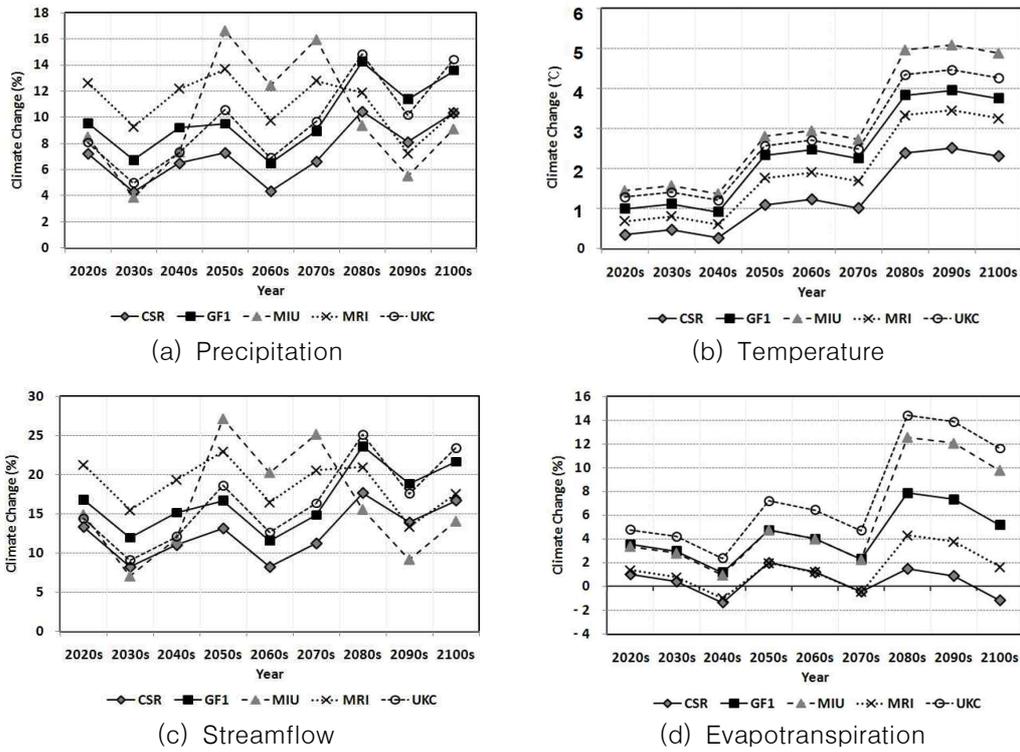


FIGURE 12. The future hydrological components for five climate scenarios of GCM models

