

## 관측자료와 RHESSys 모형을 이용한 산림유역의 생태수문 적용성 평가 -설마천유역을 대상으로-

### Evaluation of Forest Watershed Hydro-Ecology using Measured Data and RHESSys Model -For the Seolmacheon Catchment-

신형진\* / 박민지\*\* / 김성준\*\*\*

Shin, Hyung Jin / Park, Min Ji / Kim, Seong Joon

#### Abstract

This study is to evaluate the RHESSys (Regional Hydro-Ecological Simulation System) simulated streamflow (Q), evapotranspiration (ET), soil moisture (SM), gross primary productivity (GPP) and photosynthetic productivity (PSNnet) with the measured data. The RHESSys is a hydro-ecological model designed to simulate integrated water, carbon, and nutrient cycling and transport over spatially variable terrain. A 8.5 km<sup>2</sup> Seolma-cheon catchment located in the northwest of South Korea was adopted. The catchment covers 90.0% forest and the dominant soil is sandy loam. The model was calibrated with 2 years (2007-2008) daily Q at the watershed outlet and MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) GPP, PSNnet and 3 year (2007~2009) daily ET data measured at flux tower using the eddy-covariance technique. The coefficient of determination (R<sup>2</sup>) and the Nash-Sutcliffe model efficiency (ME) for Q were 0.74 and 0.63, and the average R<sup>2</sup> for ET and GPP were 0.54 and 0.93 respectively. The model was validated with 1 year (2009) Q and GPP. The R<sup>2</sup> and the ME for Q were 0.92 and 0.84, the R<sup>2</sup> for GPP were 0.93.

**Keywords** : RHESSys, Evapotranspiration, Gross Primary Productivity, Streamflow, Measured Data

#### 요 지

본 연구에서는 RHESSys (Regional Hydro-Ecologic Simulation System) 모형과 관측 자료를 이용하여 유출량, 증발산량, 토양수분량, 총일차생산량과 순광합성량을 평가하고자 한다. 수문생태모형인 RHESSys는 물, 탄소 및 질소 순환과 지형 공간적 변화에 따른 물질이동을 모의할 수 있다. 대상유역은 설마천 유역(8.5 km<sup>2</sup>)으로 우리나라 북서쪽에 위치하고 있다. 유역의 90% 이상이 산림유역이고, 토양은 대부분 사양토이다. 2007~2009년의 관측 일유출량을 이용하여 유출량을 검·보정하였고, 증발산량은 에디 공분산 방법에 의한 플릭스 타워로부터 관측되었으며 토양수분은 신뢰할만한 실측자료를 바탕으로 모형의 보정(2007~2008) 및 검증(2009)을 실시하였다. 또한 지구의 탄소순환을 규명할 수 있는 식생의 순광합성량과 총일차생산량에 대한 모형의 검·보정은 Terra 위성의 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 센서를 이용한 산출물인 순광합성량과 총일차생산량 자료를 바탕으로 모형의 보정(2007) 및 검증(2008)을 실시하였다. 모의 결과 보정기간 동안의 상관계수와 Nash-Sutcliffe 모형 효율은 유출량은 0.74와 0.63이었고, 증발산량과 총일차생산량의 상관계

\* 한국수자원공사 K-water 연구원 수자원연구소 위촉선임연구원 (e-mail: shjin@kwater.or.kr)

Senior Researcher, Integrated Water Management Research Team, K-water Institute, Korea Water Resources Corporation, 49 Wanggol Gogaet-gil, Yusung-gu, Daejeon 305-730, Korea

\*\* 메사추세츠주립대학 토목환경공학과 박사후연구원 (e-mail: iamg@konkuk.ac.kr)

Post-Doctoral Researcher, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Univ. of Massachusetts Amherst, 222 Marston Hall, 130 Natural Resources Road, Amherst, Massachusetts 01003, USA

\*\*\* 교신저자, 건국대학교 사회환경시스템공학과 교수 (e-mail: kimsj@konkuk.ac.kr, Tel: 02-450-3749)

Corresponding author, Professor, Dept. of Civil and Environmental System Engrg., Konkuk Univ., 1 Hwayang-dong, Gwangjin-gu, Seoul 143-701, Korea

수는 각각 0.54와 0.93이었다. 모형 검정결과 유출량의 상관계수와 Nash-Sutcliffe 모형 효율 각각 0.92와 0.84였으며, 총일차 생산량의 상관계수는 0.93이었다.

**핵심용어** : RHESSys, 토양수분, 증발산, 유출, 순광합성량, 총일차생산량

## 1. 서 론

생태계 물 순환 과정에서 유역의 수문 변화를 모의하고 예측함에 있어 증발산량은 유출량 및 토양수분 등에 상당한 영향을 미친다. 증발산량은 순복사량, 지표와 대기의 온도, 토양의 습도, 풍속, 대기압에 의한 기상 상태 그리고 증발표면의 특성 등의 영향을 받는다. 수문 영향 평가 연구에 사용되는 수문학적 모형은 엽면적지수(Leaf Area Index; LAI) 변화의 영향과 기공저항(기후와 CO<sub>2</sub> 농도의 변화와 연관된), 토양수분의 변화 결과, 그리고 증발산과 유출의 영향을 드물게 고려하고 있다. 이유는 실측 증발산, 토양수분 자료의 부족과 LAI, 기공저항 부분을 잘 모의하지 않기 때문이다. 국내에서는 증발산량 및 토양수분 측정의 비용 및 장비의 한계로 인하여 유출량 외의 수문 성분에 대한 실측자료가 풍부하지 않았기 때문에, 유출량을 제외한 다른 수문성분의 실측자료를 이용한 검·보정에 관련된 연구 역시 제한적일 수밖에 없었다. 그러나 2007년부터 한국건설기술연구원 유량조사사업단에 의해 설치된 유역의 증발산량 및 토양수분의 측정이 동시에 이루어짐에 따라 비교가능한 양질의 실측자료가 축적되었다. 이러한 실측자료의 활용은 보다 신뢰도 높은 모형의 모의결과를 도출할 것으로 기대된다(Joh et al., 2010). 위성영상을 이용한 지역적 혹은 범 지구로 대상으로 한 순생산량을 산출하는 연구는 미비하며, 순생산량에 대한 현지 관측의 많은 시간적 투자와 노력, 측정의 어려움을 극복하고 넓은 공간적 범위를 대상으로 Terra MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 위성영상을 이용하여 정보가 부족한 지역이라든가, 전국 규모의 감시 등에 손쉽게 적용할 수 있다. 실제로 MODIS GPP (Gross Primary Production) 알고리즘은 전국 규모의 GPP 감시를 목적으로 개발되었다(Running et al., 2000). 순생산량은 탄소순환의 규명뿐만 아니라 생물권의 특성을 밝히고 (Nemani et al., 2003) 식량과 식물 생산량 산출에 중요한 인자로 사용 될 수 있다(Running et al., 2004). MODIS의 순생산량 산출물은 기상자료, 토지피복도, MODIS의 엽면적지수와 광합성 유효 복사량 비율 산출물들을 입력인자로 사용하여 MODIS NPP 알고리즘에 사용되는 환경 생태 모

델인 Biome-BGC 모형을 이용하여 얻게 된다(Running et al., 2000).

SVAT (Soil Vegetation Atmosphere transfer) 모형과는 달리 식생은 대부분의 수문 모형에서 명백히 고려되지 않음에도, 이 모형들은 여전히 증발산량을 산출하는 매개 변수로 식생정보를 사용한다. 토양수분이나 식생의 경험식을 사용하여 잠재증발산량을 산정하는 이러한 모형들은 실제 증발산량의 산정은 통계적으로 예측하여 얻게 된다. 수문 모형에서 식생 변화 요소를 모델링 하는 데 있어, 식생 정보 즉, 수문 모형의 물리적으로 제한된 값을 가지는 구성요소(증발산량 산정을 위해 사용되는 LAI와 기공저항 등)는 매우 중요하고 할 수 있다. 생태과정과 수문과정이 함께 고려되는 생태수문모형을 이용한 연구를 살펴보면 Sim-CYCLE terrestrial ecosystem model (Ito and Oikawa, 2000)은 광합성에 따른 토양수분의 변화를 설명하기 위하여 실제에 이르는 잠재증발산량의 비율을 사용하며, Frankfurt Biosphere Model (Lüdeke et al., 1994)과 잠재증발산과 토양수분의 경험적 함수의 요소를 이용하여 유사한 접근법을 사용한 CEVSA 모델(Cao and Woodward, 1998)의 유출은 토양 수분이 수용 용량에 도달했을 때의 잔여 수량으로 계산된다. 그러나 BIOME-BGC와 좀 더 완벽하고 수관층 차단과 증발산을 수문순환 과정에서 비교적 자세하게 다룰 수 있는 RHESSys와 같은 생태계 모델이 있다. 최근 버전은 Topog (Vertessy et al., 1996) and Macaque (Watson et al., 1999) 수문 모형들이 포함되어 상세한 탄소 변화와 식생 성장과 관련된 수문학적 구성 요소를 모의할 수 있다. 식생과 수문과 과정 양쪽 모두 중에서 상세한 항목들을 포함한 이 소수 모형들을 제외하고 대부분의 수문 모형은 식생 매개변수는 말할 것도 없이 변화 요소들을 표현하지 못한다.

