

미래 기후, 식생, 토지이용 변화를 고려한 충주댐 유역의 수문변동 파악을 위한 SWAT-K 모형의 적용

Application of SWAT-K Model for the Evaluation of Hydrological Variation of Chungjudam Watershed Considering Future Climate, Vegetation and Land Use Changes

박민지*, 신형진**, 안소라***, 김성준****

Min Ji Park, Hyung Jin Shin, So Ra Ahn, Seong Joon Kim

요 지

본 연구는 충주댐 유역을 대상으로 미래의 기후변화, 그에 따른 식생상태, 그리고 미래의 토지이용 변화를 고려한 상태에서 SWAT-K 모형에 의한 수문순환인자들의 변화가 댐의 유입량에 미치는 영향을 파악하고자 한다. SWAT 모형의 검보정은 6년간(2000~2006, 2001년 제외)의 댐유입량 자료를 이용하여 실시하였으며, Nash-Sutcliffe 모형효율은 0.52~0.88의 범위로 검보정되었다. 기후변화 시나리오는 IPCC에서 제공하고 있는 GCM들 중에서 CCCma CGCM2의 A2, B2 시나리오를 이용하였으며, 댐유역의 기후변화를 모의하기 위하여 과거 30년간(1977~2006)의 기상자료 통계정보를 기준으로 Change Factor Downscaling 기법을 적용하여 2030년, 2060년, 2090년 전후의 각 30년간의 미래 정보를 재생산하였다. 미래의 식생정보는 7년(2000~2006)간의 MODIS 위성 영상에 의한 엽면적 지수를 월단위로 구축하여 엽면적 지수와 평균기온간의 상관회귀식을 도출하여 미래 기후변화에 따른 식생의 활력도를 예측하였다. 미래의 토지이용 변화는 CA-Markov 기법을 개선, 적용하여 총 9개의 토지이용 항목에 대하여 각 항목별 예측을 실시하였다. 2000년의 기상자료 및 댐유입량을 기준으로 이상의 미래기후, 식생, 토지이용 예측 정보를 적용하여 미래의 댐유입량을 모의한 결과를 분석하였다. 그 결과 강수량 및 온도의 변동이 가장 크게 영향을 주어 유입량의 변화가 모의되었으며, 이에 따른 수문인자의 변동은 2000년 기준으로 증발산량, 토양수분의 변동을 분석하였다. 미래의 수문순환에 가장 큰 영향을 주는 수문인자는 토양수분으로 나타나, 미래에는 산림지역 및 토지이용 개발에 따른 토양수분의 함양량 유지를 위한 유역관리가 중요한 요인이 될 것으로 나타났다.

핵심용어 : SWAT-K, CGCM2, Change Factor, MODIS, 엽면적지수, CA-Markov, 기후변화, 식생변화, 토지이용변화

1. 서 론

전 세계적으로 기후변화와 대기 중 CO₂ 농도 증가는 자연 자원에 직접적이고 큰 영향을 미친다. 특히 수자원의 경우 필수적이며, 기후변화에 민감한 자원이라 할 수 있다. 미래 가용 수자원의 평가를 위해 GCMs(General Circulation Models)를 이용한 수문학적 영향 평가가 이루어지고 있다. GCMs는 수문 모형에 입력자료로써 기후변화 예측에 신뢰성 있는 자료로 사용된다.

