

SWAT 모형을 이용한 소양강댐 유역의 미래 수자원 영향 평가

Assessment of future hydrological behavior of Soyanggang Dam watershed using SWAT

박민지* · 신형진** · 박근애*** · 김성준****

Park, Min Ji · Shin, Hyung Jin · Park, Geun Ae · Kim, Seong Joon

Abstract

Climate change has a huge impact on various parts of the world. This study quantified and analyzed the effects on hydrological behavior caused by climate, vegetation canopy and land use change of Soyanggang dam watershed (2,694.4 km²) using the semi-distributed model SWAT (Soil Water Assessment Tool). For the 1997-2006 daily dam inflow data, the model was calibrated with the Nash-Sutcliffe model efficiencies between the range of 0.45 and 0.91. For the future climate change projection, three GCMs of MIROC3.2hires, ECHAM5-OM, and HadCM3 were used. The A2, A1B and B1 emission scenarios of IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) were adopted. The data was corrected for each bias and downscaled by Change Factor (CF) method using 30 years (1977-2006, baseline period) weather data and 20C3M (20th Century Climate Coupled Model). Three periods of data; 2010-2039 (2020s), 2040-2069 (2050s), 2070-2099 (2080s) were prepared for future evaluation. The future annual temperature and precipitation were predicted to change from +2.0 to +6.3°C and from -20.4 to 32.3% respectively. Seasonal temperature change increased in all scenarios except for winter period of HadCM3. The precipitation of winter and spring increased while it decreased for summer and fall for all GCMs. Future land use and vegetation canopy condition were predicted by CA-Markov technique and MODIS LAI versus temperature regression respectively. The future hydrological evaluation showed that the annual evapotranspiration increases up to 30.1%, and the groundwater recharge and soil moisture decreases up to 55.4% and 32.4% respectively compared to 2000 condition. Dam inflow was predicted to change from -38.6 to 29.5%. For all scenarios, the fall dam inflow, soil moisture and groundwater recharge were predicted to decrease. The seasonal evapotranspiration was predicted to increase up to 64.2% for all seasons except for HadCM3 winter.

Keywords : SWAT, Climate change, Land use, Vegetation canopy, GCMs

요 지

기후변화는 전 세계적으로 다양한 영향을 끼치고 있다. 본 연구에서는 준분포형 연속 모형인 SWAT을 이용하여 소양강 유역(2,694.4 km²)의 기후, 식생활력도, 토지이용 변화에 따른 수문요소 변화 값을 정량화하여 기후변화에 따른 수문요소의 영향을 분석하였다. 1997-2006년의 일 댐유입량을 이용하여 모형을 보정한 결과 Nash-Sutcliffe 모형 효율이 0.45-0.91로 나타났다. 기후변화 자료는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)의 GCM 모형 중 MIROC3.2 hires, ECHAM5-OM, HadCM3의 결과 값을 입력하였으며, 이때 배출 시나리오는 A2, A1B와 B1을 사용하였다. 각 모형에 20C3M(20th Century Climate Coupled Model) 값과 과거 30년(1977-2006)의 값을 비교하여 오차 수정을 한 후 2000년(base line)을 기준으로 각 기간별 Change Factor Method로 다운스케일링을 실시하였다. 미래 기후자료는 2020s(2010-2039), 2050s(2040-2069), 2080s(2070-2099)의 기간으로 나누어 분석하였다. 미래 온도의 경우 연도별로는 2.0~6.3°C 증가하였으며, 계절적으로도 HadCM3를 제외한 전 기간에 증가하였다. 연강수량은 -20.4~32.3% 변화하였으며, 가을의 강수량 감소와 겨울과 봄 강수량 증가가 모든 모형에서 나타났다. 미래 토지이용과 식생 활력도 예측에는 CA-Markov 방법과 MODIS LAI와 온도와의 회귀식을 사용하였다. 이에 따른 연중 수문요소 예측 결과, 증발산량은 최대 30.1% 증가하였으며, 토양수분과 지하수 함양량은 최대 32.4%, 55.4% 감소하는 것으로 예측되었다. 댐 유입량의 경우는 모형별 차이가 크며, -38.6~29.5%의 변화 범위를 보였다. 계절적으로는 모든 시나리오에서 가을의 댐 유입량, 토양수분, 지하수 함양량 감소를 보였으며, 온도와 강수량이 감소하는 일부기간을 제외하고는 증발산량은 모두 증가하였다.

핵심용어 : SWAT, 기후변화, 토지이용, 식생활력도, GCMs

*정회원 · 건국대학교 사회환경시스템공학과 박사수료 (E-mail : iamg@konkuk.ac.kr)

**정회원 · 건국대학교 사회환경시스템공학과 박사수료 (E-mail : shjin@konkuk.ac.kr)

***정회원 · 건국대학교 지역건설환경공학과 박사 (E-mail : dolpin2000@konkuk.ac.kr)

****정회원 · 교신저자 · 건국대학교 환경시스템학부 사회환경시스템공학과 교수 (E-mail : kimsj@konkuk.ac.kr)

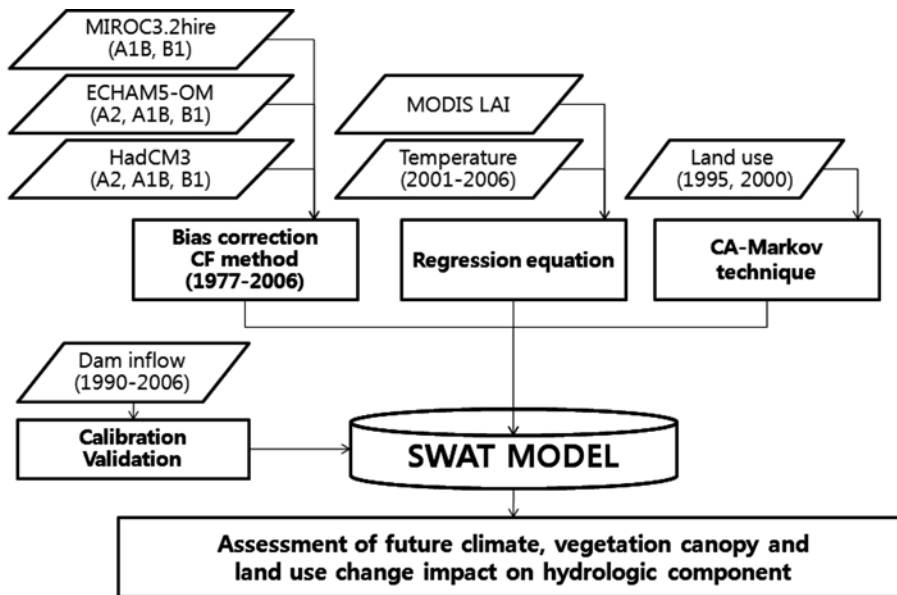


그림 1. 연구흐름도

1. 서 론

화석연료의 사용은 온실가스와 이산화탄소 배출 발생을 증가시킨다(IPCC, 2007). IPCC 시나리오의 GCM은 대기 온실가스 증가가 지표온도의 증가를 나타낸다고 예측하고 있으며, 이러한 변화는 수문 순환에 영향을 끼칠 것이다. GCM 예측 결과 1900년에 비해 2100년의 온도는 1.1~6.4°C 증가할 것이며, 강우 강도와 양도 변화할 것으로 예측하였다(IPCC, 2007).