RHESSys는 생태계생지화학모형의 일종이지만 유역 수문과정과 생태계물질순환과정을 통합적으로 모사하는 점에서는 다른 모형과 차별성을 가진다. RHESSys는 GIS (Geographic Information System)을 바탕으로 3차원 공간에서의 탄소, 물과 영양염의 흐름을 모사한다(Tague and Band, 2004). 수문과정과 식생성장 간의 상호작용을 고려하는 점에서 타 수문모형과 차별성을 가진다. 특히 유역

내의 토양수분분포는 식생의 다양성, 일차생산성, 토양생지화학적 과정의 공간적 이질성에 영향을 주며, 산림 유역 내 유출량의 상당 부분에 영향을 준다(Jun et al., 2005). RHESSys는 지속적으로 개발되어 유역의 생태계 과정을 모사하는 데에 적용되었다(Baron et al., 1998). 작은 산림유역의 탄소 순환을 평가하기 위해 RHESSys를 이용하여 수문생태학과 생물지구화학의 순환 연구를 하였다(Mackay and Band, 1997). 초원 생산성에 대한 다양한 토양 수분 조절의 공간분포도 연구를 위해 RHESSys를 이용하였다(Mitchell and Csillag, 2000). 캐나다 북쪽 평원(Creed et al., 2000)에서 뿐만 아니라, 태평양 북서부(Tague and Band, 2001)의 산림 유역에 적용되었다. 또한 Zierl et al. (2006)은 유럽 알프스 산맥의 여러 소유역에 RHESSys를 적용한 결과를 실측치와 비교하여 의미 있는 유출량, 적설량, 실제 증발산량을 예측하였다. 국내의 연구사례로 Hwang et al. (2008)등은 RHESSys를 광릉시험림유역에 적용하여 유출량, 토양수분, 증발산 및 순생태계탄소교환량 측정자료와 상호비교를 수행하였다.

본 연구는 축적된 실측자료인 유출량, 증발산량, 토양수분 자료와 Terra MODIS 영상을 이용한 산출물인 순광합성량과 총일차생산량 자료를 이용하여 수문과 생태과정을 고려한 생태수문모형인 RHESSys 모형을 이용하여 설마천유역을 대상으로 생태수문학적 측면에서 유역수문을 평가하고자 한다.

## 2. 본 론

설마천유역을 대상으로 생태수문모형을 이용하여 유역의 생태수문을 평가하기 위해 본 연구에서는 Fig. 1과 같

이 기상·수위자료, 공간자료(DEM, Wetness, 토양도, 임상도, 토지이용도, 투수계수분포도), 유역경계자료, 위성영상자료, 증발산자료, 토양수분자료를 구축하고, 이를 RHESSys 모형에 적용하여 실측 유출량, 증발산량, 토양수분량, 총일차생산량, 순광합성량을 각각 검·보정하고 산림유역의 생태수문을 평가하였다.

### 2.1 대상유역

본 연구에서는 수문생태 모형의 적용을 위해 수문요소들을 관측하는 한국건설기술연구원의 시범유역인 임진강 상류부의 설마천 유역을 대상유역으로 선정하였다(Korea Institute of Construction Technology, 2008). 유역내 수문관측망은 우량관측소 6개소(전적비교, 비룡포대, 범륜사, 빈배이, 설마리, 감마산), 수위관측소 2개소(전적비교, 사방댐) 및 기상관측소 1개소(비룡포대)가 설치되어 있으며 10분 단위로 관측·운영되고 있다. 활엽수림 지역에 Flux 타워와 토양수분이 관측되고 있다. 설마천유역은 동경 126° 52'~126° 58', 북위 37° 55'~37° 58' 사이에 위치한다(Fig. 2). 유역면적 8.5 km<sup>2</sup>, 유역연장 5.8 km, 유로경사 2%, 유역의 연평균 강우량은 1,210 mm이다. 전형적인 급경사 산지 사행하천이며 곡류하천이다. 유역의 90% 이상은 주로 20~30년 수령의 침엽수와 활엽수로 구성되어 있으며 표토는 얇은 편으로 함양능력이 대단히 낮고 산지 사면에 산재한 다량의 돌과 자갈은 집중호우 시 토석류를 유발한다(<http://kict.datapcs.co.kr>).

### 2.2 RHESSys 모형의 개요

RHESSys(Regional Hydro-Ecological Simulation System)는 식물, 대기 토양의 상호 작용에 의한 물, 탄소, 물질 순환

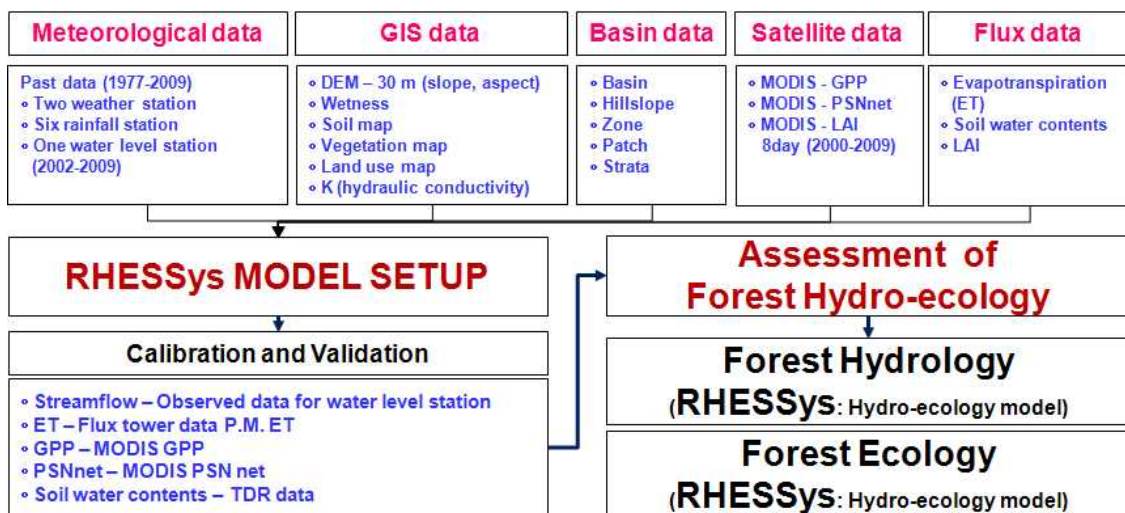


Fig. 1. Flow Chart of this Study

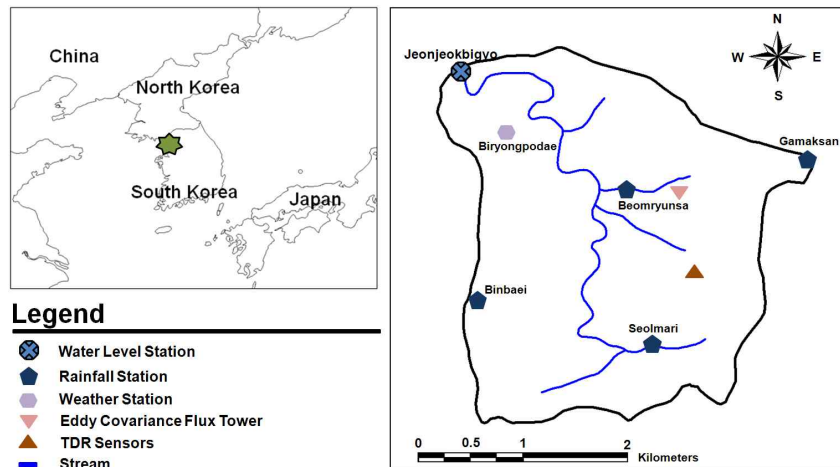


Fig. 2. Map of the Seolmacheon Watershed and the List of Hydrological Observation

과 이동을 유역규모 안에서 통합적으로 예측하기 위해 개발된 모형이다. 생지화학적 과정과 수문과정의 구동인자로서 일단위 유출량, 토양수분, 증발산과 같은 수문과정과 임목생장량, 순일차생산량, 토양호흡, 엽면적지수 등 생지화학적 과정에 대한 일 변화를 예측할 수 있다 (Lee et al., 2009). RHESSys의 초기 버전들은 Forest Biogeochemical Cycles (FOREST-BGC) canopy model (Running and Coughlan, 1988)을 critical meteorological forcing (Running et al., 1987)의 지형 수치 패턴과 명확하게 결합하기 위해 만들어졌고, 후에 TOPMODEL (Beven and Kirkby, 1979)의 수문학적 모형을 사용한 수문학적 과정과 산악미기상모형인 MITCLIM (Running et al., 1987)이 결합한 통합모형으로 Band et al. (1993)에 의해 처음 개발되었다(Tague and Band, 2004).

RHESSys는 Lumped 모형과는 달리 경관단위 사이에서 물의 연결성과 수직적 흐름을 세밀하게 묘사하고 있으며 수문과정과 식물생장을 포함한 생태계의 탄소·물질 순환 사이의 상호작용을 묘사할 수 있다. 따라서 광합성과 증발산 등의 과정과 이와 관련된 세부과정의 물리적인 특성을 분해하고 개별적으로 평가할 수 있다는 장점이 있다. 광합성을 계산하는 Farquhar 모형(Farquhar and von Caemmerer, 1982)은 효소(질소), 전자 전달(빛), 그리고 기공 전도도(빛과 물) 등, 이 세 가지에 기인한 제한성에 근거하여 광합성을 계산한다. 잠재증발량 계산에는 Penman-Monteith식(Monteith, 1965)을 적용한다. 기공전도도는 최대 기공전도도에서부터 여러 환경 제한요소(Radiation, CO<sub>2</sub>, Leaf Water Potential, Vapor Pressure Deficit)에 의해 조절된다고 가정하는 Jarvis' Multiplicative Model (Jarvis, 1976)을 이용하며, 엽면적지수 정보를 이용하여

수관전도도로 확장된다. 광합성과 증발산은 수관전도도 값을 공유한다(Lee et al., 2009). RHESSys와 BIOME-BGC 모두 토양유기물질분해의 표현은 대부분 CENTURY 모형을 기본으로 한다. RHESSys는 또한 질화 및 탈질화와 같은 N-cycling 과정을 모의하기 위해 CENTURYNGAS (Parton et al., 1996)의 방법을 사용한다.