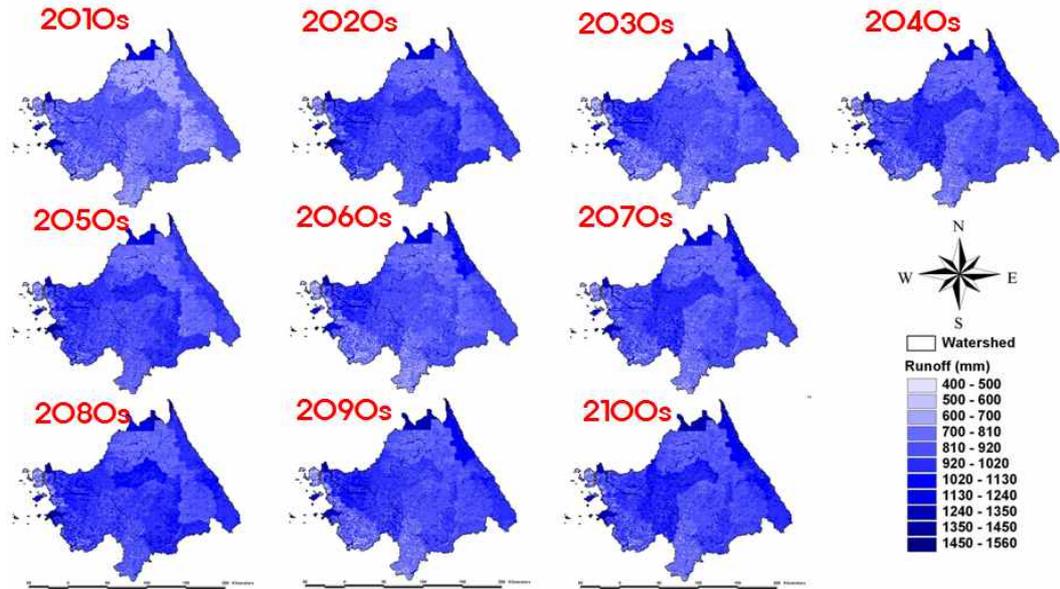


FIGURE 13. The future streamflow for CSIRO MK3 model

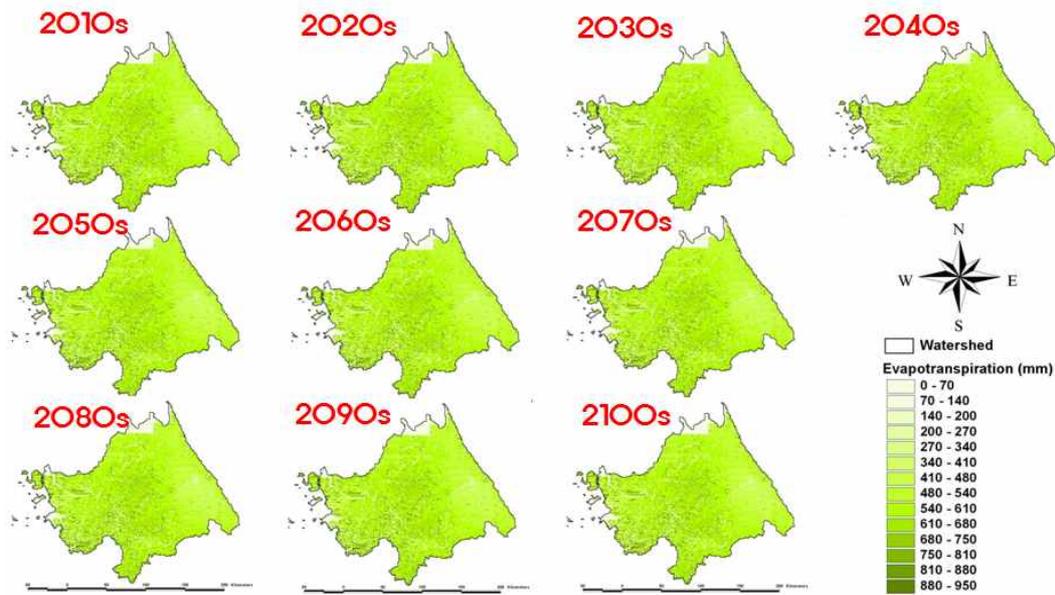


FIGURE 14. The future evapotranspiration for CSIRO MK3 model

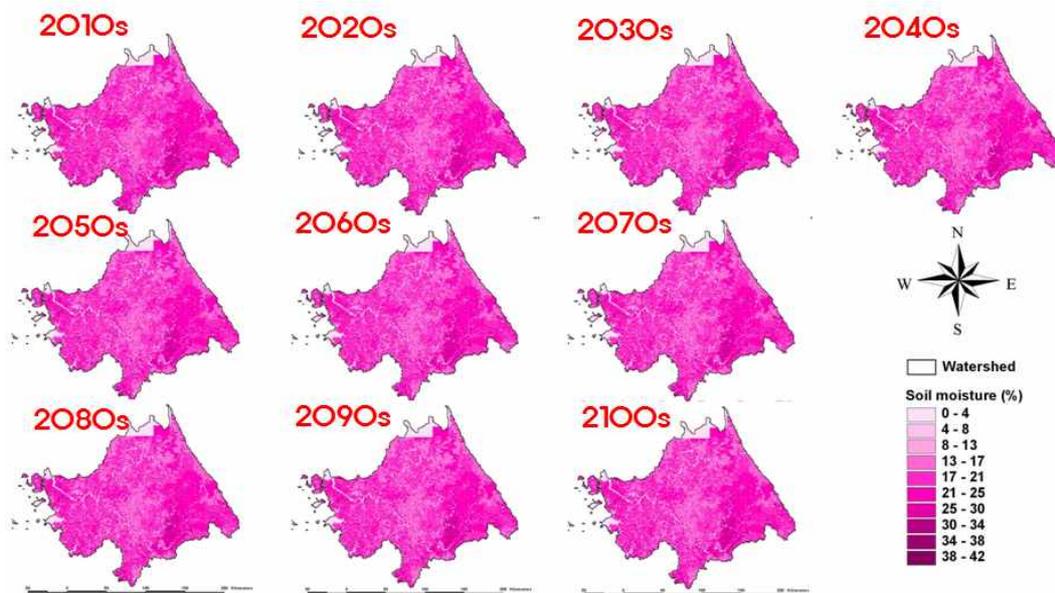


FIGURE 15. The future soil moisture for CSIRO MK3 model

나리오에서 3.9%~16.6%의 범위로 가장 큰 폭의 변화를 보였다. 기온 또한 강수량과 마찬가지로 모든 시나리오에서 모든 기간에 증가하는

것으로 나타났다. 미래 유출량의 변화는 강수량과 비슷한 경향을 보이면서 전체적으로 7.0%~27.1% 증가하는 것으로 분석되었다. 증

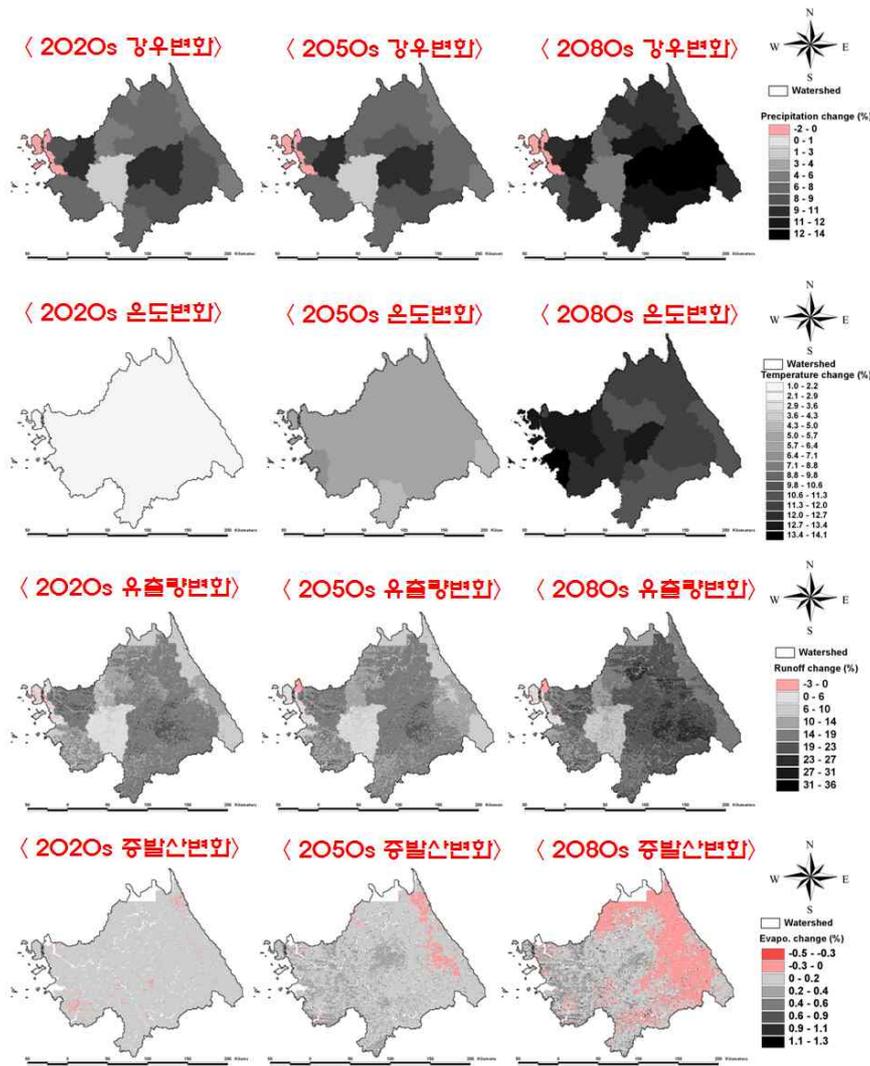


FIGURE 16. Change in precipitation, temperature, streamflow and evapotranspiration for CSIRO MK3 model

발산량은 일부 경우를 제외하고 증가하는 경향을 나타냈다. 그림 13~15는 CSIRO MK3의 경우에 대한 미래 유출량, 증발산량, 토양수분 분포도를 각각 보여주고 있다.

