

MODIS 위성영상으로부터 추출된 엽면적지수(LAI)가 SLURP 모형의 Penman-Monteith 증발산량에 미치는 영향 평가

Assessment of MODIS Leaf Area Index (LAI) Influence on the Penman-Monteith Evapotranspiration of SLURP Model

하 림* · 신형진** · 박근애*** · 김성준****

HA, Rim · SHIN, Hyung-Jin · Park, Geun-Ae · KIM, Seong-Joon

Abstract

Evapotranspiration (ET) is an important state variable while simulating daily streamflow in hydrological models. In the estimation of ET, for example, when using FAO Penman Monteith equation, the LAI (Leaf Area Index) value reflecting the conditions of vegetation generally affects considerably. Recently in evaluating the vegetation condition as a fixed quantity, the remotely sensed LAI from MODIS satellite data is available, and the time series values of spatial LAI coupled with land use classes are utilized for ET evaluation. Four years (2001-2004) of MODIS LAI was prepared for the evaluation of Penman Monteith ET in the continuous hydrological model, SLURP (Semi-distributed Land Use-based Runoff Processes). The model was applied for simulating the dam inflow of Chungju watershed (6661.3 km²) located in the upstream of Han river basin. For four years (2001-2004) dam inflow data and meteorological data, the model was calibrated and verified using MODIS LAI data. The average Nash-Sutcliffe model efficiency was 0.66. The 4 years watershed average Penman Monteith ETs of deciduous, coniferous, and mixed forest were 639.1, 422.4, and 631.6 mm for average MODIS LAI values of 3.64, 3.50, and 3.63 respectively.

Keywords : FAO penman monteith, evapotranspiration, MODIS LAI, SLURP

요 지

수문 모형을 이용한 일 유출모의에 있어 증발산량은 중요한 변수로 명시되고 있다. 증발산량 추정에 있어서는 예를 들어, FAO Penman Monteith 공식을 이용할 경우 식생의 상태를 잘 반영하는 LAI(엽면적지수) 같은 인자는 상당한 영향을 미친다. 최근에는 고정된 양으로 식생 상태를 추정하는 데 있어, 원격탐사 기법을 이용한 MODIS 위성영상 자료로부터 추정된 LAI를 이용하고 있으며, 시계열 LAI 공간자료는 토지피복도와 함께 증발산량 추정을 위해 활용된다. 본 연구에서는 한강 상류부에 위치한 충주댐 유역(6661.3 km²)의 댐 유입량을 모의하기 위해 SLURP 수문 모형을 적용하였으며, FAO Penman Monteith 공식을 통한 증발산량 추정에 식생인자가 미치는 영향을 분석하기 위해 4년(2001년-2004년) 동안의 MODIS LAI 자료를 구축하였다. 4년 동안의 9개 기상관측소 지점 기상자료 및 댐 유입량 자료와 MODIS LAI 자료를 기반으로 모델 보정(2001년, 2003년) 및 검증(2002년, 2004년)을 실시 한 결과, 평균 Nash-Sutcliffe 모델 효율 계수는 0.66이었다. 유역의 활엽수림, 침엽수림 그리고 혼효림에서의 4년 평균 MODIS LAI가 각각 3.64, 3.50, 그리고 3.63이었으며, 이에 따른 Penman Monteith ET는 639.1, 422.4, 그리고 631.6 mm로 모의되었다.

핵심용어 : FAO Penman Monteith, 증발산량, MODIS LAI, SLURP

1. 서 론

생태계 물 순환 과정에 이어 지역적 수문 변화를 모의하고 예측함에 있어 증발산량은 유출량 및 토양수분 등에 상당한 영향을 미친다. 이에, 지표에서 현재 일어나고 있는 증발산량을 추정하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 증발

산량 추정에 관련된 매개변수는 기상인자 외에도 식생관련 변수가 있으며, 식생 특성을 반영하는 대표하는 지표로 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index: 정규화식생지수)와 LAI(Leaf Area Index: 엽면적지수) 등이 있다. 우리나라의 토지피복 특성상 대부분이 산림지역이며, 강수의 약 70%가 증발산 되는 것을 감안할 때 식생지수는 생태학

*정회원 · 건국대학교 사회환경시스템공학과 석사과정 (E-mail : rim486@konkuk.ac.kr)

**정회원 · 건국대학교 사회환경시스템공학과 박사수료 (E-mail : shjin@konkuk.ac.kr)

***정회원 · 건국대학교 사회환경시스템공학과 박사 (E-mail : dolpin2000@konkuk.ac.kr)

****정회원 · 교신저자 · 건국대학교 사회환경시스템공학과 교수 (E-mail : kimsj@konkuk.ac.kr)

적 에너지와 이산화탄소 유동량 추정 등에 매우 유용한 인자라고 할 수 있다. 이러한 식생지수는 최근 위성영상을 이용하여 추정 및 활용되고 있으며, 광범위한 지역의 시공간적 변화를 분석하기에 원격탐사기법은 매우 활용도가 높다. 대부분의 증발산량 추정 식에는 LAI 값이 사용되어 영향을 미침에도 불구하고 현실적으로 LAI의 측정이 힘들며, 특히 광범위한 지역의 자료를 획득하는데 어려움이 따른다. 따라서 기존의 LAI 추정 연구는 주로 NDVI와의 관계성을 이용하여 추정되어 왔으며, 단순한 관계식에서부터 복잡한 관계식까지 증발산량 추정이나 물수지 분석을 위해 활용되고 있다. 최근에는 위성영상을 이용한 광대역 LAI의 추정 연구 또한 활발히 진행되고 있다.

식생정보를 입력 자료로 사용하여 증발산량을 모의한 국내외 연구사례를 보면, SWAP(Gusev and Nasanova, 1998), SEBAL(Bastiaanssen 등, 1998; Immerzeel 등, 2008; 유진웅, 2003)과 같은 모형을 활용하여 지역의 증발산량 또는 생태학적 에너지 등을 분석하였다. 이는 증발산량 추정을 목적으로 사용되는 모형이며, 이들 모형을 통해 추정된 증발산량 값을 SWAT과 같은 수문모형에 사용하여 유역 수문변화를 모의한 연구도 발표된 바 있다(Immerzeel 등, 2008). 또한 LAI나 NDVI 영상을 이용하여 직접 증발산량을 추정한 연구(신사철 등, 1995; 채효석 등, 1999, 2000; 권형중 등, 2005; 김주훈 등, 2005; 신사철 등, 2006)들이 다양하게 진행되어 왔다. 증발산량을 포함한 수문 모의 시에는 SHE, MIKE/SHE(Abott 등, 1986a, 1986b), IHDM(Beven 등, 1987), DHVM(Wigmosta and Lettenmaier, 1994), VIC(Liang 등, 1994), SLURP(Kite, 1995) 모형 등을 주로 사용하여 각 모형에 식생관련 데이터를 입력하게 된다. Band 등(1993)은 RHESys 모형에 입력한 LAI가 물수지에 미치는 영향을 연구하였으며, Kite(2000)와 Habets 등(1999)는 NOAA AVHRR 위성영상을 이용하여 추정된 LAI값을 MIKE SHE 모형의 입력 자료로 사용한 연구를 발표하였다. 이어 Sun 등(2008) 또한 MIKE SHE 모형을 이용하여 증발산량을 모의하기 위해 SLURP 모형과 같이 직접 LAI값을 입력한 연구를 발표하였다. 임혁진 등(2004)은 NOAA 위성영상을 이용하여 추정된 NDVI를 LAI를 계산하기 위한 입력 자료로 사용하여 SLURP 모형을 통한 수문 모의 연구를 하였으며, 김병식 등(2006)은 SLURP 모형에서의 MODIS 위성영상으로부터 추출된 NDVI와 LAI의 적용 및 평가 연구를 통해 수문모형에서의 LAI의 역할을 명시하고, 물수지 분석에 미치는 영향력을 제시하였다. 이처럼 수문모형에서 입력되는 식생관련 지수들은 유역 물수지 모의 결과 분석에 있어 중요한 매개변수로 작용하게 되므로, 식생 데이터의 획득이 손쉽고 사용이 편리할 때 증발산량 추정 및 물수지 모의 시 식생정보의 활용성은 더욱 증대 될 것이다.