### 2.3 입력자료 구축

본 연구에서는 분포모형인 RHESSys 모형의 적용성을 평가하기 위해서 검·보정기간 2007년부터 2009년의 3개년에 대해 Table 1과 같이 수치표고모형(Digital Elevation Model; DEM), 토양도, 토지이용도, 식생자료, 위성자료, 일 강우(mm), 일사량( $MJ/m^2$ ), 평균풍속(m/s), 평균상대습도(%) 등의 수문기상자료를 수집 및 구축하였다(Fig. 3). 현재 한국건설기술연구원의 시험 유역으로 운영(1995~현재)되고 있는 설마천유역에는 우량관측소, 수위관측소, 플럭스타워, 토양수분측정 및 기상관측소가 설치되어 양질의 수문자료를 얻고 있다. 본 연구에서는 한국건설기술연구원의 유량조사사업단으로부터 설마천유역의 수문자료, 증발산량자료, 토양수분자료를 제공받아 모형의 검보정에 이용하였다(Table 1). 2002년부터 2008년까지의 기상자료를 이용하여 입력자료를 구축하였다. 대상유역에서 측정되지 않는 기상자료는 인접한 동두천기상대의 자료를 이용하였으며, 일사량은 기상청에서 자료를 제공하지 않으므로 동일한 기간의 일조시간과 위도 등을 이용하여 일사량을 계산(Yoon, 2005)한 값을 이용하였다. 공간자료는 국토지리정보원에서 제공하는 격자크기 30m DEM을 이용하였으며, 물의 수평적 흐름을 모의하기 위해 경사와 수분기여면적이 포함된 수분지수를 입력자료로

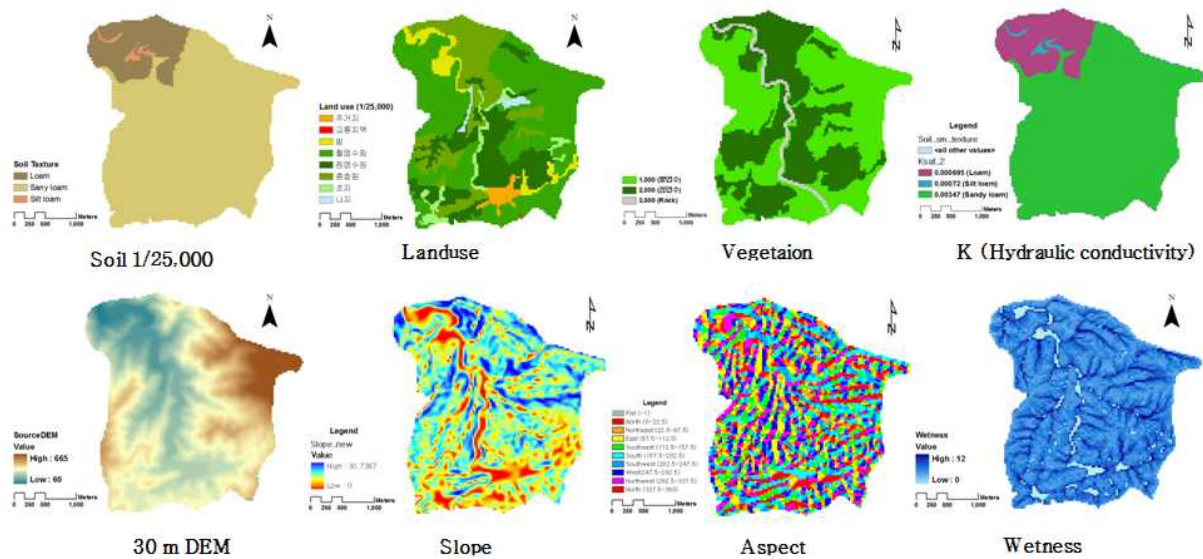


Fig. 3. GIS Data of the Study Watershed

Table 1. Data Sets for RHESSys Model Parameterization

Data type	Source	Scale/Period	Data Description / Properties
Topography	Korea National Geography Institute	1/5,000	Elevation
Soil	Korea Rural Development Administration	1/25,000	Soil classifications and physical properties such as bulk density, texture, porosity, wilting point, field capacity and saturated hydraulic conductivity
Land cover	Landsat TM satellite image	30 m	Land cover classifications such as water, forest, urban, grassland, bare ground, paddy and upland crop
Vegetation information	Ministry of Environment	30 m	Forest classification (3 classes)
Weather	Korea Meteorological Administration	1977~2009	Daily precipitation, mean, max., min., temperature, wind speed, relative humidity and sunshine hour
Streamflow	Korea Institute of Construction Technology	2007~2009	Daily observed streamflow
Evapotranspiration	Korea Institute of Construction Technology / Yonsei Univ.	2007~2009	Daily evapotranspiration data at mixed forest area
Soil water content	Korea Institute of Construction Technology	2007~2009	Daily soil water content
Photosynthesis	Terra MODIS satellite image	2000~2008	Photosynthetic Productivity (8days) Gross Primary Production (8days)

구축하였다. 식생분포도는 산림청의 제4차 전국산림자원 조사에 의하여 제작된 임상도를 이용하여 수문환경 관리 분야에서 사용되는 침엽수림(침엽수관점유면적 또는 입목분수 비율이 75% 이상인 임분), 활엽수림(활엽수관점유면적 또는 입목분수 비율이 75% 이상인 임분), 암석지역 3가지 항목으로 재분류하였다. 토지이용 자료는 가장 최근에 제공한 Landsat TM 위성영상(2004년)을 수집 및

분석하여 주거지, 교통지, 밭, 활엽수림, 침엽수림, 혼효림, 나지 및 기타 초지의 8개 항목으로 분류하였으며, 농촌진흥청에서 제공하는 1:25,000 정밀토양도를 이용하여, 토양 종류에 따른 공극률, 포장용수량, 위조점, 토양 유효 깊이 속성을 모형의 입력자료로 사용하였다. 토양과 같은 다공성 매질은 관개나 강우 또는 증발산에 의한 물의 이동이 발생하며, 이는 침투, 투수 및 모세관 이동으로 정의 될 수



있고, 이들의 이동속도는 투수계수에 의하여 결정된다. 따라서 투수계수를 이용하여 그 토양 내에서의 물의 이동 특성을 해석 할 수 있다(Huh, 2008). 본 연구에서는 모형의 입력 자료로서 Clapp and Hornberger (1978)의 포화 투수계수를 이용하였다(Table 2).

## 2.4 MODIS 자료 구축

MODIS는 지구 생물권 활동에 관한 자료를 제공하는 미항공우주국(NASA) Terra EOS (Earth Observation System)위성의 주센서로 해양, 육상과 대기 분야에 적용이 가능한 다목적 센서이다. MODIS는 현재 36개의 밴드를 이용하여 다양한 대기, 지표, 해양관련 다양한 정보들을 제공하고 있다(Shin et al., 2010). NASA의 EOS Data Gateway는 MODIS 영상을 비롯하여 EOS 프로그램을 통해 제작한 다양한 위성영상자료를 대기, 빙하, 육지, 대양, 자료보정 분야별로 제공하고 있다(Park et al., 2006). 임의의 지역의 시·공간적 특성을 효과적으로 관찰할 수 있는 주기해상도와 공간해상도를 보유하고 있다. MOD17은 일차생산성모형과 원격탐사기법을 결합함으로써 범 지구의 탄소순환에 대한 규명을 위해 Terra 위성의 MODIS 센서를 이용하여 식생에 대한 1 km 공간해상도와 8일 누적 평균 총 일차 생산량(Gross Primary Production; GPP,  $gC/m^2/8days$ )과 순광합성량(Photosynthetic Productivity; PSNnet,  $gC/m^2/8days$ ) 산출물을 제공하고 있다(Running et al., 2000)

일차생산모형은 생계호흡(Maintenance Respiration; MR)과 성장호흡(Growth Respiration; GR)은 매일의 MODIS LAI로부터 Biomass를 구하여 식물조직의 일 년 동안의 상대적 성장 관계를 이용한다. 이러한 상대 성장 관계들은 폭넓은

문헌으로부터 얻어졌으며, 통합된 다양한 변수들이 Biome-BGC 모델에 적용된다. 식생의 일차생산성과 관련하여 MODIS는 Monteith (1977)가 제안한 빛 이용효율(Light Use Efficiency, LUE)모형을 이용하여 GPP와 NPP 자료를 제공한다(Lee et al., 2011). Monteith (1972)의 본래의 형식은 간단한 환경효소의 영향력에 의하여 성장효율이 감소된다는 최대 복사에너지 변환효율 이론이다. 초기에는 최대복사에너지의 효율이 식물 종류의 적용에 있어서 하나의 공통된 상수로 가정되었지만 후에 식물의 종류에 따라서 최대 효율이 중요한 차이를 보인다고 밝혔다. 다만, 복사이용효율의 제한인자를 고려하는 방식에는 각 알고리즘마다 차이를 보이며, MODIS 일차생산성 알고리즘은 전 지구 규모의 적용을 목적으로 하였기에 온도와 수증기압 차이(Vapor Pressure Deficit; VPD)을 제한인자로 고려하는 단순한 방식을 취하였다. APAR는 NPP보다 GPP에 대한 관계가 더 가깝다고 제안되었다. GPP는 식물의 호흡소비를 제거하기 전의 광합성 작용을 통한 식생의 총 생산량이다. 입사되는 광합성 유효 복사량(Photosynthetically Active Radiation; PAR)의 흡수비율과 식물표면에 대한 입사되는 태양복사에너지 반사율이 높은 관계가 있으며 이러한 관계에 대한 예측 이론은 검증되었다(Sellers et al., 1992).

