

기후변화를 고려한 SWAT-K의 적용



박민지 ▶▶

건국대학교 사회환경시스템공학과 박사과정
iamg@konkuk.ac.kr



신형진 ▶▶

건국대학교 사회환경시스템공학과 박사과정
shjin@konkuk.ac.kr



박종윤 ▶▶

건국대학교 사회환경시스템공학과 박사과정
bellyon@konkuk.ac.kr



박근애 ▶▶

건국대학교 사회환경시스템공학과 박사후과정
dolpin2000@konkuk.ac.kr



김성준 ▶▶

건국대학교 사회환경시스템공학과 교수
kimsj@konkuk.ac.kr

인간 신체의 온도는 정상 상태인 36.7도에서 0.3도의 미약한 상승에도 아픔을 느낀다고 한다. 대부분의 생명은 상대적으로 작은 온도 변화에도 민감하다. 최근의 지구 온난화는 이러한 측면에서 절박한 위기를 보인다고 할 수 있다. 1990년대는 지난 천년 가운데 가장 따뜻했던 십년이고, 20세기는 지구 역사상 가장 더운 시기였으며 20세기 이래로 온도는 $0.6 \pm 0.2^\circ\text{C}$ 정도 온도가 상승한 것으로 발표되었다(IPCC, 2007). 또한 지구의 주요한 근간인 탄소 원소는 동식물의 성장과 호흡 등에 반드시 필요한 요소로서 탄소의 증감은 생명체의 활동뿐 아니라 태양에너지의 방출에 관여하여 지구 온도 균형에 영향을 미치게 된다. 산업화와 벌목으로 인해 지구의 탄소 양은 점점 늘어나고 있으며, IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서는 산업화의 양상에 따른 온실가스 배출시나리오를 적용하여 지구의 기후변화를 예측하고 있다. 지구의 온도가 높아지자 세계 곳곳에서 우리가 기대한 이상의 복잡한 기상 변화를 가져왔다. 이러한 기후변화에 따라 2020년에는 전 세계적으로 최대 17억명 가량이 물 부족으로 고통 받을 것이며 장기적으로 2080년대는 해수면 상승으로 해안지역의 30% 이상이 유실되고 전 세계 인구의 20% 이상이 홍수로 인한 위험에 노출될 것이라는 비관적인 미래를 예측하고 있어 이에 따른 대응 방안 마련이 시급하다고 할 수 있다. 이상 기후에 대한 대응 방안 마련을 위해서는 이러한 기후변화들이 야기하는 수문학적 변화의 정확한 예측이 필수적이라 할 수 있다.

1. 서론



기후변화에 따른 수자원 영향 평가시 유용하게 쓰이고 있는 SWAT(Soil & Water Assessment Tool)은 견고한 유역 수문/수질 모형 도구로서 30년이상 전세계적으로 사용되어 왔으며, SWAT 학회 및 수백편의 논문이 발표되어 국제적으로 인정받고 있다.

SWAT 모형을 이용한 기후변화영향 연구들은 대기 CO₂ 농도 증가에 따른 식물 성장과 증산의 변화와 기상 입력자료 변화의 영향에 따른 분석 결과가 발표되어 왔다. Stonefelt 등(2000), Fontaine 등(2001)과 Jha 등(2006)을 포함한 여러 연구는 임의의 CO₂와 기후 변화가 식물 성장, 하천 흐름과 그 외의 영향을 정량화하였다. Muttiah와 Wurbs(2002)는 텍사스에 위치한 면적이 7,300km²인 San Jacinto River basin의 과거와 미래 기후변화영향모의에 SWAT을 사용되었다. Gosain 등(2006)은 1,668~87,180 km²의 면적 분포를 보이는 인도 12개 주요 강의 20년(2041-2060년) 동안 기후변화 시나리오에 따른 하천 흐름의 영향을 모의했다. 표층흐름의 경우 기후변화의 영향으로 극한의 홍수와 가뭄이 증가하고 전체적인 양은 감소하는 것으로 연구되었다. Rosenberg 등(2003)은 SWAT을 이용하여 18개 지역의 대해 HadCM2의 다운스케일 효과를 모의하였다. Thomson 등(2003)은 계절적인 기상 패턴에 따라 기준년에 비해 -210~77%의 범위로 수분 생산량을 모의하였으며, Thomson 등(2005)은 12개 기후변화 시나리오를 분석하였다. Rosenberg 등(1999)은 12개 GCM에서 대수층의 수분량이 감소하는 것(77% 이상)을 발견하였다. Stone 등(2001)와 Hotchkiss 등(2000)은 모형을 수정하여 CISRO와 RegCM를 적용하여 기후변화에 따른 수분 생산량을 예측하였다. 봄과 여름에 10~20% 유출이 감소하지만 나머지 계절에는 증가하였으며, CISRO와 RegCM을 각각 적용하였을 때 수분 생산량 차이를 비교하였다. Jha 등(2004), Takle 등(2005)과 Jha 등(2006)은 447,500km²의 면적을 가진 Mississippi River 상류유역의 지형자료를 이용하여 연구하였다. Jha 등(2004)은 RegCM2와 HadCM2를 이용하여 10년

