

중국 남서부의 Kejie 유역을 대상으로 토지이용과 기후 변화에 따른 수문과정 변화

Response of Hydrological Processes to Land-cover and Climate Change in Kejie Watershed, South-West China

박민지* 박근애** 김성준***

Park, Min-Ji · Park, Guen-Ae · Kim, Seong-Joon

I. 서론

산은 광대한 육수를 저장하고 있으며, 해양 대기과 지구 시스템에 중대한 역할을 한다(Viviroli and Weingartner, 2002). Shrestha et al. (1999)와 Liu and Chen (2000)는 히말라야의 온도 상승이 지구 평균보다 높으며, 고위도 지역 가운데 기후변화에 가장 민감하게 반응한다고 발표했다. 산림 환경은 인간 활동과 특히 토지피복 변화에 민감하다. 강 유역의 수문과 수자원은 기후와 토지 피복 변화에 따라 변화된다(Vorosmarty et al., 2000; Wang et al., 2007). 토지피복·기후변화는 산림 지역의 수자원과 하천 유출에 중요한 영향을 끼친다. 히말라야의 기후와 토지피복 변화는 생태계, 유출량, 자연 재해, 지역의 기후에 직접적인 영향이 끼치는 것으로 예측된다(Xu et al., 2007). 본 연구에서 과거 반세기동안 토지피복과 기후변화의 따른 수문학적 반응과 이러한 변화들의 평가를 시도하였다. SWAT은 토지피복과 기후변화에 대한 수문과정 영향에 사용되었다.

II. 재료 및 방법

대상 유역은 Kejie 유역으로 Salween 강 상류에 위치하고 환경적인 자원과 시설을 Yunnan 주에 있는 Baoshan과 태국, 미얀마 하류에 제공한다. 면적은 1755km²이며, 고도 범위는 963~3076m이다. 산지는 2000~3000m 범위이다. 골짜기는 아열대, 산지는 온대성 기후를 가진다. 연평균 강수량은 970~1290mm 사이이며, 건기와 우기가 확실하다. 강수량의 80%가 5월에서 10월 사이에 내린다. 평균온도는 15.9℃이다.

토지피복 변화에는 변환 행렬을 사용하여 다른 토지피복 타입의 내부 변환을 조사하였다. 토지피복 타입의 총 '손실과 이득'에 관한 변환 손실과 변환 이득의 퍼센트가 계산된다.

수문학적 시계열 경향성을 알아보기 위해 단조 경향에는 Mann-Kendall 테스트를 시행하였으며, 주요 변화에는 Mann-Whitney 테스트를 사용되었다.

* 건국대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 (iamg@konkuk.ac.kr)

** 건국대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 (dolpin2000@konkuk.ac.kr)

*** 건국대학교 사회환경시스템공학과 교수 (kimsj@konkuk.ac.kr)

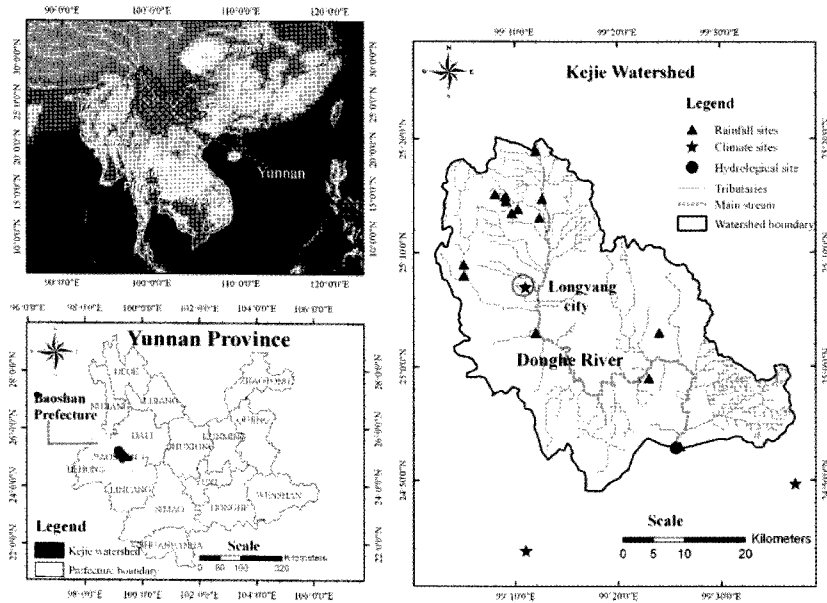


그림 1. 대상 유역

SWAT은 토양 속성과 강수량, 침투, 지표흐름, 증발산량, 지표하 흐름, 침루가 포함된 물수지 분석에 기초하고 있다. 1974, 1991, 2001, 2006 영상을 이용하여 시계열 토지피복도를 구축하였으며, 12개 강우관측소 자료를 구축하였고 1965~2005년에 유출량 자료를 수집하였다. 1:1,000,000 축척의 토양도, 식생 매개변수는 SWAT에서 제공하는 값을 사용하였다. 262와 267개의 HRUs와 31개 소유역으로 분할하였다. 모형의 검보정을 위해 1971~1975년과