MODIS GPP 영상은 8일단위의 최대 광합성유효복사 비율(Fraction of Photosynthetically Active Radiation; FPAR) 값과 일 단위의 기상자료를 이용하여 일 단위의 GPP를 계산한 후 이를 8일 단위의 누적 GPP로 변환한 값이다. 알고리즘에 대한 자세한 소개는 MODIS GPP 알고리즘 개발을 담당한 미국 몬타나대학의 Numerical Terradynamic Simulation Group (NTSG) 연구실에서 제공하는 MOD17 GPP/NPP User's Guide에 나와 있다(Heinsch et al., 2003). Fig. 4는 MODIS GPP와 PSNnet의 알고리즘을 나타낸다.

$$GPP = [\epsilon] \times [FPAR \cdot IPAR] \quad (1)$$

$$\epsilon = \epsilon_{max} \times T_{min} \times VPD \quad (2)$$

$$IPAR = 0.45 \times R_s \quad (3)$$

여기서,  $\epsilon$ 은 식물의 복사사용효율이며,  $\epsilon_{max}$ 는 최대복사 사용효율,  $T_{min}$ 은 일최저기온,  $VPD$ 는 포차,  $R_s$ 는 전천 단과일사량이며,  $FPAR$ 는 식물이 흡수한 PAR의 비율로서 0에서 1의 값을 갖는다. 즉, 식물이 흡수한 광합성유효 복사가 많을수록, 식물의 복사사용효율이 높을수록, 총일차생산성은 증가한다.  $\epsilon_{max}$ 는 식생형에 따라 상이한 값을 가진다(Field., 1995; Prince and Goward, 1985; Turner et

Table 2. Hydraulic Conductivity (Clapp and Hornberger, 1978)

Soil Texture	$K_{hsat} (cm\ s^{-1})$
Sand	$1.76 \times 10^{-2}$
Loamy sand	$1.56 \times 10^{-2}$
Sandy loam	$3.47 \times 10^{-3}$
Silt loam	$7.20 \times 10^{-4}$
Loam	$6.95 \times 10^{-4}$
Sandy clay loam	$6.30 \times 10^{-4}$
Silty clay loam	$1.70 \times 10^{-4}$
Clay loam	$2.45 \times 10^{-4}$
Sandy clay	$2.17 \times 10^{-4}$
Silty clay	$1.03 \times 10^{-4}$
Clay	$1.28 \times 10^{-4}$

al., 2003).  $T_{min}$  과  $VPD$ 에 의해 조절된다고 가정한다(Eq. 2). 또한, IPAR(전천단파일사량의 45%)는 일률적으로  $R_s$ 의 45%에 해당한다고 가정한다(Eq. (3)). 한편,  $T_{min}$  과  $VPD$ 에 따라서 기공의 개폐가 결정되는 상한, 하한을 가진 선형 반응식을 사용함으로써, 기상조건에 따라 복사사용효율이 최대값( $\epsilon_{max}$ )에서 0까지 변화하는 양상을 모사한다. Eq. (2)의  $\epsilon_{max}$ 와  $T_{min}$ ,  $VPD$  등의 기공개폐를 결정하는 상·하한 임계값 등은 BPLUT (Biome Property Look-Up Table)의 식생형에 따라 결정된 상수값을 적용한다(Heinsch et al., 2003).

PSNnet은 잎과 뿌리들의 자가 호흡으로 일 주기로 계산된다. 매일 주기 MR을 계산하기 위해서는 BPLUT에 5가지 매개변수들이 필요하다. 이 매개 변수들은 upon leaf 또는 fine root mass, 온도 20°C의 MR 그리고 일 평균기온에 의해 영향을 받는다. PSNnet은 GPP와 MR로 계산된다(Eq. (4)).

$$PSNnet = GPP - LeafMR - FrootMR \quad (4)$$

*LeafMR*: 잎의 유지호흡량, *FrootMR*: 뿌리의 유지호흡량(kgC/kgC) PSNnet는 GPP와 같이 일 단위의 PSNnet 8일 계산한 후 이를 8일 단위의 누적 PSNnet로 변환한 값이다(Heinsch et al., 2003).

## 2.5 모형의 검·보정 매개변수

본 연구에서는 모형의 보정을 위해 2007년부터 2008년까지의 2년간의 일 유출량 자료를 이용하여 모형의 보정을 실시하였다. RHESSys는 보통 각 식생분포에 따른 토양별 투수 계수 K, 깊이에 따른 투수 계수의 감쇄율인 m을 이용하여 보정한다(Table 3). 각 매개변수들의 변화에 따른 유출현상의 변화를 살펴보면 유출 관련 매개변수인 투수계수는 값이 증가할수록 총유출량이 증가하였다. RHESSys 구동을 위해선 식생과 토양의 탄소 및 질소, 수분함량에 대한 초기값이 필요하다. 하지만 실측값에 근거하여 모든 초기값을 결정하기 어려운 관계로 RHESSys에서는 생태계의 탄소이득이 안정화되는 정도에서 모형의 초기값을 결정하는 기능을 제공하는 spin-up 과정을

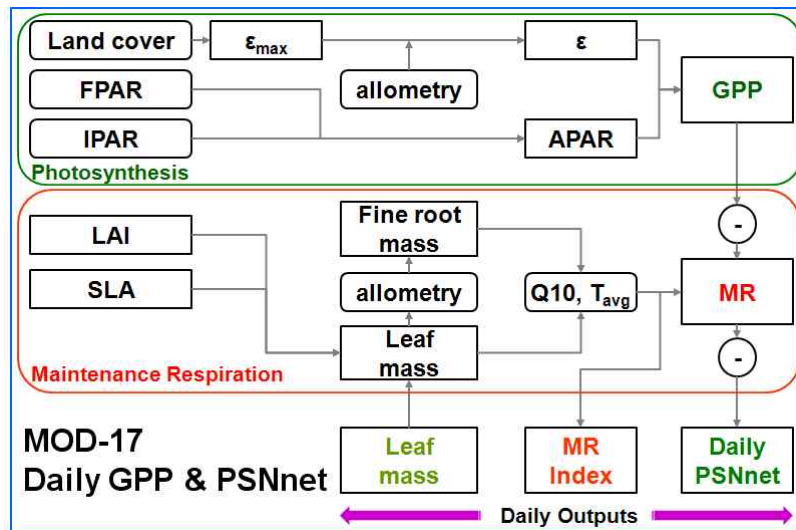


Fig. 4. MOD17 Algorithm (Heinsch et al., 2003)

Table 3. The Calibrated RHESSys Model Streamflow Parameters (Lee et al., 2009)

Parameter	Description	Units	Default	Min. value	Max. value
Ksat_0	Saturated hydraulic conductivity at surface	Metres/day	1	0.02	5
m	Decay of saturated hydraulic conductivity with saturation deficit	1/(metre of water)	1	0.01	10
porosity_0	Porosity at soil surface	Range(0-1)	0.435	0.395	0.5
porosity_decay	Porosity scaling parameter with depth - porosity decays	1/meter	4000	1	1000

이용해 모형의 초기화를 수행하였고, 안정화에 소요된 기간은 450년이였다. 초기화된 RHESSys를 2002년에서 2009년까지 구동한 후, 실측 자료와 비교하였다.

식생 성장에 영향을 미치는 매개변수는 전체 식물 사망률, 건중량단위엽면적지수(Specific Leaf Area; SLA,  $m^2kg/C$ )와 잎의 탄질비(C:N ratio), 엽내 Rubisco의 질소함량과 광합성의 산물의 분배계수 등의 매개변수를 분석하였다 (Table 4). 전체 식물 사망률(Whole Plant Mortality; WPM,  $1yr^{-1}$ , 전체 나무 사망률, 가지치기, 기타 등을 포함)은 해마다 죽고 소비되어지는 생태계 탄소 저장소의 위·아랫부분이 대상이다. 모형에 적용한 산림의 값(0.005)은 임학 연구원들에 의해 실행되고 진행 중인 대규모 포장시험에 근거하고 있으며, 대부분의 가지와 나무 사망률을 나타내기 위해 고려되었다. 질소에 대한 탄소의 비율(C:N)은 잎의 영양분 농도, litter, fine root, live wood와 dead wood pool을 묘사하기 위해 사용된다. 일반적으로  $mg/g$ 으로 측정된 C:N은 흔히 측정되고 식물 질소의 요구, 분해 호흡에 대한 강한 조절을 가한다. 잎의 질소에 대한 탄소 비는( $C:N_{leaf}$ ,  $kgC/kgN$ ) 3가지 중요한 요인들을 결정한다. 질소는 구조적인 LAI, 광합성적인 조직에서 이용할 수 있는 질소의 양, 그리고 잎의 호흡률을 요구한다. 전도도율과 제한에서 잎의 가스 교환은 상응하는 기공과 표피의 전도도 그리고 연속하는 잎의 경계층의 전도도와 같이 전기적인 순환 분석(Nobel, 1991)을 통해서 모의시험 되었다. 잎의 전도도를 조절하는 매개변수는 물의 손실과 탄소 흡수를 조절하는데 있어서 중요하다. 이러한 부분에서, 기공의 전도도, 표피의 전도도, 경계층의 전도도의 최대치에 대한 매개변수화를 고려해야하고 기공의 구멍을 막는 2가지 주요한 매개변수인 잎의 잠재 수분량

(Leaf Water Potential; LWP)과 증기압 손실들을 고려해야한다.