(2040~2049년) 동안 유출량이 50%가량 증가함을 연구하였다. 그 외에도 Krysanova 등(2005)은 독일의 Brandenburg 지역의 12개 기후 시나리오 따른 작물 생산량과 수문학적 수지에 영향을 SWIM 모형을 이용하여 분석하였다. Krysanova 등(2007)에 의해 기후변화 불확실성 분석이 GCM과 SWIM을 이용하여 평가하였다. Eckhardt와 Ulbrich (2003)은 봄철 침투용량은 감소하며 겨울 홍수의 증가하고 지하수 충전량과 하천흐름이 두 시나리오에 대해 50% 감소하는 것을 SWAT-G를 이용하여 알아내었다.

수자원 환경 변화 예측에는 기후외에도 탄소와 온도에 따른 식생활력도의 변화를 모의하여 향후 발생 가능한 환경에 대비하여야 한다. 본 고에서는 SWAT(Soil & Water Assessment Tool)을 국내 실정에 맞게 수정한 SWAT-K를 이용하여 기후변화이에 따른 식생 변화를 고려한 수문 예측 적용 방법을 기술하고자 한다.

2. 기후변화 예측

기후변화가 수자원에 미치는 영향은 전지구차원의 지표면, 물 순환의 변화에 따른 기후변화와 함께 서로 연동되어 움직인다 (IPCC, 2003). 따라서 기후변화에 따라 지역차원의 지표면, 물 순환이 변화하게 되면 이것이 다시 기후변화에 영향을 미치는 형태로 작용하게 된다. 이러한 기후변화에 대한 연구는 현재 가장 활발하게 진행되고 있다. 국내외에서 미래 기상 자료 예측을 위해 모형을 구동한 GCMs(General Circulation Models) 결과를 이용하고 있다. GCMs은 1970년대 중반을 전후하여 개발되기 시작하였으며, 대기의 3차원 운동을 유체역학적, 열역학적으로 모의하는 순환모형으로 대기, 해양, 해빙, 지표면뿐만 아니라 에어로졸, 탄소순환, 대기 화학과정 등 거의 대부분의 기후 시스템 요소를 포함하는 총체적 모형이다(안소라 등, 2008). 하지만 이러한 GCM의 격자크기(그림1)는 한반도의 기후를 표현하기에는 어려