본 연구에서는 증발산량 추정을 위해 식생 관련 입력 매개변수로 사용된 MODIS LAI의 활용성 및 영향력을 평가하고자 하였다. MODIS LAI는 자료의 획득이 쉽고 시계열 분석이 가능하며 비교적 광범위한 지역의 식생정보를 얻기에 적절하다고 판단되었으며, 수문 모의는 위성영상 자료와 지형 데이터를 이용하기에 효과적인 모형으로 잘 알려져 있는 일 단위 장기-강수 유출모형인 SLURP 모형을 적용하였

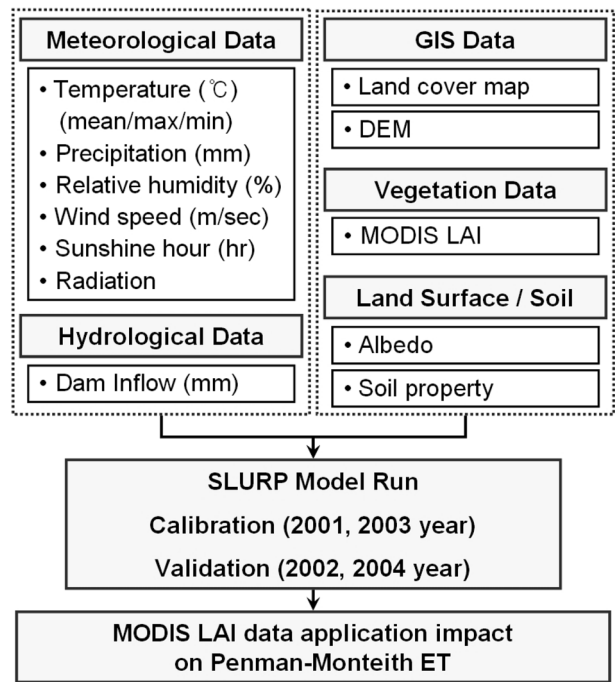


Fig. 1 Flow chart of this study

다. 대상유역은 식생이 넓은 지역에 걸쳐 고루 분포되어 있는 충주댐 유역을 선정하였다. 충주댐 유역은 우리나라의 북동쪽에 위치하여 비교적 고도가 높고 산림이 우거진 곳으로, LAI와 같은 식생정보의 적용이 적절하다고 판단되었다. 모형에 적절한 입력 매개변수를 사용하여 보정 및 검증과정을 거친 후, MODIS LAI 자료를 입력에 대한 증발산량 및 토양수분과 지하수 충전량의 변화를 분석하였다. 연구의 흐름은 Fig. 1과 같으며, 증발산량 추정에는 FAO Penman-Monteith method(Verhoef and Feddes, 1991) 공식을 사용하였다.

2. SLURP 모형의 개요

SLURP 모형은 단위 유역을 지형적 특성을 반영한 소유역으로 구분하여 모의된다. 각 소유역은 ASA(Aggregated Simulation Area) 개념으로 분리되며, 토지피복 상태에 따라 세분화된다. 입력 자료는 지형자료(ASAs 평균고도값, 수로연장, 토지피복상태 등), 시계열자료(강수량, 평균기온, 최고기온, 최저기온, 이슬점 온도 또는 상대습도, 일사량 또는 일조시간, NDVI, 적설분포면적 등), 물리적 매개변수(조도계수, 차단계수) 등을 이용한다. 지형자료의 경우 GIS와 수치지형 분석 모형 기법을 사용하여 획득할 수 있다. 시계열 자료는 기상관측소에서 실측한 값을 사용하며, 매개변수들은 측정·추정·보정된 값을 사용한다. 모형의 유출모의는 각각의 토지피복별 격자매트릭스와 ASAs 소유역에 대한 연직방향 물수지 해석에 의하여 이루어지며, 이는 수관저류, 강설초기저류, 급속저류(지표면저류, 토양층저류 등), 완속저류(지표하저류 등)의 네 가지 수직구조로 구성된다(Kite 등, 1996).

SLURP 모형은 수문순환 모의 시 강수의 차단 및 증발산에 이어 유출에 많은 영향을 미치는 식생(작물)의 영향을 잘 반영할 수 있으며, 월별 그리고 토지피복별 식생지수 입력이 쉽고 간단하다. 식생지수란 단위가 없는 복사 값으로 녹색식물의 상대적인 분포량과 활동성, 엽록소 함량 및 엽량 등과

관련된 자료로 활용되고 있다. 입력되는 식생지수로는 NDVI 또는 LAI가 있으며, 이는 정규화식생지수와 엽면적지수를 의미한다. 가장 보편적인 지표로 사용되는 NDVI는 -1에서 1사이 값을 가지며, 1에 가까울수록 식물의 활성도가 높은 것을 의미한다. LAI는 NDVI와 함께 식생정보를 대표적으로 제공하는 지표이며, 단위 지표 면적당(m²) 수목이 지니고 있는 전체 잎의 면적(m²)에 대한 비율을 지수로 나타낸 것으로 엽면적지수 1은 1 m² 지상면적에 1 m²의 엽면적이 존재함을 의미한다.

2.1 증발산량 추정 모듈

본 연구에서는 SLURP 모형 내 5가지 증발산량 추정 모듈 중 FAO Penman-Monteith method를 이용하였다. FAO Penman-Monteith 공식은 1990년에 기준작물에 대한 잠재증발산량을 추정하는 표준 방법으로 채택되었으며, 복합적 기

상 요인(일사량, 기온, 습도, 풍속)을 고려할 수 있어 비교적 정확성이 높고, 이용 목적에 따라 시간별, 일별, 순별, 월별 단위로 잠재증발산량을 산정할 수 있다(김병식, 2003). 아래 식 (4), (5)에서 보여 지는 것과 같이, 증발산량 추정에 영향을 미치는 매개변수들 중 LAI와 관계한 피복저항 (r_s)값은 단엽의 최소 유효기공저항 경험값 (r_1)을 이용하여 분모항의 LAI값과 계산 후, 모형에 입력하였다. r_1 은 토지피복별로 분포하는 작물에 따라 다르며, 이를 이용하여 r_s 를 계산 한 후, evapotranspiration 모듈에 입력하게 된다. r_s 는 값이 작을수록 (LAI 값이 클수록) 증발산량이 크게 추정되며, 이는 유역의 유출 및 토양수분과 지하수충진량에 관계하여 상당한 영향을 미친다. r_s 이외에도 작물의 최고 높이와 작물 생육시기를 입력하는데(Table 1), 각 토지피복에 해당되는 값을 대상 유역에 맞게 입력하여 증발산량을 추정하게 된다.

Table 1. Input parameters for Penman-Monteith evapotranspiration for each land use class of MODIS LAI in 2001 year

Land use	Canopy resist (s/m) ^{*1}	Max. Crop height (m) ^{*2}	Start Month ^{*2}	Start Day	End Month	End Day
Urban	0.00	0.00	4	15	10	31
Paddy	23.57	0.87	6	1	9	10
Upland Crop	40.37	2.00	4	15	10	10
Deciduous Forest	28.84	15.00	5	1	10	31
Coniferous Forest	39.31	15.00	0	0	0	0
Mixed Forest	32.09	15.00	4	1	10	31
Grassland	45.10	0.20	5	1	9	31
Bare Ground	0.00	0.00	0	0	0	0
Water	0.00	0.00	0	0	0	0