Pritchard et al. (1999)은 80개 이상의 검증된 연구로부터 결과를 요약하고,  $CO_2$ 가 환경에 많은 영향을 줄 때 24%의 식생에 대하여 잎 면적이 평균적으로 증가하는 것을 발견하였다. 79개의 검증된 연구와 통계상의 결과를 분석한 Curtis and Wang (1998)은 높아진  $CO_2$  조건에 응답하는 59개의 식생 종류로부터 지표 생물량의 31% 증가, 영양분 강조 상태의 기본생물량 16% 증가, 기공저항의 11% 감소를 제시한다. 증산의 감소와 탄소 흡수(높은  $CO_2$  조건에서)의 증가는 수분과 토양수분량이 증가되는 것을 암시한다. 많은 연구에서  $CO_2$ 가 증가하는 필요조건들은 높은 토양수분을 가진다는 것으로 간주한다(Knapp et al., 1996; Fredeen et al., 1997; Lutze and Gifford, 1998; Morgan et al., 1998; Volk et al., 2000). 최대 기공 전도도(Maximum stomatal conductance;  $g_{smax}$ ,  $m/s$ )는 환경적인 조건의 제한이 없을 때 전도도의 비율을 설정한다. 모두 같은 값의  $g_{smax}$ 에 도달한 3가지의 보고서들은 자연적인 식생 유형사이에서 크게 다르지 않다(Kelliher et al. 1995; Kömer 1995; Schulze et al. 1994). Kelliher et al. (1995)로부터 모든 생물군에 대한 0.006  $m/s$ 에 대한 가장 최근의 평가를 채택했다. LAI는 canopy physiology의 대한 모든 측면에서 강한 영향은 끼치며 또한 SLA와 leaf carbon ( $kgC/m^2$ )의 생산에 대해서 계산되어 진다. SLA는 질량단위당 잎 면적으로 정의할 수 있는데 잎 면적은 풀잎처럼 얇고 연한 잎 일 경우 SLA는 밀집된 침엽수의 잎보다 높아지게 된다. SLA는 또한 기본 잎 면적마다 잎 질소의 내용물을 계산하기 위해서  $C:N_{leaf}$ 와 함께 사용된다. SLA에 대한 정의는 탄소의 건조무게가 아닌 질량단위이다.

Table 4. The Calibrated RHESSys Model Eco-physiological Parameters (White et al., 2000)

Parameter	Description	Units	DBF	ENF
epc.g_l_smax	Maximum stomatal conductance	meters/s	0.006	0.006
epc.proj_epc.proj_sla	Specific leaf area	meters <sup>2</sup> /kgC	32.0	8.2
epc.leaf_cn	Carbon:nitrogen ratio of leaves	kgC/kgN	25.0	42.0
epc.froot_turnover	Annual fine root turnover fraction (percent carbon per year)	range(0-1)	1.00	0.26
epc.livewood_turnover	Annual livewood turnover fraction (percent carbon per year)	range(0-1)	0.70	0.70
epc.mortality	Vegetation loss through mortality	range(0-1)	0.01	0.005
epc.froot_cn	Carbon:nitrogen ratio for fine roots	kgC/kgN	48.0	58.0
epc.alloc_frootc_leafc	Ratio of new fine root carbon to new leaf carbon allocation	dimensionless	1.2	1.4

DBF: Deciduous Broadleaf Forest, ENF: Evergreen Needle leaf Forest.



Rubisco(이산화탄소로 묶여있는 촉매작용을 하는 효소)는 아마도 세계에서 가장 풍부한 단백질일 것이다. 그러므로 Rubisco 안에서의 잎의 질소에 대한 비율(Percent of Leaf N in Rubisco; PLNR, %) 카르복시화에 대한 잠재적 비율에 의해 통제되며 또한 이는 캐노피 동화작용에 대한 주요 통제이다.

## 2.6 수문인자 검·보정 결과

모형의 목적함수로는 Nash-Sutcliffe (Nash and Sutcliffe, 1970) 모형효율, 결정계수를 사용하였다. 각각의 사상들에 대한 매개변수의 평균값들을 통해 2007년부터 2008년까지의 2년간의 일 유출량 자료를 이용하여 모형의 검정을 실시하였다. 유역출구의 유출량의 결과는 Fig. 5(a)와 같으며 검증기간에 대한 강우-유출 모의는 그 양과 경향을 잘 반영하고 있다. Fig. 5와 같이 보정기간 일 유출량의 관측치와 모의치의 상관성을 분석한 결과 Nash-Sutcliffe의 모형효율계수는 0.63, 결정계수는 0.74이고, 검정 결과, Nash-Sutcliffe의 모형효율계수는 0.84, 결정계수는 0.92로 높은 상관성을 나타내었다(Table 5).

증발산량에 대한 검·보정은 혼효립에서 측정하고 있는 플렉스타워 에디공분산 시스템을 이용하여 측정된 자료를 이용하였고, 토양수분에 대한 검·보정은 설마천 유역 사양토(덕산 토양통) 지점에서 TDR (Time Domain Reflectometry) 센서를 이용하여 측정된 자료를, 유출량은 유역출구지점의 자료를 이용하여 실시되었다. 이러한 수문성분은 모두 한국건설기술연구원 유량조사사업단에 의해 실측

되고 있으며, 특히 증발산량은 연세대학교 대기과학과에서 후처리 및 보정된 자료(Kwon et al., 2009)를 이용하였다.

모형의 유출량과 증발산량, 토양수분의 모의 결과 토양수분은 TDR 센서의 일 단위 토양수분 값과 RHESys 모형의 일 단위 토양수분 예측값을 비교해 본 결과 Table 6과 같고, 성장 시즌인 여름철의 토양수분 예측값은 실측과 상당히 유사한 값을 모의하고 있다. 그러나 RHESys 모형의 예측값이 실측보다 일변화를 단순하게 예측하고 전체적으로 과대평가되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5(a)에서 Fig. 5(c)까지는 각각 유출량, 토양수분 및 증발산량에 대한 실측치와 모의치의 수문곡선의 비교를 나타낸 것이다. 보통 수문 모형에서는 관측 자료의 한계에 의해 일 유출량 모의결과와 관측유출량을 이용하여 모형의 검·보정을 한다. 본 연구에서는 유출량뿐만 아니라 증발산량, 토양수분량의 수문자료와 순광합성량과 총일차생산량의 생태자료를 관측과 원격탐사 자료를 이용하여 모형의 검·보정을 실시하였다. 수문인자와 생태인자는 서로 유기적으로 영향을 준다. 특히 수목의 증산은 토양 수분이 식물의 뿌리를 통해 목부조직, 잎과 환원되는 과정이라 할 수 있으므로 수목의 증산에 의해 토양수분의 손실량에 영향을 주며 이것은 결국 유역 내의 유출량을 결정하는 작용을 하게 된다. 따라서 생태에 영향을 주는 많은 매개변수들 중 중요한 매개변수는 Table 4에 제시하였다. 증발산의 경우 플렉스타워에서 측정된 일 단위 증발산을 RHESys 모형의 일 증발산과 비교해 본 결과, 여름을 과소 추정되는 것을 제외하고 유의한 영향

Table 5. Information on Calibration and Verification Periods for Streamflow

Period	Observation			Simulation		Statistical summary		Note
	P (mm)	Q (mm)	QR (%)	Q (mm)	QR (%)	E	R <sup>2</sup>	
2007	1262.2	761.0	0.60	736.4	0.58	0.59	0.59	C
2008	1498.3	941.6	0.63	1103.2	0.74	0.67	0.89	C
2009	1351.7	1001.4	0.74	831.8	0.62	0.84	0.92	V

P: Precipitation, Q: Streamflow, QR: Runoff Ratio, E: Nash-Sutcliffe Model Efficiency, RMSE: Root Mean Square Error, R<sup>2</sup>: Coefficient of Determination, C: Calibration, and V: Verification

Table 6. Information on Calibration and Verification Periods for Soil Moisture and Evapotranspiration

Period	P (mm)	SM (%)			ET (mm)			R <sup>2</sup>		Note
		Period	Obs.	Sim.	Pedriod	Obs.	Sim.	SM	ET	
2007	1262.2	Jun.-Dec.	26.0	25.6	Sep.-Dec.	109.0	113.5	0.37	0.53	C
2008	1498.3	Jan.-Dec.	22.9	25.0	Jan.-Dec.	471.7	473.8	0.52	0.54	C
2009	1351.7	Jan.-Dec.	23.6	21.5	Jan.-Dec.	408.6	471.0	0.18	0.49	V

P: Precipitation, SM: Soil Moisture, ET: Evapotranspiration, R<sup>2</sup>: Coefficient of Determination, C: Calibration, and V: Verification.

