Terra MODIS 위성영상과 SWAT 모형을 이용한 용설이 충주댐 유입량에 미치는 영향 평가

김새별* · 안소라** · 신형진*** · 김성준****

Kim, Saet Byul*, Ahn, So Ra**, Shin, Hyung Jin***, Kim, Seong Joon****

Assessment of Snowmelt Impact on Chungju Dam Watershed Inflow Using Terra MODIS Data and SWAT Model

ABSTRACT

This study is to evaluate the snowmelt impact on dam inflow for the Chungju Dam watershed 6,642.0 km² using Terra MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) and Soil and Water Assessment Tool (SWAT). To determine the SWAT snowmelt parameter; snow cover depletion curve (SCDC) the snow depth distribution (SDD) using Terra MODIS was used, the snow depth was spatially interpolated using snowfall data of ground meteorological stations. For 10 sets (2000-2010) data during snowmelt period (November-April), the *sno50cov* parameter, that is, the 50% coverage at a fraction of SCDC which determines the shape of snow depletion process, showed the values of 0.4 to 0.7. The SWAT model was calibrated with average R² of 0.54 using the *sno50cov* of each year. The 10 years average streamflow during snowmelt period was 104.3 mm which covers 12.0% of the annual streamflow.

Key words : Snowmelt, MODIS, SWAT, Snow cover depletion curve

초 록

본 연구에서는 충주댐 유역(6,642.0 km²)을 대상으로 Terra MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) 위성영상과 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형을 이용하여 용설이 댐유입량에 미치는 영향을 분석하였다. SWAT 모형의 용설 매개변수인 적설면적 감소곡선(Snow Cover Depletion Curve; SCDC)을 결정하기 위해 10 sets (2000-2010)의 Terra MODIS 위성영상으로부터 추출한 적설분포도와 지상 강설자료를 이용하여 구축한 적설심분포도(snow depth distribution; SDD)를 도출한 결과, 50% 적설면적일 때의 적설면적감소계수(*sno50cov*)는 0.4~0.7의 범위를 가지는 것으로 분석되었다. 매년의 용설 매개변수를 적용하여 용설기간(11~4월)동안의 유출을 보정한 결과 평균 R²는 0.54이었다. 10년 동안 용설기간의 유출량은 평균 104.3 mm로 연 유출량의 12.0%를 차지하는 것으로 분석되었다.

검색어 : 용설, MODIS, SWAT, 적설면적감소곡선

* 정회원 · 국립환경과학원 물환경연구부 수질통합관리센터 전문위원 (stella55@korea.kr)

** 정회원 · 건국대학교 사회환경시스템학과 박사과정 (ahnsora@konkuk.ac.kr)

*** 정회원 · 한국수자원공사 K-water연구원 수자원연구소 위축선임연구원 (shjin@kwater.or.kr)

**** 정회원 · 교신저자 · 건국대학교 사회환경시스템학과 교수 (Corresponding Author · Konkuk University · kimsj@konkuk.ac.kr)

Received October 29, 2012/ revised November 30, 2013/ accepted January 21, 2014

1. 서론

우리나라는 장마와 집중호우가 주를 이루는 여름철 강수량에 비해 겨울철 강수량은 약 20%로 적은 양이 발생한다. 국내 수자원 계획에서 겨울 강설에 대한 용설 해석은 수자원실무에 큰 영향을 미치지 않을 것이라 하여 많이 무시되어 왔다. 하지만, 지형 및 계절적 특성이 비교적 뚜렷한 우리나라의 경우 눈이 많이 오는 북동부 산악지대에서 겨울철 내린 눈으로 인한 용설이 봄까지 반복되면서 수문학적으로 하천유출에 어느 정도 영향을 미치게 된다. 눈은 밀도편차가 커서 5~25%의 물과 같으며 보통 새로운 눈은 약 10%의 비와 같은데 예를 들어 태백관측소의 2003년 1월 6일 기록된 일최심적설이 94.5 cm이면 약 94.5 mm의 강수량에 해당하는 적설량이 기록된 것이라 할 수 있다(Lee et al., 2003). 따라서, 여러 가지 이수 목적으로 이용될 수 있는 수년 혹은 수십 년의 장기유출해석을 위해서는 적설 및 용설의 영향을 고려한 연구가 필요하다. 또한 갈수기에 해당하는 1~5월은 용설의 효과가 유출모의 및 수문성분해석에 상당히 영향을 미치고 있지만 국외에 비해 국내에서는 이에 대한 해석도 충분치 않은 실정이다(Kim et al., 2006).

용설 모의가 가능한 장기유출모형으로는 SWAT (Soil and Water Assessment Tool), PRMS (Precipitation-Runoff Modeling System), RHESSys (Regional Hydro-Ecologic Simulation System), VIC (Variable Infiltration Capacity) 모형 등이 있다(Fontaine et al., 2002).

