



Hydrologic evaluation of SWAT considered forest type using MODIS LAI data: a case of Yongdam Dam watershed

Han, Daeyoung^a · Lee, Jiwan^b · Kim, Wonjin^{c*} · Baek, Seungchul^d · Kim, Seongjoon^e

^aGraduate Student, Department of Civil, Environmental, and Plant Engineering, Graduate School, Konkuk University, Seoul, Korea

^bPost-Doctorate Researcher, Department of Civil, Environmental and Plant Engineering, Graduate School, Konkuk University, Seoul, Korea

^cPh.D. Candidate, Department of Civil, Environmental and Plant Engineering, Graduate School, Konkuk University, Seoul, Korea

^dDeputy Director, Gyeonggi Regional Headquarter, KRC, Project Management, Department, Suwon, Korea

^eProfessor, Division of Civil and Environmental Engineering, College of Engineering, Konkuk University, Seoul, Korea

Paper number: 21-063

Received: 26 July 2021; Revised: 25 August 2021; Accepted: 25 August 2021

Abstract

This study compares and analyzes the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) and Terra MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) as coniferous, deciduous and mixed forest with Yongdam Dam upstream (904.4 km²). The hydrologic evaluation period was set to 10 years from 2010 to 2019, and the applicability of the 8-day MOD15A2 Leaf Area Index (LAI) data, 3 TDR (Time Domain Reflectometry) (GB, JC, CC), and 1 Flux Tower (DU) evaporation volume (YDD) data was simulated. As a result, the R² of coniferous forest, deciduous forest and mixed forest are 0.95, 0.89, 0.90, soil moisture and evapotranspiration stations R² were analyzed at 0.50 to 0.55 and 0.51, respectively, with R² at 0.74, RMSE 2.75 mm/day, NSE 0.70 and PBIAS 14.3% for Yongdam inflow. Based on the calibrated and validated watersheds, the annual average evapotranspiration was calculated as coniferous 469.7 mm, deciduous 501. mm and 511.5 mm mixed forest, total runoff were estimated at coniferous 909.8 mm, deciduous 860.6 mm and 864.2 mm mixed forest. In the case of annual average evapotranspiration, it was evaluated that deciduous were high, but in the case of streamflow, it was evaluated that coniferous were high. Unlike other hydrologic with similar patterns throughout the year, the average annual evapotranspiration was about 7% higher than coniferous due to the higher evapotranspiration of deciduous with high leaf area index in summer and fall. In addition, deciduous were 9% and 6% higher for surface runoff and lateral flow, but the groundwater of coniferous was 77% higher. Therefore, it was confirmed that the total runoff was in order of coniferous, mixed forest, and deciduous.

Keywords: Forest type, Evapotranspiration, Soil moisture, Leaf area index, SWAT, MOD15A2

MODIS LAI 자료를 활용하여 임상별로 고려한 SWAT의 수문 평가: 용담댐유역을 대상으로

한대영^a · 이지완^b · 김원진^{c*} · 백승철^d · 김성준^e

^a건국대학교 일반대학원 사회환경플랜트공학과 석사과정, ^b건국대학교 일반대학원 사회환경플랜트공학과 박사후연구원,

^c건국대학교 일반대학원 사회환경플랜트공학과 박사수료, ^d한국농어촌공사 경기지역본부 사업관리부 차장,

^e건국대학교 공과대학 사회환경공학부 교수

요 지

본 연구는 용담댐 유역(904.4 km²)을 대상으로 준분포형 강기유출 모델인 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)과 Terra MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)의 엽면적지수 위성자료를 활용하여 임상별로 수문에 미치는 영향을 비교 및 분석하였다. 수문 평가 기간은 2010년부터 2019년까지 10년으로 설정하였으며, 8일 간격의 MOD15A2 LAI (Leaf Area Index)자료, 토양수분 TDR (Time Domain Reflectometry) 관측소 3개소(GB, JC, CC), 증발산량 Flux Tower 1개소(DU)와 용담댐(YDD) 유입량 자료를 SWAT 모의결과와 비교하여 적용성을 검토하였다. 검·보정 결과, 침엽수, 활엽수, 혼효림 LAI의 R²는 각각 0.95, 0.89, 0.90이며, 토양수분 및 증발산량 관측소 R²는 각각 0.50 ~ 0.55, 0.51로 분석되었으며, 용담댐 유입량의 경우 R²의 경우 0.74, RMSE 2.75 mm/day, NSE 0.70, PBIAS 14.3 %로 분석되었다. 검·보정된 유역을 기반으로 하여 HRU에서 침엽수, 활엽수, 혼효림 수문분석 결과 총 연평균 증발산량은 침엽수 469.7 mm이며, 활엽수는 501.0 mm, 혼효림의 경우 511.5 mm로 산정되었으며, 유출량은 침엽수 909.8 mm, 활엽수 860.6 mm, 혼효림 864.2 mm로 산정되었다. 연중 패턴이 비슷한 다른 수문과 다르게 여름과 가을에 엽면적지수가 높은 활엽수의 증발산량이 침엽수에 비해 높아 연평균 증발산량이 약 7% 높게 산정되었다. 또한, 유출량의 경우 지표유출 및 중간유출의 경우 활엽수가 각각 9%, 6% 높았으나, 침엽수의 기저유출이 77% 더 높은 것으로 산정됐다. 따라서, 총유출량이 침엽수 혼효림 활엽수 순으로 많은 것을 확인할 수 있었다.

핵심용어: 임상별, 증발산량, 토양수분, 엽면적지수, SWAT, MOD15A2

*Corresponding Author. Tel: +82-2-444-0186

E-mail: compmp@konkuk.ac.kr (W. Kim)

1. 서론

유역 내에 있는 기후변화 및 토지이용 변화와 같은 유역환경의 변화는 유역 내 지표유출, 중간유출, 기저유출, 증발산량, 토양수분 등 수문 순환에 있어서 많은 영향을 미친다. 수문 순환을 모의하고 예측함에 있어 토지이용 변화인 산림의 영향에 따른 증발산의 변화는 결국 유역 유출량에 변화에 영향을 미친다. 이에 수문 관련 연구에 산림 또는 식생 변화를 예측하는 것은 매우 중요하다(Hibbert, 1967). 이에 Bosch and Hewlett (1982)는 침엽수, 낙엽수, 잡목림 또는 잔디의 식생 변화에 따라 예측한 바 있으며, 10%의 식생 감소 변화당 침엽수는 40 mm, 낙엽수는 25 mm, 잡목림 또는 잔디는 10 mm의 유출 변화가 있어 침엽수의 유출량이 가장 높게 나타났다. 따라서, 산림 수문학적 계획에서 토양의 자원과 물의 자원을 보존하기 위해 산림 유형 및 성장이 수문에 미치는 영향이 다르기에 이를 정량화하는 것은 중요하다(Kim *et al.*, 2003). Kim and Kim (2004)은 준분포형 모형인 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)을 이용하여 보령천 유역 산림 수문을 평가한 바 있으며, 그 결과 지표유출의 경우 침엽수가 활엽수에 비해 강우 차단효과가 크게 영향을 미쳐 활엽수가 침엽수보다 지표수가 크며, 기저유출의 경우는 반대로 나타났지만, 관측자료 및 관련 자료의 불확실성이 있음을 평가하였다. Kim and Jeong (2006)은 임상별(침엽수, 활엽수, 혼효림)에 대해 장기기간에 대해 증발산량 변화를 분석하였으며, 침엽수가 다른 임상에 비해 증발산량이 상대적으로 높게 나온 바 있다. 이는 침엽수의 엽면적이 활엽수에 비해 연중 일정하기 때문이라 판단하였다.

산림 수문 영향평가에 사용되는 수문학적 매개변수인 엽면적지수(Leaf Area Index, LAI)는 증발산에 직접적 영향을 미치며, 이는 토양수분 변화 및 유출량 변화에 영향을 미칠 수 있다. 이에 엽면적지수(LAI)를 이용해 증발산량 추정하고 자 대기에 의해 결정된 기상 변수(Penman, 1948) 및 잎 표면 저항 및 공기 역학적 저항(Monteith, 1965)을 연계한 Penman-Monteith 방식은 대기 매개변수와 엽면적지수(LAI)와 식생의 높이를 포함하는 함수를 고려한 증발산 추정하기 위한 방식이다. 이처럼 엽면적지수(LAI)는 수문에 영향을 미치므로 이를 정량화하는데 필수적이며, 이를 정량화를 위해 다양한 연구가 진행되고 있다(Boussetta *et al.*, 2013; Fang *et al.*, 2019; Yan *et al.*, 2021). 그중 Terra MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)는 전국규모의 지역적 혹은 미계측 지역에 대해서 엽면적지수(LAI)를 정량화를 할 수 있는 위성영상으로 다음과 같이 수문 분석에 이용되고 있다. Ha *et al.* (2010)은 산림이 우거진 곳을 대상으로 MODIS에서 얻은 LAI

를 SLURP 모형에 적용하여 Penman-Monteith 공식을 이용하여 증발산량 및 토양수분과 같은 수문 변화를 토지이용 별로 분석한 바 있다. Shin *et al.* (2019)는 분포모형 RHESys를 이용하여 설마천 유역을 대상으로 유출량, 증발산량, 토양수분을 검·보정을 통해 산림유역의 수문 및 생태계물질순환과정을 통합적으로 모사한 바 있다. 수문 모형 적용성 평가에 있어서 Joh *et al.* (2011)는 유역 내 유출량뿐만 아닌 증발산량 및 토양수분을 같이 모형 적용성을 평가하였으며, 그 결과 불확실성이 감소한다 하였다. 하지만, 국내에서는 유출량 외의 수문 성분에 대한 실측자료가 풍부하지 않아 유출량을 제외한 다른 수문 성분의 실측자료를 이용한 검·보정에 관련된 연구 역시 제한적이다. 그러나 각각 2011년 및 2014년부터 한국수자원공사(K-water)는 용담댐유역 내 증발산 산정을 위한 Flux Tower 및 토양수분 산정을 위한 TDR (Time Domain Reflectometry) 기록을 측정하여 정확한 결과를 기대할 수 있게 됐다.