미래 기후변화에 대한 적절한 관리를 위해서는 수문학적 정량화는 필수적이다. 지역과 계절적인 온도와 강수량의 변화 양상은 매우 다양하며 그에 따른 수문 순환에 대한 영향 예측은 매우 어려운 실정이다. 따라서 국내외 여러 각도에서 기후변화에 대한 다양한 연구가 수행되었다. 현재 강우 양상을 사용한 연구들은 온도 증가로 인해 증발산량 증가와 유출량 감소를 예측하였고 그에 따른 가뭄 빈도 증가를 보이는 것으로 나타났다(Schaake, 1990; Rind *et al.*, 1990, Nash and Gleick, 1991, 1993). Labat *et al.*(2004)는 온도 1°C 증가는 해양 증발량 증가에 따라 지구적으로는 유출량이 4% 증가한다고 증명하였다. Kamga(2001)는 수문학적 물수지 모델인 WatBal을 이용하여 카메룬의 1과 3°C의 온도 증가와 4~13% 강수량 변화가 -3~18%의 연 하천 유량의 변화를 보임을 연구하였다. Legesse *et al.*(2003)은 아프리카를 대상으로 PRMS 모형을 이용하여 강우 10% 감소에 따른 30%의 유출량 감소와 1.5°C의 온도 증가에 따른 15% 유출량 감소를 모의하였고, Lettenmaier *et al.*(1999)은 GCM의 결과를 이용하여 수자원에 대한 영향을 평가하였다. 미국 저장수 지역인 San Joaquin 강 유역을 대상으로 SWAT 모형을 이용하여 Darren *et al.*(2009)은 CO₂와 강수량, 온도 변화에 따른 수문 영향을 분석하였다. CO₂ 농도 970 ppm와 온도 6.4°C 증가에 따라 식물의 수분스트레스 감소에 영향으로 증발산량은 37.5% 감소하고 수분생산량은 36.5%, 하천 유출량은 23.5% 증가하며, 관개가 감소하고 이는 다시 여름의 유출량을 더욱 증가시킬 것이라고 예측하였다. 국내에서는 김병식 등

(2004)이 YONU GCM 결과 값을 다운스케일링한 후 CO₂ 배증 상황에서 SLURP 모형을 이용하여 용담댐 유역의 유출량을 모의하였다. 안소라 등(2008)은 CCCma CGCM2의 결과를 다운스케일링하여 경안천 상류유역의 유출변화를 분석하였고, 2009년에는 두 개의 GCM을 선정하여 연 강수량과 온도 증가에 따른 증발산량의 3~16% 증가와 지하수 함양량의 감소를 모의하였다. 이러한 연구들은 모두 유역의 수문순환 과정이 온도와 강수량 변화에 매우 민감함을 지적하였다.

본 연구에서는 기후변화에 따른 수자원의 연구 도구로 활용 중인 SWAT 모형을 이용하여 다양한 미래 시나리오 결과에 대한 온도와 강수량 변화가 소양강댐 유역의 수문순환에 미치는 영향을 정량화하여 본 유역에 미래 수자원 변화에 대한 적절한 수자원 대응 방안 마련에 도움을 주고자 한다. 본 연구의 흐름도는 그림 1과 같다.

2. SWAT 모형의 개요

SWAT 모형은 Agriculture-Agricultural Research Service (USDA-ARS)에서 개발된 수문/수질 모형이다(Arnold *et al.*, 1998). SWAT의 주요 목적은 미계측 유역의 농업과 토지이용에 따른 수문 요소, 토양 유실량, 농업적 화학물질의 영향을 예측하는 것이다. 이 모형은 유역 단위의 수문 순환과 농업적 오염을 연속적, 분포형, 일단위로 모의한다. 모형의 주요 구성 요소는 박테리아, 병원균, 살충제, 영양물질의 유출, 부하, 기후 조건, 수문, 토양 속성, 식생 성장과 토지이용이다. SWAT은 유역을 토양, 토지이용 속성에 의해 HRU로 분류한다. HRU는 수문, 지형학적으로 비슷한 속성으로 균질한 공간적 성격을 갖는다. HRU의 물수지는 차단, 눈, 토양 속성, 얇은 대수층과 깊은 대수층의 저장 구성 요소를 나타낸다. 유출량 생성은 유역 출구로 가는 저수지, 하천을 통한 흐름과 소유역의 모든 HRU를 통한 합산이다. 일강수량으로부터 지표 흐름 예측은 CREAMS 유출 모형과 비슷한 절차를 기초하여 예측된다(Knisel, 1980). 유출량은 토양, 토지 이용 관리 정보가 구체화된 값인 SCS 유출곡선을 사용하여

예측된다(SCS, 1984). 유출곡선은 현재 토양 수분량을 기초하여 각 시간대로 조정된다.

3. 대상 유역 및 입력자료 구축

소양강댐 수위관측소를 유역출구로 하는 소양강댐 유역은 유역면적은 2,694.4 km²이며 유역둘레는 383.6 km, 유역평균 폭은 16.5 km, 유역평균표고는 650.5 m, 유역평균경사는 46.0%로 국내 북동부 산악지역에 위치해있으며 산림면적은 2,478.5 km²으로서 유역면적의 92.0% 이른다.

모형을 입력 기상자료는 최고, 최저 온도(°C), 일사량(MJ/m²), 풍속(m/s), 강수량(mm), 상대습도가 필요하며 본 연구에서는 기상청에서 제공하는 4개(속초, 대관령, 춘천, 인제)의 기상관측소의 기상자료와 군량, 귀둔, 명개, 방동, 백담사, 부평, 상남, 서화, 신평, 용대, 원통, 인제, 장수대, 창촌, 천전, 추대, 추양, 현리 18개 강우 관측소의 강수량 자료를 1977년부터 2006년까지 구축하였다. 검보정시 필요한 소양강댐 유입량 자료는 1987년부터 2006년까지 일단위로 구축하였다. 국립지리원의 1:5,000 수치지도를 이용한 30×30 해상도의 DEM를 입력하였다. 또한 토지이용도에 경우 국가수자원관리종합관리시스템(WAMIS)에서 제공하는 1995, 2000년 7분류에서 미래 토지이용 예측시 필요한 시계열 산림분류를 위해 NOAA/AVHRR NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)을 이용하여 1995년과 2000년의 산림을 재분류하여 9가지(수역, 시가지, 논, 밭, 초지, 나지, 침엽수, 혼효림, 활엽수)의 토지이용도를 구축하였다. SWAT의 주요 입력 자료인 토양도 구축을 위해 농촌진흥청에서 제공하는 1:25,000 정밀토양도를 구축하였다(그림 2, 그림 5(a)).

4. 미래기후변화

4.1 GCM 및 배출 시나리오

GCM은 대기의 3차원 운동을 유체역학적, 열역학적으로 모의하는 순환 모형으로 대기, 해양, 해빙, 지표면 뿐 만 아니라 에어로졸, 탄소순환, 대기 화학과정 등 거의 대부분의 기후 시스템 요소를 포함하는 총체적 모형으로 여러 선진국들의 자국을 중심으로 모형을 개발 구동하여 기후변화를 예측하고 있다. 이러한 모형들은 IPCC에 기초한 온실가스 배출 시나리오의 특별 보고서(Special Report on Emissions Scenarios, SRES)에 따라 구동되게 된다. SRES는 인구, 화석 연료 사용과 배출 가스 저감 기술 개발 등의 기술경제발전을 고려하여 크게 A1, A2, B1, B2로 나누게 된다. 여기서 A1은 다시 D, G, B, T로 분류되는데 각각 벨런스형, 석탄주도형, 가스주도형, 고효율 에너지 기술 주도형을 뜻하며 가스 주도형인 A1B는 현실에 가장 부합되는 시나리오이다. 인구의 지속적인 증가로 고배출 시나리오인 A2, 경제, 사회, 환경 분야의 지속가능성을 고려한 지속발전형 저배출 시나리오인 B1이 본 연구에서 사용되었다. GCM은 총 세 가지로 기후변화 연구에 가장 많이 사용되고 있는 영국의 HadCM3와 독일의 ECHAM5-OM, 우리나라와 가장 가까우며 가장 높은 해상도를 가진 일본의 MIROC3.2 hires의 기후변화 시나리오 결과를 다운스케일하여 모형에 입력함으로써 수문 요소 반응의 변화를 분석하였다. 모형별 격자 크기는 그림 3과 같다. 이 중 영국의 HadCM3의 경우 A1o와 Wang(2008)은 2100년의 A1B 시나리오를 기준으로 겨울에 세계적 온도 증가가 다른 모형에 비해 0.3°C 높았으며, 다른 GCM과 다르게 여름의 증발산에 따른 상쇄효과가 보이지 않아