용설을 고려한 장기유출모의에 따른 국내연구는 Bae and Oh (1998)가 소양강 제 1지류인 내린천 유역을 대상으로 미국 국립기상청의 온도지수 용설 모형에 적용하여 국내에서의 토양수분 및 하천유량에 미치는 영향을 분석하여 용설 모형의 필요성을 밝힌 바 있다. 이는 장기 용설 모의의 기초연구로써 용설 모형의 적용 유무가 토양수분 및 하천유량에 미치는 영향을 분석하였다. Lee et al. (2003)은 소양강댐과 충주댐 유역에 탱크모형을 적용하여 적설 및 용설을 고려한 유출모의를 시행하여 용설 고려 전후의 유출량을 비교분석하였으며, 특히 3~4월 갈수기의 용설을 고려한 유출량은 고려 전보다 약 30% 차이는 것으로 분석하고 장기유출 모의시 용설 고려의 문제점을 고찰한 바 있다. Kim et al. (2006)은 SWAT 모형을 이용하여 용설 모의에 따른 유출 및 수문성분의 영향을 분석하기 위하여 표고, 온도, 강수량 등 중요한 용설 매개변수에 대해 용설 고려 전후의 유출량과 매개변수가 미치는 영향을 분석하였지만 용설 연구에 필요한 실측자료가 미비한 국내 실정에서 매개변수의 적용성 및 특성을 구체적으로 밝히지는 못하였다. Kim et al. (2007)은 SWAT 모형을 이용하여 쌍천 유역에 대한 적설 및 용설의 영향을 평가하기 위해 용설관련 기온 매개변수를

산정한 장기유출특성을 분석하였으며, 강원 산간지대의 수자원 평가시 적설 및 용설 모의의 필요성을 검토한 바 있다. 이처럼 국내에서는 용설 모의를 위한 연구가 진행되고 있지만, 적설 및 용설 연구를 위한 관측자료가 부족해 실측값과의 비교분석이 어려운 실정이다. 국외연구사례를 살펴보면, 위성영상자료를 활용하여 적설지역을 추출한 용설 모의가 1976년부터 활발히 진행 중에 있으며(Rango and Litten, 1976; Matson et al., 1986; Hall et al., 1995; Rosenthal and Dozier, 1996; Romanov et al., 2003; Salomonson and Appel, 2004, 2006; Painter et al., 2009), 국내의 경우는 Shin and Kim (2008)이 NOAA AVHRR 위성영상 자료를 이용하여 국내 주요 7개 댐유역에 대한 용설 모형의 주요 매개변수인 적설분포면적(Snow Cover Area; SCA), 유역 평균, 최대 적설심과 적설면적감소곡선(Snow Cover Depletion Curve; SCDC)을 구축한 바 있다. 이와 같은 방법으로 Shin and Kim (2007)은 적설분포를 추출한 용설 매개변수를 최적화하였고 모형을 검증하여 용설 영향으로 인한 수문성분변화를 SLURP 모형을 이용하여 적용성을 검토한 바 있다.

본 연구의 목적은 용설에 따른 장기 유출 모의를 위해 실측자료인 Terra MODIS와 기상자료를 이용하여 용설 매개변수를 구축하고, 이를 장기유출모형인 SWAT 모형에 적용하여 용설 매개변수의 적용성을 평가하고 우리나라 북동부 산악지역에 위치한 충주댐유역을 대상으로 용설의 영향 및 댐유입량에 미치는 영향을 파악하는데 있다.

2. 재료 및 방법

2.1 SWAT 모형의 개요

SWAT 모형은 미국 농무성 농업연구소(United States Department of Agriculture; USDA)에서 대규모의 복잡한 유역의 장기간에 걸친 토양과 토지이용 변화 및 토지관리 상태에 따른 물과 유사 및 농업화학물질의 거동을 예측하기 위해 개발된 유역모델이다. SWAT 모형은 4가지 부모형(수문, 토양유실, 영양물질, 하도추적)으로 구성되어 있으며, 토양과 토지이용조건에 의해 결정되는 수문 반응단위(Hydrologic Response Unit; HRU)를 기본으로 하고 각 HRU는 수문학적 동질성을 가진다. SWAT 모형의 이론은 Arnold et al. (1996)와 Neitsch et al. (2001)에 자세히 언급되어 있다.

SWAT 모형에서 사용되는 물수지 방정식은 다음 Eq. (1)과 같다.

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=0}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

여기서, SW_i 는 최종토양수분량(mm), SW_o 는 초기토양수분량(mm), t 는 시간(일), R_{day} 는 i 일의 강수량(mm), Q_{surf} 는 i 일의 지표유출량(mm), E_a 는 i 일의 증발산량(mm), w_{seep} 는 i 일의 토양면으로부터 투수층으로의 총투수량(mm), Q_{gw} 는 i 일의 회귀수량(mm)이다.