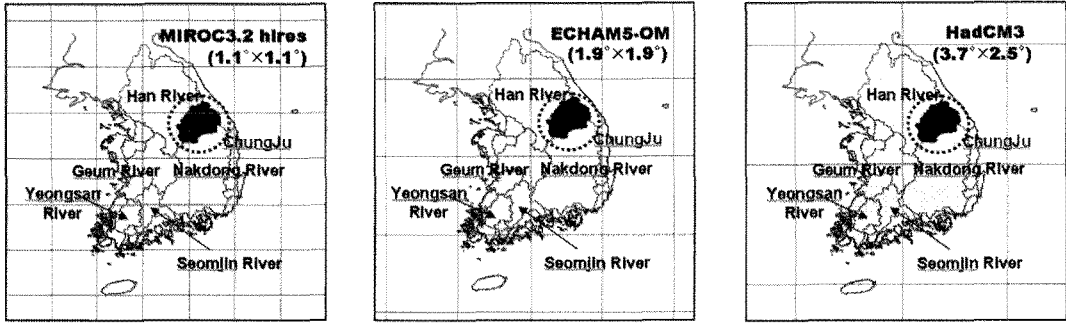


그림 1. 모형별 격자 크기

움이 있다. 특히 우리나라와 같이 지형적 특색이 두드러진 곳에서는 적절하지 못한 격자의 크기는 정확한 수자원 예측 방해 요소이다. 많은 수자원 연구자들은 다양한 다운스케일링 기법이 고안하고 적용해왔다. 다운스케일링 기법은 크게 역학적 물리적 과정을 모두 반영한 RCM(Regional Climate Model)을 이용한 방법과 광역 기후 자료에서 상대적으로 정확하게 예측한 변수를 이용하는 통계적인 방법으로 나눌 수 있다. RCM을 이용하여 다운스케일링을 실시할 경우 초기 조건, 시간에 따라 변화는 측면 기사 조건들을 포함하여 지형 고도와 해안선이 GCM보다 현실적으로 고려될 수 있으나, 초기 조건과 그 외 입력 자료의 구축이 필수적이며 구동 과정이 복잡하다. 통계적 다운스케일링 기법은 대규모의 대기 순환패턴이 지역기후의 대기 순환패턴과 관계가 있다는 것에 착안하여 대규모의 GCM에서 모의한 값과 지역기후요소 사이의 통계적 관계를 착안하여 다운스케일링하는 방법이다(정일원, 2008).

현재 IPCC의 정보분배센터(Data Distribution Center)에서는 기후변화에 의한 일관된 영향연구를 위해 IS92a 및 SRES 시나리오에 의한 다수의 GCMs 결과들을 제공하고 있다. 최근에는 IPCC의 SRES에 기초한 시나리오 산출이 주를 이루는데, SRES는 인구, 기술 경제발달 등 미래 배출문제의 원동력이 되는 요소들을 광범위하게 다루며 크게 4개 그룹(A1, A2, B1, B2)의 배출 시나리오를 제시한다. A-B축은 경제지향인가, 환경지향인가를 나타내고 1-2축은 지구주의지향인가, 지역주의지향인가를 나

타내고 있다. 이 중에서 A1 시나리오는 B, D, G, T로 나누어지며 각각 밸런스형, 석탄주도형, 가스주도형, 고효율에너지 기술주도형을 뜻하며, 에너지 공급원이 균형을 이루게 되는 밸런스형 A1B 시나리오는 현실에 가장 잘 부합되는 시나리오로 그 적용 사례가 늘고 있으며 2100년까지 CO₂가 720ppm에 도달할 것으로 예상하고 있다. A2 시나리오는 혼합세계를 설정하고 인구의 지속적인 증가를 가정하여 2100년에는 CO₂가 830ppm에 도달할 것을 예상하고 있다. B1 시나리오는 경제, 사회, 환경분야의 지속가능성에 대한 전지구적 해결을 강조하고 있는 시나리오로 2100년에 CO₂는 550ppm 정도로 예상한다(그림 2). 하지만 SRES 배출 시나리오 역시 모든 사회, 경제, 기술, 환경적 부분을 완벽하게 고려하는 것은 불가능하기 때문에 상당한 불확실성이 포함될 수밖에 없다(IPCC-TGCI, 1999). 따라서 미래 특정 시점의 기후를 정확하게 예측하는 것보다는 미래에 발생 가능한 확률빈도의 형태를 재구성 해내는 것에 초점을 맞춰야 할 것이다.