수문 순환의 유역 내 영향은 평가목적에 따른 다양한 모형들을 적용시키고 있다. 이 중 본 연구에서 사용하는 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)의 경우 모델 내 엽면적지수, 작물수확량 및 바이오매스와 같은 식물 성장의 변화에 대한 모델링에도 사용되고 있다. 이러한 식생 변화는 증발산, 침투, 토양 침식 및 바이오매스 생산에 영향을 미치기 때문에 수문학적 모델링을 정량할 수 있다. SWAT에서 엽면적지수(LAI)는 추정할 수 있으며, 이는 측정 LAI와 SWAT 모델의 비교를 통해 예측 정확도를 향상시키기 위해 공간 및 시간적으로 연속적인 정보를 제공하는 장점이 있다. 하지만, 텍사스 고원을 대상으로 Marek *et al.* (2017)은 SWAT 자체에서 고려할 수 있지만, 증발산량 추정에 있어 부정확하기 때문에, 조정된 LAI를 고려하여 식물 성장 매개변수를 증발산량에 대한 영향을 평가하였다. SWAT 식물 성장 모델은 산림 성장에 적용할 수 있으며, 개발 모델을 기반으로 엽면적을 정하는 경우 기본값으로 설정되어 오차가 생긴다. 이에 LAI를 이용하여 낙엽수와 상록수의 식물 성장 모델을 수정하여 유효성을 연구했다(Lai *et al.*, 2020).

본 연구에서는 공간적인 식생 성장을 고려하고 SWAT이 식물 성장 모델을 용담댐유역 특성에 맞게 모의하도록 MOD15A2 LAI 위성자료를 임상별로 분류하고 시계열로 나열하여 기초 자료로 활용하였으며, 토양-식생-대기에 따른 물순환을 장기 간 모의할 수 있도록 준분포형 모형인 SWAT에서 제공하는 다양한 매개변수를 조정하여 검·보정을 수행하였다. 검·보정이 완료된 모형을 활용하여 2010년부터 2019년까지 10년간의 용담댐유역 수문을 모의하였고, 모의결과를 바탕으로 침엽수, 활엽수, 혼효림이 유역 내 물순환에 미치는 영향을 분석하였다(Fig. 1).

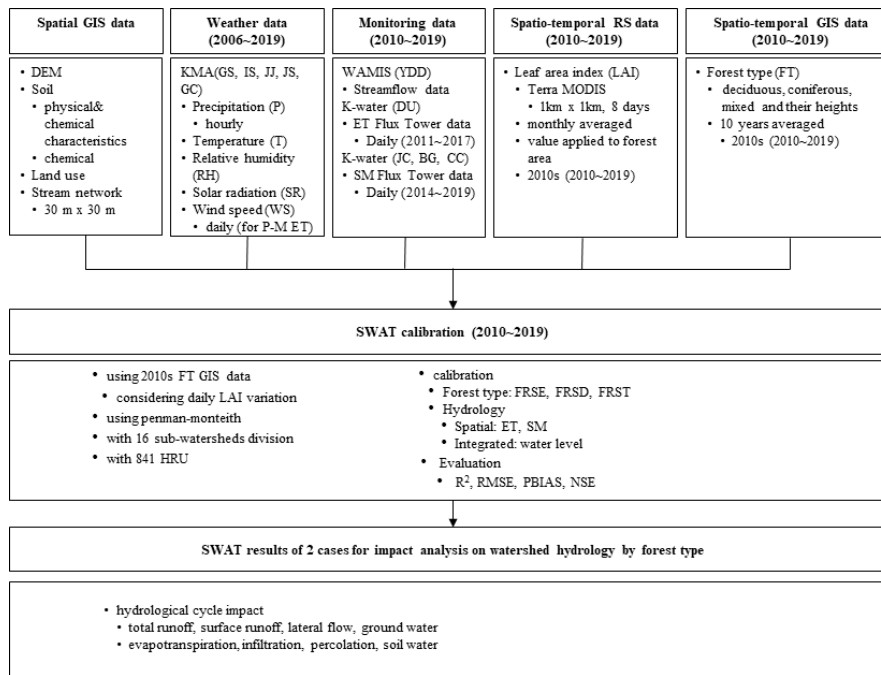


Fig. 1. Flow chart

2. 재료 및 방법

2.1 대상지역

금강 상류에 위치하며 산림이 지배적인 용담댐유역을 대상으로 연구를 수행하였으며, 수위, 증발산, 토양수분의 관측소가 있어 신뢰도 높은 수문 관측이 가능하여 선정하였다(Fig. 2). 기상기후관측망은 기상예보 및 기후조사를 목적으로 기상청에서 비교적 기상관측 환경이 양호한 96개소에 ASOS 종관기상관측장비를 설치하여 기압, 기온, 습도, 바람, 강수량, 일조, 시정 등 다양한 기상요소를 관측하고 있다. ASOS 관측소는 정해진 매 1분 간격으로 기상요소를 생산하며, 시·분 자료에 대해 관측값의 정상 여부를 판단하는 품질검사 플래그 정보제공을 한다. 용담댐유역은 기상청 관측소 ASOS 5개 지점에서 관측한 강우량 데이터를 활용하였으며, Thiessen 가중법을 사용하여 1990년부터 2019년까지 30년 기간의 연평균 강우량을 산정하였으며, 연평균 기온은 11.6°C, 연평균 강수량은 1,362.3 mm로 산정됐다. 북위 35°35'~36°00', 동경 127°20'~127°45'의 범위에 위치하며, 유역면적은 904.4 km²으로 금강 유역면적의 9.5%를 차지하고 있으며, 유역 내에 모형 적용성 평가를 위해 유출량뿐만 아니라 토양수분 및 증발산량 보정을 실시하고 있다(Joh *et al.*, 2011; Ahn *et al.*, 2013). 본 연구에서는 WAMIS (Water Management Information System)로부터 얻은 다목적댐의 유입량 자료인 용담댐(YDD) 사용

하였으며, 2014년도부터 관측을 시작한 토양수분은 K-Water의 TDR (Time Domain Reflectometry) 파형발생기(Pulse Generator)에서 발생한 구형(Square Wave) 전기신호가 전송선(Transmission Line, cable)을 통하여 흐르게 된다. 신호가 전송선을 통하여 흐르는 중 전송선의 단면이 변하면 그 지점의 임피던스(Impedance)가 변하게 되어 그 구간에서 전기신호가 반향 되어 오게 되는데, 이때의 파형을 시간영역(Time Domain)으로 측정하여 2014년부터 2019년까지 일 단위로 구축하였다. 덕유산 Flux Tower에서 증발산량은 에디공분산 기반으로 산정된다. 에디공분산 방법은 수증기 농도와 연직풍속의 두 계열이 에너지 보존방정식을 근거로 공분산으로 값을 산정하며, 용담댐 유역 내 2011년부터 금강 수계 구량천의 상류부의 덕곡제 유역 내 북위 35°51'53", 동경 127°43'02"에 위치한다. 덕유산 Flux Tower의 표고는 EL. 668.6 m이고, 유역 내 토지이용은 대부분이 산림으로 분포하고 있다. 본 연구에서는 K-Water에서 제공하는 Flux Tower 실측 증발산량 자료를 2011년부터 2019년까지 구축하여 활용하였다(Fig. 2(a)). 용담댐유역의 DEM은 금강 상류에서 최소 215 EL.m부터 최대 1,532 EL.m 까지로 평균 856 EL.m로 높은 고도에 위치한다(Fig. 2(b)). 유역 내 토양특성의 경우 사양토(Sandy loam)와 양토(Loam)가 각각 62.5%, 18.5%로 높은 비율을 차지하고 있으며, 토지이용은 산림이 68.0%, 농지가 18.4%로 구성되어 있다(Fig. 2(c)). 또한, 유역면적 대부분이 산지와 농업지역으로