*1 National Institute Crop Science

*2 Korean Forest Research Institute

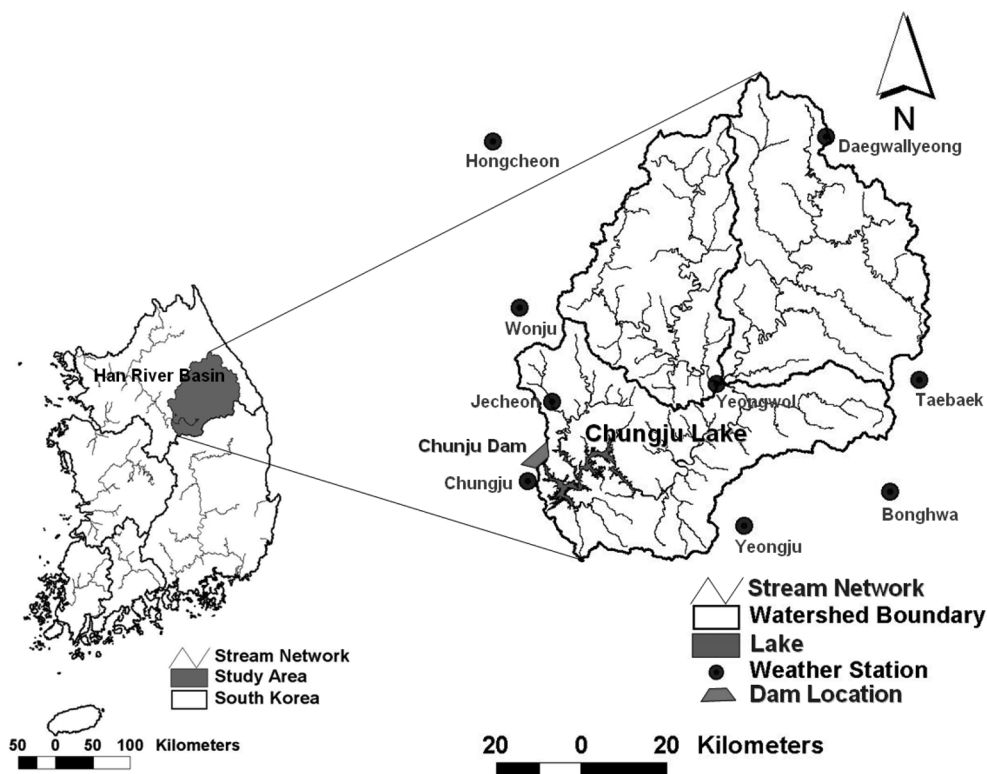


Fig. 2 The study watershed and weather stations

$$\lambda \cdot ET = \frac{s(Q^* - G) + p_a c_p (e_s - e_a) / r_a}{s + \gamma(1 + r_s / r_a)} \quad (4)$$

$$r_s = \frac{r_1}{LAI_{active}} \quad (5)$$

여기서, λ : 잠열강도 ($MJm^{-2}d^{-1}$), ET: 증발산량 (mm/d), s: 포화수증기압-온도 곡선의 기울기 $de/dT(kPa^{\circ}C)$, Q^* : 순복사량(net radiation)($MJm^{-2}d^{-1}$), G: 지열 플럭스($MJm^{-2}d^{-1}$), e_s : 포화수증기압z(kPa), e_a : 수증기압, γ : 습도상수($kPa^{\circ}C$), r_s : 식생피복저항(s/m), r_a : 공기역학저항(s/m), r_1 : 단엽의 최소 유효기공저항(s/m) 이다.

3. 대상 유역 선정

본 연구의 대상 지역은 북동부 산악지역에 위치한 충주댐 유역으로 충주댐은 높이 97.5 m, 길이 447 m, 체적 902천 m^3 로 연간 관개·생활·공업용수로 3,380백만 m^3 을 공급하고, 홍수조절 용량은 616백만 m^3 , 시설발전용량 412,000만 kW의 수력발전소를 가동하는 국내 최대 규모의 콘크리트 중력식 댐으로, 충주 다목적댐을 운영하게 됨에 따라 북한강 수계의 소양강 다목적댐과 함께 한강 하류부의 홍수 피해 경감에 기여한다. 충주댐 수위관측소를 유역 출구로 하는 충주댐 유역은 유역면적이 6,661.3 km^2 이며 유역둘레는 471.6 km, 유역 평균 폭은 23.5 km, 유역평균표고는 609.1 m, 유역평균경사는 34.9%로 국내 북동부 산악지역에 위치해있으며 산림면적은 5,481.7 km^2 으로서 유역면적의 83.0% 이 른다(Table 2, Fig. 2). 따라서 인위적인 토지이용현황 상태

가 적어 이·치수 및 용수 재이용량이 적고 자연적인 강수-수문 상태의 회귀수량 역시 댐 지점을 유역 출구로 하기 때문에 자연유출량에 가깝다고 할 수 있다. 이는 충주댐 수위 관측소의 유입량은 곧 자연적인 수문패턴을 가지고 유출이 발생한다고 볼 수 있으며, 자료의 신뢰성이 우수하다고 판단 되어 대상유역으로 선정하였다. 또한 본 유역은 산림의 면적이 매우 넓기 때문에 위성영상으로부터 추정할 수 있는 식생지표를 분석하기에 적합하며, 지표면 식생의 피복 상태를 쉽게 파악할 수 있는 원격탐사 기법의 활용도가 높은 유역으로 판단되었다. 따라서 쉽게 접할 수 있는 Terra 위성의 MODIS 센서에 의해 촬영된 영상을 이용하여 충주댐 유역의 식생정보를 추정하였다.

4. SLURP 모형의 입력자료 구축

4.1 MODIS LAI

LAI는 식물의 엽층에서 발생하는 에너지, 이산화탄소, 질소의 교환과 식물의 구조적 특징을 나타내는 중요한 지수로서 환경생태나 기상 및 수문분야에서 다양하게 활용되고 있다(국립산림과학원, 2007). 일반적으로 전 세계의 LAI 값은 0에서 8까지의 범위를 가지며, 증발산량을 비롯한 유역 수문 변화 모의 시 필수적인 매개변수이다. 여기서, EOS Data Gateway에서 MODIS LAI product를 다운 받게 되면 초기에 저장값은 100단위로 Import 된다. 따라서 제공된 영상의 헤더파일을 이용해 실사용 값으로 변환하여 0에서 8까지의 값을 가지게 된 것이다. 이것이 MODIS 산출물을 다운받고

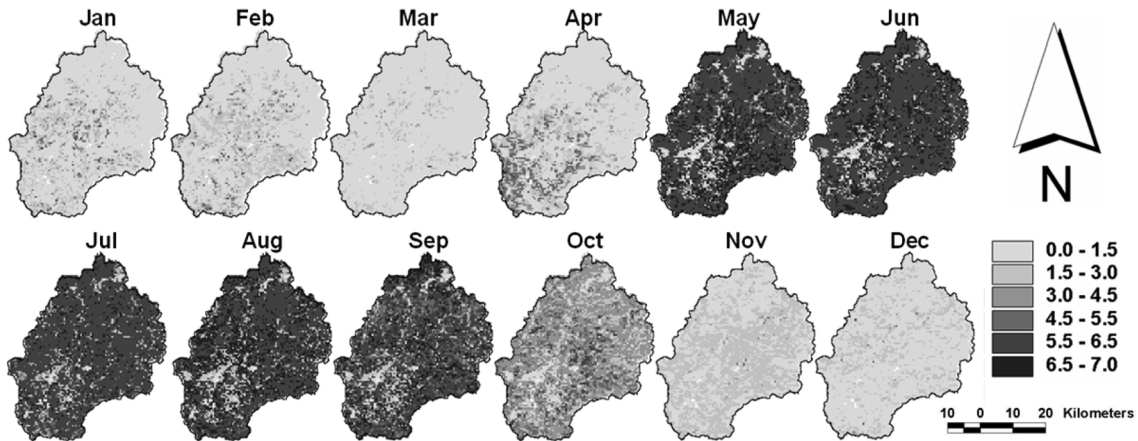


Fig. 3 Example of monthly MODIS LAI images (year of 2003)

