

*

SWAT 모형을 이용한 산림지역의 토양수분과 식생 정보 간 상관성 분석

The correlation analysis between SWAT predicted forest soil moisture and MODIS NDVI image

홍우용, 박민지, 박종윤, 신형진, 김성준

Woo-Yong Hong·Min-Ji Park·Jong-Yoon Park·Hyung-Jin Shin·Seong-Joon Kim

요 지

토양수분은 물순환계통을 이해하기 위한 필수적인 수문학적 변수이나 설치비용과 인력부족으로 실측자료가 매우 부족한 실정이다. 많은 수문모형의 개발로 토양수분 또한 결과물로써 많이 이용되지만, 그 결과의 신뢰성을 판단하기가 쉽지 않다. 본 연구에서는 활용성이 높다고 판단되는 수문모형인 SWAT 모형을 통해 산림지역의 토양수분을 모의하고 MODIS NDVI와의 상관성을 분석하여, 모의된 토양수분의 신뢰성 판단을 위한 MODIS NDVI의 활용성을 파악하고자 하였다. 대상유역은 산림이 전체유역의 약 82%를 차지하고 있는 충주댐 유역으로 하였으며 NDVI 자료는 시간해상도 16일, 공간해상도 250m 인 MODIS 영상의 Product를 이용하였다. 보다 신뢰성 있는 자료를 얻기 위해 유역의 특성이 다른 두 지점을 선정하여 다지점 검보정을 수행하였으며, 2003년부터 2006년까지의 유출 자료를 이용하여 모형을 보정하고, 2000, 2001 그리고 2002년에 대하여 검증하였다. 검보정 결과 모형 효율성 계수는 상류와 하류에 대하여 각각 0.91, 0.87, 결정계수는 각각 0.90, 0.80으로 분석되었다. 본 연구에서는 NDVI 특성에 따라 봄 기간과 가을기간으로 나누어 분석을 수행하였으며, NDVI와 토양수분의 상관관계는 NDVI가 증가하는 봄 기간에 토양수분은 감소하며 역 관계로 나타났고 NDVI가 감소하는 가을 기간에 토양수분은 증가하는 순 관계를 보였다.

핵심용어 : SWAT, Soil moisture, Evapotranspiration, MODIS NDVI, Landuse

1. 서 론

토양수분은 지구의 에너지와 물 순환을 통제하는 중요한 변수 중 하나이다. 다수의 연구들에서 토양수분이 지표면과 기후 사이의 순환에 영향을 미친다는 것을 밝힌 바 있으며(Shuka and

* 정희원 건국대학교 사회환경시스템공학과 석사과정 · E-mail : carrot84@konkuk.ac.kr
** 정희원 건국대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 · E-mail : iamg@konkuk.ac.kr
*** 정희원 건국대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 · E-mail : bellyon@konkuk.ac.kr
**** 정희원 건국대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 · E-mail : shjin@konkuk.ac.k
***** 정희원 건국대학교 환경시스템학부 사회환경시스템공학과 교수 E-mail : kimsj@konkuk.ac.kr

Mints, 1982), 특히 국내와 같이 산림 면적이 64%이상인 지역에서 산지사면 토양수분의 시간적 공간적 분포 특성은 수문기상학 예측, 비점 오염물 거동 예측에 있어서 중요한 인자로 알려지고 있다(최경문 등, 2008). 이러한 토양수분의 중요성에도 불구하고 많은 설치비용과 인력부족으로 지속적이고 광역적인 토양수분의 측량이 잘 이루어 지지 않고 있는 실정이기 때문에 연구를 수행하는데 있어서 어려움이 많다. 물 부족이 심화 되어 효과적인 물 사용에 대한 관심이 높아진 가운데 물 순환에 대한 연구가 활발해 지면서 토양수분에 대한 연구 또한 이루어졌다. 최경문 등(2008)은 전이합수를 통한 광릉 산림 유역의 토양수분 모델링에 관한 연구를 하였고, 황태하 등(2006)은 SWAT 모형을 이용하여 토양수분을 추정하고, 이로부터 계산된 토양수분결핍을 근거로 토양수분 지수를 산정하여 이 지수의 가뭄감시 적용성에 대하여 판단하였다. 많은 수문모형의 개발로 토양수분이 결과물로 추출되어 그 결과를 활용하기 좋으나, 모형에 의한 토양수분의 모의는 여러 변수들과 모형의 불확실성으로 인해 신뢰할 수가 없다. 토양수분의 실측자료를 이용하여 신뢰성을 판단하는 것이 가장 이상적이나 실측자료가 부족하므로, 유역의 토양수분 실측자료 대신 모의된 토양수분의 신뢰성을 판단할 수 있는 척도가 필요하다. 그러므로 본 연구에서는 식생지수인 NDVI와 토양수분과의 상관성을 분석 하여, 실측 토양수분 자료를 대신할 수 있는 척도로 사용될 수 있는지 판단하고자 하였다.