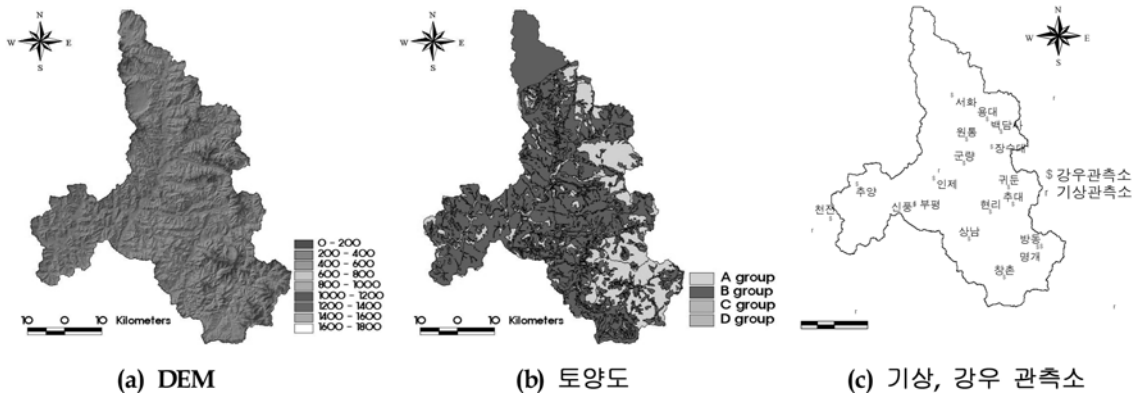


그림 2. GIS 자료

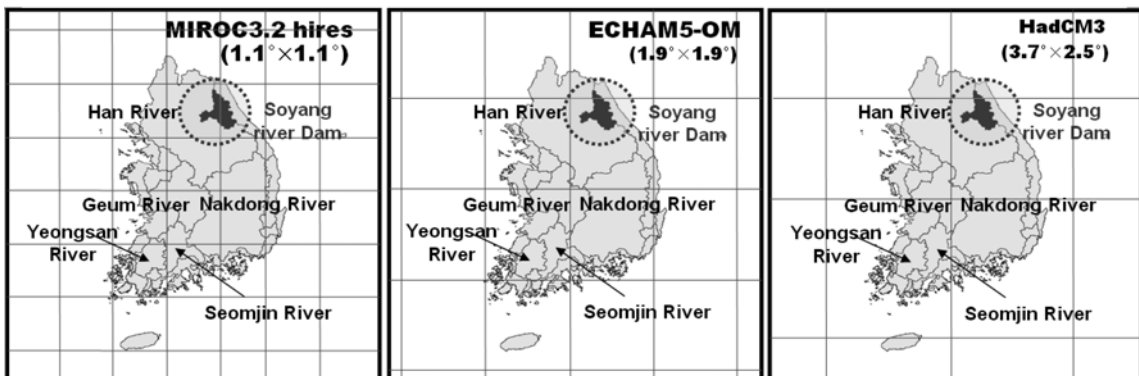


그림 3. 각 GCM별 격자 크기

여름과 겨울 모두 온난화 현상이 나타났다. 또한 다른 GCM에 비해 극한의 값을 나타냈지만, 1980-1999년과 2080-2099년의 몽골 지역의 연구에서는 겨울의 온도 증가가 다른 모형의 비해 작게 예측된 바 있어(Leary *et al.*, 2008) 연구에 따른 예측 결과에 차이가 있음을 확인할 수 있었다.

4.2 시나리오 오차 수정 및 다운스케일링

선정된 3가지 GCM 결과 값을 우리나라를 기준으로 구동되는 것이 아님으로 신뢰성을 높이기 위해 과거 실측치와 비교를 통해 확인하는 과정이 필요하다(Carter *et al.*, 1999). 수문 변화 분석에 가장 주요한 상태 변수인 온도와 강수 자료를 과거 30년 (1977~2006)과 각 GCM 모델별로 제공되는 20세기 모의 결과인 20C3M의 같은 기간의 값을 비교하여 다음의 방법으로 통계적인 유사성을 가지도록 보정하였다(Droogers and Aerts, 2005). 온도의 경우

$$T'_{GCM,fut} = T_{mean} + (\overline{T_{GCM,fut}} - \overline{T_{GCM,his}}) \quad (1)$$

여기서, $T'_{GCM,fut}$ 는 보정된 미래의 온도, T_{mean} 는 과거 30년 기준기간동안 관측된 온도, $\overline{T_{GCM,fut}}$ 는 GCM에서 모의된 미래 온도의 평균, $\overline{T_{GCM,his}}$ 는 과거 기준기간동안의 GCM에서 모의된 온도의 평균이다. 강수량의 경우,

$$P'_{GCM,fut} = P_{mean} \times (\overline{P_{GCM,fut}} / \overline{P_{GCM,his}}) \quad (2)$$

여기서, $P'_{GCM,fut}$ 는 보정된 미래의 강수량, P_{mean} 는 과거 30년 기준기간동안 관측된 강수량, $\overline{P_{GCM,fut}}$ 는 GCM에서 모의된 미래 강수량의 평균, $\overline{P_{GCM,his}}$ 는 과거 기준기간동안의 GCM에서 모의된 강수량의 평균이다.

위의 기법을 이용하여 각 시나리오별 추출된 보정계수는 표 1과 같다. 온도에 경우 MIROC3.2hire와 ECHAM5-OM

의 경우 1.0~2.1°C의 범위로 빠주었으며, HadCM3의 경우 모형의 결과 값이 과소 추정되어 4.25~4.32°C 더해주었다. 강수량의 경우 모든 GCM 모형에서 과소 추정되었으며 HadCM3가 1과 가장 큰 차이를 나타냈다. 각 모형별 보정계수를 계산하여 원본 GCM 자료의 보정을 실시하였다.

그림 3과 같이 모든 GCM은 대상 유역을 격자 하나로 표현되게 되므로 각 기상관측소별로 CF 방법을 이용하여 다운스케일링을 실시하였다. 이 방법은 현재의 기후 패턴에 변화가 없다는 가정 하에 기준 년도에 대한 비교를 통해 기후변화에 따른 수문 영향을 정량화할 수 있다는 장점을 가지고 있으며, 기존 연구에 적용되어 왔다(Diaz-nieto and Wilby, 2005; Wilby and Harris, 2006). 각 기상관측소의 30년 자료와 각 기간(2020s: 2010~2039년, 2050s: 2040~2069년, 2080s: 2070~2099년)별 오차 수정 후 기후변화 값을 비교하여 월 변화 값을 비교 분석하고 2000년으로 선정하여 매월에 변화율로 다운스케일링을 실시하였다. 다운스케일링 결과 전 기간과 시나리오에 걸쳐 연평균 온도와 강수량이 증가하였으나, 기존연구에서 다른 GCM과 차이를 보였던 HadCM3의 경우 모든 SRES 시나리오의 2020s와 2050s에서 겨울의 온도가 감소하는 것으로 나타났다.

전성우 외(2004)의 연구결과 HadCM의 2041-2050년 겨울철 온도 증가는 12월에 2.8°C로 GCM 모형 중 가장 높게 예측된 바 있다. 하지만 본 연구에서 사용된 CF 다운스케일링 방법을 사용할 경우에 HadCM3의 편이보정 후 값이 기존 연구와는 다르게 추출된다. A1B 시나리오에서 2020s와 2050s 기간의 유역평균온도가 1월은 -7.2°C, -5.9°C, 2월은 -3.3°C, -1.1°C, 12월은 -4.3°C, -2.8°C(IPCC에서 제공하는 원본값(1, 2, 12월순); 2020s: -12.1, -7.8, -9.7°C,

표 1. 3개의 GCM에 대한 온도와 강수량의 보정계수

시나리오	MIROC3.2hire		ECHAM5-OM			HadCM3		
	A1B	B1	A2	A1B	B1	A2	A1B	B1
온도(°C)	-2.10	-2.09	-1.00	-1.13	-1.06	+4.30	+4.32	+4.25
강수량(mm)	+0.92	+0.94	+0.92	+0.94	+0.90	+1.41	+1.41	+1.36