1976~1979년으로 나누어서 실시하였다. 목적 함수로 NSE, PBIAS와 RSR가 사용되었다. 토지피복과 기후변화의 따른 수문학적 과정 영향을 고려하기 위해 두 개의 기간(1965~1986, 1987~2005)으로 나누어 모의하였다. 4개 모의: 1974년 토지피복도, 1965~1986 기후자료(모의1), 2001년 토지피복도, 1965~1986 기후자료(모의2), 1974년 토지피복도, 1987~2005 기후자료(모의3), 2001년 토지피복도, 1987~2005 기후자료(모의3)를 SWAT에 입력하여 모의하였다.

표 1. 위성 영상을 이용한 유역의 토지피복 변화 통계치

Land use	1974	1991	2001	2006	1974~1991	1991~2001	2001~2006
F	385.4	604.6	654.7	778.3	+ 219.2	+ 50.1	+ 123.6
G	493.7	430.4	298.4	223.4	-63.3	+ 132.0	-75.0
C	475.4	415.3	455.6	357.8	-60.1	+ 40.3	-97.8
S	57.3	60.6	73.2	101.4	+ 3.3	+ 12.6	+ 28.2
BL	331.4	230.3	257.5	285.4	-101.1	+ 27.2	+ 27.9
W	14.8	13.4	15.2	10.4	-1.4	+ 1.8	-4.8

표 2. 기간 별 강수량, 온도, 하천 유출량 통계치

Variables	Rainfall (mm)		Temperature (°C)		Streamflow (mm)	
	1	2	1	2	1	2
Periods						
Time	1965~1986	1987~2005	1965~1986	1987~2005	1965~1986	1987~2005
Series						
Length of Record	22	19	22	19	22	19
Mean value	994.4	1004.0	15.5	16.4	387.4	365.3
Max value	1290.4	1368.3	15.9	17.4	567.0	636.1
Min value	767.4	729.3	15.1	15.6	240.6	189.3
Standard Deviation	134.73	174.16	0.25	0.51	94.74	117.97
Coefficient of variation	0.14	0.17	0.02	0.03	0.24	0.32

Ⅲ. 결과 및 고찰

과거 토지피복 변화 결과는 표 1과 같다. 산림과 주거지는 증가하였으며, 초지는 감소하는 경향을 보였다. 경작지는 1974~1991년에는 60.1% 감소하였다가 2001년에는 증가 2006년에 다시 97.8% 감소하는 것으로 나타났다. 각 기간에 대한 이득과 손실을 계산하여 1974~1991년에는 초지는 산림, 경작지는 산림, 산림은 초지, 나지는 산림과 경작지로 1991~2001년은 초지는 산림, 나지는 경작지로 2001~2006년에는 초지는 산림과 나지, 경작지는 산림, 나지, 주거지로 나지는 산림의 경향을

나타냈다. 기후와 수문 자료를 이용하여 Mann-Kendall와 Mann-Whitney 테스트를 실시한 결과 온도 부분에서 확실한 증가 추세를 보였으나 강수량과 하천 유출량의 경향성은 약한 것으로 모의되었다. 모의 기간에 따른 강수량, 온도와 하천 유출량은 표 2와 같다. 연 하천 유출량은 22.1m 감소, 온도(0.9°C), 강수량(9.7mm)은 증가하였다. 모형의 보정 결과 NSE=0.75, RSR=0.50, PBIAS=-2.3%, 검정 결과 NSE=0.91, RSR=0.30, PBIAS=-5.3%로 나타났다.

기간에 따른 모의 결과 연 평균 지표수는 15% 감소하였고, 하천 유출량도 감소하였으며 기저

표 3. 기간 1과 2 사이에 토지피복, 기후, 하천 유출량 변화 기여율

Simulation			Changes from simulated results							
			Simulated stream flow		Caused by combined factor (Sim4-Sim1)		Caused by climate change (Sim3-Sim1)		Caused by land cover (Sim2-Sim1)	
			mm		mm	%	mm	%	mm	%
sim 1	CLD	65-86	425.6							
	LCM	74								
sim 2	CLD	65-86	409.8							
	LCM	2001								
sim 3	CLD	87-05	430.0	-11.5	-2.7	4.4	1.0	-15.8	-3.7	
	LCM	74								
sim 4	CLD	87-05	414.1							
	LCM	2001								

※ CLD = Climate data; LCM = Land cover map.