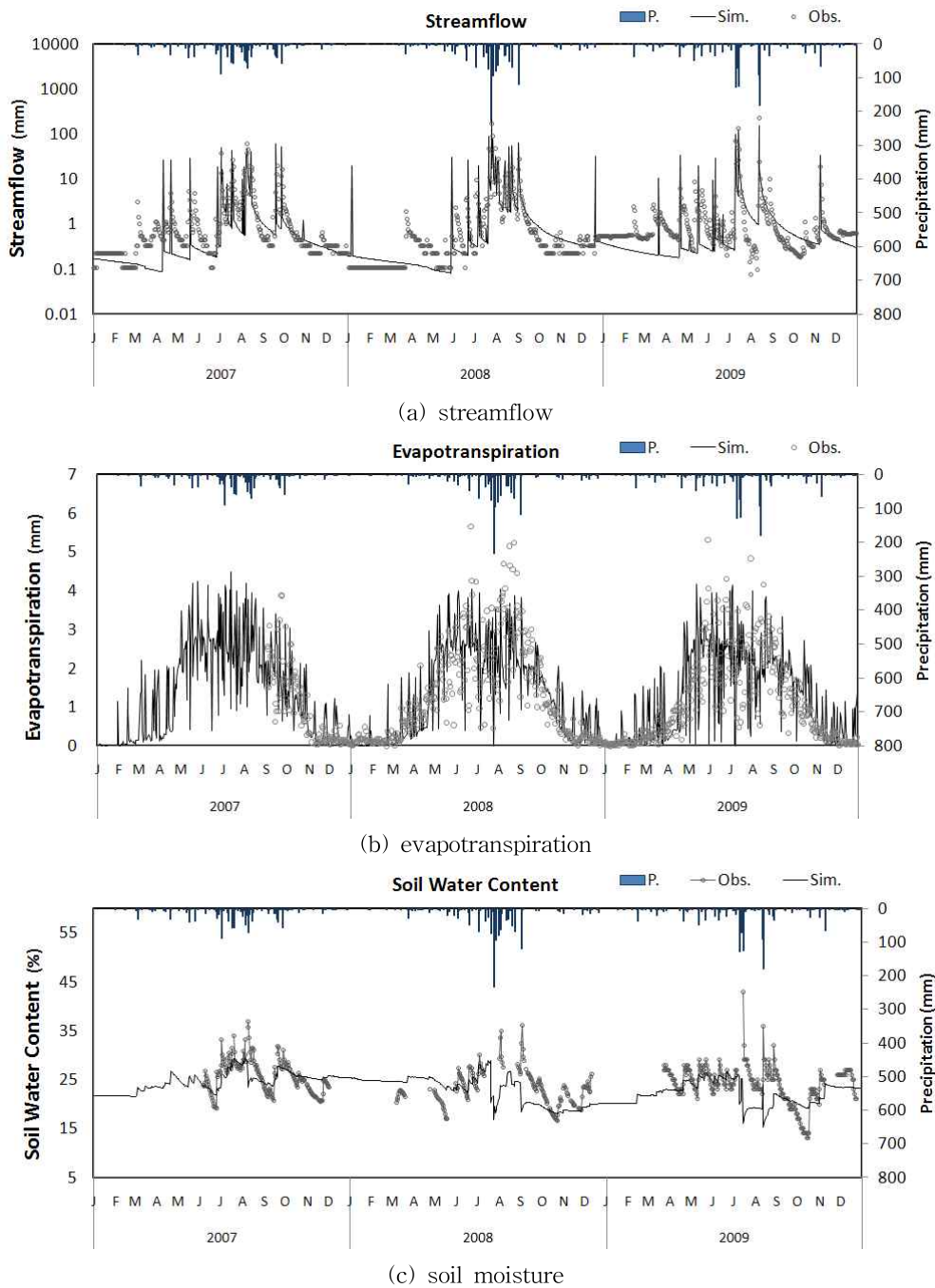


Fig. 5. Comparison of Observed Versus Simulated for (a), (b) and (c)

을 나타냈다. 봄, 가을, 겨울에 각각 17.7%, 20.2%, 81.7%로 모의치가 추정되었고 과소 추정된 여름은 -6.2% 편차를 보였다.

모형의 증발산은 매일의 강수 발생시간과 VPD에 따라 계산되는 지표 및 식생에서의 증발과 임관에 의한 차단량, 눈의 승화량 및 식생의 증산량을 포함한다. 따라서 지표 및 식생에서의 물의 이동과 밀접한 연관이 있는 토양 수

분과 증산량의 영향을 크게 받는다.

## 2.7 생태인자 검·보정 결과

Terra 위성의 MODIS 센서를 이용하여 식생에 대한 1 km 공간해상도와 8일 누적 평균 총 일차 생산량(Gross Primary Production; GPP,  $gC/m^2/8days$ )과 순광합성량(Photosynthetic Productivity; PSNnet,  $gC/m^2/8days$ )

산출물과 모형의 모의 결과를 비교하였다. 순광합성량은 결정계수 보정과 검정결과 각각 0.55, 0.38로 MODIS 순광합성량이 RHESys 모형의 예측치보다 과대치를 보이고 있다. 총일차생산량의 경우 RHESys 모형의 예측치가 과대 추정되고 있지만 월별 모의 패턴을 비슷한 경향을 갖는 것을 알 수 있으며 보정과 검정결과 각각 결정계수 0.93, 0.93으로 나타났다. 연구 대상구역의 모형 모의 결과는 Table 7, Figs. 6, 7과 같다. 순광합성량과 총일차생산량은 증발산량과 같이 모형에서 강수가 있을 시 증산활동을 이루어지지 않게 모의된다. 따라서 Fig. 6(a)와 같이 강수가 집중된 여름철 7월과 8월에 순광합성량이 5월에 비해 낮게 모의되는 것을 확인할 수 있으며 따라서 Table 7

에서 모의치가 원격탐사로부터 관측된 MODIS 자료보다 낮은 값을 갖는 것을 확인할 수 있다.

### 3. 결론

본 연구에서는 RHESys 생태수문모형을 이용하여 산림 구역의 생태수문학적 거동을 평가하고자 하였다. 설마천 구역(8.5km<sup>2</sup>)을 대상으로 실측 유출량, 증발산량, 토양 수분과 Terra MODIS 위성영상을 이용한 산출물인 순광합성량과 총일차생산량 자료를 바탕으로 모형의 적용성 평가를 위하여 적용하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 식물과 대기, 토양의 상호작용에 의해 생태계의 탄

Table 7. Information on Calibration and Verification Periods for PSNnet and GPP

Period	P (mm)	PSNnet		GPP		R <sup>2</sup>	
		MODIS	Sim.	MODIS	Sim.	PSNnet	GPP
2007	1262.2	780.8	524.6	1192.9	1395.8	0.55	0.93
2008	1498.3	807.7	500.0	1206.5	1373.0	0.38	0.93

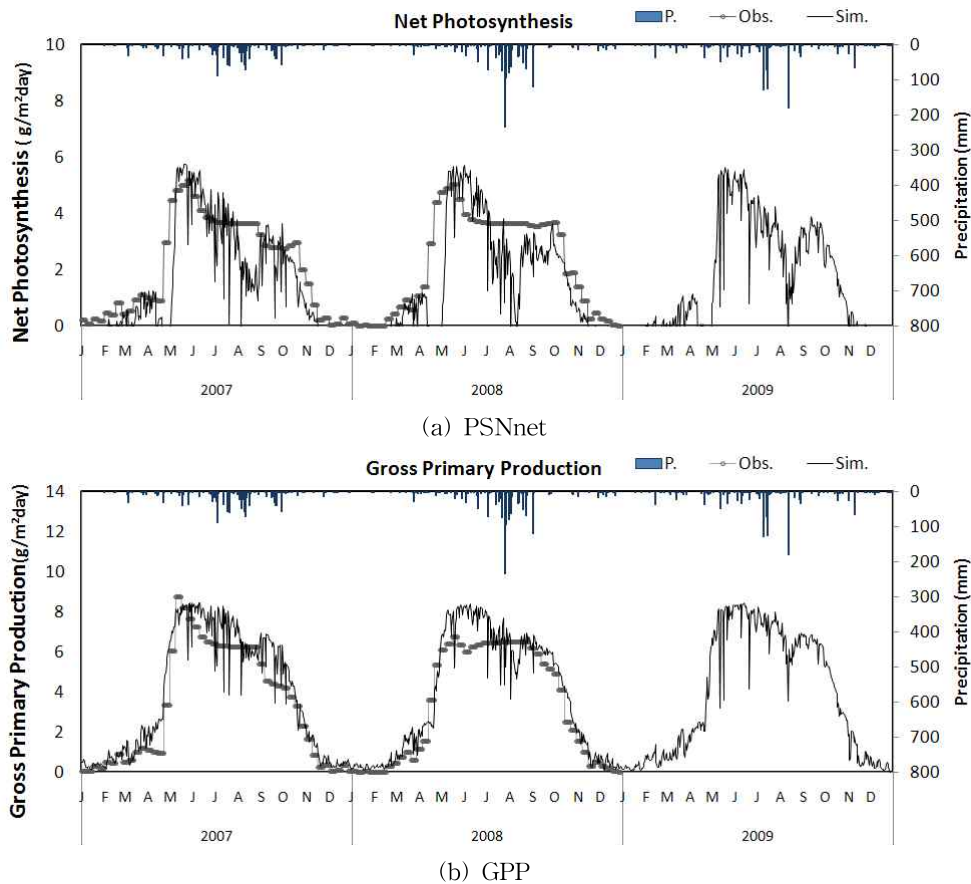


Fig. 6. Comparison of Observed Versus Simulated for (a) and (b)