국내에서 적용성이 검증된 장기유출모형 중에서 SWAT 모형은 표고에 따른 적설 및 용설 기작을 포함하고 있다. 이 모형에서는 강설과 용설에 대한 기온과 시간의 경과에 따른 적설감소를 고려하도록 되어 있다. 용설량은 적설온도, 용설률, 유역에 눈으로 덮인 면적비에 의해 결정되며 용설은 일평균기온이 적설의 용설온도인 T_{milt} 보다 낮은 경우에는 발생하지 않는 것으로 가정하며, 적설의 온도는 다음 Eq. (2)와 같이 산정된다.

$$T_{snow(d_n)} = T_{snow(d_{n-1})} \cdot (1 - l_{sno}) + \overline{T_{av}} \cdot l_{sno} \quad (2)$$

여기서, $T_{snow(d_n)}$ 는 해당일의 적설온도(℃), l_{sno} 는 적설온도와 기온에 관계된 지체계수, $\overline{T_{av}}$ 는 일평균기온(℃)이다.

강수를 강우 또는 강설로 구분할 때, $\overline{T_{av}}$ 이 임계온도보다 낮은 경우, 강수는 강설로 구분되며 강설의 형태로 유역에 도달한 수분은 적설(snow pack)의 형태로 저장된다. 적설을 강수량과 같은 형태로 나타내기 위해서 눈에 대한 물당량(snow water equivalent; SWE)을 사용하는데, 이는 강설과 동일한 열용량을 가진 강우의 질량으로서 열용량을 물의 비열로 나눈 값이다. SWE를 구하는 방정식은 다음 Eq. (3)과 같다.

$$SWE = SNO + R_{day} - E_s - SNO_{milt} \quad (3)$$

여기서, SWE 는 현재 적설에 포함된 수분량(mm), SNO 는 적설에 포함된 초기 수분량(mm), R_{day} 는 일 평균기온이 임계온도보다 낮은 경우에 발생하는 강수량(mm), E_s 는 적설에서 승화되는 수분의 양(mm), SNO_{milt} 는 용설되는 수분량(mm)이다.

SWAT 모형에서 용설은 Eq. (4)와 같이 용설에 의한 초기 및 임계온도에 의해 선형함수로 계산되어진다.

$$SNO_{milt} = b_{milt} \cdot sno_{cov} \cdot \left[\frac{T_{snow} + T_{max}}{2} - T_{milt} \right] \quad (4)$$

여기서, b_{milt} 는 용설률(mm/day/℃), sno_{cov} 는 유역의 눈으로 덮인 면적비, T_{snow} 는 적설온도(℃), T_{max} 는 일최고기온(℃)이다.

용설 기간동안 발생한 실제용설량은 잠재용설량과 눈 피복 면적비로 산정되며(Shook and Gray, 1997), 용설은 상대적으로 기온이 높은 저지대부터 발생하므로 설선(snow line)은 용설이 발생됨에 따라 표고가 높은 곳으로 이동하게 되고 적설면적은 감소하게 된다. 이러한 현상은 그 지역의 방위, 식생, 기상패턴에 따라 달라지므로 곡선(SCPC)의 형태는 각 지역마다 다르다(Hartman et al., 1999). Eq. (5)는 SCDC의 적설면적이 감소하는 곡선형태를 결정하는 식이다.

$$sno_{cov} = \frac{SWE}{SNO_{100}} \cdot \left(\frac{SWE}{SNO_{100}} + \exp(cov_1 - cov_2 \cdot \frac{SWE}{SNO_{100}}) \right)^{-1} \quad (5)$$

여기서, cov_1 , cov_2 는 곡선의 모양을 결정짓는 계수이며, Fig. 1은 SWE 감소에 따른 면적감소비를 나타낸 그림으로, X축은 전체 면적에 대한 현재의 적설면적비를 Y축은 100% 적설면적일 때 SWE의 현재의 비를 나타낸 것이다. 적설면적비 sno_{cov} 가 0.5일 때의 $\frac{SWE}{SNO_{100}}$ 과 Fig. 1에서의 고정점(0.95, 0.95)의 두 점을 이용하여 곡선형상계수 cov_1 , cov_2 가 결정된다.