Change Factor(CF) 방법은 현재 기후의 공간 패턴이 미래에도 변화가 없다고 가정하여 특정 년도를

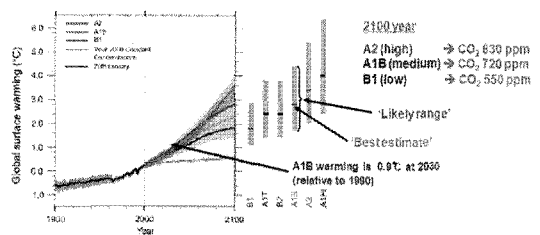


그림 2. 기후변화 시나리오

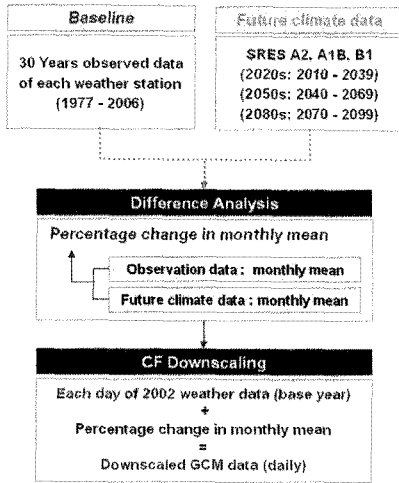


그림 3. CF 다운스케일링 방법 흐름도

기준으로 비교할 수 있는 장점을 가지며 기후변화 영향평가에 대한 많은 연구에 적용되어 왔다. 그림 3와 같은 CF 방법을 이용하여 세계적으로 가장 많은 연구에 사용되는 ECHAM5-OM과 HadCM3, 그리고 해상도(1.1°×1.1°)가 높고 모의 국가가 지리적으로 근접한 일본인 MIROC3.2 hires의 각 관측소별 미래 기상자료를 구축하게 된다. 표 1은 충주댐 유역을 대상으로 3가지 GCM 자료의 A1B와 B1시나리오를 이용하여 CF기법을 적용 및 전망된 미래(2020년: 2010-2039, 2050년: 2040-2069, 2080년: 2070-2099)의 기온과 강수량 결과이다. 그 결과 미래의 기온은 전체적으로 증가하였다. HadCM3의 겨울 온도는 감소하는 구간을 보였다. 강수량은 봄과 겨울에는 증가하고 여름과 가을에 감소하여 전체적으로는 81.7%까지 증가하는 것으로 전망되었다.

3. 식생 활력도 변화 예측

자료 취득의 용이성과 경제성 그리고 촬영 주기를 고려하였을 때 식생 지표 추출에 있어서 변화 분석에 유용하게 사용되는 위성영상으로는 미국 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration : NOAA)에 의해 운영되고 있는 NOAA 위성의 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) 센서와 미국 우주항공국(NASA)이 추진하고 범지구 환경모니터링(Earth Observing System : EOS) 프로그램의 일환으로 미국 Vandenberg 공군기지에서 발사된 TERRA 위성에 탑재된 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectro-Radiometer) 센서가 있다. 여기서, MODIS 센서는 AVHRR 센서에 비해 다양한 파장대 영상을 얻을 수 있고, 보다 획기적으로 향상된 공간 해상도를 가지며, LAI와 NDVI 등의 식생지수로 변환된 영상을 얻을 수 있다. 이렇게 제공된 식생지수는 수문모형이나 계산을 통해 수자원 영향 평가 연구에 사용되었다.

국내에서는 가뭄 홍수 등의 재해현상에 대한 파악을 위해 NOAA 위성영상으로부터 추출된 식생 및 증발산량 자료를 이용하여 기후학적 물수지를 분석한 연구가 발표된 바 있다(권형중 등, 2005). 또한 토지 피복 변화에 따른 식생지수(NDVI)의 분포나 변화에 관한 연구(성효현 등, 2000)에 원격탐사 기법을 사용하거나, NDVI 및 기온정보를 조합한 증발산량을 산정하는데 NOAA AVHRR 위성자료로부터 얻어지는 NDVI를 활용하였다(신사철 등, 2006). 김광섭 등

표 1. 3개 GCM 자료에 의한 온도, 강수량 변화(기준년-2000)

GCMs		MIROC3.2 hires		ECHAM5-OM			HadCM3		
Scenarios		A1B	B1	A1B	A2	B1	A1B	A2	B1
Temperature (°C)	2020s	+1.9	+1.9	+0.7	+0.8	+0.7	+1.9	+1.5	+1.2
	2050s	+3.5	+2.9	+2.7	+2.1	+1.7	+4.6	+3.1	+2.6
	2080s	+4.8	+3.7	+3.8	+4.0	+2.8	+5.4	+5.3	+4.0
Precipitation (%)	2020s	+54.5	+52.1	+35.6	+44.5	+45.5	+38.4	+27.6	+26.9
	2050s	+56.8	+57.6	+58.3	+54.8	+39.9	+69.1	+51.0	+42.8
	2080s	+72.4	+50.8	+54.8	+60.0	+52.2	+75.2	+81.7	+58.1

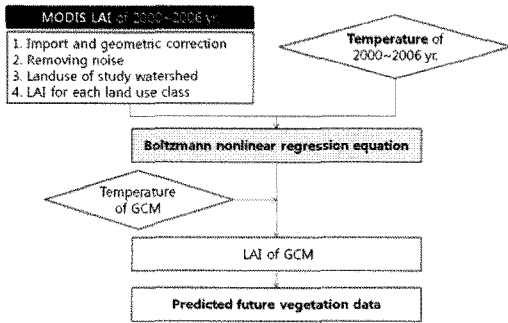


그림 4. 미래 식생 활력도 예측 흐름도

(2005)은 도시화 등의 환경변화에 따른 지역기후변화 특성을 분석하기 위해 NDVI 값의 변화 추세를 비교 분석 하였다. 국외에서는 AVHRR 위성 영상으로부터 추출된 NDVI와 지표 온도 값의 변화를 분석하여 산불 위험지역을 추정하였으며(Brigitte et al, 2006), 미국을 대상으로 NOAA/AVHRR NDVI 자료를 이용하여 2주 단위로 식생의 시계열적 변화를 모니터링하였다(Eindenshink et al, 1992). 또한, 위성영상을 이용하여 해안 습지의 변화를 파악하고 분석하는 기법도 오래전부터 연구되어 왔다(Jensen et al, 1987; Jensen et al, 1993; Wheeler, 1993;

Green et al, 1994).