표 4. 대상 유역의 토지피복/기후 변화에 따른 수문학적 영향

Hydrological processes	Change		Land-cover Contribution		Climate Contribution		Difference	
	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
Surface water	-16.6	-11.1	-26.7	-17.8	11.5	7.7	-1.4	-1.0
Baseflow	5.6	3.4	12.9	7.8	-7.2	-5.0	1.0	0.6
Lateral flow	-0.7	0.0	-2.1	-1.9	1.0	0.9	0.4	1.0
Actual ET	21.7	4.9	15.9	3.6	5.8	1.3	0.0	0.0
Streamflow	-11.5	-2.7	-15.8	-3.7	4.4	1.0	-0.1	0.0

흐름과 실제 증발산량은 5%이하로 증가하였다. 표 3은 기간 1과 2 사이에 토지피복, 기후, 하천 유출량 변화 기여율을 나타낸다. 전체 4개의 시나리오에 대한 모의를 실시하여 비교한 결과는 표 4와 같다. 산림화가 진행됨에 따라 연 유출량은 줄어든다. 이는 식생 차단과 증발산에 따른 수분 손실 증가로 하천 유출량이 줄어들게 된다. 기후 변화시에는 하천 유출과 지표 흐름량은 대부분 강수량 증가 때문이고 증발산량 증가는 온도와 강수량의 증가로 야기된다. 두 가지 사항을 모두 고려하였을 때 기후에 의해 주요한 수문과정이 결정된다. 월 기후변화에 따른 지표 흐름은 토지 피복 변화에 따른 감소로 상쇄된다.

IV. 결 론

과거 40년의 토지피복과 기후 변화를 고려하여 4개 시나리오로 SWAT을 구동한 결과를 분석하였다. 산림(22.4%)과 주거지(2.5%)가 증가하였으며, 초지(15.4%), 경작지(6.7%), 나지(2.6%)는 감소하였다. 온도는 과거 40년동안 15.5℃에서 16.4℃로 증가하였다. 연 강수량과 하천 유출량의 경향성은 작았다. 산림화에 따른 증발산량과 기저흐름의 증가로 지표 흐름과 하천 유출량은 전체적으로 감소하였으며 특히 우기(5~10월)에 더 감소하였다. 기후 변화에 따라 지표 흐름, 증발산량, 하천 유출량은 증가하였으나 기저

흐름은 감소하였다. 기후와 토지피복 변화를 모두 고려하였을 때 하천 흐름의 변화가 모호하였는데 이는 토지피복과 기후변화가 서로 상쇄 작용하여 나타난 것이다. 과거 40년 동안의 토지 피복 변화는 대상 유역의 수문 과정에 중요한 역할을 하며 기후 변화에 따른 부정적인 영향을 완화하는데 기여한다.

V. 활용방안 및 기대효과

산림의 증가에 따라 기후 변화가 수자원에 끼치는 악영향을 완화하게 됨으로 향후 기후변화에 대한 대응책 마련 기초 연구로 활용될 수 있다.

참고문헌

- Liu XD, Chen BD. 2000. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades. *International Journal of Climatology* 20: 1729~1742. DOI: 10.1002/1097-0088(20001130)20:14<1729::AIDJOC556>3.0.CO;2-Y.
- Shrestha AB, Wake CP, Mayewski PA, Dibb JE. 1999. Maximum temperature trends in the Himalaya and its vicinity: An analysis based on temperature records from Nepal for the period 1971-94. *Journal of Climate* 12: 2775-2787. DOI: 10.1175/1520 - 0442 (1999)012 <2775: MTTITH> 2.0.CO;2.
- Viviroli D, Weingartner R. 2002. The significance of mountains as sources of the world's freshwater. *GAIA-Ecological Perspectives for Science and Society* 11(3): pp.182~186.

4. Vorosmarty CJ, Green P, Salisbury J, Lammers RB. 2000. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. *Science* 289: 284~288. DOI: 10.1126/science.289.5477.284.
5. Wang GX, Liu JQ, Kubota J, Chen L. 2007. Effect of land-use changes on hydrological processes in the middle basin of the Heihe River, northwest China. *Hydrological Processes* 21: 1370-1382. DOI: 10.1002/hyp.6308.
6. Xu ZX, Li JY, Liu CM. 2007. Long-term trend analysis for major climate variables in the Yellow river basin. *Hydrological Processes* 21: 1935-1948. DOI:10.1002/hyp.6405.

출 처

Hydrol. Process. 23, 1179~1191 (2009)

Xing Ma, Jianchu Xu, Yi Luo, Shiv Prasad Aggarwal and Jiatong Li

Kunming Institute of Botany, CAS, 132 Lanhei Road, Heilongtan, Kunming 650204, China