2.2 대상유역 선정 및 SWAT 입력자료 구축

충주댐은 북동부 산악지역에 위치하여 비교적 눈이 많이 오는 지역에 속한다. 지난 30년(1981-2010)동안 기상청에서 기준한 대설특보인 최심신적설이 20 cm 이상인 일수가 최대 114일까지

Fig. 1. Snow Areal Depletion Curve (Netisch et al., 2005)

고, 연평균 최심신적설량은 80.9 cm로서 우리나라의 대설지역중 하나이다(Fig. 2(a)). 따라서 본 연구의 대상유역을 충주댐으로 선정하였으며 국가수자원관리종합정보시스템(Water Management Information System, WAMIS)에서 제공받은 공간자료를 GIS기법을 이용하여 유역의 기본현황을 파악하였다. 유역의 면적은 6,642.0 km², 유역둘레는 471.6 km, 유역평균폭은 23.5 km, 유역평균표고는 609.1 m, 유역평균경사는 36.9%이며 유역의 84.6%가 산림으로 구성되어있고, 30년(1981-2010)동안의 연 평균 강수량은 1,456.5 mm, 평균기온은 9.8 ℃, 겨울철(11월-4월) 평균기온은 1.2℃ 이다.

기상자료는 대관령, 원주, 영월, 제천, 충주, 태백 총 6개 지점의 관측소를 대상으로 11년간(2000-2010)의 일 강수량, 최고기온,

최저기온, 평균기온, 상대습도, 풍속, 일사량, 최심신적설심을 이용하였다. SWAT 모형의 적용성 평가를 위해 Fig. 2(b)와 같이 평창강 하류의 영월 1지점(YW #1), 평창강 합류전 남한강 상류의 영월 2지점(YW #2)의 2개 수위관측소에 대하여 국가수자원관리종합정보시스템에서 제공하는 일별 유출량 자료와 충주댐지점(CD)의 댐유입량자료를 사용하였다. SWAT 모형에 필요한 지형입력자료의 구축을 위하여 국토지리정보원에서 제공하는 1:5,000 수치지도로부터 30 m 해상도의 수치표고모델(Digital Elevation Model, DEM)을 이용하였으며, 2004년 Landsat TM 위성영상을 수집, 분석하여 수역, 도심지, 나지, 초지, 논, 밭, 산림 등 8개 항목으로 분류한 토지이용자료를 이용하였고, 국립농업과학원에서 제공하는 1:25,000 정밀토양도를 이용하였다(Fig. 3).

Fig. 2. The Study Area (a) Heavy Snowfall Frequency Over 20 cm/day During 30 years (1981-2010) (Kim et al., 2012) and (b) Chungju Dam Study Watershed

Fig. 3. Input Data of SWAT Model (a) DEM, (b) Land use, (c) Soil Type (Kim et al., 2013)

Fig. 4. Examples of the Snow Depth Distribution (SDD) in Chungju Dam Watershed (a) 2001, (b) 2002, (c) 2002-2003, (d) 2004, (e) 2005, (f) 2006, (g) 2007, (h) 2008, (i) 2010.

2.3 Terra MODIS 위성영상을 이용한 SCA

MODIS는 NASA (National Aeronautics and Space Administration)에 탑재된 센서이며 총 36개의 밴드를 보유하고 있다. 2개 밴드(band 1, 2)는 250 m, 5개 밴드(band 3~7)는 500 m, 29개 밴드(band 8~36)는 1 km 해상도를 가지고 있으며 MODIS는 2,330 km의 매우 넓은 폭을 1~2일마다 관측하고 있다. MODIS 자료는 level 1, level 2, level 3으로 나누어지며 level 1은 모든 밴드의 원시자료로 사용되고 level 2는 검정, 대기 보정 및 알고리즘 적용이 이루어진 자료다. level 3은 level 2자료를 시간단위로 제공한다.

적설분포를 추출하기 위해서는 NASA에서 제공하는 알고리즘인 NDSI (Normalized Difference Snow Index)를 이용하며, band 4 (0.545-0.565 μm)인 녹색파장(Green)과 band 6 (1.628- 1.652 μm)인 적외선단파장(Short-Wave Infrared)을 Eq. (6)과 같이 적용한다.

$$NDSI = \frac{\text{band 4} - \text{band 6}}{\text{band 4} + \text{band 6}} \quad (6)$$

NDSI는 위성영상 내에서 적설을 감지하기 위하여 눈의 반사도 특성 차이를 이용한 밴드비율이며 NDSI가 0.4보다 크거나 같을 경우 눈으로 분류된다. 본 연구에 사용된 위성영상자료는 일단위 Snow Cover (MOD10A1, 해상도 500 m)로 Earth Observing System Data Gateway (EOS Data Gateway; <https://wist.echo.nasa.gov/wist-bin/api/ims.cgi?mode=MAINSRCH&JS=1>)에서 제공받았으며 MOD10A1 자료로부터 3개의 항목(적설지역, 비적설지역, 구름)으로 나누어 무감독 분류를 실시한 후 SCA (Snow Cover Area)를 구축하였다. SCA는 적설지역과 비적설지역을 나누는 영상으로 적설의 양은 파악할 수 없으므로, 기상관측소별 최신산적설량자료를 공간분포화시켜 이 둘을 중첩하는 방법으로 적설심 분포도(Snow Depth Distribution; SDD)를 구축하였다.