본 고에서는 토지이용별 LAI 구축을 위해서 MODIS LAI와 2000년 토지이용도를 IDRISI 소프트웨어를 이용하여 유역의 토지이용별 평균 LAI를 추출하는 방법을 제안한다. 식생피복상태를 나타내는 지표인 엽면적지수(LAI)는 기온과 일사량의 기상조건에 강한 상관관계가 있는 것으로 연구되었다. 본 과제에서는 토지이용별 LAI와 월평균 기온과의 변동양상에 중점을 두어 기온-LAI의 Boltzmann 비선형 회귀식(그림 5)을 구축하여 미래 기후변화 시나리오에 대한 각 토지피복별 LAI를 추정함으로써 SWAT-K의 입력 자료로 사용한다(그림 4).

4. 기후변화를 고려한 수문학적 거동 분석

미래 기후뿐 아니라 MODIS LAI와 기온의 상관관계에 따른 식생활력도를 고려한 SWAT-K 결과를 이용하여 댐 유입량, 토양수분, 증발산량과 지하수 함양량의 수문 요소에 대한 분석을 실시하였다.

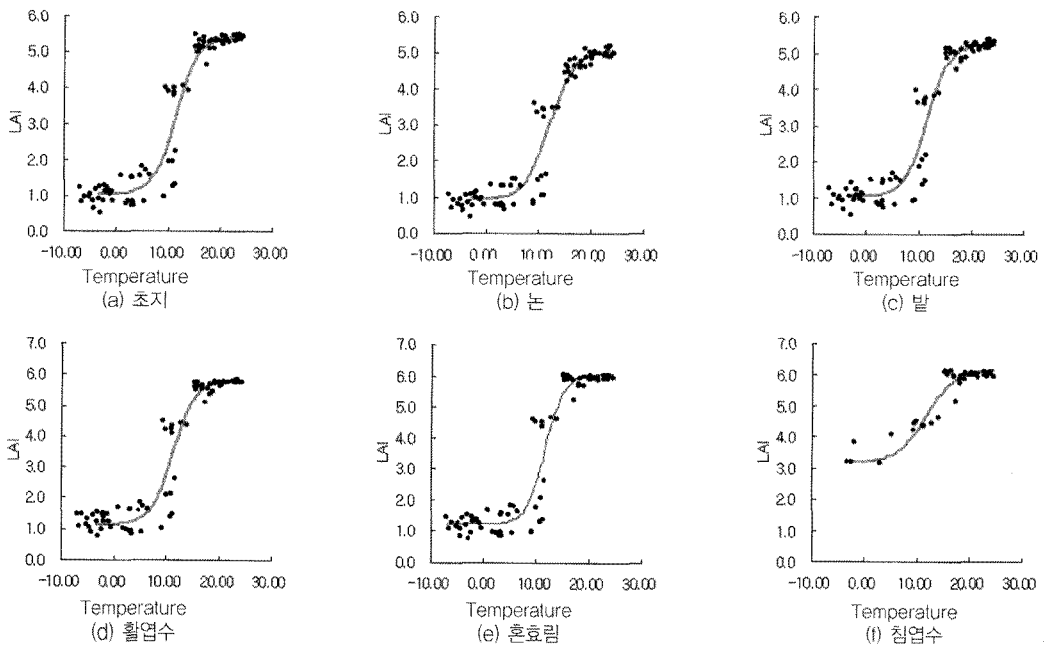


그림 5. Boltzmann 비선형 회귀식 도출

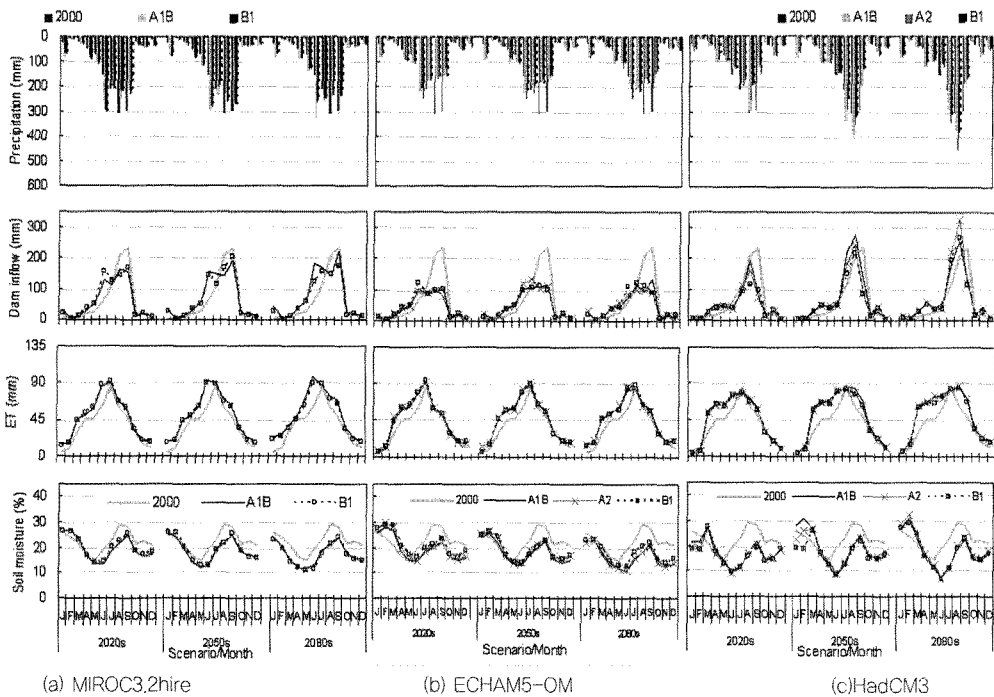


그림 6. 미래 기후변화 시나리오에 따른 수문 변화 분석

표 2와 그림 6은 각 수문 요소를 2000년인 기준년과 미래 2020s, 2050s, 2080s년을 비교를 나타낸다. 증발산량의 경우 온도의 증가에 상관하여 전체 GCM과 배출 시나리오에서 증가하는 것으로 나타났으나, 온도가 감소하는 HadCM3의 겨울에서는 -39.4%까지 감소하는 것으로 나타났다. 증발산량의 증가로 인해 강수량 증가에도 불구하고 댐유입량은

-27.8%까지 감소하지만 강수량이 81.7% 증가하는 HadCM3의 A2 시나리오에서는 27.2%까지 증가하였다. 증발산량의 경우 온도의 증가에 직접적인 영향을 받으며, 다른 수문요소는 증발산량의 증가에 영향을 받아 감소하는 것으로 나타났다. 토양수분도 증발산량의 증가에 따라 각각 4.1~27.6%까지 감소하는 것으로 모의되었다. 지하수 충전량의 경우 강수량이