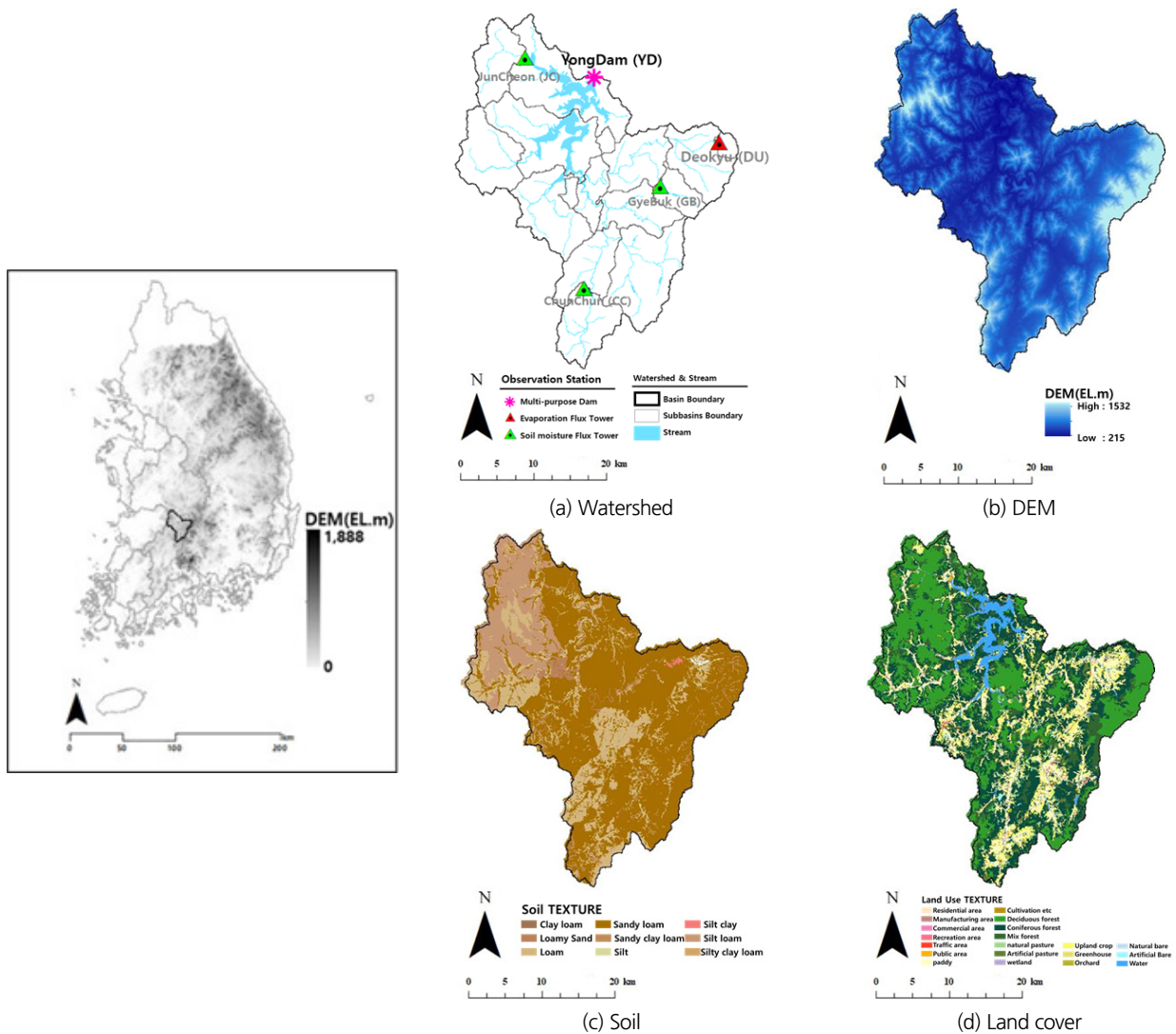


Fig. 2. Study area

이루어져 각각 68.0%, 18.4%를 차지하고 있다. 유역면적의 68.0%를 차지하는 산림은 침엽수, 활엽수, 혼효림으로 구성되어 있으며, 각각의 분포도는 침엽수 20%, 활엽수 41% 혼효림 7%로 나타났다(Fig. 2(d)).

2.2 SWAT 개요

SWAT은 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)의 Jeff Arnold에 의해 개발된 유역모델이다. SWAT은 준분포형 연속 장기유출모형으로 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 물과 유사 및 농업화학물질의 거동에 대한 토지관리방법의 영향을 예측하기 위하여 개발되었다. 이러한 목적을 위하여 모형은 물리적 이론에 근거하며, 입

력 및 출력 변수의 관계를 설명하는 회귀방정식을 사용하기보다는 유역내의 기상, 토양특성, 지형, 식생과 토지관리 방법 등에 대한 구체적인 정보를 요구한다. SWAT에서 일별 유출량은 SCS (Soil Conservation Service) CN (Curve Number) 방법으로 산정하고 측방유입량은 Kinematic Storage Model을 이용하며, 침투는 토층을 최대 10개까지 세분화 하여 선형저수량 추적기법을 사용하여 계산하며, 잠재증발산량의 산정에는 Penman-Monteith 방법을 이용한다. 물의 거동, 유사이동, 작물 성장, 영양물질 순환 등과 관련된 물리적 과정은 이러한 입력자료를 이용하여 SWAT에서 모형화된다. 또한, SWAT은 물수지 방정식에 근거를 두고 강수, 증발산량, 지표유출, 기저유출, 지하수 등에 대한 모의를 각 수문반응단위(Hydrological Response Unit, HRU) 별로 계산하여 물수지에 대한 정확도

를 높인다(Arnold *et al.*, 1998). SWAT에서 사용되는 물수지 방정식은 Eq. (1)과 같다.

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

여기서, SW_t 는 최종토양수분량(mmH_2O), SW_0 는 i 일의 초기 토양수분량(mmH_2O), t 는 시간(일), R_{day} 는 i 일의 강수량(mm), Q_{surf} 는 i 일의 지표유출량(mm), W_{seep} 는 i 일의 토양면으로 부터 투수층으로 투수되는 총량(mmH_2O), E_a 는 i 일의 증발산량(mm), Q_{gw} 는 i 일의 회귀수량(mmH_2O)이다(Neitsch *et al.*, 2001). 유역을 구분하면 여러 종류의 작물과 토양에서 다양한 증발산을 반영할 수 있다. 각 HRU에서 유출이 구분되어 계산되고 유역의 총 유출량을 얻기 위하여 흐름이 추적된다. 이러한 점이 정확도를 높이고 물수지에 대해 향상된 과정이 설명된다.

SWAT은 단일 식물 성장 모델과 함께 LAI 매개변수를 사용하여 식물 성장을 시뮬레이션한다(Neitsch *et al.*, 2011). LAI와 관련된 6 개의 매개변수는 모델에서 작물 성장을 시뮬레이션하는 데 사용된다. 여기에는 최대 엽면적지수(BLAI), 최적 엽면적개발 곡선(FRGW1)의 첫 번째 지점에 해당하는 식물 성장 계절의 비율, 최적 엽면적개발 곡선의 첫 번째 지점에 해당하는 최대 LAI의 비율(LAIMX1), 최적 엽면적 발달 곡선(FRGW2)의 두 번째 지점에 해당하는 식물 성장 계절의 비율, 최적 엽면적 발달 곡선(LAIMX2)의 두 번째 지점에 해당하는 최대 LAI의 비율, 엽면적이 감소하기 시작하는 성장기(DLAI). 이러한 매개변수는 식물 데이터베이스의 각 작물에 대한 최적의 성장 기능을 특징한다(Fig. 3). 또한, SWAT의 식물 성장은 일일 평균 온도가 성장 기준 온도를 초과하는 날에만 발생하며 다음 Eq. (2)와 같이 계산된다.

$$HU = \bar{T}_{av} - R_{base} \text{ when } \bar{T}_{av} > T_{base} \quad (2)$$

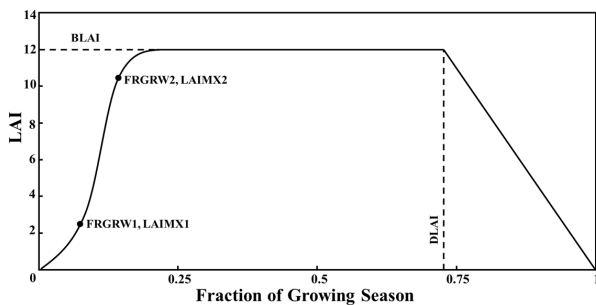


Fig. 3. leaf area index as a function of fraction of growing season

여기서, HU 는 주어진 날 누적된 Heat Units의 수, \bar{T}_{av} 는 일평균 온도($^{\circ}\text{C}$), T_{base} 는 성장을 위한 식물의 최소온도이다. 최대 성장기에 도달하기 위한 식물에게 요구되는 Heat Units의 전체수는 다음 Eq. (3)과 같이 계산된다.

$$PHU = \sum_{d=1}^{365} HU \quad (3)$$

PHU 는 식물의 성장을 위해 요구되는 전체 Heat Units, d 는 일수다. 따라서 LAI를 계산하기 위해 기본 변수는 다음 Eq. (4)와 같다.

$$fr_{PHU} = \frac{\sum_{d=1}^{365} HU}{PHU} \quad (4)$$

fr_{PHU} 는 성장기 동안 특정기간 잠재적 열 단위의 비율이며, 주어진 부분에 해당하는 최적의 잎영역 개발기능은 다음 Eq. (5)와 같다.

$$fr_{LAImx} = \frac{fr_{PHU}}{fr_{PHU} + \exp(l_1 + l_2 \times fr_{PHU})} \quad (5)$$

fr_{LAImx} 는 식물에 대한 식물의 최대 엽면적지수의 비율이며, l_1 과 l_2 는 형상계수이다. LAI 증가 i 는 다음과 같이 Eqs. (6)~(7)에 의해 계산된다.

$$\Delta LAI_i = (fr_{LAImx,i} - fr_{LAImx,i-1}) \times LAI_{mx} (1 - \exp(5(LAI_{i-1} - LAI))) \quad (6)$$

$$LAI_i = LAI_{i-1} + \Delta LAI_i \quad (7)$$

ΔLAI_i 는 LAI의 변화이며, $fr_{LAImx,i}$ 과 $fr_{LAImx,i-1}$ 은 하루 동안 식물의 최대 엽면적지수의 비율이다. LAI_{mx} 는 식물 최대 엽면적지수, LAI_i 는 오늘 엽면적지수, LAI_{i-1} 는 하루 전 엽면적지수이다.

2.3 SWAT 입력자료

2.3.1 GIS 및 기상자료

SWAT의 GIS 입력자료로 국가수자원관리종합정보시스템(Water Management Information System, WAMIS)의 DEM(Digital Elevation Model)은 30 m×30 m 해상도 자료(Fig. 2(b))

를 이용하였다. 토양도는 농촌진흥청 흙토람의 1:25,000 정밀 토양도(Fig. 2(c))를 이용하였으며, 토지이용도는 환경부의 2019년 중분류 자료를 이용하였으며, 이를 17개 항목(활엽수림, 침엽수림, 주거지, 논, 밭, 초지, 나지, 수역 등)으로 세분류하여 모형에 입력하였다(Fig. 2(d)). SWAT의 기상입력자료는 기상청(KMA)에서 제공하는 5곳(GS, IS, JJ, GC, JS) 기상 관측소의 강수량(mm/day), 최고·최저 기온(°C), 풍속(m/s), 상대습도(%), 일사량(MJ/m²)에 대해 15년(2005 ~ 2019년)의 일 자료를 구축하였다(Fig. 4).

2.3.2 LAI 및 임상도

LAI는 NDVI와 함께 식생정보를 대표적으로 제공하는 지표로서 단위 지표 면적당(m²) 수목에 대하여 투영되는 전체 잎의 면적(m²)에 대한 비율로 정의되어 수문 모형의 입력자료로 사용된다(Park *et al.*, 2009). LAI는 2010 ~ 2019년의 Terra MODIS 위성영상을 활용하여 사용하였다. Terra 위성은 태양동주기 궤도를 가지며, 약 2 일 간격으로 지구 표면을 관찰하고, 순간시야각은 ±55°, 주사폭은 2,330 km이다. 수집한 MODIS 육상자료인 MOD15A2 LAI는 8 일 단위 자료로서 1 km 공간해상도 자료를 가지며, 연간 총 46개 영상을 제공한다. 구름 및 기상에 의한 자료의 결손으로 품질관리(Quality control, QC)자료를 사용하였다.