SDD 구축방법은 Kang et al. (2006), Shin and Kim (2008), Kim et al. (2011)의 선행연구에서 자세히 언급되어 있다. 구름의 영향으로 사용이 불가능한 2008년을 제외하고 2001년부터 2010년까지 총 9 sets의 SDD를 구축하였는데, Fig. 5와 같이 충주댐 유역은 적설과 용설이 반복되었다.

Fig. 5. Snow Depletion Curve of Chungju Dam Study Watershed During 10years (2000-2010)

3. 결과 및 고찰

3.1 SDD를 이용한 융설 매개변수 추출

SDD를 이용한 융설 매개변수를 구축하기 위해서 SWAT에서 사용되는 융설 매개변수 중 눈의 피복이 50%일 때의 물당량비인 *sno50cov*를 추출하였다. 먼저, 적설이 발생하였을 때부터 녹을 때까지의 snow coverage와 snow volume을 분산형 그래프로 작성하였으며, 이때의 snow coverage는 충주댐유역의 전체면적에 따른 적설면적이고 snow volume은 적설기간동안 적설면적이 100%일 때의 분포에 따른 평균적설심이다. 이를 곡선형태로 나타내기 위해 고정점(0.95, 0.95)과 적설면적비가 0.5일 때의 점(0.5, 0.5)을 이용하여 cov_1 과 cov_2 에 대한 방정식 2개를 작성하고, 이에 따른 곡선형상계수를 Eq. (5)를 적용하여 결정하였다. 충주댐 유역을 대상으로 10 sets의 적설면적감소곡선의 형상계수는 Table 1 and Fig. 5와 같다. 적설 및 융설기간은 적설 및 융설이 발생하는

11월부터 다음년도 4월까지로 기준하였다. 예를 들어 2000년 11월 1일부터 2001년 4월 30일까지를 2000-2001로 표기하였다.

3.2 모형의 보정

모형의 보정은 warm up 기간 2년을 포함하여 1998년 11월부터 2006년 4월까지 총 8년을 모의하였다. 모형의 검증기간은 2006년 11월부터 2010년 4월까지이다. 모형의 보정을 위해 선행연구(Lee, 2006; Park et al., 2008)의 LH-OAT 민감도 분석결과를 참고하여 매개변수 민감도 등급에 따라 High (H), Medium (M), Low (L)로 분류하였다(Table 2). 충주댐 유역은 비교적 큰 유역이며 3개의 수위관측소에서 제공하는 일별 유출량이 있기에 다지점 검보정(YW #1, YW #2, CD)을 시행하였다. 먼저, 상류유역인 YW #1과 YW #2를 보정 한 후 최종출구인 CD에서 보정하였으며, 모형의 보정은 시행오차방법을 이용하여 매개변수를 최적화하였고 그 결과는 Table 3과 같다. 모형의 목적함수로는 Nash and

Table 1. The Shape Factor *sno50cov* From Snow Cover Depletion Curve (SCDC)

Parameter	2000-2001	2001-2002	2002-2003	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008	2009-2010
cov_1	7.03	0.60	1.18	7.03	0.82	7.03	1.18	1.58	7.03
cov_2	10.56	3.78	4.39	10.56	4.02	10.56	4.39	4.81	10.56
<i>sno50cov</i>	0.7	0.4	0.45	0.7	0.42	0.7	0.45	0.48	0.7

Table 2. SWAT Calibrated Parameters

Parameter	Definition	Range	Sens.	Def.	Optimal value		
					YW #1	YW #2	CD
ALPHA_BF	Baseflow alpha factor (days)	0-1	H	0.048	0.35	0.18	0.05
CH_N	Manning coefficient for channel	0.01-0.3	M	0.014	0.02	0.04	0.01
CH_K2	Effective hydraulic conductivity of main channel	-0.01-150	M	0	150	94.4	0
CN2	Curve number adjustment ratio	35-98	H	-	62.7	64.1	66.4
GWQMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur (mm)	0-100	H	0	50	0	0
GW_DELAY	Groundwater delay time (days)	0-500	H	31	85	120	31
GW_REVAP	Groundwater "revap" coefficient	0.02-0.2	M	0.02	0.02	0.07	0.02
SOL_AWC	Available water capacity	0-1	H	-	0.01	0.01	0.14
ESCO	Soil evaporation compensation	0-1	H	0	0.7	0.05	0
SFTMP	Snowfall temperature	0-5	M	1	2		
SMTMP	Snowmelt base temperature	0-5	M	0.5	1.5		
SNOCVMX	Min. snow water content that corresponds to 100% snow cover	0-500	L	1	50		
<i>sno50cov</i>	Fraction of SNOCVMX that provides 50% cover	0-1	M	0	see Table. 1		
TIMP	Snowpack temperature lag factor	0-1	L	1	1		
SMFMX	Maximum snowmelt factor	0-10	L	4.5	4.5		
SMFMN	Minimum snowmelt factor	0-10	L	4.5	4.5		

