

기후변화에 따른 대청댐 상류유역의 유출 민감도 분석

Sensitivity assessment for climate change on Daecheong Dam Basin stream flow

서형덕* · 정상만** · 한규하*** · 신광섭****

Seo, Hyeong Deok · Jeong, Sang Man · Han, Kyu Ha · Shin, Kwang Seob

Abstract

The SWAT model was used to assess the impacts of potential future climate change on the hydrology of the Upper Geum River Basin(UGRB). Calibration and validation of SWAT were performed on a monthly basis for 1982-1995 and 1996-2005, respectively. The impact of ten 15-year(1988-2002) scenarios were then analyzed relative to a scenario baseline. Among them, scenario 1-6 were set to show the sensitivity response. A doubling of atmospheric CO₂ concentration was predicted to result in an maximum monthly flow increase of 11 percent. Non-linear impacts were predicted among precipitation change scenarios of -42, -17, 17, and 42 percent, which resulted in average annual flow changes in UGRB of -55, -24, 26, and 65 percent.

Keywords : Climate change, SWAT, Streamflow, Daecheong Dam

요 지

기후변화와 지구온난화현상은 지구 전체에 걸쳐 분명하게 나타나고 있으며 그에 따라 발생할 수 있는 수문 변화에 대한 연구가 다양하게 이루어지고 있다. 본 연구에서는 기후변화에 따른 수문 변동 분석을 위하여 SWAT 모형을 이용하였으며 금강 상류유역에 적용하였다. 모형의 보정은 1982-1995년의 월평균 하천유량을 이용하였고 1996-2005년의 자료를 이용하여 검증하였다. 기후변화에 따른 수문 변동을 정량적으로 분석하기 위하여 1988-2002년을 기준시나리오 기간으로 설정하였으며 이산화탄소 농도, 기온, 강수의 변화에 따른 총 6개의 시나리오를 구성하였다. 시나리오 1~6은 수문 변화의 민감도를 나타내는 시나리오로 배증 이산화탄소를 반영하는 시나리오는 평균 11%의 하천유량 증가를 예측하였고, -42, -17, 17, 42%의 강수량 변화에 따라서는 -55, -24, 26, 65%의 하천유량 증감이 예측되었다.

핵심용어 : 기후변화, SWAT, 하천유량, 대청댐

1. 서 론

기후변화와 지구온난화현상은 지구 전체에 걸쳐 분명하게 나타나고 있으며 그에 따라 발생할 수 있는 수문 변화에 대한 연구가 다양하게 이루어지고 있다. 최근에는 지구의 평균기온이 배증 이산화탄소(Double CO₂)의 영향으로 1.4℃에서 6.9℃정도 증가할 것이라고 Christensen et al.(2007)는 지적하였다. 수문현상에 큰 영향을 미치는 기후인자는 강수, 기온, 이산화탄소의 농도 등이 있다. 강수는 지역적인 분포가 불확실하지만 전세계적으로 증가가 예상되고 있으며 특히 고위도 지방으로 갈수록 강수의 증가현상은 뚜렷이 나타나고 있다(Christensen et al., 2007). 세계적으로 GCM(Global Circulation Model)의 한계를 극복하기 위하여 물리적 기반의 AGCMs(High and Variable Resolution Atmospheric General Circulation Models), AOGCMs(Atmosphere-Ocean General Circulation Models), 그리고 RCM(Regional Climate Models), 또는 통