산림청에서 제공해 현재 사용되는 임상도는 2013년도 자료로서 1:5000의 해상도를 이용하여 임상별(상록수, 낙엽수, 혼효림)로 분류하였으며, 분포도가 침엽수 20%, 활엽수 41% 혼효림 7%로 나타났다(Fig. 5 (a)). 임상 높이의 경우는 최소 0 m에서 최대 22 m까지 나타났으며, 침엽수는 평균 11.1 m,

활엽수는 11.9 m 혼효림은 12.1 m로 나타났다(Fig. 5 (b)).

SWAT에서 제공하는 산림 데이터베이스의 경우 임상이 상록수, 낙엽수, 혼효림으로 분류되어있어 산림청에서 제공하는 임상도 분류 기준인 침엽수, 활엽수, 혼효림과 상이 하였다. 따라서 본 연구에서는 임상별로 지배적인 식생을 대표로 선정하였으며, 용담댐유역의 경우, 침엽수는 소나무, 활엽수는 참나무가 지배적으로 분포하여 이에 맞게 SWAT 임상 분류에 활용하였다.

MOD15A2 LAI 위성자료와 임상도 산림분포를 비교하여 임상별 LAI를 시계열로 분류하였다. 임상도를 기준으로 공간적으로 수집한 임상별 분포를 바탕으로 8일 간격의 46개 LAI 위성영상을 용담댐유역을 대상으로 10년(2010 ~ 2019년) 평균하여 2010년대 임상별 LAI 시계열 자료를 산정하였다. MODIS의 구름 및 기상에 의해 LAI 위성영상이 부정확하게 나오는 경우가 여름철에 많이 발생하여 최대 LAI를 활용하여 산림 성장 그래프를 보정하였다(Fig. 6). 산림 성장 그래프를 바탕으로 두 개의 성장점, BLAI, DLAI는 임상별로 관측값과 비교하여 SWAT의 입력자료로 이용하였다. 용담댐유역 식생의 경우 최적 엽면적개발 곡선(FRGW1)과 최대 LAI의 비율(LAIMX1)은 113일인 4월 중순부터 129일인 5월 초까지 급속도로 성장하며, 최적 엽면적 발달 곡선(FRGW2)와 최적 엽면적 발달 곡선(LAIMX2)은 129일부터 145일인 5월 말까지 LAI가 거의 최고점에 이른다. 그 후 최대 엽면적지수(BLAI)는 가장 낮은 침엽수의 경우 3.49, 혼효림은 4.56, 활엽수는 4.94로 나타났다. 그러다 엽면적이 감소(DLAI)하는 241 일 차인 8월 말부터 10월 초인 초가을 무렵부터 줄어들기 시작했다.

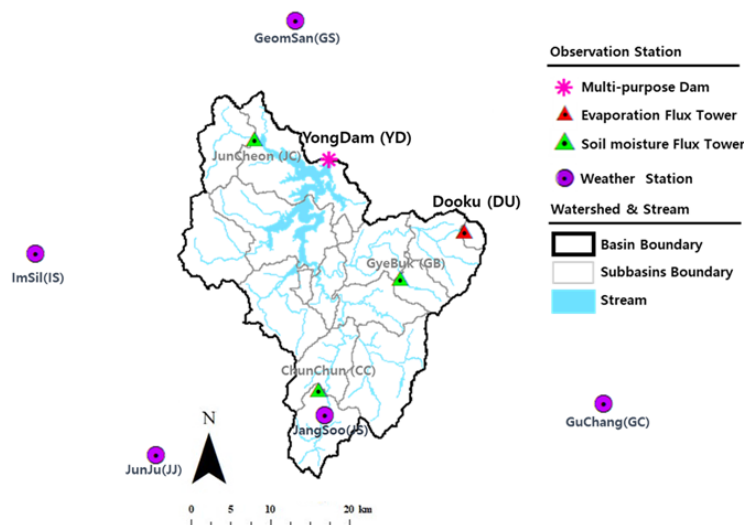


Fig. 4. Yongdam Dam watershed

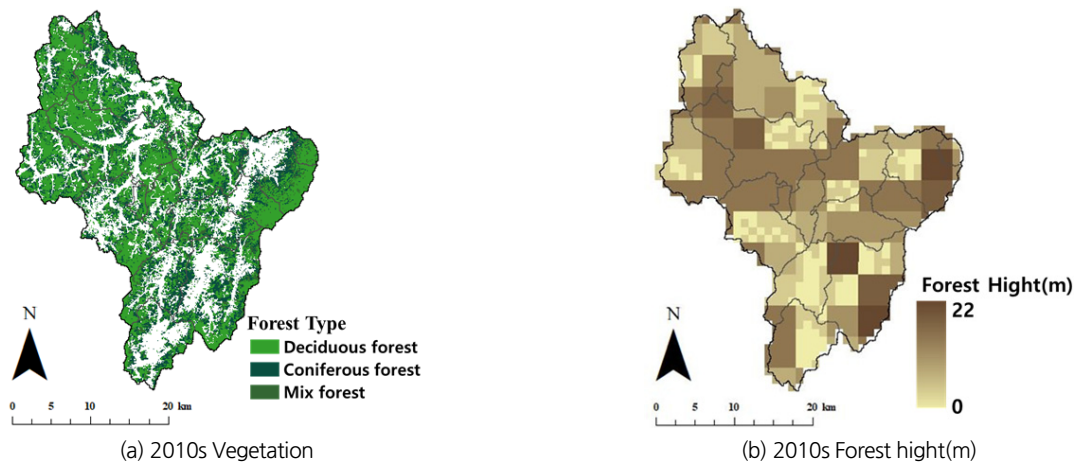


Fig. 5. Vegetation data of YongDam watershed

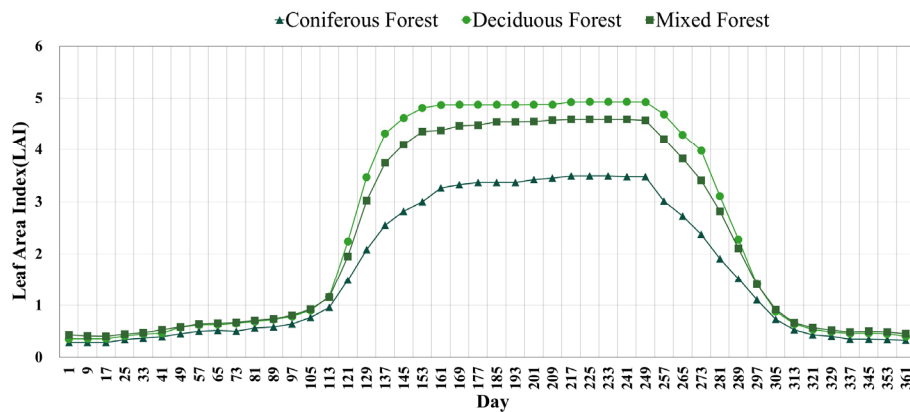


Fig. 6. leaf area index as a function of fraction of Yongdam Dam watershed

3. 결과 및 고찰

3.1 SWAT LAI 검·보정 결과

본 연구에서는 수문분석에 앞서 유역의 임상별 엽면적지수를 반영하고자 MOD15A2 LAI와 산림청 임상도를 활용하여 3가지(침엽수, 활엽수, 혼효림) 임상을 대상으로 시계열로 분류하여 위성자료와 SWAT 검·보정을 시행착오법으로 실시하였다. Table 1은 선정된 매개변수와 적용한 값을 정리한 것으로, SWAT 자체에서 계산되는 식물 성장 모델을 재현하고자 Fig. 6을 참고하여 BLAI, DLAI, FRGRW1, LAIMX1, FRGRW2, LAIMX2를 입력하였다. 또한, CHTMX, CuRYR_MAT는 산림청 임상도 자료를 입력하였고, 그 외 매개변수를 중점으로 보정을 하였다.

Fig. 7은 SWAT의 LAI 매개변수 검·보정 기간에 대해 시계열로 도시하였다. 상대적으로 강수량이 적었던 가뭄기를 제외하고는 비슷한 패턴으로 나타났으며, 적용성 평가는 Determin-

ation Coefficient (R^2)로 산정하였다. 그 결과 침엽수, 활엽수, 혼효림은 각각 0.95, 0.89, 0.90으로 산정되었다.

3.2 SWAT 수문 검·보정 결과

본 연구에서는 임상별 LAI 보정 결과를 적용하여 수문성분(유출량, 증발산량, 토양수분) 검·보정을 했다. 우선 SWAT의 적용에 앞서 용담댐유역에 대한 매개변수 민감도분석을 수행하고 최적의 매개변수를 선정하였다. Table 2는 선정된 매개변수와 적용한 값을 정리한 것으로, 지표유출관련 매개변수는 CN2와 CH_N(2)가 민감하게 나타났으며, 증발산 관련 매개변수는 EPCO와 ESCO, 토양 관련 매개변수는 SOL_AWC와 SOL_K를 선정하였다. 지하수 관련 매개변수는 GW_DELAY, GWQMN, ALPHA_BF, REVAPMN, GW_Revap이 해당 유역에서 민감하게 나타났다. 지표유출은 SCS 유출곡선법, 증발산량 산정은 Penman-Monteith 방법, 하도추적은 Muskingum 방법을 이용하였다. 모형의 warm up 기간은 5년(2005 ~ 2009