표 2. 미래 기후변화 시나리오에 따른 수문요소별 변화율

GCMs		MIROC3.2 hires		ECHAM5-OM			HadCM3		
Scenarios		A1B	B1	A1B	A2	B1	A1B	A2	B1
Dam inflow (%)	2020s	-0.7	4.4	-27.0	-27.8	-21.3	-19.6	-25.8	-31.7
	2050s	12.4	10.6	-16.9	-12.9	-19.7	19.6	4.2	-8.0
	2080s	26.2	6.5	-18.1	-21.0	-16.7	12.9	27.2	7.7
Evapotranspiration (%)	2020s	22.6	25.0	15.5	17.3	19.0	19.4	15.7	14.0
	2050s	28.8	26.1	21.6	21.5	18.9	32.7	27.1	23.9
	2080s	35.5	26.6	20.9	21.3	20.1	35.4	36.1	29.1
Soil moisture (%)	2020s	-11.4	-9.4	-12.0	-8.1	-4.1	-21.2	-25.0	-25.8
	2050s	-16.2	-14.3	-19.0	-12.8	-14.0	-15.5	-17.2	-24.9
	2080s	-22.8	-24.4	-26.7	-27.6	-20.5	-19.8	-15.4	-19.8
Ground water recharge (%)	2020s	-13.8	-10.9	-33.4	-31.6	-26.8	-35.9	-41.9	-46.0
	2050s	-10.0	-7.8	-29.8	-23.7	-31.1	-5.0	-17.6	-30.5
	2080s	-4.3	-19.1	-40.5	-43.2	-34.8	-10.8	1.1	-16.0

80% 이상 증가하는 HadCM3의 A2 시나리오에서 1% 가량 증가하는 것으로 나타났다.