* 정회원 · 건국대학교 대학원 사회환경시스템공학과 박사과정 · E-mail : iamg@konkuk.ac.kr
** 정회원 · 건국대학교 대학원 사회환경시스템공학과 박사과정 · E-mail : shjin@konkuk.ac.kr
*** 정회원 · 건국대학교 대학원 사회환경시스템공학과 석사과정 · E-mail : ahnsora@konkuk.ac.kr
**** 정회원 · 건국대학교 생명환경과학대학 사회환경시스템공학과 교수 · E-mail : kimsj@konkuk.ac.kr

본 연구에서는 GCMs 중 CGCM2 미래 기후변화 자료와 MODIS 위성영상을 이용한 식생 변화, CA-Markov 기법을 이용하여 미래의 토지이용을 예측하여 매개변수가 검보정된 SWAT 모형에 적용하여 미래 수문 상황을 예측하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 대상유역

연구 대상 유역인 충주댐 유역의 면적은 6661.0km²이며, 평균표고는 609.1m, 평균경사는 36.9%이다. 행정구역상으로 강원도, 충청북도, 경상북도가 각각 69.9, 28.4, 1.7%를 걸쳐있으며, 전체 면적에 83%가 산림을 차지하고 있다. 25개 소유역, 148개 HRU로 분할하였다.

2.2 SWAT-K 모형 개요

SWAT(Soil & Water Assessment Tool) 모형은 미국 농무성농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)의 Jeff Arnold에 의해 개발되었으며, 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 수문과 유사 및 농업화학물질의 거동에 대한 토지관리방법의 영향을 예측에 광범위하게 적용되고 있다. 준 분포형 장기 강우-유출 모형으로서 수문, 토양유실, 영양물질, 하도추적의 4가지 부모형으로 구성되어 있다. 이미 전 세계적으로 250편 이상의 발표가 있었고, 현재도 활발하게 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서 사용된 SWAT-K는 기존 SWAT 모형에 하도추적을 비선형 저류방정식으로, 유출곡선지수 산정법을 시간 가중평균으로 수정한 모형이다.

2.3 기상, 수문자료 구축

SWAT 구동에 필요한 기상자료로는 최고, 최저온도, 풍속, 일사량, 상대습도, 강수량이 있다. 충주, 제천, 영월, 대관령, 원주 5개 기상대에서 강수량을 포함한 기상자료를 구축하였으며, 수주, 영월1, 상동, 영춘, 단양, 청풍, 임계, 정선, 대화, 사북, 진부, 횡계, 안흥, 제천, 충주댐, 방림, 미탄, 왕산, 하장 19개 관측소에서 87년부터 신림, 연덕, 하동, 어상천, 봉양, 덕산, 문곡, 수항, 유천, 청옥산, 덕암 관측소의 92년 6월부터 2006년의 강우자료를 구축하였다. 1987년부터 2006년까지의 충주댐의 2000~2005년까지의 유량 자료를 검보정에 사용하였다.

2.4 미래 기후, 식생, 토지이용 변화 예측

CCCma CGCM2 A2, B2시나리오의 일별 2030s(2016-2045), 2060s(2046-2075), 2090(2071-2100)년 자료를 구축하였다. 구축된 CGCM2의 20세기 시나리오별 강수량 자료가 과거 자료와 차이를 보여 bias correction를 실시하였다. 또한 해상도를 높이기 위해 30년 평균의 월변화량을 적용하는 Change Factor 방법을 실시하여 관측소별 기후변화 값을 적용하였다. 미래기후변화 예측결과 2090s의 온도는 A2에서 5.5℃, B2에서 4.6℃ 증가하였으며, 강수량의 경우 각각 45.5mm, 124.7mm 증가하였다. 예측된 온도 자료는 위성영상에 의해 구축된 온도와 LAI와의 회귀식에 입력되어 미래 온도에 따른 LAI(Leaf Area Index)를 추정하였다. 최대 LAI의 경우 기존 모형에 5.00였던 것을 예측에 따라 침엽수의 경우 6.18, 활엽수와 혼효림에 경우 각각 5.80, 6.06으로 입력하였다. 토지이용 예측을 위해 개선된 CA-Markov(김성준 외, 2007)를 이용하여 1985~2000년의 5년 단위 토지피복도에 따른 2030, 2060, 2090년의 토지피복도를 예측하였다. 예측결과 침엽수가 46.8%에서 21.9%로 감소하였으며, 혼효림이 33.4%로 11.6% 증가하였으며 다른 토지이용에 변화는 미미하였다.