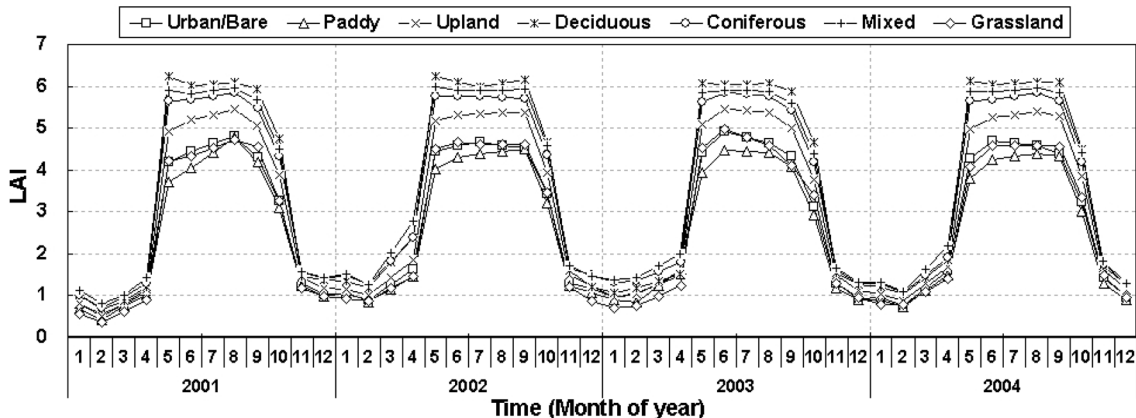


Fig. 4 MODIS LAIs for each land use

사용함에 있어 통용되는 값이므로 본 논문에서는 LAI 범위를 0에서 8까지로 정의하였다. LAI의 역할이 매우 중요함에도 불구하고 대부분의 수문모델 등에서는 LAI값을 경험에 의한 단일 값으로 처리하거나 위성영상에서 추출되는 NDVI와의 관계를 이용하여 추정된 값을 사용하는데, 때로는 대기 보정을 거치지 않은 상태로 부정확하게 추출된 NDVI를 이용하여 수증 구분 없이 무분별하게 추정하여 사용하기도 한다. 그러나, 현실적으로 LAI를 실측하는 것은 한계가 있으며, 넓은 연구 대상 지역에 대한 정보를 수집하기에는 많은 어려움이 따른다.

본 연구에서는 NDVI를 이용하여 LAI를 추정하는 방법 외에 EOS Data gateway에서 일반 사용자에게 무료로 제공되는 MODIS LAI Product를 이용하여 LAI값을 직접 입력한 후, LAI가 증발산량 및 유출에 미치는 영향력을 분석하고 활용성을 평가하였다. MODIS LAI는 자료의 획득이 쉽고 사용이 간단하기 때문에 SLURP 모형의 식생관련 입력 매개변수로 사용하였으며, 활용성을 평가하고자 하였다.

MODIS LAI 추정 알고리즘은 보스턴 대학과 몬타나 대학 연구진에 의해 개발되었다. MODIS LAI의 추정은 주 알고리즘과 주 알고리즘 실패 시 적용되는 보조 알고리즘으로 구성된다. 주 알고리즘은 공식 아래 식 (6), (7)와 같이 식생 임관의 3차원 복사전달 모델의 역변환 방식으로 LAI를 산출하는 수학적 모형이다.

$$\rho_c = f(\rho_l, \rho_b, LAI, CC, L(\theta, \phi)) : \text{역변환} \quad (6)$$

$$LAI = f(\rho_c) \quad (7)$$

여기서, ρ_c : 임관층 반사율(RS signal), ρ_l : 잎 반사율, ρ_b : 지상부 반사율(토양, 하층식생), CC: 임관율폐도(canopy closurepercent), $L(\theta, \phi)$: 태양과 센서의 기하학 정보(방위각, 천정각 등), LAI: 엽면적지수를 말한다.

MODIS LAI의 주 알고리즘에서 사용하고 있는 3차원 복사전달 모델은 태양과 센서의 방위각 및 천정각 정보와 식생의 임관구조, 토양 패턴 등의 정보를 이용하여 대상지역의 구조적 특징을 모델링한 것으로 이를 통해 대기 보정된 식생 임관부의 양방향 반사율(BRDF) 수치를 구할 수 있다. 모델링된 양방향 반사율과 센서에 의해 관측된 양방향 반사율 수치를 비교하여 성공적으로 모델링이 진행된다면, 모델링된 양방향 반사율은 식생임관부의 복사전달 상수를 저장한 LUT(Look-up Table)를 적용하여 최종 LAI가 산출된다. 그

러나 모델링에 의한 LAI 산출이 불가능한 경우 백업 알고리즘으로 수증별 NDVI와 이에 상응하는 LAI를 백업 알고리즘 LUT에 저장하여 주 알고리즘에서 실패된 픽셀에 대해 정규식생지수 수치로 LAI를 산출하게 된다. 또한, LAI 자료와 함께 제공되는 자료처리 정보(Quality Control)는 Product 산출 시 특징과 함께 사용한 알고리즘 및 화소 관련 정보가 영상으로 제공된다(국립산림과학원, 2007).

본 연구에 사용된 2001년~2004년 기간 동안의 8일 주기 MODIS LAI Product는 Earth Observing System Data Gateway(<http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/index.html>)에서 다운받았으며, The Land Processes Distributed Active Archive Center(LP DAAC)에서 제공하는 MODIS Reprojection Tool을 이용하여 Korea TM으로 좌표변환을 거친 후, GIS 프로그램을 이용하여 import 하였다. 이때, 영상은 고유 Gain 값과 Offset 값을 가지고 있으므로, LAI 값으로 변환하기 위해 다음 식 (3)을 이용하였다.

$$LAI = 0.1 \times \text{import 영상} + 0.0 \quad (8)$$

여기서, 0.1: Gain Value, 0.0: Offset Value

8일 주기 영상은 전체적으로 영상의 구름 및 대기의 영향을 최소화하기 위해 MVC (Maximum Value Composite)기법을 통해 월별 LAI 영상으로 재구축 하였으며(Fig. 4), 토지피복별 LAI값을 추출하였다. 구축된 월별 영상을 살펴보면 평균적으로 7~8월과 겨울철 LAI값이 정확하지 않은 것을 알 수 있었으며, 영상으로도 다른 지역에 비해 부분적으로 눈에 띄게 다른 값을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 보통 7~8월에 구름이 많은 대기 상황과, 겨울철 고도가 높은 지역은 눈 및 안개의 영향을 받기 때문에 촬영된 영상이 지표 환경을 잘 표현하지 못하는 것으로 판단된다. 전, 후월과 비교하여 확연히 튀는 값은 보간법을 이용하여 보정하였다.

토지피복별 연중 LAI 패턴 그래프는 다음 Fig. 4와 같으며, 계절적 특성은 잘 반영하고 있음을 알 수 있었다. 그러나, 산림 지역 LAI는 연중 엽면적의 변화가 적은 침엽수림과 4~5월부터 엽면적이 증가하는 활엽수림 특성을 잘 표현하지 못하는 것을 확인할 수 있었다.

4.2 수문 기상 자료

SLURP 모형에서 사용되는 기상자료는 일별 강우량, 일

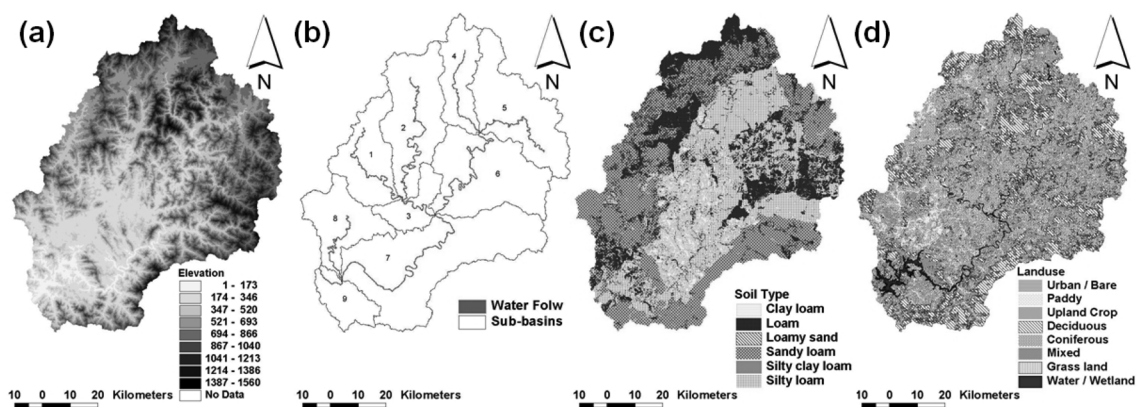


Fig. 5. Elevation (a), Subbasins (b), Soil type (c), and Land use (d) of the study watershed