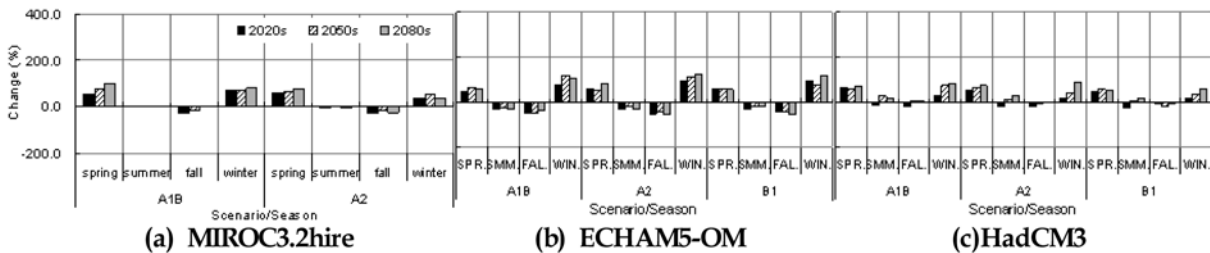


그림 4. 미래 기후변화에 따른 강수량 변화

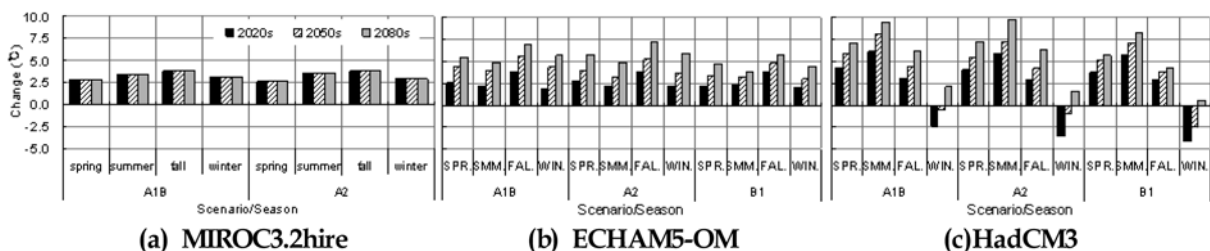


그림 5. 미래 기후변화에 따른 온도 변화

표 2. 다운스케일링 후 유역평균 온도와 강수량 변화

GCMs		MIROC3.2		ECHAM5			HadCM3		
Scenarios		A1B	B1	A1B	A2	B1	A1B	A2	B1
Temperature (°C)	2020s	+3.3	+3.2	+2.6	+2.7	+2.6	+2.7	+2.3	+2.0
	2050s	+5.0	+4.3	+4.6	+4.0	+3.6	+4.5	+4.0	+3.4
	2080s	+6.3	+5.1	+5.7	+5.9	+4.7	+6.2	+6.2	+4.7
Precipitation (%)	2020s	+1.2	-0.5	-20.1	-18.8	-15.2	-6.6	-11.4	-20.4
	2050s	+10.5	+5.3	-11.2	-10.1	-13.6	+18.7	+11.8	-20.2
	2080s	+17.7	+1.2	-13.5	-11.8	-10.9	+16.2	+32.3	-19.2

2050s: -11.2, -5.2, -8.0)로 각각 나타났다. 이에 대한 관측 소별 과거 평균값이 1월, 2월과 12월이 각각 -5.6°C, -3.2°C와 -2.7°C로 미래 겨울의 변화량이 더 낮아져 겨울철 온도 감소를 보이게 된다.

5. 미래 식생 활력도 변화

5.1 MODIS를 이용한 소양강댐 유역의 LAI 구축

2000년부터 2006년까지 7개년에 걸친 MODIS 위성영상으로부터 생성한 1월부터 12월까지의 월별 LAI를 대상유역을 중심으로 재구축하였다. 토지이용별 LAI 구축을 위해서 MODIS LAI와 2000년 토지이용도를 IDRISI 프로그램에 입력하여 유역의 토지이용별 평균 LAI를 추출하였다. 추출 결과 겨울철에 침엽수의 LAI특징을 반영하지 못하는 경향을 보여 경안천 유역의 실측 LAI자료(이승호 등, 2007)와 박지훈(2005)이 연구발표한 보고서 및 논문 내용을 참고하여 적절한 침엽수의 값을 입력하였다.

5.2 기온-LAI의 회귀식 추출

식생피복상태를 나타내는 지표인 엽면적지수(LAI)는 기온과 일사량의 기상조건에 강한 상관관계가 있는 것으로 연구되었다. 본 연구에서는 토지이용별 LAI와 월평균 기온과의 변동양상에 중점을 두어 Park *et al.*(2009)이 충주댐 유역에 사용하였던 기온-LAI의 Boltzmann 비선형회귀식을 구축하여 미래 기후변화 시나리오에 대한 각 토지피복별 LAI를 추정함으로써 SWAT의 입력자료로 사용하였다. 미래 LAI 예측 결과 HadCM3 A2 시나리오 4월에서 30.0%, A1B 시나리오 10월에 LAI가 455.7%까지 증가하여 성장시기에 변화가 있음이 예측되었다.

표 3. 월 LAI와 월평균 기온과의 상관관계 (Boltzmann 비선형 회귀식)

분류	비선형 상관 회귀식	R ²
침엽수	$y = 6.10 + (3.58062 - 6.10) / (1 + \exp^{(x - 12.86435) / 1.86042})$	0.90
혼효림	$y = 6.00 + (1.18231 - 6.00) / (1 + \exp^{(x - 12.15914) / 1.43155})$	0.90
활엽수	$y = 5.90 + (0.97323 - 5.90) / (1 + \exp^{(x - 11.95087) / 1.5916})$	0.89
초지	$y = 5.69 + (0.951504 - 5.69) / (1 + \exp^{(x - 12.81219) / 1.79429})$	0.91
논	$y = 4.80 + (0.86821 - 4.80) / (1 + \exp^{(x - 12.64996) / 1.91505})$	0.90
밭	$y = 5.60 + (1.09992 - 5.60) / (1 + \exp^{(x - 12.09167) / 1.81417})$	0.89

6. 미래 토지이용 변화

토지이용변화 모델은 각각 다른 목적에 의해서 여러 가지 기법을 이용해서 분석할 수 있으며, 구축한 데이터에 따라서 여러 가지 기법을 적용할 수 있다. CA-Markov는 토지이용 예측에 있어 가장 기본적인 분석 방법이며 많은 연구에서 활용된 셀룰라 오토마타 기법과 어떤 변수들이 가지고 있는 과거의 동적 특성을 분석함으로써 그 변수들의 미래에 있을 변화를 연속적으로 예측하기 위한 수학적 기법인 Markov Chain의 이론적 체계가 결합된 기법이다. 본 연구에서는 분석된 1995년과 2000년의 토지피복도를 Lee *et al.*(2007)에 의해 개선된 CA-Markov에 입력하여 2020, 2050, 2080년의 토지피복도를 예측하였다. 개선된 CA-Markov는 토지이용의 변화 흐름이 LOG 회귀 모형으로 변화하며, 자연보호 지역, 수역과 도심지나 나지로 변화된 지역은 더 이상 변화하지 않고 단일시기에 75% 이상 같은 항목을 유지하도록 되어 토지이용 변화 예측에 있어 일률적인 증감이 나타나지 않을 수 있다. 주요 토지이용의 변화를 보면, 침엽수는