3. 모형의 검보정

모형의 보정은 충주댐의 9개년(1997~2006)간의 일별 댐유입량 자료를 이용하여 실시하였으며, 모형의 검증은 보정된 매개변수를 적용하여 7개년(1990~1997)에 대하여 실시하였다. 극심한 가뭄 해인 2001년은 검보정에서 제외하였다. 모형의 보정시 시행오차 방법을 이용하여 매개변수를 최적화하였다. 최적화 시행 시 참고문헌을 조사하여 모형에서 민감한 매개변수를 선정하여 보정하였다. 표 1은 모형의 검·보정 결과를 요약한 것이다. 검·보정기간에 대한 Nash-Sutcliffe(1970)의 모델효율계수는 0.43~0.92, RMSE는 1.0~2.9mm로 나타났다.

표 1. 검·보정 결과

Year	Observed			Simulated			Statistical summary			Note
	P (mm)	Q (mm)	QR (%)	Q (mm)	QR (%)	ET (mm)	RMSE (mm/day)	R ²	ME	
1990	1837.8	1038.2	56.5	974.0	53.0	531.2	2.1	0.88	0.88	V
1991	1447.7	527.6	36.4	639.8	44.2	481.5	1.2	0.77	0.70	V
1992	1281.8	506.8	39.5	576.8	45.0	481.7	1.1	0.69	0.64	V
1993	1538.1	751.7	48.9	788.5	51.2	470.2	1.6	0.83	0.82	V
1994	1208.6	381.5	31.6	442.6	36.6	392.7	1.4	0.59	0.43	V
1995	1262.9	661.4	52.4	774.2	61.3	433.7	2.2	0.87	0.83	V
1996	1042.5	384.7	36.9	448.2	43.0	432.5	1.0	0.71	0.58	V
Average	1374.2	607.4	43.2	663.4	47.8	460.5	1.5	0.76	0.76	-
1997	1394.4	631.2	45.3	751.5	53.9	500.6	1.7	0.78	0.67	C
1998	1778.2	856.3	48.1	948.2	53.3	538.8	1.7	0.89	0.86	C
1999	1595.1	792.4	49.7	881.3	55.2	515.5	2.1	0.87	0.86	C
2000	1187.0	587.1	49.4	718.6	61.4	410.7	1.6	0.87	0.83	C
2002	1718.6	821.8	47.8	895.9	52.1	516.8	2.2	0.91	0.91	C
2003	1856.7	1018.4	54.8	1086.7	58.5	560.1	1.7	0.84	0.85	C
2004	1503.8	892.3	59.3	958.5	63.7	528.2	2.4	0.88	0.86	C
2005	1469.6	726.9	49.5	802.9	54.6	522.7	1.4	0.86	0.84	C
2006	1613.7	936.3	58.0	1093.3	67.7	493.5	2.9	0.92	0.90	C
Average	1568.6	807.0	51.3	904.1	57.8	509.7	2.0	0.87	0.84	-

P:강수량, Q:유출량, QR:유출률, ET: 증발산량, R2:결정계수, ME:Nash-Sutcliffe 모형효율, C:보정, V:검정

4. 미래 기후, 식생, 토지이용변화에 따른 수문 변화 예측

미래 기후 및 식생, 토지이용 변화에 따른 수문 변화는 그림 1, 표 2와 같다. 미래 기후변화에 따라 강수량의 증가에도 불구하고 온도에 증가에 따라 증발산량이 증가하여 유출률은 감소하는

경향을 보이고 있다. 또한 토양 수분도 감소하는 경향을 보였다. 계절적으로 봤을 때 겨울철 강수량이 증가와 침엽수의 감소에 따라 차단과 증산 작용이 감소하여 유출률이 증가가 예측된 것으로 판단되며, 가을철에 온도가 다른 계절에 비해 높아짐에 따라 증발산량이 증가하여 유출률과 토양 수분량이 감소하는 경향을 보였다(표 3). 이는 가용 수자원의 감소로 연결되어 수자원의 관리의 중요성이 높아질 것으로 예측된다.