Table 2. Summary of land surface and soil properties for each land use class

Land use	Area		SiB ^{*3}	FC (cm ³ /cm ³)	WP (cm ³ /cm ³)	PS (cm ³ /cm ³)	Albedo ^{*4}
	km ²	%					
Urban	112.4	1.7	11	0.266	0.124	0.418	0.15
Paddy	186.3	2.8	16	0.255	0.113	0.430	0.14
Upland Crop	590.7	8.8	12	0.271	0.127	0.417	0.12
Deciduous Forest	1668.9	25.0	2	0.265	0.115	0.439	0.11
Coniferous Forest	2501.9	37.6	4	0.269	0.124	0.421	0.10
Mixed Forest	1386.9	20.8	3	0.272	0.123	0.429	0.11
Grassland	29.4	0.4	7	0.267	0.119	0.434	0.15
Bare Ground	178.5	1.0	11	0.266	0.124	0.418	0.17
Water	66.1	1.8	9	0.244	0.109	0.427	0.12
Total	6661.3	100.0		-	-	-	-

FC: field capacity, WP: wilting point, PS: effective porosity (Rawls 등, 1982)

*3 SiB: coefficient of SiB2 method (Kite, 2002)

*4 Zhou 등, 2003

평균기온, 이슬점온도 또는 상대습도, 일조시간 또는 태양복사량 등이 기본적으로 이용되며 그 외의 일 평균풍속, 구름 분포정도, 강설량, 저수지 수위, 일 평균유출량, 연평균강수량 등이 필요에 따라 선택적으로 사용된다. 또한 ASAs 소유역 각각에 대한 기상자료가 입력 자료로 요구되나 이런 지역적 자료를 획득하기가 어렵기 때문에 유역 내 근거리 기상관측소의 기상자료를 이용하여 Thiessen 가중법에 의해 각각의 ASAs 소유역에 해당하는 기상자료로 변환되어 사용된다.

본 연구에서 기상자료는 기상청에서 제공하는 2001년부터 2004년까지의 충주댐 유역에 위치하고 있는 9개(대관령, 홍천, 원주, 영월, 태백, 제천, 영주, 봉화, 충주) 관측소의 일 기상 자료를 획득하였다. 또한 SLURP 모형에서는 고도가 증가함에 따른 기온 및 강수량의 변화와 위도에 따른 입사복사량의 변화를 고려하게 되는데, 기온 $-0.75^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, 이슬점 $-0.15^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 변화율을 고려하며, 강우의 경우 평균대기온도에 따라서 강우와 강설로 구분되기 때문에 기온의 감소율과 같이 강우 변화율 $-2.00\%/100\text{ m}$ 을 고려하였다. 유역의 수문자료는 WAMIS(Water Management Information System)에서 제공하는 2001년부터 2004년까지의 일 단위

충주댐 유입량 자료를 사용하였다.

4.3 지형 자료

DEM(Digital Elevation Model)은 수문모형에서 입력 자료로 사용되어 지형 및 지표면의 특성을 분석함으로써 지형적 매개변수를 결정하는 방법으로 이용된다. 즉, 유역의 지표면 경사, 경사향 등의 매개변수를 결정하여 수문모형에 활용, 정확한 유출량 등을 예측한다. 본 연구에서는 1:5,000 NGIS(National Geographic Information System) 수치지도를 사용하여 해상도 100 m×100 m의 DEM(Fig. 5a)과 하천망을 구축하였다. SLURP 모형에서의 하천흐름은 유역의 토지피복별 상태에 따라 분할된 ASAs 소유역에 대해 각 지점 유역 출구점까지의 하천의 고도변화·평균거리를 이용하여 유역을 추적하게 된다. 대상유역은 지형적 특성에 따라 하천분기점을 기준으로 유역이 분할되며 이것은 다시 ASAs 소유역내에서 같은 토지피복상태를 갖는 지역으로 세분화된다. ASAs 소유역 분할을 위해 DEM과 토지피복도를 지형 분석프로그램인 TOPAZ에 입력하였으며(Fig. 5a, Fig. 5d), 수리지형분할 및 하천망 생성을 위해 사용되는 중요한 매개변수인 임계수역(CSA)과 최소하천연장(MSCL)에 따라 9개

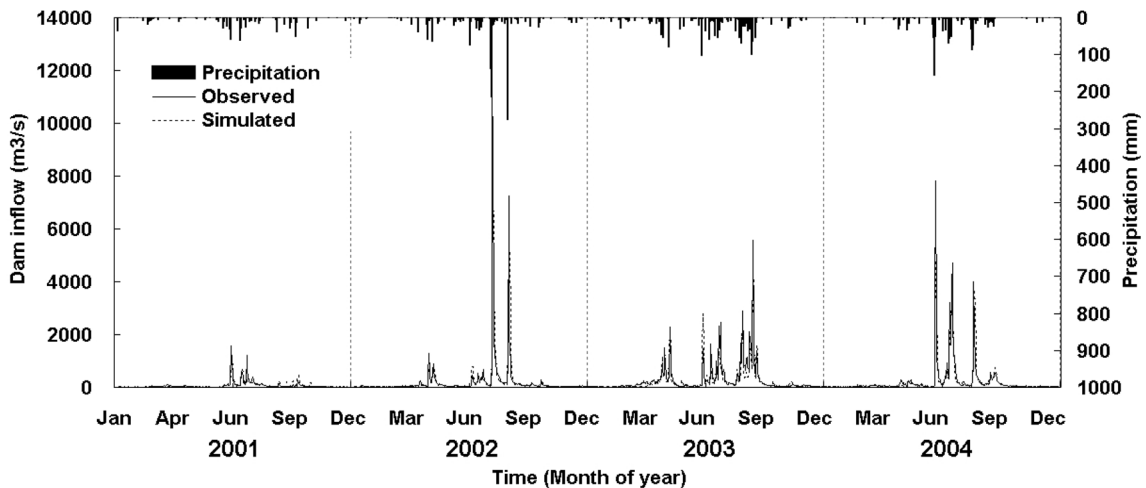


Fig. 6 Observed versus simulated dam inflow for model calibration and validation (2001 and 2003: calibration, 2002 and 2004: verification)

Table 3. Summary of model calibration and verification results (2001-2004)

Year	P (mm)	Observed		Simulated		RMSE (mm/day)	R ²	ME	Note
		Q (mm)	QR (%)	Q (mm)	QR (%)				
2001	807.9	332.9	41	318.8	39	1.24	0.99	0.58	C
2002	1710.9	974.3	57	1036.0	61	7.32	0.61	0.60	V
2003	1916.0	1241.8	65	1151.1	60	3.43	0.99	0.73	C
2004	1655.6	1016.1	61	836.7	51	4.47	0.76	0.73	V
Average	1522.6	891.3	56	835.6	53	4.11	0.84	0.66	

P: Precipitation, Q: Dam Inflow, QR: Runoff ratio, ET: Evapotranspiration, R²: Coefficient of Determination, ME: Nash-Sutcliffe Model Efficiency, C: Calibration, V: Verification

의 소유역으로 분할하였다(Fig. 5b).