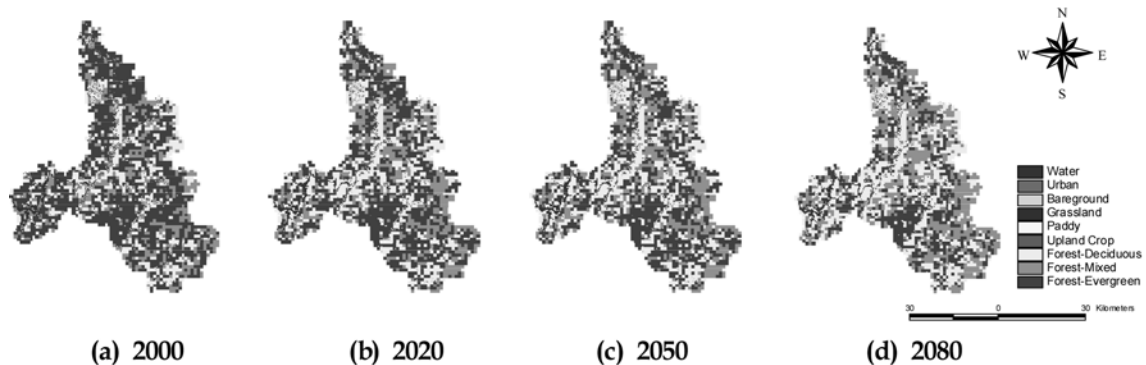


그림 6. CA-Markov를 이용하여 예측된 미래 토지이용도

표 4. 예측된 토지이용도 면적 결과

Year	Water	Urban	Bare ground	Grass	Forest			Paddy	Upland Crop	Total	
					Deciduous	Mixed	Evergreen				
Landsat km ² (%)	1995	31.2 (1.2)	12.9 (0.5)	11.0 (0.4)	14.9 (0.6)	470.9 (17.4)	508.8 (18.8)	1,523.8 (56.3)	54.0 (2.0)	77.7 (2.9)	2,704.4 (100.0)
	2000	38.4 (1.4)	16.0 (0.6)	23.7 (0.9)	10.9 (0.4)	520.3 (19.2)	579.7 (21.4)	1,425.1 (52.7)	48.4 (1.8)	44.0 (1.6)	2,704.4 (100.0)
CA-Markov km ² (%)	2020	39.0 (1.4)	18.6 (0.6)	31.1 (1.1)	7.7 (0.3)	691.8 (25.6)	690.5 (25.1)	1,172.4 (43.3)	37.5 (1.4)	27.5 (1.0)	2,704.4 (100.0)
	2050	39.1 (1.4)	17.4 (0.6)	35.8 (1.3)	9.4 (0.3)	761.0 (28.1)	725.6 (26.8)	1,061.7 (39.2)	34.2 (1.3)	21.5 (0.8)	2,704.4 (100.0)
	2080	39.3 (1.5)	18.7 (0.7)	37.4 (1.4)	11.5 (0.4)	563.7 (31.5)	451.6 (32.9)	1,481.6 (29.7)	32.2 (1.2)	18.9 (0.7)	2,704.4 (100.0)

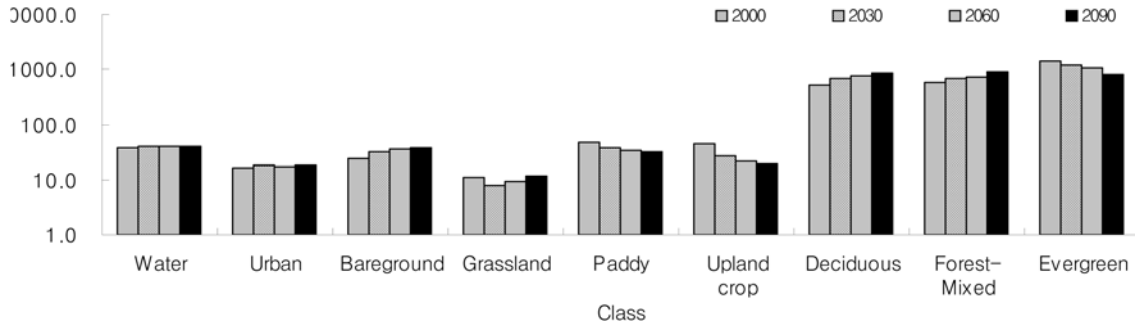


그림 7. 예측된 토지이용도 면적변화

1995년 1523.8 km²에서 2080년 804.4 km²로 719.4 km² 감소하였으며, 논과 밭은 1995년에 54.0와 77.7에서 2080년에는 32.2 km²와 18.9 km²로 각각 21.8 km², 58.8 km² 감소하였다. 활엽수는 1995년 470.9 km²에서 2008년 852.9 km²로 382.0 km² 증가하는 것으로 분석되었다.

7. 모형의 검보정

모형의 보정은 Park *et al.*(2009)와 김남원 등(2006)의 논문과 민감도 분석을 참고하고 소양강댐의 10개년(1997~2006)간의 댐 유입량 자료와 비교하여 실시하였으며, 모형의 검증은 보정된 매개변수를 적용하여 7개년(1990~1996)에 대하여 실

시하였다. 미래 변화에 대한 수문 반응 연구이므로 현재에서 가까운 과거의 매개변수 수정을 통해 보정을 실시하였다. 모형의 보정시 시행오차 방법을 이용하여 매개변수를 최적화하였다. 최적화된 매개변수는 표 5와 같다. 지표수흐름과 관련된 CN2, ESCO, EPCO, CH_K2와 융설은 SMFMX, SMFMN, TIMP, SNOCVMX, SNO50COV, 지하수흐름과 관련된 GW_REVAP, REVAPMN와 감수곡선에 민감한 ALPHA_BF을 조정하여 보정하였다. 모형의 목적함수로는 Nash-Sutcliffe(1970)가 제안한 모델효율계수(Model Efficient, ME)와 R²를 사용하였다. 보정기간에 대한 평균 ME는 0.45~0.91, RMSE는 1.4~2.9 mm, R²는 0.70~0.92로 나타났으며, 검증기간에 대한 ME는 0.43~0.88 RMSE는 1.0~2.2

표 5. 유출관련 매개변수 및 보정값

No.	Parameter	Description	Range	Optimal value
1	CN2	Curve number adjustment ratio	0 ~ 10	-8
2	ESCO	Soil evaporation compensation	0 ~ 1	0.3
3	SOL_AWC	Available water capacity	0 ~ 1	+0.025
4	SFTMP	Snowfall temperature (°C)	-5 ~ 5	0
5	SMTMP	Snow melt base temperature (°C)	-5 ~ 5	0
6	SMFMX	Maximum snowmelt factor (mm H ₂ O/°C-day)	0 ~ 10	6
7	SMFMN	Minimum snowmelt factor (mm H ₂ O/°C-day)	0 ~ 10	2
8	TIMP	Snow pack temperature lag factor	0 ~ 1	0.5
9	SNOCVMX	Threshold depth of snow, above which there is 100% cover (mm H ₂ O)	0 ~ 500	50
10	ALPHA_BF	Base flow recession constant (days)	0 ~ 1	0.2
11	GW_REVAP	Groundwater "revap" coefficient	0.02 ~ 0.2	0.2
12	REVAPMN	Threshold water level in shallow aquifer for revap or percolation to deep aquifer (mm H ₂ O)	0~500	400

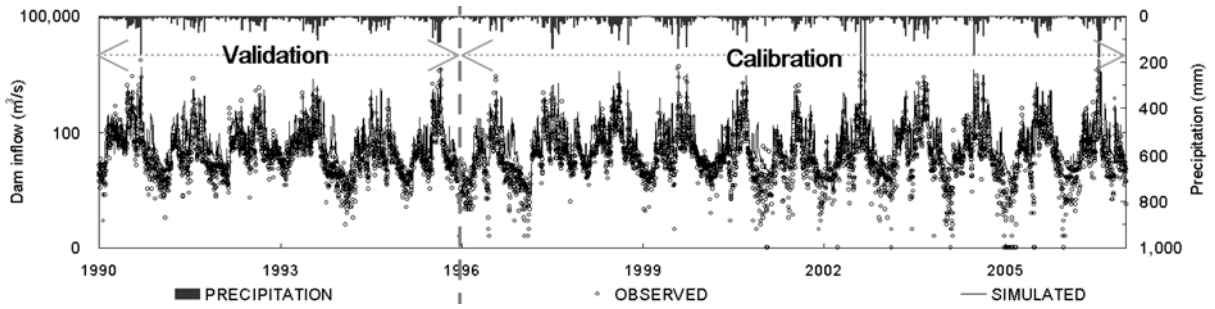


그림 8. 모형의 검보정 결과

mm, R^2 는 0.59~0.88이었다(그림 7).

8. 미래 수문학적 변동성 분석 결과

미래 기후뿐 아니라 CA-Markov를 이용한 토지이용과 MODIS LAI와 기온의 상관관계에 따른 식생활력도를 고려하여 구동한 SWAT 결과를 이용하여 댐 유입량, 토양수분, 증발산량과 지하수 함양량의 수문 요소에 대한 분석을 실시하였다.

그림 8은 월별 각 수문 요소를 2000년인 기준년과 미래 2020s, 2050s, 2080s년을 비교를 나타낸다.