Sens. : sensitivity(H: high, M: medium, L: low), Def. : default value

Table 3. Summary of Calibration and Validation Statistics for Daily Inflow at the CD

YEAR (Nov-Oct)	Precipitation (mm)	Runoff (mm)		Runoff Ratio (%)		RMSE (mm/day)	ME	R ²	Note
		Obs.	Sim.	Obs.	Sim.				
2000-2001	848.5	309.4	533.5	36.5	62.9	0.84	0.55	0.81	C
2001-2002	1404.8	836.7	1143.2	59.6	81.4	1.90	0.93	0.93	C
2002-2003	1674.4	1032.2	1263.2	61.6	75.4	1.81	0.82	0.87	C
2003-2004	1562.0	931.0	1021.9	59.6	65.4	2.02	0.90	0.91	C
2004-2005	1537.4	741.4	882.3	48.2	57.4	1.64	0.75	0.85	C
2005-2006	1309.0	953.0	1037.7	72.8	79.3	2.32	0.94	0.94	C
2006-2007	1623.5	1019.5	1008.0	62.8	62.1	2.65	0.77	0.78	V
2007-2008	959.3	472.9	492.5	49.3	51.3	3.89	0.43	0.43	V
2008-2009	1107.3	596.7	540.9	53.9	48.9	2.79	0.79	0.83	V
2009-2010	1361.2	819.7	763.6	60.2	56.1	2.81	0.72	0.73	V
Mean	1338.7	771.2	868.7	56.5	64.0	2.26	0.76	0.81	

C: calibration, V: validation

Fig. 6. Hydrograph Comparison Between Observed and Simulated Discharges (YW#1, YW#2, CD)

Table 4. Summary of Predicted Snowmelt and the Runoff During Snowmelt Period (November-April, 2000-2010)

YEAR (Nov-Apr)	Snow Depth (cm)	Precipitation (mm)		Runoff (mm)			Runoff Ratio (%)			Snowmelt (mm)		R ²	
		Obs.	Sim.	Obs.	Sim.A	Sim.B	Obs.	Sim.A	Sim.B	Sim.A	Sim.B	Sim.A	Sim.B
2000-2001	128.6	170.2	172.5	90.7	87.5	81.3	53.3	51.4	47.8	100.7	18.1	0.03	0.10
2001-2002	56.5	257.0	248.5	83.5	100.6	96.0	32.5	39.1	37.4	35.4	27.2	0.61	0.66
2002-2003	129.7	354.3	373.8	191.6	163.8	149.8	54.1	46.2	42.3	66.8	30.1	0.72	0.70
2003-2004	59.6	230.0	231.8	100.5	89.1	85.7	43.7	39.2	37.7	52.1	42.5	0.26	0.29
2004-2005	86.9	213.4	187.7	101.3	81.3	78.5	47.5	38.1	36.8	53.7	7.3	0.60	0.54
2005-2006	52.2	177.0	187.1	105.0	91.4	85.6	59.3	51.7	48.4	38.1	33.1	0.75	0.67
2006-2007	49.7	262.9	242.4	131.3	139.9	135.9	49.9	53.2	51.7	20.8	6.7	0.83	0.82
2007-2008	80.5	189.4	155.5	82.6	69.5	67.2	43.6	36.9	35.7	39.8	19.6	0.58	0.48
2008-2009	33.1	196.1	137.2	55.3	63.2	64.6	28.2	32.2	33.0	25.8	20.3	0.50	0.47
2009-2010	92.5	372.5	330.6	181.4	156.4	146.2	48.7	42.0	39.3	52.6	34.9	0.47	0.38
Mean	76.9	242.3	226.7	112.3	104.3	99.1	46.1	43.0	41.0	48.6	24.0	0.54	0.51

Sim.A : with snowmelt parameters, Sim.B : without snowmelt parameters

Fig. 7. Hydrograph Comparison Between Observed and Simulated Discharges by Varying *sno50cov* Parameter (Sim A) of Each Year and Fixing *sno50cov* Parameter (Sim B) at CD (2000-2010).

Sutcliffe (1970)가 제안한 모델효율계수(Model Efficiency; ME)와 R^2 를 사용하였다. YW #2의 경우 2006년 12월 31일까지만 유출자료가 존재하기 때문에 2000년부터 2006년까지만 보정을 시행하였다. 본 연구에서 구축한 용설 매개변수 *sno50cov*는 매년 구축한 값을 적용하였으며, 구름의 영향으로 영상을 추출하지 못한 2008-2009년의 경우, 9 sets의 평균값인 0.56을 적용하였다.