한강유역의 미래 기후변화영향에 대해 좀 더 체계적으로 살펴보기 위하여 2010s, 2020s, 2030s, 2040s, 2050s, 2060s, 2070s, 2080s, 2090s, 2100s중에서 현재시기인

2010s를 기준으로 미래시기 2020s(2010–2019년), 2050s(2040–2049년), 2080s(2070–2079년)에 대해 기상수문요소의 변화량을 분포도로 작성하였다(그림 16). CSIRO MK3의 경우에 강수량이 한강유역의 25개의 중권역 중에 한강하류와 한강서해유역을 제외하고는 모두 증가하는 경향을 보였다. 특히 2080s에는 남한강상류, 평창강, 섬강, 강릉남대

천유역의 강수량 가장 크게 증가하는 것으로 나타났다. 온도는 전체적으로 증가하며, 2080s에는 시화호유역의 온도가 가장 크게 증가하였고 섬강 경안천, 팔당댐, 한강서울, 한강고양, 한강서해유역이 그 다음으로 크게 증가하는 것으로 나타났다. 유출량은 강수량의 증가하는 경향에 따라 한강서해 하류일부지역을 제외하고는 증가하는 것으로 나타났다. 증발산량 또한 전체적으로 증가하는 경향을 보였다.

결론

본 연구에서는 현재까지 개발되어온 격자 기반 분포형 일단위 유역수문모형을 개선하여 광역의 수문순환을 모의할 수 있는 분포형 연속 수문모델로 발전시켜 수천 km²의 다유역을 대상으로 검보정을 거친 후에, 한강유역 전체를 대상으로 미래 기후변화에 따른 광역 수문 영향평가를 시도하고자 하였다.

모델의 주요내용은 유역을 일정 크기의 격자로 구분하고, 각 격자별로 지표 유출층, 지표 불포화 및 포화 토양층의 3단으로 구성하여 일별 물수지를 계산하며, 증발산량은 Terra MODIS의 LAI(Leaf Area Index)를 고려한 Penman-Monteith방법을 사용하였고, 지표 및 지표하유출은 SWAT 모델의 지체계수(lag coefficient)를 적용하였으며, 감수곡선의 보정을 위하여 감수곡선(recession curve)식을 적용하였다.

모델의 검보정을 위하여 한강유역의 충주댐과 소양강댐을 대상으로 9개년(2001-2009)의 댐유입량 자료를 이용하여 모델의 6개 주요매개변수(soil percolation ratio, surface lag coefficient, lateral flow recession curve slope, lateral flow basin lag time, base flow recession curve slope, base flow basin lag time)를 보정하였으며, Nash-Sutcliffe 모델효율(NSE)은 각각 0.57, 0.71의 값을 보였으며, 결정계수(R²)는 각각 0.65, 0.72의 값을 보였다.