댐유입량에 경우 강수량 증가과 상관성이 높은 것으로 나타났다. 강수량이 10%이상 증가하는 MIROC3.2 hires A1B와 HadCM3의 A1B, A2의 2050s와 2080s시에 0.7~29.5%까지 증가하였으며, 강수량이 감소하거나 10% 이하로 감소하는 다른 시나리오에서는 최고 38.0%까지 감소하였다. 계절적으로는 봄과 겨울에는 증가하였으나 온도가 2.0°C이상 감소하는 HadCM3의 3개 시나리오의 2020s와 B1의 2050s 겨울에는 21.2~47.9% 감소하였다. 여름과 가을에는 전 시나리오에서 67.6%까지 감소하였다. 토양수분은 댐 유입량과 유사한 경향을 보였다. 특히 가을에는 모든 시나리오에서 55.6%까지 감소하였으며, 연중 토양수분은 MIROC3.2 hires A1B의 모든 기간과 HadCM3 A1B의 2050s, 2080s와 A2의 2080s에서는 2.2~7.1% 증가하였으며, 나머지 시나리오에서는 1.3%에서 32.4%까지 감소하였다.

증발산량은 전 시나리오에 걸쳐 2.0~30.1% 증가하였으며, 온도가 낮아지는 HadCM3에 겨울을 제외한 전체 시나리오에 봄과 겨울의 증발산량은 71.8%까지 증가하였으나 여름과 가을에는 -19.4~+21.9%의 변화를 보였다. 지하수량은 55.4%까지 감소하였으며, HadCM3의 경우 A1B 2050s, A2 2080s에 각각 13.6, 22.4% 증가하였는데 이는 강수량 증가에 영향을 받은 것으로 판단된다.

월별 변화량을 GCM, 기간, 온실가스 배출 정도를 나타내는 SRES별로 그 변화량을 분석하였다. 댐 유입량에 경우 변화폭은 HadCM3가 310.9 mm로 가장 크게 나타났으며, MIROC3.2 hires가 -2.3으로 가장 변화가 작았다. 토양수분은 MIROC3.2 hires가 평균 -0.1 mm로 기준년인 2000년과 가장 비슷하였으며, ECHAM5가 -9.9 mm로 가장 많이 감소하였다. HadCM3의 표준편차가 17.4 mm로 가장 높게 나타났다. 증발산량은 MIROC3.2 hires의 월평균 변화량이 7.8 mm, 지하수 함양량은 ECHAM5의 월평균 변화량이 -0.4 mm로 기준년과 가장 많은 차이를 보였다. 기간별 변화량은 증발산량에 경우 2020s, 2050s, 2080s일 때 평균 변화량이 각각 3.6 mm, 5.7 mm, 6.4 mm로 나타나 미래로 갈수록 증발산량의 증가가 나타났다. 다른 요소들은 미래로 갈수록 그 감소량이 작아지는 것으로 나타났다. 각 SRES의 평균 변화량은 댐 유입량은 B1일 때 -14.5 mm, 토양수분은 B1일 때 -7.1 mm, 증발산량은 A1B에서 6.1 mm, 토양수분은 B1일 때 -0.4 mm로 나타났다. 온실가스의 고배출 시나리오인 A2인 경우 모든 변화 값의 평균이 B1과 A1B

표 6. 시나리오별 수문 변화율(%)

GCMs	MIROC3.2		ECHAM5			HadCM3		
	A1B	B1	A1B	A2	B1	A1B	A2	B1
Dam inflow								
2020s	-9.9	-11.3	-38.6	-38.0	-34.9	-19.8	-25.3	-37.9
2050s	0.7	-3.0	-27.4	-26.5	-30.4	13.5	3.7	-37.9
2080s	10.1	-8.8	-28.2	-26.6	-25.9	6.4	29.5	-36.6
Evapotranspiration								
2020s	7.1	-2.6	-21.2	-16.5	-14.1	-11.2	-16.7	-23.2
2050s	5.1	-1.3	-20.6	-16.4	-21.1	3.0	-4.7	-22.3
2080s	2.2	-11.6	-31.7	-32.4	-23.8	2.3	7.0	-20.9
Soil moisture								
2020s	-41.9	-42.8	-63.9	-70.3	-62.5	-60.8	-63.7	-52.5
2050s	-32.5	-30.3	-62.0	-60.8	-61.8	-46.8	-54.8	-52.5
2080s	-12.7	-38.3	-55.4	-65.9	-67.6	-46.1	-46.1	-52.5