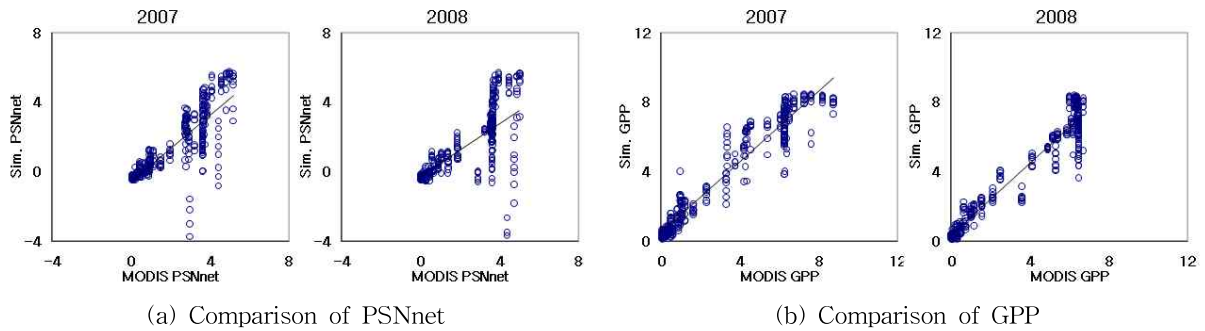


Fig. 7. Scatter Plots between the MODIS and Simulated for (a) and (b)

- 소순환과 물순환을 통합적으로 모의하고 생태계생지화학모형인 RHESSys 모형을 이용하였다.
- 한국건설기술연구원의 시험 유역으로 운영(1995~현재)되고 있는 설마천 유역에는 우량관측소, 수위관측소 및 기상관측소가 설치되어 양질의 수문자료를 구축하였고, 증발산량은 유역의 혼효림에서 플릭스타워의 에디공분산 시스템을 이용하여 측정된 자료를 이용하였고, 토양수분은 사양토(덕산 토양통) 지점에서 TDR 센서를 이용하여 측정된 자료를 이용하여 모형의 입력자료와 검·보정 자료를 구축하였다.
  - 일차생산성모형과 원격탐사기법을 결합함으로써 범지구의 탄소순환에 대한 규명을 위해 Terra 위성의 MODIS 센서를 이용하여 식생에 대한 1 km 공간해상도와 8일 누적 평균 총일차생산량과 순광합성량 자료를 구축하였다.
  - 2007~2008년까지의 2년간의 유출량 자료를 이용하여 모형의 검정을 실시하였다. 보정기간 일 유출량의 관측치와 모의치의 상관성을 분석한 결과 0.59, 0.67의 상관계수로 높은 상관성을 나타내었다. 검정결과, Nash-Sutcliffe의 모형효율계수는 0.84, 결정계수는 0.92이었다.
  - 토양수분은 TDR 센서의 일 단위 토양수분 값과 RHESSys 모형의 일 단위 토양수분 예측값을 비교해 본 결과 성장 시점인 여름철의 토양수분 예측값은 실측과 상당히 유사한 값을 모의하였으나, 예측값이 실측보다 일 변화를 단순하게 예측하고 전체적으로 과대 평가 되고 있음을 알 수 있었다. 증발산의 경우 플릭스 타워에서 측정된 일 단위 증발산을 RHESSys 모형의 일 증발산과 비교해 본 결과, 여름을 과소 추정되는 것을 제외하고 유의한 경향을 나타내었다.
  - 순광합성량은 결정계수 보정과 검정결과 각각 0.55, 0.38로 MODIS 순광합성량이 RHESSys 모형의 예

측치보다 과대치를 보이고 있다. 총일차생산량의 경우 RHESSys 모형의 예측치가 과대 추정되고 있지만 월별 모의 패턴을 비슷한 경향을 갖는 것을 알 수 있으며 보정과 검정결과 각각 결정계수 0.93, 0.93이었다. 유역의 실제적인 상황을 근접하게 모의하기 위해서는 다른 수문성분의 정확하고 신뢰성 있는 자료의 구축과 적용이 매우 중요하다고 판단된다. 이러한 실측자료의 활용은 보다 신뢰도 높은 모형의 모의 결과를 도출할 것으로 기대된다. 신뢰성 있는 모형의 모의는 수문생태를 고려한 기후변화 모의나 수문에 측에 있어 중요한 자료가 될 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비지원(11기술혁신C06)에 의해 수행되었으며 수문자료를 제공해준 한국건설기술연구원 유량조사사업단에 감사드립니다.

### REFERENCES

Band, L.E., Patterson, P., Nemani, R., and Running, S.W. (1993). "Forest ecosystem processes at the watershed scale : incorporating hillslope." *Agric. For. Mechodol.* Vol. 63, pp. 93-126.

Baron, J.S., Hartman, M.D., Kittel, T.G.F., Band, L.E. Ojima, D.S., and Lammers, R.B. (1998). "Effects of land cover, water redistribution, and temperature on ecosystem processes in the South Platte basin." *Ecological Applications*, Vol. 8, No. 4, pp. 1037-1051.

Beven, K., and Kirkby, M. (1979). "A physically-based variable contributing area model of basin hydrology."

- Hydrol. Sci. Bull.*, Vol. 24, pp. 43-69.
- Cao, M., and Woodward, F.I. (1998). "Net primary and ecosystem production and carbon stocks of terrestrial ecosystem and their response to climate change." *Global Change Biology*, Vol. 4, pp. 185-198.
- Clapp, R., and Hornberger, G. (1978). "Empirical equations for some soil hydraulic properties." *Water. Resour. Res.*, Vol. 14, pp. 601-604.
- Creed, I.F., Tague, C., Swanson, R., and Rothwell, R.L. (2000). "The potential impacts of harvesting on the hydrologic dynamics of boreal watersheds." Proc. American Geophysical Union 2000 Spring Meeting, Washington, D. C., Amer. Geophys. Union.
- Curtis, P.S., and Wang, X. (1998). "A meta-analysis of elevated CO<sub>2</sub> effects on woody plant mass, form, and physiology." *Oecologia*, Vol. 113, No. 3, pp. 299-313.
- Farquhar, G., and vonCaemmerer, S. (1982). "Modeling photosynthetic response to environmental conditions. Encyclopedia of Plant Physiology." O. Lange et al., Eds., New Series, Vol. 12B, Springer-Verlag, pp. 549-587.
- Field, C.B., Randerson, J.T., and Malmstrom, C.M. (1995). "Global net primary production: Combining ecology and remote sensing." *Remote Sensing of the Environment*, Vol. 281, pp. 237-240.
- Fredeen, A.L., Randerson, J.T. Holbrook, N.M., and Field, C.B. (1997). "Elevated atmospheric CO<sub>2</sub> increased water availability in a water-limited grassland ecosystem." *J. Am. Water Resour. Assoc.*, Vol. 33, pp. 1033-1039.
- Heinsch, F.A., Reeves, M., Votava, P., Kang, S., Miles, C., Zhao, M., Glassy, J., Jolly, W.M., Loehman, R., Bowker, C.F., Kimball, J.S., Nemani, R.R., and Running, S.W. (2003). User's guide, GPP and NPP (MOD 17A2/A3) products NASA MODIS Land Algorithm, Missoula, MT: The University of Montana.
- Huh, S.H. (2008). "Understanding of hydrology, soil moisture for water resources information." *Korea Water Resources Corporation*, Vol. 46, pp. 58-71. (in Korean)
- Hwang, T.H., Kang, S.K., Kim, Y.I., Kim, J., Lee, D.W., and Band, L.E. (2008). "Evaluating Drought effect on MODIS Gross Primary Production(GPP) with an eco-hydrological model in the Mountainous Forest. East Asia." *Global Change Biology*, Vol. 14, No. 5, pp. 1037-1056.
- Ito, A., and Oikawa, T. (2000). "A model analysis of the relationship between climate perturbations and carbon budget anomalies in global terrestrial ecosystems: 1970 to 1997." *Climate Research*, Vol. 15, No. 3, pp. 161-183.
- Jarvis, P. (1976). "The interpretations of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. Philos." *Trans. Roy. Soc. London*, Vol. B273, pp. 593-610.
- Joh, H.K., Lee, J.W., Shin, H.J., Park, G.A., and Kim, S.J. (2010). "Evaluation of Evapotranspiration and Soil Moisture of SWAT Simulation for Mixed Forest in the Seolmacheon Catchment." *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 12, No. 4, pp. 289-297. (in Korean with English abstract)
- Jun, J.H., Kim, K.H., Yoo, J.Y., Jeong, Y.H., and Jeong, C.G. (2005). "Interactions and changes between sapflow flux, soil water tension, and soil moisture content at the artificial forest of *Abies holophylla* in Gwangneung, Gyenggido." *Journal of Korean Forest Society*, Vol. 94, No. 6, pp. 496-503. (in Korean with English abstract)
- Kelliher, F.M., Leuning, R., Raupach, M.R., and Schulze, E.D. (1995). "Maximum conductances for evaporation from global vegetation types." *Agric. for Meteorol.*, Vol. 73, pp. 1-16.
- Knapp, A.K., Hamerlynck, E.P., Ham, J.H., and Owensby, C.E. (1996). "Responses in stomatal conductance to elevated CO<sub>2</sub> in 12 grassland species that differ in growth form." *Vegetatio*, Vol. 125, pp. 31-41.
- Korea institute of construction technology (2008). *Development of watershed Assessment Techniques for Healthy Water Cycle*. Summary report, Korea institute of construction technology, 2008-039, pp. 97-101. (in Korean)
- Kwon, H.J., Lee, H., Lee, Y.K., Lee, J.W., Jung, S.W., and Kim, J. (2009). "Seasonal Variations of Evapotranspiration Observed in a Mixed forest in the Seolmacheon Catchment." *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 11, No. 1, pp. 39-47. (in Korean with English abstract)
- Körner, C. (1995). "Leaf diffusive conductances in the major vegetation types of the globe." *Ecophysiology of Photosynthesis*, edited by E.D. Schulze, and M.M.