Table 1. The SWAT LAI calibrated parameters

Parameter	Definition	Range	Coniferous	Deciduous	Mixed
BLAI	Leaf max area index (m^2/m^2)	0.5 to 10	8	10	10
DLAI	Fraction of growing season when leaf area starts declining	0.15 to 1	0.65	0.98	0.98
FRGRW1	Fraction of the plan growing season corresponding to 1st point on the optimal leaf area development curve	0 to 1	0.04	0.01	0.01
LAIMX1	leaf area index corresponding to the 1st point on the optimal leaf area development curve	0 to 1	0.02	0.08	0.08
FRGRW2	Fraction of the plan growing season corresponding to 2nd point on the optimal leaf area development curve	0 to 1	0.16	0.16	0.16
LAIMX2	leaf area index corresponding to the 2nd point on the optimal leaf area development curve	0 to 1	0.93	0.98	0.98
CHTMX	Max canopy height (m)	0.1 to 20	11.1	11.9	12.1
Bio E	Radiation-use Efficiency or biomass-energy ratio ($(\text{kg}/\text{ha})/(\text{MJ}/\text{m}^2)$)	10 to 90	10	10	10
T_base	Minimum (base) temperature for plant growth ($^{\circ}\text{C}$)	0 to 11	0	8	8
T_OPT	Optimal temperature for plant growth ($^{\circ}\text{C}$)	11 to 38	15	10	10
ALAI_MIN	Minimum Leaf area index for plant during dormant period (m^2/m^2)	0 to 0.99	0.3	0.33	0.4
HUSC	Fraction of total base zero heat units at which operation takes place	0 to 1.5	0.15	0.15	0.15
HUM	Total heat units for cover/plant to reach maturity	0 to 6000	4000	1900	1900
CuRYR_MAT	Current age of trees (years)	0 to 100	35	33	33

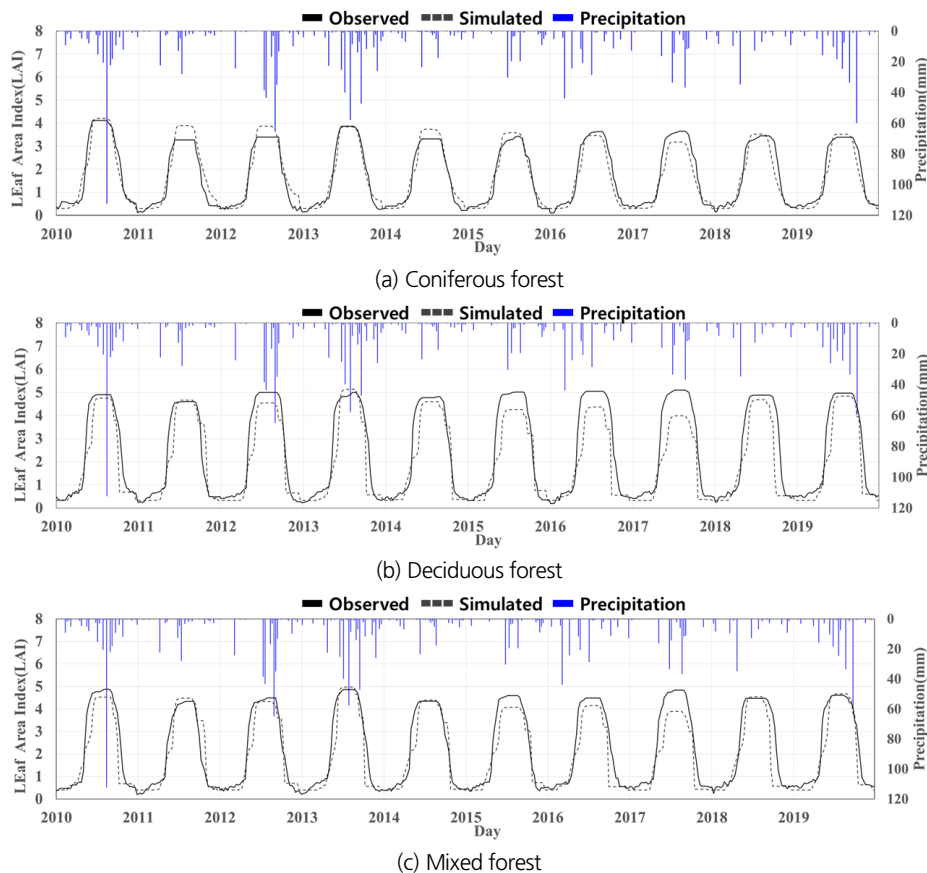
**Fig. 7.** Forest LAI calibration of Yongdam watershed

Table 2. The SWAT calibrated parameters

Parameter	Definition	Range	Adjusted value
Surface runoff			
CN2	SCS curve number for moisture condition	35 to 98	51
CH_N(2)	Manning's "n" value for the tributary channel	0.01 to 30	0.1
HRU and Soil			
EPCO	Plant uptake compensation factor	0 to 1	0.2
ESCO	Soil evaporation compensation coefficient	0 to 1	0.8
SOL_K	Saturated hydraulic conductivity (mm/hr)	0 to 150	54
SOL_AWC	Available water capacity	0 to 1	0.16
Groundwater			
GW_DELAY	Delay time for aquifer recharge (days)	0 to 500	120
GWQMN	Threshold water level in shallow aquifer for base flow (mm)	0 to 5000	2000
ALPHA_BF	Base flow recession constant	0 to 1	0.005

Table 3. Summary of SWAT calibration and validation results for streamflow

Remarks	Year	PCP (mm)	Q (mm)		QR (%)	R ²	NSE	PBIAS (%)	RMSE (mm/day)
		Obs.	Obs.	Sim.					
C	2010	1642.9	994.7	989.9	60.3	0.88	0.84	0.48	3.03
	2011	1601.2	1,080.3	1176.7	73.5	0.86	0.84	-8.92	3.66
	2012	1562.6	993.4	1090.3	69.8	0.72	0.66	-9.75	3.80
	2013	1268.5	683.3	846.5	66.7	0.83	0.81	-23.89	2.45
	2014	1187.2	578.8	670.0	56.4	0.73	0.73	-15.75	2.24
	2015	868.2	350.5	457.5	52.7	0.43	0.40	-30.55	1.76
V	2016	1324.2	643.7	839.7	63.4	0.79	0.76	-19.72	2.56
	2017	1037.3	436.5	534.9	51.6	0.69	0.66	-22.54	1.78
	2018	1492.3	846.6	938.8	62.9	0.75	0.73	-10.89	3.95
	2019	1189.7	597.1	605.6	50.9	0.67	0.61	-1.42	2.27
	Avg.	1317.4	720.5	815.0	60.8	0.74	0.70	-14.30	2.75

Obs.: Observed, PCP: Precipitation, Sim.: Simulated, Q: runoff, QR: runoff ratio, C: calibration, V: validation, NSE: Nash-Sutcliffe efficiency, PBIAS: Percent bias, RMSE: Root Mean Square Error, Avg.: Average

년)으로 설정하였으며, 보정기간은 2010~2014년, 검정기간은 2015~2019년으로 하여 시행착오법으로 실시하였다.

모형의 적용성 평가는 Determination Coefficient (R^2), Nash and Sutcliffe model Efficiency (NSE_Q), Root-Mean Square Error (RMSE), PBIAS를 사용하였으며, 수문에 있어서 R^2 및 NSE 경우 0.5 이상, Pbias는 $\pm 15\%$ 부터는 통계적으로 유의하다고 한 바 있다(Moriassi *et al.*, 2015; Barbosa *et al.*, 2019).

Table 3 용담댐유역의 강우량, 실측유출량 및 모의유출량에 대한 유출율, 그리고 검정결과에 따른 모형의 적합성 평가 결과이다. 유역의 검·보정 기간에 대한 실측 연평균 유출량은 720.5 mm이며, 모의 유출량은 815.0 mm로 + 11.5%의 오차

를 나타내었다. 검·보정 기간에 대한 평균적인 적합성 평가 결과 R^2 의 경우 0.74, RMSE 2.75 mm/day, NSE 0.70, PBIAS 14.3%로 분석됐다. 이중 모의 결과값이 실측값에 비해 유출량이 많이 산정된 2015년도 결과가 상대적으로 안 좋게 나왔다. 이는 2014년부터 이어진 연속적인 가뭄이 수문에 미친 영향을 매개변수가 잘 반영하지 못하였기 때문이라 판단된다. Fig. 8은 로그눈금 그래프로 실측유출량과 모의유출량의 검증 결과 시 지표유출에 영향을 미치는 매개변수를 조정하여 유량 peak 값을 맞춘 후 유역 내 전체 유량을 맞추기 위해 증발산량 매개변수와 토양수 매개변수를 조정하였다. 그 후 중간유출 및 기저유출을 맞추기 위해 지하수 관련 매개변수 조정을 하며 유출 별 변화를 파악하여 검·보정 정확성을 높였다.

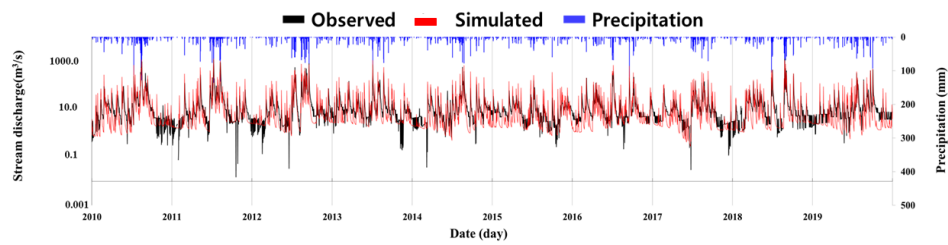
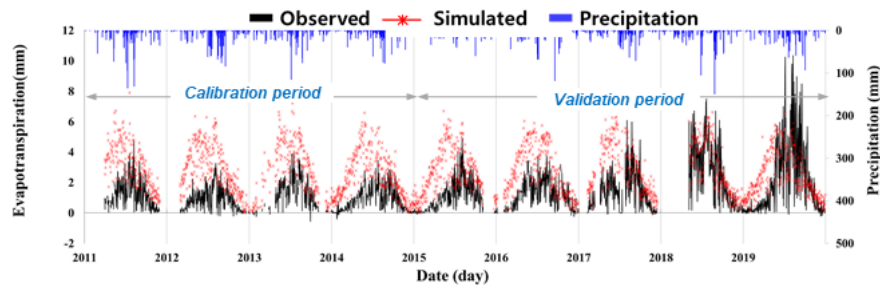
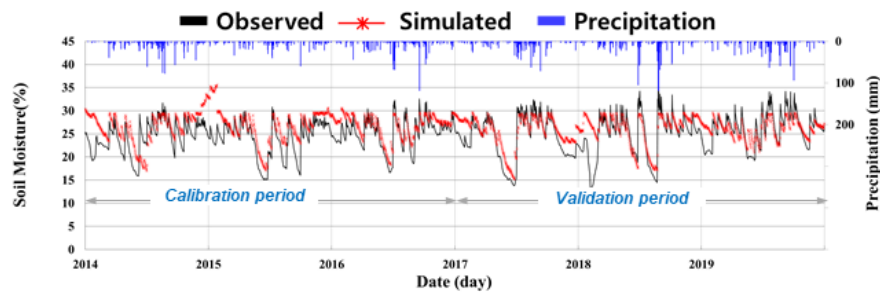