* 국립공주대학교 · 건설환경공학과 · 석사과정 · E-mail : rainytv@naver.com

** 정희원 · 국립공주대학교 · 건설환경공학부 · 교수

*** 비희원 · 국립공주대학교 · 건설환경공학과 · 석사과정

**** 국립공주대학교 · 건설환경공학과 · 석사과정

계학적 축소(statistical downscaling)등 여러 가지 기법이 사용되고 있다(Christensen et al., 2007). 사실 하나의 기후변화예측모형의 결과를 수문학적인 영향을 평가하는데 사용하는 것에는 많은 오차를 수반하게 되며 이는 산악지형, 큰 호수, 식생의 차이 등을 자세히 평가할 수 없기 때문이다(Palmer, 2004). 따라서 최근에는 좀 더 세밀한 해상도를 가질 수 있는 기후예측 모델을 개발하기 위하여 다각적인 접근이 이루어지고 있으며 단순히 하나의 기후변화 모형을 사용하는데 그치지 않고 여러 가지 모형의 결과들을 통합하여 제시하는 방법(Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison; PCMDI 혹은 MMD)을 사용하기도 한다.

본 연구에서는 아시아지역 중 동아시아지역의 A1B 시나리오를 바탕으로 한 MMD로부터 얻어진 기후변화 자료(Christensen et al., 2007)를 사용하여 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형에 적용함으로써 금강 상류유역에서 예상되는 수문변화를 분석하고자 한다.

2. 기후변화 및 기준 시나리오

기후변화의 형태는 크게 대기중의 CO₂(혹은 다른 온실가스) 농도 변화와 그에 따른 기후인자의 변화로 구분할 수 있다. SWAT 모형은 CO₂ 농도의 변화에 따른 식물성장의 영향을 모의할 수 있으며 기온/강수의 변화에 대해서도 각각 혹은 함께 모의가 가능하다. 본 연구에서는 기후변화에 따른 수문 변동을 분석하기 위하여 기후인자의 월별 변화를 나타내는 6가지의 기후변화 시나리오를 바탕으로 모의하였으며 각각의 시나리오를 표 1에 요약하였다. 여기서 시나리오 1~6은 기후인자의 변화에 따른 민감도분석을 위한 시나리오이다. 6가지의 시나리오는 Christensen et al.(2007)이 발표한 2080~2099년에 예측되는 기후인자 변화의 최저, 중간, 최고값의 연구결과를 반영한 것으로 이산화탄소의 농도와 기온의 증가 및 강수량의 증감으로 표현하였다. 기후변화에 따른 수문현상의 변화는 기준 시나리오(baseline scenario)를 설정하여 각각의 시나리오 결과와 비교함으로써 그 변동을 파악할 수 있으며 일반적으로 1951년~1980년의 자료가 사용되지만(Arnell, 1996), 본 연구에서는 자료의 보유기간과 대청댐, 용담댐의 건설시기를 고려하여 1988년~2002년을 기준 시나리오로 사용하였다.

표 1. 기후인자의 월별 변화를 나타내는 시나리오

Scenario (projected year)	Climate Parameter	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Reference
1	CO ₂ (ppm)	×2	×2	×2	×2	×2	×2	×2	×2	×2	×2	×2	×2	-
2 (2080~2099)	Temperature(°C)	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	Christensen, et al. (2007)
3 (2080~2099)	Precipitation(%)	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	
4 (2080~2099)	Precipitation(%)	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	-17	
5 (2080~2099)	Precipitation(%)	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	
6 (2080~2099)	Precipitation(%)	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	42	

3. 대상유역 및 모형의 개요

대청댐은 금강의 중류에 위치하고 있으며 하류에는 대청댐, 상류에는 용담댐이 위치하고 있다. 금강 전체 유역면적의 약 42%를 차지하고 그 면적은 약 4,150km²에 이른다. 금강 상류유역에는 추풍령, 금산, 보은, 장수 4곳의 기상관측소가 위치하고 있으며 영동, 무주, 진안 등 40여개의 우량관측소와 용담, 수통, 옥천 등 18개의 수위관측소가 운영되고 있다.