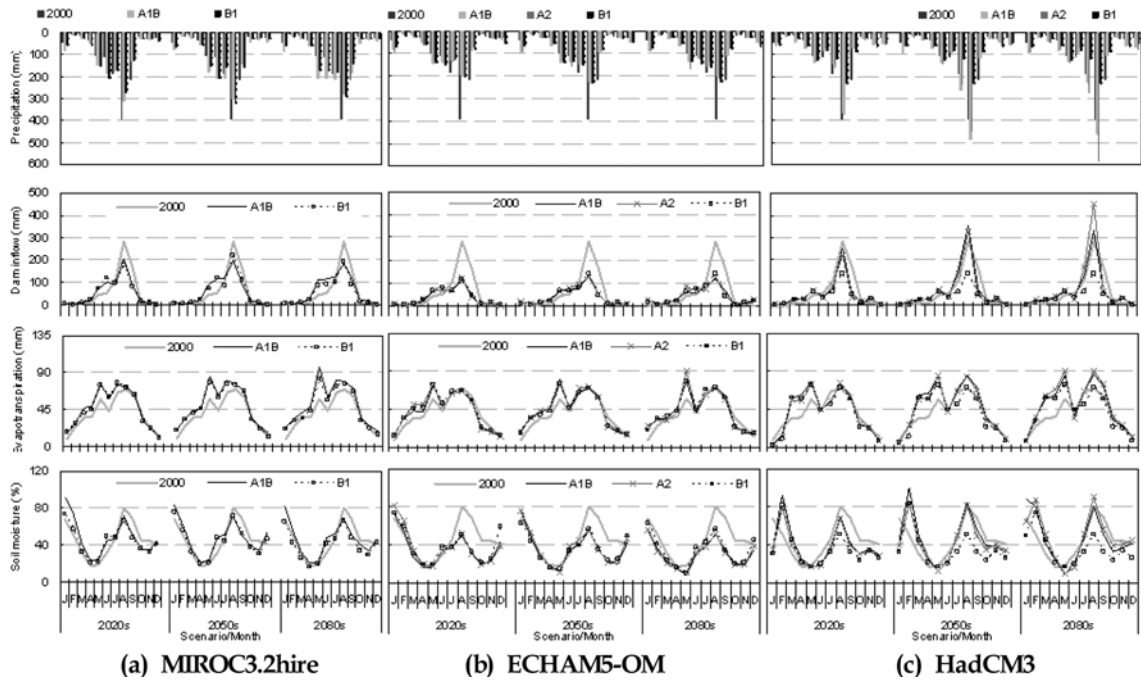


그림 8. 미래 기후, 식생, 토지이용변화에 따른 월별 수문 변화

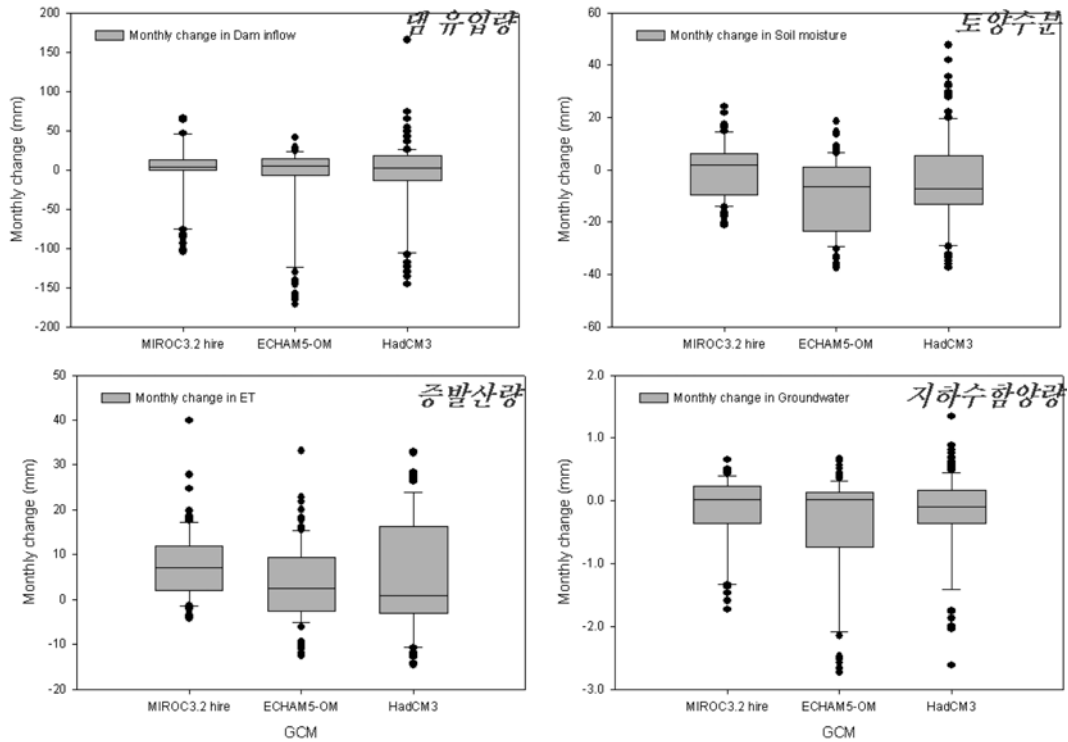


그림 10. 미래 기후, 식생, 토지이용변화에 따른 GCM에 따른 수문학적 변동성 분석

의 중간값을 보였으나 표준편차는 모든 수문 요소에서 가장 높게 나타나 증감폭이 커짐으로 수문요소에 변화를 많이 미치는 것으로 분석되었다. 결과적으로 GCM 중 HadCM3일 때 온실가스 고배출 시나리오에서 미래로 갈수록 큰 표준편차를 보이며 극한치의 수문 양상에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

9. 요약 및 결론

본 연구에서는 미래 기후, 식생활력도, 토지이용을 고려하여 소양강댐 유역의 수문학적 변동성을 분석하여 정량화를

시도하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 소양강댐 유역의 일별 댐 유입량을 이용한 모형의 검보정 (1990-2006, 17년) 결과 모형 효율은 0.43~0.91, R^2 는 0.65~0.92로 나타났고, RMSE는 2.3~4.2 mm/day로 모의치와 관측치의 유출량은 유의성이 있는 것으로 나타났다.
2. 미래 식생활력도 예측을 위해 과거 MODIS LAI와 기온 간에 Boltzmann 비선형 회귀식을 추출하여 각 토지이용별 R^2 는 0.89~0.91로 나타났으며, 미래 GCM에 따른 식생의 활력도를 예측한 결과 4월과 10월에 LAI가 각각 30.0%, 45.7%까지 증가하였다.
3. 토지이용 변화 예측 결과, 침엽수는 1995년 1523.8 km²

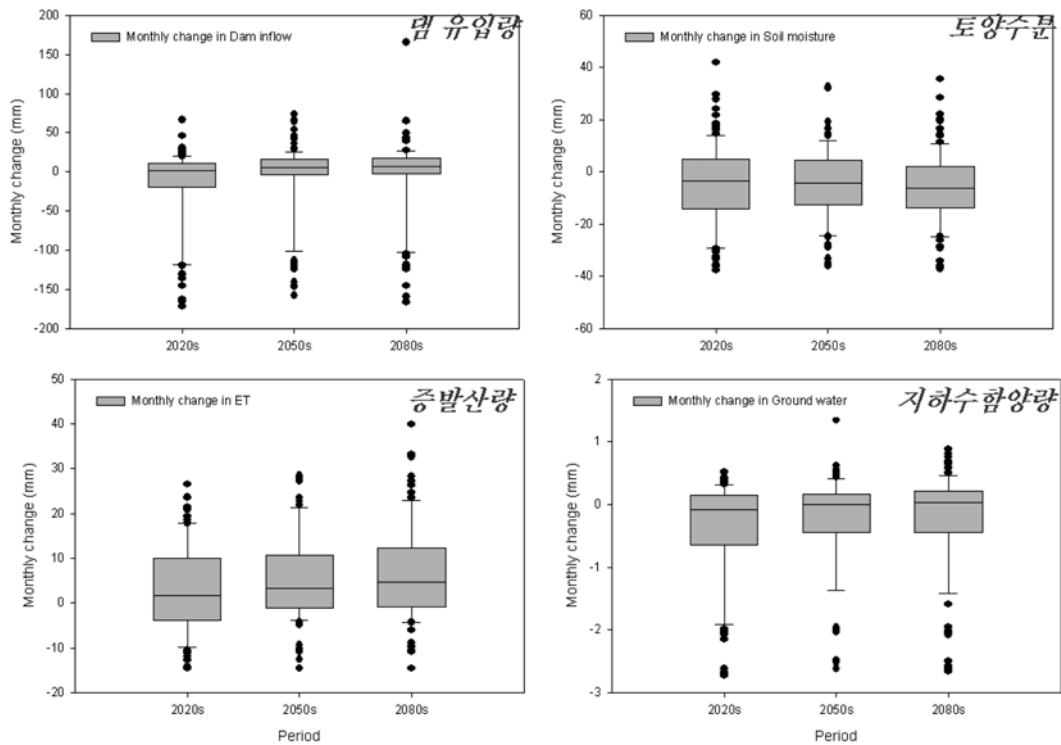


그림 11. 미래 기후, 식생, 토지이용변화에 따른 기간별에 따른 수문학적 변동성 분석

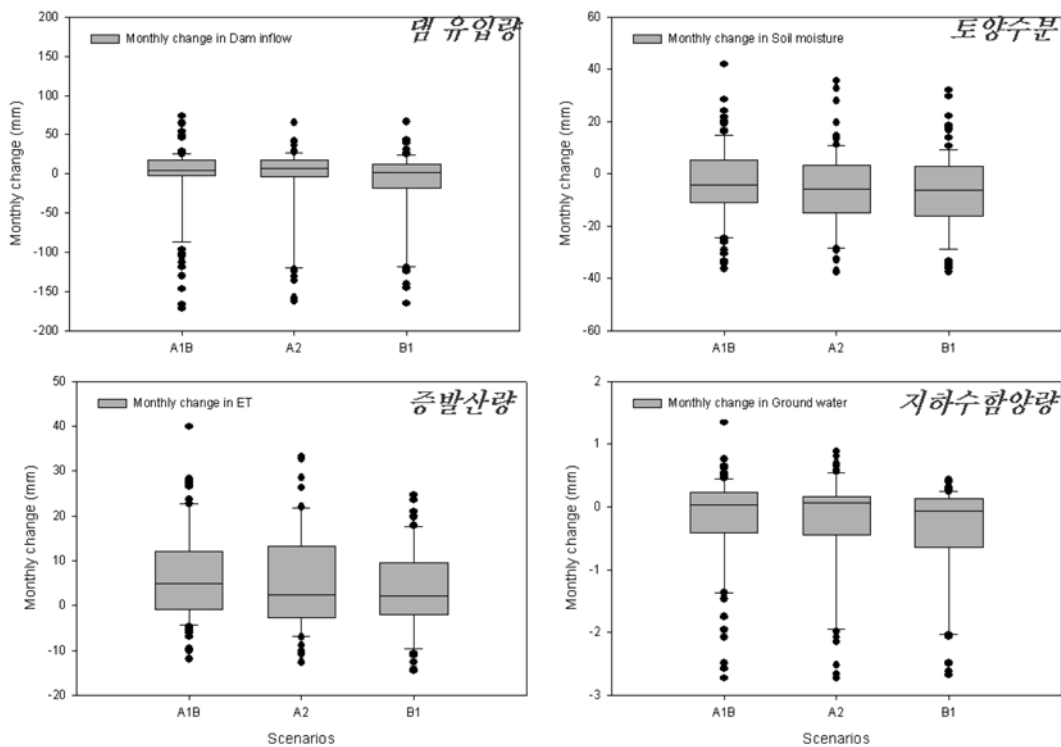


그림 12. 미래 기후, 식생, 토지이용변화에 따른 SRES에 따른 수문학적 변동성 분석

에서 2080년 804.4 km²로 719.4 km² 감소하였으며, 논과 밭은 1995년에 54.0 km²와 77.7 km²에서 2008년에는 32.2 km²와 18.9 km²로 각각 21.8 km², 58.8 km² 감소하였다. 활엽수는 1995년 470.9 km²에서 2008년 852.9 km²로 382.0 km² 증가하는 것으로 분석되었다.