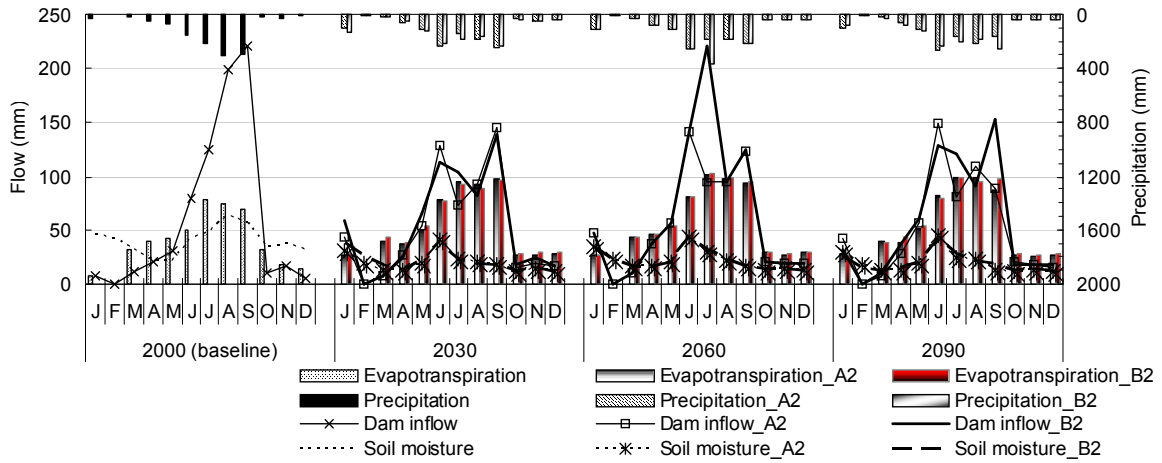


그림 1. 2030s, 2060s, 2090s에 대한 예측결과

표 2. 미래 연단위 수문 예측 및 결과 비교

Period	P (mm)	Q (mm)	QR (%)	Q variation (%)	ET (mm)	ETR (%)	ETR variation (%)	SW (%)
2000 [Baseline]	1187.0	728.9	61.4	-	462.9	39.0	-	26.1
A2 scenario								
2030s	1229.5	621.6	50.6	-10.8	614.5	50.0	+ 11.0	15.5
2060s	1303.4	666.1	51.1	-10.3	650.1	49.9	+ 10.9	17.6
2090s	1229.5	617.6	50.2	-11.2	621.8	50.6	+ 11.6	15.8
B2 scenario								
2030s	1267.5	654.3	51.6	-9.8	623.5	49.2	+ 10.2	17.0
2060s	1485.8	794.6	53.5	-7.9	652.5	43.9	+ 4.9	17.9
2090s	1308.7	681.2	52.7	-8.7	631.8	48.3	+ 9.3	16.2

P: 강수량 Q: 유출량, QR: 유출률 (Q/P), ET: 증발산량, ETR=ET/P100, SW: 토양수분

표 3. 미래 계절별 수문 예측 및 결과 비교

Period	P (mm)	Q (mm)	QR (%)	Q variation (%)	ET (mm)	ETR (%)	ETR variation (%)	SW (%)
2000 [Baseline]								
Winter	43.3	13.1	30.4	-	21.7	50.0	-	32.4
Spring	132.4	61.6	46.5	-	112.4	84.9	-	20.5
Summer	664.5	403.2	60.7	-	202.8	30.5	-	41.4
Fall	343.9	247.4	71.9	-	118.1	34.3	-	34.4
A2 scenario - 2030s								
Winter	151.0	60.6	40.1	+ 9.8	55.8	37.0	- 13.1	16.3
Spring	194.2	87.4	45.0	- 1.5	126.9	65.4	- 19.5	11.6
Summer	562.0	292.6	52.1	- 8.6	263.9	47.0	+ 16.4	22.6
Fall	322.4	179.2	55.6	- 16.4	149.8	46.5	+ 12.1	11.5