장기적인 수자원 변동성 분석에 있어서 강수량의 변화보다는 온도 증가와 그에 따른 증발산량 증가로 인한 토양 수분과 지하수 함양량으로 인한 수자원 부족이 야기될 것으로 예측되며 수자원 확보와 대응 방안 마련이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 고에서는 미래 기후변화와 그에 따른 식생활동도를 예측한 후 이를 고려하여 수문/수질 모형인 SWAT-K의 구동 결과에 따른 수문학적 변동성의 분석 방법을 제시하였다. 예측된 기후변화는 타 연구사례와 마찬가지로 전반적인 기온과 강수량이 상승하는 것으로 나타났으며, 댐유입량(유출량)은 봄과 겨울에는 증가하고, 여름과 가을에는 감소하는 결과를 보이고 있어, 이럴 경우 현재의 계절적인 기후 패턴에 맞춰진 댐운영과는 다른 운영 규칙이 필요할 것으로 판단된다.

한편 기상요소와 관련하여 변화되는 식생 정보는 수문 모형에 입력되어 유출변화 해석시에 사용되며 식생의 변화 분석과 지표환경을 효과적으로 분석하기 위해 원격탐사 기법이 매우 유용하게 사용되고 있으며, 이는 시계열적인 공간 변화에 대한 신속하고 정

확한 정보 확보 및 처리를 가능하게 한다. 더욱이 우리나라의 위성 연구가 진일보하고 있어 영상을 이용한 정확한 식생 및 토지이용 추출이 가능해질 것으로 판단되므로 향후 기후변화에 따른 식생 연구가 활발할 것으로 예측된다.

기온과 강수의 증감과 그에 따른 식생 변화에 따른 수문 요소의 정량화 결과는 미래 수자원 관리 대책 수립에 기반이 될 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 각 입력 자료의 예측 결과와 모형 자체에는 상당한 불확실성을 내포하고 있다. 이러한 불확실성을 해결하기 위해서는 국가적인 차원에서 우리나라에 적합한 미래 표준 기후자료의 준비, 또한 기후변화뿐만 아니라 기온의 상승에 따른 식생 종의 변화를 예측할 수 있는 연구가 진행될 필요가 있으며, 제시한 방법 이외에 다양한 방법의 시도를 통하여 예측결과의 정확성을 높여야 할 것이다. 향후 더욱 정확한 예측과 신뢰성을 높이기 위해 불확실성 분석을 실시할 예정이다. 또한 수문환경뿐 아니라 수질이나 생태계에 대한 영향을 평가하여 기후변화에 따른 통합적인 수자원 대응 방안을 연구하고자 한다.

감사의 글

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

참고문헌

1. Brigitte Leblon, P.A.F.G., S.O., D.A. Maclean and M.F.(2006), Using cumulative NOAA-AVHRR spectral indices for estimating fire danger codes in northern boreal forests. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 3(9): 335-342).
2. Eckhardt, K., S. Haverkamp, N. Fohrer, and H.G. Frede.(2002), SWAT-.G, a version of SWAT99.2 modified for application to low mountain range catchments. *Phys. Chem. Earth* 27(9-.10): 641-644.
3. Eidenshink, J.C.(1992), The 1990 Conterminus U.S. AVHRR Data Set. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 58(6): 809-813.
4. Fontaine, T. A., J. F. Klassen, T. S. Cruickshank, and R. H. Hotchkiss.(2001). Hydrological response to climate change in the Black Hills of South Dakota, USA. *Hydrol. Sci. J.* 46(1): 27-.40.