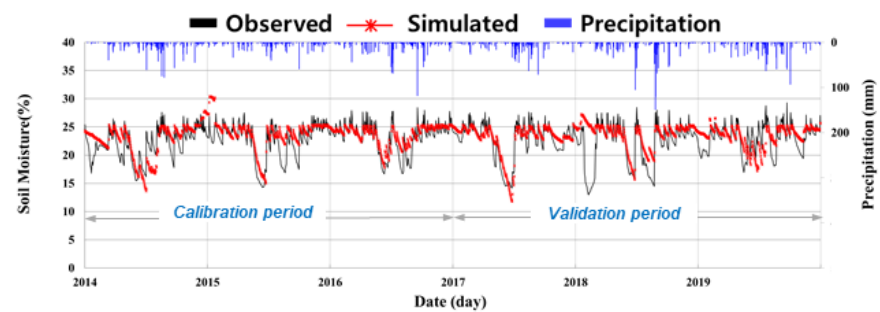
Fig. 8. The SWAT calibration and verification results using observed data



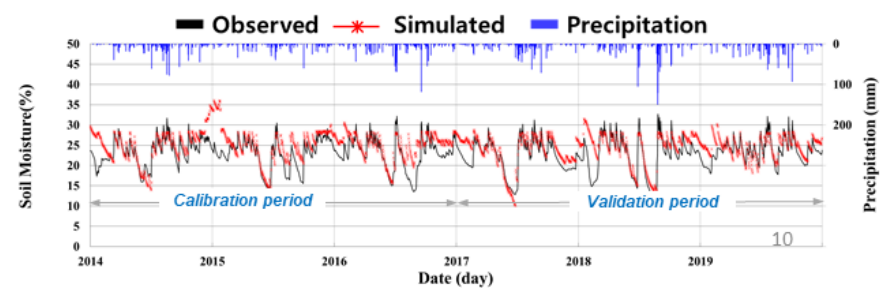
(a) Comparison of daily evapotranspiration for DU and SWAT: Flux tower



(b) Comparison of daily soil moisture for GB and SWAT: TDR



(c) Comparison of daily soil moisture for JC and SWAT: TDR



(d) Comparison of daily soil moisture for CC and SWAT: TDR

Fig. 9. The SWAT calibration and verification results using observed data

해당 구역의 HRU는 총 3,573개로 구성되어 있으며, 검보정 시 구역 내에 있는 실측자료 증발산량 1 개소(DU) 및 토양수분 3 개소(JC, GB, CC)를 대상으로 실측자료가 설치된 지점의 HRU에서 추출하여 검·보정을 실시하였다(Fig. 9). SWAT의 증발산량은 HRU 면적에 대한 엽면적지수의 상대적인 수치의 함수에 의해 추정되며, 실제 토양수분증발은 토양심과 수분량의 지수 함수에 의해 산정 및 식물의 증산에 의한 잠재증발산과 엽면적지수의 선형 함수에 의해 모의된다. 그 결과 덕유산 FluxTower의 결과를 제외한 증발산 관측값과 모의값 비교 결과 R^2 는 0.51으로 분석됐다(Fig. 9(a)). 국내 외에서도 구역의 증발산의 비율은 강우량의 40~60% 정도로 매우 중요한 부분을 차지한다(Kim and Kim, 2004; Kosugi and Katsuyama, 2007). 그러나, 덕유산 FluxTower 관측값의 경우 증발산량이 연평균 430 mm으로 강수량 대비 31.6%로 나타나 적게 산정되었다(Lee *et al.*, 2015). 또한, 2018년 이전 이후의 관측값의 증발산량 산정 값이 달라지는 것으로 보아 평년 대비 적게 측정된 것으로 판단하여, 증발산량의 패턴을 고려하고 우리나라 평균 증발산량 비율에 맞게 검·보정을 수행하였다. 또한, Table 4에서는 LAI 보정을 하기 전인 Default와 보정 후인 Simulated로 비교하였다. SWAT에서 제공하는 식생 데이터베이스값의 경우 누적복사량의 함수로 Kill operation이 적용되어 식생이 자라는 생장기를 제외한 봄철과 여름철의 LAI를 0으로 산정함으로써, 증발산량을 산정한다. 따라서, LAI 보정 후 증발산량 산정 결과 연평균 증발산량이 증가하였다.

SWAT에서 식물과 토양의 상호작용에 있어, 두 가지 중간적인 단계인 포장용수량(Field Capacity)과 영구위조점(Wilting

Point)이다. 포장용수량은 완전히 물에 젖어 습윤한 토양이 약 2일 정도 배수되었을 때의 토양수분을 말하며, 영구위조점은 토양이 토양에서 자라는 식물이 시들고, 밤새도록 잎을 습윤한 환경에 있을 때 더 이상의 회복이 되지 않을 때를 말한다. 따라서 토양수분 함량은 포장용수량에서 영구위조점 사이를 나타낸다. SWAT에서의 HRU 토양수분 결과 단위는 mm이며, 수자원공사 토양수분 자료는 % 단위이기 때문에 이를 통일하고자 토양층의 깊이는 300 mm로 설정하여 산정하였으며, 그 결과 각각의 TDR 실측관측소(GB, JC, CC)의 R^2 는 0.50, 0.53, 0.55로 분석되었으며, RMSE는 각각 3.7 mm/day, 3.1 mm/day, 2.3 mm/day으로 분석되었으며, PBIAS는 -6.5%, -7.6%, -3.5%로 분석되었다(Figs. 9(a)~9(c)). 하지만 2015년도 및 2018년도의 3 개의 TDR 관측값과 모의값의 비교 결과 모의값이 관측값에 비하여 토양수분 함량 그래프가 위로 넘치는 현상을 보였다. 이는 토양의 물은 포화 또는 불포화상태로 흐르며, 포화토양에서 흐름은 중력에 의해 유도되며 보통 아래방향으로 흐른다. 불포화흐름은 수분함량의 고저에 따라 발생하는 경사도(Gradient)에 의해 유도된다. 불포화흐름은 어떤 방향으로도 발생할 수 있지만, SWAT에서는 직접적으로 포화의 흐름만 추정한다. 따라서 포화흐름만 계산하게 되며, 포화흐름은 토양층의 수분함량이 그 층에 대한 포장용수량보다 큰 경우 발생한다. 포장용수량의 초과 수분은 토양층의 온도가 0°C 이하가 아니면, 침투 또는 측방흐름(Lateral Flow), 타일흐름 배수(Tile Flowdrainage) 등으로 나타날 수 있다. 하지만 토양층이 0°C 이하로 내려가 얼게 되면, 어떠한 수분이동도 계산되지 않는다(Neitsch *et al.*, 2011). 이러한 사실에 입각하여, 겨울철 검·보정 결과 토양수분 포장용수량 결과가 일부 높게 나오게 된다.

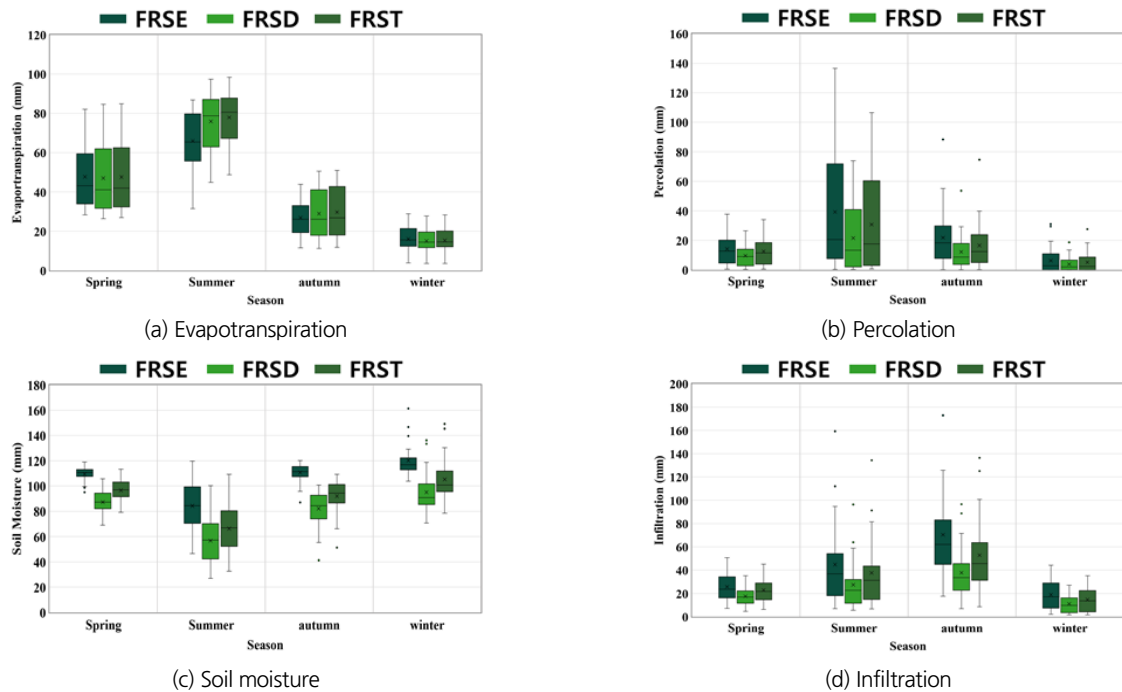
Table 4. Comparison of total evapotranspiration for DU and SWAT per year