토지피복도는 2000년 4월 29일 Landsat ETM⁺영상을 이용하여 최대우도 감독분류(Maximum Likelihood Supervised Classification)를 실시하여 총 9개(1.시가지, 2.논, 3.밭, 4.활엽수, 5.침엽수, 6.혼효림, 7.초지, 8.나지, 9.수역)의 항목으로 분류하였으며(Fig. 5d), 각 항목별 면적은 아래 Table 1에 제시된 바와 같다. 여기서, LAI 추정과 관련성이 깊은 식물 군계로 산림의 경우 침엽수, 활엽수와 혼효림으로 세분화 하였고, 그 외에는 논, 밭과 초지로 구분하였다. 김병식 등(2006)은 시기별 식생의 생육시기를 고려할 때, 활엽수의 성장 초기 단계인 4월 Landsat ETM⁺영상을 이용한 토지피복도를 사용하게 되면 침엽수와 활엽수의 구분이 명확하지 않은 시기이기 때문에 다중시기 토지피복도나 수치임상도의 활용이 요구된다고 언급하였다. 따라서 수종별 LAI값의 차이와 연중 변화 패턴을 잘 표현하지 못하는 이유는 단인시기 토지피복도를 사용하였기 때문으로 판단된다. 따라서 향후 LAI Product와 동일한 공간 해상도를 가지며, 시계열 분석이 가능한 MODIS Landcover Product를 활용하여 LAI 분석에 적용해 볼 예정이다. 토양 속성자료는 농업진흥청 토양도(Fig. 5c)로 부터 토양 타입을 확인 후, 포장용수량(FC: field capacity)과 영구위조점(WP: wilting point), 공극률(PS: effective porosity)을 계산하여 모형 입력 매개변수로 사용하였다(Table 2).

5. 모형 적용 결과 및 고찰

5.1 모형의 보정 및 검증

SLURP 모형의 매개변수 최적화를 위해 민감도분석과 SCE-UA 최적화기법(Duan 등, 1994)을 이용하여 2001년과 2003년을 보정하였으며, 2002년과 2004년을 검증하였다(Fig. 6). 매개변수추정의 최적화 척도로 Nash-Sutcliffe(Nash와 Sutcliffe, 1970) 모형효율을 사용하였다(Table 3). 평균 모형 효율은 0.66 값을 보였으며, 모의된 유출율은 평균 53%이다. 2001년 강수는 평균 강수량의 53% 밖에 발생하지 않았으므로, 다른 해에 비해 가뭄해로 모의되었다. 증발산량의 추정을 위해 입력된 매개변수는 Table 1에 제시하였다. 이는 2001년에 입력된 매개변수이며, 피복 저항, 작물 최고 높이 및 작물 생육시기를 농촌진흥청 작물과학원과 국립산림과학원 자료를 이용하였다. 다른 해에 비해 2001년은 LAI값이

Table 4. Summary of the watershed average Penman-Monteith PET and AET (2001-2004)

Year	Season	P (mm)	PET (mm)	AET (mm)
2001	Spring	29.4	254.3	116.8
	Summer	514.5	304.2	205.2
	Autumn	152.7	142.5	105.6
	Winter	111.4	54.5	63.2
	Total	807.9	755.5	490.8
			[81.5 %]	[60.7 %]
2002	Spring	332.7	255.2	216.7
	Summer	1068.4	302.9	216.7
	Autumn	179.5	135.7	130.6
	Winter	130.4	50.9	70.4
	Total	1711.0	744.7	634.4
			[37.2 %]	[37.1 %]
2003	Spring	405.4	241.9	240.3
	Summer	992.9	303.1	241.0
	Autumn	408.0	153.9	147.4
	Winter	109.7	48.4	68.7
	Total	1916.0	747.3	697.3
			[34.3 %]	[36.4 %]
2004	Spring	275.1	258.4	218.2
	Summer	1089.1	306.1	236.8
	Autumn	207.7	144.3	133.3
	Winter	83.8	59.9	75.6
	Total	1655.7	768.7	663.9
			[39.8 %]	[40.1 %]
Average		1522.6	754.0	621.6
			[42.9 %]	[40.8 %]
				(82.4 %)

P: Precipitation, PET: Potential evapotranspiration, AET: Actual evapotranspiration, Spring: March-May, Summer: June-August, Autumn: September-November, Winter: December-February, [%]: The percentage dividing ET into precipitation, (%): The percentage dividing AET into PET

적었고, 따라서 증발산량이 적게 모의되었으며, 토양수분 및 지하수 충전량 또한 적게 모의되었다(Table 4, Table 5).

5.2 LAI 적용에 따른 증발산, 토양수분, 지하수 충전량 및 댐 유입량 결과 분석

MODIS LAI를 입력 자료로 Penman-Monteith 공식을 이용하여 일별, 월별, 계절별, 연별 잠재증발산량(PET)과 실제 증발산량(AET)을 모의한 결과 유역 전체 AET는 PET의 65.0%~93.3%, AET는 강수의 36.4%~60.7%를 보였다(Table 4). 특히 여름에 다른 계절에 비해 증발산량이 많기 때문에, 여름철 증발산량이 연 증발산량을 대표한다고 판단할 수 있다. 토지피복별로 일별, 월별, 계절별, 연별 LAI에 의한 실제증발산량(AET), 토양 수분(SM), 지하수 충전량(GW)을 비교한 결과는 Table 5에 제시되었다. 유역 전체의 연 평균 AET는 621.6 mm로 모의되었으며, 토지피복별 평균 AET는 활엽수림에서 639.1 mm로 가장 많았으며, 혼효림이 631.6 mm 그리고 침엽수림이 422.4 mm로 가장 적게 모의되었다.

여기서, 9가지 토지피복항목 중 유역의 대부분의 면적을 차지하고 있는 활엽수림의 LAI를 기준으로, 평균 침엽수림은 3.85%, 혼효림은 0.27% 낮았다. 이에 따른 AET는 활엽수림을 기준으로 평균 침엽수림은 33.9%, 혼효림은 1.2% 낮았다. SM은 활엽수림에 비해 침엽수림은 7.0% 높았고, 혼효림은 5.3% 높았다. GW는 활엽수림에 비해 침엽수림은 평균 14.3% 높았으며, 혼효림은 7.1% 낮았다. 즉, LAI가 높을수록 증발산량은 증가하며, 이로 인해 토양수분은 감소하고 지하수 충전량은 조금 감소하는 것으로 보아 LAI와 물수지간의 관계성은 매우 높은 것을 알 수 있다.

증발산량을 추정함에 있어 앞에서 언급된 식 (4) 및 식 (5)와 관련하여 기공저항은 상수로 작용하므로, LAI값이 증발산량 추정에 많은 영향을 미치게 되며, 여기서 사용된 MODIS LAI는 증발산량을 포함한 물수지 모의 및 분석에 있어 중요한 인자임을 알 수 있다. SLURP 모형에 NDVI를 사용하여 수문모의를 수행했을 때와 비교하여 MODIS LAI는 사용이 편리하고 물수지 또한 잘 반영하므로, 충주댐

Table 5. Summary of the MODIS LAIs, AET, soil moisture, and groundwater recharge in deciduous forest, coniferous forest and mixed forest (2001-2004)