- Caldwell, Springer-Verlag, New York, pp. 463-490.
- Lee, D.W., Kim, E.S., Lee, H.J., and Seo, B.S. (2009). Utilizing of the eco-hydrological model (RHESys): analysis of the impact of land cover, Sustainable Water Resources Research Center, pp. 3-15. (in Korean)
- Lee, J.H., Kang, S.K., Jang, K.C., Ko, J.H., and Hong, S.Y. (2011). "The Evaluation of Meteorological Inputs retrieved from MODIS for Estimation of Gross Primary Productivity in the US Corn Belt Region" *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 27, No. 4, pp. 481-494.
- Lüdeke, M., Badeck, F., and Otto, R. (1994). "The Frankfurt Biosphere Model: a global process oriented model of seasonal and long-term CO<sub>2</sub> exchange between terrestrial ecosystems and the atmosphere. I. Model description and illustrative results for cold deciduous and boreal forests." *Climate Research*, Vol. 4, pp. 143-166.
- Lutze, J.L., and Gifford, R.M. (1998). "Carbon accumulation, distribution and water use of *Danthonia richardsonii* swards in response to CO<sub>2</sub> and nitrogen supply over four years of growth." *Global Change Biology*, Vol. 4, pp. 851-861.
- Mackay, D., and Band, L. (1997). "Forest ecosystem processes at the watershed scale: Dynamic coupling of distributed hydrology and canopy growth." *Hydrological Proc.*, Vol. 11, pp. 1197-1217.
- Mitchell, S.W., and Csillag, F. (2000). Does pattern matter? Handling bias, uncertainty, and stability of predicted vegetation growth in Grasslands National Park, Saskatchewan. Proc. Fourth Int. Conf. on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4): Problems, Prospects and Research Needs, Banff, Canada.
- Monteith, J.L. (1965). "Evaporation and Environment. 19th Symposia of the Society for Experimental." *Biology*, Vol. 19, pp. 205-234.
- Monteith, J.L. (1972). "Solar radiation and productivity in tropical ecosystems." *Journal of Applied Ecology*, Vol. 9, pp. 747-766.
- Monteith, J.L. (1977). "Climate and the efficiency of crop production in Britain." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 281, No. 980, pp. 277-294.
- Morgan, J.A., LeCain, D.R., Read, J.J., Hunt, H.W., and Knight, W.G. (1998). "Photosynthetic pathway and ontogeny affect water relations and the impact of CO<sub>2</sub> on *Bouteloua gracilis* (C4) and *Paspopyrum smithii* (C3)." *Oecologia*, Vol. 114, pp. 483-493.
- Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models, Part I-A discussion of principles." *Journal of Hydrology*, Vol. 10, pp. 283-290.
- Nemani, R.R., Keeling, C.D., Hashimoto, H., Jolly, W.M., Piper, S.C., Tucker, C.J., Myneni, R.B., and Running, S.W. (2003). "Climate-Driven Increases in Global Terrestrial Net Primary Production from 1982 to 1999." *Science*, Vol. 300, pp. 1560-1563.
- Nobel, P.S. (1991). "Physiochemical and Environmental Plant Physiology." *Academic Press, San Diego*, pp. 635.
- Park, J.S., Kim, K.T., Lee, J.H., and Lee, K.S. (2006). "Applicability of Multi-Temporal MODIS Images for Drought Assessment in South Korea." *The Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 9, No. 4, pp. 176-192. (in Korean with English abstract)
- Parton, W., Mosier, A., Ojima, D., Valentine, D., Schimel, D., Weier, K., and Kulmala, A. (1996). "Generalized model for N<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O production from nitrification and denitrification." *Global Biogeochem. Cycles*, Vol. 10, pp. 401-412.
- Prince, S., and Goward, S. (1995). "Global primary production: a remote sensing approach." *Journal of Biogeography*, Vol. 22, No. 4/5, pp. 815-835.
- Pritchard, S.G., Rogers, H.H., Prior, S.A., and Peterson, C.M. (1999). "Elevated CO<sub>2</sub> and plant structure: a review." *Global Change Biology*, Vol. 5, No. 7, pp. 807-837.
- Running, S., and Coughlan, J. (1988). "A general model of forest ecosystem processes regional applications, Hydrologic balance, canopy gas exchange and photosynthesis." *Canadian Journal of Forest Research*, Vol. 17, pp. 472-428.
- Running, S., Nemani, R., and Hungerford, R. (1987). "Extrapolation of synoptic meteorological data in mountainous terrain and its use for simulating forest evapotranspiration and photosynthesis." *Can. J. For.*

- Res.*, Vol. 17, pp. 472–483.
- Running, S.W., Nemani, R.R., Heinsch, F.A., Zhao, M., Reeves, M., and Hashimoto, H. (2004). “A Continuous Satellite-Derived Measure of Global Terrestrial Primary Production.” *BioScience*, Vol. 54, No. 6, pp. 547–560.
- Running, S.W., Thornton, P.E., Nemani, R.R., and Glassy, J. (2000). “Global Terrestrial Gross and Net Primary Productivity from the Earth Observing System.” *Methods in Ecosystem Science*, Springer-Verlag, N, pp. 44–57.
- Schulze, E.D., Kelliher, F.M., Körner, C., Lloyd, J., and Leuning, R. (1994). “Relationships among maximum stomatal conductance, ecosystem surface conductance, carbon assimilation rate and plant nitrogen nutrition: A global ecology scaling exercise.” *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, Vol. 25, pp. 629–660.
- Sellers, P.J., Hall, F.G., Asrar, G., Strebel, D.E., and Murphy, R.E. (1992). “An overview of the First International Satellite Land Surface Climatology Project (ISLSCP) Field Experiment (FIFE).” *J. Geophys. Res.* Vol. 97, No. D17, pp. 18,345–18,371.
- Shin, H.J., Ha, R., Park, M.J., and Kim, S.J. (2010). “Estimation of Spatial Evapotranspiration using the Relationship between MODIS NDVI and Morton ET-For Chungjudam Watershed-.” *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 52, No. 1, pp. 19–24. (in Korean with English abstract)
- Tague, C.L., and Band, L.E. (2001). “Simulating the impact of road construction and forest harvesting on hydrologic response using rhesys.” *Earth Surface Processes Landforms*, Vol. 26, pp. 135–151.
- Tague, C.L., and Band, L.E. (2004). “RHESSys: Regional Hydro-Ecologic Simulation System-An object oriented approach to spatially distributed modeling of Carbon, Water, and Nutrient cycling.” *Earth Interactions*, Vol. 8, pp. 1–42.
- Turner, D.P., Urbanski, S., Bremer, D., Wofsy, S.C., Meyers, T., Gower, S.T., and Gregory, M. (2003). “A cross-biome comparison of daily light-use efficiency for gross primary production.” *Global Change Biology*, Vol. 9, pp. 383–395.
- Vertessy, R.A., Hatton, T.J., Benyon, R.J., and Dawes, W.R. (1996). “Long term growth and water balance predictions for a mountain ash (*Eucalyptus regnans*) forest catchment subject to clearfelling and regeneration.” *Tree Physiol.*, Vol. 16, pp. 221–232.
- Volk, M., Niklaus, P.A., and Körner, C. (2000). “Soil moisture effects determine CO<sub>2</sub> responses of grassland species.” *Oecologia*, Vol. 125, pp. 380–388.
- Watson, F.G.R., Pierce, L.L., Mulitsch, M., Newman, W., Nelson, J., and Rocha, A. (1999). “Spatial modelling of the impacts of 150 years of land use change on the carbon, nitrogen, and water budgets of a large watershed.” ESA Annual Meeting, 8th–12th Aug. 1999, Spokane, USA
- White, M.A., Thornton, P.E., Running, S.W., and Nemani, R.R. (2000). “Parameterization and Sensitivity Analysis of the BIOME-BGC Terrestrial Ecosystem Model: Net Primary Production Controls.” *Earth Interactions*, Vol. 4, No. 3, pp. 1–85.
- Yoon, Y.N. (2005). *Hydrology-basis and practice-*. Chungmoongak Publishers, pp. 135–184. (in Korean)
- Zierl, B., Bugman, H., and Tague, C.L. (2006). “Water and carbon fluxes of European ecosystem: an evaluation of the ecohydrological model RHESSys.” *Hydrological Processes*, Vol. 214, No. 24, pp. 3328–3339. <http://kict.datapcs.co.kr/>

논문번호: 12-037	접수: 2012.04.10
수정일자: 2012.09.04	심사완료: 2012.09.04