Year	Observed	Default		Simulated	
	ET (mm)	ET (mm)	R^2	ET (mm)	R^2
2011	263.6	633.1	0.45	657.6	0.46
2012	246.6	596.3	0.40	627.4	0.55
2013	255.9	651.9	0.67	685.5	0.64
2014	274.4	622.1	0.56	640.8	0.60
2015	313.7	607.1	0.49	629.5	0.45
2016	355.7	647.8	0.53	682.4	0.57
2017	380.9	634.1	0.31	648.1	0.32
2018	878.7	615.8	0.48	650.2	0.55
2019	904	656.7	0.52	686	0.48
Avg.	430.4	629.4	0.49	656.4	0.51

Avg.: Average, ET: Evapotranspiration

3.3 임상별 수문 영향

Fig. 10 및 Table 5는 2010년부터 2019년도 기간에 대해 SWAT의 HRU에서 수문요소 값을 추출하여 임상에 따른 수문 영향을 계절별로 분류해 비교하였다. 총 연평균 증발산량은 침엽수림 469.7 mm, 활엽수림 501.0 mm, 그리고 혼효림은 511.5 mm으로 나타났다. 이는 침엽수림과 활엽수림의 비교 결과 증발산량을 제외한 수문은 계절과 상관없는 임상별 증감 패턴을 보이지만 증발산량의 경우 상대적으로 엽면적지수가 낮은 봄과 겨울철을 제외하고 평균 증발산이 많이 일어나며, 엽면적지수가 높은 여름과 가을에는 활엽수림의 증발산이 더 많이 나타났다(Kim and Kim, 2004). 또한, 본 연구에서는 혼효림의 경우는 활엽수림보다 계절별 증발산이 많이 산정되었으며, 이는 식생의 높이 차이에 따른 영향이 반영된 것으로 판



FRSE: Coniferous forest, FRSD: Deciduous forest, FRST: Mixed forest

Fig. 10. 2010s monthly hydrologic comparison by forest vegetation

Table 5. 2010s seasonally hydrologic comparison by forest vegetation

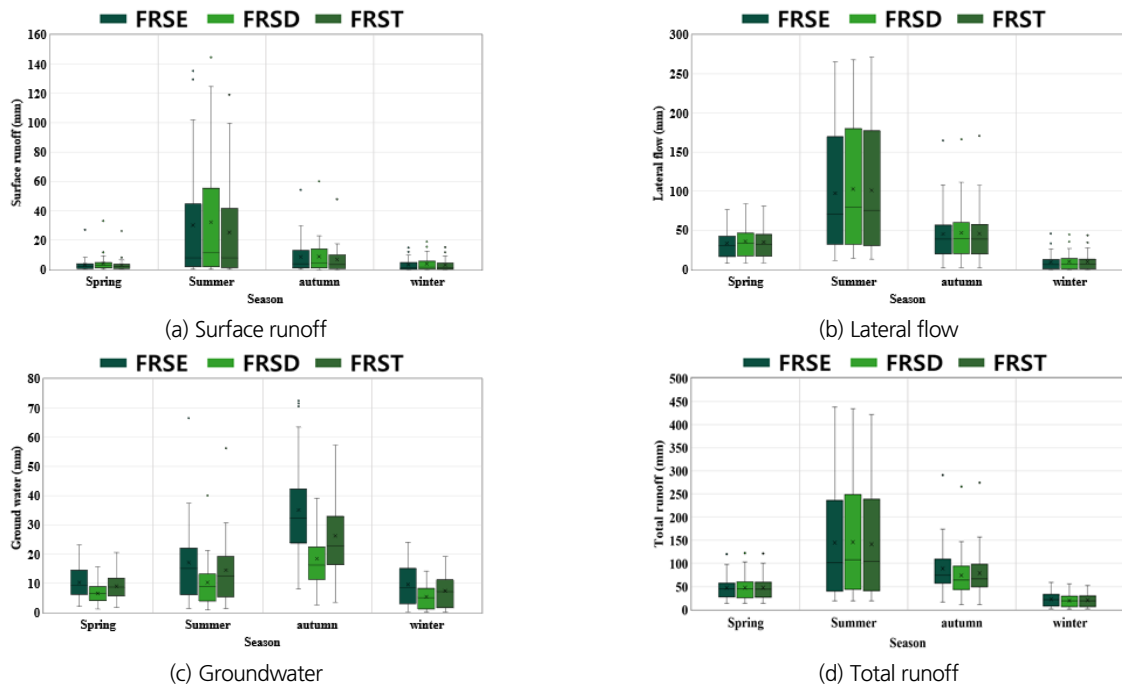
Season	Evapotranspiration (mm)			Infiltration (mm)			Percolation (mm)			Soil Moisture (mm)		
	FRSE	FRSD	FRST	FRSE	FRSD	FRST	FRSE	FRSD	FRST	FRSE	FRSD	FRST
Spr	143.1	141.1	142.7	328.3	261.9	290.1	42.5	28.8	37.8	77.2	52.7	68.6
Sum	198.1	227.8	233.9	253.1	170.1	199.2	117.9	64.7	92.1	134.4	82.3	113.0
Aut	80.6	86.9	89.1	332.1	246.5	276.0	65.6	36.7	49.8	211.1	113.3	158.5
Win	48.0	45.2	45.9	361.0	285.5	315.9	18.8	11.5	15.5	56.6	33.3	44.2
Total	469.7	501.0	511.5	479.3	281.5	384.2	244.8	141.8	195.2	1,274.5	964.0	1,081.1

Spr: Spring, Sum: Summer, Aut: Autumn, Win: Winter, FRSE: Coniferous forest, FRSD: Deciduous forest, FRST: Mixed forest

단된다. 본 연구 결과와 같이 Yang *et al.* (2021)은 침엽수인 전나무와 활엽수인 참나무를 비교해 수문요소를 분석한 바 있으며, 증발산의 경우 활엽수가 더 많았으나, 침투량 및 토양 수분의 경우는 침엽수가 높다 하였다. 또한, 침엽수림 토양은 활엽수림보다 발수성이 높아 침투율을 증가시키는 경향 및 지표유출의 감소에 영향을 미친다고 연구된 바 있다(Beatty and Smith, 2010; Butzen *et al.*, 2015). 연평균 침투량 및 침투량의 경우, 침엽수림 479.3 mm, 244.8 mm, 활엽수림 281.5 mm, 141.8 mm, 그리고 혼효림은 384.2 mm, 195.2 mm로 나타났다, 토양수분 경우 각각의 임상별로 연평균 결과 1,274.5 mm, 964.0 mm, 1,081.1 mm로 나타났다. 기존 연구와 같이 본 연구 결과에서도 연평균 결과가 침엽수림, 혼효림, 활엽수

림 순서로 높게 나타나는 경향을 보였다.

Fig. 11 및 Table 6은 유역 내 임상별 지표유출, 중간유출, 기저유출 및 총유출량을 계절별 값을 정리한 것이며, 임상별 연평균 총유출량은 침엽수 909.8 mm, 활엽수 860.6 mm, 혼효림 864.2 mm로 산정되었다. 활엽수와 혼효림에 비해 엽면적 지수가 적은 침엽수가 증발산량이 낮게 산정되어 가장 높은 유출량이 나타났다 판단된다. 또한, 지표유출과 중간유출은 침엽수림이 낮은 경향을 보였으며, 그 원인은 강우 이후 침엽수의 지표 및 강수량에서 수분 흡수를 많이하며, 활엽수는 깊은 토양층에서 물을 더 흡수한다고 한바 있다(Liu *et al.*, 2019). 따라서, 지표유출 9%, 중간유출 6% 정도 활엽수림이 많지만, 토양층 수문 반응인 침투량 및 침투량의 경우 침엽수림이 높



FRSE: Coniferous forest, FRSD: Deciduous forest, FRST: Mixed forest

Fig. 11. 2010s monthly stream flow comparison by forest vegetation

Table 6. 2010s seasonally stream flow comparison by forest vegetation

Season	Surface runoff (mm)			Lateral flow (mm)			Ground water (mm)			Total runoff (mm)		
	FRSE	FRSD	FRST	FRSE	FRSD	FRST	FRSE	FRSD	FRST	FRSE	FRSD	FRST
Spr	10.1	13.0	9.4	100.0	109.1	105.5	31.1	20.0	27.2	141.2	142.1	142.1
Sum	90.7	97.2	76.5	292.1	309.5	304.3	51.5	30.9	43.6	434.3	437.6	424.4
Aut	25.7	26.3	20.0	135.6	140.2	137.5	105.4	55.4	78.8	266.7	222.0	236.4
Win	9.6	12.1	9.4	28.9	30.5	29.7	29.0	16.3	22.3	67.6	58.9	61.3
Total	136.2	148.7	115.3	556.6	589.3	577.0	217.0	122.6	171.9	909.8	860.6	864.2

Spr: Spring, Sum: Summer, Aut: Autumn, Win: Winter, FRSE: Coniferous forest, FRSD: Deciduous forest, FRST: Mixed forest

은 것에 기인하여 활엽수림 혼효림에 비해 기저유출이 상대적으로 77% 높게 산정되어 유출량이 많은 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 산림이 지배적인 용담댐유역을 대상으로 토양-식생-대기에 따른 수문순환을 장기간에 걸쳐 모의할 수 있는 SWAT을 이용하여 검·보정을 하였다. 용담댐유역에 대한 LAI 및 유량, 증발산, 토양수분 구축하여 그 적용성을 평가하였으며, 임상별 수문 평가를 수행하였다. 연구의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 용담댐유역을 대상으로 8일 간격의 46개 MOD15A2 LAI 위성자료와 임상도를 기준으로 공간적으로 수집한 임상별 분포로 LAI 시계열 자료를 산정하고 이를 SWAT LAI와 비교하여 검·보정을 수행하였다. SWAT 검·보정 결과, R^2 침엽수, 활엽수, 혼효림은 각각 0.95, 0.89, 0.90으로 나타났다.
- 2) 수문환경을 재현하고자 SWAT에서 유입량 검·보정 결과 R^2 는 0.74, RMSE 2.75 mm/day, NSE 0.70 그리고 PBIAS는 -14.3%로 산정됐다. 또한, 증발산량과 토양수분의 산정을 위해 각각 2011년부터 운영하는 덕유산 FluxTower와 2014년부터 운영하는 TDR 센서 3개 지점 천천, 계북, 주천의 관측자료로 이용하여 SWAT 검·보정 결과 증발산

량의 R^2 는 0.51로 나타났으며, 토양수분은 0.50 ~ 0.55로 산정됐다.