2. 연구자료 및 방법

2.1 연구지역의 개요

본 연구의 대상지역은 한반도의 중심부를 관류하는 남한강 수계에 속하는 충주댐 유역이다(Fig.1). 이 유역은 동경 127°9'~ 129°0', 북위 36°8'~ 37°8'사이에 위치한다. 면적은 약 6,661.3km²이며, 이 중 산림이 82.2%를 차지하고, 유역의 연평균 강우량은 1,198mm이다.

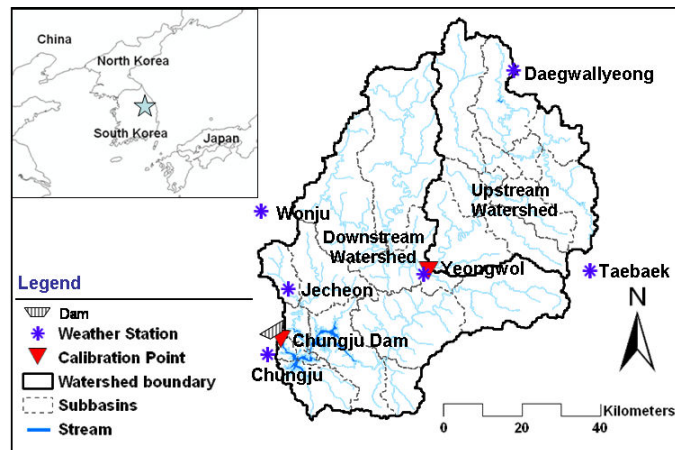


Fig 1. Study area

본 연구에서는 강우, 기온, 상대습도, 풍속 자료를 1996년 1월 1일부터 2006년 12월 31일 까지 기상청에서 측정한 충주댐 유역의 기상관측소 자료를 이용하였고 (<http://www.kma.go.kr>), 일사량은 기상청에서 자료를 제공하지 않으므로, 일조시간을 이용하여 동일한 기간의 자료를 구축하였다.

2.2 재료 및 방법

SWAT 모형은 수문순환을 정확히 예측하기 위하여 물수지 방정식에 근거를 두고 강수, 증발산, 지표유출, 기저유출, 지하수, 토양수분 등에 대한 모의를 각 수문반응단위 별로 계산할 수 있다(박종윤 등, 2008). SWAT 모형에서 사용하는 물수지 방정식은 Eq. 1과 같다.

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

여기서, SW_t 는 최종의 토양 수분량 (mm H₂O), SW_0 은 i 일의 초기 토양수분량 (mm H₂O), t는 시간 (일), R_{day} 는 i 일의 강수량 (mm H₂O), Q_{surf} 는 i 일의 지표유출량 (mm H₂O), E_a 는 i 일의 증발산량 (mm H₂O), w_{seep} 는 i 일의 토양면으로부터 투수층으로의 투수되는 총량 (mm H₂O), 마지막으로 Q_{gw} 는 i 일의 회귀수량 (mm H₂O)이다. 토양수분의 추출은 토지이용과 토양의 특성을 고려하는 HRU (Hydrologic Response Unit)를 단위로 하고 일별 토양수분 16일 단위로 평균하여 MODIS NDVI와 비교 분석 하였다.