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)은 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research

Service; ARS)의 Jeff Arnold 등에 의해 개발되었고 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 수문현상을 모의하기 위한 물리적 기반의 준분포형 모형으로 유역에 대한 물리적 특성이 반영되며, 모의를 위해서 전체유역을 수개의 소유역으로 구분함으로써 높은 공간적 해상도로 모의가 가능하다. SWAT은 수문반응의 최소 단위로 토지이용과 토양 특성 및 소유역을 기준으로 생성되는 HRU(Hydrological Response Unit)를 사용한다. 또한 수문, 토양유실, 영양물질, 하도추적의 네 가지 부모형(sub-model)으로 구분되며 수문부모형은 지표면 유출, 차단, 중간유출(측방유출), 침투, 기저유출, 수로손실, 증발산 등으로 구성되어 있다. 모형내의 물수지방정식에 기초한 수문순환의 과정은 다음 식(1)과 같이 이루어진다.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

여기서 SW_t 는 최종일의 토양수분량(mm H₂O)을 나타내며 SW_0 는 i 일의 초기토양수분량(mm H₂O), t 는 시간(days), R_{day} 는 i 일의 강수량(mm H₂O), Q_{surf} 는 i 일의 지표면 유출량(mm H₂O), E_a 는 i 일의 증발산량(mm H₂O), w_{seep} 는 i 일의 토양층 바닥(soil profile bottom)에서 침투 및 침투되는 총량(mm H₂O), Q_{gw} 는 i 의 회귀수량(mm H₂O)이다.

4. 매개변수의 보정 및 검증

모형의 보정을 위하여 1981년~1995년(모의 첫해는 안정화 기간)의 자료를 이용하였으며 검증은 1995년~2005년의 자료를 이용하였다. 모의된 유출량을 보정하기 위하여 하천유출에 영향을 미치는 매개변수를 Neitsch et al(2002)이 제시한 방법을 이용하여 CN₂, 토양증발보상계수(ESCO), 식생보상계수(EPCO), 각 토양층의 가용토양수분능(SOL_AWC) 등 8가지의 매개변수를 조정하였다. 대청댐 유입량, 옥천, 수통, 용담수위 표 월평균 하천유출을 이용하여 보정한 결과 지점별 평균 결정계수(R²)는 0.77이고, Nash-Sutcliffe 모의 효율(Ef)은 0.71로 나타나 구축된 모형이 금강 상류유역의 유출을 모의하는데 적합하다고 판단되었다. 같은 매개변수를 이용한 대청댐 유입량 검증결과 평균 결정계수는 0.86이고, Nash-Sutcliffe 모의 효율의 평균은 0.81로 나타났다.

5. 결과 분석

기후인자의 변화에 따른 6가지 시나리오 결과를 15년 동안의 기준시나리오와 비교한 표 2와 그림 1은 4곳의 검·보정 지점 중 대청댐 월평균 유입량의 변화를 백분율로 나타낸 것으로 배증된 이산화탄소를 반영하는 시나리오 1에서는 유입량이 월별로 2~8%의 변화를 보이고 있으며 2월과 3월이 기준시나리오와 비교하였을 때 가장 큰 차이가 나타났다. 이는 이산화탄소의 증가가 증산량을 감소시키고 이로 인하여 토양수분량이 증가하게 되어 유출량이 증가하기 때문이다. 시나리오 2에서는 기준시나리오의 기온보다 5.4℃를 일정하게 증가시킨 것으로 봄, 여름, 가을에는 월평균 유입량이 감소되지만 겨울에는 크게 증가되는 것을 표 2에서 확인할 수 있다. 이것은 증가된 기온이 겨울철 용설량을 증가시키게 되어 하천유량과 댐의 유입량이 증가하게 되는 것이다. 기온의 증가로 인한 용설량의 증가는 월별 유출량의 변화가 크지 않은 지역에서 침투유량이 나타나는 시기를 여름철에서 늦봄으로 앞당길 수도 있으나 금강유역을 비롯한 우리나라의 경우 계절별 유출량차이가 크기 때문에 시기가 변하지는 않지만 기온의 변화로 야기되는 유출량의 감시가 지속적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다. 시나리오 3~6은 일정한 강수량의 변화를 주어 대청댐 유입량의 증감을 모의한 것이다. 그 결과 기준시나리오와 비교한 백분율의 차이는 겨울철이 크게 나타나지만 총량의 변화는 여름철이 가장 크고 가을, 봄 순으로 크게 예측되어 기후의 변화로 인한 유출량의 변화에서 강수량의 변화가 민감도가 가장 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