- 3) 임상별 수문요소 값을 계절별로 산정하였으며, 그 결과 연평균 증발산량이 침엽수는 469.7 mm, 활엽수는 501.0 mm, 혼효림의 경우 511.5 mm로 나타났다. 또한, 침투량 및 침투량의 경우, 침엽수는 479.3 mm, 244.8 mm, 활엽수는 281.5 mm, 141.8 mm, 그리고 혼효림은 384.2 mm, 195.2 mm로 나타났으며, 토양수분 경우 각각의 임상별로 연평균 결과 1,274.5 mm, 964.0 mm, 1,081.1 mm로 나타났다. 또한, 연평균 지표유출 및 중간유출의 경우 침엽수가 낮았으나, 총유출량의 경우 침엽수 909.8 mm, 활엽수 860.6 mm, 혼효림 864.2 mm로 나타났다.
- 4) 활엽수림과 침엽수림에서 발생하는 증발산량을 계절별로 비교한 결과, 침엽수림에림에서보다 봄철은 2.0 mm (1.4%) 많게, 여름철은 29.7 mm (13.0%) 적게, 가을철은 6.3 mm (7.2%) 적게, 그리고 여름철은 2.8 mm (6.2%) 많게 나타났다. 우리나라의 기후 특성상 상대적으로 강우가 집중되고 엽면적지수가 최대치에 도달하는 여름철에 증발산량의 차이가 특히 크게 나타났으며, 엽면적지수가 최대로 감소하는 가을철까지 활엽수림의 증발산량은 침엽수림의 증발산량을 웃도는 경향을 보였다. 여름철과 겨울철의 증발산량 차이로 연평균 증발산량은 활엽수림이 침엽수림보다 31.3 mm (6.2%) 크게 나타났다.
- 5) 증발산량을 제외한 물순환요소들의 계절별로 분석하였으며, 침투량과 침투량의 경우, 침엽수가 활엽수보다 상대적으로 큰 값을 보였다. 이는 발수성이 높은 침엽수림이 침투량과 침투량이 많은 것으로 판단하였으며, 위에서 언급한 증발산량, 침투량, 침투량의 영향을 받아 토양수분의 경우, 증발산량이 많고 침투량과 침투량이 적은 활엽수림에서 침엽수림보다 더 크게 나타났다. 유출량의 관점에서 활엽수림이 지표유출이 9% 중간유출 6% 정도 많았으나, 침투량과 침투량이 많은 침엽수림이 기저유출이 77% 크게 나타나 총유출량이 침엽수 혼효림 활엽수 순서로 산정됐다.

본 연구에서는 산림이 지배적인 지역을 대상으로 SWAT을 활용해 장기간 수문영향을 임상별로 비교 평가하였다. 연구의 한계점으로는 SWAT 식생 데이터베이스 특성상 구역 내 침엽수, 활엽수, 혼효림의 성장 조건을 구역별로 분류하지 못하고 통일하여 표현해야 하는 점이 있었다. 추후 연구에서는 과거 산림 및 엽면적지수 조건을 고려한 장기간 산림성장 과 토지이용 변화에 따른 산림분포를 모의하여 임상별 성장 및 분포 변화가 구역 수문에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

이는 산림지역의 조림계획에 있어 임상별 물순환 영향에 대한 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 한강수계관리위원회 환경기초조사사업 연구 [기저유량 변동 및 하천 수질영향 특성과 회복방안 연구] 수행의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Ahn, S.R., Park, G.A., Jang, C.H., and Kim, S.J. (2013). "Assessment of climate change impact on evapotranspiration and soil moisture in a mixed forest catchment using spatially calibrated SWAT Model." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 46, No. 6, pp. 569-583.
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., and Williams, J.R. (1998). "Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development 1." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 34, No. 1, pp. 73-89.
- Barbosa, J., Fernandes, A., Lima, A., and Assis, L. (2019). "The influence of spatial discretization on HEC-HMS modelling: A case study." *International Journal of Hydrology*, Medcrave, Vol. 3, No. 5, pp. 442-449.
- Beatty, S.H., and Smith, J.E. (2010). "Fractional wettability and contact angle dynamics in burned water repellent soils." *Journal of Hydrology*, Elsevier, Vol. 391, pp. 97-108.
- Bosch, J.M., and Hewlett, J.D. (1982). "A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration." *Journal of Hydrology*, Elsevier, Vol. 55, No. 1-4, pp. 3-23.
- Boussetta, S.H., Balsamo, G.P., Beljaars, A.T., Kral, T.M., and Jarlan, L.N. (2013). "Impact of a satellite-derived leaf area index monthly climatology in a global numerical weather prediction model." *International Journal of Remote Sensing*, Taylor&Francis, Vol. 34, No. 9-10, pp. 3520-3542.
- Butzen, V., Seeger, M., Marruedo, A., Jonge, L.D., Wengel, R., Rise, J.B., and Casper, M.C. (2015). "Water repellency under coniferous and deciduous forest - Experimental assessment and impact on overland flow." *Catena*, Elsevier, Vol. 133, pp. 255-265.
- Fang, H., Baret, F., Plummer, S., and Schaepman S.G. (2019). "An overview of global leaf area index (LAI): methods, products, validation, and applications." *Reviews of Geophysics*, AGU, Vol. 57, No. 3, 739-799.
- Ha, R., Shin, H.J., Park, M.J., and Kim, S.J. (2010). "Comparison of hydrology responses by two different satellite remotely sensed leaf area indices in a mountainous watershed of South Korea." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Springer, Vol. 14, No. 5,

- pp. 785-796.
- Hibbert, A.R. (1967). "Forest treatment effects on water yield." *Asheville: coveeta hydrologic laboratory, southeastern forest experiment station*. Hydrology, Pergamon, Oxford, pp. 813.
- Joh, H.K., Lee, J.W., Park, M.J., Shin, H.J., Yi, J.E., Kim, G.S., Srinivasan, R., and Kim, S.J. (2011). "Assessing climate change impact on hydrological components of a small forest watershed through SWAT calibration of evapotranspiration and soil moisture." *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, ASABE, Vol. 54, No. 5, pp. 1773-1781.
- Kim, C.G., and Kim, N.W. (2004). "Assessment of forest vegetation effect on water balance in a watershed." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 37, No. 9, pp. 737-744.
- Kim, K.H., Jeong, Y.H., Jeong, C.G., Jun, J.H., and Yoo, J.Y. (2003). "The impacts of forest type on peak flows in long-term hydrological data at three small forested catchments." *Journal of the Korean Society of Forest Science*, KFS, Vol. 92, No. 2, pp. 462-469.
- Kim, Y.H., and Jeong, Y.H. (2006). "Variations of annual evapotranspiration and discharge in three different forest-type catchments, Gyeonggi-do, South Korea." *Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, KSAFM, Vol. 8, No. 3, pp. 174-182.
- Kosugi, Y., and Katsuyama, M. (2007). "Evapotranspiration over a Japanese cypress forest. II. Comparison of the eddy covariance and water budget methods." *Journal of Hydrology*, Vol. 334, pp. 305-311.
- Lai, G.Y., Luo, J.J., Li, Q.Y., Qiu, L., Pan, R.X., Zeng, X.G., Zhang, L.L., and Yi, F.H. (2020). "Modification and validation of the SWAT model based on multi-plant growth mode, a case study of the Meijiang River Basin, China." *Journal of Hydrology*, Elsevier, Vol. 585, pp. 381-389.
- Lee, Y.G., Kim, S.H., Ahn, S.R., Choi, M.H., Lim, K.S., and Kim, S.J. (2015). "Estimation of spatial evapotranspiration using terra MODIS satellite image and SEBAL model - A case of Yongdam Dam watershed-." *Journal of the Korean Association of Geographic*, KAGIS, Vol. 18, No.1, pp. 90-104.
- Liu, Z., Yu, X., and Jia, G. (2019). "Water uptake by coniferous and broad-leaved forest in a rocky mountainous area of northern China." *Agricultural and forest Meteorology*, ELSEVIER, Vol. 265, pp. 381-389.
- Marek, G.W., Gowda, P.H., Marek, T.H., Porter, D.O., Baumhardt, R.L., and Brauer, D.K. (2017). "Modeling long-term water use of irrigated cropping rotations in the Texas High Plains using SWAT." *Irrigation Science*, Springer, Vol. 35, No. 25, pp. 111-123.
- Monteith, J.L. (1965). "Evaporation and environment." *Symposia of the Society for Experimental Biology*. ROTHAMSTED. Vol. 19, pp. 205-234.
- Moriasi, D.N., Gitau, M.W., Pai, N., and Daggupati, P. (2015). "Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria." *Transactions of the ASABE*, ASABE, Vol. 58, No. 6, pp. 1763-1785.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., and Williams, J.R. (2001). *Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2000*. TWRI Report TR-191, Texas Water Resources Institute, College Station, TX, U.S.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., and Williams, J.R. (2011). *Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Theoretical documentation, version 2009*. TWRI Report TR-191, Texas Water Resources Institute, College Station, TX, U.S.
- Penman, H.L. (1948). "Natural evaporation from open water, bare soil and grass." *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, Vol. 193, No. 1032, pp. 120-145.
- Shin, H.J., Park, M.J., Lee, J.W., Lim, H.J., and Kim, S.J. (2019). "Evaluation of the effects of climate change on forest watershed hydroecology using the RHESSys model: Seolmacheon catchment." *Paddy and Water Environment*, CrossMark, Vol. 17, No. 4, pp. 581-595.
- Yan, K., Pu, J., Park, T., Xu, B., Zeng, Y., Yan, G., Weiss, M., Knyazikhin, Y.R., and Myneni, R.B. (2021). "Performance stability of the MODIS and VIIRS LAI algorithms inferred from analysis of long time series of products." *Remote Sensing of Environment*, ELSEVIER, Vol. 260, 112438.
- Yang, Z., Hou, F., Cheng, J., and Zhang, Y. (2021). "Modeling the effect of different forest types on water balance in the three gorges reservoir area in China, with coupmodel" *Water*, MDPI, Vol. 13, No. 5, p. 654.