본 연구에서 사용된 MODIS 센서를 활용하여 제작된 MODIS Vegetation Index Product는 두 개 혹은 세 개 분광 밴드의 조합으로 이루어지며, 식생 구조와 생물기후학적, 생물리학적 요소들의 변화를 계절별, 년 별로 분석하는데 사용된다. 두개의 MODIS 식생지수는 정규식생지수(NDVI)와 강조된 식생지수(EVI)로 전 지구를 대상으로 1-Km와 500-m, 250-m의 해상도 자료를 16일 간격으로 제공한다(<https://wist.echo.nasa.gov /api/>). 본 연구에서는 NASA에서 제공하는 시간해상도 16일, 공간해상도 250m인 MOD13Q1 Product를 사용하였다.

2.3 모형의 검보정

본 연구에서는 모형으로부터 보다 신뢰성 있는 토양수분 자료를 획득하기 위해 보정과 검증을 실시하였다. 유역의 보정은 보통 유출구 지점에서 이루어지나 본 유역과 같이 넓은 지역은 한 지점의 매개변수가 모든 유역을 대표하지 못하므로, 본 연구에서는 유출량을 기준으로 상류와 하류 두 지점의 매개변수를 조정하여 검보정을 수행하였다. 초기 매개변수를 안정화하기 위하여 1999년을 초기 안정화 기간으로 지정하고, 실측자료가 신뢰성 있다고 판단되는 2003~2006년을 보정기간, 2000~2002년을 검증 기간으로 하였으며, 침투유출 및 기저유출 기준으로 유량과 감수곡선에 영향을 미치는 매개변수를 선정하여 보정을 실시하였다. 보정과 검증은 결정계수(R^2)와 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 이용하여 판단하였고, 모형의 효율성 검증을 위해 Nash와 Sutcliffe (1970)가 제안한 모형효율성 계수(Model Efficiency, ME)를 사용하였다. 영월 지역은 보정기간 동안의 총 강수량 6118.5mm에 대하여 유출율은 약 7%의 오차를 나타내었고, 결정계수는 0.90, RMSE는 1.17mm/day, ME는 0.91이었으며, 충주댐 지역은 보정기간 동안의 총 강수량 6077.8mm에 대해 유출율은 약 4%의 오차를 보였고, 결정계수 0.79, RMSE는 1.27mm/day, ME는 0.69로 모형의 보정은 잘 이루어진 것으로 판단되었다.

3. 결과 및 고찰

본 연구의 목적은 SWAT에서 모의한 토양수분과 Terra MODIS 위성 영상에서 추출한 NDVI와의 상관관계를 구하는 것이다. 2000년부터 2006년까지의 NDVI가 증가하는 봄 기간과 감소하는 가을 기간으로 나누어 분석하였고, 산림 지역을 대상으로 NDVI와 시간해상도를 일치시키기 위하여 16일을 기준으로 한 평균한 토양수분과 NDVI를 활엽수, 침엽수, 혼효림 별로 평균하여 상관분석을 하고 상관식을 이끌어 내었다.

Table 1. The regression equation between MODIS NDVI and SWAT soil moisture of forest for each year in spring period

year	Rainfall (mm)	Equation ($y = \text{Soil Moisture}, x = \text{NDVI}$)			R^2		
		Deciduous	Evergreen	Mixed	Deciduous	Evergreen	Mixed
2000	1183.6	$y = -2.8054x + 16.840$	$y = -2.7249x + 15.629$	$y = -2.4605x + 15.732$	0.57	0.70	0.59
2001	834.3	$y = -10.114x + 22.183$	$y = -11.543x + 21.031$	$y = -10.188x + 21.362$	0.87	0.81	0.84
2002	1450.3	$y = 0.5036x + 15.138$	$y = -0.3726x + 14.072$	$y = -0.5838x + 14.903$	0.02	0.01	0.03
2003	1693.7	$y = -4.8587x + 20.618$	$y = -5.1492x + 19.280$	$y = -3.8745x + 17.463$	0.57	0.67	0.67
2004	1476.1	$y = -2.7942x + 17.591$	$y = -3.8549x + 16.533$	$y = -4.8926x + 19.759$	0.54	0.54	0.59
2005	1339.5	$y = -3.8983x + 18.140$	$y = -4.6884x + 16.732$	$y = -5.2520x + 17.898$	0.66	0.55	0.66
2006	1616.0	$y = -2.8528x + 18.305$	$y = -3.1239x + 15.915$	$y = -3.8745x + 17.463$	0.42	0.58	0.53
Total	1370.5	$y = -3.8417x + 18.421$	$y = -4.7821x + 17.977$	$y = -4.3157x + 16.971$	0.52	0.55	0.56