보정된 모델의 평균매개변수들을 이용하여

한강유역 전체를 대상으로, 5개의 기후변화 시나리오자료(CSIRO MK3, GFDL CM2_1, CONS ECHO-G, MRI CGCM2_3_2, UKMO HADGEM1)를 적용한 결과, 미래 유출량의 변화는 강수량과 비슷한 경향을 보이면서 전체적으로 7.0%~27.1% 증가하였고, 증발산량도 미래 기온의 증가경향으로 일부 경우를 제외하고 증가하는 경향을 나타내었으며, 모델의 결과로부터, 한강유역에 대한 미래 수문인자들의 공간적 변화를 알 수 있었다.

본 연구를 통해 개선된 격자기반 분포형 일 단위 유역수문모형은 국토 전반의 지형조건을 고려하여 수문순환 변화를 시각적으로 파악이 가능하다. 또한 미래 기후변화 시나리오와 연계하여 수자원 영향평가를 위한 방법론을 제시함으로써 광역적 스케일의 수문순환변화를 총체적으로 분석하여 수자원 정보를 제시하는 연구에 활용이 가능할 것으로 기대된다. 

REFERENCES

- Ha, R., H.J. Shin and S.J. Kim. 2007. Proposal of prediction technique for future vegetation information by climate change using satellite image. Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies 10(3):58-69 (하림, 신형진, 김성준. 2007. 위성영상을 이용한 기후변화에 따른 미래 식생정보 예측 기법 제안. 한국지리정보학회지 10(3):58-69).
- Hong, W.Y., G.A. Park, I.K. Jeong and S.J. Kim. 2010. Development of a grid-based daily watershed runoff model and the evaluation of its applicability. Journal of the Korean Society of Civil Engineers 30(5B):459-469 (홍우용, 박근애, 정인균, 김성준. 2010. 분포형 유역 일유출 모형의 개발 및 적용성 검토. 대한토목학회지 30(5B):459-469).

- IPCC. 2001. Climate change 2001: Scientific basis, In: B. Metz et al.(eds.). Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, New York, USA.
- Joh, H.K., S.B. Kim, H. Cheong, H.J. Shin and S.J. Kim. 2011. Projection of future snowfall by using climate change scenarios. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 14(3):188-202 (조형경, 김삿별, 정혁, 신형진, 김성준. 2011. 기후변화 시나리오를 이용한 미래의 강설량 예측. *한국지리정보학회지* 14(3):188-202).
- Kim, B.S., H.S. Kim and B.H. Seoh. 2005. Impact and assessment of climate change on water resources. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 53(4):30-42 (김병식, 김형수, 서병하. 2005. 기후변화가 수자원에 미치는 영향과 평가방법. *대한토목학회지* 53(4):30-42).
- Kim, S.J. and H.S. Chae. 1999. Development of grid-based soil moisture routing model (GRISMORM) applied to bocheonchun watershed. *Journal of GIS Association of Korea* 7(1):39-48 (김성준, 채효석. 1999. 격자기반의 토양수분추적 모형 개발 : 보청천 유역 사례연구. *한국GIS학회지* 7(1):39-48).
- Lee, M.J. and J.H. Lee. 2011. Coupled model development between groundwater recharge quantity and climate change using GIS. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 14(3):36-51 (이명진, 이정호. 2011. GIS를 이용한 기후변화 연동 지하수 함양량 산정 모델 개발 및 검증. *한국지리정보학회지* 14(3):36-51).
- Shin, H.J., G.A. Park, M.J. Park and S.J. Kim. 2012. Projection of forest vegetation change by applying future climate change scenario MIROC3.2 A1B. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 15(1):64-75 (신형진, 박근애, 박민지, 김성준. 2012. 미래 기후변화 시나리오 MIROC3.2 A1B에 따른 우리나라 산림식생분포의 변화 전망. *한국지리정보학회지* 15(1):64-75).
- Shin, S.C., M.H. Hwang, I.H. Ko and S.J. Lee. 2006. Suggestion of simple method to estimate evapotranspiration using vegetation and temperature information. *Journal of the Korea Water Resources* 39(4):363-372 (신사철, 황만하, 고익환, 이상진. 2006. 식생 및 기온정보를 조합한 증발산량 산정을 위한 간편법 제안. *한국수자원학회지* 39(4):363-372). **KAGIS**