A2 scenario - 2060s								
Winter	163.0	66.6	40.9	+ 10.5	57.3	35.2	- 14.9	18.8
Spring	219.3	102.6	46.8	+ 0.2	142.1	64.8	- 20.1	14.4
Summer	617.3	330.3	53.5	- 7.2	281.3	45.6	+ 15.0	25.5
Fall	303.7	164.1	54.0	- 17.9	149.8	49.3	+ 15.0	11.8
A2 scenario - 2090s								
Winter	145.1	57.8	39.8	+ 9.4	54.5	37.5	- 12.5	15.9
Spring	202.7	92.8	45.8	- 0.7	128.8	63.5	- 21.3	11.9
Summer	630.4	339.4	53.8	- 6.8	281.2	44.6	+ 14.1	24.9
Fall	251.2	125.4	49.9	- 22.0	139.7	55.6	+ 21.2	10.3
B2 scenario - 2030s								
Winter	176.0	74.4	42.3	+ 11.9	57.2	32.5	- 17.5	20.1
Spring	206.0	97.1	47.1	+ 0.6	135.7	65.9	- 19.0	13.8
Summer	556.6	299.6	53.8	- 6.9	257.1	46.2	+ 15.7	21.9
Fall	329.0	180.9	55.0	- 17.0	152.1	46.2	+ 11.9	20.1
B2 scenario - 2060s								
Winter	163.0	67.0	41.1	+ 10.7	57.4	35.2	- 14.8	18.9
Spring	219.3	103.2	47.0	+ 0.5	142.1	64.8	- 20.1	14.4
Summer	799.7	457.0	57.1	- 3.5	283.2	35.4	+ 4.9	26.1
Fall	303.7	164.7	54.2	- 17.7	150.2	49.5	+ 15.1	12.0
B2 scenario - 2090s								
Winter	127.9	49.4	38.6	+ 8.2	55.1	43.1	- 7.0	14.5
Spring	229.2	107.5	46.9	+ 0.4	136.0	59.3	- 25.5	13.3
Summer	617.9	340.9	55.2	- 5.5	272.9	44.2	+ 13.6	24.5
Fall	333.8	188.9	56.6	- 15.4	153.0	45.8	+ 11.5	12.6

Winter: 12월~2월, Spring: 3월~5월, Summer: 6월~8월, Fall: 9월~11월

5. 결론

본 연구는 충주댐 유역을 대상으로 하여 SWAT-K 모형의 검·보정을 통해 적용성을 판단하였으며 미래 기후변화 및 식생, 토지이용변화에 따라 미래 수문환경 변화를 보다 정확하게 예측하고자 하였다. 모형의 구동 결과 미래에 온도 증가에 따라 전체적인 증발산량 증가로 이어지고 이에 따라 유출량과 토양 수분의 높은 비율의 감소가 예측되었다. 이는 가용 수자원량의 감소로 이어져 보다 확실하고 철저한 수자원 관리 방안이 제시되어야 할 것이다. 계절별로 분석한 결과 겨울철의 강수량 증가와 침엽수의 감소에 따른 유출량의 증가가 모의되어 이에 따른 대책 및 관리 방안이 모색되어야 할 것이라도 판단된다.

감 사 의 글

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

참 고 문 헌

- Nash, J. E., and Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models; Part 1 - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3): 282-290.
- 김성준, 이용준(2007). 면적규모 및 공간해상도가 CA-Markov 기법에 의한 미래 토지이용 예측결과에 미치는 영향, *한국지리정보학회지*, 제10권 제2호, pp. 57-69.