Year	Season	P (mm)	Dam inflow (mm)	MODIS LAI			AET (mm)			Soil moisture (%)			Groundwater recharge (mm)			
				D	C	M	D	C	M	D	C	M	D	C	M	
2001	Spr	29.4	30.6	2.77	2.63	2.78	175.4	86.3	108.8	15.3	16.8	16.6	25.6	44.9	27.8	
	Sum	514.5	174.4	6.06	5.77	5.90	183.0	152.5	221.7	20.8	21.6	21.3	182.2	183.4	150.4	
	Aut	152.7	97.8	4.04	3.79	3.91	105.0	85.7	110.5	18.3	19.3	18.9	102.5	105.5	74.5	
	Win	111.4	16.1	1.27	1.33	1.37	54.9	46.7	46.2	12.9	13.9	13.8	5.3	8.6	3.6	
	Total	807.9	318.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	315.5	342.4 (+8.5%)	256.3 (-18.8)
	Ave	-	-	3.53	3.38 (-4.3%)	3.49 (-1.1%)	518.3	371.2 (-28.4%)	487.2 (-6.0%)	16.8	17.9 (+6.5%)	17.6 (+4.8%)	-	-	-	
2002	Spr	332.7	120.7	3.47	3.32	3.59	301.6	101.7	215.2	17.0	19.6	18.8	87.2	159.8	109.9	
	Sum	1068.4	544.6	6.05	5.76	5.90	210.9	196.1	277.0	20.0	20.9	20.6	201.3	211.7	175.1	
	Aut	179.5	341.3	4.14	3.91	4.06	106.0	90.4	130.4	19.1	19.9	19.7	165.9	167.1	140.2	
	Win	130.4	29.3	1.37	1.53	1.55	50.6	38.7	51.3	14.8	15.7	15.8	23.9	24.4	19.5	
	Total	1711.0	1036.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	478.3	563.0 (+17.7%)	444.7 (-7.0%)
	Ave	-	-	3.76	3.63 (-3.5%)	3.78 (+0.5%)	669.1	427.0 (-36.2%)	673.9 (+0.7%)	17.7	19.0 (+7.3%)	18.7 (+5.6%)	-	-	-	
2003	Spr	405.4	249.2	2.97	2.99	3.18	271.5	113.0	192.4	16.8	18.6	18.4	148.6	196.9	172.8	
	Sum	992.9	462.3	6.05	5.81	5.89	212.1	197.4	273.3	19.5	20.4	20.0	246.4	261.1	224.6	
	Aut	408.0	397.3	4.03	3.74	3.88	125.7	102.7	152.2	19.2	19.9	19.6	225.3	231.7	206.1	
	Win	109.7	42.3	1.29	1.39	1.44	67.4	38.6	48.7	12.7	13.9	13.6	16.8	27.1	18.8	
	Total	1916.0	1151.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	637.1	716.9 (+12.5%)	622.4 (-2.3%)
	Ave	-	-	3.59	3.48 (-3.1%)	3.60 (+0.3%)	676.7	451.6 (-33.3%)	666.5 (-1.5%)	17.1	18.2 (+6.4%)	17.9 (+4.7%)	-	-	-	
2004	Spr	275.1	47.5	3.13	3.00	3.23	305.8	111.7	215.2	16.0	18.1	17.3	81.2	143.3	100.6	
	Sum	1089.1	657.1	6.08	5.76	5.91	208.6	191.7	278.0	19.9	20.8	20.3	256.3	272.3	236.0	
	Aut	207.7	104.0	4.10	3.86	4.03	114.1	90.3	143.7	17.6	18.3	17.8	150.7	153.4	121.7	
	Win	83.8	27.7	1.39	1.42	1.47	63.7	46.3	62.0	13.6	14.9	15.1	20.1	25.0	20.1	
	Total	1655.7	836.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	508.3	594.0 (+16.9%)	478.4 (-5.9%)
	Ave	-	-	3.67	3.51 (-4.4%)	3.66 (-0.3%)	692.2	440.0 (-36.4%)	698.9 (+1.0%)	16.8	18.0 (+7.1%)	17.6 (+4.8%)	-	-	-	
Ave	1522.6	835.6	3.64	3.50 (-3.8%)	3.63 (-0.3%)	639.1	422.4 (-33.9%)	631.6 (-1.2%)	17.1	18.3 (+7.0%)	18.0 (+5.3%)	484.8	554.1 (+14.3%)	450.4 (-7.1%)		

Spr: Spring, Sum: Summer, Aut: Autumn, Win: Winter, Ave: Average, D: Deciduous forest, C: Coniferous forest, M: Mixed forest, (%): The percentage dividing coniferous forest values and mixed forest values into deciduous forest values

유역과 같은 대규모 산림지역의 경우 MODIS LAI의 활용성은 더욱 증대 될 것이다.

6. 결 론

본 연구에서는 식생정보를 분석하기에 적절한 충주댐 유역(6,661.3)을 대상으로 2001년에서 2004년 기간 동안 식생정보를 대표하는 MODIS LAI 자료 및 수문 기상자료와 지형 자료를 이용하여 SLURP 모형을 통해 수문모의를 하였으며, MODIS LAI 자료의 사용이 증발산량 추정을 포함한 댐 유입량, 토양수분과 지하수 충전량 등 유역 물수지에 미치는 영향력을 분석하였다. 분석 결과는 다음과 같다.

1. 2001년부터 2004년 동안의 수문기상자료 및 댐 유입량 등을 이용하여 SLURP 모형을 통해 충주댐유역 물수지 모의한 결과 평균 모형 효율은 0.66, 4개년 평균 유출율은 53%로 나타났다. 증발산량 추정에는 Penman-Monteith 모듈을 사용하여 적절한 매개변수를 입력하여 모의하였다.
2. 연구에 사용된 MODIS LAI Product는 EOS Data gateway에서 다운받아 좌표변환 및 간단한 보정과정을 거친 후, 토지피복별 LAI값을 추출하였다. 그 결과 LAI는 NDVI와 마찬가지로 식생의 생육시기를 잘 반영하는 것을 알 수 있었다. 그러나 토지피복도를 제작하기 위하여 사용된 4월 Landsat ETM+ 영상은 활엽수림의 식생이 성장 초기 단계인 4월에 침엽수림과의 구분을 명확하게 하지 못한다는 점을 볼 때, 연중 변화가 거의 없는 침엽수림의 LAI 값이 잘 표현되지 못한 것을 알 수 있었다. 따라서 시계열 토지피복도를 활용하거나, 보다 정확한 2월에서 4월 그리고 10월에서 12월 까지의 LAI 영상 또는 LAI 값의 활용이 요구되어진다.
3. 모형을 통해 모의된 일별, 월별, 계절별, 연별 증발산량 결과를 보면, 유역 전체 평균 AET는 PET의 82.4%를 보였으며, 강수의 40.8%를 보였다. 유역 전체의 연평균 AET는 621.6 mm로 모의되었으며, 산림 지역을 중심으로 분석 한 결과 활엽수림, 침엽수림과 혼효림에서의 LAI 값이 3.64, 3.50와 3.63이었으며, 이에 따른 AET는 활엽수림 639.1 mm, 혼효림 631.6 mm 그리고 침엽수림 422.4 mm 순으로 모의되었다. 활엽수림을 기준으로 AET는 침엽수림에서 33.9%, 혼효림에서 1.2% 낮았다. SM은 침엽수림이 7.0%, 혼효림이 5.3% 높았다. GW는 침엽수림에서 14.3% 높았으며, 혼효림에서는 7.1% 낮았다. 이것으로 LAI가 높을수록 증발산량은 증가하며, 이로 인해 토양수분은 감소하고 지하수 충전량은 조금 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 식생이 많이 분포하는 산림 지역보다 논과 밭 지역에서 상대적으로 더 많은(30%) 증발이 일어났다. LAI값이 증가할수록 Penman-Monteith 모듈의 입력변수인 피복 저항이 감소하기 때문에 증발이 크게 모의되는 것이다. 평균적으로 산림에서의 LAI값이 2.1% 증가함에 따라 증발산량은 17.5% 늘어나는 것을 확인할 수 있었으며 크게는 36.2% 민감도를 보였다.

연구 결과 MODIS LAI는 증발산량을 포함한 물수지 모의 및 분석에 있어 중요한 인자임을 알 수 있다. SLURP 모형에 MODIS LAI를 적용함으로써 유역의 수문 모의 시