검보정 결과, 최종출구 CD에서의 10 sets 평균 ME는 0.76, R^2 는 0.81, RMSE는 2.26으로 실측치를 잘 반영하는 것으로 나타났다(Fig. 6). 2000-2001과 2007-2008의 경우 전국적으로 가뭄이었으며 유출율이 50% 미만에 해당하고 ME도 0.6이하로 비교적 낮은 값을 보였다.

3.3 용설 매개변수 적용결과

본 연구에서 구축한 용설 매개변수의 영향 평가를 위해 SWAT 모형에 용설 매개변수를 적용하여 모의한 경우(Sim.A)와 Default 값 0을 적용한 경우(Sim.B)에 대하여 용설이 발생하는 11월부터 4월까지의 유출량, 용설량, 그리고 목적함수를 비교하였다(Table 4 and Fig. 7). 그 결과, Sim.A는 Sim.B에 비해 용설기간 유출량이 평균 5.2 mm 더 많게 모의되었고 2000-2001, 2002-2003, 2009-2010과 같이 눈이 많이 온 해의 경우 6.2 mm, 14.0 mm, 10.2 mm로 더 두드러진 차이를 보였다. 유출율의 변화는 -0.8-3.9% 까지 차이가 났으며 Sim.A가 평균 43.0%로 실측치에 더 가깝게 모의되었다. 용설량은 10 sets의 평균이 Sim.A와 Sim.B에서 각각 48.6 mm, 24.0 mm로 분석되었다. 아직까지 국내에서 용설량을 측정하기는 어려운 실정이므로 모형의 결과만을 나타내었다. 눈이 많이 온 2000-2001의 경우 용설량의 차이가 확연하게 드러난 결과를 알 수 있다. R^2 는 Sim.A가 대체로 Sim.B보다 1에 가깝게 나타났다. 결과적으로, 용설 매개변수를 구축하여 적용한 Sim.A가 Default값을 적용한 Sim.B 보다 용설기간 유출량이 더 많이 모의되고 R^2 는 대체로 Sim.A가 실측치를 더 잘 반영하는 것으로 분석되었다.

4. 결론

본 연구에서는 우리나라의 북동부 산악지역에 위치한 충주댐 유역을 대상으로 용설 영향을 평가하기 위해 SWAT 모형을 이용하여 용설이 댐유입량에 미치는 영향을 평가하였다. SWAT 모형에서 사용되는 용설 매개변수인 *sno50cov*를 결정하기 위하여 10 sets의 Terra MODIS 위성영상으로부터 추출한 SCA와 일별 최심적설자료를 이용하여 SDD를 구축하고, 이를 중첩하여 SCDC를 결정하였다. SCDC로부터 적설면적이 50% 피복일 때의 *sno50cov*의 값은 0.4-0.7까지 분석되었다. 이를 SWAT 모형에 적용한 결과, 최종출구인 CD에서의 평균 ME는 0.76, R^2 는 0.81, RMSE는 2.26으로

나타났다. 용설 매개변수의 적용성 평가를 위해 겨울철 용설기간(11-4월)동안의 유출 및 용설량을 비교분석 하였으며 용설 매개변수를 고려한 경우, 유출량은 평균 5.2 mm, 용설량은 평균 20.6 mm 많게 모의되었다. 특히 눈이 많이 온 해의 용설량은 용설 매개변수 미고려시 보다 5.6배 더 많게 모의되었다. 지역별 강수량의 패턴차이가 심한 우리나라의 경우, 장기유출 모의시 적설 및 용설의 영향을 고려하는 것이 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 연구비지원에 의해 수행되었습니다(No. 2013-065006).