Table 2. The regression equation between MODIS NDVI and SWAT soil moisture of forest for each year in fall period

year	Rainfall (mm)	Equation ($y = \text{Soil Moisture}, x = \text{NDVI}$)			R^2		
		Deciduous	Evergreen	Mixed	Deciduous	Evergreen	Mixed
2000	166.3	$y = 20.821x + 3.287$	$y = 26.426x + 0.339$	$y = 18.301x + 5.173$	0.64	0.81	0.53
2001	146.3	$y = 22.721x - 4.288$	$y = 25.402x - 4.935$	$y = 21.367x - 3.200$	0.78	0.85	0.83
2002	153.9	$y = 25.049x - 0.850$	$y = 20.998x + 2.169$	$y = 25.838x - 0.913$	0.57	0.51	0.56
2003	191.9	$y = 36.708x - 1.048$	$y = 39.921x - 3.088$	$y = 39.772x - 2.171$	0.92	0.96	0.75
2004	113.0	$y = 32.48x - 5.141$	$y = 31.87x - 5.847$	$y = 31.415x - 3.707$	0.94	0.93	0.90
2005	286.8	$y = 28.08x + 0.042$	$y = 25.73x - 0.483$	$y = 28.398x + 1.609$	0.58	0.51	0.59
2006	147.8	$y = 5.5029x + 9.828$	$y = -0.574x + 12.174$	$y = 2.5811x + 12.29$	0.10	0.00	0.02
Total	172.3	$y = 23.530x + 1.723$	$y = 25.759x - 0.656$	$y = 24.961x + 0.146$	0.65	0.65	0.60

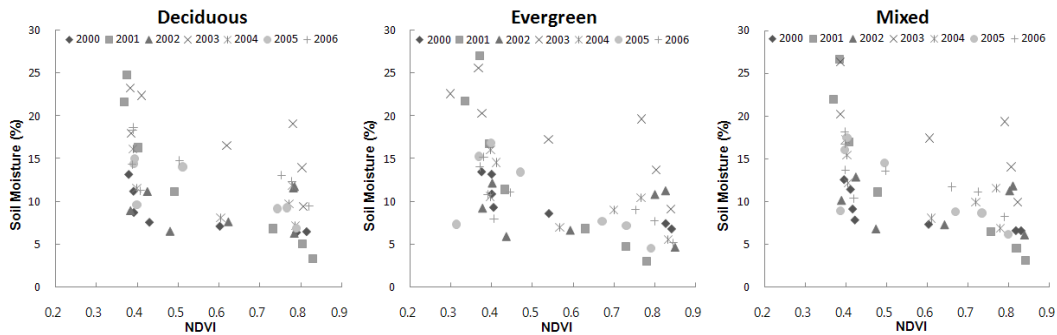


Fig. 2. The relationship between MODIS NDVI and SWAT soil moisture which were averaged for each data set in spring period

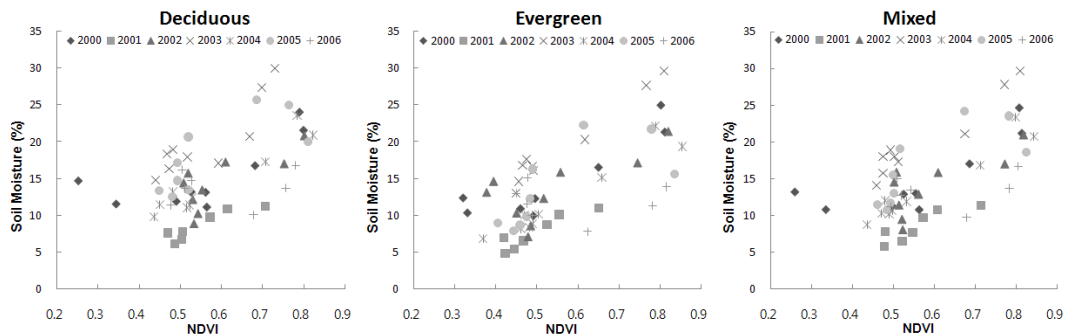


Fig. 3 The relationship between MODIS NDVI and SWAT soil moisture which were averaged for each data set in fall period