표 2. 기준시나리오(1988~2002)와 비교한 6가지 시나리오의 대청댐 유입량 변화

Month	Baseline(cms)	Scenario (% change)					
		1	2	3	4	5	6
Jan	13	4	79	-62	-28	31	85
Feb	20	8	24	-61	-28	33	83
Mar	61	7	-18	-58	-25	26	66
Apr	66	5	-9	-54	-23	24	60
May	75	4	-7	-54	-23	24	61
Jun	103	3	-4	-53	-22	24	59
Jul	287	3	-2	-52	-22	22	56
Aug	249	2	-4	-52	-22	22	55
Sep	191	2	-4	-51	-21	22	54
Oct	67	2	-4	-52	-22	22	56
Nov	37	3	-4	-54	-23	25	63
Dec	23	4	18	-57	-24	26	66
Annual Avg.	99	4	5	-55	-24	25	64

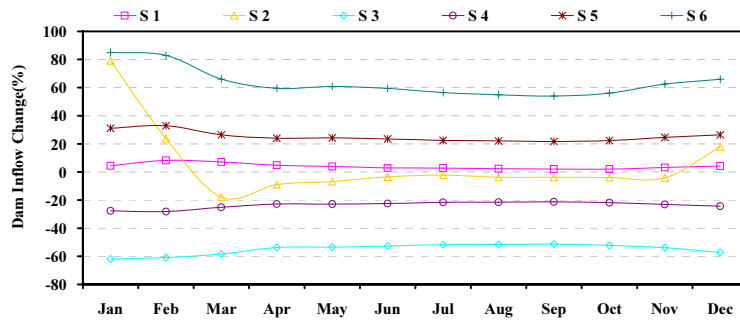


그림 1. 기준시나리오(1988~2002)와 비교한 6가지 시나리오의 대청댐 유입량 변화

6. 결론

본 연구에서는 동아시아지역의 MMD결과(Christensen et al., 2007)와 한반도를 중심으로 예측된 RegCM3의 기후변화 결과를 이용하여 대청댐의 유입량변화를 SWAT 모형을 이용하여 분석하였다. 6가지의 시나리오에서 금강 상류유역의 수문 반응은 기후변화에 매우 민감한 것으로 나타났으며 우리나라의 계절별 유출량의 차이가 큰 특성으로 인하여 대체적으로 여름철의 변화가 크게 나타났다. 또한 기온이 상승함에 따라 용설량이 증가하여 겨울철의 유출량도 큰 폭으로 증가되는 것으로 분석되었다.

참고문헌

1. Arnell, N.W. (1996) Global Warming, River Flows and Water Resources. Institute of Hydrology, Water Science Series. New York. John Wiley and Sons.
2. Christensen, J.H., B. Hewitson, A. Busuioc, A. Chen, X. Gao, I. Held, R. Jones, R.K. Kolli, W.-T. Kwon, R. Laprise, V. Magana Rueda, L. Mearns, C.G. Menendez, J. Raisanen, A. Rinke, A. Sarr and P. Whetton, (2007) Regional Climate Projections. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. pp. 852~860.
3. Neitsch, S.L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R. and Williams, J. R. (2002). Soil and Water Assessment Tool User's Manual Version 2002, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, pp. 341~345.
4. Palmer, R. N., Erin Clancy Nathan T. Vanrheenen, Matthew W.Wiley. (2004) The Impacts of Climate Change on The Tualatin River Basin Water Supply. Clean Water Services. pp. 17~20.