References

- Arnold, J. G., Williams, J. R., Srinivasan, R. and King, K. W. (1996). *SWAT manual*, USDA. Agricultural Research Service and Blackland Research Center, Texas.
- Bae, D. H. and Oh, J. H. (1998). "A fundamental study on the snowmelt effects for long-term runoff analysis." *J. Korean water resources association*, Vol. 31, No. 6, pp. 187-197 (in Korean).
- Fontaine, T. A., Cruickshank, T. S., Arnold, J. G. and Hotchkiss, R. H. (2002). "Development of a snowfall - snowmelt routine for mountainous terrain for the soil and water assessment tool (SWAT)." *J. Hydrology*, Vol. 262, pp. 209-223.
- Hall, D. K., Riggs, G. A. and Salomonson, V. V. (1995). "Development of methods for mapping global snow cover using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 54, pp. 127-140.
- Hartman, G. L., Sinclair, J. B. and Rupe, J. C. (1999). *Compendium of soybean diseases*, American Phytopathological Society (APS Press).
- Kang, S. M., Lee, M. S., Kwon, H. J. and Kim, S. J. (2006). "Extraction of snowmelt factors using NOAA satellite images and meteorological data." *J. Korean water resources association*, Vol. 39, No. 10, pp. 845-854 (in Korean).
- Kim, D. G., Jeong, J. U., Park, J. H. and Park, C. G. (2007). "Long-term runoff simulation in consideration of snow pack and snow melt." *J. Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 21, No. 3, pp. 265-272 (in Korean).
- Kim, N. W., Lee, B. J. and Lee, J. E. (2006). "An evaluation of snowmelt effects using SWAT in Chungju dam basin." *J. Korean water resources association*, Vol. 33, No. 10, pp. 833-844 (in Korean).
- Kim, S. B. (2013). *Assessment of future climate change impacts on snowmelt and stream water quality for mountainous watershed using SWAT*, Master Thesis, University of Konkuk (in Korean).
- Kim, S. B., Shin, H. J., Lee, J. E. and Kim, S. J. (2012). "Evaluation of impact on snowmelt for a mountainous dam watershed using

- MODIS Images.” *J. Korean society of remote sensing*, Vol. 15, pp. 46-50 (in Korean).
- Kim, S. B., Shin, H. J., Lee, J. W., Yu, Y. S. and Kim, S. J. (2011). “Mapping technique for heavy snowfall distribution using Terra MODIS Images and ground measured snowfall data.” *J. Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 14, No. 4, pp. 33-43 (in Korean).
- Lee, D. H. (2006). “Automatic calibration of SWAT model using LH-OAT sensitivity analysis and SCE-UA optimization method.” *J. Korean water resources association*, Vol. 39, No. 8, pp. 677-690 (in Korean).
- Lee, S. H., Ahn, T. J., Yun, B. M. and Shim, M. P. (2003). “A Tank model application to Soyganggang Dam and Chungju Dam with snow accumulation and snow melt.” *J. Korean water resources association*, Vol. 36, No. 5, pp. 851-861 (in Korean).
- Matson, M., Ropelewski, C. F. and Varnadore, M. S. (1986). *An atlas of satellite-derived Northern hemisphere snow cover frequency*, NOAA/NESDIS, Washington, D.C.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970). “River flow forecasting through conceptual models; Part 1-A discussion of principles.” *J. Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R. and Williams, J. R. (2001). *Soil and water assessment tool*, Theoretical Documentation.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R. and Williams, J. R., (2005). *Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2005*.
- Painter, T. H., Rittger, K., C.McKenzie, Davis, R. E. and Dozier, J. (2009). “Retrieval of subpixel snow-covered area, grain size, and albedo from MODIS.” *Remote Sensing of Environment*, Vol. 113, pp. 868-879.
- Park, J. Y., Lee, M. S., Lee, Y. J. and Kim, S. J. (2008). “The analysis of future land use change impact on hydrology and water quality using SWAT model.” *J. Korean water resources association*, Vol. 28, No. 2B, pp. 187-197 (in Korean).
- Rango, A. and Ltten, K. I. (1976). “Satellite potentials in snowcover monitoring and runoff prediction.” *Nordic Hydrology*, Vol. 7, pp. 209-230.
- Romanov, Y. A., Svintsitskaya, V. A. and Smirnov, V. N. (2003). “Searching for alternative sources of postnatal human mesenchymal stem cells: Candidate MSC-like cells from umbilical cord.” *Stem Cells*, Vol. 21, pp. 105-110.
- Rosenthal, W. and Dozier, J. (1996). “Automated mapping of montane snow cover at subpixel resolution from the Landsat Thematic Mapper.” *Water Resources Research*, Vol. 32, pp. 115-130.
- Salomonson, V. V. and Appel, I. (2004). “Estimating fractional snow cover from MODIS using the normalized difference snow index.” *Remote Sensing of Environment*, Vol. 89, No. 3, pp. 351-360.
- Salomonson, V. V. and Appel, I. (2006). “Development of the Aqua MODIS NDSI fractional snow cover algorithm and validation results.” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 44, No. 7, pp. 1747-1756.
- Shin, H. J. and Kim, S. J. (2007). “Application of snowmelt parameters and the impact assessment in the SLURP semi-distributed hydrological model.” *J. Korean water resources association*, Vol. 40, No. 8, pp. 617-628 (in Korean).
- Shin, H. J. and Kim, S. J. (2008). “Extraction of snowmelt parameters using NOAA AVHRR and GIS technique for 7 major dam watersheds in South Korea.” *J. Korean water resources association*, Vol. 28, No. 2B, pp. 177-185 (in Korean).
- Shook, K. and Gray, D. M. (1997). “Synthesizing shallow seasonal snow covers.” *Water resources research*, Vol. 33, No. 3, pp. 419-426.