5. Gosain, A. K., S. Rao, and D. Basuray.(2006), Climate change impact assessment on hydrology of Indian river basins. *Current Sci.* 90(3): 346-353.
6. Green, L., D. Kempka and L. Lackey.(1994), Using remote sensing to detect and monitor land-cover and land-use change. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.* 60(3): 331-337.
7. Hotchkiss, R. H., S. F. Jorgensen, M. C. Stone, and T. A. Fontaine.(2000), Regulated river modeling for climate change impact assessment: The Missouri River. *J. American Water Res. Assoc.* 36(2): 375-386.
8. IPCC(2003), IPCC Workshop Report on the Detection and Attribution of the Effects of Climate Change, C. Rosenzweig and P.G. Neofotis, Eds., NASA/Goddard Institute for Space Studies, New York
9. 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
10. IPCC-TGCI(1999), *Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment. Version 1.* Prepared by Carter, T. R., Hulme, M. and Lal, M., 69 pp. IPCC Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment.
11. Jensen, J.R., E.W. Ramsey, R.E. Mackey, E. Christensen and R. Sharitz.(1987), Inland wetland change detection using aircraft MSS data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.* 53(5): 521-529.
12. Jensen, J.R., D.J. Cowen, S. Narumalani, J.D. Althausen and O. Weatherbee.(1993), An evaluation of coastal change detection protocol in South Carolina. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.* 59(6): 1039-1046.
13. Jha, M., J. G. Arnold, P. W. Gassman, F. Giorgi, and R. Gu.(2006), Climate change sensitivity assessment on upper Mississippi river basin streamflows using SWAT. *J. American Water Resour. Assoc.* 42(4): 997-1015.
14. Jha, M., Z. Pan, E. S. Takle, and R. Gu.(2004), Impacts of climate change on streamflow in the upper Mississippi River basin: A regional climate model perspective. *J. Geophys. Res.* 109: D09105, doi:10.1029/2003JD003686
15. Jha, M., J. G. Arnold, P. W. Gassman, F. Giorgi, and R. Gu.(2006), Climate change sensitivity assessment on upper Mississippi river basin streamflows using SWAT. *J. American Water Resour. Assoc.* 42(4): 997-1015.
16. Krysanova, V., F. Hatterman, and F. Wechsung.(2005), Development of the ecohydrological model SWIM for regional impact studies and vulnerability assessment. *Hydrol. Process.* 19(3): 763-783.
17. Krysanova, V., F. Hatterman, and F. Wechsung.(2007), Implications of complexity and uncertainty for integrated modelling and impact assessment in river basins. *Environ. Model. Soft.* 22(5): 701-709.
18. Muttiah, R. S., and R. A. Wurbs.(2002), Modeling the impacts of climate change on water supply reliabilities. *Water Intl., Intl. Water Resources Assoc.* 27(3): 407-419.
19. Rosenberg, N. J., D. L. Epstein, D. Wang, L. Vail, R. Srinivasan, and J. G. Arnold.(1999), Possible impacts of global warming on the hydrology of the Ogallala aquifer region. *Clim. Change* 42(4): 677-692.

20. Rosenberg, N. J., R. A. Brown, R. C. Izaurralde, and A. M. Thomson.(2003), Integrated assessment of Hadley Centre (HadCM2) climate change projections in agricultural productivity and irrigation water supply in the conterminous United States: I. Climate change scenarios and impacts on irrigation water supply simulated with the HUMUS model. *Agric. For. Meteor.* 117(1-2): 73-96.
21. Stonefelt, M. D., T. A. Fontaine, and R. H. Hotchkiss.(2000), Impacts of climate change on water yield in the upper Wind River basin. *J. American Water Resour. Assoc.* 36(2): 321-336.
22. Stone, M. C., R. H. Hotchkiss, C. M. Hubbard, T. A. Fontaine, L. O. Mearns, and J. G. Arnold.(2001), Impacts of climate change on Missouri river basin water yield. *J. American Water Resour. Assoc.* 37(5): 1119-1130.
23. Takle, E. S., M. Jha, and C. J. Anderson.(2005), Hydrological cycle in the upper Mississippi River basin: 20th century simulations by multiple GCMs. *Geophys. Res. Letters* 32(18): L18407.1-L18407.5.
24. Thomson, A. M., R. A. Brown, N. J. Rosenberg, R. C. Izaurralde, D. M. Legler, and R. Srinivasan.(2003), Simulated impacts of ElNino/southern oscillation on United States water resources. *J. American Water Resour. Assoc.* 39(1): 137-148.
25. Thomson, A. M., R. A. Brown, N. J. Rosenberg, R. Srinivasan, and R. C. Izaurralde.(2005), Climate change impacts for the conterminous USA: An integrated assessment: Part 4. Water resources. *Clim. Change* 69(1): 67-88.
26. Wheeler, J.D.(1993), Commentary: linking environmental models with geographic information systems for global change Research. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.* 59(10): 1497-1501.
27. 김광섭, 임태경(2005), 도시화 등 환경변화에 따른 지역기후변화 특성 분석. *한국수자원학회 05 학술발표회 논문집* 912-915.
28. 권형중, 신사철, 김성준(2005), NOAA/AVHRR 위성영상을 이용한 기후학적 물수지 분석. *한국농공학회지* 47(1): 3-9.
29. 성효현, 박옥준(2000), 토지피복 변화에 따른 식생지수(NDVI)분포 및 변화에 관한 연구: 성남시를 중심으로. *한국GIS학회지* 8(2):275-288.
30. 신사철, 황만하, 고익환, 이상진(2006), 식생 및 기온정보를 조합한 증발산량 산정을 위한 간편법 제안. *한국수자원학회지* 38(4): 363-372.
31. 안소라, 이용준, 박근에, 김성준(2008), 미래토지이용 및 기후변화에 따른 하천유역의 유출특성 분석, *대한토목학회논문집* 28(2B): 215-224