Fig. 2와 Table 1은 봄 기간에 NDVI가 회귀식에 의해서 토양수분을 얼마나 설명해 주는지를 보여준다. 잎이 성장하는 시기에 식물은 증발산을 위해 수분이 필요하고, 또한 식물 성장 시기인 3월부터 6월까지 온도가 증가하여 지표면에서 수분의 증발도 활발하므로, NDVI는 식생이 성장하면서 증가하고, 강우에 영향을 받지 않는 한 토양수분은 점점 감소하게 된다. 2002년이 다른 해에 비하여 R^2 값이 지나치게 낮은 이유 또한 2002년은 봄 기간에 비가 많이 와서 토양수분의 변동이 커졌기 때문이라 생각되며, 강우량이 많은 기간에는 NDVI를 이용하여 토양수분을 보정하는 것은 적합하지 않다고 판단된다. 분석 기간 중 강우의 방해를 받지 않은 경우, 토양수분의 지속적인 감소는 두 변수들 사이의 역 관계를 보여주며, 봄기간 NDVI는 선형 회귀식에 의하여 토양수분을 약 55% 나타낼 수 있고, 토양수분의 변동성이 심했던 2002년을 제외하면 약 62% 나타낼 수 있다.

그에 반해 가을 기간은 Fig. 3에서 보여 지는 바와 같이 토양수분과 NDVI는 순 관계를 나타내는데, 여름동안 채워졌던 토양수분이 줄어들면서, NDVI 값은 서서히 작아지게 되기 때문이라 판단된다. 봄 기간 보다 가을 기간의 토양수분과 NDVI의 상관성이 더 높게 나타났으며, 봄 기간에 비해 가을기간이 강우량이 적으므로 강우가 토양수분과 NDVI의 상관성을 저하시키는 요인이라는 판단을 뒷받침 해 준다. 최종 결과에 따라 가을기간 NDVI는 선형 회귀식에 의하여 토양수분을 약 65% 나타낼 수 있으며, 가장 상관성이 적은 2006년을 제외하면 약 73% 나타낼 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 SWAT에 의한 토양수분과 MODIS 위성영상으로부터 추출한 NDVI와의 봄/가을 기간 산림지역의 시간적 상관성을 분석하였다. 2000년부터 2006년까지 봄/가을기간의 토양수분과 NDVI를 16일 단위로 분석할 결과 토양수분과 NDVI의 상관성은 봄 기간에는 역 관계를 나타내었고 가을기간에는 순 관계를 나타내었다. 두 변수 사이의 상관성은 풍수해보다 가뭄해, 봄 기간 보다 가을기간에 더 크게 나타났으며, 이것은 강우에 따른 토양수분의 변동성은 변동성이 비교적 작은 NDVI와의 상관성을 저해하는 요인이기 때문이라 판단된다. 그러므로 우리나라 산림에서 가뭄기간이나 비교적 건조한 기간의 NDVI는 토양수분을 추정하는 것이 가능하다고 판단되나 비가 많이 온 해나 여름의 NDVI는 토양수분을 추정하는데 어려움이 있을 것이라 보여 진다.

감사의 글

건설교통부 첨단도시기술개발사업 - 지능형국토정보기술혁신 사업과제의 연구비지원(07국토정보C03)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 최경문, 김상현, 손미나, 김준(2008). 전이함수를 통한 광릉 산림 구역의 토양수분 모델링, 한국농림기상학회지, 제10권, 제2호, pp. 35-46.
2. 황태하, 김병식, 김형수, 서병하(2006). SWAT 모형을 이용한 토양수분지수 산정과 가뭄감시, 대한토목학회논문집, 제26권, 제4B호, pp. 345-354.
3. Nash, J.N. and Sutcliffe, J.E.(1970). River flow forecasting through conceptual models, part I-A discussion of principles, Journal of Hydrology, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.
4. NASA WIST Primary Data Search : <https://wist.echo.nasa.gov/api>
5. Shukla, J. and Mintz, Y.(1982), Influence of land surface evapotranspiration on the earth's climate, Science, Vol. 215, pp. 1498-1500.