4. 미래 기후변화 자료 구축을 위해 각 GCM의 오차보정과 CF 방법을 이용한 기상관측소별 다운스케일링을 실시하여 온도는 기준년에 비해 2.0~6.3°C 증가하였으며, 각 GCM 별 강수량은 -20.4~32.3%의 변화폭을 보였다.

5. 미래의 토지이용과 식생활력도, 3개의 GCM(MIROC3.2 hires, ECHAM5-OM, HadCM3)의 A2, A1B, B1 온실가스 배출 시나리오에 따른 미래 월별 수문 변화를 GCM, 기간, 온실가스 배출 시나리오별로 분석한 결과 댐 유입량은 전체적인 강수량이 14% 가량 감소라는 ECHAM5-OM가 평균은 -17.7 mm로 가장 낮게 변화하는 것으로 나타났고 변화폭은 연 강수량이 -20.4~32.3% 까지 변화한 HadCM3가 -310.9 mm로 가장 넓은 폭으로 예측되어 월별 변화량의 차가 큰 것으로 나타났다.

MIROC3.2 hires, ECHAM5-OM, HadCM3의 증발산량은 평균 7.8, 3.4, 5.2 mm씩 각각 증가하였으며, 토양수분은 0.1, 9.9, 4.3 mm, 지하수 함양량은 0.2, 0.4, 0.2 mm 감소하는 것으로 분석되었다. 기간별로는 강수량이 -20.4~1.2%로 낮게 변화하는 2020년에 댐 유입량과 지하수 함양량이 각각 14.6 mm, 0.4 mm 감소, 온도가 4.7~6.3°C 증가하는 2080년의 증발산량이 6.5 mm 증가, 토양수분이 6.1 mm 감소로 가장 크게 변화하였다. 온실가스배출시나리오별 분석결과 B1 시나리오시에 댐유입량, 토양수분, 지하수 함양량이 평균적으로 14.5 mm, 7.1 mm, 0.4 mm로 가장 높게 감소하였으며, 증발산량의 경우 A1B 시나리오일 때 6.1 mm로 가장 높게 증가하였으나 온실가스의 고배출 시나리오인 A2인 경우 모든 변화값의 평균이 B1과 A1B의 중간값을 보였으나 변화폭은 모든 수문 요소에서 가장 높게 나타나 수문요소에 변화가 크게 나타나는 것으로 분석되었다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 : 2-2-3)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

김남원, 이병주, 이정은(2006) SWAT을 활용한 충주댐 유역의 용설 영향 평가, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, Vol. 39, No. 10, pp. 833-844.

김병식, 김형수, 서병하, 김남원(2004) 기후변화가 용담댐 유역의 유출에 미치는 영향. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, Vol. 37, No. 2, pp. 185-193.

박지훈(2005) MODIS 위성자료에 기반한 식물 순생산량 알고리즘 분석. 석사학위논문, 인하대학교.

안소라, 이용준, 박근애, 김성준(2008) 미래 토지이용 및 기후변화에 따른 하천유역의 유출특성 분석. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권 제2B호, pp. 215-224.

안소라, 박민지, 박근애, 김성준(2009) 기후변화가 경안천 유역의 수문요소에 미치는 영향 평가. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, Vol. 42, No. 1, pp. 33-50.

이승호(2007) 극대중분광 영상자료의 산림정보해석 및 활용기법 개발. 국립산림과학원. pp. 53-62.

진성우, 정휘철, 이동근, Matsuoka, Y., Harasawa, H. and Takahashi K. (2004) 기후변화영향평가모형 개발-물관리 부문을 중심으로-. p. 59.

Alo, C.A. and Wang, G. (2008) Hydrological impact of the potential future vegetation response to climate change projected by 8 GCMs, **Journal of Geophysical Research Biogeosciences**, Vol. 113, G03011, doi:10.1029/2007JG000598.

Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., and Williams, J.R. (1998) Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development, **Journal of the American Water Resources Association**, Vol. 34, No. 1, pp. 73-89.

Carter, T.R., Hulme, M., and Lal, M. (1999) **IPCC-TGCI A Guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment**, version 1, IPCC, Task Group on Scenarios for Impact assessment.

Darren L.F., Yuzhou L., Eike L., and Minghua Z. (2009) Climate change sensitivity assessment of a highly agricultural water-

shed using SWAT. **Journal of Hydrology**. doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.05.016

Diaz-Nieto, J. and Wilby, R.L. (2005) A comparison of statistical downscaling and climate change factor methods: impacts on low flows in the River Thames, United Kingdom. **Climatic Change**, Vol. 69, pp. 245-268.

Droogers, P. and Aerts, J. (2005) Adaptation strategies to climate change and climate variability: a comparative study between seven contrasting river basins. **Physics and Chemistry of the Earth**. Vol. 30, pp. 339-346.

Ficklin, D.L., Luo, Y., Luedeling, E., and Zhang, M. (2009) Climate change sensitivity assessment of a highly agricultural watershed using SWAT. **Journal of Hydrology**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.05.016

IPCC (2007) **Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

Knisel, W.G. (1980) **CREAMS: a field scale model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems**. USDA, p. 643.

Labat, D., Godderis, Y., Probst, J.L., and Guyot, J.L. (2004) Evidence for global runoff increase related to climate warming. **Advances in Water Resources** Vol. 27, No. 6, pp. 631-642.

Leary, N., Conde, C., Kulkarni, J., Nyong, A., and Pulhin, J. (2008) **Climate change and vulnerability**, p. 82.

Lettenmaier, D.P., Wood, A.W., Palmer, R.N., Wood, E.F., and Stakhiv, E.Z. (1999) Water resources implications of global warming: A U.S. Regional Perspective. **Climatic Change** Vol. 43, No. 3, pp. 537-579.

Nash, L.L. and Gleick, P.H. (1991) Sensitivity of streamflow in the Colorado basin to climatic changes. **Journal of Hydrology** Vol. 125, No. 3-4, pp. 221-241.

Nash, L.L. and Gleick, P.H. (1993) **Colorado River basin and climatic change. The sensitivity of streamflow and water supply to variations in temperature and precipitation**. Pacific Inst. for Studies in Development, Environment and Security, Oakland, CA. PB-94-128527/XAB.

Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970) River flow forecasting through conceptual models; Part 1-A discussion of principles. **Journal of Hydrology**. Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.

Lee, Y.J. and Kim, S.J. (2007) A modified CA-Markov technique for prediction of future land use change, **Journal of Korean Society of Civil Engineers**. Vol. 57, No. 6D, pp. 809-817.

Rind, D., Goldberg, R., Hansen, J., Rosenzweig, C., and Ruedy, R. (1990) Potential Evapotranspiration and the Likelihood of Future Drought. **Journal of Geophysical Research** Vol. 95, No. D7, pp. 9983-10004.

Schaake, J.C. (1990) **From climate to flow, in Climate Change and U.S. Water Resources**, edited by P. E. Waggoner, chap. Vol. 8, pp. 177-206, John Wiley, New York.

Soil Conservation Service (1984) **SCS National Engineering Handbook**. U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.

Park, M.J., Shin, H.J., Lee, M.S., Park, G.A., Kim, N.W., Lim, K.J., and Kim, S.J. (2009) Assessment of Future Climate and Vegetation Canopy Changes and Their Impacts on Hydrological Behavior of Dam Watershed Using the SWAT Model. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment** (Submitted)

Wilby, R.L. and Harris, I. (2006) A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: low flow scenarios for the River Thames, UK, **Water Resources Research**. (2006), p. 42.

(집수일: 2009.11.17/심사일: 2010.1.4/심사완료일: 2010.6.7)