시계열적 공간 수문 변화를 분석함에 있어, 충주댐유역과 같은 대규모 산림지역의 경우 MODIS LAI의 활용성은 증대 될 것이다. 또한 향후 토지피복분류 영상 오차를 줄이기 위한 노력이 필요하며, 2월~4월 및 10월~12월의 보다 정확한 LAI 정보 수집도 요구되어진다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 1-9-3)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 국립산림과학원(2007) 극다중분광 영상자료의 산림정보해석 및 활용기법 개발, 국립산림과학원, pp. 53-62.
- 권형중, 신사철, 김성준(2005) NOAA/AVHRR 위성영상을 이용한 기후학적 물수지 분석. 한국농공학회지, 한국농공학회, Vol. 47, No. 1, pp. 3-9.
- 김병식(2003) SLURP 모형을 이용한 하천 유출량 모의. 석사학위논문, 인하대학교.
- 김병식, 김경탁, 박정술, 김형수(2006) 준 분포형 수문모형에서의 원격탐사자료의 적용 및 평가, 한국지리정보학회지, 한국지리정보학회, 제9권, 제2호, pp. 144-158.
- 김주훈, 김경탁(2005) LAI를 고려한 잠재증발산량 추정. 한국지리정보학회지, 한국지리정보학회, 제8권, 제4호, pp. 1-13.
- 김지연(2004) Landsat 위성영상에서 산출한 NDVI와 현장자료를 이용한 MODIS LAI 평가. 석사학위논문, 서울대학교.
- 박중화, 전택기, 나상일, 박민서(2005) NOAA AVHRR 데이터를 이용한 한반도의 순별 NDVI와 LAI 특성. 2005년도 학술발표논문집, 한국농공학회, pp. 649-654.
- 신사철, 태본정수, 김치홍(1995) NOAA-AVHRR data를 이용한 증발산량추정. 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제28권 제1호, pp. 71-80.
- 신사철, 황만하, 고익환, 이상진(2006) 식생 및 기온정보를 조합한 증발산량 산정을 위한 간편법 제안. 한국수자원학회지, 한국수자원학회, Vol. 38, No. 4, pp. 363-372.
- 유진웅(2003) SEBAL 모형을 이용한 증발산량의 추정. 석사학위논문, 서울대학교.
- 임혁진, 권형중, 장철희, 김성준(2004) SLURP 모형을 이용한 유출수문분석-소양강댐 유역을 대상으로-. 한국수자원학회지, 한국수자원학회, Vol. 37, No. 8, pp. 631-641.
- 장기창(2005) 산림지역 증발산량 추정을 위한 원격탐사 염면적지수 비교. 석사학위논문, 인하대학교.
- 채효석, 김성준, 정관수(1999) 격자기반의 일 증발산량 추정모형 개발. 한국수자원학회지, 한국수자원학회, Vol. 32, No. 6, pp. 721-730.
- 채효석, 송영수, 박재영(2000) Landsat TM 자료를 이용한 광역 증발산량 추정. 한국수자원학회지, 한국수자원학회, Vol. 33, No. 4, pp. 471-482.
- 하경자, 오현미, 김기영(2001) Inter-Annual and Intra-Annual Variabilities of NDVI, LAI and Ts Estimated by AVHRR in Korea. Korean Journal of Remote Sensing, Vol. 17, No. 2, pp. 111-119.
- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E., and Rasmussen, J. (1986a) An introduction to the european hydrological system - systeme hydrologique europeen 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. J. Hydrol., Vol. 87, pp. 45-59.
- Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E., and Rasmussen, J. (1986b) An introduction to the european hydrological system - systeme hydrologique europeen 2: Structure of a

- physically-based, distributed modelling system, *J. Hydrol.*, Vol. 87, pp. 61-77.
- Asrar, G., Kanemasu, E.T., and Yoshida, M. (1985) Estimates of leaf area index from spectral reflectance of wheat under different cultural practices and solar angle. *Remote Sens, Environ*, Vol. 17, pp. 1-11.
- Band, L.E., Patterson, P., Nemani, R., and Running, S.W. (1993) Forest ecosystem processes at the watershed scale: incorporating hillslope hydrology. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 63, pp. 93-126.
- Bastiaanssen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A., and Holtslag, A.A.M. (1998) A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. *J. Hydrology* 212-213, pp. 198-212.
- Beven, K., Calver, A., and Morris, E.M. (1987) *The Institute of Hydrology distributed model (IHDM)*, Institute of Hydrology Report, 97, Wallingford, U.K.
- Duan, Q., Sorooshian, S.S., and Gupta, V.K. (1994) Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *J. of Hydr*, Vol. 158, pp. 265-284.
- Franklin, S.E., Lavigne, M.B., Deuling, M.J., Wulder, M.A., and Hunt, E.R. (1997) Estimation of forest leaf area index using remote sensing and GIS data for modelling net primary production. *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 18, No. 16, pp. 3459-3471.
- Gusev, Ye. M. and Nasonova, O.N. (1998) The land surface parameterization scheme SWAP: Description and partial validation. *Global Planet. Change*, Vol. 19, pp. 63-86.
- Habets, F., Noilhan, J., Golaz, C., Goutorbe, J.P., Lacarrere, P., Leblois, E., Ledoux, E., Martin, E., Otle, C., and Vidal-Madjar, D. (1999) The ISBA surface scheme in a macroscale hydrological model applied to the Hapex-Mobilhy area. Part I: model and database. *Journal of Hydrology*, Vol. 217, pp. 75-96.
- Hong, S.Y., Kenneth, A.S., Newell, R. K., Clyde, W.F., Harlan, L.P., and William, J.W. (2004) Comparison of remote sensing and crop growth models for estimating within-Field LAI Variability. *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 20, No. 1, pp. 175-188.
- Immerzeel, W.W., Gaur, A., and Zwart, S.J. (2008) Integrating remote sensing and a process-based hydrological model to evaluate water use and productivity in a south Indian catchment. *Agric. Water Manage*, Vol. 95, No. 1, pp. 11-24.
- Kite, G. (1995) The SLURP model. In: Singh, V., (Ed.), *Computer Models of Watershed Hydrology*, Water Resources Publications: Highlands Ranch, CO. pp. 521-562.
- Kite, G.W., and Pietroniro, A. (1996) Remote sensing applications in hydrological modelling. *Hydrol. Sci. J.*, Vol. 41, No. 4, pp. 563-592.
- Kite, G. (2000) Using a basin-scale hydrological model to estimate crop transpiration and soil evaporation. *Journal of Hydrology*, Vol. 229, pp. 59-69.
- Kite, G. (2002) *MANUAL FOR THE SLURP HYDROLOGICAL MODEL Version 12.2.*, <http://www.hydrologic-solutions.com>.
- Liang, X., Lettenmaier, D.P., Wood, E.F., and Burges, S.J. (1994) A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *J. Geophys. Res.*, Vol. 99, No. D7, pp. 14,415-14,428.
- Myneni, R.B. and Williams, D.L. (1994) On the relationship between FAPAR and NDVI. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 49, No. 3, pp. 200-211.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970) River flow forecasting through conceptual models; Part 1 - A discussion of principles. *J. of Hydr*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.
- Nemani, R. and Running, S.W. (1989) Testing a theoretical climate-soil-leaf area hydrologic equilibrium of forests using satellite data and ecosystem simulation. *Agric Forest Meteorolo*, Vol. 44, pp. 245-260.
- Pierce, L.L., Walker, J., Dowing, T., Mcvicar, T., Hatton, T., Running, S., and Coughlan, J. (1993) Ecohydrological changes in Murray-Darling basin. III. A Simulation of regional hydrological changes. *J. Appl. Ecol*, Vol. 30, pp. 283-294.
- Quan, W., Samuel, A., John, T., and Andre, G. (2005) On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 94, pp. 244-255.
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., and Saxton, K.E. (1982) Estimation of soil water properties. *Trans. of the ASAE*, 25, pp. 1316-1320, 1328.
- Sellers, P.J., Tucker, P.J., Collatz, G.J., Los, S.O., Justice, C.O., Dazlich, D.A., and Randall, D.A. (1994) A global 1degree by 1 degree NDVI data set for climate studies. Part 2: the generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from NDVI. *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 15, No. 17, pp. 3519-3545.
- Spanner, M.A., Pierce, L.L., Running, S.W., and Peterson, D.L. (1990) The seasonality of AVHRR data of temperature coniferous forests: Relation to leaf area index. *Remote Sens, Environ*, Vol. 33, pp. 97-112.
- Sun, G., Noormets, A., Chen, J., and McNulty, S.G. (2008) Evapotranspiration estimates from eddy covariance towers and hydrologic modeling in managed forests in Northern Wisconsin, USA. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 148, No. 2, pp. 257-267.
- Verhoef, A. and Feddes, R.A. (1991) Preliminary review of revised FAO radiation and temperature methods. Report 16, Landbou-wuniversiteitWageningen,Wageningen.
- Wigmosta, M.L., and Lettenmaier, D.P. (1994) A distributed hydrologyvegetatio model for complex terrain. *Water Resources Research*, Vol. 30, pp. 1665-1679.
- EOS Data Gateway : <http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/ims/welcome/index.html>

(접수일: 2008.5.7/심사일: 2008.6.4/심사완료일: 2008.7.30)